

報告 地盤凍結工法を用いたトンネル二次覆工への高流動コンクリートの適用

横関康祐*¹・上嶋正樹*²・臼井徹弥*³・高尾洋平*¹

要旨：凍結地盤中でのトンネル覆工コンクリートの施工に際して、コンクリートの練上り温度が 10～35℃、打設部位の温度が 0～10℃といった環境下での高流動コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に関する室内試験、温度応力に関する計測と Compensation Plane(以下 CP)法を用いた温度応力解析を実施した。その結果、上記のような環境条件下での高流動コンクリートの適用性が確認でき、トンネル二次覆工の温度応力挙動を CP 法により十分評価できることが確認された。

キーワード：高流動コンクリート、地盤凍結工法、流動性、温度応力、充填性

1. はじめに

現在、名古屋市中心部における電力需要の増加並びに供給信頼度の向上対策として 275kV の電力を供給するシールドトンネル工事が進められている[1][2][3][4]。本工事では、名古屋駅近傍の交差点直下において既設洞道(外径φ 4、350mm)と新設洞道(外径φ 4、800mm)の地中接続を行う必要があることから、地盤を凍結工法により固め、凍土壁内部を掘削・拡幅した後、覆工コンクリートを施工する工法が採用された。コンクリート工事においては、①過密配筋かつ閉所での作業となるため、締固めを行わなくとも高い充填性が確保されること、②コンクリートの水和熱による温度上昇と凍結地盤による冷却が引き起こす温度差に起因する温度ひび割れ対策を考慮すること、が重要な課題となった。

そこで、近年実施工の適用例が増え、施工法も急速に進歩しつつある高流動コンクリートについて本工事への適用性を検討した。ここでは、コンクリートの練上り温度が 10～35℃、打設部位の温度が 0～10℃といった特殊温度環境条件下での高流動コンクリートの諸物性、および温度応力解析と実測結果に基づく温度応力挙動評価結果について報告する。

2. 施工概要

対象部位は、図-1 に示す 2 本のシールドトンネルが直角に接続する拡幅部(φ 10×18 m)の覆工コンクリート(壁厚 0.5～2.0 m)である。これをテーバー部 2ヶ所、中央部の計 3ヶ所に区切り、それぞれ底版、側壁、頂版部分に分けて打設した。総打設量は約 610 m³(高流動=430 m³)である。鉄筋は最も密な部分では、D29 が 125mm ピッチで配筋された高密度配筋であり、掘削を進行しながら狭い空間でのコンクリート打設という施工条件が伴う。

凍土は-30℃の不凍液を凍結管に循環することにより造成され、凍土の掘削面は-2～-7℃となった[1]。コンクリートと凍土の境界にウレタンフォームおよびグラスウール製の断熱材(厚さ 50mm)を敷設するとともに、凍土側の鉄筋に温床線を敷設し、60 日間程度通電して養生温度の確保を行った。また、各部材の長手方向 1/2 の位置にひび割れ誘発目地と止水板を設置した。

* 1 鹿島建設(株) 技術研究所 第二研究部 研究員(正会員)

* 2 中部電力(株) 中央送変電建設所 地中線土木課 主任、工修

* 3 鹿島建設(株) 名古屋支店 課長代理、工修

3. 高流動コンクリートの評価

3.1 要求品質と試験概要

施工時期が8月から12月にわたるため、コンクリートの練上り温度は35~10°C程度に変化する一方で、打設部位は凍結の影響により0~10°C程度一定の低温環境となる。このような条件の下で、コンクリートには、①高い流動性・充填性を有していること、②運搬時間と打設時間の関係から、2~3時間程度流動性を保持し、その間品質を損なわないこと、③材齢28日設計基準強度24N/mm²を満足すること、④温度応力を低減すること、以上の4項目が要求品質として挙げられた。

そこで、温度応力の低減を目的と

して粉体の一部を石灰石粉で置換し、少量の特殊増粘剤で流動性の安定を図る併用系高流動コンクリート（コンクリート配合および使用材料を表-1に示す）について、表-2に示す特殊温度条件下での室内試験によりフレッシュコンクリート性状および硬化コンクリート性状を確認した。

