

既設トンネルの覆工補強設計における 骨組み構造解析結果の一考察

遠山 国彦¹・古賀 大陸²・徳永 和広³・佐保 亮輔⁴・米田 裕樹⁵

¹正会員 株式会社ダイヤコンサルタント九州支社設計部(〒812-0044 福岡市博多区千代 5-3-19)

E-mail: K.Tooyama@diaconsult.co.jp

²正会員 株式会社エイト日本技術開発九州支社(〒812-0018 福岡市博多区住吉 3 丁目 1 番 80 号)

E-mail: koga-da@ej-hds.co.jp

³正会員 有限会社サンテル設計株式会社(〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 3-30-26 中央博多ビル 9F)

E-mail: tokunaga@santeru-sekkei.co.jp

⁴正会員 基礎地盤コンサルタント株式会社九州支社(〒814-0022 福岡市早良区原 2-16-7)

E-mail: saho.ryosuke@kiso.co.jp

⁵正会員 協同エンジニアリング株式会社(〒870-0876 大分県大分市大字三芳1238-1)

E-mail : yoneda@kyodo-ccc.co.jp

近年では、トンネル点検の義務化により、トンネル覆工の老朽化が顕在化してきており、覆工補強のための詳細調査も積極的に行われてきている。このような背景から、現地に合った補強規模を決定する必要性が高まり、覆工に発生している応力状態等を力学的に評価した数値解析に基づく補強設計法を確立することが望まれている。本報告は、数値解析手法の一つである骨組解析手法を用いたパラメトリック解析を行い、解析で得られた覆工内の軸方向応力度に着目した感度分析に基づいて既設トンネルの覆工補強設計への提言を行っている。数値解析のパラメーターは、上載荷重、地盤バネ値、地盤バネの範囲、覆工巻厚、節点数、下部半断面の有無、支点、解析モデル軸の設定である。

Key Words: Reinforcement design, frame structure analysis, axial stress, existing tunnel lining

1. はじめに

トンネル覆工に緩み土圧や塑性土圧、偏土圧等の外性の変状が発生した場合、その覆工補強として内面補強工等を計画することが多いが¹⁾、主に経験に基づき補強規模を決定していたのが現状である。一方、近年では、トンネル点検の義務化により、トンネル覆工の老朽化が顕在化しておきており、覆工補強のための詳細調査も積極的に行われてきている。このような背景から、現地に合った補強規模を決定する必要性が高まり、覆工に発生している応力状態等を力学的に評価した数値解析に基づく設計法²⁾³⁾を確立することが望まれている。既設トンネルの覆工補強は、現地に発生した変状を再現解析することにより、必要な補強規模を決定する必要があるが、トンネル背面地山の状況が不明確なこと、詳細調査に限界があるため限定的もしくは線状でしか把握できないこと等、再現解析に必要なインプットデータの設定に苦慮しているのが現状である。

そこで本報告では、骨組解析^{4)~10)}のインプットデータである上載荷重、地盤バネ、覆工巻厚、節点数、下部半断面の有無、解析モデルの支点、解析モデル軸を変化させ、解析で得られた最大曲げモーメント、軸力及び軸方向応力度の変化に着目した感度分析¹¹⁾¹²⁾を実施し、インプットデータが覆工軸応力度に及ぼす影響を定量的に評価した。骨組解析では、矢板工法で建設された2車線の道路トンネルを対象に、詳細調査で得た背面空洞範囲とトンネル覆工厚を解析モデルに反映させ、それに緩み土圧を作用させた場合にトンネル頂部の覆工にひび割れが発生することを確認した。感度分析に用いたのは、①上載荷重(緩み荷重)、②地盤バネ値、③地盤バネの範囲、④覆工巻厚、⑤解析モデル節点数、⑥下部半断面の有無、⑦支点の設定、⑧解析モデル軸の8項目である。

2. 解析対象トンネルの概要

(1) 対象トンネルの概要

本解析は、在来工法で施工された2車線の道路トンネルを対象とした。標準断面図を図-1に示す。

(2) 変状概要

トンネルの天端付近に緩み荷重が原因と推察される目地を跨ぐ縦断方向のひび割れが開口しており、その周辺では覆工コンクリートの巻厚が局部的に薄くなっていた(図-2)。

3. 再現解析とインプットデータ

(1) 再現解析の手順

再現解析は、解析断面をモデル化した上で、荷重条件や地盤条件を変化させながら骨組み構造解析を行い、ひび割れ発生箇所で曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度がコンクリートの引張許容応力度を超えることを確認した。

(2) 上載荷重条件

上載荷重は、覆工コンクリートの自重と緩み荷重を作用させた。緩み荷重は、テルツァーギの緩み土圧式より緩み高さを3.18mとし、それに地山の単位体積重量を乗じて69.96kN/m²とした。

