

覆工コンクリート脱型時期判定システムの開発と導入

T-JUDG システムによる強度推定

宇野 洋志城・京 免 継 彦

筆者らは、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覆工コンクリートの脱型時期判定システムを開発した。本システムの導入により覆工コンクリートが適切な強度に達した時期(脱型時期)を判定することができ、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、建設工事現場の最前線で安全と品質を確保した施工を保証できる。

キーワード：トンネル、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

最近のトンネル新設工事では、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提案課題に対応する方策のため、様々な既存技術の転用や新技術の開発が行われている。

覆工コンクリートの耐久性を向上させる方策では、養生に関する技術の開発、適用^{1), 2)}などが散見されるが、耐久性和無縁ではないコンクリート強度の発現を推定、保証する技術に関しては、とくに目新しいものはなく、脱型目標強度や試験頻度の設定変更が行われる程度である。

コンクリートの耐久性の向上には十分な湿潤養生が効果的であるが、極めて若材齢で脱型され、セントルと呼ばれる移動式型枠とともに支保が移動する覆工コンクリートの場合には、脱型目標強度に達していないことが耐久性以前の問題として構造上の弱点となるひび割れの発生原因につながる可能性がある。そのため、覆工コンクリートにとって、脱型前のコンクリートの水和反応を把握し、脱型時の強度を推定、脱型時期を判定することは一般コンクリート構造物を対象とするよりも重要である。

そこで筆者らは、覆工コンクリートの強度を推定し、脱型時期を判定するシステムの開発と現場への導入を目指した。

2. 開発の経緯

(1) 脱型時期判定の問題点

一般的なトンネル新設工事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場合が多い。脱型時におけるコンクリートの圧縮強度(以降、本文中では脱型目標強度と称す)は $2.0 \sim 3.0 \text{ N/mm}^2$ 程度が目安とされており³⁾、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脱型目標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場合が多く、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、これらには幾つかの問題がある。

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。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。脱型までに養生温度が急激に変化する場合など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が脱型目標強度に達していない状況も起こり得る。そのため、初期材齢段階でのひび割れ発生や長期耐久性の低下に結びつく可能性がある。

また、管理供試体による圧縮強度の確認では養生中の存置場所による影響が大きく、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推定の精度を期待できないだけでなく、打

込みごとに供試体の採取と圧縮強度試験の実施が不可欠である。

つまり、これまでの経過材齢による管理あるいは供試体による管理で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していないことから、脱型時期の判定には十分な信頼性が得られない。

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ことにより適切な脱型時期の判定方法を確立することが、構造上の安全面だけでなく長期的な品質面からも必要である。

(2) 積算温度方式による強度推定

筆者らは、以前にも若材齢時におけるコンクリート強度の推定に関する検討を行った⁴⁾。最近も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の研究例⁵⁾が幾つか報告されており、貫入方式以外に、超音波方式⁶⁾、低強度用テストハンマー方式⁷⁾、ウィンザーピン貫入方式⁸⁾、引っかき傷方式⁹⁾、積算温度方式^{10), 11)}等が挙げられる。

今回、筆者らが覆工コンクリートの脱型時期判定方法の確立のために検討したのは、積算温度方式である。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℃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、基本的に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、コンクリートは常に同じ環境条件で製造されるものではない。これまでの文献^{10), 11)}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強度発現に及ぼす影響が大きいとされている。

3. 脱型時期判定システムの概要

(1) 脱型時期判定システムの概念

今回、トンネル新設工事に提案、導入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新しい脱型時期判定システムは、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。新しい脱型時期判定システムのイメージを図-1に示す¹²⁾。

練り上がり時のコンクリート温度が違う場合、フレッシュ時の初期の設定や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差が生じることも確認されている。筆者らが検証した結果によれば、同じプラントから出荷された同配合のレディーミクストコンクリートでも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ており、季節が変わればコンクリートの練り上がり温度は変わること、圧縮強度で2.0～3.0 N/mm²程度発現するまでの材齢に差はあることが認められている。

