

大規模高度浄水施設における総量 20万 m^3 の 低発熱型高流動コンクリートの適用

藤田正樹¹・宇山征夫²・櫛下町浩²・諸角誠²・新開千弘³・近松竜一⁴

¹正会員 大阪府水道部 (〒540-0012 大阪府大阪市中央区谷町二丁目3番4号)

²大阪府水道部 村野高度浄水施設建設事務所 (〒573-0014 大阪府枚方市村野高見台7-2)

³正会員 大林・鹿島・鴻池・佐藤・大豊共同企業体 (〒573-0014 大阪府枚方市村野高見台7-2)

⁴正会員 工修 大林組技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

大規模な水槽を有する高度浄水施設の築造において、水密性の確保、施工性の向上ならびに施工環境の改善を目的として、打設総量が約20万 m^3 に達する大量の高流動コンクリートを適用した。この高流動コンクリートは、マスコンクリートのひび割れ制御対策として、低熱ポルトランドセメントを用いて低発熱化を図るとともに、特に高い水密性が要求される部材には、膨張材を併用して硬化後の収縮が低減されるように配慮した。本報告は、低発熱型高流動コンクリートの材料および配合選定、レディーミクストコンクリート工場での製造管理および実施工時の品質管理結果などについてまとめたものである。

Key Words : *highly flowable concrete, low-heat portland cement, expansive admixture, mass concrete, thermal crack, self-compacting property*

1. まえがき

大阪府営水道は、現在、淀川を唯一の水源として、村野、庭窪、三島の3つの浄水場を有し、233万 m^3 /日規模で府内39市町村に水道用水を製造・供給している。

近年、淀川の水質は、BOD、アンモニア性窒素濃度が高く、上流の琵琶湖の富栄養化に伴い、カビ臭が毎年発生するなど、水道水源として全国的に見てもあまり良くない状況にある。また、塩素処理に伴いトリハロメタン等の微量有機物が生成され、従来の浄水処理では対応が困難になりつつある。そこで、府営水道では、安全でより良質な水を供給するために、オゾン処理や粒状活性炭処理などの高度浄水処理を行うべく、平成10年夏の稼働を目指して各浄水場の整備を進めている。

村野浄水場は、約180万 m^3 /日の給水能力を有する我が国でも最大規模の浄水場である。本浄水場内に建設中の高度浄水処理棟は、建築面積が約12,000 m^2 、地下2階、地上5階の大規模な鉄筋コンクリート構造物で、地下部にポンプ、吸水井、塩素混和池、浄水池、地上部にオゾン接触池、粒状活性炭吸着池等の水槽を立体的に配した複雑な構造となっている(図-1参照)。

本施設の築造に際しては、まず、構造物の機能上、構造体コンクリートには高い水密性が要求され、ジャンカ等の欠陥防止はもとより、ひび割れの発生を適正に制御する必要があった。また、約20万 m^3 に及ぶ大量のコンクリートを日平均500 m^3 の割合で日常的に打設する必要があり、施工性の向上が重要な課題であった。さらに、本浄水場は住宅地域に隣接しており、工事中に生じる騒音や振動を極力低減する必要もあった。

そこで、本工事では、水密性の確保、施工性の向上、施工環境の改善を目的として、高流動コンクリートを適用することとした。また、ひび割れ制御対策として、低熱ポルトランドセメントを使用して低発熱化を図るとともに、特に高い水密性が要求される水槽部には、膨張材を併用し硬化後の収縮を補償する対策を講じた。

本報告は、この低発熱型高流動コンクリートの適用に関する各種検討結果をまとめたものである。高流動コンクリートの材料、配合の選定、レディーミクストコンクリート工場における製造管理および実施工時の品質管理結果などについて、以下に報告する。

