

セグメント模型の載荷実験と その個別要素法解析

吉川 直孝¹・平岡 伸隆²・伊藤 和也³・三田地 利之⁴

¹正会員 (独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ (〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)

E-mail: kikkawa@s.jniosh.go.jp

²正会員 (独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ (〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)

E-mail: hiraoka@s.jniosh.go.jp

³正会員 東京都市大学 工学部 都市工学科 准教授 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail: itok@tcu.ac.jp

⁴正会員 北海道大学名誉教授 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: mitachi@eng.hokudai.ac.jp

シールドトンネルは、一般的に、セグメントリングを形成した状態において作用する土水圧等を考慮して設計されている。このため、完成後に土水圧等に対する構造耐力不足を主因として発生する変状はほとんど観察されていない。しかしながら、施工中には、シールドマシンとセグメントの競り、シールドジャッキの推力等により、セグメントは施工時荷重を受ける。本報では、様々な圧力下におけるセグメントの変形挙動を簡易的に把握するため、セグメント模型とその載荷装置を試作し、セグメントの応力ひずみ挙動等を計測する試みを実施した。また、全ての実験ケースではないが、個別要素法 (Discrete Element Method) を用いたシミュレーションも合わせて実施したのでここに報告する。

Key Words : tunnel boring machine, segment, model test, discrete element method

1. 序論

シールドトンネルは、一般的に、セグメントリングを形成した状態において作用する土水圧等を考慮して設計されている。このため、完成後に土水圧等に対する構造耐力不足を主因として発生する変状はほとんど観察されていない。しかしながら、施工中には、シールドマシンとセグメントの競り、シールドジャッキの推力等²⁾により、セグメントは施工時荷重を受ける。特に、テールの短いシールドマシン内でセグメントリングを組み立てる際、1つ前のセグメントリングはすでにシールドマシンから半分程度出てしまっていることもあり、同セグメントリングの安定性は非常に重要となる。同セグメントリングは、セグメント幅に対して半分程度、水圧又は土水圧を受ける状態にある。この時、新たなセグメントを組み立てるためにシールドジャッキを引き戻すため、トンネル縦断方向の反力が得られないセグメントもある。つまり、水圧又は土水圧が作用した状態で、シールドジャ

ッキを引き戻すことにより、Kセグメントが抜け出し、同セグメントリングの安定性が損なわれた場合には、即座に土砂水が坑内になだれ込むこととなる。

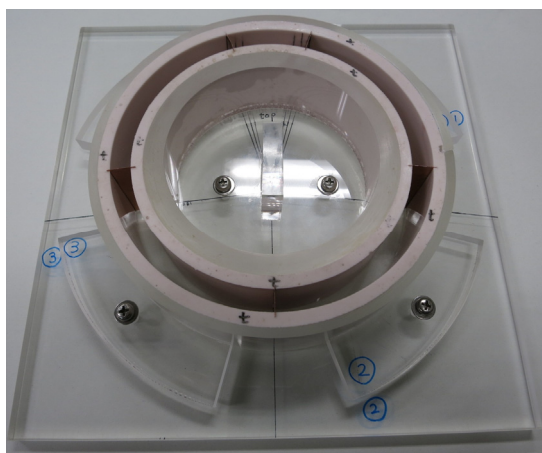
また、経年により周辺地盤環境が変化し、セグメントリングに偏圧が作用して変状をきたす場合がある。

本報では、様々な圧力下におけるセグメントの変形挙動を簡易的に把握するため、セグメント模型とその載荷装置を試作し、セグメントの応力ひずみ挙動を計測する試みを実施した。また、全ての実験ケースではないが、個別要素法 (Discrete Element Method ; 以下「DEM」という。) を用いたシミュレーションも合わせて実施したのでここに報告する。

特に、セグメントリング単体の安定性に着目し、1つのセグメントリングを用いた実験と解析を実施した。なお、セグメントリングは前後のセグメントリングとボルト等で締結されているため、トンネルの縦断方向の影響を含めた3次元的な安定性を評価すべきであるが、その議論以前に、1つのセグメントリングで安定が保たれな



厚さ 5mm



厚さ 10mm

図-1 セグメント模型作製のための型枠

ければ、それが3次的に前後のセグメントリングの真円度に少なからず影響することは想像に難くない。そのようなことから、セグメントリング単体の安定性が非常に重要と考えた。

2. 実験概要

本研究では、小型のセグメント模型を作製し、簡便な载荷・除荷装置により、セグメントに圧力を付加し、セグメントに加わる応力とひずみの関係、また、セグメントの挙動を確認した。

(1) セグメント模型の作製方法

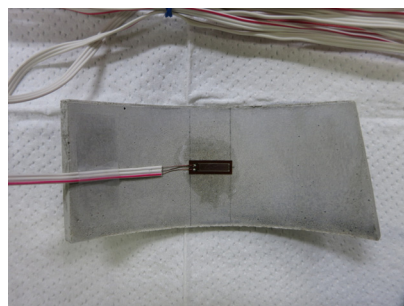
セグメント模型は、5分割 (A1, A2, B1, B2, K) とし、外径150mm、厚さ5mm又は10mmである。セグメントを作製するための型枠はセグメント内外径側がシリコンゴム、その他の箇所はアクリルで作製されている (図-1参照)。セグメントに分割する方法としては、シリコンゴ



