

論文 ダム用高流動コンクリートの硬化物性

原田尚幸^{*1}, 中島良光^{*2}, 庄司芳之^{*3}, 岩崎則夫^{*4}

要旨: 本研究の目的は、PCD工法 (Pumped Concrete for Dams) に高流動コンクリートを用いることで、中小規模コンクリートダムにおける合理化施工システムを開発することである。本報は、ダム用高流動コンクリートとして選定した3種類の配合について力学特性試験、熱特性試験を実施し、温度ひび割れ発生の可能性について検討したものである。その結果、選定した配合はいずれもダムの内部コンクリートとしての目標品質を満足し、温度応力によるひび割れ発生の危険性は少ないことが明らかになった。

キーワード: コンクリートダム, 高流動コンクリート, 低発熱セメント, 硬化物性, 温度ひび割れ

1. はじめに

PCD工法は比較的簡便な施工設備で、効率のかつ連続的なコンクリートの運搬・打設が可能な工法であり、中小規模の重力式コンクリートダムの建設工事において、今後広く採用されることが期待されている。しかし、現状ではコンクリートの圧送性、締固め作業性などに課題が残されている¹⁾。一方、大きな流動性と高い材料分離抵抗性を併せ持つ高流動コンクリートは、その特長を生かしてプレキャスト通廊の底部、放流管周辺部などへ適用されており、今後はさらに利用範囲を拡げるためにダム堤体自体への適用も検討されている^{2), 3)}。

このような背景のもと、著者らはPCD工法に高流動コンクリートを用いることで、コンクリートダムの施工の更なる合理化、省力化を図ることを目的に試験・研究を進めている。これまでの検討の結果、最大寸法80mmの粗骨材を用いた場合でも290kg/m³程度の結合材量で高流動化が可能なこと⁴⁾、また粉体容積が一定の場合、粉体の種類、置換率によらず混和剤 (高性能AE減水剤) の添加量を調整することで同様のフレッシュ性状が得られること⁵⁾などがわかった。その結果を踏まえ、ダムの内部コンク

リートとして必要なフレッシュ性状を満足する粗骨材最大寸法80mmのダム用高流動コンクリートの配合を3種類選定した。しかし、選定した配合の高流動コンクリートの硬化物性については不明であり、またこれを内部コンクリートとして用いる場合、粉体量が多いためセメントの水和発熱に起因する温度ひび割れの発生が懸念される。本論文では、選定した3種類の配合のダム用高流動コンクリートの硬化物性 (力学特性、熱特性) を把握し、温度ひび割れ発生の可能性について考察する。

2. ダム用高流動コンクリートの目標性能

本研究では、高流動コンクリートの適用対象をダム堤体自体、すなわち内部コンクリートとした。目標とした性能を表-1に示す。流動性

表-1 ダム用高流動コンクリートの目標値

項目	目標値
大型スランプフロー	120±10cm
空気量	4.0±1.0%
ブリーディング率	1%以下
凝結特性 (20℃)	終結24時間以内
単位容積質量	2.3t/m ³ 以上
圧縮強度 (σ_{91})	15N/mm ²
断熱温度上昇量	25℃以下

*1 (株) 銭高組 技術本部 技術研究所 工修 (正会員)
 *2 前田建設工業(株) 技術本部 技術研究所 研究第一グループ 工修 (正会員)
 *3 日本国土開発(株) 技術開発研究所 材料・環境研究室 工修 (正会員)
 *4 (株) 銭高組 技術本部 技術研究所

はジャンカを生じることなく型枠内を充填できる程度²⁾、その他の性能は従来のダムコンクリートと同等程度を目標とした。

なお、大型スランプフローとは、図-1に示すような通常の2倍の寸法を持つスランプコンを用いて測定したコンクリートのスランプフローである。

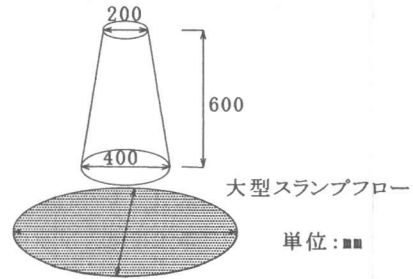


図-1 大型スランプ試験

3. 試験概要

3.1 使用材料および配合

試験に用いた材料の種類と物性を表-2に示す。結合材は水和熱抑制の観点から低発熱型セメントを使用し、その一部を混和材(石灰石粉)で置換した混合粉体とした。粉体構成は、①中庸熱フライアッシュセメント(フライアッシュ20%置換)を基材に石灰石粉を内割で40%混入したもの、②低熱ポルトランドセメントを基材に石灰石粉を内割で50%混入したもの、③3成分系低発熱セメント(セメント+高炉スラグ微粉末+フライアッシュ)を基材に石灰石粉を内割で50%混入したものである。

