

東九州自動車道新津トンネル工事における 中流動コンクリートの適用

平間昭信¹・堂園淳一²・種田敦³・筒井隆規⁴・小西裕之⁵・柳森豊¹

¹正会員 飛鳥建設(株) 建設事業本部 (〒213-0012 川崎市高津区坂戸3-2-1 KSP R&D棟)

²西日本高速道路(株) 九州支社 苅田工事区 (〒818-0131 太宰府市水城2-25-1)

³工修 西日本高速道路(株) 九州支社 苅田工事区 (〒818-0131 太宰府市水城2-25-1)

⁴正会員 飛鳥建設(株) 九州支店 新津トンネル(作) (〒800-0343 京都郡苅田町上片島小無田1622)

⁵飛鳥建設(株) 九州支店 新津トンネル(作) (〒800-0343 京都郡苅田町上片島小無田1622)

トンネル覆工コンクリートの施工においては、締固め困難な天端部におけるコンクリートの密実性の低下、打重ね部の一体化不良などによる強度低下や充填不足による背面空洞の発生や応力状態の偏りなどの問題を解決する方法として、中流動コンクリートが適用されている。

東九州自動車道新津トンネル工事におけるトンネル本体工の全線2,074mのうち、非常駐車帯部を除く1,888mの覆工コンクリートについては中流動コンクリートを適用することとした。現場適用に向けて課題を解決することを目的として、実物大型枠を用いたモデル施工を行った。本稿では、モデル施工で得られた流動状況や充填状況、型枠への影響、仕上がり状況などの知見および実施工の状況について報告する。

キーワード：中流動コンクリート、トンネル二次覆工、型枠バイブレータ、振動エネルギー、

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートの施工においては、締固め困難な天端部におけるコンクリートの密実性の低下、打重ね部の一体化不良などによる強度低下や充填不足による背面空洞の発生や応力状態の偏りなどの問題を解決する方法として、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)の各社では、平成20年8月に「トンネル施工管理要領 中流動覆工コンクリート編¹⁾」(以下、「中流動管理要領」と記す)を制定した。

中流動コンクリートは、覆工コンクリートの高品質化を目指したものであるが、混和材に石灰石微粉末(以下、石粉)、またはフライアッシュ(以下、石炭灰)をセメントに置換したコンクリートとしており、セメントの減量化、産業副産物の有効利用などによる環境負荷低減に寄与するコンクリートである。また、従来の施工方法では、狭隘な施工空間での内部振動機での締固め作業が必要であったが、中流動コンクリートは従来より高い流動性と自己充填性を付与したコンクリートであり、型枠バイブレータによる締固め作業となることから省力化が可能となる。このことから、高齢化による将来の労働力低下に対しても、施工性の向上により補える可能性が

ある。これらの中流動コンクリートの適用による品質向上、施工性向上の観点から適用事例²⁾が増えることが予想されている。

本稿では、室内配合試験、実規模大の模擬型枠による試験施工、および東九州自動車道新津トンネル工事での実施工を通して得られたコンクリートに関する知見や、今後の課題などについて報告する。

2. 中流動コンクリート

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、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」と定義しており、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バイブ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)

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)	スラブおよびスラブフロー(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(CI)(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 25	21±2.5 35～50	10秒加振後のスラブフロー広がり	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)				10±3 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以上のベ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」表-4.3で求まる最低混入率とする ³⁾	「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 ³⁾

表-2 室内配合試験で選定した配合

配合名	水セメント比 W/C (%)	水粉体比 W/(C+LS) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
				水 W	セメント C	石粉 LS	細骨材 S	粗骨材 G	繊維 ^{*1} F	混和剤 Ad
T3-1(LS) (中流動)	59.3	45.7	50.0	160	270 ^{*2}	80	904	918	2.73	3.15 ^{*4}
T3-1 (従来)	49.4	49.4	48.0	168	340 ^{*3}	—	861	947	2.73	0.85 ^{*5}

