

PC 橋の改造技術に関する研究

— その 4 : 大規模な断面修復の材料および施工に関する検討 —

谷口 秀明*1・渡辺 博志*2・竹中 秀樹*3・三加 崇*4

1. まえがき

塩害による劣化が PC 橋の PC 鋼材あるいはその周りのコンクリートに達した場合には、劣化したコンクリートを除去し、適切な補修材で修復する必要がある。PC 部材の断面修復を行うにあたっては、RC 部材とは異なり、はつり後の断面にプレストレスが再分配されることや、断面修復部分にプレストレスを再導入し、断面修復材の収縮や PC 部材への荷重作用によるひび割れを抑制すること等に対する事前の検討と施工時の管理を必要とする¹⁾。

前報(その3)²⁾では、材料の特性、はつりの状態、断面修復部の収縮およびクリープの特性等を考慮すれば、非線形 FEM 解析によって大規模なはつりおよび断面修復を行った PC 桁(試験体)の挙動を比較的精度よく推定できること、その場合の断面修復材として高流動コンクリートを用い、外ケーブルによって補強すれば、健全な桁試験体と同程度の性能に回復できること等を確認した。

高流動コンクリートは、一般に新設構造物において密な配筋箇所や閉塞空間への充てん等を目的に使用されている。昨今では、RC 橋台側面の断面修復³⁾や張出し RC 床版増厚⁴⁾等の補修補強工事にも高流動コンクリートを使用した事例があるが、PC 部材の断面修復を目的に使用された事例は見られない。このため、PC 部材の断面修復を高流動コンクリートで行う場合には、既往の研究成果や経験によって高流動コンクリートの配合や施工方法の妥当性を判断することは難しい。

本報は、断面修復後にプレストレスの再導入が要求される PC 部材の大規模な断面修復を対象とし、高流動コンクリートに対する要求性能を明確にしたうえで、明らかにしていない事柄について実験的に確認したものである。

2. 対象とする断面修復の規模と既往の研究成果に基づく断面修復工法の選定

本研究では、かぶり部分よりも深く、PC 鋼材の背後まで浸透した塩化物イオンを含むコンクリートを除去し、その後断面修復を行うもので、断面修復後に再導入するプレストレスを考慮し、断面修復材として補修用モルタルとコンクリートの選択の検討を要する場合を想定した。対象とする断面修復の規模は一概にはいえないが、たとえば、PC 桁では、断面修復の厚さが 100 mm 程度以上で、その長さ

が数 m 以上となるものである。昨今は、コンクリート構造物の維持管理が重視され、補修補強に関する研究開発が盛んとなり、学協会でも断面修復工法に関する技術がとりまとめられている^{5) 6)}。しかし、指針類等は、ポリマーセメントモルタル等の補修用モルタルを用いた比較的小規模な断面修復を前提としている。

モルタルの品質に着目すると、図-1 に示すとおり、モルタルは、一般に同一強度のコンクリートに比べてヤング係数が小さい。アンケート調査結果⁵⁾によれば、断面修復に多用される市販のポリマーセメントモルタルの圧縮強度は 10 ~ 60 N/mm² 程度であるのに対し、ヤング係数は 12 ~ 21 kN/mm² 程度である。このように、市販の補修モルタルでは、PC 橋に使用される高い強度域(設計基準強度 40, 50 N/mm²)のコンクリートのヤング係数(30 kN/mm² 程度以上)に相当するものはあまり一般的ではない。

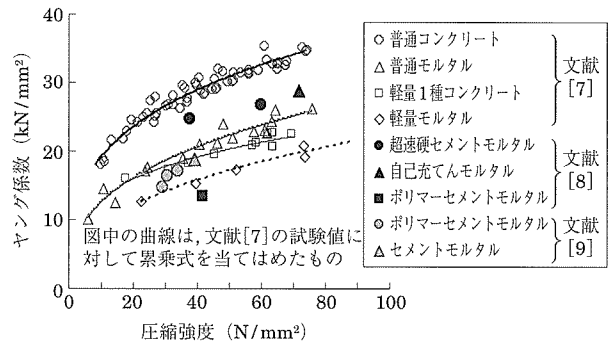


図-1 コンクリートおよびモルタルの圧縮強度とヤング係数の関係

また、モルタルの自己・乾燥収縮およびクリープは、一般にコンクリートよりも大きくなる傾向がある¹⁰⁾。ただし、PC 部材の断面修復を対象とした補修用モルタルの研究開発が行われておらず、クリープの規定値はなく、試験値もほとんど存在しない。筆者の一人¹¹⁾は、PC 部材の断面修復材としてポリマーセメントモルタルを使用した場合(全断面の 1/4)、断面修復後に外ケーブル補強を行っても、追加プレストレスは、断面修復の乾燥収縮およびクリープによって導入時の 50 ~ 70 % に減少することを確認している。したがって、PC 部材の断面修復において外ケーブル工法などにより補修後の部分にも安定したプレストレスを確

*1 Hideaki TANIGUCHI : (株)プレストレス・コンクリート建設業協会

*2 Hiroshi WATANABE : (株)土木研究所

*3 Hideki TAKENAKA : (株)プレストレス・コンクリート建設業協会

*4 Takashi SANGA : (株)プレストレス・コンクリート建設業協会

保するためには、断面修復材のヤング係数なるべくコンクリートに近く、収縮およびクリープが小さいものが有効であると考えられる。

コンクリートを使用した大規模な断面修復については、1989年に作成された建設省総合技術開発プロジェクトの資料「塩害を受けた土木構造物の補修指針(案)」¹²⁾で紹介されており、最近の指針類もその内容をほぼ踏襲している。この資料によれば、断面修復工法は、断面が大きい場合には、図-2に示すプレパックドコンクリート工法または打継ぎコンクリート工法、断面が小さい場合にはモルタル工法を用いることとしている。プレパックドコンクリート工法では、対象とする断面が小さかったり、その中の鋼材が密であったりすると、粗骨材を充てんするのが難しい。また、PC部材の断面修復には、注入モルタルに対して高い強度が求められるので、水セメント比が小さくて粘性の高いモルタルをはつり面まで圧入できる方法を検討する必要がある。打継ぎコンクリート工法に関しても通常のコンクリートを使用し、締固めを行って充てんできる施工条件は限定される。