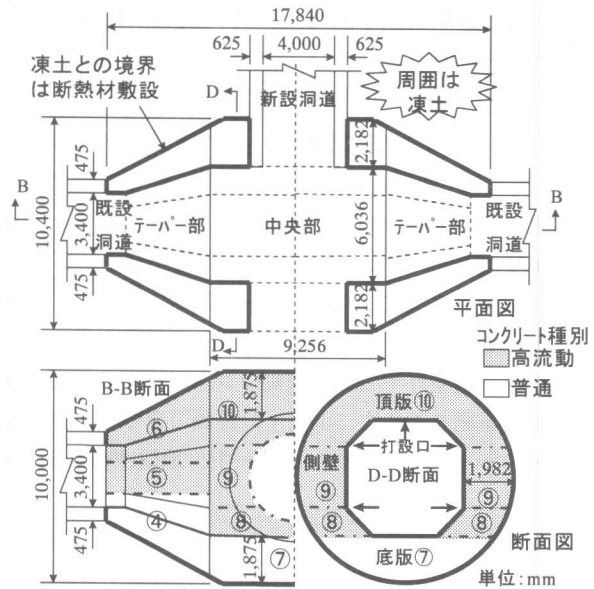


図-1 構造物の概要

表-1 コンクリート配合および使用材料

種別	適用部位	スランプフロー、スランプ(cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	C	石粉	S	G	SP剤	増粘剤
高流動	側壁・頂版	65±5	4.5±1.5	55	44.6	175	318	226	686	872	6.0~7.3	0.35
普通	底版	18±2.5			47.9	162	295	—	864	961	4.4	—

セメント：普通ポルトランドセメント（比重 3.16）、石粉：舗装用石灰石粉（比重 2.71）

細骨材：多度産山砂（比重 2.54、FM2.55）、藤原産砕砂（比重 2.68、FM2.78）山砂：砕砂=7：3

粗骨材：揖斐産川砂利（比重 2.61、FM6.50）、南濃産碎石（比重 2.67、FM6.67）砂利：碎石=5：5

SP剤：ナフタリン系高性能AE減水剤（徐放性分散剤含有）、特殊増粘剤：水溶性ポリサッカライド

表-2 室内試験項目

測定項目	適用	温度条件
スランプフロー	JSCE-1990	練上り・環境温度 10°C (0-60分) → 環境温度 5°C (60-180分)
フロー時間	スランプフローが 50cm に到達するまでの時間	練上り・環境温度 20°C (0-60分) → 環境温度 5°C (60-180分) 練上り・環境温度 35°C (0-60分) → 環境温度 5°C (60-180分) 練上り・環境温度 20°C一定 (0-180分)
圧縮強度	JIS A 1108	練上り温度を 5, 20, 35°Cとし、 所定の試験材齢 (3, 7, 28, 56, 91 日) まで 練上り温度と同温度の恒温室で養生
割裂引張強度	JIS A 1113	
ヤング係数	JSCE G502	
断熱温度上昇試験	空気循環式装置による	練上り温度 10, 20, 35°Cで供試体作成

3.2 室内試験結果

(1)フレッシュコンクリートの性状

図-2にスランプフローおよびフロー時間の経時変化を示す。コンクリートの練上り温度は10、

20、35℃とし、運搬時間を考慮して60分間まで練上り温度と同温度の恒温室に静置し、その後5℃の恒温室に移動して試験を行った。比較用として20℃一定条件下に引き続き置かれたものでは180分経過後でも性状変化はほとんど見られなかったが、低温環境下に移されたものは、練上り温度にかかわらず、温度が低下すると即座にスランプフローが小さくなり、粘性が増したため、フロー時間が増加した。これは、低温条件でナフタリン系高性能AE減水剤の分散性能が低下することによって考えられる。ただし、混和剤量を若干調整することと温度に対する品質変動を緩和する特殊増粘剤の効果により、いずれの温度条件でもスランプフロー65±5 cmを2.5時間程度保持し、2時間までは品質の変化もほとんどないことが確認された。

