

# PC 橋の断面修復に関する実験的研究

本間 淳史\*1・横山 和昭\*2・玉置 一清\*3・三加 崇\*4

## 1. はじめに

ひび割れを制御した設計となっている PC 橋は、水セメント比の低い密実なコンクリートを使用しプレストレスが導入されているため、RC 橋に比べて一般的に耐久性の高い構造物である。しかしながら、海岸付近における飛来塩分や冬期に散布される凍結防止剤の塩分浸透を受ける場合には、塩害によりコンクリート内部の鋼材が腐食しコンクリート表面にひび割れや剥離が見られる事例があり、断面修復を実施した事例も報告されている。塩害等の劣化を受けた PC 橋の補修補強工法としては、RC 橋の場合と同様に劣化したコンクリート部分を除去した後に補修材料で修復する断面修復工法が採用されており、PC 鋼材が腐食している場合には不足したプレストレスを補強する外ケーブル補強工法も併用されている。

コンクリート構造物を補修するにあたって、断面修復材に一般的に要求される性能は、力学特性（圧縮強度など）、ひび割れ抵抗性、耐久性、はく落抵抗性および美観・景観等がある。これらの要求性能のうち、ひび割れ抵抗性に関しては、従来、断面修復材の収縮量（長さ変化率）に規定値を設けることで間接的に照査を行ってきたが、本来は、収縮量のほかに、断面修復材の弾性係数、既設コンクリートとの付着強度、既設コンクリートの拘束度が相互に関連したものであり、これらを総合的かつ直接的に評価する試験方法について研究した事例<sup>1)</sup>もあるが、実構造物の補修設計に反映させるための評価手法の確立が重要な課題となっている。

また、ひび割れを許容するように設計された RC 橋とひび割れを制御するように設計された PC 橋では、ひび割れ抵抗性に対する要求性能は異なる。具体的に述べると、PC 橋の劣化部分を除去して断面修復する場合は、除去した劣化部分のプレストレスは除去部分周辺に応力が再分配され、断面修復部は PC 断面から RC 断面に変化することとなる。RC 断面となった断面修復部には、断面修復材の収縮が既設部に拘束されることによって断面修復部に有害なひび割れが発生することが懸念される。これに抵抗するために添加する膨張材によるケミカルプレストレスや、外ケーブル補強による追加プレストレス等の効果について検討する必要がある。しかし、外ケーブル補強に関しては、供試体および実橋による補強効果の検証に関する研究<sup>2)</sup>は行われ

ているが、コンクリートとは性状が異なる断面修復材と併用した場合の補強効果は未解明な点もある。

本報告は、2 章において、比較的大規模の面積に対する断面修復工として、近年その採用実績が増加している吹付け工法と、断面修復材として耐久性、施工性の観点から採用されることが多いポリマーセメントモルタルの一般的な特徴について述べる。3 章において、PC 橋の断面修復に吹付け施工およびポリマーセメントモルタルを採用した場合を想定し、断面修復材の寸法変化率等の材料試験と併せて、実橋を模擬した供試体の載荷実験等の構造実験を実施し、PC 橋の断面修復部におけるひび割れ発生挙動の解明を試みた結果を示す。

## 2. 断面修復工法の概要

### 2.1 断面修復工法の分類

コンクリート構造物の断面修復工法は、施工規模や施工方向に応じて、左官工法、打込み工法、吹付け工法（湿式、乾式）に大別される<sup>3)</sup>。これらの工法を一般的に分類すれば表 - 1 のようになるが、実際には、使用する断面修復材の性状や施工条件を加味し、さらに経済性を考慮したうえで適切な工法を選定することが必要である。比較的小規模な断面修復では、施工方向にかかわらず左官工法が汎用的に実施されているが、大規模な上向き施工などにおいては、施工能力が高く、既設コンクリートとの均質な一体化が期待でき、型枠工および振動、締固め作業を必要としない吹付け工法が断面修復工法として経済的になるものと考えられる。

表 - 1 断面修復工の一般的な分類

施工方向 施工規模	上向き	横向き	下向き
小	左官工法（コテ塗り）		
中	吹付け工法		打込み工法
大			

### 2.2 吹付け工法の特徴

吹付け工法とは、空気圧を利用して断面修復材を高速で断面修復部に衝突させ、断面修復部と既設コンクリートとの一体化を図る工法である。吹付け工法は、あらかじめ練り混ぜられた材料を吹付ける湿式吹付け工法と、水以外の

\*1 Atsushi HOMMA：中日本高速道路(株) 中央研究所 橋梁研究室 室長

\*2 Kazuaki YOKOYAMA：西日本高速道路(株) 中国支社 管理事業部 改良グループ

\*3 Kazukiyo TAMAKI：三井住友建設(株) 技術研究所 土木研究開発部

\*4 Takashi SANGA：三井住友建設(株) 技術研究所 土木研究開発部

空練り材料を圧送して吹付けノズルにて水を添加しつつ吹付ける乾式吹付け工法の2種類があり、それぞれ表-2に示す特徴がある<sup>3)</sup>。

2.3 ポリマーセメントモルタルの特徴

断面修復材に用いる材料は、セメント系、有機系と、その中間的性質を有するポリマーセメント系に大別される。最近では、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）が、以下に示す特徴により断面修復の用途に適するケースが多く、吹付け施工や左官工法において広く普及してきている。

PCMとは、セメントモルタルを改質する目的で、結合材にセメントとポリマーディスパージョン、水溶性ポリマーなどのポリマー混和剤を用いて骨材を結合したものである。PCMに用いられるポリマーは、水性ポリマーディスパージョン（SBR系ラテックス、CR系ラテックス、EVA系エマルジョン、PAE系エマルジョン等）、水溶性ポリマー（MC、PVA等）、再乳化形粉末樹脂（EVA系、VAVeova系、PAE系等）などがあり<sup>4)</sup>、その用途に応じて多種多様なPCMが

