

## 高性能コンクリートの共同研究とPC桁橋の試験施工

緒方 紀夫\*1・木曾 茂\*2・浅井 洋\*3・井手 一雄\*4

### 1. はじめに

JH 日本道路公団において汎用的に使用されているコンクリートは、JH の土木工事共通仕様書において十数種に分類されるが、この中で最も高い性能を要求しているコンクリートの種別は、PC 構造物に用いる P<sub>2-2</sub> コンクリートである。その要求性能は設計基準強度（材齢 28 日の圧縮強度）400 kgf/cm<sup>2</sup>、プレストレス導入時の圧縮強度（一般的に材齢 3 日程度）325 kgf/cm<sup>2</sup> およびフレッシュコンクリートのスランプ 8 cm などである。

JH 試験研究所と民間 4 社で共同研究を進めてきた高性能コンクリートとは、P<sub>2-2</sub> コンクリートよりさらに高い複数の性能および機能（締固め不要、高強度、高耐久性）を併せもち、その他のプレストレス導入時の圧縮強度などについても同等以上のコンクリートを言う。

このような複数の高い性能を併せもつことにより、設計面ではフレッシュコンクリートのワーカビリティおよび設計基準強度等から配筋・断面寸法に制約を受けていたが、新しい PC 構造の設計が可能となる。また、締固め不要性能および高耐久性を有することにより、施工の省力化およびランニングコストを含めたトータルコストの低減が可能となる。

共同研究は前述したような高性能コンクリートが汎用的に使用できることを目的として、混和材料を変えた 3 タイプのコンクリートの開発、高速道路 PC 桁橋の試験施工および技術基準の確立を目指して平成 4 年度から 3 ヶ年の期間で実施した。

ここでは、共同研究の一環として平成 5 年度に実施したシリカフェームを使用した高性能コンクリートの現場試験施工の結果について報告する。

### 2. 現場試験施工の概要

現場試験施工は、実機プラントミキサの練混ぜ時間を決定するための練混ぜ性能試験から高速道路の PC 桁橋の施工まで図-1 のフローで実施した。

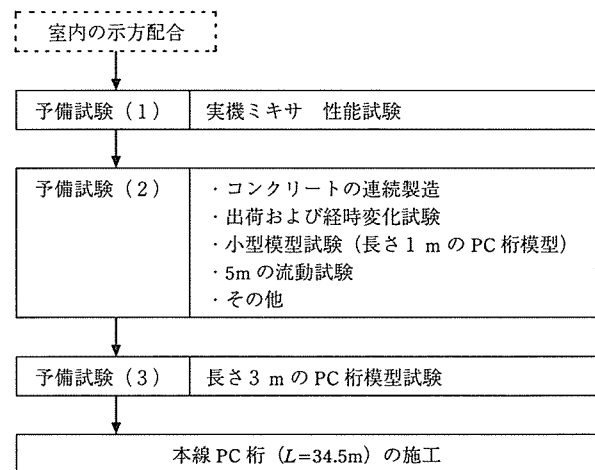


図-1 現場試験施工の流れ

#### 2.1 現場試験施工箇所

##### (1) レディミクストコンクリート工場

- ・ヤマガミ生コン工場（福島県田村郡船引町）  
ミキサ：二軸強制練スパイラルフローミキサ  
ミキサ容量：2.0 m<sup>3</sup>

##### (2) 工事名および工事概要

- 磐越自動車道 新館高架橋他 1 橋（PC 上部工）工事（福島県田村郡船引町）  
ポストテンション I 桁 [L=34.5 m (標準)]  
44 本（内 1 径間分 4 本を試験施工）

