

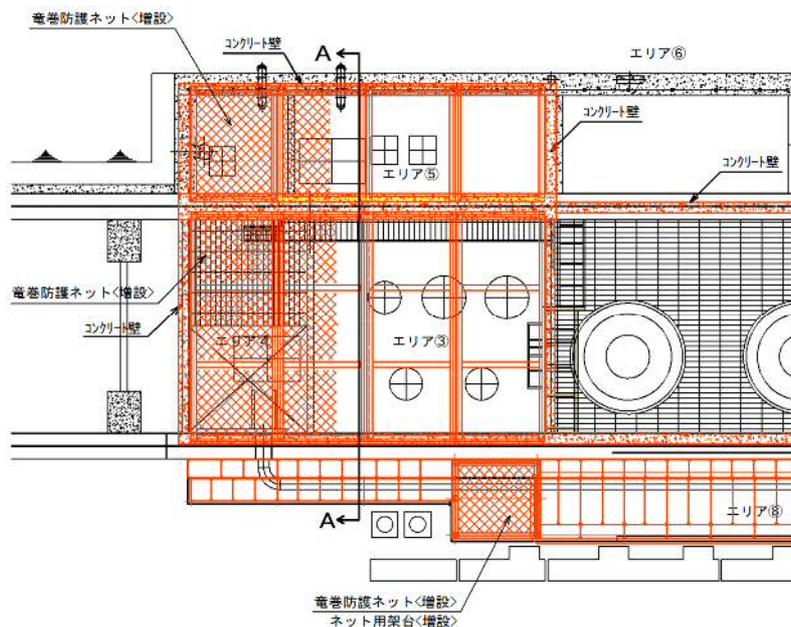
## 10. 竜巻等防護設備による地震時反力を考慮した取水構造物躯体の耐震評価

### 10.1 概要

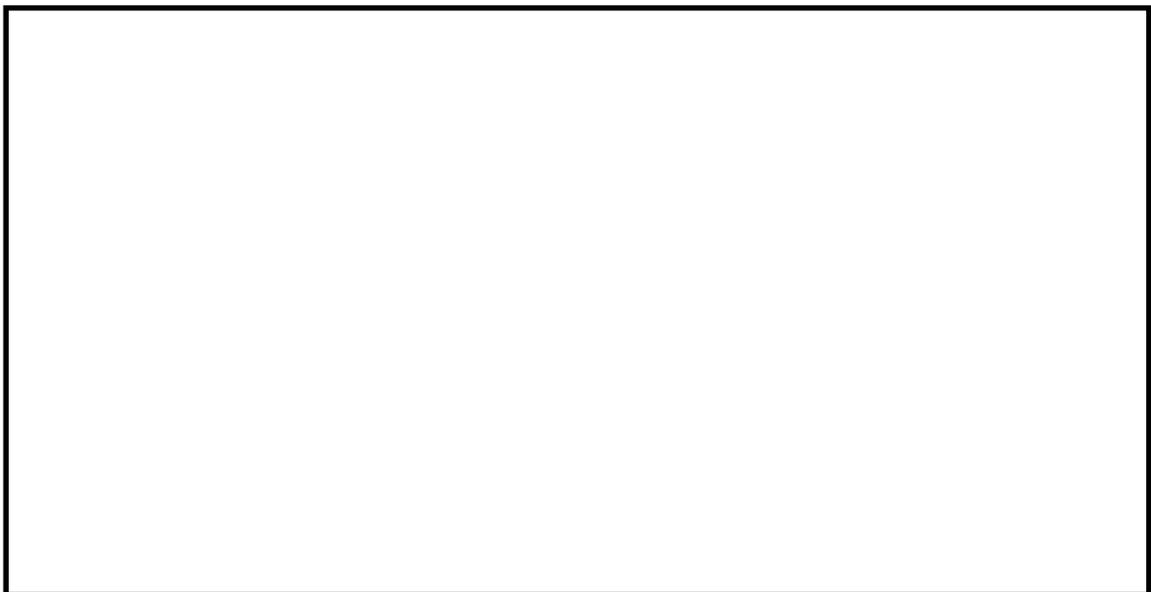
取水構造物の耐震評価では、竜巻等防護設備を分布質量として地震応答解析モデルに反映し、その質量による慣性力を考慮した照査を実施している。

また、図 10-1 に示すように、竜巻等防護設備は嵩上げ RC 壁と鋼材によるラーメン構造であることを考慮すると、地震時には既設 RC 部材への反力が発生することが想定される。

よって、本項では竜巻等防護設備による地震時反力を考慮した取水構造物躯体の耐震評価について、その詳細を示す。



(平面図)



(A-A断面)

図 10-1 竜巻等防護設備の構造概要と想定される反力

## 10.2 耐震評価フロー

竜巻等防護設備による地震時反力を考慮した取水構造物躯体の耐震評価フロー及び他の解析との関係を図 10-2 に示す。

有効応力解析より抽出した慣性力及び地震時土圧に加え、竜巻等防護設備の応力解析より得られる地震時反力を 2 次元フレームモデルに入力することで耐震評価を実施する。2 次元フレームモデルを用いた静的応力解析については、解析コード「Engineer's Studio Ver. 6.00.04」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、V-5-39「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

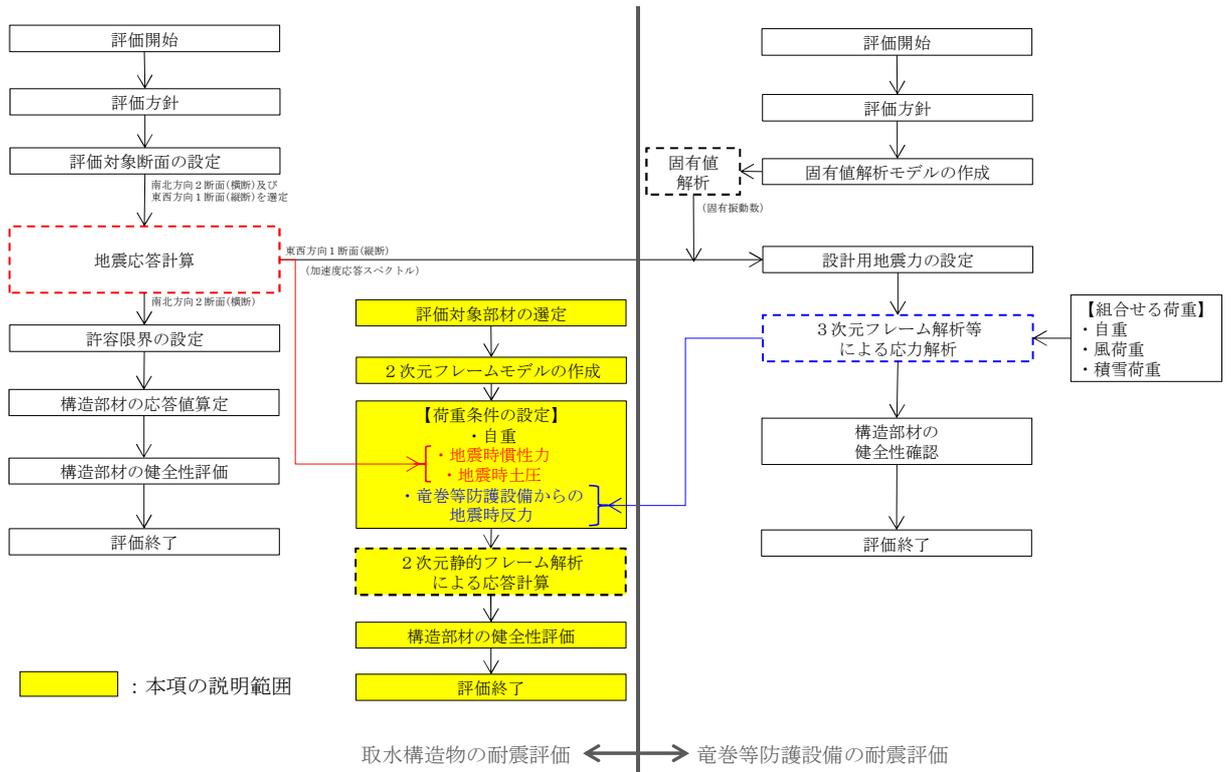


図 10-2 竜巻等防護設備による地震時反力を考慮した取水構造物躯体の耐震評価フロー

### 10.3 評価内容

#### 10.3.1 評価対象部材

対象とする構造部材は、取水構造物の縦断面にて竜巻等防護設備を受ける部材のうち、より荷重条件が厳しい部材として以下の評価対象部材を選択する。各評価対象部材を図 10-3 に示す。

- ・評価対象部材①：部材頂部にて竜巻等防護設備から地震時反力を受けるとともに、地震時土圧を受ける部材
- ・評価対象部材②：部材頂部の両側にて竜巻等防護設備を支持しており、地震時反力が大きくなると想定される部材
- ・評価対象部材③：部材頂部に加え、側方でも竜巻等防護設備を支持しており、地震時反力が大きくなると想定される部材

