

NATMトンネル覆工コンクリートの 初期ひび割れに関する実験

Experimental Tests on Early-aged Crack of NATM Tunnel Concrete Lining

高山博文¹・野々村政一²・増田康男³・高橋幹夫⁴・仲山貴司⁵
Hirofumi Takayama, Masaichi Nonomura, Yasuo Masuda,
Mikio Takahashi and Takashi Nakayama

¹フェロー会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部

(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1) E-mail:hrtf.takayama@jrnt.go.jp

²正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部

(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 (独) 鉄道建設本部東京支社成田鉄道建設所

(〒286-0031 千葉県成田市新町1032-1)

⁴正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁵正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

Cast-in-place plain concrete has been generally used as the secondary lining of mountain tunnels. In many case, the small cracks induced by the thermal, autogenous and drying shrinkage were occurred at an early-aged concrete. It can be considered that this kind of crack will not reduce an overall tunnel stability, but it can cause concrete spalling in the long term if cracks run cross one another.

In this study, firstly, the specimen tests are carried out for describing the shrinkage behaviors of concrete. Secondly, the model tests are performed for investigating the material, and construction factors which affect the occurring of early-aged cracks. From these results, the methods for controlling crack are discussed.

Key Words : NATM, Tunnel, lining, Concrete, Crack

1. はじめに

(1) 二次覆工の初期ひび割れ

現在、日本全土に広がる整備新幹線のトンネル建設では、山岳部における標準工法であるNATM (New Austrian Tunneling Method) が採用されている(写真-1)。この施工方法では場所打ちコンクリートで二次覆工を打設するため、他の構造物と同様に水和熱による温度収縮や乾燥収縮、外部拘束等により、コンクリート表面にひび割れ(本報告では、単に初期ひび割れと記す)が生じる場合がある。

この初期ひび割れは耐荷機能を低下させないという考え方が一般的であるが、鉄道トンネル



写真-1 NATMによるトンネル

は、コンクリート片の剥落等で列車走行の安全

性を阻害しないという機能も有する必要があるため、許容できる初期ひび割れには自ずと限界があり、許容を超える初期ひび割れが発生した場合には補修を実施している。

(2) 既往研究と本研究の目的

これまでも初期ひび割れの抑制対策の確立を目的とした研究は数多く実施されてきた。

例えば、鉄道分野では二次覆工と背面地山の摩擦に着目して、①背面拘束の低減（アイソレーションシートの使用）、②誘発目地の設置などを提案¹⁾した研究があり、現在、アイソレーションシートは標準的に使用されるものとなっている。しかし、NATM導入期で施工事例が少なかったこともあり、二次覆工の水和熱による温度収縮、乾燥収縮までも加味した抑止対策の確立を目的とした研究では、この成果は定性的な表現に留まっていた。

そこで、本研究では水和熱による温度収縮、乾燥収縮も加味した抑止対策の定量的な検証をさらに進めることにより、さらに効果的な初期ひび割れの抑止対策とその組合せの提案を目的としている。

本報告は、このうち著者らがこれまでに実施した要素実験、模型実験と、その考察から導いた①二次覆工に生じる水和熱による温度収縮、乾燥収縮の分布形状と②使用材料、施工方法、坑内環境が初期ひび割れに及ぼす影響、③その抑止対策の方針について報告するものである。

2. 要素実験

(1) 実験概要

一般に二次覆工の表面に生じるひび割れは、地山側と内空側でのコンクリートのひずみ差が大きい場合に生じると考えられる。背面地山とコンクリートの摩擦を考慮しない場合には、二次覆工は脱型後に内空側のみが大気中に開放されるため、乾燥収縮は内空側の表面で最も大きくなること、また、地山側は断熱に近い状態になるため、水和熱による温度収縮は地山側で最も大きくなることから、この相関関係がひずみ差を生じる主要原因になると考えられる。