流通している。最近では、再乳化形粉末樹脂を使用したブレミックタイプのPCMの開発が盛んに行われ、あらかじめ、セメント、細骨材、短繊維などと一緒に袋詰めされたブレミックタイプの形態が、現場省力型の製品として使用例が多くなってきている。

表-3に、PCMの一般的な特徴<sup>4)</sup>を示すが、ポリマーには多種多様なものがあり、ポリマーの種類や割合によっても性状がまったく異なる場合があることに注意が必要である。一般に、断面修復材としてのポリマーの添加は、とくに厳しい環境下における耐久性の改善、既設桁との接着性の向上を主な目的としているものと考えられる。ひび割れ抵抗性の観点からは、現状は収縮低減剤や膨張材の添加により収縮量を抑えることに着眼され、ポリマーの特性が十分に評価されているとはいいがたい。本来、PCMは比較的大きな曲げ強度と変形性能、コンクリートに比べて小さな弾性係数であることにより、普通モルタルに比べてひび割れ抵抗性に優れる材料の一つであると考えられる。

表-2 吹付け工法の比較

		湿式	乾式
材料	セメント	ポリマーセメントが用いられることが多い	超速硬セメントが用いられることが多い
	短繊維	将来のはく落防止対策として短繊維を混入する機会が多い	湿式同様、短繊維を混入する機会が多い
	管理上の特性	材料はブレミック状態になっているため品質は比較的安定している	水量管理はノズルマンが行うことから、その技量に品質が影響される
施工性	吹付け設備	比較的コンパクト	湿式に比べると大きい
	圧送能力	搬送距離は乾式に比べ小さくなる	長距離の搬送が可能
	施工能力	0.5 m <sup>3</sup> /hr 程度	1.0 m <sup>3</sup> /hr 程度
	施工厚さ	1層は20～30 mm程度 それ以上は多層吹付けが必要 (夏季では2～3 hr, 冬季では7～8 hrの養生後に多層吹付けを行う)	10 cm程度までの厚付け施工が可能 (数分程度の養生で多層吹付けが可能)
	仕上がり	強度発現がやや遅いため、コテ仕上げが可能	強度発現が早いので、コテ仕上げは凸部を削り取る程度
	粉じん	少ない	多い
	はね返り(リバウンド)	少ない	多い
耐久性	ポリマーセメントの特性から、 ・中性化、塩分浸透の抑制効果は大 ・凍結融解抵抗性も良好	同一のW/Cの普通モルタルと同等	

表-3 ポリマーセメントモルタルの一般的な特徴

フレッシュ時の性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ワーカビリティを改善する</li> <li>・適度な空気連行性を有する</li> <li>・保水性が向上する</li> <li>・ブリーディングや材料分離抵抗性に優れる</li> </ul>	
硬化時の性状	強度特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・圧縮強度は、ポリマーセメント比の増加に伴い、一般的に低下する傾向にある</li> <li>・曲げ強度は、ポリマーセメント比の増加に伴い、一般的に増大する傾向にあるが、逆に低下するポリマーもあるので注意が必要となる</li> </ul>
	収縮特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PCMは保水性が良好なことから普通セメントモルタルに比べ、一般に乾燥収縮は小さい</li> <li>・また、ポリマーセメント比の増加に伴い、乾燥収縮は低減する傾向にある</li> <li>・乾燥収縮は寸法の影響を受け、供試体面積/供試体体積比が増加するに従い乾燥収縮が増加することが報告されている</li> <li>(ポリマーの種類によっても乾燥収縮も大きく異なることが報告されている)</li> <li>たとえば、再乳化形粉末樹脂を用いたPCMでは、普通セメントモルタルに比べて収縮が大きくなる場合がある<sup>5)</sup>これを補う方法として収縮低減剤を併用することで改善を試みる方法等が報告されている<sup>6)</sup></li> </ul>
	変形性能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ポリマーセメント比の増加に伴い変形性能は大きくなる</li> </ul>
	接着性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多くの材料に対して良好な接着性を有する</li> </ul>
耐久性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一般に、ポリマー比の増大により次の耐久性が著しく改善される</li> <li>・フィルム形成の効果により、防水性、中性化抵抗性、遮塩性が向上する</li> <li>・水密性の向上、適度な空気連行性により、凍結融解抵抗性が向上する</li> </ul>	

次章では、PCM のひび割れ発生挙動に及ぼすこれらの要因を定性的、定量的に把握するために実施した、断面修復を施した PC 桁の暴露試験および曲げ載荷試験の結果を報告する。

### 3. 断面修復した PC 桁のひび割れ抵抗性試験

#### 3.1 実験概要

試験体は支間 20 m 程度の JIS 桁のウェブ部分を想定したものであり、試験体寸法、配筋を図 - 1 に示す。主鉄筋は D 16 の異型鉄筋とし、桁高中央部にプレストレス導入用のシーホールを配置している。断面修復は、鉄筋の背面 30 mm 程度まで取り除くものとして深さ 100 mm と設定し、ウォータージェットによりはつりを行った。以下、このはつり部を断面修復部、それ以外のコンクリート桁を既設桁として表記する。写真 - 1 にはつり後の状況を示す。断面修復工としては、ポリマーセメントを用いた湿式吹付けを採用し、3 層に分けて施工している。吹付け状況を写真 - 2 に示す。断面修復後、3 箇月の暴露（写真 - 3）を経て曲げ載荷試験を実施し、断面修復部のひび割れ抵抗性に及ぼす各種影響因子について検討を行った。実験パラメータは表 - 4 にあげる項目とし、3.2 に示す 3 つのシリーズに分類して