(2)硬化コンクリートの性状

図-3、4に硬化コンクリートの試験結果を示す。練上り温度5、20、35℃で供試体を作製し、同一温度条件下で所定材齢まで恒温室で養生後、圧縮強度、割裂引張強度およびヤング係数の測定を行った。使用した高流動コンクリートは温度にかかわらず設計基準強度24N/mm²を満足することが確認できた。また、図-3に示すように圧縮強度は積算温度(Σ(養生温度+10℃)×時間)と高い相関を示した。引張強度、ヤング係数は図-4に示すとおり、温度条件にかかわらず圧縮強度に対して1つの関数で表される。これらの式をコンクリート標準示方書(施工編)に示される

近似式と比較した。ヤング係数は、小さめに測定された3点を除けば、示方書式とほぼ同様な値を示した。実験式と示方書式は若干差が生じているが、低強度領域のみであるため、後述する解析ではこの実験式を用いた。一方、引張強度については、示方書式が構造物中での強度低下を考慮して試験値の8割に低減しているため、試験値としての回帰式はほぼ一致する。

断熱温度上昇試験結果の回帰式を示方書の推定式と比較して表-3に示す。石灰石粉はセメン

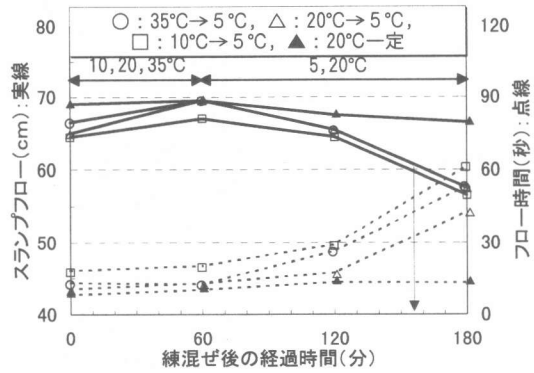


図-2 スランプフローおよびフロー時間

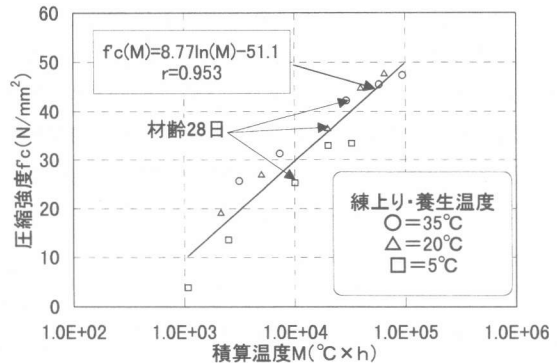


図-3 圧縮強度と積算温度の関係

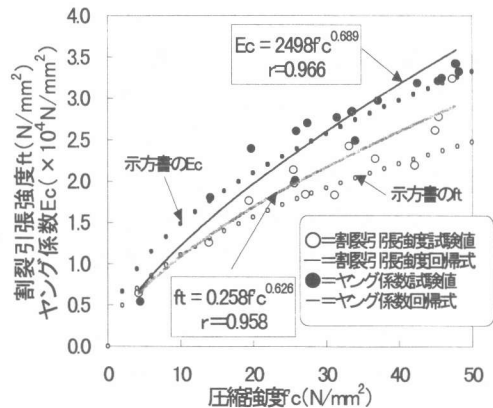


図-4 引張強度、ヤング係数と圧縮強度の関係

トの水和を促進し、初期水和熱や強度に寄与するといわれている [5] が、ここで実施した範囲では、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は示方書の推定式から算定した値とほぼ

表-3 断熱温度上昇曲線

条件	打設温度	回帰式 $Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma(t-t_0)})$		
		断熱温度上昇量 Q_{∞}	断熱温度上昇速度 γ	遅れ時間 t_0
$C=318\text{kg/m}^3$ 実験回帰式	34.6°C	46.4 (°C)	1.69 (1/°C)	0.5 (日)
		示方書式	46.5 (°C)	1.81 (1/°C)
実験回帰式	22.1°C	46.8 (°C)	1.33 (1/°C)	0.33 (日)
		示方書式	47.8 (°C)	1.26 (1/°C)
実験回帰式	8.2°C	49.8 (°C)	1.13 (1/°C)	1.0 (日)
		示方書式	49.4 (°C)	0.51 (1/°C)

