

幅拡大 R C セグメントの現場計測 (外径 : 7100mm , 幅 : 1500mm , 厚さ : 300mm)

In-situ Monitoring of the Behavior of Wide RC Segments
(outer diameter : 7100mm , width : 1500mm , thickness : 300mm)

望 月 崇¹ 稲 田 義 和²
Takashi Mochizuki Yoshikazu Inada
寺 澤 正 人³ 清 水 功⁴
Masato Terazawa Isao Shimizu

【要旨】

近年シールド工事においては、セグメント幅を拡大したセグメントを採用する工事が増加しており、臨海副都心線「天王洲T」工事は、工事費の縮減を図るためにRCセグメント区間で1.5m幅のセグメントが採用された。施工に際しては、事前に実物大室内実験を実施し、これらの知見の検証と実地盤内でのセグメントの挙動把握を目的として現場計測を行った。

本計測において、幅拡大セグメントの地盤内挙動およびテール内挙動の把握ならびに実物大実験で得られた知見を検証する事ができた。

【キーワード】 シールドトンネル セグメント セグメント幅拡大 応力分布 現場計測

1. はじめに

近年シールド工事においては、セグメント幅を従来の0.75m~1.0mから1.2m~1.5mに拡大したセグメントを採用する工事が増加してきた。

(旧)日本鉄道建設公団(現:独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構)発注の臨海副都心線「臨海、天王洲T工事」では、工事費の縮減を図るためにRCセグメント区間で1.5m幅のセグメントが採用されたが、このセグメントは外径7.1mに対してセグメント厚さが300mmと薄く、過去の研究事例¹⁾などよりリング間接合部付近に応力集中の影響が顕著に現れる可能性が高い事が想定された。

このため、平成11年3月に飛鳥建設(株)技術研究所にて実施工に用いるセグメントを千鳥組に組み立てた実物大室内曲げ試験を行うことにより、曲げ耐力の確認およびリング間接合部付近に発生する応力の集中の程度を把握し、セグメントの安全性を確認した。併せて、継手ボ

ルトの初期締付力の違いによるセグメントリングの変形特性等を把握した。

本報告は、「臨海、天王洲T工事」において使用された高剛性継手を有する幅拡大セグメントの地盤内挙動の把握、実物大室内実験で得られた知見を検証する事を目的として実施した現場計測の結果を報告するものである。

2. 工事概要

2.1 概要および現況

臨海副都心線は、新木場駅を起点として臨海副都心(東京レポートタウン)を経て大崎駅に至る延長12kmの鉄道新線である。現在は、東京臨海高速鉄道りんかい線として開業している。

本工事は、品川埠頭トンネルを発進立坑として天王洲駅を到達立坑とする延長581m20を結ぶシールドトンネルを構築する工事であった。

1. 関東土木支店 北部幹線(作)【元 天王洲(作)】

2. 関東土木支店 第二妙正寺(作)【元 天王洲(作)】

3. 土木本部 土木設計部

4. 関東土木支店 技術部

2.2 工事内容

工事件名：臨海，天王洲T工事

工事場所：東京都港区港南五丁目地先

工期：平成10年7月～平成12年10月（工事）

平成11年8月～平成12年5月（計測）

事業主体：東京臨海高速鉄道株式会社

発注者：日本鉄道建設公団

施工者：飛島・住友・アイサワ臨海，天王洲T

特定建設工事共同企業体

工法：泥水加圧式シールド

セグメント：外径 7100mm，内径 6500mm

併設2本（二次覆工省略）

分割数：5 + K

掘削外径：7250mm

最小曲線半径：R = 300m

土被り：最大27.67m，最小15.98m

3. 事前解析

3.1 概要

現場計測に先立ち，適切な計器（鉄筋計）配置の決定および基礎資料を得るために事前解析を実施した。また，解析においては実物大室内実験²⁾での結果を反映させるものとした。

3.2 地盤条件

Bor.No1 (7k060m)での値をもとに，図-1に示すような地盤を想定した。

3.3 解析モデル

解析には，図-2に示す「2リングはり-ばねモデル」を使用し，地盤ばねは「鉄道構造物等設計標準・同解説（シールドトンネル）」³⁾（以降，シールド標準と略す）に準拠し，半径方向にノーテンションばねを全周に配置するものとした。