前述したように、背面地山とコンクリートの摩擦についてはアイソレーションシートにより低減されているものと考えられるため、本研究では、まず、この水和熱による温度収縮と乾燥

収縮のみで、コンクリートと背面地山の摩擦と同様に初期ひび割れの発生に影響を及ぼすひずみ差を生じるかどうかを確認した。

(2) 実験内容

使用した供試体は図-1に示す300mm×300mm×800mmの小型角柱状のものである。この中央部表面には250mmの間隔で長さ変化用

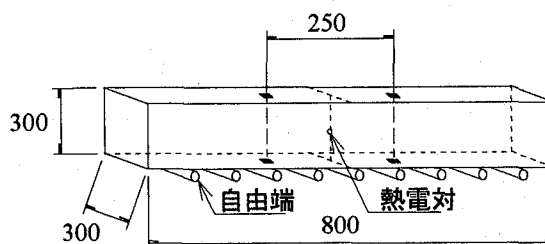


図-1 供試体

表-1 配合条件

W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)
		W	C	S	G	
60	48	180	300	847	941	15

表-2 実験ケース

Case	乾燥	水和熱
①標準	あり	放熱
②非乾燥	なし	放熱
③一面乾燥	一面のみ	放熱
④断熱	なし	断熱

①標準 ②非乾燥 ③一面乾燥 ④断熱

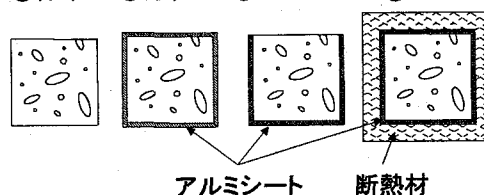


図-2 供試体被覆



写真-2 供試体写真の例

のゲージプラグを設置し、さらに中央断面内には熱電熱電対を埋設した。なお、使用したコンクリートの配合は表-1の通りである。実験ケースは、表-2に示すように二次覆工の乾燥、水和熱による収縮の状態を個々に加味した4ケースであり、図-2に100mm×100mmの供試体を本実験と同様にアルミホイール、断熱材で被覆した例を示した。なお、気温と相対湿度はそれぞれ20℃、60%で一定とした。

(3) 実験結果および考察

a) 乾燥の影響

図-3は梁供試体の乾燥の有無（Case①標準，Case②非乾燥）を比較したものである。両者のひずみ差は供試体全面に生じた乾燥収縮の影響であり、約100日で200 μ 程度であった。

これに対して、図-4は二次覆工と同様に一面のみ乾燥させたCase③一面乾燥における乾燥面とその対面にある非乾燥面を比較したものである。この結果から、乾燥面のひずみが大きく、約100日で200 μ 程度のひずみ差が生じていることが分かる。

b) 水和熱の影響

図-5は断熱材の有無によるひずみを比較したものであり、この結果、ひずみは断熱材有りのひずみが大きく、温度が一定となる約30日で100 μ 程度のひずみ差が生じていることが分かる。

c) 考察

a), b)で、それぞれ覆工コンクリートの内空側と地山側を個々に表現できたとすると、要素実験から内空側と地山側のひずみ差はこれら影響の差分である100 μ 程度になると想定できる。

これに対して、一般に無筋コンクリートに引張ひび割れが発生するひずみ量は150 μ 程度であること、梁供試体での乾燥収縮ひずみも200 μ 程度あることを加味すれば、水和熱による温度収縮と乾燥収縮は、背面地山とコンクリートの摩擦と同様に、ひび割れに十分寄与するものであり、抑止対策の検討に値すると考えられる。

3. トンネル覆工模型実験

(1) 概要

要素実験から、水和熱による温度収縮、乾燥収縮の相関関係によっては、これらのみでも二次覆工の初期ひび割れに寄与することが確認された。本研究では、さらに①トンネル形状であ

ること、②使用材料、施工方法、坑内環境の違うことにより、内空側と地山側のひずみ差がどのように変化するかを把握するため、トンネル覆工模型を用いて同様な計測を実施した。

