

女川原子力発電所2号炉
後施工せん断補強筋による耐震補強について
(コメント回答)

平成30年11月20日
東北電力株式会社

目次

1. はじめに
2. Ccb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCcb工法の適用性の確認
 - 3.1 適用性確認フロー
 - 3.2 ①適用性確認項目の抽出
 - 3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認
 - 3.4 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認
 - 3.5 ④Ccbの施工精度に影響を与える項目の確認結果
 - 3.6 ⑤施工実績・研究事例等の確認結果
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)～(C))
 - 4.1 検討方針
 - 4.2 ステップ①: Ccbの解析上のモデル化方法
 - 4.3 ステップ②: 大きな部材厚に対する適用性確認
 - 4.4 ステップ③: 実施工部材の応答性状の確認
 - 4.5 まとめ
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCcb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCcb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCcb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 Ccbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

目次

1. はじめに
2. Ccb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCcb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCcb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCcb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCcb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 Ccbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

1. はじめに(1/3)

○ 女川2号炉の屋外重要土木構造物においては、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、セラミックキャップバー工法を採用している。

後施工せん断補強工法は、女川2号炉の既工認で採用実績がなく、美浜3号炉の新規制基準における工認で実績がある。美浜3号炉のポストヘッドバー(PHb)工法と女川2号炉のセラミックキャップバー工法では定着体部の構造形状が異なっていることから、耐震論点として整理している。また、本補強工法が開発された際の実験の範囲と女川2号炉で用いる部材厚や破壊形態に差異があること等から、本資料では、セラミックキャップバー工法を採用する目的、効果及び女川2号炉への適用性について説明する。

- 女川2号炉の屋外重要土木構造物には、基準地震動Ssの大加速度化に伴い、せん断破壊に対して耐震補強工事が必要となる既設鉄筋コンクリート構造物がある。
- せん断破壊に対する補強工法としては、部材のせん断耐力を向上させる後施工せん断補強工法の他に、次ページに示す工法があるが、女川2号炉のp5に示す構造物においては、部材の耐力を直接向上させる合理的な補強工法である後施工せん断補強工法を採用している。
- 女川2号炉においては、海水を通水する取水路(漸拡部)等で後施工せん断補強工法を採用するため、耐腐食性の観点から両端に耐食性に優れたセラミック製定着体を取り付けたせん断補強鉄筋であるセラミックキャップバー(以下、CCbという)により、せん断補強を行うCCb工法を採用することとしている。(詳細については「2. CCb工法の概要(p7~9)」にて示す。)

- 女川2号炉の多くの屋外重要土木構造物は、地中に埋設されており、主たる地震時荷重は土圧と慣性力であることから、荷重が垂直に作用する壁部材により、地震時荷重を保持する構造となる。
- 基準地震動の大加速度化に伴い、地震時荷重により壁の面外方向に生じるせん断力によるせん断破壊に対する裕度が小さくなっている。

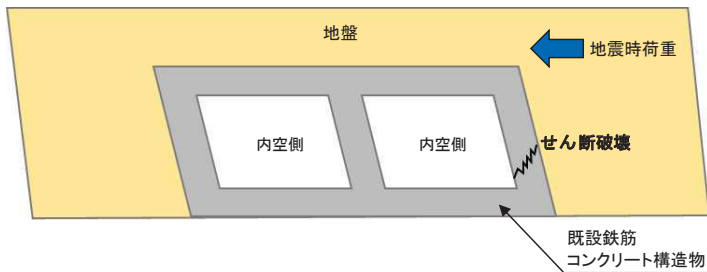


図 地中構造物のせん断破壊イメージ

- CCb工法は、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、部材を削孔後、その孔内にCCbを挿入し、グラウト充てんにて固定し、せん断耐力を向上させるものである。

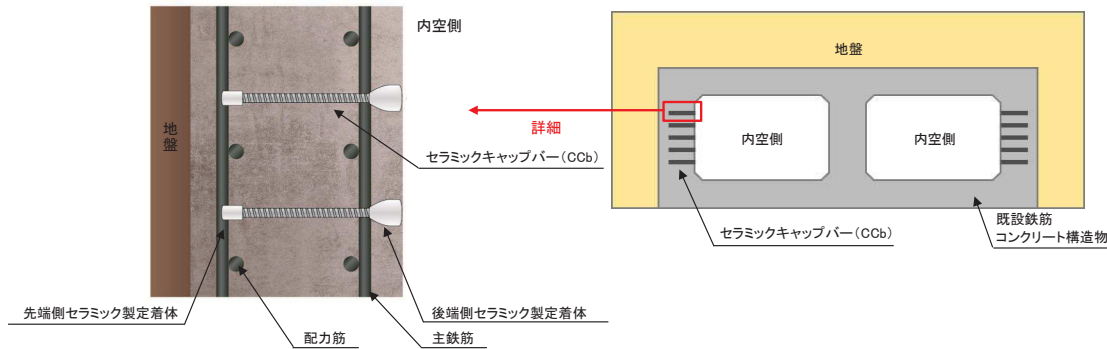


図 CCb設置状況及びCCb工法の概要図※

(※:セラミックキャップバー(CCb)工法研究会HPより引用。一部修正・加筆。)

1. はじめに(2/3)

- 主なせん断補強工法として、従来工法(せん断補強筋の先施工)、増厚工法、地盤改良工法、後施工せん断補強工法が挙げられる。

表 主なせん断補強工法

	従来工法(先施工)	増厚工法	地盤改良工法	後施工せん断補強工法
概要	<ul style="list-style-type: none"> • コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋または配力筋にフックを掛けて定着させる工法。 • せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 既設コンクリート構造物表面にコンクリートを打ち足すことで、断面を増厚する工法。 • 部材厚の増により、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 既設コンクリート構造物周辺地盤にセメントミルク等を噴射し、地盤改良体を構築する工法。 • 地盤改良を行うことにより、地震時荷重(主に土圧)が低減され、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内にせん断補強筋を差し込み充てん材で固定する工法。 • せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。
図				
備考	<ul style="list-style-type: none"> • 女川2号炉他、多数の施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> • 女川2号炉では施工実績はないが、一般土木構造物において施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> • 女川2号炉他、多数の施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> • 美浜3号炉にて、工認実績有り。(ポストヘッドバー(PHb工法))

1. はじめに(3/3)

- 女川2号炉において、CCbにより耐震補強を行った構造物を以下に示す。
 - ・ 各構造物の構造図及び補強箇所を補足説明1(p79~81)に示す。

表 CCbにより耐震補強を行った構造物(概要)※1

構造物名称	部材	部材厚 (mm)	CCb径	せん断 スパン比※2	
取水路 (漸拡部)	隔壁	1,200	D16, D22	5.61	
原子炉機器冷却 海水配管ダクト	隔壁	1,200	D25	6.02	
軽油タンク室	底版	1,500	D25	2.31~ 16.82	
	側壁	1,200	D22		
	隔壁	1,000	D16		
復水貯蔵 タンク基礎	遮蔽壁	地上部	500	D13	1.47~ 19.19
		地中部	1,000	D16, D25	
	バルブ室	頂版	800	D16	
		側壁	1,000	D19	
		隔壁	600	D16	
	連絡 トレンチ	頂版	800	D16	
側壁					

※1: 今後の評価により、CCbにより耐震補強を行う構造物は増える可能性がある。
 ※2: せん断スパン比: a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

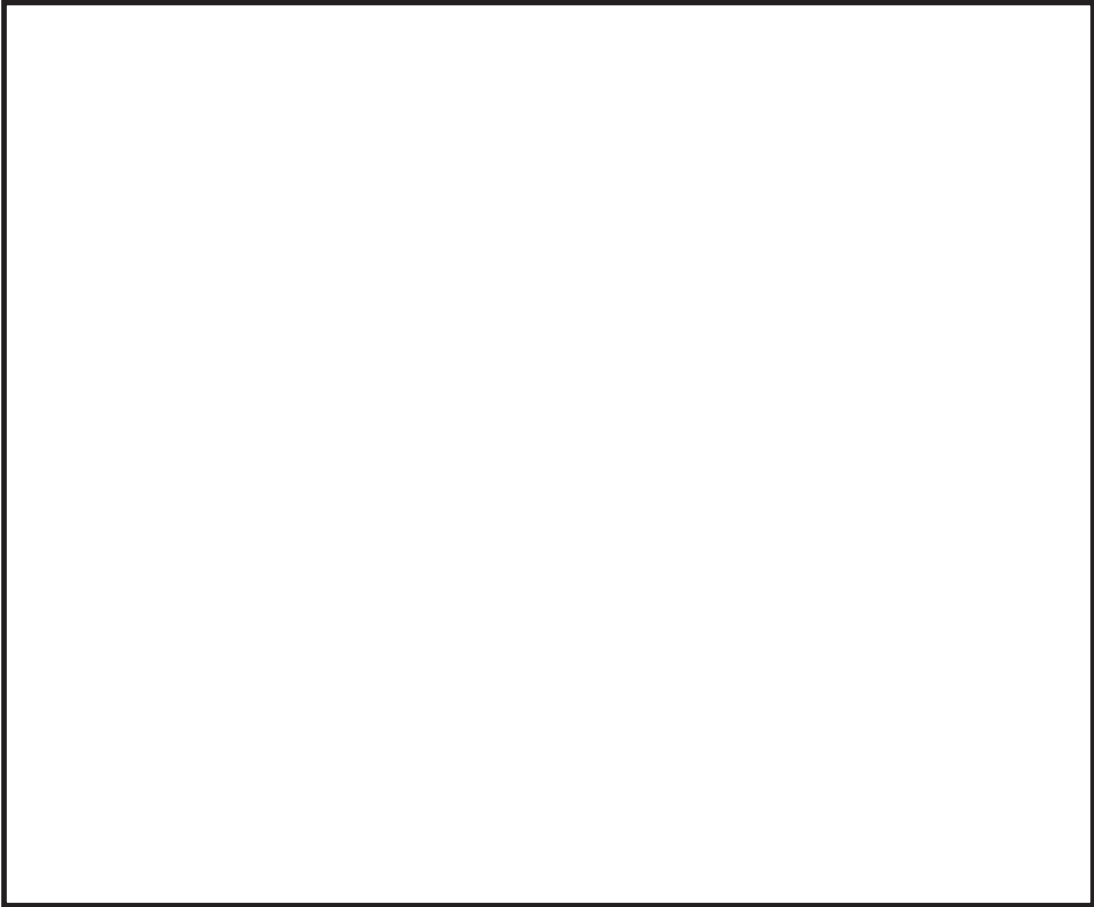


図 CCbにより耐震補強を行った構造物(全体配置図)

※:
 O.P.は女川原子力発電所工事用基準面であり、東京湾平均海面 (T.P.)-0.74m。
 2011年東北地方太平洋沖地震に伴い、牡鹿半島全体が約1m沈降したことが確認されており、女川原子力発電所の敷地も一様におおよそ1m沈降したことを確認している。現在は隆起傾向にある。
 本資料における標高は、2011年東北地方太平洋沖地震前の値で標記している。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

目次

1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

2. CCb工法の概要(1/3)

- 女川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CCb工法の概要を以下に示す。
 - CCb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※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。
 - CCb工法は、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、CCbを既設の鉄筋コンクリート構造物の部材に挿入・一体化させて、せん断耐力を向上させるものである。
 - 具体的には、既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にせん断補強材であるCCbを差し込み、充填材で固定することにより構造躯体と一体化を図っている。
 - CCb工法は後施工によりせん断補強を行うため従来工法(先施工)とは定着機構が異なることから、設計・照査にあたっては通常の従来工法(先施工)であるせん断補強筋によるせん断耐力に有効性を示す係数(β_{aw})を乗じることにより、せん断補強効果を評価する。

※: 国土交通大臣認可の公益社団法人として国土建設技術の発展向上に寄与することを目的に設立された公益法人組織であり、土木に関して、幅広い分野にまたがる研究開発と調査研究の受託、さらに開発された技術の普及及び技術支援に取り組んでいる。
 また、建設技術審査証明事業を行っており、当該審査証明技術について学識経験者及び当センターの専門技術者による審査証明委員会を設け、開発の趣旨、開発目標、技術内容、既存の技術との対比及び実績等について審査を行っており、高度な技術を有し、十分な信頼性を有した第三者機関である。

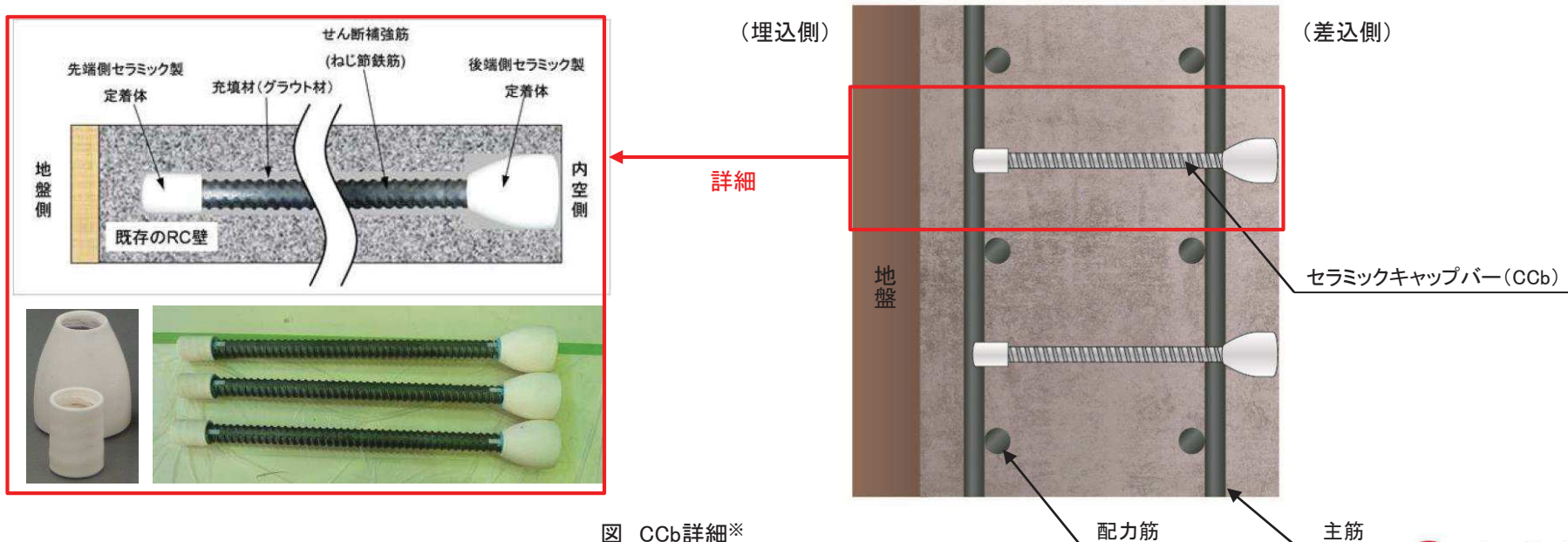


図 CCb詳細※

(※: セラミックキャップパー (CCb) 工法研究会及び鹿島建設HPより引用。一部修正・加筆。)

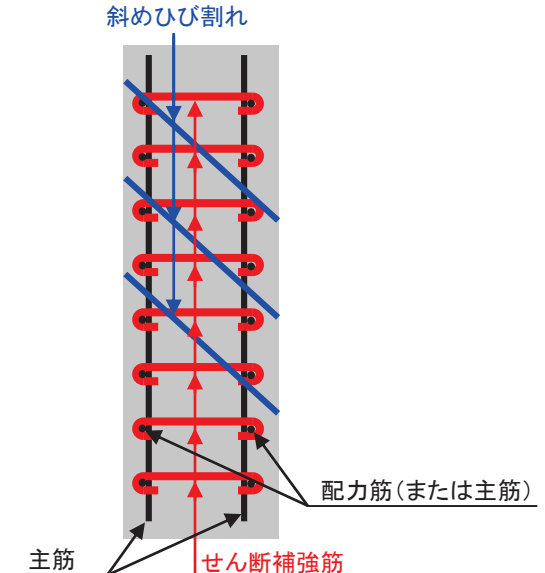
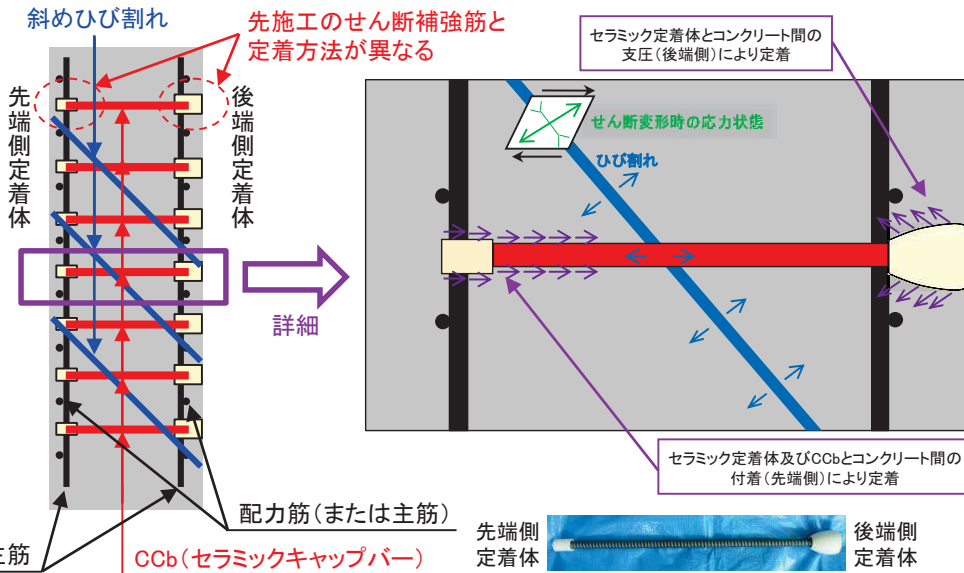
2. Ccb工法の概要(2/3)

○ せん断補強工法としての従来工法(先施工)とCcb工法の違いを整理する。

(1) 定着機構の違い

- Ccb工法は、「セラミック定着体とコンクリート間の支圧(後端側)」と「セラミック定着体及びCcbとコンクリート間の付着(先端側)」により定着しており、フックを掛けて定着する従来工法(先施工)とは定着機構が異なる。

表 定着機構の違い


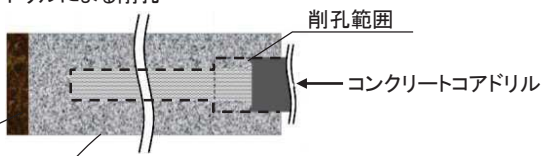
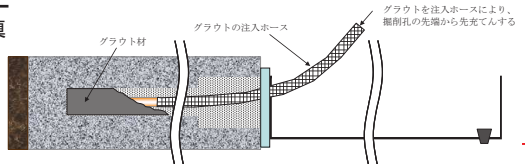
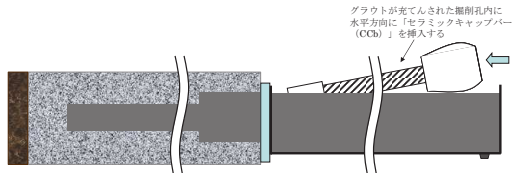
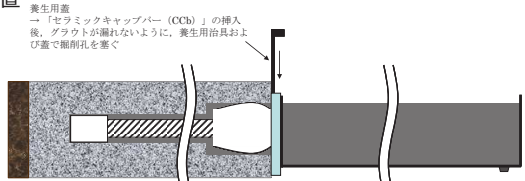


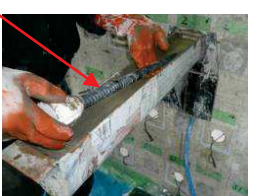

従来工法(先施工)	Ccb工法(後施工)
 <p>斜めひび割れ</p> <p>配力筋(または主筋)</p> <p>主筋</p> <p>せん断補強筋</p>	 <p>斜めひび割れ</p> <p>先施工のせん断補強筋と定着方法が異なる</p> <p>セラミック定着体とコンクリート間の支圧(後端側)により定着</p> <p>せん断変形時の応力状態</p> <p>ひび割れ</p> <p>詳細</p> <p>配力筋(または主筋)</p> <p>Ccb(セラミックキャップバー)</p> <p>先端側定着体</p> <p>後端側定着体</p> <p>セラミック定着体及びCcbとコンクリート間の付着(先端側)により定着</p>
<ul style="list-style-type: none"> • せん断補強筋は、主筋または配力筋にフックを掛けて定着しており、主に当該部にて定着効果を期待している。 	<ul style="list-style-type: none"> • Ccbは「セラミック定着体とコンクリート間の支圧(後端側)」と「セラミック定着体及びCcbとコンクリート間の付着(先端側)」により定着している。

2. CCb工法の概要(3/3)

(2) 施工方法の違い

- CCb工法は、既設コンクリートを削孔し、その孔内にCCbを設置し削孔部をグラウトにて充てんし一体化しており、コンクリート打設前に設置する従来工法(先施工)とは施工方法が異なる。

表 施工方法の違い

従来工法(先施工)	CCb工法(後施工)
 <p>配力筋 (または主筋)</p> <p>せん断補強筋</p> <p>主筋</p>	<p>①削孔工 コンクリートコアドリルによる削孔</p>  <p>削孔範囲</p> <p>コンクリートコアドリル</p> <p>地盤</p> <p>既設鉄筋 コンクリート構造物</p> <p>②CCb定着工 グラウトの充填</p>  <p>グラウト材</p> <p>グラウトの注入ホース</p> <p>グラウトを注入ホースにより、 削孔孔の先端から先充てんする</p> <p>CCb (セラミックキャップバー)</p> <p>CCbの挿入</p>  <p>グラウトが充てんされた削孔孔内に 水平方向に「セラミックキャップバー (CCb)」を挿入する</p> <p>養生用蓋の設置</p>  <p>養生用蓋 →「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入 後、グラウトが漏れないように、養生用具および 蓋で削孔孔を塞ぐ</p>    
<ul style="list-style-type: none"> コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋または配力筋にフックを掛けて設置している。 多数の施工実績があり、コンクリート打設前にせん断補強筋を設置するという確実性の高い施工方法である。 	<ul style="list-style-type: none"> 既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内にCCbを差し込み充てん材で一体化している。 従来工法(先施工)と比較すると施工実績が少なく、既設コンクリートを削孔して部材と直交する方向にCCbを設置し削孔部をグラウトにて充てんするものである。

目次

1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
 - 3.1 適用性確認フロー
 - 3.2 ①適用性確認項目の抽出
 - 3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認
 - 3.4 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認
 - 3.5 ④CCbの施工精度に影響を与える項目の確認結果
 - 3.6 ⑤施工実績・研究事例等の確認結果
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.1 適用性確認フロー

- CCb工法を女川2号炉の構造物に適用するにあたり、建設技術審査証明報告書、美浜3号炉における確認項目、施工実績及び研究事例等から適用範囲を整理し、女川2号炉の構造物の構造形式・部材諸元、使用環境等が適用範囲に該当することを以下に示すフローにて確認する。

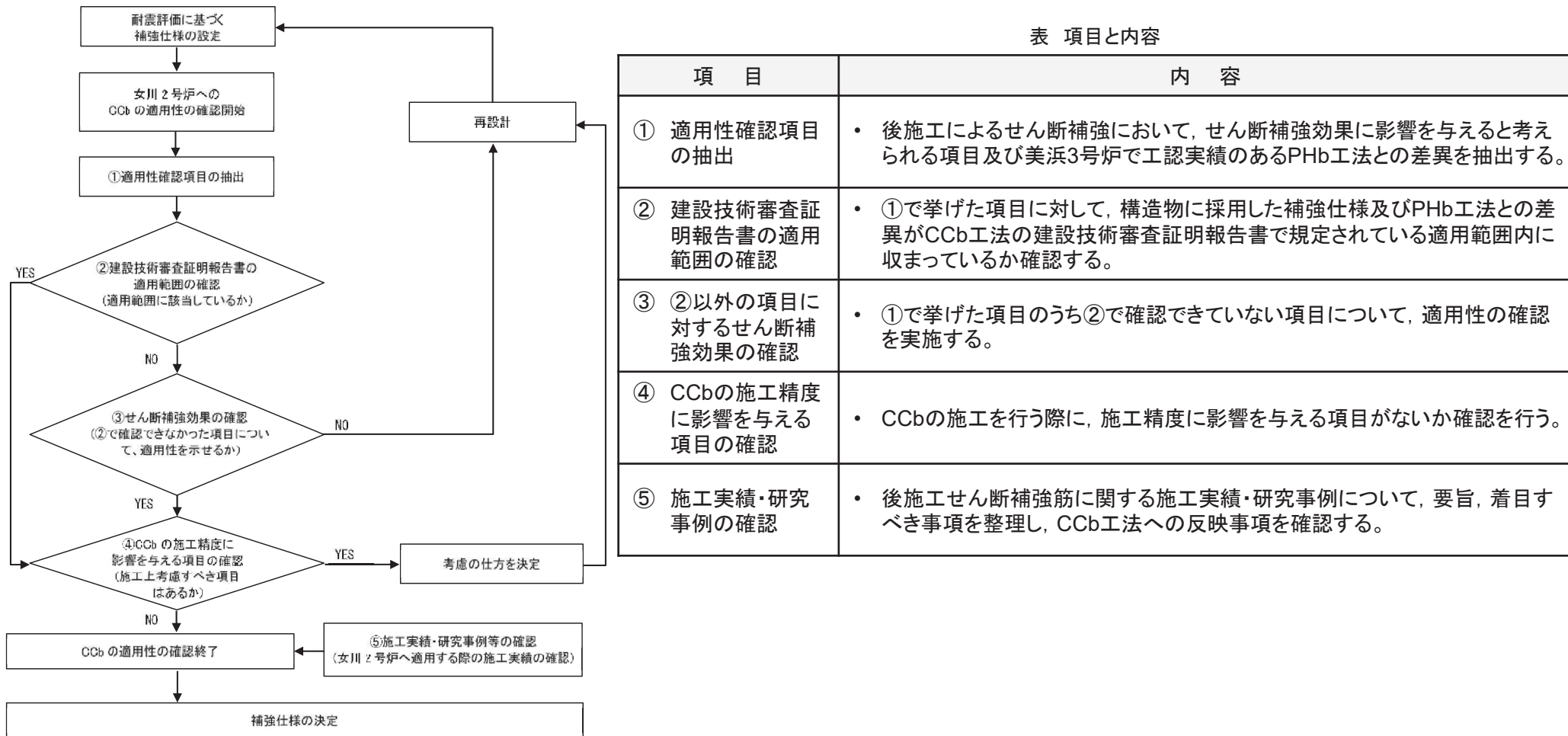


図 CCbの適用性確認フロー

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.2 ①適用性確認項目の抽出

- CCb工法の特徴, 女川2号炉固有の条件, 美浜3号炉における確認項目等の観点から, 適用性を確認するために必要な項目を抽出する。
- 抽出した15項目を示す。

表 抽出項目と確認内容

抽出項目	確認内容
I. 使用目的	• 建設技術審査証明報告書に明記している目的に該当しているか。
II. 構造形式	• 建設技術審査証明報告書で想定している構造形式に該当しているか。
III. 構造細目	• 建設技術審査証明報告書で規定している構造細目に該当しているか。
IV. 部材諸元	• 建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された部材あるいは実績のある部材厚か。 • その他諸元(せん断スパン比, 主鉄筋比等)について, 建設技術審査証明報告書の実験で適用性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。
V. 荷重方法	• 建設技術審査証明報告書の実験適用性が確認された範囲内であること, 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。
VI. 使用材料(せん断補強筋)	• 建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。
VII. 使用材料(セラミック製定着体)	同上
VIII. 使用材料(充てん材)	同上
IX. せん断補強筋の定着長	• 建設技術審査証明報告書で設定している定着長を考慮して設計しているか。
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	• 建設技術審査証明報告書の実験にて確認していない諸元において, せん断ひび割れ抑制効果を確認できるか。
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	• 定着体部にひび割れが生じて, 定着機能が保持されているか。
XII. 変形量	• 建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えていないか。
XIII. 使用環境	• 女川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。
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	• CCbを適用した部材のコンクリートにCCbのせん断補強効果を阻害するひび割れがなく, 構造物が健全であるか。
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	• PHb工法及び美浜3号炉での適用実績と比較を行い, 抽出された差異が建設技術審査証明報告書で規定された適用範囲に収まっているか。

