

幅広コッター・クイックジョイントセグメント の応力分布確認試験

近 藤 和 正*¹ 鈴 木 顕 彰
岩 本 哲*² 北 川 滋 樹*¹

要 旨

近年、シールド工事においてセグメント幅が従来の1.0mから1.2mさらに1.5mへと拡大する傾向にある。セグメント幅を拡大すると、千鳥に組み立てた隣接セグメント接合部に発生するリング間せん断力によりセグメント端部に応力集中が発生し、セグメント幅方向の曲げ応力分布に不均等が生じることが懸念される。そこで、モデル実験としてコッター継手を用いたRCセグメントで実物大載荷試験を実施し、セグメントの荷重伝達状況を確認した。

その結果、セグメント幅方向の応力集中度は小さく、千鳥組による添接効果を十分に発揮し、バランスの良い荷重伝達となったことから、幅広コッター・クイックジョイントセグメントが実用に供することができることが確認された。また、その結果と解析値とを比較検討した結果、継手面のすべりや軸力による拘束など不確定な要因はあるものの、セグメントの挙動を予測する手法として梁ばねモデル解析が有効であるという所見を得た。

キーワード シールドトンネル／セグメント幅拡大／セグメント設計／添接効果／二次覆工省略

目 次

- | | |
|-------------|------------|
| 1. はじめに | 4. 事前解析 |
| 2. セグメントの概要 | 5. 試験結果の検討 |
| 3. 試験概要 | 6. おわりに |

STRESS DISTRIBUTION EXPERIMENT OF WIDER COTTER QUICK-JOINT SEGMENT

Kazumasa KONDO Akira SUZUKI
Satoshi IWAMOTO Shigeki KITAGAWA

Synopsis:

Recently, Segments in the shield tunneling method show a tendency to be wider than 1.0m as usual standard to 1.2 and 1.5 meters. It has a possibility to induce that imbalance of stress distribution in segments along the tunnel alignment because of stress concentration on the edge of them with shearing stress between two wider RC segments rings. So, we confirmed the condition of stress transmission through the loading experiment with full-size wider RC segments models connected by "cotter joints".

As a result, it was confirmed that stress concentration is small, transmission has no problem (good balance), and wider RC segments fulfill the execution needs.

And we also recognized that this analysis is useful method to predict segments behavior by comparison of experiments data.

* 1 本店 土木本部 土木設計部 * 2 関東支店 三ノ輪T作業所

1. はじめに

近年、シールド工事においては、セグメントの幅が従来の0.9m～1.0mから1.2m、更には1.5mへと拡大する傾向にある。セグメント幅を拡大すると、工期短縮、継手金物の減少などから工事費の縮減が図れる一方、図-1に示すとおり千鳥に組み立てた隣接セグメント接合部に発生するリング間せん断力によりセグメント端部に応力集中が発生し、セグメント幅方向の曲げ応力分布に不均等が生じることが懸念される。本論文は、コッター継手を用いた1.5m幅のRCセグメントで実物大載荷試験（3リング添接曲げ試験）を実施し、セグメントの荷重伝達状況、試験から得られた結果を解析し、曲げ剛性の有効率 η 、曲げモーメントの割増率 α および回転バネ定数 k_θ 、せん断バネ定数 k_s を評価したものである。

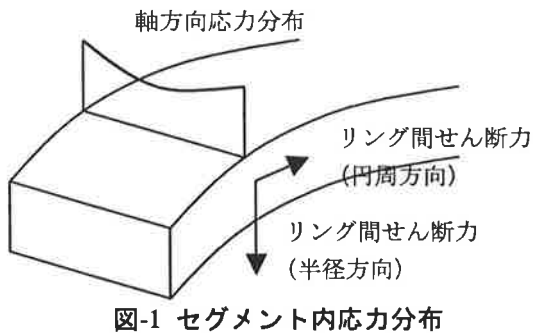


図-1 セグメント内応力分布

2. セグメントの概要

今回使用したセグメントは、セグメント外径10,000mm、幅1,500mm、厚さ400mmのRCセグメントで、8等分割セグメントである。セグメントの使用材料を表-1に、概略を図-2に示す。

