

積算温度管理による 脱型時期判定（T-JUDG）システムの適用

宇野 洋志城¹・京免 継彦²・谷川 隆之²・桑原 嗣³・小泉 直人⁴

¹正会員 佐藤工業株式会社 技術研究所（〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10）

²正会員 佐藤工業株式会社 土木事業本部技術部（〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-19）

³佐藤工業株式会社 東京支店土木事業部工務部（〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-19）

⁴正会員 工博 佐藤工業株式会社 土木事業本部（〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-19）

筆者らは、これまで覆工コンクリートの脱型強度を現位置で直接的に測定あるいは推定する方法について検討を行ってきた。今回開発し、山岳トンネル工事現場に初めて適用した覆工コンクリートの脱型時期判定（T-JUDG: Tunnel-JUDGement of removal time on site）システムは、積算温度管理により現位置でコンクリートの強度発現を推定するものである。本システムの導入効果により、脱型直後のトラブルは発生しなかった。覆工コンクリートが適切な強度に達した時期（脱型時期）を判定できることは、脱型までの初期養生期間中に環境温度が予想より低かった場合や、打込み工程にトラブルが生じて遅延した場合でも、安全と品質を確保した施工を保証できることが明らかとなった。

キーワード： 積算温度、二次覆工、脱型、強度推定、コンクリート

1. はじめに

近年、覆工コンクリートの品質・耐久性の向上を目的とした技術開発が注目されている。

現在施工中のトンネル工事においても、覆工コンクリートの品質・耐久性を向上させるために脱型後の養生方法を工夫するケースが多く見受けられるが、覆工コンクリートの耐久性に影響を及ぼす項目として、脱型前の養生方法や脱型までのコンクリートの水和反応の進行度合いを無視することはできない。

一般的なトンネル工事現場における覆工コンクリートの構築は、1 サイクル 2 日の工程で脱型～セントル移動～セット～打込みが繰り返されるパターンで行われていることが多い。脱型時におけるコンクリートの圧縮強度は 2.0～3.0N/mm² 程度が目安とされており¹⁾、脱型はコンクリート打込み終了後 12～20 時間程度で行われている例が多く報告されている。

しかし、覆工コンクリートが目標の脱型強度に達したかどうかの判断は打込み終了後の経過材齢を基準に管理するケースが多く、コンクリートの圧縮強度の確認は毎回実施されていない。仮に実施されたとしても、現場養生した管理供試体による間接的な圧縮強度の確認であり、覆工コンクリートの圧縮強度を現位置で直接的に測定あるいは推定してはいない。

脱型までに養生温度が急激に低下したり、管理供試体作製後に発生するトラブル等により打込み終了時刻が遅れた場合などでも単純に経過材齢を基準にして脱型を行えば、覆工コンクリートの圧縮強度は目標に達していないため、結果的に材齢初期段階でのひび割れの発生や長期耐久性の低下に結びつく可能性があると考えられる。

そのため、覆工コンクリートの圧縮強度を現位置で直接的に測定あるいは推定する方法を確立することが、構造上の安全性や長期的な耐久性の向上を保証する上で必要である。

本報告は、覆工コンクリートの脱型時期判定方法に関する検討から適用までの経過について述べるものである。

2. 開発の経緯

(1) 脱型時期判定の問題点

これまで一般的に採用されている覆工コンクリートの脱型時期判定は、ほとんどが間接的な管理方法によるものであり、これらには幾つかの問題点がある。

たとえば、打込み終了後の経過材齢による管理では覆工コンクリートの養生条件の変動を加味することは難しい。供試体強度による管理では養生期間中の存置場所の養生条件による影響が大きく、打込み毎に圧縮強度試験

