

ジャッキ推力による鋼製セグメントの 座屈挙動に関する研究

Study on Buckling Behavior of Steel Segment under Shield-Jacking Thrust

鈴木哲太郎¹・張穩軍²・小泉淳³

Tetsutarou Suzuki, Zhang Wenjun and Atsushi Koizumi

¹学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²学生会員 工修 早稲田大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

³正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

Speeding up the construction period and Reducing the construction cost, the width of a steel segment using in shield tunneling method has been extended up from 1000mm to 1200mm. The 1200mm standard segment was accepted by JACE and JSWA. However, it was reported that the buckling and/or large deformation of the jointing plates had occurred under the jacking thrust of shield machine in the case of the small diameter tunnel and use the thin plates to transverse joint. To clarify the mechanism of the behavior, the full scale steel segments were tested.

In this paper, the mechanical behavior of the buckling and/or large deformation of the jointing plates was investigated by the tests and the analysis by Finite Element Method.

Key Words : steel segment, buckling, transverse joints, jacking thrust, shield tunneling method

1. はじめに

近年、過密化した都市部において、シールド工法はその施工上の優位性から都市トンネルの構築に多用され、今後もその需要は増大の傾向にあると考えられる。主として中小口径のシールドトンネルでは、その一次覆工部材として鋼製セグメントが多く用いられている。「シールド工事用標準セグメント」は、平成13年7月に規格改正を行い、それまでの標準的なセグメント幅を1000mmから、1200mmに拡張した¹⁾。これは施工の効率化や高速化、継手数の削減によるコストの縮減、継手延長の短縮による漏水量の低減などを目的としたものである。

しかし、「シールド工事用標準セグメント」のうち、とくに主桁の板厚が8mmで規格された中小口径の鋼製セグメントで、1200mm幅の3本主桁のもの(S28-3, S33-3)を採用した数現場において、セグメントの組立後にジャッキ推力を作用させたところ、セグメント継手板のボルト間で最大で9mmの目開き

が発生する事例が報告された。目開きが発生した継手板は、いずれも厚さ8mmで、セグメント高さが100mm、継手ボルトはM20(4本/R)、その最大ボルト間隔は400mmであった。最大目開きはそれらのボルト間の中央で発生した。

一般に、鋼製セグメントの継手板はその製作上の効率性から、主桁と同じ厚さの板を用いている。8mmの板厚は主要部材の最小板厚であり、継手としての機能はこの板厚で十分なケースが多い。一方で、継手板は施工時のジャッキ推力に対する推力受け部材としても機能する必要がある。板厚8mmの継手板2枚の剛性は、推力受け部材である縦リブのそれに比べてかなり小さい。また、シール材をはさんで継手ボルトを締め付けると、シール材の剛性にもよるが、ボルト間ではその反発力によって継手板が初期変形を生じる。

今後、曲げに比べて軸力が卓越するようなより深い地下での施工が予想されるが、このような場合には、セグメント継手の曲げ剛性はあまり問題となら

ない。一方で、大きな土水圧に対抗する必要から、ジャッキ推力はさらに大きくなり、このような事例の増加が懸念される。

本研究は、以上のような背景から、実物の鋼製セグメントを用いて、ジャッキ推力を想定した载荷実験を実施し、継手板の目開きおよびセグメント各部のひずみを計測し、その解析を行うことで、目開き現象のメカニズムの解明をしようとするものである。

2. 実験の概要

(1) 実験に用いた供試体

本実験には S33-3 の鋼製セグメントの中心角を半分とした実物大の供試体を 4 体用い、2 体ずつボルトで締結し、計 4 回の载荷を行った。4 体の供試体のうち、2 体は継手板の外側にシール溝があるものを、2 体はシール溝がないものを用いた。供試体の概要を表-1 および図-1 にそれぞれ示す。