※1：ポリプロピレン繊維，※2：普通ポルトランドセメント，※3：高炉セメントB種，※4：高性能AE減水剤，※5：AE減水剤

- 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。

以上のことから，中流動コンクリートは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)に近いレベルのコンクリートであると言える。流動性を確保しつつ，材料分離を防ぐために増粘材として混和材料(石粉LS，または，石炭灰FA)を添加する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。

3. 室内試験での配合選定

(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添加材用のフライアッシュの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。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有し，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。



写真-1 加振前のスランプフロー

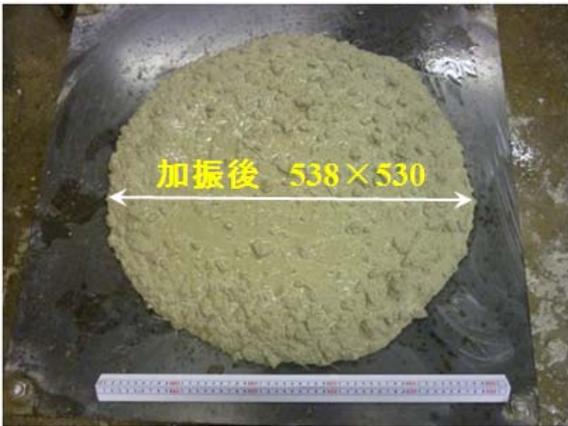


写真-2 加振後のスランプフロー

(2) 室内配合試験

a) 配合

周辺地域の製造工場、使用材料の調査結果を受け、混和材として入手できる材料を用いて室内配合試験を行い、中流動コンクリートの品質を確認し、コンクリートの品質と併せて、経済性の検討を行い、石粉を用いた中流動コンクリートを適用することとした。室内配合試験で選定した配合を表-2に示す。

b) フレッシュコンクリートの性状

写真-1、写真-2は、中流動コンクリートの指標として新たに示された加振変形試験（JHS 733-2008「中流動コンクリートの加振変形および充填性試験方法」）の結果である。この試験は、最大加速度が約 40m/s^2 に調整された試験機上でスランプ試験を行い、スランプロー測定後に10秒の振動を与え、振動前後のフロー差を指標として、振動下での変形性能および材料分離抵抗性を評価する試験方法である。

図-1に示すように、スランプフローと加振後のフロー差の関係は右肩下りの傾向にあり、加振後のフロー差の規格値である $10 \pm 3\text{cm}$ を満足するためには、今回検討したコンクリートでは、概ねスランプフローは $40 \sim 50\text{cm}$ が必要である。

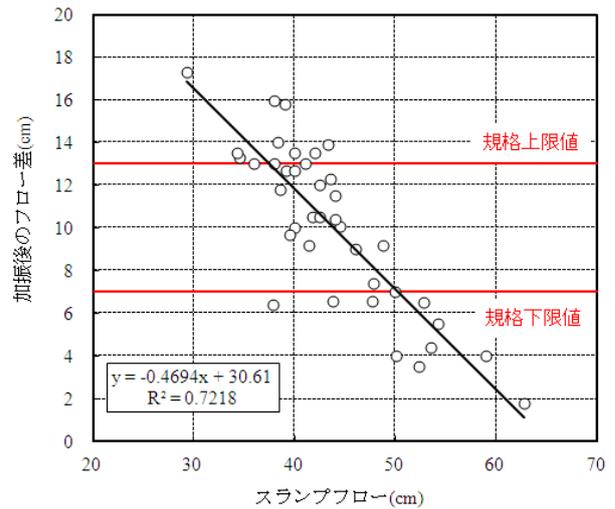


図-1 スランプフローと加振後のフロー差の関係

4. 実物大型枠による試験施工

(1) 試験施工の目的

中流動覆工コンクリートは、打設方法が従来工法とは異なり、施工ノウハウの蓄積も少ない。このことから、施工における課題を抽出して、本施工の施工計画へ反映させることを目的として試験施工を実施した。試験施工の検討項目を以下に示す。

