

要素実験を用いたシールドトンネルの 継手部モデルの構築と構造解析への適用

木下 果穂* 牛田 貴士* 野城 一栄* 細田 暁**

Proposal of Modeling Method for Segment Joints Using Element Experiments for Shield Tunnel and Its Application to Structural Analysis

Kaho KINOSHITA Takashi USHIDA Kazuhide YASHIRO Akira HOSODA

Full-scale bending tests of segment joints for shield tunnels are important for understanding and properly evaluating the behavior of joint sections. However full-scale tests are costly and time-consuming. Therefore, numerical analysis is expected to complement these tests. This study proposes a modeling method for segment joints. This method is based on behavior observed in full-scale joint bending experiments using a three-dimensional FEM analysis. Firstly, a model case of railway shield tunnels was established. Secondly, a series of steps was demonstrated, from setting rotation characteristics with finite element analysis to analyzing the frame structure of the shield tunnel, illustrating the usefulness of this study.

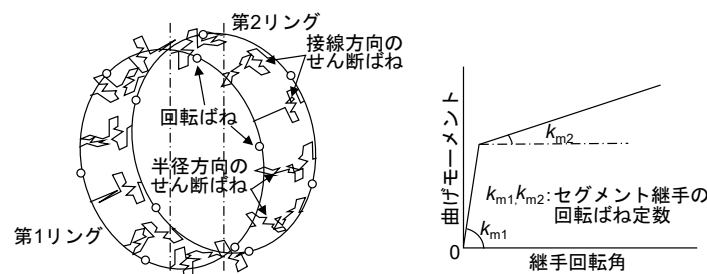
キーワード：シールドトンネル，セグメント継手，継手曲げ試験，有限要素解析，骨組構造解析

1. はじめに

シールドトンネルは多数の継手を有することが構造的な特徴の一つである。また、継手部の剛性はセグメント主断面よりも小さいため、トンネル覆工全体系の力学的挙動を評価する場合には、継手部の剛性および挙動を適切に評価することが重要である¹⁾。

シールドトンネルの骨組解析においては、セグメント継手を回転ばねでモデル化するはり-ばねモデルによる計算法²⁾ (図1) を用いることが一般的である。回転ばねの設定には、継手部の力のつり合い条件や変形の適合条件をもとに理論的に算定する方法^{例えば3) 4)} や、載荷実験による方法^{例えば5)} がある。また、シールドトンネルの有限要素解析においては、セグメントをシェル要素またはソリッド要素で、継手をばね要素または接触要素でモデル化して検討した例^{例えば6)~10)} 等が挙げられる。

これらの構造解析におけるセグメント継手のモデル化については、トンネルの状況を考慮した条件のもと実物大のセグメントを用いた載荷実験を実施することによって、より正確なモデル化が可能となると考えられる。しかし、実物大試験はコストや時間の面で負担が大きいため、それを補完する数値解析の利用



(a) はり-ばねモデル²⁾ (b) セグメント継手の回転ばね⁵⁾

図1 はり-ばねモデル

* 構造物技術研究部 トンネル研究室
** 横浜国立大学

が期待される。さらに、継手曲げ試験の挙動を表現できる数値解析手法を開発することによって、継手曲げ試験を実施しない場合においても実際に近い条件で事前検討が可能となると考えられる。

そこで本研究では、継手曲げ試験を補完する数値解析手法の構築に資する技術開発の第一段階として、以下の検討を行った。まず、継手部の挙動を把握するために実物大継手曲げ実験を実施し、実験で把握した挙動をもとに三次元有限要素解析におけるセグメント継手部のモデル化法を提案した。つぎに、提案したモデル化法によって、継手曲げ実験の再現解析を行い、モデル化法の妥当性を確認した。最後に、鉄道シールドトンネルのモデルケースを設定し、提案法によるセグメント継手の回転特性の設定からシールドトンネルの構造解析までの一連の流れを示し、本研究の有用性を例示した。

2. 実物大継手曲げ実験

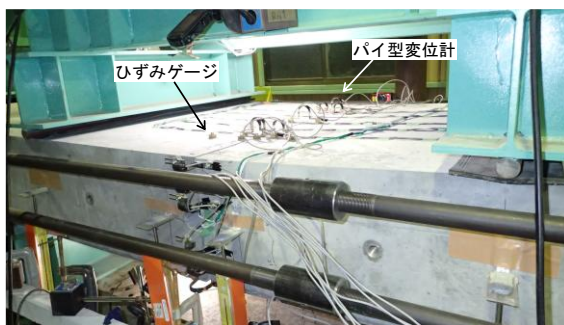
継手部の挙動の把握を目的とし、実物大継手曲げ実験を行った。許容応力度レベル以降の荷重における知見を得るため、継手部の部材降伏（以下、 M_y と示す）の荷重レベルで実験を実施した。様々な継手に対し試験が行われることを想定し、継手の力学挙動の違いが継手部の回転挙動に与える影響を把握するため、アンカー筋の付着に差異を設定した2ケースの実験を行った。

2.1 実験条件

継手曲げ実験の状況を図2に示す。実験では外径7m程度のシールドトンネルを想定して仕様を決定した実物大RCセグメント模型を製作し、設計では継手部は曲げモーメントに抵抗する回転ばねとしてモデル化されることから4点曲げ荷重を行った。セグメント1ピースは高さ300mm×幅1000mm×長さ2200mmとして、荷重スパンは4000mm、等曲げ区間は1200mmとした。セグメント継手は高さ中心に設置した。なお、実際のセグメントは曲がりばりであるが、曲率半径に対するセグメント高さの比は通常1/10程度で

