

シールドトンネル掘進時の施工時荷重に関する 実験的研究

村井 稔生¹・焼田 真司¹・津野 究¹・新井 泰¹・吉川 和行²

¹正会員 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: tmurai@rttri.or.jp

²正会員 株式会社フジタ 技術センター

(〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

シールド掘進時の施工時荷重のうち、曲線施工時に発生するジャッキ推力やマシンテール部のせりによるひび割れに着目し模型実験によりひび割れの発生を再現させることを試みた。今回の報告では、実験の概要及び実験結果の一例について報告する。実験は、曲線施工時を想定しジャッキ推力が均等載荷の場合と偏心載荷の場合の2ケースについて実験を行った。

実験の結果を基に、覆工の内空変位の推移傾向、覆工内外面におけるひび割れの発生状況、均等載荷と鉛直載荷の場合の違いについてまとめた。

Key Words : shield tunnel, maintenance, lining, experiment, the load acting on segments on during tunnelling

1. はじめに

鉄道シールドトンネルの覆工に発生しているひび割れは、土圧、水圧等の外力に起因するもののほか、施工時に発生するジャッキ推力などの施工時荷重に起因するものが存在する¹⁾²⁾。ジャッキ推力に起因するひび割れについては、偏心したジャッキ推力や隣接したセグメントに目開きがあることで発生する損傷を検討した実験³⁾、セグメント組立時のジャッキパターンによる損傷などを検討した解析⁴⁾などの研究が行われている。

本研究は、ジャッキ推力によるひび割れの要因の中で曲線部の掘進時などシールドマシンのテールクリアランスが小さい箇所でセグメントにテールからの荷重が作用するケースに着目し、ジャッキ推力やマシンテール部のせりによるひび割れの発生を、複数のリングから成る覆工模型を使用した実験により再現させる。発生したひび割れのパターンや覆工の応力状態を正確に把握し、効率的な維持管理に資することを目的とする。図1に本実験で想定した、曲線部掘進時に発生するマシンテール部とセグメントのせりの状況を概念図で示す。曲線内方側は、セグメントよりもシールドマシンが曲線の内側を向いて

いる事でせり力が発生する。なお、曲線外方側においても、マシンテール部がセグメントリング切羽側端面に接触している場合を想定し、内方側せり力の反力として曲線外方側せり力を考慮する。今回の実験は、曲線外方側のテール部もセグメントリングと接触している状況を想定しているため、反力は外方側のテール部のせりによる影響が周辺地盤から受ける影響よりも大きいと考え周辺地盤を考慮していない。また、今回は基礎的な実験報告と位置付けリング継手のせん断バネを考慮しないケースについて報告する。

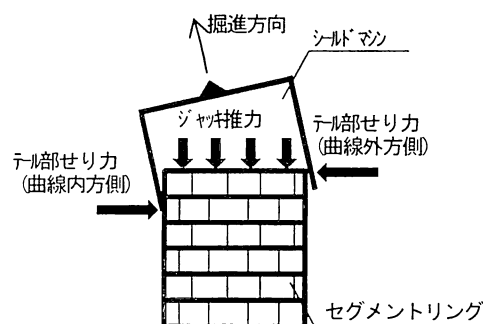


図1 曲線区間でのせり発生概念図

2. 実験方法

(1) 概要

シールドトンネルの覆工をモデル化した実験模型を作成し、鉛直方向からシールドジャッキ推力、水平方向からテール部のせりを想定した荷重を載荷する模型実験を行い、ひび割れの発生状況やひずみ・応力などを検証する。

今回は、シールドジャッキ推力を想定した鉛直荷重を均等に載荷するケースと偏圧状態で載荷するケースについて実験を行う。なお、偏圧状態で載荷するケースは、曲線施工時等で曲線の外方側ジャッキ推力が内方側ジャッキ推力より卓越した場合を想定している。

