

ボルトレスセグメントの計測結果と考察

—みなとみらい21線 MM大岡川シールドT1工事(上り線)—

A STUDY OF BOLTLESS SEGMENT IN SITE MEASUREMENT

木村光夫¹⁾・竹津英二²⁾・小林啓一³⁾・石田 修⁴⁾・畑野真仁⁵⁾

Mitsuo KIMURA, Eiji TAKETSU, Keiichi KOBAYASHI, Osamu ISHIDA, Shinji HATANO

"Minato-Mirai 21 Line" is a new subway line, constructed by Japan Railway Construction Public Corporation. It has 4.2 kilo-meters long, from Yokohama-station to (a provisional name) Motomachi-terminal. This document shows tunnelling method applied at Oookagawa shield tunnel (564meters), passes under Yokohama-Port, in the middle of "Minato-Mirai 21 Line".

Tunnel specification of this site is 7100 milli-meters diameter in parallel single line, tunnelling with high density slurry shield. Lining specification is "CONEX" segment as the first site in Japan, introduced technique from Austria in upper line, and Tenoned segment as the largest diameter tunnel with this type of lining in Japan, manufactured by Korea in down line.

This document shows tunnel behavior of boltless segment, verifications of design method propriety, and confirmation of tunnelling safety, about "CONEX" segment, with analyzing site measurement of selected section in this site.

Keyword : shield tunnel, site measurement, tunnel behavior, boltless segment

1. はじめに

日本鉄道建設公団が建設を進めている"みなとみらい21線"は、横浜駅を起点とし終点の元町駅(仮称)に至る延長4.2kmの地下鉄新線である。本研究は、みなとみらい21線のほぼ中間に位置し、横浜港の海底を通過する延長564mの大岡川シールドトンネルの施工に関するものである¹⁾。

当区間の施工は、セグメント外径7100mmの単線並列トンネルを、泥土圧シールド工法で構築するものである。このうち、上り線のトンネル覆工には、オーストリアより技術導入したCONEXセグメントを我が国で初めて使用し、下り線のトンネル覆工には、我が国で最大径のほぞ付きセグメントを韓国で製作して使用した。

本研究は、選定した計測断面から得られた、計測データをもとにした検討を行い、CONEXセグメントの施工の安全性の確認、挙動の解明、設計手法の妥当性を検証した。

2. 工事概要

(1) 路線概要

本工事は、大岡川河底を通過する、みなとみらい中央駅(仮称)から北仲駅(仮称)に至る延長564mの

¹⁾ 正会員 日本鉄道建設公団 東京支社 横浜鉄道建設所 所長

²⁾ 日本鉄道建設公団 東京支社 横浜鉄道建設所 副所長 ³⁾ 正会員 大成建設(株) 横浜支店

⁴⁾ 正会員 大成建設(株) 土木技術部 ⁵⁾ 正会員 大成建設(株) 土木設計第一部

シールドトンネルである。トンネルは掘削外径φ7260mmの単線鉄道トンネルを1D以上離れて並列で施工する。平面線形は半径310mのS字曲線となっており、掘削勾配は工事始点から中間点までは+4%、その後工事終点までは、-4%である。地盤条件はN=50以上の良好な土丹層が大部分であるが、路線の一部には、埋没谷と呼ばれるN=10程度の沖積粘性土層を通過する部分がある。路線土質図を図-1に示した。

