

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

TK-1-1468 改0

補足説明

(東海第二発電所 工事計画認可申請に係る論点整理について)

平成30年7月13日

日本原子力発電株式会社

6.1.3 止水機構に関する補足説明

6.1.3.1 止水機構（1次止水機構）の実規模大実証試験の計画について

1. 目的

止水機構が基準地震動 S_s 及び余震+津波時において、実規模大の試験装置を用いた試験（以下「実証試験」という。）を行い、止水板の挙動を確認することにより、変位追従性、水密ゴムの健全性を確認する。

実証試験においては、振動台の能力の中で実証試験を行う必要があることから、最大限の加振ケースにて実証試験を行ない止水板の挙動等*を確認する。また、実証試験にて得られた結果については、三次元的解析を実施し検証を行うと共に、基準地震動 S_s における止水板の挙動等*については、三次元的解析にて止水板の挙動等*を確認する。

※止水板の挙動等とは

地震時又は余震+津波時における止水板の挙動、変位追従性、水密ゴムの健全性

2. 止水機構（1次止水機構）の概要

鋼製防護壁と既設取水路間の止水構造は、津波による荷重、鋼製防護壁と取水路の地震時における追従性を確保する必要があることから、止水板が可動できるよう止水機構を設置する。1次止水機構は、止水板の底面と側面に設置した水密ゴムにて水密性を確保する構造とする。水密ゴムは、摩擦抵抗を低減し追従性を向上させるため、表面ライニング（樹脂）を施工する。

また、止水板には漂流物の衝突による影響も考慮し、止水板押え及び保護プレートを設置し漂流物荷重からも耐える構造とする。

止水機構の構造図を図1に、1次止水機構に係る各部位の役割・機能を表1に示す。

なお、止水機構は、1次止水機構である止水板からの微少な浸水も考慮し、敷地内に浸水させないよう陸側にシートジョイントからなる2次止水機構を設置する。

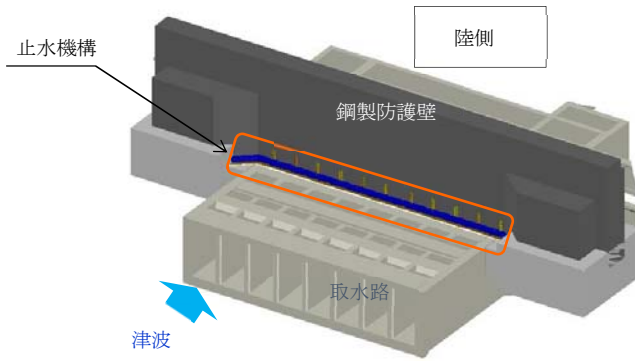


図 止水機構の設置位置

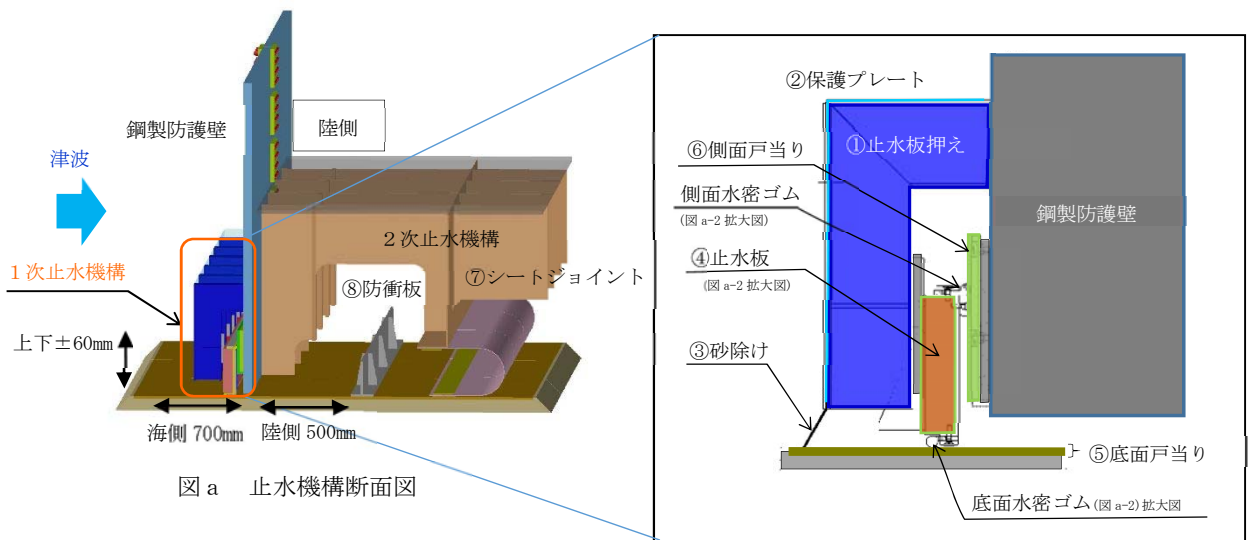


図 a 止水機構断面図

図 a-1 1次止水機構拡大図

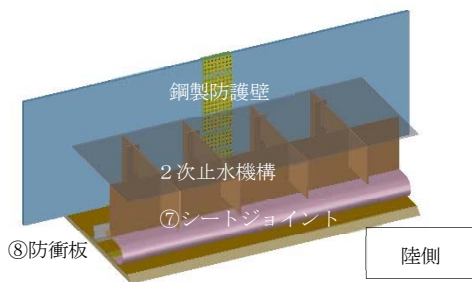


図 b 2次止水機構の構造

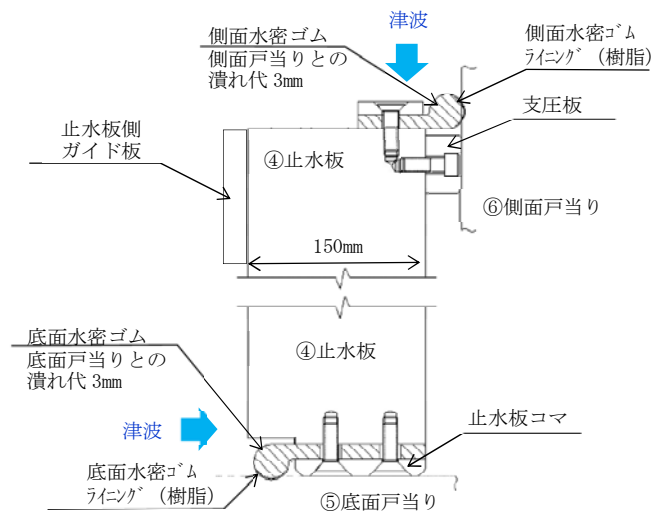


図 a-2 止水板、底面・側面水密ゴム拡大図

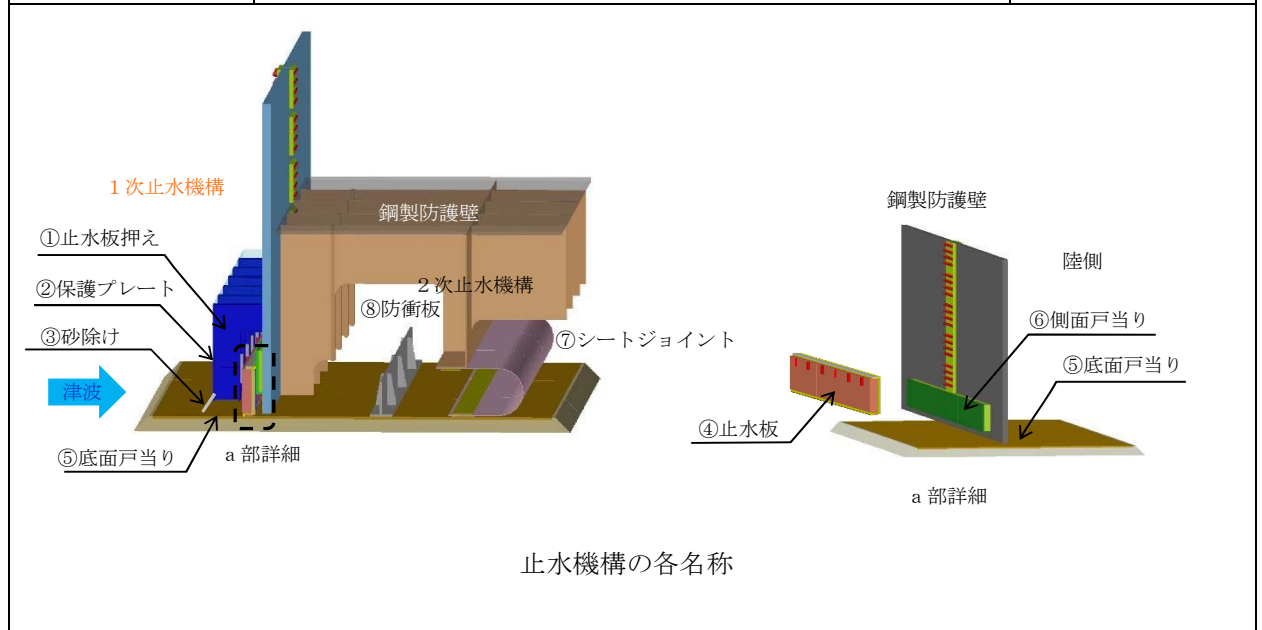
図1 止水機構の構造図

6. 1. 3-2

表1 1次止水機構に係る各部位の役割・機能

各部位の役割・機能については以下のとおり。名称は下図に示す。

名称	役割・機能	材料
① 止水板押え	<ul style="list-style-type: none"> 止水板を支持する。 漂流物等から止水板を防護する。 	鋼製
② 保護プレート	<ul style="list-style-type: none"> 大型植生などから止水板を防護する。 止水板への異物混入を防止する。 	鋼製
③ 砂除け	<ul style="list-style-type: none"> 底面戸当り面への砂等の異物混入を防止する。 	ナイロン
④ 止水板	<ul style="list-style-type: none"> 止水機構の扉体の機能。 底面及び側面の戸当りに面する部位に水密ゴムを設置し浸水を防止する。 1枚当たりの主要仕様 寸法：横2000mm×幅150mm×高さ400mm 重量：約930kg 	ステンレス ＋ 水密ゴム (P形ゴム)
⑤ 底面戸当り	<ul style="list-style-type: none"> 止水板の底面水密ゴムとのシール性を確保する。 (真直度, 平面度の管理) 床部より約100mm嵩上げし異物混入を防止する。 	ステンレス (表面仕上げNo.1) ^{※2}
⑥ 側面戸当り	<ul style="list-style-type: none"> 止水板の側面水密ゴムとのシール性を確保する。 (真直度, 平面度の管理) 	ステンレス (表面仕上げNo.1) ^{※2}
⑦ シートジョイント ^{※1}	<ul style="list-style-type: none"> 水密ゴムからの微少な浸水を保持する。 陸側からの異物混入を防止する。 	シートジョイント
⑧ 防衝板 ^{※1}	<ul style="list-style-type: none"> 1次止水機構の損傷又は保守に伴う取り外し時に漂流物が2次止水機構に到達することを防止する。 	鋼製



※1：2次止水機構

※2：JIS G 4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 表面仕上げ より

3. 鋼製防護壁と1次止水機構の検討フロー及び1次止水機構の実証試験評価フロー

鋼製防護壁と1次止水機構の検討フロー（図2）及び1次止水機構の実証試験評価フロー（図3）については以下の通り。

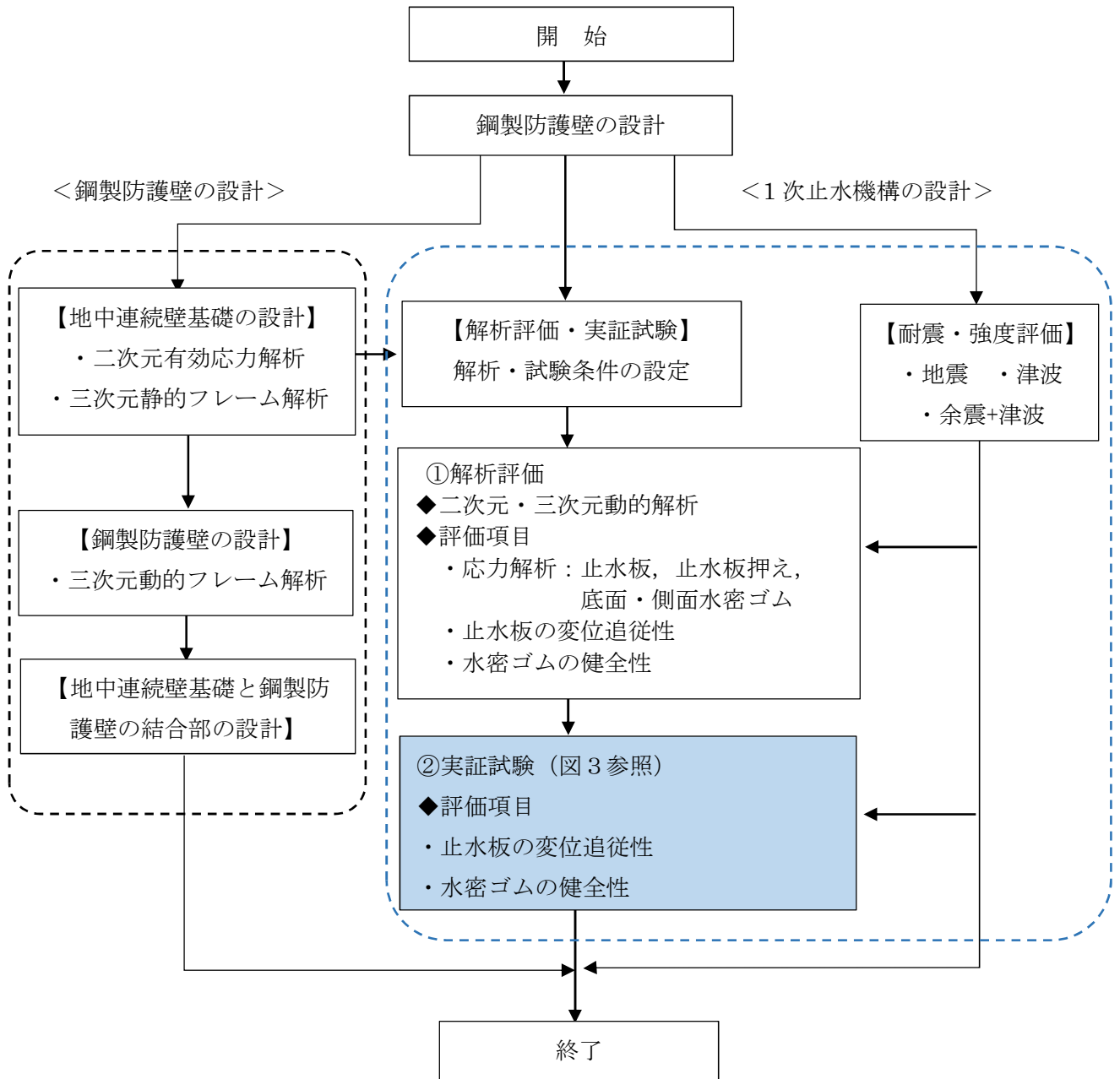


図2 鋼製防護壁と1次止水機構の検討フロー

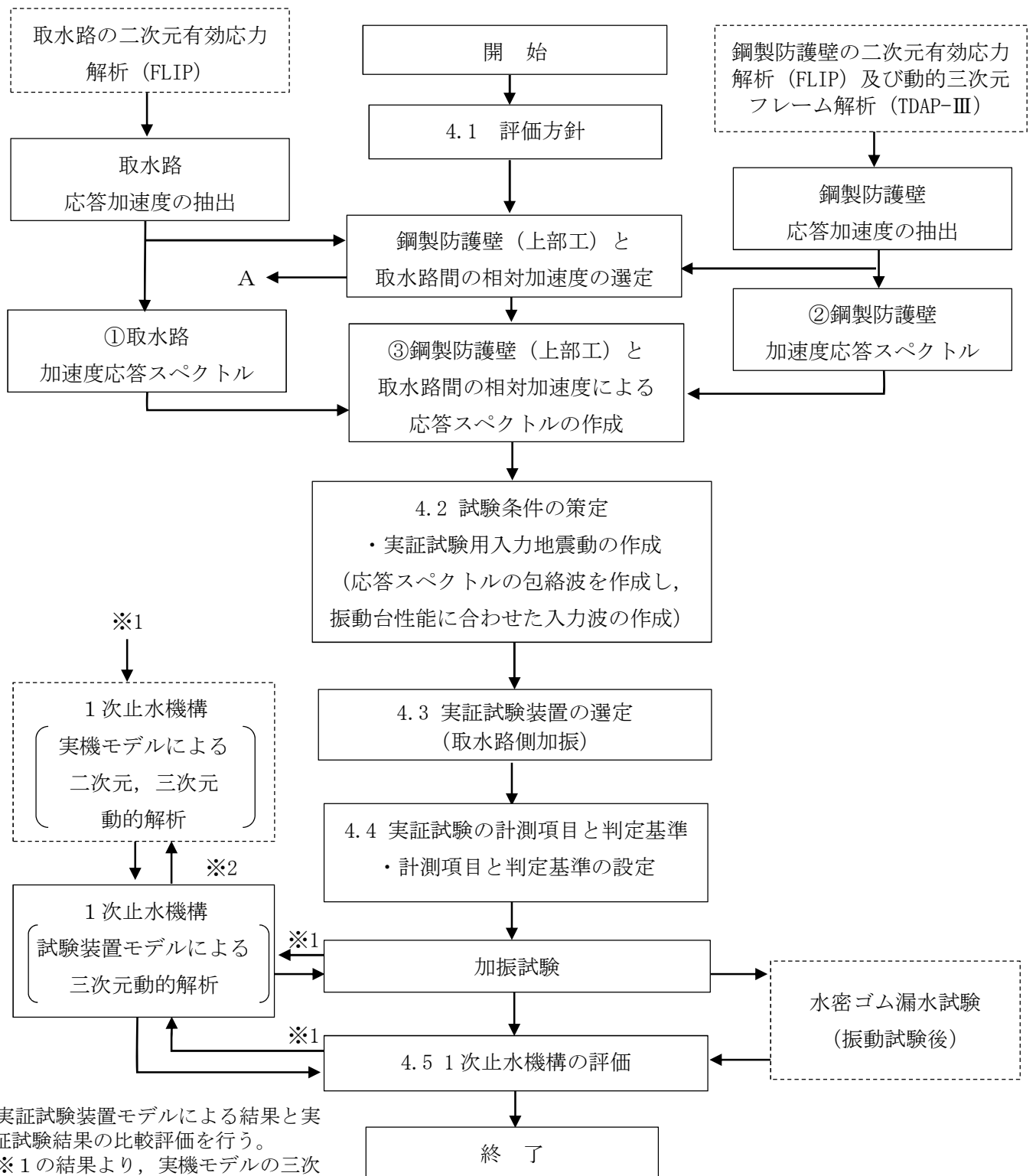


図3 1次止水機構の実証試験評価フロー

4. 実証試験の計画について

4.1 評価方針

鋼製防護壁に設置する1次止水機構は、鋼製防護壁の底面と既設取水路の応答変位の違いにより相対変位が生じ敷地に浸水する可能性があることから、可動式の止水板を設置する。

1次止水機構の実証試験において、止水板の地震時及び余震+津波における挙動を確認する。

止水板の評価は、鋼製防護壁と取水路の本震 S_s-D1 の応答加速度から加振試験用応答スペクトルを作成し実証試験を実施する。

実証試験で得られた止水板の挙動について、評価するとともに「止水板の地震時の追従性」、「水密ゴムの健全性」及び「1次止水機構の構成部品の健全性」について確認し、止水板、水密ゴム及び止水機構全体に影響がないか確認する。

また、実証試験の結果と三次元動的解析の結果から、止水板の挙動について評価を行う。

4.2 試験条件

(1) 実証試験用の入力地震動の作成

実証試験に用いる評価用の地震動は、解放基盤表面からの地盤の特性に応じた地震動の応答スペクトルに基づく本震 S_s-D1 を選定し、実証試験用に応答スペクトルを作成し実施する。

また、津波防護施設である鋼製防護壁は、余震時にも耐える必要があることから、 S_d-D1 を選定し、実証試験を実施する。表2に加振試験用応答スペクトルに用いる入力地震動を示す。

表2 加振試験用応答スペクトルに用いる入力地震動

種類	入力地震動
本震	S_s-D1
余震	S_d-D1

(2) 余震時の津波高さ

余震時の津波高さは、敷地に遡上する津波高さについても考慮した T.P. +24m の静水圧とする。

構造設計上は、止水板に動水圧を荷重条件とした構造設計を行う。但し、実証試験においては、二次元動的解析の試計算結果（補足説明2参照）から動水圧（高圧）で実施した場合に、地震時における止水板の挙動に比べ余震時の止水板が浮き上がらない傾向であったことから、動水圧（高圧）より低い状態の静水圧（低圧）での試験を実施し止水板の挙動を確認する。

また、実機における構造においても、止水板押えの前面に設置している保護プレートの下部より津波は浸水することから、直接津波の波圧を受けにくい。そのため、静水圧での実証試験がより現実的な止水板の挙動が把握できる。図3に止水板への流入イメージを示す。

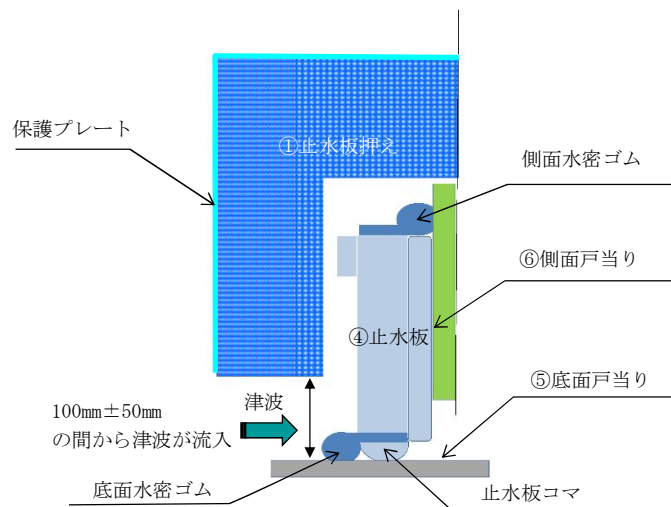


図3 止水板への流入イメージ

(3) 試験ケースと試験回数

実証試験に用いる入力地震動（ S_s-D1 ， S_d-D1 ）による確認は，以下の2ケースを実施する。

<試験ケース> ・本震 ・余震+津波

<試験回数>再現性確認のため，各2回実施。

	本震（ S_s-D1 ）	余震+津波（ S_d-D1 ）
試験回数	2回	2回

(4) 水密ゴムの摩擦係数

水密ゴムの摩擦係数は，ダム・堰施設技術基準（案）に記載のライニングがある場合，未使用状態（水密ゴムが健全の状態）の0.2（乾式）を適用し実施する。また，ライニングがない場合は，1.2（乾式）を適用し実施する。水密ゴムの摩擦係数については補足説明1に示す。

なお，水密ゴムのライニングがない状態についても実施し挙動を確認する計画であるが，二次元動的解析の摩擦係数のしきい値の結果を踏まえ，安全上配慮した試験を実施する。試験の回数については，解析結果及びライニングありの実証試験状況を踏まえ決定する。

(5) 試験装置の制限に対する対応

- ① 実証試験用地震動の加速度が試験装置の上限（水平3G，鉛直1G）を超えた場合には，振動試験装置の上限を超えない範囲で実証試験を実施する。なお，上限を超える止水板の挙動については，二次元・三次元動的解析にて挙動を把握する。
- ② 実証試験用地震動の水平又は鉛直変位が試験装置の上限（水平±150mm，鉛直±100mm）を超える場合には，振動台入力波形の長周期側で加速度をカットするハイパスフィルタで処理した入力地震動にて試験を実施する。

ハイパスフィルタで処理する場合には，止水機構（止水板：剛体）の実証試験に影響のない周波数範囲であることを確認する。

4.3 実証試験装置の概要

(1) 試験装置

振動台の上に1次止水機構を設置し、水平方向と鉛直方向とを同時加振する。図4に大型3軸振動台の概要を示す。

振動台の仕様

加振自由度	3軸6自由度		
最大積載重量	80 t f		
テーブル寸法	X : 6m × Y : 4m		
定格	X方向	Y方向	Z方向
最大変位	±300mm	±150mm	±100mm
最大加速度 (35 t 積載時)	1G (水平)	3G (水平)	1G (鉛直)

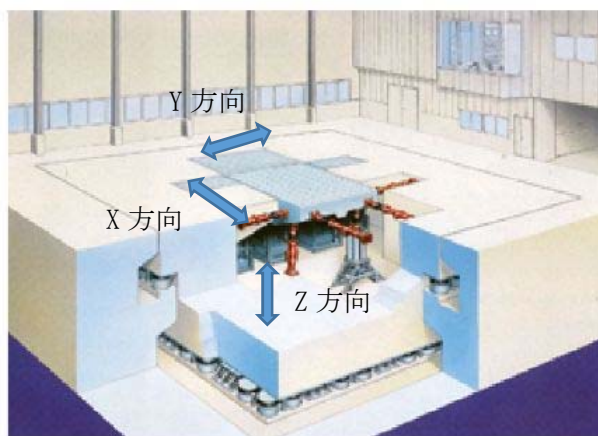
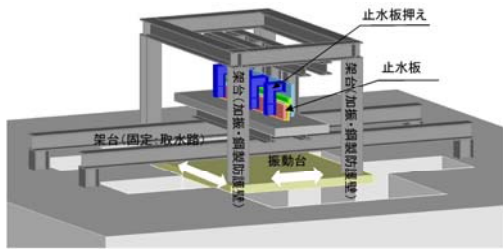
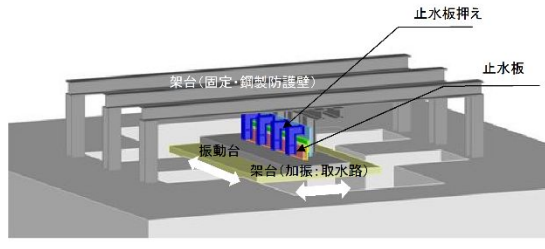


図4 大型3軸振動台の概要

(2) 試験装置の選定

実証試験を実施するに当たり、鋼製防護壁と取水路の振動特性に違いがあることから実証試験においては鋼製防護壁を固定するケースと加振させるケースの2通りについて検討した。試験装置のケースを表3に示す。

表3 試験装置ケース

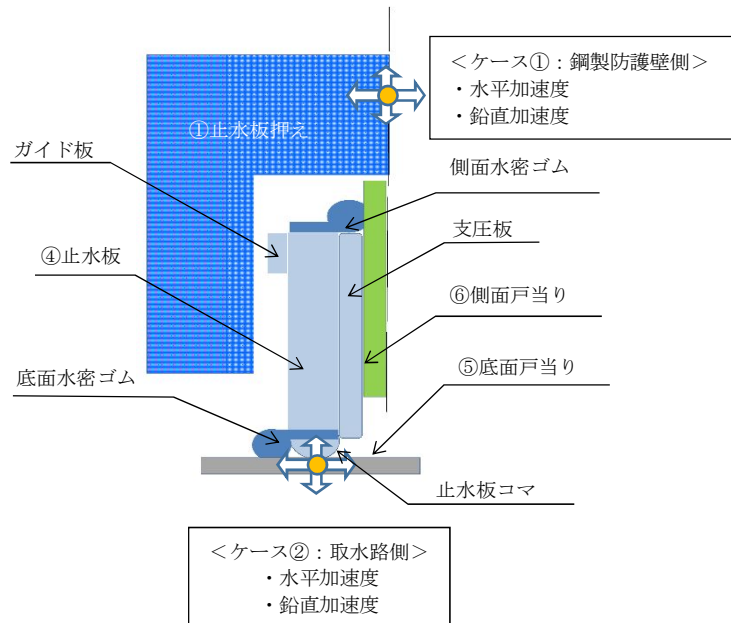
	ケース①	ケース②
固定	取水路	鋼製防護壁
加振	鋼製防護壁	取水路
装置概要		
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製防護壁側を直接加振するため、止水板に対する加速度（水平）が伝わりやすい。 鋼製防護壁側を直接加振するため、水平の慣性力が入りやすく、底面及び側面水密ゴムの挙動が確認しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 固定基礎に架構を設置することで鋼製防護壁を想定した架構の剛性が得られやすい。 取水路側を直接加振するため、止水板に対する加速度（鉛直）が伝わりやすい。 取水路側を直接加振するため、底面水密ゴム及び止水板底面が摩耗し保守的な結果が得られやすい。 想定した加速度時刻歴波形を直接振動台に入力することができる。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 実機では、鋼製防護壁と取水路が同時に振動するが、鋼製防護壁の加振のみとなる。 固定基礎に取水路を想定した架構、振動台に鋼製防護壁を想定した架構を設置する必要があるため架構が大型化する。 振動台に直接加速度時刻歴波形を入力するケース①に比べ、鋼製防護壁を介して加振するため、入力加速度の伝達に影響が生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> 実機では、鋼製防護壁と取水路が同時に振動するが、取水路の加振のみとなる。

上記デメリットの部分については、試験装置の解析モデルにて評価を行い、実証試験装置に影響のないことを確認する。

試験装置のケース毎の止水板に作用する慣性力の考え方については、表4に示すとおり。ケース②の取水路側を加振する場合、鉛直加速度の慣性力が止水板に伝わりやすく、浮き上がりの挙動を確認しやすい。また、鋼製防護壁の剛性が得られやすいことから、ケース②を選択する。

表4 止水板に作用する慣性力

振動の種別		実機適用	実証試験装置
ケース① 〈鋼製防護壁側〉	水平 加速度	止水板押えあるいは側面戸当りを介して直接慣性力が作用する。	鋼製防護壁側を加振した場合、鉛直加速度の慣性力が止水板に伝わりにくく、浮き上がり等の挙動が確認しにくい。
	鉛直 加速度	支圧板又はガイド板の摩擦抵抗力が作用した場合に慣性力が作用する。	
ケース② 〈取水路側〉	水平 加速度	底面水密ゴム及び止水板コマの摩擦抵抗力が作用した場合に慣性力が作用する	取水路側を加振した場合、鉛直加速度の慣性力が止水板に伝わりやすく、浮き上がりの挙動を確認しやすい。
	鉛直 加速度	取水路より直接慣性力が作用する。	



止水板に与える地震動の入力イメージ

試験装置ケースの選定は、前述の試験装置ケースの検討及び止水板に作用する慣性力の検討を踏まえ、更に、二次元動的解析の試験解析結果から、鉛直方向の慣性力を伝達しやすいケース②を選択する。二次元動的解析の試験解析結果を補足説明2に示す。

(3) 実証試験の試験条件

止水板の実規模の挙動を確認するため、止水板と止水板を支持する部材については実機と同じ構造部材にて実証試験を実施し実物と同じ挙動が再現できるようにする。以下の条件にて実証試験を実施する。

- ① 止水板は実機と同じ大きさ、構造のものを使用し、止水板 2 枚を止水板接続ゴムで接続する。また、止水板に取り付ける底面・側面水密ゴムも実機と同じ寸法、構造のものを使用する。図 5 に実機と同じ仕様部材を示す。

<実機と同じ仕様部材> (材質, 構造, 寸法, 重量全て同じ部材)

- ・ 止水板 (止水板本体, 止水板コマ, 支圧板, 止水板側ガイド含む)
- ・ 水密ゴム (底面・側面水密ゴム (ライニング含む), 止水板接続ゴム)
- ・ 止水板押え (止水板押え側ガイド含む)
- ・ 底面・側面戸当り (水密ゴムとの接触するステンレス部材)

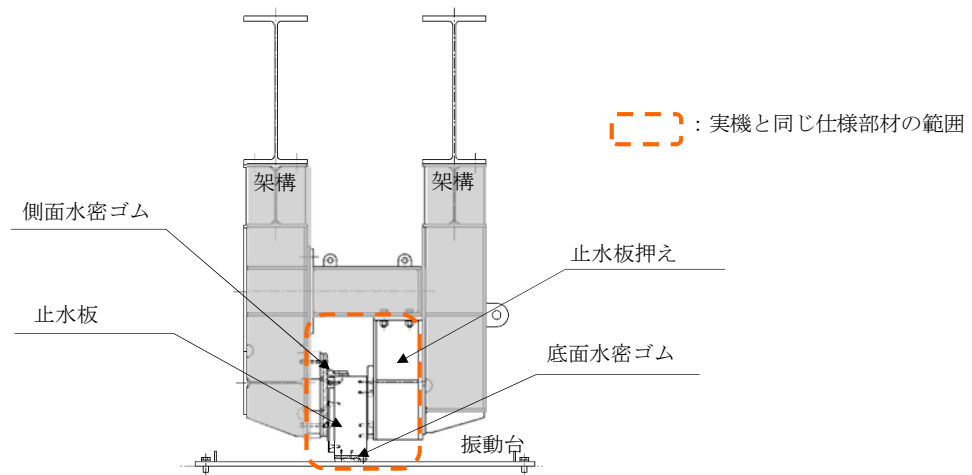


図 5 実機と同じ仕様部材の部位

- ② 止水板は取水路側に垂直に置かれ鋼製防護壁の側面戸当りと止水板押えにより、実機と同じ隙間で支持された状態で設置する。実証試験のイメージを図 6 に示す。

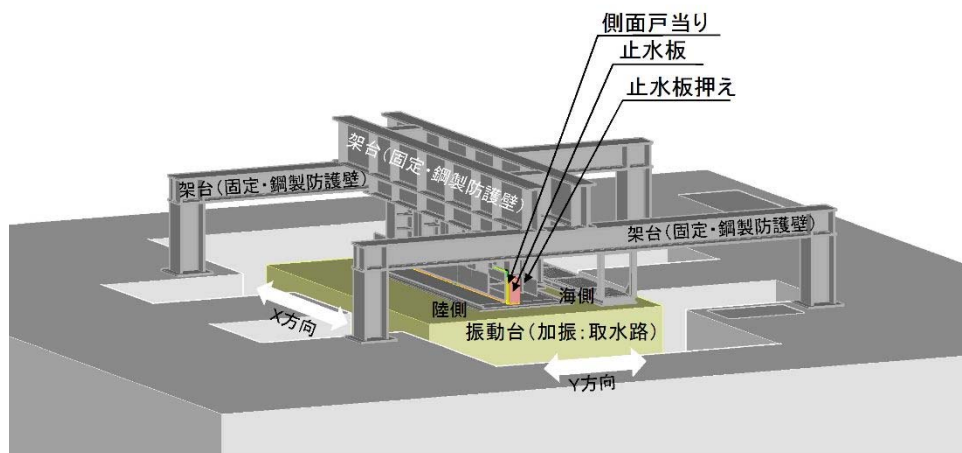


図 6 実証試験の鳥観図

③鋼製防護壁の応答加速度及び変位は取水路側に与え加振する。

入力波形については、鋼製防護壁と取水路の応答スペクトル及び鋼製防護壁と取水路の重ね合わせた相対的な応答スペクトルの全体を包絡させた応答スペクトルにより模擬地震波を作成し、加振試験を実施する。

3方向（X方向（堤軸）包絡波）の実証試験用地震動の作成方法は以下のとおり。

a. 二次元有効応力解析による鋼製防護壁基礎天端の応答時刻歴を算出する。

(図7参照)

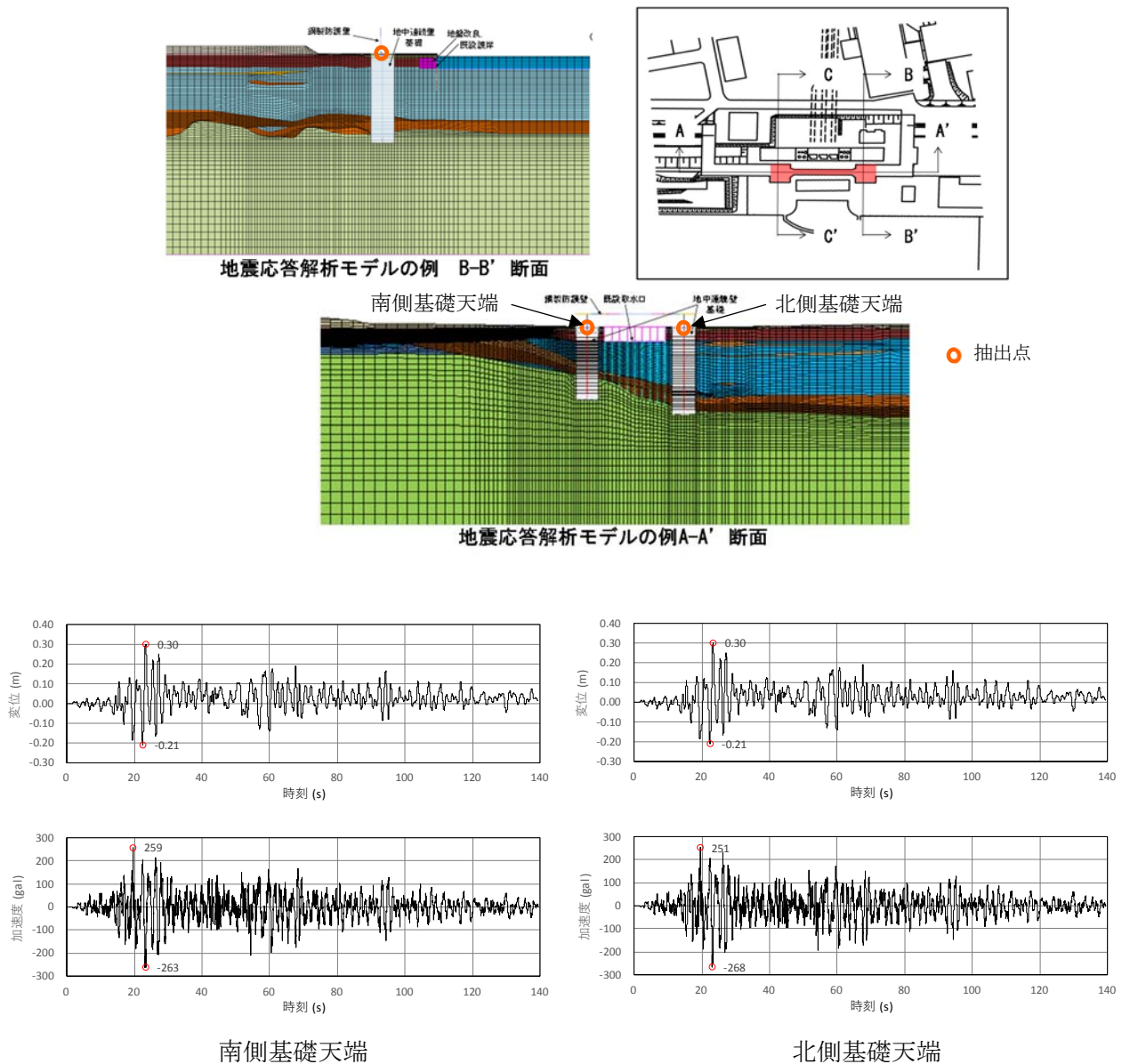


図7 鋼製防護壁基礎の二次元有効応力解析による応答時刻歴（堤軸方向；A-A断面）

b. 前項を入力した鋼製防護壁の動的三次元フレーム解析にて止水機構位置の応答時刻歴及び応答スペクトルを抽出する。(図8参照)

◎ 入力する変位時刻歴には組合せ係数法を考慮し、下記の2ケースを実施する。
 堤軸方向(X)着目ケース : X1.0, Y0.4, Z1.0
 堤軸直交方向(Y)着目ケース : X0.4, Y1.0, Z1.0

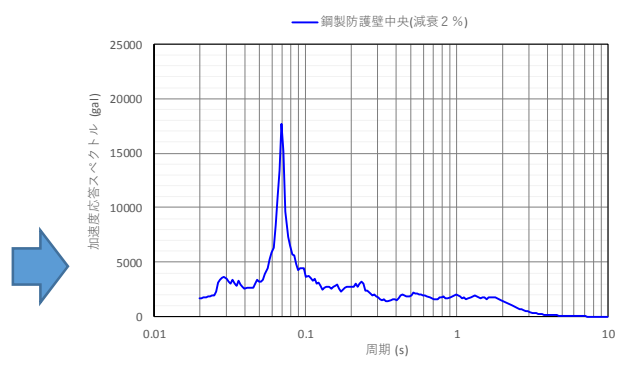
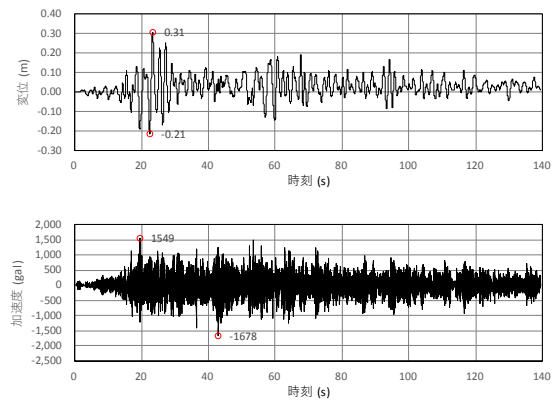
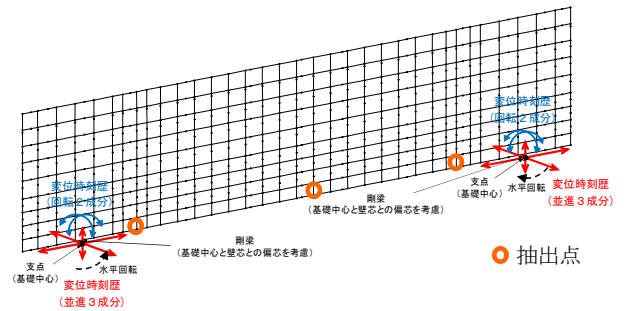


図8 鋼製防護壁の三次元フレーム解析による中央部の応答時刻歴と応答スペクトル(堤軸方向)

c. 二次元有効応力解析による取水路天端の応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。(図9参照)

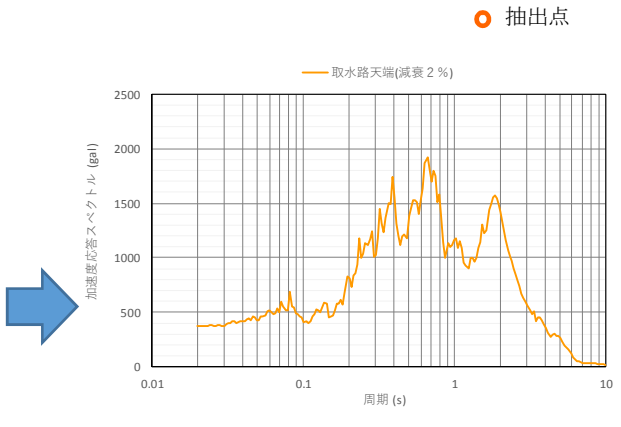
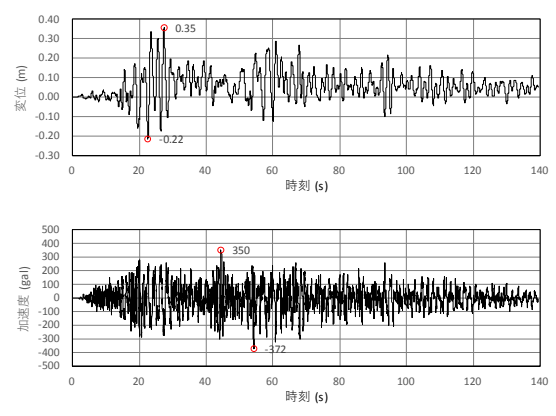
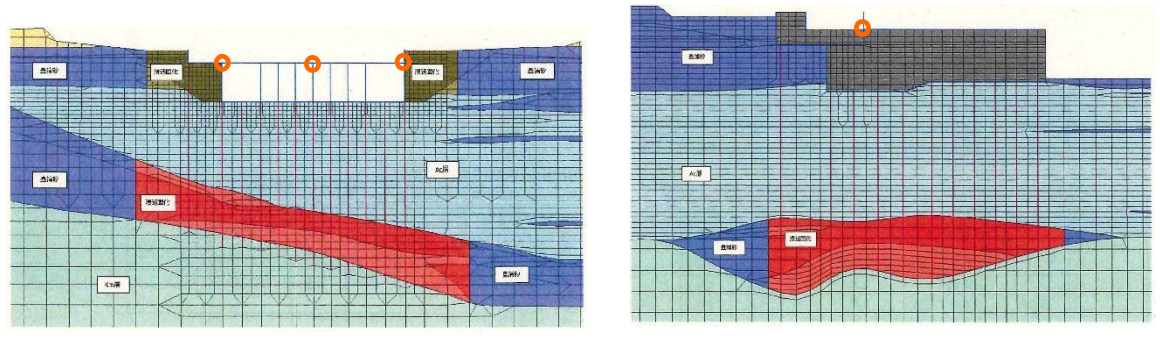
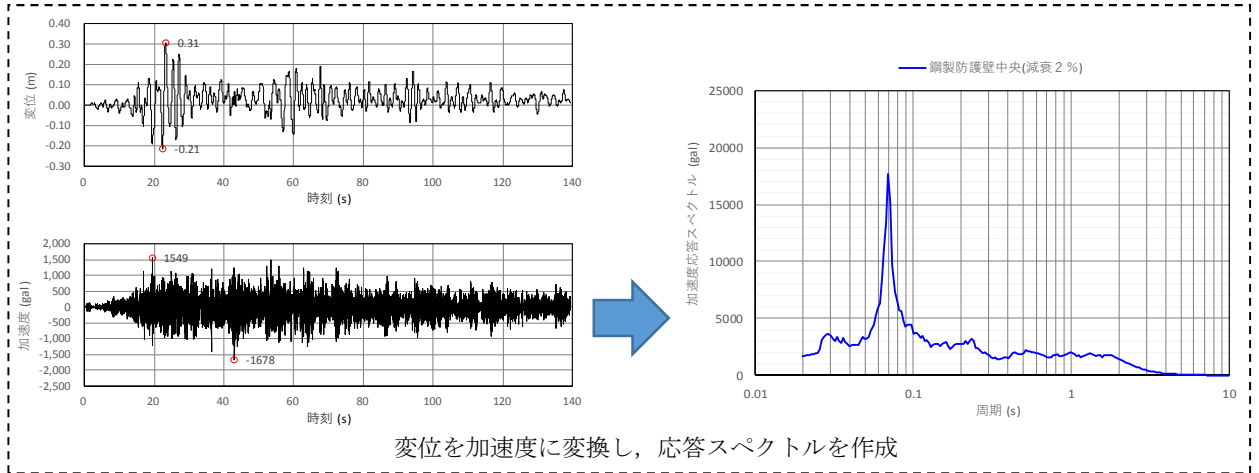


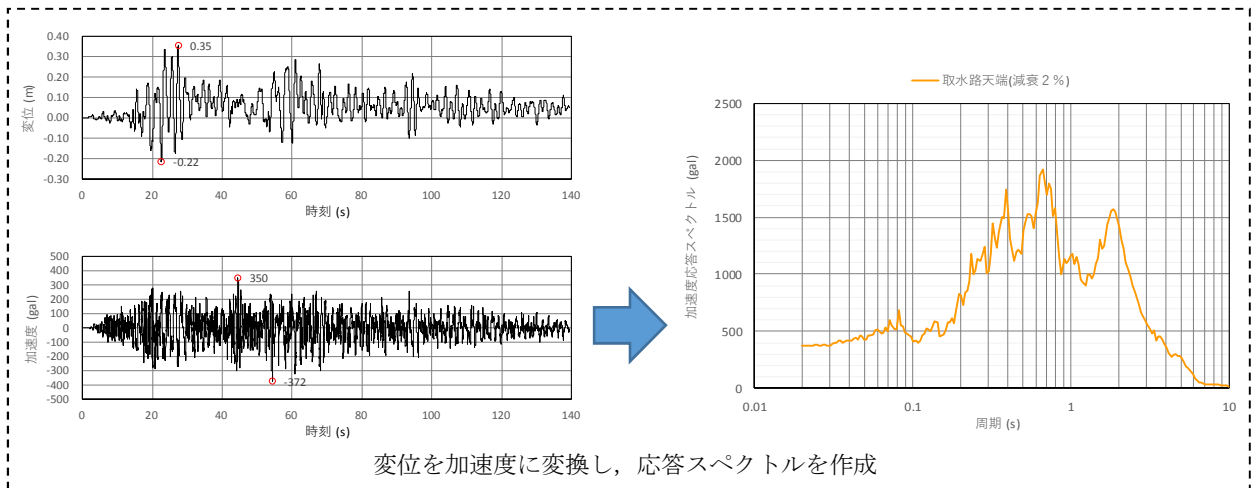
図9 既設取水路の二次元有効応力解析による応答時刻歴と応答スペクトル(堤軸方向)

d. b 項, c 項で求めた応答時刻歴を重ね合わせ, 鋼製防護壁と取水路の相対的な応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。(図 10 参照)

b 項で算出した鋼製防護壁三次元フレーム解析による中央部の応答時刻歴及び応答スペクトル(堤軸方向)



c 項で算出した取水路の二次元有効応力解析による応答時刻歴及び応答スペクトル(堤軸方向)



鋼製防護壁 (b 項) と取水路 (c 項) の応答時刻歴及び応答スペクトルの重ね合わせ(堤軸方向)

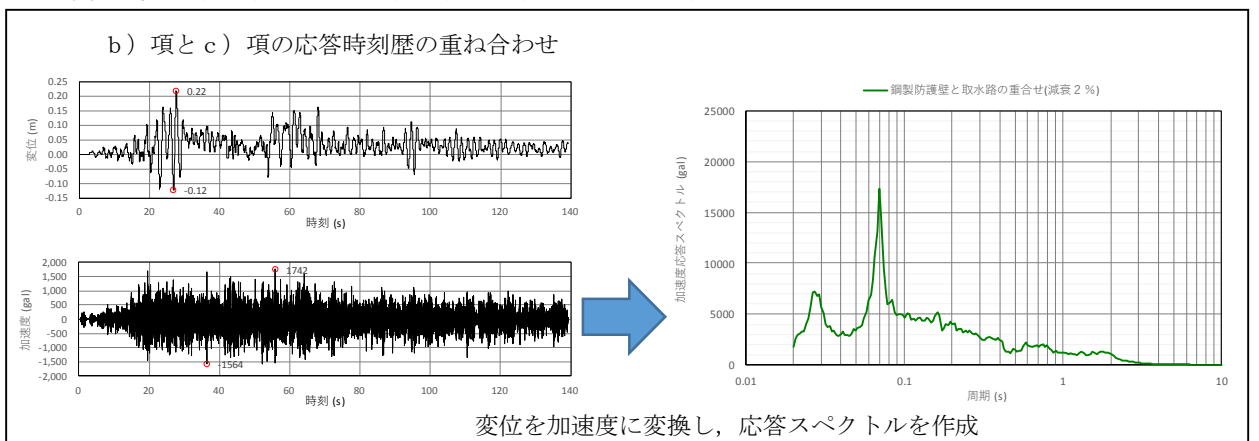


図 10 鋼製防護壁と取水路を重ね合わせた応答スペクトル

e. b 項, c 項と d 項にて算出した応答スペクトルを比較し, 加速度応答スペクトルの包絡波を作成し実証試験用地震動として振動台に入力する。(図 11)

X 方向 (NS) については振動台の能力(1G)が上限であることから, Y 方向 (EW) に X 方向 (NS) の包絡波を入力し方向を反転させた加振 (①) を行なうことで止水板の挙動を確認する。

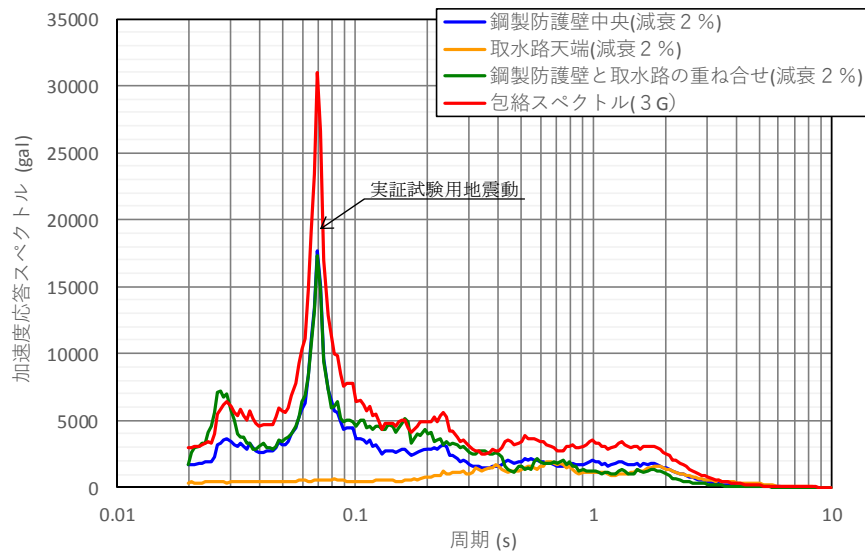


図 11 応答スペクトルの包絡波の作成(堤軸方向)

3 方向(Y 方向 (堤軸直角) 包絡波)及び鉛直 (取水路側包絡波) の実証試験用地震動の作成については, 6.1.3.4 項の「実証試験に用いる地震動の作成, 実証試験及び三次元動的解析のケースについて」にて示す。

(4) 実証試験装置の構造

① 鋼製防護壁の架構構造（固定部）

実証試験装置の試験装置構造図を図 12 に示す。

鋼製防護壁(固定部)の架構部分は、固定基礎より設置し振動台を跨ぐ構造で止水板を支持する。

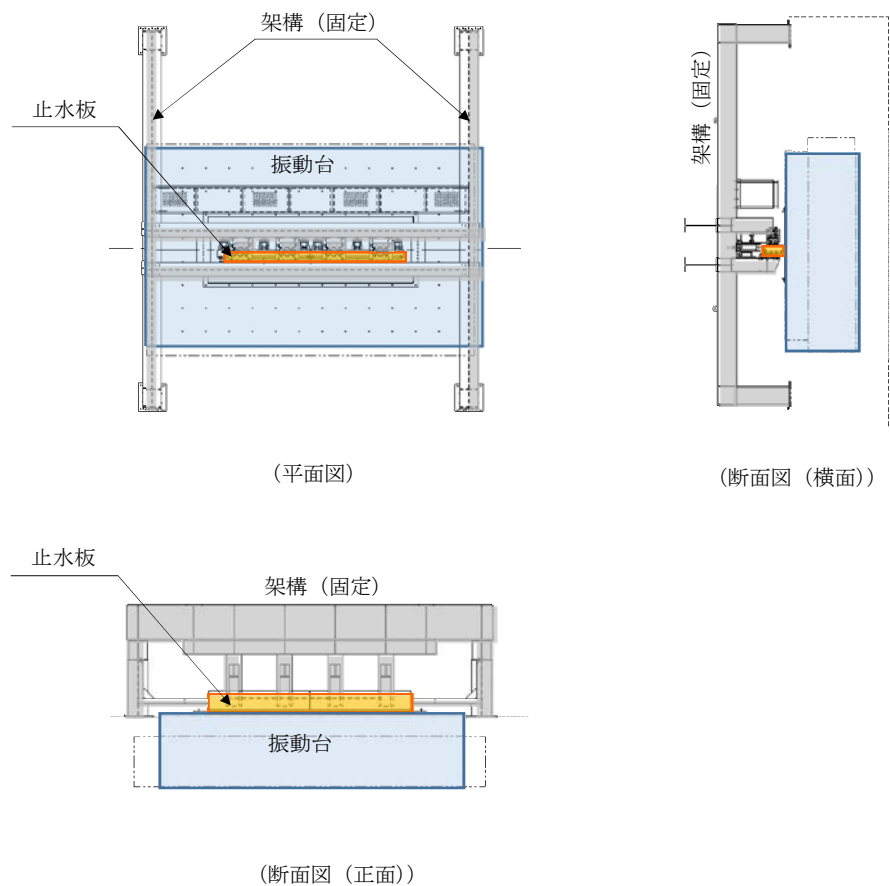


図 12 実証試験の試験装置構造図

②取水路の架構構造（加振部）

取水路側に設置する止水板部の試験装置の構造は、架構で止水板を支持する構造である。余震+津波時においては、津波高さを模擬する必要があることから、ロードセルを用いて水圧をかけた状態を模擬し余震を与える。余震時の津波高さは、敷地に遡上する津波高さについても考慮した T.P. +24m の静水圧にて実施する。余震+津波時の水圧を模擬した試験装置の構造を図 13 に示す。

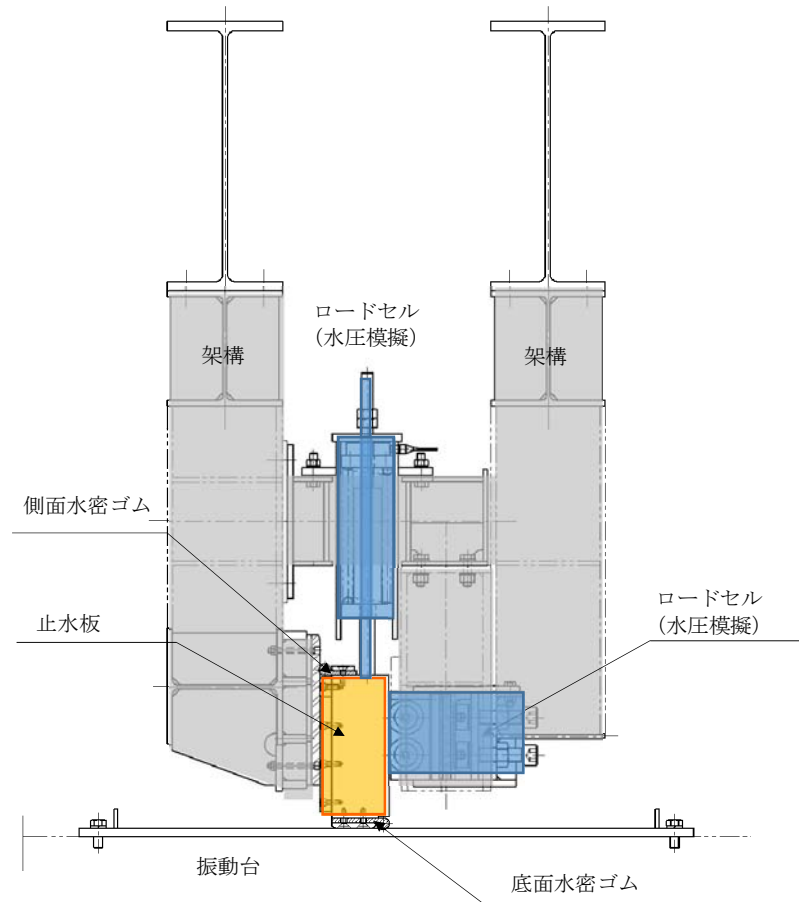


図 13 余震+津波時の試験装置の構造図

(5) 供試体（止水板）の構造（実規模）

止水板は、止水板（実物大）2枚を実機と同じ連結方法（止水板接続ゴム）にて連結させた構造にする。重量も同じ（約930kg/枚）として製作する。

水密ゴムは、止水板の底面及び側面に設置する。水密ゴムも実物と同じ構造にて設置する。

止水板の構造及び水密ゴムの構造を図14に示す。また、止水板の長手方向の挙動及び実証試験における荷重条件について補足説明3にて示す。

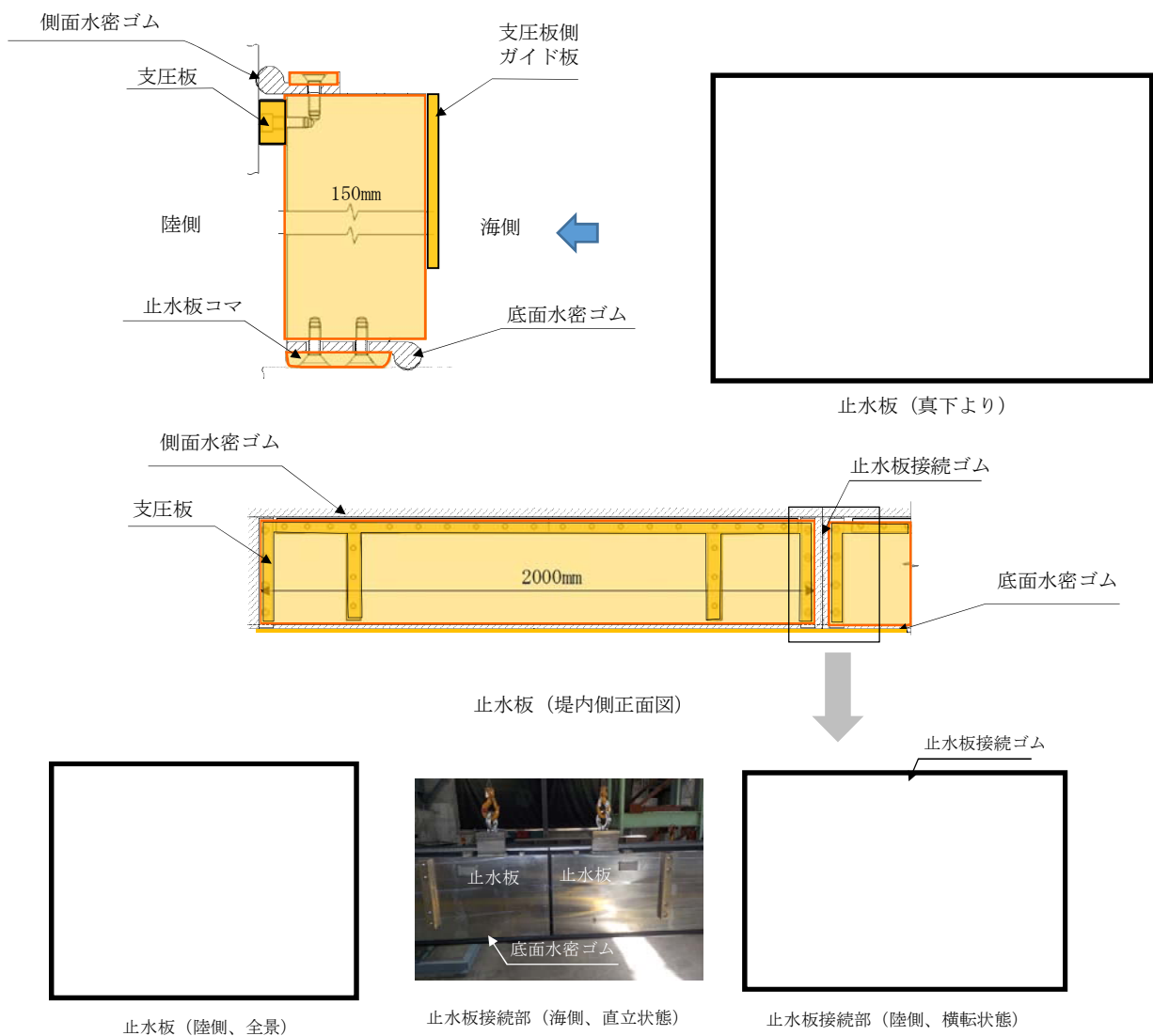


図14 止水板の構造及び水密ゴムの構造

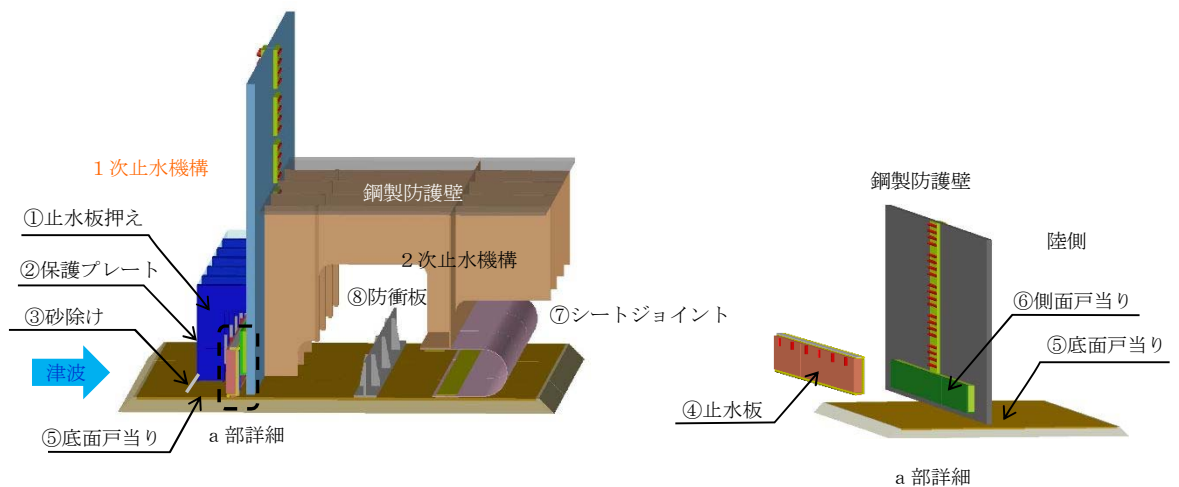
4.4 実証試験の計測項目と判定基準

実証試験では以下の項目について計測を行い「止水板の地震時の追従性」、「水密ゴムの健全性」及び「1次止水機構の構成部品の健全性」について確認し、止水機構全体に影響がないか確認する。表5に実証試験の計測項目と判定基準、表6に各部位の検査項目と図15に実証試験時の計測装置の配置を示す。

表5 実証試験の計測項目と判定基準

機能目標	計測項目※	判定基準
止水板の地震時の追従性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆追従性評価（ビデオ撮影） ◆変位計測（レーザー変位計） ◆加速度計測（加速度計） ◆外観目視検査 	<ul style="list-style-type: none"> ◆止水板の動作に異常がなく、止水板としての機能が保持されていること。（浮き上がり、止水板の破損・損傷）
水密ゴムの健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆追従性評価（ビデオ撮影） ◆変位計測（レーザー変位計） ◆寸法計測 ◆外観目視点検 	<ul style="list-style-type: none"> ◆水密ゴムの動作に異常がなく機能が保持されていること。（噛み込み、摺動による亀裂、破損、摩耗） ◆水密ゴムのライニングに異常がなく機能が保持されていること。（ライニングの破損、めくれ）
1次止水機構の構成部品の健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆止水板、側面戸当り、底面戸当り、止水板押え、架構等の外観目視点検 ◆三次元計測による試験装置全体の計測 	<ul style="list-style-type: none"> ◆装置全体に異常がなく健全であること。（試験装置、部材の変形、損傷、他）

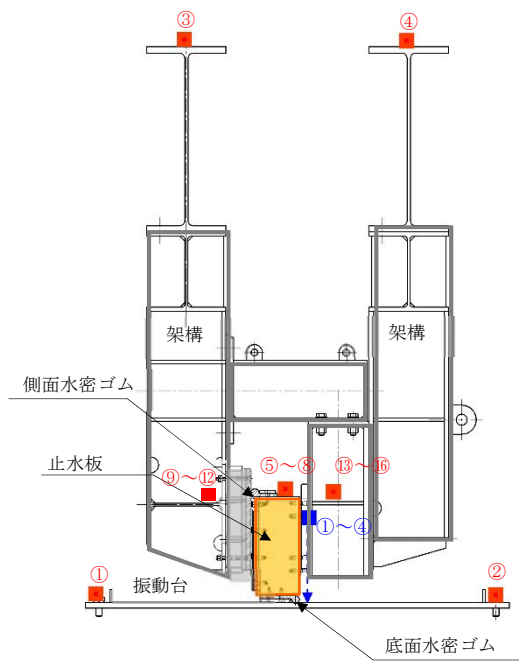
※各部位毎の計測項目については、表7の1次止水機構の各部位毎の評価項目に示す。



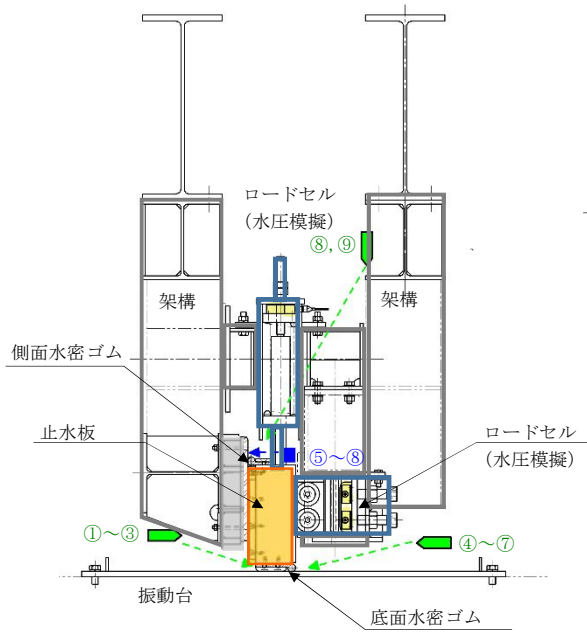
止水機構の各名称

表 6 各部位の検査項目

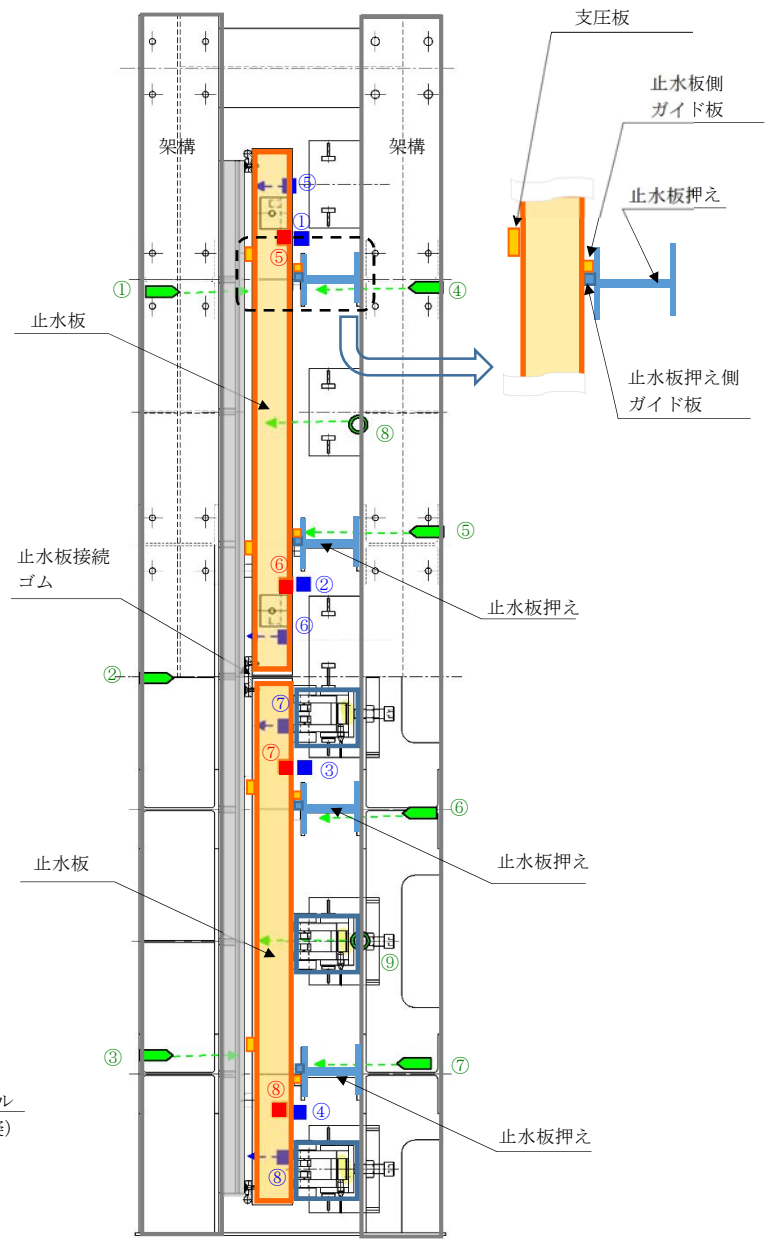
各部位	目的	確認項目	
①止水板押え	止水板の追従性に影響を与える部材の健全性を確認する。	挙動確認	◆止水板押えの加速度計測 (⑬～⑰)
		健全性確認	◆寸法計測 ・止水板押えと止水板の隙間計測 ・止水板押え側ガイド板の平面度測定 ・止水板押え側ガイド板と止水板側ガイドとの寸法測定 ◆外観目視検査 ・変形, 摩耗等の確認
④止水板 (底面止水板コマ部含む)	止水板の追従性及び健全性を確認する。	挙動確認	◆止水板と底面, 側面戸当りの変位計測 (①～⑧) (レーザー変位計による止水板の挙動確認) ◆止水板の加速度計測 (⑤～⑧) ◆ビデオ撮影 (①～⑨)
		健全性確認	◆寸法計測 ・止水板, 支圧板の寸法測定 ・止水板コマ寸法測定 (寸法, 板厚, 摩耗量測定 (試験後)) ◆外観目視, 据付け状況検査 ・止水板コマ, 支圧板の変形, 摩耗, 据付け等の確認
⑤底面戸当り ⑥側面戸当り	止水性に影響を与える部材の健全性を確認する。	挙動確認	◆加速度計測 (底面・側面戸当り) (⑨～⑫) ◆ビデオ撮影 (①～⑨)
		健全性確認	◆寸法測定 ・平面度測定 ◆外観目視, 据付け状況検査 ・変形, 摩耗, ゆがみ, 据付け等の確認
底面・側面水密ゴム	止水板に追従し, 水密性に影響がないことを確認する。	挙動確認	◆止水板と底面, 側面戸当りの変位計測 (①～⑧) (レーザー変位計による浮き上がり確認) ◆ビデオ撮影 (①～⑨)
		健全性確認	◆寸法測定 ・水密ゴムの寸法計測 (厚さ) ◆外観目視, 据付け状況検査 ・変形, 摩耗, 亀裂, ライニング面, 据付け等の確認 ◆漏水検査
止水板接続ゴム	止水板との接続部に影響がないことを確認する。	挙動確認	◆止水板の変位計測 (①～⑧) (レーザー変位計による止水板の挙動を把握し, 接続ゴムの変位を計測) ◆止水板の加速度計測 (⑤～⑧) ◆ビデオ撮影 (②)
		健全性確認	◆寸法測定 ・水密ゴムの寸法計測 (寸法) ◆外観目視検査 ・変形, 摩耗, 亀裂の確認 ・底面・側面水密ゴムの接続箇所の確認 ◆水密ゴムの据付け状況確認



断面図（加速度計，レーザ変位計）



断面図（ロードセル（水圧模擬））



平面図

<凡例>

- : 加速度計
- : レーザ変位計
- : ビデオ撮影

図 15 実証試験時の計測部位

4.5 1次止水機構の評価

実証試験の結果及び1次止水機構の評価については以下の通り分析し、二次元・三次元動的解析の結果との考察を加え、止水機構全体の評価を行う。

①実証試験データの分析

- ・表5の結果から異常の有無を確認する。
- ・加振時の止水板の挙動を評価する。

②二次元及び三次元動的解析結果の分析

- ・二次元及び三次元動的解析の結果から止水板の挙動を確認する。解析結果については補足説明4に示す。
- ・実証試験の結果と試験装置の三次元動的解析の結果から、止水板の挙動について評価を行う。

③1次止水機構の評価

1次止水機構の各部材毎における、強度評価、耐震評価の項目について、表7の1次止水機構の各部位毎の評価項目に示す。

耐震評価については、実証試験にて得られた結果と実証試験装置の解析モデルとの挙動評価の結果から、実機モデルでの三次元動的解析結果と検証を行い1次止水機構の挙動を評価する。

また、止水板の瞬間的な跳ね上がりについては、地震時の跳ね上がり時間から浸水量を評価し、余震+津波時における浸水量として算出し、2次止水機構への影響を評価する。

止水機構の概要を補足説明5に示す。

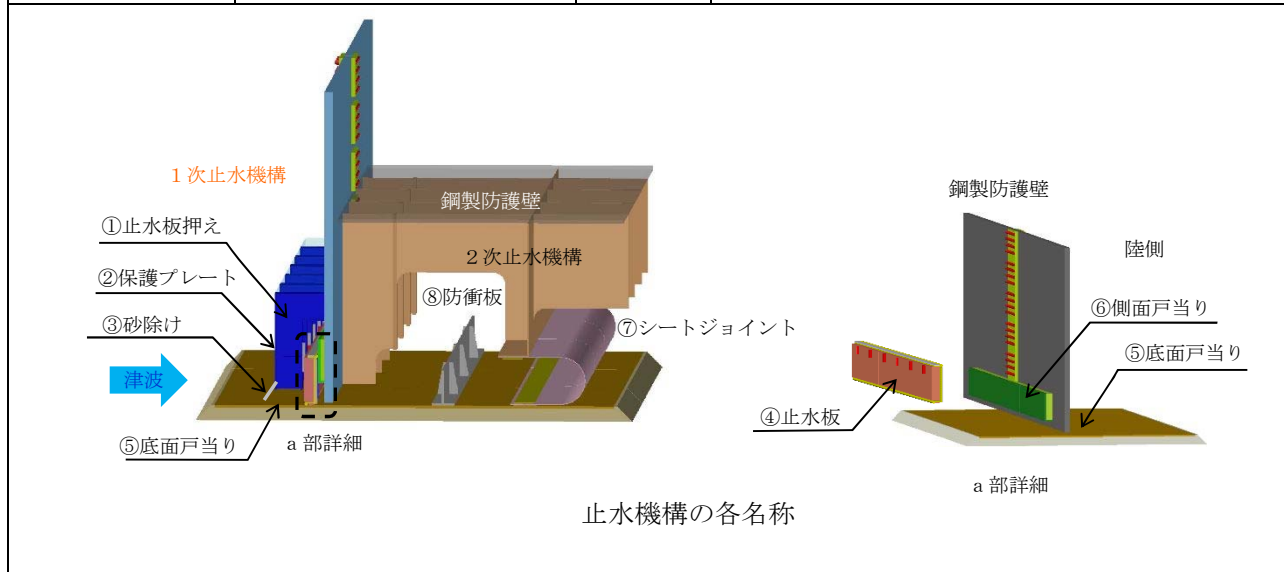
④漏水試験の実施（別途実施）

実証試験にて実施した水密ゴム（底面水密ゴム、側面水密ゴム、止水板接続ゴム）について漏水試験を実施する。

主に漏水試験は、本震、余震+津波を経験させた水密ゴムについて、漏水試験を実施し評価する。漏水試験の試験要領は補足説明6に示す。

表7 1次止水機構の各部位毎の評価項目

各部位	役割・機能	評価	評価項目
①止水板押え	<ul style="list-style-type: none"> 止水板を支持する。 漂流物等から止水板を防護する。 	耐震評価	<ul style="list-style-type: none"> ◆二次元・三次元動的解析 <ul style="list-style-type: none"> ・応力評価 ・追従性評価 ・余震+津波
		実証試験	<ul style="list-style-type: none"> ◆挙動評価 <ul style="list-style-type: none"> ・追従性評価(ビデオ撮影) ・加速度計測(水平, 鉛直) ・外観目視検査(試験装置の架構部)
④止水板 (底面止水コマ部含む)	<ul style="list-style-type: none"> 止水機構の扉体の機能 底面及び側面の戸当りに面する部位に水密ゴムを設置し浸水を防止する。 	耐震評価	<ul style="list-style-type: none"> ◆二次元・三次元動的解析 <ul style="list-style-type: none"> ・応力評価 ・追従性評価 ・余震+津波
		実証試験	<ul style="list-style-type: none"> ◆挙動評価 <ul style="list-style-type: none"> ・追従性評価(ビデオ撮影) ・変位計測(浮上り測定: 底面戸当りと鉛直の相対変位計測) ・加速度計測(水平, 鉛直) ・余震+津波(水圧模擬) ・外観目視検査
⑤底面戸当り ⑥側面戸当り	<ul style="list-style-type: none"> 止水板の底面と側面の水密ゴムとのシール性を確保する。 	実証試験	<ul style="list-style-type: none"> ◆挙動評価 <ul style="list-style-type: none"> ・追従性評価(ビデオ撮影) ・外観目視検査
底面・側面 水密ゴム	<ul style="list-style-type: none"> 底面・側面戸当りとのシール性を確保する。 	耐震評価	<ul style="list-style-type: none"> ◆二次元・三次元動的解析 <ul style="list-style-type: none"> ・応力評価 ・追従性評価 ・余震+津波
		実証試験	<ul style="list-style-type: none"> ◆挙動評価 <ul style="list-style-type: none"> ・追従性評価(ビデオ撮影) ・変位計測(浮上り測定: 底面戸当りと鉛直の相対変位計測) ・外観目視検査 ◆漏水試験(別途実施)



5. 実証試験のスケジュール

実証試験については、平成 30 年 5 月上旬までに実施する計画である。

(場所：茨城県つくば市)

表 8 に実証試験に関するスケジュール (案) を示す。

年 月	2018年				
	2月	3月	4月	5月	6月
項目					
【入力地震動の作成】					
鋼製防護壁の解析		二次元有効応力解析 (Ss-D1) 三次元フレーム解析			
取水路の解析		二次元有効応力解析 (Ss-D1)			
入力地震動の作成			▽入力地震波の作成 (包絡波)		
入力地震動の妥当性評価				▽妥当性評価 (包絡の確認)	
【止水機構の解析】					
二次元動的解析		▽試計算 (試験装置の選定)	▽実機モデル		
三次元動的解析			▽実機モデル ▽試験モデル		
【実証試験】					
製作・据付け		試験装置製作	▽据付け		
実証試験				▽試験 (5/9~5/17 予定)	
【漏水試験】					▽試験
【評価】				試験データ分析	
【ご報告】				報告 (本震) (余震) ▽	▽

表 8 実証試験に関するスケジュール (案)

【補足説明1】水密ゴムの摩擦係数について

実証試験における水密ゴムの摩擦係数は、ダム・堰施設技術基準（案）に記載の0.2及び、物性値確認を行った結果、最大で乾式の0.2、湿式の0.22であることから、ダム・堰施設技術基準（案）に記載の0.2と定義し実証試験を実施する。

なお、水密ゴムのライニングなしの実証試験については、同様に1.2と定義し実証試験を実施する。

①ダム・堰施設技術基準（案）

水密ゴム（ライニングあり）とステンレスの摩擦係数は、0.2（乾式）、0.1（湿式）と記載がある。なお、水密ゴム（ライニングなし）の場合は、1.2（乾式）、0.7（湿式）である。

②水密ゴムの物性値

- ・静摩擦係数は最大0.2（乾式）、動摩擦係数は最大0.22（乾式）表9に超高分子量ポリエチレンの物性値を示す。

表9 超高分子量ポリエチレンの物性値

項目	物性値
引張り強さ (MPa)	44
伸び (%)	450
高度 (Rスケール)	40
摩擦係数 (相手：ステンレス)	・静摩擦係数：0.10～0.20 [※] （乾式） ・動摩擦係数：0.07～0.22 [※] （乾式） 0.05～0.10（湿式）

※：動摩擦係数＞静摩擦係数の状況について

一般的に摩擦係数は、動摩擦係数＜静摩擦係数の関係であるが、高分子材料のように、静摩擦係数と動摩擦係数の値に大きな差が生じやすい場合に「スティック・スリップ（付着すべり）」と言われる現象が生じやすいことから、動摩擦係数が静摩擦係数より僅かに上回ったものと推定される。

【補足説明 2】 二次元動的解析の試解析結果

1. 目的

本解析は、止水機構の実証試験を実施するにあたり、試験ケースを確定させる必要があることから試計算を実施し試験ケースを確定する。

2. 解析条件

(1) 解析コード MSC_MARC2014.2.0 (エムエスシーソフトウェア株式会社)

(2) 解析内容 大変形超弾性解析 (水密ゴムを超弾性体として解析)

止水機構の止水板の水密ゴムと戸当り側を解析する必要があることから、大変形超弾性解析を実施する。以下に解析の概要を示す。

①材料非線形解析：水密ゴムの応力とひずみの関係が非線形状態の解析。

②幾何学非線形解析：水密ゴムの引張りひずみが100%程度を示す大変形になりうる場合も、変形に伴う荷重、応力の方向変化を考慮した解析。

③境界非線形解析：荷重の変化に伴い水密ゴムの抑え金具 (コマ) 及び扉体等への接触境界条件及びその領域を変化させた解析。

(3) 入力地震動

解析に用いた入力地震動は、基準地震動 S_s (設置許可段階) を鋼製防護壁の地中連続壁基礎天盤の応答を算出し、鋼製防護壁の三次元フレーム解析にて算出した応答時刻歴及び応答スペクトルを解析モデルの摺動側になる鋼製防護壁 (ケース①) と取水路 (ケース②) に入力し解析を実施した。

(4) モデル化

解析モデルは3次元要素 (6面体要素) で面外方向厚みを10mmとし、面外方向変位を拘束することで平面ひずみ要素の状態とした。図16に二次元動的解析のモデル図を示す。

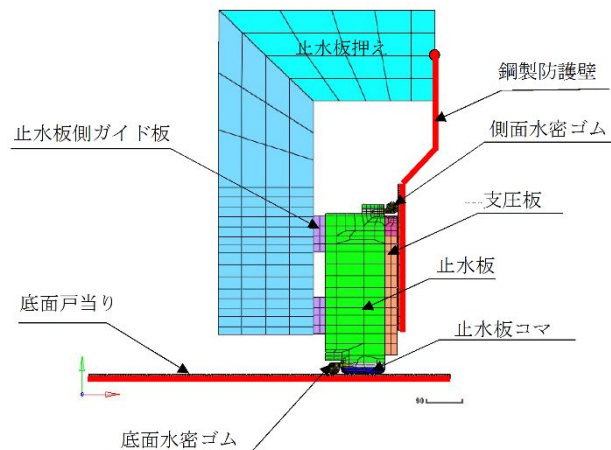


図16 二次元動的解析モデル図

(5) 解析ケース

試験装置ケースと解析ケースを表10に示す。

表10 試験装置ケースと解析ケース

試験装置ケース	摺動	解析ケース	地震波
ケース①	鋼製防護壁側	Case1-1	本震
		Case1-2	余震
ケース②	取水路側（基礎）	Case2-1	本震
		Case2-2	余震

(6) 物性値および摩擦係数

各部の物性値と摩擦係数は表11に示す通り。モデル化に当たっては、⑤底面戸当り、鋼製防護壁（⑥側面戸当り）は、剛体としてモデル化した。

表11 物性値および摩擦係数

部位（材質）	物性値	許容値	摩擦係数
①止水板押え (SM490)	縦弾性係数 205000MPa ポアソン比 0.3	耐力 315MPa	-
④止水板 (SUS304)	縦弾性係数 197000MPa ポアソン比 0.3	耐力 205MPa	-
底面・側面水密ゴム (合成ゴム+ ライニング貼付け)	単軸引張試験結果	引張強さ 14.7 MPa	0.2
止水板押え (アルミニウム銅合金)	縦弾性係数 110000MPa ポアソン比 0.3	耐力 245MPa	0.4 (金属間の摩擦係数)
支圧板 (超高分子ポリエチレン)	縦弾性係数 785MPa ポアソン比 0.3	引張強さ 44MPa	0.2
止水板側ガイド板 (アルミニウム銅合金)	縦弾性係数 110000MPa ポアソン比 0.3	耐力 245MPa	0.4

(7) 試験条件

ここでは、鋼製防護壁側の基準地震動 S_s （設置許可段階）による相対変位及び応答加速度について評価し、鋼製防護壁側及び取水路側（基礎）に摺動を与え止水機構の挙動を評価した。

①鋼製防護壁摺動（ケース①）

鋼製防護壁摺動のケースでは鋼製防護壁（止水版押えの根元も含む）は剛として水平相対変位、鉛直変位および回転変位を止水板押えの据付け部（鋼製防護壁との設置部）に強制変位として与えた。取水路側（基礎）は剛として固定した。

②取水路側（基礎）摺動（ケース②）

取水路側（基礎）摺動のケースでは、取水路側（基礎）を剛として水平相対変位、鉛直変位を強制変位として与えた。鋼製防護壁（止水版押え据付け部も含む）は剛として固定した。

③解析地震波

本震および余震ともに、最大の鉛直加速度が認められる 40～46sec（6 秒間）について解析を実施した。

(8) 水圧荷重

水圧荷重は、水位TP+20mの静水圧および動水圧とした。

(9) 解析結果

止水板コマの取水路側（基礎）からの浮き上がり量を表 12 に示す。

本震時において、静的には自重に対して摩擦力等による上向力は小さく止水板が取水路側（基礎）から浮き上がることはないが、取水路側（基礎）や鋼製防護壁への接触時に生ずる衝撃力などの動的作用により浮き上がるものと考えられる。浮き上がり量は、鋼製防護壁摺動より取水路側（基礎）摺動の方が大きい傾向が見られた（CASE1-1 と CASE2-1）。

これは、取水路側（基礎）摺動の方が鉛直方向の慣性力がより顕著に表れたためと考えられる。

余震時（津波重畳）において、鋼製防護壁摺動の場合には浮き上がりは無いが、取水路側（基礎）摺動の場合に 0.03 mm の浮き上がりが見られた。本震時と同様に衝撃力などの動的作用の影響もあるものと考えられる。また本震時と同様に浮き上がり量は、鋼製防護壁摺動より取水路側（基礎）摺動の方が大きい傾向が見られた。

表 12 止水板コマの取水路側（基礎）からの浮き上がり量

ケース	摺動側	地震波	浮き上がり量(mm)	継続時間(秒)	説明図
Case1-1	鋼製防護壁側	本震	1.81	0.15	図17
Case1-2		余震	0	—	図18
Case2-1	取水路側（基礎）	本震	3.71	0.24	図19
Case2-2		余震	0.03	0.10	図20

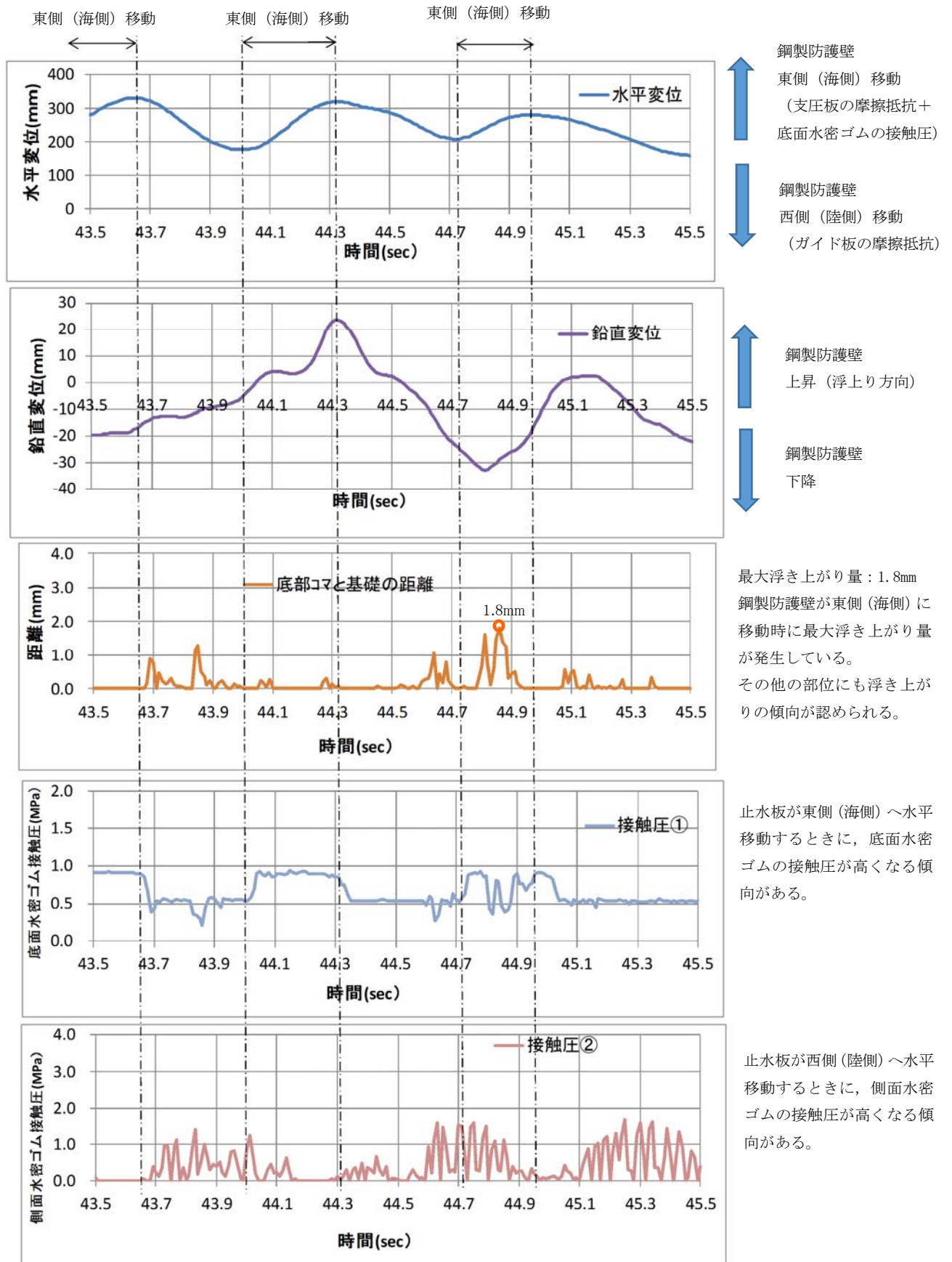
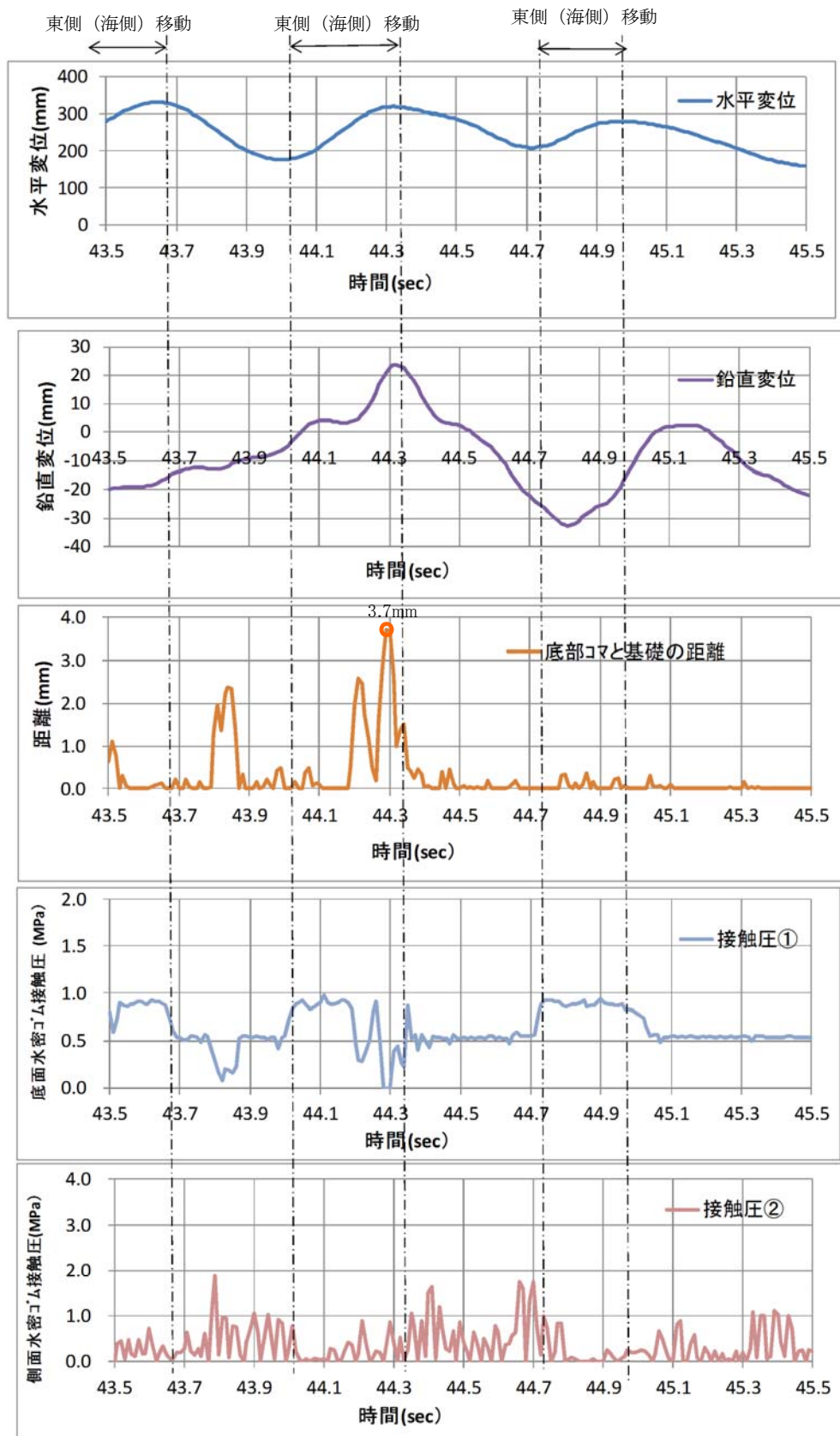


図 17 本震時 鋼製防護壁側揺動（CASE1-1）



↑ 取水路
東側（海側）移動
（支圧板の摩擦抵抗+
底面水密ゴムの接触圧）

↓ 取水路
西側（陸側）移動
（ガイド板の摩擦抵抗）

↑ 取水路
上昇（浮上り方向）

↓ 取水路
下降

最大浮き上がり量：3.7mm
取水路の東側（海側）に移動
時に最大浮き上がり量が
発生している。
その他の部位にも浮き上
がりの傾向が認められる。

止水板が東側（海側）へ水平
移動するとき、底面水密
ゴムの接触圧が高くなる傾
向がある。

止水板が西側（陸側）へ水平
移動するとき、側面水密
ゴムの接触圧が高くなる傾
向がある。

図 18 本震時 取水路側（基礎）摺動（CASE2-1）

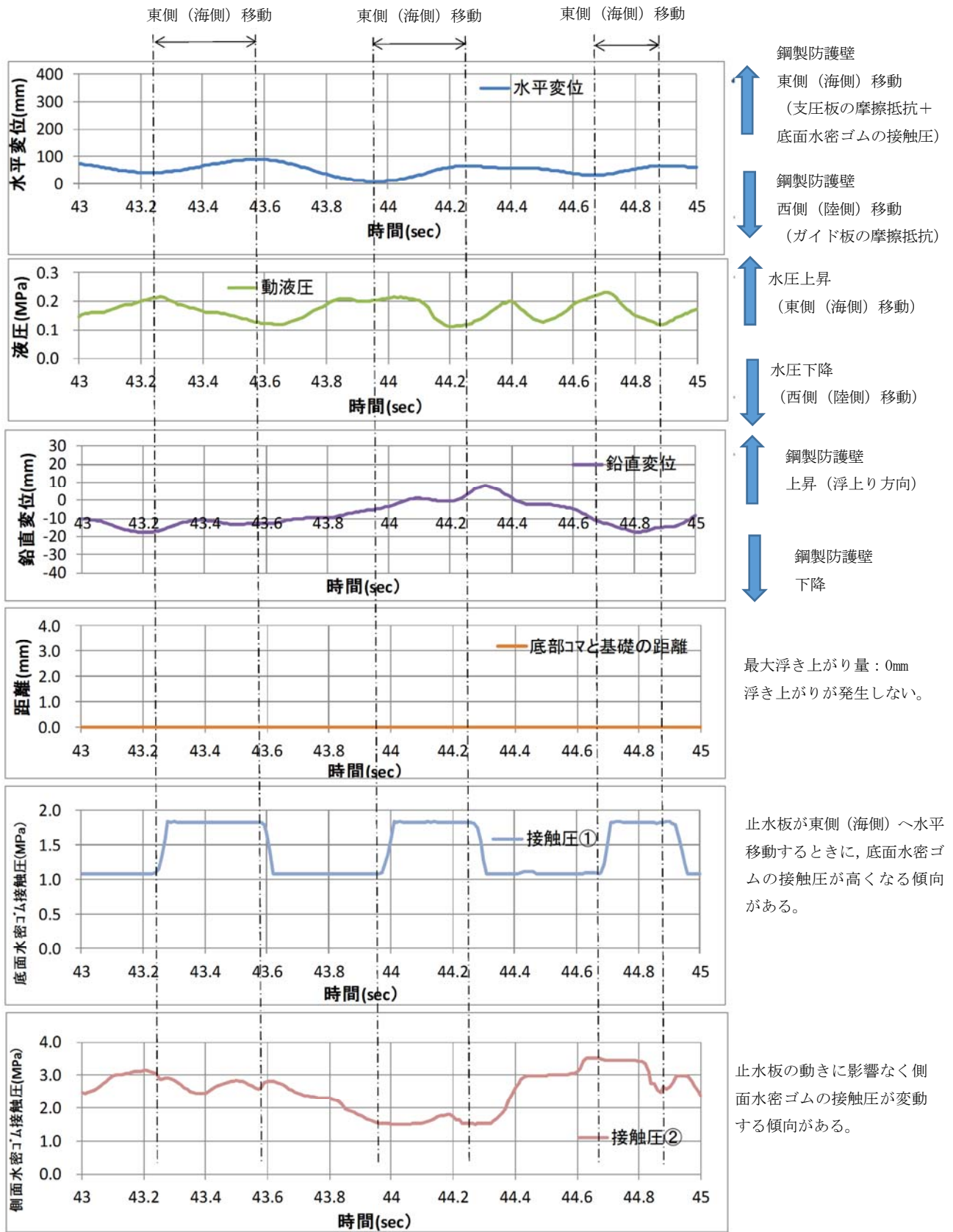


図 19 余震時 鋼製防護壁摺動 (CASE1-2)

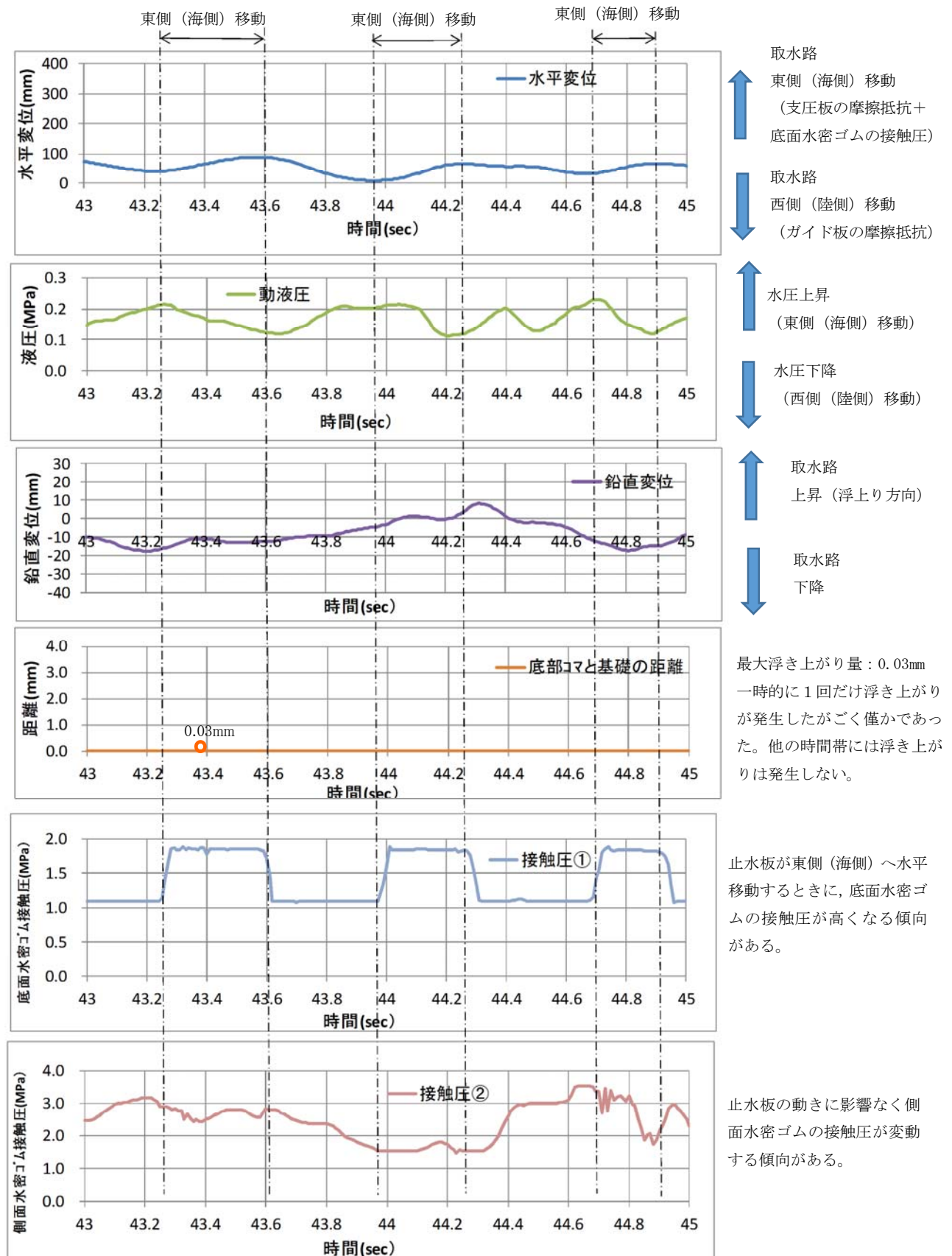


図 20 余震時 取水路側（基礎）摺動（CASE2-2）

【補足説明 3】 止水板の長手方向の挙動及び実証試験における荷重条件について

(1) 止水板の長手方向の挙動について

止水板動は、①止水板押えの止水板押え側ガイド板と④止水板の止水板側ガイド板にて長手方向の移動を制限している。止水板側ガイド板と止水板押え側ガイド板の隙間は5mmで管理している。図21に止水板と止水板押えのガイド構造について示す。

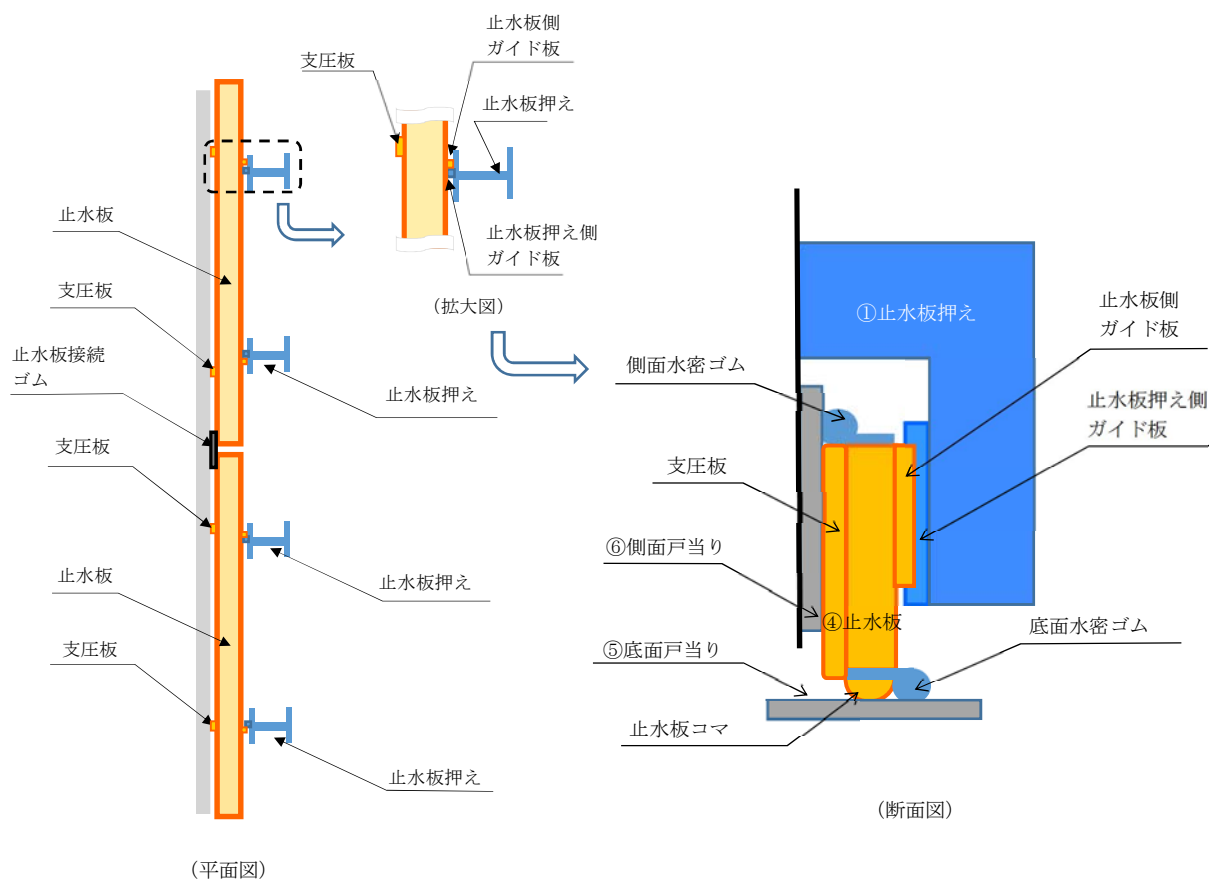


図 21 止水板と止水板押えのガイド構造について

(2) 実証試験における荷重条件について

止水板の耐震設計における考慮する荷重は、固定荷重、地震荷重である。実証試験においても、固定荷重、地震荷重について模擬している構造であり、耐震評価の荷重の組み合わせと同じ状態で実証試験を実施する。

