

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

資料 1 - 2 - 2

女川原子力発電所 2 号炉

設計基準対象施設について

(第 4 条 地震による損傷の防止)

平成 3 0 年 8 月
東北電力株式会社

第4条：地震による損傷の防止

<目次>

第1部

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
 - 1.4 設備等
 - 1.5 手順等

第2部

1. 耐震設計の基本方針
 - 1.1 基本方針
 - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
 - 2.1 重要度分類の基本方針
 - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
 - 3.1 地震力の算定法
 - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
 - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
 - 5.1 建物・構築物
 - 5.2 機器・配管系
 - 5.3 屋外重要土木構造物
 - 5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別 添)

- 別添－ 1 設計用地震力
- 別添－ 2 動的機能維持の評価
- 別添－ 3 弾性設計用地震力 S_d ・静的地震力による評価
- 別添－ 4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－ 5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添－ 6 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－ 7 主要建屋の構造概要及び解析モデルについて
- 別添－ 8 入力地震動について

(別 紙)

- 別紙－ 1 既工認との手法の相違点の整理（設置変更許可申請段階での整理）
- 別紙－ 2 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討
- 別紙－ 3 水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について
- 別紙－ 4 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－ 5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について
- 別紙－ 6 原子炉本体の基礎の復元力特性について
- 別紙－ 7 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
- 別紙－ 8 規格適用範囲外の動的機能維持の評価
- 別紙－ 9 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用
- 別紙－ 10 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について
- 別紙－ 11 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について
- 別紙－ 12 埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について
- 別紙－ 13 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 14 応力解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 15 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定について
- 別紙－ 16 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙－ 17 後施工せん断補強筋による耐震補強について
- 別紙－ 18 液状化影響の検討方針について

下線部：今回提出資料

後施工せん断補強筋による
耐震補強について

目 次

1. 概要	1
2. CCb 工法について	8
2.1 CCb 工法の使用部位	8
2.2 CCb 工法の概要	9
3. 建設技術審査証明報告書の概要	10
3.1 CCb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け	10
3.2 建設技術審査証明報告書における CCb 工法の適用範囲	11
3.3 建設技術審査証明報告書における CCb 工法の設計方法	12
3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法	12
3.3.2 使用材料・強度	34
3.3.3 構造部材の評価	40
3.3.4 構造細目	42
3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認	43
3.4.1 施工の确实性	43
3.4.2 施工の容易性	43
3.4.3 CCb の施工手順の設定	43
4. 女川原子力発電所 2 号炉における CCb の適用性確認	57
4.1 方針	57
4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定	59
4.3 適用性確認項目の抽出	60
4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認	63
4.5 せん断補強効果の確認	69
4.5.1 せん断補強効果の確認内容	69
4.5.2 せん断補強効果の確認	70
4.6 CCb の施工精度に影響を与える項目の確認	74
4.6.1 削孔方法	74
4.6.2 削孔角度	74
4.6.3 削孔位置	76
4.6.4 グラウトの充てん性	77
4.7 施工実績・研究事例等の確認	87
4.7.1 施工実績の整理	87
4.7.2 過去の地震の経験事例	90
4.7.3 レベル 2 地震動を対象とした設計事例	91
4.7.4 後施工せん断補強鉄筋工法の比較	91
4.7.5 後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例	94
4.8 CCb 工法の保守性	104
4.9 CCb の適用性確認結果	105

- 添付資料-1 建設技術審査証明書
- 添付資料-2 解析によるせん断補強効果の確認
- 添付資料-3 ひび割れを有する部材に対するCCb工法の適用性
- 添付資料-4 CCbを適用した部材のコンクリートの健全性

1. 概要

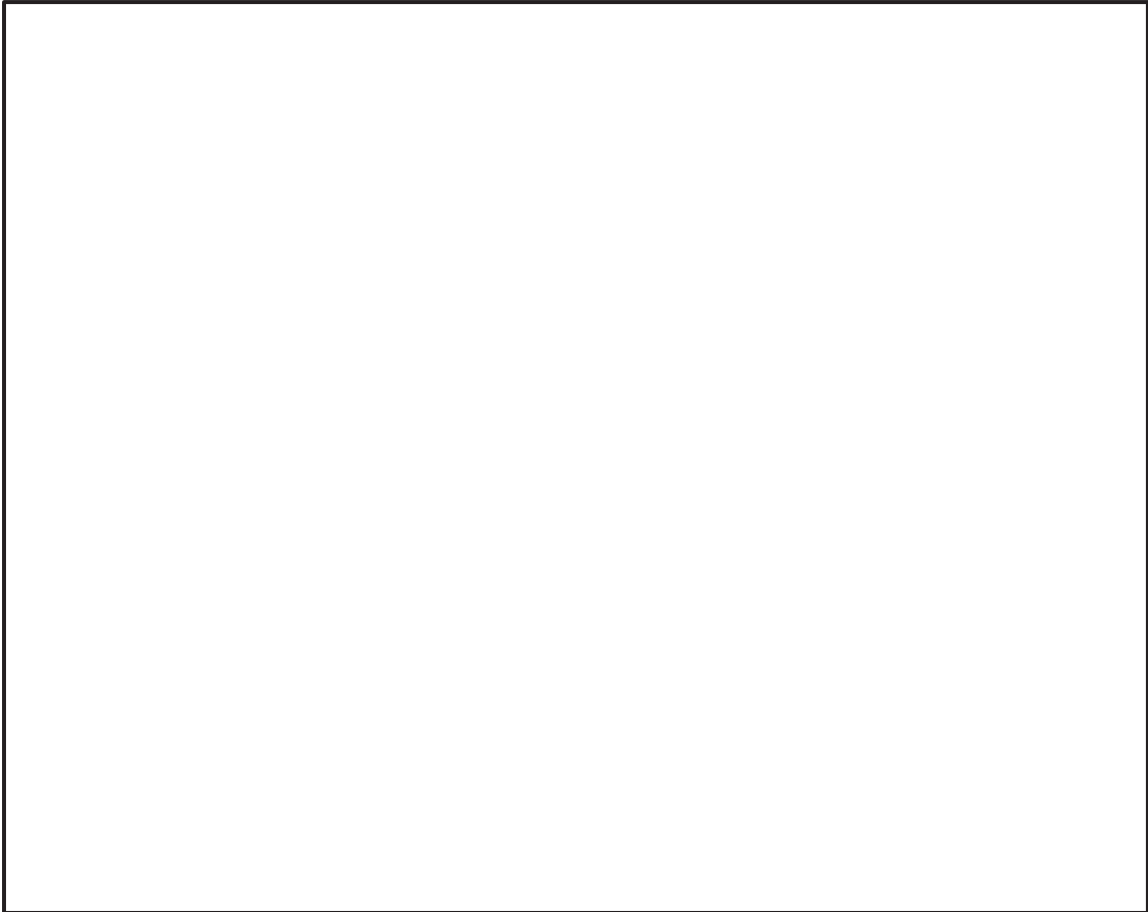
女川原子力発電所2号炉において、後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋（セラミックキャップバー）（以下、CCbという）により耐震補強を行った構造物の一覧、耐震補強箇所及び補強概要を図表1-1に示す。これらの構造物は耐震安全性を確保するために補強が必要であったことから、CCb工法による耐震補強を行った。

本資料は、女川原子力発電所2号炉においてCCbにより耐震補強を行った構造物について、CCb工法が適用性を有するか確認するものである。

図表 1-1 CCb 工法による耐震補強を行った構造物 (1/8)

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	図表 1-1 (7/8) 参照
	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	図表 1-1 (8/8) 参照
		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)

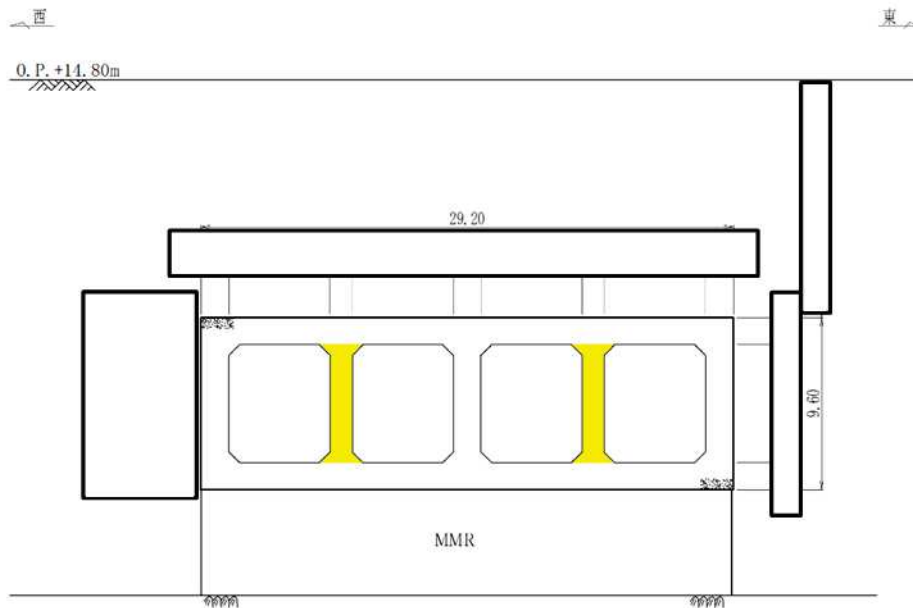


※：

- ・ 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。

図表 1-1 CCb 工法による耐震補強を行った構造物
(配置図) (2/8)

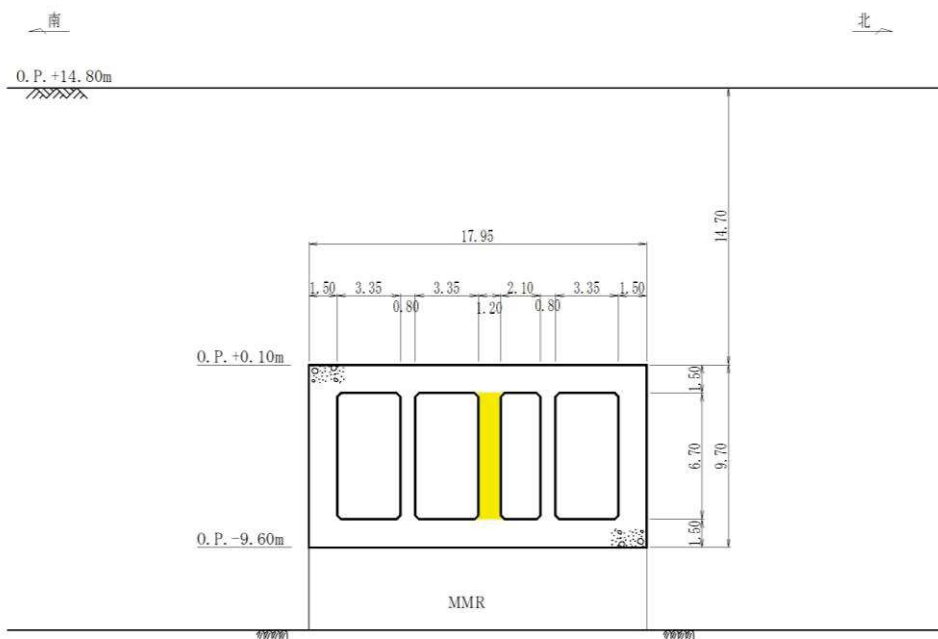
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



(単位：m)

■：耐震補強箇所

図表 1-1 CCb 工法による耐震補強を行った構造物
(取水路 (漸拡部)) (3/8)

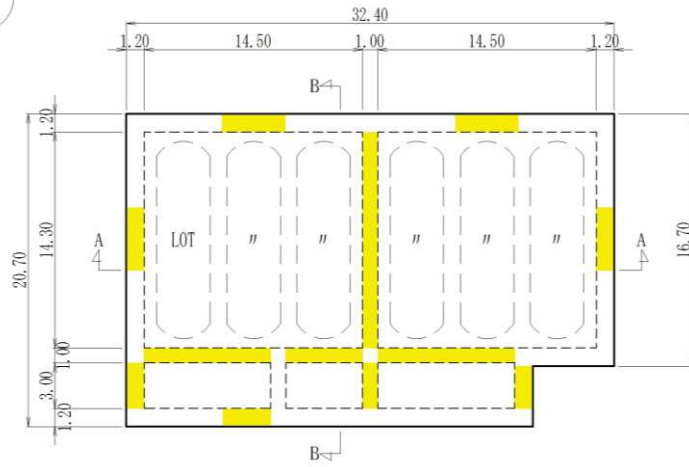


(単位：m)

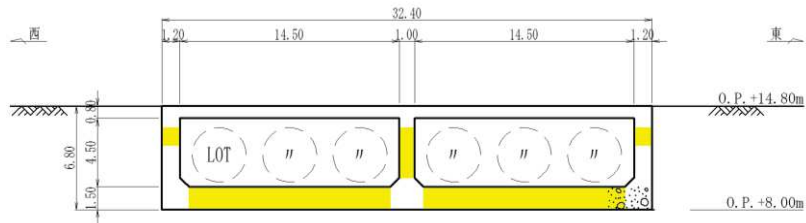
■：耐震補強箇所

図表 1-1 CCb 工法による耐震補強を行った構造物
(原子炉機器冷却海水配管ダクト) (4/8)

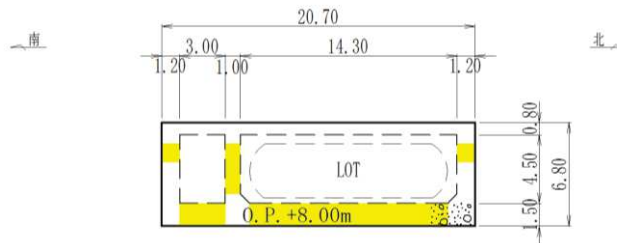
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



平面図



A-A 断面

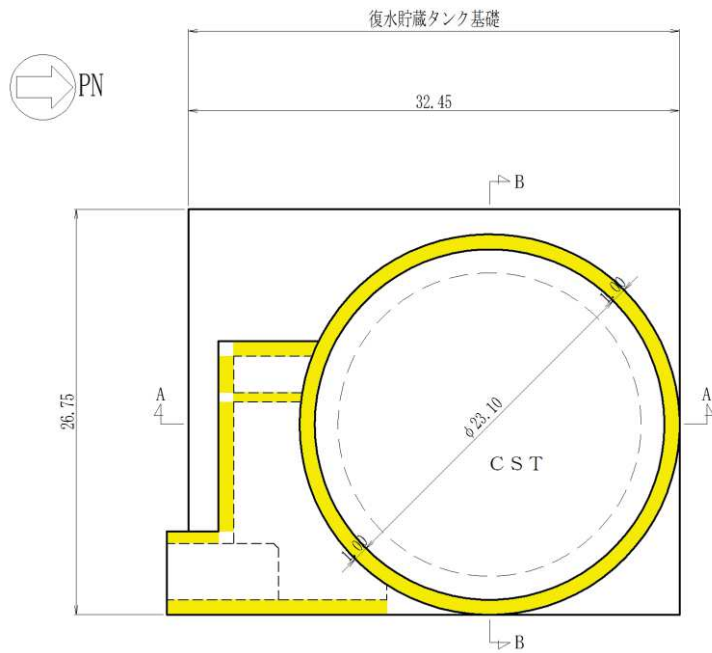


B-B 断面

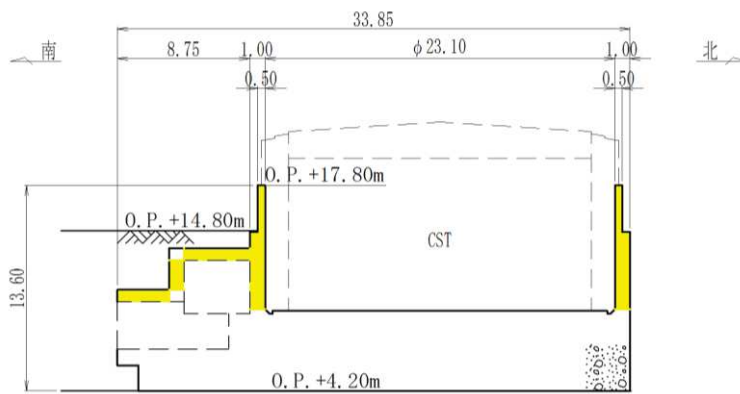
(単位：m)

■：耐震補強箇所

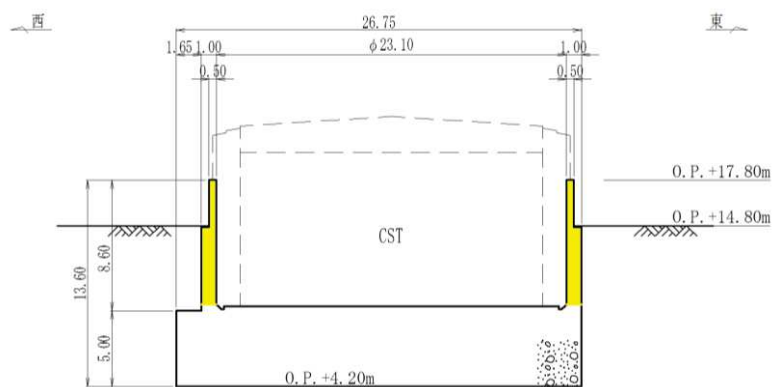
図表 1-1 Ccb 工法による耐震補強を行った構造物
(軽油タンク室) (5/8)



平面図



A-A 断面

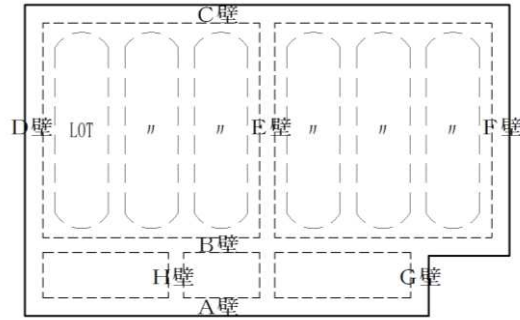


B-B 断面

(単位：m)

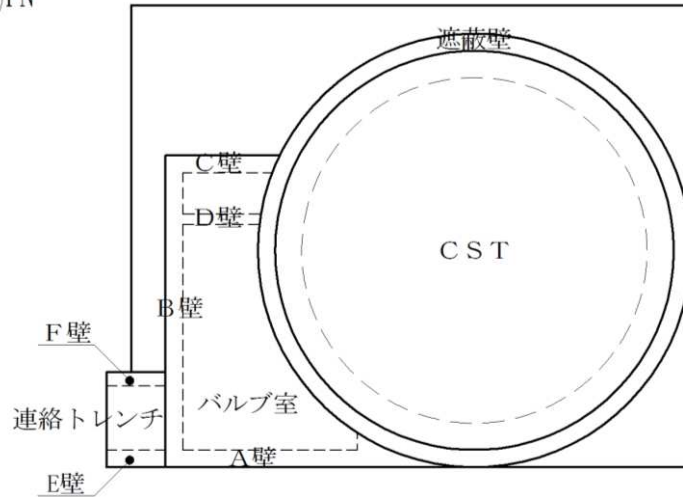
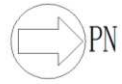
■：耐震補強箇所

図表 1-1 CCb 工法による耐震補強を行った構造物
(復水貯蔵タンク基礎) (6/8)



		東西方向・水平方向			南北方向・鉛直方向		
		支間長	有効高さ	せん断 スパン比 (最小値)	支間長	有効高さ	せん断 スパン比 (最小値)
		a (m)	d (m)	a / d	a (m)	d (m)	a / d
軽油 タンク 室	底版	5.10~14.50	1.30	3.92	3.00~14.30	1.30	2.31
	A壁 (南壁)	8.40	1.00	8.40	4.50	1.00	4.50
	B壁 (中壁)	5.10~9.10	0.85	6.00	4.50	0.85	5.29
	C壁 (北壁)	14.50	1.00	14.50	4.50	1.00	4.50
	D壁 (西壁)	3.00~14.30	1.00	3.00	4.50	1.00	4.50
	E壁 (中壁)	3.00~14.30	0.85	3.53	4.50	0.85	5.29
	F壁 (東壁)	14.30	1.00	14.30	4.50	1.00	4.50
	G壁 (東壁)	3.00	1.00	3.00	4.50	1.00	4.50

図表 1-1 CCb 工法による耐震補強を行った構造物
(せん断スパン比：軽油タンク室) (7/8)



		東西方向・水平方向			南北方向・鉛直方向			
		支間長	有効高さ	せん断スパン比 (最小値)	支間長	有効高さ	せん断スパン比 (最小値)	
		a (m)	d (m)	a / d	a (m)	d (m)	a / d	
復水貯蔵タンク基礎	遮蔽壁	—	—	—	4.15~8.60	0.87	4.77	
	バルブ室	頂版	1.00~13.05	0.68	1.47	4.35~10.10	0.68	6.40
		A壁 (東壁)	10.10	0.88	11.48	3.65	0.88	4.15
		B壁 (南壁)	2.40~13.05	0.88	2.73	1.95~3.65	0.88	2.22
		C壁 (西壁)	5.19	0.88	5.89	3.65	0.88	4.15
	D壁 (中壁)	4.53	0.48	9.43	3.65	0.48	7.60	
	連絡トレンチ	頂版	3.70	0.68	5.44	—	—	—
		E壁 (東壁)	—	—	—	3.15	0.68	4.63
		F壁 (西壁)	—	—	—	3.15	0.68	4.63

図表 1-1 CCb 工法による耐震補強を行った構造物
(せん断スパン比：復水貯蔵タンク基礎) (8/8)

2. Ccb 工法について

2.1 Ccb 工法の使用部位

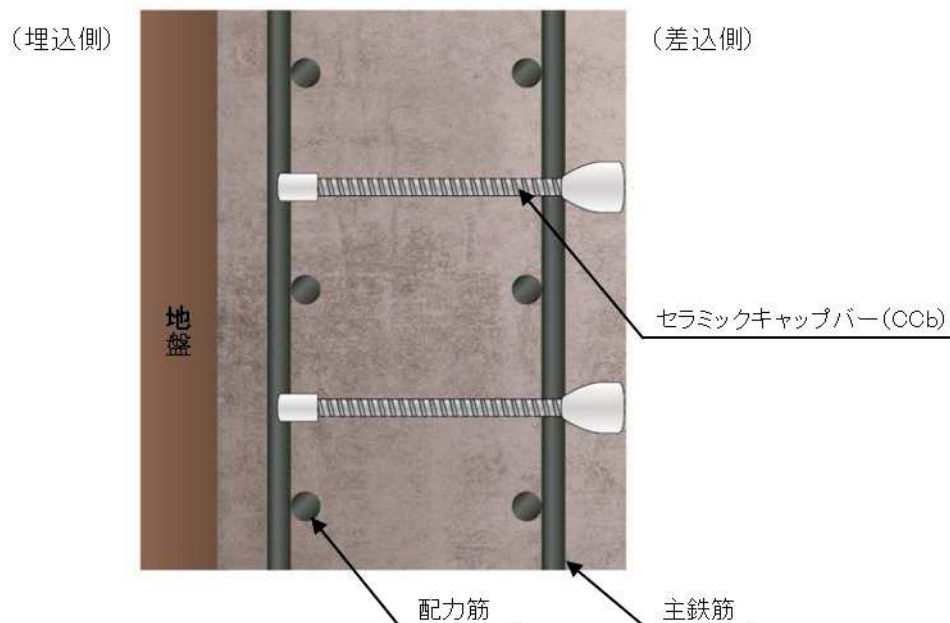
女川原子力発電所 2 号炉の屋外重要土木構造物においては、基準地震動発生時に屋外重要土木構造物としての機能（設計基準対象施設のうち耐震 S クラス施設の間接支持機能、重大事故等対処施設の間接支持機能、非常時における海水の通水機能及び貯水機能）を維持するために、耐震安全性を確保する必要がある。屋外重要土木構造物の一部の部材においては、せん断に対する安全性を確保するために、後施工によりせん断補強鉄筋を追加する工法の 1 つである Ccb 工法を適用し、せん断耐力の向上を図っている。

図表 1-1 に示すとおり、各構造物の隔壁、側壁、底版等の部材に対し、Ccb によるせん断補強を行っている。

2.2 Ccb 工法の概要

図表 1-1 に示した構造物は、基準地震動 S_s の大加速度化により部材のせん断に対する安全性を満足できない見通しがあり、せん断補強を実施する必要があった。

これら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ための工法が、Ccb 工法である。既設構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内に 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はかり、部材のせん断耐力を向上させる（図表 2-1 参照）。



図表 2-1 Ccb 工法の模式図

3. 建設技術審査証明報告書の概要

3.1 Ccb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け

女川原子力発電所 2 号炉のせん断補強が必要な各構造部材に配置した Ccb については、『建設技術審査証明報告書 技術名称 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー(CCb)」』（以下、建設技術審査証明報告書という）に適用範囲及び設計方法が示されている。

本工法は、添付資料 1「建設技術審査証明書」のとおり、高度な技術を有する第三者機関である一般財団法人土木研究センター（以下、PWRC*という）により審査証明を受けており、試験データを用いて、CCb が受け持つせん断耐力の算定方法において、CCb の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔及び CCb の埋込側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。なお、建設技術審査証明報告書では、片側からしか補強の施工ができない部材について、CCb を設置する手順を設定し、この工事に必要な施工要素（補強設計に基づく CCb の配置、CCb 配置位置での削孔方法、削孔内への CCb の固定方法、CCb 設置後の仕上げ等の施工性）を確認しており、それぞれの要素に対して施工上の考慮を示すなど、施工性についても審査対象となっている。

また、建設技術審査証明報告書では、設計・施工マニュアルが添付され、材料及び施工に関する事項が示されている。

※:PWRC は、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、河川、道路、土質・地盤、施工、橋梁等、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。PWRC では、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。

3.2 建設技術審査証明報告書における CCb 工法の適用範囲

本工法では、地震時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤等があり部材の片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対しても、後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。CCb が受け持つせん断耐力は鉄筋の材質（SD295A、SD295B、SD345）、径（D13～D32）毎に定め、その値は、先施工のせん断補強鉄筋に CCb のせん断耐力の向上への有効性を示す係数 β_{aw} を考慮することにより評価が可能である。

CCb は、主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

また、両側から施工が可能な既設コンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

3.3 建設技術審査証明報告書における Ccb 工法の設計方法

3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法

本工法では実験により性能を確かめることで、設計方法等を設定しており、その概要を以下にまとめた。

3.3.1.1 実験方法

本工法を用いた設計で Ccb のせん断耐力への寄与分を確認するために、梁試験体の交番載荷試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより、Ccb を用いて補強することによるせん断耐力の向上の確認が行われている（図表 3-1 参照）。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を図表 3-2 に、せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法を図表 3-3 に、せん断耐力向上性能試験の加力要領を図表 3-4 に示す。

3. 1. 2 「セラミックキャップバー (Ccb)」後施工によるせん断耐力

梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより、「セラミックキャップバー (Ccb)」を用いた後施工補強のせん断耐力の向上効果を確認する。梁試験体は、せん断補強鉄筋に D22 を用いたものが 3 体（シリーズ 1）、せん断補強鉄筋に D29 を用いたものが 2 体（シリーズ 2）、およびせん断補強鉄筋 D16 を用いたものが 10 体（シリーズ 3、4）である。

シリーズ 1 は、825×685mm の断面を有する RC 梁部材において、せん断スパンにせん断補強鉄筋のない試験体 (No.1-1)、通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.1-2) および「セラミックキャップバー (Ccb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.1-3) の 3 体である。なお、No.1-3 試験体の「セラミックキャップバー (Ccb)」の埋込み深さは、削孔の先端が補強面と反対側のコンクリート表面から 50mm となる 635mm である。

シリーズ 2 は、825×800mm の断面を有する RC 梁部材において、そのせん断スパンに通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.2-1) および「セラミックキャップバー (Ccb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.2-2) の 2 体である。なお、No.2-2 試験体の「セラミックキャップバー (Ccb)」の埋込み深さは、削孔の先端が補強面と反対側のコンクリート表面から 50mm となる 750mm である。

シリーズ 3、4 は、600×500×4500mm の断面を有する RC 梁部材において、せん断スパンにせん断補強鉄筋のない試験体 (No.3-1)、通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.3-2) および「セラミックキャップバー (Ccb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.3-3～3-6、4-1～4-4) の 10 体である。このうち、No.3-3～3-6 試験体は、「セラミックキャップバー (Ccb)」の埋込み位置が異なる。すなわち、埋込み側の先端位置は、主鉄筋の図心位置、主鉄筋の手前、または配力鉄筋の手前である。No.3-4 と No.3-5 については、ばらつきを確認するため同条件の試験体である。No.4-1～4-3 試験体は両端に先端型定着体を用いた両端先端型、No.4-4 試験体は両端に後端型定着体を用いた両端後端型であり、定着体は両端とも、コンクリート表面に一致している。なお、No.4-1 と No.4-2 については、ばらつきを確認するため同条件の試験体である。

各ケースの試験体の種類を表 II-3.2～3.5 に、試験体図を図 II-3.6～3.8 に示す。また、載荷装置図を図 II-3.9 に示す。載荷は、規格強度に基づいた各試験体のせん断耐力の計算値に達するまでは、段階的に荷重制御により加力を行い、以後は、その時点の加力点変位を基準とする同一振幅における繰返し回数 1 回の振幅漸増型の変位制御による交番加力を行った。

図表 3-1 実験方法
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

図表 3-2 各ケースの試験体の諸元
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

表 II-3.2 各ケースの試験体の諸元 (シリーズ 1)

	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 p_w	0	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	

表 II-3.3 各ケースの試験体の諸元 (シリーズ 2)

	No.2-1	No.2-2
断面寸法 $b \times h$	825 × 800 mm	
せん断スパン長 a	1,960 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	37N/mm ²	38N/mm ²
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	SD345 D29 両端フック	SD345 D29 セラミックキャ ップバー (CCb)
せん断補強鉄筋比 p_w	0.48 %	
試験の目的	後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価	

図表 3-2 各ケースの試験体の諸元
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

	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	1,195mm					
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 材質、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			

	No.4-1	No.4-2	No.4-3	No.4-4
断面寸法 $b \times h$	600×500 mm			
せん断スパン長 a	1,195mm			
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]	34.0	34.3	35.5	33.9
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	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	両端先端型			両端後端型
試験の目的	後施工せん断補強鉄筋による有効率 β_{aw} の評価			

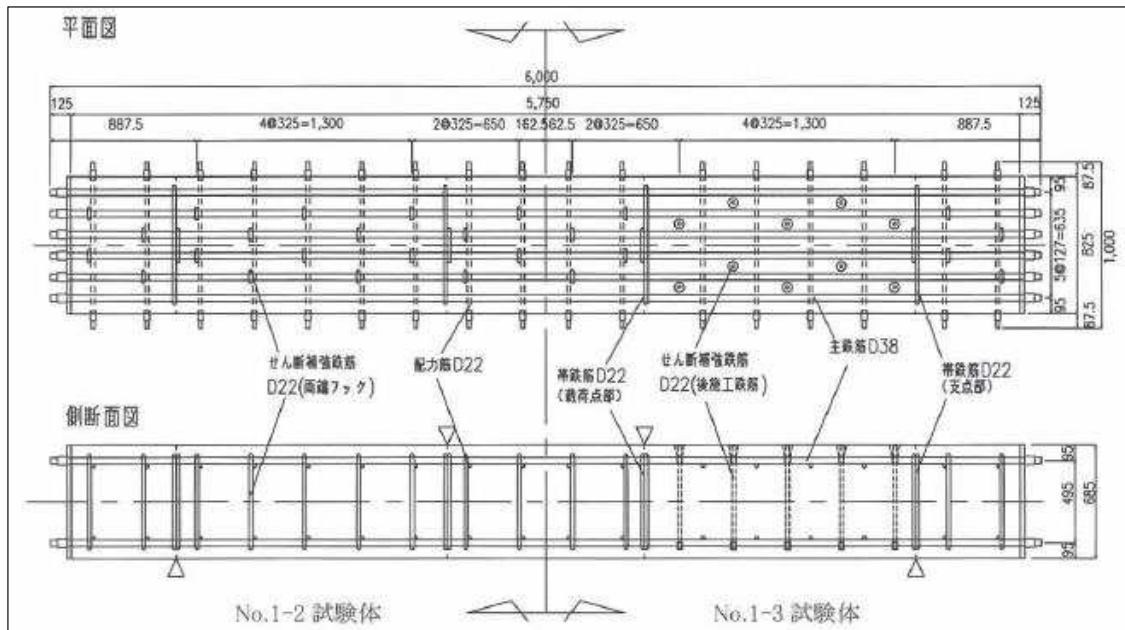


図 II - 3.6 試験体図 (シリーズ 1)

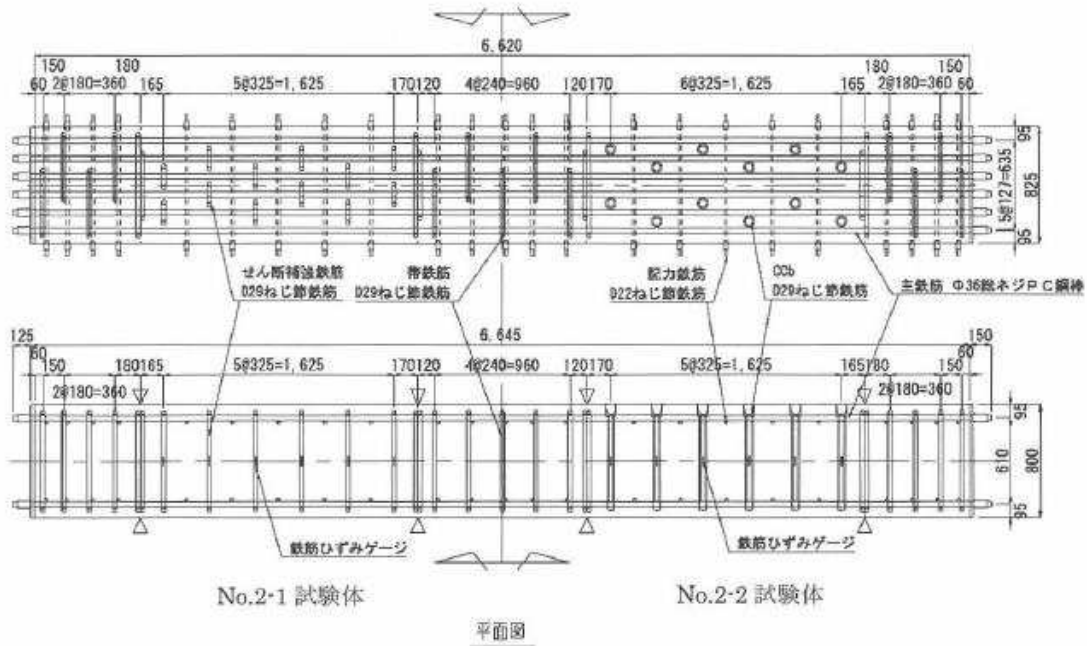
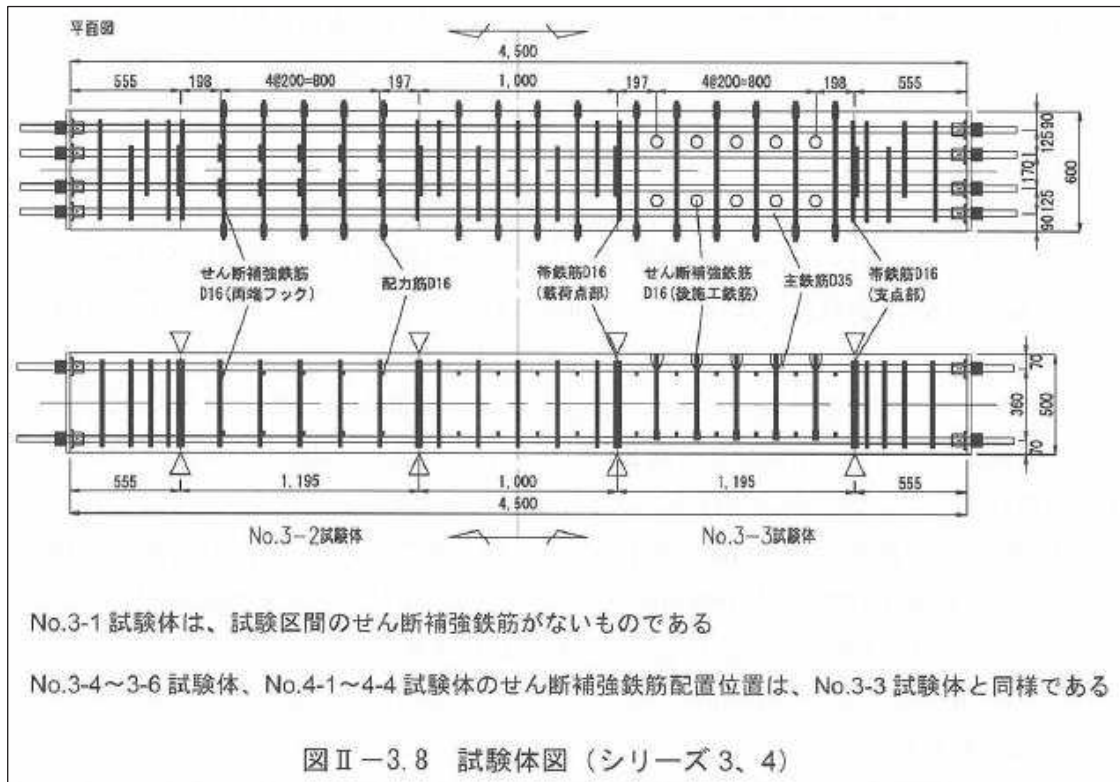


図 II - 3.7 試験体図 (シリーズ 2)

図表 3-3 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)



図表 3-3 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

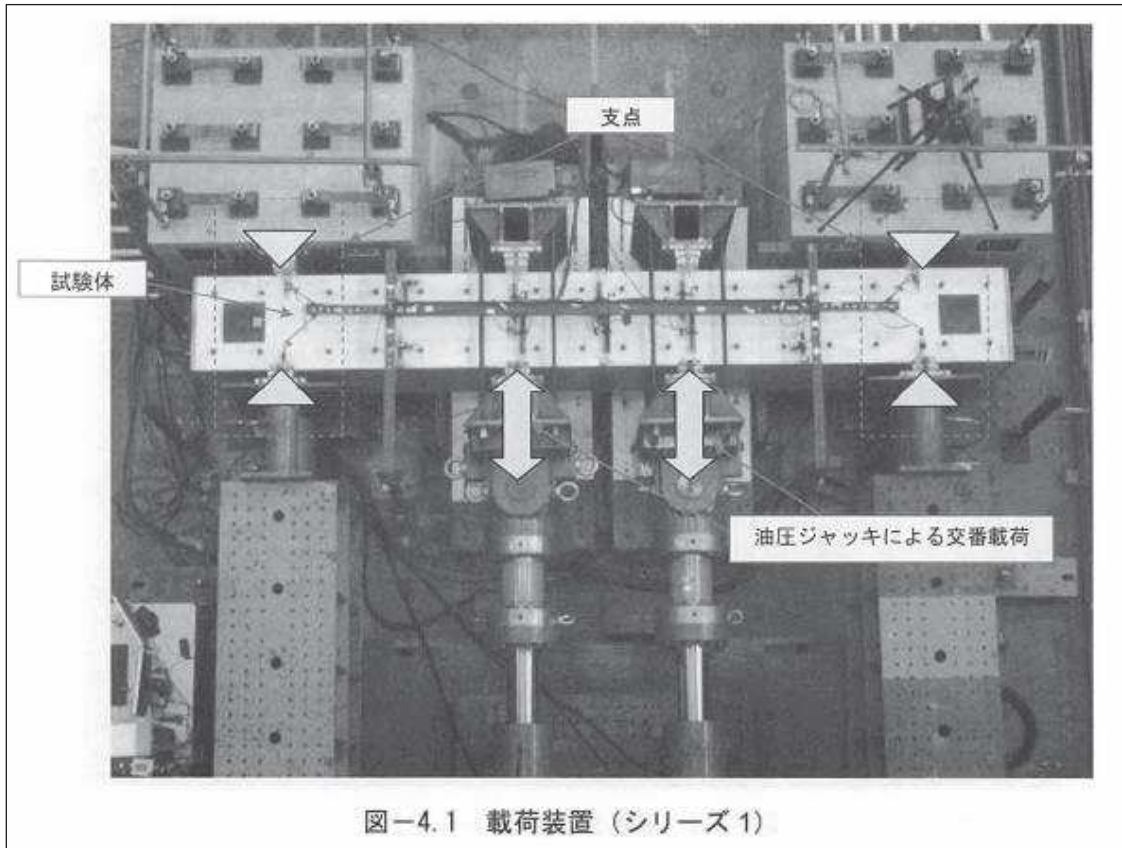


図-4.1 载荷装置 (シリーズ1)

図表 3-4 せん断耐力向上性能試験の加力要領
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

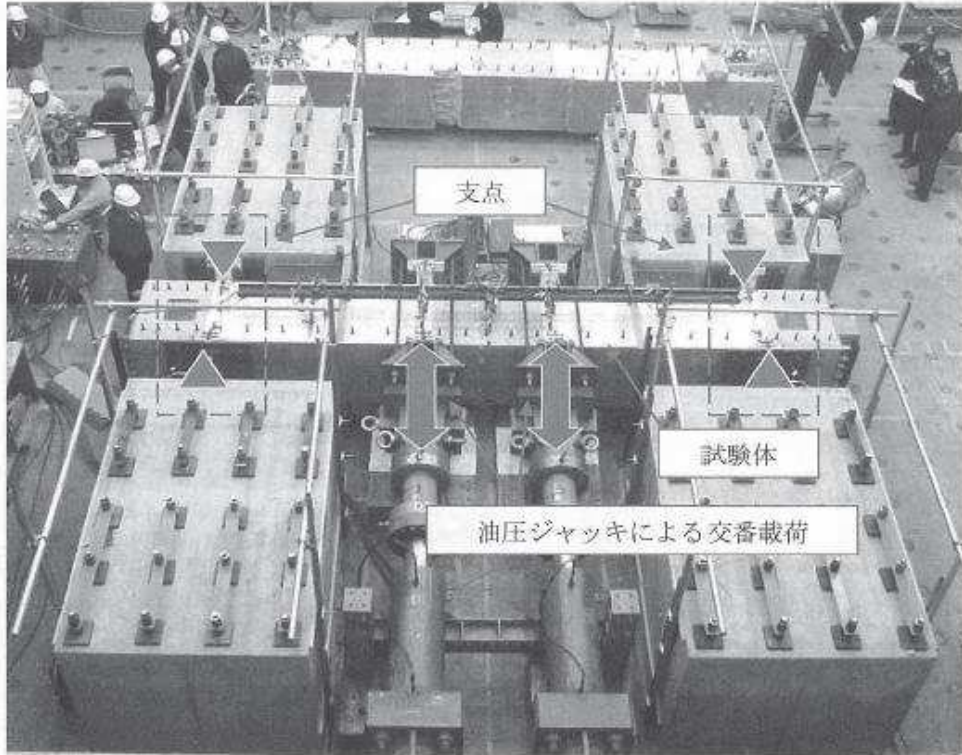


図-4.2 载荷装置 (シリーズ2)

