報告　覆工用高流動コンクリートの実施工における移動式型枠の発生応力および作用する側圧を含む各種検証結果

松本　修治[*1]・佐藤　崇洋[*2]・北村　義宜[*3]・坂井　吾郎[*4]

要旨：近年，建設業界では作業員の高齢化に伴い，さらなる施工の合理化や生産性を向上させる施工方法が求められている。山岳トンネルの分野では，覆工において締固め作業を一切必要としない高流動コンクリートの適用が考えられる。しかし，これまでに適用例が少なく，施工中における移動式型枠に発生する応力や作用する側圧に関しては明確とされていない。そこで，覆工用高流動コンクリートの適用検証を行ない，打込み時における移動式型枠に発生する応力および作用する側圧を計測した結果，それらの計測値は覆工用中流動コンクリートを打ち込んだ場合と同程度であることが確認できた。

キーワード：高流動コンクリート，覆工コンクリート，移動式型枠

1. はじめに

近年，建設業界では作業員の高齢化が進んでおり，トンネル分野では，作業員の人手不足から掘削作業の機械化および自動化による掘進速度の向上が図られつつある。覆工コンクリートの施工においても同様で，さらなる合理化，省人化とそれらによる生産性の向上が求められている。その手段の一つとして，高流動コンクリートの適用が挙げられる。

従来，トンネル覆工の施工においては，スランプ 15cm 程度のコンクリートを，覆工厚が 30cm 程度の狭小かつ閉空間となる移動式型枠内で内部振動機を用いて，人力による締固め作業が行われている。特に天端部については逆打ちになることから締固めが不十分になりやすく，背面空洞やひび割れなどの初期欠陥を発生させやすい。このため，最近では，型枠面板に取り付けた型枠バイブレータと軽微な内部振動機による締固め作業を行うトンネル覆工用の中流動コンクリート [1),2)]が開発され，実用化されている。これにより，狭隘な移動式型枠内での締固め作業が大幅に減少し，品質向上が図られている。

著者らは，さらなる合理化，省人化を図るために，覆工用中流動コンクリート（以下，中流動コンクリートと表記する）の技術をもとに，それと同等の品質を確保しつつ，一切の締固め作業を必要としない覆工用高流動コンクリート（以下，高流動コンクリートと表記する）の検討を行っている。これまでに，覆工コンクリートにおいて締固めを不要とするための要求性能がどの程度なのかを検証し，より経済的かつ合理的となる高流動コンクリートの配合検討を行い，実施工への適用を実施している [3)]。しかし，適用例が少ないため，施工中における移動式型枠の発生応力や側圧は明らかとなっていない。

写真-1　覆工用高流動コンクリート

本稿では，高流動コンクリートを大断面トンネルに適用した際の移動式型枠に発生する応力および作用する側圧を含む各種検証結果について報告する。

2. 高流動コンクリートの配合条件

一般に，高流動コンクリートは，高い流動性と材料分離抵抗性を両立させ，自己充填性を具現化している。流動性は，高性能 AE 減水剤を多量に用いていることで付与されている。そのため，型枠に作用する側圧の増大，凝結遅延による施工への影響などの課題が挙げられる。また，流動性と相反する材料分離抵抗性は，セメントなどの粉体量の増大や増粘剤の使用によって確保されている。そのため，粘性を付与するための材料が増えることによるコストアップなどの課題が挙げられる。そこで，これらの課題を解決すべく，覆工用の高流動コンクリートは，土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [4)]」（以下，指針と称する）において，コストの観点から増粘剤系高流動コンクリートに分類されるものとし，**写真-1** に示すようにスランプフローの中心値を 550mm

*1 鹿島建設株式会社　技術研究所　土木材料グループ　研究員　(正会員)
*2 鹿島建設株式会社　東北支店　課長
*3 鹿島建設株式会社　土木設計本部　地下空間設計部トンネルグループ　設計主査
*4 鹿島建設株式会社　技術研究所　土木材料グループ長　博士（工学）(正会員)

