

# 覆工コンクリートの 長期耐久性確保に関する検討

水野 希典<sup>1</sup>・大津 敏郎<sup>1</sup>・岩尾 哲也<sup>1</sup>・増田 弘明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail:m.mizuno.aa@ri-nexco.co.jp

トンネル覆工の維持管理上の問題点として、覆工表面から落下するコンクリート片のはく落による交通障害がある。このはく落の原因となるひび割れの発生・進展のメカニズムを把握することは、既設覆工に発生しているひび割れ状況からはく落の原因となるひび割れの特定や、建設においても、はく落の原因となるひび割れ発生を抑制する施工方法の検討にも活用できると考える。本稿ではひび割れ発生・進展のメカニズムを把握する解析モデルの作成にあたり、基礎データを得るため、現在実施している室内試験における途中経過と今後の展開について報告する。

**Key Words :** *Lining Concrete, Cracks, Inspection, Curing Method, Compacting Method, Semi Self-compacting Concrete for Tunnel Lining*

## 1. 研究開発の目的

道路トンネル覆工の維持管理上の問題点として、覆工表面から落下するコンクリート片のはく落による交通障害がある。このはく落の原因として考えられるのが、覆工表面上のひび割れと覆工内部に入るひび割れの関係である。本来、これらはく落の原因となるひび割れに着目し、詳細点検（打音点検）時にコンクリート片を除去することが的確で効率的な点検および応急措置となるのだが、それを現地で判断することが困難なことから、覆工全体を近接目視および打音点検により対応しているのが現状である。そこで本研究は、ひび割れ発生・進展のメカニズムを把握する解析モデルを用いて、既設覆工に発生しているひび割れ状況から、はく落の原因となるひび割れを特定し、点検時に注視すべきポイントを抽出するひび割れ評価方法の確立を目的とする。また、解析モデルを用いれば、建設においても覆工のひび割れ発生を抑制する施工方法の検討にも活用できると考え、初期に発生するひび割れを抑制する施工方法を確立し、覆工コンクリートの長期耐久性の確保も図るものである。

本稿では、ひび割れ発生・進展のメカニズムを把握する解析モデルの作成にあたり、基礎データを得るため、現在実施している室内試験における途中経過と今後の展開について報告する。

## 2. ひび割れ発生・進展に影響する施工内容整理

ひび割れ発生・進展のメカニズムを把握するためには、はく落の原因となる有害なひび割れの発生・進展へ影響を及ぼす施工内容を整理する必要があり、以下の内容に着目した。

### (1) 養生方法（早期脱型含む）の違いによる影響

トンネルの覆工コンクリートは、坑内の温度が一定で、ある程度湿潤状態であったことから、打設完了から18時間程度で脱型が行われてきた。しかしながら、すべてがこのような環境下で施工が行われていないのが現状である。また、作業環境改善のための換気設備の充実により坑内が乾燥状態となっているなど、覆工の長期的な耐久性の低下およびはく落を引き起こすひび割れの発生が懸念される。このように養生の違い（養生の有無含む）によって覆工表面付近に生じる収縮ひずみがひび割れ発生へ及ぼす影響について明確にする。また、早期脱型は、覆工の自重により潜在的に発生したひび割れを助長させる可能性があることから、この影響についても明らかにする。

### (2) 打設および締固めによる影響

覆工コンクリートの打設は、特に天端部において吹上げ施工となり妻側に傾斜をつけて横流しする方法が一般

的である(図-1 参照)。この結果、従来の覆工コンクリートでは妻部において粗骨材が少なくモルタル分が多くなることが既往文献<sup>1)2)</sup>等から確認されている。本研究では、粗骨材の含有率の違いによる収縮ひずみ差がひび割れ発生へ及ぼす影響について明確にする。