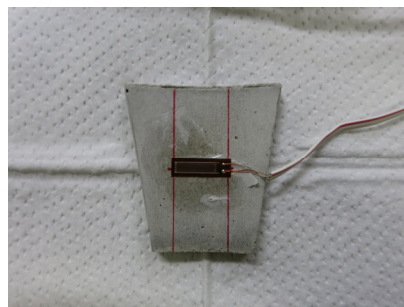
図-2 厚さ 0.2mm の銅板 (セグメントの仕切り板)



(a) セグメントリング



(b) B2セグメント



(c) Kセグメント

図-3 作製されたセグメント模型 (厚さ 5mm)

ムの所定の箇所に切り込みを入れ、厚さ0.2mmの銅板を差し込むことによる (図-2参照)。作製方法として、はじめに、離型剤を塗布した型枠にセメントミルク (早強

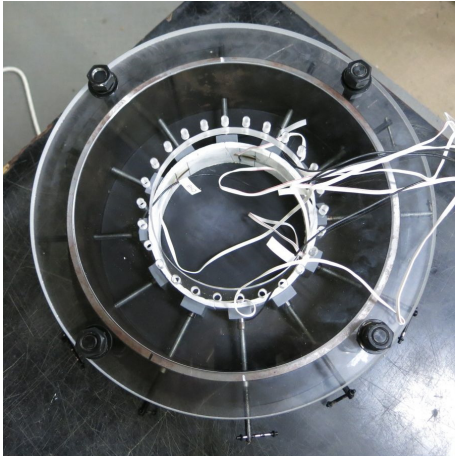


図-4 セグメント模型（厚さ 5mm）と載荷装置

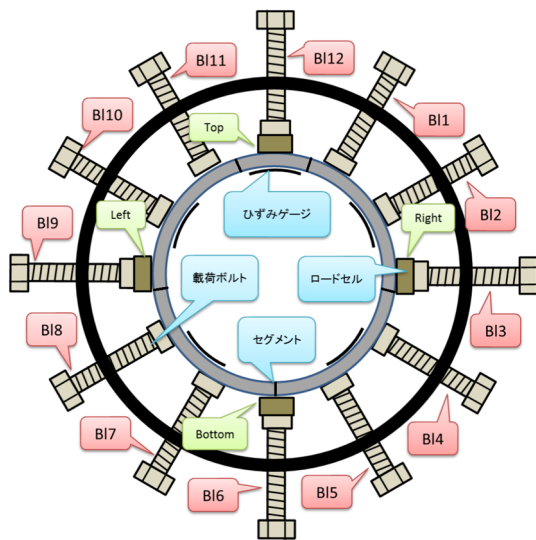


図-5 セグメント模型と載荷装置の概略図

セメント：豊浦砂：水＝1：2：0.65³⁾を流し込む。同配合で作製されたコンクリートの28日強度は、3つの供試体の平均として46.2 N/mm²になることを確認している。また、合せて超音波速度も計測し、P波速度 $V_{p,lm}=3920$ m/sec, S波速度 $V_{s,lm}=2340$ m/secであった。次に、セグメントに気泡が侵入しないよう、バイブレーターによりセグメントミルクを振動させ密実にする。その後、離型剤を塗布したガラス板を上から被せ、重りを載せる。数日後、型枠から脱型し、打設から合計28日の養生日数となるよう水中養生させた。養生後、実験中のセグメントのひずみ量を計測するため、各セグメントの内径側にひずみゲージを接着した。作製後のセグメントを図-3に示す。