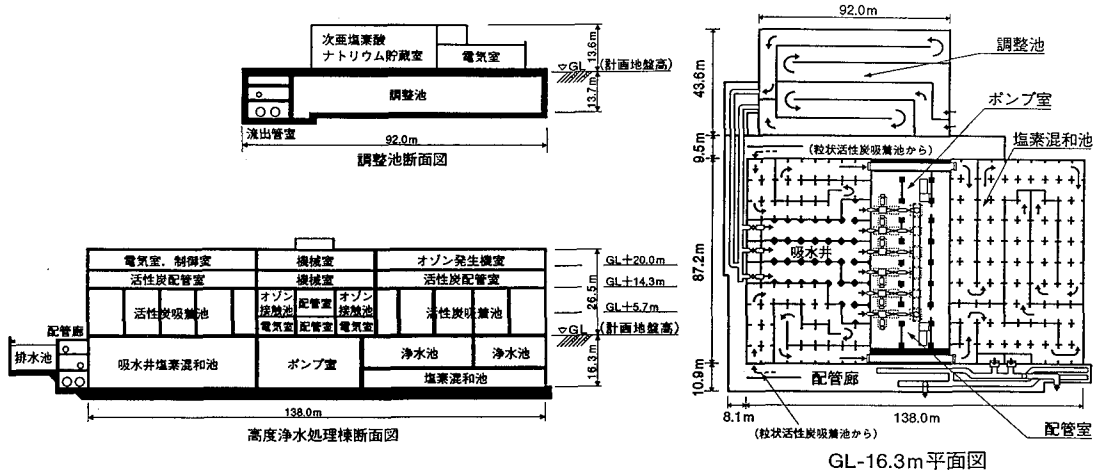


図-1 対象構造物の概要図

表-1 高流動コンクリートの配合条件および示方配合の概要

種別	適用部位	設計基準強度 (N/mm ²)	U型充填高さ (cm)	スランプ 70-	空気量 (%)	W/P (%)	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					SPA (P%)	
									W	P			S		G
										C	EX	LF			
F30	配 管 廊	30	≥30	60	4.5	32.0	45.0	50.5	165	367	0	150	804	821	1.4
F30E	処理棟水槽					33.0	47.0	51.0		351	0		817	821	1.4
F27	処理棟底版	27	≥30	60	4.5	33.0	49.0	51.0	165	337	0	165	817	821	1.4
F21	調整池底版	821											821	1.5	
F21E	調整池水槽	21								307	30	821	821	1.5	

注) W:水, C:セメント, EX:膨張材, LF:石灰石微粉末, S:細骨材, G:粗骨材, SPA:高性能AE減水剤

2. 低発熱型高流動コンクリートの実用化検討

(1) 材料・配合の検討

高流動コンクリートの配合条件および示方配合の概要を表-1に示す。コンクリート種別は、設計基準強度および膨張材の有無により5種類に分けられる。

自己充填性は、U型充填性試験(S1)時の充填高さを評価指標とし、その目標値を30cm以上とした。また、スランプフローの目標値は60cmとした。実施工時の品質管理の指標には、スランプフロー、○漏斗流下時間を用いた。なお、これらの管理範囲は、所要の充填高さが確保されることを前提に、試験練りにより定めた。

セメントは低熱ポルトランドセメント¹⁾(密度 3.24 g/cm³, プレーン値 3100cm²/g, C_s 60%)を用い、比較のために、高炉セメントB種(密度 3.04g/cm³, プレーン値 4080cm²/g), 中庸熱ポルトランドセメント(密度 3.21 g/cm³, プレーン値 4080cm²/g)を用いた。また、粉体の増量材として、石灰石微粉末²⁾(比重 2.71, プ

レーン値 5500cm²/g)を用い、高い水密性が要求される部材には収縮補償用としてCSA系膨張材(密度 2.80 g/cm³, プレーン値2500cm²/g)を用いた。細骨材は山砂(表乾比重 2.56, 吸水率 2.0%, 粗粒率 2.80), 粗骨材は碎石(最大寸法20mm, 表乾比重 2.67, 吸水率0.76%, 粗粒率 6.69, 実積率 58.5%)を用いた。また、高性能AE減水剤には、ポリカルボン酸系の製品を用いた。

高流動コンクリートの配合は、水粉体比を32~33%、水結合材比を設計基準強度毎に45~49%の範囲で設定した。膨張材はこれを同量のセメントと置換して使用した。単位粉体量は、各種結合材および石灰石微粉末を併せて500~520 kg/m³の範囲で設定した。単位粗骨材量は、容積換算値で 0.310m³/m³程度とした。

U型充填試験、スランプフロー試験および圧縮強度試験は、土木学会高流動コンクリート研究小委員会による提案方法(案)に準拠した。また、断熱温度上昇試験には、空気循環式試験装置を用い、一軸拘束膨張率の測定は、JIS A 6202 参考 1)に準拠して実施した。

