

塩害が生じたシールドトンネルの 継手腐食を考慮した数値解析法

木下 果穂* 牛田 貴士**

Numerical Analysis Method for Corrosion of Segment Joint
of Shield Tunnel Caused by Chloride Attack

Kaho KINOSHITA Takashi USHIDA

Deterioration caused by chloride ions may occur in some shield tunnels located in waterfront areas or near tidal rivers. In this paper, we propose a three-dimensional finite element method for the maintenance of shield tunnels effected by chloride ions. In proposing this method, we developed a modeling method for deteriorated segment joints by reducing stiffness. In addition, we verified the validity of the method by loading tests of tunnel lining specimens.

キーワード：シールドトンネル，セグメント継手，塩害，腐食，載荷試験，数値解析

1. はじめに

近年，臨海部や感潮河川近傍に位置するシールドトンネルでは，RCセグメントに塩化物イオンを含む漏水に起因する鋼材腐食が見られる場合がある。塩化物イオンの存在によりコンクリート中の鋼材腐食が進行し，コンクリートのひび割れや剥離・剥落，あるいは鋼材の断面減少が生じ，性能低下につながる現象（以下，塩害劣化）は，一旦顕在化するとその後の進行が速く，効果的な対策も限られることが多いため¹⁾，維持管理において重要な課題の一つとなっている。

また，シールドトンネルにおける漏水は継手部から生じることが多く，漏水発生箇所の継手鋼材は厳しい腐食環境となることが予測される。しかし，塩害環境下におけるRCセグメントの鉄筋腐食の状況や，コンクリート中の塩化物イオンの挙動に関する研究が進められている一方で，塩害劣化が力学的挙動に及ぼす影響について検討した事例²⁾は少ない。

さらには，シールドトンネルは多数の継手を有する構造であり，継手部の剛性は本体のコンクリート部よりも小さい。そのため，継手鋼材の腐食により継手部の剛性が変化した場合，トンネル覆工の力学的挙動に影響を及ぼすことが考えられる。今後，塩害環境下のシールドトンネルを適切に維持管理するためには，継手部の劣化状況と劣化に伴う力学的挙動を把握し，これらの影響を考慮した解析法が必要となると考えられる。

以上を踏まえ，本研究では，継手部を模擬した供試体

の腐食促進実験³⁾の知見に基づき，既設の鉄道シールドトンネルに多く使用されているボルト継手を対象として，三次元FEMにおいて塩害劣化の影響を考慮できる新たな継手部のモデル化手法を提案し，載荷実験の結果を用いて提案手法の妥当性を検証する。

2. シールドトンネルの三次元FEM

2.1 提案手法の概要

多数の継手を有することはシールドトンネルの構造的特徴であるため，数値解析的にシールドトンネルの力学的挙動を把握する際には，継手のモデル化は重要と考えられる。一般に設計で用いられるはり-ばねモデルでは，継手を回転ばねとしてモデル化し，覆工全体系の応答値を算出する。また，三次元FEMを用いてセグメントの詳細検討を行った事例に，セグメント覆工をシェル要素，継手をばね要素でモデル化して検討を行った例⁴⁾や，セグメント覆工をソリッド要素，継手をばね要素でモデル化して検討を行った例⁵⁾がある。

そこで，本研究では，シールドトンネルの維持管理において，対策工の詳細検討に用いることを想定し，継手部のモデル化手法を提案した。その概要は以下の通りである。まず，部材内の応答を三次元的に把握できるソリッド要素でセグメント覆工をモデル化した。継手は既設の鉄道シールドトンネルに多く使用されているボルト継手を想定し，継手を構成する継手板はシェル要素で，ボルトやアンカー筋は継手ばねとしてモデル化する。次に，塩害劣化の影響については，継手ばねの剛性を低減させる方法で表現する。なお，シールドトンネルの通常の維持管理では，継手鋼材の降伏応力以下に応答値を抑える

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

表1 提案手法におけるモデル化方法

モデル化対象	要素種類 (呼称)	備考
セグメント本体	ソリッド要素	線形弾性モデル
継手板	シェル要素	線形弾性モデル
継手ボルト	ばね要素 (継手ばね)	継手ボルトとアンカー筋 の複合ばね
継手アンカー筋		
コンクリート面の 相互作用	ばね要素※ (接触ばね)	等価剛性で非線形挙動を 考慮する圧縮ばね

