

# 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

---

平成30年8月7日  
東北電力株式会社

# 目次

1. はじめに
  2. CCbにより耐震補強を行った構造物の概要
  3. CCb工法について
    - 3.1 CCb工法の概要
    - 3.2 従来工法(先施工)とCCb工法の差異に係る確認項目
    - 3.3 PHb工法とCCb工法の差異に係る確認項目
  4. 適用性の確認
    - 4.1 確認フロー
    - 4.2 適用性確認項目の抽出
    - 4.3 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認
    - 4.4 せん断補強効果の確認
    - 4.5 CCbの施工精度に影響を与える項目の確認結果
    - 4.6 施工実績・研究事例等の確認結果
  5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性
    - 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))
    - 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))
    - 5.3 CCbを適用した部材のコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))
  6. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性の整理
  7. 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

○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、新規制基準における先行プラントでは美浜3号炉で工認実績(ポストヘッドバー(PHb)工法)があるが、セラミックキャップバー工法と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。

本資料は、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 $S_s$ 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、今回採用する部材のせん断耐力を向上させる後施工せん断補強工法他に、次ページに示す工法があるが、女川2号炉のp4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「3.1 CCb工法の概要(p5~6)」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。

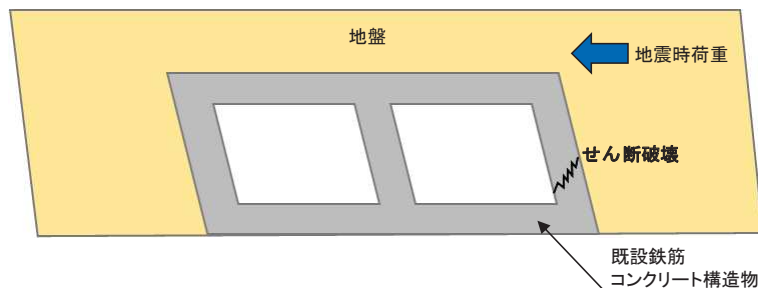


図 地中構造物のせん断破壊イメージ

- セラミックキャップバー工法は、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、グラウト充填にて固定し、せん断耐力を向上させるものである。

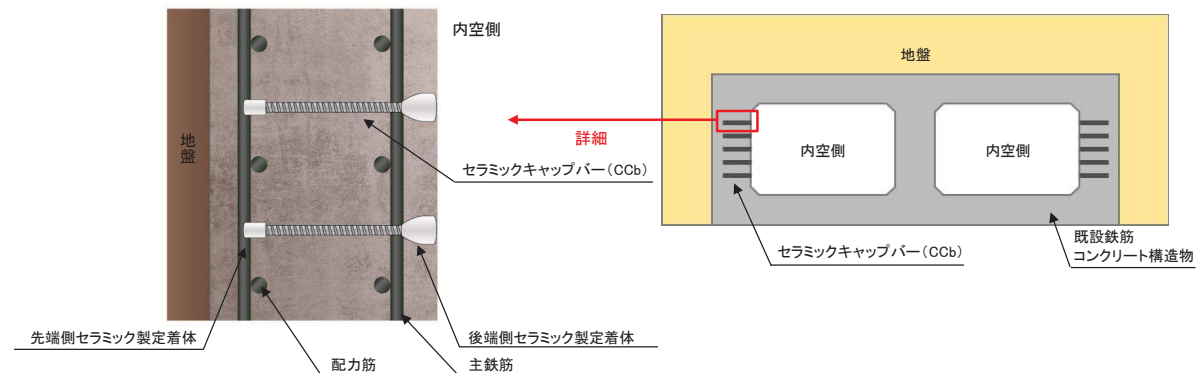


図 CCb設置状況及びCCb工法の概要図※

(※: 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(参考)

○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。

	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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>断面を増厚し部材の剛性を上げることで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
図				
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>女川2号炉他、多数の施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>女川2号炉他、多数の施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>美浜3号炉にて、工認実績有り。(ポストヘッドバー(PHb工法))</li> </ul>

## 2. CCbにより耐震補強を行った構造物の概要

○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(p46～48)に示す。

表 CCbにより耐震補強を行った構造物(概要)

構造物名称	部 材	部材厚 (mm)	CCb径	せん断 スパン比※	
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～ 14.50	
	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～ 11.48
		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					

※:せん断スパン比:a/d(a:支間長, d:有効高さ)

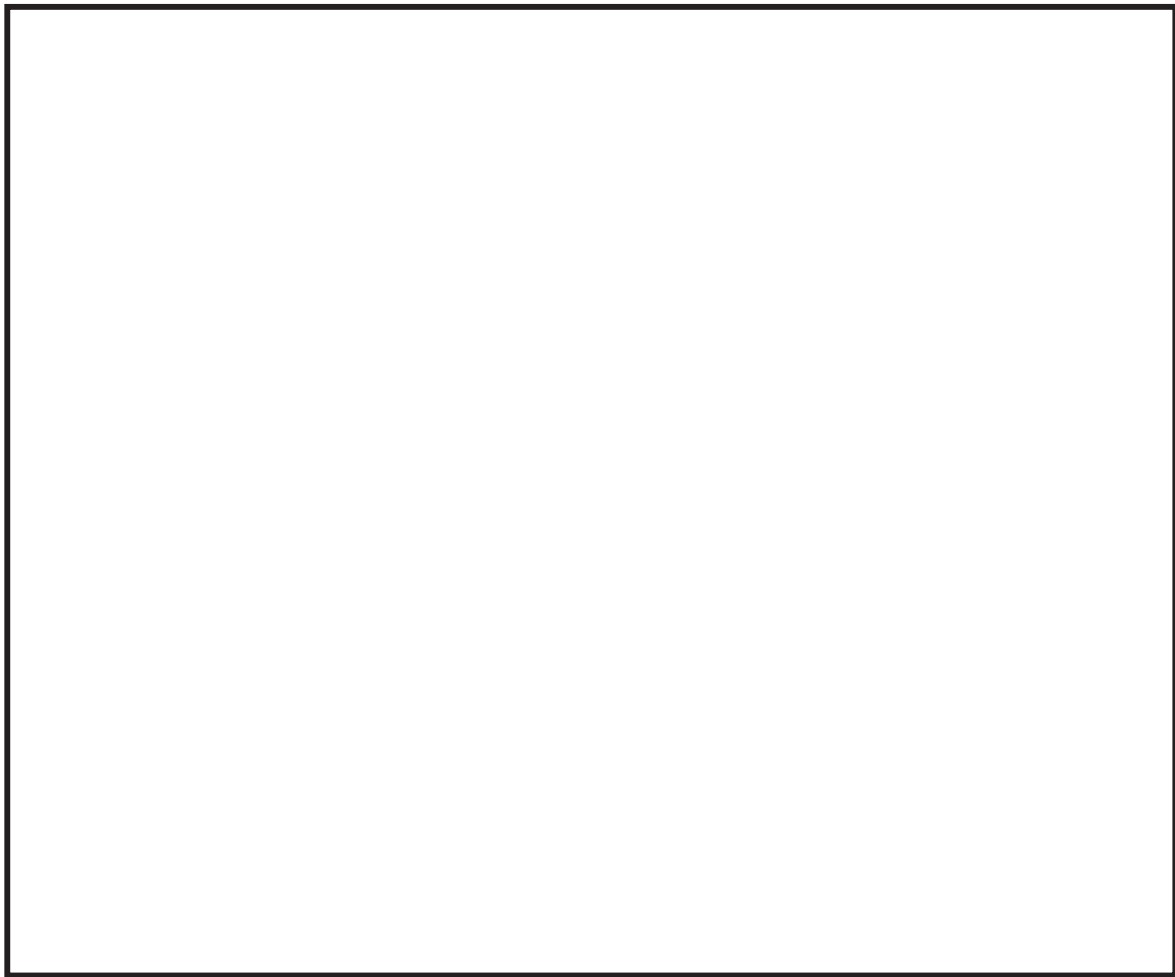


図 CCbにより耐震補強を行った構造物(全体配置図)

※:

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。



### 3. Ccb工法について

#### 3.1 Ccb工法の概要

○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( $\beta_{aw}$ )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、開発目標及び技術内容、既存の技術との対比、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。

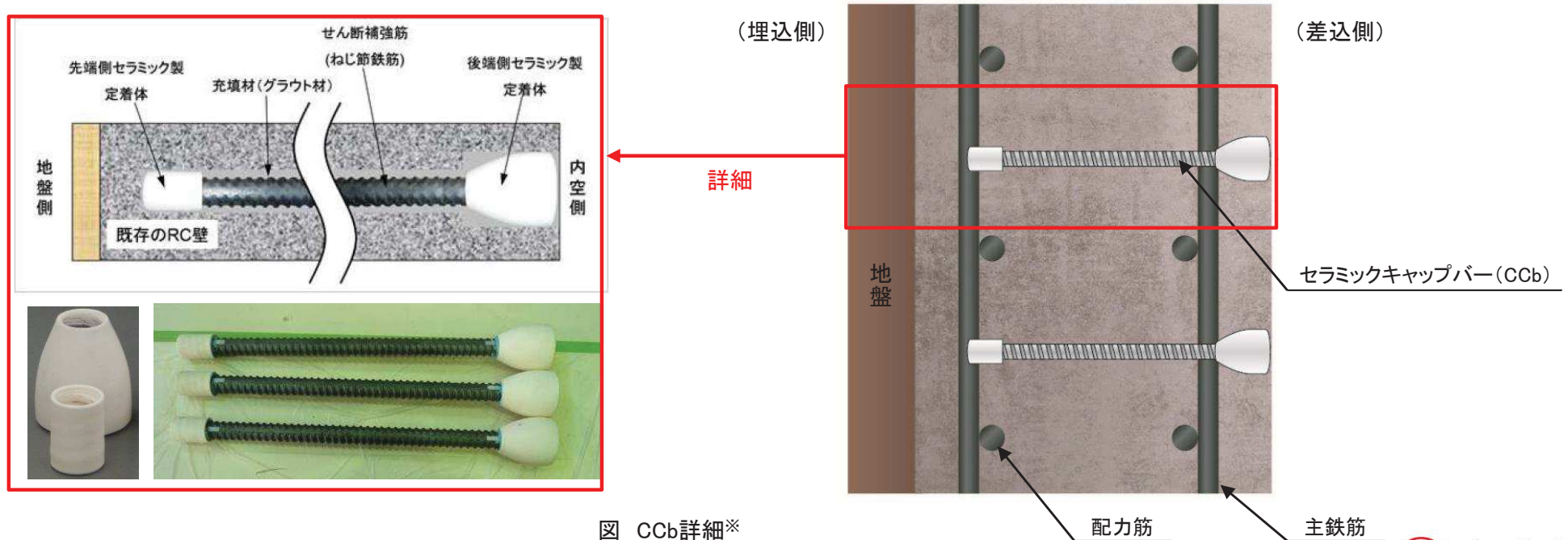


図 Ccb詳細※

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

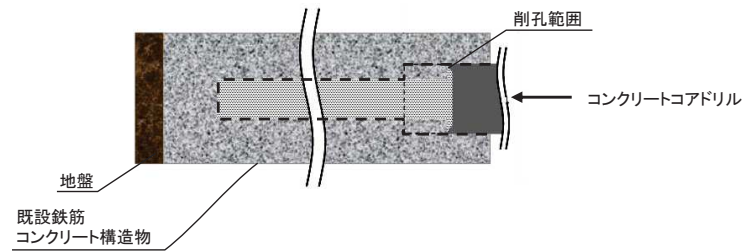
### 3. CCb工法について

#### 3.1 CCb工法の概要(施工方法)

○CCb工法の施工方法を以下に示す。

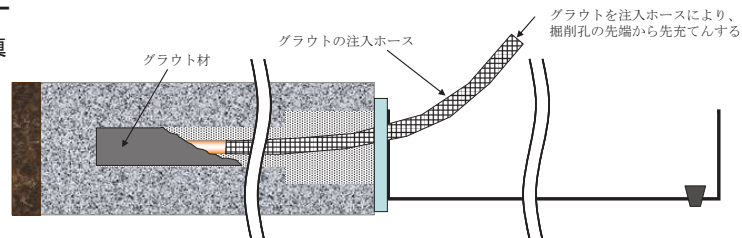
##### ①削孔工

コンクリートコアドリルによる削孔

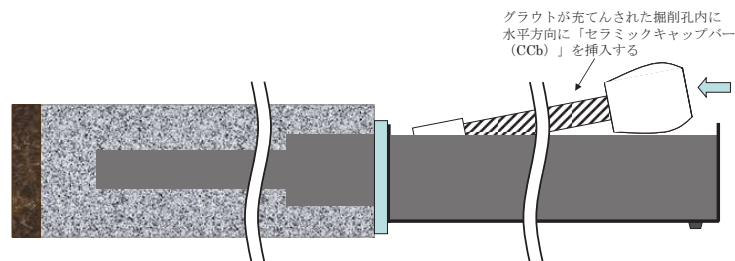


##### ②CCb定着工

グラウトの充填



CCbの挿入



養生用蓋の設置

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掘削孔を塞ぐ

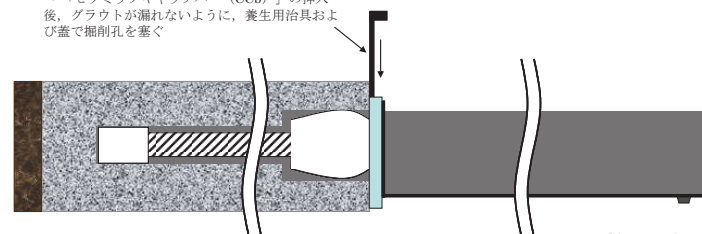


図 施工方法(概要)

