

中流動覆工コンクリートの実物大型枠による試験施工 — 東九州自動車道新津トンネル工事 —

Trial Construction of Middle-performance Concrete Lining with Full-scale Formwork
- Construction of the Aratsu Tunnel on Higashi-Kyushu Expressway -

柳 森 豊 ^{*1}	小 西 裕 之 ^{*2}	中 辻 尚 ^{*2}	筒 井 隆 規 ^{*2}
Yutaka Yanagimori	Hiroyuki Konishi	Hisashi Nakatsuji	Takanori Tsutsui
菅 原 健 ^{*2}	岡 田 朋 道 ^{*3}	平 間 昭 信 ^{*4}	松 原 利 之 ^{*1}
Ken Sugawara	Tomomichi Okada	Akinobu Hirama	Toshiyuki Matsubara

【要旨】

近年の土木構造物に対する要求品質の高まりを受けて、山岳トンネルの覆工コンクリートにおいても、施工の合理化、高品質化が強く求められている。覆工コンクリートは、狭隘な閉鎖空間にコンクリートを打込み、締め固めるといふ、施工の特殊性を有しており、一般の明り構造物と比べると、施工方法や使用材料への特別な配慮が必要とされる。

したがって、従来の配合から流動性や充填性を向上させた中流動コンクリートを覆工コンクリートに適用することは、施工性を改善するだけでなく、省力化にも寄与するため、非常に有用な技術であると言える。

本稿では、中流動コンクリートの適用性を実物大型枠による試験施工で検証し、施工特性を明らかにするとともに、得られた知見により、新津トンネルにおける実施工の施工計画へ反映させた事項を報告する。

【キーワード】 中流動コンクリート トンネル二次覆工 型枠パイプレータ 振動エネルギー 省力化

1. はじめに

近年のトンネル覆工コンクリートの品質確保のニーズの高まりを受けて、施工の合理化、高品質化を目的に、当社は、これまでに、天端部の締固め、打設管理、養生管理等の技術向上について取り組んでいる。更なる高度化を目指し、施工面での取り組みに留まらず、打設するコンクリート配合も含めて検証し、施工の不確実性を解消し、施工の省力化も企図した自社の技術開発の一貫として、中流動覆工コンクリートの適用を図ることとした。

中流動覆工コンクリートについては、東日本、中日本、西日本の各高速道路株式会社により、「トンネル施工管理要領（中流動コンクリート編）」¹⁾（以下、「中流動管理要領」と記す）が平成20年8月に制定されており、この要領に基づき、東九州自動車道新津トンネル工事での施工において、検討を進めている。

本稿では、新津トンネルでの中流動覆工コンクリート適用に際して実施した、実物大型枠による試験施工結果と本施工の施工計画をまとめて報告する。

2. 中流動覆工コンクリートの配合

2.1 中流動覆工コンクリート

中流動管理要領では、「中流動コンクリートとはスランプフロー35cm～50cm程度で、スランプ15cm～18cmの普通（従来）コンクリートとスランプフロー65cm程度の高流動コンクリートの中間的な性状を有するコンクリートである」と定義されており、以下の特徴を有するもの

としている¹⁾。

- ① 覆工コンクリートの吹上げ打設を型枠パイプレータの振動だけでも行える。
- ② 特殊な材料を用いない。（現在、室内試験等で確認されている混和材は石粉(LS)と石炭灰(FA)である。）
- ③ 一般の生コンクリート工場の設備で製造可能である。
- ④ 運搬・ポンプ圧送が通常の施工機械で行え、型枠（セントル）の補強等を必要としない。
- ⑤ コンクリート強度18N/mm²以上を対象とする。
- ⑥ 普通コンクリートと同等以上のひび割れ抵抗性を有する。

自己充填性を有する高流動コンクリートのランク3（流動障害なし）に近いレベルが中流動コンクリートであるといえる。また、流動性を確保しつつ、材料分離を防ぐために、混和材料（石炭灰FAまたは石粉LS）を添加して粘性を付与したコンクリートである。表-1に中流動覆工コンクリートの配合決定のための基準を示す。

2.2 新津トンネルでの中流動覆工コンクリートの配合

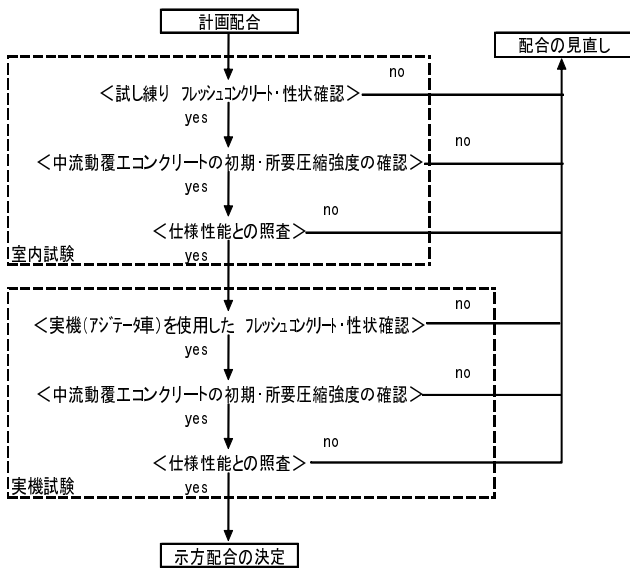
道路二車線断面の新津トンネル(L=2,074m)のうち、非常駐車帯を除く、L=1,888mとほぼ全線で中流動覆工コンクリートを適用することとしたため、数本のトンネルでの試験施工を経て策定された「中流動管理要領」に基づいた示方配合決定フロー(図-1)に加えて、実物大型枠による試験施工を追加して検討を行った。

1. 土木事業本部 土木技術部 トンネル技術G
3. 技術研究所 第三研究室

2. 西日本土木支社 九州土木事業部 新津トンネル作業所
4. 土木事業本部 土木技術部 設計G

表－1 中流動覆工コンクリートの配合決定のための基準¹⁾

種別	材齢28日における圧縮強度(N/mm ²)	粗骨材最大寸法(mm)	スランプおよびスランプフロー(cm)	加振変形試験(cm)	U形充填性高さ(障害無し)(mm)	空気量(%)	セメントの種類	最低単位セメント量(kg/m ³)	単位水量(kg/m ³)	最大塩化物含有量(C1)(g/m ³)	繊維混入率(%)	材齢28日における曲げ靱性
T1-1(LS) T1-1(FA)	18	20	21±2.5	10秒加振後のスランプフローの広がり 10±3	280以上	4.5±1.5	普通ポルトランドセメント(LSの場合高炉セメントB種を使用しても良い)	270	LS:175以下 FA:180以下	300	—	—
T3-1(LS) T3-1(FA)		25	35~50						加振後の広がったコンクリートにおいて、中央部に粗骨材が露出した状態を呈することなく、周囲部に2cm以上のペーストや遊離した水の帯が無いこと		0.3以上で「繊維補強覆工コンクリート編」図4.1に示す基準線を下回らないこと、かつ曲げ靱性係数の平均値で1.40N/mm ² を下回らないこと	