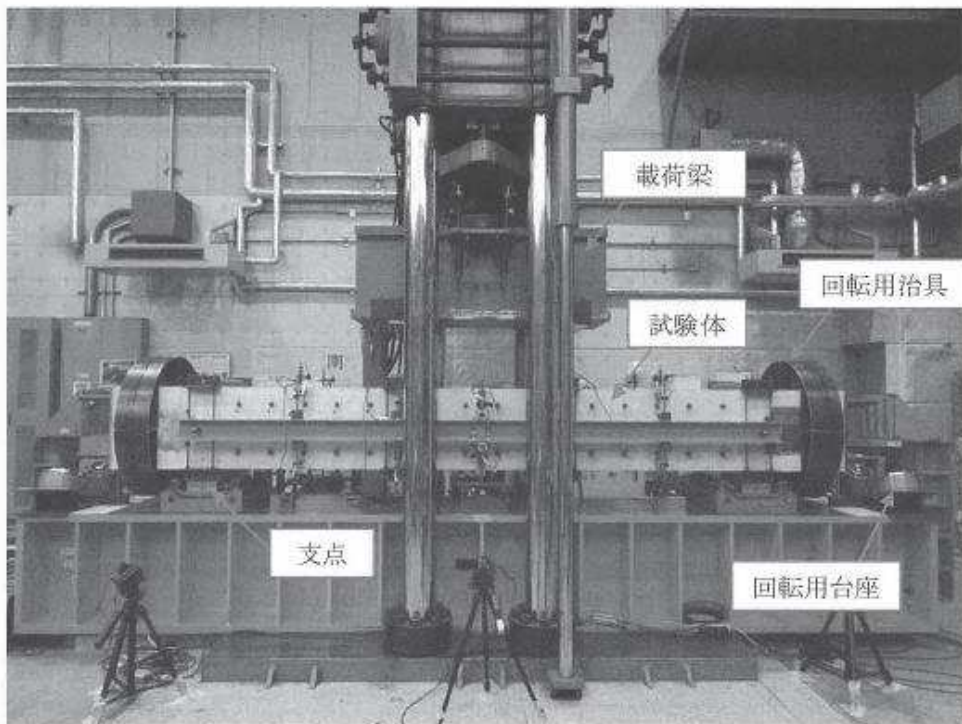


図-4.3 载荷装置 (シリーズ3、4)

図表 3-4 せん断耐力向上性能試験の加力要領
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.3.1.2 実験結果

3.3.1.1の実験結果を、図表 3-5 及び図表 3-6 に示す。

本実験では、セラミックキャップバー（CCb）工法によるせん断耐力の向上効果を評価するために、せん断破壊する梁試験体に対する交番載荷実験を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- ・ セラミックキャップバー（CCb）で後施工せん断補強した梁試験体の最大せん断耐力は、同量の両端フック型のせん断補強鉄筋であらかじめせん断補強した梁試験体のそれと、概ね等しい値であった。
- ・ 梁の交番載荷実験時におけるセラミックキャップバー（CCb）のひずみ挙動は、両端フック型のせん断補強鉄筋と同様であり、せん断ひび割れを架橋する複数のセラミックキャップバー（CCb）が規格降伏強度相当以上のせん断力を負担していることを確認した。
- ・ セラミックキャップバー（CCb）の埋込み位置の先端を主鉄筋の表面から 5mm 手前および配力筋の表面から 5mm 手前に配置した試験体においても、せん断ひび割れを架橋する複数のセラミックキャップバー（CCb）が規格降伏強度相当以上のせん断力を負担していることを確認した。
- ・ 定着体の組合せのうち、両端に先端型定着体を装着した試験体、および両端に後端型定着体を装着した試験体のいずれにおいても、せん断ひび割れを架橋する複数のセラミックキャップバー（CCb）が規格降伏強度相当以上のせん断力を負担していることを確認した。
- ・ せん断補強鋼材として、D16、D22 および D29 のセラミックキャップバー（CCb）を用いた場合、いずれの試験ケースにおいても同様のメカニズムでせん断補強鉄筋として機能していることが確認された。
- ・ 両端フック型のせん断補強鉄筋のせん断耐力負担分に対する、セラミックキャップバー（CCb）のせん断耐力負担分の比で表される有効率 β_{aw} は、いずれの鉄筋径においても計算値以上であった。
- ・ セラミックキャップバー（CCb）の埋込み位置の先端および定着体の組合せを検討したいずれの試験ケースにおいても、通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する、セラミックキャップバー（CCb）のせん断耐力負担分の比

図表 3-5 実験結果
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

で表される有効率 β_{aw} は計算値以上であった。

- ・ 実験におけるセラミックキャップバー (CCb) のせん断補強効果に対する有効率 β_{aw} は、式(5)または式(9)～(12)による算出値よりも大きかった。また、複数のセラミックキャップバー (CCb) が通常 of せん断補強鉄筋と同様にせん断ひび割れを架橋し、せん断耐力を負担できている。このことから、セラミックキャップバー (CCb) によるせん断補強効果を、トラス理論に基づいて通常 of せん断補強鉄筋により負担されるせん断耐力に式(5)または式(9)～(12)による有効率 β_{aw} を乗じて評価することは、安全側であることが分かる。

図表 3-5 実験結果
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

※図表 3-5 中の式(5) は 3.3.1.3 に、式(9)～(12)は 3.3.1.4 に詳細を示す。

図表 3-6 実験結果の一覧
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

		No.1-1	No.1-2	No.1-3	備考
せん断補強鉄筋の種類・形状		せん断補強鉄筋なし	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミック定着体	
せん断耐力の実験値	V	454 kN	1,045 kN	1,050 kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
	V _c	454 kN	401 kN	403 kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値。
	V _s	0 kN	644 kN	647 kN	V _s =V-V _c として
せん断耐力の計算値	V _{cal}	396 kN	898 kN	837 kN	計算値は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づき、安全係数を 1.0 として算出した値。
	V _{c cal}	396 kN	401 kN	403 kN	
	V _{s cal}	0 kN	497 kN	437 kN	No.1-3 は示方書による V _s に有効率 β=0.88 を乗じた値。

		No.2-1	No.2-2	備考	
せん断補強鉄筋の種類・形状		SD345D29 両端フック	SD345D29 セラミック定着体		
せん断耐力の実験値	正側	V	1597kN	1598kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V _c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V _s	1168kN	1164kN	V _s =V-V _c として
	負側	V	1577kN	1498kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V _c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V _s	1148kN	1064kN	V _s =V-V _c として
せん断耐力の計算値	V _{cal}	1372kN	1263kN	計算値は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づき、安全係数を 1.0 として算出した値	
	V _{c cal}	429kN	434kN		
	V _{s cal}	943kN	829kN	No.2-2 は示方書による V _s に有効率 β=0.88 を乗じた値	
せん断補強鉄筋の有効率 β _{aw}		正側	1164/1168=1.00	No.2-1 試験体と No.2-2 試験体の比較による値	
		負側	1064/1148=0.93		

図表 3-6 実験結果の一覧
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

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 (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 β_{av} (V_{CCb}/V_s)			有効率の 設計値 β_{av}
			正側	負側	V_{cal}	V_{cd}	V_s	正側	負側	正側	負側	平均	
	定着体の 組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}	V_{cal}	V_{cd}	V_s	V_{CCb}	V_{CCb}	正側	負側	平均	
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	<u>563</u>	<u>499</u>	542	253	289	310	246	<u>1.07</u>	0.85	0.96	0.89
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>515</u>	<u>570</u>	543	254	289	261	316	<u>0.90</u>	<u>1.09</u>	1.00	0.83
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>531</u>	509	543	254	289	277	255	<u>0.96</u>	0.88	0.92	
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>497</u>	<u>526</u>	543	254	289	243	272	<u>0.84</u>	<u>0.94</u>	0.89	0.78
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>532</u>	<u>520</u>	525	235	290	297	285	<u>1.02</u>	<u>0.98</u>	1.00	0.82
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>520</u>	<u>535</u>	526	236	290	284	299	<u>0.98</u>	<u>1.03</u>	1.01	0.82
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>539</u>	<u>546</u>	524	234	290	305	312	<u>1.05</u>	<u>1.08</u>	1.06	0.78
No.4-4	両端後端型	—	<u>667</u>	<u>568</u>	525	235	290	426	333	<u>1.47</u>	<u>1.15</u>	1.31	1.00

※1 下線は正負交番荷重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、その荷重方向での最大荷重を示す

3.3.1.3 Ccb のせん断補強の考え方

CCb のせん断補強の考え方を図表 3-7 に示す。

(5) 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断補強効果の考え方

「セラミックキャップバー (CCb)」は通常の方法でせん断補強せず、既設構造物を後からせん断補強するために、土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] のせん断耐力式におけるせん断補強鉄筋が負担するせん断力 V_{sd} を全て見込むことは困難であると考えられる。そこで「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果を、アルカリ骨材反応を受けて破断したせん断補強鉄筋のせん断耐力評価と同じ方法 (参考文献: 土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、2005.9) により検討した。

せん断補強鉄筋が破断した場合は、せん断ひび割れ箇所から破断箇所までの付着長さが短くなることにより、せん断ひび割れを架橋する箇所でせん断補強鉄筋が全強度を発揮できなくなり、せん断補強効果が低下すると考えられる。この効果を以下のように考慮し、定着不良が生じた場合のせん断耐力をトラス理論により評価する。

せん断ひび割れを架橋するせん断補強鉄筋を考えたとき、せん断ひび割れが破断位置にある場合は、そのせん断補強鉄筋はせん断力を負担することができず、一方、破断位置から定着長さ l_y 以上離れた位置にせん断ひび割れがあるせん断補強鉄筋では、付着により十分な定着性能が確保されていると判断され、降伏強度相当のせん断力を負担することができる。また、破断位置から定着長さ l_y 以下の範囲にせん断ひび割れがあるせん断補強鉄筋は、ある程度のせん断力は負担できるが定着性能が低下しているため、降伏強度相当より小さなせん断力のみが負担できるとした。その場合について、せん断ひび割れからのせん断補強鉄筋の定着長さにしたがって負担できるせん断力を線形で仮定したのが、図 II-4.33 に示す概念図である。この仮定によれば、平均化した破断した鉄筋の負担応力の低下率 η は次式で表すことができる。

$$\eta = (d-d')/(4l_y) \quad \text{if } (d-d') \leq 2l_y \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\eta = 1 - l_y/(d-d') \quad \text{if } (d-d') > 2l_y \quad \dots \dots \dots (2)$$

一部のせん断補強鉄筋のみが破断している場合には、その破断割合 α を考慮すると、破断したせん断補強鉄筋を含む有効せん断補強効果割合 β は式(3)となる。

$$\beta = \eta \alpha + (1 - \alpha) \quad \dots \dots \dots (3)$$

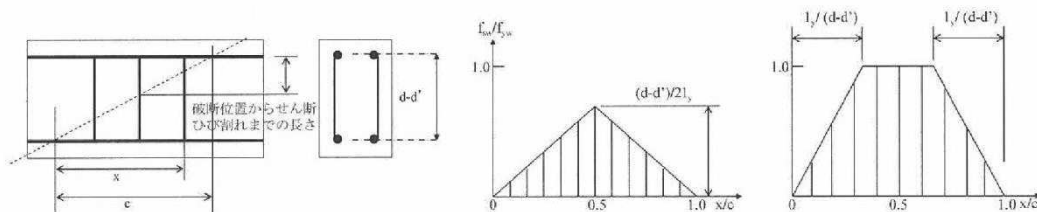


図 II-4.33 斜めひび割れ内の破断したせん断補強鉄筋応力

図表 3-7 Ccb のせん断補強の考え方
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

すなわち、全てのせん断補強鉄筋が有効であるとして、トラス理論に基づきコンクリート標準示方書式で算出したせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力分に、有効せん断補強効果割合 β を乗じることにより、定着が不良であるものを含むせん断補強鉄筋のせん断耐力負担分を評価することができる。

以上の考え方に「セラミックキャップパー (CCb)」の定着性能を適用することにより、「セラミックキャップパー (CCb)」工法のせん断補強効果を評価することができる。「セラミックキャップパー (CCb)」の定着性能については、引抜き試験により以下について明らかとなっている。

- ・ 先端型定着体が、「セラミックキャップパー (CCb)」の規格降伏強度相当以上の定着力を確保するための必要定着長は、定着体の先端から $5D$ (D : 鉄筋の直径) である。
- ・ 後端型定着体は、単体で「セラミックキャップパー (CCb)」の規格引張強度相当以上の定着力を發揮できる。

「セラミックキャップパー (CCb)」の定着長 l_y が $5D$ であることと、「セラミックキャップパー (CCb)」工法の適用部材における主鉄筋間隔が $2l_y$ 以上であるとすると、「セラミックキャップパー (CCb)」の応力低下率 η の算出では、式(2)を基本とすることができる。また、後端型定着体部においては、せん断補強鉄筋の材端までせん断耐力に対して有効に作用することから、式(2)の第2項の $l_y/(d-d')$ には、係数 $1/2$ が乗じられる (式(4))。さらに、式(3)において破断している鉄筋は無いことから $\alpha=1$ とすると、「セラミックキャップパー (CCb)」のせん断補強の有効率 β_{aw} は、式(5)により算出できる。

$$\eta = 1 - \frac{l_y}{2(d-d')} \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta_{aw} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2(d-d')} \dots\dots\dots (5)$$

図表 3-7 CCb のせん断補強の考え方
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.3.1.4 実験結果に基づくCCbによるせん断補強効果の評価

実験結果に基づくCCbによるせん断補強効果の評価について、図表3-8に示す。

(6) 実験結果に基づく「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果の評価

i) 「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果の評価

上記の考え方の適用性を検討するために、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} をシリーズ1の実験結果に基づいて評価する。

「セラミックキャップバー (CCb)」によって負担されるせん断耐力 V_{CCb} は、式(6)に示すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 $V_{exp,no1-3}$ から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。また、せん断補強鉄筋によって負担されるせん断耐力 V_s は、式(7)に示すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 $V_{exp,no1-2}$ から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。

図表 3-8 実験結果に基づくCCbによるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/9)

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効性は、前述のように有効率 β_{aw} により評価される。有効率 β_{aw} は、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効率である。すなわち、本実験においては、No.1-2 試験体におけるせん断補強鉄筋が負担するせん断力 V_s と、No.1-3 試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力 V_{CCb} との比として式(8)のように評価することができる。

$$V_{CCb} = V_{exp,no1-3} - V_{c,no1-3} \dots\dots\dots(6)$$

$$V_s = V_{exp,no1-2} - V_{c,no1-2} \dots\dots\dots(7)$$

$$\beta_{aw} = V_{CCb} / V_s \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

V_{CCb} : 「セラミックキャップバー (CCb)」による負担されるせん断耐力

$V_{exp,no1-2}$: 実験で得られた No.1-2 試験体のせん断耐力

$V_{exp,no1-3}$: 実験で得られた No.1-3 試験体のせん断耐力

$V_{c,no1-2}$: せん断補強鉄筋を用いない場合の No.1-2 試験体のせん断耐力の計算値

$V_{c,no1-3}$: せん断補強鉄筋を用いない場合の No.1-3 試験体のせん断耐力の計算値

V_s : 通常のせん断補強鉄筋に負担されるせん断耐力の計算値

β_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力の補強効果を示す有効率

表Ⅱ-4.1 に各試験体の実験結果、および土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出した設計計算値を示す。なお、No.1-2、1-3 試験体のコンクリート負担分 V_c は、実験時のコンクリート強度を用いて土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出した。また、表中の計算値は、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出したものであり、No.1-3 試験体のせん断耐力については、有効率 β_{aw} を式(5)により以下のように算出し、No.1-2 試験体のせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力の計算値に乗じている。

$$d - d' = 495\text{mm}, l_y = 110\text{mm} \text{ (5D, D=22mm) より}$$

$$\beta_{aw} = 1 - 1/2 \cdot l_y / (d - d') = 1 - 1/2 \cdot (110/495) = 0.88$$

表Ⅱ-4.1 より、各試験体の実験結果に基づいて算出される「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率 β_{aw} が、コンクリート負担分を計算値に基づいた場合で 1.00 であり、式(5)による有効率 0.88 以上であることが分かる。また、各試験体の設計計算値と実験結果との比較においても、全ての試験体の実験結果は設計計算値よりも大きくなっている。

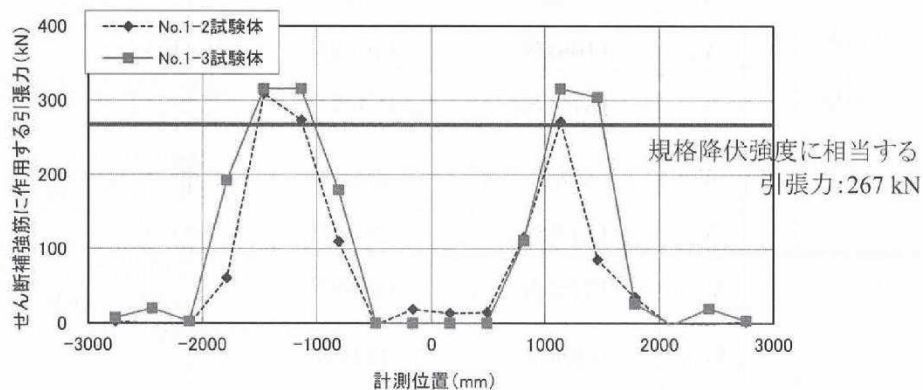
次に、図Ⅱ-4.34 に最大せん断耐力経験時におけるせん断補強鉄筋に作用する引張力の分布について、比較したものを示す。なお、図Ⅱ-4.34 におけるせん断補強鉄筋の引張力

図表 3-8 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/9)

は、せん断補強鉄筋のひずみゲージの測定値を材料試験による応力-ひずみ関係に基づいて引張応力に換算し、断面積を乗じた値である。図Ⅱ-4.34より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強した No.1-3 試験体においても、通常のせん断補強を行った No.1-2 試験体と同様に、1つの斜めひび割れに対して複数本の「セラミックキャップバー (CCb)」が規格降伏強度以上の引張力を負担していることが確認できる。

表Ⅱ-4.1 実験結果の一覧 (シリーズ1)

		No.1-1	No.1-2	No.1-3	備 考
補強鉄筋の種類・形状		せん断補強鉄筋なし	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミック定着体	
せん断耐力の実験値	V	454 kN	1,045 kN	1,050 kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
	V_c	454 kN	401 kN	403 kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
	V_s	0 kN	644 kN	647 kN	$V_s = V - V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	396 kN	898 kN	837 kN	計算値は、コンクリート標準示方書 [設計編] に基づき、安全係数を 1.0 として算出した値
	$V_{c cal}$	396 kN	401 kN	403 kN	
	$V_{s cal}$	0 kN	497 kN	437 kN	No.1-3 は示方書による V_s に有効率 $\beta = 0.88$ を乗じた値
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}				647 / 644 = 1.00	No.1-2 試験体と No.1-3 試験体の比較による値



図Ⅱ-4.34 せん断補強鉄筋に作用する引張力の比較 (シリーズ1)

また、シリーズ2のD29の「セラミックキャップバー (CCb)」においても、セラミック定着体および周囲へ充てんされたグラウトによって、両端フックを有するせん断補強鉄筋

図表 3-8 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/9)

と同様なメカニズムでせん断補強鉄筋として機能することが確認された。そこで、シリーズ1と同様に「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率を実験に基づいて評価する。

表Ⅱ-4.2に各試験体の実験結果、および土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出した設計計算値を示す。荷重方向正側と負側でせん断耐力が若干異なるものの、「セラミックキャップバー(CCb)」による補強効果が小さい方である負側の有効率は0.93であった。これに対し、No.2-2の試験体の諸元から式(5)に基づいて以下の様に算出される有効率の設計計算値は0.88 ($d-d'=610\text{mm}$ 、 $l_y=145\text{mm}$ (5D、 $D=29\text{mm}$)) である。つまり、D29のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合でも、式(5)から算出される有効率以上のせん断補強効果が期待できることが確認された。

次に、図Ⅱ-4.35に最大せん断耐力経験時におけるせん断補強鉄筋に作用する引張力の分布について、比較したものを示す。同図より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強したNo.2-2試験体においても、通常のせん断補強を行ったNo.2-1試験体と同様に、1つの斜めひび割れに対して複数本の「セラミックキャップバー (CCb)」が規格降伏強度以上の引張力を負担していることが確認できる。

表Ⅱ-4.2 実験結果の一覧 (シリーズ2)

		No.2-1	No.2-2	備考	
補強鉄筋の種類・形状		SD345D29 両端フック	SD345D29 セラミック定着体		
せん断耐力の実験値	正側	V	1597kN	1598kN	実験における正側破壊時の 載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度 に基づく計算値
		V_s	1168kN	1164kN	$V_s=V-V_c$ として
	負側	V	1577kN	1498kN	実験における正側破壊時の 載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度 に基づく計算値
		V_s	1148kN	1064kN	$V_s=V-V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	1372kN	1263kN	計算値は、コンクリート標準 示方書〔設計編〕に基づき、安 全係数を1.0として算出し た値	
	$V_{c cal}$	429kN	434kN		
	$V_{s cal}$	943kN	829kN	No.2-2は示方書による V_s に 有効率 $\beta=0.88$ を乗じた値	
せん断補強鉄筋の有効率 B_{aw}	正側		1164/1168=1.00	No.2-1試験体とNo.2-2試験 体の比較による値	
	負側		1064/1148=0.93		

図表 3-8 実験結果に基づくCCbによるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/9)

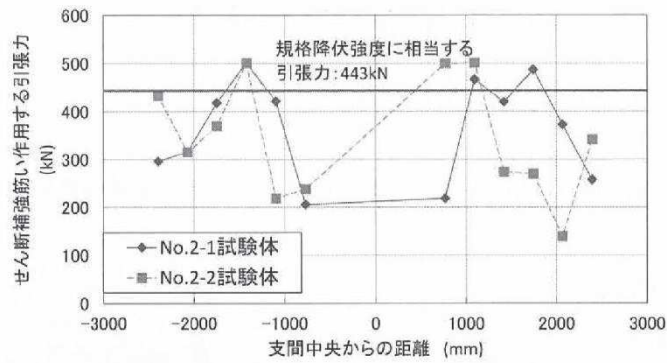


図 II-4.35 せん断補強鉄筋に作用する引張力の比較 (シリーズ 2)

以上より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を、トラス理論に基づいて算出した「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なして求められるせん断耐力負担分に、式(5)による有効率 β_{aw} を乗じて算出することは、設計上、安全側となることが分かる。

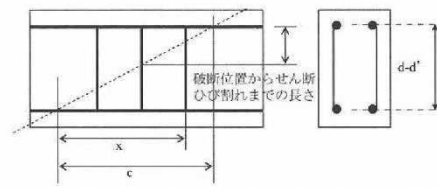
ii) 「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置および定着体の組合せによるせん断補強効果の評価

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} に対して、「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置の先端および定着体の組合せが及ぼす影響をシリーズ 3、4 の実験結果に基づいて評価する。

前述の結果より、式(5)による有効率 β_{aw} を乗じて「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を評価できる。シリーズ 3、4 における実験結果より、斜めひび割れ発生状況およびせん断補強鉄筋のせん断力負担はシリーズ 1、2 とほぼ同様であることが確認されている。つまり、埋込み位置の先端が主鉄筋の図心より手前となる「セラミックキャップバー (CCb)」や、定着体の組合せが標準型、両端先端型、両端後端型である「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力負担分を、シリーズ 1、2 と同様の手法で評価できると考えられる。

ここで、各種条件に応じた「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率算定における概念図を図 II-4.36 に示す。検討ケースは、表 II-4.3 に示すとおりである。

図表 3-8 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/9)



(a)斜めひび割れ内に定着不良が生じたせん断補強鉄筋

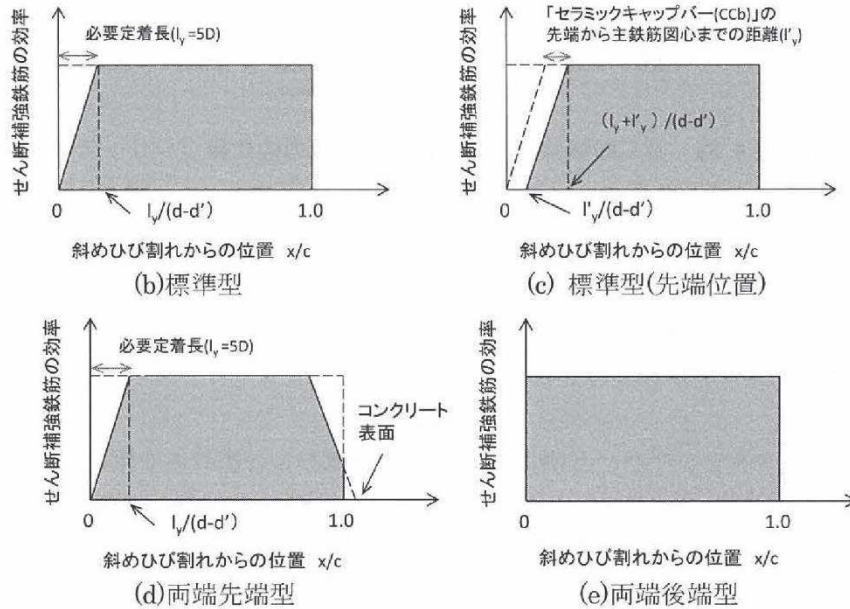


図 II - 4. 36 有効率算定の概念図

表 II - 4. 3 検討ケースの一覧

検討ケース	埋込側の定着体タイプ	差込側の定着体タイプ	埋込み位置
(b) 標準型	先端型定着体	後端型定着体	主鉄筋の図心
(c) 標準型 (先端位置)	先端型定着体	後端型定着体	主鉄筋の図心より手前
(d) 両端先端型	先端型定着体	先端型定着体	主鉄筋の図心
(e) 両端後端型	後端型定着体	後端型定着体	—

先端型定着体の先端位置が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前となる「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率は、図 II - 4. 36(c)に示すように、実際の埋込み位置から差込側の主鉄筋の図心までの範囲の有効率 (β_{awxd-f}) のみを考慮することで算出できると考えられる。

両端ともに先端型定着体を設置した「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率 (β_{awxx}) は、差込側においても埋込側と同様に、必要定着長に応じた有効率の低減を考慮すること

図表 3-8 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/9)

で評価できる。ただし、差込側の定着体は、コンクリートの表面に定着されていることを考慮して、図Ⅱ-4.36(d)に示すような有効率を算出することとする。

両端ともに後端型定着体を設置した「セラミックキャップバー (CCb)」では、両側で標準フックと同等の定着性能が期待できる。そのため、その補強効果も両端フックのせん断補強鉄筋と同様となり、有効率 (β_{awdd}) は 1.0 であると考えられることができる。

図Ⅱ-4.36 を参考に式(5)を拡張すると、それぞれのせん断補強有効率は式(9)~(11)と表すことができる。なお、両端先端型を用いて、かつ埋込み位置が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前となる場合は、式(10)に対して式(9)の算出方法を組み合わせることで式(12)により有効率 (β_{awxx-f}) を評価することができる。

$$\beta_{awdd-f} = \eta = 1 - \frac{(l_y + 2l'_y)}{2(d - d')} \dots\dots\dots (9)$$

$$\beta_{awxx} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2(d - d')} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y(d - d')} \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta_{awdd} = \eta = 1 \dots\dots\dots (11)$$

$$\beta_{awxx-f} = \eta = 1 - \frac{(l_y + 2l'_y)}{2(d - d')} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y(d - d')} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

β_{awdd-f} : 標準型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いて、その埋込み位置の先端が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前である場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awxx} : 両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awdd} : 両端後端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awxx-f} : 両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いて、その埋込み位置の先端が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前である場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

d' : 差込側の部材表面から圧縮鋼材図心までの距離

l'_y : 埋込側の主鉄筋の図心から「セラミックキャップバー (CCb)」の先端までの距離

上記の考え方の適用性を検討するために、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} をシリーズ 3、4 の実験結果に基づいて評価する。

「セラミックキャップバー (CCb)」によって負担されるせん断耐力 V_{CCb} は、式(13)に示

図表 3-8 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (7/9)

すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 V_{exp} から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。また、せん断補強鉄筋によって負担されるせん断耐力 V_s は、式(14)に示すように、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なすことで求めることができる。つまり、「セラミックキャップバー (CCb)」の鉄筋配置が決まれば、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕のせん断耐力式と同様に求められる。なお、安全係数は 1.0 とした。

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効性は、前述のように有効率 β_{aw} により評価される。有効率 β_{aw} は、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効率である。すなわち、各試験体諸元を基に通常のせん断補強鉄筋と仮定して算出されるせん断耐力 V_s と、その試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力 V_{CCb} との比として式(15)のように評価することができる。

$$V_{CCb} = V_{exp} - V_{cd} \dots\dots\dots(13)$$

$$V_s = [A_{aw} f_{awy} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / s_{aw}] z / \gamma_b \dots\dots\dots(14)$$

$$\beta_{aw} = V_{CCb} / V_s \dots\dots\dots(15)$$

ここで、

V_{CCb} : 「セラミックキャップバー (CCb)」による負担されるせん断耐力

V_{exp} : 実験で得られたせん断耐力

V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない場合のせん断耐力の計算値

V_s : 「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋とみなして求められるせん断耐力の計算値

A_{aw} : 単位長さあたりの区間 s_{aw} におけるセラミックキャップバー (CCb) の総断面積

f_{awy} : 「セラミックキャップバー (CCb)」の降伏強度で 400N/mm²以下とする

α_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」が部材軸となる角度

z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で、一般に $d/1.15$ としよ

γ_b : ここでは、1.0

β_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力の補強効果を示す有効率

表Ⅱ-4.4 にシリーズ 3、4 における実験結果の一覧を示す。有効率 β_{aw} は、正側載荷時および負側載荷時についてそれぞれ算出した。また、梁の正負交番載荷実験において、最初にせん断破壊した載荷方向におけるせん断耐力に表中に下線で示す。実験から得られた最初にせん断破壊した側の有効率 β_{aw} は、式(9)~(12)で算出される有効率 β_{aw} よりも、い

図表 3-8 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (8/9)

れの試験ケースにおいても大きな値であることが分かる。つまり、「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置の先端および定着体の組合せが異なる場合においても、式(9)~(12)から算出される有効率 β_{aw} 以上のせん断補強効果が期待できることが確認された。

以上より、鉄筋の埋込み位置の先端および定着体の組合せが異なる場合においても、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を、トラス理論に基づいて算出した「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なして求められるせん断耐力負担分に、式(9)~(12)による有効率 β_{aw} を乗じて算出することは、設計上、安全側となることが分かる。

表 II-4.4 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 β_{aw} (V_{CCb}/V_s)			有効率の設計値 β_{aw}
			正側	負側	V_{cal}	V_{cd}	V_s	正側	負側	正側	負側	平均	
	定着体の組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}									
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	<u>563</u>	<u>499</u>	542	253	289	310	246	<u>1.07</u>	0.85	0.96	0.83
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	<u>497</u>	<u>526</u>	543	254	289	243	272	<u>0.84</u>	<u>0.94</u>	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	<u>1.02</u>	<u>0.98</u>	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	<u>0.98</u>	<u>1.03</u>	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	<u>1.05</u>	<u>1.08</u>	1.06	0.78
No.4-4	両端後端型	—	661	568	525	235	290	426	333	<u>1.47</u>	<u>1.15</u>	1.31	1.00

※1 下線は正負交番荷重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、その荷重方向での最大荷重を示す

図表 3-8 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (9/9)

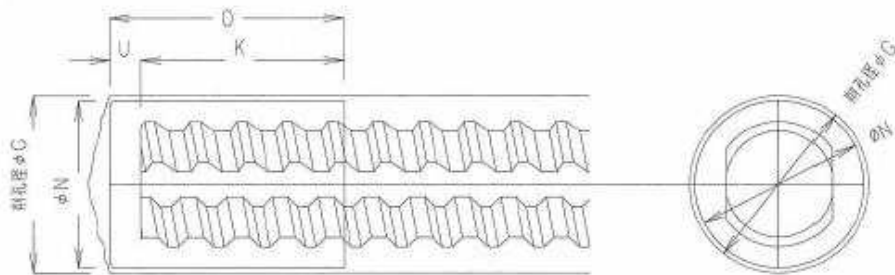
3.3.2 使用材料・強度

実験を元にした本設計法では、図表 3-9 に示すとおり使用材料を定めている。今回の設計でも、これらに適合する使用材料・強度を用いる。

- | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(1) セラミックキャップパー（CCb）工法は、使用の目的に対してせん断耐力が不足する部材のせん断補強および地震時のじん性が不足する部材のじん性確保などの目的に使用する。</p> <p>(2) セラミックキャップパー（CCb）工法の適用範囲は、以下の条件に該当するものとする。</p> <ul style="list-style-type: none">・主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。・両側からの施工が可能な既設のコンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

図表 3-9 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/6)

セラミックキャップバー (CCb) は、D32、D29、D25、D22、D19、D16、D13のねじ鉄筋の両端に高純度アルミナ系セラミック製のキャップを設け定着体をなす構造とする。先端型・後端型の定着体の例、およびねじ鉄筋の寸法を図-2.1~2.3に示す。



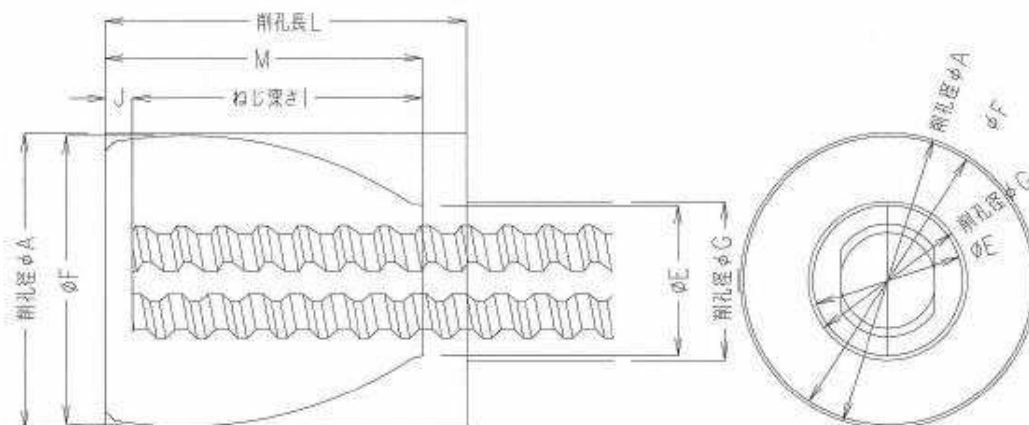
呼び名	削孔寸法	
	削孔径 φG mm	継手仕様時 削孔径 φG mm
D13	30.0	30.0
D16	30.0	34.0
D19	34.0	36.0
D22	36.0	40.0
D25	46.0	46.0
D29	50.0	50.0
D32	55.0	55.0

呼び名	定着体の寸法			
	φN mm	O mm	ねじ深さK mm	U mm
D13	25.0	36.0	30.0	6.0
D16	27.0	46.0	40.0	6.0
D19	30.0	46.0	40.0	6.0
D22	33.0	46.0	40.0	6.0
D25	42.0	52.0	46.0	6.0
D29	45.0	59.0	53.0	6.0
D32	50.0	64.0	58.0	6.0

【先端型定着体 (CX)】

図-2.1 セラミック定着体、ねじ鉄筋の例 (その1)

図表 3-9 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/6)



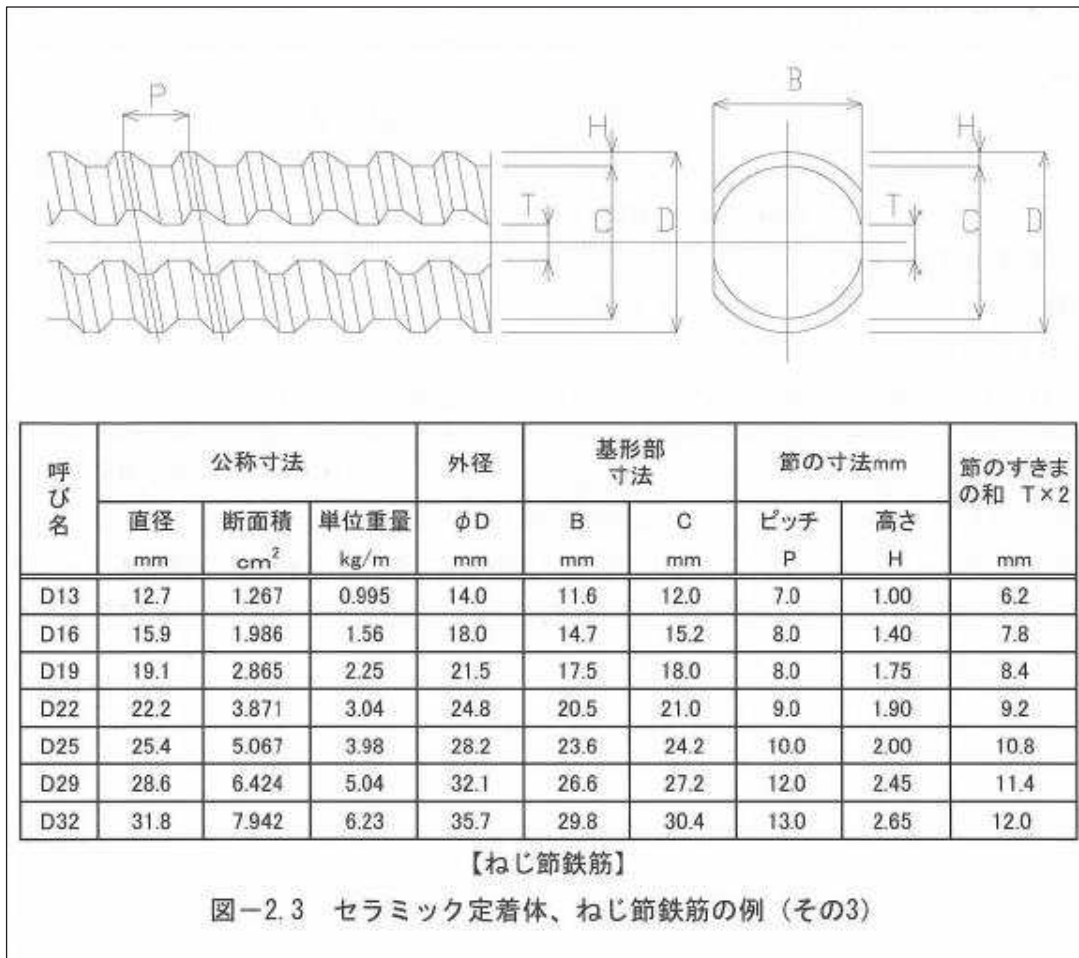
呼び名	削孔寸法		
	削孔径φA mm	削孔径φG mm	削孔長L mm
D13	60.0	30.0	80.0
D16	60.0	30.0	80.0
D19	65.0	34.0	80.0
D22	65.0	36.0	80.0
D25	70.0	46.0	80.0
D29	75.0	50.0	80.0
D32	75.0	55.0	80.0

呼び名	定着体の寸法				
	φF mm	φE mm	M mm	ねじ深さ mm	J mm
D13	53.5	22.0	70.0	64.0	6.0
D16	55.5	25.0	70.0	64.0	6.0
D19	58.5	29.0	70.0	64.0	6.0
D22	62.5	32.0	70.0	64.0	6.0
D25	65.5	35.0	70.0	64.0	6.0
D29	69.5	39.0	70.0	64.0	6.0
D32	72.5	42.0	70.0	64.0	6.0

【後端型定着体(CD)】

図-2.2 セラミック定着体、ねじ筋鉄筋の例 (その2)

図表 3-9 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/6)



図表 3-9 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/6)

セラミック定着体は、JIS R 1600 に示すファインセラミックスに分類されるセラミックにて製作されており、顆粒物性においてアルミナ純度 96% 以上のアルミナ材で、焼成体物性において 300N/mm² 以上の曲げ強度 (JIS R 1601) を製造会社が保証するものを用いることを原則としている。

セラミック定着体の寸法、ねじ節強度及び密度については、以下のとおり品質管理基準を定めている。

・セラミック定着体			
解説表-3.4 セラミック定着体の品質管理基準			
管理項目	管理内容	規格値	管理頻度
最外径	ノギスによる計測	(D13~D25) 先端型：設計値±0.8mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。
全高	ノギスによる計測	(D13~D25) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.2mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。
ねじ部長さ	測定治具による計測	(D13~D25) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。
ねじ節強度	ねじ節強度試験	母材となるねじ節鉄筋の規格降伏強度相当以上	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 3 体。
密度	密度試験	<ul style="list-style-type: none"> ・製造者から発行される材料証明書の密度との誤差が ±0.05g/cm³ 以内 ・各試験値が平均値の ±1.5% 以内 ・各試験値が 3.75 g/cm³ 以上 	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。

図表 3-9 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/6)

(1) セラミックキャップバー (CCb)

セラミックキャップバー (CCb) を構成するねじ鉄筋は、JIS G 3112に準拠したネジテツコン (東京鐵鋼株式会社製ねじ鉄筋) で、種類はSD295A、SD295B、SD345とし、呼び名はD32、D29、D25、D22、D19、D16、D13とする。特性値 f_{yk} および f_{uk} はJIS G 3112の下限值としてよい。また、限界状態の検討に用いる異形鉄筋の断面積は、JIS G 3112による各呼び名の公称断面積としてよい。

(2) 充てん材

充てん材は補強する構造体コンクリートと同等な性能であるとする。

図表 3-9 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/6)

3.3.3 構造部材の評価

3.3.1 で示した基本的考え方に基づき、図表 3-10 で示すコンクリート標準示方書[設計編]（土木学会、2012）（以下、コンクリート標準示方書（2012）という）の考え方を準用した設計式を用いてせん断耐力を定めている。

