

覆工補強設計における 背面空洞等の影響評価について

林 琪煒¹・韓 偉²・蔣 宇静³・古賀 大陸⁴

¹長崎大学 大学院工学研究科(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)
E-mail: linqiweilink@163.com

²長崎大学 大学院工学研究科(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)
E-mail: sdkdwei@163.com

³正会員 長崎大学教授 大学院工学研究科(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)
E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp

⁴(株)エイト日本技術開発 防災保全事業部九州支社(〒812-0018 福岡市博多区住吉 3-1-80)
E-mail: koga-da@ej-hds.co.jp

高度経済成長期に建設されたトンネルの老朽化が進み、補修・補強が必要となるトンネルが増えている。特に、トンネル覆工に緩みなど外的要因と施工技術等に起因して、覆工の背面空洞や巻厚不足が生じていることがあり、天端部の覆工の構造耐力が明らかに減少していることが数値シミュレーションにより判明されている。一方、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も現状である。そこで本報では、覆工の骨組み解析に対し、各種インプットデータを変化させて感度分析を実施することにより、背面空洞などがトンネル覆工の軸応力度や耐力に与える影響を定量的に評価することを目的とする。

Key Words: tunnel defect, lining, voids, insufficient thickness, framed structure analysis

1. はじめに

日本のトンネルの多くは戦後の復興、高度経済成長期を通して急速かつ大量に建設されたものである。そのため、多くのトンネルが30～50年経過し、老朽化の問題に直面することとなっている。トンネル覆工に地山の緩みなど外的要因による変状が発生した場合、経験的判断に基づく補強設計が主に行われているのが現状である。一方、近年では、トンネル点検の義務化により、覆工補強のための詳細調査も積極的に行われている。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があり、覆工に発生している応力状態等を力学的に評価し、合理的補強設計を行うことが望まれている。

既設トンネルの覆工補強は、実際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、覆工背面地山の状況が不明確なことや詳細調査に限界があるために限定的もしくは線状でしか把握できないことなど、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ことがあるようである。そこで本論では、覆工解析に用いられている骨組み解析ソフトのインプットデータを変化させて感度分析を実施し、覆工の

軸応力度に及ぼす覆工背面空洞などの影響を定量的に評価することを目的とする。

解析モデルの設計では、覆工背面空洞および覆工巻厚不足（ここでは構造的欠陥部という）がある場合の、構造的欠陥部の範囲、位置、離隔距離、巻厚を変化させて、曲げモーメントと軸力に着目した分析と考察を行った。

2. 背面空洞等を有する覆工応力状態の解析的評価

(1) 解析モデルの設計

緩み荷重は、Terzaghiの緩み土圧式よりゆるみ高さを3.18mとし、地山の变形係数は、CL級で200MPaとする。解析断面はS. L.より上半部を対象とし、節点数37、部材数36、大きさは半径5mの半円でモデル化するが、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する。なお、構造解析ソフトはFRAME（面内）を使用した。

図-1(b)は、構造的欠陥部が1ヵ所の場合で、青線と青線の間で欠陥部（巻厚不足または背面空間あり）が発生していることを示しており、欠陥部の範囲 α 、位置 β で

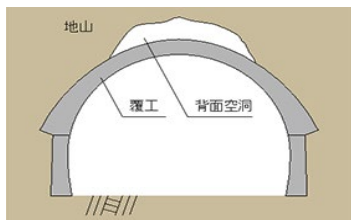
表す。図-1(c)は、構造的欠陥部が2カ所の場合で、位置 γ を表す。図-1(d)では、構造的欠陥部の離隔距離（各欠陥部の中央）を δ で表す。

(2) 解析ケースの設定

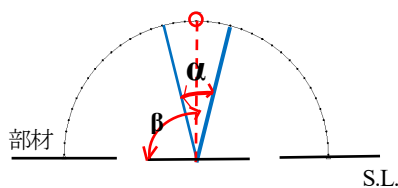
本研究では、以下のように解析ケースを設定した。図-2のように覆工背面空洞のあるケースを基本モデルとし、以下のように代表的な解析パターンを設定し、詳しい考察を行う。

- ① 覆工背面の単空洞
- ② 覆工背面の双空洞
- ③ 覆工巻厚不足(1カ所)
- ④ 覆工巻厚不足(2カ所)

