

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-015 改 12
提出年月日	2023 年 4 月 3 日

工事計画に係る補足説明資料

(発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書)

2023 年 4 月

中国電力株式会社

補足説明資料目次

今回提出範囲：

1. 防護すべき設備
 - 1.1 機能喪失高さ
 - 1.2 防護すべき設備のうち溢水評価対象外とする設備
2. 想定破損による溢水評価
 - 2.1 想定破損による溢水評価における溢水源
 - 2.2 高エネルギー及び低エネルギー配管の分類
 - 2.3 高エネルギー配管及び低エネルギー配管の応力評価
 - 2.4 想定破損における減肉の考慮
3. 消火水の放水による溢水評価
 - 3.1 消火水の放水による溢水評価の概要
4. 地震起因による溢水評価
 - 4.1 地震起因による溢水評価における溢水源
 - 4.2 溢水防護に関する施設等の耐震評価対象設備・部位の代表性及び網羅性
 - 4.3 燃料プール等のスロッシングによる溢水量の算出
5. 溢水評価（没水、被水及び蒸気影響評価）
 - 5.1 溢水伝播経路概念図
 - 5.2 溢水伝播経路モデル図
 - 5.3 想定破損による溢水に対する没水影響評価
 - 5.4 想定破損による溢水に対する被水影響評価
 - 5.5 想定破損による溢水に対する溢水評価結果（溢水防護対象設備）
 - 5.6 想定破損による溢水に対する溢水評価結果（重大事故等対処設備）
 - 5.7 消火水の放水による溢水に対する溢水評価結果（溢水防護対象設備）
 - 5.8 消火水の放水による溢水に対する溢水評価結果（重大事故等対処設備）
 - 5.9 地震起因による溢水に対する溢水評価結果（溢水防護対象設備）
 - 5.10 地震起因による溢水に対する溢水評価結果（重大事故等対処設備）
6. その他の溢水評価
 - 6.1 タービン建物からの溢水に対する評価
 - 6.2 屋外タンク等からの溢水評価
 - 6.3 地下水による溢水影響
 - 6.4 放射性物質を含む液体の管理区域外漏えい防止評価
7. 全般
 - 7.1 溢水防護区画毎における機能喪失高さ
 - 7.2 ケーブルの被水影響評価
 - 7.3 没水影響評価における水上高さ及び滞留面積
 - 7.4 貫通部止水処置に関する健全性

- 7.5 地下水位低下設備
- 7.6 その他漏えい事象に対する確認
- 7.7 排水を期待する流下開口
- 7.8 鉄筋コンクリート壁の水密性
- 7.9 経年劣化事象と保全内容
- 7.10 エキспанションジョイント止水板の性能
- 7.11 水密扉の開閉運用
- 7.12 循環水系隔離システムの内、復水器水室出入口弁への地震時復水器の影響

別紙（1）工認添付資料と設置許可まとめ資料との関係

別紙（2）添付VI-1-1-9 の各資料と工認補足説明資料との関係

参考資料 2 補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトールラス水受入タンク遮蔽壁における
PHb 工法の適用性の検討

1. はじめに

島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトールラス水受入タンク遮蔽壁に対する PHb 工法の適用性については、NS2-補-026-01「屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」における参考資料 12「後施工せん断補強筋の適用性について」にて確認している。

ここでは、補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトールラス水受入タンク遮蔽壁の部材厚が 300mm と小さいことに加え、PHb が設置計画位置よりも高止まりしている箇所があることから、「構造細目（PHb の配置間隔）」及び「定着長」について、建設技術審査証明報告書の適用範囲内であることを確認する。また、高止まりを考慮した場合においても、せん断ひび割れを抑制し、せん断補強効果を期待できることについて確認する。PHb の構造概要を図 1-1 に示す。

また、補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトールラス水受入タンク遮蔽壁の配置図を図 1-2 に、PHb による耐震補強の概要を図 1-3 及び図 1-4 に示す。また、PHb の配置間隔と高止まりについて表 1-1 及び表 1-2 に整理する。

