

報告 過密配筋されたトンネル覆工への高流動コンクリート施工

宇野 洋志城^{*1}・市野 大輔^{*2}・吉永 正雄^{*3}・弘中 義昭^{*4}

要旨：本報告は、水路トンネルの一部区間（総延長 1205m のうち 420m）において総鉄筋量が 350kg/m^3 を上回る過密な配筋状況にある二次覆工に対して、土木学会指針の自己充てん性レベルでランク 1 に相当する『膨張材添加型粉体系高流動コンクリート』を適用した施工例をもとに、トンネル構造物への高流動コンクリートの適用実績とその効果を確認した計測結果を述べ、考察を加えるものである。

キーワード：高流動コンクリート、二次覆工、膨張材、ひび割れ防止、過密配筋

1. はじめに

高流動コンクリートとは、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を著しく高めたコンクリートである。平成 10 年に高流動コンクリート施工指針が整備されて以降、実構造物への適用例も増加しており、その技術と存在価値は広く認知されたものとなった。主な使用目的には締固めが困難な閉塞された部位や鋼材や鉄筋が過密に配置された部位への充てん性の確保の他に、合理的な施工方法による打設作業の省力化、振動・騒音の排除による作業環境の改善、さらに耐久性を要求する箇所への高耐久の実現等が挙げられる。

一方、トンネルの二次覆工はその多くが無筋コンクリート構造であるが、圧力トンネル等では立地条件や設計次第で二次覆工に高密度な配筋を施す事例もある。

平成 15 年末現在施工中のダム仮排水路トンネル工事（総延長 1205m）では一部区間（420m：40 スパン）が圧力トンネル構造であるため、該当区間における二次覆工の配筋条件は以下のとおりであった。

- ・ 覆工厚 400mm の断面に対して D29（主筋）と D22（配力筋）をダブル配筋

- ・ 配筋ピッチは 100mm
- ・ 継手部分における鉄筋の最小あき寸法は 40mm 以下
- ・ 総鉄筋量は 350kg/m^3 以上

そこで、筆者らは上記の配筋条件である二次覆工区間に対して土木学会指針の自己充てん性レベルでランク 1 に相当する膨張材添加型粉体系高流動コンクリートを適用し、その効果を確認するために埋設計器を用いて二次覆工コンクリート内部の計測も実施した。

本報告は、ダム仮排水路トンネルにおける「膨張材添加型粉体系高流動コンクリート」の適用実績とその効果を確認した計測結果を述べ、考察を加えるものである。

2. 施工概要

2.1 施工条件

本施工における対象構造物は、ダム本体の建設工事に伴い川の流れを一時的に切替える仮排水トンネルである。当初設計では内圧の一部を地山に分担させるためにコンソリデーショングラウトが計画されていたが、その後の設計変更によりコンソリデーショングラウトを省略し、トンネル中央部分の 420m 区間（40 スパン）で

*1 佐藤工業（株）中央技術研究所主任研究員（正会員）

*2 佐藤工業（株）中央技術研究所

*3 佐藤工業（株）土木技術部門

*4 佐藤工業（株）中央技術研究所所長（正会員）

は内圧をすべてトンネル覆工コンクリートにより受け持つように鉄筋量を大幅に増加させることとなった（写真－１）。

その結果、配筋は高流動コンクリート施工指針（土木学会コンクリートライブラリー93：平成10年制定）における自己充てん性レベルでランク1（最小鋼材あき 35～60mm 程度，鋼材量 350kg/m^3 以上）に相当し¹⁾，一般部の特記仕様配合（21-15-25BB）では充てんすることは不可能であり，高流動コンクリートであってもかなり高レベルな充てん性能を発揮できる配合が必要と判断した。