さらに、それらの傾向は試験材齢までの養生温度が等しくても変わらないことも確認済みである。

これより、圧縮強度3.0 N/mm²程度レベルまで対象として強度発現状況を推定するためには、単純に積算温度を測定するだけでは不十分であると判断した。

一方、コンクリートの計画配合が同一であれば、空

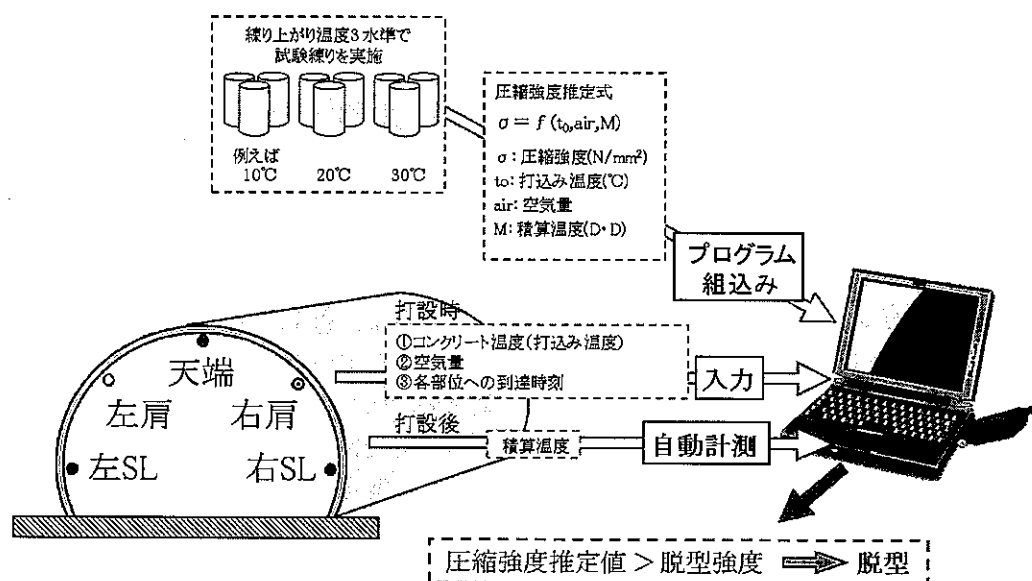


図-1 新しい脱型時期判定システムのイメージ

気量1%の増加によって圧縮強度は4~6%減少する¹³⁾ことは硬化コンクリートの基本性質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。

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が微妙に変更されている。

そこで、新しい脱型時期判定システムの導入にあたっては、まず、各プラントにおいて同じレディミクストコンクリートの夏用配合、標準配合、冬用配合それぞれに対して試験練りを行った。

新しい脱型時期判定システムの手順は以下のとおりである。

- ①コンクリート練り上がり温度の目標を夏用配合では35℃、標準配合では20℃、冬用配合では5℃とし、各ケースでコンクリート練り上がり温度、空気量を測定する。若材齢時に行う圧縮強度試験用の供試体採取し、養生中の積算温度を測定する。
- ②目標の脱型強度を超える範囲まで適当な材齢で圧縮強度試験を行う。
- ③積算温度とコンクリート練り上がり温度(=打込み時のコンクリート温度)と空気量の3つをパラメータとする圧縮強度推定式を求める。
- ④覆工のセントル棲部付近に高さを変えて温度センサーを複数個設置する。
- ⑤パソコンに圧縮強度推定式を組み込み、積算温度を自動で取り込むように設定する。
- ⑥打込み時のコンクリート温度と空気量を手動で入力し、3つのパラメータから覆工コンクリートの圧縮強度の発現状況をモニタリングする。
- ⑦推定される圧縮強度が脱型目標強度を超えることを確認して脱型時期の判定を下す。

(2) 新しい脱型時期判定システムのポイント

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、最後が天端部となる。つまり、棲側天端部は脱型時に最も若材齢となる部位である。

覆工コンクリート施工の場合には、セントルの脱型と同時に支保も移動してしまう。そのため、脱型時期が早過ぎれば、天端部の強度不足が原因で覆工コン

リートに自重によるひび割れが発生する可能性がある。

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いる(図-2参照)¹⁴⁾。覆工コンクリートの強度発現は同一断面で一様ではなく、最後にコンクリートの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。