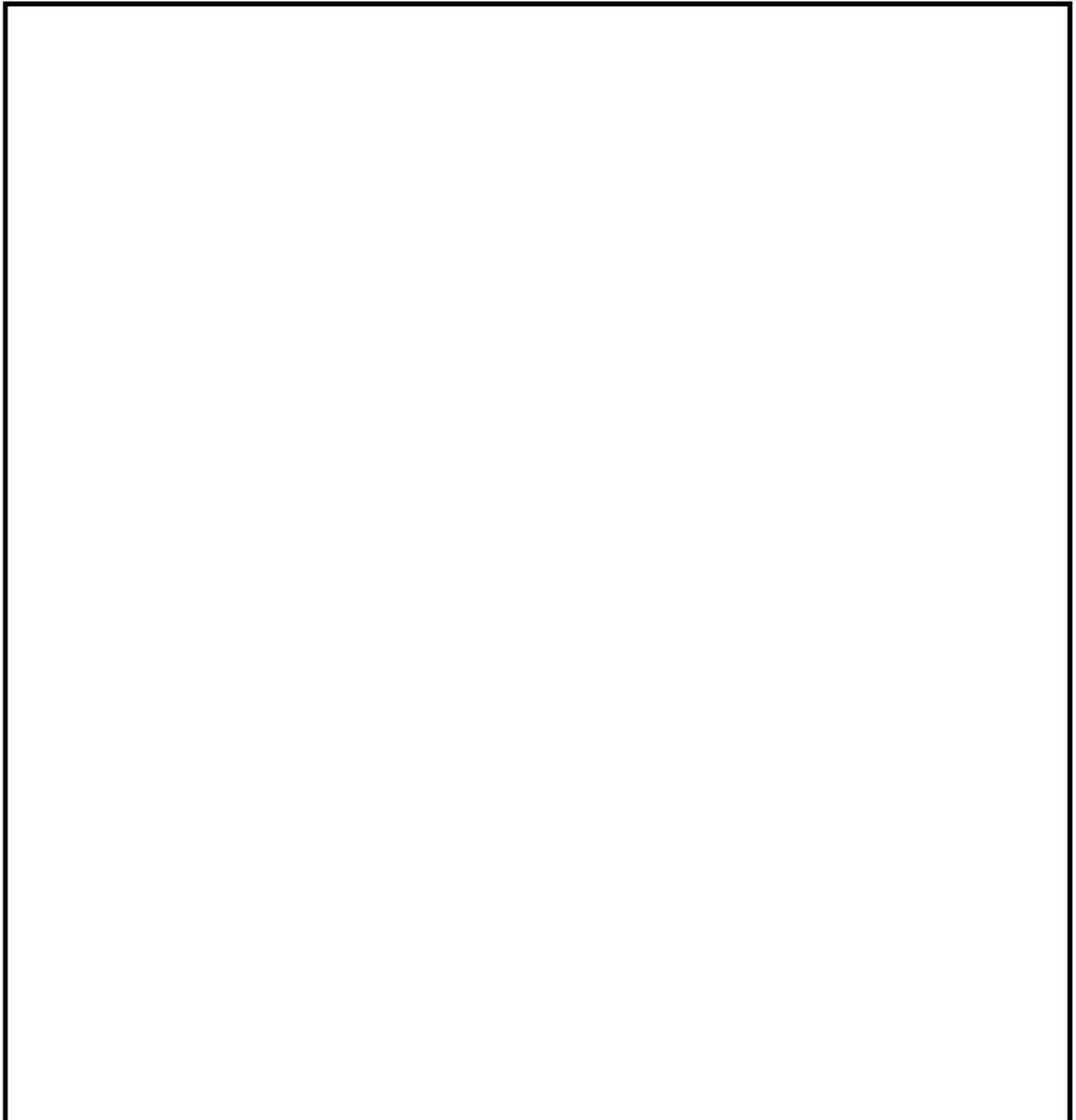


図 10-3 評価対象部材

(参考) 2-102

### 10.3.2 解析モデル

各評価対象部材について、下端固定の片持ちはりとしてモデル化する。解析モデルを図 10-4 に示す。

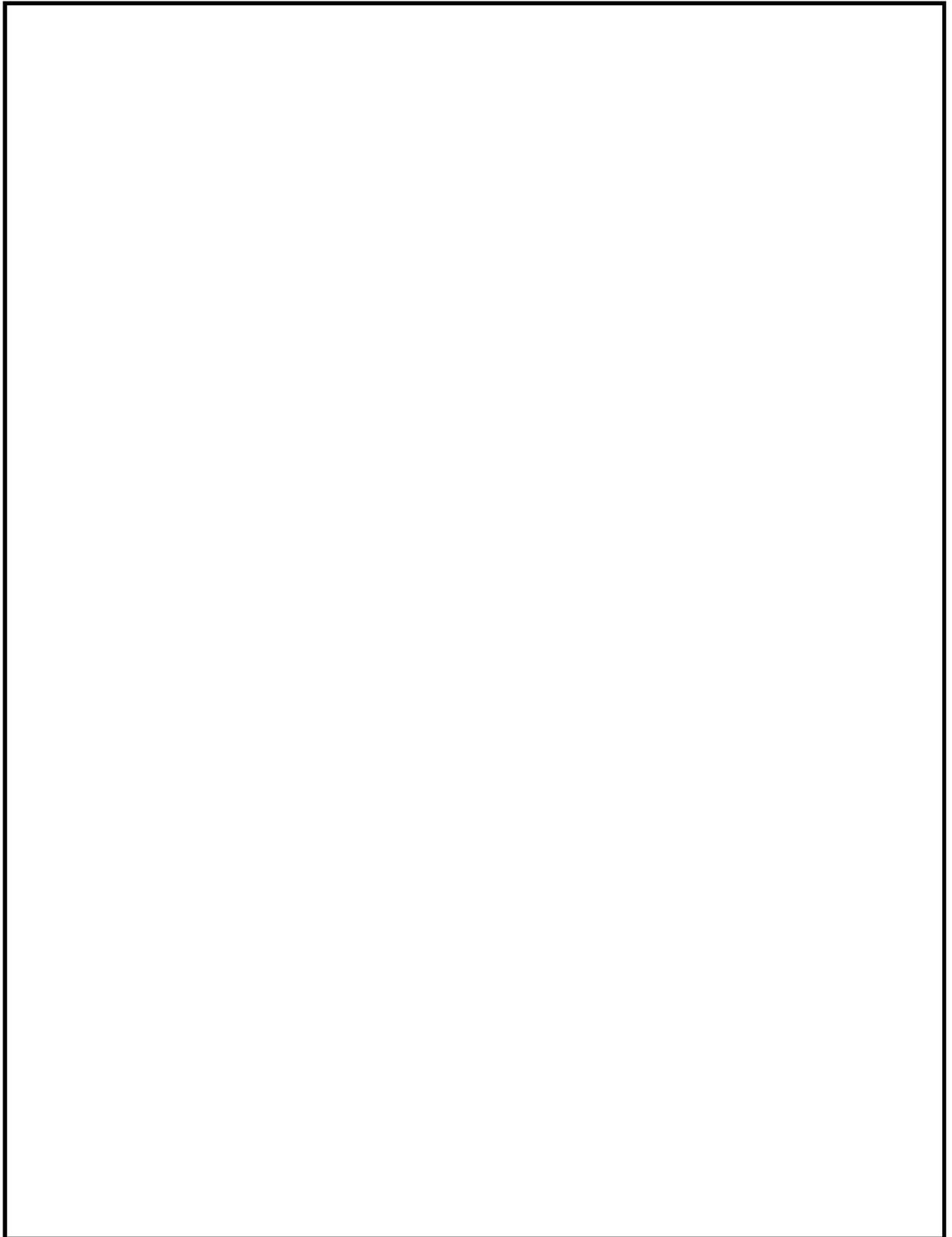
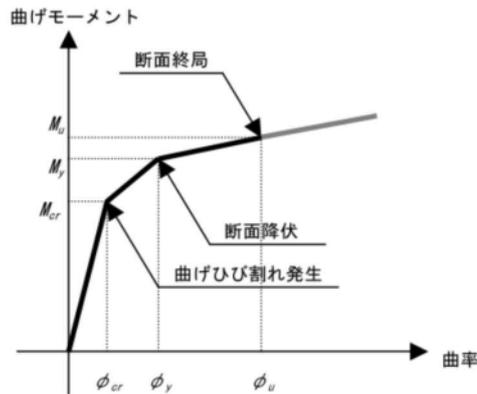


図 10-4 解析モデル

(参考) 2-103

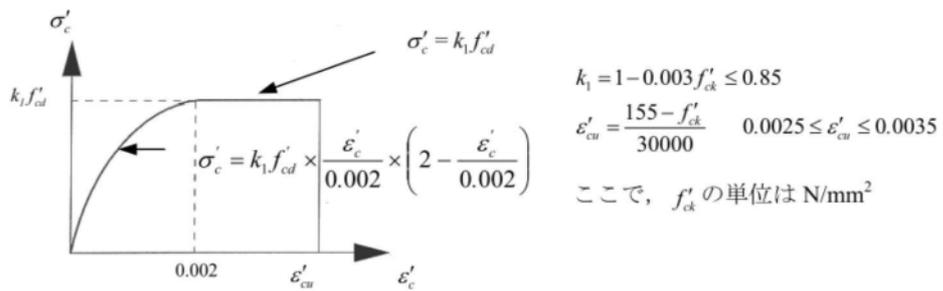
なお、壁部材は非線形はり要素を用いてモデル化する。非線形特性の設定においては、コンクリート及び鉄筋について、それぞれの非線形特性を考慮する。

鉄筋コンクリート部材における M- $\phi$  関係のトリリニアモデルを図 10-5 に示す。また、コンクリート及び鉄筋の非線形特性を図 10-6 及び図 10-7 に示す。



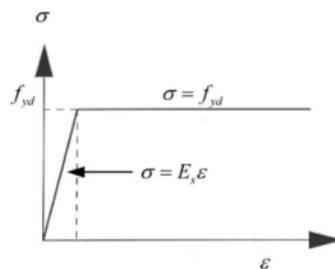
(原子力発電所屋外重要構造物の耐震性能照査指針・マニュアル ((社) 土木学会 2005 年) より引用)

図 10-5 M- $\phi$  関係のトリリニアモデル (鉄筋コンクリート部材)



(コンクリート標準示方書[設計編] ((社) 土木学会 2007 年制定) より引用)

図 10-6 コンクリートの応力-ひずみ曲線



(コンクリート標準示方書[設計編] ((社) 土木学会 2007 年制定) より引用)

図 10-7 鉄筋の応力-ひずみ曲線

### 10.3.3 荷重

#### (1) 地震応答解析により得られる荷重

解析モデルに入力する荷重は、常時荷重に加え、取水構造物縦断方向（⑥—⑥断面）の地震応答解析から得られる地震時土圧及び慣性力とする。

部材の曲げ及びせん断照査については、取水構造物縦断方向（⑥—⑥断面）の地震応答解析により、各評価対象部材における加速度及び地震時土圧が最大となる時刻を抽出し、この時刻における地震時土圧及び慣性力を解析モデルに作用させる。図 10-8 に⑥—⑥断面の地震応答解析モデルと評価対象部材を示す。また、図 10-9 に評価対象部材①を例に、荷重抽出の考え方を示す。

