セグメント模型の単体曲げ試験と その個別要素法解析

吉川 直孝1・今井 鋭2・平岡 伸隆3・伊藤 和也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学生会員 東京都市大学4年 工学部都市工学科(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1) E-mail: g1318015@tcu.ac.jp

3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

⁴正会員 東京都市大学准教授 工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1) E-mail: itok@tcu.ac.jp

これまでの著書らの研究において、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・除荷装置を試作し、セグメントの応力ひずみ挙動を計測する試みを実施してきた.同研究において、様々な圧力下で発生したひずみが弾性範囲内に収まっているのか、塑性ひずみにまで到達しているのか、セグメントの損傷を評価する上で重要な情報であると考えている.そこで本報では、セグメント単体曲げ試験を実施し、試験時の荷重、変位およびひずみを計測し、セグメント単体の強度とひずみの関係を明らかにすることを目的とした.また、3次元個別要素法を用いて、セグメント単体曲げ試験をシミュレートし、実験時の挙動をどこまで再現できるか試みた.それらの結果、最大荷重を呈する時のひずみ量はセグメントの厚さに依らず一定であり、コンクリートの性能に起因した破壊ひずみが得られていると推察された.また、DEMによるシミュレーションでは、実験結果と定性的に一致するものの、最大荷重時の変位およびひずみともに実験結果よりも大きくなり今後の課題となった.

Key Words : segment, model test, bending test, discrete elemet method

1. 序論

セグメント単体曲げ試験は、一般的にセグメントが所 定の性能を有していることを確認するために行われる. 同試験は、鉄筋コンクリート製セグメントの単体を両端 可動支点とするアーチ状の梁とし、セグメント外径側の 中央部に2線載荷して行われる¹⁾.曲げ試験には水平方向 に載荷する方法と、鉛直方向に載荷する方法(図-1参照) とがある.前者の載荷方法では設置面とセグメントの摩 擦の影響が、後者の載荷方法では自重の影響がある.後 者の場合の曲げモーメントは以下の式で示され、自重の 影響を考慮して曲げモーメントを算出する.

$$M = \frac{P \cdot (L1 - L2)}{4} + \frac{W_D \cdot L2}{8}$$
(1)

ここで, P: 試験時の荷重, Wo: セグメントの自重である. セグメント単体曲げ試験時には,一般的に,ひび割れ 発生荷重,最大荷重,たわみ量,ひび割れ幅等が計測さ れる.湯浅ら²は,鉄筋コンクリート製セグメントを用 いて単体曲げ試験を行い,ひび割れ幅を検討し,同セグ メントの水密性を評価している.

また、セグメントの曲げ試験に対する数値解析的な検 討も行われており、張・小泉³は、合成セグメントの曲 げ試験時の荷重と変位の関係および曲げモーメントと曲 率の関係を有限要素法による3次元非線形解析により精 度良く表現している.

一方,著書ら⁴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,個別要素法(Disrete Element



図-1 セグメント単体曲げ試験の概念図

Method;以下「DEM」という.)を用いたシミュレー ションと比較検討している.その一連の研究の中で, 様々な圧力下で発生したセグメント内径側の円周方向ひ ずみ(以下,「ひずみ」という.)が,弾性範囲内であ るのか,塑性ひずみにまで到達しているのか,把握する 必要が生じてきた.そこで本報では,セグメント単体曲 げ試験を実施し,試験時の荷重,変位およびひずみを計 測し,セグメント単体の強度とひずみの関係を明らかに することを目的とした.また,DEMによりセグメント 単体曲げ試験をシミュレートし,実験時の挙動をどこま で再現できるか試みた.

2. 実験概要

本研究では、小型のセグメント模型を作製し、地盤材 料試験で用いられる一軸圧縮試験機⁹を使用し、セグメ ント模型の単体曲げ試験を実施した.単体曲げ試験は、 セグメント模型が耐えうる荷重およびその時の変位とひ ずみを計測するために実施した.

(1) セグメント模型の作製方法

本研究では3種類のセグメント模型を作製した.標準 セグメント模型に加えて,薄肉および厚肉のセグメント 模型を作製した.標準セグメント模型は,外径150mm, 厚さ6.25mmの6分割(A1,A2,A3,B1,B2,K)とした.実際 の標準セグメント¹⁰と比較して32分の1縮尺の模型を想定 している.一方,薄肉および厚肉のセグメント模型は, 外径150mmであり,厚さ5mmまたは10mmの5分割(A1,



図-2 薄肉のセグメント模型を作製するための型枠



図-3 標準セグメント模型 (A2) の作製状況 (内径側にひず みゲージを接着)

A2,B1,B2,K)とした. セグメント模型の寸法を表-1にま とめて示した.