骨材は砂岩系碎石および砕砂を用い、粗骨材の最大寸法を $G_{max}=80\text{mm}$ とし、混合割合を $G1:G2:G3=34.4:27.4:38.2$ と設定した。

高性能AE減水剤はポリカルボン酸系を使用し、併せてセルロース系増粘剤を使用した。

配合は表-3に示す3種類とした。水粉体容積比($V_w/V_{pd}=1.7$)、ペースト細骨材容積比($V_{pt}/V_s=0.9$)、モルタル粗骨材容積比($V_m/V_g=1.35$)を固定し、結合材の種類および石灰石粉の混合比率を要因とした配合である。

3.2 練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、容量100ℓの強制2軸型ミキサを使用した。練混ぜは図-2に示す方法で行い、1バッチの練混ぜ量は80ℓとした。

3.3 試験項目と試験方法

試験項目および試験方法を表-4に示す。大型スランプフロー試験、断熱温度上昇試験には80mmフルサイズ試料を用い、その他の試験には

表-2 使用材料の物性

使用材料	物性
セメント	中庸熱フライアッシュセメント 比重3.03 (FA20%置換)
	低熱ポルトランドセメント 比重3.22 比表面積3420cm ² /g
	3成分系低発熱セメント 比重2.73 比表面積4970cm ² /g
混和材	石灰石粉 比重2.70 比表面積2600cm ² /g
	G1:砂岩系碎石 80~40mm 比重2.68 FM8.26
粗骨材	G2:砂岩系碎石 40~20mm 比重2.68 FM7.70
	G3:砂岩系碎石 20~5mm 比重2.68 FM6.38
	砂岩系砕砂 0.15以下の微粉10% 比重2.68 FM2.55
減水剤	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
増粘剤	水溶性セルロースエーテル

表-3 ダム用高流動コンクリートの配合

配合No.	粗骨材の最大寸法(mm)	水粉体容積比	ペースト細骨材容積比	モルタル粗骨材容積比	単位量 (kg/m ³)					
					水	セメント	石灰石粉	細骨材	粗骨材	増粘剤
1					173 ^{*1}	104				
2	80	1.70	0.90	1.35	165	156 ^{*2}	131	786	1095	0.49
3					132 ^{*3}	131				

*1 中庸熱 *2 低熱 *3 3成分

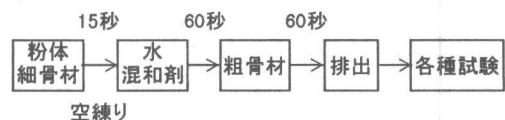


図-2 練混ぜ方法

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
大型スランプフロー	JSCE-503-1990の方法
空気量	JIS A 1128に準拠
ブリーディング	JIS A 1123に準拠
凝結時間	JIS A 6204に準拠
自己収縮	JCI「高流動コンクリートの自己収縮試験法」に準拠
圧縮強度	JIS A 1108に準拠
引張強度	JIS A 1113に準拠
静弾性係数	JSCE-G502に準拠
断熱温度上昇	空気循環式、28日間測定
熱伝導率	プローブ法
熱拡散率	水中冷却法 (GLOVER法)
熱膨張係数	温度可変水槽 (10~50℃)

40mmウェットスクリーニングした試料を用いた。ただし、熱特性試験は、80~40mmの粗骨材を40mm以下に置き換え、骨材量を一定とした試料を用いた。打込み温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ である。

4. 試験結果および考察

4.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-5に示す。ダム用高流動コンクリートのスランプフローは、いずれの配合とも目標値の $120 \pm 10\text{cm}$ を満足した。また、ブリーディングは、配合No.2でみられたが1%以下とごくわずかであった。

4.2 凝結特性

凝結特性は、一般にベースセメントの凝結時間や混和材置換率の影響を受ける。凝結試験結果を表-6に示す。配合No.3は他の配合のそれと比べ、始発で3~5時間、終結で8~9時間程度遅延する傾向がみられた。この凝結の遅れは設定した目標値を越える結果であったため、今後検討が必要と考えている。