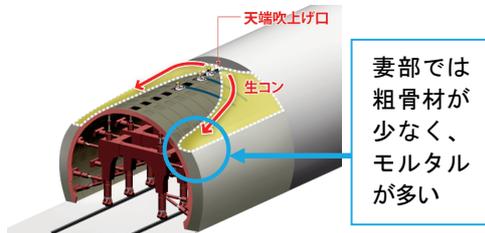


図-1 従来コンクリート打設状況

一方、現在高速道路トンネルで標準的に使用されている中流動覆工コンクリートは、締固めにおいて型枠バイブレータを基本としているが、型枠補強材やヒンジ等をかかわした配置となることから、図-2のように型枠バイブレータの設置間隔が離れ、段階的なコンクリート打設状況において、型枠バイブレータ配置箇所では複数回振動させることとなる。この振動エネルギーの違いから、粗骨材の分布状況が偏る可能性があり、この偏りによる収縮ひずみ差の影響についても明らかにする。

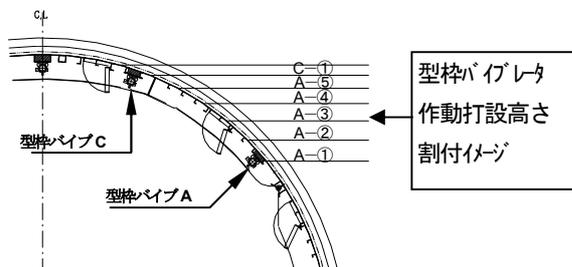


図-2 型枠バイブレータ配置例

### 3. 室内試験計画

ひび割れ発生のメカニズムを把握するために、解析モデルにより、ひび割れ発生を推測する手法を用いる。そのため、2. で述べた施工内容の状態を再現した室内試験を実施し、解析モデル作成に必要な物性値の把握を行う。試験は、従来覆工コンクリート(以下「T1-1」という。)と中流動覆工コンクリート(以下「T1-4」という。)の石炭灰(以下「FA」という。)、石粉(以下「LS」という。)および高性能AE減水剤(増粘剤1液タイプ)(以下「Ad」という。)の配合で行い、打設直後からの各試験データについて収集することとした。

### (1) 養生方法(早期脱型含む)の違いによる試験

養生方法や早期脱型による影響を把握するため、表-1のとおり一般的な型枠脱型(18時間)や養生設備構築(8時間)を考慮し、条件設定を行った。

なお、養生終了後は、室温20℃・湿度60%で一定とし、計測を行っている。

表-1 養生方法種別

記号	種別	養生内容
A	無養生	18時間脱型後 20℃湿度 60%養生 (坑内環境)
B	脱型時期	48時間脱型後 20℃湿度 60%養生
C		72時間脱型後 20℃湿度 60%養生
D	湿度 80%	18時間脱型後→8hr 後に湿度 80%養生 →7日間で養生終了
E	水中養生	18時間脱型後→直後水中養生
F	水中養生 (8hr 後)	18時間脱型後→8hr 後に養生開始 →7日間で養生終了
G		18時間脱型後→8hr 後に養生開始 →28日間で養生終了
H	封緘養生	18時間脱型後 封緘養生 →7日間で養生終了
I	膜養生	乾燥収縮 低減剤 18時間脱型後塗布 →塗布後→養生終了

各試験から収集するデータについては、表-2のとおりである。

表-2 試験から得られる物性データ

供試体 (mm)	物性データ
300×300×300	水分拡散係数
	細孔径分布 (1材齢:水分拡散試験併用)
φ100×200	圧縮強度
	静弾性係数
	直接引張試験
100×100×400	コンクリートの長さ変化 (埋め込みゲージ)
	コンクリートの長さ変化 (ダイヤゲージ方法) 質量変化

### (2) 打設および締固めによる影響把握の試験

打設および締固めによる影響を把握するため、覆工厚を想定した縦300×横300×高さ300 (mm) の供試体を作製し、締固めの際に適正な締固めとなる振動エネルギーの2倍程度で過度に振動を与えることで、厚さ方向に粗骨材の分布状況の変化を与え、供試体の上・中・下段における収縮ひずみ差等を確認した。併せて、決定配合のモルタル分はそのまま、粗骨材のみを変化させた配合により供試体100×100×400 (mm) を作製し、収縮ひずみ等を確認した。