※引張状態となる場合は剛性を0とする

ことが一般的と考えられるため、本提案手法は継手鋼材の降伏応力以下の挙動を対象として構築した。

2.2 シールドトンネルのモデル化

提案手法におけるシールドトンネルのモデル化方法を表1、図1に示す。提案する解析法は、継手挙動を2種類のばねによりモデル化することを特徴とするソリッド-シェル要素を用いた解析法である。

提案手法では、既往研究⁴⁾を参考にセグメント本体をソリッド要素で、継手板をシェル要素でモデル化する。また、ソリッド要素とシェル要素の境界は二重節点として剛結する。シェル要素の自由度にはソリッド要素にはない回転3成分があるため、それを拘束するために機能要素の一種である剛体要素を用いる。ここでボルトボックスは、有限要素モデルによりその形状を実物に合わせて表現する。

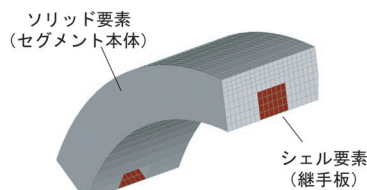
上記のソリッド要素およびシェル要素でモデル化していない継手鋼材、セグメント間のコンクリート面の相互作用は、継手ばね、接触ばねでモデル化する。継手ばねは継手ボルトと継手アンカー筋とをモデル化した1つの複合ばねである。継手部を模擬した供試体の腐食促進実験³⁾の結果から、継手付近では継手鋼材に沿った塩化物イオンの浸透が生じており、アンカー筋の欠損やアンカー筋の先端部まで腐食が発生することを確認した。これより、アンカー筋の腐食によってコンクリートとの付着が低減し、覆工の力学的挙動に影響を及ぼすことが示唆されたため、継手ばねは継手アンカー筋を考慮した複合ばねとし、それをボルト位置に設置する。

また、接触ばねはセグメント間のコンクリート面の相互作用をモデル化する圧縮ばねであり、セグメント本体のひび割れ等の影響を考慮した等価剛性として、継手面のコンクリート全体に設置する。なお、地盤ばねと接触ばねが引張状態となる場合のばね剛性は0とした。

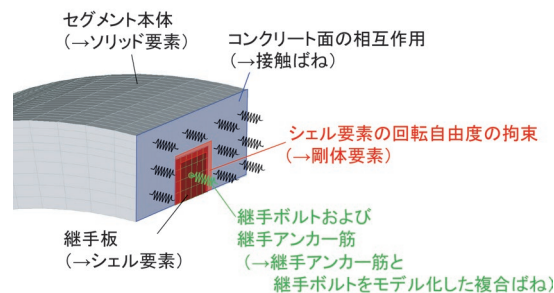
2.3 継手部のモデル化

2.3.1 セグメント間の接触ばね

載荷に伴いセグメント本体では、継手部においてセグメント同士の接触・圧縮により反力を生じる。これらを表現するため、セグメント間のコンクリート面に接触ば



(a) セグメント本体・継手板のモデル化



(b) 継手部のモデル化

図1 シールドトンネルのモデル化方法

ねを導入することとした。継手部ではコンクリートの圧縮時の非線形挙動や、ひび割れ発生に伴う非線形挙動、セグメント同士が不連続であることから生じる接触挙動等、材料の非線形性のほか、部材的な非線形性、構造的な非線形性を有する複雑な挙動を呈すると考えられる。提案手法では、これらの挙動を接触ばねで一括してモデル化するものとした。ここで、接触ばねは、接触ばね長さによってセグメントの非線形挙動を等価線形で考慮することとした。接触ばねの剛性は式(1)により算定する。なお、接触ばねの長さについては、次章で後述する。

$$k = \frac{E_c A}{L} \quad (1)$$

ここで、

E_c : セグメント本体のヤング係数 (kN/m²)

A : 継手面におけるコンクリートの断面積 (m²)

L : セグメントの非線形挙動を等価線形で考慮する接触ばね長さ (m)

2.3.2 継手ばね

提案手法では、継手板はシェル要素によりモデル化し、ボルト継手の他の主な構成要素である継手ボルト1本とアンカー筋8本については、継手ばねとしてモデル化する。供用時は、継手のアンカー筋と継手ボルトは引張と曲げが作用した状態となると考えられるため、図2に示す引張挙動と図3に示す曲げ挙動を考慮して、式(2)でばね剛性を設定する。