セラミックキャップバー（CCb）により補強された壁部材のせん断耐力が作用するせん断力より大きいことを確認することにより、補強後の構造物の安全性の照査を行う。

セラミックキャップバー（CCb）により補強された壁部材の単位長さ当たりのせん断耐力 V_{pyd} は、式(1)と式(2)によりセラミックキャップバー（CCb）のせん断耐力への寄与を考慮し、2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準] 3編 2.4.3.2に準じて、以下のように求めてよい。

$$V_{pyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{CCbd} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{CCbd} = \beta_{aw} \cdot V_{awd} = \beta_{aw} [A_{aw} \cdot f_{awyd} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / S_{aw}] z / \gamma_b \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta_{awxd} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2S_{rb}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta_{awxx} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2S_{rb}} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y S_{rb}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta_{awdd} = \eta = 1 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 V_{cd} ：せん断補強鋼材を用いない壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{sd} ：既存のせん断補強鋼材により受け持たれる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{CCbd} ：セラミックキャップバー（CCb）により受け持たれる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{awd} ：セラミックキャップバー（CCb）を通常のスターラップとみなして求められる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 β_{aw} ：セラミックキャップバー（CCb）のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awxd} ：標準型のセラミックキャップバー（CCb）を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awxx} ：両端先端型のセラミックキャップバー（CCb）を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awdd} ：両端後端型のセラミックキャップバー（CCb）を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 A_{aw} ：単位長さあたりの区間 S_{aw} におけるセラミックキャップバー（CCb）の総断面積
 f_{awyd} ：セラミックキャップバー（CCb）の設計降伏強度で 400N/mm^2 以下とする

図表 3-10 せん断に対する安全性照査
 （建設技術審査証明報告書より抜粋）（1/2）

α_{aw} : セラミックキャップバー (CCb) が部材軸となす角度
 S_{aw} : セラミックキャップバー (CCb) の配置間隔
 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で一般に $d/1.15$ としてよい
 γ_b : 部材係数 (一般に 1.10 としてよい)
 l_y : セラミックキャップバー (CCb) の先端型定着体の定着長 (5D としてよい)
 S_{rb} : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔

図表 3-10 せん断に対する安全性照査
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.3.4 構造細目

本設計方法では、想定外の破壊形式をとらないように、図表 3-11 で示す構造細目を定めている。

- | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(1) セラミックキャップバー (CCb) によって補強された壁部材では、補強前に配置されていたせん断補強鉄筋とセラミックキャップバー (CCb) を加えたせん断補強鉄筋の断面積比が0.15%以上になるように、セラミックキャップバー (CCb) を配置する。</p> <p>(2) セラミックキャップバー (CCb) を配置する最大の間隔は、補強前に配置されていたせん断補強鉄筋の位置も含めて、壁部材の有効高さの1/2でかつ300mm以下としなければならない。また、計算上でセラミックキャップバー (CCb) による補強を必要とする区間の外側の有効高さに等しい区間にも、これと同量のセラミックキャップバー (CCb) を配置しなければならない。</p> <p>(3) 差込側のセラミック定着体は、差込側のコンクリート表面に配置することを標準とする。</p> <p>(4) 埋込側の先端は、主鉄筋の中心まで配置することを原則とする。ただし、掘削孔の先端から埋込側の表面まで厚さは50mm以上とする。</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

図表 3-11 構造細目 (建設技術審査証明報告書より抜粋)

3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認

3.4.1 施工の確実性

建設技術審査証明報告書において確認されている、CCbの施工の確実性について、図表3-12に示す。

背面に地盤などがあり、片側からしか施工できないRC部材に対して、補強後の掘削孔内にエア抜き用ホースを残置せずにせん断補強できることが確認された。

両側からの施工が可能な既設鉄筋コンクリート部材に対し、両端に後端型定着体を設置する場合、片方のセラミック定着体をグラウト中で接合することで、施工が確実に進められることが確認された。

図表 3-12 施工の確実性
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

3.4.2 施工の容易性

建設技術審査証明報告書において確認されている、CCbの施工の容易性について、図表3-13に示す。

狭あいな空間や複雑な部位において、大型機材を用いずに容易に施工でき、安定した品質を確保できることが確認された。

挿入する「セラミックキャップバー (CCb)」の長さを確保できないような狭あいな空間での施工においても、カプラーによる機械式継手を用いて、安定した品質の作業を容易に施工できることが確認された。

図表 3-13 施工の容易性
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

3.4.3 CCbの施工手順の設定

建設技術審査証明報告書において設定されている、CCbの施工手順について、図表3-14に示す。

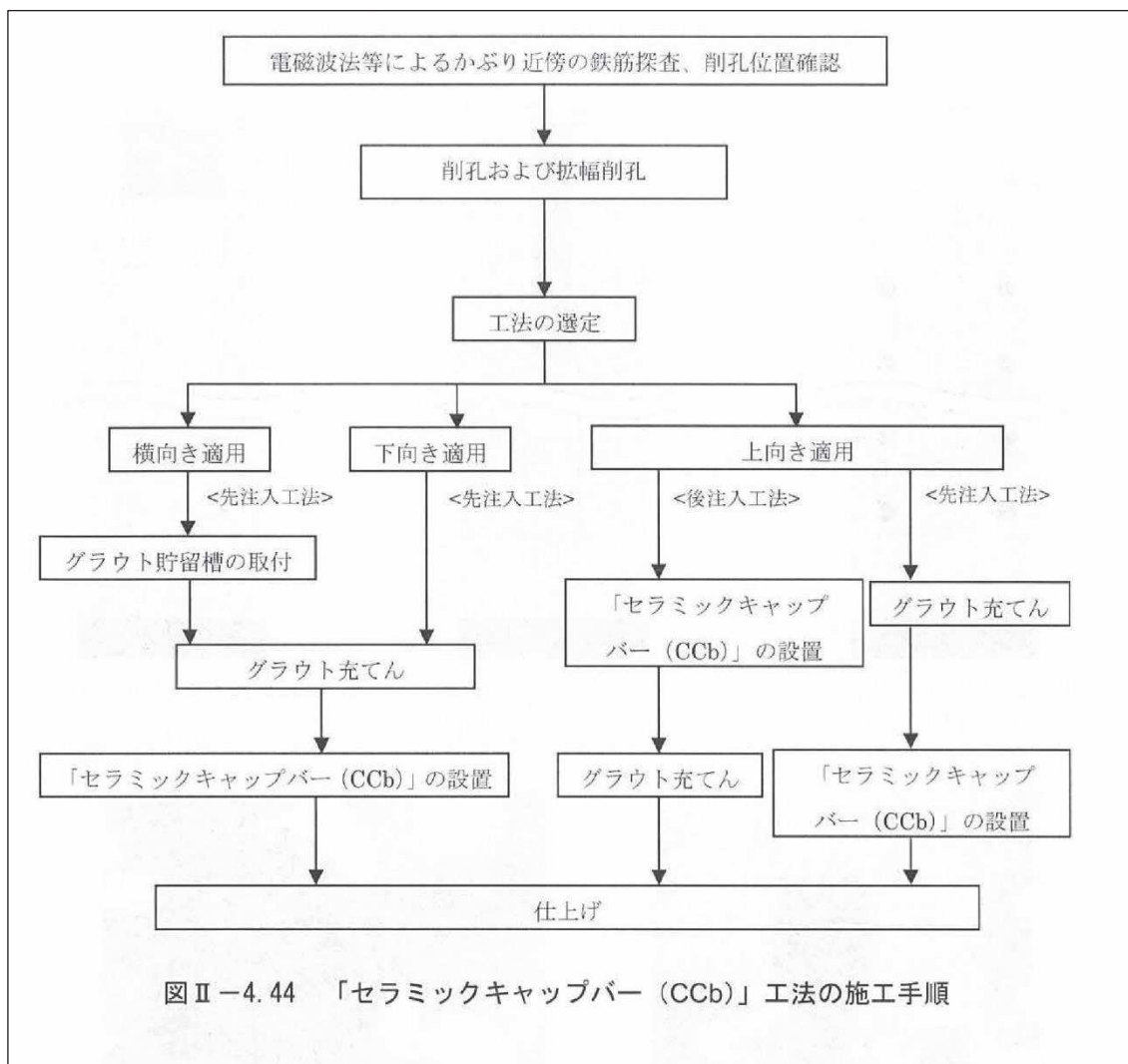
片側からしか補強施工できない部材について、鉛直下向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む手順、および横向きあるいは鉛直上向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む手順を設定し、この工事に必要な施工要素を確認した。

横向きあるいは鉛直下向き、上向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む場合 (先充てん後挿入)、および鉛直上向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む場合 (先挿入後充てん) の各々の工法における施工手順を図Ⅱ-4.44に、設置方法の例を図Ⅱ-4.45～図Ⅱ-4.54に示す。

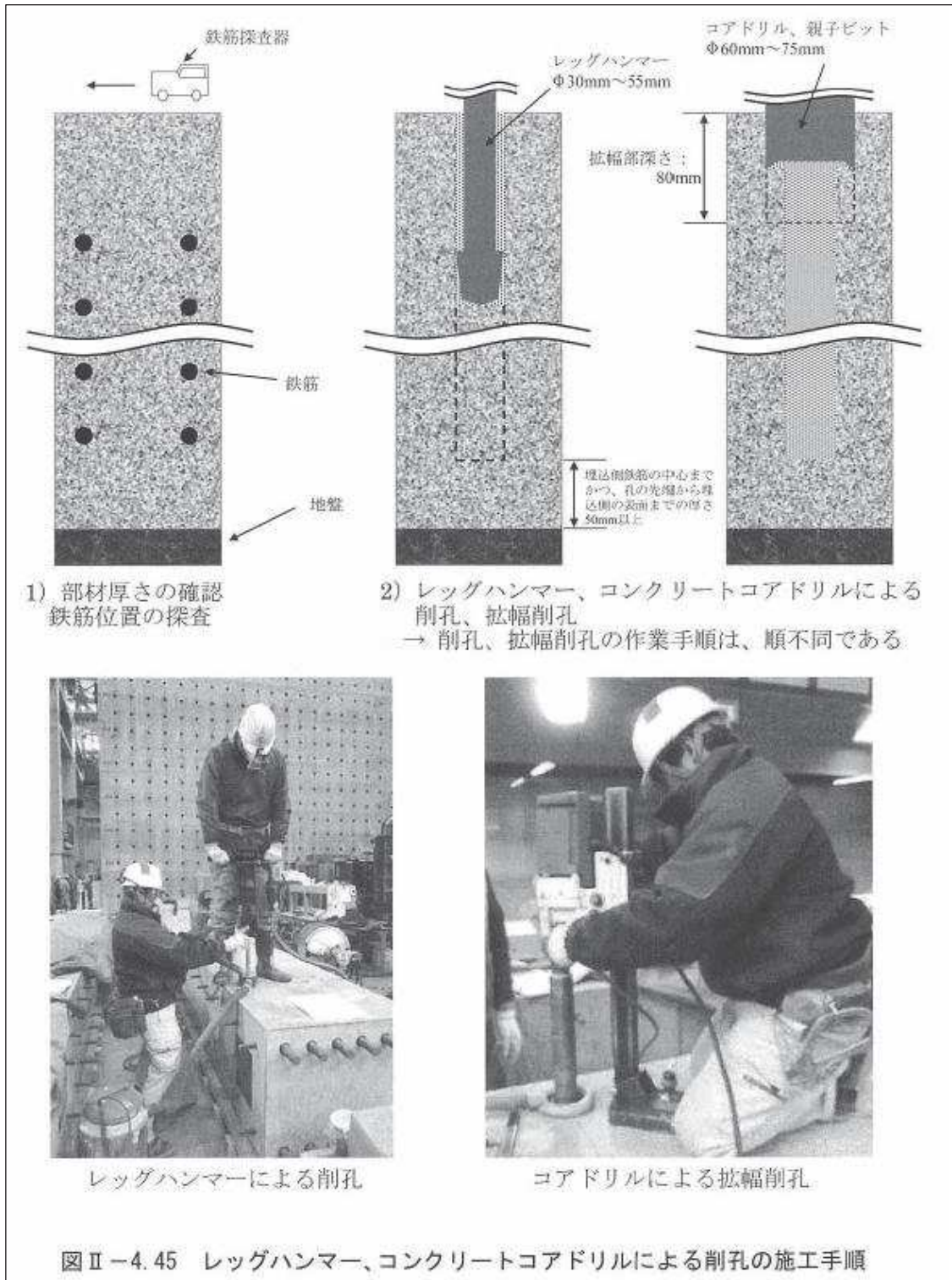
両側からの施工が可能な部材に対する設置方法の例を図Ⅱ-4.55～図Ⅱ-4.57に示す。

さらに、カプラーによる機械式継手を使用し、接続しながら、「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む場合の設置方法の例を図Ⅱ-4.58、59に示す。

図表 3-14 CCbの施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/14)



図表 3-14 CCb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/14)

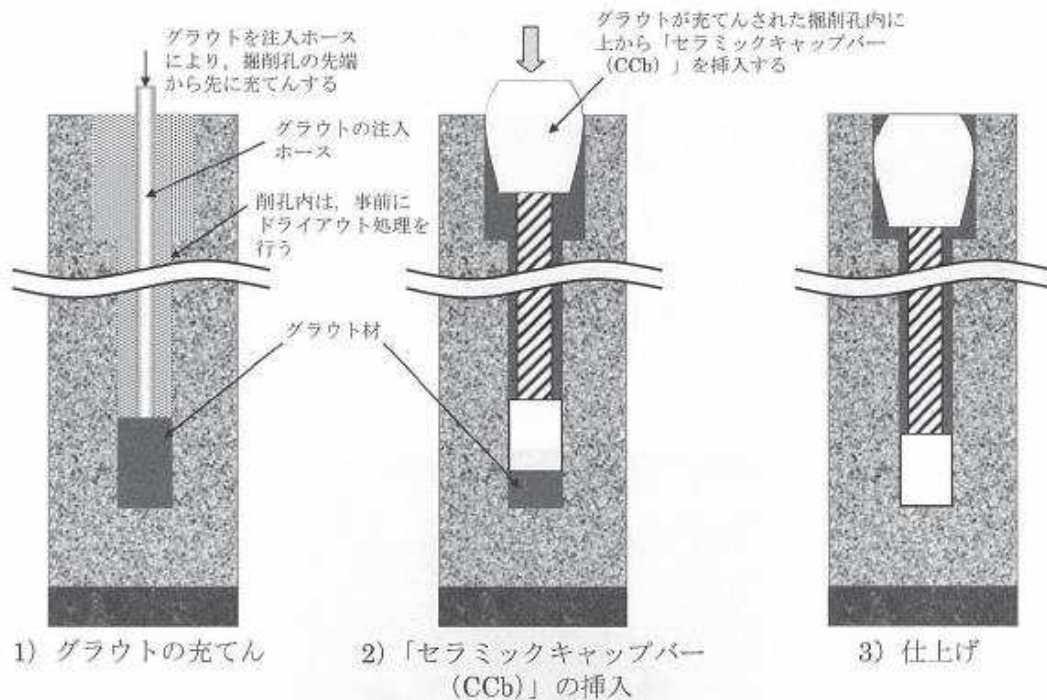


図表 3-14 Ccb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/14)



拡幅削孔用親子ビット

図Ⅱ-4.46 親子ビットを用いたレッグハンマーによる削孔の施工手順



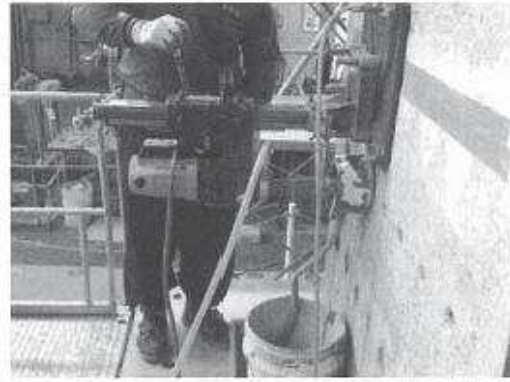
「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入

図Ⅱ-4.47 先充てん後挿入法 (下向き) の施工手順

図表 3-14 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/14)

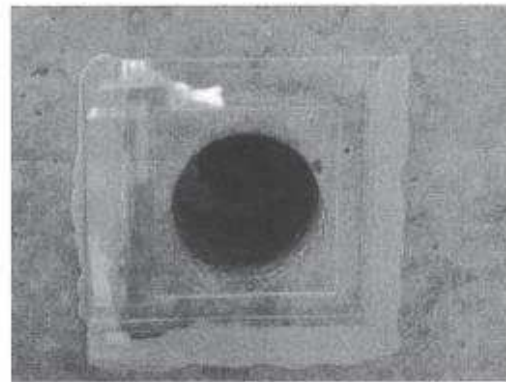
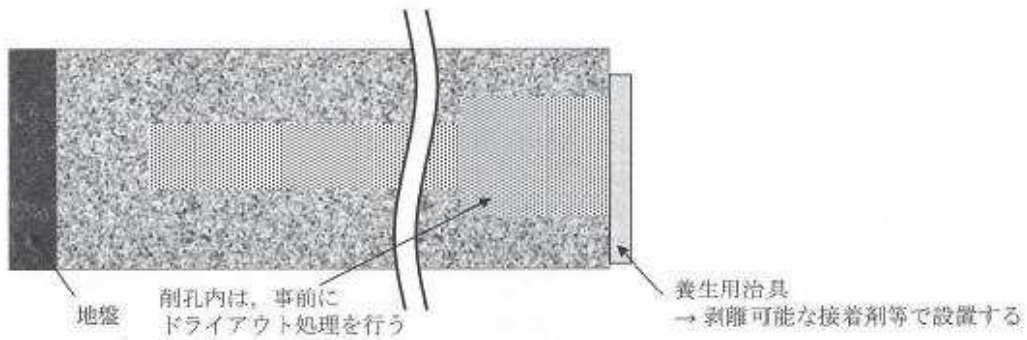


レッグハンマーによる削孔



コンクリートコアドリルによる拡張削孔

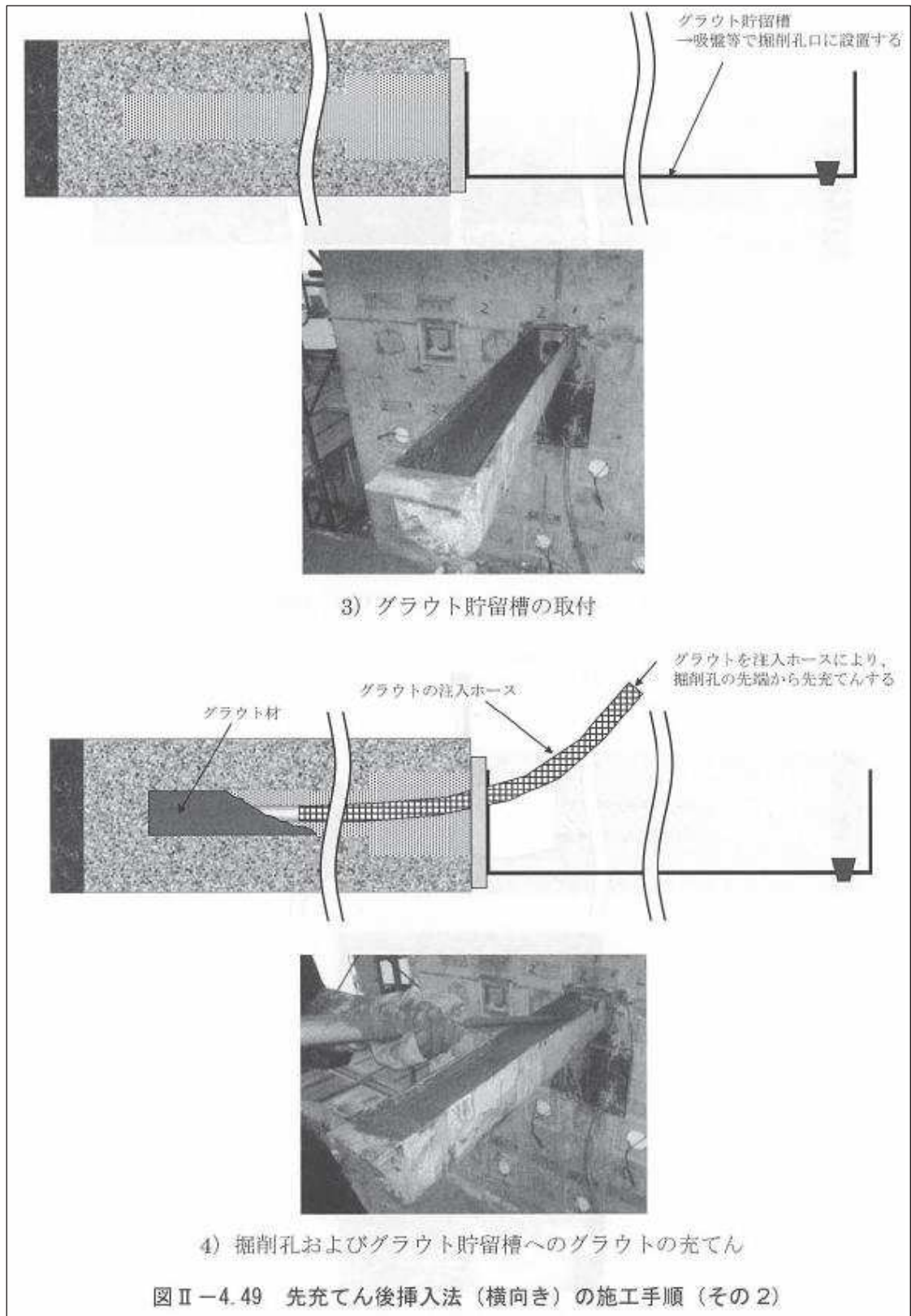
1) 削孔 (手順は下向き施工と同様)



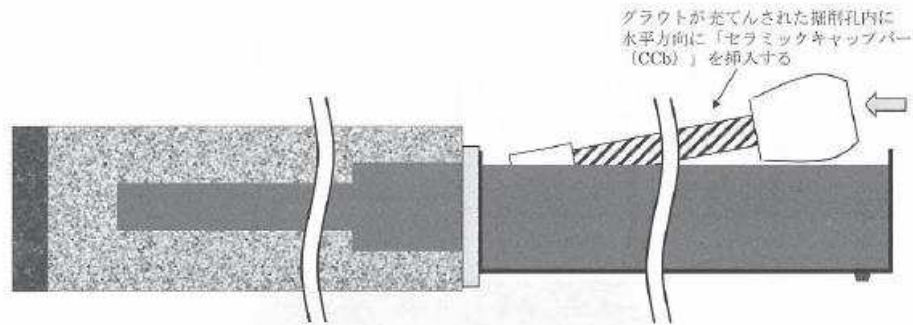
2) 養生用治具の取付け

図Ⅱ-4.48 先充てん後挿入法 (横向き) の施工手順 (その1)

図表 3-14 Ccb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/14)

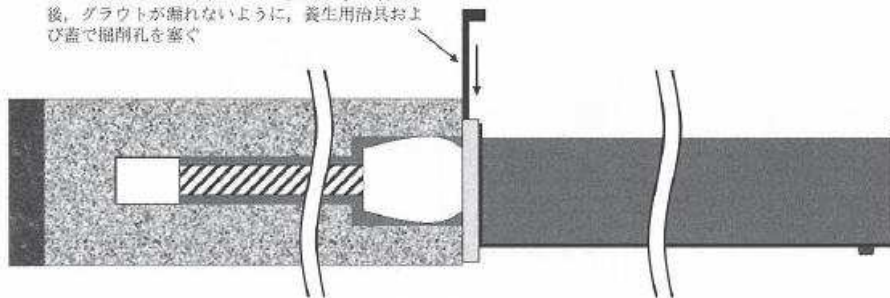


図表 3-14 Ccb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/14)



5) 「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入

養生用蓋
 →「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入
 後、グラウトが無れないように、養生用治具および蓋で掘削孔を塞ぐ



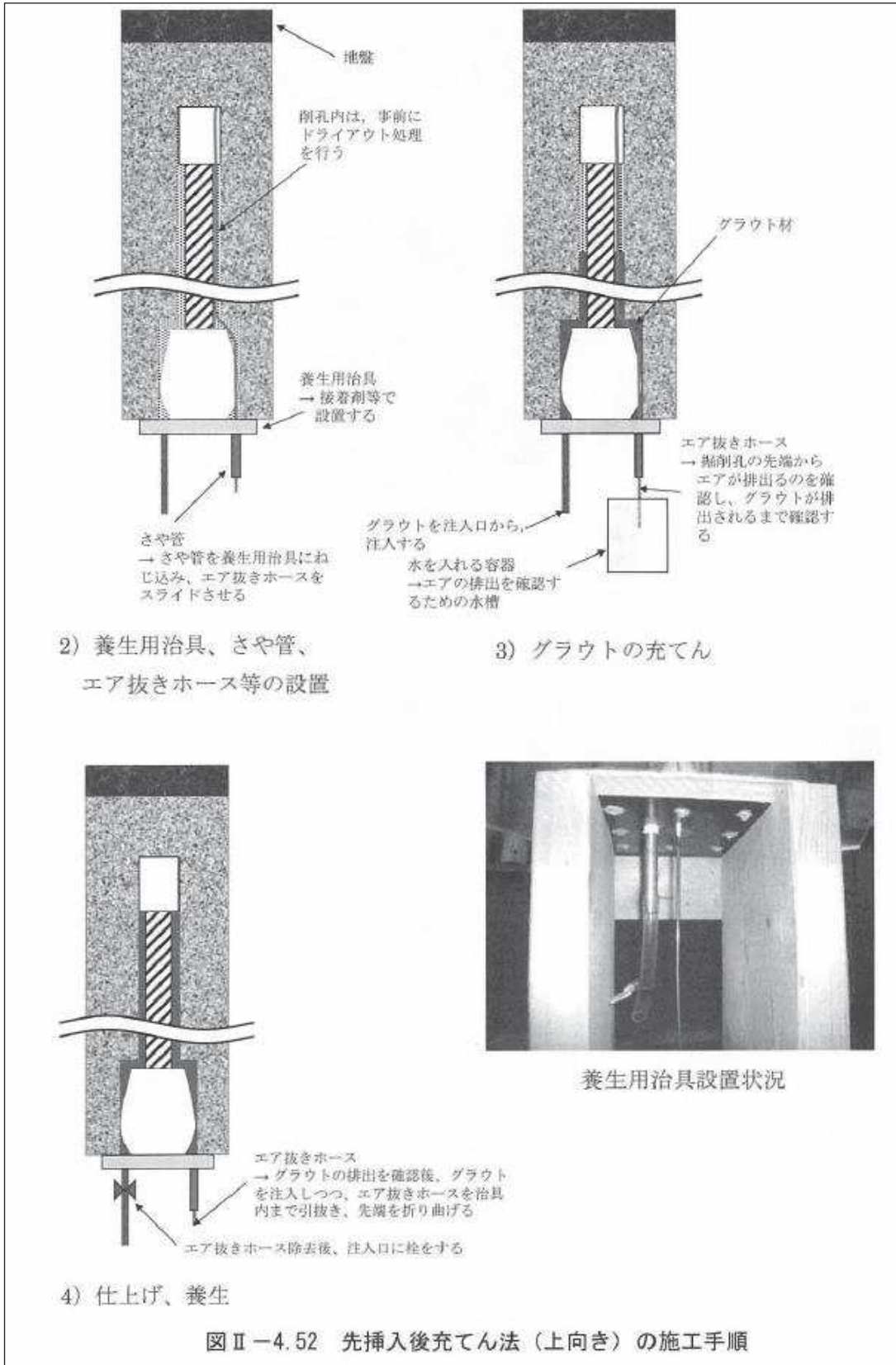
6) 養生用蓋の設置

図Ⅱ-4.50 先充てん後挿入法 (横向き) の施工手順 (その3)

図表 3-14 CCb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (7/14)

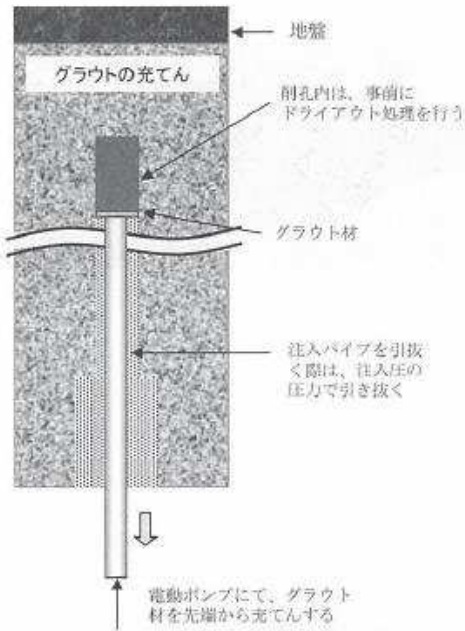


図表 3-14 CCb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (8/14)

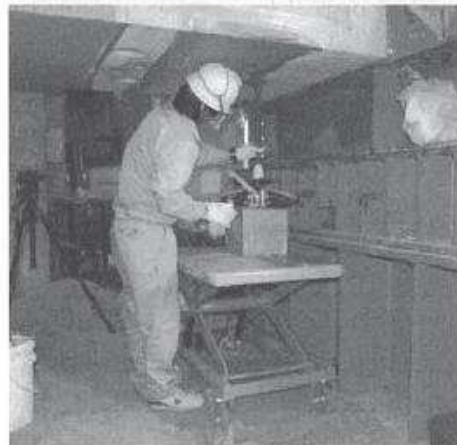
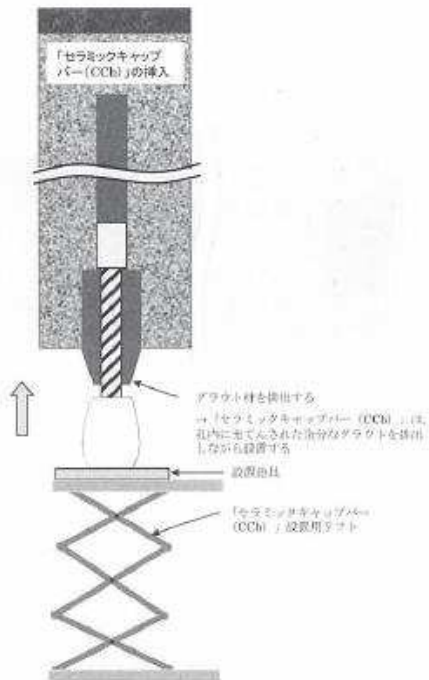


図表 3-14 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (9/14)

1) 削孔 (手順は下向き施工と同様)



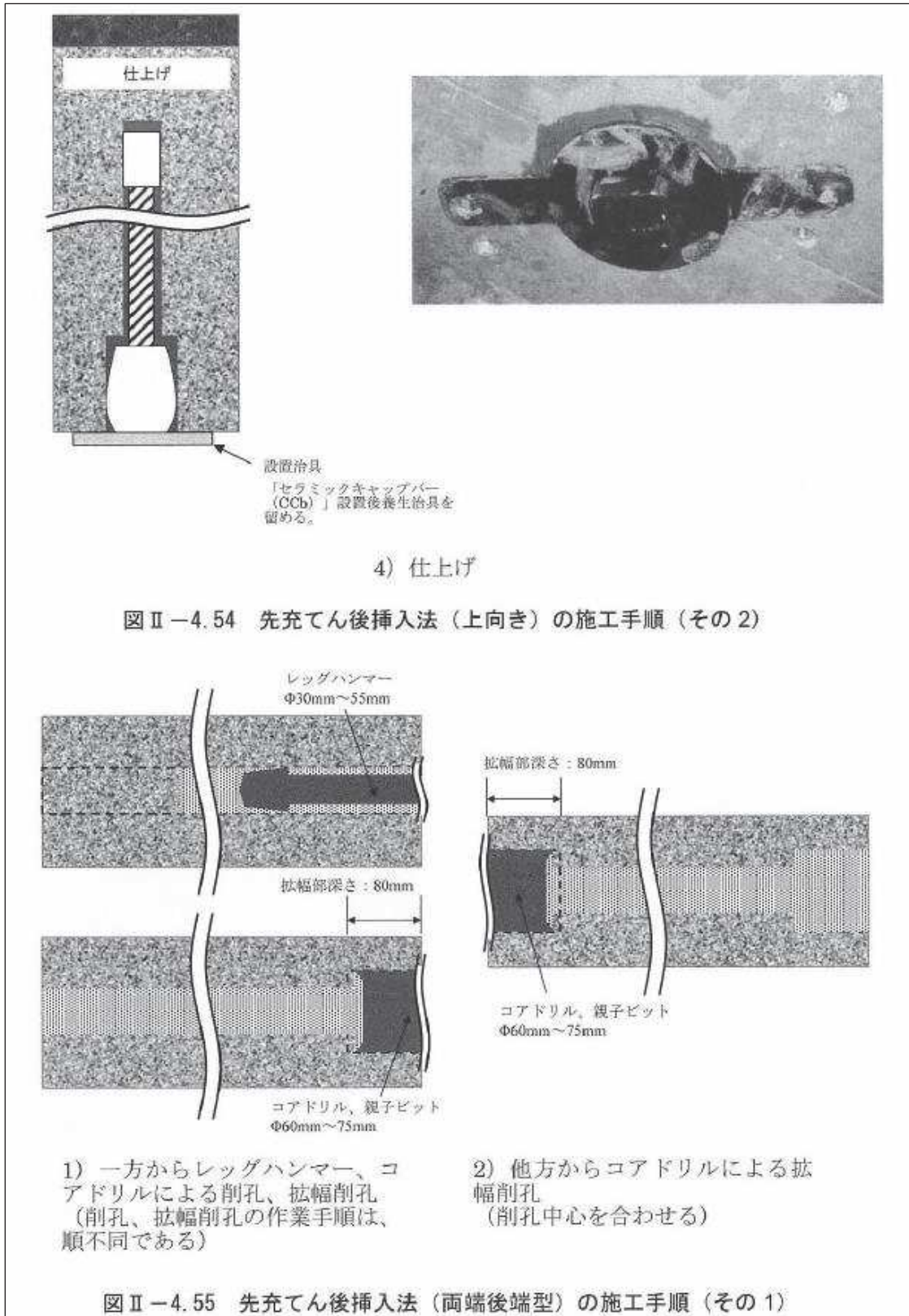
2) グラウトの充てん



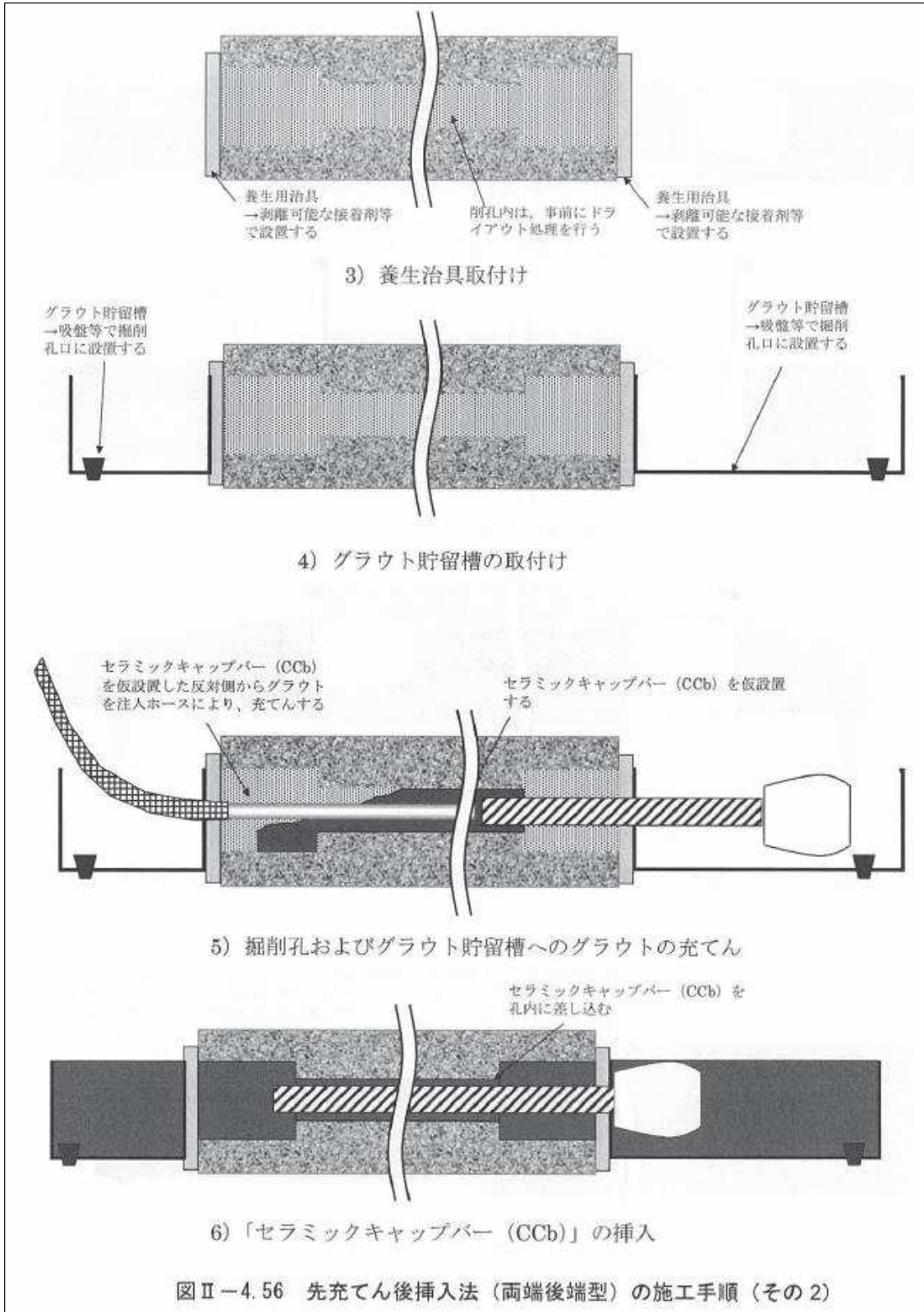
3) 「セラミックキャップバー (CCb)」設置例

図Ⅱ-4.53 先充てん後挿入法 (上向き) の施工手順 (その 1)

図表 3-14 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (10/14)



図表 3-14 Ccb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (11/14)



図表 3-14 Ccb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (12/14)

