

# 論文 早期脱型を考慮した高強度・高流動コンクリートの諸物性に関する検討

溝淵利明\*<sup>1</sup>・柳井修司\*<sup>1</sup>・坂田昇\*<sup>2</sup>・藤田時男\*<sup>3</sup>

**要旨:** 長大橋梁の主塔建設やトンネルセグメントの製造において、施工サイクルの短縮を目的とした型枠の早期脱型は重要な課題のひとつである。また、最近の高密度配筋や構造物形状の複雑化によるコンクリートの充填性確保も重要な課題となっている。そこで、早期脱型を考慮した高流動コンクリートの検討を行い、早期脱型と高流動化に伴う硬化遅延という相反する条件を満足するコンクリートの検討を行った。検討の結果、練上り温度 20℃でスランプフロー保持時間を 2 時間以上確保し、かつ材齢 5 時間で  $0.1\text{N}/\text{mm}^2$  以上の圧縮強度を満足する配合を得ることができ、また、貫入抵抗値による若材齢時圧縮強度の簡便な推定方法の提案を行った。

**キーワード:** 高強度, 高流動, 早期脱型, せん断強度, 若材齢時強度

## 1. はじめに

高流動コンクリートは、優れた材料分離抵抗性および充填性により、締固めを行うことなく高密度配筋部や複雑な形状を有する部位への施工が可能であり、これまでに多くの構造物に適用されている。一方、高流動コンクリートは、従来のコンクリートに比べて粉体量が増大することにより、温度ひび割れ発生の可能性が高くなること、高性能 AE 減水剤の多量使用による硬化遅延や流動性を高めたことによる側圧の増大などの課題を有している。そこで、本検討では高い流動性および充填性を確保しながら早期に脱型可能なコンクリートの研究を行った。

また、早期脱型を考慮した施工を行う場合、目標強度に達しているかどうか確認するための品質管理は重要な課題である。しかしながら、強度試験による管理の場合、所定強度を確認するために多数の供試体を作製する必要があること、若材齢時の供試体脱型が非常に難しいこと、供試体端面の整形方法が難しいことなどの問題を有している。本検討では、凝結試験での貫入抵抗値を利用して、現場でも簡単にできる強度

管理方法についての検討も行った。

本報文は、早期脱型を考慮した高強度・高流動コンクリートのフレッシュ性状、若材齢時の強度発現性、圧縮強度と凝結特性との関係を基にした簡便な強度管理方法の提案および打継ぎ部のせん断特性や引張特性の実験結果について報告するものである。

## 2. 検討の概要

### 2.1 コンクリートの要求品質

早期脱型を考慮した高強度・高流動コンクリートにおける脱型時強度および脱型時期の目標値としては、煙突<sup>1)</sup>や海外において橋梁主塔部への適用例のあるスリップフォーム工法<sup>2)</sup>でも適用可能となるように、練上り後6時間で自立可能な強度である  $0.1\text{N}/\text{mm}^2$  以上とした<sup>3)</sup>。また、長大橋梁主塔を目指す場合には、高強度コンクリートでかつ場所打ちコンクリートとする必要があると考えられる。高強度コンクリートの場合、国内においては場所打ちで設計基準強度  $60\text{N}/\text{mm}^2$  が最大であるが、高性能 AE 減水剤等の混和材料の適用を考慮す

\* 1 鹿島技術研究所 土木技術研究部材料・施工グループ 工修 (正会員)

\* 2 鹿島技術研究所 土木技術研究部材料・施工グループ 工博 (正会員)

\* 3 鹿島建設総事業本部 土木技術本部工務部

れば、設計基準強度 80N/mm<sup>2</sup>程度までは可能と思われる<sup>4)</sup>。また、高橋脚においてはこれまでに設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup>の実績のある<sup>5)</sup>。したがって、これまでの実績および今後の適用を考慮して設計基準強度 50 および 80N/mm<sup>2</sup>を本検討の対象とした。自己充填性を有する高流動コンクリートとした場合の流動性および充填性を確保するための保持時間は、運搬および打込み後の充填性を考慮して2時間以上とした。