3.4 荷重条件

計測は，後行トンネルで実施するものとしたが，併設先行トンネルの掘進の影響は少ないと判断し，載荷荷重としては自重，土圧・水圧を考慮するものとした。

土水圧の荷重値算定および載荷方法はシールド標準に

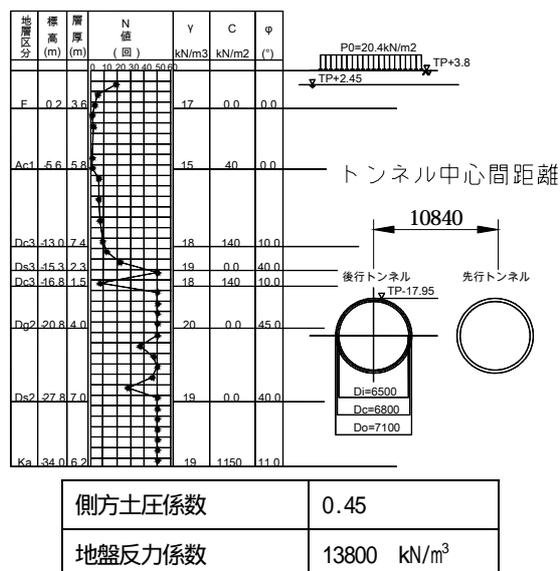


図-1 地盤想定図

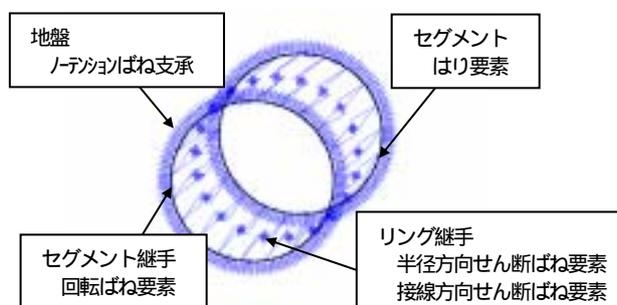


図-2 解析モデル図

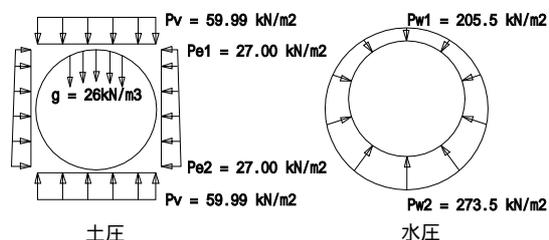


図-3 載荷荷重図

示される方法に準拠した。図-3に載荷荷重図を示す。

3.5 解析定数

1) セグメント継手回転ばね定数

実物大室内実験結果より，図-4に示すばね特性とした。

2) リング継手せん断ばね定数

実物大室内実験結果より，

半径方向せん断ばね定数 = 3600000 kN/m

接線方向せん断ばね定数 = 3400000 kN/m とした。

3) その他解析定数

セグメント弾性係数 E = 39000 MN/m² とした。

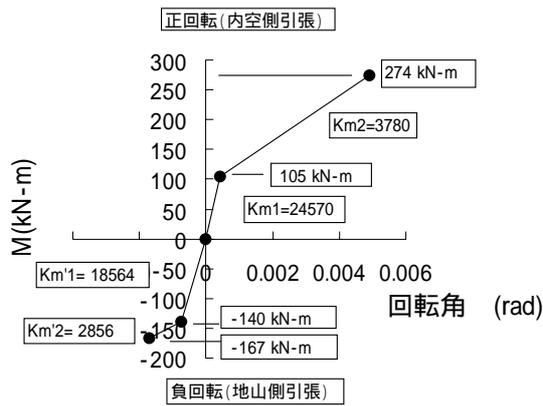
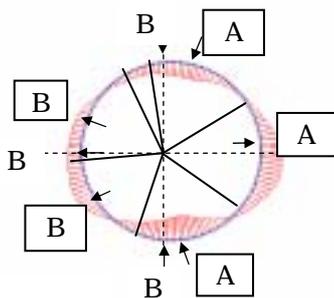


