

吊橋主塔基礎コンクリートの 大深度逆打ち施工での品質向上の研究

熊谷勝弘*・高橋守人**・青木 茂***・
十河茂幸****

白鳥大橋第3橋脚基礎本体の施工において、深さ76mにおよぶ未だ事例のない大深度の逆打ち施工が採用された。基礎本体のうち、側壁コンクリートにおいては逆打ち各ロット毎の打継部の一体化が、また底版コンクリートにおいては高落差のポンプ圧送性の確保が課題となった。そこで、これらのコンクリートについて各種混和材料を用いた配合改善を行い、その適用性を各種試験により事前に評価した。本論文は各種試験により得られた知見と施工結果について述べるものである。

Key Words: *inversely casting concrete, construction joint, filling capacity, vertical conveying, pumpability*

1. まえがき

白鳥大橋は、一般国道37号室蘭港に架かる図-1に示す中央径間720m、全長1,380mの側塔付き2ヒンジ補剛箱桁吊橋である。本橋は室蘭港を南北に横断し都市内環状道路網を形成し室蘭市の都市機能の拡充を図るとともに、北海道縦貫自動車道と連結し圏域の広域化と活性化を図ることを目的として計画された。1983年から吊橋構造形式の検討にとりかかり、1985年に着工し現在はケーブルの架設工事が行なわれている。

本橋の特徴は積雪寒冷地に架設される我が国初の長大吊橋であるとともに、主塔基礎の支持層は図-1に示すようにTP-73m(陣屋側主塔基礎(3P))、TP-57m(祝津側主塔基礎(4P))と非常に深いため、基礎本体を構築する仮設工として大深度地中連続壁を利用し、内部掘削と平行して基礎本体側壁を構築する逆打ち工法を採用したことにあつた。逆打ち工法の適用により、内部掘削時の大深度土留壁の安全性と全体工期の短縮化が図られたが、ここで用いた逆打ちコンクリートには、側壁の各ロット毎の打継部の一体化および底版コンクリートには地盤面より76mの深部への高落差のポンプ圧送性の問題点があった。これを解決するため施工に先立ち、これらのコンクリートの配合検討が必要と考えた。

従来より逆打ちコンクリートに、ブリーディングの低減を図るための水溶性高分子(以下分離低減剤と呼ぶ)と発泡により膨張性を付与するためのアルミ粉末(以下膨張剤と呼ぶ)を適用し打継部の一体化を図った報告^{1)・2)}はあるが、本稿ではこれらを併用しかつ高流動化させたコンクリート(以下「逆打ち用高流動コンク

リート」と呼ぶ)を施工することとした。このような施工例³⁾は少なく、さらに逆打ち用高流動コンクリートを本工事のような寒冷地でかつ冬期に施工した事例はほとんどない。そこで筆者らは、逆打ち用高流動コンクリートの低温領域での膨張性状や強度発現性状、小型逆打ちモデルによる打継部の一体化などを諸試験により事前に把握し、壁体のコア状況、品質管理結果、施工時のポンプ圧送性などによりその有用性を確認した。また最深部の底版に打設されるコンクリートは地盤面以下76mの高落差ポンプ圧送となるため、圧送中での加圧脱水に起因する管内閉塞が危惧された。これに対し、「土木学会・コンクリートのポンプ施工指針」⁴⁾では細骨材の0.3mm以下の微粒分を大きくするなど単位微粒末量を多くすることが加圧ブリーディング低減に有効であるとしているが、微粒末の種類によっては水和熱の増大を招くことになる。そこで不活性な範ちゅうにある石灰石粉(以下「石粉」と呼ぶ)を加圧ブリーディング低減のための微粒末材料として用いることとした。しかし、このような目的で石粉を混入した事例が少ないため、石粉混入コンクリートの諸性状について事前に検討を行い、施工時の圧送状況や管内圧力損失量などについて調査を行った。以下、配合検討結果と施工結果を詳述する。

2. 主塔基礎の構造とコンクリートの打設手順

(1) 主塔基礎の構造

2基ある主塔のうち、支持層が最も深い3Pの基礎構造を図-2に示す。主塔基礎の構成部材は地中連続壁、側壁、底版、隔壁、頂版である。大深度の止水・土留壁となる地中連続壁の寸法は、壁厚1.5m、内径34m、壁厚106mである。本体側壁は、地中連続壁完成後、壁内をドライ状態にし、内部土砂を掘削して陸上に搬出し、所定の深度毎に逆打ちで順次構築する。側壁の寸法は、壁厚2.0m、内径30m、壁高さ47mであり、単位ロット6mの高さで施工される。単位ロットのうち上部約0.9mは打継部の一体化が要求されるコンクリート(以下「打継部

*正会員 工修 北海道開発局 局長官房 開発調整課長
(〒060 札幌市北区北8条西2丁目1番1)

**正会員 北海道開発局 室蘭開発建設部
室蘭道路事務所 副所長

***正会員 大林組技術研究所 主任研究員

****正会員 工博 大林組技術研究所 主任研究員

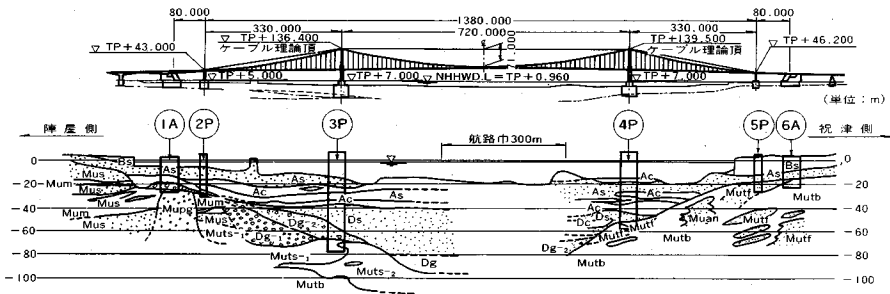


図-1 白鳥大橋全体一般図および地質構成図

コンクリート」と呼ぶ)であり、下部約5.1mは普通コンクリート(以下「一般部コンクリート」と呼ぶ)である。側壁は、全8ロットの逆打ち施工となる。底版は厚さ6mであり、コンクリートは2リフトに分割して打設され、深さ76mに及ぶ高落差のポンプ圧送となる。隔壁、中頂版は、基礎内空断面の剛性増加を図るためのものであり、上頂版は、橋脚を支持し上部工荷重を基礎本体に伝達するためのものである。これらは、底版工終了後、隔壁、中頂版、上頂版の順で順打ち施工された。

