

III-1 既設プレストレストコンクリート構造物の改造技術に関する研究開発

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 15～平 17

担当チーム：構造物マネジメント技術チーム

研究担当者：渡辺 博志、久田 真(H16 まで)

中村 英祐

【要旨】

本研究課題では、既設プレストレストコンクリート（P C）構造物の鋼材腐食による劣化対策を主な対象とし、損傷状況や補修補強の目標から、補修補強方法を選定する手法および補強設計方法の開発を目指し、材料・構造実験およびシミュレーション解析による検討を実施した。その結果、材料選定技術、再劣化防止技術、断面修復 P C 部材の補強技術の各要素技術について、新たな知見を得ることができた。また、これらの成果を踏まえ、既設プレストレストコンクリート構造物の補修補強マニュアル原案を作成した。

キーワード：プレストレストコンクリート構造物、補修、補強

1. はじめに

既設 P C 構造物を出来るだけ長期間にわたり供用するには、構造物の損傷状況に応じ、的確な補修あるいは補強を施す必要がある。近年、既設 P C 構造物の寿命を延長することを目的とした様々な補修補強工法・材料が開発されつつあるが、補修補強を実施する際、構造物の損傷状況や補修補強の目標に応じた選定手法や評価手法が整備されていないのが現状である。

そこで、本研究課題では、既設 P C 構造物の鋼材腐食による劣化対策を主な対象とし、損傷状況や設定した補修補強の目標から、採用すべき補修補強方法を選定できる手法および補強設計方法の開発を目指した。

本研究課題の成果目標を以下に示す。

- ①既設 P C 部材の残存耐荷性能の評価方法の提案
- ②合理的な補修補強方法の選定手法の提案
- ③補強設計方法の提案
- ④補修補強工法の施工要領の提案
- ⑤新たな補強方法の提案

2. 研究概要

2.1 研究項目

実施した研究項目を以下に示す（図 2.1.1）。

- ①材料選定技術に関する事項
- ②再劣化防止技術に関する事項
- ③断面修復 P C 部材の補強技術に関する事項

なお、これらの検討は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究（P C 橋の改造技術に関する共同研究）として実施した。

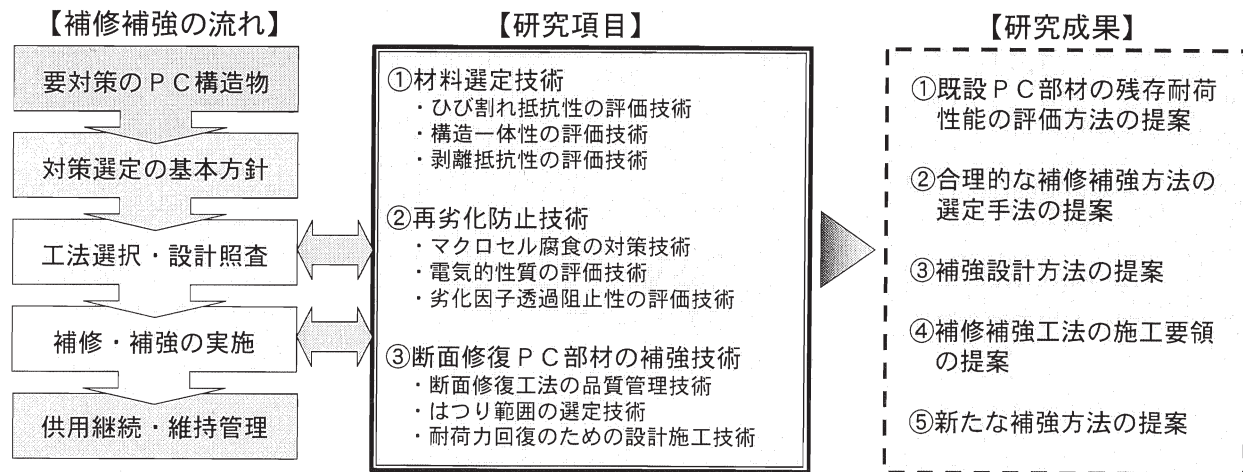


図 2.1.1 研究項目および成果の全体連関図

2. 2 研究内容

ここでは、各要素技術の研究内容について、その概要を説明する。

(1) 材料選定技術に関する事項

塩害を受けた既設コンクリート構造物を出来るだけ長く供用するため、これまで断面修復工法による補修が数多く行われてきている。この補修方法は、塩分の多い部位を含めた損傷部をはつり取り、鉄筋の防錆処理、補修材の施工により断面を元通りに修復する手順で行われている。また、近年、補修後の寿命をより延長することを目的とした様々な補修材が開発・適用されてきている。

本研究で用いた補修材は、モルタルの性質を改善する目的で混和されている有機高分子材料（俗に、

表 2. 2. 1 使用した補修材の材料試験値

補修材の種類	略 称	圧縮強度* (N/mm ²)	硬化収縮率** (%)
ポリマーセメントモルタル	P C M	43.9	0.10%
セメントモルタル	C M	76.9	0.15%
軽量タイプのPCM	L PCM	26.7	0.07%
規 格 値 ¹⁾		20.0 以上	0.20%以下

*水中養生 28 日。 **材料試験は 193 日（規格は 3 ヶ月）

ポリマーと呼ばれている）の有無や種類の異なる材料を市販品より選定した。この補修材は、ポリマーセメントモルタル(PCM)、セメントモルタル(CM)、軽量ポリマーセメントモルタル(LPCM)であり、セメント、骨材、繊維および混和剤等がコンパウンドされた材料と水やポリマーを練り混ぜて使用するものである。

一方、現在、広く参考にされている「塩害を受けた土木構造物の補修指針(案)」¹⁾(以下、指針案)は昭和 63 年に発刊されたものの、その後の改訂はなされてない。表 2.2.1 に示すように、指針案の規格には圧縮強度と硬化収縮率の 2 項目があり、現在市販されている補修材の多くはその規格値を満足しているが、それだけでは補修材の適性を判定するには不十分である。そこで、補修材に必要な性能として、①ひび割れ抵抗性、②構造一体性、③剥離抵抗性を設定し、その評価方法について実験的に検討した。

(2) 再劣化防止技術に関する事項

塩害を受けたコンクリート構造物の補修補強では、多くのケースで断面修復工法が行われている。一方、補修を実施する際、施工上や構造性能上の制約を受

け、塩分を十分に除去できないケースも考えられる。既設構造物に塩分が多く残留したままでの補修は、図 2.2.1 に示すようなマクロセルが形成され、著しい鉄筋腐食を引き起こす可能性がある²⁾。しかしながら、マクロセルの発生を考慮して、断面修復の部位を決定し、補修材の種類を選択することは現状では一般的になされておらず、補修工法の効果に対する信頼性が十分に確保されていない。

そこで、マクロセル腐食反応が再劣化に及ぼす影響の解明や再劣化防止手法に関し、①マクロセル腐食の対策、②電気的性質の評価、③劣化因子透過阻止性の評価について、実験的に検討した。

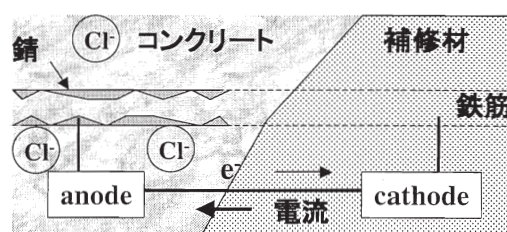


図 2. 2. 1 再劣化（マクロセル腐食）メカニズム

(3) 断面修復 P C 部材の補強技術に関する事項

断面修復を行う際に劣化部を除去された P C 構造物の耐荷性能は、既設コンクリートおよび補修材の品質、プレストレス量や鋼材位置のプレストレスの条件、断面形状などに大きく影響される。特に、断面の大部分にわたって断面修復工法を適用する場合には、その影響を無視できなくなり（表 2. 2. 2）、設計条件の設定によっては適切な補強効果を得られないことも予想される。

表 2. 2. 2 P C 部材の断面修復に対する設計の考え方

項目	小断面修復	大断面修復
使用材料の品質	設計では、既設コンクリートを実際の品質で検討する。また、補修材は母材程度の剛性とすることが望ましい。	
プレストレスの条件	はつりによるプレストレスの再分配は一般的に考慮しない。	再分配、たわみ変化に伴う P C 鋼材応力が無視できない。
断面形状		部材寸法が相対的に小さい場合、断面除去の影響が大きい。