そこで、本研究では、従来よりも充てんが難しい箇所での打継ぎコンクリート工法で、プレパックドコンクリート工法の代替となる、高流動コンクリートを用いた打継ぎ工法(以下、高流動コンクリート工法と略す)を対象とした。とくに、図-2(a)のように断面修復部分がPC部材の下部で、逆打ち工法を適用しなければならない場合を想定した。なお、そのような条件では、モルタルを用いた場合には吹付け工法の適用が増加している^{6, 8)}が、コンクリートを用いた吹付け工法は、トンネル一次覆工に使用される、設計基準強度が18 N/mm²程度のコンクリートを大型の吹付け機械によって吹き付けるものであり、本研究で対象とするPC部材の大断面修復に適用するためには十分な検討を要するため、検討の対象から除外した。

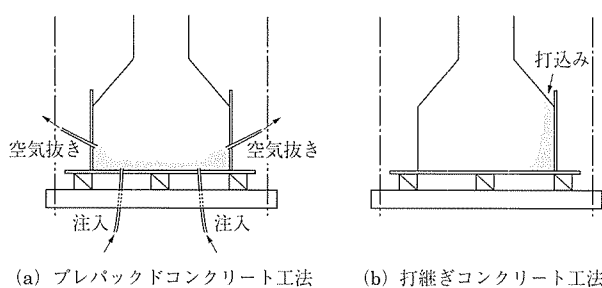


図-2 コンクリートを用いた断面修復工法¹²⁾

3. 断面修復に対する要求性能

PC部材の断面修復に関しては必ずしも明確になっていないため、本研究を行うにあたっては、まず、要求性能を整理したうえで断面修復の材料および工法の選定を行うことが非常に重要になる。表面保護工法設計施工指針(案)⁵⁾を参考に、高流動コンクリート工法を用いた断面修復に対する要求性能について検討を行うと、以下のとおりである。

(1) 力学的性能

断面修復後にもPC部材としての力学的性能および使用性能(ひび割れを許容しないこと等)を満足するためには、断面修復部分に対してプレストレスを有効に、かつ安全に働かせる必要がある。プレストレスを有効に働かせるためには、高流動コンクリートのヤング係数は、なるべく既設コンクリートと同等であることが望ましい。必要となる圧縮強度は、導入されるプレストレスや許容圧縮応力度等の設計条件によって異なるが、基本的には、ヤング係数と同様に既設コンクリートと同程度であることが望ましい。

導入されるプレストレスが断面内で不均一な状態で働き、導入時および導入後に安全性を阻害することがないように、断面修復材は均質であること、密実に充てんされること、既設部との一体性が確保されていること等が重要となる。これらは、後述の施工性能と密接な関わりをもつ。

(2) ひび割れ抵抗性および再導入プレストレスの消失抑制

ひび割れ抵抗性は、構造物の使用性能を満足するうえで重要であり、断面修復材においては、一般に寸法安定性によって設定される。寸法安定性は、自己収縮、乾燥収縮および温度変化に伴う寸法の変化を表すものである。既往の長さ変化率の規格値は、自己収縮を含む乾燥収縮を対象としたものであるが、乾燥開始や判定の材齢等を含めて各機関によって異なり、 500×10^{-6} 以下とするものから、 2000×10^{-6} 以下とするものまでさまざまな値が設定されている。

PC部材の断面修復では、断面修復部分に対する再導入プレストレスを期待しない場合には、寸法の変化に伴うひび割れについて検討する必要がある。しかし、本研究では、断面修復部分にプレストレスを再導入することを前提としているため、寸法変化の影響は、導入前の初期ひび割れを除き、ひび割れよりも再導入後の収縮およびクリープによるプレストレスの消失に着目する必要がある。もちろん、荷重作用による引張応力(ひずみ)と長期的な供用におけるプレストレスの消失によるひび割れの問題は検討しておく必要がある。

プレストレスの消失を考慮した場合には、収縮はできるだけ小さい方がよいので、市販の材料の組合せにより可能な範囲で、高流動コンクリートの収縮低減を図ることとした。クリープの低減については、強固な骨材を使用し、所要のワーカビリティが確保できる範囲で、既設コンクリートとのクリープ係数の差異が認められない範囲¹³⁾で単位粗骨材量を確保することとした。

(3) はく落抵抗性

一般に構造物の第三者影響度に関する性能として、断面修復工にははく落抵抗性が必要である。はく落抵抗性は、付着強度によって照査することになっている。付着強度の妥当性は理論的には明確になっていないが、一般環境下における従来の断面修復では、付着強度は1.0 N/mm²以上であれば、十分に性能を発揮し、施工の良否を安全係数として与えても1.3 N/mm²以上であればよいとしている⁵⁾。

PC部材の断面修復で必要となる付着強度は、これまでに検討されていないが、長期的な荷重作用により付着切れを

生じ、既設部分と断面修復部分の一体性を損ねたり、その部分への腐食因子の侵入によって鋼材の腐食を再発し、断面修復材のひび割れやはく落を生じる可能性もあるので、付着はある程度確保されていることが望ましい。付着強度の目標値を明確に定めることが困難であるが、通常の $1.0 \sim 1.5 \text{ N/mm}^2$ を目安とし、厳しい環境下も想定して 2.0 N/mm^2 以上を確保できる方法を検討することとした。

(4) 施工性能

高流動コンクリートの施工性能としては、密実に充てんできるワーカビリティの設定が重要となる。想定した断面修復の規模は、断面修復工事としては大きいですが、コンクリートの打込みという観点からはかなり小さい。また、コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透により鋼材が腐食した状態を想定しているため、断面修復部分には鋼材が密集している。さらには、本研究では、図 - 2 (a) に示す逆打ち工法を必要とする断面修復を対象とした。このため、高流動コンクリート工法には、通常の新設構造物で実績があるものよりも高いレベルの自己充てん性が必要となる可能性があるため、高流動コンクリート施工指針¹⁴⁾を参考に配合設計を行うが、対象断面を模擬した試験体等を用いて事前に充てん性を確認し、配合および施工方法を決定することとした。

