

島根原子力発電所2号炉 地震による損傷の防止 (コメント回答)

[後施工せん断補強筋による耐震補強]

令和元年11月
中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません

Energia

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく論点			
9	H31.4.9	[論点Ⅱ-26：後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用] ・ポストヘッドバー工法によるせん断補強効果について，先行炉実績との類似点，相違点を整理し，説明すること。	2～38

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

■ 指摘事項

【No.9（論点Ⅱ-26）：後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用

○ポストヘッドバー工法によるせん断補強効果について、先行炉実績との類似点、相違点を整理し、説明すること。

■ 回答

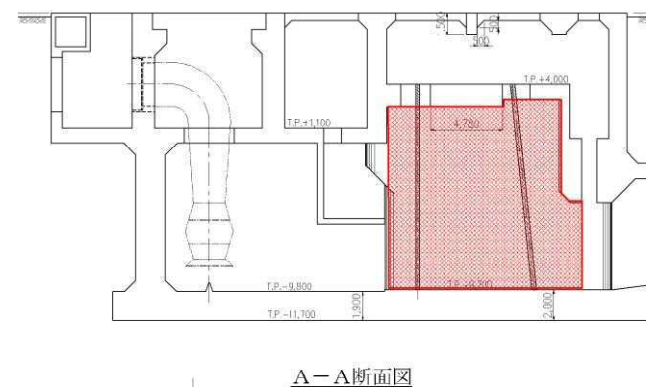
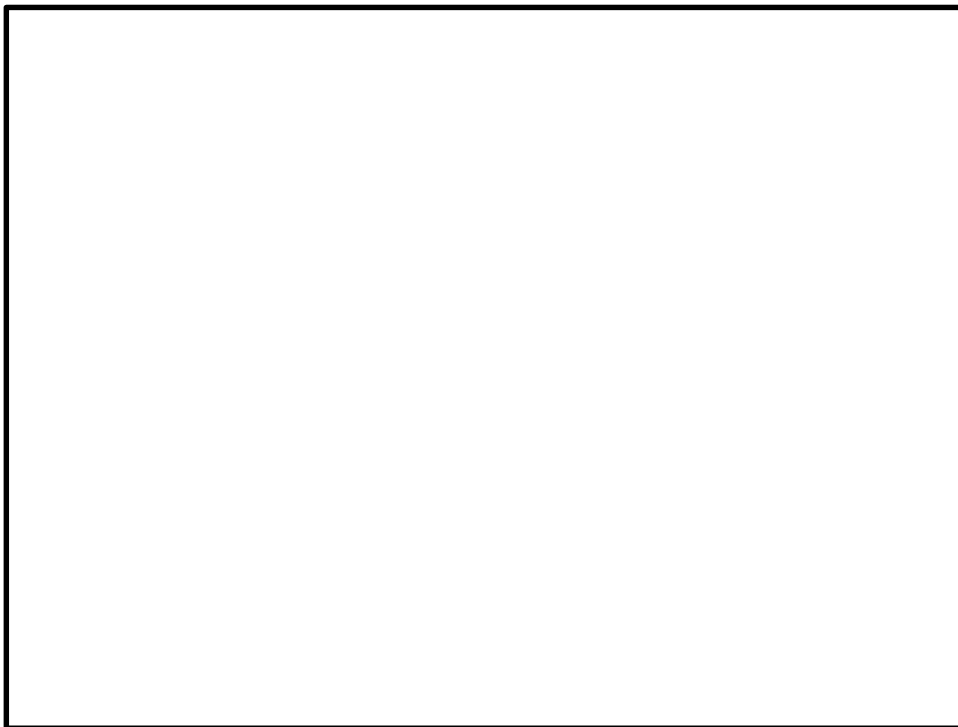
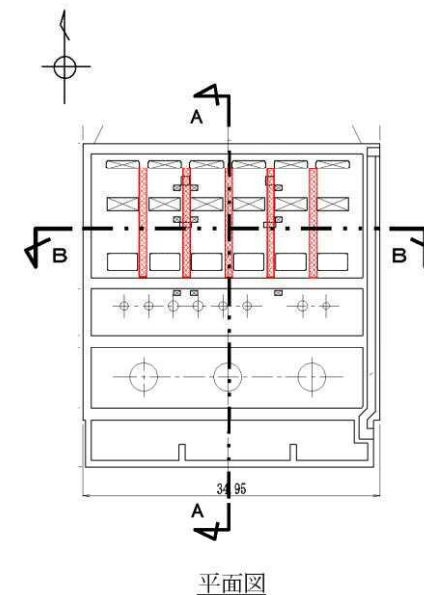
・ポストヘッドバー工法によるせん断補強効果について、先行サイト（美浜3号炉及び東海第二）と島根2号炉との類似点、相違点を整理し、その適用性について確認した。（P.3～38）

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（1）

1 はじめに

- 島根2号炉の取水槽（スクリーン室）隔壁においては、地震時荷重によるせん断破壊に対する裕度向上対策として、後施工せん断補強工法の一つである、ポストヘッドバー工法（以下、PHb工法とする）を採用している。
- 後施工せん断補強工法は、島根2号炉の既工認で採用実績がなく、美浜3号炉及び東海第二の新規制基準における工認で実績があることから、先行サイトとの類似点及び相違点について整理を行う。
- 本補強工法が開発された際の実験と島根2号炉で用いる部材厚等に差異があることから、本資料では、PHb工法の島根2号炉への適用性及び効果について説明する。



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません

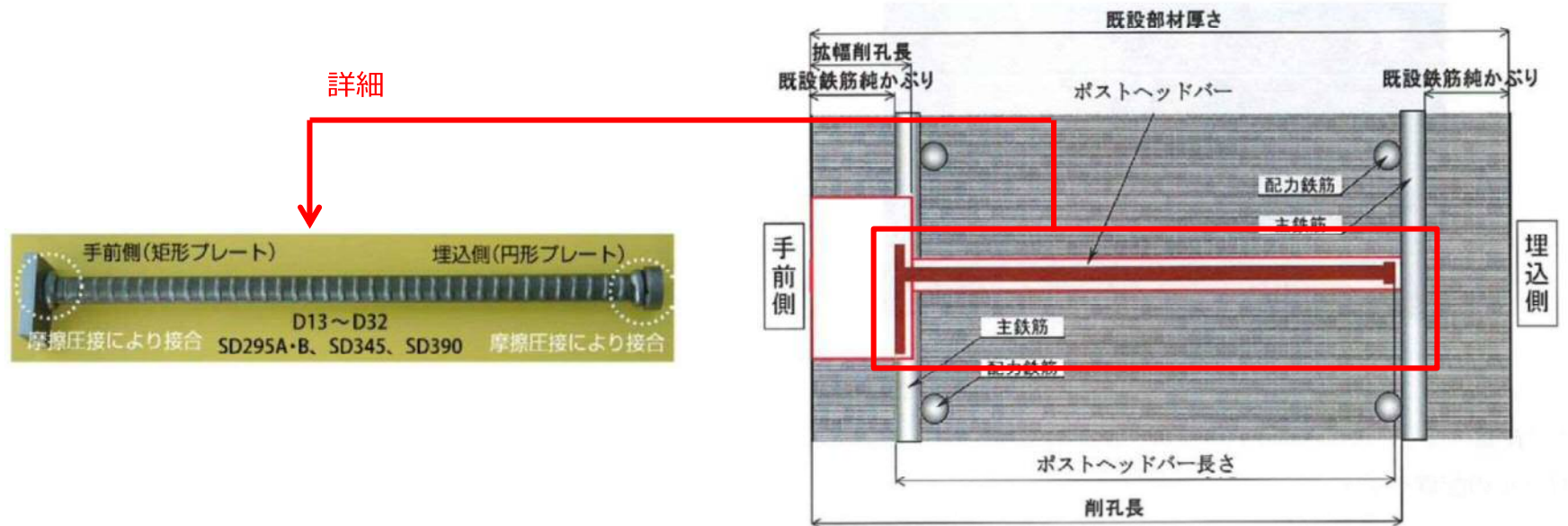
審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（2）

2 PHb工法の概要

島根2号炉において適用した、後施工による耐震補強技術の一つであるPHb工法の概要を以下に示す。

- ・PHb工法は様々な実験によりせん断補強効果を確認しており、国土交通大臣認可の公益社団法人である一般財団法人土木研究センターにより建設技術審査証明を受け、せん断補強工法としての有用性が確認されている。
- ・審査証明において、PHb工法が受け持つせん断耐力は、鉄筋の材質、径毎に定め、その値は、先施工によるせん断補強鉄筋のせん断耐力の最大0.9倍で評価可能としている。
- ・PHb工法は、既存構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にプレート定着型せん断補強鉄筋を差込み、充てん材で固定することにより、構造躯体と一体化をはかり、部材のせん断耐力を向上させる。



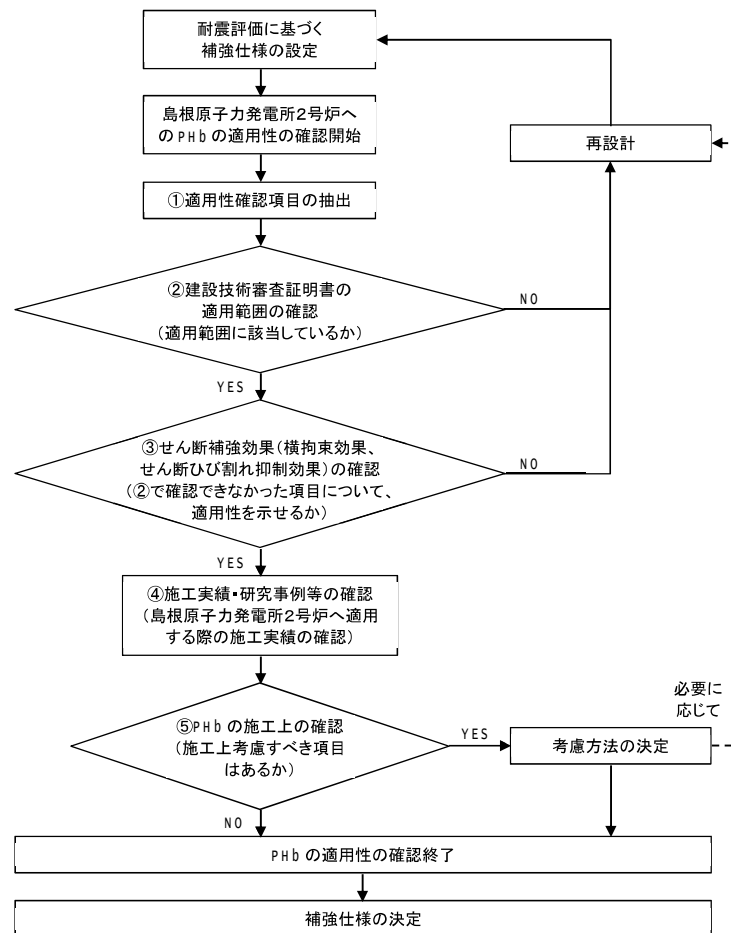
PHb詳細

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（3）

3 PHbの適用性確認

- PHb工法を島根2号炉の取水槽に適用するにあたり、以下に示すとおり、建設技術審査証明報告書の適用範囲やせん断補強効果等についての確認を行い、島根2号炉の構造形式・諸元、地盤条件、使用環境、補強内容等が適用範囲に該当することを確認する。
- 適用性の確認は、先行サイトとの類似点及び相違点を整理した上で行う。