(3) 地盤バネ条件

地山の変形係数は、CL級の花崗岩であることから200,000kN/m²とした。地山の地盤ばね定数は、「道路橋示方書・同解説IV下部構造編(社)日本道路協会(9.5.2 地盤反力係数)」に示された計算式を用いて、200,000kN/m³とした。地盤バネの分布範囲は、背面空洞調査結果を参考に頂部120°を除く範囲とした。

(4) 骨組み解析モデルと解析条件の設定

解析断面は上部半断面を対象とし、節点数33、部材数32でモデル化し、これを基本モデルとし、各部材の断面積を変化させることで覆工コンクリートの巻厚の違いを表現した。支点条件は、在来工法のため上半と下半が一体化していないことから、ピン-ピンとした(図-3)。

その他の解析条件を表-1に示す。

(5) 発生部材力と発生応力度

骨組み計算の結果、天端付近は内空側に引張の曲げモーメントが発生し、図-4に示すように、その最大値は8.731kN・mとなった。また、軸力は図-5に示すような分

布となった。軸方向応力度は、 $\sigma = M/Z \pm N/A$ 、 $Z = bh^2/6$ 、 $A = bh$ であることから、 $\sigma = 6M/bh^2 \pm N/bh$ で表され、これを算出すると最大値は $\sigma_1 = 3.973 \text{ N/mm}^2$ 、最小値は $\sigma_2 = 0.278 \text{ N/mm}^2$ となり、引張側の発生応力度が無筋コンクリートの許容応力度を越え、ひび割れの発生を再現することができた。

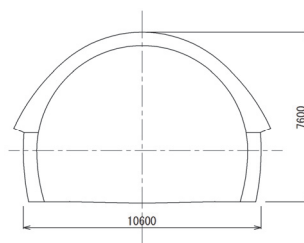


図-1 標準断面図 (寸法 mm)

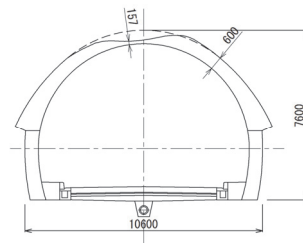


図-2 調査後の断面図

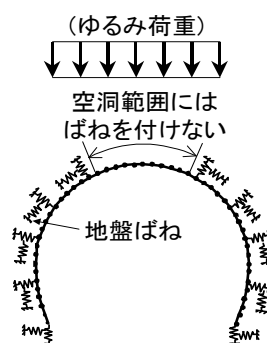


図-3 解析モデル図 (概念図)

表-1 解析条件

覆工	覆工巻厚	600mm
	覆工最小厚	157mm
	弾性係数	22,000 N/mm ²
	設計基準強度	18N/mm ²
地盤	変形係数	200,000kN/m ²
	ばね定数	200,000kN/m ³
荷重	地圧作用方向	鉛直方向 / 69.96kN/m ²

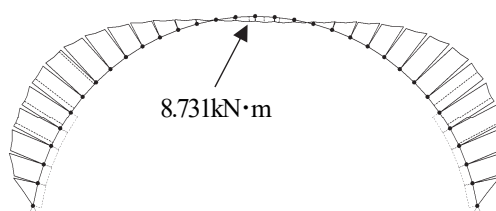


図-4 曲げモーメント図

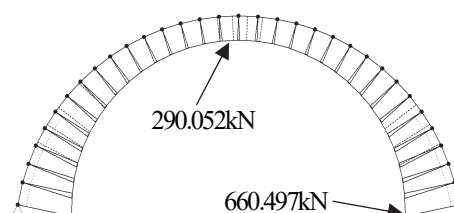


図-5 軸力図

4. 感度分析項目と分析結果

(1) 分析項目

再現解析を行ったモデルを基本モデルとして、覆工内の最大曲げモーメント、軸力及び軸方向応力度に着目し、下記に示す8項目について検討した。感度分析に用いた項目は、モデル化に関して、①解析モデル節点数、②下部半断面の有無、③支点の設定、④解析モデル軸の4項目であり、構造及び外部条件の影響に関して、①上載荷重(緩み荷重)、②地盤バネ値、③地盤バネの範囲、④覆工巻厚の4項目である。

以下の考察における、曲げモーメントと軸力による応力度を合成した軸方向応力度は、覆工内縁天端頂部(節点番号16)の値である。

(2) 分析結果：その1ーモデル化に関して

a) 節点数

節点数は、基本モデルの節点数を2倍に変化させた。節点数を2倍にすると、最大曲げモーメントは1.042倍、軸力は1.002倍、負の最大曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度は 0.086N/mm^2 だけ引張側に増加した(図-6、図-7)。

曲げモーメントの増加は、着目した部材が天端付近であったため、節点数を増したことで局所的な曲率の変化を再現できたと考えられる。

軸力にほとんど変化が認められなかったのは、当初モデルから比較的円滑に軸力が伝達されており、細分化の影響が認められなかったためと考えられる。

軸方向応力度は、曲げモーメントの増加した分、さらに引張側に増加したと考えられる。

b) 下部半断面の有無

下部半断面の有無は、基本モデル(上部半断面のみ)に対し、下部半断面を追加して全断面とした。

全断面にした場合、最大曲げモーメントは1.163倍、軸力は1.001倍、負の最大曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度は 0.344N/mm^2 だけ引張側に増加した(図-8、図-9)。