(2) 実験の方法²⁾

実験方法は、継手板と縦リブにスプレッダーに相当する载荷板を介して荷重を与え、供試体下面は、隣接セグメントの主桁を想定した厚さ 8mm の添接板にボルトで固定し、これを定盤上に設置することで、現場での組み立て作業時におけるジャッキ推力を忠

表-1 供試体の寸法と材料¹⁾

外径		(mm)	2950
セグメント幅		(mm)	1200
主桁	高さ	(mm)	100
	厚さ	(mm)	8
継手板の厚さ		(mm)	8
スキンプレーットの厚さ		(mm)	3.0
中心角		(度)	83.077
縦リブ	高さ	(mm)	93
	厚さ	(mm)	8
	幅	(mm)	87
リング継ぎボルト	中心角	(度)	13.846
	呼び径	(mm)	20
	孔径	(mm)	23
	長さ	(mm)	45
セグメント継ぎボルト	へりあき	(mm)	35
	本数	(本)	4
	呼び径	(mm)	20
	孔径	(mm)	23
セグメント弧長	長さ	(mm)	45
	へりあき	(mm)	35
	外周	(mm)	1069.4
	内周	(mm)	994.7
鋼材			SM490A

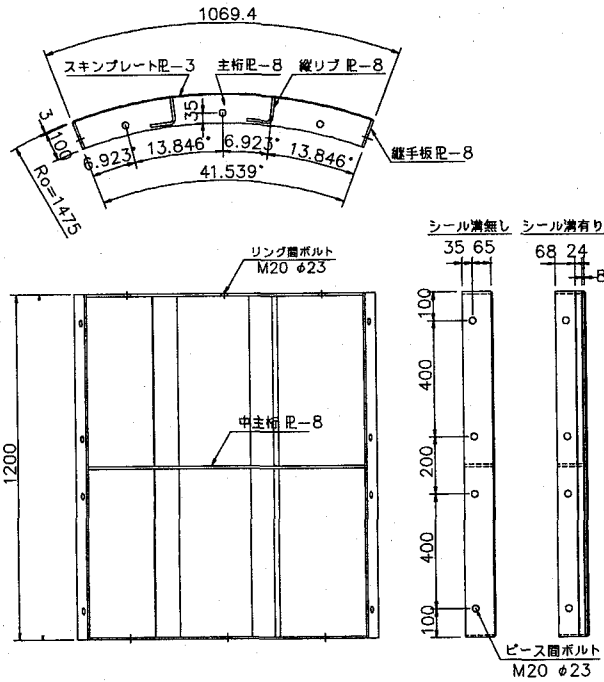


図-1 供試体

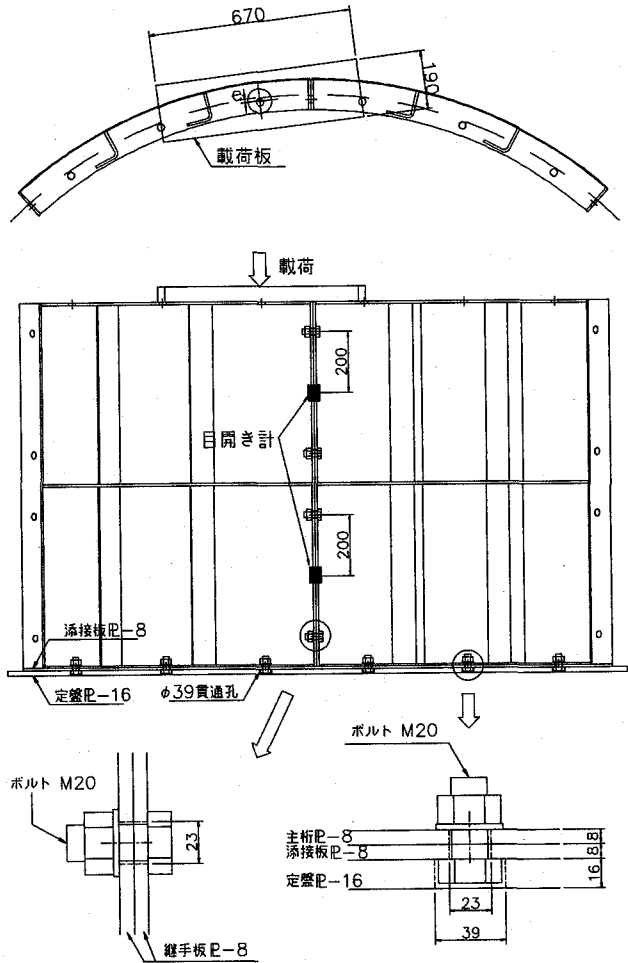


図-2 载荷状況図

実に再現するものである。

目開き計は、上部の2本と下部2本のそれぞれのボルト間の中央に1つずつ設置した。載荷の状況を図-2に示す。4回の載荷を実験条件に合わせて、case1～case4とした。case1はシール溝のない2体をボルトで締結し、供試体の主桁の中央位置と荷重の中心位置との偏心量を10mmとして、載荷板の鉛直変位が5mm程度に達するまで載荷したケースである。case2は、case1で用いた供試体の左右を入れ替え、同様にボルト締結をした状態で、偏心量を30mmにして、破壊まで載荷を行ったケース、case3およびcase4はシール溝がある供試体でcase1、case2と同様の載荷を行ったケースである。