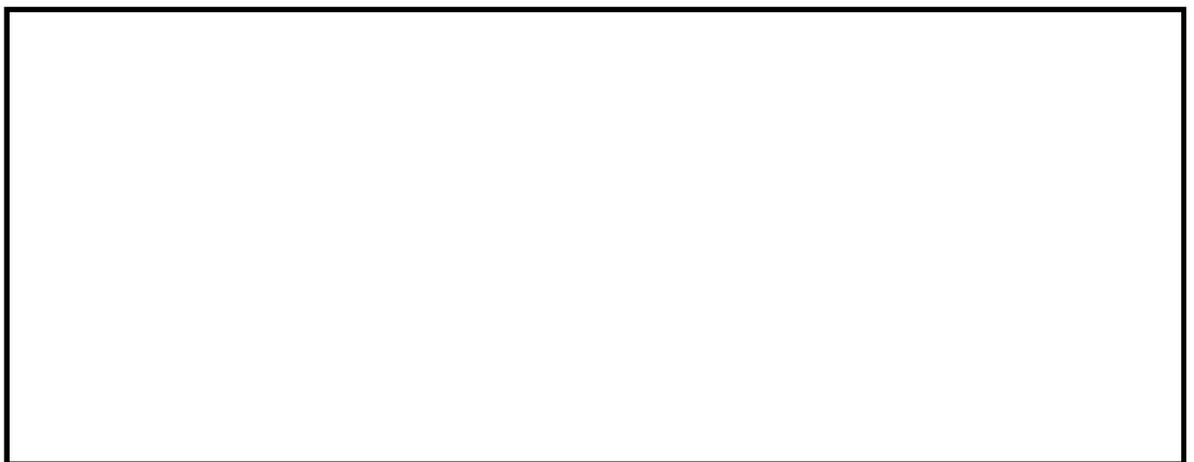


図 10-8 ⑥—⑥断面の地震応答解析モデルと評価対象部材

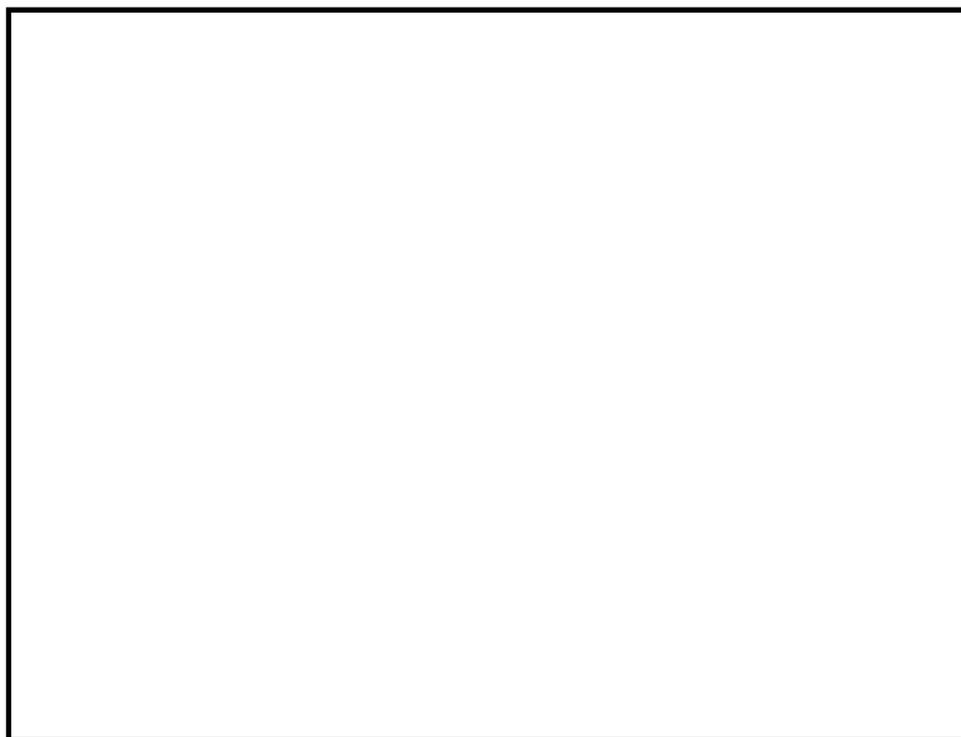


図 10-9 荷重（時刻）抽出の考え方

(2) 竜巻等防護設備の応力解析により得られる地震時反力

図 10-4 に示す解析モデルの上端には、竜巻等防護設備の応力解析により得られる地震時反力を考慮する。竜巻等防護設備の応力解析モデル及び地震時反力抽出の考え方を以下に示す。

竜巻等防護設備の応力解析においては、鋼材部を3次元フレーム、嵩上げ RC 壁部及び RC 壁部を既設 RC 部材との接続部を固定端とする片持ちはりとしてモデル化する。竜巻等防護設備から既設 RC 部材への応力伝達の考え方を図 10-10 に示す。

考慮する荷重は、竜巻等防護設備及び嵩上げ壁自重、積雪荷重、風荷重、慣性力とする。慣性力は、取水構造物縦断方向（⑥—⑥断面）の地震応答解析に基づき算出する。

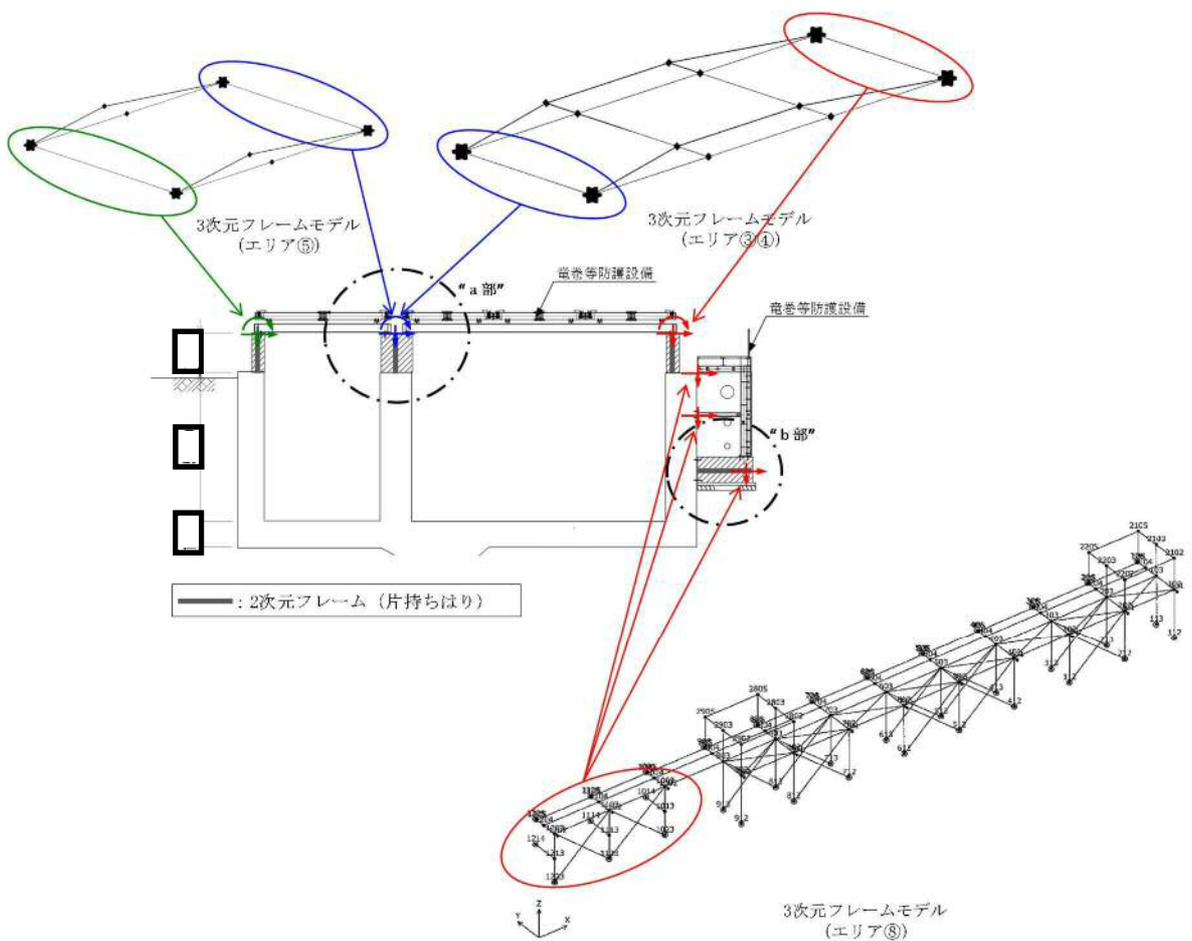


図 10-10 (1) 竜巻等防護設備から既設 RC 部材への応力伝達の考え方

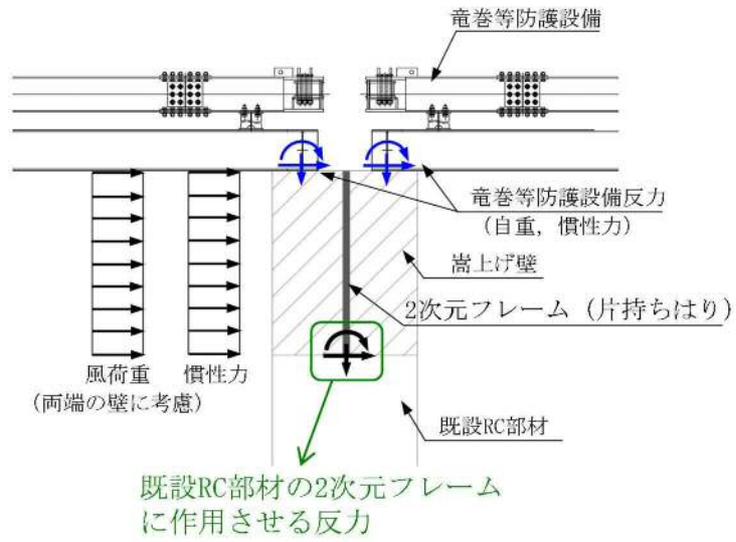


図 10-10 (2) 竜巻等防護設備から既設 RC 部材への応力伝達の考え方 (“a 部” 詳細)

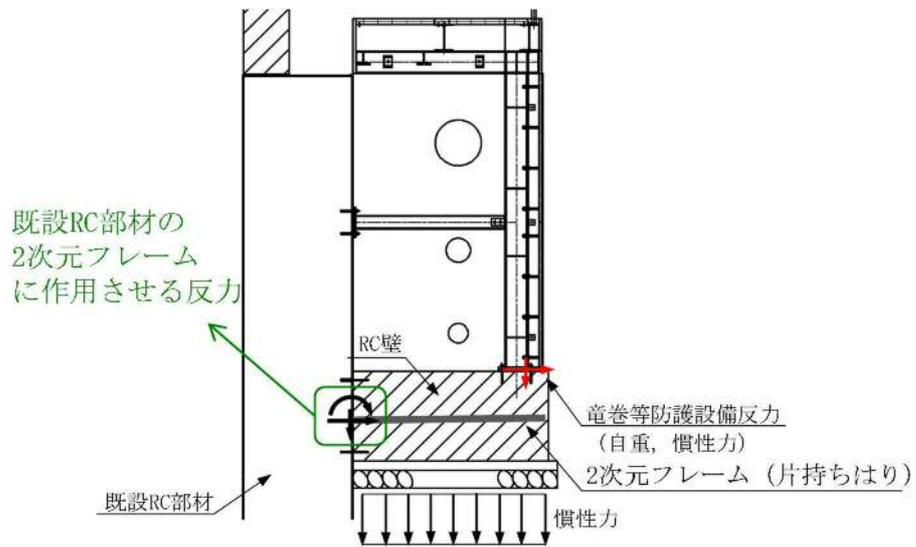


図 10-10 (3) 竜巻等防護設備から既設 RC 部材への応力伝達の考え方 (“b 部” 詳細)