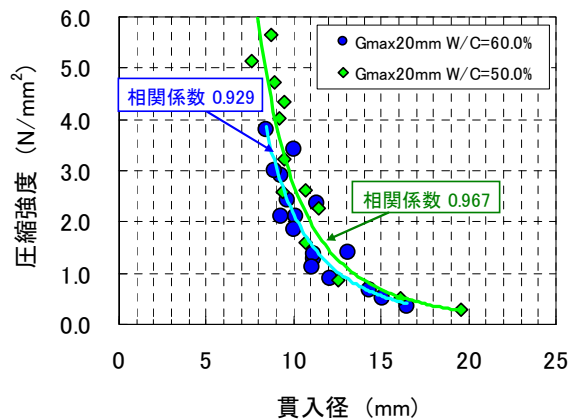


図-1 貫入径と圧縮強度との関係

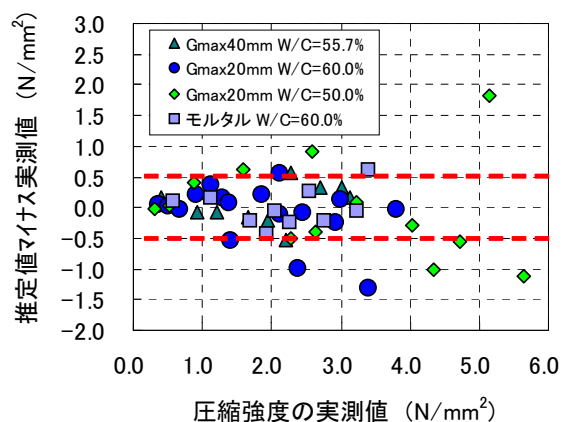


図-2 貫入方式による圧縮強度推定の精度

の実施が不可欠である。トンネル内の温度は一定ではなく、同一断面であっても上下方向に温度分布は存在し、換気用風管の周りでは通気の影響で温度分布は変化する。延長方向では坑口付近は屋外の環境の影響を受けやすく、トンネルの貫通次第では空気の流れが季節変動による気温変化の影響を増長させる。

つまり、脱型時期判定の目安となる覆工コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす要因は打込み後の経過材齢以外にも多く存在し、材齢による管理あるいは供試体による管理だけでは不十分なことは明らかである。

したがって、これまでの脱型時期の判定方法には改善の余地があり、安全面だけでなく品質面からも適切な脱型時期の判定は必要であると考えられる。

(2) 若材齢コンクリートの直接的な強度推定

既往の文献²⁾によると、非破壊あるいは微小な破壊による若材齢コンクリートおよび低強度のコンクリートの強度推定に関して幾つかの研究例^{3)~9)}が報告されている。

筆者らは、貫入方式³⁾、超音波方式⁴⁾、低強度用テストハンマー方式⁵⁾、ウィンザーピン貫入方式⁶⁾、引っか



写真-1 改良型貫入装置セット状況

き傷方式⁷⁾、積算温度方式^{8),9)}等のうち、貫入方式、超音波方式、低強度用テストハンマー方式の3方式に関して実験的検討を行った。その結果、相関関係は同程度でも、超音波方式は供試体を利用する点で間接的な推定方法であり、低強度用テストハンマー方式は本来の使用マニュアルの用途範囲でないとの理由から、貫入方式が最適と判断した¹⁰⁾(図-1参照)。

フレーム計算結果から、覆工コンクリートの脱型目標強度が 1.04N/mm^2 と指定されている新設トンネル工事において貫入方式の実用性の検証を行った際には、覆工コンクリート面に垂直に、かつ 500N の載荷力で貫入させる反力保持のために装置固定用の磁石や圧縮空気を利用する等の装置改良が必要となった(写真-1参照)。

また、貫入方式による測定結果では圧縮強度 2.0N/mm^2 以上の領域では強度推定の信頼度が低くなり¹¹⁾(図-2参照)、覆工コンクリートの脱型時期判定方法としては 3.0N/mm^2 程度を目安とする場合には最適とはいえない。

これらの理由により、トンネル工事で標準採用するには制約が多すぎることが懸念され、実験的検討を行った3方式以外の覆工コンクリートの脱型時期判定方法について検討する必要があると考えた。

(3) 積算温度方式による強度推定

最近のトンネル工事における覆工コンクリートの品質向上に関する技術提案では、覆工コンクリートの強度発現を保証し、安全かつ確実に脱型する方法として積算温度管理を利用する提案が多く採用されている。

