

# 報告 狭隘な施工環境下におけるボックスカルバート頂版コンクリートの施工

幸田 圭司\*1・大西 孝典\*2・戸田 晶\*3・根本 浩史\*4

**要旨：**本稿は、狭隘な施工環境下でボックスカルバート躯体の壁部および頂版部を構築した工事の施工報告である。施工では、品質および出来形の確保のため、締固めが困難な壁上層および頂版下層はセルフベリング性に優れた高流動コンクリートを、勾配を有する頂版上層は、締固めおよび均しの施工性に優れた中流動コンクリートを用いて施工する計画とし、それぞれ配合検討を行った。検討の結果、セルフベリング性を確保するためにこわばりを低減した高流動コンクリートを、締固めおよび勾配均しの施工性を確保するために適度な流動性を有する中流動コンクリートを用いることで、品質および出来形を確保することができた。

**キーワード：**狭隘環境, 高流動コンクリート, こわばり, セルフベリング, 中流動コンクリート

## 1. はじめに

東京都道である環状第2号線は、全長約14kmの都市計画道路であり、そのうち首都高速自動車道の八重洲線高架および都心環状線汐留トンネルに交差する区間については、開削工法によって、供用中の道路直下でトンネル（以下、環2トンネル）を建設している。

環2トンネルの平面図および断面図を、図-1および図-2にそれぞれ示す。本区間は交通量が多い汐先橋交差点直下に位置しており、交通規制の条件から覆工板を開きできない範囲が広く、覆工板直下での作業が強いられた。また、環2トンネルは既設の汐留トンネルの上を交差するため、土被りが非常に小さく、図-3に示すように覆工板と頂版天端との離隔が最小で80cm程度しかない狭隘な施工空間でボックスカルバート頂版および壁部のコンクリート（以下、頂版リフト）を構築しなければならなかった。また、天端は最大3.0%の縦断勾配を有しており、さらに、頂版と側壁との隅角部は最小あき40mm程度の高密度配筋という構造面の特徴もあった。

本施工では、このような条件下で、いかにして頂版リフトの品質および出来形を確保するかが課題となった。そこで、この課題を解決するような施工方法およびコンクリート配合を検討し、実施工前に実際の施工条件を模擬したモックアップ試験を実施することで、施工方法および配合の妥当性を検証することとした。本稿はこれらの検討内容および検討結果を報告するものである。

## 2. 課題の抽出および施工方法の検討

### 2.1 課題の抽出

表-1に本施工の概要を示す。前項で述べた通り、本施工では頂版リフトの品質および出来形の確保が課題と

表-1 頂版リフト施工概要

施工時期	2018.1～2018.11
施工数量	約 6,500m <sup>3</sup>
設計基準強度	30N/mm <sup>2</sup>
部材厚さ	頂版：700～1,100mm 壁：700～1,200mm