2.2 配合検討

打設対象とした二次覆工の配筋条件は，以下のとおりである。

- ・ 鉄筋の最小あき寸法が 40mm 以下
- ・ 総鉄筋量が 350kg/m^3 以上

一般に，どの程度の施工条件ならば適用すべきかどうかという点に関して明確な線引きはされていないものの，高流動コンクリートの適用事例には，既に振動・締固めを十分に行えない環境を対象としたもの（閉塞コンクリート，逆打ちコンクリート等）や鉄筋量 300kg/m^3 程度のシールドトンネル接合部およびコンクリート二次製品を対象としたもの（鉄道用コンクリートセグメント等）がある。

既に土木学会において行った高流動コンクリートの施工事例に関する調査¹⁾でも，平成9年までの集計結果（全 136 件）に対してトンネル



写真－１ 配筋状況

二次覆工への適用が 8 件報告されており，適用理由に関して『過密配筋による締固め困難』が 55 件，『閉塞スペースへの充てん』が 41 件さらに『省力化施工』が 23 件となっている点から判断しても，今回は高流動コンクリートを適用することが最善の策であると考えられた。

今回の配合設計に必要な条件を以下に示す。

- ・ 優れた充てん性能を有すること（自己充てん性ランクはレベル 1）
- ・ 設計基準強度 24N/mm^2 以上を確保すること（構造計算上は 21N/mm^2 で十分だが，国土交通省からの通達により鉄筋コンクリート造の場合に水セメント比を 55%以下とした）
- ・ 型枠への側圧の影響が少なく，早期脱枠できること（凝結がより早くするため，粉体系高流動コンクリートとした）

使用材料の一覧を以下に示す。

表－１ 使用材料の一覧

材料項目	種類	物性値および主成分
セメント	C 高炉 B 種セメント	密度 3.05g/cm^3 ，比表面積 $3860\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	LS 石灰石微粉末	密度 2.71g/cm^3 ， $75\ \mu\text{m}$ 通過率 86.6%
	EX 膨張材	密度 2.94g/cm^3 ，比表面積 $2680\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S1 陸砂（細目）	表乾密度 2.58g/cm^3 ，吸水率 3.05%，FM 1.62
	S2 陸砂（粗目）	表乾密度 2.58g/cm^3 ，吸水率 3.14%，FM 2.86
粗骨材	G 陸砂利（2505）	表乾密度 2.69g/cm^3 ，吸水率 2.85%，FM 6.80，実積率 59.7%
混和剤	SP 高性能 AE 減水剤	主成分：ポリカルボン酸エーテル系の化合物
	AE AE 助剤	主成分：高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体

表－２ 示方配合

Gmax (mm)	W/Cw (%)	W/P (%)	W/Cv (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
						W	C	EX	LS	S1	S2	G	Ad
25	54.8	30.9	89.0	4.5	57.9	170	280	30	240	624	266	673	6.82

表－３ フレッシュ性状

試験項目	練り直後
スランプフロー (cm)	69.0×66.0
50cm到達時間 (秒)	7.0
空気量 (%)	4.8
コンクリート温度 (℃)	20.0
充てん高さ (cm)	33.5

表－４ 強度発現性

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)
0.25	0.459
0.33	0.692
0.42	1.10
7	28.7
28	45.4

配合上の特徴には、過剰な強度発現を抑制するために $W/C \leq 55\%$ を満足する範囲内でセメントの一部を石灰石微粉末に置換したこと、高流動コンクリートのひび割れ発生を抑制するために膨張材を添加したことが挙げられる。

石灰石微粉末の置換は、コンクリートを製造出荷する生コンクリートプラントの貯蔵設備や計量設備に余裕があることから粉体系高流動コンクリートを選定する上で必要不可欠な条件であった。また、高流動コンクリートは単位粗骨材量が少ないため、同程度の単位水量であっても従来コンクリートより乾燥収縮量が多く、ひび割れの発生する可能性が高くなる（充てん性は向上しても、拘束によるひび割れ発生に対する抵抗性は残る）ため、収縮補償する膨張材の添加を提案した。