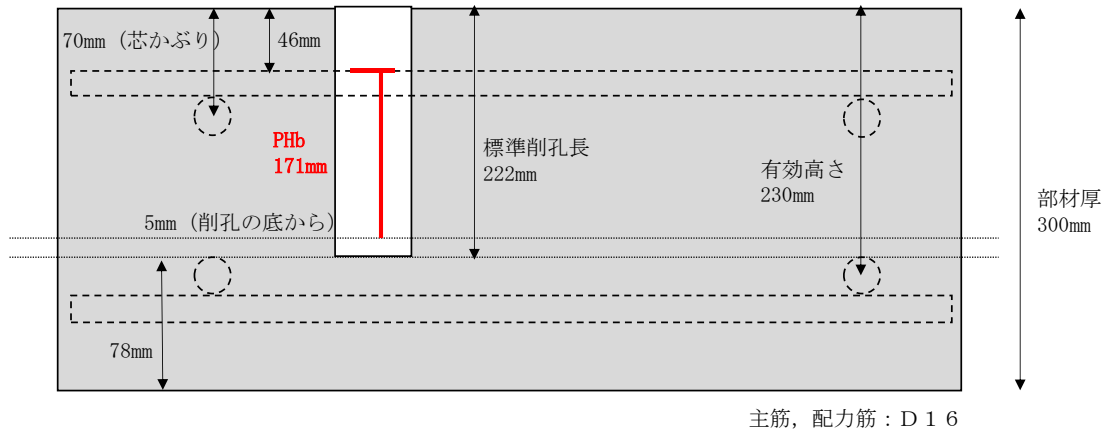


図 1-1 PHb の構造概要

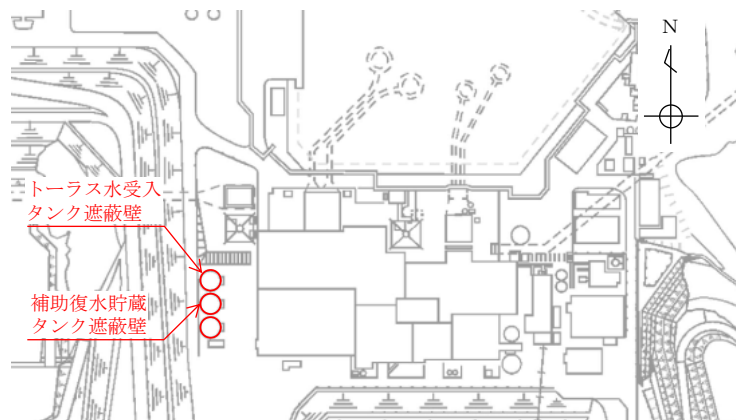
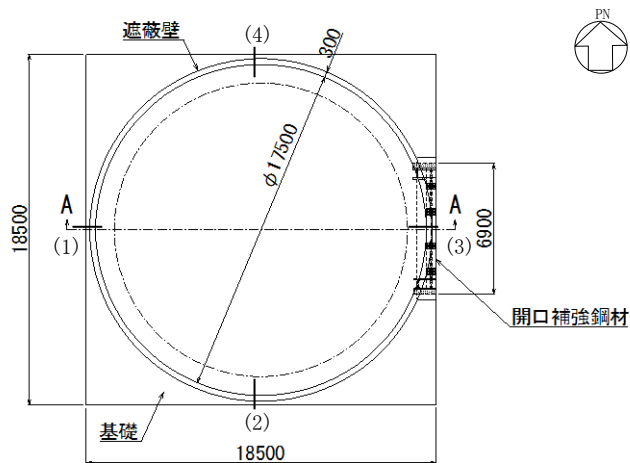
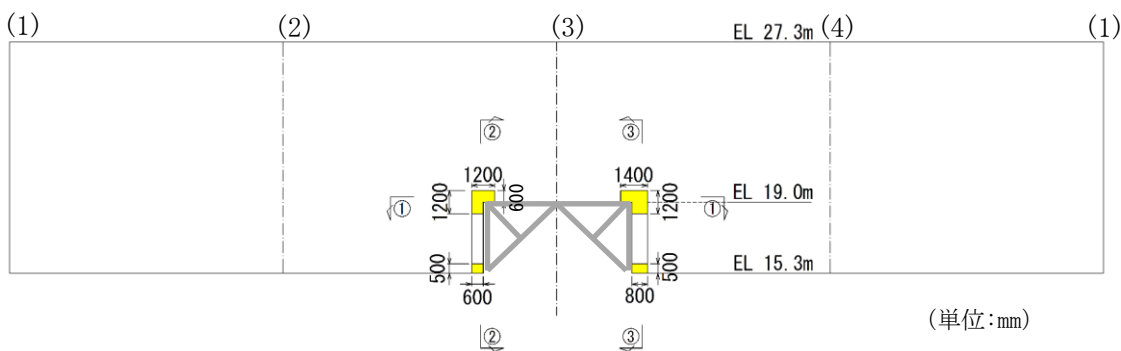