図 - 4 セグメント継手回転ばね特性図



: リング継手位置に配置

図 - 5 解析横断方向曲げモーメントと鉄筋計配置断面図

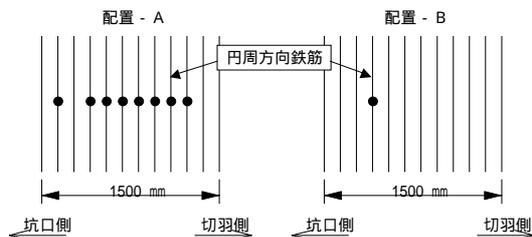


図 - 6 鉄筋計配置平面図

3.6 解析結果

図 - 5 に解析結果（横断方向曲げモーメント）と、セグメント内の応力を計測する鉄筋計の配置を示す。

配置 - A: 横断方向（円周方向）断面力のトンネル軸方向分布を把握するために、同一断面にてトンネル軸方向に複数の鉄筋計を配置（図 - 6 参照）

配置 - B: 横断方向断面力の横断方向断面力分布を把握するために、トンネル軸方向において 1 点のみに鉄筋計を配置（図 - 6 参照）

4. 計測計画

4.1 計測位置

計測位置は直線区間で極力影響が少ないと考えられた起点(7k071m)より約 80m先の併設トンネル下り線(後



図 - 7 計画計測位置図

表 - 1 計測項目

計測項目	計測目的	計測機器	数量		
			個所数	計器数/個所	計器数小計
土圧	・計測対象リングに作用している外圧の計測 ・裏込注入時にも計測	バット式土圧計	6	1	6
水圧	・計測対象リングに作用している水圧の計測。	間隙水圧計	2	1	2
リグ間目違い量	・セグメントの目違いの計測	カンチレバ - 変位計 (ひずみゲージ式)	4	1	4
セグメント継手目開き量	・セグメント継手の回転バネ定数照査	高感度変位計	1	2	2
リグ間目開き量	・トンネル軸方向力の把握	高感度変位計	4	1	4
円周方向鉄筋ひずみ (配置-A)	・円周方向断面力の把握 (分布詳細把握)	ひずみゲージ (鉄筋計)	3	32	96
円周方向鉄筋ひずみ (配置-B)	・円周方向断面力の把握 (分布詳細把握)	ひずみゲージ (鉄筋計)	5	4	20

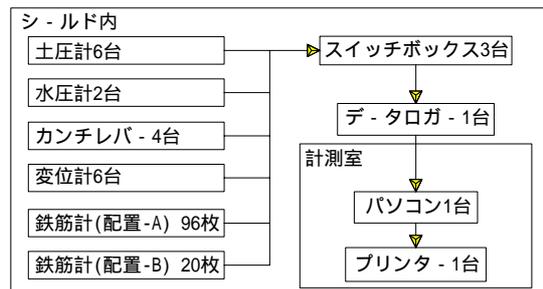


図 - 8 計測システム概要図

行トンネル)7k154m地点を計画計測位置とした。図 - 7 に計画計測位置図を示す。

4.2 計測項目

計測項目を表 - 1 に示す。

4.3 計測システム

図 - 8 に計測システム概要図を示す。

4.4 計測機器配置

図 - 9, 図 - 10 に示すように、計測するセグメントは隣接する 3 リングとした。なお 第 3 リングにおいては、第 2 リングとのリング間目開きを計測した。