(3) 荷重の組合せ

「地震応答解析により得られる荷重」と「竜巻等防護設備の応力解析により得られる地震時反力」の組合せ方法についての考え方を示す。

a. 部材①における荷重の組合せ

「地震応答解析により得られる荷重」と「竜巻等防護設備の応力解析により得られる地震時反力」の水平成分（水平力、曲げモーメント）が同一方向となるように組合せる。また、「竜巻等防護設備の応力解析により得られる地震時反力」の鉛直成分は軸圧縮と軸引張の両方向を考える。荷重の組合せの模式図を図 10-11 に示す。

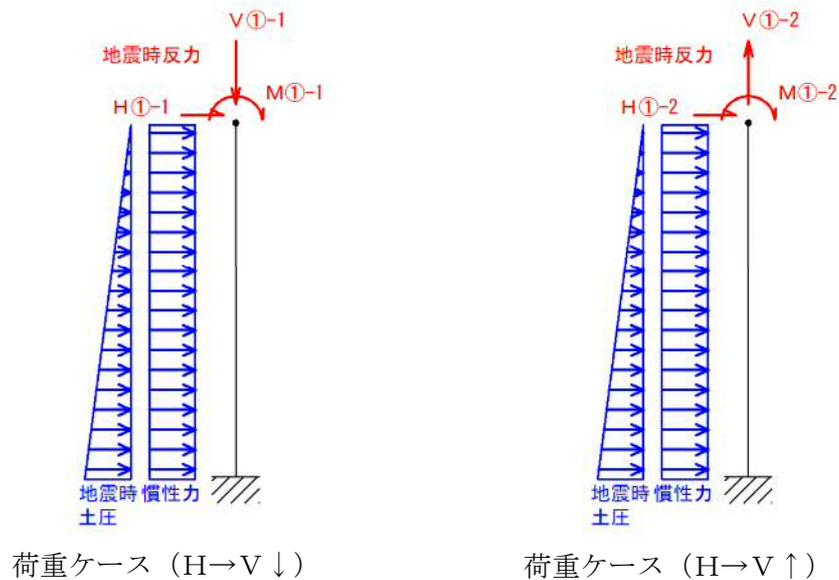


図 10-11(1) 荷重の組合せの模式図（部材①）

b. 部材②における荷重の組合せ

部材①と同様の考え方で荷重を組合せる。荷重の組合せの模式図を図 10-11 に示す。

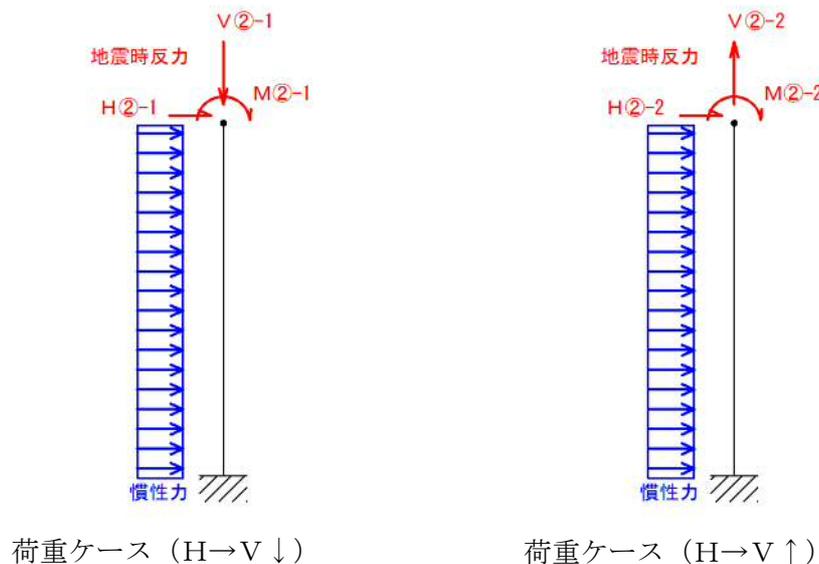


図 10-11(2) 荷重の組合せの模式図（部材②）

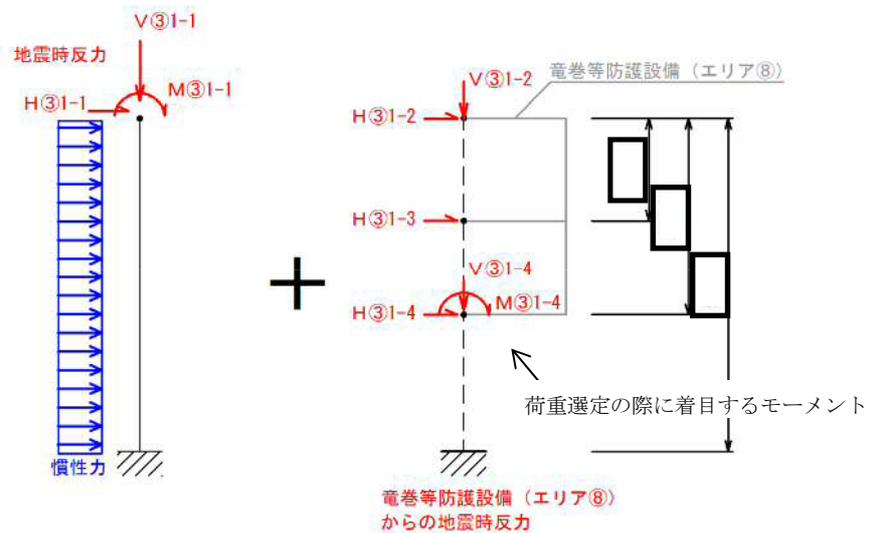
c. 部材③における荷重の組合せ

部材③においては、「竜巻等防護設備の応力解析により得られる地震時反力」として上部の竜巻等防護設備に加えて、側面に接続する竜巻等防護設備（エリア⑧）を考慮する。

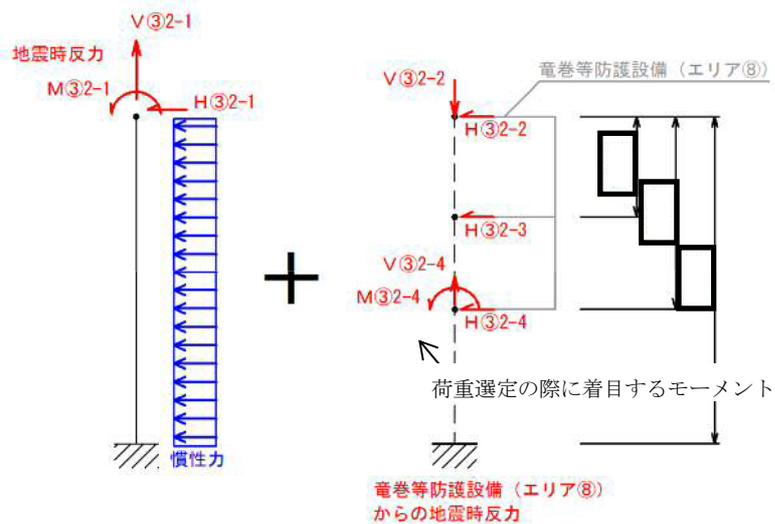
側面に接続する竜巻等防護設備（エリア⑧）に対しては、部材中央付近に作用する曲げモーメントに着目し、上部の竜巻等防護設備からの地震時反力の作用方向に合わせて、以下2つの荷重ケースを選定する。

- ・荷重ケース（ $H \rightarrow V \downarrow$ ）：軸圧縮状態において時計回りの曲げが卓越するケース
- ・荷重ケース（ $H \leftarrow V \uparrow$ ）：軸引張状態において反時計回りの曲げが卓越するケース

なお、上記の荷重ケースには、部材③が側面で支持している非常用海水配管を考慮している。



荷重ケース（ $H \rightarrow V \downarrow$ ）



荷重ケース（ $H \leftarrow V \uparrow$ ）

図 10-11(3) 荷重の組合せの模式図（部材③）

（参考） 2-109

## 【竜巻等防護設備の嵩上げ RC 壁が FRS に与える影響について】

### 1. はじめに

竜巻等防護設備の FRS の基となる加速度応答スペクトルは、取水構造物の地震応答解析により算定している。取水構造物の地震応答解析モデルでは、竜巻等防護設備の嵩上げ RC 壁を部材としてモデル化せず、分布質量として考慮する方針としている。取水構造物の地震応答解析モデルにおけるモデル化の考え方を図 1 に示す。

本モデルでは、嵩上げ RC 壁の質量による慣性力は考慮できるが、当該部材による加速度応答の増幅効果を考慮出来ていない可能性がある。よって、本項では、嵩上げ RC 壁による加速度応答の増幅効果を確認し、地震応答解析モデルの妥当性を検証する。