考察を行う。

#### 3.2 実験パラメータ

##### (1) 断面修復材の配合による影響（シリーズ 1）

シリーズ 1 は、断面修復材に一般的に添加される膨張材、ポリマーの影響を検証するためのものである。表 - 5 に、今回の試験用に特別に配合した断面修復材のケースを示す。材料 1 は、PAE 系再乳化型粉末ポリマーを用いたプレミックスタイプとして一般的に市販されている PCM である。材料 2 は、材料 1 を基本として、圧縮強度が大きく阻害されない範囲で膨張材の量だけを増量したものである。材料



写真 - 3 PC 梁試験体暴露状況

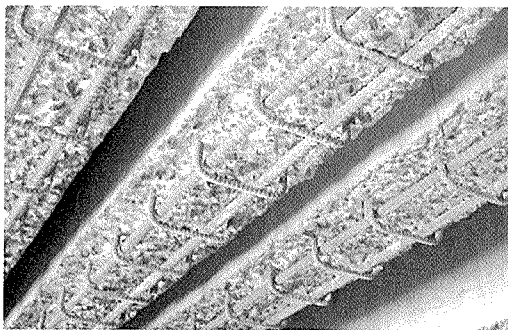


写真 - 1 はつり後の状況

表 - 4 実験パラメータ

	断面修復材	既設桁のプレストレス	断面修復後のプレストレス導入	シリーズ 1	シリーズ 2	シリーズ 3
case 1	材料 1	P = 323 kN	-	○	○	○
case 2	材料 2			○		○
case 3	材料 3			○		
case 4	材料 4			○		
case 5	材料 1	P = 473 kN			○	
case 6		無し			○	
case 7	材料 1	P = 323 kN	+ P = 400 kN (合計 P = 723 kN)			○
case 8	材料 2					○

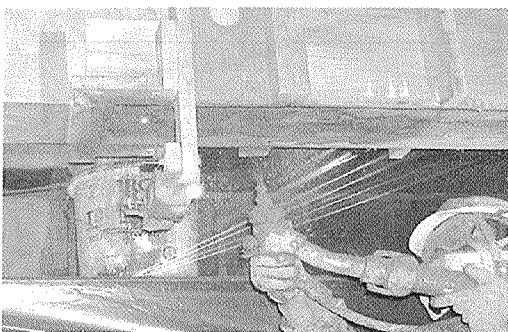


写真 - 2 湿式吹付け状況

表 - 5 断面修復材の配合

試験体	断面修復材	ポリマーの種類	ポリマー混入量	膨張材
case 1	材料 1	一般的な PCM	PAE 系	C × 8 % C × 5 %
case 2	材料 2	一般的な PCM + 膨張材増量	PAE 系	C × 8 % C × 8 %
case 3	材料 3	セメントモルタル	-	- -
case 4	材料 4	ポリマーの種類を変更し、添加量を増加した特殊 PCM	純アクリル	C × 18 % C × 5 %

C : セメント質量

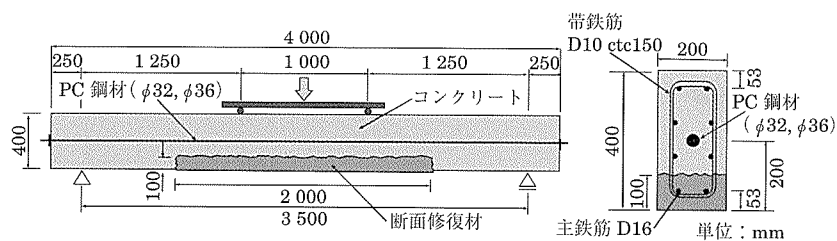


図 - 1 PC 梁試験体

3は、材料1から膨張材およびポリマーを除去したセメントモルタルである。ここで、材料1からポリマーだけを増量する配合についても検討したところ、吹付け時の施工性等に問題が生じたことから、ポリマーの種類を純アクリルに変更し、施工できる範囲で最大限まで増量し弾性係数を小さくすることで変形性能の増大を図ったものを材料4としている。また、シリーズ1では、収縮特性が大きく異なる4つの断面修復材を比較することにより、断面修復材の収縮量と断面修復材に生じる収縮拘束応力の関係を検証し、断面修復材におけるひび割れ発生荷重の照査式の提案を試みている。

(2) 既設桁のプレストレスの影響 (シリーズ2)

シリーズ2は、既設桁のプレストレスの影響を検証するためのものである。断面修復材は材料1のみとした。図-2に断面修復前(はつり直後)のプレストレスによる応力分布を示す。case1を基本ケースとし、case5は断面修復を施す打継面に許容圧縮応力程度の高圧縮応力が発生している場合、case6は既設桁にはプレストレスを導入しないで、自重により若干の引張応力が発生している場合である。吹付けによる断面修復後においても、断面修復部の自重の影響はわずかであるので、基本的に断面修復部はほぼ無応力状態に近く、既設桁の応力状態は図-2に示すまほとんど変化しないと考えることができる。

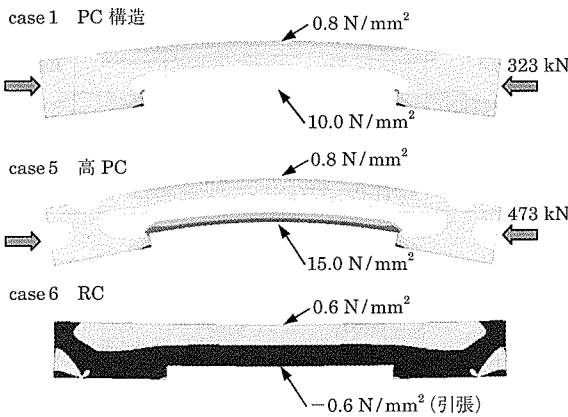


図-2 断面修復前における既設桁の応力状態

(3) 断面修復後のプレストレス導入効果 (シリーズ3)

