

【論点1】 止水機構の論点コメント及び実証試験の概要



＜本論点の経緯＞

防潮堤のうち鋼製防護壁については、取水路と鋼製防護壁の地震時の変位による相互干渉を回避するため、取水路と鋼製防護壁間に100mmの隙間を設け、この隙間からの津波の流入を防止することを目的に止水機構を設置することとしている。

この止水機構の構造に対して、第520回審査会合(平成29年10月17日)において、「止水板の追従性として、解析での確認に加え、試験についても検討し、方針及び実施時期を示した上で、設置許可断面と工認断面の範囲を整理して示すこと。」という指摘があった。

この指摘を踏まえて、第562回審査会合(平成30年4月5日)において、工事計画認可申請に係る論点整理の一つとして、止水機構に関して「止水機構の地震時の追従性について、評価及び実規模大の試験装置を用いた加振試験にて確認する。」ことを説明している。

また、第578回審査会合(平成30年5月31日)において、実証試験結果の挙動へのコメントや工事認可への反映事項について問われており今回は、上記の回答及び工事認可への反映事項について説明するものである。

【実証試験の概要】

(1) 止水機構の評価フロー及び実証試験ケース(図1～図4)

- ① 本震時：3方向加振2ケース、鉛直方向加振2ケースの計4ケース×2回(合計8回)
- ② 余震+津波時：3方向加振1ケース、鉛直方向加振2ケースの計3ケース×2回(合計6回)

(2) 実証試験期間

平成30年5月9日～平成30年5月21日

(3) 実証試験結果(図5)

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、止水板の鉛直変位量は小さく、止水性に問題ないことを確認できた。

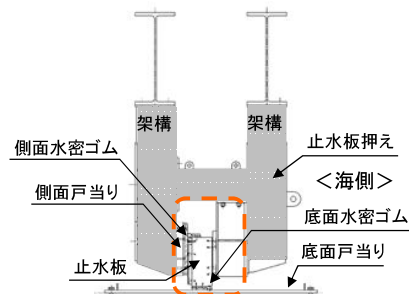


図2 1次止水機構供試体構造

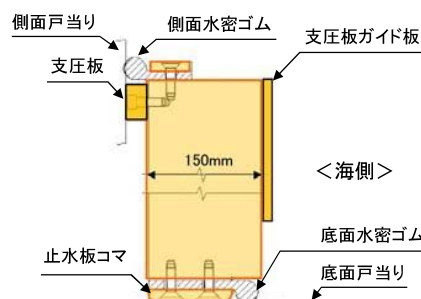


図3 止水板構造

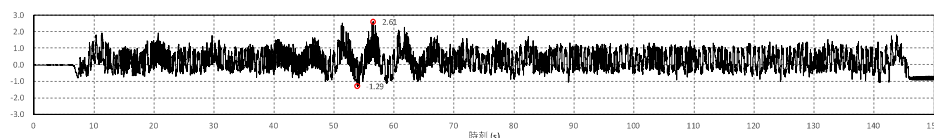


図5 3方向同時加振時鉛直計測データ

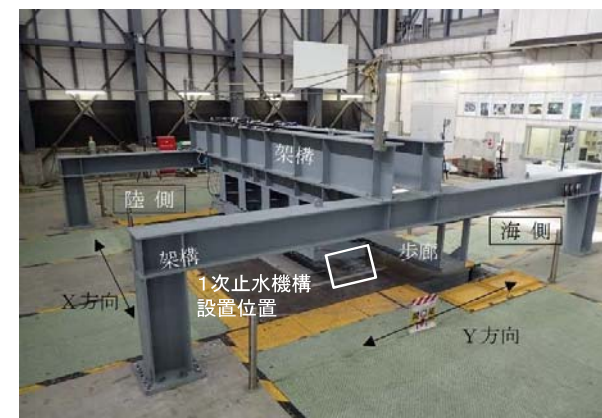


図1 実証試験装置全景



図4-1 止水板



図4-2 底面水密ゴム

図4 1次止水機構の構造図

本資料のうち、は営業秘密又は核物質防護上の観点から公開できません。

【論点1】 実証試験結果 止水板のうねりの分析(1/3)



<コメント>

1. 実証試験結果のうち、鉛直方向に長周期のうねりが出る原因について、3方向同時加振時に出て、鉛直加振で出ないことを踏まえて、合理的に説明できる根拠を示した上で特定すること

<回答>

実証試験の結果、3方向同時加振時において鉛直変位の中心軸に約5秒(0.2Hz)のうねりが認められた(図1、図2)。以下(1)~(7)に各部位毎に分析し、うねりの原因について特定した。

