

# 報告 山岳トンネル二次覆工への高流動コンクリートの適用

吉田 克弥\*1・佐藤 誠\*2・福元 准士\*3

**要旨：**山岳トンネルの覆工コンクリートは、一般的にスライドセメントルを用いてコンクリート打込みが行われる。覆工コンクリートは無筋コンクリートであることが多く、普通コンクリートをパイプレーターによる締固めで打込んでいる。本報告における覆工コンクリートは耐震設計された鉄筋コンクリート造であり、鉄筋が密に配置されているため高流動コンクリートを適用した。本報告は、最近開発された増粘剤混入型高性能 AE 減水剤を使用した高流動コンクリートの適用検討から施工に至るまでを報告するものである。

**キーワード：**覆工コンクリート, 高流動コンクリート, 高性能 AE 減水剤, 若材齢強度

## 1. はじめに

高流動コンクリートを適用したトンネルの断面形状および配筋を図-1 に示す。断面形状は、標準幌型(内幅:2.6m, 内高:2.8m)の山岳トンネルであり、施工延長 401.6m である。また、配筋は主鉄筋 150mm 間隔の複鉄筋であり、せん断補強筋が配置されている。高流動コンクリートは、このトンネルの側壁、アーチおよびクラウン部分に適用した。高流動コンクリートの総打込み量は約 1,290m<sup>3</sup> であり、1 スパン長は 9.0m, 1 回当たりの打込み量は約 29m<sup>3</sup> である。打込み方法として

は、型枠にスライドセメントルを使用し、図-2 に示すように側壁部下半分はスライドセメントルの検査窓からの落下込み、側壁部上半分、アーチおよびクラウン部は、スライドセメントルクラウン部の吹上口より流し込んだ。コンクリートの運搬は定置式のポンプを坑口付近に設置し、配管により圧送した。また、適用した高流動コンクリートは、混和剤として増粘剤混入型高性能 AE 減水剤(以

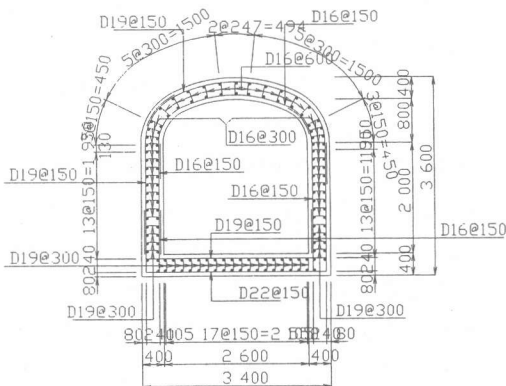


図-1 トンネル断面図

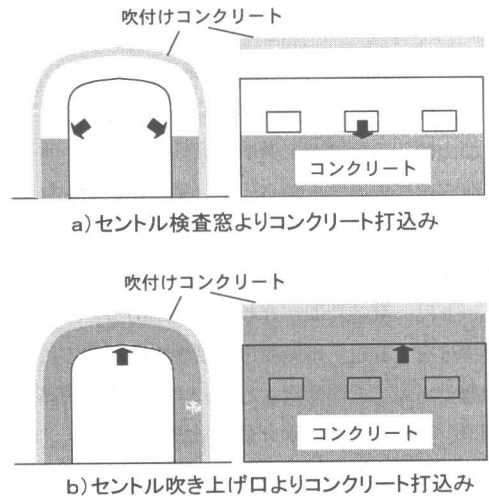


図-2 覆工コンクリート打込み手順

\*1 佐藤工業(株)中央技術研究所土木研究部門材料グループ(正会員)

\*2 中部電力(株)土木建築部

\*3 佐藤工業(株)名古屋支店

下、一液化混和剤と記す)、混和材として石灰石微粉末を用いている。本報告では、この高流動コンクリートの配合選定から施工に至るまでを報告する。

## 2. 高流動コンクリートの仕様

### 2.1 施工サイクル

覆工コンクリート打込み時の施工サイクルを図-3に示す。工程上、覆工コンクリートの打込みは、連日行われる予定であった。そのため、養生時間 14~15 時間程度で脱型可能なコンクリート強度(以下、脱型強度)が必要であった。