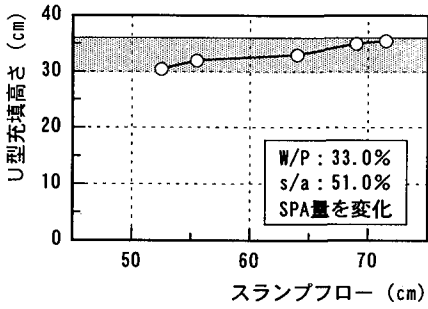


図-2 スランプフローとU型充填高さ

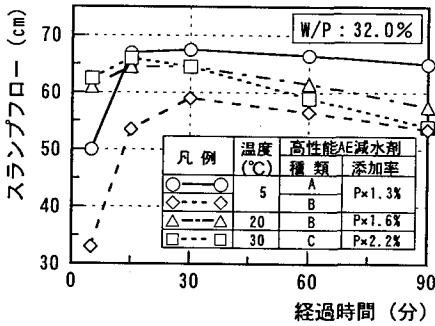


図-3 スランプフローの経時変化

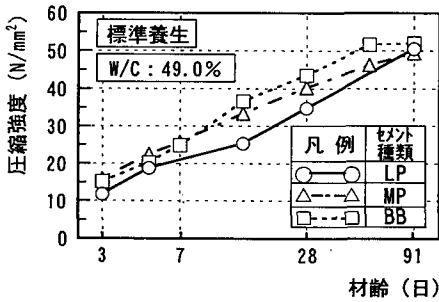


図-4 強度発現特性 (セメント種類の影響)

スランプフローとU型充填高さの関係を図-2に示す。U型充填高さは、スランプフローの増大とともに増加する結果となり、スランプフローが50cm以上の範囲では所要の充填高さ が得られることが確認された。

スランプフローの経時変化を図-3に示す。スランプフローは、温度が高い場合ほど、時間の経過に伴う低下が大きい傾向にあるものの、高性能AE減水剤の種類や添加量を調整することにより、施工時の可使用時間(練上り15~60分後)の範囲で所要の流動性が確保できることが確認された。なお、コンクリート温度が低い場合には、練上り直後のスランプフローが小さく、時間の経過に伴い増大する傾向にあるため、プラント出荷時の管理値を適宜変更して対処することとした。

各種セメントを用いた場合の強度発現および断熱温

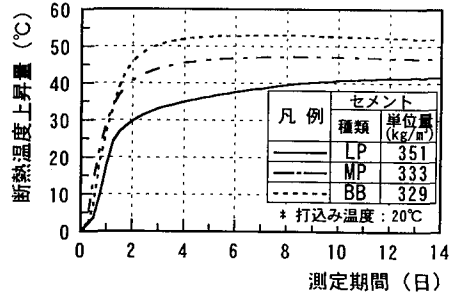


図-5 断熱温度上昇特性 (セメント種類の影響)

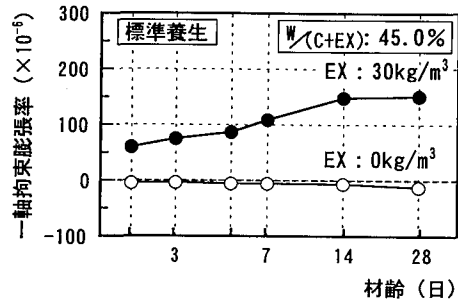


図-6 一軸拘束膨張率の経時変化

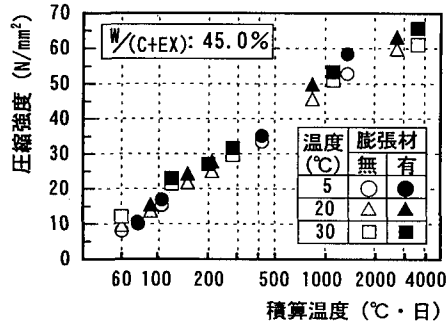


図-7 積算温度と圧縮強度の関係

度上昇特性を図-4および図-5に示す。低熱ポルトランドセメントを用いた場合は、中庸熱ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いたものより強度発現が緩慢となる傾向にあるものの、材齢91日ではほぼ同等の強度が得られた。一方、発熱特性に関しては、低熱ポルトランドセメントの場合は、他のセメントより発熱速度、終局断熱温度上昇量とも小さく、コンクリートの低発熱化に効果的であることが確認された。

膨張材の有無による一軸拘束膨張率および強度発現特性の相違を図-6および図-7に示す。膨張材を30kg/m³添加することにより、収縮補償用コンクリートとして規定されている150~250μ程度の膨張率が得られること、また、膨張材の有無による強度発現特性の相違はほとんどないこと、等が確認された。