PHbの適用性確認フロー

PHbの適用性確認項目と内容

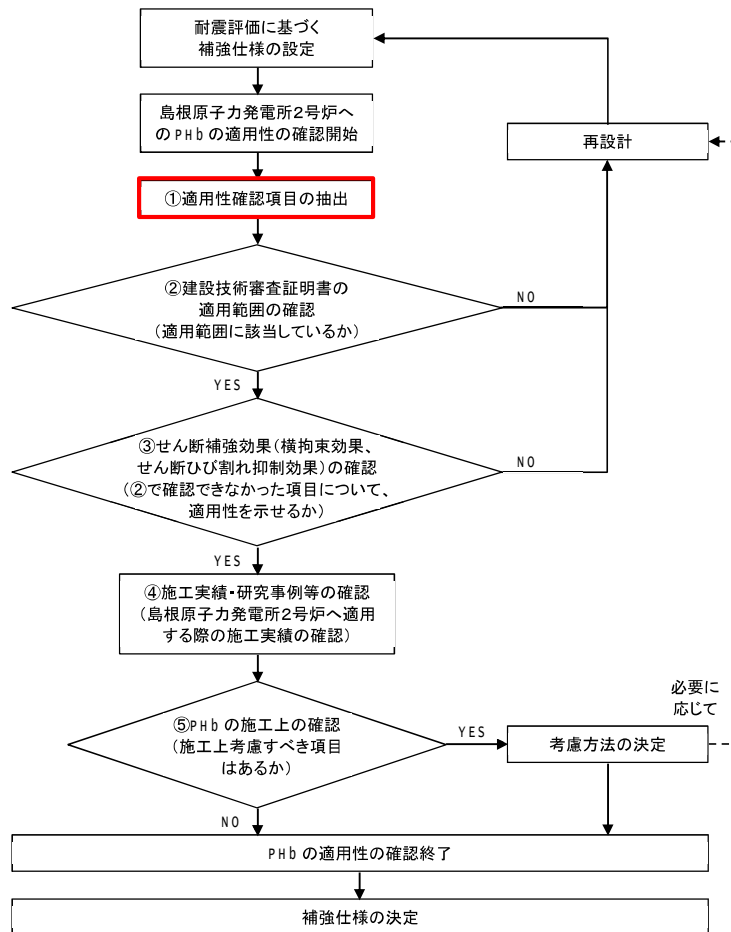
項目	内容
① 適用性確認項目の抽出	・後施工によるせん断補強において、せん断補強効果に影響を与えと考えられる項目を抽出する。その際、建設技術審査証明報告書に記載されている審査証明の範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出する。
② 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認	・島根原子力発電所2号炉の構造物に採用する補強仕様がPHb工法の建設技術審査証明報告書において規定されている適用範囲に収まっているかの確認をする。収まっていない場合は適用範囲内に収まる補強仕様になるように再設計を実施する。
③ せん断補強効果の確認	・①で挙げた適用性確認項目のうち②で確認できていない項目について、適用性の確認を実施する。適用性確認の際は、せん断補強効果が期待できるかという点について検討を実施する。
④ 施工実績・研究事例等の確認	・後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について、目的、試験体諸元等を整理し、島根原子力発電所2号炉への適用において考慮・反映すべき事項を検討する。
⑤ PHbの施工上の確認	・島根原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物に対してPHb工法の施工をする際に、考慮しておくべき事項がないか確認を行う。ある場合は施工上または設計上どのように考慮するかを決定した上で考慮方法によっては再設計を実施するか適宜判断を行う。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（4）

3. 1 フロー①適用性確認項目の抽出

- PHb工法の特徴及び島根2号炉固有の条件等の観点から、適用性を確認するために必要な検討項目を抽出する。
- 抽出した14項目を示す。



PHbの適用性確認フロー

抽出項目と確認内容

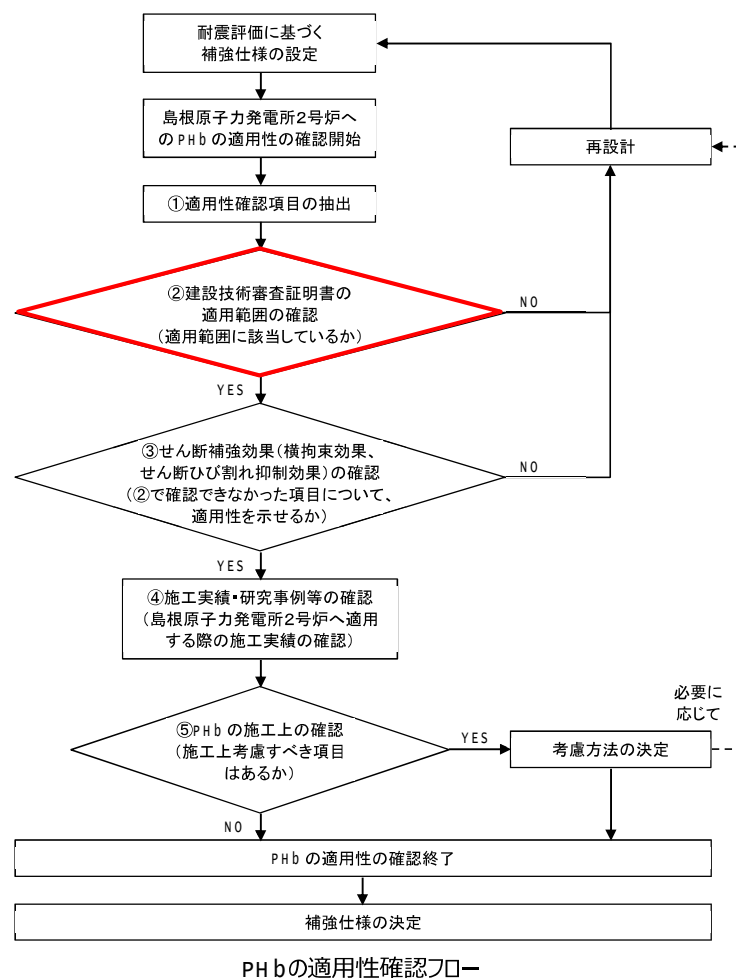
抽出項目	確認内容
a. 使用目的	・適用の前提として、審査証明の範囲として明記されている目的に該当しているか。
b. 構造形式	・適用の前提として、審査証明において想定している構造形式に該当しているか。
c. 構造細目	・想定外の破壊形式をとらない様に審査証明において規定している構造細目に該当しているか。
d. 部材諸元	・部材厚については、審査証明において適用が確認された部材あるいは実績のある部材厚であるか。 ・せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度については、応力伝達の観点から審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
e. 使用材料（せん断補強鉄筋）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
f. 使用材料（プレート）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
g. 使用材料（充てん材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
h. 使用材料（断面修復材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
i. 載荷方法	・応力伝達の観点から、審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
j. せん断補強筋の定着長	・審査証明において設定している定着長を考慮して設計しているか。
k. せん断ひび割れ抑制効果	・材料非線形解析を実施して、特異なひび割れが発生していないか。
l. 応力状態（損傷程度）	・PHbの両端の定着プレートが有効に機能する必要があることから、構造物が概ね弾性範囲内であるか。
m. 変形量（横拘束効果の確認）	・審査証明における適用性確認実験の変形量を超えないか。
n. 使用環境	・島根2号炉では海水環境下にて使用していることから、海水環境下相当での実績があるか。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（5）

3.2 フロー②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

- PHb工法の適用について、建設技術審査証明報告書に記載の、右表に示す項目について確認した結果を示す。



抽出項目と確認内容

抽出項目	確認内容
a. 使用目的	・適用の前提として、審査証明の範囲として明記されている目的に該当しているか。
b. 構造形式	・適用の前提として、審査証明において想定している構造形式に該当しているか。
c. 構造細目	・想定外の破壊形式をとらない様に審査証明において規定している構造細目に該当しているか。
d. 部材諸元	・部材厚については、審査証明において適用が確認された部材あるいは実績のある部材厚であるか。 ・せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度については、応力伝達の観点から審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
e. 使用材料（せん断補強鉄筋）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
f. 使用材料（プレート）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
g. 使用材料（充てん材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
h. 使用材料（断面修復材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
i. 載荷方法	・応力伝達の観点から、審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
j. せん断補強筋の定着長	・審査証明において設定している定着長を考慮して設計しているか。
k. せん断ひび割れ抑制効果の確認	・材料非線形解析を実施して、特異なひび割れが発生していないか。
l. 応力状態（損傷程度）	・PHbの両端の定着プレートが有効に機能する必要があることから、構造物が概ね弾性範囲内であるか。
m. 変形量（横拘束効果の確認）	・審査証明における適用性確認実験の変形量を超えないか。
n. 使用環境	・鳥根2号炉では海水環境下にて使用していることから、海水環境下相当での実績があるか。

3. 2 フロー②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 a.使用目的

- 使用目的は、先行サイト（美浜3号炉及び東海第二）と同様、以下に示すとおり、審査証明の範囲として明記されている目的に該当していることを確認した。

PHbの適用範囲及び適用条件（使用目的）



建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
	地中構造物であり、片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
	地中構造物に適用し、せん断補強の目的で用いる。（変形性能（じん性）の向上を目的として用いているわけではないため、左記に示す変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の上限值の規定については不問である。）