なお、骨組み解析による脱型強度の算出では、 $1.7\text{N/mm}^2$ 以上の圧縮強度を必要とした。

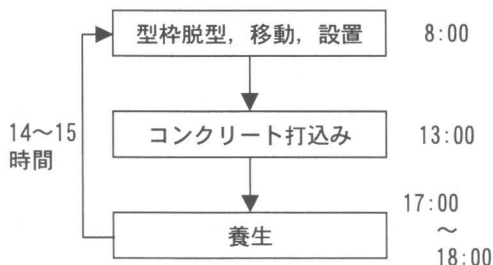


図-3 施工サイクル図

### 2.2 高流動コンクリートの選定

高流動コンクリートは連日施工されること、および出荷元の生コン工場が高流動コンクリートの出荷実績がないことから、水分量の影響が少なく比較的製造管理が簡易な増粘剤系高流動コンクリートが望まれた。しかし、増粘剤系高流動コンクリートは、凝結時間が遅れる傾向があるため、脱型強度を 14~15 時間程度の養生で確保するには困難であることが想定された。また、粉体系高流動コンクリートは、水分量の影響を受け易く、連日の製造管理が煩雑になることが想定された。そこで、併用系に近い一液化混和剤を使用した高流動コンクリートを選定することとした。

### 2.3 配合選定

#### (1) 品質目標

今回、高流動コンクリートの配合を選定する上で品質目標を表-1に示す。フレッシュ時の目

標は、鉄筋の最小あき寸法から土木学会「高流動コンクリート施工指針」<sup>1)</sup>の自己充填性ランク 2の目標値を参考にして設定した。なお、充填高さについては、経験的にスランプフローと材料分離抵抗性を確認すれば施工できるという判断から品質目標には取り入れなかった。フレッシュの性状の保持時間は、実施工におけるトラブルなどを考慮し 60 分とし、表-1に示すデータ収集時間において、満足することを目標とした。また、圧縮強度の比較を行うために、フレッシュ性状を満足する 3 種類の配合(粉体内割り混和材量をパラメーター)を選定候補配合とした。

表-1 品質目標

項目	目標値 (データ収集時間)	
スランプ フロー	650±50mm (練上り後, 30 分後, 60 分後)	
V 漏斗流下 時間	7~13 秒 (練上り後, 30 分後, 60 分後)	
空気量	4.5±1.5% (練上り後, 30 分後, 60 分後)	
圧縮強度	材齢 28 日	24N/mm <sup>2</sup>
	脱型時	1.7N/mm <sup>2</sup>

#### (2) 配合選定

使用材料を表-2に示す。また、配合選定フローを図-4に示す。基準配合となる配合 No.1 は粉体を普通ポルトランドセメントのみとし、フレッシュ性状の品質を満足する適切な単位粉体量、単位水量および混和剤添加率を定めた。次に、単位粉体量を固定し、混和材として石灰石微粉末を内割りで 50kg (配合 No.2)、100kg (配合 No.3) 置換し、フレッシュ性状の目標品質を満足する適切な単位水量および混和剤添加率を求め、合計 3 種類の配合を選定した。この 3 種類の配合について  $\sigma_{10h}$ ,  $\sigma_{14h}$ ,  $\sigma_{18h}$  を測定し、材齢 14~15 時間での脱型強度を満足し、かつ初期強度発現の最も優れた配合を選定配合とした。

配合 No.1~配合 No.3 を表-3に示す。基準配合となる配合 No.1 の検討の結果、最適な単位粉体量は  $450\text{kg/m}^3$ 、単位水量は  $170\text{kg/m}^3$ であった。また、一液化混和剤の添加率は 1.3%であった。単位粉体

表-2 使用材料

材料	種類	物性値および主成分
セメント	普通ポルトランドセメント ランド	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3310cm <sup>2</sup> /g
混和材	石灰石微粉末	比重 2.71 比表面積 4100cm <sup>2</sup> /g
細骨材	静岡県小笠郡 小笠山産山砂	表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 2.86
粗骨材	静岡県小笠郡 小笠山産山砂 利	表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 6.98 実積率 65.5%
混和剤	一液化混和剤	ポリカルボン酸エーテル系

量は、一液化混和剤の増粘剤成分の効果で併用系高流動コンクリートとしては多くない単位量に抑えることができたと考えられる。

単位水量については、配合 No.2 については配合 No.1 と同様の 170kg/m<sup>3</sup>、配合 No.3 については 165kg/m<sup>3</sup> となった。これは混和材の石灰石微粉末の置換量が多くなることにより流動性が向上したため、同様のフレッシュ性状を得るための水量を減少させることが可能となったと考えられる。

