型枠存置期間の長期化による 覆エコンクリート品質向上効果の解析的検討

手塚 康成¹・玉村 公児²・村上 浩次³・西川 航平⁴・井関 隆文⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部(〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11) E-mail: tezuka-yasunari@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30) E-mail: tamamura@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部(〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30) E-mail: koji-murakami@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 西鉄雑餉隈駅付近連立交差JV工事事務所 (〒812-0878 福岡県福岡市博多区春町2-4-13明永ビル107号室)

E-mail: nishkohe@kajima.com

5正会員 鹿島建設株式会社 富山ラインA-4工区統括工事事務所 (〒939-0729 富山県下新川郡朝日町舟川新字舟川475-1)

E-mail: isekita@kajima.com

一般的に、トンネル覆工の脱型時の強度、時期は、コンクリートの自重を支えるのに必要な強度を確保するという観点で設定されている。アーチ構造物であるトンネル覆工は圧縮応力が卓越するため、一軸圧縮強度で2~3N/mm²程度、型枠存置期間は12~20時間がその目安とされている。トンネル供用後の覆工コンクリートのひび割れが問題になっているが、最近の研究では、自重と強度の関係以外の、初期の温度応力や坑内環境等にその発生原因を求めているものが多く、それらに対応した新技術も開発・適用されている。著者らは、トンネル覆工の長期的な品質の確保における施工時の型枠存置期間を検討のテーマとした。セントルの構造が持つ若材齢コンクリートの自重保持効果に加え、保温性や保湿性といった効果に着目し、型枠存置期間の長短が、初期のひび割れ発生にどの程度影響するかを温度応力解析により評価した。

Key Words: lining concrete, stripping time, thermal stress analysis, thermal cracking index

1. はじめに

トンネル標準示方書第127条では,覆エコンクリートの型枠の取外しについて,「型枠は,打ち込んだコンクリートが必要な強度に達するまで取り外してはならない.」とある¹⁾. また,その解説文には,一般的な脱型時間はコンクリート打ち込み後12~20時間,圧縮強度の目安は2~3N/mm²という値が示されており,これより早い時期,小さい強度での脱型や,特殊構造の場合に,別途計算による検討が必要となっている.この,コンクリート打ち込み後12時間以内,2N/mm²以下での脱型という状況はかなり特殊な条件であるため,通常は,特段の計算をすることなく,打設の翌日に上記時間の経過と強度を確認して,脱型することが一般的になっている.

一方で、覆エコンクリートの問題として、長い供用期間中におけるひび割れの進展と、それに伴うコンクリートブロックの剥落や漏水がある。これらは大規模な変状は伴わないまでも、特に道路や鉄道トンネルにおいては、安全な供用を妨げることに繋がる。そのため、最近では覆エコンクリートの品質を長期にわたって確保するための、材料、締固め技術、養生技術、評価技術等の研究・開発が各所でなされている².

覆工のひび割れの原因として、外力の作用以外の、材料的な問題に、締固めの精度などの施工上の問題、配合、乾燥収縮なども考えられるが、覆工コンクリート施工時・施工直後のコンクリートの硬化過程で生じる、温度変化とそれに伴う体積と応力の変化も1つの要因としてあげることができる。

著者らは、温度応力解析により、若材齢の覆エコンク リートの温度・応力場を再現し、型枠存置期間が、初期 のひび割れ発生に与える影響を検討することとした³.

2. 温度解析

今回の検討では、コンクリート打ち込み直後から材齢にして、5日程度までの極めて若い材齢期間のコンクリートの挙動に注目した。解析を行うに際しての必要な物性値・条件設定については、原則は既往の研究を参考にしたが、若材齢コンクリートかつ、トンネルという特殊な条件下であることから、一部の物性については、室内試験と再現解析を用いて設定することとした。この章では、解析に必要な熱伝達率の設定を行うために実施した、予備的な温度解析について述べる。