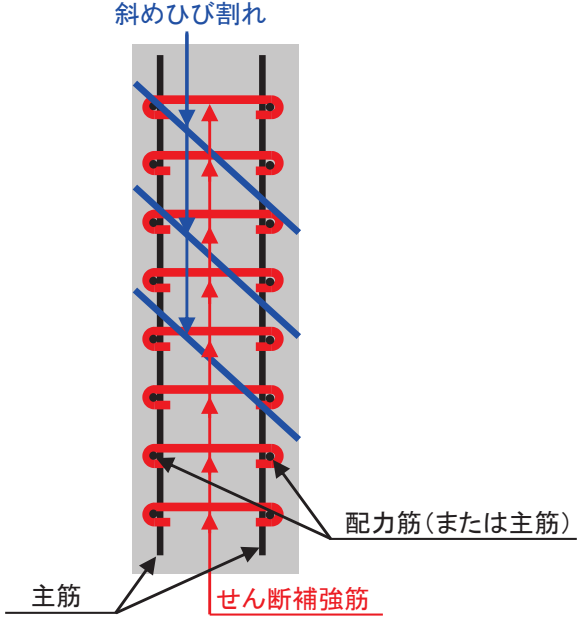
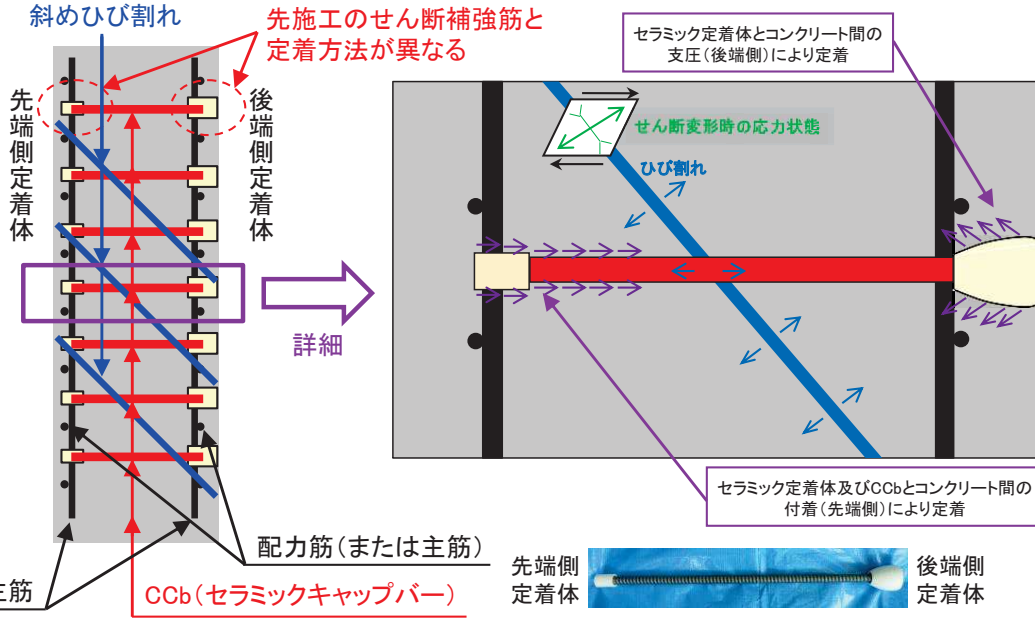
### 3. CCb工法について

#### 3.2 従来工法(先施工)とCCb工法の差異に係る確認項目

○せん断補強工法としての従来工法(先施工)とCCb工法の差異について整理する。

(1) 定着機構の違い

- 従来工法(先施工)とCCb工法の大きな違いはせん断補強筋端部の定着機構である。
- 女川2号炉において発生する可能性のあるひび割れが、CCbの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が発揮できていることを確認する。

従来工法(先施工)	CCb工法(後施工)
 <p>斜めひび割れ</p> <p>主筋</p> <p>せん断補強筋</p> <p>配力筋(または主筋)</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>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"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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ことから、CCb工法は定着体部付近のコンクリートの状態が従来工法(先施工)よりも定着機能に与える影響が大きいと考えられる。</li> <li>CCb工法がせん断補強筋としての機能を発揮するためには定着体部の定着機能が保持されている必要があり、定着体部にひび割れが生じると定着体部の定着機能を阻害するおそれがある。</li> </ul>





### 3. CCb工法について

#### 3.2 従来工法(先施工)とCCb工法の差異に係る確認項目

##### (2) 施工方法の違い

- CCb工法は、既設コンクリートを削孔して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ことから、施工精度に影響を与える項目（削孔方向、削孔深さ、削孔角度、削孔位置、グラウトの充てん性）について確認する必要がある。

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>40</p>	<p>CCb (セラミックキャップバー)</p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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固定している。</li> <li>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。</li> </ul>

### 3. Ccb工法について

#### 3.3 PHb工法とCcb工法の差異に係る確認項目

○美浜3号炉で工認実績のあるPHb工法と女川2号炉で採用したCcb工法の差異から、適用性確認における論点を整理する。

- ・ 女川2号炉でCcb工法を採用するにあたり、美浜3号炉と同様に女川2号炉へのCcb工法の適用性について確認する。
- ・ 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)	差異の有無と概要		
工法の差異	目的	・ 左に同じ	無	(p2「1. はじめに」参照)	
	定着体の構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ せん断補強筋の両端部にプレートを取り付けたもの。</li> <li>・ プレートは、摩擦圧接により取り付けられている。</li> </ul>	有	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 定着体部に差異あり (p5「3. Ccb工法について」参照)</li> </ul>	
	施工方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 左に同じ(使用材料の違いのみ)</li> <li>・ 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。</li> </ul>	無	(p3「1. はじめに(参考)」参照)
	認定方法①	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 左に同じ</li> </ul>	無	(p5「3. Ccb工法について」参照)
	認定方法②	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> <li>・ 梁試験体として、棒部材(せん断スパン比※: <math>a/d=2.7</math>他)に加え、せん断スパン比が小さいディープビーム(<math>a/d=1.19 \sim 1.58</math>)についても性能確認試験を行っている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> <li>・ 梁試験体として、棒部材(<math>a/d=2.78</math>)を対象に性能確認試験を行っている。</li> </ul>	有	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。(p44「6. 女川2号炉におけるCcb工法の保守性の整理」参照)</li> </ul>
	せん断耐力の設計法① (せん断耐力の算出方法)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>V_{phb} = V_{awd} \times \beta_{aw}</math></li> <li><math>V_{phb}</math>: PHbで負担されるせん断耐力</li> <li><math>V_{awd}</math>: 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</li> <li><math>\beta_{aw}</math>: PHbのせん断耐力向上への有効性を示す係数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>V_{ccbd} = V_{awd} \times \beta_{aw}</math></li> <li><math>V_{ccbd}</math>: Ccbで負担されるせん断耐力</li> <li><math>V_{awd}</math>: 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</li> <li><math>\beta_{aw}</math>: Ccbのせん断耐力向上への有効性を示す係数</li> </ul>	無	(まとめ資料p40～41「3.3.3 構造部材の評価」参照)
	せん断耐力の設計法② ( $\beta_{aw}$ の設定)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>\beta_{aw} = 1 - l_y / (2 \cdot S_{rb})</math></li> <li><math>l_y</math>: 定着長</li> <li><math>S_{rb}</math>: 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔</li> <li>・ <math>\beta_{aw}</math>の上限値を、0.9としている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>\beta_{aw}</math>の算出式は、左に同じ。</li> <li>・ <math>\beta_{aw}</math>の上限値は、ない。</li> </ul>	有	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>\beta_{aw}</math>の算定式に差異はないが、Ccb工法は<math>\beta_{aw}</math>に上限値なし (まとめ資料p40～41「3.3.3 構造部材の評価」参照)</li> </ul>

※: 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. Ccb工法について

#### 3.3 PHb工法とCcb工法の差異に係る確認項目

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)		差異の有無と概要
適用性確認における差異	適用性	<ul style="list-style-type: none"> <li>適用性確認のためのフローを設定している。</li> <li>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。</li> </ul>	左に同じ		無
	検討対象 構造物① (構造諸元)	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物: 海水ポンプ室</li> <li>対象部材: 底版</li> <li>部材厚: 2000mm</li> <li>部材照査: 梁に発生する断面力に対して照査を実施。</li> </ul>	① <ul style="list-style-type: none"> <li>構造物: 取水路(漸拡部)</li> <li>対象部材: 隔壁</li> <li>部材厚: 1200mm</li> <li>部材照査: 梁に発生する断面力に対して照査を実施。</li> </ul>	② <ul style="list-style-type: none"> <li>構造物: 軽油タンク室</li> <li>対象部材: 側壁</li> <li>部材厚: 1500mm</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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、面外せん断力と面内せん断力が同時に作用することから、その影響について確認する。 (p34~41「5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目D)」参照)</li> </ul>
	検討対象 構造物② (荷重形態)	<ul style="list-style-type: none"> <li>分布荷重系</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>集中荷重系</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分布荷重系</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>また、分布荷重が作用する部材においては、ディープビーム的な破壊についても着目し確認する。 (p21~32「5.1.4 実施工部材の応答性状の確認」参照)</li> </ul>
	定着体部の 状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>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。 (p34~41「5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目D)」参照)</li> </ul>

## 4. 適用性の確認

### 4.1 確認フロー

○女川2号炉におけるCCb工法の適用性確認フローを以下に示す。

- 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、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。

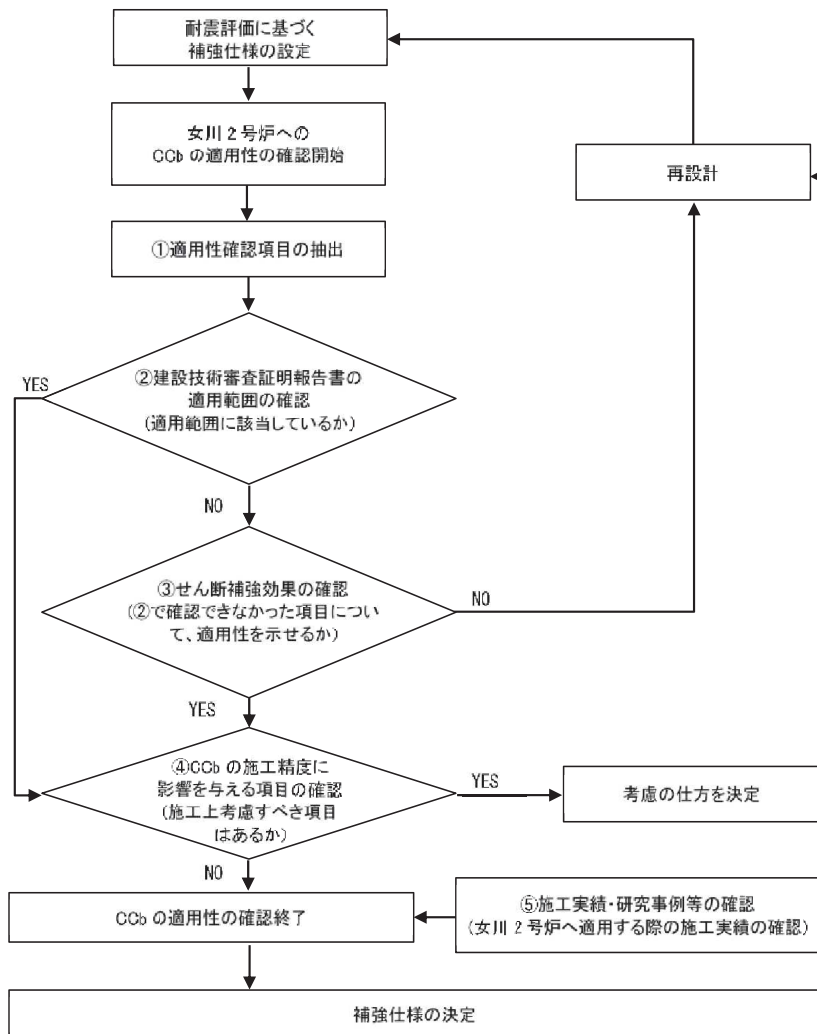


表 確認項目と内容

項目	内容
① 適用性確認項目の抽出	• 後施工によるせん断補強において、せん断補強効果に影響を与えると考えられる項目を抽出する。
② 建設技術審査証明報告書の適用範囲	• ①で挙げた項目に対して、構造物に採用した補強仕様がCCb工法の建設技術審査証明報告書において規定されている適用範囲内に収まっているか確認する。
③ ②以外の項目に対するせん断補強効果の確認	• ①で挙げた項目のうち②で確認できていない項目について、適用性の確認を実施する。
④ CCbの施工精度に影響を与える項目	• CCbの施工を行う際に、施工精度に影響を与える項目がないか確認を行う。
⑤ 施工実績・研究事例	• 後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について、要旨、着目すべき事項を整理し、CCb工法への反映事項を確認する。

図 CCbの適用性確認フロー



## 4. 適用性の確認

### 4.2 適用性確認項目の抽出

#### ①適用性確認項目の抽出

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

表 抽出項目と確認内容

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にて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にて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. 使用材料(せん断補強筋)	• 建設技術審査証明報告書にて確認されている材料か。
VI. 使用材料(セラミック製定着体)	同上
VII. 使用材料(充てん材)	• 構造体コンクリートと同等の強度か。
VIII. 載荷方法	• 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。
IX. せん断補強筋の定着長	• 建設技術審査証明報告書にて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. 定着体部における定着機能の保持	• 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。

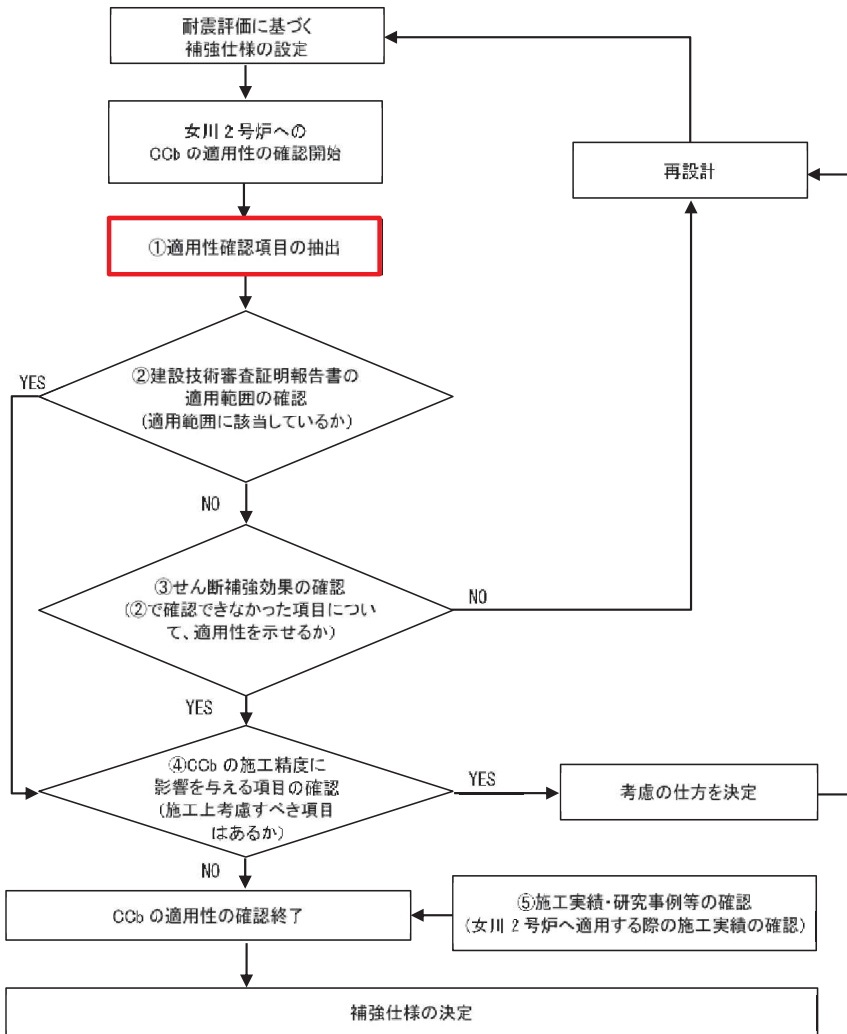


図 CCbの適用性確認フロー



## 4. 適用性の確認

### 4.3 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(1/2)

#### ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

- 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)