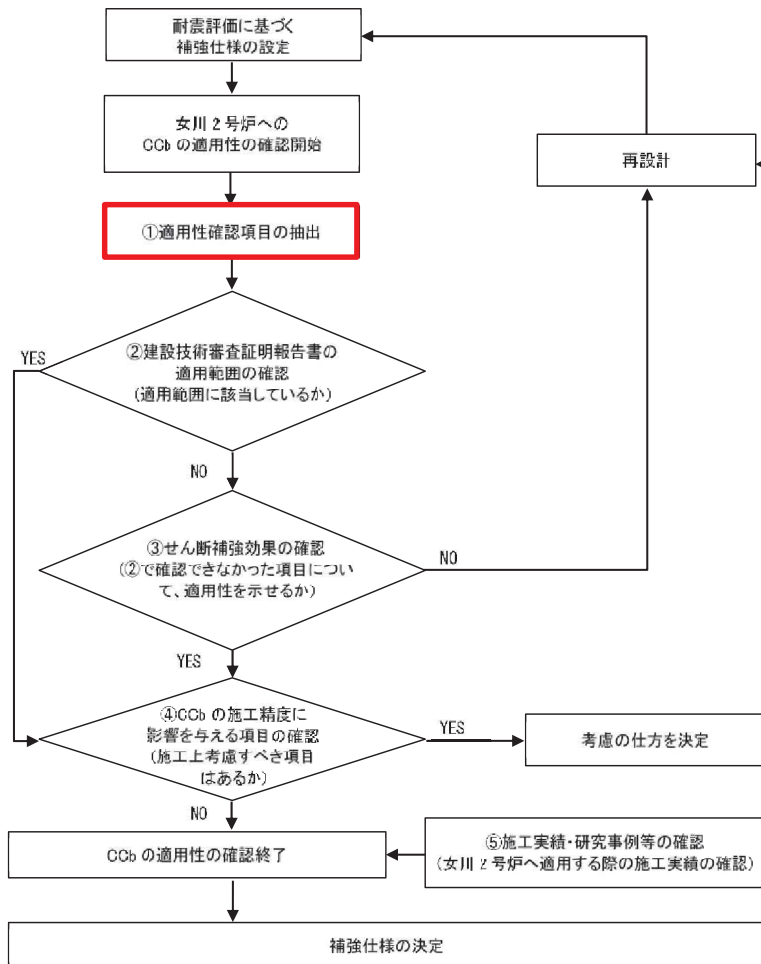


図 CCbの適用性確認フロー

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(1/10)

- Ccb工法を適用するにあたり、建設技術審査証明報告書から適用範囲を確認する。

表 抽出項目と確認結果の概要(1/2)

抽出項目	確認結果の概要	確認結果
I. 使用目的	• Ccbを適用する構造物は地中構造物であり、既設コンクリート部材に対して後施工によるせん断補強の目的で用いていることから建設技術審査証明報告書に合致することを確認した。	○
II. 構造形式	• 「原子力施設などの重要地下構造物など、巻立て補強が適用できない構造物の耐震性能を改善することができる」と記載されており、女川2号炉の構造物にも適用可能である。	○
III. 構造細目	• せん断補強鉄筋比や最大配置間隔等が建設技術審査証明報告書と合致することを確認した。 (詳細については、p17~18「3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す。)	○
IV. 部材諸元	• 建設技術審査証明報告書の実験では、部材厚500~800mmを対象としているが、女川2号炉にてCCbにより耐震補強を行った構造物の最大部材厚は1500mmである。 • せん断スパン比(a/d)においても、実験ではa/d=2.78を対象としているが、女川2号炉にてCCbにより耐震補強を行った構造物はa/d=1.47~19.19である。 • その他、主鉄筋比等の各種諸元が実験と異なっている。 (詳細については、p17~18「3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す。)	フロー③にて確認 (一部、フロー②にて確認している)
V. 荷重方法	• 建設技術審査証明報告書の実験では、集中荷重による正負交番荷重を行っているが、女川2号炉にてCCbにより耐震補強を行った構造物に作用する荷重は、実験より大きく、集中荷重及び分布荷重である。 (詳細については、p17~18「3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す。)	フロー③にて確認 (一部、フロー②にて確認している)
VI. 使用材料 (せん断補強筋)	• 建設技術審査証明報告書に記載されている使用材料と合致することを確認した。 (詳細については、p19~21「3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す。)	○
VII. 使用材料 (セラミック製定着体)		
VIII. 使用材料 (充てん材)		
IX. せん断補強筋の定着長	• 建設技術審査証明報告書で設定されている定着長を考慮していることを確認した。	○

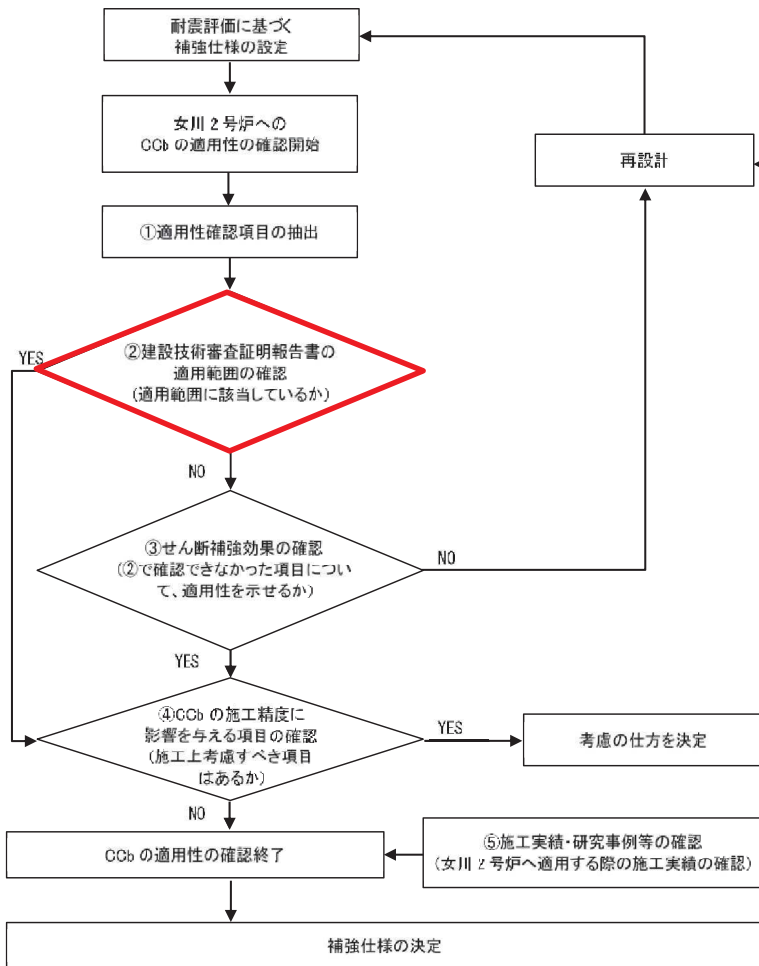


図 Ccbの適用性確認フロー

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(2 / 10)

- Ccb工法を適用するにあたり、建設技術審査証明報告書から適用範囲を確認する。

表 抽出項目と確認結果の概要(2/2)

抽出項目	確認結果の概要	確認結果
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	<ul style="list-style-type: none"> 建設技術審査証明報告書の実験と女川2号炉にてCCbにより耐震補強を行った構造物の各種諸元(部材厚, せん断スパン比, 主鉄筋比, 載荷方法)が異なっている。 	フロー③にて確認
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	<ul style="list-style-type: none"> 建設技術審査証明報告書の実験と女川2号炉にてCCbにより耐震補強を行った構造物では、発生するひび割れ性状が異なる可能性がある。 定着体部に実験と性状が異なるひび割れが生じても定着機能が保持されていることを確認する必要がある。 	同上
XII. 変形量	<ul style="list-style-type: none"> CCb工法を適用した構造物の変形量が建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えないことを確認した。(詳細については、p22「3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す。) 	○
XIII. 使用環境	<ul style="list-style-type: none"> CCb工法が、硫酸等の影響を受ける腐食環境下での施工実績があり海中よりも厳しい環境下での施工実績を確認した。(詳細については、p25「3.6 ⑤施工実績・研究事例等の確認結果」に示す。) 	○
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	<ul style="list-style-type: none"> 建設技術審査証明報告書の実験では、新規に供試体を作成しているが、女川2号炉にてCCbにより耐震補強を行った構造物については建設時の基準地震動を一部周期帯で超過する地震動を経験していることから、部材の健全性を確認する。 CCb工法のせん断補強効果を発揮するためには、コンクリートがCCb工法のせん断補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認する必要がある。 	フロー③にて確認
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	次ページのとおり	次ページのとおり

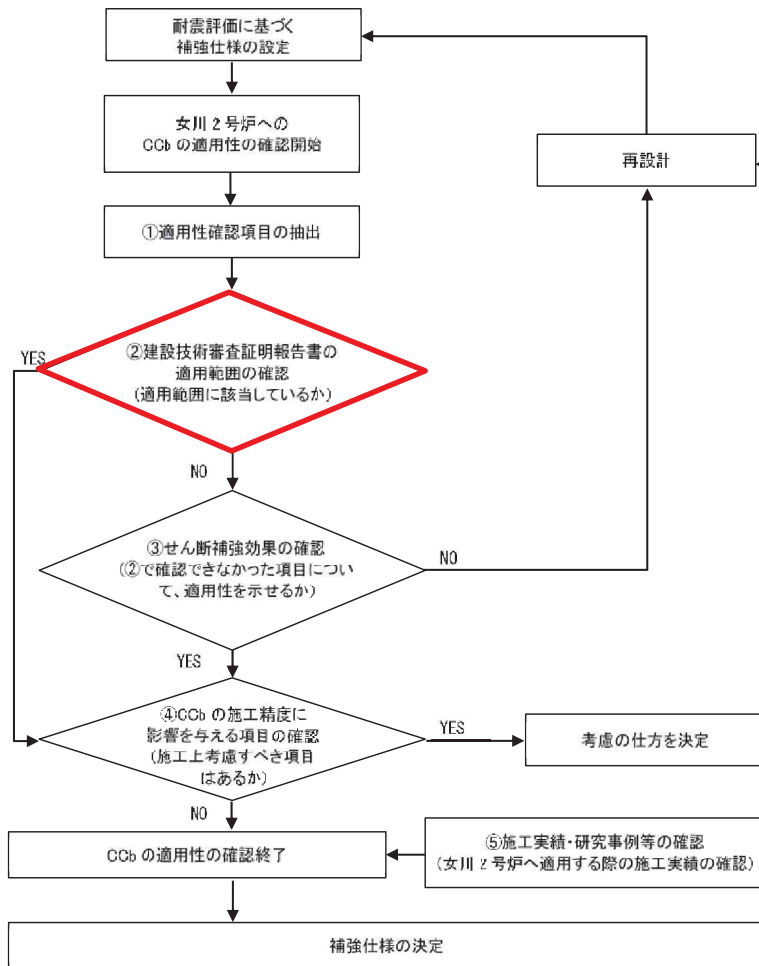


図 Ccbの適用性確認フロー

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(3/10)

- PHb工法とCCb工法の差異及び美浜3号炉と女川2号炉の適用性確認における差異の確認結果は以下のとおりである。

表 美浜3号炉(PHb工法)と女川2号炉(CCb工法)の差異(1/2)

確認項目	PHb工法 (美浜3号炉)	CCb工法 (女川2号炉)	差異の有無及び確認結果と概要
目的	<ul style="list-style-type: none"> 地震時荷重によるせん断破壊に対する補強工法として、使用している。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ 	無 —
定着体の構造	<ul style="list-style-type: none"> せん断補強筋の両端部にプレートを取り付けたもの。 プレートは、摩擦圧接により取り付けられている。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断補強筋の両端部にファインセラミック製の定着体を取り付けたもの。 定着体とせん断補強筋は、ねじ節構造であり、ねじの噛合せ及びエポキシ樹脂により取り付けられている。 	有 ○ <ul style="list-style-type: none"> 定着体部に差異有り。 「VII. 使用材料(セラミック製定着体)」と同様、建設技術審査証明報告書に合致することを確認した。
施工方法	<ul style="list-style-type: none"> 既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルにより削孔→孔内にPHbを挿入→充てん材で固定。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ(使用材料(PHbまたはCCb)の違いのみ) 既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルにより削孔→孔内にCCbを挿入→充てん材で固定。 	無 —
認定方法	<ul style="list-style-type: none"> 一般財団法人土木研究センターより建設技術審査証明を受けている。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ 	無 —
対象部材	<ul style="list-style-type: none"> 梁試験体として、棒部材(せん断スパン比※:a/d=2.7他)に加え、せん断スパン比が小さいディープビーム(a/d=1.19~1.58)についても性能確認試験を行っている。 PHb工法の性能確認は、梁試験体による正負交番載荷試験により確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 梁試験体として、棒部材(a/d=2.78)を対象に性能確認試験を行っている。 CCb工法の性能確認は、梁試験体による正負交番載荷試験により確認している。 	有 <ul style="list-style-type: none"> フロー③にて確認 各工法の性能確認方法に違いはないが、CCb工法の性能確認試験ではディープビームを対象とした試験を行っていない。
せん断耐力の設計法① (せん断耐力の算出方法)	$V_{phb} = V_{awd} \times \beta_{aw}$ V_{phb} : PHbで負担されるせん断耐力 V_{awd} : PHbを通常のせん断補強鋼材とみなして求められるせん断耐力 β_{aw} : PHbのせん断耐力向上への有効性を示す係数	$V_{CCbd} = V_{awd} \times \beta_{aw}$ V_{CCbd} : CCbで負担されるせん断耐力 V_{awd} : CCbを通常のせん断補強鋼材とみなして求められるせん断耐力 β_{aw} : CCbのせん断耐力向上への有効性を示す係数	無 —
せん断耐力の設計法② (β_{aw} の設定)	$\beta_{aw} = 1 - l_y / (2 \cdot S_{rb})$ l_y : 定着長 S_{rb} : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔 <ul style="list-style-type: none"> β_{aw}の上限値を、0.9としている。 	<ul style="list-style-type: none"> β_{aw}の算出式は、左に同じ。 β_{aw}の上限値は、ない。 	有 ○ <ul style="list-style-type: none"> β_{aw}の算定式に差異はないが、CCb工法はβ_{aw}に上限値なし。 建設技術審査証明報告書に合致することを確認した。

※: せん断スパン比: a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

PHb工法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. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(4/10)

表 美浜3号炉(PHb工法)と女川2号炉(CCb工法)の差異(2/2)

確認項目		美浜3号炉 (PHb工法)	女川2号炉 (CCb工法)		差異の有無及び確認結果と概要	
適用性確認における差異	適用性	<ul style="list-style-type: none"> 適用性確認のためのフローを設定している。 建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目については、個別に数値実験等を用いてせん断補強効果を確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ 		無	—
	検討対象 構造物① (構造諸元)	<ul style="list-style-type: none"> 構造物: 海水ポンプ室 対象部材: 底版 部材厚: 2000mm 部材照査: 梁に発生する断面力に対して照査を実施。 	① <ul style="list-style-type: none"> 構造物: 取水路(漸拡部) 対象部材: 隔壁 部材厚: 1200mm 部材照査: 梁に発生する断面力に対して照査を実施。 	② <ul style="list-style-type: none"> 構造物: 軽油タンク室 対象部材: 側壁 部材厚: 1500mm 部材照査: 版や壁部材に発生する断面力に対して照査を実施。 	有	<p>フロー③にて確認</p> <ul style="list-style-type: none"> 女川2号炉では、版や壁部材(面部材)へCCb工法を適用しており、面内荷重と面外荷重が同時に作用することから、その影響について確認する必要がある。
	検討対象 構造物② (荷重形態)	<ul style="list-style-type: none"> 分布荷重系 	<ul style="list-style-type: none"> 集中荷重系 	<ul style="list-style-type: none"> 分布荷重系 	有	<p>フロー③にて確認※</p> <ul style="list-style-type: none"> 女川2号炉では、CCbによりせん断補強を行っている部材位置を踏まえ、集中荷重系と分布荷重系の両方に着目し確認する。 <p>※: 「V. 載荷方法」と同一の内容であることから、「V. 載荷方法」にて確認する。</p>
	定着体部の 状況	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> CCbにより耐震補強を行っている構造物は、主筋の降伏強度以下、M-Φ曲線の第2折点以下(主筋の降伏)または主筋のひずみが降伏ひずみ以下の範囲にてCCb工法を使用することとしており、部材にひび割れが発生する可能性がある。 		有	<p>フロー③にて確認※</p> <ul style="list-style-type: none"> 女川2号炉においては、主筋の降伏強度以下にてCCb工法を使用することとしているため、ひび割れ発生による定着機能への影響を確認する。 <p>※: 「XI. ひび割れに対する定着機構の保持」と同一の内容であることから、「XI. ひび割れに対する定着機構の保持」にて確認する。</p>

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(5/10)

(1) 「III. 構造細目」, 「IV. 部材諸元」, 「V. 載荷方法」の確認

- 「III. 構造細目」, 「IV. 部材諸元」, 「V. 載荷方法」の項目が, フロー② (建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認) に該当することを確認する。

a. 建設技術審査証明報告書から確認した適用範囲の整理

- 建設技術審査証明報告書及び建設技術審査証明報告書の実験から確認した適用範囲について整理する。

表 適用範囲の整理

	III. 構造細目		IV. 部材諸元				V. 載荷方法	
	せん断補強鉄筋比 (%)	最大配置間隔	部材厚 (mm)	せん断スパン比	CCbの鉄筋径	CCbの鉄筋種別	主鉄筋比 (%)	荷重形態
建設技術審査証明報告書で規定されている適用範囲	せん断補強鉄筋比 $\geq 0.15\%$ 以上	最大配置間隔 \leq 部材の有効高さの1/2	—	—	D13~D32	SD345	—	—
建設技術審査証明報告書の実験から確認した範囲	—	—	500~800	2.78 (棒部材的な破壊)	—	—	1.05~1.48	集中荷重

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(6/10)

b. CCbにより耐震補強を行った構造物への適用範囲の整理

- CCbにより耐震補強を行った女川2号炉の構造物に対し、フロー②より確認できた範囲及びフロー③で確認する範囲を整理する。
- 下表より、「III. 構造細目」はフロー②より確認できており、「IV. 部材諸元」と「V. 載荷方法」のうち主に部材厚、せん断スパン比、主鉄筋比及び荷重形態がフロー②から確認できていない項目であり、これらについてはフロー③で適用性を確認する。(下表に示した構造物及び補強箇所については、補足資料1(p79~81)を参照。)

表 CCbにより耐震補強を行った構造物への整理結果

構造物名称	部 材	III. 構造細目		IV. 部材諸元				V. 載荷方法		
		せん断補強鉄筋比(%)	最大配置間隔(mm) 有効高さ(mm)	部材厚(mm)	せん断スパン比 ^{※1,2}	CCbの鉄筋径	CCbの鉄筋種別	主鉄筋比(%)	荷重形態	
取水路(漸拡部)	隔壁	0.430~0.436	300	1,200	5.61	D16	SD345	0.495	集中荷重	
			1070			D22				
原子炉機器冷却海水配管ダクト	隔壁	0.563	300 1080	1,200	6.02	D25		0.590	集中荷重	
軽油タンク室	底版	0.187	600 1300~1350	1,500	2.31~11.15	D25		0.317~0.981	分布荷重	
	側壁	0.191~0.430	450 1000~1050	1,200	3.00~14.50	D22		0.408~0.857	分布荷重	
	隔壁	0.220~0.441	300 850	1,000	3.53~16.82	D16		0.225	集中荷重	
復水貯蔵タンク基礎	遮蔽壁	0.231	200 400	500	7.75	D13		0.250~0.261	集中荷重	
			地中部			0.178~0.315		300 900 450 900	1,000	4.61~9.56
	バルブ室	頂版		0.248	200 680			800		1.47~19.19
		側壁	0.358	200 880	1,000	2.22~14.83		D19	0.220~0.365	分布荷重
		隔壁	0.248	200 480	600	7.60~9.43	D16	0.298~0.403	集中荷重	
	連絡トレンチ	頂版	0.248	200 680	800	5.44	D16	0.211~0.373	分布荷重	
		側壁	0.248~0.372	200 680		4.63		0.211~0.285	分布荷重	

■ : フロー②(建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認)より確認できた範囲 ■ : フロー③(せん断補強効果の確認)より確認する範囲

※1: せん断スパン比 a/d (a : 支間長, d : 有効高さ)

※2: せん断スパン比(a/d)が3.5以上(土木学会マニュアル2005参照)かつ荷重形態が集中荷重の場合は棒部材と判断して「フロー②より確認できる範囲」とし、 a/d が3.5以上であっても荷重形態が分布荷重の場合は等価せん断スパン比を考慮すると、ディープビーム的なせん断スパン比となる可能性があることから「フロー③より確認する範囲」として整理している。

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(7/10)

(2)「VI～VIII. 使用材料(せん断補強筋・セラミック製定着体・充てん材)」の確認

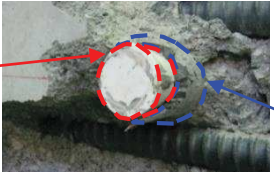
- 「VI～VIII. 使用材料(せん断補強筋・セラミック製定着体・充てん材)」は、建設技術審査証明報告書に規定されている使用材料と合致するため、フロー②に該当することを確認している。
- セラミック製定着体及び充てん材は従来工法とCCb工法の特徴的な差異となることから、これらの材料の役割と要求性能について詳細に整理する。
- 材料特性や要求性能に対する性能確認試験(定着性能試験・ねじ節強度試験)により、弱部が生じないことや部材と一体となって挙動するといった要求性能が満たされていることが確認されており、CCb工法を採用するにあたり、その性能に悪影響を与える要因がないことを確認した。
- また、定着体であるセラミックキャップの損傷(割れや欠け)の要因となる傷がないことを確認している。さらに、施工箇所となる部材にはセラミックキャップの損傷となるような衝撃荷重が作用しないことから、定着体が破損する要因はない。

表 各使用材料の役割・要求性能・材料特性

使用材料	役割	要求性能	要求性能を踏まえた材料特性																							
充てん材 (グラウト)	<ul style="list-style-type: none"> CCbと掘削孔の空隙を充てんし、既設構造部材との一体化を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> CCbと掘削孔の充てん時に、隙間ができないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 硬化後に空隙が発生しないよう、充てん性を考慮した流動性を有する無収縮グラウトを使用している。 																							
		<ul style="list-style-type: none"> 充てん部が弱部とならないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 既設コンクリートと同等以上の強度を有するため、弱部とならない。 <p style="text-align: center;">グラウトの品質管理基準</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>品質管理対象</th> <th>管理項目</th> <th>管理内容</th> <th>規格値</th> <th>管理頻度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">グラウト</td> <td>流動性</td> <td>JA ロート試験</td> <td>15～30 秒</td> <td>作業開始前</td> </tr> <tr> <td>圧縮強度</td> <td>圧縮強度試験</td> <td>28 日強度が 49.0N/mm² 以上*1</td> <td>500 本毎</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">可塑性 グラウト</td> <td>流動性</td> <td>フロー試験</td> <td>静止時 105mm～120mm 15 回打撃 150mm～200mm</td> <td>作業開始前</td> </tr> <tr> <td>圧縮強度</td> <td>圧縮強度試験</td> <td>28 日強度が 49.0N/mm² 以上*1</td> <td>500 本毎</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>*1 グラウト強度については、標準となる材料に対する製造者の目標仕様を記載している。 なお、充てん材の強度は補強する既設コンクリート躯体と同等以上である必要がある。</small></p>	品質管理対象	管理項目	管理内容	規格値	管理頻度	グラウト	流動性	JA ロート試験	15～30 秒	作業開始前	圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎	可塑性 グラウト	流動性	フロー試験	静止時 105mm～120mm 15 回打撃 150mm～200mm	作業開始前	圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎
		品質管理対象	管理項目	管理内容	規格値	管理頻度																				
グラウト	流動性	JA ロート試験	15～30 秒	作業開始前																						
	圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎																						
可塑性 グラウト	流動性	フロー試験	静止時 105mm～120mm 15 回打撃 150mm～200mm	作業開始前																						
	圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎																						
<ul style="list-style-type: none"> 定着体の定着性能を阻害せず、充てん材とコンクリート面の境界が弱部とならないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 定着体部の強度を確認する定着性能試験(p21参照)により、定着体の定着性能が発揮される材料であること及び鉄筋の規格降伏強度を超える引張荷重を作用させても、CCbが抜け出さないことを確認している。 よって、充てん材とコンクリート面の境界面は弱部とならない。 																									

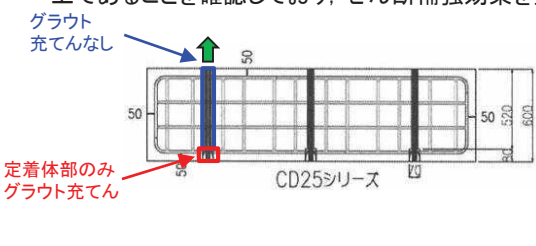
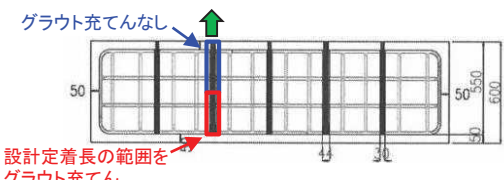
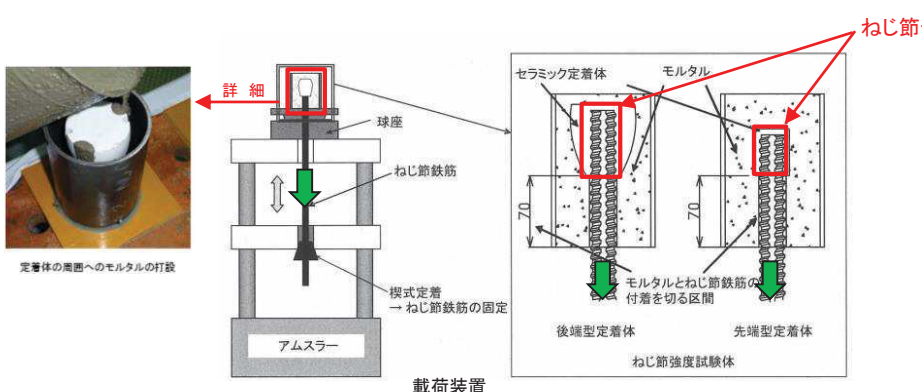

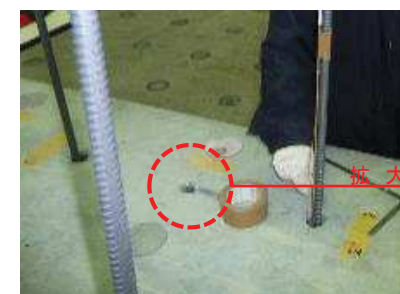

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

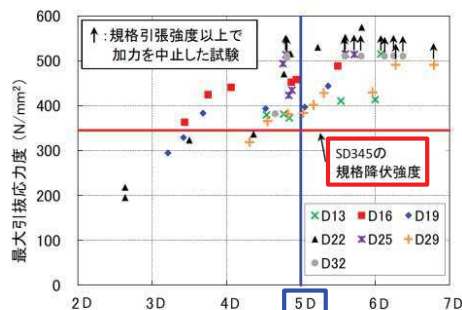
3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(8/10)

