

報告

[1046]  $f'_{ck}=1,000\text{kgf/cm}^2$ シリカフェーム超高強度コンクリートのPC橋への適用

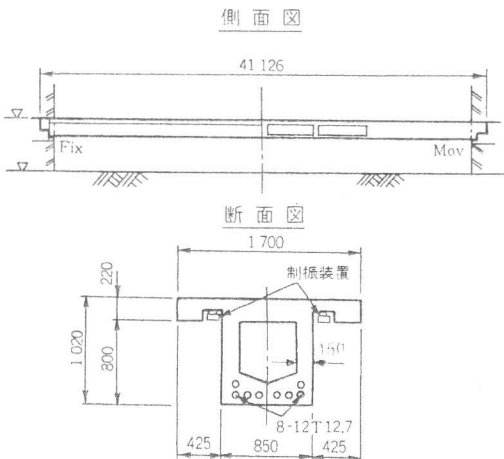
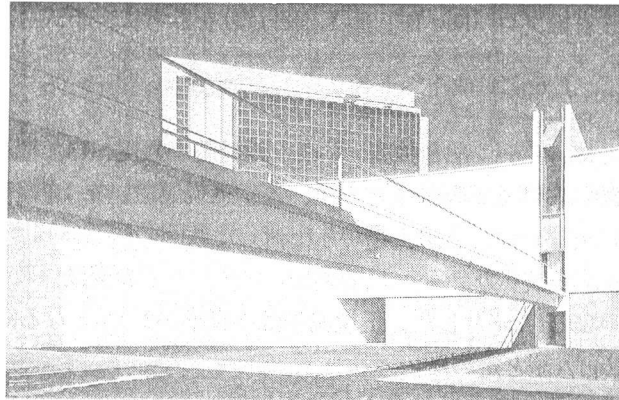
三井 健郎\*1・米澤 敏男\*2・横田 勉\*3・手塚 正道\*4

1. はじめに

超高層RC集合住宅の開発に端を発したコンクリートの高強度化技術は1980年代に急激な発展をみせ、今日では設計基準強度が400~600kgf/cm<sup>2</sup>クラスの高強度コンクリートの現場打設が可能となっている。これらのコンクリートは概ね水セメント比が30~40%の範囲にあるが、更に高強度化を図るために、水セメント比を30%以下とすると、コンクリートの粘性が極めて高くなり、流動性の経時変化が大きいなどの理由から、現場打設は困難であった。また高強度コンクリートの強度発現と流動性向上に効果の高い粉末シリカフェームは、貯蔵、搬送、計量が困難なことから生コンクリートプラントでの利用が制約されていた。こうした理由から設計基準強度が1,000kgf/cm<sup>2</sup>クラスの超高強度コンクリートを実際の構造物に適用することは従来の技術では困難であった。

筆者らは、粉末シリカフェームを生コンクリートプラントで利用する設備[1]を開発するとともに、水セメント比が20%と極めて小さい領域でもコンクリートに高い流動性を確保しその経時変化が小さい新しい超高強度コンクリート用の高性能減水剤[2]を開発することにより、現場打設可能な施工性を持つ設計基準強度1,000kgf/cm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートを実用化した。

PC橋CNTスーパーブリッジ(写真-1)は2棟の建物間を結ぶ連絡歩道橋であるが、外観デザイン上の理由から、約40mのスパンを橋脚なしで結ぶことが要求された。このためコンクリート構造物としては我国で最高強度となる設計基準強度1,000kgf/cm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートを適用することにより桁高スパン比1/40というコンクリート単純桁橋としては例のない極めてスレンダーな形状を実現することとした。本報告はこうした技術開発から可能になった設計基準強度1,000kgf/cm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートをプレストレストコンクリート橋に適用した例について、コンクリートの材料、配合、製造、及び施工時の品質について報告するものである。



2. プレストレストコンクリート橋の形状および設計の概要

本橋梁の構造一般図を図-1に示す。構造形式はポストテンション方式PC単純箱桁橋である。図-1に示すように桁長41.126mに対し桁高1.02mと桁高スパン比が約1/40となっている。断面は張出床版を有する箱型であり、スパン中央部分中空となっている。桁高スパン比の低減によるたわみ振動の増大に対しては、板状の制振装置を取り付けることによ