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	• せん断補強筋の断面積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。	○
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=1.47~14.50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。	フロー③にて確認
V. 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一致していることを確認した。	○
VI. 使用材料 (セラミック製定着体)	同上	○
VII. 使用材料 (充てん材)	同上	○
VIII. 载荷方法	• 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载荷を行っているが, 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。	フロー③にて確認
IX. せん断補強筋の定着長	• 建設技術審査証明報告書に記載されている定着長を考慮していることを確認した。	○

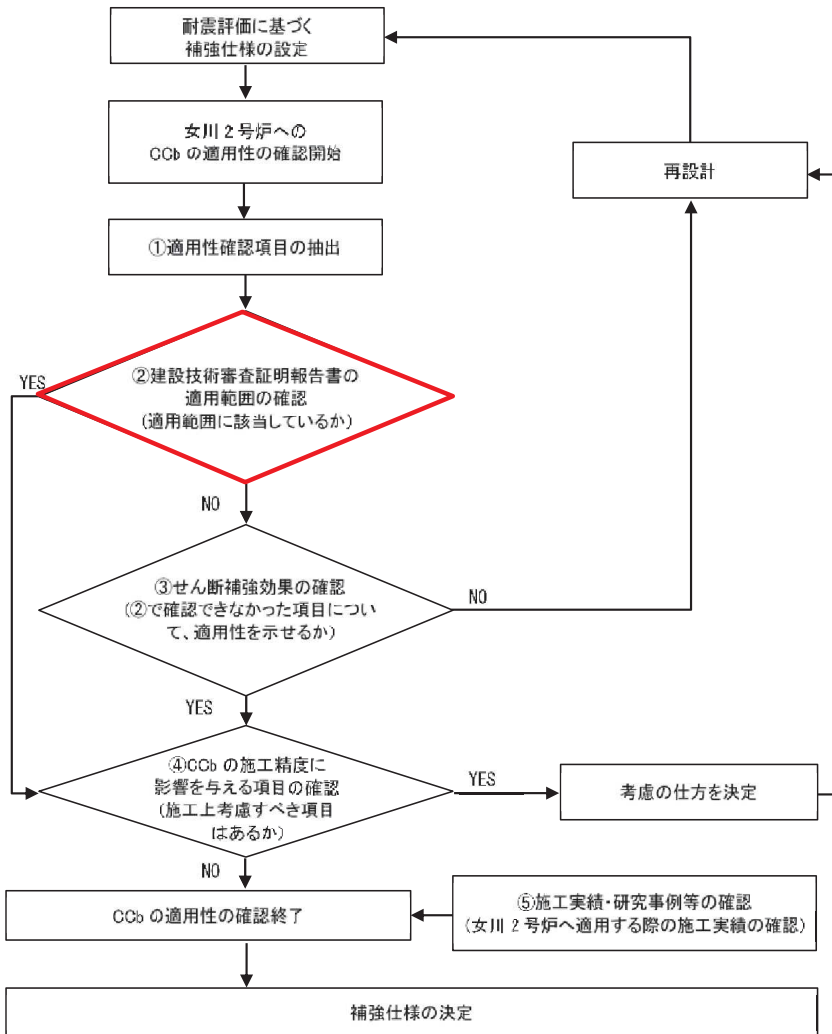


図 CCbの適用性確認フロー

## 4. 適用性の確認

### 4.3 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認(2/2)

#### ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

- 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)

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"> <li>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。</li> </ul>	フロー③にて確認
XI. 定着体部における定着機能の保持	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	同上
XII. 変形量	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	○
XIII. 使用環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>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水中よりも厳しい環境下での施工実績を確認した。</li> </ul>	○
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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	フロー③にて確認

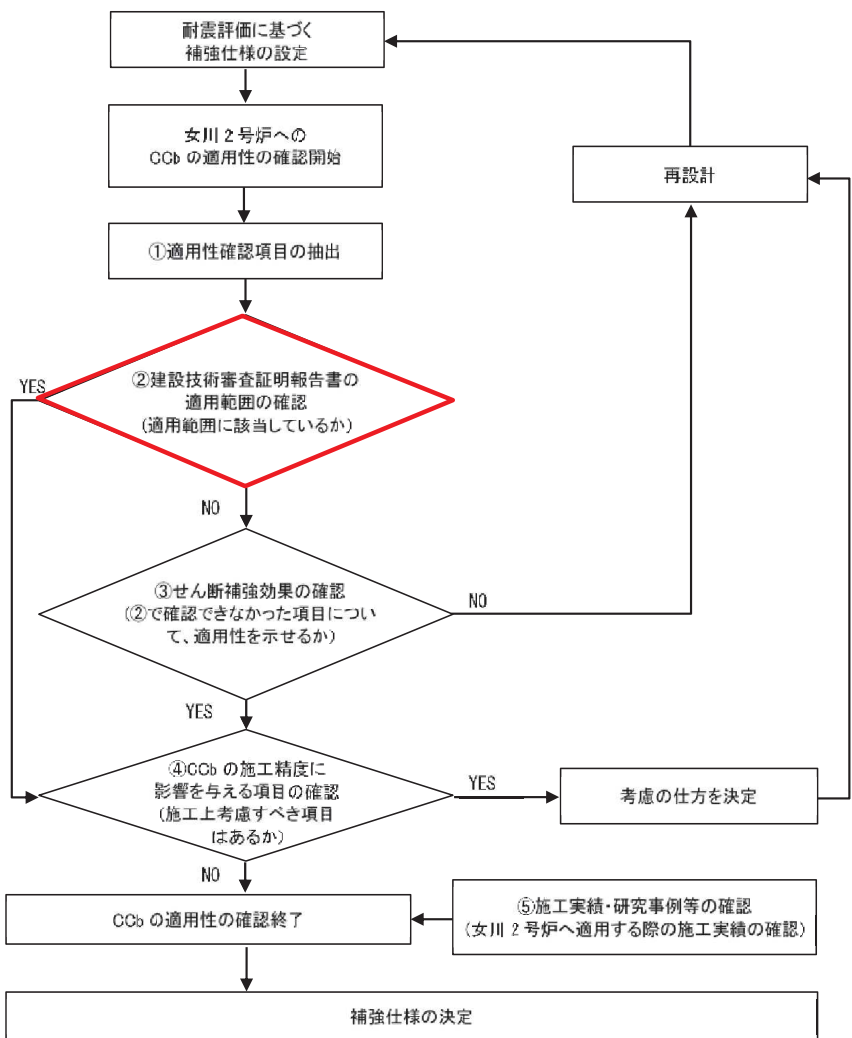


図 CCbの適用性確認フロー

## 4. 適用性の確認

### 4.4 せん断補強効果の確認

#### ③せん断補強効果の確認

- ・ フロー②にて確認できなかった項目に対して、せん断補強効果が期待できることを確認する。

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
IV. 部材諸元 ⇒確認項目(A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> <li>・ 詳細は、「p18~33, 5.1 部材諸元・載荷補法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))」にて示す。</li> </ul>
VIII. 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. 定着体部における定着機能の保持 ⇒確認項目(D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> <li>・ 詳細は、「p34~41, 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))」にて示す。</li> </ul>
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)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> <li>・ 詳細は、「p42~43, 5.3 Ccbを適用した部材のコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))」にて示す。</li> </ul>

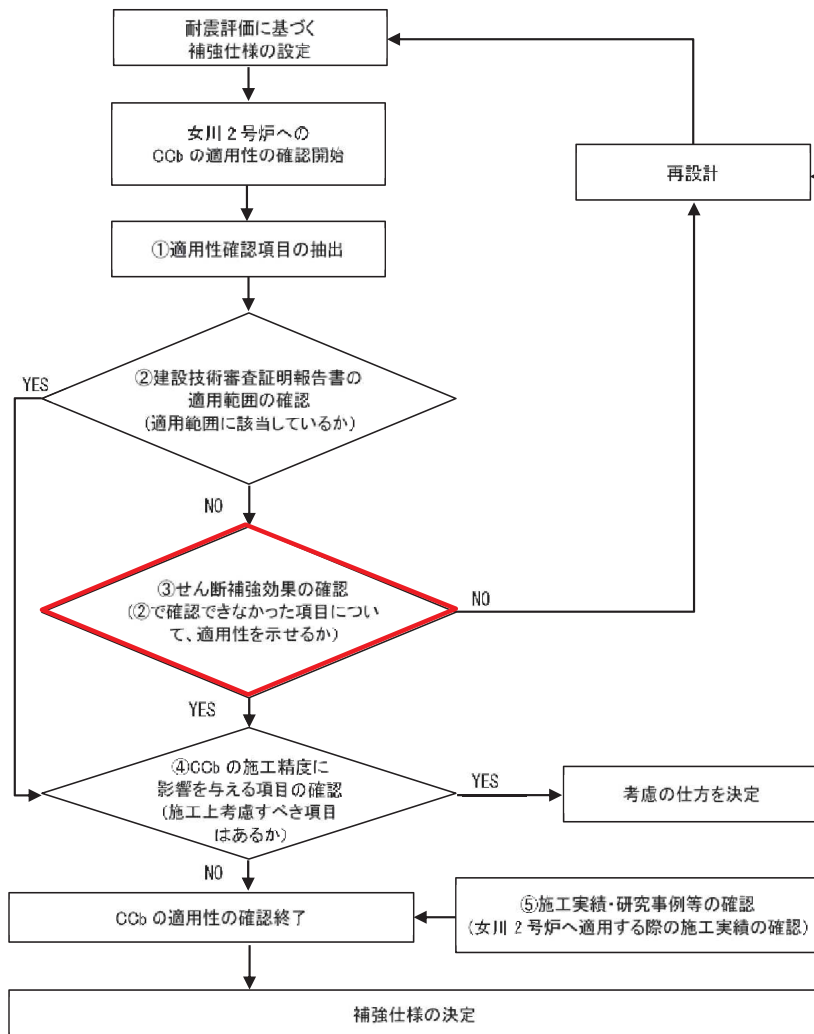


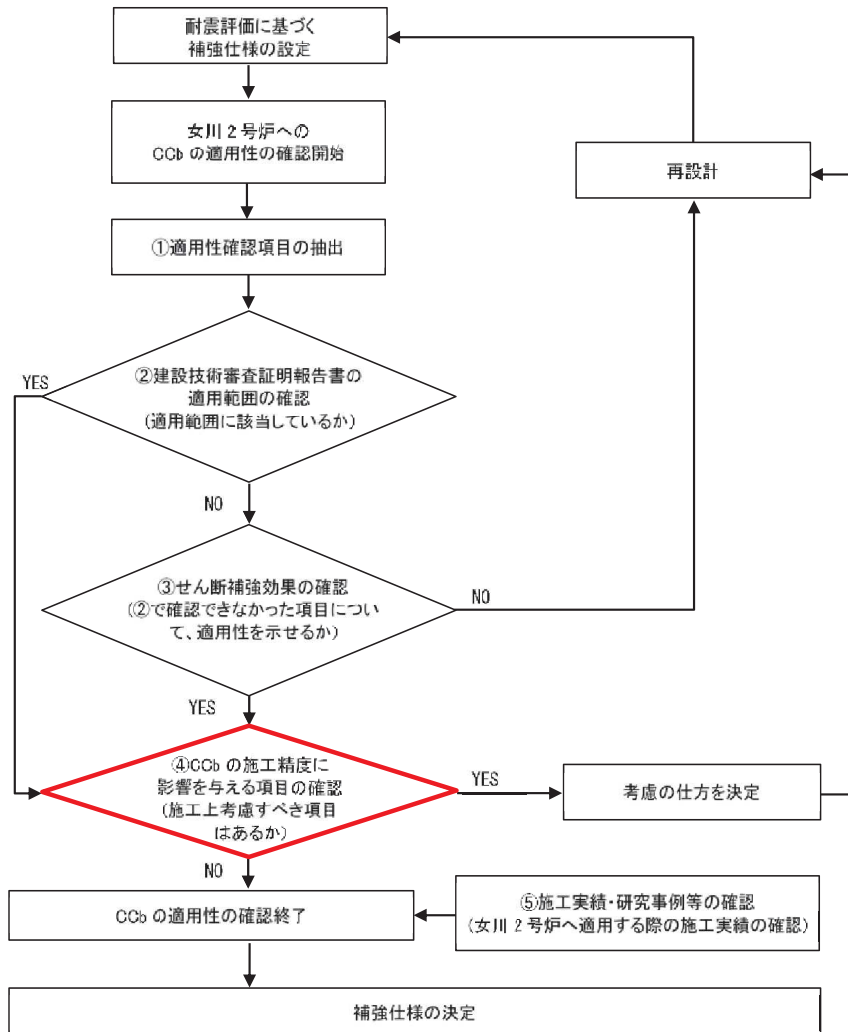
図 Ccbの適用性確認フロー

## 4. 適用性の確認

### 4.5 CCbの施工精度に影響を与える項目の確認結果

#### ④CCbの施工精度に影響を与える項目の確認

- 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は生じないことを確認した。



#### 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

## 4. 適用性の確認

### 4.6 施工実績・研究事例等の確認結果

#### ⑤施工実績・研究事例等の確認

- 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。

表 施工実績(2017年9月30日現在)

対象施設		施工件数
道路・地下街	道路橋他	
浄化センター	最終沈澱池、ポンプ室他	
浄水場	配水池他	
水門	防潮水門他	
排水機場	排水機場他	
排水路	地下排水路	
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	

部材厚(mm)	件数
~500	78
501~1000	126
1001~1500	77
1501~2000	39
2001~3000	10
3001~	7

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

- 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。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

