

既設めがねトンネルに生じた 偏在ひび割れ発生要因の解析的検討

大野 智貴¹・北村 彩絵²・森本 真吾³・林 久資⁴・進士 正人⁵

¹学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail:i021ve@yamaguchi-u.ac.jp

²非会員 元山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: w019ve@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 トボクリエイト株式会社 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台二丁目16-1 大学研究推進機構)
E-mail: charlie@dobocreate.jp

⁴正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

⁵正会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

めがねトンネルは低土被りや近接施工等の厳しい施工環境において施工される。そのため、単線トンネルに比べめがねトンネルの覆工コンクリートに生じるひび割れの発生要因はより複雑であると考えられる。本研究で対象とする既設めがねトンネルは、施工時期に差があり施工方法が異なるという特徴があり、めがねトンネル完成後に、覆工コンクリートに生じたひび割れに進行性が認められた。

本研究では、このめがねトンネルを対象に三次元数値解析を実施し、めがねトンネルのⅡ期線施工によるⅠ期線への影響を再現し、トンネル周辺地山の挙動の把握をした。その上で、めがねトンネル完成後に作用する緩み荷重を考慮し、めがねトンネル完成後に覆工コンクリートに発生したひび割れの発生要因を推定した。

Key Words : twin tunnel, crack map, center pillar, 3D-numerical analysis, FLAC3D,

1. はじめに

都市部でのトンネル施工は、土被りの小さいケースや道路線形・用地取得等の制約が厳しいケースが多い。そのような状況で採用されるトンネル形状としてめがねトンネルが挙げられる。めがねトンネルはセンターピラー（以下CPと称す）を共有する2本のトンネルが近接して施工されるため、施工時に相互影響を受けやすい構造である。表-1に、本研究で対象とするめがねトンネル（以下Aトンネルと称す）の概要を示す。表から明らかのように、一般的なめがねトンネルでは、Ⅰ期線とⅡ期線がほぼ連続して施工されるのが基本であるのに対し、AトンネルではⅠ期線施工の約16年後にⅡ期線施工が行われている。そのため、2本のトンネルが異なる施工法すなわち設計思想で施工されているのも大きな特徴である。このような施工環境で施工されたAトンネルは図-1に示すようにめがねトンネル完成後からⅠ期線覆工の片側（Ⅱ期線側）にひび割れが集中的に発生している¹⁾。

そこで本研究ではAトンネルを対象に三次元数値解析

表-1 Aトンネル概要

	Ⅰ期線	Ⅱ期線
施工年	1983年	1999年
竣工年	1984年	2000年
施工方法	在来工法	NATM
延長	87m	84m
土被り(max)	20m	
土被り(min)	5m	

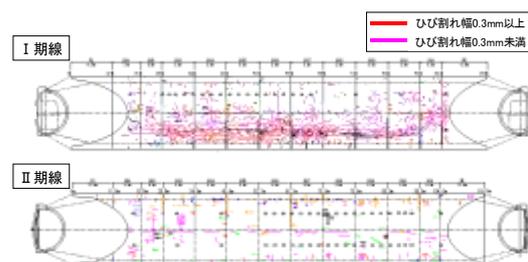


図-1 2015年点検時のAトンネル覆工展開図

を行うことで、偏ったひび割れ分布（本研究ではこれを「偏在ひび割れ」と呼ぶ）の発生要因解明を行った。そのため、Ⅱ期線施工時の現場計測データを用いて、地山物性の同定およびトンネル覆工応力の再現を行った。さらに、Ⅱ期線施工終了後すなわち、めがねトンネル完成後にトンネルに作用する荷重を緩み荷重と仮定し、緩み荷重載荷によるⅠ期線覆工への影響について考察した。これらの結果から、Aトンネルに生じる偏在ひび割れの発生要因を推定した。

2. Ⅱ期線掘削時の挙動再現

本研究では三次元有限差分法コードFLAC3Dを用いた。図-2に地山モデルを示す。図からわかるように、地質報告結果および等高線をもとに3次元モデルを作成することで現場の地質や傾斜を再現している。トンネル掘削解析に関しては、Ⅰ期線を一括掘削で行い、Ⅱ期線はⅠ期線への掘削影響を再現するために、1mごとの逐次掘削で行った。拘束条件は上面以外の五面固定とし、掘削モデルのトンネル延長は70mとした。