(2) 実験内容

使用したトンネル覆工模型は、図-6に示す高

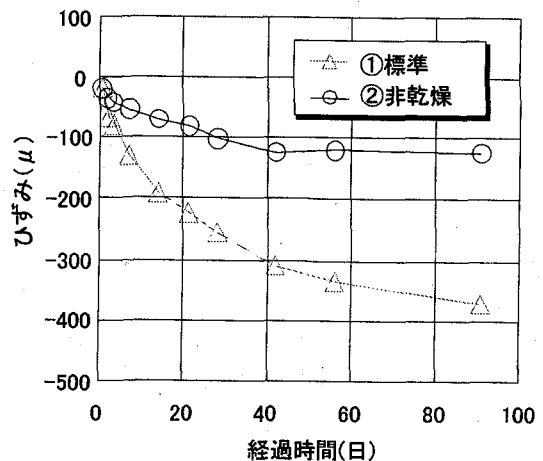


図-3 ①標準と②非乾燥の比較

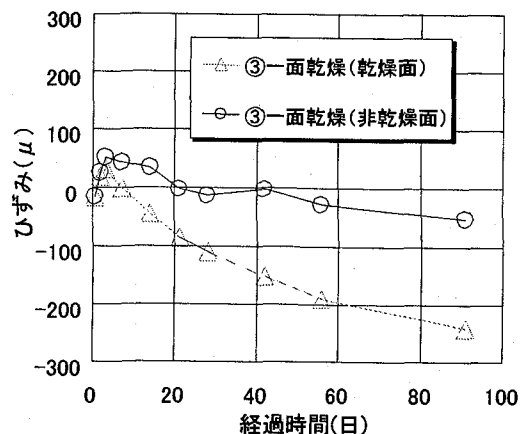


図-4 ③一面乾燥の乾燥面と非乾燥面の比較

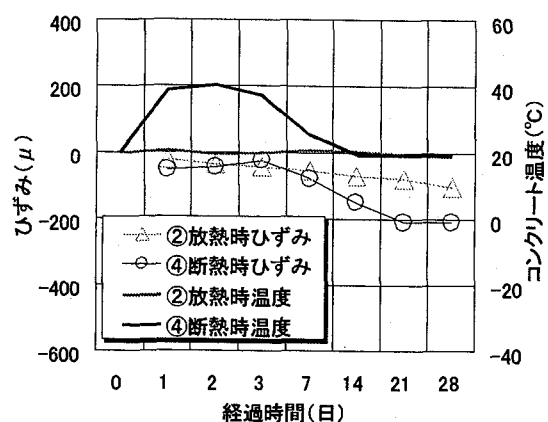


図-5 ④断熱と②非乾燥の比較

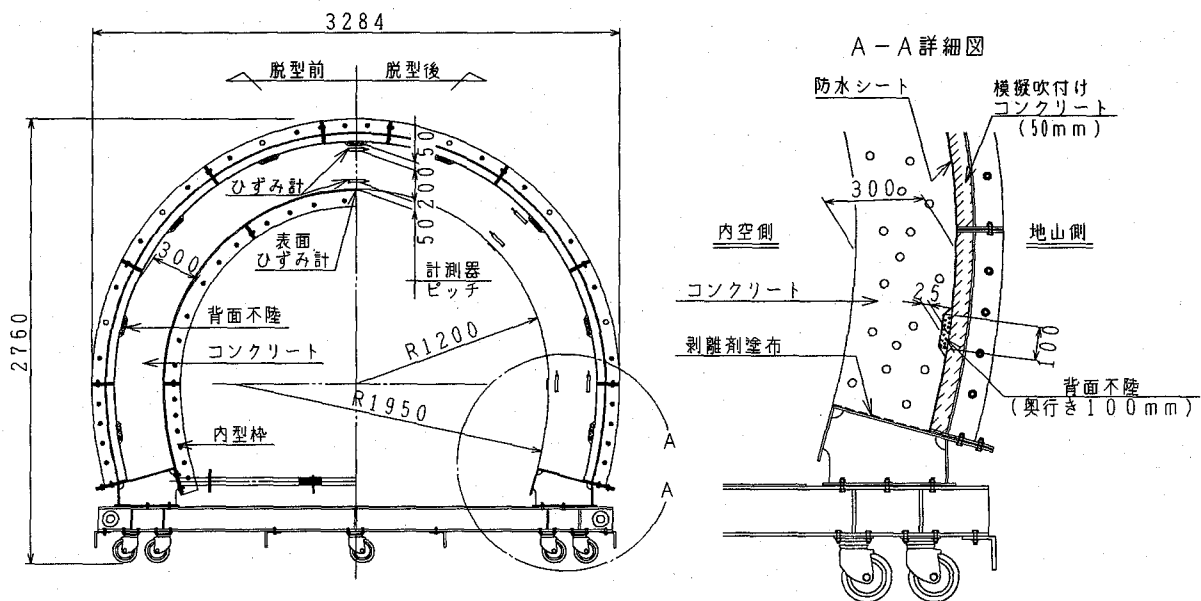


図-6 トンネル模型供試体

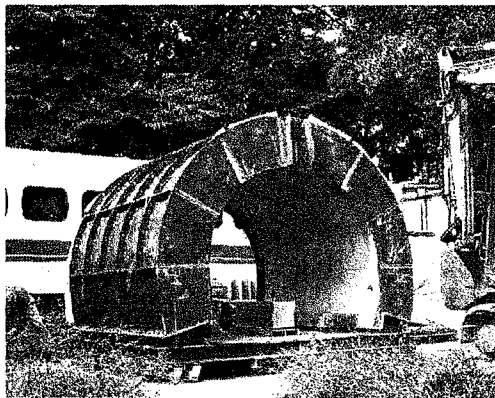


写真-3 トンネル覆模模型

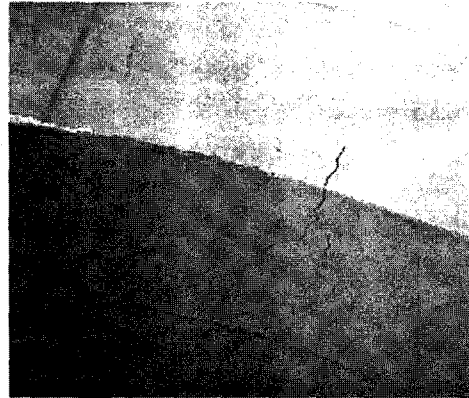


写真-4 供試体のひび割れ状況

さ2760mm, 幅3284mm(新幹線断面の1/4スケール)である。ただし、覆工厚は実トンネルに近いひずみ差を捉えるため、実寸と同じ300mmとした。計測は同図に示すように天端部と肩部、脚部の内空側、地山側に埋め込み型ひずみ計、温度計を設置して実施しており、コンクリートの打設から脱型を通して約50日程度にわたるデータが現在得られている。なお、地山側は断熱条件としており、コンクリートの配合は表-4に示すとおりである。写真-3はトンネル覆工模型、写真-4は計測中に生じたひび割れの写真である。

実験ケースは表-3に示す全5ケースであり、実トンネルの材料、施工方法、坑内環境に類似させた標準ケースを基本として、材料に関するパラメータとしてセメント種類・W/Cを、施工方法に関するパラメータに脱型時間を、坑内環境に関するパラメータに坑内湿度を実現場で想定される範囲内で変化させたケースを設けた。

(3) 実験結果および考察

a) 部位毎のひずみ分布

図-7～図-9には、標準ケースにおける脚部、肩部、天端部の地山側、内空側に発生したひずみの時間変化を示した。この結果、計測開始後50日まで、天端部では地山側の方がひずみ量は大きくなり、その差は50 μ 程度となった。これに対して、脚部に向かうにつれ地山側のひずみが減少するとともに、相対的に内空側が大きくなり、ひずみ差は100 μ 程度となった。