図 1-2 配置図（補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトールラス水受入タンク遮蔽壁）



(単位:mm)

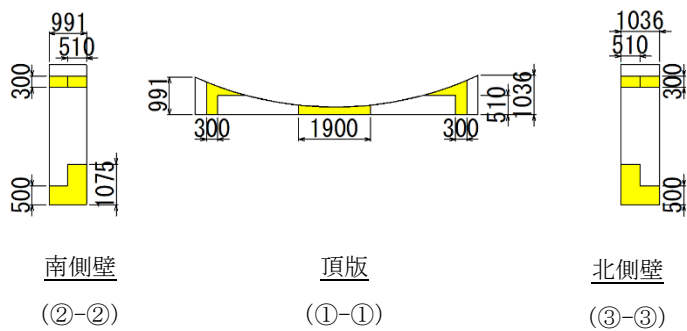
(平面図)



(単位:mm)

■ : PHb による補強箇所

(展開図)



(単位:mm)

■ : PHb による補強箇所

図 1-3 補助復水貯蔵タンク遮蔽壁 PHb による耐震補強箇所

表 1-1 PHb の配置間隔と高止まりの整理 (補助復水貯蔵タンク遮蔽壁)

鉄筋径	D13	D19	D22
最大配置間隔	115mm	115mm	115mm
高止まり高さ	15mm~48mm	0mm~7mm	0mm
最小 PHb 長	123mm	164mm	171mm

(参考) 2-2

2. せん断補強効果の確認

2.1 PHb の配置間隔

PHb の配置間隔については、建設技術審査証明報告書に構造細目として「Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は、補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下かつ 300mm 以下とする。」と記載されている。補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトラス水受入タンク遮蔽壁における PHb の最大配置間隔は 115mm であり、図 1-1 に示す有効高さ 230mm の 1/2 以下であることから、建設技術審査証明報告書の適用範囲に合致することを確認している。

また、配置間隔に関して、「コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2017 年制定)」では、「スターラップがせん断補強筋として有効な働きをするためには、腹部コンクリートに発生する斜めひび割れと必ず交わるように、スターラップの間隔を定めて配置する必要がある。」と記載されている。表 1-1 及び表 1-2 に示すとおり、高止まりを考慮した場合でも最小 PHb 長は 123mm であり、最大配置間隔の 115mm を上回っていることから、45 度方向の斜めひび割れを想定した場合に、PHb がせん断補強筋として有効に働くことを確認している。

2.2 PHb の定着長

PHb の定着長については、建設技術審査証明報告書に図 2-1 のとおり記載されている。

表 II-4.2 各鉄筋の円形プレート側の必要定着長 (D: 鉄筋の直径)

種類の記号 鉄筋の呼び名	SD295	SD390
	SD345	
D13	3.5D	4.0D
D16	5.0D	5.5D
D19		
D22		
D25	5.5D	
D29		
D32		

図 2-1 PHb の必要定着長 (建設技術審査証明報告書より抜粋)

補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトラス水受入タンク遮蔽壁の施工実績を踏まえた PHb の定着長に関する整理結果を表 2-1 に示す。なお、鉄筋種別は SD345 である。表 2-1 に示すとおり、高止まりを考慮しても、必要定着長を確保していることを確認している。