(1) 地山物性の同定

本研究では、Ⅱ期線掘削時の現場計測データ²⁾（地表面・天端・CP沈下量）を用いて、逆解析により地山物性値の同定を行った。具体的には、解析値を現場計測結果に近づけるよう繰り返し掘削解析を行うことで、実際の地山および覆工コンクリートの挙動を再現し、適当な地山物性値の算出を試みた。図-3に示した現場計測結果と逆解析の結果を比較すると、現場で生じた変位を数値

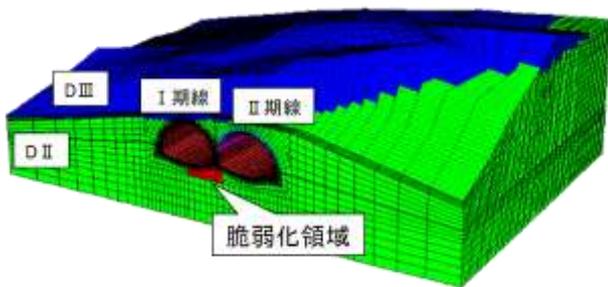


図-2 Aトンネル地山モデル

解析で精度よく再現できていることがわかる。また、最終的に決定した地山物性値およびその他用いた材料物性値を表-2に示す。本研究では、Aトンネルの「Ⅰ期線施工16年後にⅡ期線施工」という特殊な施工環境を考慮して、CP直下からⅠ期線下部の地山が脆弱化していると考え、図-2に示す脆弱化領域を設けた。この領域を想定することで現場計測結果と逆解析結果がよく一致した。脆弱化領域の物性値は表-2に示す通りである。

(2) Ⅱ期線施工後の覆工応力

前節で算出した物性値を用いて、Ⅰ期線覆工の変位および覆工応力を算出した。図-4にⅡ期線施工後の覆工変位と沈下量を、図-5にⅡ期線施工後の覆工応力（最大主応力）を示す。図-4から、Ⅱ期線施工によってⅠ期線全体が右側（Ⅱ期線側）に引っ張られる挙動を示していることがわかる。これは、CP直下に脆弱化領域を設けたことでCPが沈下し、CPの沈下に引っ張られるようにⅠ期線全体がⅡ期線側に引っ張られていると考えられる。また、図-5からⅠ期線覆工のⅡ期線側に引張応

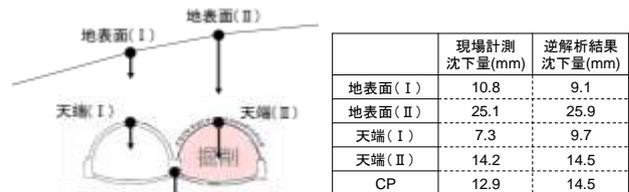


図-3 現場計測結果と逆解析結果

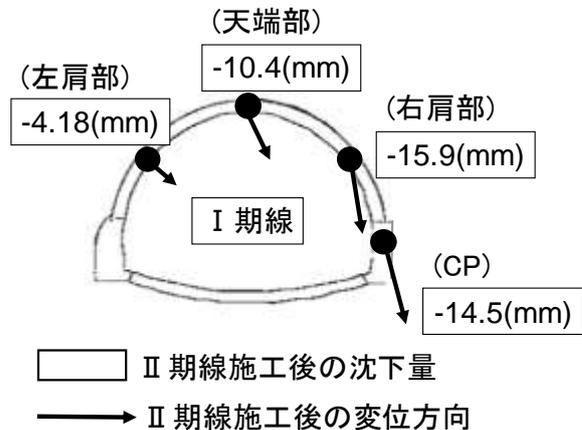


図-4 Ⅱ期線施工後の覆工変位と各沈下量

表-2 解析物性値

	変形係数 (MPa)	初期ポアソン比	単位体積重量 (kg/m ³)	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)
DⅢ地山	8	0.35	2000	0.008	30
DⅡ地山	65	0.40	1850	0.005	30
CP直下脆弱化領域	12	0.40	2000	0.008	30
コンクリート	2000	0.30	2400	2000	45
パイプルーフ	1000	0.30	1900	0.04	35
吹付け	9235	0.25	2400	2000	45

力が発生していることがわかる。これは、CP が沈下したことで I 期線覆工が II 期線側に引っ張られたことによる影響と考えられる。これらのことから、CP 直下の脆弱化領域の発生により、I 期線覆工右側に引張応力が作用したと考えられる。この結果から、CP 直下の地山の脆弱化領域発生が、I 期線覆工に生じる偏在ひび割れの発生要因の 1 つと考えられた。