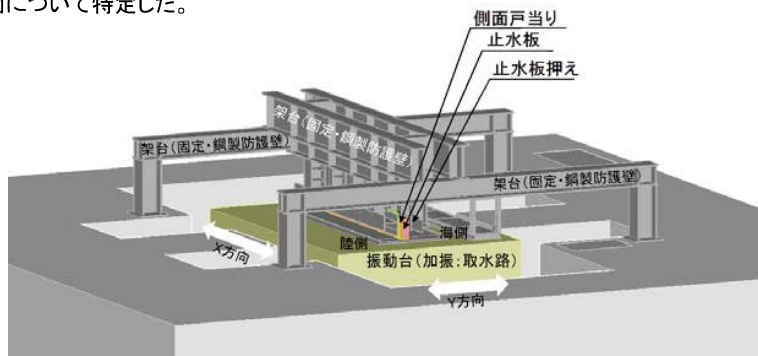


図1 加振試験装置概要図

(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。

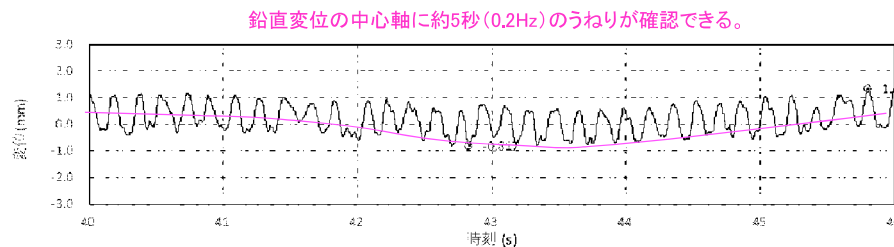
その結果、卓越周波数に3つのピーク(1.09Hz, 1.22Hz, 5.77Hz)を確認した。

表1に実証試験時の入力地震動における卓越振動数、図3に実証試験時のY方向フーリエスペクトル図を示す。

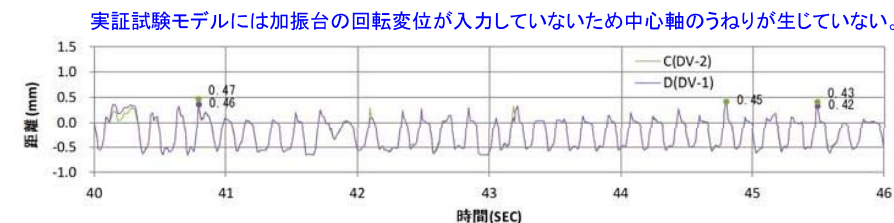
実証試験用入力波からはうねりの周波数0.2Hzは確認できなかった。

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



実証試験の結果(3方向)



三次元的解析の結果(3方向)

図2 3方向同時加振結果(上:実証試験, 下:三次元的解析)

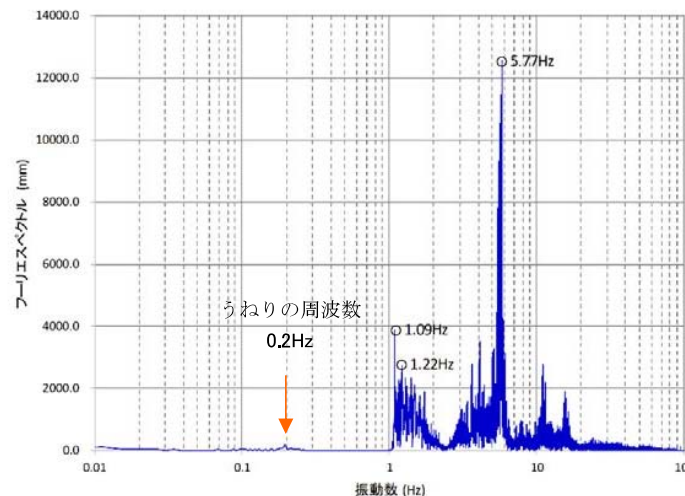


図3 実証試験時のY方向のフーリエスペクトル

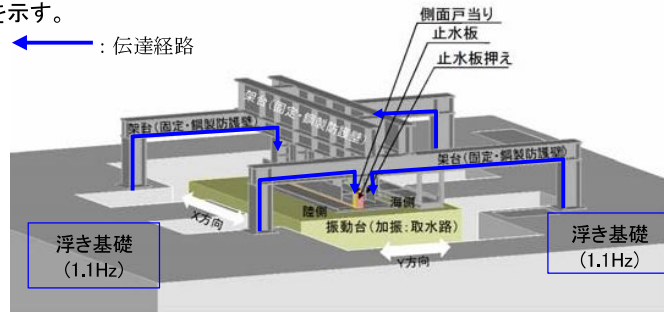
【論点1】 実証試験結果 止水板のうねりの分析(2/3)



(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、架台を經由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4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。