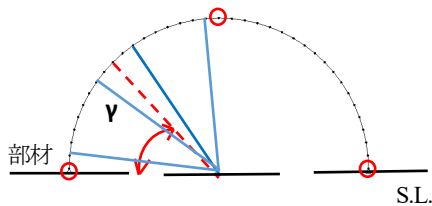
なお、① 覆工背面の単空洞、または、覆工の巻厚不足



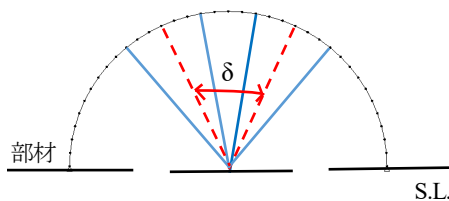
(a) トンネルの標準断面



(b) 欠陥部の位置を示す基本モデル
(欠陥部1カ所の場合)



(c) 欠陥部の位置を示す基本モデル
(欠陥部2カ所の場合)



(d) 欠陥部の離隔を示す基本モデル

図-1 基本モデルの設定

(1カ所)の範囲は円周上の角度で(30°, 40°, 50°, 60°)とし、② 覆工背面の空洞間の離隔距離も円周上の角度で($\beta=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$)とする。それに覆工巻厚不足箇所間の距離は、例として($\beta=20^\circ, 40^\circ$)とする。

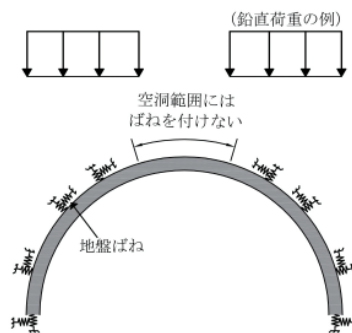
(3) 断面安全係数

本報では、「鉄道トンネル設計示様書 Code for Design of Railway Tunnel」(TB10003-2016)¹⁾に基づき、総合安全係数法を用いてコンクリート矩形断面の偏心受圧部材の圧縮強度を計算する。

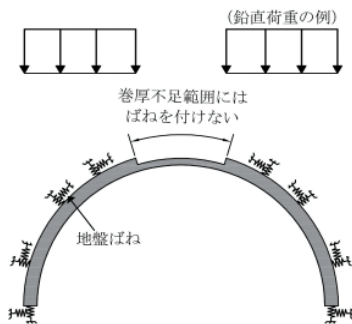
鉄筋コンクリート覆工断面は、偏心距離の大きさや鉄

表-1 解析ケースの概要

欠陥部	位置	欠陥部の範囲
覆工背面の単空洞	範囲 (位置: 90°)	30°, 40°, 50°, 60°
	範囲 (位置: 120°)	30°, 40°, 50°, 60°
覆工背面の双空洞	離隔距離	40°, 50°, 60°
	空洞の範囲	30°, 40°, 50°
覆工巻厚不足 (1カ所)	範囲 (位置: 90°)	30°, 40°, 50°, 60°
	巻厚	0.2m, 0.3m
覆工巻厚不足 (2カ所)	巻厚不足間の距離	20°, 40°



(a) 背面空洞の基本モデル



(b) 覆工巻厚不足の基本モデル

図-2 変状は覆工巻厚不足の基本モデル

表-2 天端部空洞(空洞中心位置 90°)のケースに対する断面安全係数の比較

空洞範囲	天端部(90°)	アーチ両肩部(60°)	アーチ両肩部(30°)	側壁(0°)
30°	30.85	12.42	15.62	11.89
40°	14.73	6.71	17.78	12.82
50°	10.16	6.14	20.81	13.83
60°	10.08	8.97	25.10	14.92

筋の配筋率などに応じて、大きな偏心破壊または小さな偏心破壊が生じる。

覆工に発生する曲げモーメント(M)と軸力(N)の考察を行うために、コンクリートの矩形断面軸及び偏心受圧部材の耐圧強度および引張強度の計算式により、次のように、安全係数(K)を推定することとした。

$$K \leq \frac{\varphi \alpha R_a b h}{N} \quad (\text{耐圧強度}) \quad (1)$$

$$K \leq \frac{\varphi 1.75 R_1 b h}{\frac{6e_0}{h} - 1} \quad (\text{引張強度}) \quad (2)$$

$$\alpha = 1 + 0.648 \left(\frac{e_0}{h}\right) - 12.569 \left(\frac{e_0}{h}\right)^2 + 15.444 \left(\frac{e_0}{h}\right)^3 \quad (3)$$