表-1 使用材料

材 料	規 格	設 定 値
コンクリート	設計基準強度	48 N/mm ²
	曲げ圧縮応力度	18 N/mm ²
	ヤング係数	39 kN/mm ²
鉄筋 (SD345)	降伏点応力度	350 N/mm ²
	許容引張応力度	200 N/mm ²
	許容圧縮応力度	200 N/mm ²
	ヤング係数	210 kN/mm ²
コッターH型金物 (8.8)	降伏点応力度	640 N/mm ²
	許容引張応力度	240 N/mm ²
	ヤング係数	210 kN/mm ²
コッターC型金物 (FCD900-8)	降伏点応力度	610 N/mm ²
	許容引張応力度	240 N/mm ²
	ヤング係数	170 kN/mm ²
クイックジョイント (M30 10.9)	降伏点応力度	900 N/mm ²
	許容引張応力度	380 N/mm ²
	ヤング係数	210 kN/mm ²

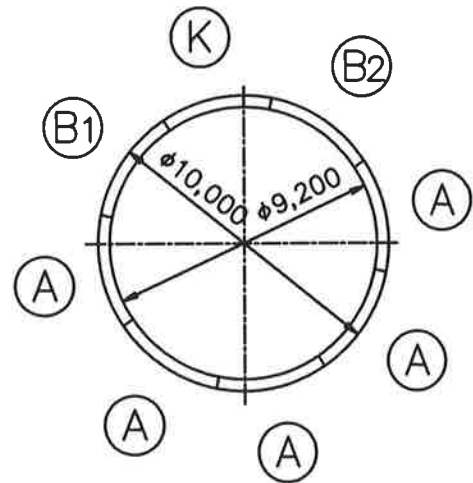


図-2 セグメントリング概略

このセグメントは、セグメント継手にコッター継手、リング継手にクイックジョイントを用いている。それぞれの特長を以下に示す。

・コッター継手

くさびの原理を応用し、セグメント端面に埋め込まれたC型金物同士を合わせ、くさび型のH型金物を圧入するだけで締結できる（図-3）。

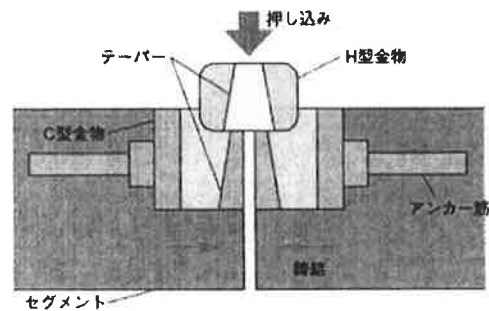


図-3 コッター継手

・クイックジョイント

リング間継手には雄型が割コマを押し上げながら進入すると、締結の少し手前で割りコマが雄型拡張部をかわし、口元に押し戻され逆くさびとして作用し、

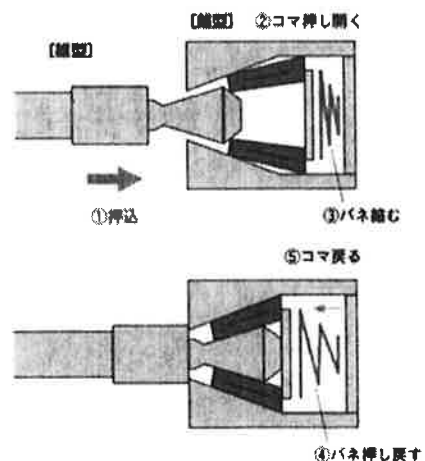


図-4 クイックジョイント

雄型を強く締結する(図-4)。

また、その組立順序は、

①組立ピースをセグメント間内面に合わせてトンネル軸方向に送り込む(この動作のみで、リング間は自己締結される)

②セグメント間にH型金物を挿入する

の2ステップとなっている。

従来のボルトボックスが無く、内面が平滑な仕上がりとなり、二次覆工省略に適したセグメントである。

3. 実験概要

3.1 試験装置

本試験は、供試体を千鳥に組み立て、支承部を両端可動とし、分布荷重による2点載荷正曲げ試験とし、供試体は実物大のもの(A型セグメント)を用いた。なお、載荷はジャッキの荷重を載荷治具を通してセグメントに伝達することにより行い、載荷荷重はロードセルにより計測した。図-5に試験概要を示す。