図－1 中流動覆工コンクリートの示方配合決定の流れ¹⁾

新津トンネルにおける配合検討は、

- ① 施工地域におけるコンクリート材料の市場調査
- ② 室内試験による配合設計
- ③ 実機試験による試験練り
- ④ 実物大型枠による試験施工
- ⑤ 実機試験による配合修正のステップで行った。

(1) 周辺地域における製造工場、使用材料の調査

配合検討に先立ち、新津トンネルが位置する福岡県京都郡苅田町周辺において、中流動コンクリートに使用する混和材で調達可能なものや、対応可能な生コン工場等を調査した。

石炭灰は、九州電力株松浦火力発電所産と、苅田町内の九州電力株苅田火力発電所産が調達可能であるが、苅田発電所産はコンクリート用のフライアッシュ JIS 規格を一部外れることから、松浦発電所産を基本とした。た

表－2 中流動コンクリートの使用材料

材料	記号	材料の諸元
セメント	普通	CN 普通ポルトランドセメント、麻生セメント株、密度 3.15 g/cm ³
	高炉B種	CB 高炉セメント B 種、新日鐵高炉セメント株、密度 3.02 g/cm ³
混和材	石炭灰	FA-M 石炭灰 (松浦発電所産)、密度 2.29 g/cm ³ 、比表面積 3,960cm ² /g
		FA-K PFBC 灰原粉 (苅田発電所産)、密度 2.73 g/cm ³ 、比表面積 4,390cm ² /g
	石粉	LS 石粉 (石灰石微粉末)、密度 2.72 g/cm ³
細骨材	S	田川市弓削田産砕砂、FM 2.66、密度 2.66 g/cm ³ 、吸水率 0.91%
粗骨材	G	田川市弓削田産砕石、Gmax 20mm、密度 2.70 g/cm ³ 、吸水率 0.32%
混和剤	高性能	8SV 高性能 AE 減水剤、レオビルド SP8SV、BASF ポゾリス株
	高機能	15Sc 高機能型 AE 減水剤、ポゾリス 15Sc、BASF ポゾリス株
	AE 助剤	202A AE 助剤、マイクロエア 202、BASF ポゾリス株
	消泡剤	404T 消泡剤、マイクロエア 404、BASF ポゾリス株
繊維	F-B	ポリプロチレン繊維、バルチップ 40mm、萩原工業株、密度 0.91 g/cm ³

だし、施工現場からの立地条件が良好であるため、室内試験における試し練り段階では、苅田発電所産の石炭灰も考慮することとした。

石粉は、苅田町周辺で石灰石骨材を採取していることもあり、比較的容易に調達できることが判明した。

生コン工場は、施工場所から約15kmに混和材貯蔵サイロ設備を具備し、中流動覆工コンクリートに対応可能なプラントがあることが判明した。この生コン工場では、定期的に石粉を貯蔵しており、混和材の調達面でも優位

であることが確認できた。

(2) 室内試験による試験練り

試験練りは、表-2に示した、骨材、セメント、混和材、混和剤を用いて、表-3に示す配合の組合せで実施した。なお、覆工コンクリートは、トンネル全線で繊維補強コンクリートを技術提案しており、T3-1 (LS) およびT3-1 (FA) 配合で検討を行った。

試験練りでは、スランプ試験、スランプフロー試験、空気量、加振変形試験、U型充填性試験、L型フロー試験、圧縮強度試験、曲げじん性試験を実施した。表-1に示す基準を満足できた配合を表-4に示す。

表-3 試験練りを実施した材料の組み合わせ

セメント種類	混和材	配合の記号	選定事由
高炉B種	石粉	LS-BB	中流動管理要領で規定されている配合である。
普通		LS-N	中流動管理要領で規定されている配合である。
高炉B種	松浦産石炭灰	FA-BB	中流動管理要領で規定されていないが、副産物を最も再利用できる配合である。
普通		FA-N	中流動管理要領で規定されている配合である。
普通	荏田産石炭灰	FAB-N	中流動管理要領で規定されている配合である。 (石炭灰品質が JIS 規格外となるものの、産地が現地に最も近い。)
高炉B種	なし	T3-1	現行の繊維補強覆工コンクリートを比較配合とした

室内試験による、フレッシュ性状では5種類の材料の組合せ全てで基準を満足できたものの、FA-BB (高炉B種セメント、松浦産石炭灰を混和材で使用) や、FAB-N (普通ポルトランドセメント、荏田産石炭灰を混和材で使用) の配合では、付与する粘性や空気量調整が敏感に変動し、現場配合での品質への影響が懸念された。

また、強度試験でも品質管理基準の材齢28日強度や曲げじん性係数は全ての配合で満足できたが、LS-N配合は、高機能型AE減水剤の過添加が原因と考えられる材齢1日強度の発現の遅れが確認されたことから、実施工での脱枠時間を考慮した施工サイクルへの適用が困難と判断した。

したがって、実機試験までに適正な混和剤選定と添加量の調整により配合を修正することとした。

室内試験で得られた知見としては、スランプフローと加振スランプフローの関係が、ほぼ比例関係にあり、規格値である10±3cmを満足するためには、概ねスランプフローは40~50cmが必要であることが確認できた。

室内試験練りの結果から、新津トンネルにおける中流動覆工コンクリート配合は、LS-BB配合 (高炉B種セメント、石粉を混和材で使用)、FA-N配合 (普通ポルトランドセメント、松浦産石炭灰を混和材で使用) の二配合が適当と判断して実機試験へ向けて、品質変動 (経時変化、耐久性、長期強度など) や、経済性の更なる検討を進めることとした (表-5)。