そこで、部材寸法が比較的小さく、断面除去の影響が鋭敏に表れるプレテンション方式の P C 桁を対象として、①断面修復工法の品質管理、②はつり範囲の選定、③耐荷力回復のための設計施工について検討した。

次章より、上記の研究内容について、具体的な研究手法ならびに研究結果を紹介する。

3. 材料選定技術に関する研究

3. 1 ひび割れ抵抗性の評価技術³⁾

(1) 実験概要

本検討では、補修材の種類、供試体寸法、補修厚み、および暴露条件の異なる供試体を作製し、補修材の硬化収縮特性がひび割れ抵抗性に及ぼす影響について実験的に検討した。実験に用いた補修材の材料物性は表 2. 2. 1 に示した通りである。

供試体は以下の 2 タイプを各 2 体ずつ作成した。

- ① ひび割れ抵抗性の確認するため、補修を施した「補修コンクリート供試体」(図 3. 1. 1、写真 3. 1. 1)
- ② 上記①の供試体にひび割れが生じた時点の硬化収縮ひずみを確認するため、補修材のみで作成した「補修材供試体」

補修コンクリート供試体は、設計基準強度 40N/mm² の配合で作成した母材コンクリートが十分乾燥した後で、補修部の厚み(補修厚み t)が t=10、25、50mm となるように補修材を打ち重ね、その翌日に設定した暴露条件に応じてアルミ箔で覆った。補修材供試体については、暴露面の数が異なる 3 種類の供試体を作成した。供試体作成後、1 年以上暴露し、ひび割れ発生の確認および取り付けたひずみゲージ等の測定を実施した。なお、暴露環境は平均して温度 20℃、湿度 50%であった。

(2) 実験結果

①補修コンクリート供試体のひび割れについて

補修材 CM は指針案の規格値を満足する材料であるが、補修厚み t / 全高 H = 0.33 以下の 3 種類(6 供試体)でひび割れが生じた(表 3. 1. 1)。その中でも、補修厚みが薄いものほど、ひび割れ発生日数が早まる傾向となった。一方、補修材 PCM と LPCM では、ひび割れは生じなかった。

②ひび割れ発生時の硬化収縮ひずみについて

ひび割れの生じた時点の硬化収縮ひずみは、補修厚みとの相関性が見られた(図 3. 1. 2)。また、補修厚み 10mm の場合、硬化収縮ひずみの最も大きく生じている全面暴露を行った補修材供試体でも 300μ(0.03%)以下であり、指針案の規格値(0.20%)と大きく乖離していることが確認された。

以上より、補修厚みとひび割れ発生には相関性があり、補修部のひび割れを防ぐためには補修厚みを小さくするほど硬化収縮率を抑制する必要があること、および、ポリマー混入の補修材 PCM、LPCM はひび割れ抵抗性に優れる材料であること

が確認された。

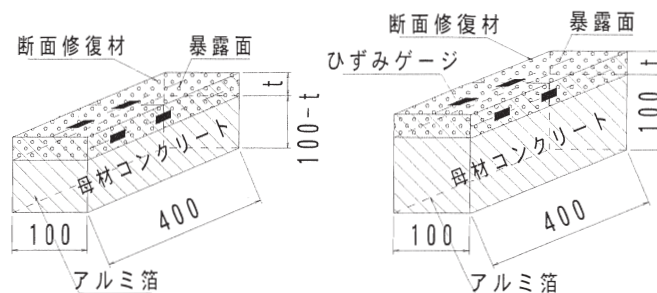


図 3. 1. 1 補修コンクリート供試体

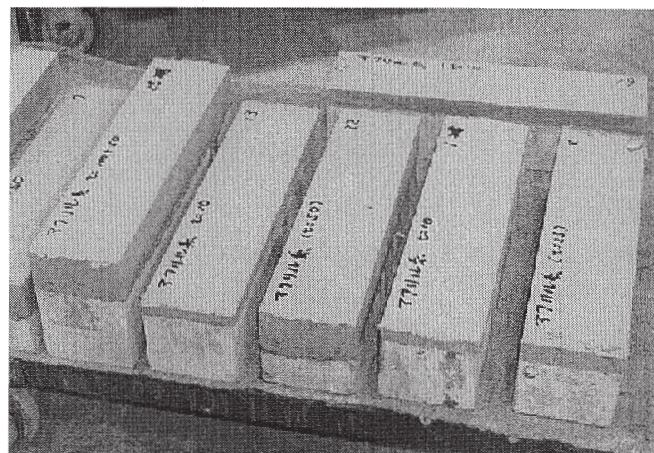


写真 3. 1. 1 補修コンクリート供試体の状況

表 3. 1. 1 ひび割れの有無および発生日数

補修材の種類	(上段)全高 H (中段)補修厚み t (下段) t/H			
	100mm			150mm
	10mm	25mm	50mm	50mm
PCM	0.10	0.25	0.50	0.33
PCM	無	無	無	無
CM	有(4日)	有(11日)	無	有(31日)
LPCM	無	無	無	無

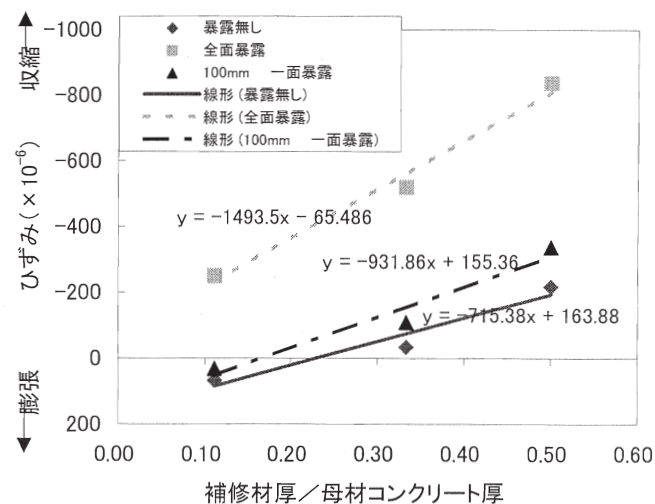


図 3. 1. 2 ひび割れ発生時の硬化収縮ひずみ

3. 2 構造一体性の評価技術

(1) 実験概要

前節 3. 1 では、断面修復部に求められるひび割れ抵抗性の評価を行ったが、補修箇所に耐荷性能を期待する場合、補修材には荷重の分担も求められる。そこで、材質や補修厚み、乾燥過程が異なる補修コンクリート部材の耐荷性能を明らかにすることを目的として、前節 3. 1 の実験を終えた供試体を用いて実験的に検討した。

実験方法は、供試体の補修部を下側とし、その下縁にひずみゲージを取り付けて曲げ強度試験 (JIS A 1106) を行った。以降の解析では、補修材の応力-ひずみ関係は全面乾燥させた補修供試体で測定されたものを用いた (表 3. 2. 1)。

(2) 実験結果

① 補修部の構造一体性の評価

実験で得られた断面下縁の発生ひずみと載荷荷重から求まる見かけの曲げ応力度から、補修部の弾性係数を未知数として逆算した。この結果と材料特性値との関係を図 3. 2. 1 示す。これより、補修厚み 10mm を除き、両者がほぼ等しくなることが確認され、補修コンクリート供試体にも平面保持の仮定を適用できることが分かった。

一方、補修厚み 10mm の供試体は、いずれも試験開始前には良好な外観であったが、載荷中に構造一体性が損なわれたものと考えられる。

② 材質や補修厚みが曲げ強度に及ぼす影響

補修コンクリート供試体の曲げ強度は、母材部と補修部の剛性差や破壊時ひずみの大小により変化する。このため、断面形状 10×10cm のコンクリート部材に換算した曲げ強度を、平面保持の成立下で、補修部を有効とみなし母材側の破壊を考慮しない場合 (Case1)、補修部を有効とみなし母材側の破壊を考慮する場合 (Case2)、補修部を無効とした場合 (Case3) に分けて算定した。

図 3. 2. 2 に上記の算定結果と実測値を示す。これより、ひび割れの生じてない供試体は case2 と同等かそれ以上の曲げ強度を示すことが分かった。算定値を上回った理由は、乾燥過程で母材部が収縮拘束による圧縮力を受けたためとも考えられる。しかしながら、補修材 LPCM の曲げ強度が最大 4N/mm² の増加となるのは母材の約 1/3 の弾性係数である材料の拘束力としては過大であると思われる、今後の検討が必要である。