#### 2.2 使用材料

セメントは、JH の PC 橋梁工事において早期強度を得るために早強ポルトランドセメントを使用しているが、本コンクリートの場合には、普通ポルトランドセ

\*1 Norio OGATA : 日本道路公団 試験研究所橋梁研究室 室長

\*2 Shigeru KISO : 日本道路公団 試験研究所橋梁研究室 主任

\*3 Hiroshi ASAI : 住友建設(株) 土木本部 土木部主任

\*4 Kazuo IDE : 三井建設(株) 技術研究所

◇研究報告◇

ントで要求強度を満足できるので、普通ポルトランドセメントを使用した。

本試験施工に使用するその他の材料については、混和材料を除き、PC 橋梁工事で用いられている材料を使用した。

セメント：普通ポルトランドセメント（比重；3.15, 比表面積；3 290 cm<sup>2</sup>/g）

細骨材：いわき市大久町産山砂（比重；2.58, 粗粒率；2.59, 実績率；68.5）

粗骨材：福島県双葉郡富岡町産碎石（比重；2.72, 粗粒率；6.87, 実績率；61.6）

シリカフューム：比重；2.18, 比表面積；18~20 m<sup>2</sup>/g

高性能 AE 減水剤：芳香族アミノスルホン酸系

2.3 コンクリートの性能と示方配合の決定

高性能コンクリートと従来の P<sub>2-2</sub> コンクリートの物性・性能比較試験結果を表-1 に示す。

示方配合は、単位骨材容積量のみを変動させた配合および単位骨材容積量を一定とし、各材料の単位量をパラメータとした配合から決定した。室内試験で決定した示方配合および PC 桁のコンクリートに用いた現場配合を表-2 に示す。

2.4 コンクリートの製造および試験方法

コンクリートの製造は、プラントミキサでの 1 回の練

混ぜ量を 1.5 m<sup>3</sup>/バッチとした。練混ぜ後、ミキサからアジテータ車に排出したので、プラントでの試験はアジテータ車から試料を採取した。

現場までの運搬時間は約 20 分を要するが、現場での試験は、主に現場着直後、練混ぜ 60 分後およびポンプ圧送後のフレッシュコンクリートについて試験した。

予備試験および PC 桁のコンクリート施工で実施した試験項目および方法を表-3 に示す。

V ロート試験について、ここでは粗骨材最大寸法 G<sub>max</sub>=25 mm を用いているが、20 mm のものと比べて流出口付近で粗骨材どうしが接触し合って流下時間が長くなる傾向にあった。同じ V ロートの流下時間であっても、粘性が大きなものと、粘性は小さくても粗骨材がかみ合って流下時間が前者と同じになる場合があるので注意が必要であった。

3. 現場試験施工の結果

3.1 予備試験結果

(1) 実機ミキサ性能試験

予備試験 (1) の実機ミキサ性能試験において、室内試験で定めた表-2 に示す示方配合と同じフレッシュ性状を確保するために、単位水量を +7.0 kg/m<sup>3</sup> および高性能 AE 減水剤を粉体質量（セメント+シリカフューム）の 1.7 % から 1.9 % に増加させて配合を修正し、

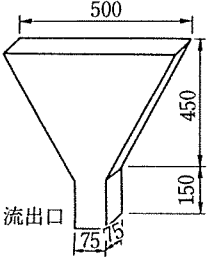
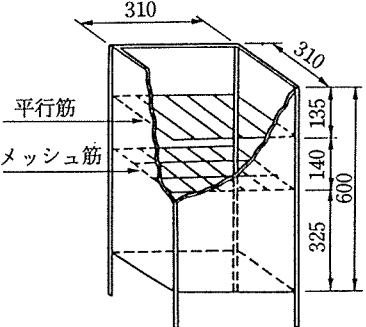
表-1 コンクリートの物性、性能比較

項目	種別	高性能コンクリート	従来コンクリート (P <sub>2-2</sub> )	備考
		ブリーディング率	0	
凝結時間 (min)	始発	450	270	
	終結	530	350	
断熱温度上昇 (°C)		70.6	78.3	
圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		799	547	材齢 28 日
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		62	36	〃
静弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )		3.86×10 <sup>5</sup>	3.38×10 <sup>5</sup>	〃
乾燥収縮	長さ変化	386×10 <sup>-6</sup>	535×10 <sup>-6</sup>	35 週
	重量変化 (%)	0.64	0.93	
クリープひずみ		396×10 <sup>-6</sup>	418×10 <sup>-6</sup>	42 週
凍結融解抵抗性 (相対動弾性係数 %)		98	97	
促進塩分浸透性 (mm)		6	18	コア供試体使用 「3 % NaCl, 20°C 浸漬 3 日 ; 20°C, 60 % 乾燥 4 日」を 16 サイクル