なお、膨張材の添加による効果の確認に関しては 3. 計測概要以降において詳述する。

2.3 打設方法

トンネル総延長は 1205m あり、当初坑口付近の一般部（特記仕様配合を使用）ではコンクリートの運搬に 6 インチ配管を使ったコンクリート圧送を採用した。一方、圧力トンネル区間では、高流動コンクリートは材料分離抵抗性が高いためポンプ圧送しても配管内の閉塞は起こらないと予想できたが、圧送負荷の増大や長距離圧送に付随する問題からコンクリートの運搬を

軌道方式に切り替えた。軌道方式ではバッテリーカーが走行し、坑口でアジテータ部分（容量 6.0m³）に高流動コンクリートを積み替えて運搬、型枠手前でピストン方式の定置式ポンプを使用して打設した。

打設口は上下 2 箇所あり、打設は真円のトンネル断面に対してインバート部分（下）より圧入を開始した後、点検窓（写真－２）から目視でコンクリートの流動状況を監視し、スプリングライン付近までコンクリートが上昇（充てん）した段階でクラウン部分（上）からの吹き上げ打設に切り替える方法を基本とし、40 スパン連続打設する中で順次改善を行った。最後まで圧入方式を続けなかった理由は型枠の浮きの危険性を考慮したからである。

打設速度は、軌道方式による運搬時間や運搬量に限界があることに加えて配管の盛り替え等に時間を要することから、平均で 15～20m³/h 程度であった。

2.4 適用実績

高流動コンクリート適用部分（40 スパン、延長 420m 分）の打設は平成 15 年 11 月末に終了し、総打設量は 5,744m³ に達した。打設期間中は午前午後 1 回ずつ 2 回/日の頻度で受入れ検査を実施した。品質管理基準とのべ 80 回の試験結果を以下に示す。

スランプフロー平均は 67.6cm、標準偏差が

2.18cm, 変動係数が3.2% (データ数 80) であったが, 高流動コンクリートのスランブフロー実績は管理基準範囲 ($65 \pm 5\text{cm}$) の正規分布ではなく, 上限の70cm付近に集中した (図-1)。この理由は, 製造プラントからの運搬時間が30～40分であることを考慮して現場到着時にスランブフローが67～70cmとなるように上限寄りの厳しい範囲で調整を行っていたが, 受入れ検査で製造からの経過時間が予定より大きくなった場合にフローのロスを生じたものと考えられた。ただし, 同試料でのU型充てん試験では充てん高さは常に30cm以上を記録しており, 自己充てん性ランクのレベル1を満足していた。当然, コンクリートに材料分離は認められず, 定置式ポンプに投入する段階においても差はなかった。

一方, 強度発現性状に関しては材齢28日の圧縮強度試験結果から明らかなように, 典型的な正規分布を呈した (図-2)。平均 44.8N/mm^2 , 標準偏差 1.34N/mm^2 , 変動係数3.0% (データ数80) ということから, のべ40日間にわたって製造プラント (JIS 認定工場) で製造・出荷した高流動コンクリートの単位水量や表面水率の調整は安定していたことを示している。一般に用いられる管理限界として 3σ 限界の概念があり (σ : 標準偏差), 今回の高流動コンクリートの材齢28日圧縮強度は管理限界 $m \pm 3\sigma$ (上限管理限界 UCL: 48.8, 下限管理限界 LCL: 40.8) の領域内で, 異常値は一切認められなかった。

3. 計測概要

3.1 計測目的

圧力トンネル区間の高流動コンクリート配合だけにひび割れ抑制のための膨張材を使用した理由は, 以下のとおりである。

高流動コンクリート配合では不活性の材料 (石灰石微粉末) を使用しているものの, 多くの場合に同一単位セメント量かつ同一水セメント比の標準配合より単位粉体量が多く, 水和発熱量, 強度発現ともに大きくなる。すなわち水和発熱による温度ひび割れの発生する可能性を