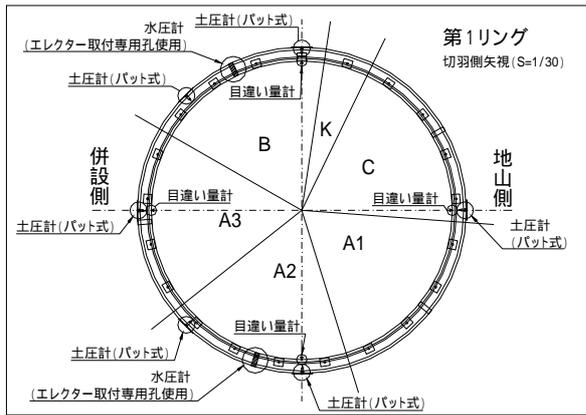


図 - 9 第1リング計器配置断面図

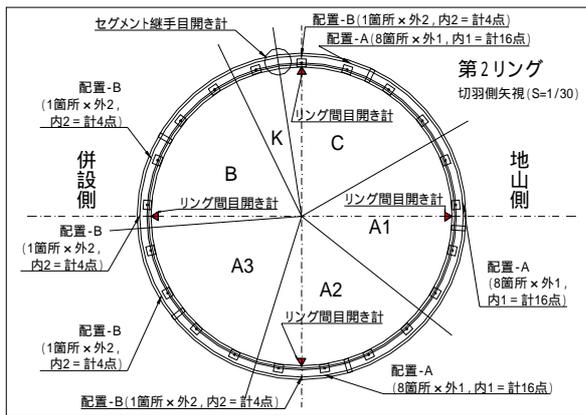


図 - 10 第2リング計器配置断面図

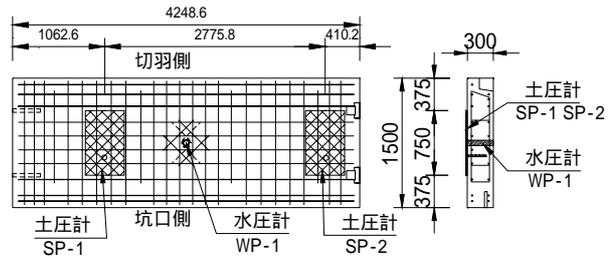


図 - 11 土圧計・水圧計平面配置図

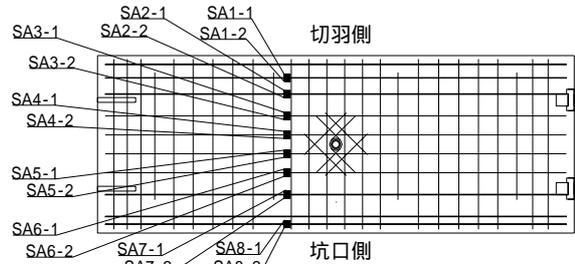


図 - 12 鉄筋計平面配置図

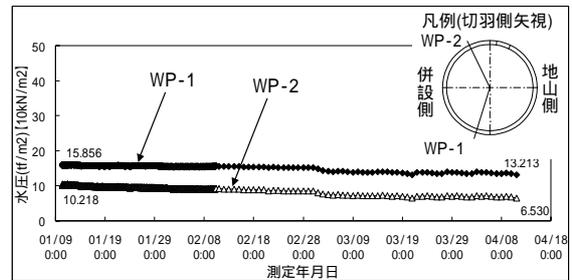


図 - 13 水圧経時変化図

図 - 11, 図 - 12 に土圧計・水圧計および鉄筋計(配置-A)の平面配置図を示す。

4.5 計測期間および計測頻度

計測期間は計測対象セグメント組立直後より3ヵ月とした。また、計測頻度は以下に行った。

- 計測開始 ~ 3日: 3分間隔
- 3日 ~ 1ヶ月: 1時間間隔
- 1ヶ月 ~ 3ヵ月: 1日間隔

5. 計測結果および考察

5.1 水圧

図 - 13 に示すように水圧は計測期間を通じてほぼ一定であった。また、図 - 14 に示すように各点の水圧が水深の関数であると仮定して計算したリング天端および下端の水圧はそれぞれ約 70 ~ 80kN/m² および 140 ~ 150kN/m² となったが、この値は別途実施した地下水水位計測結果から求められた値とほぼ一致した。

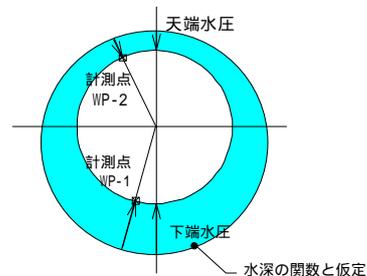


図 - 14 各点水圧の計算法模式図

5.2 土圧

図 - 15 に土圧の長期的な経時変化の例として、併設側スプリングライン (SP-3) の経時変化図を、図 - 16 に計測の初期段階における土圧の経時変化図を示す。

いずれの測点においても土圧は掘進や真円保持装置の設置などの影響を受ける計測の初期段階では変動が大きいものの、長期的にはほぼ一定値となり、シールド標準に示される土圧計算式から求めた設計土圧値とほぼ同等だった。