(3) 実機試験による試験練りへ向けた配合の修正

室内試験により絞り込まれた二配合 (LS-BB、FA-N) に加え、混和剤を高機能AE減水剤に変更したLS-N配合

表-4 室内試験の試験練り結果

配合No.	スランプ cm	スランプフロー		加振フロー		加振変形 cm	空気量 %	コンクリート 温度 ℃	L型フロー			U型充填試験		圧縮強度試験 N/mm ²			曲げ強度 N/mm ²	曲げじん性係数 N/mm ²
		cm	cm	cm	cm				フロー cm	停止時間 sec	沈下量 cm	停止時間 sec	充填高さ mm	材齢1日	材齢7日	材齢28日		
規格値	21±2.5	35~50	—	—	—	10±3	4.5±1.5	—	—	—	—	—	280以上	—	—	18.0	—	1.4以上
LS-BB-11	20.5	40.0×40.0	40.0	53.0×52.3	52.7	12.7	5.2	19.0	46.8	29.34	26.7	11.62	302	4.37	28.9	38.1	6.39	2.61
LS-N-2	23.0	44.5×43.5	44.0	55.5×56.0	55.5	11.5	4.7	18.5	39.0	14.98	26.9	5.37	299	1.11	18.5	26.0	5.86	2.08
FA-BB-9	22.5	45.0×44.0	44.5	55.2×54.0	54.6	10.1	4.7	19.0	48.2	17.96	28.4	8.32	302	4.42	28.4	42.0	—	—
FA-N-15	22.5	43.0×45.0	44.0	53.5×55.2	54.4	10.4	5.5	20.0	51.5	18.59	29.5	8.26	310	6.79	31.6	43.7	5.68	1.72
FAB-N-5	21.5	39.8×43.0	41.4	52.5×48.7	50.6	9.2	3.1	19.0	22.0	21.04	13.1	9.02	312	4.31	30.2	41.9	—	—
T3-1.2	12.5	—	—	—	—	—	4.3	19.0	—	—	—	—	—	4.45	30.2	41.9	7.35	2.32

表-5 室内試験結果から選定された配合

配合No.	セメントの種類	混和材の種類	水セメント比 W/C(%)	水粉体比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	混和剤		空気調整剤		繊維	単位量 (kg/m ³)							
						種類	添加率 P×%	種類	添加率 P×%		セメント		水	混和材		細骨材	粗骨材	混和剤
											CN	CB		W	FA-M			
LS-BB-11	高炉B	石粉	60.4	44.1	50.5	8SV	0.5	404A	0.20T	パルチップ	—	270	163	—	100	884	890	1.85
FA-N-15	普通	石炭灰	59.3	43.2	50.5	8SV	0.5	404A	0.00T	パルチップ	270	—	160	100	—	884	890	1.85

表-6 実機試験用に修正した試験練り配合

配合種別	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)							
			水 W	セメント		石粉 LS	細骨材 S	粗骨材 G	繊維 F	混和剤 Ad
				BB	N					
LS-N-80	59.3	50	160	-	270	80	904	918	2.73	3.15 ^{※1}

※1:高性能AE減水剤 SP8SV

の三配合で性状をさらに比較検討した。中流動管理要領に示された、標準とされる粉体量 350kg/m^3 （セメント量 270kg/m^3 +混和材 80kg/m^3 ）と水セメント比60%以下という条件、および、施工地域におけるコンクリート材料の市場性、経済性を考慮して、最終的に表-6に示す修正配合を現地の生コン工場において試し練りして、性状を確認した上で、同配合により実機試験を行うこととした。

3. 実機試験、実物大型枠による試験施工

3.1 実機試験の目的

実機試験は、室内試験で選定したコンクリートの配合について、実施工と同じ設備、同じ機械での適用性を確認し、現場配合へ修正することを目的としている。

中流動覆工コンクリートの場合、室内試験では中流動管理要領の管理基準の規定値を満足しているものの、実施工を考慮すると、以下の不明確な点を実機試験において検証することが重要と考えた。

- ・生コン工場での練り混ぜ状況
- ・現場到着後の繊維添加によるフレッシュ性状変化
- ・コンクリートポンプ圧送による影響
- ・型枠内でのコンクリート流動状況
- ・コンクリート打設リフトに応じた締固め方法
- ・コンクリート配管の分配方法

打設方法が従来工法とは異なり、数例の試験施工があるのみで施工ノウハウの蓄積も少ないことから、模擬型枠による試験施工を実機試験と位置付けて、実施工への課題を整理抽出し、本施工の施工計画へ反映させることとした。

3.2 模擬型枠による試験施工

(1) 概要

これまでに報告されている中流動覆工コンクリートにおける模擬型枠による試験施工は、実際のトンネル寸法よりも小さい型枠で実施されているため、コンクリートの流動状況やポンプ圧送負荷、型枠バイブレータによる締固め効果などが十分に検証されていないと考えられた。

このことから、新津トンネルでは、別工事で実際に使用したセントルのクラウン部を流用した実物大模擬型枠を作製して、実施工により近い状況での試験施工を行い、施工計画立案段階で不明確な点も明らかにすることにした。使用した実物大模擬型枠を写真-1に示す。

(2) 検証項目

試験施工では、以下に示す検証項目を測定や目視観察により確認した。測定計器や型枠バイブレータの配置などを図-2に示す。

① 中流動コンクリートの流動性に関する検証

打設した中流動コンクリートのセルフレベリング性、



写真-1 実物大型枠幅 (10.1m×高さ 4.2m×奥行き 6.0m)

また、型枠バイブレータを用いた場合の流動勾配などについて検証した。目視観察とビデオ撮影を行い、打ち込まれたコンクリートの流動状況についても把握した。

② 型枠バイブレータによる締固め性状に関する検証

型枠バイブレータの振動時間を「中流動管理要領」に示されている施工例の15秒箇所を基本とし、平均 $E=3.7\text{J/l}$ 以上の振動エネルギーを加えることとし、型枠バイブレータに関する項目（位置・間隔、設置台数、振動数）を模擬型枠の左右側で異なるパターンで検証した。

新津トンネルでは鋼支保工なしの支保パターン区間が多いことから、設計厚30cmに余巻き厚を考慮して部材厚さ50cmでの背面側の充填状況や仕上がり状態についても検証した。また、箱抜き部の仕上がりや締固め状態を確認するため、実物大型枠の内部に $10\times 10\times 100\text{cm}$ の木製型枠を埋込み、充填状況や仕上がりを確認した。

③ コンクリート打込み時における型枠側圧の検証

打設速度を「中流動管理要領」に示されている 1.5m/hr とし、型枠に生じる側圧を計測し、測定結果を型枠計算に反映させて、セントル補強の必要性を検討することとした。