最大曲げモーメントの増加は、下部半断面がモデルに追加されたことから、よりフレキシブルなモデルになったためと思われる。なお、軸力の変化はほとんどなかった。

表-2 解析ケース：その1ーモデル化に関して

感度分析項目	当初条件	変化後の条件
解析モデル節点数	n (33 節点)	2n (66 節点)
下部半断面の有無	上部半断面	全断面
支点の設定	ピンーピン	ローラーーローラー
解析モデル軸	覆工中心	覆工内側

表-3 解析ケース：その2ー構造及び外部条件の影響に関して

感度分析項目	当初条件	変化後の条件
上載荷重	w (69.96kN/m^2)	2w, 3w
地盤バネ値	k ($200,000\text{kN/m}^3$)	k/16~16k
地盤バネの範囲	120°	$60^\circ \sim 150^\circ$
覆工巻厚	t ($156\text{mm} \sim 600\text{mm}$)	t/2~2t

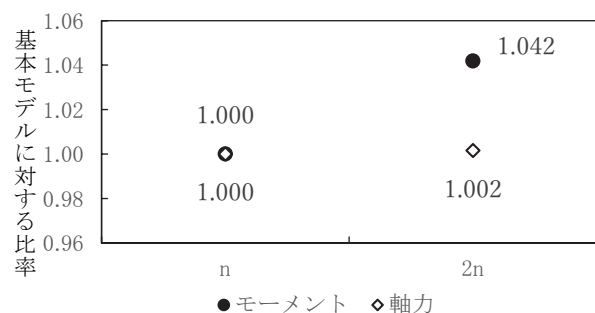


図-6 節点数の変化に伴う曲げモーメントと軸力の変化

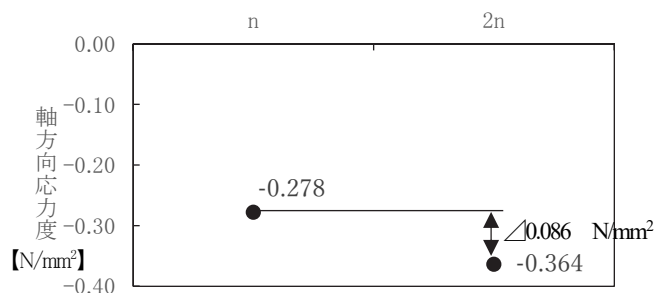


図-7 節点数の変化に伴う軸方向応力度の変化

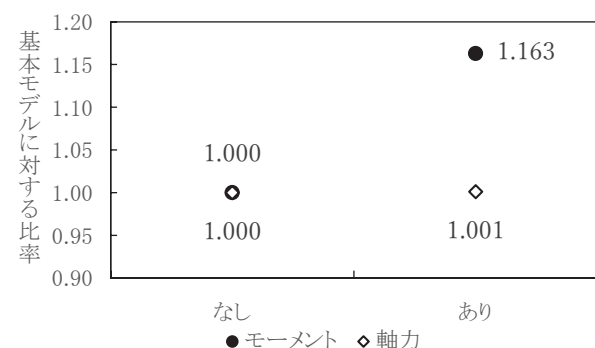


図-8 下部半断面の有無に伴う曲げモーメントと軸力の変化

c) 支点条件

支点の変化は、基本モデルの支点条件(両ピン)に対して、上半が動くことを想定し両ローラーを設定した。ただし、水平方向には地盤バネを入れ、地山による拘束を考慮した。

両ローラーにした場合、最大曲げモーメントは 0.816 倍、軸力は 1.163 倍、負の最大曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度は 0.693N/mm^2 だけ圧縮側に増加し、圧縮側に転じた(図-10, 図-11)。