(3) II 期線施工後の地山挙動

図-6に I 期線施工後から II 期線施工直後までの地山および覆工コンクリートの鉛直方向変位を示す。図-6から II 期線掘削によって、II 期線上部から I 期線右肩部付近で地山が沈下していることがわかる。また、II 期線上部では天端から地表面にかけて一様の大きさで変化しており、II 期線上部の地山全体が沈下し、いわゆる共下がり現象が生じていることがわかる。これは A トンネルの土被りが極めて小さいことから、掘削による影響が地表面まで及んでいるためであると考えられる。

図-7 に、A トンネル I 期線覆工のスパン No.4 におけ

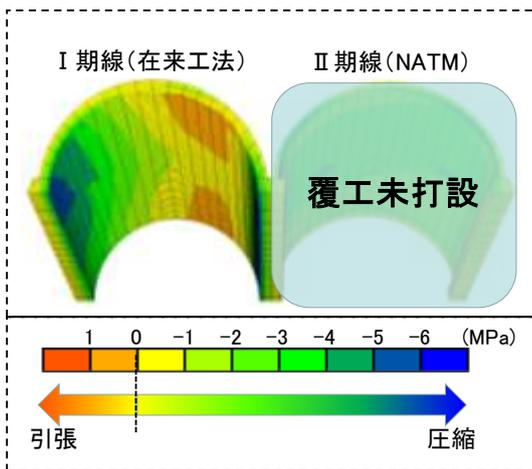


図-5 II 期線施工後の覆工応力

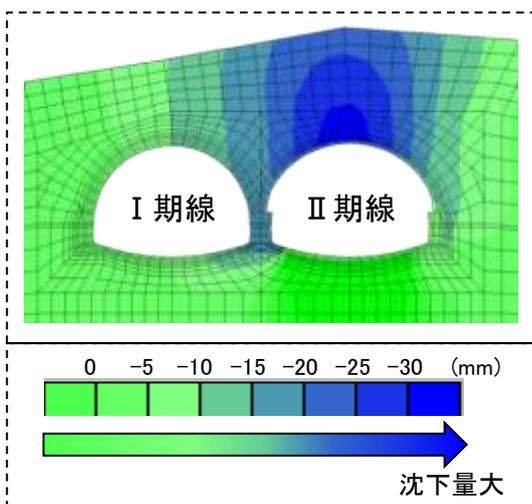


図-6 II 期線施工後の鉛直方向変位

るひび割れの経年変化を示す。この図から I 期線覆工に生じるひび割れは、めがねトンネル完成後に経年的に増加していることがわかる。以上のことから、本研究ではめがねトンネル完成後にトンネル上部の地山が緩み荷重³⁾として作用していると仮定し、数値解析による緩み荷重の再現を行った。

3. II 期線施工後の覆工コンクリートの挙動再現

(1) 解析モデルと荷重載荷方法

図-8に、緩み荷重載荷後の挙動再現で用いた解析モデルを示す。ここでは、トンネル支持地盤と覆工コンクリートのみの関係を明らかにするため、トンネル周辺地山は考慮せずモデルを作成した。物性値は前章と同様のものを用いた。図-8のモデルのトンネル覆工コンクリートに対して強制荷重を載荷することで、緩み荷重を再現した。

荷重は図-9に示すように、両トンネルの中心間の地山の土被り圧を覆工コンクリート外側要素に応力として与えた。また、地山のポアソン比を用いて鉛直荷重に対する水平荷重の大きさを算出することで、土被り圧に対する水平反力を載荷した。本研究では、トンネル覆工コンクリートを弾塑性体としてモデル化を行った。