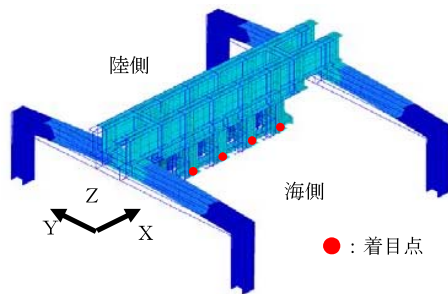
浮き基礎の軸	1次固有振動数(Hz)
X軸	1.16
Y軸	1.13
Z軸	1.16

図4 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) 試験装置の影響

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。(図5)



浮き基礎の軸	振動数(Hz)	備考
モード1	5.58	X方向
モード2	12.94	Z方向
モード3	15.29	Y方向

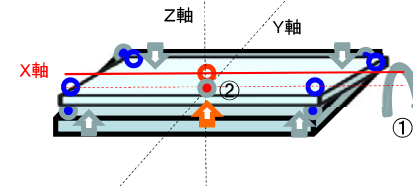
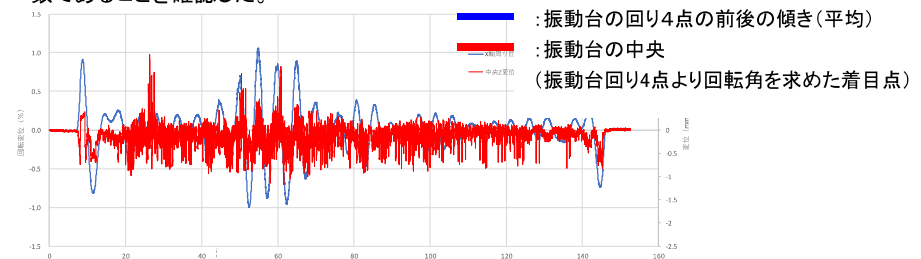
架構(縦材下端)	卓越振動数(Hz)
海側	1.09, 1.21, 5.77
陸側	1.09, 1.21, 4.07, 5.77

図5 試験装置の固有振動数

(4) 振動台のうねりの分析

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回転変位と中央部の鉛直変位算出結果を図6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0.20Hzで鉛直変位は0.21Hz, 1.09Hz, 5.77Hzであった。図7に振動台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は回転変位の影響と思われる振動台のピッチングによる影響があるものと思われる。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。



【振動台の動き<回転+鉛直成分>】

- ① Y軸を中心に●点が上下に傾く動き、青線の回転成分
- ② 中央部に鉛直による変位が入ると●点が上下の動き。Y軸が上がるのが赤線の鉛直成分

図6 振動台の回転変位と中央部の鉛直変位算出結果

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

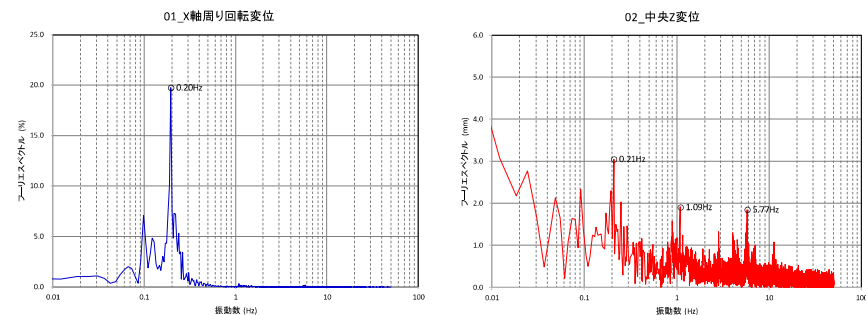


図7 振動台の回転変位と中央部鉛直変位のフーリエスペクトル

【論点1】 実証試験結果 止水板のうねりの分析(3/3)



(5) 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8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

○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

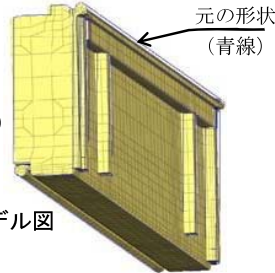


図8 止水板の固有周期解析モデル図

(6) 振動台の要因

今回の実証試験では、定期点検時の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800cm/s²~1000cm/s²であり、止水機構の実証試験にて再現したい3000cm/s²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。

(7) 実証試験の生じたうねりの評価

【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、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9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、止水板の固有値解析の結果(10.55Hz)、周波数が共振領域にないことを確認した。

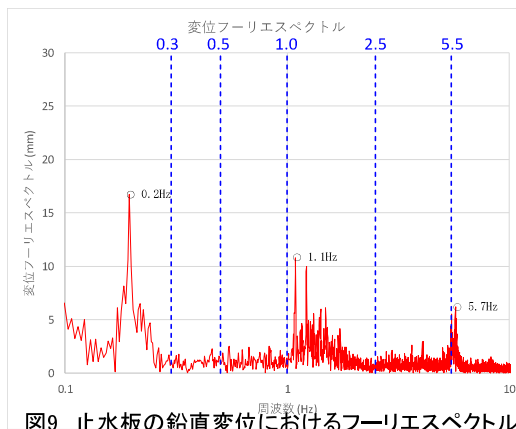


図9 止水板の鉛直変位におけるフーリエスペクトル

各評価対象による周波数成分を評価した結果を表2に示す。

表2 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)	—	—	—	0.21(ピッチング)	—
	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。