	標準1)	薄肉	厚肉
外径(mm)	150	150	150
内径(mm)	137.5	140	130
厚さ(mm)	6.25	5	10
幅(mm)	37.5	43.8	43.8
分割数	6	5	5

表-1 セグメント模型の寸法

セグメントを作製するための型枠は、標準セグメント 模型の場合、PVC(ポリ塩化ビニル)で作製した.一方、 薄肉および厚肉のセグメント模型の場合、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-2参照).セグメントに分割する方法と しては、PVCまたはシリコンゴムの所定の箇所に切り込 みを入れ、厚さ0.15mm~0.2mmの銅板を差し込むことに よる.作製方法として、はじめに、離型剤を塗布した型



(a) 標準セグメント (厚さ6.25mm, A1)



(b) 薄肉(厚さ5mm)のA1セグメント



(c) 厚肉(10mm)のA1セグメント図4 セグメント単体曲げ試験の様子

枠にセメントミルク(早強セメント:豊浦砂:水=1: 2:0.65)のを流し込む.同配合で作製されたコンクリートの28日圧縮強度は、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おり、一般的なコンクリートの設計基準強度45N/mm²を満足している.また、DEM

によるシミュレーションを実施する際、DEMパラメー タを決定するために超音波速度が必要であることから, 合せて超音波速度も計測⁷し、平均としてP波速度Vpm= 3920 m/sec, S波速度Vs m= 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 ト模型のひずみ値を計測するため、各セグメント模型の 内径側にひずみゲージを接着した. ひずみゲージの伸び 縮みの方向は円周方向である. 作製後のセグメントを図 -3に示す. セグメント単体曲げ試験に供した試験体は、 標準セグメント模型の場合, Al, A2およびA3セグメント であり、薄肉および厚肉の場合、AlおよびA2セグメン トとした.

(2) セグメント模型単体曲げ試験装置

試験装置は、地盤材料試験で用いられる一軸圧縮試験 機⁹を用いた.同試験装置は、上部載荷冶具を固定端と して下部ペデスタルが上方に一定速度で上昇し、試験体 を載荷する仕組みとなっている.なお、上部載荷冶具に 球座が組み込まれており、載荷時に試験体に集中荷重が 加わることを低減させている.セグメントの単体曲げ試 験は一般的に2線載荷により実施されるが、ここでは試 験を簡便に行うため、平板による線載荷とした.

実験手順として、まず試験体の質量を計測した.次に、 下部ペデスタルの上にテフロンシートを2枚重ねて置き、 その上にセグメント模型を設置、下部ペデスタルとセグ メント模型の摩擦を低減させている.次に、試験体が上 部載荷冶具に接触する直前まで下部ペデスタルを上昇さ せた.その後、lmm/minの一定速度で下部ペデスタルを 上昇、試験体を上部載荷冶具に接触させ曲げ破壊させた. 試験中の荷重、変位およびひずみをそれぞれ荷重計、外 部変位計およびひずみゲージにより計測した.

試験時の様子を図-4に示す.

3. 解析概要

本節では、セグメント単体曲げ試験をDEMによりシ ミュレートし、DEMによりセグメント単体の強度変形 特性を評価できるか否か検討する.

なお、本報では、薄肉および厚肉のセグメント模型の みシミュレーションを実施している、今後、標準セグメ ント模型のシミュレーションも実施する予定である.

DEMパラメータの設定方法を図-5に示す.実験値とし



図-5 DEMパラメータの設定方法



図-6 セグメントを囲む7つの壁要素とセグメントを構成する 球要素群

て必要な情報は、骨材(豊浦砂)の土粒子密度 ρ および P波・S波速度 V_{p} , V_{s} , コンクリートのP波・S波速度 V_{p} Lm, V_{s} Lmおよび一軸圧縮強度 q_{u} である.解析値としては、球 要素の半径Rを決定すれば、骨材(豊浦砂)の土粒子密 度およびP波・S波速度から、球要素の剛性 k^{n} , k^{e} を図-5か ら算出することができる.また、球要素の剛性が求まる と、球要素のP波・S波速度、コンクリートのP波・S波 速度、ボンドの断面積4から、ボンドの剛性 $\overline{k^{n}}$, $\overline{k^{s}}$ が求 まる.ここで、ボンドの半径 \overline{R} は球要素の半径と同等 とした($\overline{\lambda}$ =1.0).また、一軸圧縮強度 q_{u} からボンドの強度



(a) 薄肉(厚さ5mm)のセグメント模型



(b) 厚肉(厚さ10mm)のセグメント模型図-7 セグメント単体曲げ試験のシミュレーション

 $\overline{\sigma_c}, \overline{\tau_c}$ が求まる. ここでは, m=n=3.0とした. パラメー タの設定方法の詳細は参考文献に詳しい⁸.

