高流動コンクリート「ニューロクリート」の開発（その2）

——橋梁マスコンクリート構造物への適用例——

近松竜一　竹田宣典
新開千弘　十河茂幸
(本店 土木工事第2部)

Development of Highly Workable Concrete, "Neuro-crete" (Part 2)

——Application to Mass Concrete Structure for Anchorage——

Ryuichi Chikamatsu　Nobufumi Takeda
Chihiro Shinkai　Shigeyuki Sogo

Abstract

Highly workable concrete, "Neuro-crete", is high-performance concrete with self-compactability instead of vibration. It has been applied to many concrete structures for such purposes as shortening the construction period and labor savings, in addition to placing work is difficult.

This report introduces the application of Neuro-crete to rapidly constructed mass concrete structures for a large anchorage with a concrete volume up to 140,000 cubic-meters. Included is the mix design of highly workable mass concrete in consideration of cost efficiency, as well as properties of execution.

概　要

高流動コンクリート「ニューロクリート」は，締固め不要の自己充塡性能を有する高性能コンクリートであり，締固めが不可能あるいは困難で充塡難度が高い場合はもとより，工期短縮や省力化など施工の合理化の観点から各種コンクリート構造物への適用事例が増加している。

本報告は，打設総量が約14万 m^3 に達する大型橋梁マスコンクリート構造物の急速施工への適用例として，コストパフォーマンスを考慮したマスコン用高流動コンクリートの配合技術や施工性に関する検討結果とともに，実構造物への適用結果について紹介する。

1. まえがき

高流動コンクリート「ニューロクリート」は，締固め不要の自己充塡性を有する高性能コンクリートであり，充塡が困難で施工欠陥の発生が懸念される特殊な場合はもとより，急速化施工や省力化など施工の合理化を図る有効な手段として適用の拡大が望まれている。

耐久的なマスコンクリート構造物を構築するためには温度ひび割れの制御が重要な課題となる。本報告事例の橋梁アンカレイジでは，まずコンクリートの低発熱化に取組み，高炉スラグ微粉末やフライアッシュを多量に混合した低発熱セメントを用いて水和熱を低減し，単位セメント量が少なくても良好なプラスティシティーを有する硬練りマスコン配合の検討を進めてきた[1]。

しかし，①本体基礎工事の進捗に伴い，橋梁全体工期のうちケーブル架設との兼合いから当初計画より更なる急速施工が要請されたこと，②労務事情の悪化により，打込みや締固めに要する多大な労力に見合った作業員の確保が困難となったこと，③工事現場周辺の地域環境に配慮して作業時間が規制されたこと，など諸般の事情により省力化や施工性の改善をさらに図る必要が生じた。

そこで，これら施工の合理化に対する一策として，マスコンとして所要の品質を確保しつつ高流動性を付与した低発熱型高流動コンクリートを適用するに至った。

本報告は，コストパフォーマンスを考慮したマスコン用高流動コンクリートの配合や施工性検討結果，さらに打設総量が約14万 m^3 の大型橋梁マスコンクリート構造物への適用結果について紹介するものである。

2. 実験概要

2.1 配合実験

配合条件を表－1に示す。単位セメント量は低発熱化と耐久性確保の観点から 260 kg/m^3 に設定した。変形性の指標にはスランプフローを用い，目標値を55 cmとした。

使用材料の概要を表－2に示す。中庸熱ポルトランドセメントを基材に，高炉スラグ微粉末，フライアッシュを内割で各55%，20%混入した三成分系低発熱セメントを用いた。また，混和材としては粉末度が異なる3種類の石灰石微粉末（以下，石粉と略称）を用いた。高性能AE減水剤は，分散成分系別に2種類，同一の分散系で分散保持効果が異なる2種類の計3銘柄を使用した。

配合に関する検討要因と水準の範囲を表－3に示す。

単位水量は，硬化後の体積変化を極力低減する観点から従来の硬練り配合と同等とし，AE減水剤を用いてスランプが5 cm程度に相当する水量（140 kg/m^3）を基準値に設定した。また，同一水量でスランプ11 cmのマスコン配合（以下，基本配合と呼称）も試験した。

