

# セグメント模型に対する単体曲げ実験および解析的検討

東京都市大学大学院 学生会員 ○益子 時佳  
 (独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 正会員 吉川 直孝  
 正会員 平岡 伸隆  
 東京都市大学 正会員 伊藤 和也

## 1. はじめに

シールド工法におけるセグメントの力学挙動は、地盤条件やトンネルの断面形状、施工方法に依存する。設計時には、地盤状態の変化やシールドマシンとセグメントの競合などによる荷重分布の変状を予測することは難しく、セグメントの損傷や欠損を引き起こし、災害に繋がる危険性がある。力学挙動を可視化することで、継手構造、地盤と構造物の相互作用、隣接するリングとの荷重配分能力などを把握することが可能となる。そこで本稿では、セグメント模型の単体曲げ試験およびそれらの個別要素法によるシミュレーション解析を行い、これらを定量的に比較してセグメントの力学挙動への適用性を検証した。

## 2. 解析概要

### 2-1 個別要素法 (Discrete Element Method)

個別要素法とは、粒状体の変形・降伏・破壊のメカニズムを数値解析によって定量的に解明するための有効な手段とされている。<sup>1)</sup>接触する粒子間力の相互作用を簡単なアルゴリズムで計算するため、ボンディングなどの状態も表現可能となる。

### 2-2 解析モデル

DEM におけるシミュレーションのフローチャートを図-1 に示す。初期条件や境界条件の設定から粒子の位置や速度、各速度を計算し、粒子間の接触判定を行う。そして粒子間に働く作用力を計算し、差分法<sup>3)</sup>を用いて粒子を移動させることを微小時間の中で繰り返し行う。

### 2-3 解析方法

粒状体の粒子を球形の剛性要素と仮定した。解析における粒子配置は、粒子同士に重なり合いが発生しないよう、粒子が丁度接するような配置とした。図-2 に実験前の初期粒子配置を示す。解析に必要な材料定数は、法線方向および接線方向の弾性係数や粘

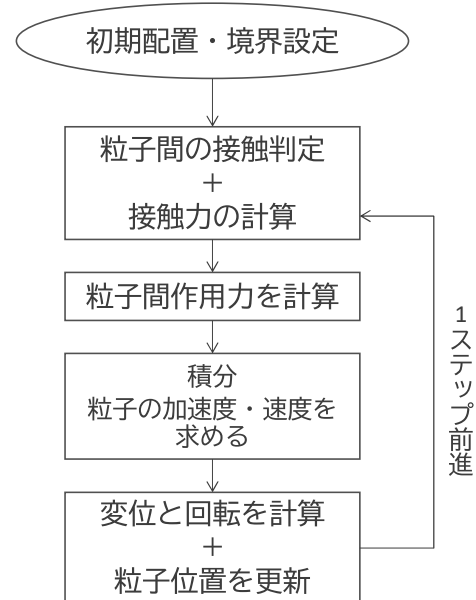


図-1 DEM の計算の流れ

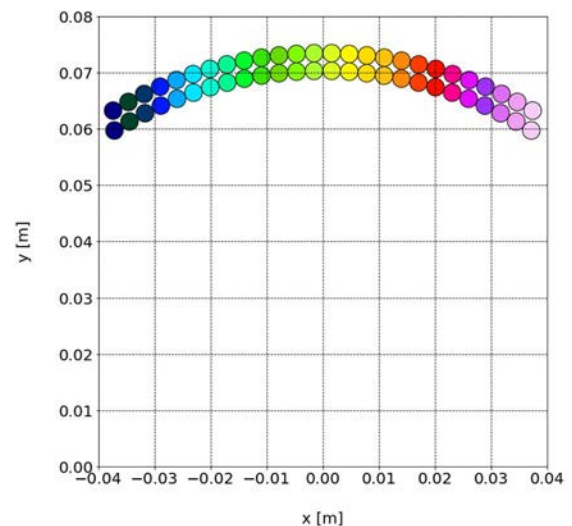


図-2 解析モデル

性係数、摩擦係数、密度等である。また、粒子同士の接触以外に粒子と載荷板の接触を考慮した。ここでは、載荷板を壁要素でモデル化した。解析プログラムにはYade<sup>4)</sup>を用いた。

キーワード シールド工法, セグメント, 単体曲げ実験, 個別要素法, DEM

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 TEL : 03-5707-0104 E-mail : g2181625@tcu.ac.jp

### 3. 実験概要

#### 3-1 模型概要

外径 150mm, 内径 137.5mm の型枠を用いて図-3に示す模型を3つ (A1, A2, A3 セグメントとする) を作製した. モルタル(豊浦砂: 早強ポルトランドセメント: 水=2: 1: 0.65)を配合した. 打設の際は気泡を除去し密実にし, 脱型後は打設から28日となるように水中養生を行った.