使用材料	役割	要求性能	要求性能を踏まえた材料特性																																								
セラミック 定着体 (先端・後端)	<ul style="list-style-type: none"> 後施工せん断補強筋として、従来工法(先施工)のフックの代わりとなるために、同等程度の定着性能を得る。 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリート中の定着体が弱部とならないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> セラミック(アルミナ材)はコンクリートに比べ高強度(曲げ強度300N/mm²以上)であり、鉄筋コンクリートの耐力に影響を与えないことから弱部とならない。 <p style="text-align: center;">アルミナ材の一般物性の試験結果</p> <table border="1" data-bbox="1503 475 1982 662"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th rowspan="2">アルミナ</th> <th colspan="2">参考値</th> </tr> <tr> <th>コンクリート</th> <th>鋼</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>硬度 HV (kN)</td> <td>12.74</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>ヤング率 (kN/mm²)</td> <td>317.5</td> <td>20.6</td> <td>205.8</td> </tr> <tr> <td>熱膨張係数</td> <td>6.84×10⁻⁶</td> <td>10.0×10⁻⁶</td> <td>10.0×10⁻⁶</td> </tr> <tr> <td>ポアゾン比</td> <td>0.227</td> <td>0.17</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>曲げ強度 (N/mm²)</td> <td>398</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">※:コンクリートの曲げ強度は、一般的に圧縮強度の1/5~1/8程度</p> <ul style="list-style-type: none"> また、定着体であるセラミックキャップの損傷(割れや欠け)の要因となる傷がないことを確認している。 なお、建設技術審査証明報告書に示す梁試験終了後(せん断破壊後)の状態を確認した結果、定着体に割れや欠けは確認されず、健全である。 <p style="text-align: center;">CCbの品質管理基準</p> <table border="1" data-bbox="1436 854 2030 1057"> <thead> <tr> <th>管理項目</th> <th>管理内容</th> <th>規格値</th> <th>管理頻度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>セラミック定着体へのねじ筋鉄筋の差込長さ</td> <td>マーキングゲージによる確認</td> <td>定着体の端部がマーキングにかかっていること</td> <td rowspan="3">全数</td> </tr> <tr> <td>セラミックキャップバネ(CCb)の長さ</td> <td>メジャーによる計測</td> <td>削孔後に確定した挿入長さ+10~-5mm以内</td> </tr> <tr> <td>セラミック定着体・鉄筋表面のキズ</td> <td>目視</td> <td>深さ0.5mm以上のキズが無いこと</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">試験後のセラミック定着体の状況</p>  <p style="text-align: center;">後端定着体 (定着体表面に見られる灰色の部分は、定着体に充てん材が付着したものであり、定着体の割れや欠け等の損傷ではない。)</p> <p style="text-align: right;">充てん材</p>		アルミナ	参考値		コンクリート	鋼	硬度 HV (kN)	12.74	—	—	ヤング率 (kN/mm ²)	317.5	20.6	205.8	熱膨張係数	6.84×10 ⁻⁶	10.0×10 ⁻⁶	10.0×10 ⁻⁶	ポアゾン比	0.227	0.17	0.3	曲げ強度 (N/mm ²)	398	—	—	管理項目	管理内容	規格値	管理頻度	セラミック定着体へのねじ筋鉄筋の差込長さ	マーキングゲージによる確認	定着体の端部がマーキングにかかっていること	全数	セラミックキャップバネ(CCb)の長さ	メジャーによる計測	削孔後に確定した挿入長さ+10~-5mm以内	セラミック定着体・鉄筋表面のキズ	目視	深さ0.5mm以上のキズが無いこと
		アルミナ	参考値																																								
			コンクリート	鋼																																							
硬度 HV (kN)	12.74	—	—																																								
ヤング率 (kN/mm ²)	317.5	20.6	205.8																																								
熱膨張係数	6.84×10 ⁻⁶	10.0×10 ⁻⁶	10.0×10 ⁻⁶																																								
ポアゾン比	0.227	0.17	0.3																																								
曲げ強度 (N/mm ²)	398	—	—																																								
管理項目	管理内容	規格値	管理頻度																																								
セラミック定着体へのねじ筋鉄筋の差込長さ	マーキングゲージによる確認	定着体の端部がマーキングにかかっていること	全数																																								
セラミックキャップバネ(CCb)の長さ	メジャーによる計測	削孔後に確定した挿入長さ+10~-5mm以内																																									
セラミック定着体・鉄筋表面のキズ	目視	深さ0.5mm以上のキズが無いこと																																									
	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリートと一体となって挙動すること。 	<ul style="list-style-type: none"> セラミックを構成するアルミナ材の熱膨張係数、ポアゾン比及びヤング率はコンクリート・鋼材と同等であり、一体となって挙動する(上表「アルミナ材の一般物性の試験結果」青枠部参照)。 																																									
	<ul style="list-style-type: none"> 後施工せん断補強筋として、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有すること。 	<ul style="list-style-type: none"> 定着体部の強度を確認する「定着性能試験」及びねじ筋部の強度を確認する「ねじ筋強度試験」により、定着体がせん断補強効果を発揮するための定着性能を有していることを確認している(p21参照)。 																																									

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(9/10)

項目	定着性能試験	ねじり強度試験						
目的	<ul style="list-style-type: none"> 「定着体部のみ(後端側)」または「定着体部と設計定着長をグラウト充てんした試験体(先端側)」の定着部が、母材であるねじり鉄筋の規格降伏強度相当の引張荷重以上のねじり強度を有していることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 定着体のねじり部(定着体とねじり鉄筋の接合部)が、母材となるねじり鉄筋の規格降伏強度相当の引張荷重以上のねじり強度を有していることを確認する。 						
確認内容	<p>【後端型定着体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 定着体部のみをグラウト充てんし、定着体のみで定着強度が母材の規格降伏強度以上であることを確認しており、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有している。  <p>【先端型定着体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計定着長(5D, D: 鉄筋径)の範囲をグラウト充てんし、定着体及び鋼材とコンクリートの付着による定着強度が母材の規格降伏強度以上であることを確認しており、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有している。 設計定着長(5D)は、下図「先端型定着体の定着力と定着長の関係」とおり、鉄筋の直径の5倍以上の定着長があれば母材の規格降伏強度相当以上まで定着力を確保できることが確認できている。 また、下表「定着体の有無による定着長の比較」とおりCCbの先端型定着体を取り付けることで、定着体無しの場合よりも設計定着長を20%程度低減させ、定着性能を向上させることができる。  <p>定着体の有無による定着長の比較</p> <table border="1" data-bbox="262 1315 640 1477"> <thead> <tr> <th>定着体の種類</th> <th>設計定着長</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>定着体有り(先端側定着体)</td> <td>5D</td> </tr> <tr> <td>定着体無し※</td> <td>6D</td> </tr> </tbody> </table> <p>※: RMA及びベストグラウトバーを参照し記載。</p>	定着体の種類	設計定着長	定着体有り(先端側定着体)	5D	定着体無し※	6D	<ul style="list-style-type: none"> セラミック定着体部のみモルタル付着し、ねじり鉄筋とモルタルの付着を切った試験体を用いて試験を行い、ねじり部の強度が母材(鋼材)の規格降伏強度以上であることを確認しており、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有している。     <p>試験終了時※の状況 (孔周辺のコンクリート表面にはひび割れ等は認められない。) ※: 規格降伏強度確認後、コンクリート表面位置で鉄筋を切断した状況の写真。</p>
定着体の種類	設計定着長							
定着体有り(先端側定着体)	5D							
定着体無し※	6D							



先端型定着体の定着力と定着長の関係

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.3 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(10/10)

(3)「XII. 変形量」の確認

- 「XII. 変形量」が、フロー②に該当することを確認する。
- CCbにより耐震補強を行った構造物の変形量(層間変形角)が、建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えていないことを確認する。

a. 梁試験体の変形量

- 梁試験体のせん断耐力時における載荷点変位より変形量(変形角)を算出し、下表のとおり整理した。
- 梁試験体は女川2号炉での施工実績を踏まえ試験体No.1-3とNo.3-3について整理し、変形角が1%を超えていることを確認している。

b. CCbにより耐震補強を行った構造物の変形量

- CCbにより耐震補強を行った構造物の変形量の確認例として、取水路(漸拡部)の結果を示す。
- 取水路(漸拡部)の層間変形角は最大でも0.29%(29/10,000)程度(基準地震動S_s-D2による照査結果(暫定値))であり、梁試験体の変形量以内である。
- また、女川2号炉では、かぶりコンクリートの剥落によるCCbの定着体部の定着機能を阻害するおそれがあるため、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態である圧縮縁コンクリートひずみ1.0%または層間変形角1%(1/100)に、十分な余裕をもってCCb工法を使用する。

表 梁試験体の変形量(変形角)

試験体	せん断スパン長a[mm]	載荷点変位δ[mm]	変形角R[%]
No.1-3	1640	21.0	1.28
No.3-3	1195	18.1	1.51

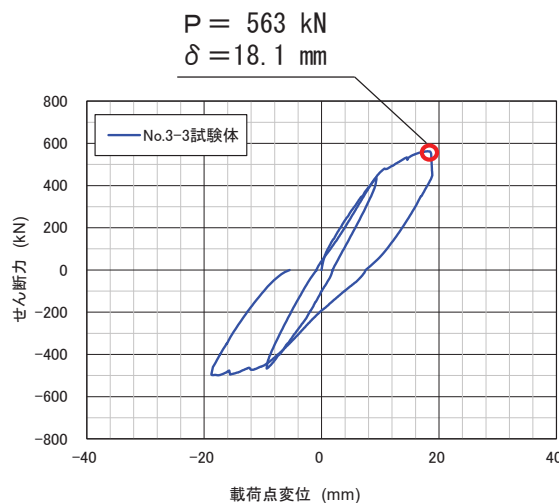


図 荷重-変位関係(試験体No.3-3の例)

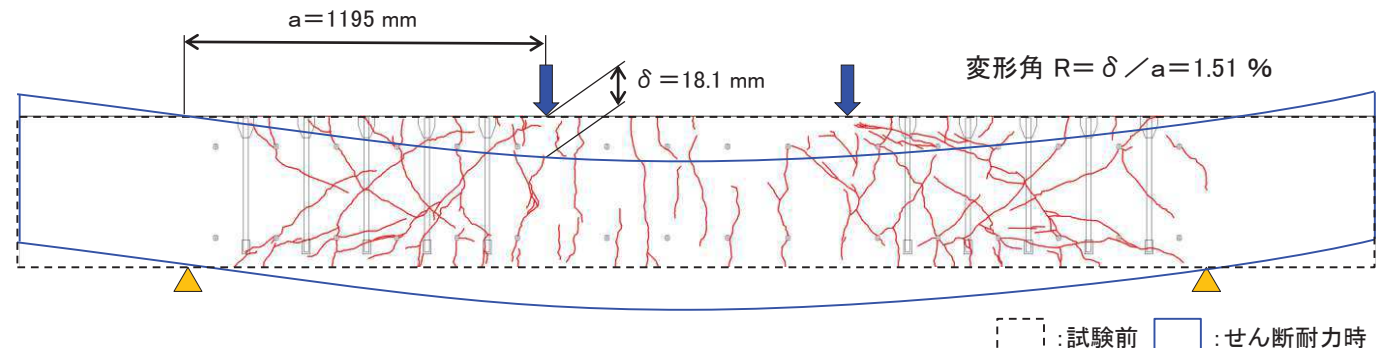


図 ひび割れ及び変形状況のイメージ図(試験体No.3-3の例)

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.4 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認

- フロー②にて確認できなかった確認項目(A)～(G)に対して、せん断補強効果が期待できることを4章～8章で確認する。

表 フロー②にて確認できなかった項目と確認結果の概要

フロー②にて確認できなかった項目		確認結果の概要	確認ページ
IV. 部材諸元	確認項目(A)	実験と異なる部材諸元(部材厚, せん断スパン比及び主鉄筋比等)や載荷方法でも適用可能であること及びせん断ひび割れ抑制効果があることを数値解析により確認した。	詳細は「4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)～(C))」(p27～51)に示す。
V. 載荷方法	確認項目(B)		
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	確認項目(C)		
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	確認項目(D)	建設技術審査証明報告書の実験及び実験を再現した数値解析結果より、定着体部やその周囲に実験と性状が異なるひび割れが生じても定着機能が保持されていることを確認した。	詳細は「5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))」(p53～60)に示す。
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	確認項目(E)	CCb工法のせん断補強効果を発揮するためには、コンクリートが健全である必要があることから、ひび割れ状況及び圧縮強度試験によりコンクリートの健全性を確認した。	詳細は「6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))」(p62～64)に示す。
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	確認項目(F)	CCb工法では、ディープビームを対象とした性能確認試験を行っていないことを踏まえ、「応力の負担機構」及び「ひび割れの影響」の観点から整理を行い、適用性を確認した。	詳細は「7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))」(p66～69)に示す。
	確認項目(G)	女川2号炉では、面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材も対象としていることから、「設計の考え方」及び「ひび割れの影響」の観点から整理を行い、適用性を確認した。	詳細は「8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))」(p71～72)に示す。

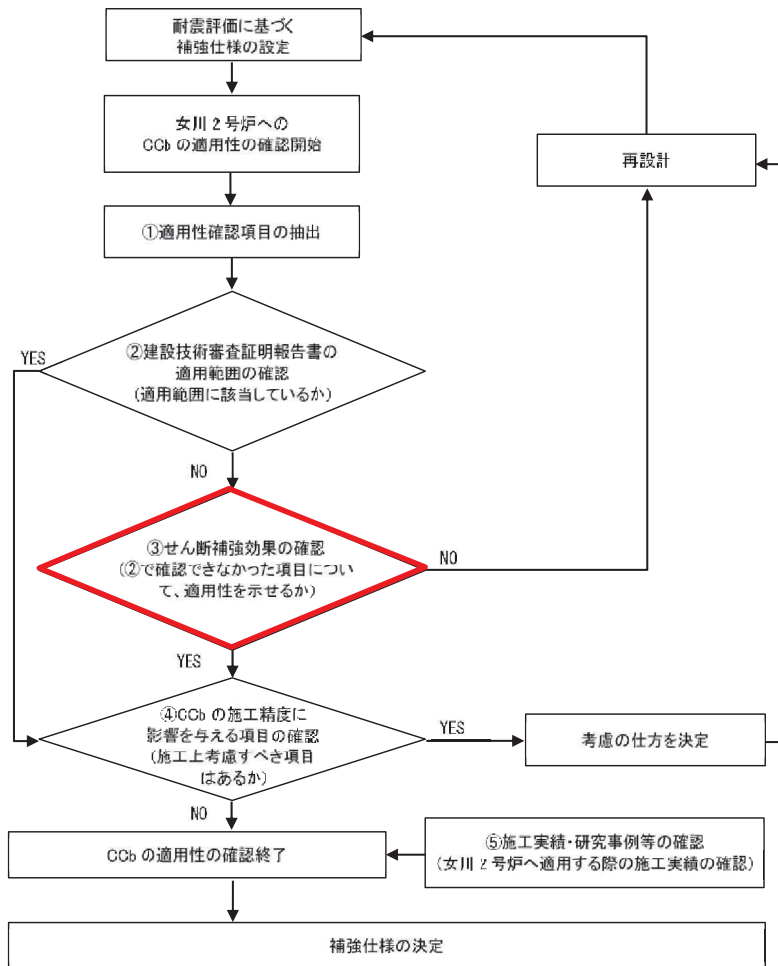
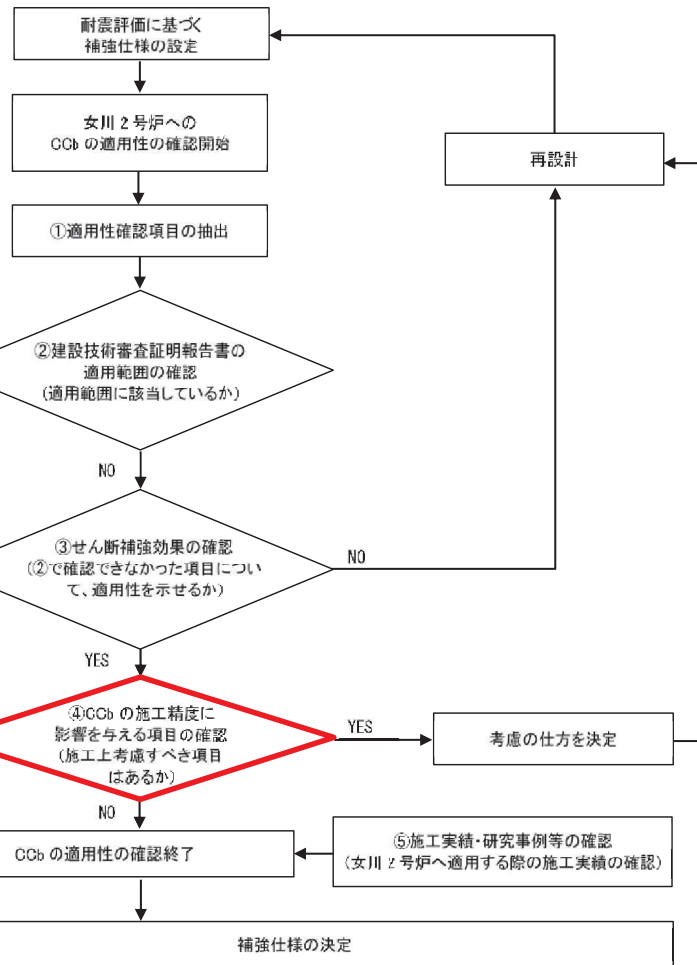


図 CCbの適用性確認フロー

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.5 ④CCbの施工精度に影響を与える項目の確認結果

- ・ 施工精度に影響を与える項目を抽出し、施工精度の低下やせん断補強効果に大きな影響を与えないことを確認する。
- ・ 項目として、「a. 削孔方法」、「b. 削孔角度」、「c. 削孔位置」、「d. グラウトの充てん性」について抽出を行い、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精度の低下が生じる可能性は低いことを確認した。



a. 削孔方法

- ・ コンクリートコアドリルを使用することで、削孔方向と削孔深さを精度良く確保している。

b. 削孔角度

- ・ コンクリートコアドリルを専用架台に設置し、ドリルの鉛直方向及び水平方向が削孔面に対して垂直となるよう水平器、金尺等で確認し削孔することから、削孔角度のばらつきが生じる可能性は低い。

c. 削孔位置

- ・ 部材内部に障害物があり計画位置で削孔できずCCbを計画通り配置できない可能性がある。
- ・ その際は、付近を再削孔しCCbを挿入することで設計上必要な補強鉄筋量を確保する。

d. グラウトの充てん性

- ・ 建設技術審査証明報告書のグラウト充てん性確認実験により、削孔内に設置したCCbの先端定着部までグラウトが密実に充てんされ、CCb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。

図 Ccbの適用性確認フロー

3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.6 ⑤施工実績・研究事例等の確認結果

- Ccbの施工実績及び後施工せん断補強に関する研究事例を踏まえ、CCb工法への設計及び施工への反映事項を確認する。
- 表のとおり、様々な施設及び幅広い範囲の部材厚にて実績があり、豊富な施工実績があることを確認した。
- また、研究事例等から着目すべき事項を整理し、CCb工法へ反映されていることを確認した。

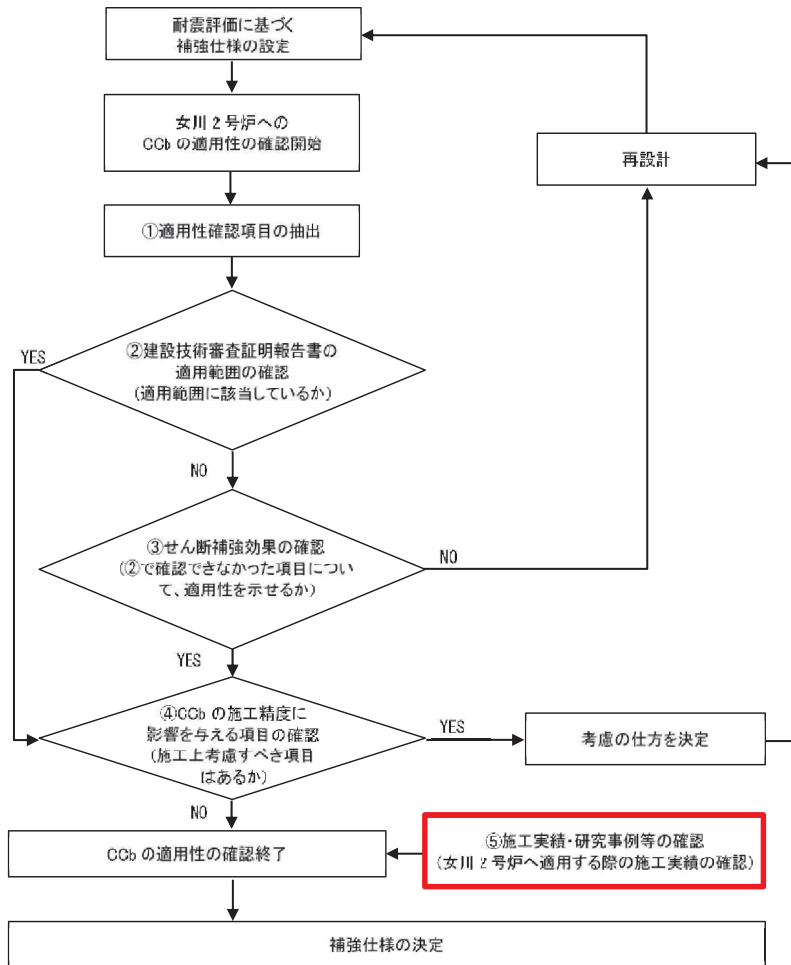


図 Ccbの適用性確認フロー

表 施工実績(2017年9月30日現在)

対象施設		施工件数	部材厚(mm)	件数
道路・地下街	道路橋他		~500	78
浄化センター	最終沈澱池、ポンプ室他		501~1000	126
浄水場	配水池他		1001~1500	77
水門	防潮水門他		1501~2000	39
排水機場	排水機場他		2001~3000	10
排水路	地下排水路		3001~	7
発電所・プラント	貯水池・水路他			
ダム	ダム			
空港	空港			
護岸	防潮堤他			
栈橋	栈橋			

施工中案件を含む 合計:174件 376,000本以上

研究事例・施工実績に関する文献の主な着目すべき事項

- 上表に示すように、硫酸等の影響を受ける腐食環境下である浄化センター(下水道処理施設)での実績もあり、女川2号炉で採用する環境よりも厳しい環境下での施工実績を確認した。
- 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、定着性能の確認、梁試験体の正負交番載荷によるせん断補強効果の確認を実施しており、CCb工法においても同様の確認を行っている。
- 標準フックのせん断補強筋(先施工)が負担できるせん断力に対する、後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されており、CCb工法においても同様の評価手法であることを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

目次

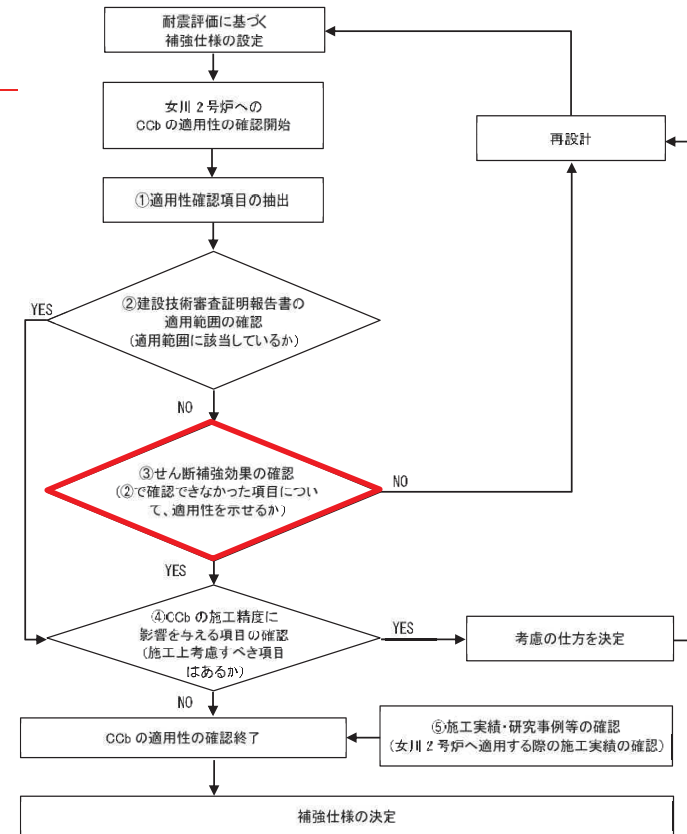
1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
 - 4.1 検討方針
 - 4.2 ステップ①: CCbの解析上のモデル化方法
 - 4.3 ステップ②: 大きな部材厚に対する適用性確認
 - 4.4 ステップ③: 実施工部材の応答性状の確認
 - 4.5 まとめ
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

CCbの適用性確認フロー



フロー③にて確認する項目

フロー③にて確認する項目	
IV. 部材諸元	確認項目(A)
V. 载荷方法	確認項目(B)
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	確認項目(C)
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	確認項目(D)
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	確認項目(E)
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	確認項目(F)
	確認項目(G)

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.1 検討方針

- Ccbの適用性確認フローの「3.4 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認」で示した確認項目のうち「(A)部材諸元」、「(B)載荷方法」、「(C)せん断ひび割れ抑制効果」について確認する。
- 女川2号炉においてCcb工法を適用した構造物と建設技術審査証明報告書に記載の各種実験条件(部材諸元(部材厚, せん断スパン比, 主鉄筋比)及び載荷方法等)と異なっても, Ccb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する。
 - 数値実験を行うにあたり, Ccbのモデル化方法の確認(ステップ①)を行う。ステップ①の結果を用いて, 女川2号炉でCcbにより耐震補強を行った構造物に相当する部材厚に対する適用性を確認(ステップ②)する。次に, 荷重形態等の違いに着目し, 女川2号炉の実施工部材への適用性を確認(ステップ③)する。

ステップ①:「Ccbの解析上のモデル化方法の確認」

【確認内容】

- Ccb工法は従来工法(先施工)よりも定着性能が劣るものと仮定し, Ccbのモデル化方法(せん断補強鉄筋の無効区間の設定)を確認する。
- 建設技術審査証明報告書の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の比較により妥当性を確認する。

【確認結果の概要】

- 実験結果と解析結果の比較を行いCcbのモデル化方法として, せん断補強鉄筋の無効区間を「先端から5D(D:鉄筋径)の区間」とした。

ステップ②:「建設技術審査証明報告書の実験よりも大きな部材厚に対する適用性の確認」:「(A)部材諸元」のうち部材厚に着目。

【確認内容】

- 女川2号炉においてCcb工法を適用した構造物のうち最も部材厚が大きい軽油タンク室底版($t=1500\text{mm}$)を想定して材料非線形解析を行い, 実験よりも大きな部材厚に対する適用性を確認する。

【確認結果の概要】

- 従来工法(先施工)による材料非線形解析との比較を行い, 従来工法とCcb工法の間でせん断ひび割れ抑制効果に影響を与えるような特異な状況等が確認されなかったことから, 実験よりも大きな部材厚に対する適用性を確認した。

ステップ③:「実施工部材の応答性状の確認」:「(A)部材諸元」のうちせん断スパン比(破壊形態)及び「(B)載荷方法」に着目。

【確認内容】

- 女川2号炉でCcbにより耐震補強を行った構造物のうち取水路(漸拡部)隔壁を対象に材料非線形解析を行い, 従来工法(先施工)との比較により女川2号炉で用いた部材及び荷重レベルでの適用性を確認する。(集中荷重系)
- 荷重形態や破壊形態の違いに着目し, 土圧による分布荷重が作用する軽油タンク室側壁についても同様に適用性を確認する。(分布荷重系)

【確認結果の概要】

- 従来工法による材料非線形解析との比較を行い, 取水路(漸拡部)隔壁及び軽油タンク室側壁においても, 従来工法とCcb工法の間でせん断ひび割れ抑制効果に影響を与えるような特異な状況等が確認されなかったことから, 実施工部材に対する適用性を確認した。

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①:CCbの解析上のモデル化方法(1/10)

- Ccbの定着効果及び付着効果を考慮したモデル化方法の妥当性の確認を目的に、建設技術審査証明報告書の実験で用いた試験体をモデル化し、材料非線形解析を行っている。
- 試験体は下表のとおり、せん断補強筋径及び定着体の型が女川2号炉の施工実績と合致する、シリーズ1(試験体No.1-3)とシリーズ3(試験体No.3-3:CCb先端位置が主筋の図心位置であり女川2号炉と同じ条件)を選定する。

表 試験体概要

試験体	断面寸法 b×h(mm)	せん断 スパン比	せん断 補強筋径	定着体の 組合せ
シリーズ1	825×685	2.78	D22	標準型※
シリーズ2	825×800	同上	D29	同上
シリーズ3	600×500	同上	D16	同上
シリーズ4	同上	同上	D16	両端先端型 両端後端型

■ : 女川2号炉で実績のある補強 □ : 材料非線形解析を実施

※: 差込側に後端型、埋込側に先端側となる標準的なCCbの組合せ

表 シリーズ1の試験体の種類と諸元

	No.1-1	No.1-2	No.1-3
断面寸法 $b \times h$	825×685 mm		
せん断スパン長 a	1,640 mm		
せん断スパン比 a/d	2.78		
実験時の コンクリート圧縮強度 f_c	32N/mm ²	33N/mm ²	34 N/mm ²
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	—	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 「セラミックキャ ップバー (CCb)」
せん断補強鉄筋比 ρ_w	0	0.29%	0.29%
試験の目的	コンクリート負担分 V_c の評価	後施工せん断補強 鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価	後施工せん断補強 鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価

表 シリーズ3の試験体の種類と諸元

	No.3-1	No.3-2	No.3-3	No.3-4	No.3-5	No.3-6
断面寸法 $b \times h$	600×500 mm					
せん断スパン長 a	1,195 mm					
せん断スパン比 a/d	2.78					
実験時のコンクリート 圧縮強度 f_c [N/mm ²]	41.2	40.6	42.4	42.6	42.9	42.6
帯鉄筋・補強鉄筋の 種類、および形状	—	SD345 D16 両端フック	SD345 D16 セラミック キャップバー (CCb)			
せん断補強鉄筋比 ρ_w	0.33%					
セラミックキャップ バー(CCb)の埋込み側先 端位置	—	—	主鉄筋の 図心	主鉄筋の表面 から5mm 手前	配力鉄筋の 表面から 5mm 手前	
定着体の組合せ	—			標準型		
試験の目的	試験体諸元の 妥当性検討		後施工せん断補強 鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価	後施工せん断補強 鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価		

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①: CCbの解析上のモデル化方法(2/10)