表 12 に止水板の耐震評価における荷重の組合せを示す。

なお、積雪荷重と風荷重については、止水板押えの外側に設置している保護プレートで受けることから、構造上止水板には積雪荷重及び風荷重は考慮しない。

表 12 止水板の耐震評価における荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S_s)	$G + K_s$

G : 固定荷重 躯体自重を考慮する。

K_s : 地震荷重 基準地震動 S_s による荷重を考慮する。

【補足説明 4】 二次元・三次元動的解析の解析評価について

(1) 二次元動的解析

<評価条件>

- ・解析コード：MARC（大規模解析対応非線形解析）
- ・地震動：基準地震動 S_s
- ・解析ケース：3ケース 地震時，津波時，津波時+余震
解析モデルは図22に示す。
- ・水密ゴム摩擦係数：
常時：0.2（ダム・堰施設技術基準（案）（国土交通省）
劣化時の挙動把握（しきい値確認）：0.2～1.2
- ・金属間摩擦係数
止水板（接触面アルミニウム）と戸当り（ステンレス）：0.4
- ・評価対象部位：
底面水密ゴム，側面水密ゴム，止水板接続ゴム，止水板（止水板コマ含む），
止水板押え，底面・側面戸当り，止水板側ガイド板，支圧板
- ・許容応力：引張り強度，変形量（伸び）（水密ゴム）
弾性設計範囲内（止水板，その他の部材）
- ・評価項目：
応力評価，追従性評価（止水板浮上り），水圧模擬，摩擦係数しきい値確認

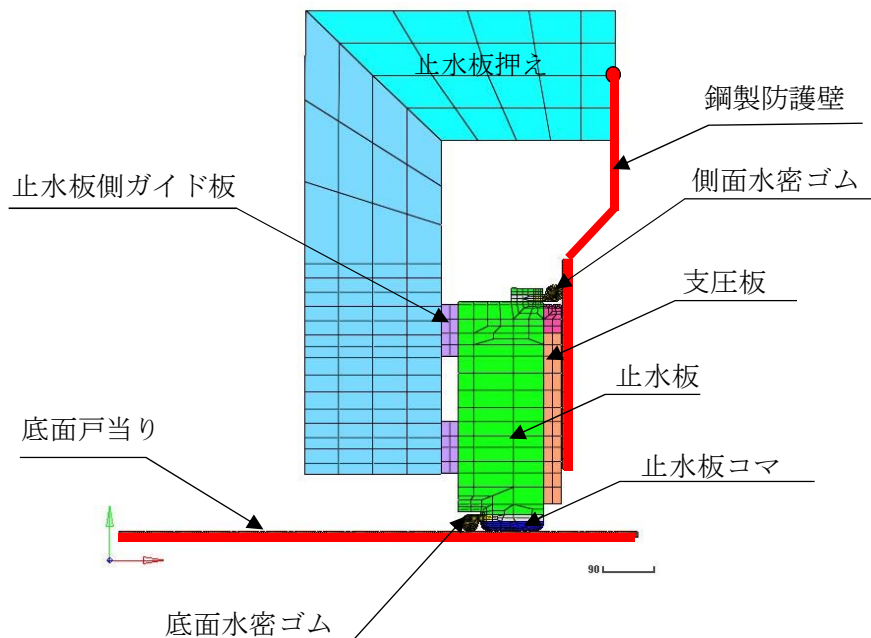


図 22 二次元動的解析モデル

(2) 三次元的解析

<評価条件>

- ・解析コード：MARC（大規模解析対応非線形解析）
- ・地震動：基準地震動 S_s
- ・解析ケース：3ケース 地震時，津波時，津波時+余震
解析モデルは図23に示す。
- ・水密ゴム摩擦係数：
常時：0.2（ダム・堰施設技術基準（案））（国土交通省）
- ・金属間摩擦係数
止水板（接触面アルミニウム）と戸当り（ステンレス）：0.4
- ・評価対象部位：
底面水密ゴム，側面水密ゴム，止水板接続ゴム，止水板（止水板コマ含む），
止水板押え，底面・側面戸当り，止水板側ガイド板，支圧板
- ・許容応力：引張り強度，変形量（伸び）（水密ゴム）
弾性設計範囲内（止水板，その他の部材）
- ・評価項目：
応力評価，追従性評価（止水板2枚の挙動，浮上り），水压模擬

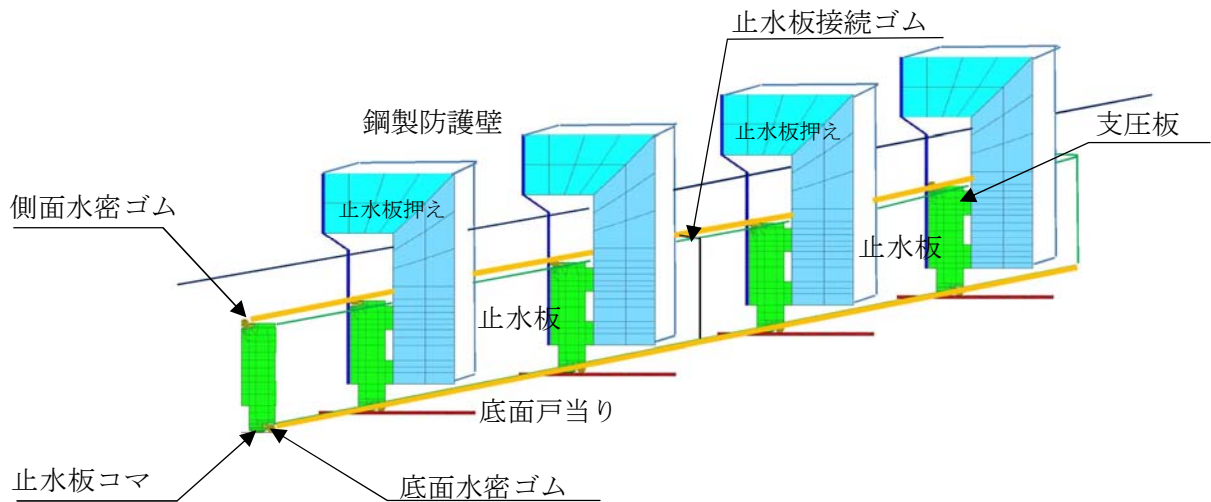


図 23 三次元的解析モデル

【補足説明 5】 止水機構の概要について

(1) 1次止水機構の止水板について

1次止水機構の止水板は、地震時の追従性を確保するとともに、津波による津波荷重、漂流物による衝突荷重を考慮した構造とする。水密部の水密ゴムは、津波による圧力に耐えうるよう設置し津波からの浸水を防止する。

なお、止水板からの微少な漏えいを考慮し、敷地内に浸水させないよう陸側にシートジョイントからなる2次止水機構を設置している。図24に止水機構全体の構造図を示す。

(2) 2次止水機構の構造について

- a. 2次止水機構は、共通要因故障（止水板の追従性不良等）による同時機能喪が生じないように多様性を図ることとし、1次止水機構の構造と異なるシートジョイントを設置している。
- b. シートジョイントについては、想定する津波荷重に対して十分な耐性を有するものを採用するが、1次止水機構の取り外し時に津波の襲来を想定すると、漂流物が2次止水機構に到達する可能性があることから、2次止水機構前面に防衝板を設置し、漂流物による損傷を防止する構造にしている。
- c. さらに、2次止水機構の後段には、2次止水機構からの漏水の可能性を考慮し、漏水を収集・排水可能な排水溝を設置する構造にする。排水は、構内排水路の防潮堤内側の集水枘に収集し、構内排水路逆流防止設備を介して排水する。
- d. 1次止水機構及び2次止水機構のこれらの対策により、基準津波の遡上波の重要な安全機能を有する海水ポンプが設置されたエリアへの到達、流入防止を確実なものとしている。

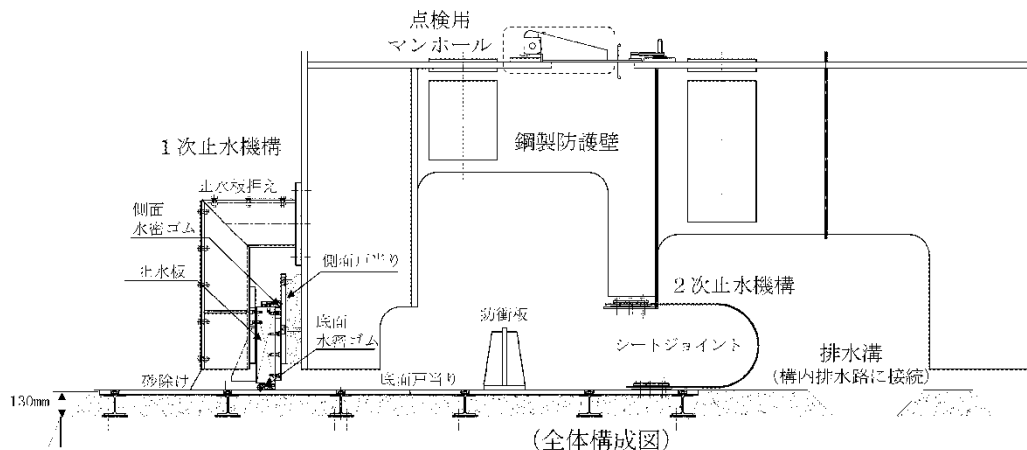


図 24 止水機構全体の概要

【補足説明6】漏水試験について

実証試験にて実施した水密ゴムについて、漏水試験を実施し水密性を確認する。

設計圧力における漏水試験のため、止水機構の水密ゴム（P形）について、試験装置を製作し、漏水試験により設計圧力に耐えることを確認する。

試験装置は、止水板2枚分（4m）の水密ゴムを設置可能な漏水試験装置を製作し、底面水密ゴム、側面水密ゴム、止水板接続ゴムからの漏水を確認する。漏水位置は中央部の3m分からの漏水量を算出する。

表13に漏水試験条件の一覧、表14に漏水試験装置の主要仕様、表15に漏水試験結果、図25に漏水試験の装置概要図を示す。

表13 漏水試験条件一覧表

項目	条件	備考
水密ゴム	試験体 1	本震，余震+津波を経験させた水密ゴム
	試験体 2	本震，余震+津波を経験させた水密ゴム
試験圧力	0.17MPa以上	保守的に，防潮堤天端高さ（T.P. +20m）から設置地盤標高（T.P. +3m）を差し引いた値
	0.21MPa以上	敷地に遡上する津波高さ（T.P. +24m）から設置地盤標高（T.P. +3m）を差し引いた値
試験時間	10分保持	「ダム・堰施設技術基準（案）」より
許容漏水量*	5.2 ℓ/10分	試験圧力0.17MPaに対する許容漏水量
	6.4 ℓ/10分	試験圧力0.21MPaに対する許容漏水量

* 「ダム・堰施設技術基準（案）（国土交通省）」で規定する保持時間及び許容漏水量算定式に基づく3m当たりの許容漏水量

・許容漏水量： $W = 10.2 L \times P$

W：漏水量（ml/min）

P：設計圧力（MPa）

L：長辺の長さ（cm）

（試験装置の漏水検出範囲長さ300cm）

表 14 漏水試験装置の主要仕様

項目		仕様
試験装置	寸法	長さ約 4.3m×高さ約 0.7m×幅約 0.7m
	材質	鋼製
	設計圧力	0.7MPa
止水板	寸法	1枚当たり 長さ約 2m×幅約 0.1m×高さ約 0.4m 2枚の止水板を接続ゴムにて接続し実施
	材質	ステンレス鋼
	重量	約 930kg/枚

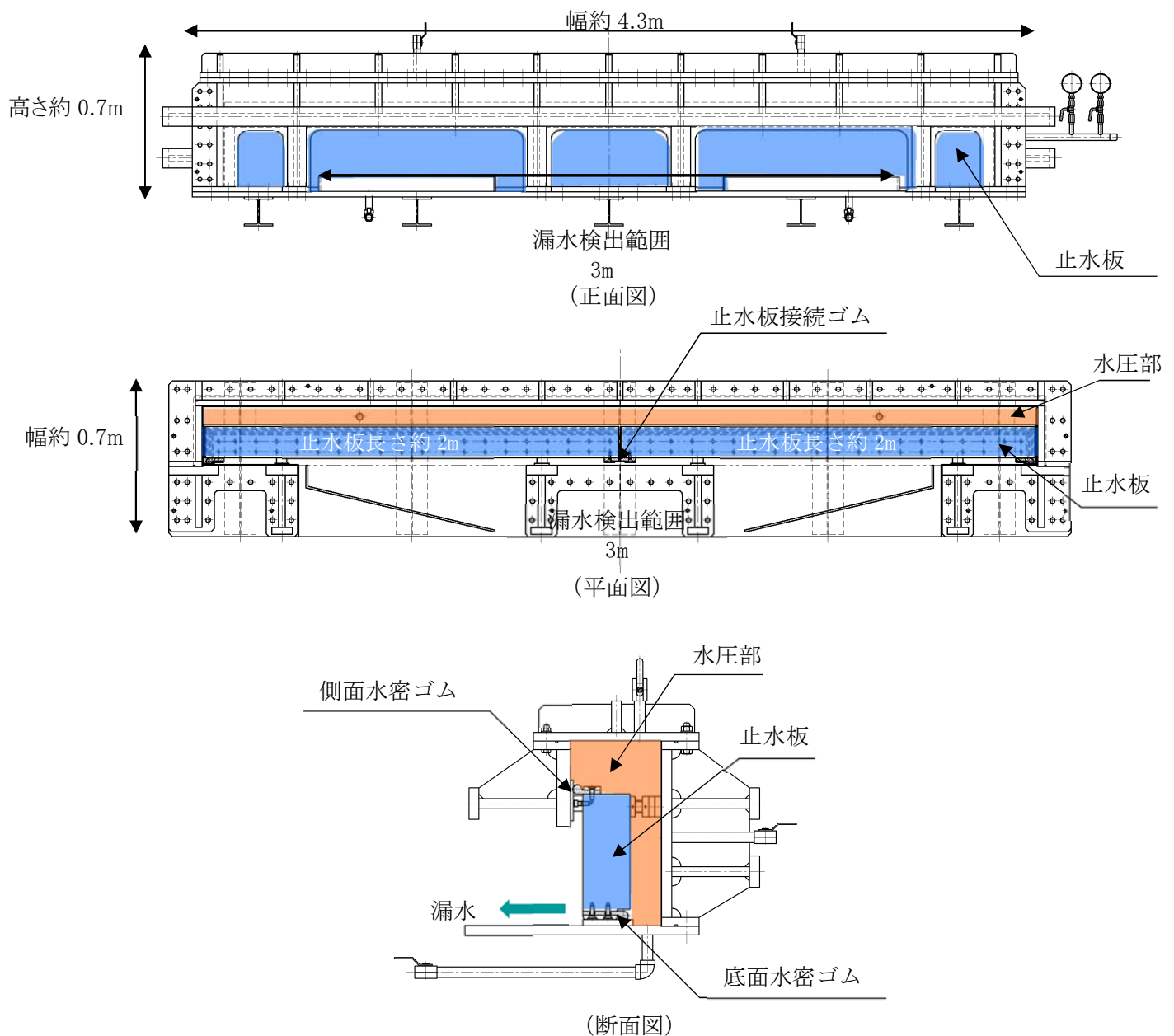
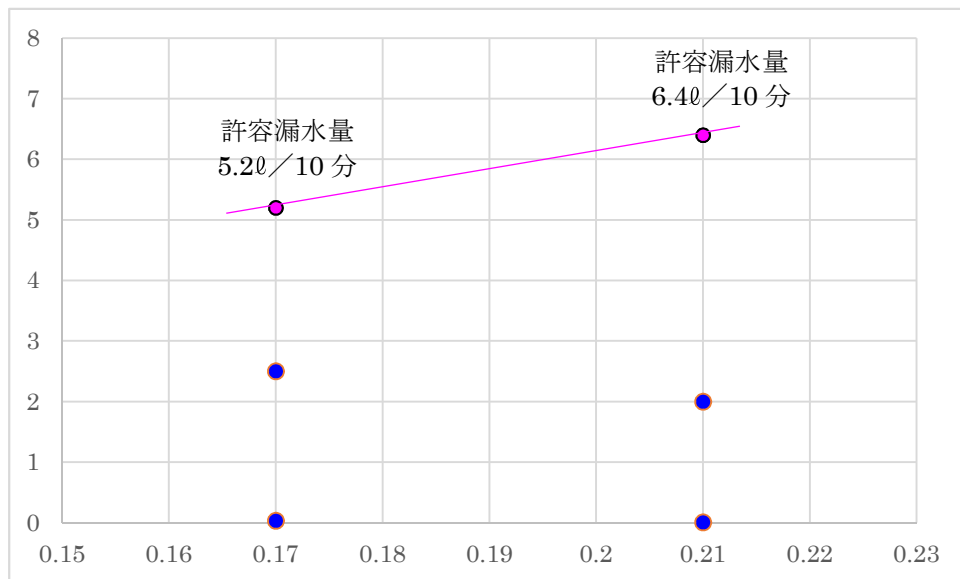


図 25 漏水試験の装置概要図

表15 漏水試験結果

	試験圧力 (MPa)	時間 (分)	漏水量 ^{※1} (ℓ/10分)	許容 漏水量 (ℓ/10分)	判定
試験体1 (1回目加振)	0.17	10	2.5	5.2	○
	0.21	10	2.0	6.4	○
試験体2 (2回目加振)	0.17	10	0.035	5.2	○
	0.21	10	0.005	6.4	○

※1：漏水量は1 mあたり10分間漏水量。



試験圧力と漏水量

<水密ゴムの単体漏水試験結果>

水密ゴムの単体試験として、未使用品の水密ゴム及び劣化状況を模擬した漏水試験を実施しており良好な結果を得ている。表 16 に試験装置の主要仕様、表 17 に漏水試験結果、図 25 に試験装置の概要図、図 26 に試験圧力と漏水量を示す。

表 16 試験装置主要仕様

項目		仕様
試験装置	寸法	長さ約 2.3m×高さ約 0.7m×幅約 0.5m
	材質	鋼製
	設計圧力	0.7MPa
止水板	寸法	長さ約 2m×幅約 0.1m×高さ約 0.4m
	材質	ステンレス鋼
	重量	約 620kg

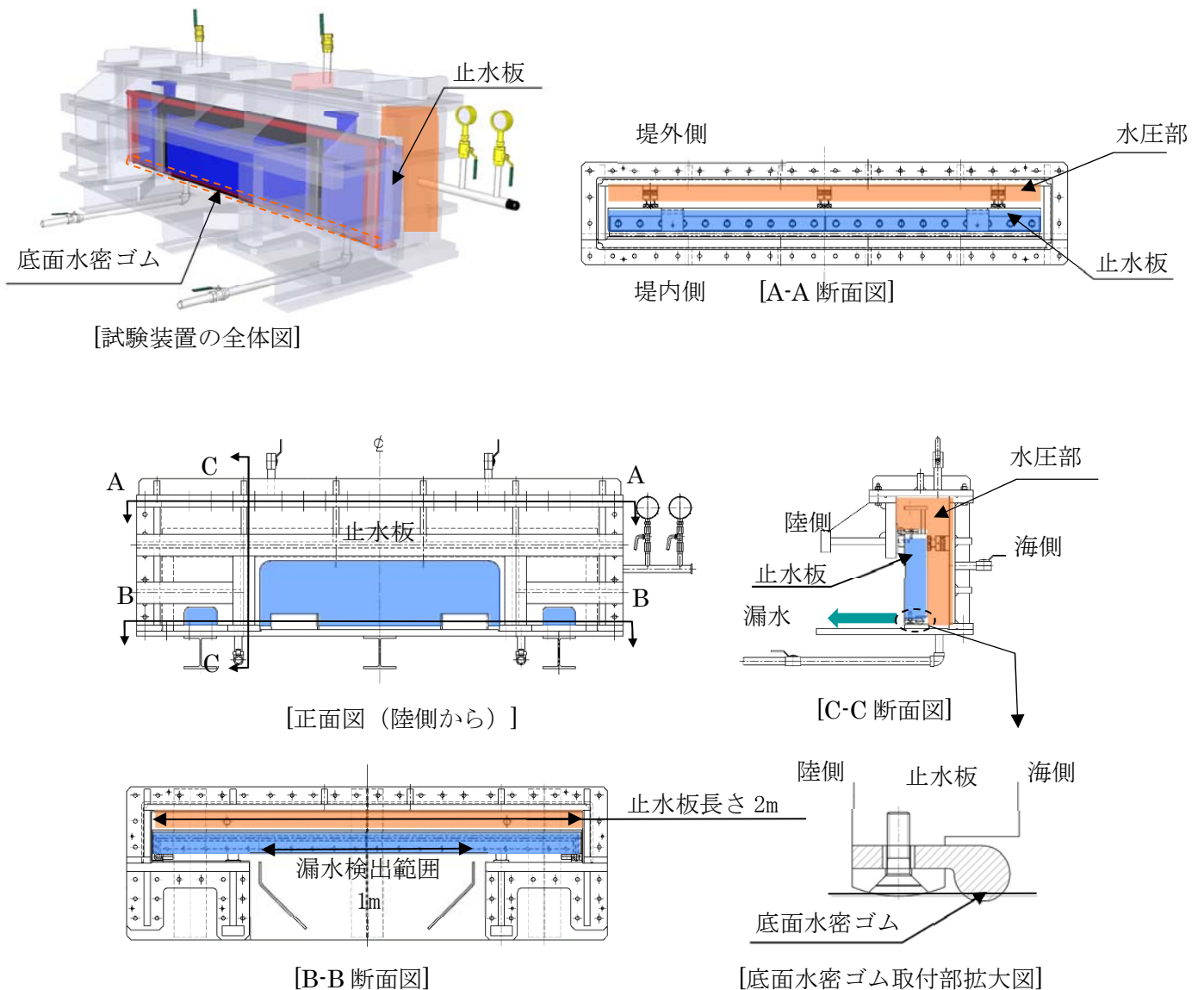


図 25 試験装置概要図

表17 漏水試験結果

	区分	試験圧力 (MPa)	時間 (分)	漏水量 ^{※1} (ℓ/10分)	許容漏水量 (ℓ/10分)	判定
試験体1	未使用品	0.20	10	0.020	2.0	○
試験体2		0.20	10	0.029	2.0	○
試験体3	劣化状態を仮定	0.17	10	0.039	1.7 ^{※2}	○
		0.66	10	0.625	6.7 ^{※2}	○
		0.17	10	0.440	1.7 ^{※2}	○
		0.66	10	0.525	6.7 ^{※2}	○

※1：漏水量は1 mあたり10分間漏水量。

※2：未使用品（新品）の場合の許容漏水量

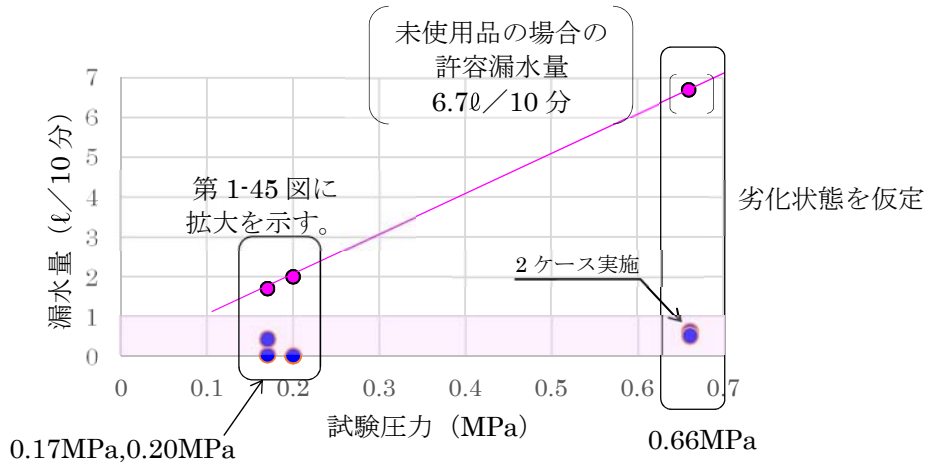


図 26 試験圧力と漏水量（高圧）

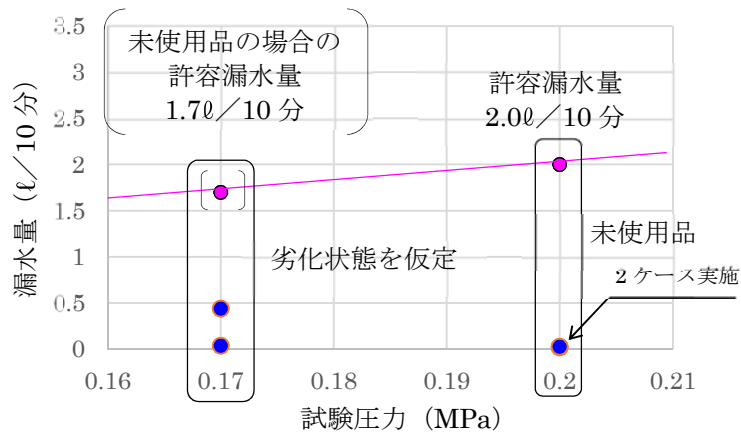


図 26 試験圧力と漏水量（低圧）

【参考】実証試験において想定される不具合と対策（案）

実証試験において想定される不具合として、止水板の浮上りや水密ゴムの噛み込み等が考えられるため、以下の対策（案）を検討している。

対策（案）の実施に当たっては、二次元・三次元動的解析の結果も踏まえ、原因の分析を十分に行い、必要に応じて対策を実施する。

図 27 に要因と対策（案）を示す。

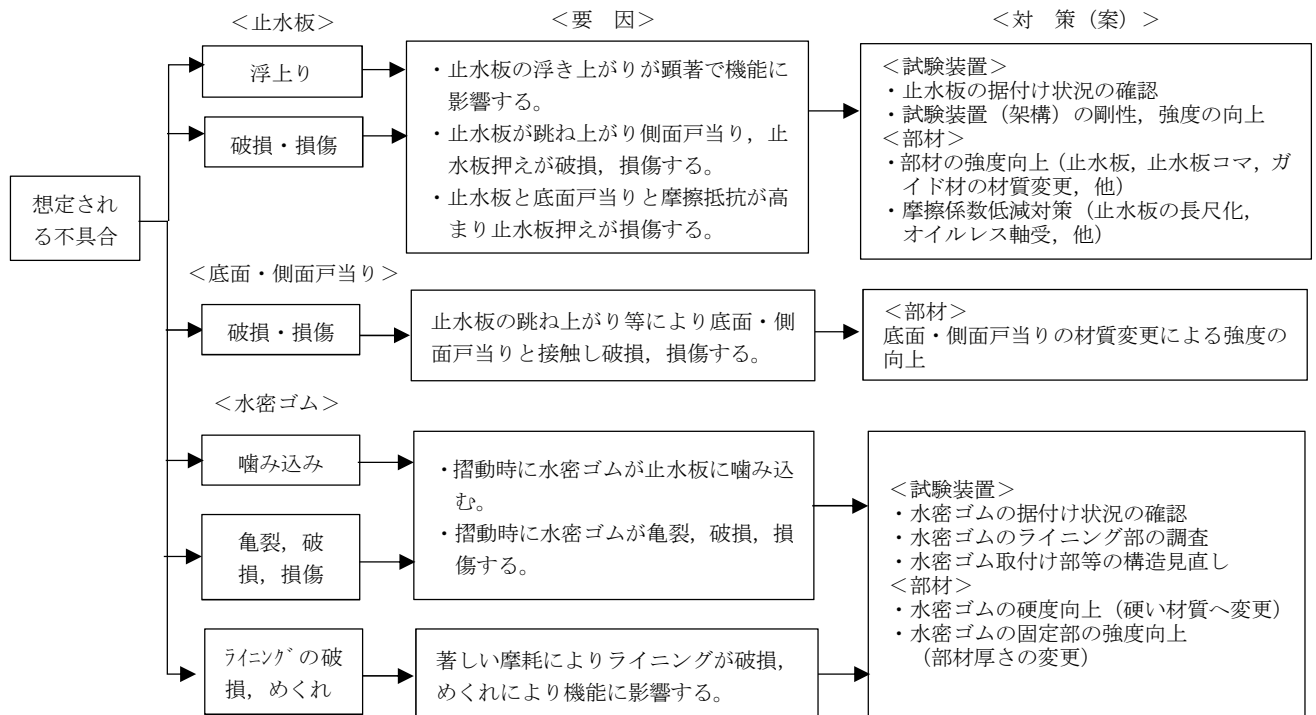


図 27 実証試験時における不具合時に対する対策（案）

6.1.3.2 止水機構（1次止水機構）の実証試験の試験要領について

1. 目的

止水機構の地震時及び余震+津波時の追従性を確認するため、実規模大の試験装置を用いた試験（以下「実証試験」という。）を行い、止水板の挙動を確認することにより、変位追従性、水密ゴムの健全性を確認する。本件は、実証試験の試験要領を示す。

2. 試験期間及び場所

実施時期：平成30年5月9日（水）～17日（木）（予定）

場 所

--

3. 試験体制

実証試験体制は、図1に示す。

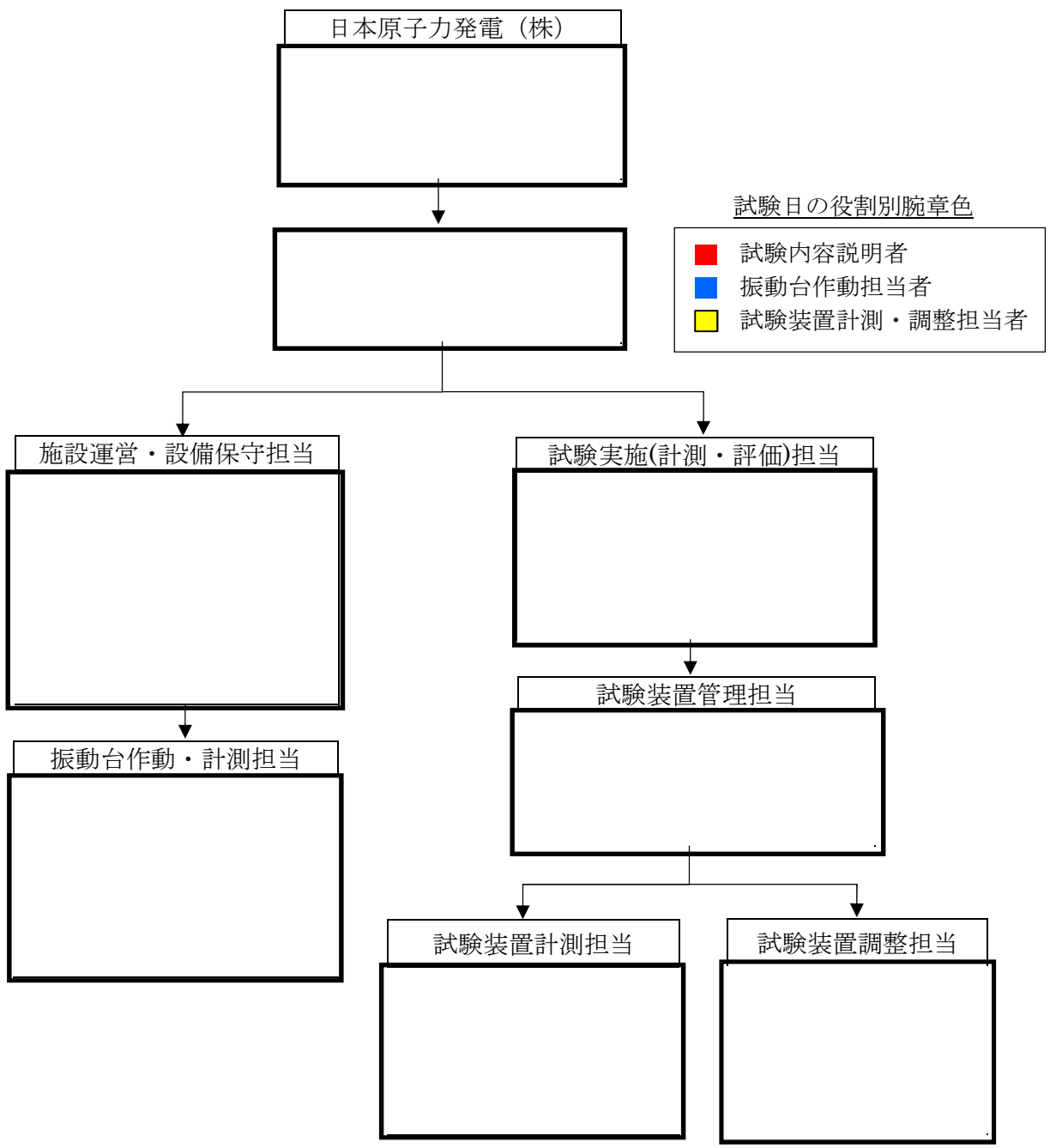


図1 実証試験体制

4. 実証試験装置の概要

振動台の上に1次止水機構を設置し、水平方向と鉛直方向とを同時加振する。図2に大型3軸振動台の概要、図3に振動台の平面図、図4に試験装置のイメージ図を示す。

振動台の仕様

加振自由度	3軸6自由度		
最大積載重量	80 t f		
テーブル寸法	X : 6m × Y : 4m		
定格	X方向	Y方向	Z方向
最大変位	±300mm	±150mm	±100mm
最大加速度 (35 t 積載時)	1G (水平)	3G (水平)	1G (鉛直)

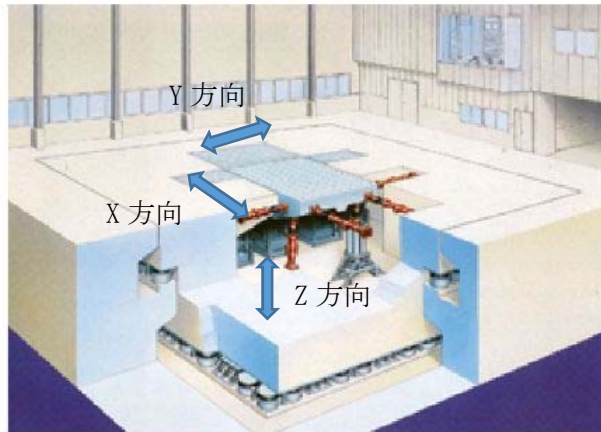


図2 大型3軸振動台の概要



図3 振動台平面図

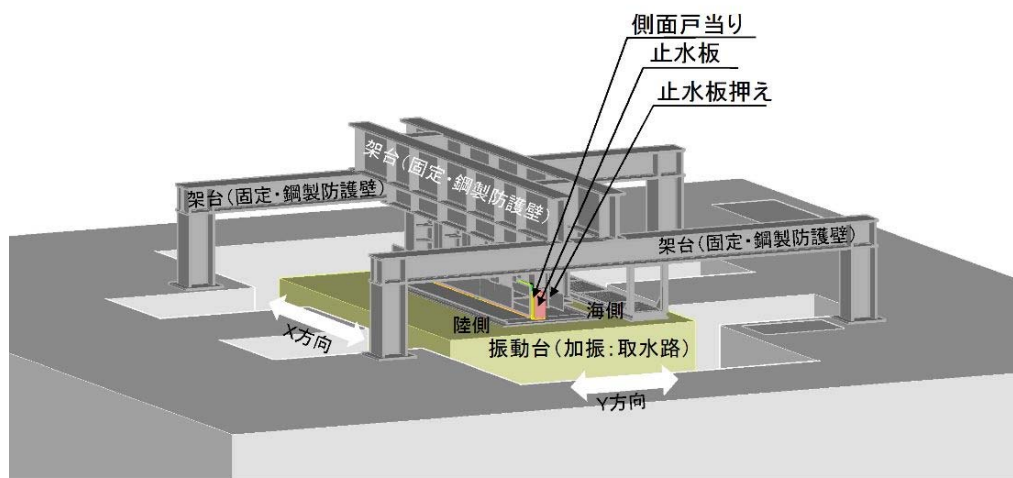


図4 試験装置の鳥観図

6. 1. 3-48

5. 試験条件

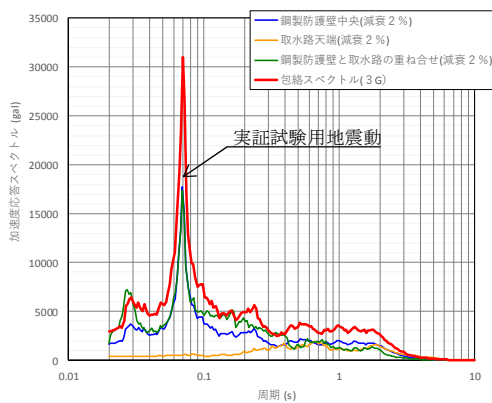
(1) 実証試験用地震動

振動台に入力する実証試験用地震動は、本震として基準地震動 S_s を包絡させた地震動及び余震+津波時として津波波圧を模擬的に与えた条件にて実証試験を実施する。表1に実証試験用応答スペクトルに用いる入力地震動を示す。

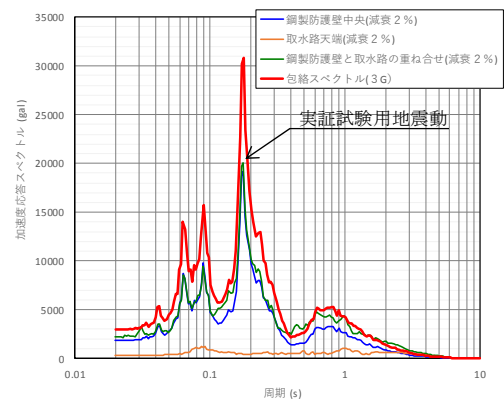
図5に本震による三方向（X，Y，Z）の実証試験用地震動の加速度応答スペクトルを示す。模擬地震動の詳細については「6.1.3.4 実証試験に用いる地震動の作成，実証試験及び三次元動的解析のケースについて」に示す。

表1 実証試験用応答スペクトルに用いる入力地震動

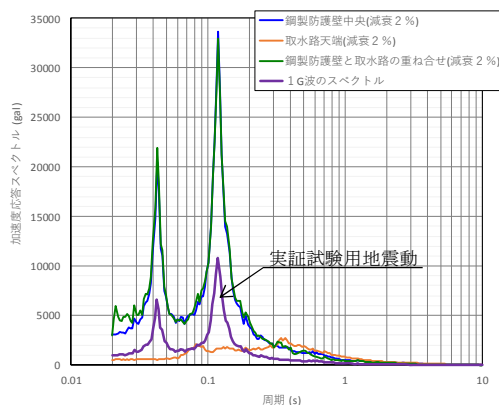
種類	入力地震動
本震	$S_s - D1$
余震+津波	$S_d - D1$



加速度応答スペクトルX方向（NS）



加速度応答スペクトルY方向（EW）



加速度応答スペクトルZ方向

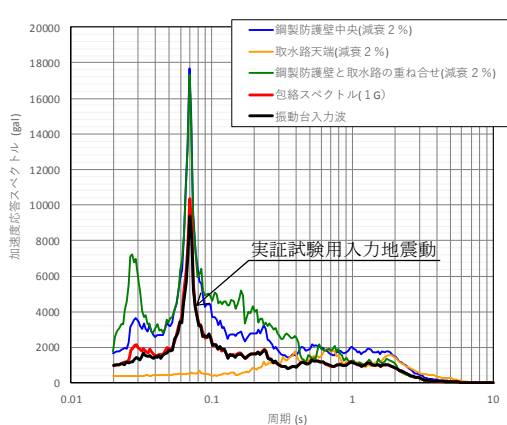
図5 本震による三方向（X，Y，Z）の実証試験用地震動の加速度応答スペクトル

(2) 実証試験用入力地震動

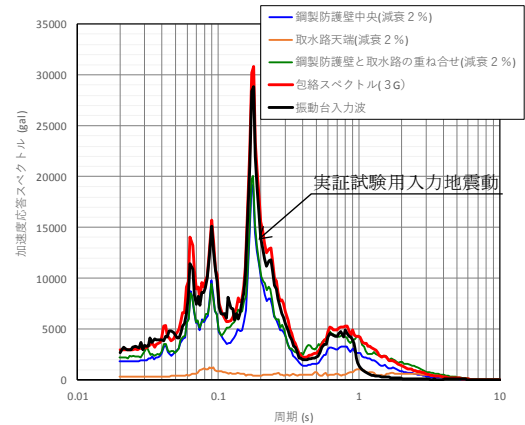
実証試験用入力地震動は、変位量に対する振動台性能の制限内に地震動を収めることを目的として、実証試験用地震動にハイパスフィルター（HPF）を掛け、長周期成分をカットした地震動である。

実証試験に用いる振動台へ入力する入力波形を図6に示す。

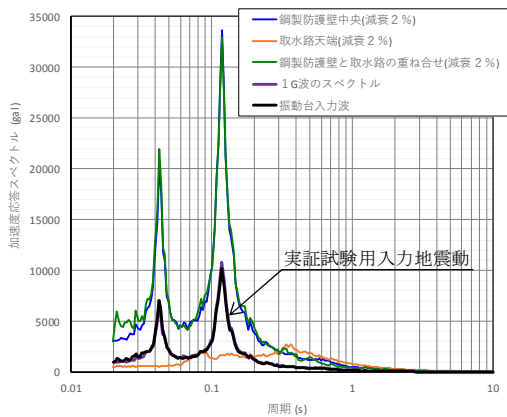
図6の入力加速度が最大3GであるY方向（EW）の加速度応答スペクトル図から周期1sec付近でHPFが掛かっていることが読み取れるが、最大加速度レベルは実証試験用地震動とほぼ同一レベルであることを確認した。



加速度応答スペクトルX方向（NS）



加速度応答スペクトルY方向（EW）



加速度応答スペクトルZ方向

図6 本震による三方向（X，Y，Z）の実証試験用入力地震動の加速度応答スペクトル

(3) 実証試験ケースと三次元動的解析ケース

表2に本震時、表3に余震時の実証試験のケースと三次元動的解析のケースを示す。

表2 本震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3方向 (X方向(堤軸)包絡波)	1 G	3 G (X包絡波)	1 G	○	○	3方向同時 (Y方向にX方向の地震動を入力。方向反転)
② 3方向 (Y方向(堤軸直角)包絡波)	1 G	3 G (Y包絡波)	1 G	○	○	3方向同時 (図7に実証試験用入力地震動)
③鉛直 (鋼製防護壁包絡波)	—	—	1 G	○	—	鉛直単独
④鉛直 (取水路側包絡波)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独 (図8に実証試験用入力地震動)
⑤基準地震動 (S_s) (S_s -D1)	—			—	○	3方向同時
⑥基準地震動 (S_s)	—			—	○	3方向同時

○：解析実施ケース

表3 余震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3方向 (Y方向(堤軸直交)包絡波)	1 G	2 G (Y包絡波)	1 G	○	○	3方向同時
②鉛直 (鋼製防護壁波形入力)	—	—	1 G	—	—	鉛直単独
③鉛直 (取水路側波形入力)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独
④基準地震動 (S_d) (S_d -D1)	—			—	○	3方向同時

○：解析実施ケース

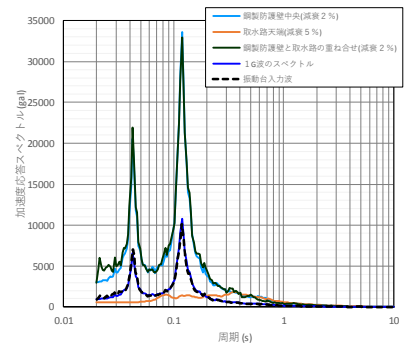
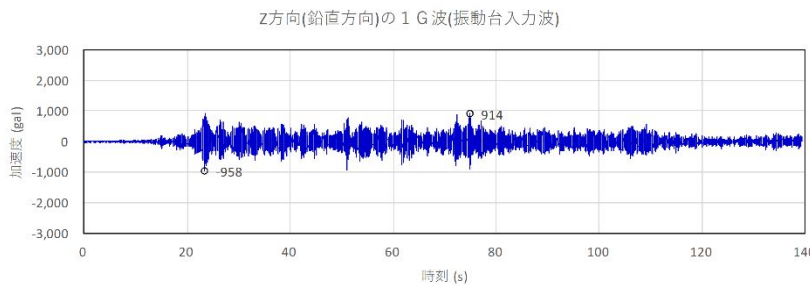
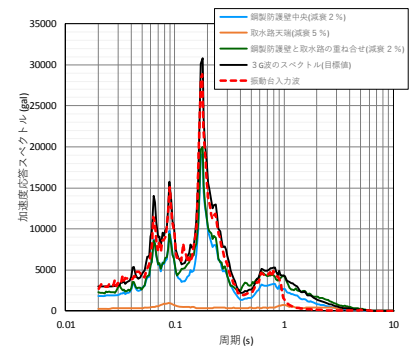
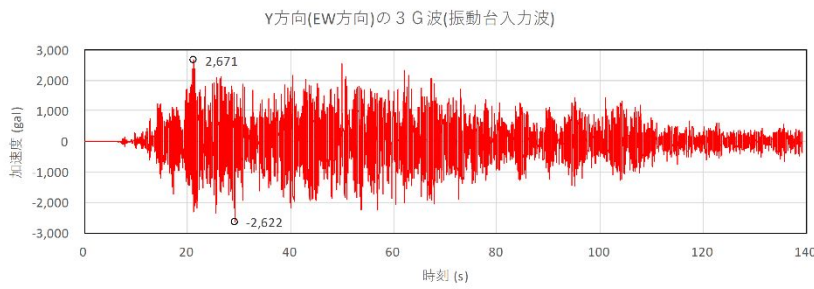
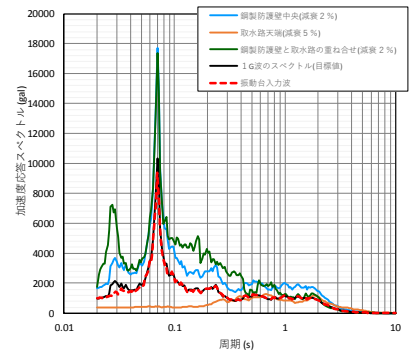
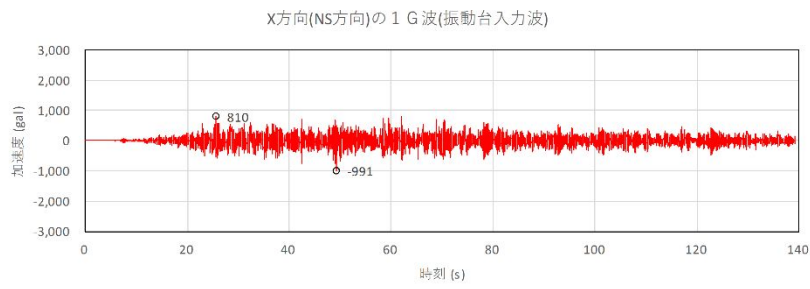


図7 ②3方向（Y方向（堤軸直交）包絡波）実証試験用入力地震動

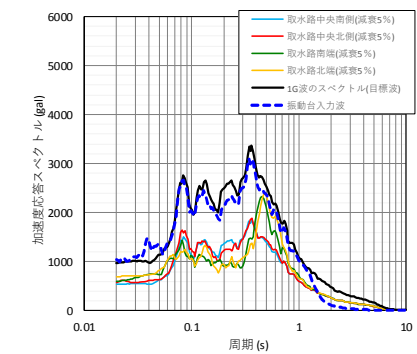
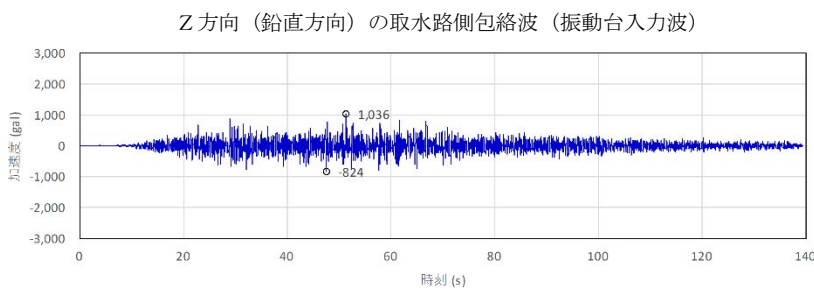


図8 ④鉛直（取水路側包絡波）実証試験用入力地震動

(4) 試験回数

実証試験に用いる入力地震動（ S_s-D1 ， S_d-D1 ）による確認は、止水板の挙動の再現性を確認するため、表4の試験回数の設定のとおり2回づつ実施する。

表4 試験回数の設定

	本震	余震+津波
試験回数	2回	2回

(5) 摩擦係数の設定

止水板に設置する側面・底面水密ゴムは、材料証明書にてダム堰施設技術基準の物性値であることを確認した未使用品のものを使用するため、摩擦係数は0.2の状態とする。表5に水密ゴムの物性値及び試験方法の規格を示す。

表5 水密ゴムの物性値及び試験方法の規格

	試験項目	物性値	規格値	試験条件・試験方法	
通常	硬さ (DURO-A型)	55	55±5	JIS K 6253	
	引張り 強さ	(MPa)	16.3	14.7以上	JIS K 6251
		(kgf/cm ²)	166	150以上	
	伸び (%)	500	300以上		

(6) 余震時の波圧の設定について

余震時においては、余震+津波の津波高さの圧力を想定する必要があるため、津波による荷重を以下のとおり止水板に負荷し、実証試験を実施する。

◆水平方向荷重

止水板1枚(2m)当り3カ所×2セットの水圧負荷装置により29.0kN以上の荷重を掛ける。

$$W_h = 86.7 \text{ kN/m} \times 2 \text{ m} \div (3 \times 2) = 28.9 \text{ kN} \approx 29.0 \text{ kN}$$

<水平方向水圧荷重(単位m当たり)>

$$W_H = 1/2 \cdot (h^2 - h_1^2) \cdot \gamma_w$$

$$= 1/2 \times (20.90^2 - 20.485^2) \times 10.1 = 86.7 \text{ kN/m}$$

γ_w : 海水の単位体積重量 10.1 kN/m

◆鉛直方向荷重

止水板1枚(2m)当り2カ所×2セットの水圧負荷装置により29.0kN以上の荷重を掛ける。

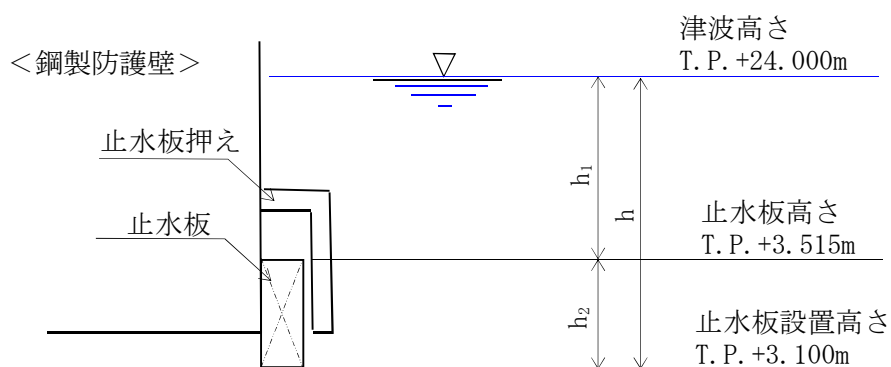
$$W_v = 29.0 \text{ kN/m} \times 2 \text{ m} \div 2 = 29.0 \text{ kN}$$

<鉛直方向水圧荷重(単位m当たり)>

$$W_V = h_1 \cdot \gamma_w \cdot B'$$

$$= 20.485 \times 10.1 \times 0.14 = 29.0 \text{ kN/m}$$

B' : 鉛直方向受圧厚さ 0.14m



$$h = 20.9 \text{ m}$$

$$h_1 = 20.485 \text{ m}$$

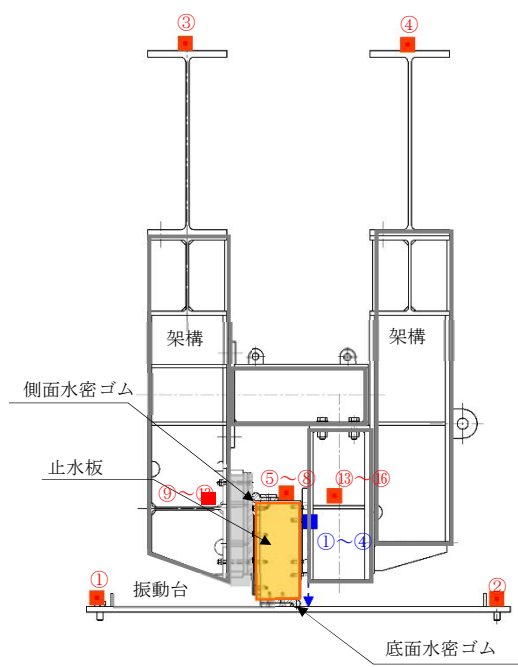
$$h_2 = 0.415 \text{ m}$$

(7) 実証試験に係る計測項目

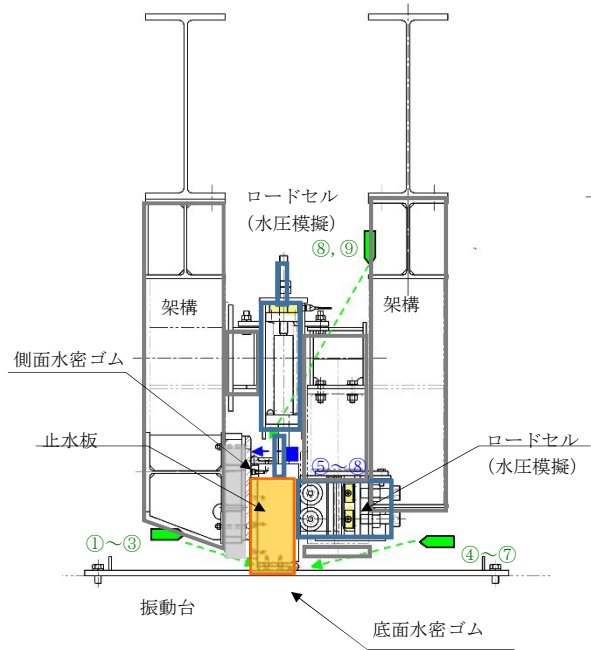
実証試験における計測項目（表6）計測箇所（図9）及び計測器一覧（表7）を示す。

表6 実証試験における計測項目

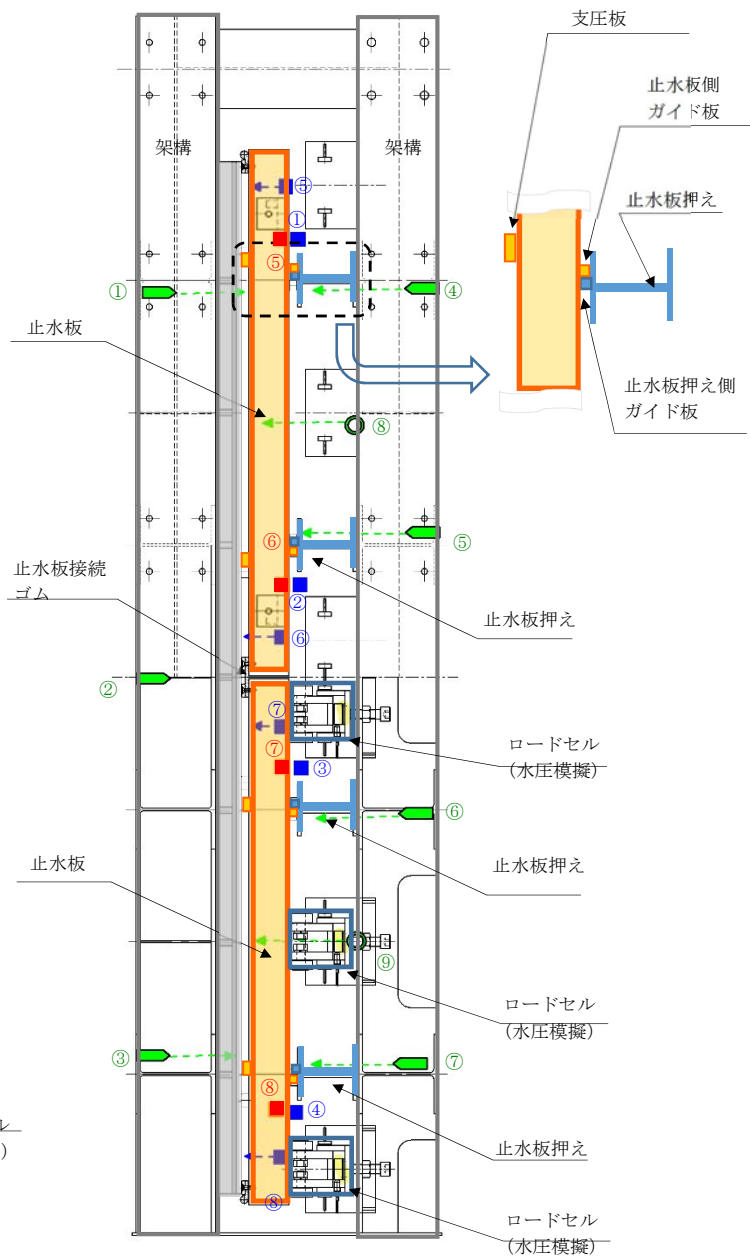
各部位	目的	確認項目	
①止水板押え	止水板の追従性に影響を与える部材の健全性を確認する。	挙動確認	◆止水板押えの加速度計測（⑬～⑯）
		健全性確認	◆寸法計測 ・止水板押えと止水板の隙間計測 ・止水板押え側ガイド板の平面度測定 ・止水板押え側ガイド板と止水板側ガイドとの寸法測定 ◆外観目視検査 ・変形，摩耗等の確認
④止水板 （底面止水板コマ部含む）	止水板の追従性及び健全性を確認する。	挙動確認	◆止水板と底面，側面戸当りの変位計測（①～⑧） （レーザー変位計による止水板の挙動確認） ◆止水板の加速度計測（⑤～⑧） ◆ビデオ撮影（①～⑨）
		健全性確認	◆寸法計測 ・止水板，支圧板の寸法測定 ・止水板コマ寸法測定（寸法，板厚，摩耗量測定（試験後）） ◆外観目視，据付け状況検査 ・止水板コマ，支圧板の変形，摩耗，据付け等の確認
⑤底面戸当り ⑥側面戸当り	止水性に影響を与える部材の健全性を確認する。	挙動確認	◆加速度計測（底面・側面戸当り）（⑨～⑫） ◆ビデオ撮影（①～⑨）
		健全性確認	◆寸法測定 ・平面度測定 ◆外観目視，据付け状況検査 ・変形，摩耗，ゆがみ，据付け等の確認
底面・側面水密ゴム	止水板に追従し，水密性に影響がないことを確認する。	挙動確認	◆止水板と底面，側面戸当りの変位計測（①～⑧） （レーザー変位計による浮き上がり確認） ◆ビデオ撮影（①～⑨）
		健全性確認	◆寸法測定 ・水密ゴムの寸法計測（厚さ） ◆外観目視，据付け状況検査 ・変形，摩耗，亀裂，ライニング面，据付け等の確認 ◆漏水検査
止水板接続ゴム	止水板との接続部に影響がないことを確認する。	挙動確認	◆止水板の変位計測（①～⑧） （レーザー変位計による止水板の挙動を把握し，接続ゴムの変位を計測） ◆止水板の加速度計測（⑤～⑧） ◆ビデオ撮影（②）
		健全性確認	◆寸法測定 ・水密ゴムの寸法計測（寸法） ◆外観目視検査 ・変形，摩耗，亀裂の確認 ・底面・側面水密ゴムの接続箇所の確認 ◆水密ゴムの据付け状況確認



断面図 (加速度計, レーザ変位計)



断面図 (ロードセル (水圧模擬))



平面図

<凡例>

- : 加速度計
- : レーザ変位計
- ➡ : ビデオ撮影

本震時の計測機器に、更に水圧模擬するためロードセルを設置する。

図9 実証試験時の計測部位 (本震時・余震+津波時)

表7 計測器一覧

計測器	型番	メーカー	仕様	数量	備考
レーザー変位計			測定範囲 160~450 mm 繰返し精度 30 μ m 計測精度 : 0.1mm	4	鉛直 相対変位
			測定範囲 75~130 mm 繰返し精度 30 μ m 計測精度 0.01mm	4	水平 相対変位
加速度計			定格容量 ±20G 応答周波数範囲 500Hz 計測精度 0.02G±1%	16	X Y Z 方向
ロードセル			定格容量 50 k N 非直線性 ±0.05%	12	水平方向
			定格容量 100 k N 非直線性 ±0.2%	4	鉛直方向
CCD カメラ			f6 mm, 8 mm, 12 mm	6	
			f3.7 mm	3	
ビデオ カメラ			デジタルハイビジョン方式	2	全景用

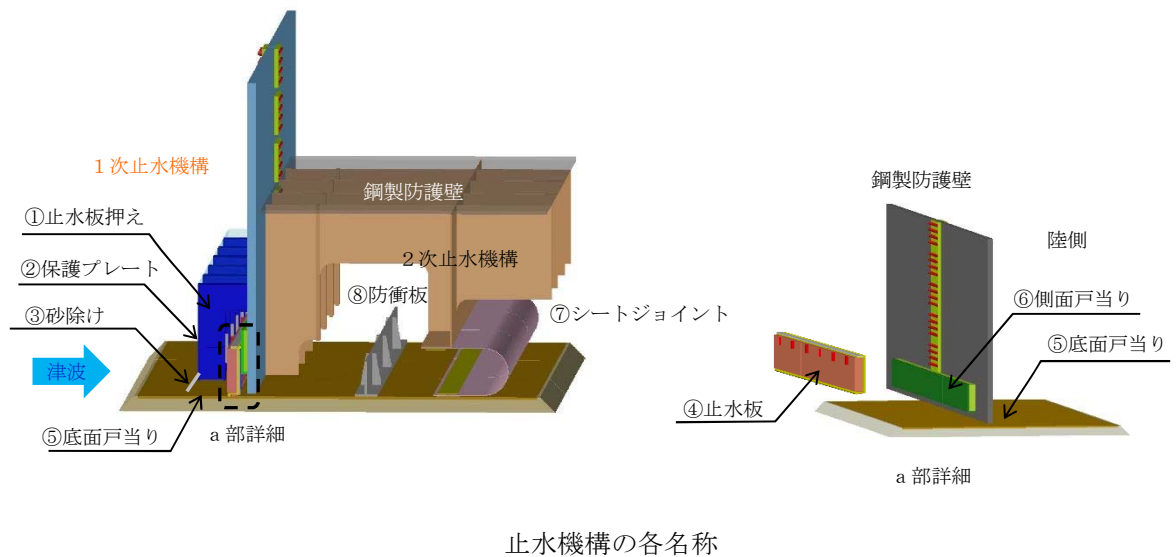
(8) 実証試験の計測項目と判定基準

実証試験では以下の項目について計測を行い「止水板の地震時の追従性」、「水密ゴムの健全性」及び「1次止水機構の構成部品の健全性」について確認し、止水機構全体に影響がないか確認する。表8に実証試験の計測項目と判定基準を示す。

表8 実証試験の計測項目と判定基準

機能目標	計測項目※	判定基準
止水板の地震時の追従性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆追従性評価（ビデオ撮影） ◆変位計測（レーザー変位計） ◆加速度計測（加速度計） ◆外観目視検査 	<ul style="list-style-type: none"> ◆止水板の動作に異常がなく、止水板としての機能が保持されていること。（浮き上がり、止水板の破損・損傷）
水密ゴムの健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆追従性評価（ビデオ撮影） ◆変位計測（レーザー変位計） ◆寸法計測 ◆外観目視点検 	<ul style="list-style-type: none"> ◆水密ゴムの動作に異常がなく機能が保持されていること。（噛み込み、摺動による亀裂、破損、摩耗） ◆水密ゴムのライニングに異常がなく機能が保持されていること。（ライニングの破損、めくれ）
1次止水機構の構成部品の健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆止水板，側面戸当り，底面戸当り，止水板押え，架構等の外観目視点検 ◆三次元計測による試験装置全体の計測 	<ul style="list-style-type: none"> ◆装置全体に異常がなく健全であること。（試験装置，部材の変形，損傷，他）

※各部位毎の計測項目については、表7の1次止水機構の各部位毎の評価項目に示す。



(9) 実証試験手順

実証試験は1回の実証試験で約3日間必要とする。そのため、実証試験の「本震」,「余震+津波」を実施し水密ゴムの計測等は4日目に実施する手順になる。表9に実証試験の実施手順を示す。

水密ゴムは、実際に想定しうる「本震」の後に「余震+津波」となるため、「余震+津波」の実証試験が終了するまでは同じものを通して使用する。

以下は1回目の試験手順を示す、2回目の試験手順も同様の手順で実施する。

表9 実証試験の実施手順 (1回目)

時間帯	本震 (1日目)	本震 (2日目)	余震+津波1回 (3日目)
午前 (約3.5時間)	<試験前準備> ・各部外観検査, 寸法計測 (試験前健全性確認) ・振動台の油圧上昇 (XYZ軸方向) ・振動台の油圧降下 ・止水板設置 ・計測器取付け ・水密ゴムの計測 ・水密ゴムの外観据付け検査	<試験前準備> ・同左	<試験前準備> ・同左
午後 (約4.5時間)	<試験前準備> ・振動台油圧上昇 ・ホワイトノイズ加振 [*]	<試験枚準備> ・同左	<試験前準備> ・水密ゴムの外観据付け検査 ・水密ゴムの計測 ・水圧負荷装置設置
	<実証試験> ・実証試験(本震) ・加振終了後油圧降下	<実証試験> ・同左	<実証試験> ・油圧上昇 ・水平負荷装置荷重調整 ・実証試験(余震) ・水平負荷解除 ・加振終了後油圧降下
	<試験後> ・止水板取り外し ・水密ゴムの外観・据付け検査	<試験後> ・同左	<試験後> ・止水板取り外し ・水密ゴムの外観・据付け検査 ・水圧負荷装置取外し

(4日目)

- ・水密ゴム取外し, 摩耗等計測
- ・各部外観検査, 寸法計測(試験後健全性確認)
- ・品質記録の例を図10に示す。

※ホワイトノイズ加振とは

止水板を設置しない状態で試験装置の固有振動数を算出し, 試験装置の固有振動数に有意な変化がないことを試験前に確認することで, 試験装置が正常な状態であることを確認する。

発注者	日本原子力発電株式会社 殿		発注者	受注者	再委託先				
	業務名	東海第二発電所			承認	審査	担当		
実施日	一次止水機構 振動試験								
再委託先									
実施場所									
試験NO.	UPC有無	計測場所		試験NO.	UPC有無	計測場所		備考	
		止水板	位置			止水板	位置		
1		底面止水板		3	有り	底面止水板			
		加振前	加振後			加振前	加振後		
		右側	右側						
		中央	中央						
		左側	左側						
		右側	右側						
		中央	中央						
		左側	左側						
		右側	右側						
		中央	中央						
		左側	左側						
2		底面止水板		4	無し	底面止水板			
		加振前	加振後			加振前	加振後		
		右側	右側						
		中央	中央						
		左側	左側						
		右側	右側						
		中央	中央						
		左側	左側						
		右側	右側						
		中央	中央						
		左側	左側						
備考	摩擦量計測：0-100mmノギス		左側	中央	右側	左側	中央	右側	
	計測箇所 (海側から見る)		左						

図 10 品質記録の例 (1/3) (止水板の寸法計測の例)

発注者		日本原子力発電株式会社 殿		再委託先		担当			
業務名		東海第二発電所		再委託先		審査			
実施日		一次止水機構 振動試験		承認					
受注者				発注者		受注者			
再委託先									
実施場所									
止水板厚さ		ガイド間隔		止水板の軸直角方向隙間 (mm)		備考			
右	位置	設計値 (mm)	計測値 (mm)	設計値 (mm)	計測値 (mm)	C = B - A			
	右側								
左	位置	設計値 (mm)	計測値 (mm)	設計値 (mm)	計測値 (mm)				
	左側								
	右側								
	左側								
		位置	設計値 (mm)	計測値 (mm)	設計値 (mm)			計測値 (mm)	
		1							
		2							
		3							
		4							
		上下							
		上下							
		上下							
		上下							
		上下							
		上下							

平面配置

止水板押え及び側面戸当り

計測：ノギス、スケール
備考

図 10 品質記録の例 (2/3) (止水板押えと側面戸当りの寸法計測の例)

発注者	日本原子力発電株式会社 殿									
業務名	東海第二発電所									
実験名	一次止水機構 振動試験									
実施日										
受注者										
再委託先										
実施場所										
止水板ガイド板間隔	止水板押えガイド板間隔		止水板押えガイド板間隔		止水板押えガイド板間隔		止水板押えガイド板間隔		止水板押えガイド板間隔	
位置	設計値 (mm)	計測値 (mm)	設計値 (mm)	計測値 (mm)	設計値 (mm)	計測値 (mm)	設計値 (mm)	計測値 (mm)	設計値 (mm)	計測値 (mm)
右			上		右		上		ガイド板軸方向隙間 (mm)	
			下				下		B - A / 2	
中央			上		中央		上			
			下				下			
左			上		左		上			
			下				下			

平面配置

備考	計測: スケール
----	----------

図 10 品質記録の例 (3/3) (止水板押えの間隔計測の例)

6.1.3.3 二次元・三次元動的解析の結果について

1. 目的

止水機構の実規模大の試験装置を用いた試験（以下「実証試験」という。）では，基準地震動 S_s 及び余震＋津波時における止水板の挙動を確認することにより，変位追従性，水密ゴムの健全性を確認する。

本件では，実証試験に合わせて実施する二次元・三次元動的解析の結果について説明する。

2. 解析条件

(1) 二次元動的解析

<評価条件>

- ・解析コード：MARC（大規模解析対応非線形解析）
- ・地震動：基準地震動 S_s
- ・解析ケース：3ケース 地震時，津波時，津波時+余震
解析モデルは図1に示す。
- ・水密ゴム摩擦係数：
常時：0.2（ダム・堰施設技術基準（案）（国土交通省）
劣化時の挙動把握（しきい値確認）：0.2～1.2
- ・金属間摩擦係数
止水板（接触面アルミニウム）と戸当り（ステンレス）：0.4
- ・評価対象部位：
底面水密ゴム，側面水密ゴム，止水板接続ゴム，止水板（止水板コマ含む），
止水板押え，底面・側面戸当り，止水板側ガイド板，支圧板
- ・許容応力：引張り強度，変形量（伸び）（水密ゴム）
弾性設計範囲内（止水板，その他の部材）
- ・評価項目：
応力評価，追従性評価（止水板浮上り），水圧模擬，摩擦係数しきい値確認

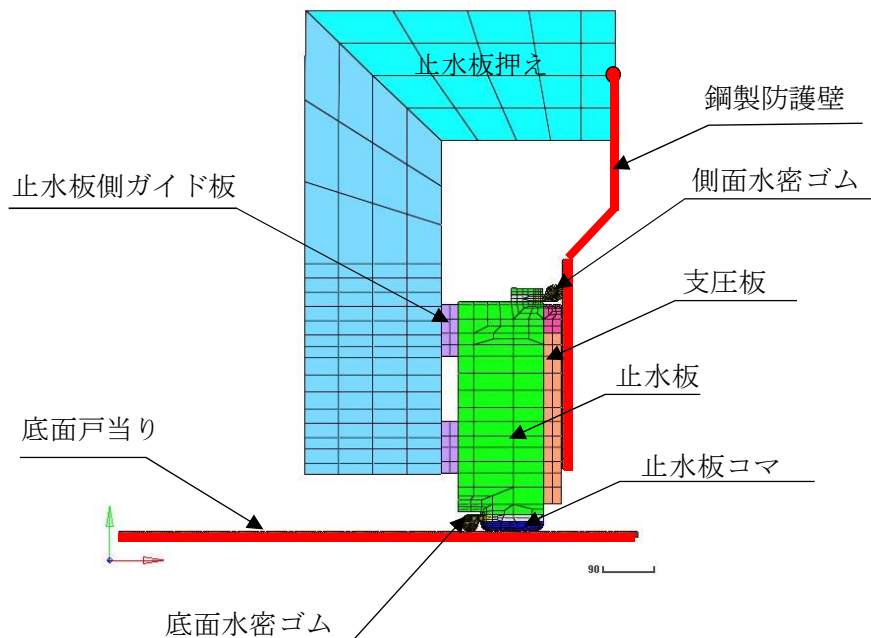


図1 二次元動的解析モデル

3. 三次元動的解析

(1) 実証試験モデルの解析条件

- a. 解析コード MSC_MARC2014. 2. 0 (エムエスシーソフトウェア株式会社)
- b. 解析内容 大変形超弾性解析 (止水ゴムを超弾性体として扱う)
- c. モデルの説明

基本的に6面体ソリッド要素，架台の部分はシェル要素として作成した。

d. 解析に用いる物性値および摩擦係数

各部の物性値と摩擦係数は表 1 に示す通り。モデル化に当たっては，⑤底面戸当り，鋼製防護壁 (⑥側面戸当り) は，剛体としてモデル化した。

表1 物性値および摩擦係数

部位 (材質)	物性値	許容値	摩擦係数
①止水板押え (SM490)	縦弾性係数 205000MPa ポアソン比 0.3	耐力 315MPa	-
④止水板 (SUS304)	縦弾性係数 197000MPa ポアソン比 0.3	耐力 205MPa	-
底面・側面水密ゴム (合成ゴム+ライニング貼付け)	単軸引張試験結果	引張強さ 14.7 MPa	0.2
止水板コマ (アルミニウム銅合金)	縦弾性係数 110000MPa ポアソン比 0.3	耐力 245MPa	0.4 (金属間の摩擦係数)
支圧板 (超高分子ポリエチレン)	縦弾性係数 785MPa ポアソン比 0.3	引張強さ 44MPa	0.2
止水板側ガイド板 (アルミニウム銅合金)	縦弾性係数 110000MPa ポアソン比 0.3	耐力 245MPa	0.4

e. 解析モデルに考慮している隙間

止水機構の実機と同じ構造を模擬するため，以下の箇所については，解析モデル上も隙間を考慮し解析を実施する。図 3 に解析モデル上の隙間を示す。

- ①側面水密ゴムと側面戸当りの隙間 3mm
- ②底面水密ゴムと底面戸当りの隙間 3mm
- ③止水板ガイドと止水板押えの隙間 5mm

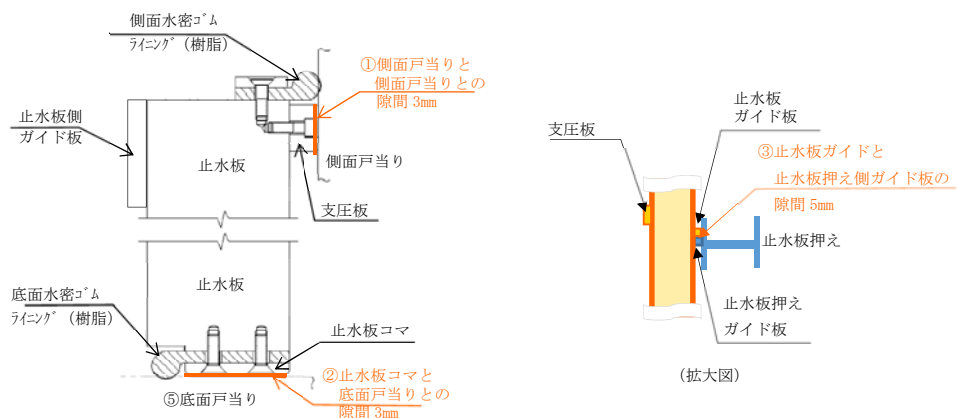


図 3 解析モデル上の隙間

f. 解析モデルの作成

実証試験モデルの解析モデルを図4に示す。

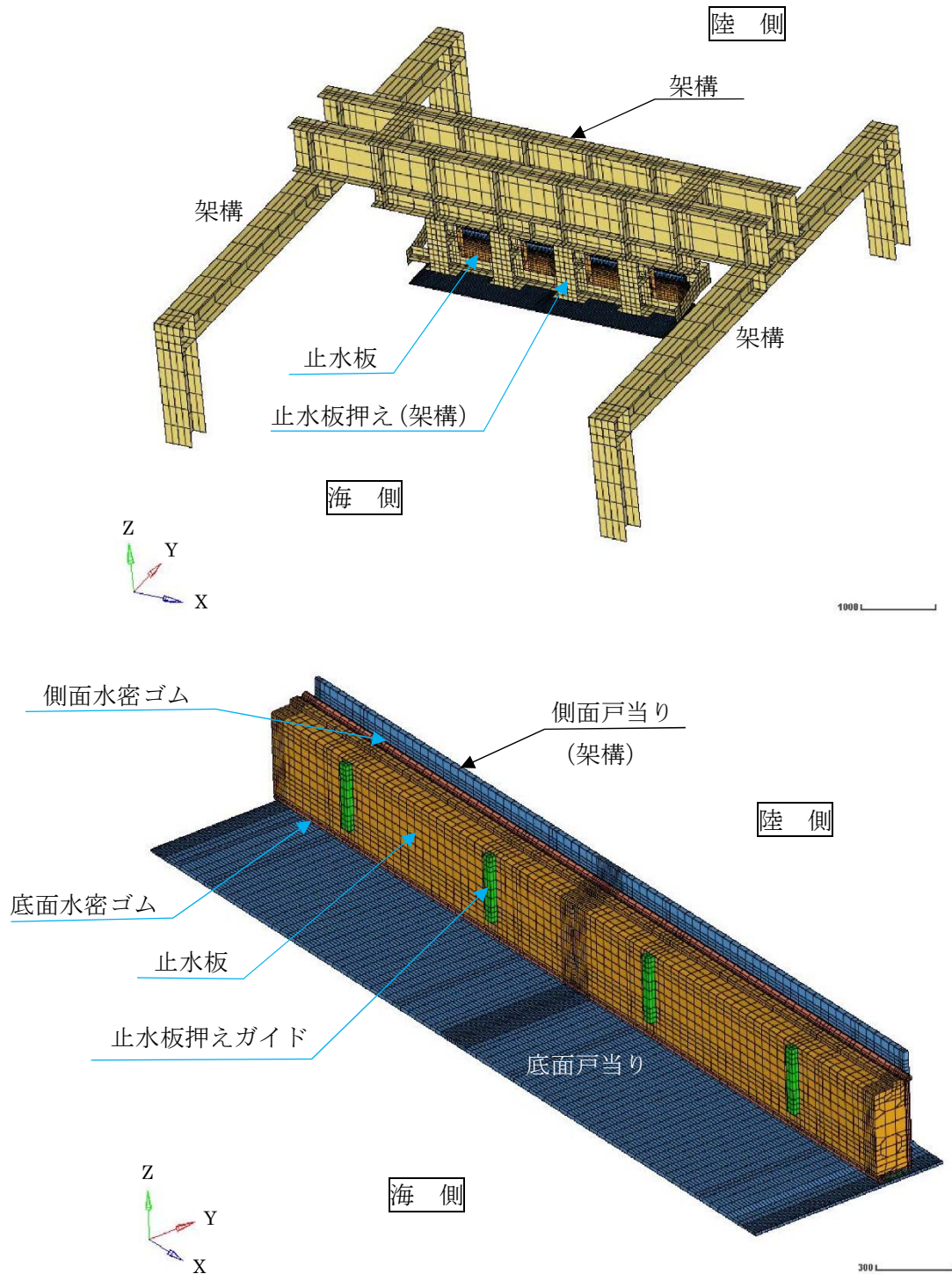


図4 三次元解析モデル（実証試験用）（1/2）

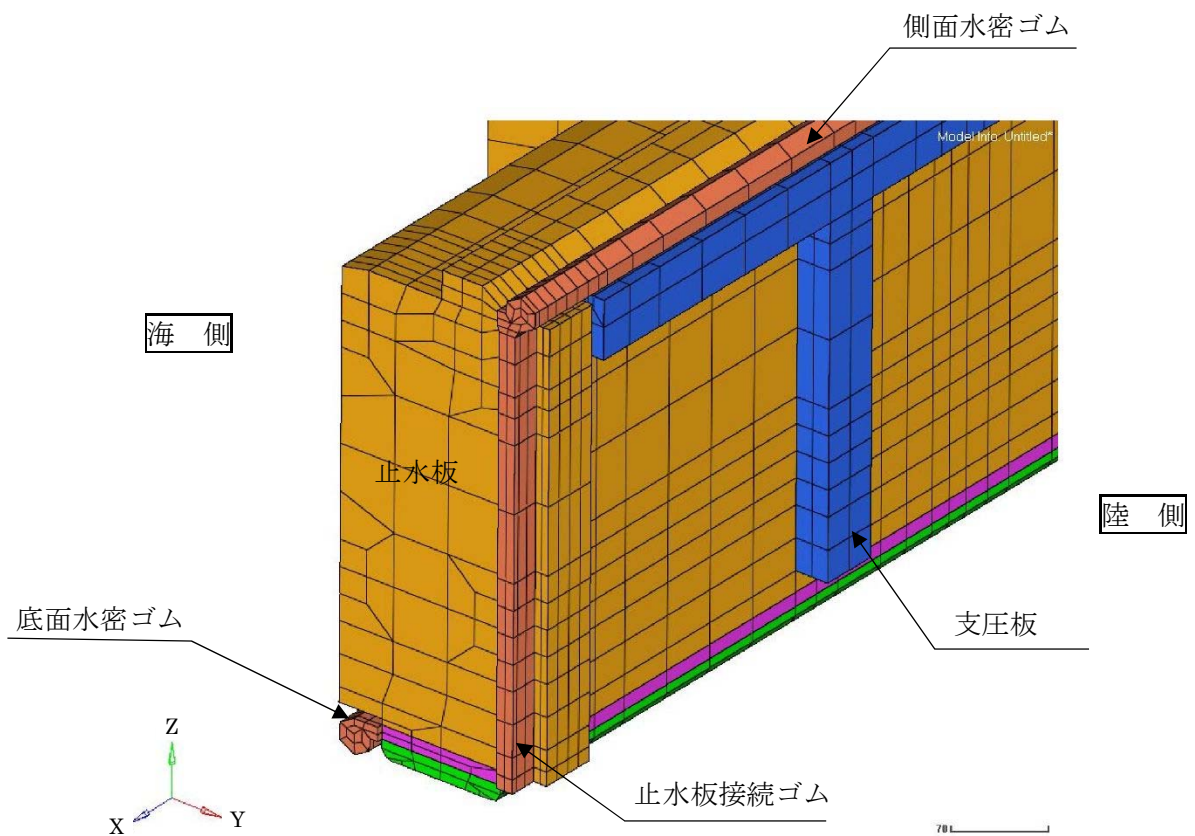
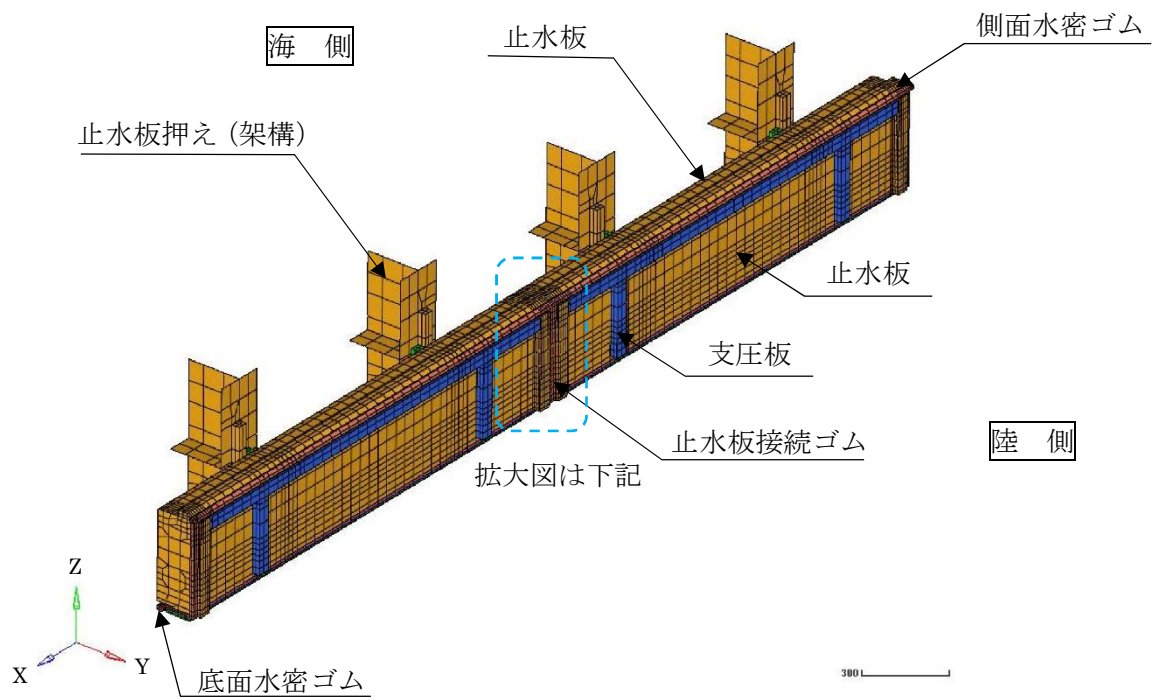


図4 三次元解析モデル(実証試験用)(2/2)

(2) 実機モデルの解析条件

- a. 解析コード MSC_MARC2014. 2. 0 (エムエスシーソフトウェア株式会社)
- b. 解析内容 大変形超弾性解析 (止水ゴムを超弾性体として扱う)
- c. モデルの説明
基本的に6面体ソリッド要素として作成した。
- d. 解析に用いる物性値および摩擦係数
各部の物性値と摩擦係数は表 1 に示す通り。

表1 物性値および摩擦係数

部位 (材質)	物性値	許容値	摩擦係数
①止水板押え (SM490)	縦弾性係数 205000MPa ポアソン比 0.3	耐力 315MPa	-
④止水板 (SUS304)	縦弾性係数 197000MPa ポアソン比 0.3	耐力 205MPa	-
底面・側面水密ゴム (合成ゴム+ライニング貼付け)	単軸引張試験結果	引張強さ 14.7 MPa	0.2
止水板コマ (アルミニウム銅合金)	縦弾性係数 110000MPa ポアソン比 0.3	耐力 245MPa	0.4 (金属間の摩擦係数)
支圧板 (超高分子ポリエチレン)	縦弾性係数 785MPa ポアソン比 0.3	引張強さ 44MPa	0.2
止水板側ガイド板 (アルミニウム銅合金)	縦弾性係数 110000MPa ポアソン比 0.3	耐力 245MPa	0.4

e. 解析モデルに考慮している隙間

止水機構の実機と同じ以下の箇所については、解析モデル上も隙間を考慮し解析を実施する。図 5 に解析モデル上の隙間を示す。

- ①側面水密ゴムと側面戸当りの隙間 3mm
- ②底面水密ゴムと底面戸当りの隙間 3mm
- ③止水板ガイドと止水板押えの隙間 5mm

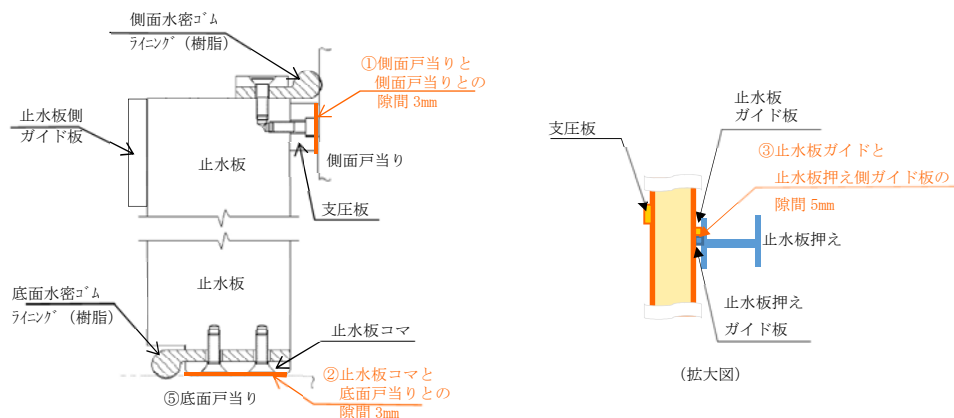


図 5 解析モデル上の隙間

f. 解析モデルの作成

実機モデルの解析モデルを図6に示す。

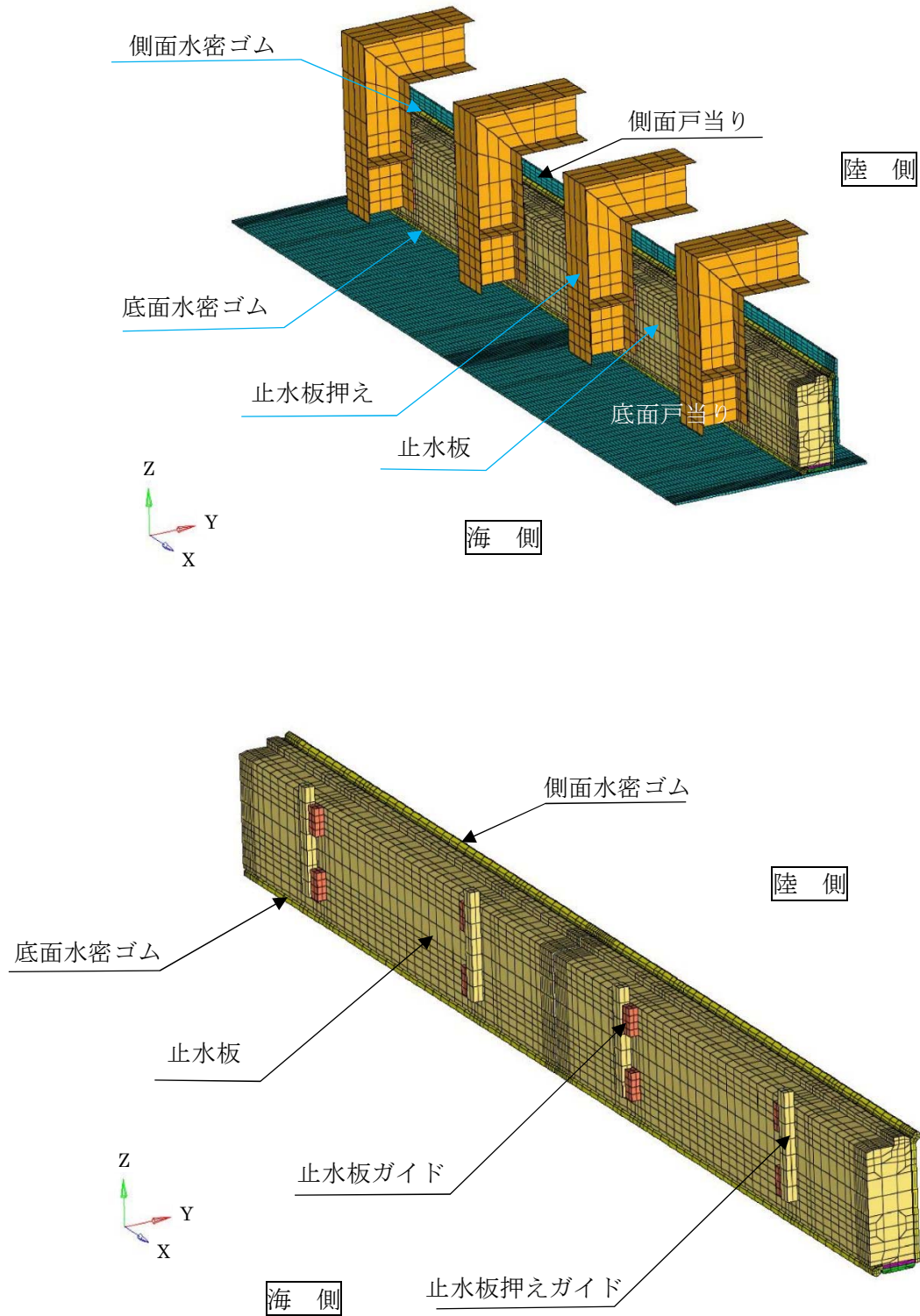


図6 三次元解析モデル（実機用）（1/2）

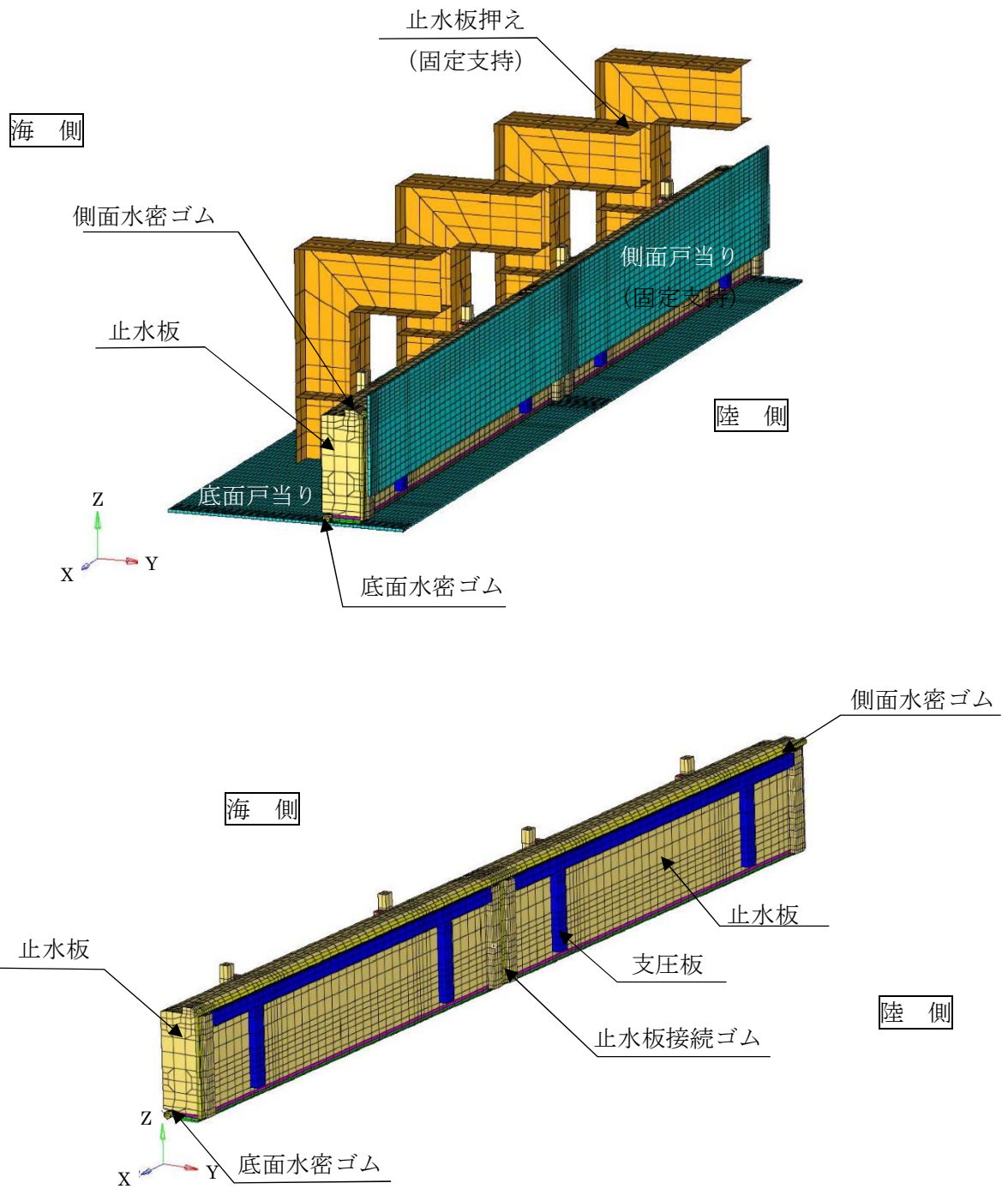


図6 三次元解析モデル（実機用）（2/2）

(3) 実証試験と三次元動的解析ケースの目的について

三次元動的解析と実証試験検証における検証ケースとして、3方向加振試験の場合は②の三次元動的解析と実証試験を検証ケースとし、鉛直方向については、④の三次元動的解析と実証試験を検証ケースとして実施する。その他のケースについては、主にデータ拡充の観点から止水板の挙動について確認する。表2に実証試験及び三次元動的解析ケースの目的を示す。

表2 実証試験及び三次元動的解析ケースの目的

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		各実証試験及び三次元動的解析ケースの目的
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3方向 (X方向(堤軸) 包絡波)	1 G	3 G (X包絡波)	1 G	○	○	【データ拡充】3方向データ ◆実証試験において、鋼製防護壁側の堤軸側の水平方向の包絡波を入力し止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。 ◆3次元動的解析における止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。
② 3方向 (Y方向(堤軸直 角)包絡波)	1 G	3 G (Y包絡波)	1 G	○	○	【検証ケース】3方向データ(実機と同じ方向確認) ◆実証試験において鋼製防護壁側の堤軸直角側の水平方向の包絡波を入力し止水板の挙動を確認する。 ◆3次元動的解析については、実証試験と実証試験ケースの検証を行うと共に実機ケースモデルとの解析検証を行いモデルの妥当性についても確認する。
③ 鉛直 (鋼製防護壁包 絡波)	-	-	1 G	○	-	【データ拡充】鉛直方向データ ◆実証試験において鋼製防護壁側の鉛直方向の加速度(1G)を取水路側の鉛直方向に入力し、止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。 ◆3次元動的解析における止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。
④ 鉛直 (取水路側包絡 波)	-	-	波形 入力	○	○	【検証ケース】鉛直方向データ(実機と同じ方向確認) ◆実証試験において止水板の挙動は、鉛直方向からの慣性力が支配的と考えられることから本件をベースケースとした実証試験を実施し、鉛直からの変位量を計測する。実機と同じ方向で確認 ◆3次元動的解析については、実証試験と実証試験ケースの検証を行うと共に実機ケースモデルとの解析検証を行いモデルの妥当性についても確認する。

(4) 三次元動的解析結果

表 3 に本震時，表 4 に余震時の三次元動的解析ケースと解析結果を示す。

表 3 本震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備 考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3 方向 (X 方向 (堤軸) 包絡波)	1 G	3 G (X 包絡波)	1 G	○	○	3 方向同時 (Y 方向に X 方向の地震動 を入力。方向反転) 図 7, 8 に記載
② 3 方向 (Y 方向 (堤軸直角) 包絡波)	1 G	3 G (Y 包絡波)	1 G	○	○	3 方向同時 図 9, 図 10 に記載
③ 鉛直 (鋼製防護壁包絡波)	—	—	1 G	○	—	鉛直単独 図 11, 図 12 に記載
④ 鉛直 (取水路側包絡波)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独 図 13, 図 14 に記載
⑤ 基準地震動 (S _s) (S _s -D1)	—			—	○	3 方向同時
⑥ 基準地震動 (S _s)	—			—	○	3 方向同時

○: 解析実施ケース

表 4 余震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備 考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3 方向 (Y 方向 (堤軸直交) 包絡波)	1 G	2 G (Y 包絡波)	1 G	○	○	3 方向同時
② 鉛直 (鋼製防護壁波形入力)	—	—	1 G	—	—	鉛直単独
③ 鉛直 (取水路側波形入力)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独
④ 基準地震動 (S _d) (S _d -D1)	—			—	○	3 方向同時

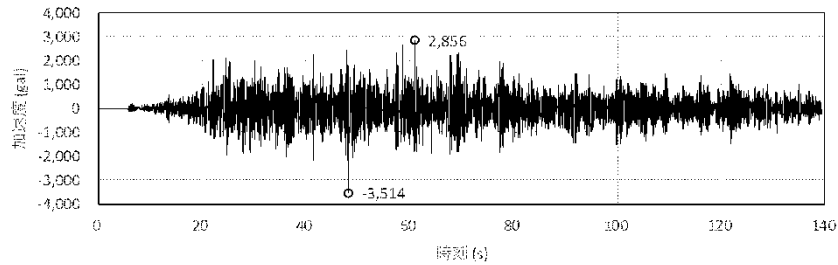
○: 解析実施ケース

【本震時】

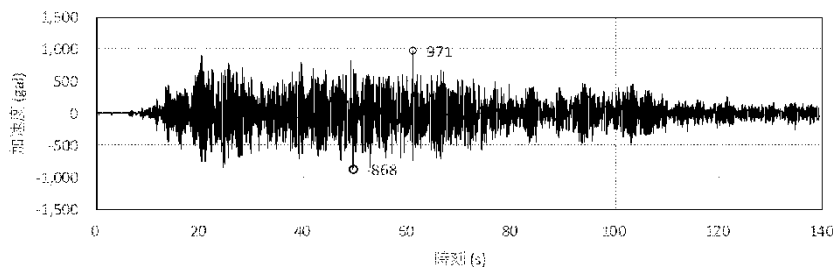
①3 方向（X 方向（堤軸）包絡波）の解析結果

(a) 加速度時刻歴

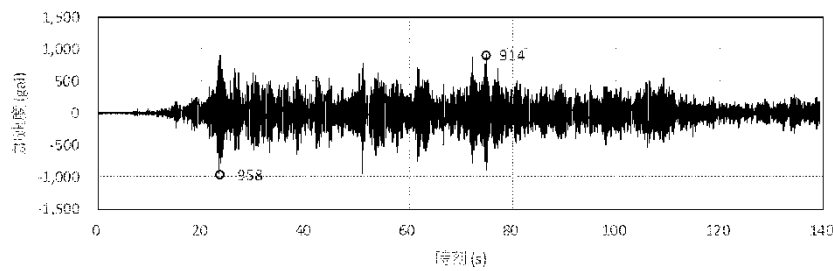
3 軸方向（X, Y, Z）の加速度時刻歴を図 7 に示す。



水平（X 方向）加速度



水平（Y 方向）加速度



鉛直（Z 方向）加速度

図 7 3 方向（X 方向（堤軸）包絡波）の加速度応答時刻歴

(b) 実証試験モデルの解析結果

実証試験モデルの解析結果を図8に示す。

浮き上がり量は最大で0.55mm (図8-1)であることを確認した。

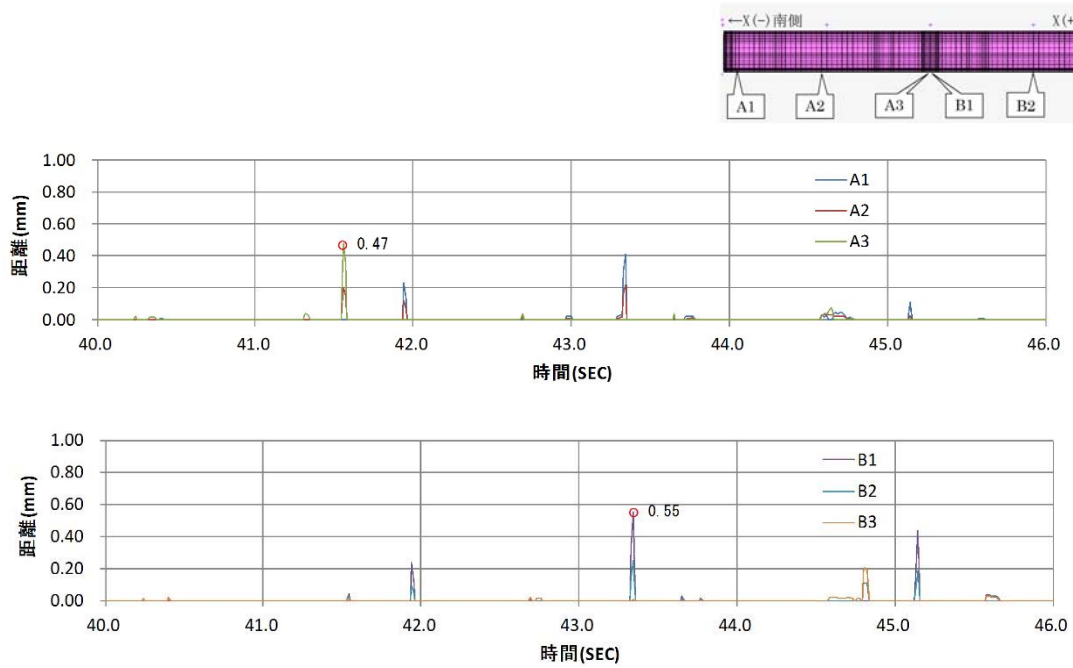


図8-1 止水板コマと底面戸当りとの距離 (浮上り量)