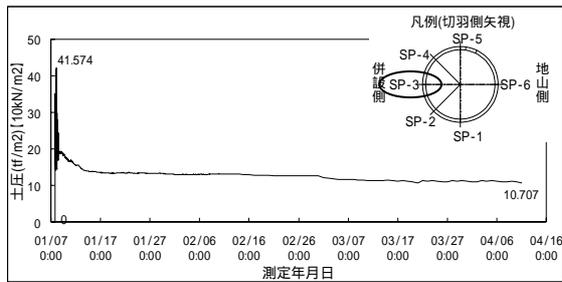


図 - 15 土圧経時変化図（長期）

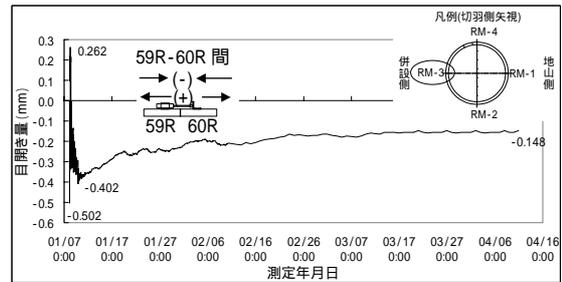


図 - 17 リング間目開き量の経時変化図（長期）

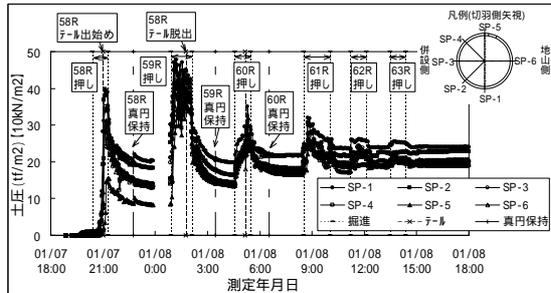


図 - 16 土圧経時変化図（初期）

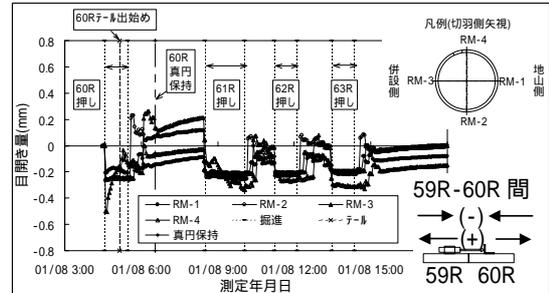


図 - 18 リング間目開き量の経時変化図（初期）

5.3 リング間目開き・目違い

図 - 17 にリング間目開き量の長期的な経時変化の例として、併設側スプリングライン（RM-3）の経時変化図を、図 - 18 には計測の初期段階におけるリング間目開き量の経時変化図を示す（リング組立直後からの相対変位量）

リング間目開きは計測の初期段階で掘進中には圧縮側に転じて、掘進の終了とともに元に戻るという弾性的な挙動を示し、その後は徐々に目が開く方向へと転じ最終的には圧縮側（目が閉じた状態）でほぼ一定値となった。

図 - 19 に掘進時における目開きの変化量と計測リングとそれ以降掘進されているリング間の距離Lの関係図を示す。目開きに対する掘進の影響は徐々に小さくなり、約20リング（約30m）先の掘進まで影響した。

図 - 20 にリング間目違い量の長期的な経時変化の例として、セグメント天端（DG-4）の経時変化図を、図 - 21 に計測初期段階における各測点のリング間目違い量の経時変化図を示す。

目違い量はリングがテールから脱出始める時点から変動し始め、完全にテールから脱出する時点で最も大きい。その後の変動は小さく、長期的にはほぼ一定値となった。

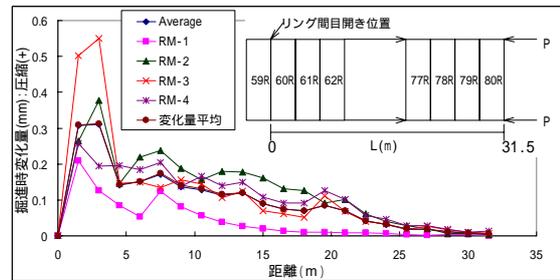


図 - 19 リング間目開き影響範囲関係図

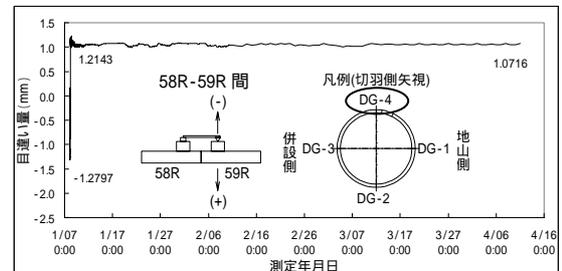


図 - 20 リング間目違い量の経時変化図（長期）

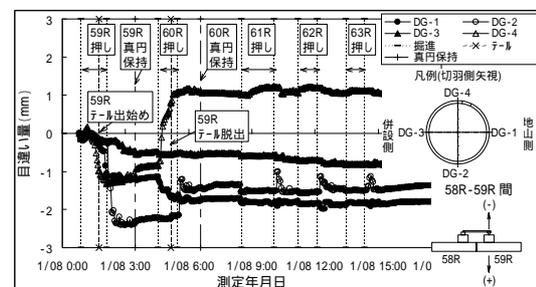


図 - 21 リング間目違い量の経時変化図（初期）

5.4 ピース間目開き

図 - 22 にピース間目開き量の長期的な経時変化の例として、トンネル天端 (SM-1) の経時変化図を、図 - 23 に計測初期段階における各測点のピース間目開き量の経時変化図を示す。測点位置における目開き量はリング組立直後から完全にテ - ルから脱出する時点まで徐々に圧縮側 (目が閉じる方向、内空側圧縮) に変動を示すが、その後の変動は小さく、長期的にはほぼ一定値となった。