4.3 自己収縮特性

自己収縮試験結果を図-3に示す。自己収縮は、いずれの配合ともほぼ終結後から生じている。また自己収縮速度においても配合間の相違はみられなかった。既往の文献⁶⁾によれば、3成分系低発熱セメント、低熱ポルトランドセメントを用いた $W/C=40 \sim 55.3\%$ 、 $G_{\text{max}}=20\text{mm}$ の低発熱型高流動コンクリートの自己収縮量は、材齢28日で $100 \sim 250 \times 10^{-6}$ 程度である。これらの値と比較して、本検討によるコンクリートでは、材齢28日の自己収縮量が 50×10^{-6} 程度の小さな値であった。これはダム用高流動コンクリートの結合材量が少なく、水結合材比が大きい($W/C=95 \sim 125\%$)ためと考えられる。

4.4 力学特性

硬化コンクリートの試験結果を表-7に示す。圧縮強度の発現性状を図-4に示す。圧縮強度はすべての配合で目標強度(材齢91日強度 15N/mm^2)を満足した。強度発現性状は、配合No.1, 2が同様な発現傾向を示すこと、配合No.3は材

表-5 フレッシュ性状の試験結果

配合No.	密度 (t/m^3)	大型スランプフロー (cm)	フルサイズ空気量 (%)	ブリーディング率 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)
1	2.323	122×115	4.4	0	21.0
2	2.333	121×115	4.4	0.7	21.0
3	2.309	131×129	4.2	0	21.0

表-6 凝結試験結果

配合No.	セメント種類	石粉置換率 (%)	セメントの凝結時間		コンクリートの凝結時間	
			始発 (h-m)	終結 (h-m)	始発 (h-m)	終結 (h-m)
1	中庸熟	40	3-20	4-30	15-30	20-25
2	低熟	50	2-25	3-40	12-40	19-35
3	3成分系	50	5-25	7-15	18-10	28-30

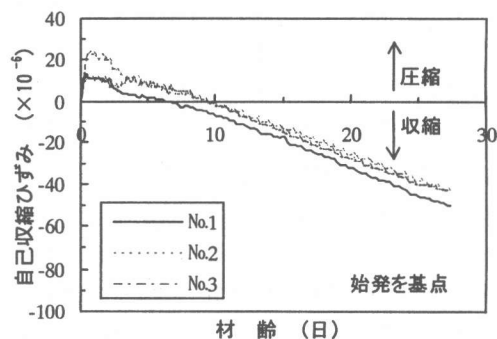


図-3 自己収縮試験結果

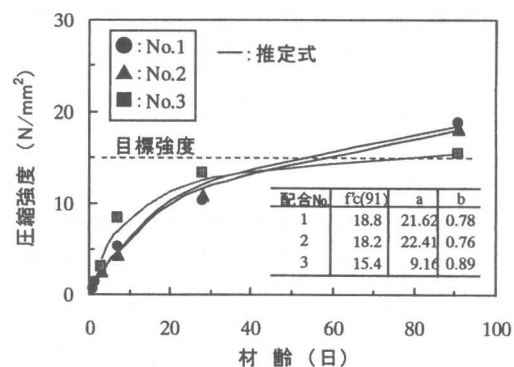


図-4 圧縮強度の発現状況

齢3日から7日までに急激な強度発現を示し、それ以降の強度増進は少ないことがわかった。また、図にはコンクリート標準示方書⁷⁾に採用されている圧縮強度発現式 $f_c(t)=f_c(91) \cdot t/(a+bt)$ の係数 a, b を求めた結果も併せて示した。

圧縮強度と引張強度との関係を図-5に示す。

表-7 力学特性試験の試験結果

配合No.	圧縮強度 f_c (N/mm ²)						引張強度 f_t (N/mm ²)		静弾性係数 E_e ($\times 10^4$ N/mm ²)		$f_t(91)/f_c(91)$	$f_t(91)/E_e(91)$
	材齢 24時間	材齢 30時間	材齢 3日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 91日	材齢 28日	材齢 91日	材齢 28日	材齢 91日		
	1	0.66	1.29	3.04	5.20	10.3	18.8	1.26	2.16	1.75		
2	—	—	2.57	4.37	10.9	18.2	—	1.79	—	2.21	0.10	81×10^{-6}
3	—	—	2.94	8.41	13.4	15.4	—	1.74	—	2.44	0.11	71×10^{-6}