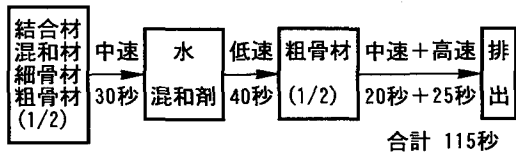


図-8 練混ぜ方法の一例

(2) 実機ミキサによる練混ぜの検討

高流動コンクリートは、少ない水量で高性能A/E減水剤を添加して複数の粉体と骨材を均質に分散させるため、練混ぜ時間は、通常のA/Eコンクリートより長くなる傾向にある。本工事では、高流動コンクリートをレディーミクストコンクリート3工場から購入することとし、さらに練混ぜ時間が約120秒/バッチ以内を目標に、各プラント毎に練混ぜ方法に関して検討した。

いずれのプラントとも、ミキサの形式は二軸強制練りミキサで、回転数の制御が可能であるが、容量や羽根の形状など装置仕様は異なっている。練混ぜ効率を高めるためには、ミキサの回転数を上げ、1バッチの練混ぜ量を減少させることが有効であるが、練混ぜ量を少なくすると製造能力が低下する。そこで、粗骨材を分割投入し、少ない粗骨材量で長く練り混ぜることで効率を高めた。練混ぜ方法の一例を図-8に示す。

(3) 実規模モデルによる施工性の検討

鉄筋や鋼材が多く配置される部材を想定したモデル試験体(図-9参照)を用いて、高流動コンクリートの施工性や硬化後の品質について検討した。

ブーム式ポンプ車を用い、最大吐出圧(公称4.4MPa)で圧送した結果、実吐出圧は3.4MPa、吐出量は最大65 m³/h、充填効率は約85%であった(図-10参照)。

高流動コンクリートの流動勾配は、レベルに近く、開口部のある場合でも最大で1/15程度であった。

型枠に作用するコンクリート圧の最大値を図-11に示す。打上り速度は、実施工の最大値を想定して約2m/hとした。コンクリート圧はセパレータ張力からの換算値、土圧計の測定値とも一致した結果が得られ、天端から約1.5m下方ではほぼ液圧、約2mの位置では液圧の80%程度であった。これらの結果をもとに、型枠、支保工の設計は安全率を見込み、液圧換算で計算することとした。

モデル試験体からコアを採取し、硬化コンクリートの品質を調査した。コア供試体の圧縮強度および単位容積質量を打上り高さとの関係で整理して、図-12に示す。圧縮強度は、高さ方向には顕著な差はなく、流動させると若干小さくなる傾向にあるが、いずれも十分な強度が得られていた。また、単位容積質量は、下層の方が若干大きくなる傾向が認められた。

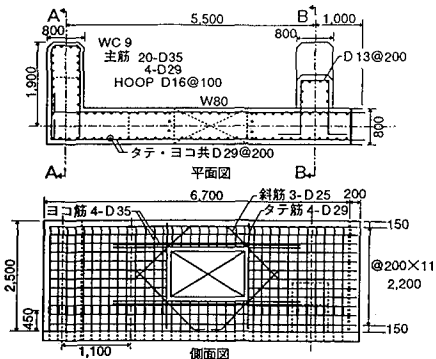


図-9 実規模モデルの概要図

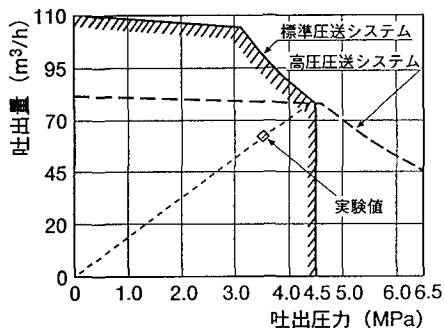


図-10 ポンプ吐出圧力と吐出量の関係

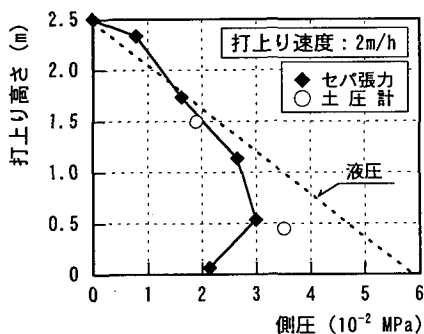


図-11 コンクリートの側圧

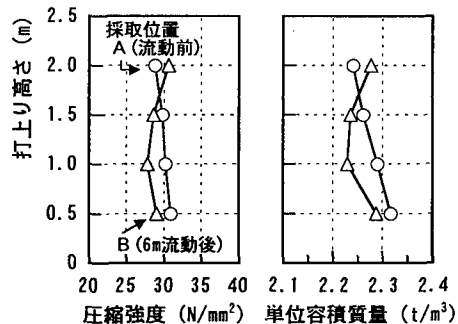


図-12 コア供試体の品質調査結果

3. 高流動コンクリートの実施工への適用結果

(1) コンクリートの品質管理結果

使用材料のうち、セメントと混和材料は、製造ロット毎に、モルタルあるいはコンクリートの試験練りを行い、それらの品質を確認した。骨材は使用前に粒度を測定し、現場配合の修正に反映させた。また、骨材の貯蔵はヤード全体を屋根で覆い、降雨や日射による骨材表面水率の変動が極力小さくなるように配慮した。