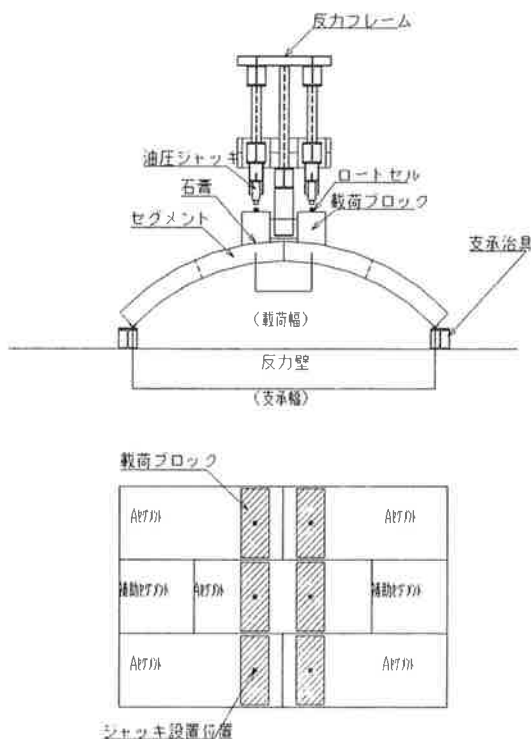


図-5 試験概要

3.2 載荷方法

載荷方法は、中央リングの応力分布を確認するため両端リングのみに載荷するCASE-1と、過大なリング間せん断伝達を避けるため全リングに載荷するCASE-2の2ケースとした。

CASE-1は、リング間のすべりによる非線形挙動を避けるため、目視によるひび割れ発生確認直後まで単調載荷した後、除荷した。

CASE-2は、設計荷重まで単調載荷した後一旦除荷し、その後破壊まで単調載荷した。

3.3 測定位置及び項目

測定項目は、セグメント断面内のひずみ分布を確認するためのコンクリートひずみ計、鉄筋ひずみ計を主に、変位計、目開き計などの機器を配置した。またその位置は、図-6に示すとおり、①～⑥の6断面とした。

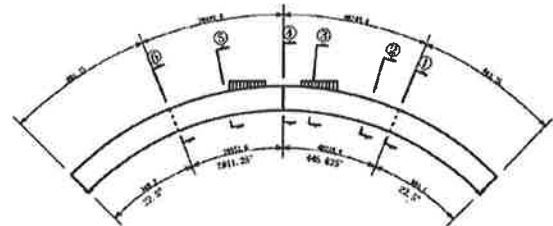


図-6 ひずみ測定位置

4. 事前解析

4.1 解析概要

試験を実施する前に、セグメントの挙動を予測することを目的として、3リング梁ばねモデルによる解析を実施した。

解析は、図-7に示すとおり、

セグメント本体 線形梁要素

セグメント継手 継手の降伏を考慮したバイリニア型の曲げ変形特性を有する非線形回転ばね要素

リング継手 リング面でのすべりを考慮したトリリニア型のせん断変形特性を有する非線形せん断ばね要素

にて試験体をモデル化し、実施した。

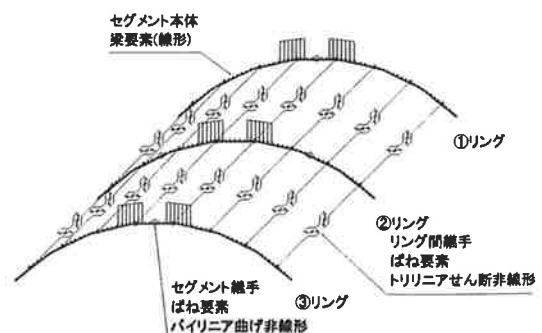


図-7 解析モデル

4.2 材料特性

解析に先立ち、セグメント本体、セグメント間継手、リング間継手について、材料特性を求めた。

(1) セグメント本体

図-8に示す断面について、モデル化された応力-ひずみ関係²⁾を用いて曲げ変形特性を求めた。その結果を表-2に示す。

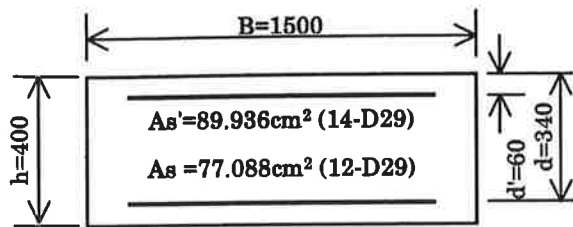


図-8 セグメント断面

表-2 セグメント本体曲げ特性

ひび割れ発生モーメント	M_{cr} [kN・m]	148.55
抵抗モーメント	M_r [kN・m]	445.03
降伏モーメント	M_{yo} [kN・m]	805.25
終局モーメント	M_u [kN・m]	858.72