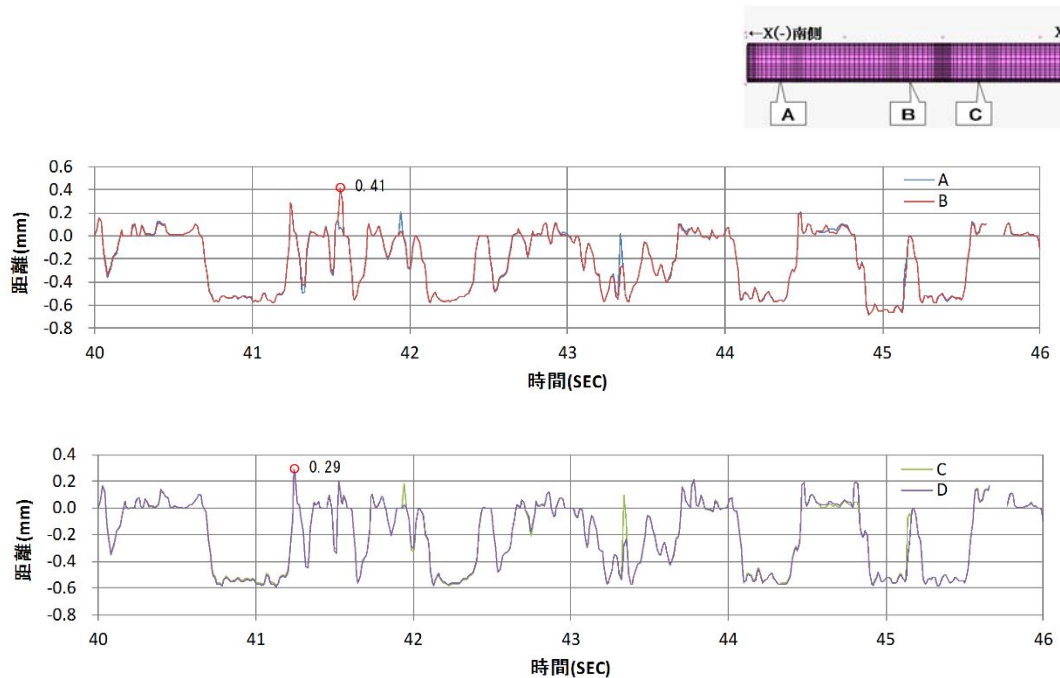


図8-2 止水板と底面戸当りとの距離 (浮上り量) 実証試験計測位置

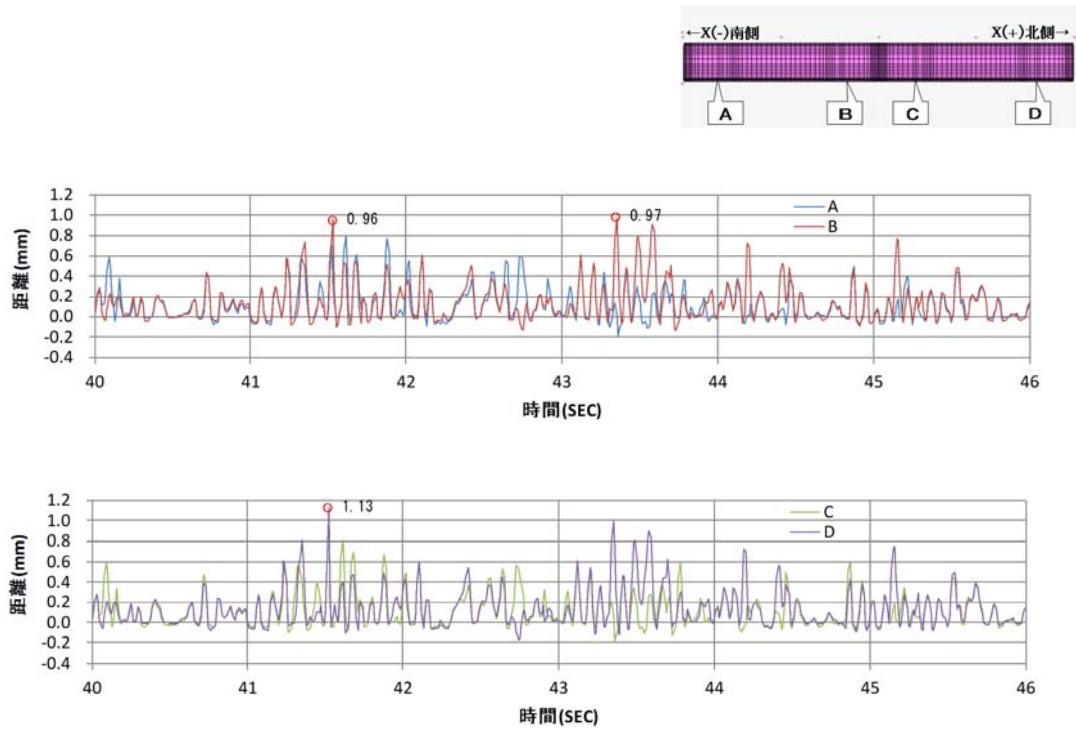


図 8-3 止水板と側面戸当りとの距離

図 8 (1/2) 3 方向 (X 方向 (堤軸) 包絡波) の解析結果

(c) 実機モデルの解析

実機モデルの解析結果を図8に示す。

浮き上がり量は最大で0.65mmであることを確認した。

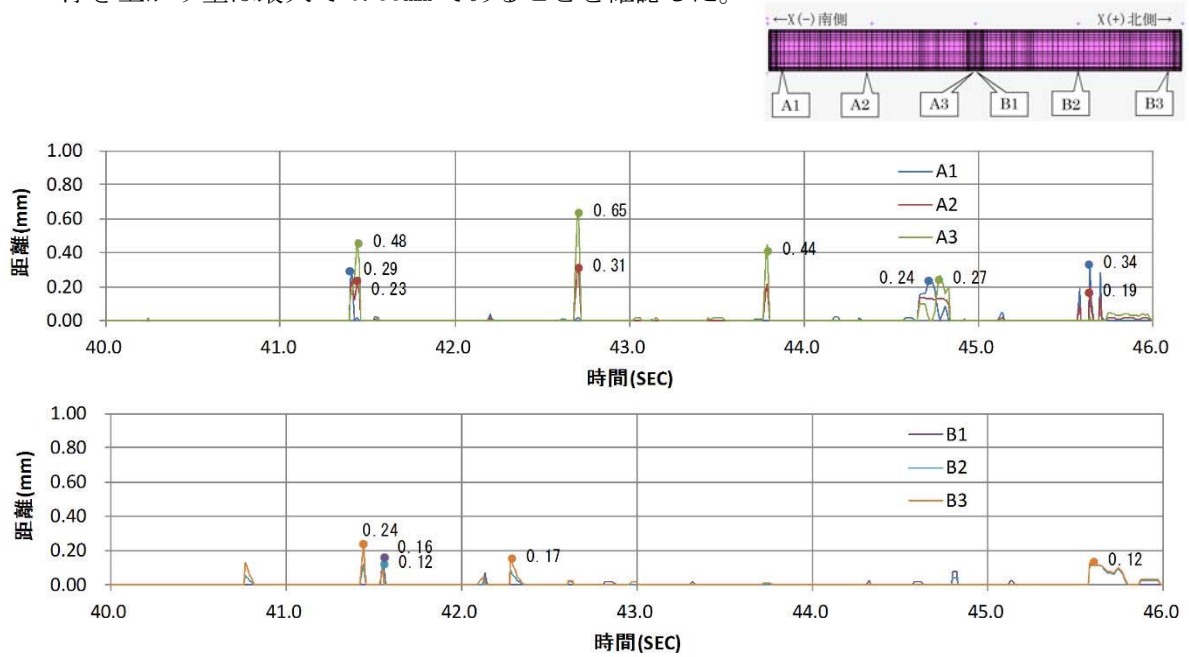


図 8-4 止水板コマと底面戸当りとの距離（浮上り量）

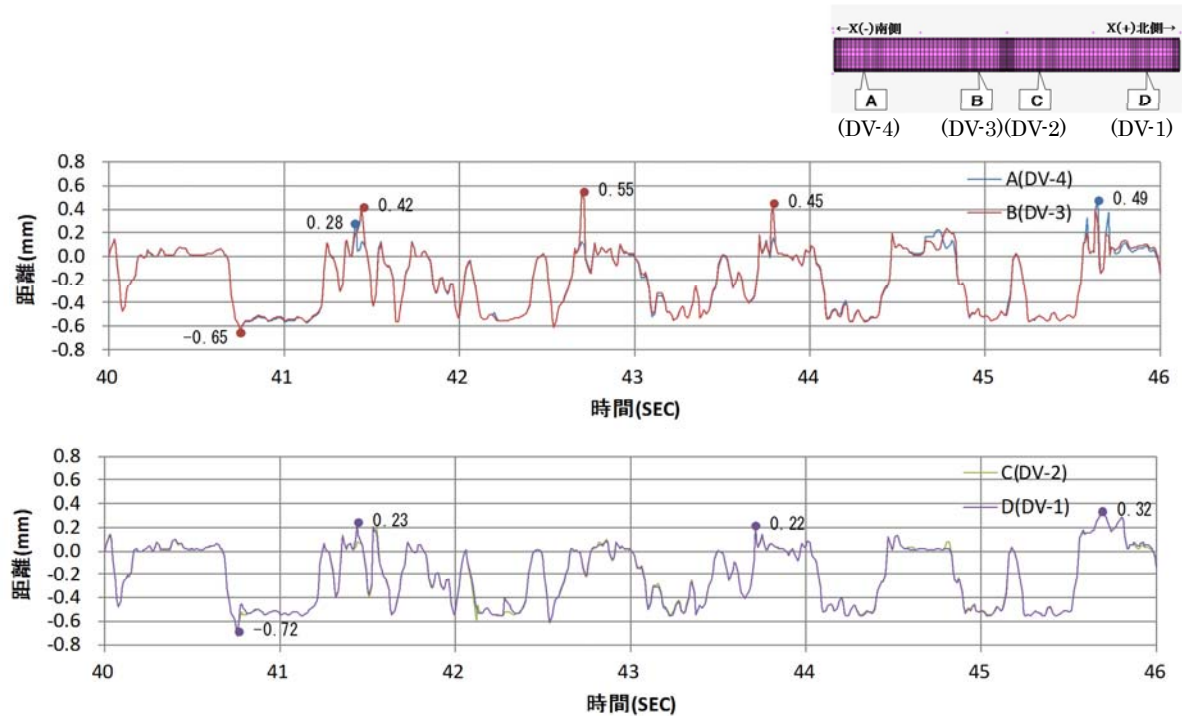


図 8-5 止水板と底面戸当りとの距離（浮上り量）実証試験計測位置

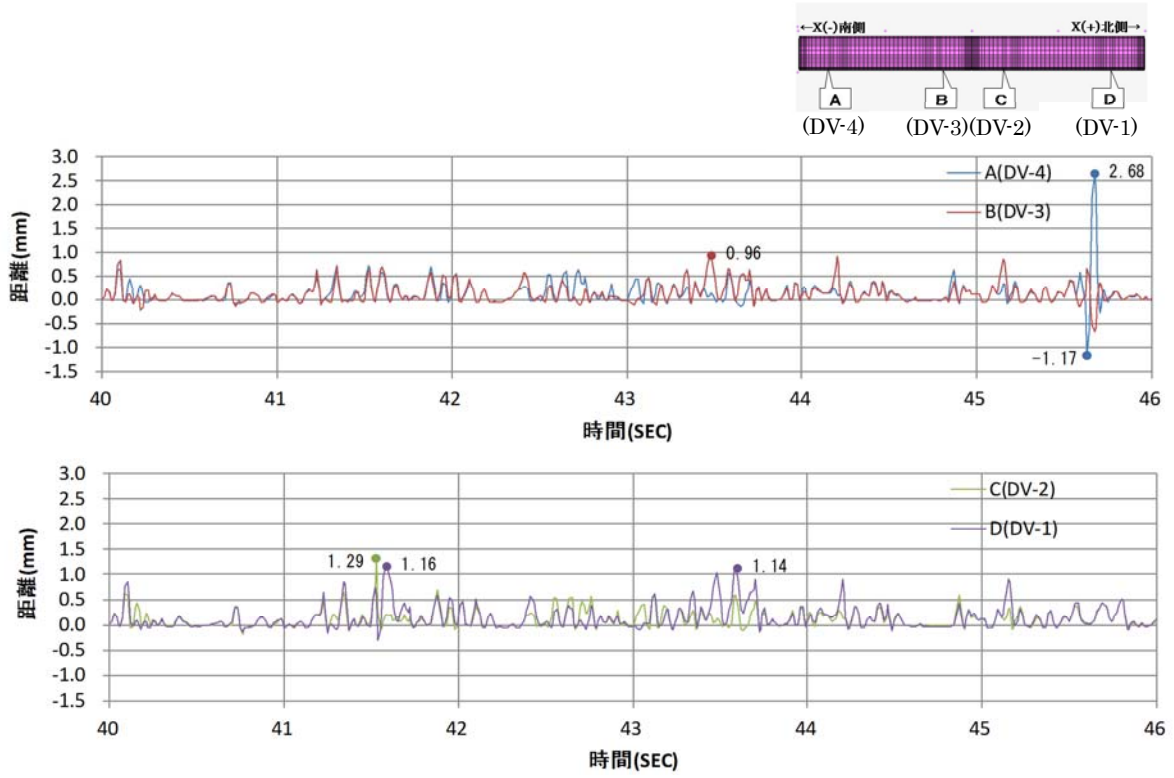


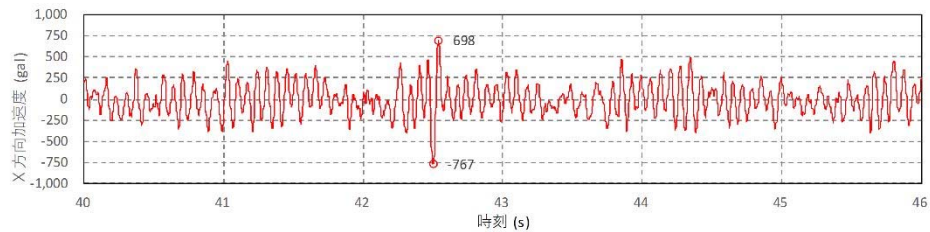
図 8-6 止水板と側面戸当りとの距離（浮上り量）実証試験計測位置

図 8 (2/2) 3 方向（X 方向（堤軸）包絡波）の解析結果

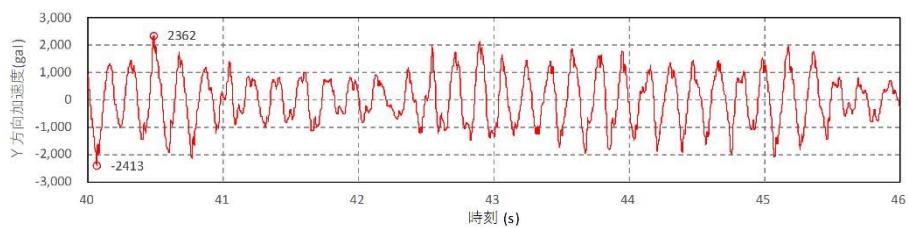
②3 方向（Y 方向（堤軸直角）包絡波）の解析結果

(a) 加速度時刻歴

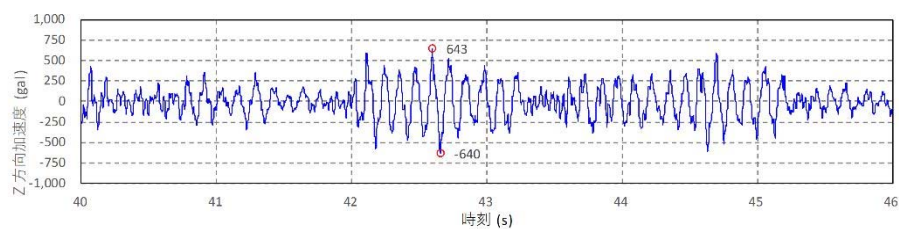
3 軸方向（X, Y, Z）の加速度時刻歴を図 9 に示す。



水平（X 方向）加速度



水平（Y 方向）加速度



鉛直（Z 方向）加速度

図 9 3 方向（Y 方向（堤軸直角）包絡波）の加速度応答時刻歴

(b) 実証試験モデルの解析結果

実証試験モデルの解析結果を図 10 に示す。

浮き上がり量は最大で 0.72mm (図 10-1) であることを確認した。

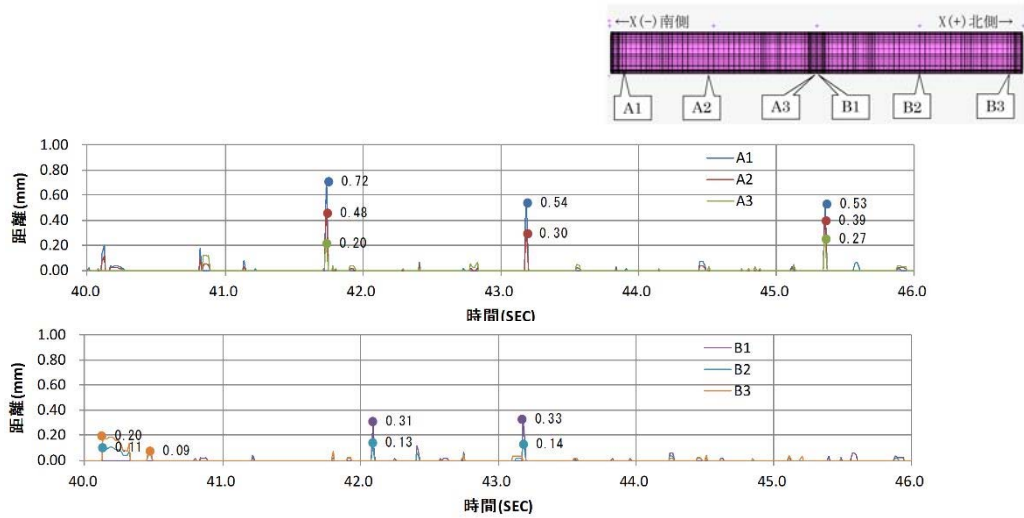


図 10-1 止水板コマと底面戸当りとの距離 (浮上り量)

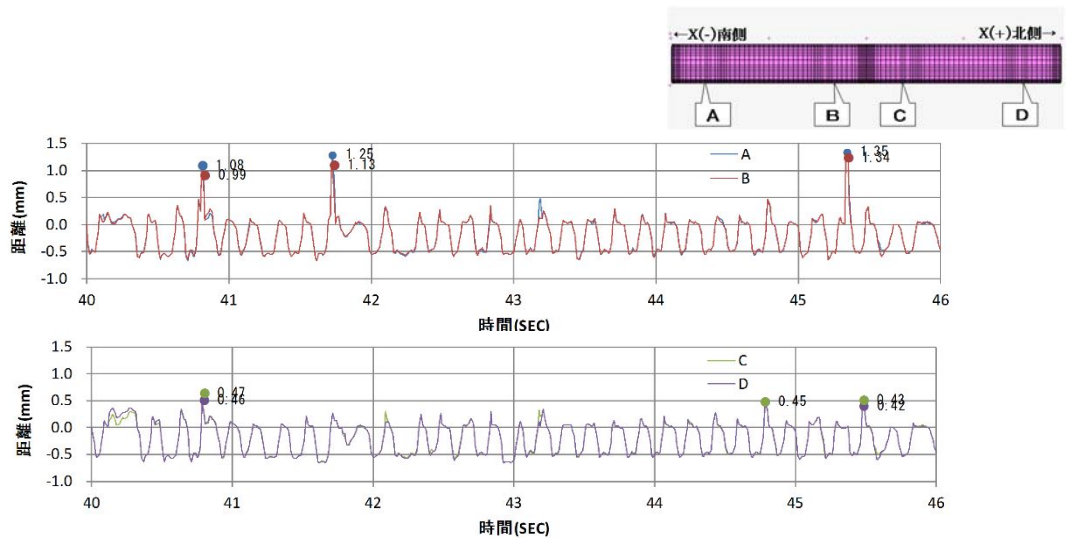


図 10-2 止水板と底面戸当りとの距離 (浮上り量) 実証試験計測位置

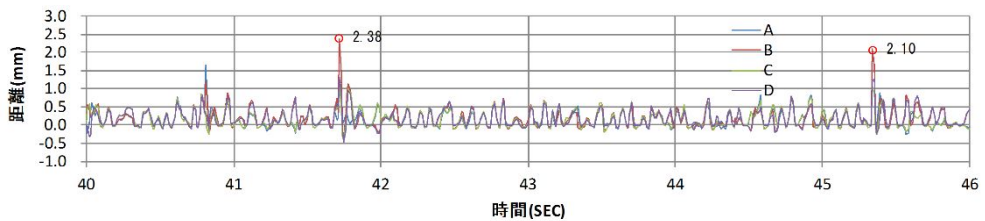


図 10-3 止水板と側面戸当りとの距離

図 10 (1/2) 3 方向 (Y 方向 (堤軸直角) 包絡波) の解析結果

【実証試験モデル】

(c) 実機モデルの解析

実機モデルの解析結果を図 8 に示す。

浮き上がり量は最大で 1.92mm であることを確認した。

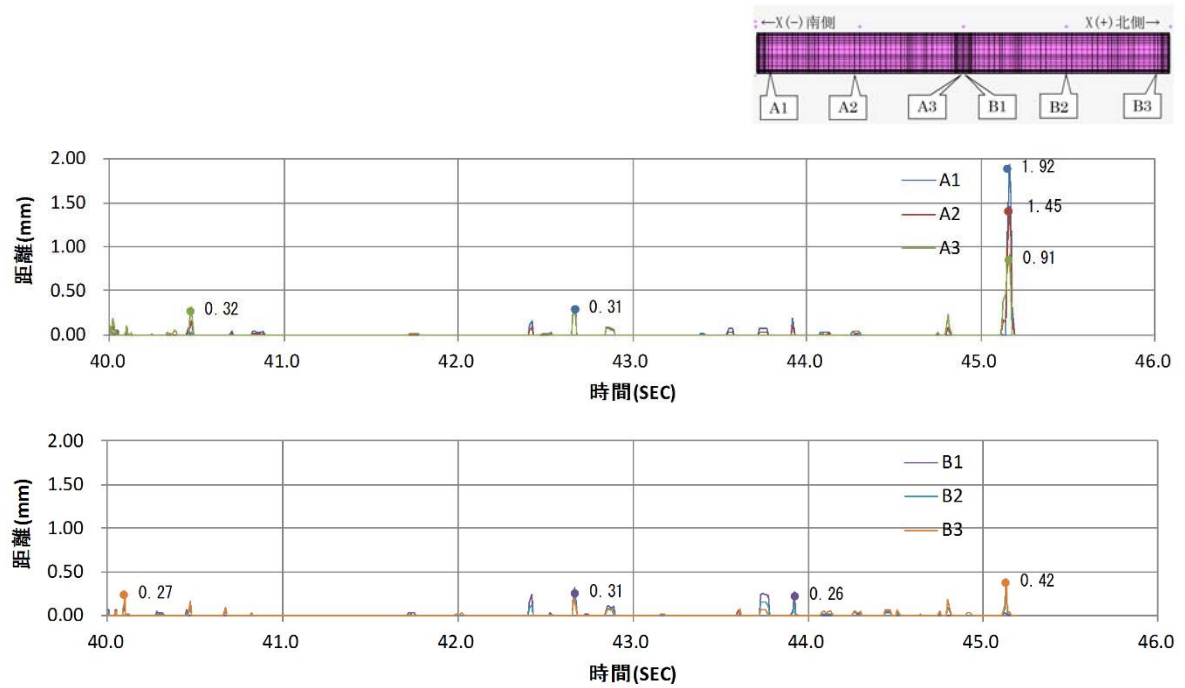


図 10-4 止水板コマと底面戸当りとの距離（浮上り量）

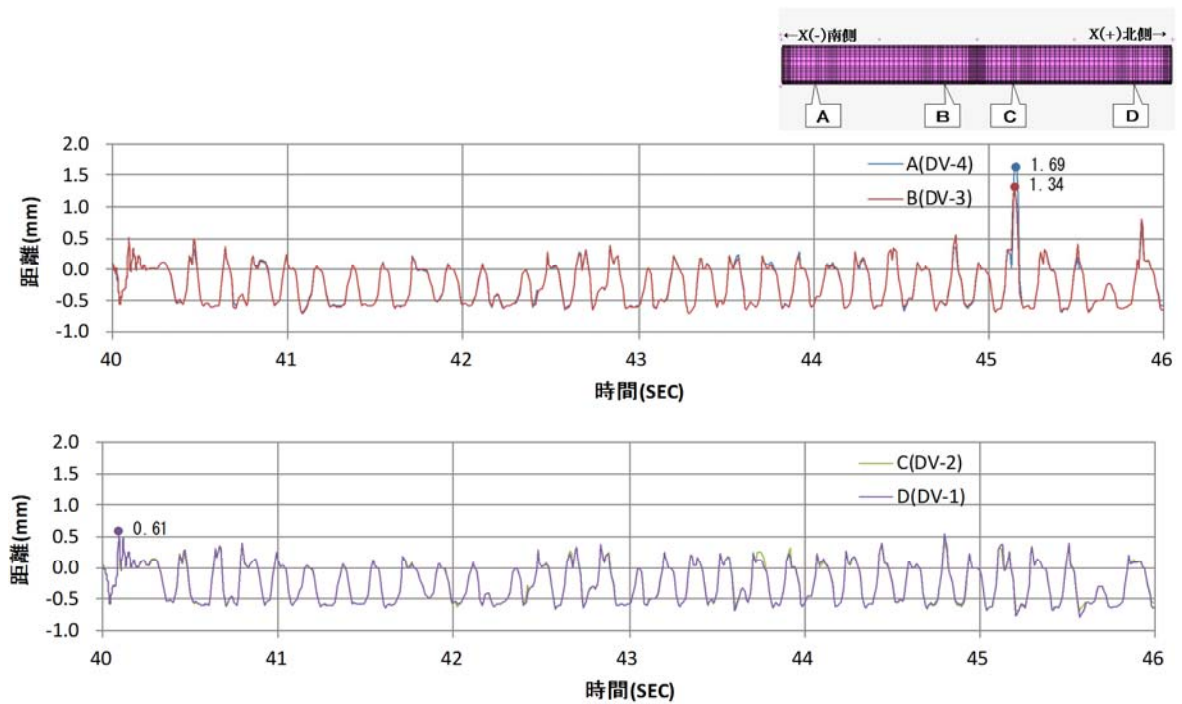


図 10-5 止水板と底面戸当りとの距離（浮上り量）実証試験計測位置

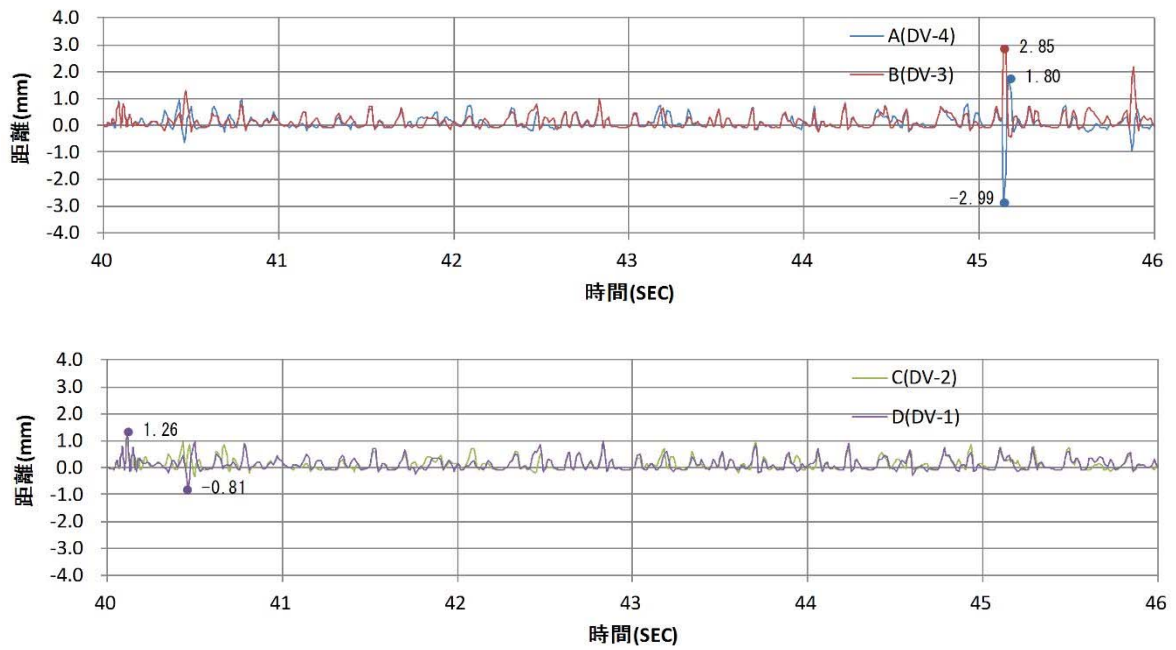


図 10-6 止水板と側面戸当りとの距離（浮上り量）実証試験計測位置

図 10 (2/2) 3 方向（Y 方向（堤軸直角）包絡波）の解析結果

③鉛直（鋼製防護壁包絡波）の解析結果

(a) 加速度時刻歴

鉛直方向（Z方向）の加速度時刻歴を図 11 に示す。

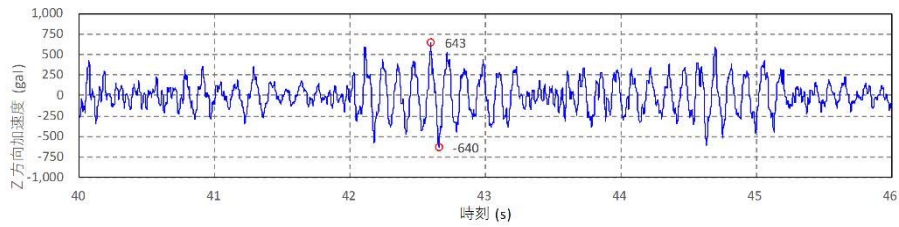


図 11 鉛直（鋼製防護壁包絡波）の加速度応答時刻歴

(b) 実証試験モデルの解析結果

実証試験モデルの解析結果を図 12 に示す。

浮き上がり量は最大で 0.00mm (図 12-1) であることを確認した。

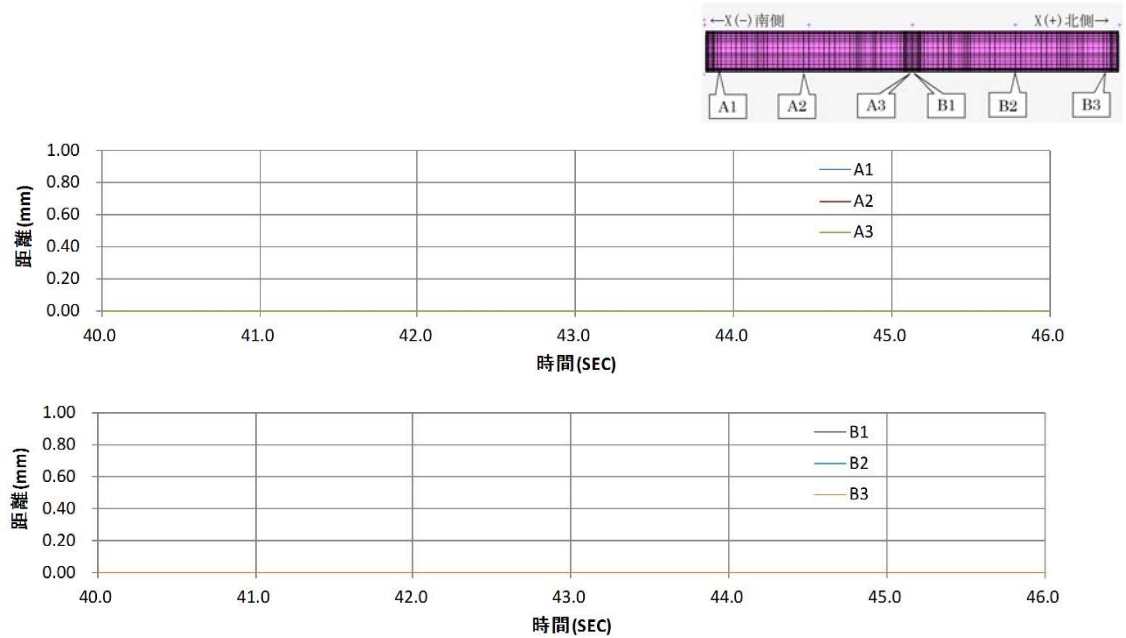


図 12-1 止水板コマと底面戸当りとの距離 (浮上り量)

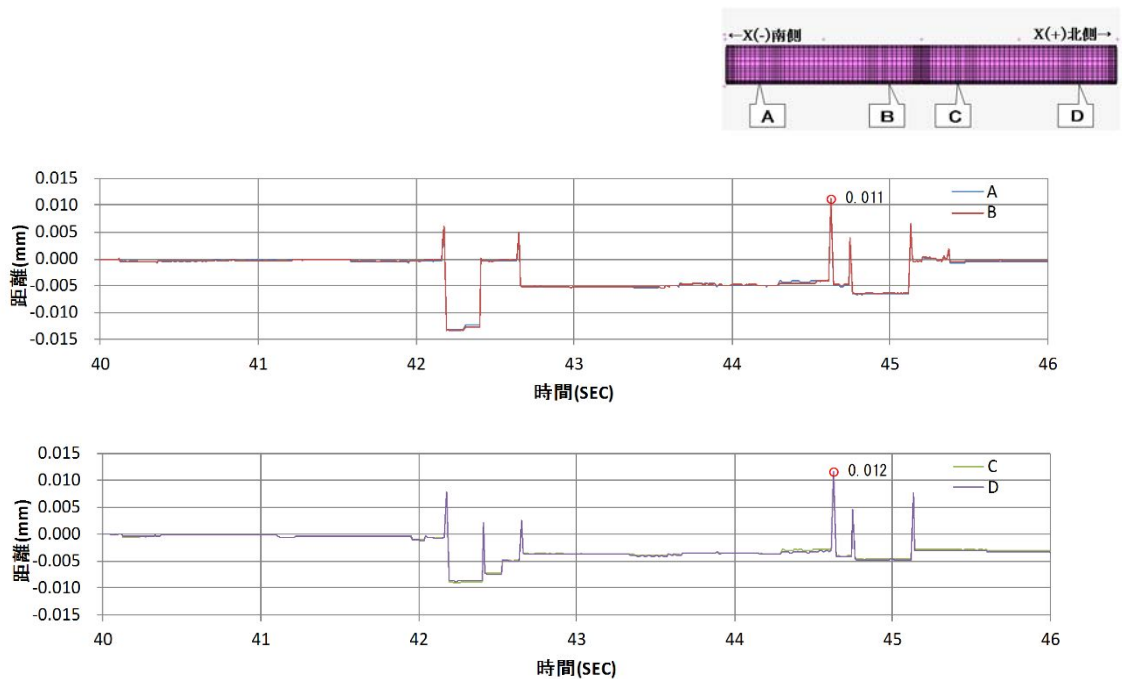


図 12-2 止水板と底面戸当りとの距離 (浮上り量) 実証試験計測位置

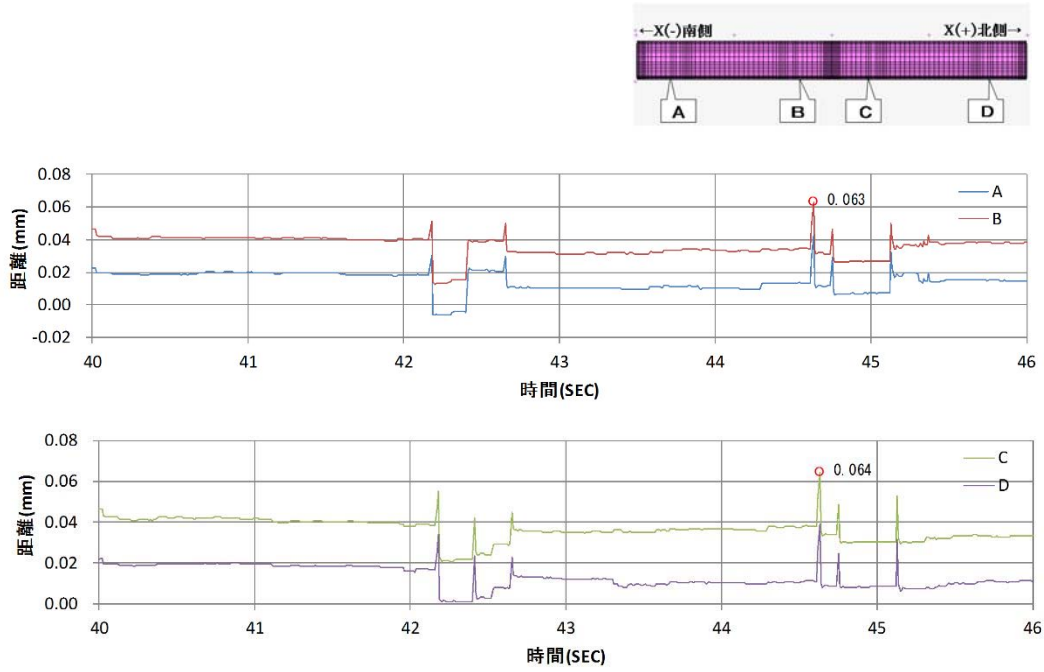


図 12-3 止水板と側面戸当りとの距離

図 12 (1/2) 鉛直 (鋼製防護壁側包絡波) の解析結果
【実証試験モデル】

④鉛直（取水路側包絡波）の解析結果

(a) 加速度時刻歴

鉛直方向（Z方向）の加速度時刻歴を図13に示す。

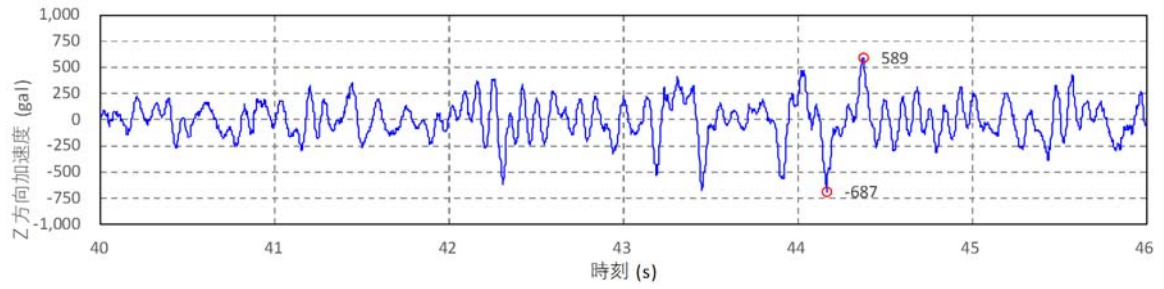


図13 鉛直（取水路波形入力）の加速度応答時刻歴

(b) 実証試験モデルの解析結果

実証試験モデルの解析結果を図 14 に示す。

浮き上がり量は最大で 0.08mm (図 14-1) であることを確認した。

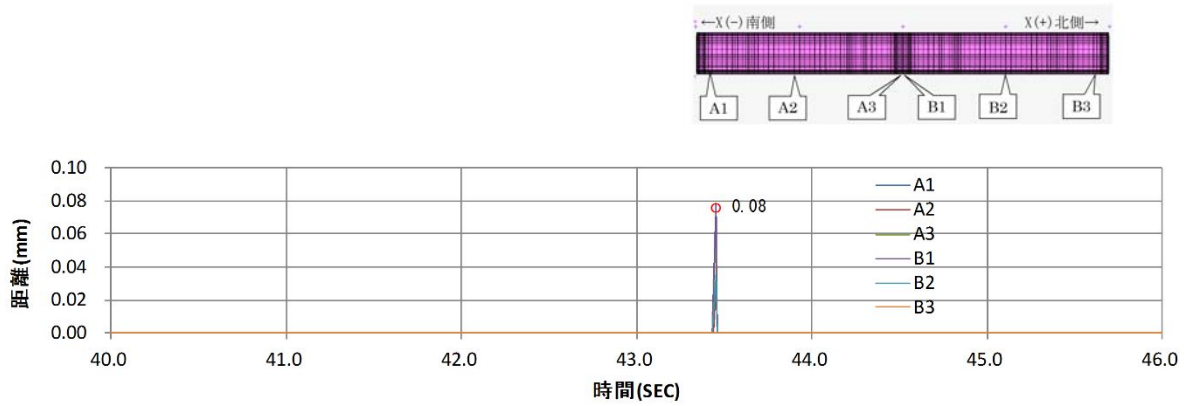


図 14-1 止水板コマと底面戸当りとの距離 (浮上り量)

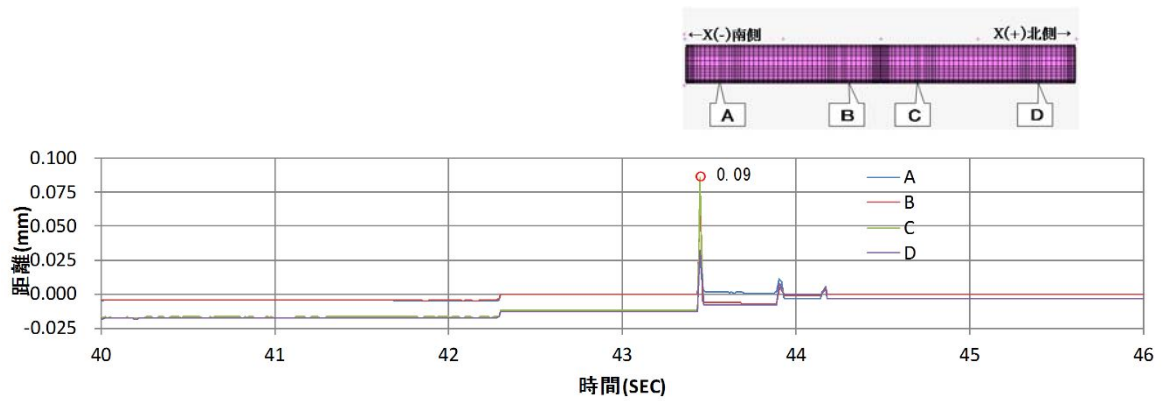


図 14-2 止水板と底面戸当りとの距離 (浮上り量) 実証試験計測位置

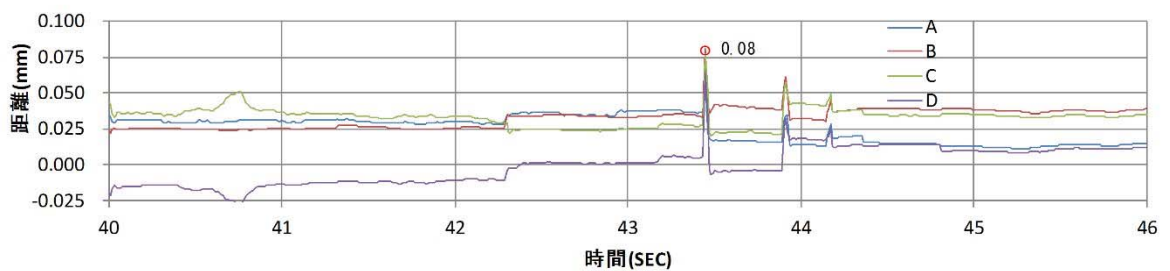


図 14-3 止水板と側面戸当りとの距離

図 14 (1/2) 鉛直 (取水路波形入力) の解析結果
【実証試験モデル】

(c) 実機モデルの解析結果

実機モデルの解析結果を図 14 に示す。

浮き上がり量は最大で 0.05mm (図 14-4) であることを確認した。

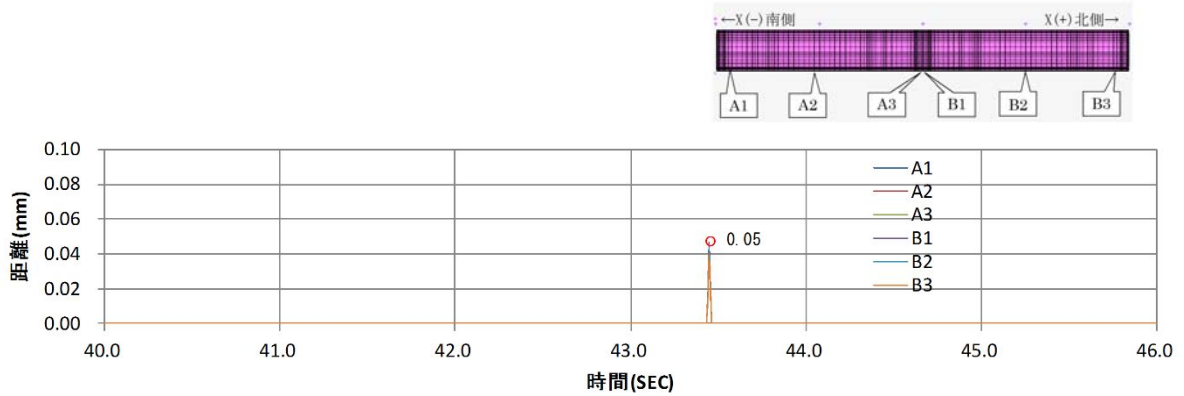


図 14-4 止水板コマと底面戸当りとの距離 (浮上り量)

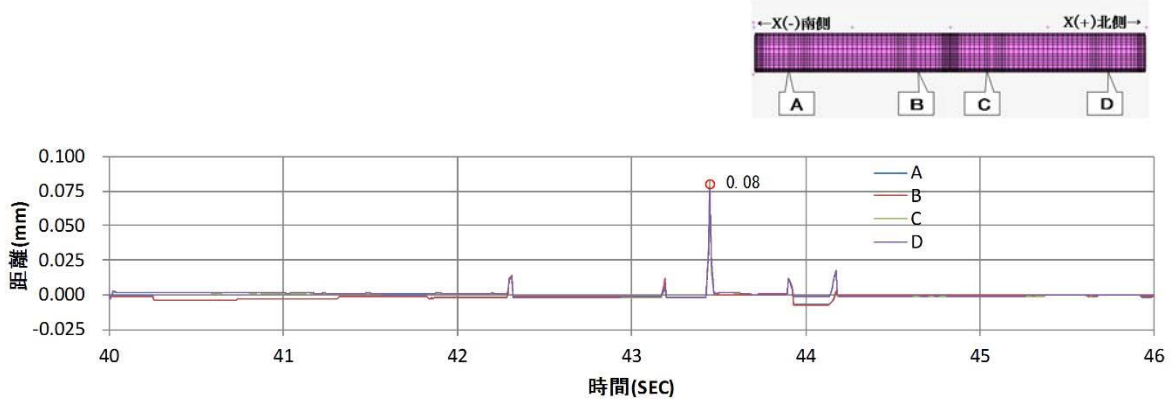


図 14-5 止水板と底面戸当りとの距離 (浮き上がり量) 実証試験計測位置

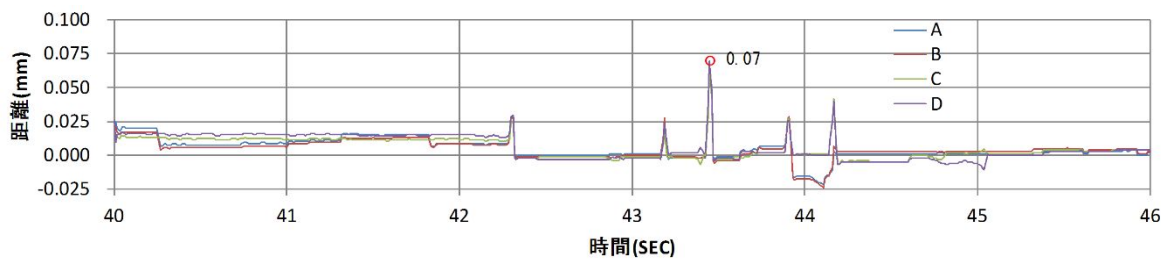


図 14-6 止水板と側面戸当りとの距離

図 14 (2/2) 鉛直 (取水路波形入力) の解析結果
【実機モデル】

【余震時】

③鉛直（取水路側波形入力）の解析結果

(a) 加速度時刻歴

鉛直方向（Z方向）の加速度時刻歴を図15に示す。

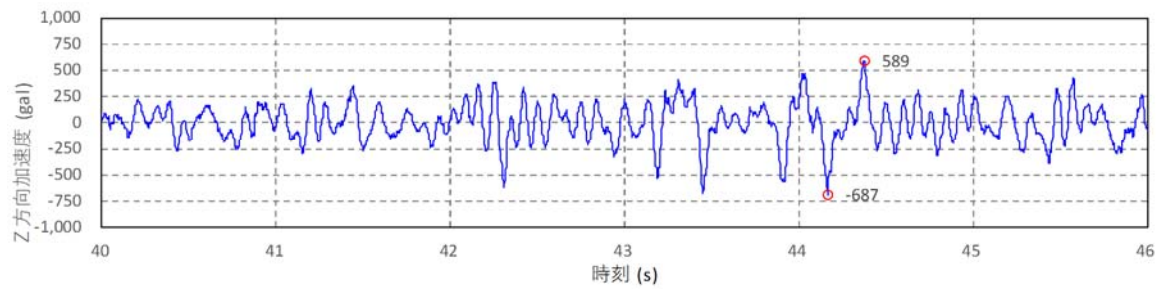


図15 鉛直（取水路波形入力）の加速度応答時刻歴

(b) 実証試験モデルの解析結果

実証試験モデルの解析結果を図 16 に示す。

浮き上がり量は最大で 0.00mm (図 16-1) であることを確認した。

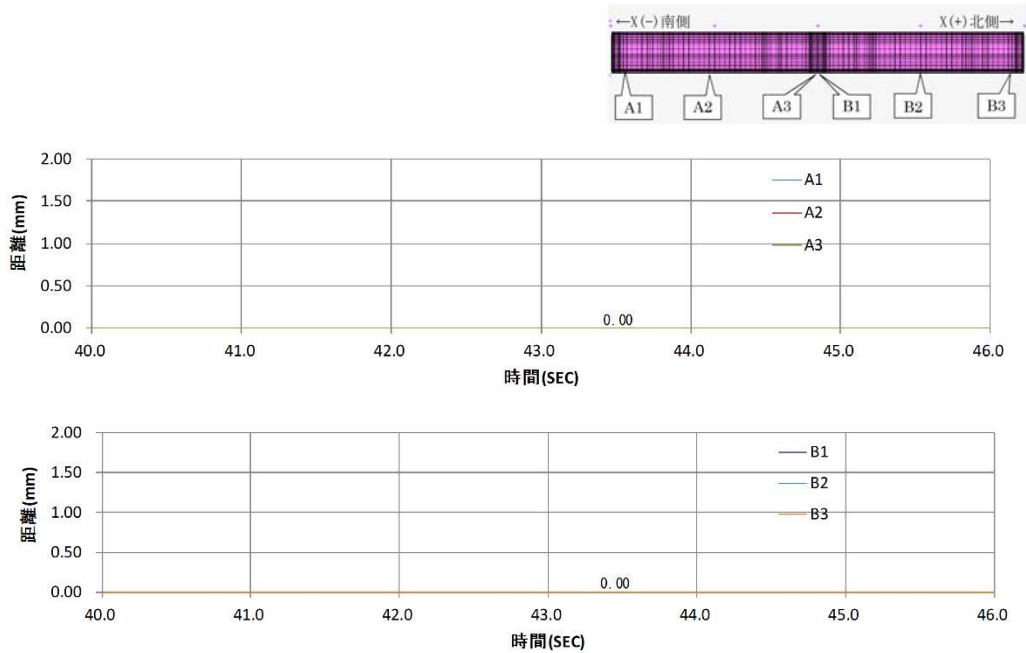


図 16-1 止水板コマと底面戸当りとの距離 (浮上り量)

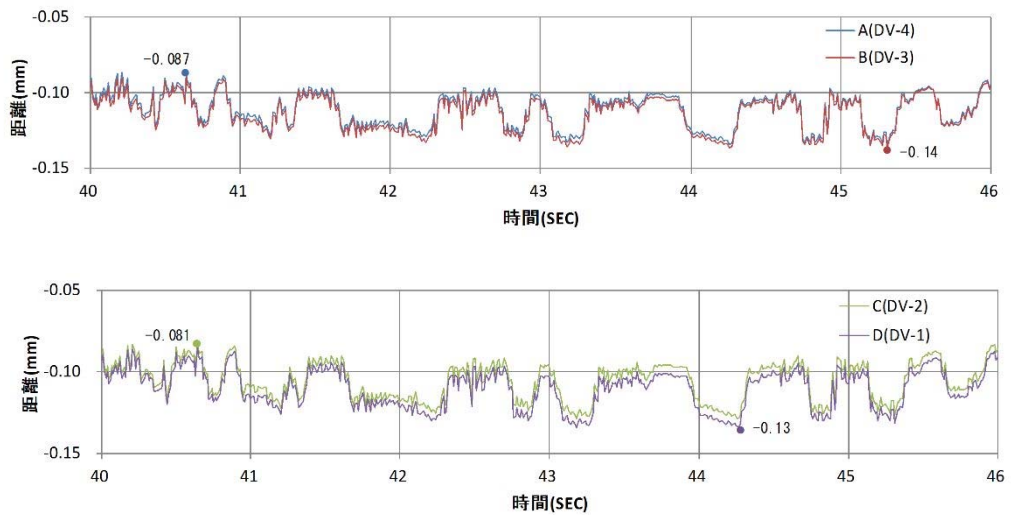


図 16-2 止水板と底面戸当りとの距離 (浮上り量) 実証試験計測位置

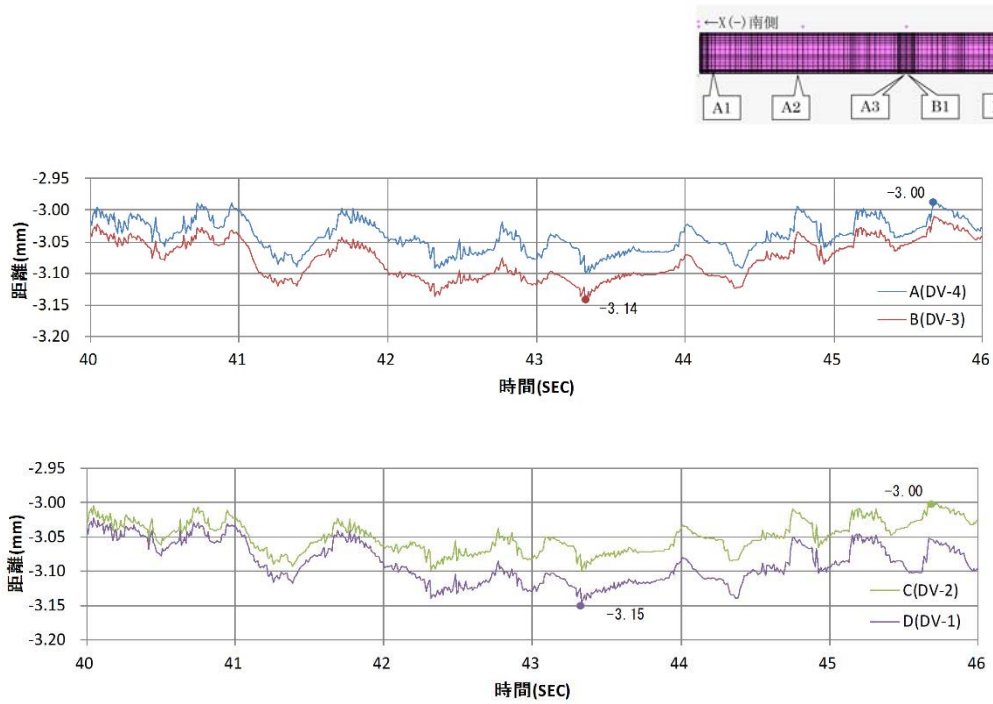


図 16-3 止水板と側面戸当りとの距離

図 16 (1/2) 鉛直 (取水路波形入力) の解析結果
【実証試験モデル】

(c) 実機モデルの解析結果

実機モデルの解析結果を図 16 に示す。

浮き上がり量は最大で 0.27mm (図 16-4) であることを確認した。

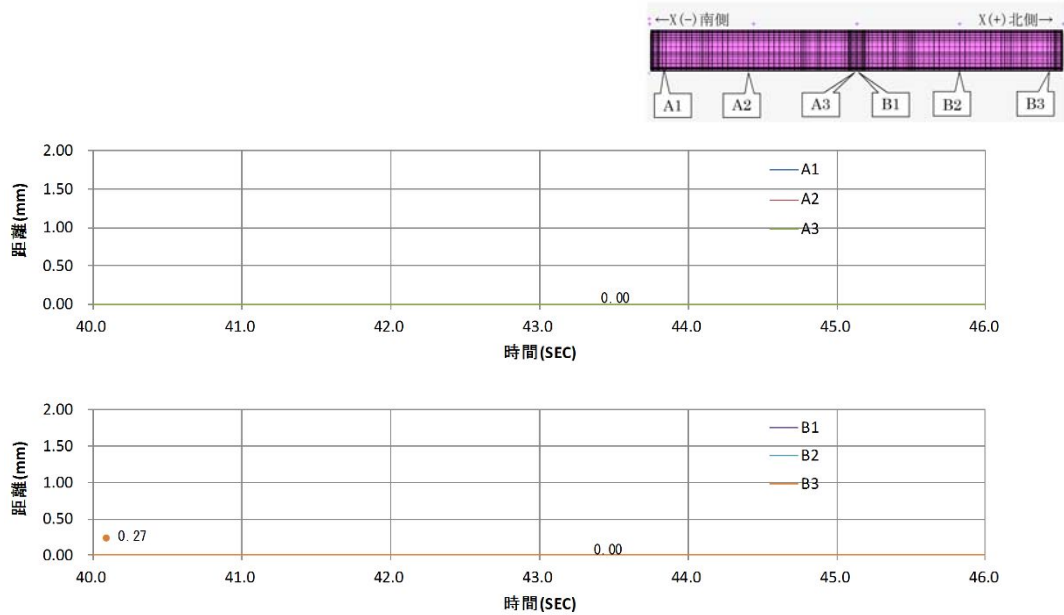


図 16-4 止水板コマと底面戸当りとの距離 (浮上り量)

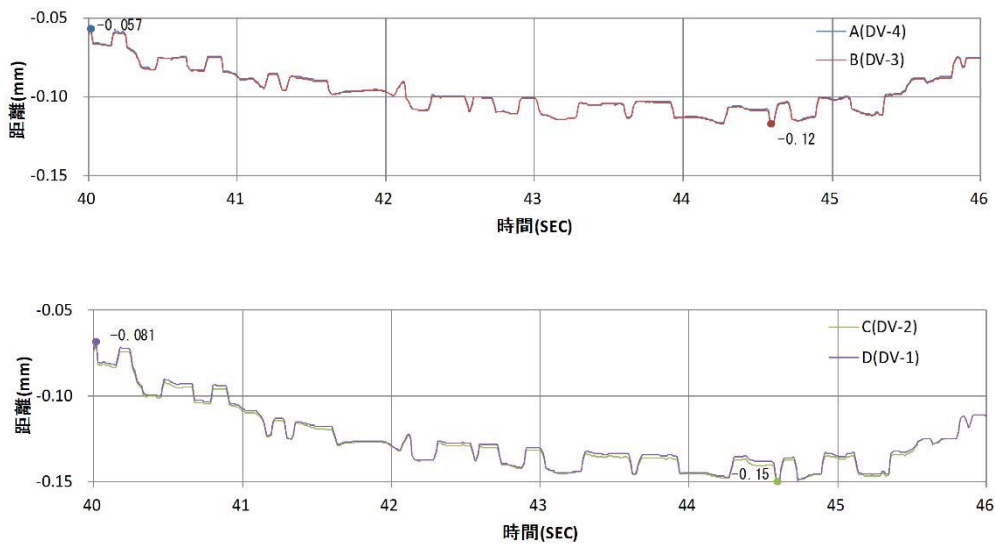


図 16-5 止水板と底面戸当りとの距離 (浮上り量) 実証試験計測位置

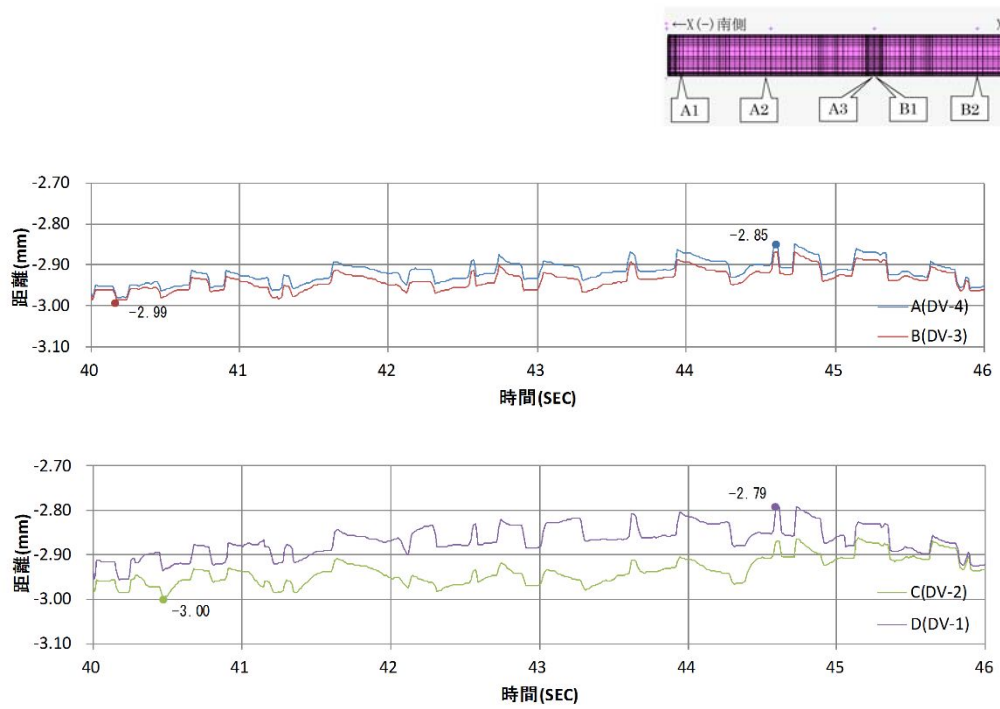


図 16-6 止水板と側面戸当りとの距離

図 16 (2/2) 鉛直（取水路波形入力）の解析結果
【実機モデル】

(5) 実証試験モデルと実機モデルとの検証

鉛直の解析結果 (④鉛直く取水路波形入力), 実証試験モデルと実機モデルとの解析結果を比較すると, 止水板の浮き上がりの挙動やタイミング, 浮き上がり量はほぼ同じ結果が得られ, 止水板の挙動をよく再現できている結果が得られた。比較の結果を図 15 示す。

実機モデルの止水板押えは, 鋼製防護壁側にボルト接合されているため, 比較的剛性が高いのに対し, 実証試験モデルの場合は, 架構による支持のため剛性は低いものとなっている。また, 実機モデルにおける止水板は, 両端が連続して設置されているのに対し, 実証試験モデルの場合は, 両端が拘束されていない自由端となる。そのため, 実証試験モデルの場合は, 比較的浮き上がりの挙動が大きくなる傾向にある。

実証試験モデルと実機モデルの浮き上がりについて 2 枚の止水板の浮き上がりを検証した。検証結果を図 16, 図 17 示す。

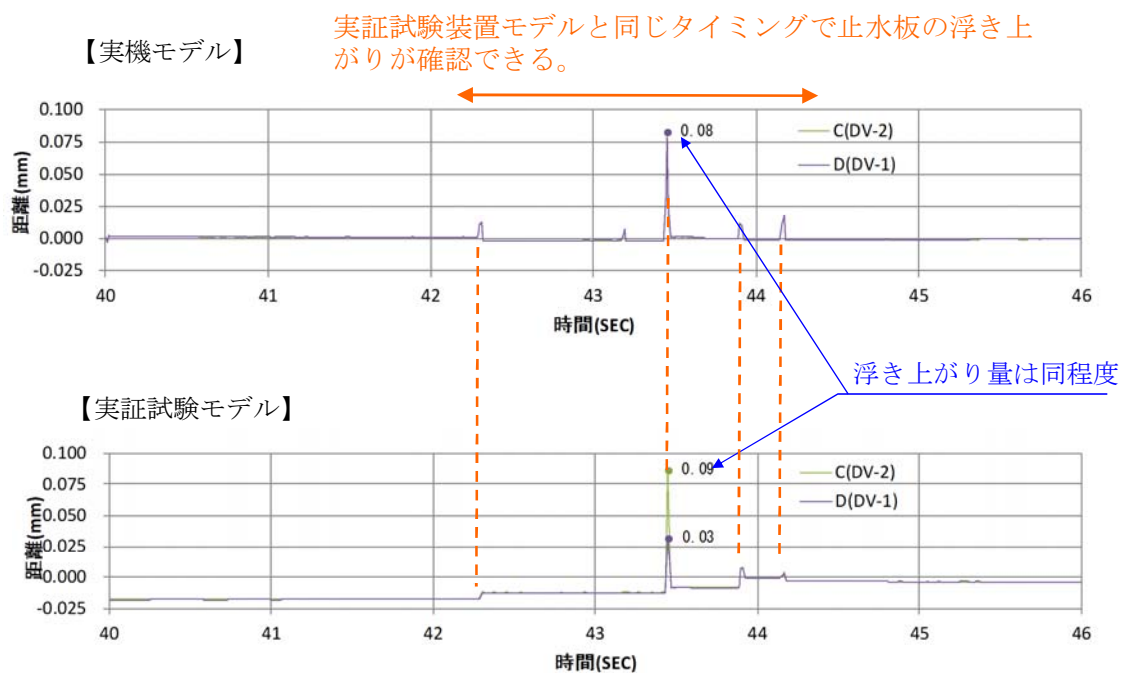


図 15 実機モデルと実証試験モデルの三次元的動的解析結果の比較

【実証試験モデルの検証】

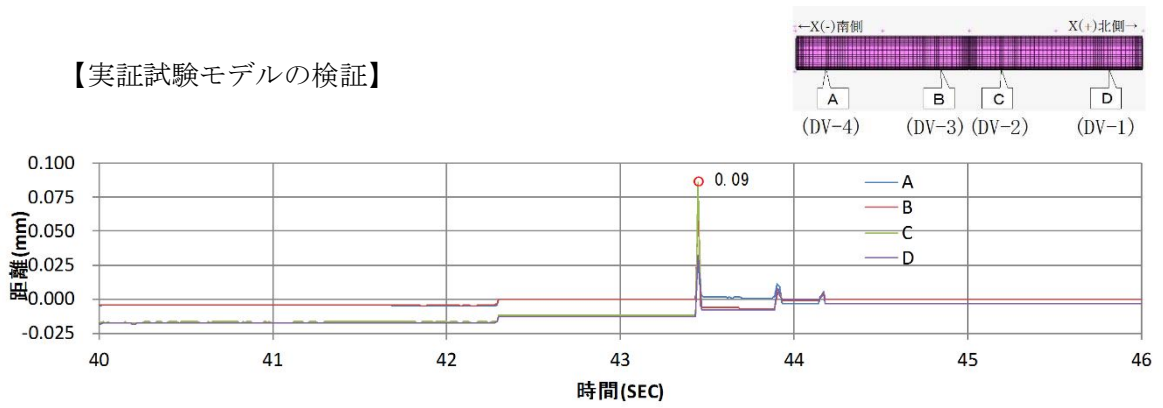


図 16-1 止水板コマと底面戸当りとの浮き上り量

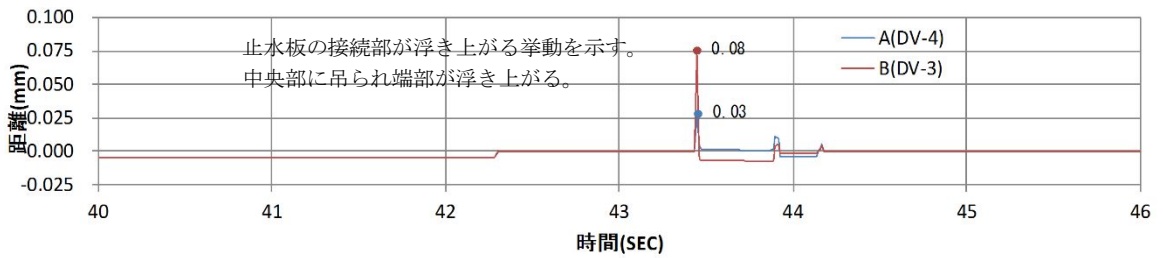


図 16-2 止水板 (A, B) の浮き上がり量

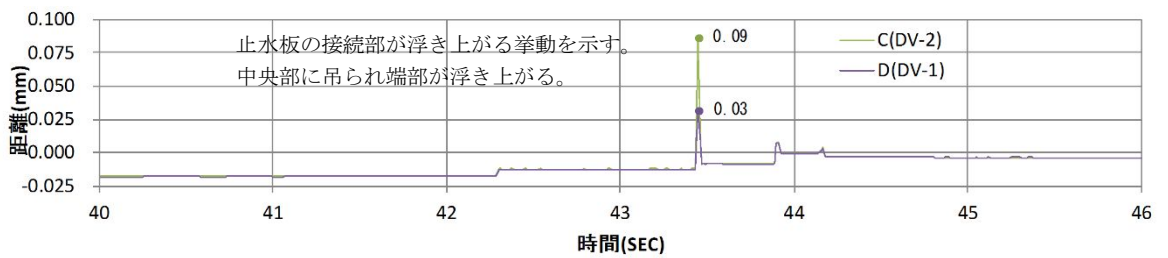
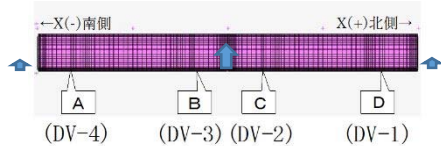


図 16-3 止水板 (C, D) の浮き上がり量

実証試験モデルは両端が拘束されていないため、中央部の浮き上がりに吊られ両端部も浮き上がる傾向が確認できる。浮き上がり量は最大で 0.09mm であった。

中央の浮き上がりに吊られて両端が浮き上がる。



止水板の浮き上がりの模式図



止水板の浮き上がり量 (mm)

【実機モデルの場合】

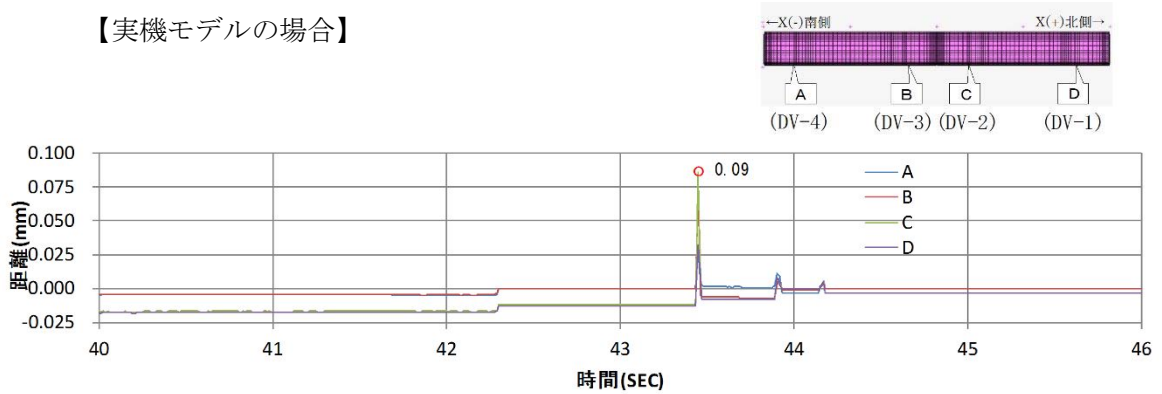


図 17-1 止水板コマと底面戸当りとの浮き上がり量

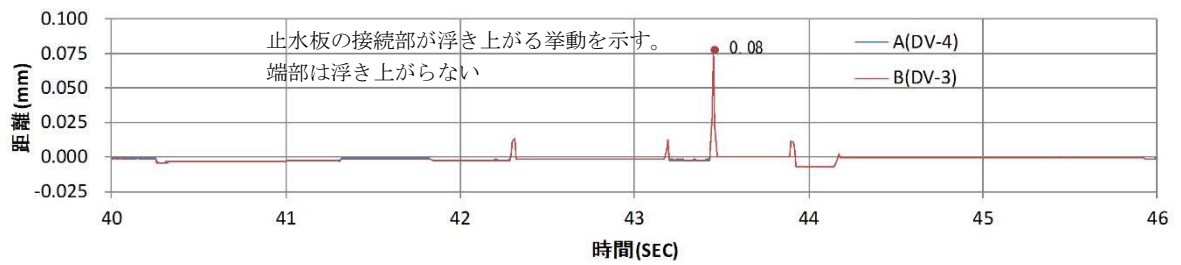


図 17-2 止水板 (A, B) の浮き上がり量

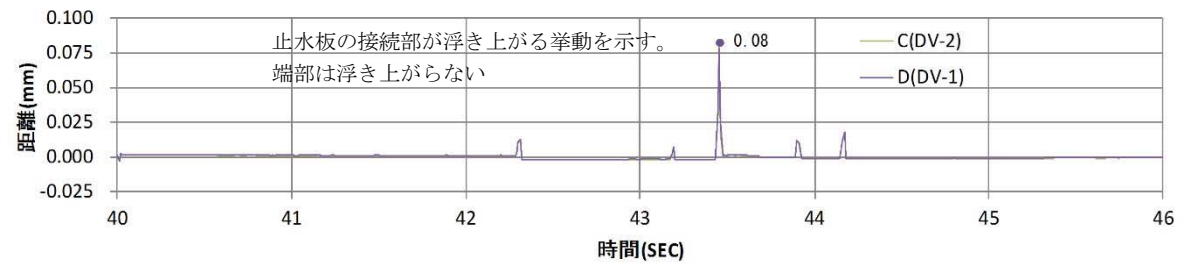
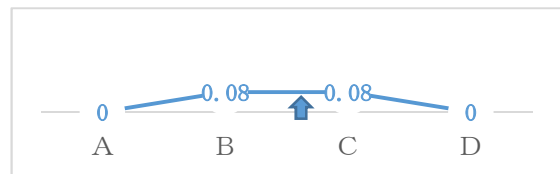
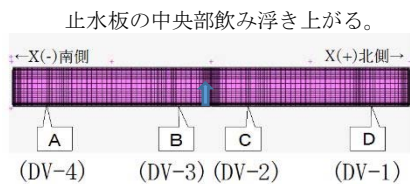


図 17-3 止水板 (C, D) の浮き上がり量

実機モデルは両端が拘束されているため、止水板の中央部が浮き上がるが両端は浮き上がらない傾向が確認できる。また、浮き上がり量の最大値は実証試験モデル 0.09mm に対し実機モデル 0.08mm とほぼ同じ浮き上がり量となった。



止水板の浮き上がりの模式図

止水板の浮き上がり量 (mm)

(6) 3方向同時加振の実証試験モデルの検証及び挙動

a. 実証試験モデルと実機モデルとの検証

鉛直の解析結果(②Y方向(堤軸直角)包絡波), 実証試験モデルと実機モデルとの解析結果を比較すると, 止水板の浮き上がりの挙動やタイミング, 浮き上がり量はほぼ同等の結果が得られ, 止水板の挙動をよく再現できている結果が得られた。比較の結果を図18に示す。

実証試験結果を再現できた実証試験装置モデルによる三次元動的解析の結果と実機設計モデルによる三次元動的解析結果によく一致していることから, 三次元動的解析による実機止水板の地震時の追従性の評価は問題ないと判断される。

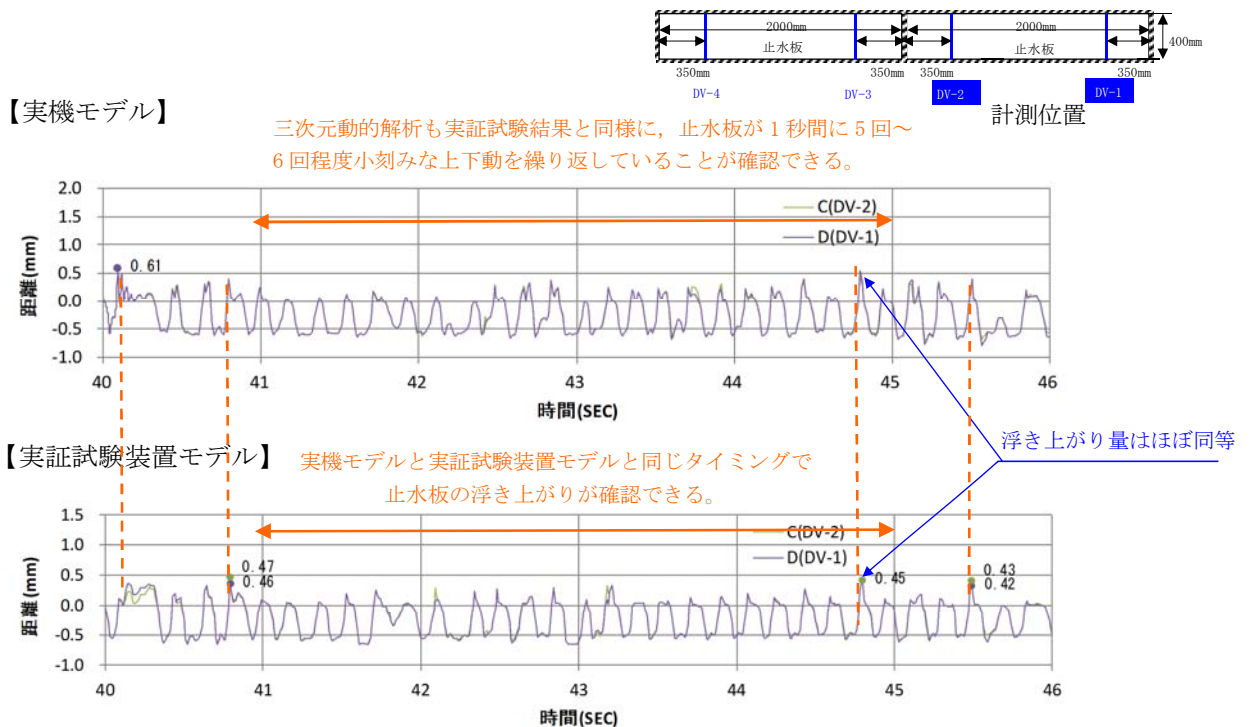


図18 実機モデルと実証試験装置モデルの三次元動的解析結果の比較

<実機モデル考察>

- ◆実証試験装置モデルにおける止水板の挙動と良く一致している。
- ◆このため, 「実証試験結果」⇔「実証試験装置モデルによる三次元動的解析結果」⇔「実機設計モデルによる三次元動的解析結果」に相関があり, 実機設計において三次元動的解析の適用に問題ないと判断される。

<実証試験装置モデル考察>

- ◆実証試験結果の方が鉛直変位量(+側の絶対値)が約2倍大きい結果となっているが, 実証試験結果の鉛直変位のうねりを考慮した場合の鉛直変位量は, 実証試験装置モデルの鉛直変位量とほぼ同等である。
- ◆実機設計においては, 実証試験結果の鉛直変位量(+側の絶対値)を安全側と捉え考慮する。但し, 鉛直変位量自体が数mmと小さいため, 浸水の観点からは実質問題はない。

b. 止水板の挙動検証

3方向同時加振（②3方向（Y方向包絡波））について止水板の挙動について検証を行った。

前述の（5）項の鉛直の解析の結果、止水板の両端が実機モデルは固定支持であるが、実証試験モデルは自由端であるため、3方向同時加振の2枚の止水板の挙動、浮き上がるタイミング、浮き上がり量は一致しない傾向にあることが分かった。

また、実証試験モデルは両端部分の浮き上がりが大きくなる傾向がある。検証結果を図19に示す。

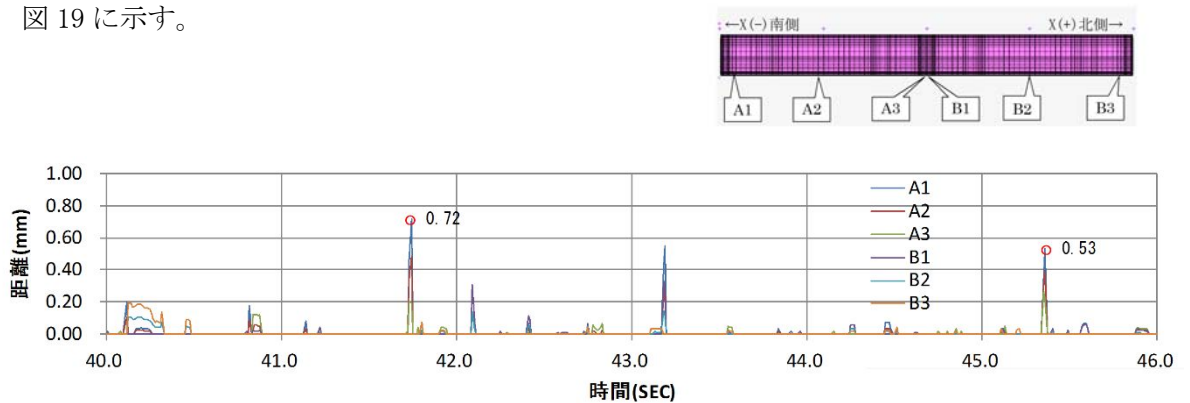


図 19-1 止水板コマと底面戸当りとの距離（浮上り量）

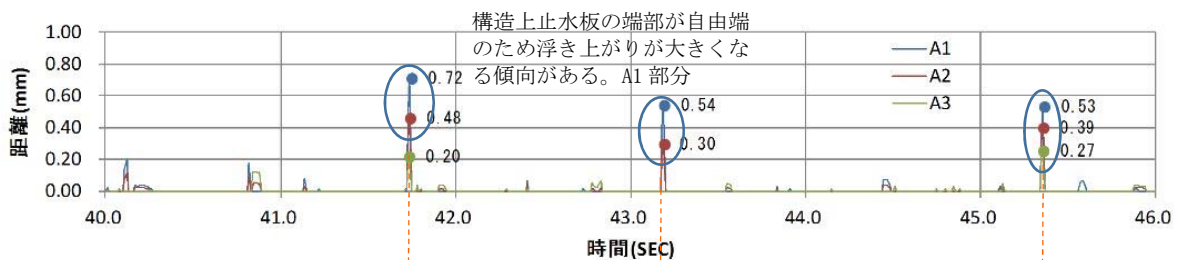


図 19-2 止水板の A 側（A1～A3）の浮き上がり量

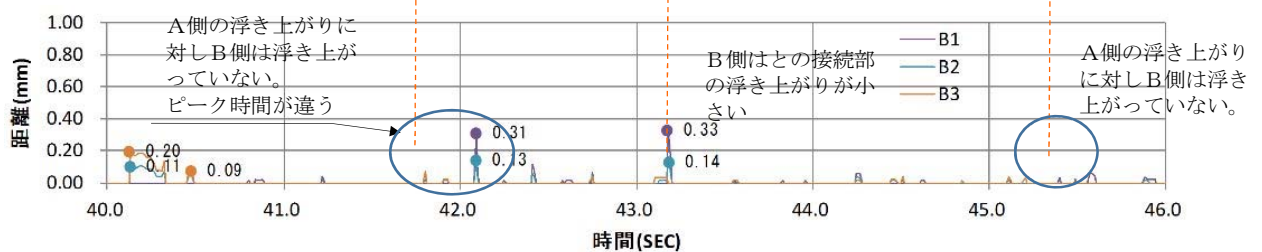


図 19-3 止水板の B 側（B1～B3）の浮き上がり量

上記の解析結果を分析すると、A側の浮き上がりのピークに対しB側は浮き上がっていない。また、浮き上がりのピーク時間も違い、浮き上がりもB側の方が小さな傾向にあることが確認できる。

そのため、実証試験における2枚の止水板の鉛直変位による距離は、2枚同じ挙動を示さず、止水板の端部の浮き上がりが大きくなる傾向が解析結果より確認できる。

6.1.3.4 実証試験に用いる地震動の作成，実証試験及び三次元動的解析のケースについて

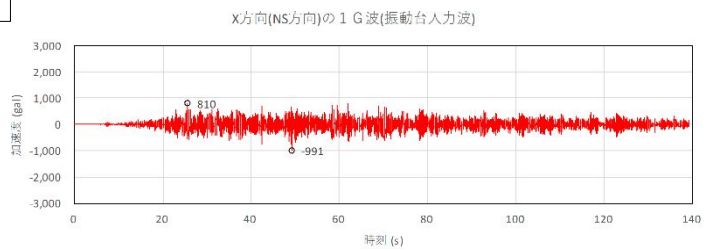
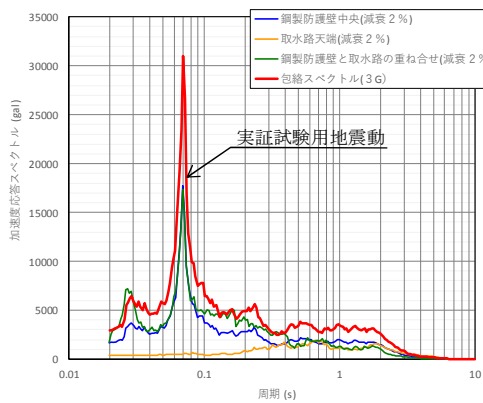
1. 本震

(1) 本震時における実証試験用地震動の加速度応答スペクトルと時刻歴波形

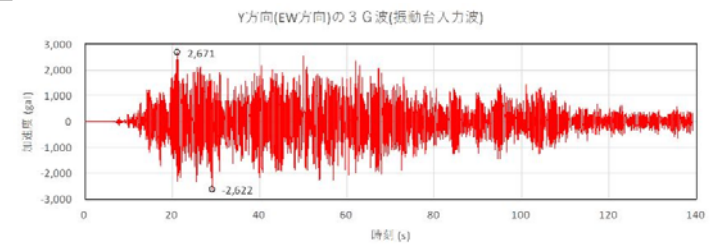
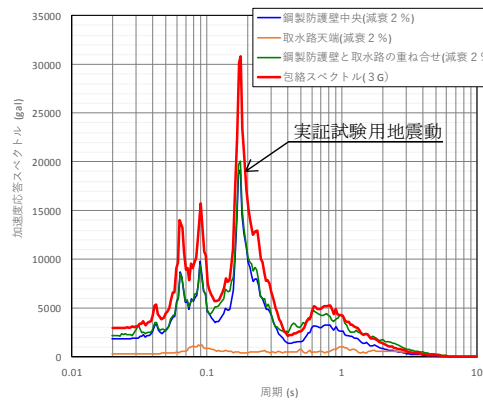
X Y方向の水平加振については，振動台の能力(3G)の範囲で包絡波を作成した。

Z方向の鉛直加振については，振動台の能力(1G)を超えるため，実証試験において振動台の鉛直性能の最大の1Gの加振により実施する。

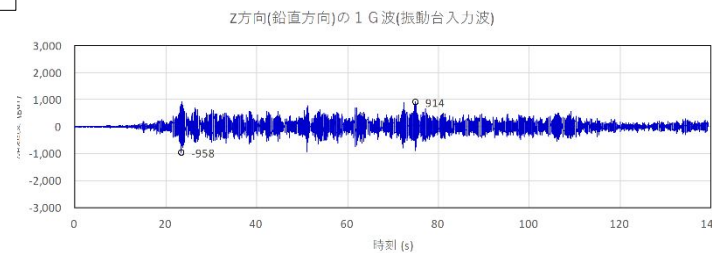
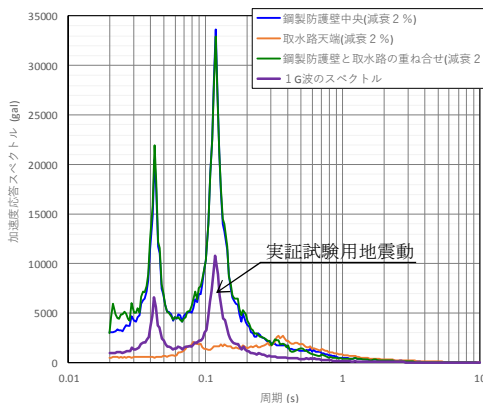
図1に三方向(X, Y, Z)の実証試験用地震動の加速度応答スペクトルと加速度時刻歴を示す。



加速度応答スペクトルと時刻歴波形 (X方向 (NS))



加速度応答スペクトルと時刻歴波形 (Y方向 (EW))



加速度応答スペクトルと時刻歴波形 (Z方向)

図1 三方向 (X, Y, Z) の実証試験用地震動の加速度応答スペクトルと加速度時刻歴

(2) 本震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

本震時における実証試験のケースと検証に用いる三次元動的解析の実施ケースを表1に示す。

実証試験実施前に実施する項目は、実証試験に合わせた三次元動的解析を実施し、実証試験結果の報告時には、実機モデルでの三次元動的解析を実施し止水板の挙動を検証する。

a. 水平方向 (X, Y)

水平方向の加振は、Y方向 (EW) の包絡波で加振 (②) を行う。X方向 (NS) については振動台の能力(1G)が上限であることから、Y方向 (EW) にX方向 (NS) の包絡波を入力し方向を反転させた加振 (①) を行なうことで止水板の挙動を確認する。

b. 鉛直方向 (Z方向)

鉛直方向による加振試験については、実証試験による振動台の能力(1G)が上限であることから、鉛直方向の上限 (1G) を考慮したケース (①, ②) にて実証試験を行い、止水板の挙動を確認する。

また、データ拡充の観点から鋼製防護壁の波形と取水路の波形を与えたケース (③, ④) も実施し、止水板の挙動を確認する。

表1 本震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3方向 (X方向 (堤軸) 包絡波)	1 G	3 G (X包絡波)	1 G	○	○	3方向同時 (Y方向にX方向の地震動を入力。方向反転)
② 3方向 (Y方向 (堤軸直角) 包絡波)	1 G	3 G (Y包絡波)	1 G	○	○	3方向同時 (図7に実証試験用入力地震動)
③ 鉛直 (鋼製防護壁包絡波)	—	—	1 G	○	—	鉛直単独
④ 鉛直 (取水路側包絡波)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独 (図8に実証試験用入力地震動)
⑤ 基準地震動 (S_s) (S_s -D1)	—			—	○	3方向同時
⑥ 基準地震動 (S_s)	—			—	○	3方向同時

○：解析実施ケース

2. 余震

(3) 余震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

余震時における実証試験のケースと検証に用いる三次元動的解析の実施ケースを表2に示す。

表2 余震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3方向 (Y方向(堤軸直交)包絡波)	1 G	2 G (Y包絡波)	1 G	○	○	3方向同時
② 鉛直 (鋼製防護壁波形入力)	—	—	1 G	—	—	鉛直単独
③ 鉛直 (取水路側波形入力)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独
④ 基準地震動 (S _d) (S _d -D1)	—			—	○	3方向同時

○：解析実施ケース

(3) 実証試験用地震動の作成について

◆ X方向（堤軸）の実証試験用地震動の作成

作成方法は、6.1.3-13頁に示す。

◆ Y方向（堤軸直角）の実証試験用地震動の作成

a. 二次元有効応力解析による鋼製防護壁基礎天端の応答時刻歴を算出する。（図2参照）

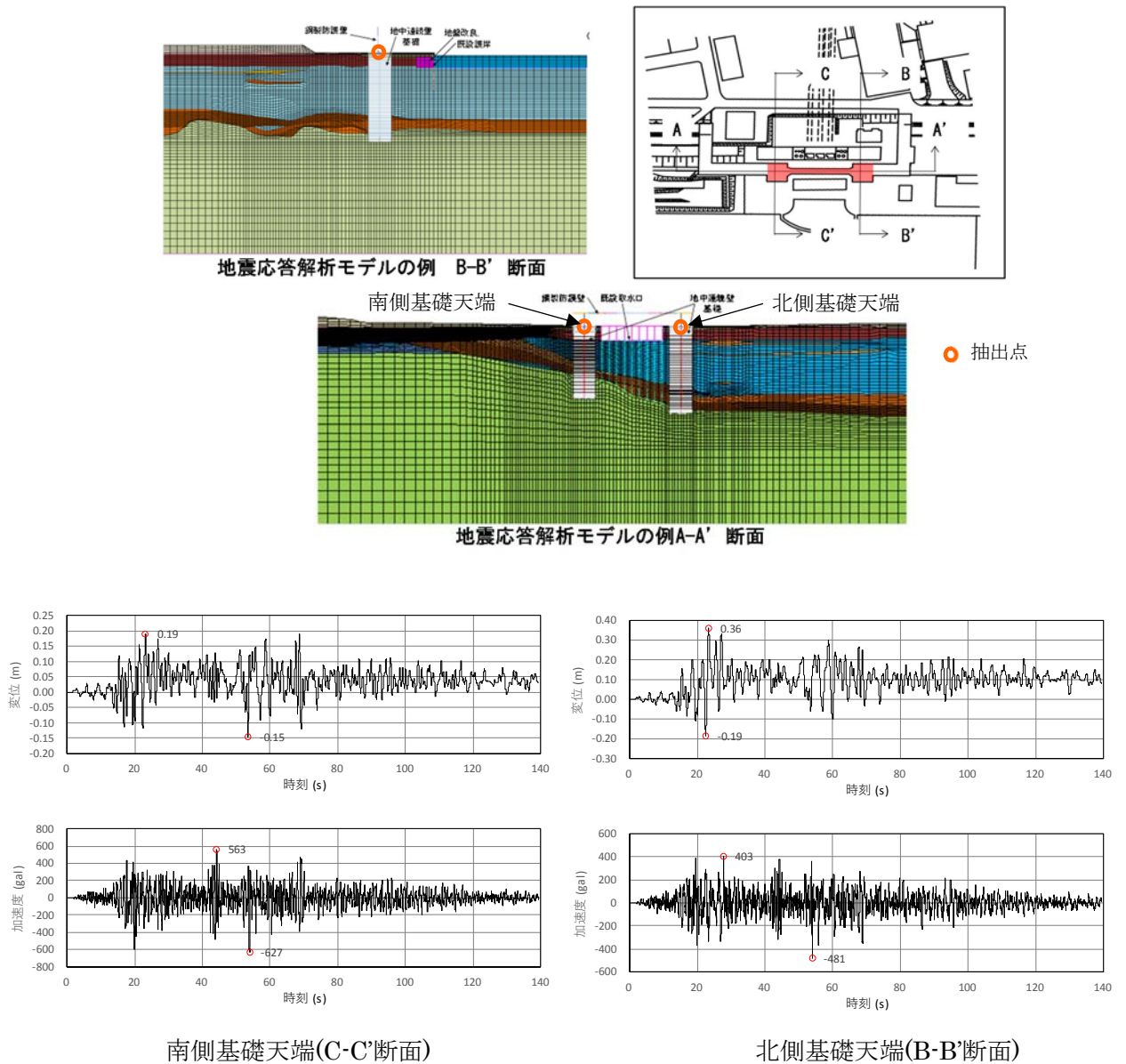


図2 鋼製防護壁基礎の二次元有効応力解析による応答時刻歴

(堤軸直角方向; B-B'及び C-C'断面)

- b. 鋼製防護壁の三次元フレームモデルの基礎との接続部に前頁の a. に示す変位時刻歴を入力した動的解析を行い、止水機構位置の応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。
(図 3 参照)

◎ 入力する変位時刻歴には組合せ係数法を考慮し、下記の 2 ケースを実施する。
堤軸方向(X)着目ケース：X1.0, Y0.4, Z1.0
堤軸直交方向(Y)着目ケース：X0.4, Y1.0, Z1.0

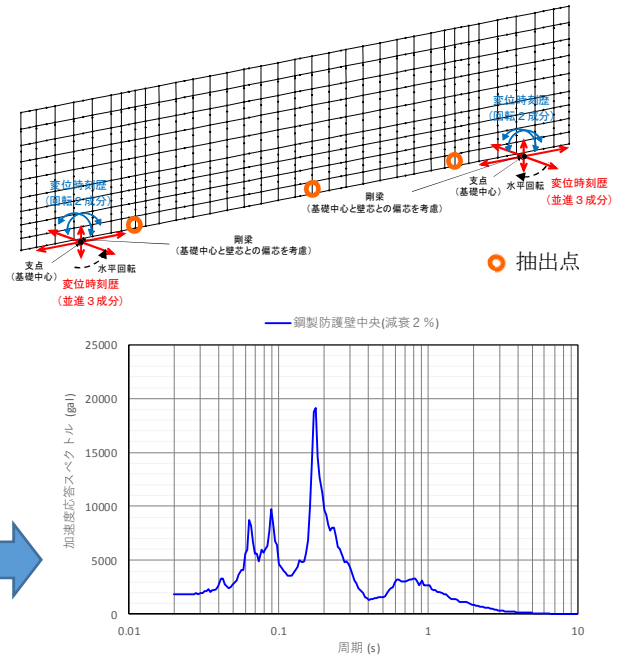
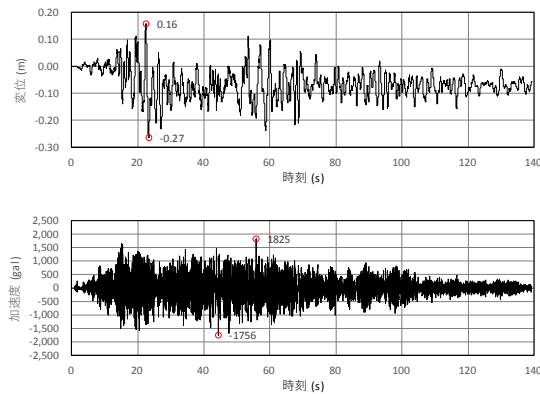


図 3 鋼製防護壁の三次元フレーム解析による中央部の応答時刻歴と応答スペクトル
(堤軸直交方向)

- c. 二次元有効応力解析による取水路天端の応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。
(図 4 参照)

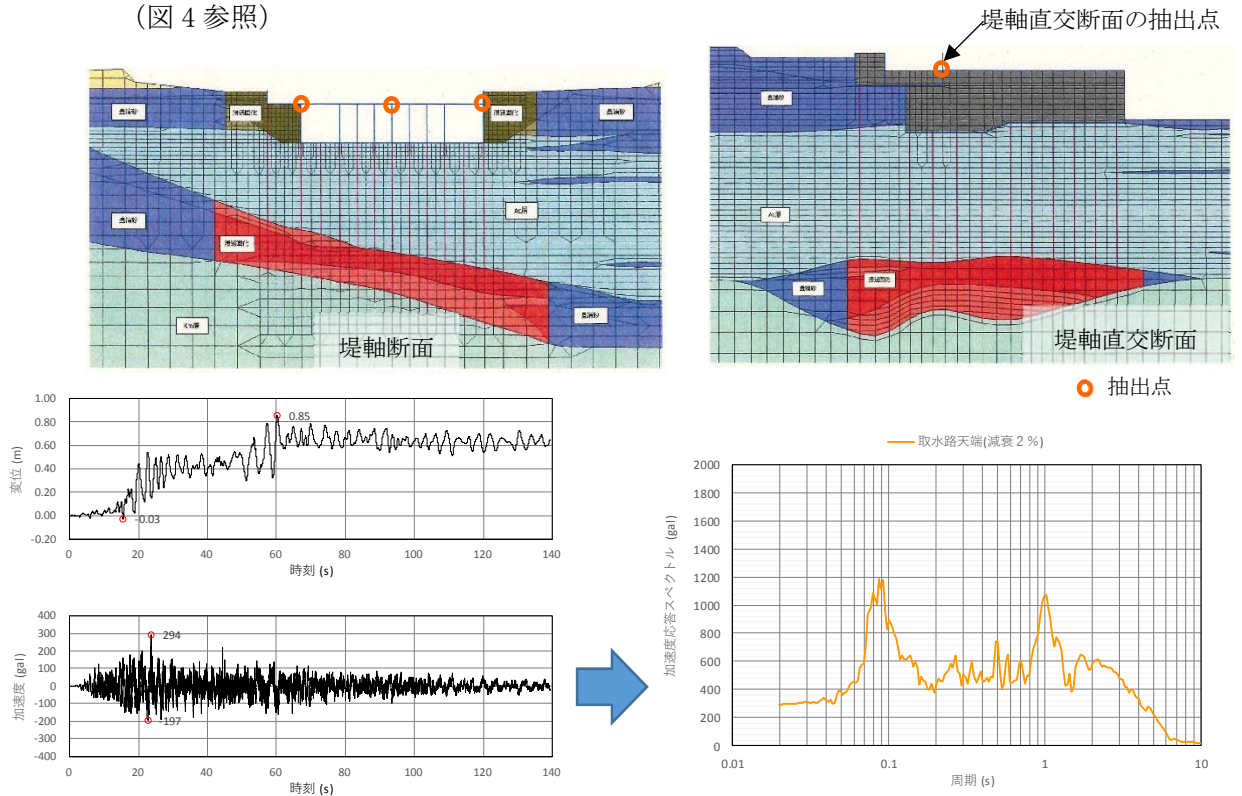
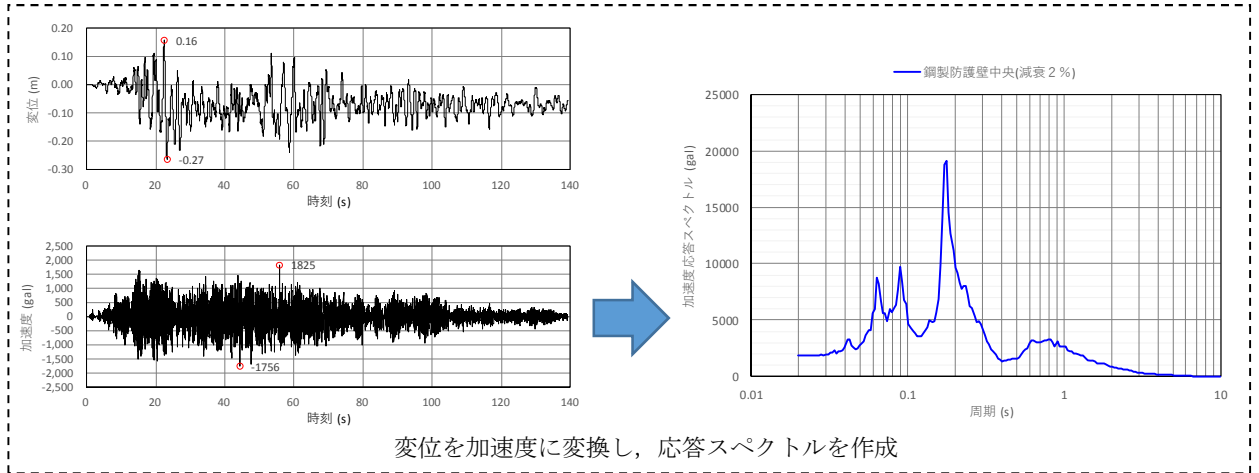


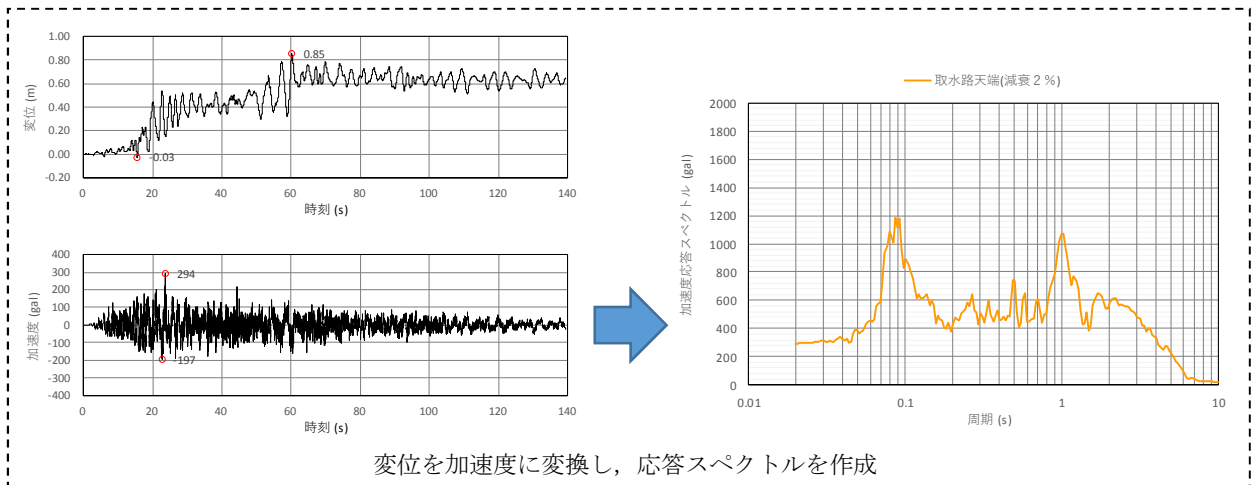
図 4 既設取水路の二次元有効応力解析による応答時刻歴と応答スペクトル(堤軸直交方向)

d. b 項, c 項で求めた応答時刻歴を重ね合わせ, 鋼製防護壁と取水路の相対的な応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。(図 5 参照)

b 項で算出した鋼製防護壁三次元フレーム解析による中央部の応答時刻歴及び応答スペクトル(堤軸直交方向)



c 項で算出した取水路の二次元有効応力解析による応答時刻歴及び応答スペクトル(堤軸直交方向)



鋼製防護壁 (b 項) と取水路 (c 項) の応答時刻歴及び応答スペクトルの重ね合わせ(堤軸直交方向)

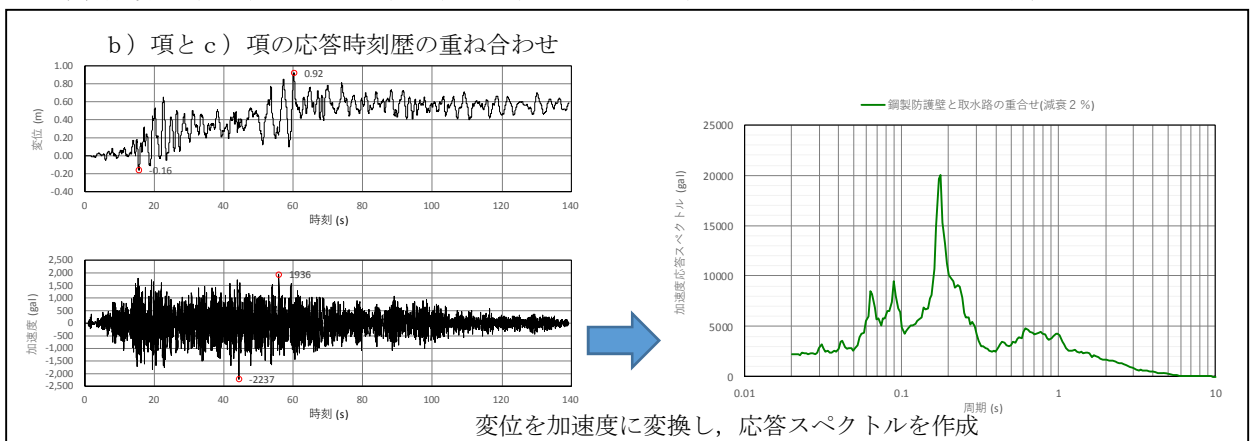


図 5 鋼製防護壁と取水路を重ね合わせた応答スペクトルの作成

e. b 項, c 項と d 項にて算出した応答スペクトルを比較し, 加速度応答スペクトルの包絡波を作成し実証試験用地震動として振動台に入力する。(図 6)

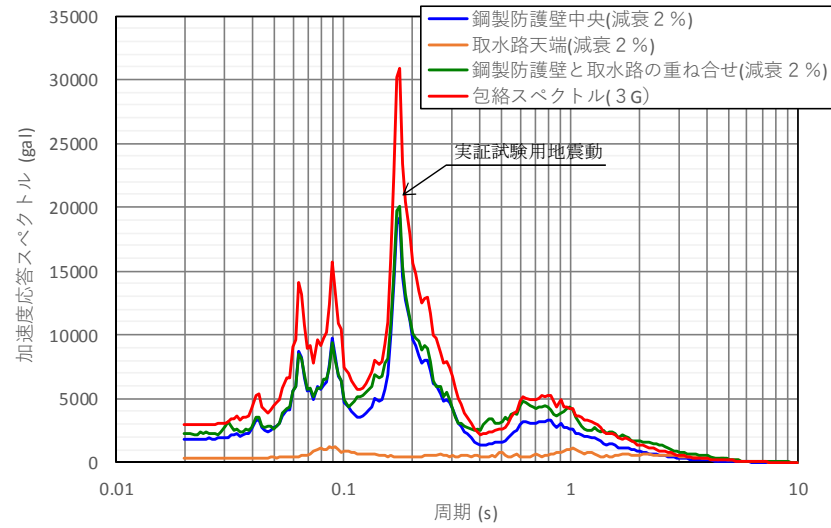


図 6 応答スペクトルの包絡波の作成(堤軸直交方向)

◆Z方向(鉛直方向)の実証試験用地震動の作成方法

a. 二次元有効応力解析による鋼製防護壁基礎天端の応答時刻歴を算出する。(図7参照)

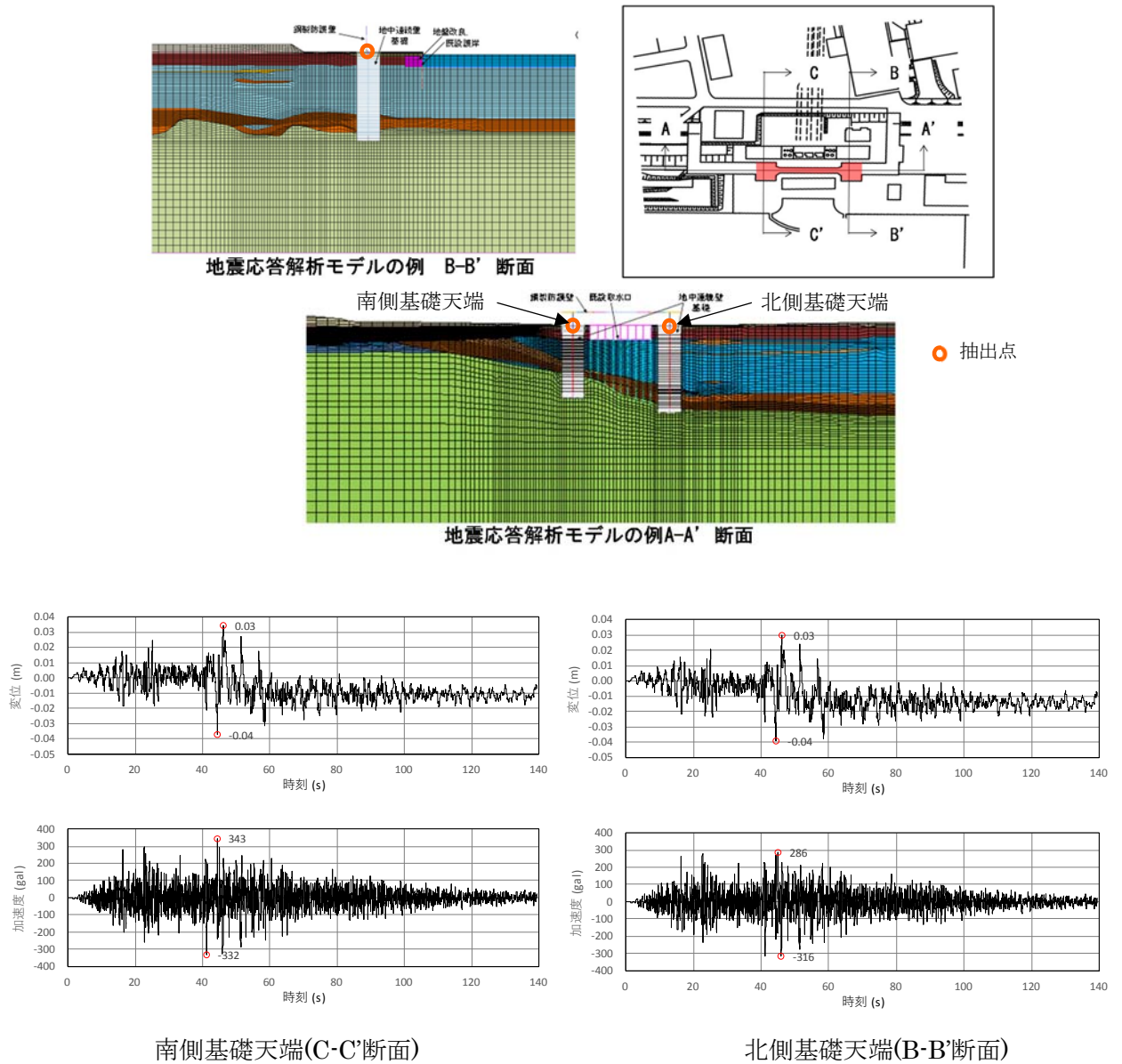


図7 鋼製防護壁基礎の二次元有効応力解析による応答時刻歴(鉛直方向)

- b. 鋼製防護壁の三次元フレームモデルの基礎との接続部に前頁の a. に示す変位時刻歴を入力した動的解析を行い、止水機構位置の応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。
(図 8 参照)

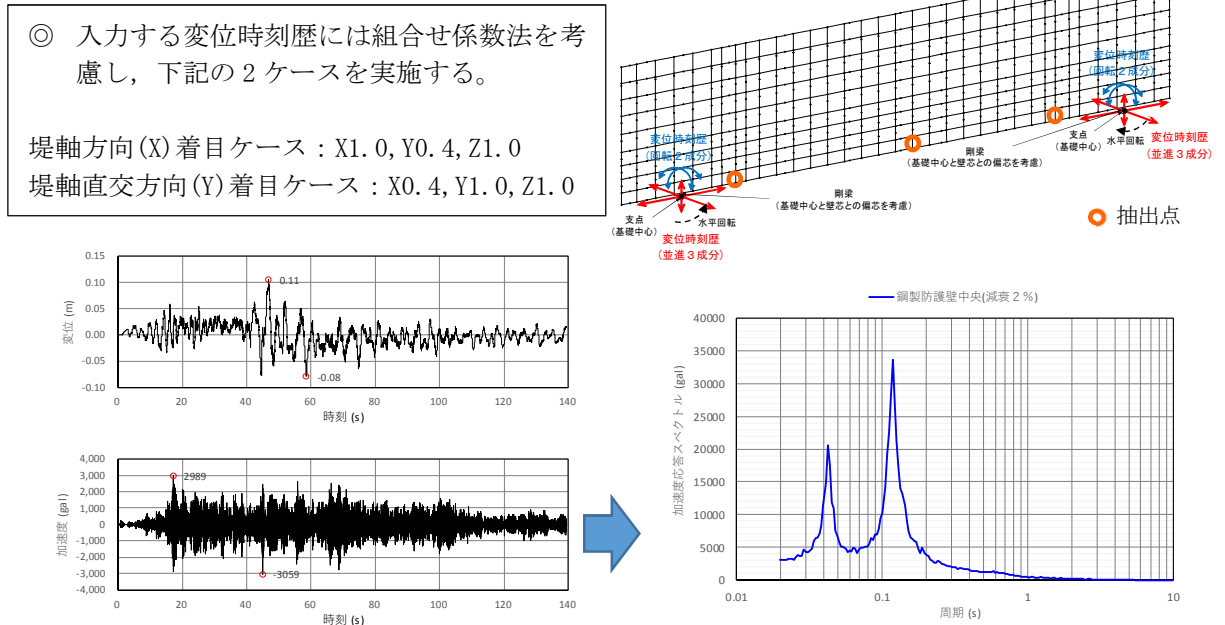


図 8 鋼製防護壁の三次元フレーム解析による中央部の応答時刻歴と応答スペクトル(鉛直方向)