○：型枠バイブレータ据付位置

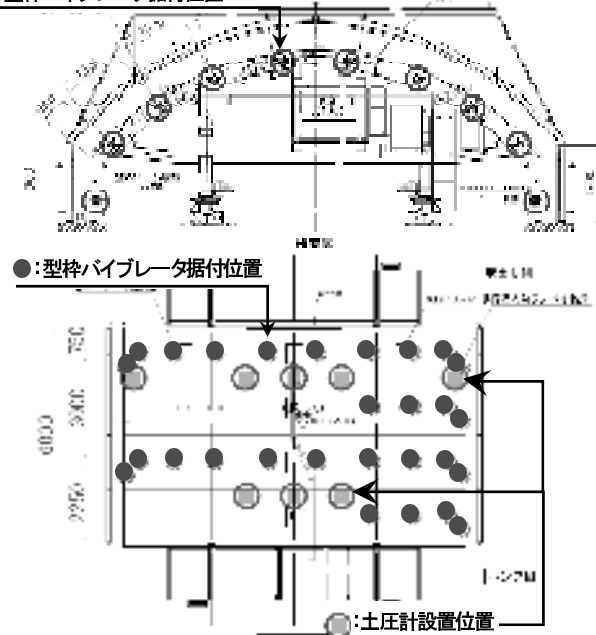


図-2 実物大型枠の型枠バイブレータ、測定機器配置

④ コンクリート表面の仕上がりに関する検証

トンネル内空面の外観および通常のトンネル施工では不可視となる地山側背面の仕上がり状態を目視と打音で検証した。充填性の改善のほか、中流動コンクリートでは、側壁部での気泡（アバタ）の発生報告もあることから、型枠バイブレータのみによる仕上がりも確認した。

⑤ コンクリートの品質変動に関する検証

コンクリート製造から打込み完了に至るまでのフレッシュ性状の変化や、硬化後の品質に関する基礎資料を収集し、試験練りにより選定した配合の妥当性を検証した。

4. 試験施工の結果

4.1 流動性に関する検証結果

側壁部、肩部、天端クラウン部のコンクリート流動状況を、それぞれ写真-2～写真-4に示す。

コンクリート打設リフトが側壁から天端へ上昇するにつれて、型枠面の周方向勾配が水平に近づき、型枠面と流動するコンクリートの接触面積が増加して、コンクリート流動は、徐々に抵抗を受けると想定されたが、側壁部、肩部、クラウン部で、流動状況に大差はなかった。

打込みにより生じるトンネル縦断方向のリフト差の勾配は、模擬型枠セントル長6mで数cm程度と小さく、施工上の問題にはならず、良好なセルフレベリング性が確認できた。

4.2 型枠バイブレータによる締固め性状に関する検証

型枠バイブレータによる型枠への振動伝搬は、中流動管理要領に施工例として示された管理目安値の振動エネルギー $E=3.7J/l$ となるように稼働させた。

振動による締固めが十分であるかを評価される振動エネルギー E は式(4a)で表される。

$$E = \frac{m \cdot \alpha_{\max}^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot f} \dots\dots\dots (4a)$$

$$\text{ここで、} \alpha_{\max} = \frac{2\pi^2 \cdot 2a \cdot f^2}{1000}$$

E : 振動エネルギー(J/l), m : コンクリートの密度(kg/l),
 f : 振動数(Hz), t : 振動時間(s),
 α_{\max} : 振動の最大加速度(m/s²), a : 振幅(mm)

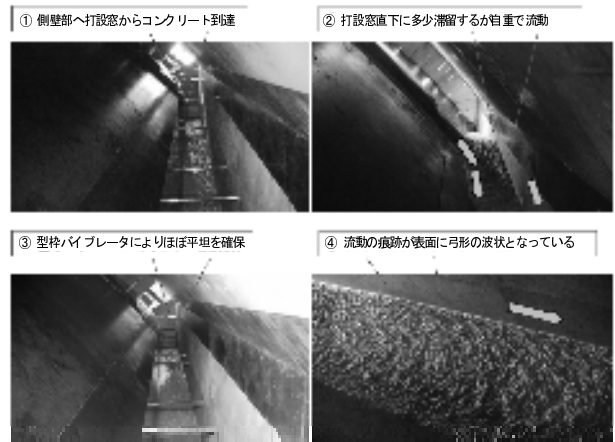


写真-2 側壁部のコンクリート流動状況

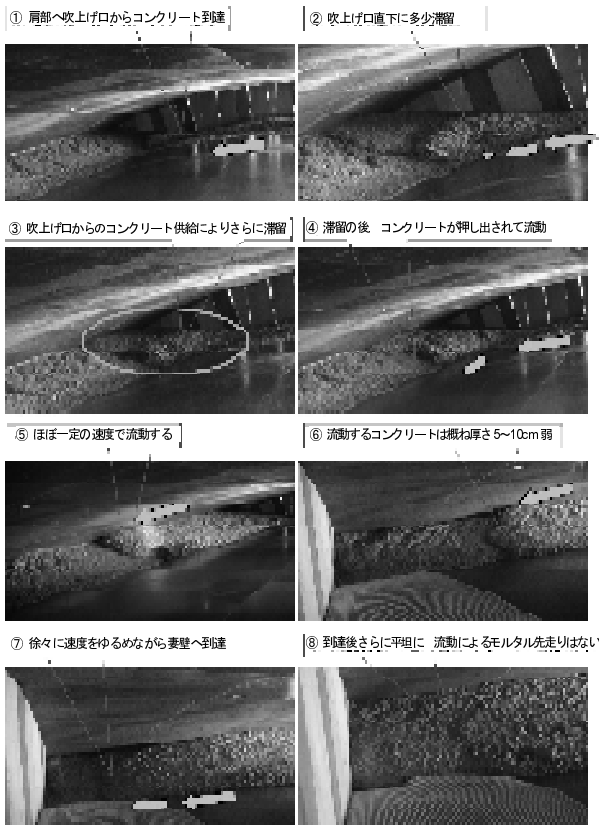


写真-3 肩部のコンクリート流動状況

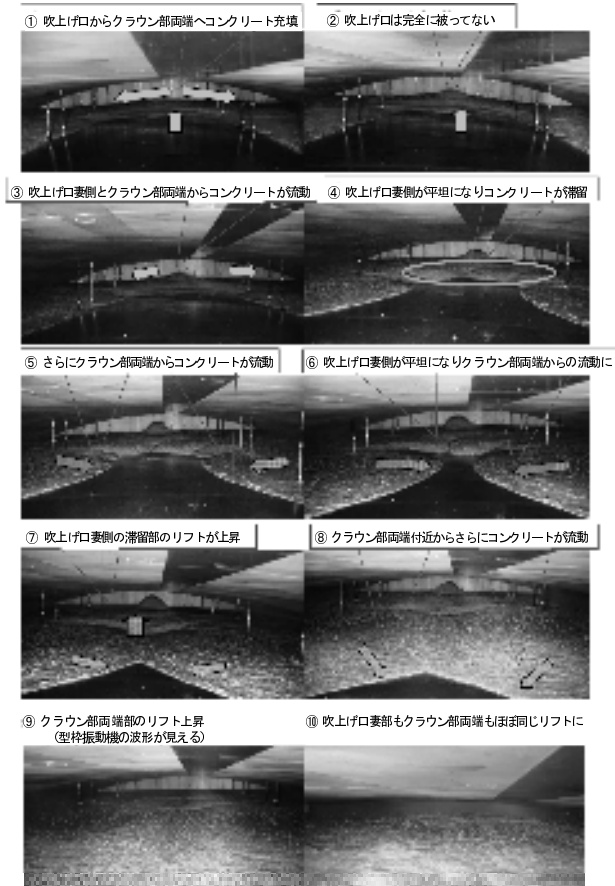


写真-4 クラウン部のコンクリート流動状況

したがって、振動エネルギーは、振動時間、振幅の2乗、振動数の3乗に比例することになる。

試験施工における型枠バイブレータの振動数設定は、当初振動数を50Hzとし、打設状況に応じて増加させた。型枠バイブレータの振動の伝播は、型枠面に磁石で固定したポータブル振動計により測定した。