(1) CCbの定着効果のモデル化

- CCbのせん断補強効果を確認するための材料非線形解析による数値実験において、CCb先端の領域では先施工より定着性能が劣る可能性があることから、せん断補強筋が機能しない(無効区間)ものとしてCCbのモデル化を行っている。
- せん断補強筋の無効区間の設定に関する考え方は、前川ら*の論文を参照しており、せん断補強筋の定着不良を有する部材のせん断耐力評価は、材料非線形解析を用いてせん断補強筋の無効区間を設けることで評価可能であることが示されている。

a. 前川らの検討内容

- 前川ら*は、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の確認を目的に、実験的検証に加え材料非線形解析による定着不良部のモデル化について検討している。
- せん断補強筋の定着不良を模擬するため、せん断補強筋端部近傍の定着を効かなくした梁に対する実験を行い、その実験の再現として、せん断補強筋の定着不良部を鉄筋無効区間として要素内鉄筋比をゼロとした材料非線形解析を行うことで、実験のせん断耐力を評価することが可能であることを示している。

※: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(コンクリート工学年次論文集, 2004)

b. モデル化方法

- 構造部材は、平面応力要素にてモデル化する。
- CCbのモデル化は、CCb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。
- CCb先端側の主筋領域(かぶりの2倍)の鉄筋比をゼロとするCCb1とCCb先端側の主筋軸心から必要定着長5D(D:鉄筋径)の鉄筋比をゼロとするCCb2の2パターンで検討を行う。

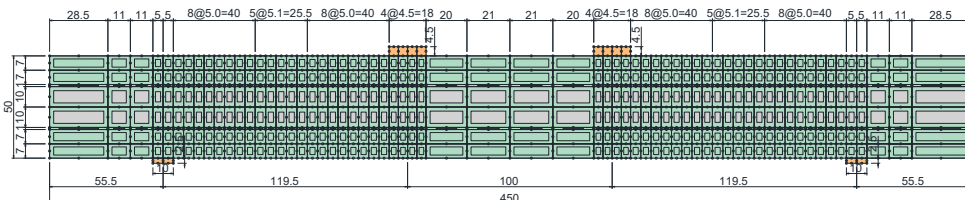
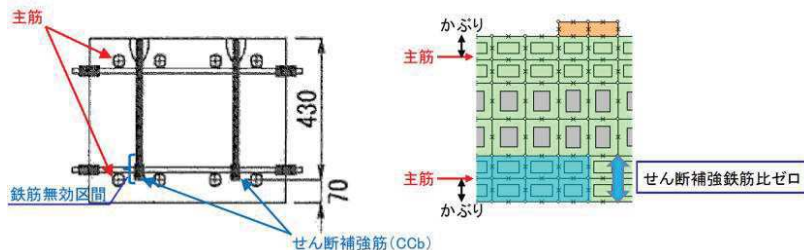


図 解析モデル図(試験体No.3-3の例)

表 CCbのモデル化方法

解析パターン	CCbのモデル化方法
CCb1	<ul style="list-style-type: none"> • CCb先端側の主筋領域(かぶりの2倍)の鉄筋比をゼロ • シリーズ1(試験体No.1-3):無効区間 95mm × 2 = 190mm • シリーズ3(試験体No.3-3):無効区間 70mm × 2 = 140mm
CCb2	<ul style="list-style-type: none"> • CCb先端側の主筋軸心から必要定着長5D(D:鉄筋径)の鉄筋比をゼロ • シリーズ1(試験体No.1-3):無効区間 95mm + 5 × 22mm = 205mm • シリーズ3(試験体No.3-3):無効区間 70mm + 5 × 16mm = 150mm

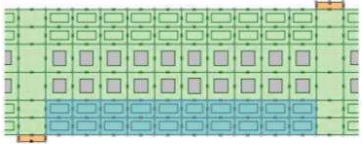
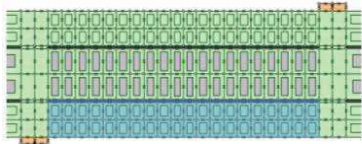
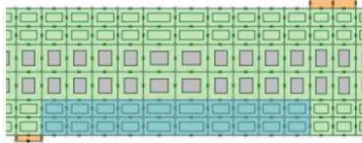
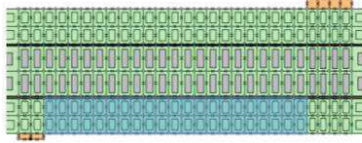
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①:CCbの解析上のモデル化方法(3/10)

c. 妥当性の確認

- 定着効果のモデル化の妥当性は、建設技術審査証明報告書の梁試験の結果から得られるせん断耐力と材料非線形解析より得られるせん断耐力を比較し、試験のせん断耐力を再現できているかにより確認を行っている。
- 表に示すとおり、シリーズ1・3共に実験から得られたせん断耐力に対して、CCb1のせん断耐力がCCb2のせん断耐力より大きいという傾向が確認された。
- また、シリーズ1ではCCb1とCCb2でせん断耐力の再現性(実験結果との解離)は同程度であり、シリーズ3ではCCb2が再現性が良く、両シリーズにおいてCCb2のせん断耐力がやや保守的な評価となる。
- これらより、材料非線形解析によるCCbのモデル化をCCb2の方法で行うことで、試験のせん断耐力を良好に再現できると共に、保守的評価が可能であることを確認できた。

表 各解析パターンの確認結果

解析パターン※	CCbのモデル化	実験のせん断耐力(kN)	解析によるせん断耐力(kN)	再現性
シリーズ1 No.1-3試験体	 <p>無効区間: 95mm × 2 = 190mm</p>	1050	1123 (<u>実験値の107%</u>)	△ (再現性は CCb2と同程度)
	 <p>無効区間: 95mm + 5 × 22mm = 205mm</p>		965 (<u>実験値の92%</u>)	△ (再現性は CCb1と同程度)
シリーズ3 No.3-3試験体	 <p>無効区間: 70mm × 2 = 140mm</p>	563	676 (<u>実験値の120%</u>)	× (再現性が 低い)
	 <p>無効区間: 70mm + 5 × 16mm = 150mm</p>		550 (<u>実験値の98%</u>)	○ (再現性が 高い)

※:CCb1:「CCb先端側主筋領域(かぶりの2倍)の鉄筋比をゼロ」として無効区間を設定
 CCb2:「CCb先端側主筋軸心から必要定着長5Dの鉄筋比をゼロ」として無効区間を設定

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①: CCbの解析上のモデル化方法(4/10)

d. 解析パターン(CCb1・CCb2)の違いによるせん断耐力への影響確認

- 「c. 妥当性の確認」に示したとおり, CCbのモデル化はCCb2の方法で行うことが妥当であることを確認しているが, 解析パターンの違いによるせん断耐力への影響について, 建設技術審査証明報告書の実験結果に着目し確認する。
- また, CCb1と比べCCb2は要素のアスペクト比の関係からメッシュ分割が細くなっているため, メッシュサイズの違いによる解析結果への影響についても併せて確認する。

(a) 建設技術審査証明報告書の実験結果

- CCbの先端位置をパラメータとして影響検討を行った, シリーズ3の梁試験結果について整理する。
- CCbの先端位置を「主鉄筋位置(No.3-3)」、「主鉄筋の表面より5mm手前(No.3-4・3-5)」、「配力鉄筋の表面より5mm手前(No.3-6)」とした3ケースの検討を行い, せん断耐力を算出している。
- 下表のとおり, CCbの先端位置が主鉄筋位置より離れるに従って, せん断耐力が低下していることがわかる。
- これは, 前川らの論文に示されている傾向と同様であり, せん断補強筋が主鉄筋から離れるに従い, トラス機構の形成が弱まり, せん断耐力が低下したと考えられる。

表 建設技術審査証明報告書の実験結果(シリーズ3)

項目	試験体No.3-3	試験体No.3-4・3-5	試験体No.3-6
CCbの先端位置	<p>主鉄筋位置</p> <p>主鉄筋 図心位置</p> <p>せん断補強鉄筋D16</p>	<p>主鉄筋の表面より5mm手前</p> <p>せん断補強鉄筋D16</p> <p>$D35/2+5=22.5\text{mm}$</p>	<p>配力鉄筋の表面より5mm手前</p> <p>せん断補強鉄筋D16</p> <p>$D35/2+D16+5=38.5\text{mm}$</p>
せん断耐力(kN)	563	515(No.3-4), 531(No.3-5)	497

(b) メッシュサイズの影響について

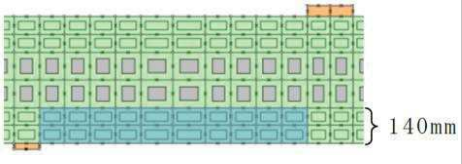
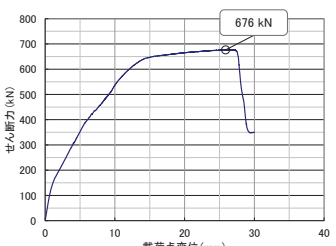
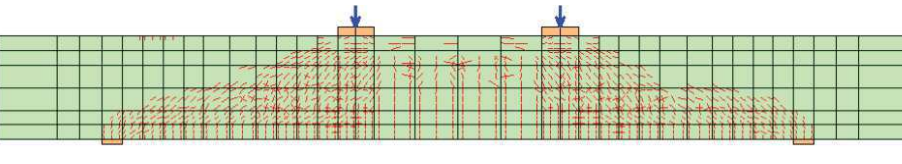
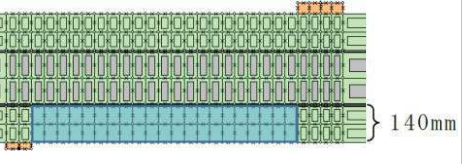
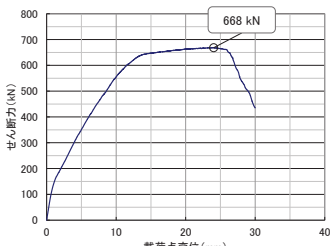
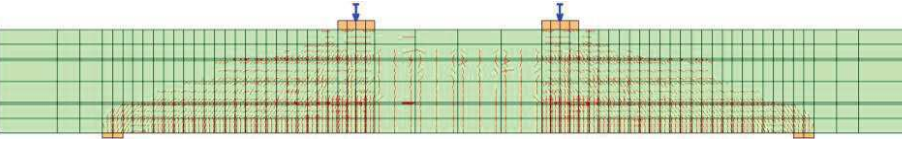
- CCbの解析上のモデル化方法を検討するにあたり, せん断補強筋の無効区間をパラメータとしているため, CCb1とCCb2ではメッシュ分割が異なる。
- メッシュ分割を行うにあたり, CCb2では無効区間の設定において小さな要素が存在するため要素のアスペクト比の関係からCCb1と比べてメッシュ分割が細くなっていることから, メッシュサイズの違いが, せん断耐力等に与える影響について確認する。
- 確認はシリーズ3の試験体を対象とし, CCb2の解析モデルでCCb1の無効区間(必要定着長 $2C=140\text{mm}$ の鉄筋比をゼロ)を反映した材料非線形解析(CCb1'とする)により行う。結果を次ページに示す。

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①: CCbの解析上のモデル化方法(5/10)

- 下表にCCb1及びCCb1' の材料非線形解析の結果を示す。
- 下表に示すとおり、CCb1とCCb1' のせん断耐力はほぼ同一となり、ひび割れ状況についても大きな差がないことを確認した。
- 以上より、メッシュサイズの違いによるせん断耐力及びひび割れの発生状況への影響がないことを確認した。

表 CCb1及びCCb1' の材料非線形解析の結果

解析パターン	CCbのモデル化	解析によるせん断耐力	ひび割れ状況※
シリーズ3 No.3-3試験体	<p>CCb1</p>  <p>無効区間: 70mm × 2 = 140mm</p>	<p>676kN</p> 	
	<p>CCb1'</p>  <p>無効区間: 70mm × 2 = 140mm</p>	<p>668kN (CCb1の99%)</p> 	

※: 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。

(c) 解析パターン(CCb1・CCb2)の違いによる材料非線形解析への影響

- 「c. 妥当性の確認」に示したとおり、CCb2は無効区間がCCb1と比べて大きく、せん断耐力の値が小さい。
- これは、「(a)建設技術審査証明報告書の実験結果」に示したとおり、前川らの論文及び実験結果と同様の傾向であり、せん断補強筋の無効区間によりトラス機構の形成が弱まって、せん断耐力が低下したものであり、CCb1と比較して無効区間が大きいCCb2のせん断耐力が小さくなったと考えられる。

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①: CCbの解析上のモデル化方法(6/10)

e. 従来工法とCCb工法の材料非線形解析結果の比較

- 従来工法(先施工)とCCb工法の材料非線形解析の結果を、表に示す。
- 従来工法は、CCbの定着不良領域(無効区間)を設定していないため、シリーズ1・3共にせん断耐力がCCbの実験値を上回っている。
- ひび割れ状況を従来工法とCCb工法で比較すると、CCb工法はひび割れの分散性が若干低下しているが、これは無効区間の設定方法について参考とした前川らの論文においても同様の傾向が確認できており、CCbの定着不良域(無効区間)を適切にモデル化できている。
- CCb工法のうちCCb1とCCb2のひび割れ状況を比較すると、CCb1の方がCCb2よりもひび割れの分散性が良く、せん断耐力も大きい値となるが、ひび割れ分散性の差異が軽微であることと、「c. 妥当性の確認」にて示したとおり、せん断耐力を保守的に評価する観点からCCb2の方法でモデル化することが妥当である。

表 従来工法とCCb工法の材料非線形解析結果(シリーズ1)

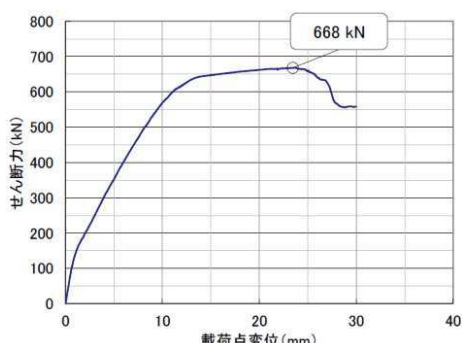
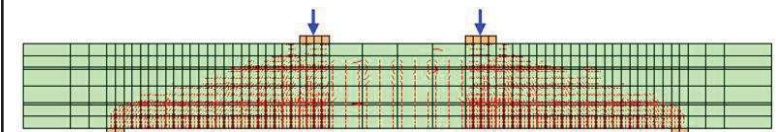
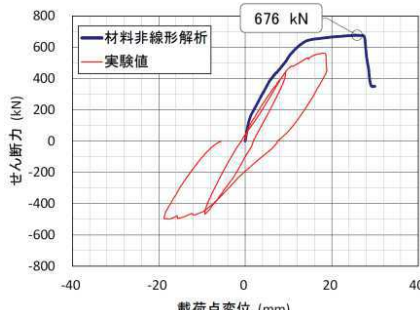
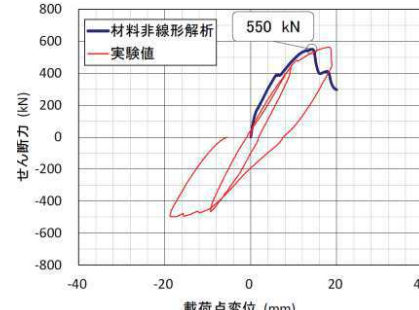
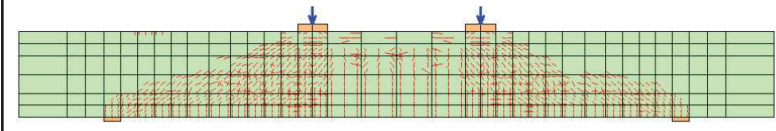
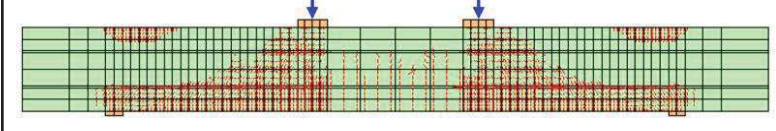
解析ケース		荷重-変位関係	ひび割れ状況*
シリーズ1	従来工法	<ul style="list-style-type: none"> 最大荷重: 1202kN 	
	CCb工法	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>【CCb1: 無効区間2C】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最大荷重: 1123kN(実験値の107%) 実験値: 1050kN(試験体No.1-3) </div> <div style="width: 45%;"> <p>【CCb2: 無効区間C+5D】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最大荷重: 965kN(実験値の92%) 実験値: 1050kN(試験体No.1-3) </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column;"> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>【CCb1: 無効区間2C】</p> </div> <div> <p>【CCb2: 無効区間C+5D】</p> </div> </div>

※: 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。

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①: Ccbの解析上のモデル化方法(7/10)

表 従来工法とCCb工法の材料非線形解析結果(シリーズ3)

解析ケース		荷重-変位関係	ひび割れ状況※
シリーズ3	従来工法	<ul style="list-style-type: none"> 最大荷重: 668kN 	
	CCb工法	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>【CCb1: 無効区間2C】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最大荷重: 676kN(実験値の120%) 実験値: 563kN(試験体No.3-3)  </div> <div style="width: 45%;"> <p>【CCb2: 無効区間C+5D】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最大荷重: 550kN(実験値の98%) 実験値: 563kN(試験体No.3-3)  </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; justify-content: space-around;">   </div>

※: 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。

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①: Ccbの解析上のモデル化方法(8/10)

(2) Ccbの付着効果のモデル化

- 「(1) Ccbの定着効果のモデル化」と同様に, Ccbとコンクリート間の付着効果の妥当性の確認を行う。
- 付着効果の妥当性の確認は, 建設技術審査証明報告書の実験結果と実験を模擬した材料非線形解析の結果のひび割れ状況の比較により行うこととし, 材料非線形解析におけるCcbのモデル化は「(1) Ccbの定着効果のモデル化」で再現性が良く保守的評価が可能なCcb2の方法とする。

a. モデル化方法

- Ccbのせん断補強効果を確認するための材料非線形解析による数値実験において, Ccbの付着が有効な領域は鉄筋コンクリート要素にて, Ccbとコンクリートが完全付着であるものとしてモデル化しており, 付着の影響が及ばない領域は無筋コンクリート領域としてモデル化している。
- セラミック定着体の強度はコンクリートより強いこと, かつ定着部の強度試験より, セラミック定着体とコンクリート間で破壊は生じないことから, 鉄筋コンクリートの分散ひび割れモデルにおいて, ひび割れの影響は鉄筋コンクリート要素の剛性を低下させることにより考慮する。

b. 妥当性の確認

- 付着効果のモデル化の妥当性の確認は, 建設技術審査証明報告書のシリーズ3(梁試験体No.3-3)を例に交番載荷試験の結果と材料非線形解析によるCcbの無効区間(Ccb2: Ccb先端側主筋軸心から必要定着長5D(D: 鉄筋径)の鉄筋比をゼロ)を考慮した試験の再現解析結果の比較により行う。
- Ccbとコンクリートが付着していると仮定した解析結果と試験結果の比較から, ひび割れ状況を良好に再現できていることが確認できた(比較結果は, 次ページ参照)。

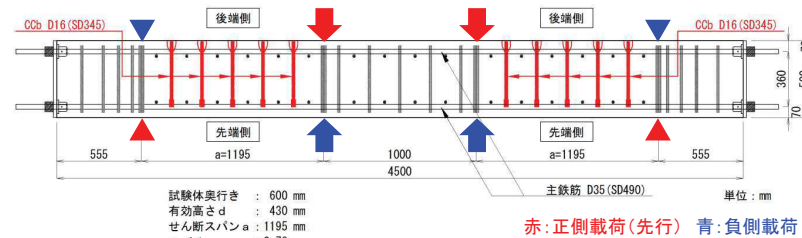


図 試験体概要 (No.3-3)

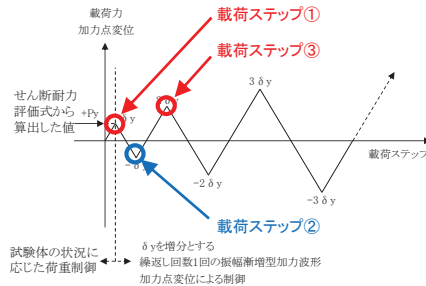
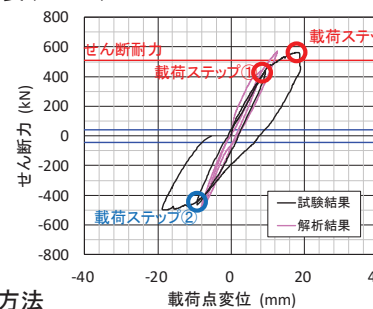


図 載荷方法

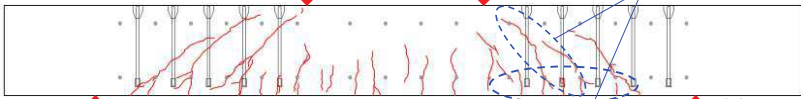
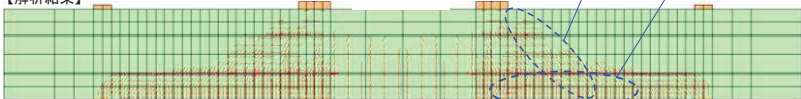
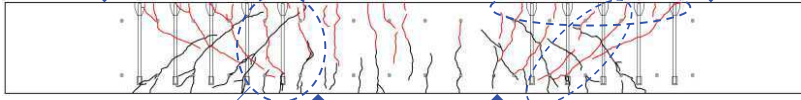
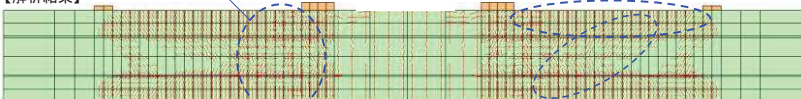
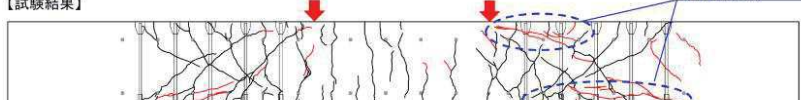
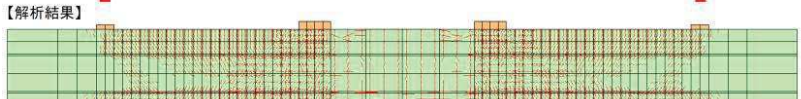


- ※: 図中の青線は支間中央における曲げひび割れ発生荷重を示す
- ※: 図中の赤線は以下の条件で算出した試験体のせん断耐力
- コンクリート強度 : 実強度
- 補強筋の降伏強度 : 実強度
- 有効係数 β_{aw} : 建設技術審査証明報告書に従う
- 安全係数(材料係数, 部材係数)は全て1.0とした。

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①:CCbの解析上のモデル化方法(9/10)

表 各荷重ステップにおける試験結果(試験体No.3-3)と解析結果のひび割れ状況の比較

荷重方法	試験結果と解析結果の比較
<p>荷重 ステップ①</p>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 45%;"> <p>【試験結果】</p>  </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>腹において、斜めひび割れ(正側)が発生</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 45%;"> <p>【解析結果】</p>  </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>曲げによる引張縁に部材軸に対してほぼ垂直な曲げひび割れ(正側)が発生</p> </div> </div> <p>※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。</p> </div>
<p>荷重 ステップ②</p>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 45%;"> <p>【試験結果】</p>  </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>正側のひび割れが連結</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 45%;"> <p>【解析結果】</p>  </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>正側と同様に、曲げひび割れ(負側)、斜めひび割れ(負側)が生じる</p> </div> </div> <p>※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。</p> </div>
<p>荷重 ステップ③</p>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 45%;"> <p>【試験結果】</p>  </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>斜めひび割れが進展し破壊(斜め引張破壊)。定着体部及び試験体全体に多数のひび割れが生じているが、CCbのせん断補強効果は発揮されている。</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 45%;"> <p>【解析結果】</p>  </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>※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。</p> </div> </div> </div>

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.2 ステップ①:CCbの解析上のモデル化方法(10/10)

(3)CCbの解析上のモデル化方法のまとめ

- CCbの解析上のモデル化方法について、CCbの定着効果及び付着効果を材料非線形解析によるせん断耐力の再現や実験と解析のひび割れ状況の整合性の観点から確認を行った。
- 定着体部のモデル化範囲を変えた2パターンのモデル化方法について検討を行い、CCb2(CCb先端側主筋軸心から必要定着長 $5D$ (D :鉄筋径)の鉄筋比をゼロ)の方法によりモデル化を行うことで、実験のせん断耐力やひび割れ発生状況を良好に再現でき、もう一方のモデル化方法(CCb1:CCb先端側主筋領域(かぶりの2倍)の鉄筋比をゼロ)よりもせん断耐力をやや保守的に評価できることを確認できた。
- ここで採用した材料非線形解析では分散ひび割れモデルを用いており、CCbに発生したひび割れによる付着性能の低下を完全に模擬することはできないが、今回採用したモデル化により実験のせん断耐力やひび割れ状況を十分に再現できており、CCbの定着効果及び付着効果を間接的に表現し得ることが確認できた。
- なお、今回採用した解析モデル・解析コードは、美浜3号炉(PHb工法)の工事計画認可申請において適用性を確認した際のものと同様である。

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

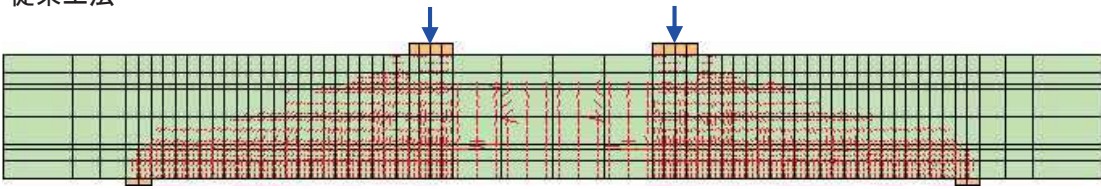
4.3 ステップ②: 大きな部材厚に対する適用性確認

- 建設技術審査証明報告書の実験よりも大きな部材厚に対する適用性の確認を目的に、女川2号炉においてCCb工法を適用した構造物のうち最も部材厚が大きい軽油タンク室底版(t=1500mm)を想定して材料非線形解析を行っている。
- CCbのモデル化は「4.2 ステップ①: CCbの解析上のモデル化方法」で再現性の良いCCb2の方法とし、シリーズ3(梁試験体No.3-3)を例に従来工法とCCb工法の材料非線形解析の結果の比較を行う。

確認結果

- せん断耐力の低下割合を比較するとステップ①よりもステップ②の方が小さいことが確認された。
- これは、建設技術審査証明報告書のせん断耐力算出時における有効係数 β_{aw} (CCb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、部材厚が大きい程、従来工法に対するCCb工法によるせん断耐力の低下割合は小さくなることを確認でき、CCb工法の特性を良く再現できている。
- ひび割れ状況についても全体的にひび割れが分散しており、従来工法と顕著な差は見られなかった。ステップ②では、部材厚が大きくなることでCCb端部定着の影響が小さくなったと考えられる。
- CCb工法によるせん断ひび割れ抑制効果についても従来工法とCCb工法で顕著な差は見られず、実験よりも大きな部材厚に対する適用性を確認できた。

表 解析ケースと解析結果

解析ケース	解析結果と考察															
従来工法																
CCb工法																
	<ul style="list-style-type: none"> せん断耐力 <table border="1"> <thead> <tr> <th>ケース</th> <th>せん断耐力 (kN)</th> <th>従来工法とCCb工法のせん断耐力の比率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ステップ① (従来工法)</td> <td>668</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>ステップ① (CCb工法)</td> <td>550</td> <td>0.82</td> </tr> <tr> <td>ステップ② (従来工法)</td> <td>1973</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>ステップ② (CCb工法)</td> <td>1841</td> <td>0.93</td> </tr> </tbody> </table>	ケース	せん断耐力 (kN)	従来工法とCCb工法のせん断耐力の比率	ステップ① (従来工法)	668	—	ステップ① (CCb工法)	550	0.82	ステップ② (従来工法)	1973	—	ステップ② (CCb工法)	1841	0.93
ケース	せん断耐力 (kN)	従来工法とCCb工法のせん断耐力の比率														
ステップ① (従来工法)	668	—														
ステップ① (CCb工法)	550	0.82														
ステップ② (従来工法)	1973	—														
ステップ② (CCb工法)	1841	0.93														
	<ul style="list-style-type: none"> 従来工法とCCb工法のせん断耐力の低下割合は、ステップ②の方が小さい。 従来工法及びCCb工法共に全体的にひび割れが分散しており、顕著な差は確認されなかった。 															

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(1/12)

- 荷重形態及び破壊形態(せん断スパン比)の違いに着目して選定した部材に対する材料非線形解析を行い、実施工部材に対するCCb工法の適用性を確認する。
- 従来工法とCCb工法の材料非線形解析の結果の比較より、女川2号炉でCCbにより耐震補強を行っている構造物の部材諸元においても、適用性があることを確認した。