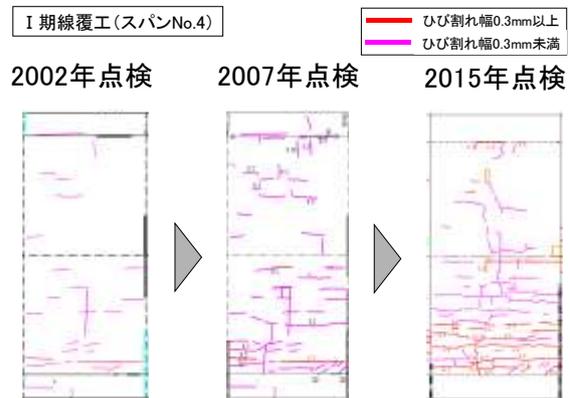


図-7 I 期線覆工展開図の経年変化

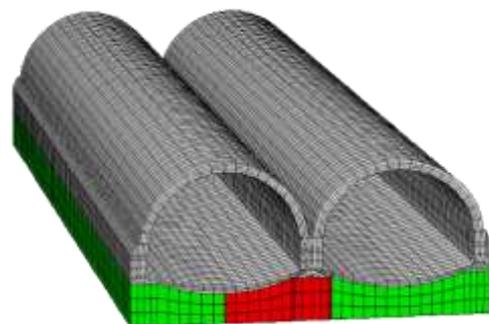


図-8 緩み荷重載荷解析モデル

(2) 緩み荷重載荷結果

緩み荷重載荷後の覆工コンクリートに生じる鉛直方向変位を図-10に示す。図-10から、Ⅱ期線覆工ではほとんど様な沈下量を示しているのに対して、Ⅰ期線覆工ではⅡ期線側に近づくにつれ沈下量が大きくなっていることがわかる。なかでもCPは大きく沈下しており、実現場においてもCP直下の脆弱化領域発生に加え土被り圧が作用することでCPの沈下量が増加していると推定される。また、緩み荷重載荷後の覆工コンクリートにおける塑性領域を図-11に示す。図-11から、緩み荷重の載荷によってⅠ期線覆工の側壁部および、Ⅰ期線覆工のⅡ期線側肩部に塑性域が生じていることがわかった。また、塑性域と図-7の覆工展開図を比較すると、塑性域発生箇所とひび割れ発生箇所が一致することがわかった。

図-12に緩み荷重載荷後のⅠ期線覆工応力の発生状況を示す。図から明らかなように、緩み荷重載荷後のⅠ期線覆工コンクリートには引張応力が生じている。特に、Ⅰ期線覆工のⅡ期線側にはトンネル横断方向の引張応力が生じていることがわかる。つまり、Ⅰ期線覆工のⅡ期

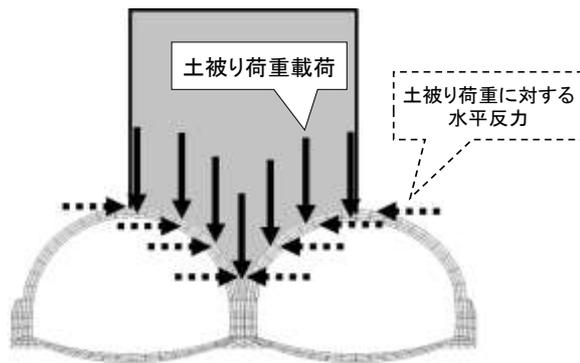


図-9 緩み荷重載荷の概要

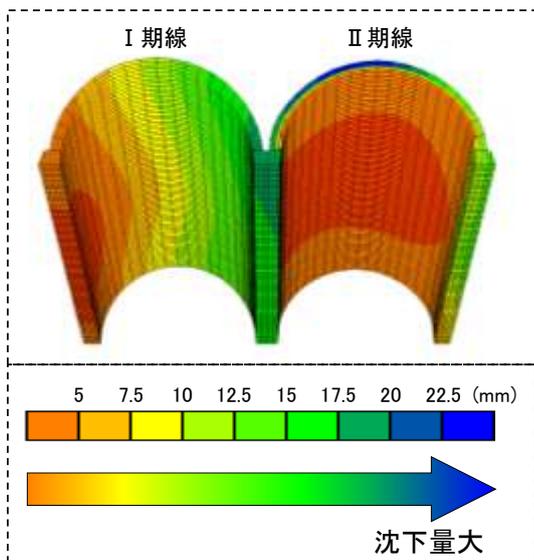


図-10 緩み荷重載荷後の鉛直方向変位

線側には横断方向引張応力によって縦断方向ひび割れが生じていると考えられる。図-7の覆工展開図を見ると実際にトンネル縦断方向のひび割れが卓越していることから、緩み荷重載荷による解析結果は実現象と一致していると考えられる。