表 3. 2. 1 解析計算に用いた材料特性値

部 位	材料名	曲げ強度* (N/mm ²)	弾性係数* (kN/mm ²)	破壊時 ひずみ
母 材	コンクリート	5.48	38.5**	142×10 ⁻⁶
補 修	P C M	8.31	22.7	366×10 ⁻⁶
	C M	6.02	27.1	222×10 ⁻⁶
	L P C M	5.33	12.9	413×10 ⁻⁶

*全面乾燥の曲げ強度試験結果より算定 **静弾性係数

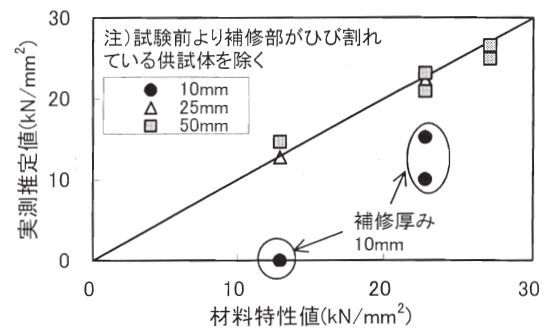


図 3. 2. 1 補修部弾性係数の推定結果

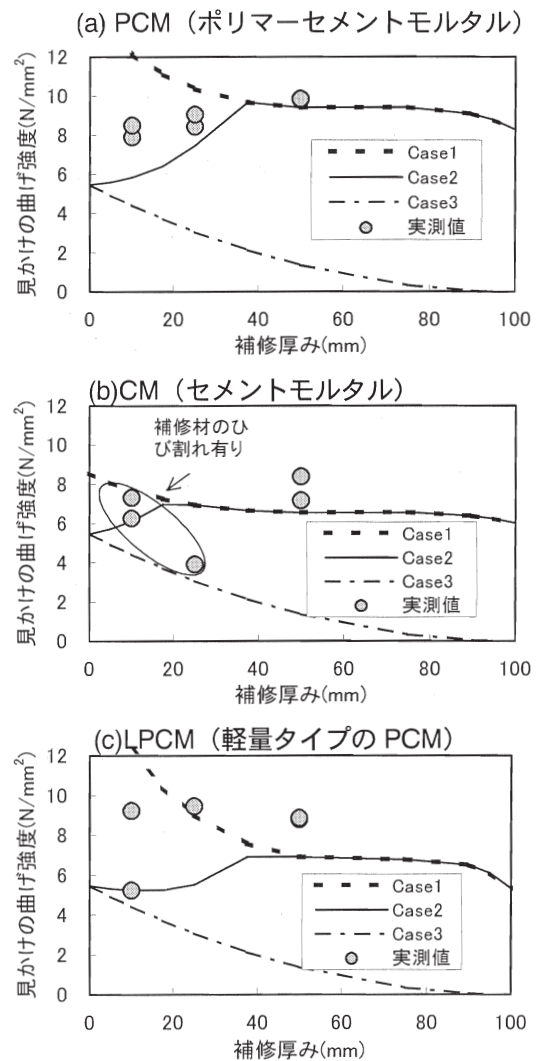


図 3. 2. 2 見かけの曲げ強度による比較

3.3 剥離抵抗性の評価技術

(1) 実験概要

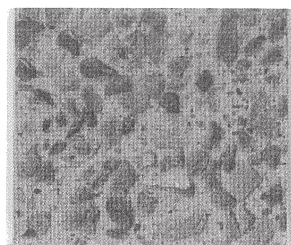
断面修復工法の耐久性は、補修材を施工する面(はつり面)の表面処理方法、補修材の種類、補修材の施工法等の組み合わせにより大きく異なる⁴⁾。特に修復部において凍結融解作用を受けると、修復部が剥離しやすく、耐久性上きわめて厳しい環境となる。ここでは、表 3.3.1 に示す補修コンクリート供試体(10×10×40cmの角柱)を作成し、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法(A法:水中凍結融解試験方法)」による実験を行い、剥離抵抗性を指標とした評価方法の適用性について検討した。

確認項目は、動弾性係数の測定、ひび割れ等の確認および試験後の曲げ強度(JIS A 1106)とした。また、得られた曲げ強度 σ_{ex} は、母材コンクリートの曲げ強度 σ_b との比率から補修部が受け持つ耐荷力を曲げ強度寄与率Aとして、式(1)より算定した。

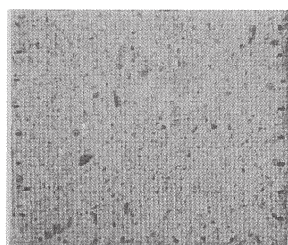
$$A(\%) = 1 - \frac{1 - \sigma_{ex} / \sigma_b}{\{(H - t) / H\}^2} \quad \text{式(1)}$$

ここで、H:全高(mm)、t:補修厚み(mm)。

WJ相当(最大3mmの凹凸)



チッピング(最大1mmの凹凸)



平滑(サンドペーパー#150)

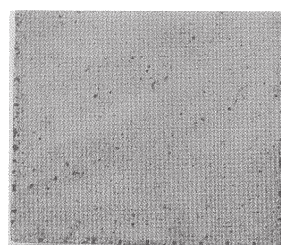


写真 3.3.1 はつり面の凹凸作成状況

表 3.3.1 剥離抵抗性実験の結果

検討・目的	厚み(mm)	はつり面の凹凸状態	はつり面の接着方法	打設方向	実験結果	補修材の種類							
						PCM	CM	LPCM	高流動				
目的(1)はつり面の凹凸状態による影響	25	WJ相当	標準状態 + プライマー	上面	ひび割れ発生								
					曲げ強度寄与率	○	×	◎	◎				
		チッピング			ひび割れ発生		×						
					曲げ強度寄与率	△	×	○	◎				
		平滑			ひび割れ発生		×		××(剥離)				
					曲げ強度寄与率	○	△	◎	×				
目的(2)はつり面の接着方法による影響	25	チッピング	標準状態	上面	ひび割れ発生	×	××(剥離)						
					曲げ強度寄与率	△	×	◎	◎				
			湿度90%		ひび割れ発生		×××(剥離)						
					曲げ強度寄与率	△	×	◎	◎				
			目的(3)施工方向の影響		25	チッピング	標準状態 + プライマー	下面	ひび割れ発生		×	×	××(剥離)
									曲げ強度寄与率	◎	×	×	×
目的(4)補修厚みの影響	10	チッピング	標準状態 + プライマー	上面	ひび割れ発生		×						
					曲げ強度寄与率	△	×	○					
	5				ひび割れ発生			×	(浮き)				
					曲げ強度寄与率	◎	◎	◎					

記号説明

ひび割れ発生のサイクル

××× 0~100サイクル
 ×× 100~200サイクル
 × 200~300サイクル
 無印 ひび割れ発生せず

補修部の曲げ強度寄与率

× 0%以下
 △ 50%以下
 ○ 80%以下
 ◎ 80%以上

標準状態

・20°C、60%×14日間とした。
 プライマー
 ・メーカー推奨のものを使用した。
 ・高流動は水湿とした。

↑ 未実施とした

(2) 実験結果

表 3.3.1 に実験結果を示す。

- ① ひび割れが発生しない順に、『PCM、LPCM>高流動>CM』となった。ただし、曲げ強度から判断すると、CM 以外は実験条件により優劣が入れ替わる結果となった。
- ② はつり面の凹凸の影響:ひび割れが発生しない順に、『WJ>平滑、チッピング』となった。
- ③ 施工性の影響:下面施工は PCM を除き、ひび割れが発生した。
- ④ 補修厚みの影響:厚みを増すほどひび割れが生じ易く、『25mm>10mm>5mm』の順に剥離した。

以上より、過酷な凍結融解作用を受ける補修コンクリート部材では、はつり方法はWJ相当が好ましいことが明らかとなった。また、下面施工の場合は、上面施工よりも凍結融解作用によるひび割れが生じやすいため、アンカー筋などによる剥落防止性能の付与が望ましい。なお、補修厚みを増加させるほど凍結融解作用の影響が大きくなったのは供試体サイズの問題であるとも考えられ、今後の課題として実構造物と同じ程度の寸法における評価手法の確立が必要であると思われる。

4. 再劣化防止技術に関する研究

4. 1 マクロセル腐食の対策技術

(1) 実験概要

使用材料は3章と同様の補修材およびコンクリートとした。供試体は、図4.1.1に示すように、「母材部」の長手方向に「補修部」を打ち継いだ100×100×400mmの形状とした。母材部のコンクリートに塩化ナトリウム(NaCl)を塩化物イオン(Cl⁻)換算で0.9~13.5kg/m³添加した。また、比較として、補修部だけのGroup Bという供試体も作成した。