表 2-1 高止まりを考慮した定着長の整理結果

鉄筋径	D13	D19
公称直径 (mm)	12.7	19.1
必要定着長 (mm)	44.5	95.5
最小 PHb 長 (mm)	123	164

2.3 高止まりの影響

補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトラス水受入タンク遮蔽壁は施工実績で PHb が設置計画位置よりも最大 48mm の高止まりが生じている。このため、高止まりしていても、せん断ひび割れを抑制し、せん断補強効果を期待できることを材料非線形解析を用いた数値実験により確認する。

材料非線形解析の手法は、NS2-補-026-01「屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」における参考資料 12「後施工せん断補強筋の適用性について」と同様に以下の手法とする。

- ・ 鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ・ 鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ・ 鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

材料非線形解析に用いる解析コードは、上記の鉄筋コンクリートの構成則を有する解析コードの 1 つである「WCOMD Studio ver. 1.3.3」とする。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

2.3.1 検討方針

NS2-補-026-01「屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」における参考資料 12「後施工せん断補強筋の適用性について」においてモデル化手法の妥当性を確認した材料非線形解析を用いて、高止まりを考慮した場合の PHb 工法の適用性を確認する。

適用性の確認は、高止まりの有無によりひび割れ状況に差が生じるかを確認すると共に、高止まりを考慮した解析から得られる有効係数 β_{aw} と、設計計算値における β_{aw} を比較することにより確認する。

2.3.2 モデル化方法

NS2-補-026-01「屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」における参考資料 12「後施工せん断補強筋の適用性について」において妥当性を確認したモデル化方法を用いて、高止まりを考慮した場合の PHb 工法の適用性を確認する。

構造部材は、平面応力要素にてモデル化する。モデル化は、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル」を参考に、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋領域としてモデル化する。

PHb のモデル化は、PHb 先端の領域では定着が十分ではない可能性があるため、せん断補強筋が機能しない（無効区間）ものとして、せん断補強鉄筋比をゼロとしてモデル化する。加えて、施工実績を踏まえ、高止まりした区間についてもせん断補強筋が機能しない（無効区間）ものとしてモデル化する。

高止まりを考慮した無効区間は、施工実績における最大高止まり 48mm を踏まえ、保守的に図 2-2 のとおりとした。

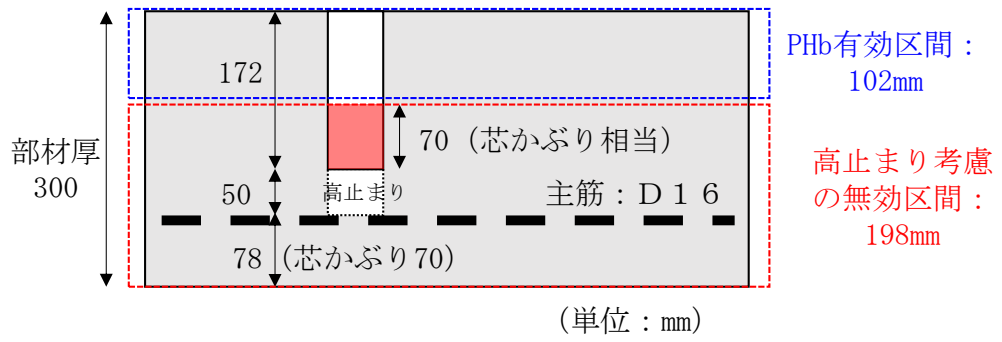


図 2-2 PHb のモデル化概念図

また、解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を、表 2-2 及び表 2-3 に示す。これらの条件により設定した解析モデル図を図 2-3 に示す。

表 2-2 コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 f'_c	32N/mm ²
引張強度 f_t	2.32N/mm ² (小数 2 位に四捨五入) ($=0.23 \times 32.0^{2/3} = 2.3182$)
ヤング係数 E_c	WC OMD で自動計算

表 2-3 鉄筋の材料特性

項目	設定値	設定根拠
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm ²	土木学会マニュアルに準拠し設定
主鉄筋の降伏強度	999N/mm ²	土木学会マニュアルに準拠し、せん断耐力を得るために主筋の降伏強度を十分大きな値に設定
PHb 鉄筋の降伏強度	384N/mm ²	建設技術審査証明報告書より設定