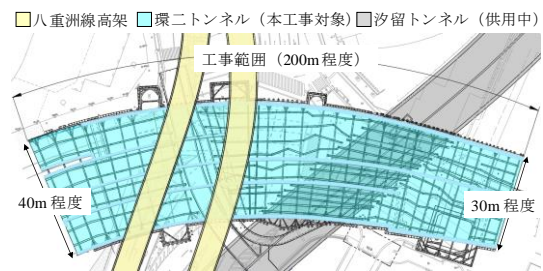


図-1 環2トンネル平面図

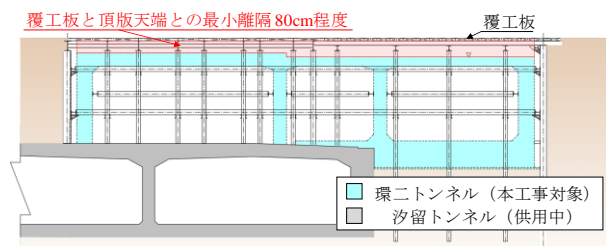


図-2 環2トンネル断面図

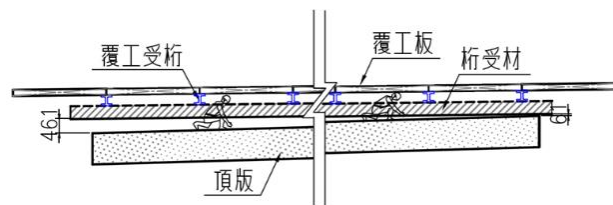


図-3 頂版施工イメージ図

\*1,4 清水建設株式会社 土木技術本部 基盤技術部 工修 (正会員)

\*2 首都高速道路株式会社 東京西局プロジェクト本部

\*3 清水建設株式会社 土木東京支店 土木第2部 工修 (正会員)

なった。狭隘な施工環境下においては施工空間が制限されるため、施工性が著しく損なわれ、通常のコンクリート施工で行われるようなコンクリートの打込みおよび締固め、仕上げ等の施工が困難となる。特に夏場の施工では施工環境温度が40℃程度となることが予想され、このような条件下での施工は困難を極めることが予見された。

上記の観点から、計画通りに工期内で躯体を構築するためには狭隘環境下でのコンクリート施工の省力化は必須であると考えられた。そこで、施工性に優れたコンクリートを用いることで施工を省力化し、コンクリート施工の生産性向上を図ることを計画した。

## 2.2 施工方法の検討

施工は図-4に示すように、頂版リフトをコンクリートの要求性能の異なる2つの部位（壁上層+頂版下層、頂版上層）に分け、それぞれの部位で要求性能を満足するようなコンクリート配合を選定することとした。

まず、勾配仕上げを考慮する必要のない壁上層および頂版下層については、自己充填性を有する高流動コンクリートを用いることで、締固め作業の省力化を図った。特に当該箇所は締固め作業高が高く、締固め作業が困難であること、さらに鉄筋の最小あきが40mm程度の高密度配筋箇所を含むことから、高流動コンクリートの採用が妥当と判断した。また、狭隘環境下での筒先のこまめな移動は困難であるため、作業の省力化のため、高流動コンクリートの中でも、よりセルフレベリング性に優れた配合を採用することで、図-5に示すように筒先の移動を最小限に抑えることを目標とした。

一方で、3.0%の勾配仕上げが必要な頂版上層部の施工においては、コンクリートの流動性が高すぎると勾配を仕上げるのが困難となり、逆に流動性が低すぎると、締固めおよび均しの施工性が悪くなる。そのため、頂版上層部の施工は、勾配を仕上げられ、かつ、締固めおよび均しの作業量が最小限となるような、適度な流動性を有する中流動コンクリートで打ち重ねる計画とした。