供試体は、各2体ずつ作成し、一つはJCI-SC3の乾湿繰返し法による促進試験を実施し、もう一方は、土木研究所内で暴露試験を実施した。

(2) 実験結果

促進試験終了後に鋼材の腐食とひび割れ状況を確認した結果、Cl⁻量1.8kg/m³以下の供試体では総じて腐食範囲が狭く、ひび割れも生じなかった。一方、Cl⁻量4.5kg/m³以上の供試体では、母材部は全面腐食となり、ひび割れも生じた(表4.1.1)。

図4.1.2より、Cl⁻=1.8kg/m³程度以下の供試体は、マクロセル腐食の影響を受け、補修材料によって、腐食量に違いが生じた。一方、それ以上の濃度になるとCl⁻量と腐食量に相関性が見られ、補修材の種類による影響が小さくなった。この関係より、残留塩分は、ひび割れが発生するような鋼材腐食以下に留める場合に相当する算定Cl⁻量3.0kg/m³(C×0.74%)を超さない範囲で選定するのが望ましいと考える。

なお、マクロセル腐食の対策として、残留塩分の制限値を設けるだけでなく、

- ① コンクリートが適度に湿潤状態となる促進試験Cl⁻=4.5kg/m³における自然電位は、おおよそ腐食反応が活性化していると思われる電位(-350mV)を示したが、コンクリートの乾燥が進行する屋外暴露では腐食反応があまり進行しないと考えられる電位(-200mV)よりも貴な状態を示すように、暴露環境により腐食状態が異なる(図4.1.3)

- ② 補修材の中には、マクロセル電流が大きく、補修部がアノードを形成する材料がある(図4.1.4)

ことなどを考慮する必要がある。特に上記②については、補修部の鋼材腐食につながることから、補修材料の選定にあたっては十分な注意を要する。そのため、本研究ではマクロセル形成に関する評価試験方法を提案した。

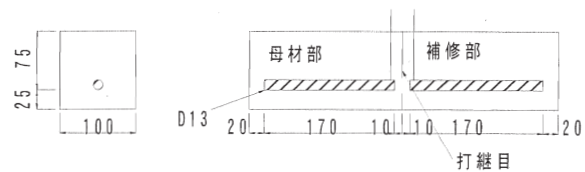


図4.1.1 マクロセル腐食実験用の標準的な供試体

表4.1.1 鋼材の腐食とひび割れ状況(促進試験、PCM)

Cl ⁻ 量 (kg/m ³)	鋼材の腐食状況		ひび割れの状況
	母材部	補修部	
0.9			ひび割れ無
1.8			ひび割れ無
4.5			母材部に0.1mmのひび割れ発生
13.5			母材部に0.7mmのひび割れ発生

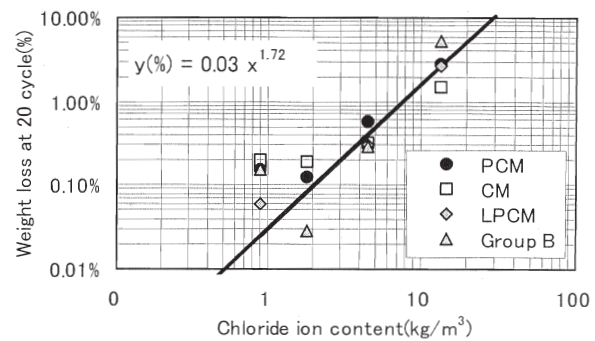


図4.1.2 促進試験における塩化物イオン量と母材部の腐食減量との関係(促進試験)

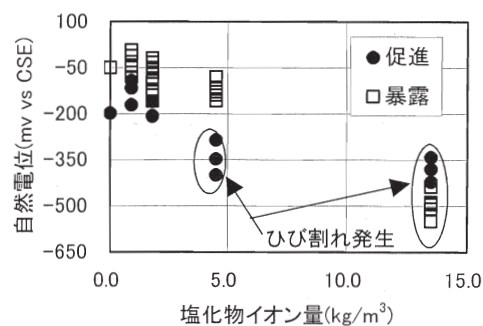


図4.1.3 自然電位測定の結果

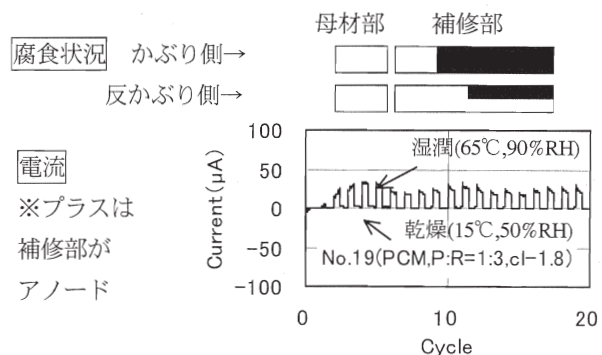


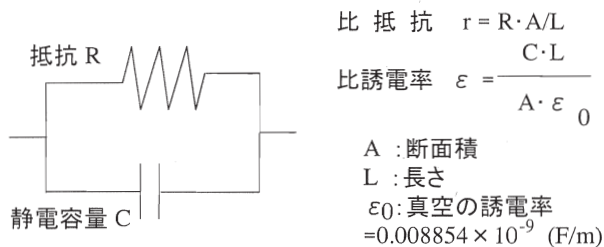
図4.1.4 アノード・カソード比を変化させた場合のマクロセル電流と腐食状況(促進試験、PCM)

4.2 電気的性質の評価技術

(1) 実験概要

コンクリート構造物中の鋼材腐食は、劣化要因である塩化物イオン濃度が同一であっても、酸素や水の供給量により腐食速度が異なる。また、前節 4.1 で取り上げたマクロセル腐食による腐食量や影響範囲は、補修部が有する電気抵抗の大きさに左右される。しかし、電気抵抗に関する研究事例⁵⁾は、コンクリートの品質やその基本物性としてのモルタルの耐久性等に関する内容のものが多い。そこで、ここでは、補修コンクリート部材の再劣化防止の観点より、補修材が有する電気的性質を実験的に検討した。

直径100mm×幅50mmを基本とする円筒試料を作成し、CMC（カボキ・メル・セロス）水溶液を介して銅電極に挟み込み、LCRメーターにて比抵抗および比誘電率の測定を行った（図4.2.1）。また、測定時には、抵抗Rおよび静電容量Cから成る並列回路を仮定した。測定結果の一例を図4.2.2に示す。



(2) 実験結果

- ① 補修材はすべて母材コンクリートよりも比抵抗が1.7~13倍と大きくなった（図4.2.3）。
- ② 試料が乾燥して含水率が低下するに従い、急激に比抵抗が増加した（図4.2.4）。
- ③ 塩分の侵入や防錆材の塗布等による比抵抗の変化は、含水率変化の影響に比べて微小であった。

以上より、今回用いた補修材は、含水状態が同条件であれば、電気抵抗が母材コンクリートよりも小さくなることはなく、補修材を用いたことでマクロセル腐食が過度に助長されることはないと思われる。

一方、4.1節の図4.1.2において、Cl量13.5kg/m³の場合、母材部のミクロセルが卓越する腐食状況となったが、この内、LPCMは腐食量が多くなる結果となった。このことから、再劣化防止対策として、既設コンクリートと同等程度以上でかつ含水率による変動の小さい電気的性質を有する補修材を選定しておいた方が無難であると思われる。