以上の実験条件を表-2に示す。なお、すべてのケースとも、継手板の間にシール材を貼付し、セグメントを締結した後、載荷前に継手板の目開きの初期値を計測した。載荷には大型2軸構造物評価装置(EHF-SG5MN/1MN-20L)を使用し、球面座を介して載荷板に荷重を与えた。載荷速度はいずれのケースも、400kNまでは荷重制御で0.5kN/sec、400kNからは変位制御とし0.005mm/secとし、載荷ステップごとの発生ひずみ、継手板の目開き量の測定を行った。

(3) 実験結果

実験結果を表-3、図-3～図-6に示す。各ケースとも座屈は図-3に示すスキンプレートで発生した。case4では、他のケースに比べ、早い段階で座屈が発生したが、これはcase3の載荷で供試体に大きな変形が生じてしまったことが原因であると考えられる。なお、図-4に示した鉛直ストロークは、試験機における載荷装置の鉛直ストロークである。計測した継手の締結時の初期目開き量はすべてのケースともに1mm以内であったため、図-5では目開きの初期値を0として示してある。なお、中主桁より下部の目開きは、載荷後もほとんど変化が見られなかったので省略した。図-6にcase2の載荷後の写真を示す。

表-2 実験のケース

実験ケース	シール溝	偏心量 e (mm)
case1	なし	10
case2	なし	30
case3	あり	10
case4	あり	30

表-3 実験結果

実験ケース	座屈位置 (図-3 参照)	座屈荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
case1	2	1150	1399
case2	1	1340	
case3	1	1330	1424
case4	2	830	