\*1(株)竹中工務店技術研究所, 工修(正会員), \*2(株)竹中工務店技術研究所主任研究員, Ph.D(正会員)

\*3オリエンタル建設(株)東京支店設計課長, (正会員), \*4オリエンタル建設(株)技術研究所主任研究員, (正会員)

り振幅の減少を図っている。

本橋の設計は日本道路協会「道路橋示方書」を基本に許容応力度法により行った。ただしコンクリートの許容応力度は $f'_{ck}=1,000\text{kgf/cm}^2$ の規定がないため、土木学会「高強度コンクリート設計施工指針(案)」を参考に表-1のように定めた。また室内実験の結果からコンクリートの材料定数を表-2のように定めた。

### 3. 超高強度コンクリートの配合及び製造

#### 3.1 配合強度設計

コンクリートの配合強度は土木学会コンクリート標準示方書等では、標準養生を行った材齢28日供試体強度で構造体の強度を代表するというのが基本的な考え方である。しかし設計基準強度 $1,000\text{kgf/cm}^2$ クラスの超高強度コンクリートはこれまで使用実績もなく標準養生が構造体強度を代表するというデータは十分ではない。一方高強度コンクリートの場合、セメントの水和発熱に伴う過大な温度上昇等の要因により、構造体コンクリート強度が標準養生供試体強度に比較して低下する可能性が指摘されている[3]。こうした理由から本橋梁では、コンクリートの配合強度は、材齢28日における構造体コンクリート強度と標準養生供試体強度との差を実験によって求め、建設省総プロ「New RC」施工指針(案)を参考に、下式(1)に基づいて定めた。

$$f'_{cr} \geq f'_{ck} + f_s + K\sigma \quad (1)$$

ここに、 $f'_{cr}$ ；配合強度、 $f'_{ck}$ ；設計基準強度、 $f_s$ ；構造体コンクリート強度と標準養生供試体の管理材齢における圧縮強度との差、 $K$ ；正規偏差、 $\sigma$ ；構造体コンクリート強度の標準偏差

$f_s$ 及び $\sigma$ は、当該工場から出荷した数回の構造体強度の実験結果及び約 $1,000\text{m}^3$ 出荷した配合強度 $865\text{kgf/cm}^2$ のシリカフェーム高強度コンクリートの変動係数の結果[4]を参考にそれぞれ、 $f_s=110\text{kgf/cm}^2$ 、 $\sigma=55\text{kgf/cm}^2$ とした。正規偏差は不良率が2.3%となる $K=2$ とした。これらの結果から配合強度を $f'_{cr}=1,220\text{kgf/cm}^2$ と定めた。

#### 3.2 配合条件および使用材料

コンクリートの配合条件は、所要の配合強度を満足し、かつ現場打設時の施工性を考慮して、スランプフロー $60 \pm 5\text{cm}$ 、空気量 $2.0 \pm 1.0\%$

とした。またコンクリートの粘性をL型フロー試験[5]により判定し、粘性を表す指標であるL型フロー初速度の目標値を $2.0\text{cm}$ 以上とした。特に今回の施工では打設サイトが生コンクリートプラントより約 $50\text{km}$ の遠隔地にあるため、練混ぜ後2時間以上の所定の品質の確保が要求された。

コンクリートの使用材料を表-3に、以上の条件より定めた配合を表-4に示す。シリカフェーム

表-1 コンクリートの許容応力度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

設計基準強度		400	600	800	1000
許容曲げ	プレストレス導入直後	180	220	250	270
圧縮応力度	静荷重・設計荷重時	140	180	210	230
許容曲げ引張応力度	プレストレス導入直後	-15	-21	-24	-26
	静荷重時	0	0	0	0
	設計荷重時	-15	-21	-24	-26

表-2 コンクリートの材料定数

圧縮強度	設計時	$1,000\text{kgf/cm}^2$
	緊張時	$650\text{kgf/cm}^2$
ヤング係数	設計時	$4.0 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$
	緊張時	$3.0 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$
クリープ係数		2.6
乾燥収縮度		$20 \times 10^{-5}$