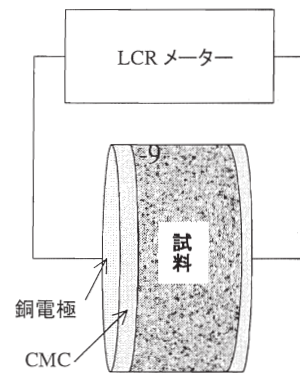


図4.2.1 LCRメーターを用いた電気化学的測定

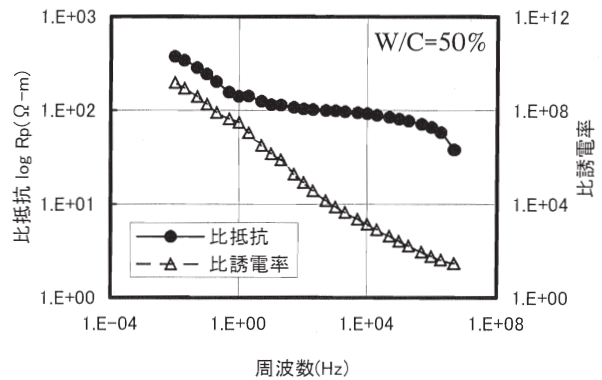


図4.2.2 測定結果の一例（湿度90%、3ヶ月保管後）

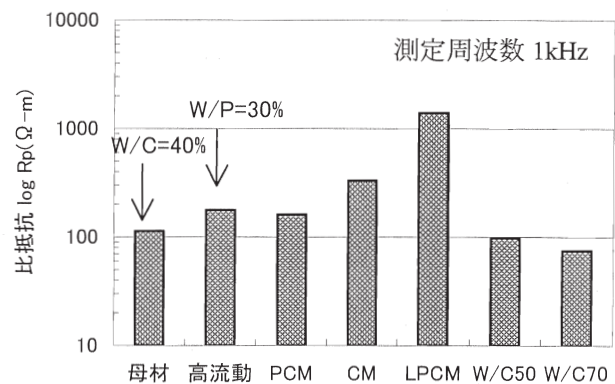


図4.2.3 各補修材の比抵抗（湿度90%、3ヶ月保管後）

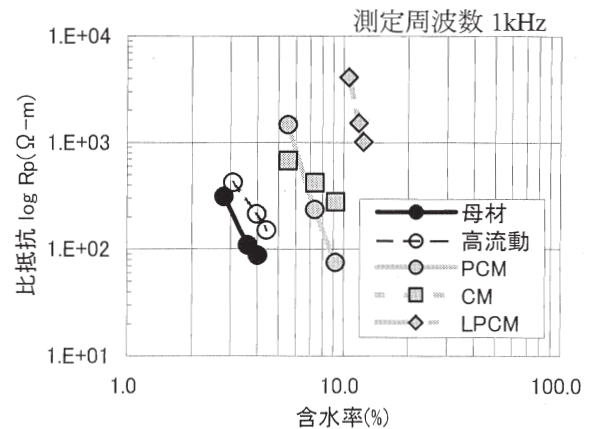


図4.2.4 補修時の含水率が比抵抗に及ぼす影響

4.3 劣化因子透過阻止性の評価技術

(1) 実験概要

当チームでは、高強度コンクリートなど緻密なセメント硬化体の塩分浸透性を評価する方法として、電気泳動法（非定常法）を利用したコンクリートの急速塩分浸透性試験（RCPT）を提案している⁶⁾。

ここでは、下面補修時の打継ぎ界面に生じるような残留空隙が、塩分透過阻止性に及ぼす影響を検討するため、①母材及び補修材が有する塩分透過阻止性、②発泡剤により空隙を導入した各材料の塩分透過阻止性について比較実験を行った。なお、空隙の導入率は、発泡剤の添加量 $0.3\text{L}/\text{m}^3$ で概ね 0.2% 、 1.0L で 0.6% 以上となった。

表 4.3.1 発泡剤による空隙導入率

使用材料	発泡剤の添加量(コンクリート m^3 当たり)		
	0.0 L	0.3 L	1.0 L
母材	0.00%	0.24%	0.69%
高流動	0.00%	0.23%	1.48%
PCM	0.00%	0.28%	1.68%
CM	0.00%	0.19%	2.50%
LPCM	0.00%	0.16%	0.66%

実験装置を図 4.3.1 に示す。通電条件は、印加電圧 30V で 6、15、30hrs とした。通電終了後、供試体の割裂面に 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧し、その呈色部より塩化物イオン浸透深さを測定した。この浸透深さより求まる拡散係数 D_c の算出⁷⁾ も可能であるが、ここでは浸透深さの比較による検討結果を報告する。

(2) 実験結果

RCPT 試験後の塩分浸透深さを図 4.3.2 に示す。これより、以下のことが確認された。

- ① 発泡剤を用いない場合の塩分浸透深さは、母材と同等かそれ以下となり、今回用いた補修材は母材程度の塩分浸透阻止性を有している。
- ② 今回の実験では、発泡剤による空隙の導入は塩分の浸透を大きく促すほどの影響はなかった。
- ③ ただし、発泡剤を 1.0L 添加した試料の中には、0.3L の場合よりも浸透深さが増すものもあった。

なお、写真 4.3.2 のように補修材 CM で作成した供試体内部には充填不足のような空隙がみられるケースもあり、そこを起点として塩分がより深部まで浸透したのもあった。この空隙は、供試体の作成方法をコンクリートと同様な方法（JIS A 1123）に基づいて実施したことが問題であると思われるが、実施工時にも空隙を残すことのないように適切な施工方法の取り決め、および、適切なコンシステンシーの選定などについての検討が望まれる。

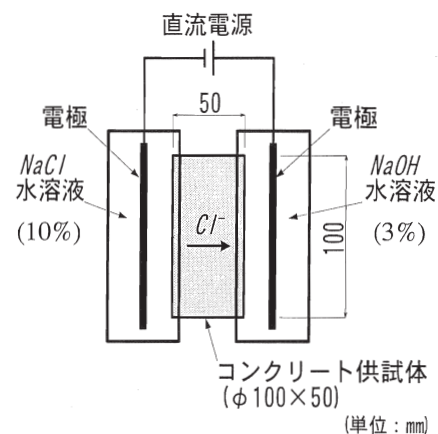


図 4.3.1 RCPT 実験装置の概略図



写真 4.3.1 RCPT 実験状況

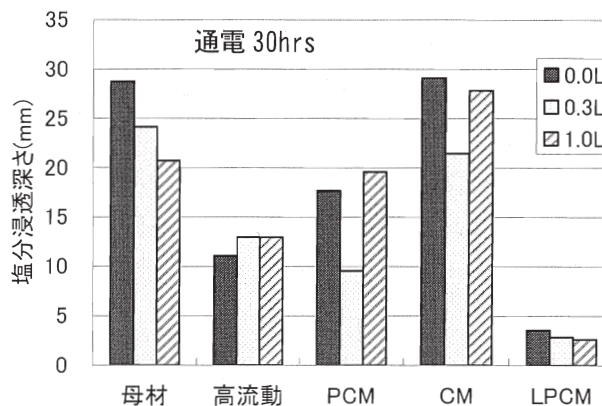


図 4.3.2 RCPT 試験後の塩分浸透深さ

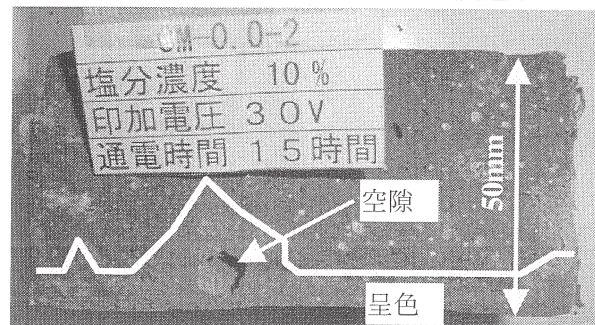


写真 4.3.2 塩化物イオン浸透深さの状況（補修材 CM）

5. 断面修復PC部材の補強技術に関する研究

5. 1 断面修復工法の品質管理技術⁸⁾

(1) 実験概要

塩化物イオンの浸透がPC鋼材に達した場合には、PC鋼材を完全に露出させ、その部分を修復するような大断面修復が必要になる。その場合、補修後の部材挙動を元通りまで回復させるには、補修材についても母材と同等程度の力学特性が求められることが予想される。しかし、これまでかぶり部分等の小断面修復を対象とした補修材料が多く、ヤング係数が母材コンクリートと比べて小さいなどの問題点がありプレストレスの再導入時に不具合が生じ、PC構造物の大断面修復に対応できない。そこで、PC桁下面の大断面修復を対象とした断面修復材の一つとして高流動コンクリートの適用性を実験的に検討した。

(2) 実験結果

表 5. 1. 1 に示す要求性能を設定し、これらを満足するように、使用材料及び配合を決定した。

実験の結果、流動性・粘性、ノンブリーディング性、初期膨張性、早強性、ヤング係数、強度については、要求性能を満足できることを確認した。以下、それ以外の品質管理項目についての実験結果を示す。