引張挙動については、ワンパス継手の引張ばね定数の算出方法⁶⁾を参考に、図2に示すように1つの複合ばね(以下、継手ばね)としてモデル化し、これをトンネル周方向の継手ばね剛性とした。

曲げ挙動については、セグメント覆工の荷重実験³⁾後に取り出した継手のアンカー筋の変形状態から、アンカー筋先端部を固定端とした片持ち梁の曲げ状態と仮定して式(3)を用いて設定することとし、トンネル半径方向の継手ばね剛性とした。ここで、半径方向の継手ばねにおいて、アンカー筋の周囲のコンクリートによる拘束の影響や、その破壊進展に伴う非線形性、腐食によるアンカー筋の曲げ剛性への影響等については、感度が低いことを確認したうえで、簡便のため考慮しないこととした。また、本手法では横断方向の挙動に着目しているため、トンネル奥行き方向の継手ばね剛性は、半径方向と同じ値を用いることとした。

また、継手部を模擬した供試体の腐食促進実験³⁾の結果から、塩化物イオンの作用が継手アンカー筋に強く影響を及ぼすことが示唆された。この結果を踏まえ、アンカー筋や継手ボルト等の継手鋼材の腐食の影響は、トンネル周方向の継手ばね剛性 k_2 においてばね低減係数 α を乗じることで考慮することとした。

$$[k_1, k_2, k_3] = \left[8k_{ab}, \alpha \frac{k_{at}k_{bt}}{k_{at} + 2k_{bt}}, 8k_{ab} \right] \quad (2)$$

ここで、

- k_1 : トンネル半径方向の継手ばね剛性 (kN/m)
 - k_2 : トンネル周方向の継手ばね剛性 (kN/m)
 - k_3 : トンネル奥行き方向の継手ばね剛性 (kN/m)
 - k_{ab} : 1本の継手アンカー筋の曲げによるばね剛性 (kN/m)
- 式(3)による。(継手1つあたりアンカー筋8本)

$$k_{ab} = \frac{3E_s I}{l^3} \quad (3)$$

- k_{at} : 継手アンカー筋の引張ばね剛性 (kN/m)
- k_{bt} : 継手ボルトの引張ばね剛性 (kN/m)
- α : 腐食によるばね低減係数 ($\alpha = 0 \sim 1.0$)
- E_s : アンカー筋のヤング係数 (kN/m²)
- I : アンカー筋の断面二次モーメント (kN/m²)

3. 大型覆工模型実験を用いた提案手法の検証

3.1 概要

セグメント覆工の荷重実験³⁾を対象に、提案した解析法の検証を実施した。提案手法は、覆工の継手が降伏応力以下の状態での挙動の把握を目的としている。また、現在供用中の鉄道シールドトンネルは許容応力度法で設計されている。そのため、解析法の検証は、覆工模型の応答値が概ね許容応力度以下であった荷重板鉛直変位10mm程度以下の範囲を対象として行うこととした。