コンクリートの製造は，二軸強制練りミキサを用い，各種粉体・骨材を60秒間空練りした後，混和剤・練混ぜ水を投入して120秒間練り混ぜた（0.1 m^3/バッチ)。

試験項目および方法を表－4に示す。各試験用試料の作製は突き棒を用いず木づちで軽く叩いて締固めた。なお,コンクリートの粘性を簡便に調べる手法として,図－1に示す装置により漏斗流下時間を測定した。

2.2 施工性検証実験

実構造物（^{L}18 m×^{B}12 m×^{H}1.5 m,約 330 m^3）の試験施工により高流動コンクリートの施工性を調査した。

試験施工に先立って，実機ミキサ（可変速型二軸強制練り，容量6 m^3）での製造管理について検討した。

ポンプ圧送性は,実施工時の最大抵抗値を想定して,ϕ 200 mm(8B)の配管を水平換算距離で約350 m配置した。

打設方法は，各配管系列毎に6 m間隔で配置したゲートバルブを交互に開閉させて投入し，極力均等に打上がるようにした。流動状況を目視観察するとともに，硬化後コアを採取して流動後の品質について調査した。

3. マスコン用高流動コンクリートの品質特性[2)]

3.1 流動特性

コンクリートの変形性と分離抵抗性はトレードオフの関係にある。マスコン用高流動配合では，特にコストパフォーマンスを重視し，所要の充塡性が確保される範囲で変形性を過度に増大させないように配慮した。また，低発熱化の観点から化学的に安定した石粉を多量に添加して粉体量を増大させ，骨材粒度を調整することで所要の分離抵抗性が確保されるように配慮した。

スランプフロー試験時の流動状況や漏斗試験時の流下状態の観察より，高粉末度の石粉を多量に添加した場合ほど分離抵抗性が改善される傾向が認められ，特に単位石粉量を150 kg/m^{3}程度添加すれば，均質な状態で所要の流動性を確保できることが確認された。

細骨材率が34%の場合，スランプフロー試験時に粗骨材が中央部に残留し，漏斗試験時には骨材間のアーチングにより一時的な閉塞が生じて流下時間が増大した。一方，細骨材率が48%の場合には，粗骨材の沈降現象が観察され，流動時の閉塞や骨材沈降が少なく良好な均質性が確保される骨材粒度としては細骨材率で45%程度が適切であると判断された。

分離抵抗性に関しては，コンクリートの粘性が支配的であり，粘性は水量の多少に左右される。図－2では，水量増加に伴う粘性の低下が流下時間の減少として示されている。また，混和剤が粘性に及ぼす影響も大きく，ナフタリン系よりもポリカルボン酸系の減水剤を用いた方が粘性が小さく，流下時間を指標とすると両者の相違は水量換算で約10 kg/m^{3}に相当する結果となった。

スランプフローの経時変化を調べた結果，①減水剤中の分散成分の種類や分散保持成分の比率により流動性の保持効果が顕著に相違すること(図－3参照)，②流動性の保持効果は温度依存性が大きく，低温度下ほど保持効果が持続する一方，練上り直後からフローが急増する場合もあること（図－4参照）等の知見が得られ，品質管

表－1 高流動コンクリートの配合条件

骨材最大寸法 (mm)	設計基準強度 (材齢91日) (MPa)	単位セメント量 (kg/m^3)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)
40	24	260	55	4.0

表－2 コンクリート用各種材料の概要

区分	種類	比重	物性・その他
セメント	三成分系	2.80	比表面積：524m^2/kg
混和材	石粉	2.71	比表面積：400～750m^2/kg
細骨材	海砂	2.55	吸水率：1.98%，粗粒率：2.56
	砕砂	2.55	吸水率：2.11%，粗粒率：2.97
粗骨材	砕石4020	2.63	吸水率：0.54%，粗粒率：7.96
	砕石2005	2.63	吸水率：0.58%，粗粒率：6.24
混和剤	高性能	1.04	ポリカルボン酸系（PO）
	AE減水剤	1.15	ナフタリン系（NS）