3. 2 フロー②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 c.構造細目

- 構造細目は、先行サイトと同様、以下に示すとおり、審査証明において規定している構造細目に該当していることを確認した。

PHbの適用範囲及び適用条件（構造細目）

確認項目	美浜3号炉 (PHb工法)	東海第二 (PHb工法)	島根2号炉 (PHb工法)	建設技術審査証明報告書 の適用範囲
構造細目① (せん断補強鉄筋の断面積比)	・0.21~0.94%	・0.43%	・0.51%	補強前に配置されていたスターラップとPost-Head-barを加えたせん断補強鉄筋の断面積比が0.15%以上。
構造細目② (PHb配置のせん断スパン方向の最大間隔)	・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倍以下で、かつ300mm以下。	・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倍以下で、かつ300mm以下。	・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倍以下で、かつ300mm以下。	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倍以下で、かつ300mm以下。
構造細目③ (埋込先端のかぶり)	・Post-Head-barの埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、100mm+主筋径の1/2とし、50mm以上を確保している。	・Post-Head-barの埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、75mm+主筋径の1/2とし、50mm以上を確保している。	・Post-Head-barの埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、130mm+主筋径の1/2とし、50mm以上を確保している。	Post-Head-barの埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、必要なかぶりを確保しつつ50mm以上とする。

他サイトの情報に係る記載内容については、会合資料やHP等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

3. 2 フロー②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

e~h.使用材料及びj.せん断補強筋の定着長

- 使用材料及びせん断補強筋の定着長は、先行サイトと同様、以下に示すとおり、審査証明に明記されている適用範囲に合致することを確認した。 PHbの適用範囲及び適用条件（使用材料及びせん断補強筋の定着長）



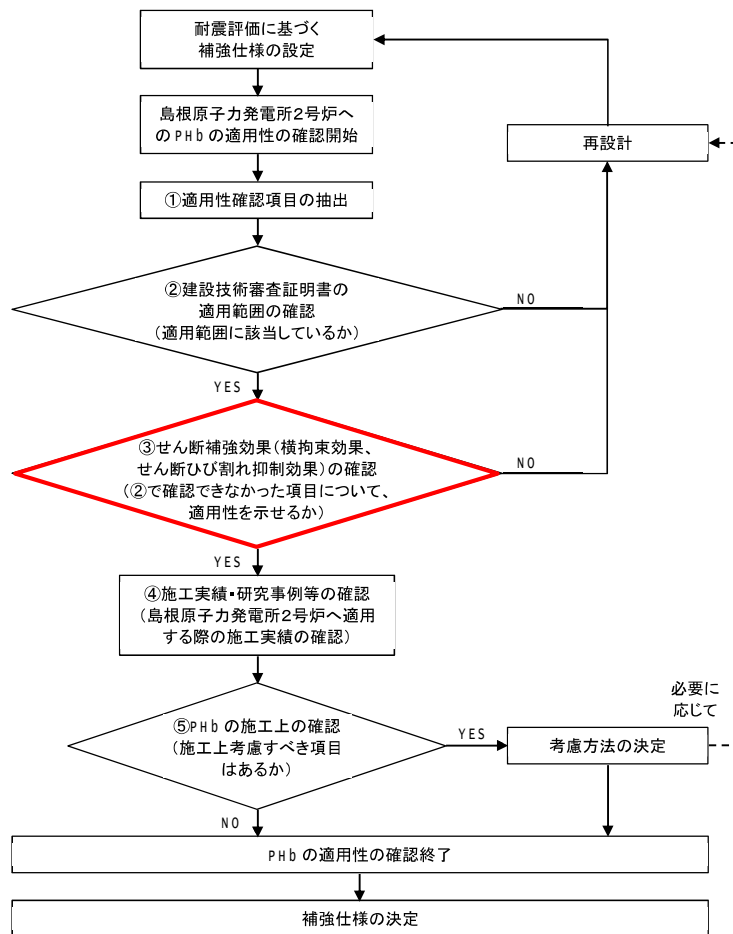
	建設技術審査証明報告書の材料範囲等	実使用材料
せん断補強筋		左記範囲内の材料を使用する。 (D19~D32 SD345)
プレート		材質は、SM490相当を用い、品質証明書でその品質を確認する。
充てん材		躯体コンクリート以上の強度
断面修復材		躯体コンクリート以上の強度
定着長		左記の定着長を考慮して設計を実施する。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（9）

3.3 フロー③せん断補強効果の確認

- フロー②にて確認できなかった項目について、せん断補強効果が期待できるかを確認する。



PHbの適用性確認フロー

抽出項目と確認内容

抽出項目	確認内容
a. 使用目的	・適用の前提として、審査証明の範囲として明記されている目的に該当しているか。
b. 構造形式	・適用の前提として、審査証明において想定している構造形式に該当しているか。
c. 構造細目	・想定外の破壊形式をとらない様に審査証明において規定している構造細目に該当しているか。
d. 部材諸元	・部材厚については、審査証明において適用が確認された部材あるいは実績のある部材厚であるか。 ・せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度については、応力伝達の観点から審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
e. 使用材料（せん断補強鉄筋）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
f. 使用材料（プレート）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
g. 使用材料（充てん材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
h. 使用材料（断面修復材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
i. 載荷方法	・応力伝達の観点から、審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
j. せん断補強筋の定着長	・審査証明において設定している定着長を考慮して設計しているか。
k. せん断ひび割れ抑制効果	・材料非線形解析を実施して、特異なひび割れが発生していないか。
l. 応力状態（損傷程度）	・PHbの両端の定着プレートが有効に機能する必要があることから、構造物が概ね弾性範囲内であるか。
m. 変形量（横拘束効果の確認）	・審査証明における適用性確認実験の変形量を超えないか。
n. 使用環境	・島根2号炉では海水環境下にて使用していることから、海水環境下相当での実績があるか。

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認 b.構造形式

- 構造形式について、建設技術審査証明報告書に構造形式の具体的な記載はないが、使用目的として、「地震時の変形量が限定される地中構造物など」という記載があることから、地中に埋設されたボックスカルバート構造の構造物を想定していると考えられる。
- 先行サイトにおいても同様の考察を行っており、島根2号炉取水槽は先行サイトと同様の構造形式であることから、島根2号炉取水槽はPHb工法が適用可能な構造形式であると考えられる。

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認

d.部材諸元, i.載荷方法, k.せん断ひび割れ抑制効果（1 / 2）

- 島根 2 号炉取水槽の部材諸元（部材厚，せん断スパン比，主鉄筋比及びコンクリート設計基準強度）について，先行サイト（美浜 3 号炉及び東海第二）と島根 2 号炉を整理した結果を以下に示す。
- 部材諸元及び載荷方法は，建設技術証明報告書に記載の各種実験と差異があるため，先行サイトと同様，せん断ひび割れ抑制効果の確認とともに，島根原子力発電所 2 号炉の実際の構造物の設計荷重等と同じ条件でも PHb 工法によるせん断補強効果が期待できるかの確認を解析により補足する。
- 解析の詳細については，20～34 頁で説明する。

美浜 3 号炉（PHb 工法），東海第二（PHb 工法）及び島根 2 号炉（PHb 工法）の差異（1/2）

確認項目	美浜 3 号炉 (PHb 工法)	東海第二 (PHb 工法)	島根 2 号炉 (PHb 工法)	建設技術審査証明報告書 の実験諸元との差異の有無 及び確認結果の概要
検討対象 構造物① (部材厚)	・2,000mm (海水ポンプ室底板)	・3,190mm (取水ピット中頂板) ・1,500mm (左・右側壁) ・1,200mm (取水ピット底板, 隔壁) ・1,000mm (上記以外の部材)	・1,200mm (取水槽スクリーン室隔壁)	有 建設技術審査証明報告書 の実験で用いられている部 材厚 (500mm, 800mm) より， 部材厚が大きいため， 解析により適用性を確認し ている。
検討対象 構造物② (せん断スパン比)	・1.92 (海水ポンプ室底板)	・2.15 (取水ピット中頂板)	・11.40 (取水槽スクリーン室隔壁)	有 建設技術審査証明報告書 の実験で用いられた部材の せん断スパン比 (1.19～ 2.79) より大きいため，解 析により適用性を確認してい る。

他サイトの情報に係る記載内容については，会合資料やHP等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（12）

3.3 フロー③せん断補強効果の確認

d.部材諸元, i.載荷方法, k.せん断ひび割れ抑制効果（2/2）

美浜3号炉（PHb工法）、東海第二（PHb工法）及び島根2号炉（PHb工法）の差異（2/2）

確認項目	美浜3号炉 (PHb工法)	東海第二 (PHb工法)	島根2号炉 (PHb工法)	建設技術審査証明報告書 の実験諸元との差異の有無 及び確認結果の概要
検討対象 構造物③ (主鉄筋比)	・0.47	・0.46	・0.85	有 他サイトと同様に、建設技術審査証明報告書の実証試験の値（1.48）と比べて十分に小さいため、PHbの定着性能に影響を与えるような付着割裂破壊は生じないと推察される。
検討対象 構造物④ (コンクリート強度)	・23.5N/mm ²	・20.6N/mm ²	・23.5N/mm ²	有 建設技術審査証明報告書の適用実験におけるコンクリート圧縮強度は32.0~38.3N/mm ² 程度である。

他サイトの情報に係る記載内容については、会合資料やHP等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認 1.応力状態（損傷程度）（1 / 4）

- PHbの構造の特徴として、両端の定着プレートが有効に機能する必要があることから、構造物が概ね弾性範囲内であることを確認する。
- 定着体部の状況については、先行サイトはM-φ曲線を用いて部材が弾性域に入っていることを示しているが、島根2号炉では構造部材にファイバー要素を用いているため、応力-ひずみ曲線から弾性域であることを確認する。詳細については、次頁に示す。