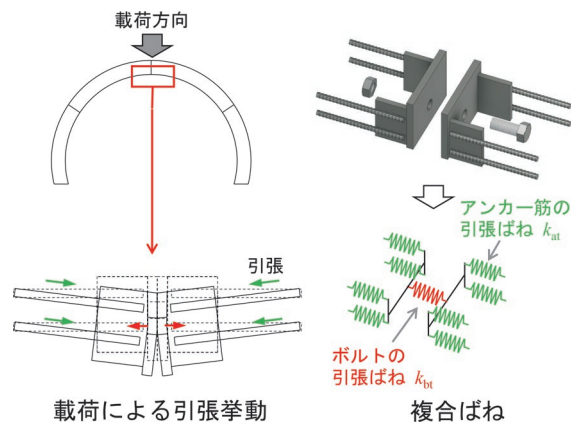


図2 ボルトとアンカー筋の引張挙動

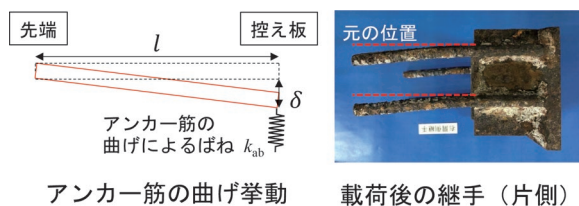


図3 アンカー筋の曲げ挙動



図4 大型トンネル覆工模型実験装置の外観

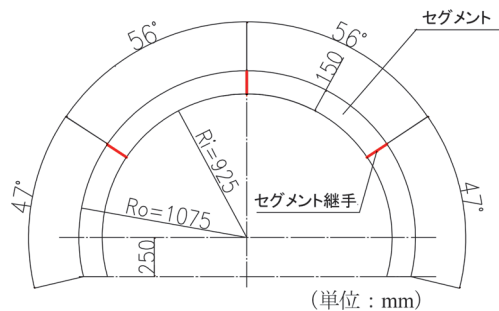


図5 覆工模型

3.2 セグメント模型の荷重実験

検証対象である荷重実験は図4に示す大型トンネル覆工模型実験装置⁷⁾を用いた。荷重実験は、装置の反力用油圧ジャッキをすべて稼働させ、地盤反力が生じている状態を模擬して、天端部の荷重用油圧ジャッキにより鉛直下向きに荷重を行った。また、セグメント覆工は、

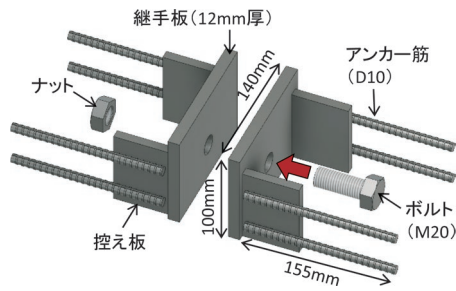


図6 ボルト継手

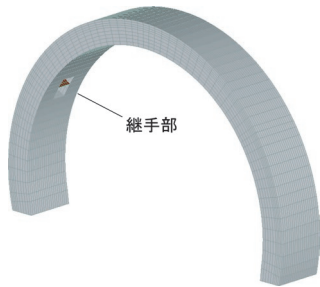


図7 有限要素モデル

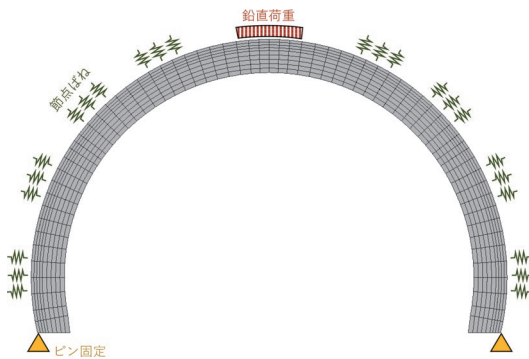


図8 境界条件

図5に示すように4つのセグメント模型を図6に示すボルト継手により結合して作製した。作製した覆工模型は、塩害劣化覆工、アンカー筋の付着切れ覆工、健全覆工の3体である。

塩害劣化覆工は、荷重実験において継手の変形が最も大きいと考えられる天端部のセグメント模型の2ピースを、腐食促進実験³⁾により劣化させ、促進実験終了後にM20のボルトでセグメント模型を締結して作製した。なお、締結時に必要な強度を確保するため、締結ボルトは促進実験を実施していない。

アンカー筋の付着切れ覆工は、腐食促進実験³⁾の結果を参考に、ボルト継手のアンカー筋をD10からφ8の丸鋼(SR-24)に変更してプチルゴム系のテープを接着し、アンカー筋とモルタル部を事前に縁切りしてから、モルタルを打設して作製した。

健全覆工は、塩害劣化覆工および付着切れ覆工との対比用として作製した。

表2 解析に用いた物性値等

構成部材	項目	諸元
セグメント本体	ヤング係数 E_c^{**}	22.5 kN/mm ²
	ポアソン比 ν_c	0.2
	単位体積重量 γ_c^{**}	24.5 kN/m ³
継手板	ヤング係数 E_s	200 kN/mm ²
	ポアソン比 ν_s	0.3
継手ばね	単位体積重量 γ_s	77.0 kN/m ³
	半径方向剛性 k_1	1.9 kN/mm
	周方向剛性 k_2	379.5 kN/mm
	奥行き方向剛性 k_3	1.9 kN/mm
接触ばね	ばね低減係数 a	1 (健全) 0 (付着切れ)
	周方向剛性	0.03 kN/mm