表-3 試験から得られる物性データ

供試体 (mm)	締め条件	物性データ
300×300×300	①適正締め ②過剰締め	圧縮強度 (コア採取)
		コンクリート表面歪み 側面の上, 中, 下で歪ゲージ測定
		粗骨材分布 側面を3分割 上側, 中側, 下側で測定
φ100×200		圧縮強度
100×100×400	①モルタル ②粗骨材 20% ③粗骨材 40% ④粗骨材 60%	コンクリートの長さ変化 (ダイヤゲージ方法)

#### 4. 試験結果

(1) 養生方法 (早期脱型含む) の違いによる試験結果  
試験結果のうち, 本文では, コンクリートの長さ変化 (埋め込みゲージ), 圧縮強度の結果について以下に示す.

a) コンクリートの長さ変化 (埋め込みゲージ)

表-1の各養生方法を行ったT1-4 (FA) を代表として, 収縮ひずみの経時変化を図-3に示し, そのうちの初期の材齢10日までを抽出したものを図-4に示す.

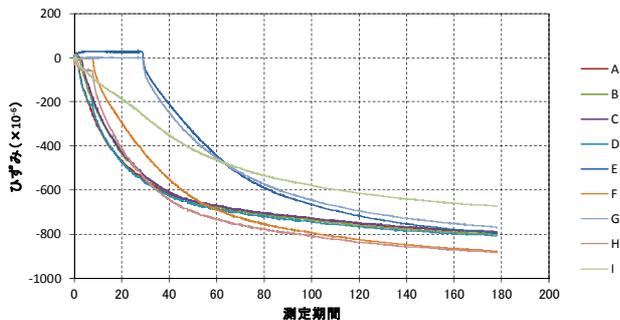


図-3 ひずみと測定期間の関係 (T1-4 (FA) )

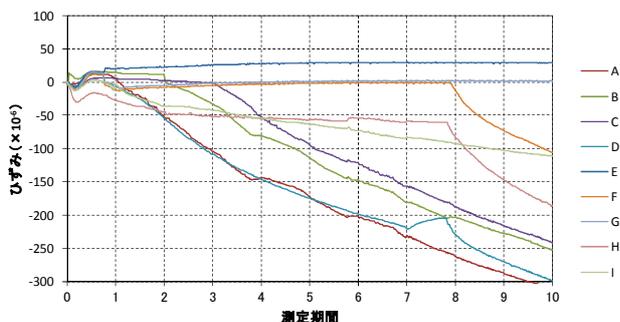


図-4 ひずみと測定期間の関係 (材齢10日まで) (T1-4 (FA) )

また, 脱型時間を変化させた場合の収縮ひずみの経時変化を図-5に示し, そのうちの初期の材齢7日までを抽出したものを図-6に示す. さらに水中養生期間を変化させた場合の収縮ひずみの経時変化を図-7に示す.

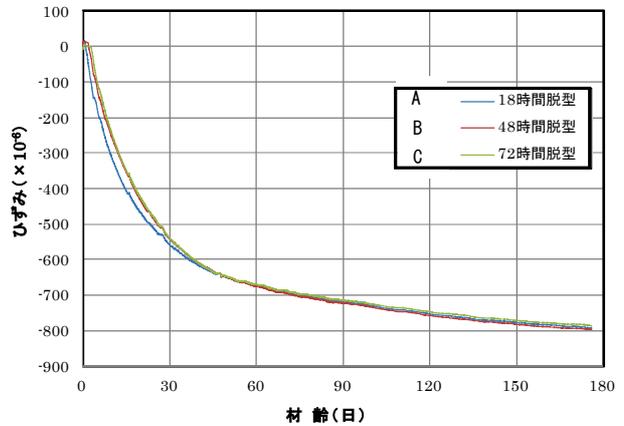


図-5 脱型時間の違いによる収縮ひずみ (T1-4 (FA) )