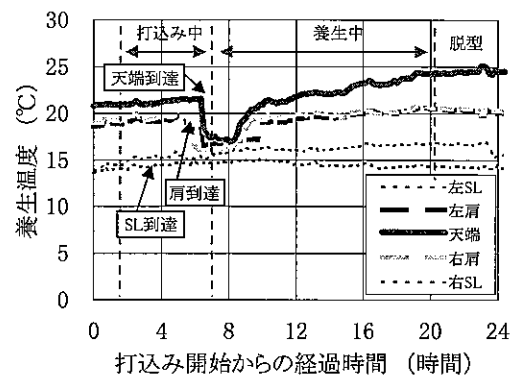


図-2 温度測定結果の一例

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、最も強度発現が遅い部位を対象とする必要がある。以下のポイントを押さえる必要がある。

- ①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。
- ②同一断面で高さ方向を変えた複数個所に温度センサーを設置する必要がある。

(3) 新しい脱型時期判定システムの特徴

新しい脱型時期判定システムの特徴は、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、具体的には以下に示すとおりである。

(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することができる。

(b) 打込み温度と空気量もパラメータ

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が及ぼす影響や、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、精度よく覆工コンクリートの圧縮強度を推定することができる。

(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、モニタリングするため、脱型目標強度に達する前に脱型する危険を回避でき、構造上の安全と長期的な品質を確保することができる。

(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必要に応じて脱型時期の調整や作業の効率化を図ることができる。

4. 新しい脱型時期判定システムの導入

(1) 通年施工するトンネルでの導入

新しい脱型時期判定システムが初めて本格導入された¹⁵⁾のは、中国地方で施工された自動車専用道路（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 1170.8 m）である。

このトンネル工事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（全 118BL）に通年施工で行われた。

コンクリート練り上がり温度の高くなる夏季には、スランブ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た。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た。その結果、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かと当初考えられた。

全区間のうち、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。養生条件は通年一定ではなく、9 月～10 月まで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。

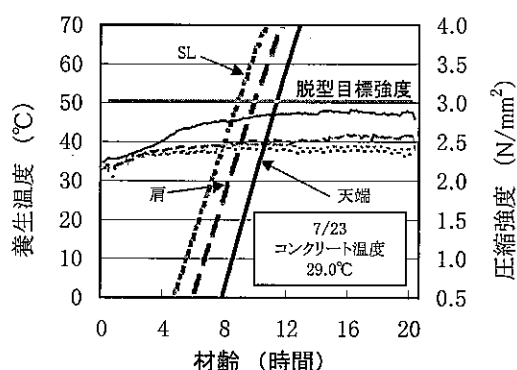
全区間で覆工コンクリートの圧縮強度が脱型目標強度 3.0 N/mm^2 以上になったことを確認した後に脱型作業を行った結果、脱型時の強度不足が原因と思われるひび割れ等の欠陥は認められなかった。

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 3.0 N/mm^2 を得るため

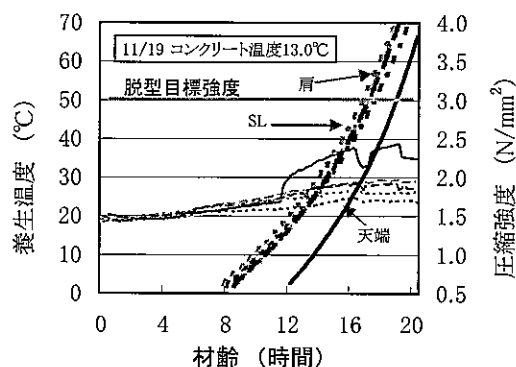
に養生温度を管理した結果、夏季から秋季においては最終打込み箇所である天端部の強度発現が最も遅かった（図—3、4 参照）。