#### 3-2 単体曲げ実験

1mm/min の一定速度で底盤を上昇させ, セグメント模型を固定端の上盤に接触させることで曲げモーメントを発生させる. ロードセルにより荷重を測定した. セグメント模型の内外径の中央部にそれぞれひずみゲージを配置した. また, 荷重時にひずみゲージを保護するため, 外径側に2枚のテフロンシートを貼り付けた.

### 4. DEM 解析結果と実験結果の比較

図-4 にマイクロひずみと解析ステップ数の関係を示した. 赤線と青線はそれぞれ内径側と外径側ひずみ値である. 1000 ステップごとのひずみをそれぞれ取得し, 50000 ステップで計測を終了した. 計測開始後, 内外径のひずみが徐々に増加し, ステップ数が約45000の時, 内径側ひずみが急増しセグメントが完全に破壊した. 図-5 の荷重ひずみ関係から解析結果と実験結果を比較したところ, 挙動がほとんど一致していることが分かる. また, 解析結果は実験結果と比べ, 破損後に急激に荷重が低下した. 実験ではセグメント模型のセグメントペーストが破損後もある程度応力を伝達するのに対して, 解析では破損直後にボンドが消失してしまい, ボンドが応力を伝達なくなることが原因と考えられる.

### 5. まとめ

本研究では, セグメント模型の単体曲げ試験とその個別要素シミュレーション結果を定量的に比較した. その結果, 個別要素解析によりセグメントの力学挙動を評価することができると考えられる.

#### 参考文献

- 1) 伯野元彦(1997)『破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー』 pp10-55 森北出版株式会社
- 2) Catherine O'Sullivan 原著 鈴木輝一 訳(2014)『粒子個別要素法 Particulate Discrete Element

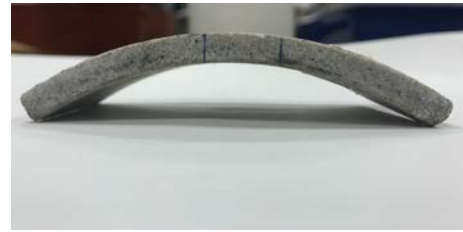


図-3 セグメント模型

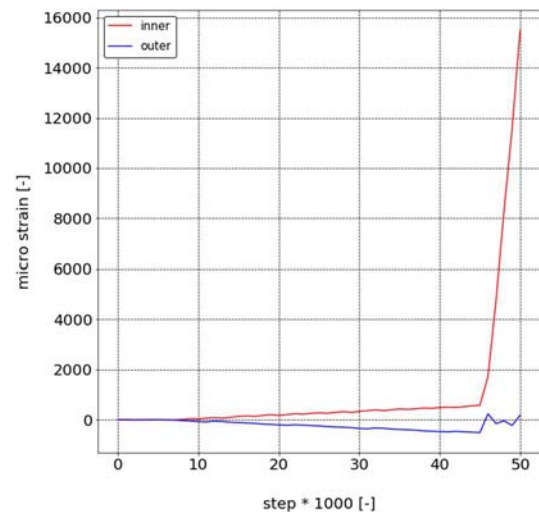


図-4 マイクロひずみステップ数関係図

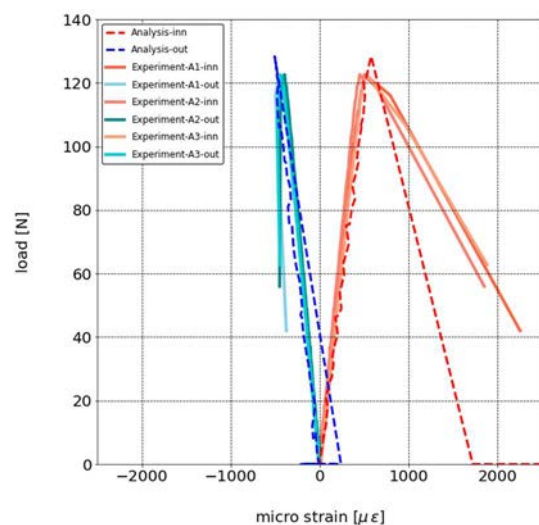


図-5 荷重ひずみ関係図

Modelling :A Geomechanics Perspective』 pp10-140  
森北出版株式会社

- 3) 粉体工学会編(2001)『粉体シミュレーション入門  
コンピュータで粉体技術を創造する』 pp29-44 産業図書株式会社
- 4) V. Šmilauer et al. (2021), Yade Documentation 3rd ed.  
The Yade Project. DOI:10.5281/zenodo.5705394  
(<http://yade-dem.org/doc/>)