コンクリートの強度発現は水和反応によるものであり、養生温度 $+10^\circ\text{C}$ と養生時間の積で表される積算温度と圧縮強度とは強い相関関係にあるという基本性質が広く知られている。材料と配合が同じであれば、積算温度と圧縮強度との関係は一定と考えてよい。

しかし、これまでの文献^{8),9)}では、寒中コンクリートとしての低温養生あるいは促進養生における強度発現推定に利用する例が多く、材齢100時間までの養生条件が

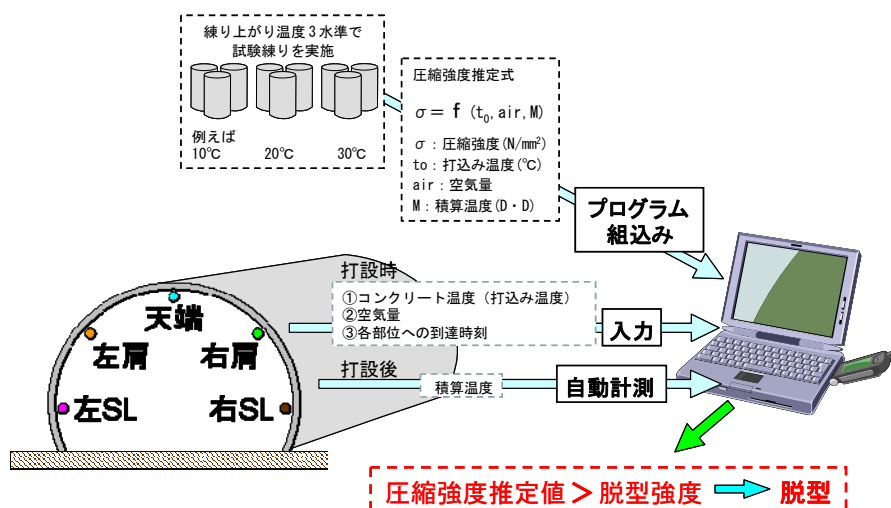


図-3 T-JUDGシステムのイメージ

強度発現に及ぼす影響が大きいとされている。また、練り上がり時のコンクリート温度が違う場合、たとえば単位セメント量の違いや季節変動に対応した使用混和剤のタイプあるいは使用混和剤量の違いにより、同じ積算温度であっても若材齢時の初期強度発現に大きな差が生じることも確認されている。

あるトンネル工事現場で契約したレディーミクストコンクリート出荷プラントでは、季節によって夏用配合あるいは冬用配合と称して混和剤の使用量が微調整され、結果的に 2.0～3.0N/mm² 程度の初期強度発現までの材齢に差が生じる可能性があった。

一方、コンクリートの計画配合が同一であれば、空気量 1%の増加によって圧縮強度は 4～6%減少する¹²⁾ことも硬化コンクリートの基本性質の一つとして広く知られており、推定精度の向上のためには考慮が必要である。

そこで筆者らは、覆工コンクリートの圧縮強度を現位置で直接的に測定あるいは推定する方法として、積算温度以外に打込み時のコンクリート温度と空気量もパラメータとして取り込むことを考えた。

今回トンネル工事現場に提案、適用することになった積算温度管理による覆工コンクリートの脱型時期判定（以降、T-JUDG : Tunnel-JUDGement of removal time on site と称す）システムは、覆工コンクリートの圧縮強度を現位置で積算温度とコンクリート打込み温度と空気量から推定するものである。