に設定した。また，混和剤にポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物が一液となった高性能 AE 減水剤を用いるものとした。以下に，これらの設定を含む覆工コンクリート特有の施工条件における高流動コンクリートの要求性能および目標性能の設定について詳述する。

2.1 覆工コンクリートの施工条件を踏まえた要求性能

覆工コンクリートは，無筋もしくは単鉄筋程度の配筋を有する構造物である。これを土木学会の指針に照らすと，高流動コンクリートとして必要となる自己充填性のランクは「3」に該当する。

表-1に設定した覆工用高流動コンクリートの要求性能を示す。覆工コンクリートは，打込む空間の厚さが30cm程度，ポンプによるコンクリートの圧入が可能，型枠への負荷低減のため側圧を低減するという施工上の特徴がある。これらを踏まえつつ，指針でランク3に該当するスランプフローの中心値の範囲550～650mmのうち，下限値となる550mmを目標値の目安とした。また，U形充填高さは，指針により，障害なしで300mm以上という目標値の目安を設定し，空気量は，標準的範囲である3.0～7.0%とした。さらに，設計基準強度は，一般的な覆工コンクリートとして設定される18N/mm^{2}以上とした。

2.2 高流動コンクリートの配合選定

（1）配合要因と各種単位量の範囲の設定

著者らは，これまでに，高流動コンクリートの検討において，高流動コンクリートの側圧低減方法 [5]および単位粉体量が低い配合等の室内試験を実施し，実現場への適用検証も行っている [3]。これらで得られた知見により，**表-2** に示す配合要因と各種単位量の範囲を設定した。指針では，界面活性剤系高流動コンクリートの単位セメント量は 340～450kg/m^3，単位水量は 165～185kg/m^3，水セメント比は 35～50%，単位粗骨材絶対容積は 290～320L/m^3 が目安とされている。これに対して，高流動コンクリートの単位セメント量は，一般的に覆工コンクリートの設計基準強度が 18N/mm^2 程度で設定されることから，できるだけ少なくすることとし，400kg/m^3 以下を目標として設定した。また，単位水量は，覆工コンクリートが部材厚に対して表面積が大きく，乾燥収縮が卓越しやすいことを考慮して，175kg/m^3 以下とした。単位粗骨材絶対容積に関しては，指針での目安と同値に設定した。

（2） 流動勾配および側圧に関する目標値の設定

表-3 に覆工用高流動コンクリートの流動勾配および側圧の目標値を示す。流動勾配は，一般的な 1BL の延長である 10.5m を流動させて 100cm 以下の高低差であれば施工上問題がないと考え，1/11 以下を目標とした。また，高流動コンクリートの側圧は，液圧として型枠の設計を行うことが標準である。しかしながら，作業空間が狭隘なトンネル工事においては，補剛材を入れるスペースがなく，移動式型枠の補強を行うことが容易ではない。そこで，高性能 AE 減水剤の添加量をできるだけ少なくして中流動コンクリートと同程度の側圧とすることを目標とした。すなわち，側壁の高さ 5m での液圧 120kPa 程度に対し，中流動コンクリートを対象とした場合の移動式型枠における設計上の耐力がこれまでの実績として 80kPa に設定されている [3]ことを参考に，液圧に対する側圧の比を 80/120≒0.7 以下とすることとした。

表-1　覆工用高流動コンクリートの要求性能

設計基準強度 (σ28) (N/mm^2)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	U形充填高さ (障害なし) (mm)
18以上	550±50	3.0～7.0	300以上 (ランク3)

表-2　配合要因と各種単位量の範囲

配合要因	配合設計・施工指針[4]	覆工用高流動コンクリート
単位水量	165～185 kg/m^3	175 kg/m^{3}以下
単位セメント量	340 kg/m^3～450 kg/m^3	400 kg/m^{3}以下
単位粗骨材絶対容積	290 L/m^3～320 L/m^3	290 L/m^3～320 L/m^3