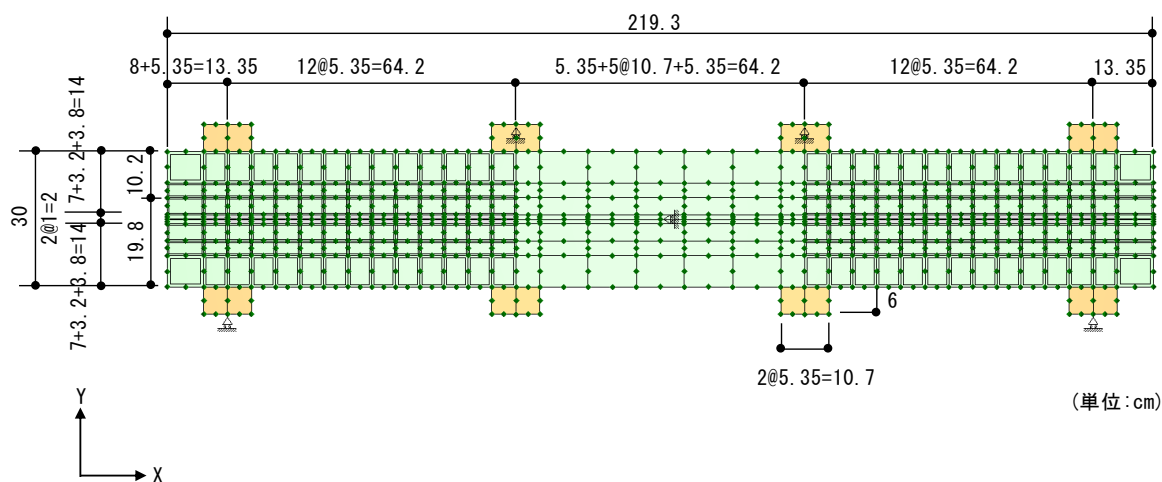


図 2-3 解析モデル図

2.3.3 荷重条件

材料非線形解析にて考慮する荷重は、建設技術審査証明報告書の実験における荷重条件を模して、変位を作用位置に強制的に与える。また、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、十分小さい値を漸増荷重する。耐力の評価を主目的とするため、単調荷重とするが、実験条件である交番荷重の影響についても参考として確認することとする。

2.3.4 破壊判定基準

材料非線形解析における構造部材の破壊判定基準は、既往の研究事例に基づき圧縮ひずみ1%、せん断ひずみ2%、引張ひずみ3%（以下「1, 2, 3%破壊基準」という。）とする。

2.3.5 検討ケース

検討ケースは、表2-4に示すとおり2ケースとする。

表2-4 検討ケース一覧

ケース	荷重載荷方法
CASE 1 PHb工法（高止まり考慮）	単調載荷
CASE 2 PHb工法（高止まり考慮）	交番載荷【参考】

2.3.6 確認結果

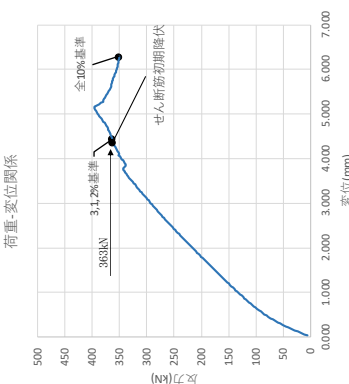
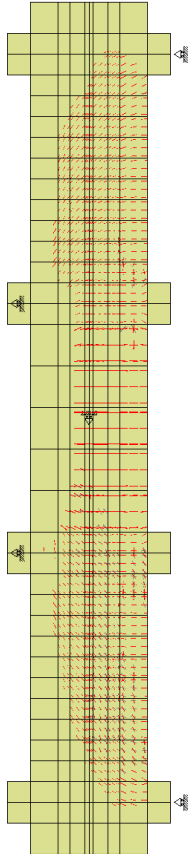
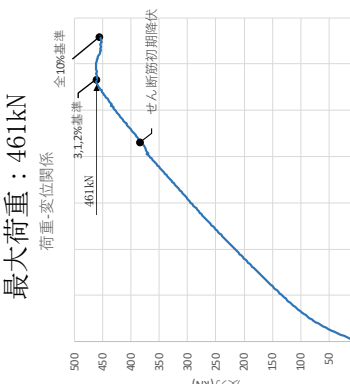
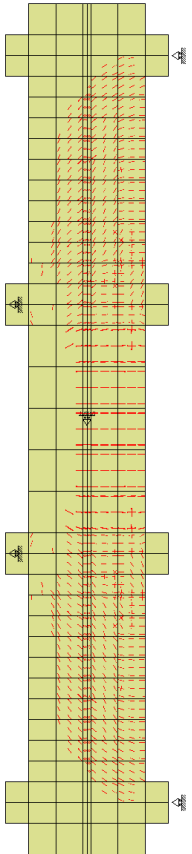
解析結果を表2-5に示す。表2-5には比較のために、NS2-補-026-01「屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」における参考資料12「後施工せん断補強筋の適用性について」で検討した部材厚300mmに従来工法を適用したケース②-Aの結果を再掲する。また、参考として交番載荷を行ったCASE2の解析結果を表2-6に示す。