(2) 覆工模型

模型材料は、単線鉄道シールドトンネルの外径のおよそ 1/20 である下水道用鉄筋コンクリート管（外径 360mm、肉厚 30mm）を使用した。覆工模型は、コンクリート管を高さ 10cm 程度の輪切り状に切断し（図 2）、採取したリングを 6 段積み重ねることにより形成した（図 3）。各リングの切断面は、無収縮モルタルにて成形し、積み重ねた際の不陸の影響を低減した。今回の実験では、セグメント継手やリング継手はモデル化せず、リング間はコンクリート同士の摩擦のみ作用する構造とした。

材料に使用した下水道用鉄筋コンクリート管の要素試験として一軸圧縮試験と外圧試験を実施した（図 4）。供試体は、下水道用鉄筋コンクリート管を長さ 720mm に切りだしたものを使用した。一軸圧縮試験の結果、弾性係数は $36,860\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.19 程度であった。外圧試験は、JIS A 5303 に準拠して使用材料の品質確認を行った。外圧試験の結果、供試体のひび割れ荷重は 19.2kN（基準値 12.7kN）、破壊荷重は 19.1kN（基準値 27.5kN）となり品質に問題ないことを確認した。

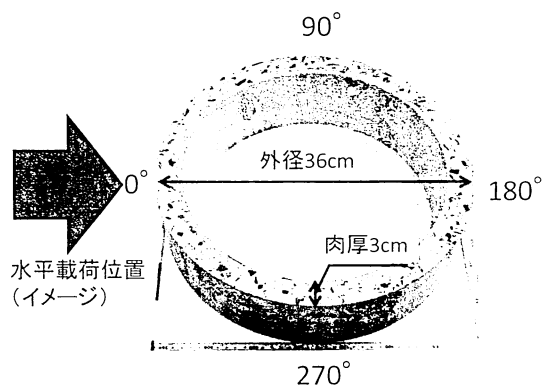


図2 覆工模型1リング概要図

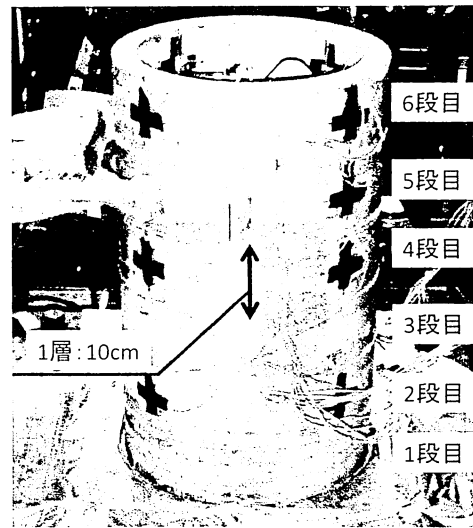
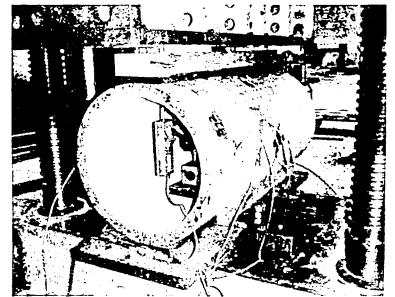


図3 覆工模型全体概要図



(a) 一軸圧縮試験



(b) 外圧試験

図4 実験装置概要図

(3) 実験装置

実験に使用した載荷実験装置を図5に示す。本装置は、①反力フレーム、②シールドのジャッキ推力を模擬した鉛直方向の載荷ジャッキ4本、③曲線区間掘進時における曲線内方側のテール部とセグメントリングとのせり力を模擬した水平方向の載荷ジャッキ1本、④曲線外方側のテール部がセグメントリングに接触している状況を模擬した反力体からなっている。

鉛直方向載荷ジャッキは、覆工模型上面に設置した鋼板を介して鉛直荷重を載荷できる構造とした。鉛直ジャッキ位置とジャッキ番号を図6に示す。水平方向載荷ジャッキは、下から5段目のリングに対して90°の範囲に水平荷重を変位制御で円周状に載荷できる載荷版を使用する。また、反力体は6段目のリングに対して水平方向載荷ジャッキと反対側に円周状（90°範囲）の反力板を設置した。載荷板と反力板の位置関係を図7に示す。