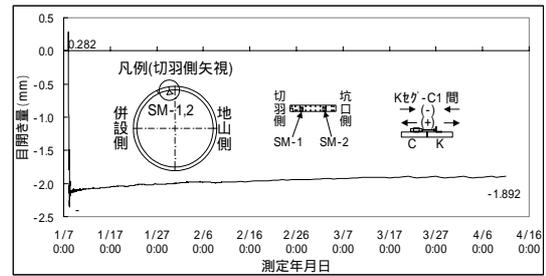


図 - 22 ピース間目開き量の経時変化図 (長期)

5.5 横断方向鉄筋応力度

図 - 24 に横断方向鉄筋応力度の長期的な経時変化の例として、C セグメント (SA22) の経時変化図を、図 - 25 に計測初期段階における経時変化図を示す。

計測初期段階では、リング組立後の自重による変形、初期掘進時のテ - ルブラシの影響、テ - ルからの脱出および後続リングの掘進に伴う後続リングの変形の影響などを受けて応力度は変動するが、それ以降徐々に変動は小さくなり長期的にはほぼ一定値となった。また、各測点の計測初期段階の応力度は 70N/mm² (引張) から 90N/mm² (圧縮) の範囲、長期的には 40N/mm² (引張) から 50N/mm² (圧縮) の範囲にあり、全て許容応力度 (200N/mm²) 以下であり安全性が確保されていることが確認された。

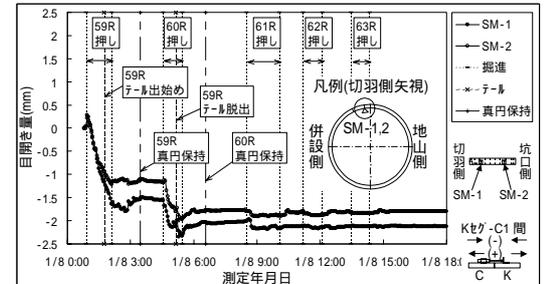


図 - 23 ピース間目開き量の経時変化図 (初期)

図 - 26 には計測開始 2 ヶ月後 (平成 12 年 3 月 7 日 0:00 時点) における横断方向鉄筋応力度のセグメント内での分布図を示す。(配置 A 測線)

鉄筋応力度はいずれの測線においてもリング継手面近傍にて断面中央測点での値よりも大きいかまたは小さいという傾向を示しており、前後リングからの添接効果の影響を受けていることが確認された。

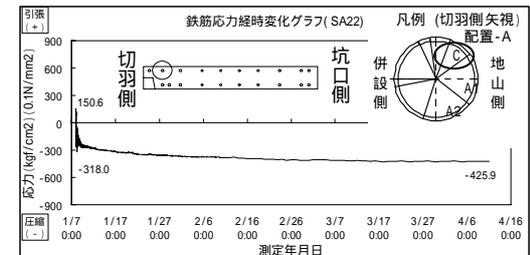


図 - 24 横方向鉄筋応力度の経時変化図 (長期)

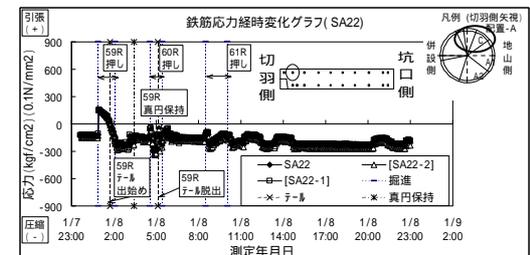


図 - 25 横方向鉄筋応力度の経時変化図 (初期)

5.6 応力集中度

計測された圧縮側および引張側鉄筋ひずみを用いて、各鉄筋の分担領域を考慮して計算した曲げモーメントより、下式にて定義される応力集中度 を考えた。

$$i = M_i / M_{ave}$$

ここに i : 各点の応力集中度

M_i : 各点の横断方向曲げモーメント

M_{ave} : 横断方向曲げモーメントの平均値

図 - 27 に土水圧および鉄筋応力度が安定した計測開始 2 ヶ月後の応力集中度 の分布図を示す。なお、本図

には、今回の計測セグメントはリング継手近傍に若干のひび割れ発生が見られることおよび鉄筋応力度は許容応力度以下であることから、室内実験における「鉄筋応力度が設計上の許容応力度に到達した」時の分布 (表 - 2 参照) を合わせて示す。