圧縮強度に対する引張強度の比率は、一般に1/10~1/14といわれているが、ダム用高流動コンクリートの結果は表-7に示すように1/10に近い値を示した。またこれらのコンクリートの引張強度を $f_t(t) = c \cdot \sqrt{f_c(t)}$ により近似した場合の係数 c の値は0.45であり、示方書の標準値より2割程度大きな値であった。

圧縮強度と静弾性係数との関係を図-6に示す。静弾性係数も同様に $E_e(t) = c \cdot \sqrt{f_c(t)}$ により近似した場合、係数 c の値は5600と示方書の標準値より2割程度大きな値であった。

したがって、後述する温度ひび割れ発生への検討に際してのダム用高流動コンクリートの力学特性は、コンクリート標準示方書の標準値を用いることで安全側に推定できると考えられる。

なお、コンクリートの伸び能力を表す引張強度と静弾性係数の比率は、表-7に示すように $70 \sim 90 \times 10^{-6}$ とほぼ一定であり、いずれの配合も同程度のひび割れ抵抗性を有するものと考えられる。

4.5 熱特性

断熱温度上昇試験結果を図-7および表-8に示す。図によれば、いずれの配合も終局断熱温度上昇量は、目標値である25℃以下に低減されており、ダム用コンクリート配合として使用可能な低発熱化が図られていると考えられる。この試験結果を $Q(t) = Q_\infty [1 - \exp(-\alpha t^\beta)]$ 式で近似した場合の係数は表-8のようになり、実測値に対する近似式の適合性はかなりよい。

また、同表中の圧縮強度と終局断熱温度上昇との比、すなわち圧縮強さ1 N/mm²あたりの温度上昇量は、中庸熱フライアッシュセメントを主体とした配合No.1が最も小さく、温度ひび割

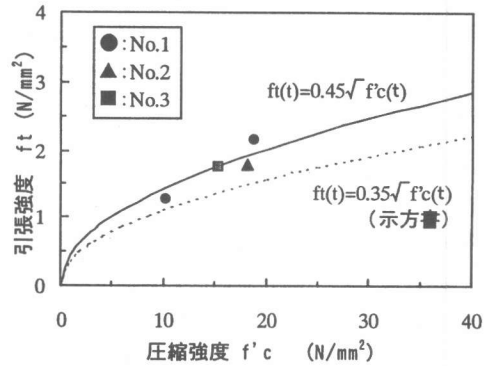


図-5 圧縮強度と引張強度の関係

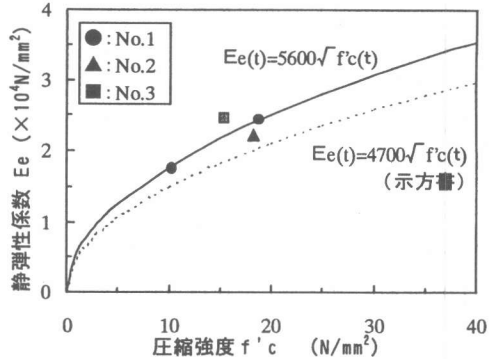


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

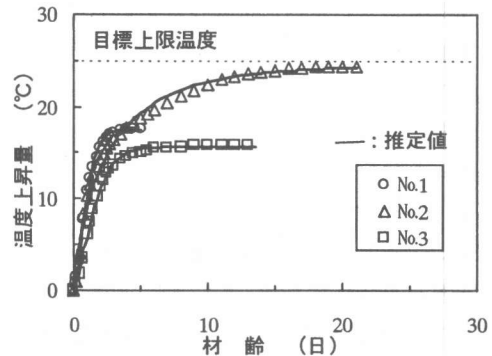


図-7 断熱温度上昇試験結果

れ制御の点からは有利な配合と考えられる。

コンクリートの熱特性は、一般に体積の70～80%を占める骨材の石質や単位量、コンクリートの含水状態や空隙量に影響を受けること、熱伝導率 K 、単位容積質量 ρ 、比熱 C および熱拡散率 h^2 の間に $K = \rho C h^2$ の関係があることが知られている。このため熱定数に粉体構成の相違がおよぼす影響は少ないものと考え、熱伝導率、熱拡散率および熱膨張係数に関する試験は配合No.1についてのみ行った。その結果を既往の文献^{7), 8), 9)}による熱特性値と比較して表-9に示す。試験結果は、既往値の範囲内にあり、ダム用高流動コンクリートの熱特性は通常のコンクリートの熱特性と同等であることが確認された。