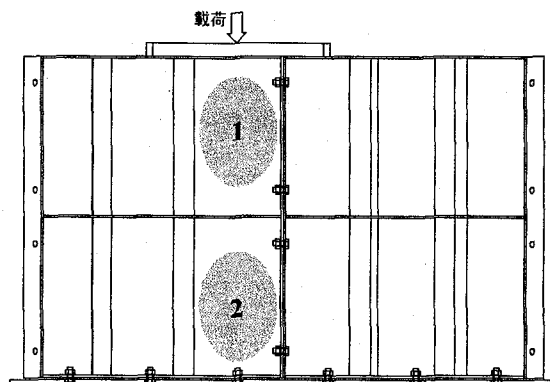


図-3 座屈位置

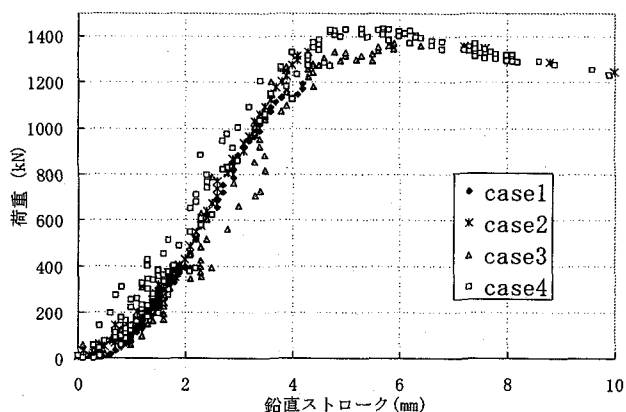


図-4 荷重と鉛直ストロークの関係

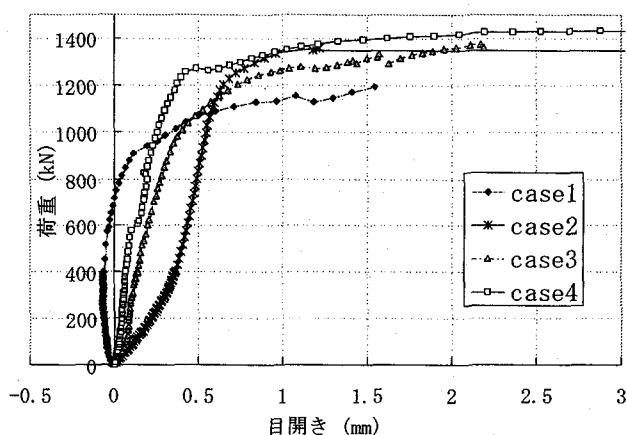


図-5 荷重と継手板の目開きの関係 (実験値)

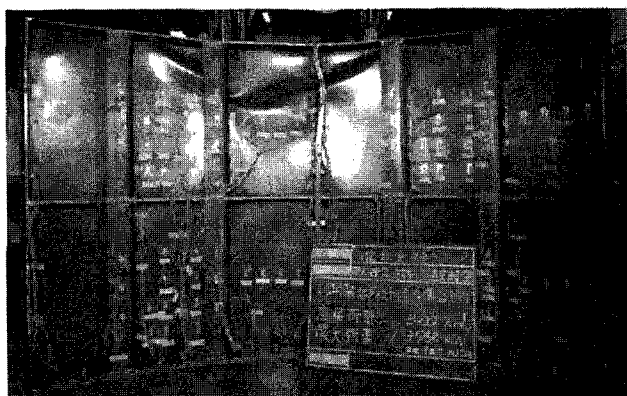


図-6 載荷後の供試体 (case2)

表-4 解析のパターン

解析モデル	解析項目	偏心 (mm)
MODEL1	座屈	-
MODEL2	目開き	10
MODEL3	目開き	30

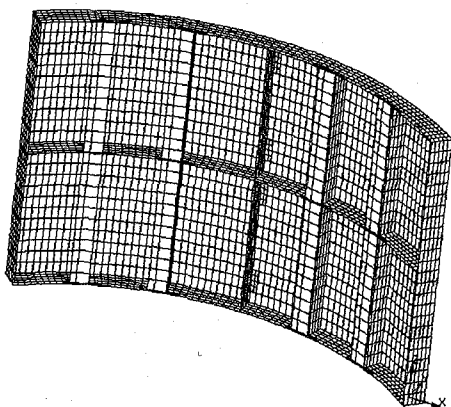


図-7 解析モデル (MODEL1)

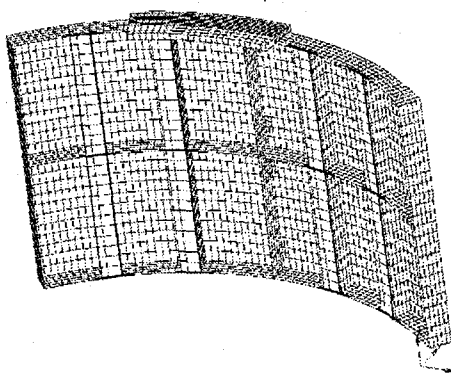


図-8 解析モデル (MODEL2 および MODEL3)