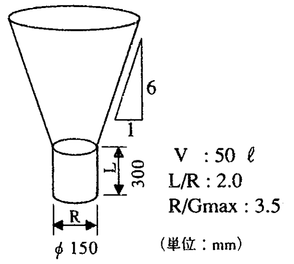
表－3 材料・配合の検討要因と水準

分類	検討要因	検討要因の水準	
材料	石粉の粉末度	400, 550, 750 m^2/kg	（3種類）
	混和剤の種類	NS系（1種類），PO系（2種類）	
配合	細骨材率	34～48%	（計5水準）
	単位水量	130～150 kg/m^3	（計5水準）
	単位石粉量	30～220 kg/m^3	（計5水準）

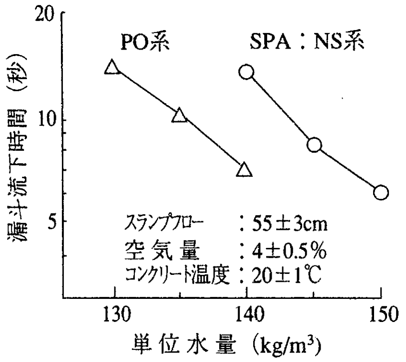
表－4 試験項目および準拠方法

試験項目	試験方法（準拠規格他）
スランプ スランプフロー 漏斗流下時間 空気量 練上り温度	JIS A 1101 土木学会規準 漏斗試験装置使用（図－1参照） JIS A 1128 アルコール温度計使用
ブリーディング 凝結時間	JIS A 1123 JIS A 6204 附属書1
圧縮強度 引張強度 静弾性係数	JIS A 1108 JIS A 1113 コンプレッソメータ使用
断熱温度上昇	空気循環式，測定期間：12日
乾燥収縮	JIS A 1129，試験開始：材齢28日
中性化深さ* 塩分浸透深さ* 凍結融解抵抗性*	促進条件（CO_2：5%，30°C，55% RH） 人工海水中（3%濃度）に浸漬 JIS A 6204 附属書2，300サイクル迄