製造時には、細骨材の表面水率を自動測定し、水量補正の迅速化を図るとともに、ミキサ負荷値（電流または油圧）の経時変化を監視し、練混ぜ終了時の負荷が一定となるように管理した。

コンクリートの品質管理の概要を図-13に示す。フレッシュコンクリートの品質は、原則としてプラント出荷時と現場荷卸し時に、約70m³毎（アジテータ車15台毎）に確認した。出荷から荷卸しまでの品質変化を事前に特定し、出荷時の品質目標を設定した。また、打込み時の流動・充填状況を目視により確認した。

高性能AE減水剤添加量の管理結果を練上り温度との関係で図-14に示す。年間を通して所定の流動性を有するコンクリートを製造するには、高性能AE減水剤量を調整する必要が生じ、練上り温度が高くなるに伴って高性能AE減水剤量が増加する結果となった。

プラント出荷時と現場荷卸し時でのスランプフローの関係を図-15に示す。また、プラント出荷時から現場荷卸し時までのスランプフローの増大量を練上り温度との関係で整理した結果を図-16に示す。現在市販されている高性能AE減水剤は、一般にその分散効果が経時的に持続するように配慮されており、スランプフローは、練混ぜ後、時間の経過に伴い増大する場合がある。本工事では、高性能AE減水剤の主成分であるポリカルボン酸の粉体に対する吸着速度の温度依存性を考慮し、10~30℃の範囲で高温時ほど分散剤の粉体への吸着速度を遅らせるように調整した3種類の製品を使い分け、練上り温度に応じて高性能AE減水剤量を調整した結果、スランプフローの変化量は、最大で約5cm程度に制御することができた。これらの結果より、打込み時に一定の品質の高流動コンクリートを供給するためには、荷卸しまでの所要時間や練上り温度を考慮して、プラント出荷時の流動性の目標管理値を別途設定することが望ましいと考えられる。

底版部および側壁部に適用した高流動コンクリートのフレッシュ時の各種品質管理結果の一覧を表-2、図-17に示す。いずれの項目も、試験結果の平均値は目標値とほぼ一致し、個々の測定値も目標管理範囲内に全て収まっており、十分な精度でフレッシュ時の品質を管理できたことが実証された。