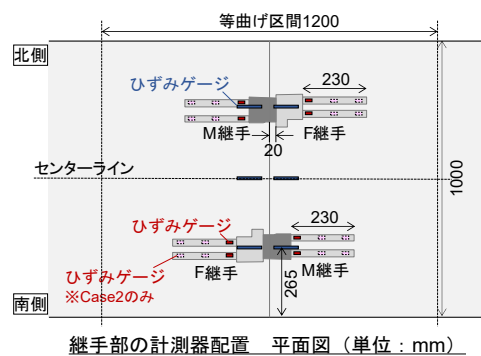


全体

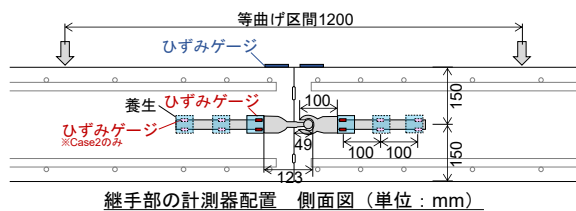


継手部周囲

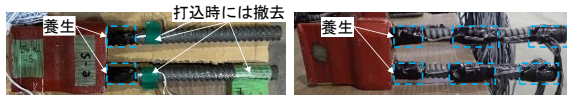
(a) 実験状況



継手部の計測器配置 平面図 (単位: mm)



継手部の計測器配置 側面図 (単位: mm)



Case 1 の継手

Case 2 の継手

(b) 継手部の計測器配置

図2 実物大継手曲げ実験

あり、この比が大きくなならない限り、真直なはりとして計算してよいとされている⁵⁾。本実験においても、事前解析により曲がりばりと真直なはりで応答値の差が1%以下と小さいことを確認した上でセグメントの形状は平板とした。

実験ケースを表1に示す。2ケースに同じ継手(2組、軸方向挿入型、アンカー筋D19×2本)を用いて、養生の違いによりアンカー筋の付着に差異を設定した。Case1は継手アンカー筋の金物側のみを、Case2は金物側、中央、先端側をそれぞれ防水テープで養生してセグメント本体との付着が有効なアンカー長を低減した。Case1はアンカー筋の付着耐力の方が降伏耐力よりも大きい状態を、Case2は降伏耐力の方が大きい状態を想定した。

本実験の載荷手順を図3に示す。軸力500kN¹¹⁾を作用させ、鉛直下向き・上向きの交番載荷を行った(以降、それぞれ正載荷・負載荷と示す)。本実験では、小土被りのシールドトンネルの地震時等で正曲げと負曲げが交互に生じる可能性も想定し、載荷方法を交番載荷としている。Case1は事前解析により M_y 相当の載荷荷重を想定し、 M_y 相当の載荷荷重以下で交番載荷荷重や各種ひずみ等の計測値を確認しながら3段階の交番載荷を実施した後、 $2.0\delta_y$ までの正載荷を実施した。Case2は M_y 相当の変位($1.0\delta_y$)以上で3段階($\pm 1.0\delta_y$, $\pm 1.5\delta_y$, $\pm 2.0\delta_y$)の交番載荷を実施した後、正載荷で押し切る実験を実施した。なお、各ケースで異なる着目点を設定したため、載荷方法が異なっている。

2.2 実験結果

Case2は予備載荷を行っている。予備載荷については、既報¹²⁾を参照されたい。なお、予備載荷は供試体の許容応力度相当の載荷荷重であり、後述するCase1において、許容応力度相当の繰返し載荷がその後の挙動に及ぼす影響は小さかった。そのため、Case2の予備載荷の影響は些少として考察を行った。

本実験で得られた荷重-鉛直変位を図4に示す。最大荷重は両ケースとも170kN程度であった。Case1はアンカー筋が降伏した点、Case2は勾配が急変した点を M_y 相当荷重と扱うこととする。アンカー筋の付着耐力の方が降伏耐力よりも大きいCase1では、 M_y 相当荷重時の変位($1.0\delta_y$)の2倍相当まで急激な荷重の低下が生じなかった。また、アンカー筋の付着耐力の方が降伏耐力よりも小さいCase2では、 M_y 相当荷重時以降の載荷において荷重の低下が生じた。

Case2の $+1.0\delta_y$ の正載荷における勾配がCase1と比較して大きい結果となった。これは、シールドトンネルでは、組立て後のセグメント間の離隔には小さなばらつきが生じること等から、継手アンカー筋の付着の状態よりも継手の組立て余裕に起因するセグメント間の継手面の接触状況の影響と考えている。なお、継手の組立て余裕については、次章で後述する。

実験で計測した継手アンカー筋の引張りひずみと継手部コンクリートの表面圧縮ひずみの計測結果を図5に示す。図5(a)の継手アンカー筋の引張りひずみの値は、継手金物に近い位置のひずみゲージの値を各継手(アンカー筋2本、各アンカー筋上下の計4カ所)で平均した値である。Case1では最大荷重に達すると同時に継手アンカー筋のひずみが急増した。一方、Case2では最大荷重に達する前に南側のアンカー筋のひずみの増加が緩やかになった後ひずみの低下も認められた。これらはそれぞれアンカー筋の降伏、引抜けが生じたことを示唆しており、両ケースとも計画した継手挙動を示したと考えている。