以上のことから、緩み荷重の載荷がⅠ期線覆工に生じる偏在ひび割れの発生要因の1つと考えられた。

4. 結論

本研究では、特殊な施工環境において施工された既設めがねトンネルであるAトンネルを対象に三次元数値解析を行い、覆工コンクリートに生じた偏在ひび割れの発生要因の考察を行った。Ⅱ期線掘削解析では、特殊な施工環境であったことから、CP直下の地山が脆弱化していると考え脆弱化領域を設けた。これによりCPが沈下しⅠ期線覆工に引張応力が生じたことから、CP直下の地山の脆弱化がⅠ期線覆工に生じる偏在ひび割れの発生要因の1つではないかと考察した。また、緩み荷重載荷解析では、荷重の載荷によって、Ⅰ期線覆工のⅡ期線側において塑性領域を示した。また、引張応力の方向から解析結果が実現象と一致していることがわかった。この結果から、緩み荷重の載荷がⅠ期線覆工に生じる偏在ひび割れの発生要因の1つと考察した。

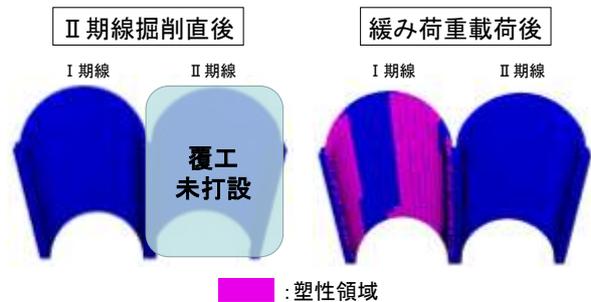


図-11 緩み荷重載荷後の塑性変形領域

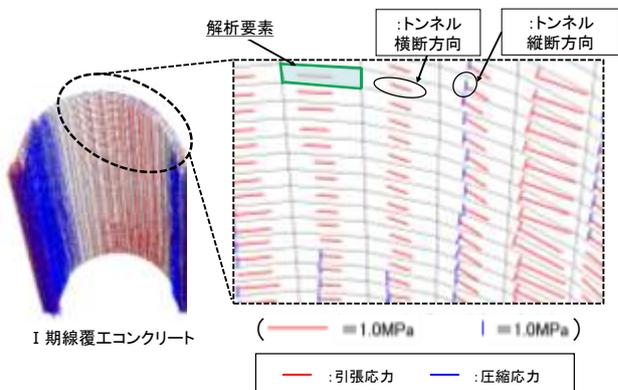


図-12 緩み荷重載荷後の覆工応力発生状況

このように本研究では、実際のトンネル施工を解析上で再現することで偏在ひび割れの再現を試みた。しかしながら、緩み荷重以外の外力の作用や材料劣化等を考慮し再現することができていないため今後の課題としたい。また、今回行った緩み荷重の載荷についても、適切な大きさ、範囲を考察し、より実現場に近い解析を行うことも今後の課題として考えられる。

- 1) 北村彩絵, 森本真吾, 進士正人: ひび割れ指数 TCI を援用した既設トンネルのメンテナンス優先度箇所判定, トンネル工学報告集, 第 27 巻, I -1, 2017.
- 2) 青木宏一: めがねトンネルの設計と施工結果の評価に関する研究 (山口大学修士論文), pp.5-48, 2002.
- 3) 土木学会岩盤力学委員会: トンネルの変状メカニズム, pp.90-115, 2003.

(2018. 8. 10 受付)

謝辞: 本論文を取りまとめるにあたり、国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所の方々には、貴重なデータを提供して頂いたことに深く感謝申し上げます。

参考文献

ANALYTICAL CONSIDERATION OF OCCURRENCE MECHANISM OF CENTRALIZED CRACK ON TWIN TUNNEL

Tomoki Oono, Ayaka Kitamura, Shingo MORIMOTO,
Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

In the urban area, there are many tunnel construction projects under severe conditions such as a small overburden. In such a construction environment, a twin tunnel is one of the useful solution. A twin tunnel is a tunnel shape that two tunnels are constructed in very close proximity to each other, and these are sharing the Center Pillar(CP). Therefore, a twin tunnel is easy to be affected during the construction.

In this study, we investigated the twin tunnel which the first tunnel was constructed at 1984 and second tunnel were constructed at 2000. This twin tunnel constructed by different construction method (Conventional sheet pile method and New Austrian Tunneling Method). From this special construction environment, crack occurs intensively on the one side of lining of first tunnel. In this study, we make to clear a mechanism of crack occurrence on old tunnel lining by using 3D-numerical analysis.