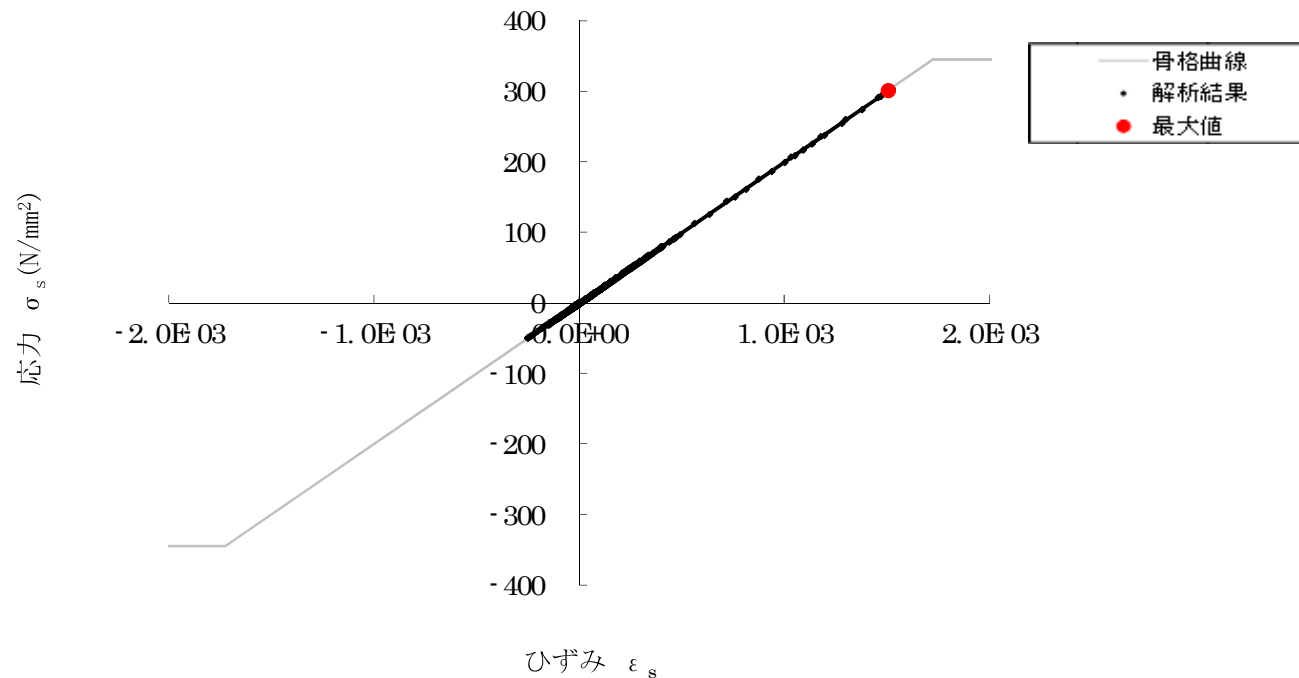
美浜3号炉（PHb工法）、東海第二（PHb工法）及び島根2号炉（PHb工法）の差異

確認項目	美浜3号炉 (PHb工法)	東海第二 (PHb工法)	島根2号炉 (PHb工法)	建設技術審査証明報告書 の実験諸元との差異の有無 及び確認結果の概要
定着体部の状況	PHbにより耐震補強を行っている海水ポンプ室及び海水管トレンチは、M-φ曲線の第1折点（ひび割れ発生）程度であり、かぶりコンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全である。	東海第二発電所 取水構造物の評価結果のうち曲げ軸力照査が最も厳しい部材及び時刻のM-φ曲線から、最大応答は、おおむねM-φ曲線の第2折点（鉄筋の降伏）程度であることから、コンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全である。	主鉄筋の引張応力-引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果より、健全であると判断している。詳細は次頁に示す。	有 建設技術審査証明報告書の実験ではひび割れは許容されている。

他サイトの情報に係る記載内容については、会合資料やHP等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認 1.応力状態（損傷程度）（2 / 4）

- 部材の応力状態について、鉄筋コンクリートが健全であることを主鉄筋の引張応力－引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果により確認する。
- 取水槽（スクリーン室）隔壁における評価結果のうち、PHb適用部材の照査値が最も厳しくなる基準地震動Ss-N1の損傷程度を以下に示す。
- 隔壁において、主鉄筋の引張応力度の最大値は鉄筋の降伏強度を下回ることから、コンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全であるといえる。



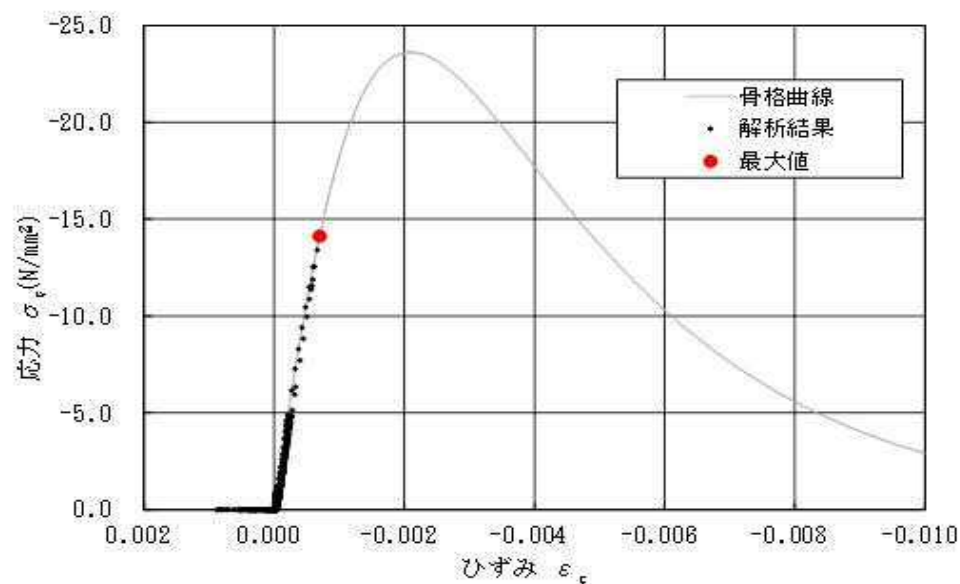
取水槽（スクリーン室）隔壁の損傷図
（主鉄筋の引張応力-引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果）

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（15）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認 1.応力状態（損傷程度）（3 / 4, 参考）

- 圧縮縁コンクリートひずみは1.0% を大きく下回る0.07% 程度であり、かぶりコンクリートに顕著なひび割れは発生していないことを確認した。



取水槽（スクリーン室）隔壁の損傷図
 （コンクリートの圧縮応力-圧縮ひずみ関係の骨格曲線と解析結果）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認 1.応力状態（損傷程度）（4 / 4）

- 「解析によるせん断補強効果の確認」（20～34頁）に示すとおり，隔壁の照査値が最も厳しくなるSs-N1を対象として材料非線形解析を実施した結果，弾性範囲内の挙動においても特異なひび割れや変形は発生していないことを確認した。

取水槽の照査結果一覧

基準地震動	隔壁の照査値※
Ss-D	0.37
Ss-N1	0.51
Ss-N2 (NS)	0.28
Ss-N2 (EW)	0.28
Ss-F1	0.26
Ss-F2	0.27

※照査値 = 照査用せん断力 / せん断耐力
 ここで，照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数

地震時荷重時の損傷状況

対象部材及び解析ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
取水槽 (スクリーン室) 隔壁 PHb考慮			

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認 m .変形量, n .使用環境

m .変形量

- PHbの適用範囲として「地震時の変形量が限定される地中構造物等」とされている。
- 変形に関しては、変形に伴う曲げひび割れの影響が考えられるが、変形量に関する定量的な影響検討は行われていないため、変形量に対しては、先行サイトと同様、適用確認実験の変形量を超えないことを確認する。
- 適用確認実験における層間変形角は0.4%程度以上であるが、取水槽においては最大でも層間変形角0.42%であり、適用確認実験の最小変形量程度であることを確認した。なお、適用実験における層間変形角は、実験において発生している変位量及びせん断スパン比から算出した。

n .使用環境

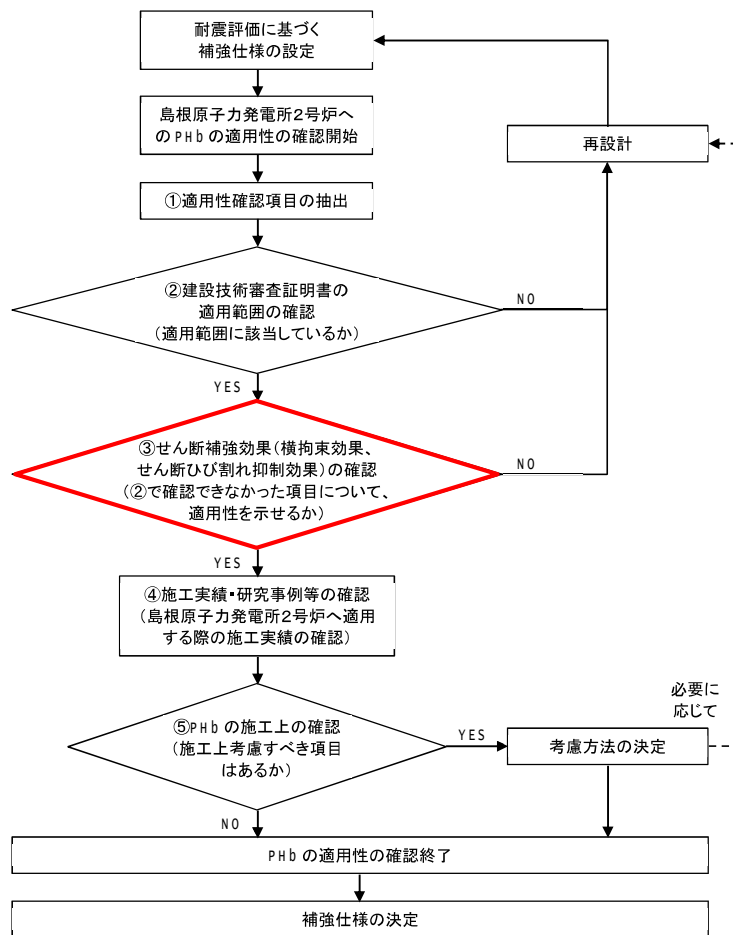
- 島根2号炉の屋外重要土木構造物におけるPHb工法による耐震補強では、先行サイトと同様、気中及び水中の部材に対してPHb工法を適用することから、海水環境下での実績があることを確認する。
- PHbそのものはすべて構造物内に埋設され、かぶり部分によって腐食に対する抵抗性が確保される。
- 気中及び水中で数多くの施工実績があることを、35頁のフロー④にて確認した。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（18）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

- フロー③にてPHbのせん断補強効果が確認できなかった項目及びせん断ひび割れ抑制効果について、PHbの補強効果が期待でき適用性を有することを、先行サイトと同様、解析により補足する。