また、発熱を抑えることを目的に、低熱ポルトランドセメントを適用することとした。

本検討で対象とするコンクリートの目標品質を表-1に示す。

表-1 本検討で対象としたコンクリートの目標品質

項目	目標品質
設計基準強度	50, 80N/mm <sup>2</sup>
配合強度	60, 96N/mm <sup>2</sup> (変動係数:10%)
スランプフロー	65±5cm
スランプフロー保持時間	2時間以上
空気量	4.5±1.5%
脱型時強度	0.1N/mm <sup>2</sup> 以上(練上り後6時間)

表-2 検討ケース

ケース No.	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	練上り温度 (°C)	混和剤添加率 (粉体量×%)	フレッシュ特性試験	凝結特性試験	力学的特性試験	打継ぎ部強度試験
1-1	80	20	1.4	○	○	○	○
1-2	80	20	1.2	-	○	○	-
2-1	50	20	1.2	○	○	○	○
1-3	80	10	1.4	○	○	○	-
2-2	50	10	1.2	○	○	○	-

表-3 使用材料

項目	摘要
セメント	低熱ポルトランドセメント, 比重:3.22
石灰石微粉末	炭酸カルシウム, 比重:2.70
細骨材	信濃川産川砂, 表乾比重:2.60, 吸水率:1.80, 粗粒率:2.36
粗骨材	硬質砂岩碎石, 表乾比重:2.65, 吸水率:0.67
混和剤	高性能AE減水剤(ポリエーテル系)
増粘剤	主成分:ウエランガム

次に、高流動コンクリートの場合、ほとんどブリーディングが生じないことや普通コンクリートに比べて凝結時間が長いことから、打継ぎ処理を行わなくても打継ぎ面のない部分(以後母材と称する)と同等の強度が得られることが報告されている<sup>6)</sup>。しかしながら、本検討で対象とした配合の場合、普通コンクリートと同程度の凝結特性を有することが予想されることから、母材と同等の強度を打継ぎ部の強度が有するかどうか確認する必要があると考えられる。また、高密度配筋の場合、打継ぎ処理を入念に実施することが難しく、打継ぎ部処理として水洗い程度しか行えなかった場合においても十分一体性が確保できるかどうか確認する必要があると考えられることから、打継ぎ部での処理の

有無および簡単な処理程度でのせん断強度および引張強度について検討を行った。

## 2.2 検討ケース

本検討では、これまで高橋脚などで適用されている設計基準強度 (f'ck) 50N/mm<sup>2</sup>および今後適用が予想される設計基準強度 80N/mm<sup>2</sup>の2ケースについて実験を行うこととした。また、練上り温度および養生温度の影響を検討するため、練上りおよび養生温度 10°Cについても実験を行った。さらに、凝結および強度特性試験においては、混和剤の影響を検討するために、混和剤添加率を変化させた場合について試験を行った。検討ケースを表-2に示す。

## 2.3 使用材料およびコンクリート配合

本検討で使用した材料およびコンクリート配

表-4 コンクリートの配合

ケース No.	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			水	セメント	石灰石微粉末	細骨材	粗骨材	混和剤	AE剤	増粘剤
1	80	28.2	175	621	-	694	848	C×1.4%	2A	W×0.1%
2	50	35.0	175	500	102	694	848	C×1.2%	2A	W×0.1%

合を表-3および表-4に示す。混和剤は、コンクリート二次製品等で用いられている凝結遅延を生じにくいポリマー系の高性能 AE 減水剤を用いることとした。また、コンクリート配合は設計基準強度 50, 80N/mm<sup>2</sup>とも流動性および充填性を同等とするために、粗骨材容積、モルタル中の細骨材容積および水粉体容積比を同じ値とした。

## 2.4 試験方法

本検討では、設計基準強度 50, 80N/mm<sup>2</sup>の各ケースについてフレッシュコンクリートの性状、凝結性状および材齢 4~24 時間までの若材齢時での強度発現性状について実験を行った。

打継ぎ強度に関する検討は、打継ぎ処理の有無、打設後から処理開始までの時間および強度レベルの違いが打継ぎ強度（せん断、引張強度）に及ぼす影響について試験を行った。打継ぎ処理方法としては、打継ぎ面を水で洗い流す程度とした。また、処理時間は、打設後 1 日とした。試験方法は、図-1 に示すように 500×500×高さ 300mm の型枠にコンクリートを半分の高さまで打設し、材齢 1 日で打継ぎ処理を行った後コンクリートを打継ぎ、材齢 2 週間で打継ぎ面を挟んでコア（φ150mm）を採取した。