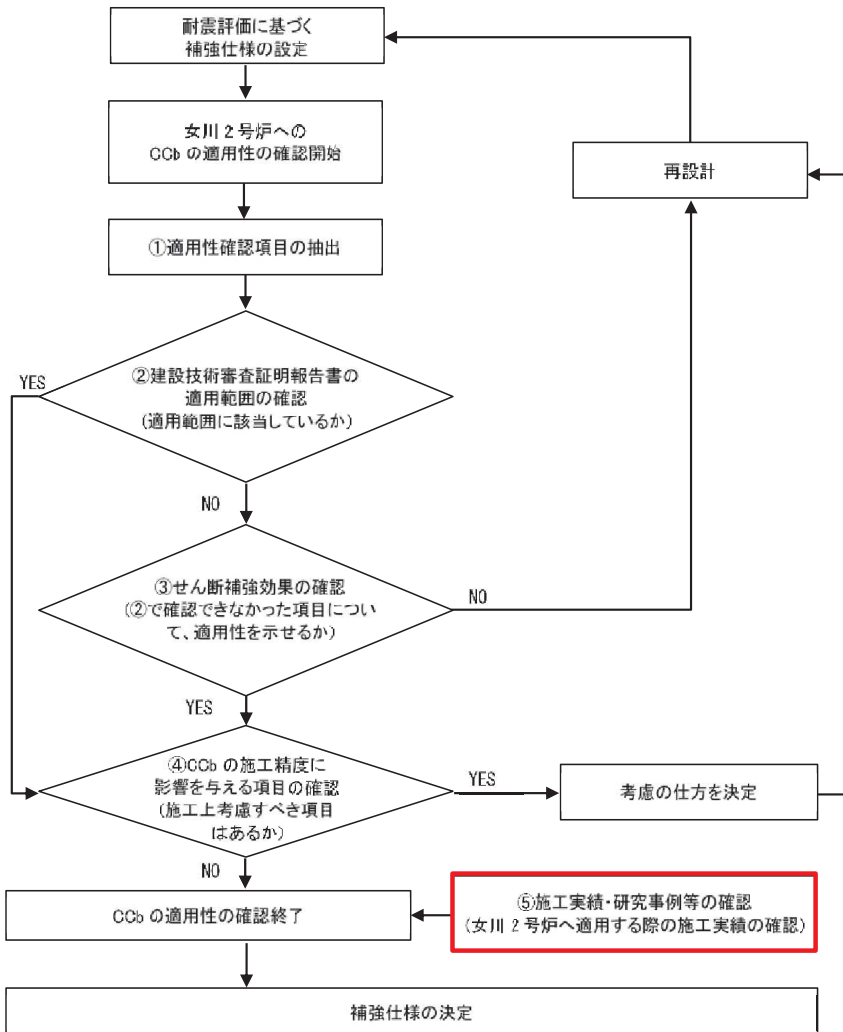


図 Ccbの適用性確認フロー



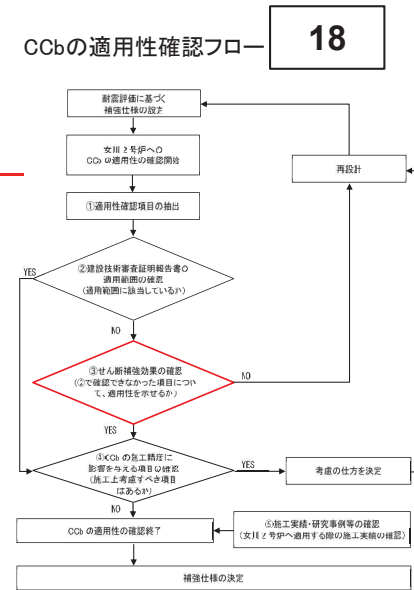
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)～(C))

#### 5.1.1 検討方針

〇CCbの適用性確認フローの「③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補足確認する。
- ・ 数値実験を行うにあたり, CCbのモデル化方法の検討(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」

##### 【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=1500mm)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。

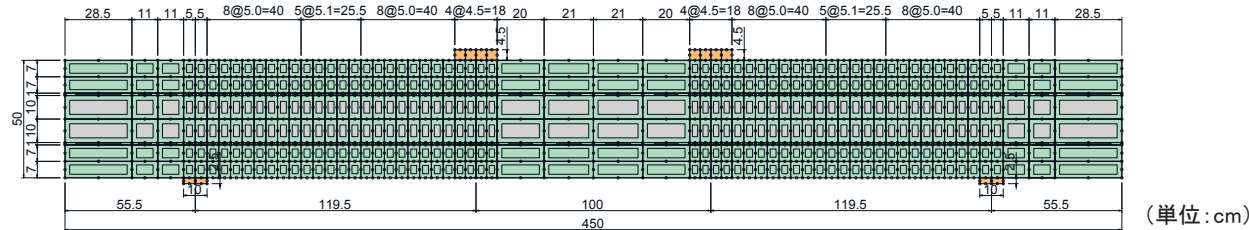
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.2 CCbの解析上のモデル化方法

##### (1) ステップ①の材料非線形解析

- CCbのモデル化方法(せん断補強鉄筋の無効区間の設定)の検討を目的に、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。
- 2パターンのモデル化について検討を行い実験結果の再現性が高い、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。

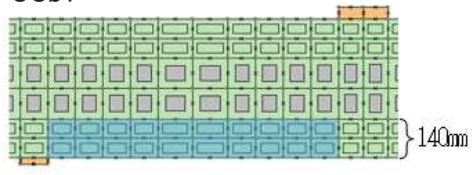
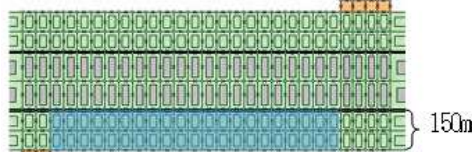


解析モデル図

##### ○解析内容と解析結果

- CCb先端の領域では付着が十分ではない可能性があるため、せん断補強鉄筋が機能しない(無効区間)ものとしてCCbのモデル化を検討する。せん断補強鉄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鉄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。
- せん断補強鉄筋の無効区間をパラメータに2パターンのモデル化を実施し、解析パターンCCb2のモデル化方法が耐力を再現できていることが確認できた。

※: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)

解析パターン	CCbのモデル化方法	解析結果と実験結果との比較	再現性
CCb1 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CCb先端側主筋領域(かぶりの2倍)の鉄筋比をゼロ</li> <li>• 無効区間: <math>70\text{mm} \times 2 = 140\text{mm}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実験のせん断耐力: 563kN</li> <li>• 解析によるせん断耐力: 676kN (実験値の120%)</li> </ul>	× (再現性が低い)
CCb2 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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</li> <li>• 無効区間: <math>70\text{mm} + 5 \times 16\text{mm} = 150\text{mm}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実験のせん断耐力: 563kN</li> <li>• 解析によるせん断耐力: 550kN (実験値の98%)</li> </ul>	○ (再現性が高い)

## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

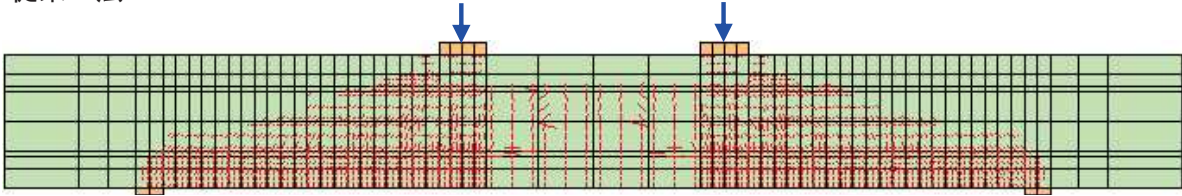
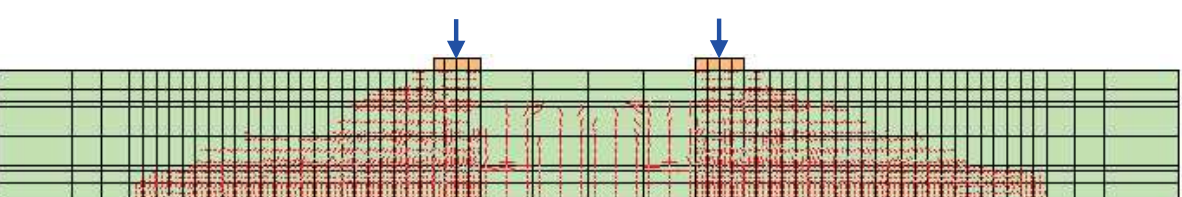
#### 5.1.3 大きな部材厚に対する適用性確認

##### (2)ステップ②の材料非線形解析

- 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の鉄筋無効区間はステップ①より得られた5Dとし、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。
- 材料非線形解析の結果より、大きな部材厚に対してもCCb工法の適用性があることを確認している。

##### ○解析結果及び従来工法とCCb工法の比較

- 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 $\beta_{aw}$ (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工法の特徴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。

解析ケース	解析結果と考察															
従来工法 	<ul style="list-style-type: none"> <li>せん断耐力               <table border="1" data-bbox="1451 1018 2042 1342"> <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> </li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	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														
CCb工法 																



## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(1/12)

##### (3)ステップ③の材料非線形解析

- 荷重形態及び破壊形態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。
- 対象部材は、集中荷重系及び分布荷重系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が作用する構造物のうち部材厚が最大である軽油タンク室側壁。

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	<ul style="list-style-type: none"> <li>集中荷重系</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>棒部材的な破壊(斜め引張破壊)</li> </ul>
ケース③-2-1	軽油タンク室側壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>分布荷重系</li> </ul>	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>ディープビーム的な破壊(せん断圧縮破壊)</li> </ul>
ケース③-2-2	同上	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>等分布荷重</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>棒部材的な破壊(斜め引張破壊)</li> </ul>

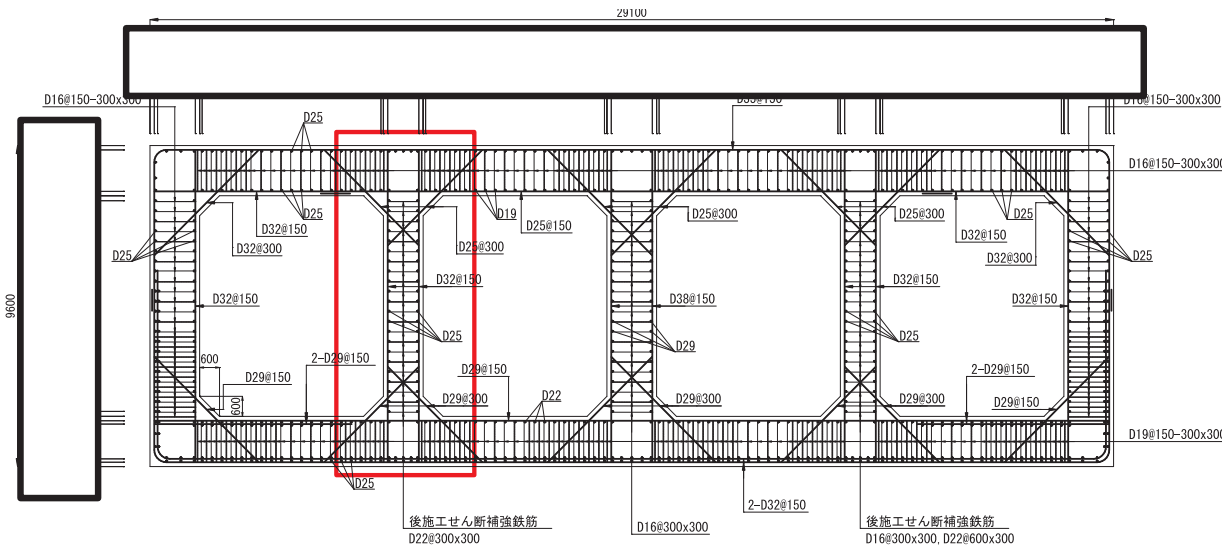
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(2/12)

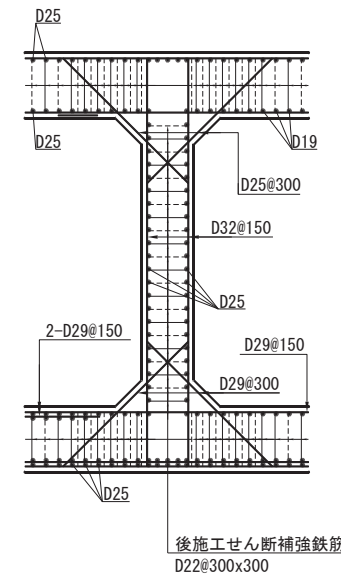
##### (3-1)集中荷重系ケース③-1の材料非線形解析

- 対象部材: 取水路(漸拡部)隔壁
- 荷重形態: 集中荷重系(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)

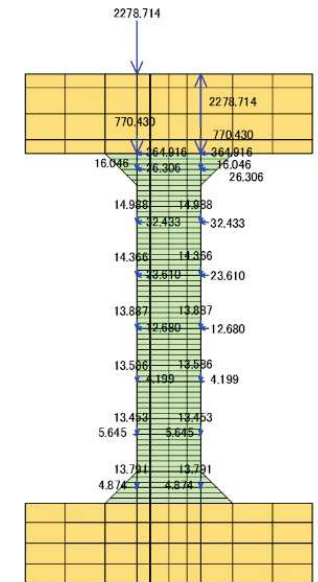


※補強仕様は、今後変更となる可能性がある。

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。



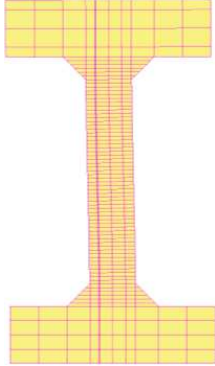
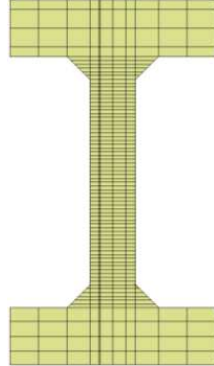
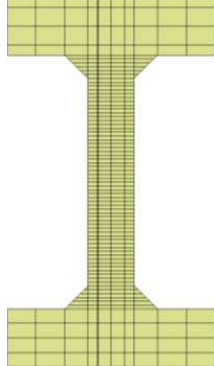
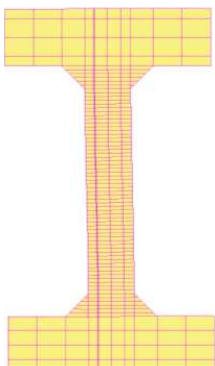
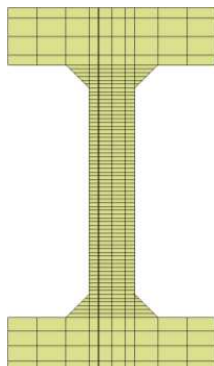
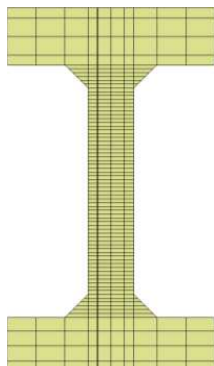
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(3/12)

##### ○解析結果及び従来工法とCCb工法の比較

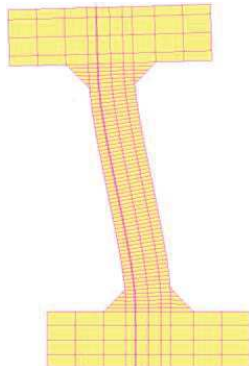
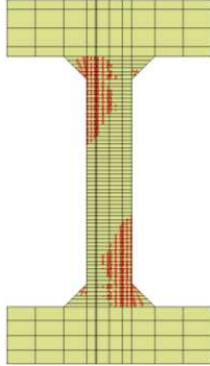
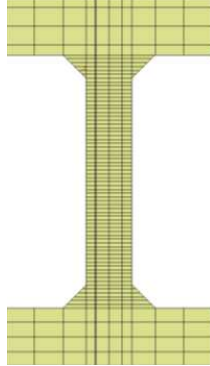
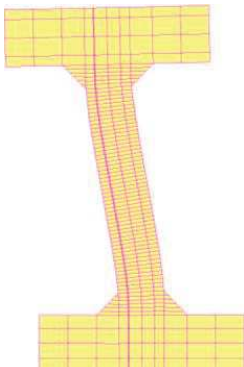
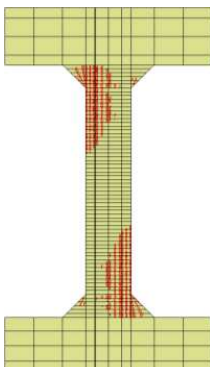
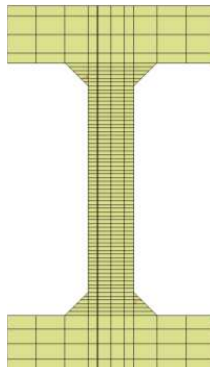
- 初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず、概ね整合的な結果となった。
- せん断耐力については、CCb工法のせん断耐力の低減割合が約88%となり、従来工法よりもせん断耐力は小さくなっている。これはCCbの定着機能を考慮したせん断補強筋の無効区間による影響であり、部材厚が大きい程、せん断耐力の低下割合が小さくなるというステップ①・②と整合する結果が得られた。
- 以上より、従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されず、実施工部材のうち集中荷重系となる荷重形態の部材に対するCCb工法の適用性を確認できた。