断面修復部のひび割れ抵抗性を向上させる手段として、断面修復後に外ケーブルなどで後補強をし、断面修復部にプレストレスを導入する工法が考えられる。シリーズ3は、断面修復後に既設桁に配置したPC鋼棒を追加緊張することにより、外ケーブル補強の効果を検証したものである。使用した断面修復材は、材料1および2である。

3.3 断面修復材の配合の影響 (シリーズ1) に関する試験結果

(1) 材料試験結果

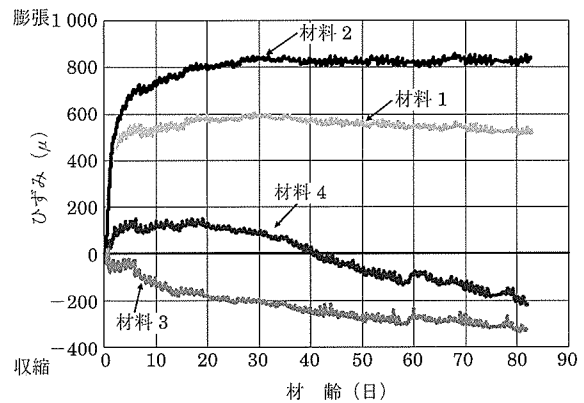
材料1~4の断面修復材の基本性状を把握するため、表-6に示す材料試験を梁試験体の断面修復施工と同時に実施している。試験体は、型枠に直接吹付け、または吹付けに

表-6 材料試験一覧

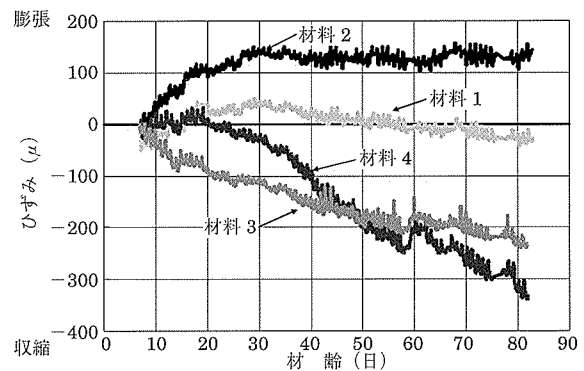
		寸法 (mm)	製作方法
一般的な PCM の品質管理試験	圧縮強度試験	φ 100 × 200	大ブロックに吹付け、試験直前に切出し
	曲げ強度試験	□ 100 × 400	
	寸法変化率試験	□ 40 × 160	
経時変化試験	自由膨張収縮試験	200 × 100 × 400	型枠に直接吹付け
	鉄筋拘束試験(JCI)	200 × 100 × 1500	

より大型ブロックを作製し、試験直前にそこから切出す方法で製作している。また、寸法変化率試験以外は屋外に暴露し、梁試験体と同一の養生および環境条件とした。表-7に、材齢28日における材料試験結果を示す。膨張材およびポリマーを添加しない材料3に比べ、材料1および2のPCMでは曲げ強度が大きく、またJIS A 1171による寸法変化率も大幅に減少していることがわかる。

図-3に、PC梁試験体の断面修復部と同じ断面積(200 × 100 mm)の試験体を用いた自由膨張収縮ひずみ結果を示す。図より、材料1および膨張材を増量させた材料2では、材齢5~10日程度まで膨張挙動を示し、その後、今回の暴露期間内である材齢3箇月程度まではほとんど変化が見られない結果となった。表-7に示した□40 × 160のJIS A 1171試験は材齢7日を基長としたものであるため、初期の膨張が考慮されていない。図-3の2)にJIS試験同様、材齢7日を初期値とした場合を示す。□40 × 160では、材齢28日で200~250 μ程度の収縮となっているが、



1) 吹付け直後を初期値とした場合



2) 吹付け後7日を初期値とした場合

図-3 自由膨張収縮ひずみ試験結果

表 - 7 断面修復材の材料試験結果 (材齢 28 日)

断面修復材	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	寸法変化率 JIS A 1171
材料 1	33.8	17.2	5.0	208 $\mu$
材料 2	30.4	16.5	5.1	245 $\mu$
材料 3	38.8	18.9	3.7	495 $\mu$
材料 4	28.9	14.9	4.5	712 $\mu$

実際の吹付け厚と同じ寸法とした試験体では、ほとんど収縮していないか逆に膨張状態にあることがわかる。膨張材を添加しない材料 3 では、材齢初期から収縮挙動が見られ材齢 1 箇月では約 200  $\mu$  程度の収縮であるが、これも材齢 7 日以降で JIS 試験体と比較すると約 20 % 程度とその寸法によって収縮量は大きく異なることがわかる。

ここで、弾性係数の低減を目的とし、ポリマーの種類を変更し増量した特殊配合の材料 4 では、材料 1 と同量の膨張材を配合しているにもかかわらず、初期の膨張量が小さく、また材齢 20 日程度から収縮方向に大きく反転する挙動となってしまった。今回の試験では、ポリマーの種類変更と増量を同時に行ったため、この原因を明確に特定することはできないが、このいずれかの原因により凝結時間が遅延し、膨張材の効果が阻害されたものと推定される。ポリマーの種類やその添加量については、製造メーカにおいてプレミックスまたは指定配合されているものが一般的であり、収縮量等の規格を満足するよう検証されたものであれば通常は問題ないと考えられるが、PC 構造などの高い要求性能に應えるため、さらにひび割れ抵抗性を向上させる目的で新たに断面修復材を開発する際には、ポリマーや膨張材、収縮低減剤など構成材料の相性などをふまえ、施工性、力学特性、長期特性、耐久性に関して総合的に検証を進めていく必要がある。材料 4 の新規配合は、結果的に課題を有する特性のものとなってしまったが、以降、極端に収縮量の大きな材料を吹付けたケースとして取扱い、考察を進めていく。