- c. 二次元有効応力解析による取水路天端の応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。
(図 9 参照)

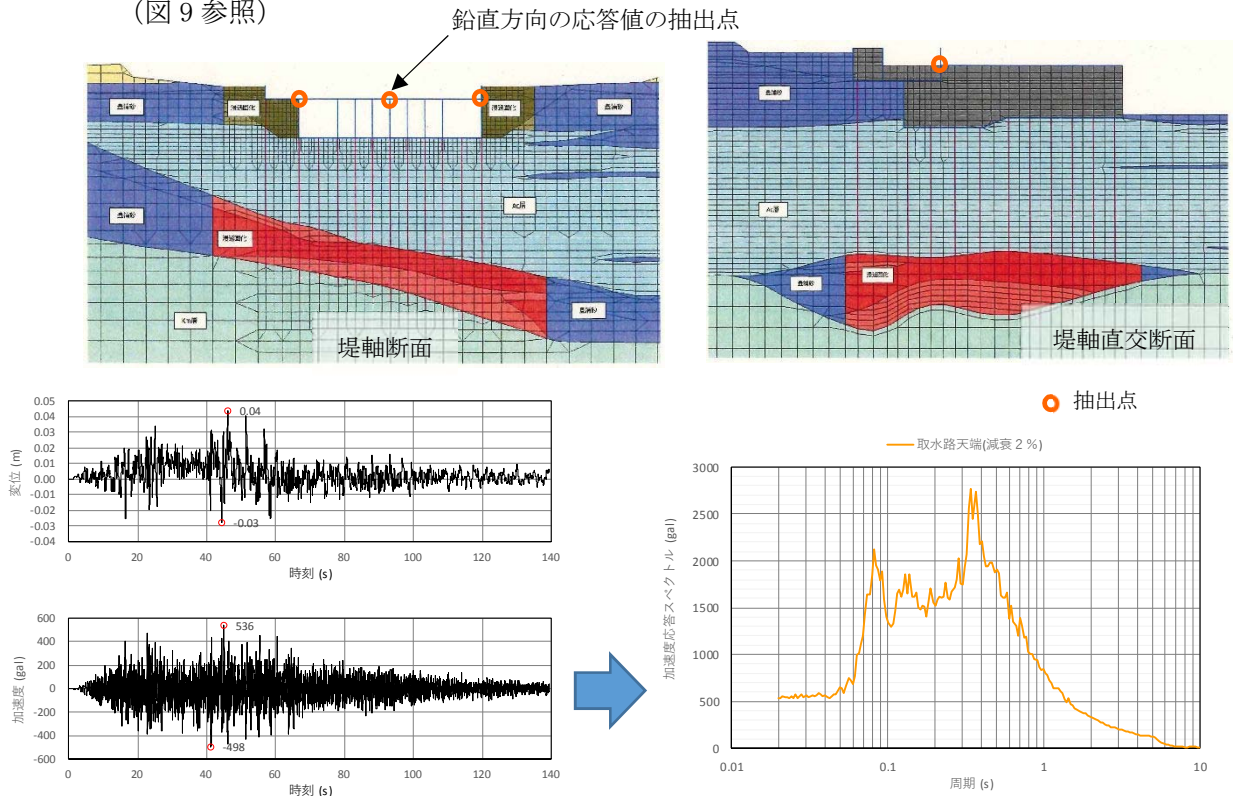
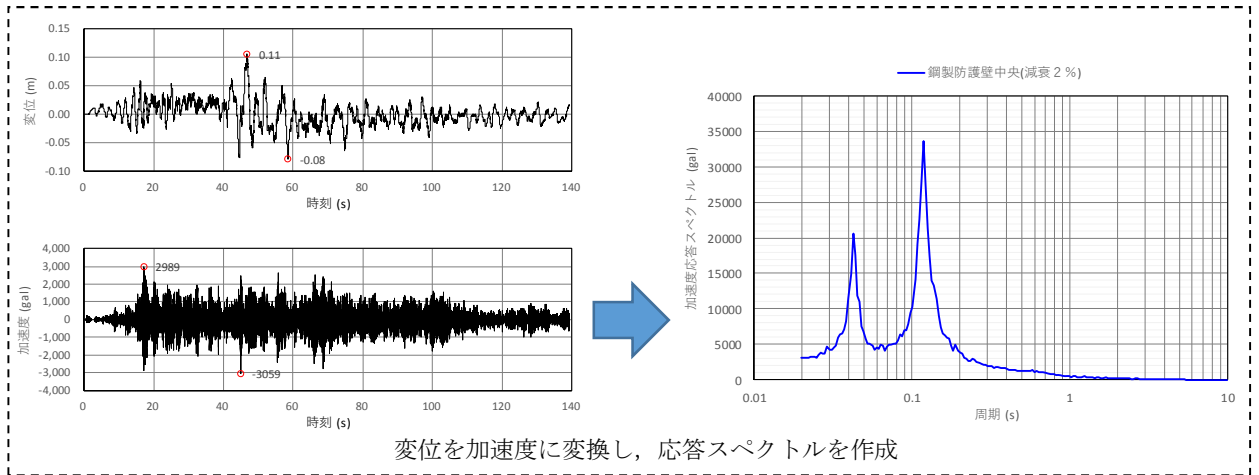


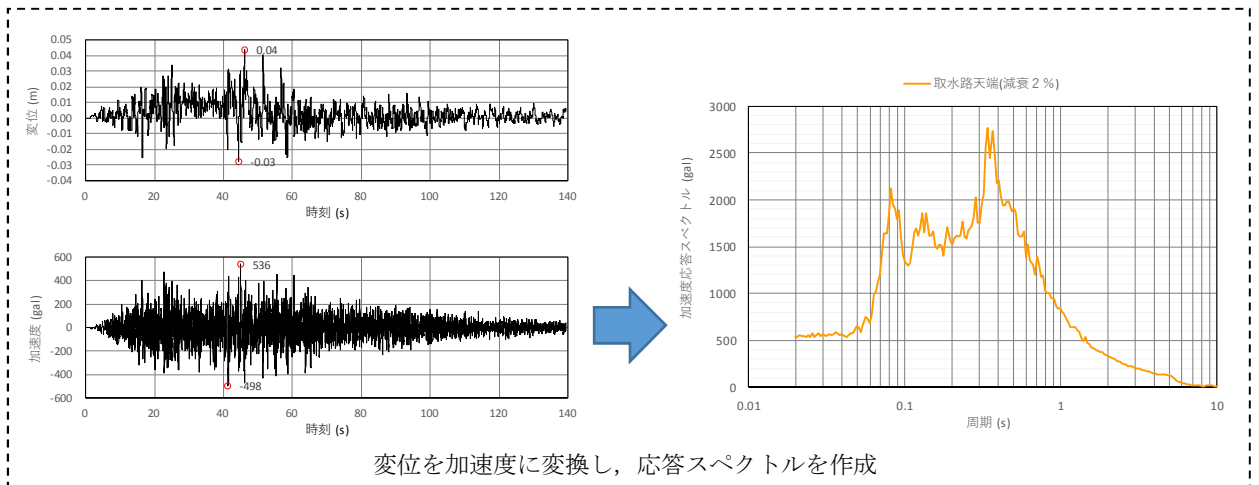
図 9 既設取水路の二次元有効応力解析による応答時刻歴と応答スペクトル(鉛直方向)

d. b 項, c 項で求めた応答時刻歴を重ね合わせ, 鋼製防護壁と取水路の相対的な応答時刻歴及び応答スペクトルを算出する。(図 10 参照)

b 項で算出した鋼製防護壁三次元フレーム解析による中央部の応答時刻歴及び応答スペクトル(鉛直方向)



c 項で算出した取水路の二次元有効応力解析による応答時刻歴及び応答スペクトル(鉛直方向)



鋼製防護壁 (b 項) と取水路 (c 項) の応答時刻歴及び応答スペクトルの重ね合わせ(鉛直方向)

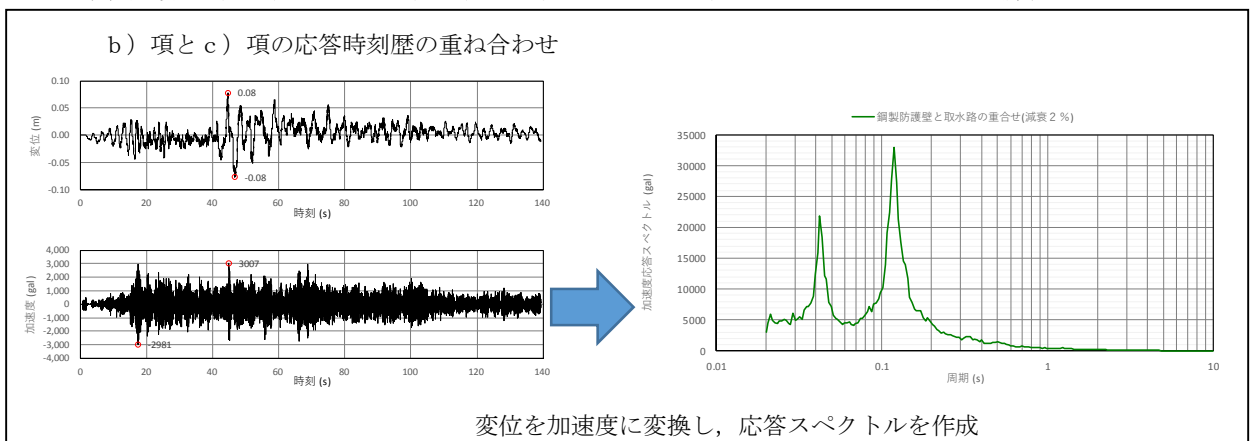


図 10 鋼製防護壁と取水路を重ね合わせた応答スペクトルの作成

e. b 項, c 項と d 項にて算出した応答スペクトルを比較し, 加速度応答スペクトルの包絡波を作成し実証試験用地震動として振動台に入力する (図 11)。

鉛直による加振試験については, 実証試験による加振は 1G が振動台の能力の上限であることから, 鉛直の上限 (1G) によるケースを考慮し実証試験を行う。なお, 三次元動的解析においては, 基準地震動 (S_s) を包絡波した実証試験用地震動にて解析を実施し挙動を確認する。

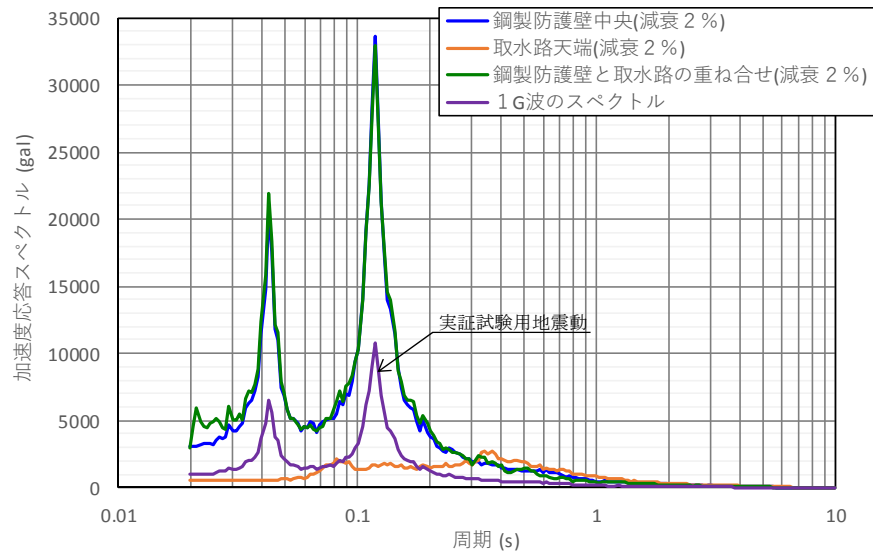


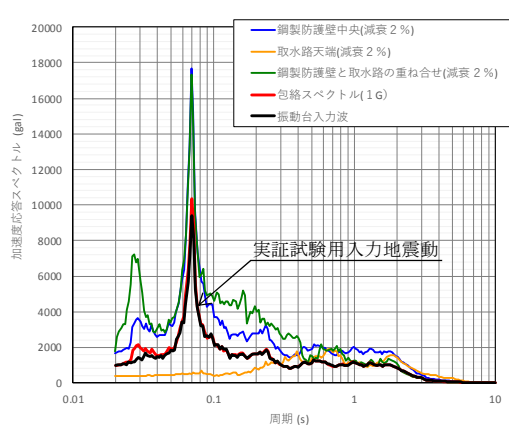
図 11 応答スペクトルの包絡波の作成(鉛直方向)

(4) 実証試験用入力地震動

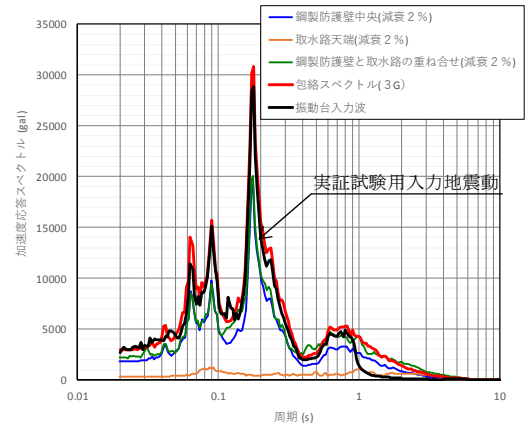
実証試験用入力地震動は、変位量に対する振動台性能の制限内に地震動を収めることを目的として、実証試験用地震動にハイパスフィルター（HPF）を掛け、長周期成分をカットした地震動である。

実証試験に用いる振動台へ入力する入力波形を示す。

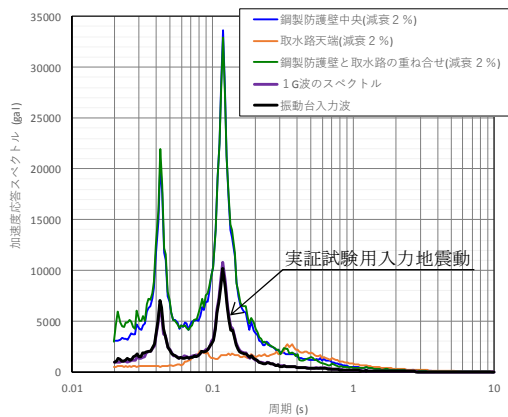
図 12 の入力加速度が最大 3G である Y 方向（EW）の加速度応答スペクトル図から周期 1sec 付近で HPF が掛かっていることが読み取れるが、最大加速度レベルは実証試験用地震動とほぼ同一レベルであることを確認した。



加速度応答スペクトル X 方向（NS）



加速度応答スペクトル Y 方向（EW）



加速度応答スペクトル Z 方向

図 12 本震による三方向（X，Y，Z）の実証試験用入力地震動の加速度応答スペクトル

◆鉛直（取水路側包絡波）の実証試験用地震動の作成

鉛直（取水路側包絡波）における実証試験に用いる振動台へ入力する入力波形の策定の考え方を図13～図15に示す。

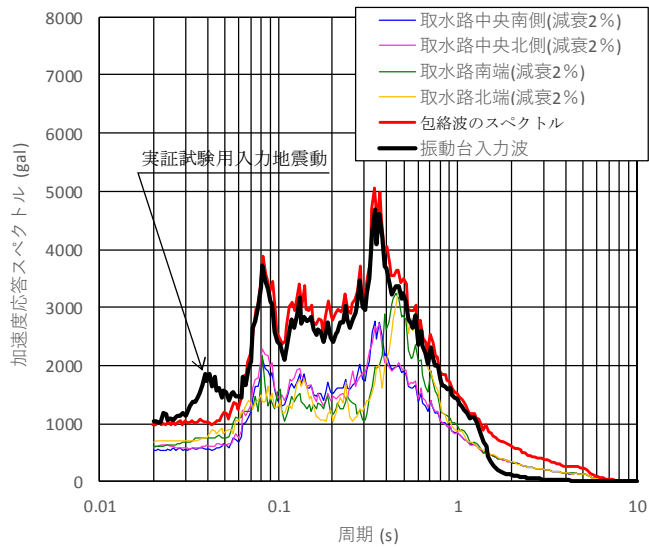


図13 取水路上面の加速度応答スペクトル(包絡波は取水路中央南側の1.83倍

※入力地震動はSs-D1-H-V

取水路のZ方向（鉛直方向）の包絡波

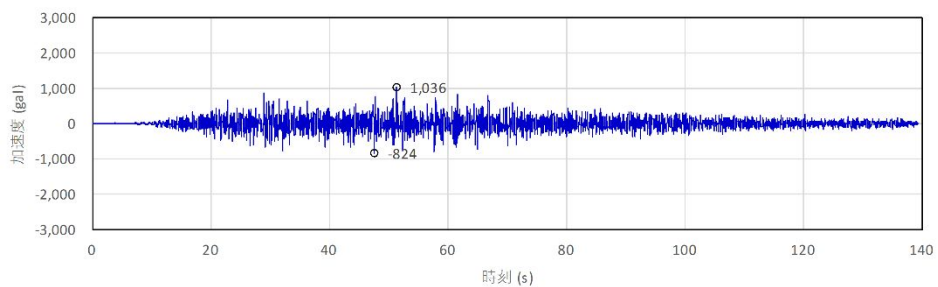


図14 取水路の鉛直方向の包絡波の加速度時刻歴(包絡波は取水路中央南側の1.83倍)

取水路中央南側の応答加速度時刻歴を1.83倍して取水路の鉛直方向の包絡波を作成

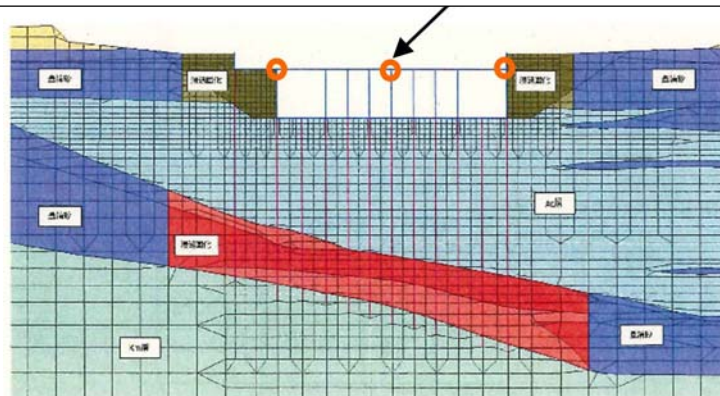


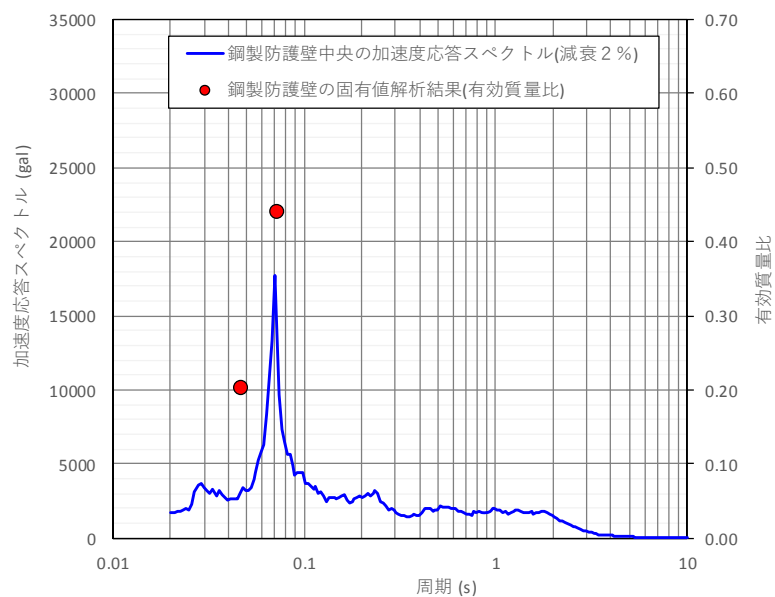
図15 加速度応答スペクトルの算出位置

(5) 実証試験用地震動の加速度応答スペクトルのピークについて

実証試験用地震動は、前述のとおり鋼製防護壁の三次元フレーム解析により算出した鋼製防護壁中央の応答加速度時刻歴に所定の倍率を乗じることにより、作成したものである。乗じる倍率は、振動台の能力を考慮しつつ鋼製防護壁中央の加速度応答スペクトルを基に取水路天端および鋼製防護壁と取水路の重ね合せの加速度応答スペクトルを包絡するように設定したものである。ここでは、実証試験用地震動を設定する上で基になった鋼製防護壁中央の加速度応答スペクトルのピークについて考察する。

図 16 に X 方向(堤軸方向)の鋼製防護壁中央の加速度応答スペクトルと鋼製防護壁の固有値解析により得られた固有周期及び有効質量比の比較図を示す。同図から、加速度応答スペクトルの最大ピークを示す周期(0.070s)と有効質量比が最大ピークを示す周期(0.072s)がほぼ一致していることが分かる。したがって、鋼製防護壁中央で算出した堤軸方向の加速度応答スペクトルの妥当性を確認することができる。

なお、有効質量比最大ピーク時の鋼製防護壁のモード図を図 17 に示す。



ピーク	加速度応答スペクトル		有効質量比(固有値解析)	
	周期 (s)	スペクトル (gal)	周期 (s)	有効質量比
最大ピーク	0.070	17697	0.072	0.44
2 番目のピーク	—	—	0.047	0.20

図 16 鋼製防護壁の加速度応答スペクトルと固有値解析結果の比較(堤軸方向)

固有周期(s): 0.07154
 固有振動数(Hz): 13.97800
 有効質量比
 DX(%): 44
 DY(%): 0
 DZ(%): 0
 RX(%): 0
 RY(%): 0
 RZ(%): 0
 制振係数
 DX: -57.640
 DY: 0.000
 DZ: -0.005
 RX: 0.000
 RY: 0.000
 RZ: 0.000

No.1:固有値解析 MODE No.5

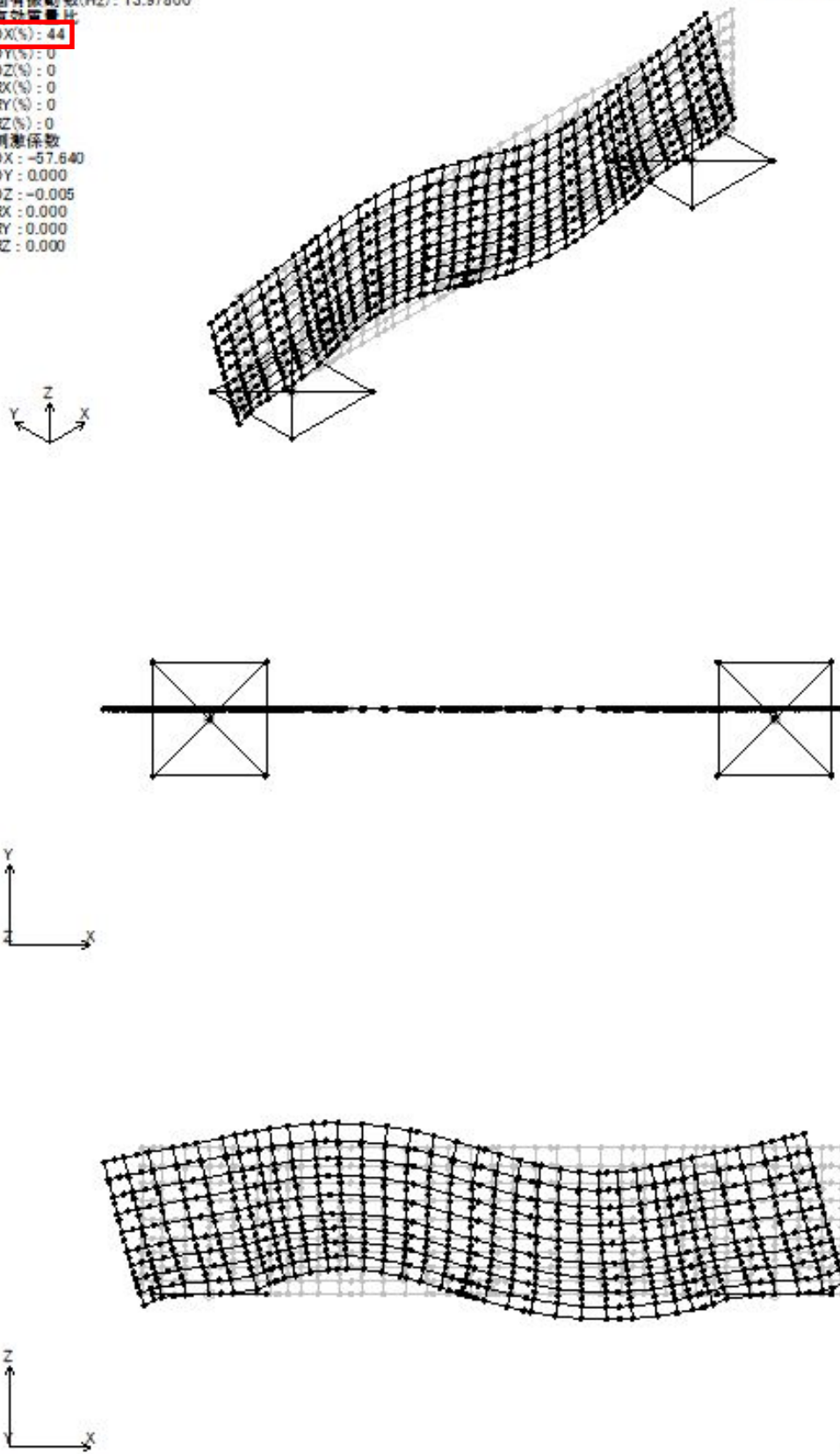
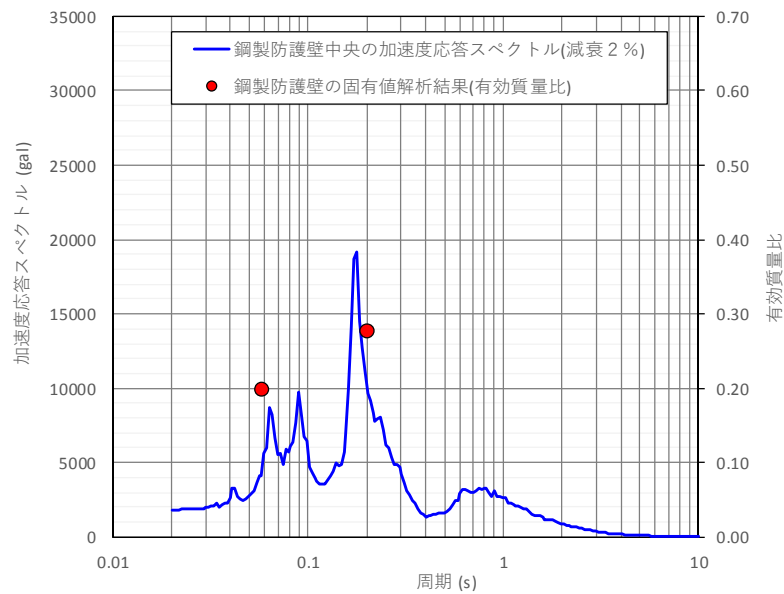


図 17 有効質量比最大ピーク時の鋼製防護壁のモード図(堤軸方向)

図 18 に Y 方向(堤軸直交方向)の鋼製防護壁中央の加速度応答スペクトルと鋼製防護壁の固有値解析により得られた固有周期及び有効質量比の比較図を示す。同図から、加速度応答スペクトルの最大ピークを示す周期(0.178s)と有効質量比が最大ピークを示す周期(0.201s)がほぼ一致していることが分かる。また、加速度応答スペクトルの 3 番目のピークを示す周期(0.064s)と有効質量比の 2 番目のピークを示す周期(0.058s)が対応していると考えられる。

以上のことから、鋼製防護壁中央の堤軸直交方向の加速度応答スペクトルのピークは、概ね固有値解析による有効質量比のピークに対応している。

なお、有効質量比最大ピーク時の鋼製防護壁のモード図を図 19 に示す。



ピーク	加速度応答スペクトル		有効質量比(固有値解析)	
	周期 (s)	スペクトル (gal)	周期 (s)	有効質量比
最大ピーク	0.178	19157	0.201	0.28
2 番目のピーク	0.090	9759	0.058	0.20
3 番目のピーク	0.064	8721		

図 18 鋼製防護壁の加速度応答スペクトルと固有値解析結果の比較(堤軸直交方向)

固有周期(s): 0.20111
 固有振動数(Hz): 4.97230
 有効質量比
 DX(%): 0
 DY(%): 28
 DZ(%): 0
 RX(%): 0
 RY(%): 0
 RZ(%): 0
 制振係数
 DX: 0.000
 DY: 45.660
 DZ: -0.011
 RX: 0.000
 RY: 0.000
 RZ: 0.000

No.1:固有値解析 MODE No.1

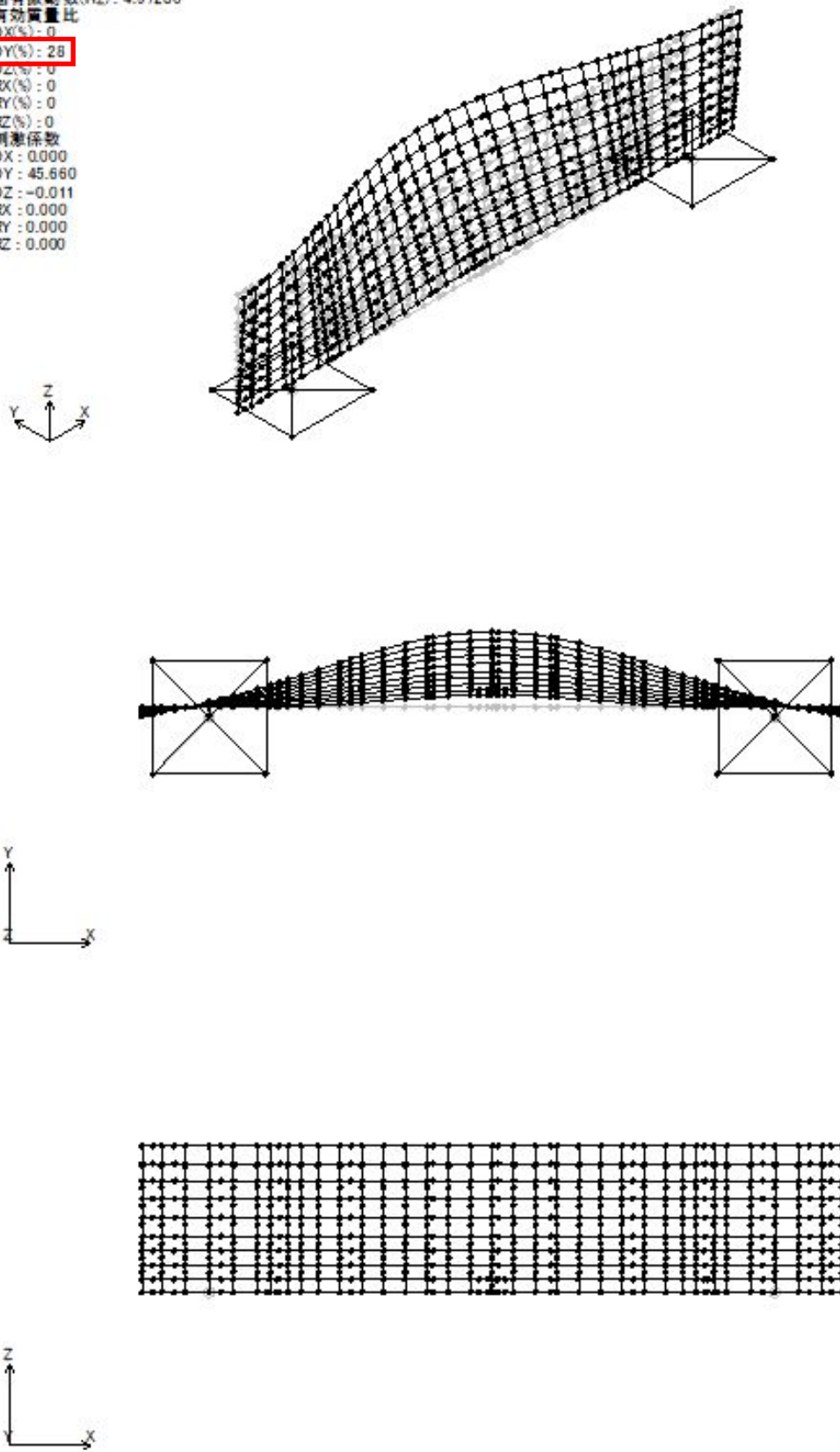
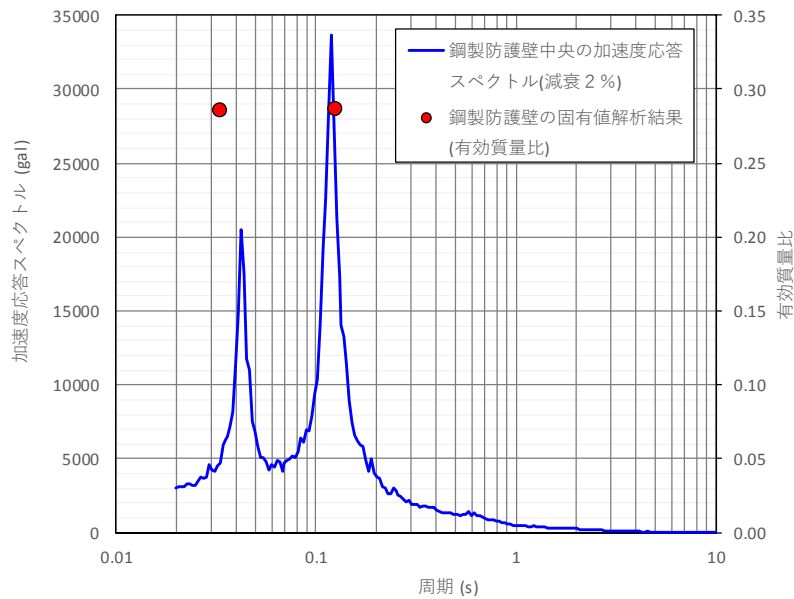


図 19 有効質量比最大ピーク時の鋼製防護壁のモード図(堤軸直交方向)

図 20 に Z 方向(鉛直方向)の鋼製防護壁中央の加速度応答スペクトルと鋼製防護壁の固有値解析により得られた固有周期及び有効質量比の比較図を示す。同図から、加速度応答スペクトルの最大ピークを示す周期(0.119s)と有効質量比が最大ピークを示す周期(0.124s)がほぼ一致していることが分かる。また、加速度応答スペクトルの 2 番目のピークを示す周期(0.042s)と有効質量比の 2 番目のピークを示す周期(0.033s)が対応していると考えられる。

以上のことから、鋼製防護壁中央の鉛直方向の加速度応答スペクトルのピークは、概ね固有値解析による有効質量比のピークに対応している。

なお、有効質量比最大ピーク時の鋼製防護壁のモード図を図 21 に示す。



ピーク	加速度応答スペクトル		有効質量比(固有値解析)	
	周期 (s)	スペクトル (gal)	周期 (s)	有効質量比
最大ピーク	0.119	33639	0.124	0.29
2 番目のピーク	0.042	20518	0.033	0.29

図 20 鋼製防護壁の加速度応答スペクトルと固有値解析結果の比較(鉛直方向)

固有周期(s): 0.12445
 固有振動数(Hz): 8.03540
 有効質量比
 DX(%): 0
 DY(%): 0
 DZ(%): 29
 刺激係数
 DX: -0.003
 DY: -0.001
 DZ: 46.460
 RX: 0.000
 RY: 0.000
 RZ: 0.000

No.1:固有値解析 MODE No.2

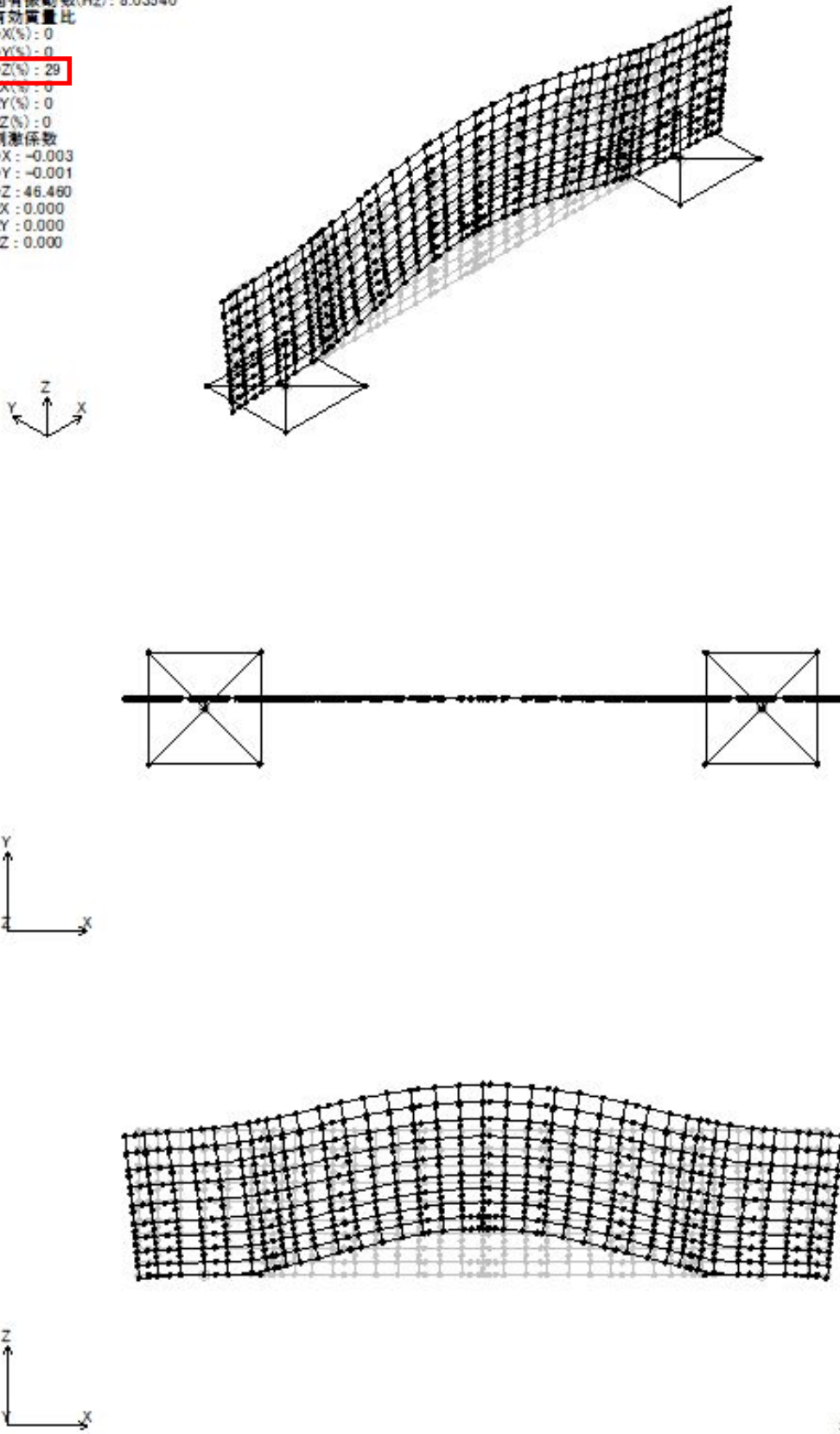


図 21 有効質量比最大ピーク時の鋼製防護壁のモード図(鉛直方向)

6.1.3.5 止水機構（1次止水機構）の実証試験結果及び3次元動的解析との検証について

1. 目的

止水機構の地震時及び余震+津波時の追従性を確認するため、実規模大の試験装置を用いた試験（以下「実証試験」という。）を行い、止水板の挙動を確認することにより、変位追従性、水密ゴムの健全性を確認する。本件は、実証試験の試験結果及び3次元動的解析との検証結果を示す。

2. 実証試験ケースと結果

表1に本震時、表2に余震時の実証試験のケースと三次元動的解析のケースを示す。

表1 本震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
①3方向 (X方向(堤軸)包絡波)	1G	3G (X包絡波)	1G	○	○	3方向同時 (Y方向にX方向の地震動を入力。方向反転)
②3方向 (Y方向(堤軸直角)包絡波)	1G	3G (Y包絡波)	1G	○	○	3方向同時
③鉛直 (鋼製防護壁包絡波)	—	—	1G	○	—	鉛直単独
④鉛直 (取水路側包絡波)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独 (図8に実証試験解析結果)
⑤基準地震動 (S_s) (S_s -D1)	—			—	○	3方向同時
⑥基準地震動 (S_s)	—			—	○	3方向同時

○：解析実施ケース

表2 余震時の実証試験ケースと三次元動的解析のケース

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		備考
	X	Y	Z	実証試験	実機	
①3方向 (Y方向(堤軸直交)包絡波)	1G	2G (Y包絡波)	1G	○	○	3方向同時
②鉛直 (鋼製防護壁波形入力)	—	—	1G	—	—	鉛直単独
③鉛直 (取水路側波形入力)	—	—	波形 入力	○	○	鉛直単独
④基準地震動 (S_d) (S_d -D1)	—			—	○	3方向同時

○：解析実施ケース

3. 実証試験の試験結果

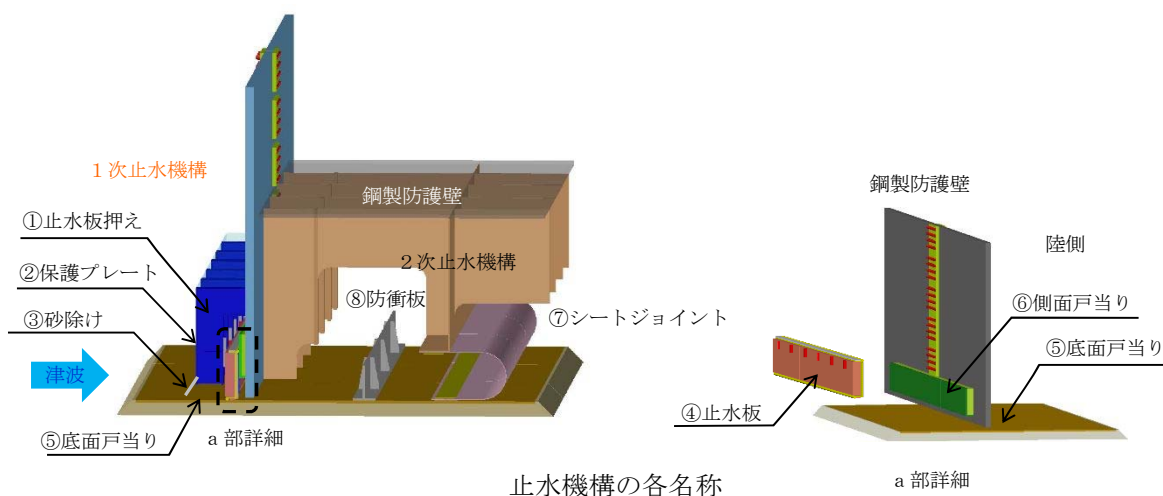
実証試験では以下の項目について判定を行い、「止水板の地震時の追従性」、「水密ゴムの健全性」及び「1次止水機構の構成部品の健全性」について確認し、止水機構全体に影響がないことを確認した。表3に実証試験の確認項目と試験結果を示す。

特段の不具合もなく、止水板の追従性、水密ゴムの健全性及び1次止水機構構成部材の健全性に関し、想定通りの結果を得ることができた。また、止水板の跳ね上がり量は小さく、止水性に問題ないことを確認できた。

表3 実証試験の確認項目と試験結果

機能目標	判定基準	試験結果
止水板の地震時の追従性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 止水板の動作に異常がなく、止水板としての機能が保持されていること。(浮き上がり、止水板の破損・損傷) ◆ 止水板の浮き上がり量* 3mm以下の浮き上がりであれば水密ゴムは底面戸当りと接触状態 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 止水板の浮上り固着、止水板の破損・損傷の異常は認められなかった。 ◆ 約1.94mm(5月9日) / 約2.61mm(5月15日) (加振ケース: 3方向加振時)
水密ゴムの健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 水密ゴムの動作に異常がなく機能が保持されていること。(噛み込み、摺動による亀裂、破損、摩耗) ◆ 水密ゴムのライニングに異常がなく機能が保持されていること。(ライニングの破損、めくれ) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 水密ゴムの噛み込み、摺動による亀裂、破損、摩耗は認められなかった。 ◆ ライニングの破損、めくれは認められなかった。
1次止水機構の構成部品の健全性確認	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 装置全体に異常がなく健全であること。(試験装置、部材の変形、損傷、他) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 試験装置、部材の変形、損傷等は認められなかった。

※: 別途、止水機構の損傷・保守を想定し、1次止水機構及び2次止水機構がない場合の敷地内浸水量を評価しており、止水板の瞬間的な跳ね上がりによる漏えいは無視できる程度であり安全上の問題はない。



4. 実証試験結果【本震時】

(1) 振動試験結果の波形

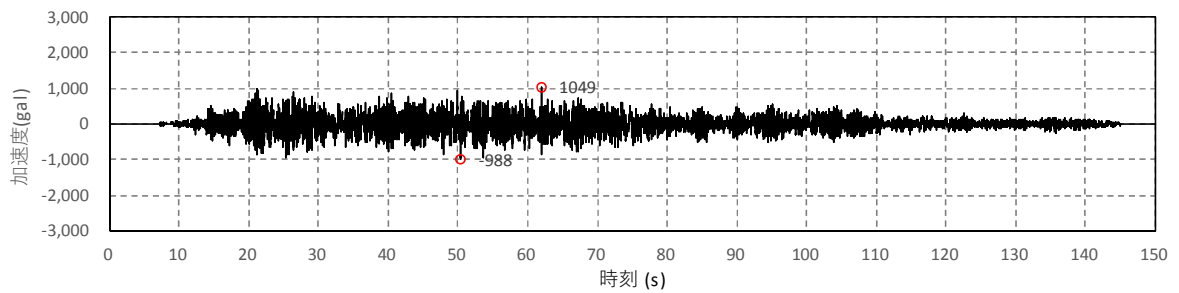
① 3方向（X方向（堤軸）包絡波）

a. 水平（Y方向）加速度最大（1回目）

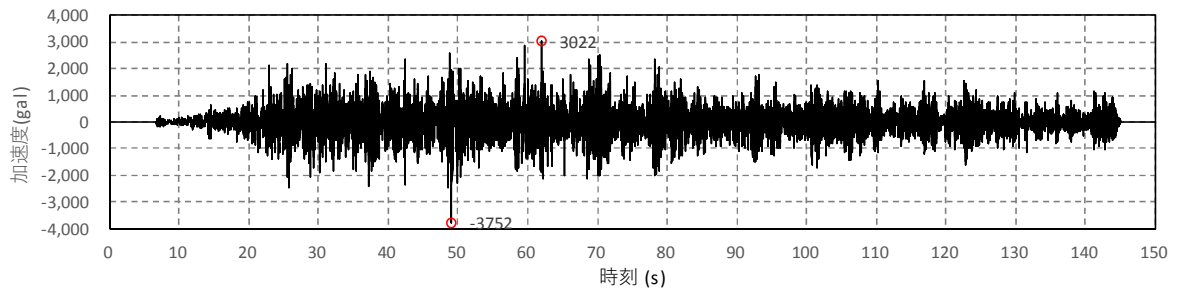
【振動台上応答加速度変位】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	1049	-3752	-1089

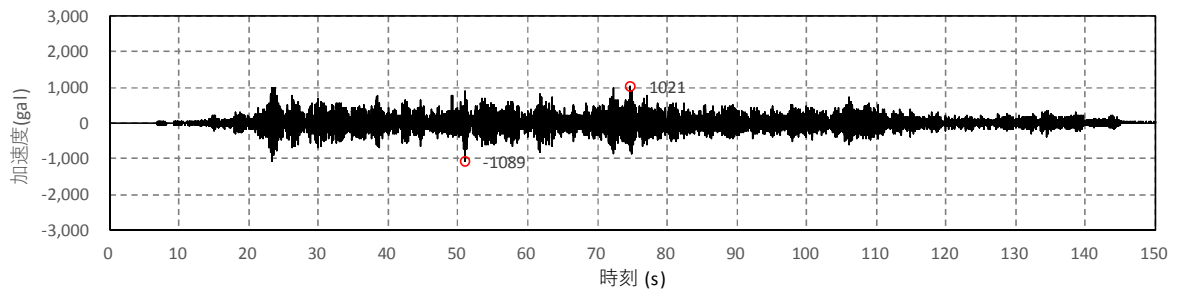
X方向



Y方向



Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

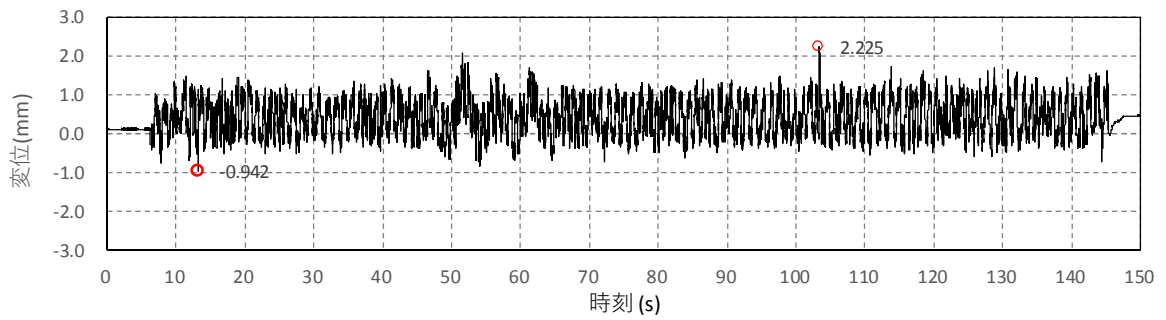


図-a DV-1 時刻歴波形

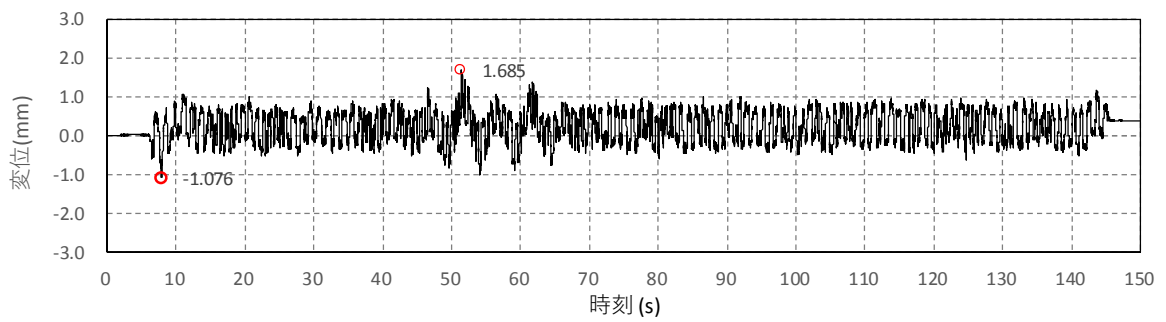


図-b DV-2 時刻歴波形

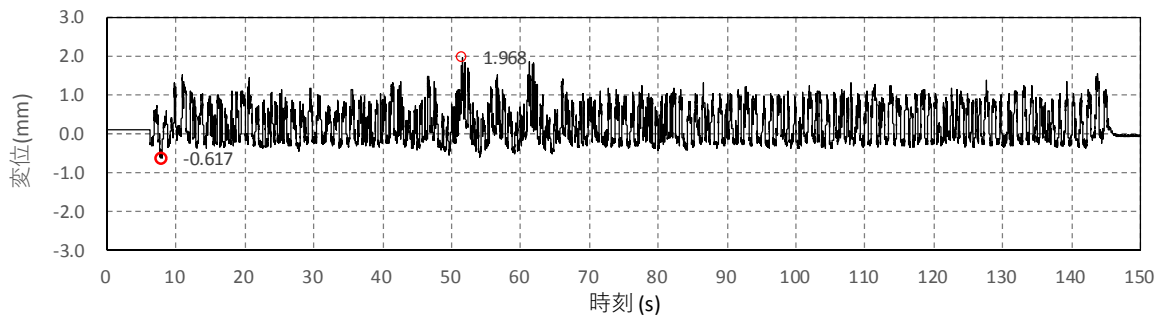


図-c DV-3 時刻歴波形

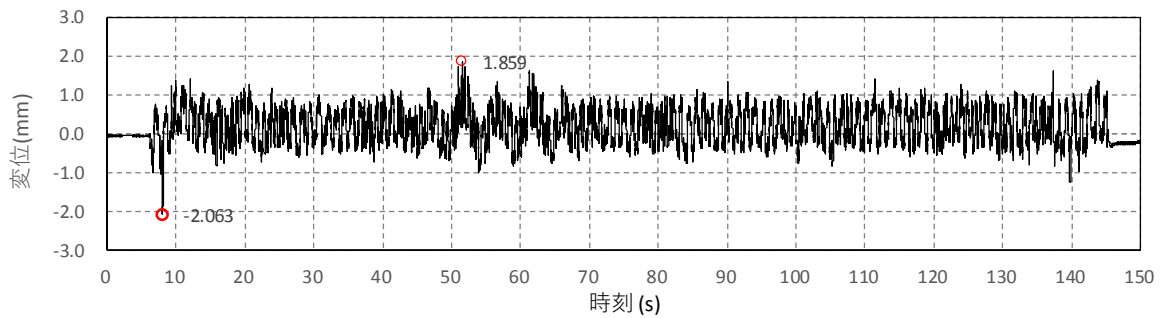


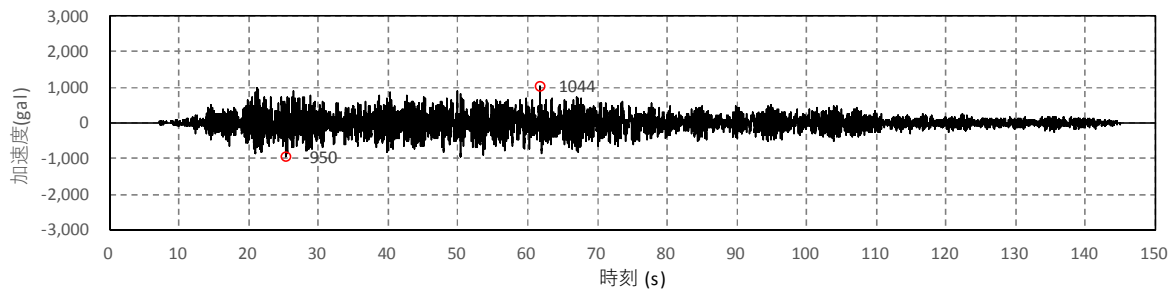
図-d DV-4 時刻歴波形

b. 水平（Y方向）加速度最大（2回目）

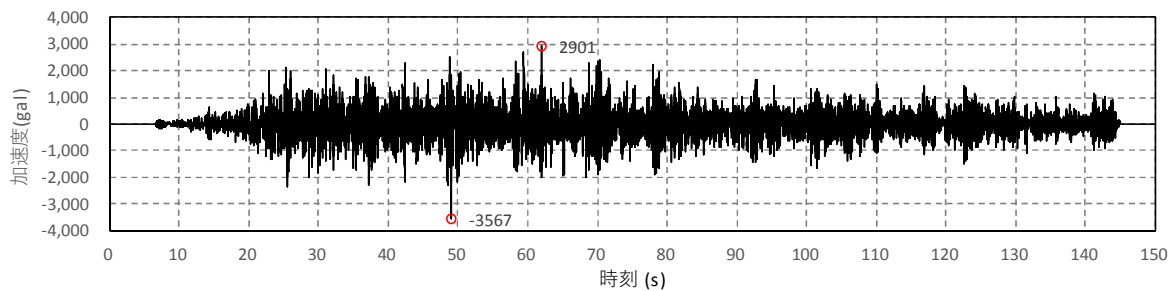
【振動台上応答加速度波形】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	1044	-3567	-1076

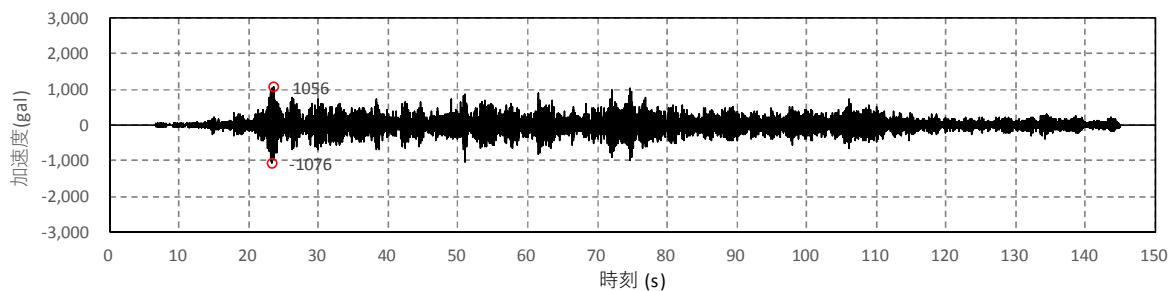
X方向



Y方向



Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

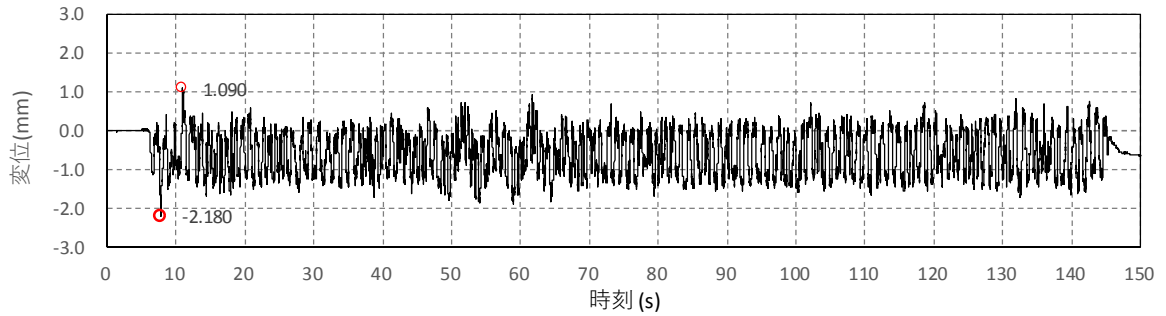


図-a DV-1 時刻歴波形

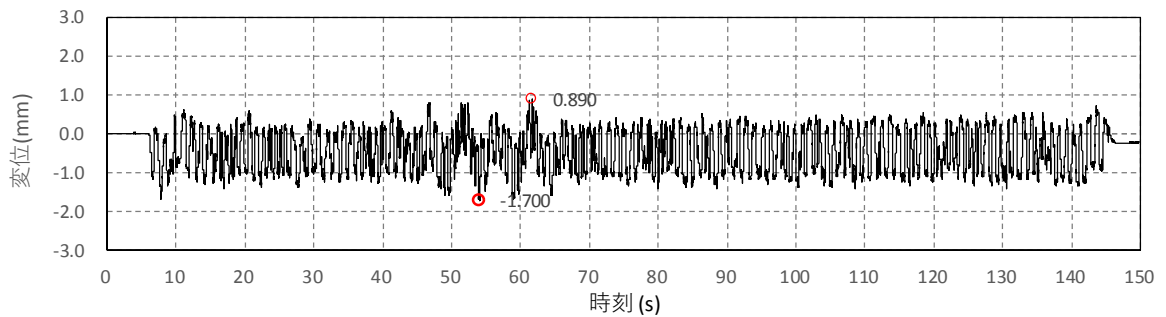


図-b DV-2 時刻歴波形

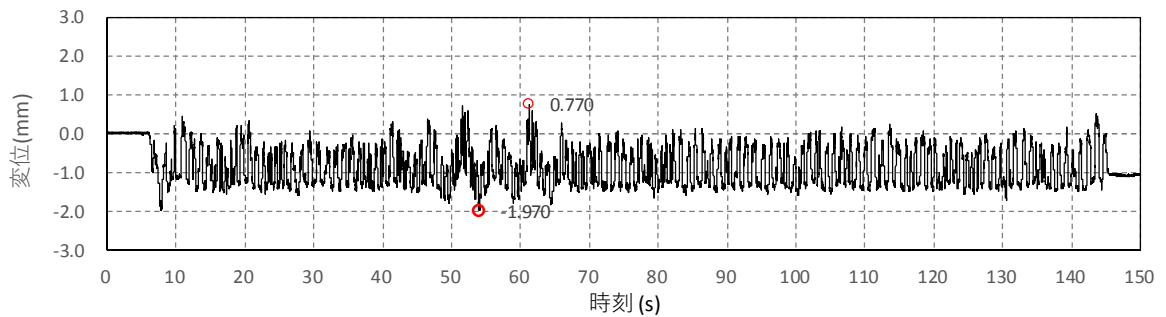


図-c DV-3 時刻歴波形

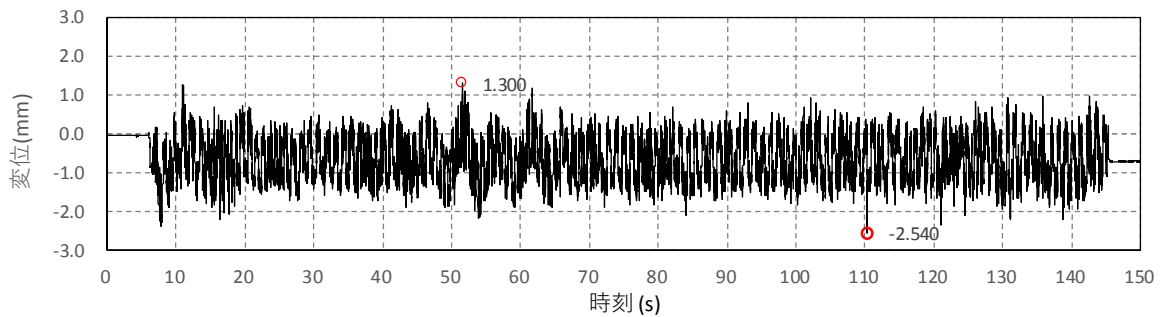


図-d DV-4 時刻歴波形

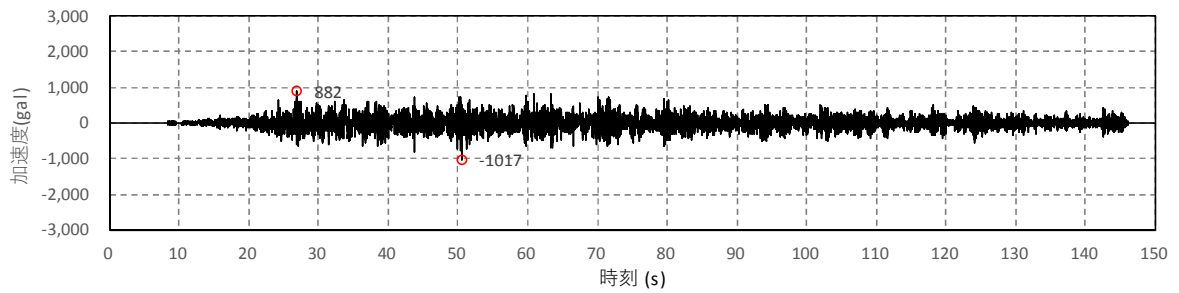
② 3方向（Y方向（堤軸直角）包絡波）

a. 水平（Y方向）加速度最大（1回目）

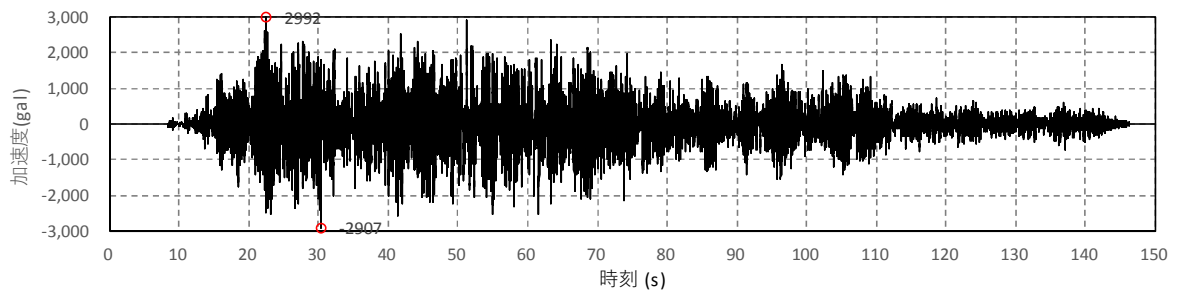
【振動台上応答加速度波形】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-1017	2992	-1109

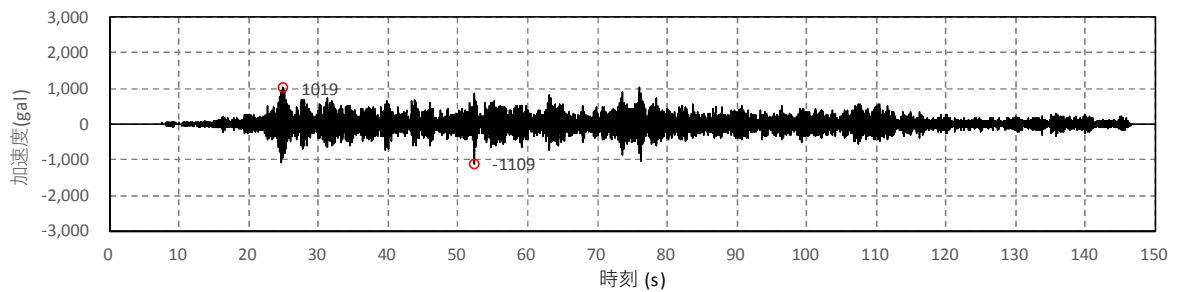
X方向



Y方向



Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

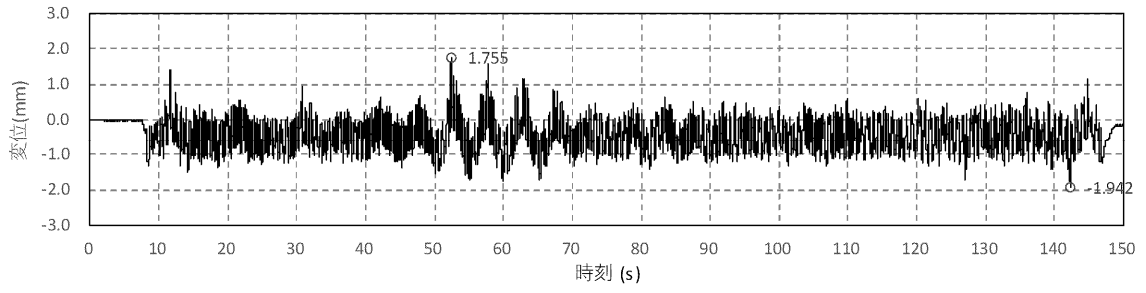


図-a DV-1 時刻歴波形

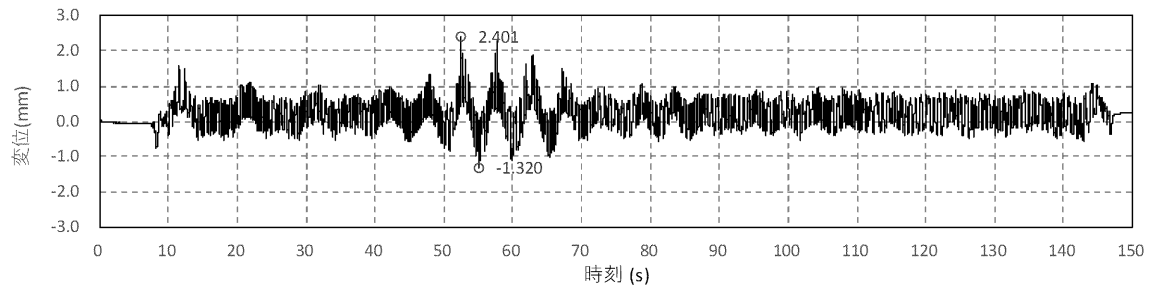


図-b DV-2 時刻歴波形

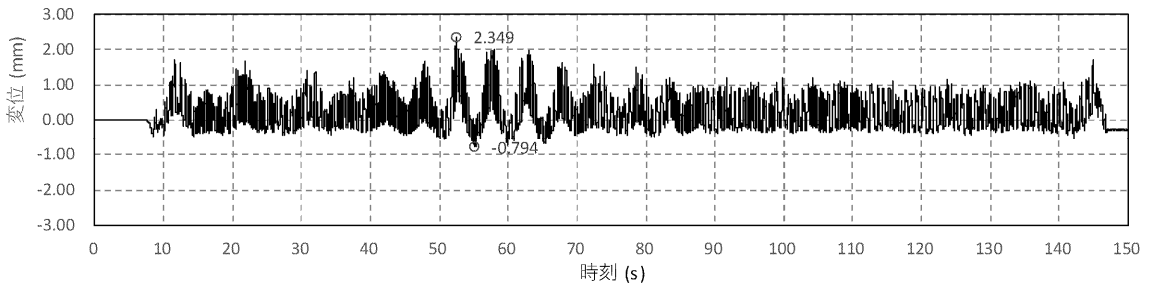


図-c DV-3 時刻歴波形

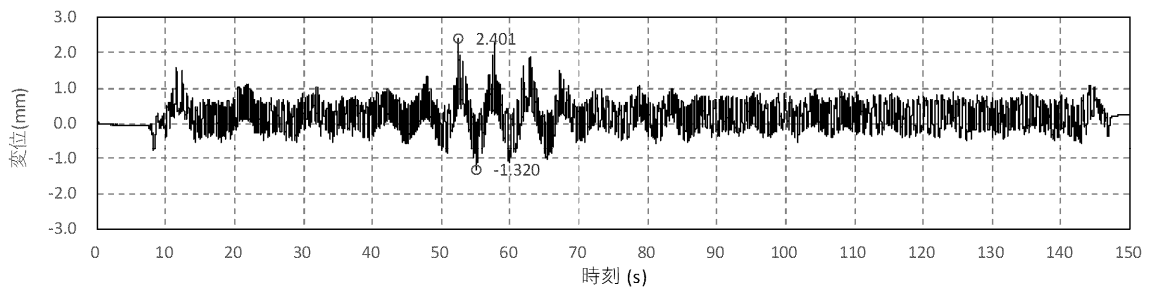


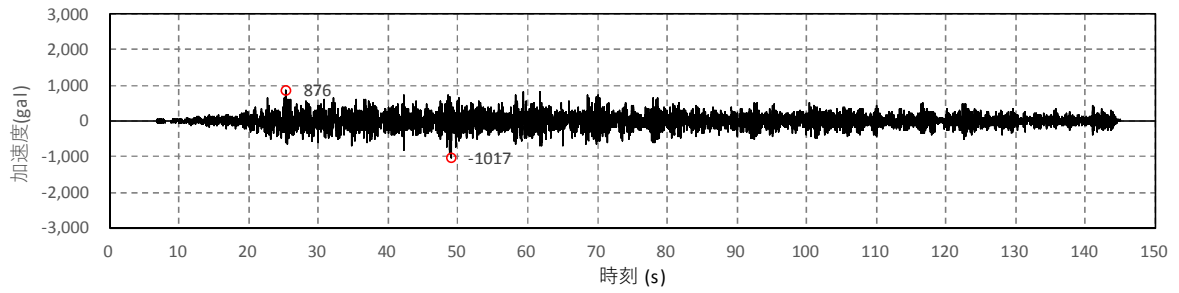
図-d DV-4 時刻歴波形

b. 水平（Y方向）加速度最大（2回目）

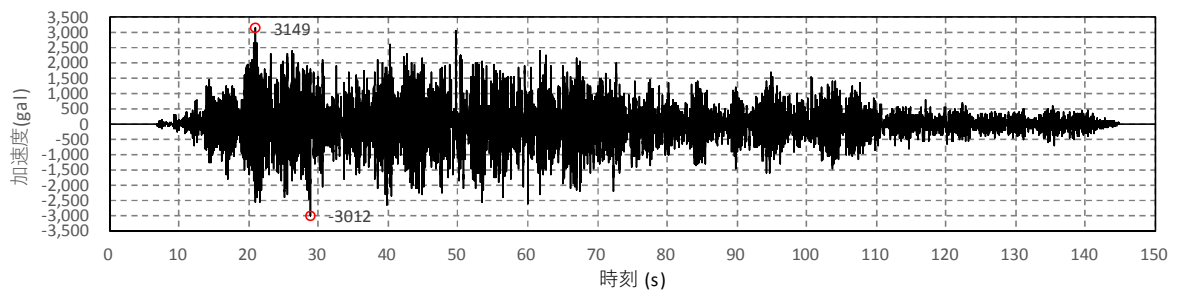
【振動台上応答加速度波形】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-1017	3149	-1095

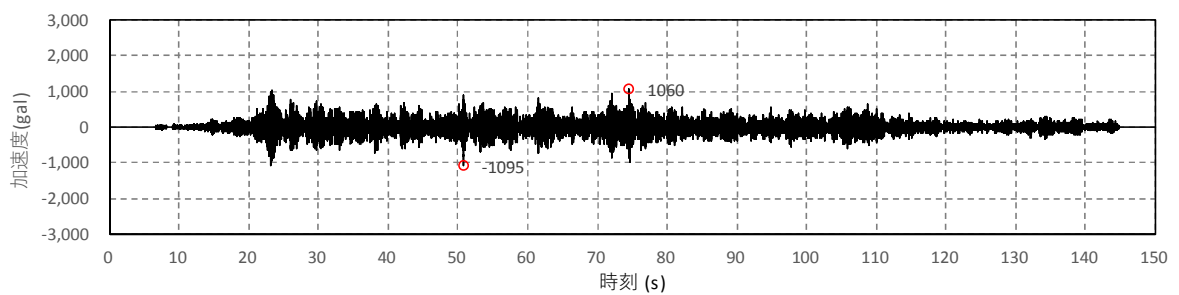
X方向



Y方向



Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

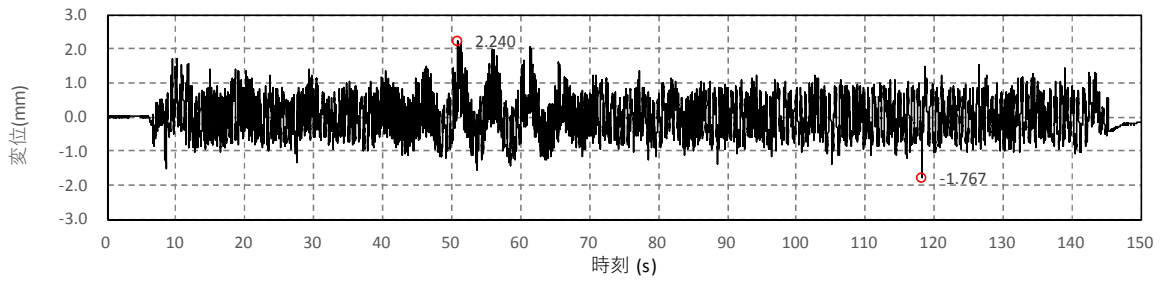


図-a DV-1 時刻歴波形

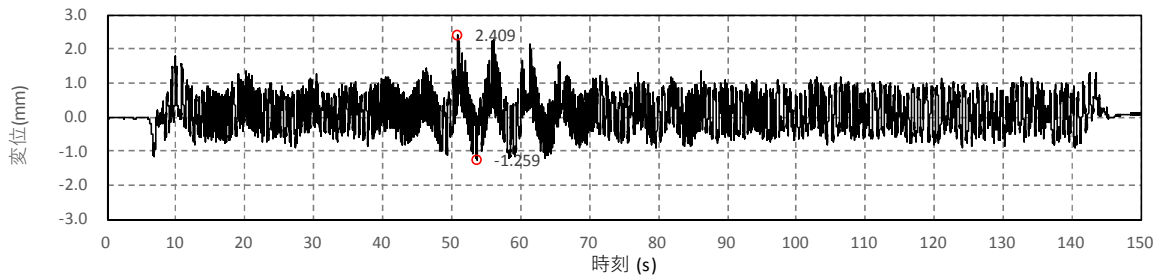


図-b DV-2 時刻歴波形

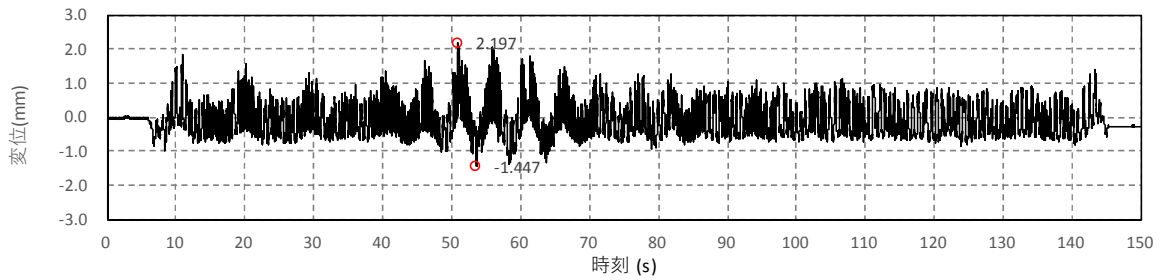


図-c DV-3 時刻歴波形

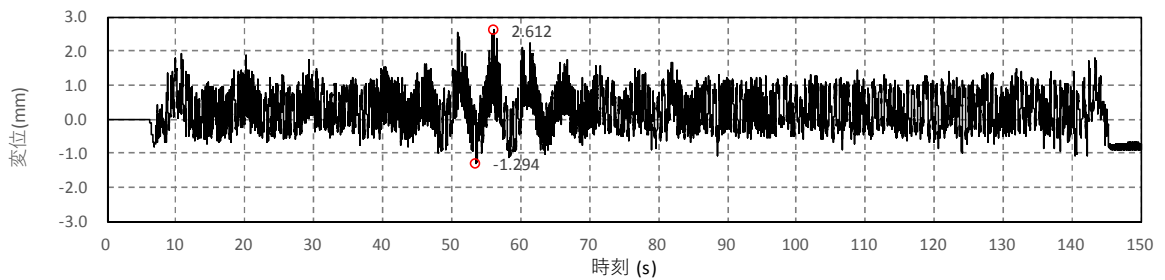


図-d DV-4 時刻歴波形

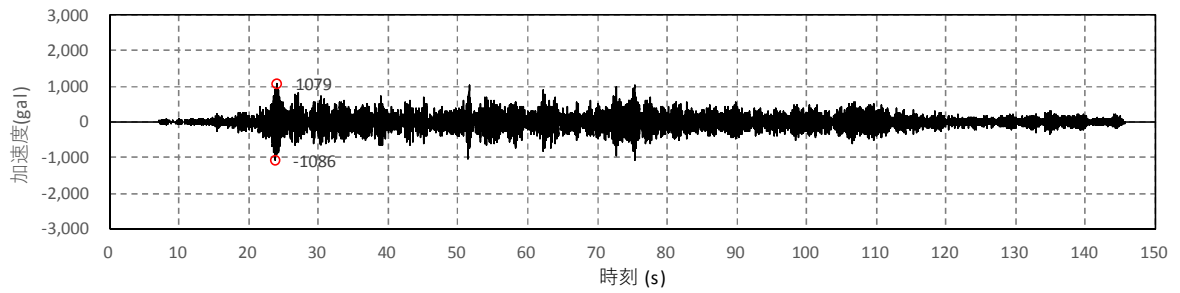
③鉛直（鋼製防護壁包絡波）

a. 鉛直最大加速度（1回目）

【振動台上応答加速度波形】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-257	79	-1086

Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

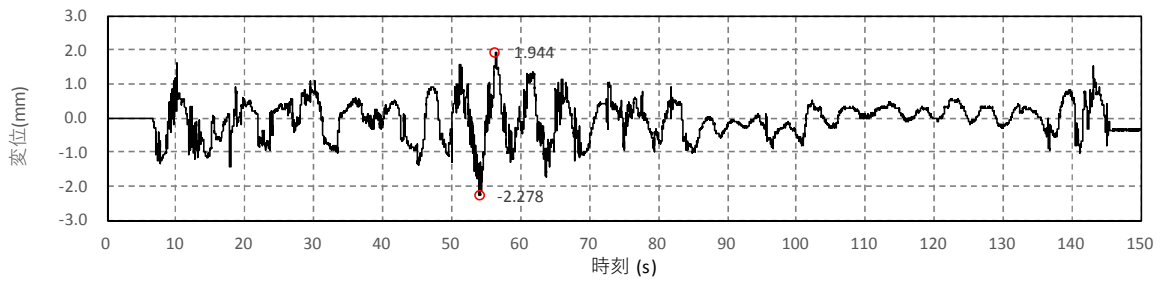


図-a DV-1 時刻歴波形

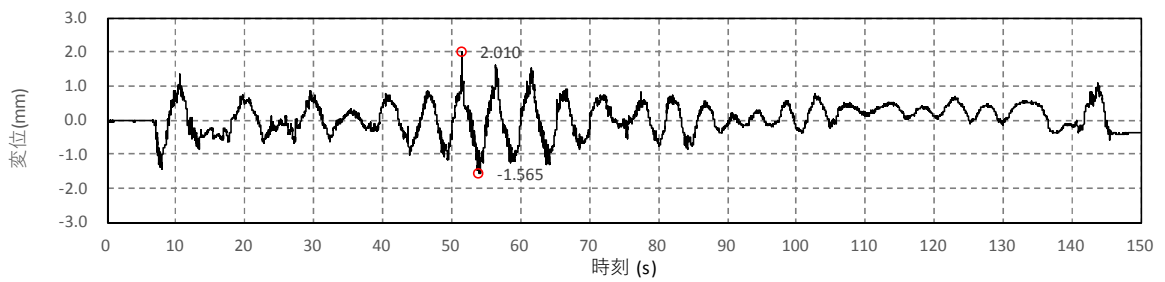


図-b DV-2 時刻歴波形

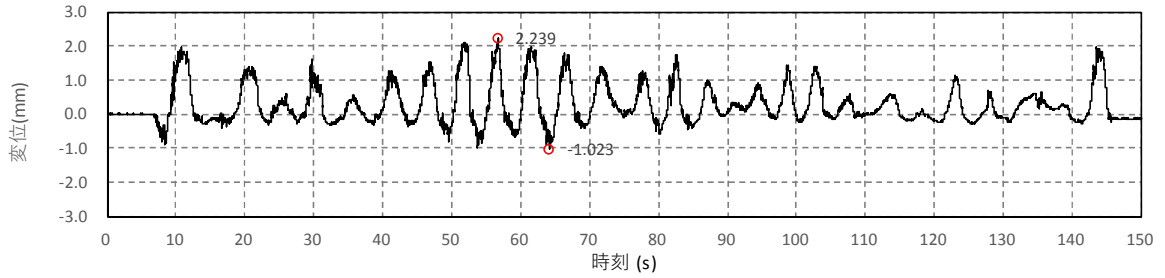


図-c DV-3 時刻歴波形

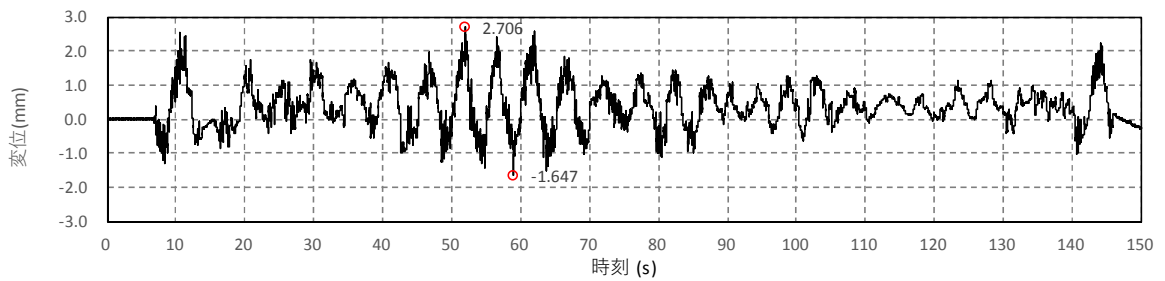


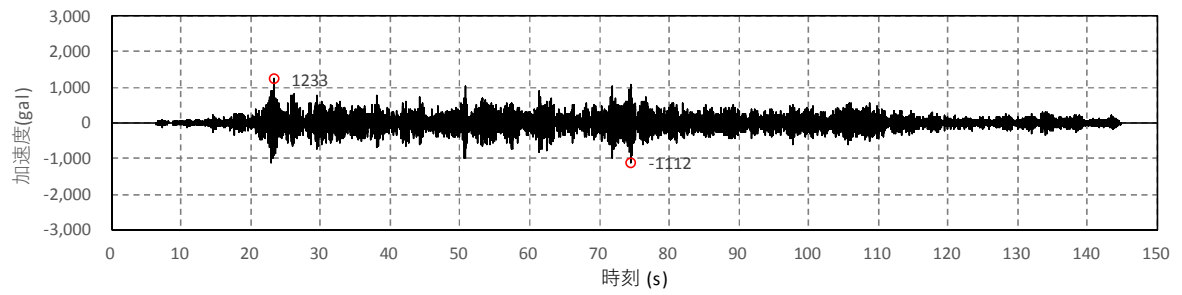
図-d DV-4 時刻歴波形

b. 鉛直最大加速度（2回目）

【振動台上応答加速度波形】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-251	-80	1233

Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

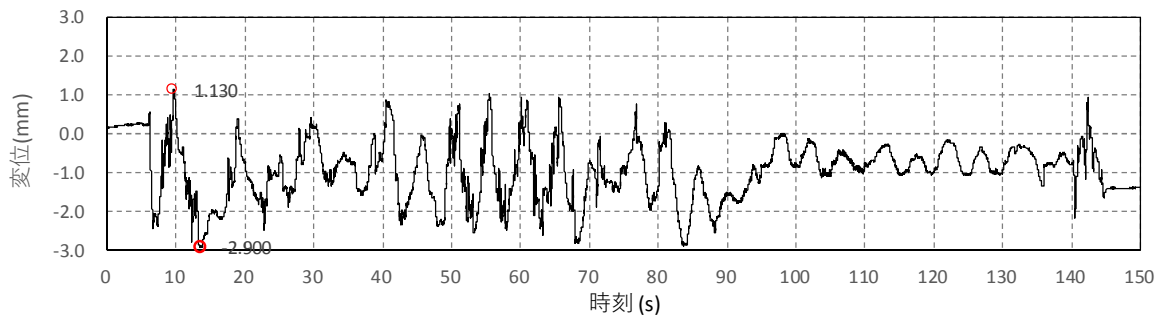


図-a DV-1 時刻歴波形

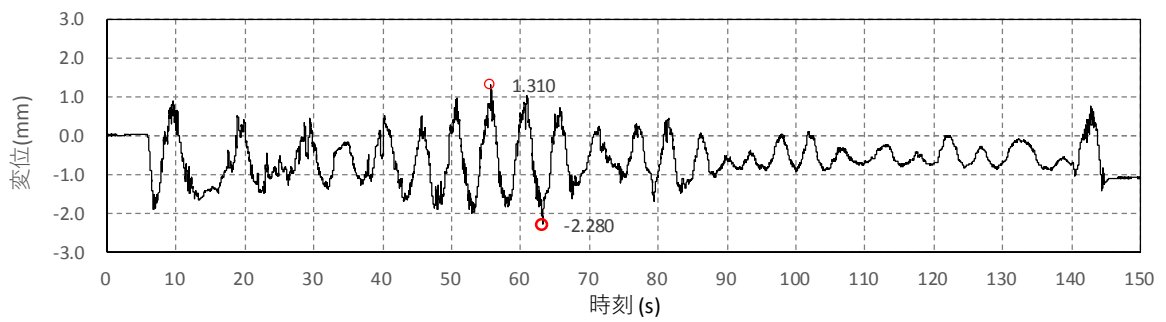


図-b DV-2 時刻歴波形

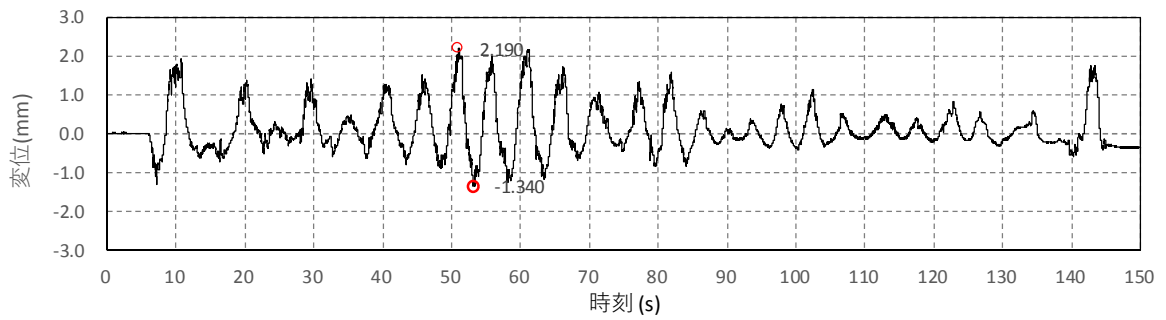


図-c DV-3 時刻歴波形

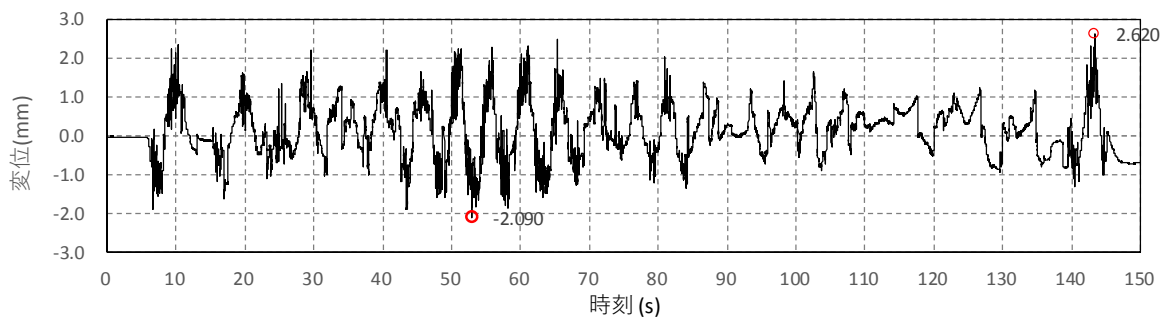


図-d DV-4 時刻歴波形

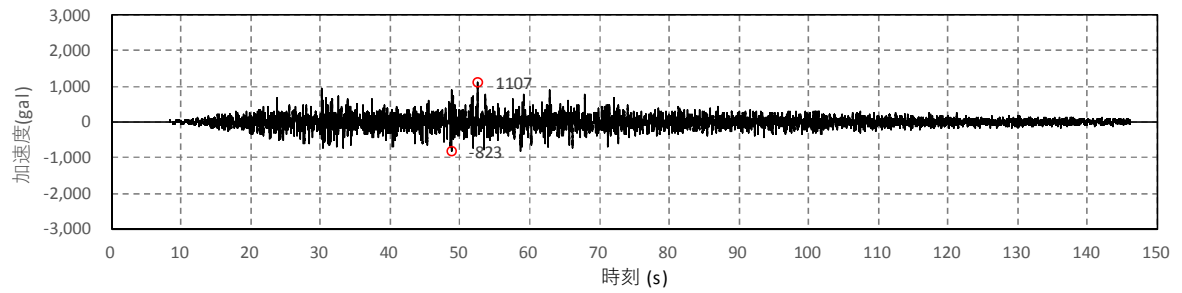
④鉛直（取水路包絡波）

a. 鉛直最大加速度（1回目）

【振動台上応答加速度波形】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	60	101	1107

Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

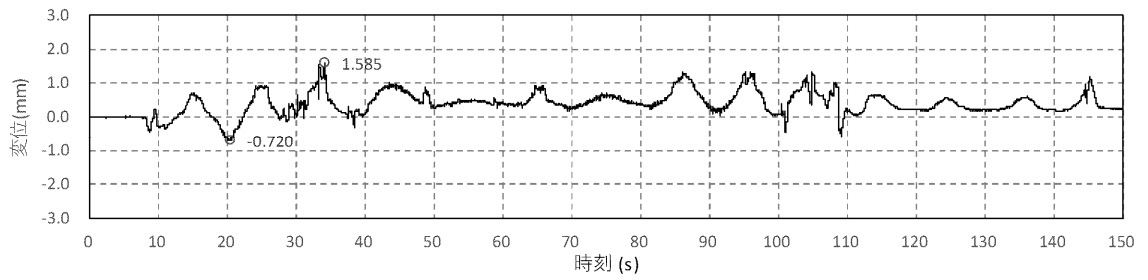


図-a DV-1 時刻歴波形

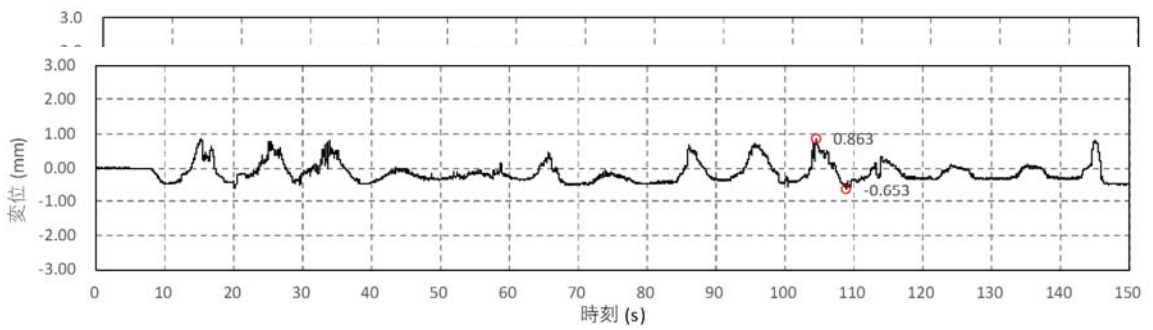


図-b DV-2 時刻歴波形

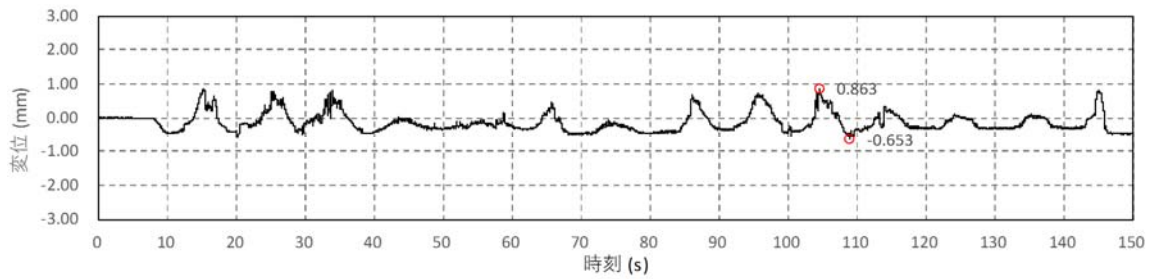


図-c DV-3 時刻歴波形

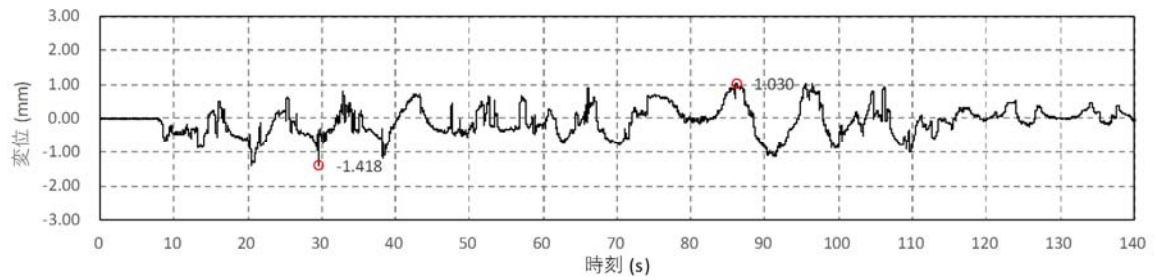


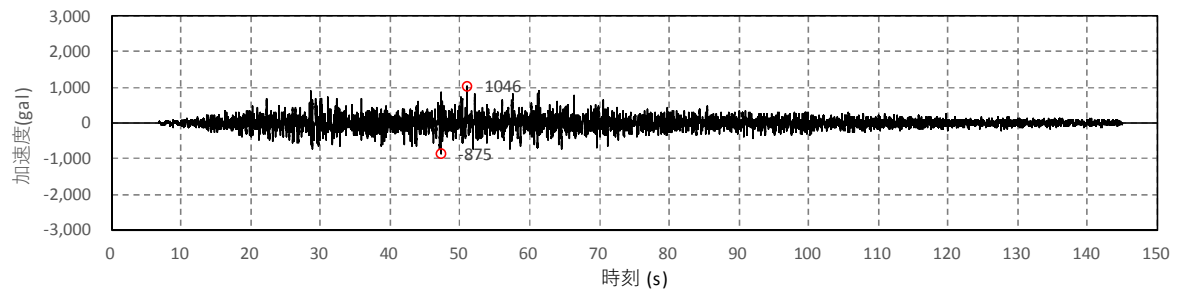
図-d DV-4 時刻歴波形

b. 鉛直最大加速度（2回目）

【振動台上応答加速度波形】

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-54	65	1046

Z方向



【鉛直変位時刻歴波形】

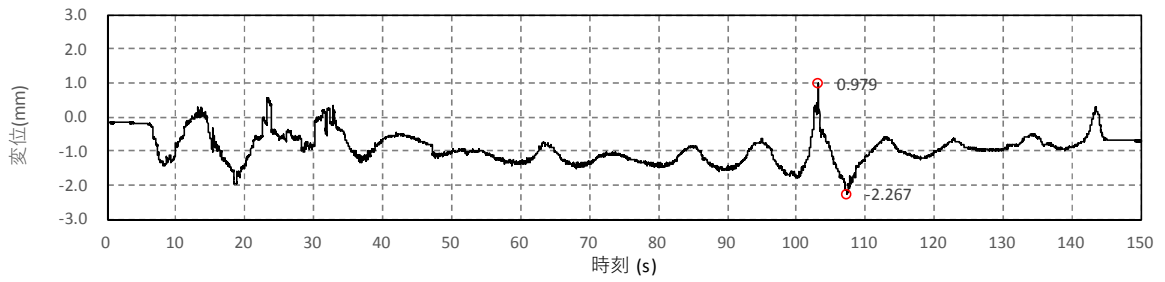


図-a DV-1 時刻歴波形

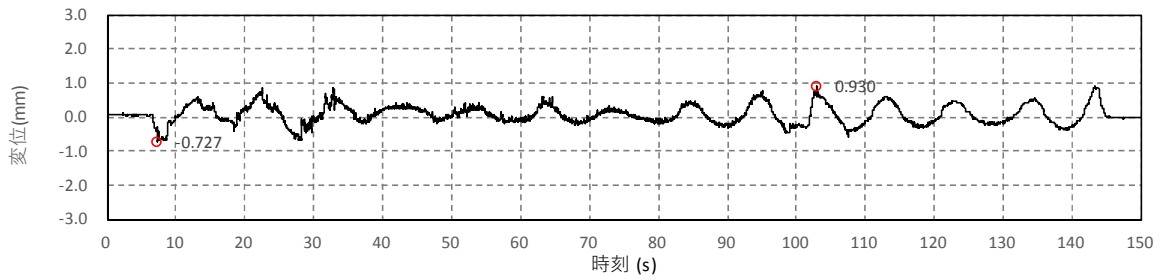


図-b DV-2 時刻歴波形

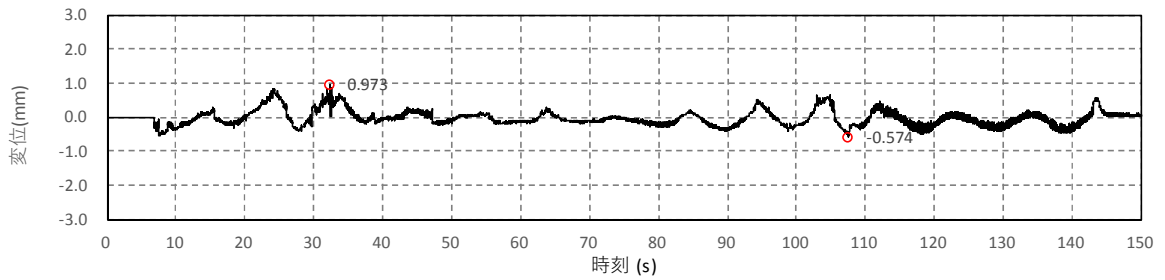


図-c DV-3 時刻歴波形

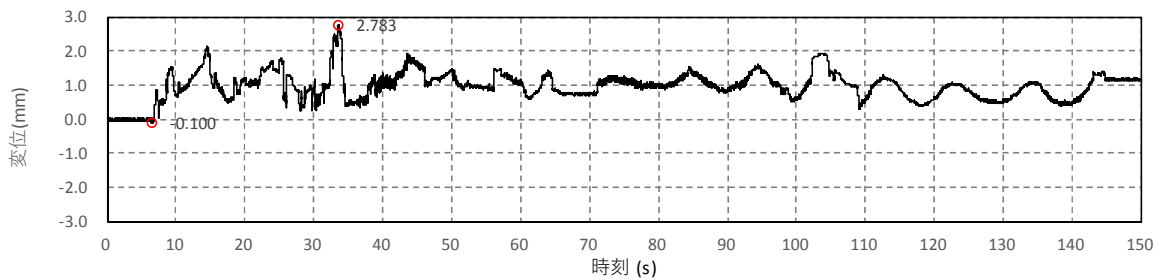


図-d DV-4 時刻歴波形

(2) 水密ゴムの外観状況

a. 各部位の水密ゴムの外観状況

摺動試験 2 回目の本震後の水密ゴム等の状況

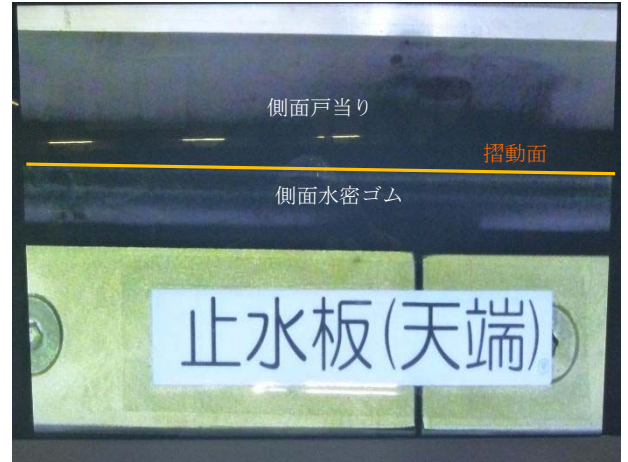
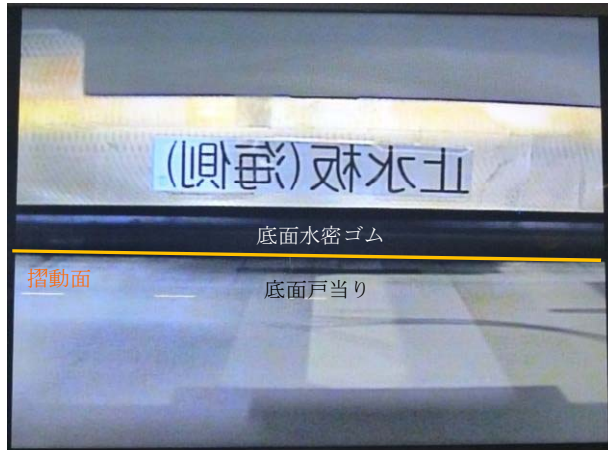


写真1 底面水密ゴムと底面戸当り
(海側より)

写真2 側面水密ゴムと側面戸当り
(海側より)

加振中における底面水密ゴム及び側面水密ゴムの噛み込みは画像から認められなかった。

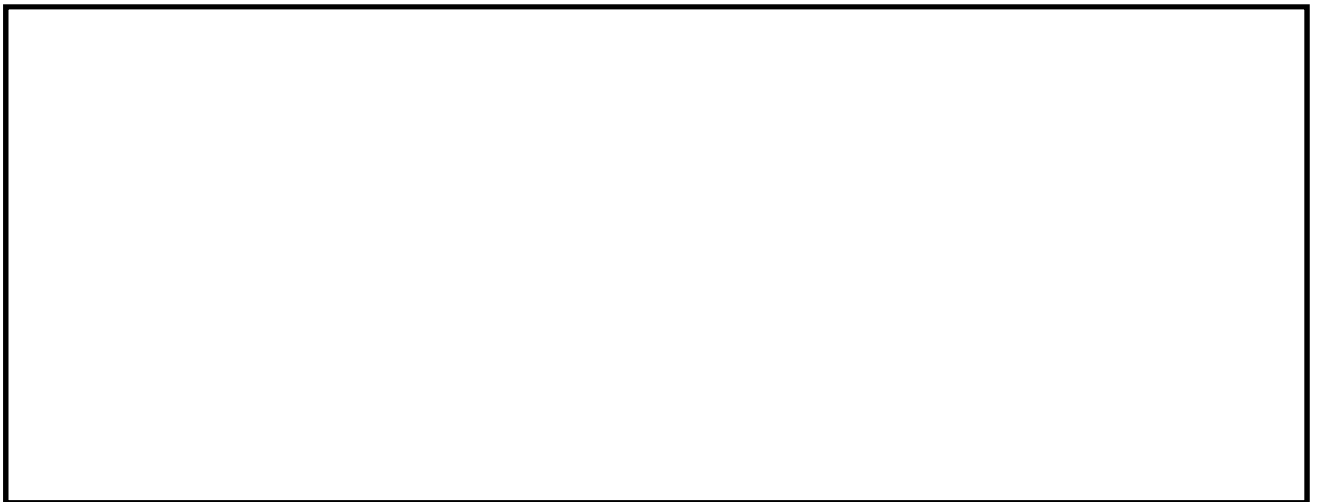


写真3 底面水密ゴムと底面戸当り
(陸側より)

写真4 止水板接続ゴム
(陸側より)

加振中における底面水密ゴム及び止水板接続ゴムの状況に画像から異常は認められなかった。



(上方側移に移動)



(中間位置)



(下方側に移動)

写真4 加振時の止水板の挙動

(3) 確認結果【本震時】

実証試験の本震時の結果、全てのケースにおいて止水板の追従性は良好であった。水密ゴムの噛み込みや破損等についても見られなかった。表4に実証試験結果を示す。水密ゴムの浮き上がり量については表5に示す。実証試験モデルの場合、実態に近い挙動は止水板接続部であることから表6に止水板接続部として整理し、全てのケースで3mm以下(図1参照)であることを確認した。実証試験モデルと実機モデルの検証については、6.1.3.3に示す。

表4 実証試験結果(1回目/2回目)

		①3方向 (X方向(堤軸)包絡波)	②3方向 (Y方向(堤軸直角)包絡波)	③鉛直 (鋼製防護壁包絡波)	④鉛直 (取水路側包絡波)
止水板の地震時の追従性確認	◆止水板の動作に異常がなく、止水板としての機能が保持されていること。(浮き上がり、止水板の破損・損傷)	良好/良好	良好/良好	良好/良好	良好/良好
水密ゴムの健全性確認	◆水密ゴムの動作に異常がなく機能が保持されていること。 (噛み込み、摺動による亀裂、破損、摩耗) ◆水密ゴムのライニングに異常がなく機能が保持されていること。(ライニングの破損、めくれ) 写真5参照	良好/良好	良好/良好	良好/良好	良好/良好
1次止水機構の構成部品の健全性確認	◆装置全体に異常がなく健全であること。 (試験装置、部材の変形、損傷、他) 写真5参照	良好/良好	良好/良好	良好/良好	良好/良好

表5 止水板の浮き上がり量(最大値の整理(mm))



			①3方向 (X方向(堤軸)包絡波)	②3方向 (Y方向(堤軸直角)包絡波)	③鉛直 (鋼製防護壁包絡波)	④鉛直 (取水路側包絡波)
止水板の地震時の追従性確認	◆止水板の浮き上がり量3mm以下3mm以下の浮き上がりであれば水密ゴムは底面戸当りと接触状態(図1参照)	1回目	2.23 (DV-1)	2.55 (DV-4)	2.71 (DV-4)	1.59 (DV-1)
		2回目	1.30 (DV-4)	2.61 (DV-4)	2.62 (DV-4)	2.78 (DV-4)