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		

## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(4/12)

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		

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

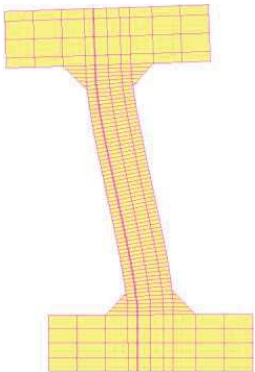
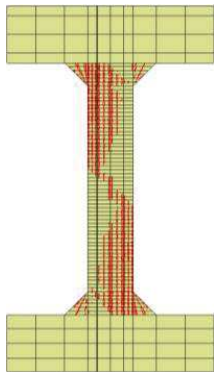
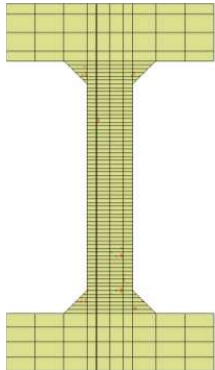
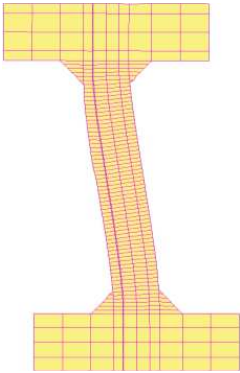
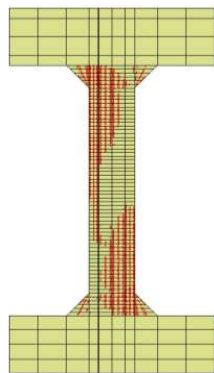
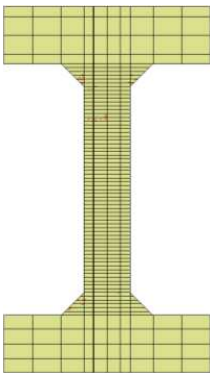
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(5/12)

##### ○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。

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		

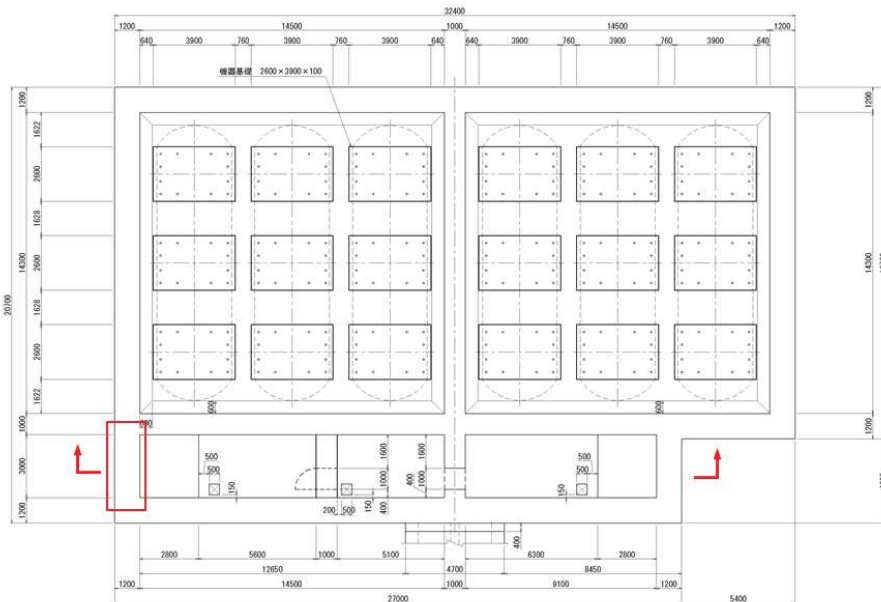
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

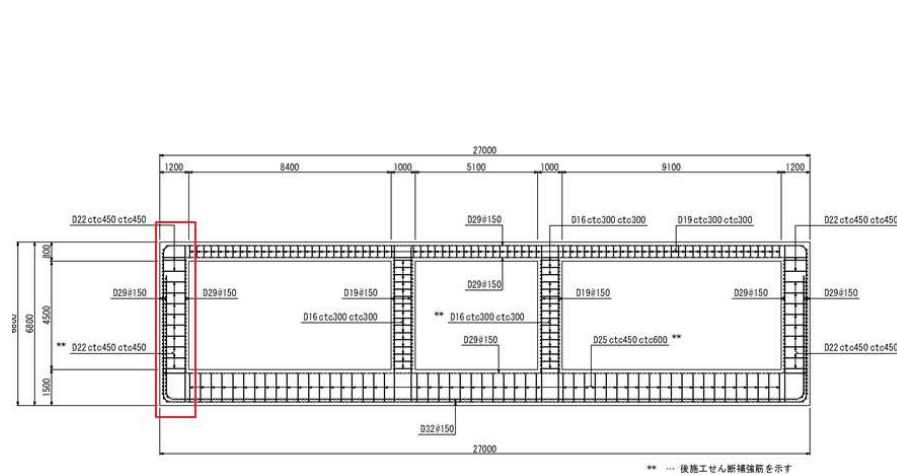
#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(6/12)

##### (3-2) 分布荷重系ケース③-2の材料非線形解析

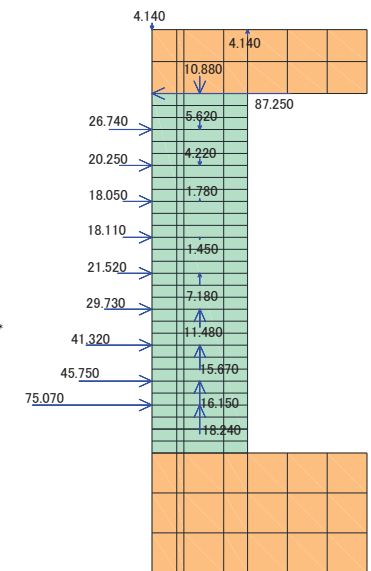
- 対象部材: 軽油タンク室側壁
- 荷重形態
  - ケース③-2-1: 分布荷重系(地震応答解析(基準地震動 $S_s$ -D2)から得られる応答断面力を再現できる荷重)
  - ケース③-2-2: 分布荷重系(等分布荷重)荷重形態
- 破壊形態
  - ケース③-2-1: ディープビーム的な破壊(せん断圧縮破壊)
  - ケース③-2-2: 棒部材的な破壊(斜め引張破壊)



平面図



断面図



材料非線形解析での荷重図

□ : 評価対象部材



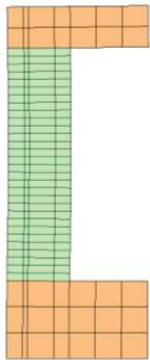
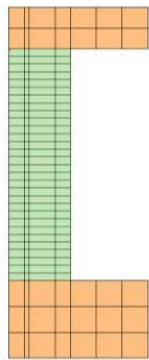
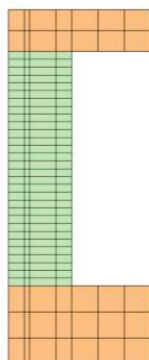
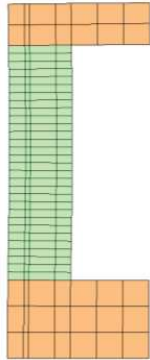
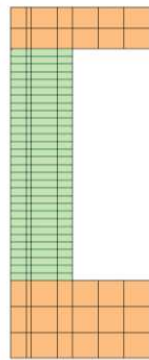
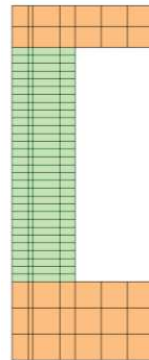
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(7/12)

○ケース③-2-1の解析結果及び従来工法とCCb工法の比較

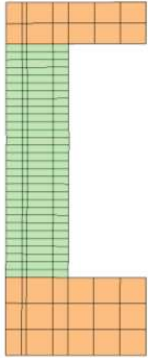
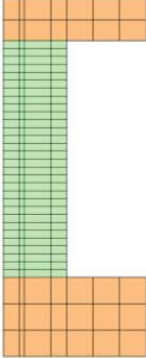
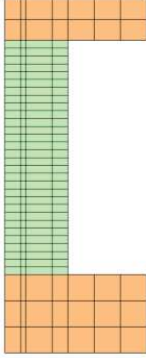
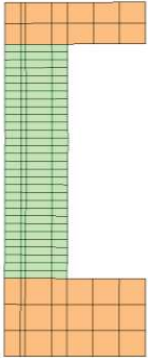
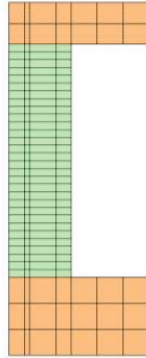
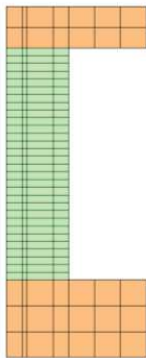
- 初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず、概ね整合的な結果となった。
- せん断耐力については、CCb工法のせん断耐力の有効割合が約99%となった。これは、等価せん断スパンを考慮したせん断スパン比( $a/d=0.66$ )が小さく、破壊形態がディープビーム的な破壊(せん断圧縮破壊)であるため、せん断耐力はコンクリートの圧縮強度の影響が支配的であり、従来工法とCCb工法の差異である定着体部の影響が現れなかったためである。
- 以上より、従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響を与え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。

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		

## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(8/12)

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

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


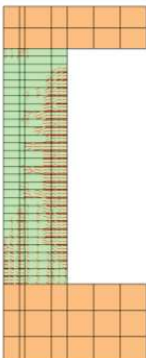
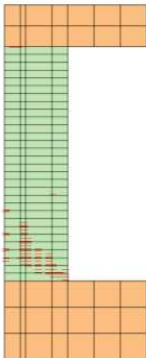

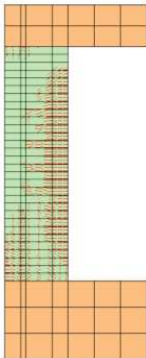
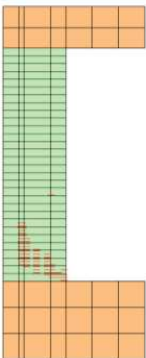
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(9/12)

○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。

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		

## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)～(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(10/12)

##### ○ケース③-2-2の解析結果及び従来工法とCCb工法の比較


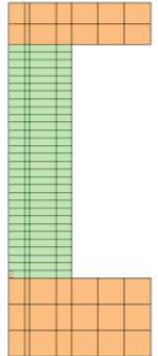
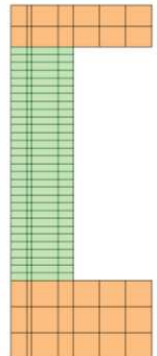
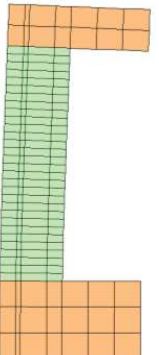
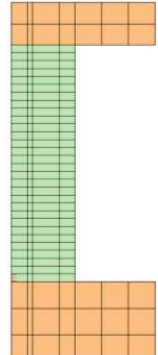
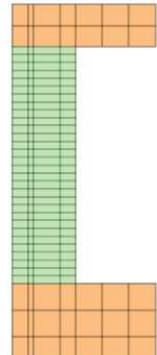
- 初期ひび割れ発生時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず、概ね整合的な結果となった。次ページに、初期ひび割れ発生時の各損傷状況結果を示す。
- せん断耐力については、CCb工法のせん断耐力の有効割合が約91%となった。これは、取水路(漸拡部)隔壁(ケース③-1)と同等の有効割合となっており、分布荷重が作用する場合であっても、集中荷重が作用する場合と同様のせん断補強効果が得られることが確認された。
- 取水路(漸拡部)隔壁(ケース③-1)の結果の比較から、荷重形態の違いによる従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響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。



## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(11/12)

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		

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
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
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

※: 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、取水路(漸拡部)の結果を併記している。

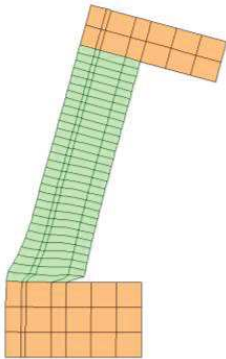

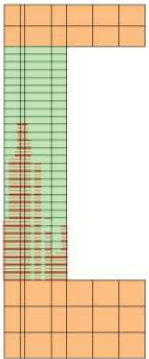
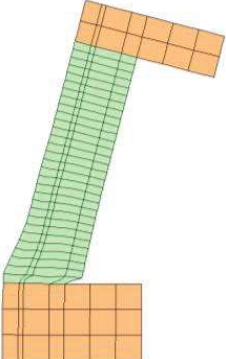

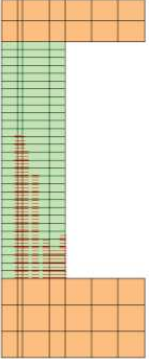
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)~(C))

#### 5.1.4 実施工部材の応答性状の確認(12/12)

○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。

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		

## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.1 部材諸元・載荷方法・せん断ひび割れ抑制効果の検討(確認項目(A)～(C))

#### 5.1.5 まとめ

#### (4) 材料非線形解析によるせん断ひび割れ抑制効果の確認のまとめ

- 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, 「5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))」及び「6. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性の整理」にて別途確認する。

# 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

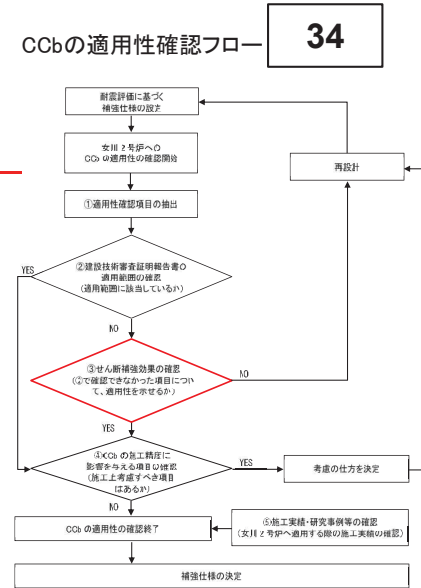
## 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))(1/8)

〇CCbの適用性確認フローの「③せん断補強効果の確認」で示した確認項目のうち「(D) 定着体部における定着機能の保持」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。