同じであり、石灰石粉や増粘剤などが Q_{∞} に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、断熱温度上昇速度 γ は、遅れ時間 t_0 を考慮する必要があるが、打設温度が変化しても示方書式ほど変化が大きくなかった。これらの結果は、徐放性分散剤を含む高性能 AE 減水剤の影響と考えられる。

3.3 実施工結果

練混ぜは強制二軸型ミキサ (容量 1.75 m^3) を用い、トラックアジテータにより現場まで約 30~40 分運搬した。その後立坑上のポンプ車で 5 B 管により地下 20 m、水平約 80 m を圧送し、図-1 に示すように側壁は各部位の上端部 1 カ所からフレキシブルホースを用いて流し込み、頂版は天端部 2 カ所から注入する方法により打設速度約 $20\sim 30\text{ m}^3/\text{h}$ で打設を行った。その結果、低温環境下でも良好な流動性を示したため、締固めは一切行わなかった。また、妻型枠脱型後、地盤とコンクリートの境界を目視で確認した結果、未充填部は確認されなかった。

1 回の打設量が $20\sim 190\text{ m}^3$ 程度と少量であるため、品質管理試験はプラントおよび現場で 1 日あるいは 50 m^3 に 1 回とし、その他はミキサの負荷値と目視により管理した。図-5 に実施工でのスランブフローと温度測定結果を示す。練上り温度は約 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで変化しているのに対して、プラントでのスランブフローは $63.0\sim 68.5\text{ cm}$ (変動係数 $V=2.3\%$)、現着時は $64.0\sim 69.5\text{ cm}$ ($V=3.2\%$) で室内試験と同様に若干増加したが、打設時期によらず流動性は常に安定していた。

図-6 に圧縮強度試験結果を示す。全ての供試体が材齢 28 日設計基準強度 24 N/mm^2 を満足した。しかし、坑内温度は常に $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ であるため、普通コンクリート、高流動コンクリートともに標準養生供試体より現場水中養生供試体の方がやや圧縮強度が低い結果となった。一方、同一水セメント比でも高流動コンクリートは普通コンクリートに比べて石灰石粉の影響により $2\sim 5\text{ N/mm}^2$ 大きい値を示すとともに、相関係数が大きく、ばらつきの少ない結果が得られた。