①自己充填性

図 5. 1. 1 に示すようにPC鋼材の配置により、コンクリートの流動・充填性が左右される可能性がある。模擬試験体でコンクリートの流動状況を観察した結果、コンクリートは底面を先行して流動し、PC鋼材間の通過性がやや低下する現象が見られたものの、最終的に吹上げ口からオーバーフローし、密実に充填できることがわかった。よって、土木学会が定めた指針⁹⁾による充填高さや目安となる漏斗流下時間であれば、PC橋桁下面の充填が可能であると考えられる。

②低収縮性

図 5. 1. 2 は、埋込みひずみ計で測定した高流動コンクリートの膨張収縮ひずみである。この結果、膨張材、収縮低減剤、発泡剤の使用により、打込み翌日から乾燥状態であっても、収縮量を大幅に低減することが可能であることが確認された。

③はつり面との付着性

チップングを行ったコンクリートブロックを用い、高流動コンクリートの逆打ちを行った場合のチップング面と高流動コンクリートの付着強度を測定した。表 5. 1. 2 に示すとおり、打継ぎ処理剤の有無に関わらず、発泡剤を使用しない場合には付着強度は

0N/mm²となった。一方、発泡剤を使用した場合であっても、打継ぎ処理剤を塗布しない場合には付着強度が小さく、打継ぎ処理剤の必要性が確認された。

ただし、付着強度自体のばらつきも大きいことから、新旧コンクリートの付着性には過度に依存しない補修計画を行うのが良いと考えられる。

表 5. 1. 1 断面修復材料としての高流動コンクリートに対する主な要求性能

自己充填性	断面寸法、鋼材の最小あき等により自己充填性ランクが必要である。
流動性、粘性	流込み位置からの円滑な流入を考え、スランブフロー650mm前後、V ₇₅ 漏斗時間10~15秒を目安とする。
ノンブリーディング性	打込み後のはつり面との間に空けき発生を考え、ブリーディング率(JIS A 1123)は0%を目標とする。
初期膨張性	硬化前に打上り面が沈下せず、はつり面に密着できるように初期膨張性が必要である。
早強性	通行開始までの日数、施工時の外気温等による。実験では材齢7日で桁コンクリートと同等の強度とする。
付着性	はつり面との付着性は必要であるが、必要性能が明確ではないため、一般的な1~1.5N/mm ² を目安とする。
ヤング係数、強度	PC桁コンクリートと同等。実験では設計上のヤング係数33kN/mm ² 、圧縮強度50N/mm ² を目安とする。
低収縮性	収縮・クリープ変形の小さいものが良いが、具体的にはなっていないので市販品の組合せで可能な低収縮性を確認する。

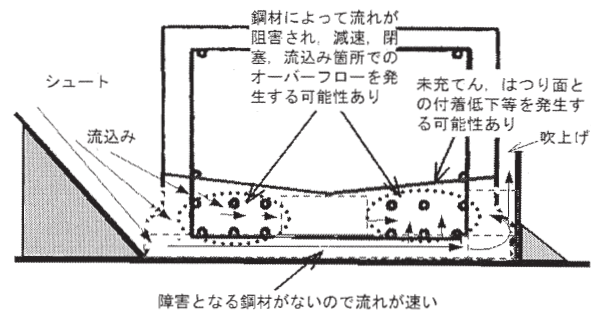


図 5. 1. 1 高流動コンクリートの流動予測

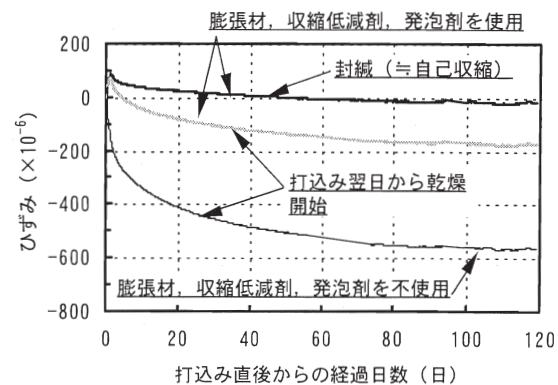


図 5. 1. 2 膨張収縮ひずみの測定結果

表 5. 1. 2 付着強度試験の結果

発泡剤	あり		なし	
	あり	なし	あり	なし
最大	1.62	0.62	0	0
最小	0.82	0.00	0	0
平均	1.15	0.21	0	0

(単位:N/mm²)

5.2 はつり範囲の選定技術¹⁰⁾

(1) 検討概要

ここでは、PC桁に対して力学的に影響を及ぼすような大断面のはつりを実施する場合の変形挙動を非線形解析によって把握し、桁断面に応じたはつり範囲に関する検討を行った。

図5.2.1に対象とするPC桁の形状寸法を示す。本桁は、支間10mで、長方形の充実断面を有するJIS桁であり、鉄筋およびPC鋼材配置は、PC建設業協会発行の設計・製造便覧JIS A 5373-2004¹¹⁾に従うものとした。はつり作業によって、母材断面が減少し、桁に上反りが生じることが予想されるため、あらかじめ上反り変形を拘束する治具を取り付けた後、はつり施工を実施した。はつり完了後、拘束治具を徐々に緩め、拘束治具に作用する反力と部材の上反り変形を測定した。

解析は、3次元の非線形FEM解析とし、適切な材料の構成モデルおよび材料特性を設定し、はつり範囲を変化させた場合の応答値を算出した。

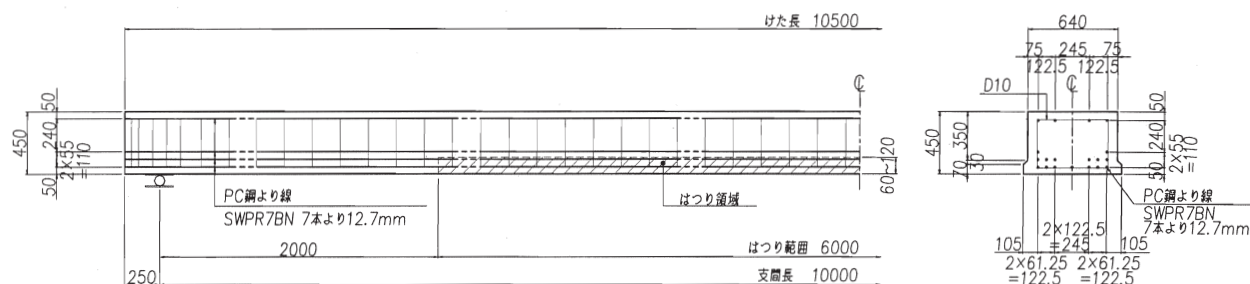


図 5.2.1 PC桁寸法および鋼材配置図

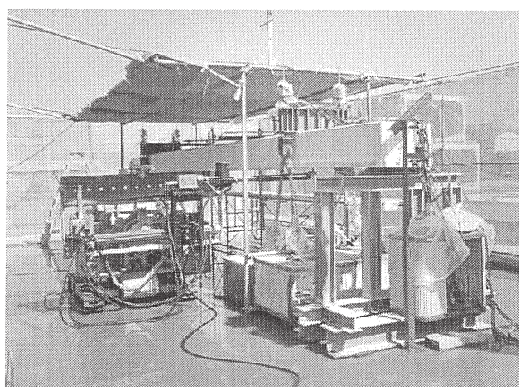


写真 5.2.1 試験体およびWJ機器設置状況

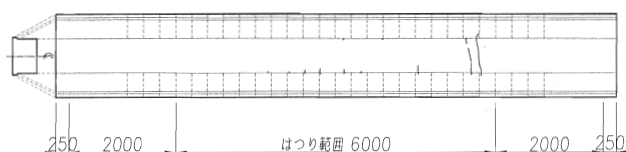


図 5.2.3 ひび割れ発生状況(除荷時)

(2) 検討結果

①線形解析との比較による解析モデルの妥当性確認

図5.2.2に線形解析と本解析結果を示した。はつり高さが80mmまでは、両者の結果はほぼ一致したが、それ以上、はつり範囲を大きくすると、上縁側のコンクリートにひび割れが生じることにより、線形解析とは異なる結果になった。

②変形挙動の予測

はつり高さ60mmでは試験結果が小さめになったものの、77mmおよび120mmでは解析結果ははつり試験の結果と良く一致した。

③ひび割れ発生の予測

はつり試験でのひび割れ状況を図5.2.3に、本解析結果を図5.2.4に示す。はつり試験では、はつり高さ120mmの除荷時にひび割れが確認された。一方、解析では、材料試験結果を反映させたモデルとすれば、実験結果と同様な傾向が確認された。これより、ひび割れ発生についても、実物の材料特性を用いた解析により、再現可能となることが確認された。