(3) に関連し、図 - 2 (a) に示す逆打ち工法では、高流動コンクリートと既設コンクリートとの一体性には、施工性能の良否が影響を及ぼしやすい。すなわち、一体性を確保するためには、① はつり面との境界まで密実に充てんできること、② 打込み時および打込み後にコンクリートから気泡が浮上してはつり面近くに蓄積しないこと、③ 何らかの方法（ポンプ圧力、コンクリートヘッド、初期膨脹性の付与等）により高流動コンクリートをはつり面に圧着し、コンクリートの沈降が開始してもすき間を生じないようにすること、④ 打込み後にブリーディングにより浮上した水がはつり面近くに蓄積しないこと、⑤ 打継目となるはつり面の適切な処理を事前に行っておくこと等が重要となる。

それらに関して、① 波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋¹⁵⁾では、波形鋼板ウェブに溶接された鋼製下フランジ下面には、スランプ 8 cm 程度の通常のコンクリートでも充てんできるが、締め固め時に発生するコンクリートからの気泡の浮上により、フランジ面積に対して $15 \sim 25 \%$ 程度の空隙を発生すること、② 張出し RC 床版の下面増厚³⁾では、所定の付着強度を確保するためには、高流動コンクリートの空気量を抑えるとともに、ポンプ圧入で作用する圧力を利用し、既設コンクリート面に対して高流動コンクリートを十分に押し付ける必要があること、③ RC 中空床版橋下面に対する逆打ち工法の実験⁸⁾では、自己充てん性を有する高流動モルタルは、鉄筋周りの充てん性に優れるが、凹凸が大きなはつり面においては空隙を生じること（図 - 3）等が確認されている。付着性を確保するための打継目の処理方法は確認されていないため、実験を行って適切な処理方法を決定することとした。

なお、工事中は型枠支保工で支えていても、断面修復材の強度発現が遅い場合には不完全な状態を長期間持続する

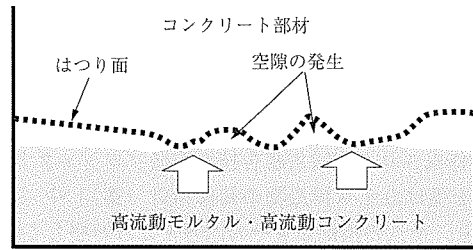


図 - 3 逆打ち工法で発生しやすい空隙

こととなること、一般には早期の供用開始が望まれること等を考え、早強性も要求性能の一つといえる。

(5) 耐久性および美観・景観

断面修復材は、中性化、塩化物イオンの侵入、凍結融解作用、化学的侵食等に対する抵抗性のうち、必要な性能を選定し、照査する必要がある。本報では、それぞれの環境条件および既設コンクリートの耐久性に応じ、耐久性から定まる水結合材比を決めることとし、耐久性の照査は省略した。ただし、(4) で述べた張出し RC 床版の下面増厚³⁾のように空気量を少なくした場合には、凍結融解作用に厳しい地域では、所要の凍結融解抵抗性が得られることを事前に確認する必要がある⁸⁾。また、断面修復における耐久性は、断面修復材自体の耐久性以外に、既設コンクリートとの境界部分からの劣化も検討する必要がある。これに関して、筆者らは、凍結融解作用がはく離抵抗性に及ぼす影響に着目した実験を行っている¹⁶⁾。

なお、本報では、美観・景観に関する検討は行わない。

4. 高流動コンクリートの配合設計

4.1 実験で対象とする桁試験体の条件

本研究では、図 - 4 に示す桁試験体（道路橋用 PC 橋桁 AS10, JIS A 5373 に準ず）を用いて、図 - 2 (a) に示す桁下面の断面修復の検討を行った。桁試験体は、長さが 10.5 m 、高さが 0.45 m 、上縁幅が 0.64 m および下縁幅が 0.7 m であり、試験体中には PC 鋼より線（SWPR7BN 7 本より 12.7 mm ）が 19 本配置されている。コンクリートの設計基準強度は 50 N/mm^2 である。また、断面修復の範囲は、図 - 5 に示す桁試験体中央の約 2 m とした。これは、前報（その 3）²⁾で報告したように、補修・補強後の部材性能を把握

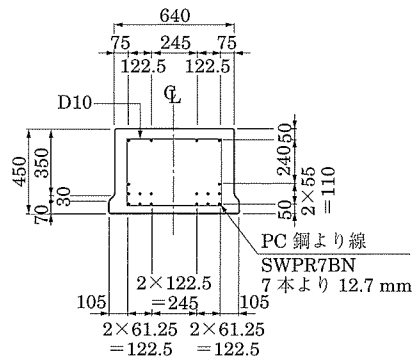


図 - 4 実験で使用した桁試験体の断面

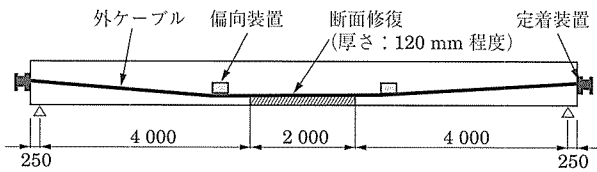


図 - 5 桁試験体の断面修復箇所および断面修復後の補強方法

する必要があることに加え、後述の充てん性に関する実験結果に基づき、1 箇所から密実に充てんできる範囲とすること等の検討結果に基づくものである。また、下面から 2 段目の PC 鋼材周りまで塩化物イオンが浸透した状態を想定し、断面修復厚さ (120 mm 程度) を決めた。

4.2 使用材料および配合

高流動コンクリートに使用した材料を、表 - 1 に示す。初期強度を高めるため、早強ポルトランドセメントを使用した。高い自己充てん性を得るには単位粉体量が多く必要になるので、石灰石微粉末、膨張材および収縮低減剤を使用し、コンクリートの粘性の低下や収縮の低減を図った。また、高流動コンクリートと旧コンクリート部の密着性を