表-2 室内試験で決定した示方配合

項目	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプフローの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水結合材比 W/(C+SF) (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	シリカフューム SF	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤
示方配合	25	60±5	4.5±1.0	30.1	50	154	475	36	815	856	8.69
PC 桁に使用した現場配合	25	65±5	2.0~4.0	31.6	50	161	473	36	811	854	11.20

表-3 コンクリート品質試験の項目および方法

試験項目	試験方法
スランプフロー試験	土木学会規準「コンクリートのスランプフロー試験方法(案)(JSCB-1990)」に準ずる。
空気量試験	JIS A 1128「まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法)」に準ずる。
Vロート試験	<p>東京大学工学部土木工学科コンクリート研究室において考案された試験であり、下図に示す形状のロートを用いて行う。試験方法は、ロートにコンクリートを充填したのち、流出口に設置した扉を開き、流出口からコンクリートを自重により流出させ、流出に要する時間を測定するものである。</p> 
二段配筋通過試験	<p>約 30 l のコンクリートを上面幅 40×40 cm、高さ 40 cm、流出口 12×12 cm のロートを用いて、下図の装置を通過させる。上側平行筋純間隔 48 mm、下部メッシュ筋純間隔 63 mm である。PC 桁に使用するコンクリートは、この装置を全量通過することを条件とする (JH 考案装置)。</p> 
圧縮強度試験	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強さ試験方法」に準ずる。

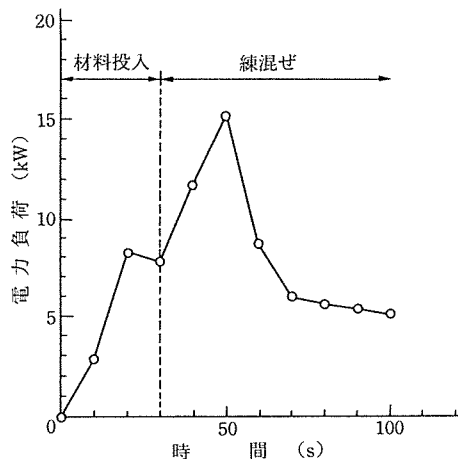


図-2 ミキサ電力負荷と練混ぜ時間の関係

これを現場配合とした。

練混ぜ時間については、ミキサ電力負荷と練混ぜ時間の関係からこれを求めたが、この関係を図-2 に示す。製造時の材料投入は、細骨材、セメント、シリカフェーム、水、高性能 AE 減水剤および粗骨材の順に 30 秒の間に投入した。図-2 によれば、全材料投入後 20 秒過ぎに電力負荷は最大となり、その後の負荷は低下しているが、全材料投入後 40 秒以降の低下はわずかである。

全材料投入後 60 秒間練り混ぜて、コンクリートの練混ぜ性能試験 (JIS A 1119) を実施したが、その結果は次のとおりであった。コンクリート中のモルタルの単位容積質量差およびコンクリート中の粗骨材量の差は、許容値がそれぞれ 0.8 %、5 % に対して 0.11 %、0.84 % であり、P<sub>2-2</sub> コンクリートと同じく 60 秒間の練混ぜで、均一に練混ぜできると判断した。一般的に、この種の高性能コンクリートは、従来のコンクリートと比べ負荷が大きく、練混ぜ時間が長くなるが、近年はミキサ性能も向上しているので同程度の練混ぜ時間となったと考えられる。

(2) 流動性試験および模型試験結果

(a) 製造時のフレッシュコンクリートの性状

予備試験 (2) および (3) の流動性試験および模型試験における製造直後のフレッシュコンクリートについて、各製造ごと (アジテータ車ごと) のスランプフローおよび空気量の変動を図-3 に示す。