表-3 使用材料

材料	品質
セメント	フライアッシュB種セメント
シリカフェーム	ノルウェー産・粉末シリカフェーム ( $\text{SiO}_2$ :93.7%、比表面積:15.5 $\text{m}^2/\text{g}$ 、比重:2.39)
細骨材	木更津産砂 (表乾比重:2.61、吸水率:1.53、FM:2.99)
粗骨材	石英系砕石 (表乾比重:2.63、吸水率:0.70、FM:6.63)
高性能A E減水剤	特殊ポリカルボン酸系

表-4 超高強度コンクリートの配合

水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位重量 ( $\text{kg/m}^3$ )					
		水	セメント	シリカフェーム	細骨材	粗骨材	高性能減水剤
20	47.3	135	574	101	748	836	14.24

は筆者らが定めた品質管理基準[4]に基づき、強度発現と流動性向上効果の優れたノルウェー産粉末シリカフュームを選択して用いた。化学混和剤は新規に開発した超高強度コンクリート用高性能減水剤(特殊ポリカルボン酸系)[2]を用いた。新高性能減水剤(SSP)と従来のナフタレン系高性能減水剤(NSF)を用いた場合のスランプフローとL型フロー初速度の経時変化の比較を行った実験の配合を表-5、結果を図-2に示す。

表-5 高性能減水剤性能比較実験のコンクリートの配合

水結合材比 (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )					高性能減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )	
	水	セメント	シリカフューム	細骨材	粗骨材	SSP	NSF
20	130	585	65	688	998	3.19*	12.29*

(\* 高性能減水剤の添加量は固形分換算)

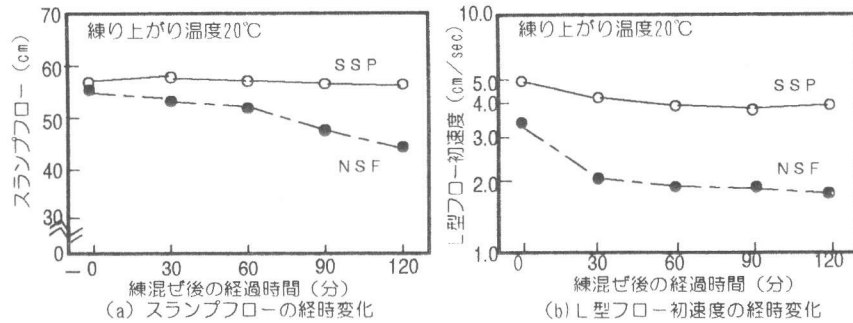


図-2 高性能減水剤の種類とコンクリートの経時変化

新しい高性能減水剤は従来のものより、L型フロー初速度が大きく、また2時間後までの経時変化が小さいことから、現場施工に適した良好な流動性の超高強度コンクリートが得られることがわかる。

### 3.3 コンクリートの製造

コンクリートの製造はシリカフュームコンクリートプラント[1]を設置した生コンクリートプラントで行った。ミキサはパン型強制練りミキサで、1バッチの練混ぜ量は1.0m<sup>3</sup>とし、図-3に示すサイクルで練混ぜた。練混ぜ時間の設定は、練混ぜ時間と練り上がったコンクリートの品質との関係及びその時のミキサの負荷電流の関係から負荷電流がほぼ一定となる70秒とした。これは当該工場のスランプ18cmの普通コンクリートの練混ぜ時間45秒に比べ約1.5倍の時間であった。