以上より、頂版リフトの施工で要求されたコンクリートの性能をまとめると、下記の通りである。

### ○ 壁上層および頂版下層

優れたセルフレベリング性を有する高流動コンクリート

### ○ 頂版上層

最大3.0%の勾配均しが可能であり、かつ、締固めおよび均しの施工性に優れた中流動コンクリート

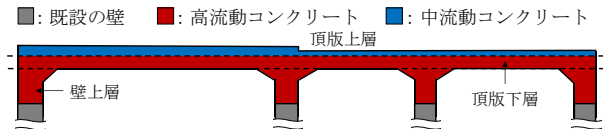


図-4 頂版リフト配合区分模式図

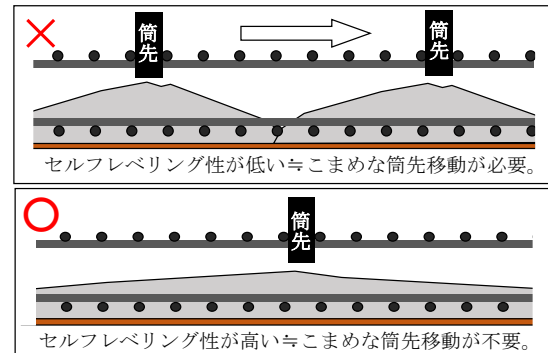


図-5 筒先移動の省力化に関する模式図

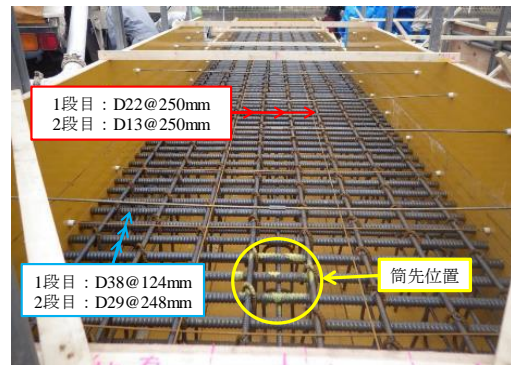


写真-1 流動性評価試験で用いた型枠内の状況

## 3. 高流動コンクリートの配合選定

### 3.1 流動性評価試験

#### (1) 試験概要

高流動コンクリートの配合選定にあたって、まずは指針<sup>1)</sup>で示される最も流動性の高い配合として、自己充填性ランク1、スランプフローの目標値が70cmの標準的な高流動コンクリート配合(30 70 20L)を用いて、写真-1に示すような実際の頂版スラブの配筋を模擬して作製した型枠内(幅2m、流動距離10m)にコンクリートを打ち込み、流動勾配の形成状況を確認する試験を実施した。ここでいう流動勾配とは、打込み完了後の天端仕上り面の勾配のことを指し、打込み完了後のコンクリート天端面の高さを流動距離0, 1, 3, 5, 7, 10mの位置でそれぞれ測定することで評価した。本試験では表-2に示す通り、材料分離抵抗性を増大する目的で添加する増

表-2 流動性評価試験配合

呼び名	$G_{max}$ (mm)	Slump flow (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )						
						W	C	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	SP	VA (外割)
L	20	70	4.5	31.8	54.0	175	550	606	259	753	7.15	0
L+VA											9.37	0.15

※C: 低熱ポルトランドセメント (密度: 3.22g/cm<sup>3</sup>), S<sub>1</sub>: 富津産山砂 (表乾密度: 2.60g/cm<sup>3</sup>), S<sub>2</sub>: 八戸産砕砂 (表乾密度: 2.69g/cm<sup>3</sup>)

G: 八戸産砕石 2005 (表乾密度: 2.69g/cm<sup>3</sup>) SP: 高性能 AE 減水剤, VA: 増粘剤

粘剤の影響を評価するため、増粘剤を添加しない【L】配合および増粘剤を添加した【L+VA】配合の2配合で試験を実施した。なお、温度ひび割れ制御の観点から、両配合とも低熱ポルトランドセメントを使用した。

## (2) 試験結果

打込み後の流動勾配を図-6に示す。流動勾配は増粘剤を添加した場合の方が急であり、両配合とも流動先での材料分離はほとんど確認されなかった。この結果から、本施工では増粘剤の添加は不要であると判断した。

また、流動勾配の形成状況を目視確認したところ、図-7に示すように、コンクリート①の打込みから10分程度後にコンクリート②が続いて打ち込まれる際に、流動が停止してから10分程度静止した状態の①が②に追従して流動せずに、②が①の上を覆いかぶさるように流動していくことによって流動勾配が形成される現象が確認され、【L+VA】配合においてこの傾向が特に顕著であった。これはコンクリート①の静的状態が一定時間保持されることでこわばり、外力に対する変形抵抗性が増加したために生じたものと推察された。ここでいうこわばりとは、静的状態のコンクリートを動かす外力が動的状態のコンクリートの降伏値以上になる現象と定義している。本施工においても、広がりのあるスラブ部材へ打ち込むことを考慮すると、コンクリートの流動が一定時間静止し、静的状態が保持される状況は十分に考えられる。そのため、本施工で要求される高いセルフレベリング性を実現するためには、一定時間静止した後でも外力による変形抵抗性が低い配合、即ち、コンクリートのこわばりを低減した配合を選定することが必要と考えられた。