一液化混和剤の添加率は、図-5 に示すように配合 No.1 で 1.3%、配合 No.2 で 1.5%、配合 No.3 で 1.65% となった。一般的に石灰石微粉末の置換量の増大に伴い高性能 AE 減水剤の使用量は減少する<sup>2)</sup>とされているが、今回の材料の場合は石灰石微粉末の置換量の増大に伴い、一液化混和剤の使用量も増大する結果となった。この原因としては、今回使用した一液化混和剤が増粘剤成分を混入した高性能 AE 減水剤であり、分離抵抗を目的とした増粘剤と分散作用を目的とした高性能 AE 減水剤という相反する性能を持ち合わせている。そのため、同様のフレッシュ性状を得るための一液化混和剤使用量が高性能 AE 減水剤のみの場合とは異なった結果となったと考えられる。

フレッシュ時の試験成績および圧縮強度の試験成績を表-4 に示す。配合 No.1 では 60 分後のスランプフロー値および練上り後の V 漏斗流下時間が表-1 の品質目標の範囲に入っていないが、目視で確認する上では十分に流動性および材料分離抵抗性を保持していると判断できたために適用候

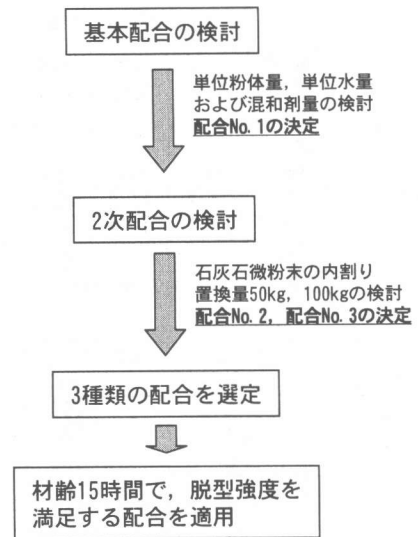


図-4 配合選定フロー

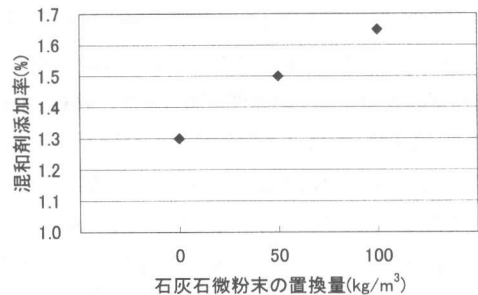


図-5 混和材置換量と混和剤添加率の関係

補の配合とした。また、配合 No.2 の 60 分後のスランプフロー値についても同様に表-1 の品質目標に当てはまらなかったが、目視で流動性は有していると判断し適用候補の配合とした。今回使用した一液化混和剤は、増粘剤成分が含まれているが、V 漏斗流下時間には増粘剤成分の影響がそれほど強い性状では現れなかった。そのため、増粘剤系高流動コンクリートほど増粘剤による材料分離抵抗性は有していない混和剤であることがわかる。目視における材料分離抵抗性は十分に有している要因としては、増粘剤系高流動コンクリートと比較すると単位粉体量が 450kg/m<sup>3</sup> と多いため、粉体による材料分離抵抗性作用が比較的大きく、併用系に近い高流動コンクリートの配合となったことが考えられる。

表-3 フレッシュ性状の品質を満足した示方配合

配合 No.	粗骨材最大寸法 (mm)	水結合材比 (%)	水粉対比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水	セメント	石灰石微粉末	細骨材	粗骨材	混和剤*
1	25	37.8	37.8	49.3	4.5	170	450	0	827	864	1.30%
2	25	42.5	37.8	49.1	4.5	170	400	50	819	864	1.50%
3	25	47.1	36.7	49.2	4.5	165	350	100	825	864	1.65%

\*一液化混和剤，ポリカルボン酸エーテル系

表-4 試験成績

配合 No.	経時 (分)	スランブフロー (mm)	Vロート (sec)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
					10h	14h	18h
1	練上り後	600	6.0	5.3	0.19	1.24	3.79
	30	620	8.3	4.7			
	60	585	11.0	4.6			
2	練上り後	605	8.3	5.0	0.18	1.17	4.02
	30	600	10.2	5.0			
	60	585	12.5	5.2			
3	練上り後	635	—	4.2	0.19	1.35	4.35
	30	625	9.9	4.1			
	60	655	13.2	4.1			