(1) 熱伝達率の設定

温度解析において熱伝達率は境界条件の一つであり、解析結果にあたえる影響が大きい.一方でこの値は、物質固有のものではなく、風等の環境条件に依存するため、室内試験で設定することが難しい.そのため、通常の解析では表-1に示した参考値をそのまま使用する事例が多い⁴.この場合、セントルのようなメタルフォームの熱伝達率は、コンクリート露出面と同じ14W/m²℃であり、保温効果を見込めないことになる.つまり、脱型前後で温度変化の勾配は変わらないということである.しかし、後述する現地計測結果において、メタルフォームであっても、脱型前後に明確な温度勾配の変化を確認できた.そこで、本検討では参考値を使用せず、実測値の再現解析により見かけの熱伝達率を求めることとした.

表-1 修正熱伝達率の参考値

No.	養生方法	η W/m²°C
1	メタルフォーム, 散水(湛水深さ10mm未満)	14
2	湛水(湛水深さ 10mm 以上 50mm 未満), むしろ養生を含む	8
3	湛水(湛水深さ50mm以上100mm未満)	8
4	合板	8
5	シート	6
6	養生マット, 湛水+養生マット, 湛水+シートを 含む	5
7	発泡スチロール(厚さ50mm)+シート	2
8	エアバッグ(シート付き);2枚,3枚,4枚	6,4,2
9	コンクリート・地盤・岩盤の露出面	14

(2) Tトンネルでのデータの取得

Tトンネルでは、覆エコンクリート施工時に図-1に示す位置に埋設計器を設置し、コンクリート打設中から打設後にかけてのコンクリート温度、周方向のひずみの計測を行った。計測は、コンクリート打設完了後、18時間型枠を存置してから脱型(セントルダウン)したケースと、66時間存置したケースの2回行った。このうち、66時間存置のケースについて、天端に設置した2点の計器で得られた計測値を図-2に示す。図より、内空側のコンクリート温度は、脱型後に温度の低下勾配が変化していることが確認できる。これに対し、地山側の計器では、勾配の変化はあるものの、内側に比べて変化が小さいことが確認できる。

(3) 解析モデル

図・3に検討で使用した解析モデルを示す.解析は2次元の半断面モデルで行った.物性は①覆エコンクリート,②吹付コンクリート,③地山の3つとした.また,覆工内空壁面は温度固定条件とした.表・2に各物性の温度解析の入力値を示す.

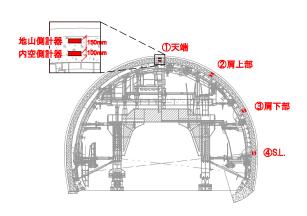


図-1 計器設置位置

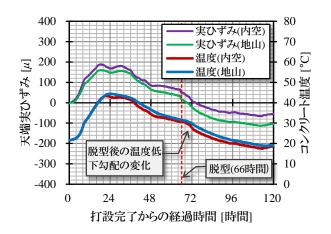


図-2 コンクリート温度,ひずみ計測結果

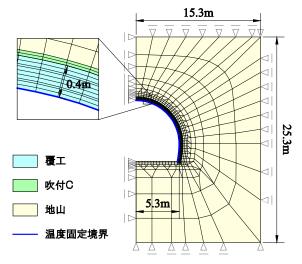


図-3 解析モデル

表-2 各物性の入力値

	熱伝導率	密度	比熱	初期温度
	[W/m°C]	[kg/m ³]	[kJ/kg°C]	[°C]
覆工	2.7	2,382	1.15	22.8
吹付け C	2.6	2,300	1.05	18
地山	3.5	2,300	0.79	18

(4) 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇特性は式(1)によるものとしたが、各パラメータは、断熱温度上昇特性試験により設定した.

$$Q(t) = Q_{\infty} \left(1 - e^{-r(t - t_0)^S} \right) \tag{1}$$

 $Q_{\infty}=51.5$ 終局断熱温度上昇量(°C)

r = 1.55 温度上昇速度に関する係数

 $t_0 = 0.21$ 発熱開始材齢(日)

S=1.2 パラメータ

(5) 坑内温度

坑内温度は**図-3**の温度固定境界において,全解析時間で18℃一定となるように設定した.

