

PC橋の断面修復に関する実験的研究 (その1)
 -断面修復部に生じるひび割れ発生挙動の推定方法-

中日本高速道路 (株) 中央研究所 正会員 工修 ○横山 和昭
 中日本高速道路 (株) 中央研究所 博(工) 本間 淳史
 三井住友建設 (株) 技術研究所 正会員 工修 玉置 一清
 三井住友建設 (株) 技術研究所 正会員 工修 三加 崇

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物に対して断面修復を実施する場合、断面修復部に求められる要求性能の一つとして、有害なひび割れを生じないことが挙げられる。既設部材と断面修復材との一体化、耐久性の観点からも、ひび割れ抵抗性は最も重要な性能照査項目と考えられるが、その照査方法は明確であるとは言い難い。また、設計荷重時までひび割れを許さないという条件で設計されているPC構造物を断面修復する場合、建設時の性能まで回復するには、プレストレスの導入されていない断面修復部に対しても、高いひび割れ抵抗性を求めることになる。一方、断面修復部には、断面修復材の膨張や収縮による寸法変化が新旧部材の打継ぎ界面や内部鋼材を介して既設部材に拘束されることによって拘束応力が発生し、有害なひび割れが生じる可能性が高いことが指摘されている。収縮ひび割れに対しては、長さ変化率試験による硬化収縮率を規定することで間接的に照査を行っているが、断面修復部に蓄積されている拘束応力がひび割れ発生荷重に影響するものと考えられ、その定量的な把握が断面修復材のひび割れ照査の上で重要な課題となっている。

本研究は、PC橋の断面修復に対する要求性能としてひび割れ抵抗性に着目し、湿式吹付け工法により断面修復を施したPC梁供試体の暴露ならびに載荷試験、拘束応力を模擬した鉄筋拘束試験体の暴露試験を実施し、ひび割れ発生挙動に影響を及ぼす拘束応力の定量的把握および算定手法の提案を試みたものである。

2. 実験の概要

2.1 拘束応力の推定方法

断面修復部におけるひび割れ発生モーメントは、一般的に式(1)により算定することができる。

$$M_{cr} = (\sigma_b - \sigma_r) \times W' \quad (1)$$

ここで、 σ_b : 断面修復材の曲げ強度

σ_r : 断面修復材の収縮が、既設部材に拘束されることによって生じる拘束応力

W' : 断面修復材の弾性係数を考慮した換算断面係数

式(1)において、断面修復材の曲げ強度 σ_b は材料試験により容易に得ることができるが、問題となるのが拘束応力 σ_r の算定である。そこで、この拘束応力の推定方法について表-1 に示す2種類の方法による検討実験を実施した。方法1は、既設桁の拘束に相当する鉄筋比を検討し、図-1 に示す断面修復材の鉄筋拘束試験を実施することにより、任意の材齢における拘束応力の推定を試みたものである。方法2は、方法1を検証する目的で、次節に示す梁試験体を作製し、暴露後の曲げ載荷試験の結果から式(1)により拘束応力を逆算したものである。

表-1 拘束応力の推定方法

方法		内容
方法1	鉄筋拘束試験の結果から推定する	既設桁の拘束と同等となる換算鉄筋比を算出し、それに相当する拘束応力を鉄筋拘束試験から算出
方法2	暴露後の曲げ載荷試験より推定する	曲げ強度を用いた計算値と、ひび割れ発生の実測値の差が拘束応力と考える

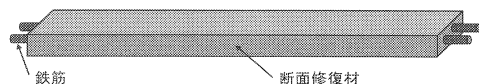


図-1 鉄筋拘束試験

2.2 試験体概要

曲げ載荷試験用のPC梁試験体の寸法を図-2に示す。はつり深さは、図-3に示すように鉄筋の裏側30mm程度まで取り除くものとして100mmと設定した。中央にφ32mmのPC鋼棒を配置し、はつり前の梁試験体のコンクリート応力を4.0N/mm²に設定した。はつり直後の打継目に発生する応力は10.0N/mm²である。