そこで、本検討ではコンクリートのこわばりの程度を簡易的な試験により評価することを試み、それによって、よりこわばりが低減された配合を選定することとした。

## 3.2 こわばり評価試験

### 3.2.1 L型フロー試験器を用いた試験方法

#### (1) 試験概要

1つ目の試行試験として、既報<sup>2)</sup>を参考に、高流動コンクリートのレオロジー特性評価方法の1つとして用いられるL型フロー試験器に対し、写真-2に示すように流動速度を計測するセンサを設置して、コンクリートの流動速度を評価指標とした試験を実施した。試験は、試料を打ち込んだ直後に流動させる水準と、試料打込み後

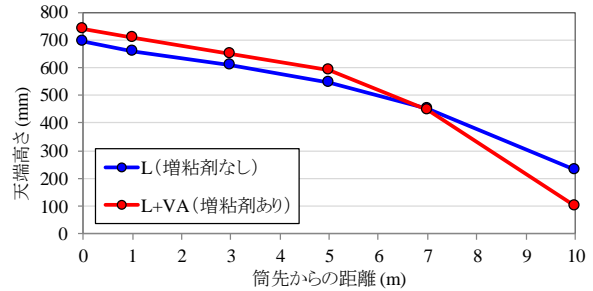


図-6 打込み後の流動勾配

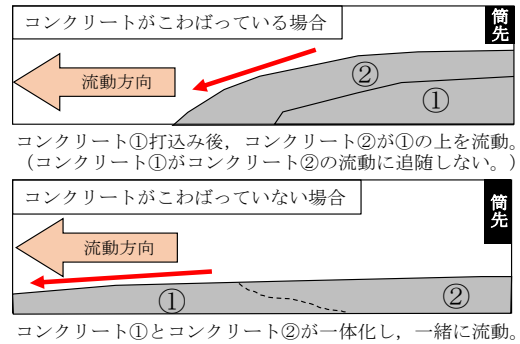


図-7 流動勾配形成の模式図

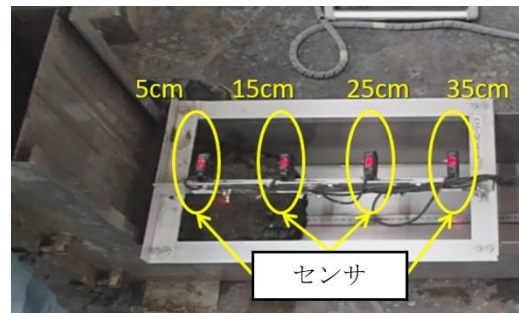


写真-2 L型フロー試験器へのセンサ設置状況

10分間静置した後に流動させる水準の2水準でそれぞれ流動速度を測定し、2水準の流動速度の差をこわばりの程度として評価することを試みた。なお、評価指標は流動距離5~15cm間の流動速度とした。検討配合は表-3に示す通りで、流動性評価試験で使用した粉体系高流動コンクリート配合である【L】配合をベースとして、既報<sup>3)4)</sup>で報告されているこわばり低減剤を添加した【L+TR】配合、さらに石灰石微粉末をセメントに内割置換した【M+TR+LSP】配合の計3配合とした。いずれの配合もスランプフロー70±5cm、空気量4.5±1.5%である。なお、【M+TR+LSP】配合は、石灰石微粉末をセメントの一部に置換することで単位セメント量を低減できるため、