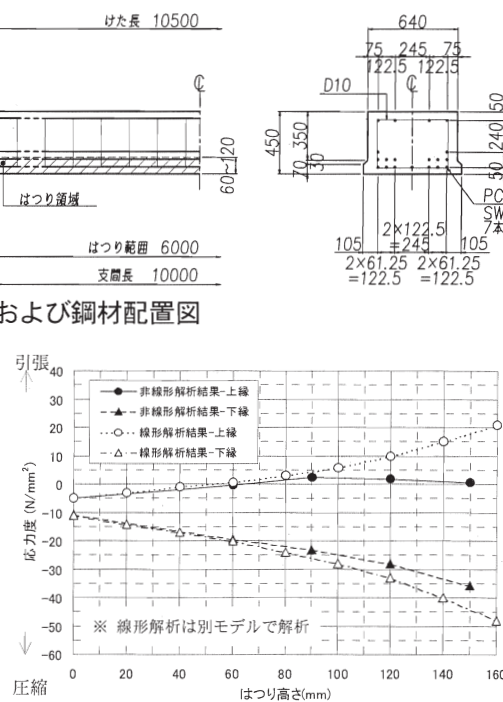


図 5.2.2 はつり高さとコンクリート応力度



図 5.2.4 実桁の材料特性を反映したモデルによるひび割れ分布図(120mm はつり状態)

5.3 耐力回復のための設計施工技術

(1) 検討概要

劣化損傷を受けた既設PC部材の耐力を回復させるための課題として、以下の項目が挙げられる。

- a) 既設PC部材の耐力評価手法
- b) 補強したPC部材の耐力照査方法

ここでは、項目 a) についてはPC鋼材の破断本数から耐力を評価できるものとし、項目 b) について実物大のPC桁を作成し、ウォータージェット (WJ) はつり、断面修復、外ケーブル補強を行った試験体を用いて、実験的に検討した (図 5.3.1、写真 5.3.1 ~ 3 を参照)。

ここでは、塩害等によりPC鋼材が30%程度破断している場合の模擬実験として、以下の項目について確認することにした。

- ① 高流動コンクリート打込みによる断面修復の施工性
- ② クリープ・収縮による長期挙動の確認
- ③ 断面修復材のひび割れ性状
- ④ 外ケーブル補強桁の曲げ耐力

なお、修復部に所定のプレストレストを導入するには、PC桁の最下段に配置されている7本 (全19本) 中5本の切断が必要となった (図 5.3.2)。

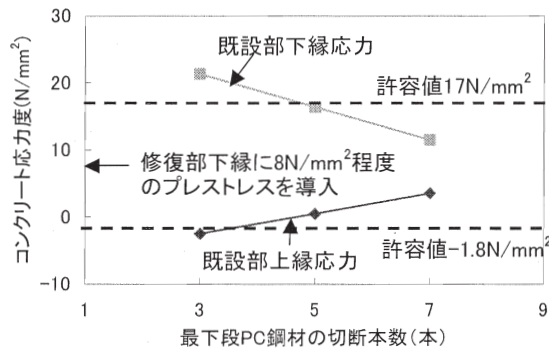


図 5.3.2 PC鋼材の必要破断本数

実構造物では、死活荷重の割合が本試験体とは異なるので、PC鋼材の切断という方法は採られないと思われるが、大断面修復を行う場合、PC鋼材の破断本数によっては、はつり時の安全性の確保や補強時の耐力回復を図るためのプレストレスト量の調節が必要であると考えられる。

(2) 検討結果

上記項目①、②については、5.1節および5.2節で検討した方法により照査可能であることが概ね確認された。項目③、④については、現在、長期挙

動の確認中であるが、これまでの検討結果より、シミュレーション解析による再現が可能であるものと推察される。

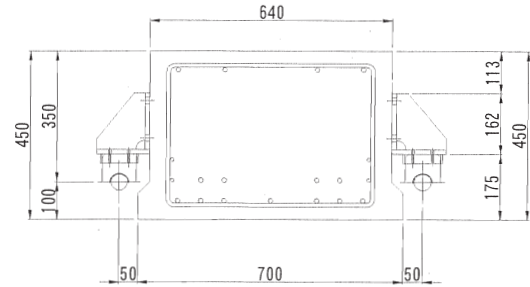


図 5.3.1 外ケーブル補強桁の断面形状

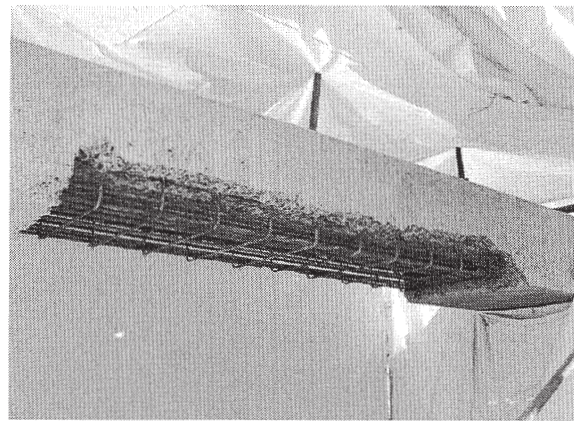


写真 5.3.1 はつり後のPC桁の状態

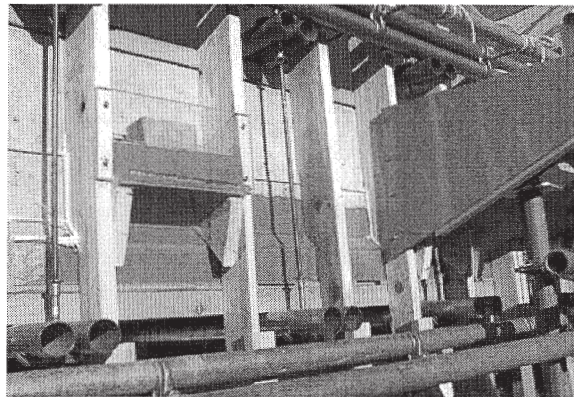


写真 5.3.2 高流動コンクリートの打込み完了

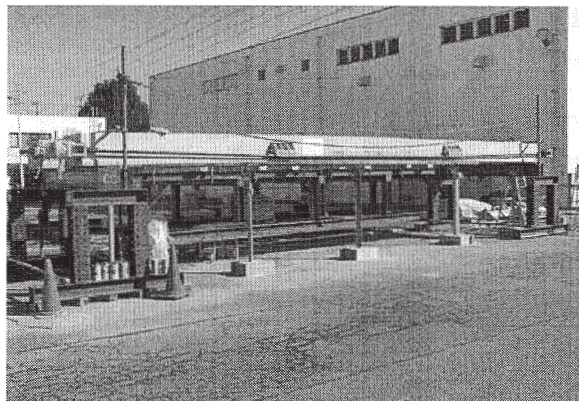


写真 5.3.3 外ケーブル補強桁の長期挙動確認状況

6. PC部材の改造システムの構築に向けた提案

6.1 既設PC部材の残存耐荷性能の評価方法

供用されているPC構造物は、適切な維持管理により、建設時の性能を保持し得る。一方、塩害等により耐荷力を損なう段階まで劣化が進行したPC部材では、耐荷性能の低下を見込んで補修補強工法の選定を行う必要がある。残存する耐荷性能を評価する上での課題点を以下に示す(表6.1.1)。

- ① 残存プレストレス量の評価
- ② PC鋼材の残存率の評価
- ③ 腐食によるPC鋼材の伸び残存率の評価

項目①に関しては、いくつかの非破壊検査手法が提案され、実際に適用されてきている状況である¹²⁾。しかしながら、項目②、③を含め、非破壊検査の推定精度自体に課題が残されており、既設PC構造物の残存耐荷力をこの方法のみにより適切に評価できるまでには至っていない。

以上より、現在、一般的に実施されている点検結果・設計検討に基づく診断技術を充実・発展させ、残存耐荷力評価の確度を高めていくことが、当面の技術的課題であると考えられる。

6.2 合理的な補修補強方法の選定方法

本研究では、表6.2.1に示すように、断面修復工

法に関する選定技術について検討し、新たな指標の設定と具体的な評価手法を確立した。

- ① 補修部のひび割れ抵抗性に関する評価手法
- ② 補修コンクリート部材の構造一体性の評価手法
- ③ 補修部の剥離抵抗性の評価手法
- ④ 補修部の再劣化防止性の評価手法