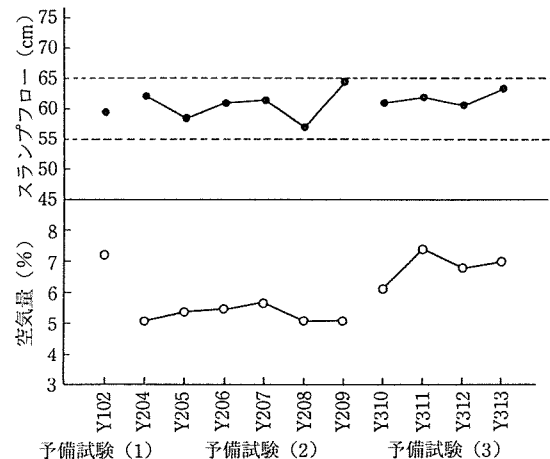


図-3 コンクリート製造時におけるスランプフローおよび空気量の変動

スランプフローの変動は、目標値 60 cm に対して全製造日の平均値が 60.9 cm、標準偏差 2.0 cm であり、バラツキは非常に小さく、均一な流動性を持つコンクリートの製造が可能であった。

空気量については、製造日ごとに AE 助剤の添加量を変えて空気量を変化させているので、全数を比較する

#### ◇研究報告◇

ことはできないが、製造日ごとのバラツキは小さい。

#### (b) フレッシュコンクリートの経時変化

予備試験(2)において、製造後60分間の現場据置きによるスランプフローの経時ロスが4 cm程度あり、その後のポンプ圧送では6~10 cmの圧送ロスがみられた。そこで、予備試験(3)においては、高性能AE減水剤の添加量を粉体質量の1.9%から2.2%に変更したので、経時ロスおよびポンプ圧送ロスはほとんどみられなかった。これについて、スランプフローを保持するために必要な最小添加量が存在し、これに満たない場合には大きなロスが生じるものと考えられた。

空気量は、予備試験(2)において、大きな経時ロスとポンプ圧送ロスがみられたので、予備試験(3)においてAE助剤の量を増加して製造時の空気量を5%から7%に変更したが、ポンプ圧送後には予備試験(2)と同程度の2.5~3.0%の空気量となった。

そこで、凍結融解試験を行い、問題がないことを確認して空気量を2.0~4.0%の範囲とした。このような高強度コンクリートでは、空気量を2.0%程度に設定した事例もある。

#### (c) 硬化コンクリートの圧縮強度

プラントで出荷前に試料採取し、標準養生した供試体は、材齢3日で400 kgf/cm<sup>2</sup>以上となり、材齢28日では700 kgf/cm<sup>2</sup>以上となった。

現場で採取して現場養生した供試体は、冬季であることから材齢28日で600 kgf/cm<sup>2</sup>程度であったが、P<sub>2-2</sub>コンクリートの材齢28日強度505 kgf/cm<sup>2</sup>を上回った。

#### (d) 流動性試験結果

予備試験(2)において、練混ぜ後約80分経過したコンクリートをポンプ圧送した後、70 cm幅の矩形断面の型枠内を5.0 m流動させた。経時ロスとポンプ圧送ロスにより、流動前にスランプフローは41 cmに低下していたが、写真-1に示すように5.0 mを流動させることができた。



写真-1 5 mの流動試験〔予備試験(2)〕

5.0 m流動後のスランプフローのロスは1.5 cmであり、空気量の変化はなかった。洗い試験の結果、生コンプラントで採取したコンクリートの単位粗骨材量を100とした場合、5.0 mの流動後のそれは101であり、材料分離がなかったと考えられる。圧縮強度は、流動後が流動前のコンクリートと比べて8%程度大きかった。

#### (e) 模型試験結果

予備試験(3)では、写真-2に示す実物大断面の長さ3.0 m模型供試体に、締固めを行わない高性能コンクリートの打込み試験を行ったが、型枠の隅々まで密実に充填できたことが、透明の亚克力型枠を通した打込み時の目視観察および硬化コンクリートから採取したコアによって確認できた。