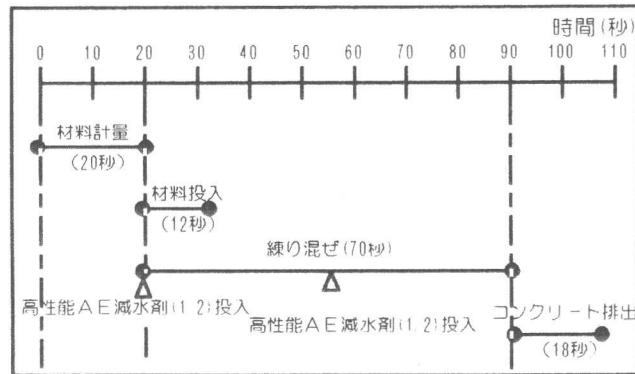


図-3 生コンクリートプラントでの練混ぜサイクル

## 4. 実大施工実験

### 4.1 実験の概要

実際の施工に先立って実構造物を模擬した試験体による現場施工実験を実施し、表-4に示した実工事に用いるものと同じの配合のコンクリートの製造から運搬、打設、養生までの一連の項目について確認を行い、フレッシュコンクリートの品質、施工性、強度発現等を試験した。施工実験における試験体の形状を図-4に示す。試験体の形状は、実構造物と同一の断面を持ち、長さは約1/10の4mとした。断面は実構造物のスパン中央部分を模した中空部分(a)及び端部を模した部分(b)より成り、鉄筋及びP C鋼材の配置は実構造物と同様とした。型枠の側面はアクリ

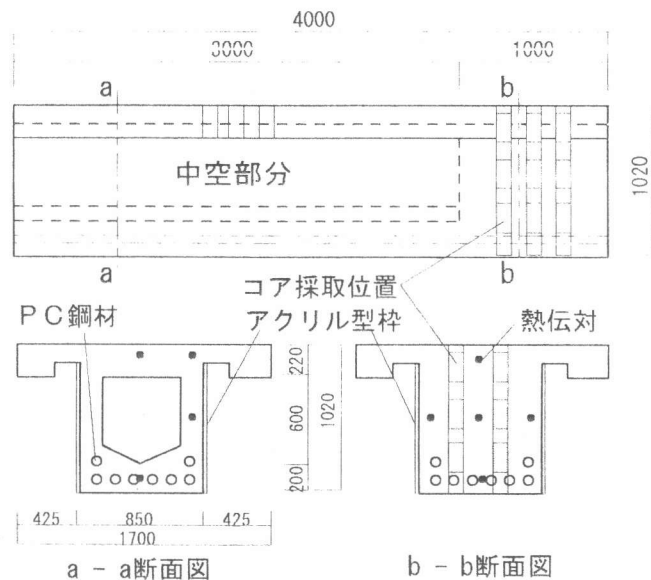


図-4 施工実験試験体の形状

ル製透明型枠とし、コンクリートの充填性を目視により確認した。超高強度コンクリートはブリーディングがないため、表面の急激な乾燥によりプラスチック収縮ひび割れが発生しやすい。そのため床面の仕上げ及び養生方法として、こて押さえ終了後床面から5cm程度上面を養生シートで覆ったもの、及びこて押さえ終了後も表面に水を噴霧し湿潤状態に保ったものの2種類について仕上がり状況を比較した。

コンクリートの打設は、バケツ（容量1.0m<sup>3</sup>）を用いて行った。打設方法は、コンクリートの流動性を確認する目的で、バケツを試験体端部に固定し、バケツの容量である1.0m<sup>3</sup>を全量排出後1分間静置し、30秒間棒状内部振動機により締め固めるサイクルを4回繰り返して、約4.0m<sup>3</sup>を打設した。

## 4.2 実験結果

### (1) フレッシュコンクリートの品質

フレッシュコンクリートの品質試験結果を表-6に示す。出荷から荷卸まで約100分が経過していたが、経時変化は小さく、ほぼ所要の品質を保持していた。これはシリカフェームによる流動性の向上に加えて、超高強度コンクリート用高性能減水剤の流動性保持効果によるものである。

### (2) コンクリートの充填性

バケツ排出後から1分間静置した後のコンクリート天端の勾配は約1/15と非常に小さく、型枠の他端まで達していた。特に断面が中空部分の底部はP C鋼材のシースが緊密に配置され振動機が入らない部分であるが、P C鋼材廻りへも密実に充填されていた。これによりコンクリートは十分な流動性と充填性を持つことが確認された。

### (3) 模型試験体の温度履歴

図-5には試験体表面部（コンクリート表面から50mmの深さ）及び中心部の温度履歴を示す。打設時のコンクリート温度は18.4℃であったがセメントの水和反応による発熱により、打設後31時間で中心部の温度は55℃に達している。一般に高強度コンクリートは単位セメント量が多いことから水和発熱により構造体内部の温度上昇量が大きくなるが、今回の配合では水結合材比が20%と低いにもかかわらず、新しい高性能減水剤により単位水量を135kg/m<sup>3</sup>と極めて小さくすることが可能となった結果、単位セメント量が低減され、温度上昇を低く押さえることができた。その結果後述するように、温度ひびわれは発生せず構造体の強度発現に与える影響も小さかったと考えられる。