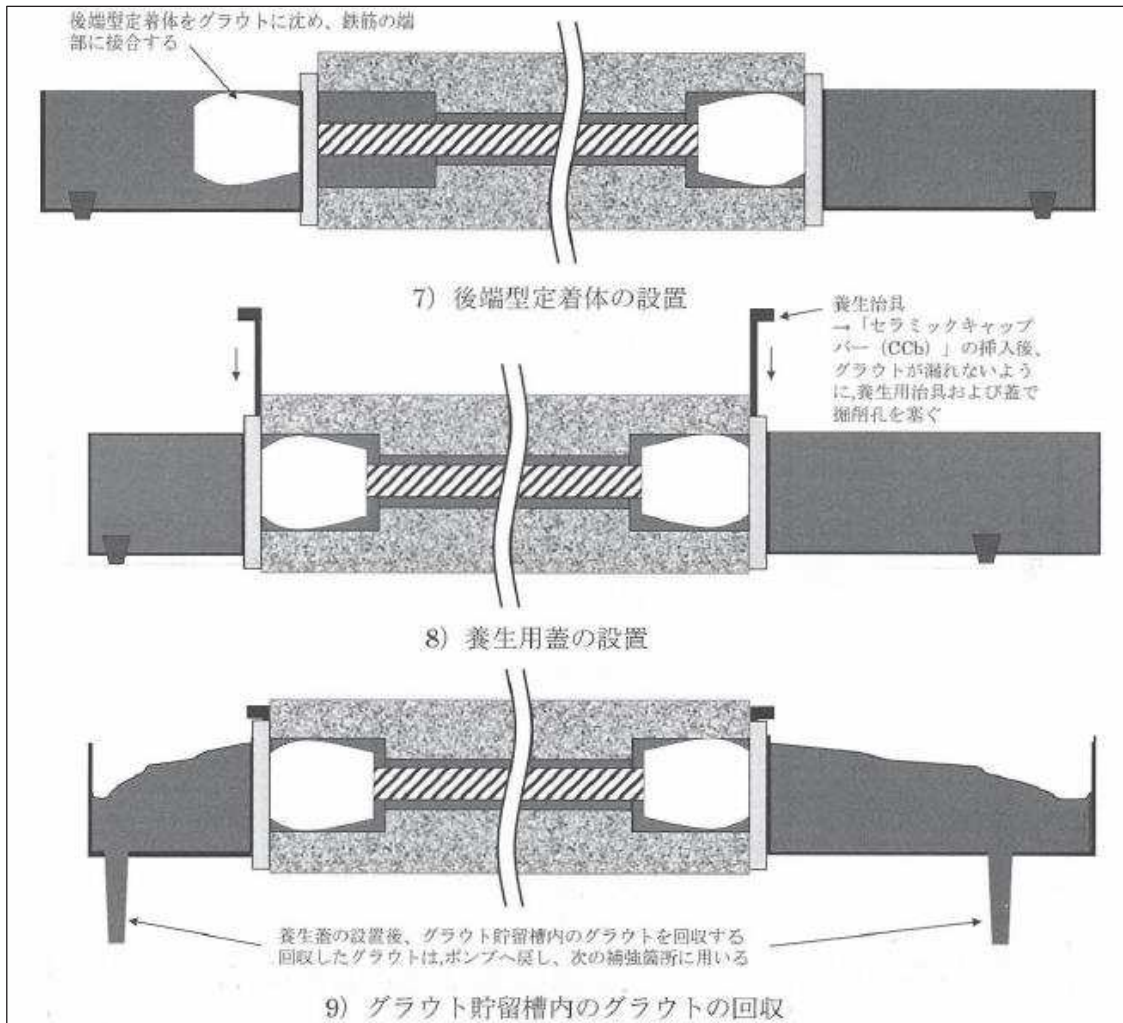


図 II-4.57 先充てん後挿入法（両端後端型）の施工手順（その 3） 図 II-4.37

1) 削孔（手順は下向き施工と同様）

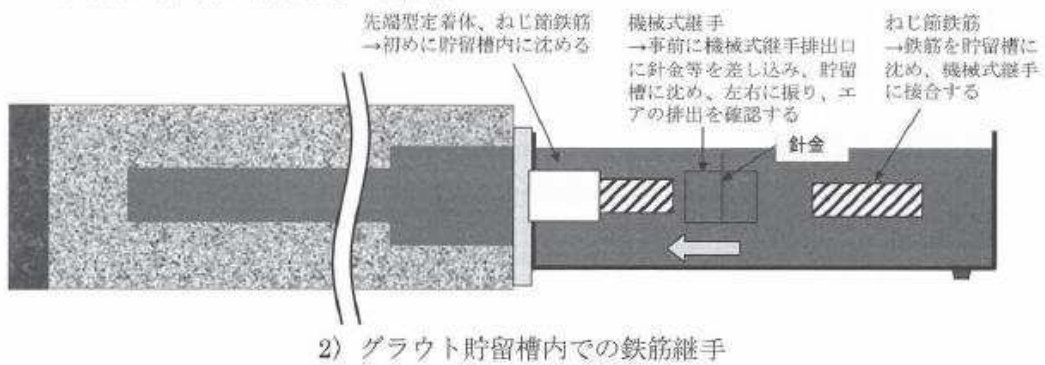
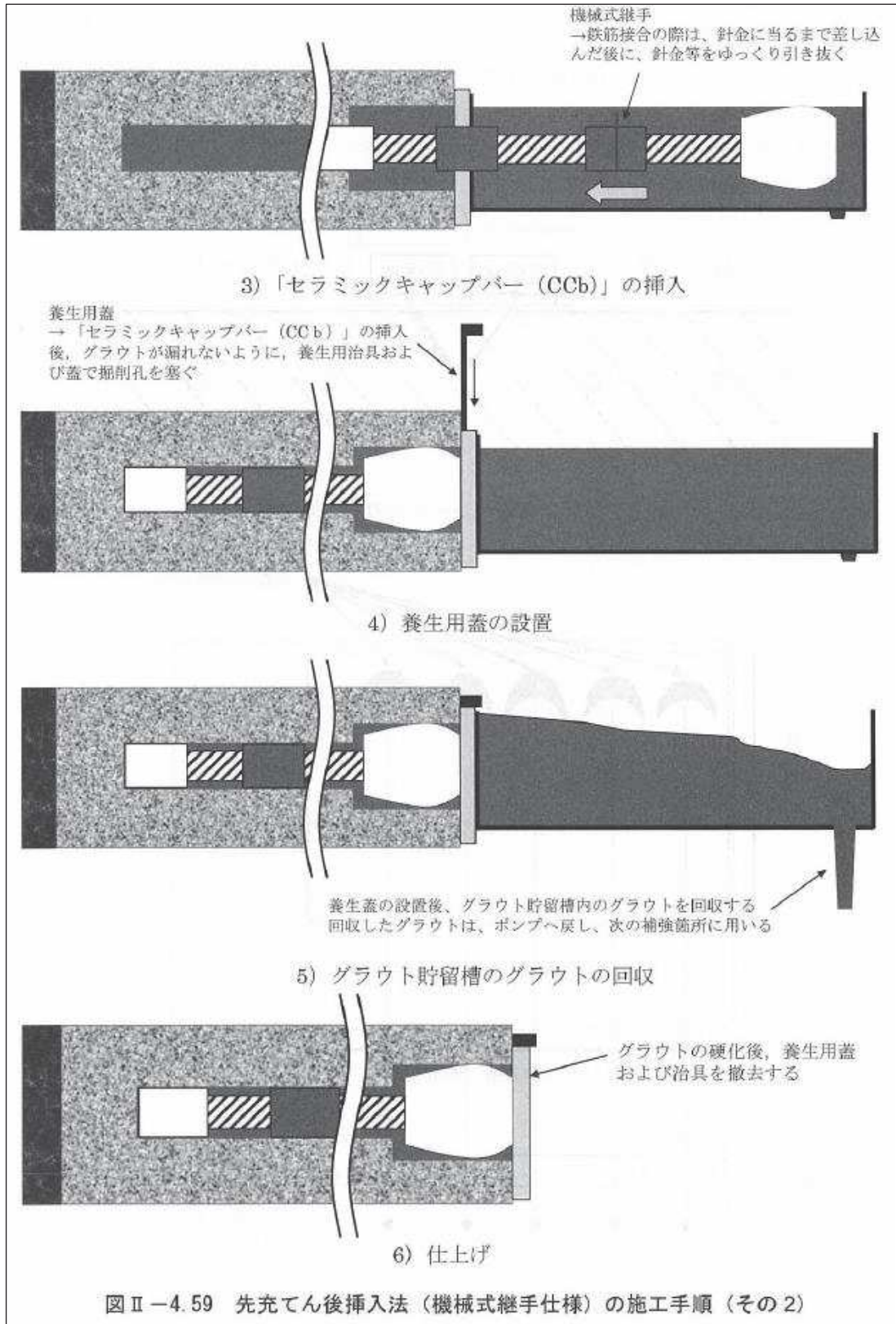


図 II-4.58 先充てん後挿入法（機械式継手仕様）の施工手順（その 1）

図表 3-14 CCb の施工手順の設定
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（13/14）



図表 3-14 CcB の施工手順の設定
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（14/14）

4. 女川原子力発電所 2 号炉における CCb の適用性確認

4.1 方針

CCb 工法は、建設技術審査証明報告書により後施工せん断補強方法としての有効性が証明されており、また、これまでに数多くの施工実績がある。CCb 工法を女川原子力発電所 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、女川原子力発電所 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確認する。確認フローを図表 4-1 に示す。

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。その際、建設技術審査証明報告書に記載されている審査証明の範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出する。

② 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

女川原子力発電所 2 号炉の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

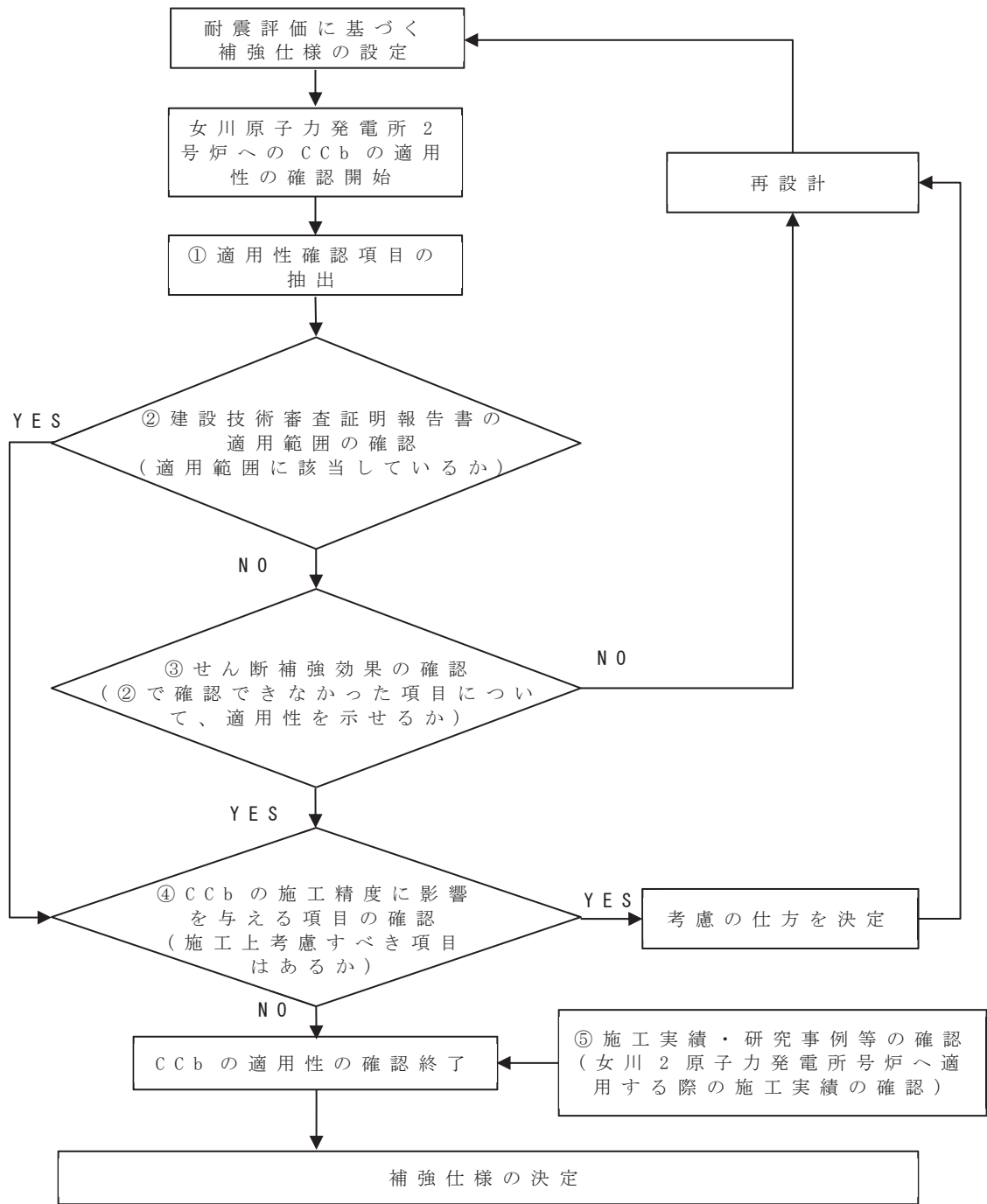
①で挙げた適用性確認項目のうち②で確認できていない項目について、適用性の確認を実施する。適用性確認の際は、せん断補強効果が期待できるかという点について検討する。

④ CCb の施工精度に影響を与える項目の確認

女川原子力発電所 2 号炉の図表 1-1 に示す構造物に対して、CCb 工法の施工を行う際に、考慮しておくべき事項がないか確認を行う。考慮しておく事項がある場合は、施工上または設計上どのように考慮するかを決定したうえで、必要により再設計を実施するか適宜判断を行う。

⑤ 施工実績・研究事例等の確認

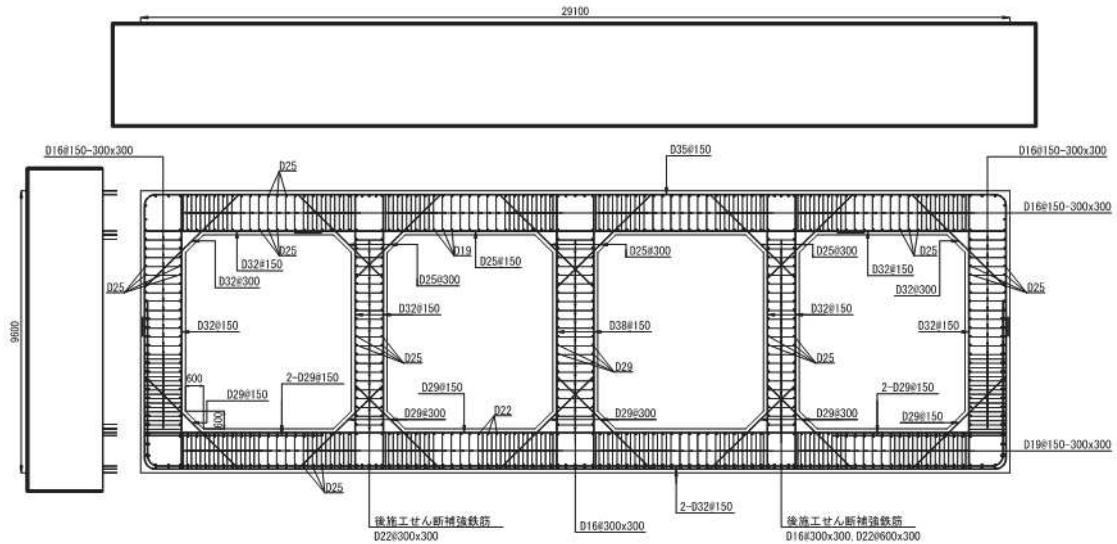
後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について、要旨、着目すべき事項を整理し、女川原子力発電所 2 号炉への後施工せん断補強工法及び CCb 工法の適用性を検討する。



図表 4-1 CCb の適用性確認フロー

4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定

耐震安全性評価を実施し、各部材において不足するせん断耐力を満足するように設定した結果の一例として、取水路（漸拡部）での補強仕様※を図表 4-2 に示す。



図表 4-2 取水路（漸拡部）の補強仕様

※：補強仕様については、今後変更となる可能性がある。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

4.3 適用性確認項目の抽出

CCb 工法の特徴及び女川原子力発電所 2 号炉固有の条件等の観点から、適用性を確認するために必要な検討項目を抽出する。以下に確認項目を挙げる。

- ① 使用目的
建設技術審査証明報告書に明記されている目的に該当している必要がある。
- ② 構造形式
建設技術審査証明報告書において想定している構造形式に該当している必要がある。
- ③ 構造細目
CCb 工法では、想定外の破壊形式とならないように建設技術審査証明報告書において規定している構造細目に該当している必要がある。
- ④ 部材諸元
部材厚については、建設技術審査証明報告書内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であることを確認する。
せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度については、応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内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ことを確認する。
- ⑤ 使用材料（せん断補強鉄筋）
せん断補強鉄筋は、建設技術審査証明報告書において規定しているとおり、JIS G 3112 に準拠した熱間圧延異形棒鋼ネジテツコン（東京鐵鋼株式会社製）で、鉄筋の種類は SD295A、SD295B、SD345 とし、呼び名は D32、D29、D25、D22、D19、D16、D13 とする。
- ⑥ 使用材料（セラミック製定着体）
建設技術審査証明報告書において確認されている材料を用いる必要がある。
- ⑦ 使用材料（充てん材）
応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等である必要がある。
- ⑧ 載荷方法
応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内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ことを確認する。

- ⑨ せん断補強鉄筋の定着長
建設技術審査証明報告書において設定している定着長を考慮して設計している必要がある。
- ⑩ 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、特異なせん断ひび割れが発生しないことを数値解析にて確認する。
- ⑪ 定着体部における定着機能の保持
CCbの特徴として、せん断補強筋端部の定着機構があげられる。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。そのため、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る。
定着体部の定着機能を阻害するおそれがある要因として、定着体部に生じるひび割れがある。よって、女川原子力発電所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、建設技術審査証明報告書の実験で確認されているひび割れと同様であることと、定着体部にひび割れ（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ひび割れ）が発生した状況下においても定着体部の定着機能が保持されていることを確認する。
- ⑫ 変形量
変形に伴うかぶりコンクリート部の剥落によって、CCbの定着体部の定着機能を阻害するおそれがある。
また、建設技術審査証明報告書では、CCbの適用範囲として「地震時の変形量が限定される地中構造物等」とされているが、変形量に関する定量的な影響検討は行われていない。
よって、変形量に対しては、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する。
- ⑬ 使用環境
女川原子力発電所2号炉固有の使用環境として、取水路（漸拡部）は海水に接することが挙げられることから、海水環境下相当での実績があることを確認する。
- ⑭ CCbを適用した部材のコンクリートの健全性
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。

4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

CCb 工法の適用について、建設技術審査証明報告書に記載の使用目的、構造形式、構造細目、使用材料、せん断補強鉄筋の定着長、変形量及び使用環境の確認結果を以下に示す。

(1) 使用目的・使用材料・せん断補強鉄筋の定着長（図表 4-3 参照）

① 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している。

② 使用材料（せん断補強鉄筋、セラミック製定着体、充てん材）

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している。

③ せん断補強鉄筋の定着長

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。

4. 2 審査証明の範囲

主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、施工が片側からしか実施できない壁状の既設鉄筋コンクリート部材に対し、鉄筋の埋込側に先端型定着体を、差込側に後端型定着体を設置した標準型、または、鉄筋の両端に先端型定着体を設置した両端先端型の「セラミックキャップバー（CCb）」により、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

ただし、両側からの施工が可能な既設の構造物に対しては、変形性能の向上を目的としないことを前提として、鉄筋の両端に後端型定着体を設置した両端後端型の「セラミックキャップバー（CCb）」を後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。

図表 4-3 CCb の適用範囲と適用条件（建設技術審査証明報告書より抜粋）（1/4）

図表 4-3 CCb の適用範囲と適用条件（2/4）

建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
<p>主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、施工が片側からしか実施できない壁状の既設鉄筋コンクリート部材に対し、鉄筋の埋込側に先端型定着体を、差込側に後端定着体を設置した標準型、または、鉄筋の両端に先端型定着体を設置した、両端先端型の「セラミックキャップバー（CCb）」により、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>	<p>地中構造物であり、片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>
<p>ただし、両側からの施工が可能な既設の構造物に対しては、変形性能の向上を目的としないことを前提として、鉄筋の両端に後端型定着体を設置した両端後端型の「セラミックキャップバー（CCb）」を後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。</p>	<p>両側からの施工が可能な既設の構造物に対して、変形性能の向上を目的としないことを前提として、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>

2. 2 セラミック定着体

- (1) セラミック定着体は、所定の材料により製作する。
- (2) セラミック定着体は、所定の製造工程で製作されたものを用いる。
- (3) セラミック定着体の検査は、形状、外観、ねじ節強度、密度について、所定の頻度で実施する。

2. 3 材料の設計値

- (1) セラミックキャップバー (CCb)

セラミックキャップバー (CCb) を構成するねじ節鉄筋は、JIS G 3112に準拠したネジテツコン (東京鐵鋼株式会社製ねじ節鉄筋) で、種類はSD295A、SD295B、SD345とし、呼び名はD32、D29、D25、D22、D19、D16、D13とする。特性値 f_{yk} および f_{ak} はJIS G 3112の下限值としてよい。また、限界状態の検討に用いる異形鉄筋の断面積は、JIS G 3112による各呼び名の公称断面積としてよい。
- (2) 充てん材

充てん材は補強する構造体コンクリートと同等な性能であるとする。

図表 4-3 CCb の適用範囲と適用条件 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/4)

図表 4-3 CCb の適用範囲と適用条件 (4/4)

	建設技術審査証明報告書の材料範囲等	使用材料
せん断補強筋 (ねじ節鉄筋)	径 : D13 ~ D32 強度 : SD295A、SD295B、SD345	左記範囲内の材料を使用する。 (D16 ~ D32 SD345)
セラミック 定着体	所定の材料、製造工程で製作され、所定の頻度で形状、外観、ねじ節強度、密度について検査されたもの。	左記検査を受けた材料を使用する。
充てん材	構造体コンクリートと同等な性能	躯体コンクリート以上の強度とする。
定着長	定着長確認試験に基づき設定した定着長に準じた設計	左記の定着長を考慮して設計を実施する。

(2) 構造形式・使用環境

建設技術審査証明報告書に、「CCb 補強工法によれば、相次ぐ地震によりその耐震補強の必要性が高まっている原子力施設などの重要地下構造物、高速道路、鉄道及び上下水処理施設などの地下構造物、また、水門あるいは堰の門柱・堰柱など、構造上、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」と記載されていることから、図表 1-1 に示した構造物においては、構造形式・使用環境共に合致している。

また、女川原子力発電所 2 号炉の屋外重要土木構造物においては、気中及び海水中の部材に対して CCb 工法を適用している。CCb そのものはすべて構造物内に埋設され、かぶり部分にて腐食に対する抵抗性が確保される。4.7 に記載のとおり、気中及び水中で数多くの施工実績があることが確認されており、硫酸等の影響を受ける腐食環境下にある下水道施設での施工実績もあることから、海水中よりも厳しい環境下での施工実績が確認できているため、使用環境として問題がない。

(3) 構造細目

建設技術審査証明報告書に、以下のとおり構造細目として記載されており、建設技術審査証明報告書と合致している。

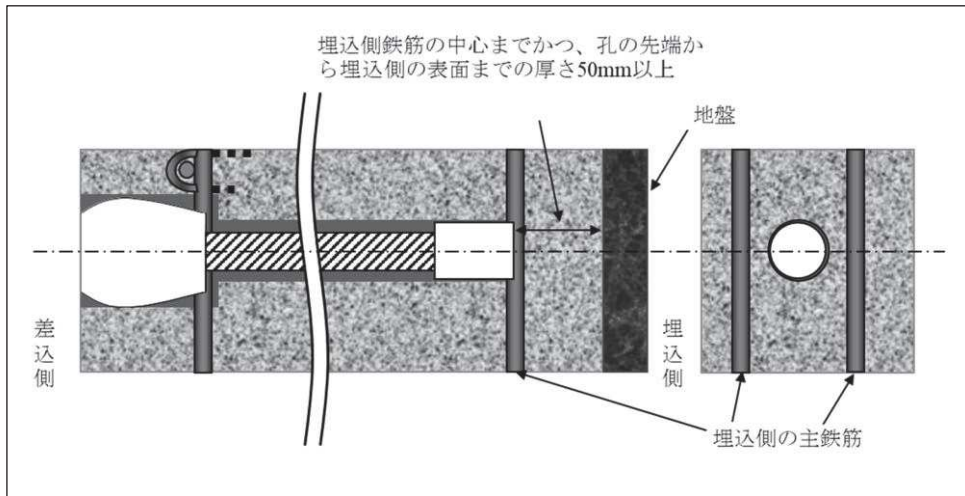
- ① せん断補強鉄筋の断面積比 $\geq 0.15\%$ とする。
- ② 補強前に配置されていたせん断補強鉄筋を含めた CCb との最大配置間隔 \leq 補強対象部材の有効高さの $1/2$ かつ 300mm とする。
- ③ CCb の配置は図表 4-4 に示す標準配置によるものとする。
- ④ CCb の埋込側の先端は、主鉄筋の中心まで配置することを原則とする。ただし、孔の先端から埋込側の表面までの厚さは 50mm 以上とする。

②の最大配置間隔 300mm は、収縮等によるひび割れの発生を防ぐための用心鉄筋としての配慮である。

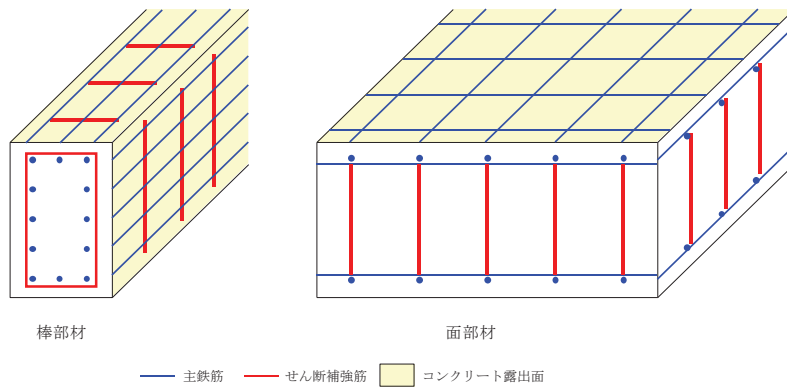
用心鉄筋としての配慮については棒部材の場合、スターラップが露出面（腹部）に配置されることから、「露出面の用心鉄筋」に規定される「 1m 当たり 500mm^2 以上の鉄筋を 300mm 以下の間隔で配置する」に準じて規定されたものである。一方、面的な広がりをもつボックスカルバートや箱型構造物の各部材に配置されるせん断補強鉄筋は、各部材の中間的な位置に配置され、「露出面の用心鉄筋」としての機能は不要であるため、「面部材ではせん断補強鋼材の配置間隔は、部材有効高さの $1/2$ 倍以下で配置すればよい」とされている（コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会 2017））（図表 4-5 参照）。

女川原子力発電所 2 号炉において CCb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており、収縮が収束していると考えられるこ

と、また、せん断補強鋼材が露出面に配置されない面部材に対する耐震補強であることから、この規定（最大配置間隔 300mm 以下）は除外することができる。



図表 4-4 CCb 標準配置
(建設技術審査証明報告書より抜粋)



図表 4-5 露出面の用心鉄筋（棒部材・面部材）

(4) 変形量

CCb 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。

確認の一例として、添付資料 2「解析によるせん断補強効果の確認について」にて検討した取水路（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%程度（基準地震動 Ss-D2 による照査結果）であり、実験における層間変形角（1%を超える範囲まで確認）の変形量以下に収まっていることを確認した。

しかしながら、変形量が過度に大きくなると、かぶりコンクリートの剥落により 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、女川原子力発電所 2 号炉においては層間変形角が 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）である範囲においてのみ、せん断補強として CCb 工法を適用することとした。

なお、実験における層間変形角は、実験において発生している変位量及びせん断スパン比から算出した。

4.5 せん断補強効果の確認

4.5.1 せん断補強効果の確認内容

4.3 で示した適用性確認項目のうち、建設技術審査証明報告書では確認できなかった項目についてもせん断補強効果が期待できるかを確認する。以下に確認する項目を挙げる。CCb 工法と先施工のせん断補強鉄筋で大きく異なる部分は、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ことである。したがって、コンクリート部分に関する項目が主となり、せん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる。なお、(1)～(4)の項目については、4.5.2 以降において、解析的な検証及び建設技術審査証明報告書の試験の確認を通じて、せん断補強効果が得られていることを確認する。

- (1) 部材諸元
- (2) せん断ひび割れ抑制効果
- (3) 載荷方法
- (4) 定着体部における定着機能の保持
- (5) CCb を適用した部材のコンクリートの健全性

4.5.2 せん断補強効果の確認

(1) 部材諸元、(2)せん断ひび割れ抑制効果、(3)載荷方法

CCbによる補強効果については、建設技術審査証明報告書の各種実験にて検証している。建設技術審査証明報告書では、実験を上回る部材厚については、理論式により求められる有効係数 β_{aw} を用いて設計することとしている。女川原子力発電所2号炉でCCbを適用した構造物の多くは、部材厚が実験で用いた部材と比べて大きいため、実験を上回る部材厚でもCCbの補強効果が期待でき適用性を有することを解析により補足する。

また、部材厚以外にもせん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度及び載荷方法が女川原子力発電所2号炉でCCb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と異なっている。これらの項目が、女川原子力発電所2号炉の構造物の設計荷重等と同じ条件においても、せん断ひび割れを抑制し、せん断補強効果を期待できるかを解析により補足確認する。

解析の詳細については、添付資料2「解析によるせん断補強効果の確認について」に記載する。添付資料2にて記載したとおり、実験条件と異なる項目である(1)～(3)の項目においてもせん断補強効果を確認できた。併せて、終局荷重時においても特異なひび割れや変形が発生しないことを確認した。

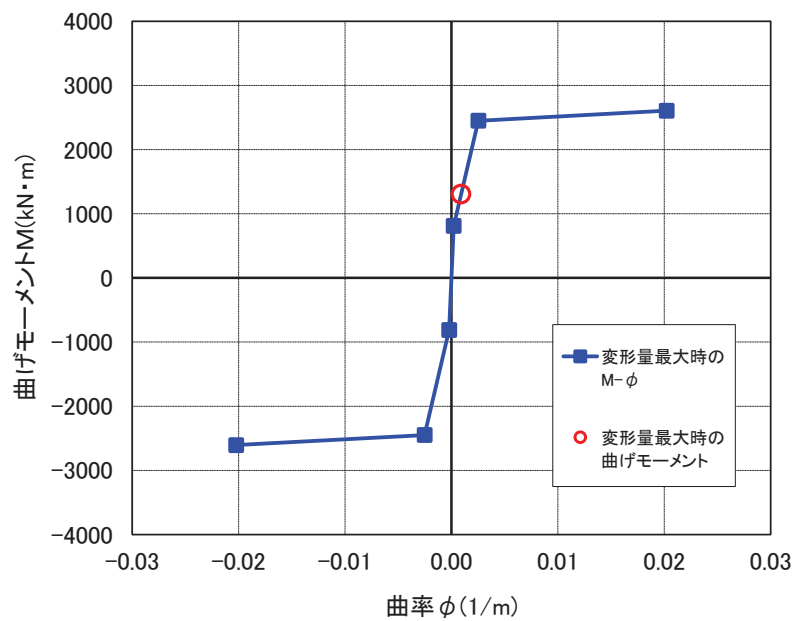
(4) 定着体部における定着機能の保持

詳細は、添付資料 3「ひび割れを有する部材に対する Ccb 工法の適用性」に記載する。添付資料 3 にて記載したとおり、女川原子力発電所 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ひび割れ）が Ccb の定着体部に生じても、定着機能は保持されることを建設技術審査証明報告書の実験との対比から確認できた。

しかしながら、建設技術審査証明報告書の実験では曲げ降伏後のひび割れ幅が大きく進展した場合の Ccb の定着機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、女川原子力発電所 2 号炉においては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 工法を適用することとした。

さらに、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に対して大きくなるが、Ccb 工法の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は実施していないため、ディープビーム的な破壊形態が想定される部材に対しても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こととした。

主鉄筋の応力が降伏強度以下であることについては、応力による評価以外の指標として $M-\phi$ 曲線の第 2 折れ点（主鉄筋の降伏に相当）以下、または主鉄筋のひずみが降伏ひずみ以下であることを確認する。 $M-\phi$ 曲線による確認例として、図表 4-6 に取水路（漸拡部）における評価結果（基準地震動 S_s-D2 による照査結果）を示す。応答値を $M-\phi$ 曲線上にプロットすると $M-\phi$ 曲線の第 1 折点（ひび割れ発生）付近であり、主鉄筋は降伏していないため Ccb 工法が適用可能であることがわかる。



図表 4-6 取水路（漸拡部）の M- ϕ 曲線（暫定値※）

※：暫定値であり、今後変更となる可能性がある。

(5)CCb を適用した部材のコンクリートの健全性

詳細については、添付資料 4「CCb を適用した部材のコンクリートの健全性」に記載する。添付資料 4 に記載したとおり、地震後（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））のひび割れ状況及び圧縮強度試験結果から、CCb を適用した部材のコンクリートが健全であり、CCb を適用した構造物が CCb の効果を発揮できる状況にあることを確認した。

4.6 Ccb の施工精度に影響を与える項目の確認

CCb 工法によるせん断補強にあたっては、既設鉄筋配置のずれ等、施工精度により計画どおり施工できなかった場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そこで、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。

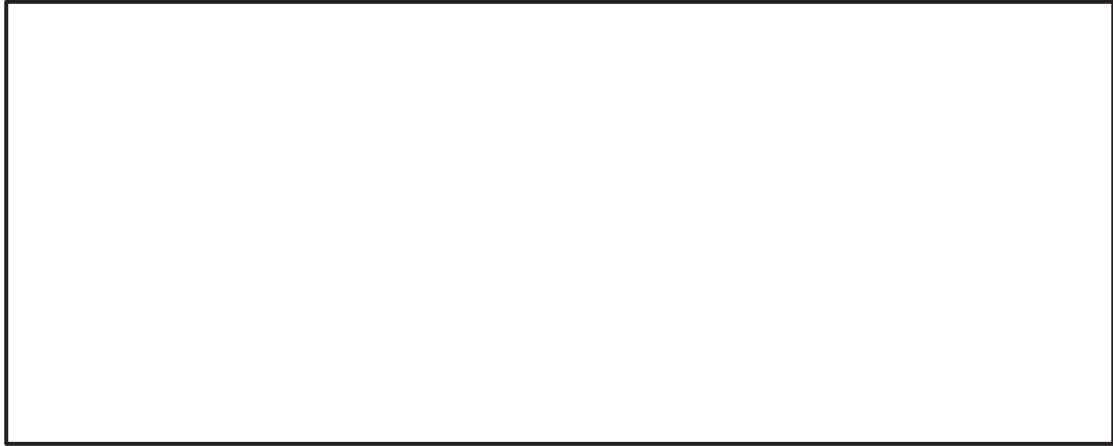
4.6.1 削孔方法

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、その削孔方法としてはレッグハンマードリル、またはコンクリートコアドリルの使用が主となっている。ここで、コンクリートコアドリルは設置面に強固に固定でき、掘削方向と掘削深さを精度良く確保することが容易であることから、原子力発電所施設では主にコンクリートコアドリルでの削孔を採用している。なお、削孔時に既存鉄筋の切断を回避するため、既存鉄筋干渉時にコンクリートコアドリルの回転を停止させる鉄筋センサーの使用を標準装備としている（図表 4-7 参照）。

4.6.2 削孔角度

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、削孔角度に誤差が生じた場合、CCb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そのため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、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により、削孔角度のばらつきが生じる可能性を低減させる。

また、「建設技術審査証明報告書 技術名称 あと施工型せん断補強用無機系モルタルカプセル及びせん断補強筋「RMA」（建技審証第 1203 号）」ではコンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験を実施している（図表 4-8 参照）。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験では、幅 1200mm×高さ 600mm×長さ 1200mm のコンクリートブロック 4 体を削孔し、削孔位置のずれを確認している。コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果を、図表 4-9 に示す。女川原子力発電所 2 号炉の CCb を適用した構造物のうち、最大部材厚は 1500mm である。削孔角度誤差を換算すると、長さ 1200mm、2400mm は 0.72° 、長さ 3600mm で 0.66° となり、コアドリルによる長尺削孔は十分精度があることが示されている。



図表 4-7 削孔状況



図表 4-8 試験概要図



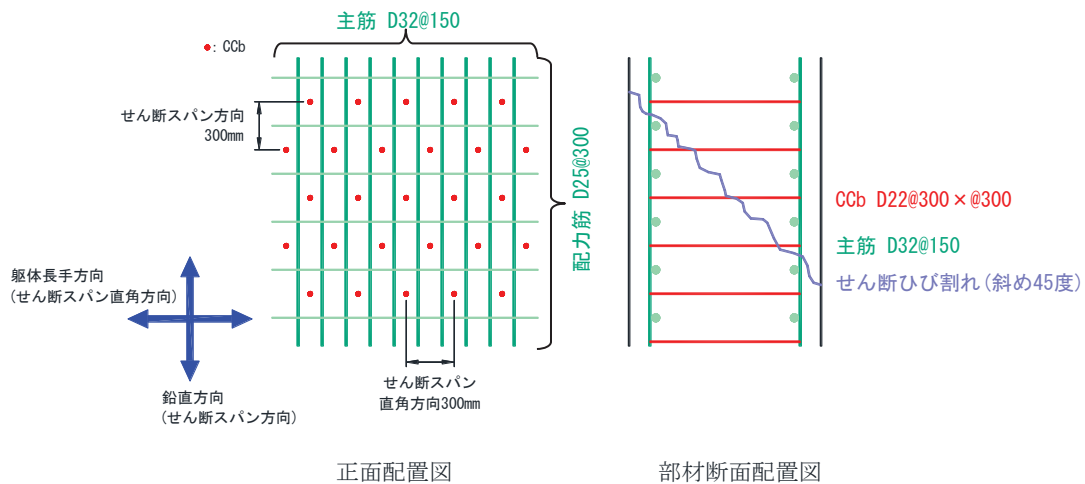
図表 4-9 コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果

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。

4.6.3 削孔位置

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、部材内部に障害物があり計画位置で削孔できず CCb を計画通り配置できない可能性がある。その場合は、付近を再削孔し CCb を挿入することで設計上必要な鉄筋量を確保する。再削孔し CCb を配置する際は、4.4 に示す記載事項を満足するものとする。なお、図表 4-10 に示すせん断補強鉄筋正面配置図及び部材断面配置図のとおり、再削孔する際は削孔計画位置（赤丸）から位置をずらし、せん断補強効果に影響のない位置に削孔することが可能である。再削孔の際、新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性があることから、孔を隣接させて削孔することが可能なコンクリートコアドリルを使用し、再削孔時の精度向上を図る。

以上より、削孔位置に変更が生じてても必要鉄筋量を確保できるためせん断補強効果に影響を及ぼさない。



図表 4-10 取水路（漸拡部）のせん断補強鉄筋正面配置図及び部材断面配置図

4.6.4 グラウトの充てん性

グラウトの充てん性については、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。以下に、建設技術審査証明報告書に記載されているグラウト充てん性確認実験の内容を示す。

グラウト充てん性確認実験は、①先充てん工法（横向き）、②先充てん工法（下向き）、③先充てん工法（上向き）、④後充てん工法（上向き）にて実施されている（図表4-11参照）。

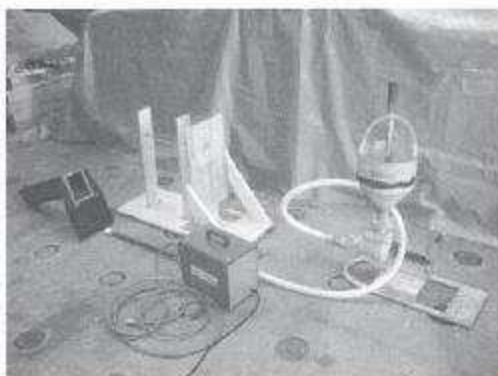
① 先充てん工法（横向き）

先充てん工法（横向き）の場合、コンクリート躯体面に養生用治具を止水剤、接着剤等で設置し、グラウト貯留槽を真空ポンプと吸盤で固定する。そして、グラウトポンプを用いて、掘削孔の先端からエアを追出すようにグラウトを充てんし、削孔部分およびグラウト貯留槽部分にグラウトを満たす。その状態で「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入することにより、エア抜きホースを残置すること無く、「セラミックキャップバー（CCb）」の挿入およびその周囲へのグラウトの充てんを行う。

写真Ⅱ-4.9～写真Ⅱ-4.11に示すように、グラウトが充てんされた削孔内に「セラミックキャップバー（CCb）」を抵抗無く挿入でき、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんできることを、アクリル模型およびRC部材を用いた施工試験により確認した。また、実際の施工では、ほぼ水平となるように削孔することが可能であるが、アクリル模型の先端を2°以上、上に傾けた状態でのグラウトの充てん確認試験を実施し、孔内後端部の上部の角部にエアが残留した場合でも、エア抜き工具を用いて残留エアの有無の確認と除去が可能であることを確認している（写真Ⅱ-4.10）。

図表4-11 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/10)

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できるので、最小限の設備と人員での「セラミックキャップバー (CCb)」の横向きの設置が可能である。



試験器具一式



アクリル模型への「セラミックキャップバー (CCb)」の仮設置



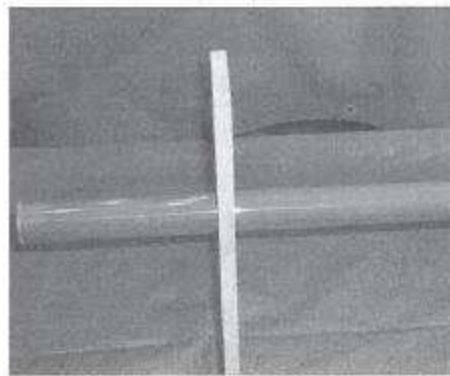
グラウトの充てん状況



グラウトの充てん状況 (先端)



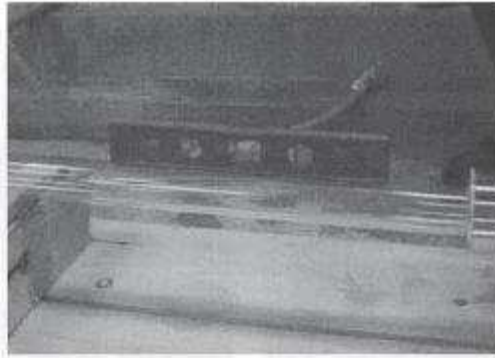
「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



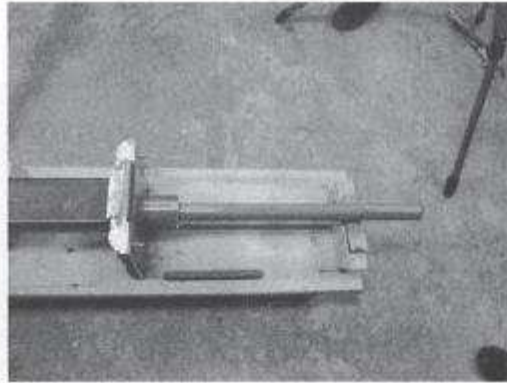
先端部の充てん状況

写真Ⅱ-4.9 アクリル模型によるグラウト充てん性確認実験 (横向き)

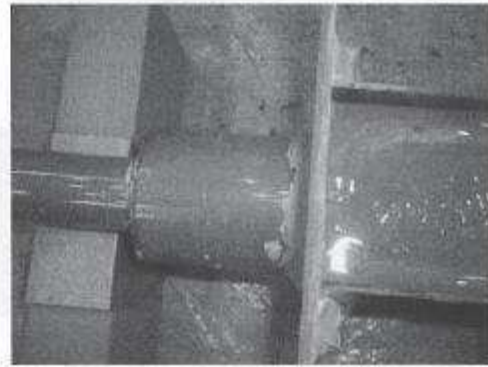
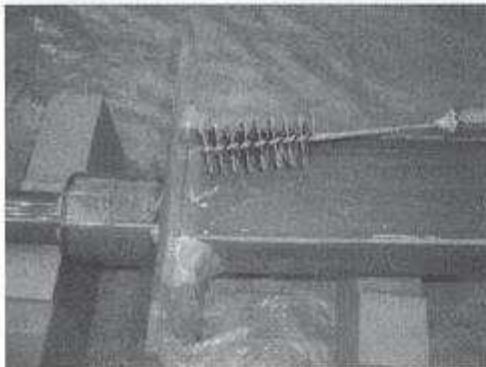
図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/10)



上傾き充てん確認試験



上傾き充てん状況



後端部エア抜き確認試験

写真Ⅱ-4.10 アクリル模型によるグラウト充てん性確認実験(先端が上に傾いた場合)

図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/10)



RC 部材への削孔



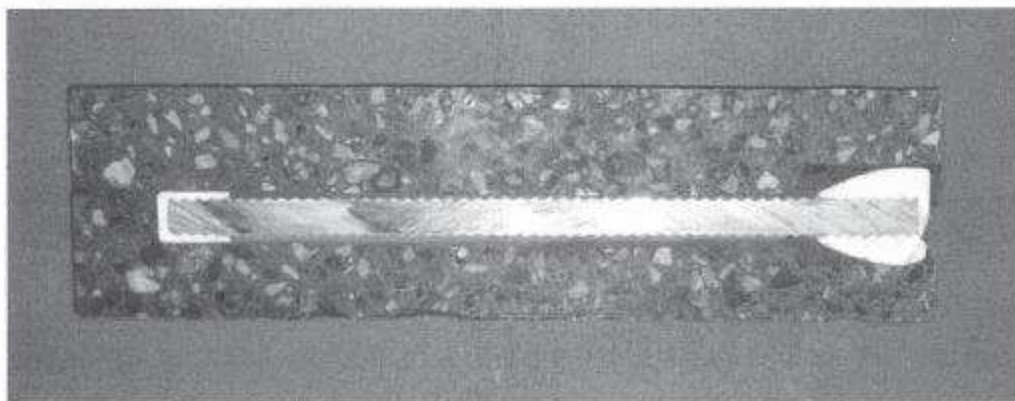
グラウト貯留槽の設置



「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



グラウトの注入状況 (鉄筋部)
「セラミックキャップバー (CCb)」挿入部を切断したもの



グラウトの注入状況 (全体)

「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入部

写真Ⅱ-4.11 RC 部材によるグラウト充てん性確認実験 (横向き)