採取したコアは、材齢 28 日まで水中養生した後、図-2 に示すような治具にコアを挟み、せん断面に対して直交する方向に荷重をかけた状態でせん断試験を行うとともに、割裂試験を行い引張強度を求めた。また、比較のために打継ぎ面のないコアについてもせん断試験および引張試験を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

各ケースのスランプフローの経時変化を図-3 に示す。各ケースとも練上り時は所定の値を満足する結果となった。練上りから 2 時間までの経時変化では、練上り温度 20℃ の場合約 5cm のフロー低下が見られたものの、ほぼ所定の品質を満足する結果となった。また、練上り温度

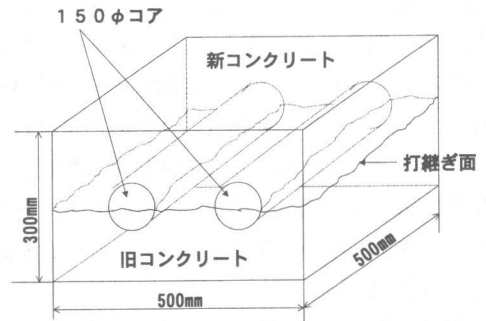


図-1 打継ぎ面に関する試験用供試体

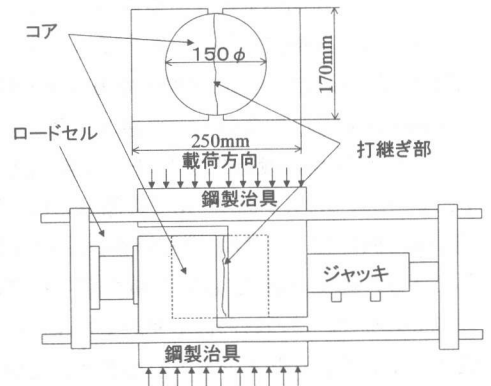


図-2 せん断試験の概要

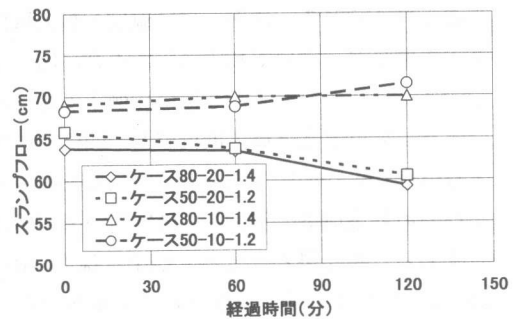


図-3 スランプフロー経時変化

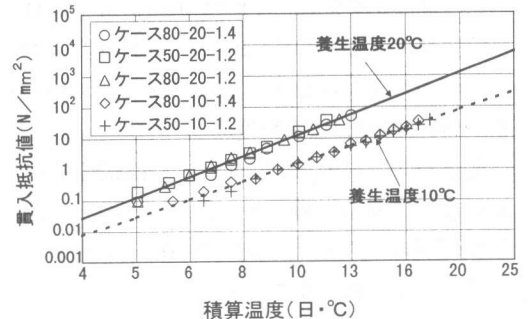


図-4 凝結試験結果

10℃の場合には時間経過とともにフローが増加する傾向にあり、練上り後2時間で約2cmの増加があった。これは、低温時において混和剤のセメント分散効果が遅れたためではないかと思われる。したがって、今回検討した配合の場合、練上り温度 20℃までの範囲でスランプフロー保持2時間は可能であると考えられる。

### 3.2 凝結性状

凝結時間は、高流動コンクリートの場合普通コンクリートに比べて遅延する傾向にある。しかしながら、本検討で用いた配合では、練上り温度 20℃の場合で凝結始発時間が6～7時間、終結時間が約9時間であり、普通コンクリートとほぼ同等程度の凝結性状<sup>7)</sup>を示す結果となった。一方、練上り温度 10℃の場合には、凝結始発時間が約1.4時間、終結時間が約20時間であり、練上り温度 20℃の場合に比べて約2倍であった。このことは本検討で対象とした低熱ポルトランドセメントの使用および高性能AE減水剤を多量使用した配合の場合、温度依存性、特に低温時での影響が大きいことを示すものと考えられる。また、積算温度と貫入抵抗値との関係は、常用対数表示した場合、図-4に示すように各ケースともほぼ比例する結果となった。積算温度と貫入抵抗値との関係は、練上り温度によって異なるものの、強度レベルおよび混和剤添加率に関係なくほぼ同一の関係式で求められる結果となった。練上り温度 10℃および 20℃での積算温度と貫入抵抗値との関係式を以下に示す。