(2) 側壁および底版コンクリートの打設手順

側壁および底版は、連壁で囲まれた内部の水位をディープウェルにより管理し、ドライ状態でコンクリートを打設した。コンクリートの打設は省力化のため全てポンプ圧送により行った。図-3にコンクリートの配管計画を示す。配管は、地上に配置した4台のポンプ車から縦配管を型枠最上部まで降ろし、ループ管($r=1m$)を設け、ピンバルブを介して下り配管および水平配管により打設孔に送るものである。一般部コンクリートの打設は、図-4に示すように側型枠に設けた24箇所(4mピッチ)の開孔部(人孔)から型枠内に縦シュートで打設した。打継部コンクリートは一般部コンクリート打設終了後、作業員が型枠外に退出すると同時に開孔部型枠を閉じて配管を切り替え、型枠最上部の全周に設けた投入孔(2.0mピッチ)から打設した。なお、打継部コンクリートは、その特性(逆打ち用高流動コンクリート)から締固めせずに打設された。また、型枠支保工には、コンクリートの膨張圧による $2tf/m^2$ の側圧増加を考慮した。この側圧増加量は既往の試験⁵⁾より、膨張率が1.0%~3%のときのセパレータ張力により測定した膨張圧の最大値が側圧換算で $2tf/m^2$ であることから決めたものである。底版コンクリートは、側壁下端までは図-3に示す縦配管を用い、ループ管を側壁第7ロットの位置に設置し、鉛直管と水平管を所定位置まで延長させて打設した。底版コンクリートの打設状況を写真-1に示す。

3. コンクリートの検討概要

(1) コンクリートの要求性能と関連試験概要

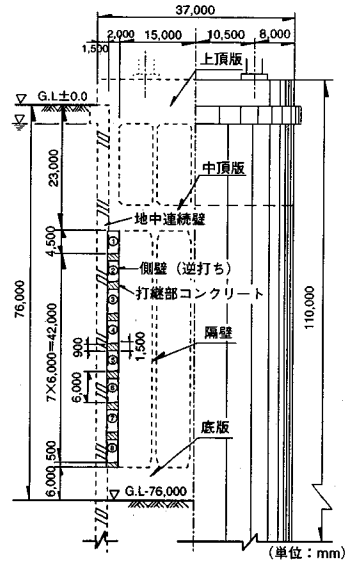


図-2 主塔基礎構造図(3P)

側壁および底版コンクリートの要求性能を表-1に、またコンクリートの配合条件を表-2に示す。このうち、水セメント比の最大値と最小単位セメント量は、海洋コンクリートにおける耐久性を考慮したものである。コンクリートの種類は逆打ち施工に伴う側壁打継部の一体化を確保するための打継部コンクリート、深度76mに及ぶ低所圧送時での管内閉塞の抑止を図った高落差ポンプ圧送コンクリートに大別される。打継部コンクリートにおいては、型枠内への流動性を高め充填性を確実にするとともに、材料分離(ブリーディング)に伴うレイタンスの発生を抑止や、沈下を補償する適切な膨張性が必要となる。また硬化後の強度についても一般部コンクリートと同程度の強度が必要となる。そこで、分離低減剤と膨張剤を併用した逆打ち用高流動コンクリートを適用することとし、これらの材料の混入量を設定するための各種試験を実施した。また、本工事は寒冷地での冬期施工(9月から翌年2月)となるため低温領域における膨張特性や強度特性をこれらの試験において把握することが特に必要であった。したがって、雰囲気温度や初期

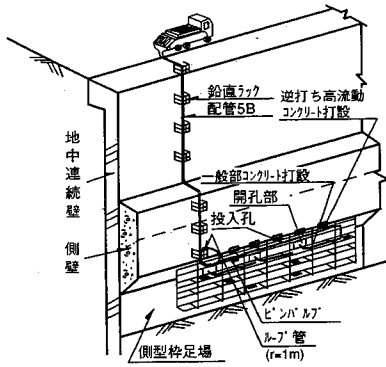


図-3 コンクリートの配管計画図

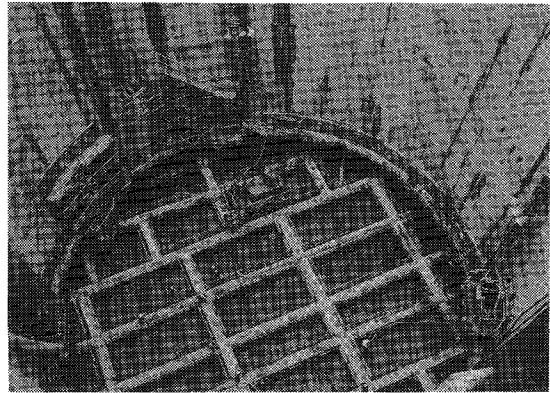


写真-1 底版コンクリートの打設状況

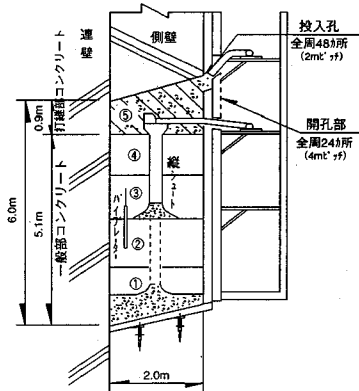


図-4 側壁コンクリートの打設概要

表-1 コンクリートの要求性能と品質項目

構造および施工条件	対象部材	要求性能	品質項目	材料および配合上の対応策
逆打ち施工	側壁打継部	打継部の一体化	・材料分離抵抗性 ・流動性 ・膨張性 ・強度特性	・分離低減剤の利用 ・流動化剤の利用 ・膨張剤の利用
高落差ポンプ圧送	側壁下端 (G.L-40m以深) 底版 (G.L-76m)	圧送時の管内閉塞の抑止	・加圧時の材料分離抵抗性 ・管内流動性 ・管内変形性	・微粉末量の増大 ・流動化剤の利用

表-2 コンクリートの配合条件

項目	設計基準強度 f_{ck} (kgf/cm ²)	基準材齢 (日)	空気量の範囲 (%)	水セメント比の最大値 (%)	最小単位セメント量 (kg/m ³)
仕様	210	28	4±1.0	50	300

養生温度を10℃まで低下させた場合の膨張率測定試験、圧縮強度試験を実施するとともに、打継部の一体性を評価するための小型逆打ちモデルによる曲げ強度試験を実施した。なお、雰囲気温度、初期養生温度10℃は、生コンクリートにおいて冬期では20℃の練混ぜ水を用いて打設温度を10℃以上に保つこと、打設後は養生シートにより保温養生を行うことなどを考慮して設定した。