表 - 1 使用材料

種類, 成分等		密度 (g/cm ³)	記号		
水	水道水	1.00	W		
セメント	結合材	早強ポルトランドセメント, 比表面積 4 640 cm ² /g	3.13	C	P
		石灰系膨張材, 標準品, 標準使用量 20 kg/m ³	3.16	E	
		石灰石微粉末	2.66	LF	
混和剤	川砂	栃木県鬼怒川産, 吸水率 2.93 %, F.M 2.71	2.54	S1	S
	砕砂	栃木県葛生産硬質砂岩, 吸水率 1.48 %, F.M 3.01	2.64	S2	
粗骨材	砕石 1 505	栃木県栗野町産硬質砂岩, 吸水率 1.3 %, F.M 6.20, 実積率 63.5 %	2.62	G	
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体 (消泡タイプ)		SP	
	収縮低減剤	低級アルコールアルキレンオキシド化合物界面活性剤		RS	
	発泡剤	特殊処理アルミニウム, 特殊変性アルコール, ポリカルボン酸系混和剤の混合液		AL	
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体		NA	

骨材の密度は、表乾密度である。

高めるため、高流動コンクリートの打込み直後から硬化初期までの膨張性を付与できる発泡剤を使用した。

川砂と砕砂の混合比率は、自己充てん性とヤング係数により決めることとした。粗骨材の最大寸法は、間隙通過性を考慮して 15 mm とした。事例^{3, 8)}を参考として、空気量を抑制するため (2 % 以下)、消泡剤を使用した。

断面の大きさや配筋、あるいは逆打ち工法の適用等を考慮し、自己充てん性ランク¹⁴⁾に相当する自己充てん性が必要であると判断された。そこで、単位粗骨材絶対容積は 0.28 ~ 0.32 m³/m³ の範囲¹⁴⁾、単位水量は高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの上限値 175 kg/m³ として試験練りによって定めることとした。

桁試験体に使用したコンクリートの水セメント比は 36.8 % である。高流動コンクリートは、前述のとおり、空気量が少ないため、水結合材比が同一であれば、桁試験体に使用したコンクリートよりも圧縮強度が大きくなる可能性がある。しかし、その一方で、膨張材、収縮低減剤および発泡剤の併用により強度低下を生じる可能性がある。また、ヤング係数に関しても、単位粗骨材絶対容積が少ないこと等の影響で桁試験体に使用したコンクリートよりも小さくなる可能性がある。そこで、水結合材比は、桁試験体に使用したコンクリートよりも若干小さい値 (34 %) とし、圧縮強度およびヤング係数を測定して妥当性を確認することとした。水粉体比は、単位粗骨材絶対容積、単位水量および単位結合材量を考慮して 30 % 程度¹⁴⁾ と仮定した。

膨張材は標準使用量とし、収縮低減剤は過去の実験および施工実績³⁾に基づき、8 ~ 9 kg/m³ の範囲で決めることとした。発泡剤の使用量は、通常のコンクリートでは 2 L/m³ 程度が多いが、高流動コンクリートはブリーディングが少なく、筆者が行った過去の実験では 0.5 L/m³ 程度であっても通常のコンクリートと同等の膨張率を発現した。そこで、本研究では、0 ~ 0.6 L/m³ の範囲で膨張率を確認して決めることとした。なお、高性能 AE 減水剤および消泡剤の使用量は、それぞれ、スランプフローが 650 mm 程度、空気量が 2 % 以下になるように調整することとした。

表 - 2 は、以上の検討をもとに、高流動コンクリートの性能を確認して決めた最終的な配合である。

5. 高流動コンクリートの性能確認

5.1 フレッシュ性状

表 - 3 は、決定配合 (表 - 2) で製造した高流動コンクリートのフレッシュ性状である。ブリーディング量は JIS A 1123, その他の試験は高流動コンクリート施工指針¹⁴⁾に

表 - 2 高流動コンクリートの配合 (決定配合)

質量と容積の区分	水結合材比 W/B (%)	水粉体比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量							RS (kg/m ³)	AL (L/m ³)	SP (P × wt %)	NA (P × wt %)
				上段: 質量 (kg/m ³)										
				下段: 絶対容積 (m ³ /m ³)										
				W	P		S		G					
	B	LF	S1		S2									
	C	E												
質量	34.2	30.3	175	491	20	67	599	267	734	8.5	0.3	2.1	0.002	
容積	107	93	54.6	0.175	0.157	0.006	0.025	0.236	0.101					0.280

表 - 3 決定配合の高流動コンクリートのフレッシュ性状

U型充てん試験 (障害 R1)		スランプフロー 試験		V ₇₅ 漏斗流下 時間 (s)	空気量 (%)	コンク リート 温度 (℃)	ブリー ディン グ率 (%)
充てん 高さ (mm)	充てん 高さ 300 mm の到達 時間 (s)	スランプ フロー (mm)	500 mm スランプ フロー 到達時間 (s)				
340	6.2	649	4.0	9.6	0.5	14.0	0
~ 345	~ 8.3	~ 713	~ 7.6	~ 14.0	~ 0.6	~ 15.0	

準じた。表 - 2 において、単位粗骨材絶対容積を 0.3 m³/m³ とした場合には、充てん高さは 280 mm 程度になり、0.28 m³/m³ まで低減させる必要があることが分かった。また、石灰石微粉末を使用しない場合には、V₇₅ 漏斗流下時間は 25 秒程度となる粘性の高い高流動コンクリートとなり、充てん高さも 300 mm に達しないことが確認された。

川砂と砕砂の混合比率は、通常のコンクリートの製造で採用している比率 (1 : 1) とした場合には骨材のかみ合いを生じ、充てん高さが 300 mm に達するためには単位水量および単位粉体量を増加させる必要があると判断された。しかし、通常のコンクリートの試験により、川砂のみを使用した場合にはヤング係数が若干小さくなることが確認されていた。そこで、表 - 2 に示すとおり、その比率を 7 : 3 とした結果、表 - 3 に示す充てん高さを得ることができた。

5.2 充てん性

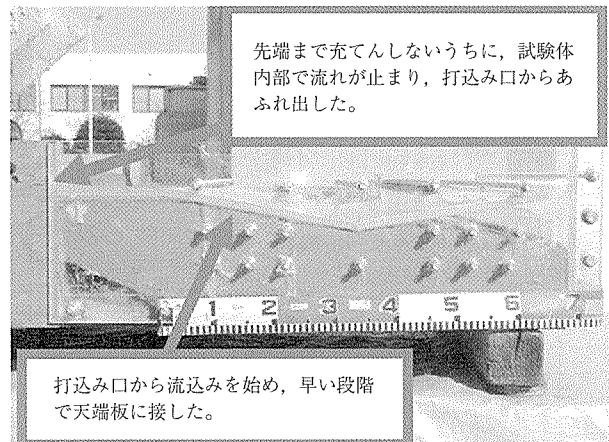
(1) 模擬試験体を用いた充てん性の確認

写真 - 1 に示す模擬試験体 A は、図 - 4 に示す桁試験体において断面修復を行う下面の形状寸法および配筋を模擬したものである。試験体の奥行きは 0.9 m であり、この実験では打込み口から橋軸直角方向の流動を確認した。