(6) 温度解析の結果

再現解析により得た見かけの熱伝達率を表-3に示す. また,この値を決定したケースの再現解析結果と実測値の比較を図-4(内空側計器),図-5(地山側計器)に示す.温度低下過程で,5℃程度の開きがあるものの,初期の温度の立ち上がり,脱型後の温度低下勾配の変化を,2つの熱伝達率の使い分けで再現することができた.

解析結果と表-1の比較より、型枠存置期間中は、保温効果的には養生マットと同程度であることが解った.一方で、脱型後は露出面の参考値と比べ倍以上の値になった.今回は施工時期がトンネル貫通後であり、通常より気流の影響が大きかったためと判断した.

表-3 再現解析により求めた見かけの熱伝達率

型枠存置期間中	脱型後
5 W/m ² °C	30 W/m ² °C

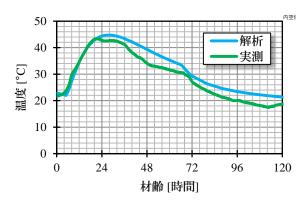


図-4 温度解析結果① (内空側計器)

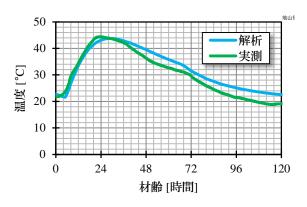


図-5 温度解析結果② (地山側計器)

3. 温度応力解析

前章において、熱伝達率の設定を行ったが、温度応力解析を実施するためには、力学的なパラメータについても設定する必要がある. これらも、実施工で使用したコンクリートと同じ配合の供試体により物性を得た.

(1) 線膨張係数の設定

線膨張係数は、室内試験によって求めた. 図-6に温度変化量と温度ひずみの関係を示す. この図をもとに、各段階での入力値を設定した.

(2) 圧縮強度の設定

圧縮強度 f'_c は、試験結果より積算温度の関数として入力した。積算温度と圧縮強度の関係を式(2)、式(3)に示す。

長期
$$f_c' = 35.799 \log_{10} M - 96.701$$
 (2)

短期
$$f_c' = 12.244 \log_{10} M - 11.665$$
 (3)

M : 積算温度

(3) 引張強度の設定

引張強度 $f_{tk}(t')$ は、試験結果をもとに圧縮強度の関数として以下の式で設定した。

$$f_{tk}(t') = 0.169 \times f_c'(t')^{0.78}$$
 (4)

(4) ヤング係数の設定

ヤング係数 $E_e(t')$ は、試験結果をもとに圧縮強度の関数として以下の式で設定した。

$$E_{\rho}(t') = 0.73 \times 5829.6 \times f_{c}'(t')^{0.41}$$
 (5)

(5) 乾燥収縮量の設定

乾燥収縮量も、材齢との関係を試験により求めた.練り混ぜ後の型枠存置期間を、18時間と66時間おいた供試体により、コンクリートの長さ変化試験を実施した.試験により得られた、材齢と乾燥ひずみの関係を図-7に示す.

(6) 地山・吹付コンクリートの力学物性

地山と吹付コンクリートは等方弾性体でモデル化した. 表-4に弾性係数の入力値を示す.

(7) セントルダウンのモデル化

セントルダウン(脱型)のモデル化は、型枠養生中は自重を作用させず、セントルダウンの時点で自重を作用させる方法とした 5 .

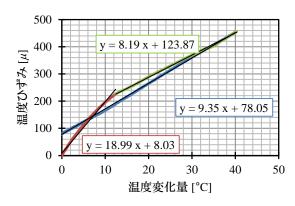


図-6 線膨張係数

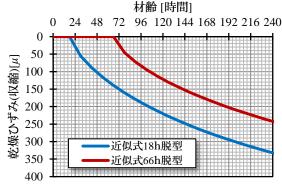


図-7 乾燥収縮ひずみ

(8) 外部拘束条件のモデル化

通常のトンネル工事では、吹付コンクリートと覆工コンクリートの間には防水シートが存在する。本検討では、 圧縮方向のみ応力を伝えるバネ要素でモデル化を行った。 バネ要素の設定条件を表-5に示す。

(9) 解析ケース

解析ケースを表・6に示す.解析は、以下の2ケース実施し、型枠存置期間の長短による影響を確認する.