一方、高落差圧送コンクリートの圧送性に影響を及ぼす主要因は、管内でのコンクリートの流動性、変形性、材料分離抵抗性であると言われている(「土木学会・コンクリートのポンプ施工指針」⁴⁾)。これに対し、本工事の底版コンクリートは深度76mに及ぶ高落差の低所圧送となり、径路の長い鉛直管、ベント管、ループ管を流動する際の流動性、変形性の低下が予想された。また、圧送中の管内圧力損失によりポンプ車前面吐出部や、圧送中断時におけるピンバルブ直前での加圧脱水が危惧された。側壁の施工では、第3ロット (G.L-40m)以降に単位細骨材量 (細骨材率) を増大させた配合を用いたが、第7ロット (G.L-63m)以降数回の管内閉塞がみられたため、底版の施工では単位微粉末量を増大させることにした。検討に際しては、加圧時の材料分離抵抗性を評価するための加圧ブリーディング試験、管内流動性および変形性を評価するためのコンクリート用ロートを用いた流

下試験、断熱温度上昇試験を実施した。加圧ブリーディング試験における加圧力、加圧時間は側壁第3ロット、第7ロットにおける管内圧力測定値、圧送時におけるコンクリートの管内流動時間を調査して試験に反映させた。

(2) 使用材料

使用材料とこれを適用したコンクリートの種類を表-3に示す。使用材料のうちセメント、骨材、AE減水剤は各種コンクリートに共通である。セメントに低発熱セメントを用いたのは、本体側壁がマスコンクリートになるためである。低発熱セメントの化学成分を表-4に示す。この低発熱セメントを用いた場合、同一単位セメント量 ($C=429\text{kg/m}^3$) の普通セメントに比べて断熱温度上昇量で10℃以上の低減効果が得られる⁶⁾。なお、AE減水剤は、スランブの時間経過に伴う低下量を小さくするために打設時期にかかわらず遅延形のものを用いた。

打継部コンクリートに用いる分離低減剤にはブリーディングを抑止するためにメチルセルロースエーテルを主成分とする水溶性ポリマーを選定した。膨張剤にはアル

ミ粉末を用いているが、膨張開始時間を制御するために樹脂被膜により表面処理したものを選定した。このアルミ粉末を用いたコンクリートの膨張率の経時変化を図-5に示す。特殊表面処理しないものに比べて、沈下回復時間が遅延している。沈下回復時間とは、膨張が初期の収縮領域から膨張領域に移行する時点までの時間であり、打継面の付着を高めるためには、打設時間を考慮して、これらを適度に遅延させることが必要と考える。なお、沈下回復時間が0とは、練混ぜ直後から膨張が開始することを示す。

高落差圧送コンクリートには、石粉を細骨材に置換して用いている。ここで用いた石粉は「JIS A 5008舗装用石粉」に準拠したものであり、一般に道路舗装に使われているフィラーである。

流動化剤は打継部コンクリートと高落差圧送コンクリートで主成分の異なるものを用いている。打継部コンクリートにおいては、メラミンスルホン酸系の流動化剤を選定し、また高落差圧送コンクリートにおいては、圧送管内での流動性や変形性の経時低下を抑制するためにスランプロス低減型の流動化剤（リグニン系）を選定した。

4. 打継部コンクリートの品質に関する検討

(1) コンクリートの品質項目と試験方法

コンクリートに要求される品質項目とそれを評価するための試験項目、基準値、試験方法を表-5に示す。スランプフローは、投入孔の間隔が2.0mであり流動距離が1.0m程度と短いことから、下限値を45cmとしても締めくくりに打設可能と判断された。

試験項目のうち、アルミ粉末を用いて膨張性を付与したコンクリートの膨張率の測定や圧縮強度試験用供試体の作製に関する規格は特に定められるものがない。ここでは、膨張率の測定については、土木学会規準「膨張材を用いた充填モルタルの膨張率試験方法」を参考にし、高感度変位計を用いてコンクリートの収縮、膨張量を測定した。また、圧縮強度用供試体の作製については土木学会規準「プレバッドコンクリートの注入モルタルの圧縮試験方法」を参考に図-6に示す方法を用いた。図-6において、供試体上面を拘束する重りの重量は、既往の試験⁵⁾より、 $2tf/m^2$ 以上となるように設定した。なお、目標膨張率は、各ロットのコンクリート全量打設終了以後の、一般部コンクリートの沈下量 ΔS (mm)（ブリーディング試験より得られるブリーディング率と単位水量から一般部コンクリートの打設高さについて単位面積当りで算定）と膨張率の変動量（既往の実績より $\pm 0.5\%$ ）より式（1）で算定した。

なお、膨張効果とブリーディング低減効果による打継

表-3 使用材料

区分	種類	物性、主成分など	コンクリートの種類
セメント	低発熱型高炉セメント	比重 2.97, スラグ60%, 比表面積 3.455cm ² /g 凝結水量 31.0%, 始発 3h40m, 終結 5h30m 圧縮強さ(3日 76kgf/cm ² , 7日 151, 28日 336) 水和熱(7日, 57cal/g, 28日 74)	A,B,C
	陸砂(登別産)	最大寸法 2.5mm, 比重 2.68, 粗粒率 2.61 単位容積質量 1.80kg/L, 吸水率 1.2%, 実積率 67.1%	
粗骨材	砕石(敷生川産)	最大寸法 25mm, 比重 2.68, 粗粒率 6.64 単位容積質量 1.57kg/L, 吸水率 2.0%, 実積率 59.9%	C
混和材	石灰石粉	比重 2.69, 水分 0.1%, 比表面積 7,200cm ² /g 74μm以下84%, 0.15mm以下95%, 0.3mm以下100%	
混和剤	A E減水剤(遅延型)	比重 1.11±0.01 リグニンスルホン酸誘導体	A,B,C
	流動化剤	比重 1.21±0.01 メラミンスルホン酸系	
	流動化剤(遅延型)	比重 1.15±0.02 ナフタリンスルホン酸変性リグニン縮合物	C
	分離低減剤	比重 1.3±0.01 水溶性ポリマー(メチルセルロースエーテル)	B
	膨張剤	アルミ粉末(特殊表面処理)	

(注) コンクリートの種類 A: 一般部コンクリート
B: 打継部コンクリート
C: 高落差圧送コンクリート

表-4 低発熱セメントの化学成分

化学成分 (%)						
ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
0.6	27.5	10.7	1.7	51.1	4.4	2.5