セメントの一部を石灰石微粉末で置換していない高流動コンクリート (U型充てん高さ：285 mm, V₇₅ 漏斗流下時間：25.7 秒) は粘性が高く、間隙通過性も悪いため、写真 - 2 (a) に示すとおり、鋼材間を通過する速度が遅く、打込み直後から早い段階で打込み口側の天端板に達し、全内面が摩擦抵抗となって一層充てんしにくい状態になり、反対

側の天端板 (写真右側) との間にすき間を残した状態で閉塞し、最終的には打込み口の反対側まで充てんすることができなかった。この状態に対して、打込み口からパイプレータを挿入して若干の振動締固めを行えば、再び流動し始め、写真 - 2 (a) の未充てん部分に高流動コンクリートが充てんされることが分かった。しかし、施工事例¹⁵⁾と同様に、はつり面を想定した天端板にはコンクリートから発生した多量の気泡が確認された。はつり面近くに多量の気泡を発生することは付着強度の低下を招くため³⁾、逆打ち工法では振動締固めを行わなくても隔ずみまで充てんできるよう、高流動コンクリートの配合および施工方法の検討が重要である。

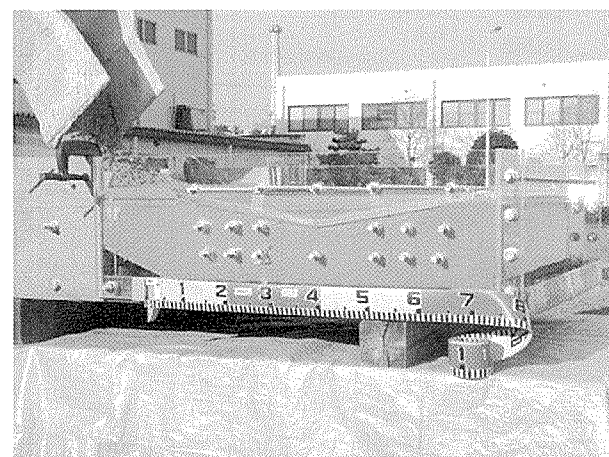
写真 - 1 は、表 - 3 に示すフレッシュ性状を有する高流動コンクリートの打込み途中の流動状況を撮影したものである。鋼材間の通過時には、高流動コンクリートの流動速度が若干低下する現象が見られたが、比較的緩やかなこう配で流動していることが分かる。このコンクリートを使用した場合には、写真 - 2 (b) に示すとおり、打込み口からあふれ出すことなく、その反対側に設けた開口から吹き上がり、試験体内に密実に充てんされた。よって、高流動コンクリート施工指針¹⁴⁾ で定めた自己充てん性ランク 1 の充て



(a) 充てん高さ 285 mm の高流動コンクリートの場合



写真 - 1 模擬試験体 A を用いた高流動コンクリートの充てん性確認実験



(b) 充てん高さ 340 mm の高流動コンクリートの場合

写真 - 2 模擬試験体 A を用いた高流動コンクリートの充てん状況

ん高さや V_{75} 漏斗流下時間の目安値を満足する高流動コンクリートであれば、図 - 4 に示す断面の寸法および配筋に対する充てん性は確保できるといえる。

しかし、対象とする断面修復部分は、図 - 5 に示すように、橋軸方向に 2 m の範囲を有するため、模擬試験体 A により決定した高流動コンクリートであっても、打込み方法が不適切な場合には橋軸方向への流動が停止し、未充てんを生じる可能性がある。そこで、写真 - 3 に示すように、図 - 5 に示す断面と同じ寸法 (0.7 × 2.0 × 0.12 m) の模擬試験体 B を製作し、打込み方法と充てん状況の関係を調べた。写真 - 3 の打込み口は一例であり、高流動コンクリートの流入状況や充てん状況を確認しながら、形状寸法や位置を変更した。今回の実験では、断面修復の形状寸法等を考慮し、コンクリートポンプによる圧入ではなく、バケツを用いて打込み口から流し込む方法を採用した。

打込み口の幅を約 0.3 m とした場合、試験体内部への流動速度が遅く、流込み開始から早い段階で流れ込まなくなった。また、長さ 2 m 区間の端部に打込み口を設けると、写真 - 4 に示すように端部まで充てんしない状況が多く見られた。実験の範囲では、長さ方向の中央に打込み口を設け、その幅は 0.6 m 程度にする必要があることが分かった。

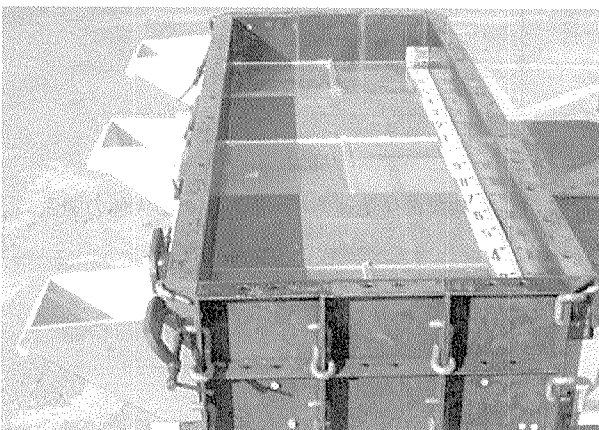


写真 - 3 模擬試験体 B (一例)