(2) 暴露試験

JIS A 1171 の寸法変化率および図 - 3 に示す自由収縮量が大きい材料 3 および材料 4 を吹付けた梁では、材齢 1 箇月程度で図 - 4 に示すような幅 0.05 ~ 0.10 mm 程度の初期ひび割れが生じた。なお、今回の湿式吹付けは 3 層に分けて施工しており、図中における水平方向のひび割れは、その打継ぎ境界面に発生したものである。膨張材の効果が有効であった材料 1 および材料 2 では、暴露期間中、水平方向ならびに橋軸直角方向のいずれにも微細なひび割れは確認

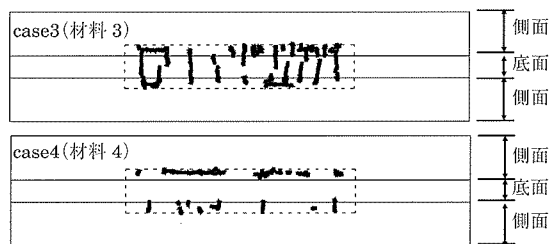


図 - 4 初期ひび割れ発生状況 (下面からの展開図)

できなかった。

(3) 曲げ載荷試験によるたわみ剛性

図 - 5 に、3 箇月の暴露後に実施した曲げ載荷試験 (写真 - 4) における曲げモーメントと中央たわみの関係を示す。図 - 5 中の健全桁 (計算値) とは、はつりを行わない桁における計算値を、無補修桁 (計算値) とは断面修復材の引張強度を無視した場合の計算値を示している。材料 3 および材料 4 を吹付けた梁では、前項で示した初期ひび割れの影響により載荷初期から、材料 1, 2 に比べ剛性は小さくなるものの、断面修復材の引張強度を無視した計算値よりは十分に大きいことがわかる。

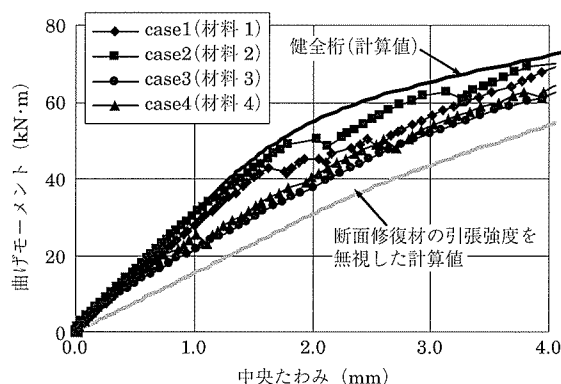


図 - 5 曲げモーメントと中央たわみ

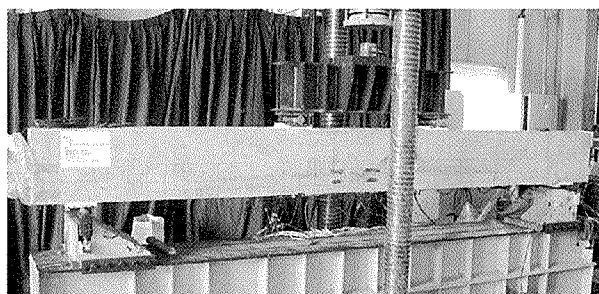


写真 - 4 載荷試験状況

(4) 曲げ載荷試験ひび割れ発生荷重による収縮拘束応力の推定

表 - 8 に、曲げ載荷試験における、断面修復部のひび割れ発生時の下縁応力値を示す。下縁応力は、断面修復材の弾性係数を考慮した換算断面係数  $W'$  により求めている。また、材料 3 および 4 については、初期ひび割れ以外の箇所に初めてひび割れが生じたときの載荷モーメントとした。ここでは、このひび割れ発生応力と断面修復材の曲げ強度  $\sigma_b$  の差分が、暴露 3 箇月期間中に断面修復材に生じた収縮拘束応力  $\sigma_r$  と推定される。材料 1 および材料 2 は、膨張材の効果、いわゆるケミカルプレストレスにより、下縁応力が PCM の曲げ強度を上回ってもひび割れが発生しなかったものと考えることができ、この場合、拘束応力は負の符号となる。

(5) 自由収縮ひずみと収縮拘束応力の関係

図 - 6 に、実寸サイズの自由膨張収縮試験 (図 - 3 参照)

表 - 8 ひび割れ発生モーメントによる拘束応力の推定結果

	断面修復材	ひび割れ発生モーメント $M_{cr}$ ( $kN \cdot m$ )	換算断面係数 $W'$ ( $mm^3$ )	ひび割れ発生時のPCM下縁応力 $M_{cr}/W'$ ( $N/mm^2$ )	曲げ強度 $\sigma_b$ ( $N/mm^2$ )	拘束応力 $\sigma_r = \sigma_b - M_{cr}/W'$ ( $N/mm^2$ )
case 1	材料 1	42.5	6.93 E + 06	6.1	5.0	- 1.1
case 2	材料 2	48.8	7.04 E + 06	6.9	5.1	- 1.8
case 3	材料 3	18.8	6.83 E + 06	2.7	3.7	1.0
case 4	材料 4	15.0	7.47 E + 06	2.0	4.5	2.5