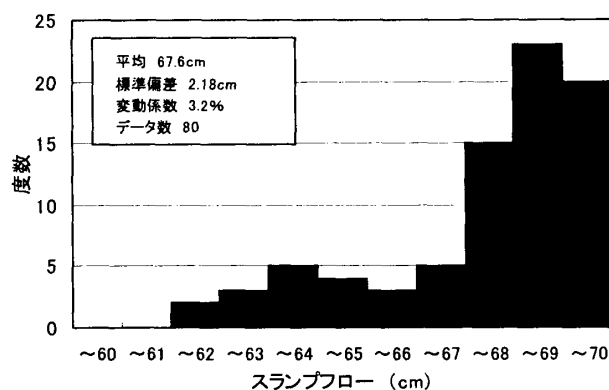


図-1 スランブフロー試験結果

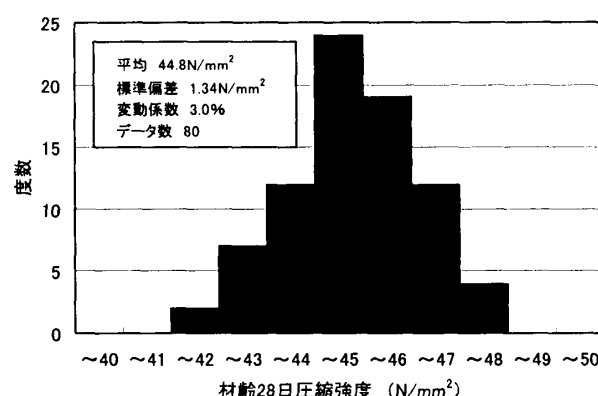


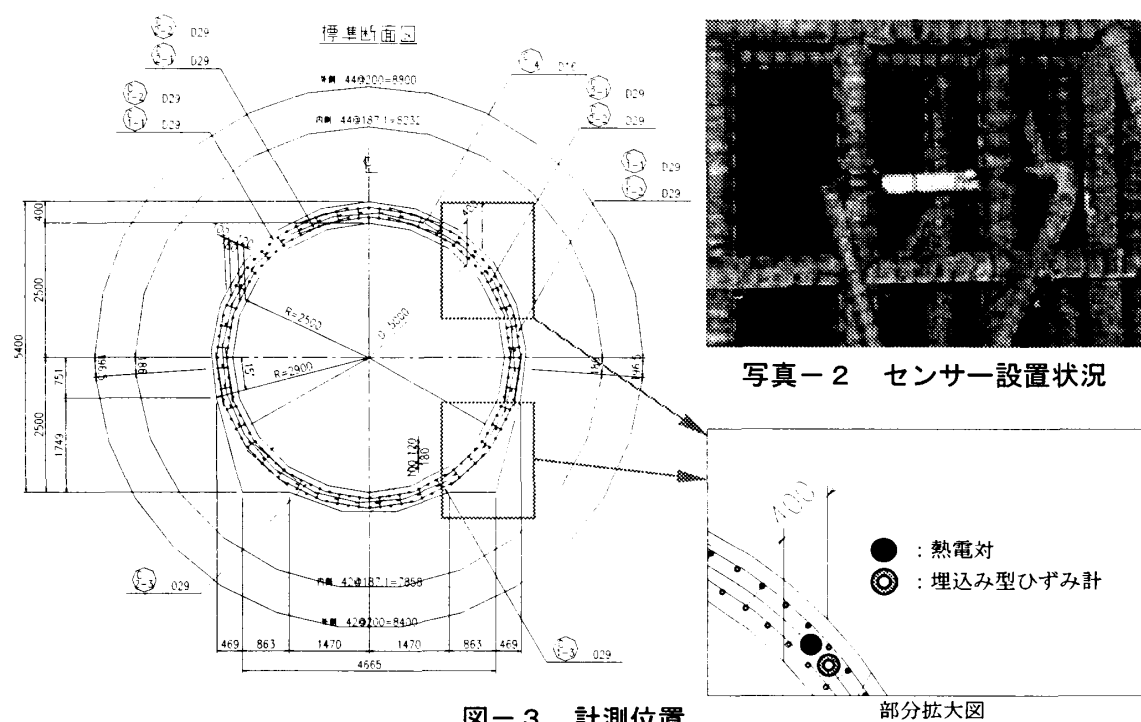
図-2 材齢28日圧縮強度試験結果

無視できないことになる。また, 高流動コンクリートでは単位粗骨材量が少ない。それは収縮する成分である単位セメントペースト量が多い (水分の逸散による収縮量が多い (収縮ひずみが多い) という) ことであり, 乾燥収縮によるひび割れの発生する可能性を無視できないことになる。

つまり, 高流動コンクリートの施工によって充てん性が確保できたとしても, ひび割れに対する抵抗性が低くなることが予想された。

さらに, その材料単価がセメントの10倍程度することから膨張材を使用した配合は決して経済的とならない。それでも膨張材を使用するためには, 膨張材の使用がひび割れの抑制に有効であることを証明する必要があると考えられた。

そこで, 実施工において二次覆工に計測センサーを埋込み, ひび割れの発生を抑制した事象を確認するための計測を実施した。



3.2 計測条件

計測は、高流動コンクリートを適用する圧力トンネル区間の1スパンにおいて実施した。計測間隔は1時間とし、計測センサーの設置位置は縦断方向でスパンの中央部1箇所（スパン端部より5.25m）、横断方向で同一断面上の2箇所：インバート付近とアーチ付近とした（表面から距離200mmの位置でダブル配筋の中央付近にバインド線を用いて固定：図-3、写真-2）。