PHbの適用性確認フロー

抽出項目と確認内容

抽出項目	確認内容
a. 使用目的	・適用の前提として、審査証明の範囲として明記されている目的に該当しているか。
b. 構造形式	・適用の前提として、審査証明において想定している構造形式に該当しているか。
c. 構造細目	・想定外の破壊形式をとらない様に審査証明において規定している構造細目に該当しているか。
d. 部材諸元	・部材厚については、審査証明において適用が確認された部材あるいは実績のある部材厚であるか。 ・せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度については、応力伝達の観点から審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
e. 使用材料（せん断補強鉄筋）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
f. 使用材料（プレート）	・審査証明において適用が確認されている材料か。
g. 使用材料（充てん材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
h. 使用材料（断面修復材）	・応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等か。
i. 載荷方法	・応力伝達の観点から、審査証明において適用が確認された範囲内であるか。または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。
j. せん断補強筋の定着長	・審査証明において設定している定着長を考慮して設計しているか。
k. せん断ひび割れ抑制効果	・材料非線形解析を実施して、特異なひび割れが発生していないか。
l. 応力状態（損傷程度）	・PHbの両端の定着プレートが有効に機能する必要があることから、構造物が概ね弾性範囲内であるか。
m. 変形量（横拘束効果の確認）	・審査証明における適用性確認実験の変形量を超えないか。
n. 使用環境	・鳥根2号炉では海水環境下にて使用していることから、海水環境下相当での実績があるか。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（19）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

- ・島根2号炉取水槽（スクリーン室）の隔壁について、PHbを考慮した材料非線形解析により力学的挙動を確認し、島根原子力発電所2号炉取水槽（スクリーン室）隔壁のPHbの適用性を以下のステップ①～③により確認する。
- ・比較のため、在来工法である先施工のせん断補強筋を想定した材料非線形解析についても各ステップで実施する。

解析によるPHbの適用性確認フロー

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証

- ・材料非線形解析を実施するにあたり、PHbの解析モデルへの考慮方法の妥当性を確認する必要がある。
- ・そこで、建設技術審査証明報告書におけるせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し、実験結果と解析結果においてせん断耐力を比較することにより、解析モデルの妥当性を検証する。

- ・ケース①-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース①-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）
- ・ケース①-C：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（交番載荷）

○ステップ②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価方法の適用性の確認

- ・建設技術審査証明報告書の各種実験では、部材厚の大きい供試体で実験を行っていないことから、PHbの受け持つせん断耐力は、先施工によるせん断補強筋のせん断耐力の0.9倍を上限値としている。
- ・そこで、島根2号炉取水槽を想定した大きな部材厚に対して材料非線形解析を実施し、在来工法とPHbの解析結果においてせん断耐力を比較することにより、部材厚が大きい対象に対しても適用可能であること示す。

- ・ケース②-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース②-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）
- ・ケース②-C：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（交番載荷）

○ステップ③島根原子力発電所2号炉取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認

- ・ステップ①、②を確認の上、取水槽の部材諸元相当の部材の解析モデルについて材料非線形解析（解析的実験）を実施し、PHbの適用性を確認する。
- ・適用性を確認する際には、部材の応答性状により取水槽の部材諸元相当でも変形量、ひび割れ及び設計荷重に関して特異な応答が生じていないことを確認する。

- ・ケース③-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース③-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（20）

3.3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証

PHbの適用性確認フロー

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証

- ・材料非線形解析を実施するにあたり、PHbの解析モデルへの考慮方法の妥当性を確認する必要がある。
- ・そこで、建設技術審査証明報告書におけるせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し、実験結果と解析結果においてせん断耐力を比較することにより、解析モデルの妥当性を検証する。

- ・ケース①-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース①-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）
- ・ケース①-C：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（交番載荷）

○ステップ②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価方法の適用性の確認

- ・建設技術審査証明報告書の各種実験では、部材厚の大きい供試体で実験を行っていないことから、PHbの受け持つせん断耐力は、先施工によるせん断補強筋のせん断耐力の0.9倍を上限値としている。
- ・そこで、島根2号炉取水槽を想定した大きな部材厚に対して材料非線形解析を実施し、在来工法とPHbの解析結果においてせん断耐力を比較することにより、部材厚が大きい対象に対しても適用可能であること示す。

- ・ケース②-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース②-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）
- ・ケース②-C：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（交番載荷）

○ステップ③島根原子力発電所2号炉取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認

- ・ステップ①、②を確認の上、取水槽の部材諸元相当の部材の解析モデルについて材料非線形解析（解析的実験）を実施し、PHbの適用性を確認する。
- ・適用性を確認する際には、部材の応答性状により取水槽の部材諸元相当でも変形量、ひび割れ及び設計荷重に関して特異な応答が生じていないことを確認する。

- ・ケース③-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース③-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証 モデル化する実験の試験体について

- ・材料非線形解析を実施するにあたり、建設技術審査証明報告書の実験の再現解析を行い、解析モデルの妥当性を検証する。
- ・実験で用いた試験体のモデル化にあたっては、以下の理由からCASE5を選定する。
 - (1) PHb先端位置が主鉄筋手前であり、施工時の条件と一致していること。
 - (2) 破壊形態がせん断破壊先行であり、適切にせん断耐力を評価できること。
 - (3) 再現解析においては実験値と理論値が整合的である必要があること。



せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法（抜粋）
（建設技術審査証明報告書より抜粋）



せん断耐力の向上性能確認試験の加力要領（抜粋）
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

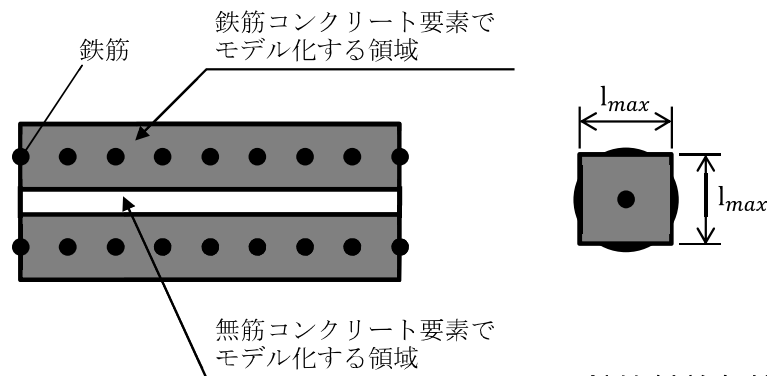
審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（22）

3.3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証 構造物のモデル化について

- ・ 構造部材をモデル化する際は、平面応力要素にてモデル化する。
- ・ 構造部材のモデル化にあたっては、以下に示すとおり、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。
- ・ 主筋領域については付着領域を考慮して芯かぶりの厚さを基準として設定する。



$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} Db \sqrt{f_y / f_t}$$

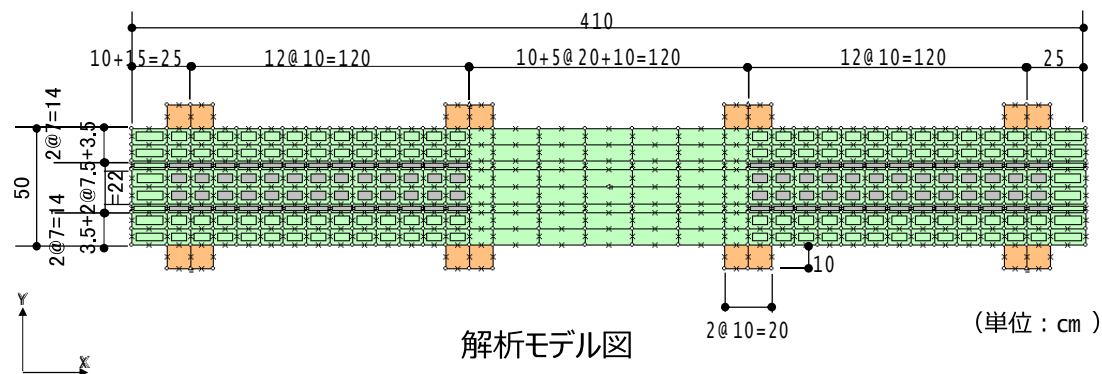
ここで、 l_{max} ：鉄筋一本あたりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ

Db ：鉄筋の直径

f_y ：鉄筋の降伏強度

f_t ：コンクリートの引張強度

鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要



審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

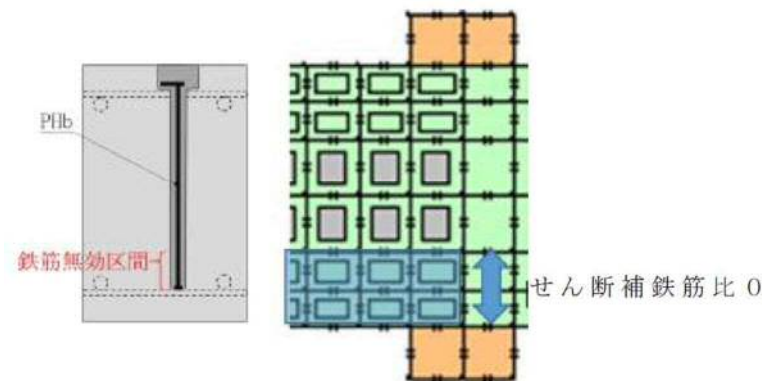
論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（23）

3.3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証 PHbのモデル化について

- PHbを適切にモデル化するため、「コンクリート工学年次論文集 Vol.26, No.2, 2004 せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に、PHb先端の領域では付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ものとし、該当する部分のせん断補強鉄筋比を0としてモデル化する。
- 上記の考え方をベースに、以下の予備解析を実施してPHbのモデル化手法を検討する。
【予備解析ケース】
PHb1：主鉄筋領域（芯かぶりの2倍分）に相当する厚さ（PHb先端から4.4D）のせん断補強鉄筋比を0とするケース
PHb2：上記のモデルをベースにPHbの必要定着長である5D分の厚さのせん断補強鉄筋比を0とするケース
- 予備解析の結果、実験値のせん断耐力の再現性が高いPHb1のケースでモデル化する。

PHbのモデル化の予備解析ケース及び結果



PHbのモデル化イメージ

PHb1		主筋領域2要素分（PHb先端から4.4D分）の鋼材比を0 ・実験値（CASE5）：486kN ・1,2,3% 破壊基準：477kN （実験値の98%）
PHb2		PHb先端から必要定着長である5D分の要素の鋼材比を0とするために無筋要素を挿入 ・実験値（CASE5）：486kN ・1,2,3% 破壊基準：341kN （実験値の70%）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証 解析結果と実験結果の比較結果

- ・ステップ①における解析結果と建設技術審査証明報告書における実験結果を比較した結果、概ね整合的であることを確認した。

解析ケース

ケース①-A	先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
ケース①-B	PHbを考慮するケース（単調載荷）
ケース①-C	PHbを考慮するケース（交番載荷）

ステップ①解析結果と実験結果の比較

ケース	破壊時の最大荷重		実験結果と解析結果の比率
	解析結果	実験結果	
①-A	615kN	—	—
①-B	477kN	486kN※	0.98
①-C	500kN		1.03