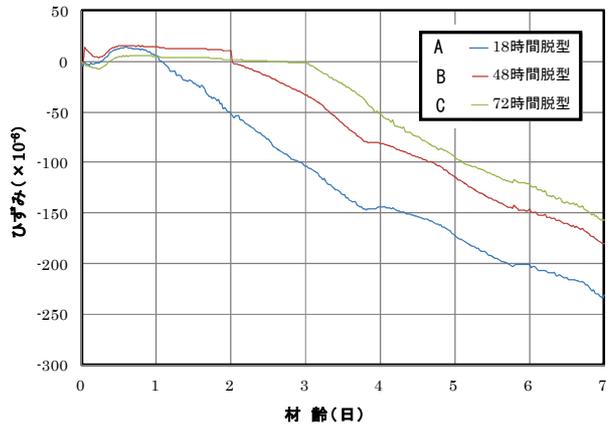


図-6 脱型時間の違いによる収縮ひずみ (材齢7日まで) (T1-4 (FA) )

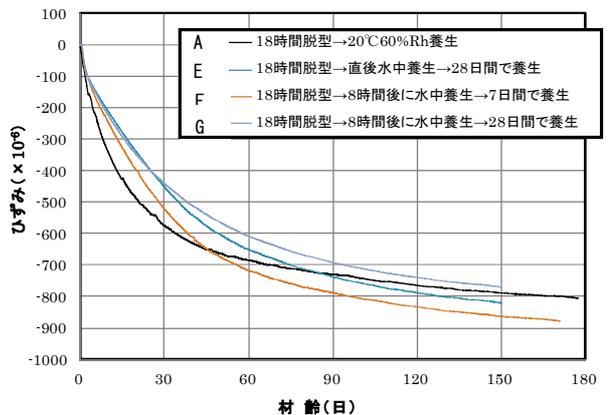


図-7 水中養生終了を初期値とした収縮ひずみ (T1-4 (FA) )

試験結果から, 図-3に示すとおり, 養生の違いによる最終的な収縮ひずみに明確な差はなく, ほぼ同一の値に

収束することがわかった。

しかし、**図-4**に示す初期の収縮ひずみの発生推移には、養生の違いによる差が明確に表れており、水中養生を行ったE、F、Gにおいては、水中養生時は収縮ひずみが発生しない結果となった。一方で脱型後、養生しなかったA、B、Cと湿度80%で養生を行ったDについては、材齢10日時点で $-250 \sim -300 \times 10^{-6}$ の収縮ひずみが発生している。また、本試験では、養生の違いによる収縮ひずみへの影響のほか、型枠脱型時間が収縮ひずみにおよぼす影響についても確認した。結果としては、通常型枠脱型している18時間から時間を延ばしたとしても**図-5**に示すとおり、材齢180日時点での収縮ひずみには、ほとんど差異は認められない結果となった。ただし、**図-6**に示すように、材齢初期に関しては、脱型時間18時間の収縮ひずみは、48時間、72時間と比較して $50 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度大きい結果となった。

水中養生期間の影響については、**図-7**に示すとおり養生期間が7日では、28日と比較して収縮ひずみ増加の傾向は、大きい結果となった。比較として示している水中養生を行っていないA（無養生）については、材齢初期の収縮ひずみ増加の傾向は、水中養生を実施したケースに比べて大きい。材齢60日程度で水中養生の収縮ひずみと同程度となった。

## b) 圧縮強度

圧縮強度は、各養生条件で、試験日の実材齢が異なるため、次の方法で比較した。

- ①製造後18時間の強度を同一と仮定 ( $4N/mm^2$ )
- ②試験を実施した実材齢（養生終了後の材齢1, 3, 28日）に①の1材齢を加え対数近似を行い、すべての養生における材齢28日強度を換算
- ③養生条件E（18時間脱型直後水中養生）を1として、材齢28日強度比を算定  
結果を表-4、**図-8**に示す。