(2) 載荷装置

載荷装置は、セグメントの外径よりも大きい外径を有する鋼製円管の周囲に計12個のボルトを貫入させ、ボルトを締める又は緩めることによって、セグメントの外周

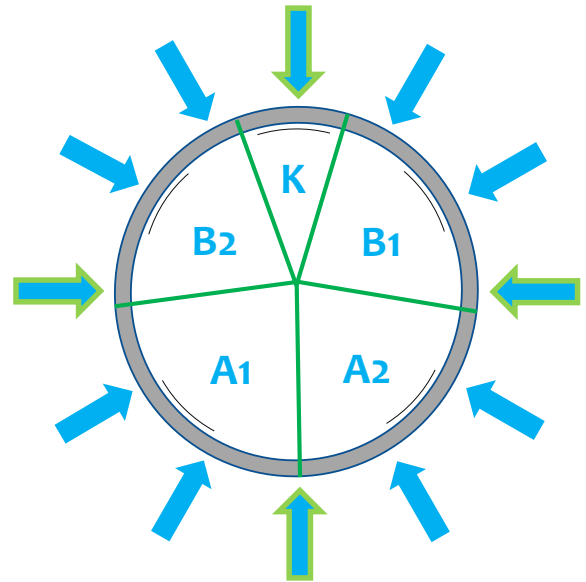


図-6 等方載荷時の圧力載荷方法

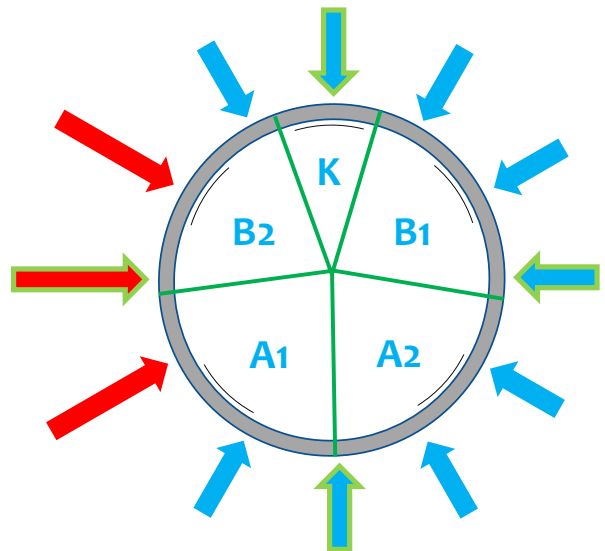
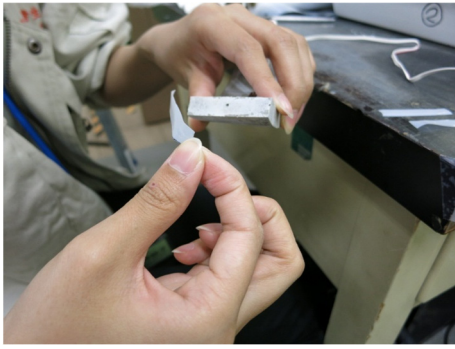


図-7 偏圧載荷時の圧力載荷方法

に圧力を載荷又は除荷できる構造となっている。載荷装置の外観を図-4に、概略図を図-5にそれぞれ示す。ここで、ボルトの配列は時計と同様の並びとし、1時の方向から時計回りにBI1, BI2, BI3,・・・とし、頂部のボルトをBI12とする。また、ボルトの先端は小型のロードセルを設置できる構造としており、ボルトとセグメントとの間にロードセルと載荷治具（長辺40mm, 短辺20mm）を設置し、集中荷重の発生を低減しつつ載荷荷重もモニタリングできる構造としている。ロードセルはBI3, BI6, BI9, BI12の箇所に設置した。

(3) 載荷および除荷方法

実験はまず等方的な圧力を500kN/m²ほど載荷し、その後、0kN/m²まで除荷することで実施した（図-6参照）。



(a) テフロンシートの貼付，グリスの塗布



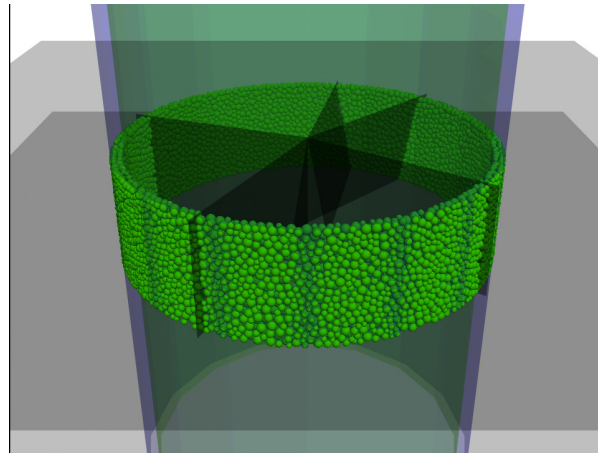
(b) Kセグメントへの変位計の設置

図-8 Kセグメントに対する実験条件 (Case3,4)

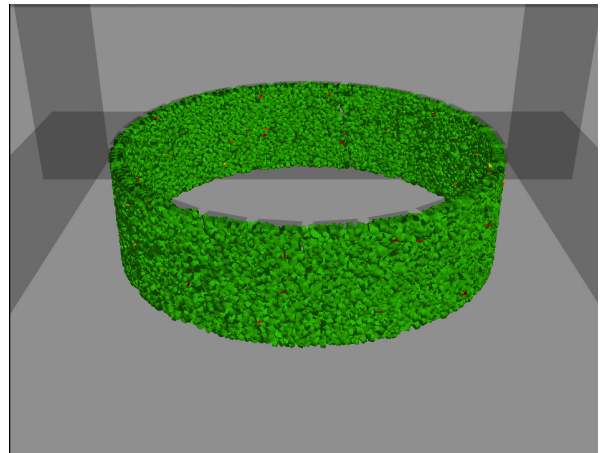
次に，再度等方的な圧力を 500kN/m^2 ほど載荷し，セグメントリングに向かって左側のBI8, BI9, BI10を増し締めし，偏圧 700kN/m^2 ほど載荷した（図-7参照）．その後，BI8, BI9, BI10を等方的な圧力 500kN/m^2 まで緩めた後，全てのボルトを等方的に緩め， 0kN/m^2 まで除荷した．

載荷および除荷時の注意点として，先述したように鋼製円管の周囲に計12個のボルトがあるが，対角線の2つのボルトを手締めで同時に締めていくことにより載荷した．その際，先端部にロードセルの装着してある4本のボルトを先に締め，荷重と回転角度を確認してから，残りの8本のボルトを締めた．ロードセルの装着されていない載荷点は正確な荷重の大きさが確認できないため，ロードセルの付いている載荷点と同様の回転角度ほど締めて載荷した．圧力は，段階的に $20\sim 60\text{kN/m}^2$ 程度ごと上昇させた．除荷も同様の手順で，ロードセルの装着してある4本のボルトを先に緩め，次いで，残りの8本のボルトを緩めた．

一方，実施工において，Kセグメントの挿入を容易にするため，KセグメントとBセグメントの接触面に潤滑剤を塗布する場合もある．本報では，潤滑剤の影響を確認するケースの実験も実施した．つまり，KセグメントとBセグメントの接触面にテフロンシートを貼り付け，