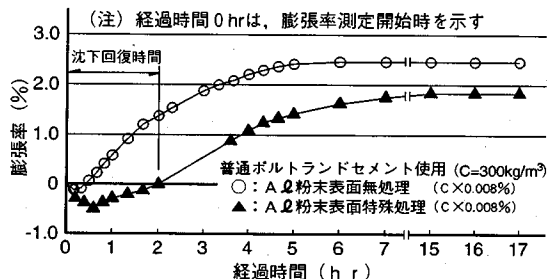


図-5 アルミ粉末の種類と膨張率の経時変化

表-5 打継部コンクリートの品質項目と試験方法

品質項目	試験項目	基準値	試験方法
流動性	スランプ	24±1.5cm	JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法
	スランプフロー	52.5±7.5cm	土木学会規準「水中不 分離性コンクリートの 設計施工指針」
分離抵抗性	ブリーディング率(量)	ブリーディングの発生がないこと	JIS A 1123 コンクリートのブリー ジング試験方法
膨張性	膨張率	1.25±0.75%	φ15cm×30cmモールド および高感度変位計に よる
強度特性	圧縮強度	呼び強度 210 (kgf/cm ²)	φ10cm×20cmモールド および重りによる拘束 方法 (図-6参照)
	(参考) 逆打ち曲げ強度	—	10cm×10cm×40cm逆打 ち供試体による曲げ強 度試験 (図-7参照)

$$\alpha = \Delta S / h + \beta \dots\dots\dots (1)$$

- α : 目標膨張率 (%)
- ΔS : 一般部コンクリートの沈下量 (mm)
- h : 逆打ち用高流動コンクリートの打設高さ (mm)
- β : 膨張率の変動量 (%)

面の一体性を無打継ぎの場合と相対比較する意味で参考として、図-7に示す小型逆打ち供試体を用いた曲げ強度試験⁵⁾を実施した。

(2) 打継部コンクリートの配合

実施工および事前試験に用いたコンクリートの各種配合を表-6に示す。No①は一般部コンクリートの配合であり、No②~No⑬は打継部における逆打ち用高流動コンクリートの配合である。このうちNo②~No④は水溶性ポリマーの添加量を、No⑤~No⑦はアルミ粉末の添加率を、No⑧~No⑩は水セメント比を変えたものである。また、No⑪~No⑬は水溶性ポリマーやアルミ粉末の有無が打継部の曲げ強度に与える影響を調査するために用いた配合である。逆打ち用高流動コンクリートの目標スランプは24cm、目標スランプフローは52.5cmとしたが、これは、逆打ち用高流動コンクリートの打設は、投入孔からのみの打設になり、締固めがほとんどできず、高流動性を必要としたためである。

なお、逆打ち用高流動コンクリートの実施工においては、各種配合のうち、表-5に示す品質項目に係る各種基準値を満足するものとして配合No⑧を用いている。逆打ち用高流動コンクリートの混練は生工場にて行い、水溶性ポリマーは粉体のまま細骨材と同時に、またアルミ粉末は流動化剤と同時にミキサ内に時差添加した。

(3) 打継部コンクリートの基礎的性質

逆打ち用高流動コンクリートにおける水溶性ポリマー添加量とブリーディング率の関係を図-8に示す。水溶性ポリマーの添加量が0.6kg/m³以上のコンクリートではブリーディングの発生は認められない。これは、水溶性ポリマーの混入により粘性が増大したためと考える。ただし、混入量を1.0kg/m³以上とすると、水中不分離性コンクリートにみられるようにコンクリートの粘性が相当大きくなり、ポンプ圧送する場合には吐出圧が過大となると予想された。そこで実施工においては、生コンプラントでの骨材の表面水の変動を考慮し、水溶性ポリマーの混入量を0.8kg/m³とした。

アルミ粉末添加率と膨張率の関係を図-9に示す。図中に示した温度は膨張終了時点までの雰囲気温度である。一般にアルミ粉末添加率と膨張率の関係には温度依存性のあることが知られているが、今回の結果においてもこの傾向が認められる。しかし、10℃と20℃の場合を比較すると膨張率に大きな差はなく、目標膨張率(1.25

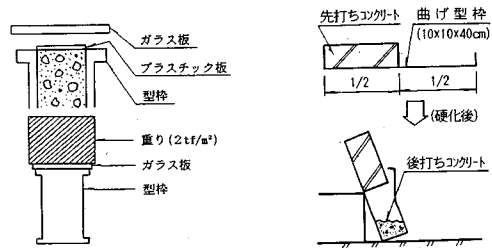


図-6 圧縮強度試験用供試体の作製方法

図-7 小型逆打ち供試体の作製方法

表-6 打継部コンクリートの配合

No.	Gmax (mm)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤			
							W	C	S	G	AE減水率 (P x %)	水溶性ポリマー (kg/m ³) (C x %)	アルミ粉末 (kg/m ³) (C x %)	流動化剤 (C x %)
①		12±2.5	—		50	43	150	300	817	1083	0.25	—	—	—
②												0.6	3.0	
③					50	43	150	300	817	1083	0.25	0.8	—	3.5
④												1.0	5.0	
⑤												—	0.01	
⑥					50	43	150	300	817	1083	0.25	0.8	0.02	3.5
⑦												—	0.03	
⑧	25	24±1.5	52.5±7.5	4±1.0	46	43	150	326	807	1072	0.25	0.8	0.01	3.5
⑨												0.015	—	
⑩					42	41.4	148	352	769	1091	0.25	0.8	0.015	3.5
⑪					43	150	300	817	1083		0.25	0.8	0.015	3.5
⑫					50	46	155	310	811	1075	0.25	—	0.025	0.9
⑬					43	150	300	817	1083		0.25	1.0	—	5.0

%)付近ではほぼ同等の値を示している。これは、10℃の場合、凝結遅延の影響で膨張が長く続くためと思われる。これらの結果と打設時期(9月から翌年2月)を考慮して、品質管理における膨張率測定時の養生温度は20℃とした。

図-10に膨張率と圧縮強度の関係を示す。膨張率が大きくなるに従い圧縮強度は低下している。これはアルミ粉末による発泡の影響と考えられる。また、膨張率が同一の場合、膨張終了までの雰囲気温度の違いにより圧縮強度は異なる傾向を示すが、この傾向は膨張率が大きくなるほど顕著になることが認められる。なお、膨張率が1%程度では、膨張終了までの雰囲気温度の違いによる強度差は小さい。

小型逆打ち供試体を用いた曲げ強度試験結果を表-7に示す。供試体は前述した図-7に示す方法で作製し、曲げ強度試験は「JIS A 1106コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠して行った。水溶性ポリマーとアルミ粉末を併用したコンクリートの場合、逆打ち供試体と一体供試体との曲げ強度比は約80%に達している。これに対し、アルミ粉末、あるいは水溶性ポリマーを各々単体で用いたコンクリートは曲げ強度比が小さい。これは、前者においてはブリーディングに伴うレイタンスが界在したため、後者においては付着力が小さいためと思われる。