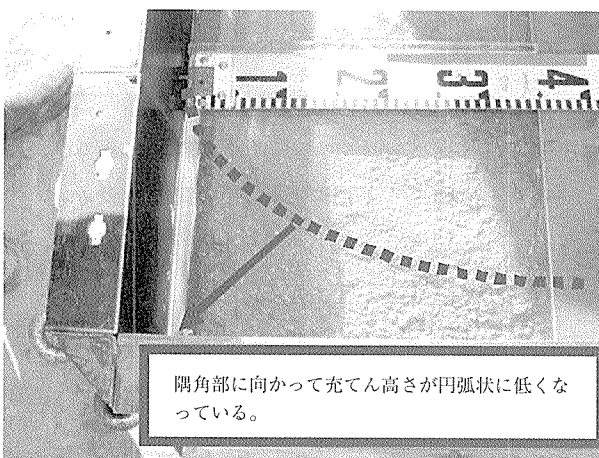


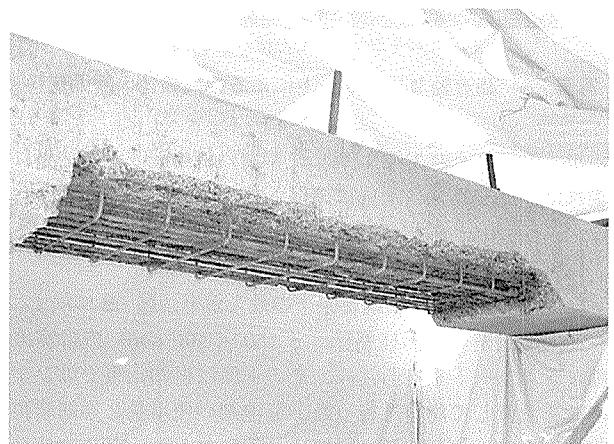
写真 - 4 高流動コンクリートを模擬試験体 B 内に流し込んだ場合に試験体の端部で発生した未充てん

そのような条件であっても、高流動コンクリートの流動が一度止まると、打込み口を高くしてヘッドをかけても流れ込んだコンクリートの先端まで動くことがなかった。これは、高さが 0.12 m と低いために流積が小さく、高流動コンクリートの流動中には天端板と底板の内面による摩擦抵抗によって高流動コンクリートの流動を妨げる働きが作用すること、その流動が静止すると、それらの板と高流動コンクリートが付着し、再度流動させるには高いエネルギーが必要になること、換言すれば、静止摩擦力が動摩擦力よりも大きいことを表しているといえる。したがって、このような狭い空間には連続的に打ち込むことが重要である。

以上のとおり、自己充てん性ランク 1 の高流動コンクリートを用いても打込み方法が不適切な場合には未充てんを発生する可能性があるため、打込み機械、打込み口の形状あるいはその位置等を事前に検討し、確認する必要がある。

(2) 桁試験体を用いた充てん性の確認

図 - 4 および図 - 5 に示す桁試験体の断面修復の状況を、写真 - 5 に示す。桁試験体のはつりは、ウォータージェットによるものである。側面に透明型枠を用いることにより、高流動コンクリートの充てん状況がリアルタイムで確認され、最終的な打止めのタイミングも把握することができた。打込み時および型枠を取りはずした後の充てん状況により、事前に検討した配合および施工方法が妥当なものであることが確認された。内部の充てん状態については把握できな



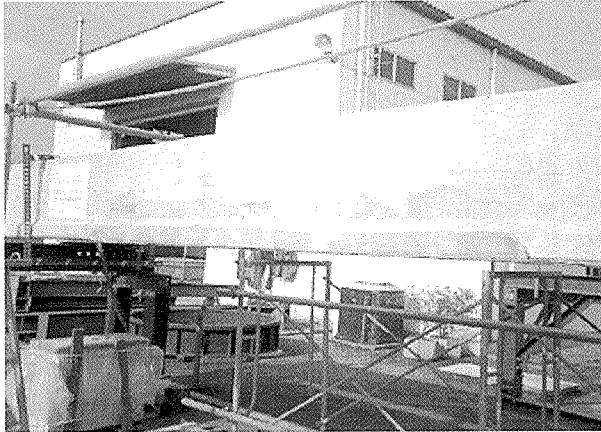
(a) はつり後の状態



(b) 高流動コンクリートの打込み状況



(c) 高流動コンクリートの充てん状況（透明型枠を使用）



(d) 型枠を取りはずした後の充てん状況

写真-5 高流動コンクリートによる桁試験体の断面修復

いが、前報（その3）²⁾において部材性能を確認した結果によれば、充てん性は十分に確保されていたものと推測される。

5.3 一体性（付着強度）

発泡剤の使用量と初期膨張率の最大値を、図-6に示す。

初期膨張率は、円柱型枠（ $\phi 150 \times 300$ mm）内に高流動コンクリートを打ち込み、その上面に樹脂円板と動ひずみ計を設置して測定を行った。発泡剤の使用量と初期膨張率の最大値は比例関係ではなく、使用量が 0.6 L/m^3 の値は 0.3 L/m^3 の3.5倍程度に増加している。実際の工事では、構造物の劣化状況やそれを支える仮設構造物の条件等により、強固な型枠を設けることが困難になる場合があるため、初期膨張は既設コンクリートとの付着が確保できる範囲で小さくした方がよい。また、図-7に示すとおり、発泡剤の反応は注水から早い時期に始まり、注水から2時間後には初期膨張率が最大値に達するため、注水から打ち込み終了までの時間管理等を事前に検討する必要がある。

高流動コンクリートの打継目の処理方法と付着強度の関係を調べるため、図-8に示す方法により、付着強度試験用供試体を製作した。コンクリートブロックの下面は、チップング（実験No.1）、遅延剤による洗出し（実験No.2）およびウォータージェットはつり（実験No.3）により凹凸を付けた。また、その凹凸の処理は、プライマーのみを用

いた場合（実験No.1）とプライマーおよびモルタルを使用した場合（実験No.2, No.3）を比較した。付着強度は、コア抜き機で切込み（直径100 mm）を入れて測定を行った。

高流動コンクリートがはつり面に達しても、発泡剤を使用しない場合には、図-7に示すように打上り面の沈下を生じるため、表-4に示す実験No.1の試験結果のとおり、はつり面との付着が得られない。付着強度を確保するためには、高流動コンクリートに対して初期膨張を与える等、何らかの方法で圧着した状態を保持することが重要である。また、プライマーの使用により、付着の効果は若干高まるが、発泡剤とプライマーを併用しても、付着強度は 1 N/mm^2 前後で、そのばらつきも大きい。試験後の破壊面を観察すると、凸部に高流動コンクリートが充てんされていないため、付着面積の小さいことが付着強度の結果に影響を及ぼしていると考えられる。ただし、チップングによる