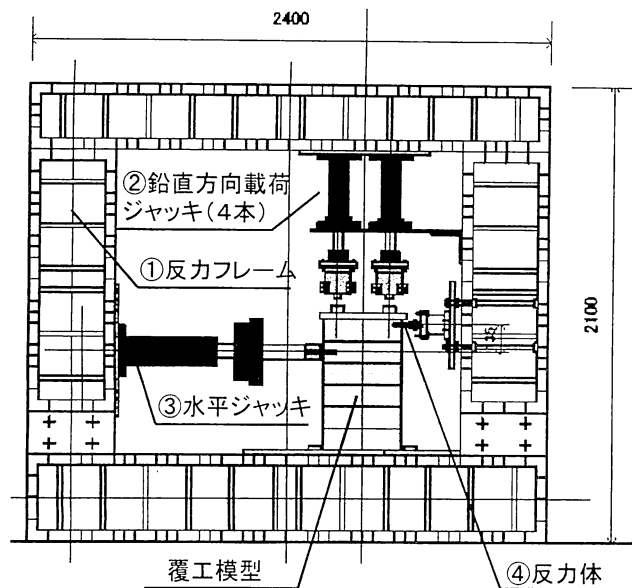


図5 実験装置概略図

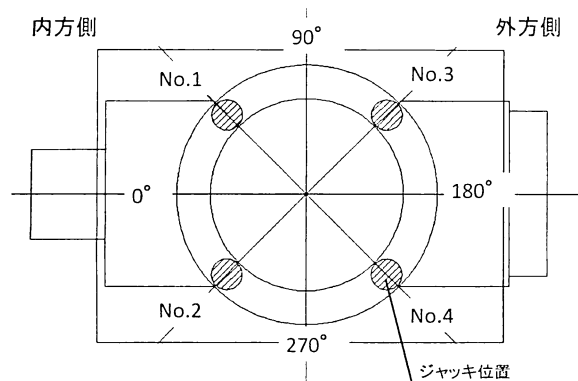
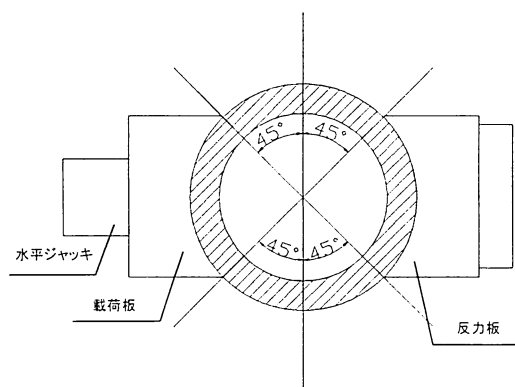
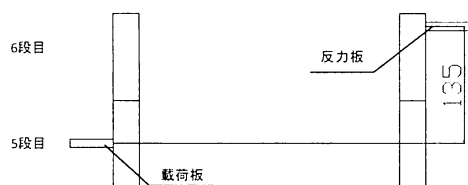


図6 鉛直ジャッキ载荷位置とジャッキ番号



(a) 位置関係図 (鉛直方向より望む)



(b) 位置関係図 (水平方向より望む)

図7 载荷板と反力板位置関係図

表1 ケース別鉛直ジャッキ圧 (KN)

	曲線内方側		曲線外方側	
	No.1	No.2	No.3	No.4
ケース1 (均等载荷)	20	20	20	20
ケース2 (偏心载荷)	2	2	38	38

(4) 実験方法

鉛直荷重ケースは、鉛直方向载荷ジャッキを均等に载荷したケースと、曲線施工時等で曲線の外方側のジャッキ推力が内方側のジャッキ推力より卓越した場合を想定し、偏圧状態で载荷したケースを設定した。表1にケース別の鉛直载荷荷重を示す。なお、ジャッキ番号は図6と対応している。ケース1は、均等载荷であり各ジャッキ共に20KNを载荷する。ケース2は、曲線内方側に相当するジャッキNo.1、No.2は2KN、曲線外方側に相当するNo.3、No.4は38KNを载荷し偏心状態とする。ケース1、2共に、全4本の合計ジャッキ圧は80KNである。