ステップ③の検討ケース概要

- 荷重形態及び破壊形態(せん断スパン比)の違いに着目し、3ケースの材料非線形解析を実施し適用性を確認した。
- 建設技術審査証明報告書の梁試験はせん断破壊を対象としており、曲げ破壊先行とならないように主鉄筋比を大きく設定していることを踏まえ、CCbのせん断補強効果に大きく影響を与える可能性がある荷重形態及び破壊形態に着目している。
- 対象部材は、集中荷重及び分布荷重が作用する構造物のうち部材厚に着目し選定した。
 - 集中荷重系:多連ボックスカルバートの隔壁のように、主な荷重が頂版から受ける集中荷重となる構造物のうち、部材厚が最大である取水路(漸拡部)隔壁。
 - 分布荷重系:ボックスカルバートの側壁のように、主な荷重が地震時増分土圧等の分布荷重となる構造物のうち、部材厚が最大である軽油タンク室側壁。

表 検討ケースの概要

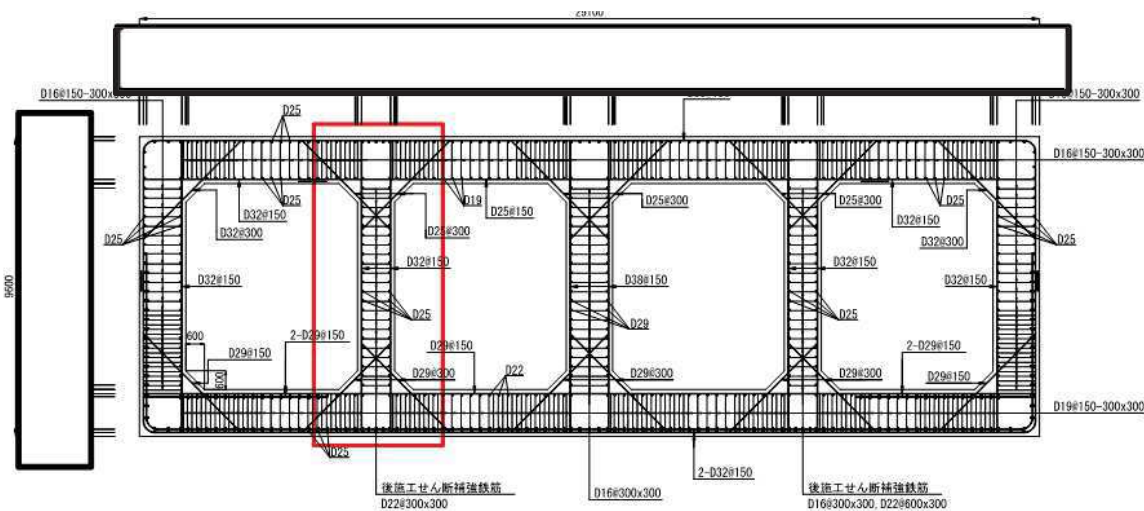
検討ケース	対象部材	荷重形態	作用荷重	破壊形態
ケース③-1	取水路(漸拡部)隔壁	集中荷重系	構造物-地盤連成の二次元有限要素解析による地震応答解析(基準地震動Ss-D2)から得られる応答断面力を再現できる荷重。	棒部材的な破壊 (斜め引張破壊)
ケース③-2-1	軽油タンク室側壁	分布荷重系	同上	ディープビーム的な破壊 (せん断圧縮破壊)
ケース③-2-2	同上	同上	等分布荷重	棒部材的な破壊 (斜め引張破壊)

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(2/12)

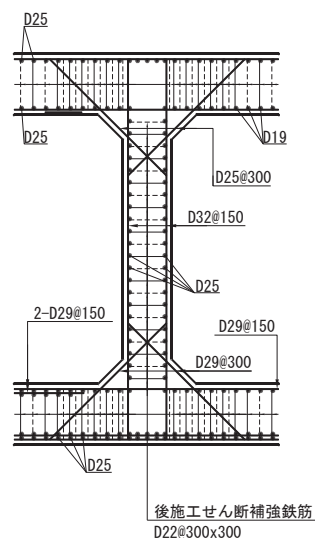
(1) ケース③-1(集中荷重系)の材料非線形解析

- 対象部材: 取水路(漸拡部)隔壁
- 荷重形態: 地震応答解析(基準地震動 S_s-D2)から得られる応答断面力を再現できる荷重

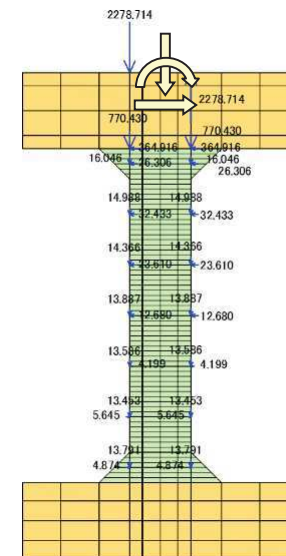


※補強仕様は、今後変更となる可能性がある。

断面図



断面図(拡大)



材料非線形解析での荷重図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

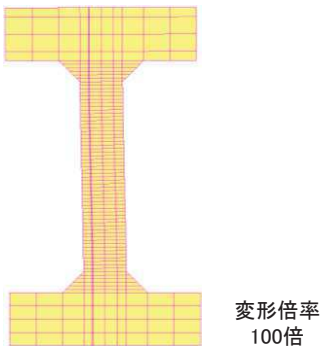
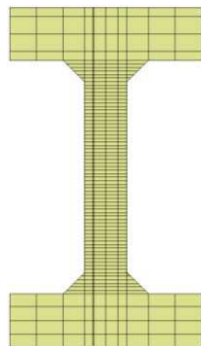
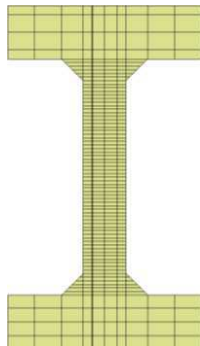
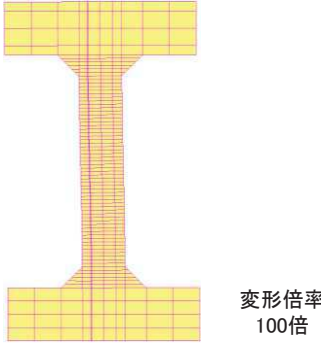
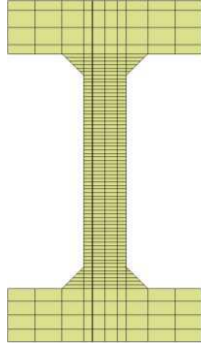
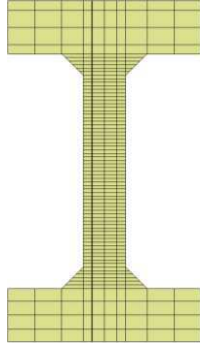
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(3/12)

a. 解析結果及び従来工法とCCb工法の比較

- 初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず、概ね整合的な結果となった。

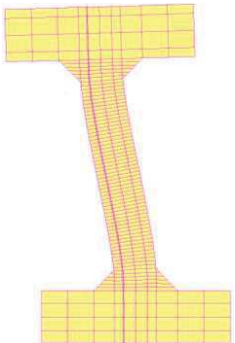
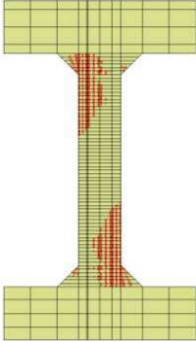
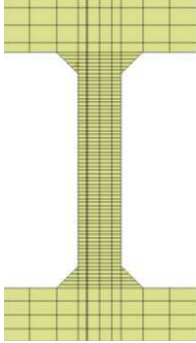
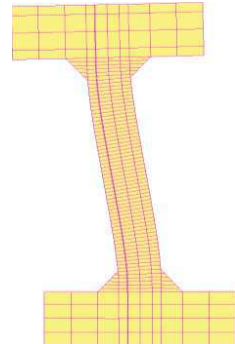
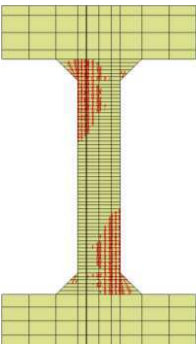
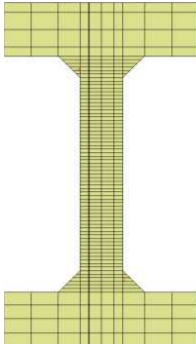
表 初期ひび割れ発生時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-1-A)	 変形倍率 100倍		
CCb工法 (ケース③-1-B)	 変形倍率 100倍		

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(4/12)

表 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
従来工法 (ケース③-1-A)	 変形倍率 50倍		
CCb工法 (ケース③-1-B)	 変形倍率 50倍		

- せん断耐力については、表に示すとおりCCb工法のせん断耐力の低減割合が約88%となり、従来工法よりもせん断耐力は小さくなっている。これはCCbの定着機能を考慮したせん断補強筋の無効区間による影響であり、部材厚が大きい程、せん断耐力の低下割合が小さくなるというステップ①・②と整合する結果が得られた。
- 以上より、従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されず、実施工部材のうち集中荷重系となる荷重形態の部材に対するCCb工法の適用性を確認できた。

表 せん断耐力の比較

ケース	せん断耐力(kN)	従来工法とCCb工法のせん断耐力の比率
従来工法 (ケース③-1-A)	1678	-
CCb工法 (ケース③-1-B)	1488	0.88

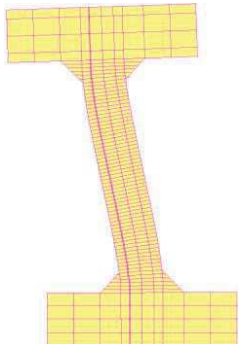
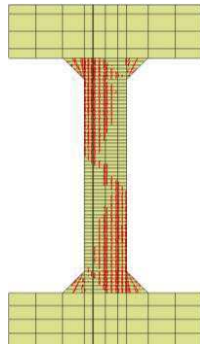
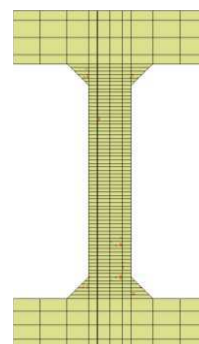
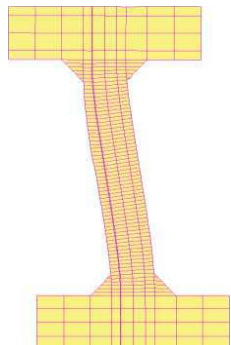
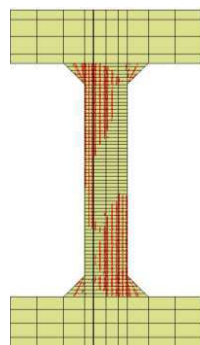
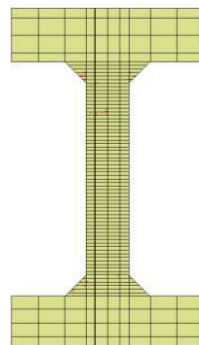
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③: 実施工部材の応答性状の確認(5/12)

b. 解析結果及び従来工法とCCb工法の比較【参考】

- 参考に終局荷重時の状況を確認する。
- 終局荷重時のひび割れ状況から従来工法及びCCb工法共に隔壁中央部付近において、ひび割れが繋がることで破壊しており、従来工法とCCb工法で破壊状況に顕著な差は見られなかった。

表 終局荷重時の損傷状況

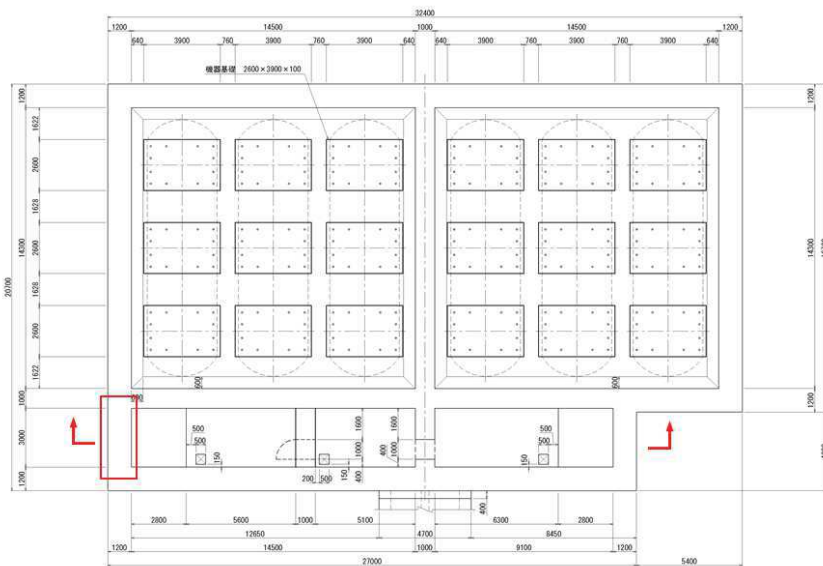
ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-1-A)	 変形倍率 20倍		
CCb工法 (ケース③-1-B)	 変形倍率 20倍		

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

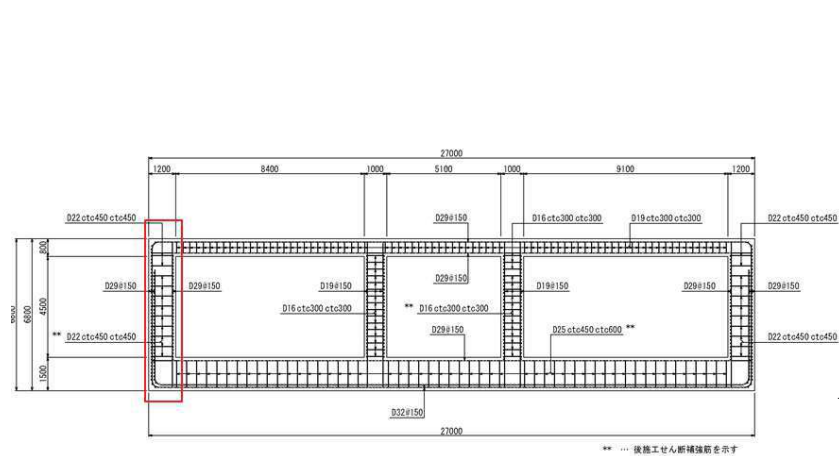
4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(6/12)

(2) ケース③-2(分布荷重系)の材料非線形解析

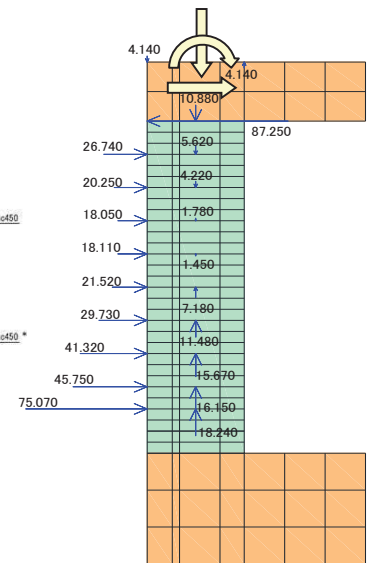
- 対象部材: 軽油タンク室側壁
- 荷重形態
 - ケース③-2-1: 地震応答解析(基準地震動 S_s -D2)から得られる応答断面力を再現できる荷重
 - ケース③-2-2: 等分布荷重
- 破壊形態
 - ケース③-2-1: ディープビーム的な破壊(せん断圧縮破壊)
 - ケース③-2-2: 棒部材的な破壊(斜め引張破壊)



平面図



断面図



材料非線形解析での荷重図

□ : 評価対象部材

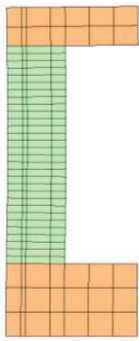
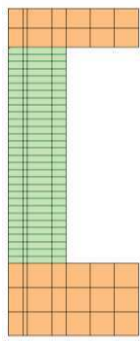
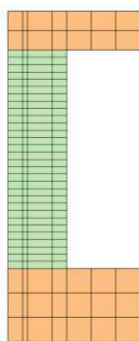
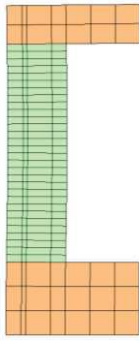
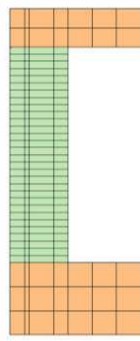
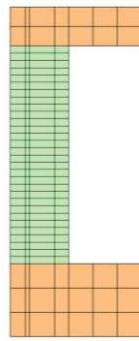
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(7/12)

a. ケース③-2-1の解析結果及び従来工法とCCb工法の比較

- 初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず、概ね整合的な結果となった。
- せん断耐力については、CCb工法のせん断耐力の有効割合が約99%となった。これは、等価せん断スパンを考慮したせん断スパン比($a/d=0.66$)が小さく、破壊形態がディープビーム的な破壊(せん断圧縮破壊)であるため、せん断耐力はコンクリートの圧縮強度の影響が支配的であり、従来工法とCCb工法の差異である定着体部の影響が現れなかったためである。
- 以上より、従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されず、数値解析実験上は実施工部材のうち分布荷重が作用し破壊形態がディープビーム的な破壊となる部材に対するCCb工法の適用性を確認できた。

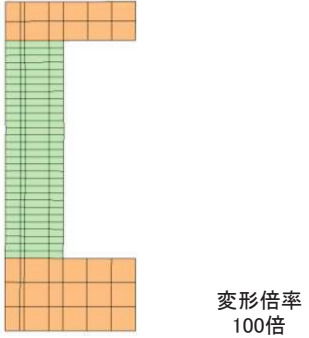
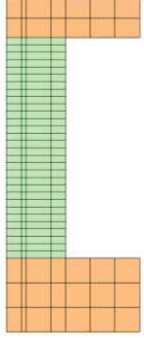
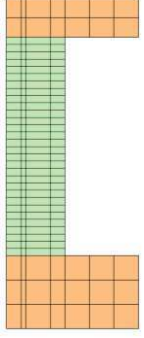
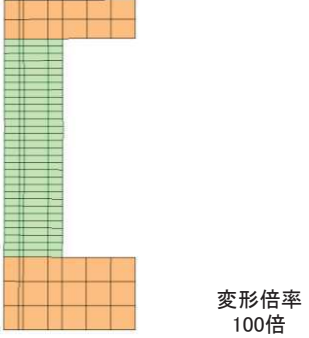
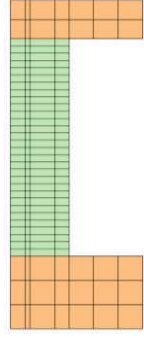
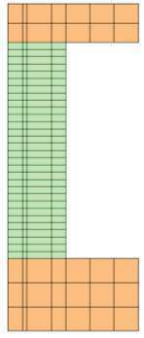
表 初期ひび割れ発生時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-1-A)	 変形倍率 100倍		
CCb工法 (ケース③-2-1-B)	 変形倍率 100倍		

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(8/12)

表 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
従来工法 (ケース③-2-1-A)	 変形倍率 100倍	 変形倍率 100倍	 変形倍率 100倍
CCb工法 (ケース③-2-1-B)	 変形倍率 100倍	 変形倍率 100倍	 変形倍率 100倍

- せん断耐力については、表に示すとおりCCb工法のせん断耐力の有効割合が約99%となった。これは、等価せん断スパンを考慮したせん断スパン比 ($a/d=0.66$) が小さく、破壊形態がディープビーム的な破壊(せん断圧縮破壊)であるため、せん断耐力はコンクリートの圧縮強度の影響が支配的であり、従来工法とCCb工法の差異である定着体部の影響が現れなかったためである。
- 以上より、従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されず、数値解析実験上は実施工部材のうち分布荷重が作用し破壊形態がディープビーム的な破壊となる部材に対するCCb工法の適用性を確認できた。

表 せん断耐力の比較

ケース	せん断耐力(kN)	従来工法とCCb工法のせん断耐力の比率
従来工法 (ケース③-2-1-A)	2635	-
CCb工法 (ケース③-2-1-B)	2610	0.99


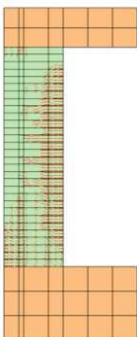
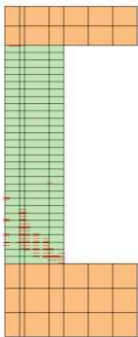

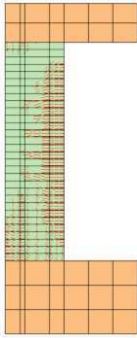
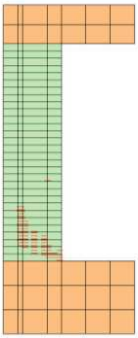
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(9/12)

b. ケース③-2-1解析結果及び従来工法とCCb工法の比較【参考】

- 参考に終局荷重時の状況を確認する。
- 終局時のひび割れ状況と鉄筋降伏状況から、ひび割れが部材の広範囲に渡って発生しているのに対し、せん断補強筋の降伏は局所的であり、ディープビーム的な破壊形態(せん断圧縮破壊)となっていることがわかる。

表 終局荷重時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-1-A)	 変形倍率 20倍		
CCb工法 (ケース③-2-1-B)	 変形倍率 20倍		


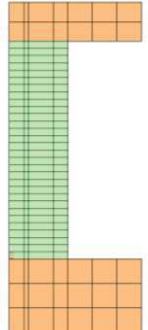
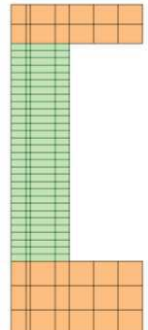
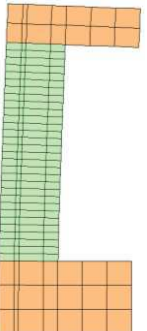
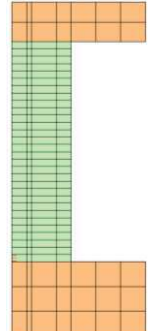
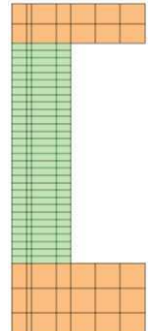
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(10/12)

c. ケース③-2-2の解析結果及び従来工法とCCb工法の比較

- 初期ひび割れ発生時において, 変形状況, ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は, 従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず, 概ね整合的な結果となった。

表 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
従来工法 (ケース③-2-2-A)	 変形倍率 100倍		
CCb工法 (ケース③-2-2-B)	 変形倍率 100倍		

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(11/12)

- せん断耐力については、表に示すとおりCCb工法のせん断耐力の有効割合が約91%となった。これは、取水路(漸拡部)隔壁(ケース③-1)と同等の比率となっており、分布荷重が作用する場合であっても、集中荷重が作用する場合と同様のせん断補強効果が得られることが確認された。
- 取水路(漸拡部)隔壁(ケース③-1)の結果の比較から、荷重形態の違いによる従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されなかった。
- 以上より、実施工部材のうち分布荷重が作用し破壊形態が棒部材的な破壊(斜め引張破壊)となる部材に対するCCb工法の適用性を確認できた。

表 せん断耐力の比較

ケース		せん断耐力(kN)	従来工法とCCb工法の せん断耐力の比率
軽油 タンク室	従来工法(ケース③-2-2-A)	2449	-
	CCb工法(ケース③-2-2-B)	2232	0.91
取水路 (漸拡部)※	従来工法(ケース③-1-A)	1678	-
	CCb工法(ケース③-1-B)	1488	0.88

※:荷重形態の違いによるせん断耐力への影響を確認するため、集中荷重である取水路(漸拡部)の結果を併記している。

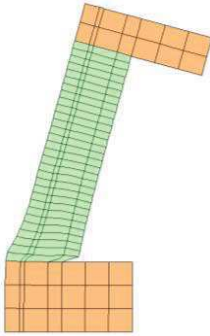
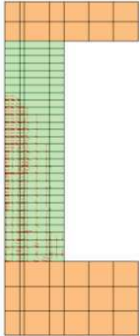
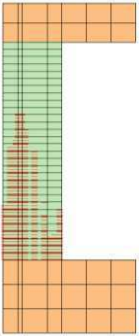
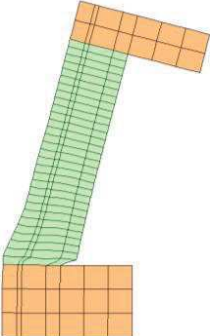
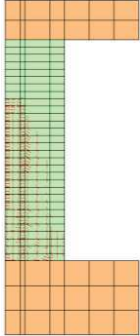
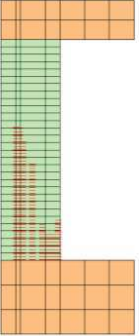
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.4 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認(12/12)

d. ケース③-2-2解析結果及び従来工法とCCb工法の比較【参考】

- 参考に終局荷重時の状況を確認する。
- 終局時のひび割れ状況と鉄筋降伏状況から、ひび割れ及びせん断補強筋の降伏が広範囲に渡っており、ケース③-2-1のディープビーム的な破壊形態とは異なる棒部材的な破壊(斜め引張破壊)となる破壊形態となっていることが確認できる。

表 終局荷重時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-2-A)	 変形倍率 20倍		
CCb工法 (ケース③-2-2-B)	 変形倍率 20倍		

4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))

4.5 まとめ

- 女川2号炉においてCCb工法を適用した構造物と建設技術審査証明報告書に記載の各種実験条件(部材諸元(部材厚, せん断スパン比, 主鉄筋比)及び載荷方法等)と異なっても, CCb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。
- 検討ステップ①~③により, CCb工法の適用性を確認した内容は以下のとおりである。
 - ① 建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚においても, せん断ひび割れ抑制効果を確認できており, CCb工法が適用できることを確認した。【ステップ①, ②により確認】
 - ② 建設技術審査証明報告書の実験と実施工部材では部材諸元及び載荷方法(設計荷重)等が異なるが, 女川2号炉でCCbにより耐震補強を行っている構造物の部材諸元においても, せん断ひび割れ抑制効果を確認できており, CCb工法が適用できることを確認した。【ステップ③により確認】
 - ③ 建設技術審査証明報告書に記載の梁試験体ではディープビームを対象とした試験を実施していないが, ディープビーム的な破壊となる部材に対しても, CCb工法が適用できることを確認した。【ステップ③により確認】
なお, ディープビームとなる部材に発生する高角度なひび割れが生じた際の定着性能及び女川2号炉にてディープビームとなる部材へのせん断耐力評価上における保守性については, p53~60「5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))」及びp66~69「7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))」にて別途確認する。

目次

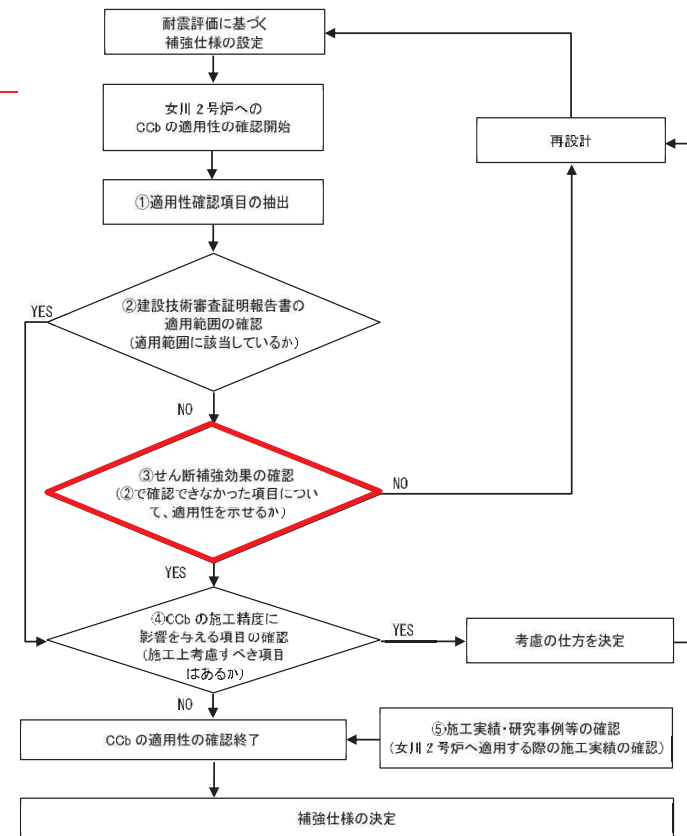
1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

CCbの適用性確認フロー



フロー③にて確認する項目

フロー③にて確認する項目	
IV. 部材諸元	確認項目(A)
V. 载荷方法	確認項目(B)
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	確認項目(C)
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	確認項目(D)
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	確認項目(E)
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	確認項目(F)
	確認項目(G)

5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(1/8)