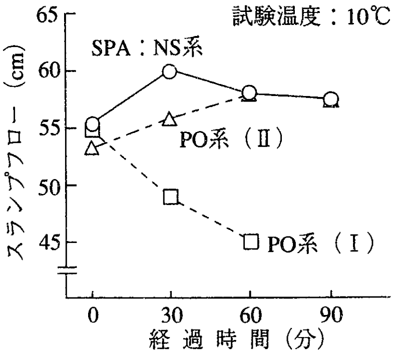
*耐久性に関する各種試験は，材齢28日から開始した。



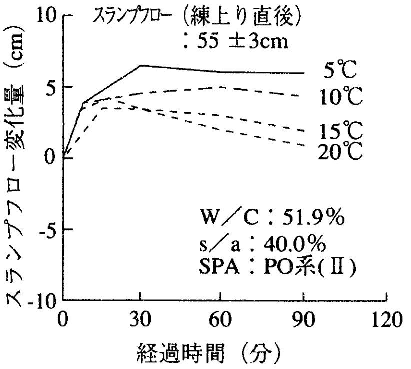
図—1　漏斗試験装置



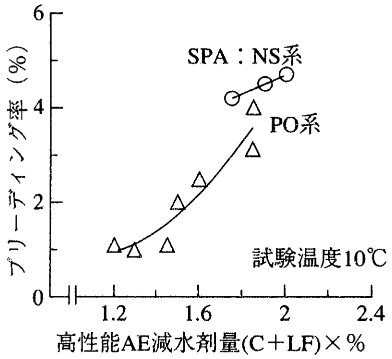
図—2　単位水量と漏斗流下時間



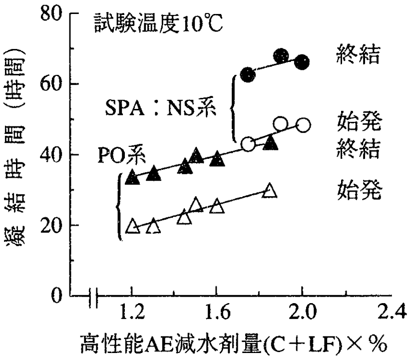
図—3　スランプフロー経時変化



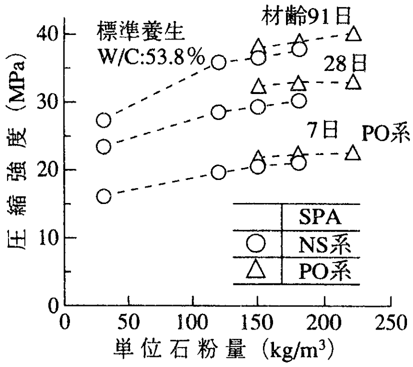
図—4　スランプフロー経時変化



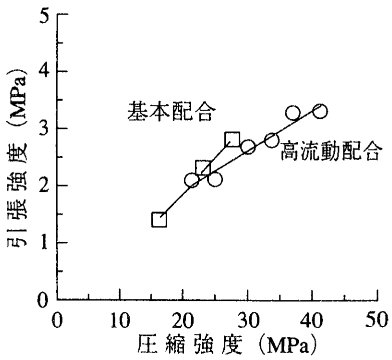
図—5　ブリーディング特性



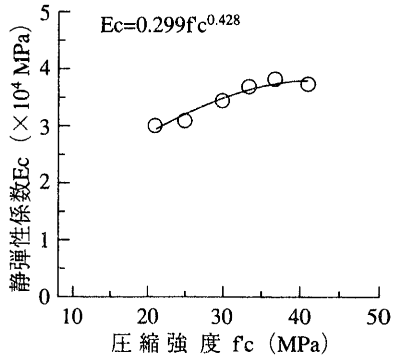
図—6　凝結特性



図—7　単位石粉量と圧縮強度



図—8　圧縮強度と引張強度



図—9　圧縮強度と静弾性係数

理に際して温度条件に対応した適切な混和剤量の調整が重要となることが確認された。

3.2　ブリーディング・凝結特性

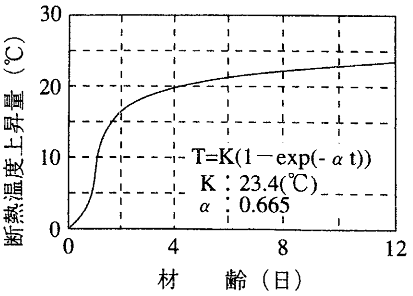
ブリーディング，凝結特性は，混和剤種類や温度条件により顕著に相違する。全般的には，ポリカルボン酸系減水剤を用いた方がブリーディングが少なく，凝結時間も短い傾向にある。また，混和剤添加量の増加とともにブリーディングが増大し，凝結が遅延する傾向にあり，低温度ほどこの傾向は顕著となる（図－5，6参照）。

3.3　強度特性

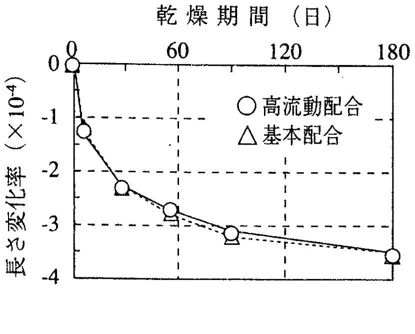
高流動コンクリート配合は，同一水セメント比で比較した場合，標準的なマスコン配合（基本配合）より圧縮強度の発現が大きく，この強度増進効果は石粉添加量が多いほど，またポリカルボン酸系減水剤を用いた場合に特に顕著に認められる（図－7参照）。なお，この結果として高流動配合における引張強度の圧縮強度に対する比率は，基本配合と比較して若干小さくなる傾向にある（図－8参照）。参考までに，圧縮強度と静弾性係数の関係を図－9に示す。