(4) 打継部コンクリートの施工結果

現場施工におけるコンクリートの品質管理結果を表-

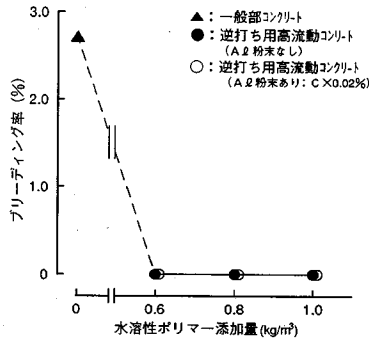


図-8 水溶性ポリマー添加量とブリーディング率

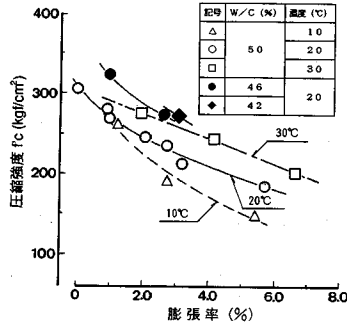


図-9 アルミ粉末添加率と膨張率

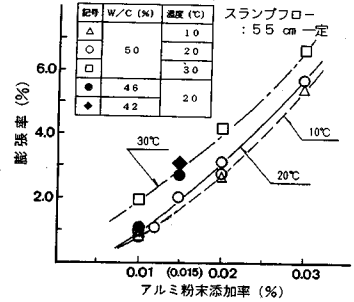


図-10 膨張率と圧縮強度

8に示す。統計処理は、打設量 150m³毎に採取した3本の供試体の全数について行ったものである。膨張率については、その平均値は1.24%であり、結果として目標値(基準値)±0.3%で管理できた。沈下回復時間は約2時間～3時間30分の範囲にあり、平均値は約2時間30分であった。なお、逆打ち用高流動コンクリートの打設時間は、各打設ブロックとも2時間～3時間であった。これより、沈下回復時間が打設時間より1時間程度短い場合があるが、このときの膨張量のロスが図-5より約0.5%であり、膨張率の下限値0.5%を満足している。圧縮強度の平均値は273kgf/cm²であり、一般部コンクリートのそれより19kgf/cm²程度小さい。しかし、生コンプラントでの製造工程、表面水の管理方法などは一般部コンクリートと同じであるにもかかわらず、変動係数は一般部コンクリートよりも小さい。この結果は、水溶性ポリマー、アルミ粉末、流動化剤などを併用したコンクリートでも、市中生コン工場において、品質変動を小さく混練することができることを示唆している。

写真-2に打継部のコア供試体を示す。コア供試体は打継面のテーパに沿って採取したものであり、直径10cmの供試体中央に新旧コンクリートの境目がくる様にコアボーリングしたものである。コア観察の結果、打継面は付着していることが認められた。

写真-3に逆打ち高流動コンクリート施工後の壁面状況を示す。打継部からの漏水は認められなかった。

5. 高落差圧送コンクリートの品質に関する検討

(1) コンクリートの品質項目と試験方法

高落差圧送コンクリートの品質項目と試験方法を表-9に示す。配管内のコンクリートの流動性、変形性を評価しうる試験方法として、ロート流下試験を行った。ロート流下試験はコンクリートの粘性を含む流動性を評価するものとして考案されたものであるが⁷⁾、筆者らは、ロート容積10ℓにおける排出前のコンクリート容積

表-7 逆打ち供試体による曲げ強度

No.	水溶性ポリマー (kg/m ³)	アルミ粉末 (C x %)	膨張率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 f _b (kgf/cm ²)		曲げ強度比 ((B)/(A))
					A 一般部	B 逆打ち	
①	—	—	-0.8	305	41.1	—	—
①①	0.8	0.015	1.8	286	33.3	26.0	0.78
②	—	0.025	1.0	287	34.0	6.0	0.18
③	1.0	—	-0.6	284	34.7	9.7	0.28

表-8 コンクリートの品質管理結果

種別	逆打ち高流動コンクリート				一般部コンクリート	
	膨張率	沈下回復時間	圧縮強度	空気量	圧縮強度	空気量
個数 (コ)	42	39	42	14	61	62
最大値	1.53%	3hr-20min	293 (kgf/cm ²)	4.7%	321 (kgf/cm ²)	4.8%
最小値	0.96%	1hr-50min	242 (kgf/cm ²)	3.1%	256 (kgf/cm ²)	3.4%
標準偏差	0.12%	25min	12.3 (kgf/cm ²)	0.5%	14.3 (kgf/cm ²)	0.3%
変動係数	—	—	4.5%	12.4%	4.9%	8.5%
平均	1.24%	2hr-26min	273 (kgf/cm ²)	4.0%	292 (kgf/cm ²)	4.0%

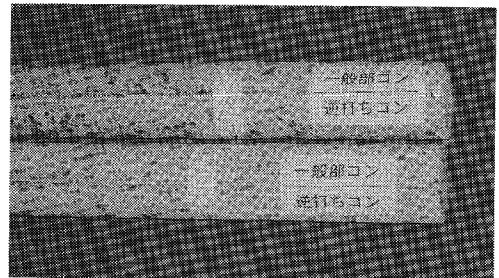


写真-2 打継部のコア供試体

重量に対する排出後の重量の比率を測定することにより、圧送管のうち、特に直管とベント管、直管とループ管などの管種の変化位置における粗骨材の凝集とアーチングに起因するコンクリートの流動性、変形性をある程度評価できるものと考えた。材料分離抵抗性を評価するものとして、ブリーディング試験、加圧ブリーディング試験を実施した。なお、ブリーディング試験、加圧ブリーディング試験においてブリーディング率を評価する

経過時間は前者においては練混ぜから打設までの最大所要時間として60分を、後者においてはポンプ車吐出口から排出までに要する時間を側壁第3ロットの施工状況より60秒と想定した。加圧ブリーディング試験における最大加圧力は、「コンクリートのポンプ施工指針」⁴⁾では35kgf/cm²としているが、側壁第3ロット、第7ロット打設時における管内圧力測定結果より、底板コンクリートでは最大20kgf/cm²程度と想定した。