- ・中流動コンクリートの流動性に関する検証
- ・型枠パイプレータによる締固め性状に関する検証
- ・コンクリート打込み時における型枠側圧の検証
- ・コンクリート表面の仕上がりに関する検証
- ・コンクリートの品質変動に関する検証

(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。測定機器や型枠パイプレータの配置を図-2に示す。

a) 中流動コンクリートの流動性に関する検証

中流動コンクリートのセルフレベリング性や、型枠パイプレータを用いた場合の流動勾配などについて検証した。また、目視観察とビデオ撮影により、コンクリートの流動状況についても検証した。

b) 型枠パイプレータの締固め性状に関する検証

型枠パイプレータ振動時間(15秒/箇所)を基本に平均 $E=3.7\text{J/l}$ 以上の振動エネルギーを加えることを目標とし、型枠パイプレータの位置・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(図-2参照)。

c) コンクリート打込み時における型枠側圧の検証

中流動管理要領の打設速度(1.5m/hr)で、型枠への側圧を計測し、セントル補強の必要性を検討した。

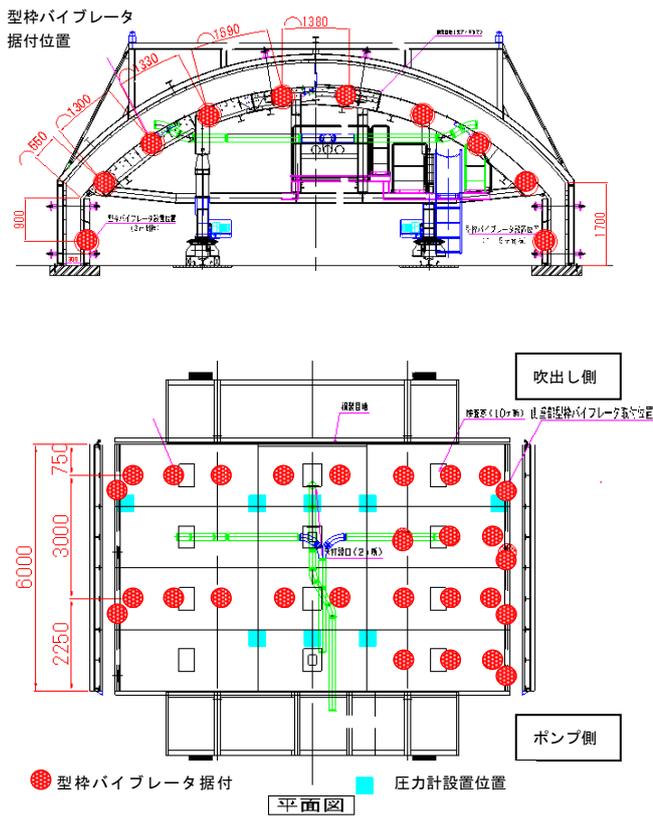


図-2 試験施工における型枠バイブレータの配置

d) 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・充填性を目視と打音で検証した。また、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状況も確認した。

e) コンクリートの品質変動に関する検証

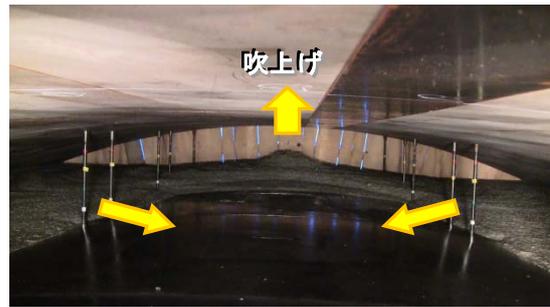
製造から打込み完了に至るまでのフレッシュ性状変化や、硬化後の品質に関する基礎資料を収集し、室内配合試験で選定した配合の妥当性を検証した。