表2-5及び表2-6に示すとおり、全体的にひび割れが分散しており、特異な状況は確認されなかった。

参考に、CASE1について、各損傷状況における変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況を表2-7に示す。また、比較のために部材厚300mmに従来工法を適用したケース②-Aの結果を表2-8に再掲する。

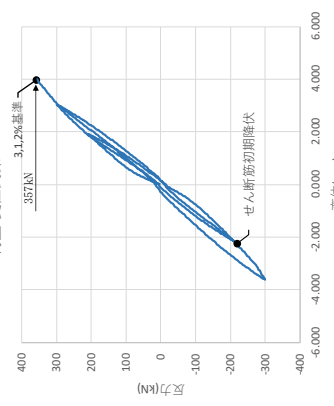
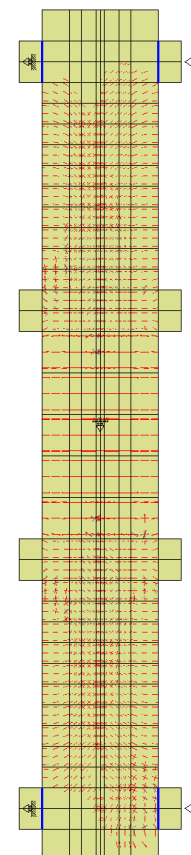
表2-7及び表2-8に示すとおり、各損傷状況において、従来工法と比較してPHbによるせん断補強効果に影響を与えるような顕著な差は確認されなかった。

表2-5 各ケースの荷重-変位関係とひび割れ状況

解析ケース	荷重-変位関係	ひび割れ状況*
<p>CASE 1 PHb 工法 (高止まり考慮) (単調載荷)</p>	<p>1, 2, 3%破壊基準までの 最大荷重：363kN</p> 	
<p>【再掲】 ②-A 従来工法 (単調載荷)</p>	<p>1, 2, 3%破壊基準までの 最大荷重：461kN</p> 	

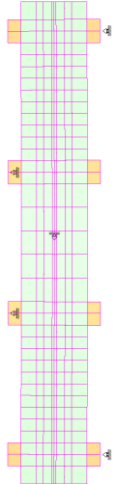
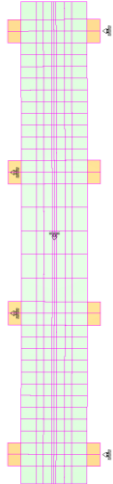

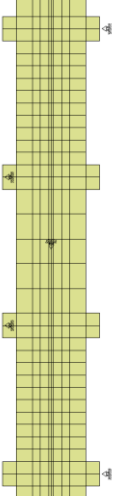
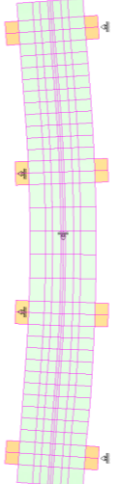
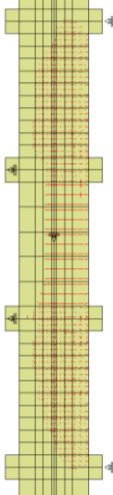
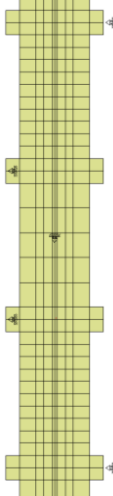