表-3　流動勾配および側圧の目標値

項目	配合設計・施工指針[4]	覆工用高流動コンクリート
流動勾配	－	1/11以下
液圧に対する側圧の比	1.0（液圧）	0.7以下

表-4　検証ケース一覧

ケース	コンクリートの種類	挙動計測の有無	側圧計測の有無	締固めの有無
覆工用中流動	覆工用中流動コンクリート	有り	有り	有り
覆工用高流動	覆工用高流動コンクリート	有り	有り	無し

3. 現場における高流動コンクリートの適用検証

3.1 適用現場の概要

高流動コンクリートを適用した現場は，大断面トンネル工事である。トンネル断面寸法は，内空幅12m，高さ8m，断面積95m^{2}で，覆工厚が40cmであり，1BLを対象として適用した。

3.2 検証ケース

検証は，**表-4** に示すように，中流動コンクリートで内部振動機による締固めを行った覆工用中流動のケースと，締固めを行わなかった覆工用高流動のケースで実施した。

3.3 検証時の施工方法

（1） 製造および運搬方法

覆工コンクリートは，**表-5** に示す材料を常用しているレディーミクストコンクリート工場にて容量 2m^3 の強制

2 軸ミキサにより，1 バッチ 2m³ として練り混ぜた。

表-6 に覆工コンクリートの配合を示す。高流動コンクリートの配合は，事前の室内試し練りにて目標性能を満足するように高性能 AE 減水剤の添加量などをパラメータとして選定した。また，空気量は，耐凍害性確保として，5.5±1.5%を管理値とした。また，1 バッチの練混ぜ時間は，50 秒とした。現場までの運搬は，アジテータ車にて 1 台当り 4m³ 積載し，30 分程度であった。

（2） 打込み方法

覆工コンクリートの打込み位置および手順を図-1 に示す。スプリングライン（以降，S.L.と称す）下部においては，打込み時のエントラップトエアによる表面気泡を抑制するために，予め設置しておいた S.L.下部吹上げ口からの打込みとし，S.L.位置程度にある検査窓までコンクリートを打ち込んだ。S.L.まで打込みが完了した後，圧送管の切替えを行い，肩下部，肩上部にある検査窓からコンクリートを打込むこととした。天端部においては，逆打ちになることから，S.L.下部と同様に吹上げ方式により打込みを行った。また，打込み位置は，S.L.から肩下までは，セントル縦断方向の中央からの打込みとし，打込み高さは，1 層 50cm とした。さらに，肩上から天端にかけては，発生したブリーディングを裾部で排除するために，既設コンクリート側から裾側までの 12.5m 程度を吹上げにて流動させる打込み方法とした。なお，締固めは行わなかった。

3.4 フレッシュコンクリートの性状と硬化物性における試験項目と頻度

フレッシュコンクリートの性状と硬化物性の確認は，締固めを行わなかった覆工用高流動のケースで表-7 に示す項目を実施した。また，品質管理試験であるフレッシュコンクリートの性状においては，覆工用中流動と覆工用高流動の検証ケース全てで行い，覆工用高流動のケ

表-5 使用材料

使用材料	記号	種類	摘要
セメント	C	高炉セメント B 種	密度：3.04 g/cm³
膨張材	EX	石灰系 (20kg/m³)	密度：3.16 g/cm³
細骨材 S (S1:S2 =65：35)	S1	苫小牧市 字勇払産砂	表乾密度：2.68g/cm³ 粗粒率：2.80
	S2	板木山地区 砕砂	表乾密度：2.68g/cm³ 粗粒率：2.70，35%
粗骨材 G (G1:G2 =70：30)	G1	北斗市峨朗産 石灰砕石 2005	表乾密度：2.70 g/cm³ 実積率：59.0 g/cm³
	G2	板木山地区 砕石	表乾密度：2.72 g/cm³ 実積率：59.0%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物