3.3 計測結果

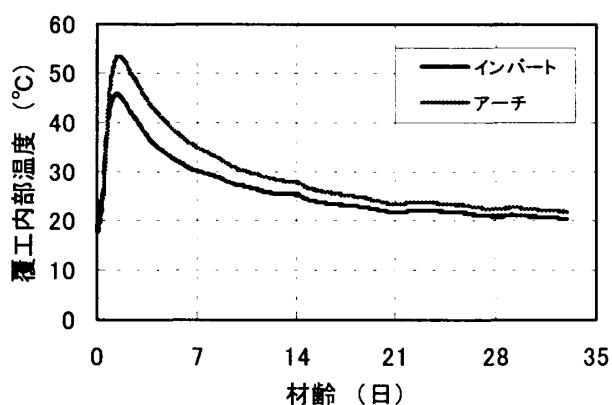
2箇所の温度履歴のピーク値が異なる（図-4）のは覆工厚の差である。インバート部分の一部には段取り等の目的で既設コンクリートがあり、新規に打設した覆工厚が400mm程度以下となる箇所があるのに対し、アーチ部分には余掘りが多く存在して新規に打設した覆工厚は確実に500mm以上であると考えられた。

その結果、新規打設分の覆工厚の大きい方がコンクリートの最高上昇温度も高く、結果的に実ひずみの絶対値も大きくなった。

4. 考察

4.1 充てん性について

脱型後の覆工コンクリートには未充てん箇所



はなく、現時点でひび割れは認められない。逆打ちとなるインバート内面にも巻込み空気による空気あばたは一切なく良好であったが、一部に水平方向の縞模様が認められた。その原因は打設口の切り替えにより連続打設が途切れたことであり、下方から圧入されたコンクリートと上方から型枠壁面を流動したコンクリートの接する面が跡に残ったものと考えられた。この縞模様は、配管の切り替え時間の短縮やコンクリート流動性レベル（スランプフローの大きさ）の改善に加え、部分的に型枠振動機の補助的な使用を試みた結果、排除することができた。