(5) 計測方法

計測は、ロードセルによる鉛直荷重の計測、変位計による载荷点変位、リング変位、内空変位の計測、目違い計、目開き計によるリング継手部に発生する変位の計測を行った。また、リング内外面での水平方向及び鉛直方向にひずみ計を設置し覆工模型に発生する応力を把握できるようにした。今回は、変位計による内空変位に注目した。

3. 結果

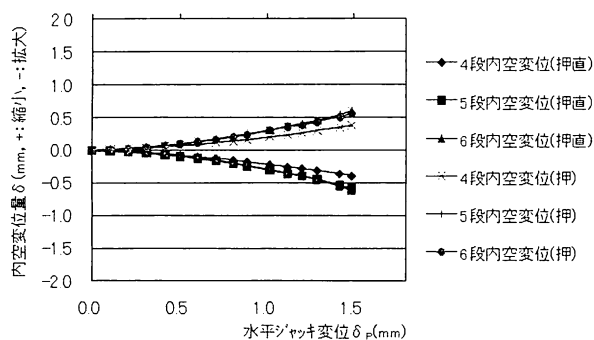
(1) 内空変位

a) 内空変位の推移

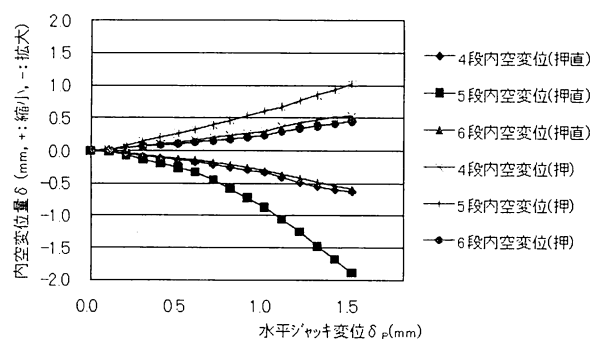
ケース1とケース2の下から4・5・6段目の内空変位の推移を図8に示す。各ケースとも共通して、水平ジャッキの押し方向の内空変位が縮小し押し直角方向の内空変位が拡大した。

ケース1は、水平方向ジャッキにて载荷した5段目と反力体を設置した6段目の変位量はほぼ同様の傾向が見られ、4段目は5・6段目よりも緩やかに推移した。ケース2は、水平方向ジャッキにて载荷した5段目の変位量が4・6段目より卓越し、4・6段目はほぼ同様の傾向であった。

水平ジャッキ変位が1.5mm時の内空変位量は、ケース1の場合4・5・6段目共に0.5mm前後、ケース2では4・6段目は0.5mm前後、5段目のみ1.0mmを超える結果となった。水平ジャッキ変位1.5mm時のジャッキ圧力は、ケース1の場合55KN、ケース2の場合40KNとなった。この事により5段目リングについて、ケース2



(a) ケース 1：鉛直均等載荷



(b) ケース 2：鉛直偏心載荷

図 8 内空変位の推移

の場合は、ケース 1 と比較して小さい荷重で大きな変位が発生したことが確認できた。

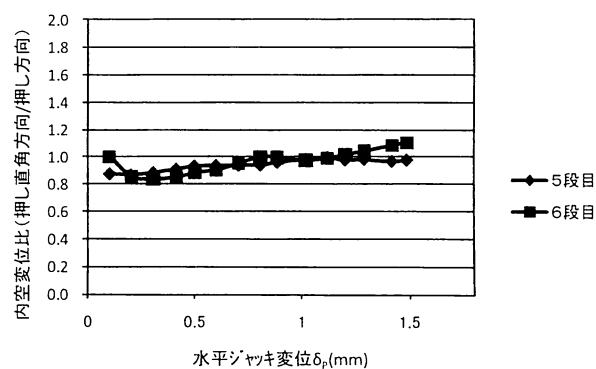
b) 内空変位比

水平載荷による覆工模型の縦横のつぶれ傾向を把握するため内空変位比を調べた。内空変位比は、水平ジャッキ押し方向の内空変位量に対する押し直角方向の内空変位量とする。すなわち、内空変位比が1.0を上回る場合は、押し方向に比べ押し直角方向の変位が卓越している事を示す。