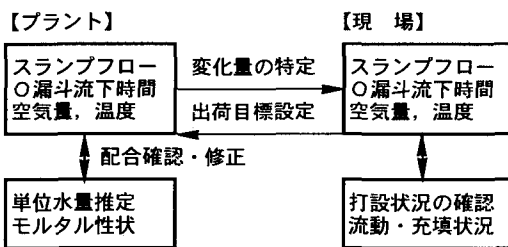


図-13 品質管理方法の概要

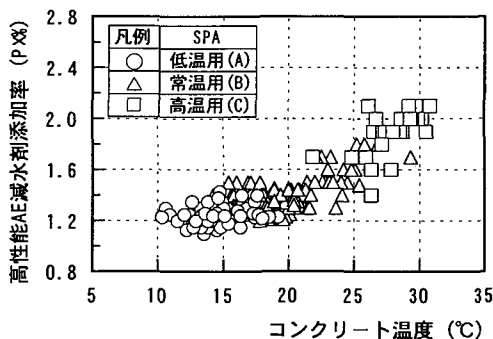


図-14 練上り温度と高性能AE減水剤量の関係

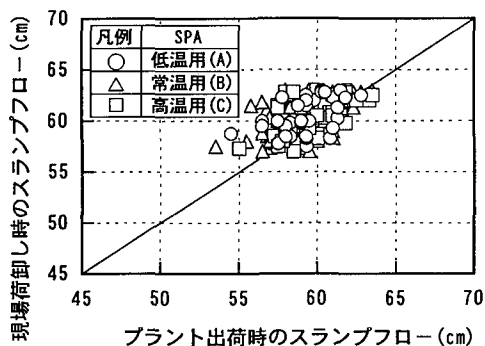


図-15 出荷時と荷卸し時のスランプフローの関係

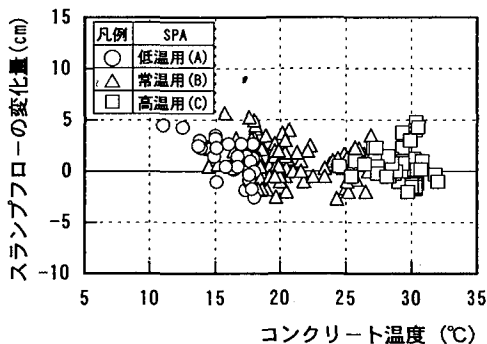


図-16 スランプフロー変化量と温度の関係

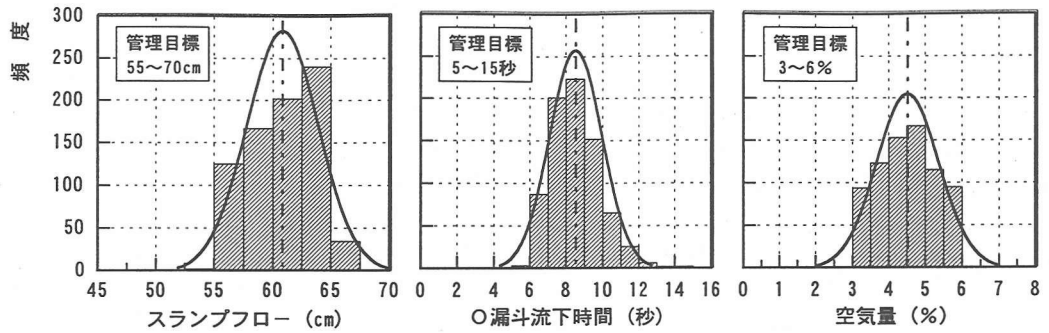


図-17 フレッシュコンクリートの各種品質管理結果

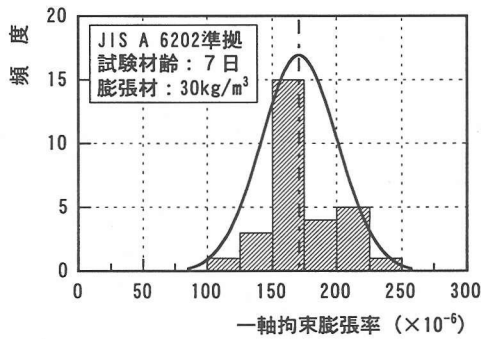


図-18 一軸拘束膨張率の管理結果

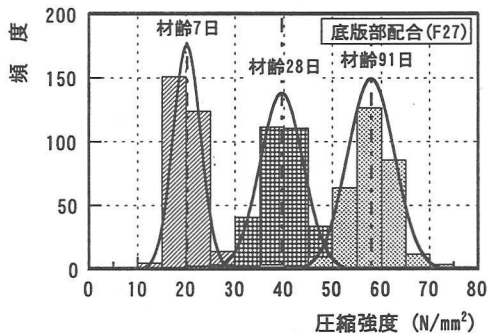


図-19 コンクリートの圧縮強度管理結果

膨張材を用いた高流動コンクリートの一軸拘束膨張率の試験結果を図-18に示す。一軸拘束膨張率は、いずれも約100~250 μ の範囲にあり、十分な収縮補償性能が付与されていることが確認された。

コンクリートの圧縮強度の管理結果の一覧を表-3に示す。また、各材齢における圧縮強度の統計処理結果の一例を図-19に示す。底版用コンクリートの場合、圧縮強度の平均値は、材齢7日で約20N/mm²、材齢28日で約40N/mm²、材齢91日で約58N/mm²であった。変動係数は、長期材齢ほど小さくなる傾向にあり、材齢91日の場合で約8%となった。

表-2 フレッシュコンクリートの品質管理結果

特性値	管理目標	工場	平均	最大	最小	標準偏差	変動係数
スランブフロー (cm)	55~70	A	60.5	67.0	55.0	2.9	4.8%
		B	60.5	66.5	55.0	3.0	4.9%
		C	61.0	67.5	55.0	3.0	4.9%
		全体	60.5	67.5	55.0	3.0	4.9%
O漏斗流下時間 (秒)	5~15	A	8.5	14.5	5.3	1.2	13.8%
		B	9.1	14.9	6.3	1.4	15.5%
		C	7.9	11.7	5.3	1.3	17.6%
		全体	8.5	14.9	5.3	1.3	16.4%
空気量 (%)	3~6	A	4.5	6.0	3.0	0.8	18.0%
		B	4.6	6.0	3.0	0.9	20.0%
		C	4.4	6.0	3.0	0.8	17.0%
		全体	4.5	6.0	3.0	0.8	18.3%