表-5 境界条件

	MODEL1 (座屈解析)		MODEL2, 3 (目開き解析)	
	上端面	下端面	上端面	下端面
x 変位	fix	fix	free	fix
y 変位	fix	fix	free	fix
z 変位	free	fix	free	fix
x 回転	fix	fix	free	fix
y 回転	free	fix	free	fix
z 回転	fix	fix	free	fix

表-6 解析に用いた物性値³⁾

弾性係数 E (N/mm ²)	210000
ポアソン比 ν	0.3
降伏点 σ_y (N/mm ²)	320
降伏ひずみ ϵ_y	0.0015
引張強さ σ_B (N/mm ²)	550
伸び率 S (%)	15

3. 有限要素法 (FEM) による解析の概要

(1) 解析条件

有限要素法による解析には、汎用 FEM ソフト MARC を用い、3次元弾塑性解析を行った。

解析には 4 節点シェル要素を用い、実験供試体を忠実にモデル化した。セグメント継手の部分では、ボルトの締結部でのみ節点を結合し、それ以外の節点は結合していない。また、継手板の間のシール材およびシール溝は考慮に入れていない。

実験結果を精度よく表現するために、設定条件を変えて 3 パターンの解析を行った。表-4 に示す MODEL1, MODEL2, MODEL3 である。MODEL1 は座屈解析であり、MODEL2, MODEL3 は、載荷板のモデルを作成して行った目開き解析である。図-7, 図-8 に解析モデルを、表-5, 表-6 に解析に用いた境界条件と物性値をそれぞれ示す。なお、表-6 中に示す物性値は SM490A のものを用いている³⁾。

(2) 解析結果

表-7, および図-9～図-12は解析結果を示したものである。図-11は図-10の座屈部分を拡大したものであり、図-12はMODEL3の各部における鉛直変位を示したものである。図-9をみると、偏心量が大きい MODEL3の方がMODEL2より早い段階で目開きが大きくなっている。このことから、解析からは、偏心量を大きくした方が目開きしやすいという結果が得られた。一方、最大荷重は、偏心量が小さい MODEL2の

方がMODEL3より大きくなる傾向がみられ、目開きの小さい方が大きな荷重を受けられることがわかる。これらの解析結果は妥当なものと思われる。

表-7 解析結果

解析ケース	偏心量 (mm)	座屈荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
MODEL1	-	1230	-
MODEL2	10	-	1417
MODEL3	30	-	1335

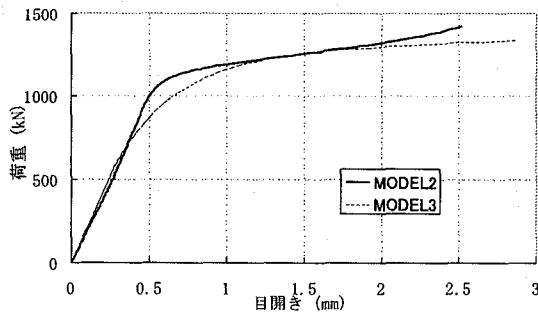


図-9 荷重と継手板の目開きの関係 (解析値)

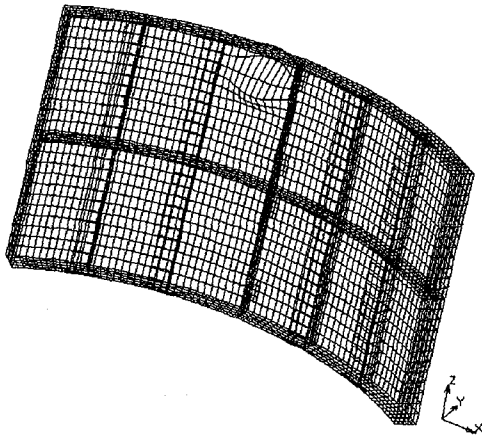


図-10 解析結果 (MODEL1)