※：実験では交番載荷が行われており、その結果を示す。

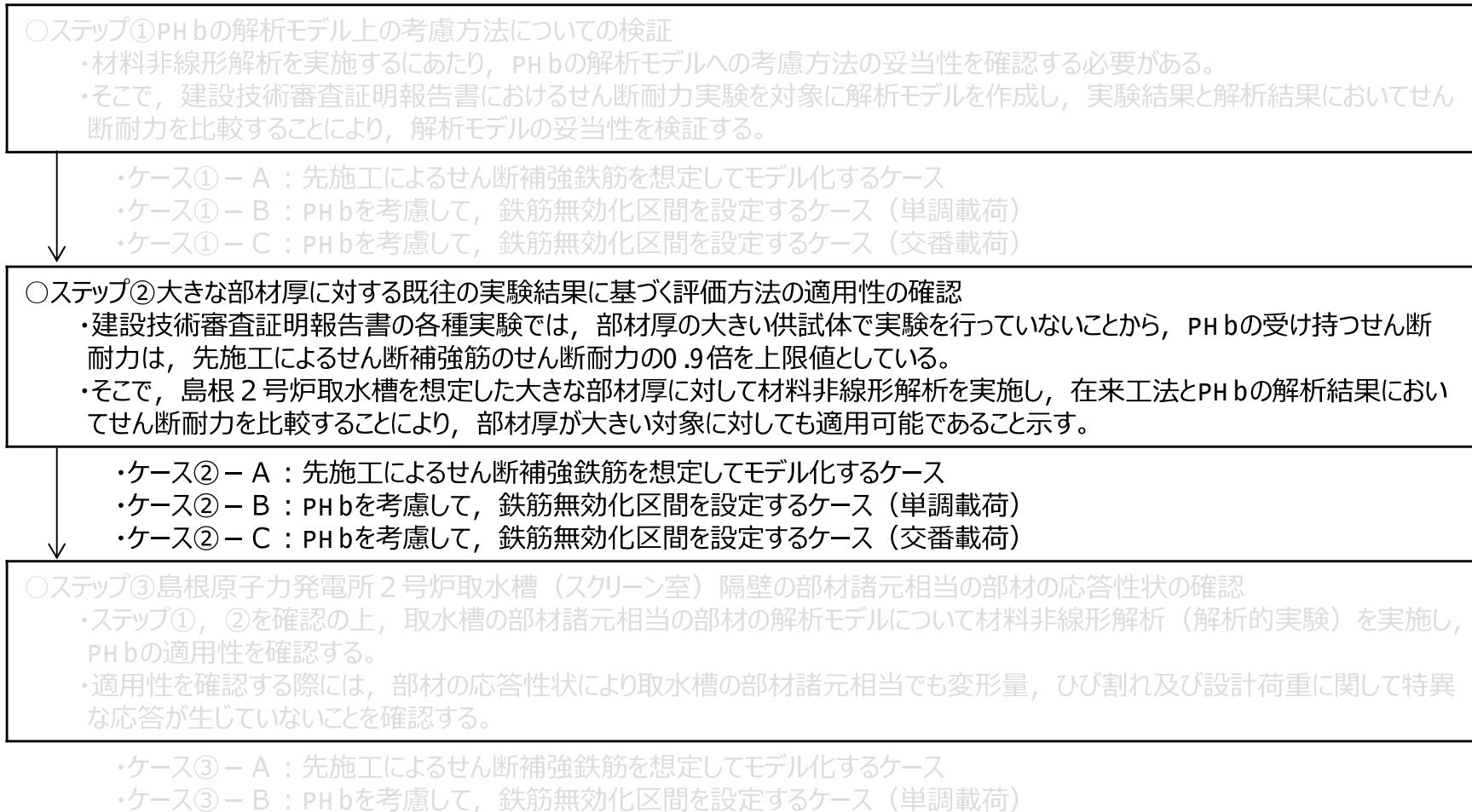
審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（25）

3.3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価方法の適用性の確認

PHbの適用性確認フロー



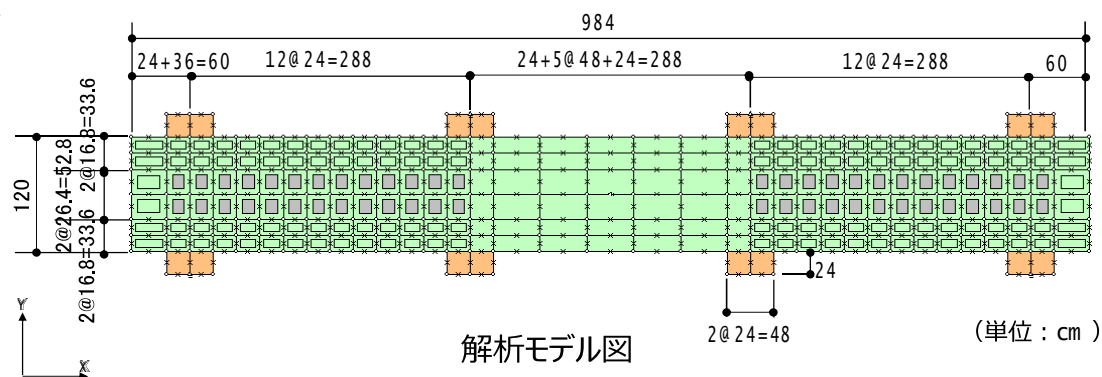
審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（26）

3.3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価方法の適用性の確認

- ・島根2号炉取水槽を想定した大きな部材厚を参考に、せん断スパン比がステップ①と同等となる部材寸法に対して材料非線形解析を実施し、在来工法である先施工のせん断補強とPHbの解析結果においてせん断耐力を比較した。
- ・比較の結果、在来工法とPHb工法のせん断耐力の比率は約90%であり、ステップ①の比率よりも大きいことが確認された。
- ・これは、建設技術審査証明報告書のPHbのせん断耐力算出時における有効係数 β_{aw} （PHbのせん断耐力の補強効果を示す有効係数）を算出する際の理論と同様の傾向であり、部材厚さが大きい部材程、PHbによるせん断補強効果が大きくなることを確認した。



ステップ②せん断耐力結果一覧

ケース	せん断耐力(kN)	在来工法とPHb工法の比率
①-A (在来工法)	615	—
①-B (PHb, 単調載荷)	477	0.78
①-C (PHb, 交番載荷)	500	0.81
②-A (在来工法)	1,335	—
②-B (PHb, 単調載荷)	1,235	0.93
②-C (PHb, 交番載荷)	1,200	0.90

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（27）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ③取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認

PHbの適用性確認フロー

○ステップ①PHbの解析モデル上の考慮方法についての検証

- ・材料非線形解析を実施するにあたり、PHbの解析モデルへの考慮方法の妥当性を確認する必要がある。
- ・そこで、建設技術審査証明報告書におけるせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し、実験結果と解析結果においてせん断耐力を比較することにより、解析モデルの妥当性を検証する。

- ・ケース①-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース①-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）
- ・ケース①-C：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（交番載荷）

○ステップ②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価方法の適用性の確認

- ・建設技術審査証明報告書の各種実験では、部材厚の大きい供試体で実験を行っていないことから、PHbの受け持つせん断耐力は、先施工によるせん断補強筋のせん断耐力の0.9倍を上限值としている。
- ・そこで、島根2号炉取水槽を想定した大きな部材厚に対して材料非線形解析を実施し、在来工法とPHbの解析結果においてせん断耐力を比較することにより、部材厚が大きい対象に対しても適用可能であること示す。

- ・ケース②-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース②-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）
- ・ケース②-C：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（交番載荷）

○ステップ③島根原子力発電所2号炉取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認

- ・ステップ①、②を確認の上、取水槽の部材諸元相当の部材の解析モデルについて材料非線形解析（解析的実験）を実施し、PHbの適用性を確認する。
- ・適用性を確認する際には、部材の応答性状により取水槽の部材諸元相当でも変形量、ひび割れ及び設計荷重に関して特異な応答が生じていないことを確認する。

- ・ケース③-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース③-B：PHbを考慮して、鉄筋無効化区間を設定するケース（単調載荷）

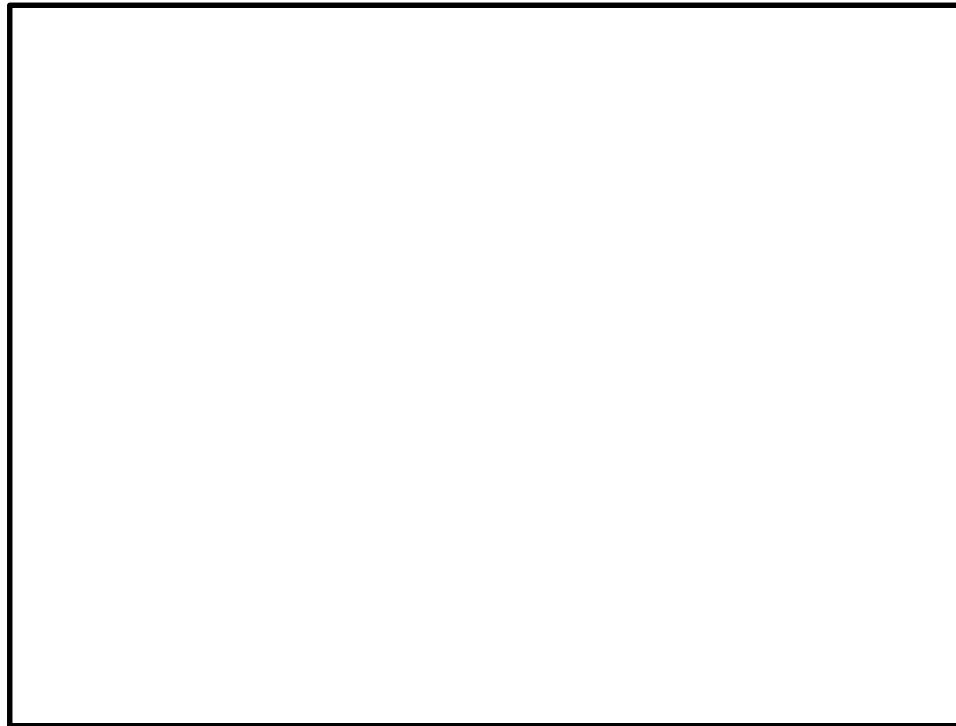
審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（28）