図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/10)

ハンチ部の施工や、支障物が近傍にあるために、グラウト貯留槽が使用できない箇所は、表Ⅱ-1.4に示す可塑性グラウトを用いて作業を行うことにより、グラウト貯留槽を用いた時と同様の充てん性能を有していることをアクリル模型の施工試験で確認している。

グラウトポンプを用いて、掘削孔の先端からエアを追出すようにグラウトを充てんする。その後に「セラミックキャップバー (CCb)」をゆっくり挿入することにより、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入およびその周囲へのグラウトの充てんを行う。

グラウトは、セメントに所定の水を加えてハンドミキサで練り混ぜ、その後に所定の可塑性剤を添加して再度練り混ぜて使用する。



アクリル模型試験体



「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



「セラミックキャップバー (CCb)」の設置

写真Ⅱ-4.12 アクリル模型による可塑性グラウト充てん性確認試験 (横向き)

表Ⅱ-1.4 可塑性グラウトの性能

水セメント比 (%)	添加率 (%)	テーブルフロー値 (mm)	ブリーディング率 (%)	膨張収縮率 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		
					3日	7日	28日
33.0~39.0	0.28%~0.32%	(静止) 105mm~120mm (15回打撃) 150mm~200mm	0.0	0.12%~0.18%	35.9	45.5	56.4

圧縮強度は現場封緘養生による結果である。

図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/10)

② 先充てん工法（下向き）

先充てん工法（下向き）の場合、削孔内にグラウトを充てんし、「セラミックキャップパー（CCb）」を上方から差し込むだけで配置を完了する。削孔内面は、グラウトを充てんする前に湿潤状態にするか、あるいはドライアウト防止剤を散布し、グラウトが吸湿されないようにする。

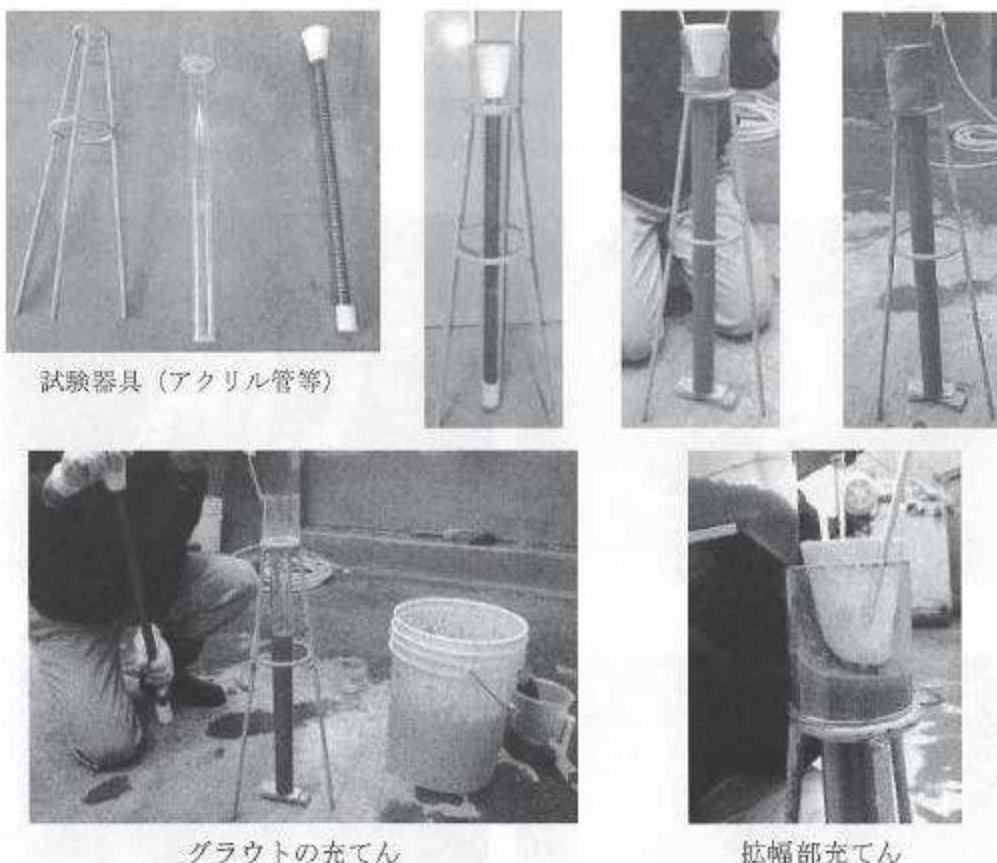
写真Ⅱ-4.8 に示すように、グラウトが表Ⅱ-1.2 に示すものであれば、「セラミックキャップパー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんすることを、アクリル模型を用いた施工試験により確認した。

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できる。

表Ⅱ-1.3 グラウトの性能

水セメント 比 (%)	JAロート 流下時間 (秒)	ブリーディ ング率 (%)	膨張収縮率 (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
				1日	3日	7日	28日
33.0~39.0	15~30	0.0	0.14~0.23	22.2	38.6	58.3	65.3

圧縮強度は現場封緘養生による結果である。



写真Ⅱ-4.8 グラウト充てん性確認実験（下向き）

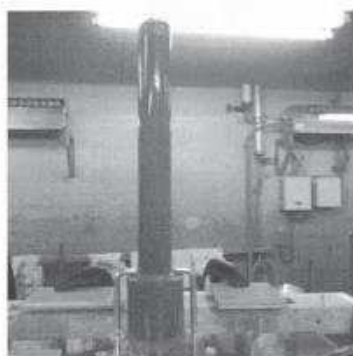
図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（6/10）

③ 先充てん工法（上向き）

先充てん工法（上向き）の場合、可塑性グラウトを削孔内にグラウトを充てんし、「セラミックキャップバー（CCb）」を下方から差込むだけで配置を完了する。

写真Ⅱ-4.14、写真Ⅱ-4.15 に示すように、可塑性グラウトであればグラウトで充てんされた削孔内に、「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入でき、エア抜きホースを残置すること無く、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんできることを、アクリル模型およびRC 部材を用いた施工試験、専用エアメータを用いた上向き充てん試験により確認した。

グラウトは、セメントに所定の水を加えてハンドミキサで練り混ぜ、その後に所定の可塑剤を添加して再度練り混ぜて使用できる。



グラウトの充てん



「セラミックキャップバー（CCb）」の設置



グラウトの充てん



「セラミックキャップバー（CCb）」の挿入

写真Ⅱ-4.14 先充てん後挿入工法グラウト充てん性確認実験（上向き）（その1）

図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（7/10）

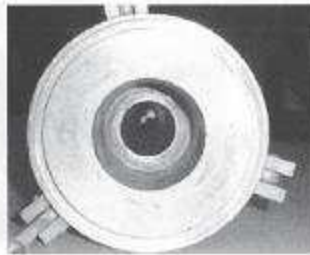


拡幅部通常コア



拡幅部親子ビット

グラウトの注入状況（全体）



CCb 工法仕様上向き空気量測定

写真Ⅱ-4.15 先充てん後挿入工法グラウト充てん性確認実験（上向き）（その2）

図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（8/10）

④ 後充てん工法（上向き）

後充てん工法（上向き）の場合、写真Ⅱ-4.13に示すように、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部にエア抜きホースを設置した養生治具を用意し、「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入した削孔口部分に設置する。

そして、高流動性のグラウトを下方から注入し、エア抜きホースから掘削孔内の空気を排出して充てんする。この時、あらかじめ配置した「セラミックキャップバー（CCb）」が削孔の中心部に配置されるように、差込側の定着体に対し、注入治具側にスペーサ等を設置し位置を調整する。削孔内面は、グラウトの注入前に湿潤状態にするか、あるいはドライアウト防止剤を散布し、グラウトが吸湿されないようにする。グラウトの充てん状況は、グラウト注入時におけるエア抜きホースからの空気の排出と、グラウトの流失を確認することによって把握する。そして、グラウトの注入圧を保ったまま、エア抜きホースを養生治具の位置まで引き抜き、その口を閉じる。

写真Ⅱ-4.13に示すように、上向き施工でも「セラミックキャップバー（CCb）」の先端までグラウトを充てんでき、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー（CCb）」設置できることを、アクリル模型を用いた施工試験により確認した。

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できる。

図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (9/10)



図表 4-11 グラウトの充てん性確認実験
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (10/10)

4.6.1～4.6.4に示したとおり、施工上の配慮により、せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工精度の低下は生じないと考えられる。

しかし、現時点では後施工による施工精度に対して、施工実績に基づく十分な統計がとれていないため、施工精度の低下による影響が生じる可能性を否定することはできない。

以上を踏まえて、適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工精度の低下への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こととする。

4.7 施工実績・研究事例等の確認

4.7.1 施工実績の整理

CCbの施工実績は、図表4-12に示すように2017年9月30日までに、道路・地下街、浄化センター、浄水場、水門、排水機場、排水路、発電所・プラントなど、施工中案件を含め174件の工事に適用され、37.6万本以上が施工されている。

図表4-12 CCbの施工実績（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	

施工中案件を含む 合計：174件 376,000本以上

CCbの施工実績を部材厚、鉄筋径及び使用環境毎に整理する。部材厚毎に整理した結果を図表4-13に、鉄筋径毎に整理した結果を図表4-14に、使用環境（気中または水中）毎に整理した結果を図表4-15に示す。なお、カウントする際は、1件の工事のうち複数にまたがって該当する場合には、各項目でそれぞれカウントしている（例：同一工事内でD13、D16、D19の鉄筋を用いている場合はD13、D16、D19の全てにカウント）。

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。

図表 4-13 Ccb の施工実績（部材厚）（1/4）※

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

図表 4-13 Ccb の施工実績（部材厚）※
（上記実績のうち横向き施工）（2/4）

部材厚（mm）	件数
～500	53
501～1000	87
1001～1500	47
1501～2000	17
2001～3000	5
3001～	2

図表 4-13 Ccb の施工実績（部材厚）※
（上記実績のうち下向き施工）（3/4）

部材厚（mm）	件数
～500	35
501～1000	61
1001～1500	48
1501～2000	29
2001～3000	6
3001～	5

図表 4-13 CCb の施工実績（部材厚）※
（上記実績のうち上向き施工）（4/4）

部材厚（mm）	件数
～500	6
501～1000	22
1001～1500	14
1501～2000	0
2001～3000	0
3001～	0

図表 4-14 CCb の施工実績（鉄筋の種類）※

補強鉄筋の種類		件数
SD345	D13	42
	D16	71
	D19	82
	D22	80
	D25	61
	D29	30
	D32	33

図表 4-15 CCb の施工実績（使用環境）※

施工場所	件数
気中	12
水中	162

※：ハッチング箇所は、女川原子力発電所2号炉の構造物に採用している項目を示す。

4.7.2 過去の地震の経験事例

CCb 工法により補強された構造物は、過去に多くの地震を受けている（図表 4-16）。その中には、震度 5 強の地震を受けた事例もあり、CCb 工法研究会に確認したところ、いずれの地点においても、現時点では被害・不具合が発生したという報告はない。

図表 4-16 震度 4 以上の地震を受けた構造物



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。

4.7.3 レベル2地震動を対象とした設計事例

広島空港直下を通る用倉トンネルにおいて、レベル2地震動を対象として耐震補強に鉄筋差込工法（後施工せん断補強鉄筋工法 RMA 工法）を適用したせん断補強事例が報告されている[※]。本事例においては、広島空港が大都市拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられたため、耐震性能照査を行った結果、せん断耐力が不足していることが判明したことによる。用倉トンネルは現場打ちのアーチカルバートの上に 20m 弱の盛土をおこなった構造物である。構造形式等の詳細については、4.7.5④に記載する。

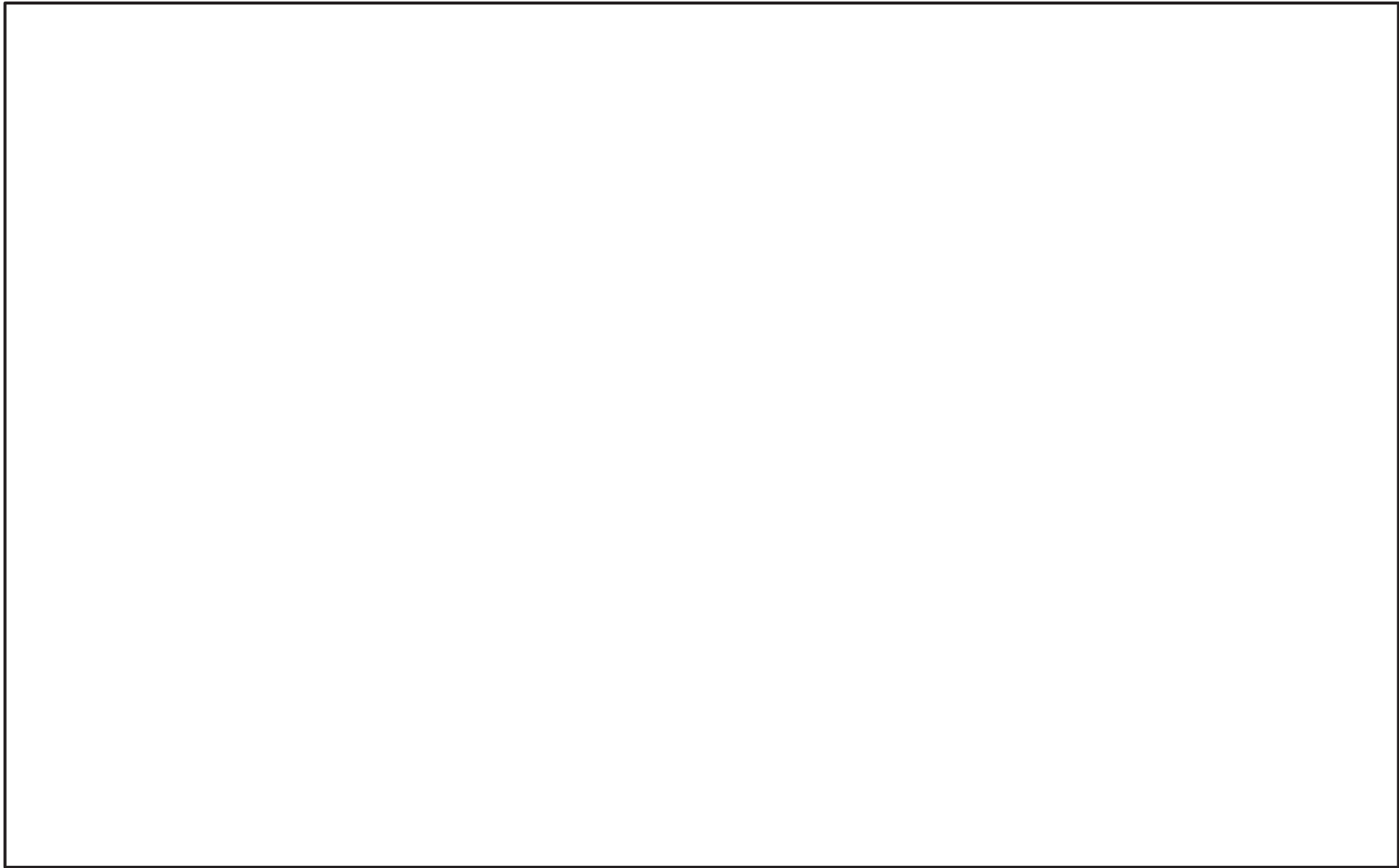
※：参考文献

岡崎大宜：後施工型せん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

4.7.4 後施工せん断補強鉄筋工法の比較

CCb 工法以外にも土木研究センターにおいては、類似する後施工せん断補強鉄筋工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強鉄筋工法の比較結果を、図表 4-17 に示す。工法に差異はあるものの、コンクリート部分に付着を期待してせん断耐力の向上を期待する点は共通している。また、せん断耐力の算出方法については、工法により多少の差異は存在するものの、概ねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

図表 4-17 後施工せん断補強鉄筋工法の比較(1/2)



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。

※土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成

図表 4-17 後施工せん断補強鉄筋工法の比較(2/2)



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。

※土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成

4.7.5 後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例

後施工せん断補強工法に関する研究事例や施工実績に関する文献から着目すべき事項を整理し、女川原子力発電所2号炉におけるCCb工法への反映事項を確認する。

① コンクリート構造物の後施工せん断補強技術

◆ 文献の要旨

既存のコンクリート構造物の耐震補強技術のうち、カルバートや地下貯水槽の壁（地下壁構造）に用いられるせん断補強（後施工せん断補強）技術について述べられたものである。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強鉄筋の定着性能の確認試験として、鉄筋の引抜き試験が例示されている。
 - ・ 標準フックのせん断補強鉄筋（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鉄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いる。
 - ・ 後施工せん断補強効果の確認試験として、梁試験体の正負交番載荷試験が例示されている。
 - ・ 「マルチプルナット」、「セラミックキャップバー（CCb）」、「Post-Head-bar（PHb）」の建設技術審査証明報告書を参考文献としている。
- ###### ◆ 女川原子力発電所2号炉におけるCCb工法への反映事項の確認
- ・ 後施工せん断補強技術が地下壁構造に対して効果的であることを確認した。
 - ・ CCb工法の建設技術審査証明報告書には、本文献と同様の引抜き試験、梁試験体の正負交番載荷試験が実施され、それら試験結果に基づいた有効係数による評価手法が明記されていることを確認した。

② 耐震補強等に用いるあと施工型せん断補強技術（RMA 工法）

◆ 文献の要旨

既設の地中構造物を後施工によりせん断補強する工法として RMA 工法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強鉄筋の性能確認実験として、引抜き試験による定着性能の確認、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いる。
- ・ 後施工せん断補強において、せん断補強鉄筋の定着長を考慮した有効係数によるせん断補強効果の評価手法が示されている。なお、この評価手法は参考文献として示されている「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」（土木学会、2005）に準じている。
- ・ RMA 工法により補強が実施された構造物は、東日本大地震においても損傷がなかったことが報告されている。

◆ 女川原子力発電所 2 号炉における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と同様の性能確認試験を CCb 工法でも実施していることを確認した。
- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と CCb 工法とでは、定着方法の差異により定着長が異なるが、有効係数の算出方法は同様であり、CCb 工法の建設技術審査証明報告書に示される有効係数の算出方法が一般的であることを確認した。
- ・ CCb により耐震補強を行った構造物において、現時点で地震による被害・不具合が発生していないことを確認した。

③ 論文 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験

◆ 文献の要旨

既存のボックスカルバート等の連続壁に異形鉄筋を埋込みせん断補強を行う方法に対し、その有効性を確認するために梁供試体を用いたせん断試験が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強した供試体のせん断耐力を実験で確認した結果、先施工として算出したせん断耐力（設計値）とほぼ同等のせん断耐力が得られている（実験値/設計値=0.93～1.12）。
- ・ 後施工によりせん断補強した供試体のせん断耐力は、先施工した供試体のせん断耐力と同等のせん断耐力を有している（後施工/先施工=0.85～1.07）。

◆ 女川原子力発電所2号炉におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・ 先施工のせん断補強に対するCCb工法の有効係数は、建設技術証明報告書に記載されている梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

④ 後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

◆ 文献の要旨

広島空港の滑走路及び誘導路直下の地下構造物（用倉トンネル）が、レベル2地震動に対する耐震性能照査においてせん断耐力が不足していることが確認された。用倉トンネル(アーチカルバート)に対し耐震補強工法の選定・検討を実施し、RMA 工法による後施工せん断補強が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 重要施設である空港滑走路及び誘導路直下の地下構造物（アーチカルバート）に対して、後施工型せん断補強工法（RMA 工法）による耐震補強が実施されている。
- ・ アーチカルバートの補強には、増厚工法、後施工せん断補強工法（鉄筋差込工法）、接着工法、巻立て工法の中から、施工後においても現況の内空断面を確保でき、坑内からの施工も可能である後施工せん断補強工法が選定されている。
- ・ 補強対象のアーチカルバートの部材厚は 1600mm である。

◆ 女川原子力発電所2号炉におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・ 地下構造物の補強工法として、後施工せん断補強工法が効果的であることを確認した。
- ・ 女川原子力発電所2号炉原子炉補機冷却海水配管ダクト及び取水路（漸拡部）の部材厚（隔壁：1200mm）相当の構造物に対して後施工せん断補強工法の施工実績があることを確認した。

⑤ 地下駅舎 RC 壁のせん断力評価と耐震補強対策

◆ 文献の要旨

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い、先施工せん断補強と後施工せん断補強との耐力比較及び後施工せん断補強鉄筋の埋込長の違いによる耐力比較が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ せん断補強鉄筋のピッチ 300mm 以下の規定については、新設構造物を対象とした乾燥収縮等によるひび割れを防ぐためのものであることから考慮せず、有効高さの 1/2 としている。
- ・ 先端を 45° にカットした後施工によるせん断補強の場合、先施工の設計耐力に対して最低でも 80% 程度のせん断耐力が実験で得られている。

◆ 女川原子力発電所 2 号炉における Ccb 工法への反映事項の確認

- ・ 女川原子力発電所 2 号炉において Ccb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており乾燥収縮は終了していることから、せん断補強鉄筋のピッチ 300mm 以下の規定は除外した。
- ・ 先施工のせん断補強に対する Ccb 工法の有効係数は、建設技術審査証明報告書に記載される梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

⑥ 論文 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

◆ 文献の要旨

せん断補強鉄筋の定着不良が RC はりのせん断抵抗機構に及ぼす影響を確認することを目的として、せん断補強鉄筋の定着フック及び端部付近の付着を除去したはりを作製し、せん断耐力の低下と破壊モードを実験的に検証している。また、材料非線形解析における定着不良部のモデル化について検討されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ せん断補強鉄筋の定着不良部から鉄筋径の 10 倍程度を鉄筋無効区間として要素内鉄筋比をゼロとすれば、2次元ひび割れ解析でせん断耐力を概略評価することが可能であることが示されている。

◆ 女川原子力発電所 2 号炉における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb の解析モデル上の考慮方法の検証（添付資料 2）において、CCb のモデル化に本解析手法を参考とし、実験結果と整合する鉄筋径の 5 倍を後せん断補強鉄筋の無効区間とし検討を実施した。

⑦ 地下道における PHb(ポストヘッドバー)工法の採用と積雪寒冷地の施工について

◆ 文献の要旨

既設地下道を耐震補強する目的で採用した PHb 工法の実施内容及び積雪寒冷地での施工方法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 充填材の温度と強度の関係を把握するための試験施工が実施されており、充填材料が 0℃以下の履歴を受けた場合、強度発現が低下することが確認されている。

◆ 女川原子力発電所 2 号炉における Ccb 工法への反映事項の確認

- ・ Ccb 工法においては充填材料が 0℃以下とならないように、施工上の管理基準 (5℃以上) を設けて適切な施工管理を実施した。

⑧ せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強

◆ 文献の要旨

東京都港湾局が後施工せん断補強工法における補強効果確認のために行った室内せん断実験の概要、その実験結果の設計への反映、実施工への適用及びその施工結果についての考察が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 施工上予想される不具合を設計上考慮し、せん断耐力に対して低減係数 0.75 を乗じている。

◆ 女川原子力発電所 2 号炉における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法は第三者機関による審査証明が行われており、その中で施工の確実性についても審査対象となっていることから、本研究事例の低減係数をそのまま設計に適用する必要はない。なお、4.7 にて施工精度の向上に向けた方策を記載している。

- ⑨ セラミック定着型せん断補強鉄筋（CCb 工法）による既設地下コンクリート構造物の耐震補強
第 57 回 電力土木講習会テキスト 平成 27 年 2 月
一般社団法人 電力土木技術協会

◆ 文献の要旨

CCb 工法の設計法および施工法の概要と、電力分野での実績を含む施行実績が紹介されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ CCb 工法の施工実績は、下水道処理場のポンプ棟、分水槽、重力濃縮槽、汚泥処理槽、ポンプ室及び放流渠等が多い。
- ・ CCb 工法の定着体は、アンカーやインサートにも広く用いられている高い耐食性を有する高純度アルミナ系セラミックス製であるため、塩害や硫酸などの影響を受ける厳しい環境（海水に接する発電所の取・放水路や腐食環境にある下水道施設）においても、耐久性を確保できる。

◆ 女川原子力発電所 2 号炉における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法が様々な施設で施工実績があることを確認した。
- ・ 塩害や硫酸などの影響を受ける厳しい環境下においても CCb 工法が使用されていることを確認した。

後施工せん断補強鉄筋に関する各研究事例を踏まえて、設計及び施工へ反映している事項を以下に示す。

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

4.8 Ccb 工法の保守性

女川原子力発電所 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

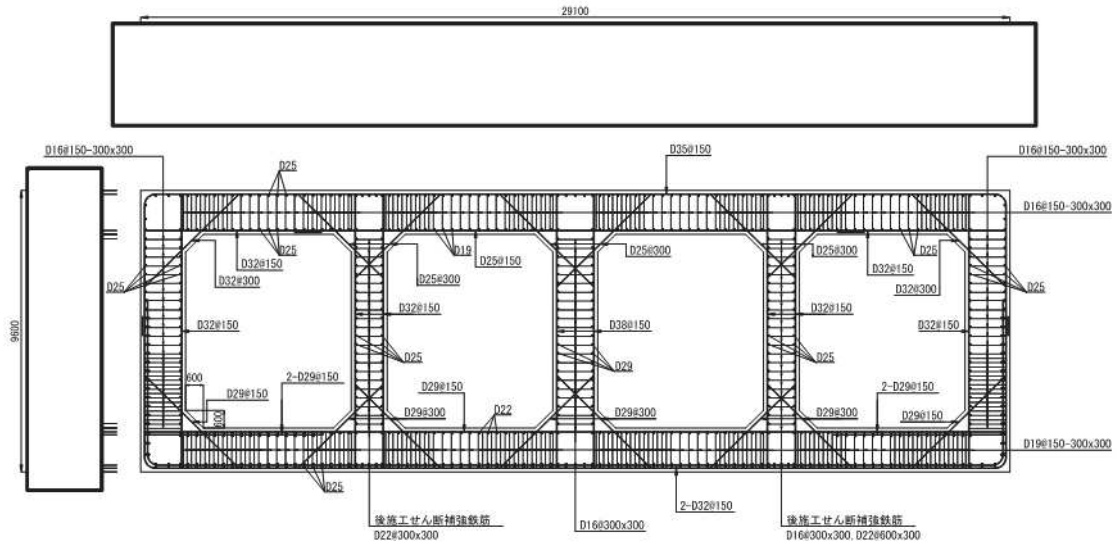
- ① 設計において Ccb が負担するせん断耐力を算出する際に乗じる有効率 β_{aw} (Ccb のせん断耐力の補強効果を示す有効率) は、建設技術審査証明報告書において、試験結果に対して保守的に小さい値を設定しており、せん断耐力を安全側に評価している。

(2) 女川原子力発電所 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、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 2363μ 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 1725μ (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。

4.9 Ccb の適用性確認結果

4.2 で決定した補強仕様について、4.1 に沿って女川原子力発電所 2 号炉屋外重要土木構造物への Ccb 適用性を検討した結果、建設技術審査証明報告書に記載のとおり、せん断補強効果が期待できることを確認した。一例として、取水路（漸拡部）で決定した補強仕様^{*}を図表 4-18 に示す。



図表 4-18 補強仕様

^{*}：補強仕様については、今後変更となる可能性がある。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



建設技術審査証明書

建技審証第 0811 号

技術名称 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋
「セラミックキャップバー (CCb)」

(開発の趣旨)
両端に耐久性が高いセラミック定着体を設置したねじ部鉄筋を用いることにより、補強材で最もコンクリート表面に近くなる定着体の耐久性を確保しつつ、高い効率でせん断耐力、じん性の向上を図ることができる後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー (CCb)」を提供する。

(開発の目標)
後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー (CCb)」の開発目標を以下に示す。

- (1) 定着性能
規格降伏強度相当の定着力を確保するために必要な「セラミックキャップバー (CCb)」の先端型定着体の定着長が 5D (D: 鉄筋の直径) であること。
後端型定着体については、定着体単体で規格降伏強度相当以上の定着力を確保できること。
- (2) 配置後のせん断耐力
「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の負担分を、通常の方法でせん断補強した部材のせん断補強鉄筋によるせん断耐力寄与分に、適用部材の主鉄筋の間隔および「セラミックキャップバー (CCb)」の各定着体を用いた場合の定着長から評価される有効率を乗じたものとして評価できること。
- (3) 配置後のじん性
「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強した RC 部材において、先端型定着体が圧縮となる場合は、拘束効果を無視した終局変位の計算値より大きな変形性能が確保されること。また、後端型定着体が圧縮となる場合は、通常の方法でせん断補強した RC 部材と同等以上の変形性能が確保されること。
- (4) 施工の確実性
背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない RC 部材に対して、補強後の掘削孔内にエア抜き用ホースを残置せずにせん断補強できること。
両側からの施工が可能な RC 部材に対し、片方のセラミック定着体をグラウト中で接合することで、両端に後端型定着体を設置する施工が確実に実行できること。
- (5) 施工の容易性
狭い空間や複雑な部位において、大型機材を用いずに容易に施工でき、安定した品質を確保できること。
挿入する「セラミックキャップバー (CCb)」の長さを確保できないような狭い空間での施工においても、カブラーによる機械式継手を用いて、安定した品質の作業を容易に施工できること。

一般財団法人土木研究センターの建設技術審査証明事業実施要領に基づき、依頼のあった標記の技術について下記のとおり証明する。

平成 21 年 2 月 3 日	平成 22 年 5 月 17 日	内容変更
平成 24 年 2 月 6 日	平成 25 年 3 月 18 日	内容変更
平成 25 年 9 月 30 日	平成 26 年 2 月 3 日	更新
平成 26 年 8 月 25 日		内容変更

建設技術審査証明事業実施要領

一般財団法人土木研究センター

理事長 中村 亮

1. 審査証明の結果
上記の開発の趣旨、開発の目標に照らして審査した結果、「セラミックキャップバー (CCb)」は以下の性能を有することが確認された。

- (1) 定着性能
引抜き試験によれば、規格降伏強度相当の定着力を確保するために必要な「セラミックキャップバー (CCb)」の先端型定着体の定着長が 5D (D: 鉄筋の直径) であること、並びに、後端型定着体については、定着体単体で規格降伏強度相当以上の定着力を確保できることが確認された。
- (2) 配置後のせん断耐力
せん断破壊モードの梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験によれば、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の負担分を、通常の方法でせん断補強した部材のせん断補強鉄筋によるせん断耐力寄与分に、適用部材の主鉄筋の間隔、および「セラミックキャップバー (CCb)」の各定着体を用いた場合の定着長から評価される有効率を乗じたものとして評価できることが確認された。
- (3) 配置後のじん性
曲げ破壊モードの RC 梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験によれば、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強した RC 部材において、先端型定着体が圧縮となる場合は、拘束効果を無視した終局変位の計算値より大きな変形性能が確保されること、また、後端型定着体が圧縮となる場合は、通常の方法でせん断補強した RC 部材と同等以上の変形性能が確保されること確認された。
- (4) 施工の確実性
施工試験等によれば、背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない RC 部材に対して、補強後の掘削孔内にエア抜き用ホースを残置せずにせん断補強できることが確認された。
両側からの施工が可能な RC 部材に対し、片方のセラミック定着体をグラウト中で接合することで、両端に後端型定着体を設置する施工が確実に実行できることが確認された。
- (5) 施工の容易性
典型的な補強工事のケーススタディの照査によれば、狭い空間や複雑な部位において、大型機材を用いずに容易に施工でき、安定した品質を確保できることが確認された。
挿入する「セラミックキャップバー (CCb)」の長さを確保できないような狭い空間での施工においても、カブラーによる機械式継手を用いて、安定した品質の作業を容易に施工できることが確認された。

2. 審査証明の前提
(1) 本審査証明は、依頼者からの試験データ等の資料を基に審査し、確認したものである。
(2) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、所定の材料を用いて、適正な品質管理のもとで製造されるものとする。
(3) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、適正な補強設計によって計画されるものとする。
(4) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、適正な機材および施工手順によって設置されるものとする。
(5) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、適正な管理のもとで施工されるものとする。

3. 審査証明の範囲
本審査証明は、主に地盤時の応答変位量が限定される地中構造物であって、施工が片側からしか実施できない形状の既設鉄筋コンクリート構造物に対し、鉄筋の両端に先端型定着体を、差込部に後端型定着体を設置した標準型、鉄筋の両端に先端型定着体を設置した両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」により、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
ただし、両側からの施工が可能な既設の構造物に対しては、変形性能の向上を目的としないことを前提として、鉄筋の両端に後端型定着体を設置した両端後端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。

4. 審査証明の詳細 建設技術審査証明書
平成 31 年 2 月 2 日

5. 審査証明の有効期限

6. 審査証明の依頼者
鹿島建設株式会社 カジマ・リノベイト株式会社
所在地: 東京都港区元赤坂 1-3-1 所在地: 東京都新宿区住吉町 1-20

解析によるせん断補強効果の確認

1. せん断補強効果の確認	1
1.1 検討方針	1
2. ステップ①における材料非線形解析	4
2.1 モデル化について	4
2.2 荷重条件	9
2.3 破壊判定基準	9
2.4 CCb のモデル化の検討	9
2.5 解析結果と実験結果の比較	10
3. ステップ②における材料非線形解析	15
3.1 モデル化について	15
3.2 荷重条件	15
3.3 破壊判定基準	15
3.4 解析結果	16
4. ステップ③における材料非線形解析	22
4.1 集中荷重系ステップ③ - 1 における材料非線形解析	22
4.1.1 モデル化について	22
4.1.2 荷重条件	27
4.1.3 破壊判定基準	28
4.1.4 解析結果	28
4.2 分布荷重系ステップ③ - 2 における材料非線形解析	31
4.2.1 モデル化について	31
4.2.2 荷重条件	35
4.2.3 破壊判定基準	36
4.2.4 解析結果	37
4.2.5 CCb 工法の安全裕度の確認	45
5. まとめ	47

1. せん断補強効果の確認

CCbによる補強効果については、建設技術審査証明報告書の各種実験にて検証している。女川原子力発電所2号炉においてCCbを適用した構造物（原子炉機器冷却海水配管ダクト、取水路（漸拡部）、軽油タンク室、復水貯蔵タンク基礎）の部材厚の多くは、実験で用いた部材厚と比べて大きい。そのため、実験を上回る部材厚でもCCbの補強効果が期待でき適用性を有することを材料非線形解析により補足確認する。また、部材厚以外にもせん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度、せん断ひび割れ抑制効果及び載荷方法が女川原子力発電所2号炉においてCCb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と異なっている。したがって、これらの項目についても実構造物諸元相当の解析により、CCb工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっても、建設技術審査証明報告書に示されるせん断補強効果が期待できることを材料非線形解析により補足確認する。

なお、材料非線形解析に用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されているコンクリート標準示方書（2017）において標準とされている以下の手法とする。

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

材料非線形解析に用いる解析コードは、上記の鉄筋コンクリートの構成則を有する解析コードの1つである「UC-win/WCOMD ver2.02」及び「WCOMD Studio ver1.00」とする。

1.1 検討方針

CCbを考慮した材料非線形解析により力学的挙動を確認し、女川原子力発電所2号炉においてせん断補強が必要な構造物へのCCbの適用性をステップ①～③により確認する（図表1-1）。

なお、比較のために、従来工法である先施工のせん断補強鉄筋を想定した材料非線形解析も以下の各ケースで実施することとする。

- ・ステップ①：CCbの解析モデル上の考慮方法について検証

材料非線形解析を実施するにあたり、CCbの解析モデル上の考慮方法を確認する必要がある。そこで、建設技術審査証明報告書におけるせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し、実験結果と解析結果においてせん断耐力を比較することにより、CCbのモデル化方

法の妥当性を検証する。

なお、CCbは先施工せん断補強鉄筋と異なり、セラミック定着体により定着しており、この定着方法の違いをモデル上で考慮する必要がある。そのため「コンクリート工学年次論文集 Vol. 26、No. 2、2004 せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に、供試体をモデル化する際に要素内鉄筋比を0とする区間を設けることとし、実験への再現性が高い区間設定を基にステップ②以降の検討を実施する。

- ・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

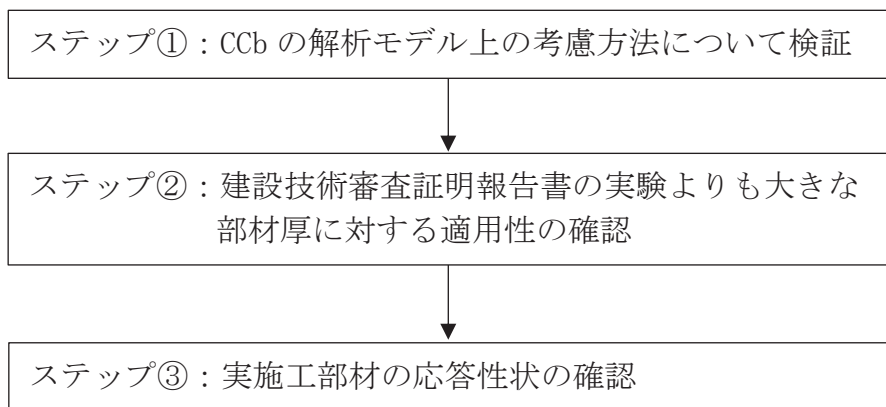
部材厚が大きい対象に対しても適用可能であることを示すため、女川原子力発電所2号炉においてCCbを適用した構造物のうち最も部材厚の大きい軽油タンク室の底版（ $t=1,500\text{mm}$ ）を想定して材料非線形解析を実施する。なお、解析モデルのせん断スパン比はステップ①と同様（相似形）とする。ステップ①とステップ②の解析結果の比較により、建設技術審査証明報告書の実験よりも大きな部材厚に対してもCCbを適用できることを確認する。

- ・ステップ③：実施工部材の応答性状の確認

ステップ①・②にて適用性を確認の上、実施工部材として、構造物を棒部材でモデル化して地震応答解析及び構造照査を実施している構造物のうち部材厚が最大である取水路（漸拡部）隔壁を対象に材料非線形解析を実施し、CCbの適用性を確認する。

また、取水路（漸拡部）隔壁に作用する主な荷重は頂版から受ける集中荷重と慣性力であり、地震時増分土圧等が作用する分布荷重系の荷重形態とは異なることから、部材に作用する荷重の違いに着目し、地震時増分土圧が作用する部材のうち部材厚が最大である軽油タンク室側壁についても材料非線形解析を実施し、CCbの適用性を確認する。

適用性を確認する際には、取水路（漸拡部）隔壁及び軽油タンク室側壁の部材諸元相当でも変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋の降伏状況に対して特異な状況とならないことを確認する。



図表 1-1 女川原子力発電所 2 号炉の Ccb の
適用性確認フロー

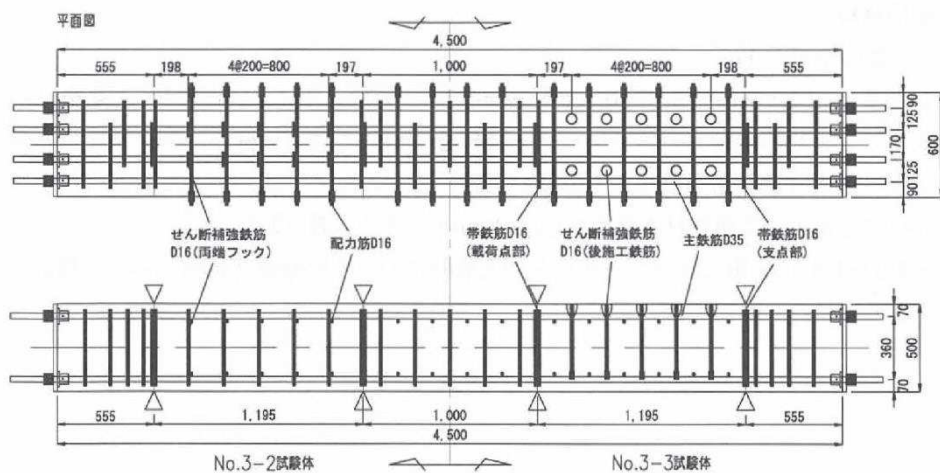
2. ステップ①における材料非線形解析

2.1 モデル化について

材料非線形解析では、建設技術審査証明報告書の実験で用いた試験体 (No. 3-3) をモデル化する。図表 2-1 にモデル化の対象とする試験体 No. 3-3 を、図表 2-2 に載荷装置を示す。なお、女川原子力発電所 2 号炉において Ccb を施工した条件と同様に、Ccb 先端位置が主鉄筋の図心としていることから、図表 2-1 に示す試験体のうち No. 3-3 を選定している。

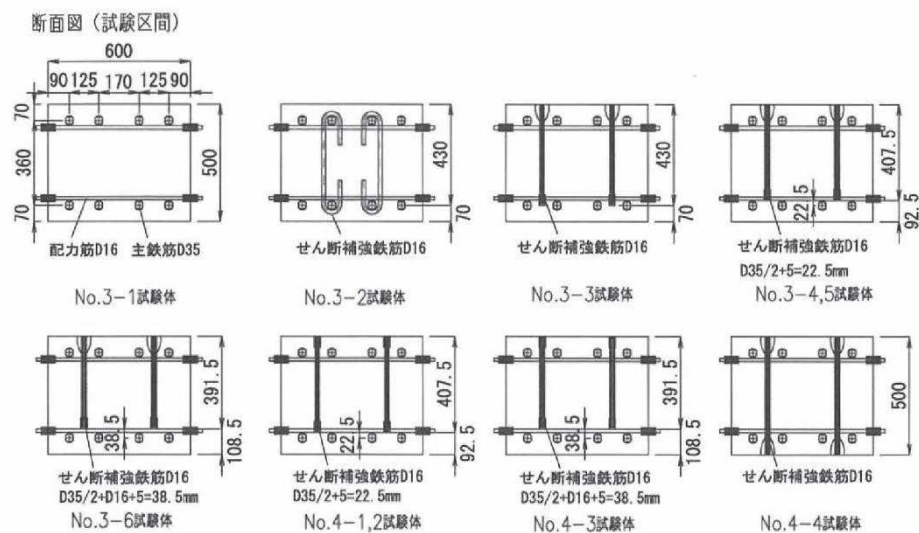
構造部材をモデル化する際は、平面応力要素にてモデル化する。構造部材のモデル化にあたっては、土木学会マニュアルを参考に、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋領域としてモデル化する。

	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	1,195mm					
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 p_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			