3. T-JUDG システムの概要

(1) T-JUDGシステムの概念

覆工コンクリートに使用する計画配合には夏季あるいは冬季に備えた配合があり、コンクリート温度が 5℃～35℃の範囲内で使用混和剤量は微妙に変更されている。

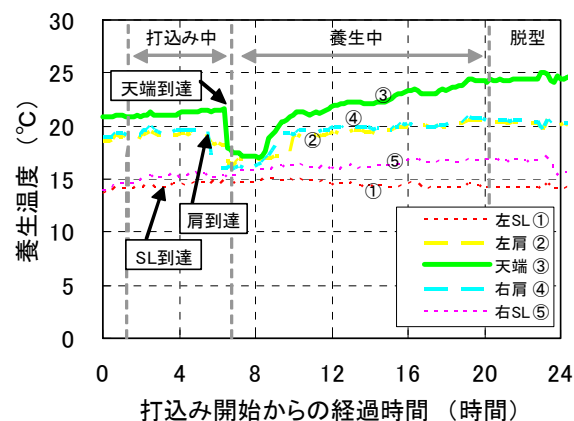


図-4 セントル内養生温度の経時変化

そこで、T-JUDGシステムの開発にあたっては、各トンネル工事現場で契約したレディーミクストコンクリート出荷プラントにおいて、夏用配合、標準配合、冬用配合それぞれに対してコンクリート温度を 35℃、20℃、5℃を目標に試験練りを実施し、積算温度とコンクリート打込み温度と空気量をパラメータとする圧縮強度推定式を求めた。そのイメージを図-3に示す¹³⁾。

また、覆工コンクリートの打込み順序は一定であり、延長方向に関してはラップ側から棲側に充填し、上下方向に関しては側壁部からアーチ部にかけて充填し、最後に天端部に達する。つまり、棲側天端部は最後に充填し、脱型時には最も若材齢となる部位である。脱型時期が早過ぎれば、天端部は強度不足が原因で自重によるひび割れが発生する可能性の最も高い部位でもある。

一方、脱型前養生期間中にはコンクリートの水和発熱作用によりセントル内部温度は上昇し、最も遅く打込み完了となる天端部で最も養生温度が高く、最も早く打込み完了となる側壁部で最も養生温度は低くなることが確認されており¹⁴⁾（図-4 参照）、最後にコンクリートの

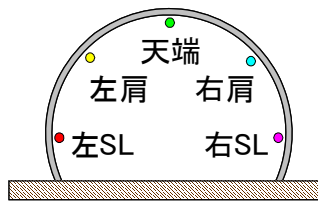


図-5 標準の養生温度測定箇所

理論

- ・積算温度による強度推定
- ・打込み温度と空気量もパラメータ

安全・品質

- ・安全と安心の提供

工程

- ・施工サイクルの効率化

図-6 T-JUDGシステムの特徴

打込みが終了する天端部と最初にコンクリートの打込みが終了する側壁部では、材齢が経過するにつれて積算温度が逆転する（＝圧縮強度が逆転する）現象が認められる場合がある。

したがって、覆工コンクリートの脱型時期判定のためには、最後に打込み終了となる棲部付近で養生温度を測定する必要があるものの、同一断面で高さ方向を変えた数カ所に温度センサーを設置することが望ましいと考え、標準の養生温度測定箇所を図-5に示すとおりとした。

(2) T-JUDGシステムの特徴

T-JUDGシステムの特徴は、強度推定の理論、覆工コンクリートの安全と品質の保証、作業工程上のメリットにあり、以下に示すとおりである（図-6参照）。

a) 積算温度による強度推定

打込み後の経過材齢や供試体の圧縮強度などの間接的な管理によらず、覆工コンクリートの現位置で測定した養生温度を管理することで、あらかじめ行う試験練りにより準備した積算温度との関係式を利用して覆工コンクリートの圧縮強度を推定できる。

b) 打込み温度と空気量もパラメータ

季節変化に伴うコンクリート打込み温度の違いによる混和剤の種類あるいは使用量の変動や、コンクリートに含まれる空気量の変動が及ぼす影響を考慮するため、積算温度以外のパラメータにコンクリートの打込み温度と空気量を加えることで、精度よく圧縮強度を推定できる。

c) 安全と安心の提供

脱型までの初期養生期間中に環境温度が予想より低かった場合や、打込み工程にトラブルが生じて遅延した場合でも、覆工コンクリートの強度を直接的に推定、モニ

表-1 計画配合（標準配合 27-15-20BB）

G _{max} (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	4.5	51.5	51.5	175	340	895	859	3.74

表-2 計画配合（標準配合 27-15-40BB）

G _{max} (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40	4.5	52.0	44.9	164	315	801	1004	2.21