これは、脚部の水平移動により天端部に発生する曲げモーメントが軽減され、軸力が卓越したことによるものと考えられる。

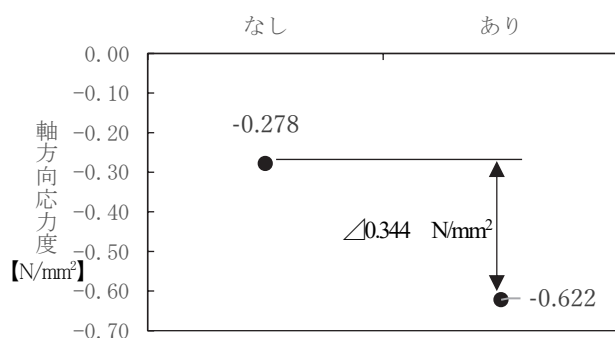


図-9 下部半断面の有無に伴う軸方向応力度の変化



図-10 支点条件を変えた場合の曲げモーメントの変化

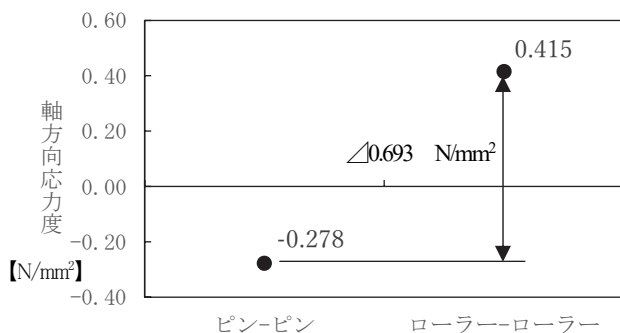


図-11 支点条件を変えた場合の軸方向応力度の変化

d) モデル軸の位置

モデル軸の位置は、基本モデルの覆工中心から覆工内側に变化させた。

部材軸を覆工内側にした場合、最大曲げモーメントは 0.935 倍、軸力は 0.927 倍、負の最大曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度は 0.003N/mm^2 だけ圧縮側に变化した(図-12, 図-13)。

これは、覆工内面でモデル化したことにより節点間が若干短くなり、天端部に発生する曲げモーメントも軸力も僅かに減小したと考えられる。

(3) 分析結果:その2-構造及び外部条件の影響に関して

a) 上載荷重(緩み荷重)

上載荷重は、基本モデルの緩み荷重を 1/2 倍、2 倍、3 倍に変化させた。

上載荷重と負の最大曲げモーメントとの関係は式(1)、上載荷重と軸力の関係は式(2)によって表される(図-14)。

$$y=0.9808x \quad (1)$$

$$y=0.9337x \quad (2)$$

また、上載荷重と負の最大曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度との関係は式(3)となる(図-15)。

$$y=-0.4261x+0.1456 \quad (3)$$

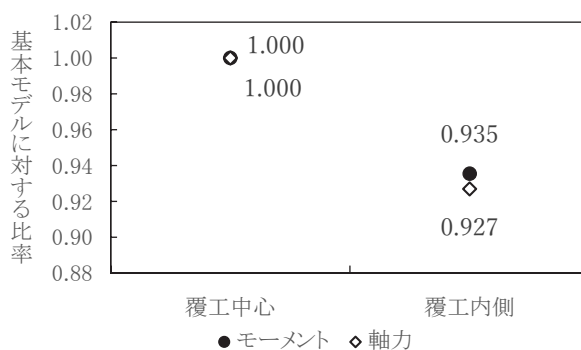


図-12 モデル軸の位置の違いによる曲げモーメントと軸力の変化

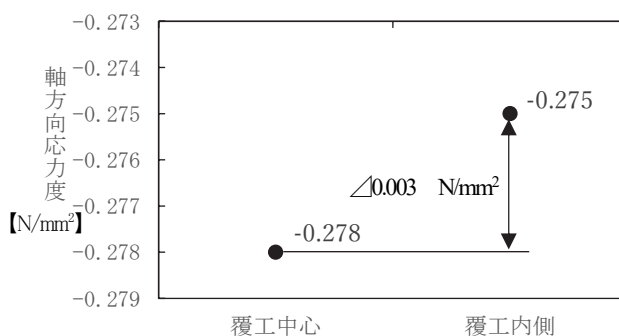


図-13 モデル軸の位置の違いによる軸方向応力度の変化

これは、単純梁の荷重と曲げモーメントとが比例関係であることと整合する。また、軸方向応力度も上載荷重の増加に比例して引張側に増加したことを示している。

b) 地盤バネ値

地盤バネ値は、基本モデルのバネ値を 1/10 倍, 1/5 倍, 1/4 倍, 1/3 倍, 1/2 倍, 2 倍, 3 倍, 4 倍, 5 倍, 10 倍に変化させた。その結果、地盤バネ値を増加させると曲げモーメントは減少したが、一方で、地盤バネ値を減少させると曲げモーメントは増加した。

地盤バネ値と負の最大曲げモーメントとの関係は式(4), (5)によって表される(図-16, 図-17)。

$$y = -0.17 \ln x + 0.9877 \quad (4)$$

$$y = 0.0445 \ln x + 1.005 \quad (5)$$

また、地盤バネ値と、負の最大曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度との関係は式(6)となる。ともに対数的関係を有することが分かる。