(10) 解析結果

解析により得た,覆工天端要素の「温度」,「周方向の応力」,「周方向実ひずみ」,「周方向温度ひずみ」,「周方向温度ひずみ」,「周方向弾性ひずみ」,「引張強度」,「ひび割れ指数」の経時変化をそれぞれ図-8に示す.

打設完了後のコンクリートは、水和反応による温度の 上昇にともなって、正の温度ひずみ(膨張)が発生する. ただし、外側を吹付けコンクリートと地山で拘束されて いるため、実ひずみの増加は抑えられ、結果的に負の弾 性(圧縮)ひずみを貯めた状態になる. この状態で型枠存 置期間18時間のケースは、脱型により自重載荷、熱伝達 率の変化による冷却、乾燥が同時に開始される. まず自 重載荷により、即時的に引張応力が発生する、続いて内 空側からの冷却により、内部の温度上昇を打ち消すよう に温度の低下が始まり、温度ひずみが収縮側に転ずる. また、脱型前に蓄積された弾性ひずみは、逆向きの膨張 側に生じ、全体としては引張の応力が発生する. 乾燥も、 負の体積ひずみを発生させるので, 正の弾性ひずみを伴 い, 引張応力が発生する. 今回のモデル化では外部拘束 の影響を小さくしているが、地山側の要素は着目した内 空側の要素と比べ、温度低下が遅いのため、内部拘束が 発生している.

表4 地山・吹付コンクリートの弾性係数

材料	弹性係数 [N/mm²]	
地山	2,000	
吹付けコンクリート	28,200	

表-5 バネ要素設定条件

圧縮方向弾性係数[N/mm²]	厚さ[mm]
10	1.0

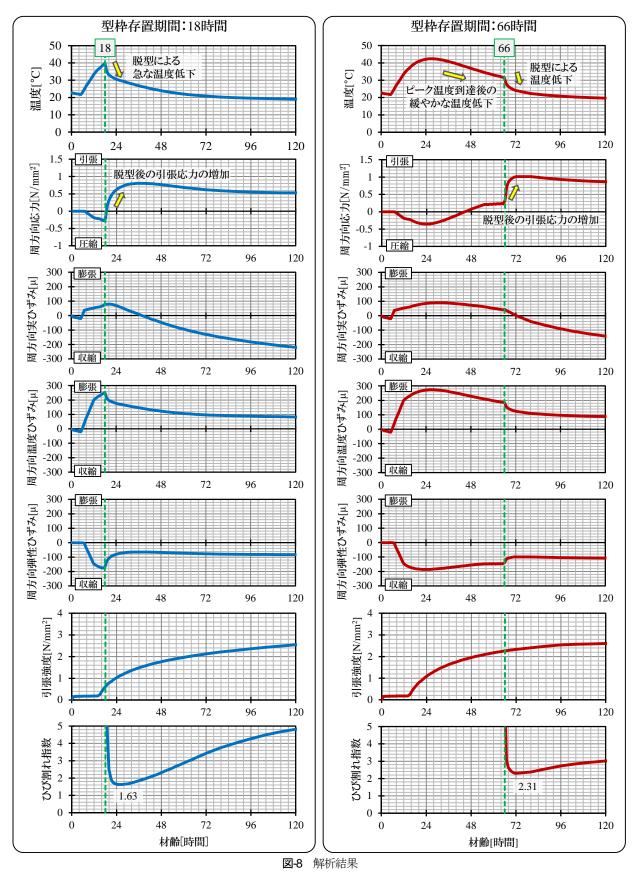
表-6 解析ケース

解析ケース	型枠存置期間[時間]	
Case-1	18	
Caes-2	66	

一方,66時間脱型のケースでは、型枠存置期間中にピーク温度に達し、脱型前から開始する温度低下にともなって、引張応力が発生する.脱型後は、18時間脱型のケースと同様に、温度変化、自重、乾燥により引張応力が

発生している.