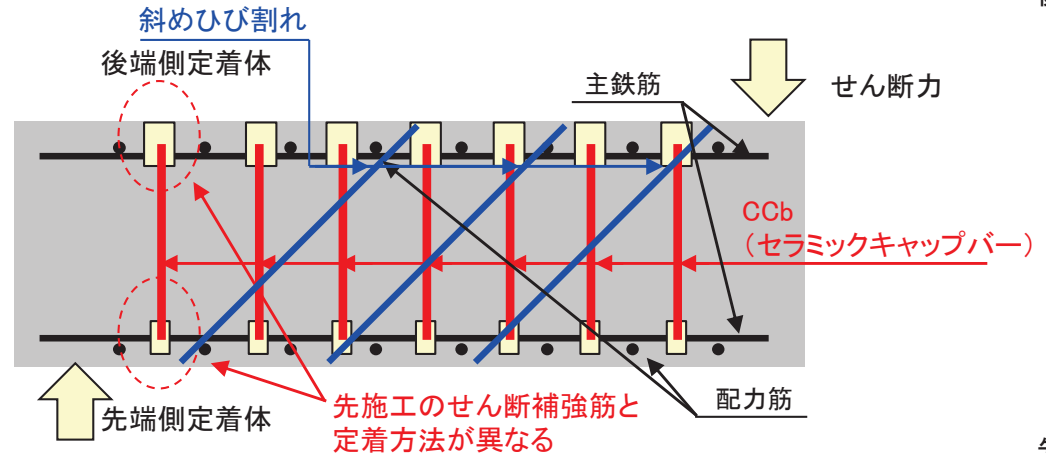
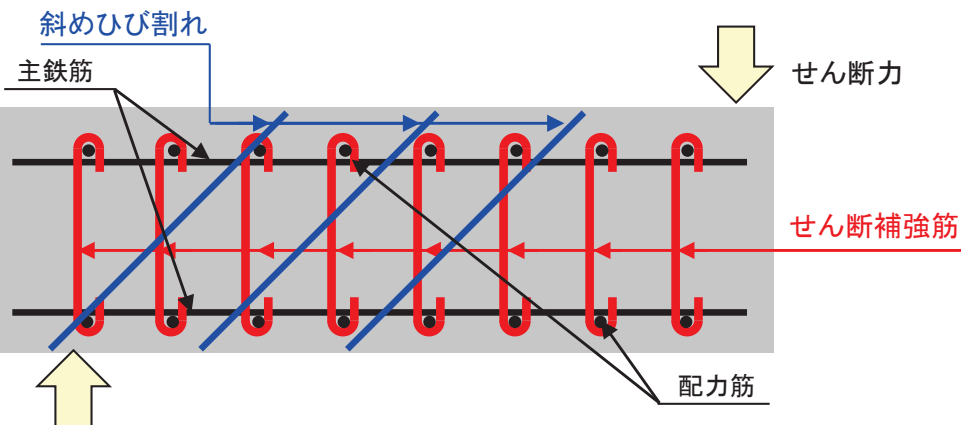
### (1) Ccbの定着機構

- 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

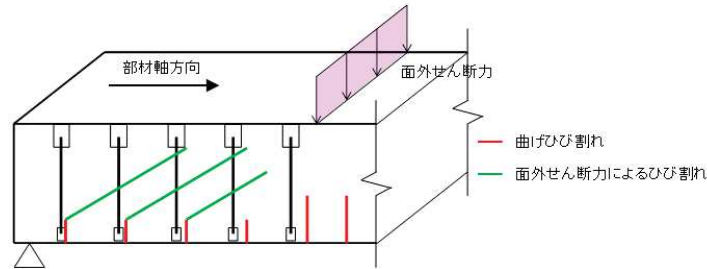


## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))(2/8)

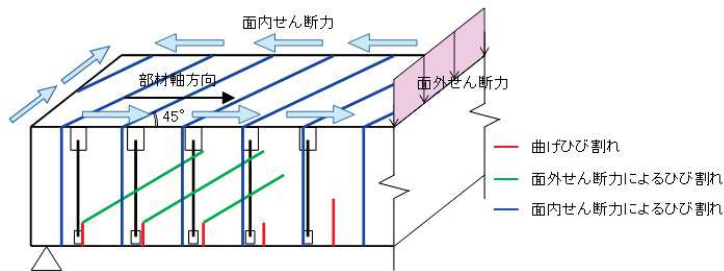
#### (2) 定着機能に影響を与える可能性のあるひび割れ状況下での定着機能の保持

- 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載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。



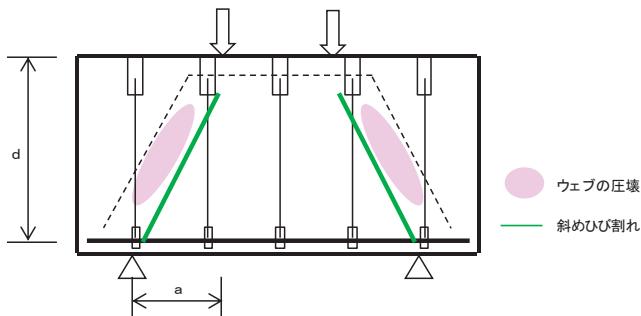
#### 曲げひび割れの特徴

- 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。

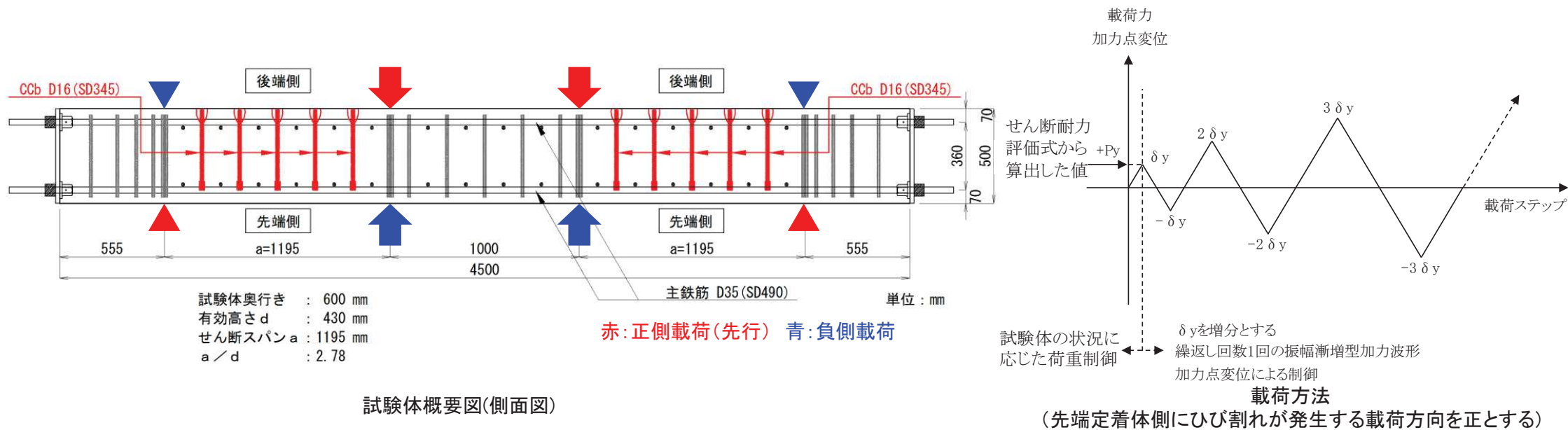
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(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载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。



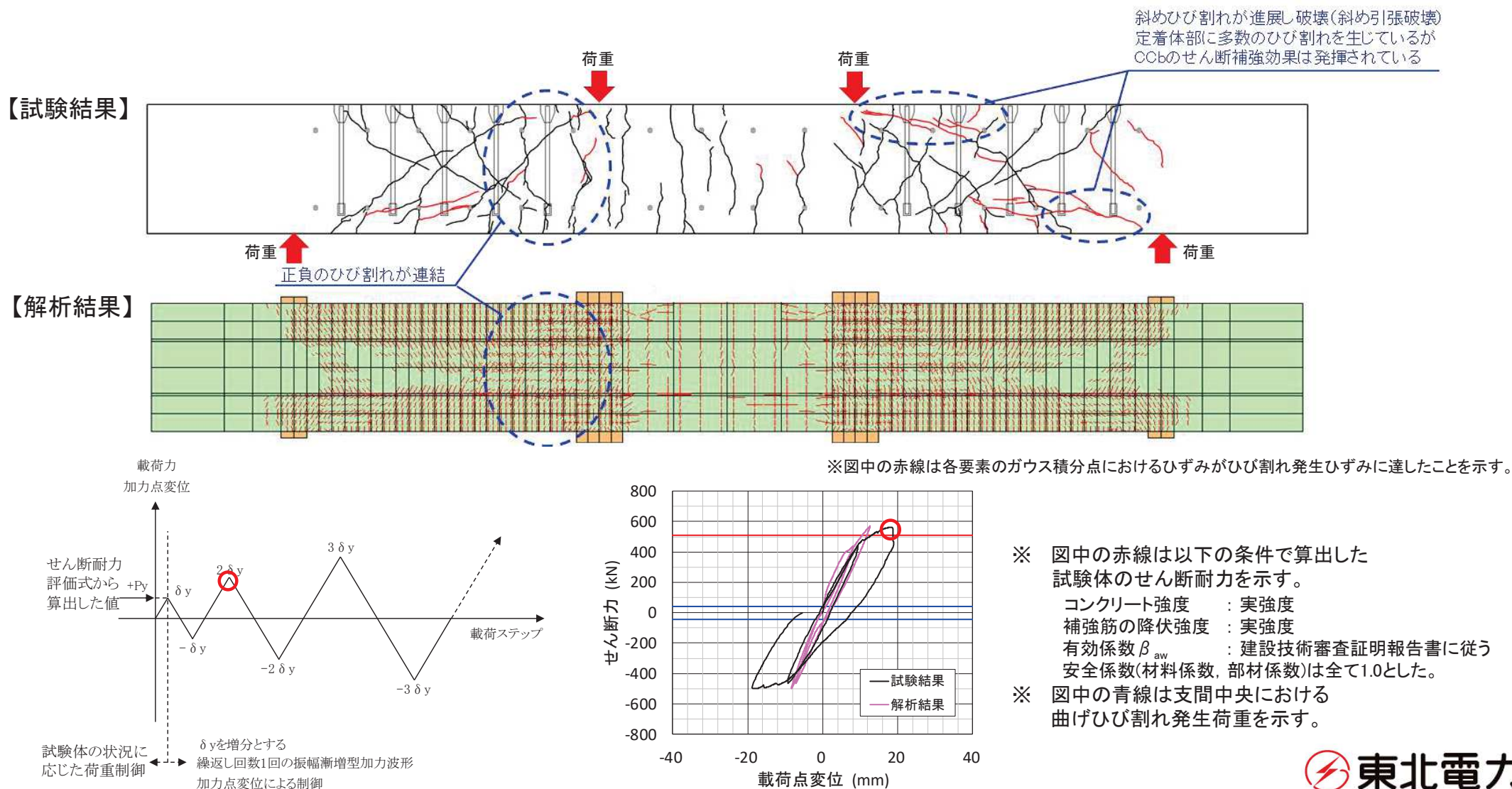
- ・ せん断補強効果の確認は、定着体部(先端・後端)に曲げによる垂直に近い高角度のひび割れが生じた状態においても、試験体が建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数( $\beta_{aw}$ )を考慮したせん断耐力を有していることを確認する。
- ・ さらに、試験体のひび割れ状況を整理するとともに、CCbによるせん断補強筋の定着機能はひび割れによらず保持されていると仮定した再現解析の結果を参考に、試験体に生じたひび割れ性状と解析によるひび割れ性状の比較を行い、定着体部の定着機能を確認する。

## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(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。



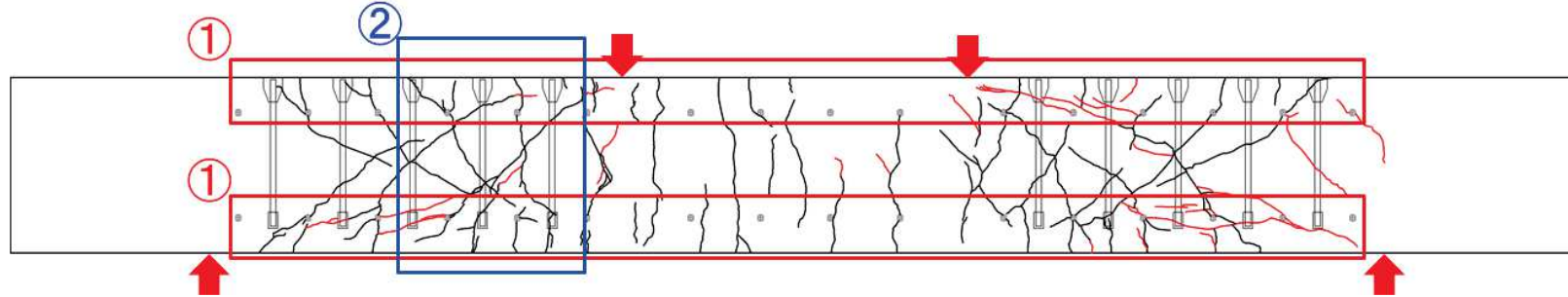


## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

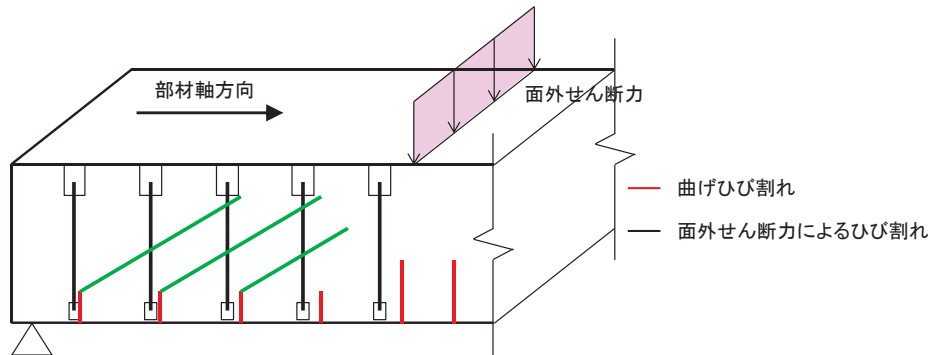
### 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))(5/8)

- 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)】

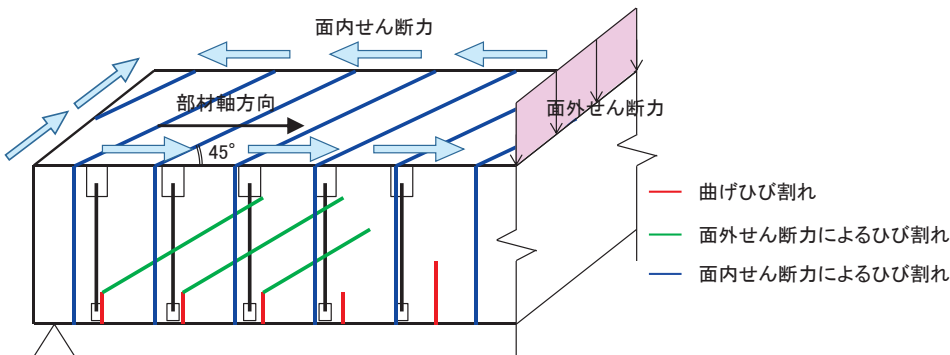


a. 試験結果と曲げひび割れの比較(図中①との比較)