図5(b)のコンクリートひずみは、Case1ではアンカー筋の降伏時にもコンクリートの表面ひずみに顕著な変化は生じなかった。一方、Case2では $+1.0\delta_y$ 載荷において、南側のアンカー筋の引抜けとほぼ同時にコンクリートの表面ひずみが低下した。これは載荷中の供試体の目視観察から、かぶりのごく表層の剥離を捉えたものと判断している。また、 $+1.5\delta_y$ 載荷において、引抜けが生じた南側のアンカー筋ではひずみの勾配が $+1.0\delta_y$ 載荷よりも小さくなった。また、コンクリートひずみも勾配が小さくなっており、継手部

3.1 セグメント継手部のモデル化法

3.1.1 概要

再現解析に用いたモデルの概略を図6に示す。節点数は10192、要素数は8666である。コンクリートは8節点のソリッド要素、セグメント継手は金物とアンカー筋それぞれを2節点のはり要素でモデル化した。解析対象はセグメント1ピースとして継手面には対称境界条件を設定した。図6のように供試体はF継手とM継手が互違いに2組設置されているが、その影響を平均化して同じ形状でモデル化することとした。なお、要素寸法はF継手の金物寸法を代表値として設定した。本解析で用いた物性値等を表2に示す。また、コンクリートは継手面におけるセグメント同士の接触によりかぶりの表層剥離が生じたことを踏まえ、室内試験結果に基づき圧縮側の軟化勾配を考慮してモデル化した(図7)。なお、継手アンカー筋の引抜け挙動によって生じる界面付近の非線形挙動はせん断ばねでモデル化しており、その詳細は次項に示す。継手金物は弾性、アンカー筋は弾塑性とし、降伏後は弾性係数を初期の1/1000として計算した。

3.1.2 継手のアンカー筋～コンクリート間のせん断ばね

継手のアンカー筋とコンクリート間には、すべり方向に機能するせん断ばねを各節点に設置し、せん断力の伝達を表現した。なお、本研究では引抜き試験における引抜き力をアンカー筋の有効長で補正したうえで、アンカー筋の全節点に抵抗力を平均化してばね剛性を設定した。

せん断ばねはアンカー筋の引抜き試験により設定した。引抜き試験は、継手曲げ実験に用いた継手のアンカー筋と強度・公称径が同じねじ鉄筋を使用した。コンクリートへの埋込み深さは継手のアンカー筋の長さ分(12D=230mm)とした。

引抜き試験の結果、コンクリートがコーン状に破壊する結果となり、破壊開始位置はコンクリート表面から深さ110mm程度の位置であった。この110mmのうち、防水テープによる養生がされていない部分の長さである95mmが有効引抜き抵抗長さと判断した。この結果に継手曲げ実験Case1のアンカー筋の有効長の割合8割を考慮し、せん断ばねを補正する方法とした。設定したせん断ばねのモデル化を図8に示す。なお、引抜き耐力に達する引抜き変位は同じ値と考え、同図に示すように、挙動変化が生じるアンカー筋の引抜き変位は同じ値とした。

本研究で実施した引抜き試験は、セグメント中のアンカー筋の状況を精緻に再現する試験条件および計測方法としたが、上記の補正をしなくてもよい試験方法についても、更なる検討が必要と考えている。

3.1.3 セグメント間の接触ばね

セグメント間の継手面には、接触要素相当の非線形ばねである接触ばねを設置した。接触ばねが圧縮となる場合には、十分に大きなばね剛性($k = 1.0 \times 10^{11}$ kN/m²/m)を与え、引張となる場合にはばね剛性を0とすることにより、セグメントの接触をモデル化した。また、継手間にも接触ばねを設置し、ばね剛性は圧縮・引張ともに十分に大きな値とした。

3.1.4 継手の組立て余裕の影響

本検討で使用したセグメント継手は、セグメントが軸方向にスライドされ、M継手がF継手に挿入嵌合することにより組立てられる。この機構から、継手金物部には組立て余裕が設定されており、これに起因して組立て時に図9のように継手面および継手金物間に遊間が生じることが想定される。これらの遊間が継手部の挙動に与える影響については、継手面の遊間は継手面の接触ばね上で、継手金物間の遊間はアンカー筋とコンクリート間のせん断ばね上で考慮した。

遊間の影響を表現したそれぞれのばねのモデル化を図10に示す。それぞれ、遊間の分変位した後にばねが抵抗するものとした。継手面の遊間の値は載荷前のセグメント間の離隔の計測結果により、継手金物間の遊間の値は実験結果のフィッティングにより設定した。

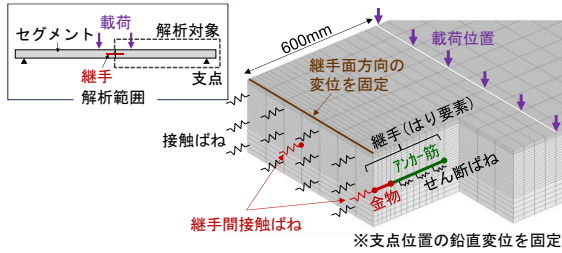


図6 解析モデル

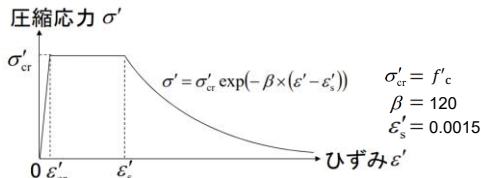
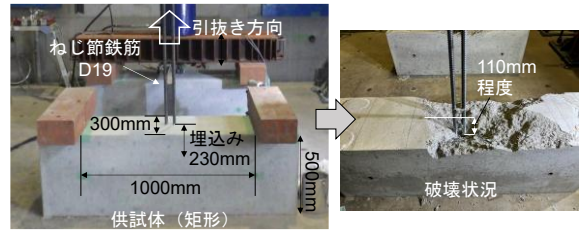