※実験値

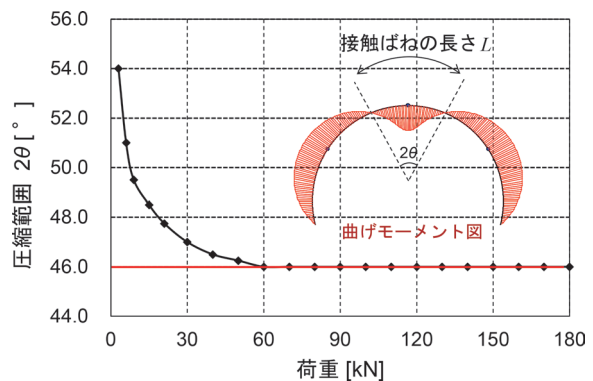


図9 はりばね解析による圧縮範囲の試算結果

3.3 解析条件

解析に用いた有限要素模型を図7に示す。セグメント本体を8節点ソリッド要素、ボルト継手の継手板を4節点シェル要素でモデル化した。また、ソリッド要素とシェル要素の境界部には剛体要素を配置した。節点数は14702、要素数は11736である。

本解析の境界条件を図8に示す。セグメント覆工の脚部は、地盤側の端部を鉛直・水平固定とし、底面は鉛直下側への変位固定を与えた。背面地盤との相互作用を模擬した実験装置の反力板は地盤ばねとしてモデル化し、既往の研究⁸⁾から地盤反力係数は16 MN/m³とした。

本解析で用いた物性値等を表2に示す。ここで、荷重実験は天端部から鉛直荷重したため、同位置の継手挙動の影響が大きいことが考えられた。また、接触ばねは継手面の圧縮や接触挙動を表現するものであり、天端の継手は外側が圧縮となっている。そこで、本解析では接触ばねの長さLは天端付近の地山側で圧縮が生じる範囲と仮定し、すべての継手に同値の値を適用することとした。

具体的には、図9に示すように別途実施したはりばね解析⁹⁾から、荷重の増加に伴い圧縮が生じる範囲は一定値に収束することが確認されたため、天端付近の正曲げ区間の周長の収束値を接触ばねの長さLとした。なお、実験ではコンクリートの引張領域でひび割れが生

じる程度の変位レベルでは、荷重～変位曲線の勾配に影響は認められなかった。そのため、接触ばねの長さ L は、線形のはりばね解析から設定している。

腐食の影響によるばね低減係数 α については、健全覆工を想定した $\alpha=1$ と、付着切れ覆工を想定した $\alpha=0$ の2ケースを実施した。また、荷重の進行に伴うばね剛性の変化を考慮するため、荷重増分を与えるステップ解析とした。

3.4 解析結果

3.4.1 荷重～変位

トンネル天端位置における、実験と解析の荷重～変位曲線の比較を図10に示す。載荷板鉛直変位10mm程度までの範囲において、ばね剛性を低減させなかったケース（ばね低減係数 $\alpha=1$ ）は健全覆工の実験結果を精度よく表現することができた。これより、セグメント本体を線形弾性体としてモデル化し、非線形化の影響をセグメント間の接触ばねとして考慮する提案手法の妥当性を例証する結果を得た。

ばね剛性を低減させたケース（ばね低減係数 $\alpha=0$ ）は、付着切れ覆工の実験結果と概ね整合する結果が得られたが、変位10mm以降は乖離が見られた。また、健全覆工に対する覆工の剛性の低減率は、実験よりも解析の方が大きい結果となった。この結果は、解析では完全に付着が切れた状態としていることに対し、実験では控え板の付着等により抵抗力が残存しているためと考えられる。これより、提案手法で対象とする変形レベルにおける妥当性を例証する結果を得た。

3.4.2 目開き量および応力分布

健全覆工を想定したばね低減係数 $\alpha=1$ のケースと付着切れ覆工を想定した $\alpha=0$ のケースの鉛直変位と、von Mises 応力分布を図11に示す。同図(a)鉛直変位については、継手部の回転剛性低下により、 $\alpha=1$ のケースよりも $\alpha=0$ のケースの方がセグメント間の目開き量が5.2mm程度大きく、それに伴い天端部の鉛直変位も