備考) A (n:333), B (n:208), C (n:230), 全体 (n:771)

表-3 コンクリートの圧縮強度管理結果

設計基準強度 (N/mm ²)	試験材齢	平均値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数
30	7日	22.7	33.3	16.1	2.6	11.5%
	28日	45.1	56.1	35.4	3.7	8.2%
	91日	64.7	74.9	54.1	4.4	6.8%
27	7日	20.2	28.3	12.4	2.8	13.7%
	28日	39.5	51.1	22.8	4.3	10.9%
	91日	57.9	71.5	37.9	4.6	8.0%
21	7日	16.9	20.6	14.6	1.3	7.9%
	28日	32.1	35.6	27.5	2.0	6.4%
	91日	47.5	52.6	40.0	2.8	6.0%

(2) 構造体コンクリートの品質検証結果

高流動コンクリートの打設方法は、ポンプ車のブーム配管の先端にフレキシブルホースを設置し、このホースを順次移動させながら平均約30m³/hの速度で打ち込んだ。打設時の流動勾配は、1/40～1/70程度とほぼレベルに近い勾配であった。コンクリートの流動距離は平均で約10m程度であるが、壁部材の場合には流動する方向が左右に限定されるため、流動距離が最大で約30m程度となる場合もあった。そこで、型枠内に打ち込んだコンクリートを流動距離毎に採取し、これらのコンクリートの品質を調べた。結果を表-4に示す。15mまたは30m流動させた場合、打込み直下よりスランブフローが若干増大したが、モルタルの先走り等の顕著な材料分離は認められなかった。また、硬化コンクリートの品質も、流動距離による差はほとんどなく、荷卸し時とほぼ同等の品質を有することが確認された。

実構造物からコアを採取し、構造体コンクリートの品質を調査した結果を表-5に示す。材齢7日でコアを採取し、材齢28日まで現場水中養生を行った。コア強度は、材齢28日時点で設計基準強度(30 N/mm²)を上回る結果が得られた。また、圧縮強度および単位容積質量とも、採取位置によらずほぼ同等の値が得られ、均質な構造体が構築されていることが確認された。

底版と側壁の一部に温度計と有効応力計を配置し、構造体コンクリートの温度および応力挙動を計測した。底版部の温度計測結果を図-20、壁部コンクリートの温度と発生応力の経時変化の一例を図-21に示す。

底版は、版厚が4mで、これを高さ方向に2分割し、平面的には約20×20mの矩形にブロック分割して順次打設した(打設量:約800m³/回)。実施工時の温度上昇量は、各リフトとも約27℃で、断熱温度上昇試験による終局断熱温度上昇量(約40℃)の65%程度とかなり小さい値となった。発熱速度が小さいために、放熱効果によって温度上昇が抑制されたものと考えられる。

一方、厚さ0.8mの壁部での打込み後の温度上昇量は、寒中期で約12℃、暑中期で約20℃となった。また、構造体コンクリートに発生する応力は、外気温や各リフトの拘束度に左右されることから、一義的に評価するのは困難であるが、いずれのリフトも発生引張応力は約2.0N/mm²以下に抑制されたことが確認できた。

本処理棟の地下2階の水槽外壁部を対象に、打設から約半年が経過した時点でひび割れの発生状況を調査した。部材厚が1.2m、高さが2.5mの側壁において壁長の累計が約340mにわたり調査した結果、発生したひび割れの平均間隔は約13.5m/本程度、そのひび割れ幅は平均で約0.14mmであった。この値は、防水性の観点から補修を必要とされるひびわれ幅(0.2mm以上)に比べて十分に小さく、ひび割れの発生頻度も相当に少ない

表-4 流動距離とコンクリートの品質

試料の採取位置	荷卸	流動距離		
		0m	15m	30m
スランブフロー (cm)	62.0	61.5	68.0	68.0
28日圧縮強度 (N/mm ²)	37.7	36.2	37.5	36.9
単位容積質量 (t/m ³)	2.37	2.34	2.33	2.34

表-5 構造体コンクリートコアの品質

試験項目	28日圧縮強度 (N/mm ²)		単位容積質量 (t/m ³)	
	210	34.3	2.34	2.34
打設高さ (cm)	150	36.3	2.35	
	80	34.9	2.34	
	0	33.5	2.34	