図7 コンクリートの圧縮軟化特性¹³⁾

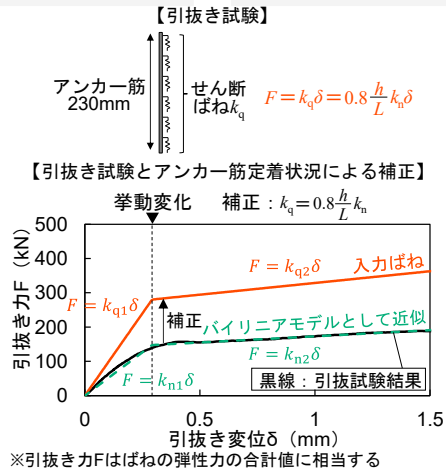
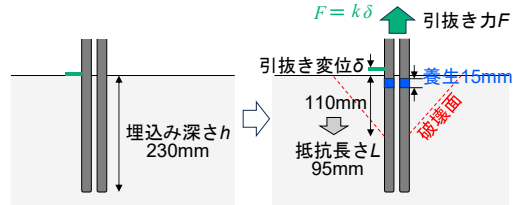
表2 物性値(継手曲げ実験 Case1)

構成部材	項目	諸元
セグメント主断面	圧縮強度 f'_c ※	57.7 N/mm ²
	ヤング係数 E_c ※	31.4 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
継手金物	ヤング係数 E_s	200 kN/mm ²
	ポアソン比 ν_s	0.3
	単位体積重量 γ_s	77.0 kN/m ³
継手アンカー筋	ヤング係数 E_s	200 kN/mm ²
	ポアソン比 ν_s	0.3
	単位体積重量 γ_s	77.0 kN/m ³
	降伏強度 f_{sy} ※	401 N/mm ²

※室内試験結果に基づき設定



(a) 引抜き試験の状況



※引抜き力Fはばねの弾性力の合計値に相当する

(b) せん断ばね補正の考え方

図8 せん断ばねのモデル化 (Case1)

3.2 解析ケース

解析ケースは3ケースとした(表3)。Case1-Aは図9の継手の組立て余裕の影響を考慮しないモデル, Case1-Bは継手面の遊間 δ_f を考慮したモデル, Case1-Cは継手面の遊間 δ_f と継手金物間の遊間 δ_j を考慮したモデルとした。各ケースは、自重と軸力を与えた後に変位増分を与えるステップ解析とし、アンカー筋の降伏相当変位の2倍程度まで载荷した正载荷を対象とした。

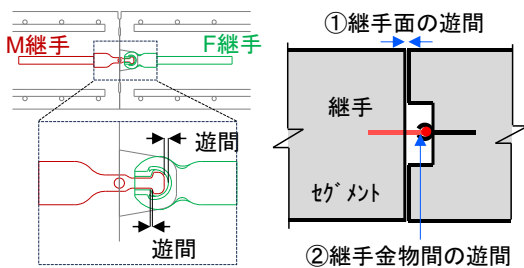
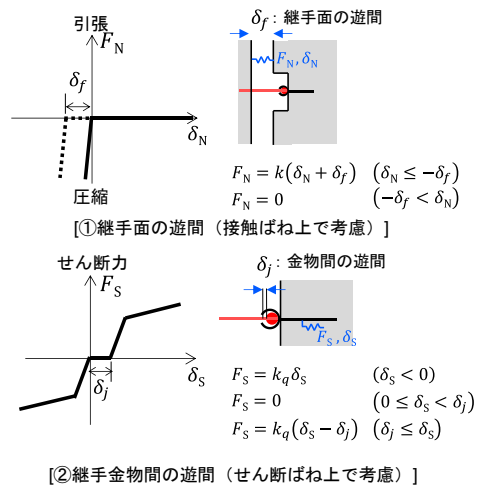


図9 継手の組立て余裕による遊間

表3 Case1 解析ケース

	1:継手面の遊間 δ_f	2:継手金物間の遊間 δ_j
Case1-A	0mm	0.0 mm
Case1-B	0.2 mm	0.0 mm
Case1-C	0.2 mm	0.6mm



【②継手金物間の遊間(せん断ばね上で考慮)】

図10 遊間のモデル化

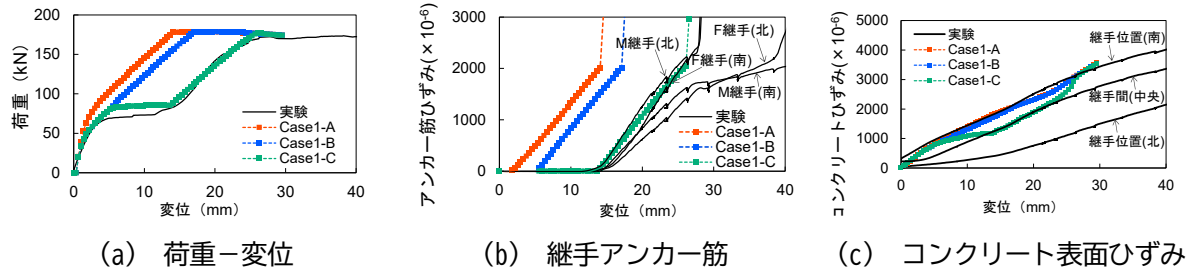


図 11 解析結果

3.3 解析結果

解析により算出した荷重-変位，継手アンカー筋の引張ひずみ，コンクリート表面の圧縮ひずみを図 11 に示す．すべての解析ケースにおいて，アンカー筋が降伏強度に達するとともに最大荷重に達し，最大荷重は実験と同程度の値であった．最大荷重後は勾配が変化し，その後は急激な荷重の減少は生じず，実験と概ね同様の傾向を示した．