(2) セグメント継手回転ばね特性

セグメント継手回転ばね特性は、軸力 $N=0$ としてばね定数を算定した¹⁾。その特性は、H型コッター降伏点を折れ点とするバイリニア型（完全弾塑性型）とした。

設計計算で使用したセグメント継手回転ばね特性を図-9に示す。

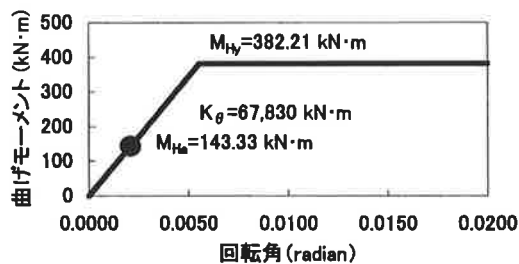


図-9 セグメント継手回転ばね特性

(3) リング継手ばね特性

今回の試験ではリング間でのすべりが発生すると考えられることから、リング継手摩擦及びリング継手余裕を変化点としたトリリニア型のせん断ばね特性を有する非線形ばね要素とした¹⁾。

設計計算で使用したリング間継手ばね特性を、表-3、図-10に示す。

表-3 リング間せん断ばね特性

軸方向継手間隔	(m)	0.942
半径方向せん断ばね定数	k_{sr1} (kN/m)	1.39×10^6
	k_{sr2} (kN/m)	1.39×10^6
接線方向せん断ばね定数	k_{st1} (kN/m)	8.39×10^6
	k_{st2} (kN/m)	8.39×10^6
リング継手面摩擦係数	(kN)	106.25
リング継手余裕	(mm)	3.0

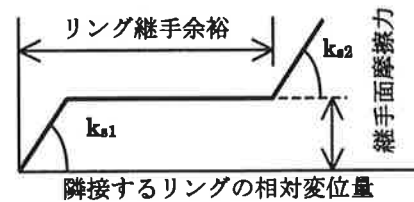


図-10 せん断ばね特性モデル

4.3 解析ケース

試験荷重ケースを想定し、添接リングのみに荷重するCASE-1と、全リングに荷重するCASE-2の2ケースとする。

4.4 解析結果

解析結果を表-4に示す。また、解析結果より求められた荷重荷重と本体リング（中央リング）のスパン中央点の半径方向変位関係を図-11、図-12に示す。なお、荷重荷重は、総荷重を示す。

表-4 解析結果一覧

解析ケース	モデルの状態 (リング)	荷重荷重 (kN)
CASE-1	本体ひび割れ (本体)	137
	鉄筋許容引張到達 (本体)	439
	継手許容引張到達 (添接)	451
	継手降伏 (添接)	931
	鉄筋降伏 (本体)	962
	破壊 (本体)	996
CASE-2	本体ひび割れ (本体)	136
	鉄筋許容引張到達 (本体)	417
	継手許容引張到達 (添接)	479
	鉄筋降伏 (本体)	889
	継手降伏 (添接)	—
	破壊 (本体)	949

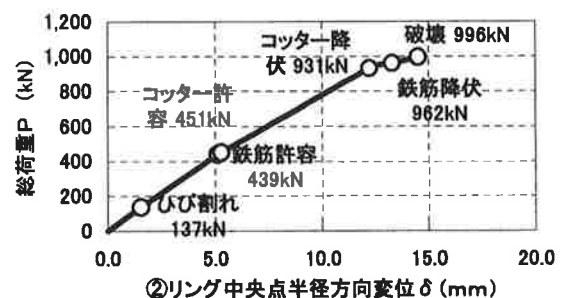


図-11 CASE-1 荷重－変位曲線(解析結果)