大きい結果であった。実験では、健全覆工よりも付着切れ覆工の方が目開き量は2.8mm程度大きく、定性的に一致する結果が得られた。解析では、アンカー筋とボルトの抵抗力がボルト位置の継手ばねに集約されていることや、前述したように解析では完全に付着が切れた状態としていること等から、実験の目開き量よりも大きい値となったものと考えられる。

同図(b) von Mises 応力については、想定される損傷範囲として、せん断強度(6N/mm²)以上を着色して図示した。なお、せん断強度は覆工模型に使用したコンクリートの圧縮強度(30N/mm²)の1/5相当とした。 $\alpha=1$ のケースでは、ボルトボックス内部や継手周囲に von Mises 応力が大きい領域が集中した。載荷実験³⁾では、同位置にひび割れが生じており、解析結果と概ね一致している結果が得られた。これより、継手部を接触ばねと

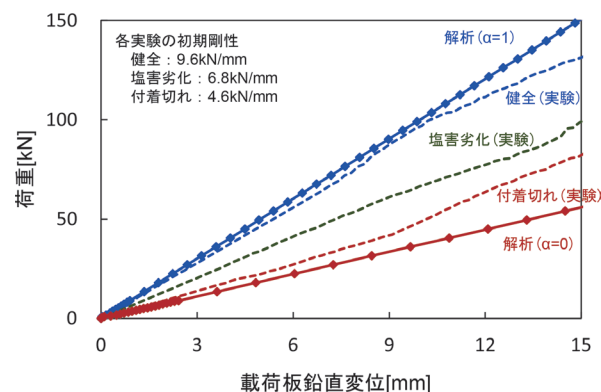


図10 荷重～変位曲線比較

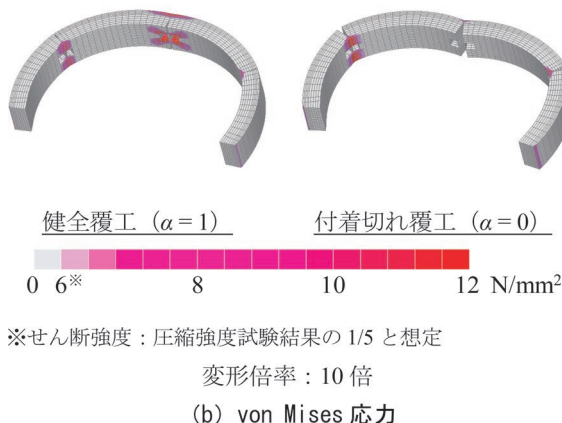
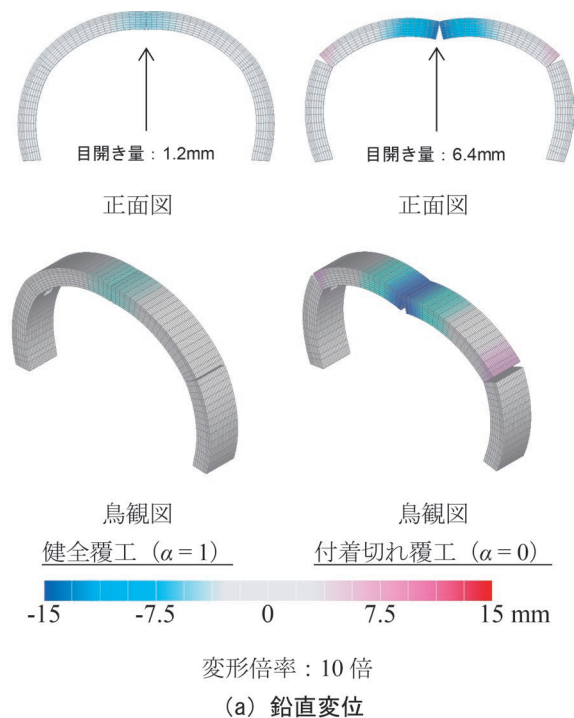


図11 解析結果 (54 kN 載荷時)

して考慮し、実験を再現することができた。

また、 $\alpha=0$ のケースでは天端の継手付近の応力集中は認められず、継手ばねが低減し目開きが大きくなることで、継手周囲が負担する応力が小さくなるという結果が得られた。これは、載荷実験で得られた曲げモーメント分布や覆工のひび割れ発生状態³⁾と定性的に一致する結果であり、継手特性が変化した覆工の応答を把握する手法としての有用性を例示する結果を得た。