これは図-10に示すように天端部がより高温となり、それに伴い水和熱による温度収縮も増加したためと考える。トンネル覆工模型では寸法効果があることや、厳密には背面の断熱条件が実トンネルと異なるため、地山側の方が大きくなるとは一概には言えないが、トンネル自体は天端部にひび割れが発生しにくい形状ではあるものとする。

一般的にトンネルの初期ひび割れは天端部に発生する場合は多いのは、この効果に相対する内空側の影響が強いものと考える。

b) 使用材料, 施工方法, 坑内環境の影響

図-11はW/Cを増加させたケースの天端部ひずみの時間変化である。この結果、地山側のひずみは標準ケースと変わらないものの、内空側のひずみが増加することにより、ひずみ差が減少していることが分かる。これはW/Cの増加により、乾燥収縮の影響が強くなり現れたものと考えられる。高炉セメントを使用したケース(図-12)、早期脱型を行ったケース(図-13)でも、ひずみが発生する時間は水和熱による温度収縮の影響により異なるものの、全体としては同様な傾向となった。ただし、図-14に示す養生湿度が低下したケースでは、内空側のひずみ増加がさらに大きく、ひずみ差の相関関係が標準ケースと逆転する結果となった。

c) 考察

50日までの計測では、天端部は脚部と比較して地山側と内空側のひずみ差が小さくなったことから、トンネル形状は天端部にひび割れを発生させにくい構造であると考えられる。ただし、使用材料、施工方法、坑内環境は内面側の乾燥収縮の増加に強く影響するため、これらの程度によっては、天端にひび割れが生じる可能性が高いものと考えられる。特に、養生湿度が低下した場合には、その傾向が強く現れた。また、その他の要因についてもひずみの絶対量は大きいと、他の要因と複合することにより、ひび割れの発生原因になりうるものとする。

表-3 配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				スランプ [*] (cm)
		W	C	S	G	
60	49	182	303	873	914	18

表-4 実験ケース

実験項目	材料		施工・環境	
	セメント	W/C	脱型	養生湿度
①標準	普通	60%	18 h	60%
②セメント種類	高炉			
③W/C	普通	70%	12 h	50%
④脱型時間		60%	18 h	
⑤養生湿度				

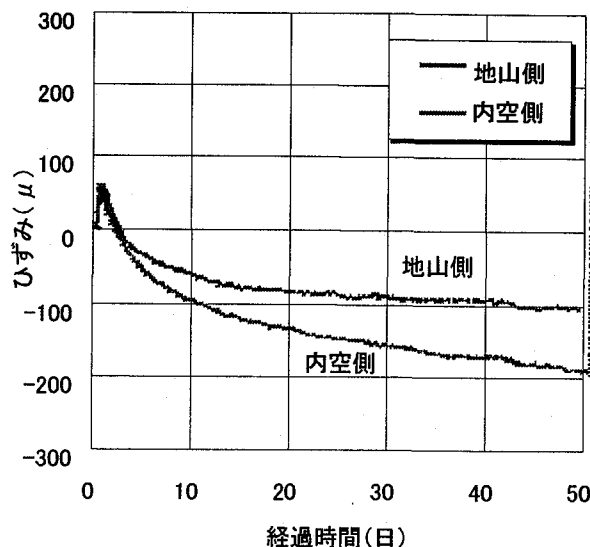


図-7 標準ケース(脚部)