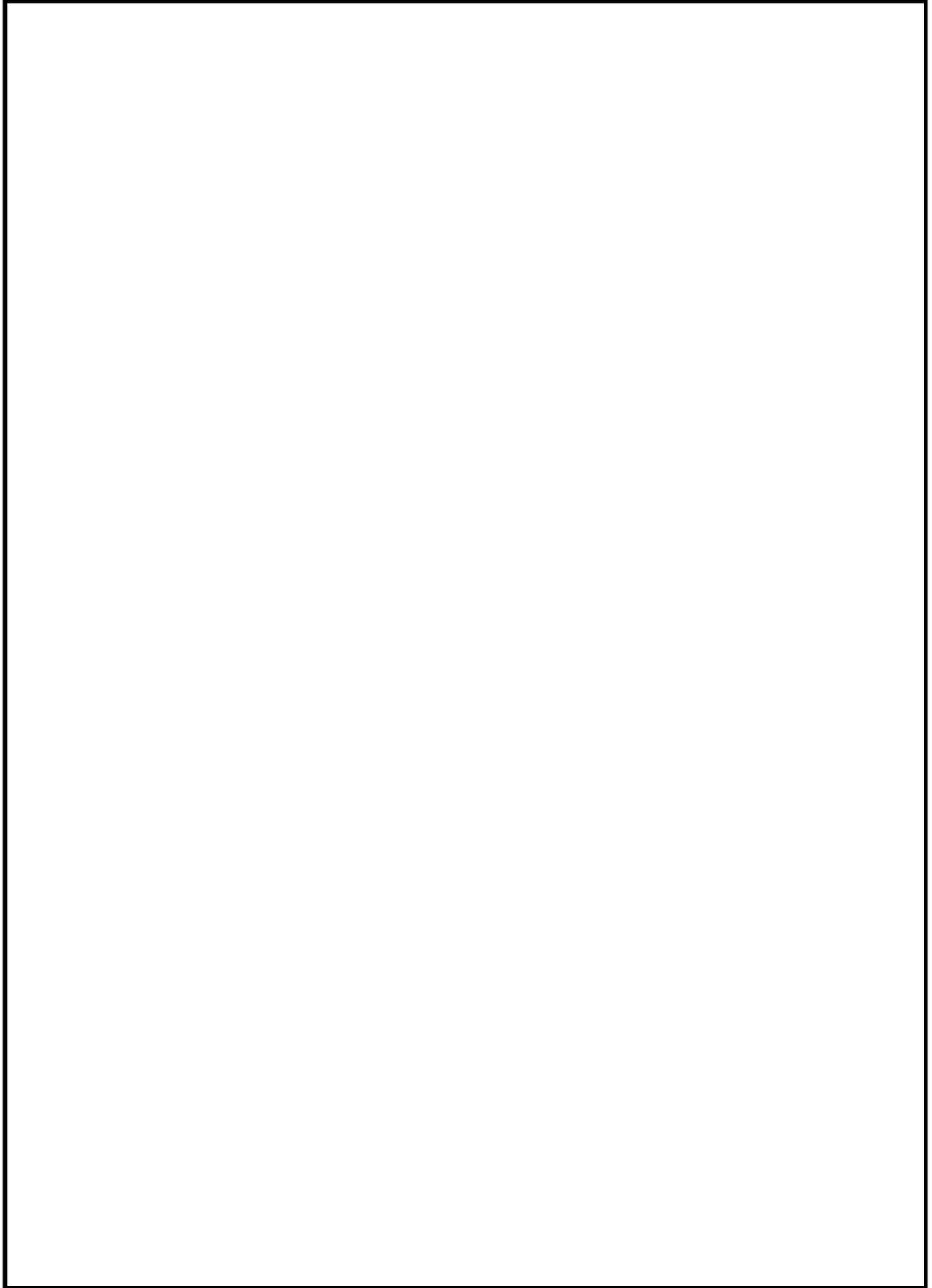
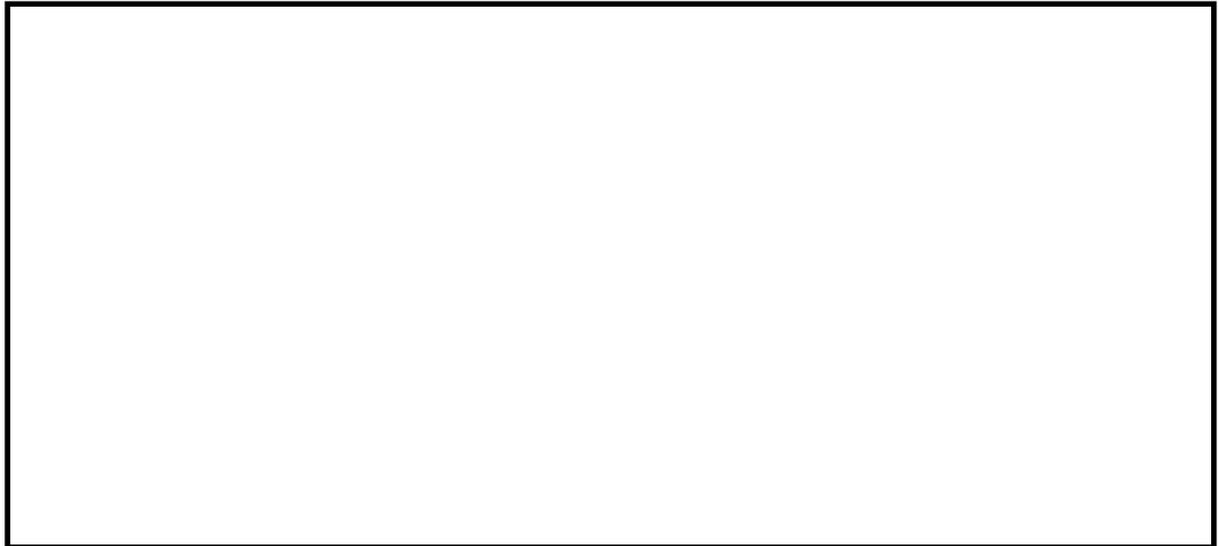


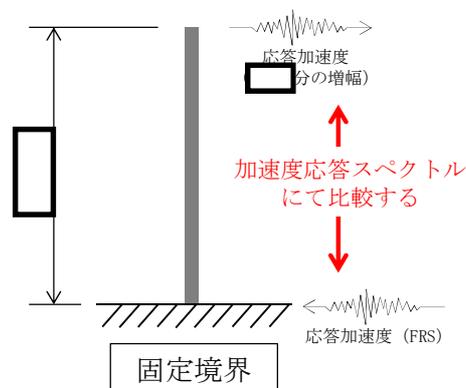
図1 取水構造物の地震応答解析モデルにおけるモデル化の考え方

## 2. 検討方針

嵩上げ RC 壁の下端を固定端とした片持ちはりモデルにて、モデル下端より入力した応答加速度を嵩上げ RC 壁上端部で取り出し、加速度応答スペクトルにて比較する。加速度応答スペクトル比較用の片持ちはりモデルを図 2 に示す。また、検討波は検討ケース⑤（原地盤において非液状化の条件を仮定した解析ケース）における  $S_s$  全波とし、水平成分を入力する。\*



(検討対象部材)



(解析モデル)

図 2 加速度応答スペクトル比較用の片持ちはりモデル

注記 \* : 下端を固定端とした片持ちはりモデルにて水平成分のみの入力を行うことで、加速度応答のうち回転成分を考慮しないモデルとなる。ただし、以下に示すとおり、入力波の回転成分は極めて小さいことから、下端固定によるモデル化は妥当であると判断した。

評価対象 部材	最大回転加速度 R (rad/s <sup>2</sup> )	部材長 $\square$ × R (cm/s <sup>2</sup> )
部材①	0.0283	4.36
部材②	0.0307	4.73
部材③	0.0421	6.48

\* : 代表波として、 $S_s-D 1 (H+, V+)$  を対象に上記確認を実施した。

(参考) 2-112

### 3. 検討結果

□分のRC壁による増幅を考慮した加速度応答スペクトルを算定し比較した結果を図3に示す。S<sub>s</sub>全波において、嵩上げRC壁部における有意な応答増幅は確認されなかった。

以上より、現状の取水構造物の地震応答解析モデルにおけるモデル化の妥当性を確認した。

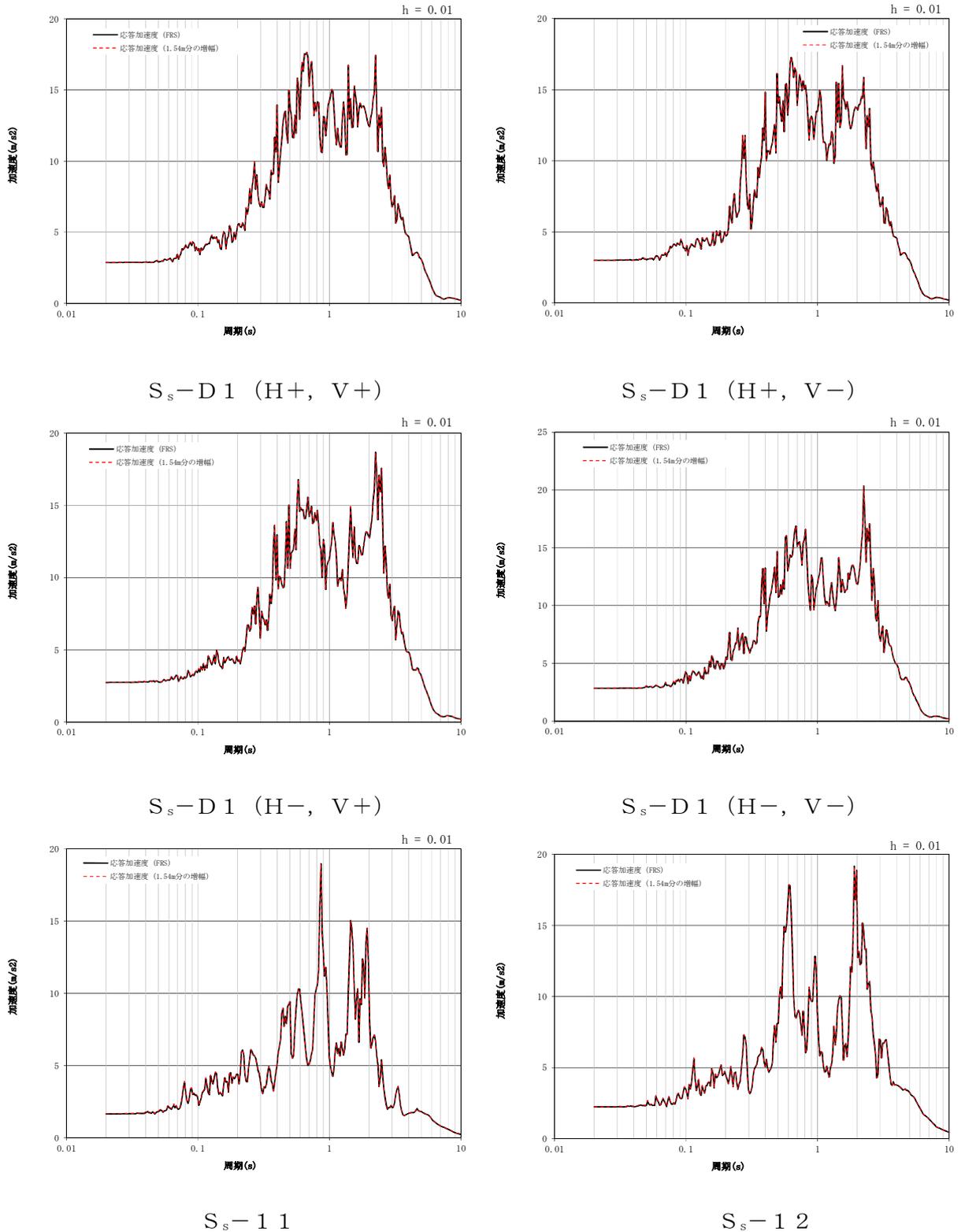
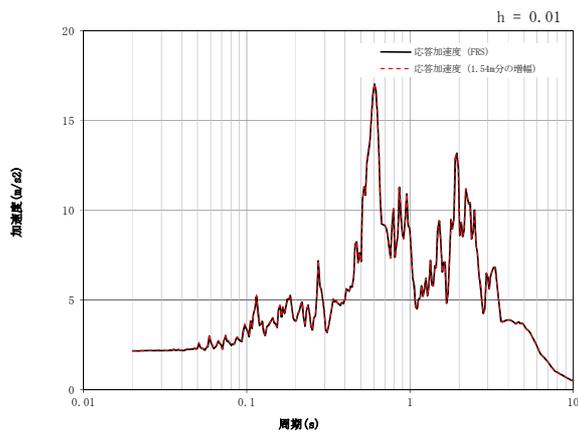
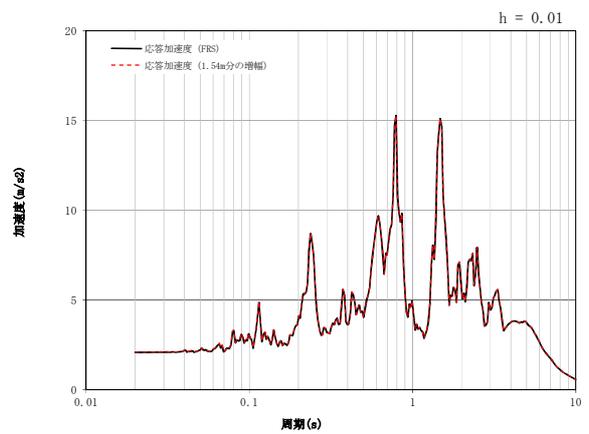