3.5 塩害劣化ケースに関する検討

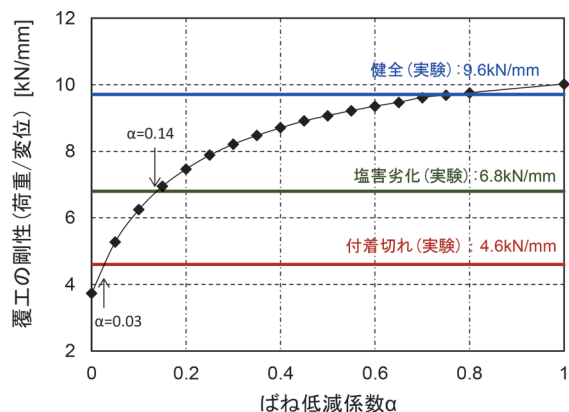
本節では、塩害劣化覆工ケースの状況推定を通じて、提案手法を用いた覆工の状態推定の手順を例示する。ばね低減係数 α のパラメトリックスタディを実施して、荷重～変位曲線の勾配（以下、覆工の剛性）との関係を整理した結果を図12に示す。なお、同図には実験各ケースの覆工の初期剛性も示した。

変状過程を加速期程度の状態を想定して腐食させた塩害劣化覆工では、実験後に目視確認した継手アンカー筋は全体的に孔食が生じており³⁾、付着特性に大きな影響が生じていると想定される状況であった。また、FEMにおける覆工の剛性は $\alpha=0.14$ 程度で実験と整合し、解析においても付着特性のばね低減係数が小さい状態であると推定された。また、本検討の条件では、ばね低減係数 $\alpha=0.2$ 程度以下で、覆工の剛性低下が大きくなる傾向が認められた。

4. まとめ

本研究では、感潮河川付近や沿岸部における塩害劣化したシールドトンネルの維持管理において、対策工の詳細検討に用いることを想定して、継手鋼材の腐食の影響を考慮したシールドトンネルの数値解析法を提案した。提案手法では、セグメント間の接触や、コンクリートの圧縮を接触ばねとしてモデル化することとした。また、継手板を除く継手鋼材を継手ばねとしてモデル化し、腐食の影響をばね剛性の低減で考慮することとした。この提案した手法を用いて覆工モデルの載荷実験の再現解析を行った結果、荷重～変位や継手目開き量、応力分布において整合する結果が得られ、手法の妥当性を確認した。

本論文では模型実験を対象として手法の検証を行った。今後は、実トンネルを対象とした検討を行い、目視調査で得られる指標と継手の腐食状態の関係性の整理を進め、手法の深度化を図る計画である。



※実験は初期剛性（載荷板変位5～10mm）を記載

図12 覆工剛性（荷重／変位）とばね低減係数の関係

文献

- 1) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2018
- 2) 塩冶幸男，阿南健一，大塚正博，小泉淳：地中送電用シールドトンネルの維持管理に関する研究，土木学会論文集F1，Vol.67，No.2，pp.108-125，2011
- 3) 木下果穂，牛田貴士，津野究，細田暁：継手鋼材の腐食の影響を考慮したシールドトンネルの有限要素解析法の提案，土木学会論文集F1，Vol.78，No.1，pp.88-101，2022
- 4) 石村利明，真下英人，森本智：三次元シェルモデルを用いた施工時荷重の影響に関する一考察，トンネル工学報告集，Vol.22，pp.303-308，2012
- 5) 小山幸則，岡野法之，清水満：シールドトンネルにおけるセグメント継手の3次元FEM解析，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第5巻，pp.397-402，1995
- 6) 日本シールドセグメント技術協会RCセグメント部会：コーンコネクターセグメントワンパス継手，パンフレット，2014
- 7) 高橋幹夫，津野究，小島芳之：大型トンネル覆工模型実験装置の開発，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，第III編，pp.139-140，2006
- 8) 野城一栄，小島芳之，新井泰，岡野法之，竹村次朗：圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究，土木学会論文集C，Vol.65，No.4，pp.1024-1037，2009
- 9) 木下果穂，津野究，牛田貴士：セグメント覆工を対象とした数値解析手法に関する検討，土木学会第74回年次学術講演会講演概要集，III-26，2019