- 定着体部(先端・後端)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( $\beta_{aw}$ )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)

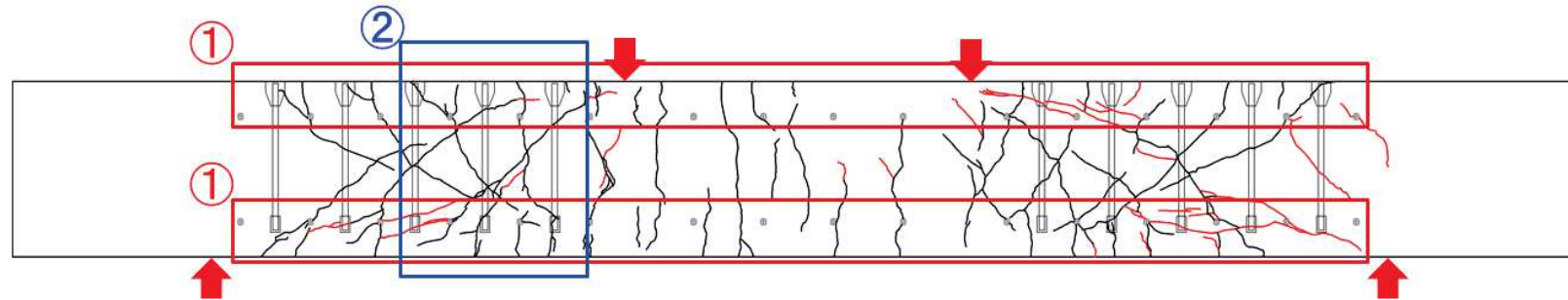


- 面内せん断力により発生する貫通ひび割れは、正負交番載荷試験の正側の曲げひび割れと負側の曲げひび割れが連結したことにより、同様のひび割れ性状として再現できている。
- また、曲げひび割れ同様、定着体部(先端・後端)に高角度なひび割れが生じた状態においても、試験体は建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数( $\beta_{aw}$ )を考慮したせん断耐力以上の耐荷力を有しており、定着機能は保持されている。

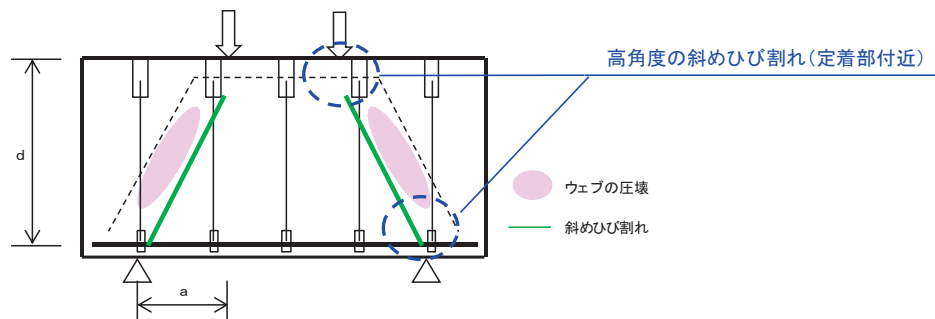
## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(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)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( $\beta_{aw}$ )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CCb工法の適用性

### 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))(7/8)

#### ○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 $2363\mu$ 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( $1725\mu$ )未満または応力が降伏強度( $345\text{N}/\text{mm}^2$ )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	$2363\mu$ ※	降伏ひずみ: $2450\mu$ (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CCb工法の適用性

### 5.2 定着体部における定着機能の保持の検討(確認項目(D))(8/8)

(4)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。

## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.3 CCbを適用した部材のコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))(1/2)

○CCbの適用性確認フローの「③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。
- 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。

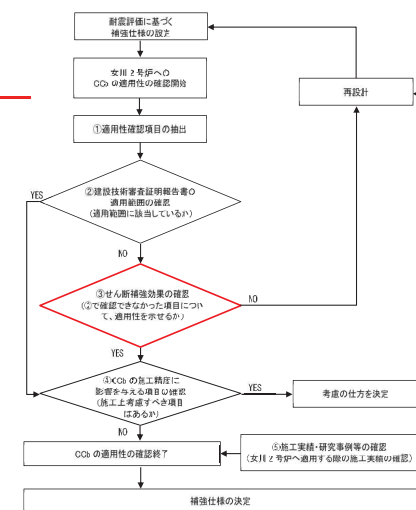
#### (1) ひび割れ状況の確認

- 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により、地震の影響を否定できないひび割れについて、以下のとおり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<sup>\*</sup>)がないことを確認している。

※: 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 東北地方太平洋沖地震及び宮城県沖の地震によるひび割れ確認結果

CCbを適用した構造物	ひび割れ幅 [mm]
取水路(漸拡部)	0.2mm以上のひび割れなし
原子炉機器冷却海水配管ダクト	同上
軽油タンク室	同上
復水貯蔵タンク基礎	同上



## 5. 女川2号炉におけるCCb工法の適用性

### 5.3 CCbを適用した部材のコンクリートの健全性の検討(確認項目(E))(2/2)

#### (2) コンクリートの圧縮強度試験結果の確認

- CCbを適用し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/mm<sup>2</sup>)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 <sup>2</sup> ]	圧縮強度(最低値) [N/mm <sup>2</sup> ]
取水路	20.5	45.4
原子炉機器冷却海水配管ダクト		36.3
軽油タンク室		43.0
復水貯蔵タンク基礎		32.4

#### (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及び圧縮強度試験結果より、CCbを適用した部材のコンクリートが健全であることが確認できた。
- よって、女川2号炉のCCbを適用した既設コンクリートの状態がCCbの効果を発揮できる条件にある。

## 6. 女川2号炉におけるCCb工法の保守性の整理

○CCb工法の保守性及び女川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を整理する。

### (1) CCb工法の保守性

- ① 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 $\beta_{aw}$  (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。

### (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

- ① 設計においてCCbが負担するせん断耐力評価は、CCb工法の建設技術審査証明報告書に記載の梁試験体でディープビームを対象とした試験を実施していないことを踏まえ、ディープビーム式により算出され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大きくなるが(例:軽油タンク室 下表参照)、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する。
- ② 建設技術審査証明報告書の梁試験では層間変形角が1%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るCCbの定着体部の定着機能を阻害するおそれがあることから、層間変形角が1%以下(限界層間変形角1/100及び圧縮縁コンクリートひずみ1.0%に相当)の範囲内でCCb工法を使用する。
- ③ 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 $\mu$ 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、面内せん断力と面外力の合力による鉄筋のひずみが1725 $\mu$  (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対してCCb工法を使用する。
- ④ 適切な施工管理を実施してもなお施工精度の低下が発生し得ると仮定し、設計上の配慮として耐震評価上の裕度(例えば照査値を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) $V_{cal}=V_{cd}+V_s$			「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力(kN)		せん断補強鉄筋の有効率 $\beta_{aw}$ ( $V_{CCb}/V_s$ )			有効率の設計値 $\beta_{aw}$
	定着体の組合せ	先端位置	正側	負側	$V_{cal}$	$V_{cd}$	$V_s$	正側	負側	正側	負側	平均	
			$V_{exp}$	$V_{exp}$				$V_{CCb}$	$V_{CCb}$				
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	563	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	
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	
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	
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	0.98	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	1.03	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

表 せん断耐力の比較例(軽油タンク室)

ケース	せん断耐力評価	せん断耐力 (kN)
③ - 2 - 1 - B (CCb工法)	棒部材式	775
	ディープビーム式	2407
	材料非線形解析	2610
③ - 2 - 2 - B (CCb工法)	棒部材式	876
	ディープビーム式	-
	材料非線形解析	2232

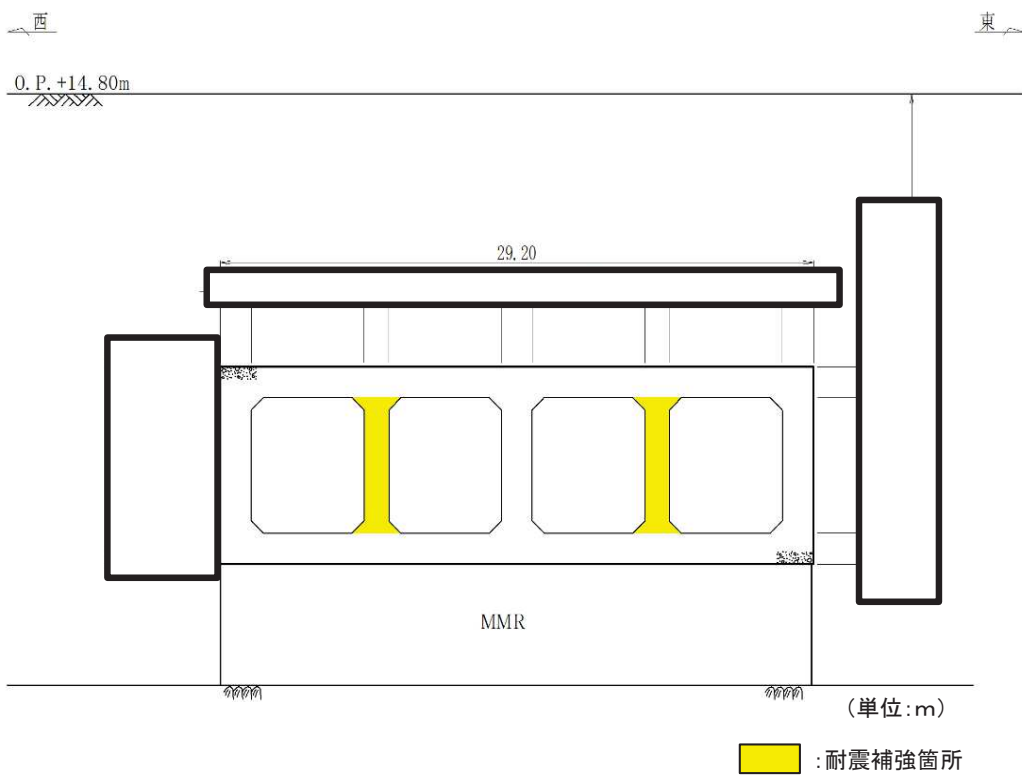


## 7. まとめ

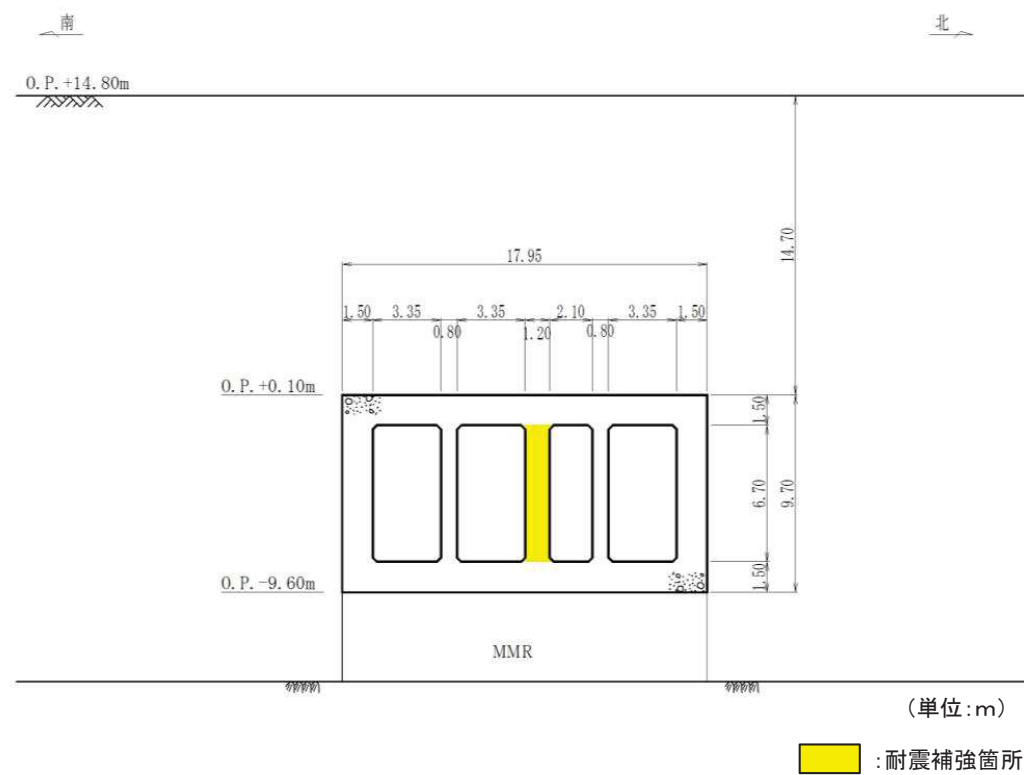
○女川2号炉の取水路(漸拡部), 原子炉機器冷却海水配管ダクト, 軽油タンク室, 復水貯蔵タンク基礎は, 後施工せん断補強工法(CCb工法)を適用して耐震補強を行っており, その適用性について検討した。

- 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。
- 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。なお, ディープビームを対象とした試験を実施していないことを踏まえ, 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実施する。
- 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。
- CCbを適用した構造物の部材が健全であり, CCbの効果を発揮できる条件にあることを確認した。
- 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工法を適用する範囲を定めると共に, CCb工法に保守性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。

# 補足説明1 Ccbにより耐震補強を行った構造物(1)



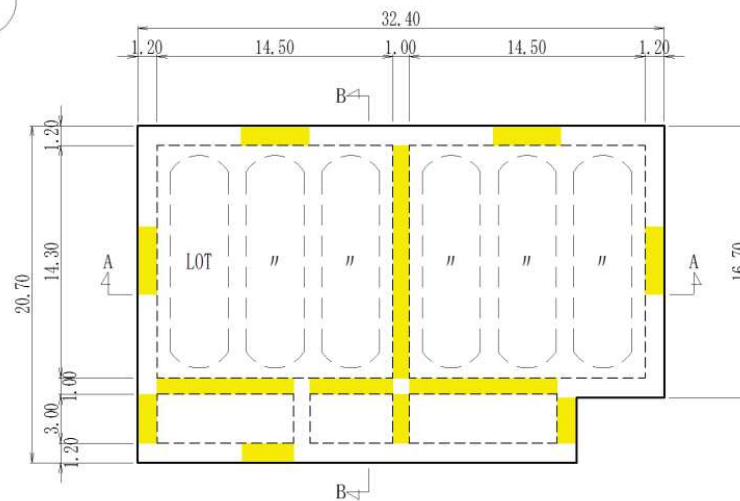
取水路(漸拡部)