0.21Hzだけが振動台によるピッチング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特定される。

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し、振動台からのピッチングによる影響である事を確認した。図10に止水板の鉛直変位におけるフィルタリングの範囲、図11に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を示す。

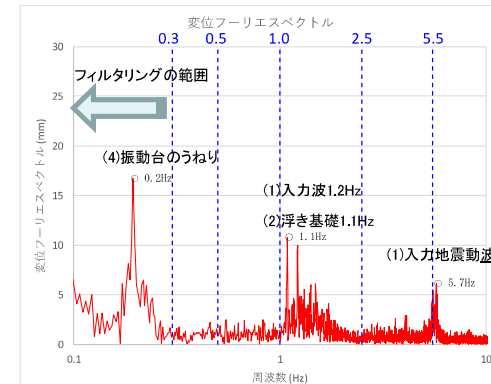


図10 止水板の鉛直変位におけるフィルタリングの範囲

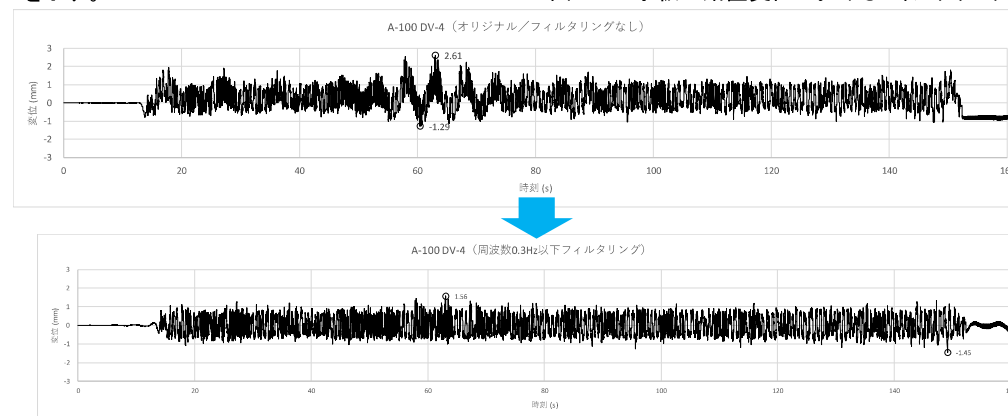


図11 3方向同時加振時の鉛直変位時刻歴波形フィルタリング

【論点1】 実証試験及び解析結果による一次止水機構の設計反映 (1/3)



<コメント>

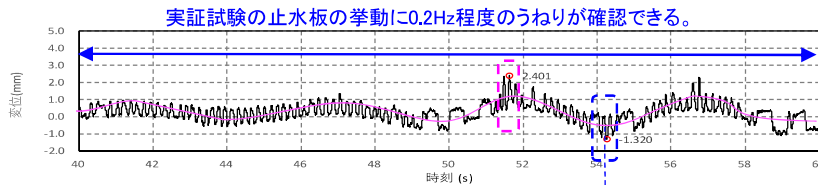
2. 実機解析を工認に適用することも踏まえ、解析の信頼性を示すこと。

<回答>

(1)三次元動的解析フィルタリングによる再現性の検証

3方向同時入力の「三次元動的解析の実機モデル」に0.2Hzの回転変位を与えた。その結果、実証試験と同じ挙動やうねりが認められた。(図1)

【実証試験結果】



【実機モデル】

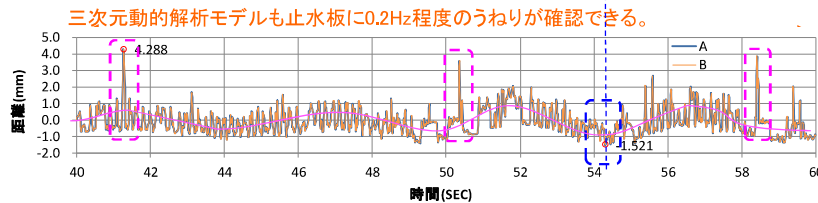
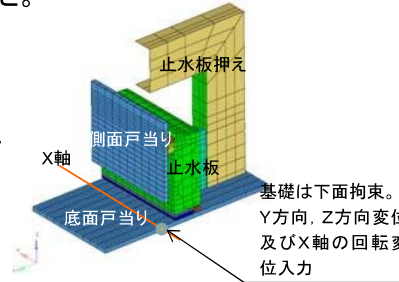