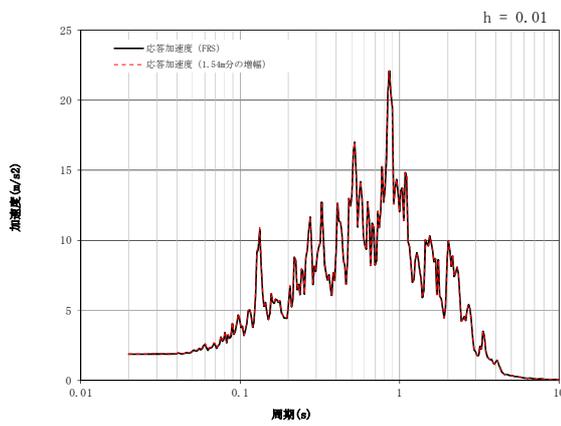
図3(1) 加速度応答スペクトルの比較結果 (対象部材①) (1/2)



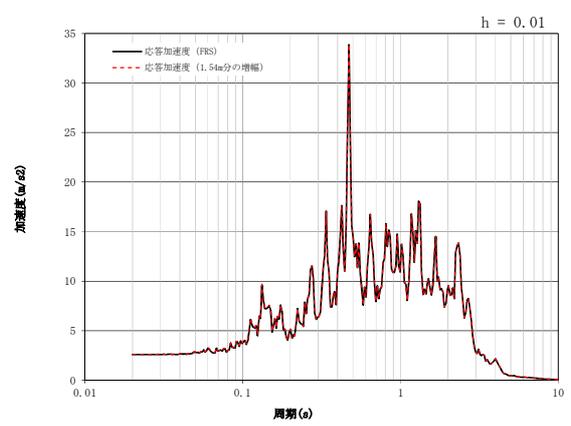
S<sub>s</sub>-13



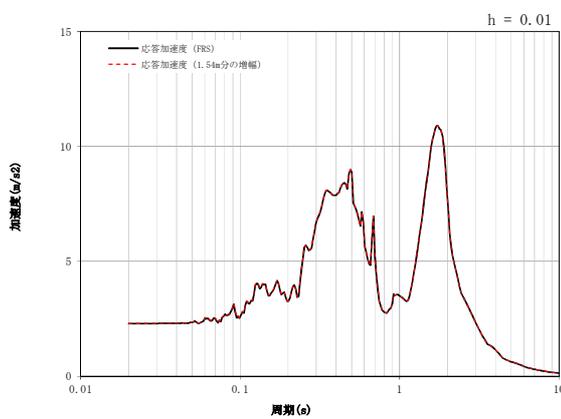
S<sub>s</sub>-14



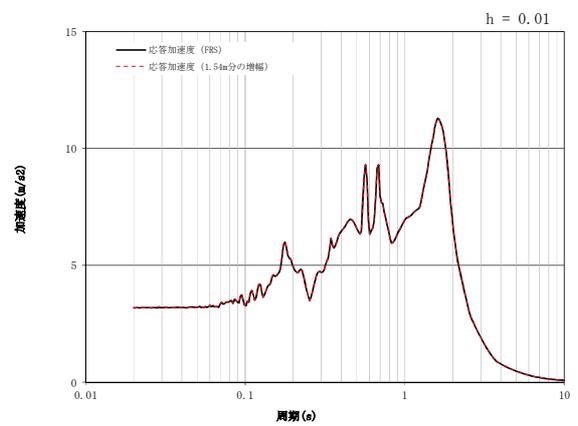
S<sub>s</sub>-21



S<sub>s</sub>-22

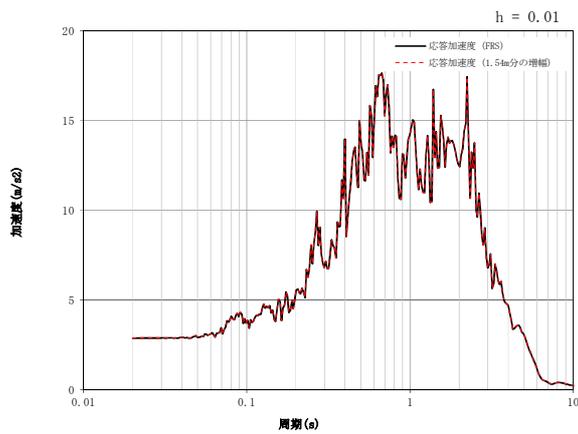


S<sub>s</sub>-31 (H+, V+)

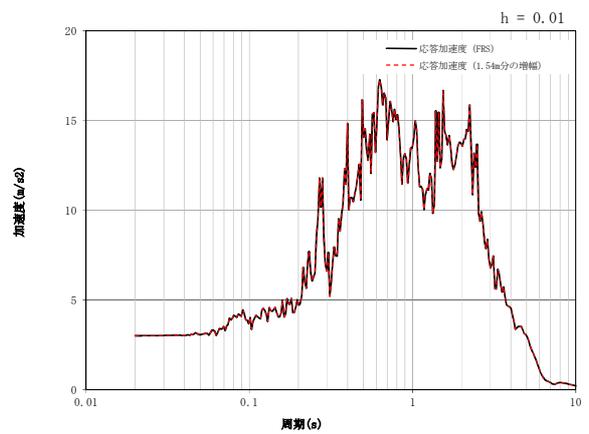


S<sub>s</sub>-31 (H-, V+)

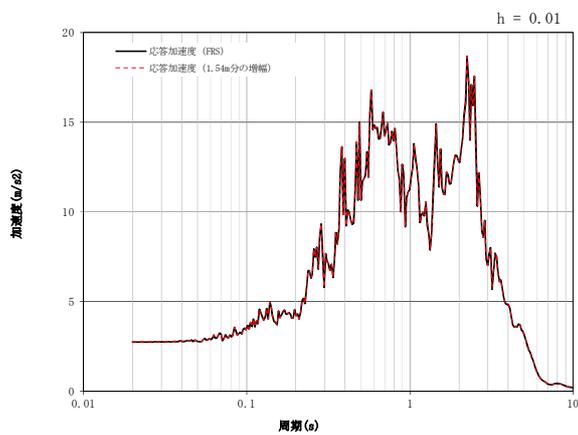
図3(2) 加速度応答スペクトルの比較結果 (対象部材①) (2/2)