式中の e_0 は覆工断面内の偏心距離、 R_a はコンクリートの耐圧強度、 R_1 はコンクリートの引張強度、 b は断面の幅、 h は断面の厚さ、 φ は部材の縦方向の曲げ係数、トンネル覆工の場合、 $\varphi = 1.0$ 、 α は偏心軸力の影響係数を示す。

覆工モデルの各節点毎に安全係数は式(1)と式(2)によって求められるが、覆工内の最も危険な箇所を抽出するために、全節点に対して安全係数の比較を行うことにした。表-2は、安全係数の比較例を示す。

(4) 解析結果と考察

a) 単空洞の範囲が変化する場合

単空洞が天端部(90°)にあり、空洞の円周上範囲を30°、40°、50°、60°と変化させた場合の解析結果は図-3に示す。円周上の曲げモーメント、覆工内軸力と安全係数の分布特徴より、以下のことが分かる。

- ・空洞範囲(円周上)が50°以内の場合、曲げモーメントのピーク値が空洞範囲(円周上)の拡大(30°から50°)とともに増大するが、空洞範囲が60°に広がっても、さらに増大せず、50°の場合が最大を示す。一方、空洞円周上の安全係数の分布は逆の傾向を示し、空洞範囲が50°以内の場合、空洞範囲外の安全係数が空洞範囲の拡大とともに減少する。

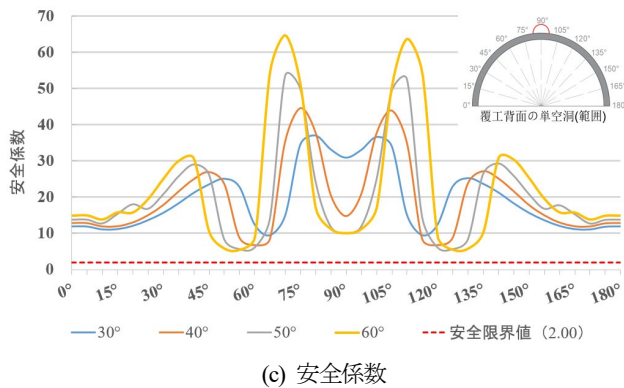
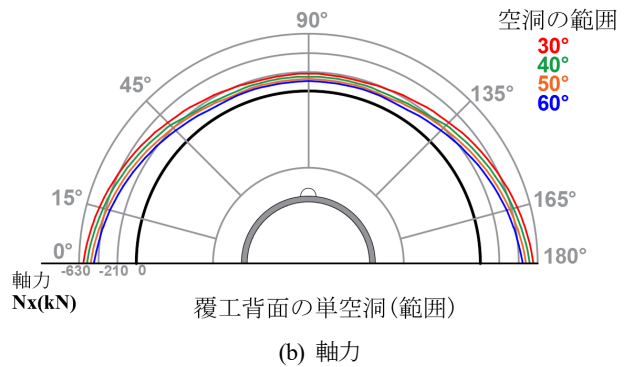
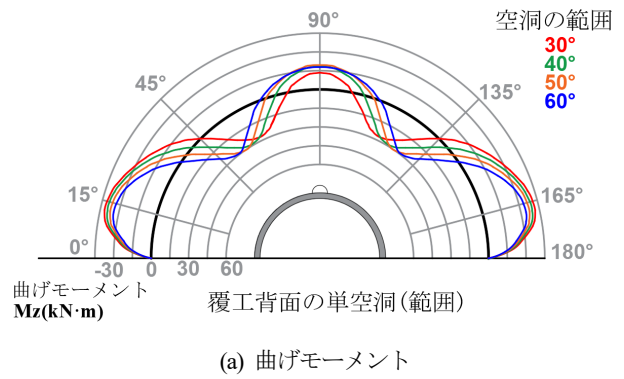


図-3 解析結果(単空洞、天端部)

- ・円周上の位置70°~80°(空洞の両サイドエッジ)では、空洞範囲の拡大による曲げモーメントの値がほとんど変化せず、安全係数が空洞範囲の拡大に伴って急速に増大する。この現象は、空洞の両サイドエッジに作用荷重の変化による影響と考えられる。

- ・円周上の位置50°~60°(アーチの肩部)では、覆工内の曲げモーメントが空洞範囲の拡大とともに増大するものの、安全係数が逆に減少するので、トンネルの覆工コンクリート構造においては、最もひび割れの生じやすい箇所となる。

