

論文 高流動コンクリートの施工性に関する実験的研究

竹迫 淳*1・丸山 久一*2・峰村 修*3・坂田 昇*4

要旨：ダム本体の常用洪水吐周りへの高流動コンクリートの適用を考え、施工実験によりその施工性を確認した。また、トンネルの閉塞工へ高流動コンクリートを適用し、工期短縮及び品質向上を確認することができた。さらに、ポンプ圧送性について実験的に検討し、高流動コンクリートの吐出圧力が増加することを確認するとともに、その要因として、コンクリートの粘度と脱水速度が影響していることを確認した。

キーワード：高流動コンクリート、施工性、脱水速度、粘性

1. はじめに

締固め作業が不要で自己充填性を有する高流動コンクリートが開発され、近年では、実施工への適用例も数多く見られるが、その施工性を詳細に検討した例は少ない。そこで、本論文では、高流動コンクリートの実構造物への適用にあたり、特に、アーチ式ダム本体の常用洪水吐の放流管周りへの使用を考え、事前検討としての施工実験を行い、その自己充填性及び施工性を確認することを目的とした。また、ダムの調査横坑(トンネル)の閉塞工への高流動コンクリートの適用実績を報告するとともに、ポンプ圧送時の吐出圧力の増加現象を実験的に検討した。

2. 施工実験

2.1 概要

放流管周りへの高流動コンクリートの適用を検討するため、施工実験を実施した。表-1に使用材料を、表-2に施工実験および実施工に使用したコンクリートの配合を示す。配合は、事前の配合試験により選定したもので、粉体に中庸熟ポルトランドセメント単味を用いた。コンクリートの練混ぜは、ダム天端に設置したパッチャープラントミキサ(強制二軸ミキサ、容量2.25m³)にて行い、生コンダンプおよび7.5tケーブルクレーンで運搬し、2m³バケットによって打設した。練上ったコンクリートは、スランプフロー試験、空気量試験、V漏斗試験を行うとともに、キッチンペーパーによる材料分離評価試験[1]を行い、圧縮強度試験用供試体を作製した。実際の放流管周りの形状および配筋を模して作製した施工実験のモデルを図-1に示す。実験は、このモデルの片側からコンクリートを打設し、高さ0.3m、水平距離5.0mの間コンクリートを締固めを行わないで流動させ、反対側までコンクリートが充填することを確認することとした。鉄筋は、高さ0.3m、水平距離5.0mの狭所にD22を鉛直筋とし流動方向に0.5m間隔、流動に直角方向0.3m間隔で配置した。また、打設時においては、図-1に示す位置に設置した熱電対によってコンクリートの温度履歴を計測した。打設側および流動先端部において上部のコンクリートをそれぞれ

*1 長岡技術科学大学大学院、工修(正会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系、Ph.D.(正会員)

*3 新潟県三面川開発事務所(正会員)

*4 鹿島建設(株)北陸支店、工博(正会員)

採取し、コンクリートの洗い試験による粗骨材量の測定および圧縮強度試験用供試体を作製した。さらに、コンクリート打設後、材齢 14～21 日において図-1 に示す位置よりコアを採取し、粗骨材の分布を観察した後にコア供試体を作製し、材齢 91 日において圧縮強度試験を行った。

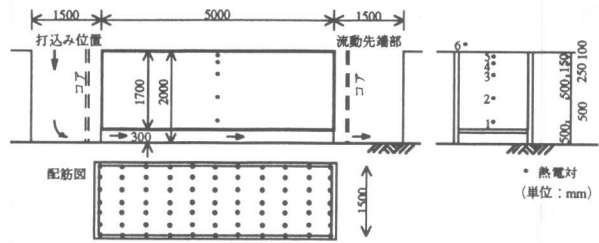


図-1 施工実験モデル

2.2 実験結果および考察

図-2 に前述のプラントミキサで練混ぜたコンクリートのフレッシュ性状の経時変化を示す。図に示すように、各配合とも練上り 60 分後、120 分後においてもスランプフローの低下はわずかであった。V 漏斗流下時間及び 50cm フロー時間は経時時間とともに若干増大する結果となった。この結果と目視による結果を総合すると、コンクリートの粘性が経時的に増加しているものと

表-1 使用配合

項目	摘要
セメント	中廣熱ホルランドセメント 比重3.20
細骨材	川砂を破砕して製造した骨材 比重2.59, 吸水率1.71%, FM=2.75
粗骨材	川砂利を破砕して製造した骨材 Gmax=20mm, 比重2.64, FM=6.64
高性能AE減水剤(SP)	ポリカルボン酸塩
増粘剤	ウエランガム
水	三面川河川水