表-4 養生方法による28日圧縮強度比

養生方法 記号	T1-1	T1-4 (Ad)	T1-4 (FA)	T1-4 (LS)
A	0.828 (28.0)	0.833 (37.8)	0.775 (32.3)	0.719 (27.0)
B	0.890 (30.1)	0.865 (39.3)	0.812 (33.9)	0.869 (32.6)
C	0.940 (31.8)	0.940 (42.7)	0.838 (35.0)	0.965 (36.3)
D	0.703 (23.7)	0.664 (30.1)	0.621 (25.9)	0.679 (25.5)
E	1 (33.8)	1 (45.4)	1 (41.7)	1 (37.6)
F	1.083 (36.6)	1.085 (49.2)	1.005 (41.9)	1.108 (41.6)
G	1.066 (36.0)	1.042 (47.3)	1.003 (41.9)	1.047 (39.3)
H	0.963 (32.5)	0.969 (44.0)	0.917 (38.3)	1.009 (37.9)
I	0.922 (32.0)	0.807 (36.6)	0.844 (35.2)	0.876 (32.9)

( ) は材齢 28 日換算強度  $N/mm^2$

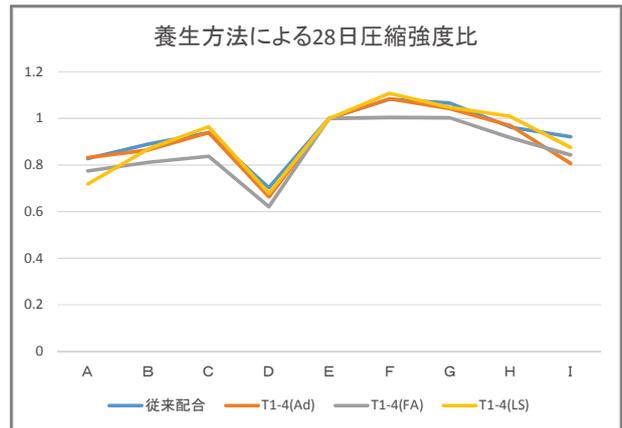


図-8 養生方法による圧縮強度比

圧縮強度試験の結果から、4配合各々において養生条件による材齢28日における強度比は、同様の傾向を示した。養生の比較においては、いずれの配合においても（湿度80%養生）が他の養生より小さく、A（無養生）と同等以下であり養生の効果はみられない。脱型8時間後に7日および28日水中養生したFとGは、Eより強度が大きい結果となり、養生までの8時間程度（養生設備構築）の乾燥状態では、強度に影響はみられない。脱型時間による効果は、A（18時間脱型）に比べて、B（48時間脱型）、C（72時間脱型）と脱型時間が長いほど強度は増加することがわかった。しかし、脱型を長くする効果より、18時間脱型後に7日間封緘養生を行ったHの方が強度増進の効果が大きい結果となった。最後に乾燥収縮低減剤塗布のIについては、効果がばらついている結果となった。

## (2) 打設および締固めによる影響把握の試験結果

本稿では、締固め条件の違いによる粗骨材分布と収縮ひずみの結果と、粗骨材の含有量の違いによる収縮ひずみについて試験結果を以下に示す。

### a) 締固めの違いによる粗骨材分布

適正に締固めた場合と過剰に締固めた場合の粗骨材の分布状況を**図-9**、**図-10**に示す。

なお、T1-4 (FA)、T1-4 (LS)、T1-4 (Ad) の粗骨材分布状況は、同じ結果であったことから、本稿では、中流動覆工コンクリートT1-4 (FA) と従来覆工コンクリートT1-1について示す。