図1 実証試験結果と実機モデルとの比較

<再現性確認>

- ◆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。(図2)

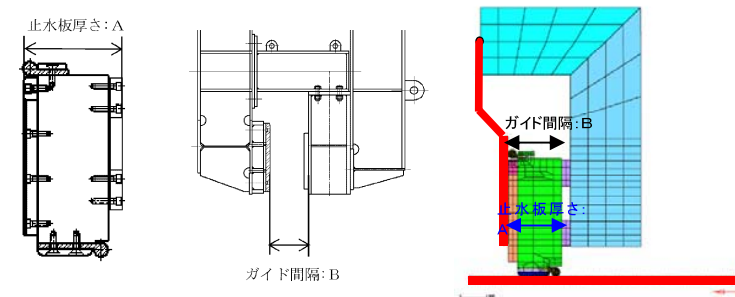


止水板の鉛直変位	②3方向(Y方向(提軸直角)包絡波)		実証試験との差(②-①)
	実証試験(①)	0.2Hz回転変位モデル(②)	
浮き上がり量(プラス側)	2.41	4.29	+1.88
沈み込み量(マイナス側)	-1.26	-1.52	-0.26

図2 三次元動的解析(実機モデル)と止水板の鉛直変位量

(2)三次元動的解析モデルの信頼性向上

前述(1)項の結果、解析モデルの浮き上がりの時間帯が違う解析結果がみられた。ここでは、三次元動的解析モデルの信頼性を確認するため、解析モデルに製作公差を含め解析モデルを作成し信頼性を確認した。支圧板厚さとガイド間隔の隙間を4mmにして三次元動的解析を実施した。図3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。



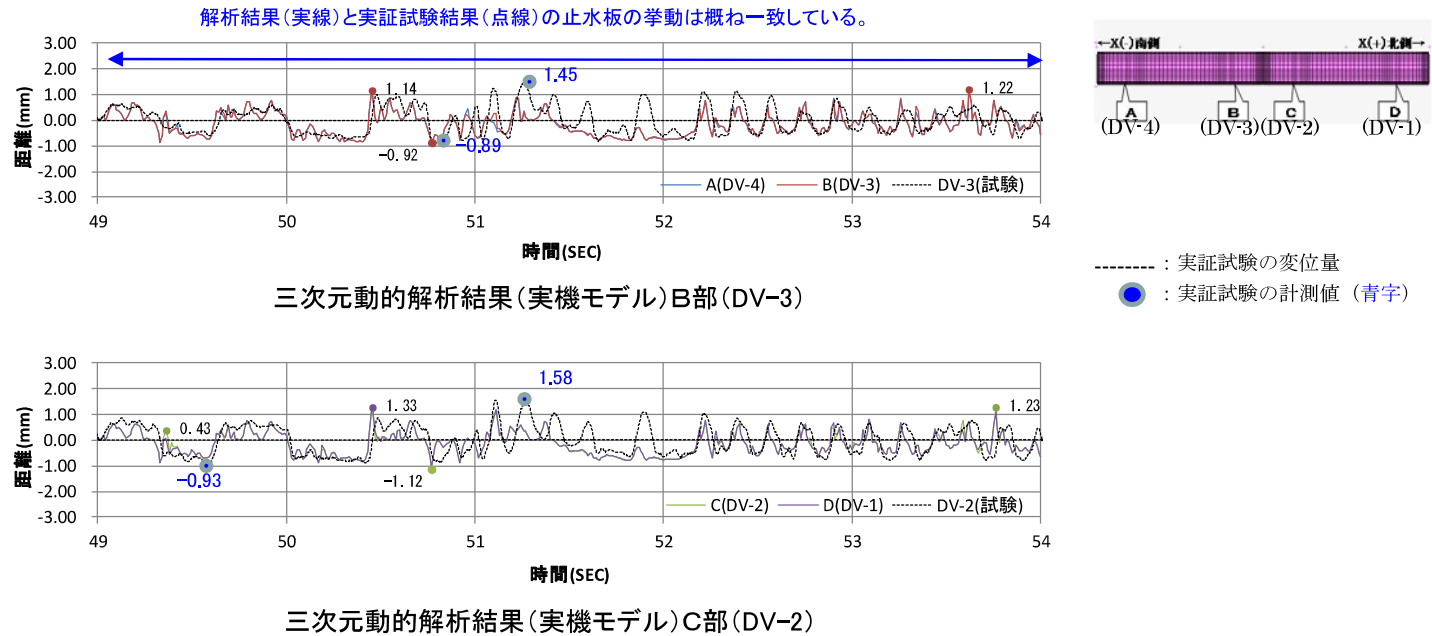
	止水板厚さ A (mm)	ガイド間隔 (mm)	隙間 (mm)
図面寸法	210	213	3
実際の供試体の寸法(製作公差含む)	207	211~210	3~4