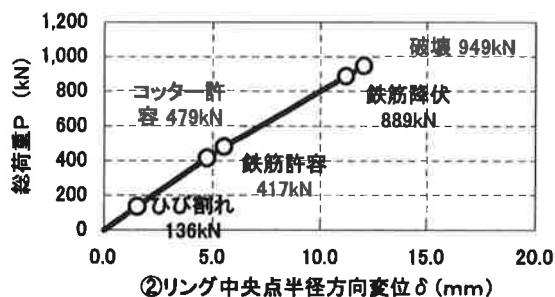


図-12 CASE-2 荷重－変位曲線(解析結果)

5. 試験結果の検討

5.1 荷重－変位関係について

(1) CASE-1 (添接リング載荷)

図-13 に、CASE-1 の荷重－変位関係を示す。

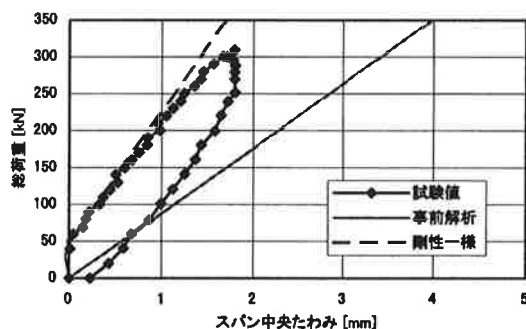


図-13 荷重－変位曲線 (CASE-1)

CASE-1 では、スパン中央のたわみの計測値は、梁ばねモデル事前解析値よりも剛性の高い挙動を示す。これは、CASE-1 では荷重レベルが小さいことから、リング間の静止摩擦力により剛性一様リングとして挙動しているためと考えられる。なお、図中波線は剛性一様モデルとして解析した結果を、変位 0 点からプロットしたものである。

(2) CASE-2 (全リング載荷)

図-14 に、CASE-2 の荷重－変位関係を示す。

破壊荷重まで載荷した CASE-2 では、設計荷重前後までは梁ばねモデルにおける全断面有効の剛性を用いた解析値にほぼ一致した挙動を示した。以後、荷重の増加に伴い、RC 断面剛性による解析値へと漸近し、計測上の降伏荷重 ($P=1260$ kN) 付近では RC 断面による解析値に一致した。また、破壊荷重 (1460 kN) は設計荷重 (417 kN) の約 3.5 倍であった。これらから、本試験について以下のことがいえる。

イ) 計測値は解析値と比較して妥当な値を示し、本試験の信頼度は高い。

ロ) 千鳥組みされた本セグメントの挙動は梁ばねモデル

解析により精度良く推定できる。

降伏荷重及び破壊荷重の試験値と事前解析値 (設計値) の違いは、事前解析ではセグメント本体の非線形性

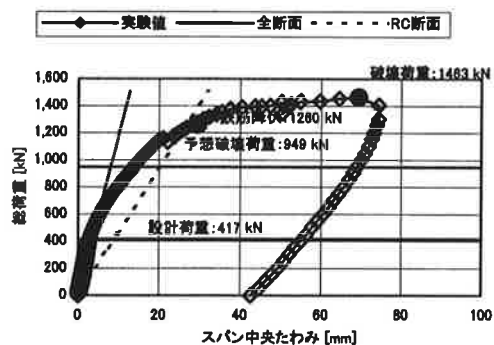


図-14 荷重－変位曲線 (CASE-2)

を考慮していないこと、セグメント本体の強度が設計値よりも高く、継手強度とのバランスも良かったことによるものと考えられる。

5.2 応力集中について

鉄筋ひずみの計測値より得られた曲げモーメントから、本体リングの応力集中度を各々の設計荷重である CASE-1: $P=310$ kN, CASE-2: $P=417$ kN について求めたものを表-5 に示す。

なお、応力集中度 α , β は以下の式より算定した。

$$\alpha_i = \frac{M_i}{M_{ave}} \quad [1]$$

α_i : 各点の添接荷重による応力集中度

M_i : 各点のモーメント

M_{ave} : 断面内各点モーメントの平均値

$$\beta_i = \frac{1 + \alpha_i \cdot \zeta}{1 + \zeta} \quad [2]$$

β_i : 各点の設計応力からの応力集中度

ζ : 曲げモーメントの割増率 (=0.25)