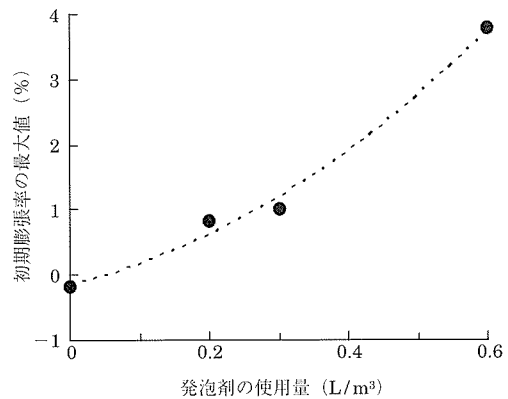


図-6 発泡剤の使用量と初期膨張率の最大値の関係

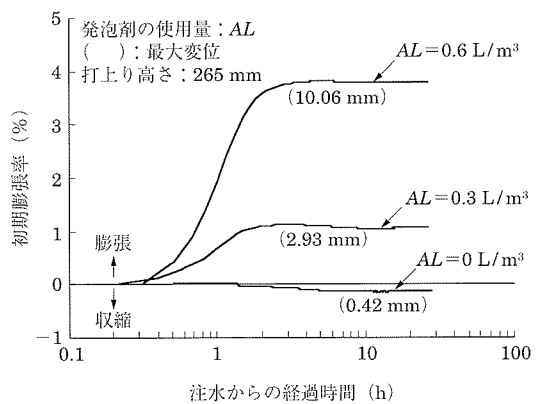


図-7 初期膨張率の経時変化

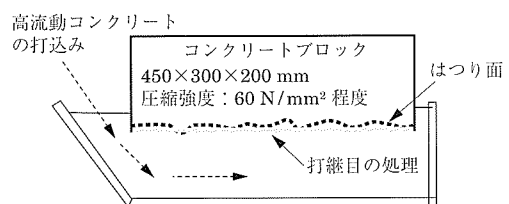


図-8 付着強度試験用供試体の製作方法（逆打ちの場合）

表 - 4 付着強度の結果

(単位: N/mm²)

実験 No.	1				2					3		
打継ぎ方向	水平 (逆打ち)									鉛直		
下地の処理方法	チッピング				遅延剤による洗出し					ウォータージェット		
打継目の処理方法	A	なし	A	なし	a	b	c	d	e	c	c	
発泡剤の使用量 (L/m ³)	0.3		0		0.3	0.2	0.3					
平均	1.15	0.21	0	0	1.48	1.54	0.53	1.67	1.61	2.44	2.17	2.46
最大	1.62	0.62	0	0	1.94	1.88	1.13	1.69	1.69	2.76	2.25	2.50
最小	0.82	0	0	0	0.63	1.25	0.23	1.63	1.50	2.13	2.07	2.38

〈打継目の処理方法における記号の説明〉

A: プライマーのみによる処理 (アクリル系プライマーを使用)

以下, プライマーとポリマーセメントモルタルを組み合わせた処理

a: アクリル系プライマー, セメントモルタル, アクリル系プライマーの3層

b: アクリル系プライマー, 繊維入りアクリル系ポリマーセメントモルタル, アクリル系プライマーの3層

c: EVA プライマー, EVA系ポリマーセメントモルタル, EVA プライマーの3層

d: EVA プライマー, EVA系ポリマーセメントモルタル2層

e: 湿潤面対応エポキシ系プライマー, エポキシ系ポリマーモルタルの2層

はつりは人力によるもので, 局部的に脆弱部を発生しやすいため, これが付着強度のばらつきを招いた可能性もある。

実験 No.2 において, a (0.2) 以外の発泡剤の使用量は 0.3 L/m³ である。方法 a と方法 a (0.2) を比較すれば, 付着強度の違いはほとんど認められない。このため, 付着強度を確保するための発泡剤の使用量としては 0.2 L/m³ でも十分である。この結果は, 図 - 6 に示すとおり, 発泡剤の使用量が 0.2 L/m³ と 0.3 L/m³ の範囲では, 初期膨張率の変化が小さいことに起因すると考えられる。しかし, 図 - 5 の桁試験体の断面修復を行う場合には, 注水から打込み終了までの時間経過に伴う初期膨張率のロスも考慮する必要があるため, 使用量は安全側の 0.3 L/m³ とした。

セメント系モルタルを使用した方法 (a, b, c, d) の付着強度の平均値は, 方法 b が他の方法に比べて小さいことを除けば, 顕著な差異が認められない。しかし, 供試体の破断面を観察すると, 方法 d ではすべてモルタルが破壊していた。また, 方法 a および方法 b に関しては, モルタルの破断を生じた供試体の付着強度が小さいため, 付着強度の平均値が小さくなった。これらの中では, 方法 c のみが, すべての供試体においてモルタルの破壊を生じず, はつり面で破壊を生じていた。そのため, 方法 (a, b, d) ではモルタル強度を高めること, 方法 c でははつり面との付着を向上させることにより, さらに付着強度を高められる可能性がある。エポキシ樹脂を使用した方法 e は, セメント系のものに比べて接着性に優れるが, エポキシ樹脂の可使用時間が短く, この方法を適用できる施工条件にきわめて限定される。

実験 No.3 においては, 方法 c を用い, 逆打ち工法によって水平打継ぎを行った場合と鉛直打継ぎを行った場合の付着強度を調べた。水平打継ぎの付着強度の平均値は 2 N/mm² を超えており, ウォータージェットはつりは他の方法よりも付着強度を高めることができる。また, 鉛直打継ぎにおける付着強度は水平打継ぎよりも若干高いため, 逆打ち工法では局部的に付着が十分でない部分も存在すると

考えられる。

5.4 力学的性能および寸法安定性

表 - 5 は, 図 - 5 の桁試験体の断面修復を行う際に使用した高流動コンクリートの力学的性能に関する試験結果である。使用した高流動コンクリートは初期膨張性を有し, 桁試験体では型枠支保工によって強固に固定するとともに, 打込み口の打上り面にも錘を載せた。このため, 圧縮強度用供試体に関しても, 型枠は鋳鉄製のものを使用し, 打上り面には錘を載せ, その状態を翌日まで持続させた。