$$y = 0.4441 \ln x - 0.2421 \quad (6)$$

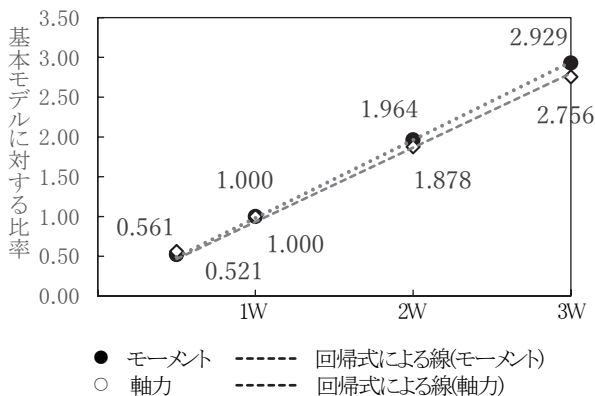


図-14 上載荷重の変化に伴う曲げモーメントと軸力の変化

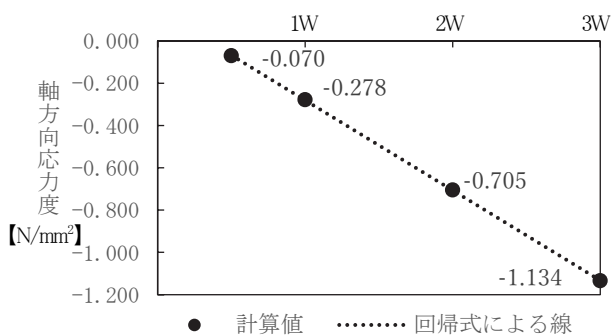


図-15 上載荷重の変化に伴う曲げ応力度の変化

c) 地盤バネの範囲

地盤バネの範囲は、基本モデルの地盤バネを天端から概ね 60° から 150° の範囲で取り除くように変化させた。

バネ設置範囲と負の最大曲げモーメントとの関係は式(7), (8)によって表される。

$$y = 0.0001x^2 - 0.0195x + 1.6016 \quad (7)$$

$$y = -0.00004x^2 + 0.0082x + 0.6727 \quad (8)$$

また、地盤バネの範囲と軸方向応力度の関係は式(9)となる(図-18, 図-19)。

$$y = -0.0003x^2 + 0.0567x - 2.1631 \quad (9)$$

本報で設定した解析ケースでは、背面空洞範囲を 60° ~ 100° とする場合、曲げモーメントの変化は小さいが、100° を超えるあたりから曲げモーメントが増大し、軸力は逆に減小することから、覆工天端部の負の軸応力度が増加する傾向が確認された。このことから、地盤バネの範囲の適切な設定が正確な応力状態を知る上で重要であることが分かる。

d) 覆工巻厚

覆工巻厚は、基本モデルの覆工巻厚を 1/2 倍, 3/4 倍, 1.25 倍, 1.5 倍, 1.75 倍, 2 倍に変化させた。

覆工巻厚と負の最大曲げモーメントとの関係は式(10), (11)によって表される(図-20)。

$$y = -0.2542x^2 + 1.3836x - 0.1365 \quad (10)$$

$$y = 0.0973x^2 - 0.2649x + 1.1704 \quad (11)$$

覆工巻厚と負の最大曲げモーメントと軸力から算出した軸方向応力度との関係は式(12)によって表される(図-21)。

$$y = -0.3591x^3 + 1.5288x^2 - 1.7177x + 0.2812 \quad (12)$$

覆工巻厚の増加に伴い荷重も増加することから、曲げモーメントは増加するが軸力の変化は小さい。

覆工巻厚の増加に伴い、断面積や断面形数が増大することから、覆工厚が 1.7 倍となった付近で軸方向応力度は負から正に転じている。したがって、覆工巻厚の増加は軸引張応力度の解消に役立っているといえる。