図3 実証試験の試験装置における止水板とガイド間の寸法

【論点1】 実証試験及び解析結果による一次止水機構の設計反映 (2/3)



実証試験(フィルタリング後)と実際の試験装置の隙間(4mm)の3方向同時加振後の結果について比較した。その結果、実証試験における結果と実際の試験装置の隙間(4mm)の方の浮き上がり量の差が僅かであり、非常によく似た結果が得られた。浮き上がりに対して解析モデルの信頼性が向上した結果が得られた。(図4)



止水板の鉛直変位	②3方向(Y方向(堤軸直角)包絡波)		
	実証試験(①)	隙間4mmモデル(②)	実証試験と解析モデルとの差(②-①)
	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)
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~-0.19mm

図4 実証試験結果と実機モデルとの比較

【論点1】 実証試験及び解析結果による一次止水機構の設計反映 (3/3)



<コメント>

3. 実証試験結果を踏まえて解析にフィードバックする項目はないか、応力評価において実証試験と解析の違いを考慮する必要がないか検討すること。

<回答>

【実証試験結果と三次元動的解析からの設計への反映事項】

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することを確認したため、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ことが確認できた。

実機設計については、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設計へ反映する。解析結果を適切に設計に反映することで設備の信頼性を高める。

図1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。

①解析モデルの信頼性向上

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、隙間3mmモデルも検証し止水板の挙動や浮き上がり量、発生応力の観点からも比較し、保守的な三次元動的解析モデルを選定する。

②衝突荷重等の解析結果の反映

止水板の鉛直変位の結果から左右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、衝突荷重の評価を実施し設計に反映する。

③基準地震動Ssによる止水板の挙動解析

基準地震動Ssによる止水板の三次元動的解析の結果について、工事認可申請書の別添資料等に反映する。

◆上記の結果については、7月末までに解析の結果等をまとめご報告する。

<コメント>

4. 試験結果と実証試験モデル結果の差が浸水防止機能に影響を及ぼすか否かを分析し、今後設計への反映の有無を示すこと。

<回答>

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、今後の設計段階において三次元動的解析モデルについては、前述の隙間3mmのモデルについても確認し、設計に保守的な評価になる解析モデルを選定する。

また、僅かな浮き上がりについても止水機構には2次止水機構が存在しているため、1次止水機構の水密ゴムに万が一損傷等が発生したとしても敷地内には浸水しない。仮に底面水密ゴムが1枚(2m)損傷し隙間から津波が流入したとしても敷地内(T.P.+3m盤)の浸水深は約1.6mとなり、安全機能を有する海水ポンプ室への影響はなく浸水防止機能に影響を及ぼすことはない。図2に1次止水機構浸水量評価を示す。