鉛直変位の最大値は、止水板の端部(DV-1,4)が拘束されていないため浮き上がる傾向が認められた。

表6 止水板の浮き上がり量(止水板接続部(mm))

			①3方向 (X方向(堤軸)包絡波)	②3方向 (Y方向(堤軸直角)包絡波)	③鉛直 (鋼製防護壁包絡波)	④鉛直 (取水路側包絡波)
止水板の地震時の追従性確認	◆止水板の浮き上がり量3mm以下3mm以下の浮き上がりであれば水密ゴムは底面戸当りと接触状態(図1参照)	1回目	1.69(DV-2) 1.97(DV-3)	2.40(DV-2) 2.35(DV-3)	2.01(DV-2) 2.24(DV-3)	0.96(DV-2) 0.86(DV-3)
		2回目	0.89(DV-2) 0.77(DV-3)	2.41(DV-2) 2.20(DV-3)	1.31(DV-2) 2.19(DV-3)	0.93(DV-2) 0.97(DV-3)

実態に近い止水板接続部については、数値に大きなばらつきもなく全ての状態で3mm以下であった。



底面水密ゴム



底面水密ゴム



側面水密ゴム



止水板接続ゴム

【1回目加振試験後（1回目加振試験供試材）】

- ◆底面・側面止水ゴムの亀裂・破損・摩耗，水密ゴムライニングの破損，めくれ等はなかった。
- ◆止水板接続の破損，底面・側面水密ゴムとの接続部の破損等は認められなかった。



底面水密ゴム



底面水密ゴム



底面水密ゴム



止水板接続ゴム

【2回目加振試験後（2回目加振試験供試材）】

- ◆底面・側面止水ゴムの亀裂・破損・摩耗，水密ゴムライニングの破損，めくれ等はなかった。
- ◆止水板接続の破損，底面・側面水密ゴムとの接続部の破損等は認められなかった。

写真5 (1/2) 加振試験後における水密ゴムの点検結果



底面戸当り



側面戸当り



止水板コマ

【2回目加振試験後（1回目及び2回目共通加振試験供試材）

- ◆底面・側面戸当り，止水板コマに摺動痕は認められるが，破損等の異常は認められなかった。
- ◆水密ゴム固定ボルトの緩み，脱落も認められなかった。

- ◆加振試験後に1次止水機構を取り外し，1次止水機構の構成部材の状態について確認した。底面戸当り，側面戸当り，止水板コマの点検結果を上記写真5に示す。
 - ①底面戸当り，側面戸当りに摺動痕が見られるものの，1次止水機構の機能を阻害するような破損等は認められなかった。
 - ②水密ゴムを固定する止水板コマの取り付けボルトの緩み，脱落等の異常は認められなかった。
- ◆以上より，1次止水機構の構成部材の地震時の健全性が保持できることが確認できた。今後，三次元動的解析等により，各主要部材に作用する応力等について評価を実施し，今回の実証試験結果と合わせて構造成立性について確認していく。

写真5 (2/2) 加振試験後における水密ゴムの点検結果

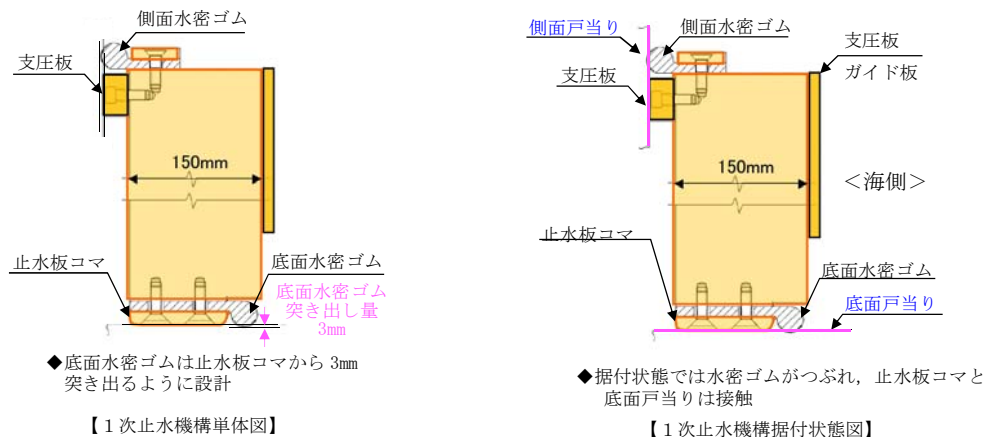


図1 底面，側面水密ゴムの単体及び据付け状況

(4) 実証試験結果と3次元動的解析(実証試験モデル)の検証について【本震時】

a. 実証試験及び三次元動的解析ケースの目的

実証試験は以下の4ケース(①~④)を実施した。各試験ケースの目的を示す。

検証ケースとして3方向加振試験の場合は、②の実証試験と三次元動的解析を実施し、鉛直方向については④の実証試験と三次元動的解析を実施する。表7に三次元動的解析及び実証試験ケースの目的を示す。

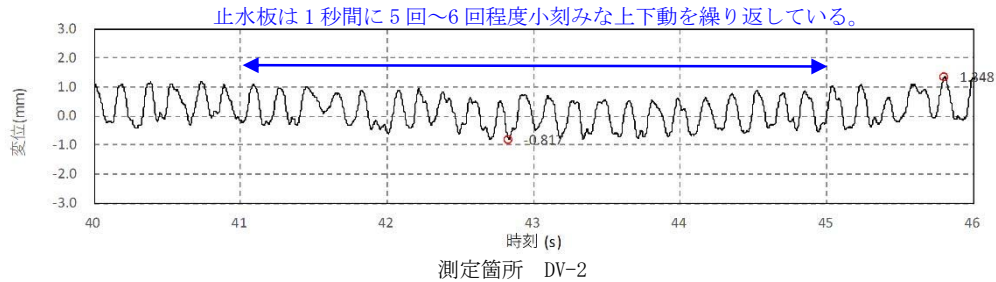
表7 実証試験及び三次元動的解析ケースの目的【本震時】

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		実証試験及び三次元動的解析ケースの目的
	X	Y	Z	実証試験	実機	
① 3方向 (X方向(堤軸) 包絡波)	1 G	3 G (X包絡 波)	1 G	○	○	【データ拡充】3方向データ ◆実証試験において、鋼製防護壁側の堤軸側の水平方向の包絡波を入力し止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。 ◆3次元動的解析における止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。
② 3方向 (Y方向(堤軸直 角)包絡波)	1 G	3 G (Y包絡 波)	1 G	○	○	【検証ケース】3方向データ(実機と同じ方向確認) ◆実証試験において鋼製防護壁側の堤軸直角側の水平方向の包絡波を入力し止水板の挙動を確認する。 ◆3次元動的解析については、実証試験と実証試験ケースの検証を行うと共に実機ケースモデルとの解析検証を行いモデルの妥当性についても確認する。
③ 鉛直 (鋼製防護壁包 絡波)	-	-	1 G	○	-	【データ拡充】鉛直方向データ ◆実証試験において鋼製防護壁側の鉛直方向の加速度(1G)を取水路側の鉛直方向に入力し、止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。 ◆3次元動的解析における止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。
④ 鉛直 (取水路側包絡 波)	-	-	波形 入力	○	○	【検証ケース】鉛直方向データ(実機と同じ方向確認) ◆実証試験において止水板の挙動は、鉛直方向からの慣性力が支配的と考えられることから本件をベースケースとした実証試験を実施し、鉛直からの変位量を計測する。実機と同じ方向で確認 ◆3次元動的解析については、実証試験と実証試験ケースの検証を行うと共に実機ケースモデルとの解析検証を行いモデルの妥当性についても確認する。

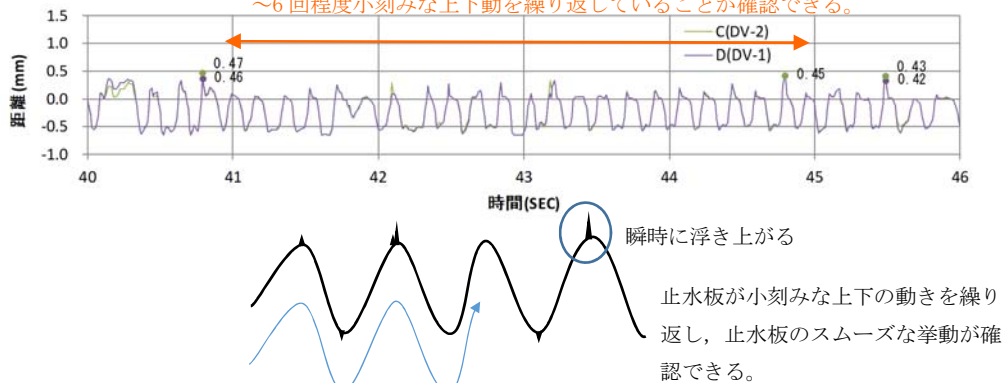
b. 実証試験と実証試験モデルとの検証 (② 3方向Y方向 (堤軸直角) 包絡波での検証)

止水板の挙動について、3方向同時加振時の検証ケースとして「② 3方向 (堤軸直角) Y方向包絡」について、実証試験で得られた鉛直変位の結果と実証試験モデルの解析結果から得られた検証結果を以下に示す。

【実証試験結果】



【3次元動的解析結果】 三次元動的解析も実証試験結果と同様に、止水板が1秒間に5回~6回程度小刻みな上下動を繰り返していることが確認できる。



止水板の鉛直変位の模式図 (3方向加振)

<検証結果>

◆ 3方向同時入力による「実証試験結果」、「実証試験装置モデルによる三次元動的解析結果」及び「実機設計モデルによる三次元動的解析結果」における止水板の鉛直変位量を比較した。

- ① 「実証試験」及び「実証試験装置モデルによる三次元動的解析結果」を比較すると、鉛直変位量に差があるものも、止水板は1秒間に5~6回程度の小刻みな上下動を繰り返している。
- ② 「実証試験装置モデルによる三次元動的解析結果」と「実機モデルによる三次元動的解析結果」を比較すると、鉛直変位が生じるタイミング (1秒間に5~6回程度の小刻みな上下動も同じ) 及び鉛直変位量とも良く一致している。
- ③ それぞれ結果とも、止水板は動作途中で固着 (引っ掛かり) するような異常な挙動は見られない。

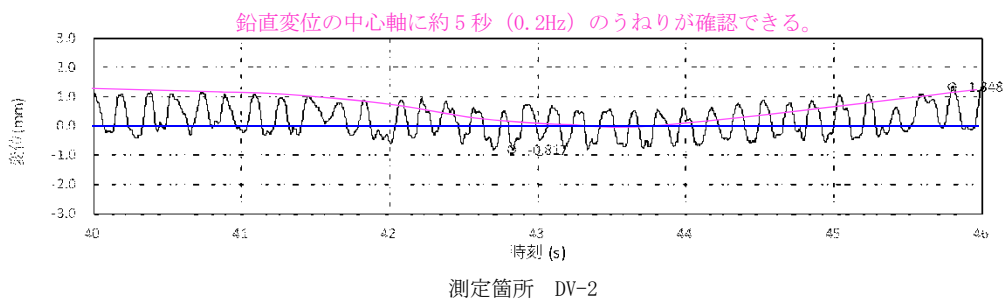
◆ 以上のとおり、三次元動的解析は「実証試験結果」をよく再現できていることから、解析の信頼性は確認できたものと考えられる。このため、実機止水板の地震時の追従性評価への三次元動的解析の適用は問題ないと判断される。

< 考 察 >

◆実証試験装置モデル及び実機設計モデルによる三次元動的解析結果には見られない鉛直変位量の中心軸のうねりが確認される。うねりの原因については、「6.1.3.5 実証試験結果と三次元動的解析結果における評価について」に示す。

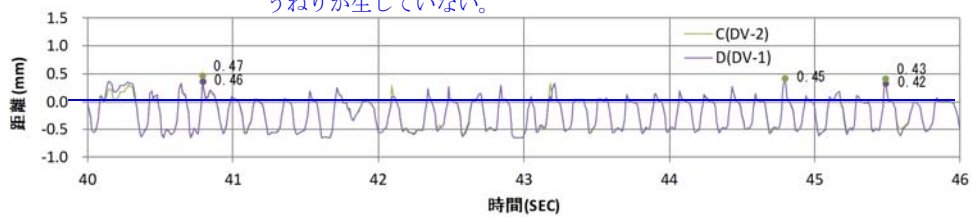
一方、実証試験装置モデルによる三次元動的解析は、加振台のみが振動する条件になっているため、実証試験のような中心軸のうねりが生じていないものと推定される。

【実証試験結果】



【三次元動的解析】

実証試験モデルには加振台の条件になっていないため中心軸のうねりが生じていない。



c. 止水板の上下の挙動について

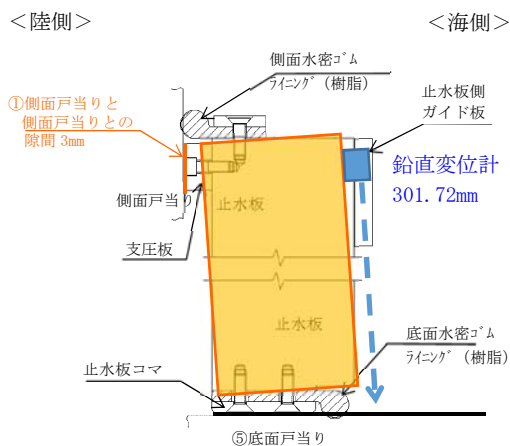
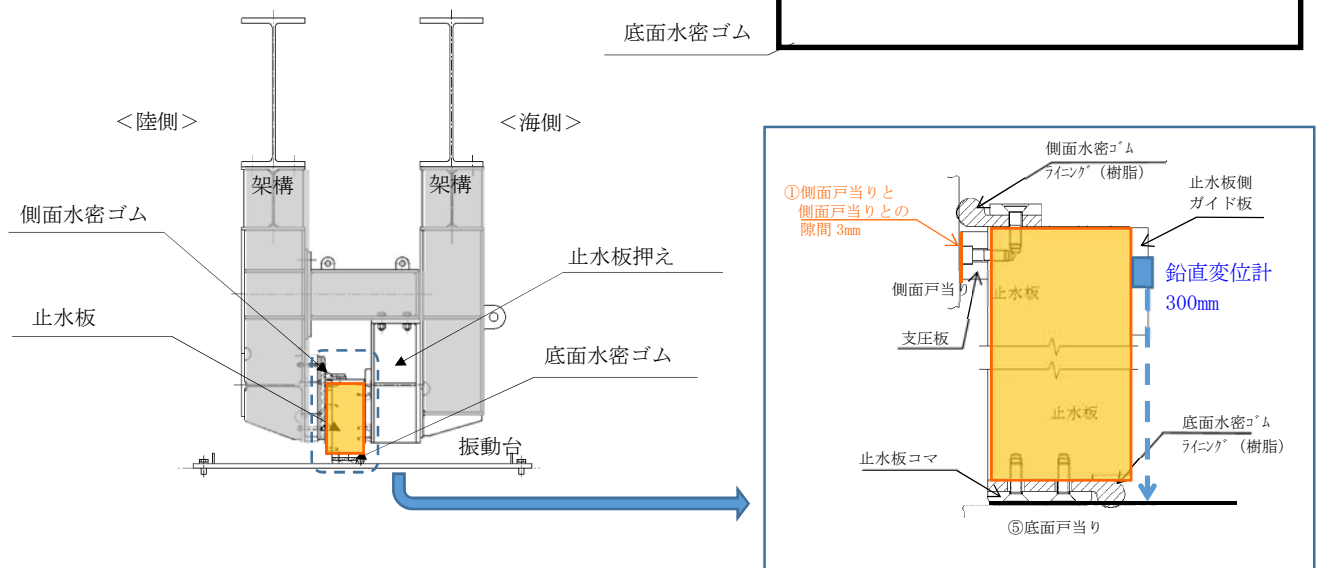
b 項 c 項の特徴にてみられる止水板の上下の挙動について

止水板と側面戸当りとの間には 3mm の隙間を施工上設けており 3mm の隙間による止水板の傾きが鉛直変位に影響していると思われる。

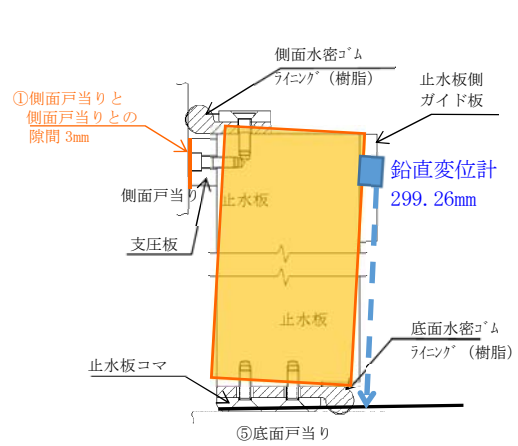
以下は図面寸法による算出結果を示す。

◆通常状態 300mm

- ・陸側に傾いた場合 301.72mm (+1.72mm)
- ・海側に傾いた場合 299.26mm (-0.74mm)



陸側に倒れた場合



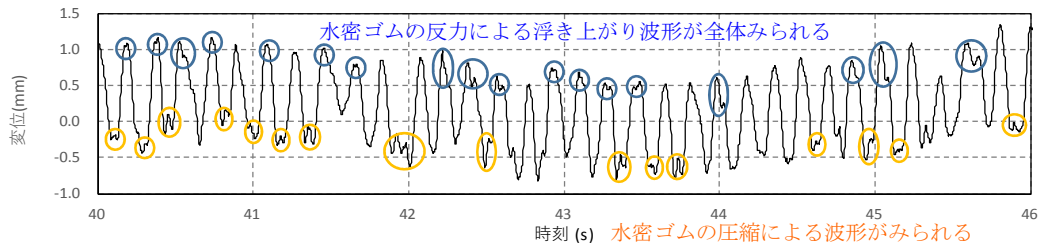
海側に倒れた場合

止水板の傾きにより鉛直変位量にはわずかな上下の傾きが常に発生している。そのため、止水板の浮き上がり量が 3mm 以下を水密ゴムの接触状態として判断しているが、仮に 3mm 以上の僅かな浮き上がりが発生したとしても、止水板の鉛直変位量には上記の寸法が含まれた数値となり、水密機能に影響を与えるものではない。

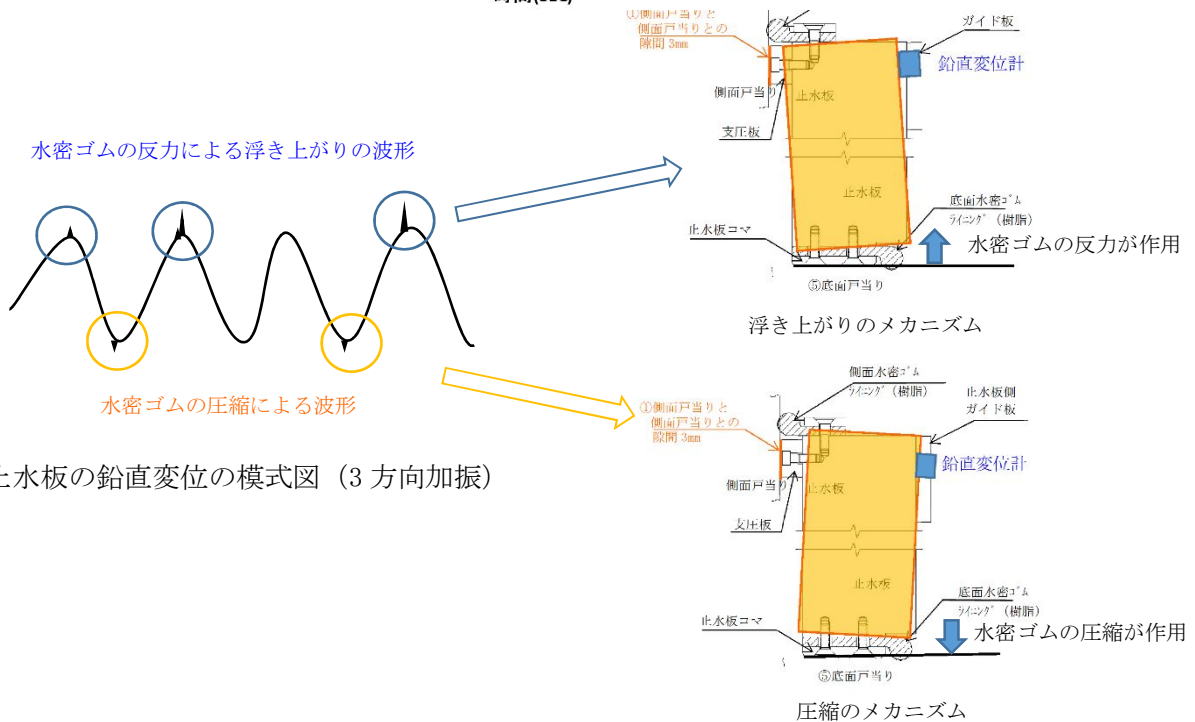
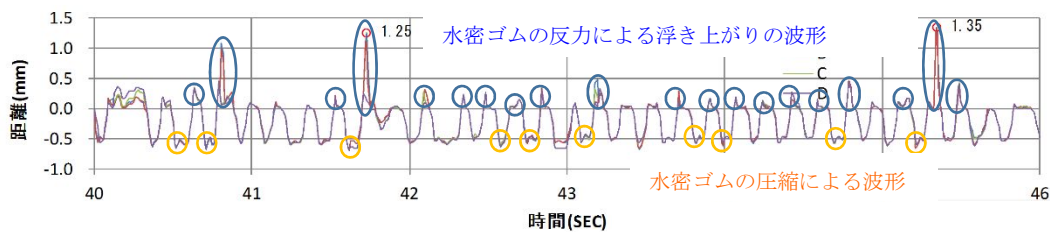
d. 水密ゴムの浮き上がりと圧縮による挙動について

止水板の鉛直変位の上下挙動の動きに合わせ、水密ゴムの反力による浮き上がりと圧縮による波形が見られる。ここでは、水密ゴムの浮き上がりと圧縮の挙動について分析する。底面水密ゴムに設置している水密ゴムは、常時 3mm 圧縮した状態で設置している（図 1 参照）。そのため、止水板の上下挙動に合わせ、水密ゴムの反力及び圧縮による影響が鉛直変位の波形に表れている。

<実証試験> 3 方向鉛直変位



<3次元動的解析> 3 方向鉛直変位



止水板の鉛直変位の模式図（3方向加振）

浮き上がる波形の大小については、その時の振動台の入力加速度や方向、振動する固有周波数に左右され瞬時に大きく浮き上がる時と微小なときが存在すると考えられ、大小さまざまな波形が認められる。圧縮側についてはほぼ同じ圧縮量のため波形の大きさに同じ大きさのものが多く傾向にある。

5. 実証試験結果【余震時】

(1) 振動試験結果の波形

① 3方向（Y方向（堤軸直角）包絡波）

a. 鉛直最大変位（1回目）

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-984	-2112	1038

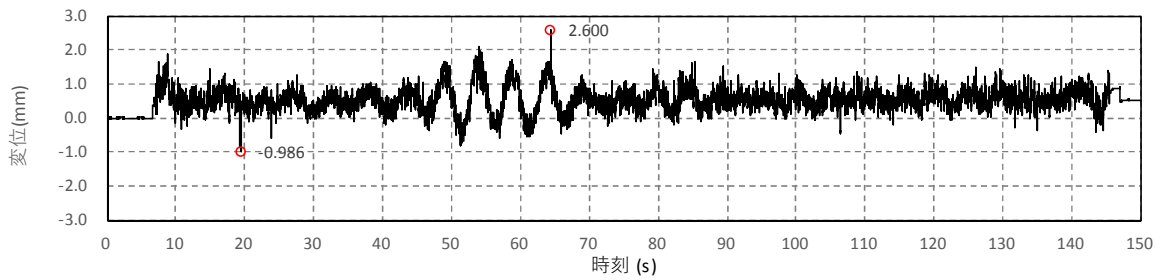


図-a DV-1時刻歴波形

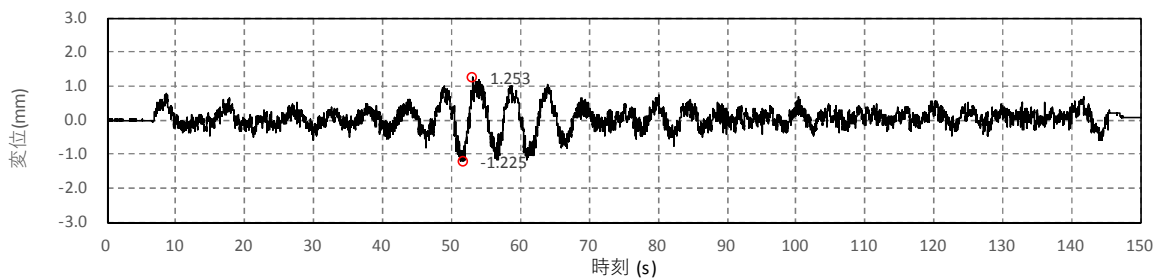


図-b DV-2時刻歴波形

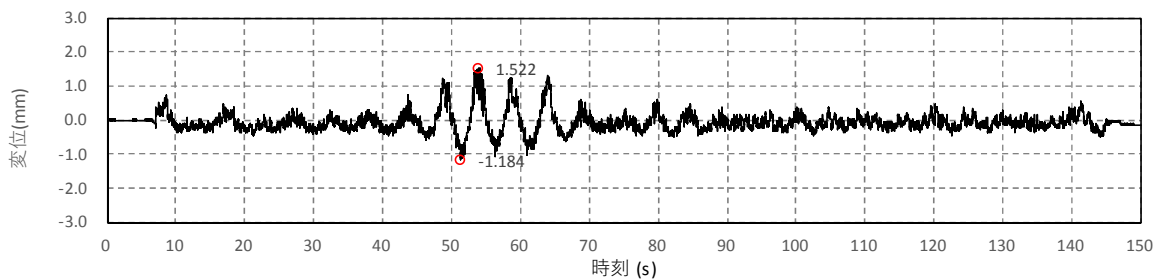


図-c DV-3時刻歴波形

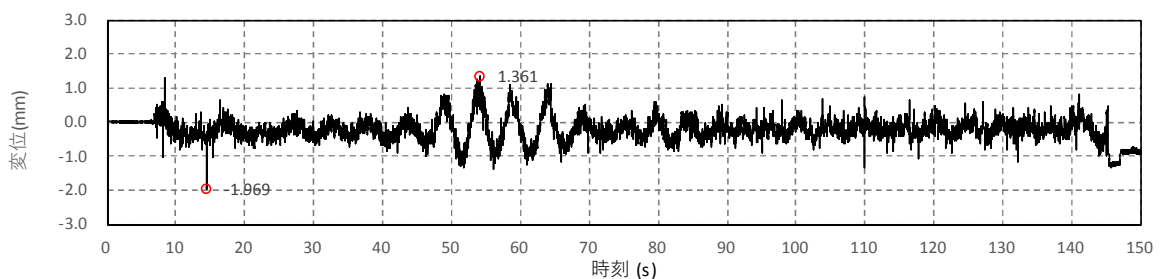


図-d DV-4時刻歴波形

b. 鉛直最大変位（2回目）

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-988	-2087	1075

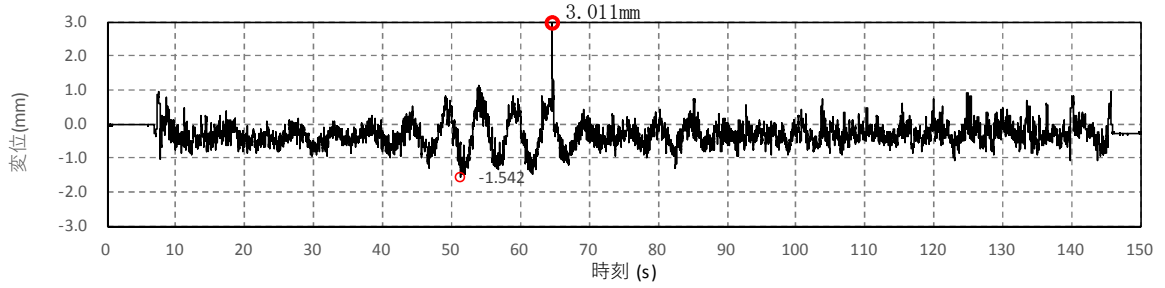


図-a DV-1 時刻歴波形

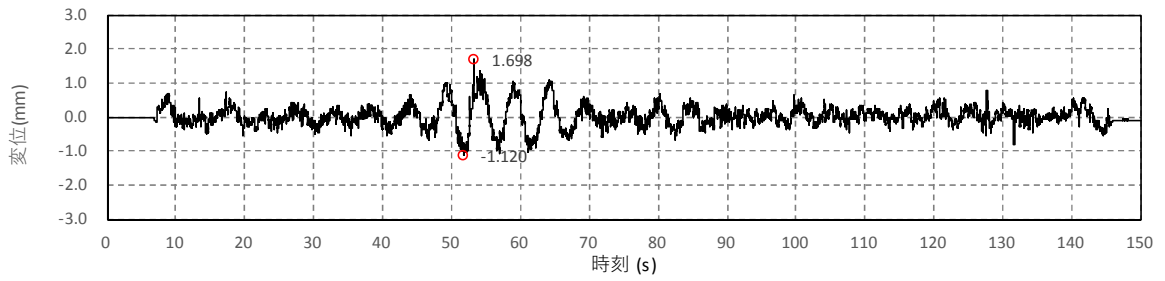


図-b DV-2 時刻歴波形

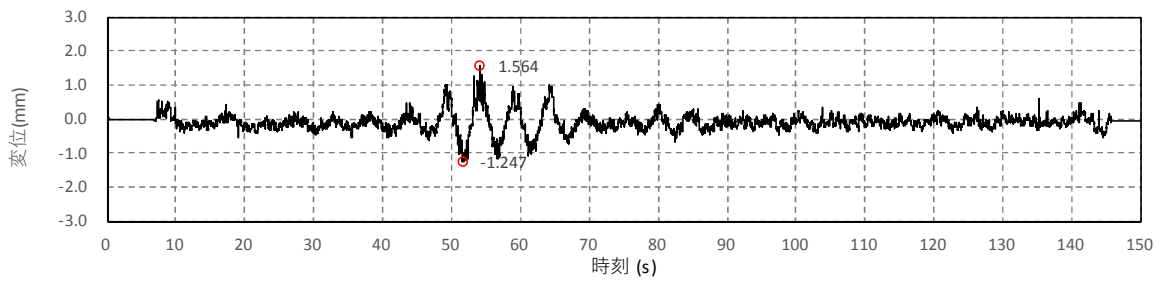


図-c DV-3 時刻歴波形

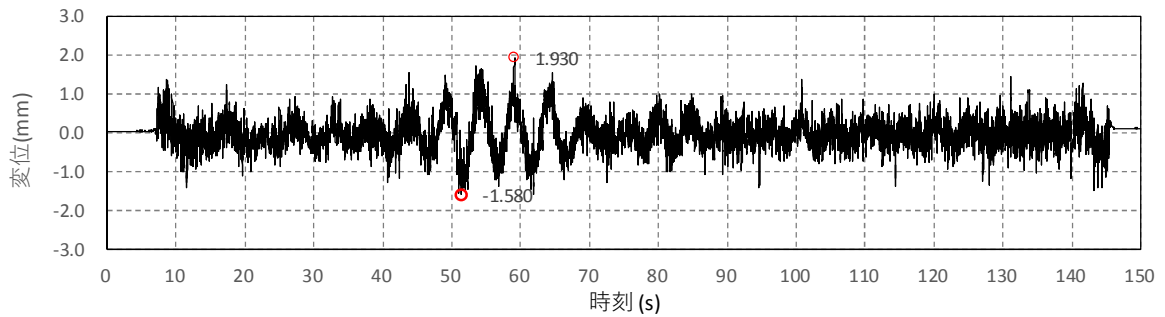


図-d DV-4 時刻歴波形

②鉛直（鋼製防護壁波形入力）

a. 鉛直最大変位（1回目）

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-62	108	1082

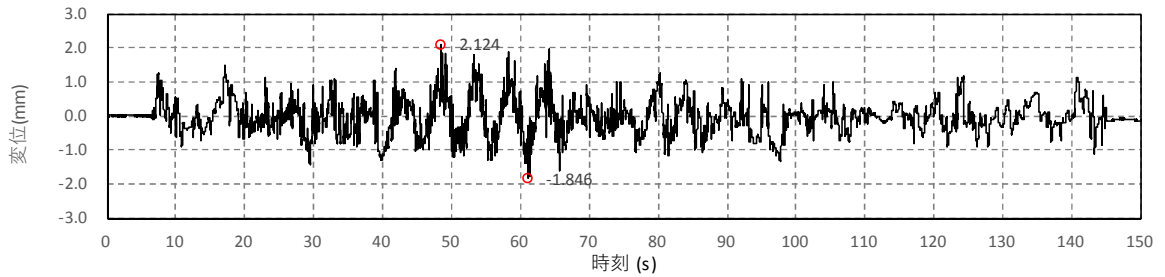


図-a DV-1時刻歴波形

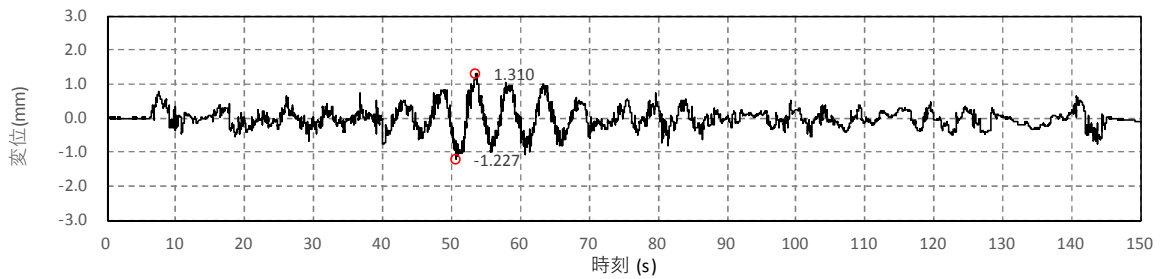


図-b DV-2時刻歴波形

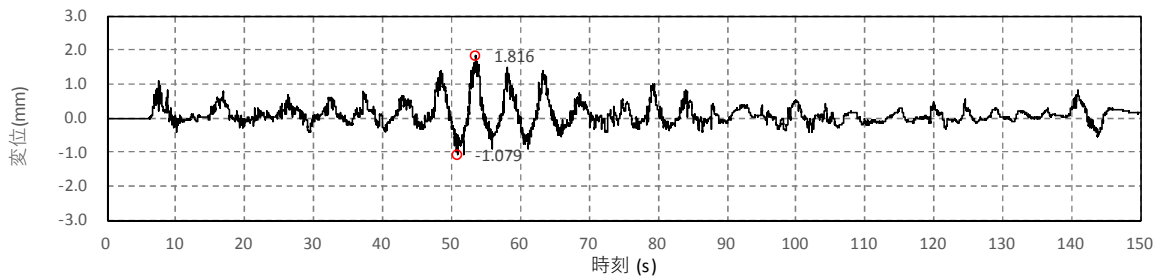


図-c DV-3時刻歴波形

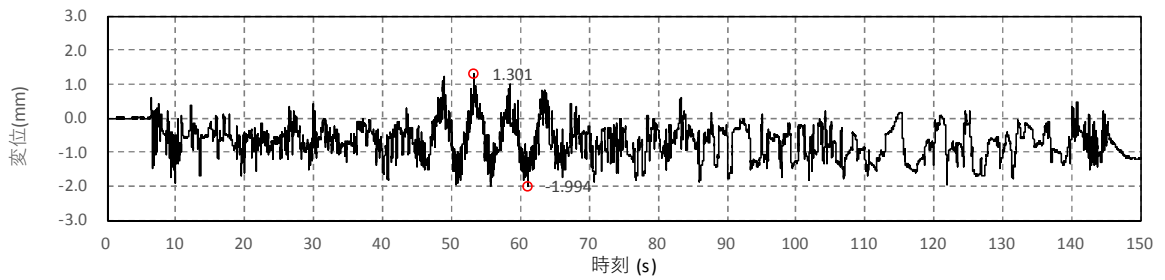


図-d DV-4時刻歴波形

b. 鉛直最大変位（2回目）

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-64	119	1046

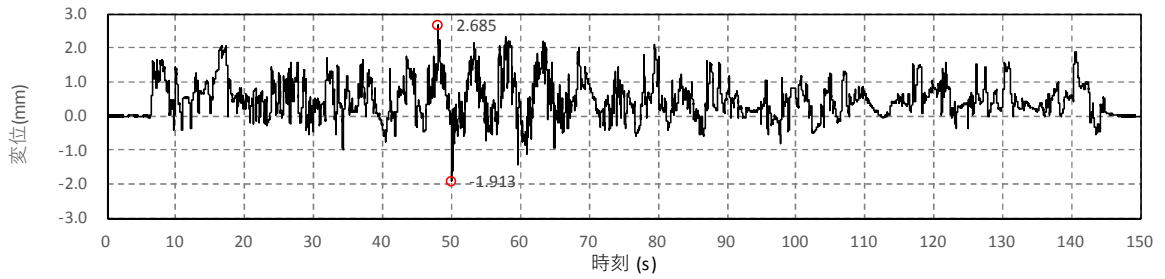


図-a DV-1時刻歴波形

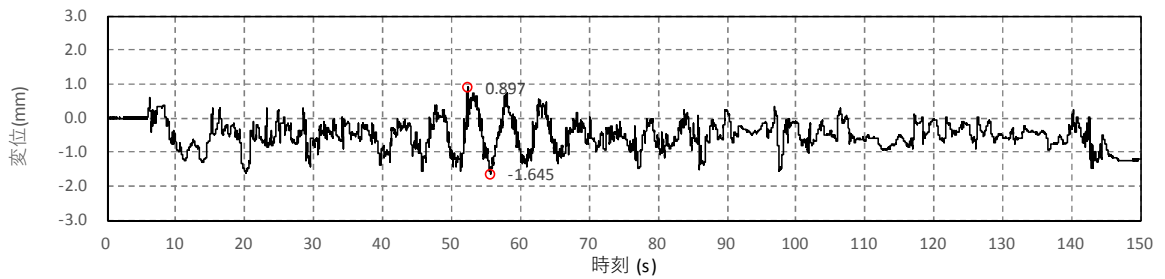


図-b DV-2時刻歴波形

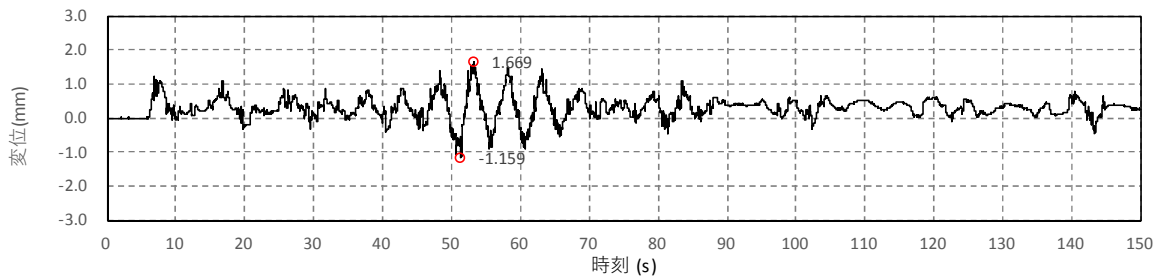


図-c DV-3時刻歴波形

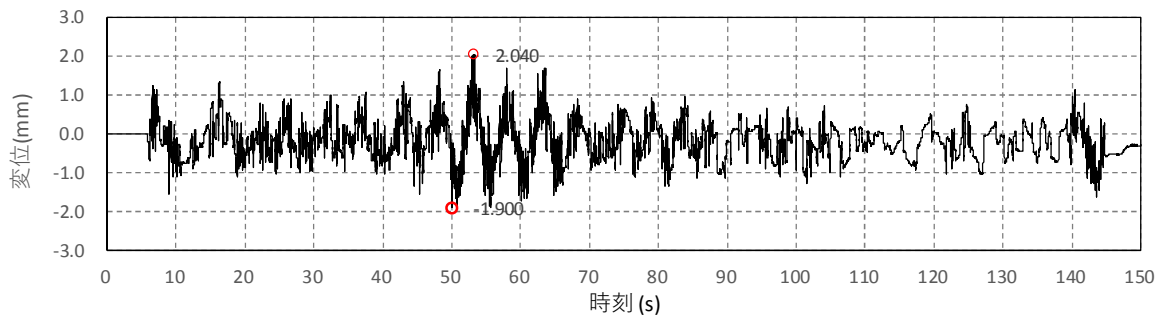


図-d DV-4時刻歴波形

③鉛直（取水路波形入力）

a. 鉛直最大変位（1回目）

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	-33	49	-572

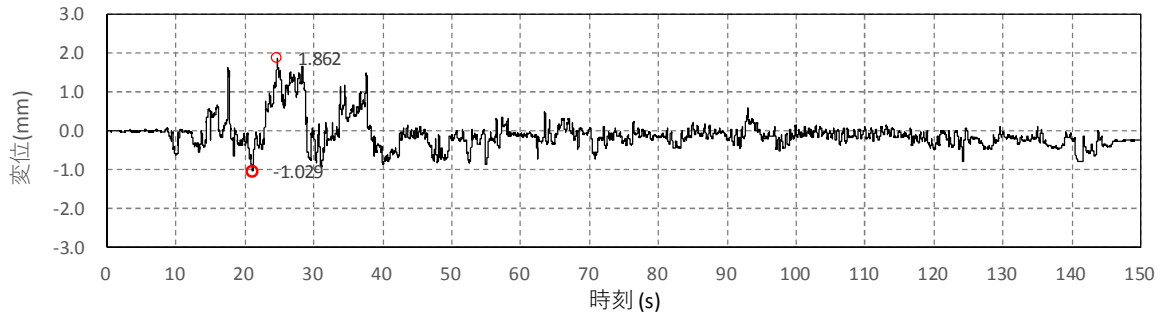


図-a DV-1 時刻歴波形

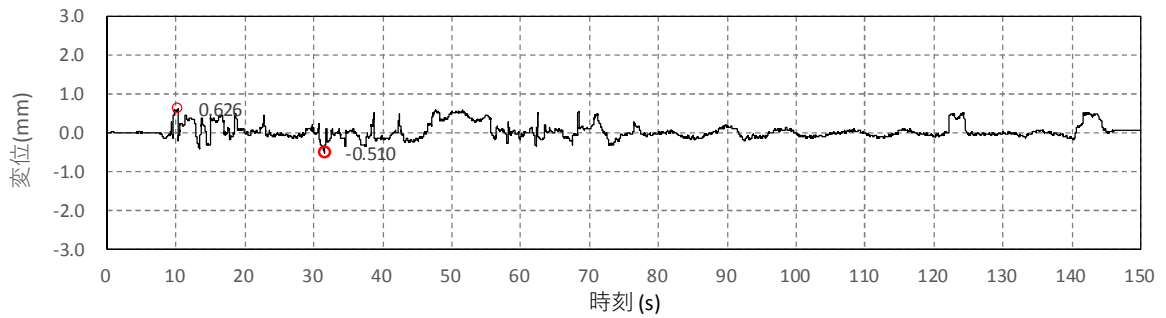


図-b DV-2 時刻歴波形

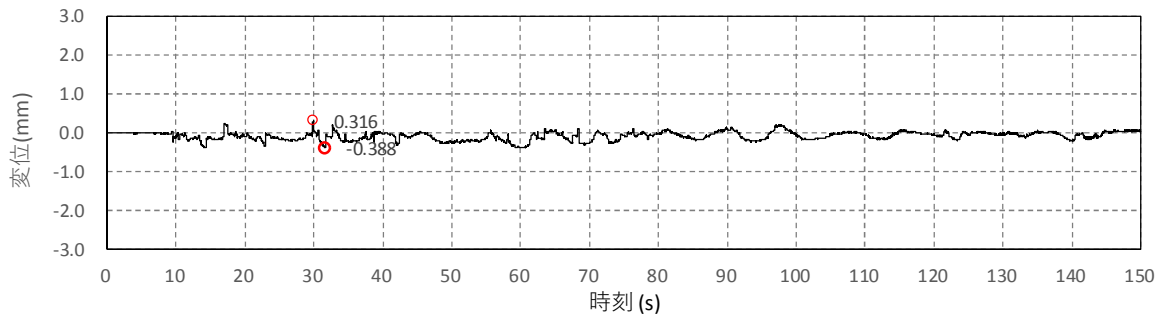


図-c DV-3 時刻歴波形

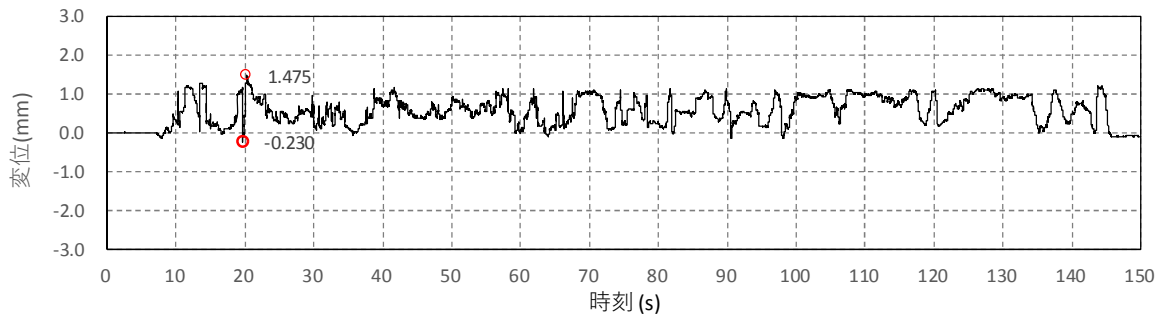


図-d DV-4 時刻歴波形

b. 鉛直最大変位（2回目）

	X方向	Y方向	Z方向
振動台入力加速度 (gal)	30	-50	-558

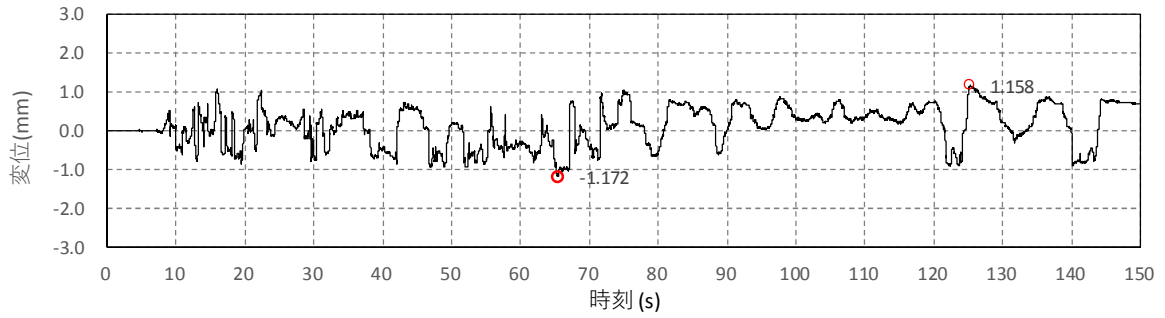


図-a DV-1 時刻歴波形

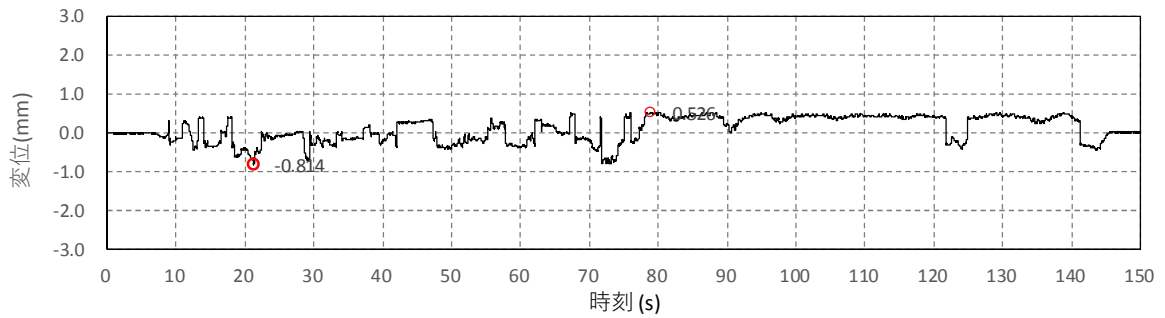


図-b DV-2 時刻歴波形

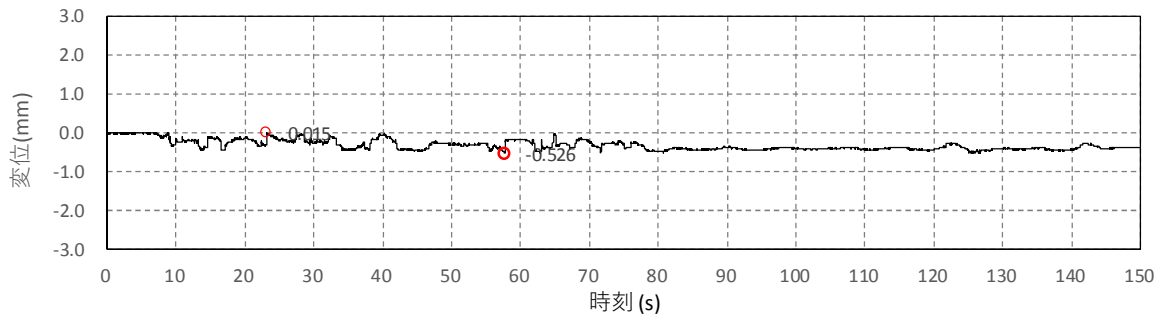


図-c DV-3 時刻歴波形

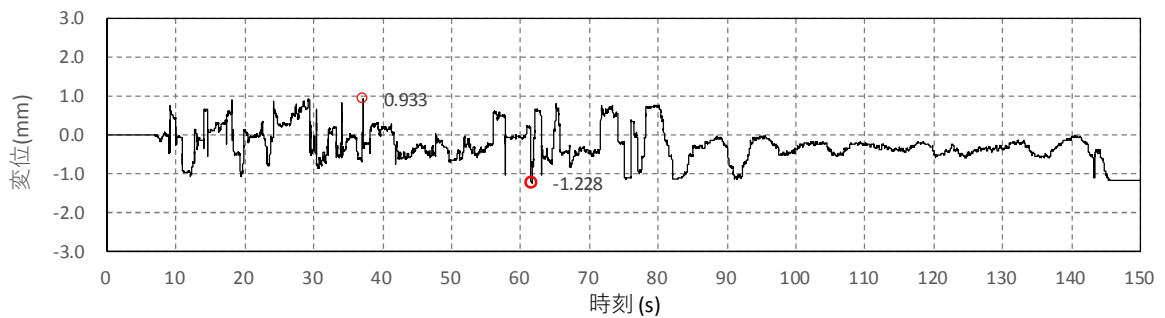


図-d DV-4 時刻歴波形

(2) 確認結果【余震時】

実証試験の余震時の結果、全てのケースにおいて止水板の追従性は良好であった。水密ゴムの噛み込みや破損等についても見られなかった。表8に実証試験結果を示す。水密ゴムの浮き上がり量については表9に示す。最大値で1箇所3mmを0.01mm上回る箇所が認められた。実証試験モデルの場合、実態に近い挙動は止水板接続部であることから表10に止水板接続部として整理し、全てのケースで3mm以下(図1参照)であることを確認した。(実証試験モデルと実機モデルの検証については、6.1.3に示す。)

表8 実証試験結果(1回目/2回目)

		①3方向 (Y方向(堤軸直 角)包絡波)	②鉛直 (鋼製防護壁波形 入力)	③鉛直 (取水路側包絡波)
止水板の地震 時の追従性確 認	◆止水板の動作に異常がなく、止水板としての機能が保持されていること。(浮き上がり、止水板の破損・損傷)	良好/良好	良好/良好	良好/良好
水密ゴムの健全 性確認	◆水密ゴムの動作に異常がなく機能が保持されていること。 (噛み込み、摺動による亀裂、破損、摩耗) ◆水密ゴムのライニングに異常がなく機能が保持されていること。(ライニングの破損、めくれ)※	良好/良好	良好/良好	良好/良好
1次止水機構 の構成部品の 健全性確認	◆装置全体に異常がなく健全であること。 (試験装置、部材の変形、損傷、他)	良好/良好	良好/良好	良好/良好

※詳細については、試験終了後に確認

表9 止水板の浮き上がり量(最大値(mm))

			①3方向 (Y方向(堤軸直 角)包絡波)	②鉛直 (鋼製防護壁波形 入力)	③鉛直 (取水路側包絡波)
止水板の地震時の追従性確認	◆止水板の浮き上がり量3mm以下3mm以下の浮き上がりであれば水密ゴムは底面戸当りと接触状態(図1参照)	1回目	2.60 (DV-1)	2.12 (DV-1)	1.86 (DV-1)
		2回目	3.01※ (DV-1)	2.69 (DV-1)	1.16 (DV-1)

鉛直変位の最大値は、止水板の端部(DV-1,4)が拘束されていないため浮き上がる傾向が認められた。

※:浮き上がり量3mmに対し0.01mm上回った。

表10 止水板の浮き上がり量(止水板接続部(mm))

			①3方向 (Y方向(堤軸直 角)包絡波)	②鉛直 (鋼製防護壁波形 入力)	③鉛直 (取水路側包絡波)
止水板の地震時の追従性確認	◆止水板の浮き上がり量3mm以下3mm以下の浮き上がりであれば水密ゴムは底面戸当りと接触状態(図1参照)	1回目	1.25(DV-2) 1.52(DV-3)	1.31(DV-2) 1.82(DV-3)	0.63(DV-2) 0.32(DV-3)
		2回目	1.70(DV-2) 1.56(DV-3)	0.90(DV-2) 1.67(DV-3)	0.53(DV-2) 0.02(DV-3)

実態に近い止水板接続部については、数値に大きなばらつきもなく全ての状態で3mm以下であった。

表9の①3方向(Y方向(堤軸直角)包絡波)の0.01mm浮き上がりのケースの場合についても良好な結果であった。

(3) 実証試験結果と3次元動的解析（実証試験モデル）の検証について【余震時】

a. 実証試験及び三次元動的解析ケースの目的

実証試験は以下の3ケース（①～③）を実施した。各試験ケースの目的を示す。

検証ケースとして3方向加振試験の場合は，①の実証試験と三次元動的解析を実施し，鉛直方向については③の実証試験と三次元動的解析を実施する。表11に実証試験及び三次元動的解析ケースの目的を示す。

表11 実証試験及び三次元動的解析ケースの目的

	実証試験のケース			三次元動的解析ケース		実証試験及び三次元動的解析ケースの目的
	X	Y	Z	実証試験	実機	
①3方向 (Y方向(堤軸直角)包絡波)	1G	2G (Y包絡波)	1G	○	○	【検証ケース】3方向データ(実機と同じ方向確認) ◆実証試験において鋼製防護壁側の堤軸直角側の水平方向の包絡波を入力し止水板の挙動を確認する。 ◆3次元動的解析については，実証試験と実証試験ケースの検証を行うと共に実機ケースモデルとの解析検証を行いモデルの妥当性についても確認する。
②鉛直 (鋼製防護壁波形入力)	—	—	1G	○	—	【データ拡充】鉛直方向データ ◆実証試験において鋼製防護壁側の鉛直方向の加速度(1G)を取水路側の鉛直方向に入力し，止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。 ◆3次元動的解析における止水板の挙動をデータ拡充の観点から確認する。
③鉛直 (取水路側波形入寮)	—	—	波形入力	○	○	【検証ケース】鉛直方向データ(実機と同じ方向確認) ◆実証試験において止水板の挙動は，鉛直方向からの慣性力が支配的と考えられることから本件をベースケースとした実証試験を実施し，鉛直からの変位量を計測する。実機と同じ方向で確認 ◆3次元動的解析については，実証試験と実証試験ケースの検証を行うと共に実機ケースモデルとの解析検証を行いモデルの妥当性についても確認する。

実証試験と実証試験モデルとの検証（3方向及び鉛直方向）については解析結果確認後に検証する。

6.1.3.5 実証試験結果と三次元動的解析結果における評価について

1. 評価目的

止水機構の実証試験結果の挙動において、三次元動的解析結果との挙動に相違する部分が見受けられることから、実証試験結果における要因を分析評価し、三次元動的解析モデルの信頼性を評価する。

2. 評価・検証項目

実証試験結果と三次元動的解析との止水板の挙動について、以下の項目について検討を実施し、実証試験結果と三次元動的解析結果との挙動の相違点等について評価する。

図1に実証試験結果における三次元動的解析との挙動等の相違点に対する評価方針を示す。

<評価項目>

①実証試験に生じるうねりの解明

うねりが3方向同時加振時に発生し、鉛直のみの時には発生しない理由。

②実証試験の浮き上がり量が三次元動的解析より大きくなる事の分析

③その他、実証試験及び三次元動的解析の結果に生じた挙動等の相違についての評価 (架構自体の挙動、振動台の挙動など)

④①～③の検討を踏まえ、三次元動的解析モデルの更なる信頼性の向上

工事計画認可申請時の評価用のため、改良点等を抽出しモデルの信頼性を向上

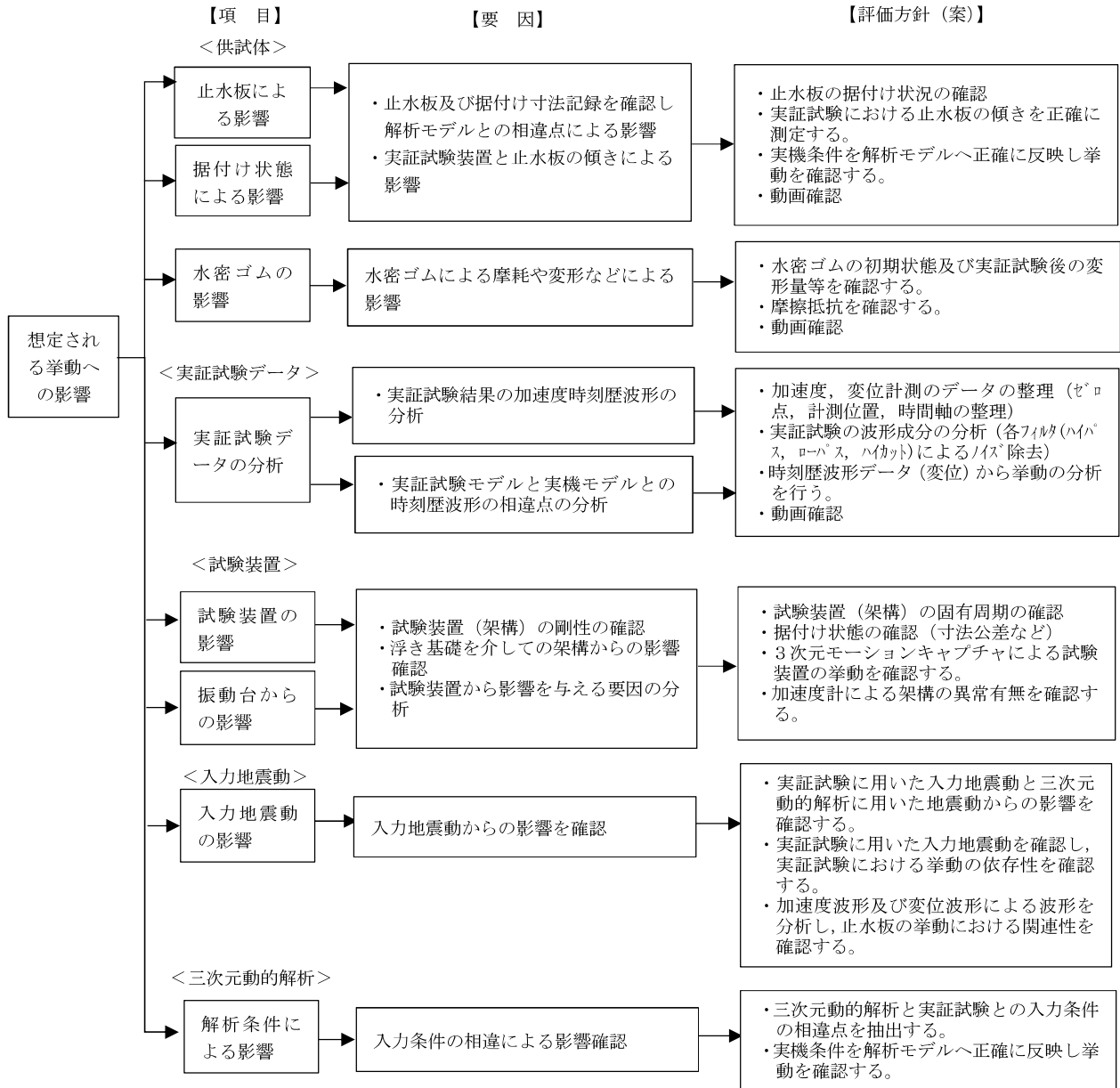


図1 実証試験結果における三次元的解析との挙動等の相違点に対する評価方針

3. 実証試験に生じるうねりの解明

実証試験における3方向同時加振の鉛直変位の結果から、長周期のうねりが認められたことから、評価項目の「①実証試験に生じるうねりの解明」及び「③その他実証試験及び三次元動的解析の結果に生じた挙動等の相違についての評価」について本項で説明する。

(1) 実証試験用入力波による影響

実証試験時における3方向同時加振時の実証試験用地震動は、「Y方向（堤軸直角）包絡波」で鋼製防護壁の応答加速度を包絡させた地震動を用いている。

そのため、振動台より伝達される実証試験用地震動のY方向についてフーリエスペクトルを作成し周波数成分を分析した。

その結果、卓越周波数に3つのピーク（1.09Hz, 1.22Hz, 5.77Hz）を確認した。卓越周波数の1.22Hzと5.77Hzについては、鋼製防護壁のY方向の固有周期と一致している。

表1に実証試験時の入力地震動における卓越振動数、図2に実証試験時のY方向フーリエスペクトル図を示す。

表1 実証試験時の入力地震動における卓越振動数

方向	卓越振動数(Hz)	
	1回目	2回目
X方向	0.72, 14.48	0.72, 14.48
Y方向	1.09, 1.22, 5.77	1.09, 1.22, 5.78
Z方向	8.25, 23.75	8.25, 23.75

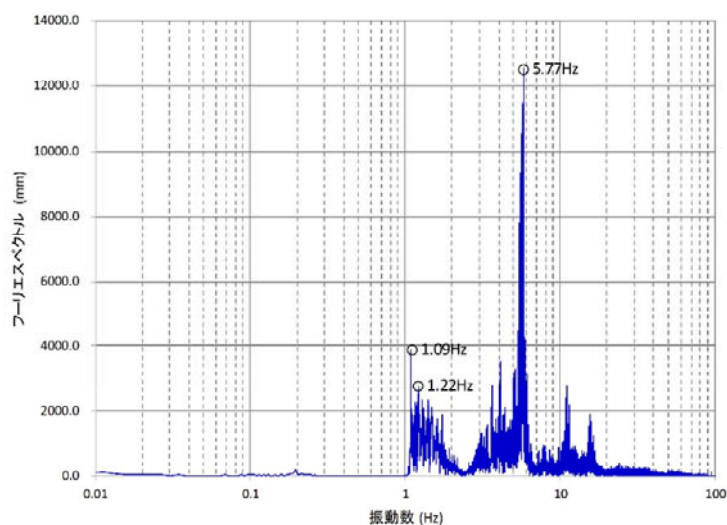
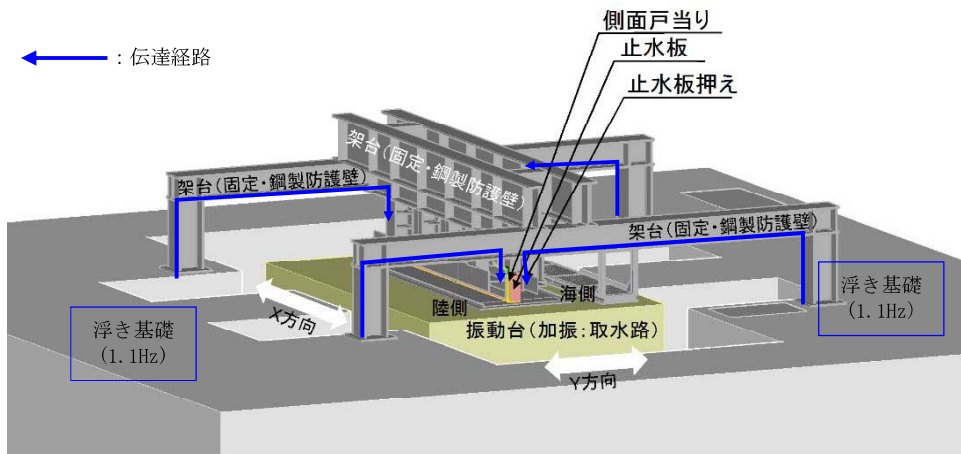


図2 実証試験時のY方向のフーリエスペクトル

(2) 浮き基礎による影響

実証試験時に用いた加振装置において浮き基礎の影響を確認した。その結果、浮き基礎の固有周期は 1.1Hz 程度であることを確認した。

浮き基礎からの振動（周波数）は、架台を経由し止水板の摺動時の振動（周波数）として伝達したと思われる。図 3 に浮き基礎からの振動（周波数）の伝達イメージと固有振動数を示す。



浮き基礎からの振動（周波数）の伝達イメージ

浮き基礎の固有振動数

浮き基礎の軸	1次固有振動数 (Hz)
X軸	1.16
Y軸	1.13
Z軸	1.16

浮き基礎の固有振動数は、「特性把握加振」（ランダム波による逆伝達関数を求める加振）の結果から 3 成分ともに 1.1Hz 程度であった。

図 3 浮き基礎からの振動（周波数）の伝達イメージと固有振動数

(3) 試験装置による影響

試験装置の影響を検討するにあたり想定される事象として考えられることは、取水路を模擬した振動台にアクチュエータによる入力波を入力した際に、アクチュエータからの振動が固定側の鋼製防護壁を模擬した架構を設置している浮き基礎に伝わり、架構側も揺れた影響によることが想定される。

その影響を確認するため、振動試験装置の固有周期について固有値解析を実施した。その結果、X : 5.58Hz, Y : 15.29Hz, Z : 12.94Hz であることが分かった。

その結果、3方向同時加振中にみられる長周期のうねりとは異なる短い周期であることから、試験装置による影響ではないと評価する。

また、加振時における試験装置架構下端（Y方向）の卓越振動数は、3つのピーク（1.09Hz, 1.21Hz, 5.77Hz）を確認した。

表2に試験装置の固有振動数及び周期、表3に加振時における試験装置の架構下端（Y方向）の卓越振動数、図4に実証試験装置の解析モデル図を示す。

表2 試験装置の固有振動数および周期

モード	止水板質量考慮		備考
	振動数(Hz)	周期 T(s)	
モード1	5.58	0.18	X方向
モード2	12.94	0.077	Z方向
モード3	15.29	0.065	Y方向

表3 加振時における試験装置架構下端(Y方向)の卓越振動数

架構（縦材下端）	卓越振動数(Hz)
海側	1.09, 1.21, 5.77
陸側	1.09, 1.21, 4.07, 5.77

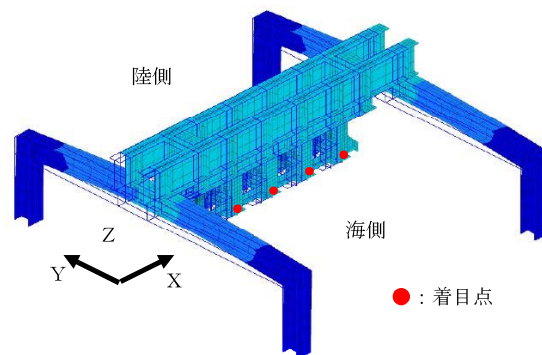


図4 実証試験装置の解析モード図

(4) 振動台による影響

実証試験の鉛直変位の結果から約5秒(0.2Hz)のうねりが確認できたが、
実証試験用入力波による実証試験時のY方向のフーリエスペクトルからは約5秒(0.2Hz)のところにピークは現れなかったため、振動台による影響を調査した。その結果、振動台にピッチングによる回転変位が確認できた。図5から図7に振動台にうねり成分があることを示す。

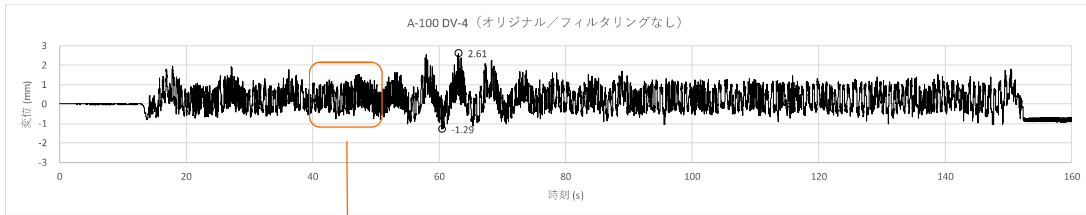


図5 実証試験結果

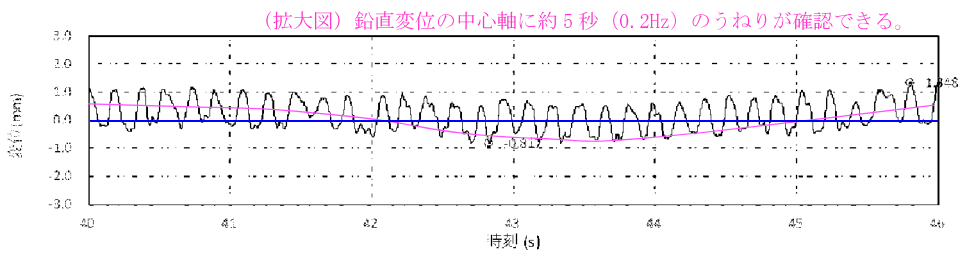


図6 実証試験結果(拡大)

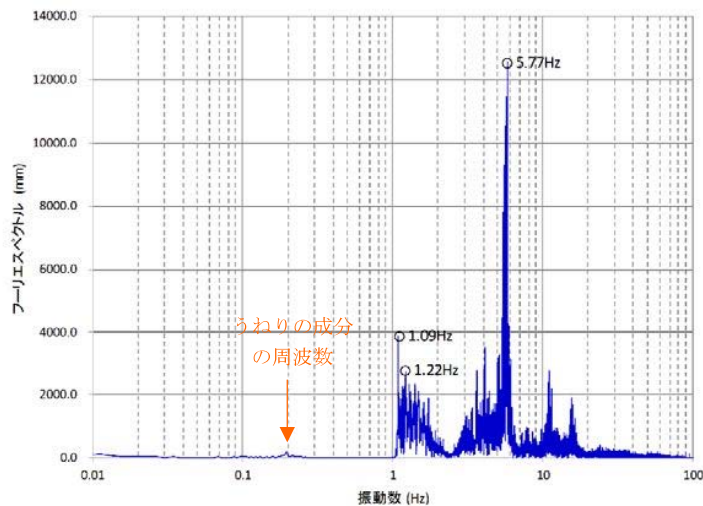


図7 実証試験入力波によるY方向のフーリエスペクトル

a. 振動台のうねりの分析

振動台に設置したモーショキャプチャ測定値による振動台のX軸の回転変位と中央部の鉛直変位算出結果を図8に示す。

その結果、水平Y方向のみの単独加振時において振動台中心に回転変位（青線）及び鉛直変位（赤線）が生じていた。振動台の回転変位（青線）と鉛直変位（赤線）の周期について周波数分析を行い回転変位は0.10Hz, 0.20Hz, 鉛直変位は0.21Hz, 1.09Hz, 5.77Hzであった。図9に振動台のX軸の回転変位と中央部鉛直変位のフーリエスペクトルを示す。

鉛直変位のうち0.21Hzは振動台のピッチングによる影響があるものと思われること、及び周波数1.09Hz, 5.77Hzは、実証試験用入力地震動の卓越周波数に近い周波数であることを確認した。

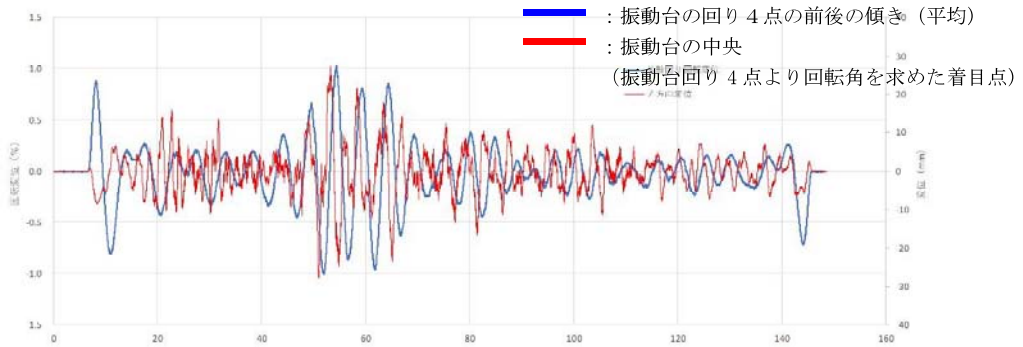


図8 振動台のX軸の回転変位と中央部の鉛直変位

振動台のX軸の回転変位と中央部の卓越振動数

種別	卓越振動数 (Hz)
回転変位	0.10, 0.20
中央部鉛直変位	0.21, 1.09, 5.77

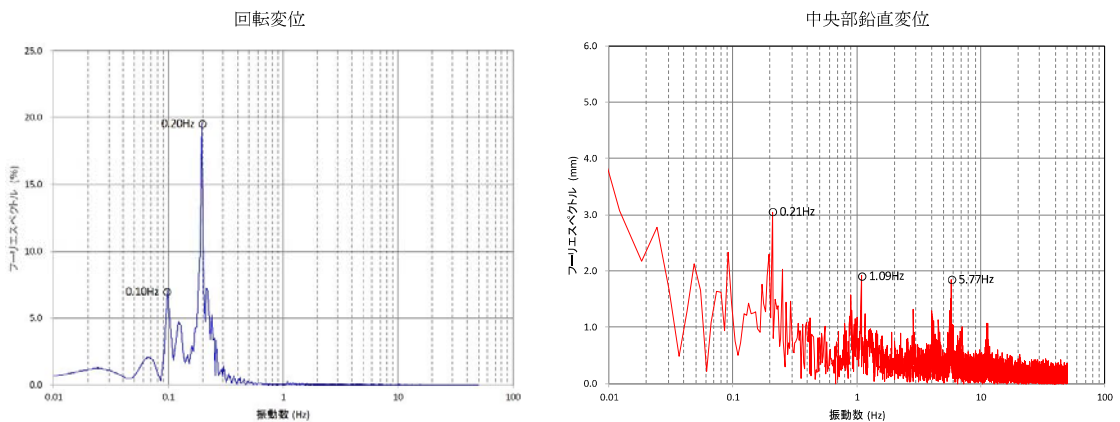


図9 振動台のX軸の回転変位と中央部の卓越周波数とフーリエスペクトル

b. 振動台の変位の計測方法

3次元モーションキャプチャによる振動台の影響について評価を行った。

振動台の影響をみるためにY方向（3G）のみの加振時データの実証試験データを分析した。

その結果、振動台にピッチングによる影響が確認された。図10に振動台の特性と図11にモーションキャプチャの測定点を示す。図12にモーションキャプチャ設置位置による回転成分と鉛直成分の算出方法を示す。

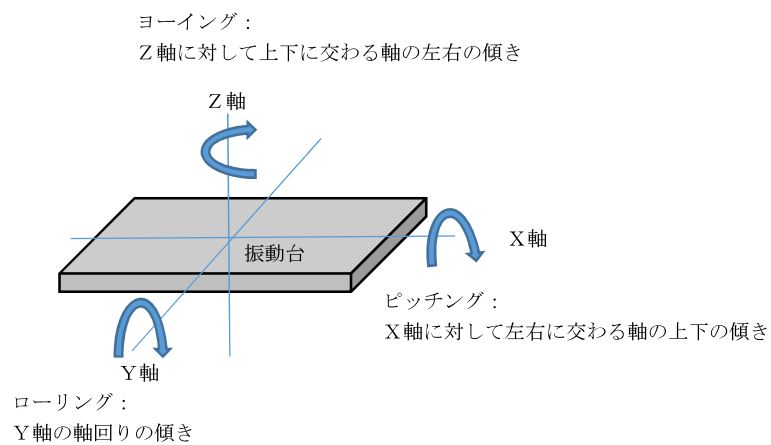


図10 振動台の傾きの特性

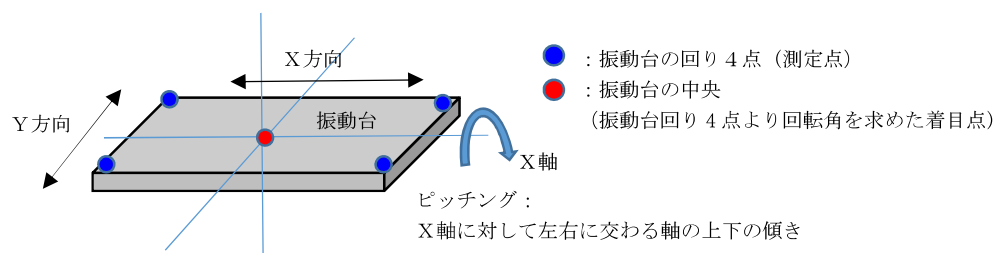


図11 モーションキャプチャの測定点

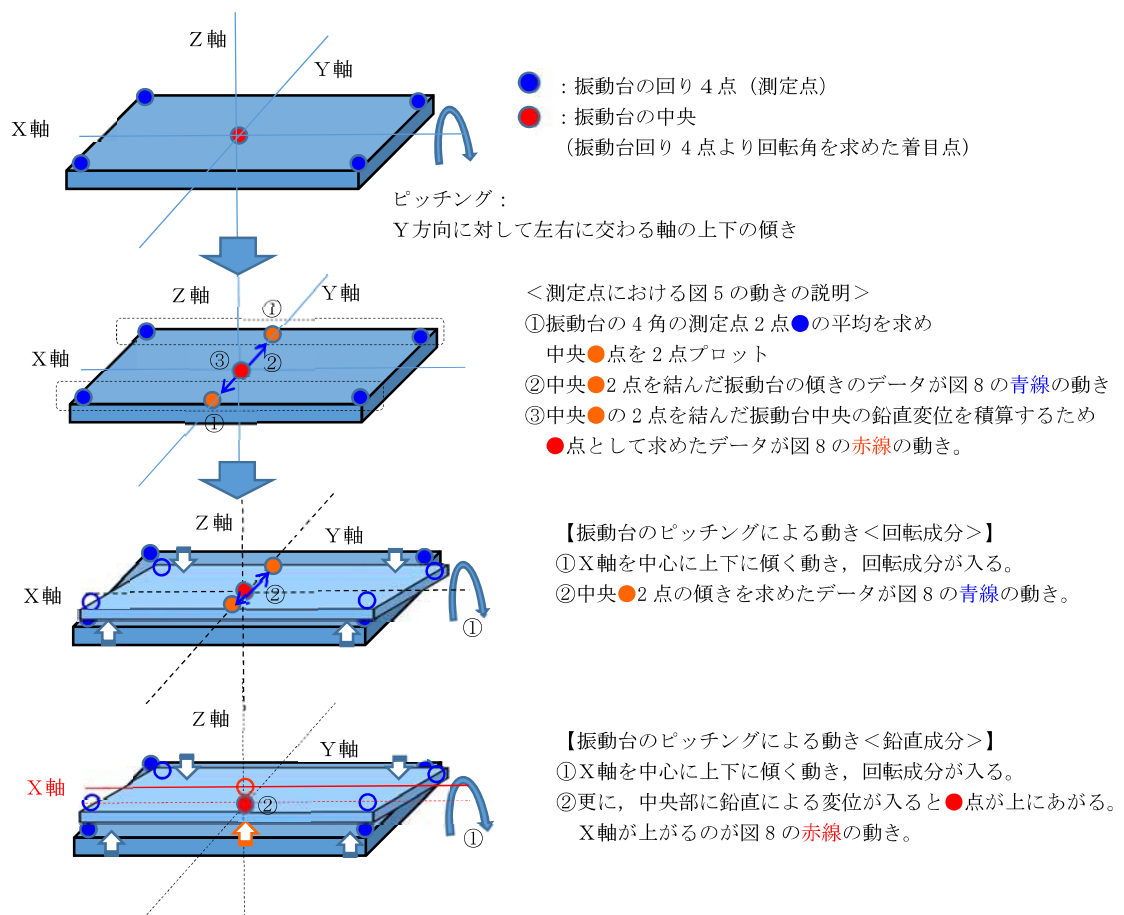


図 12 モーションキャプチャ設置位置による回転成分と鉛直成分の算出方法

c. 振動台の要因

振動台を 3 次元で振動させる場合、入力地震動に対し入力成分にない回転成分などが応答に発生し、入力に対して誤差が生じる。この誤差を低減し振動台を正確に振動させるため、振動台の特性を反映した逆伝達関数を用いて制御している。振動台の特性を把握して逆伝達関数を設定する作業は定期点検時に実施されている。

今回の試験における要求波形 X 方向 : 1G, Y 方向 : 3G, Z 方向 : 1G の加振波形作り込み作業の際、定期点検時(2 月)に設定されていた通常使用頻度の高い大振動ではなく、一般に低い入力により振動台の特性を把握し、誤差を制御するデータが設定されていたが、振動台の特性把握加振時の加速度レベルが $800\text{cm/s}^2 \sim 1000\text{cm/s}^2$ であり、今回の実証試験では、止水機構の実証試験にて再現したい 3000cm/s^2 の入力波形に対して小さく、十分に補正がかからなかった。そのため回転成分があらわれ 0.2Hz 周辺でのうねりが発生したと思われる。

加振波形の作成を行う際に、加速度スペクトルの合致度と加速度最大値の確認に傾注し、振動台の回転成分の確認が不足であった。

d. 振動台の変位調査

振動台の変位調査として、先にピッチングによる影響を確認したが、本項ではY軸に対する回転変位（ローリング）についての影響を調査する。

振動台に設置したモーションキャプチャ測定値による振動台のY軸の回転変位と中央部の鉛直変位算出結果を図13に示す。

その結果、3方向同時加振時において振動台中心に回転変位（青線）及び鉛直変位（赤線）が生じていた。振動台の回転変位（青線）と鉛直変位（赤線）の周期について周波数分析を行い回転変位は0.10Hz、0.20Hzで、鉛直変位は0.20Hzであった。図14に振動台のY軸の回転変位と中央部鉛直変位のフーリエスペクトルを示す。

回転変位と鉛直変位の0.20Hzは振動台のローリングによる影響を示している。また、回転変位の0.10Hzも同様に長周期成分が他の設備等に見られない周波数であること、及び振動台のローリングによる影響であることを確認した。

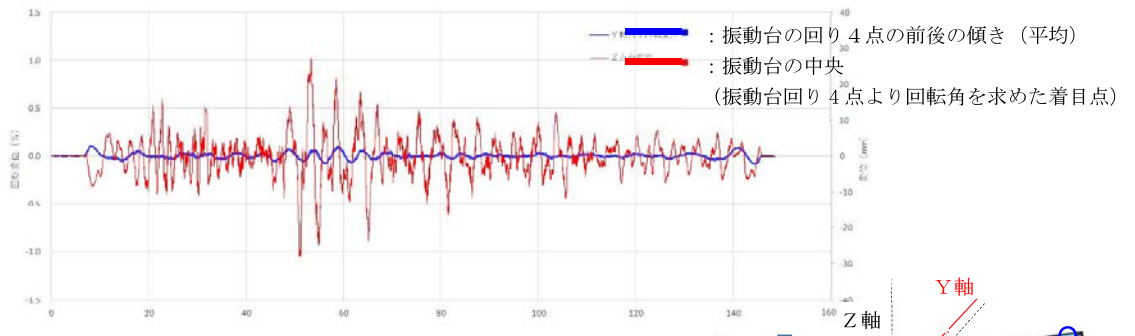


図13 振動台のY軸の回転変位と中央部の鉛直変位

振動台のY軸の回転変位と中央部の卓越振動数

種別	卓越振動数(Hz)
回転変位	0.10, 0.20
中央部鉛直変位	0.20

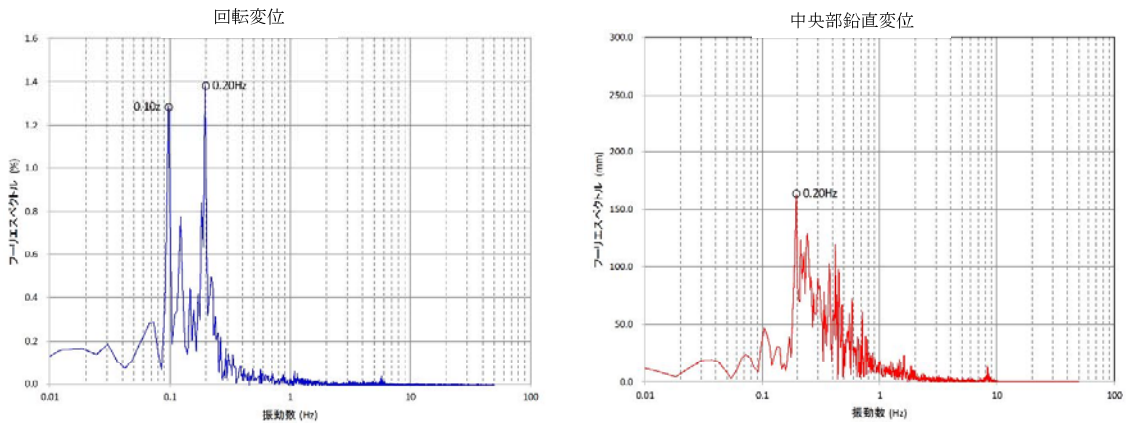


図14 振動台のY軸の回転変位と中央部の卓越周波数とフーリエスペクトル

(5) 止水板の挙動について

a. 止水板の固有値解析

止水板の固有値解析を実施した。止水板の固有値は 10.55Hz であった。

図 15 に止水板の固有周期解析モデル図を示す。

<解析条件>

○解析コード

MSC_MARC2014.2.0 (エムエスシーソフトウェア株式会社)

○解析内容

線型固有値解析 (止水ゴムを弾性体とした解析)

○モデルの説明

6面ソリッド要素

<解析結果>

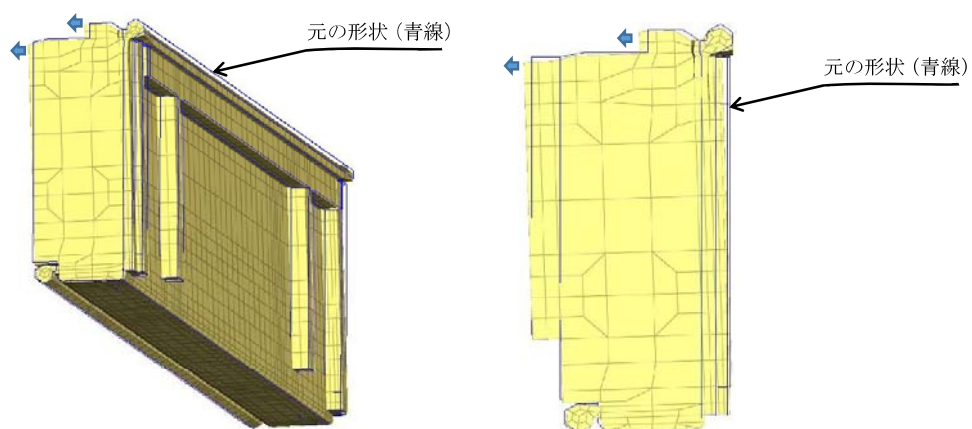


図 15 止水板の固有周期解析モデル図

b. 鉛直変位におけるピッチングの影響

(4)項にて振動台におけるピッチングによる影響を確認した。ここではピッチングによる影響と思われる長周期のピークが止水板の挙動に表れてないか確認する。そのため、止水板の鉛直変位のフーリエスペクトルを作成し周期を分析し、周期のピーク 0.2Hz, 1.1Hz, 5.7Hz を確認した。その結果、ピッチングによる影響である周波数 0.2Hz が確認できた。図 16 に止水板の鉛直変位におけるフーリエスペクトルを示す。

また、前項 a にて確認した止水板の固有値解析の結果 10.55Hz とは周波数が共振領域にはないことを確認した。

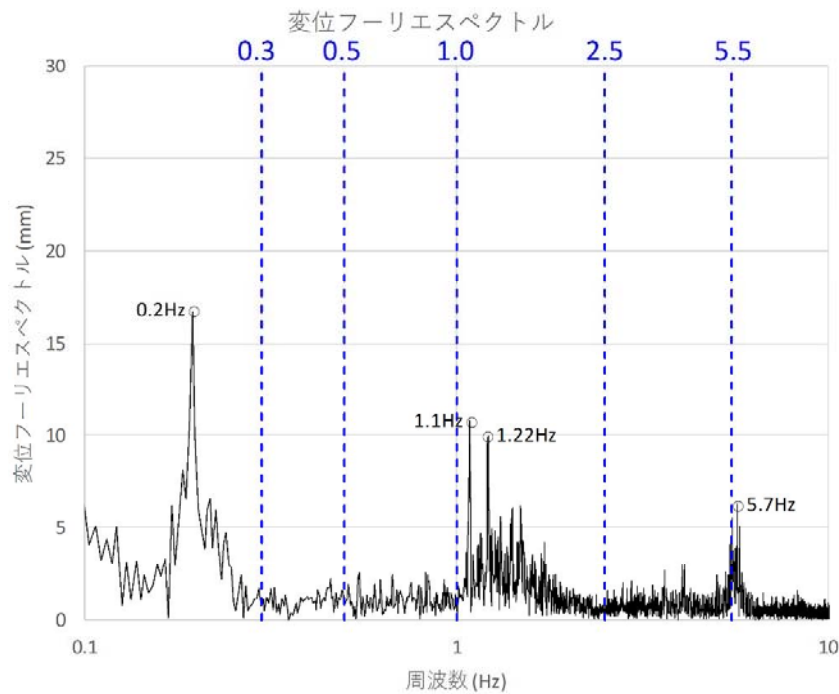


図 16 止水板の鉛直変位におけるフーリエスペクトル図

(6) 実証試験に生じるうねりの評価

各評価対象による周波数成分を評価した結果を表4に示す。

表4 各評価対象の周波数分析結果

	(1)実証試験用入力波	(2)浮き基礎	(3)試験装置	(4)振動台	(5)止水板
周波数 (Hz)	—	—	—	0.10, 0.20 (ピッチング) 0.10, 0.20 (ローリング)	—
	1.09	1.1 (固有値)	1.09	1.09	—
	1.22 (固有値) ※	—	1.21	—	—
	5.77 (固有値) ※	—	5.77	5.77	—
	—	—	—	—	10.55 (固有値)

※：鋼製防護壁のY方向の固有周期

各評価対象の周波数が伝達し各対象設備に同様の周波数が検出されていることから、実証試験のうねりの原因は、実証試験装置や供試体（止水板等）の影響ではないことが分かった。

振動台による影響は、ピッチングとローリング共に（0.10Hz, 0.20Hz）による影響であることから、実証試験に生じているうねりは振動台によるものと推測される。

そのため、実証試験に生じている振動台のピッチング成分を除去するため、止水板の鉛直変位におけるフーリエスペクトルから、0.3Hz以下のフィルタリングにより影響を除去した止水板の挙動を確認する。図17に止水板の鉛直変位におけるフィルタリングの実施範囲を示す

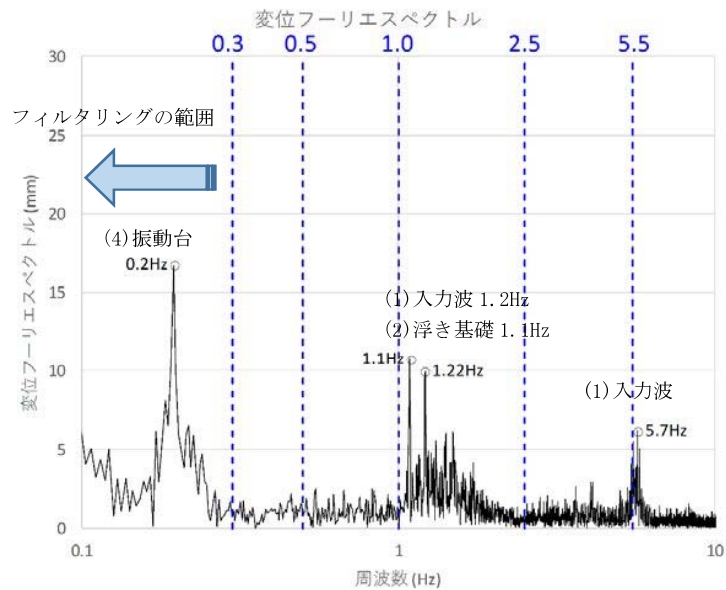
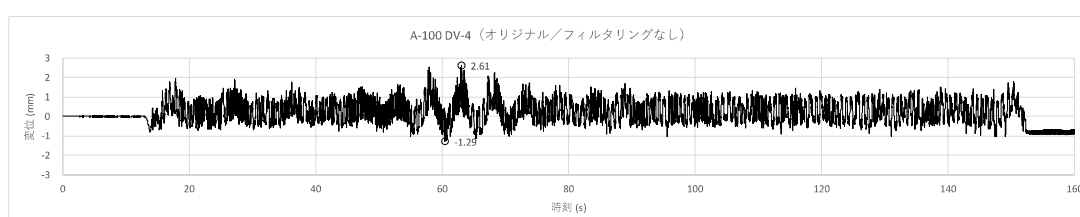


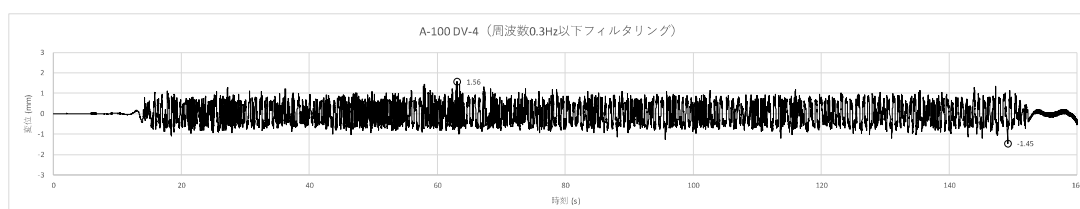
図17 止水板の鉛直変位におけるフィルタリング実施範囲

実証試験にて得られた鉛直変位の結果から振動台のピッチングにおける周波数を除去するため実証試験の鉛直変位のデータに対し、0.3Hz以下の周波数をフィルタリングした波形を以下に抽出した。

その結果、止水板の実証試験の鉛直変位の結果から、ピッチングを除去した止水板の鉛直変位データを把握することができ、ピッチングが実証試験におけるうねりの成分であることが明らかになった。図18に3方向同時加振時（Y方向）の鉛直変位時刻歴波形を示す。



実証試験時の鉛直変位（計測値）



実証試験時の鉛直変位（0.3Hz以下フィルタ）

図18 3方向同時加振時の鉛直変位時刻歴波形フィルタリング結果

今後は、止水板の挙動について三次元動的解析結果と実証試験データとの比較や検討時には、必要に応じてフィルタリング（0.3Hz以下）を通した止水板の挙動と比較することで検証を実施する。

(7) 実証試験結果とフィルタリング (0.3Hz 以下) 結果との比較

実機に近い実証試験の止水板の接続部 B (DV-2) と C (DV-3) の鉛直変位の結果について比較した。うねりの影響のある成分を除去した結果、鉛直変位量は減少し止水板の鉛直挙動の範囲内となった。表 5 に止水板の鉛直変位量と浮き上がり量, 図 19 に 3 方向同時加振のフィルタリング前後の時刻歴波形を示す。

止水板の上下の挙動の詳細は, 「6.1.3.5 止水機構 (1 次止水機構) の実証試験結果及び 3 次元動的解析との検証について」に示す。

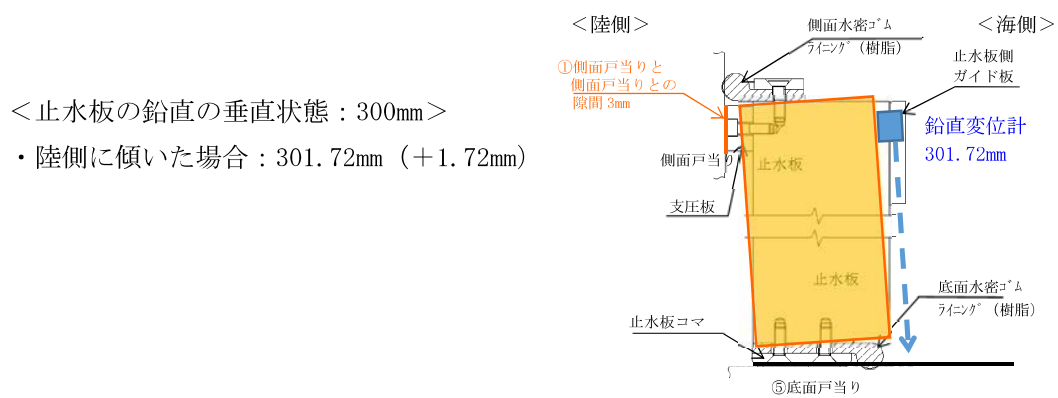


表 5 止水板の鉛直変位量と浮き上がり量 (止水板接続部 (mm))

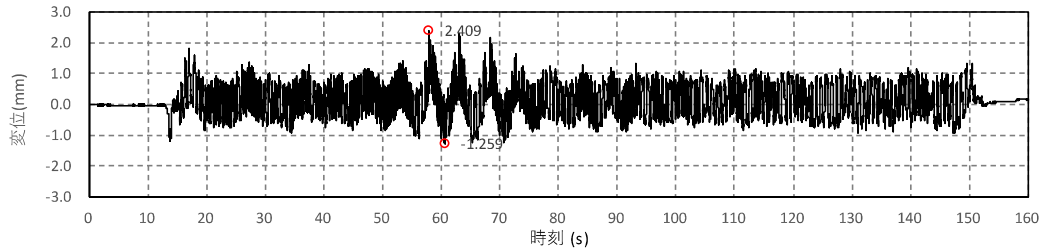
		② 3 方向 (Y 方向 (堤軸直角) 包絡波)		浮き上がり量判定 +1.72mm 以下
		計測値	フィルタリング後	
止水板の地震時の鉛直変位量	1 回目	2.40 (DV-2)	1.52 (DV-2)	○
		2.35 (DV-3)	1.30 (DV-3)	
	2 回目	2.41 (DV-2)	1.58 (DV-2)	○
		2.20 (DV-3)	1.49 (DV-3)	

<3方向(Y方向(堤軸直角)包絡波)>

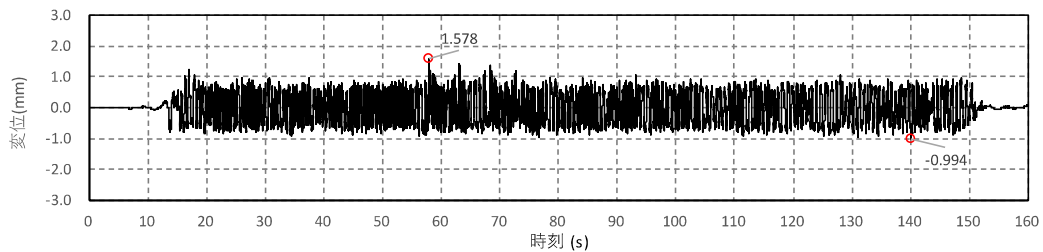
a. 水平(Y方向)最大加速度(2回目)

◆鉛直変位測定点 B (DV-2)

<計測波形>

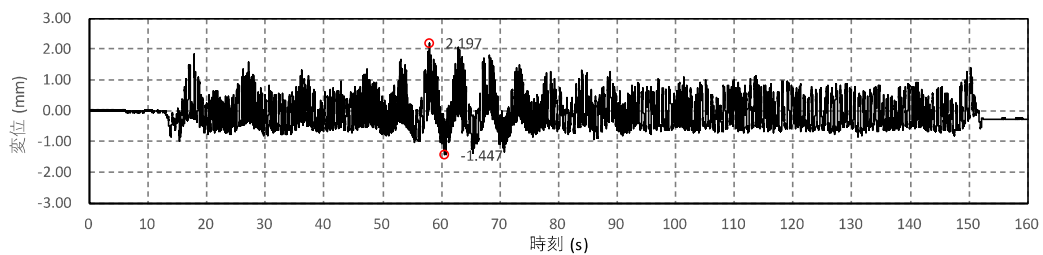


<フィルタリング後の波形>



◆鉛直変位測定点 C (DV-3)

<計測波形>



<フィルタリング後の波形>

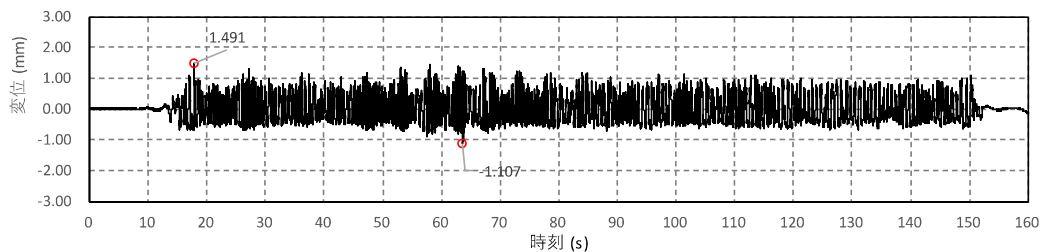


図 19 3方向同時加振のフィルタリング前後の時刻歴波形

(8) 三次元動的解析フィルタリングによる再現性の検証

底面戸当り側に 0.2Hz の回転変位 (図 8 の振動台の回転変位 (青線)) を与えた場合の三次元動的解析を実施し、止水板の鉛直変位の動きにうねりが生じるか確認した。

三次元動的解析の結果、止水板の鉛直変位の動きに 0.2Hz のうねりが認められ、実証試験結果と同じうねりの挙動が確認できた。また、三次元動的解析モデルは、実証試験の鉛直変位量よりも大きくなる結果が認められた。

表 6 に止水板の鉛直変位量の比較、図 20 から図 21 にモデル図及び解析結果を示す。

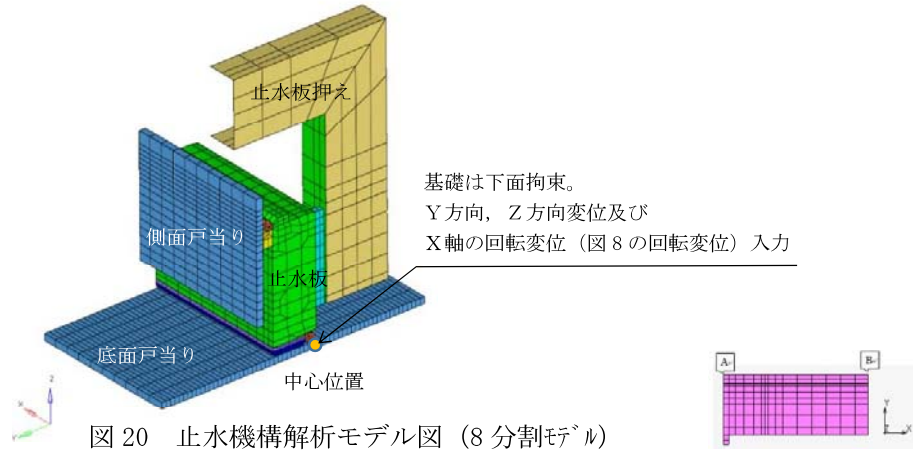


図 20 止水機構解析モデル図 (8 分割モデル)

三次元動的解析も実証試験結果と同様に止水板に 0.2Hz 程度のうねりが確認できる。

止水板モデル平面図 (上面)

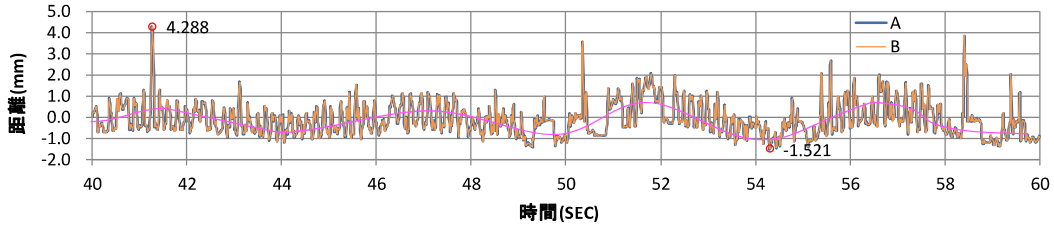


図 21 三次元動的解析 (実機モデル) の結果
<8 分割, 0.2Hz 回転変位入力>

表 6 止水板の鉛直変位量の比較 (mm)

止水板の鉛直変位量		② 3 方向 (Y 方向 (堤軸直角) 包絡波)		実証試験との差 (②-①)
		実証試験 (①)	0.2Hz 回転変位モデル (②) 8 分割モデル (参考値) ※	
浮き上がり量 (プラス側)		2.41	4.29	+1.88
沈み込み量 (マイナス側)		-1.26	-1.52	-0.26

※8 分割モデルの特徴：フルスケールモデルは実機と同じ奥行方向の拘束条件に対し、8 分割モデルは平面的な二次元動的解析に近いことから、浮き上がりに対しての応力が平面的に一律かかる状態になり、鉛直変位量が大きくなる傾向にある。

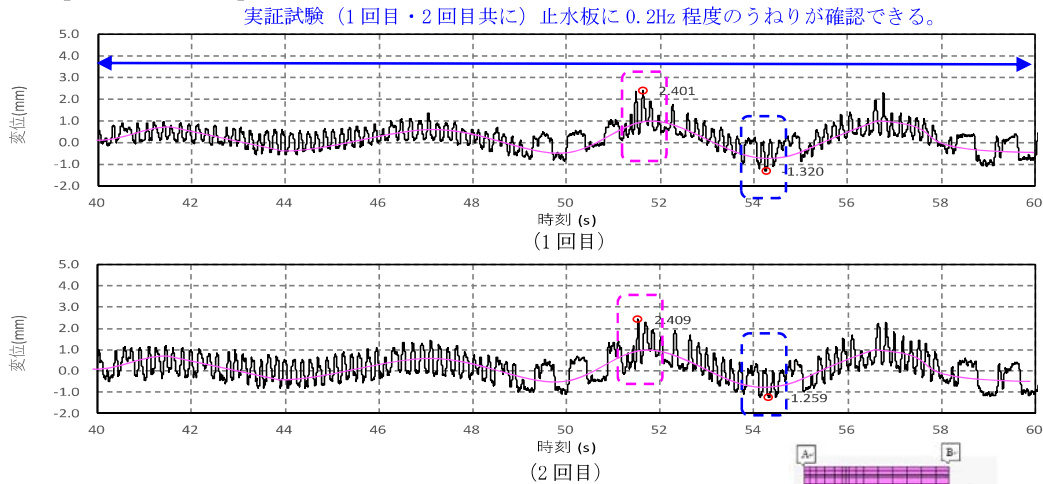
前述より、実証試験の観測値と三次元動的解析の実機モデルに回転変位を与えた結果との検証結果を以下に示す。

- ◆実証試験結果及び三次元動的解析の実機モデル共に 0.2Hz 程度のうねりが確認できた。
- ◆浮き上がり量のプラス側（浮き上がる：桃色点線）は、実証試験よりも三次元動的解析の実機モデルの方が大きくなる傾向がある。また、浮き上がる時間帯は、実証試験と違う時間帯で発生することが確認できた。
- ◆浮き上がり量のマイナス側（沈み込む：青色点線）は、ほぼ同じ量で同じ時間帯に発生することが確認できた。

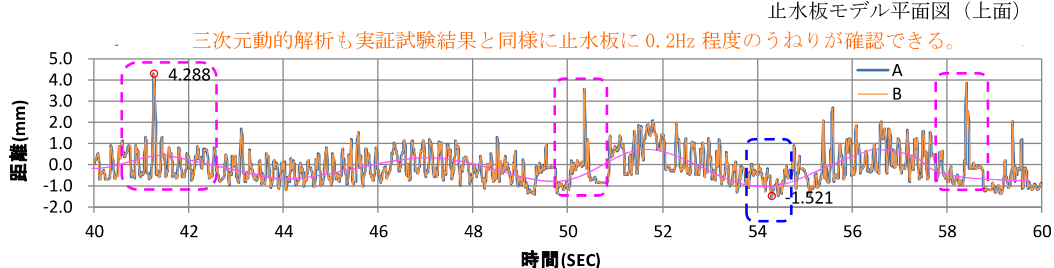
実証試験の観測値と三次元動的解析の実機モデルに 0.2Hz 程度のうねりを確認し、実機モデルへの再現性を確認した。

また、三次元動的解析の実機モデルは、実証試験結果に比べ鉛直変位のプラス側（浮き上がる側）が大きく保守的な値であることが分かった。また、マイナス側（沈み込み側）は同じ沈み込み量及び時間帯であることが分かった。

【実証試験結果】



【実機モデル（8分割モデル）】（0.2Hz 回転変位入力）



浮き上がり量は、実証試験結果よりも大きくなる傾向が得られた。（桃色点線）
 また、浮き上がる時間帯は、鉛直変位のプラス側（桃色点線）は違う時間帯で浮き上がるが、マイナス側（青色点線）は、同じ沈み込み量及び同じ時間帯になることが確認できた。