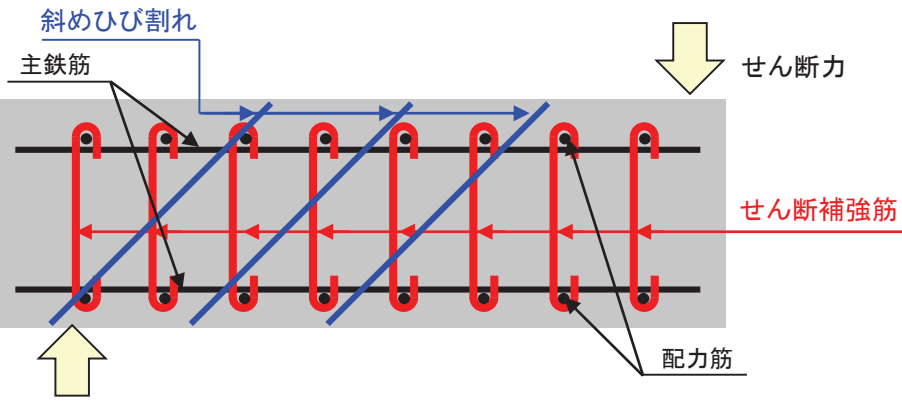
○ CCbの適用性確認フローの「③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認」で示した確認項目のうち「(D)ひび割れに対する定着機能の保持」について確認する。

- CCbの定着体部にひび割れが生じると定着機能を阻害するおそれがあることから、女川2号炉においてCCbを適用した構造物に発生する可能性があるひび割れ(曲げひび割れ、面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びディープビームに生じる45度を超える高角度の斜めひび割れ)が、定着体部に生じても定着機能が保持され、所要のせん断補強効果を発揮できていることを確認する。併せて、女川2号炉におけるCCb工法の適用範囲を設定する。

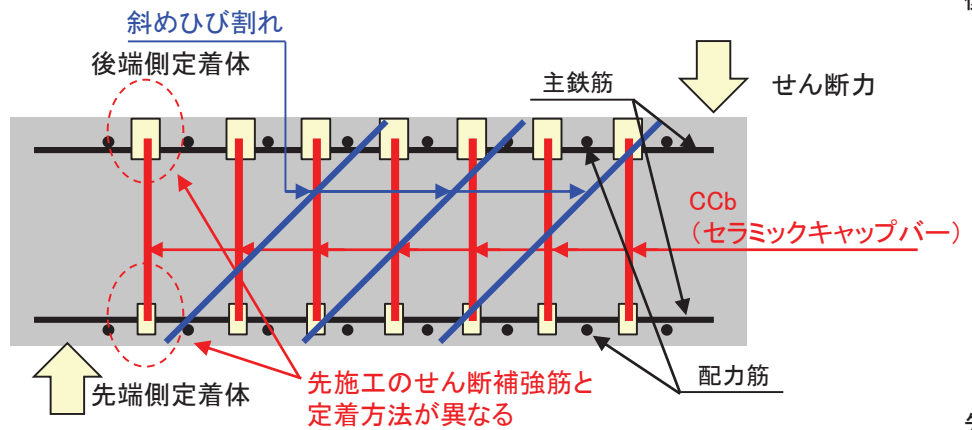
(1) CCbの定着機構

- CCb工法におけるせん断補強筋の効果は、先施工されたせん断補強筋と同様に、コンクリート標準示方書をはじめとする規準類に示されるトラス理論により評価される。
- CCbと先施工のせん断補強筋の差異は、せん断補強筋端部の定着機構であり、先施工されたせん断補強筋が主鉄筋または配力筋にフックを掛けて定着していることに対して、CCbはセラミック定着体とコンクリート間の支圧と、セラミック定着体及びせん断補強筋とコンクリート間の付着により定着している。
- また、斜めひび割れ位置でせん断補強筋が設計で期待する降伏強度に相当する引張力に抵抗するために、CCb工法の定着体部では、せん断補強筋の降伏強度に相当する引張力に対する定着強度を確保していることを建設技術審査証明報告書にて確認している。

従来工法(先施工)



CCb工法(後施工)



後端側定着体

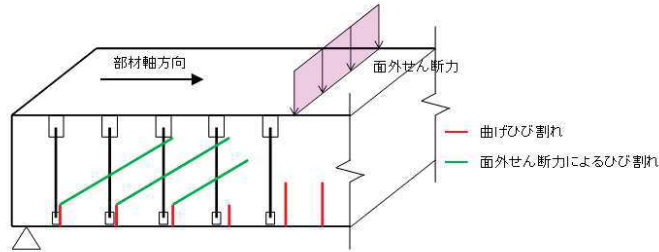


先端側定着体

5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(2/8)

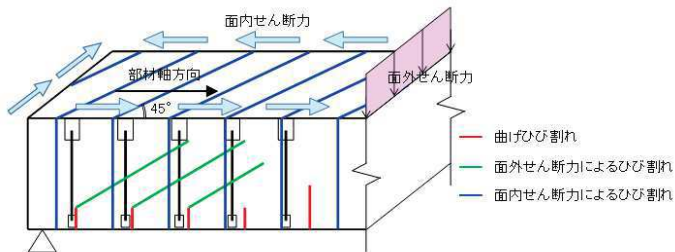
(2) 定着機能に影響を与える可能性のあるひび割れ状況下での定着機能の保持

- CCb工法を適用し、せん断耐力を向上させることにより、部材はせん断破壊先行型の形態から曲げ破壊先行型の形態に移行する。曲げ破壊先行型の形態に移行することにより、曲げひび割れが生じた状態でもCCbの定着機能が保持されている必要がある。
- 面内せん断力を受ける壁(側壁、底版)においては、面内せん断力によるひび割れが生じ、また、ディープビームにおいては斜めひび割れが生じた状態においてもCCbの定着機能が保持されている必要がある。
- CCbのせん断補強効果は、梁試験体の正負交番载荷試験により確認していることから、試験時のひび割れ状況を整理し、部材(特に定着体部)のひび割れがCCbの定着機能に与える影響を確認するとともに、女川2号炉におけるCCb工法の適用範囲について検討する。



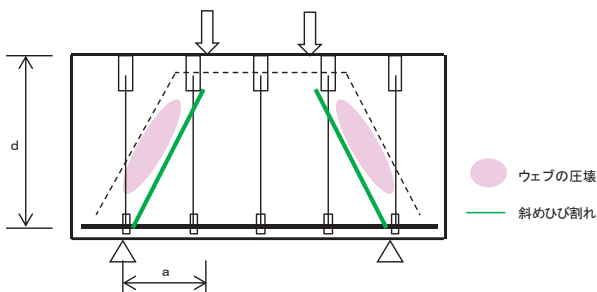
曲げひび割れの特徴

- 曲げによる引張縁に部材軸方向に対してほぼ垂直に発生する。
- ひび割れの幅、分布は引張鉄筋(軸方向鉄筋)により制御される。
- CCbの定着体部付近に高角度で生じるため、定着機能に影響を与える可能性がある。



面内せん断力によるひび割れの特徴

- 面内せん断力により部材軸方向に対して平面的に45度の方向に発生する。
- 部材断面を貫通するひび割れである。
- ひび割れの幅、分布は軸方向鉄筋及び配力筋(上縁・下縁)により制御される。
- CCbの定着体部付近を含む断面全体に高角度で生じるため、定着機能に影響を与える可能性がある。



ディープビームに発生するひび割れの特徴

- せん断スパン比が小さいディープビーム($a/d \leq 1.0$)では、角度が45度を超える斜めひび割れが発生する。
- CCbの定着体部付近を含む断面全体に45度を超える高角度で生じるため、定着機能に影響を与える可能性がある。

図 各ひび割れの特徴

5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(3/8)

(3) CCbのせん断補強効果の確認

- ひび割れ状況下におけるCCbのせん断補強効果の確認は、建設技術審査証明報告書の梁試験体による交番載荷試験におけるひび割れ状況とせん断耐力を対比することにより行う。
- 女川2号炉でCCbを施工した条件と同じ、CCbの先端位置が主鉄筋の図心位置となる試験体(No.3-3)を対象とする。
- 対象とする試験ではせん断耐力を確認するため、曲げ降伏させないよう主鉄筋には高強度の鉄筋を使用している。

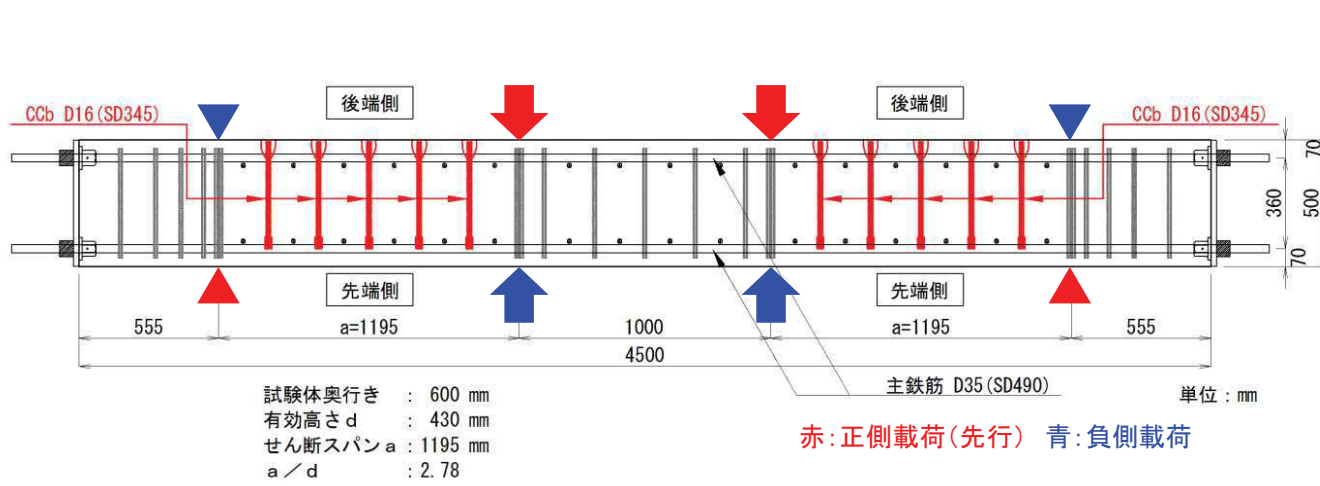
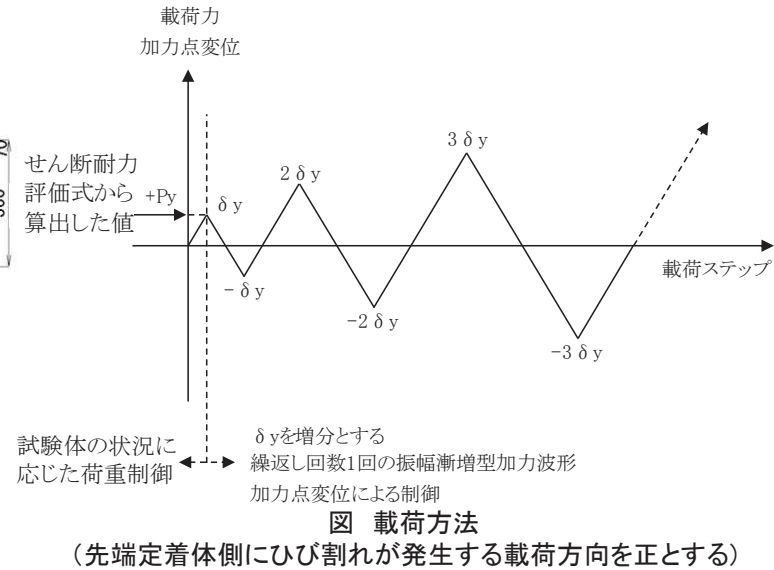


図 試験体概要(側面図)



- せん断補強効果の確認は、定着体部(先端・後端)に曲げによる垂直に近い高角度のひび割れが生じた状態においても、試験体が建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数(β_{aw})を考慮したせん断耐力を有していることを確認する。
- さらに、試験体のひび割れ状況を整理するとともに、CCbによるせん断補強筋の定着機能はひび割れによらず保持されていると仮定した再現解析の結果を参考に、試験体に生じたひび割れ性状と解析によるひび割れ性状の比較を行い、定着体部の定着機能を確認する。

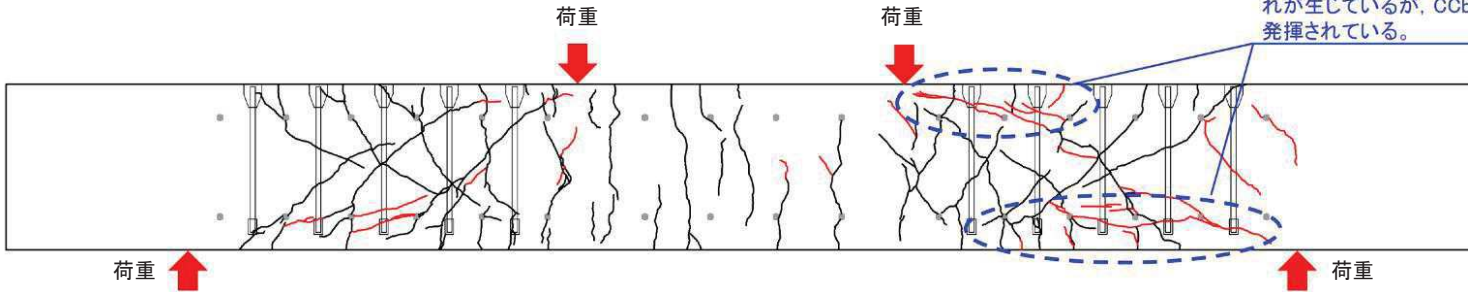
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(4/8)

試験最大荷重時(試験体のせん断破壊時)のひび割れ状況(正側)

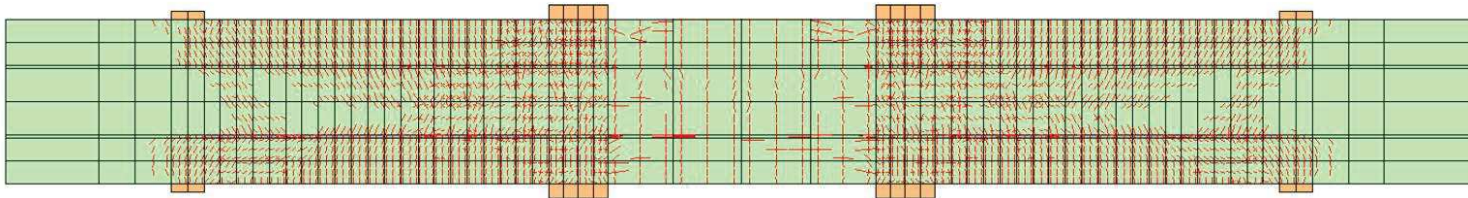
- 試験結果と解析結果は整合的であり, 解析結果は試験結果のひび割れ状況を良好に再現している。
- CCbの定着体部及び梁試験体全体に多数のひび割れが生じているが, せん断耐力評価式から算出した値よりも大きなせん断耐力が確認されており, CCbのせん断補強効果は発揮されていることがわかる。

斜めひび割れが進展し破壊(斜め引張破壊)。定着体部及び梁試験体全体に多数のひび割れが生じているが, CCbのせん断補強効果は発揮されている。

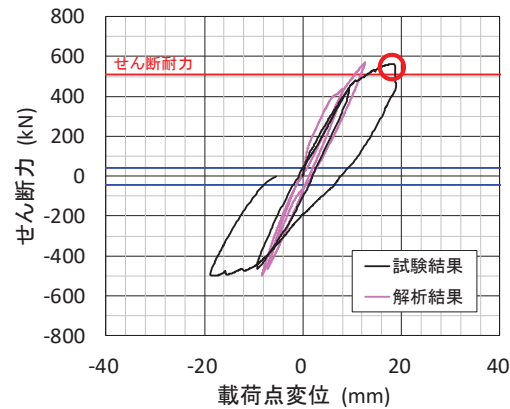
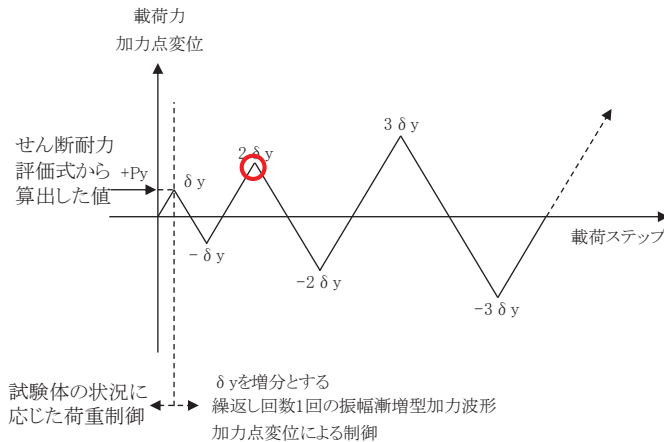
【試験結果】



【解析結果】



※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。

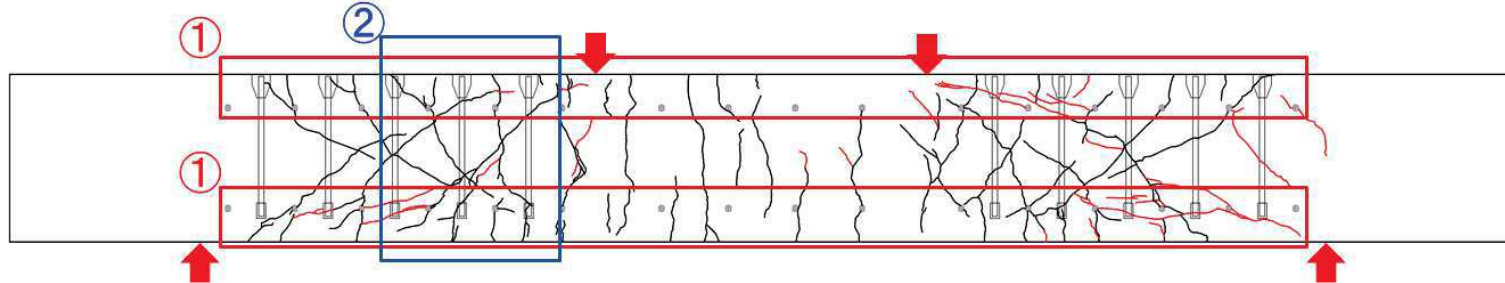


- ※ 図中の赤線は以下の条件で算出した試験体のせん断耐力を示す。
 コンクリート強度 : 実強度
 補強筋の降伏強度 : 実強度
 有効係数 β_{aw} : 建設技術審査証明報告書に従う
 安全係数(材料係数, 部材係数)は全て1.0とした。
- ※ 図中の青線は支間中央における曲げひび割れ発生荷重を示す。

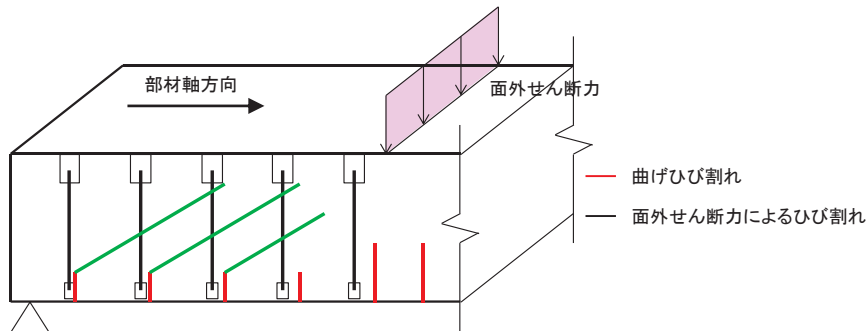
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(5/8)

- 試験結果と各ひび割れ状況の比較により, 定着体部の定着機能を確認する。
- 試験結果より定着体部とその周囲に各種ひび割れが生じても, せん断補強効果が発揮され定着機能が保持されていることを確認した。

【試験結果: 試験最大荷重時(試験体のせん断破壊時)のひび割れ状況(正側)】

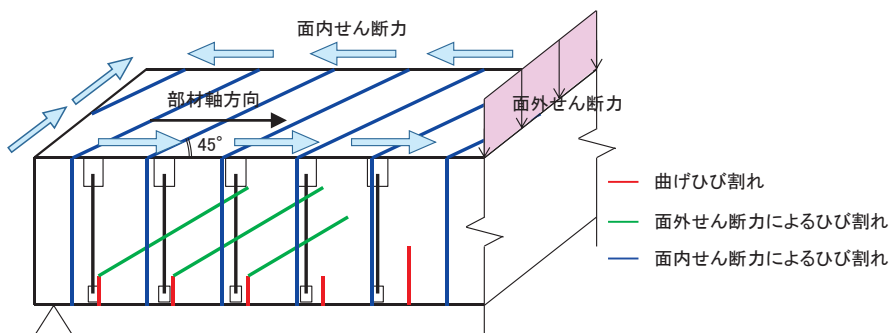


a. 試験結果と曲げひび割れの比較(図中①との比較)



- 定着体部(先端・後端)とその周囲に高角度な曲げひび割れが生じた状態においても, 試験体は建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数(β_{aw})を考慮したせん断耐力以上の耐荷力を有しており, 定着機能は保持されている。

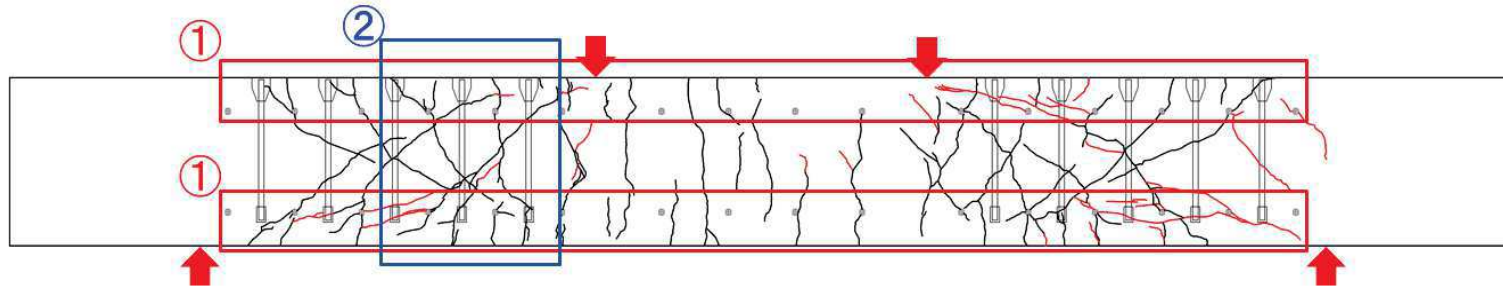
b. 試験結果と面内せん断力によるひび割れの比較(図中②との比較)



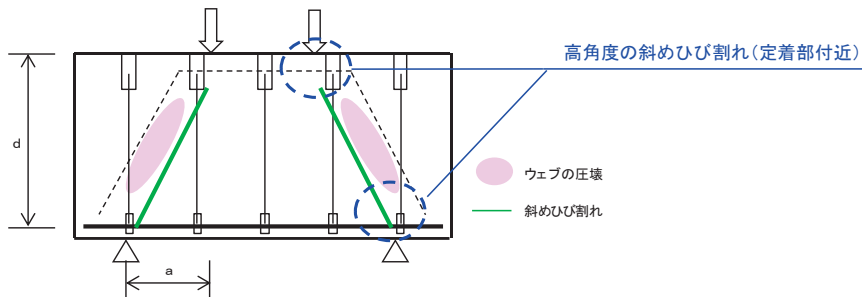
- 面内せん断力により発生する貫通ひび割れは, 正負交番載荷試験の正側の曲げひび割れと負側の曲げひび割れが連結したことにより, 同様のひび割れ性状として再現できている。
- また, 曲げひび割れ同様, 定着体部(先端・後端)とその周囲に高角度なひび割れが生じた状態においても, 試験体は建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数(β_{aw})を考慮したせん断耐力以上の耐荷力を有しており, 定着機能は保持されている。

5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(6/8)

【試験結果:試験最大荷重時(試験体のせん断破壊時)のひび割れ状況(正側)】



c. 試験結果とディープビームへのひび割れの比較(図中①との比較)



- CCb工法はディープビームを対象とした試験を実施していないが、せん断スパン比が小さく($a/d \leq 1.0$)、斜めひび割れの角度が45度を超える高角度なひび割れは、試験体の定着体部に発生した曲げひび割れにより、同様のひび割れ性状として再現できている。
- 定着体部(先端・後端)とその周囲に高角度なひび割れが生じた状態においても、試験体は建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数(β_{aw})を考慮したせん断耐力以上の耐荷力を有しており、定着機能は保持されている。

試験結果と解析結果の比較及び試験結果と各ひび割れ状況の比較のまとめ

【試験結果と解析結果の比較】

- 試験結果とCCbの無効区間を5Dとした解析結果は整合的であり、解析結果は試験結果のひび割れ状況を良好に再現している。
- また、CCbとコンクリートが付着しているとした解析結果が実験結果を良好に再現されていることを踏まえると、試験体に載荷された最大荷重(試験体のせん断破壊時)の範囲では、CCbとコンクリートの付着は保持されていると考えられる。

【試験結果と各ひび割れ状況の比較】

- 試験結果と各ひび割れ状況の比較から、女川2号炉においてCCbを適用した構造物に発生する可能性があるひび割れが、定着体部やその周囲に生じても定着機能が保持され、所要のせん断補強効果を発揮できていることを確認した。

5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(7/8)

(4) 梁試験体の鉄筋ひずみの整理

- 梁試験体のせん断破壊時における主鉄筋のひずみを確認し、女川2号炉においてCCb工法を適用するにあたっての適用範囲を設定する。
- 梁試験体は、せん断耐力を確認するための試験であることから、曲げ降伏させないように主鉄筋に高強度の鉄筋を使用しており、せん断破壊時における主鉄筋のひずみは、降伏ひずみ未満の2363 μ まで確認されている。
- よって、主鉄筋にSD345を用いている女川2号炉においてCCbを適用した構造物については、応答値として主鉄筋のひずみが降伏ひずみ(1725 μ)未満または応力が降伏強度(345N/mm²)未満であることを確認する。

表 梁試験体に生じた鉄筋ひずみ

項 目		備 考
鉄筋ひずみ	2363 μ ※	降伏ひずみ: 2450 μ (SD490)

※:コンクリートの引張応力を無視し、縦ひずみは断面の中立軸からの距離に比例するものとして算出した。

5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))(8/8)

(5) CCbの梁試験体のひび割れ状況下での定着機能についてのまとめ

- 建設技術審査証明報告書の梁試験結果及び試験を再現した材料非線形解析による数値解析結果から、CCbは定着体部やその周囲にひび割れが発生した状態においても、定着機能が保持されており、せん断補強効果が発揮されることが確認できた。
- 建設技術審査証明報告書の梁試験の内容を踏まえ、女川2号炉におけるCCb工法の適用範囲を以下のとおりとする。

- ① 高角度の曲げひび割れ、面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びせん断スパン比が小さい($a/d \leq 1.0$)ディープビームに生じる45度を超える高角度なひび割れが発生する可能性のある部材に対してもCCb工法の適用を可能とする。
- ② ただし、曲げ降伏後のひび割れ幅が大きく進展したときのように定着部のひび割れ幅が大きい場合、CCbの定着性能を含めた所要のせん断補強効果が発揮できることは確認できていない。また、建設技術審査証明報告書に記載の梁試験にて発生している鉄筋ひずみ以内でせん断補強効果を確認していることを踏まえ、曲げによる主鉄筋の応力が降伏強度以下である範囲においてのみ、せん断補強としてCCb工法の適用を可能とする。
- ③ 同様に面内せん断力と面外力(曲げ、せん断等)の両方に対して耐震要素として期待する壁(側壁、底版)に対しては、面内せん断力と面外力の合力による鉄筋の応力が降伏強度以下である範囲、もしくは面内せん断力に対して、コンクリートのみで抵抗可能な部材においてCCb工法の適用を可能とする。

目次

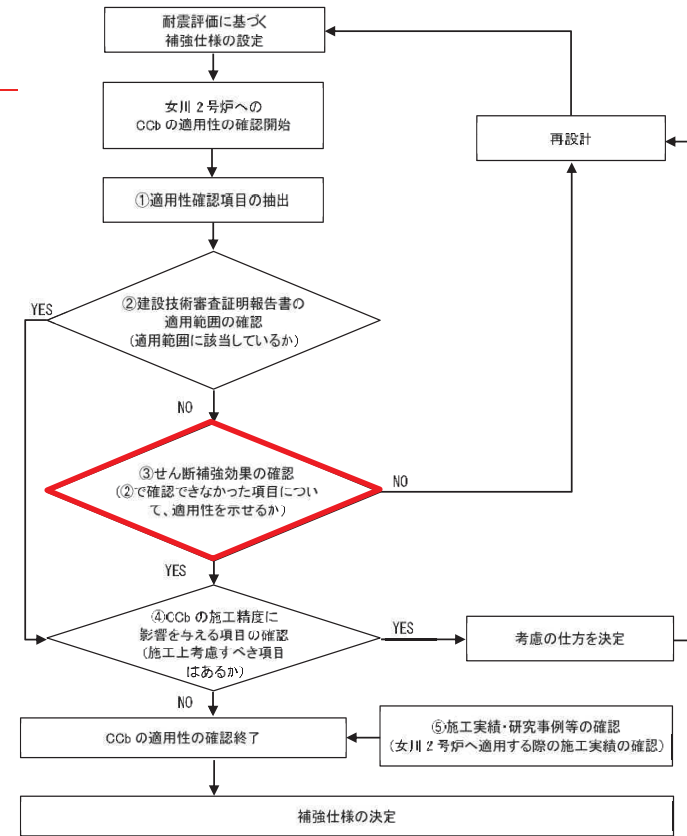
1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