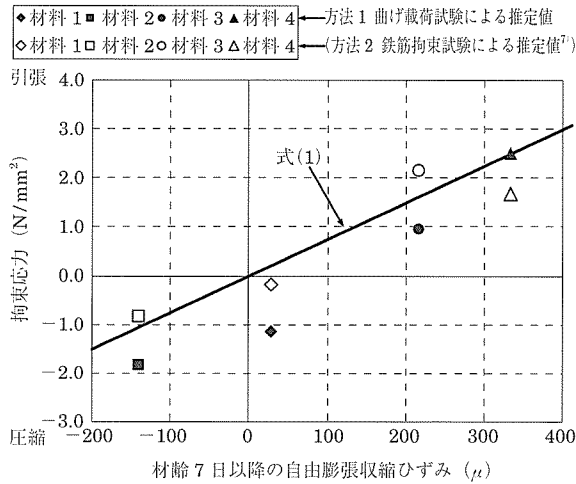


図 - 6 拘束応力と自由膨張収縮ひずみ

における材齢 7 日以降から曲げ載荷試験時までの収縮量と、断面修復材に生じていたと推定される拘束応力の関係を示す。材齢 7 日以降としたのは、断面修復材の弾性係数が十分に発現していない状態での拘束応力はきわめて小さいと判断したためである。また、梁試験体に比べ拘束条件が単純である鉄筋拘束試験 (図 - 7) の結果から、梁試験体の拘束応力の推定を試みた結果も併せて示す。この鉄筋拘束試験の詳細については既報<sup>7)</sup>を参照されたい。

断面修復部の拘束応力  $\sigma_r$  は、理論上、自由ひずみ  $\epsilon_0$  と拘束を受けた状態での拘束ひずみ  $\epsilon_s$  の差分に、クリープの影響を考慮した有効弾性係数を乗じた式 (1) により表すことができる。ここで、 $k = (\epsilon_0 - \epsilon_s) / \epsilon_0$  を既設桁の拘束度と定義すると、 $k = 1$  が完全拘束状態であり、拘束応力の最大値となる。鉄筋拘束試験の結果より、今回使用した断面修復材のクリープ係数を  $\phi_{pcm} = 2.8$  と推定し、図中に  $k = 1$  の計算値を重ねたところ、曲げ載荷試験および鉄筋拘束試験による推定値によく整合することがわかる。今回の断面修復は、既設断面の 25% を置換しており、これより置換率が小さくなる場合はさらに拘束度が大きくなる。以上より、断面修復の置換率 25% 以下では、拘束応力の

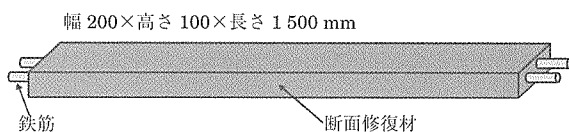


図 - 7 鉄筋拘束試験<sup>7)</sup>

推定には理論上の最大値である  $k = 1$  として式 (1) を用いることが、必ず安全側の評価となることから、実務的には妥当であると考えられる。

$$\sigma_r = (\epsilon_0 - \epsilon_s) \times \frac{E_{pcm}}{1 + \phi_{pcm}/2} = \epsilon_0 \frac{E_{pcm}}{1 + \phi_{pcm}/2} \times k \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_0$  : 実際の断面修復部と同寸法、同環境における、材齢 7 日以降の自由膨張収縮ひずみ

$E_{pcm}$  : 断面修復材の弾性係数

$\phi_{pcm}$  : 断面修復材のクリープ係数

$k$  : 既設桁の拘束度 (断面修復の置換率が 25% 以下では、 $k = 1$  としてよい)

(6) 今後の課題

本研究で提案した式 (1) により、断面修復材の収縮が既設桁に拘束されることによって発生する断面修復部の応力を、断面修復材の自由膨張収縮ひずみ、クリープ係数、弾性係数から推定できることを示した。しかし、提案式の自由膨張収縮ひずみは、実際の断面修復部と同寸法および同環境による試験体によることが前提であるが、実構造物ではこれを材料試験により把握することは困難であると思われる。一般に実施されている JIS 等の小型試験体 (□40 × 160) による寸法変化率試験を用いることを想定すると、今後は、この JIS 試験の収縮ひずみ量から実構造物の収縮ひずみを予測するための寸法効果等に関する研究が早急に必要になるものと考えられる。また、使用する断面修復材の弾性係数、クリープ係数に関するデータについても同時に把握する必要があるものと考えている。

3.4 既設桁のプレストレスの影響 (シリーズ 2) に関する試験結果

図 - 8 に、断面修復前における既設桁のプレストレス度合い (打継面のコンクリート応力で表す) と、曲げ載荷試験における断面修復材のひび割れ発生時応力の関係を示す。RC 桁に吹付けた case 6 と比較して PC 桁に吹付けた case 1 の方がひび割れ発生時応力は 40% 程度大きくなる結果となっているが、さらに既設桁のプレストレスを 1.5 倍に増加した case 5 では、ひび割れ発生時の応力は逆に低下している。既設桁の圧縮応力がクリープ等により断面修復部に移行しひび割れ抵抗性が向上することを想定したシリーズであったが、この結果は実験誤差の範囲ともうかがえる程度であり、既設桁のプレストレスは、ひび割れ発生荷重には顕著な影響を及ぼさないものと判断してよいと考える。