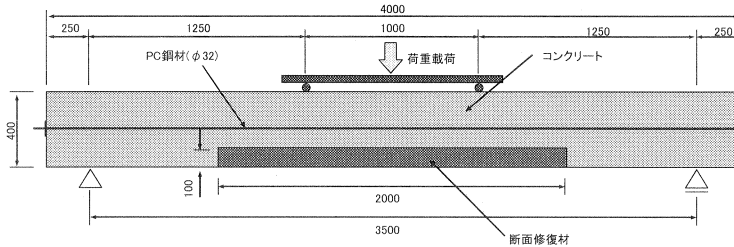


図-2 梁試験体寸法

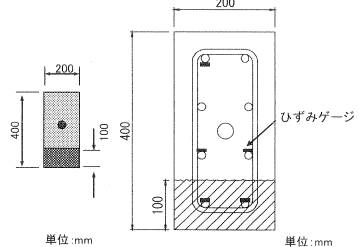


図-3 断面図

2.3 断面修復材の配合

断面修復材には、表-2に示す4種類の材料を用いた。材料1はポリマーセメントモルタルの一般的な市販品である。材料2および3は、材料1を基本としてポリマーおよび膨張材の量を調整したものである。材料4は、比較用に膨張材およびポリマーを混入しなかったものである。

表-2 断面修復材の配合一覧

材料種類		ポリマー混入量	膨張材
材料1	ポリマーセメントモルタル	C×7~9%	C×4~6%
材料2	ポリマーセメントモルタル+膨張材増量	C×7~9%	C×7~9%
材料3	ポリマーセメントモルタル+ポリマー増量	C×15~20%	C×4~6%
材料4	セメントモルタル(膨張材, ポリマー無し)	—	—

※C:セメント質量

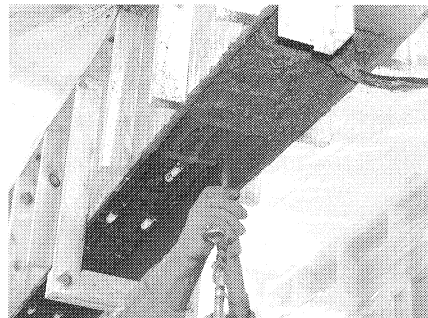


写真-1 吹付け状況

2.4 実験手順

実験手順を図-4に示す。断面修復は、ウォータージェットによる断面はつり後の打継ぎ界面にプライマーを塗布後、湿式吹付けにより3層に分けて行った。また、暴露は、屋外条件で実施したが、直射日光および雨水の影響によりデータが複雑化するのを今後の課題とし、今回は屋根を設置している。また、梁試験体と同時に、断面修復材の基本性状を把握するために表-3に示す材料試験を実施している。試験体は、すべて吹付けにより製作し、寸法変化率試験以外は、梁試験体と同一の養生および環境条件としている。

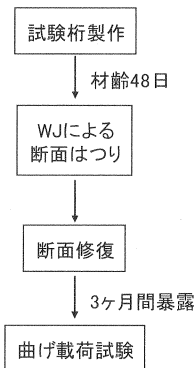


図-4 実験手順

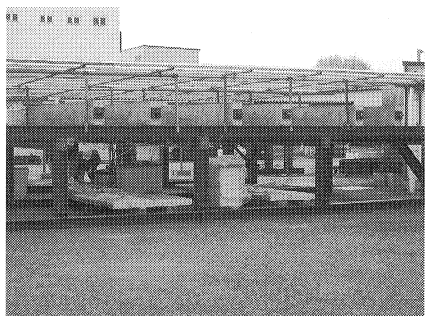


写真-2 暴露状況

表-3 材料試験一覧

材料試験	製作方法	寸法	環境条件	備考	
品質管理試験	圧縮強度試験	ブロックからコア抜き	φ100mm×200mm	屋外	
	曲げ強度試験	ブロックから切り出し	100mm×100mm×400mm		
経時変化試験	寸法変化率試験(JISA1171)	型枠に吹き付け	40mm×40mm×160mm	恒温恒湿室	材齢7日まで水中→基長
	自由膨張収縮ひずみ試験	型枠に吹き付け	200mm×100mm×400mm	屋外	梁試験体の吹付け断面積と同じ
	鉄筋拘束試験	型枠に吹き付け	200mm×100mm×1500mm		

3. 実験結果

3.1 材料試験結果

P C 梁試験体の断面修復部と断面積 (200×100) を同じとした自由膨張収縮ひずみ試験結果を図-5 に、示す。図-5 より、材料1および膨張材を增量させた材料2は、今回の暴露期間内では収縮挙動がほとんど見られなかった。ポリマーを增量させた材料3では、膨張材の効果が大きく低減され、初期膨張後すぐに収縮に反転する結果となった。ポリマー量が過添加の場合、膨張材の水和反応を阻害している可能性があり、ポリマーと膨張材を併用する場合、硬化後の膨張量が確保できる最適なポリマー添加量を検討する必要がある。材料4は吹付け直後から収縮挙動であった。また、(既設)コンクリートの材料試験結果を表-4 に、断面修復材の材料試験結果を表-5 に示す。表-4 および表-5 より、断面修復材の弾性係数はコンクリートの50%程度であった。