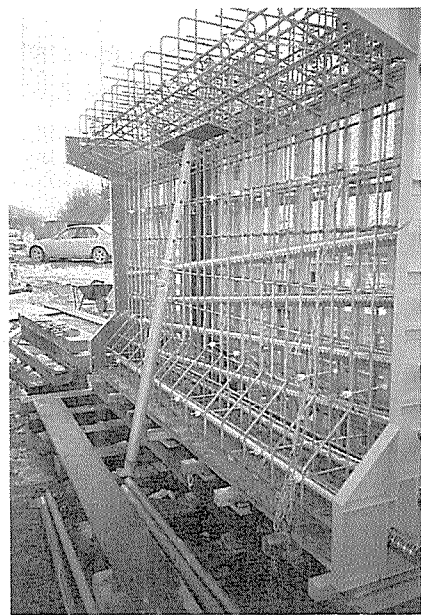


写真-2 予備試験(3)に用いた模型供試体

しかし、棒状バイブレーター等により振動を与えないので、表面の気泡跡は、従来のコンクリートより多くなった。また、一つの気泡跡の表面積も大きかった。表面の気泡跡を少なくするために、型枠剥離剤の種類を変えた試験並びに打込み方法(型枠に添わせてコンクリートを流し込む等)および打込み速度(10 m<sup>3</sup>/hr~20 m<sup>3</sup>/hr)を変えた試験を追加して実施したが、コンクリート表面にできる気泡跡の差は認められなかった。なお、型枠に添わせてコンクリートを流し込んだ場合には、流し込み箇所型枠に付着したコンクリートが先に硬化して、他の部分と色が違うためにコンクリート表面の見栄えが悪くなった。

#### (3) PC桁のコンクリート施工

予備試験完了後、締固めを必要としない高性能コンクリートを用いてL=34.5 mのPCポストテンションI桁を1径間分4本施工した。これらの結果について以下に

述べる。

(a) コンクリートの品質性状

桁1本当りのコンクリート量は約35 m<sup>3</sup>であり、これをアジテータ車9台で運搬した。フレッシュコンクリートの試験については、アジテータ車1台ごとに出荷前、現場着直後およびポンプ筒先で試料採取して試験した。これらの結果を図-4に示す。

スランプフローの平均値および標準偏差は、生コンプラント：63.4 cm；1.64 cm，現場着後：64.8 cm；2.47 cm，ポンプ筒先：63.8 cm；2.47 cmとなっており、製造時のバラツキは非常に小さいが、現場着後およびポンプ筒先ではそれに比べて大きくなっている。

スランプフローの経時変化については、生コンプラントから現場までの約20分の運搬で平均1 cm程度大きくなっており、ポンプ圧送では平均1 cm程度の圧送ロ

スが生じている。スランプフローの経時変化および圧送ロス量は許容範囲内にあると言える。

空気量の平均値は、生コンプラント：5.6%，現場着後：5.7%，ポンプ筒先：2.8%であった。運搬中の変化はほとんど見られなかったが、ポンプ圧送後は予備試験と同様に3%以下となった。また、圧送後の標準偏差は0.43%であり、圧送前の値に関係なく、圧送後はほぼ一定の値に低下していることがわかる。

Vロートの流下時間については、試験を2回実施し、2回目の値を採用しているが、生コンプラントおよび現場着後の平均値は9秒台のほとんど同じ値であるが、ポンプ筒先では8秒程度となっており、粘性がやや小さくなっている。

硬化コンクリートの圧縮強度試験結果と標準偏差は、生コンプラントで試料採取したものが材齢3日：459 kgf/cm<sup>2</sup>；77 kgf/cm<sup>2</sup>，材齢28日：701 kgf/cm<sup>2</sup>；52 kgf/cm<sup>2</sup>，ポンプ筒先で採取したものが材齢3日：541 kgf/cm<sup>2</sup>；41 kgf/cm<sup>2</sup>，材齢28日：768 kgf/cm<sup>2</sup>；29 kgf/cm<sup>2</sup>であり、高強度となっている。ポンプ筒先で採取したものが生コンプラントで採取したものより強度が大きく、標準偏差が小さいことは、空気量の減少の影響と考えられる。