表-3 こわばり評価試験検討配合

呼び名	$G_{max}$ (mm)	Slump flow (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
						W	$C_{LD}$	$C_{DM}$	LSP	$S_1$	$S_2$	G	SP	TR (外割)
L	20	70	4.5	31.8	54.0	175	550	0	0	606	259	753	5.50	0
L+TR						175	0	350	200	584	250	753	4.90	0.15
M+TR+LSP						175	0	350	200	584	250	753	4.90	0.15

※ $C_{LD}$ : 低熱ポルトランドセメント (密度: 3.22g/cm<sup>3</sup>),  $C_{DM}$ : 中庸熱ポルトランドセメント (密度: 3.21g/cm<sup>3</sup>)

LSP: 石灰石微粉末 (密度: 2.70g/cm<sup>3</sup>),  $S_1$ : 富津産山砂 (表乾密度: 2.60g/cm<sup>3</sup>),  $S_2$ : 八戸産砕砂 (表乾密度: 2.69g/cm<sup>3</sup>)

G: 八戸産砕石 2005 (表乾密度: 2.69g/cm<sup>3</sup>), SP: 高性能 AE 減水剤, TR: こわばり低減剤

温度ひび割れ制御の観点から、低熱ポルトランドセメントから中庸熱ポルトランドセメントに変更している。

## (2) 試験結果

試験結果を図-8に示す。各配合の流動速度を比較すると、【L】配合が最も遅く、【M+TR+LSP】配合が最も速かった。この結果は、コンクリートの流動性（スランブフロー値）および粘性に影響されるものと考えられるが、スランブフロー値は3配合ともほぼ同様であった。そのため、本試験における流動速度は、粘性を表す一つの指標になると推察される（速度が速いものほど粘性は低い）。また、静置前後の流動速度の差については、【L】配合が最も大きく（2.1cm/s）、【L+TR】配合ではその差は微量（0.6cm/s）、【M+TR+LSP】配合では微量（0.9cm/s）ではあるが静置後の流動速度の方が大きかった。±0.5cm/s程度は測定誤差とも捉えられるため、【L+TR】配合および【M+TR+LSP】配合のこわばりの程度は本試験では評価しきれていない可能性が高い。この要因としては、試験の都合上、高さ400mmまで打ち込んだコンクリートに作用する重力が、コンクリートのこわばりによる流動抵抗と比較して明らかに大きかったためと考えられた。

### 3.2.2 スランブ板を傾斜させる方法

#### (1) 試験概要

2つ目の試行試験として、図-9に示すように、内径φ200mmの円筒形コーンに2L分の試料を詰め、スランブフロー試験を実施した後にスランブ板端部を300mm持ち上げて傾斜させ、写真-3のように10秒間コンクリートを流動させたときの流動距離を評価指標とした試験（以下、スランブ板傾斜試験）を実施した。試験は3.1.1と同様に、スランブフロー試験実施直後にスランブ板を傾斜させる水準と、試験実施後に10分間静置させた後にスランブ板を傾斜させる水準の2水準を設け、それらの差によってこわばりの程度を評価することを試みた。

#### (2) 試験結果

試験結果を図-10に示す。こわばりの程度を示す指標とした静置前後の流動距離の差は全ての配合で検出され、ベース配合である【L】配合と比較して、こわばり低減剤を添加した他の2配合はその差が小さく、同程度であった。この結果から、【L+TR】配合および【M+TR+LSP】配合は同等のこわばり低減効果が得られているものと推察された。また、本試験方法では【L+TR】配合および【M+TR+LSP】配合のこわばりの程度も評価することができたため、こわばりの程度を評価するのに有用な試験方法である可能性が示唆された。なお、配合の選定に際しては、3.1.1の試験で得られた結果より、【L+TR】配合よりも【M+TR+LSP】配合の方が粘性を低減できていたことから、【M+TR+LSP】配合を暫定配合（30 70 20M）として、モックアップ試験で用いることとした。