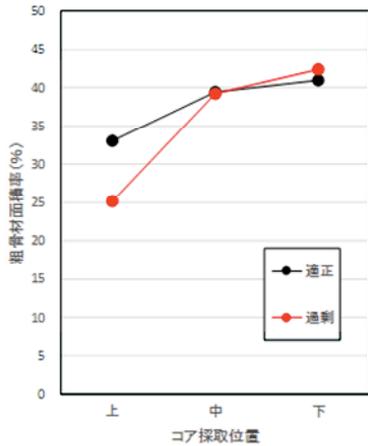


図-9 適正・過剰締固めの粗骨材面積率 (T1-4 (FA))

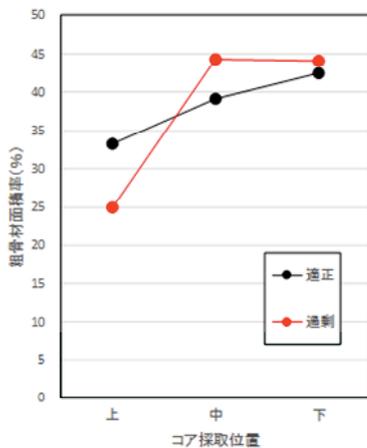


図-10 適正・過剰締固めの粗骨材面積率 (T1-1)

供試体上部では、全配合ともに過剰な締固めでは、粗骨材面積率が減少している。さらに供試体中部から下部に向かって、粗骨材面積率が増加するとともに、過剰締固めの方が粗骨材面積率が適正な締固めよりも大きくなっている。これは、過剰な締固めにより材料分離が生じ、粗骨材が供試体下部に向かって沈降したことがわかる。特にT1-1は、過剰な締固めによる粗骨材の沈降が大きくなる傾向がみられる。このことから中流動覆工コンクリートは、従来配合T1-1よりも材料分離しにくいといえる。

#### b) 粗骨材分布の違いによる収縮ひずみ

適正に締固めた場合と過剰に締固めた場合の粗骨材の分布状況の違いによる収縮ひずみの経時変化の結果について図-11、図-12に示す。

なお、a)の試験結果同様、中流動覆工コンクリートにおいては、収縮ひずみの経時変化についても各配合による差がないことから、本稿では、T1-4 (FA) とT1-1について示す。

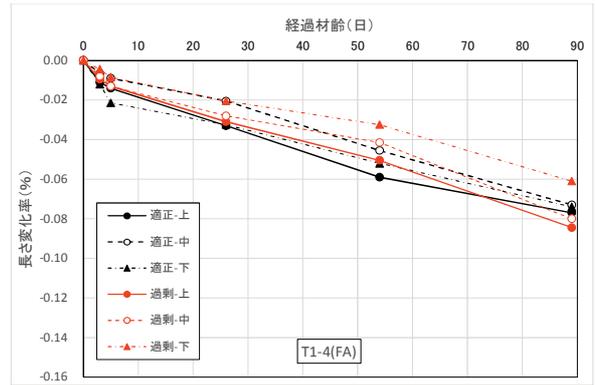


図-11 適正・過剰締固めでの長さ変化率 (表面ひずみ) (T1-4 (FA))

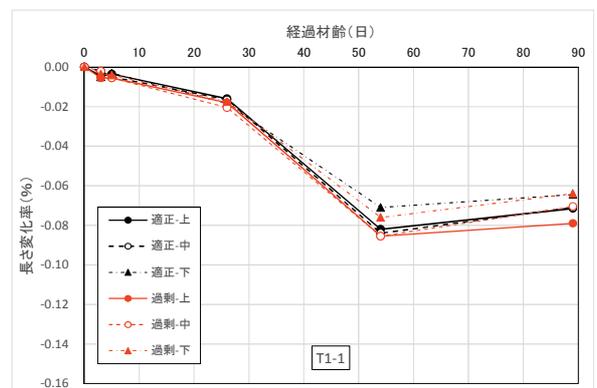


図-12 適正・過剰締固めでの長さ変化率 (表面ひずみ) (T1-1)