これより、応力集中度 の計測値および室内実験値はほぼ同等である事が確認された。

5.7 横断方向曲げモーメントのリング横断面分布

図 - 28 に計測開始 2 ヶ月後 (平成 12 年 3 月 7 日 0:00

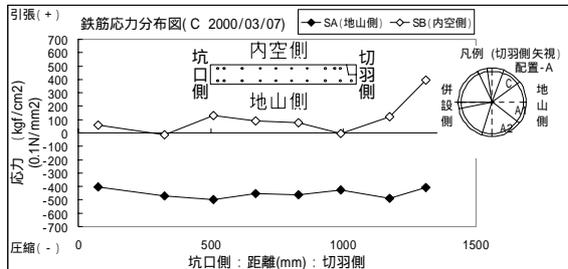
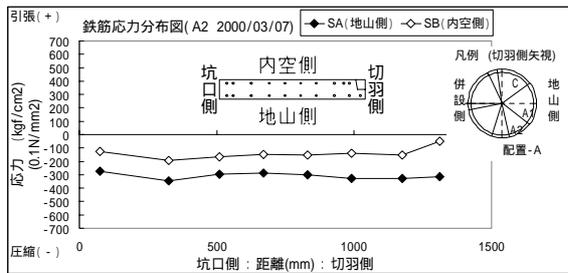


図 - 26 横断方向鉄筋応力度の断面内分布図

表 - 2 実物大室内実験における応力集中度の結果

	max	min
ひび割れ発生前	1.08	0.90
ひび割れ発生時	1.15	0.91
設計上の鉄筋応力度許容値到達時	1.21	0.86
全断面ひび割れ貫通時	1.08	0.94

時点)における横断方向曲げモーメントのリング横断面分布を事前解析結果と比較する形で示す。計測値の分布形状は事前解析値のそれに近い状態にあるが、値には差があることが確認された。

これは、前述の土水圧の計測値や実際のセグメントの弾性係数と事前解析時における設定値の違いによるものと考えられた。

5.8 はり - ばねモデルによる再解析

図 - 28 に示すように事前解析値と計測値による横断方向曲げモーメント分布には差が生じた。そのため、以下の修正を行い再解析を実施した。

- 土水圧を計測値の値に変更
- セグメントコンクリートの弾性係数を別途実施した室内弾性試験結果より $E = 35700 \text{ MN/m}^2$ に変更
- 地盤反力係数はシールド標準をもとに、裏込め注入の影響を考慮して計算した値 26000 kN/m^3 に変更
- Kセグメント両側のセグメント継手部のばね定数はゼロに変更

図 - 29 に修正後の再解析結果を示すが、修正解析結果は、計測値とほぼ同値を示した。

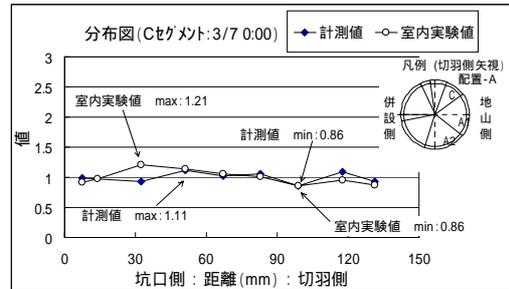
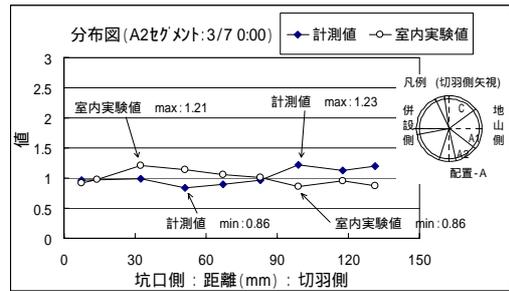


図 - 27 断面内応力集中度の断面内分布図

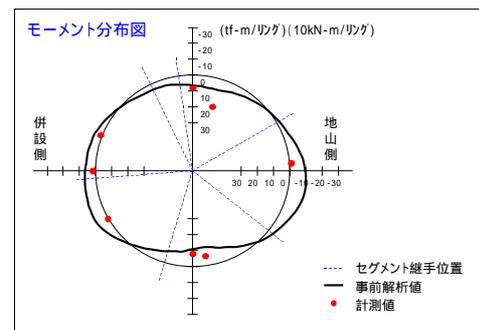


図 - 28 横断方向モーメント分布の比較図 (事前解析値分布と計測値分布)