土木学会の指針では、高流動コンクリートの

水平方向の最大流動距離は原則として8mとし、最大でも15m以下となるようにする¹⁾とある。今回の打設条件では型枠端部から圧入して流動させる距離が10.5mと長く、自己充てん性レベルのランク1に相当する過密配筋の中を完全充てんするには高流動コンクリートでも極めて高いレベルの流動性が必要と考え、スランブフローに関しては通常よりも狭い65~70cm程度を目標とした出荷は妥当であったと考えられる。

4.2 膨張材の効果について

今回二次覆工内に計測センサーを設置したのは、膨張材の添加効果を目視によるひび割れ発生状況の観察以外の方法で確認するためである。その方法は、膨張効果によりプレストレスを与えられた二次覆工コンクリートに発生する拘束ひずみ（自由ひずみ－実ひずみ）から応力を推定し、引張強度と比較することとした（図－5）。

自由ひずみは、以下の近似式²⁾と温度履歴から求め、

$$\epsilon'_{cs} = [1 - \exp \{-0.108 (t - t_0)^{0.56}\}] \times \epsilon'_{sh} \quad (1)$$

ここで、 ϵ'_{cs} ：材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ

ϵ'_{sh} ：収縮ひずみの採取値 t までの収縮ひずみ

有効ヤング係数には、以下の近似式³⁾を適用。

$$E_t = \phi_t \times 4.7 \times 10^3 \times f'_c{}^{-0.5} \quad (2)$$

ここで、 E_t ：有効ヤング係数

ϕ_t ：材齢3日まで0.73、材齢5日以降1.00

f'_c ：材齢 t 日の圧縮強度

圧縮強度には以下の近似式³⁾を適用。

$$f'_c = (t / 6.2 + 0.93 t) \times 1.15 \times f'_{ck} \quad (3)$$

ここで、 f'_c ：材齢 t 日の圧縮強度

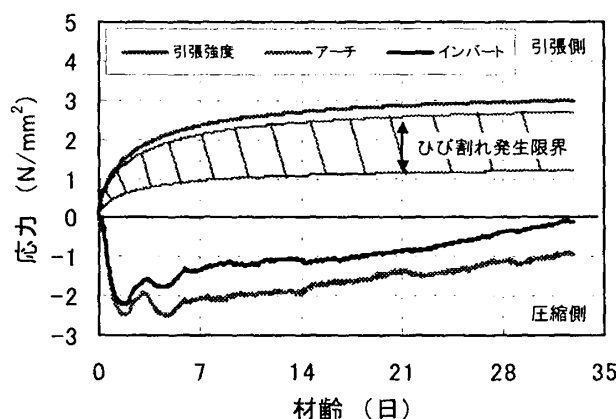
f'_{ck} ：材齢28日の圧縮強度：実績45N/mm²

引張強度には以下の近似式³⁾を適用。

$$f'_t = 0.44 \times f'_c{}^{-0.5} \quad (4)$$

ここで、 f'_t ：材齢 t 日の引張強度

参考文献によれば、ひび割れ発生限界点は引張強度の45~90%とある^{4) 5)}。図中の引張応力



図－5 応力と引張強度の比較

はひび割れ発生限界領域に現時点では達しておらず、ひび割れが認められない現象と合致する。

これは、膨張材を添加したことで初期材齢において圧縮応力が導入（収縮補償）されているためであると考えられ、引張応力が発生する時期には引張強度は3N/mm²程度まで達しており、ひび割れ発生しないことが裏付けられている。

5. おわりに

今回、ダム排水路トンネルに「膨張材添加型粉体系高流動コンクリート」を適用し、充てん性を満足するためのスランブフローには通常より厳しい管理幅が必要であることがわかった。

また、膨張材の添加はひび割れ発生に対して十分な抑制効果のあることが認められた。

参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，pp.10，pp.179-181，1998.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，pp.30-31，2002.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.52-53，2002.
- 4) 佐竹紳也ら：二次覆工コンクリートにおける膨張材のひび割れ低減効果に関する現場実験，土木学会第58回年次学術講演会，VI-006，pp.11-12，2003.
- 5) JCI：コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム，pp.164，2001.