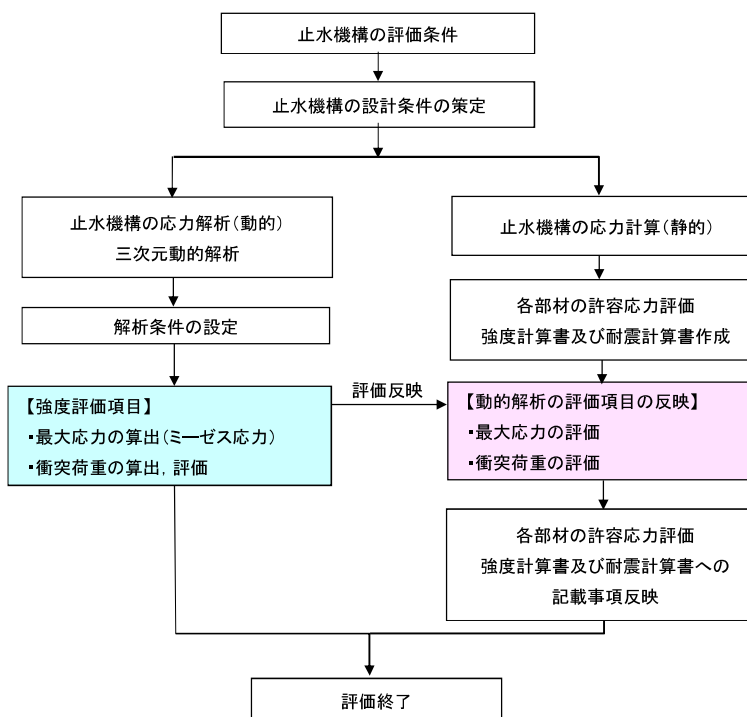


図1 1次止水機構の工事認可申請書構造設計フロー

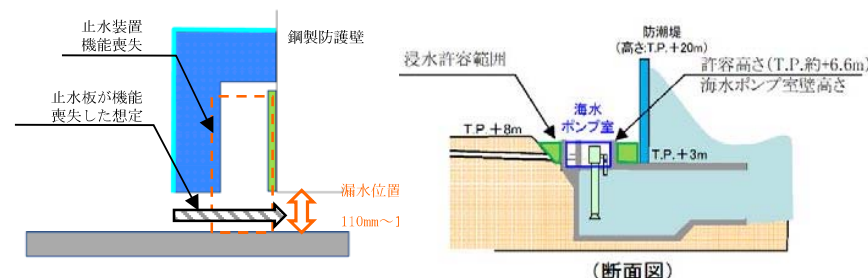


図2 1次止水機構浸水量の評価

＜本論点の経緯＞

防潮堤のうち鋼製防護壁については、取水路と鋼製防護壁の地震時の変位による相互干渉を回避するため、取水路と鋼製防護壁間に100mmの隙間を設け、この隙間からの津波の流入を防止することを目的に止水機構を設置することとしている。

この止水機構の構造に対して、第520回審査会合(平成29年10月17日)において、「止水板の追従性として、解析での確認に加え、試験についても検討し、方針及び実施時期を示した上で、設置許可断面と工認断面の範囲を整理して示すこと。」という指摘があった。

この指摘を踏まえて、第562回審査会合(平成30年4月5日)において、工事計画認可申請に係る論点整理の一つとして、止水機構に関して「止水機構の地震時の追従性について、評価及び実規模大の試験装置を用いた加振試験にて確認する。」ことを説明している。

今回は、上記の評価及び加振試験結果について説明するものである。



図1 鋼製防護壁の配置図

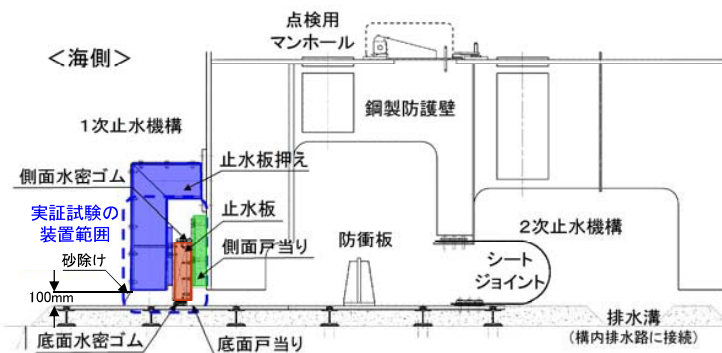


図3 止水機構全体構造概要

表1 止水機構の目的と要求機能

対策設備	目的/機能要求
1次止水機構 ・浸水防止設備 ・外郭防護1	鋼製防護壁下部と取水路間の隙間から海水ポンプエリアへの津波の流入、到達を防止する。
防衝板 ・影響防止設備 ・外郭防護1	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。
2次止水機構 ・浸水防止設備 ・外郭防護2	1次止水機構からの漏えいを考慮して、海水ポンプエリアへの漏水を防止する。安全機能への影響確認として、海水ポンプエリアへの浸水量評価を実施し、安全機能への影響がないことを確認する。
点検用マンホール ・浸水防止設備 ・外郭防護2	1次止水機構からの漏えいを考慮して、鋼製防護壁鋼殻内への漏水を防止する。