図 22 実証試験結果と実機モデルとの比較

(9) 実証試験における振動台のピッチングとローリングの影響について

実証試験において、実際の波形にはない振動台による回転変位 0.1, 0.2Hz 程度の長周期のうねりの影響が考えられる。ピッチングとローリングの影響により試験条件は実際の入力波形である短周期成分とピッチングとローリングの長周期成分が混在した状況での試験となった。しかし、図 12 に示す振動台のピッチングとローリングの周波数が 0.1, 0.2Hz であり止水板の周波数 10.55Hz から離隔が大きい事より共振することなく、止水板の挙動に影響を与えることはなかった。

止水板の挙動については、振動台のピッチングとローリングの周波数成分(0.1, 0.2Hz)を除去するためフィルタリング(0.3Hz 以下)を掛けることにより、止水板の挙動を正確に把握することができる結果となった。

図 23 に止水板の鉛直変位における振動台と止水板の固有周期について示す。

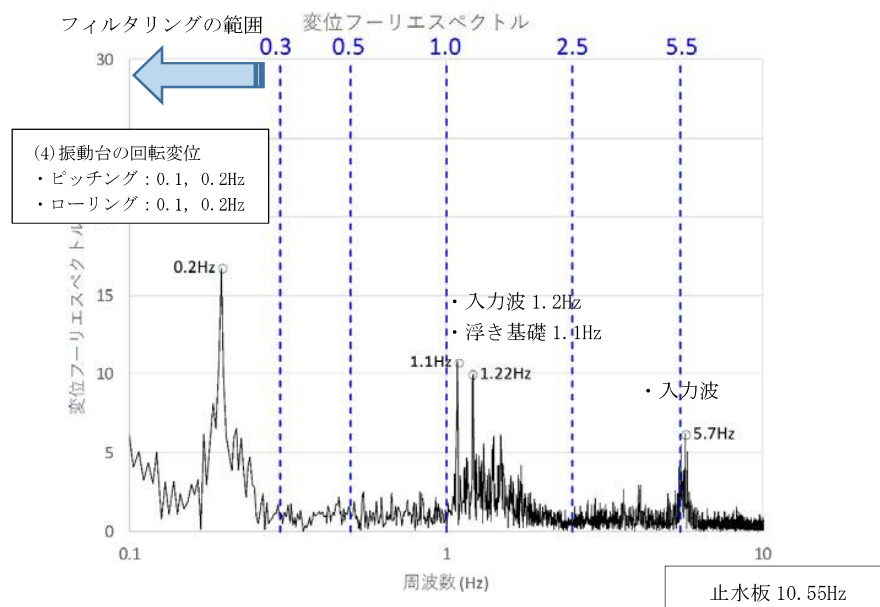


図 23 止水板の鉛直変位における振動台と止水板の固有周期

4. 三次元的解析モデルの信頼性の向上及び設計への反映事項

三次元的解析モデルの信頼性を向上させるため、解析モデルに製作公差を含めた解析モデルを作成し三次元的解析を実施した。実際の試験装置の支圧板厚さとガイド間隔の隙間を 4mm にして三次元的解析を実施した。

図 24 に実証試験の試験装置における止水板とガイド間の寸法を示す。

<寸法記録>

	止水板厚さ A (mm)	ガイド間隔 (mm)	隙間 (mm)
図面寸法	210	213	3
実際の試験装置の寸法 (製作公差含む)	207	211~210	3~4

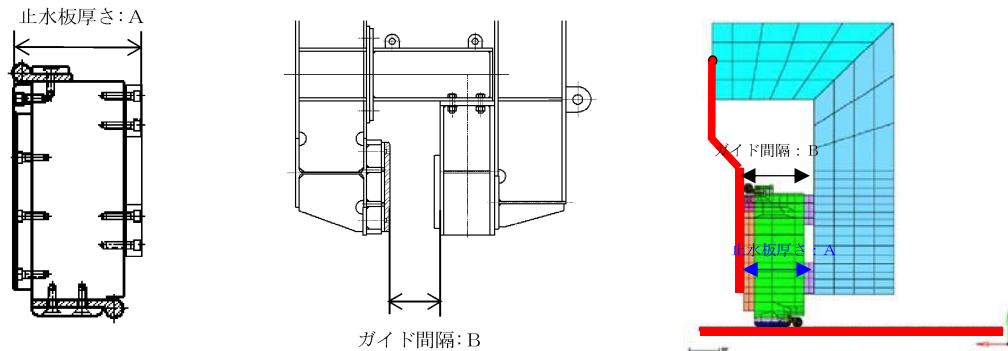
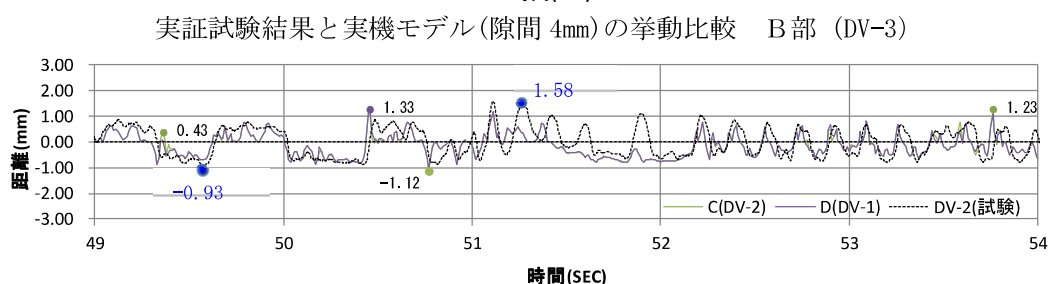
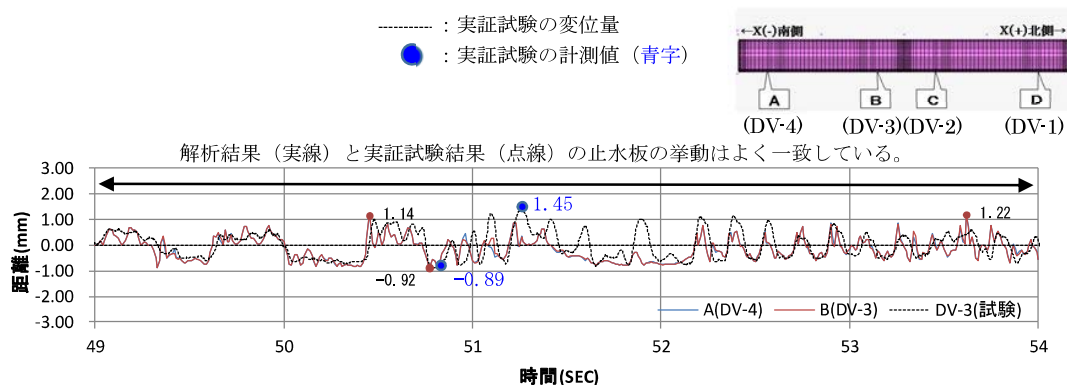


図 24 実証試験の試験装置における止水板とガイド間の寸法

実証試験結果（フィルタリング後）と実機モデルの隙間（4mm）の 3 方向同時加振時の結果について比較した。その結果、実証試験結果と実機モデル（隙間 4mm）との比較において、浮き上がり量の差が僅かであり、よく一致した結果が得られた。また、止水板の浮き上がりや挙動に対してもよく一致しており、解析モデルの信頼性が向上した結果が得られた。

図 25 に実証試験結果と実際の試験装置の隙間（4mm）での解析比較、表 7 に止水板の鉛直変位について示す。



実証試験結果と実機モデル (隙間 4mm) の挙動比較 C部 (DV-2)

解析結果 (実線) と実証試験結果の止水板の挙動はよく一致している。
 鉛直の変位量も誤差は僅かであり解析モデルの精度が向上した。

図 25 実証試験結果と実機モデル (隙間 4mm) との挙動比較

表 7 止水板の鉛直変位比較 (mm)

		② 3 方向 (Y 方向 (堤軸直角) 包絡波)		実証試験と解析モデルとの差 (②-①)
		実証試験 (①)	隙間 4mm モデル (②)	
止水板の鉛直変位	浮き上がり量 (プラス側)	1.45 (DV-3) 1.58 (DV-2)	1.22 (DV-3) 1.33 (DV-2)	-0.23 ~ -0.25
	沈み込み量 (マイナス側)	-0.89 (DV-3) -0.93 (DV-2)	-0.92 (DV-3) -1.12 (DV-2)	-0.03 ~ -0.19

図 23 から止水板の挙動や鉛直変位量について、精度の高い解析モデルが確認でき信頼性が向上した。浮き上がりについては、実証試験の鉛直変位量の結果が解析結果を僅かに上回ることから、地震時における浮き上がりが大きくなる可能性がある。しかしながら、止水機構には 2 次止水機構を設ける設計であり、仮に、1 次止水機構の水密ゴムの浮き上がりによる漏水が発生したとしても敷地内には浸水しない。

5. 1次止水機構の構造設計への反映事項

三次元動的解析の実機モデルが実証試験と同じ止水板の挙動を確認したため、三次元動的解析モデルの信頼性は高く、地震時における浸水防止機能に影響を与えることのないよう反映する。

実機の構造設計については、静的荷重による強度計算、耐震計算を実施し、動的な評価として三次元動的解析による解析結果を構造設計に適切に反映することで設備の構造信頼性を高める。なお、2次止水機構については、別途工事計画認可申請書に強度計算を実施する。

図 26 に 1 次止水機構の工事認可申請書構造設計フローを示す。

以下に今後設計への反映項目を示す。

①解析モデルの信頼性の向上

実証試験の結果と三次元動的解析モデルを比較すると止水板の挙動や浮上り量において、隙間 4mm モデルが実証試験に近い結果が得られている。今後の止水機構の構造設計においては、原則設計の公称値である隙間 3mm モデルにて強度評価を実施し、止水板の挙動や浮き上がり量、発生応力にいてのばらつきを考慮し、隙間 4mm モデルの解析結果と比較し応力評価する。

また、製作、施工上止水板ガイド付き厚さとガイド間隔は、最少 3mm 最大 6mm で施工することから、6mm の隙間モデルにおける三次元動的解析も実施し、解析モデルのばらつきを評価し解析モデルの信頼性向上を図る。6 項に詳細を示す。

②衝突の部材に与える影響評価

止水板の鉛直変位の挙動の結果から、前後（海側・陸側）の傾きが確認できる。

実証試験中においても止水板と止水板押えや底面・側面戸当りとの接触音が認められることから三次元動的解析の結果より、衝突の部材に与える影響評価を実施し構造設計への影響を評価する。

③実証試験結果及び三次元動的解析結果の報告

実証試験にて得られた止水板の挙動、変位追従性、水密ゴムの健全性の観点より結果を取り纏める。また、動的解析（二次元・三次元）による結果も合わせて集約し、構造部材の許容応力の照査、水密ゴムの応力照査について評価する。

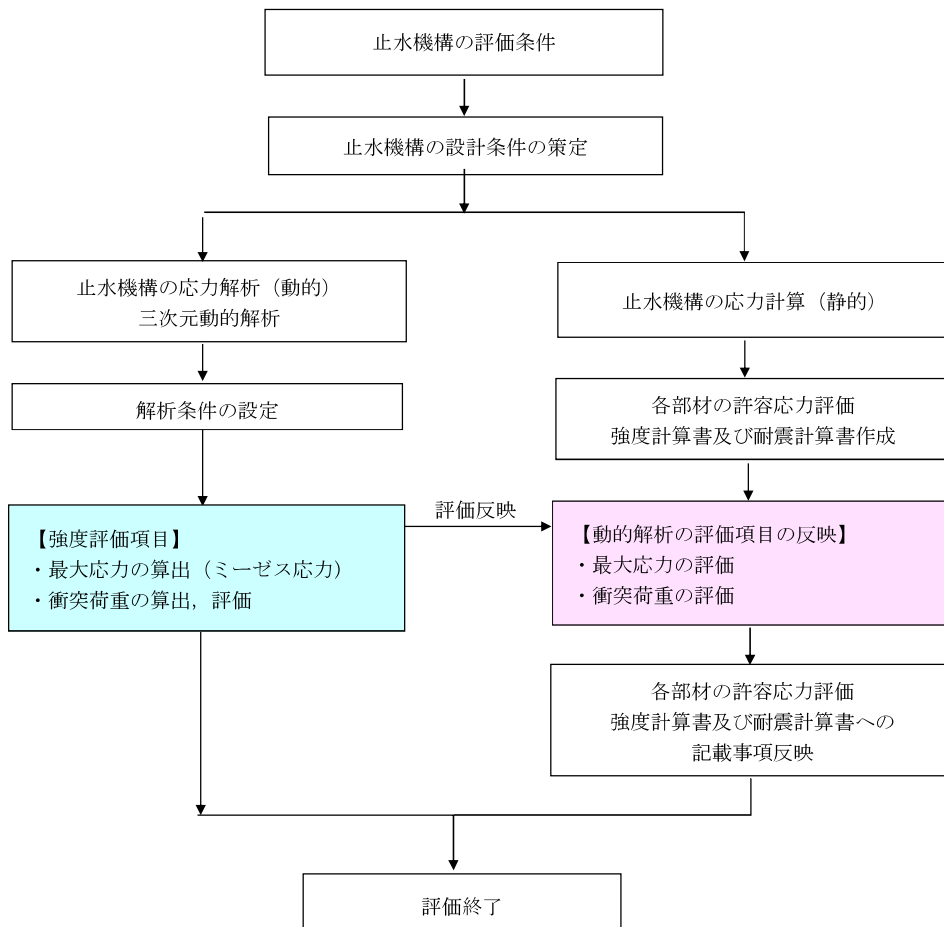


図 26 1次止水機構の工事認可申請書構造設計フロー

6. 実機製作における公差の考え方

前述にてモデルの公差を原則 3mm とし、ばらつきを考慮し 4mm においても解析を実施し信頼性の高いモデルであることを確認した。ここでは、実際の製作における隙間を考慮した場合の解析モデルのケースについて、実機寸法を整理した。

止水板ガイド付き厚さとガイド間隔は、最少 3mm 最大 6mm で施工することから、6mm の隙間モデルにおける三次元動的解析も実施し、解析モデルのばらつきを評価し解析モデルの信頼性向上を図る。図 27 の実機における止水板とガイド隙間の寸法を示す。

なお、設置時における隙間の管理は、止水板押えの位置（約 2m 間隔）にて管理する。

< 止水板と止水板ガイド間の寸法 >

	止水板厚さ A (mm)	止水板ガイド付き 厚さ B (mm)	ガイド間隔 C (mm)	【隙間管理値】 C-B (mm)
図面寸法	150	210	213	3
実機寸法 (製作公差含む)	150 ⁺¹ ₋₀	210±3 (ライナ調整)	213 ⁺⁶ ₋₃ (ライナ調整)	3 ⁺³ ₋₀
解析モデル	150	210 ⁺⁰ ₋₃	213	3 ⁺³ ₋₀

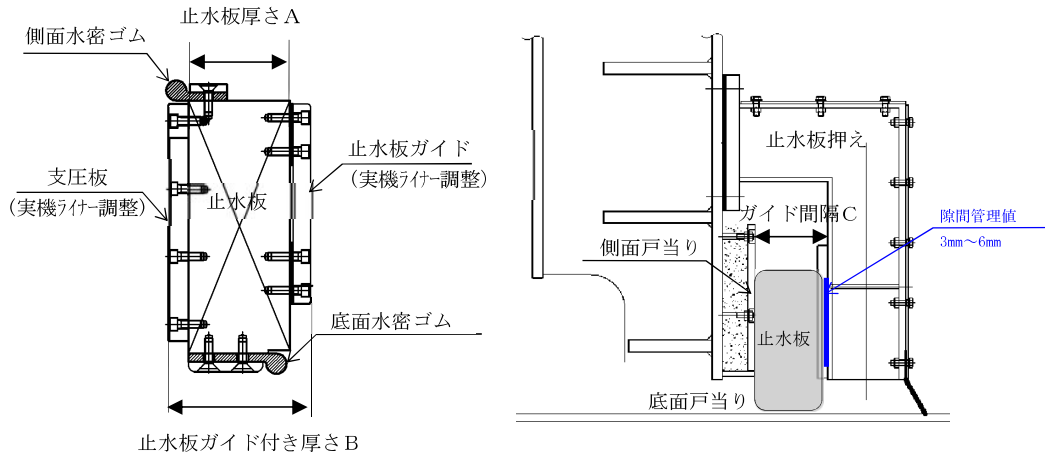


図 27 実機における止水板とガイド間の寸法

三次元動的解析モデルについては、ガイド間の隙間の寸法について公称値の 3mm を基本として評価する。また、製作、施工上のばらつきを考慮した 1mm 増加の 4mm、最大 6mm の 2 ケースの三次元動的解析を実施し、ばらつき等の保守的なモデルを設計に反映する。

なお、実機製作の隙間の管理も同様に、3mm～6mm にて設置することにより、止水板の挙動は三次元動的解析と同等の挙動を示す。次頁に実機における具体的な止水機構の寸法管理方法について説明する。

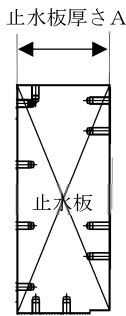
<実機における止水機構の寸法管理方法> (図 28 参照)

①止水板単体の板厚測定 (図①：A寸法)

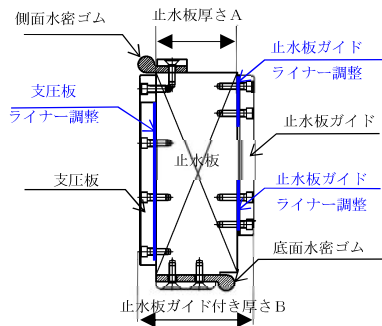
A寸法が 150mm(+1mm/-0mm)の公差内であることを確認する。

②止水板ガイド (30mm)，支圧板 (30mm) の設置 (図②：B寸法)

ボルトにて取り付ける際、寸法調整のため止水板と止水板ガイドの間及び支圧板の間の取付け部にライナー(ステンレス鋼)により調整し、止水板厚さ 150mm(+1mm/-0mm)を含めた、止水板ガイド付き厚さのB寸法を 210mm±3mm になるように調整し設置する。



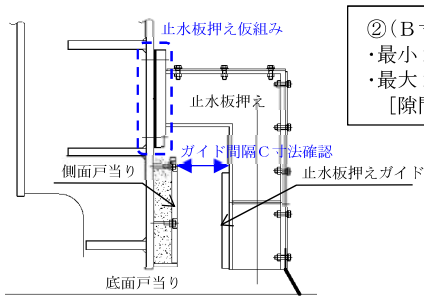
図① 止水板の測定 (A寸法)



図② 止水板ガイド付き厚さの測定 (B寸法)

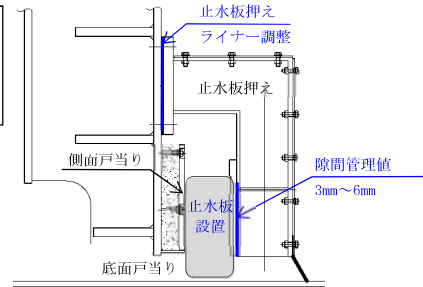
③止水板押えを仮組状態でガイド間隔C寸法を測定し、②で測定した止水板ガイド付き厚さB寸法を差引き止水板押えライナー調整の厚さを決める。その際、C寸法が④管理値内 3mm(+3mm/-0mm)に入るようライナー厚さを調整する。(図③：C寸法)

④止水板及び止水板押え設置後にガイド間隔C寸法を測定し、管理値内 3mm(+3mm/-0mm)であることを確認する。隙間管理値は 3mm～6mm にて管理する。(図④)



図③ ガイド間隔寸法 (C寸法:止水板設置前)

②(B寸法)⇒③C寸法
 ・最小 207mm⇒210～213mm
 ・最大 213mm⇒216～219mm
 [隙間管理値 3mm～6mm]



図④ ガイド間隔据付け寸法 (C寸法:止水板設置後)

(単位: mm)

	①止水板A寸法	②止水板ガイド厚さ B寸法	③ガイド間隔 C寸法	④隙間管理値 (C-B)
公称値 / (): 公差 / [] : 許容範囲	150(+1mm/-0mm) [150～151mm]	210(±3mm) [207～213mm]	213(+6mm/-3mm) [210～219mm]	3(+3mm/-0mm) [3～6mm]

図 28 実機における止水機構の据付け手順及び寸法管理方法

原子炉格納施設的设计条件に関する説明書のうち
重大事故等時の動荷重について

1. 概要

東海第二発電所において、重大事故等時の原子炉格納容器に生じる動荷重について整理し、その動荷重が設計基準事故を上回る又は設計基準事故で想定されていない動荷重については、原子炉格納容器に対する影響を確認する。

2. 原子炉格納容器に生じる動荷重について

2.1 設計基準事故時に生じる動荷重

原子炉格納容器に生じる動荷重を抽出するにあたって、初めに設計基準事故時に生じる動荷重について、記載する。

設計基準事故時に生じる動荷重は、「BWR MARK II型格納容器圧力抑制系に加わる動荷重の評価指針」で示されており、原子炉冷却材喪失時及び逃がし安全弁作動時に生じるものを考慮することが求められている（参考資料 1）。この 2 つの事象時は、以下のような現象により動荷重が生じる。

2.1.1 原子炉冷却材喪失（LOCA）時に生じる動荷重

原子炉冷却材喪失（LOCA）時には、原子炉冷却材圧力バウンダリ内から多量の原子炉冷却材が流出することに伴い、以下のような現象が生じる。

- ・ LOCA 時のドライウェル圧力の急激な上昇によりベント管内の水がサブプレッション・チェンバへ移行する
- ・ その後、ドライウェル内の非凝縮性ガスがサブプレッション・チェンバへ移行する
- ・ 原子炉冷却系統から流出した原子炉冷却材が蒸気となり、ドライウェルからサブプレッション・チェンバへ移行する

この過程で、ベント管内の水がサブプレッション・チェンバへ移行すると、水ジェット流が形成され、動荷重が作用する。また、非凝縮性ガスがサブプレッション・チェンバへ移行すると気泡を形成し、プール水中の圧力上昇、水面上昇による衝撃力等により、動荷重が作用する。さらに蒸気がサブプレッション・チェンバへ移行するとプール水によって蒸気は凝縮され、この過程でサブプレッション・チェンバ内のプール水が揺動し、種々の動荷重が生じる。

2.1.2 逃がし安全弁の作動時に生じる動荷重

逃がし安全弁の作動時には、逃がし安全弁から多量の原子炉冷却材が流出することに伴い、以下のような現象が生じる。

- ・逃がし安全弁作動時に多量の原子炉冷却材が放出されるため、逃がし安全弁排気管（以下「排気管」という。）内の水がサプレッション・チェンバへ移行する
- ・その後、排気管内の非凝縮性ガスがサプレッション・チェンバへ移行する
- ・原子炉圧力容器から流出した蒸気が、逃がし安全弁から排気管を通じて、サプレッション・チェンバへ移行する

この過程で、排気管内の水がサプレッション・チェンバへ移行すると、水ジェット流が形成され、動荷重が作用する。また、非凝縮性ガスがサプレッション・チェンバへ移行すると気泡を形成し、この気泡が過膨張・収縮を繰り返す、動荷重が作用する。さらに蒸気がサプレッション・チェンバへ移行するとプール水によって蒸気は凝縮され、この過程で蒸気が不安定凝縮となる場合、動荷重が生じる。

2.2 重大事故等時に生じる動荷重の整理

2.1 に示したとおり、動荷重は、ベント管又は排気管から、多量の水、非凝縮性ガス及び蒸気がサプレッション・チェンバに移行するときに発生する。このため、重大事故等時に生じる動荷重についても、ベント管又は排気管から、多量の水、非凝縮性ガス及び蒸気がサプレッション・チェンバに移行する事象を抽出し、整理する。

整理方法としては、炉心損傷防止対策の有効性評価における重要事故シーケンス及び格納容器破損防止対策の有効性評価における評価事故シーケンス（重要事故シーケンス等）ごとに事故進展を整理し、生じる動荷重を抽出する。重要事故シーケンス等において、多量の水、非凝縮性ガス及び蒸気がサプレッション・チェンバに移行するシーケンスを第 2-1 表に示す。

この整理により、設計基準事故時で考慮されていない動荷重は、以下のように抽出できた（第 2-2 表）。

- ・ 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱
逃がし安全弁作動時に原子炉圧力容器からサプレッション・チェンバへ放出される蒸気が過熱蒸気であることから設計基準事故時の飽和蒸気と性状が異なる
- ・ 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用
高温の炉心（デブリを含む）と水との接触に伴う圧力上昇に伴い、サプレッション・チェンバへドライウェル内の非凝縮性ガス等が流入する
- ・ 格納容器過圧・過温破損
ベント時にサプレッション・チェンバが減圧することによりドライウェルからサプレッション・チェンバへ蒸気が流入するとともにプール水の減圧沸騰が生じる恐れがある

これらの動荷重に対して、有効性評価等で得られている各パラメータ等を用いること

で、原子炉格納容器の健全性を確認する。

また、逃がし安全弁作動時の動荷重のうち、設計基準事故時に想定される動荷重と同等以下となる重要事故シーケンスについては、一部のパラメータが設計基準事故時のパラメータを超えることから、その影響について評価結果を記載する。

第 2-1 表 重大事故等時に生じる動荷重

No.	重要事故 シーケンス等	事象の概要及び重大事故等時に生じる動荷重
1	<p>高圧・低圧注水 機能喪失 (給水喪失)</p> <p>[TQUV]</p>	<p>給水喪失により原子炉水位は低下するが、逃がし安全弁（自動減圧機能）7 弁を手動開放させ、低圧代替注水系（常設）により注水する。</p> <p>本事象は、<u>逃がし安全弁（自動減圧機能）7 弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。また、<u>格納容器ベント時のドライウエルからサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出及びサプレッション・チェンバ内のプール水の減圧沸騰</u>を想定している。</p>
2	<p>高圧注水・減圧 機能喪失 (給水喪失)</p> <p>[TQUX]</p>	<p>給水喪失により原子炉水位は低下するが、過渡時自動減圧機能による自動減圧が行われ、低圧炉心スプレイ系等により注水される。</p> <p>本事象は、<u>自動減圧時の逃がし安全弁の作動に伴うサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。</p>

No.	重要事故 シーケンス等	事象の概要及び重大事故等時に生じる動荷重
3	<p style="text-align: center;">全交流 動力電源喪失</p> <p>[長期 TB (津波浸水による 最終ヒートシンク喪失と 同じ)]</p>	<p>全交流動力電源喪失により原子炉水位は低下し、その後原子炉隔離時冷却系が運転開始して原子炉水位は維持される。8 時間後に可搬型代替注水中型ポンプを用いた低圧代替注水系 (可搬型) の準備が完了した時点で、逃がし安全弁 (自動減圧機能) 7 弁を手動開放させ、低圧代替注水系 (可搬型) により注水する。</p> <p>本事象は、<u>逃がし安全弁 (自動減圧機能) 7 弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。</p>
	<p style="text-align: center;">[TBD, TBU]</p>	<p>全電源喪失により原子炉水位は低下し、その後高圧代替注水系を手動起動して原子炉水位を維持する。8 時間後に可搬型代替注水中型ポンプを用いた低圧代替注水系 (可搬型) の準備が完了した時点で、逃がし安全弁 (自動減圧機能) 7 弁を手動開放させ、低圧代替注水系 (可搬型) により注水する。</p> <p>本事象は、<u>逃がし安全弁 (自動減圧機能) 7 弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。</p>
	<p style="text-align: center;">[TBP]</p>	<p>全交流動力電源喪失により水位は低下し、その後原子炉隔離時冷却系が運転開始して原子炉水位は維持される。3 時間後に可搬型代替注水中型ポンプを用いた低圧代替注水系 (可搬型) の準備が完了した時点で、再閉鎖に失敗した逃がし安全弁 1 弁に加えて逃がし安全弁 (自動減圧機能) 6 弁を手動開放させ、低圧代替注水系 (可搬型) により注水する。</p> <p>本事象は、<u>再閉鎖に失敗した逃がし安全弁 1 弁に加えて逃がし安全弁 (自動減圧機能) 6 弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。</p>

No.	重要事故 シーケンス等	事象の概要及び重大事故等時に生じる動荷重
4	崩壊熱除去 機能喪失 (取水機能喪失) [TW]	<p>外部電源喪失により原子炉水位は低下し、その後原子炉隔離時冷却系が運転開始して原子炉水位が維持される。その後、逃がし安全弁（自動減圧機能）7弁を手動開放させ、低圧代替注水系（常設）により注水する。</p> <p>本事象は、<u>逃がし安全弁（自動減圧機能）7弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。</p>
5	崩壊熱除去 機能喪失 (残留熱除去系機能喪失) [TW]	<p>給水喪失により原子炉水位は低下し、その後原子炉隔離時冷却系及び高圧炉心スプレイ系が運転開始して原子炉水位が維持される。その後、逃がし安全弁（自動減圧機能）7弁を手動開放させ、低圧代替注水系（常設）により注水する。</p> <p>本事象は、<u>逃がし安全弁（自動減圧機能）7弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。また、<u>格納容器ベント時のドライウエルからサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出及びサプレッション・チェンバ内のプール水の減圧沸騰</u>を想定している。</p>
6	原子炉停止 機能喪失 [ATWS]	<p>主蒸気隔離弁誤閉止の発生後、原子炉スクラムに失敗する。主蒸気隔離弁が閉止されると原子炉圧力が上昇し、原子炉圧力高信号で再循環系ポンプがトリップする。主蒸気隔離弁の閉止により、タービン駆動給水ポンプはトリップするが、電動駆動給水ポンプが自動起動して給水が継続される。</p> <p>本事象は、<u>逃がし安全弁の作動に伴うサプレッション・チェンバへの蒸気放出</u>を想定している。</p>

No.	重要事故 シーケンス等	事象の概要及び重大事故等時に生じる動荷重
7	LOCA 時注水 機能喪失 (中小破断) [SE]	<p>外部電源喪失及び LOCA 発生により原子炉水位は低下するが、逃がし安全弁（自動減圧機能）7 弁を手動開放させ、低圧代替注水系（常設）による注水を開始する。</p> <p>本事象は、<u>原子炉冷却材喪失時のブローダウン過程における高温水・蒸気の放出</u>を想定している。また、<u>逃がし安全弁（自動減圧機能）7 弁の手動開放に伴うサブプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。また、<u>格納容器ベント時のドライウエルからサブプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出及びサブプレッション・チェンバ内のプール水の減圧沸騰</u>を想定している。</p>
8	格納容器バイパス (残留熱除去系配管破断) [ISLOCA]	<p>ISLOCA 時は、残留熱除去系配管の破断を想定し、破断口からの冷却材流出による水位低下により、原子炉隔離時冷却系が運転開始して原子炉水位が維持される。その後、逃がし安全弁（自動減圧機能）7 弁を手動開放させ、低圧炉心スプレイ系による注水を開始する。</p> <p>本事象は、<u>逃がし安全弁（自動減圧機能）7 弁の手動開放に伴うサブプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u>を想定している。</p>
9	雰囲気圧力・温度 による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損)	<p>大破断 LOCA により原子炉水位は低下し、炉心が損傷・熔融する。その後、低圧代替注水系（常設）により、スプレイを開始し、原子炉格納容器を冷却・減圧する、又は、冷却・減圧ができなかった場合、格納容器ベントによって、原子炉格納容器を減圧する。</p> <p>本事象は、<u>原子炉冷却材喪失時のブローダウン過程における高温水・蒸気の放出</u>を想定している。また、<u>格納容器ベント時のドライウエルからサブプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出及びサブプレッション・チェンバ内のプール水の減圧沸騰</u>を想定している。</p>
10	水素燃焼	<p>本事象は、<u>原子炉冷却材喪失時のブローダウン過程における高温水・蒸気の放出</u>を想定している。また、<u>格納容器ベント時のドライウエルからサブプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出及びサブプレッション・チェンバ内のプール水の減圧沸騰</u>を想定している。</p>

No.	重要事故 シーケンス等	事象の概要及び重大事故等時に生じる動荷重
1 1	高压溶融物放出／格納容器 雰囲気直接加熱	給水喪失により原子炉水位は低下し、炉心が損傷・溶融する。その後、逃がし安全弁（自動減圧機能）2弁を手動開放させ、原子炉圧力容器の圧力を低下することで、高压溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の発生を防止する。
1 2	原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用	本事象は、 <u>逃がし安全弁（自動減圧機能）2弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の過熱蒸気放出</u> を想定している。また、 <u>高温の溶融炉心と水との接触に伴う蒸気等のペDESTAL（ドライウエル部）からドライウエルを介したサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u> を想定している。
1 3	溶融炉心・コンクリート相互作用	本事象は、 <u>逃がし安全弁（自動減圧機能）2弁の手動開放に伴うサプレッション・チェンバへの多量の過熱蒸気放出</u> を想定している。また、 <u>高温の溶融炉心と水との接触に伴う蒸気等のペDESTAL（ドライウエル部）からドライウエルを介したサプレッション・チェンバへの多量の蒸気放出</u> を想定している。

第 2-2 表 重大事故等時に生じる動荷重のまとめ表

	重要事故 シーケンス等	動荷重			
		逃がし 安全弁	LOCA	FCI	ベント
1	高圧・低圧注水機能喪失 (給水喪失) [TQUV]	○			●
2	高圧注水・減圧機能喪失 (給水喪失) [TQUX]	○			
3	全交流動力電源喪失[TB]	○			
4	崩壊熱除去機能喪失 (取水機能喪失) [TW]	○			
5	崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系機能喪失) [TW]	○			●
6	原子炉停止機能喪失 [ATWS]	○			
7	LOCA 時注水機能喪失 (中小破断) [SE]	○	○		●
8	格納容器バイパス (残留熱除去系配管破断) [ISLOCA]	○			
9	雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損)		○		●*
10	水素燃焼		○		●
11	高圧溶融物放出/ 格納容器雰囲気直接加熱	●*		●	
12	原子炉圧力容器外の溶融燃料 -冷却材相互作用	●		●*	
13	溶融炉心・コンクリート相互作用	●		●	

○：設計基準事故時に生じる動荷重と同等以下

●：設計基準事故時に考慮されていないもの

●*：設計基準事故時に考慮されていないもののうち、動荷重評価で代表するもの

2.3 重要事故シーケンス等のうち他の重要事故シーケンスで包絡できるものについて

2.2 で抽出した重大事故等時に生じる動荷重のうち、重要事故シーケンス等のうち他の重要事故シーケンスで包絡できるものについて、検討する。

逃がし安全弁作動時の動荷重のうち、設計基準事故時に想定される動荷重と同等以下となる重要事故シーケンスについては、一部のパラメータが設計基準事故時のパラメータを超えるため、動荷重への影響検討が必要である。

検討のため、原子炉格納容器に対する逃がし安全弁の動荷重の考え方について、設計基準事故時の設計条件について記載する。設計条件は、東海第二の実機試験により、非凝縮性ガスによる気泡脈動の圧力振幅が支配的であることを確認しているため、この圧力振幅に基づき動荷重が設定されている（第 2-1 図）。排気管内の非凝縮性ガスに保留されている非凝縮性ガスの体積は、設計基準事故時と重大事故等時で変わらないため、重大事故等時の気泡脈動による圧力振幅は設計基準事故と同等以下である。また、非凝縮性ガスの放出後は、原子炉压力容器から放出された蒸気が凝縮する過程で圧力振幅が生じるが、第 2-1 で示すように既往の試験から不安定凝縮しなければ、気泡脈動による動荷重を上回ることはないため、逃がし安全弁作動時の蒸気が安定的に凝縮できることを確認することにより、設計基準事故時に生じる動荷重と同等以下であることを確認できる。また、既往の試験条件として、多弁作動時による影響、原子炉压力容器圧力による影響も確認されていることから、以下の観点で設計基準事故時と重大事故等時のパラメータを比較し、他の重要事故シーケンス等の包絡性を確認する。

- ・ サプレッション・チェンバ内のプール水温

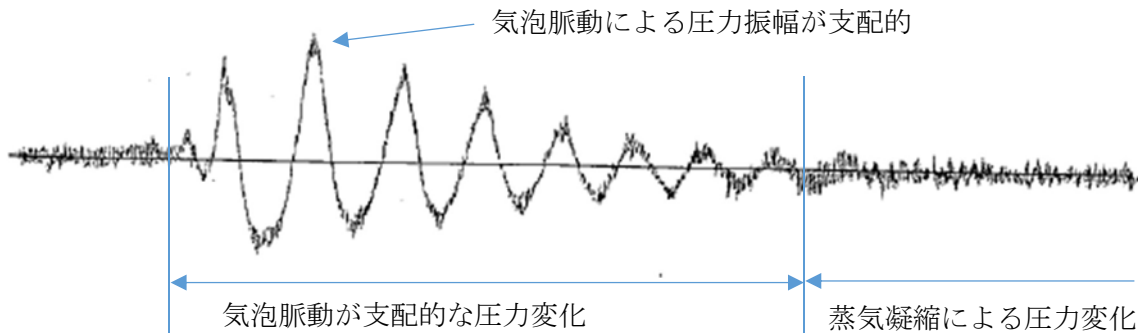
プール水温が設計基準事故時（サプレッション・チェンバの最高使用温度）より高くなる場合、原子炉压力容器より放出される蒸気による不安定凝縮が生じる可能性があるため、動荷重が設計基準事故時より大きくなる可能性がある

- ・ 逃がし安全弁作動時の弁数

逃がし安全弁作動時に作動する弁の数が設計基準事故時より多い場合、既往の試験結果で確認している多弁作動時の圧力振幅が大きくなり、動荷重が設計基準事故時より大きくなる可能性がある

- ・ 逃がし安全弁作動時の原子炉压力容器圧力

逃がし安全弁は原子炉压力容器圧力に応じた吹出量を放出するため、逃がし安全弁作動時の圧力が設計基準事故時より大きくなった場合、動荷重が設計基準事故時より大きくなる可能性がある



第 2-1 図 東二実機試験で得られた逃がし安全弁作動時の水中圧力振動波形
(横軸：時間，縦軸：圧力) (参考資料 2 ③)

整理した結果を第 2-3 表に示す。その結果，以下の 2 つの重要事故シーケンス等で生じる動荷重は，設計基準事故の評価条件を超えるパラメータあるため，影響評価が必要と判断した。

- ・全交流動力電源喪失

プール水温は約 100 °C に達しており，さらに，減圧完了までの間に約 119 °C まで上昇するため，設計基準事故時のプール水温 °C を超える。

- ・原子炉停止機能喪失時

主蒸気隔離弁閉止後の原子炉停止失敗に伴い，逃がし安全弁 18 弁が動作するため，設計基準事故時に設計上考慮している最大 17 弁を超える。このとき，原子炉圧力が約 8.19 MPa[gage] まで上昇するため，既往の試験で確認している試験条件 (7.37 MPa) を超える。

第 2-3 表 重大事故等時に生じる動荷重のうち設計基準事故時の包絡性について (1/2)

重要事故シークエンス等	高圧・低圧注水機能喪失 (給水喪失)	高圧注水・減圧機能喪失 (給水喪失)	全交流動力電源喪失	崩壊熱除去機能喪失 (取水機能喪失)	崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系機能喪失)	原子炉停止機能喪失時	LOCA時注水機能喪失 (中小破断)	格納容器バイパス (残留熱除去系配管破断)
逃がし安全弁作動時 (排気管からサプレッション・チェンバへの流入)	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>原子炉圧力容器を急速減圧する事象発生後早期 (約 25 分) 時点での原子炉圧力容器圧力は 7.79 MPa[gage]以下, プール水温は 53 °Cであり, 原子炉圧力容器圧力は原子炉停止機能喪失時に, プール水温は全交流動力電源喪失に包絡される。</p> <p>また, 原子炉圧力容器減圧時には逃がし安全弁 7 弁による急速減圧を想定しており, 作動弁数は原子炉停止機能喪失時の条件に包絡される。</p>	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>原子炉圧力容器が急速減圧される事象発生後早期 (約 31 分) 時点での原子炉圧力容器圧力は 7.79 MPa[gage]以下, プール水温は 52 °Cであり, 原子炉圧力容器圧力は原子炉停止機能喪失時に, プール水温は全交流動力電源喪失に包絡される。</p> <p>また, 原子炉圧力容器減圧時には逃がし安全弁 2 弁による急速減圧を想定しており, 作動弁数は原子炉停止機能喪失時の条件に包絡される。</p>	<p>DBA に包絡</p> <p>長期TBシークエンスでは, 減圧開始時点でのプール水温は約 100 °Cに達しており, さらに, 減圧完了までの間に約 119 °Cまで上昇する。</p> <p>このため, 設計基準事故時のプール水温 <input type="text" value="119"/> °Cを超えるが, 既往の試験結果等から設計基準事故時の動荷重と同等以下である (2.4に記載)。</p> <p>また, 原子炉圧力容器減圧時には逃がし安全弁 7 弁による急速減圧を想定しており, 作動弁数は原子炉停止機能喪失時の条件に包絡される。</p>	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>原子炉圧力容器の減圧を開始するプール水温が 65 °C到達時点での原子炉圧力容器圧力は 7.79 MPa[gage]以下であり, 原子炉圧力容器圧力は原子炉停止機能喪失時に, プール水温は全交流動力電源喪失に包絡される。</p> <p>また, 原子炉圧力容器減圧時には逃がし安全弁 7 弁による急速減圧を想定しており, 作動弁数は原子炉停止機能喪失時の条件に包絡される。</p>	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>原子炉圧力容器の減圧を開始するプール水温が 65 °C到達時点での原子炉圧力容器圧力は 7.79 MPa[gage]以下であり, 原子炉圧力容器圧力は原子炉停止機能喪失時に, プール水温は全交流動力電源喪失に包絡される。</p> <p>また, 原子炉圧力容器減圧時には逃がし安全弁 7 弁による急速減圧を想定しており, 作動弁数は原子炉停止機能喪失時の条件に包絡される。</p>	<p>DBA に包絡</p> <p>原子炉圧力容器の除熱の過程で, プール水温は約 115 °Cまで上昇するが, プール水温は全交流動力電源喪失に包絡される。</p> <p>また, 主蒸気隔離弁閉止後の原子炉停止失敗に伴い, 逃がし安全弁 18 弁が動作するものの原子炉圧力が約 8.19 MPa[gage]まで上昇しており, 原子炉圧力の上昇率が設計基準事故時より高くなるが, 2.4 で記載のとおり, 設計基準事故時の動荷重と同等以下である。</p>	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>原子炉圧力容器が急速減圧される事象発生後早期 (約 25 分) 時点での原子炉圧力容器圧力は 7.79 MPa[gage]以下, プール水温は 52 °Cであり, 原子炉圧力容器圧力は原子炉停止機能喪失時に, プール水温は全交流動力電源喪失に包絡される。</p> <p>また, 原子炉圧力容器減圧時には逃がし安全弁 7 弁による急速減圧を想定しており, 作動弁数は原子炉停止機能喪失時に包絡される。</p>	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>原子炉圧力容器が急速減圧される事象発生後早期 (約 15 分) 時点での原子炉圧力容器圧力は 7.79 MPa[gage]以下, プール水温は 44°Cであり, 原子炉圧力容器圧力は原子炉停止機能喪失時に, プール水温は全交流動力電源喪失に包絡される。</p> <p>また, 原子炉圧力容器減圧時には逃がし安全弁 7 弁による急速減圧を想定しており, 作動弁数は原子炉停止機能喪失時に包絡される。</p>
ドライウェル圧力上昇時等 (ベントからサプレッション・チェンバへの流入)	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>1 Pd での格納容器ベント実施を想定することから, 格納容器ベント実施時のガス放出流量は, 格納容器過圧・過温破損 (1.5 Pd での格納容器ベントを想定) に包絡される。</p>	—	—	—	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>1 Pd での格納容器ベント実施を想定することから, 格納容器ベント実施時のガス放出流量は, 格納容器過圧・過温破損 (1.5 Pd での格納容器ベントを想定) に包絡される。</p>	—	<p>他シークエンスに包絡</p> <p>1 Pd での格納容器ベント実施を想定することから, 格納容器ベント実施時のガス放出流量は, 格納容器過圧・過温破損 (1.5 Pd での格納容器ベントを想定) に包絡される。</p>	—

第 2-3 表 重大事故等時に生じる動荷重のうち設計基準事故時の包絡性について (2/2)

重要事故シークエンス等	格納容器過圧・過温破損	水素燃焼	高压溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱	原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用	溶融炉心・コンクリート相互作用
逃がし安全弁作動時 (排気管からサブプレッション・チェンバへの流入)	-	-	<p><u>DBA で考慮されていない</u></p> <p>原子炉水位が低下し燃料有効長底部から燃料有効長の 20 % 上の位置に到達した時点で、原子炉圧力容器の減圧を実施していることから、原子炉圧力容器内の蒸気が露出した燃料に熱せられ過熱状態となる。よって、逃がし安全弁作動時に生じる動荷重について過熱蒸気の影響評価を実施する。</p>	<p><u>他シークエンスと同じ</u></p> <p>高压溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱と同じシークエンス。</p>	<p><u>他シークエンスと同じ</u></p> <p>高压溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱と同じシークエンス。</p>
ドライウエル圧力上昇時等 (ベントからサブプレッション・チェンバへの流入)	<p><u>DBA で考慮されていない</u></p> <p>大破断 LOCA を起因事象とするシナリオであり、事象発生後短期間における原子炉格納容器内の圧力・温度挙動及び生じる動荷重は設計基準事故時の大破断 LOCA と同等となるため、DBA に包絡される。</p> <p>格納容器ベントの実施を想定する場合には、一時的なベント管の蒸気流束の増加及びサブプレッション・チェンバ内のプール水表面での減圧沸騰が大きくなることが考えられるため、影響評価を実施する。</p> <p>格納容器ベント後、長期的な動荷重としてチャギングが継続すると考えられるため、5. にて、影響評価を実施する。</p>	<p><u>他シークエンスと同じ</u></p> <p>格納容器過圧・過温破損と同じシークエンス。</p>	<p><u>他シークエンスと同じ</u></p> <p>原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用と同じシークエンス。</p>	<p><u>DBA で考慮されていない</u></p> <p>原子炉圧力容器破損に伴い溶融燃料がペDESTAL 内 (ドライウエル部) の水に落下した際に、当該溶融燃料と水との相互反応によって、大量の水蒸気が発生する。この時、ドライウエルが急激に加圧されることによってサブプレッション・チェンバへ移行するガス・蒸気の流量が増大すると考えられるため、ガス及び蒸気の移行に伴う荷重の影響について考慮する必要がある。</p>	<p><u>他シークエンスと同じ</u></p> <p>原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用と同じシークエンス。</p>

2.4 重大事故等時に生じる動荷重のうち設計基準事故時の逃がし安全弁作動時と同等以下となる重要事故シーケンス等

2.3において、設計基準事故時の動荷重が包絡できるとしたと同等以下とする重要事故シーケンス等について、影響評価が不要とできる理由を既往の試験等から、その妥当性について記載する。

2.4.1 全交流動力電源喪失時において設計基準事故時に包絡される理由

本事象は、事象発生後 8 時間までの原子炉注水を原子炉隔離時冷却系に期待しているため、原子炉圧力容器減圧操作する事象発生後 8 時間時点でプール水温は約 100 °C に達し、さらに、減圧完了までの間に約 119 °C まで上昇する（第 2-2 図）。このことから、原子炉圧力容器減圧操作時点でのプール水温は設計基準事故時（約 °C）を逸脱する。

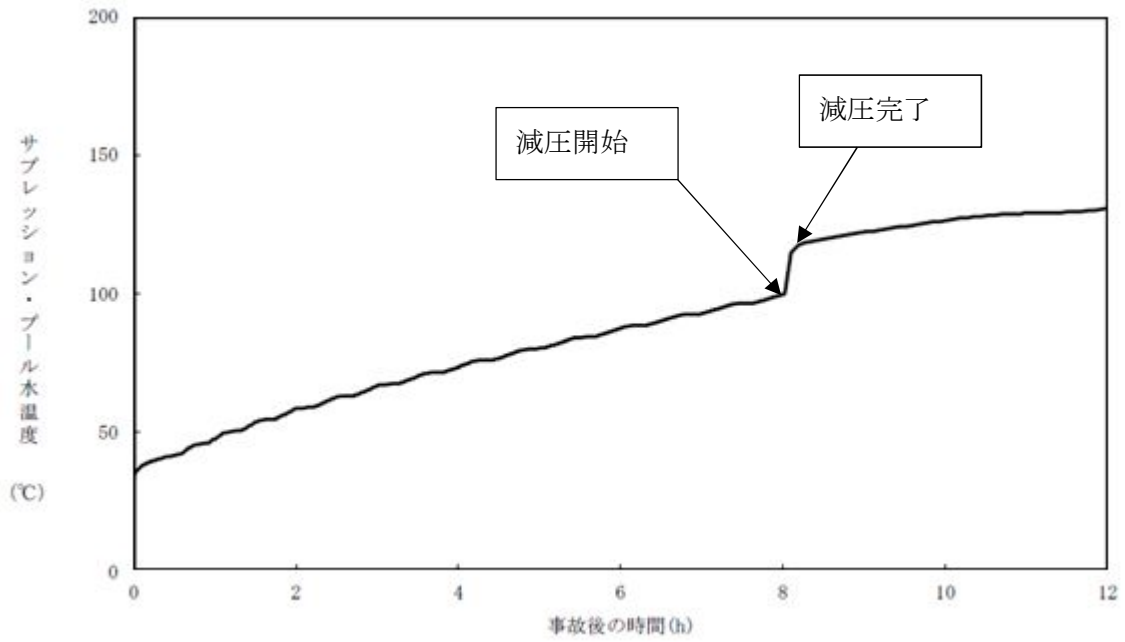
このため、以下のように検討し、設計基準事故時に生じる動荷重と同等以下であることを確認する。

プール水温が設計基準事故時を逸脱する場合において設計基準事故時に包絡される理由

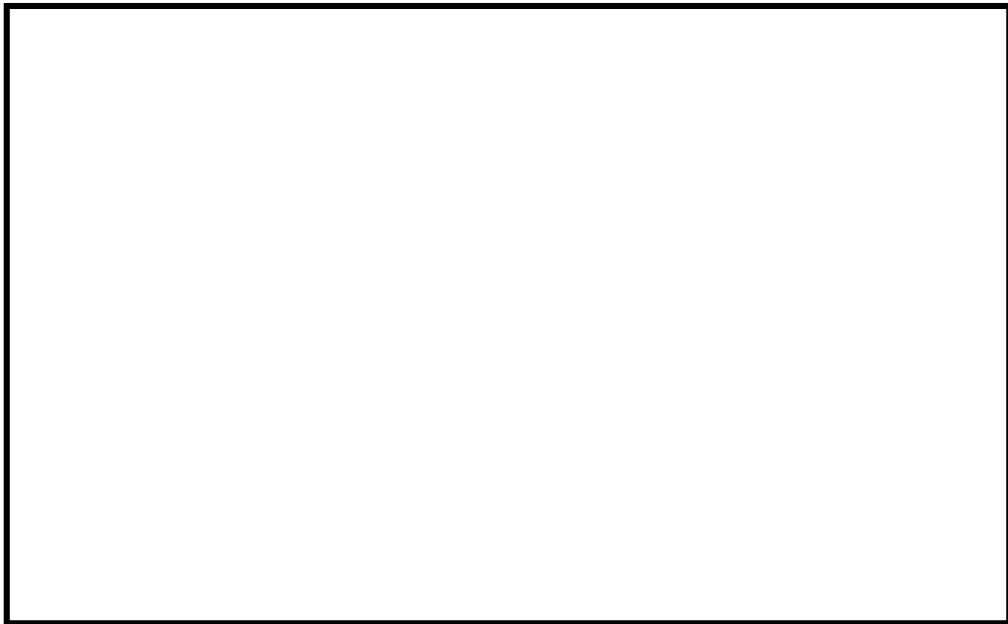
クエンチャを採用した場合の逃がし安全弁作動時の凝縮性能に関しては、第 2-2 図で示すように、プール水がほぼ飽和状態となっても不安定凝縮が発生しないことを確認している（参考資料 2 ①）。このため、第 2-1 図で示すようにプール水温が 100 °C 以上の飽和水は第 2-2 図の 100 °C 付近の飽和水の試験結果と同様に不安定凝縮することはない。また、本事象は原子炉圧力容器圧力が 7.79 MPa 時に逃がし安全弁が動作する。このときの最大蒸気流束は、約 kg/s/m² であるため、第 2-3 図で示す試験条件を逸脱しているが、第 2-4 図で示すように蒸気流束 kg/s/m² において、蒸気は不安定凝縮をしていない。よって、現状の設計条件を逸脱することはない、設計基準事故時と同等以下の動荷重となる。

また、蒸気による動荷重への影響の他に非凝縮性ガスの動荷重への影響が考えられるが、このときの荷重として支配的な気泡脈動荷重については、逃がし安全弁排気管内に保留されている非凝縮性ガスの放出に伴う荷重であり、排気管内の非凝縮性ガスの体積は設計基準事故時と同等である。また、気泡脈動荷重は、サプレッション・チェンバ内での凝縮を伴わないことから、プール水温上昇による影響を受けない。

よって、蒸気的不安定凝縮が生じなければ、上記で示すように設計基準事故時の動荷重を上回ることは無いため、SA 時の逃がし安全弁作動時の蒸気が安定的に凝縮できることを確認することにより、設計基準事故時と同等以下であることを確認した。

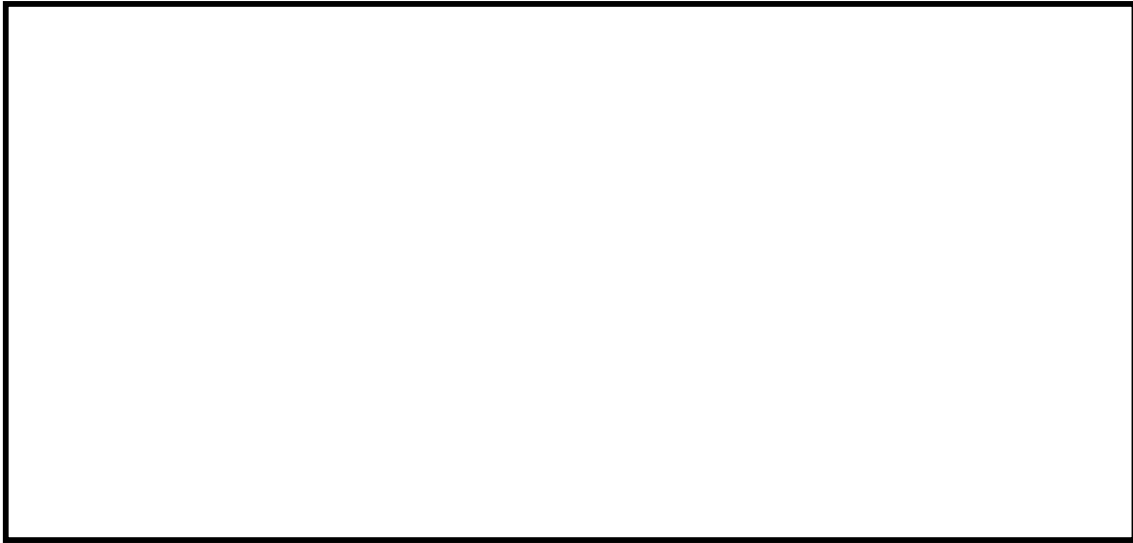


第 2-2 図 全交流動力電源喪失時のプール水温度の時刻歴



第 2-3 図 蒸気凝縮時の圧力変動と水温の関係*1

*1：“MARK-I 型格納容器の動荷重評価について”，MARK-I 型格納容器評価検討会，昭和 59 年 5 月（参考資料 2 ①）



第 2-4 図 蒸気流束及びプール水温と凝縮性能の関係 (クエンチャタイプ)
(参考資料 2 ①, ②)

2.4.2 原子炉停止機能喪失時において設計基準事故時に包絡される理由

主蒸気隔離弁閉止後の原子炉停止失敗に伴い、逃がし安全弁 18 弁が動作するため、既往の試験結果で確認している多弁作動時の弁数より多く、設計基準事故時に設計上考慮している最大 17 弁より多い。また、このときに原子炉圧力が約 8.19 MPa[gage]まで上昇するため、既往の試験で確認している試験条件（7.37 MPa）を超える。

上記の 2 つの事象について、以下のように検討し、設計基準事故時に生じる動荷重の同等以下であることを確認する。

2.4.2.1 逃がし安全弁 18 弁作動時において設計基準事故時に包絡される理由

東海第二発電所及び海外プラントで逃がし安全弁作動時の実機試験を実施しており、以下のことが確認されており、このことから考察できる。

- ・東海第二の実機試験で全主蒸気隔離弁同時閉し、スクラム成功後に□弁の逃がし安全弁が作動したときに測定された圧力振幅は、単弁作動時と同等の結果
- ・海外プラントの実機試験で複数の逃がし安全弁を手動開とし、各試験で有意な差がない
- ・東海第二の実機試験で測定された圧力振幅は、クエンチャ近傍で大きく、距離が離れるほど、減衰する

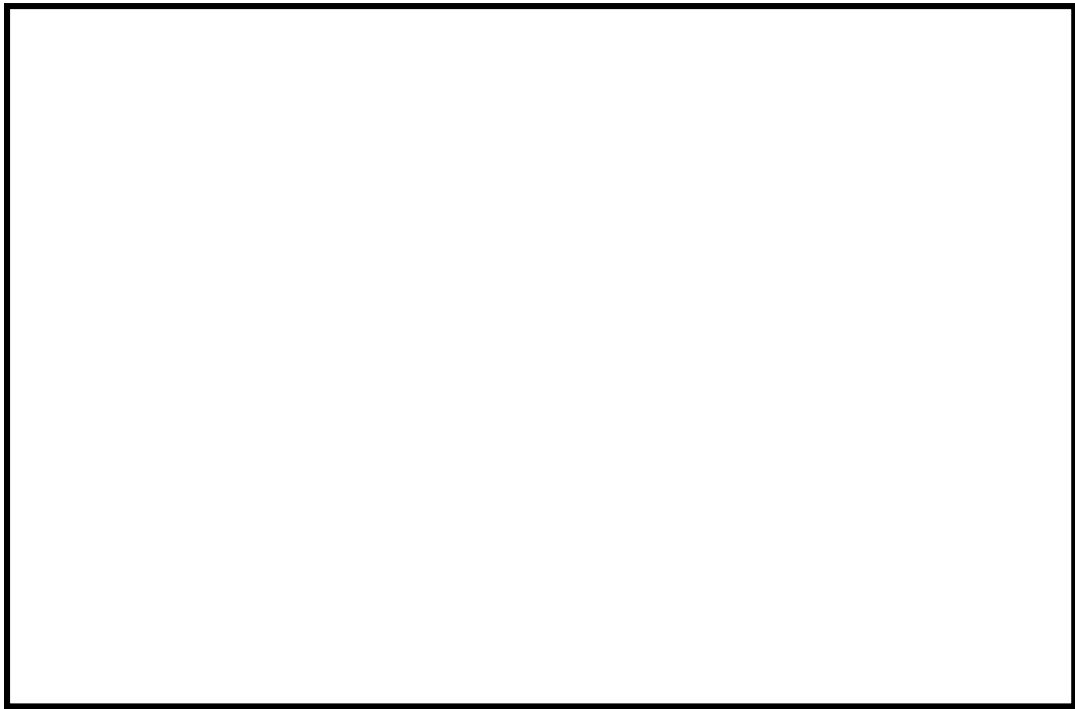
東海第二の実機試験及び海外プラントで確認されている多弁作動時の影響

東海第二の実機試験では、全主蒸気隔離弁を同時閉とすることでプラントをスクラムさせ、逃がし安全弁が吹き出すように試験を実施している。

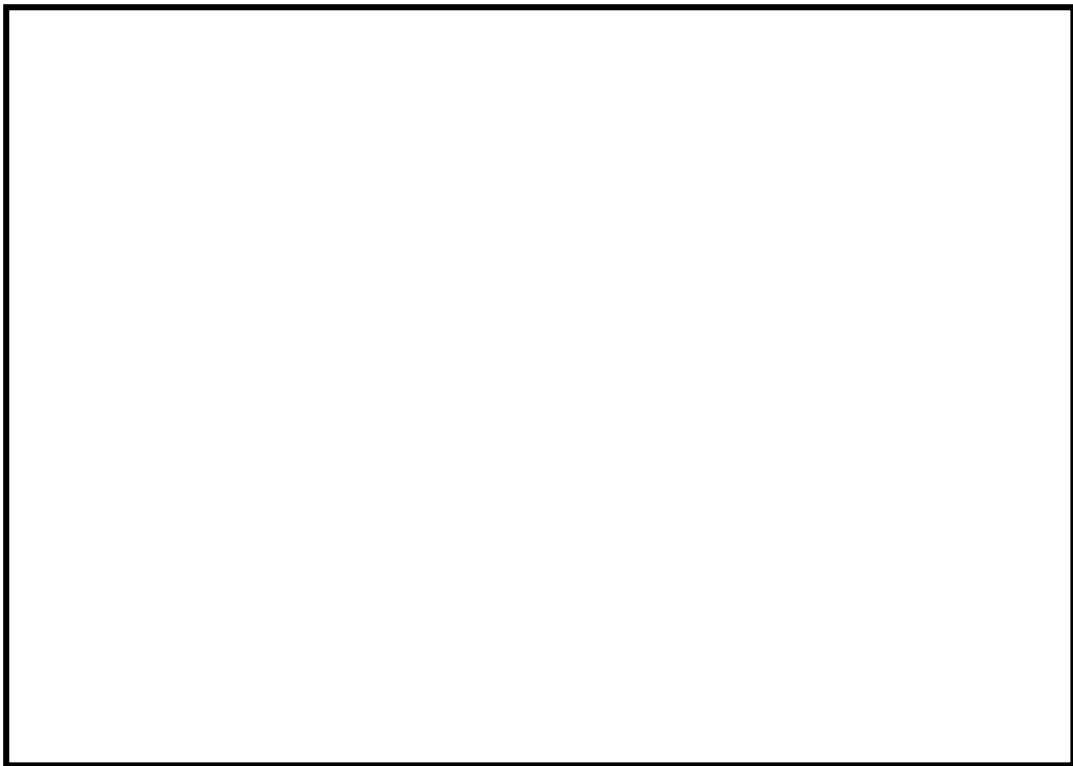
本試験では、逃がし安全弁は□弁作動しており、多弁作動の圧力振幅を確認している。

第 2-5 図に示すように逃がし安全弁作動時の圧力振幅は、単弁作動時と比較し、多弁作動時の方が小さい結果であった。多弁作動した時に圧力振幅が大きくならなかった理由は、逃がし安全弁の作動タイミングのずれ、排気管の配管長及び非凝縮性ガスが排出される各クエンチャから測定点までの距離の違いによる気泡脈動の位相のずれが生じる。これにより圧力振幅が相殺される等によって、圧力振幅が増幅しなかったものと考えられる。

さらに海外プラントでは複数の逃がし安全弁を複数弁同時に手動開とする実機試験を実施しており、測定された圧力振幅に有意な差がなく、東海第二の試験と同様な理由で圧力振幅が増幅しなかったと考えられる（第 2-6 図）。^[3]



第 2-5 図 多段弁作動時と単弁作動時の水中圧力脈動の比較
(横軸：測定点，縦軸：圧力振幅) (参考資料 2 ③)



第 2-6 図 海外プラント実機試験時の圧力振幅

海外プラント実機試験の東海第二への適用性

実機試験を実施した海外プラントは東海第二と同じMARK-II側格納容器となっている。また、クエンチャの形状が同等であること、クエンチャの配置については、対称的な配置が同様である（第2-7図）。これらのことから、海外プラントと東海第二は類似した形状であるため、実機試験の結果は適用できる。

海外プラント ^[3]	東海第二

海外プラント^[3]

東海第二

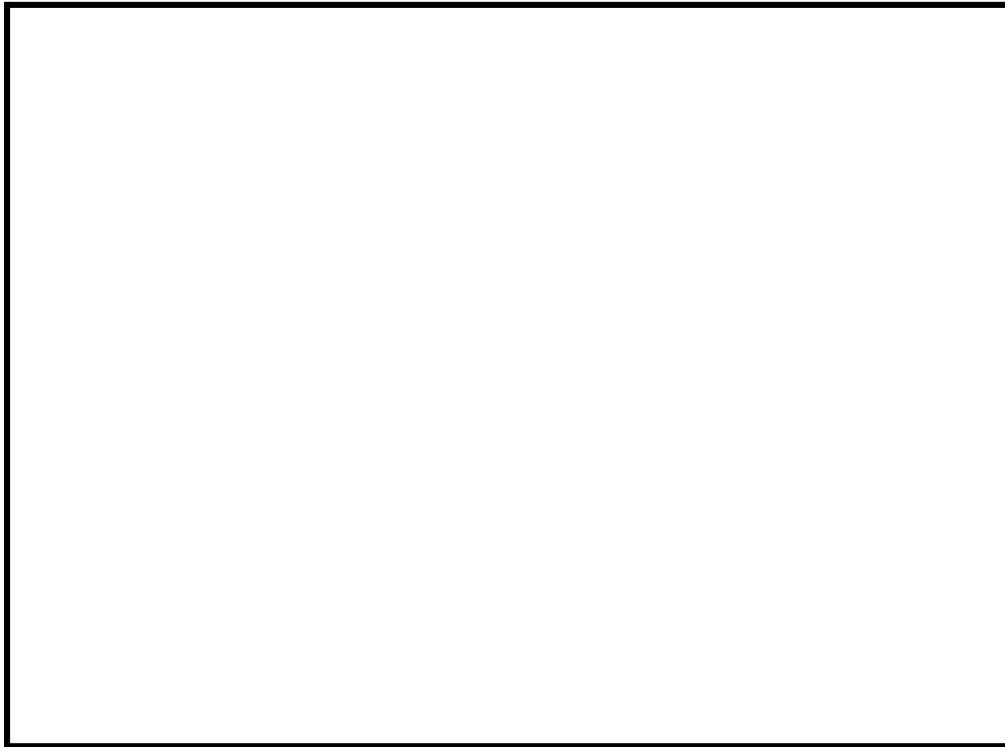
--

逃がし安全弁の作動タイミングのずれ等による位相のずれについて

逃がし安全弁は、それぞれの弁毎に作動圧（吹出圧力）が定められており、多弁が作動するような状況においても、当該作動圧の違いにより、吹出すタイミングが異なる。また、東海第二の実機試験結果から、同じ作動圧が設定された逃がし安全弁であってもすべてが同時に作動するわけではない。

さらに、排気管の長さは、配管の引き回しによってそれぞれ異なるため、仮に逃がし安全弁が同時に作動したとしても、クエンチャ出口で気泡が形成されるタイミングにはずれが生じる。

これらのことから、逃がし安全弁が複数弁作動時した場合においては、それぞれの圧力荷重の位相にずれが生じる。よって、これらの圧力荷重が作用する原子炉格納容器バウンダリにおいては、位相の一致による荷重の増加が生じることはない。

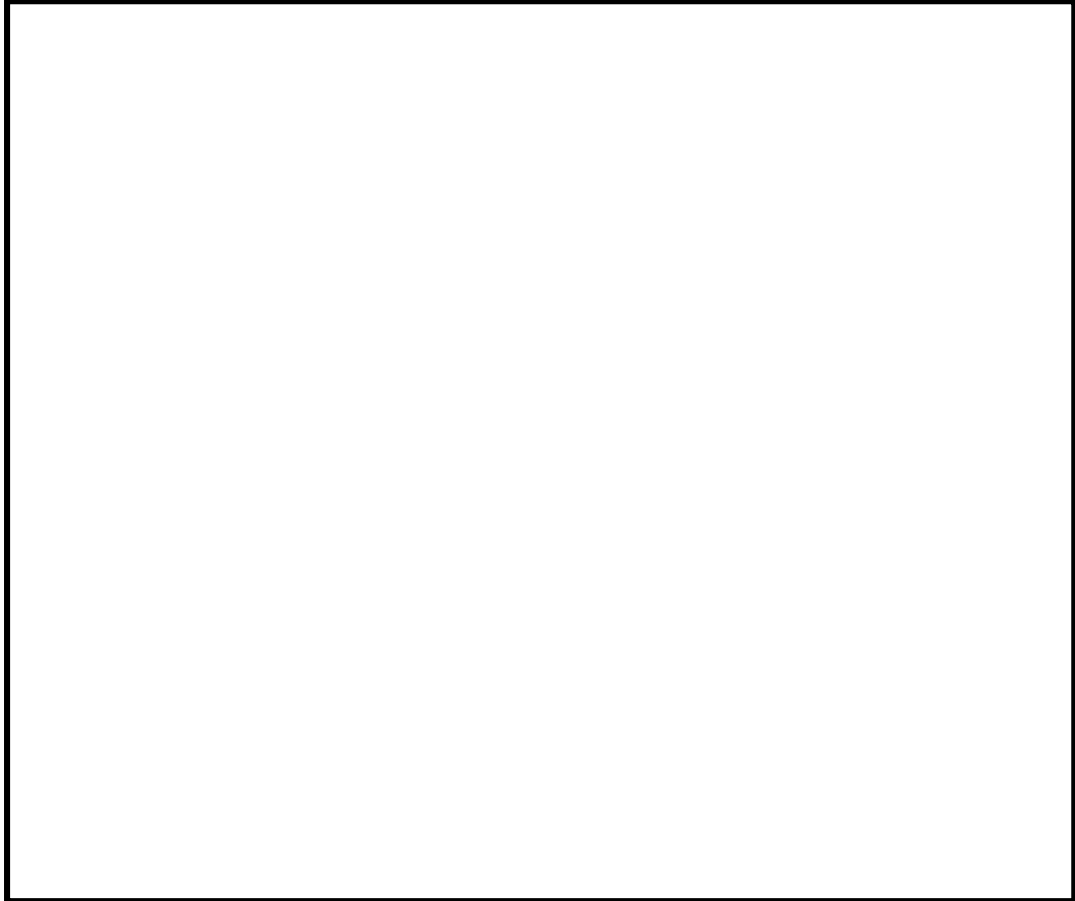


系統	対象	吹出圧力[MPa]	排気管の長さ[m]
主蒸気系 A	D 弁クエンチャ	7.37	
	G 弁クエンチャ	7.44	
	H 弁クエンチャ	7.51	
主蒸気系 B	P 弁クエンチャ	7.44	
	M 弁クエンチャ	7.51	
	F 弁クエンチャ	7.58	
	S 弁クエンチャ	7.58	
	B 弁クエンチャ	7.65	
	K 弁クエンチャ	7.65	
主蒸気系 C	N 弁クエンチャ	7.37	
	E 弁クエンチャ	7.44	
	J 弁クエンチャ	7.51	
	A 弁クエンチャ	7.58	
	L 弁クエンチャ	7.65	
	R 弁クエンチャ	7.65	
主蒸気系 D	U 弁クエンチャ	7.44	
	V 弁クエンチャ	7.51	
	C 弁クエンチャ	7.58	

図 2-8 逃がし安全弁の設置位置及び吹出圧力，排気管の長さの関係

東海第二の実機試験で確認されている距離による減衰効果

東海第二での実機試験結果を第 2-9 図で示すように圧力振幅はクエンチャから距離に応じて減衰していることを確認しており、距離に応じて動荷重の影響は小さくなる。例として、原子炉格納容器本体の壁面では、壁面から近いクエンチャから受ける圧力振幅はクエンチャ近傍と比較し、小さくなる。



第 2-9 図 東海第二実機試験時に確認された距離による減衰効果

(参考資料 2 ③)

逃がし安全弁 18 弁作動時における設計基準事故時の包絡性確認

東海第二及び海外プラントの実機試験から、多弁作動時に気泡脈動の位相のずれ等により圧力振幅が増幅していないこと及び距離による減衰が確認されており、重大事故等時に 18 弁の逃がし安全弁が作動しても、設計基準事故時の動荷重と同等以下となる。また、NUREG-0802において、MARK-II 型原子炉格納容器である海外プラントの実機試験結果から 8 弁及び 19 弁作動時の動荷重は、4 弁の結果の動荷重と同等であることが記載されていることから東海第二の実機試験における 1 弁作動時の動荷重が最も大きくなった結果は妥当と考えられる。

このことから、重大事故等時には、設計基準事故時の動荷重を設計条件とする。

逃がし安全弁 18 弁作動時に生じる動荷重における強度の感度評価

逃がし安全弁 18 弁作動時においては、気泡脈動の位相のずれにより圧力振幅が増幅しないが、保守的に逃がし安全弁作動時に生じる圧力振幅を重ね合わせた場合の強度の感度評価を実施する。

評価に当たっては、各クエンチャと評価点の距離による減衰を考慮する。また、各クエンチャから生じる気泡脈動が独立して評価点に到達するものとし、そのときのそれぞれの圧力振幅を重ね合わせる（第 2-10 図）。なお、クエンチャから評価点に到達する全ての気泡脈動がピーク値で一致することは統計学的に極めて低いことから、各ピーク値を二乗和平方根により圧力振幅を算出し、評価する。評価方法は、NUREG-0487^[4]に参照して実施した。評価点は、強度評価として裕度の小さい原子炉格納容器本体で実施する（参考資料 5）。なお、評価点の選定は、原子炉格納容器本体に近いクエンチャから最短距離の評価点（第 2-10 図 評価点 1）とクエンチャ 2 か所の中間位置の評価点（第 2-8 図 評価点 2）とする。

各クエンチャから生じる圧力振幅を重ね合わせた結果、以下のようになった。

評価点	P / P_B	圧力振幅 [kg/cm ²]
1		
2		

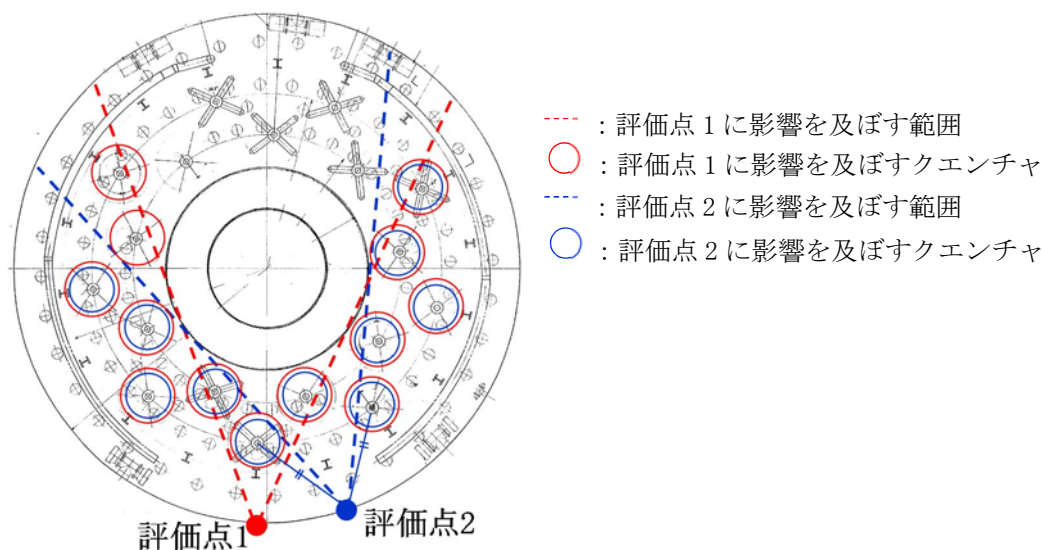
$$\text{任意のクエンチャからの圧力振幅： } P_n = 2 \frac{r_0}{r} \cdot P_B$$

東海第二の実施危険時の圧力振幅の最大値： P_B (+0.84 / -0.39 kg/cm²)

クエンチャのアーム長さ相当： r_0 (約 m)

クエンチャ中心からの距離： r

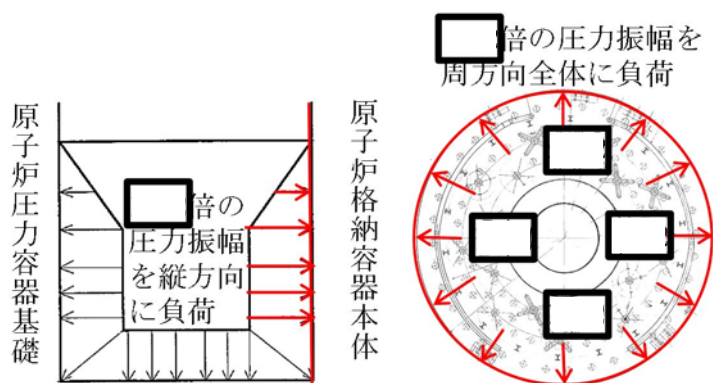
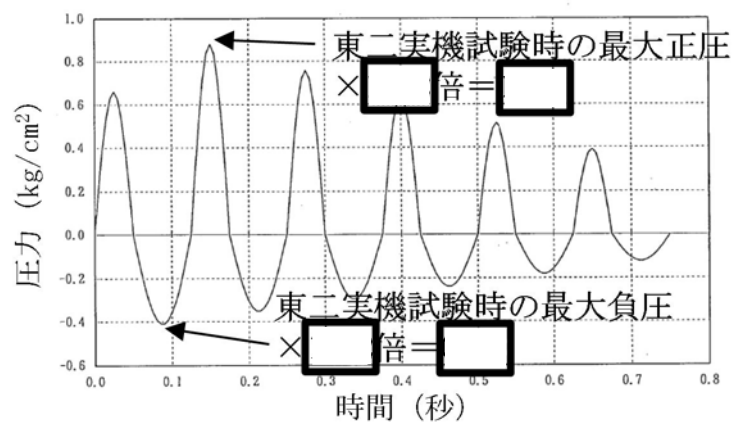
$$\text{評価点における最大圧力振幅： } P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2}$$



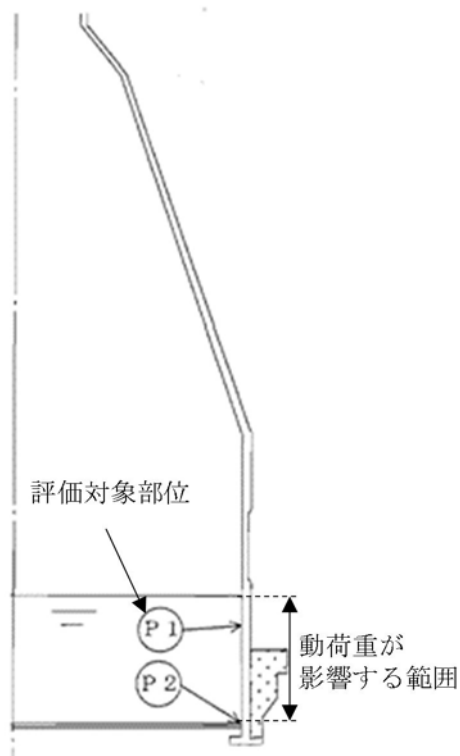
- : 評価点 1 に影響を及ぼす範囲
- : 評価点 1 に影響を及ぼすクエンチャ
- : 評価点 2 に影響を及ぼす範囲
- : 評価点 2 に影響を及ぼすクエンチャ

第 2-10 図 感度評価を実施する評価点

強度の感度評価に当たっては、強度評価と同様に、保守的に圧力振幅の重ね合わせた結果で得られた原子炉格納容器本体に生じる動荷重の最大値を一様に負荷させて評価を実施する（第 2-11 図）。評価対象部位を第 2-12 図に示す。



第 2-11 図 強度評価における評価上の保守性のイメージ



第 2-12 図 動荷重の感度評価を実施する部位

評価した結果，以下のように十分な裕度があることを確認した。なお，評価は，逃がし安全弁作動時の荷重の組合せを考慮し，重大事故等時の内圧と動荷重を組み合わせた。また，18 弁が作動するタイミングは，事象初期であるため，サブプレッション・チェンバ内のプール水位は通常運転時の水位とする。

荷重の組合せ	発生応力	許容応力	裕度
死荷重+水頭圧 (通常水位) +18 弁作動時 (6kPa) +SRV 作動時 (多弁影響補正)			

※1：18 弁作動時の原子炉格納容器圧力

※2：動荷重は簡易評価にて実施。発生応力のうち円周方向の動荷重成分を記載。

※3：許容応力状態 V_A としての IV_A 許容限界を用いる。(限界温度 (200 °C) における許容値)

2.4.2.2 原子炉圧力の上昇率が設計基準事故時より高くなる場合において設計基準事故時に包絡される理由

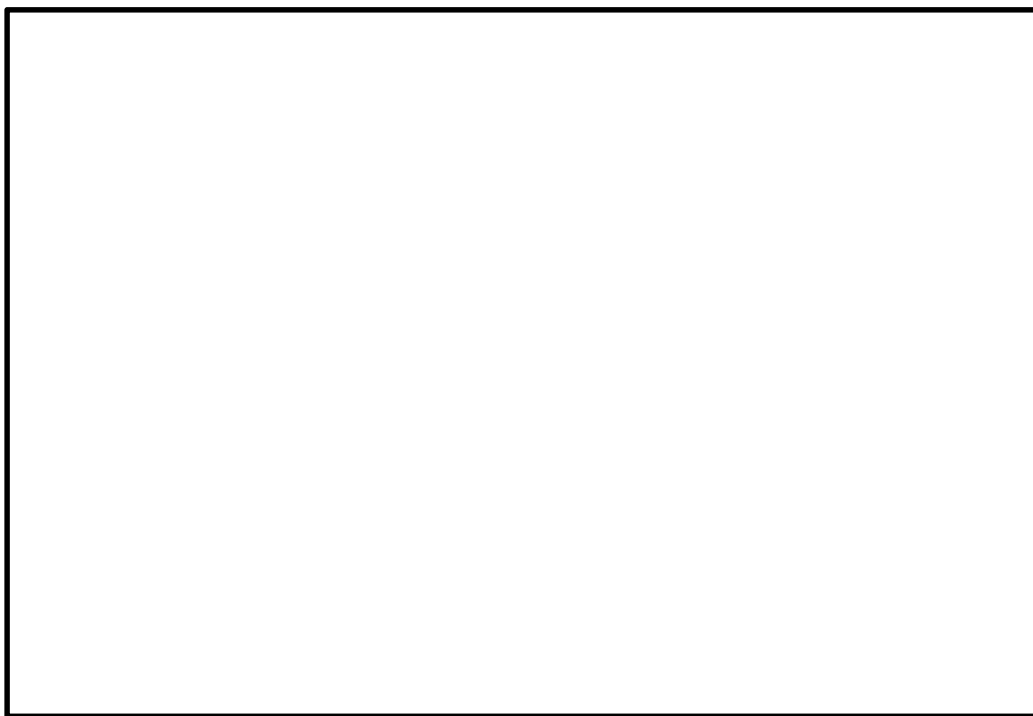
有効性評価結果及び既往の試験結果を考慮した設計基準事故時の包絡性確認

本事象においては、主蒸気隔離弁閉止後のスクラム失敗に伴い、原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁の逃がし弁機能の設定圧に応じて 18 弁が動作するものの原子炉圧力が約 8.19 MPa[gage]まで上昇する。この過程において、排気管内の非凝縮性ガスは、逃がし安全弁作動後約 0.35 秒間^{※1}で放出が完了する。この時間を A T W S 事象に適用すると、約 2.2～2.5 秒後に逃がし安全弁が作動するため、約 2.55～2.85 秒後に非凝縮性ガスの放出が完了すると考えられ、この間原子炉圧力は**最大約 0.3 MPa 程度**上昇するため、動荷重に対して影響を及ぼす可能性がある（第 2-13 図）。

※1：逃がし安全弁の設計上の排気流量を基に、排気管内の非凝縮性ガスがサプレッション・チェンバに全て排出されるまでの時間を計算した結果
(排出されるまでの時間＝排気管長（全長が最大となる箇所）／蒸気の流速)

上記に示すとおり、逃がし安全弁作動時の圧力上昇率による影響よりも逃がし安全弁作動時の原子炉圧力が高い方が動荷重への影響があるが、クエンチャ開発時に実施した試験から、となる（第 2-14 図）。

以上のことから、逃がし安全弁作動時の動荷重は、圧力上昇率でなく、圧力が上昇したあとの高い原子炉圧力が一定に負荷された方が厳しい値となるが、既往の試験により
となるため、設計基準事故時の原子炉圧力及び圧力上昇率のパラメータが超えていても、重大事故等時の動荷重は、設計基準事故時と同等以下である。



第 2-13 図 ATWS 事象時の原子炉圧力変化（運転圧力との差）



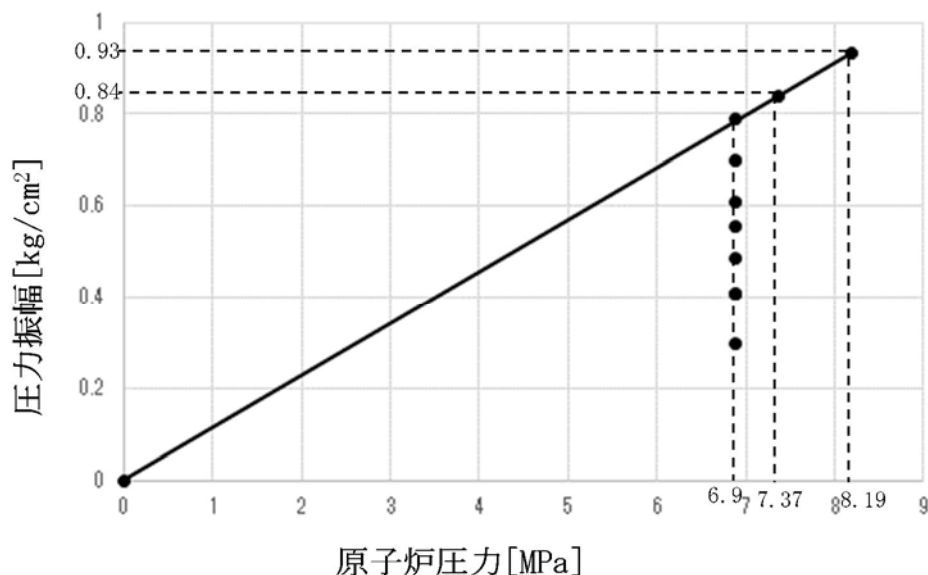
第 2-14 図 模擬圧力容器蒸気源圧力と圧力振幅の関係（気泡脈動）

（参考資料 2 ②）

ATWS 時の最大圧力時に生じる動荷重を踏まえた強度の感度評価

ATWS 時の圧力上昇率及び最大圧力による圧力振幅への影響はないと考えるが、保守的に設計条件としている東海第二の実機試験結果で得られている逃がし安全弁作動時

の圧力振幅とそのときの原子炉圧力から，ATWS時の最高圧力時を線形補間して原子炉格納容器本体の強度の感度評価を実施する。ATWS時の最高圧力を線形補間したグラフを第2-15図に示す。また，評価対象部位は，第2-12図に示す。



第2-15図 原子炉圧力と線形補間した圧力振幅の関係

評価した結果，以下のように十分な裕度があることを確認した。なお，評価は，逃がし安全弁作動時の荷重の組合せを考慮し，重大事故等時の内圧と動荷重を組み合わせた。また，18弁が作動するタイミングは，事象初期であるため，サプレッション・チェンバ内のプール水位は通常運転時の水位とする。

荷重の組合せ	発生応力	許容応力	裕度
死荷重+水頭圧 (通常水位) +18弁作動時 (6kPa) +SRV作動時 (圧力影響補正)			

※1：18弁作動時の原子炉格納容器圧力

※2：動荷重は簡易評価にて実施。発生応力のうち円周方向の動荷重成分を記載。

※3：許容応力状態 V_A としての IV_A 許容限界を用いる。(限界温度 (200℃) における許容値)

2.4.2.3 逃がし安全弁作動時の荷重の組合せを考慮した包絡性

2.4.2.1 及び 2.4.2.2 で感度評価を実施し、十分な裕度が確保されることを確認した。逃がし安全弁作動時の動荷重を考慮した荷重の組合せは、参考資料 4 で示すように A T W S 時の最大圧力 (200 kPa) との組合せがある。以下に示すようにすでに考慮している動荷重の裕度を踏まえても感度評価を実施した裕度の方が大きいことを確認できたため、逃がし安全弁作動時の動荷重との組合せは、参考資料 4 で示している荷重の組合せで代表できる。

荷重の組合せ	発生応力	許容応力	裕度
死荷重 + 水頭圧 (通常水位) + 18 弁作動時 (6kPa) + SRV 作動時 (多弁影響補正)			
死荷重 + 水頭圧 (通常水位) + 18 弁作動時 (6kPa) + SRV 作動時 (圧力影響補正)			
死荷重 + 水頭圧 (SA 時の最大水位) + 18 弁作動時 (200kPa) + SRV 作動時			

※1: 動荷重は多弁及び最大圧力の比率から簡易的に算出。発生応力のうち円周方向の動荷重成分を記載。

※2: 重大事故等時の長期的な影響を考慮した組合せであるため、重大事故等時のプールの水位及び動荷重の影響範囲が広がったことによる動荷重の寄与が大きくなる箇所が変わるため、その影響を考慮 (第 2-16 図)。動荷重は、設計・建設規格の式から圧力による影響を $P=2S\eta / (Di / t + 1.2)$ の関係より簡易的に算出。算出方法は、動荷重が作用する範囲の厚さ t が [] となるため、圧力による影響 P が [] となり、動荷重が [] (円周方向の動荷重成分を記載) と大きくなる。

※3: 許容応力状態 V_A としての IV_A 許容限界を用いる。(限界温度 (200 °C) における許容値)

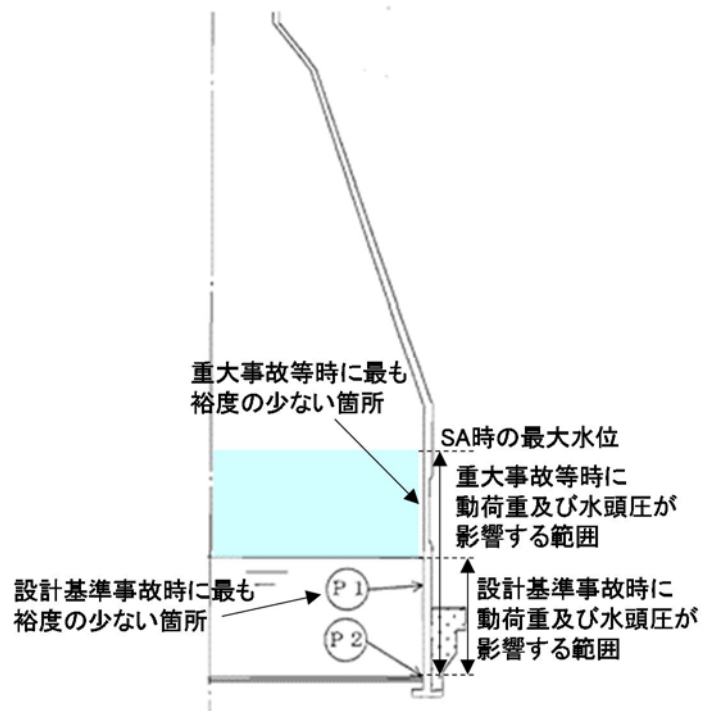


図 2-16 図 重大事故等時（長期）における動荷重の影響範囲
（原子炉格納容器本体）

3. 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱（DCH）の発生防止のための逃がし安全弁作動時における動荷重の評価について

DCHの発生防止のための逃がし安全弁作動時においては、原子炉圧力容器内の水位が低下し、燃料が露出した後、逃がし安全弁によって、原子炉圧力容器圧力を減圧する。このとき、原子炉圧力容器内で発生する蒸気は露出した燃料に熱せられ過熱状態となるため、排気管からサブプレッション・チェンバへ流入する蒸気は、設計基準事故時と異なる性状となる。これにより、蒸気が不安定凝縮する可能性があり、大きな動荷重が生じる恐れがあるため、不安定凝縮することなく、設計基準事故時に生じる動荷重と同等以下となることを確認する。

蒸気凝縮の観点で着目すべき項目としては、短期的にはサブプレッション・チェンバ内に流入する蒸気が最大となる逃がし安全弁作動時の蒸気流束及びプール水温のピーク値、及び、長期的には逃がし安全弁作動後の原子炉圧力容器圧力低下に伴う蒸気流束の減少であることから、この2点について、検討を実施した。

3.1 逃がし安全弁作動時の短期的な影響

DCHの発生防止のための逃がし安全弁作動時の短期的な影響として、過熱蒸気によって設計基準事故時に想定していない動荷重が生じる可能性があるため、過熱蒸気と飽和蒸気の違いから影響を検討する。

過熱蒸気は、単位質量あたりに保有するエネルギーが飽和蒸気に比べて高いため、飽和蒸気と異なり、蒸気温度が低下しても蒸気の状態を維持される（第3-1図）。飽和蒸気となるまでは蒸気の状態を維持されるものの、高温の蒸気泡と周囲のプール水との温度差による熱伝達や気泡そのものの膨張により、短時間で蒸気温度が低下し飽和蒸気と同等となる。このため、DCHの発生防止のための逃がし安全弁作動時において、過熱蒸気の持つエネルギーと同等となる飽和蒸気が不安定凝縮していなければ、設計基準事故で生じる動荷重よりも大きくなることはない。

設計基準事故時に生じる飽和蒸気の凝縮時の動荷重は、既往の試験により、蒸気流束とプール水温の関係から、確認できる。

これらのパラメータは有効性評価結果から過熱蒸気を飽和蒸気と仮定して蒸気流束の換算が可能であり、有効性評価結果からプール水温は確認が可能である。ここで確認した蒸気流束及びプール水温と既往の試験結果を比較することで過熱蒸気の凝縮時の動荷重は評価可能である。以下に評価過程を記載する。

①蒸気流束の算出

- ・過熱蒸気のエネルギー流束が最大となるように有効性評価の原子炉圧力（7.79 MPa）、蒸気温度（332 °C）及び排気管出口の流路断面積から蒸気の比エンタルピ及び蒸気流束を算出し、サブプレッション・チェンバへの流入するエネルギー流束を求める。
- ・算出した結果は、第3-1表のとおり。

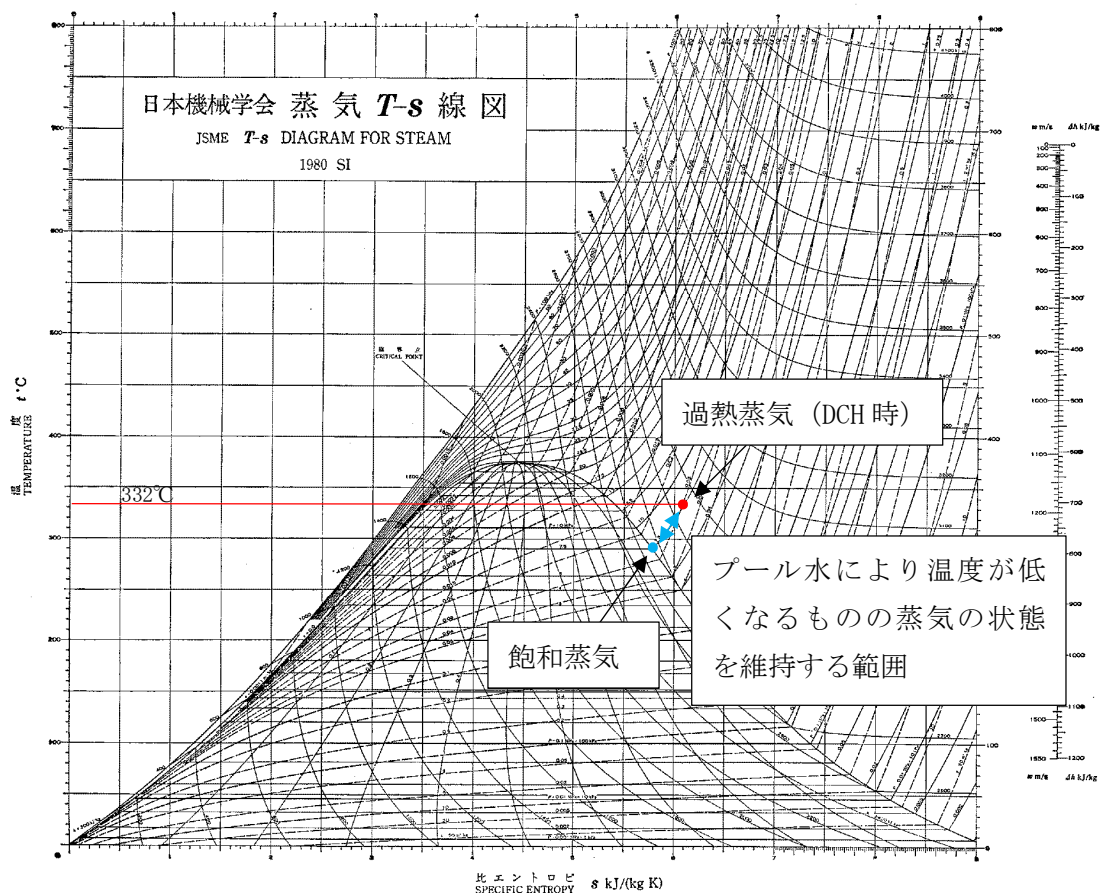
②プール水温の確認

- ・逃がし安全弁作動時のプール水温は、有効性評価結果 (57 °C) に基づく (第 3-2 図, 第 3-3 図)。

③過熱蒸気を飽和蒸気に仮定した場合の蒸気凝縮時の動荷重確認

- ・①, ②で確認したエネルギー流束とプール水温の関係から, 第 3-4 図を用いて蒸気が安定凝縮するかを確認する。

既往の試験結果であるクエンチャを有しないストレートパイプにおいて, 安定凝縮が確認されており, 蒸気凝縮による動荷重は非凝縮性ガスによる気泡脈動に包絡される領域であることを確認した。設計基準事故時の動荷重は非凝縮性ガスによる気泡脈動の値を用いているため, DCHの発生防止のための逃がし安全弁作動時の短期的な動荷重は設計基準事故時と同等以下となる。なお, 第 3-4 図で示す大振動領域は第 3-5 図で示すようにクエンチャを設けた場合, 解消され, プール水温に係らず, 蒸気が安定凝縮することを確認している。

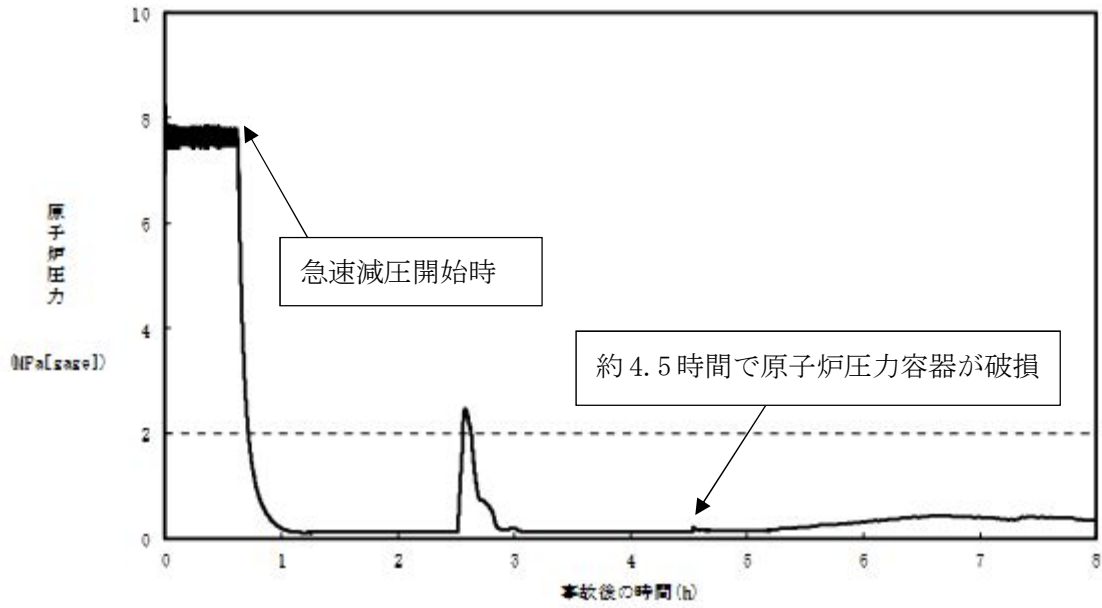


第 3-1 図 蒸気 T-s 線図*1

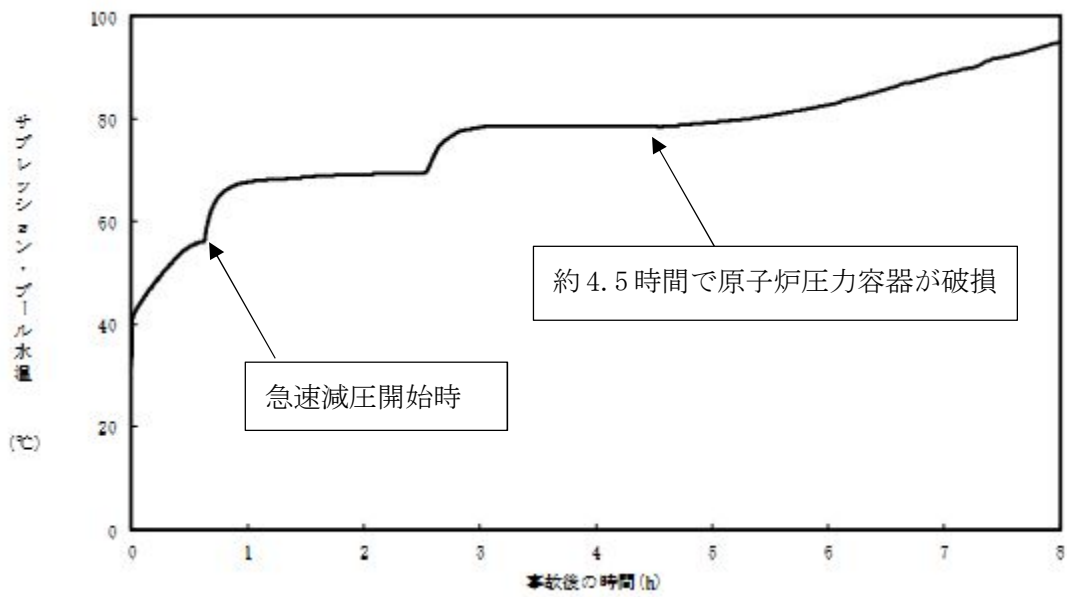
*1: “工業熱力学” 朝倉書店 1982 年

第 3-1 表 逃がし安全弁作動時のパラメータ

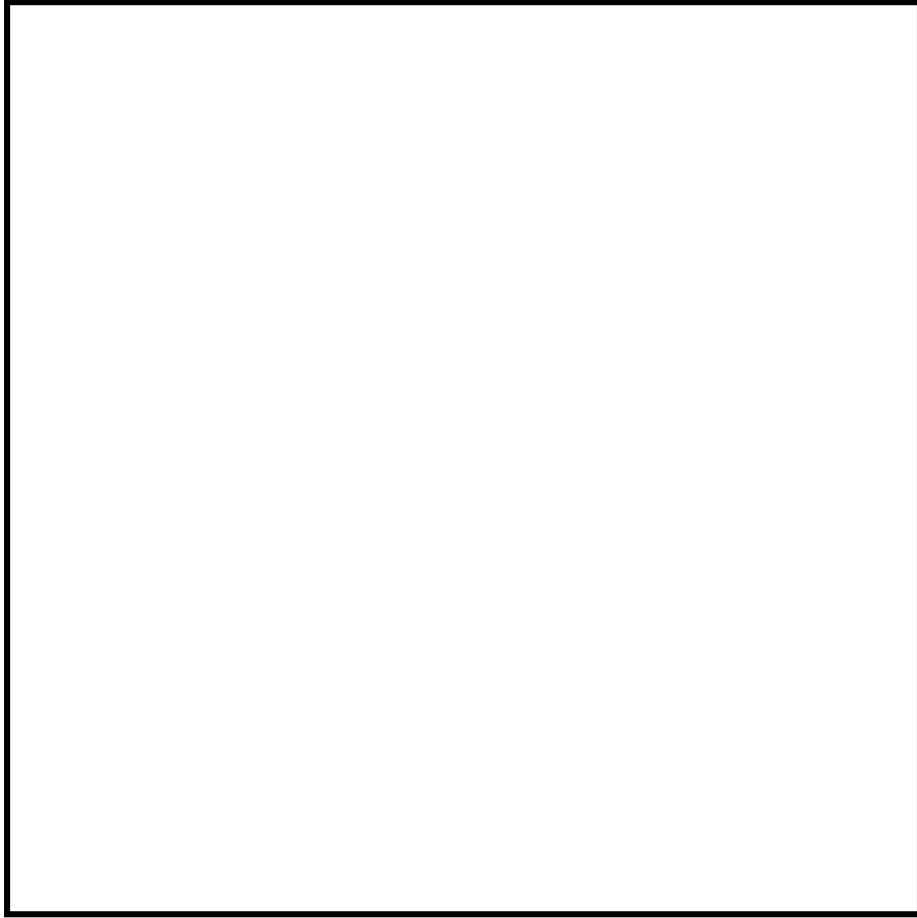
パラメータ	高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱
原子炉压力容器圧力 [MPa]	7.79 (解析値)
蒸気温度 [°C]	332 (解析値)
蒸気の比エンタルピ [kJ/kg]	
排気管出口の流路断面積 [m ²]	
蒸気流束 [kg/s/m ²]	
サブプレッション・チェンバへの 流入エネルギー流束 [MJ/s/m ²]	



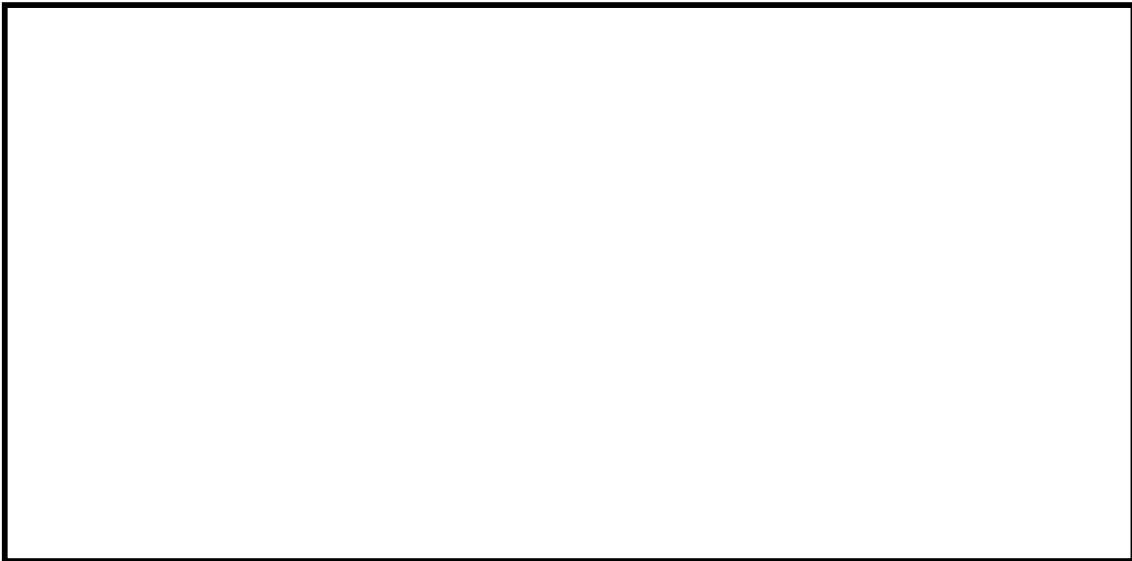
第 3-2 図 高压熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱時の原子炉圧力容器圧力の推移



第 3-3 図 高压熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱時の原子炉格納容器温度の推移



第 3-4 図 飽和蒸気の蒸気流束及びプール水温と圧力振幅の関係 (ストレートタイプ)
(参考資料 2 ①)



第 3-5 図 飽和蒸気の蒸気流束及びプール水温と圧力振幅の関係 (クエンチャタイプ)
(参考資料 2 ①, ②)

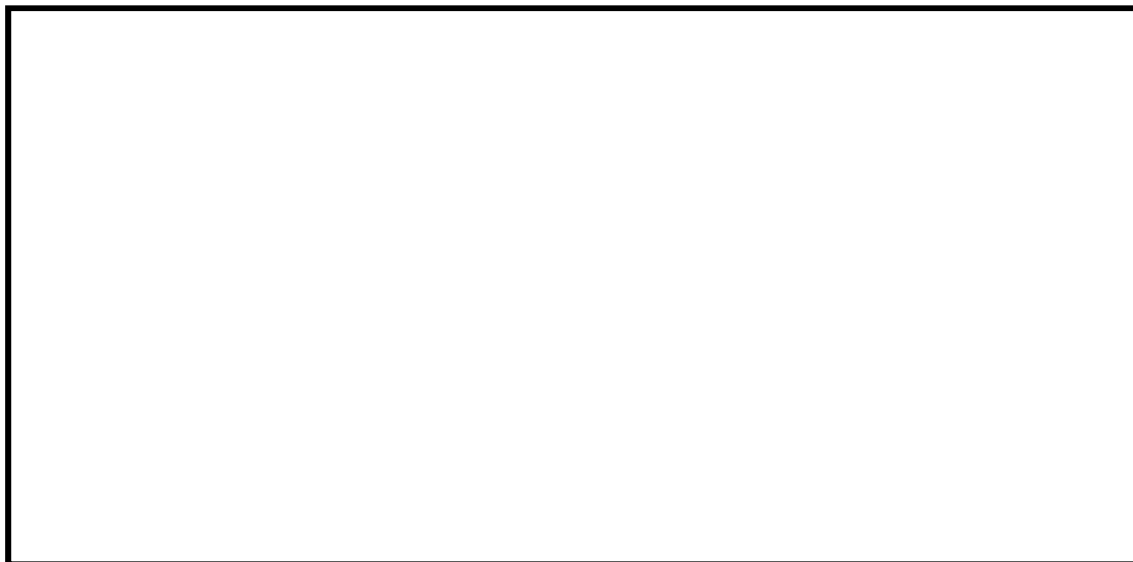
3.2 逃がし安全弁作動後の長期的な影響

本事象では逃がし安全弁を開保持とするため、原子炉圧力容器の減圧に伴い、蒸気流束が小さくなるため、このときに生じる動荷重として、蒸気凝縮に伴うチャギング等が考えられるため、そのときの動荷重が設計基準事故時と同等以下であることを確認する。