セメント：高炉セメントB種、密度 304 g/cm³

細骨材：東広島市小多田産砕砂と津久見市戸高産砕砂の混合、表乾密度 260 g/cm³

粗骨材：呉市広町蜘蛛取産砕石、表乾密度 265 g/cm³

混和剤：高性能 AE 減水剤、主成分はポリカルボン酸系化合物

（表-1 冬用配合：セメント×1.0%、標準配合：セメント×1.1%、夏用配合：セメント×1.25%）

（表-2 冬用配合：セメント×0.6%、標準配合：セメント×0.7%、夏用配合：セメント×0.85%）

非鋼繊維：ピニオン繊維、表-1の外割りで容積の 0.3%混入（39 kg/m³）

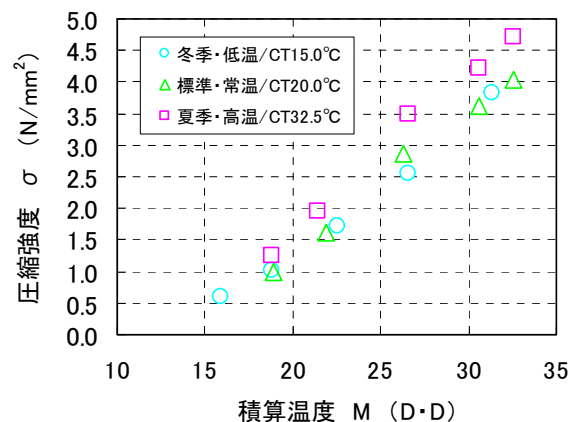


図-7 積算温度と圧縮強度との関係（配合 27-15-40BB）

タリングするため、目標強度に達する前に脱型する危険を回避でき、安全と品質を確保した施工を保証できる。

d) 施工サイクルの効率化

圧縮強度をモニタリングしながら、必要に応じて養生温度の管理を行って脱型に必要な目標強度に達する材齢を変えることができるので、施工サイクルの中で自由に脱型時期の調整や作業の効率化を図れる。

4. T-JUDGシステムの実施工への適用

(1) I トンネルにおける適用

中国地方に位置する4車線（暫定2車線）の自動車専用道路（高規格幹線道路）新設区間のトンネル工事現場（仮称Iトンネル：坑門工以外の全区間 1170.8m）において、平成22年6月よりT-JUDGシステムを初めて本格導入した¹⁵⁾。使用したコンクリートを表-1、表-2に示す。DIIIa区間には配合27-15-20BB（非鋼繊維入り）、DIIIa区間以外には配合27-15-40BBを適用した。後者27-15-40BB配合における空気量4.5%での積算温度

と圧縮強度との関係を図-7 に示す。なお、図中の圧縮強度の数値は、空気量 1%の増加に対して 5%減少するとして試験練り実施時の空気量を元に補正している。

このトンネル工事は通年施工が行われ、コンクリート練り上がり温度の高くなる夏季にはスランプロスなどのフレッシュ性状の経時変化を抑えるために標準配合よりも混和剤使用量が多く設定されている。同様に、冬季には標準配合よりも混和剤使用量が少なく設定されており、初期材齢における強度発現は夏季には遅れ、冬季には早まる可能性があるとして当初考えられた。

しかし、図-7 に示した結果をみると、コンクリートの練り上がり温度が 32.5℃であった夏用配合の圧縮強度は、同じ積算温度でも他配合に比べて大きくなり、当初懸念された現象は起こらなかった。その点に関しては非鋼繊維を混入した 27-15-20BB 配合でも同様の傾向を示しており、混和剤使用量の変動が圧縮強度発現材齢に及ぼす影響は大きくなかった。

I トンネルにおける覆工コンクリートの打込みは平成 22 年 6 月～平成 23 年 5 月の期間に行われ、全 118 BL で T-J UDG システムを利用した脱型時期判定が行われた。養生条件はたびたび変更され、9 月～10 月まではブルーシートによる保温養生が行われ、11 月～5 月まではブルーシートに加えてジェットヒーターを 3 台使用した給熱養生が行われた。全 118 BL で覆工コンクリートの圧縮強度が 3.0N/mm²以上になったことを確認した後に脱型作業が行われた結果、脱型時の強度不足が原因と思われるひび割れ等の欠陥は認められなかった。