測定の結果、型枠バイブレータの振動伝播の減少傾向は、型枠の水平方向と鉛直方向で異なる。図-3に示すように、水平方向は型枠バイブレータからの離隔が大きくなると減少率が低下し、75cm~150cm程度の離隔では減少率に大きな差がでない。一方、鉛直方向はバイブレータからの離隔に対して一様に減衰して、40cm程度下方では、ほとんど振動しないことが明らかになった。

型枠バイブレータの上方には比較的振動が伝わりやすいものの、図-4に示すようにバイブレータ位置からコンクリートリフトの高低差が150cm程度の範囲までしか有効な振動が得られないことも判明した。

なお、振動エネルギーは、式(4a)の関係のとおり、振動数 f 、稼働時間により制御できることも実測値により確認できた。

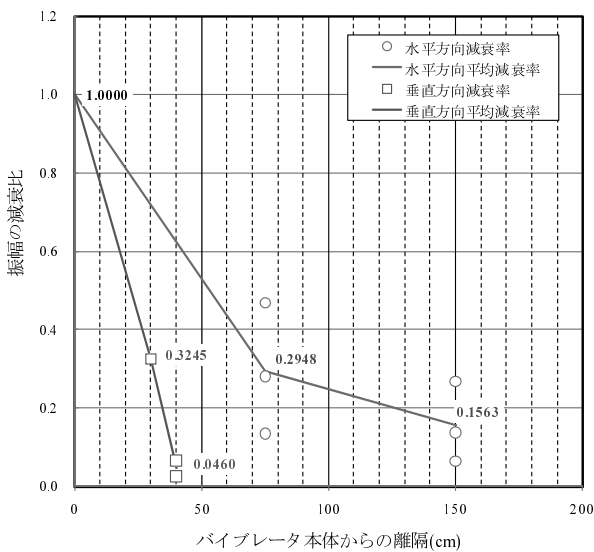


図-3 水平方向と鉛直方向の型枠バイブレータ振幅減衰比

4.3 コンクリート打込み時の型枠側圧の検証

一般的な配合のトンネル覆工コンクリートでは、打設時の型枠への荷重は、打設速度にもよるが、ほぼ一定となる側圧、打込み時のポンプ圧送圧、コンクリート自重などを考慮して決定される²⁾。高流動コンクリート配合の場合は、コンクリートリフト高さに応じた側圧を液圧として載荷しているため、型枠セントルの部材への補強が必要とされている。

中流動コンクリート配合の場合は、過去の試験施工において、一部で液圧が確認されたこともあり、今回の試験施工では、型枠面に土圧計を埋め込み、打設中に連続

計測した。

側壁部打設時には、打設リフトに応じて側圧が上昇したが、図-5に示すとおり、側圧係数 $K=0.75\sim 0.88$ 程度であった。側壁部からアーチ部へ打設リフトが上昇すると側圧は一旦落ち着き(側圧係数0.32程度)、最後に天端付近にまでコンクリートが充填されると昇圧(45kPa~65kPa)して打設を完了している。

中流動管理要領では、特別なセントル補強を必要としないとされているが、側壁部打設中には、液圧に近い状態になることも懸念されると判明した。

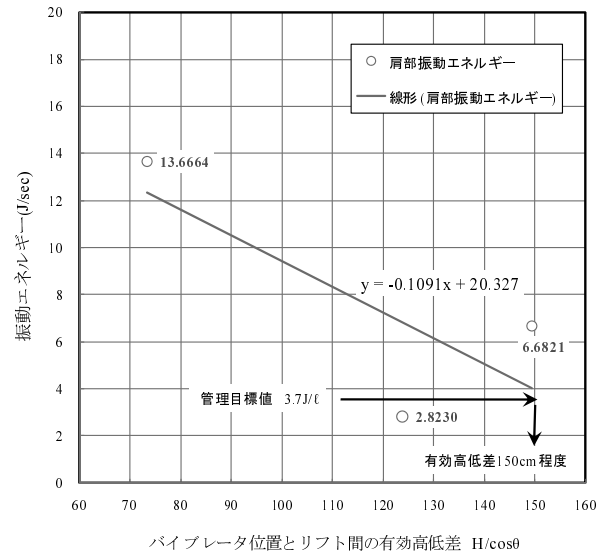


図-4 型枠バイブレータ位置とリフト間の有効高低差による振動エネルギーの減衰傾向

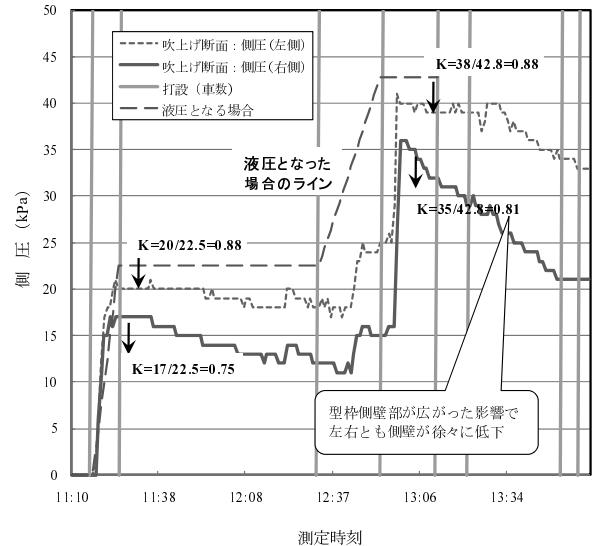


図-5 型枠側壁部の計測圧の経時変化

4.4 コンクリート表面の仕上がりに関する検証

コンクリート表面の仕上がりは、一般的な覆工コンクリート配合(単位セメント量 270kg/m^3 以上、スランプ15cm)と比べて、写真-5に示すとおり、内空面は遜色がなく、良好な充填、仕上がりを確認できた。