5. 温度ひび割れ発生 の検討

ダム用高流動コンクリートと通常の中規模ダムに使用される有スランブコンクリート ($G_{max}=80\text{mm}$, スランブ $4\pm 1\text{cm}$) との温度応力の発生傾向の違いを解析シミュレーションにより検討した。

解析手法は2次元有限要素法による温度解析とCP法による温度応力解析である。解析条件を表-10に、解析モデルを図-8に示す。解析に用いたコンクリートの力学特性値、熱特性値は、それぞれ試験による実測値である。その他、コンクリート打設間隔は3日とし、外気温は日変動を考慮したsin関数¹⁰⁾とした。なお、ここでの検討は、施工中の打設リフト内部に発生するひび割れを対象とした。

図-9に第3リフトの高さ25cm部分(節点1)の応力履歴を示す。同図からいずれのコンクリートを用いた場合も打設後15日程度の間は圧縮応力が生じ、その後引張応力が生じることがわかる。発生する引張応力は極めて小さく、その最大値は 0.25N/mm^2 程度となった。このようにダム用高流動コンクリートは、比較対象としたダムコンクリートと同様の温度応力の発生傾向にあり、発生する引張応力は圧縮強度から

表-8 断熱温度上昇特性

配合No	水セメント比	圧縮強度 (N/mm ²)	終局断熱温度上昇量 Q_{∞} (°C)	温度上昇速度の定数 α	温度上昇速度の定数 β	温度上昇量/圧縮強度 (°C/N/mm ²)
1	0.95	18.8	17.4	0.82	1.56	0.93
2	1.06	18.2	24.5	0.46	0.76	1.35
3	1.25	15.4	15.5	0.45	1.42	1.01

表-9 コンクリートの熱特性・既往値との比較

	熱伝導率 K (W/m°C)	熱拡散率 h^2 ($\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{S}$)	比熱 C (J/kg°C)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/\text{°C}$)
配合No1	2.24	0.89	1074	8.4
土木学会示方書 ⁷⁾	2.56~2.79	0.83~1.10	1047~1256	10.0
マスコン指針 ⁸⁾	1.50~3.61	0.69~1.53	837~1047	6.0~30.0
多目的ダム建設 ⁹⁾	1.74~2.91	0.69~1.25	837~1256	7.0~11.0

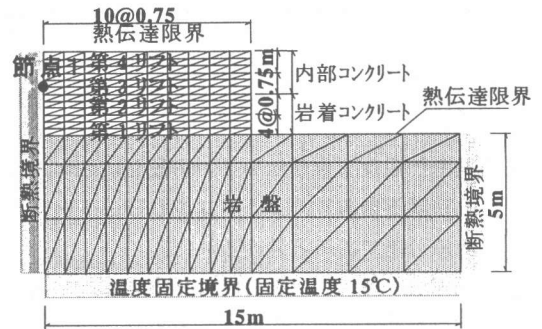


図-8 解析モデル

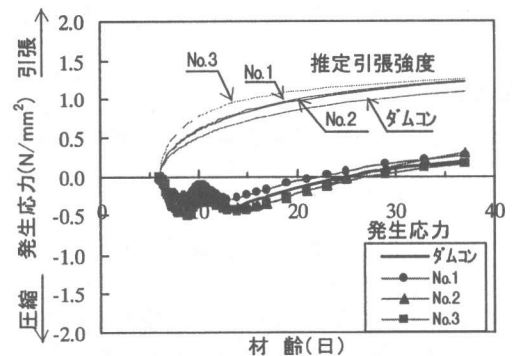


図-9 解析結果(第3リフト応力履歴)