(2) 高落差圧送コンクリートの配合

実施工および事前試験に用いたコンクリートの各種配合を表-10に示す。配合Aは石粉を用いない基本配合であり、配合Bはポンプ圧送性を改善するために細骨材率を大きくしたものである。配合C, D, Eは、配合Bを基本に細骨材に内割で石粉を置換(50kg/m³, 100kg/m³, 150kg/m³)したものである。配合F, G, Hは、高炉スラグ微粉末をセメントの外割で混入(60kg/m³, 100kg/m³, 150kg/m³)したものであり、これを混入したコンクリートの性状を石粉混入の場合と比較するために選定した。ここで使用した高炉スラグ微粉末の性質は、比重2.92, 比表面積7,270cm²/g, 74μm以下84%, 0.15mm以下95%, 0.3mm以下100%である。なお、高炉スラグ微粉末をセメントの外割で混入したのは、セメントの一部に置換した場合、初期強度の発現が遅れることを危惧したためである。配合I, J, Kは、水溶性ポリマーを混入した場合の粘性により加圧ブリーディングの低減を図ったものである。このうち配合Kは、側壁の施工に用いた逆打ち用高流動コンクリートの配合である。配合A, Kを除き、スランブは、15cmとしている。

なお、実施工においては、側壁第1ロットと第2ロットに配合Aを、側壁第3ロットから第7ロットに配合Bを、底板コンクリートに配合Dを用いている。

(3) 高落差コンクリートの基礎的性質

各種配合におけるブリーディング率を図-11に示す。60分経過時点でのブリーディング率は、配合Aに比べて、細骨材率を増大した配合Bのものが若干小さく、石粉を細骨材の一部に置換(以下「石粉を置換」と略記する)した場合や高炉スラグ微粉末を混入した配合ではさらに小さい結果を示している。石粉を置換したものは、置換量が増えるに従い、また高炉スラグ微粉末を混入したものは混入量が増えるに従いブリーディング率が減少することが認められる。この傾向はブリーディング終了時においても同様である。水溶性ポリマーを0.4kg/m³以上混入した配合では、その粘性増大効果によりブリーディングは生じていない。

各種配合における加圧ブリーディング率を図-12に示す。加圧力は10kgf/cm², 20kgf/cm²とし、水溶性ポリマーを混入した配合のみ加圧力を35kgf/cm²とした。60秒経過時点における加圧ブリーディング率は細骨材率

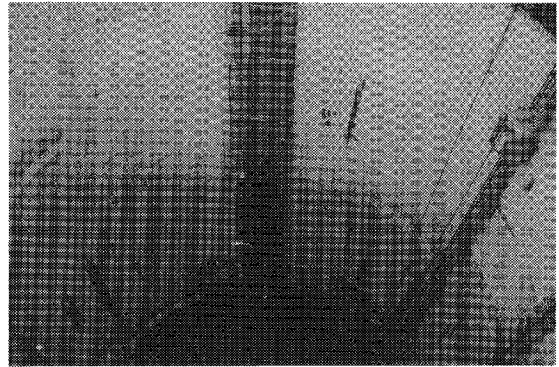


写真-3 打継部コンクリート施工後の壁面状況

表-9 高落差圧送コンクリートの品質項目と試験方法

品質項目	試験項目	試験方法
流動性	スランブ (ｽﾌﾞﾌﾟｰ)	JIS A 1101 コンクリートのスランブ試験方法
	ロート流下試験 (流下時間)	図-13に示すコンクリート用ロートを用いて、排出前後の出口重量と排出までの時間を測定
分離抵抗性	ブリーディング試験	JIS A 1123 コンクリートのブリーディング試験方法
	加圧ブリーディング試験	土木学会「コンクリートのポンプ施工指針(案)・参考資料・加圧ブリーディング試験方法」

表-10 高落差圧送コンクリートの配合

配合種別	G _{max} (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	単 位 量 (kg/m ³)				混 和 剤				
							C	Sg (Sg)	S (Lf)	G	AE 減水剤 (P x %)	流動化剤 (P x %)	水溶性ポリマー (P x %)		
A	12±2.5				43.0				817	1083					
B										911	989				
C					48.0			50	863						
D						300		100	812	989					
E								150	764						
F	25	15±2.5	4±1.0	50.0		150		60	850	997	0.25				
G								100	833	976					
H					46.0			250	150	833	976				
I									874	1026					0.2
J									874	1026					0.4
K		24±1.5		46.0	43.0			326		807	1072				0.8

P: C, Sg, Lfの総量, SP-1: ナフタリン系, SP-2: メラミン系

を増大した配合Bに比べ、石粉を細骨材に100kg/m³以上置換した配合あるいは高炉スラグ微粉末を100kg/m³以上混入した配合において小さくなる傾向が認められる。石粉の細骨材置換量や高炉スラグ微粉末の混入量が大きくなるに従い加圧ブリーディング率は小さくなる傾向を示している。水溶性ポリマーを混入した逆打ち用高流動コンクリートはP=35kgf/cm²でも加圧ブリーディングの発生はほとんど認められない。

図-13に、各種配合における流下率を示す。配合A, 配合Bに比べて、石粉を置換した配合C~E, 高炉スラグ微粉末を混入した配合F~Hの流下率は大きい。これ

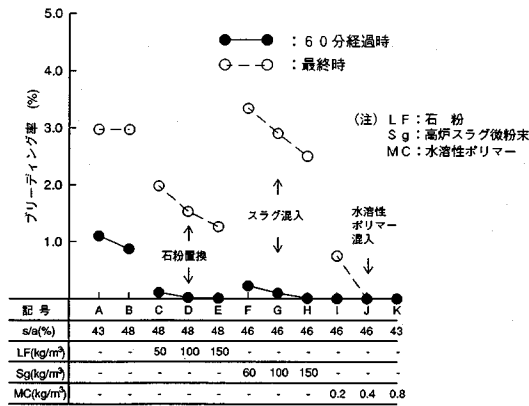


図-11 各種配合とブリーディング率

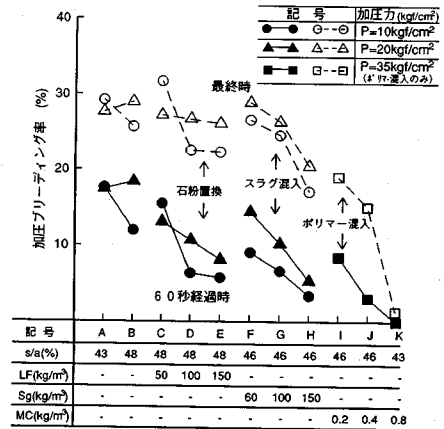


図-12 各種配合と加圧ブリーディング率

はロート内での流動性、テーパ部と直管部での変断面における変形性が大きいことを示すものと考えられる。なお、逆打ち用高流動コンクリート（配合K）は流下時間60秒程度で全量通過している。流下率は、石粉の置換量や高炉スラグ微粉末の混入量が増大するに従い大きくなる傾向が認められる。これらは、単位微粉末量が増大するためであり、これを表わすものとして図-14に0.15mm以下の単位微粉末量と加圧ブリーディング率、流下率の関係を示した。なお、第7ロット以降の閉塞状況から、筆者らは圧送中の管内閉塞が、流下率により推定できる管種の変化位置における粗骨材の凝集、アーチングに起因する流動性低下と、加圧ブリーディング率により推定できる加圧脱水現象との相乗効果により発生するものと推察した。同じ微粉末量でも石粉を置換した場合と高炉スラグ微粉末混入の場合で流下率が異なるのは、粒子の形状の違いが要因の1つとして考えられる。