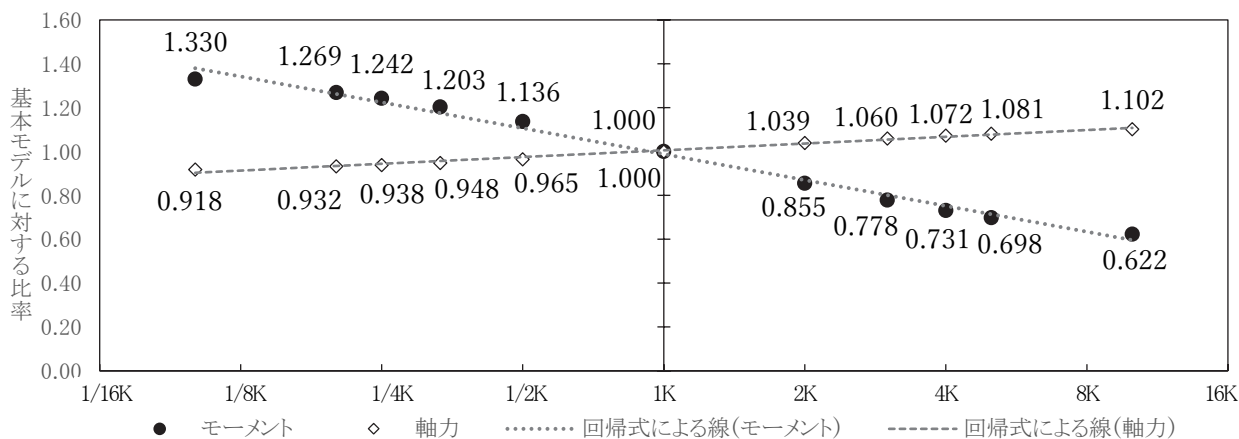


図-16 地盤バネ値の変化に伴う曲げモーメントと軸力の変化

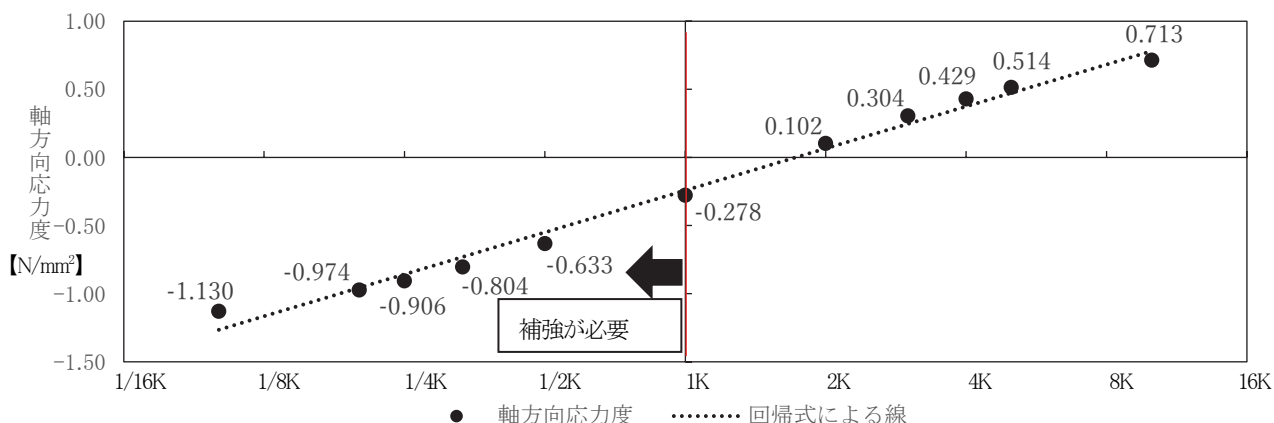


図-17 地盤バネ値の変化に伴う軸方向応力度の変化

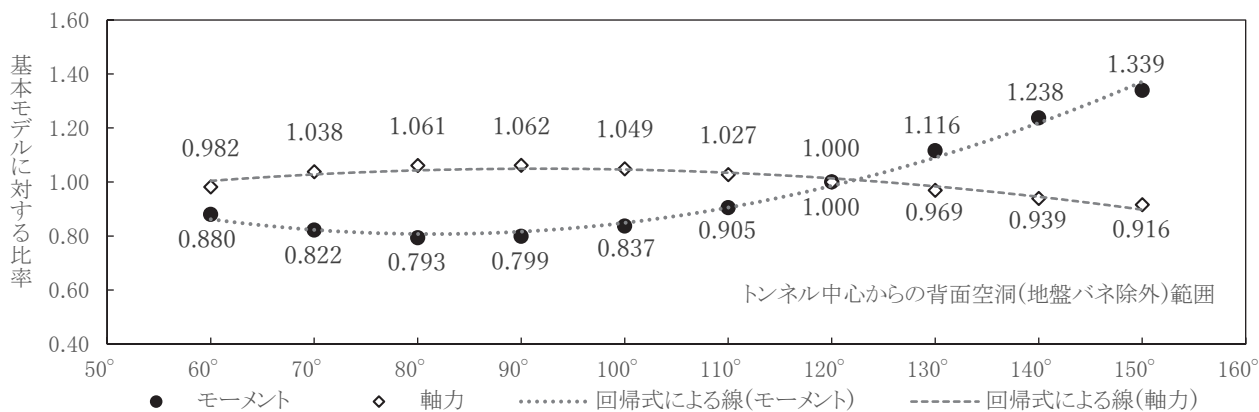


図-18 地盤バネの範囲と曲げモーメントの変化率と軸力の変化

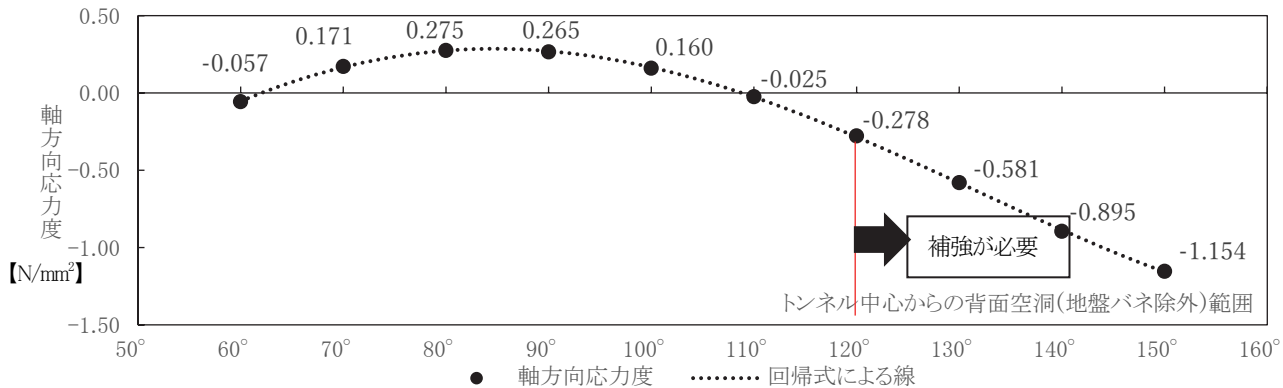


図-19 地盤バネの範囲と軸方向応力度との関係

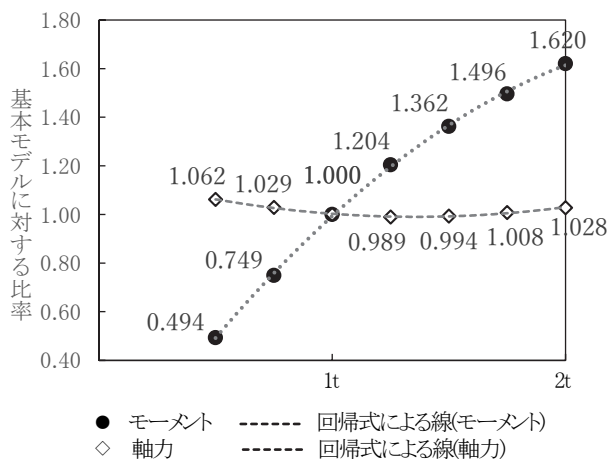


図-20 覆工巻厚と曲げモーメントの変化率と軸力の変化

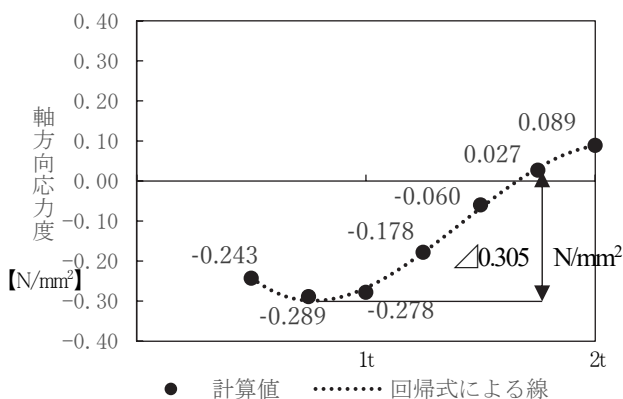


図-21 覆工巻厚と軸方向応力度との関係

(4) 考察

a) モデル化に関して

解析モデルを作成する上で、以下に留意することが望ましい。

①解析モデルを細分化することで、解析精度が向上するため、着目部材と作用荷重方向を考慮して、必要に応じて部分的にでも節点数を増やすことが望ましい。ただし、節点数による軸方向応力度の差分 0.086N/mm^2 に比べ（図-7）、覆工巻厚による差分 0.305N/mm^2 （図-21）が大きくなるため、覆工巻厚の現状把握が重要となる。

②在来工法で施工されたトンネルを対象とする場合、水路トンネル等の小断面トンネルで用いられる全断面掘削工法と道路トンネル等の上半先進掘削工法とでは上下半の覆工の連続性が異なり、支点条件が異なるため、施工目地を適切にモデル化する必要がある。

③覆工水平目地は水平移動を許容する支持構造とはなっていないため、両端ピン構造とすることが妥当である。

④解析モデル軸を部材中心とすることで、若干、安全側の解析結果となる。