図 - 9 に、下縁に配置したワイヤー変位計により測定し

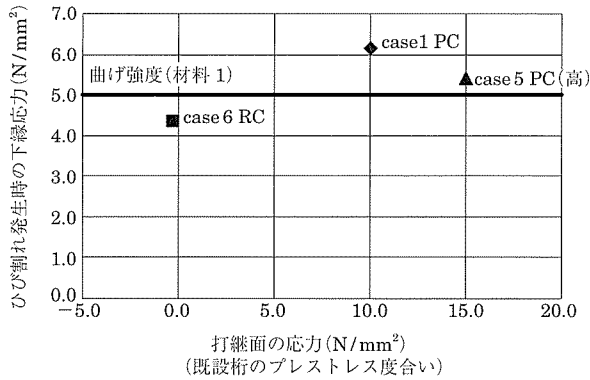


図 - 8 既設桁プレストレス量とひび割れ発生時の応力関係

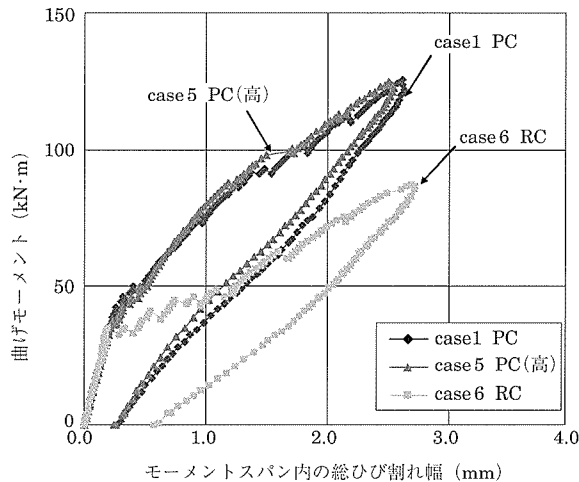


図 - 9 载荷モーメントと総ひび割れ幅の関係

たモーメントスパン内に発生した総ひび割れ幅の履歴を示す。ひび割れ発生後におけるひび割れ幅の増加は、PC 桁を断面修復した case 1, 5 では、RC 桁を断面修復した case 6 に比べ緩やかなものとなる。また、いずれの試験体も最下段の鉄筋ひずみが降伏寸前である  $2000 \mu$  まで载荷した後に除荷をしたが、RC 桁 (case 6) と比較して PC 桁 (case 1, 5) の残留ひび割れが小さくなっていることがわかる。

### 3.5 断面修復後のプレストレス導入効果 (シリーズ 3) に関する試験結果

#### (1) 追加プレストレス導入時の挙動

断面修復完了後に、PC 鋼材の追加緊張を行うことにより、外ケーブル補強等で断面修復部に追加プレストレスの導入を行った場合を検証した。追加プレストレスの導入は、断面修復材の弾性係数が材齢 28 日の約 8 割である  $E_{pcm} = 15 \text{ N/mm}^2$  に達した材齢 14 日に実施した。図 - 10 に、追加プレストレスの導入による試験体中央断面におけるひずみ断面分布を示す。ひずみ実測値は、断面修復材の弾性係数  $E_{pcm} = 15 \text{ N/mm}^2$  とした FEM 解析値にはほぼ一致する。このことから、断面修復材および既設桁に導入されたコンクリート応力度は、同じ FEM より図 - 11 と推定され、下縁では  $-3.8 \text{ N/mm}^2$  となる。断面修復部に導入される圧縮応力は、断面修復材の弾性係数がコンクリートと同程度と仮定

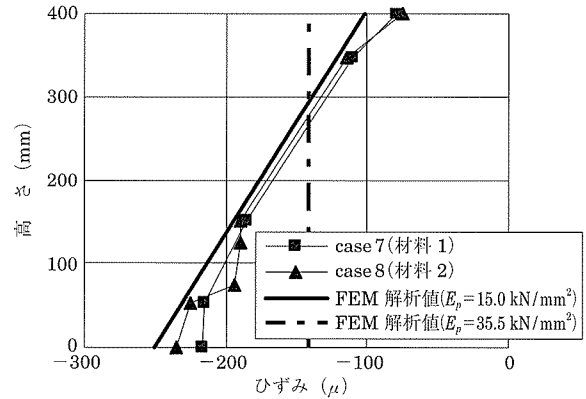


図 - 10 断面修復後のプレストレスによるひずみ分布

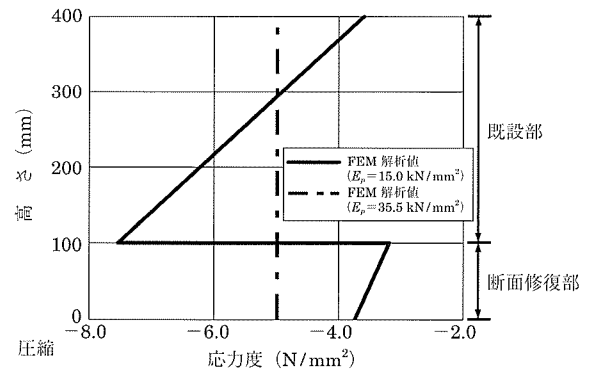


図 - 11 断面修復後のプレストレスによる応力分布

した場合の 70 % 程度となる。その反面、既設桁の打継目近傍には大きな圧縮応力が導入されることになる。打継目近傍では、はつり直後にも新たに圧縮応力が発生し、この後補強によるものと併せて許容圧縮応力度の照査を行い、補強量を検討することが必要である。図中には参考までに、断面修復材の弾性係数が既設桁と同じ場合 ( $E_p = 35.5 \text{ kN/mm}^2$ ) の計算値も併せて示している。

#### (2) 暴露 3 箇月後の曲げ载荷試験

図 - 12 に、シリーズ 3 における载荷モーメントと支間中央たわみの関係を示す。表 - 9 に、ひび割れ発生時の下縁応力から推定した後補強によるプレストレスの有効率を示す。ひび割れ発生時の下縁応力は、case 1, 2 に比べ、追加プレストレスを導入した case 7, 8 では  $2.2 \sim 2.5 \text{ N/mm}^2$  程度大きくなる結果となっている。追加プレストレス導入時の下縁圧縮応力は  $3.8 \text{ N/mm}^2$  であったので、その差分がクリープ・収縮によって減少したものと推定される。断面修復材に後補強によりプレストレスを追加することは、ひび割れ抵抗性を高めるうえで有効な手段ではあるが、その効果の損失は比較的早期においてより発生していることがわかった。