(1) セグメント模型の作製方法

本シミュレーションでは,以下の手順でAセグメント を作製した.

- ① セグメントリングの内径および外径を有する2つの 円筒状の壁要素を発生させる.また、セグメント幅 方向に2つの正方形の壁要素(一辺313mm)を発生 させる.さらに、セグメントのセグメント継手面に 接するような2つの四角形の壁要素を発生させる. 壁要素の法線方向および接線方向の剛性(k,k)は球 要素の剛性と同等である.
- ② 上記の6つの壁要素で囲まれる領域に平均半径Rman=
 1.275mm (Rmin=0.85mm, Rmax=1.7mm)の球要素を発生 させる.発生時の球要素には密度ρ,法線方向の剛 性kⁿ,減衰定数βⁿ,β^sを与え,この段階では接線方向の剛性k^kおよび摩擦係数μは与えない.
- セグメントの下部に266×313mmの四角形の壁要素 Wbottomを設ける.ここまでを図-6に示す.
- ④ 球要素の動きが落ち着くまで計算させ、ある程度落



図-9 荷重とひずみの関係 (Aセグメント)

ち着いた後,球要素の変位,速度,回転速度を0に する.

- ⑤ 球要素に接線方向の剛性₭,摩擦係数μを与える. また,球要素同士の全ての接触面にボンドを付与する.この時,ボンドの法線方向および接線方向の剛 性,ボンドの強度,ボンドの大きさを与える.
- ⑥ 壁要素Wbottom以外の壁要素を削除する.
- ⑦ 重力を作用させる.
- ⑧ 球要素の動きが落ち着くまで計算し、ある程度落ち着いた後、球要素の変位、速度および回転速度を0にする。
- ・ セグメントの上部に壁要素Wkpを設ける. 壁要素 Wkpの寸法は, 壁要素Wkotomのそれと同等であり, 同壁要素Wkpが載荷板となる.
- ⑩ 壁要素Wupを一定速度0.1m/secで下降させ、セグメントに載荷荷重を負荷する(図-7参照).その時、両壁要素に加わる荷重とセグメント内径側の中央にある球要素の鉛直変位をモニタリングする.また、セグメントの内径側中央の4つの球要素の3次元座標(x, y, z)をモニタリングし、各載荷段階における4つの球要素の中心間距離の合計値の変化からひずみを算出する.

本報にて設定したDEMパラメータを表-2に示す.



(a) 標準セグメント (厚さ6.25mm, A1)



(b) 薄肉(厚さ5mm)のA1セグメント



(c) 厚肉 (10mm) のA1セグメント

図-10 セグメント単体曲げ試験後の供試体の様子



図-12 セグメント単体曲げ試験の荷重ひずみ関係 (シミュレーション, Aセグメント)

パラメータ (材料定数)		記号	セグメン ト	単位
球要素	密度	$ ho_{ m s}$	2650	kg/m ³
	平均半径	R	1.275	mm
	法線方向の剛性	k ⁿ	0.57	kN/mm
	接線方向の剛性	ks	0.23	kN/mm
	摩擦係数	μ	0.50	-
	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		$\overline{\lambda}$	1.0	-
パラレルボ	法線方向の剛性	\overline{k}^n	11	kN/mm ³
	接線方向の剛性	\overline{k}^{s}	3.8	kN/mm ³
	法線方向の強度	$\overline{\sigma}_{c}$	140(薄肉) 70(厚肉)	N/mm ²
ンド	接線方向の強度	$\overline{\tau}_{c}$	140(薄肉) 70(厚肉)	N/mm ²

表-2 用いたDEMパラメータ

4. 実験および解析結果

(1) セグメント単体曲げ試験結果

セグメント単体曲げ試験時の荷重と変位の関係を図-8



(a) 薄肉のセグメントの曲げ破壊状況



(b) 厚肉のセグメントの曲げ破壊状況図-13 セグメント単体曲げ試験シミュレーション時の曲げ破壊の状況(Aセグメント)

に示す. 同図からセグメントの厚さの増加とともに最大 荷重が増加し,最大荷重を示す時の変位量は減少してい ることがわかる.