(3) 検証結果

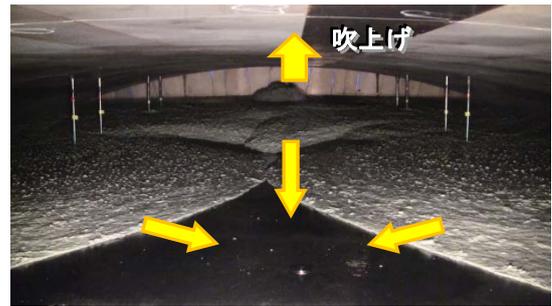
a) 流動性に関する検証結果

側壁部の流動状況は、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、クラウン部では流動状況に大差はなかった。

写真-3に、天端クラウン部のコンクリート流動状況を示す。良好な流動性を有していることから、クラウン部両端からコンクリートが流動することが確



①吹上げ妻側とクラウン部両端からコンクリートが流動



②吹上げ口妻側の滞留部のリフトが上昇し、吹上げ口妻側が平坦になりクラウン部両端から流動



③クラウン部両端部のリフト上昇(型枠振動機の波形を確認)

写真-3 クラウン部のコンクリート流動状況

認された。吹上げ口妻側の滞留部のリフトが上昇すると、吹上げ口妻側が平坦になり、クラウン部両端から流動しながら、ほぼ平坦になる状況であることが確認された。

トンネル縦断方向の打設リフト差の勾配は、模擬型枠セントル長=6mで最大でも6cm程度と小さく、施工上の問題にはならず、良好なセルフレベルリング性が確認できた。

b) 型枠バイブレータの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。

振動による締固めの指標となる振動エネルギー E は式(1)で表される。

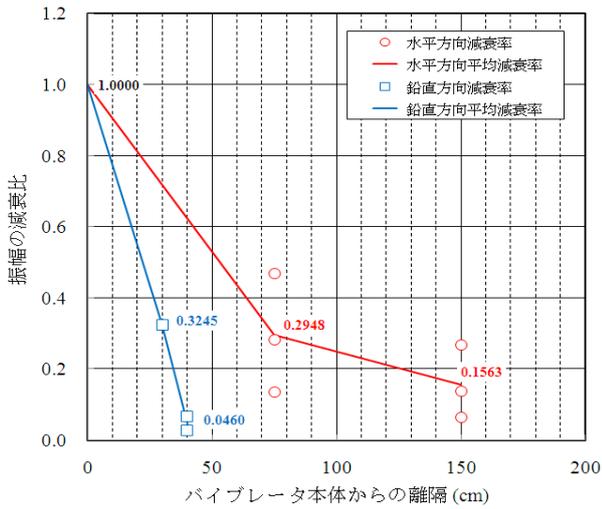


図-3 水平方向と鉛直方向の型枠パイプレータ振幅減比

$$E = \frac{m \cdot \alpha_{\max}^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot f} \quad (1)$$

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

図-3に示すように、型枠パイプレータの振動伝搬の減少傾向は、型枠の水平方向と鉛直方向で異なる結果であった。水平方向は型枠パイプレータからの離隔が大きくなるほど減少率は低下し、70cm～150cm程度の離隔では減少率に大きな差が見られない。一方、鉛直方向は型枠パイプレータからの離隔に対して一様に減衰しており、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。

c) コンクリート打込み時の型枠側圧の検証

従来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、側圧、打込みポンプ圧送圧、コンクリート自重などを考慮して決定される⁴⁾。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させ、型枠セントルの部材を補強している。中流動コンクリートでは、これまでの報告事例の一部で液圧が確認されたこともあり、試験施工では型枠面に圧力計を埋め込み、打設中に連続計測を実施した。

側壁部打設時には、図-4に示すように、打設リフトに応じて側圧が上昇したが、側圧係数はK=0.75～0.88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側圧係数0.32程度で一定となった。