今後は、断面修復材のクリープ、収縮特性から本結果をシミュレーションし、断面修復桁の後補強設計手法の確立を目指す予定である。

### 3.6 まとめ

1) 断面修復材に生じる収縮拘束応力は式 (1) により求

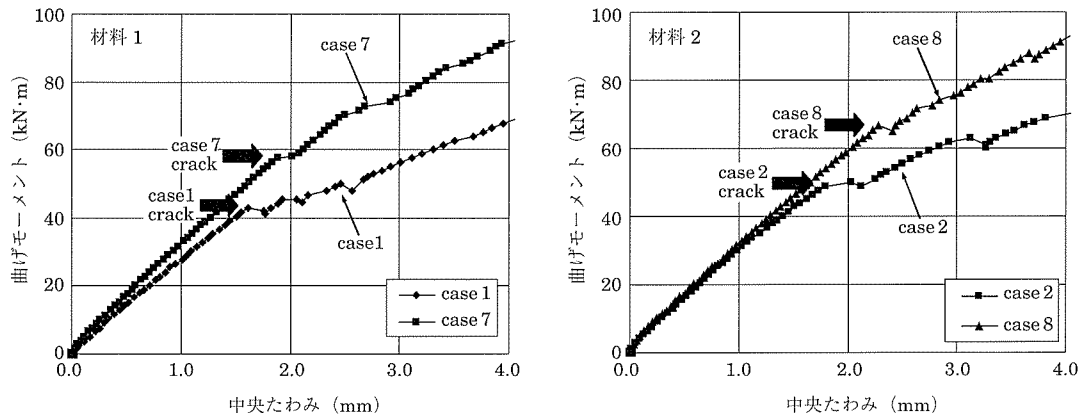


図 - 12 荷重モーメントと支間中央たわみの関係

表 - 9 プレストレス有効率

	ひび割れ発生時の下縁応力		追加プレストレスによる下縁応力		プレストレス有効率 実験時 / 導入時
	case 1, 2	case 7, 8	実験時	導入時	
材料 1	6.1	8.3	2.2	3.8	58 %
材料 2	6.9	9.4	2.5	3.8	66 %

めることができ、式 (2) により断面修復を施した桁のひび割れ発生モーメントを算定することができる。膨張材やポリマー等の配合の影響は、 $\sigma_r$ の算定および $\sigma_b$ において考慮されることになる。

$$M_{cr} = (\sigma_b - \sigma_r) / W \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_b$  : 断面修復材の曲げ強度

$\sigma_r$  : 断面修復材の収縮が既設桁に拘束されることによって生じる拘束応力 (式 (1))

$W$  : 断面修復材の弾性係数  $E_{pcm}$  を考慮した換算断面係数

- 既設桁のプレストレスは、ひび割れ発生モーメントには顕著な影響を及ぼさないものと考えられることができる。ただし、PC 桁に断面修復を施した場合、ひび割れ発生後の幅の増加、残留ひび割れは小さくなる。
- PCM を用いた断面修復部に、外ケーブル等であと補強を行う場合、既設桁の打継面近傍の圧縮応力が大きくなることに十分な注意が必要である。また、本試験で用いた PCM に材齢 14 日程度であと補強を行った場合では、PCM のクリープ・収縮の影響により導入した圧縮応力が材齢 90 日程度でも 50 % 程度まで減少してしまうことがあるので、その有効率を考慮した設計計画が必要である。

#### 4. おわりに

3 章で述べた試験結果より、PC 橋の断面修復における打継ぎ界面により拘束を受ける断面修復部のひび割れ発生挙動を予測することが可能になり、PC 橋の補修補強設計に反映できる知見が得られた。また、かざられた試験データで

はあるが、既設 PC 桁のプレストレスの度合いや断面修復後のプレストレス導入の影響に関して定性的な傾向を把握することができた。今後は、断面修復範囲が拘束応力に与える影響を解析的に検証し、拘束応力の理論式に基づく実用的なひび割れ発生挙動の予測式の構築に関して研究した結果を報告する予定である。

最後に、本研究の実施にあたっては横浜国立大学名誉教授池田尚治博士にご指導、ご尽力を賜っており、材料試験の実施にあたっては電気化学工業無機材料研究センターの五十嵐数馬氏にご協力をいただいた。ここに心から感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 横山和昭, 鹿野善則, 紫桃孝一郎, 室井智文: 断面修復用吹付けモルタルの性能評価試験方法に関する実験的検討, 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, 第 4 巻, pp. 225 - 230, 2004.10
- 長田光司, 本間淳史, 佐藤正明, 池田尚治: PC 橋の補修・補強技術, コンクリート工学, Vol.43, No.12, pp. 18 - 25, 2005.12
- (社) 土木学会編: コンクリートライブラリー「吹付けコンクリート指針 (案) [補修・補強編]」, 2005 年
- 大濱嘉彦, 出村克宣: ポリマーセメントコンクリート / ポリマーコンクリート, シーエムシー出版, 1984 年
- Ohama, Y., Demura, K. and Kim, W.: Properties of Polymer-Modified Using Redispersible Polymer Powders, Proceedings of the First East Asia Symposium on Polymers in Concrete, Vol. 1, pp. 81 - 90, May 1994
- 金 完基, 大濱嘉彦, 出村克宣: 再乳化形粉末樹脂混入モルタルの乾燥収縮および強さ, コンクリート工学年次論文 Vol. 19, No.1, pp. 697 - 702, 1997
- 横山和昭, 本間淳史, 玉置一清, 三加 崇: PC 橋の断面修復に関する実験的研究 (その 1), 第 15 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. 143 - 148, 2006.10

【2006 年 11 月 17 日受付】