中流動覆工コンクリートと従来覆工コンクリートともに適正な締固めと過剰な締固めとの収縮ひずみの顕著な差はなかった。

また、供試体の上部、中部、下部での粗骨材の分布による収縮ひずみの差についても全配合とも顕著な差は確認できなかった。

これらの結果は、過剰締固めで設定した最適な振動エネルギーの約2倍の締固め程度では、中流動覆工コンクリートも従来覆工コンクリートも収縮ひずみ差が生じるような材料分離傾向にはならないといえる。

#### c) 粗骨材の変動による収縮ひずみ

最終の収縮ひずみは、供試体による長さ変化試験で得られた180日までの収縮ひずみの経時変化から回帰して推定した。推定結果を図-13、図-14に示す。

また、図-15、図-16に粗骨材の変動率と収縮ひずみとの関係を示す。粗骨材の変動率とは、決定配合の粗骨材量を100%として表し、粗骨材変動率が-20%であれば、決定配合の粗骨材量の80%しか骨材が含まれていないことを示す。したがって、-100%は全く粗骨材が含まれないモルタルとなる。

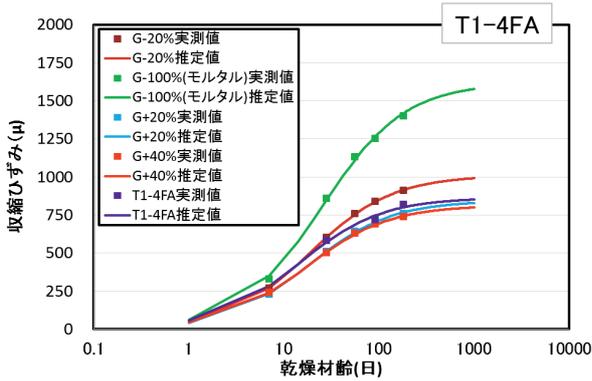


図-13 収縮ひずみの推移 (T1-4 (FA) )

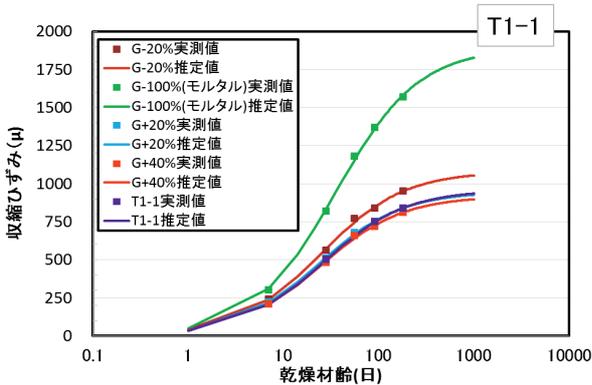


図-14 収縮ひずみの推移 (T1-1)

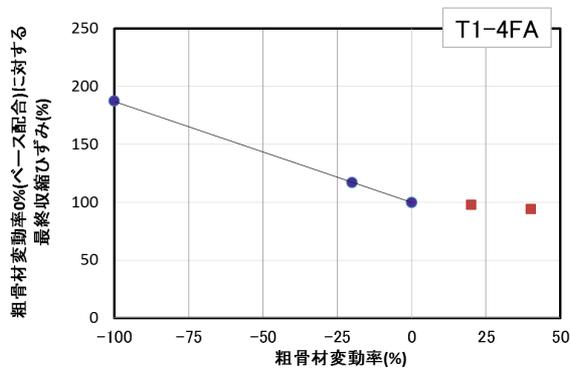


図-15 収縮ひずみの推移 (T1-4 (FA) )