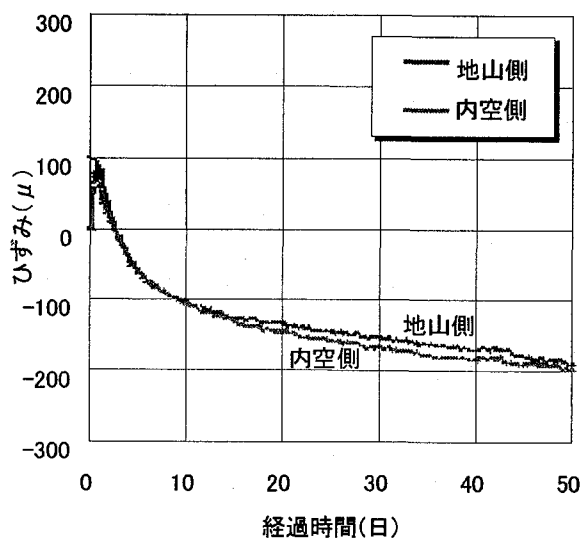


図-8 標準ケース(肩部)

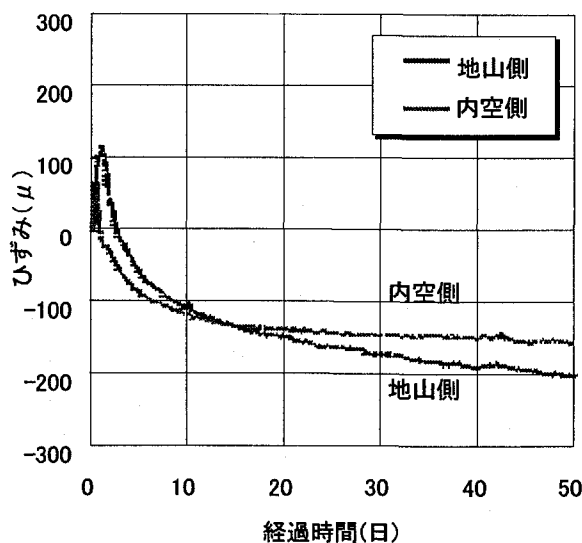


図-9 標準ケース(天端)

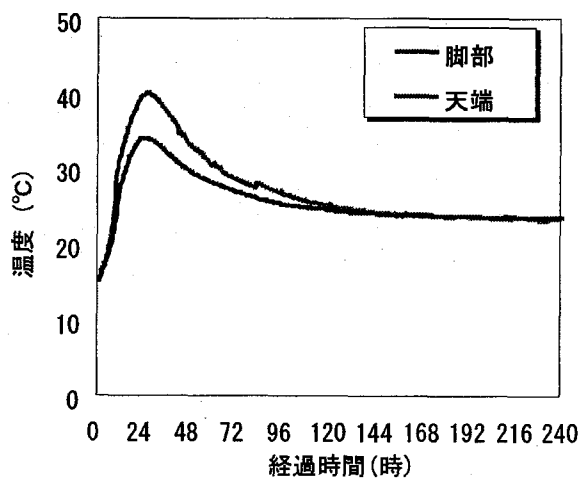


図-10 温度(天端, 脚部)

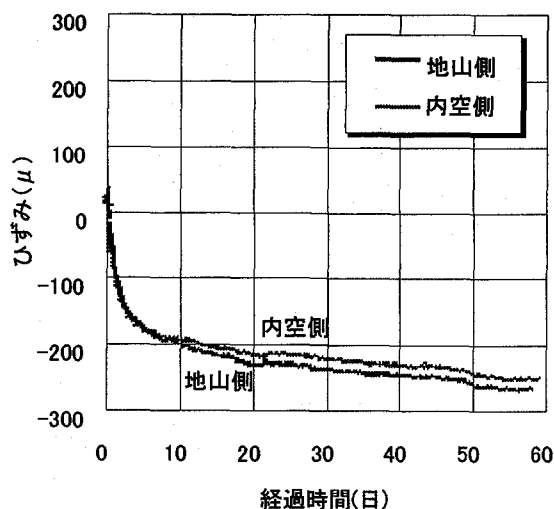


図-13 脱型時間(天端)