CCbの適用性確認フロー



フロー③にて確認する項目

フロー③にて確認する項目	
IV. 部材諸元	確認項目(A)
V. 载荷方法	確認項目(B)
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	確認項目(C)
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	確認項目(D)
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	確認項目(E)
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	確認項目(F)
	確認項目(G)

6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))(1/3)

- CCbの適用性確認フローの「③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認」で示した確認項目のうち「(E)CCbを適用した部材のコンクリートの健全性」について確認する。
- 女川原子力発電所においては、東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)及び宮城県沖の地震(2011年4月7日)により、建設時の基準地震動を一部周期帯で超過する地震動を経験していることを踏まえ、CCbを適用した部材のコンクリートにおいてCCbのせん断補強効果を阻害するひび割れがなく、構造物が健全であることを確認する。
 - また、CCbの施工箇所地震起因以外によるひび割れとして、乾燥収縮によるひび割れやコンクリートの劣化によるひび割れ(アルカリ骨材反応、凍結融解作用、中性化、塩害)等についても抽出し、CCbのせん断補強効果を阻害するひび割れがないことを確認する。
 - 健全性はコンクリートのひび割れ状況及び圧縮強度試験結果より判断する。

6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))(2/3)

(1) ひび割れ状況の確認

a. 地震起因によるひび割れの確認

- 東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)及び宮城県沖の地震(2011年4月7日)以降に実施しているひび割れ調査(平成23年度に実施)により、地震の影響を否定できないひび割れについて、耐震性能に影響するひび割れ(評価基準値:ひび割れ幅1.0mm※)がないことを確認している。

b. 地震起因以外によるひび割れの確認

- CCbの施工箇所が生じている地震起因以外によるひび割れは下表のとおりであり、これらは主に乾燥収縮によるひび割れであることから、構造物の耐力に影響を与えるものではない。
- また、ひび割れ幅は大多数が0.2mm程度であり一部0.5mm程度のひび割れが存在する箇所があるが、部材の一部に集中しているものではなく、数mに1本程度の頻度であり、社内基準に基づき補修することとしている。
- このひび割れは、部材の耐力に影響を与えるひび割れではなく、エポキシ樹脂等の注入により補修を行うことで、新たなひび割れの進展等は発生しないことから、今後ひび割れがCCbの付着性能低下に影響を与えることはない。
- よって、地震起因以外によるひび割れにおいては、CCbのせん断補強効果に影響を与えるひび割れではないことを確認できた。
- なお、これらのひび割れについては、ただちに部材の耐力やCCbの付着性能に影響を与えるものではないことから、継続監視のもと計画的に補修を実施していく。

※: Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake (EPRI NP-6695)に示すひび割れ幅約1.5mmを参考に安全側に1.0mmとして設定している。

表 ひび割れ確認結果

CCbを適用した構造物	地震の影響を否定できないひび割れの幅[mm]	地震起因以外によるひび割れの幅[mm]
取水路(漸拡部)	耐震性能に影響するひび割れなし	0.2~0.5 (確認時期: H29.6, H29.8)
原子炉機器冷却海水配管ダクト	同上	ひび割れなし (確認時期: H30.1)
軽油タンク室	同上	0.1~0.4 (確認時期: H30.2)
復水貯蔵タンク基礎	同上	0.2~0.4 (確認時期: H30.1)

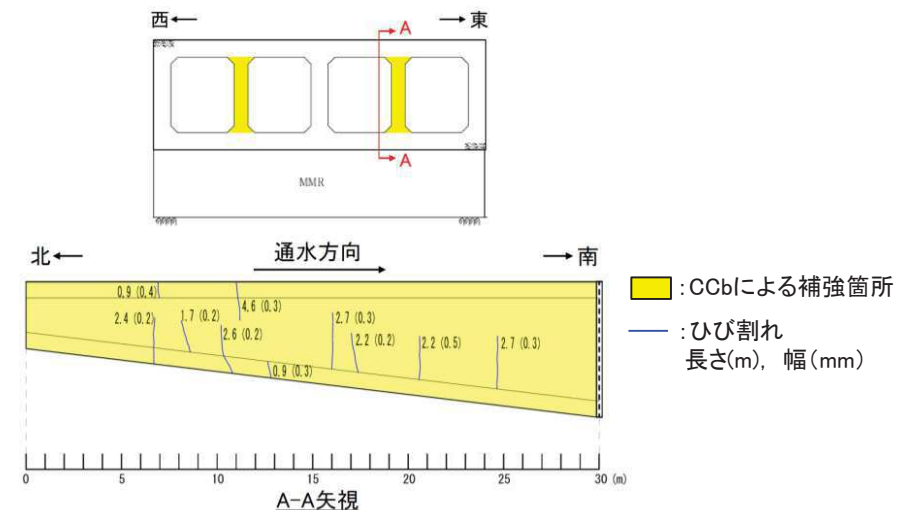


図 CCbによる補強箇所とひび割れ位置の関係(取水路(漸拡部)の例)

6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))(3/3)

(2) コンクリートの圧縮強度試験結果の確認

- Ccbにより耐震補強を行った構造物からコンクリートコアを採取し実施した圧縮強度試験の結果を示す。
- 圧縮強度の最低値は、全ての構造物において設計基準強度(20.5N/mm²)以上であることを確認している。

表 圧縮強度試験結果

CCbを適用した構造物	設計基準強度 [N/mm ²]	圧縮強度(最低値) [N/mm ²]
取水路(漸拡部)	20.5	45.4 (確認時期:H23.9)
原子炉機器冷却海水配管ダクト		36.3 (確認時期:H30.2)
軽油タンク室		43.0 (確認時期:H30.2)
復水貯蔵タンク基礎		32.4 (確認時期:H30.2)

(3) Ccbを適用した部材のコンクリートの健全性確認のまとめ

- コンクリートのひび割れ状況より、CCbにより耐震補強を行った構造物にCCbのせん断補強効果に影響を与えるひび割れがないことを確認した。
- また、構造物から採取したコンクリートコアの圧縮強度が、設計基準強度(20.5N/mm²)以上であり、CCbのせん断補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認した。
- 以上より、女川2号炉のCCbにより耐震補強を行った構造物の既設コンクリートの状態が、CCbのせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認できた。

目次

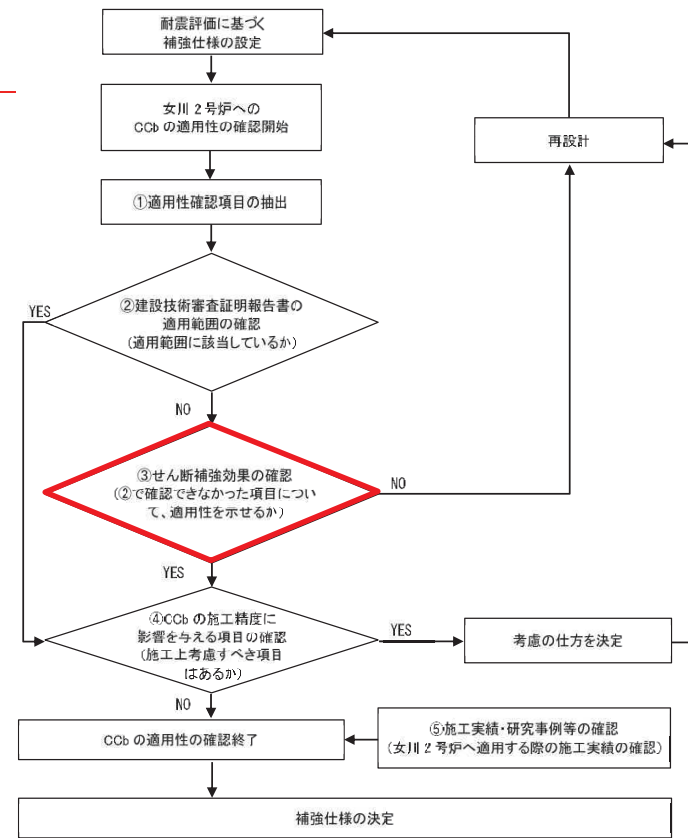
1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

CCbの適用性確認フロー



フロー③にて確認する項目	
IV. 部材諸元	確認項目(A)
V. 载荷方法	確認項目(B)
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	確認項目(C)
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	確認項目(D)
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	確認項目(E)
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	確認項目(F)
	確認項目(G)

7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F)) (1/4)

○ CCbの適用性確認フローの「③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認」で示した確認項目のうち「(F)PHb工法(美浜3号炉)との差異 ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性」について確認する。

(1) ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性

- CCb工法は建設技術審査証明報告書において、梁試験体による正負交番載荷試験により性能確認を行っており、その試験体は棒部材($a/d^{\ast}=2.78$)を対象としており、ディープビームを対象とした実験は行われていない。
- 一般に、ディープビーム的な破壊形態が想定される場合のせん断耐力は、棒部材的な破壊形態が想定される場合のせん断耐力よりも大きい。
- これらのことから、女川2号炉においてCCbによりせん断補強を行う部材については、棒部材式によるせん断耐力により照査を行うとともに、照査値は0.8程度を目標としてCCbによるせん断補強鉄筋量を算定することにより安全側の配慮をしている。
- ここでは、一般的なトラス理論に基づくせん断補強筋の役割や、建設技術審査証明報告書における実験を考察することによりディープビーム的な破壊形態に対するCCb工法の適用性について検討する。

※: a/d : せん断スパン比

a: せん断スパン

d: 部材の有効高さ

7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F)) (2/4)

a. 各破壊形態におけるコンクリート及びせん断補強筋の応力の負担機構

- せん断スパン比(a/d)により、斜めひび割れが発生する角度が変わることにより、「棒部材式で想定する破壊形態」と「ディープビーム式で想定する破壊形態」に分けられる。

- 部材のせん断耐力 V_{yd} は、コンクリート負担分のせん断耐力 V_{cd} とせん断補強筋によるせん断耐力 V_{sd} の和で表現される。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$$

せん断補強筋は、棒部材式で想定する破壊形態、ディープビーム式で想定する破壊形態のいずれもひび割れ面と直交する方向に作用する引張応力(下表 →)に対して抵抗する(下表 ←)ことによりせん断力を負担する(V_{sd})ものであり、ひび割れ角度によりその効果に差はあるが、せん断力の負担機構は変わらない。

コンクリートは、棒部材式で想定する破壊形態の場合は、ひび割れ発生面の骨材のかみ合い作用 V_a 、主鉄筋のダウエル作用 V_d 、圧縮部のせん断力 V_{cz} によりせん断力を負担する。ディープビーム式で想定する破壊形態の場合は、形成されるタイドストラット部(またはタイドアーチ部)のコンクリートの圧縮力 V_{cdd} によりせん断力を負担する。

表 各破壊形態における応力の負担機構

	応力状態	
	棒部材式で想定する破壊形態 (a/dが大きい場合)	ディープビーム式で想定する破壊形態 (a/dが小さい場合)
せん断補強筋が負担するせん断耐力 (V_{sd})		
コンクリートが負担するせん断耐力 (V_{cd})		

7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F)) (3/4)

b. 設計における保守性

- ここまで述べたように、ディープビーム式におけるコンクリート分のせん断耐力は主に圧縮によりせん断力に抵抗するものであり、棒部材式におけるコンクリート分のせん断力負担分(せん断耐力)よりも大きいことから、せん断スパン比(a/d)の範囲によって破壊形態とせん断耐力は下図のように分けられ、ディープビーム型の破壊形態が想定される a/d の範囲($a/d \leq 2$)において棒部材式により評価を行うことは安全側の評価となる。
- また、下表に示すp44~47「4.4 実施工部材の応答性状の確認」にて実施した、ディープビーム型の破壊形態となる部材のせん断耐力評価においても、棒部材式よりもディープビーム式のせん断耐力が大きく、棒部材式によりせん断耐力を評価することが安全側の設計であることが確認でき、材料非線形解析の結果も棒部材式よりも大きなせん断耐力となることが確認できる。
- 女川2号炉においてCCbによりせん断補強を行う部材の設計に当たっては、 a/d がディープビーム式で想定する破壊形態の範囲であっても棒部材式により評価を行うとともに、設計上の配慮としてせん断耐力と設計せん断力に対する比を0.8程度とする方針であり、更に裕度大きいものと考えられる。

$a/d=2$ を境に、棒部材式よりもディープビーム式の方がせん断耐力が大きくなる。

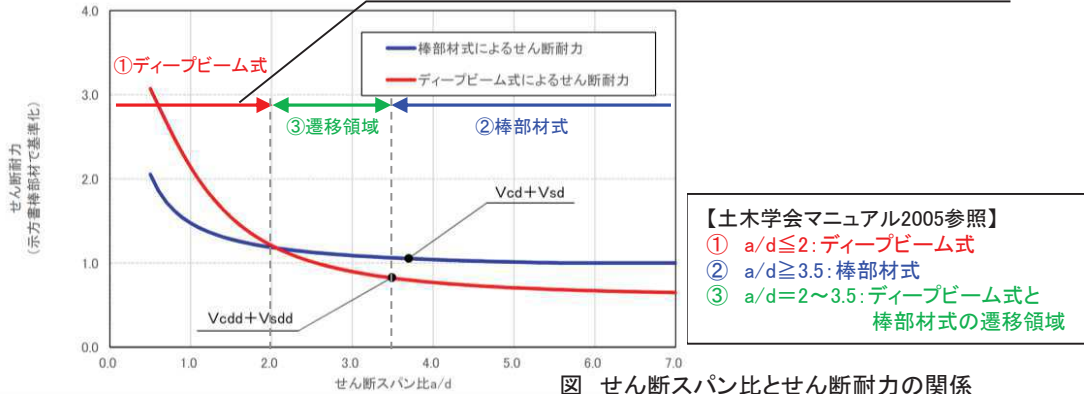


図 せん断スパン比とせん断耐力の関係

表 せん断耐力の比較例(軽油タンク室)

ケース	せん断耐力(kN)		
	せん断耐力評価式	棒部材式	ディープビーム式
軽油タンク室	③ - 2 - 1 - B (CCb工法)	775	2407
		材料非線形解析	
		2610	

c. ディープビーム的な破壊により発生するひび割れの影響

- ディープビーム的な破壊形態のせん断力によるひび割れ角度は、棒部材的な破壊形態において想定するひび割れ角度(45°)より大きくなる場合がある。
- この高角度のひび割れにより、CCbの定着性能に影響を与える可能性があるが、p58「5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D)) (6/8)」に示すとおり建設技術審査証明報告書の梁試験から高角度のひび割れが発生している状態においても所要のせん断補強効果が確認できている。

以上のとおり、女川2号炉においてCCbを用いる部材については棒部材式を用いてせん断力に対する評価を行うことに加え、照査値を0.8程度に抑える設計上の配慮を行うこと及びディープビーム的な破壊形態において発生する可能性のある高角度のひび割れについても実験によりCCbの補強効果が発揮されることが確認されていることから、ディープビーム的な破壊形態が想定される部材への適用性は問題ないと考えられる。

7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F)) (4/4)

(2) ディープビーム的な破壊形態に対するCCbのせん断補強効果の確認実験

- ディープビーム的な破壊が発生する可能性のある部材へのCCb工法の適用性は、「b. 設計における保守性」及び「c. ディープビーム的な破壊により発生するひび割れの影響」に示すとおり問題ないと考えられる。
- しかしながら、「b. 設計における保守性」に示す軽油タンク室を例としたディープビーム的な破壊形態の材料非線形解析には、分散ひび割れモデルを用いており、ひび割れの発生等による付着効果の低下を間接的に表現するモデルであるため、解析の不確かさを含んでいることから、ディープビーム的な破壊形態を想定した実験を行い、解析と同様なせん断補強効果が得られることを確認する。
- 実験は設計荷重に対してディープビーム的な破壊が想定される断面力となる部材を概ね想定することとし、CCbの効果の確認結果は工事計画認可申請段階で示すこととする。

a. 検討目的

- ディープビームに対するCCbのせん断補強効果を、実験により確認する。

b. 検討概要

- 女川2号炉の諸元を基に決めた基本ケースを参考に、計5ケースの実験を行う予定である。

No.	ケース概要	検討の目的
1	基本ケース	女川2号炉にてCCbにより耐震補強を行った構造物のうちディープビームとなる部材の適用性を確認
2	せん断補強筋無し	CCbありとの比較によりせん断補強筋の効果を確認
3	せん断補強筋比の変更	CCbのせん断補強筋比の違いによる効果を確認
4	せん断スパン比の変更	せん断スパン比の違いによるCCbの効果を確認
5	鉄筋種類の変更	従来工法(先施工)について実験を行い、CCbとの差異を確認

c. 確認内容

- ディープビームを対象とした実験を行い、実験から得られたせん断耐力が棒部材式により算定されるせん断耐力よりも大きいことを確認すると共に、CCbを用いた場合のディープビーム式による評価の可能性について確認する。

d. 実験結果への対応方針

- 実験結果の考察を行い、ディープビーム的な破壊形態におけるCCbのせん断補強効果については必要に応じて女川2号炉の設計に取り込むとともに(ディープビーム式の採用)、期待するせん断補強効果が得られない場合は、CCbの打ち増しや太径の採用、他のせん断補強工法(例えば部材厚増や地盤改良等)との併用等について検討し、所要の安全性を確保する。

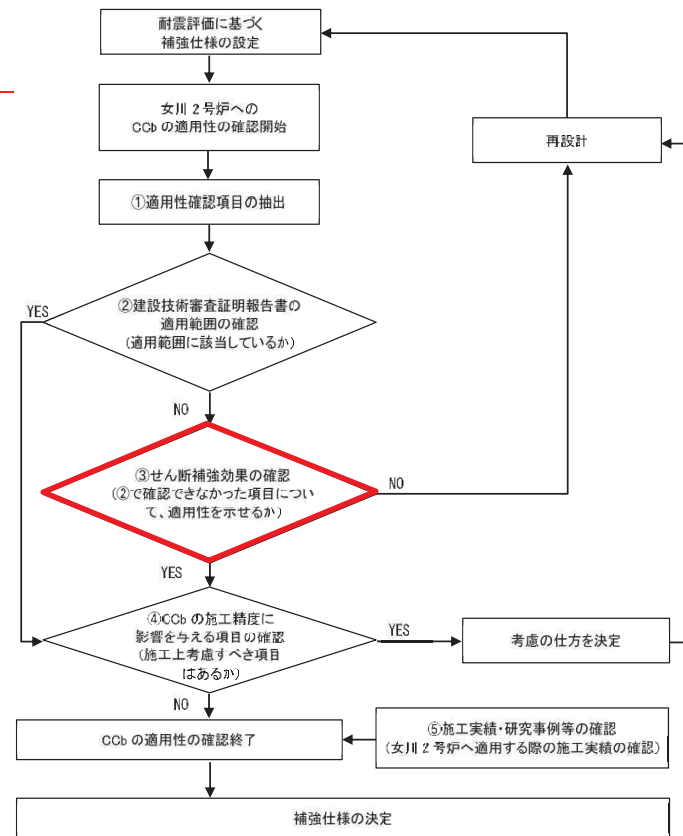
目次

1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重



フロー③にて確認する項目	
IV. 部材諸元	確認項目(A)
V. 载荷方法	確認項目(B)
X. せん断ひび割れ抑制効果の確認	確認項目(C)
XI. ひび割れに対する定着機能の保持	確認項目(D)
XIV. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	確認項目(E)
XV. PHb工法(美浜3号炉)との差異	確認項目(F)
	確認項目(G)

8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G)) (1/2)

○ Ccbの適用性確認フローの「③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認」で示した確認項目のうち「(G)PHb工法(美浜3号炉)との差異 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性」について確認する。

(1) 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性

- 女川2号炉においてCCbによりせん断補強を行った部材には、面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材があることから、CCbの当該荷重状態における適用性について検討する。

a. 面内荷重及び面外荷重に対する設計の考え方

- 女川2号炉においてCCbを適用する構造物のうち面内荷重と面外荷重を同時に受ける部材の設計に当たっては、面内荷重は主筋及びコンクリートで負担し、面外荷重は主筋、せん断補強筋及びコンクリートで負担する設計としている。
- そのため、部材に面内荷重と面外荷重が同時に作用してもCCbは面内荷重を負担させない設計としていることから、CCbへの影響はなく負担する荷重の観点からは適用性に問題はない。

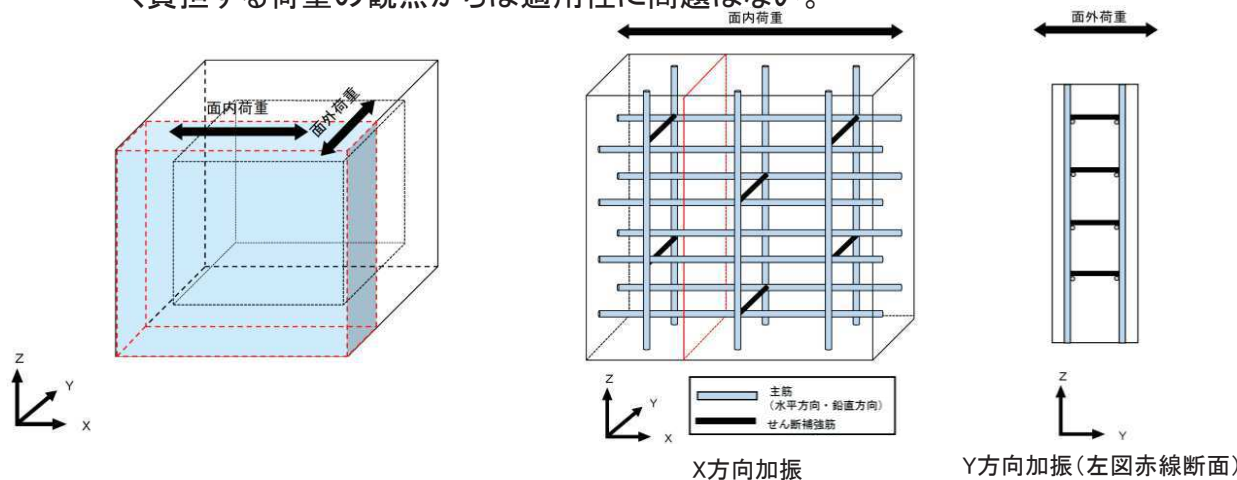


図 三次元モデルへ作用する荷重の概念図

図 X方向・Y方向の壁部材の概要配筋状況

表 面内荷重・面外荷重に対する設計の考え方

	面内荷重 (X方向加振)	面外荷重 (Y方向加振)
主筋※	○	○
せん断補強筋	×	○

○: 荷重を負担する

×: 荷重を負担しない

※: 主筋は降伏ひずみ以下の範囲で使用する。

b. 面内荷重により発生するひび割れの影響

- 面内荷重が作用することにより、部材を貫通するひび割れ(面内せん断力によるひび割れ)が発生する可能性があるが、女川2号炉においてはCCbを採用する面部材については、面内せん断ひずみを2,000 μ 以下とすることや、主筋のひずみが降伏ひずみ以下で用いることなどの使用制限を設けることとしており、ひび割れの発生が限定的な範囲で使用することとしている。
- 面内せん断力によるひび割れにより、CCbの定着性能に影響を与える可能性があるが、p55「5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D)) (5/8)」に示すとおり建設技術審査証明報告書の梁試験より、同等のひび割れ状態においてもせん断補強効果を確認していることから、CCb工法の適用性に問題はない。

8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G)) (2/2)

(2) 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性に関する数値解析による検討

- 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性は、「a. 面内荷重及び面外荷重に対する設計の考え方」及び「b. 面内荷重により発生するひび割れの影響」よりCCbへの悪影響はなく問題ないと考えられるが、数値解析(静的材料非線形解析)を実施し適用性に問題がないことを確認する。
- なお、数値解析は面外荷重と面内荷重を同時に受ける部材について設計荷重時の状態を概ね再現することとし、解析および評価結果は工事計画認可段階にて示すこととする。

a. 検討目的

- 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法のせん断補強効果を、数値解析を用いた検討により確認する。

b. 検討概要

- CCbをモデル化した面部材の数値解析は、三次元構造物の応力状態を再現することができる三次元静的材料非線形解析の解析コードであるCOM3により行う。
- 検討対象とする部材は軽油タンク室の側壁とし、面外荷重として支配的である地震時増分土圧が作用する部材を選定する。
- 常時荷重と基準地震動時における地震時増分荷重を、面外方向及び面内方向に作用させた際のCCbに生じる応力やひずみを確認する。
- また、従来工法(先施工)のケースについても実施し、CCb工法とのせん断補強効果の比較を行う。

c. 確認内容

- 面内荷重と面外荷重を同時に作用させた場合のせん断補強筋(CCb)の状態を確認する(面外荷重作用時、面内・面外荷重作用時のCCbのひずみ等)。
- 面外荷重に伴う面内せん断ひび割れの発生の有無やその影響について確認する。

d. 評価結果への対応方針

- 面内荷重と面外荷重を受ける部材でのCCbの効果について、設計荷重に対してせん断耐力が不足することが想定された場合は、CCbの打ち増し・太径の採用や、他のせん断補強工法(例えば部材厚増や地盤改良等)との併用について検討し、所要の安全性を確保する。

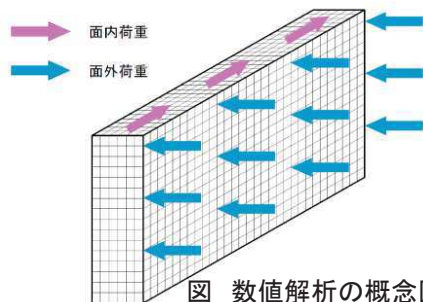


図 数値解析の概念図

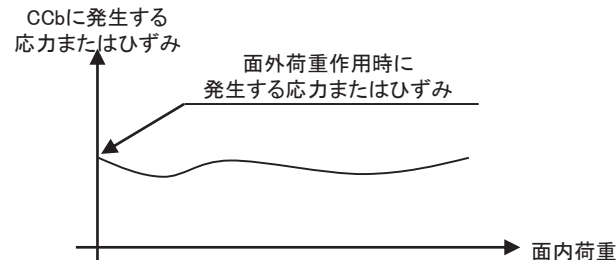


図 面外荷重と面内荷重作用時のCCbに発生する応力またはひずみ(イメージ)

目次

1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理(1)

(1) CCb工法の保守性

- 設計においてCCbが負担するせん断耐力を算出する際に乗じる有効係数 β_{aw} (CCbのせん断耐力の補強効果を示す有効係数)は、建設技術審査証明報告書において、試験結果に対して保守的に小さい値を設定(下表参照)しており、せん断耐力を安全側に評価している。(詳細な確認内容を、次ページに示す。)

(2) 女川2号炉においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての保守性

- 設計においてCCbが負担するせん断耐力は、棒部材式により算出されるせん断耐力よりもディープビーム式により算出されるせん断耐力の方が大きくなるが、保守的に棒部材式により算出されるせん断耐力により部材の照査を行うことで、本来必要と考えられるせん断補強筋量以上のせん断補強筋を配置している。

(3) 女川2号炉においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての設計上の制限

- 建設技術審査証明報告書の梁試験では、主鉄筋ひずみが2363 μ (SD490)まで達した状態でのひび割れ状況においてもせん断耐力を保持していることが確認されているが、女川2号炉ではSD345の鉄筋を使用していることから、面内せん断力と面外力の合力による鉄筋のひずみが1725 μ 以下(応力が降伏強度以下)、もしくは面内せん断力に対して、コンクリートのみで抵抗可能な部材を対象に概ね弾性範囲となる状況下でCCb工法を使用する。
- 建設技術審査証明報告書の梁試験では層間変形角が1%(1/100)を超えている範囲までせん断耐力が保持されていることが確認されているが、かぶりコンクリートの剥落によってCCbの定着機能を阻害するおそれがある。そのため、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態である圧縮縁コンクリートひずみ1.0%または層間変形角1%(1/100)に、十分な余裕をもってCCb工法を使用する。なお、当使用制限は一般に上記に示す鉄筋のひずみに対する制限により満足される。
- CCbの施工において、施工精度の低下が生じる可能性は低いと完全に否定できるものではないこと等から、設計上の配慮として耐震評価上の裕度(せん断破壊に対する照査値を8割程度に抑える)を持たせた設計を行う。

表-8.4 実験結果の一覧(シリーズ3、4)