表-6 覆工コンクリートの配合

配合	W/C %	s/a %	単位量 kg/m³				混和剤 C*%
			W	B※1	S	G	
中流動	45.7	54.0	160	350	992	812	0.90
高流動	45.5	52.0	157	345	940※2	876	1.10

※1 B＝C+EX　※2 高流動は S1 のみを使用

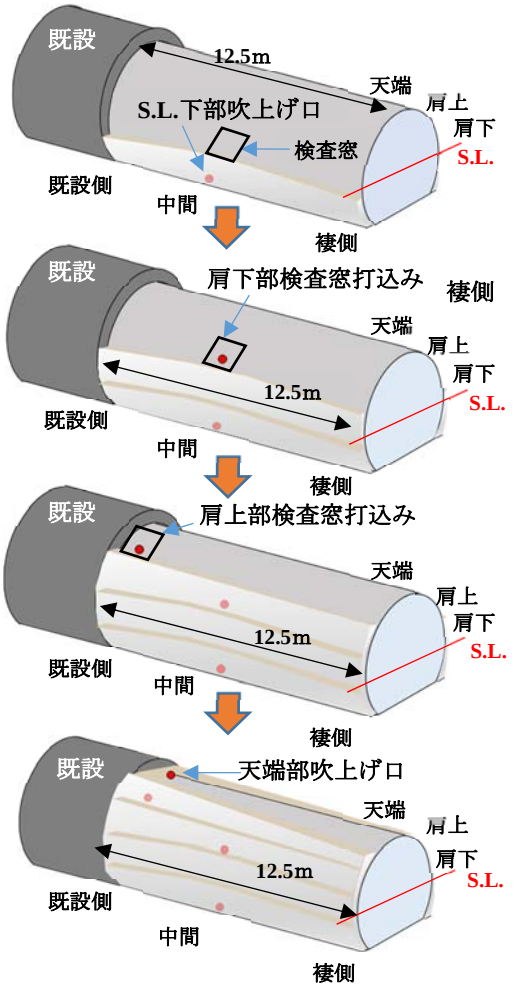


図-1 打込み手順のイメージ図

表-7 適用時の確認項目

項目	確認方法	頻度・箇所
フレッシュ性状試験	スランプフロー (JSCE-F 503) 空気量 (JIS A 1128) コンクリート温度	4 リフト（S.L. ,肩下，肩上，天端）で計測
流動勾配	検査窓からの深さをスケールで測定	3 箇所(既設部，中間，裾）3 リフト（S.L. ,肩下，肩上）で計測
強度試験	圧縮強度試験 (JIS A 1108) 静弾性係数試験 (JIS A 1149) φ100　N=3 本	3 箇所(既設部，中間，裾）4 リフト（S.L. ,肩下，肩上，天端）で計測※天端は中間なし
荷重計による側圧計測	事前にセントルに設置し側圧を記録	SL 部に 3 箇所（既設部，中間，裾）に設置計測

ースは，S.L.部，肩下部，肩上部，天端部を打込み時のアジテータ車から採取したコンクリートで計 4 回実施した。ただし，肩部打込み時は，スランプフローのみとした。

図-2 に流動勾配および供試体採取位置を示す。流動勾配は，S.L.部，肩下部および肩上部で測定しテストピースは，全リフトの検査窓位置で採取を行った。

3.5 移動式型枠の発生応力と作用する側圧計測

適用現場で用いた移動式型枠は，支持骨組みと鋼製パネルを組合せた型枠と，それを支持する移動架台で構成されており，打込み完了して 18 時間以降から脱型するまでは型枠が独立して覆工コンクリートを支持する機構となっている。また，移動式型枠の設計耐力は，中流動コンクリートを対象として設定されたものを用いた。