3.1と同様に過熱蒸気の蒸気流束及びエネルギー流束とプール水温から、蒸気凝縮時の動荷重への影響を確認した。第3-2表で示すパラメータのとき、第3-6図で示す。過熱蒸気が保有するエネルギー流束とプール水温は蒸気が安定凝縮する領域であることを確認した。

第3-2表 逃がし安全弁作動時のパラメータ

パラメータ	高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱 (逃がし安全弁作動後 (長期))
原子炉圧力容器圧力[MPa]	0.13 (解析値)
蒸気温度[°C]	586 (解析値)
蒸気の比エンタルピ [kJ/kg]	
排気管出口の流路断面積[m ²]	
蒸気流束[kg/s/m ²]	
サプレッション・チェンバへの 流入エネルギー流束[MJ/s/m ²]	



第3-6図 飽和蒸気の蒸気流束及びプール水温と圧力振幅の関係 (クエンチャタイプ)

(参考資料2 ①, ②)

また、逃がし安全弁作動後、高蒸気流束から低蒸気流束へ遷移する過程においては、第 3-7 図で示す。

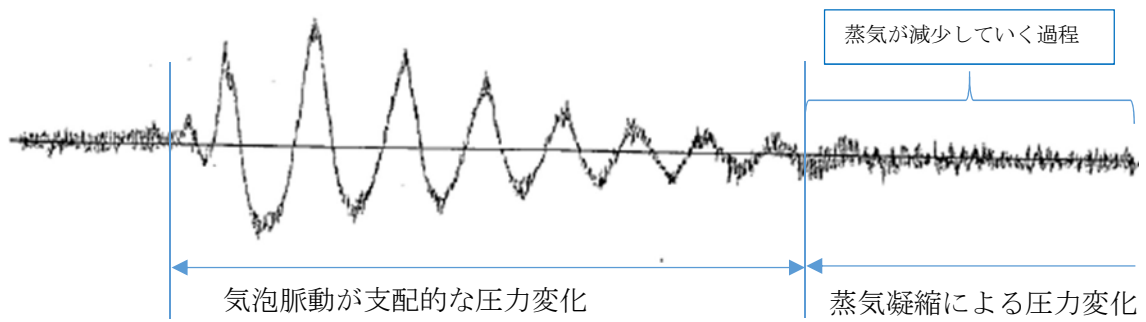


第 3-7 図 飽和蒸気の蒸気流束及びプール水温と圧力振幅の関係（クエンチャタイプ）
（参考資料 2 ①, ②）

第 3-7 図で示すように原子炉圧力容器からサブプレッション・チェンバへ放出される蒸気は減少し、異なる圧力振幅が生じる領域を通過する。

このような状況において生じる動荷重は東二の実機試験結果から得られた第 3-8 図の結果から、その影響がないことを確認できる。第 3-8 図で示すように、動荷重が大きくなるのは逃がし安全弁作動直後に生じる気泡脈動荷重である。気泡脈動荷重は、非凝縮性ガスがサブプレッション・チェンバへ移行した際に生じる荷重であり、蒸気による影響ではない。よって、東二の実機試験から原子炉圧力容器からサブプレッション・チェンバへ放出される蒸気が減少する過程において、蒸気凝縮による動荷重は気泡脈動荷重を超えることはない。

このことから、逃がし安全弁を開保持し、原子炉圧力容器から蒸気がサブプレッション・チェンバに移行した際の蒸気凝縮に伴う動荷重の影響はないことから、設計基準事故時の動荷重として、設定している気泡脈動荷重を超えることはなく、同等以下となることを確認した。



第 3-8 図 東二実機試験で得られた逃がし安全弁作動時の水中圧力振動波形
 (横軸：時間，縦軸：圧力) (参考資料 2 ③)

4. 原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用（FCI）時の動荷重の評価について格納容器破損防止対策の有効性評価の解析の結果、ベント管内の水のサプレッション・チェンバへの移行及びドライウェルからサプレッション・チェンバへの非凝縮性ガス及び蒸気を含む気体の移行量の最大値は第4-1表のとおりであり、LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出時の移行量が最大となっており、このときの動荷重が最も厳しくなる。LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出は、設計基準事故「原子炉冷却材喪失」の起因事象である大破断LOCA時と同じであり、このときの破断想定は原子炉水位の低下が最も早くなる再循環系配管（出口ノズル）の両端破断としていること、及び、この設計基準事故「原子炉冷却材喪失」時に原子炉格納容器の健全性が確保されることを確認していることから、FCI時は、設計基準事故時に包絡されており、原子炉格納容器の健全性が確保される。なお、FCI発生時には、発生する蒸気によってドライウェルは急激に圧力上昇することから、これに伴う動荷重は大きくなる可能性が考えられるが、有効性評価結果（第4-1図、第4-2図）より、LOCA時の圧力上昇率の方が大きいことを確認しており、設計基準事故時に包絡される（FCI時の圧力上昇率：約4.6 kPa/s、LOCA時の圧力上昇率：約8.5 kPa/s）。

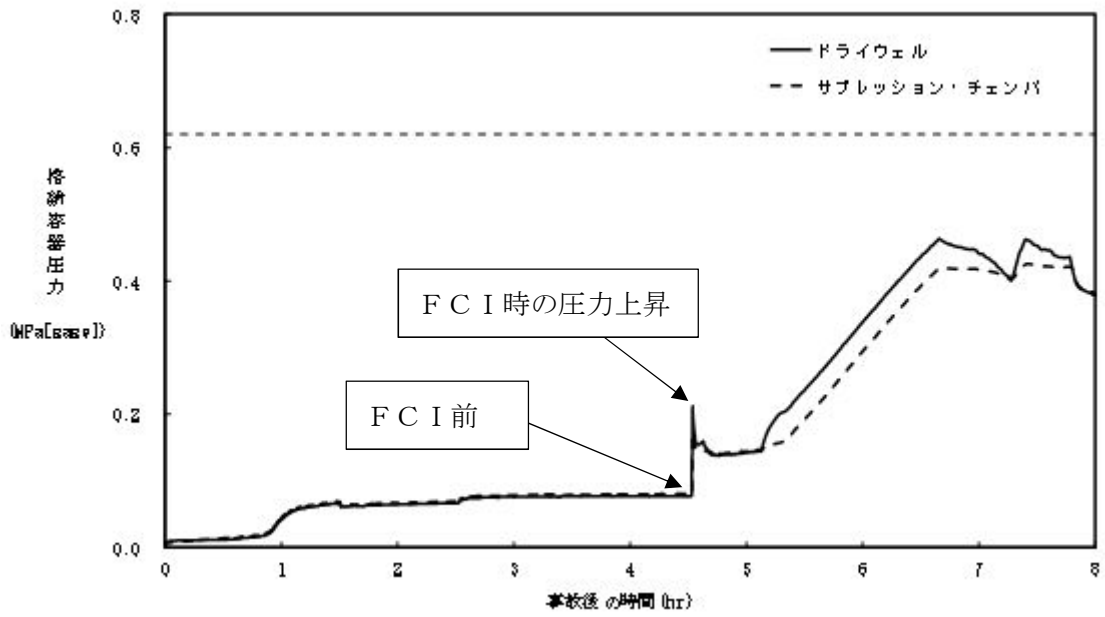
また、長期的にはチャギングによる動荷重が考えられるが、既往の試験よりサプレッション・チェンバ内のプール水の水温（40℃以下）が低く、さらにベント管内の蒸気流束（18～28 kg/s/m²）の特定の領域で振幅の大きな荷重が生じることが確認されているが、FCI時において、プール水温は約□℃、蒸気流束□kg/s/m²が小さいため、設計基準事故時に生じる動荷重の影響は大きくなることはない^[2]。

第4-1表 サプレッション・チェンバへの水等の移行量

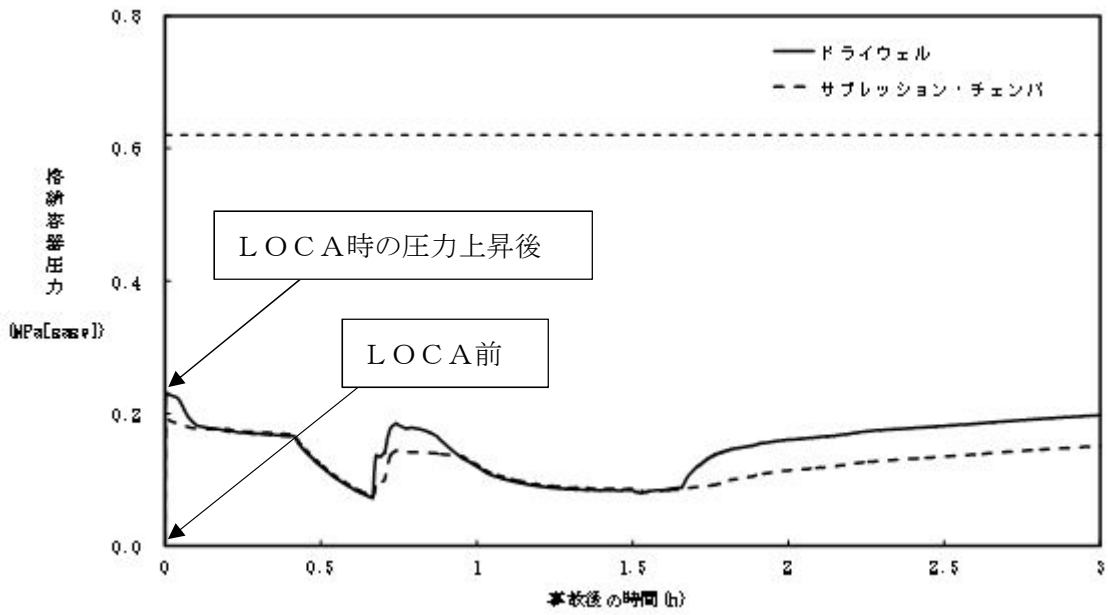
事象	水移行量の最大値 [kg/s/m ²]	ガス移行量の最大値 [kg/s/m ²]	蒸気移行量の最大値 [kg/s/m ²]
原子炉圧力容器破損に伴うFCI発生時の蒸気発生			
LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出（「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の起因事象である大破断LOCAを対象）			
LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出（設計基準対処設備としての設計条件）			

※1：有効性評価の解析結果 ※2：既往の試験結果（参考資料2 ①）

※3：既往の試験結果（参考資料2 ⑤）



第 4-1 図 F C I 時の原子炉格納容器圧力の推移



第 4-2 図 L O C A 時の原子炉格納容器圧力の推移

5. 格納容器ベント時の動荷重の評価について

5.1 格納容器ベント時のサプレッション・チェンバへの水等の移行に伴う影響

格納容器ベント開始直後はサプレッション・チェンバの圧力低下率が最も大きく、ベント管内の水のサプレッション・チェンバへの移行並びにドライウエルからサプレッション・チェンバへの非凝縮性ガス及び蒸気を含む気体の移行量が多くなる。

格納容器破損防止対策の有効性評価の解析の結果、ベント管内の水のサプレッション・チェンバへの移行並びにドライウエルからサプレッション・チェンバへの非凝縮性ガス及び蒸気を含む気体の移行量の最大値は第 5-1 表のとおりであり、LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出時の移行量が最大となっており、このときの動荷重が最も厳しくなる。LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出は、設計基準事故「原子炉冷却材喪失」の起因事象である大破断LOCA時と同じであり、このときの破断想定は原子炉水位の低下が最も早くなる再循環系配管（出口ノズル）の両端破断としていること、及び、この設計基準事故「原子炉冷却材喪失」時に原子炉格納容器の健全性が確保されることを確認していることから、格納容器ベント時は、設計基準事故時に包絡されており、原子炉格納容器の健全性が確保される。

第 5-1 表 サプレッション・チェンバへの水等の移行量

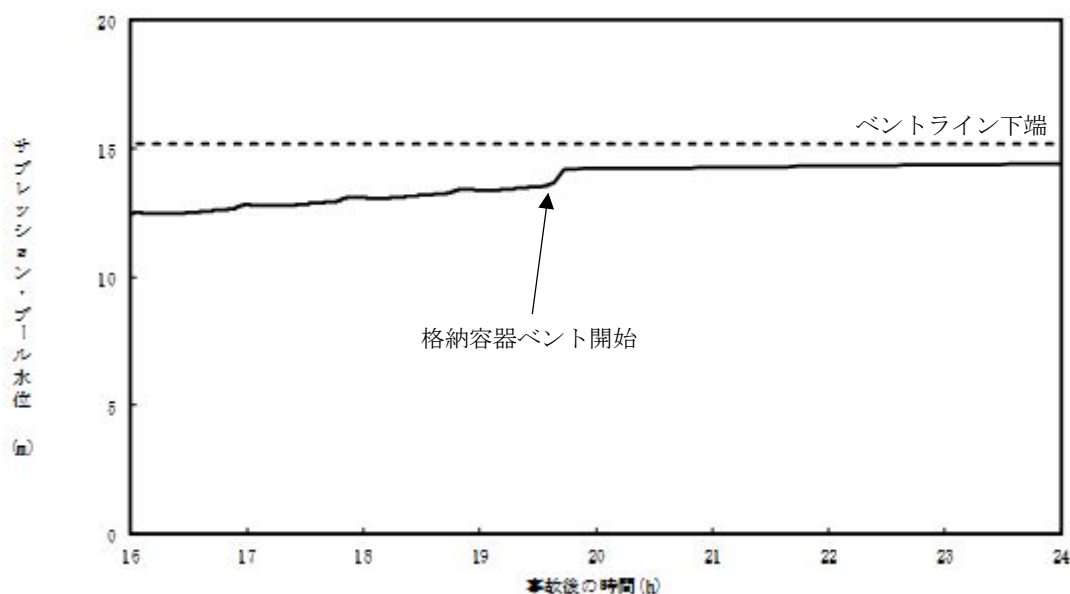
事象	水移行量の 最大値 [kg/s/m ²]	ガス移行量の 最大値 [kg/s/m ²]	蒸気移行量の 最大値 [kg/s/m ²]
格納容器ベント （「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損） （代替循環冷却系を使用できない場合）」の格納容器ベント時を対象）			
LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出（「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の起因事象である大破断LOCAを対象）			
LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出（設計基準対処設備としての設計条件）			

※1：有効性評価の解析結果 ※2：既往の試験結果（参考資料 2 ①）

※3：既往の試験結果（参考資料 2 ⑤）

5.2 格納容器ベント時の水位上昇による影響

格納容器ベント時において、ベント管内の水がサプレッション・チェンバへ移行するため、サプレッション・チェンバ内のプール水の水位上昇が生じるが、第5-1表に示すように、LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出と比較し、水の流量は小さいため、緩やかな上昇となる。このため、動荷重として、LOCAブローダウン時の高温水・蒸気の放出に包絡される。なお、このときの格納容器ベント時におけるサプレッション・チェンバ内のプール水位を第5-1図に示す。この時の水位上昇は約0.6 mであるが、この水位上昇に伴う影響は、原子炉格納容器に対する水頭圧であり、静荷重に分類される。この静荷重は、2 Pd 時の静荷重と比較し、小さいため、原子炉格納容器の健全性は維持される。



第5-1図 格納容器ベント時のサプレッション・チェンバ水位上昇

また、重大事故等時の水位上昇による影響としては、設計基準事故時と異なり、水没する真空破壊弁への考慮が必要であるが、水没する真空破壊弁は、重大事故等時に機能を期待していない。ただし、真空破壊弁の構造健全性を検討するため、格納容器ベント時のサプレッション・チェンバ内のプール水の水位上昇に伴う荷重と真空破壊弁が取り付けられている箇所の構造強度を比較する。

真空破壊弁は構造上、ベント管の板厚に対して、真空破壊弁との取合部は□倍以上の厚さを有するとともに、サプレッション・チェンバ内のプール水の水位上昇時に水から荷重を受ける面積はベント管よりも小さい。また、真空破壊弁の位置は、荷重発生源であるベント管先端から距離があることから、水の流速が減衰する。これらのことから、真空破壊弁は水没したとしてもドラッグ力の影響は小さく、構造強度として大きな影響とならないと考えられるが、プールのスウェルによりドラッグ力の影響を確認する。その結果、ベン

ト管と真空破壊弁の取付部に生じるプールスウェルによる応力は、 MPa であり，許容値（380 MPa）に対して十分に小さいことを確認した。

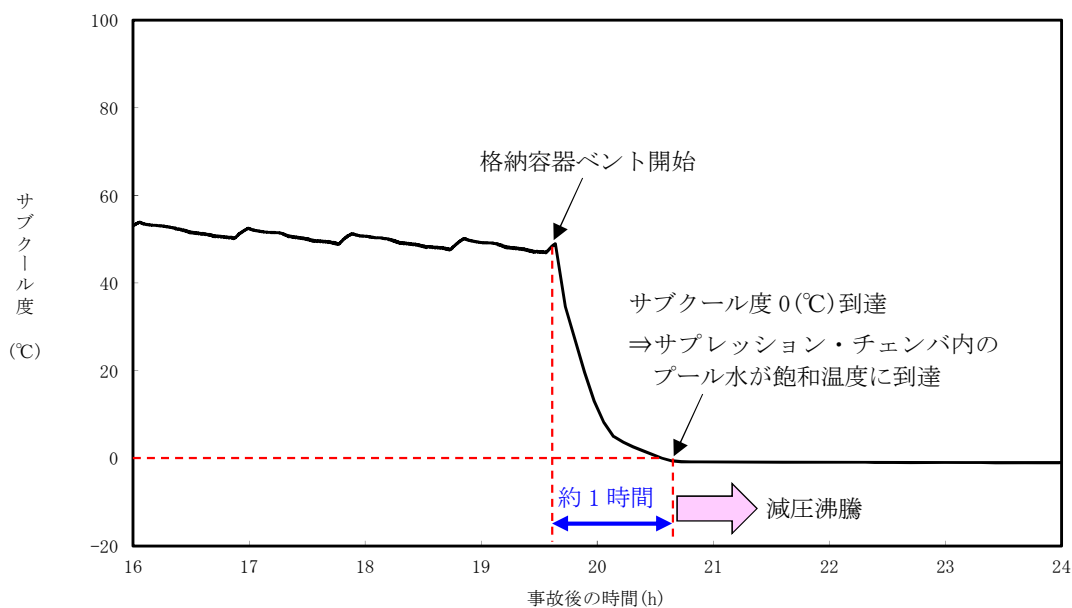
5.3 格納容器ベント時の減圧沸騰による影響

格納容器ベント時には、サプレッション・チェンバ圧力の低下によりサプレッション・チェンバ内のプール水が減圧沸騰することが考えられるが、以下のことから、格納容器ベント時の原子炉格納容器への動荷重としては小さく、健全性への影響はない。

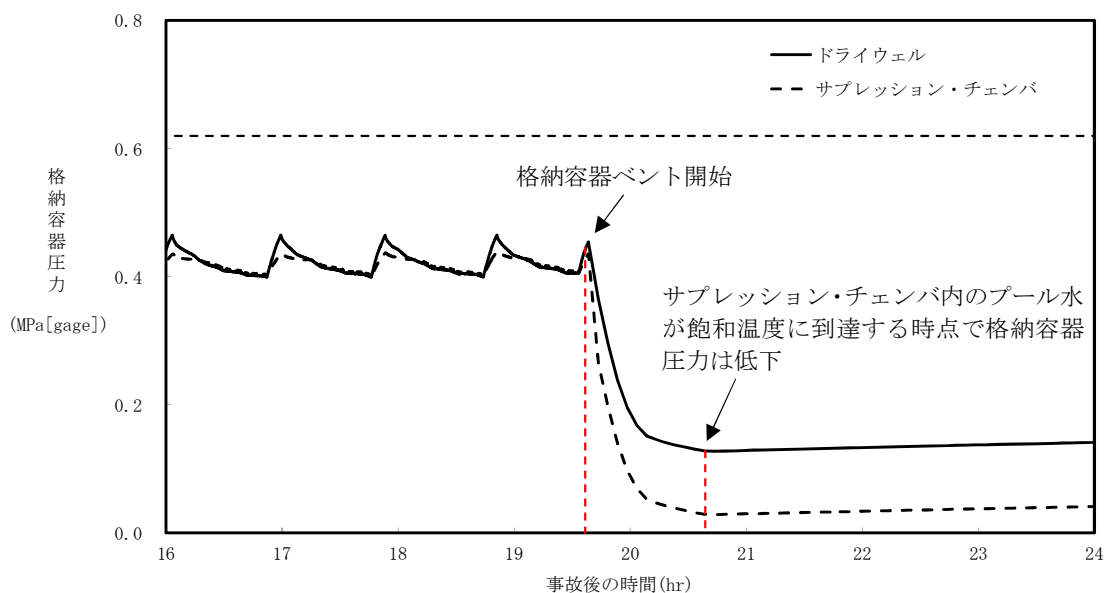
- ・「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（代替循環冷却系を使用できない場合）」では、事故発生約 19 時間後に格納容器ベントを実施しているが、第 5-2 図で示すように、サプレッション・チェンバ内のプール水が飽和温度に達するのは格納容器ベントを開始して約 1 時間後であり、これ以降減圧沸騰が生じると考えられる。しかしながら、第 5-3 図で示すように、サプレッション・チェンバ内のプール水が飽和温度に達するタイミングではほぼ原子炉格納容器圧力は静定していることから、急速減圧しないため、減圧沸騰が生じない。
- ・サプレッション・チェンバ内のプール水の減圧沸騰が生じるタイミングにおいては、ドライウエルとサプレッション・チェンバに圧力差があることから、サプレッション・チェンバへの非凝縮性ガス及び蒸気を含む気体の移行は継続するが、その移行量は少ない。
- ・減圧沸騰の影響はなく、及び、減圧沸騰が生じるタイミングにおいては、ドライウエルからサプレッション・チェンバへの非凝縮性ガス及び蒸気を含む気体の移行量は少ないことから原子炉格納容器の健全性への影響はないと考えられる。

上記に加えて、有効性評価の解析における格納容器ベント時の流量が全て減圧沸騰に寄与したと仮定して、検討を行った。

ここで、発生蒸気が水面に到達するまでに要する時間を 1 秒と仮定し、1 秒間に発生した蒸気がすべてサプレッション・チェンバ内のプール水位の上昇に寄与すると仮定する。減圧沸騰が生じるタイミングでのベント流量は約 kg/s であることから、この時減圧沸騰によって発生する蒸気量も同等の kg/s と仮定すると、最大 kg の蒸気によってサプレッション・チェンバ内のプール水面が押しあげられることとなる。また、この時の蒸気の密度を、大気圧下における蒸気の密度約 kg/m³ とすると発生蒸気の体積は約 m³ となる。サプレッション・チェンバの断面積は約 m² であるため蒸気泡がサプレッション・チェンバ内に一様に分布しているとする、発生蒸気による水位上昇は約 m となる。このことから、減圧沸騰によりサプレッション・チェンバの水位上昇が生じたとしても、その規模は小さい。



第 5-2 図 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（代替循環冷却系を使用できない場合）のプール水のサブクール度の推移



第 5-3 図 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（代替循環冷却系を使用できない場合）の原子炉格納容器圧力の推移

5.4 格納容器ベント時の継続時間による影響

原子炉冷却材喪失事故を起因とする格納容器ベント時における継続時間による影響について、検討する。

格納容器ベント時の重大事故等時荷重の時間履歴を第 5-4 図に示す。原子炉冷却材喪失事故時に加わる荷重のうち、a. から g. までの現象における荷重に関しては配管破断発生後、原子炉圧力容器からのブローダウンが終了するまでの比較的短期間に生じる荷重であるため、生じる荷重の強さ及び荷重発生時の原子炉格納容器内圧力・温度条件は設計基準事故と同等となる。

一方で、h. 及び i. については、原子炉圧力容器からのブローダウン収束後も比較的長期にわたって継続する荷重であるため、重大事故等時の原子炉格納容器内圧力・温度条件との組み合わせを考慮する必要がある。具体的には、原子炉格納容器の除熱手段の復旧等により格納容器ベントを停止し、ドライウェルとサプレッション・チェンバの差圧が解消されるまでは、崩壊熱によって発生した蒸気がサプレッション・チェンバ内のプール水へと移行し続けることにより、チャギングが生じると考えられることから、h. 及び i. の荷重は格納容器ベント停止までの期間において発生し続けることを考慮する。

第 5-5 図、第 5-6 図で示すように格納容器ベント後サプレッション・チェンバ内のプール水温が高いこと及び破断口からの蒸気放出量が低下することで、ベント管の蒸気流束が小さくなっていく。なお、長期的にチャギングによる動荷重は既往の試験である旧原研で実施された Mark-II 型格納容器の圧力抑制系の実証試験より、サプレッション・チェンバ内のプール水の水温（40 °C 以下）が低く、さらにベント管内の蒸気流束（18～28 kg/s/m²）が比較的大きい、特定の領域で振幅の大きな荷重が生じることが確認されており、格納容器ベント後においては、ベント時のプール水温が□°C、蒸気流束が□以下と小さいため、設計基準事故時に生じる動荷重の影響は大きくなることはない^[2]。

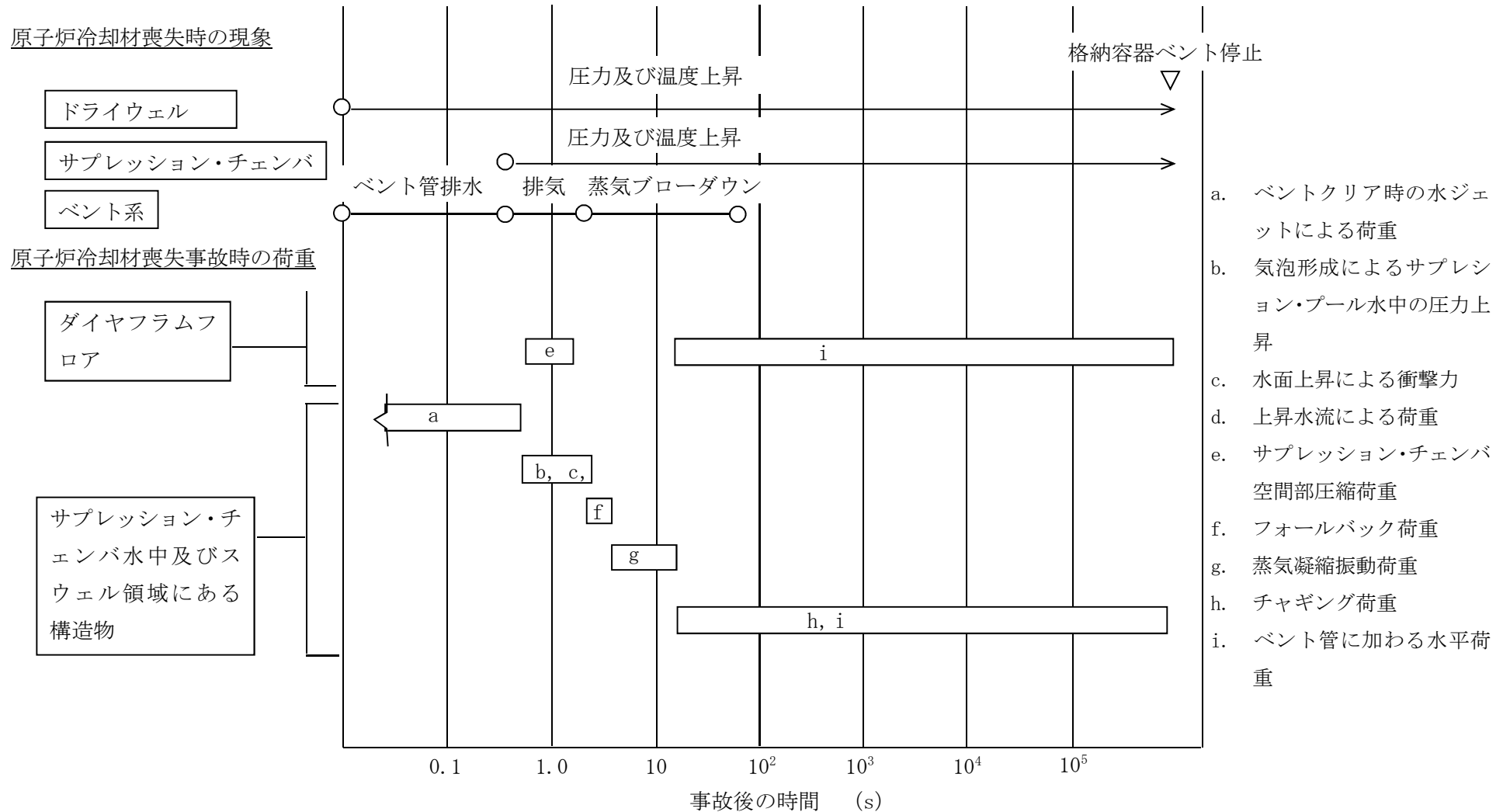
なお、設計基準事故時に想定しているチャギング荷重が繰返し生じた場合であっても最大約 130 MPa であり、原子炉格納容器本体の一次+二次応力の許容限界内（393 MPa）となることから、原子炉格納容器の強度評価に対する影響はない。

第 5-4 図は、原子炉冷却材喪失事故を起因とする格納容器ベント時における荷重の時刻歴を示したものであるが、以下の理由により、原子炉冷却材喪失事故を伴わない事象における荷重の時刻歴は第 5-4 図の時刻歴に包絡されると考えられる。

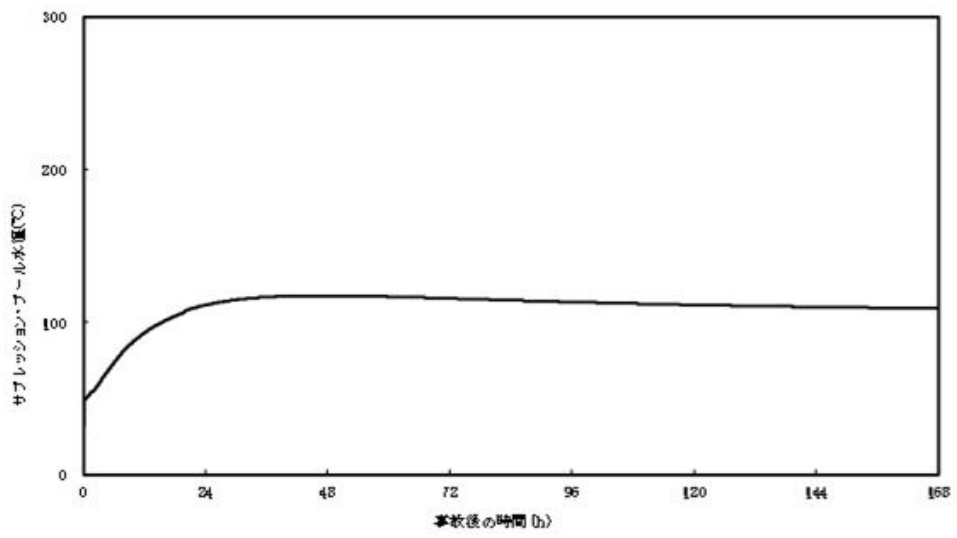
- a. 原子炉冷却材喪失事故を起因としない事象においては、原子炉圧力容器破損時に原子炉圧力容器内のガスがドライウェルへと放出されると考えられるが、原子炉圧力容器破損時点では、すでに原子炉圧力容器内は減圧されており、原子炉冷却材喪失事故時に生じるような急激なガス放出とならない。
- b. 高温の溶融燃料がペDESTAL 内に落下した際には、溶融燃料と水の相互作用（F C I）によって急激な蒸気発生が生じると考えられるが、当該事象において、サプレ

ッション・チェンバに流入する水等の移行量は原子炉冷却材喪失事故時に比べて非常に小さく（第 4-1 表），原子炉冷却材喪失事故発生直後に生じる荷重（第 5-4 図における a. から g. までの荷重）に包絡される。

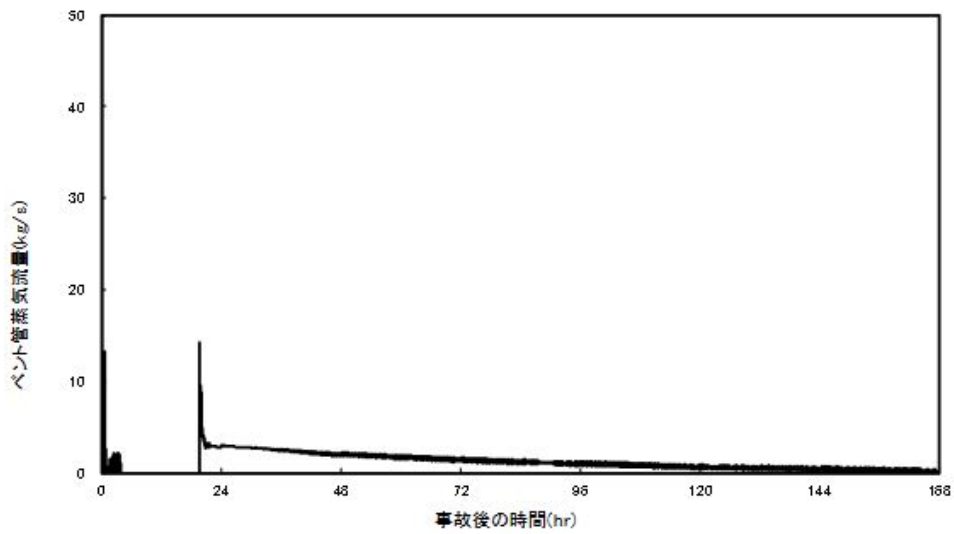
- c. 原子炉格納容器ベント実施時においても一時的にドライウェルからサプレッション・チェンバに流入する水等の移行量が増加すると考えられるが，この時の移行量は原子炉冷却材喪失事故時に比べて非常に小さく（第 5-1 表），b. 同様に原子炉冷却材喪失事故発生直後に生じる荷重に包絡される。



第5-4図 重大事故等時荷重の時間履歴（原子炉冷却材喪失事故起因）



第 5-5 図 サプレッション・チェンバ内のプール水温の時刻歴



第 5-6 図 ベント管蒸気流量の時刻歴

5.5 格納容器ベント時の減圧波による影響

US-ABWRには原子炉格納容器の過圧保護のため、系統に取り付けたラプチャーディスクにより、瞬時に配管の流路断面積を100%開放し、大気放出によって急速減圧するCOPS (Containment Overpressure Protection System) が設けられている。このため、米国ではCOPSを設ける場合、急速減圧による減圧波の影響を考慮する必要があるとされている。東二の原子炉格納容器は、格納容器ベント時において、弁による開動作により減圧することから、COPSのように急速減圧することはない。しかしながら、保守的に減圧波を考慮するため、COPSと同様に弁の開操作直後に配管の流路断面積が100%開放され、大気放出することを仮定し、検討を実施した。

検討にあたっては、US ABWR DCD Ch. 19E. 2. 3. 5. 1における評価手法を用いて、格納容器ベント直後のサブプレッション・チェンバ内のプール水面に作用すると考えられる減圧波について評価する。

評価に用いる主要なパラメータは、以下のとおりである。

第5-2表 評価に用いる主要なパラメータ

パラメータ		記号	値	備考
S/C 圧力		P_0		最高使用圧力の2倍
S/C 水位		—		MAAPによる解析結果
S/C ガス密度		P_{g0}		200°C, 2Pd時の蒸気密度
比熱比		k		理想気体における二原子分子の比熱を仮定
ベントライン入口	半径	R		AC系配管(28B)
	面積	A		
ベントラインチョーク部		面積		a

プール水の水面に到達する減圧波を評価するため、格納容器ベント直後において、原子炉格納容器より放出されるガスは、臨界流と仮定する。ベント流量は、ベントラインにおけるチョーク部で律速されることから、当該箇所におけるガス流量はDCDにおける以下の評価式及び第5-2表のパラメータを用いるとガス流量は、約75 kg/sとなる。

$$G_{gc} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/2(k-1)} \sqrt{k g_0 P_0 \rho_{g0}}$$

$$m = G_{gc} a$$

この時、ベントライン入口におけるガスの流速 (V) は、以下の式により約80 m/sとな

る。

$$V = \frac{m}{A * \rho_{g0}}$$

また、DCDにおける以下の評価式により、サプレッション・チェンバ内の音速 (C_{g0}) は約 543 m/s であり、この時のマッハ数 (V/C_{g0}) は約 0.15 (<0.2) であることから、ベント時の減圧波は音響波として扱うことができる。

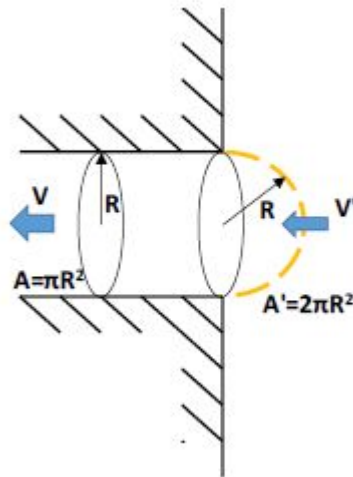
$$C_{g0} = \sqrt{(kg_0 P_0 / \rho_{g0})}$$

ここで、ベントラインに吸い込まれるガスの流速について、ベントライン入口から、ベントライン入口半径 (R) 相当離れた位置 (評価点のイメージは、第 5-7 図のとおり) におけるガス流速 (V') を計算する。当該位置における流路を半径 R の半球の表面積相当とする。よって、ベント管内の流路面積との面積比からベントライン入口から R 離れた半球表面上の位置におけるガス流速は、以下となる。

$$V' = V \frac{\pi R^2}{2\pi R^2} = \frac{V}{2} = \text{約 } 40 \text{ m/s}$$

この流速及び DCD における以下の音響方程式を用いると、前述の半球表面における減圧波は、約 74 kPa となる

$$\delta P_0 = \frac{C_p \delta V}{g_0}$$



第 5-7 図 評価点のイメージ図

次に、上記減圧波がプール表面に到達した際の圧力を求める。

ベントライン入口高さは約 15.4 m であるため、ベントライン入口から、水面までの距離 (r) は、約 4.7 m となる。したがって、DCD における以下の式から、水面に到達す

る減圧波は約 4.6 kPa となる。

$$\delta P = \frac{R}{r} \delta P_0$$

さらに水面に到達した減圧波の水中への伝達係数を DCD における以下の式から、算出する。

$$\frac{\delta P_{transmitted}}{\delta P_{oncoming}} = \frac{2}{1 + \rho_1 C_1 / \rho_2 C_2}$$

ρ_1 : 気体の密度

C_1 : 気体中の音速

ρ_2 : 水の密度

C_2 : 水中の音速

ここで、水の密度及び水中音速はそれぞれガスの密度及び気体中の音速に比べて大きいことから、保守的に、上記における $\rho_1 C_1 / \rho_2 C_2$ を 0 とすると減圧波の水中への伝達係数は、2 となる。したがって、ベントライン入口で生じた減圧波によってサブプレッション・チェンバにもたらされる負圧度は約 10 kPa となる。

格納容器ベント実施時点でのサブプレッション・チェンバ圧力は約 620 kPa [gage] であり、負圧度を考慮した正味の圧力は約 610 kPa [gage] であることから、水面の飽和温度は、約 159 °C となる。ベント開始時のサブプレッション・チェンバ内のプール水温は、約 89 °C であることから、水面の飽和温度 (159°C) に対して十分に小さい。よって、減圧波を踏まえてもプール水の減圧沸騰の影響は極めて小さい。

また、蒸気の負圧度より、水面に到達した減圧波によってプール水面の揺動する速度は、以下の式より約 0.01 m/s であり、プール水面の揺動する速度は小さく、これに伴うプールのスウェルの影響は極めて小さい。

$$\delta V_L = \frac{g_0 \delta P}{\rho_L C_L}$$

ρ_L : 水の密度

C_L : 水中の音速

以上のことから、格納容器ベントによる減圧沸騰及びプールのスウェルを保守的に評価したが、その影響は小さく、原子炉格納容器の健全性に影響はない。

6. まとめ

重大事故等時の原子炉格納容器に生じる動荷重について整理した。重大事故等時の動荷重は設計基準事故時に想定している動荷重に包絡されること等を確認することにより、重大事故等時の動荷重を想定した場合の原子炉格納容器の健全性を確認した。

7. 参考文献

- [1] 塚田浩司, 山口宏克, 森田照道; 沸騰水型軽水炉主蒸気逃し安全弁作動時の圧力抑制室内の動荷重の測定, 火力原子力発電, 1979年8月
- [2] 久木田 他, “蒸気凝縮振動及びチャギングによる圧力抑制プール内動荷重の統計的評価, 2; 格納容器圧力抑制系信頼性実証試験データ評価レポート, 3”, JAERI-M 83-186, 1983年10月
- [3] NEDE-24757-P “MARK II Containment Supporting Program-Caorso Safety Relief Valve Discharge Tests-Phase II test Report”, GE
- [4] NUREG-0487 “MARK II CONTAINMENT LEAD PLANT PROGRAM LOAD EVALUATION AND ACCEPTANCE CRITERIA”

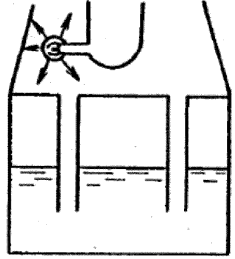
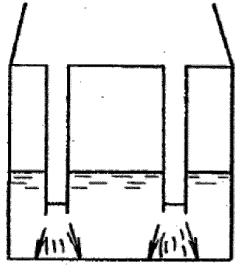
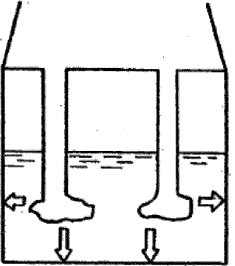
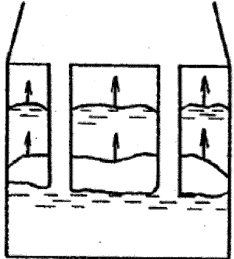
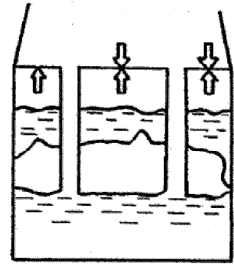
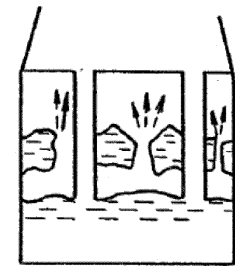
設計基準事故時に生じる動荷重について

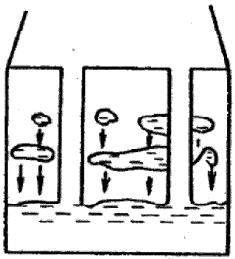
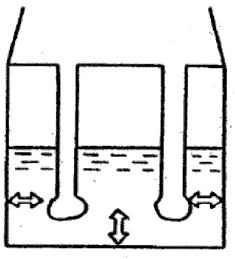
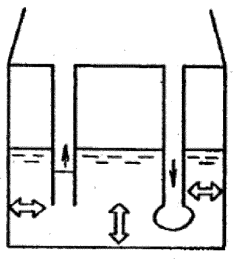
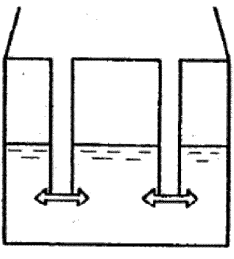
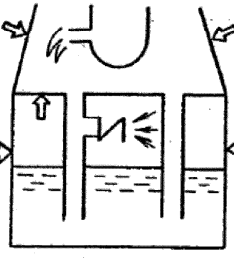
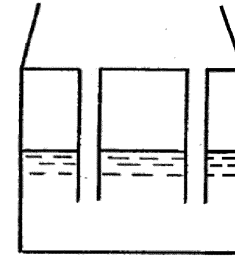
原子炉冷却材喪失時に原子炉格納容器に生じる各荷重に対する現象を第 1 表に、現象の流れを第 1 図に示す。また、逃がし安全弁作動時に原子炉格納容器に生じる各荷重に対する現象を第 2 表に、現象の流れを第 2 図に示す。

東海第二発電所では、「BWR. MARK II 型格納容器圧力抑制系に加わる動荷重の評価指針」に基づき、原子炉冷却材喪失時及び逃がし安全弁作動時の動荷重を第 3 図に示す評価対象に対して、第 3 表、第 4 表及び第 5 表で示すような荷重が生じて、原子炉格納容器の健全性が確保されることを確認している。また、生じる荷重は、第 6 表で示すように解析や試験データに基づき設定している。

第1表 原子炉冷却材喪失時の各荷重の現象

荷重	現象
a. L O C A発生時のドライウエル内の圧力上昇	原子炉冷却系統の配管の破断が瞬時に発生したとすると、圧力波がドライウエル、ベント管内を通過してプールの底面や壁面、内部構造物などに動荷重が作用する。
b. ベントクリア時の水ジェットによる荷重	ドライウエル圧力の急激な上昇によりベント管内のプール水がサブプレッション・チェンバ内に放出されるため水ジェット流が形成され、ジェットによる衝撃力及びドラッグ力がベント管の下部にある内部構造物及び原子炉格納容器底部鉄筋コンクリートマットに作用する。
c. 気泡形成によるプール水中の圧力上昇	ドライウエルの空気がベント管から放出される際、気泡がサブプレッション・チェンバ側壁、内部構造物及び原子炉格納容器底部鉄筋コンクリートマットに圧力波として作用する。
d. 水面上昇による衝撃力	スラグ流が上昇する際、水面より上方にある機器、配管、内部構造物にプール水が衝突しそれらに衝撃力が作用する。
e. 上昇水流による荷重	プール水が上昇する際、上昇水流によりドラッグ力が、機器、配管及び内部構造物に作用する。
f. サプレッション・チェンバ空間部圧力荷重	プール水面の上昇によりサブプレッション・チェンバ上部の空間部が圧縮されることにより、サブプレッション・チェンバ空間部圧縮荷重が作用する。 また、この現象により真空破壊弁が反復動作することが考えられる。
g. ブレーク・スルー	気泡が上昇し水面を貫通（ブレイク・スルー）することで、サブプレッション・チェンバ気相とつながる。この時、水面付近のプール水は、フロス状の2相混合物を形成し、これによりサブプレッション・チェンバ気相部内の構造物及びダイアフラム・フロアに衝撃荷重が加わる。
h. フォールバック荷重	上昇した水面の上昇が停止し、プール水が落下するとき落下水により、機器、配管、内部構造物にドラッグ力が作用する。
i. 蒸気凝縮振動荷重	中高流量蒸気が凝縮する際、プール水に凝縮振動波が伝播し、サブプレッション・チェンバ側壁、原子炉格納容器底部鉄筋コンクリートマット、原子炉本体基礎及び内部構造物に作用する。
j. チャギング荷重	低流量蒸気が凝縮する際、ベント管出口での不均一な凝縮によりバウンダリに荷重が加わる。 また、この現象により、真空破壊弁が反復動作することが考えられる。
k. ベント管に加わる水平荷重	低流量蒸気が凝縮する際、ベント管出口での不均一な凝縮によりベント管に水平力が作用する。
l. E C C S 作動時	原子炉冷却系統の圧力が低下し、炉心がE C C Sにより再冠水されると破断口からはサブクール水が流出するようになる。このサブクール水により、ドライウエル雰囲気は冷却され圧力が低下する。この時、真空破壊弁が作動することでドライウエルの負圧は抑制される。さらに、格納容器スプレイ系の作動によりドライウエル-サブプレッション・チェンバ間の差圧は解消される。

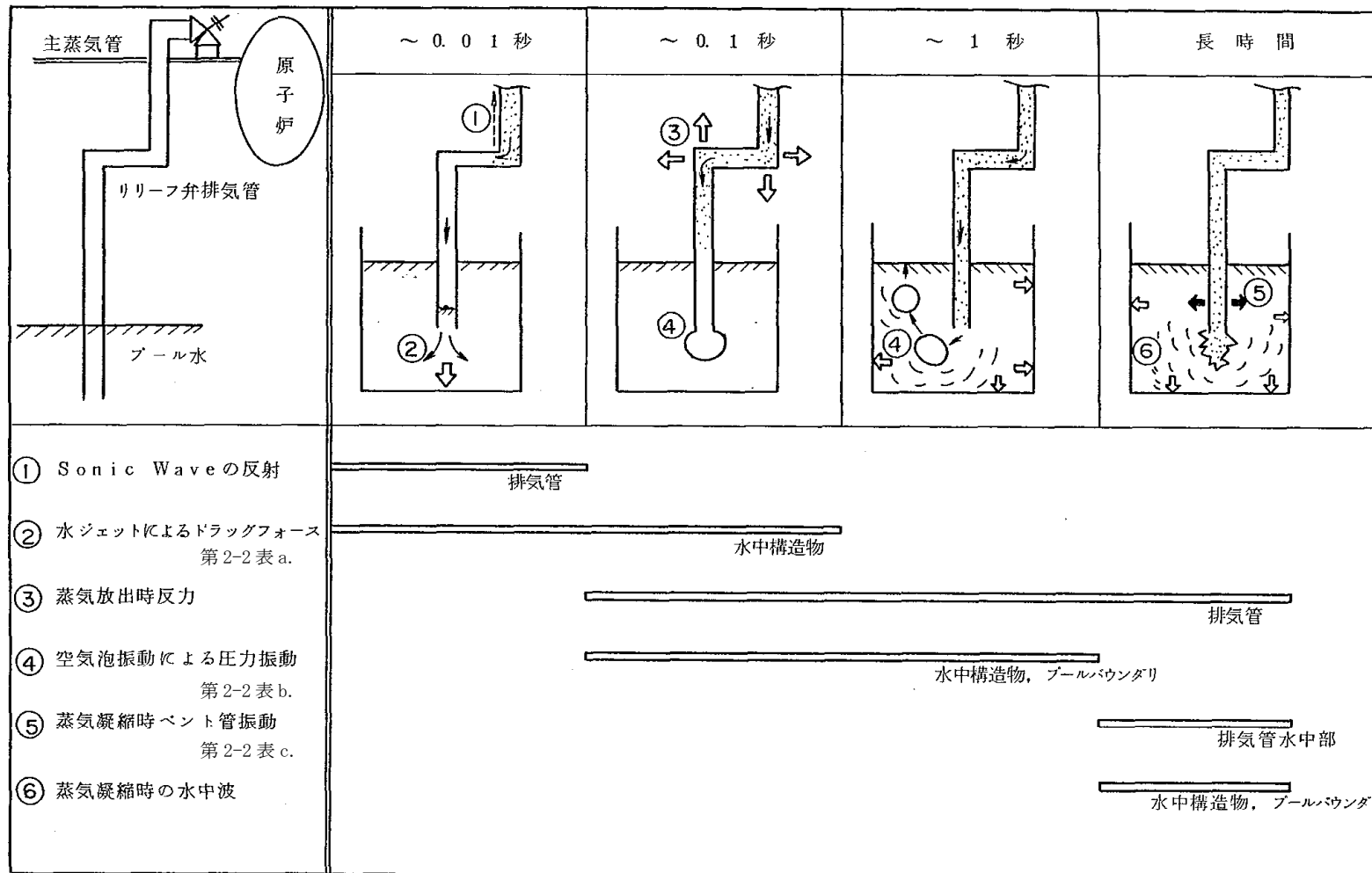
① LOCA発生	② ベントクリア	③ 気泡形成	④ プール水面上昇	⑤ 空間部圧縮	⑥ ブレーク・スルー
圧力波伝播		水中圧力上昇	衝撃力・ドラッグ		フロス衝撃力
					
時間 0~0.01秒 第1表 a.	0~0.7秒 第1表 b.	0.6~1.2秒 第1表 c.	0.7~1.6秒 第1表 d. e.	0.7~1.6秒 第1表 f.	~1.6秒 第1表 g.

⑦ フォール・バック	⑧ 高蒸気流	⑨ 低蒸気流	⑩ 同左	⑪ ECCS作動	⑫ 過渡変化終了
水面落下によるドラッグ	蒸気凝縮による圧力振動	凝縮不安定によるチャギング	凝縮不定常による ベント管横振れ	D/W負圧でV/B作動	
					
時間 1.7~3秒 第1表 h.	3~40秒 第1表 i.	40秒~2分 第1表 j.	3秒~2分 第1表 k.	~2分 第1表 l.	長期 -

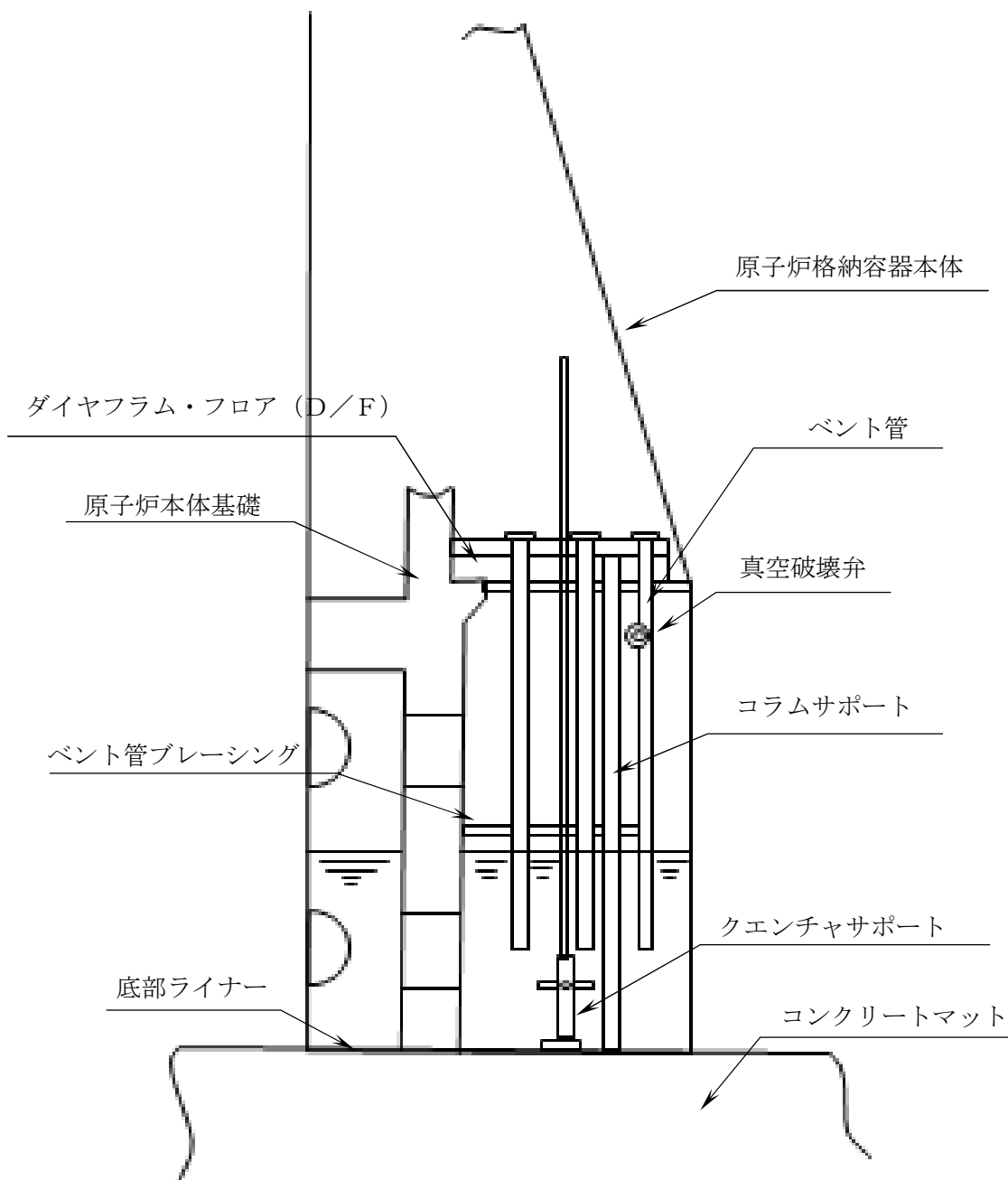
第1図 原子炉冷却材喪失時の現象の流れ

第2表 逃がし安全弁作動時の各荷重の現象

荷重	現象
a. 水ジェットによる荷重	逃がし安全弁作動時，排気管内の水がクエンチャノズルによりサプレッション・チェンバに放出される際，ジェット流が形成され，サプレッション・チェンバ内の内部構造物に衝撃力及びドラッグ力が作用する。
b. 空気泡圧力の振動による荷重	逃がし安全弁作動時，排気管内の空気が圧縮され，これがサプレッション・チェンバに放出される際，気泡を形成し，この気泡が過膨張，収縮を繰り返す，圧力振動が，機器，配管，内部構造物，サプレッション・チェンバ側壁，原子炉格納容器底部鉄筋コンクリートマットに作用する。
c. 蒸気凝縮振動荷重	蒸気がサプレッション・チェンバ内に流入して凝縮する際，凝縮が不安定となる場合，サプレッション・チェンバ底面，壁面に圧力荷重が加わり，サプレッション・チェンバ内の構造物にドラッグ荷重が作用する。また，これらの現象を通じて，クエンチャに対しても荷重が作用する。



第2図 逃がし安全弁作動時の現象の流れ

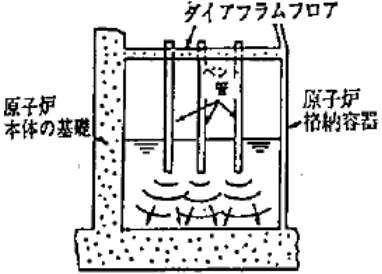
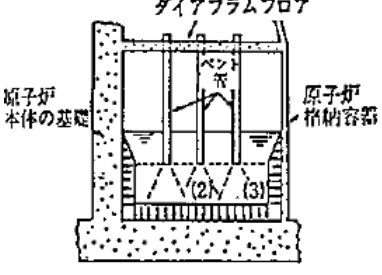
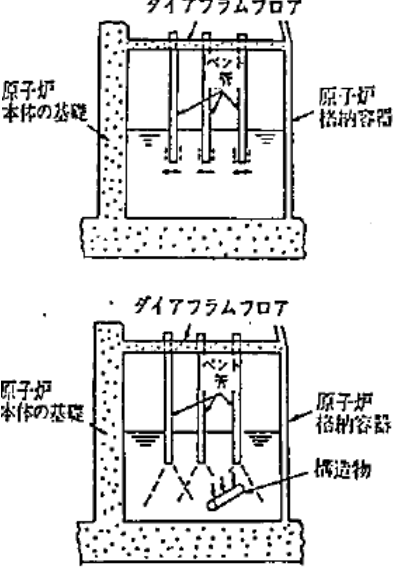


第3図 動荷重の評価対象

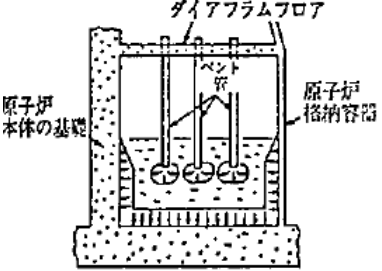
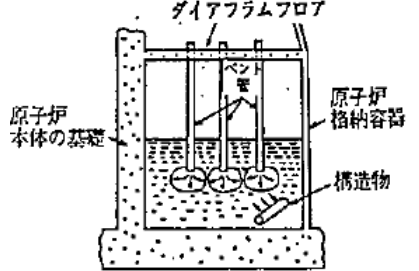
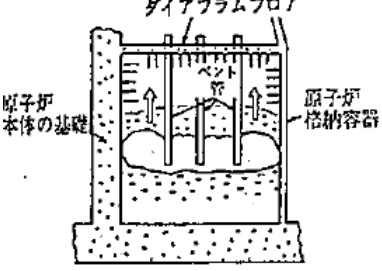
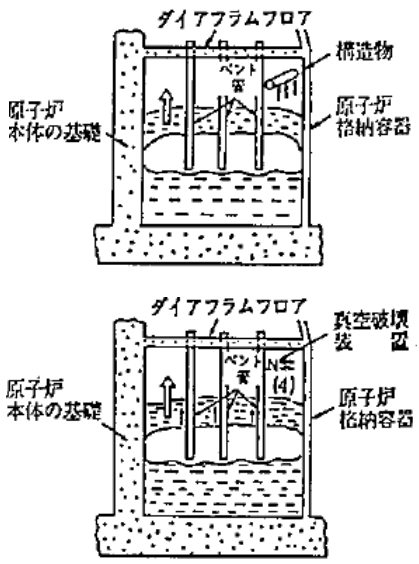
第3表 PCV動荷重指針要求荷重と対象構造物との対応

Mark-II PCV 動荷重指針	項 目	原子炉 格納容器本体	ベント管及びベン ト管ブレーシング	底 部 ラ イ ナ	ク エ ン チ ャ サ ポ ー ト 部	真 空 破 壊 弁	D / F 及 び コ ラ ム サ ポ ー ト	原 子 炉 本 体 基 礎	コ ン ク リ ー ト マ ツ ト	備 考
圧力抑制 系のバウ ンダリに 加わる荷 重	第4表(1)	(2次荷重であり、指針上評価を省略可)								
	第4表(2)	-	-	○	-	-	-	-	○	
	第4表(3)	○	-	-	-	-	-	○	-	
	第4表(4)	○	-	○	-	-	-	○	○	
	第4表(5)	○	-	-	-	-	-	○	-	
	第4表(6)	-	-	-	-	-	○	-	-	
	第4表(7)	(2次荷重であり、指針上評価を省略可)								
	第4表(8)	(2次荷重であり、指針上評価を省略可)								
	第4表(9)	○	-	○	-	-	-	○	○	
圧力抑制 系内の構 造物に加 わる荷重	第4表[1]	-	○	-	-	-	-	-	-	
	第4表[2]	-	○	-	○	-	○	-	-	
	第4表[3]	-	○	-	-	-	-	-	-	
	第4表[4]	-	-	-	-	○	-	-	-	
	第4表 [5]~[8]	(2次荷重であり、指針上評価を省略可)								
逃がし安全 弁作動時の 動荷重	第5表(1)	○	-	○	-	-	-	○	○	
	第5表(2)	○	-	○	-	-	-	○	○	
逃がし安全 弁作動時の 構造物に加 わる荷重	第5表[1]	-	○	-	○	-	○	-	-	
	第5表[2]	-	○	-	○	-	○	-	-	
	第5表[3]	-	○	-	○	-	○	-	-	
	第5表[4]	-	-	-	○	-	-	-	-	

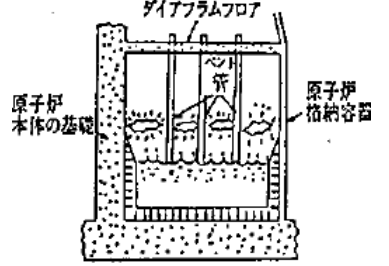
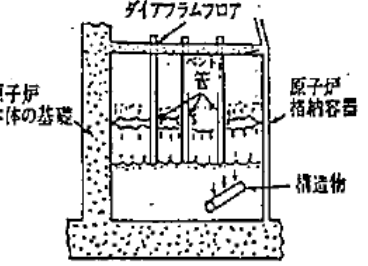
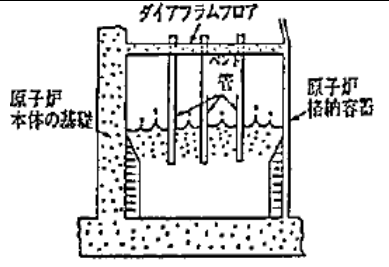
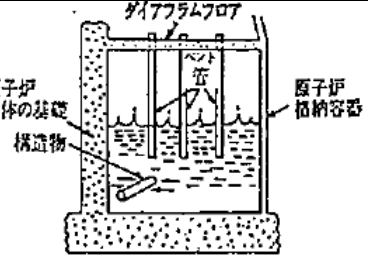
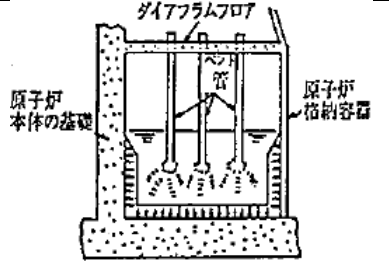
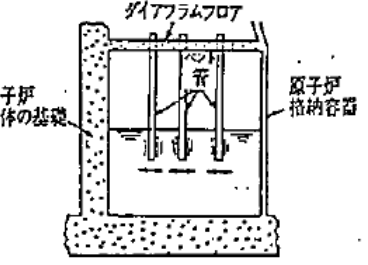
第4表 (1/4) 指針要求に対応するLOCA時動荷重の概要図

事故後の推移	圧力抑制系のバウンダリに加わる荷重	対応する荷重	圧力抑制系内の構造物に加わる荷重	対応する荷重
①破断直後		<p>(1) 破断発生直後に生ずる圧力波により、プール底面に加わる荷重</p>		
②ベントクリアリング過程		<p>(2) ベントクリアリングに至るまでの過程におけるベント管下端からの噴流によるサブプレッション・チェンバの底面への荷重</p> <p>(3) (2)と同じ噴流によるサブプレッション・チェンバの壁面への圧力による荷重</p>		<p>[5] ベントクリアリング時にベント管に加わる水平荷重</p> <p>[2] ベントクリアリングに伴うプール水の流動によるドラッグ荷重</p>

第4表 (2/4) 指針要求に対応するLOCA時動荷重の概要図

事故後の 推移	圧力抑制系のバウンダリに加わる荷重	対応する荷重	圧力抑制系内の構造物に加わる荷重	対応する荷重
③ 気泡形成過程	 <p>ダイアフラムフロア 原子炉本体の基礎 原子炉格納容器</p>	<p>(4) 気泡の形成、プールスウェルによるプール底面、壁面への圧力による荷重</p>	 <p>ダイアフラムフロア 原子炉本体の基礎 原子炉格納容器 構造物</p>	<p>[2] 気泡形成に伴うプール水の流動によるドラッグ荷重</p>
④ プールスウェル過程	 <p>ダイアフラムフロア 原子炉本体の基礎 原子炉格納容器</p>	<p>(5) プールスウェル時のサブプレッション・チェンバ気相部圧縮によるサブプレッション・チェンバ気相部壁面に加わる圧力による荷重</p> <p>(6) (5)と同じくサブプレッション・チェンバ気相部圧縮によるダイアフラム・フロアへの圧力による荷重</p>	 <p>ダイアフラムフロア 原子炉本体の基礎 原子炉格納容器 真空破壊装置 原子炉格納容器 (4)</p>	<p>[3] プールスウェルに伴うサブプレッション・チェンバ気相部内の構造物に対する衝撃荷重</p> <p>[4] プールスウェル時の真空破壊弁への荷重</p> <p>[6] プールスウェル時にベント管に加わるドラッグ荷重</p>

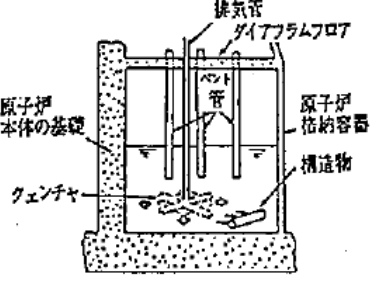
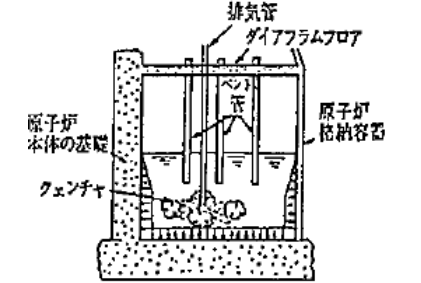
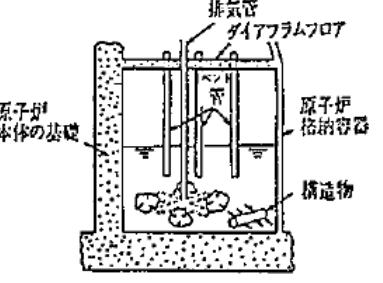
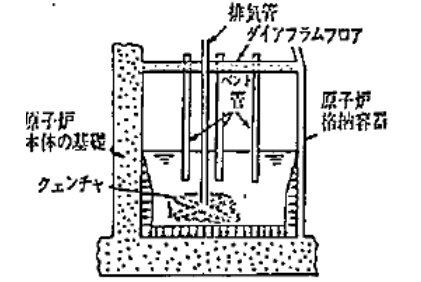
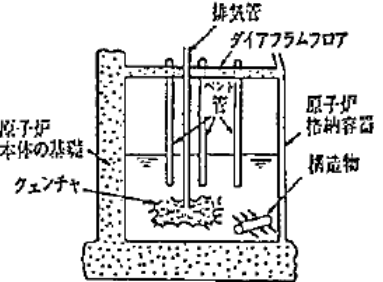
第4表 (3/4) 指針要求に対応するLOCA時動荷重の概要図

事故後の 推移	圧力抑制系のバウンダリに加わる荷重	対応する荷重	圧力抑制系内の構造物に加わる荷重	対応する荷重
⑥ フォールバック過程		(7) フォールバックによるプール底面，壁面に加わる圧力による荷重		[2] フォールバックに伴うプール水の流動によるドラッグ荷重
⑥ フォールバック後の 水面揺動過程		(8) プールのウェル後のプール水面の揺動により，プール壁面に加わる荷重		[7] プールのウェル後のプール水面の揺動による荷重
⑦ 蒸気放出過程		(9) 蒸気凝縮に伴うプール底面，壁面に加わる圧力による荷重		[1] 蒸気凝縮に伴いベント管に加わる水平荷重

第4表 (4/4) 指針要求に対応するLOCA時動荷重の概要図

事故後の 推移	圧力抑制系のバウンダリに加わる荷重	対応する荷重	圧力抑制系内の構造物に加わる荷重	対応する荷重
⑦ 蒸気放出 過程 (続き)				<p>[2] 蒸気凝縮に伴うプール水の流動によるドラッグ荷重</p> <p>[8] 蒸気流によりベント管に加わる反力による荷重</p> <p>[4] 蒸気凝縮時の真空破壊弁への荷重</p>

第5表 指針要求に対応する逃がし安全弁作動時動荷重の概要図

事故後の推移	圧力抑制系のバウンダリに加わる荷重	対応する荷重	圧力抑制系内の構造物に加わる荷重	対応する荷重
① クリアリング過程				[1] クリアリング時水中構造物に加わる衝撃荷重及びドラッグ荷重
② 気泡放出過程		(1) 気泡形成に伴うプール底面、壁面に加わる圧力による荷重		[2] 気泡形成に伴い水中構造物に加わる衝撃荷重及びドラッグ荷重
③ 蒸気放出過程		(2) 蒸気凝縮が不安定となる場合、プール底面、壁面に加わる圧力による荷重		[3] 蒸気凝縮が不安定となる場合、水中構造物に加わるドラッグ荷重 [4] これらの現象を通じてクエンチヤ地震に加わる荷重

第 6 表 設計基準事故時に生じる動荷重と根拠

荷重	根拠	第 4 表との対応
a. L O C A発生時の ドライウエル内の 圧力上昇	指針上評価の省略可	(1)
b. ベントクリア時の 水ジェットによる 荷重	米国で実施された 4T 試験(参考 資料 2 ④)結果における出口噴 流速度から算出	(2), (3) [2]
c. 気泡形成によるサ プレッション・チェ ンバ内の圧力上昇	プールスウェル解析モデルに基 づく解析結果から算出	(4)
d. 水面上昇による衝 撃力	プールスウェル解析モデルに基 づく解析結果から算出	[3]
e. 上昇水流による荷 重	プールスウェル解析モデルに基 づく解析結果から算出	[2], [4], [6]
f. サプレッション・チ ェンバ空間部圧力 荷重	プールスウェル解析モデルに基 づく解析結果から算出	(5), (6)
g. ブレーク・スルー	指針上評価の省略可	—
h. フォールバック荷 重	C R T 試験(参考資料 2 ⑤)結 果より, バウンダリに作用する 荷重としては無視可能。 水中構造物に対する荷重は, プ ールスウェル解析モデルに基 づく解析結果をもとに落下速度を 求め, ドラッグ荷重を計算。	(7), (8) [2], [7]
i. 蒸気凝縮振動荷重	C R T 試験(参考資料 2 ⑤)デ ータに基づき設定	(9) [2]
j. チャギング荷重	C R T 試験(参考資料 2 ⑤)デ ータに基づき設定	(9) [2]
k. ベント管に加わる 水平荷重	NUREG-0808 の評価手法から算出	[1], [5], [8]
l. E C C S 作動時	考慮不要	—

荷重	根拠	第 5 表との対応
a. 水ジェットによる 荷重	b. に包絡(東海第二発電所の実 機試験等)	[1], [4]
b. 空気泡圧力の振動 による荷重	東海第二発電所(参考資料 2 ③)の実機試験	(1) [2], [4]
c. 蒸気凝縮振動荷重	b. に包絡(東海第二発電所の実 機試験等)	(2) [3], [4]

① 主蒸気逃がし安全弁クエンチャ開発試験： 大規模試験（1/4 体積スケールテスト）

試験目的

小規模試験からクエンチャ型が蒸気凝縮振動の安定化に最良との結果を得たので、実機に適用するためのクエンチャノズルを開発すべく大規模実験が実施された。

試験の項目及び成果

本試験では、主に水温等をパラメータとして、°C前後から°Cまで幅広い温度範囲で試験が実施された。気泡脈動荷重及び蒸気凝縮振動荷重の試験結果から、主に以下の内容が確認された。

- ・クエンチャを採用すれば低プール水温 (°C) から高プール水温 (°C) まで安定した蒸気凝縮性能が確保可能である。
- ・蒸気凝縮振動荷重に対する蒸气流束 (kg/s/m²) 及びプール水温による影響
- ・



【参考文献】 NUREG-0783 “Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containment”

NEDO-21061 “MARK II Containment Dynamic Forcing Functions Information Report”

② 主蒸気逃がし安全弁クエンチャ開発試験： 実規模試験

試験の目的

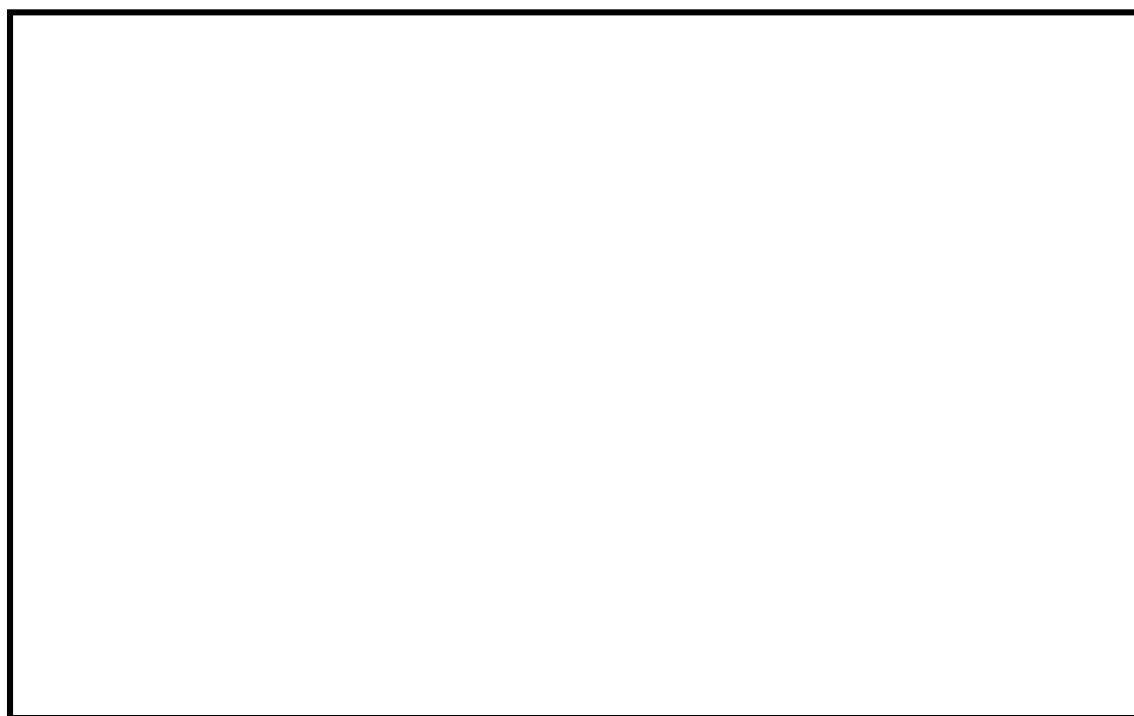
本試験では、実規模のクエンチャを使用して荷重確認試験を行った。

試験の項目及び成果

試験に用いられたクエンチャのクエンチャアーム角度は、1か所が□，他の3か所が□であり、クエンチャアーム取り付け角度の影響が確認された。また、試験は、実機の運転条件を包絡するように幅広いレンジの蒸気源圧力（□ Psi □ MPa）、プール水温条件 □ ° F □ ° C）で実施された。

この結果、以下の内容が確認された。

- ・クエンチャアーム角度 □，□ の全ての方向でクエンチャは安定した凝縮性能を發揮した。
- ・クエンチャアームの孔の放射角度が □ 程度以下であれば高温水がクエンチャ周囲に留まることなく安定凝縮が得られることが示された。



- 【参考文献】 NUREG-0783 “Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containment”
NUREG-0802 “Safety/Relief Valve Quencher Loads Evaluation for BWR Mark II and III Containments”
NEDO-21061 “MARK II Containment Dynamic Forcing Functions Information Report”
NEDE-21078 “Test Results Employed by General Electric for BWR Containment and Vertical Vent Loads”

③ 東海第二発電所 主蒸気逃がし安全弁実機試験

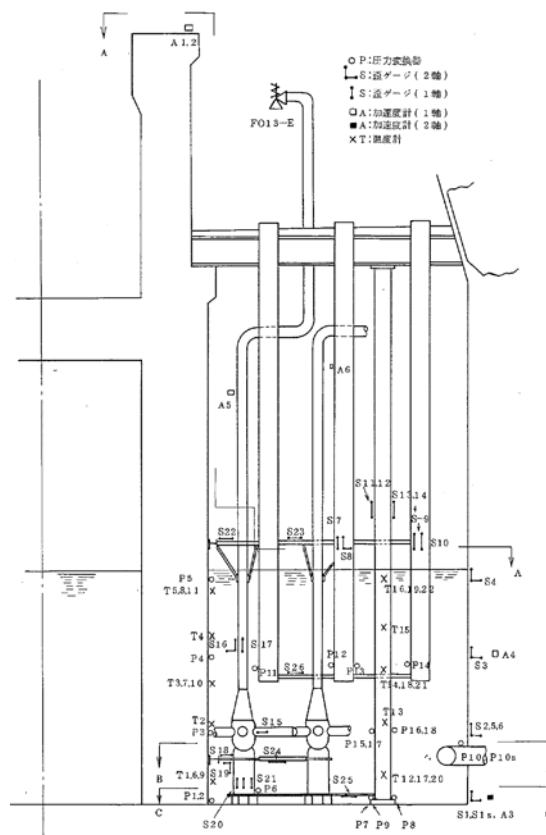
試験の目的

本試験は、新設計格納容器の安全性・健全性・妥当性を確認するとともに、従来設計荷重の妥当性の評価、構造材の応力算出モデルの妥当性を評価するために実施された。

試験の項目及び成果

試験は、東海第二発電所における実機を用いて行われ、原子炉圧力 35 kg/cm²g (約 3.4 MPa)、55 kg/cm²g (約 5.4 MPa) 及び通常運転圧力である 70 kg/cm²g (約 6.9MPa) における試験が実施された。試験結果により、主蒸気逃がし安全弁作動時の荷重や格納容器に作用する応力、圧力の距離による減衰の挙動が確認され、以下の成果が得られた。

- Mark-II 格納容器及びプール内構造物の健全性が実証された。
- 測定された気泡脈動荷重の最大/最小圧力はそれぞれ 0.84kg/cm² (約 82 kPa) / -0.39 kg/cm²(約-38 kPa)であった。
- 1弁(単弁)を作動させた試験のほか、主蒸気隔離弁を全閉させることによる多段・多弁作動試験も実施されたが、すべての試験において蒸気凝縮は、安定したものだった。
- 主蒸気隔離弁を全閉させた試験において、逃し安全弁の最初の作動と後継作動とで気泡圧力に有意差がないことが確認された。



【参考文献】東海第二発電所主蒸気逃がし安全弁実機試験報告書 (昭和 53 年 3 月)

④ 米国 4T/4TCO (Temporary Tall Tank Test Condensation Oscillation) 試験

試験の目的

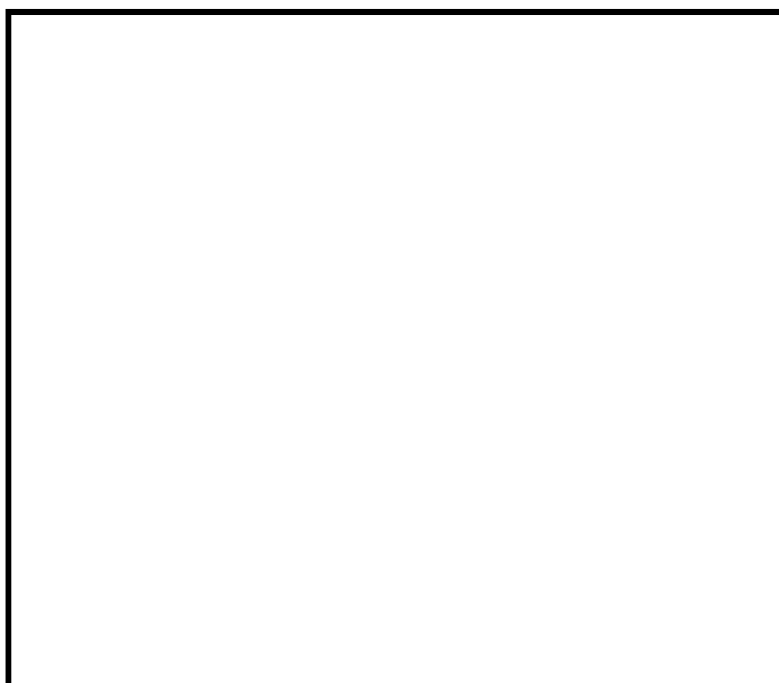
Mark-II プラントでの L O C A 時の蒸気凝縮振動現象を把握することを目的として実施された。

試験装置は、Mark-II 型格納容器のベント管 1 本が実物大で模擬されており、また、これに対応するサプレッション・チェンバ及びドライウエル部分（実炉との体積比約 1/100）が模擬されている。

試験の項目及び成果

試験は、L O C A 時のブローダウン（液相破断、蒸気相破断それぞれ）が模擬され、模擬する破断面積や、ベント管水深、プール水温などを変化させて実施された。この試験により以下の成果が得られた。

- ・ Mark-II 格納容器の蒸気凝縮振動現象が明らかにされ、蒸気凝縮振動荷重に対する様々なパラメータの影響が確認された。
- ・ また、ベントクリア時の水の流速データが計測され、上限流速として 60 ft/s (約 18.3 m/s) が設定された。
- ・ この試験結果には、米国における Mark-II 型格納容器の L O C A 時動荷重の評価に広く用いられている。



【参考文献】 NUREG-0487 “MARK II CONTAINMENT LEAD PLANT PROGRAM LOAD EVALUATION AND ACCEPTANCE CRITERIA”

⑤ 格納容器圧力系信頼性実証試験 (CRT : Containment Reliability Test)

試験の目的

LOCA時のBWR格納容器圧力抑制系の主要な動荷重の評価に用いられる計算モデルの検証と、圧力抑制系のLOCA時における機能の信頼性を実証することを目的として実施された。

試験装置は、Mark-II型格納容器の圧力抑制系の一部分が実物大で模擬されている。

試験の項目及び成果

試験は、LOCAを現実的に模擬し、プールスウェル荷重及び蒸気凝縮荷重の両者についてデータを得ることを目的とした試験等、全28回実施された。これにより、以下の成果が得られた。

- ・従来の試験に基づいて開発された評価モデルないし評価値が試験結果に比べて保守的であることを立証した。
- ・複数ベント管を有する系に特有な荷重低減効果を含む試験結果を得て、従来の単一ベント管試験に基づくものよりも現実的な実炉荷重の評価を可能にした。
- ・蒸気凝縮に伴う荷重の測定を目的とした試験では、初期プール水温を °C、ベント管最大蒸気流束を約 kg/s/m² として試験が実施され、大振幅のチャギング荷重は特定の熱水力条件(蒸気流束 18~28 kg/s/m²、プール水温 40 °C以下)で多発することが確認された。

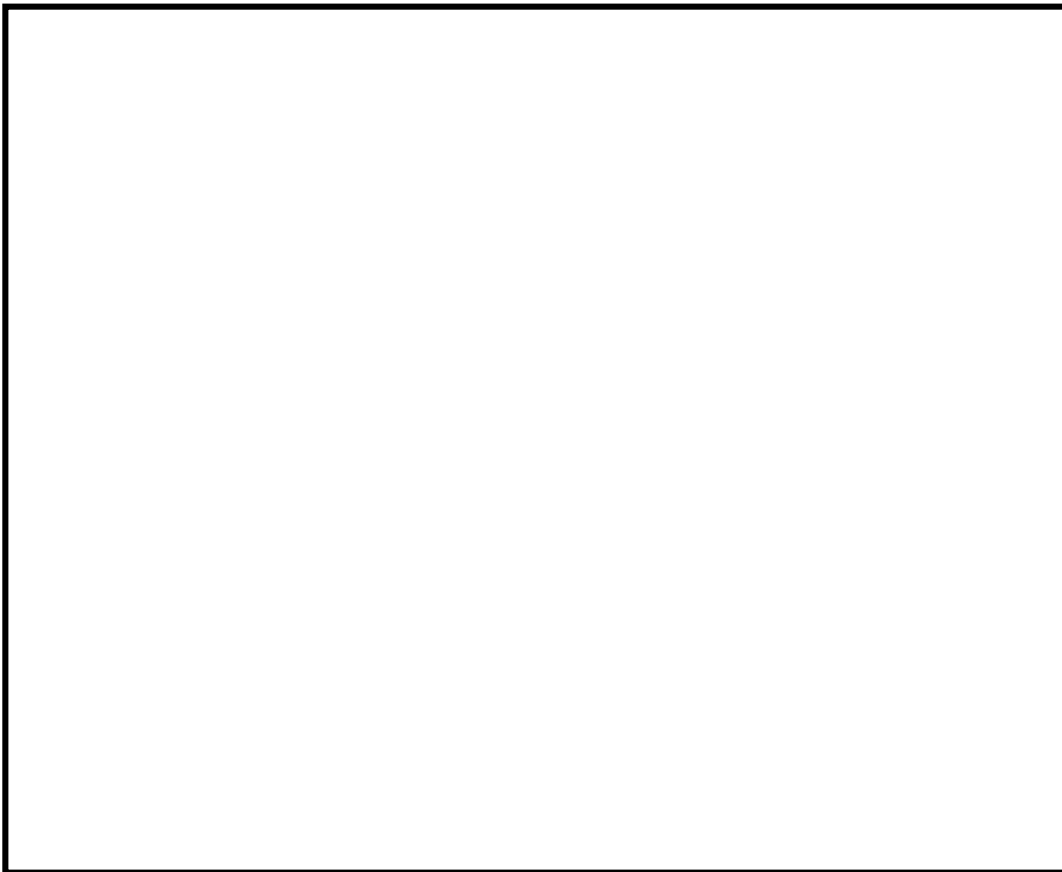


[参考文献] 格納容器圧力抑制系信頼性実証試験評価委員会報告書 (昭和 58 年 11 月)

東二の実機試験における逃がし安全弁作動時の多弁作動について

2.4 で示したように東海第二発電所での実機試験により、主蒸気隔離弁を全閉し逃がし安全弁が□作動したとき（原子炉圧力約 7.44 MPa）と 1 弁作動したときでは、1 弁作動したときの方が動荷重は大きくなることが確認されている。1 弁作動時の動荷重が大きくなった理由として、多弁作動時は排気管出口から放出される圧力波が相互干渉し、圧力振幅が相殺されるためと考えられている。この妥当性を考察するため、東二の実機試験で多弁作動した箇所とその位置関係から圧力振幅が相殺されることを検討する。

第 1 図に示すように逃がし安全弁は、作動圧ごとに第 1 段から第 5 段まで対称的な配置となっており、どの作動圧で排出されても、圧力振幅は相殺されやすいと考えられる。逃がし安全弁□作動時の試験結果も対称的な配置で排気管から排出されており、圧力振幅は相殺されたと推測される。よって、1 弁作動時が最も大きな動荷重を生じると評価することは妥当である。



第 1 図 排気管の配置

【参考文献】東海第二発電所主蒸気逃がし安全弁実機試験報告書（昭和 53 年 3 月）

重大事故等時の動荷重の組み合わせについて

設計基準対象施設としての原子炉格納容器に対する動荷重の組み合わせの考え方を以下に示す。

- ・原子炉格納容器の応力計算は、各運転状態に生じる荷重の組み合わせの中で最も厳しい条件について行う。
- ・圧力、温度及び原子炉冷却材喪失時の蒸気ブローダウンによる荷重において、荷重の生じる時間が明らかに異なる場合は時間のずれを考慮する。具体的には以下の組み合わせとなる。
 - 原子炉冷却材喪失直後のジェット力、及び原子炉冷却材喪失時のサプレッション・チェンバのプール水揺動による荷重は事象発生後一度のみ作用する荷重であるため、許容応力状態Ⅳ_Aとして評価する。この状態は、原子炉格納容器の内圧が上昇する前の過渡的な状況であることから、最高使用圧力とは組み合わせない。
 - ドライウエルからサプレッション・チェンバへの蒸気の流入が起こり、継続的に蒸気の凝縮等による動的荷重（CO、CH）が作用する状態は、設計条件として評価するものとし、原子炉冷却材喪失事故後の最大内圧との組合せを考慮する。なお、COとCHはドライウエルからサプレッション・チェンバに流入する蒸気量の変化に伴い段階的に生じる事象であるため、互いに組み合わせる必要はない。
 - 逃がし安全弁作動時の動荷重については、逃がし安全弁の作動が運転状態Ⅱに区分される事象であることから、許容応力状態Ⅱ_Aとして評価するとともに、弾性設計用地震動 S_d と基準地震動 S_s との組み合わせも評価する。
 - MARK-Ⅱ型格納容器については、CHと逃がし安全弁作動時の荷重は組み合わせない。

前述の考え方を踏まえ、重大事故等時に生じる動荷重（本文第2-2表）に係る荷重の組み合わせを以下のように整理する（第1表）。

<逃がし安全弁作動時荷重>

逃がし安全弁が作動する事象は、「高圧・低圧注水機能喪失（給水喪失）[TQUV]」のように原子炉圧力容器バウンダリの機能が維持されている状態であり、原子炉圧力容器破損は想定されない。したがって、重大事故等時であっても、逃がし安全弁作動時荷重と同時に原子炉格納容器の過度な圧力上昇は重畳するものではなく、原子炉格納容器の内圧は最大でもATWS事象において想定される200 kPa程度である。

<LOCA、FCI及びベント時に生じる動的荷重>

本文2章および5章で述べたとおり、LOCA時に生じる動荷重について重大事故等

時において特に考慮が必要となる荷重は、LOCA後長期にわたって発生しうる荷重であるチャギング荷重のみとなる。また、格納容器ベント実施時やFCI発生時にはベント管を通過する水やガスの流量が一時的に増大するが、この時の水およびガスの流量（流束）はLOCA時に想定される最大流量（流束）に比べて小さいことから荷重としては包絡される。したがって、重大事故等時における原子炉格納容器内の圧力・温度条件との組み合わせを考慮すべき荷重は設計基準事故時に想定するチャギング荷重に包絡される。また、格納容器圧力が最大となるのは、格納容器雰囲気過圧・過温のシナリオにおいて1.5Pdでベントする時点となる。

ここで、前述のとおり、想定される圧力及び荷重条件を上回る条件として、1.5Pd+チャギング事象を保守的に組み合わせ評価した結果を第2表に示す。なお、格納容器ベント実施時やFCI発生時には、40℃以上、かつ、蒸气流束も 18 kg/s/m^2 以下であり、設計条件としているチャギングによる荷重よりも小さくなるが、保守的な値を用いる。この保守性については、5.4で示したとおり、サプレッション・チェンバ内のプール水の水温（40℃以下）が低く、さらにベント管内の蒸气流束（ $18\sim 28\text{ kg/s/m}^2$ ）が比較的大きい領域で振幅の大きな荷重が生じることが確認されており、このときの荷重を設計条件としているためである。

重大事故等時の荷重の組合せが設計基準対処施設としての荷重の組合せを網羅的に適用できているかを確認するため、第2表で示す。確認した結果、設計基準事故時には設計・建設規格に基づき、運転状態IIである逃がし安全弁作動時の動荷重は地震との組合せが必要であるが、重大事故等時は逃がし安全弁作動が短期的な荷重であることから組み合わせないため、相違が生じたものの、その他の荷重について、網羅的に組み合わせしており、重大事故時の組合せが妥当であることを確認した（第2表）。

第3表に示すとおり、重大事故等時に生じる動荷重の組み合わせは原子炉格納容器の限界圧力（620 kPa）による構造評価に包絡される。このため、原子炉格納容器の重大事故等時における閉じ込め機能の健全性は、限界圧力2Pd（620 kPa）によって確認ができる。このときの各荷重による応力を第4表に示す。

また、動荷重の観点で、最大圧力1.5Pd（465kPa）+チャギングの動荷重の裕度は、 ATWS時の最大圧力+SRV作動時の動荷重の裕度は、 である。このことから、重大事故等時において、チャギングによる荷重の影響は大きいものの、上記で記載したとおり、重大事故等時においてはチャギングによる動荷重が大きくなる特定の領域でないことから、原子炉格納容器が有する裕度は小さくならず、動荷重による原子炉格納容器の強度評価への影響はない。

第1表 重大事故等時の荷重の組合せ

荷重の組合せ			許容応力状態	死荷重	限界圧力	圧力					動荷重				重要事故シーケンス等	荷重の組合せの考え方	備考
No.	各運転状態による荷重	地震				S A時最大	A T W S時	L O C A時 中小破断	S A(L) 圧力	S A(LL) 圧力	S R V 作動	L O C A	F C I	ベント			
SA1	SA短期における荷重	—	V _A	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	なし	限界温度、圧力 (200°C, 2Pd) を考慮する。	強度計算書 評価ケース
SA2	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	原子炉停止機能喪失 包絡される重要事故シーケンス等： 高圧注水・低圧機能喪失 (給水喪失)， 高圧注水・減圧機能喪失 (給水喪失)， 全交流動力電源喪失， 崩壊熱除去機能喪失 (取水機能喪失)， 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系機能喪失)， 格納容器バイパス (残留熱除去系配管破断)， 高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱， 原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用， 溶融炉心・コンクリート相互作用	逃がし安全弁による急速減圧までの短期的な原子炉格納容器圧力上昇と逃がし安全弁作動時の荷重が重畳するため、組み合わせる。原子炉格納容器圧力は、逃がし安全弁作動時に最大となるATWS時を用いる。	≦SA1に包絡
SA2'	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	—	—	○	—	—	○	○	—	—	LOCA時注水機能喪失 (中小破断)	中小破断LOCAが発生し、チャギングが生じている状況で、逃がし安全弁が作動する可能性があるため、組み合わせる。原子炉格納容器圧力は、逃がし安全弁作動時とする。	
SA3	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	○	—	—	—	—	—	○	—	—	格納容器過圧・過温破損 包絡される重要事故シーケンス等： 水素燃焼	格納容器ベント時の原子炉格納容器圧力1.5 Pdと長期間継続しうる動荷重であるチャギングとの重畳を考慮し、組み合わせる。	動荷重は CHで代表 ≦SA1に包絡
SA4	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	○	—	—	—	—	—	—	○	—	原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用 (FCI) 包絡される重要事故シーケンス等： 高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱， 溶融炉心・コンクリート相互作用	SA3で想定される動荷重 (LOCA時) に包絡される。	≦SA3に包絡
SA5	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	○	格納容器過圧・過温破損 包絡される重要事故シーケンス等： 高圧・低圧注水機能喪失 (給水喪失)， 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系機能喪失)， LOCA時注水機能喪失 (中小破断)， 水素燃焼	SA3で想定される動荷重 (LOCA時) に包絡される。	≦SA3に包絡
SA6	SA長期(L)における荷重	S _d	V _A S	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	なし	重大事故等時の地震を考慮するため、事故後1×10 ⁻² 年 (3.65日) の荷重と弾性設計用地震動S _d を組み合わせる。原子炉格納容器圧力は、SA(L)で想定される圧力を包絡する最大内圧を用いる。SA(L)の状況では原子炉圧力容器は既に減圧されており、逃がし安全弁作動時の荷重は重畳しない。	耐震計算書 評価ケース
SA7	SA長期(L)における荷重	S _d	V _A S	○	—	—	—	—	○	—	—	○	—	—	格納容器過圧・過温破損 包絡される重要事故シーケンス等： 高圧・低圧注水機能喪失 (給水喪失)， 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系機能喪失)， LOCA時注水機能喪失 (中小破断)， 水素燃焼	事故後1×10 ⁻² 年 (3.65日) の荷重と弾性設計用地震動S _d との組合せ。SA(L)で想定される原子炉格納容器圧力と長期間継続しうる動荷重であるチャギングとの重畳を考慮し、組み合わせる。	動荷重は CHで代表 ≦SA6に包絡
SA8	SA長期(LL)における荷重	S _s	V _A S	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	なし	重大事故等時の地震を考慮するため、事故後2×10 ⁻¹ 年 (73日) の荷重と基準地震動S _s を組み合わせる。この時点では原子炉格納容器は代替循環冷却系等により冷却が開始されており、動的荷重が作用しないため、SA(LL)で想定される圧力のみを地震と組み合わせる。	耐震計算書 評価ケース

第2表 重大事故等時の荷重の組合せの網羅性

荷重の組合せ			許容応力 状態	死 荷重	圧力			動荷重				備 考
No.	各運転状態による荷重	地震			使用 最高 圧力	運 転 通 常 圧 力	最 大 事 故 時 圧 力	作 動 時 S R V	P S	C O	C H	
1	設計条件による荷重	—	設計条件	○	○	—	—	—	—	—	—	SA1の荷重の組合せと同様
2	運転状態Ⅰによる荷重	—	ⅠA	○	—	○	—	—	—	—	—	通常運転時のため、SA時は組み合わせない
3	運転状態Ⅱによる荷重	—	ⅡA	○	—	○	—	○	—	—	—	SA2の荷重の組合せと同様
4	運転状態Ⅳによる荷重	—	ⅣA	○	—	—	—	—	○	—	—	SA3の荷重の組合せと同様
5	運転状態Ⅳによる荷重	—	設計条件	○	—	—	○	—	—	○	—	
6	運転状態Ⅳによる荷重	—	設計条件	○	—	—	○	—	—	—	○	
7	運転状態Ⅰによる荷重	S _d	ⅢAS	○	—	○	—	—	—	—	—	SA6の荷重の組合せと同様
8	運転状態Ⅰによる荷重	S _s	ⅣAS	○	—	○	—	—	—	—	—	SA8の荷重の組合せと同様
9	運転状態Ⅱによる荷重	S _d	ⅢAS	○	—	○	—	○	—	—	—	SRV作動は短期であるため、SA時は組み合わせない
10	運転状態Ⅱによる荷重	S _s	ⅣAS	○	—	○	—	○	—	—	—	
11	運転状態Ⅳによる荷重	S _d	ⅣAS	○	—	—	○	—	—	—	—	SA6の荷重の組合せと同様
SA1	SA短期における荷重	—	V _A	○	○	—	—	—	—	—	—	評価圧力：限界圧力2 Pd (620 kPa)
SA2	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	—	○	○	—	—	—	評価圧力：ATWS時 (200 kPa ^{*1})
SA2'	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	—	○	○	—	—	○	評価圧力：中小破断LOCA時 (25 kPa ^{*1})
SA3	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	—	○	—	—	—	○	評価圧力：SA時の最高圧力 (465 kPa ^{*1})
SA4	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	—	○	—	—	—	○	SA3と同等以下
SA5	SA短期における荷重	—	V _A	○	—	—	○	—	—	—	○	
SA6	SA長期(L)における荷重	S _d	V _A S	○	—	—	○	—	—	—	—	評価圧力：SA時の最高圧力 (465 kPa ^{*1})
SA7	SA長期(L)における荷重	S _d	V _A S	○	—	—	○	—	—	—	○	評価圧力：SA(L)時の圧力310 kPa ^{*1}
SA8	SA長期(LL)における荷重	S _s	V _A S	○	—	—	○	—	—	—	—	評価圧力：SA(LL)時の圧力200 kPa ^{*1}

※1：有効性評価結果

上記の表は、重大事故等時の荷重の組合せとして考慮すべき、設計基準事故時の圧力、動荷重及び地震に関連する組み合わせについて、整理している。このため、運転時に想定されない燃料交換/耐圧試験は、組み合わせを記載していない。

第3表 原子炉格納容器 サプレッション・チェンバの強度評価結果

評価部位	No.	荷重の組合せ※1	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度
円筒胴部	SA1	死荷重+限界圧力 (620 kPa)		281※2	
	SA2	死荷重+ATWS時 (200 kPa) +SRV作動時		281※2	
	SA2'	死荷重 +中小破断LOCA時 (25 kPa) +SRV作動時+チャギング		281※2	
	SA3	死荷重+最大圧力 (465 kPa) +チャギング		281※2	
	SA4	死荷重+最大圧力 (465 kPa) +チャギング (SA3と同等以下)		281※2	
	SA5	死荷重+最大圧力 (465 kPa) +チャギング (SA3と同等以下)		281※2	
	SA6	死荷重+最大圧力 (465 kPa) + S _d		253※3	
	SA7	死荷重+SA(L)圧力 (310 kPa) +チャギング+ S _d		253※3	
	SA8	死荷重+SA(LL)圧力 (200 kPa) + S _s		254※3	

※1：水頭圧は重大事故後に起こりうる最大水位を包絡するものとしてサプレッション・チェンバのベントライン下端位置を水面位置として算出した値を用いる。また、動荷重はこのときの水位を考慮したものとする。

※2：許容応力状態V_AとしてのIV_A許容限界を用いる。(限界温度(200℃)における許容値)

※3：許容応力状態V_{AS}としてのIV_{AS}許容限界を用いる。(SA(L)(171℃), SA(LL)(150℃)における評価温度)

第4表 重大事故等時の各荷重による応力

荷重の種類	各荷重による応力 ^{※2}									SA1	SA2	SA2'	SA3	SA4	SA5	SA6	SA7	SA8
	Pm			P1+Pb														
				内面			外面											
	σt	σl	τ	σt	σl	τ	σt	σl	τ									
死荷重										○	○	○	○	○	○	○	○	○
水頭圧 ^{※1}										○	○	○	○	○	○	○	○	○
限界圧力(620kPa)										○								
SA 時最大(465kPa)													○	○	○	○		
SA(L) 時(310kPa)																	○	
SA(LL) 時(200kPa)																		○
ATWS 時(200kPa)											○							
中小 LOCA 時(25kPa)												○						
SRV 作動時 ^{※1}											○	○						
CH 時 ^{※1}												○	○	(○)	(○)		○	
Sd 地震時(鉛直)																		
Sd 地震時(水平)																○	○	
Sd 地震時(水頭分)																		
Ss 地震時(鉛直)																		
Ss 地震時(水平)																		○
Ss 地震時(水頭分)																		

σt : 円周方向応力, σl : 軸方向応力, τ : せん断応力 (t-l 方向)

※1 重大事故時のプール水の水位を考慮。

※2 動荷重及び地震荷重は振動荷重のため±両方存在するが、本表では1方向のみ表記

設計基準対処施設としての動荷重に対する健全性

東海第二発電所の原子炉格納容器は、建設時において動荷重による影響の知見がなく、その後の知見によって設計上の考慮が必要となった。これを踏まえ、東海第二発電所では、既工認及び定期的安全レビューで原子炉格納容器の健全性を確認している。

第 1 表に示す対象部位（第 1 図）に対して、強度評価を実施している。なお、各部位の評価結果については、裕度が最も小さいものを記載する。

既工認及び定期的安全レビューの結果で示すように設計基準対処施設としての動荷重は原子炉格納容器本体に生じる荷重が最も裕度が小さい結果となった。

最も裕度が小さくなる理由としては、

- ・原子炉格納容器本体は、内部構造物と異なり内圧による荷重を受けること（第 2 表の事故時圧力）及び動荷重の受圧面積が大きく動荷重が大きいこと（第 2 表の逃がし安全弁作動時等）
- ・これらの荷重は第 3 表で示すように組合せが必要であり、第 4 表で示すように地震による荷重よりも動荷重を組み合わせた荷重の方が大きいこと
- ・動荷重に対する許容値は、地震時と比較し、小さいこと

が挙げられる。

このことから、原子炉格納容器の健全性は原子炉格納容器本体を代表とすることで確認できる。なお、MARK-II 改良型と構造比較した部位については、動荷重を考慮したプラント設計されたものと同等以上の強度を有することを確認していることから、十分な裕度を有するものとした。

第 1 表で示すように残留熱除去系ストレーナは、動荷重を含まない評価結果を記載している。その理由は、応力評価点を第 6 図、各荷重による応力を第 16 表に示すように評価点ごとに生じる動荷重は異なるものの、差圧による荷重が最も大きい。このため、動荷重を組み合わせた結果では裕度が大きくなるため、動荷重でない評価結果を第 1 表に記載している。