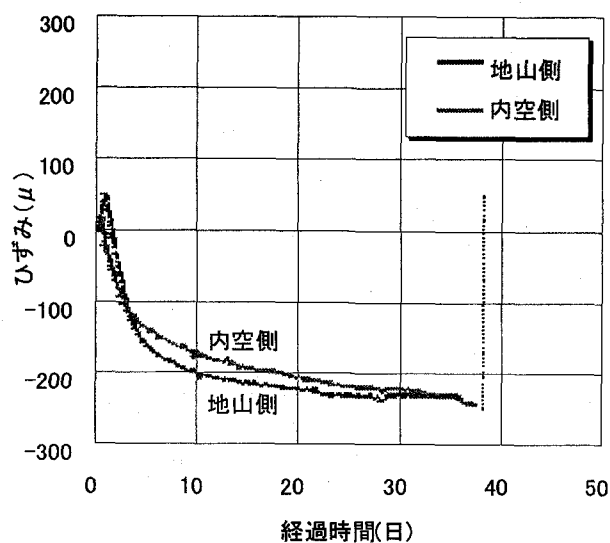


図-11 W/C(天端)

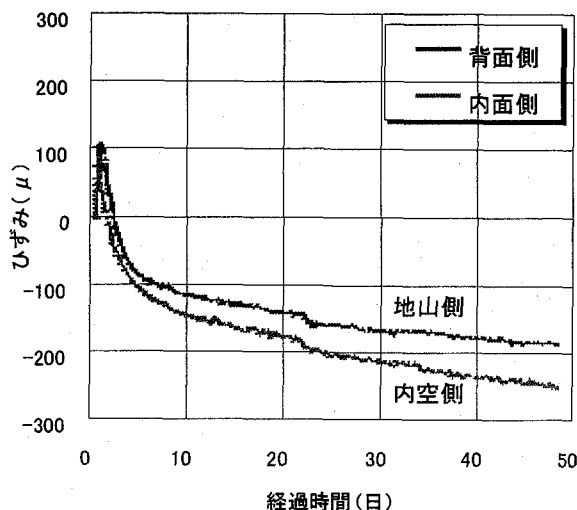


図-14 養生湿度(天端)

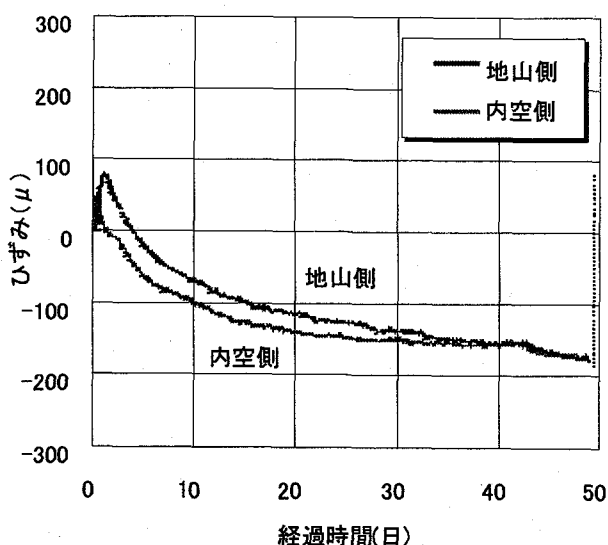


図-12 脱型時間(天端)

5. まとめ

本報告では、二次覆工に生じる内空側と地山側のひずみ差について考察を行った。この結果から、ひび割れ抑制の対策としては養生湿度の確保が重要と考えられ、さらにはW/Cの低下、脱型時間の確保も対策方法として有効であるものと考えられる。

今後は長期的な乾燥収縮との相関関係からも考察するとともに、現地調査、数値解析を実施して現場との相関の確認や既往の対策方法との定量的な比較を実施し、最良な対策方法を提案する予定である。

参考文献

- 1) NATM設計施工指針, 日本鉄道建設公団, 1996.2.
- 2) コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, 2002.3