高流動コンクリートに初期膨張を与えても, これを拘束させた条件では, 発泡剤の使用による圧縮強度の低下は 5% 程度である。また, 高流動コンクリートのヤング係数は単位粗骨材絶対容積が少ないこと等に伴い, 桁試験体で使用したコンクリートよりも若干小さくなったが, 設計用値を十分に満足する結果となった。

高流動コンクリートの収縮ひずみを, 図 - 9 に示す。桁下の断面修復部分に対して, 通常の構造物と同等の湿潤養生を行うことは難しいため, 打込み翌日から乾燥を開始した厳しい条件下での収縮ひずみを測定した。表 - 2 に示す高流動コンクリートの収縮ひずみは, 膨張材および収縮低減剤を含まない場合に比べて 1/3 程度まで低減されている。また, 一般的な断面修復モルタルの乾燥収縮ひずみ^{*)} に比べてもかなり小さい。なお, 封緘状態とした場合には,

表 - 5 高流動コンクリートの力学的特性

コンクリートの種類	養生方法	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
桁コンクリート	屋外 封緘	477	67.6	38.5	0.22
		(設計用値)	50.0	33.0	0.20
高流動コンクリート	20℃ 気中	7	67.1	34.8	0.19
		30	70.5	35.0	0.19
	20℃ 封緘	30	81.4	35.7	0.19
		屋外* 封緘	30	71.6	34.5

*) 12月下旬で桁試験体と同一養生 (打込み終了後から材齢3日は給熱養生, 材齢4日から21日はシート養生, 材齢22日から30日まで, 外ケーブル等の作業のため, 屋外暴露)

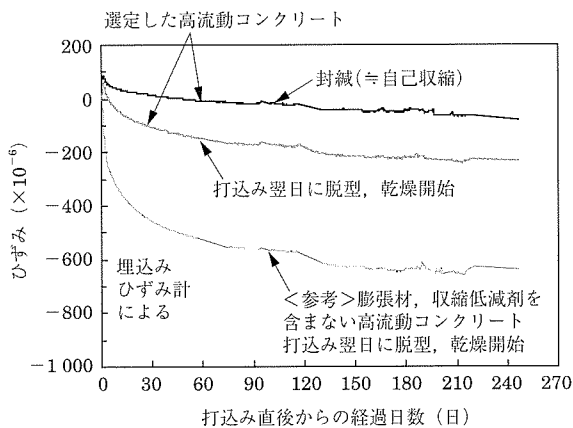


図-9 打込み終了からの収縮ひずみの変化

数 10×10^{-6} 程度の収縮ひずみである。

6. まとめ

本研究では、PC 鋼材位置まで劣化が進行した PC 橋の補修において、断面修復を行った後には外ケーブル工法等により断面修復の部分にもプレストレスを再導入することを想定し、高流動コンクリート工法の適用性を検討した。実施にあたっては、断面修復に対する要求性能を明確にし、模擬試験体による充てん性の確認により、高流動コンクリートの配合および流動性状の妥当性を評価した。また、逆打ち工法で問題となる既設のはつり面との付着強度を高めるための方法を実験により確認した。

実験の結果、自己充てん性ランク 1 に相当する高流動コンクリートを用いれば、PC 桁下面の狭くて鋼材量の多い部分に逆打ち工法で密実に充てんできることが分かった。また、高流動コンクリートの初期膨張率を 1.0 % 程度とし、はつり面に対して事前に適切なプライマーとポリマーセメントモルタルで凹凸の処理を行うことで、逆打ち工法であっても付着強度は 2 N/mm^2 以上を得ることが可能になった。しかし、それらは材料や施工方法が妥当なものでなければ要求性能を満足しないため、事前に諸条件を十分に調査し、理解したうえで、選択した材料や施工方法が要求性能を満足することを確認する必要がある。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：コンクリート構造診断技術，2007.7
- 2) 中村定明，濱田譲，谷口秀明，中村雅之：PC 橋の改造技術に関する研究 — その 3：PC 部材のはつりの適切性に関する研究 —，プレレストコンクリート，Vol.50, No.1, pp.54 - 60, 2008.1
- 3) 池田光次，大部菌和久，岡田滋夫，西本好克：高流動コンクリートを用いた張出し床版下面増厚圧入工法 — 名神高速道路釈迦ヶ池橋への適用例 —，コンクリート工学，Vol.38, No.10, pp.35 - 40, 2000.10
- 4) 谷口秀明，浅井洋，樋口正典，三上浩：膨張材と収縮低減剤による各種コンクリートの収縮低減効果，第 16 回プレ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.167 - 170, 2007.11
- 5) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），2005.4
- 6) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案），[補修・補強編]，2005.7
- 7) 谷口秀明：テストハンマーによる構造体コンクリートの強度推定法に関する研究，筑波大学学位論文，参考資料，p.4, 2007.3
- 8) 本荘清司，井手上文雄，上東泰，谷口秀明，丸屋剛，宮川豊章：塩害劣化した RC 中空床版橋への吹付けによる断面修復工法の適用，土木学会論文集，No.798 / VI, pp.75 - 88, 2005.9
- 9) 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）— 断面修復部に生じるひび割れ発生挙動の推定方法 —，第 15 回プレ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
- 10) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧（第二版），1996.2
- 11) 三加崇，本間淳史，横山和昭，玉置一清：PC 橋の断面修復に関する実験的研究（その 2）— 断面修復後の追加プレストレスの経時変化 —，第 15 回プレ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.149 - 152, 2006.10
- 12) 土木研究センター：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，1989.5
- 13) 藤田学，永元直樹，西本好克，浅井洋，菅谷泰之：高流動コンクリートに関する研究 — 硬化性状に関する基礎的研究 —，住友建設技術研究所所報，pp.1 - 8, 1995
- 14) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998.7
- 15) 浅井 宏隆，野村 謙二，今里 氏彦，谷口 秀明：波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋における波形鋼板下フランジ接合部のコンクリート充填性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.1207 - 1212, 2005
- 16) 北野勇一，渡辺博志，久田真，竹中秀樹，篠崎英二：断面修復工法の凍結融解作用に対する剥離抵抗性の検討，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，Vol.6, pp.191 - 196, 2006.10

【2008 年 2 月 4 日受付】