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

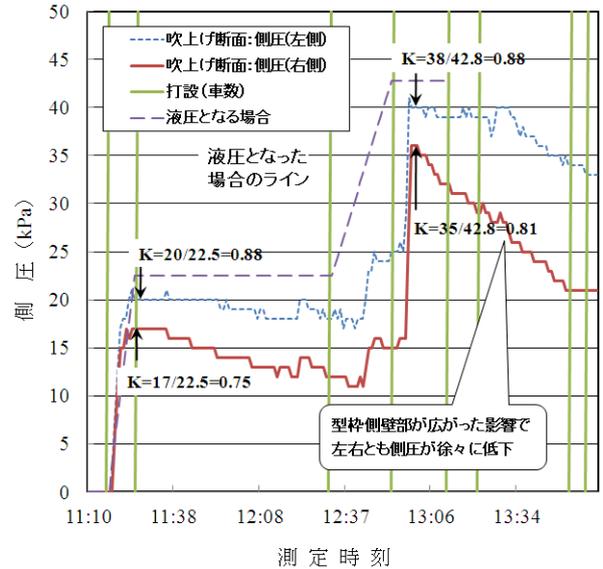


図-4 型枠側壁部の計測圧の経時変化



写真-4 内空側仕上がり外観状況

近い状態になることが確認されたことから、セントル補強が必要であると判断した。

d) 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/m³以上、スランプ 15cm）と比べて、写真-4に示すとおり、内空面は遜色がない仕上がりであることを確認できた。また、背面となる地山側表面では、良好な充填が確認できた。