### (4) コンクリート表面の仕上がり状況

コンクリート表面の養生方法として、こて押さえを終了した後養生シートで覆ったのみの部分はコンクリート表面からの急激な水分の逸散を防止できず、翌日には床面に亀甲状のプラスチック収縮ひび割れが発生した。このひび割れ深さは採取したコアの目視から表層部分に留まっていることが確認された。一方こて押さえ終了後もコンクリートの凝結が終結するまで水を表面に噴霧し、さらにその後水を含んだ養生マットを敷いて養生した部分はひび割れの発生はなかった。また型枠脱型後の側面もひび割れやじゃんか等の欠陥はみられず良好な仕上がりであった。

### (5) 硬化コンクリートの品質

図-6には荷卸時に採取した管理用供試体及び模擬試験体から採取したコアの圧縮強度試験結果を示す。コアは各材齢とも鉛直方向に2箇所採取したもののから6本作成したものの平均値とした。断熱養生は、

表-6 フレッシュコンクリートの試験結果

	経過時間 (分)	スラフ (cm)	フロー値 (cm*cm)		空気量 (%)	温度 (℃)	L70-試験	
			61.0	60.0			L70-長さ (cm)	L初速度 (cm/s)
出荷	0	26.0	61.0	60.0	2.1	18.0	62.0	10.63
荷卸	100	25.0	53.0	49.0	2.3	18.4	51.0	5.62

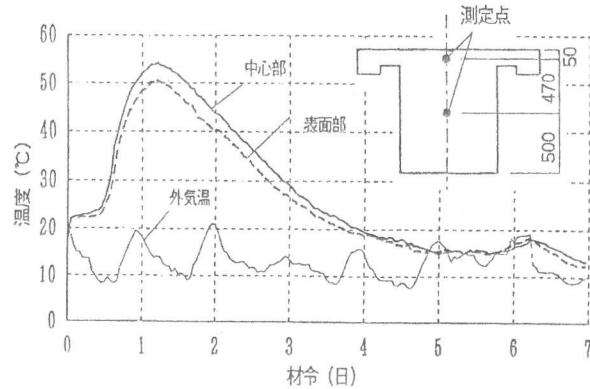


図-5 試験体の温度履歴

一辺40cmのコンクリートを断熱材で覆い模擬試験体中心部とほぼ同じ温度条件で養生したものである。

標準養生供試体の強度は材齢28日で1,120kgf/cm<sup>2</sup>、材齢91日で1,402kgf/cm<sup>2</sup>であった。コア強度は材齢28日で1,100kgf/cm<sup>2</sup>、材齢91日で1,210kgf/cm<sup>2</sup>と設計基準強度を満足する値であった。またコア強度の標準偏差は材齢28日で54.3kgf/cm<sup>2</sup>、材齢91日で37.4kgf/cm<sup>2</sup>であった。標準養生供試体強度とコア強度の強度差は材齢28日では20kgf/cm<sup>2</sup>と配合設計時に設定した値よりも小さかった。また、材齢91

日のコア強度は標準養生材齢28日強度よりも高い値となっている。高強度コンクリートでは、最高温度が約60°Cを越えると構造体の強度が材齢28日標準水中養生供試体に比較して低下することが指摘されている[3]が、今回の実験では模擬試験体の最高温度が比較的良かったことにより構造体強度の低下が小さかったと考えられる。また、コア強度と断熱養生供試体の強度はほぼ同程度であった。