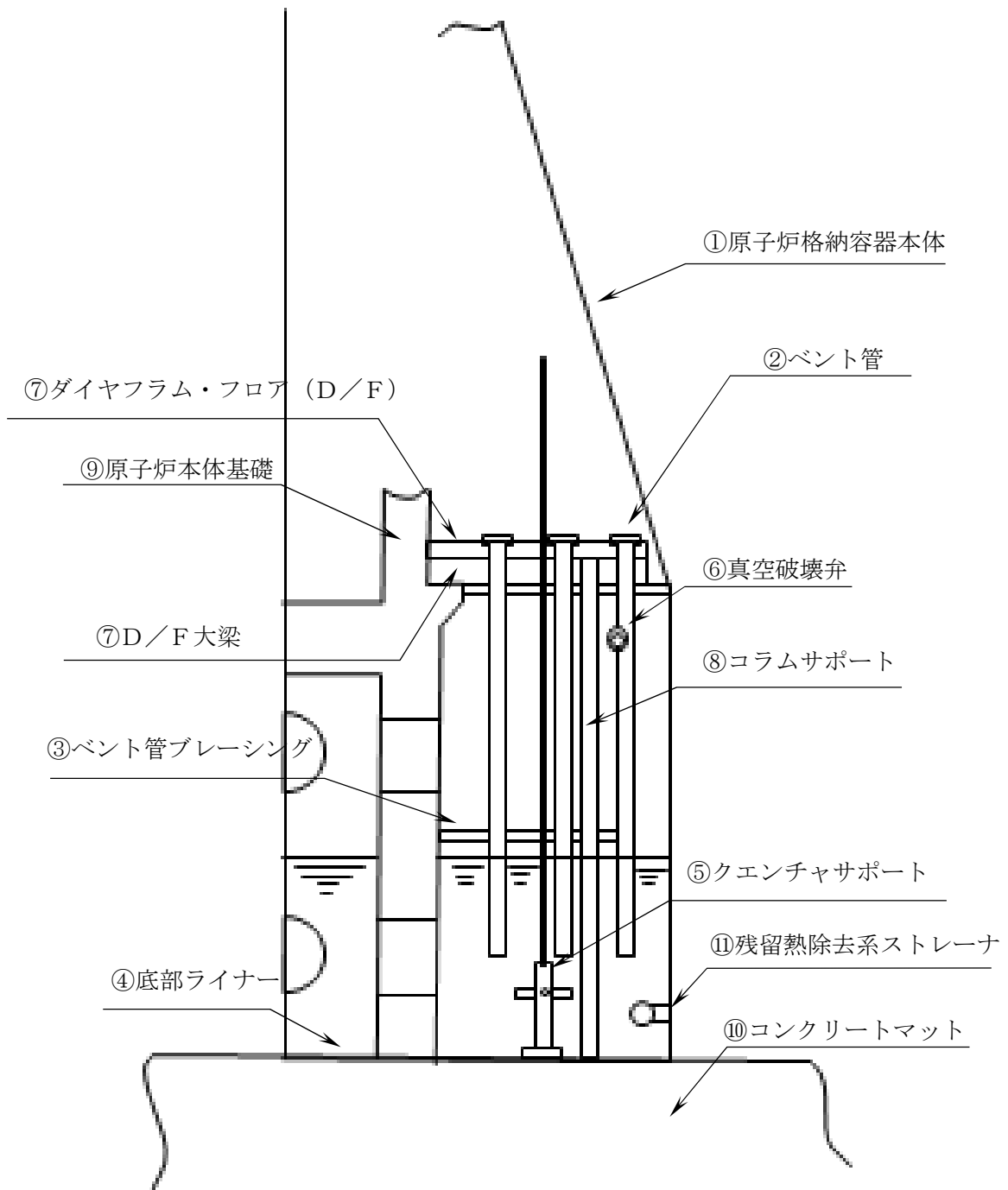
第1表 設計基準対処施設としての原子炉格納容器の健全性確認結果

評価対象	評価結果
① 原子炉格納容器本体 (第2表～第4表)	(事故時圧力+チャギング荷重時) 一次応力 ^{※1} : <input type="text"/> MPa/許容値: 131 MPa 裕度: <input type="text"/>
② ベント管 (第5表, 第6表)	(SRV作動時) 一次応力 ^{※2} : <input type="text"/> kg/mm ² /許容値: 14.6 kg/mm ² 裕度: <input type="text"/>
③ ベント管ブレイシング (第7表, 第8表)	(フォールバック荷重) 曲げ荷重 ^{※2} : <input type="text"/> kg/mm ² /許容値: 24.6 kg/mm ² 裕度: <input type="text"/>
④ 底部ライナー	ベースマットの評価から算出されることから, ベースマットの評価に代表される
⑤ クエンチャーサポート (第9表)	(SRV作動時+S ₁) 圧縮応力 ^{※2} : <input type="text"/> kg/mm ² /許容値: 21.5 kg/mm ² 裕度: <input type="text"/>
⑥ 真空破壊弁 (第10表)	(プールスウェル(LOCA時)) 組合せ応力 ^{※2} : <input type="text"/> kg/mm ² /許容値: 50.0 kg/mm ² 裕度: <input type="text"/>
⑦ ダイヤフラム・フロア (第11表)	(SRV作動時+S ₁) SRV作動時 (<input type="text"/> ton) + S ₁ (<input type="text"/> ton) ^{※2} <input type="text"/> ton S ₂ : <input type="text"/> ton 裕度: <input type="text"/> (S ₂ に対する裕度)
⑦ ダイヤフラム・フロア大梁 (第12表)	(MARK-II改良型プラントとの単位差圧が作用した場合の裕度の比較) 東二 ^{※2} : <input type="text"/> MARK-II改良型プラント: <input type="text"/> 比率: <input type="text"/>
⑧ コラムサポート (第13表)	(水ジェット荷重+フォールバック荷重) 発生応力 ^{※2} : <input type="text"/> ton/cm ² /許容値: <input type="text"/> ton/cm ² 裕度: <input type="text"/>
⑨ 原子炉本体基礎 (第14表)	(MARK-II改良型プラントとの構造比較) 配筋量: 東二 ^{※2} : <input type="text"/> cm ² MARK-II改良型プラント: <input type="text"/> cm ² 比率: <input type="text"/>
⑩ コンクリートマット (第15表)	(MARK-II改良型プラントとの構造比較) 鉄筋比(最小値を示す): 東二 ^{※2} : <input type="text"/> MARK-II改良型プラント: <input type="text"/> 比率: <input type="text"/>
⑪ 残留熱除去系ストレーナ ^{※3} (第16表～第18表)	(異物荷重+差圧+地震荷重(ストレーナ, 異物)) 一次応力 ^{※1} : <input type="text"/> MPa/許容値: <input type="text"/> MPa 裕度: <input type="text"/>

※1: 既工認評価値(工事計画認可申請書参考資料(平成20・02・29原第41号 平成20年4月7日付け))

※2: 定期的安全レビュー結果

※3: 低圧炉心スプレイ系及び高圧炉心スプレイ系ストレーナを包絡。なお, 原子炉隔離時冷却系ストレーナはストレーナを大型化していないため, 差圧による荷重が小さいことから, 包絡される。



第1図 動荷重の評価対象

第2表 原子炉格納容器本体の各荷重による応力

応力評価点 P1 (単位: MPa)

荷重	一次応力									一次+二次応力								
	P _m			P _L + P _b						P _L + P _b + Q								
	σ _t	σ _ℓ	τ	内面			外面			内面			外面					
				σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ			
1 最高使用圧力 (内圧) 2 最高使用圧力 (外圧) 3 事故時圧力 4 PCV鉛直荷重 (通常) 5 PCV鉛直荷重 (燃交) 6 プール水頭 7 PCV鉛直方向S ₁ *地震 (通常, 上向U) 8 PCV鉛直方向S ₁ *地震 (通常, 下向D) 9 PCV鉛直方向S ₁ *地震 (燃交, 上向U) 10 PCV鉛直方向S ₁ *地震 (燃交, 下向D) 11 PCV鉛直方向S ₂ 地震 (通常, 上向U) 12 PCV鉛直方向S ₂ 地震 (通常, 下向D) 13 PCV鉛直方向S ₂ 地震 (燃交, 上向U) 14 PCV鉛直方向S ₂ 地震 (燃交, 下向D) 15 プール水S ₁ *地震 (上向U) 16 プール水S ₁ *地震 (下向D) 17 プール水S ₂ 地震 (上向U) 18 プール水S ₂ 地震 (下向D) 19 PCV水平方向S ₁ *地震 (圧縮C) 20 PCV水平方向S ₁ *地震 (引張T) 21 PCV水平方向S ₂ 地震 (圧縮C) 22 PCV水平方向S ₂ 地震 (引張T) 23 PCV熱荷重 (通常) 24 逃がし安全弁作動時荷重 (正圧P) 25 逃がし安全弁作動時荷重 (負圧N)																		

注 : σ_t:円周方向応力, σ_ℓ:軸方向応力, τ:せん断応力 (t - ℓ方向)

応力評価点 P1 (単位: MPa)

荷重	一次応力									一次+二次応力								
	P _m			P _L + P _b						P _L + P _b + Q								
	σ _t	σ _ℓ	τ	内面			外面			内面			外面					
				σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ			
26 水ジェット 27 蒸気凝縮振動 (正圧P) 28 蒸気凝縮振動 (負圧N) 29 チャギング (正圧P) 30 チャギング (負圧N)																		

注 : σ_t:円周方向応力, σ_ℓ:軸方向応力, τ:せん断応力 (t - ℓ方向)

第3表 原子炉格納容器本体の荷重の組合せ

応力評価点 P1, P2

荷重条件					荷重番号*
番号	運転状態	地震荷重	供用状態	荷重条件	
1	設計条件	—	設計条件	設計条件	1 4 6
2	運転状態 I	—	A	I—通常運転	2 4 6 23
3	運転状態 I	—	A	I—燃料交換	5 6
4	運転状態 II	—	B	II—SRV—(P)	2 4 6 23 24
5	運転状態 II	—	B	II—SRV—(N)	2 4 6 23 25
6	運転状態 IV	—	D	IV	4 6 26
7	運転状態 IV	—	設計条件	設計条件—CO (P)	3 4 6 27
8	運転状態 IV	—	設計条件	設計条件—CO (N)	3 4 6 28
9	運転状態 IV	—	設計条件	設計条件—CH (P)	3 4 6 29
10	運転状態 IV	—	設計条件	設計条件—CH (N)	3 4 6 30
11	運転状態 I	S ₁ *	C(IIIAS)	I—S ₁ *通常運転 (U, T)	2 4 6 7 15 20 23
12	運転状態 I	S ₁ *	C(IIIAS)	I—S ₁ *通常運転 (D, C)	2 4 6 8 16 19 23
13	運転状態 I	S ₁ *	C(IIIAS)	I—S ₁ *燃料交換 (U, T)	5 6 9 15 20 23
14	運転状態 I	S ₁ *	C(IIIAS)	I—S ₁ *燃料交換 (D, C)	5 6 10 16 19 23
15	運転状態 II	S ₁ *	C(IIIAS)	II—SRV—S ₁ * (U, T, P)	2 4 6 7 15 20 23 24
16	運転状態 II	S ₁ *	C(IIIAS)	II—SRV—S ₁ * (U, T, N)	2 4 6 7 15 20 23 25
17	運転状態 II	S ₁ *	C(IIIAS)	II—SRV—S ₁ * (D, C, P)	2 4 6 8 16 19 23 24
18	運転状態 II	S ₁ *	C(IIIAS)	II—SRV—S ₁ * (D, C, N)	2 4 6 8 16 19 23 25
19	運転状態 I	S ₂	D(IVAS)	I—S ₂ 通常運転 (U, T)	2 4 6 11 17 22 23
20	運転状態 I	S ₂	D(IVAS)	I—S ₂ 通常運転 (D, C)	2 4 6 12 18 21 23
21	運転状態 I	S ₂	D(IVAS)	I—S ₂ 燃料交換 (U, T)	5 6 13 17 22 23
22	運転状態 I	S ₂	D(IVAS)	I—S ₂ 燃料交換 (D, C)	5 6 14 18 21 23
23	運転状態 II	S ₂	D(IVAS)	II—SRV—S ₂ (U, T, P)	2 4 6 11 17 22 23 24
24	運転状態 II	S ₂	D(IVAS)	II—SRV—S ₂ (U, T, N)	2 4 6 11 17 22 23 25
25	運転状態 II	S ₂	D(IVAS)	II—SRV—S ₂ (D, C, P)	2 4 6 12 18 21 23 24

応力評価点 P1, P2

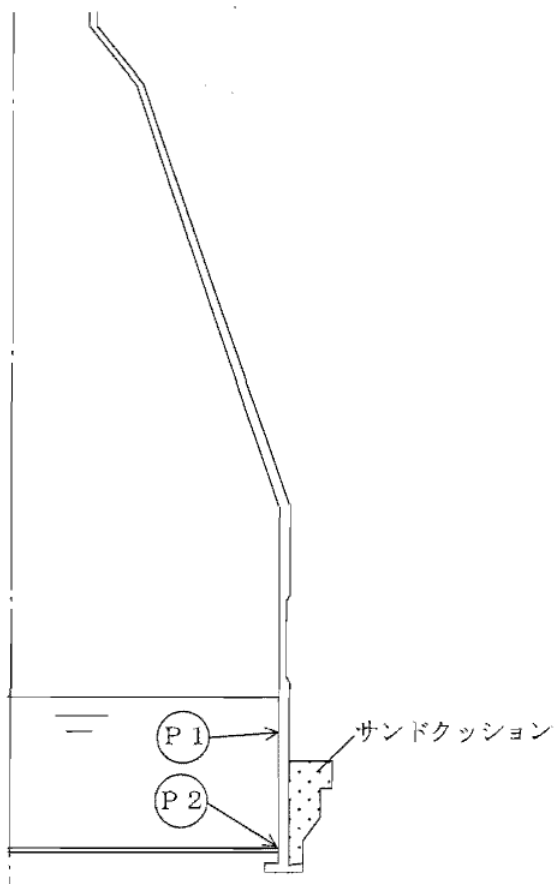
荷重条件					荷重番号*
番号	運転状態	地震荷重	供用状態	荷重条件	
26	運転状態 II	S ₂	D(IVAS)	II—SRV—S ₂ (D, C, N)	2 4 6 12 18 21 23 25
27	運転状態 IV	S ₁ *	D(IVAS)	IV—S ₁ * (U, T)	3 4 6 7 15 20
28	運転状態 IV	S ₁ *	D(IVAS)	IV—S ₁ * (D, C)	3 4 6 8 16 19

第4表 原子炉格納容器本体の応力評価結果

応力評価点 P1 (単位: MPa)

荷重の組合せ		供用状態	一次応力				一次 + 二次応力	
運転状態	地震荷重		P _m		P _L + P _b		P _L + P _b + Q	
			応力強さ	許容値	応力強さ	許容値	応力振幅	許容値
設計条件	—	設計条件		131		196		—
I	—	A		—		—		393
II	—	B		—		—		393
IV	—	D		258		387		—
IV	—	設計条件		131		196		—
I	S ₁ *	C(IIIAS)		237		356		393
II	S ₁ *	C(IIIAS)		237		356		393
IV	S ₁ *	D(IVAS)		258		387		393
I	S ₂	D(IVAS)		258		387		393
II	S ₂	D(IVAS)		258		387		393

注記 * : 地震荷重のみによる応力振幅を示す。



第2図 原子炉格納容器本体の応力評価点

第5表 ベント管の各荷重による応力

(単位：kg/mm²)

番号	荷重	P1	P2
		一次応力	一次応力
(1)	内圧		
(2)	死荷重		
(3)	地震荷重		
(4)	冷却材喪失事故時のプール水揺動		
(5)	ベント管に加わる水平方向荷重		
(6)	逃がし安全弁作動時の荷重		

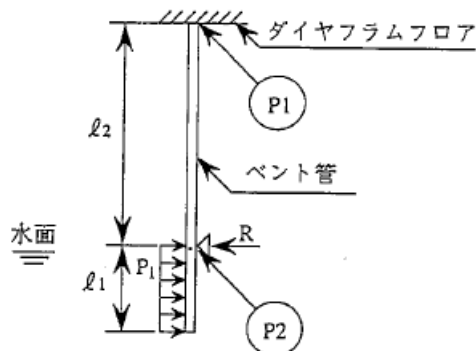
第6表 ベント管の応力評価結果

(単位：kg/mm²)

応力評価点		P1		P2	
荷重条件	荷重の組合せ番号	一次応力	許容応力	一次応力	許容応力
1	(1)+(2)		12.2		12.2
1	(2)+(6)		14.6		14.6
3	(1)+(2)+(4)		38.7		25.8
3	(1)+(2)+(5)		38.7		25.8
4	(2)+(3)+(6)		23.4		23.4
5	(1)+(2)+(3)		23.4		23.4

(単位：kg/mm²)

応力評価点		P1		P2	
荷重条件	荷重の組合せ番号	一次+二次応力	許容応力	一次+二次応力	許容応力
4	(3) × 2		46.8		46.8
5	(3) × 2		46.8		46.8



第2図 ベント管の応力評価点

第7表 ベント管ブレーシングの各荷重による応力

(単位：kg/mm²)

番号	荷 重	P3		
		引張応力	圧縮応力	曲げ応力
(1)	地震荷重			
(2)	逃がし安全弁作動時の荷重			
(3)	ベント管に加わる水平方向荷重			
(4)	事故時の上昇水流による荷重			
(5)	事故時のフォールバック荷重			

第8表 ベント管の応力評価結果

(単位：kg/mm²)

応 力 評 価 点		P3					
荷重条件	荷重の組合せ番号	引張応力		圧縮応力		曲げ応力	
		合計応力	許容応力	合計応力	許容応力	合計応力	許容応力
2	(2)		13.6		11.6	—	—
3	(3)		24.6		20.2	—	—
3	(5)*2	—	—	—	—		24.6
4	(1)+(2)		20.5		17.4	—	—

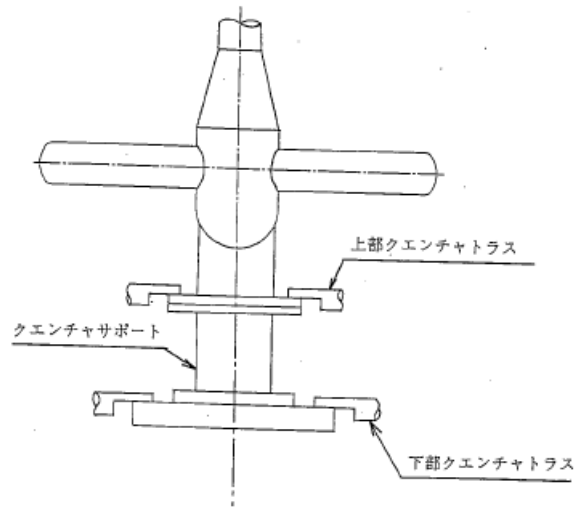
注記*：荷重番号(4)，(5)のうち，応力の大きいフォールバック荷重による応力により評価する。

第9表 クエンチャサポート部の応力評価結果

(単位：kg/mm²)

評価部位	荷重の 組合せ	引張応力		圧縮応力		せん断応力	
		応力	許容 応力	応力	許容 応力	応力	許容 応力
クエンチャ サポート	II+S1*		22.3		21.5		12.9
	II+S2		26.6		25.9		15.3
上部クエンチャ トラス	II+S1*		22.3		18.4	—	12.9
	II+S2		26.8		21.3	—	15.4
下部クエンチャ トラス	II+S1*		22.3		16.7	—	12.9
	II+S2		26.8		19.0	—	15.4

注記*：曲げモーメントによる応力を含む

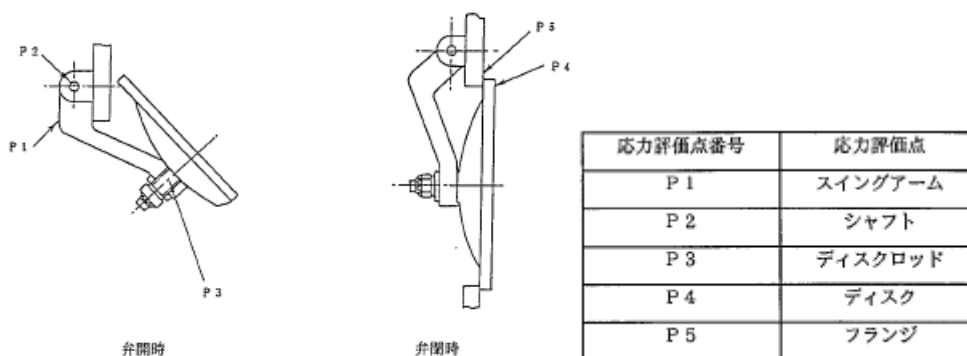


第3図 クエンチャサポートの応力評価点

第 10 表 真空破壊装置の応力評価結果

(単位: kg/cm²)

荷重	弁運動方向	応力評価点	部材	組合せ応力	引張応力	せん断応力	応力値	準用する許容応力 (材料: 現状)	準用する許容応力 (材料: 改善)	備考
ブローキック	開	P1	スイングアーム					25.0 (SM41A)	50.0 (SPV499)	(AIJ短期)
		P2	シャフト					12.1 (SUS304)	12.1 (SUS304)	(AIJ短期)
		P3	ディスクロッド					27.0 (SAE16Gr.70)	27.0 (SDV480)	(AIJ短期)
	閉	P4	ディスク					26.3 (SAE16Gr.70)	26.3 (SDV480)	(IV,S)
		P5	フランジ					36.3 (SAE16Gr.70)	36.3 (SDV480)	(IV,S)
ブローバック	開	P1	スイングアーム					25.0 (SM41A)	50.0 (SPV499)	(AIJ短期)
		P2	シャフト					12.1 (SUS304)	12.1 (SUS304)	(AIJ短期)
		P3	ディスクロッド					27.0 (SAE16Gr.70)	27.0 (SDV480)	(AIJ短期)
	閉	P4	ディスク					26.3 (SAE16Gr.70)	26.3 (SDV480)	(IV,S)
		P5	フランジ					36.3 (SAE16Gr.70)	36.3 (SDV480)	(IV,S)



第 4 図 真空破壊装置の応力評価点

第 11 表 ダイアフラム・フロアの応力評価結果

(a) 逃がし安全弁作動時の荷重

荷重の種類	発生応力[ton]	備考
逃がし安全弁作動時		
S ₁ 地震力		定期的安全レビュー時
S ₂ 地震力		建設時

(b) 原子炉冷却材喪失事故時プール水揺動に対する荷重

部位	荷重[ton/m ²]	備考
断熱コンクリート		下向き荷重
構造体コンクリート		下向き荷重
鉄骨グレーチング等		下向き荷重
鉄骨梁		下向き荷重
原子炉冷却材喪失時の荷重		上向き荷重
合計		
スタッドにかかる引抜き力		引抜き耐力 : <input type="text"/> ton

(c) 原子炉冷却材喪失時蒸気ブローダウンによる荷重

荷重の種類	発生応力[ton]	備考
水平荷重		
S ₁ 地震力		定期的安全レビュー時

第 12 表 ダイアフラム・フロア大梁の許容応力比

プラント	単位差圧 1.0 ton/m ² に対する許容応力比	設計差圧 <input type="text"/> ton/m ² に対する裕度
東海第二発電所		
MARK-II 改良型 プラント		

第 13 表 コラムサポートの応力評価結果

(a) 逃がし安全弁作動時の荷重

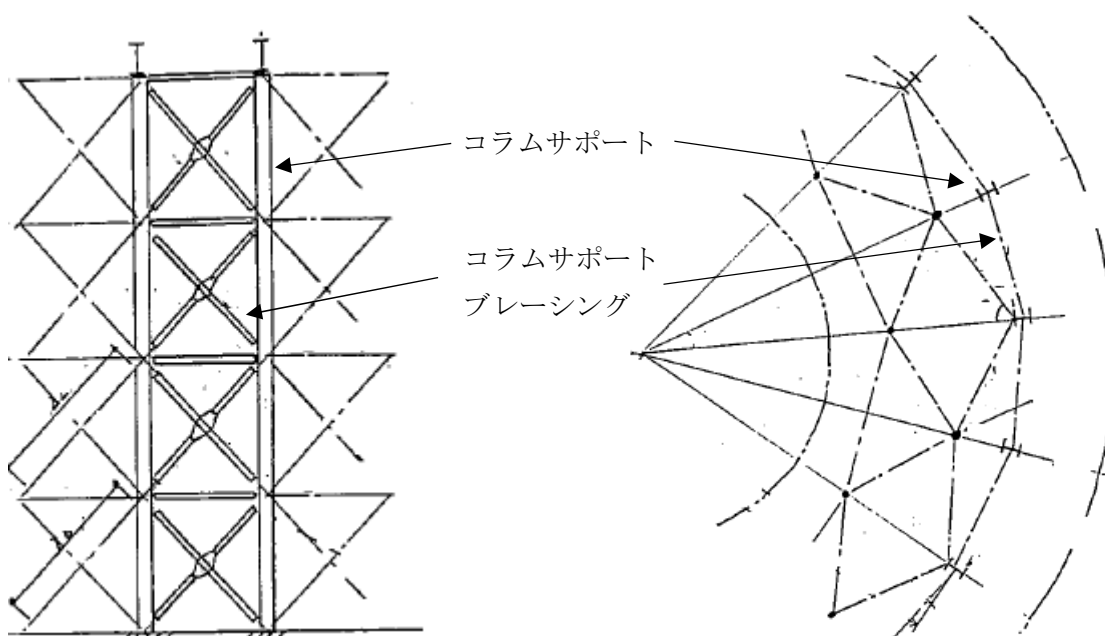
評価部位	発生応力 [ton/cm ²]	許容応力 [ton/cm ²]
コラムサポート		
コラムサポート		
ブレーシング		

(b) 原子炉冷却材喪失事故時プール水揺動に対する荷重（上向き荷重）

評価部位	発生応力 [ton]	許容応力 [ton]
基礎ボルト		
基礎スラブ		

(c) 原子炉冷却材喪失事故時プール水揺動に対する荷重（下向き荷重）

評価部位	発生応力 [ton/cm ²]	許容応力 [ton/cm ²]
コラムサポート		
コラムサポート		
ブレーシング		



第 5 図 コラムサポートの概要図

第 14 表 原子炉本体基礎の配筋量

方向	比較 部位	東海第二発電所			MARK-II改良型発電所						
		設計配筋	配筋量	補正鉄筋量	設計配筋	配筋量					
縦方向	A	内・外側 中 央			内・外側 中 央						
	B	内・外側 開口廻り 中 央			内・外側 開口廻り 中 央						
横方向	A	内・外側 中 央							内・外側 中 央		
	B	内・外側 中 央							内・外側 中 央		

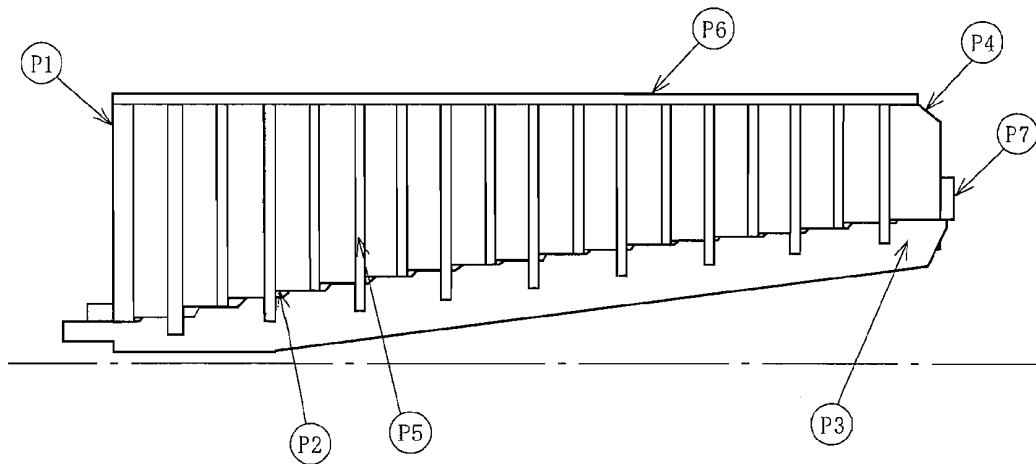
第 15 表 コンクリートマットの鉄筋比

		東海第二発電所			最新MARKII改良型発電所		
厚 さ		4.6 m			4.95 m		
鉄筋の比較		位 置	設計配筋	竣工図 による 鉄筋比	位 置	設計配筋	①工認用必要鉄筋比 ②厚さ補正後工認用必要 鉄筋比(★)
放 射 筋	上 端 筋	原子炉本体の基礎下			原子炉本体の基礎下		
		中央部			中央部		
		PCVF			PCVF		
	下 端 筋	原子炉本体の基礎下			原子炉本体の基礎下		
		中央部			中央部		
		PCVF			PCVF		
円 周 筋	上 端 筋	原子炉本体の基礎下			原子炉本体の基礎下		
		中央部			中央部		
		PCVF			PCVF		
	下 端 筋	原子炉本体の基礎下			原子炉本体の基礎下		
		中央部			中央部		
		PCVF			PCVF		

(*) マット厚さの違いにより生じる曲げモーメント等への影響を考慮して、マット厚さ比の二乗による補正を実施した。

名称		応力評価点 番号	応力評価点
多孔 プレート	ディスク	P 1	全ディスクセットの多孔プレート
	スペーサ*	P 2	ディスクセット間の円筒形多孔プレート
リブ		P 3	リブ
コンプレッションプレート		P 4	コンプレッションプレート
フィンガ		P 5	フィンガ
ストラップ		P 6	ストラップ
フランジ		P 7	フランジ

注記 * : ボトムスペーサを含む。



第 6 図 残留熱除去系ストレーナの構造図及び応力評価点

第 16 表 残留熱除去系ストレーナの各荷重による応力 (1/3)

(単位 : MPa)

応力 評価 番号	荷重	一 次 応 力								
		P _m			P _L + P _b					
		σ _t	σ _ℓ	τ	内 面			外 面		
					σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ
P 1	1 死荷重	-	-	-						
	2 異物荷重	-	-	-						
	3 差圧	-	-	-						
	4 S R V 荷重	-	-	-						
	5 プールスウェル	-	-	-						
	6 蒸気凝縮(CO)	-	-	-						
	7 チャギング (CH)	-	-	-						
	8 ストレーナ S ₁ *地震荷重	-	-	-						
	9 ストレーナ S ₂ 地震荷重	-	-	-						
	10 異物 S ₁ *地震荷重	-	-	-						
P 2	1 死荷重	-	-	-						
	2 異物荷重	-	-	-						
	3 差圧	-	-	-						
	4 S R V 荷重	-	-	-						
	5 プールスウェル	-	-	-						
	6 蒸気凝縮(CO)	-	-	-						
	7 チャギング (CH)	-	-	-						
	8 ストレーナ S ₁ *地震荷重	-	-	-						
	9 ストレーナ S ₂ 地震荷重	-	-	-						
	10 異物 S ₁ *地震荷重	-	-	-						
P 3	1 死荷重	-	-	-						
	2 異物荷重	-	-	-						
	3 差圧	-	-	-						
	4 S R V 荷重	-	-	-						
	5 プールスウェル	-	-	-						
	6 蒸気凝縮(CO)	-	-	-						
	7 チャギング (CH)	-	-	-						
	8 ストレーナ S ₁ *地震荷重	-	-	-						
	9 ストレーナ S ₂ 地震荷重	-	-	-						
	10 異物 S ₁ *地震荷重	-	-	-						

注 : σ_t, σ_ℓ: 互いに直交する垂直応力, τ : せん断応力 (t - ℓ 方向)

第 16 表 残留熱除去系ストレーナの各荷重による応力 (2/3)

(単位 : MPa)

応力 評価点 番号	荷重	一 次 応 力								
		P _m			P _L + P _b					
		σ _t	σ _ℓ	τ	内 面			外 面		
					σ _t	σ _ℓ	τ	σ _t	σ _ℓ	τ
P 4	1 死荷重	-	-	-						
	2 異物荷重	-	-	-						
	3 差圧	-	-	-						
	4 S R V 荷重	-	-	-						
	5 プールスウェル	-	-	-						
	6 蒸気凝縮 (CO)	-	-	-						
	7 チャギング (CH)	-	-	-						
	8 ストレーナ S ₁ *地震荷重	-	-	-						
	9 ストレーナ S ₂ 地震荷重	-	-	-						
	10 異物 S ₁ *地震荷重	-	-	-						
P 5	1 死荷重	-	-	-						
	2 異物荷重	-	-	-						
	3 差圧	-	-	-						
	4 S R V 荷重	-	-	-						
	5 プールスウェル	-	-	-						
	6 蒸気凝縮 (CO)	-	-	-						
	7 チャギング (CH)	-	-	-						
	8 ストレーナ S ₁ *地震荷重	-	-	-						
	9 ストレーナ S ₂ 地震荷重	-	-	-						
	10 異物 S ₁ *地震荷重	-	-	-						
P 6	1 死荷重	-	-	-						
	2 異物荷重	-	-	-						
	3 差圧	-	-	-						
	4 S R V 荷重	-	-	-						
	5 プールスウェル	-	-	-						
	6 蒸気凝縮 (CO)	-	-	-						
	7 チャギング (CH)	-	-	-						
	8 ストレーナ S ₁ *地震荷重	-	-	-						
	9 ストレーナ S ₂ 地震荷重	-	-	-						
	10 異物 S ₁ *地震荷重	-	-	-						

注 : σ_t, σ_ℓ: 互いに直交する垂直応力, τ : せん断応力 (t - ℓ 方向)

第 16 表 残留熱除去系ストレーナの各荷重による応力 (3/3)

(応力評価点 P 7)

(単位：MPa)

荷 重		曲げ応力
1	死荷重	
2	異物荷重	
3	差圧	
4	S R V 荷重	
5	プールスウェル	
6	蒸気凝縮 (CO)	
7	チャギング (CH)	
8	ストレーナ S ₁ * 地震荷重	
9	ストレーナ S ₂ 地震荷重	
10	異物 S ₁ * 地震荷重	

第 17 表 残留熱除去系ストレーナの荷重の組合せ

番号	荷重の組合せ		地震荷重	荷重番号*	供用状態
	運転状態				
①	運転状態 I	—	1		A
②	運転状態 II	—	1 4		B
③	運転状態 IV (L)	—	1 2 3		A
④	運転状態 IV (S)	—	1 2 3 6		D
⑤	運転状態 IV (S)	—	1 2 3 4		D
⑥	運転状態 IV (S)	—	1 2 3 7		D
⑦	運転状態 IV (S)	—	1 5		D
⑧	運転状態 I	S ₁ *	1 8		C (III A S)
⑨	運転状態 I	S ₂	1 9		D (IV A S)
⑩	運転状態 II	S ₁ *	1 4 8		C (III A S)
⑪	運転状態 II	S ₂	1 4 9		D (IV A S)
⑫	運転状態 IV (L)	S ₁ *	1 2 3 8 10		C (III A S)

第 18 表 残留熱除去系ストレーナの応力評価結果 (1/3)

(単位: MPa)

応力 評価点 番号	荷重の組合せ		供用状態	一 次 応 力			
	運転状態	地震荷重		P _m		P _L + P _b	
				応力強さ	許容値	応力強さ	許容値
P 1	I	—	A	—	—		161
	II	—	B	—	—		193
	IV(L)	—	A	—	—		161
	IV(S)	—	D	—	—		193
	I	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		143
	I	S ₂	D(IVAS)	—	—		365
	II	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		143
	II	S ₂	D(IVAS)	—	—		365
	IV(L)	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		143
P 2	I	—	A	—	—		161
	II	—	B	—	—		193
	IV(L)	—	A	—	—		161
	IV(S)	—	D	—	—		193
	I	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		143
	I	S ₂	D(IVAS)	—	—		365
	II	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		143
	II	S ₂	D(IVAS)	—	—		365
	IV(L)	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		143
P 3	I	—	A	—	—		181
	II	—	B	—	—		218
	IV(L)	—	A	—	—		181
	IV(S)	—	D	—	—		218
	I	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	I	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	II	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	II	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	IV(L)	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169

第 18 表 残留熱除去系ストレーナの応力評価結果 (2/3)

(単位 : MPa)

応力 評価 番号	荷重の組合せ		供用状態	一 次 応 力			
	運転状態	地震荷重		P _m		P _L + P _b	
				応力強さ	許容値	応力強さ	許容値
P 4	I	—	A	—	—		181
	II	—	B	—	—		218
	IV(L)	—	A	—	—		181
	IV(S)	—	D	—	—		218
	I	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	I	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	II	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	II	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	IV(L)	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
P 5	I	—	A	—	—		181
	II	—	B	—	—		218
	IV(L)	—	A	—	—		181
	IV(S)	—	D	—	—		218
	I	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	I	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	II	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	II	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	IV(L)	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
P 6	I	—	A	—	—		181
	II	—	B	—	—		218
	IV(L)	—	A	—	—		181
	IV(S)	—	D	—	—		218
	I	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	I	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	II	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169
	II	S ₂	D(IVAS)	—	—		395
	IV(L)	S ₁ *	C(IIIAS)	—	—		169

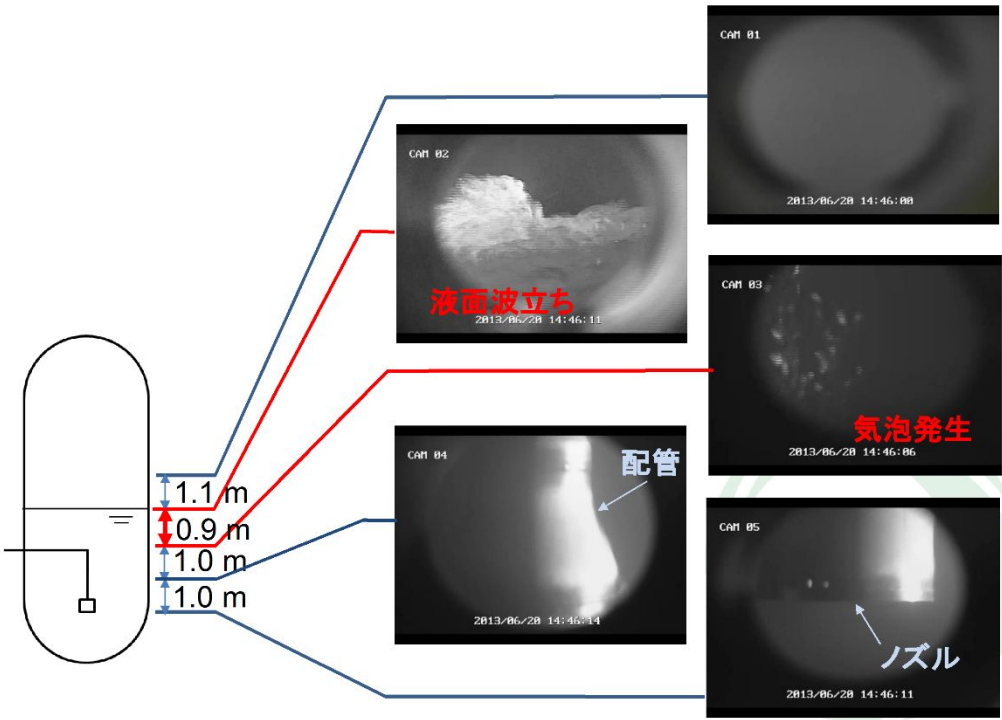
第 18 表 残留熱除去系ストレーナの応力評価結果 (3/3)

(単位 : MPa)

応力 評価点 番号	荷重の組合せ		供用 状態	曲げ応力	許容応力
	運転状態	地震荷重			
P 7	I	—	A		181
	II	—	B		218
	IV(L)	—	A		181
	IV(S)	—	D		218
	I	S ₁ *	C(ⅢAS)		169
	I	S ₂	D(ⅣAS)		395
	II	S ₁ *	C(ⅢAS)		169
	II	S ₂	D(ⅣAS)		395
	IV(L)	S ₁ *	C(ⅢAS)		169

減圧沸騰に関する既往の試験

既往の研究でタンクの初期圧力 0.33 MPa 時にガスの流入がない状態で，減圧による沸騰が発生させる試験が実施されている。当該試験では水面から約 1 m 程度で気泡が発生するものの，水面の揺動としては，比較的小さいものと考えられる。（第 1 図）。



第 1 図 減圧沸騰時の水面の揺動

[参考文献] 秋葉 美幸 “プールスクラビングによるエアロゾル除去効果実験”，NRA ， 平成 29 年 11 月

東海第二発電所

ブローアウトパネル閉止装置 機能確認試験要領書

日本原子力発電株式会社

平成 30 年 7 月

目次

1. 目的	1
2. 試験期間及び場所	1
3. 試験項目	1
4. 加振試験	3
5. 試験要領	13

東海第二発電所 ブローアウトパネル閉止装置機能確認試験要領について

1 目的

ブローアウトパネル閉止装置（以下、「閉止装置」という。）に要求される機能を確認するため、実機規模の試験体を用いた加振試験を行い、重大事故等時における閉止装置の機能維持確認を実施する。また、機能確認試験時に発生した閉止装置の不具合に対する対策の効果を確認するため、対策を施した試験体を用いた加振試験を行い、対策の妥当性を確認する。

2 試験期間及び場所

実施時期：平成 30 年 6 月 18 日（月）～ 22 日（金）

平成 30 年 7 月 24 日（火）～ 31 日（月）

場 所：国立研究開発法人 防災科学研究所 兵庫耐震工学研究センター
兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21

3 試験項目

3.1 閉止装置に要求される機能について

閉止装置は、原子炉建屋外側ブローアウトパネル（以下、「BOP」という。）が開放状態で炉心損傷が発生した場合に、運転員等の中央制御室での居住性確保のため、BOPの開放部を速やかに閉止し、原子炉建屋の気密性を維持することが求められる。具体的には下記の機能が求められる。

- ・ 地震後においても、容易かつ確実に閉止でき、また現場において人力による操作できる作動性を確保し、原子炉建屋原子炉棟を負圧に維持できる気密性を確保していること。
- ・ 開放したBOPを復旧するまでの期間において閉止装置を使用するため、重大事故後、一定期間内に想定される地震が発生した場合においても、原子炉建屋原子炉棟を負圧に維持できる気密性を確保していること。

3.2 加振条件

(1) 基準適合性を確認するための加振（基準地震動 S_s 加振波による加振）

閉止装置の設置位置（最も高所の設置位置）における基準地震動 S_s^{*1} に対する設計用震度を上回るように設定された加振波を用いて加振を行う。

※1 閉止状態の閉止装置は、BOPと同等の弾性設計用地震動 S_d による荷重が作用した場合の気密性確保が求められるが、耐震裕度を確認するため、基準地震動 S_s 加振波を用いて加振を行う。

(2) 閉止装置の耐震裕度を確認するための加振（基準地震動 S_s 加振波を超える加振波による加振）

閉止装置の耐震裕度を確認するため、振動台の性能限界（基準地震動 S_s の1.1倍相当 *2 ）での加振波を用いて加振を行う。

※2 振動台を動かす油量等の制限により数値が上下する可能性がある。

(3) 閉止装置の不具合対策の効果を確認するための追加加振

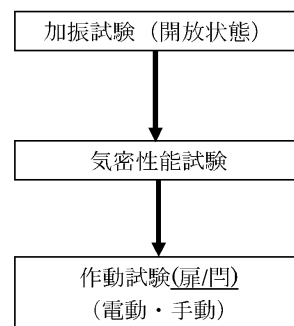
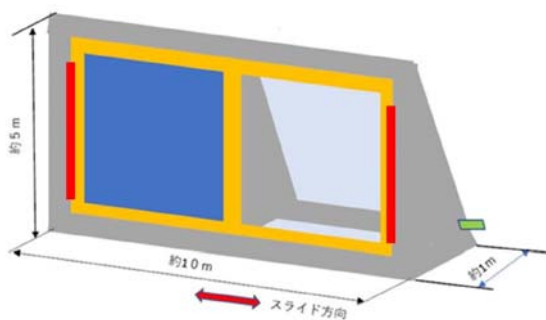
閉止装置の不具合対策（チェーン等の補強、門の設置）の効果を確認するため、3.1(1)と同じ基準地震動 S_s 加振波による加振を行う。

3.3 試験項目

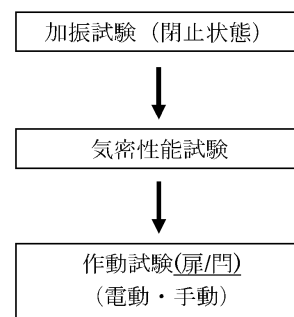
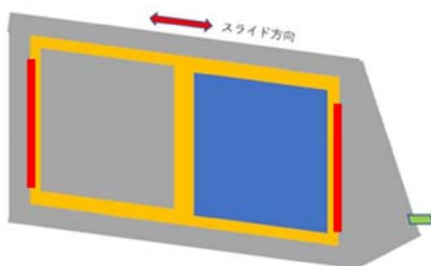
基準地震動 S_s 加振波及び振動台性能限界加振波による加振を行い、閉止装置に要求される機能が確保されことを確認する。

- ・ 加振後の作動確認 : 閉止装置が開放状態において、加振後の扉本体の作動性が確保していることを確認する。また、扉本体の作動確認に合わせて、門の作動性が確保していることを確認する。
- ・ 加振後の気密性能試験 : 閉止装置が開放状態において、加振後の気密性を確保していることを確認する。気密性能試験の準備段階で、扉本体を閉動作させる際に、門が作動することを確認する。
- ・ 加振後の気密性能試験 : 閉止装置が閉止状態において、加振後の気密性を確保していることを確認する。
- ・ 加振後の作動確認 : 閉止装置が閉止状態において、加振後の扉本体の作動性が確保していることを確認する。扉本体の作動確認に合わせて、門の作動性が確保していることを確認する。

【扉開放状態】



【扉閉止状態】



第1図 試験治具概念図

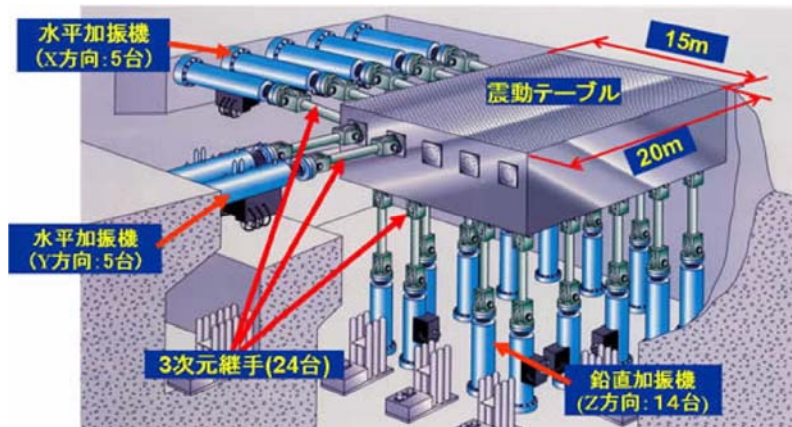
4 加振試験について

4.1 加振装置（三次元振動台）の概要

振動台の上に試験体を設置し，水平方向と鉛直方向を同時に加振する。第1表に振動台の仕様，第2図に三次元振動台の概要図及び第3図に試験体の鳥瞰図を示す。

第1表 三次元振動台の仕様

加振自由度	3軸6自由度		
振動台寸法	20m×15m		
最大積載重量	1200 t f		
加振方向	X方向	Y方向	Z方向
最大加速度	900cm/s ²	900cm/s ²	1500cm/s ²
最大速度	200cm/s	200cm/s	70cm/s
最大変位	±100mm	±100mm	±100mm



第2図 三次元振動台の概要図



第3図 試験体の鳥瞰図



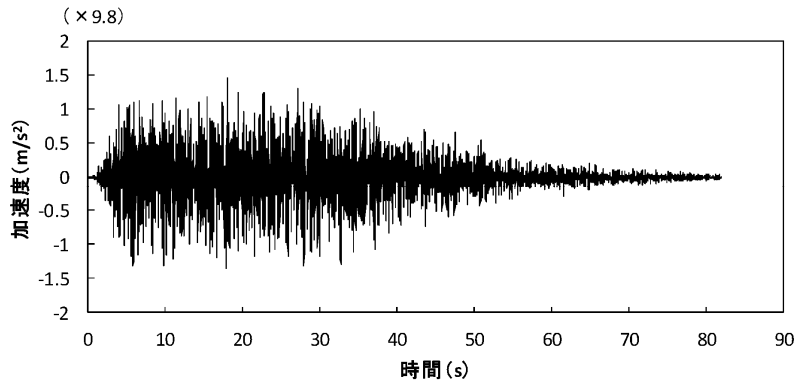
側イメージ図

4.2 加振波

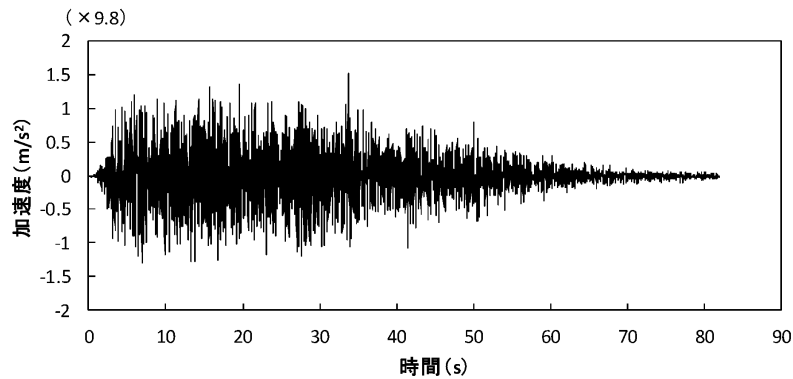
(1) 基準地震動 S_s 加振波

加振試験用の模擬地震波は以下のとおりとする。第4図、第5図に、複数の基準地震動 S_s の床応答スペクトルを包絡する模擬地震波の時刻歴波形、床応答スペクトルを示す。

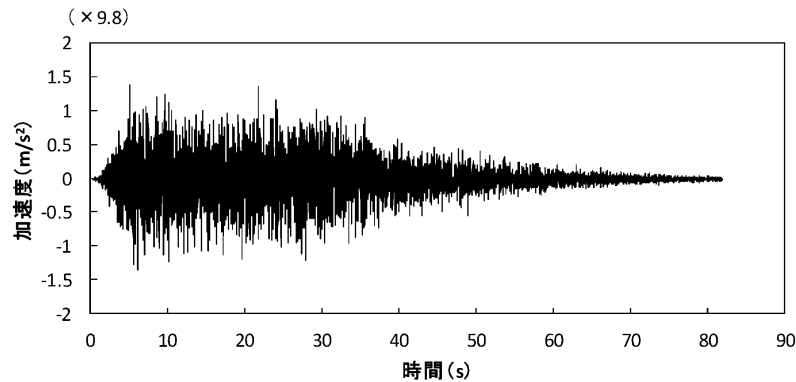
- ・ 閉止装置の設置高さより上方の原子炉建屋 EL. 63. 65m
- ・ 基準地震動 S_s 8 波及び建屋影響評価で考慮するばらつきケースを包絡
- ・ 加振目標の包絡スペクトルは減衰定数 1. 0%で設定



(1) 水平 (NS) 方向

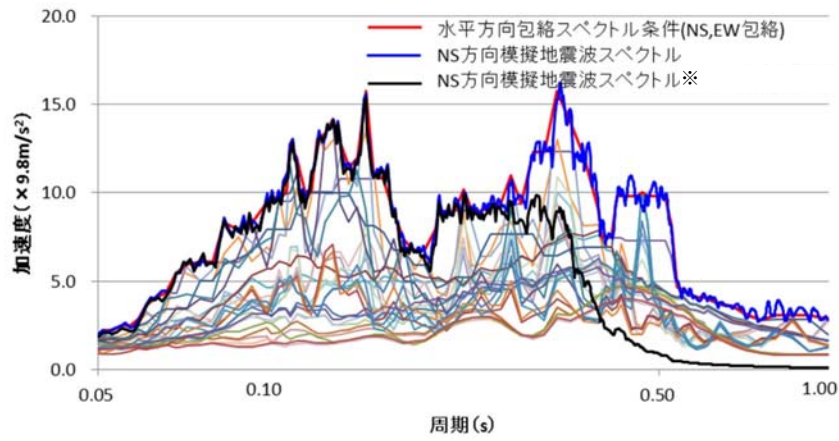


(2) 水平 (EW) 方向

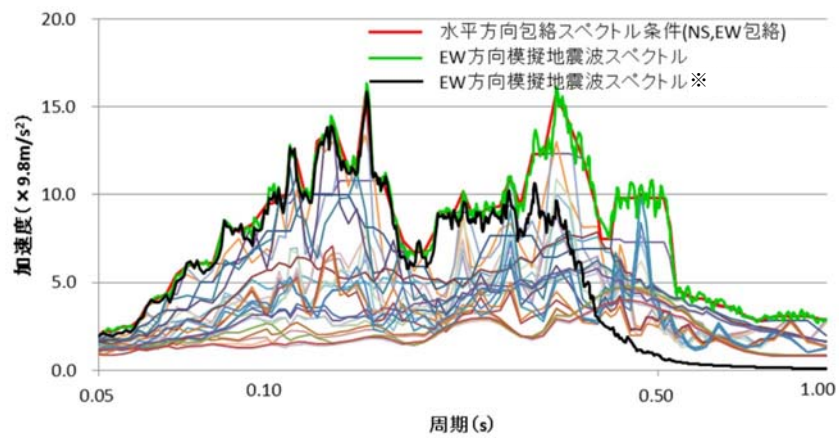


(3) 鉛直方向

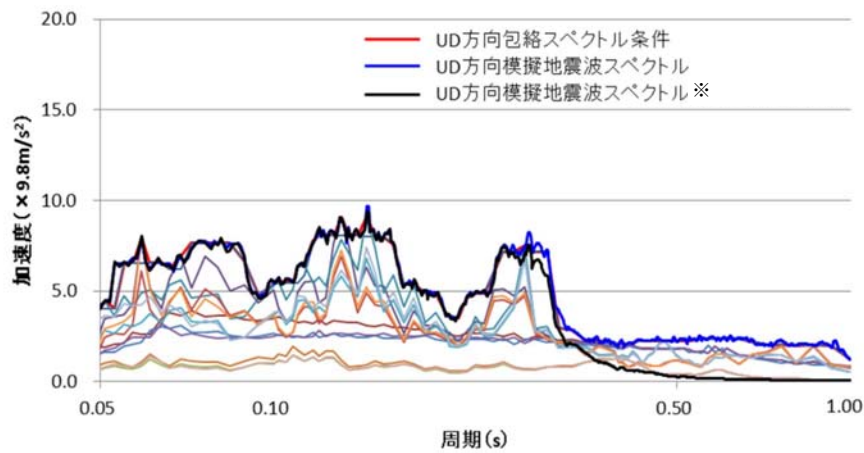
第4図 模擬地震波の時刻歴波形



(1) 水平 (NS) 方向



(2) 水平 (EW) 方向



(3) 鉛直方向

第 5 図 模擬地震波の床応答スペクトル (減衰定数 1%)

※ 振動台の性能を考慮し、閉止装置の固有周期近傍の加速度に影響を及ぼさない長周期側の加速度を低減処理した入力地震動にて試験を実施する。

(2) 振動台性能限界加振波

振動台性能限界加振波は、4.2 (1) の基準地震動 S_s 加振波の振幅を、振動台の性能限界付近（基準地震動 S_s の 1.1 倍相当）の加速度振幅になるよう等倍した加振波とする。

4.3 加振試験項目及び内容

加振試験ケースの項目、概要は以下の通りである。各試験ケースの扉の試験体条件（閉止装置の開閉状態）、加振波等を第2表に示す。

(1) 振動台補償加振

目標とする入力波を精度よく振動台で再現するための振動台補償加振を行う。本試験は、試験体を振動台に搭載しない条件で行う。

(2) センサ確認試験

センサの取付方向、感度確認を行うために、各方向単独で正弦波加振を行う。

(3) 振動特性把握試験

試験体の振動特性を把握するため、0.1Hz～30Hz 程度の振動数成分を有する広帯域ランダム波による加振試験を行う。加振方向は各方向単独とし、扉の開状態及び閉状態の振動特性を確認する。なお、試験体の固有振動数が高い場合は、入力波の主要な振動数成分の範囲に固有振動数がないことを確認する。

(4) 地震波加振試験

加振レベルは4段階に分けて振動台の加振性能限界まで漸増させていく。加振方向は3方向同時とし、閉止装置の開状態、閉状態のそれぞれで実施する。

なお、基準地震動 S_s を超える加振試験として、振動台の性能限界である基準地震動 S_s の 1.1 倍相当をレベル4として実施し、閉止装置の耐震裕度を確認する。

第2表 試験ケース一覧

No	試験項目	試験体条件	加振方向	加振波	加振レベル	備考
—	振動台補償加振	—	X+Y+Z	—	—	—
1	センサ確認試験	扉閉	X	正弦波	0.5m/s ² 程度	1~2Hz で実施
2			Y			
3			Z			
4	振動特性把握試験	扉閉	X	ランダム波 ^{*1}	2.0m/s ² 程度	—
5			Y			
6			Z			
7	振動特性把握試験	扉閉	X	ランダム波 ^{*1}	2.0m/s ² 程度	—
8			Y			
9			Z			
10	地震波加振	扉閉	X+Y+Z	包絡波 ^{*2}	0.3×S _s	レベル1
11					0.6×S _s	レベル2
12					1.0×S _s	レベル3
13					1.1×S _s	レベル4 ^{*3}
14		振動台性能限界				
15		扉閉	X+Y+Z	包絡波 ^{*2}	0.3×S _s	レベル1
16					0.6×S _s	レベル2
17					1.0×S _s	レベル3
18					1.1×S _s	レベル4 ^{*3}
19					振動台性能限界	

※1 0.1Hz~30Hz 程度の振動数成分を有する広帯域ランダム波で加振を行う。

※2 方向毎に複数の基準地震動S_sの床応答スペクトルを包絡する模擬地震波を作成して加振する。

※3 基準地震動S_sに対する裕度を確認するために実施。

4.4 計測要領

(1) 計測項目

計測項目は、対策前の試験と同様とする。ただし、対策前の試験結果を参考に加速度、ひずみ計測点を追加する。

試験体の代表的挙動を評価するための項目を計測する。計測項目を第3表に示す。

第3表 計測項目

項目	計測点
加速度	・振動台 ・支持架台 ・扉 ・駆動装置
ひずみ	・プッシュローラ（開閉時に扉を押える部位） ・レール※ ・チェーン※ ・門周辺（門の荷重を伝達する部位）※

※：対策後の加振試験に追加する計測点

(2) 計測位置

計測点は、試験体の代表的な挙動を評価する位置に設置する。第4表に計測項目の一覧表を示す。

① 加速度

第6図に加速度計の設置位置を示す。

② ひずみ

第7図にひずみゲージの設置位置を示す。扉の開時、閉時において扉を抑える荷重が発生するプッシュローラのひずみを計測する。対策後の加振試験には、レール、チェーン、門周辺（門の荷重を伝達する部位）を追加して計測する。ただし今後の詳細検討、試験時の状況判断により、計測位置の見直し、追加の可能性がある。

③ その他

加速度、ひずみ以外に、加振試験時や扉の開閉動作の記録のため、動画撮影を実施する。なお、必要に応じ試験場に備え付けられているカメラも活用する。

- ・試験体全景：振動台外から、試験体全景を撮影
- ・扉近傍：振動台または支持架台上から、レール、プッシュローラ付近を撮影

(3) 測定計器

試験に使用する測定計器を第5表に示す。

第4表(1/2) 計測項目の一覧表

No	項目	記号	測定点	方向	備考		
1	加速度	A1	振動台	X	<ul style="list-style-type: none"> ・振動台上加速度を計測 ・計画条件の範囲内で加振試験が実施されたことの確認が目的 		
2				Y			
3				Z			
4				A2		X	
5						Y	
6						Z	
7		A3	扉上部(閉時)	X	<ul style="list-style-type: none"> ・閉時, 開時の扉上部の支持架台に設置 ・閉時, 開時の閉止装置の機能維持確認加速度の計測が目的 		
8				Y			
9				Z			
10		A4	扉上部(開時)	X	<ul style="list-style-type: none"> ・支持架台の振動特性確認も兼ねる 		
11				Y			
12				Z			
13		A5	駆動装置本体	X	<ul style="list-style-type: none"> ・駆動装置単体の機能維持確認加速度の計測が目的 ・駆動装置の振動特性確認も兼ねる 		
14				Y			
15				Z			
16				A6		駆動装置の取付位置	X
17							Y
18							Z
19		A7	扉の中央部	X	<ul style="list-style-type: none"> ・扉の振動特性確認が目的 ・振動特性把握試験時に設置^{※1} 		
20				Y			
21				Z			
22		A8	扉の右・中央	X	<ul style="list-style-type: none"> ・扉の振動特性, 地震応答の確認が目的 ・地震波加振, 扉閉, レベル3または4 (第1表のNo. 16または17)のケースで扉に設置^{※1} 		
23		A9	扉の左・中央	X			
24		A10	扉の中央部	X			
25				Y ^{※2}			
26		A12	扉の中央部	X	<ul style="list-style-type: none"> ・扉の振動特性, 地震応答の確認が目的 ・地震波加振, 扉閉, レベル3または4 (第1表のNo. 16または17)のケースで扉に設置^{※1} 		
27				Y ^{※2}			

※1 扉の開閉による作動性能の確認の際にケーブルが試験体や他センサと干渉する恐れがあるため、代表試験ケースのみでの計測とする。対策前の試験では、計測点 A11 を設定していたが、計測点 A7 で代表できるため対策後の試験では計測点 A11 は設定しない。

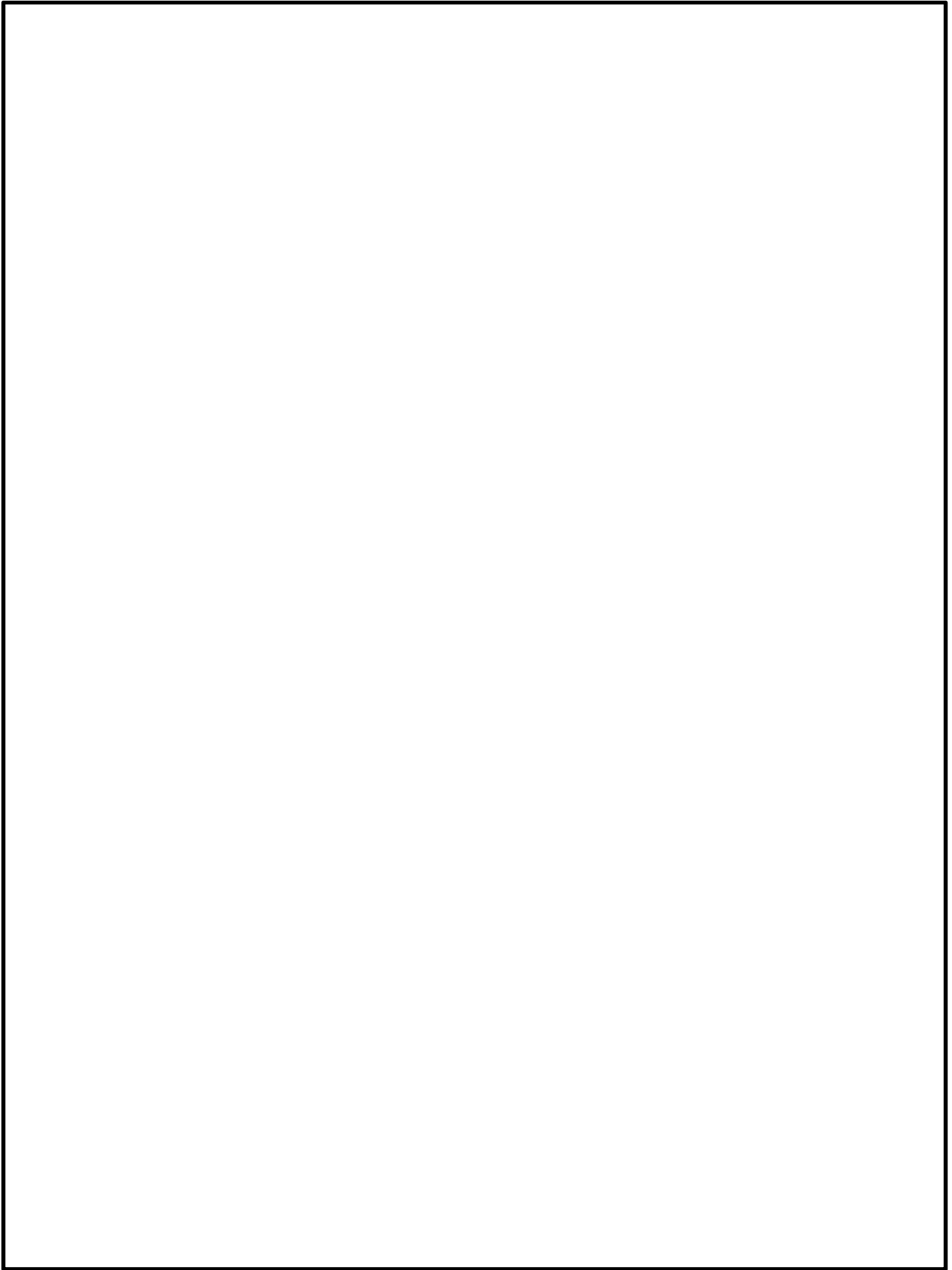
※2 対策後の加振試験に追加する。

第4表(2/2) 計測項目の一覧表

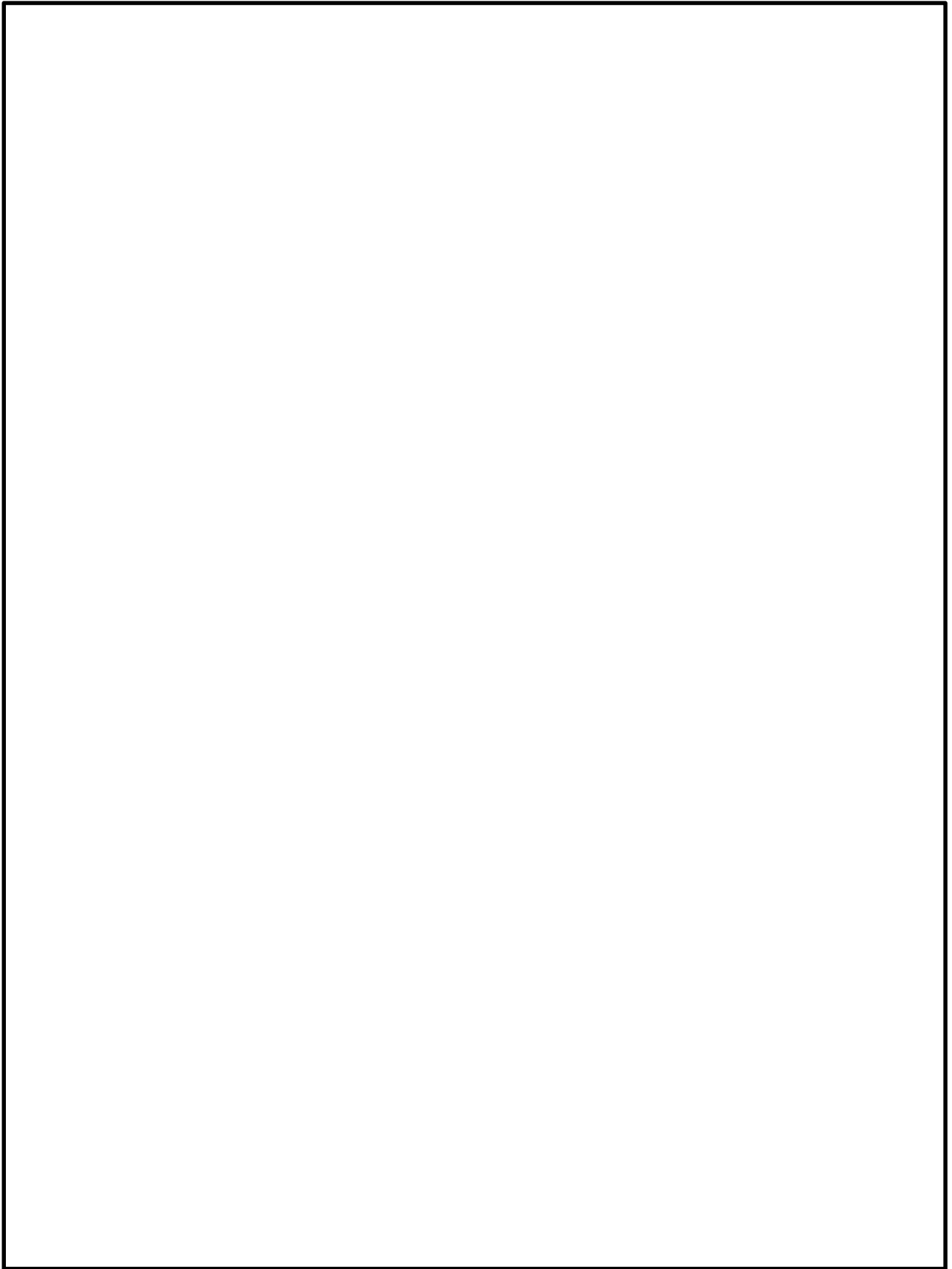
No	項目	記号	測定点	方向	備考
28	ひずみ	S1	プッシュローラ (扉閉時) ※1	-	・扉の開放状態及び閉止状態での加振試験時に代表位置として、ひずみの計測が目的
29		S2			
30		S3	プッシュローラ (扉開時) ※1		
31		S4			
32		S5※2	レール		・S5, S6 は、扉閉時のローラ付近の上部レールの加振試験時のひずみを計測 ・S7 は、扉開時のローラ付近の加振試験時のひずみを計測 ・S8 は、下部レール付近の加振試験時のひずみを計測
33		S6※2			
34		S7※2			
35		S8※2			
36		S9※2	チェーン		・チェーンの固定端付近の加振試験時のひずみを計測
37		S10※2			
38		S11※2	門周辺 (扉閉時)		門の荷重が伝達する部位の加振試験時のひずみを計測する。
39		S12※2			
40		S13※2	門周辺 (扉開時)		
41		S14※2			

※1 扉の全閉時、全開時に扉に作用する荷重を代表する位置として計測

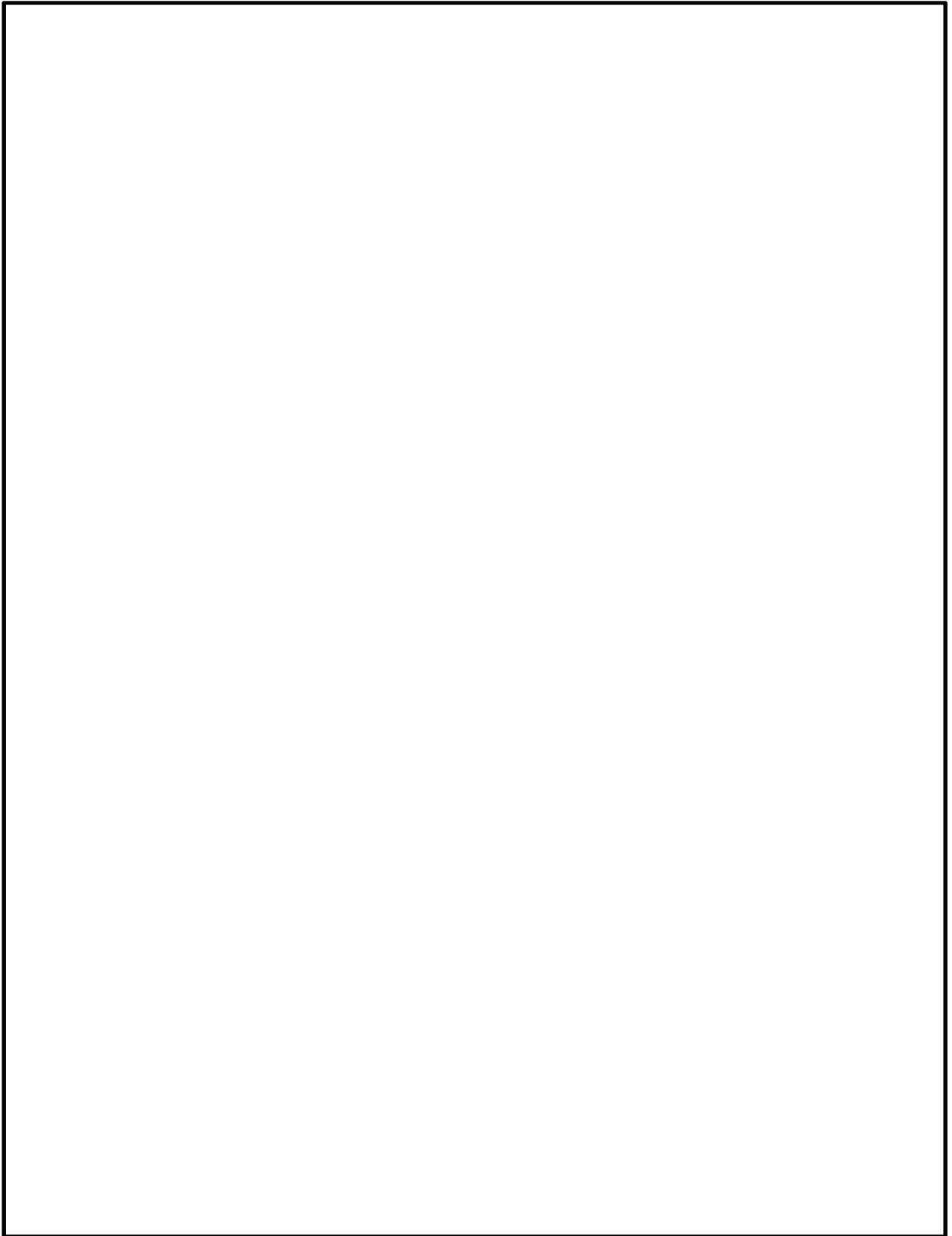
※2 対策後の加振試験で追加



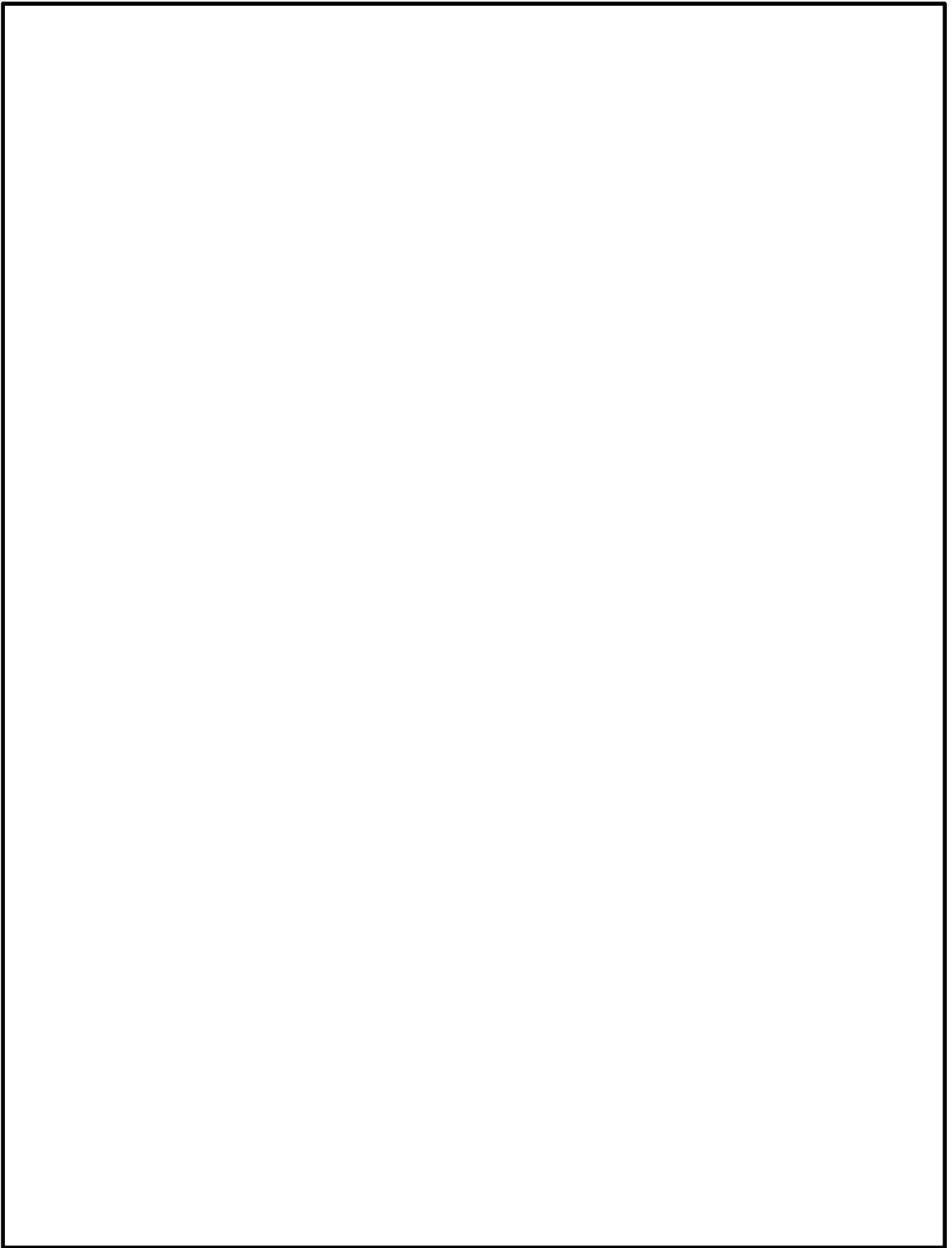
第6図 (1/2) 加速度計の設置位置 (振動台, 支持架台)



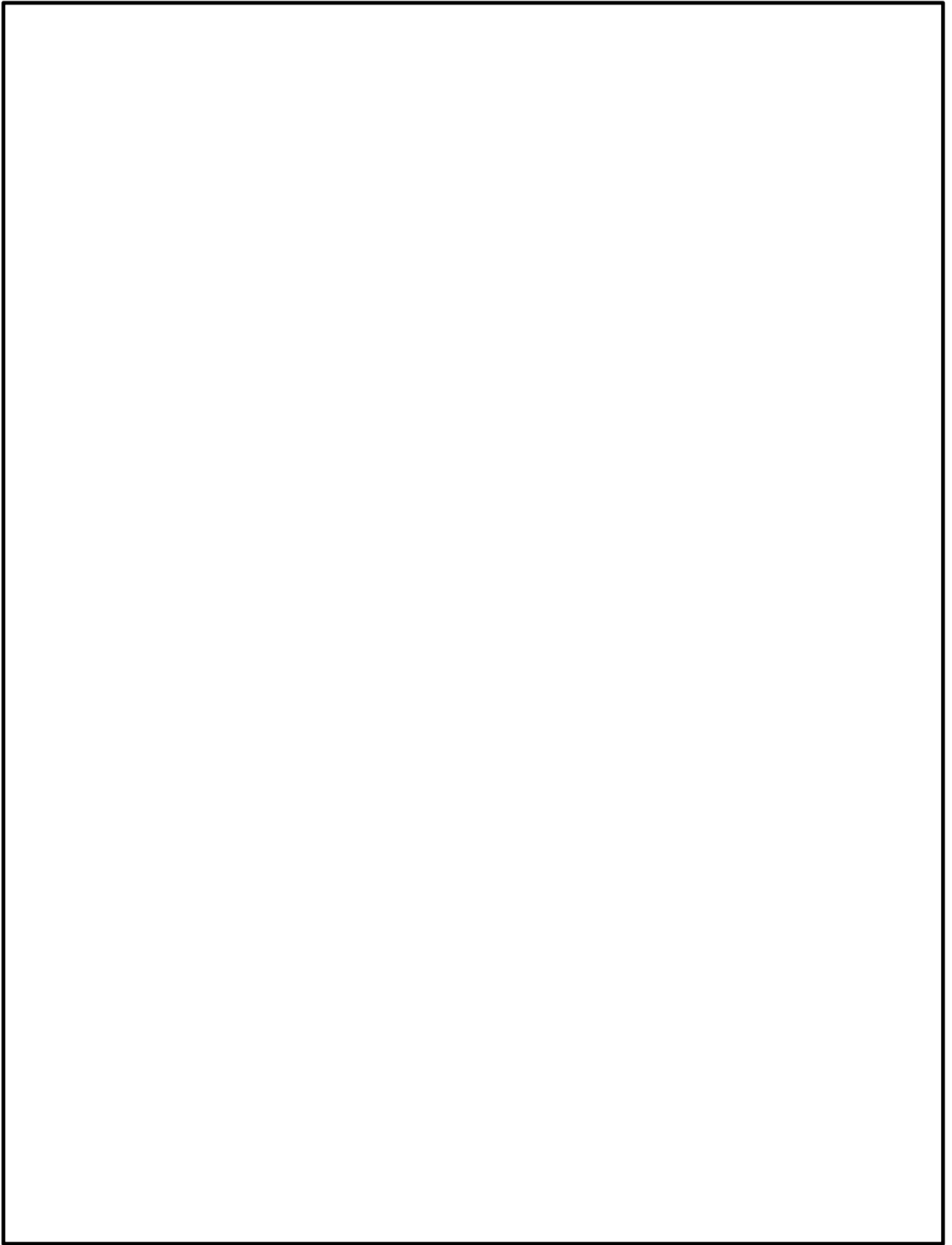
第 6 図 (2/2) 加速度計の設置位置 (扉, 駆動装置)



第7図 (1/3) ひずみゲージの設置位置 (プッシュローラ)



第7図 (2/3) ひずみゲージの設置位置 (レール)



第7図 (3/3) ひずみゲージの設置位置 (チェーン、門)

5 試験要領

5.1 試験手順

目標とする入力波を精度よく振動台で再現するための振動台補償加振の後，試験体を振動台に搭載し，下記の手順で加振及び加振後の作動試験，気密性能試験を実施する。

なお，試験場との調整，現場の進捗状況等により，試験手順が変更となる場合もある。

- (1) 加振試験の準備として，センサ（加速度計及びひずみゲージ）が所定の位置に設置されていることを確認する。また，測定計器の仕様が適切であることを確認する。
- (2) センサ確認試験を以下の手順で実施する。
 - ① 閉止装置の扉が閉止状態であることを確認する。
 - ② 加振レベル 0.5m/s^2 程度，振動数 $1\sim 2\text{Hz}$ にて，各方向単独で正弦波加振を行う。
 - ③ センサの取付方向，感度を確認する。
- (3) 振動特性把握試験を以下の手順で実施する。
 - ① 閉止装置の扉が閉止状態であることを確認する。
 - ② 加振レベル 2.0m/s^2 程度にて，各方向単独で， $0.1\text{Hz}\sim 30\text{Hz}$ 程度の振動数成分を有する広帯域ランダム波の加振を行う。
 - ③ 試験体の固有振動数を測定し，入力波の主要な振動数成分の範囲に固有振動数の有無を確認する。
 - ④ 閉止装置の扉を開放状態とし，(3) ②，③ を実施する。

【閉止装置の扉開放状態における加振試験】

- (4) 地震波 ($0.3\times S_s$) 加振試験を以下の手順で実施する。
 - ① 閉止装置の扉を開放状態であることを確認する。
 - ② センサ取付状況及び試験体の外観目視を行い，異常のないことを確認する。
 - ③ 3方向同時加振の包絡波によるレベル1 ($0.3\times S_s$) で加振する。
 - ④ 加振後，採取データを確認する。
- (5) 地震波 ($0.6\times S_s$) 加振試験を実施する。
 - ① 閉止装置の扉が開放状態であることを確認する。
 - ② センサ取付状況及び試験体の外観目視を行い，異常のないことを確認する。
 - ③ 3方向同時加振の包絡波によるレベル2 ($0.6\times S_s$) で加振する。
 - ④ 加振後，採取データを確認する。
 - ⑤ 気密性能試験を「5.2 (1) 気密性能試験」のとおり実施する。
 - ⑥ 作動試験を「5.3 (1) 作動試験」のとおり実施する。
- (6) 地震波 ($1.0\times S_s$) 加振試験を実施する。
 - (5) ①～⑥と同じ。ただし，下記に読み替える。
 - ・レベル2 ($0.6\times S_s$) をレベル3 ($1.0\times S_s$)

- ・基準地震動 S_s の 0.6 倍を 1.0 倍
- (7) 地震波 ($1.1 \times S_s$) 加振試験を実施する。
- (5) ① ~ ⑥と同じ。ただし、下記に読み替える。
- ・レベル 2 ($0.6 \times S_s$) をレベル 4 ($1.1 \times S_s$)
 - ・基準地震動 S_s の 0.6 倍を 1.1 倍

【閉止装置の扉閉止状態における加振試験】

閉止装置の扉を閉止状態とし、5.1(4)~(7)を実施する。ただし、下記に読み替える。

- ・扉の開放状態を閉止状態

【追加加振試験（閉止装置の扉開放状態）】

- ① 閉止装置の扉が開放状態、門（開側，閉側）が挿入状態であることを確認する。
- ② センサ取付状況及び試験体の外観目視を行い，異常のないことを確認する。
- ③ 3方向同時加振の包絡波によるレベル 3 ($1.0 \times S_s$) で加振する。
- ④ 加振後，採取データを確認する。
- ⑤ 開側の門及び閉側の門を引き上げる。^{※1}
- ⑥ 気密試験準備のため，扉閉動作させる。
- ⑦ 開側の門及び閉側の門を挿入する。^{※2}
- ⑧ 気密性能試験を「5.2 (1) 気密性能試験」のとおり実施する。
- ⑨ 作動試験を「5.3 (1) 作動試験」のとおり実施する。

【追加加振試験（閉止装置の扉閉止状態）】

- ① 閉止装置の扉が閉止状態，門（開側，閉側）が挿入状態であることを確認する。
- ② センサ取付状況及び試験体の外観目視を行い，異常のないことを確認する。
- ③ 3方向同時加振の包絡波によるレベル 3 ($1.0 \times S_s$) で加振する。
- ④ 加振後，採取データを確認する。
- ⑤ 気密性能試験を「5.2 (1) 気密性能試験」のとおり実施する。
- ⑥ 作動試験を「5.3 (1) 作動試験」のとおり実施する。^{※1, 2}

※1 扉移動の際，門を引き上げることとなるが，門の電動シリンダ引上げの起動信号投入後，15秒経過しても引上げ検知のリミットスイッチが作動しない場合は，電動シリンダを停止し，扉駆動用電動機にて扉のインチングを行う。その後，再度，電動シリンダによる門の引き上げを行う。

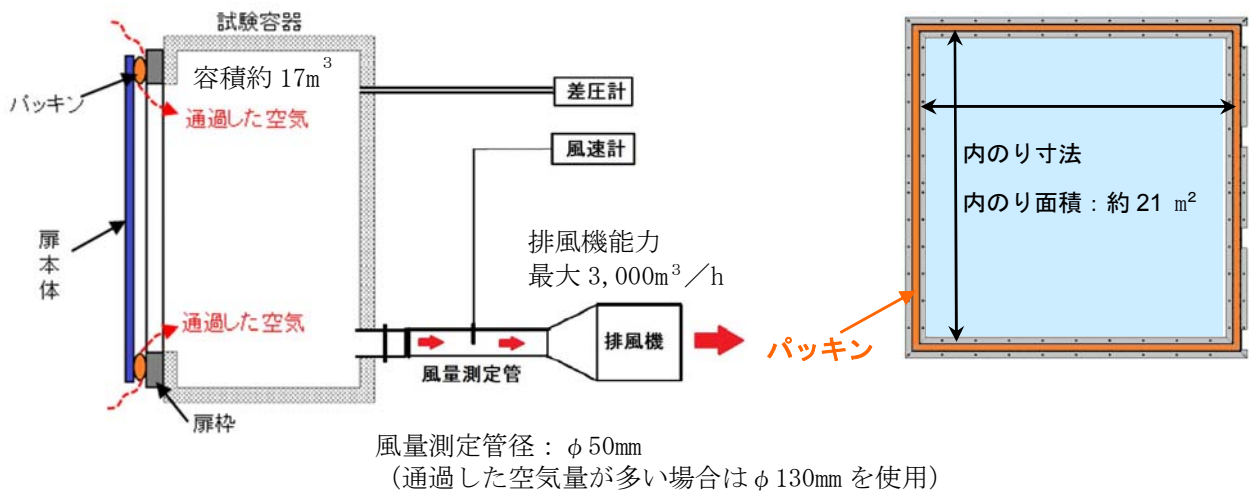
※2 扉移動後，門を挿入することとなるが，門の電動シリンダ引下げの起動信号投入後，15秒経過しても挿入位置検知のリミットスイッチが作動しない場合は，電動シリンダが待機位置にあることを確認の上，扉駆動用電動機にて扉のインチングを行う。

5.2 気密性能試験について

(1) 気密性能試験

A S T M E 283-4 (Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen) に準じた装置を用いて実施する。排風機により試験容器内の空気を排出することにより試験体前後に圧力差を生じさせ、試験体のシール部から試験容器へ流入する通気量を測定する。

第 8 図に気密性能試験装置図、第 9 図に試験体の内のり寸法図を示す。



第 8 図 気密性能試験装置図

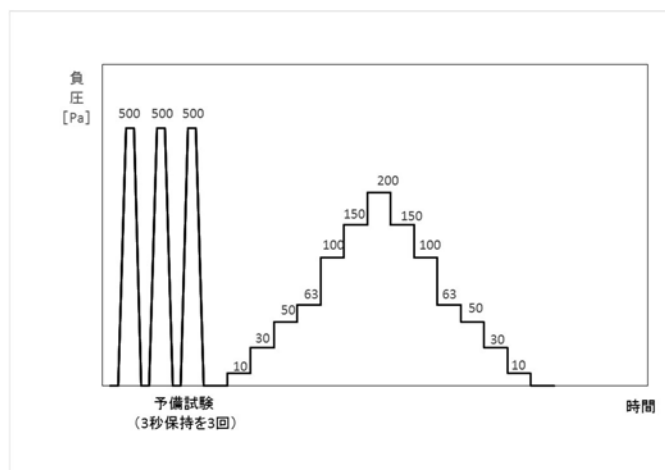
第 9 図 試験体の内のり寸法図

試験体を通じた空気量 Q (m^3/h) は、風速計の風速 V (m/s)、風量測定管の直径 d (m) から算出する。

$$Q = V \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times 3,600$$

試験手順は、「J I S A 1516 (建具の気密性試験方法) 6.3 試験手順」に準じて (ただし、予備加圧後の開閉確認は省略する。), 負圧での圧力差 10Pa, 30Pa, 50Pa, 63Pa, 100Pa, 150Pa, 200Pa と上げ, 150Pa, 100Pa, 63Pa, 50Pa, 30Pa, 10Pa と下げていく※ (保持時間 1 分)。通気方向は 1 方向 (負圧) とする。(第 10 図 負圧試験線図)

※ 負圧を維持できる範囲で試験を実施する。



第 10 図 負圧試験線図

試験により得られた試験体を通過した空気量 Q (m^3/h) を、標準状態 (20°C , $1,013$ hPa) に換算し、扉の内り面積 (m^2) で除すことにより、単位面積当たり、1 時間当たりの通気量 ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) として算出する。圧力差に応じた通気量の推移を確認する。

$$q = Q' / A$$

ここで、

q : 通気量 ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$)

A : 試験体の内り面積 (m^2)

Q' : 通過した空気量 (20°C , $1,013\text{hPa}$ 換算値) (m^3/h)

$$Q' = Q \cdot \frac{P}{1,013} \cdot \frac{273+20}{273+T}$$

P : 試験容器内の気圧 (hPa)

T : 試験時の空気温度 ($^\circ\text{C}$)

(2) 判定基準

通気量 : $12.6 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ 以下※ (差圧 63Pa 時)

※ 閉止装置単体の判定基準 (設計目標) としては、J I S A 1516 で示される A4 等級以上とする。なお、原子炉建屋原子炉棟全体としての気密性能は確保できることを確認する。試験体は、実機に取り付ける全ての閉止装置を考慮し、各々の縦・横寸法を包絡する大きさで製作することにより試験の保守性を考慮する。

5.3 作動確認について

(1) 作動確認

【電動作動確認】

電動駆動により閉止装置が開閉できることを確認する。併せて電動機の電流測定及び開閉時間を測定する。なお、開操作と閉操作は原則各1回とするが、初期状態との差異があると判断した場合は、各5回を計測し、最も保守的な値を判定基準に用いる。

また、閉止装置の開閉に合わせ、閘を電動操作により持上げ、挿入できることを確認する。

【手動作動確認】

① 閉止装置の扉が開放状態での加振後

手動操作により閉止装置が閉止できることを確認する。(第11図)

また、手動操作により閘を持上げ、挿入できることを確認する。

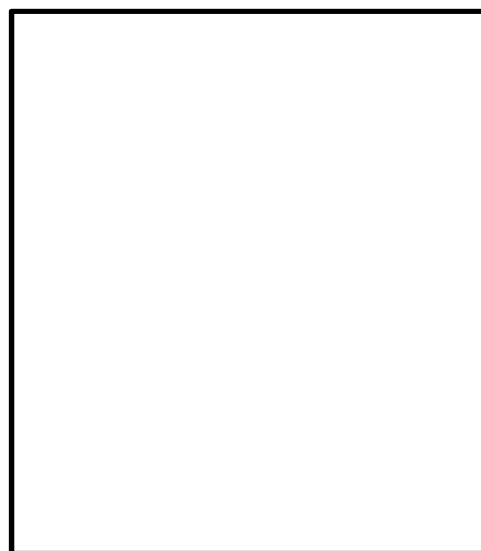
ただし、電動作動確認結果から作動状況に変化がないと判断できる場合は、手動作動確認を省略する。

② 閉止装置の扉が閉止状態での加振後

手動操作により閉止装置が開放できることを確認する。

また、手動操作により閘を持上げ、挿入できることを確認する。

ただし、電動作動確認結果から作動状況に変化がないと判断できる場合は、手動作動確認を省略する。



第11図 手動作動概念図

(2) 判定基準

【電動作動確認】

○扉

電動駆動により開閉できること。

扉の閉止 : 全閉位置であること

開閉時間 : 2分以内(参考値)

電流値 : 定格電流値以内であること

○閘

電動駆動シリンダにより閘が持上げ、挿入できること。

閘の位置 : 閘が挿入又は引き抜き位置であること

開閉時間 : 15秒以内(参考値)

電流値 : 定格電流値以内であること

【手動作動確認】

○扉

手動操作により閉止（開放状態の加振後）又は開閉（閉止状態の加振後）できること。

扉の閉止 : 全閉位置又は全開位置であること。

○門

手動操作により門を引き上げ又は自重により門挿入できること

門の位置 : 物理的な上限位置までの引上げ又は挿入時にピン頭部がフレーム側の
門受の位置にあること

第12図 試験工程※1

項目	6/15(金)		6/16(土)		6/17(日)		6/18(月)		6/19(火)		6/20(水)		6/21(木)		6/22(金)	
	AM※3	PM※3	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
振動台補償加振																
センサ確認試験3方向(扉開)																
振動特性把握試験3方向(扉開)																
振動特性把握試験3方向(扉閉)																
地震波加振(扉開) レベル1 (0.3×S _s)																
地震波加振(扉開) レベル2 (0.6×S _s)																
地震波加振(扉開) レベル3 (1.0×S _s) ※2																
地震波加振(扉閉) レベル1 (0.3×S _s)																
地震波加振(扉閉) レベル3 (1.0×S _s) ※2																
地震波加振(扉閉) レベル2 (0.6×S _s)																
地震波加振(扉閉) レベル3 (1.0×S _s) ※2																
地震波加振(扉閉) レベル4 (1.1×S _s) ※2																
地震波加振(扉閉) レベル4 (1.1×S _s) ※2																

予備日

振動台への試験体の据付け
試験体へのセンサ等計測器類の取付け
初期状態の気密性能試験
等の作業

※1 試験場との調整により変更となる場合もある。
 ※2 地震波加振のうちレベル2, 3, 4の加振後に、健全性確認試験(作動確認, 気密性能試験)を実施する。
 ※3 AMは, 10:00~1:00 PMは, 13:30~18:00を想定している。

第13図 追加試験工程※1

項目	7/21(土)		7/22(日)		7/23(月)		7/24(火)		7/25(水)		7/26(木)		7/27(金)		7/28(土)		7/29(日)		7/30(月)		7/31(火)		
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	
センサ確認試験 3 方向 (扉開)																							
振動特性把握試験 3 方向 (扉開)																							
振動特性把握試験 3 方向 (扉開)																							
地震波加振 (扉開) レベル3 (1.0×S _s)																							
地震波加振 (扉開) レベル3 (1.0×S _s)																							
作動確認																							
気密性能試験																							
地震波加振 (扉開) レベル3 (1.0×S _s) ※2																							
地震波加振 (扉開) レベル3 (1.0×S _s) ※2																							
地震波加振 (扉開) レベル3 (1.0×S _s) ※2																							
地震波加振 (扉開) レベル3 (1.0×S _s) ※2																							

※1 試験場との調整により変更となる場合もある。

※2 加振後に、健全性確認試験（作動確認、気密性能試験）を実施する。

※3 AMは、10:00～1:00 PMは、13:30～18:00 を想定している。

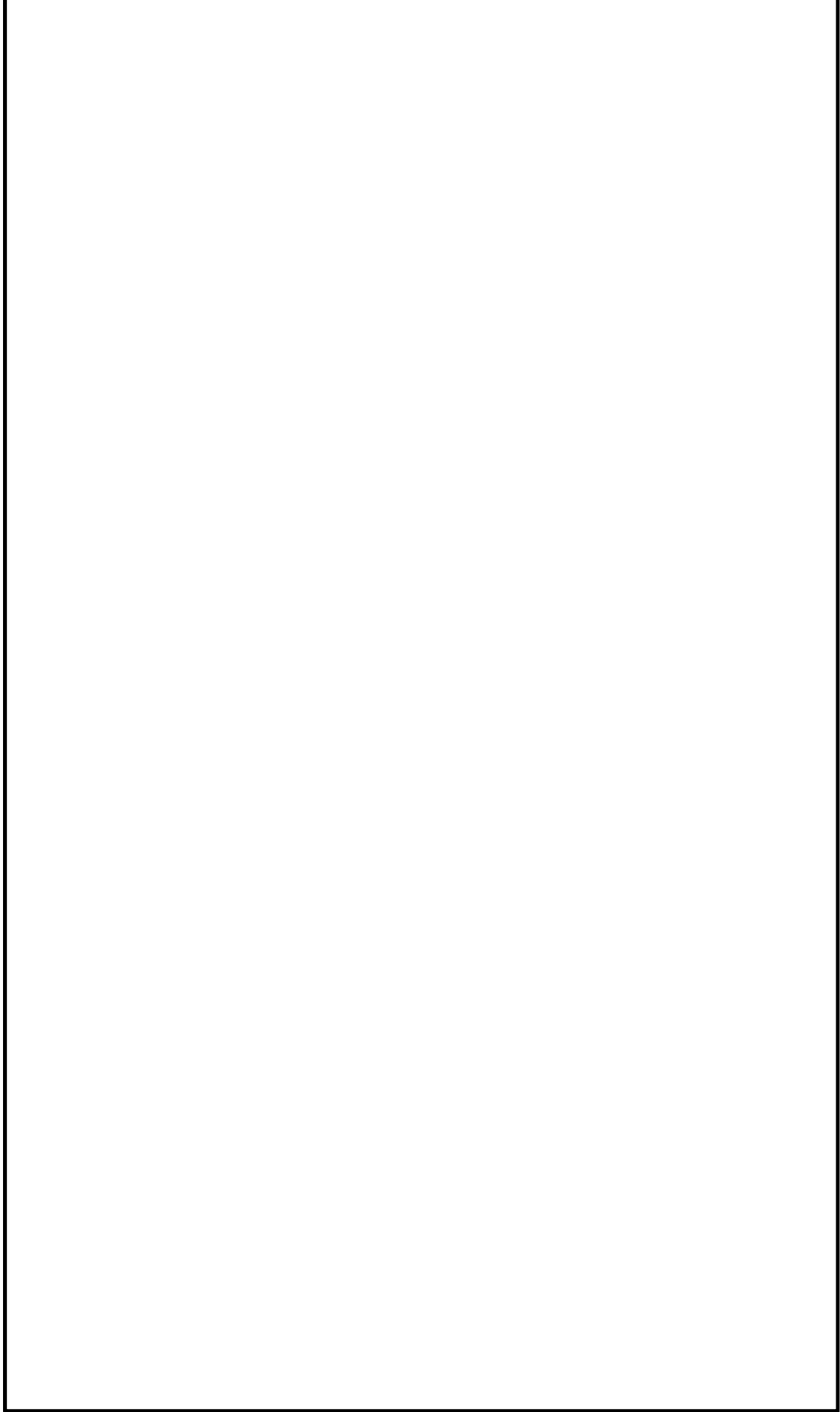
第5表 測定計測器一覧表 (1/2)

No.	用途	計測器名称	メーカー (型式)	仕様
1	絶縁抵抗測定	絶縁抵抗計	sanwa (PDM508S)	管理番号：HS01A667 定格測定電圧(V/MΩ)：500/100 精度：第一有効測定範囲(指示値の±5%以内) 第二有効測定範囲(指示値の±10%以内)
2	動作試験 (モータ電流値測定)	デジタルクランプ メータ	HIOKI (3282)	管理番号：HS01A509 交流電流(A)：レンジ 30A, 300A, 600A 精度：30A(40~1kHz：±1%rdg±0.7%fs) 300A/600A(45~60Hz：±1.0%rdg±5dgt, 40~45Hz：±1.5%rdg±5dgt 66~1kHz：±1.5%rdg±5dgt)
3	動作試験 (扉開閉速度測定)	ストップウォッチ	SEIKO (S034-4000)	管理番号：HS01Z003 時間精度：±0.0012%(月差±30秒以内)
4		熱式風速計	日本カノマックス㈱ (6141)	製造番号：642361 3レンジ：0~1m/s(50等分目盛。最小読取値0.02m/s) 0~10m/s(50等分目盛。最小読取値0.2m/s) 0~50m/s(50等分目盛。最小読取値1m/s) 精度：各レンジのメータフルスケールの±2%
5		風量計測管	一般財団法人 建材試験センター	φ50mm (内径) φ130mm (内径)
6		デジタル圧力計	㈱サヤマトレーディング (マノエース 230-8110HP-B)	器物番号：2K43019 圧力レンジ：0~110kPa, 200kPa, 700kPa 最大表示：700kPa 精度：±0.35%fs±1dgt
7	気密性能試験	デジタル圧力計 (差圧計)	㈱コスモ計器 DM-3501 (200Pa)	器物番号：311-I813-05B 圧力レンジ：0~±200Pa 最大表示：220Pa 精度：±0.15%fs±1dgt
8			㈱コスモ計器 DM-3501 (500Pa)	器物番号：311-2144-07B 圧力レンジ：0~±500Pa 最大表示：550Pa 精度：±0.15%fs±1dgt
9		ガラス製単管温度計	日本計量器工業㈱ (DF-201)	範囲：-20℃~50℃以下 目盛：1℃

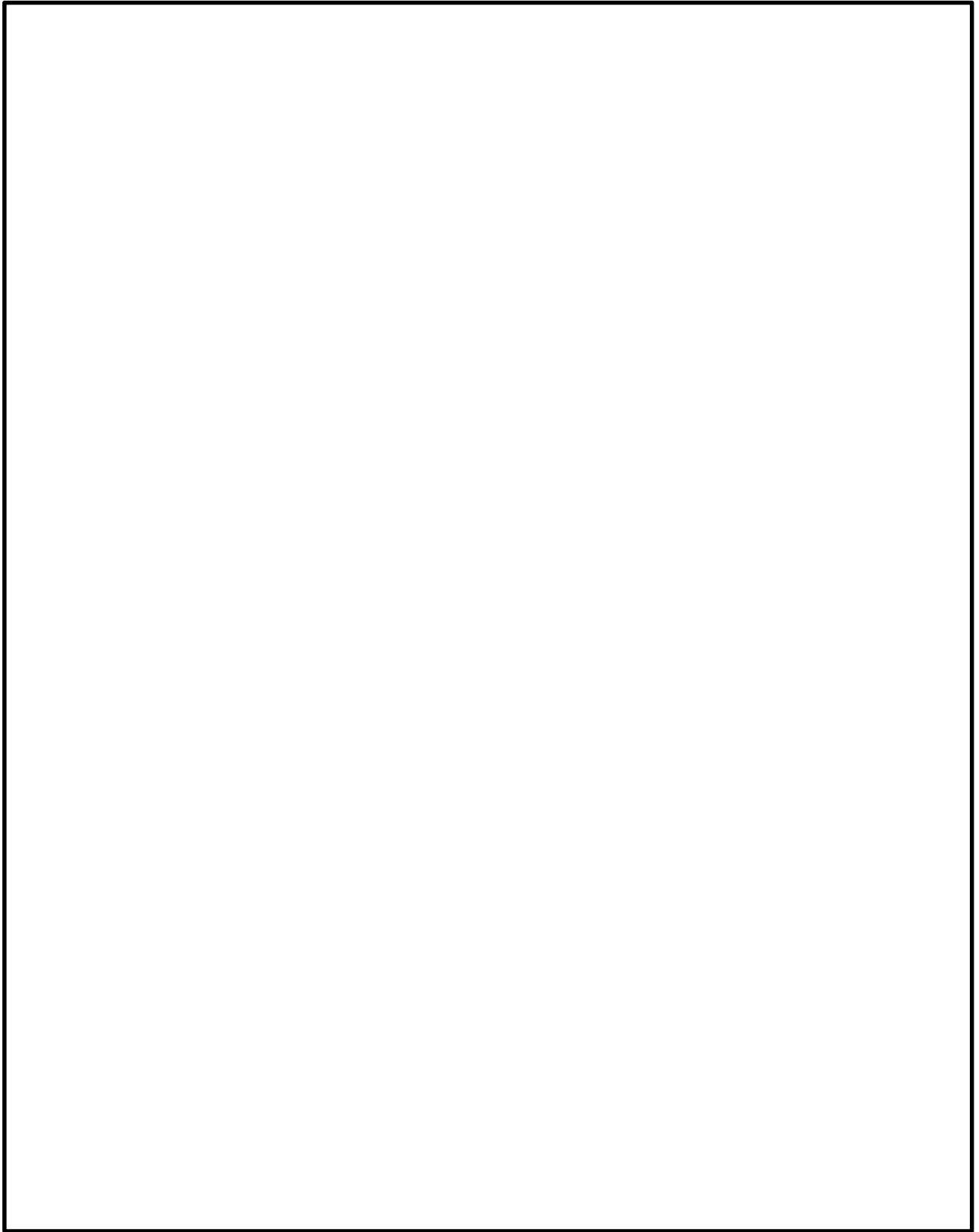
第 5 表 測定計測器一覧表 (2/2)

No.	用途	計測器名称	メーカー (型式)	仕様
10	加振試験	加速度計	株式会社共和電業 (AS-5GB, AS-10GB, AS-20GB)	定格容量 AS-5GB : $\pm 49.03\text{m/s}^2$ AS-10GB : $\pm 98.07\text{m/s}^2$ AS-20GB : $\pm 196.1\text{m/s}^2$ 精度 (非直線性/ヒステリシス) : $\pm 1.0\%$ RO 以内 ※RO (Rated Output) : 定格出力
11		ひずみゲージ	株式会社共和電業 (KFG-2-120-C1-11)	ひずみ限界 : 約 5% (常温) 誤差 : 最大 10% (ひずみ限界条件における最大誤差)

参考資料 1
「閉止装置構造図」



第 1 図 閉止装置の構造概略図



第 2 図 閉止装置の駆動機構概略図

参考資料 2

「J I S A 1516 建具の気密性試験方法」抜粋

6.3 試験手順 試験は、図 2 に示す手順に従って行う。

a) 予備加圧 試験に先立ち試験圧力 P_{max} (1) より 10 % 以上大きい圧力差を 3 秒以上保持し、3 回加える。ただし、その圧力差は 500 Pa 以上とする。

なお、圧力を変化させる時間は、1 秒以上とする。

b) 開閉確認 戸の開閉繰返しを 5 回行い、その後施錠する。

c) 加圧 加圧は、図 2 に示す試験手順に従い、正圧のもとで各段階ごとに最低 10 秒以上保持しながら、この試験で要求されている最高圧まで昇圧する。

なお、試験における圧力差の段階は、10、30、50、100、150、200、300、400、500 及び 600 Pa とし (図 2)、 P_{max} が 600 Pa を超える場合は、100 Pa を超えない範囲の段階で圧力差を増加する (図 3)。この圧力差は、降圧にも適用する。

d) 測定 個々の圧力差ごとに流量が定常になったときの流量を測定する。

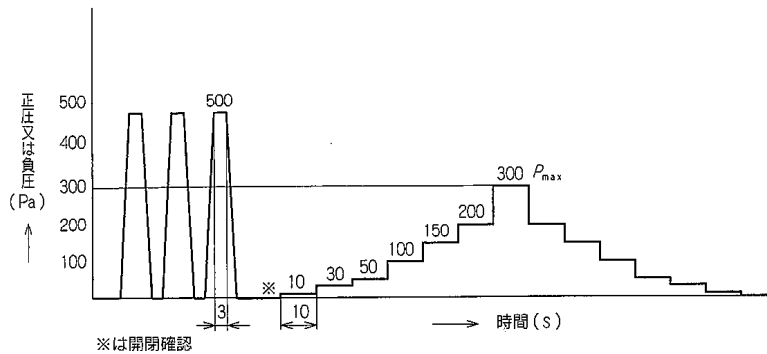


図 2 加圧線図 (P_{max} が 600 Pa 以下の例)

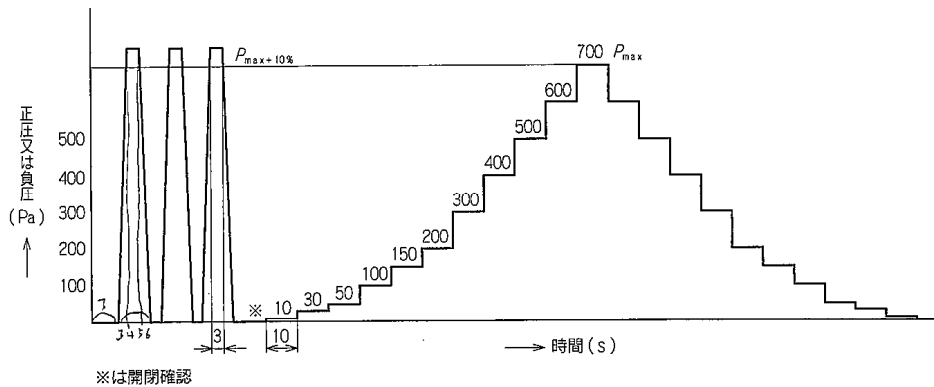


図 3 加圧線図 (P_{max} が 600 Pa を超える例)

7. 試験結果の記録

7.1 通気量の表し方 通気量は、次のいずれか一つで表す。

- 建具面積の平方メートル当たり
- 可動部の平方メートル当たり
- すき間長さメートル当たり

7.2 通気量の算出 通気量は、それぞれの加圧時での通気面積 1 m²当たり (又は、すき間長さ 1 m 当たり)、1 時間当たりの流量で表し、JIS A 1513の5.で規定する基準状態の値に次の式を用いて換算する。

なお、換算結果は JIS Z 8401によって丸めて表す。

・通気面積当たりの換算式

$$q = \frac{Q}{A} \cdot \frac{P_1 \cdot T_0}{P_0 \cdot T_1}$$

・すき間長さ 1 m 当たりの換算式

$$q_1 = \frac{Q}{L} \cdot \frac{P_1 \cdot T_0}{P_0 \cdot T_1}$$

ここに、 q : 基準状態に換算した通気量 (m³/h·m²)

q_1 : 基準状態に換算した通気量 (m³/h·m)

Q : 測定された流量 (m³/h)

A : 通気面積 (m²)

L : すき間長さ (m)

P_0 : 1 013 (hPa)

P_1 : 試験室の気圧 (hPa)

T_0 : 273 + 20 = 293 (K)

T_1 : 測定空気温度 (K)

7.3 記録 7.2で求めた通気量の換算結果は、縦軸に通気量を、横軸に圧力差をとった両対数グラフ (通気量線図) で示す。

なお、通気量線図に示す通気量は、昇圧時の値と降圧時の値の両者のうち、大きい値を記入する。