(a) セグメント作製



(b) シールドジャッキの再現

図-9 個別要素法 (DEM) によるセグメント作製

潤滑剤を塗布した．また，Kセグメントの抜け出し量を確認するため，Kセグメントに変位計を接触した（図-8参照）．これらの実験条件を表-1にまとめた．

表-1 実験条件

実験ケース	継手面摩擦	セグメント厚さ
Case1	摩擦有り	5mm
Case2		10mm
Case3	摩擦低減	5mm
Case4		10mm

3. 解析概要

実験をシミュレーションするため，個別要素法を用いた解析を実施した．本報では，全てのCaseの解析を実施しておらず，Case3のみの解析を実施した．なお，解析では模型セグメントの大きさを32倍し，実物大規模である外径 4820mm ，内径 4500mm としている．セグメントの

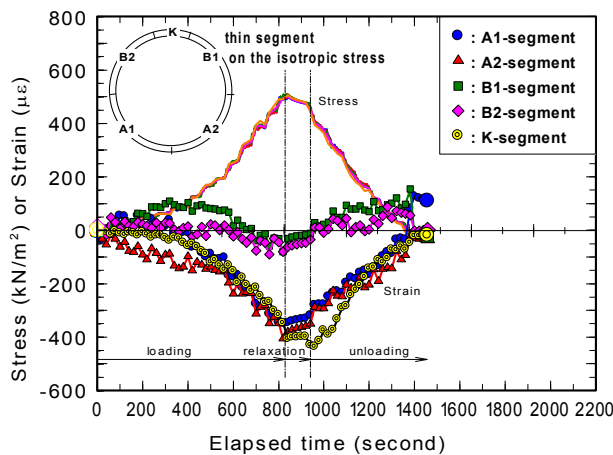


図-10 等方載荷時の応力ひずみの経時変化 (厚さ 5mm)

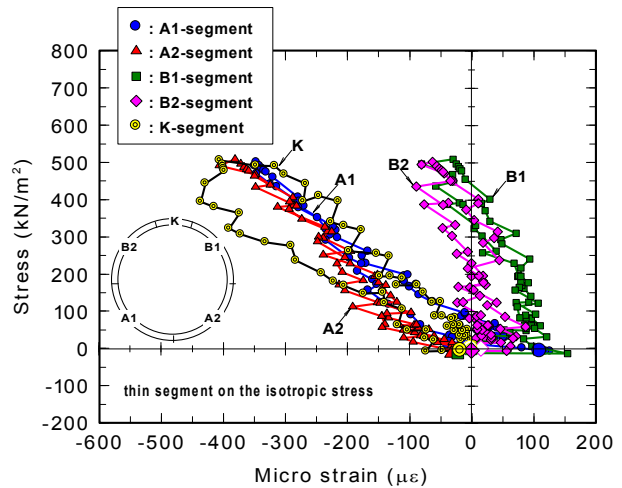


図-11 等方載荷時の応力ひずみ関係 (厚さ 5mm)

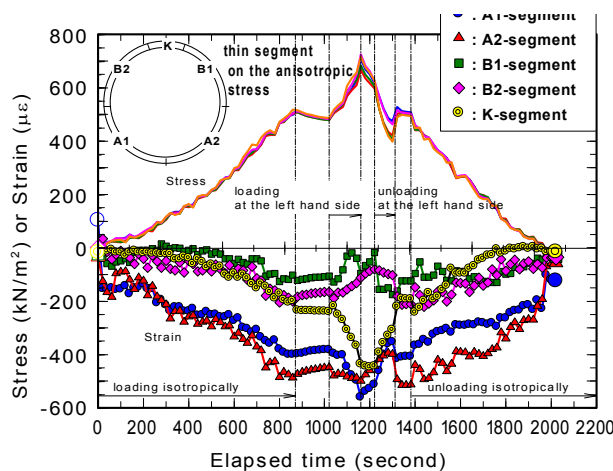


図-12 偏圧載荷時の応力ひずみの経時変化 (厚さ 5mm)

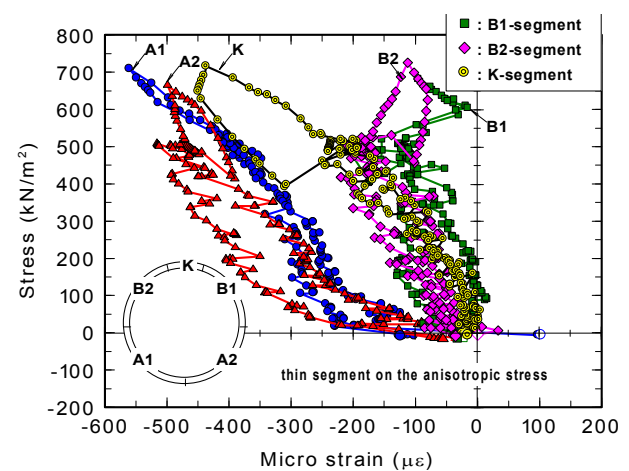


図-13 偏圧載荷時の応力ひずみ関係 (厚さ 5mm)