3.4　断熱温度上昇特性

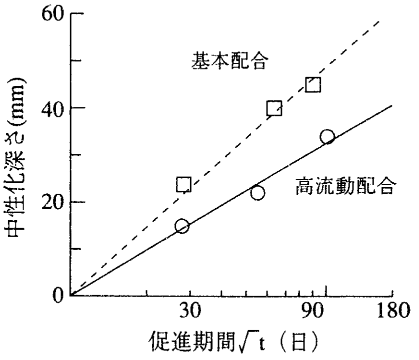
低発熱セメントを用いてその単位量を260 kg/m³とし，高流動化に伴う分離抵抗性を確保するための粉体として発熱に関与しない石粉を添加することで，終局断熱温度上昇量は約25°C以下に低減され，マスコン用配合として十分な低発熱化が図られた（図－10参照）。



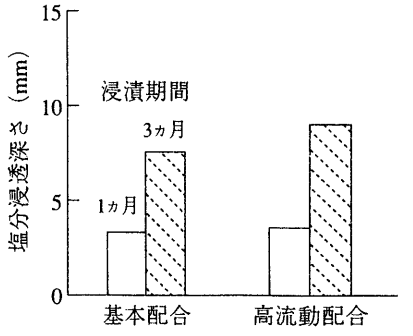
図—10　断熱温度上昇特性



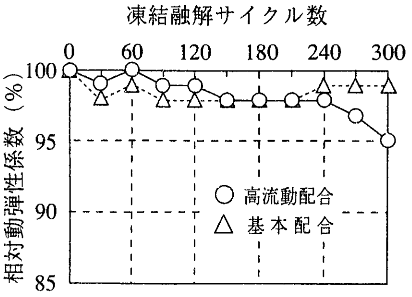
図—11　乾燥収縮特性



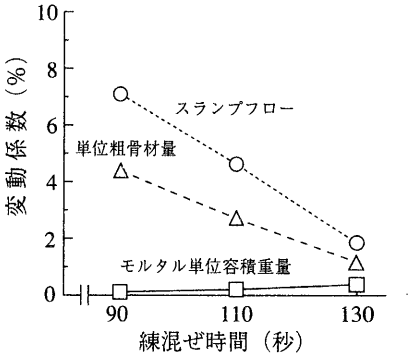
図—12　中性化促進試験結果



図—13　塩分浸積試験結果



図—14　凍結融解試験結果



図—15　練混ぜ時間と変動係数

3.5　乾燥収縮特性

高流動配合の乾燥収縮特性は，標準的なマスコン配合（基本配合）と同等である。標準試験結果によれば材齢6ヵ月時点で約350μ程度で，単位水量が少ないために乾燥収縮量も小さい（図—11参照）。

3.6　耐久性（中性化，遮塩性，凍結融解抵抗性）

CO_2濃度5％，温度30℃，相対湿度55％の条件下での中性化促進試験結果より，高流動配合は前述の強度増進の影響から基本配合よりも中性化の進行が30％程度抑制される結果が得られた（図—12参照）。

また，人工海水（濃度3％）浸漬による塩分浸透試験結果から，高流動配合と基本配合の塩分浸透深さはほぼ同等で有為な差異は認められない（図—13参照）。

さらに，凍結融解試験結果（図—14参照）により，凍結融解300サイクル終了時の相対動弾性係数が95％以上で同試験による耐凍害性の判定指標（80％）を十分に確保する結果が得られた。

以上の結果より，石粉や減水剤を多量に添加したマスコン用高流動コンクリートの耐久性に関しては，通常のマスコン配合とほぼ同等であると評価できる。

4．マスコン用高流動コンクリートの施工性[2)]

4.1　実機ミキサでの製造管理方法

実機ミキサ内の対角4点から試料を採取して各特性値の変動係数を調べた結果を図—15に示す。練混ぜ性能の指標であるモルタル単位容積質量や単位粗骨材量は，いずれも規定範囲内（JIS A 1119）にあるが，単位粗骨材量やスランプフローの変動係数は練混ぜ時間の増大に伴って減少した。また，練混ぜ時間が110秒以上では，コンクリートの品質に差異は認められないが，90秒では流動性の経時変化が大きく，圧縮強度も相当に低下した（表—5参照）。これらの練混ぜ時間による品質やばらつきの相違と実施工時の供給速度を考慮して，実機ミキサによる高流動コンクリートの製造時間は110秒程度が効率的かつ適切であると判断した。