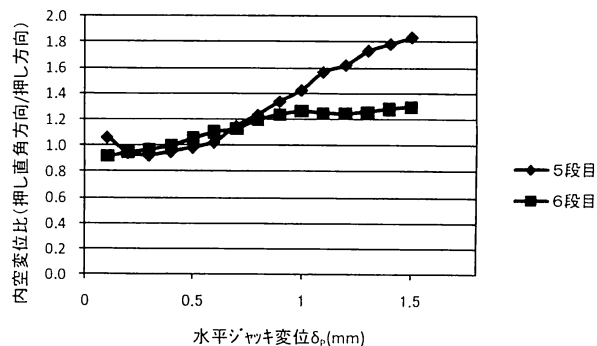
水平載荷によるケース1とケース2について、5・6段目の内空変位比を図9に示す。ケース1は、5・6段目共に1.0前後で推移した。ケース2は、5・6段目共に値が1.0を上回り、ケース1に比べ押し直角方向の内空変位拡大量が押し方向の内空変位縮小量よりも卓越する結果となった。特に5段目は、水平ジャッキ変位1.5mm時の内空変位比に注目すれば、値は1.8となり水平ジャッキ押し方向に対して押し直角方向の内空変位は2倍近い変位量を示すなど、押し直角方向の内空変位の拡大が著しい結果となった。

(2) ひび割れの発生状況

ケース1のひび割れ展開図を図10にケース2のひび割れ展開図を図11に示す。実験終了時の水平載荷状況につい



(a) ケース 1：鉛直均等載荷



(b) ケース 2：鉛直偏心載荷

図 9 内空変位比（押し直角方向／押し方向）

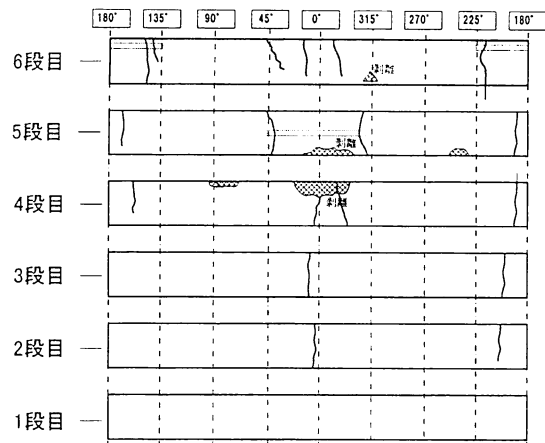
て、ケース1の場合は水平ジャッキ変位5.11mm、水平ジャッキ荷重64.78kN、ケース2の場合は水平ジャッキ変位1.5mm、水平ジャッキ荷重40.2kNであった。各ケースについてひび割れの原因、各リング別の発生状況、発生したひび割れの位置について目視にて確認した。発生したひび割れの位置は、図2 (a) に示すように載荷点の中心を0°とし時計回りに角度を振り、位置を表した。

a) ケース1

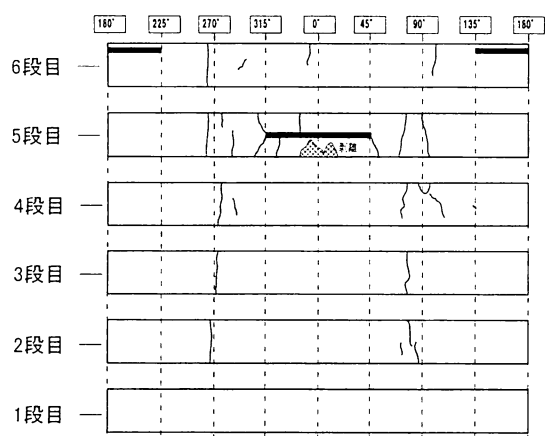
ケース 1 のひび割れ状況をまとめる。発生したひび割れは、覆工模型のトンネル軸方向（長手方向）に発生している傾向が見られる。また、鉛直方向ジャッキの載荷側から発生し進展しているひび割れと上から下まで貫通しているひび割れが確認できた。