なお、表6.2.1に示すように、複数の要求性能を同時に満足し得ないこともあり、個々の材料が有する特性の一長一短を見極め、より適切な方法を選択できるような体系づくりが必要であると考えられる。

6.3 補強設計方法

残存耐荷性能の評価手法は、6.1節に示した通り、点検・設計検討などを行う従来技術をベースとし、6.1節の項目②、③については、

- a) 終局時の耐荷力はPC鋼材の残存率の減少に応じて低下すること^{13) 14)}
- b) 腐食によるPC鋼材の断面欠損と伸び率には相関性があること¹⁵⁾
- c) 上記b)を考慮したPC部材の力学的特性の算定結果が実構造物の載荷試験とおおよそ一致すること¹⁶⁾

がすでに検証されており、これらの考え方と、本文5章の研究結果を組み合わせる方法を採用すること

表 6.1.1 残存耐荷性能の評価のための課題の整理

項目	考えられる構造物所機能への影響		各評価手法の適用性の現状	
	機能の事例	具体的な事象	非破壊検査による推定	点検結果・設計検討に基づく診断
①残存プレストレス量	供用性の低下	過大なひび割れ 過度のたわみ	幾つかの手法が提案 実用化されているが、 推定精度に課題。	外観変状および設計図書 等の調査検討による診断は 概ね適切な 程度 の 確 度 有 り。
②PC鋼材の残存率	耐荷力の低下	破壊に対する安全 性の損失	AE法等による検出方法 の提案有り。研究段階。	部分はずり検査による診断 が一般的で確度も有る。
③腐食によるPC鋼材 の伸び残存率	靱性の低下	設計上想定してい る安全率の喪失	伸び残存率の検査手法 の開発はされてない。 不適	部分はずり検査では 未検査部位が残る。 適切性 に欠ける

表 6.2.1 断面修復工法における材料・施工選定技術のとりまとめ

項目	材料特性			施工条件		
	硬化収縮 ひずみ	伸び ひずみ	材質	補修厚み	はつり面の凹凸	施工方向
①ひび割れ抵抗性	小さいほど 良い	大きいほど 良い	適切なポリマー混入は良 い	厚い方が良い	—	—
②構造一体性	同上	同上	同上	同上	—	—
③剥離抵抗性	—	—	同上であるが、施工条件 により異なる	適度な厚みが 良い	WJ(ウォーター ジェット)が良い	下面施工は上面 施工よりも劣る
④再劣化防止性	—	—	適切な電気的性質、 劣化因子阻止性が必要	—	—	—

により、既設PC部材の補強設計における照査確度を高めることができるものとする。

なお、既設PC構造物の耐荷力には、安全率が暗黙のうちに計算上見込まれており、かつ、部材によって安全度が異なること（荷重設定、格子桁による荷重の再分担、床版ハンチ部の効果等）をどの程度見込めるかについては、今後の検討が必要である。

6. 4 補修補強工法の施工要領

3章および5章に示したように、断面修復工法の材料、施工に必要な性能を新たに設定した上で、①品質管理手法の確立、②施工上の留意事項について提案した。ただし、これらの適用の際には、まだいくつかの課題があると思われる、今後、検討を詰めていく必要がある。

6. 5 新たな補強方法

本研究課題で幾つかの新たな補強方法の可能性を示すことができた。これらのうち、今後の適用が望まれると思われる技術について、以下に示す。

- ① 大断面修復PC部材に適した高流動コンクリートの配合設計および施工技術
- ② 大断面修復PC部材の耐荷力回復のためのプレストレス量調節技術
- ③ 高靱性補修材料によるPC部材の曲げ強度向上技術

7. まとめ

本研究課題では、既設PC構造物の損傷状況および目標の設定から、採用すべき補修補強方法を判断できる手法および補強設計方法の開発を目指すため、①材料選定技術、②再劣化防止技術、③断面修復PC部材の補強技術に関する事項を研究項目として取り上げ、検討を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 様々な補修材料・工法の開発・適用がなされてきた結果、現行の補修・補強指針ではそれらの良否について適切な判定を下すものではなくなりつつある。そこで、より適切な工法選定や材料評価のための新たな指標を設定し、実験的に検討した結果、幾つかの性能を照査・評価する手法を確立することができた。
- (2) 今回検討した各要素技術を組み合わせることにより、PC部材の改造システムの構築手法に関する以下の提案が可能となった。
 - ① 既設PC部材の残存耐荷性能の評価方法

- ② 合理的な補修補強方法の選定手法
 - ③ 補強設計方法
 - ④ 補修補強工法の施工要領
 - ⑤ 新たな補強方法
- (3) 上記(1)、(2)の成果を踏まえ、既設プレストレストコンクリート構造物の補修補強マニュアル原案を作成した。

【既設PC構造物の補修補強マニュアル原案（目次）】

1. 総則
 1. 1 一般原則・適用範囲
 1. 2 用語の定義
2. 補修補強技術の必要性の判定
 2. 1 判定の基本
 2. 2 損傷度の判定
3. 補修補強技術の選定
 3. 1 技術の選定
 3. 1. 1 技術選定の判断
 3. 1. 2 技術の選定フロー
 3. 2 材料の選定
 3. 2. 1 一般
 3. 2. 2 小断面修復用補修材の品質
 3. 2. 3 大断面修復用補修材の品質
4. 補修補強技術の設計
 4. 1 一般
 4. 2 事前調査
 4. 3 要求性能に対する照査
 4. 4 はつりの適切性の照査
5. 補修補強技術の施工
 5. 1 一般
 5. 2 残留塩分の照査
 5. 3 はつり面の処理の照査
 5. 4 既設構造物への影響度の照査
6. 補修補強技術の効果の確認
7. 補修補強後の維持管理
 7. 1 一般
 7. 2 記録の保存
 7. 3 追跡点検

以上より、既設PC構造物の補強対策時における安全性の確保・向上に寄与する一応の成果が得られたと思われるが、今後はこれらの成果の信頼性を向上させ、技術の高度化を図っていくことも必要であり、しいては、コスト縮減・施工の効率化を促すことにつながるものとする。

参考文献

- 1) 建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」、建設省、1988.11
- 2) 例えば、長滝重義、大即信明、守分敦郎、宮里心一：「鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究」、土木学会論文集、No.544/V-32、pp.109-119、1996.8
- 3) 北山良、渡辺博志、久田真、中村英祐：「断面修復材の硬化収縮に関する研究」、第14回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.97-100、2005.10
- 4) 土木研究所：「各種コンクリート断面修復工法の施工性、強度、耐久性に関する実験的検討」、土木研究所資料、第3925号、2004.2
- 5) 例えば、土木研究所：「コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究」、土木研究所資料、第3716号、2000.3
- 6) 渡辺博志、河野広隆、田中良樹、渡辺豊：「コンクリートの急速塩分浸透性試験の適用性」、土木技術資料、44-1、pp.32-37、2002
- 7) 渡辺豊、河野広隆、渡辺博志：「コンクリートの急速塩分浸透試験による塩化物イオン核酸係数の算定について」、コンクリート工学年次論文集 Vol.24、No.1、pp.663-668、2002.6
- 8) 谷口秀明、藤田学、久田真、渡辺博志：PC部材の大断面修復を対象とした高流動コンクリートに関する検討、第60回土木学会年次講演会概要集、V-pp.133-134、2005.9
- 9) 土木学会：コンクリートライブラリー第93号「高流動コンクリート施工指針」、1998
- 10) 中村定明、中村雅之、藤田学、久田真：「はつりによるPC桁の変形挙動解析とその検証」、第5回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、日本材料学会、pp.359-366、2005.1
- 11) プレストレスト・コンクリート建設業協会、「道路橋用橋げた設計・製造便覧 JIS A 5373-2004」、p.204、2004
- 12) 例えば、肥田研一：「PC橋の診断」プレストレストコンクリート、Vol.45、No.1、2003.1
- 13) 土木研究所：「塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(II)―旧暮坪陸橋の載荷試験―」、土木研究所資料、第3809号、2001.3
- 14) 土木研究所：「塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(IV)―旧芦川橋の載荷試験―」、土木研究所資料、第3816号、2001.3
- 15) 土木研究所：「塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(III)―塩害により損傷を受けたPC鋼材の機械的性質―」、土木研究所資料、第3810号、2001.3
- 16) 土木研究所：「塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(I)―プレテンションPC桁の載荷試験―」、土木研究所資料、第3808号、2001.3