- ・円周上の位置0°~45°(スプリングラインからアーチ肩部までの範囲)においては、覆工内に発生した曲げモーメントが空洞範囲の拡大とともに減少し、安全係数が増大する。

- ・トンネル覆工内の軸力がいずれのケースにおいても空洞範囲の拡大とともに減少する。

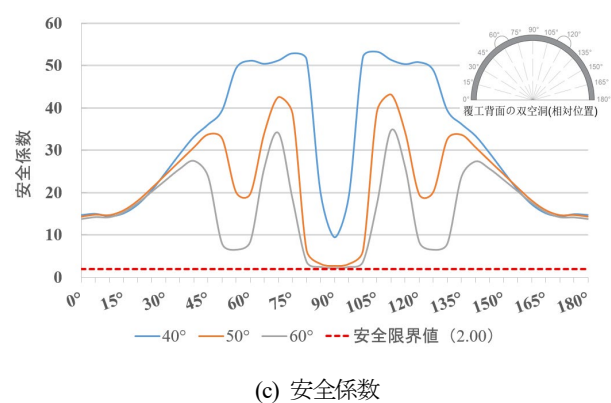
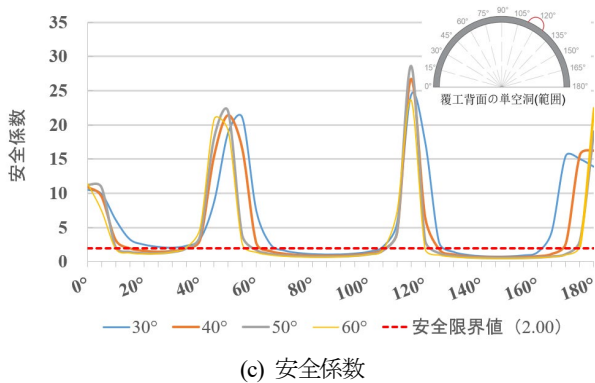
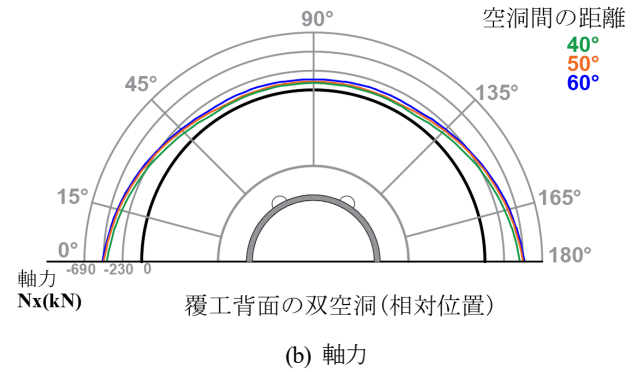
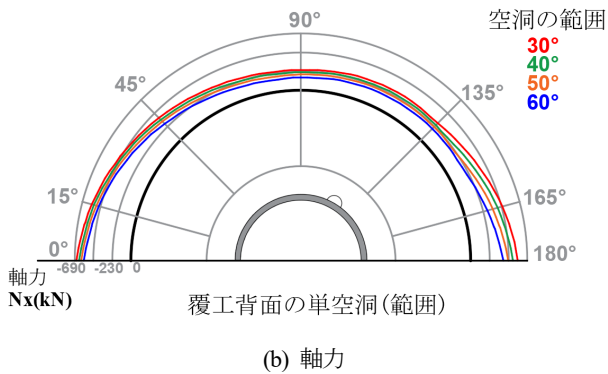
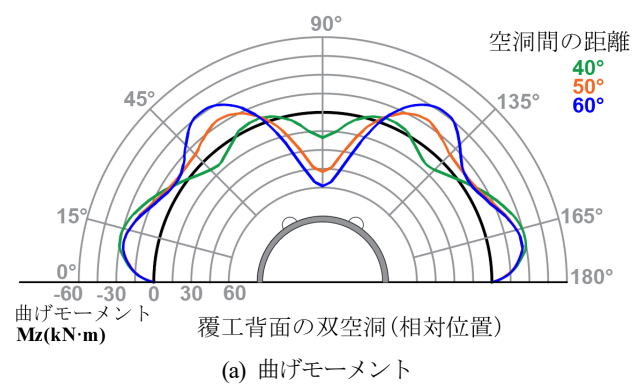
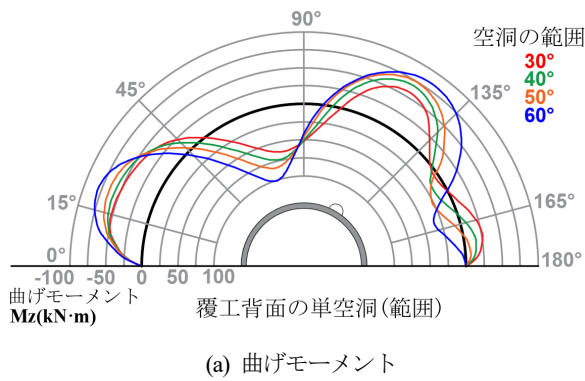