各リングのひび割れの発生状況に着目すると、水平方向ジャッキにて載荷した 5 段目が 14 箇所と最も多く、次いで 4 段目及び反力体を設置した 6 段目が 10 箇所であった。また、2 段目及び 3 段目は共に 5 箇所と 4 段目より上部と比べて減少しており、無収縮モルタルで下端部を拘束した 1 段目はひび割れは発生しなかった。

覆工内外面のひび割れ発生位置に着目する。覆工内面では、5段目の水平方向ジャッキ載荷位置である0°を中心に±45°の範囲及び6段目の反力体設置位置である180°を中心に±45°の範囲で18箇所発生した。また、覆工外

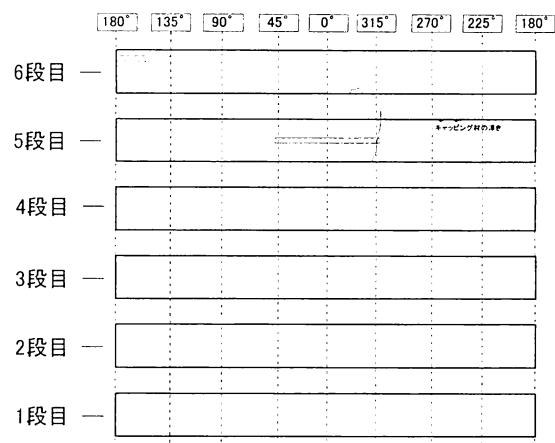


(a) 覆工内面

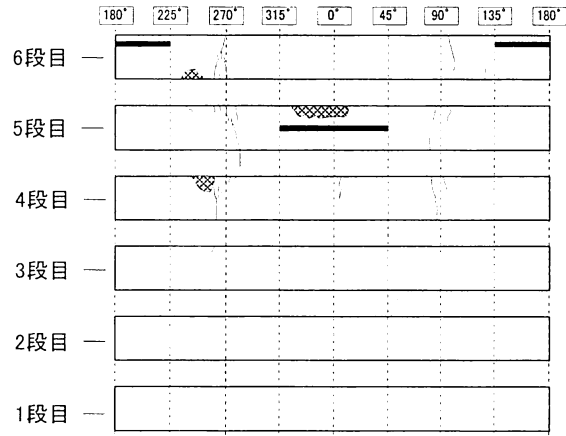


(b) 覆工外面

図10 ケース1 ひび割れ展開図



(a) 覆工内面



(b) 覆工外面

図11 ケース2 ひび割れ展開図

面では、水平载荷の直角方向となる 90° を中心に $\pm 45^\circ$ の範囲及び 270° を中心に $\pm 45^\circ$ の範囲の位置に20箇所発生し、8割以上のひび割れが集中した。

b) ケース2

ケース2のひび割れ状況をまとめる。発生したひび割れは、ケース1同様、覆工模型のトンネル軸方向（長手方向）に発生している傾向が見られる。また、ケース2とは若干異なりリング上下方向から発生し進展しているひび割れと上から下まで貫通しているひび割れが確認できた。

各リングのひび割れの発生状況に着目すると、水平方向ジャッキにて载荷した5段目が10箇所と最も多く、次いで4段目及び反力体を設置した6段目が7箇所であった。また、3段目は小さなひび割れが1箇所、2、1段目は共にひび割れは発生しなかった。

覆工内外面のひび割れ発生位置に着目する。覆工内面では、5段目の水平方向ジャッキ载荷位置である 0° より 45° の付近に上下が貫通したひび割れが1箇所確認された。また、覆工外面では、水平载荷の直角方向となる 90° を中心に $\pm 45^\circ$ の範囲及び 270° を中心に $\pm 45^\circ$ の範囲の位置

に21箇所発生し8割以上のひび割れが集中した。ケース1と比較すると発生箇所数は少ないものの発生位置は類似の結果となった。ケース1のひび割れ発生箇所数が多いのは、実験終了時の水平ジャッキ圧が 64.78 kN となりケース2の 40.2 kN と比べて非常に大きいからである。

4. 考察

(1) 変形形状

内空変位の推移から、各ケース共、水平ジャッキの押し方向の内空変位が縮小し、押し直角方向の内空変位が拡大している。このことから覆工模型は、横からの水平荷重とその反力によって真円を保つことが出来なくなり楕円に近い形状に変形したと推測される。