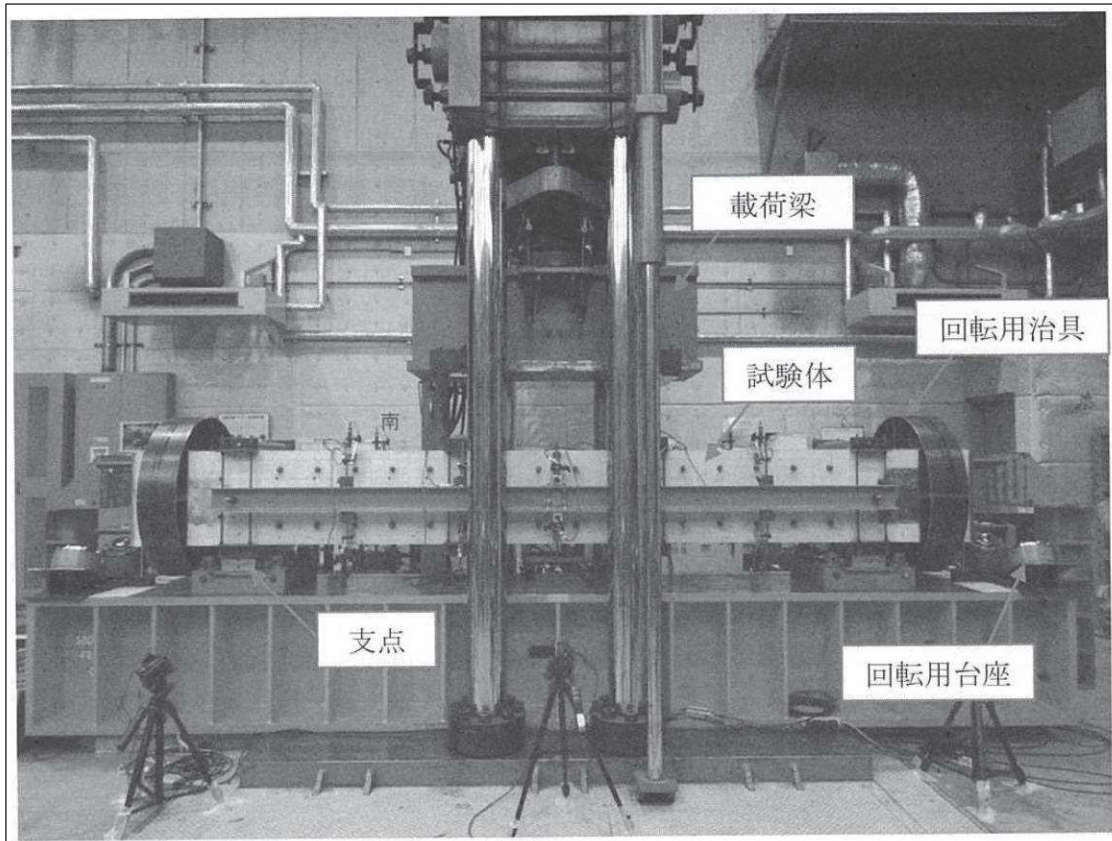


No.3-1 試験体は、試験区間のせん断補強鉄筋がないものである

No.3-4~3-6 試験体、No.4-1~4-4 試験体のせん断補強鉄筋配置位置は、No.3-3 試験体と同様である



図表 2-1 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

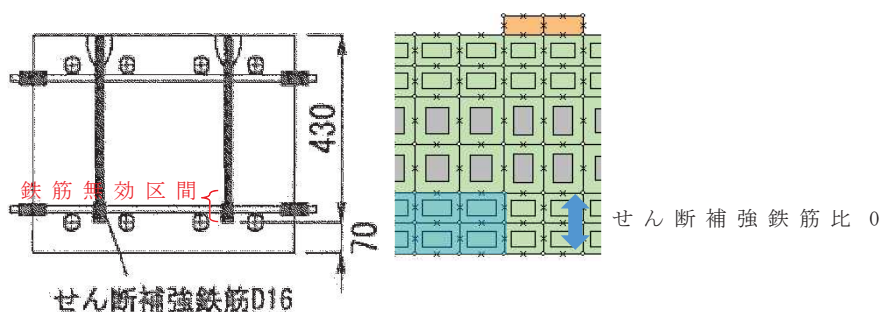


図表 2-2 载荷装置
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

CCb を適切にモデル化するため、「コンクリート工学年次論文集 Vol. 26、 No. 2、 2004 せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に、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ものとして CCb のモデル化を検討する。具体的には、該当する部分のせん断補強鉄筋比を 0 としてモデル化を実施する。モデル化のイメージを図表 2-3 に示す。

以上の考え方をベースに CCb のモデル化を実施する際は以下のケースを実施して CCb のモデル化手法を検討する。

- ・ CCb1 : 主鉄筋領域 (芯かぶりの 2 倍分) に相当する厚さ (CCb 先端から 4.4D) のせん断補強鉄筋比を 0 とするケース
- ・ CCb2 : 上記のモデルをベースに CCb の必要定着長である 5D 分の厚さのせん断補強鉄筋比を 0 とするケース



図表 2-3 CCb のモデル化イメージ

上記の予備解析の結果から、CCb の再現性が高い条件を用いて、以下のケースを実施する。

- ・ ケース① - A : 従来工法によるせん断補強を想定してモデル化するケース
- ・ ケース① - B : CCb を考慮して、鉄筋無効区間を設定するケース (単調載荷)
- ・ ケース① - C : CCb を考慮して、鉄筋無効区間を設定するケース (交番載荷)

なお、解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を、図表 2-4 及び図表 2-5 に示す。

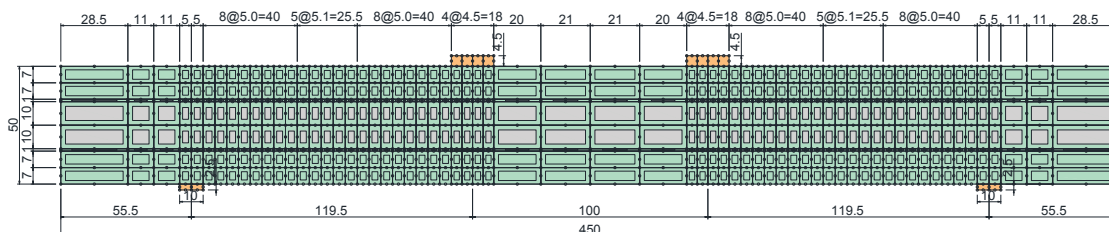
以上の条件により設定した解析モデル図を、図表 2-6 に示す。

図表 2-4 コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 f'c	42.4 N/mm ²
引張強度 ft	2.80 N/mm ² (少数 2 位に四捨五入) (=0.23×42.4 ^{2/3} =2.7967)
ヤング係数 Ec	WCOMD で自動計算

図表 2-5 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋のヤング係数	196.4 kN/mm ²
CCb 鉄筋・せん断補強鉄筋のヤング係数	197.5 kN/mm ²
主鉄筋の降伏強度	515.9 N/mm ²
CCb 鉄筋・せん断補強鉄筋の降伏強度	388.9 N/mm ²



(単位 : cm)

図表 2-6 解析モデル図

2.2 荷重条件

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

2.3 破壊判定基準

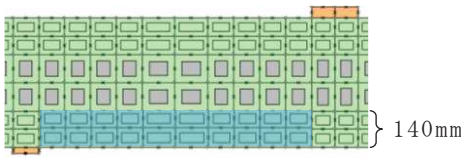
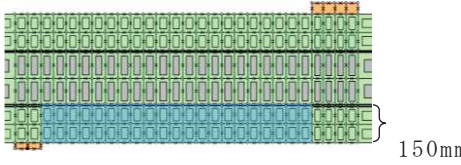
材料非線形解析における構造部材の破壊判定は、荷重が減少した場合とし、その直前の最大荷重をせん断耐力とする。

2.4 CCb のモデル化の検討

CCb のモデル化検討の結果を図表 2-7 に示す。表に示すとおり、実験で得られたせん断耐力 563kN に対し、CCb1 のケースのせん断耐力は 676kN（実験値の 120%）、CCb2 のケースのせん断耐力は 550kN（実験値の 98%）であった。

評価の結果、CCb1 のケースより CCb2 のケースが実験値の耐力を再現できていることから、CCb を材料非線形解析でモデル化する際は、主筋軸心から必要定着長 5D（D：鉄筋径）を鉄筋無効区間としてモデル化することとする。なお、従来工法である先施工によるせん断補強鉄筋を考慮した場合の材料非線形解析も併せて実施することにより CCb の有効性を確認することとする。

図表 2-7 CCb の定着区間のモデル化

CCb1		CCb 先端側主筋領域（かぶりの 2 倍）の鉄筋比を $0.70\text{mm} \times 2 = 140\text{mm}$ ・実験値（No. 3-3）：563kN ・解析によるせん断耐力：676kN（実験値の 120%）
CCb2		CCb 先端側主筋軸心から必要定着長 5D の鉄筋比を $0.70\text{mm} + 5 \times 16 = 150\text{mm}$ ・実験値（No. 3-3）：563kN ・解析によるせん断耐力：550kN（実験値の 98%）

2.5 解析結果と実験結果の比較

材料非線形解析で得られる結果と建設技術審査証明報告書における実験値を比較して概ね整合的であることを確認する。

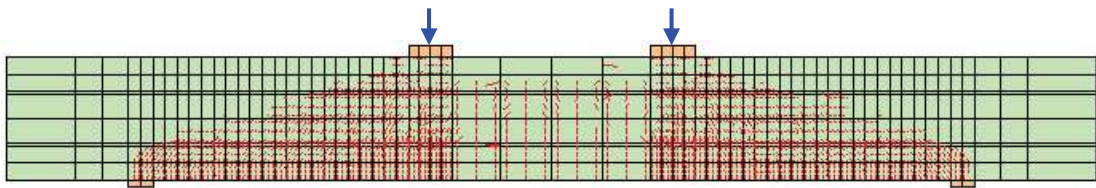
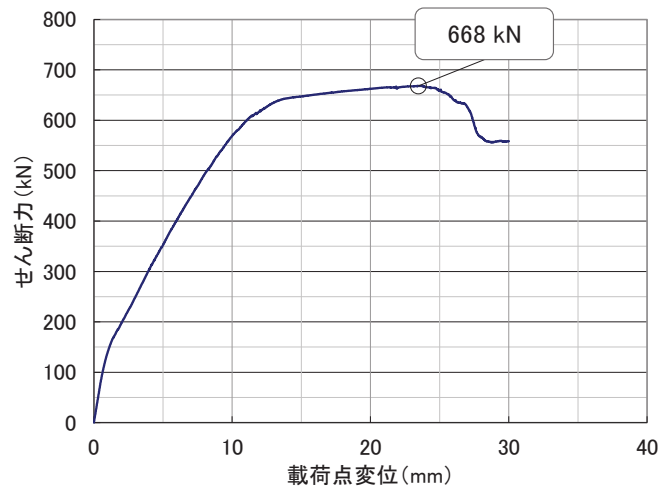
ケース① - A～ケース① - Cの解析結果を図表 2-8～図表 2-10 に、実験結果を図表 2-11 に示す。破壊基準に至るまでの最大荷重をせん断耐力とする。

実験値(No. 3-3 : 563kN)に対して、ケース① - Aのせん断耐力はCCbの定着不良領域を設定していないため実験値に対して上回ったと考えられ、ケース① - Bではせん断耐力は概ね実験を再現できている。また、ひび割れ状況についてはケース① - Aが部材全体にひび割れが分散しているのに対し、ケース① - Bにおいては、若干ひび割れの分散性が低下しており、スパン中央側に寄った部位に発生している。これは、参考にした論文である「コンクリート工学年次論文集 Vol. 26、 No. 2、 2004 せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響」においても同様の傾向が確認できており、CCbの定着不良分を適切にモデル化でき、応力の伝達状況も再現できていると考えられる。

実験では交番载荷が行われており、再現解析においては载荷条件が模擬できることが望ましい。ケース① - Cは、図表 2-10 で示すようにひび割れ状況は部材全体にひび割れが分散しており、特異な状況は確認されなかった。

なお、荷重の再現性は単調载荷により確認されており、せん断耐力は良好に再現されている。

- ・ ケース① - A
最大荷重：668kN



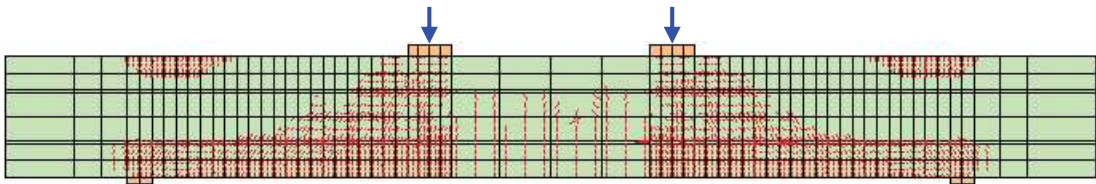
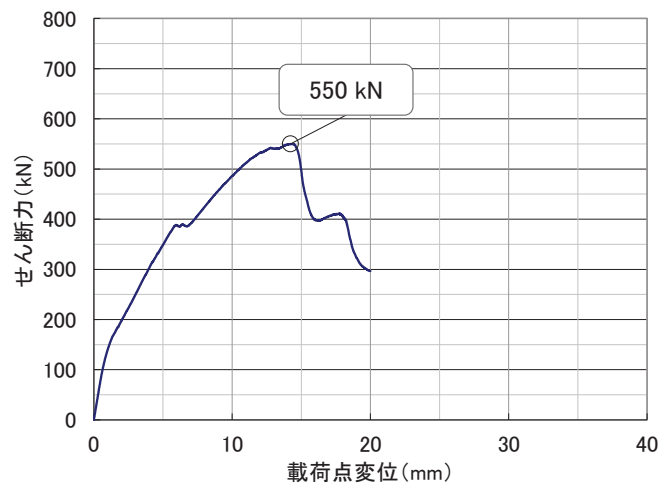
図表 2-8 ケース① - Aの荷重-変位関係とひび割れ状況

※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（以下、同様）。

・ ケース① - B

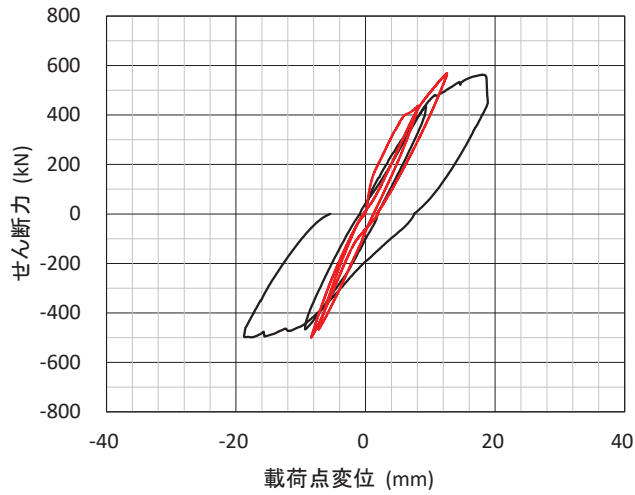
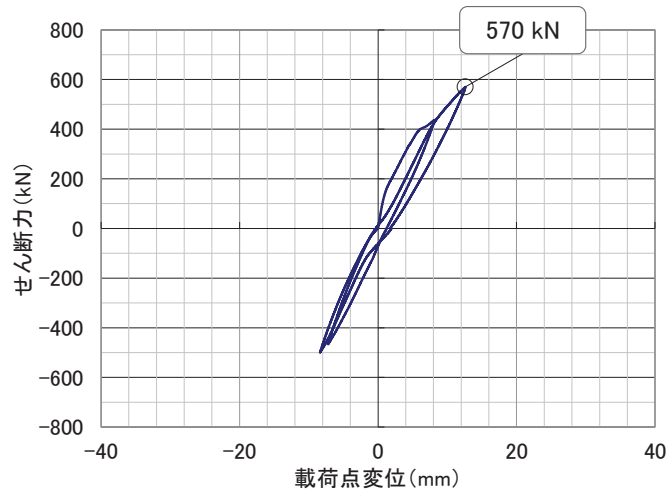
最大荷重：550kN（実験値の98%）

実験値（No. 3-3）：563kN



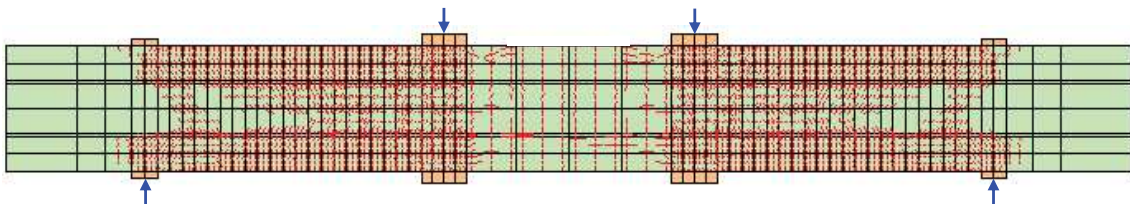
図表 2-9 ケース① - Bの荷重-変位関係とひび割れ状況

- ケース① - C
 最大荷重：570kN（実験値の 101%）
 実験値（No. 3-3）：563kN



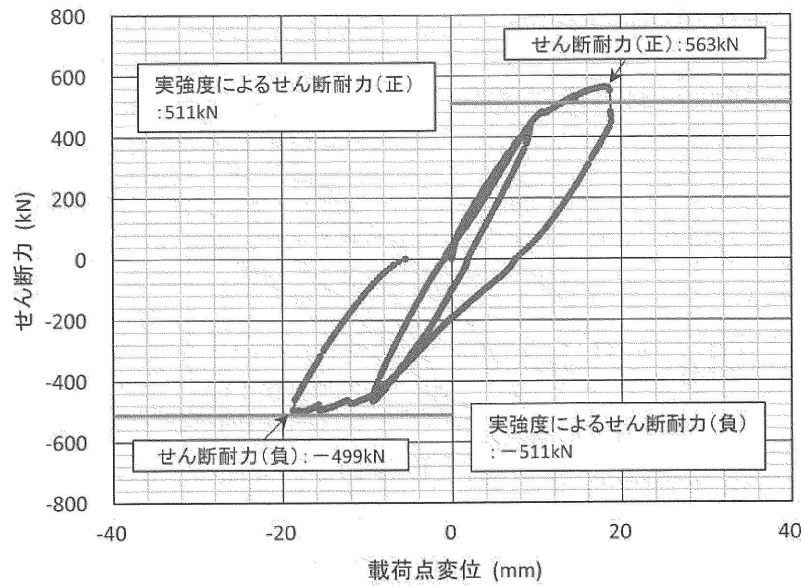
荷重変位図

(赤：材料非線形解析 黒：実験値)

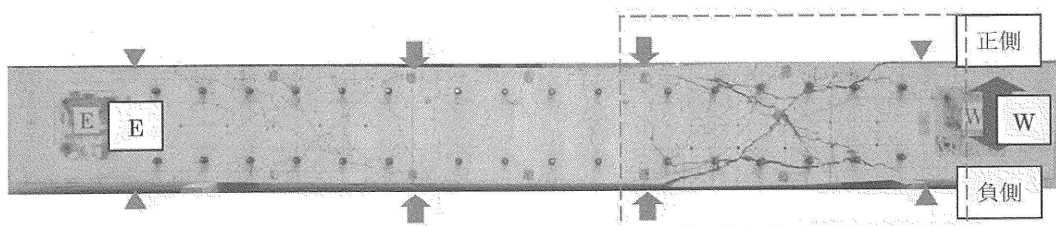


図表 2-10 ケース① - C の荷重-変位関係とひび割れ状況

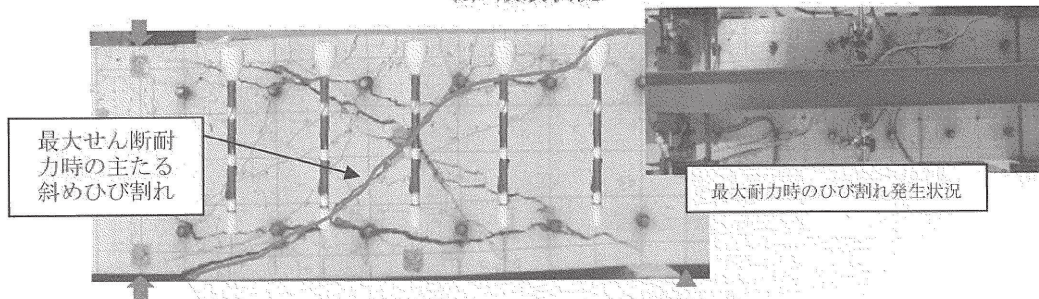
●No.3-3 試験体



(a) せん断力-変位関係



(b) 破壊状況



※CCbは合成により設置位置を明示

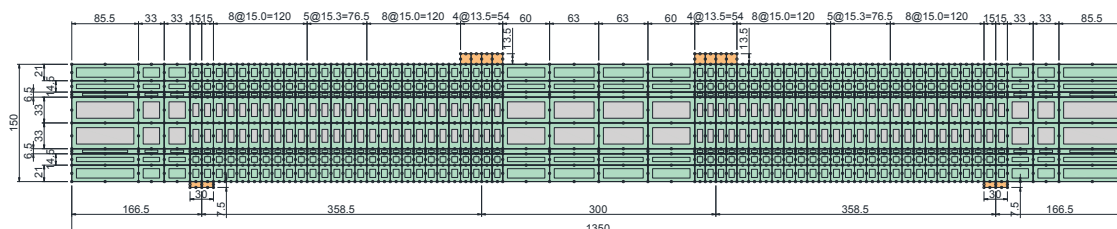
(c) 破壊状況 - 近景 (西側) -

図表 2-11 構造実験 (No. 3-3) の荷重 - 変位関係と
ひび割れ状況
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

3. ステップ②における材料非線形解析

3.1 モデル化について

部材厚は軽油タンク室の底版の部材を参考に設定し、せん断スパン比 (a/d) がステップ①と同等となるような部材寸法 (ステップ①の躯体の相似形) とする。配筋については、主鉄筋、せん断補強鉄筋共に鉄筋比が一定となるように、2.1 に準じて設定する。なお、CCb の鉄筋無効区間はステップ①で確認された主鉄筋軸心から 5D とする。また、材料物性については、構造実験と同一とする。解析モデル図を図表 3-1 に示す。



(単位 : cm)

図表 3-1 解析モデル図

3.2 荷重条件

2.2 に準じて設定する。

3.3 破壊判定基準

2.3 に準じて設定する。

3.4 解析結果

従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース② - Aとし、CCb工法によるせん断補強を想定したケースをケース② - Bとする。参考として、交番載荷としたケースをケース② - Cとする。実施するケースを図表 3-2 に、それぞれの結果を図表 3-3～図表 3-5 に示す。併せて、ステップ①、②の評価結果一覧を、図表 3-6 に示す。

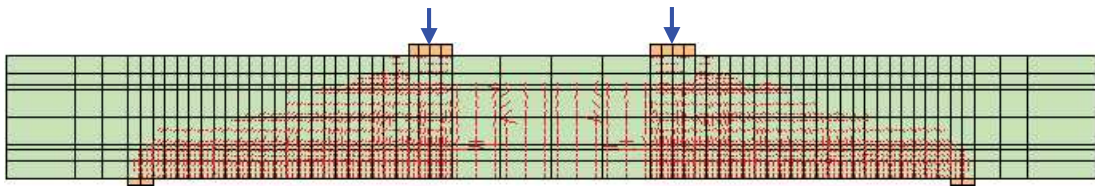
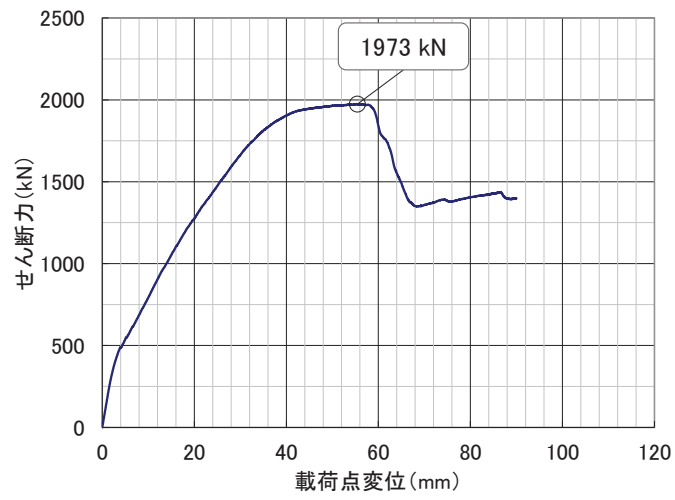
ケース② - Aのせん断耐力は 1973kN、ケース② - Bのせん断耐力は 1841kN であり、CCb を考慮したことによる耐力の低減率は約 93%となった。ここで、ケース① - Aとケース① - Bから得られるせん断耐力の低減率は約 82%であった。これは、建設技術審査証明報告書における β_{aw} を算出する際の理論と同様の傾向であり、部材厚が大きい程、従来工法に対する CCb によるせん断耐力の低下割合は小さくなることが確認できた。ひび割れ状況についても全体的にひび割れが分散しており、従来工法と顕著な差は見られなかった。ステップ①では CCb によるひび割れの分散性が低下したが、ステップ②においては、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 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 で顕著な差は見られなかった。

また、ケース② - Cの交番載荷のケースにおけるせん断耐力は 1950kN であり、低減率は約 99%となった。ひび割れ状況についても、部材全体にひび割れが分散しており、特異な状況は確認されなかった。

図表 3-2 ケース一覧

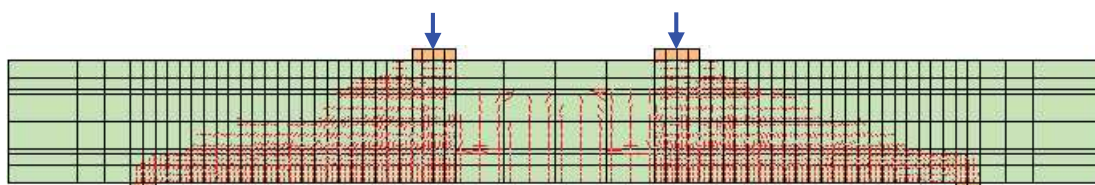
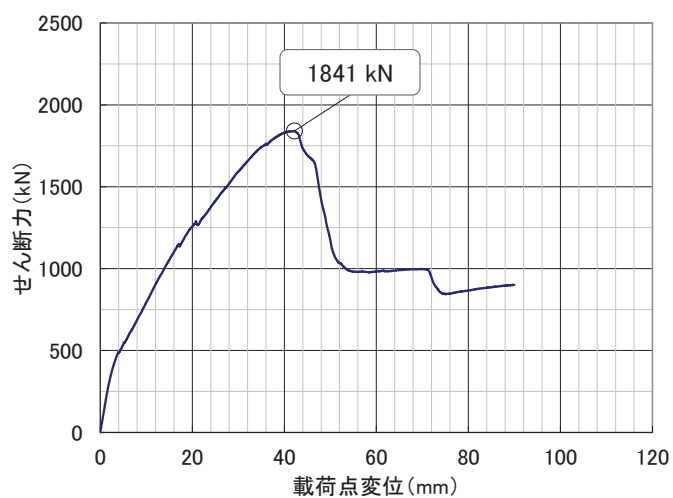
ケース	荷重載荷方法
② - A	単調載荷
② - B	単調載荷
② - C	交番載荷

- ・ ケース② - A
最大荷重：1973kN



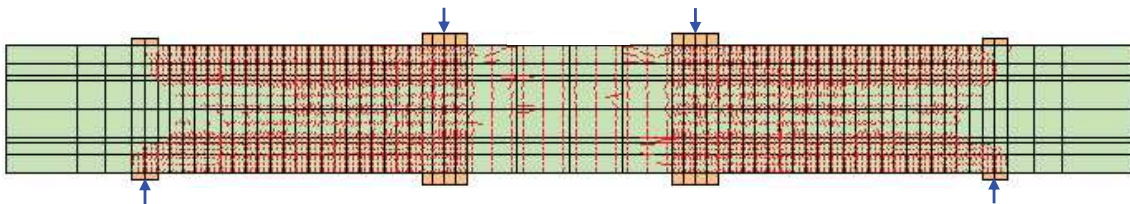
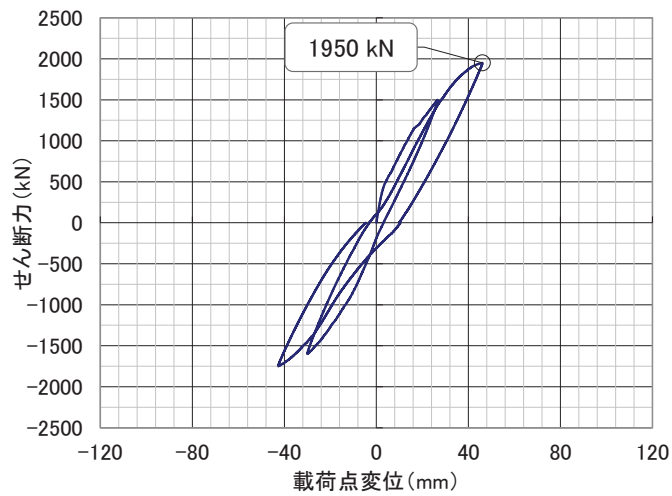
図表 3-3 ケース② - Aの荷重-変位関係とひび割れ状況

- ・ ケース② - B
最大荷重 : 1841kN



図表 3-4 ケース② - Bの荷重-変位関係とひび割れ状況

- ・ ケース② - C
最大荷重：1950kN



図表 3-5 ケース② - Cの荷重-変位関係とひび割れ状況

図表 3-6 評価結果一覧

ケース	せん断耐力 (kN)	従来工法と CCb 工法の比率
① - A (単調載荷)	668	—
① - B (単調載荷)	550	0.82
① - C (交番載荷)	570	0.85
② - A (単調載荷)	1973	—
② - B (単調載荷)	1841	0.93
② - C (交番載荷)	1950	0.99

ケース② - A及びケース② - Bの解析における初期ひび割れ発生時、初期降伏時、終局荷重時の変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況を図表 3-7 及び図表 3-8 に示す。表に示すとおり、初期ひび割れ時、初期降伏時及び終局荷重時においては、従来工法と CCb 工法の間で CCb による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。

図表 3-7 ケース② - A (従来工法) の解析結果

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

図表 3-8 ケース② - B (CCb 工法) の解析結果

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

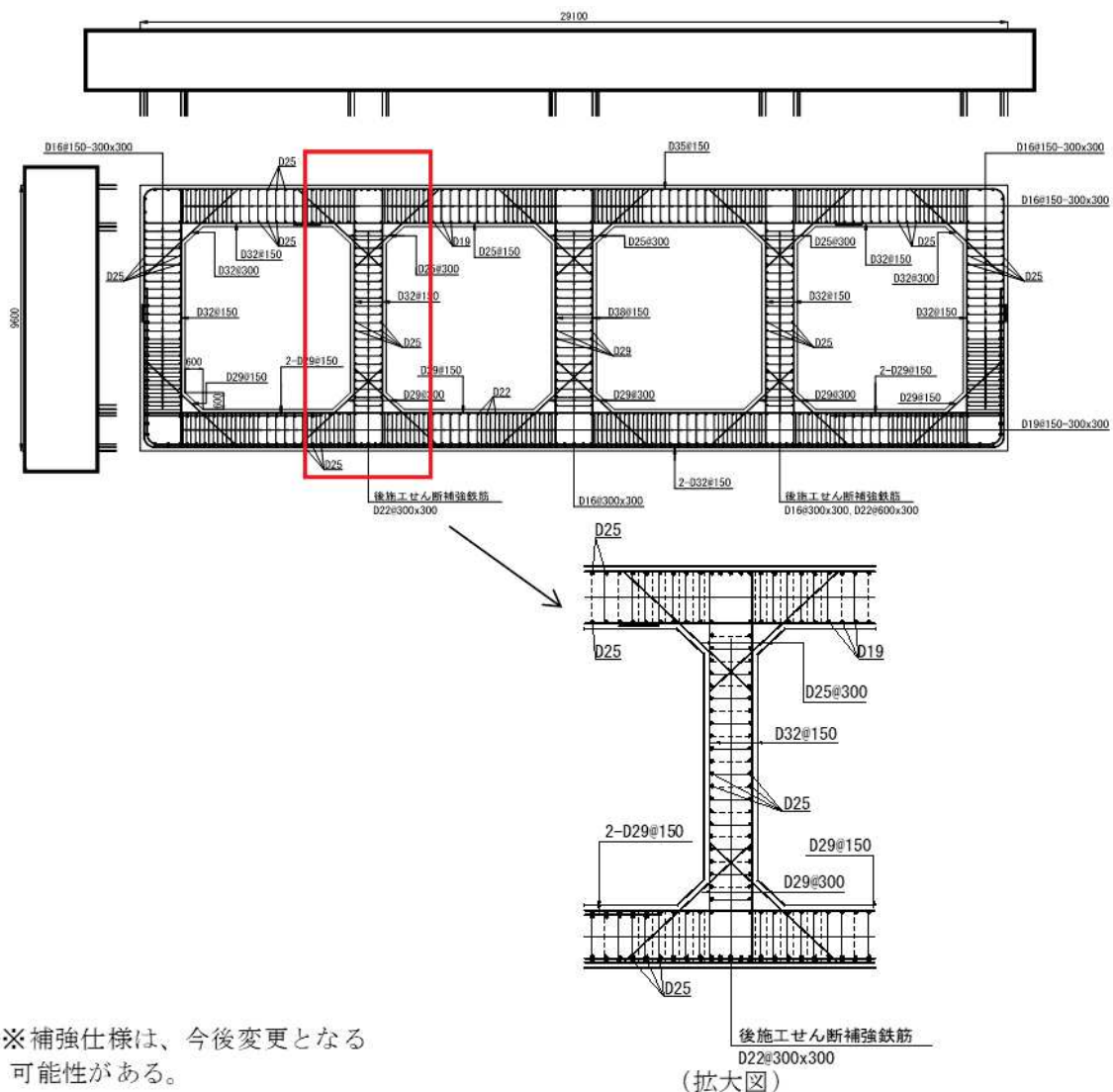
4. ステップ③における材料非線形解析

部材に作用する荷重の違いに着目し、取水路（漸拡部）隔壁（ステップ③ - 1：集中荷重系）及び軽油タンク室側壁（ステップ③ - 2：分布荷重系）を対象に材料非線形解析を実施する。

4.1 集中荷重系ステップ③ - 1における材料非線形解析

4.1.1 モデル化について

2.1 に準じて設定する。なお、部材諸元は取水路（漸拡部）の部材のうち部材厚及びせん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート圧縮強度がステップ①、ステップ②と異なる隔壁とする。対象とする部材は左隔壁とする。対象とする部材を図表 4-1 に示す。



図表 4-1 評価対象部材

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

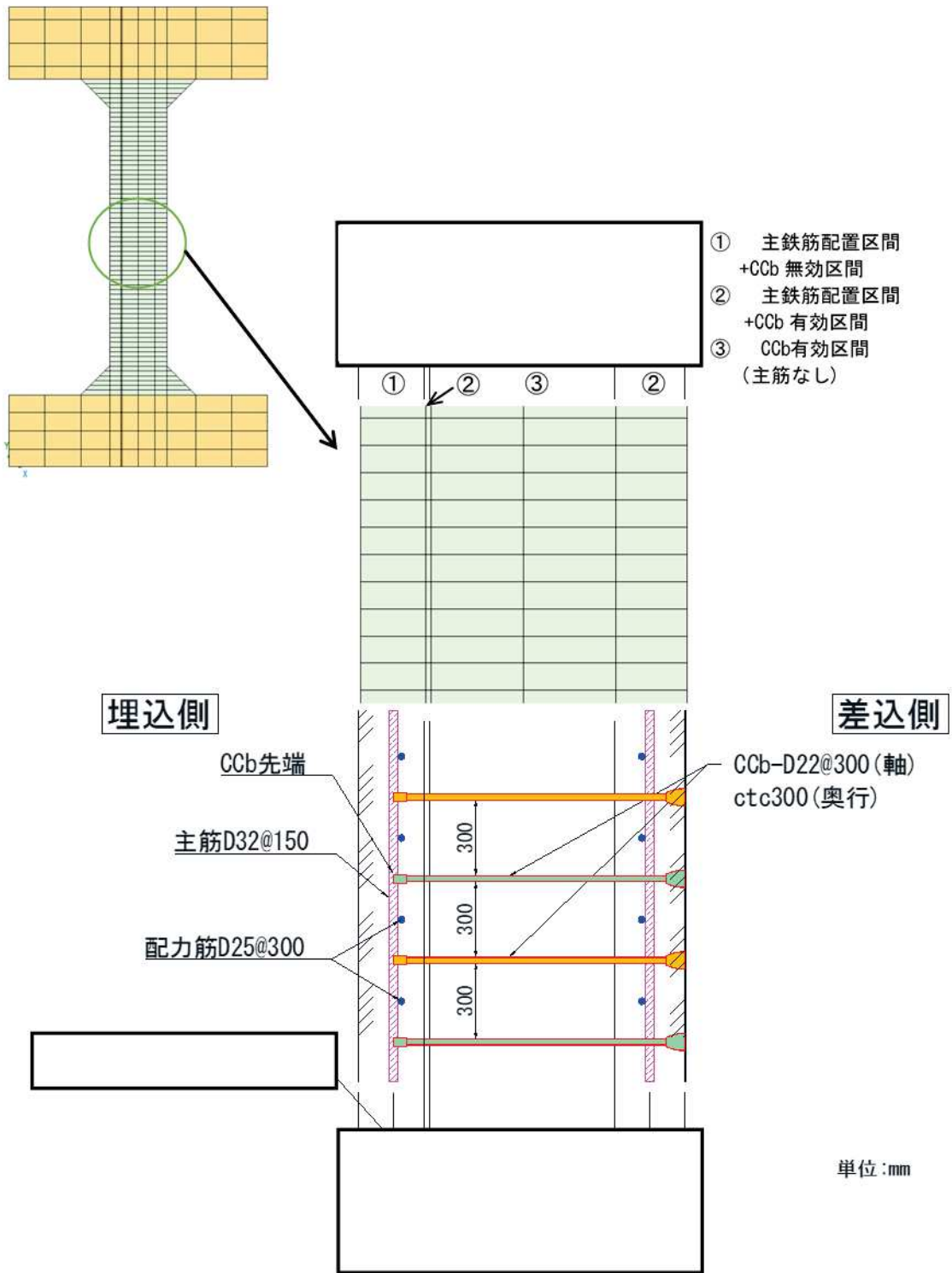
解析モデルについては、主鉄筋位置や Ccb の鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を検討する。なお、奥行き方向の厚さは 100cm とする。

梁部材の高さ方向の分割については図表 4-2 に示すとおりとする。

主鉄筋芯かぶりは 130mm であるので、 $260\text{mm}(=130+130)$ を主鉄筋が配置される要素の高さとする。Ccb の無効区間は主鉄筋芯かぶり+Ccb 定着長分 ($130+5D=130+5\times 22=240\text{mm}$) とする。主鉄筋が配置されかつ Ccb 有効区間は $20\text{mm}(=260-240)$ とする。左側主鉄筋領域と右側主鉄筋領域の間の領域を 2 分割して、合計 5 分割とした。

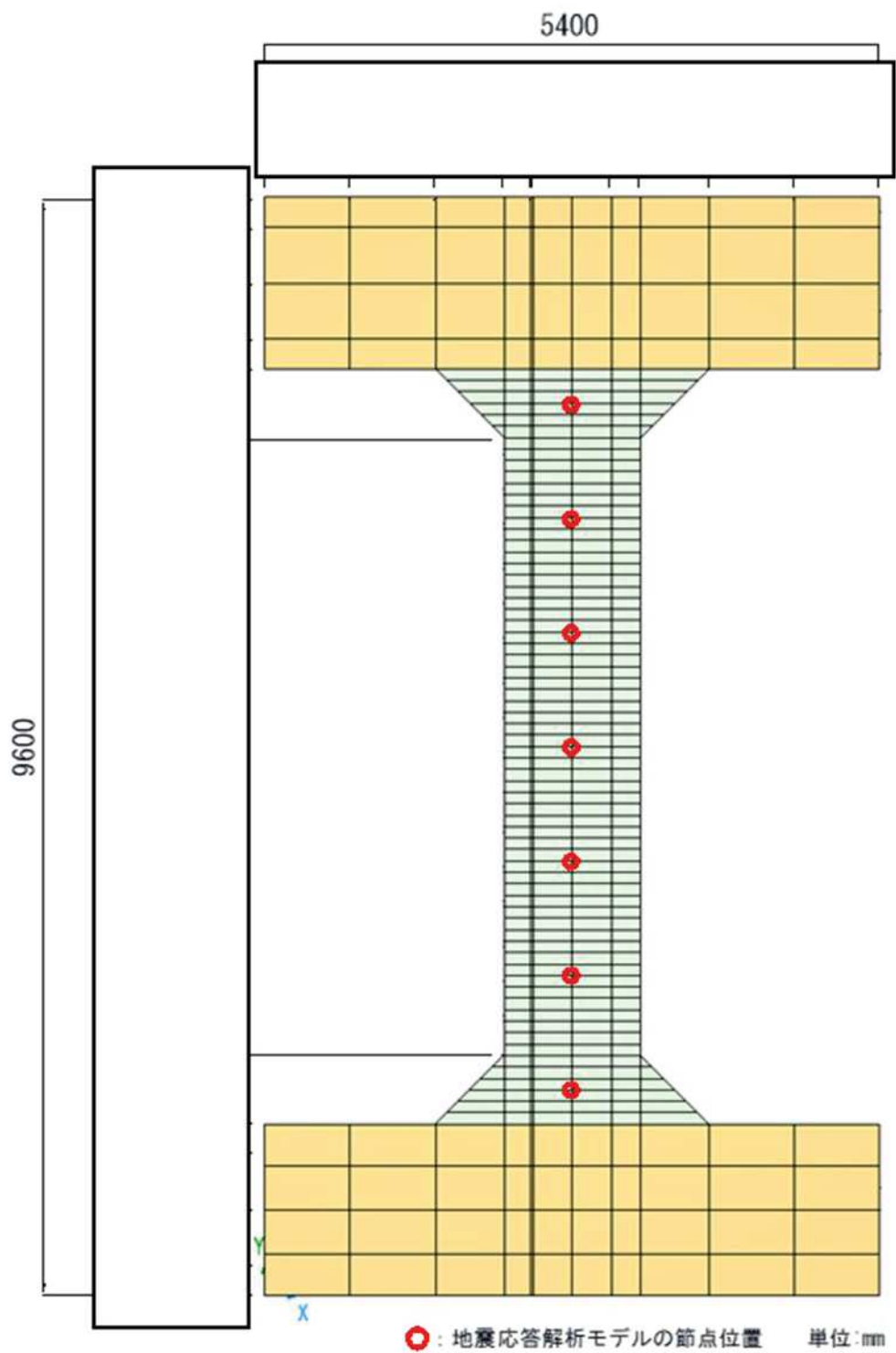
梁部材の軸方向は、地震応答解析モデルでの梁要素の節点位置を考慮して分割を行うものとする。