推定される引張強度を下回っていることから、温度ひび割れ発生 の危険性は低いと考えられる。

6. まとめ

ダム用高流動コンクリートとして選定した3

表-10 解析条件

	岩盤	有スランブコンクリート		ダム用高流動コンクリート		
		岩着コンクリート	内部コンクリート	配合No.1	配合No.2	配合No.3
熱伝導率 (W/m°C)	3.02	2.24				
比熱 (kJ/kg°C)	753	1074				
密度 (kg/m³)	2.65	2.470	2.450	2.323	2.333	2.309
熱伝達率 (W/m²°C)	-	11.6				
断熱温度上昇式 (°C) $Q(t) = Q_{\infty}[1 - \exp(-\alpha t^{\beta})]$	-	$Q_{\infty}=26.0$ $\alpha=0.94$ $\beta=1.01$	$Q_{\infty}=16.0$ $\alpha=1.21$ $\beta=1.12$	$Q_{\infty}=17.4$ $\alpha=0.82$ $\beta=1.56$	$Q_{\infty}=24.5$ $\alpha=0.46$ $\beta=0.76$	$Q_{\infty}=15.5$ $\alpha=0.45$ $\beta=1.42$
初期温度 (°C)	15.0	20.0				
外気温 (°C)	-	$T=20+10\sin(2\pi \cdot t)$ t:時刻(時)				
熱膨張係数 (1/°C)	-	10×10^{-6}		8.4×10^{-6}		
圧縮強度 (N/mm²) $f_c(t) = f_c(91) \cdot t / (a+bt)$	-	$f_c(91)=32.7$ a=18.95 b=0.80	$f_c(91)=16.0$ a=28.17 b=0.70	$f_c(91)=18.8$ a=21.62 b=0.78	$f_c(91)=18.2$ a=22.41 b=0.76	$f_c(91)=15.4$ a=9.16 b=0.89
引張強度 (N/mm²)	-	$f^t(t) = 0.35 \sqrt{f_c(t)}$				
弾性係数 (N/mm²)	3,000	$E_e = \phi(t) \times 4700 \sqrt{f_c(t)}$ 3日まで $\phi(t)=0.73$, 5日以降 $\phi(t)=1.0$				
外部拘束係数 R_N	-	0.30 ^{*1}	0.24 ^{*2}	0.37 ^{*3}	0.37 ^{*3}	
外部拘束係数 R_{M1}	-	1.15 ^{*1}	0.92 ^{*2}	0.90 ^{*3}	0.90 ^{*3}	
外部拘束係数 R_{M2}	-	1.15 ^{*1}	0.92 ^{*2}	0.90 ^{*3}	0.90 ^{*3}	

*1 第1リフト *2 第2リフト *3 第3リフト以降

種類の配合について検討した結果は、次のとおりである。

- ①終局断熱温度上昇量はいずれの配合においても25°C以下であり、ダム用コンクリートとして使用可能であると考えられる。
- ②熱伝導率、熱膨張係数などの熱特性値は、通常のコンクリートと同程度である。
- ③圧縮強度と引張強度の関係、圧縮強度と静弾性係数の関係などの基本的な力学特性は、通

常のコンクリートと同程度である。

- ④自己収縮量は材齢28日で 50×10^{-6} と小さく、大きな自己収縮は発生しないと考えられる。このように、本検討における粗骨材最大寸法80mmの高流動コンクリートの硬化物性値は、従来のダム内部コンクリートと何ら遜色がなく、ダム用コンクリートとして必要な品質が確保できるものと考えている。

参考文献

- 1) 川口 信幸：宮ヶ瀬副ダム施工の特徴について、ダム日本, No.609, PP.53-66, 1996.5.
- 2) 永山 功, 渡辺和夫他：高流動コンクリートのダムへの適用性に関する検討, ダム技術, No.130, pp.28-34, 1997.7.
- 3) 柳田 力, 永山 功他：粗骨材最大寸法40mmを用いた高流動コンクリートの室内および現地流動特性試験, ダム技術, No.133, pp.26-31, 1997.10.
- 4) 庄司, 渡部ほか：最大寸法80,40mmの粗骨材を用いた高流動コンクリートに関する基礎実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20.1998.投稿中

- 5) 中島, 原田ほか：ダム用高流動コンクリートの品質に及ぼす粉体種類の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20.1998.投稿中
- 6) 横井謙二, 新藤竹文：低発熱型高流動コンクリートの収縮特性, 土木学会第51回年次学術講演会概要集V, pp.698-699, 1996.9.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編], 1996.9.
- 8) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策指針, 1989.3.
- 9) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設-第3巻-設計V編, 1987.
- 10) コンクリート技術シリーズ14/最新のマスコンクリート技術, 土木学会, pp.24-31, 1996.11.