ひび割れの発生位置が、覆工内側では水平载荷位置である 0° 及び反力体設置位置である 180° 付近に集中し、覆工外面では水平载荷に対して直角方向となる 90° 及び 270° 付近に集中したことから、推測される楕円形状の変形とひび割れ発生位置とは整合性が見られた。

(2) ケース1とケース2の相違点

ケース1とケース2の相違点として下から5段目の内空変位量の推移、内空変位量比の傾向、覆工内外のひび割れ発生頻度に違いが見られた。

5段目の内空変位量の推移は、ケース2の変位量が、ケース1と比較して大きくなった。また、水平ジャッキ変位量が1.5mmの時のジャッキ圧を比較するとケース2のジャッキ圧がケース1より小さな値を示した。これらのことから、ケース2はケース1よりも変形が起り易い事が分かる。理由は、ケース2は曲線内方側（水平载荷側）の鉛直荷重が小さく、外方側（反力体側）の鉛直荷重が大きい偏心载荷状態であるため、曲線内方側のおおよそ半断面はリング間の摩擦力が弱く外方側の残り半断面は摩擦力が大きいことによるものと推測される。半断面は摩擦が弱く拘束されないが、もう半断面は非常に摩擦力が強く拘束されるため、拘束されない部分が非常に変形し易いと考えられる。

覆工内外のひび割れ発生頻度は、ケース1は覆工内側と覆工外側のひび割れ発生頻度に大きな差は見られなかったが、ケース2については、覆工内側のひび割れ箇所数と覆工外側のひび割れ箇所数を比較すると覆工外側のひび割れ箇所数が卓越しひび割れの発生頻度に違いが確認された。このことから、鉛直方向より偏心荷重を受けている状態で水平荷重を受けると外側のひび割れが先行するのではないかと想像される。このひび割れの発生状況は、内空変位比において水平ジャッキ押し方向の内空変位縮小量より押し直角方向の内空変位拡大量が卓越した点と整合性がある。

5. おわりに

今回の報告では、曲線区間におけるシールド掘進時のジャッキ推力や覆工とマシンテール部とのせりを模擬した荷重を載荷する模型実験について、実験の概要

及び結果について述べた。本実験により得られた知見を以下に示す。

- ・内空変位量について、各リングの変位量増加の傾向を把握することができた。
- ・各リング及び覆工内面、外面におけるひび割れの発生状況を把握することができた。
- ・ジャッキ推力を均等と想定した場合と鉛直と想定した場合を比較して、内空変位の推移や覆工内外のひび割れ発生状況について違いを確認できた。

今回の報告は、基本となるケースについて実験を行い結果を報告したが、今後地盤ばねを想定した模擬地盤を使用したケースやリング間のせん断バネを考慮したケースについて実験を実施し、各ケースで計測した応力やひずみについて分析を行う予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル・ライブラリー第 17 号シールドトンネルの施工時荷重，土木学会，2006.
- 2) 小山 幸則，小西 真治，P.S.Jovanovic，橋本 正：シールドトンネルに施工時荷重が及ぼす影響，トンネルと地下 第33巻8号，pp.35-43，2002.
- 3) 吉本 正浩，阿南 健一，大塚 正博：シールドトンネルの施工時荷重の照査方法に関する一提案，土木学会論文集 No.756/VI-62，pp.131-144，2004.
- 4) 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のセグメントの損傷抑制策に関する提案，土木学会論文集 F Vol.64 NO.2，pp.173-184，2008.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF LOAD WHEN SHIELD TUNNEL IS CONSTRUCTED

Toshiomi MURAI, Shinzi YAKITA, Kiwamu TSUNO, Yasushi ARAI,
and Kazuyuki YOSHIKAWA

This paper introduces a experimental method, which is proposed to relation between the thrust force of shield jacks and cracks in the shield tunnel construction. The experiment modeled the lining made from more than one ring segment. This research concentrates on cracks caused by contact of the segment and the shield tail.

This proposed experiment confirms the shape of a lining and a situation of cracks, the point of difference by jack's pattern.