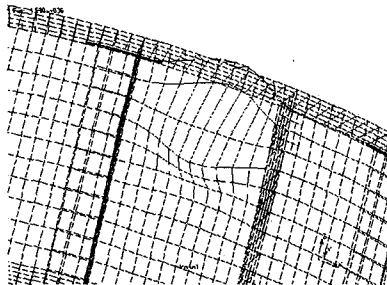


図-11 座屈部の拡大図 (MODEL1)

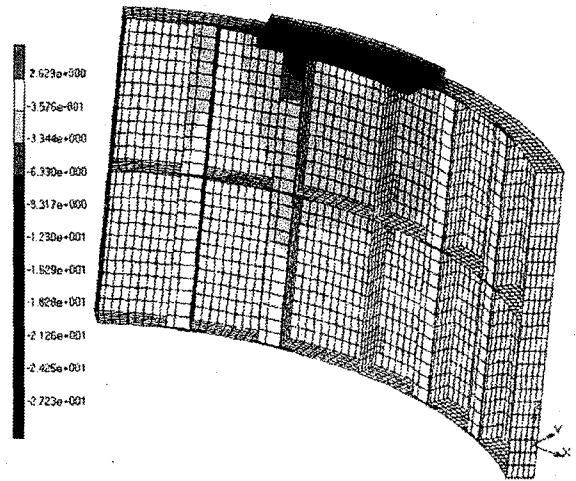


図-12 鉛直変位 (MODEL3)

表-8 実験結果と解析結果の比較

実験条件	座屈荷重			最大荷重		
	実験値 (kN)	解析値 (kN)	誤差 (%)	実験値 (kN)	解析値 (kN)	誤差 (%)
case1	1150	1230	7.0	-	-	-
case2	1340		8.2	1399	1335	4.6
case3	1330		7.5	-	-	-
case4	830		48.2	1424	1335	6.3

4. 実験結果と解析結果の比較および考察

表-8 は座屈荷重および最大荷重の実験値と解析値との比較を、図-13 は偏心量 10mm の場合の、図-14 は偏心量 30mm の場合の荷重と目開きの関係をそれぞれ示したものである。最大荷重および、case1～case3 における座屈荷重は、実験値と解析値を比べると、いずれも 10%以内の誤差に収まっている。

case3 については、FEM 解析で、精度よく実験の挙動を表現できたが、それ以外のケースでは、目開き 0.5mm までの荷重の初期段階において、解析値と実験値の曲線の形状および傾きに大きな違いがみられ、十分に実験結果を表現できているとは言い難い結果となった。

また、曲線の傾きが急激に緩やかになり目開き量が増大し始める荷重は、case1, case3 では 1000kN 付近であるのに対し、case2, case4 では 1250kN 付近となり、偏心量を大きくしたケースの方が、急激な目開きの増大を始める荷重が大きい傾向がみられた。しかし、いずれのケースにおいても、現場で使用したジャッキ推力である 400～500kN では異常な目開きは発生しなかった。

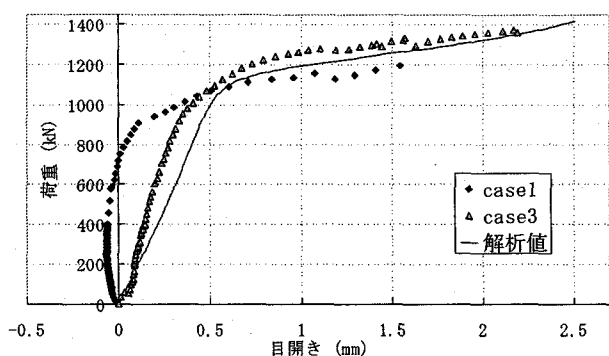


図-13 荷重と継手板の目開きの関係(e=10mm)