高流動コンクリートの製造上，特に注意すべき骨材の物性変動の影響に関して，①細骨材表面水率の設定誤差は±0.5％以内で管理する必要があること，②細骨材の粗粒率が2.3～2.7の範囲ではスランプフローの変動は約5 cmであり，高性能AE減水剤添加量が±0.05％程度の配合修正で対応可能であること，③粗骨材中に過小粒が8％程度ある場合でも細骨材の単位量補正で対応できること，などが確認された。

4.2　ポンプ圧送性

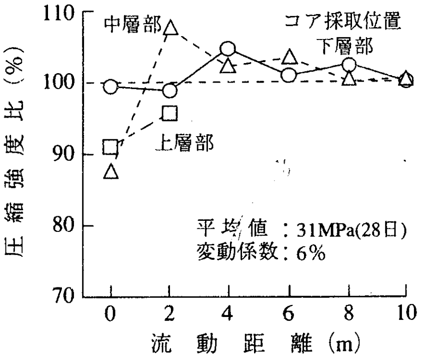
ポンプ圧送性に関しては，①吐出圧力は吐出量にほぼ比例し，実施工時の最大抵抗を想定して，8B管（ϕ200）を水平換算で約350 m配管した場合でも最大圧力に対して約45 m^3/hの圧送量が確保できること（表—6参照），②圧送時の圧力損失は，管径増大により相当に小さく，スランプ12 cmのコンクリートを6B管により圧送した場合の約70％であること，等を確認した（図—16参照）。

表－5　練混ぜ時間による品質の相違

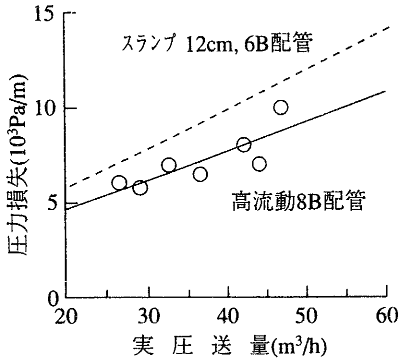
練混ぜ	スランプフロー (cm)			空気量	ブリーディング率	圧縮強度(MPa)	
(秒)	直後	30分	60分	(%)	(%)	7日	28日
90	54.0	64.0	57.5	4.9	0.46	18.9	24.1
110	55.5	57.0	56.5	4.0	0.46	26.4	36.8
130	55.0	57.5	56.0	3.5	0.52	27.7	36.8

表－6　ポンプ圧送試験結果

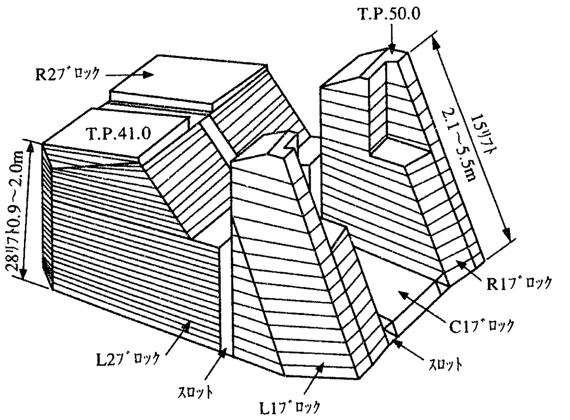
設定吐出量 (m^3/h)	ポンプ主油圧 (MPa)	容積効率 (%)	実質吐出量 (m^3/h)
30	11.5	85.4	26.5
40	14.5	84.7	32.5
50	18.5	81.2	41.9
60	21.5	78.7	46.7



図－17　流動距離と強度変動



図－16　実圧送量と圧力損失



図－18　アンカレイジの概要

4.3　流動性状と流動後の品質

高流動コンクリートの流動勾配は，障害がない場合は1/20～1/30程度であるが，水平配筋（D25@150）や鋼材の障害により1/10程度まで低下し，水平方向の障害間隔が流動を阻害する最大の要因であることが判明した。