図-4 解析結果（単空洞、円周上120°）

図-5 解析結果（双空洞、円周上60°と120°）

b) 単空洞の位置が変化する場合

単空洞の位置が円周上120°の場合では、空洞範囲を30°、40°、50°、60°と変化した解析結果を図-4に示す。

空洞範囲による影響の比較から、以下のことが分かる。

- ・天端部（円周上90°）では、曲げモーメントが空洞範囲の拡大とともに増大するが、安全係数はほとんど変化せず、限界値2を下回っているため、引張りによるひび割れが入りやすい状態にある。

- ・円周上の位置110°~125°（背面空洞中心120°）では、曲げモーメントと安全係数が空洞範囲の拡大とともにいずれも増大する。

- ・円周上の位置130°~170°（背面空洞の近傍）においては、空洞範囲の拡大による曲げモーメントと安全係数がほとんど変化しないが、安全係数が限界値2を下回っているため、同様に引張りによるひび割れが入りやすい状態にある。

態にある。

- ・円周上の位置45°~55°（背面空洞の反対側）では、曲げモーメントが空洞範囲の拡大とともに減少し、安全係数がほとんど変化せず、限界値2を超えているため、ひび割れが生じない健全な状態にある。

- ・円周上の位置10°~40°（背面空洞から離れた位置）では、曲げモーメントが空洞範囲の拡大とともに増大するので、安全係数が減少し、限界値2を下回ってしまう。

- ・覆工内軸力が空洞範囲の拡大とともに僅かでありながら減少し、背面空洞の範囲においてはその傾向がやや明らかである。

c) 双空洞間の距離が変化する場合

双空洞間の距離を40°、50°、60°と変化した解析結果を図-5に示す。背面空洞の円周上範囲はすべて30°とし、双空洞の対称中心線間の離隔は円周上90°である。

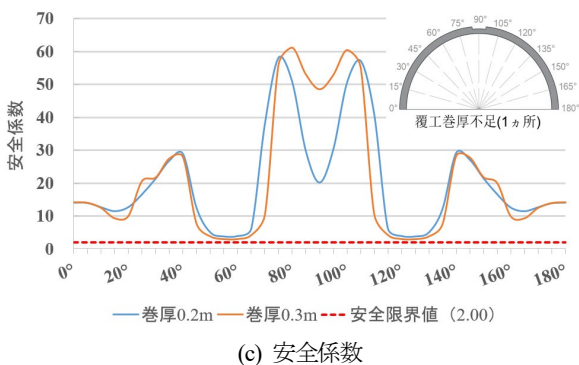
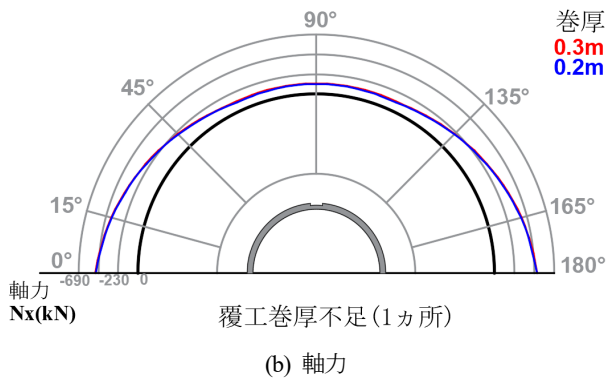
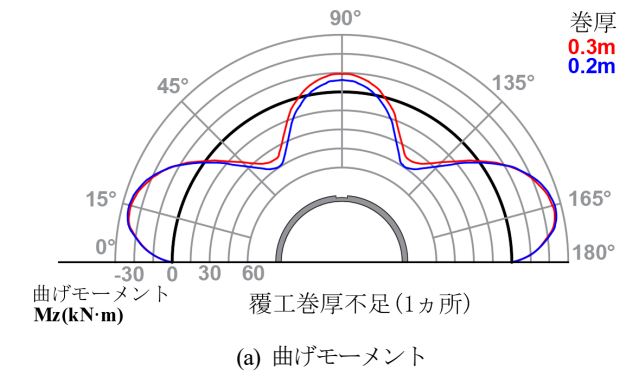