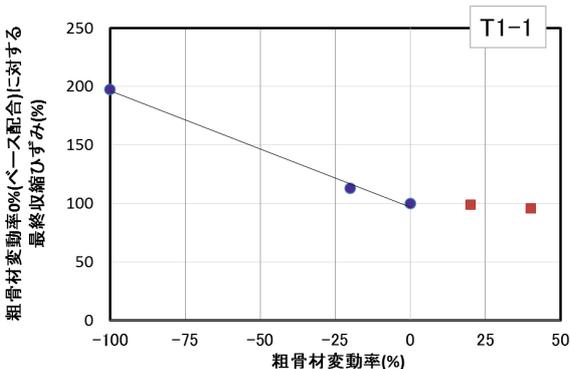


図-16 収縮ひずみの推移 (T1-1)

粗骨材の変動率がマイナス方向に大きくなる（モルタルに近づく方向）に伴って、収縮ひずみが大きくなる傾向がある。一方、粗骨材が多くなる方向である変動率がプラスとなった場合には、収縮ひずみに与える影響は少ない。これらの傾向は、中流動覆工コンクリート、従来覆工コンクリート全ての配合に共通したものであった。また、粗骨材が全くなくなった状態である変動率-100%の収縮ひずみについては、決定配合の約2倍となることがわかった。

## 5. 得られた技術的知見

今回の試験結果で、養生の違いによる初期の収縮ひずみの発生推移には、明確な差が表れており、強度についても差があることがわかった。これにより、初期材齢段階での各種養生方法の違いによるひずみ量とコンクリートの強度発現との関係からひび割れ発生メカニズムが明らかとなることが予見される。また、材料分離においては、粗骨材の含有量が標準配合より少なくなる方向では、収縮ひずみが大きくなることがわかり、粗骨材の分布の違いによる収縮ひずみ差によってひび割れが発生する可能性がある。このことは、覆工コンクリートの施工方法である吹上げ打設・横流しによる粗骨材の分布状況が密接に関係する。この施工方法による粗骨材分布状況の把握と収縮ひずみ差とひび割れ発生との関係を解明することで、ひび割れ発生メカニズムが明らかとなることが予見される。

## 6. 今後の展開

今後の進め方としては、一定条件で行った室内試験より得られた基礎データをもとに、コンクリート中の水和反応および水分移動を考慮した解析モデルにより、実トンネルの施工環境を反映させ、将来の乾燥収縮ひずみ量を予測しひび割れ発生状況の確認を行うこととしている。また、トンネルの施工方法から考えられる覆工背面の吹付けコンクリート等地山側の拘束条件を整理し、解析に反映させていくこととしている。さらに、覆工コンクリート打設による粗骨材の分布状況や早期脱型による影響についても把握していく。

## 謝辞

本研究において、協力いただいている「覆工の長期耐久性確保に関する検討委員会」の皆さまに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 梁俊、丸屋剛、坂本淳、松元淳一、下村泰造、滝沢正徳：  
締固め完了エネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範  
囲の評価方法に関する研究、土木学会論文集 E2 (材料・コ  
ンクリート構造)、Vol.69, No.4, pp.438-449, 2013
- 2) 坂井吾郎、安齋勝、近藤啓二、菅俣匠：特殊な混和剤を用  
いたトンネル覆工用中流動コンクリートの開発、セメント・  
コンクリート、No.787, Sep. 2012

(2014. 9. 15 受付)

## STUDY ON SECURING LONG - TERM DURABILITY OF LINING CONCRETE

Maresuke MIZUNO, Toshiro OTSU, Tetsuya IWAO and Hiroaki MASUDA

An issue in maintain tunnel lining concrete is to prevent flaking, which may fall off and disrupt traffic. By understanding the mechanism of how cracks in the lining, which cause flaking, start and develop, it will be possible to identify cracks in existing linings that may lead to flaking by looking at the state of the cracks. Identifying the characteristics will allow us to select points to pay attention to when inspecting linings. The findings may also be used to study construction methods that suppress cracking. This paper reports on the current status and future prospects of laboratory tests currently conducted to get basic data to create an analysis model to understand the mechanisms of how a crack starts and develops in the lining concrete.