表-8 に，覆工コンクリート打込み時の挙動確認項目，**図-3** に計測機器配置図を示す。計測は，移動式型枠に覆工用高流動コンクリートを打ち込んだ際の型枠に発生する応力および作用する側圧を確認するために実施した。これにより，覆工用高流動コンクリートを適用する際の移動式型枠の設計耐力を確認することができる。

4. 適用結果と考察

4.1 覆工コンクリートの品質

（1）フレッシュコンクリートの性状

表-9 に，フレッシュコンクリートの性状試験結果を示す。全試験において，要求性能を満足する結果であった。中流動のケースでのスランプフローは 450mm であった。一方，覆工用高流動のケースでは，S.L.から肩上部までのスランプフローは，結果的に 515mm で，天端部では 545mm であった。いずれも粗骨材が分離するような傾向はなく，所定の性状が確保されていることを確認した。

（2）流動勾配

図-4 に，各リフトにおける流動勾配の測定結果を示す。流動勾配の測定は，S.L.部，肩下部，肩上部の各リフトで実施しており，S.L.部，肩下部，肩上部の計測した全てにおいて，目標とする流動勾配である 1/11 を十分に満足することができた。S.L.部の打込みでは，スランプフローが 515mm で要求性能としたスランンプフローの下限値に近いコンクリートであっても流動勾配は 1/39 であった。また，吹上げでの打込みでも問題なく S.L.部付近の検査窓まで打ち込むことができた。S.L.上部となる肩下部，肩上部での打込みでも，S.L.部の打ち込んだコンクリートと同じスランプフローで，流動勾配は 1/21～1/29 と若干，勾配が大きくなった程度であった。

中流動コンクリートを型枠に打込む状況は，ある高さまで，あまり流動せずに筒先付近で盛り上がり，さらに打込みが進行すると一気にコンクリートが崩れて急速に流末に流れるといった現象が見られた。これは，覆工コンクリートの均質性を確保する上で，問題になる可能性が考えられる。一方，高流動コンクリートを型枠に打込む状況は，緩やかな一定勾配を保ちつつ連続的に流動す

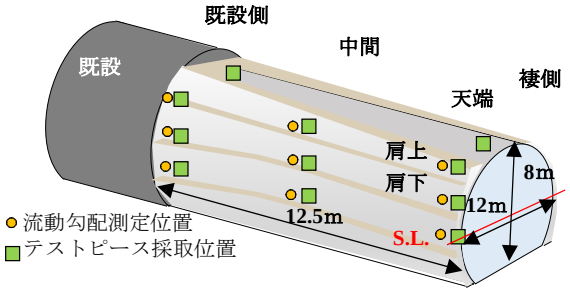
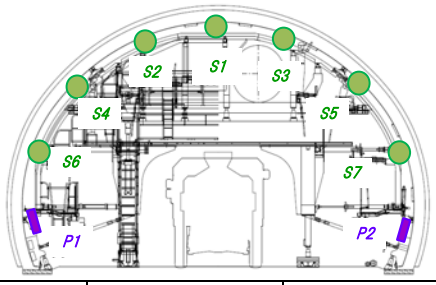


図-2　流動勾配およびテストピース採取位置図

表-8　覆工コンクリート打込み時の挙動確認項目

挙動確認目的	計測項目	計測機器	計測数量
型枠の応力状態	型枠の応力	ひずみゲージ	7 箇所
コンクリート内部圧力の上昇	面盤圧	土圧計	2 箇所



記号	計測項目	計測数量
S	型枠の応力	7 箇所×1 側線中間
P	面盤圧	2 箇所×1 側線中間

図-3　計測機器配置図

表-9　フレッシュ性状試験の結果

ケース	スランプフロー(mm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
覆工用中流動	450	6.1	19
覆工用高流動	515（S.L.）	6.5	18
	515（肩下）	－	－
	515（肩上）	－	－
	545（天端）	6.8	18