表-11に石粉を置換しない配合Bと石粉を100kg/m³置換した配合Dの断熱温度上昇試験結果を示す。配合Dは配合Bに比べて、K値で約1℃、αで約0.1程度の増加を示している。石粉の多量置換にかかわらず、温度上昇への影響は比較的小さいことが認められる。

図-15に、各種配合における圧縮強度を示す。配合A、配合Bに比べて、石粉を置換した配合は材齢7日からの強度発現が大きく、この差は材齢28日まで続いている。石粉を100kg/m³混入した場合は、配合Aに比べて材齢28日で約5割の強度増加が認められた。これは、石粉を混入したことによるセメント粒子の分散効果⁹⁾と思われる。石粉の置換量や高炉スラグ微粉末の混入量が増大するに従い、発現強度は大きくなる傾向が認められる。以上より、底板コンクリートにおいては、加圧ブリーディング率、流下率が改善でき、強度増加が得られるものとして石粉を100kg/m³置換した配合を選定した。

(4) 高落差圧送コンクリートの施工結果

表-12に示す3段階についてコンクリート圧送中の管

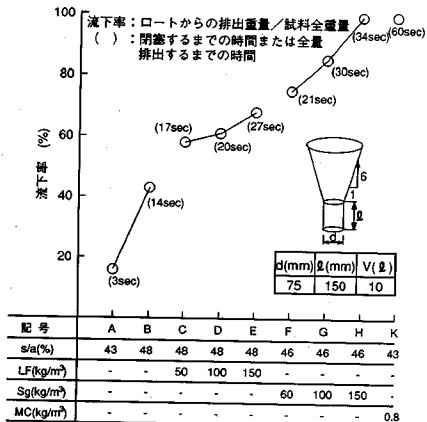


図-13 各種配合と流下率

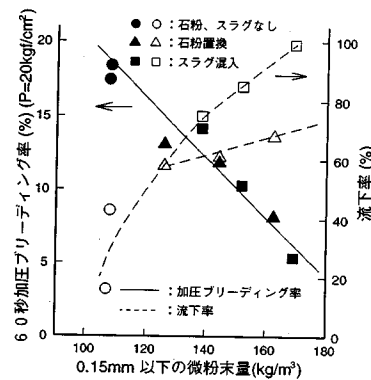


図-14 微粉末量と加圧ブリーディング率および流下率の関係

表-11 断熱温度上昇試験結果

配合	石粉 (kg/m³)	温度測定値 (℃)			近似式	
		打込み温度	最高温度	温度上昇量	K	α
B	-	19.0	55.3	36.3	36.5	0.61
D	100	21.0	58.5	37.5	37.6	0.70

内圧力の測定を実施した。配合の種類は、側壁第3ロットと第7ロットにおいては、一般部コンクリート（配合B）と逆打ち用高流動コンクリート（配合K）であり、底版コンクリートにおいては石粉を置換した配合（配合D）のものである。計測は小型圧力変換器を配管と同径の測定用管に取り付け、動ひずみ測定器により行った。測点は、ポンプ車前面吐出、鉛直管、ベント管、ループ管、水平管、ピンバルブの前後を基本に6測点とした。

第7ロットおよび底版コンクリート施工中における管内圧力の分布を図-16に示す。逆打ち用高流動コンクリート圧送中の管内圧力は一般部コンクリートと同様にポンプ車前面吐出出口付近で最大を示すが、その値は一般部コンクリート(11kgf/cm²)の3倍(33kgf/cm²)となっている。鉛直管下端(P₄)での管内圧力の両者の差は小さい(約3kgf/cm²)ことを考えると、逆打ち用高流動コンクリートの場合にはその粘性により鉛直管で大きな圧力損失を生じていることが認められる。今回の工事で最も高落差の圧送となる底版コンクリートについても、圧送中の管内圧力はポンプ車前面吐出出口で最大を示し、その値は約23kgf/cm²であった。なお、底版コンクリートの圧送深さは逆打ち高流動コンクリートの場合より約13m深いにもかかわらず、ポンプ車前面吐出出口での管内圧力が小さいのは、石粉置換と水溶性ポリマー混入でのコンクリートの粘性の違いによるものと思われる。圧送停止中の管内圧力の最大値は、底版コンクリート、逆打ち高流動コンクリートともピンバルブ手前で最大を示すが、その値は両者ともポンプ車前面吐出圧を下回っている。なお、圧送中のコンクリートの吐出量はコンクリートの種類にかかわらず、平均55m³/hrであり、このときのピストン主油圧は、逆打ち高流動コンクリートの場合で平均150kgf/cm²、一般部コンクリートおよび底版コンクリートで平均100kgf/cm²であった。

管内圧力損失を表-13に示す。逆打ち用高流動コンクリートおよび底版コンクリートを圧送する場合の鉛直管

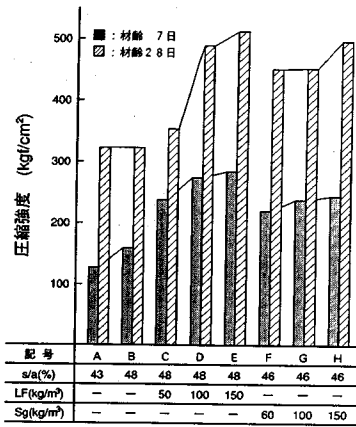


図-15 各種配合と圧縮強度

表-12 管内圧力測定区分

測定段階	側壁第3ロット	側壁第7ロット	底版コンクリート第1リフト
深さ	G.L-40m	G.L-63m	G.L-76m
配合の種類	配合B	配合B	配合D
	配合K	配合K	

表-13 管内圧力損失

種類	部位			
	鉛直部 (kgf/cm ² /m)	ベント部 (r=1.0m) (r=1.6m) (kgf/cm ² /本)	ループ部 (r=1.0m) (r=6.4m) (kgf/cm ² /本)	水平部 (kgf/cm ² /m)
一般部コンクリート	0.09	0.39	1.48	0.20
逆打ち用高流動コンクリート	0.51	0.53	2.10	0.50
底版コンクリート	0.21	0.50	2.30	0.26