b) 構造及び外部条件の影響に関して

①発生する曲げモーメントは上載荷重にはほぼ比例する。

②発生する曲げモーメントと地盤バネ値は対数的関係にあり、地盤バネ値の設定により発生する曲げモーメントは大きく変化するため、地盤バネ値の設定は慎重に行う必要がある。

③地盤バネの範囲設定により、発生する曲げモーメントは大きく変化する。地盤バネの範囲設定は十分な調査結果に基づいて行うべきである。

④覆工巻厚の増大は曲げ引張応力度の解消に役立つ。

5. おわりに

(1) 妥当性の検証

本報は、左右非対称で一部覆工厚の薄いトンネルをモデル化して感度分析を行ったが、軸力に比べ曲げモーメントが大きく変動した点、及び各項目に対する軸方向応力度の分析結果については概ね想定とおりの結果を得た。ただし、地盤バネに関しては、使用モデルの形状が結果に大きく影響したと感じられるので、左右対称かつ等厚のモデルを用いてさらに検証することも必要であろう。

(2) 得られた知見

a) 解析の傾向と方向性

モデル化に関する感度分析で、基本的なモデルの組み方を示すことができた。自重や上載荷重についても、傾向は概ね理解できた。地盤バネに関しては、使用モデルの影響もあると思われるが、定数の設定次第で計算結果が大きく変化することを確認することができた。

b) 影響度合

本解析の結果からインプットデータの影響度合を整理する。荷重については、上載荷重を約 1 割(土被りで 30cm 程度)増加させると負の軸応力度が 0.042N/mm^2 だけ増加し、覆工巻厚を約 1 割(巻厚で 15cm 程度)減少させると負の軸応力度が 0.021N/mm^2 だけ増加する。地盤バネについては、地盤バネ値を 1/2 程度に低減させると負の軸応力度が 0.355N/mm^2 だけ増加し、空洞範囲を 10° 広げると負の軸応力度が 0.303N/mm^2 だけ増加する。