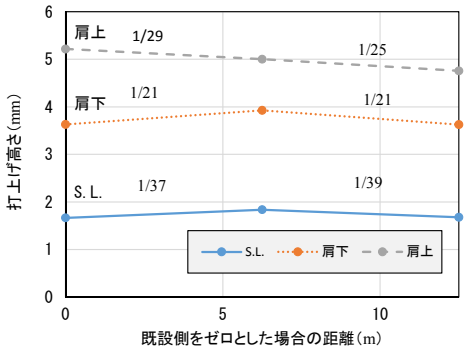


図-4　各リフトでの流動勾配

る状況であったことから，良好な施工性を示しているものと考えられた。これらのことから，高流動コンクリートのスランプフローは，目標値の範囲における下限値付近であっても流動勾配の目標値である 1/11 以下を満足することが確認された。

（2）圧縮強度および静弾性係数

図-5, 図-6 に，それぞれ各部位におけるリフト毎の圧縮強度および静弾性係数の測定結果を示す。S.L.部，肩下部の覆工用高流動コンクリートの打込みは，流動距離が6m 程度で，打込み口で採取したテストピースと，流末で採取したテストピースの圧縮強度および静弾性係数は，概ね同値であった。また，肩上部と天端部での打込みは，流動距離が長くなり 12m 程度あるが，打込み口となる既設部と流末の褄部において圧縮強度および静弾性係数は，概ね同値であった。以上の結果より，全ての測定した結果は同程度と見なすことができ，全リフトで均一な品質が確保されていることを確認した。

4.2 発生応力と側圧の計測結果および考察

（1）型枠に発生した応力

覆工コンクリートをS.L.から肩下に打込む時点と，天端まで打込み完了した時点における型枠の最大発生応力について，トンネル断面の中心線から片側となる計測位置S1，S2，S4およびS6での応力変化を図-7に，全体の発生応力を図-8に比較した。覆工用中流動と覆工用高流動のケースにおける型枠に発生した応力は，どちらも概ね同じであった。打込み中においては，肩下付近のS4位置における応力以外は，若干ではあるが引張側の値を示した。一方，打込み完了における応力は，覆工用高流動と覆工用中流動のケースともに，S3での計測値を除き，全周にわたってマイナス値を示し，圧縮応力が卓越した。打込み完了時の傾向としては，S.L.付近であるS6の応力