また，継手の組み立て余裕の影響を考慮しない Case 1-A は，載荷初期の荷重-変位の勾配が最も大きくなった．接触ばねで継手面の遊間 δ_f を表現した Case 1-B，Case 1-C では，載荷初期の勾配が低減する傾向を示した．さらに，アンカー筋とコンクリート間のせん断ばねで継手金物間の遊間 δ_j も表現した Case 1-C，Case 1-B，Case 1-A の順で，アンカー筋の引張ひずみが発生する変位が大きくなり再現性が向上した．この結果，Case 1-C では変位 5mm 付近から荷重が概ね一定のまま推移し，変位 12mm 付近でアンカー筋のひずみの発生に伴い，荷重が増加する挙動も再現した．本結果のように，継手の組み立て余裕に起因する遊間を考慮することにより，アンカー筋の引張ひずみの挙動を表現でき，荷重-変位の再現性も向上する結果となった．また，コンクリートの圧縮ひずみについては，実験の計測結果は計測位置によりばらつきが見られるが，解析では概ね同じレベルの圧縮ひずみを算出した．

以上より，継手アンカー筋の降伏や引抜き挙動，継手面および金物間の遊間等を表現したセグメント継手部のモデル化法により，荷重-変位，アンカー筋のひずみ，コンクリート表面のひずみについて，実物大曲げ実験の結果を概ね再現することができた．

4. 提案モデルの再現性の検証

前章では，セグメント継手部のモデル化法を提案し，その手法を用いて継手曲げ実験 Case1 (降伏耐力<付着耐力) の再現解析を実施した．本章では，継手曲げ実験 Case2 (降伏耐力>付着耐力) を対象に，前章で用いた解析モデルに対して，実験 Case2 と同じ付着の条件で実施したアンカー筋引抜き試験の結果を用いて，提案したモデルにより再現性の検証を行った．

4.1 再現解析の条件

前章で提案したセグメント継手部のモデル化法を用いて，継手曲げ実験 Case2 の再現解析を実施した．解析で用いた物性値を表 4 に示す．継手のアンカー筋とコンクリート間のせん断ばねの剛性は，アンカー筋の付着の状態により変化すると想定される．ここで，継手のアンカー筋のみの引抜き試験は，実物大の継手曲げ実験よりも簡易かつ短期間で実施できるため，本解析では，引抜き試験を実施することを前提とした．そのため，継手曲げ実験 Case2 のアンカー筋と強度・公称径が同じねじ節鉄筋を使用し，コンクリートへの埋込み深さや防水テープによる養生条件を再現した引抜き試験を実施し，その結果をもとにせん断

ばねを設定した。せん断ばねのモデル化を図 12 に示す。引抜き試験の結果、コンクリートがコーン状に破壊し、破壊開始位置はコンクリート表面から深さ 75 mm 程度の位置であった。この 75mm のうち、防水テープによる養生がされていない長さ 45 mm を有効引抜き抵抗長さと判断した。前章と同様の考え方により、有効引抜き抵抗長さと、継手曲げ実験 Case2 のアンカー筋の有効長の割合 4 割を考慮してせん断ばねを補正した。なお、セグメント間の接触ばねについては、前章と同じ設定とした。

4.2 解析ケース

解析ケースを表 5 に示す。前章と同様に条件を設定し、Case 2-A は継手の組立て余裕に起因する遊間を考慮しないモデル、Case 2-B は継手面の遊間を考慮したモデル、Case 2-C は継手面の遊間と継手金物間の遊間を考慮したモデルとした。なお、各遊間の値は前章の継手曲げ実験 Case 1 の再現解析と同値とした。

本解析も自重と軸力を与えた後に変位増分を与えるステップ解析とし、解析の対象は+1.0 δ_y と+1.5 δ_y の正載荷を対象とした。

4.3 解析結果

再現解析により得られた、荷重-変位、継手アンカー筋の引張ひずみ、コンクリート表面の圧縮ひずみを図 13 に示す。すべてのケースにおいて、アンカー筋は降伏強度に達する前に、継手のせん断ばね (図 12) で設定した 2 つめの挙動変化点に達して、実験の +1.0 δ_y の正載荷と同程度の荷重で最大荷重に達した。接触ばねで継手面の遊間を表現した Case 2-B は実験の +1.0 δ_y の正載荷の挙動を概ね再現する結果を示した。

表 4 物性値 (継手曲げ実験 Case2)

構成部材	項目	諸元
セグメント主断面	設計基準強度	50 N/mm ²
	ヤング係数 E_c	33 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
継手金物	ヤング係数 E_s	200 kN/mm ²
	ポアソン比 ν_s	0.3
	単位体積重量 γ_s	77.0 kN/m ³
継手アンカー筋	ヤング係数 E_s	200 kN/mm ²
	ポアソン比 ν_s	0.3
	単位体積重量 γ_s	77.0 kN/m ³
	降伏強度	345 N/mm ²