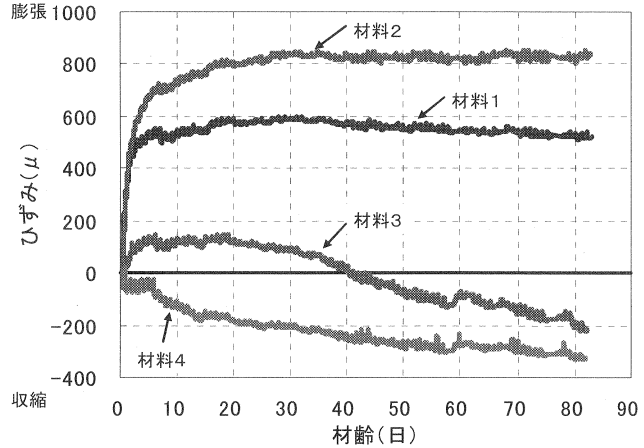


図-5 自由膨張収縮試験結果

表-4 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度	53.6 N/mm ²
弾性係数	33.5 kN/mm ²
曲げ強度	6.2 N/mm ²

表-5 断面修復材の材料試験結果(材齢 28 日)

材料種類		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	寸法変化率試験 JIS A1171 (μ)
材料1	ポリマーセメントモルタル	33.8	17.2	5.0	208
材料2	ポリマーセメントモルタル+膨張材增量	30.4	16.5	5.1	245
材料3	ポリマーセメントモルタル+ポリマー增量	28.9	14.9	4.5	712
材料4	セメントモルタル(膨張材, ポリマー無し)	38.8	18.9	3.7	495

3.2 鉄筋拘束試験による拘束応力の推定

図-6、図-7 に鉄筋比を 2.0~8.0%とした鉄筋拘束試験における鉄筋ひずみを、図-8、図-9 に鉄筋の圧縮力とコンクリートに生じる引張力との釣合い条件より算出した拘束応力を示す。まだ強度発現が十分ではなく膨張の影響が大きい材齢 7 日までと、弾性係数がほぼ一定とみなせ、収縮が開始される 7 日以降に分けて整理を行っている。図-8 より、材料1および材料2の材料7日までのケミカルプレストレスは、鉄筋比に関わらず 0.5N/mm²程度と考えられる。

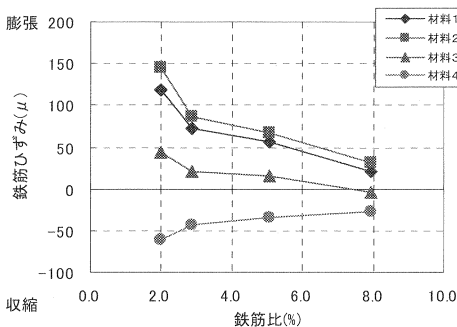


図-6 鉄筋ひずみ(材齢 7 日まで)

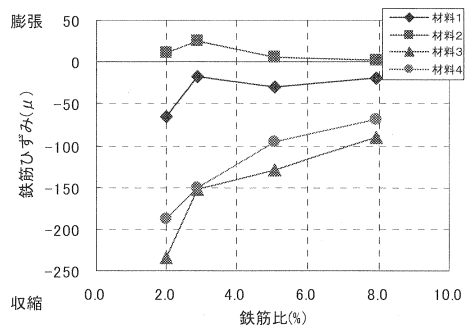


図-7 鉄筋ひずみ(材齢 7 日以降)

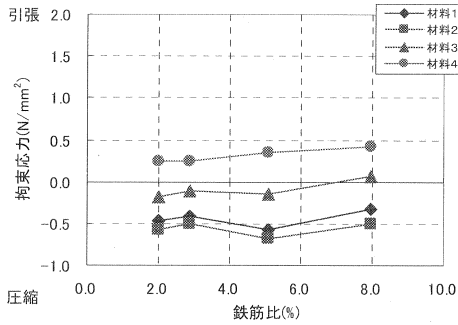


図-8 拘束応力(材齢 7日まで)