一概にインプットデータの影響度合を順位付けすることは出来ないが、地盤バネ値と地盤バネの範囲は、軸応力度に及ぼす影響は大きいこと、また、上載荷重も軸応力度に及ぼす影響は小さくないことが分かった。

c) 今後の展望

本報では感度分析を行うことで、軸方向応力度に大きく影響を及ぼすインプットデータとして、地盤バネ値、

地盤バネの範囲，上載荷重であることが分かった。

精度の高い骨組み構造解析を行うためには，覆工厚，覆工背面空洞の分布状況を確認するための地中レーダー探査やキャリブレーションボーリングの適切な計画が重要である。

今後は，空洞充填材の強度についての検討や縦断方向へ長くのびた背面空洞についての評価，解析手法の検討が望まれる。

謝辞：本報告は，一般社団法人九州橋梁・構造工学研究会（KABSE）が設置されている「既設トンネルの効果的補修補強工法に関する研究分科会」（部会長：蔣宇静）の研究活動成果の一部を取り纏めたものである。解析モデルの設計および解析結果の考察においては，研究分科会の宇都宮隆，鷲尾寛，竹内一博，大塚久哲などの各委員から協力を頂いた。九州橋梁・構造工学研究会からの支援に感謝するとともに，研究分科会での活動成果が，既設トンネルの効果的補修補強工法の設計で苦慮されている実務者に役立つことを切に願う次第である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】， pp.248-249, 2015.
- 2) 真下英人，砂金伸治，木谷努：山岳トンネルの構造解析手法に関する一考察，トンネル工学報告集，第 15 巻， pp.107-114, 2005.
- 3) 蔣宇静，東 幸宏，谷口硯士，古賀大陸：変状トンネルの覆工内面補強設計に用いる解析モデル化手法の提案，トンネルと地下，第 524 号， pp.69-77, 2014.
- 4) 松長剛，熊坂博夫，小島芳之，朝倉俊弘：地山強度の経時変化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する研究，土木学会論文集，第 799 号， pp.75-88, 2005.
- 5) 野城一栄，小島芳之，櫛田正人，佐野 力：欠陥を考慮したトンネル覆工の骨組構造解析，土木学会第 56 回年次学術講演会，III-B017， pp.34-35, 2001.
- 6) 西村直人，西村和夫，土門剛：都市 NATM 覆工の骨組構造解析，土木学会第 58 回年次学術講演会概要集，III004， pp.7-8, 2003.
- 7) 朝倉俊弘，安東祐豊弘，小島芳之：トンネル覆工の力学挙動挙動解析，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第 2 巻， pp.51-58, 1992.
- 8) 横山幸也，志水義彦，石田毅：応力測定によるトンネルライニングの健全度評価に関する実証的研究：土木学会論文集，No687III-56， pp.65-76, 2001.
- 9) 砂金伸治，真下英人，：トンネル覆工の耐荷力の評価に関する研究，土木工学研究発表会論文・報告集，第 12 巻， pp.401-406, 2002.
- 10) 砂金伸治，真下英人，義永茂司，馬場弘，城間博通：トンネル覆工の耐荷力の評価に関する基礎的研究，土木工学研究発表会論文・報告集，第 11 巻， pp.141-146, 2001.
- 11) 木股浩考，仲山貴司，津野 究，焼田真司：圧密地盤におけるシールド掘削解析の感度分析，土木学会第 67 回年次学術講演会，III-116， pp.231-232, 2012.
- 12) 清水幸範，岡嶋正樹，田作裕輔，焼田真司：硬質地盤における円形トンネルの設計法に関する一考察(その 2)，土木学会第 64 回年次学術講演会概要集，VI-264， pp.527-528, 2009.

(2020. 8. 7 受付)

SENSITIVITY ANALYSIS OF AXIAL STRESSES OF EXISTING TUNNEL LINING BY PARAMETRIC FRAME STRUCTURE ANALYSIS

Kunihiko TOYAMA, Dairoku KOGA, Kazuhiro TOKUNAGA, Ryosuke SAHO
and Hiroki YONEDA

In recent years, the aging phenomena of existing tunnel linings have been clarified in detail by the increasing inspection of tunnels, and the detailed investigations of lining reinforcements have been actively conducted. According to this background, the necessity of rational reinforcement design method of linings is increasing. In this report, the change of axial stresses in the lining was clarified by parametric studies using the frame structure analysis method. Specifically, the maximum bending moments, axial forces, and axial stresses generated in the lining became clearly by changing the input data such as load, ground spring value, range of ground spring acting, lining thickness, and number of nodes. The truly necessary soil investigation around tunnels are pointed out in this study. After obtaining these values, we can conduct to more exact design of lining reinforcement of tunnels.