図-6 解析結果（巻厚不足、天端部）

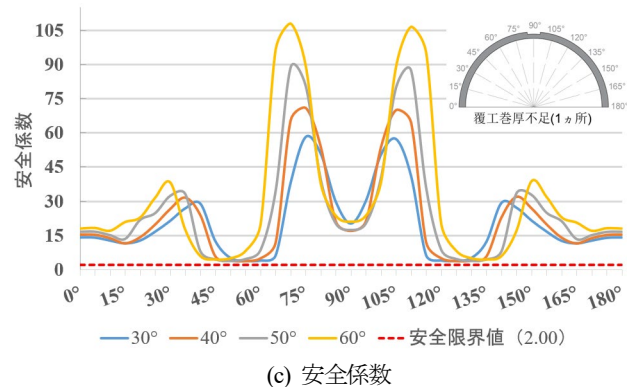
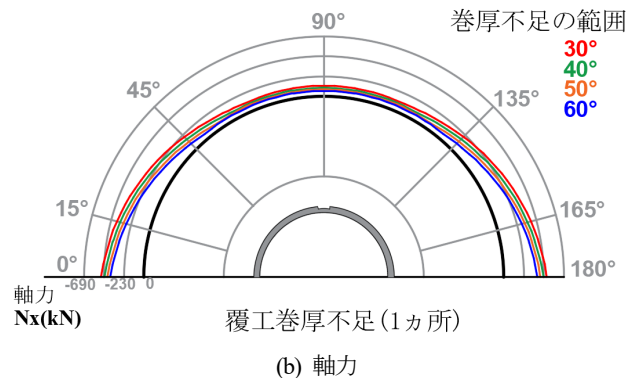
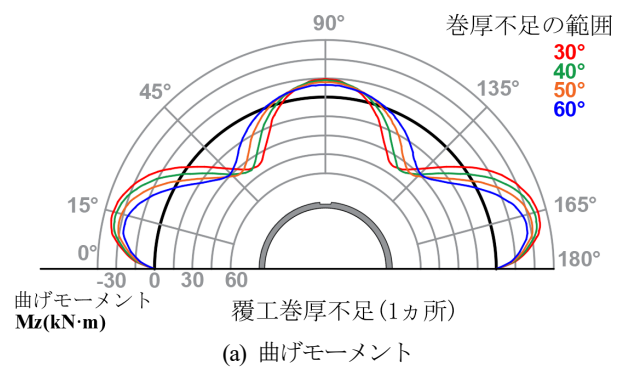


図-7 解析結果（巻厚不足の範囲、天端部）

空空間離隔による影響について、以下のことが分かる。

- ・円周上 70°~110°（双空洞間の対称中心線の離隔）では、曲げモーメントが離隔距離とともに増大するが、安全係数が逆に急速に減少し、限界値に近づくので、引張りによるひび割れが入りやすい状態にある。
- ・円周上の位置 60°~70°と 110°~120°（2つの空洞中心）では、空洞間の離隔とともに曲げモーメントが増大する、一方、安全係数も増大する。
- ・円周上の位置 50°~60°と 120°~130°（空洞の両サイトエッジ）では、曲げモーメントがほとんど変化せず、安全係数が空洞の離隔とともに減少していく。
- ・円周上の位置 0°~45°（スプリングラインからアーチ肩部までの範囲）では、曲げモーメントと安全係数がほとんど変化しない。
- ・覆工コンクリート構造全体の軸力が空洞間の離隔とともに減少する。

d) 覆工巻厚による影響

標準時(0.45m)に対し、覆工の巻厚を 0.3m, 0.2m と変化させた解析結果を図-6 に示す。巻厚不足の箇所は円周上 90°（天端部）にあり、範囲は円周上 30°とする。