e) コンクリート品質に関する検証

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。

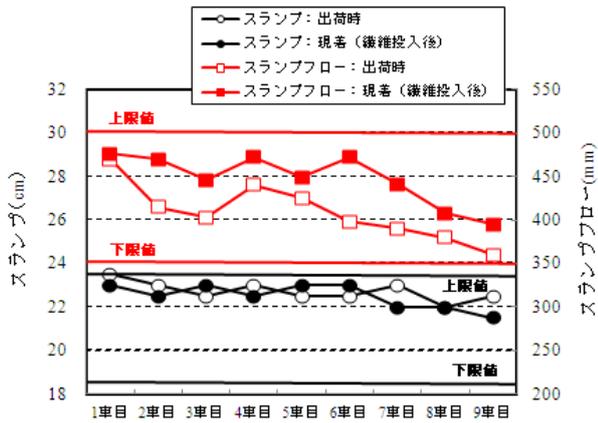


図-5 スランプ，スランプフローの結果

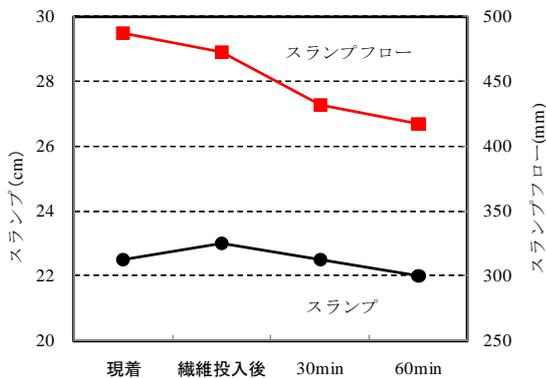


図-6 スランプ，スランプフローの経時変化

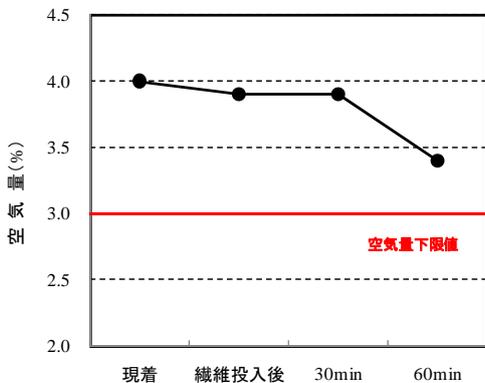


図-7 空気量の経時変化

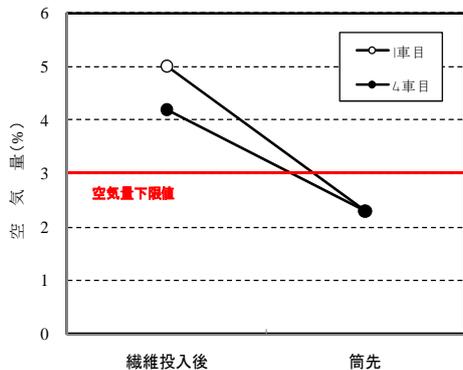


図-8 空気量のポンプ圧送前後の変化

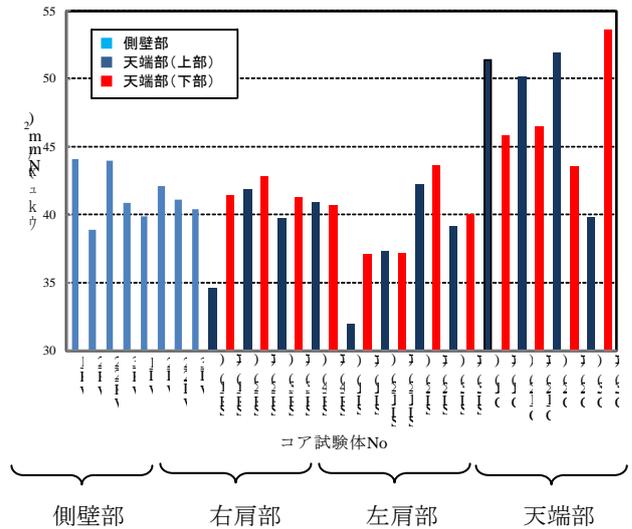


図-9 コア試験体の圧縮強度試験結果

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、基準値内の値であり、工場出荷時からの変化量はスランプで 1cm、スランプフローで 50mm 程度であった。また、図-6 に示すとおり、現場到着繊維投入後でも 60 分経過後に 56mm の小さい低下であり、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、空気量は現着から 60 分後には 0.6%の低下は認められたが、空気量は規定値の $4.5 \pm 1.5\%$ を満足する結果であった。ただし、図-8 に示すとおり、ポンプ圧送前には規格値を満足したが、圧送後では規格値を満足しない結果となった。これは、試験施工時が低温であったため、繊維添加前のコンクリートは巻き込みエアが入りやすい状況であり、AE 助剤での連行エアの殆どない状態での練り混ぜであったためと考えられた。このことから、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。

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/mm^2 以上と良好な発現強度であることが確認された。

5. 新津トンネルにおける実施工への適用

試験施工により実施工への課題抽出とその対策が明確にできたことから、東九州自動車道新津トンネル工事（トンネル延長L=2,074mのうち、非常駐車

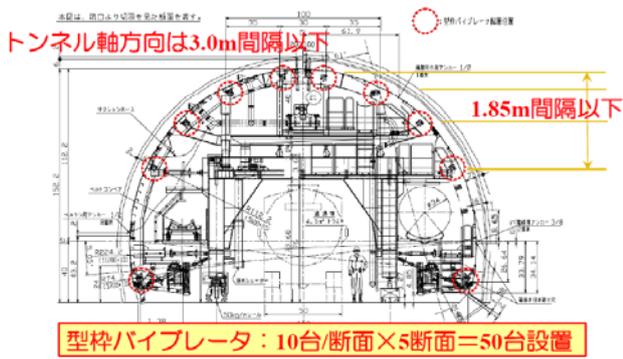


図-10 型枠パイブレータの配置状況



写真-6 打設圧管理用に型枠に設置した圧力計



写真-5 型枠パイブレータの集中制御盤



写真-7 3スパン連続覆工コンクリート養生台車

帯を除く、 $L=1,888\text{m}$) のほぼ全線に適用することとした。

(1) 中流動コンクリートの施工

a) 型枠パイブレータの配置

中流動コンクリートを施工する型枠セントルは $L=12.5\text{m}$ であり、試験施工で把握した流動可能距離 6m からコンクリート投入口を1~2箇所とし、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、自動配管切替装置を配置した構造となっている。