$$\text{練上り温度 } 10^\circ\text{C}; P=2.9 \times 10^{-6} M^{5.73} \quad (1)$$

$$\text{練上り温度 } 20^\circ\text{C}; P=2.9 \times 10^{-6} M^{6.64} \quad (2)$$

P; 貫入抵抗値 (N/mm<sup>2</sup>), M; 積算温度 (日・℃)

### 3.3 若材齢時の強度特性

各ケースの材齢 24 時間までの積算温度と圧縮強度との関係を図-5に示すとともに、圧縮強度試験結果を基に算定した 0.1N/mm<sup>2</sup>に達する材齢を図-6に示す。

積算温度と圧縮強度との関係は、凝結特性試験結果と同様に対数表示することにより、温度

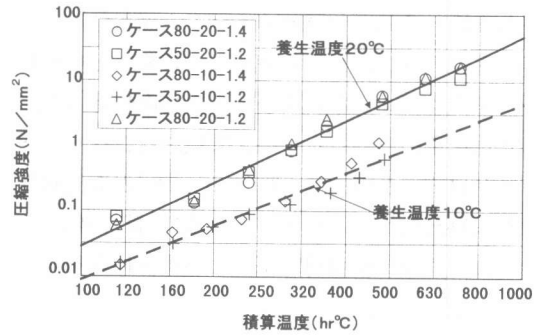


図-5 若材齢時の圧縮強度と積算温度との関係

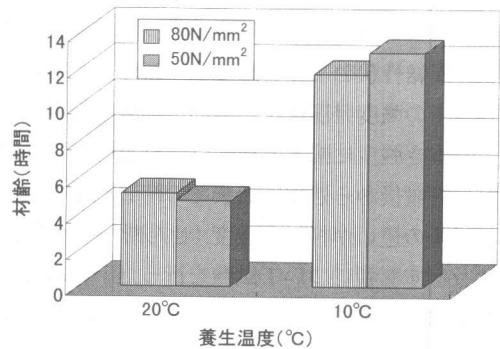


図-6 圧縮強度が 0.1N/mm<sup>2</sup>に達する時間

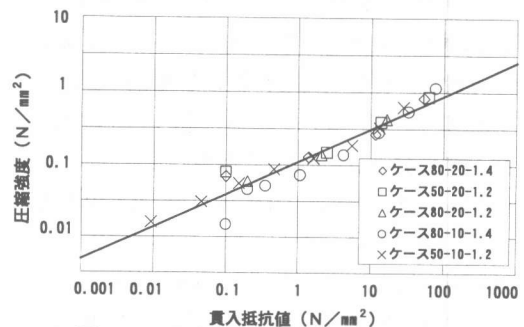


図-7 圧縮強度と貫入抵抗値との関係

条件ごとに強度レベルおよび混和剤添加率に影響されことなく高い相関関係を有する結果となった。以下に、本検討で実施した養生温度 10℃および 20℃での積算温度と圧縮強度との関係式を示す。

$$\text{養生温度 } 10^\circ\text{C}; f=9.87 \times 10^{-9} M^{3.23} \quad (3)$$

$$\text{養生温度 } 20^\circ\text{C}; f=3.19 \times 10^{-8} M^{2.72} \quad (4)$$

f; 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>), M; 積算温度 (hr・℃)

表-1の要求品質で示したスリップフォーム工法適用の際の材齢6時間で圧縮強度 0.1N/mm<sup>2</sup>以上の条件については、図-6に示

すように練上り温度および養生温度 20℃の場合約5時間で 0.1 N/mm<sup>2</sup>の強度となり、目標値を満足する結果となった。養生温度 10℃の場合には、材齢6時間でほぼ自立はするものの、圧縮強度は 0.05 N/mm<sup>2</sup>以下であり、圧縮強度 0.1 N/mm<sup>2</sup>を満足したのは、練上り後 12~13時間で、凝結特性結果と同様に養生温度 20℃の約2倍の時間を要する結果となった。