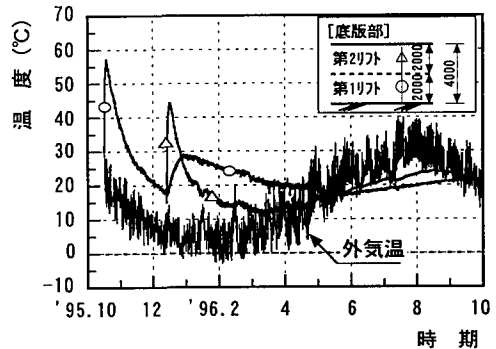


図-20 底版コンクリートの温度計測結果

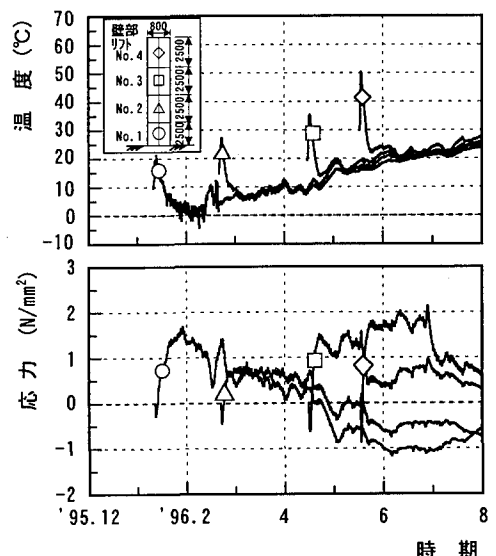


図-21 壁体コンクリートの温度・応力計測結果

ことから、低熱ポルトランドセメントと膨張材の併用により、温度ひび割れの発生を適切に制御できたものと考えられる。

4. まとめ

大規模な高度浄水施設のコンクリート工事において、水密性の確保、施工性の向上および施工環境の改善を目的とし、約20万 m^3 の低発熱型高流動コンクリートを適用した。本報告で得られた知見を以下に示す。

(1) 間隙通過性を確保するために単位粗骨材量を低減させ、高性能A E減水剤により流動性を増大させる一方、結合材として低熱ポルトランドセメントや膨張材を用い、これに石灰石微粉末を併用して所要の材料分離抵抗性を付与することにより、ひび割れ抵抗性に優れた自己充填性を有する高流動コンクリートとすることができる。

(2) 高流動コンクリートを製造する場合には、通常のA Eコンクリートの場合よりも練混ぜ時間を増加させる必要がある。本事例では、市中のレディーミキストコンクリート3工場の実績として、1バッチ当りの所要練混ぜ時間は120秒程度であった。

(3) 年間を通じて所要の流動保持性能を有する高流動コンクリートを製造するためには、温度条件に対応して高性能A E減水剤の添加量を調整するとともに、

できるだけ経時変化が小さい高性能A E減水剤の種類を選定することが望ましい。

(4) 現場での打込み時に所定の流動性を有する高流動コンクリートを供給するためには、練上り温度や荷卸しまでの運搬時間の影響による品質変化を考慮して、プラントでの目標管理値を設定することが望ましい。

(5) 細骨材の表面水率の変動を連続的に測定し、ミキサの負荷電流を製造管理指標とすることにより、所要の品質を有する高流動コンクリートを安定して製造できる。

(6) 複数のレディーミキストコンクリート工場にて、約20万 m^3 の高流動コンクリートを年間を通じて製造した結果、骨材の表面水率を適正に把握し、かつ温度条件に応じた適切な配合を選択することにより、安定した品質のコンクリートが得られることが実証された。

参考文献

- 1) 名和豊春：高ビーライト系セメントの現状，コンクリート工学，Vol. 34，No. 12，pp. 16-25，1996. 12.
- 2) 古屋信明，斉藤哲男，近松竜一，十河茂幸：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，pp. 51-60，1993. 5.

(1997. 8. 28 受付)

APPLICATION OF LOW HEAT TYPE HIGHLY FLOWABLE CONCRETE TO WATER PURIFICATION PLANT WITH A CONCRETE VOLUME UP TO 200,000 m^3

Masaki FUJITA, Seio UYAMA, Hiroshi KUSHIGEMACHI, Makoto MOROKADO, Chihiro SHINKAI and Ryuichi CHIKAMATSU

A large quantity of highly flowable concrete was placed on the construction of water purification plant with total concrete volume up to 200,000 m^3 , which concrete was made from low-heat portland cement and expansive admixture as a binder. This reports refers to applicability of highly flowable concrete to mass concrete structure, quality control on concrete mixing and mix design of highly flowable concrete.