表-14 圧縮強度の管理結果

個数 (口)	最大値 (kgf/cm ²)	最小値 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)	平均 (kgf/cm ²)
40	410	334	19.5	5.1	379

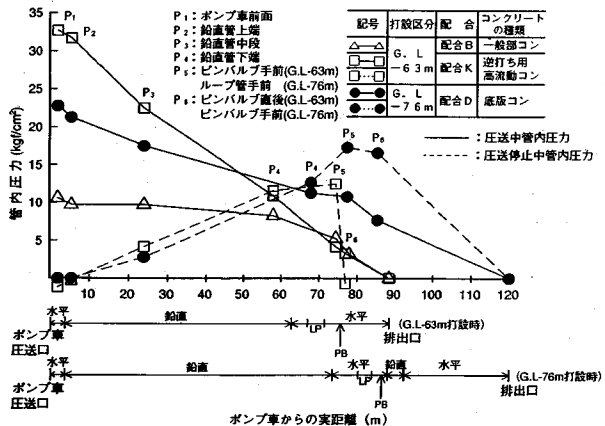
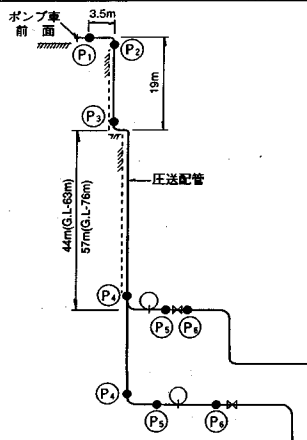


図-16 管内圧力分布図

の圧力損失は一般部コンクリートの場合と比較して、前者で約5.6倍、後方で約2.3倍と大きな値を示している。水溶性ポリマーや石粉を混入した粘性の高いコンクリートを高落差圧送する場合には、配管計画と合わせ、ポンプ車の圧送能力を慎重に選定する必要があると思われる。

底版コンクリートは、深さ76mの高落差圧送にもかかわらず、石粉を細骨材に100kg/m³置換した配合とすることにより、加圧ブリーディング性状を改善し管内閉塞を生じることなく打設できた。底版コンクリートの圧縮強度の管理結果を表-14に示す。石粉の混入により圧縮強度の平均値は379kgf/cm²と大きな値を示すものの、変動係数は約5%であった。

6. まとめと今後の課題

施工深さ76mにおよぶRC躯体の逆打ち施工において、側壁打継部では、その一体化を図るために水溶性ポリマーとアルミ粉末を併用した高流動コンクリートを、底版には高落差圧送時の加圧ブリーディング低減のために細骨材の一部に石粉を置換したコンクリートを打設し、良好な結果が得られた。事前の配合検討から施工までのプロセスのなかで明らかとなった事項を以下に記述する。

- ①養生中の雰囲気温度が10℃と低温の場合、アルミ粉末添加率に対する膨張率の値は20℃の場合に近似する。従って、本工事のような寒冷地施工の場合、使用するアルミ粉末の種類によっては雰囲気温度が20℃の場合の膨張曲線を用いることができる。
- ②水溶性ポリマーとアルミ粉末を併用した高流動コンクリートで逆打ちした場合、無打継ぎのものに対し80%の曲げ強度が得られる。また、施工後のコアポーリングにより打継部の付着も十分であることが確認された。
- ③水溶性ポリマー、アルミ粉末、流動化剤などを併用したコンクリートでも、市中生コン工場において、圧縮強度の変動係数が5%程度で混練できる。
- ④圧送管内のコンクリートの流動性と変形性を評価するためのロート流下試験において、石粉を細骨材の一部に50kg/m³～150kg/m³置換したコンクリートは無置換のものに比べて流下率が大きい。

⑤ロート流下率は、加圧ブリーディング率と同様に0.15mm以下の単位微粉末量の多少により増減する。

⑥石粉を細骨材の一部に100kg/m³置換したコンクリートの断熱温度上昇特性は、石粉無置換のものに比べてほとんど変化はない。

⑦石粉を細骨材の一部に100kg/m³置換したコンクリートを76mの高落差に低所圧送した場合、鉛直管の管内圧力損失は石粉を置換しないコンクリートのそれより2倍程度大きくなる。

今後の課題としては、①逆打ち打継部の一体化をさらに定量的に評価するための試験方法の確立、②膨張性コンクリートの沈下回復時間（収縮領域から膨張領域に移行する時点までの時間）を制御するための材料開発、③加圧ブリーディングを低減するための石粉以外の不活性微粉末の模索などが挙げられる。

参考文献

- 1) 高瀬三郎・田辺清・松岡康訓：アルミウム粉末を使用した逆打ちコンクリート，土木録文集，No. 355，pp. 63-71，1985。
- 2) 今野強・蒲原貢・上杉浩国・野田道：逆巻工法による超大型コンクリート地中タンク側壁の施工，セメントコンクリート，No. 447，pp. 20-29，1984。
- 3) 佐藤哲司・小沢郁夫・山下祐爾：ブリーディング 抑止膨張コンクリートの逆巻コンクリートへの適用，土木学会第43回年次学術講演会，V-215，1988。
- 4) 土木学会：コンクリートの打設施工指針(案)，コンクリートライブラリー第57号，1985年11月。
- 5) 佐藤哲司・小沢郁夫・青木茂・玉田信二：反応遅延性アルミウム粉末による膨張コンクリートの諸物性，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，[94]，pp. 373-376，1986。
- 6) 川崎博巳・田口史雄・三浦智：水中コンクリートの現状(白鳥大橋における事例)，コンクリート工学，Vol. 28，No. 3，1990。
- 7) 近松竜一・三浦律彦・青木茂・十河茂幸：高流動コンクリートの流動性を評価する方法(大型ロート試験の提案とその適用性)，セメントコンクリート，No. 530，pp. 60-66，Apr. 1991。
- 8) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究，土木学会論文集，第85号，1962年9月。

(1993. 9.29 受付)

STUDY ON QUALITY OF INVERSELY CASTING CONCRETE AND VERTICAL DEEP CONVEYED CONCRETE APPLIED ON FOUNDATION OF LONG SUSPENSION BRIDGE

Katsuhiko KUMAGAI, Morito TAKAHASHI, Shigeru AOKI and Shigeyuki SOGO

The Construction for foundation of HAKUCHYO OHASHI BRIDGE was finished in April 1992. inverted construction method applied on this construction had large depth : 76m depth, which we had not experienced before. Therefore, filling capacity was necessary to sidewall concrete for high quality construction joint. Also, pumpability was necessary to bottom concrete in order to evade stoppage under vertical deep conveyning. Accordingly, before construction we estimated application of concrete using various admixture testing properties. We thus successfully finished it. This paper describes results of testing properties of applied concrete and construction.