試験ケース	「セラミックキャップバー(CCb)」の仕様		実験での最大せん断耐力(kN)		算定式によるせん断耐力(kN) $V_{ccb} = V_{cal} + V_s$					「セラミックキャップバー(CCb)」が負担するせん断耐力(kN)			せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw} (V_{ccb}/V_s)			有効率の設計値 β_{aw}
			正側	負側	V_{cal}	V_s	V_{ccb}	V_{ccb}	正側	負側	平均	平均				
													V_{exp}	V_{exp}	V_{cal}	
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	583	499	542	253	289	310	246	1.07	0.85	0.96	0.89			
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	515	570	543	254	289	261	316	0.90	1.09	1.00	0.83			
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	531	509	543	254	289	277	255	0.96	0.88	0.92	0.78			
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面より5mm手前	497	526	543	254	289	243	272	0.84	0.94	0.89	0.78			
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	532	520	525	235	290	297	285	1.02	0.99	1.00	0.82			
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	520	535	526	236	290	284	299	0.98	1.07	1.01	0.82			
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面より5mm手前	539	546	524	234	290	305	312	1.05	1.08	1.06	0.78			
No.4-4	両端後端型	—	667	568	525	235	290	426	333	1.47	1.15	1.31	1.00			

※1 下線は正負交番載荷で最初にせん断破壊したことを示す
 ※2 斜体はせん断破壊をしていない場合、その載荷方向での最大荷重を示す

9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理(2)

- 有効係数 β_{aw} の保守性について確認する。
 - ・ 設計においてCCbが負担するせん断耐力を算出する際に乗じる有効係数 β_{aw} の保守性を、設計式と実験結果及び数値解析実験結果の比較により行う。
 - ・ 有効係数 β_{aw} は、せん断耐力評価式で算定するせん断補強筋が負担するせん断耐力 V_{sd} に対するCCbが負担するせん断耐力 V_{ccbd} の比として定義される。
 - ・ 保守性は、設計式から得られる有効係数 β_{aw} よりも実験値及び解析値から得られる β_{aw} の方が大きいことにより確認する。
 - ・ なお、実験値及び解析値の有効係数 β_{aw} は、設計式から得られるせん断補強筋が負担するせん断耐力 V_{sd} をベースに算出しており、実験及び解析のCCbが負担するせん断耐力 V_{ccbd} は、実験または解析から得られたせん断耐力から設計式より算出したコンクリートが負担するせん断耐力 V_{cd} を減じて算出している。
 - ・ 検討ケースは、比較データ(実験結果と解析結果)が充実しているステップ①の材料非線形解析にて対象としている試験体(No.3-3)とする。
- 有効係数 β_{aw} の比較検討結果を以下に示す。
 - ・ CCbが負担するせん断耐力 V_{ccbd} は、設計式、解析値、実験値の順に大きくなっており、設計式が保守的な評価になっている。
 - ・ 設計式、実験値及び解析値から得られる有効係数 β_{aw} の比較結果より、設計式から得られる β_{aw} よりも実験値及び解析値から得られる β_{aw} の方が大きく、設計式から得られる β_{aw} の保守性が確認された。

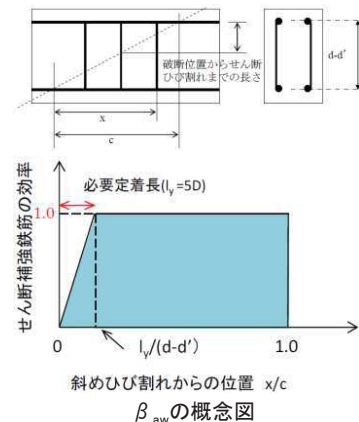
試験ケース		せん断耐力(kN)※1									有効係数 β_{aw} ※2		
		設計式(せん断耐力評価式)			実験値			解析値			⑧設計式	⑨実験値	⑩解析値
		① V_{cal}	② V_{cd}	③ V_{sd}, V_{ccbd}	④ V_{exp}	② V_{cd}	⑤ V_{ccbd}	⑥ V_{ana}	② V_{cd}	⑦ V_{ccbd}			
No.3-3	従来工法	542	253	289	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CCb工法	510		257	563	253	310	550	253	297	0.89	1.07	1.03

ここに、

- ・ V_{cal} : 設計式(せん断耐力評価式)から得られるせん断耐力
- ・ V_{cd} : コンクリートが負担するせん断耐力
- ・ $V_{sd}(V_{ccbd})$: せん断補強筋(CCb)が負担するせん断耐力
- ・ V_{exp} : 実験から得られるせん断耐力
- ・ V_{ana} : 解析から得られるせん断耐力
- ・ β_{aw} : CCbのせん断耐力の補強効果を示す有効係数 $\beta_{aw} = (1 - (l_v / 2S_{rb}))$

※:

1. 各せん断耐力の算出について
 - ・ ①・②・③: せん断耐力評価式(棒部材式)より算出
 - ・ ④: 実験から得られたせん断耐力
 - ・ ⑤: 「実験から得られたせん断耐力」から「設計式により算出したコンクリートが負担するせん断耐力」を減じて算出(⑤=④-②)
 - ・ ⑥: 解析から得られたせん断耐力
 - ・ ⑦: 「解析から得られたせん断耐力」から「設計式により算出したコンクリートが負担するせん断耐力」を減じて算出(⑦=⑥-②)
2. 有効係数 β_{aw} の算出について
 - ・ ⑧: 設計式より得られる有効係数 $(1 - (l_v / 2S_{rb}))$, l_v : CCbの定着長(5D, D: 鉄筋径), S_{rb} : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔
 - ・ ⑨・⑩: CCbを通常のせん断補強筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効係数
 - ・ ⑨: 「実験から得られたCCbが負担するせん断耐力」を「設計式から得られる通常のせん断補強筋が負担するせん断耐力」で除して算出(⑨=⑤(V_{ccbd})/③(V_{sd}))
 - ・ ⑩: 「解析から得られたCCbが負担するせん断耐力」を「設計式から得られる通常のせん断補強筋が負担するせん断耐力」で除して算出(⑩=⑦(V_{ccbd})/③(V_{sd}))



目次

1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

10. まとめ

○ 女川2号炉の取水路(漸拡部), 原子炉機器冷却海水配管ダクト, 軽油タンク室及び復水貯蔵タンク基礎は, 後施工せん断補強工法(CCb工法)により耐震補強を行っており, その適用性について検討した。

- 建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚においても, せん断ひび割れ抑制効果を確認できており, CCb工法が適用できることを確認した。
- 建設技術審査証明報告書の実験と実施工部材では部材諸元及び載荷方法(設計荷重)等が異なるが, 女川2号炉でCCbにより耐震補強を行った構造物の部材諸元においても, せん断ひび割れ抑制効果を確認できており, CCb工法が適用できることを確認した。
- CCbにより耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れ(曲げひび割れ, 面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びディープビームに生じる45度を超える高角度の斜めひび割れ)が, CCbの定着体部やその周囲に生じても定着機能が保持され, 所要のせん断補強効果が発揮できていることを確認した。
- 女川2号炉でCCbにより耐震補強を行った構造物にCCbのせん断補強効果に影響を与えるひび割れはなく, 圧縮強度においても設計基準強度以上であったことから, 既設コンクリートの状態がCCbのせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認した。
- 建設技術審査証明報告書に記載の梁試験体ではディープビームを対象とした試験を実施していないが, ディープビーム的な破壊となる部材に対しても, CCb工法が適用できることを確認した。
- 女川2号炉でCCbにより耐震補強を行った構造物には, 面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材があるが, 当該部材に対してもCCb工法が適用できることを確認した。
- なお, 「ディープビーム的な破壊となる部材へのCCb工法の適用性」は, 適用性確認に用いた材料非線形解析に不確かさを含んでいることを踏まえ, 実験を行い解析と同様なせん断補強効果が得られることを確認することとし, 「面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材へのCCb工法の適用性」については, 数値解析(材料非線形解析)を行い適用性に問題がないことを確認する。実験結果及び解析結果は, 工事計画認可段階にて示すこととする。
- 建設技術審査証明報告書の実験にて確認できている範囲を踏まえ, 女川2号炉にてCCb工法を適用するにあたっての保守性を設定すると共に, 設計上の制限を設定し適用することとした。

以上より, 女川2号炉においてCCb工法により耐震補強を行うことの適用性を確認した。

目次

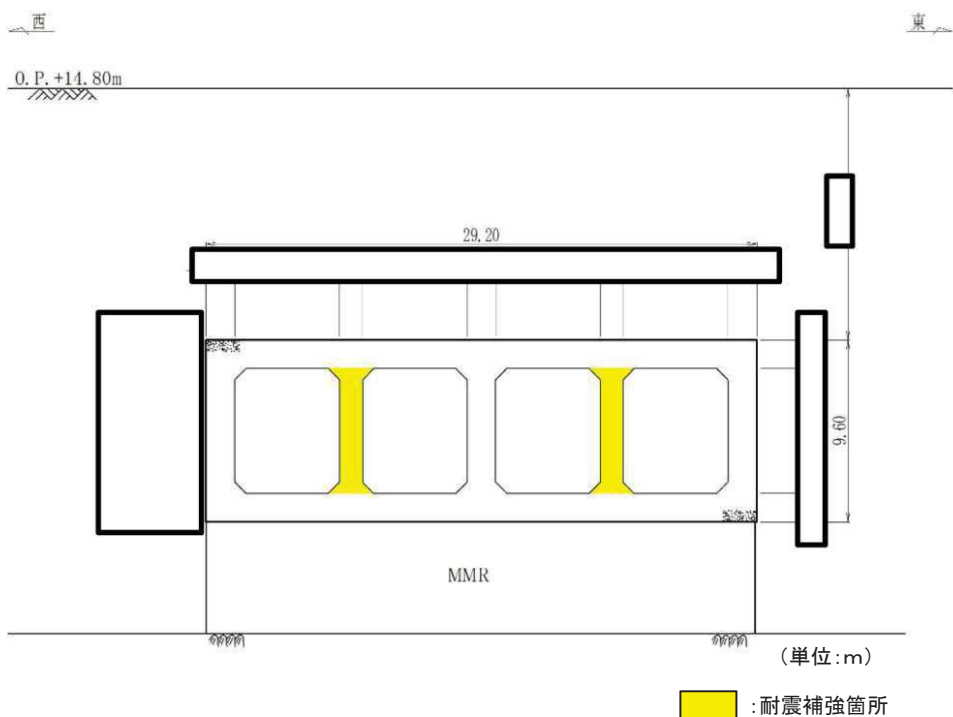
1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

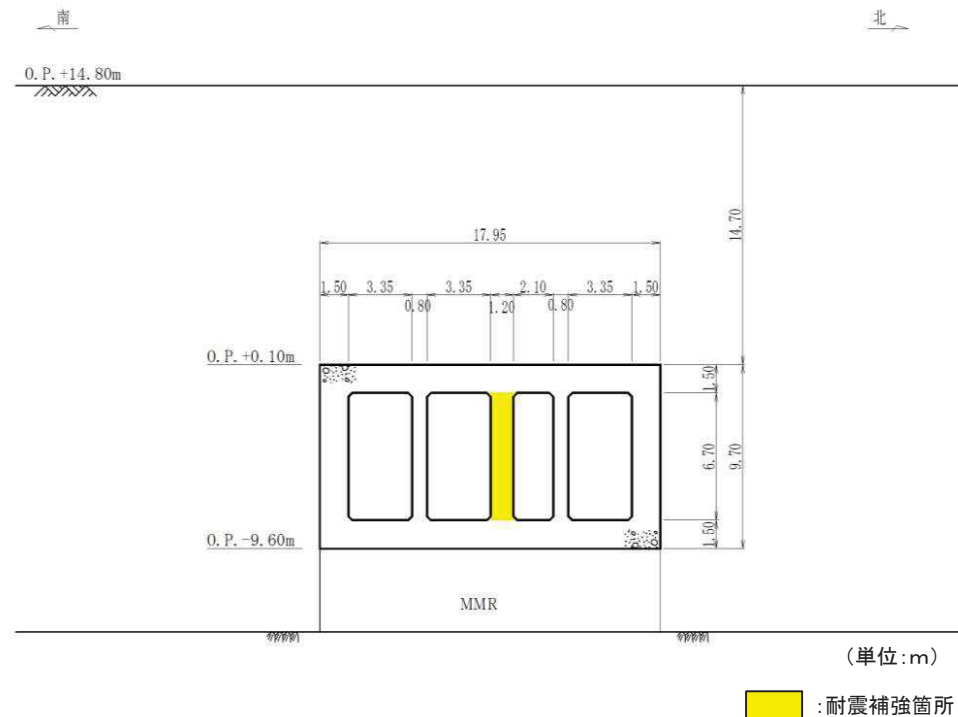
付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

補足説明1 Ccbにより耐震補強を行った構造物(1/3)



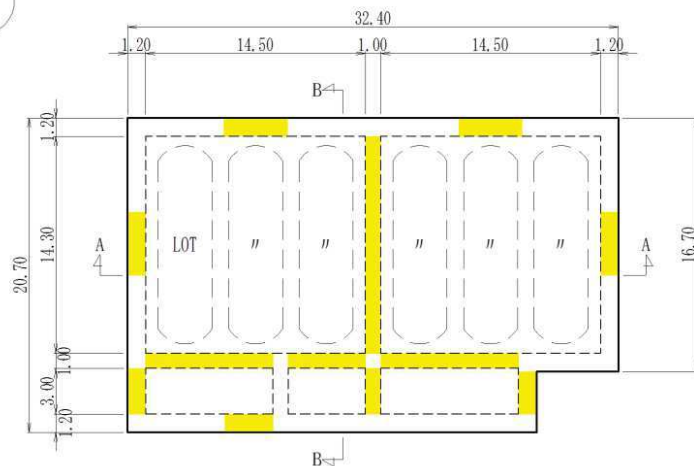
取水路(漸拡部)



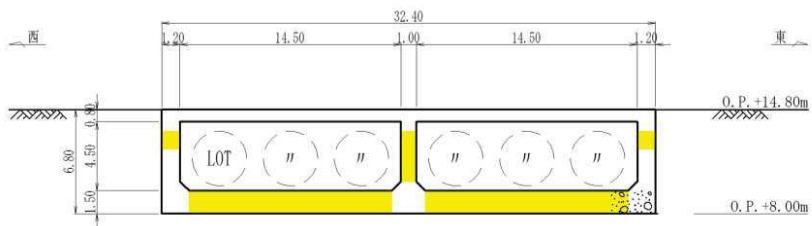
原子炉機器冷却海水配管ダクト

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

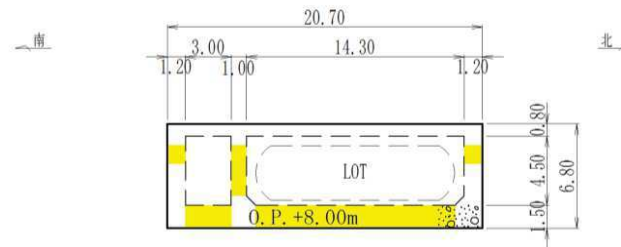
補足説明1 Ccbにより耐震補強を行った構造物(2/3)



平面図



A-A断面



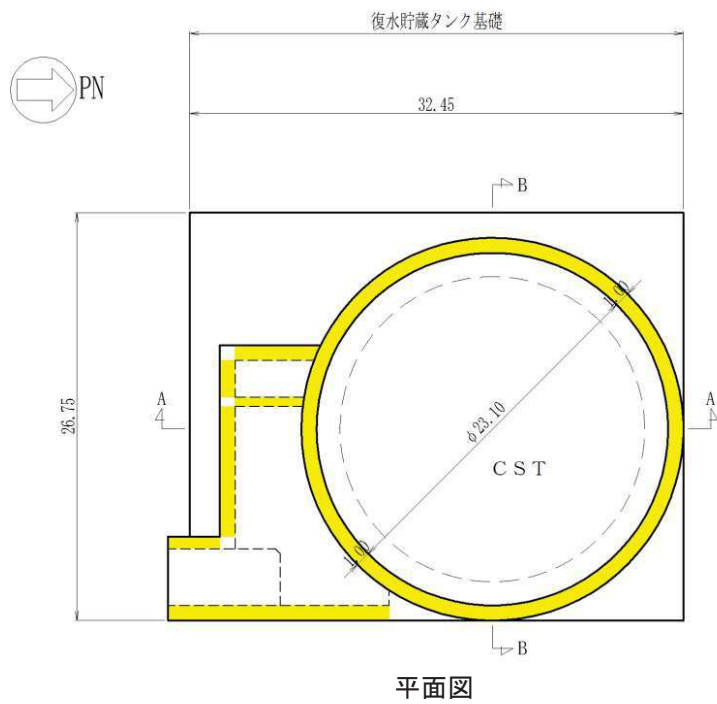
B-B断面

(単位:m)

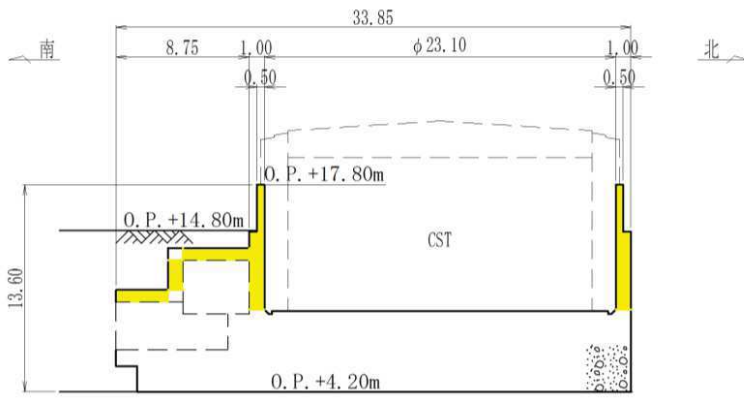
 : 耐震補強箇所

軽油タンク室

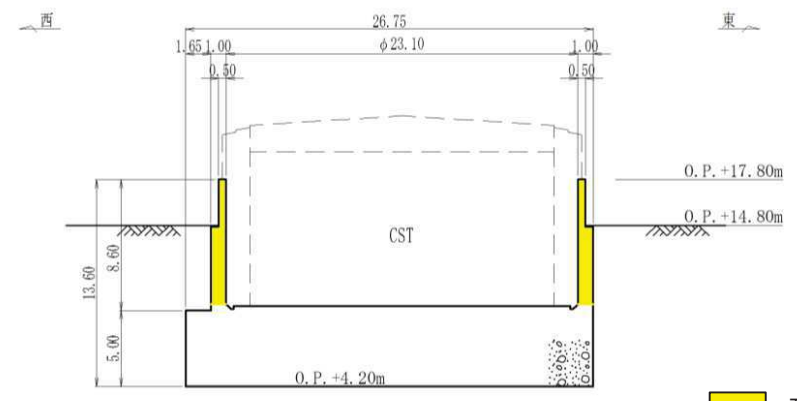
補足説明1 Ccbにより耐震補強を行った構造物(3/3)



平面図



A-A断面



B-B断面

復水貯蔵タンク基礎

(単位:m)
耐震補強箇所

目次

1. はじめに
2. CCb工法の概要
3. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性の確認
4. 女川2号炉における部材諸元他の適用性の検討(確認項目(A)~(C))
5. 女川2号炉におけるひび割れに対する定着機能保持の検討(確認項目(D))
6. 女川2号炉におけるコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
7. ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討(確認項目(F))
8. 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討(確認項目(G))
9. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性及び設計上の制限の整理
10. まとめ

補足説明1 CCbにより耐震補強を行った構造物

付録

- (1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態
- (2) 集中荷重と分布荷重

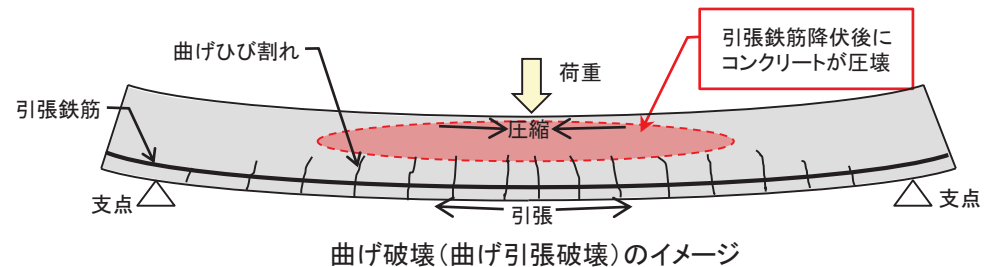
付録

(1) 鉄筋コンクリート部材の破壊形態

○ 鉄筋コンクリート部材の破壊形態は大きく「曲げ破壊」と「せん断破壊」に分けられる。

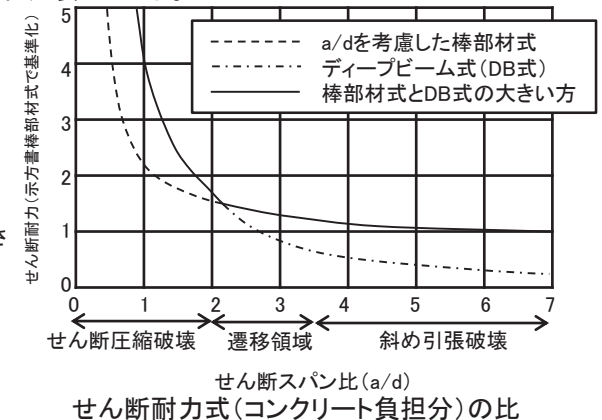
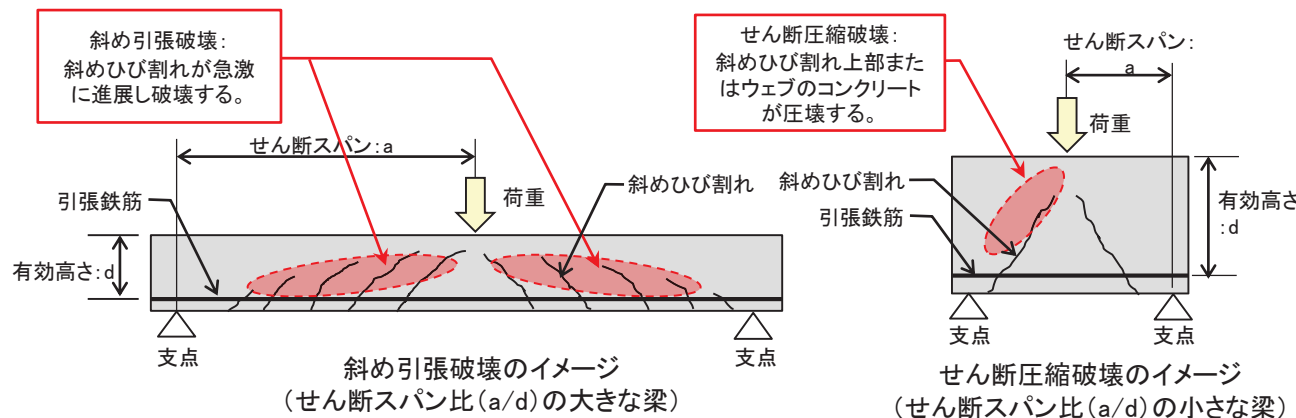
○ 曲げ破壊

- 部材の曲げ挙動の進展により発生する破壊であり「曲げ引張破壊」と「曲げ圧縮破壊」に大別される。代表的な曲げ引張破壊について説明する。
- 曲げ引張破壊：荷重が増大するにつれて、先ず曲げひび割れが発生し、その後曲げひび割れが部材の上部に伸展していき、引張鉄筋が降伏し、最終的には部材上部の圧縮側コンクリートが圧壊する破壊。

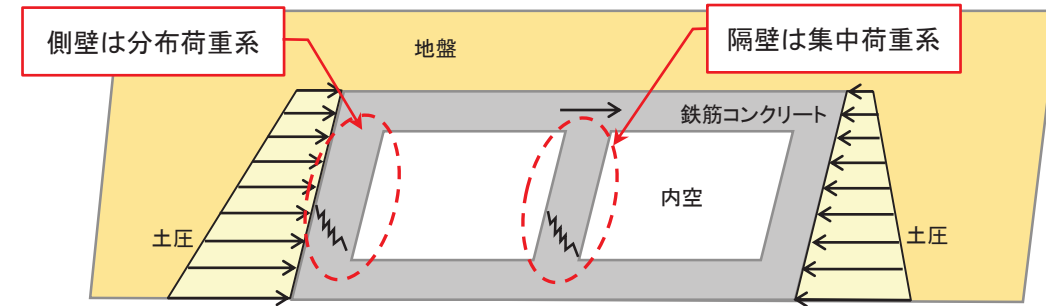


○ せん断破壊

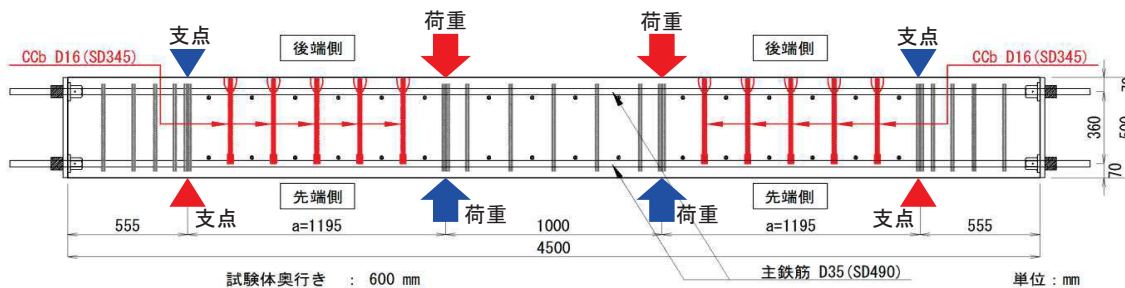
- せん断破壊の形態は、せん断スパン比※の大きさによって「斜め引張破壊」と「せん断圧縮破壊」に分けられる。
※せん断スパン比：支間長(せん断スパン) a と断面の有効高さ d の比 (a/d) のこと。
- 「斜め引張破壊」と「せん断圧縮破壊」の破壊形態の関係については、一般的な目安として、せん断スパン比が2以下であれば、「せん断圧縮破壊」となり、せん断スパン比が3.5以上であれば、「斜め引張破壊」になる。せん断スパン比が2~3.5の場合は両者の遷移領域であるので一般的には両者が生じうる。
- 「斜め引張破壊」では、斜めひび割れが急激に載荷点方向及び支点方向に向かって発達し、それとほぼ同時に耐力を失ってせん断破壊に至る。
- 「せん断圧縮破壊」では、せん断力の増加に伴い徐々に斜めひび割れが進展するが、斜めひび割れが十分に発達しても耐力を失わず、最終的には斜めひび割れ上部またはウェブの圧縮側コンクリートの圧壊によりせん断破壊に至る。



付録 (2)集中荷重と分布荷重



地下土木構造物の荷重形態イメージ



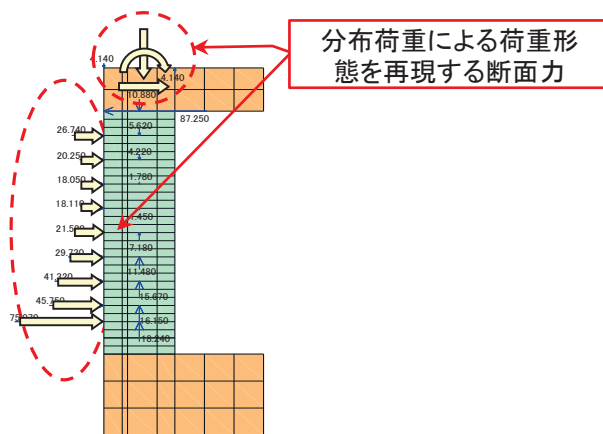
試験体奥行き : 600 mm
有効高さ d : 430 mm
せん断スパン a : 1195 mm
 a/d : 2.78

CCb載荷試験概要

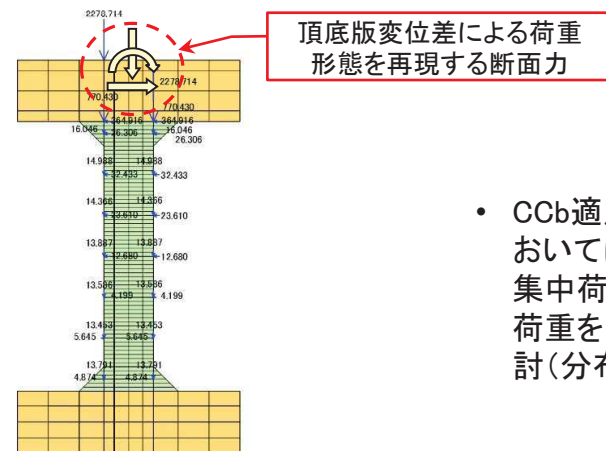
単位 : mm

- 地下に埋設された土木構造物に地震時荷重が作用すると、隔壁は頂底板の変位差による荷重形態(集中荷重系)、側壁は土圧等の分布荷重による荷重形態(分布荷重系)になっている。

- CCb工法の載荷実験は集中荷重による正負交番載荷であり、隔壁の荷重形態(集中荷重系)と同様である。



分布荷重系の材料非線形解析イメージ(側壁)



集中荷重系の材料非線形解析イメージ(隔壁)

- CCb適用性確認における材料非線形解析においては、CCb耐力試験と同様の荷重形態(集中荷重系、ケース③-1)に加えて、分布荷重を受ける部材の荷重形態を模擬した検討(分布荷重系、ケース③-2)も実施する。