梁試験体の断面修復材に生じている材齢 7 日以降の拘束応力を図-7, 図-9 の結果から推定する。図-10 に材齢 7 日以降における梁試験体の下から 2 段目の鉄筋ひずみを示す。この結果には既設コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみが含まれており、それを除外したものが図-7 と比較する拘束ひずみとする。鉄筋拘束試験において、鉄筋比と拘束ひずみ ε_s の関係は文献 1) より、式(2)と導かれる。拘束応力 σ_{pcm} は、式(2)を代入して、式(3)として算出される。ここで、 k は拘束度を表し、 $k=1$ の場合が完全拘束であり拘束応力の最大値となる。ここで、今回使用した断面修復材のクリープ係数は、本試験結果と式(2)から同定した結果、 $\varphi_{pcm}=2.8$ と推定された。図-11 に換算鉄筋比と拘束度の関係を示す。

図-12 に、式(2)と鉄筋拘束試験結果および梁試験体の拘束ひずみを併せて示す。図-12 より、梁試験体の拘束度を鉄筋比に換算すると、材料 1, 2, 4 では 35~40%, 材料 3 では 10%強と推定される。梁試験体の拘束度(換算鉄筋比)は基本的に全試験体とも同じであると考えられるが、図-12 の式(2)の曲線を見ると、鉄筋比 5%を超える辺りから鉄筋比の増加に対してひずみの変化が小さくなり、設計値のわずかな差異で換算鉄筋比は大きくばらつくことになる。これは本手法の課題であるが、図-11 より、換算鉄筋比 10%以上では、拘束度の変化は小さく、本実験の範囲においては、拘束応力算定に大きな影響はないものとする。

拘束ひずみ ε_s

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_0}{1 + n_s(1 + \varphi_{pcm}/2)\rho_s} \quad (2)$$

拘束応力 σ_{pcm}

$$\sigma_{pcm} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_s) \times \frac{E_{pcm}}{1 + \varphi_{pcm}/2} = \varepsilon_0 \times \frac{E_{pcm}}{1 + \varphi_{pcm}/2} \times k \quad (3)$$

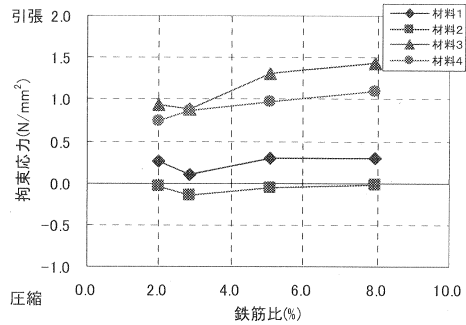


図-9 拘束応力(材齢 7 日以降)

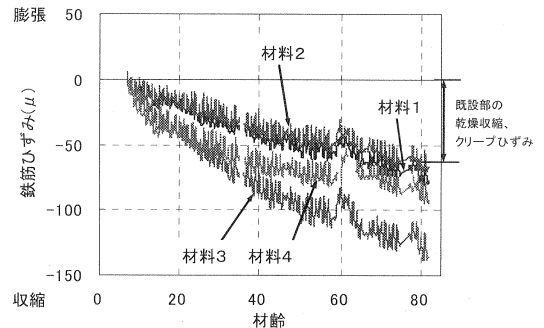


図-10 梁試験体の鉄筋ひずみ(材齢 7 日以降)

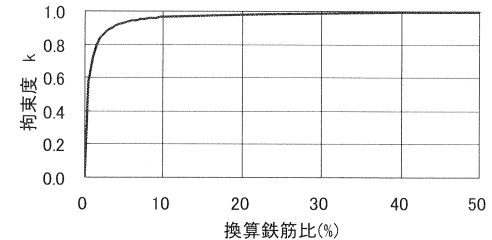


図-11 換算鉄筋比と拘束度

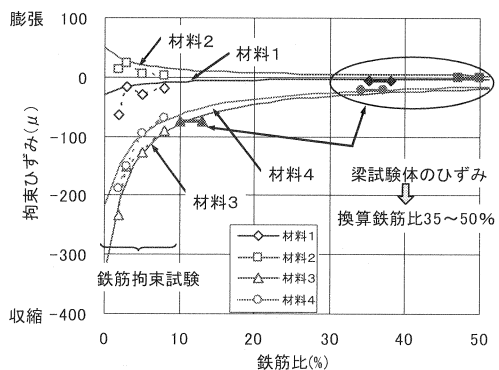


図-12 鉄筋比と拘束ひずみ

ここで、
$$k = \frac{-n_s(1 + \varphi_{pcm}/2)\rho_s}{1 + n_s(1 + \varphi_{pcm}/2)\rho_s} \quad (0 < k < 1)$$