考えられる。しかし、この程度の粘性の増加はむしろ充填性を向上させるものと推察される。キッチンペーパーによる材料分離評価試験においても、コンクリートがキッチンペーパーにほとんど附着せず、材料分離が生じていないことを定量的に確認した。コンクリート中の骨材洗い試験結果を図-3 に示す。図に示すように、流動先端部の方が逆に粗骨材が多い結果

表-2 配合

粗骨材最大寸法 (mm)	目標スランプフロー (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	SP	増粘剤
20	65±5	4.5±1.5	30.0	160	533	773	871	12	0.08

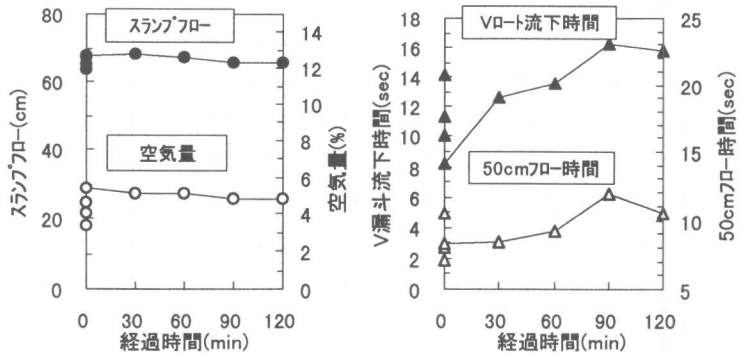


図-2 コンクリートのフレッシュ性状

となったが、その差は僅かであり、打込み位置及び流動先端部ともに粗骨材の理論含有率の 0.94～1.04 であり、ほぼ均一に粗骨材が分布しているものと推察される。コンクリートの打上り高さは、打込み位置及び流動先端部で最大高低差は 4.5cm であり、ほぼフラットに打上がった。パッチャープラントにて採取したコンクリート、施工時に打込み位置及び流動先端部で採取したコンクリートをそれぞれ標準養生し、材齢 7 日、28 日、91 日で圧縮強度試験を行った結果を図-4 に示す。

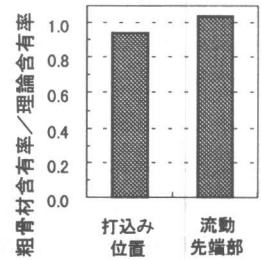


図-3 コンクリート中の粗骨材量

材齢 91 日の圧縮強度は、パッチャープラントで採取したコンクリートで 74.7N/mm^2 であり、高強度が得られた。コア供試体の圧縮強度は、打込み位置で $61.9\sim 64.6\text{N/mm}^2$ 、流動先端部で $60.5\sim 67.3\text{N/mm}^2$ であり、標準養生供試体の圧縮強度よりも 1 割～2 割程度小さくなったが、これは養生条件が違うほか、コアの場合、表面のカバーモルタルがないことによる圧縮強度の低下が考えられ、実際の強度はさらに大きかったものと考えられる。また、コア供試体の表面の粗骨材の分布は、打込み位置及び流動先端部ともに均一であることが確認できた。打設したコンクリートの温度を計測した結果、最高温度は 69°C であった。粉体量の多い高流動コンクリートは、このように高温となることから、マスコンクリートに用いる際には、十分な温度応力解析を行い、クーリングパイプの設置等を検討すると同時に、使用材料や配合の点からも十分な検討を加え、極力必要な部位にのみ使用し、温度応力の緩和を図る必要があると思われる。

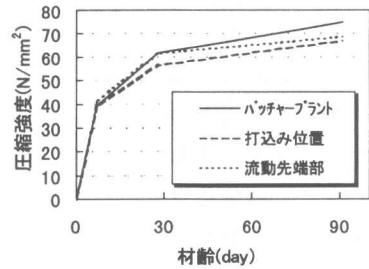


図-4 圧縮強度

3. 調査横坑閉塞工への適用

3.1 概要

調査横坑の閉塞に自己充填性に優れた高流動コンクリートの使用を検討し、3カ所の調査横坑の施工(施工①、②及び③)を行った。練混ぜたコンクリートはコンクリートポンプにて打設した。使用したコンクリートポンプは、最大理論吐出量 $35\text{m}^3/\text{h}$ のもので、施工時の打設速度は $25\text{m}^3/\text{h}$ であった。輸送管には 6 B 管を使用した。使用材料および配合はそれぞれ表-1、表-2 に示すものと同じである。練上ったコンクリートは、スランプフロー試験、空気量試験、V 漏斗試験、及びキッチンペーパーによる材料分離評価試験をそれぞれ行い、圧縮強度試験用供試体を作製した。打設時においては、コンクリートポンプの吐出圧力および時間当たりの吐出回数を計測した。