解析モデル図を図表 4-3 に示す。



図表 4-2 要素分割の考え方

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



図表 4-3 解析モデル図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

4 条-別紙 17-添付 2-25

コンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を、図表 4-4 及び図表 4-5 に示す。

ステップ②の解析モデルとステップ③ - 1 の解析モデルの違いを、図表 4-6 に示す。表に示すとおり、せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート強度及び荷重の載荷方法が解析により応答性状及びせん断補強効果にどの程度影響するかを確認する。

図表 4-4 コンクリートの材料特性

項目	設定値
設計基準強度 f'_{ck}	20.5 N/mm ²
引張強度 f_t	1.72 N/mm ²
ヤング係数 E_c	解析プログラム内で自動計算

図表 4-5 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200 kN/mm ²
主鉄筋の降伏強度	3450 N/mm ²
CCb 鉄筋の降伏強度	345 N/mm ²

図表 4-6 解析モデルの違い

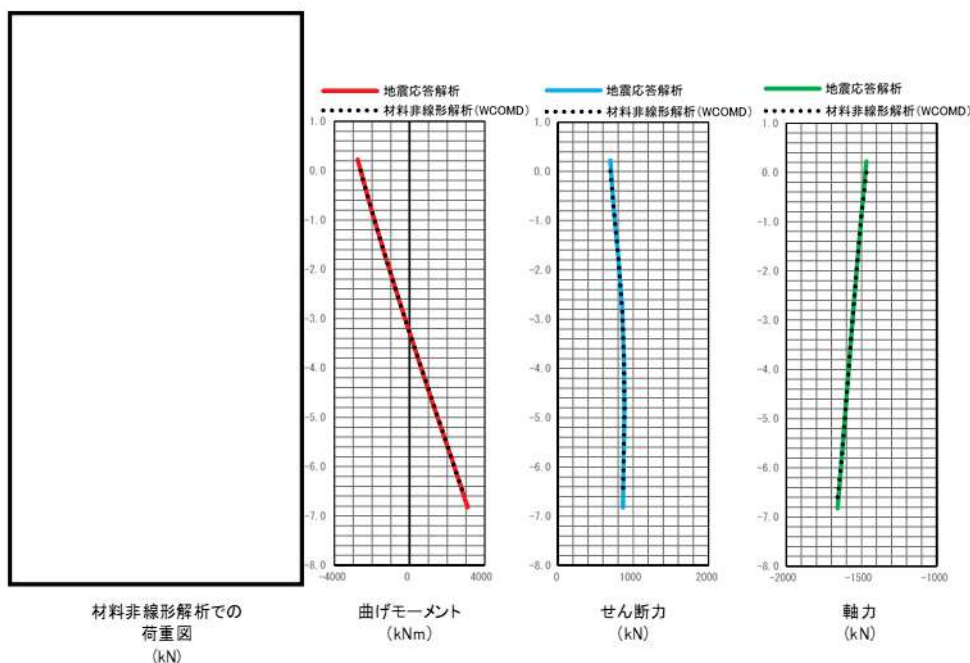
項目	ステップ②	ステップ③ - 1
部材厚	1500 mm	1200 mm
せん断スパン比	2.78	6.17
主鉄筋比	1.28 %	0.44 %
コンクリート強度	42.4 N/mm ²	20.5 N/mm ²
載荷方法	強制変位 (集中荷重系)	断面力に基づく 節点力 (集中荷重系)

4.1.2 荷重条件

荷重は、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から得られる断面力を用いるものとする。具体的には、取水路（漸拡部）をモデル化した地震応答解析から得られる断面力分布（曲げモーメント、軸力、せん断力）を再現できる荷重を材料非線形解析モデルに作用させる。図表 4-7 に示す断面力分布より、材料非線形解析に作用させる荷重が地震応答解析の応答断面力を良好に再現できていることがわかる。

材料非線形解析では、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、荷重を 1/100 にしたものを漸増载荷する。

荷重ケースについては、CCb を考慮したせん断耐力評価式による照査値が最も厳しくなる Ss-D2 を対象とする。取水路（漸拡部）の Ss-D2 のせん断耐力評価式による照査結果を、図表 4-8 に示す。



図表 4-7 荷重図及び断面力分布

図表 4-8 取水路（漸拡部）の照査結果（暫定値^{※1}）

基準地震動	左隔壁の照査値 ^{※2}
Ss-D1	-
Ss-D2	0.61
Ss-D3	-
Ss-F1	-
Ss-F2	-
Ss-F3	-
Ss-N1	-

※1：暫定値であり、今後変更となる可能性がある。

※2：照査値＝照査用せん断力／せん断耐力

ここで、

照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

4.1.3 破壊判定基準

ステップ③-1の破壊判定基準は、荷重－変位関係において変位が急増した場合とし、その直前の荷重をせん断耐力とする。

4.1.4 解析結果

解析ケースを図表 4-9 に示す。従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-1-Aとし、CCb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-1-Bとする。

せん断耐力を図表 4-10 に示す。ケース③-1-A、ケース③-1-Bのせん断耐力は、1678kN、1488kN であり、CCb を考慮したことによる耐力の低減率は約 88%となった。

それぞれの結果を図表 4-11 及び図表 4-12 に示す。初期ひび割れ発生時、作用荷重時のそれぞれの段階において、変形状況は従来工法と CCb 工法で顕著な差は見られず、概ね整合的な結果となった。ひび割れ状況についても、従来工法と顕著な差は見られず、ステップ①、②と同様の傾向となった。CCb 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 工法の間で顕著な差は見られなかった。以上より、従来工法と CCb 工法の間で CCb による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。

参考に初期降伏時及び終局荷重時の状況を示す。終局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 工法で破壊形態に顕著な差は見られなかった。

なお、従来工法と CCb 工法でひび割れが繋がる位置が異なるのは、CCb 工法の鉄筋無効区間による影響である。

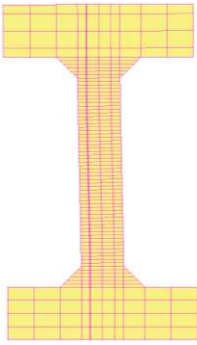
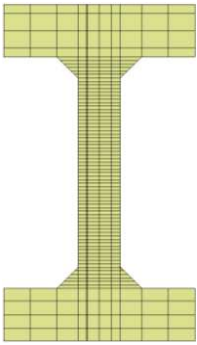
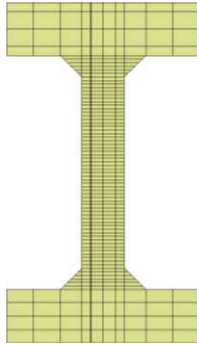
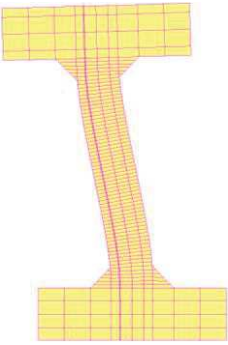
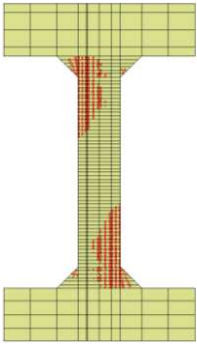
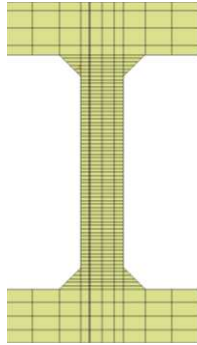
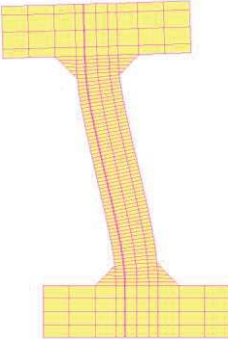
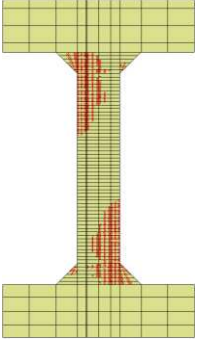
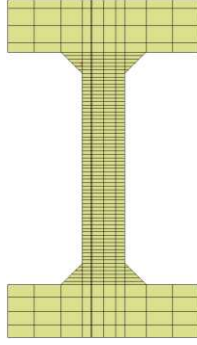
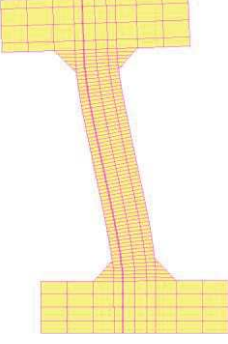
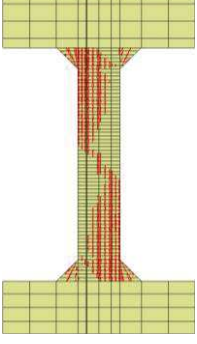
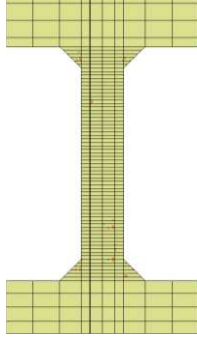
図表 4-9 ケース一覧

ケース	地震動	せん断補強鉄筋設置方法
③ - 1 - A	Ss-D2	従来工法（先施工）
③ - 1 - B	Ss-D2	CCb 工法（後施工）

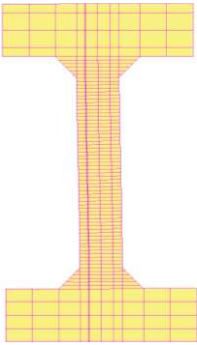
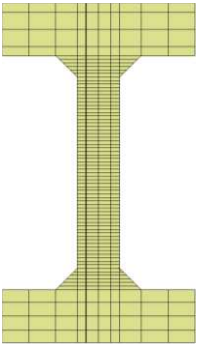
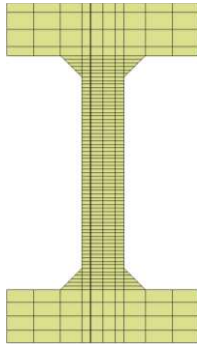
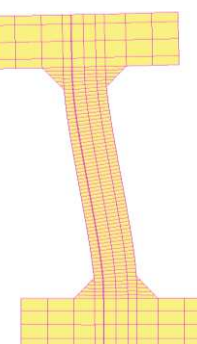
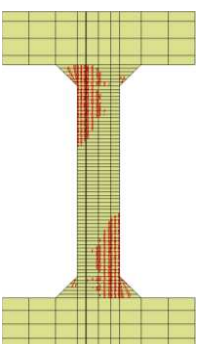
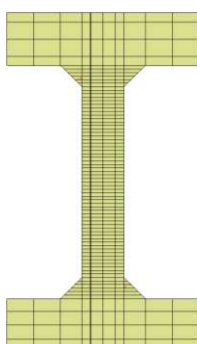
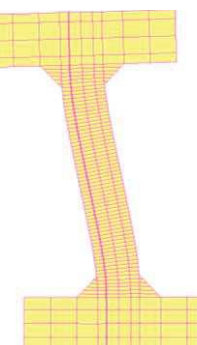
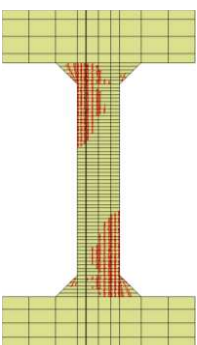
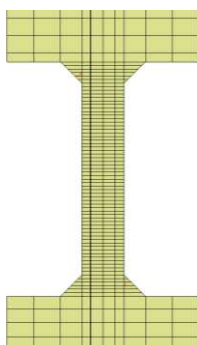
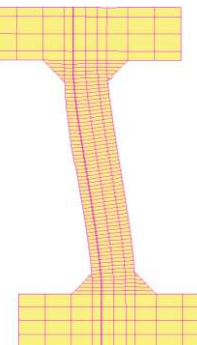
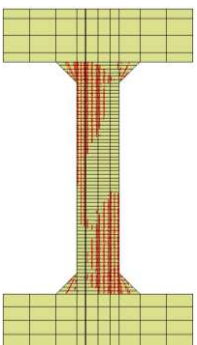
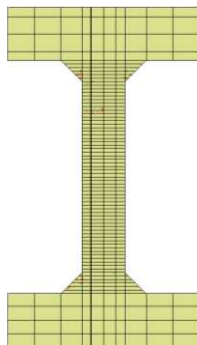
図表 4-10 せん断耐力結果一覧

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

図表 4-11 ケース③- 1 - A (従来工法) の解析結果

初期ひび割れ発生時の損傷状況	 変形状況 (変形倍率 100 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況
作用荷重時の損傷状況	 変形状況 (変形倍率 50 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況
初期降伏時の損傷状況	 変形状況 (変形倍率 50 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況
終局荷重時の損傷状況	 変形状況 (変形倍率 20 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況

図表 4-12 ケース③- 1 - B (CCb 工法) の解析結果

<p>初期ひび割れ発生時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (変形倍率 100 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>作用荷重時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (変形倍率 50 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>初期降伏時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (変形倍率 50 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>終局荷重時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (変形倍率 20 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>

4.2 分布荷重系ステップ③ - 2における材料非線形解析

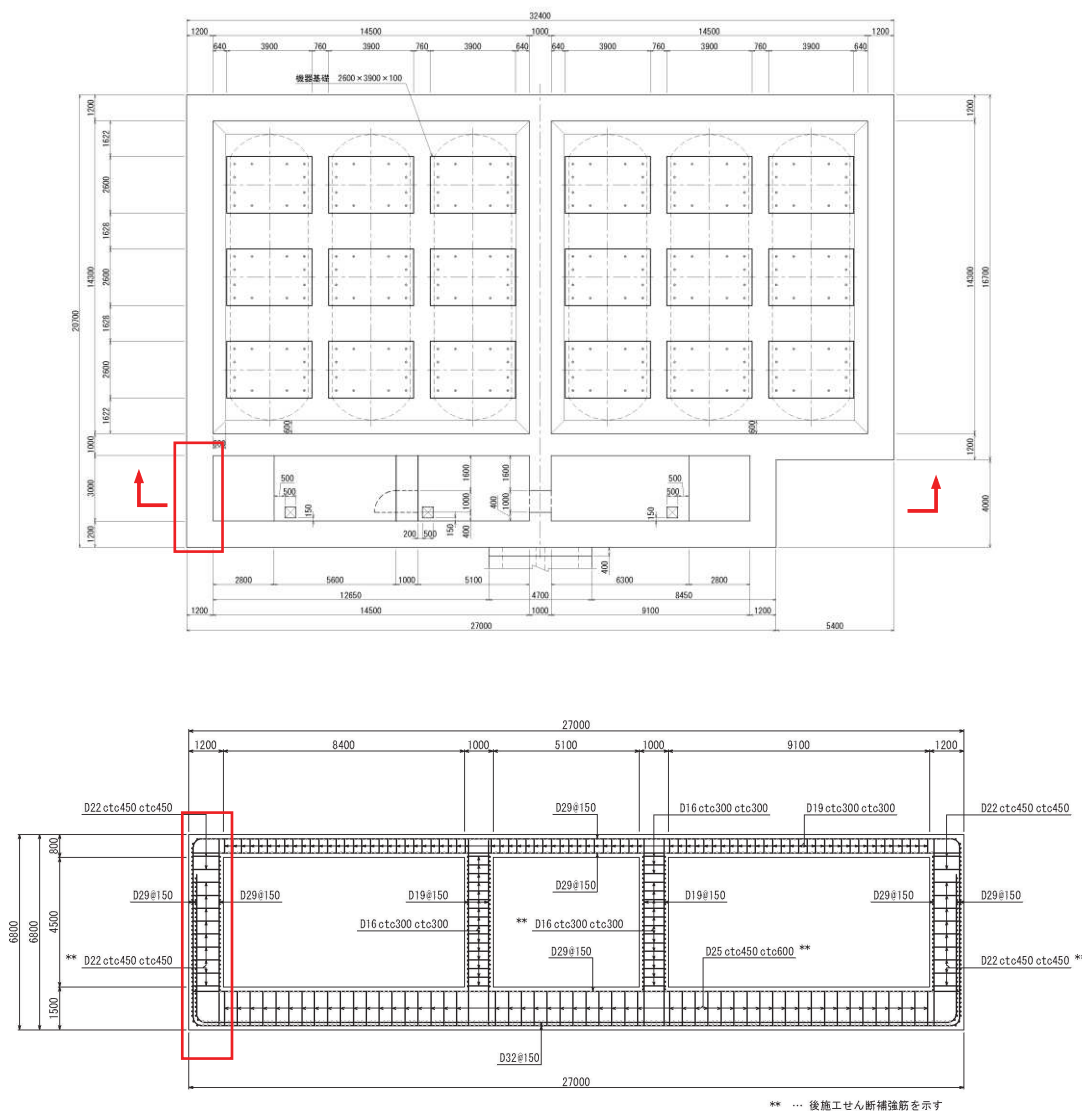
ステップ③ - 2では、荷重条件を変更し以下に示す2ケース（ステップ③ - 2 - 1、ステップ③ - 2 - 2）の材料非線形解析を実施する。

- ▶ ステップ③ - 2 - 1：二次元有限要素解析による地震応答解析から得られる応答断面力分布を再現できる荷重を作用させる。
- ▶ ステップ③ - 2 - 2：等分布荷重を作用させる。

ステップ③ - 2 - 2は、ステップ③ - 2 - 1の解析を実施した結果、等価せん断スパンを考慮した場合のせん断スパン比が小さく、破壊形態がディープビーム的な破壊（せん断圧縮破壊）となり、せん断補強工法の差異が確認できなかったことから、破壊形態が斜め引張破壊となるように荷重条件を変更したものである。

4.2.1 モデル化について

2.1 に準じて設定する。なお、検討対象は軽油タンク室の部材のうち、地震時増分土圧等の分布荷重を受ける側壁とする。対象とする部材を図表4-13に示す。



□：評価対象部材

図表 4-13 評価対象部材

4 条-別紙 17-添付 2-31

解析モデルについては、主鉄筋位置やCCbの鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を検討する。なお、奥行き方向の厚さは100cmとする。

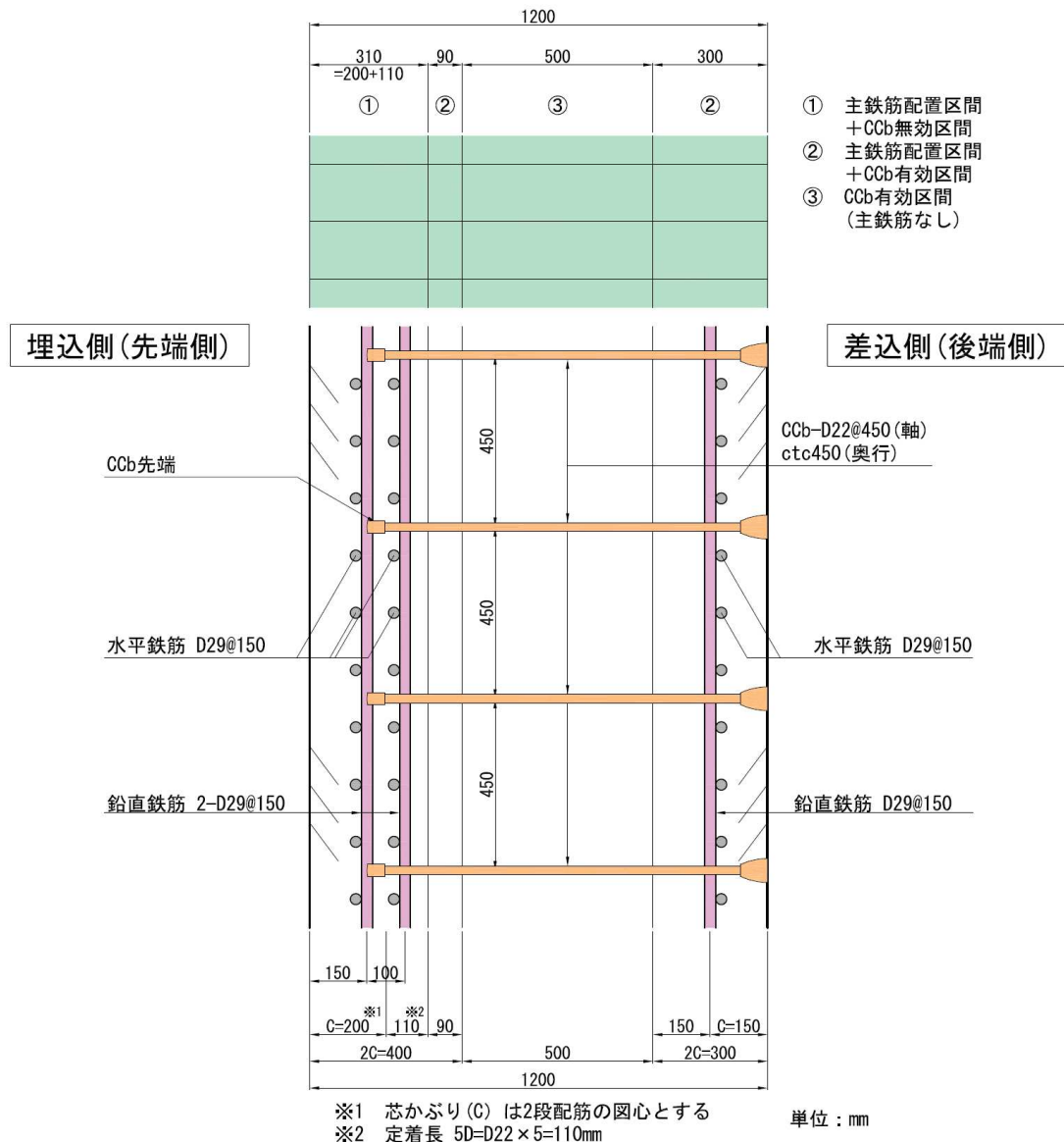
梁部材の高さ方向の分割については、図表4-14に示すとおりとする。

主鉄筋芯かぶりは、埋込側（先端側）200mm（1段目150mm+2段目250mmの中心）、差込側（後端側）150mmであるので、埋込側（先端側）400mm（200+200）、差込側（後端側）300mm（150+150）が、主鉄筋が配置される要素の高さとなる。

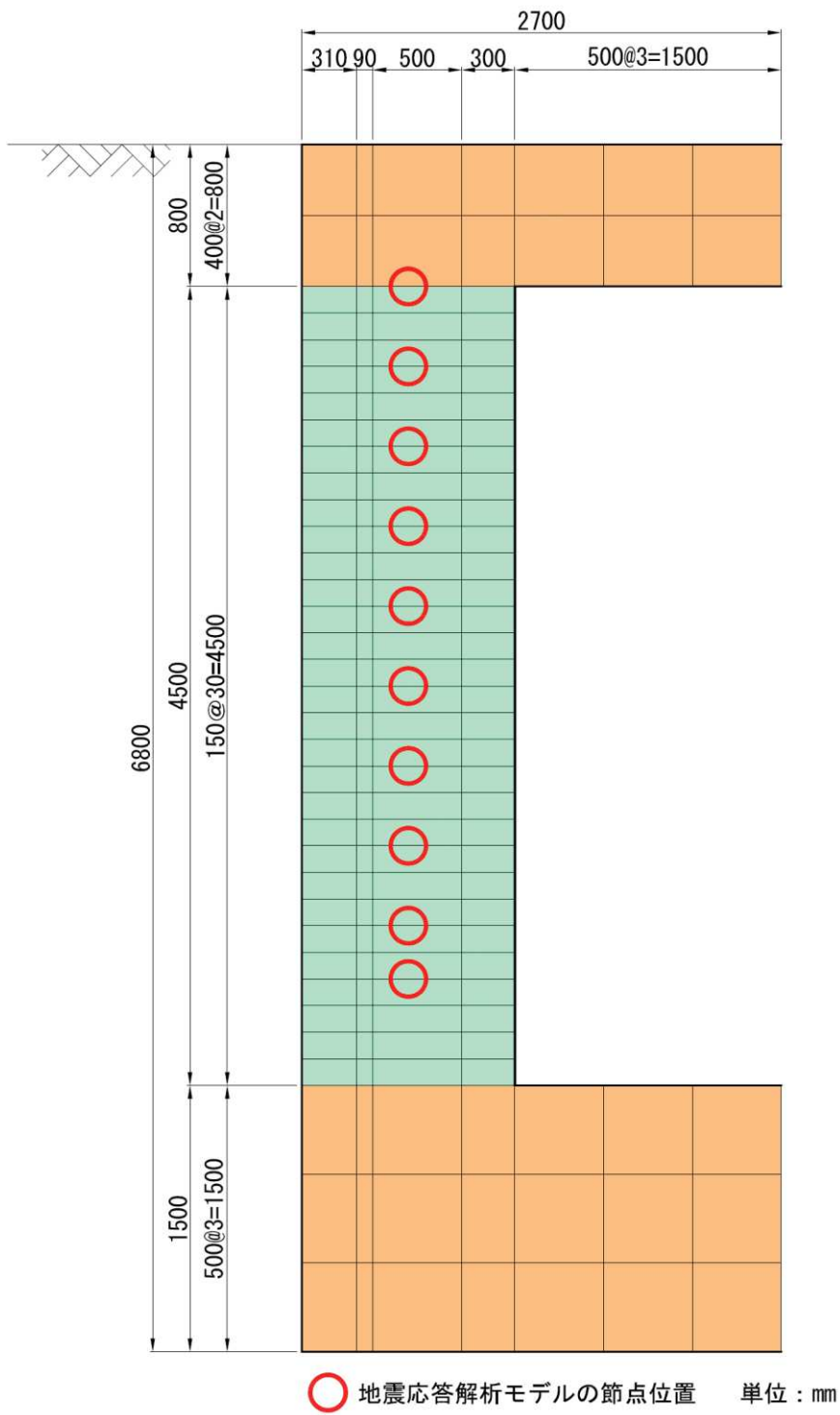
CCbの無効区間は、部材外側主鉄筋芯かぶり+CCb定着長分（ $200+5D=200+5\times 22=310\text{mm}$ ）とする。主鉄筋が配置されかつ、CCb有効区間は90mm（ $400-310$ ）とする。

梁部材の軸方向は、地震応答解析モデルでの梁要素の節点位置を考慮して分割を行うものとする。

解析モデル図を図表4-15に示す。



図表 4-14 要素分割の考え方



図表 4-15 解析モデル図

コンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を図表 4-16 及び図表 4-17 に示す。

ステップ②及びステップ③ - 1 の解析モデルとステップ③ - 2 の解析モデルの違いを、図表 4-18 に示す。表に示すとおり、せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート強度及び荷重の荷重方法が解析により応答性状及びせん断補強効果にどの程度影響するか確認する。

図表 4-16 コンクリートの材料特性

項目	設定値
設計基準強度 f'_{ck}	20.5 N/mm ²
引張強度 f_t	1.72 N/mm ²
ヤング係数 E_c	解析プログラム内で自動計算

図表 4-17 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200 kN/mm ²
主鉄筋の降伏強度	3450 N/mm ²
CCb の降伏強度	345 N/mm ²

図表 4-18 解析モデルの違い

項目	ステップ②	ステップ③ - 1	ステップ③ - 2
部材厚	1500mm	1200mm	1200mm
せん断スパン比	2.78	6.17	4.50
主鉄筋比	1.28%	0.44%	0.71%
コンクリート強度	42.4 N/mm ²	20.5 N/mm ²	20.5 N/mm ²
荷重方法	強制変位 (集中荷重系)	断面力に基づく 節点力 (集中荷重系)	断面力に基づく 節点力 (分布荷重系)

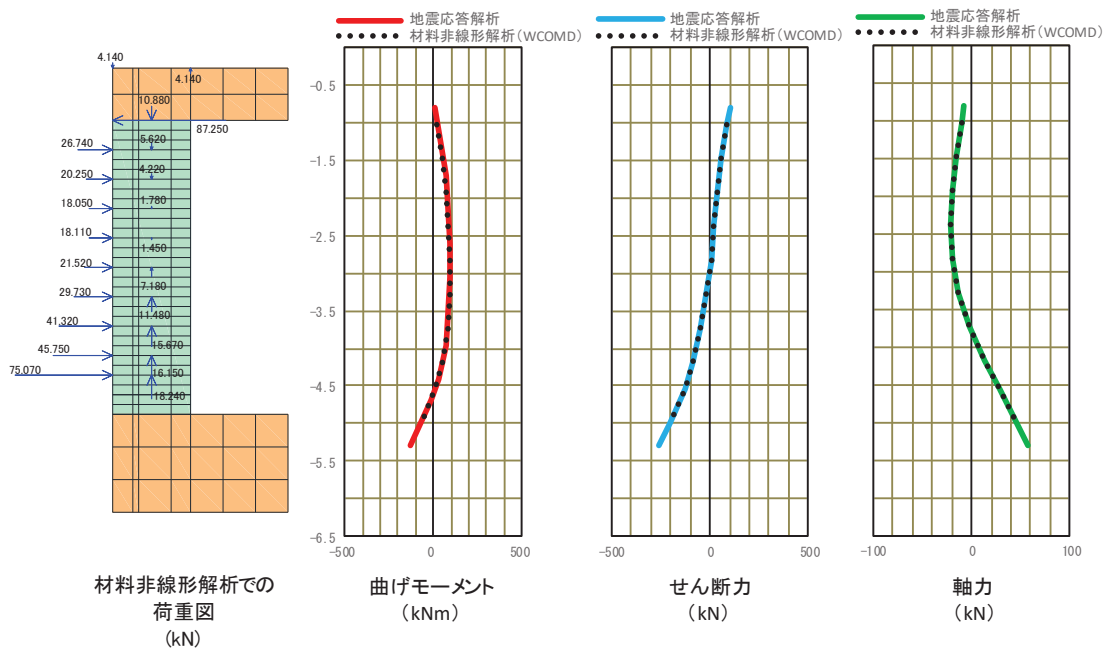
4.2.2 荷重条件

(1) ステップ③ - 2 - 1 における荷重条件

荷重は、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から得られる断面力を用いるものとする。具体的には、軽油タンク室をモデル化した地震応答解析から得られる断面力分布（曲げモーメント、軸力、せん断力）を再現できる荷重を材料非線形解析モデルに作用させる。図表 4-19 に示す断面力分布より、材料非線形解析に作用させる荷重が地震応答解析の応答断面力を良好に再現できていることがわかる。

材料非線形解析では、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、荷重を 1/100 にしたものを漸増载荷する。

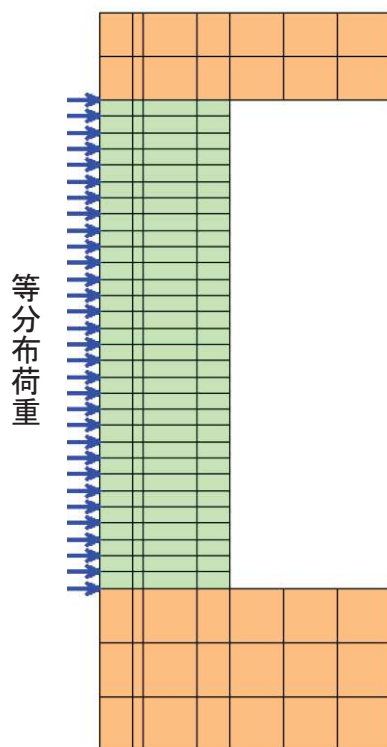
なお、荷重ケースについては、取水路（漸拡部）と同様に S_s-D2 を対象とする。



図表 4-19 荷重図及び断面力分布

(2) ステップ③ - 2 - 2における荷重条件

破壊形態が斜め引張破壊となるように、等分布荷重を材料非線形解析モデルの各節点に作用させるものとする。載荷図を図表 4-20 に示す。



図表 4-20 載荷図

4.2.3 破壊判定基準

4.1.3 に準じて設定する。

4.2.4 解析結果

(1) ステップ③ - 2 - 1における解析結果

解析ケースを図表 4-21 に示す。従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 2 - 1 - Aとし、CCb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 2 - 1 - Bとする。

せん断耐力を図表 4-22 に示す。ケース③ - 2 - 1 - A、ケース③ - 2 - 1 - Bのせん断耐力は、2635kN、2610kNであり、CCb 工法を考慮したことによる耐力の低減率は99%であり、従来工法とCCb 工法のせん断耐力の差がほとんど見られなかった。これは、等価せん断スパンを考慮した場合のせん断スパン比 ($a/d=0.66$) (図表 4-23) 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。

それぞれの結果を図表 4-24、図表 4-25 に示す。初期ひび割れ発生時、作用荷重時のそれぞれの段階において、変形状況は従来工法とCCb 工法で顕著な差は見られず、概ね整合的な結果となった。ひび割れ状況についても、顕著な差は見られず、CCb 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 工法の間で顕著な差は見られなかった。

参考に初期降伏時及び終局荷重時の状況を示す。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。

以上より、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おいても、従来工法とCCb 工法の間でCCb による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。

※：ディープビーム的な破壊は、図表 4-26 に示すように、支点と載荷点を結ぶ直線付近に斜めひび割れが発生し、ウェブコンクリートの圧縮破壊により生じる。

図表 4-21 ケース一覧

ケース	地震動	せん断補強鉄筋設置方法
③ - 2 - 1 - A	Ss-D2	従来工法（先施工）
③ - 2 - 1 - B	Ss-D2	CCb 工法（後施工）

図表 4-22 せん断耐力結果一覧

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

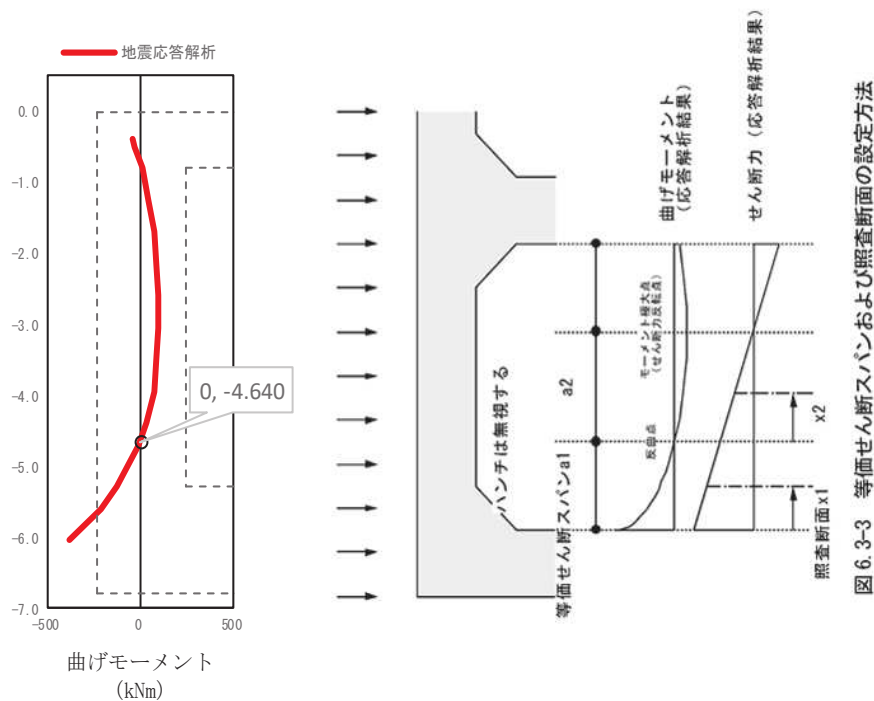
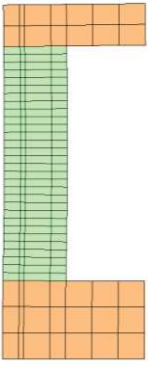
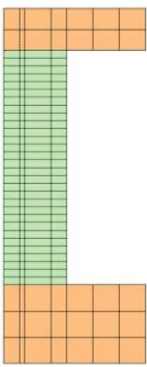
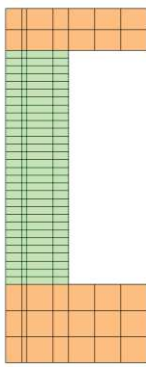
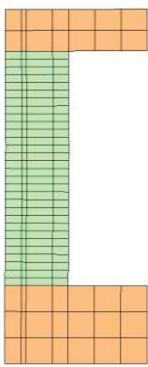
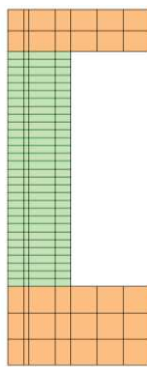
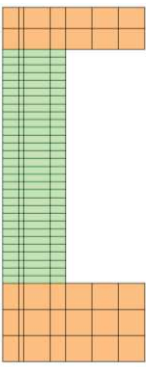
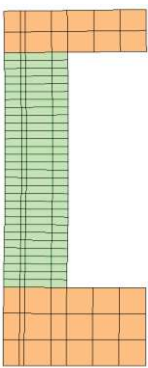
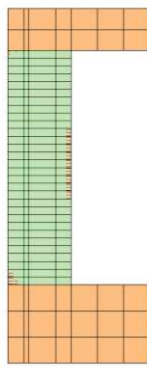
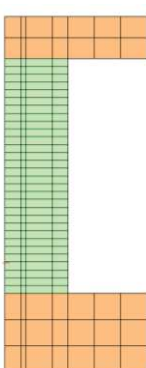

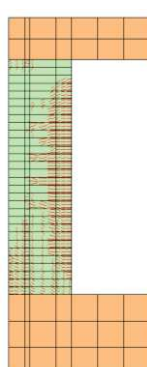



図 6.3-3 等価せん断スパンおよび照査断面の設定方法

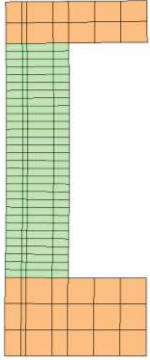
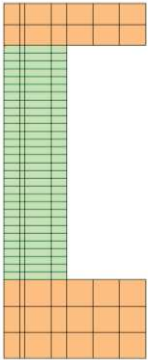
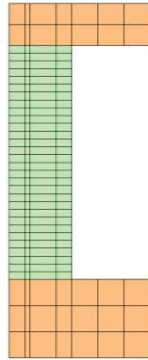
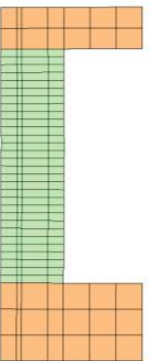
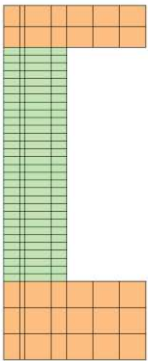
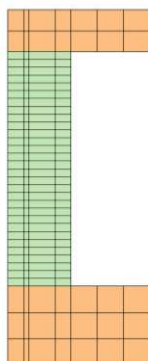
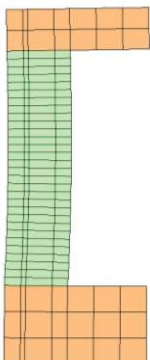
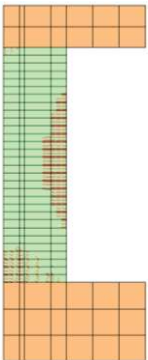
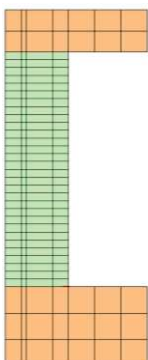
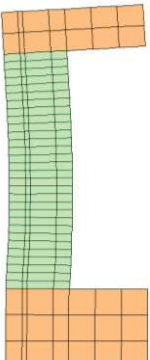
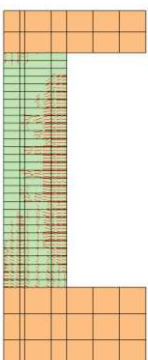
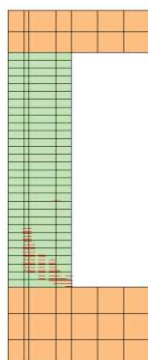
- 等価せん断スパン a1
底版天端 : GL-5.300m
曲げモーメントの反曲点 : GL=-4.640m
 $a1 = 5.300 - 4.640 = 0.660\text{m}$
- 部材の有効高 $d = 1.200\text{m} - 0.200\text{m} = 1.000\text{m}$
- 等価せん断スパンを考慮した場合のせん断スパン比 a/d
 $a/d = 0.660 / 1.000 = 0.66$

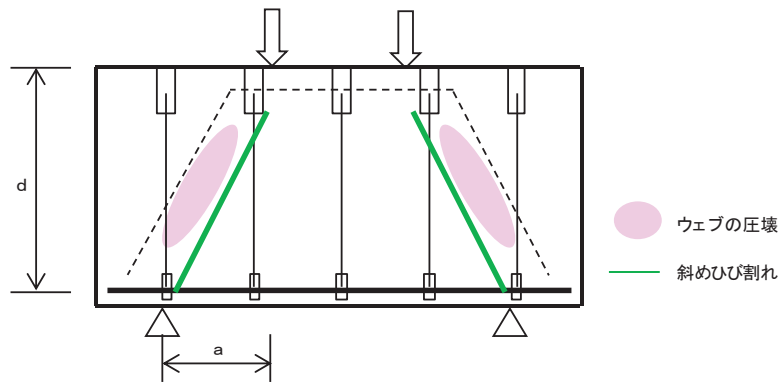
図表 4-23 等価せん断スパンを考慮した場合のせん断スパン比 (土木学会マニュアル準拠)

図表 4-24 ケース③-2-1-A (従来工法) の解析結果

<p>初期ひび割れ発生時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (100 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>作用荷重時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (100 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>初期降伏時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (50 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>終局荷重時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (20 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>

図表 4-25 ケース③ - 2 - 1 - B (CCb 工法) の解析結果

初期ひび割れ発生時の損傷状況	 変形状況 (100 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況
作用荷重時の損傷状況	 変形状況 (100 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況
初期降伏時の損傷状況	 変形状況 (50 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況
終局荷重時の損傷状況	 変形状況 (20 倍)	 ひび割れ状況	 鉄筋降伏状況



図表 4-26 ディープビーム型の破壊形態

(2) ステップ③-2-2における解析結果

解析ケースを図表 4-27 に示す。従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-2-2-Aとし、CCb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-2-2-Bとする。