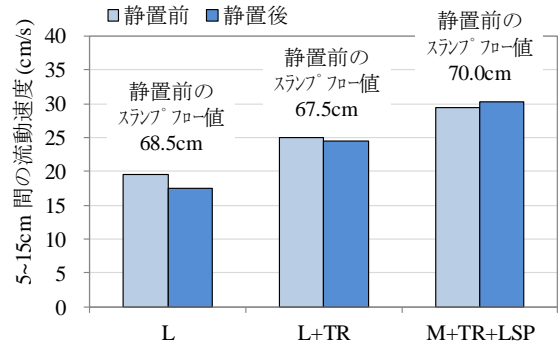


図-8 L型フロー試験器を用いた試験結果

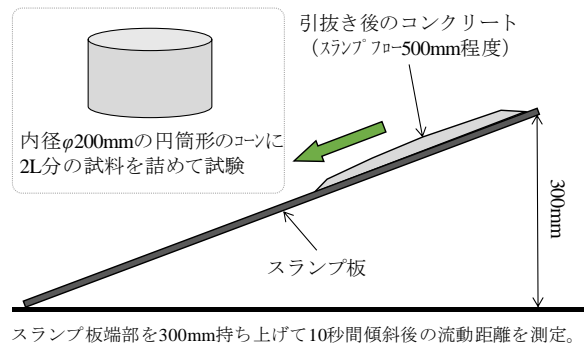


図-9 スランブ板傾斜試験方法

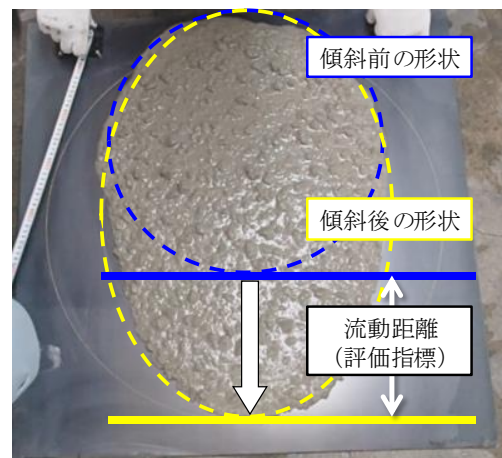


写真-3 スランブ板傾斜後の状況

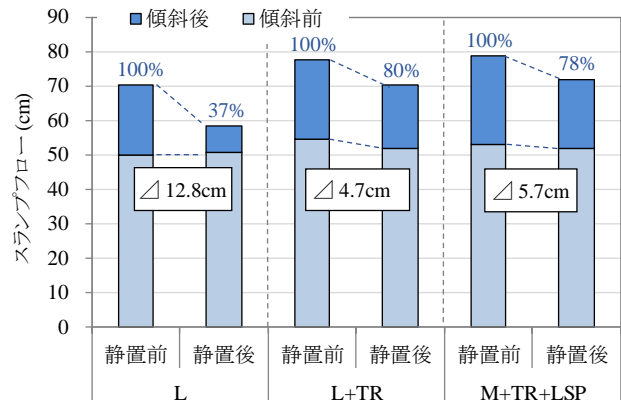


図-10 スランブ版傾斜試験結果

表-4 中流動コンクリート選定配合

$G_{max}$ (mm)	Slump flow (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	SP
20	45	4.5	43.8	50.1	175	400	603	258	879	3.80

※C：中層熟ポルトランドセメント（密度：3.21g/cm<sup>3</sup>），S<sub>1</sub>：富津産山砂（表乾密度：2.60g/cm<sup>3</sup>），S<sub>2</sub>：八戸産砕砂（表乾密度：2.69g/cm<sup>3</sup>）  
G：八戸産砕石 2005（表乾密度：2.69g/cm<sup>3</sup>），SP：高性能 AE 減水剤