季節の変動に伴いトンネル内の環境温度は必ずしも一定とならず、脱型目標強度 3.0N/mm²を得るために養生温度を管理した結果、夏季から秋季においては最終打込み箇所である天端部の強度発現が最も遅かったが（図-8、図-9 参照）、ジェットヒーター等を使用したことにより暖気が天端部に集中する状況にあった冬季では、天端部の強度増進が大きく、最も早く脱型目標強度に達した（図-10 参照）。脱型までに必要な養生時間は 11 時間 20 分～18 時間 30 分まで変動したが、6 月～10 月までの平均 13 時間 50 分に対して 11 月～5 月までの平均は 15 時間 30 分と大きく変わることはなく、冬季でも養生温度が高く保たれていた影響の表れと考えられた。通年平均では 14 時間 50 分程度となり、2 日に 1 回の打込み工程に支障をきたすことはなかった。

(2) T-J UDG システムの水平展開

平成 23 年 6 月時点で、T-J UDG システムを導入しているトンネル工事は、前項の I トンネルを含めた 6 件である。各トンネル工事における使用レディーミクストコンクリートの出荷プラントとコンクリート配合は全

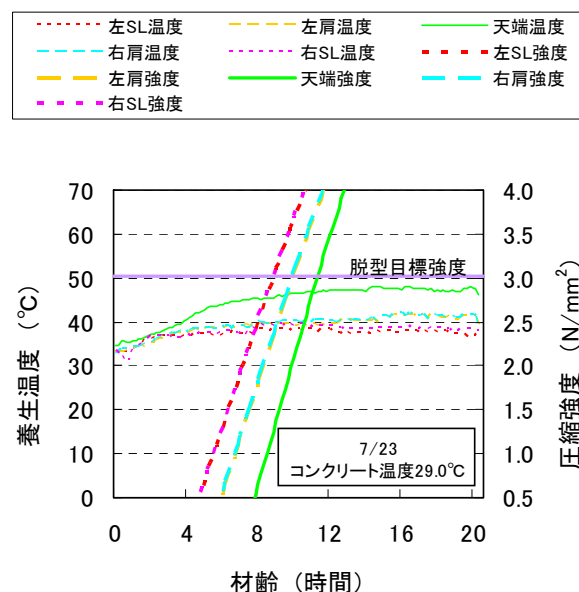


図-8 養生開始からの強度発現（夏 7/23 施工）

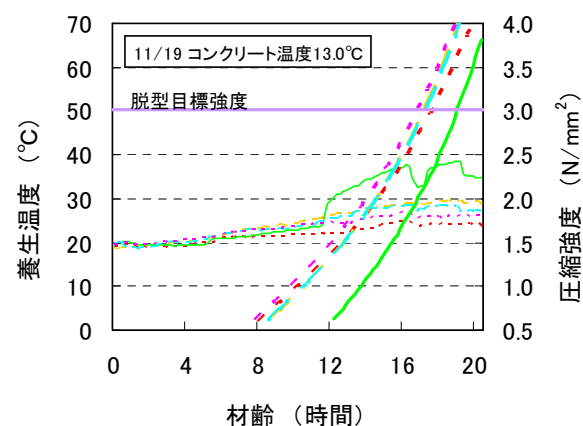


図-9 養生開始からの強度発現（秋 11/19 施工）

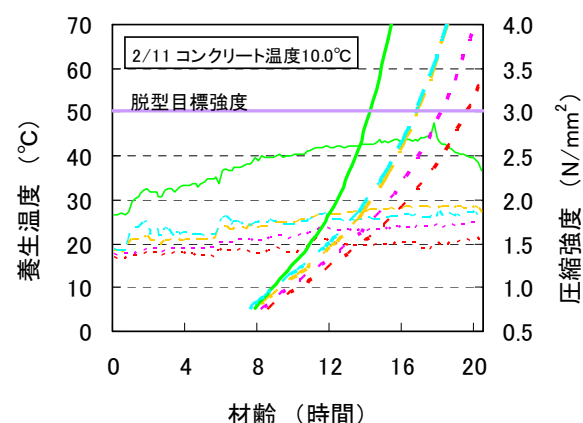


図-10 養生開始からの強度発現（冬 2/11 施工）

て異なり、積算温度と圧縮強度との関係式も全て異なる。

T-J UDG システムの導入のために必要な準備作業としては、積算温度と圧縮強度との関係式を用意するた

めの試験練りの実施が挙げられる。通常の試験練りにより標準配合が確定した後に、たとえば3水準の練り上がり温度で再度試験練りを実施し、材齢 24 時間程度までの間に若材齢、かつ低強度範囲での積算温度の測定と圧縮強度試験を行うことが必要である。脱型目標強度が 3.0N/mm^2 であれば、 $4.0\sim 5.0\text{N/mm}^2$ 程度を上限とする範囲まで試験データを得ることが望ましい。

5. おわりに

T-JUDGシステムの導入により、予想より養生温度の低い場合や打込み工程が遅れた場合でも、覆工コンクリートの強度発現をモニタリングすることが可能となり、施工の安全と覆工コンクリートの品質を確保することができた。

積算温度管理の概念を用いた本システムの有効活用は、覆工コンクリートの安全性と耐久性を保証することができると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2006 年制定トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説，pp. 172-173，2006. 7
- 2) 宇野洋志城，歌川紀之，桑原嗣：非破壊試験による若材齢コンクリート強度の推定方法に関する研究，佐藤工業株式会社技術研究所報 2009，No. 34，pp. 1-8，2010