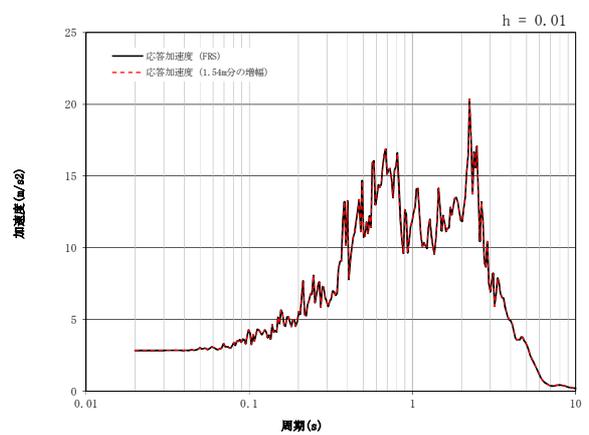
$S_s-D 1 (H+, V+)$



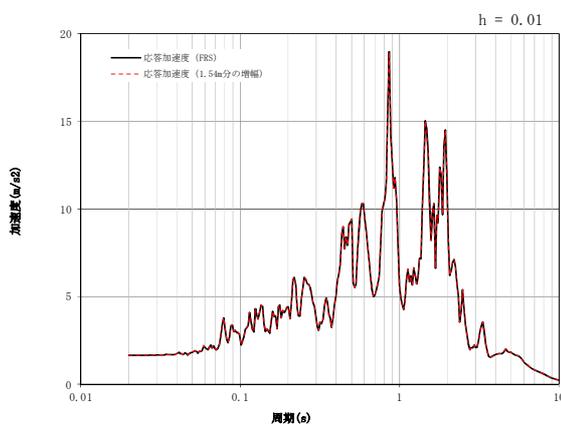
$S_s-D 1 (H+, V-)$



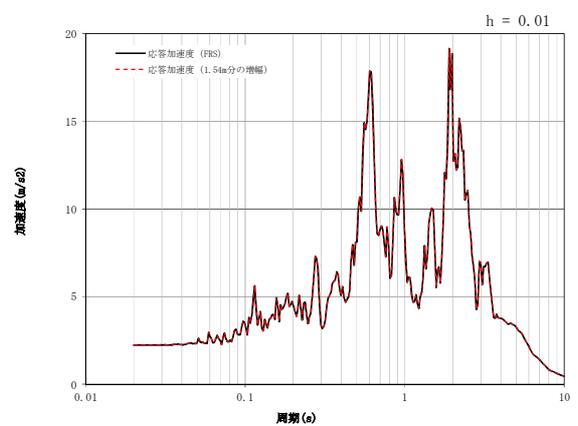
$S_s-D 1 (H-, V+)$



$S_s-D 1 (H-, V-)$

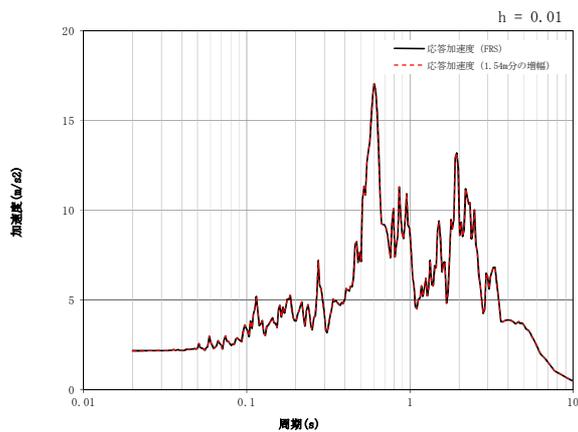


$S_s-1 1$

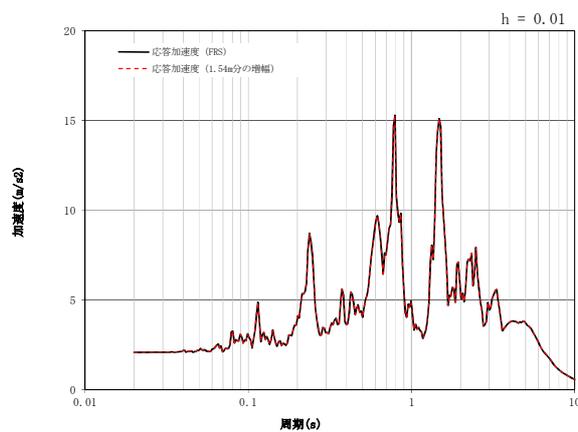


$S_s-1 2$

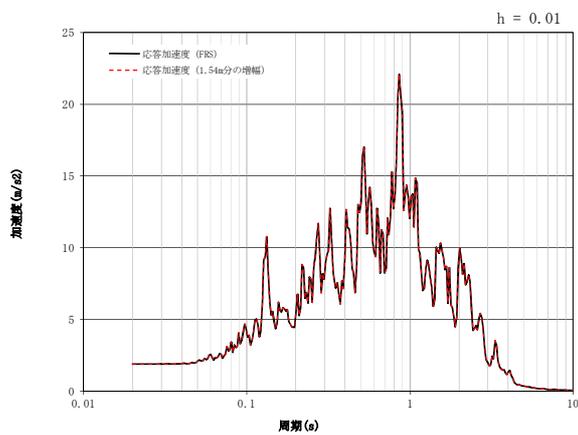
図 3(3) 加速度応答スペクトルの比較結果 (対象部材②) (1/2)



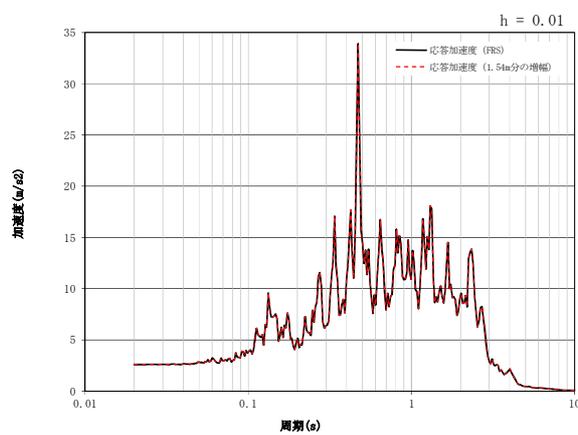
S<sub>s</sub>-13



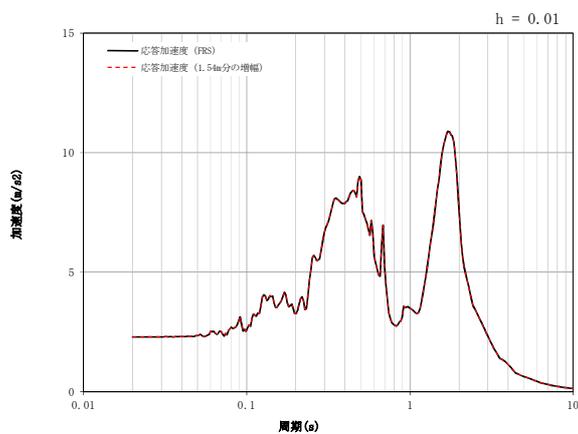
S<sub>s</sub>-14



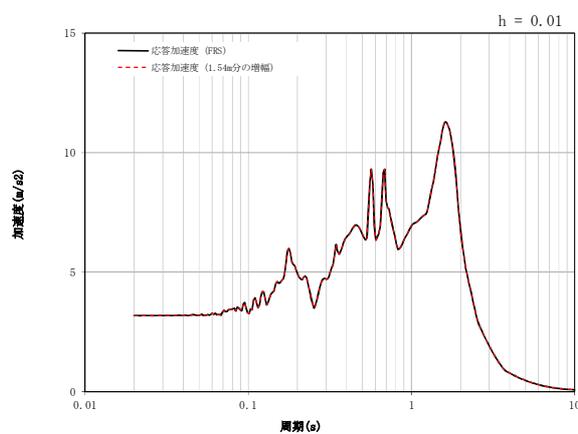
S<sub>s</sub>-21



S<sub>s</sub>-22

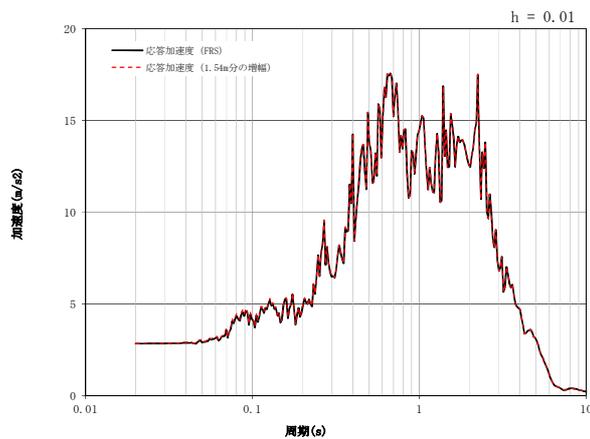


S<sub>s</sub>-31 (H+, V+)

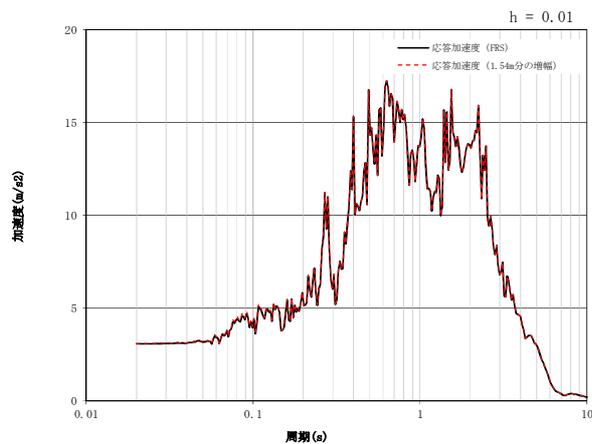


S<sub>s</sub>-31 (H-, V+)

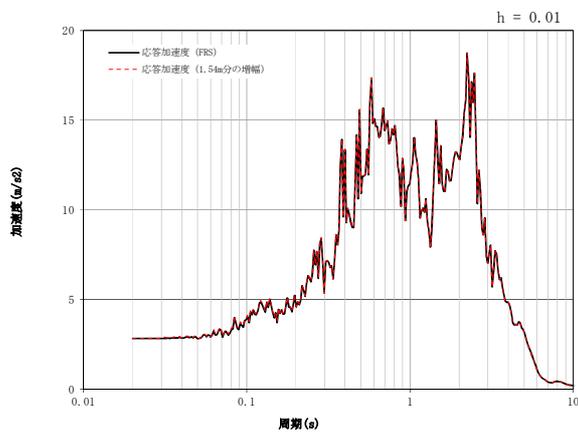
図3(4) 加速度応答スペクトルの比較結果 (対象部材②) (2/2)