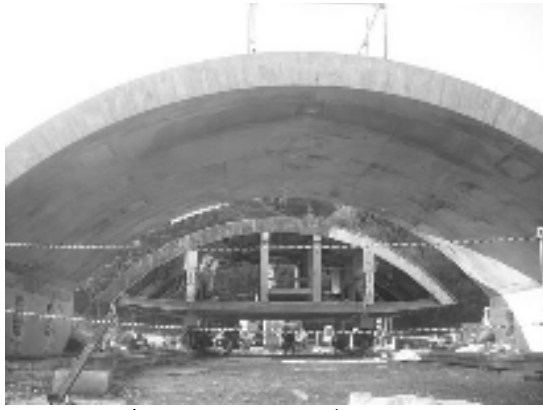


写真-5 内空側仕上がり外観状況

背面となる地山側表面では、ほとんどの部分で良好な充填が確認できた。しかし、仕上がり面については表面にペースト分がやや不足した状態を呈する箇所が、写真-6に示すように側壁部および天端の妻枠側（吹上げ口と反対側）に見受けられた。これらは、型枠バイブレータの振動エネルギーが不足した箇所や、打込み最終段階における打設圧が不足した（目標打設圧50kPaを下回る）箇所が発生していると考えられる。なお、これらの位置から採取したコア状況は、背面側の表面のみが粗骨材表面をモルタルペーストが覆いきれていないだけで、表層部以外は密実なコンクリートであった。また、圧縮強度試験結果においても、健全な箇所から採取したコアと同等の結果であった。

箱抜きを模した木製突起設置部においては、コンクリート流動にやや滞留ができることを除いて大きな障害はなく、充填、仕上がりともに良好であった。

4.5 コンクリート品質に関する検証

(1) フレッシュコンクリート性状

コンクリートのフレッシュ性状は、生コン工場出荷時、現場到着繊維投入後、ポンプ圧送後において、スランプ、スランプフロー（加振前後）、空気量などの変化を検証した。

現地到着繊維投入後のコンクリートのスランプ、スランプフローは、試験施工したアジテータ1車～9車目の全てで、基準値内の値となった。図-6に示すとおり、工場出荷時からの変化量もスランプで1cm、スランプフローで50mm程度、現場到着繊維投入後の経時変化でも60分経過後に56mm程度の低下であり、スランプ保持性は良好なコンクリートであった。これは試験施工時の外気温が10℃以下でコンクリート温度が13℃程度であったことも、経時変化に影響したと考えられる。

図-7に示すとおり、空気量の経時変化は小さい結果であった。ただし、図-8に示すとおり、ポンプ圧送後には、空気量が低下している。これは、試験施工時が低温であったため、AE助剤での連行エアがない状態での練

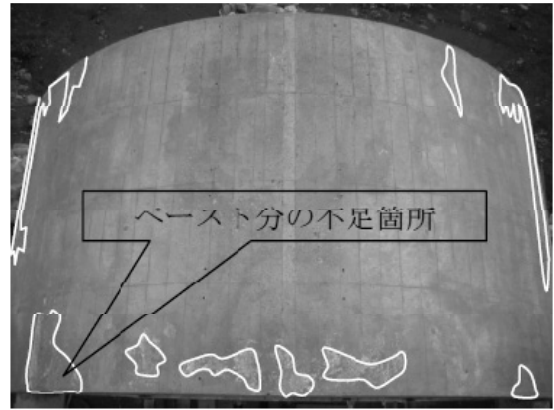


写真-6 背面となる地山側仕上がり状況

り混ぜであったために、ポンプ圧送前には規格値を満足したものの、ポンプ圧送によりエントラップドエアが減少し、圧送後の筒先では規格値を満足しない結果となったためと考えられる。

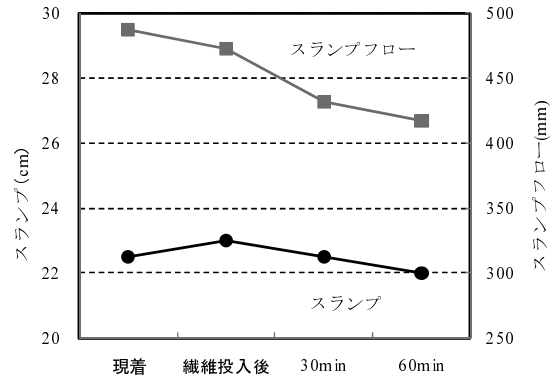


図-6 スランプ、スランプフローの経時変化

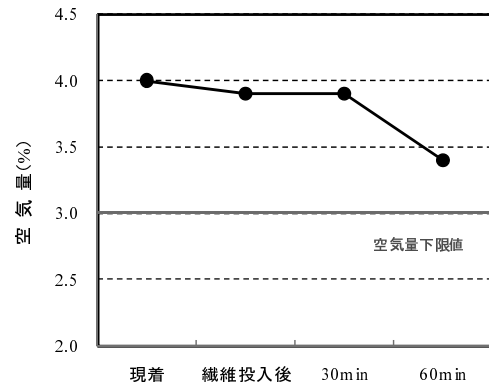


図-7 空気量の経時変化

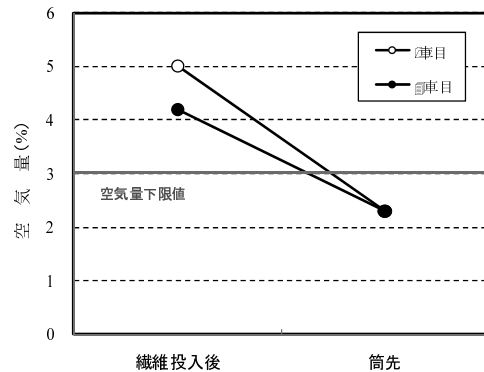


図-8 空気量のポンプ圧送前後の変化

このことから、コンクリート打設時の施工環境が要因ではあるものの、本施工へ向けた課題が抽出され、後日、ポンプ圧送試験を行い、練り上がり温度に応じた空気量の調整方法を改善した。

(2) 硬化コンクリート性状

硬化後のコンクリートは、供試体（標準養生と現場封緘養生）型枠による採取と脱枠後の模擬部材からの切り出しにより、圧縮強度試験、曲げじん性試験を実施した。切り出した供試体については、ヤング係数、単位体積重量、骨材分布などについても試験を実施した。

型枠採取による圧縮強度の試験結果は、繊維投入撈拌後の供試体もポンプ圧送筒先での供試体も、養生条件に関わらず材齢7日で30N/mm²以上、材齢28日で40 N/mm²以上と、良好な強度発現を確認できた。

コア採取した供試体の圧縮強度は、図-9に示すように、養生条件に因らず、材齢28日で40 N/mm²以上と発現強度には差異がない結果であった。天端部の強度が比較的大きかったのは、模擬型枠自体を打設終了直後からシートで覆った上にジェットヒータで養生したことによるものと考えられ、実施工においても打設完了直後の養生が、強度発現の観点で重要であることが示唆された。