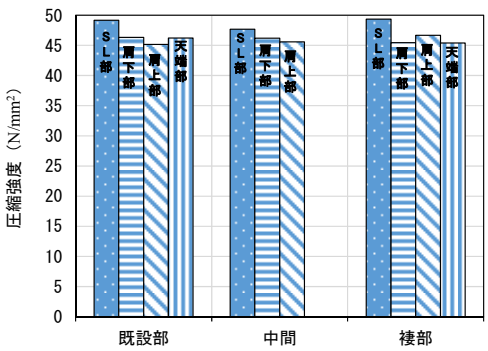


図-5　各部位におけるリフト毎の圧縮強度

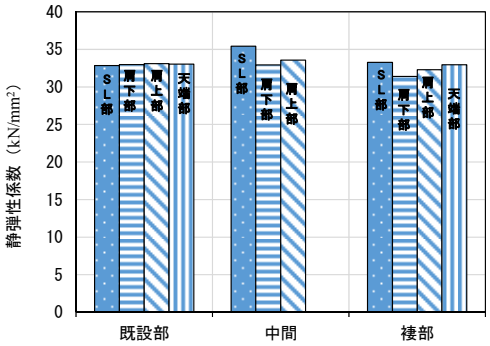


図-6　各部位におけるリフト毎の静弾性係数

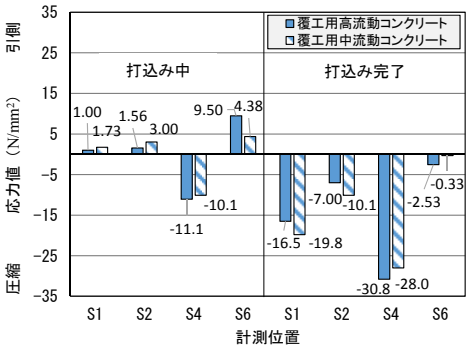


図-7　部位毎の発生応力

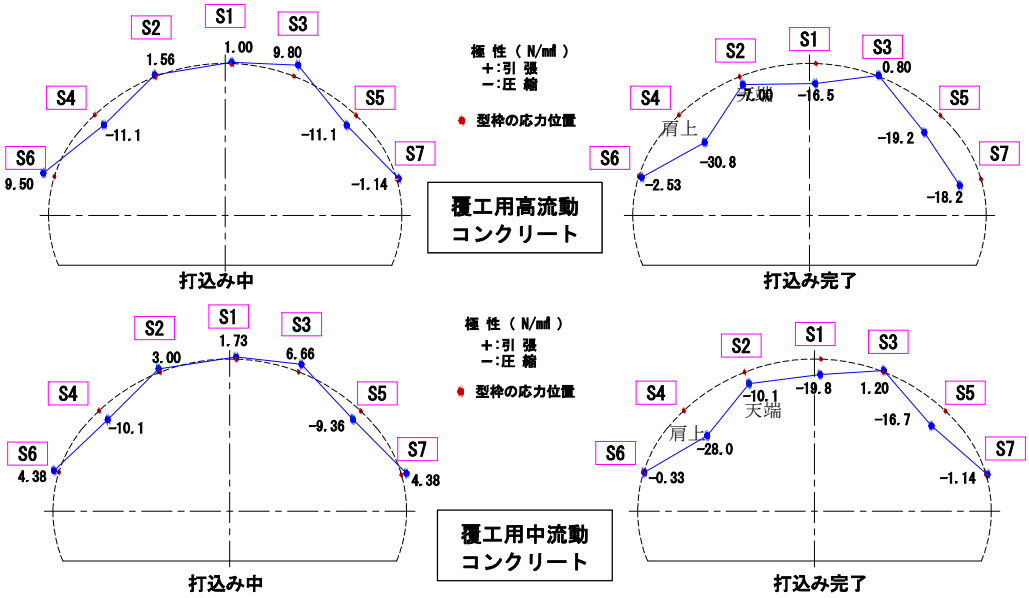


図-8　型枠の発生応力比較

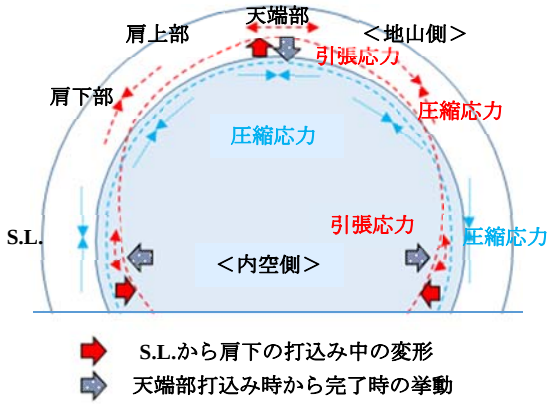


図-9　型枠の変形イメージ図

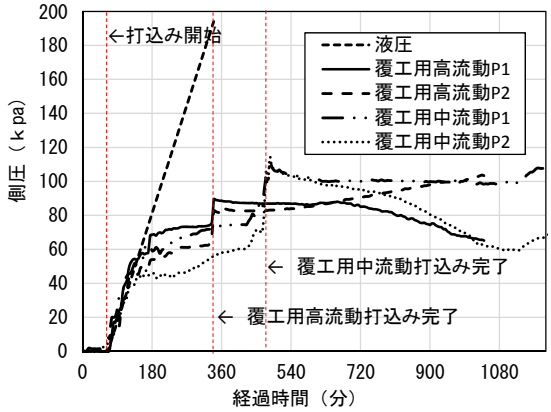


図-10　側圧計測結果

値は，覆工用高流動と覆工用中流動のケースで，それぞれ－2.53 N/mm^2，－0.33 N/mm^{2}を示し，天端部に位置するS1の応力値は，それぞれ－16.5 N/mm^2，－19.8 N/mm^{2}の圧縮応力が型枠に発生している。これに対し，肩下付近のS4の応力値は，それぞれ－30.8 N/mm^2，－28.0 N/mm^{2}で最も大きい圧縮応力が型枠に発生していた。また，肩下部は，覆工用高流動のケースのS4位置における打込み中と打込み完了時に型枠に発生する応力の絶対値が30.8－11.1＝19.7 N/mm^{2}変化しており，他の部位と比べて最も変化量が大きかった。覆工用中流動のケースのS4位置における応力変化も同様の傾向であった。このことから，本検討における肩下部は，覆工コンクリートの打込み過程における型枠の発生応力において，トンネル円周断面の変曲点から起因する応力集中を起こす部位と推察された。しかし，型枠の設計における許容応力度は，使用鋼材の降伏点より算出した163 N/mm^{2}であるため，いずれの応力値も設計耐力上，問題がないことが確認できた。

図-9に，天端部に覆工コンクリートを打込み完了させた時点において，計測された応力値から推察した型枠の変形イメージを示す。前述の応力の計測結果から，S.L.部から肩下部における覆工コンクリートの打込みでは，S.L.部の型枠に作用した側圧により，S.L.付近の型枠が内空側に，肩上部と天端の型枠は地山側に押し上がるような変形が生じているものと考えられる。また，打込み完了時においては，打込み過程での変形が，天端部に覆工コンクリートを打ち込むにつれて，自重と圧入圧により概ね元の型枠形状に戻っているものと推察された。