次に、簡便な強度管理方法として、各ケースの圧縮強度と貫入抵抗値との関係について検討を行った。図-7から、強度レベル、養生温度、混和剤添加率に関係なく圧縮強度と貫入抵抗値には高い相関関係があった。したがって、本検討で対象とした範囲においては、以下に示す式を用いて貫入抵抗値から圧縮強度を簡便に推定することが可能であり、脱型時強度管理が容易になると考えられる。

$$f = 0.11 \times P^{0.452} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5)$$

### 3.4 若材齢時の変形特性

若材齢時の変形特性に関しては、強度試験機の載荷床とクロスヘッドとの間に変位計を設置して測定を行った。図-8に変形係数と圧縮強度との関係を示す。ここで、変形係数とは応力-ひずみ曲線において比例する区間での傾きとした。圧縮強度および変形係数とも対数表示することにより、強度レベル、養生温度などに関係なく高い相関関係が得られた。若材齢時における変形係数と圧縮強度との関係を以下に示す。

$$\text{変形係数} = 114.8 \times f^{1.40} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

### 3.5 打継ぎ部の力学特性

#### (1) 打継ぎ部のせん断強度

設計基準強度 50, 80 N/mm<sup>2</sup>での材齢 28日での一面せん断試験の結果を図-9および10に示す。設計基準強度 80 N/mm<sup>2</sup>において、せん断面と直交する方向の荷重（以後鉛直圧と称する）を与えない場合、母材せん断強度は約 7 N/mm<sup>2</sup>であるのに対して、打継ぎ処理を実施しない場合約 50%低下する結果となった。また、打継ぎ処理した場合でも約 20%低下する結果となった。設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup>で

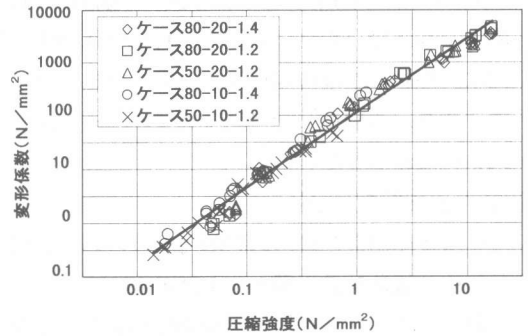


図-8 変形係数と圧縮強度との関係

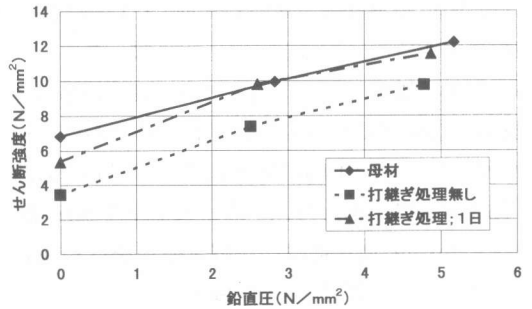


図-9 一面せん断試験結果 ( $f'_{ck}$ ; 80 N/mm<sup>2</sup>)

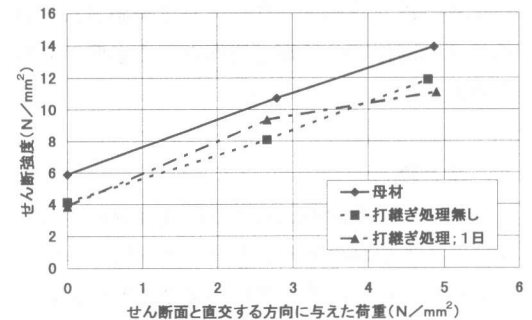


図-10 一面せん断試験結果 ( $f'_{ck}$ ; 50 N/mm<sup>2</sup>)

は、鉛直圧を与えない場合打継ぎ処理の有無に関わらずほぼ同等な値であり、母材強度に比べて約 30%低下する結果となった。

鉛直圧を与えた場合のせん断強度は、各ケースとも鉛直圧の増加に伴いかみ合わせの効果により増加し、鉛直圧が 5 N/mm<sup>2</sup>で鉛直圧を与えない場合に比べて 2~3 倍増加する結果となった。設計基準強度 80 N/mm<sup>2</sup>の場合、打継ぎ処理したケースではほぼ母材と同等の強度であったが、打継ぎ処理しない場合には 20~30%程度母材強度よりも低い結果であった。