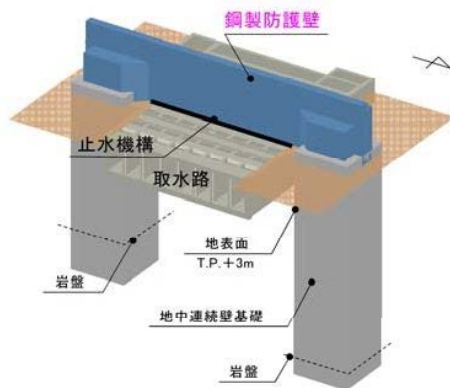


図2 鋼製防護壁の構造と止水機構の位置

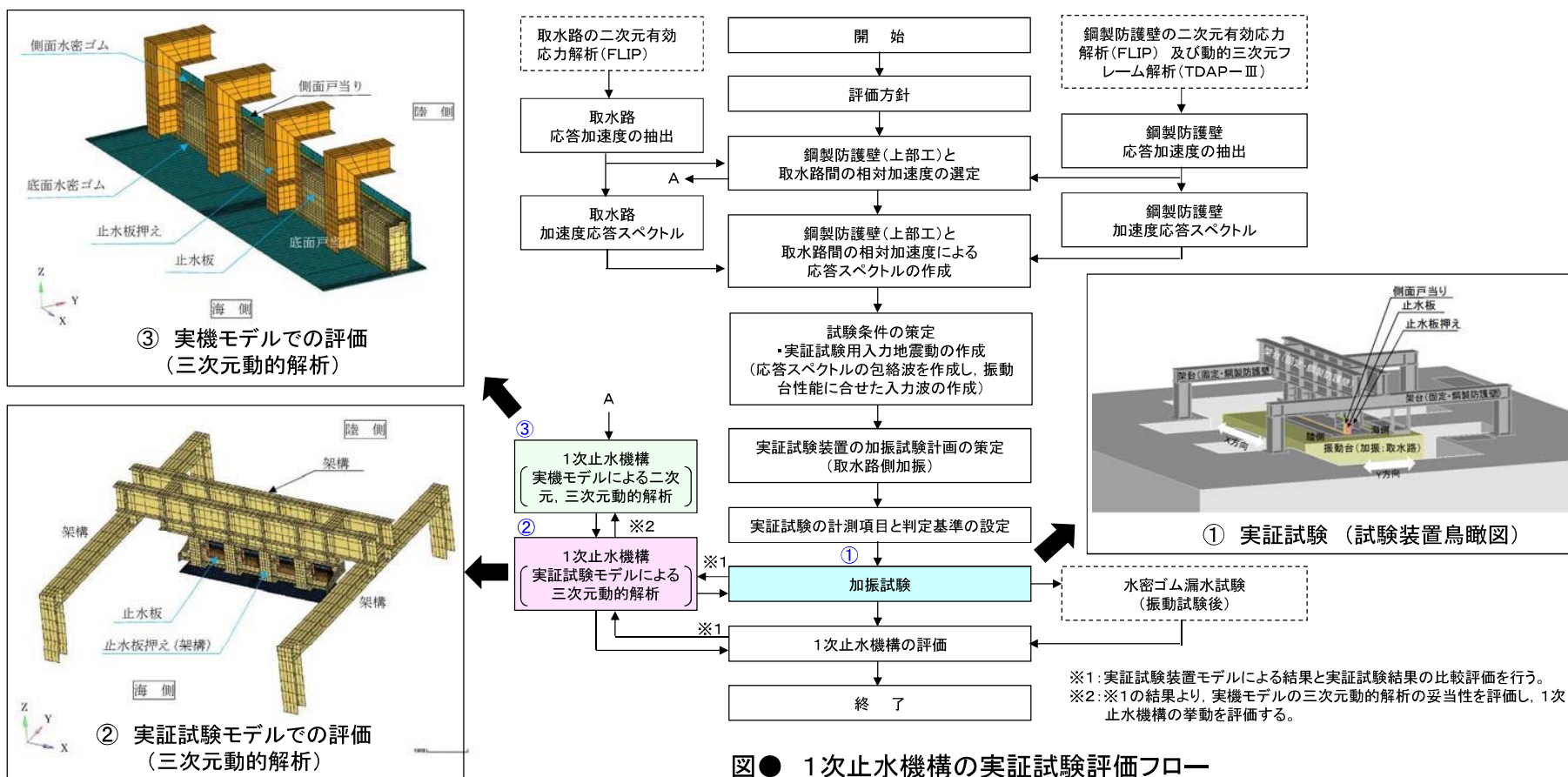
- 【鋼製防護壁寸法】
- ・長さ: 約 80m
 - ・奥行(厚さ): 約 4.5m
 - ・天端高さ: T.P.+20m
- 【地中連続壁基礎寸法】
- ・幅: 約 15.5m × 約 15.5m
 - ・基礎下端部標高
(南): T.P. 約 -50m
(北): T.P. 約 -60m
- 【岩盤標高】
- (南): T.P. 約 -30m
 - (北): T.P. 約 -56m

【参考2】 1次止水機構の実証試験評価フロー

第578回 (H30,5,31) 審査会合資料抜粋



- ◆ 1次止水機構の実証試験フローを図●に示す。止水機構の地震時の追従性については、実規模大の試験装置による「実証試験(加振試験)」と「三次元動的解析」により確認する。
- ◆ 「実証試験(加振試験)」と「三次元動的解析」の目的及び関係は以下のとおりである。
 - ① 実証試験(加振試験)：加振試験により、止水機構の追従性、水密ゴムの健全性、1次止水機構の構成部材の健全性について確認する。
 - ② 実証試験モデルによる三次元動的解析：実証試験装置をモデル化した三次元動的解析結果が、加振試験時の止水機構の挙動を再現できているか確認する。(三次元動的解析の信頼性・妥当性確認)【検証Ⅰ】
 - ③ 実機モデルによる三次元動的解析：実証試験装置をモデル化した三次元動的解析結果と実機設計をモデル化した三次元動的解析結果を比較するにより、実機設計をモデル化した三次元動的解析結果の妥当性を確認する。【検証Ⅱ】
- ◆ 上記①, ②, ③を関連付けることにより、三次元動的解析による実機止水機構の設計・構造の妥当性を確認する。



図● 1次止水機構の実証試験評価フロー