硬化後採取したコア強度の平均値は，標準養生供試体の約90%であった。また，流動による強度変動は水平・鉛直方向とも小さく，流動距離が10m以内では大きな差異は生じなかった（図－17参照）。

5．マスコン用高流動コンクリートの大型橋梁アンカレイジへの適用

5.1　施工概要

大型橋梁アンカレイジ地上部は，打設総量が約14万 m^3 にも達する巨大なマスコンクリート構造物（幅63 m，長さ84.5 m，高さ47.5 m）である（図－18参照）。

本躯体工事の特徴としては，急速施工の要請に対して後述するマスコン用高流動コンクリートを適用したことの他に，低発熱セメントの採用，冷水や氷，液体窒素によるプレクーリング，パイプクーリング，スロット工法等の各種温度ひび割れ制御対策を講じたこと，また耐久性向上に加え景観にも配慮して躯体表面にプレキャストコンクリートパネルを採用したこと等が挙げられる。

アンカレイジの施工は，全体を平面的に5ブロックに分割し，各ブロック毎にリフト割りをして順次構築する方法を採用し，日作業時間の規定を順守しながら日最大約2,000 m^3 の高流動コンクリートを打設した。

コンクリートは現場内のプラントからアジテータ車で躯体に隣接して設置したポンプステーションへ運搬し，110 m^3 級のポンプ車を用いて1系統当たり約45 m^3/hの速度で最多で6系列の配管系統(8B)により圧送した。なお，最長圧送距離は水平換算で約330 mであった。

打込み方法は，各配管毎に自動開閉式のゲートバルブを設置し，投入箇所を順次切り替えながら打設範囲全体を層状かつ均等に打上げる層打ち方式を採用した。

流動に伴う材料分離や打上り面の不陸を極力低減するために，ゲートバルブは全打設範囲が投入箇所から半径3.5 m以内で網羅されるように5 m間隔で配置した。また，各バルブの開閉時間を1分間隔に設定して各層の打足し時間間隔を短縮（90分以内）し，コールドジョイントの発生を防止した。さらに，打込み時の材料分離を抑制するために自由落下高さを3 m以下に規定した。なお，打込み時の締固めは原則として行わず，鋼材周辺部の充塡や天端の不陸修正などを補助する目的で分離しない程度に部分的にバイブレータを使用した。

5.2　高流動コンクリートの品質管理結果[3)]

高流動コンクリートの示方配合を表－7に示す。

表−7　高流動コンクリートの示方配合*

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
		W	C	LF	S	G	SPA
55.8	45.0	145	260	150	769	965	6.35

*LF：石粉（粉末度550 m²/kg），SPA：高性能AE減水剤（PO系）
骨材混合割合（海砂：砕砂＝8：2，4020：2005＝4：6）

表−8　フレッシュコンクリートの品質管理結果

	試験項目	測定数	平均	最大	最小	変動
出荷時	スランプフロー (cm)	1,349	54.4	63.5	43.5	5.9%
出荷時	漏斗流下時間 (秒)	850	7.9	18.5	3.8	22.8%
出荷時	空気量 (%)	1,349	3.8	5.0	3.0	12.4%
筒先	スランプフロー (cm)	629	50.5	62.0	35.5	10.0%
筒先	空気量 (%)	629	3.9	5.0	2.2	12.8%

表−9　躯体部コアの品質試験結果（リフト厚：2.8 m）

調査項目		粗骨材面積率 (%)			圧縮強度 f'_{c28} (MPa)		
採取位置		打込部	合流部	鋼近傍	打込部	合流部	鋼近傍
打設高 (m)	2.6	37.1	43.2	42.3	33.7	33.6	34.0
	2.0	38.0	39.4	44.6	32.4	33.0	33.9
	1.4	37.8	40.5	47.3	33.3	31.9	33.0
	0.8	38.8	39.5	−	33.4	34.4	−
	0.2	39.4	40.6	−	34.5	33.7	−