表-5 応力集中度

項目	応力集中度 α	応力集中度 β
CASE-1	0.90～1.13	0.98～1.03
CASE-2	0.90～1.10	0.98～1.02

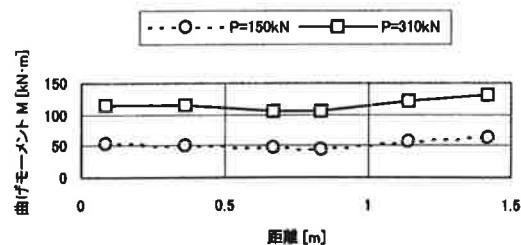


図-15 幅方向曲げモーメント分布

ここで、CASE-1 における最も応力集中度の高い断面でのセグメント幅方向曲げモーメント分布を図-15 に示す。

この結果から荷重による違いはみられず、曲げモーメント分布もほとんど一定であることから、幅広化による幅方向の応力集中は小さいことが確認された。

5.3 曲げモーメントの割増率（ ζ ）について

計測結果（CASE-1：P=310kN，CASE-2：P=417kN）から算定した発生モーメントからモーメント割合を求め、梁ばねモデル解析結果と比較したものを図-16、図-17 に示す。なお、横軸はスパン中央からの距離を示し、縦軸にはモーメント割合とともに曲げモーメントの割増率 ζ を併記した。また、図-18 に示すとおり、④断面（スパン中央）、①断面は継手面を含む断面となるため、添接リングの曲げモーメントから計算した推定値とした。

これらから、試験値と解析値は定性的には一致しており、セグメントを千鳥組にしたことによる添接効果が確認できた。しかし、継手面を含む断面では、それらにズレが生じている。これは、

イ) 実験では一般に解析より小さめの値となること

ロ) 解析結果よりも見かけ上回転ばね定数が大きくなっているため、モーメントの分担率が上がったことによるものと考えられる。

また、これらから曲げモーメントの割増率 ζ を、④断面の推定値と、③断面の計測値についてまとめたものを表-6 に示す。

この表から、今回の試験では $\zeta=0.1\sim0.2$ 程度となった。これは、平板コンクリートセグメントで一般的に設計に用いられる値（ $\zeta=0.2\sim0.3$ ）より若干小さい値となった。

表-6 曲げモーメントの割増率

項 目	CASE-1	CASE-2
スパン中央（④断面）	0.11	0.10
載荷内側（③断面）	0.20	0.17

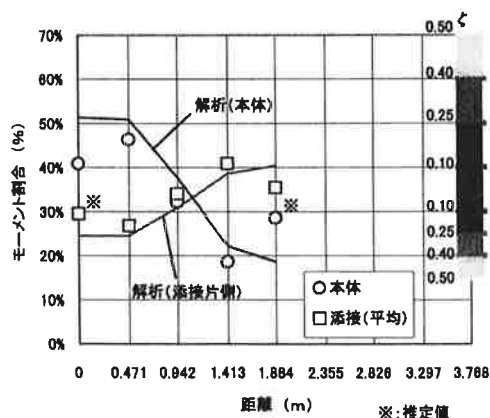


図-16 CASE-1 モーメント割合

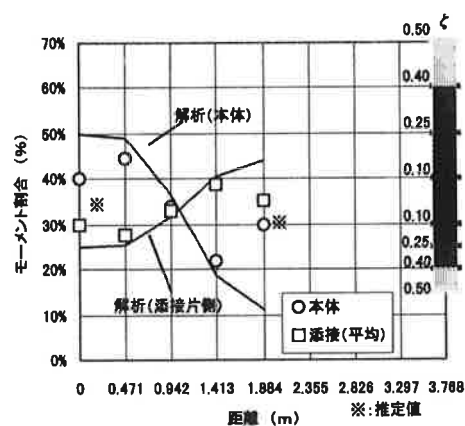


図-17 CASE-2 モーメント割合

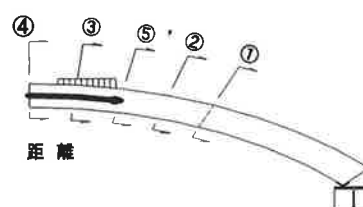


図-18 モーメント算定位置

5.4 曲げ剛性の有効率（ η ）について

剛性一様としたリングで梁ばねモデル解析を行い、CASE-1：P=310kN，CASE-2：P=417kN の中央スパンの半径方向変位量が試験値と一致するよう剛性を低下させ、曲げ剛性の有効率（ η ）を推定したものを表-7 に示す。