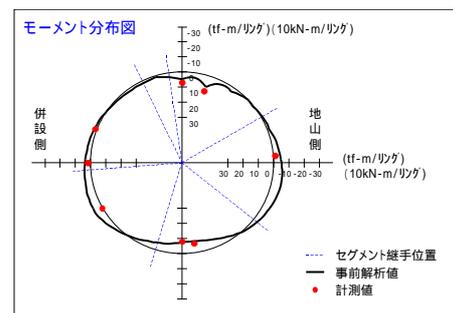


図 - 29 横断方向モーメント分布の比較図 (再解析値分布と計測値分布)

6. まとめ

今回の計測より得られた知見を以下に示す。

水圧計測値は計測期間を通じてほぼ一定値であり、別途実施された地下水位計測結果より求められた理

論水圧とほぼ同等であった。

土圧は計測の初期段階においては施工の影響を受けて変動し、特にセグメントがテールより土中に押し出される段階で大きな変動を示したが、長期的には一定値となった。長期的な土圧値はシールド標準に示される土圧計算式を用いて求められる設計土圧とほぼ同等であった。また断面左右の土圧値はほぼ同等であり、後続トンネルでの併設側と地山側との影響はないことが確認された。

リング間目開きはジャッキ推力の影響を受け、約30m(20リング)先まで掘進の影響を受けることが確認された。また掘進の影響を受けなくなってからはシールド材の反発力によりリング間が開く方向に進む傾向が見られ、リング間ボルトの増し締めが必要があると判断された。

リング間目違いおよびピース間目開きはセグメントが完全にテールから土中に脱出する時点まで変動するが、それ以降の変動は小さく、長期的にはほぼ一定値になることが確認された。また、テール脱出時点でセグメントの変形形状がほぼ固定されるものと判断された。

横断方向鉄筋応力度は計測の初期段階では施工の影響を受け変動するが、長期的にはほぼ一定値となった。鉄筋応力度のレベルは初期(施工時)および長期のいずれにおいても許容応力度以内にあり、構造物の安全性が確保されていることが確認された。

鉄筋応力度のレベルはリング継手面近傍が断面中央よりも高く、前後リングからの添接効果の影響を受けていることが確認された。また、計測鉄筋応力度より求めた応力集中度は0.86~1.23であり、室内実験にて得られた結果0.86~1.21(曲げひび割れ発生荷重~鉄筋許容到達荷重レベルにおける値)とほぼ同等であることおよび応力集中度の計測値断面

内分布と室内実験断面内分布もほぼ同様であることが確認された。今後も、幅拡大セグメントの採用は増加するものと判断されるが、設計に際しては前後リングからの添接効果を考慮する必要があるものと思われ、同様の計測を通じてデータの蓄積が必要と考えられた。

シールド標準に示される「全周はりばねモデル」を用いた事前解析から得られた横断方向モーメント分布と計測値モーメント分布には差が生じたが、入力定数見直し後の再解析による横断方向モーメント分布と計測値分布はほぼ同等となった。従って、シールド標準におけるセグメントの横断方向設計手法は妥当なものと判断された。なおKセグメント両側のセグメント継手ばね定数を低減する必要が生じたのは、ピース間の断面が完全には合わないことによるものと考えられた。今後はこの点の解消が課題であると思われた。

謝辞

最後に本現場計測において幾多のご指導を頂いた発注者である(旧)日本鉄道建設公団(現:独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構)の皆様には紙面を借りて心から感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 久保, 町田他: 平板型セグメント(厚さ40cm)の幅拡大の考察 土木学会第49回年次学術講演会概要集()
- 2) 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 土木学会第55回年次学術講演会概要集()
- 3) 財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(シールドトンネル) 平成9年7月

Summary In recent domestic shield works such as the “Tennozu T” on the Rinkai-Fukutoshin Line, so-called wide RC segments 1.5m in width have been employed to reduce the cost of shield works. Prior to the execution, the authors conducted laboratory tests on assembled segments and obtained data on the motion of segments. This paper reports on in-situ monitoring of the segment behavior in the ground and while being assembled in the shield tail to verify the analysis data

[Keywords] shield tunnel segment magnify segment width stress distribution site monitoring