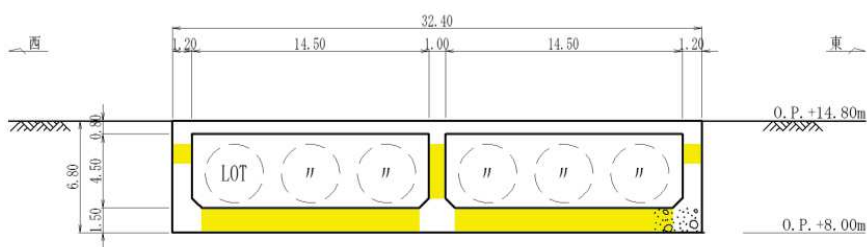
原子炉機器冷却海水配管ダクト

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

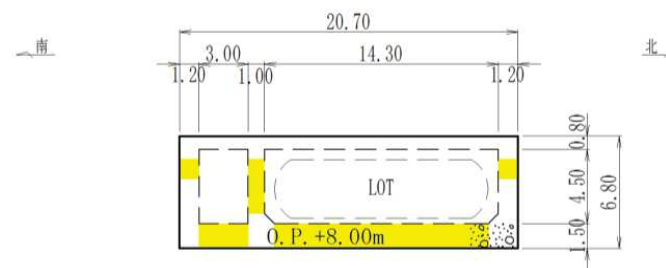
# 補足説明1 Ccbにより耐震補強を行った構造物(2)



平面図



A-A断面



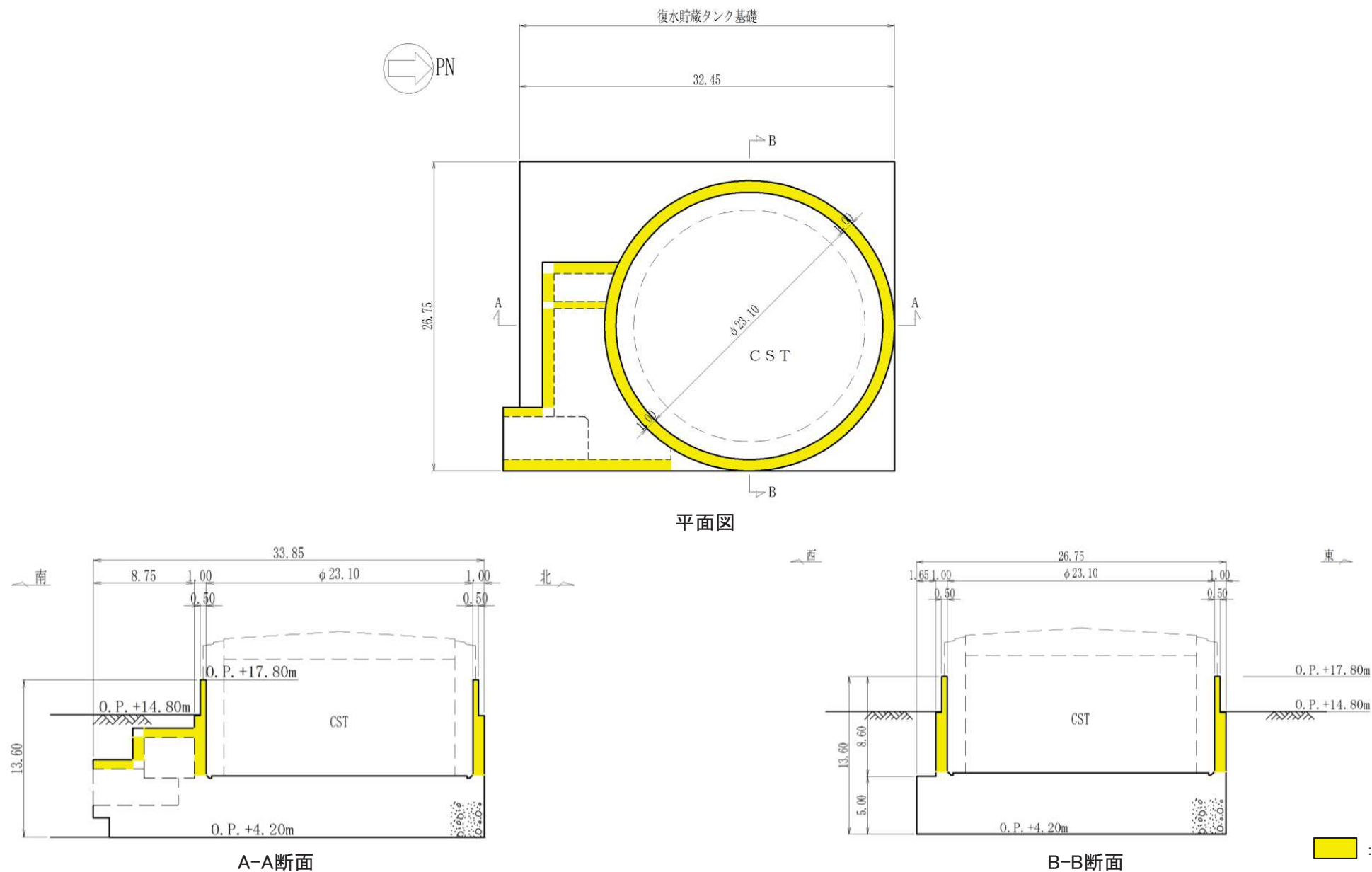
B-B断面

(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)



復水貯蔵タンク基礎

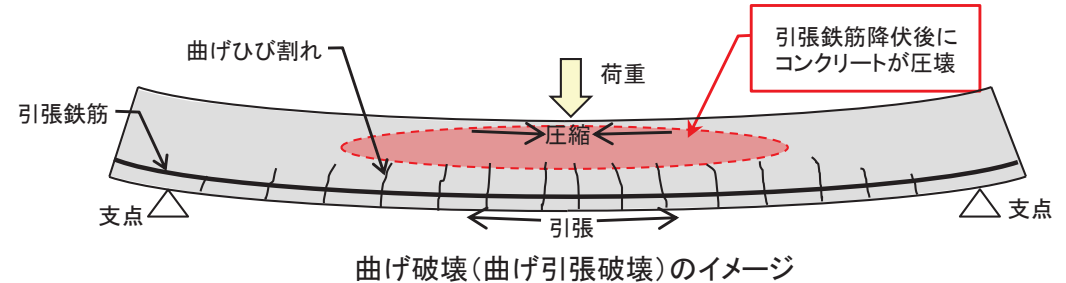
# 付録

## (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。

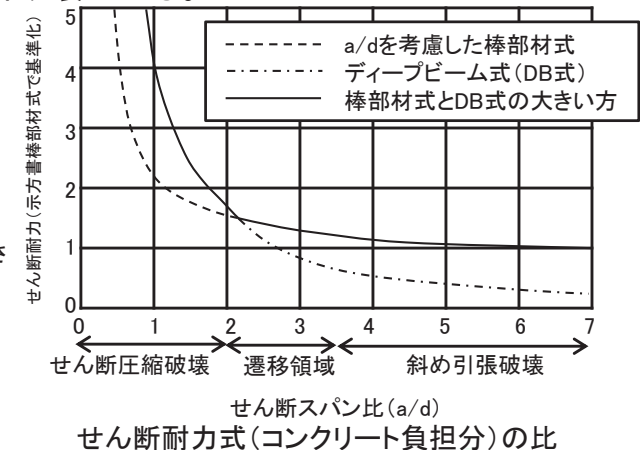
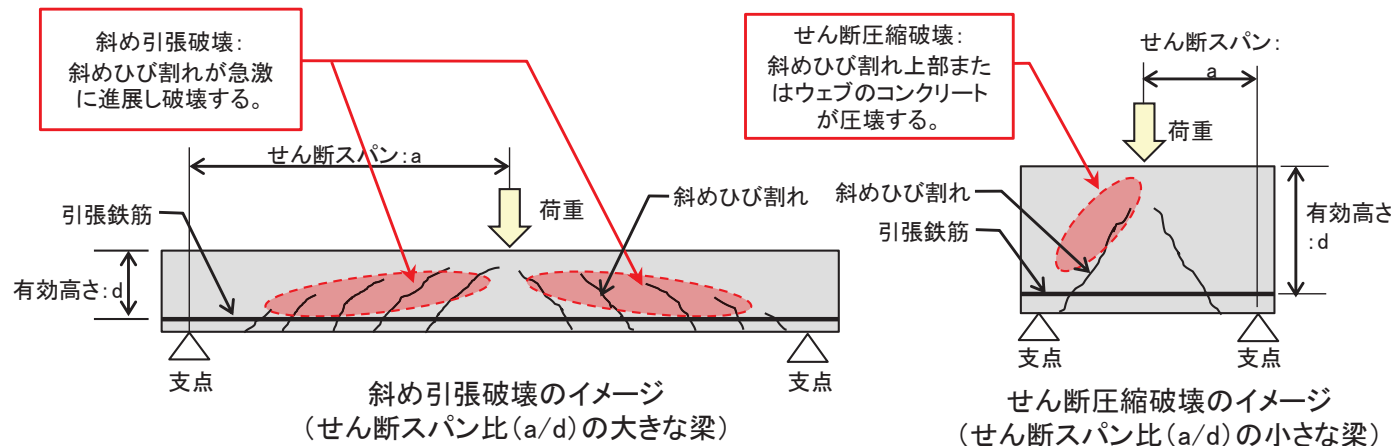


○ せん断破壊

- 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。

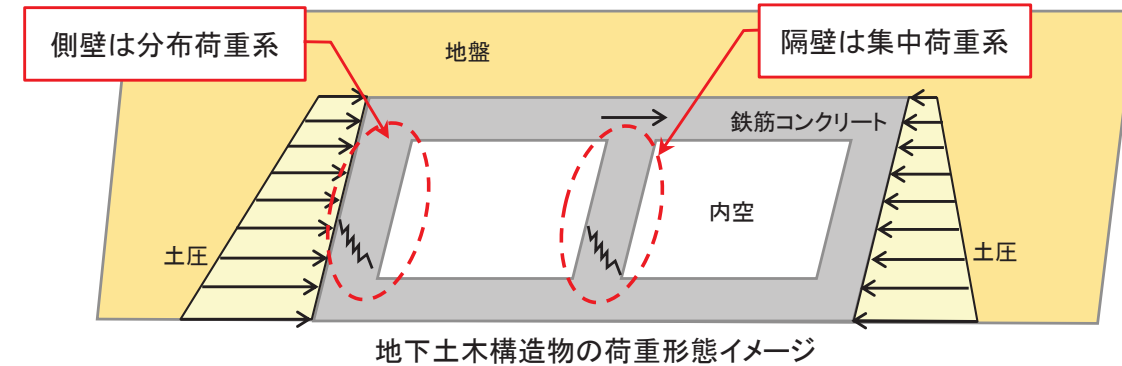
- 「斜め引張破壊」と「せん断圧縮破壊」の破壊形態の関係については、一般的な目安として、せん断スパン比が2以下であれば、「せん断圧縮破壊」となり、せん断スパン比が3.5以上であれば、「斜め引張破壊」になる。せん断スパン比が2~3.5の場合は両者の遷移領域であるので一般的には両者が生じる。
- 「斜め引張破壊」では、斜めひび割れが急激に載荷点方向及び支点方向に向かって発達し、それとほぼ同時に耐力を失ってせん断破壊に至る。
- 「せん断圧縮破壊」では、せん断力の増加に伴い徐々に斜めひび割れが進展するが、斜めひび割れが十分に発達しても耐力を失わず、最終的には斜めひび割れ上部またはウェブの圧縮側コンク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



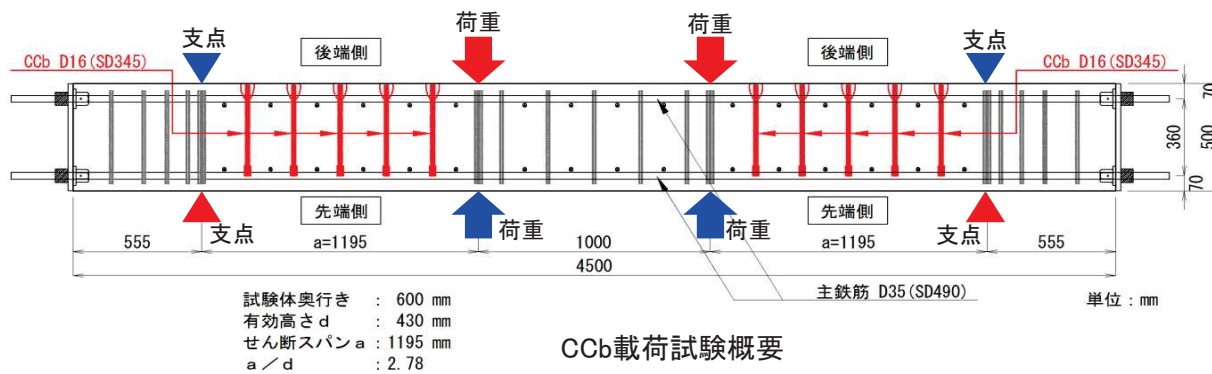


# 付録

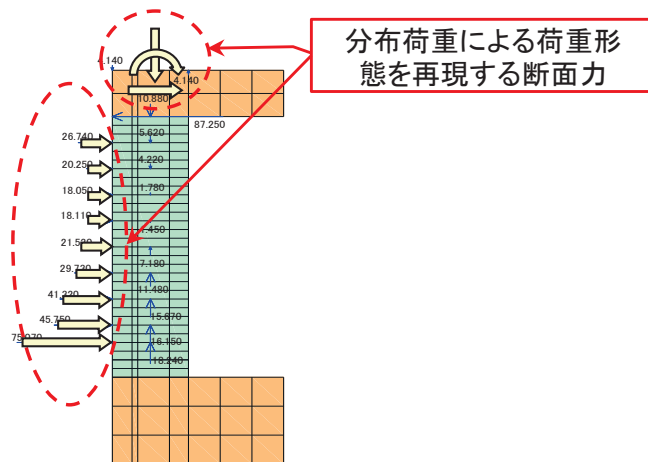
## (2)集中荷重と分布荷重



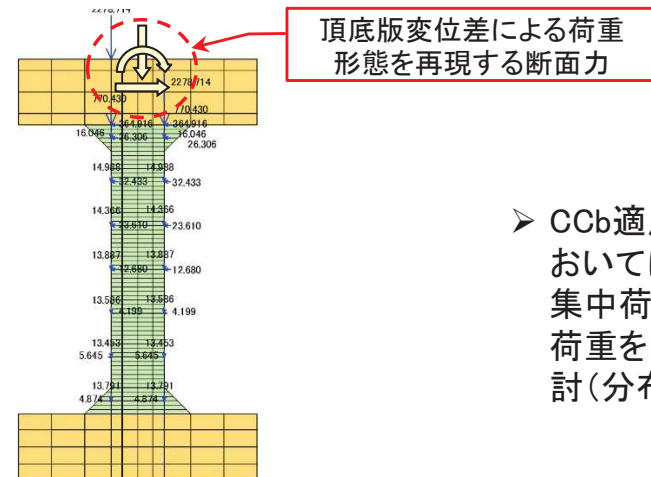
- 地下に埋設された土木構造物に地震時荷重が作用すると、隔壁は頂底板の変位差による荷重形態(集中荷重系)、側壁は土圧等の分布荷重による荷重形態(分布荷重系)になっている。



- 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。