3.2 フレッシュコンクリートの性状

図-5 にコンクリートのフレッシュ性状の試験結果およびその経時変化を示す。図に示すように、練上ったコンクリートは、施工時の季節がそれぞれ異なるにもかかわらず、安定した性状を示し、すべての試験値が目標範囲内に入る良好なコンクリートであった。パッチャープラントにて採取したコンクリートを標準養生し、材齢 7 日、28 日及び 91 日で圧縮強度試験を行った結果、材齢 91 日の圧縮強度は、 $60.0\sim 76.2\text{N/mm}^2$ とかなりの高強度が得られた。これは、粉体にセメント単味を用いた効果である。

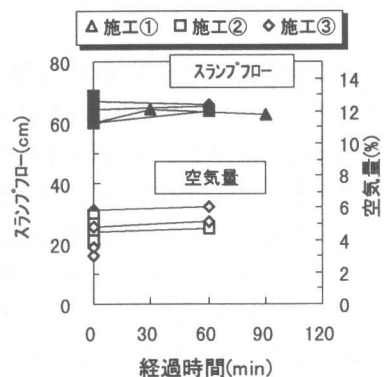


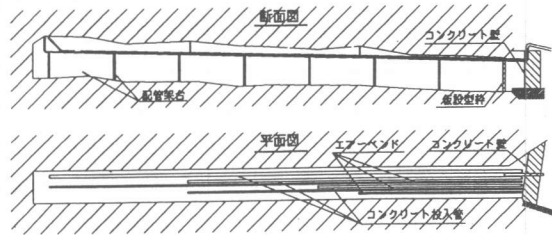
図-5 コンクリートのフレッシュ性状

3.3 施工性

図-6 に従来工法と高流動コンクリートを用いた工法の比較を示す。図に示すように、従来工法では、延長 70m を約 10m 間隔で 7 分割し、それぞれの区間に普通コンクリートを打設し、かつコンクリート硬化後、モルタルの注入を行うため、工程に長期間を要する。また、十分な締固めが困難であるため、締固め不十分な箇所を生じる可能性がある。これに対し、高流動コンクリ

ートでは、吐出口を3ヶ所設けることにより、1回の打設でコンクリート施工を終了することができる。同時に、密実にコンクリートを充填させることが可能であると考えられた。その結果、工期を36日短縮(施工③)することができた。また、高流動コンクリートの施工にあたっては、空気抜きのパイプを

高流動コンクリート



普通コンクリート
(従来工法)

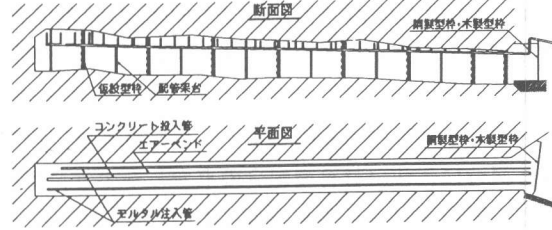


図-6 施工法の比較

配置し、そのパイプより高流動コンクリートが流れ出てくることを確認の上打設を終了した。ここで、トンネル入口においては、当初木製型枠を使用していたが、トンネル断面と、型枠の隙間からのコンクリートの流出が多かったため、事前にトンネル入口においてコンクリート壁を構築した。ポンプの水平換算距離と理論吐出圧力の関係を図-7に示す。図より、本施工に使用した高流動コンクリートは、水平換算距離の増加に比例して理論吐出圧力が増加しており、その理論吐出圧力は、普通コンクリートのおよそ1.5倍であった。

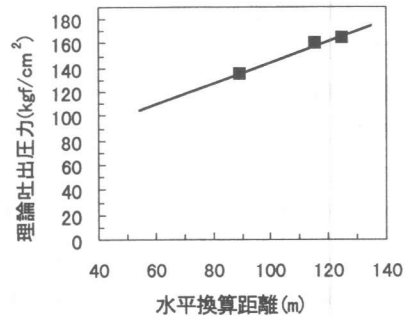


図-7 ポンプの理論吐出圧力

4. 高流動コンクリートのポンプ圧送性に関する研究

高流動コンクリートのポンプ打設については、圧送前後での流動性の変化、圧送による粘性の低下、吐出圧力の増加等が指摘されているが、そのメカニズムの解明には至っていないのが現状である。特に、吐出圧力の増加は、長距離圧送や高所圧送を行う場合、その圧送計画に大きく影響を及ぼすものである。調査横坑閉塞の施工において、図-7示す理論吐出圧力が普通コンクリートの約1.5倍であったことから、吐出圧力を左右すると思われる潤滑層の形成に着目し、モルタルによる流動特性値の測定、コンクリートの静置ブリーディング試験、圧送管内におけるコンクリートの荷圧状態を想定した加圧ブリーディング試験、遠心分離によるモルタル中の残存水抽出試験を行い、高流動コンクリートの脱水性状について検討を行った。