18時間と66時間のケースで、タイミングの違いはあるものの、最初に圧縮側に働いた応力は、温度低下と脱型により、引張側に転じていく、両ケースの発生応力の最



大値と、その値が発生する材齢を表-7に示す。応力の最大値は、18時間脱型の方が小さくなったが、この時点で既に0.8N/mm²の引張強度が発生している。この値を式(4)により圧縮強度に換算すると7.3N/mm²となり、一般に脱型強度の目安としている2N/mm²の圧縮強度は、危険側の値であることが解る。

引張応力と引張強度の比であるひび割れ指数を比較すると、66時間脱型のケースは、応力の最大値は大きくなるものの、その間での強度の増進があるため、値は2.31となり、18時間の1.63よりも高くなった。

(11) ひび割れ発生確率による評価

ひび割れ指数から求めたひび割れ発生確率のプロットを図-9に示す.型枠存置期間18時間のケースの8.27%に対し、66時間のケースでは1/4以下のの1.92となり、構造物の「ひび割れを防止したい場合」の目標値である5%を下回ることが確認できた4.

4. 脱型時間の影響検討

この章では、型枠存置期間をパラメータにした解析を 行い、必要なひび割れ指数を得るための、最適な養生期 間の検討を行うこととした.

(1) 乾燥収縮量の一般化

前章の検討では、型枠存置期間を18時間と66時間のそれぞれの状態を想定した、2回の室内試験結果から乾燥収縮量を設定していたが、今回は型枠存置期間を変えた

表-7 引張応力最大値と発生材齢

	* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	
型枠存置期間	引張応力最大値	発生材齢
至件什直别间	$[N/mm^2]$	[時間]
18 時間	0.80	37
66 時間	1.01	80

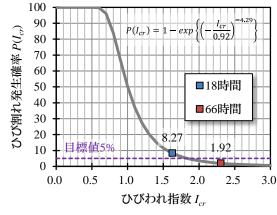


図-9 ひび割れ発生確率

ケースを複数実施するため、乾燥収縮量 $\epsilon'_{cs}(t,t_0)$ は以下の式で設定した 0 . 坑内の相対湿度は60%とした 7,8 .

$$\begin{split} \varepsilon'_{CS}(t,t_0) &= [1 - \exp\{-0.108(t-t_0)^{0.56}\}] \times \varepsilon'_{sh}(6) \\ \varepsilon'_{sh} &= -50 + 78\left[1 - \exp\left\{\frac{RH}{100}\right\}\right] + 38\log_e W \end{split}$$

$$-5\left[\log_e\left(\frac{V/S}{10}\right)\right]^2\tag{7}$$

 $\varepsilon'_{CS}(t,t_0)$ 材齢 $_{t_0}$ から $_{t_0}$ までの収縮ひずみ $_{t_0}$ ($\times 10^{-5}$)

 ε'_{sh} 収縮ひずみの最終値($\times 10^5$)

RH = 60 相対湿度 W = 170 単位水量

V/S = 300 体積表面積比

t₀ 乾燥開始時の有効材齢(型枠存置期間)

(2) 解析結果

型枠存置期間とひび割れ発生確率の関係を図-10に示す。全体としては、型枠存置期間が長くなると、ひび割れ発生確率が低下する右下がりの曲線となった。しかし、24時間未満では、全体と逆の傾向を示していることが分かる。一般に材齢が短くなることで、ひび割れ発生確率が低下する状況は考えにくい。解析結果がこのような傾向を示した原因として、材齢24時間未満、圧縮強度にして1~2N/mm²の範囲は、引張強度やヤング係数の推定式が想定している範囲よりも、かなり小さい値であることが考えられる。

この図より得た知見を以下に示す.