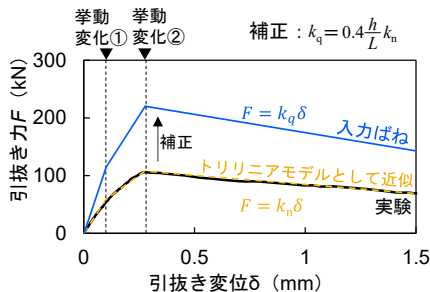
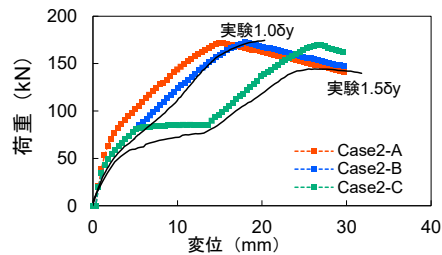


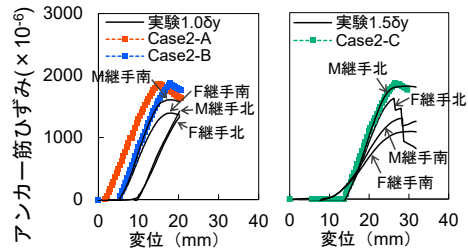
図 12 せん断ばねのモデル化 (Case2)

表 5 Case2 解析ケース

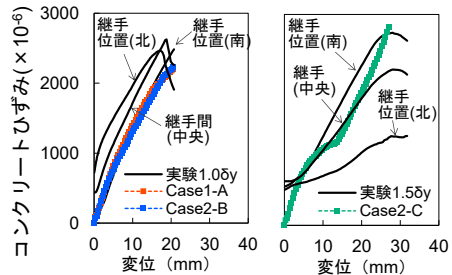
	1:継手面の遊間	2:継手金物間の遊間
Case2-A	0.0 mm	0.0 mm
Case2-B	0.2 mm	0.0 mm
Case2-C	0.2 mm	0.6mm



(a) 荷重-変位



(b) 継手アンカー筋



(c) コンクリート表面ひずみ

図 13 解析結果

しかし、継手面の遊間はセグメントの製作精度や施工状態により異なることに留意して評価する必要があると考えられる。また、アンカー筋とコンクリート間のせん断ばねで継手金物間の遊間を表現した Case 2-C は、実験の $+1.5 \delta_y$ の正載荷の挙動の特徴を捉えたが、実験と比較して初期勾配は大きく、荷重が一定のまま推移する変位も少し小さかった。この結果は、継手面と継手金物間の遊間の値を大きくすると、より一致する結果となると考えられる。

これらの結果から、継手面および継手金物間の遊間を考慮することにより、継手部の挙動の再現性が向上することを確認した。実務上は、遊間の値が未知である場合には、継手部の遊間を考慮しないことで継手部の剛性が大きくなることに留意して評価することが重要と考えられる。以上より、継手アンカー筋の引抜き試験の結果を用いて、提案したセグメント継手部のモデル化法により、継手曲げ実験 Case2 の挙動を再現できた。これより、提案したモデル化法の妥当性を確認するとともに、継手曲げ試験における継手部の挙動を再現できる可能性を示した。

5. シールドトンネルの構造解析への適用

本章では、鉄道シールドトンネルのモデルケースを設定し、提案したセグメント継手部のモデル化法を適用した構造解析の試算を実施した。本試算では、有限要素解析による回転特性の設定からシールドトンネルの構造解析までの一連の流れを示した。構造解析は、前述したはりばねモデルによる骨組解析により実施した。本章では提案法の使用方法を例示することを目的とするため、作用は永久作用としての土水圧のみを考慮した。なお、提案法は地震時等の非線形挙動の影響が大きい場合に、従来法との差異が顕著になるものと考えている。

5.1 提案法を活用した構造解析の手順

提案したセグメント継手部のモデル化法を活用したシールドトンネルの構造解析について、その解析手順を図 14 に示す。まず、セグメント寸法、材料強度、適用する継手等の設計条件を踏まえ、継手部のモデル化に必要な要素実験を実施する。次に要素実験の結果に基づき、有限要素解析に必要なパラメータを決定し、セグメント継手部の継手曲げ試験を有限要素解析により実施する。この有限要素解析で算出した継手部の曲げモーメントと回転角の関係を整理し、継手部の回転特性を設定する。最後に設定した回転特性を適用したはりばねモデルによる骨組解析を行い、シールドトンネルの各部材の断面力を算出する。

なお、セグメント継手部の回転特性の設定については、理論的に算定する方法や載荷実験による方法、有限要素解析による方法等があり、それぞれを荷重レベルによって組み合わせる場合もあるが、今回は有限要素解析でのみ回転特性を設定することとした。また、リング継手のせん断ばねの設定をはじめとした、はりばねモデルによる骨組解析は、鉄道シールドトンネルの設計基準⁴⁾に準じて実施した。

5.2 試算条件

試算条件を図 15 に示す。モデルケースはトンネル土被りの異なる 3 ケースとした。セグメント寸法や使用する継手は、2 章の実物大継手曲げ実験と同じ条件とし、外径 7m のシールドトンネルとして仕様を決定した。トンネルの解析モデルおよび作用を図 16 に示す。シールドトンネルにおいては、軟らかい粘性土では水圧を土圧の一部として含有し一体として算定する考え方が用いられることが一般的である⁴⁾ため、土圧と水圧を一体として作用を算出した。また、シールドトンネルは法線方向の地盤ばねにより支持されるものと考え、トンネル法線方向の地盤反力係数を、鉄道シールドトンネルの設計基準⁴⁾に準じて 2090 kN/m^3 とした。