(b) PC桁のコンクリート施工

ポストテンションPC桁のコンクリート施工は、鉄筋、PC鋼材を配置して、鋼製型枠が組み立てられた桁長34.5 mの中央部横にブーム式のポンプ車を配置し、ポンプ打設した。打込み箇所は、桁を長さ方向に4等分した箇所にある中間横桁取付け部と両端部の5か所とした。当初、打込み高さを低くするため中間横桁取付け箇所の側面に開口部を設け、そこにポンプ筒先を挿入して打込みを計画したが、この準備と移動に1か所当たり20分程度要するため、打込みはすべて上フランジ上面からとした。

コンクリートの打込み順序は、①下フランジ下部→②下フランジテーパ部→③ウェブ下1/2→④ウェブ上1/2→⑤上フランジの順序とした。ポンプ筒先の移動は、コンクリートの流動距離が長くなって材料分離が起こらないように、流動状況を見ながら定められた打込み位置へ移動させた。

一般に、締め固め不要コンクリートは、打込み中に巻き込んだ気泡が振動を与えないために抜け難いので、ポンプ筒先はなるべく下フランジに近い位置まで下げて打込みを行い、気泡の巻き込み量を少なくした。また、打上がり速度が速いと、打込み中に巻き込んだ気泡が抜けないので、打上がり速度にも注意した。型枠を外した後のコンクリート表面に発生した気泡跡は、予備試験と同様に従来のコンクリートより多かった。また、図-5に示す