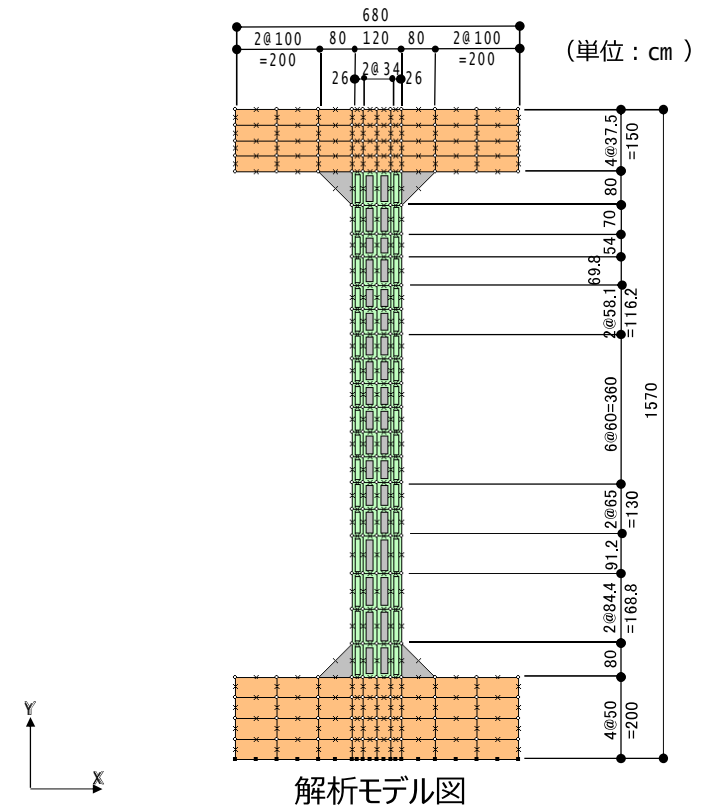
3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ③取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認 解析モデル

- ・ステップ①，②の確認結果を踏まえ，取水槽の部材諸元相当の部材の解析モデルについて材料非線形解析（解析的実験）を実施し，PHbの適用性を確認する。
- ・適用性を確認する際には，部材の応答性状により取水槽の部材諸元相当でも変形量，ひび割れ及び設計荷重に関して特異な応答が生じていないことを確認する。



評価対象部材（取水槽（スクリーン室）隔壁）



本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（29）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ③取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認 解析ケース及び解析結果

- ・荷重ケースについては、隔壁の照査値が最も厳しくなるSs-N1を対象とした。
- ・材料非線形解析を実施した結果、在来工法とPHb工法のせん断耐力の比率は約96%となり、審査証明におけるPHbのせん断耐力算出時に考慮する有効係数 β_{aw} の上限値90%を上回るせん断補強効果が期待できることを確認した。

取水槽の照査結果一覧

基準地震動	隔壁の照査値※
Ss-D	0.37
Ss-N1	0.51
Ss-N2 (NS)	0.28
Ss-N2 (EW)	0.28
Ss-F1	0.26
Ss-F2	0.27

せん断耐力結果一覧

ケース	せん断耐力 (kN)	在来工法とPHb工法の比率
③-A (在来工法)	1,610kN	-
③-B (PHb, 単調載荷)	1,549kN	0.96

※照査値 = 照査用せん断力 / せん断耐力
ここで、照査用せん断力
= 発生せん断力 × 構造解析係数

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（30）

3. 3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

○ステップ③取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認 在来工法とPHb工法の応答性状（1 / 3）

- ・ 初期ひび割れ発生時，作用荷重時のそれぞれの段階において，変形状況は在来工法とPHb工法で顕著な差は見られず，概ね整合的な結果となった。また，ひび割れ状況，鉄筋の降伏位置においても在来工法と顕著な差は見られず，ステップ①，②と同様の傾向となった。
- ・ したがって，島根原子力発電所2号炉取水槽（スクリーン室）隔壁に作用する荷重の範囲においては，在来工法とPHb工法の間でPHbによるせん断補強効果に影響を与える様な特異な応答等は確認されなかった。

3.3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

- ステップ③取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認
 在来工法とPHb工法の応答性状（2 / 3）

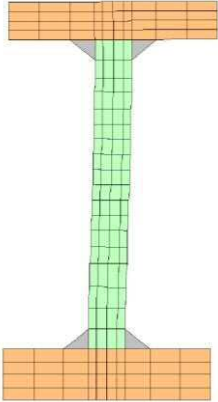
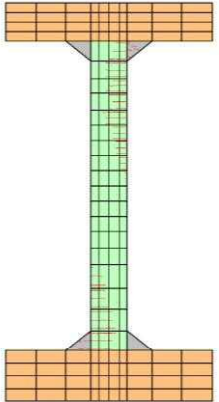
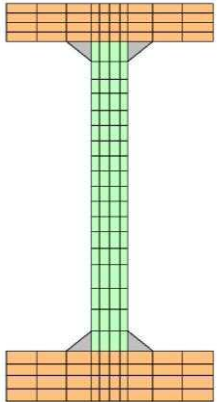
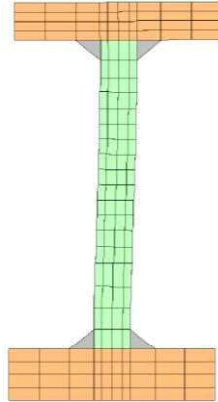
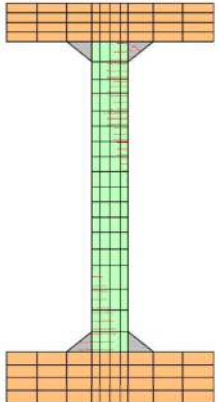
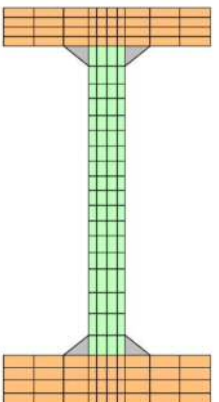
初期ひび割れ発生時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
③-A (在来工法)			
③-B (PHb, 単調載荷)			

3.3 フロー③せん断補強効果の確認（解析によるせん断補強効果の確認）

- ステップ③取水槽（スクリーン室）隔壁の部材諸元相当の部材の応答性状の確認
 在来工法とPHb工法の応答性状（3 / 3）

地震時荷重時の損傷状況

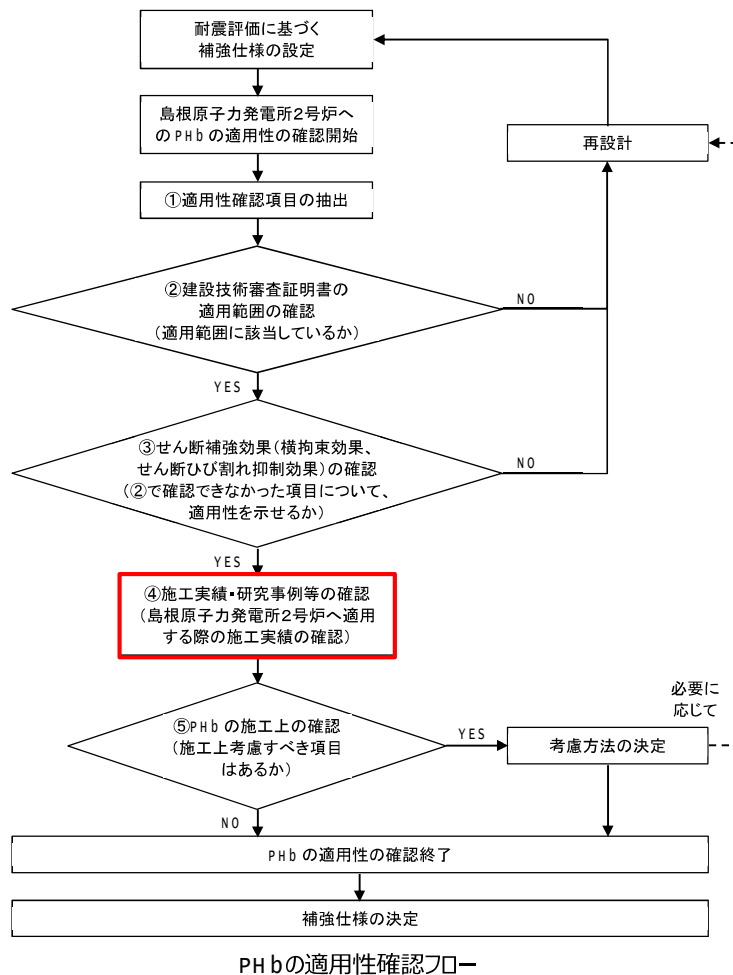
ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
③-A (在来工法)			
③-B (PHb, 単調載荷)			

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（33）

3.4 フロー④施工実績・研究事例等の確認

- PHbの施工実績・研究事例等を確認した結果、以下に示すとおり、様々な施設及び幅広い範囲の部材厚にて豊富な施工実績があり、島根2号炉の構造物に採用する項目について、十分に実績のある範囲にあることを確認した。
- 研究事例等から島根2号炉への適用において考慮、反映すべき事項を検討し、以下のとおり、設計、施工への反映事項を整理した。



PHbの施工実績



各研究事例を踏まえた島根2号炉の設計・施工への反映事項

- 建設技術審査証明報告書にて規定されている有効係数（上限値0.9）を用いて、PHbのせん断耐力を算定する。
- 充填材の施工管理基準（5℃以上）を設ける。
- 施工上予測される不具合の考慮については、施工精度の向上方策を講じるとともに、設計上の配慮についても検討する。