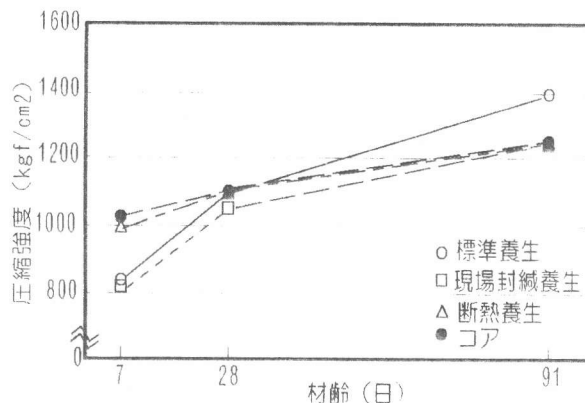


図-6 施工実験の圧縮強度試験結果

## 5. 実施工

### 5.1 コンクリートの実施工手順

本打設時のコンクリートの所要品質は施工実験と同様とした。コンクリートの打設状況を写真-2に示す。コンクリートの打設は容量1m<sup>3</sup>のバケット2台を用いて、橋梁の両端から中央に向かって順次移動しながら打設した。コンクリートは締め固め不要なほどの流動性を有していたが、充填性を確認しながら棒状内部振動機により締め固めた。これはコンクリートの過度の水平方向の押し流しによる分離を避け、PC鋼材廻りや支承部の補強材の密な部分の確実な充填と、施工中のコンクリートのコールドジョイントの発生を防止するためである。

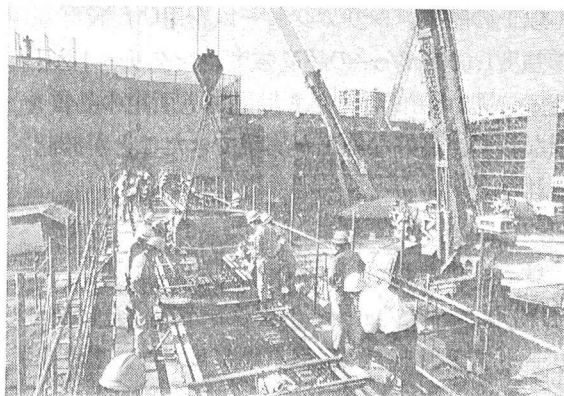


写真-2 コンクリートの打設状況

床面の仕上げは木ごて押さえであり、施工実験の結果から表面のプラスチック収縮ひび割れを防止するため、打設終了直後から水を噴霧し表面を湿潤状態に保った。水の噴霧はコンクリートの凝結が終結する約15時間まで行い、硬化後は材齢14日まで水を含ませた養生マットにより湿潤状態で養生した。型枠及び支保工の解体はプレストレスの導入に合わせて材齢5日で行ったが、材齢14日までは全体をシートで覆い養生した。プレストレスの導入は、標準養生供試体の強度が670kgf/cm<sup>2</sup>であることを確認し、材齢5日で行った。PC緊張の翌日にグラウト充填を行った。

### 5.2 コンクリートの施工結果

コンクリートの出荷時及び荷卸時の品質試験結果を図-7に示す。試験は15m<sup>3</sup>毎に実施した。コンクリートの運搬時間は約2.5時間と長時間であったが、施工実験時と同様、フレッシュコンクリートの品質の経時変化は小さく、すべての試験ロットで所定の品質を満足していた。

図-8には実施工時の圧縮強度試験結果を示す。プレストレス導入時の材齢5日の強度は標準養生で670kgf/cm<sup>2</sup>、現場封緘養生で618kgf/cm<sup>2</sup>が得られた。標準養生供試体の強度は材齢28日で1,169kgf/cm<sup>2</sup>と配合強度よりは約40kgf/cm<sup>2</sup>小さい値ではあったが、材齢91日で1,343kgf/cm<sup>2</sup>と十分な強度が得られた。また構造体とほぼ同程度の温度で養生された断熱養生供試体強度は材齢91日で約1,120kgf/cm<sup>2</sup>と設計基準強度を満足する十分な強度が得られ、配合計画で想定したものと同程度の強度であった。