表-7 曲げ剛性の有効率

	中央スパンの変位量 δ [mm]	曲げ剛性の有効率 η
CASE-1	1.80	0.84
CASE-2	2.74	0.75

通常、今回のような地盤反力の期待できない室内試験では、 η は一般的に設計に用いる値（0.7～0.9）より小さくなる傾向にあるが、今回の結果はそれとほぼ同等となった。

5.5 セグメント継手回転ばね定数（ k_θ ）について

回転ばね定数は、計測結果から求まる曲げモーメントと、継手部の目開き量から求まる回転角の関係から算定することができるが、今回の試験では計測位置の関係から、以下に示すとおり、曲げモーメントの算定で2通り、回転角の算定で2通りの計4通りの組み合わせができる。

・ 曲げモーメントの算定

イ) スパン中央（④断面）の推定モーメントより算定

ロ) スパン中央近傍の載荷内側 (③断面) の計測モーメントより算定

・ 回転角の算定

イ) リング端部の目開き量より算定

ロ) セグメント内面の目開き量より算定

これらの算定方法で得られた $M-\theta$ 曲線から、設計荷重時の割線にて回転ばね定数を算定した結果を表-8 に示す。

表-8 回転ばね定数一覧

モーメント	回転角	回転ばね定数 [kN・m/rad]	
		添接リング上	添接リング下
④断面	内面	164,000	178,000
	端部	131,000	140,000
③断面	内面	140,000	107,000
	端部	112,000	84,000

この表から、回転ばね定数 k_θ の範囲は事前解析に用いた値より大きく、かなり幅を持った値となった。これは、
 イ) 回転角の測定位置がセグメント端部では自由端となるため、セグメント内面に比べ大きくなること
 ロ) スパン中央近傍の載荷内側 (③断面) では計測位置が載荷ブロック内にあるため、その影響を受けること
 ハ) セグメント端部で継手面に近いため、鉄筋ひずみの計測に問題が生じやすいこと
 によるものと考ええる。

従って、今回の試験結果としての回転ばね定数はスパン中央のモーメントとセグメント内面の目開き量との組み合わせによるもの ($k_\theta \approx 170,000 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$) が妥当であると考ええる。図-19 にその時の $M-\theta$ 関係を示す。

回転ばね定数が、設計値と試験値とで大きく異なる要因のひとつとして、セグメント継手面に軸圧縮力が作用していることが考えられる。単純な載荷、例えば継手曲げ試験などでは載荷内側のスパン中央付近に軸力は作用しないが、今回の試験ではトータルの軸力は0であるが、千鳥組による面内せん断方向の添接効果により各リングに軸力が作用する。ちなみに梁ばねモデル解析では、設計荷重時 ($P=417\text{kN}$)、約 100kN の軸圧縮力が継手部に作用することになる。

また、添接による面内せん断力により、継手面の目開きが拘束されたことも回転ばね定数が設計値より大きくなった要因と考えられる。

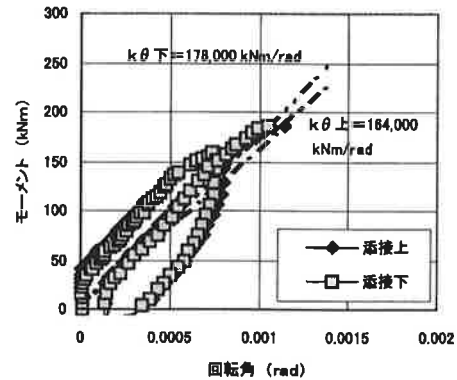


図-19 $M-\theta$ 曲線 (線形領域)

ここで、破壊付近の非線形領域までの $M-\theta$ 関係を図-20 に示す。図に示すとおり、曲げモーメント $200\text{kN} \cdot \text{m}$ 付近を変化点とした、バイリニア型の曲げ変形特性を示すことが確認できた。また、その第1勾配は $k_{\theta 1} = 170,000\text{kN} \cdot \text{m/rad}$ 、第2勾配は $k_{\theta 2} = 45,000\text{kN} \cdot \text{m/rad}$ 程度であることがわかった。