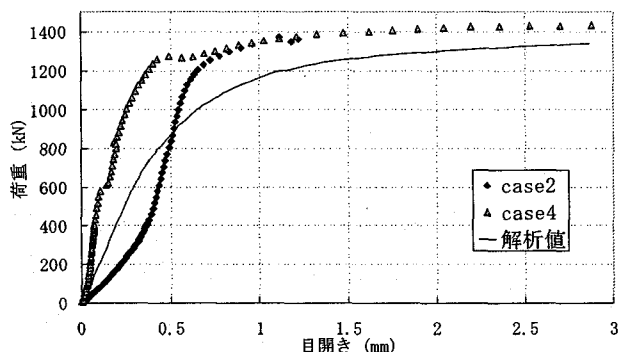


図-14 荷重と継手板の目開きの関係(e=30mm)

本実験の結果からは、標準鋼製セグメント S33-3 の設計ジャッキ推力である 800kN を与えても、大きな目開きは発生しないことが確認できた。このことから、実際に大きな目開きが発生した現場では、この実験とは異なり、スプレッダーが縦リブと 2 枚の継手板の所定の位置に正確にあたっていなかった可能性や偏心量が想定していたよりもかなり大きかった可能性、また、すでに組まれたセグメントリングの面が平面を保持していなかった可能性やシールドが片押しされていた可能性などが考えられる。これらのうち、とくに偏心量に関しては、たとえリングが真円に組まれていても、そのリング自身がシールド内で偏心していれば、ジャッキ荷重の偏心量は相応に大きなものになる。大きな目開きはこれらの要因が複合されて起きたものと推測される。

5. おわりに

実施工時には室内の実験とは異なる様々な要因が考えられる。とくに、鋼製セグメントを用いる場合には、コンクリート系のセグメントとは異なり、割れや欠けの心配がないため、乱暴に取り扱うケースも目にする。大きな目開きを生じた現場がそうであったというわけではないが、ジャッキ推力はセグメ

ントに作用する最大の荷重であることを考え、セグメントの組立てやジャッキの作用のさせ方など、慎重な対応が必要と思われる。一方、今後より深い地下の施工が増えることを考えると、1ランク上の板厚をもつセグメントを選択したり、製作上の効率は落ちるが、主桁と継手板の板厚を変えてセグメントを製作したりしなければならないケースもできそうである。いずれにせよ、2枚の継手板の座屈に対する剛性は縦リブとそれと同等かそれ以上にする必要がある。継手板はシール材によって初期変形を受けるためである。また、継手板にはシール材を十分に押しつぶすことができる剛性を付与すべきである。本実験からは有為な差が見られなかったが、この観点から、小口径の鋼製セグメントであっても、シール溝を設ける方が望ましいと考えられる。

本実験の結果は貴重なデータであり、今後より高い精度でこの実験結果を解析するために、以下に挙げる検討を行う予定である。

- ①シール材とシール溝をモデル化し、より忠実な解析モデルを作成する。また、case2, case4 の解析では、case1, case3 の载荷により実験前に初期変形を受けている。この影響についても検討する予定である。
- ②セグメント継手部、ボルト締結部、載荷面、支持面のそれぞれの境界条件を検討し、その上で最適な境界条件の組み合わせを選定する。

実験をより高い精度で表現できる解析モデルが完成したら、継手板の厚さ、継手ボルト間の距離、継手ボルトの本数を変化させて解析を行い、最終的には安全かつ経済的な継手板の形状寸法の提案を試みたいと考えている。

本研究は、下水道協会の立会いのもとで、鋼製セグメント工業会の委託により実施したものであり、関係各位に御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 土木学会、日本下水道協会：シールド工用標準セグメント、pp1-9, pp. 85-89, 2001
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説、pp47-48, pp82-89, pp131-134, 1997
- 3) 日本規格協会：JISハンドブック⑫鉄鋼Ⅱ、pp. 259-260, 2003