各材料毎に品質規格を設定して受入れ管理を実施した結果，セメントや石粉，高性能AE減水剤の品質は施工期間（16ヵ月）中を通じほとんど変動なく，細骨材の粗粒率の変動幅は±0.2程度で管理できた。製造時の表面水率変動を1％程度で精度良く管理しながら施工時期の温度に応じて混和剤量を調整した。

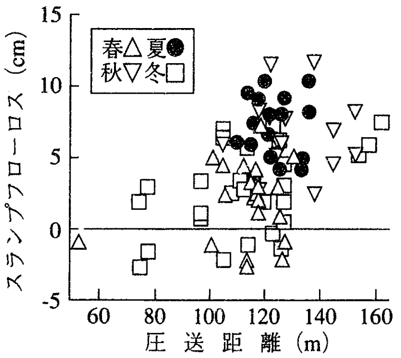
フレッシュ時の品質管理結果を表−8に示す。総量が約14万 m³ の高流動コンクリートに対して，変動が小さく各品質ともほぼ許容範囲内で管理できた。なお，品質管理の精度を高めるためにポンプ圧送後の品質についても調べた結果，練上り温度が高い場合（特に暑中）や圧送距離が長い場合（図−19参照）にスランプフローロスが増大する傾向が認められた。

圧縮強度に関しては，長期材齢ほど変動係数が小さくなる傾向が認められ，材齢91日で平均 47 MPa 程度，変動係数5.7％で，所要の配合強度（30 MPa）が十分に確保される結果となった（図−20参照）。

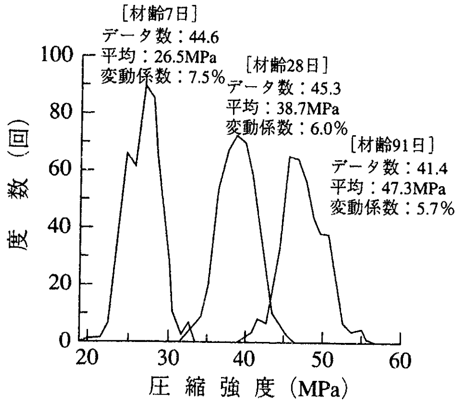
5.3　躯体コンクリートの均質性検証結果[4]

リフト分割施工時に躯体からコアを採取して均質性を検証した（計9回）。結果の一例を表−9に示す。

骨材分布の指標であるコア表面部の粗骨材面積率は，下層ほど大きい傾向にあり，採取位置で最大10％前後の粗骨材量の差異が生じたものの，粒径の偏りはなく均質な分布であった。また，採取場所による圧縮強度の差異は±1.5 MPa 程度と極めて僅かであった。さらに，単位容積重量の変動もほとんど認められず，躯体コンクリートの均質性が十分に確保されていることが実証された。



図−19　圧送距離とフローロス



図−20　圧縮強度管理結果

6．あとがき

本報告の橋梁アンカレイジへの適用成果を踏まえて，今後は，さらに類似のマスコンクリート構造物に対して高流動コンクリートの積極的な適用を図る予定である。

謝辞

実施工に際し，御指導を賜りました本四連絡橋構造用マスコンクリート委員会（委員長　東京工業大学工学部長瀧重義教授）の各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 金沢，山田，新田，二宮，十河：大型橋りょうマスコンクリートに適した超低発熱型セメント，コンクリート工学，Vol. 29, No. 4, p. 27～36,（1991）
2) 古屋，斉藤，近松，十河：石灰石微粉末を多量に用いたマスコンクリート用低発熱型高流動コンクリート，土木学会論文集，No. 466/V-19, p. 51～60,（1993）
3) 糸日谷，斉藤，新開，菊地：マスコン用高流動コンクリートの品質変動に及ぼす温度および圧送の影響，土木学会第49回年次学術講演会，p. 340～341,（1994）
4) 新開，糸日谷，斉藤：マスコン用高流動コンクリートの流動に伴う粗骨材分布と構造体強度，土木学会第49回年次学術講演会，p. 324～325,（1994）