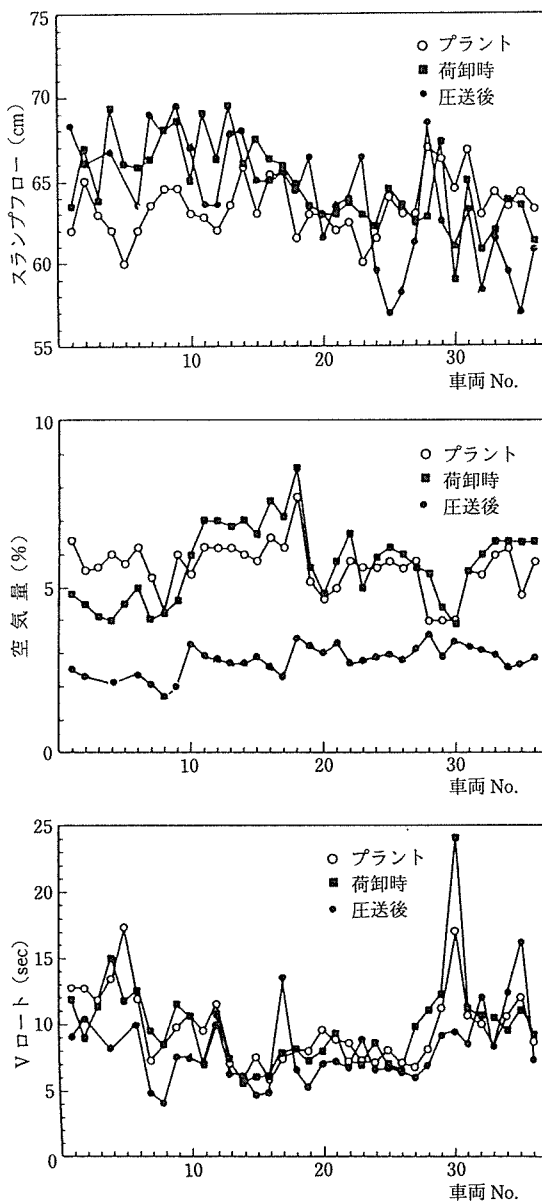


図-4 PC桁に使用した高性能コンクリートの試験結果

◇研究報告◇

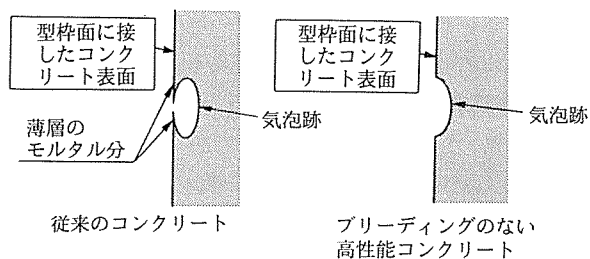


図-5 型枠に接したコンクリート表面の気泡跡のでき方

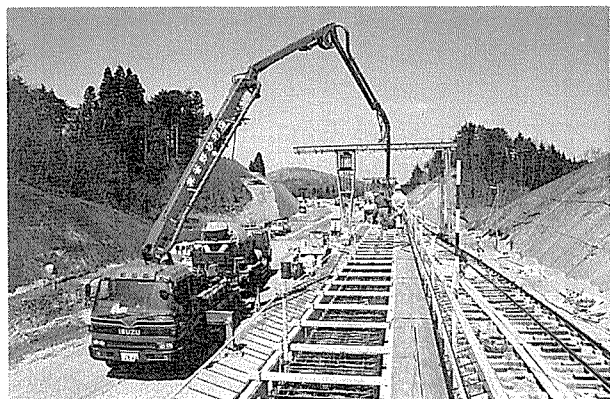


写真-3 高性能コンクリートのPC桁への打込み状況

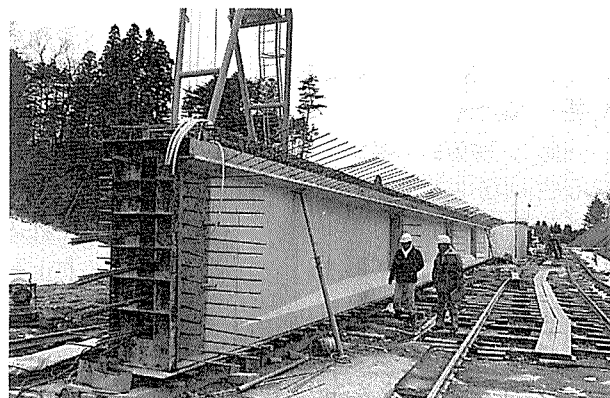


写真-4 締固め不要の高性能コンクリートを用いたPC桁

ように、従来のコンクリートでは型枠面と接する部分に薄いモルタルの膜ができて気泡径が小さく見えるが、ブリーディングの全く生じない高性能コンクリートではこのようなことがないので、見た目にも気泡跡が大きく見えるが、耐久性に問題があるようなものではない。

打込み後の表面仕上げについて、高性能コンクリートはブリーディングが全く生じないので表面の仕上げがやや難しく、プラスチックひび割れを生じやすいので、仕上げ後には直ちに被膜養生等を行う必要があった。長所として、従来のコンクリートでは、表面のレタンス処理が必要であるが、高性能コンクリートはブリーディングが全く生じないのでその必要は無いと考えられる。

#### 4. 現場試験施工のまとめ

高性能コンクリートを用いた現場での予備試験およびPC桁の試験施工の結果から次のことが言える。

- 1) ここで定義するような自己充填性能等を有する高性能コンクリートを生コンプラントにおいて、許容できる小さな品質のバラツキの範囲で製造することが可能である。
- 2) 練混ぜ時間については従来のコンクリートと同じであり、製造能力も同等と考えられる。
- 3) フレッシュコンクリートのスランプフローについて、経時変化およびポンプ圧送ロス、所定量の高性能AE減水剤の添加で小さくすることができる。
- 4) 空気量のポンプ圧送ロスは、今後、原因を究明し、適切な高性能AE減水剤の選定を行う必要があると考えられる。
- 5) 締固めを行うことなくPC桁にコンクリートを充填でき、欠陥部のない密実なコンクリートが得られた。
- 6) コンクリート表面の型枠に接する部分にできる気泡跡は、従来のコンクリートより多く、径も大きいですが、耐久性に問題があるようなものではない。

#### 5. おわりに

高性能コンクリートの現場試験およびPC桁の試験施工の結果について述べてきたが、今後、高性能コンクリートの施工マニュアルを作成し、汎用的に高性能コンクリートが使用できるようにしたいと考えている。

最後に、共同研究と本試験施工を進めるに当たって本共同研究の技術検討会委員長 東京大学工学部 岡村甫教授ならびに委員各位には貴重な御助言、御援助を賜り、ここに深謝の意を表す。

現場試験施工を実施したシリカフェームを用いた高性能コンクリートは、JHと住友建設(株)・三井建設(株)との共同研究である。 【1994年11月21日受付】