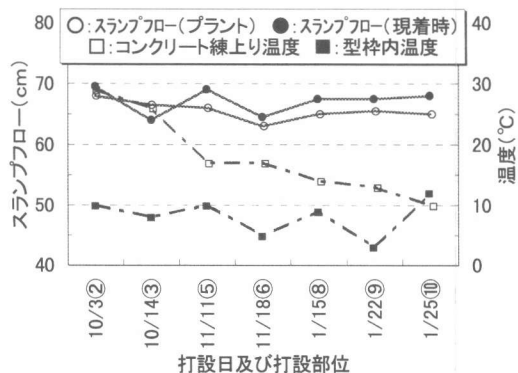


図-5 実施工でのスランブフローと温度

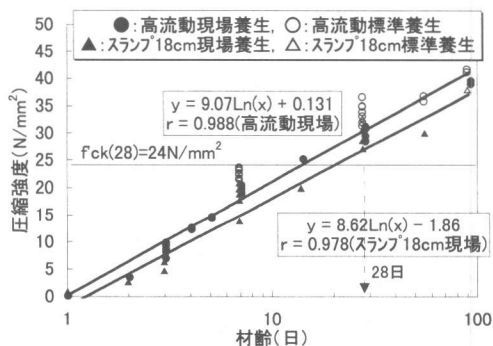


図-6 実施工での圧縮強度

4. 温度応力挙動評価

4.1 解析方法および解析条件

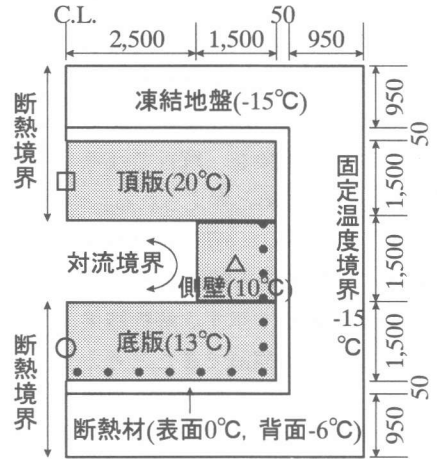
図-7 にテーパー部を対象とした解析モデルを示す。Compensation Plane 法（以下、CP 法と称する）を適用するために、実構造物の形状を同一面積の矩形形状に置き換えて、凍結地盤、断熱材を含めたモデル化を行った。温度解析は二次元 FEM、応力解析は CP 法を用いた。

解析に用いた入力値の内、断熱温度上昇特性、圧縮強度、引張強度、ヤング係数は前述した試験結果を基に定めた。コンクリートの熱膨張係数は無応力ひずみ計による実構造物の計測結果から 5.96×10^{-6} ($1/^\circ\text{C}$) とした。拘束係数は全て 0 とした場合の解析と示方書に準じた拘束係数を用いた解析を実施し、得られた応力履歴の形状および変動幅を計測結果と比較することで表-4 に示す値を決定した。その他の値はコンクリート標準示方書などを参考に定めた。

打設温度と養生方法をパラメータとした事前解析では底版および頂版のひび割れ指は 1.5 以上でひび割れ発生の可能性は低いが、側壁のひび割れ発生の可能性が高いと推定された。図-8 に側壁の最小ひび割れ指数を示す。養生方法により若干異なるが、打設温度が 10°C 上昇することでひび割れ指数は 0.2 程度減少した。打設温度 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ の範囲では、発泡スチロール養生 ($\eta = 2\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) 以外ひび割れ指数 1.2 をクリアすることはできず、通常実施されるシート養生 ($\eta = 6\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) あるいはメタルフォームでは最小ひび割れ指数は 1.0 未満を示した。ただし、より断熱性の高い養生方法を採用することでひび割れ指数を改善することができると分かったため、底版には合板による養生 (熱伝達率 $\eta = 8\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)、側壁および頂版には発泡スチロール養生を行うとともに、ひび割れ誘発目地を設置した。

4.2 解析と計測の比較

図-9 にテーパー部の各リフト中心部における温度解析結果と計測結果を合わせて示す。凍結地盤、断熱材や温床線など複雑なモデルではあったが、解析結果が実測値をほぼ模擬できたと考



()内は初期温度 ○△□:出力位置
●:温床線位置 (30°C 固定) (単位: mm)

	コンクリート	凍結地盤	断熱材
λ	$2.7\text{W}/\text{m}^2\text{C}$	$2.7\text{W}/\text{m}^2\text{C}$	$0.035\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
C	$1.15\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$	$1.30\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$	$0.84\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$
ρ	$2,277\text{kg}/\text{m}^3$	$1,650\text{kg}/\text{m}^3$	$24\text{kg}/\text{m}^3$

図-7 解析モデル

表-4 拘束係数

部位	軸拘束 R_N	曲げ拘束 R_{M1}	曲げ拘束 R_{M2}
底版	0.01	0.4	0.6
側壁	0.008	0.24	0.44
頂版	0.01	0.3	0.5

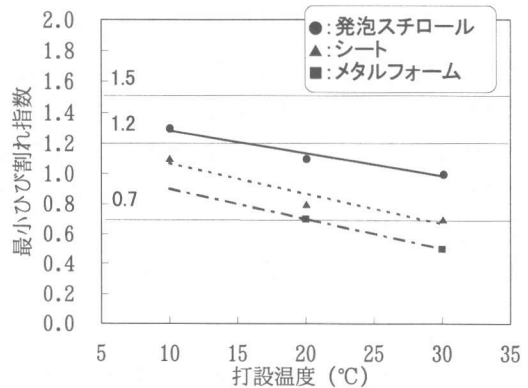


図-8 事前解析結果 (側壁最小ひび割れ指数)