一方、設計基準強度  $50\text{N}/\text{mm}^2$  の場合には鉛直圧を与えない場合と同様に、打継ぎ処理の有無にかかわらずほぼ同様な値を示す結果となった。また、母材強度と比較した場合、約 20% 低い結果となった。

## (2). 打継ぎ部の引張強度

打継ぎ部および母材の材齢 28 日における引張強度の試験結果を図-11 に示す。

図-11 から、打継ぎ処理を行わなかった場合、強度レベルに関係なくほぼ同様な値であった。また、母材強度と比較した場合には、約 60% の値であった。

打継ぎ処理を行った場合には、設計基準強度  $80\text{N}/\text{mm}^2$  において、処理を行わなかった場合に比べて若干増加するものの、母材強度の約 75% の強度であった。一方、設計基準強度  $50\text{N}/\text{mm}^2$  の場合には、打継ぎ処理を行わなかった場合と同様な値であった。

以上の結果から、打継ぎ部の一体性を確保するためには、普通コンクリートで実施されている場合と同程度の打継ぎ処理を行う必要があると考えられる。

## 4. まとめ

早期脱型と高流動化に伴う硬化遅延という相反する条件を満足するコンクリートについて、フレッシュ性状、若材齢時の強度特性および打継ぎ部のせん断特性や引張特性の検討を行った。本検討で得られた結果を以下に示す。

- ①. 低熱ポルトランドセメントおよびポリエーテル系の高性能 AE 減水剤の組合せによる高流動コンクリートの配合は、練上り温度および養生温度  $20^\circ\text{C}$  において、スランプフロー保持 2 時間および材齢 6 時間で  $0.1\text{N}/\text{mm}^2$  以上の圧縮強度を得ることができることを確認した。
- ②. 若材齢時の圧縮強度は、貫入抵抗値と高い相関関係があることから、貫入抵抗値は若材齢時の簡便な強度管理法として利用できる可能性のあることを確認した。

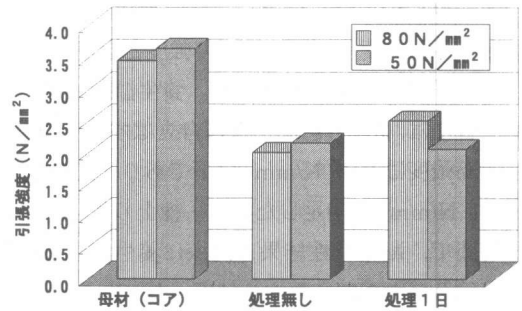


図-11 打継ぎ部の引張強度

- ③. 打継ぎ部のせん断強度は、打継ぎ処理の有無によって若干異なるものの、母材強度の 70%~80%、引張強度が 60% 程度であり、母材と同程度の強度を得るためには、入念な打継ぎ処理を実施する必要があると考えられる。今後は、低温時での強度特性の改善や発熱特性および温度ひび割れ抑制効果の確認等の検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 原田恒則：RC 塔状構造物施工におけるスリップフォーム自動化システム，建築施工ロボットシンポジウム予稿集，vol.10<sup>th</sup>, pp9-14, 1996
- 2) 酒井和吉：イズミット湾横断橋，スエズ運河橋，ラプラタ河口橋，橋梁と基礎，98-8，pp190-191, 1998
- 3) 定塚正行・佐取勘四郎：関越トンネル谷川立坑における覆工工事，セメント・コンクリート，vol.452, pp8-19, 1984
- 4) 一瀬賢一・中根淳・久保田昌吾：若材齢時における高強度コンクリートの現状，コンクリート工学年次論文報告集，vol.13, No.1, pp225-230, 1991
- 5) 水口和之・芦塚憲一郎・大塚一雄：高強度鉄筋，高強度コンクリートの高橋脚への活用，コンクリート工学，vol.36, No.11, pp37-40, 1998.11
- 6) 小松原徹・早川康之・坂田昇：高流動コンクリートの打継強度に関する一実験，土木学会第 49 回年次学術講演会第 V 部門，pp378-379, 1994
- 7) 岡田清・六車熙：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp281-282, 1981