4.1 実験概要

実験は、粉体の種類を変えた3種類の高流動コンクリート(配合Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)と比較用の普通コンクリート(配合Ⅰ)を使用して行った。使用材料及び配合をそれぞれ表-3、表-4に示す。配合Ⅰはスランプ12cmの普通コンクリートである。モルタルは、それぞれのコンクリートから粗骨材を取り除いたものである。コンクリートの練混ぜには、100リットルのパン型強制練りミキサを

使用した。練混ぜ終了後、スランブフロー試験、空気量試験、V漏斗試験、キッチンペーパーによる材料分離評価試験を行い良好な性状であることを確認した後、各試験を行った。流動特性値の測定は、モルタルによって行った。モルタルのレオロジー特性は、内円筒回転型レオメーター（外筒φ27mm、内筒φ14mm、試料高さ65mm）を用い、練上がり直後に測定した。レオロジー曲線は、内筒を100sec⁻¹まで50秒で指数的に上昇・下降させて測定し、上昇時

表-3 使用材料

項目	摘要	配合
セメント	普通ポルトランドセメント 比重3.16	I, II, III
	中庸熱ポルトランドセメント 比重3.20	IV
石粉	石灰石粉 比重2.70	
細骨材	陸砂(千葉県君津産) 比重2.63	
	吸水率1.80%, FM=2.34	
粗骨材	石灰砕石(西頸城郡産) 比重2.69	
	吸水率0.50%, FM=6.68, 実積率61.5%	
AE減水剤	リグニンスルホン酸	I
高性能AE減水剤 (SP)	β-ナフタリンスルホン酸ナトリウム塩	II, III
	ポリカルボン酸塩	IV
増粘剤	ウエランガム	
水	水道水	

表-4 配合

配合番号	粗骨材最大寸法 (mm)	目標スランブフロー (cm)	目標空気量 (%)	水粉体比 (%)	単位量 (kg/m ³)				*) P%	**) W%	
					水	セメント	石粉	細骨材			粗骨材
I	20	12±1.5	4.5±1.5	56.8	171	311	0	788	992	0.15	0
II	20	65±5	4.5±1.5	35.0	169	260	223	763	869	2.0	0.05
III	20	65±5	4.5±1.5	35.0	160	520	0	763	869	2.0	0.05
IV	20	65±5	4.5±1.5	30.0	160	533	0	773	871	2.5	0.05

*)単位粉体量に対する%, **)単位水量に対する%

の低せん断ひずみ速度条件 (0~10sec⁻¹) における見掛けの塑性粘度及び見掛けの降伏値を求めた。静加圧脱水試験は、加圧ブリーディング試験方法 (案) (JSCE-F502-1990) に準じて行った。試験にはφ125mm加圧ブリーディング容器を用い、加圧力は35N/mm²とした。加圧脱水後練り返し、ウェットクリーニングした試料は、遠心分離機により回転数7000rpmで20分間脱水し、その脱水量及びモルタル中の残存水量を計測した。

表-5 レオロジー特性

配合	フロー(mm)	粘度(Pa·s)	降伏値(Pa)
I	181×181	1.34	20.1
II	267×266	4.67	15.1
III	267×266	7.04	28.8
IV	231×230	11.30	27.0

4.2 実験結果および考察

モルタルのレオロジー特性値測定結果を表-5に、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係を図-8に示す。図において、切片が降伏値を、傾きが見掛けの塑性粘度を表す。見掛けの塑性粘度は、普通コンクリートより高流動コンクリートが大きく、石粉を用いた高流動コンクリートより、セメント単味のものが大きくなっている。普通ポルトランドセメントを使用したものと、中庸熱ポルトランドセメントを使用したものを比較すると、若干中庸熱ポルトランドセメントを使用したものが見掛けの塑性粘度が大きくなっている。同一単位水量、同一水粉体比の場合、中庸熱セメントの方が塑性粘度が小さくなる[2]が、今回の場合、中庸熱セメントの方が単位水量が少なかったため、見掛けの塑性粘度が大きくなったものと思われる。静置ブリーディング試験の結果、普通コンクリートの脱水率は5%前後であったが、高流動コンクリートは、全ての配合でブリーディングは観測されなかった。普通コンクリート及び石粉を用いた高流動コンクリートの加圧ブリー