えられる。ただし、頂版の解析結果が実測値とやや異なる挙動を示した。これは、構内温度が底版付近から頂版付近へかけて5～10℃上昇していた現象を、解析では考慮していないためと考えられる。

図-10 にテーバー部の各リフト中心部における応力解析結果と計測結果を比較して示す。解析結果が実測値をほぼ模擬できたと考えられる。側壁の実測で材齢32日頃から圧縮側に転じているのは、事前解析でも予測していたひび割れ誘発目地付近に発生したひび割れの影響と考えられる。最大温度降下量が40～50℃であるにもかかわらず、本構造物のひび割れは唯一この1本(幅0.1mm程度)のみであり、十分なひび割れ制御ができたと考えられる。

5. おわりに

本施工を通じて、特殊温度環境下での高流動コンクリートの適用性およびひび割れ制御対策効果が

十分証明された。具体的には、①特殊増粘剤を用いた併用系高流動コンクリートは練上り温度や今回検討したような環境温度の変化に対して鋭敏な反応を示さず、安定した品質が得られることが分かった。②凍結地盤中でのマスコンクリート施工に対して、粉体の一部に石灰石粉を使用した高流動コンクリートの適用、断熱性の高い発泡スチロール養生、ひび割れ誘発目地などにより、十分なひび割れ制御対策を行うことができることが確認できた。

最後に、本検討に際して数多くのご助言をいただいた梅原秀哲名古屋工業大学教授に対し、記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 片山英明ほか：凍結工法による既設シールドトンネルの地中拡幅工事の設計・施工、電力土木、No.265、pp.71-77、1996.9
- [2] 上嶋正樹ほか：凍結工法による地中拡幅工事について(その1)―大断面地中拡幅工事の施工実績―、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第6部、pp.308-309、1996
- [3] 上嶋正樹ほか：凍結工法による地中拡幅工事について(その2)―現場凍土の力学特性による安定評価―、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第6部、pp.310-311、1996
- [4] 横関康祐ほか：凍結工法による地中拡幅工事について(その3)―凍結地盤中での高流動コンクリートの施工―、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第6部、pp.312-313、1996
- [5] セメント協会：わかりやすいセメント科学、pp.57-61、1993

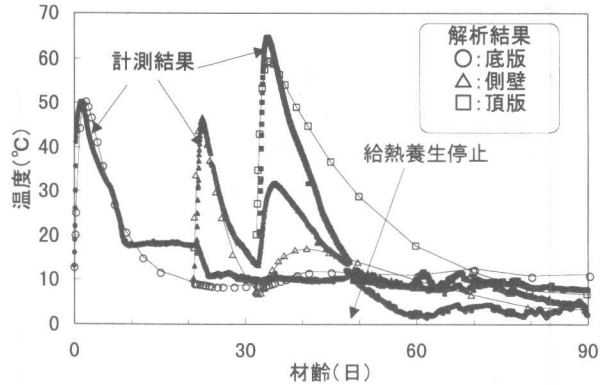


図-9 温度解析結果と計測結果の比較

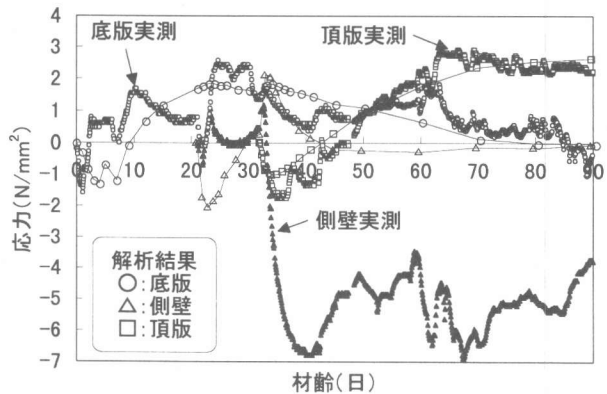


図-10 応力解析結果と計測結果の比較