$n_s = E_s/E_{pcm}$: 弾性係数比, $\rho_s = A_s/A_{pcm}$: 鉄筋比

E_s : 鉄筋の弾性係数, E_{pcm} : 断面修復材の弾性係数, ε_0 : 断面修復材の自由膨張収縮ひずみ

A_s : 鉄筋の断面積, A_{pcm} : 断面修復材の断面積, φ_{pcm} : 断面修復材のクリープ係数

表-6 および図-13 に、鉄筋拘束試験から推定される梁試験体の拘束応力を示す。ここで、膨張の影響が強い材料 2 のみは、 ε_0 を実測値ではなく、鉄筋拘束試験を外挿して求めた有効自由膨張ひずみ²⁾により算出を行っている。表-6 および図-13 より、膨張材の効果が有効であった材料 1 および材料 2 に比べて材料 3 および材料 4 には大きな拘束応力が蓄積されていることがわかる。

3.3 梁の暴露試験

拘束応力が大きいと推定される材料 3 および材料 4 を吹き付けた梁では、材齢 1 ヶ月程度で図-14 に示す幅 0.05~0.1mm 程度の初期ひび割れが生じている。膨張材の効果が有効であった材料 1 および材料 2 には、暴露期間中、微細なひび割れも確認できなかった。

3.4 曲げ載荷試験による拘束応力の推定

図-15 に、3 ヶ月の暴露後に実施した曲げ載荷試験における曲げモーメントと中央たわみの関係を示している。図中の無補修桁(計算値)は、断面修復材の引張強度を無視した場合の計算値である。初期ひび割れが生じた材料 3 および材料 4 では、初期から剛性が小さく、無補修桁(計算値)と健全桁(計算値)の中間程度であった。

表-7 に、曲げ強度試験結果と曲げ載荷試験のひび割れ発生時の下縁応力との差分から、拘束応力を推定した結果を示す。材料 3、材料 4 については、初期ひび割れ以外の箇所でもひび割れ発生が確認された荷重とした。材料 1 および材料 2 は、膨張材の効果(ケミカルプレストレス)により、下縁応力が、曲げ強度を上回るまでひび割れが発生しなかったと考えられる。

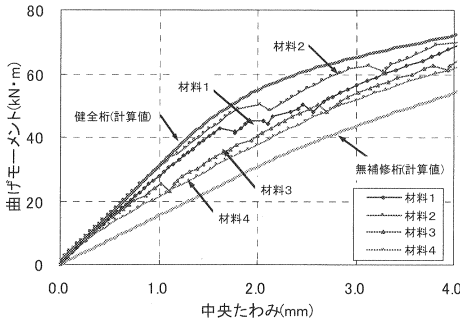


図-15 載荷荷重と中央たわみ

表-6 断面修復材に蓄積された拘束応力

材料種類	拘束応力 (N/mm ²)		
	材齢7日まで	材齢7日以降	曲げ載荷試験時
材料1 ポリマーセメントモルタル	-0.4	0.2	-0.2
材料2 ポリマーセメントモルタル+膨張材増量	-0.5	-0.3	-0.8
材料3 ポリマーセメントモルタル+ポリマー増量	0.0	1.7	1.7
材料4 セメントモルタル(膨張材, ポリマー無し)	0.5	1.7	2.2