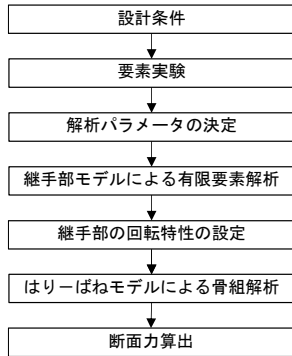


図 14 構造解析の手順

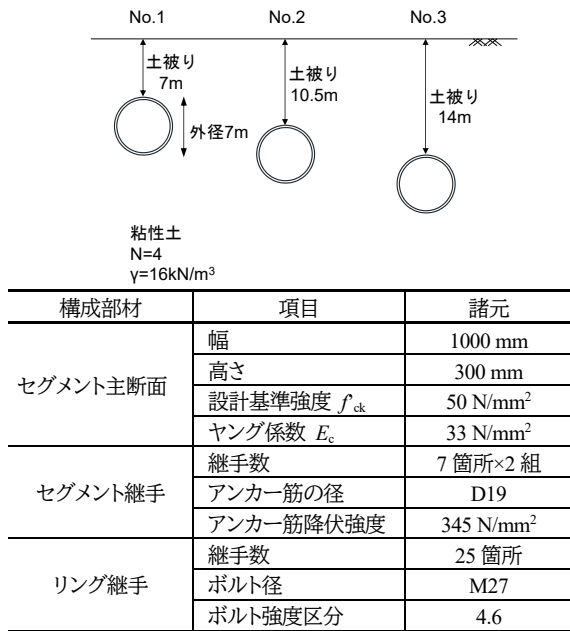


図 15 モデルケース

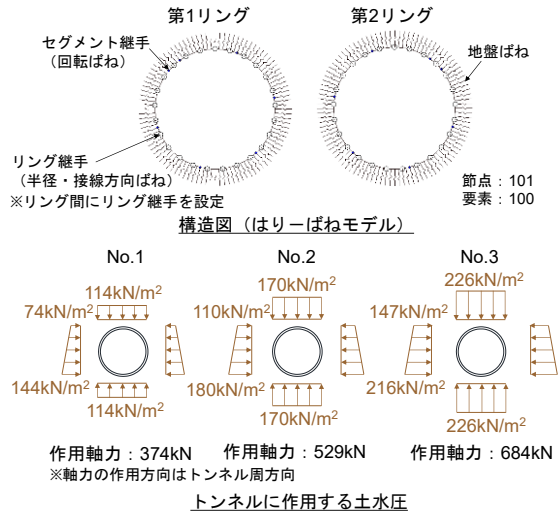


図 16 トンネルの解析モデルおよび作用

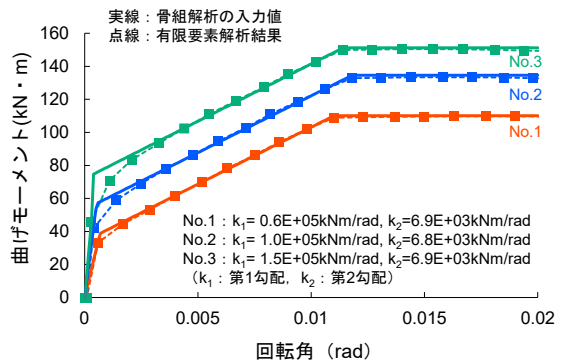


図 17 設定したセグメント継手部の回転特性

5.3 有限要素解析による回転特性の設定

本試算では、有限要素解析における継手部のモデル化に必要な要素実験を引抜き試験とし、引抜き試験の結果を用いた継手アンカー筋～コンクリート間のせん断ばね等の解析パラメータの決定は、3章に示す（継手面および継手金物間の遊間は考慮しないモデル）を用いた。設定した鉄道シールドトンネルのモデルケース No.1～No.3 それぞれの荷重条件に応じた軸力を作用させて、曲げモーメントおよび回転角を算出した。

有限要素解析により設定した回転特性を図 17 に示す。対象とする荷重レベルでは、実験と解析において継手位置周囲から引張縁の継手面は概ね直線であることを確認した上で、回転角は図 18 より算出した。この有限要素解析の結果をトリリニアモデルとして近似し、骨組解析の入力値とした。なお、全ケースにおいて、曲げモーメントが一定となる第三勾配は $k_3 = 0.1 \text{ kNm/rad}$ とした。

5.4 試算結果

はりばねモデルによる骨組解析により算出した No.1 の断面力を図 19 に、各モデルケースの部材断面力の各最大値を表 6 に示す。すべてのケースにおいて、図 19 に示すようにトンネル上下にトンネル内側方

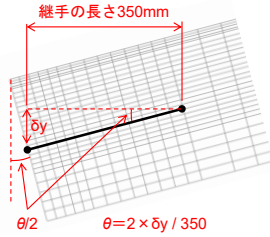


図 18 解析結果

表 6 断面力算出結果

部材	項目	No.1	No.2	No.3
セグメント	曲げ	55.3 kNm	102.7 kNm	152.4kNm
	せん断	44.1 kN	85.7 kN	129.5 kN
セグメント継手	曲げ	28.5 kNm	55.3 kNm	79.6 kNm
リング継手	せん断	30.3kN	59.9 kN	94.1 kN