- ひび割れ発生確率5%以下に抑えるためには、型 枠存置期間は44時間以上必要である.
- 型枠存置期間が長くなると、ひび割れ発生確率 の低減効果が小さくなる。

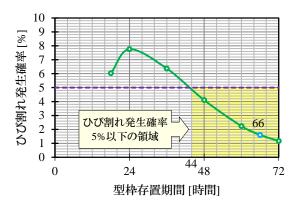


図-10 型枠存置期間とひび割れ発生確率の関係

5. まとめ

(1) 熱伝達率の設定

温度応力解析に用いる熱伝達率は、施工時の計測データを用いた再現解析により、型枠存置期間中で5 W/m²℃、脱型後で5 W/m²℃の値を得た.

(2) 型枠存置期間 18 時間と 66 時間ケースの比較

型枠存置期間を長くとった66時間のケースでは、18時間のケースに比べ、ひび割れ発生確率が約1/4に低下し、ひび割れを発生させないための目標値である5%を下回った。

(3) 型枠存置時間の影響

型枠存置期間をパラメータにした解析を実施した. ひび割れ発生確率5%未満を満足するための, 最短の型枠存置期間は44時間であった.

今回の検討は、入力情報が多数ある温度応力解析において、代表的な入力値の多くを室内試験より設定した. その点において、あらゆる条件の覆エコンクリートに対して、普遍的に言えるわけではないが、型枠存置期間を通常より長くとることで、初期のひび割れ発生確率が低下することを、解析的に確認できた.

今後は、若材齢のコンクリートの挙動を、さらに正確に再現できるよう解析手法の改善に努めていく。また、その手法をもとに、様々な条件の覆エコンクリートで最低限満足すべき型枠存置期間を求め、重要な社会インフラであるトンネルの品質向上に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会:トンネル標準示方書 2006年制定 山岳 工法・同解説、2007.
- 2) 水野希典,大津敏郎,岩尾哲也,増田弘明:覆エコンクリートの長期耐久性確保に関する検討,トンネル工学報告集 Vol.24. I-2, 2014.12.
- 3) 西岡和則,手塚康成,坂井吾郎,松本修治,村上浩次:新型テレスコピックセントル工法を用いて66時間型枠を存置する効果について,トンネル工学報告集 Vol.24, I-5, 2014.
- 4) 日本コンクリート工学協会:マスコンクリートのひ び割れ制御指針2008, 2008.
- 5) 高山博文,増田康男,仲山貴司,植村義幸, Narentom YINGYORGRATTANAKUL,朝倉俊弘:トンネル覆エコンクリートに生じるひび割れの発生メカニズムに関する実験的研究,土木学会論文集F Vol.66 No.1, pp.132-145, 2010.3.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 2007年制定 設計編, 土木学会, 2008.
- 7) 越智修,登坂敏雄,北川博通,奥利之,工藤暢章: NATMトンネル覆工のひび割れ発生に関する施工実 態調査,トンネル工学報告集 Vol.14, pp.287-294, 2004.11.
- 8) 馬場弘二,伊藤哲男,城間博通,宮野一成,中島 浩,谷口裕史:施工中のトンネル坑内環境と覆エコ ンクリートの湿度変化に関する研究,土木学会論文 集 No.742/VI-60, pp.27-35, 2003.9.

(2015.8.7 受付)

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF STRIPPING TIME ON TUNNEL LINING CONCRETE QUALITY

Yasunari TEZUKA, Koji TAMAMURA, Koji MURAKAMI, Kohei NISHIKAWA and Takafumi ISEKI

Generally, the strength of tunnel lining concrete at stripping time is set to exceed the strees caused by self-weight. Therefore, The standard of strength is 2-3 N/mm² and of stipping time is 10-12 hours after placing concrete. Crack of tunnel lining concrete in service becomes a problem. Recent stydies have shown that early thermal steress of concrete and environment in tunnel are principal causes of cruck. Authors have considered the effect of stripping time on quality of tunnel lining concrete. We evaluate the influence of stripping time on early concrete cruck by thermal stress analysis with paying attention not only the role as support but also the curing effect of centre.