配合 No.1~配合 No.3 の強度発現状況を図-6 に示す。材齢 10h においては各配合ともに 0.18N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度であったが、材齢 18hr においては配合 No.1<配合 No.2<配合 No.3 の順で 3.79N/mm<sup>2</sup>~4.35N/mm<sup>2</sup> と圧縮強度に若干ではあるが差が生じている。一液化混和剤の添加率は表-3 からわかるように配合 No.1<配合 No.2<配合 No.3 と順に多くなっているが、この一液化混和剤添加率の違いよりも、混和材である石灰石微粉末の影響の方が若材齢強度には強く現れたこととなった。材齢 14 時間では、脱型強度を満足する配合はなかった。一方、近似曲線から材齢 15 時間とすれば、配合 No.3 のみが脱型強度以上の結果を得ることが出来た。そこで、15 時間以上の養生時間を確保できる施工サイクルとすることを条件とし、配合 No.3 を適用配合とした。

また、実施工においては、強度のバラツキが予想されたが、脱型強度を安全率 4 として算出していることから、コンクリートの品質に関する安全係数は 1.0 とし、強度発現のバラツキは考慮していない。

### 3. 実施工までのアプローチ

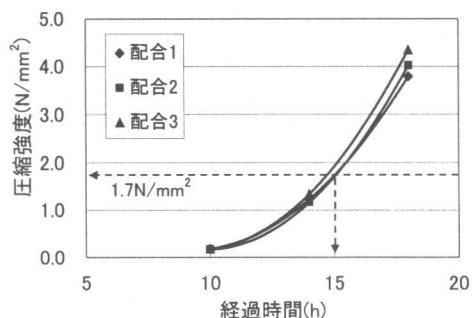


図-6 強度発現状況

### 3.1 流動化コンクリートでの検証

#### (1) 実験概要

通常の覆工コンクリートは普通コンクリートで施工される。今回、耐震設計され配筋が密となっているが流動化コンクリートを適用し、可能な限り締めを行えば良質な覆工コンクリートとなるのではとの見方もあった。そのため、普通コンクリートに流動化剤を現場添加して流動化コンクリートとしたコンクリートを用いての打込み+締め実験を行った。実験は、覆工コンクリートの側壁部を透明型枠を用いてモデル化して行った。

#### (2) 実験方法

実験に使用した試験体の寸法・形状は図-7 に示すような、高さ 2150mm×延長 3000mm×厚さ

400mm の壁状の試験体である。鉄筋は覆工コンクリート側壁部と同様に配置し、スライドセントルに設けられている検査窓もモデル化している。コンクリートは24-18-25Nのベースコンクリートに流動化剤を現場添加し、スランブを21cmに増大させた流動化コンクリートとした。

打込み手順としては、以下に示すように行った。

- ① 図-7におけるパイプレーター有りの区間は検査窓よりポンプによる流し込み+パイプレーターによる締固め
- ② 図-7におけるパイプレーター無しの区間ではコンクリート投入口より流し込みで締固め無し

また、締固め具合を判断する目的で試験体の上端、中央、下端の3箇所においてコア(φ50mm)を採取し、実験時に採取した圧縮強度試験用供試体と圧縮強度の比較を行った。

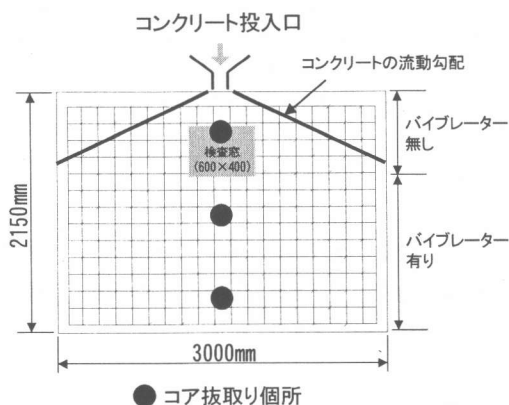


図-7 試験体概要および実験結果

### (3) 実験結果

流動化コンクリートの打込み実験結果は図-7に示す。パイプレーター有りの区間ではせん断補強筋がパイプレーターの挿入を妨害したにも関わらず、可能な限り締固めを実施し、外観上は良質なコンクリートとなった。一方、パイプレーター無しの区間ではスライドセントル吹き上げ口からのコンクリートの打込みを再現しているため、締固めを実施していない。そのため、コンクリートの天端形状が図-7に示す流動勾配を持った形状となり、コンクリート表面も豆板などの目立つも