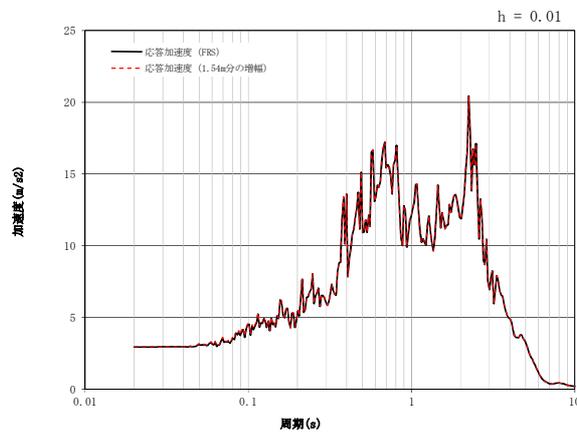
$S_s-D 1 (H+, V+)$



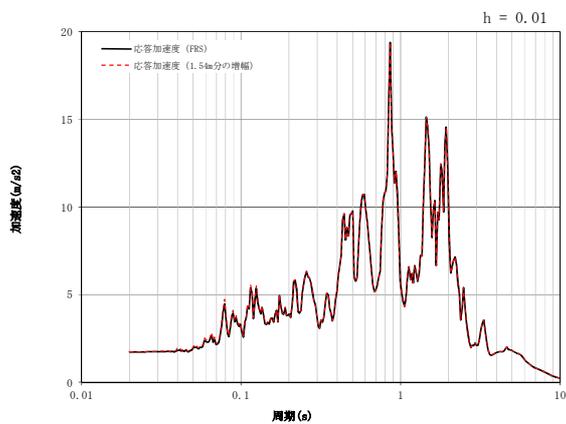
$S_s-D 1 (H+, V-)$



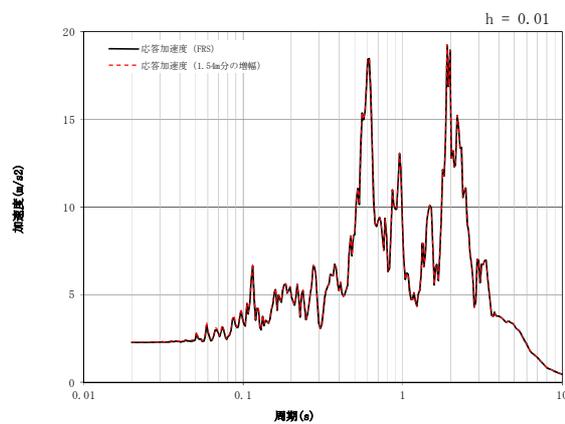
$S_s-D 1 (H-, V+)$



$S_s-D 1 (H-, V-)$

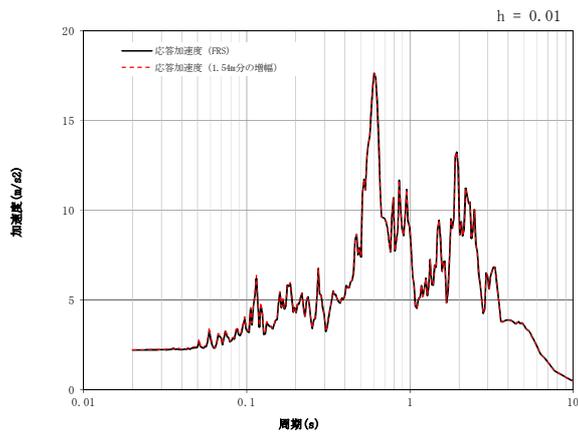


$S_s-1 1$

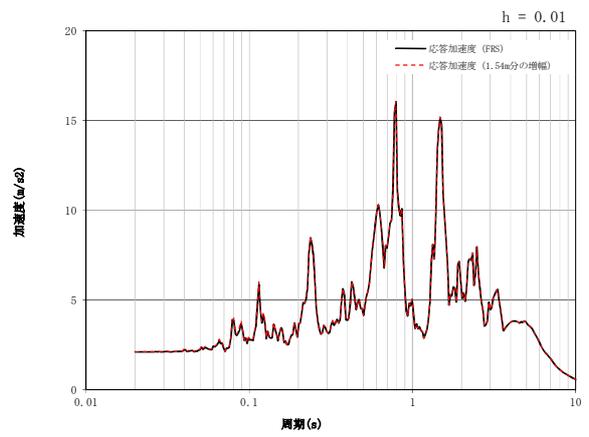


$S_s-1 2$

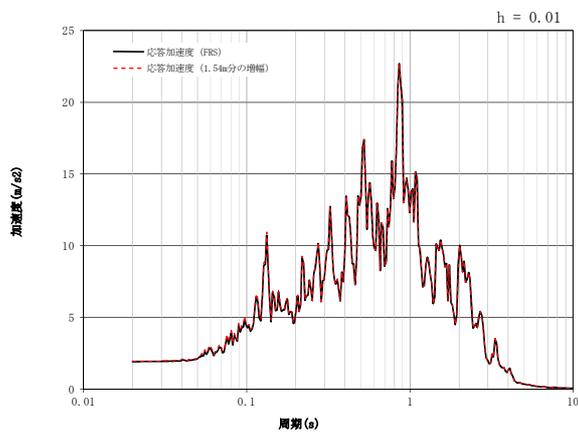
図 3(5) 加速度応答スペクトルの比較結果 (対象部材③) (1/2)



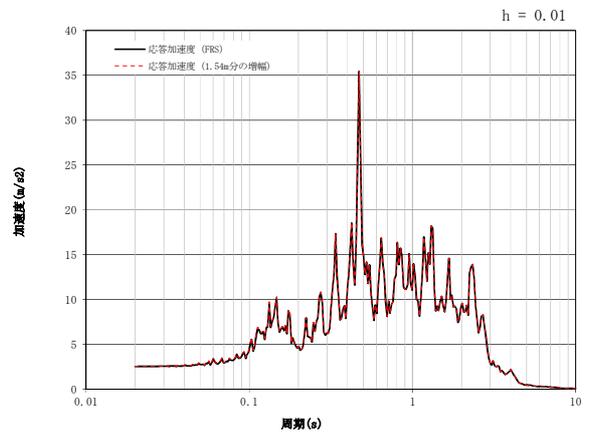
S<sub>s</sub>-13



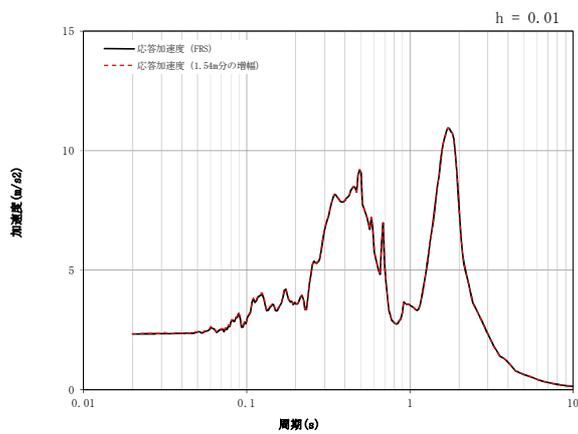
S<sub>s</sub>-14



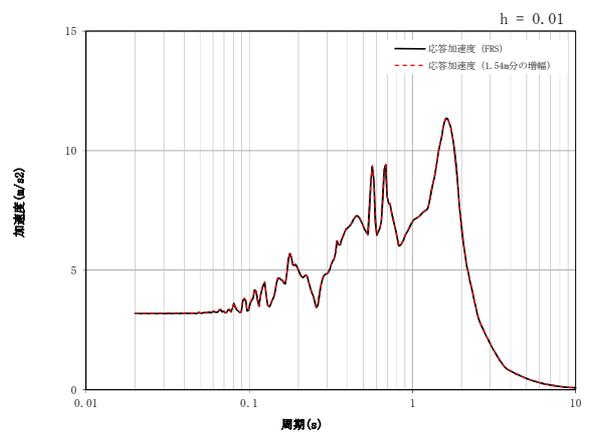
S<sub>s</sub>-21



S<sub>s</sub>-22



S<sub>s</sub>-31 (H+, V+)



S<sub>s</sub>-31 (H-, V+)

図3(6) 加速度応答スペクトルの比較結果 (対象部材③) (2/2)

## 【部材③における非常用海水配管荷重の載荷方法についての追加検討】

### 1. はじめに

竜巻等防護施設を間接支持する取水構造物躯体のうち評価対象部材③は、部材側面にて非常用海水配管等を間接支持している。竜巻等防護施設からの地震時反力を考慮した耐震評価を実施する際には、この非常用海水配管の重量を付加質量として考慮することで、その自重と慣性力を耐震評価に反映している。

非常用海水配管を付加質量として考慮する際には、その全重量を全配管長で除した単位長さ当たりの線荷重として考慮することを基本としているが、実際の配管サポートは点により壁面に支持されていることから、ある区間においては、平均化された線荷重以上の荷重を支持することとなる。

本項では、基本としている線荷重による耐震評価にて最も照査値が厳しい解析ケースを対象に、実際の支持条件を踏まえた荷重増分による耐震評価への影響について検討する。

### 2. 配管荷重のモデル化方法

取水構造物躯体の耐震評価においては、2次元FEM（片持ちはりモデル）を用いていることから、点荷重を単位奥行き分布荷重に変換する必要がある。ここでは、その考え方を記載する。

竜巻等防護施設エリア⑧のうち、基礎盤を含む竜巻等防護施設を単独で支持する部材（図1に示す。）を既設RC壁の評価対象としているが、そこに近接しており、かつ上部配管により部材下端に作用する曲げモーメントが最も大きくなる位置の配管荷重を考慮する。



図1 配管荷重の考え方

点荷重を単位奥行き分布荷重に変換する際の単位奥行き幅については、部材照査において最も厳しくなる部位が部材下端部であることを考慮し、点荷重が45度方向に分散すると過程した上で、部材下端部がその荷重を背負う幅にて設定する。

図1に上下の配管それぞれで設定した単位奥行き幅を示すが、ここではより保守的に単位奥行き幅を小さく設定するために、B2 (5.708m)を採用する。

以上のように設定した、配管荷重 (付加質量) を図2に示す。

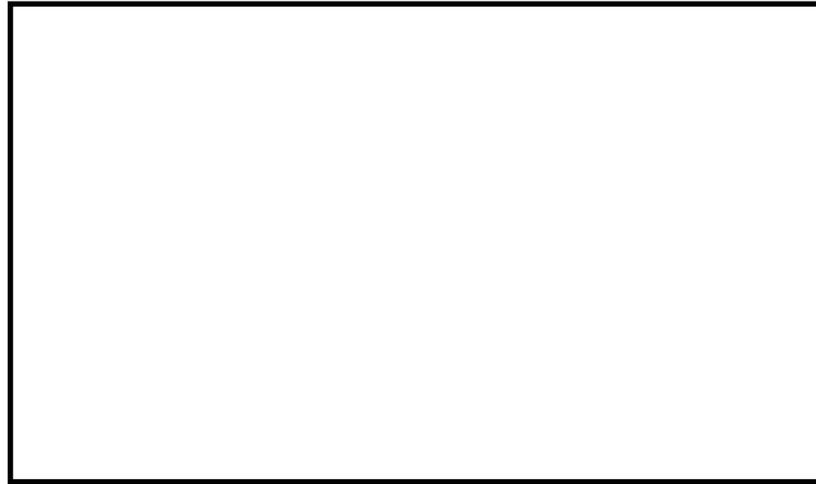


図2 実際の支持形式 (点支持) を考慮した単位奥行き当たりの配管荷重

### 3. 照査結果の比較

実際の支持形式 (点支持) を考慮して変更した荷重条件にて、曲げ及びせん断照査が最も厳しいケースについて再解析を実施した (表1)。その結果、照査値は若干増分したものの、ほぼ同等であり、許容限界に対しては十分余裕のある結果となった。

表1 (1) 躯体の曲げ軸力に対する照査結果 (配管荷重変更)

地震応答解析により得られる荷重		部材	竜巻等防護設備の 応答解析により 得られる地震時反力	断面性状			鉄筋仕様		軸方向 ひずみ $\epsilon_a$ [-]	曲率 $\phi d$ [1/m]	限界曲率 $\phi L \cdot [D/\phi] \phi L$	照査値
検討ケース および地震動	応答抽出 の考え方			部材幅 b (mm)	部材高 h (mm)	有効高 d (mm)	上端	下端				
⑤ $S_s - 31$ (H-, V+)	最大加速度 発生時刻	③	(H→V↓)	1000	1200	1125	D19	D19	$-1.66 \times 10^{-5}$	$-1.62 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-2}$	0.098
			(H→V↑)						$-3.73 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-2}$	0.088
		③ *荷重変更	(H→V↓)	1000	1200	1125	D19	D19	$-1.74 \times 10^{-6}$	$-1.97 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-2}$	0.119
			(H→V↑)						$-4.08 \times 10^{-6}$	$1.81 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-2}$	0.110

表1 (2) 躯体のせん断力に対する照査結果 (配管荷重変更)

地震応答解析により得られる荷重		部材	竜巻等防護設備の 応答解析により 得られる地震時反力	断面性状			照査用 せん断力 Vd [kN]	せん断耐力 Vyd [kN]	照査値 $\gamma_i \cdot Vd/Vyd$
検討ケース および地震動	応答抽出 の考え方			部材幅 b (mm)	部材高 h (mm)	有効高 d (mm)			
⑤ $S_s - 31$ (H-, V+)	最大加速度 発生時刻	③	(H→V↓)	1000	1200	1125	131	273	0.480
			(H→V↑)				-131	248	0.529
		③ *荷重変更	(H→V↓)	1000	1200	1125	138	273	0.506
			(H→V↑)				-139	248	0.561