一方、荷重とひずみの関係を図-9に示す. 同図から、 最大荷重を示す時のひずみ量は、セグメントの厚さに依 らずほぼ一定値を示しており、200~450µcの範囲にある ことがわかる. これは、本報で配合したコンクリートの 破壊ひずみが、この範囲内にあるものと推察される.

セグメント単体曲げ試験後の供試体の様子を図-10に 示す. 同図から,ほぼ全ての供試体におけて,セグメン トの幅(1200mmまたは1400mm)方向に中央部分からひ び割れが発生しほぼ半分に破壊している.

(2) 解析結果

セグメントにおける荷重変位関係および荷重ひずみ関 係をそれぞれ図-11および図-12に示す.変位は、セグメ ント内径側の中央にある球要素の鉛直変位とした.一方、 ひずみは、セグメント内径側の中央付近にある4つの球 要素の中心間距離の合計値の変化から算出した.これら の球要素は、ひずみゲージの計測方向と同様、ほぼセグ メントの円周方向に並んでいる.荷重変位曲線、荷重ひ ずみ曲線ともに全体的な傾向は、実験結果(図-8および 図-9)と定性的に一致しているが、シミュレーションに おいては最大荷重を示す時の変位量およびひずみ(1000 ~1200με)が大きくなっている.

この原因については検討中であるが、一つには球要素 の大きさが骨材(豊浦砂)よりも大きいこと、もう一つ には試験体の密度が実際よりも小さいためだと推察して いる.つまり、球要素が大きいため、間隙の空間的な大 きさも大きくなるとともに、試験体の密度が小さいこと により球要素が破壊に至るまでに回転または変位できる 自由度があるため、破壊に至るまでの変位とひずみが実 際よりも大きくなると推察している.

シミュレーション時の破壊の性状を見てみると, セグ メントが幅方向にほぼ中央で破壊されており, 実験結果 と同様の傾向を呈している.

5. まとめ

実験と解析の結果から、セグメント単体曲げ試験時の 強度変形特性について、以下の事項が判明した.

- a) セグメントの厚さが厚くなるにつれ,最大荷重が増 加し,その時の変位量も小さくなることがわかった.
- b) 最大荷重を呈する時のひずみ量は厚さに依らず一定 であり、コンクリートの性能に起因した破壊ひずみ であると推察される.
- c) DEMによるシミュレーションでは、実験結果と定 性的に一致するものの、最大荷重時の変位およびひ ずみともに実験結果よりも大きくなる.これらの原 因については、球要素の大きさと試験体の密度が影

響していると推察されるが、今後検討していく予定 である.

参考文献

- 社団法人土木学会,社団法人日本下水道協会:シール ド工事用標準セグメントー下水道シールド工事用セ グメントーJSWAS A-3,4-2001,428p.,社団法人日本下 水道協会,2001.
- 湯浅康尊, 増野正男, 小泉淳: 大きな内水圧を受けるシ ールドトンネルの設計法に関する一考察, 土木学会 論文集 F, Vol.66, No.4, pp. 578-592, 2010.
- 3) 張穏軍,小泉淳:合成セグメントの曲げ挙動に関する 研究,土木学会論文集F, Vol. 65, No. 2, pp.246-263, 2009.
- 吉川直孝,平岡伸隆,伊藤和也,三田地利之:セグ メント模型の載荷実験とその個別要素法解析,トン ネル工学報告集, CD-ROM, II-9, 9p., 2016.
- 5) 社団法人地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会: 岩石の一軸圧縮試験方法,地盤材料試験の方法と解 説一二分冊の2一,社団法人地盤工学会,pp.817-828, 2009.
- 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.
- 7) 社団法人地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会: パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法,地 盤材料試験の方法と解説―二分冊の1―,社団法人地 盤工学会,pp.259-270,2009.
- 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.

(2017.8.11受付)

BENDING TESTS OF SEGMENTAL MODEL AND ITS DISCRETE ELEMENT SIMULATION

Naotaka KIKKAWA, Satoki IMAI, Nobutaka HIRAOKA and Kazuya ITOH

In our previous research, in order to evaluate easily the behavior of segments in various pressures, we made segmental models and its loading and unloading apparatus, and then we investigated to measure the stress-strain behavior of segments. Then, in order to evaluate the damages of segment models in various pressures, it is very significant to understand if the strain of segment model under a pressure would be within the elastic strain or already in the plastic strain. Therefore, in this report, we performed the bending tests of the segment models and then measured the load, displacement and strain to evaluate the limitation of elastic strain. In addition, we simulated the bending tests using Discrete Element Method and so we tried to express the behaviour of segment models in respect of the relationship between load and displacement/strain.