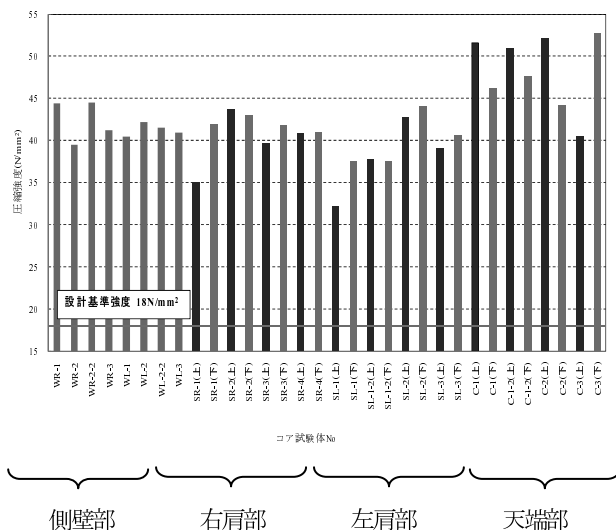


図-9 コア試験体の圧縮強度試験結果

曲げじん性係数については、型枠採取した供試体と天端部より切り出した供試体については、基準値1.4N/mm²を上回る2.1N/mm²程度を確認できたが、側壁部から切り出した供試体については、基準値を下回った。これは、打ち込まれたコンクリートの流動により非鋼繊維の配向が整ったことによるものと考えられる。

ヤング係数は、図-10に示すとおり、型枠パイプルータ配置や覆工部材上部と下部による差はなく、27~30N/mm²程度と標準的な値が確認され、均一で密実な品

質が確保されていると言える。

単位体積質量は、配合により算出される理論値(2.33g/cm³)よりもやや大きい値が確認された。このことは、空気量が3%以下であったことが原因と推察される。

図-11に示すとおり、コア試験体により粗骨材分布を確認した。天端部ではコア上部の粗骨材は28~37%程度と下部に比べてやや多く分布し、発現強度も大きかった。これは、天端部ではコンクリートのモルタルペースト分がやや先行して流動し、ペースト分の上に骨材を含んだコンクリートが順に覆いながら流動していることによるものと推察できる。

部材上下で骨材分布にやや差はあるものの、発現強度やヤング係数は何れも基準値を満足しており、地山側面にややペースト分が不足した箇所においても、硬化コンクリートの試験結果は、全て要求性能を満足しており、施工品質に問題はなかった。

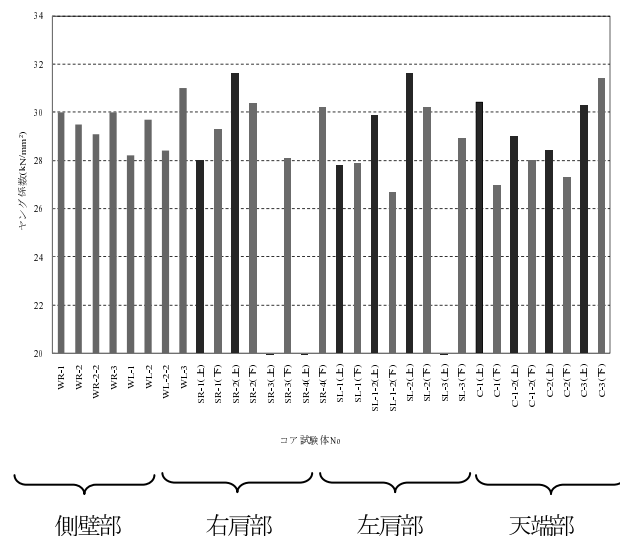


図-10 コア試験体のヤング係数試験結果

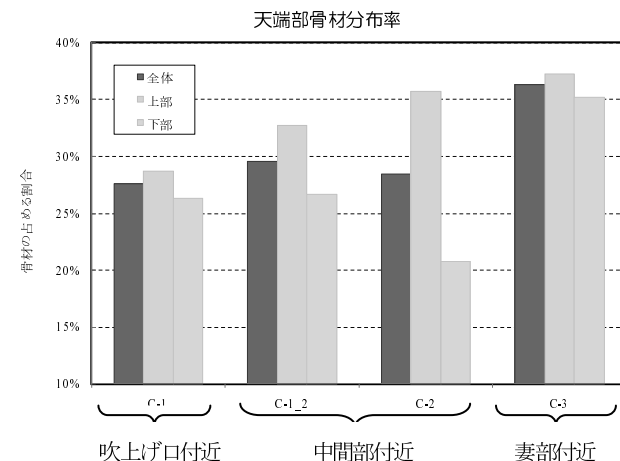


図-11 天端部における粗骨材分布測定結果

5. 試験施工での課題と本施工への反映

5.1 試験施工で明らかになった課題

(1) コンクリートの流動性

側壁部から肩部にかけては、材料分離もなく、セルフレベリング性、流動性ともに良好である。天端部については、型枠バイブレータが 1.5m 間隔配置された箇所ではモルタルペースト分の先走り傾向が若干見られた。

概ね試験施工の模擬型枠 L=6m 程度の流動であれば施工に大きな問題がないことがわかった。

(2) 型枠バイブレータによる締固め

型枠バイブレータは水平方向（トンネル縦断方向）への振動伝搬は 3.0m 間隔も 1.5m 間隔も大きな差がなく、3.0m 間隔に配置しても施工可能である。

鉛直方向（トンネル周方向）への振動伝搬は、型枠バイブレータの上方のコンクリート打設リフトが大きくなるほど伝わりにくい傾向にあり、上方へは、ほぼ有効高低差 1.5m 程度が、下方へは 0.3m 程度が限界である。型枠バイブレータの配置は、この振動の伝播可能範囲を考慮する。

また、側壁部ではエアあばたがたまりやすいとの試験施工での報告があるため、型枠バイブレータのみの施工では限界があり、棒状バイブレータの併用も考慮する。

(3) 打込み時の型枠への側圧

型枠最下部における側圧は、側壁部から肩部付近では打設リフトに応じて、側圧係数 0.71~0.88 程度の側圧が生じる。アーチクラウン部の 100° 範囲に打設リフトが上昇するとコンクリート自重は型枠面で支持されて、最下部までコンクリート圧が伝わらない。

これらの傾向を反映させて型枠への載荷重を考慮し、型枠最下部の耐圧を一般的なセントルよりも補強することを検討する。

(4) コンクリートの表面仕上がり

内空側の仕上がりは、標準配合に見られるような打設リフトの縞模様なども見られず、良好である。

背面となる地山側では、標準配合よりも優れた充填性を確認できたが、打設最終段階のポンプ圧は妻部天端付近で十分に伝搬されていないと、モルタルペーストの不足する表面が生じるなどの不具合が発生する懸念がある。