写真-4 中流動コンクリート配合選定試験状況

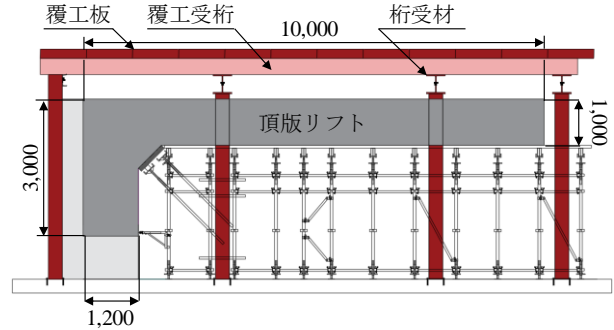


図-11 モックアップ試験体断面図

#### 4. 中流動コンクリートの配合選定

中流動コンクリートの配合選定にあたっては、頂版の配筋を模擬した型枠内にスランプフロー45cm および55cm の2 配合でそれぞれコンクリートを打ち込み、締固めおよび勾配均しの施工性を確認した（写真-4）。結果として、スランプフロー55cm では流動性が過大であり、勾配均しの施工性が悪かったため、表-4 に示すスランプフロー45cm の配合（30 45 20M）を暫定配合として選定し、モックアップ試験で改めて暫定配合の妥当性を検証することとした。

#### 5. モックアップ試験および実施工への適用

##### 5.1 モックアップ試験

##### 5.1.1 試験概要

上記の検討結果から暫定的に選定したコンクリート配合を用いてモックアップ試験を実施し、配合および施工方法の妥当性を検証した。試験では打設ブロックの一部を模擬して作製した型枠を用いて、図-11 に示すような試験体を構築した。なお、型枠および鉄筋の組立時に、それらの組み上げ方法等についても、施工の妥当性検証を合わせて行っている。また、コンクリートの打込みはポンプ車1 台からの配管打ちとし、分岐管を用いて筒先を4 箇所設け、壁上層、頂版下層および上層のそれぞれで図-12 に示すように行った。なお、頂版下層の高流動コンクリートは、流動距離が5m 以内となるように、筒先位置を固定して施工した。また、中流動コンクリートの締固めについては、狭隘環境下で施工が制限されることから、短尺の突き棒による突固めを50cm 程度の間隔で実施する方法を試行した。

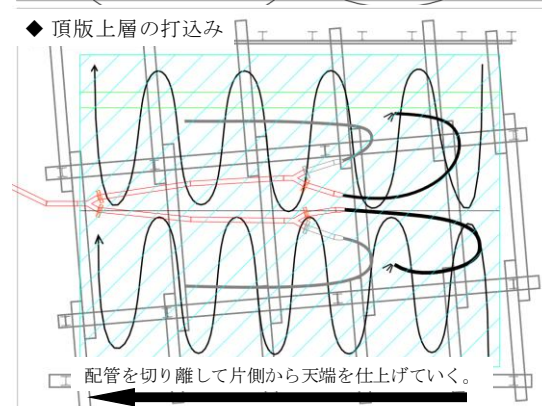
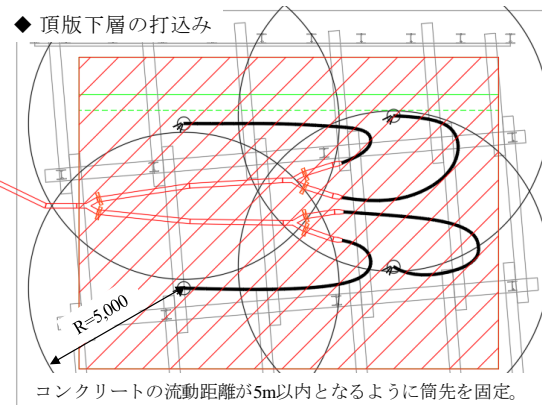
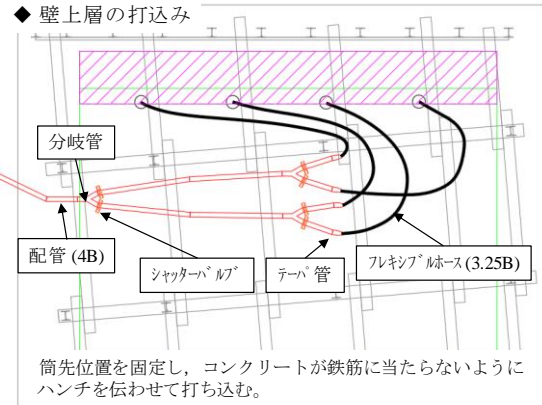