寸法の相似則は満足している。

DEMによるセグメントの作製方法について述べる。

- ① セグメントの内径および外径を有した円筒状の壁要素をそれぞれ設ける。また、セグメントの桁高 (厚さ) の方向にも上下に正方形の壁要素を設ける。
- ② 壁要素間に球要素 (最小半径 $R_{\min}=0.0272\text{m}$, 最大半径 $R_{\max}=0.0544\text{m}$, 平均半径 $R=0.0408\text{m}$) を充填密度 1.572g/cm^3 となるよう発生させる。
- ③ セグメント間に壁要素を発生させる (図-9(a) 参照)。
- ④ 全球要素間に平行ボンドを付加する。
- ⑤ セグメント間の平行ボンドを削除する。これにより、セグメントは完全に独立した状態となる。
- ⑥ セグメント間の壁要素、セグメントの内外径を有した円筒状の壁要素、セグメントの桁高 (厚さ) の方向にあるセグメントの上の正方形の壁要素を削除す

る。その後、新たにセグメントの上にシールドマシンのジャッキを模した壁要素を合計26個ほど設ける (図-9(b) 参照)。

- ⑦ 重力を作用させる。
- ⑧ 等方的な圧力 500kN/m^2 を作用させる。
- ⑨ シールドジャッキを模した壁要素を削除する。

セグメントを表現するために用いたDEMパラメータの一覧を表-2に示す。同パラメータは、実際のセグメントからコンクリートをサンプリングし、その一軸圧縮強度と弾性波速度から決定した。一軸圧縮強度は平均として 59.9 N/mm^2 であり、超音波速度は平均としてP波速度 $V_{p, \text{bm}}=4760\text{ m/sec}$, S波速度 $V_{s, \text{bm}}=2470\text{ m/sec}$ であった。今回実験で用いた配合の一軸圧縮強度 (46.2 N/mm^2) と弾性波速度 ($V_{p, \text{bm}}=3920\text{ m/sec}$, S波速度 $V_{s, \text{bm}}=2340\text{ m/sec}$) よりも大きい。DEMパラメータの決定方法については、参考文献に詳しい⁴⁾。

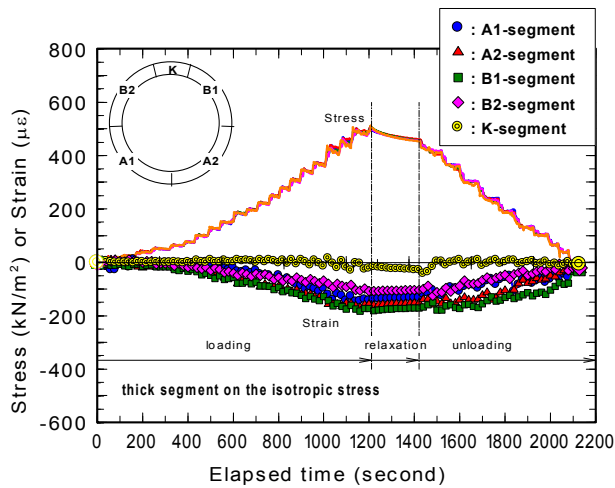


図-14 等方載荷時の応力ひずみの経時変化 (厚さ 10mm)

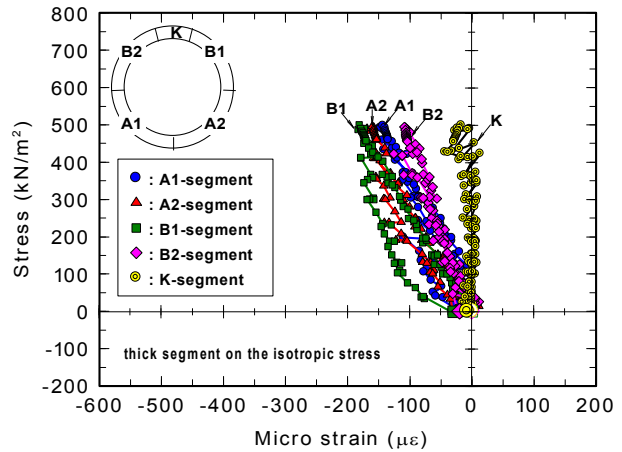


図-15 等方載荷時の応力ひずみ関係 (厚さ 10mm)

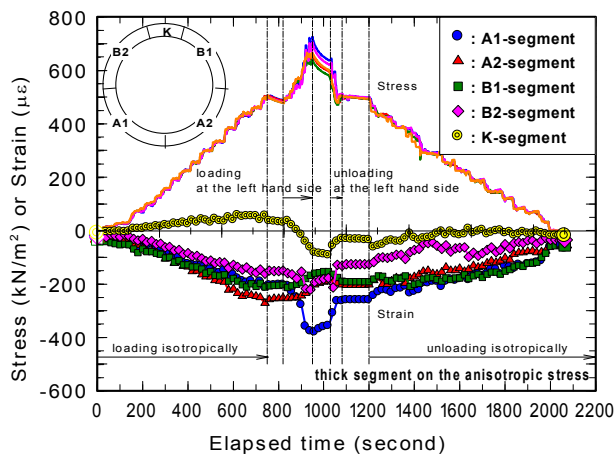


図-16 偏圧載荷時の応力ひずみの経時変化 (厚さ 10mm)

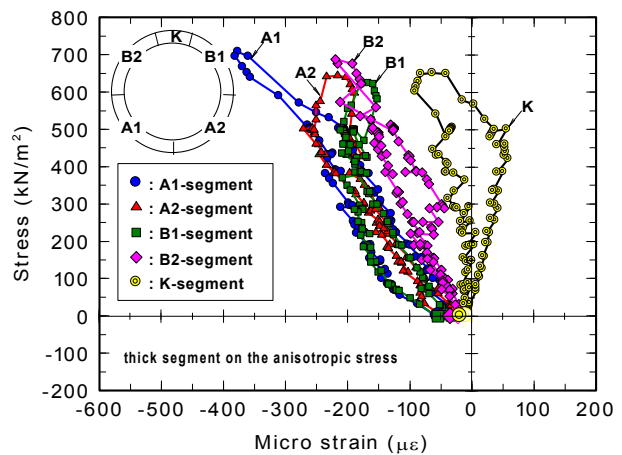


図-17 偏圧載荷時の応力ひずみ関係 (厚さ 10mm)