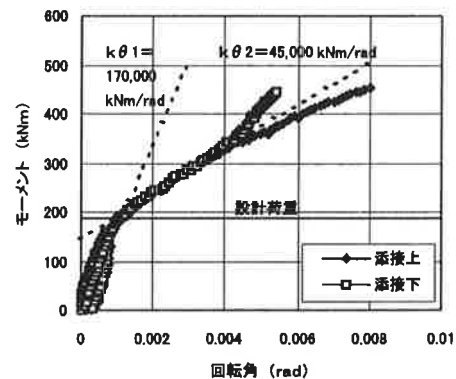


図-20 $M-\theta$ 曲線 (非線形領域)

5.6 リング間せん断ばね定数 (k_s) について

リング間に作用するせん断ばね定数を評価するため、図-21 中、R-1~R-8 でリング間の目違い量を、D-1~D-3 で半径方向変位量を計測した。CASE-1: $P=290\text{kN}$ における目違い量の計測結果を表-9 に、各リングの半径方向変位量を表-10 に示す。

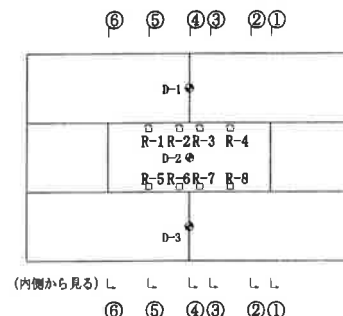


図-21 リング間目違い量計測位置

表-9 目違い量 (CASE-1 : P=290kN)

測定位置	R-1,5	R-2,6	R-3,7	R-4,8
目違い量 [10^{-3} mm]	0	8.0	22.0	3.0

表-10 変位量 (CASE-1 : P=290kN)

測定位置 (リング)	D-1 (添接)	D-2 (本体)	D-3 (添接)	相対 変位
変位量 [mm]	1.9	1.6	1.9	0.3

表-9, 表-10 から, 本体リングと添接リングの相対変位に比べ, 目違い量は非常に小さいことがわかる。

ここで, 添接リング載荷時, 本体リングに作用するせん断力がリング間継手面を介して伝達する面外せん断力となることから, CASE-1 : P=290kN の本体リングの円周方向曲げモーメント分布を図-22 に示す。なお横軸は図-18 に示すようにスパン中央を基準点に, 支承部までの距離とする。



図-22 円周方向モーメント分布

図から, 計測区間内の曲げモーメントより本体リングの面外せん断力は, 89kN と求まる。これを用いて, 単位長さあたりのせん断ばね定数を算定したものと, 今回設計に用いたせん断ばね定数を単位長さあたりのせん断ばね定数に換算したものを表-11 に示す。

表-11 せん断ばね算定結果

	ks [kN/m/m]
目違い量より算定	$1.72 \times 10^7 \sim \infty$
相対変位量より算定	1.26×10^6
設計値より換算	1.48×10^6

この表から, せん断ばね定数は, 目違い量ではなく, 半径方向相対変位量から求めたものが設計に適応したものであるといえる。

6. おわりに

以上から, 応力集中度が低いことや千鳥組による添接効果から, コッター・クイックジョイントセグメントの幅広化に対する安全性が確認された。また, 梁ばねモデル解析により試験結果を把握でき, 本試験における諸定数が得られた。

今回の試験により求められた各値は検証不足な面があり, 直接的に設計値として用いるには問題があるが, 梁ばねモデルによる解析はセグメントの挙動を把握する際に有効な手法であるといえる。

謝辞 : 本研究の実施にあたり, ご指導いただいた小泉淳 早稲田大学教授, 及び関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説—シールドトンネル, (財) 鉄道総合技術研究所, 平成 9 年 8 月。
- 2) 土木学会コンクリート委員会 : コンクリート標準示方書[設計編], (社) 土木学会, 平成 8 年。
- 3) 土木学会トンネル工学委員会 : トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, (社) 土木学会, 平成 8 年。
- 4) 望月, 寺澤, 城内, 清水 : 幅拡大セグメントの応力分布確認試験, 土木学会題 55 回年次学術講演会概要集, III-B148, 平成 12 年 9 月。
- 5) 村上博智, 小泉淳 : シールド工事前セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, No.296, pp.73-115, 1980。