一方、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—5 参照）。

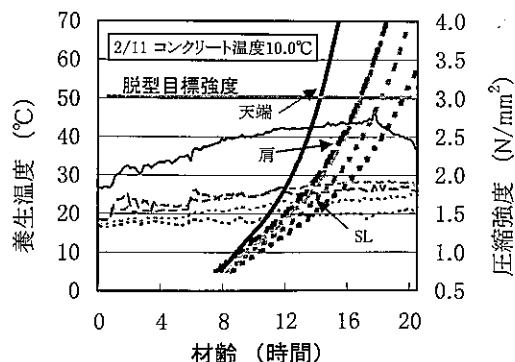
脱型までに必要な養生時間は 11 時間 20 分～19 時間 30 分まで変動したが、6 月～10 月までの平均 13 時間 50 分に対して 11 月～5 月までの平均は 15 時間 30 分と大きく変わることはなく、冬季でも養生温度が高く保たれていた影響の表れと考えられた。通年平均では 14 時間 50 分程度となり、2 日に 1 回の打込み工程に支障をきたすことはなかった。



図—3 Ⅰトンネルでの実績（夏 7/23 施工）



図—4 Ⅰトンネルでの実績（秋 11/19 施工）



図—5 Ⅰトンネルでの実績（冬 2/11 施工）

(2) 冬季施工するトンネルでの導入

東北地方で施工されたダム付替道路新設区間のトンネル工事現場（仮称 T トンネル：坑門工以外の全区間 423.0 m）である。

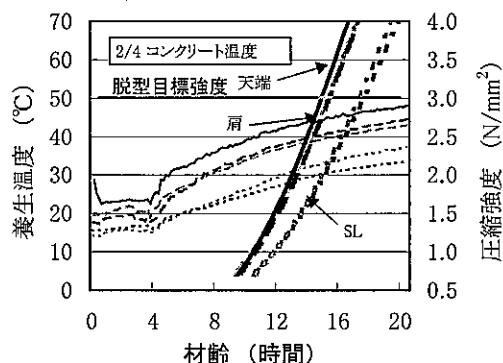
このトンネル工事における覆工コンクリートの打込みは覆工コンクリートの打込み期間は平成 22 年 12 月～平成 23 年 5 月の期間（全 40BL：東日本大震災の影響で 3 月予定が延期）で行われた。

全区間のうち、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。

冬季の施工でもあり、養生条件は 4 月までジェットヒーターを最大 6 台使用した給熱養生が行われた結果、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。

ジェットヒーター等を使用した養生条件では、暖気が天端部に集中したことにより天端部の強度発現が早く、脱型目標強度に達するまでの時間が最も短かった（図—6 参照）。

脱型までに必要な養生時間は 14 時間 40 分～22 時間 10 分と変動したが、通年平均は 16 時間 40 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。



図—6 T トンネルでの実績（冬 2/4 施工）

5. おわりに

本稿で報告した新しい脱型時期判定システムは、T-JUDG (Tunnel-JUDGement of removal time on site) システムとして開発された。このシステム（以降、T-JUDG システムと称す）が導入されたトンネル工事現場は、平成 23 年 9 月現在で 6 件である。

T-JUDG システムの導入により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、仮に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、施工の都合で脱型目標強度に達する前に脱型してしまう可能性がなくなった結果、構造上の安全と

覆工コンクリートの長期的な品質を確保することができた。

今後の展開として、積算温度管理の概念を用いた T-JUDG 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の保証に貢献することができるものと考えられる。

JICMA

〈参考文献〉

- 1) 壹岐直之：トンネル覆工コンクリートにおける湿潤養生＝プラスチックフィルムを用いたトンネル覆工コンクリートの長期養生＝，建設機械，Vol.47，No.6，pp.47-51，2011.6
- 2) 椎名貴快，吉永浩二，佐藤幸三：覆工コンクリート養生 温めく・うるおい＝保温・断熱性の高い中空構造板を用いた覆工養生＝，建設機械，Vol.47，No.6，pp.67-72，2011.6
- 3) 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
- 4) 宇野洋志城，弘中義昭：若材齢コンクリートの強度推定法，コンクリート工学会論文報告集，Vol.12-1，pp.225-230，1990.6
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 高取秀和，川崎元，鈴木昌次，綾野克紀：PT 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
- 8) 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
- 9) 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：引ひき傷法），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.241-242，2007.8
- 10) 逃尾孝一，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
- 11) 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
- 12) 日本コンクリート工学会：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

〔筆者紹介〕

宇野 洋志城（うの よしき）
佐藤工業㈱
技術研究所
主任研究員



京免 継彦（きょうめん つくひこ）
佐藤工業㈱
土木事業本部 技術部
機電課長