型枠パイブレータは、試験施工で得られた振動伝播可能範囲を検討し、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 間隔を基本とし、図-10に示すように、10台/断面 × 5断面 = 50台を設置した。また、型枠パイブレータの操作は、写真-5に示すように、制御盤を設けて、集中稼働管理を行うこととした。

なお、型枠パ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、型枠パイブレータを設けず、棒状パイブレータで対応することとした。

b) 打込み時の型枠への側圧に対する対応

試験施工において、型枠最下部では打設リフトに対して側圧係数 $0.71\sim 0.88$ 程度の側圧が生じたこ

とから、最終打設圧を考慮した荷重で型枠計算を実施した。脚部においては 120kPa 、クラウン部では 100kPa と設定して部材設計を行い、下げネコ部などを補強した。また、天端妻部付近では十分に打設圧が上昇しないと充填に不具合が生じる懸念があったことから、試験施工で良好な仕上がり面が得られた充填圧である 60kPa を充填管理圧とし、セントル妻部で充填圧を計測できるようにした。

打設中の型枠への載荷圧は、写真-6に示す型枠面に圧力計を設置して、リアルタイムで監視することとし、吹き出し口断面に2箇所、妻側断面の天端部、肩部に3箇所計測管理することとした。

c) 養生

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、写真-7に示すように、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することとした。



写真-8 中流動覆工コンクリート仕上がり状況

(2) 中流動コンクリートの課題

覆工コンクリートは、平成 22 年 6 月より着手以来、13 ヶ月が経過して、全長 2,074m のほぼ 60%である L=1,250m の打設を完了している。

通年で本体施工に適用された中流動コンクリートに関する課題として、以下のようなものが得られた。

- ・施工時の気温などの環境変化により、コンクリートのフレッシュ性状、特にスランプ保持性能が変動することから、混和剤添加率や粉体量の微調整が必要になる。
- ・繊維添加時のアジテータ車ドラム攪拌による巻き込み空気のために、圧送前のコンクリートの管理では空気量の規定値を満足しないことがある。ポンプ圧送筒先では巻き込み空気泡の空気量低下を考慮した管理が必要になる。
- ・型枠バイブレータの取付位置、角度によっては、型枠バイブレータの振動エネルギーが得にくい部位もあり、振動数調整や棒状バイブレータとの併用が必要になる。

これらの課題については、適宜、配合の微修正や定期的な振動測定などを行い、実施工に反映している。その結果、写真-8 に示すとおり、不具合もなく、良好な覆工コンクリートの施工が行えている。

6. おわりに

東九州自動車道新津トンネル工事での施工を通じ

て、中流動コンクリートは覆工コンクリートの品質向上や、省力化において有効なコンクリート技術であることが確認された。しかし、コンクリートの配合設計や施工方法などにおいては課題もある。施工実績は増加することが予想され、中流動コンクリートの課題については、今後の適用事例での取組みを共有することによって、技術向上が図られることが望まれる。

また、トンネル覆工コンクリート以外にも、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、施工の確実性向上、将来の省力化、合理化施工に資する技術である。本稿が、様々なコンクリート構造物への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本施工に際し、西日本高速道路(株)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、(株)高速道路総合技術研究所道路研究部の皆さま、中村産業生コン(株)、BASF ポゾリス(株)、(株)計測技研をはじめ、多数の皆さまからご協力をいただきました。本誌面を借りまして、心より感謝の意を表します。

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，2008. 8.
- 2) 中間祥二・谷藤義弘・森俊介・桜井邦昭：中流動コンクリートを用いたトンネル覆工の施工，コンクリート工学，Vol. 48，No. 6，2010. 6.
- 3) 西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領繊維補強覆工コンクリート編，pp. 3-5，2008. 7.
- 4) 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.