せん断耐力を図表 4-28 にケース③-1（取水路（漸拡部））の結果と併せて示す。ケース③-2-2-A、ケース③-2-2-Bのせん断耐力は、2449kN、2232kNであり、CCb 工法を考慮したことによる耐力の低減率は91%となった。これはCCb のモデル化において、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0（ゼロ）としているためであり、ケース③-1の低減率88%とも整合する結果である。

それぞれの結果を図表 4-29 及び図表 4-30 に示す。変形状況は従来工法とCCb 工法で顕著な差は見られず、概ね整合的な結果となった。ひび割れ状況についても、顕著な差は見られず、CCb 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 工法の間で顕著な差は見られなかった。

参考に初期降伏時及び終局荷重時の状況を示す。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。

ケース③-1及びケース③-2-2の結果より荷重形態の違いによって、従来工法とCCb 工法の間でCCb による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。


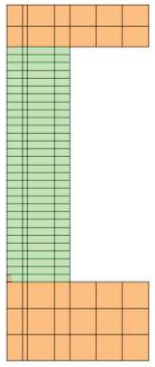
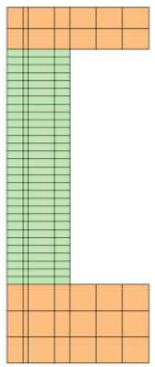
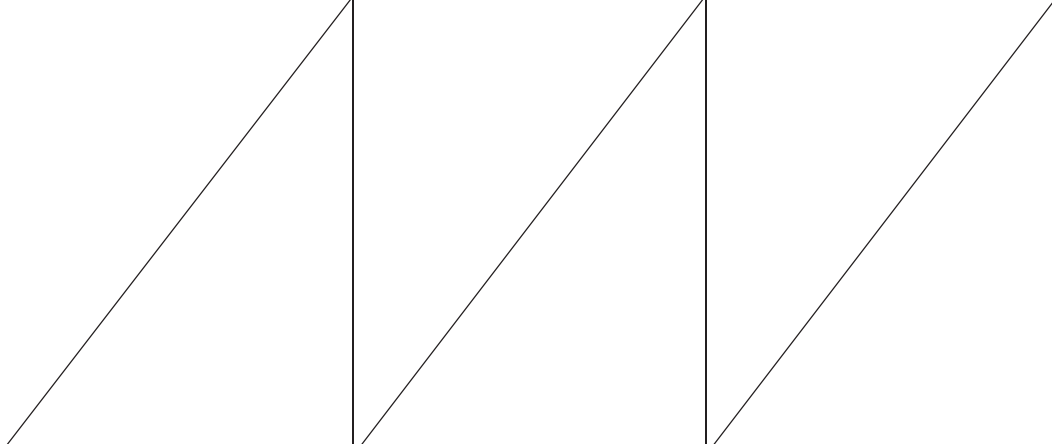
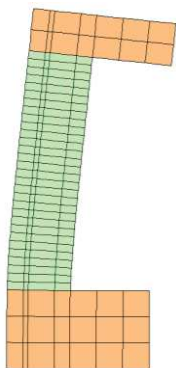
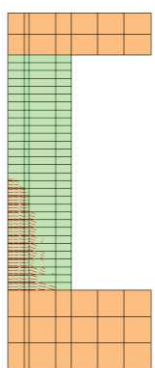
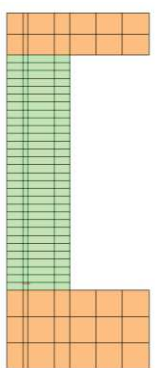
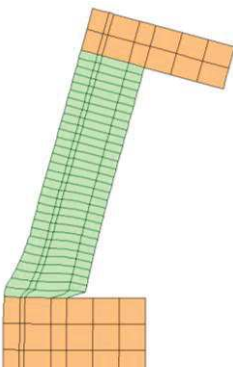
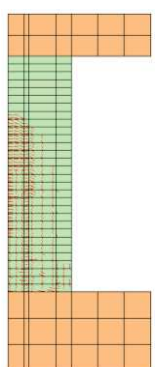
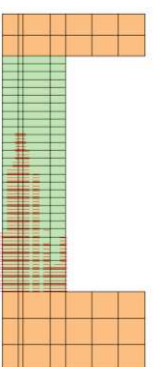
図表 4-27 ケース一覧

ケース		せん断補強鉄筋設置方法
③-2-2-A	等分布荷重	従来工法（先施工）
③-2-2-B		CCb 工法（後施工）

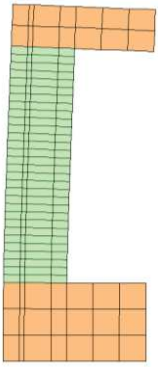
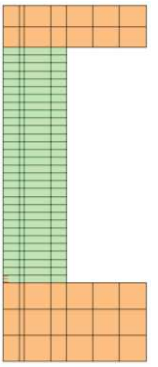
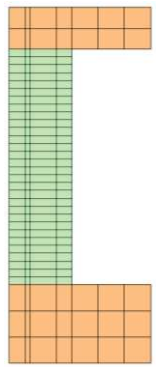
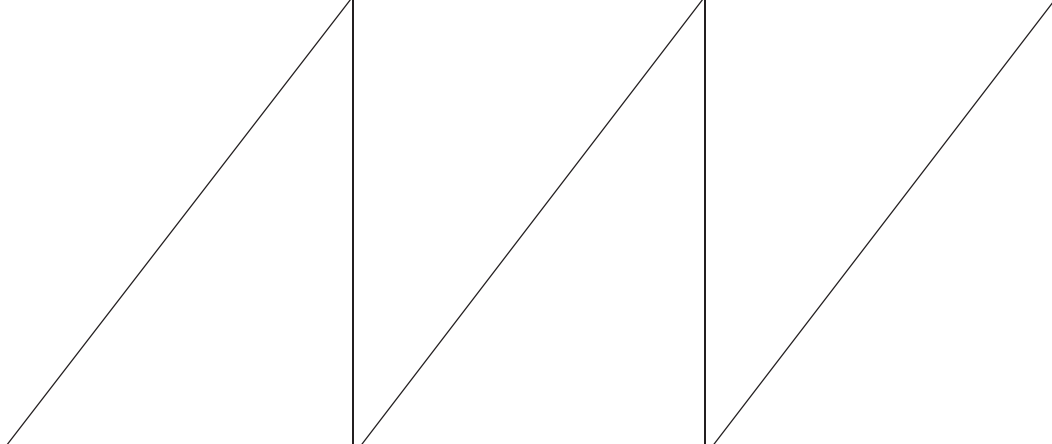
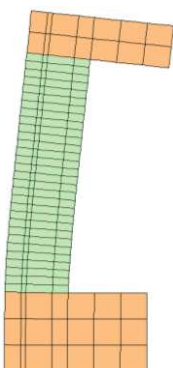

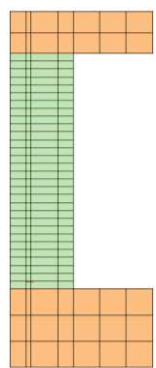
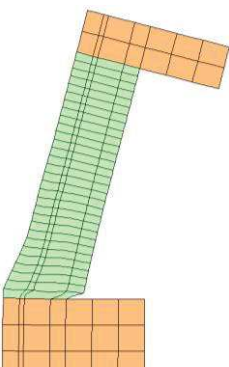


図表 4-28 せん断耐力結果一覧

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

図表 4-29 ケース③ - 2 - 2 - A (従来工法) の解析結果

<p>初期ひび割れ発生時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (100 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>作用荷重時の損傷状況</p>			
<p>初期降伏時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (50 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>終局荷重時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (20 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>

図表 4-30 ケース③ - 2 - 2 - B (CCb 工法) の解析結果

<p>初期ひび割れ発生時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (100 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>作用荷重時の損傷状況</p>			
<p>初期降伏時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (50 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>
<p>終局荷重時の損傷状況</p>	 <p>変形状況 (20 倍)</p>	 <p>ひび割れ状況</p>	 <p>鉄筋降伏状況</p>

4.2.5 Ccb 工法の安全裕度の確認

CCb 工法が妥当な安全裕度を有した手法であることを確認するため、前述の材料非線形解析によるせん断耐力と設計式（土木学会マニュアルに示す棒部材式とディープビーム式）によるせん断耐力を比較する。

図表 4-31 に示すとおり、設計式によるせん断耐力は材料非線形解析によるせん断耐力よりも小さく、ディープビーム的な破壊となる部材（ケース③ - 2 - 1 - B）では、ディープビーム式よりも棒部材式によるせん断耐力の方が小さいことがわかる。

女川原力発電所 2 号炉で Ccb を適用した部材のせん断耐力評価は、ディープビーム式によるせん断耐力評価は行わず、すべて棒部材式を適用していることから妥当な安全裕度が確保できている。

図表 4-31 せん断耐力結果一覧

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

また、CCb により負担されるせん断耐力算出時に乗じる有効率 β_{aw} (CCb のせん断耐力の補強効果を示す有効率) についても、安全裕度を確保していることを確認する。図表 4-32 に建設技術審査証明報告書に記載の試験結果から得られる有効率 β_{aw} と設計値として算出される有効率 β_{aw} の値を示している。図表 4-32 に示すように、設計値として算出される有効率 β_{aw} は試験結果から得られる有効率 β_{aw} よりも小さく、せん断耐力を安全側に評価していることがわかる。

なお、適切な施工管理を実施しても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こととしている。

図表 4-32 Ccb のせん断耐力の補強効果を示す
有効率 β_{aw} の比較 (建設技術審査証明報告書より抜粋)

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 (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 パー(CCb)」が負担 するせん断力(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_{cd}	V_s	正側	負側	正側	負側	平均	
	定着体の 組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}				V_{CCb}	V_{CCb}				
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	<u>563</u>	<u>499</u>	542	253	289	310	246	<u>1.07</u>	0.85	0.96	0.89
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>515</u>	<u>570</u>	543	254	289	261	316	<u>0.90</u>	<i>1.09</i>	1.00	0.83
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>531</u>	509	543	254	289	277	255	<u>0.96</u>	0.88	0.92	
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>497</u>	<u>526</u>	543	254	289	243	272	<u>0.84</u>	<i>0.94</i>	0.89	0.78
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>532</u>	<u>520</u>	525	235	290	297	285	<u>1.02</u>	<i>0.98</i>	1.00	0.82
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>520</u>	<u>535</u>	526	236	290	284	299	<u>0.98</u>	<i>1.03</i>	1.01	0.82
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>539</u>	<u>546</u>	524	234	290	305	312	<u>1.05</u>	<i>1.08</i>	1.06	0.78
No.4-4	両端後端型	—	<u>661</u>	<u>568</u>	525	235	290	426	333	<u>1.47</u>	<u>1.15</u>	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

5. まとめ

ステップ①～③における材料非線形解析を用いて、女川原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物におけるCCb工法の適用性の確認を実施した結果、以下の内容が確認できた。

- ・ CCbの解析モデル上の考慮方法を材料非線形解析により検証した結果は、建設技術審査証明報告書における実験結果と概ね整合する。
- ・ 建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚に対する解析結果において、特異な状況は確認されていない。
- ・ 実構造物諸元相当の解析により、CCb工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっても、応答性状に変化はなく、建設技術審査証明報告書で確認したとおりのせん断補強効果を期待できる。

以上より、女川原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物においてCCb工法を適用することは妥当である。

添付資料 3

ひび割れを有する部材に対する CCb 工法の適用性

1. はじめに	1
2. CCb の定着機構	1
3. ひび割れ状況下における CCb の定着機構	2
4. CCb のせん断補強効果の確認	4
4.1 確認方法	4
4.2 確認結果	5
5. ひび割れ状況下での定着機能についてのまとめ	11
6. 女川原子力発電所 2 号炉における CCb 工法の適用範囲	12

1. はじめに

先施工されたせん断補強筋は主鉄筋または配力筋にフックを掛けて定着しているが、CCb はせん断補強筋端部の定着体とコンクリートにより定着している。そのため、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。

よって、女川原子力発電所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、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を発揮できていることを確認する。併せて、女川原子力発電所2号炉におけるCCb工法の適用範囲を設定する。

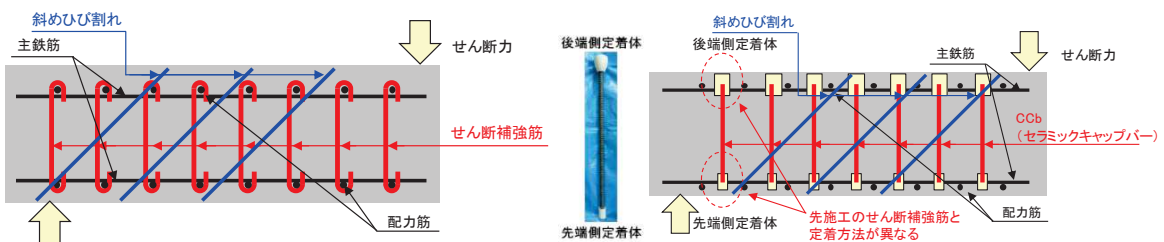
せん断補強効果の確認及びCCb工法の適用範囲の設定においては、建設技術審査証明報告書に記載の梁試験結果を参考に行う。

2. CCb の 定 着 機 構

CCb工法における後施工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（図表2-1参照）。

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。



図表 2-1 従来工法と CCb 工法の差異

3. ひび割れ状況下における Ccb の定着機構

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。同様に、面内せん断力を受ける壁（側壁、底版）に発生する面内せん断力によるひび割れやディープビームに発生する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。

図表 3-1 のとおり、曲げひび割れ及び面内せん断力によるひび割れが、CCb の定着体部付近において Ccb とほぼ平行な高角度に発生することや、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、斜めひび割れの角度が 45 度を超え、CCb の定着体部付近に高角度なひび割れが発生することが予想されることから、その状況下においても所要のせん断補強効果を保持していることを確認する。

なお、曲げひび割れ、面内せん断力によるひび割れ及びディープビームへのひび割れが発生した状況下において、定着体部以外は先施工と Ccb 工法で差異はない。

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、女川原子力発電所 2 号炉における Ccb 工法の適用範囲について検討する。

図表 3-1 ひび割れの特徴

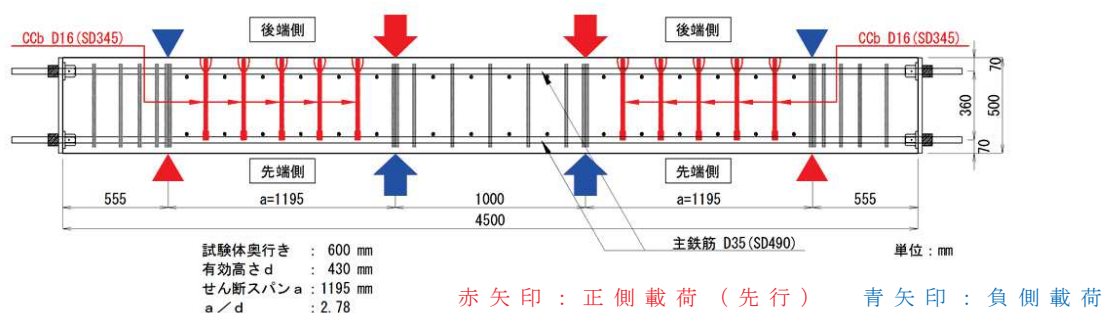
曲げひび割れの特徴	
	<ul style="list-style-type: none"> • 曲げによる引張縁に部材軸方向に対してほぼ垂直に発生する。 • ひび割れの幅、分布は引張鉄筋(軸方向鉄筋)により制御される。 • CCb の定着体部付近に高角度で生じるため、定着機能に影響を与える可能性がある。
面内せん断力によるひび割れの特徴	
	<ul style="list-style-type: none"> • 面内せん断力により部材軸方向に対して平面的に 45 度の方向に発生する。 • 部材断面を貫通するひび割れである。 • ひび割れの幅、分布は軸方向鉄筋及び配力筋(上縁・下縁)により制御される。 • 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	
	<ul style="list-style-type: none"> • 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。

4. Ccb のせん断補強効果の確認

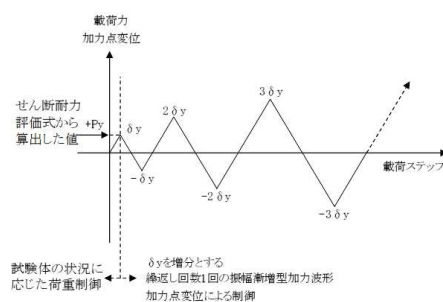
4.1 確認方法

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。試験の概要は以下のとおりである（図表 4-1 及び図表 4-2 参照）。

- ・ Ccb によりせん断補強を行った試験体 (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。
- ・ 正負交番载荷により、Ccb によるせん断補強効果を確認した試験である。
- ・ 正負交番载荷は、先端側定着体側に曲げひび割れが生じる载荷方向を正側としている。



図表 4-1 試験体概要図



図表 4-2 試験体への载荷方法

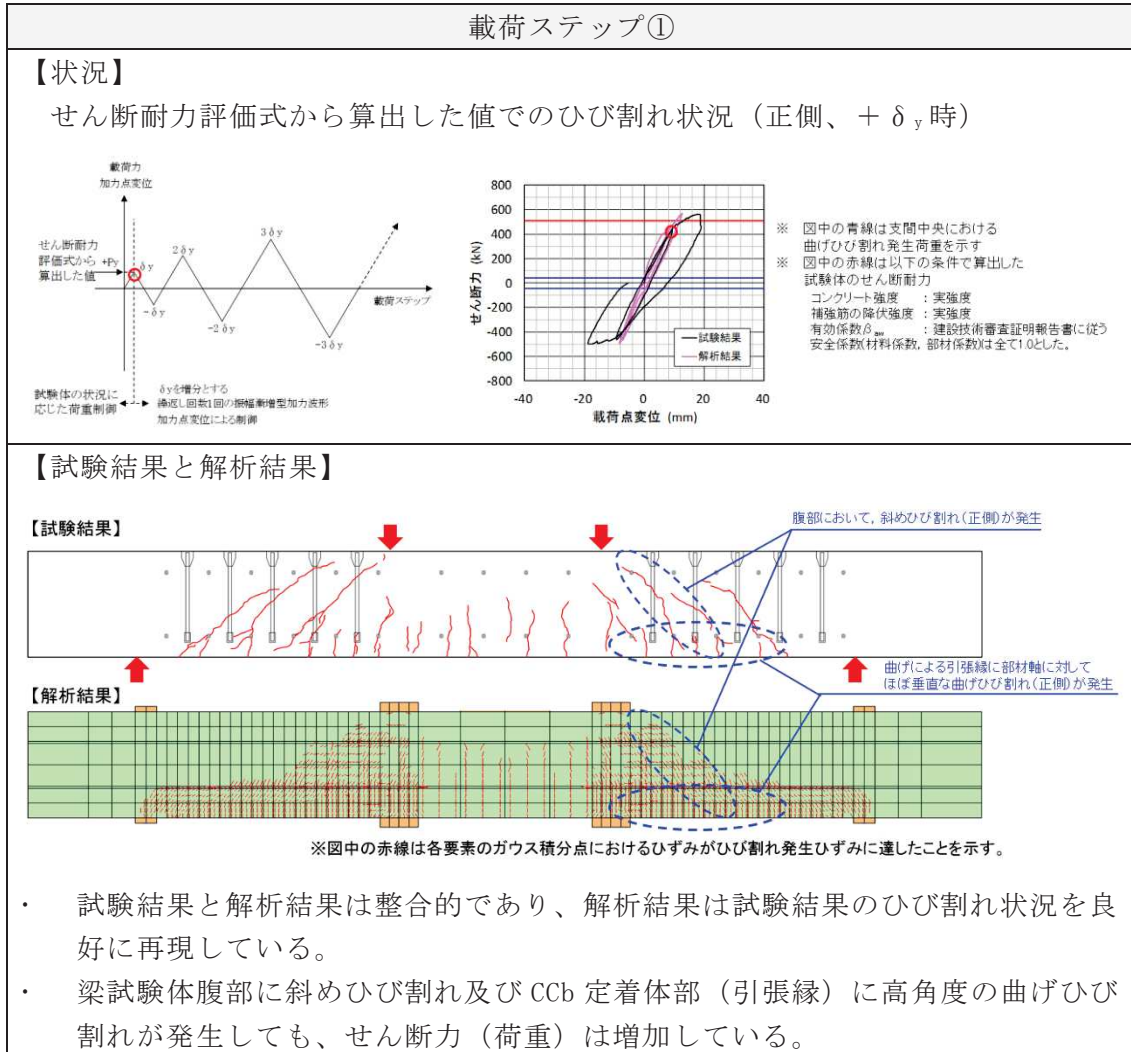
せん断補強効果の確認は、定着体部（先端・後端）に曲げによる垂直に近い高角度のひび割れが生じた状態においても、試験体が建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数（ β_{aw} ）を考慮したせん断耐力を有していることを確認する。

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（添付資料 2 「2. ステップ①における材料非線形解析」）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。

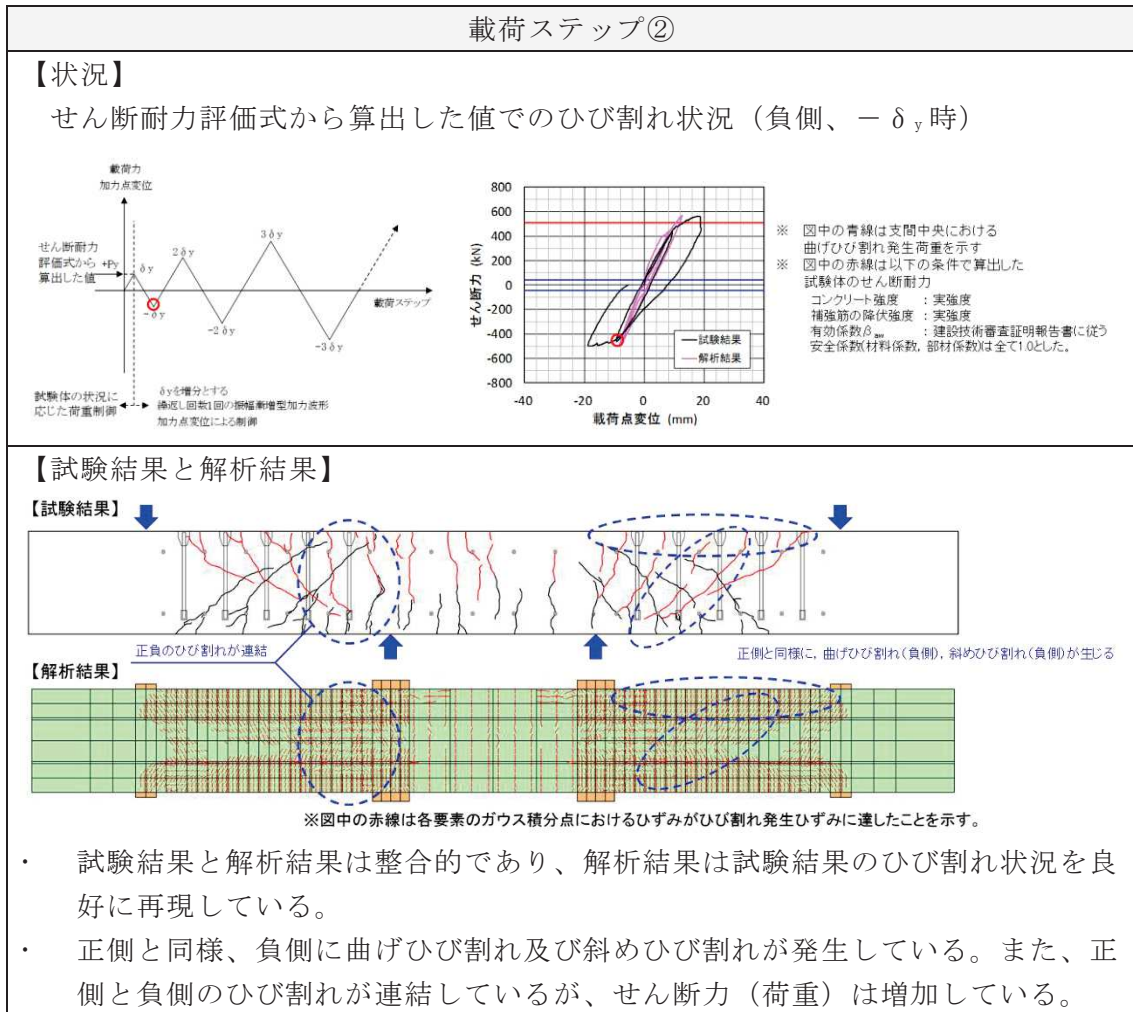
4.2 確認結果

図表 4-3～図表 4-6 に示すとおり、ひび割れ状況の整理及びひび割れ状況と曲げひび割れ、面内せん断力によるひび割れ及びディープビームによるひび割れとの比較結果より、CCb の定着体部にひび割れが生じた状態においても定着機能が保持されており、せん断補強効果を確認することができた。

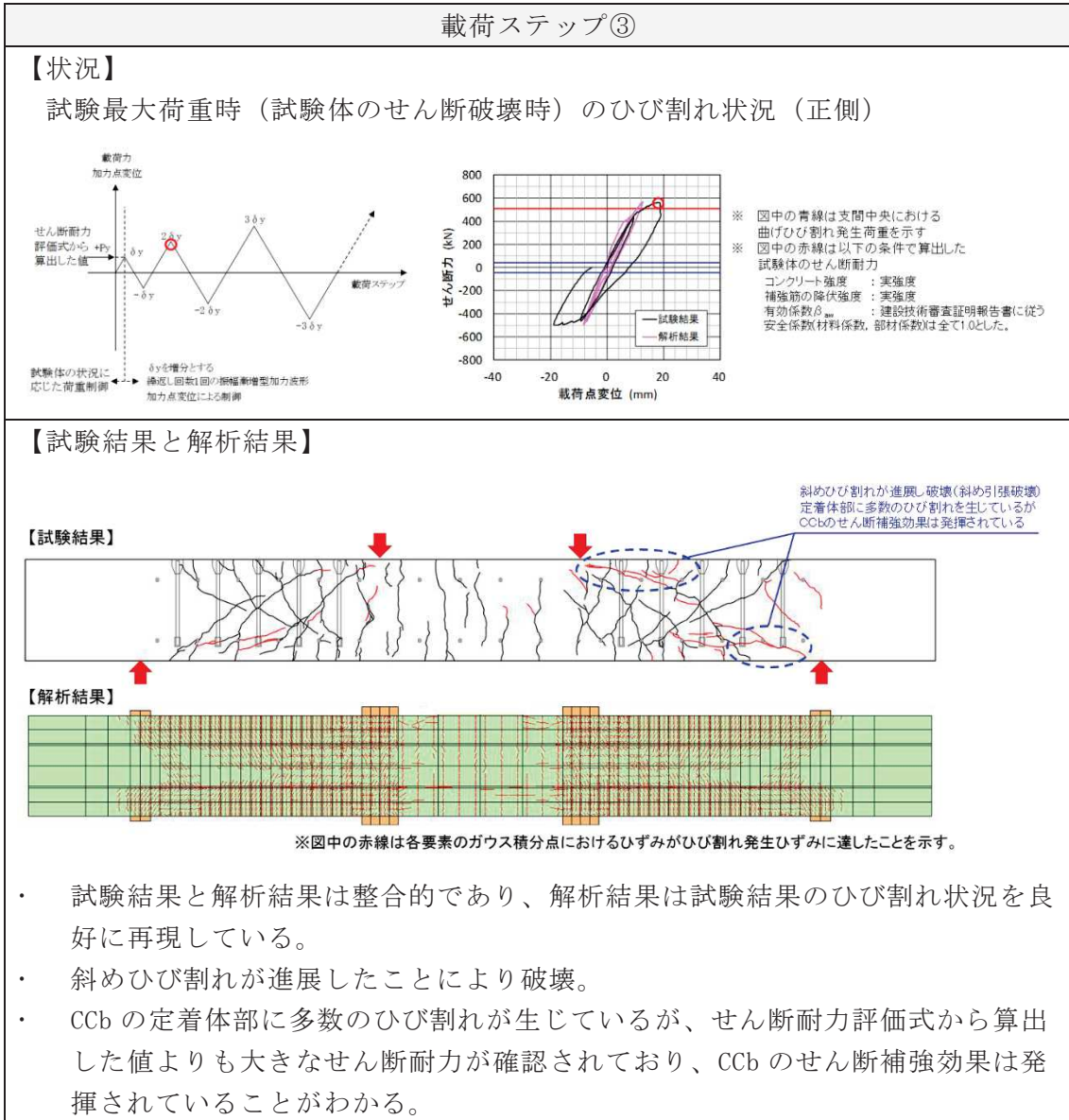
図表 4-3 荷重ステップ①におけるひび割れ状況



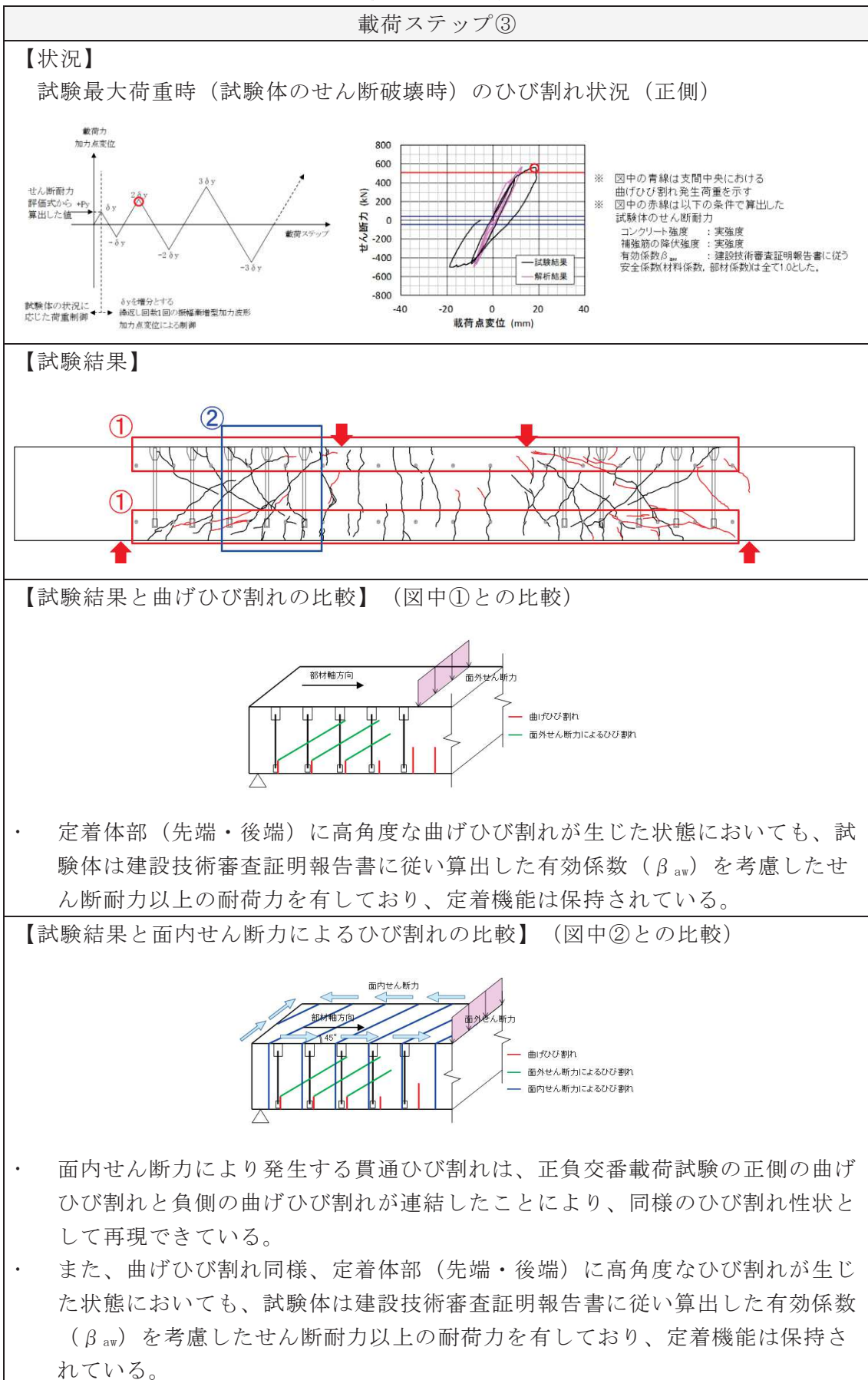
図表 4-4 荷重ステップ②におけるひび割れ状況



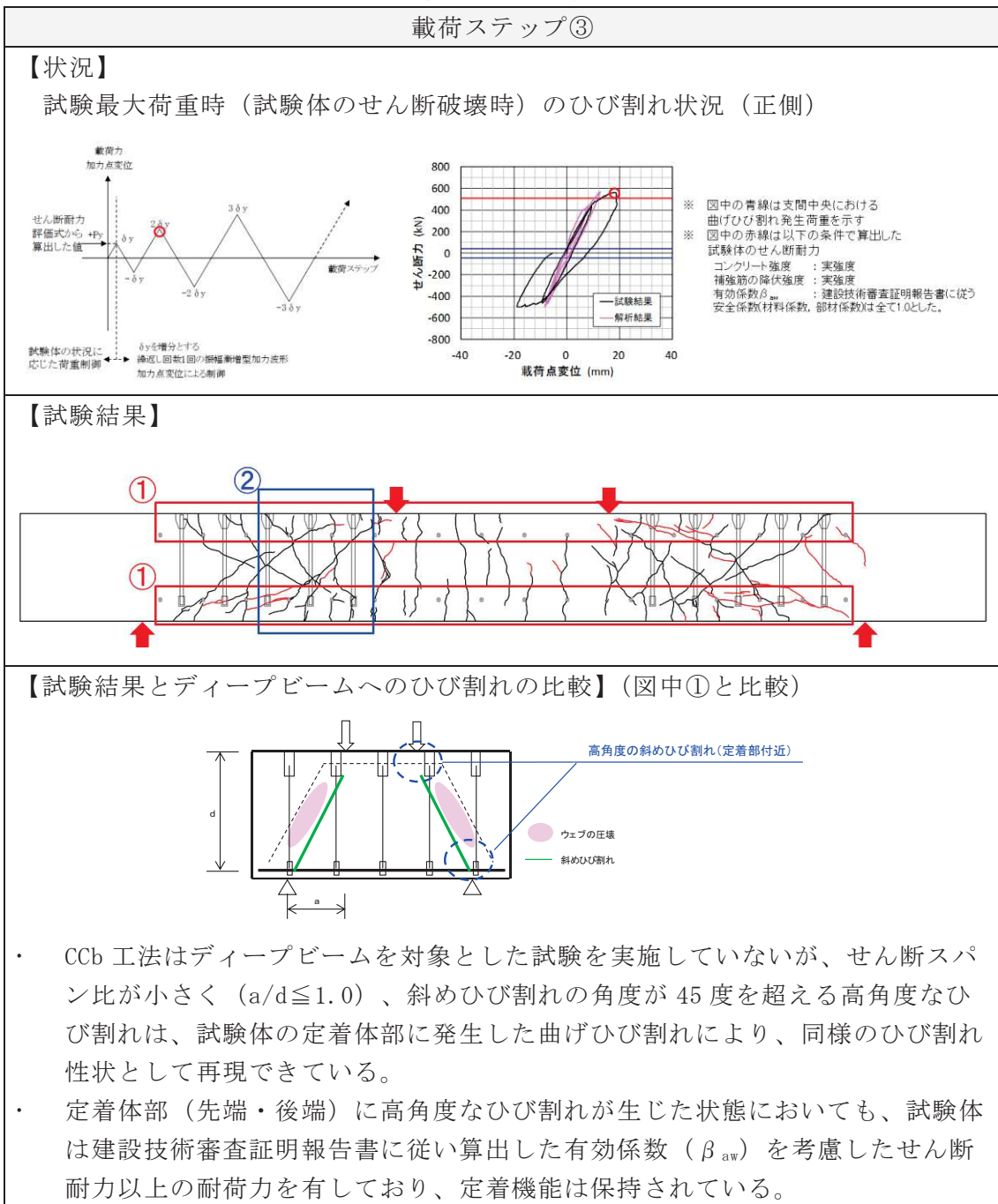
図表 4-5 荷重ステップ③におけるひび割れ状況



図表 4-6 載荷ステップ③におけるひび割れ状況の比較 (1/2)



図表 4-6 荷重ステップ③におけるひび割れ状況の比較 (2/2)



また、前述のとおり当該試験の梁試験体は、せん断耐力を確認するための試験であり、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いる。

せん断破壊時における主鉄筋のひずみを図表 4-7 のとおり確認している。図表 4-7 に示すとおり、主鉄筋のひずみは降伏ひずみ未満であり 2363 μ まで確認されている。

よって、主鉄筋に SD345 を用いている女川原子力発電所 2 号炉において Ccb を適用した構造物については、応答値が降伏ひずみ (1725 μ) または降伏強度未満 (345N/mm²) であることを確認する。

図表 4-7 試験体の鉄筋ひずみ

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. 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。詳細を以下に示す。

- ・ 定着体部（先端、後端）に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いることから定着機能は保持されていると確認できる。
- ・ 正負交番载荷であるため、正側の高角度の曲げひび割れと負側の高角度の曲げひび割れが連結しており、面内せん断により部材に生じる可能性がある貫通ひび割れを有した状態においても、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いることから定着機能は保持されていると確認できる。
- ・ 定着体部（先端・後端）に、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や貫通ひび割れ等の様々なひび割れが発生しても、定着機能は保持されることが確認できる。
- ・ 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は整合的で、解析結果は試験結果のひび割れ状況を良好に再現できている。よって、試験体に载荷された最大荷重（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おり、定着体部は定着機能を保持していることが確認できた。
- ・ しかしながら、せん断破壊先行型の試験体のため、主鉄筋降伏後に曲げひび割れが増大する範囲においてCCbの定着機能が保持されていることの確認はできていない。
- ・ また、面内せん断により部材に生じる可能性がある貫通ひび割れに関しても、試験体の主鉄筋は降伏していないため、鉄筋降伏後のひび割れが増大する範囲においてCCbの定着機能が保持されていることの確認はできていない。

6. 女川原子力発電所 2 号炉における Ccb 工法の適用範囲

「5. ひび割れ状況下での定着機能についてのまとめ」を踏まえ、女川原子力発電所 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体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。
- ④ ディープビーム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に対して大きくなるが、Ccb 工法の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は実施していないため、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。

添付資料 4

CCb を適用した部材のコンクリートの健全性

1. はじめに	1
2. ひび割れ状況の確認	1
3. コンクリートの圧縮強度試験結果の確認	3
4. 既設コンクリートの健全性確認のまとめ	3

1. はじめに

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。

2. 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、図表2-1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^{*}）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。

図表 2-1 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

図表 2-2 参照文献

文献※	評価基準値	評価概要												
①	ひび割れ幅 0.06インチ (約1.5mm)	<ul style="list-style-type: none"> 幅 0.06 インチ (約 1.5mm) を超えて新しく地震によって生じたひび割れ、コンクリートの剥離、目視で確認できるフレームの変形を重大な損傷とする (当該値以上のコンクリートひび割れは鉄筋の降伏を示している)。 コンクリート構造物のわずかなヘアクラックのような微細なひび割れは重要な被害ではない。 												
②	ひび割れ幅 1.0mm	<ul style="list-style-type: none"> 損傷度分類の基準と補修後の耐力回復係数として、評価している。 下表に示す損傷度Ⅰに分類されるひび割れ (ひび割れ幅 0.2mm 以下) 及び損傷度Ⅱに分類されるひび割れ (ひび割れ幅 0.2～1.0mm) については、エポキシ樹脂等の注入によるひび割れの補修により耐力が従前の状態まで回復することが可能とされている。 <p style="text-align: center;">表 II.2.3-1 損傷度分類の基準</p> <table border="1" data-bbox="582 875 1303 1341"> <thead> <tr> <th data-bbox="582 875 724 938">柱、耐力壁の損傷度</th> <th data-bbox="724 875 1303 938">損傷内容</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="582 938 724 1001">Ⅰ</td> <td data-bbox="724 938 1303 1001">近寄らないと見えにくい程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2mm 以下)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="582 1001 724 1064">Ⅱ</td> <td data-bbox="724 1001 1303 1064">肉眼ではっきり見える程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2～1mm 程度)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="582 1064 724 1158">Ⅲ</td> <td data-bbox="724 1064 1303 1158">比較的大きなひび割れが生じているが、コンクリートの剥落は極くわずかである。 (ひび割れ幅 1～2mm 程度)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="582 1158 724 1220">Ⅳ</td> <td data-bbox="724 1158 1303 1220">大きなひび割れ (2mm を超える) が多数生じ、コンクリートの剥落も著しく鉄筋がかなり露出している。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="582 1220 724 1341">Ⅴ</td> <td data-bbox="724 1220 1303 1341">鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱 (耐力壁) に高さ方向や水平方向に変形が生じていることがわかるもの。沈下や傾斜が見られるのが特徴。鉄筋の破断が生じている場合もある。</td> </tr> </tbody> </table>	柱、耐力壁の損傷度	損傷内容	Ⅰ	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2mm 以下)	Ⅱ	肉眼ではっきり見える程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2～1mm 程度)	Ⅲ	比較的大きなひび割れが生じているが、コンクリートの剥落は極くわずかである。 (ひび割れ幅 1～2mm 程度)	Ⅳ	大きなひび割れ (2mm を超える) が多数生じ、コンクリートの剥落も著しく鉄筋がかなり露出している。	Ⅴ	鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱 (耐力壁) に高さ方向や水平方向に変形が生じていることがわかるもの。沈下や傾斜が見られるのが特徴。鉄筋の破断が生じている場合もある。
柱、耐力壁の損傷度	損傷内容													
Ⅰ	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2mm 以下)													
Ⅱ	肉眼ではっきり見える程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2～1mm 程度)													
Ⅲ	比較的大きなひび割れが生じているが、コンクリートの剥落は極くわずかである。 (ひび割れ幅 1～2mm 程度)													
Ⅳ	大きなひび割れ (2mm を超える) が多数生じ、コンクリートの剥落も著しく鉄筋がかなり露出している。													
Ⅴ	鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱 (耐力壁) に高さ方向や水平方向に変形が生じていることがわかるもの。沈下や傾斜が見られるのが特徴。鉄筋の破断が生じている場合もある。													

※: ① Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake (EPRI NP-6695)

② 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針 ((財) 日本建築防災協会)

3. コンクリートの圧縮強度試験結果の確認

図表 3-1 に 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^2 ）以上であることを確認している。

図表 3-1 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	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

4. 既設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、女川原子力発電所 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。