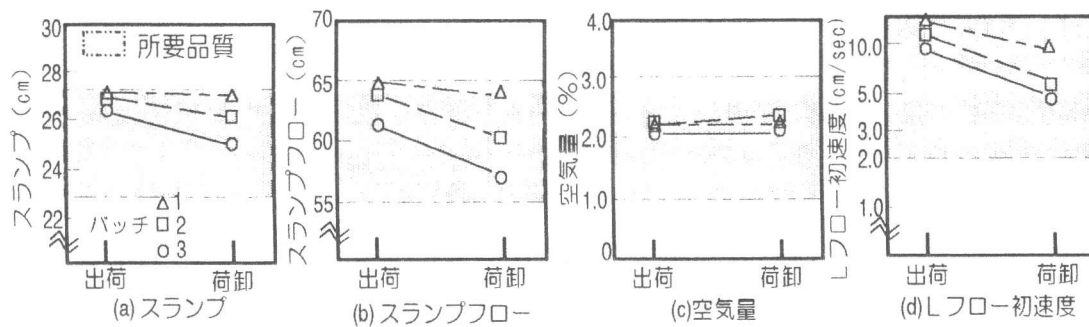


図-7 フレッシュコンクリートの品質 (本施工)

コンクリートの仕上がり状況は床面、側面ともひび割れの発生は全く見られず、養生方法が適切であったことが確認された。またコールドジョイントやじゃんか等もなく型枠内への充填性も良好であった。

以上の結果、シリカフェームを用いた設計基準強度 $1,000\text{kgf}/\text{cm}^2$ の超高強度コンクリートが、運搬時間2.5時間という長時間でも所定の品質を損なわず、良好な施工が実現できたことが確認された。

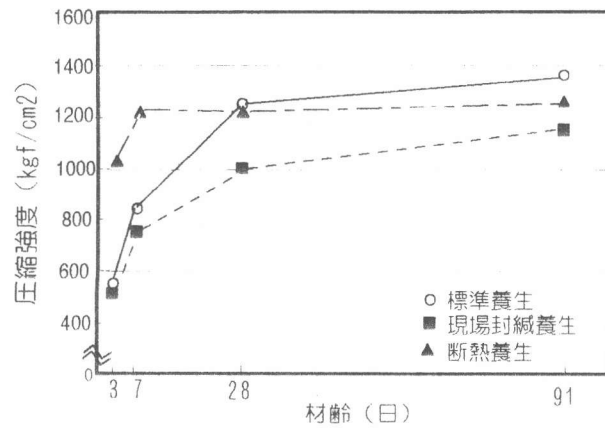


図-8 圧縮強度試験結果 (本施工)

## 6. まとめ

- (1) 粉末シリカフェームのプラント設備及び超高強度コンクリート用高性能減水剤の開発により生コンクリートプラントで、現場打設が可能な流動性を持った設計基準強度 $1,000\text{kgf}/\text{cm}^2$ の超高強度コンクリートが製造・出荷ができた。
- (2) 新高性能減水剤により、超高強度コンクリートは、運搬時間が2.5時間でも、品質の経時変化は小さく、現場打設できる流動性を保持することができた。また、材齢5日でのプレストレス導入、及び材齢28日で構造体コンクリート強度が設計基準強度を満足する十分な強度発現が得られた。
- (3) 設計基準強度 $1,000\text{kgf}/\text{cm}^2$ という現在わが国の現場打設コンクリート構造物では最高の強度の超高強度コンクリートの使用により、桁高スパン比1/40というスレンダーな橋梁の現場施工が実現できた。

(謝辞) 本橋梁の設計・施工を実現した各種技術の開発は、筆者らの他、三菱マテリアル(株)、京浜菱光コンクリート工業(株)、竹本油脂(株)、その他多くの関係者の共同の成果によるものである。本橋の施工とシリカフェームの利用技術に関して、東京工業大学長瀧重義教授、横浜国立大学池田尚治教授、東京大学友澤史紀教授に貴重な御助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 佐藤光男、大浦鉄男、奥野亨、米澤敏男、シリカフェーム高強度コンクリート用生コンクリートプラントの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、pp75-80、1993
- 2) 木之下光男、下野敏秀、米澤敏男、三井健郎、超高強度コンクリート用高性能減水剤の性質、コンクリート工学年次論文報告集、1994
- 3) 栴田佳寛、高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度管理方法に関する考察、日本建築学会学術講演梗概集、pp837-838、1991
- 4) 米澤敏男、奥野亨、三井健郎、沼倉紀章、大浦鉄男、佐藤光男、シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの鋼管圧入施工、コンクリート工学、Vol. 31、No. 12、pp22-33、1993
- 5) 米澤敏男、和泉意登志、三井健郎、奥野亨、高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型フロー試験法による研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11、pp171-176、1989