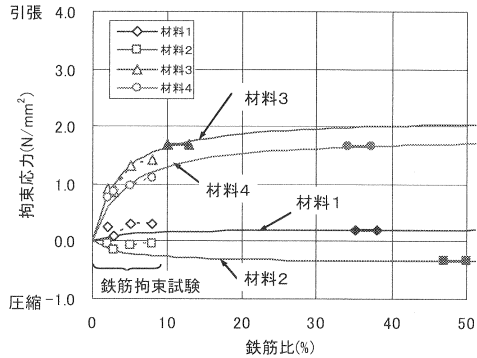


図-13 鉄筋比と拘束応力

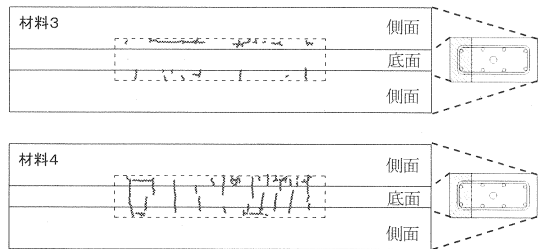


図-14 初期ひび割れ状況

表-7 拘束応力の推定結果

材料種類	ひび割れ発生モーメント M _{cr} (kN·m)	換算断面係数 W (mm ³)	M _{cr} /W (N/mm ²)	曲げ強度 拘束応力	
				σ _b (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)
材料1	42.5	6.933E+06	6.1	5.0	-1.1
材料2	48.8	7.040E+06	6.9	5.1	-1.8
材料3	15.0	7.467E+06	2.0	4.5	2.5
材料4	18.8	6.827E+06	2.7	3.7	1.0

3.5 自由膨張収縮ひずみと拘束応力の関係

図-16に、材齢7日以降の自由膨張収縮ひずみ(図-5)と、方法1および方法2により推定した拘束応力の関係を示す。図-16より、自由膨張収縮ひずみと拘束応力は原点を通る線形関係にあることがわかる。また、材齢3ヶ月時点での方法1の拘束応力は、方法2による曲げ載荷試験による拘束応力とほぼ一致していることから、式(3)の妥当性が検証されたものと考えられる。

4. 断面修復材の拘束応力算定式の提案

梁試験体の換算鉄筋比は図-12で示しているように35%~50%であり、式(3)で示す拘束度kは0.90~0.93となるため、今回の梁試験体は完全拘束状態に限りなく近いと考えることができる。

今回の梁試験体の断面修復率(断面修復部の断面積/全断面積)は25%であり、したがって、断面修復率が25%以下では、断面修復部に発生する拘束応力は、自由膨張収縮ひずみが完全に拘束されたものとして、式(3)をk=1とした簡易な式(4)が提案できる。図-16に、今回の梁試験体における式(4)の計算結果を併せて示している。式(4)の計算結果は、方法1による鉄筋拘束試験から推定した拘束応力および方法2による暴露後の曲げ載荷試験から推定した拘束応力と概ね一致しており式(4)の妥当性が検証された。

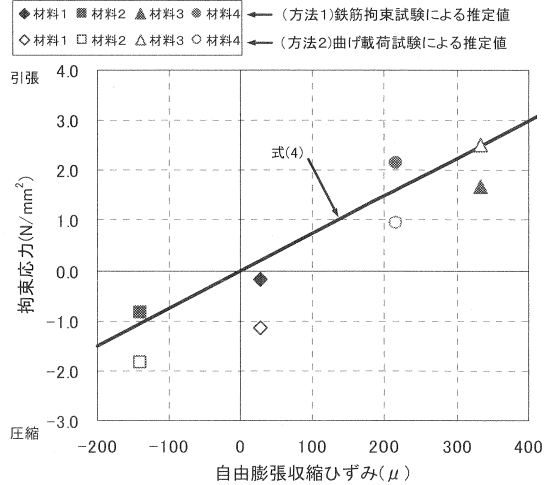


図-16 拘束応力と自由膨張収縮ひずみ

断面修復率25%以下の場合の拘束応力 σ_{pcm}

$$\sigma_{pcm} = \varepsilon_0 \times \frac{E_{pcm}}{1 + \frac{\varphi_{pcm}}{2}} \quad (4)$$

ここで、 ε_0 : 断面修復材が無拘束状態で材齢7日以降に生じる自由膨張収縮ひずみ

φ_{pcm} : 断面修復材のクリープ係数

E_{pcm} : 断面修復材の弾性係数

5. まとめと今後の課題

本研究で提案した式(4)により、打ち継ぎ界面や内部鉄筋により発生する断面修復部の拘束応力を断面修復材の自由膨張収縮ひずみおよびクリープ係数、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での測定が前提であり、一般的にJIS等で実施される小型試験体による寸法変化率試験をそのまま用いることはできない。また、クリープ係数は、コンクリートのクリープ係数の予測式と同様の推定方法は無く、実験によってのみ得られる値である。今後は、小型試験体の収縮ひずみ測定値から、実構造物の収縮ひずみを予測するための寸法効果等の影響およびクリープ係数の推定に関する研究が必要になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 玉置, 三加, 浅井, 藤田: 鉄筋が乾燥収縮を拘束することによって生じる初期ひび割れに関する基礎的研究, 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. 123-128, 2005年
- 2) 岡田, 六車: コンクリート工学ハンドブック, pp. 666, 1991年