表-2 セグメントを表現するためのDEMパラメータ

パラメータ (材料定数)	記号	セグ メン ト	単位
球要素	密度	ρ_s	2650 kg/m ³
	平均半径	R	0.0408 m
	法線方向の剛性	k^n	18.0 kN/mm
	接線方向の剛性	k^s	7.3 kN/mm
	摩擦係数	μ	0.10~0.30
	減衰定数	β^n, β^s	0.8
パラレルボンドと球要素の 半径比	$\bar{\lambda}$	1.0	-
パラレルボンド	法線方向の剛性	$\bar{k}^n$	480 N/mm ³
	接線方向の剛性	$\bar{k}^s$	130 N/mm ³
	法線方向の強度	$\bar{\sigma}_c$	160 N/mm ²
	接線方向の強度	$\bar{\tau}_c$	160 N/mm ²

4. 実験および解析結果

(1) 載荷除荷実験結果

セグメント厚さ5mmの場合の等方的な圧力下におけるセグメントの応力とひずみの経時変化を図-10に示す。Case1の摩擦有りの条件である。応力については圧縮を正とし、ひずみについてはセグメントが外側に開く場合を正とし、内側に閉じる場合を負としている。同結果から、載荷圧力の増加に伴い、A1, A2, Kセグメントが内側に閉じる方向に挙動し、B1, B2については、外側に開く場合もあれば逆の場合もあり、ひずみ0付近に終始していることがわかる。一方、除荷時には、圧力の減少に伴い、ひずみも0に戻る挙動を呈しており、弾性的な変形であることがわかる。応力ひずみ関係 (図-11) を見ると、A1, A2, Kセグメントの場合、応力ひずみ関係の傾きはほぼ一致し、B1, B2セグメントと比較して小さい。

偏圧載荷時の応力とひずみの経時変化 (図-12) を見

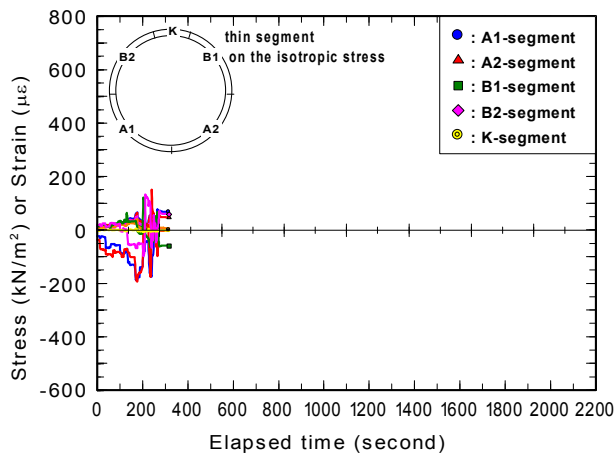


図-18 等方載荷時の応力ひずみの経時変化 (厚さ 5mm)

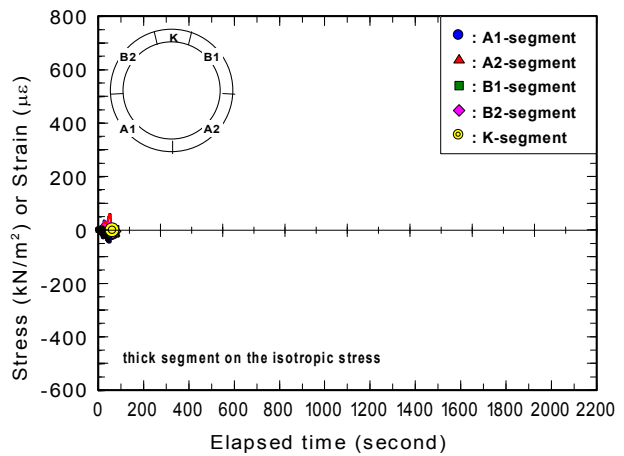


図-19 等方載荷時の応力ひずみ関係 (厚さ 10mm)

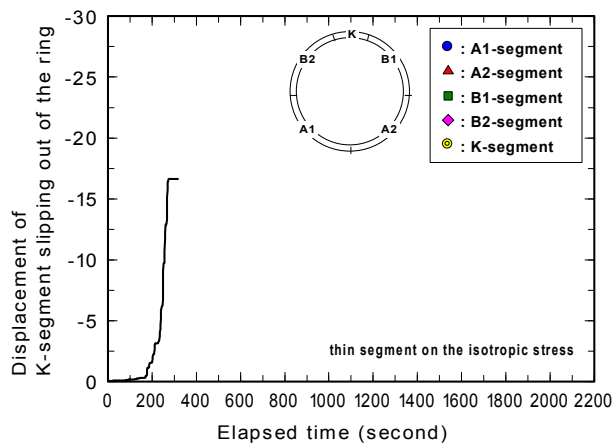


図-20 Kセグメントの抜出量の経時変化 (厚さ 5mm)