図-12 各層のコンクリートの打込み方法



写真-5 モックアップ試験後の天端仕上り状況

### 5.1.2 試験結果

#### (1) 出来形の確保について

モックアップ試験後のコンクリート躯体天端の仕上り状況を写真-5に示す。提案した施工方法でコンクリート躯体は出来形通りに構築することができた。この結果から、頂版上層に適用する中流動コンクリート配合は適切であると判断し、実施工に展開させることとした。

#### (2) 品質の確保について

コンクリートの材料分離や充填不良が生じていないかを確認するため、硬化後の躯体の数箇所からコアを採取したところ、充填不良は生じていなかった。ただし、高流動コンクリート打込み部のうち、流動距離4~5mの一部の箇所において、流動先の生コンクリートを採取してみたところ、骨材量が若干少なくなっている箇所が確認された。これはモルタル分の粘性が不足していることによって粗骨材が沈降し、モルタル分だけが先走ったためであると推察された。対策として、配合面ではコンクリートの材料分離抵抗性を向上させるために、暫定配合に対して、石灰石微粉末 50kg/m<sup>3</sup>分をセメントに置換する(単位セメント量:400kg/m<sup>3</sup>, 石灰石微粉末量:150kg/m<sup>3</sup>とする)ことで粘性を付与した。また、スランプフローが70cmを超過すると材料分離しやすい傾向となるため、受入れ時のスランプフローの品質管理基準値 60~75cmに対して、自主管理目標値を65~70cmに設定し、品質確保に努めた。なお、中流動コンクリートの締固めについては、突き棒による突固めでも十分に締め固まっていたが、作業が煩雑であるため、実施工ではハンディタイプの軽便バイブレータによる締固めに変更した。

### 5.2 実施工への適用結果

実施工は2018年1月から2018年11月までの期間で、計17ブロックに分割して施工した。施工時の状況および施工後の躯体内空の状況を写真-6および写真-7にそれぞれ示す。事前検討の成果として、計画した施工方法によって、すべてのブロックで規格値内(標高±30mm, 部材厚-20mm以上)の出来形を確保することができた。



写真-6 実施工時の状況



写真-7 施工後の躯体の内空状況

## 6. まとめ

本稿では、狭隘な施工環境下でボックスカルバート躯体の壁部および勾配を有する頂版部を構築した事例を報告した。施工方法として、壁部および頂版下層については打込み・締固め作業の省力化のため、優れたセルフベリング性を有する高流動コンクリートを、頂版上層については締固めおよび均しの作業量を最小限にするため、中流動コンクリートを用いて施工することで、品質および出来形を確保することができた。本報告が同種工事のコンクリート施工計画立案の一助となれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針, pp.33-58, 2012.6
- 2) 松田敦夫, 東邦和, 廣中哲也：L型フロー試験のフロー値とフロー時間による高流動コンクリートの品質評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.11-16, 1995.6
- 3) 根本浩史, 平野修也, 伊達重之, 橋本紳一郎：コンクリートのこわばりを低減する混和剤, コンクリート工学, Vol.57, No.1, pp.16-19, 2019.1
- 4) 幸田圭司, 根本浩史, 戸田晶, 永峯崇二, 大塩隆, 赤松諒亮：狭隘な施工環境下で適用する高流動コンクリートのこわばり評価方法の検討, 土木学会第73回学術講演会, V-415, pp.829-830, 2018.8