- 3) 宇野洋志城，弘中義昭：若材齢コンクリートの強度推定法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12-1，pp. 225-230，1990. 6
- 4) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No. 61 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，pp. 22-33，2004. 8
- 5) 高取秀和，川崎元，鈴木昌次，綾野克紀：P T型シュミットハンマーを用いたトンネル覆工コンクリートの脱枠時強度の推定方法，土木学会第 63 回年次学術講演会，V-303，pp. 605-606，2008. 9
- 6) 谷川恭雄，木俣典良，西川奈津子，山根政夫：各種非破壊試験方法による低強度コンクリートの強度推定に関する研究，セメントコンクリート論文集，Vol. 61，pp. 154-159，2008. 2
- 7) 西川奈津子，山根政夫，谷川恭雄，鈴木計夫：各種非破壊試験方法による低強度コンクリートの強度推定に関する研究（その 2：引っかかり傷法），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp. 241-242，2007. 8
- 8) 蓮尾孝一，西本好克，松本拓，河上浩司：積算温度方式による若材齢強度の推定法，三井住友建設技術研究所報告，Vol. 2，pp. 145-150，2004
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，pp. 280-281，1991. 7
- 10) 北川真也，鍋谷雅司，宇野洋志城，歌川紀之：若材齢コンクリートの圧縮強度推定方法に関する検討，土木学会第 64 回年次学術講演会，VI-279，pp. 557-558，2009. 9
- 11) 京免継彦，小泉直人，本馬幸治，宇野洋志城：貫入方式による圧縮強度推定方法に関する検討，土木学会第 64 回年次学術講演会，VI-280，pp. 559-560，2009. 9
- 12) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点' 09，pp. 59，2009. 9
- 13) 京免継彦，宇野洋志城，草信元春，藤原康史：積算温度管理による脱型時期判定（T-JUDG）システムの提案，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-416，pp. 831-832，2011. 9
- 14) 京免継彦，宇野洋志城，桑原嗣，乾川尚隆：脱型時期判定を目的とした積算温度管理に関する一考察，土木学会第 65 回年次学術講演会，VI-013，pp. 25-26，2010. 9
- 15) 宇野洋志城，京免継彦，上村佑介，藤原康史：積算温度管理による脱型時期判定（T-JUDG）システムの導入，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-417，pp. 833-834，2011. 9