（2）型枠に作用した側圧

覆工コンクリートの打込み中の S.L.部の型枠に作用する側圧について，中流動コンクリートを打ち込んだブロックと高流動コンクリートを打ち込んだブロックを図-10 で比較した。どちらも天端部圧入前においては，概ね同値を示し，70～80kPa 程度であった。天端圧入時にかかる圧力が側圧に大きく影響し，液圧が 195kPa 程度であるのに対し，最終側圧は，90～110kPa 程度で，液圧の 110/195≒0.56 倍となり目標値の 0.7 倍以下を満足した。

5.まとめ

本適用および計測結果で得られた知見を以下に示す。

(1) スランプフローが515mm以上の場合，打ち込んだコンクリートの流動勾配は1/21～1/39程度となり，良好な自己充填性を示した。

(2) 側圧は，打込み初期では液圧になるが，打込みの進行と共に軽減され，最終的に液圧の0.5倍程度になった。

(3) 覆工用中流動コンクリートと覆工用高流動コンクリートを打ち込んだ際に移動式型枠に作用する側圧は，同程度であった。

(4) 移動架台と型枠が独立した構造の移動式型枠に，覆工用中流動コンクリートと覆工用高流動コンクリートのどちらを打ち込んだ場合でも，型枠に発生する応力は，同程度であった。

参考文献

1)　株式会社高速道路総合技術研究所：NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ，2011.12.

2)　坂井吾郎,安齋勝,近藤啓二,菅俣匠：特殊な混和剤を用いたトンネル覆工用中流動コンクリートの開発，セメント・コンクリート，No.787，pp.35-40，セメント協会，2012.9.

3)　松本修治,佐藤崇洋,坂井吾郎,手塚康成,青柳隆浩,西岡和則：山岳トンネルにおける覆工用高流動コンクリートの適用実績，トンネル工学報告集，第 27 巻，I-17，2017.11.

4)　土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針，2012.6.

5)　小山広光,大野誠彦,西岡和則,坂井吾郎,松本修治：凝結促進剤を添加した中流動および高流動覆工コンクリートの各種性状について，第 70 回年次学術講演会，VI－640，pp.1279-1280，土木学会，2015