のとなった。

表-5に試験体から採取したコアの圧縮強度と実験時に採取した供試体の圧縮強度の試験結果(σ<sub>28</sub>)を示す。この表に示す圧縮強度比とは供試体に対するコアの圧縮強度の比を示したものである。上端部コアについては全く締固めをしていないので、圧縮強度比は0.52という結果となった。また、中央部コアおよび下端部コアの圧縮強度比は0.9前後となった。圧縮強度比から締固め具合の良否を判断すると、パイプレーター有りの区間では、1.0に近い結果となり締固めの効果が現れた。一方、パイプレーター無しの区間では、圧縮強度比からも締固め不良が顕著に現れた。

実験の結果、今回のように配筋が密な覆工コンクリートでは、流動化コンクリートを用いても締固めが十分に行えない箇所については、良質なコンクリートの施工が困難であることが証明された。

表-5 圧縮強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度比
供試体	29.0	1.0
上端部コア	15.0	0.52
中央部コア	27.0	0.93
下端部コア	24.5	0.85

### 3.2 ポンプ圧送性の検証

本トンネルでは、トンネル断面が小さいためトンネル内に配管し、コンクリートをポンプ圧送で打込む計画であった。配管長は最大で約200mとなる。高流動コンクリートは、ポンプ圧送によりスランブフローがロスする<sup>1)</sup>ことが一般的であり、今回の施工において品質管理を行う上で筒先での性状確認を行う必要があった。本トンネルは、インバートコンクリートを覆工コンクリートと同様のポンプ圧送で先行して施工している。そこで、配管長が約200mとなるインバートコンクリート打込み時に高流動コンクリートのポンプ圧送性試験を行った。圧送試験に用いた高流動コンクリートは配合No.3のものを用いた。品質確認試験は、出荷時、荷下し時、筒先で実施し、品質確認項目

は、スランプフロー、空気量の2つとした。表-6に品質確認試験結果を示す。ポンプ圧送性試験結果から、採用した高流動コンクリートにおいては出荷時と筒先でのスランプフローのロス等の品質変化は認められなかった。そのため、実施工におけるスランプフロー管理は出荷時および荷下し時の2回とし、出荷時におけるスランプフロー管理値を $650 \pm 50\text{mm}$ とすることとした。

#### 4. 実施工

高流動コンクリートの打込み個所数は、46スパンであった。施工は図-2の打込み手順、図-3の施工サイクルで行った。日常のフレッシュコンクリートの品質管理項目は表-7に示す。また、荷下し時のスランプフローを図-8に示す。今回高流動コンクリートの製造を行った工場は、高流動コンクリートの出荷の経験はなかった。しかしながら、一液化混和剤を適用することで図-8に示すような安定した出荷を実現することが可能となった。また、施工においても型枠の破損や早期脱型によるひび割れなどの問題もなく完了することができた。

#### 5. まとめ

今回、覆工コンクリートに高流動コンクリートを適用するにあたり様々な検討を行った。これらの検討および施工によって得られた結果を以下に示す。

- ① 一液化混和剤を採用することで安定したスランプフローの高流動コンクリートの出荷が可能であった。
- ② 今回の高流動コンクリートでは、200mのポンプ圧送によるスランプフローロス認められなかった。
- ③ 今回の高流動コンクリートにおいては、脱型強度の検討を実施したことで、材齢15時間での脱型が可能であった。
- ④ 今回の配合検討においては、石灰石微粉末の置換量と一液化混和剤添加率は比例関係にあった。

表-6 品質確認試験結果

	経時時間 (分)	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)
出荷時	0	655	5.2
荷下し時	35	645	5.0
筒先	55	670	4.7

表-7 フレッシュコンクリートの品質管理項目

項目	頻度
スランプフロー	出荷時, 荷下し時
空気量	出荷時, 荷下し時
コンクリート温度	出荷時, 荷下し時
塩分量	荷下し時

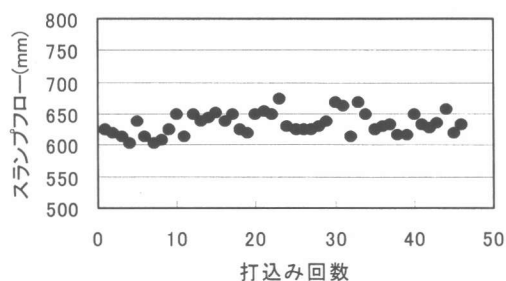


図-8 実施工におけるスランプフロー

#### 〈謝辞〉

今回の配合検討および施工に御協力頂いた(株)ポゾリス物産の方々をはじめ多くの関係者の皆様に厚く謝意を表します。

#### 〈参考文献〉

- 1) 土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリート施工指針，土木学会，1998
- 2) 石灰石微粉末研究委員会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム，コンクリート工学協会，1998.5