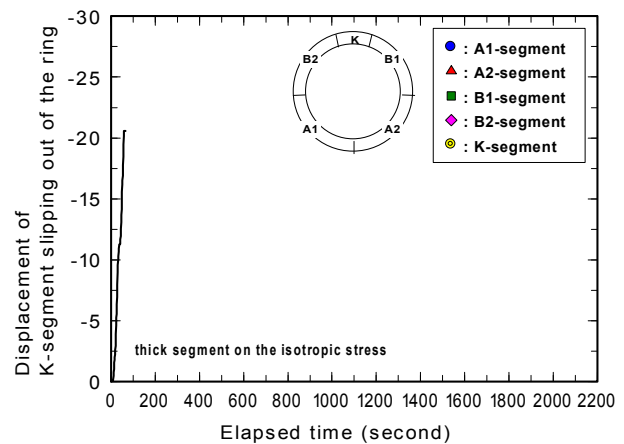


図-21 Kセグメントの抜出量の経時変化 (厚さ 10mm)

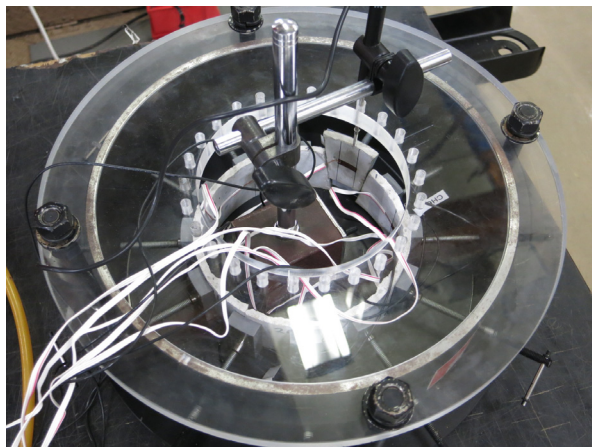


図-22 Kセグメントの抜け出し (厚さ 5mm)

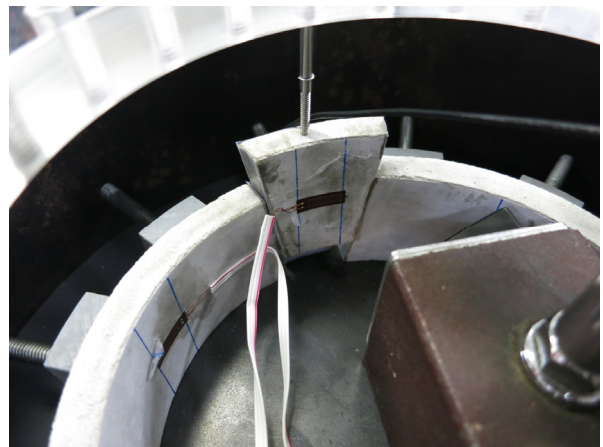
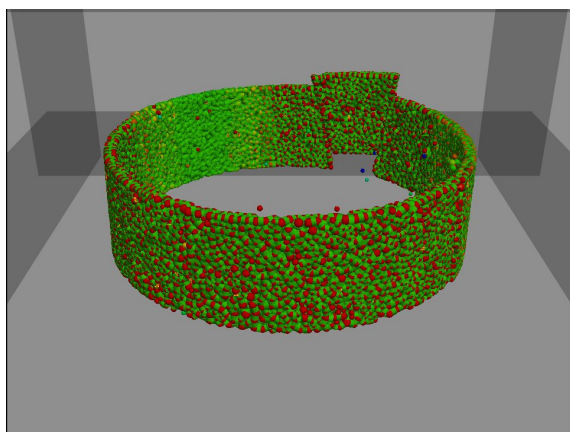


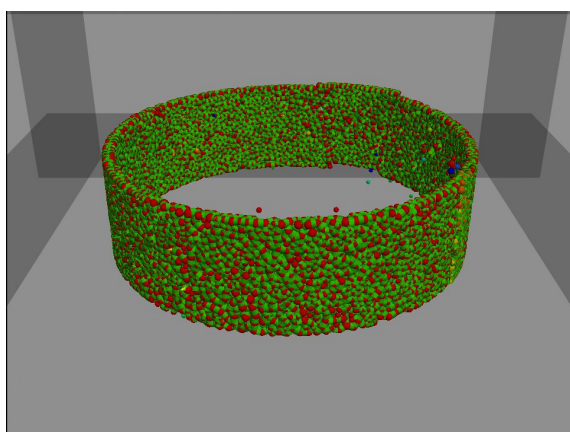
図-23 Kセグメントの抜け出し (厚さ 10mm)

ると、等方的な応力が 500kN/m^2 まで増加する間、各セグメントは負のひずみを呈している。その後、偏圧載荷時には、B18, 9, 10のみ増し締めしたにもかかわらず、各応力値がほぼ同等の値を示しており、その応力の増加分をセグメントリング全体で支えようとしていることがわかる。ひずみの変化をみると、偏圧載荷時には、A-1, A-2セグメントのひずみが大きくなる一方、B-1, B-2セグメ