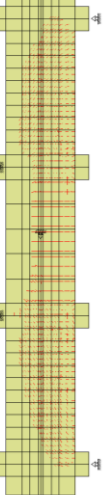
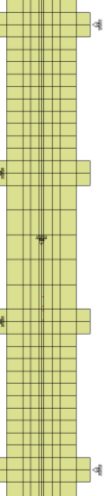
注記*：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

表2-6 各ケースの荷重-変位関係とひび割れ状況

解析ケース	荷重-変位関係	ひび割れ状況*
<p>【参考】 CASE 2 PHb 工法 (高止まり考慮) (交番載荷)</p>	<p>1, 2, 3 %破壊基準までの 最大荷重 : 357kN 荷重-変位関係</p>  <p>The graph shows a hysteresis loop with load (kN) on the y-axis (ranging from -400 to 400) and displacement (mm) on the x-axis (ranging from -6,000 to 6,000). The peak load is 357 kN, which is 3.42% of the design strength. A point on the unloading curve is labeled 'せん断筋初期降伏状' (Initial yielding of shear reinforcement).</p>	 <p>The diagram shows a vertical column with four support points. Red arrows indicate the location and direction of cracks. Cracks are visible at the top and bottom ends of the column, as well as near the support points.</p>

注記* : 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

表2-7 CASE 1 (PHb工法・高止まり考慮) の解析結果

初期 損傷 状況 ひび割れ発生時の	変形状況 (変形倍率10倍)	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
			
初期降伏時の損傷状況			
終局荷重時の損傷状況			

注記*: 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れ発生ひずみに選したことを示す。

解析結果から算出した有効係数 β_{aw}' と設計計算値における有効係数 β_{aw} の比較を表 2-9 に示す。なお、 β_{aw}' の算出にあたっては、PHb が負担するせん断力を解析結果のせん断耐力 $V_{cd}+V_{phb}$ と、計算値であるコンクリートのせん断耐力 V_{cd} の差で算出しており、この方法は建設技術審査証明報告書における算出方法と同様である。

β_{aw}' を算出する際のコンクリートのせん断耐力は、NS2-補-026-01「屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」における参考資料 12「後施工せん断補強筋の適用性について」の検討において、 β_{aw}' が保守的な値となった「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（以下「RC規準」という。）を用いて算出した。

表 2-9 から、部材厚を 300mm とし、高止まりを考慮した場合、解析から得られる有効割合 β_{aw}' は設計計算値における有効係数 β_{aw} とおおむね同等であり、構造評価において β_{aw} を使用することで保守的な評価が可能であることを確認した。

表2-9 解析結果から算出した有効係数 β_{aw}' と設計計算値における有効係数 β_{aw} の比較

ケース			PHb工法（高止まり考慮）・ 単調載荷（CASE 1）
解析結果	コンクリート+ せん断補強筋の せん断耐力（kN）	$V_{cd}+V_{phb}$	363
計算値 （RC規準）	コンクリートの せん断耐力（kN）	V_{cd}	297
解析結果	PHbが負担する せん断力（kN）	V_{phb}	66
計算値 （棒部材式）	従来工法とした場合に せん断補強筋が負担する せん断耐力（kN）	V_{sd}	137
解析結果	有効係数 β_{aw}' （解析）	V_{phb}/V_{sd}	0.48
計算値	有効係数 β_{aw}^* （計算値）		0.44

注記*： $\beta_{aw} = 1 - I_y / \{2 \cdot (d - d')\}$ ただし、 $\beta_{aw} \leq 0.9$

ここで、 I_y ：PHb の埋込側に必要な定着長

$d-d'$ ：補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔（ $d-d' \geq I_y$ ）

（ β_{aw} の算出式は建設技術審査証明報告書に準拠）

3. まとめ

島根2号機においてPHbにより耐震補強を行った補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトールス水受入タンク遮蔽壁の部材厚が建設技術審査証明報告書に記載の実験で用いられた部材厚よりも薄いこと及びPHbの高止まりを考慮した場合にも、PHb工法によるせん断ひび割れ抑制効果が期待できることを材料非線形解析を用いた数値実験により確認した。