巻厚不足による影響の比較から、以下のことが分かる。

- ・覆工の巻厚が 0.3m から 0.2m に変化させると、巻厚不足範囲の中心点における曲げモーメントがやや低下するが、覆工内の軸力はほとんど変化しないので、断面積の減少とともに安全係数は急速に低下する。
- ・円周上の位置 45°~65°と 115°~135°（巻厚不足範囲の両サイト）では、曲げモーメントがやや大きくなり、安全係数が限界値 2 を下回っているため、引張りによるひび割れが生じやすい。

e) 巻厚不足の範囲が異なる場合

図-7 は巻厚不足の範囲による影響を示す。なお、巻厚不足箇所は同様に天端部（円周上 90°）とする。

巻厚不足の範囲による影響効果は次のとおりである。

・天端部（円周上 90°）では、曲げモーメントが巻厚不足範囲の拡大とともに減少し、安全係数が巻厚不足の範囲にわたり比較的低いレベルにある。

・円周上の位置 70°~80°と 105°~115°（巻厚不足範囲の両サイトエッジ）では、巻厚不足範囲の広がりとは関係せず曲げモーメントがほとんど変化しない。一方、両サイトエッジに荷重が集中するために安全係数が巻厚不足範囲の拡大とともに急速に増大する。

・円周上の位置 45°~65°と 120°~140°（アーチ肩部）では、曲げモーメントが巻厚不足範囲の広がりとともに増大し、安全係数が逆に低減し、限界値 2 に近づくので、最も割れやすい箇所になる。

・円周上の位置 0°~45°（スプリングラインからアーチ肩部までの範囲）では、曲げモーメントが巻厚不足範囲の広がりとともに減少するので、安全係数が増大する傾向にある。

・覆工構造全体の軸力が巻厚不足の範囲の拡大とともに減少する。

3. おわりに

本報では、覆工の背面空洞および巻厚不足といった構造的欠陥部の存在に着目して、欠陥部の範囲や箇所、複数欠陥部の場合の離隔距離、巻厚の厚さを変化させながら、覆工に生じる曲げモーメント、軸力と安全係数について詳細な考察を行い、次のことを明らかにした。

1) 欠陥部（背面空洞や巻厚不足）の個所（円周上）では安全係数が顕著に低下する。トンネル S. L. 付近においても安全係数が決して高くない。

2) 曲げモーメントについて、欠陥部である巻厚不足よりも覆工の背面空洞による影響が大きい。安全係数が巻厚不足の影響を受けやすい。

3) 欠陥部が複数個所に存在する場合、安全係数が明らかに低下し、しかも低下する範囲も増大する。

4) 複数の欠陥部の離隔距離が覆工の健全性に明らかな影響を及ぼし、安全係数の低下範囲も増大する。

以上は基礎的検討として解析的に得られた知見であるが、変状を引き起すケースをさらに検討していくことで、トンネル覆工変状が発生した場合の補強設計において参考になることを期待したい。

参考文献

- 1) 鉄道トンネル設計規範(Code for Design of Railway Tunnel) : TB10003-2016, 2016.
- 2) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル, 1998.
- 3) 農林水産省構造改善所：土地改良事業計画設計基準設計「水路トンネル」, 1996.
- 4) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧, 1993.
- 5) 日本道路公団：JH 設計要領第三集 トンネル本体工保全編(変状対策), 1998.
- 6) 土木学会：トンネルの変状メカニズム, 丸善, 2003.
- 7) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領, 2019.
- 8) 野城一栄, 小島芳之, 榎田正人, 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 回年次学術講演会概要集, pp.34-35, 2001.
- 9) 遠山国彦, 古賀大陸, 徳永和広, 佐保亮輔, 米田裕樹：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, トンネル工学報告集, Vol.30, I-26, pp.1-8, 2020.

(2022. 8. 26受付)

A STUDY ON THE FRAME STRUCTURE ANALYSIS FOR LINING DESIGN OF EXISTING TUNNEL

Qiwei LIN, Wei HAN, Yujing JIANG and Dairiku KOGA

Tunnels built during the period of high economic growth are aging, and an increasing number of them need to be repaired and reinforced. Especially, due to the external factor such as looseness to the tunnel lining and the construction technology, the back cavity and the shortage of thickness of the lining are caused. It can be found through numerical simulation that the bearing force of the lining structure at the crown is significantly reduced. On the other hand, there is currently a dilemma about how to set the input data required for the reconstruction analysis. The purpose of this paper is to quantitatively evaluate the influence of the back hole on the axial stress and bearing capacity of the tunnel covering project by changing various input data for sensitivity analysis.