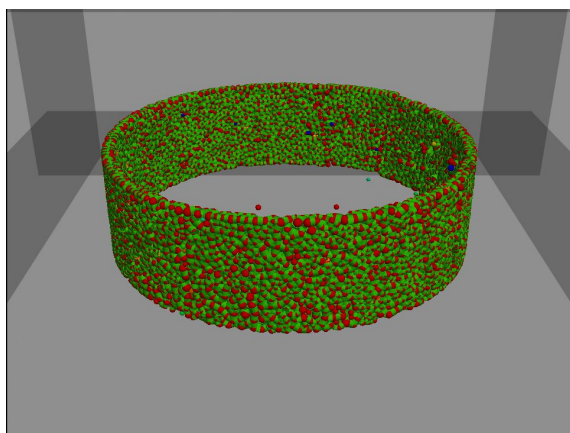
ントのひずみは小さいままである。特徴的なことは、Kセグメントのひずみが偏圧載荷時に急激に増加している点であるが、その原因は定かではない。わずかなセグメントのずれによって、ひずみが集中する箇所が出てきている可能性も示唆される。応力ひずみ関係 (図-13) を見ると、その傾向がより明らかであり、A-1, A-2, Kセグメントの応力ひずみ関係の傾きが小さくなっている。ま



(a) 摩擦係数 0.1



(b) 摩擦係数 0.2



(c) 摩擦係数 0.3

図-24 Kセグメントの抜け出し

た、除荷後の残留ひずみもA-1セグメントで $-125\mu\epsilon$ 程度発生している。

次に、Case2であるセグメント厚さ10mm、摩擦有りの場合、等方載荷時の応力とひずみの経時変化（図-14）、応力ひずみ関係（図-15）ともに各セグメントのばらつきが小さくなっていることがわかる。つまり、A-1、A-2、B-1、B-2セグメントの応力とひずみの経時変化の傾向が非常に類似しており、また応力ひずみ関係の傾きも各セグメントで同程度である。また、ひずみ量の絶対値も最

大で $200\mu\epsilon$ 程度であり、厚さ（5mm）のセグメント（ $400\mu\epsilon$ 程度）よりも小さい。一方、Kセグメントについては、ひずみの発生が非常に小さく、ほぼひずみが0に等しい。Kセグメントは、他のセグメントに比べ、元来、弧長も短い上、セグメントの厚さが厚くなったことで、圧力に対してより強度が高まったものと推察される。

偏圧載荷時（図-16、17参照）も同様であり、A-1セグメントのひずみが比較的大きくなっているが、Kセグメント以外の各セグメントの応力ひずみ関係の傾きは類似している。また、除荷後の残留ひずみもほぼ0に収束しており、弾性変形内であることがわかる。そのため、偏圧に対しても厚さの厚いセグメントの方が、安定性が増すと推察される。

最後に、Case3とCase4の摩擦低減の場合、どちらのケースもわずかな等方的な圧力（約 100kN/m^2 以下）でKセグメントが抜け出し、それ以降は圧力が増加せず、圧力増加分がKセグメントの抜け出し量を増加させていくのみであった（図-18-23参照）。

(2) 解析結果

本報では、Case3のみDEMを用いたシミュレーションを実施した。

摩擦係数0.1、0.2、0.3と変化したシミュレーション結果をそれぞれ図-24に示す。摩擦係数0.1の場合、Kセグメントが明らかに抜け出すことがわかる。摩擦係数0.2の場合、完全に抜け出すわけではないが、若干目視で確認できる程度に抜け出す。摩擦係数0.3の場合は、目視では抜け出しを確認できない。

5. まとめ

実験と解析の結果から、セグメントが薄肉な場合、セグメントにかかる負担も増加することが示唆された。また、セグメント同士の継手も摩擦に頼るのではなく、ボルト等で締結し、1つのセグメントリングでも安定が保てる構造とすべきである。

謝辞：実験は、当時、日本大学生産工学部学部4年生であった中川原理紗子氏（現応用地質株式会社）と山元健史氏（現セントラルコンサルタント株式会社）と共に実施しました。ここに示して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木股浩孝, 仲山貴司, 津野究, 粥川幸司, 小西真治: シールドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解析的検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル

- 工学) , Vol. 69, No. 1, pp.73-88, 2013.
- 2) 齊藤仁, 黒崎秀, 高橋晃, 竹内友章, 小泉淳: 大深度シールドトンネルにおける施工時荷重作用時に発生するセグメントの損傷の原因, 土木学会論文集 F, Vol. 63, No. 2, pp. 200-211, 2007.
 - 3) 木村 亮, 足立紀尚, 小林秀人: 水平力を受ける鉄筋コンクリート群杭の終局挙動に関する遠心模型実験, 京都大学防災研究所年報, 第 38 号 B-2, pp.1-16, 1995.
 - 4) 吉川直孝, 堀智仁, 伊藤和也, 三田地利之: 固結粒状材料における個別要素法パラメータの決定方法の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 8, No.2, pp. 221-237, 2013.
- (2016. 8. 5受付)

LOADING AND UNLOADING TESTS OF SEGMENT MODELS AND ITS DISCRETE ELEMENT SIMULATION

Naotaka KIKKAWA, Nobutaka HIRAOKA, Kazuya ITOH and Toshiyuki MITACHI

The TBM tunnels are generally designed to consider earth and water pressures acted on segment ring that was completely constructed. Therefore, there are not so many reports that segment rings suffered some damages from earth and water pressures due to its lack of capacity for these pressures after constructed. Segment rings, however, suffered some pressures in construction such as approaching TBM to segment rings, jack pressures during TBM advancing etc. In this report, in order to evaluate easily the behavior of segments in various pressures, we made segment models and its loading and unloading system, and then we investigated to measure the stress-strain behavior of segments. In addition, we simulated the experimental test using Discrete Element Method although it was not full cases of the experimental tests.