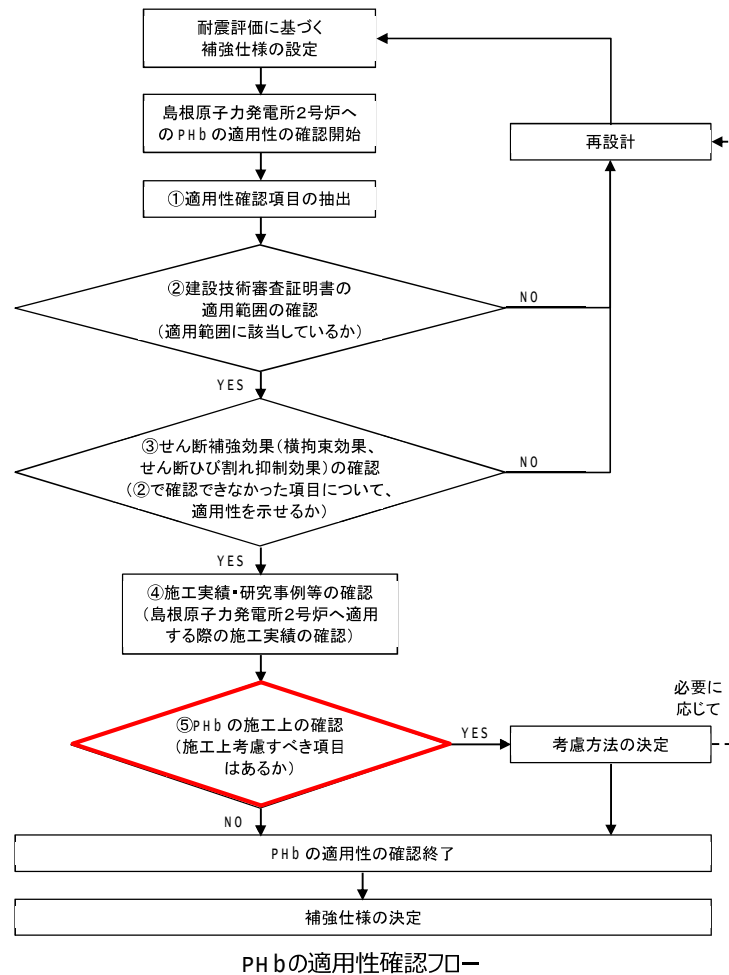
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（34）

3.5 フロー⑤PHbの施工上の確認

- PHb工法によるせん断補強にあたっては、既設鉄筋配置のずれ等施工のばらつきにより計画通り施工できなかった場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。
- 施工上せん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある施工のばらつきに関する項目を抽出し、以下のとおり、適切な施工管理によりばらつきを生じさせない、もしくはせん断補強効果に大きな影響を及ぼさないことを確認する。



(1) 削孔角度

- 先行サイトと同様、削孔時に施工用架台を使用し、ドリルの鉛直工法、水平方向が削孔面に対して垂直となるよう、スランートルール、金尺等で確認して削孔することから、削孔角度のばらつきは生じない。

(2) 削孔位置

- PHb挿入計画位置をドリルにより削孔するが、部材内部に障害物があり計画位置で削孔できずPHbを計画通り配置できない可能性がある。
- その場合は、先行サイトと同様、付近を再削孔しPHbを挿入することで設計上必要な補強鉄筋量を確保する。

(3) 定着効果

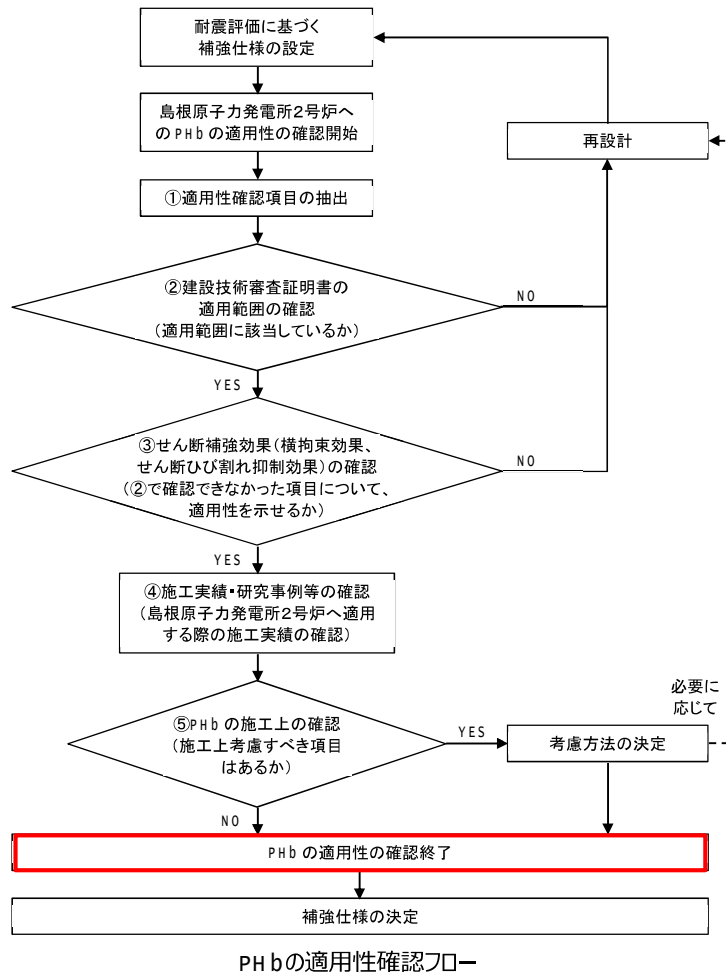
- 充填材の定着効果については、審査証明において充填確認試験を実施しており、先行サイトと同様、削孔内に設置したPHbの先端定着部までグラウトが密実に充填され、PHbとコンクリート躯体が一体となっていることを確認している。
- 上記(1)～(3)に示したとおり、施工上の配慮により、せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工のばらつきは生じないと考えられる。
- 現時点では、後施工による施工のばらつきに対して施工実績に基づく十分な統計がとれていないため、施工のばらつきによる影響が生じる可能性を完全に否定することはできない。
- 以上を踏まえて、適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工ばらつきに対する設計上の配慮として、耐震評価上の裕度を持たせた設計を行うこととする。

審査会合における指摘事項に対する回答【No.9】

論点Ⅱ-26 後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）の適用（35）

4 まとめ（PHbの適用性の確認終了）

島根2号炉と先行サイト（美浜3号炉及び東海第二）との類似点，相違点について整理した結果は以下のとおりであり，先行サイトと同様にPHb工法が適用できると判断した。



・ PHb工法の適用性確認項目のうち，建設技術審査証明報告書の使用目的，構造細目，使用材料及びせん断補強筋の定着長について確認した結果，島根2号炉は先行サイトと同様に，報告書の適用範囲内であることを確認した。

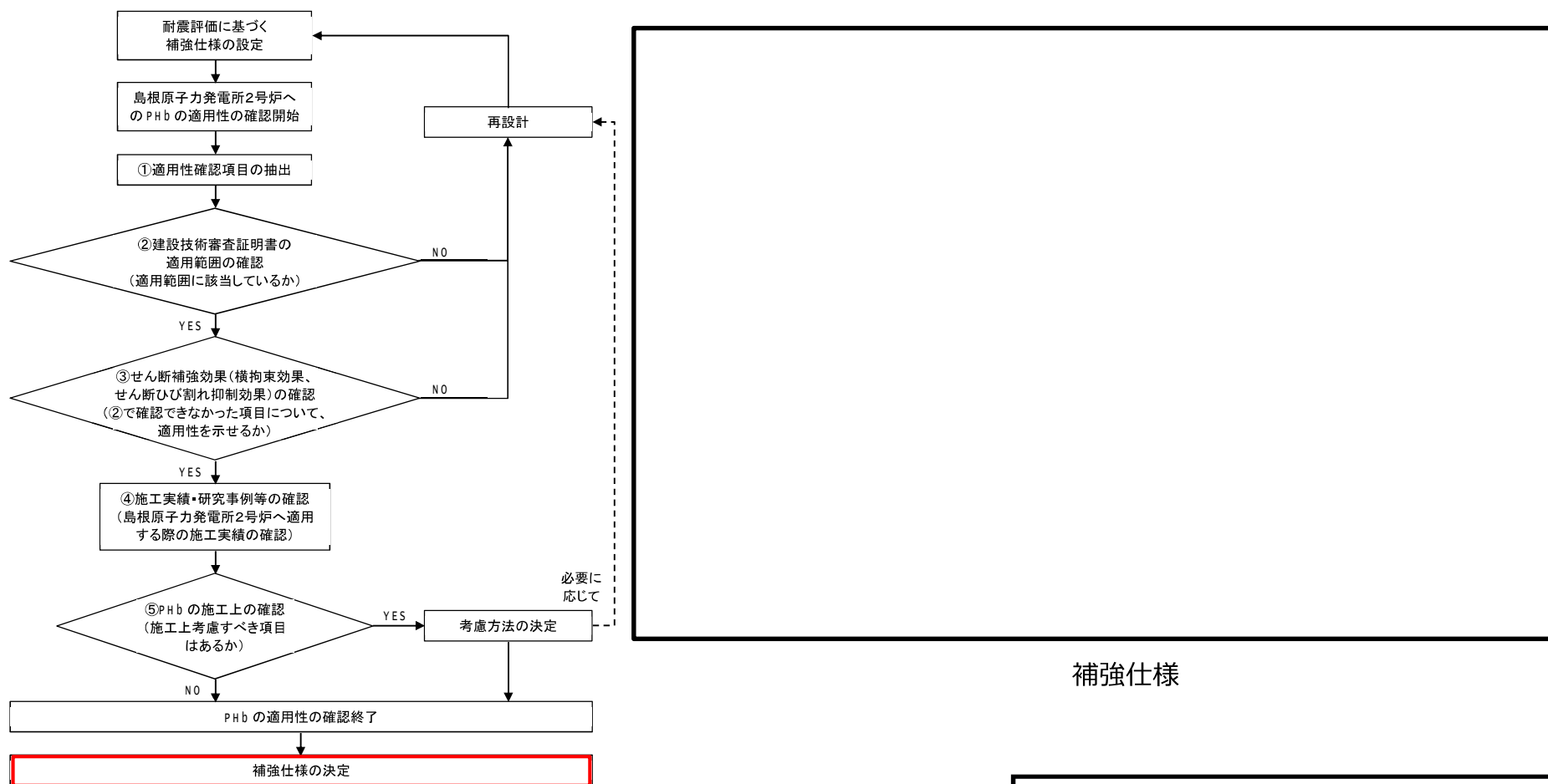
・ PHb工法の適用性確認項目のうち，せん断ひび割れ抑制効果及び建設技術審査証明報告書の実験諸元と差異がある部材諸元及び載荷方法については，先行サイトと同様にPHbの補強効果が期待でき適用性を有することを解析により確認した。

①島根2号炉取水槽（スクリーン室）隔壁における材料非線形解析の結果，PHbによるせん断耐力は，先施工によるせん断補強のせん断耐力の約96%であり，審査証明におけるPHbのせん断耐力算出時に考慮する有効係数 β_{aw} の上限値90%を上回るせん断補強効果が期待できることを確認できた。

②審査証明における実験条件と異なっても，応答性状に変化はなく，審査証明で確認したとおりのせん断補強効果を期待できることを確認できた。

4 まとめ（補強仕様の決定）

PHbの適用性確認の結果，決定した補強仕様を以下に示す。



PHbの適用性確認フロー