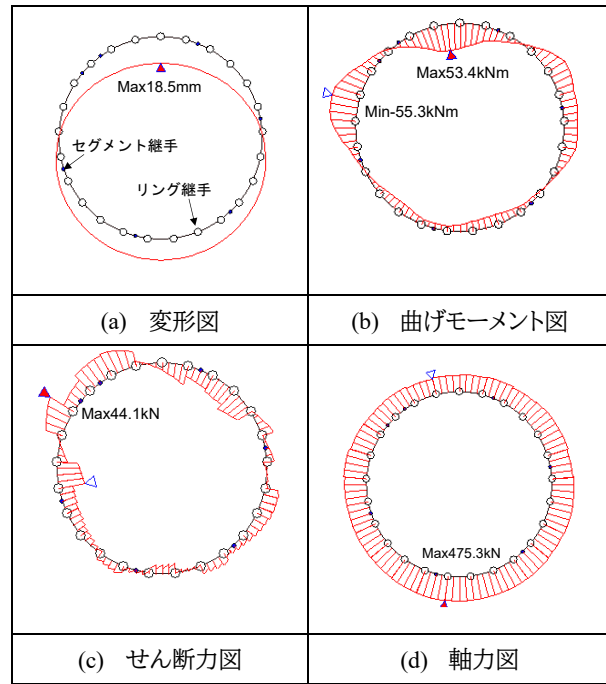


図 19 断面力図 (No.1)

向の曲げモーメント，トンネル側方にトンネル外側方向の曲げモーメントが算出された。また，本試算では土被りが大きくなるほど，セグメント主断面とセグメント継手，リング継手すべての断面力は大きくなる結果となった。

以上のように，提案したセグメント継手のモデル化法によって継手部の回転特性を設定することが可能となった。また，これを用いて構造解析を行う一連の流れを例示することができた。これにより，1つのトンネルの中で複数の設計断面に対し，実際に近い条件の継手ばねを適用した構造解析も可能となると考えられる。

6. まとめ

本研究では，継手曲げ試験を補完する数値解析手法の構築に資することを目的として，実物大継手曲げ実験を実施し，この実験で把握した挙動をもとに三次元有限要素解析によりセグメント継手部のモデル化法を提案するとともに，シールドトンネルの構造解析の試算を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 実物大継手曲げ実験において，継手アンカー筋の付着耐力の方が降伏耐力よりも大きい場合には，最大荷重以降に急激な荷重の低下が生じず，降伏耐力よりも小さい場合には，最大荷重以降に荷重の低下が生じる結果を得た。また，セグメント継手部の全体挙動を表現する上で，継手アンカー筋の降伏や引抜き，セグメント同士の継手面における接触等の局所的な挙動を考慮することが重要と示唆された。
- 2) 有限要素解析における継手部のモデル化手法を提案し，継手面・継手金物間の遊間等を表現することにより，アンカー筋のひずみの挙動が再現でき，実物大曲げ実験の荷重-変位の結果の再現性が向上することを確認した。
- 3) 有限要素解析における継手部のモデル化手法と継手アンカー筋の引抜き試験の結果を用いることで，継手曲げ実験の継手挙動を再現できる可能性を示した。
- 4) 提案した継手部のモデル化手法を用いた継手部の回転特性の設定から，シールドトンネルの構造解

析までの一連の流れを例示し、提案法の有用性を示した。

今後は、本研究の実験や解析結果の分析を深度化して設計におけるシールドトンネルの要求性能やそれを具体化した継手部の限界状態の検討を進めるとともに、多種多様な継手に対する提案したモデル化法の適用についても検討を進めることを考えている。

謝 辞

本研究の実物大継手曲げ実験は、戸田建設株式会社と日本ヒューム株式会社との共同研究で実施したものである。関係者の皆様には、実験の実施や載荷手順の検討等にあたり様々なご助言をいただいた。ここに深謝の意を表する

文 献

- 1) 木下 果穂, 牛田 貴士, 野城 一栄, 細田 暁: シールドトンネルの要素実験を用いた継手部モデルの構築と構造解析への適用, 土木学会論文集, Vol.81, No.15, pp.1-15, 2025
- 2) 土木学会: 2016年制定トンネル標準示方書 [共通編]・同解説/ [シールド工法編]・同解説, 2016
- 3) 村上博智, 小泉淳: シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文集, 第296号, pp.73-86, 1980
- 4) 小山幸則: シールド工法におけるセグメント設計法の合理化に関する研究, 京都大学博士学位論文, 1999
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・シールド編, 丸善出版, 2022
- 6) 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次元有限要素解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第5巻, pp.397-402, 1995
- 7) 田嶋仁志, 岸田政彦, 深井直光, 斉藤正幸: 三次元モデルを用いたシールドトンネルの施工時荷重に関する検討, トンネル工学報告集, Vol. 14, pp.353-360, 2004
- 8) 有泉毅, 竹内友章, 江森吉洋: ボルト締結を伴わない継手を用いたシールド工用セグメント設計法に関する研究, 土木学会論文集F, Vol. 65, No.4, pp.414-433, 2009
- 9) 焼田真司, 仲山貴司, 小西真治, 赤木寛一: シールドトンネルのひび割れ進展過程に関する一考察, 土木学会論文集F1, Vol. 67, No. 3, pp.109-116, 2011
- 10) 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
- 11) 中山卓人, 野城一栄, 牛田貴士, 木下果穂: 鉄道単線シールドトンネルの地盤条件による発生断面力の差違に関する一考察, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol. 58, 11-3-3-06, 2023
- 12) 木下果穂, 牛田貴士, 中山卓人, 野城一栄, 田中宏典: シールドトンネルの発生軸力を考慮した継手曲げ試験(その2: 試験結果), 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 78, III-144, 2023
- 13) 野城一栄, 平田亮, 岡野法之, 小島芳之: 種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究, 土木学会論文集F1 (トンネル工学), Vol.71, No.2, pp.78-94, 2015