設計耐圧を試験施工時よりも強化して、最終段階の打設圧を管理できる計測システムがあると望ましい。

(5) コンクリートの品質変化

スランプ、スランプフローについては、練り上がりから運搬、繊維投入攪拌、ポンプ圧送に至る施工段階で問題となることはなかった。

空気量についてはコンクリート温度が低かったこともあり、コンクリートポンプ圧送後に、規格値を満足できないケースも見られた。

このことから、実施工への対応として、施工前にポンプ圧送試験を実施して、ポンプ圧送による空気量のロスや練り混ぜ時の空気量調整などを把握して、現着繊維投入後の目標空気量を修正し、圧送後の品質を確認した。

5.2 本施工への反映

(1) コンクリートの流動性

基本的に配合を修正することは不要であるが、中流動コンクリートとは言え必要以上に打ち込まれたコンクリートを流動させることは、材料分離や補強繊維の配向性への影響などが懸念されることから、本施工セントル（L=12.5m）にはコンクリート投入口を 3 箇所設けて、切替えることとした。

また、アーチクラウン部においても天端吹き出し口にコンクリート投入口を切り替えるまでに、左右両側ともにほぼ均等な打設リフトを極力維持できるように、肩部や天端への投入口を天端検査窓に増設して対応することとした。

なお、打設配管のルートを円滑に切替えて、コールドジョイントの発生を防止できるように、スパイダー配管切替システム（写真-7）を採用している。



写真-7 配管切替で採用したスパイダーシステム

(2) 型枠バイブレータによる締固め

型枠バイブレータは水平方向（トンネル縦断方向）に約 3.0m 間隔、鉛直方向（トンネル周方向）に約 1.8m 間隔を基本に配置した。

ただし、型枠バイブレータのみではアバタの発生が懸念される側壁部は、セントル内にずり運搬用のベルトコンベアや坑内換気用の風管が通過することもあり、型枠バイブレータを設けず、棒状バイブレータで対応することとした。

また、アーチクラウン部と側壁部の節点となる部分や

(4) コンクリートの表面仕上がり

トンネル天端部の完全な充填を確認するために、充填センサーを2台設置することに加えて、コンクリート打設最終段階の打設圧をセントル妻部に設けた圧力センサーで昇圧(60kPa以上)を確認して管理することとした。

これらのセンサーは、パイロットランプと回転灯の点灯により作業者に計測値を視覚により周知できるシステムとし、安全性を確保した。

(5) コンクリートの品質変動

試験施工時に唯一問題となった空気量の調整については、室内試験結果から、繊維投入攪拌時に巻き込まれる空気量は1~2%程度で、30分経過後には、ほぼ消えることから、投入手順を図-13に示すとおりに変更した。

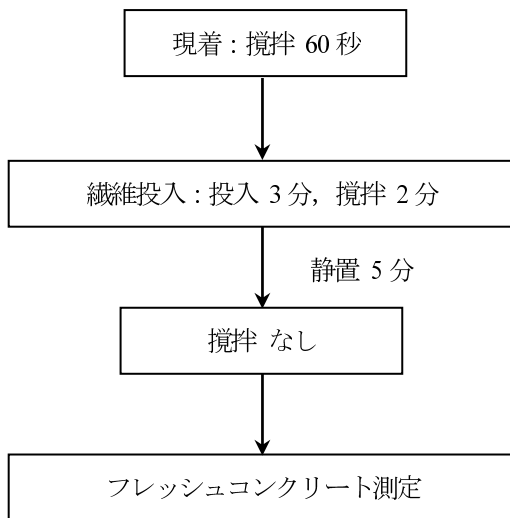


図-13 現着後の繊維投入の手順

また、ポンプ圧送による空気量の低下が1.4~1.9%であったことから、ポンプ圧送前の空気量を $5.5 \pm 1.5\%$ として管理することで、筒先での空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を満足できた。

試験施工においても、打設後の初期養生が覆工コンクリートの強度発現に重要な役割を果たすことが明らかになっていることから、打設完了後の型枠移動の段階から、セントル後方に3打設スパンを覆って保温、加湿養生ができる養生台車を設置して、リアルタイムに養生台車空間内の温度、湿度を管理する連続養生を実施している(写真-10)。

なお、試験施工は冬期であり、これに基づく施工計画としたが、実施工では夏期施工段階で品質変動を生じたため、さらに配合を見直して現在施工している。



写真-10 3スパン連続覆工コンクリート養生台車



写真-11 中流動覆工コンクリート仕上がり状況

6. おわりに

新津トンネルにおける中流動覆工コンクリートの適用に際して、実物大型枠を使用して実施した試験施工の結果と実施工の施工計画への反映を取りまとめた。

新津トンネルの覆工コンクリートは、平成22年8月中旬現在で、15スパンの打設が完了している(写真-11)。今までのところ、大きなトラブルもなく、順調に施工が進んでいる。しかしながら、現場では、中流動覆工コンクリートの施工技術の更なる創意工夫を鋭意、試行錯誤している最中である。

山岳トンネルの覆工コンクリートだけでなく、複雑な形状を有する構造物や過密配筋となるような構造物についても、中流動コンクリートは、施工の確実性を向上させるだけでなく、将来の省力化、合理化施工に資するものであり、有望な技術である。本稿が、今後、中流動コンクリートの導入を検討される段階で参考となれば幸甚である。

謝辞：新津トンネルでの中流動覆工コンクリート適用に際し、ご指導、ご鞭撻をいただきました。西日本高速道路㈱の福岡工事事務所、福岡技術事務所、九州支社建設事業部、本社技術部、㈱高速道路総合技術研究所道路研究部の皆さま、試験施工や配合検討に際し、ご協力をいただきました。中村産業生コン㈱、BASF ポゾリス㈱、計測技研㈱の皆さまに本紙面を借りてお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領中流動覆工コンクリート編， pp.1-4, 2008.08.
- 2) 日本道路公団試験研究所：試験研究所技術資料第360号 覆工コンクリート施工マニュアル，道路研究部トンネル研究室， pp.23-24 およびpp.91-110, 2002.03.

Summary With the growing needs of quality assurance of tunnel lining concrete, not only increasing construction effectiveness and quality but also concrete mix proportions were verified and middle-performance concrete was applied.

This paper describes the process of examination of middle-performance concrete before actually applying it in the construction of the Aratsu Tunnel on the Higashi-Kyushu Expressway.

Key Words : *Middle-performance Concrete, Secondary lining, Form Vibrator, Vibration Energy, Manpower Saving*