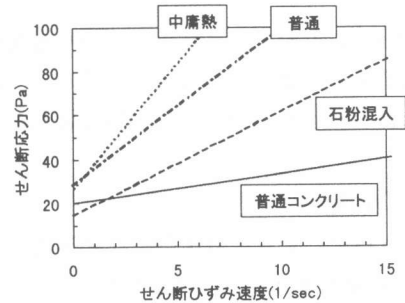


図-8 レオロジー特性

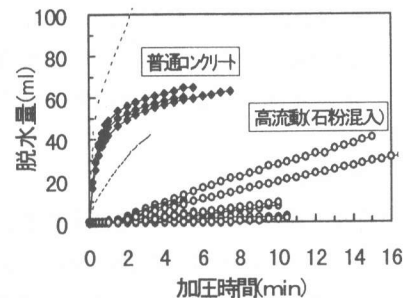


図-9 加圧ブリーディング性状

ディング試験結果を図-9に示す。図中の破線は、土木学会コンクリートのポンプ施工指針(案)より抜粋した「加圧ブリーディング試験における圧送性が良好である条件」である。普通コンクリートの脱水性状は、圧送性が良好である条件の範囲内であった。一方、高流動コンクリートは、加圧後、即脱水されるわけではなく、脱水が記録され始めるまでに時間を要した。その時間は同配合のコンク

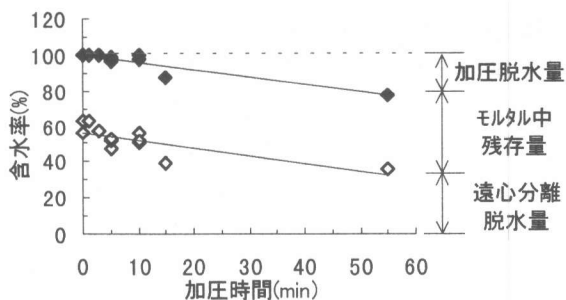


図-10 遠心分離脱水

リートであるにもかかわらず、40秒から7分30秒とばらつきがあったが、1分から2分30秒後の間に脱水が始まるケースが多かった。脱水が始まった後も普通コンクリートと異なり、脱水速度は非常に小さく、加圧時間に比例して脱水量が増加した。ほとんど脱水が記録されなくなるまで加圧した場合、その最終脱水量は71.5mlに達した。加圧ブリーディング試験により脱水された試料をウェットスクリーニングし、そのモルタル中の残存水を遠心分離により抽出した結果を図-10に示す。図において、◆は各加圧時間の加圧脱水量を示し、◇は各時間加圧脱水後の遠心分離脱水量を示す。図より、加圧ブリーディング試験の加圧時間の増加に伴い脱水量も増加するが、脱水された試料より遠心分離によって抽出される水量は減少する。すなわち、加圧時間に関わらず、加圧ブリーディング試験、遠心分離試験どちらでも脱水されずモルタル中に残存する水量は一定であるものと思われる。加圧ブリーディング試験における高流動コンクリートの最終脱水量は71.5mlであったが、これは、普通コンクリートの最終脱水量の66.7mlとほぼ同じであった。この2種類のコンクリートは、単位水量もほぼ同じであることから、高流動コンクリートも加圧により脱水するものの、脱水速度が非常に小さく、圧送管内において潤滑層が形成され難くなるものと推量される。このことと高流動コンクリートの見掛けの塑性粘度が大きいことが、圧送時のポンプ吐出圧力の増加現象の主要因であると思われる。

5. 結論

本研究により、以下のような知見を得た。

- (1)ダム本体の常用洪水吐放流管周りへの適用について、事前検討としての施工実験を通して詳細な検討を行い、その良好な施工性を確認することができた。
- (2)調査横坑閉塞工の施工において、高流動コンクリートを使用することにより、工期短縮や品質向上が可能であることを確認した。
- (3)高流動コンクリートのポンプ圧送時の吐出圧力の増加現象の主要因として、見掛けの粘性が大きいことと、脱水速度が小さいことが考えられる。

参考文献：

- [1]坂田昇、丸山久一、稲葉美穂子、皆口正一：高流動コンクリートの材料分離の簡易評価方法について、土木学会高流動コンクリートシンポジウム論文報告集、pp157-162、1996.3
- [2]土木学会高流動コンクリート研究小委員会粉体系分科会：分科会中間報告、土木学会高流動コンクリートシンポジウム論文報告集、pp253-274、1996.3