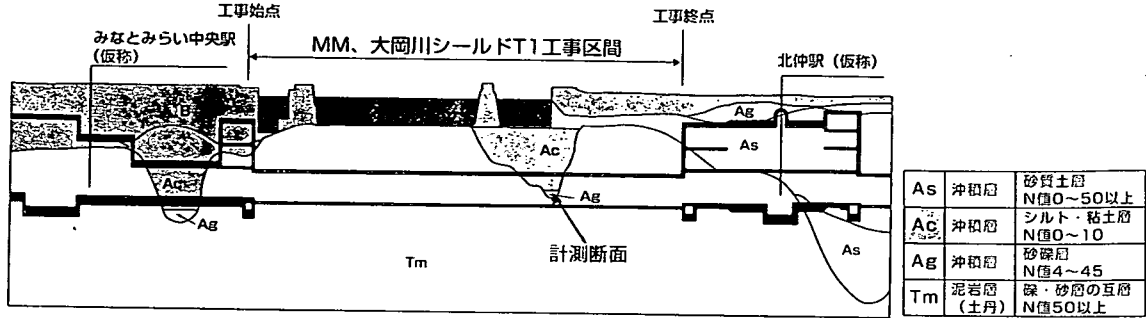


図-1 路線土質図

(2) シールドセグメント

本工事に採用されたシールドセグメントは、上り線にオーストリアのマイレーダー社より技術導入した CONEX セグメント (図-2) を我が国で初めて使用し、下り線には我が国で最大径のほぞ付きセグメントを韓国で製作して使用している。CONEXセグメントは、図-2に示すように、セグメント継手に位置合わせの為の GUIDANCE-ROD、リング継手にはプラスチック製の DOWEL 継手を用いたセグメントである。このセグメントはボルトレス構造の為、組み立てに要する時間が早く、しかも継手金物がないので内面が平滑であり二次覆工省略に適しているなどの特徴がある。

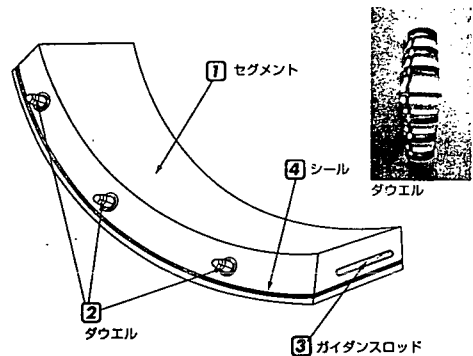


図-2 コネックスセグメント

3. 計測概要

計測セグメントを図-1に図示した地点に設置し計測を行った。この位置の地盤条件は、埋没谷と呼ばれるN=10程度の沖積粘性土層を含む層となっている。

この計測セグメントには図-3に示すように、土圧計 (3ヶ所)、鉄筋計 (12ヶ所)、目開き計 (12ヶ所)、内空変位計 (4測線) と、間隙水圧計 (1ヶ所) を設置し自動計測を行っている。

4. 計測結果

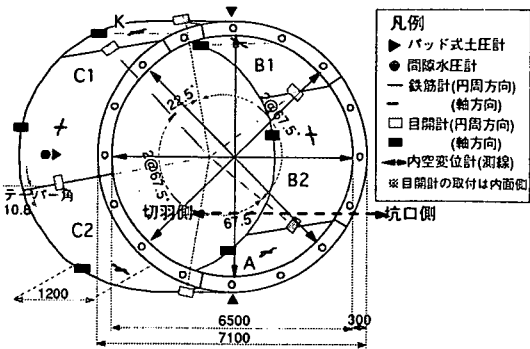


図-3 計器配置

計測結果は、図-4に示す主な9つの時点を生シールドトンネルの掘進中を避けて選択して整理した。また、計測された鉄筋応力からセグメントの断面力を算定して整理した。

(1) セグメント外荷重 (土圧及び水圧)

a) 土圧

パッド式土圧計で計測した土圧の変動を図-5に示した。計測リングがシールドマシンのテールシールを通過した直後には、頂部 (0°) に $20.8[\text{tf/m}^2]$ の土圧が作用しているが、スプリングライン (90°) や底部 (180°) ではそれぞれ $12.1[\text{tf/m}^2]$, $9.4[\text{tf/m}^2]$ であり、頂部よりも少ない土圧しか作用しておらず、裏込め材注入前には土圧の不陸がある状態であった。その後、裏込め注入を経て土圧のモードが設計値に見られる通常モードに近づいた。その後徐々に裏込め注入の圧力が抜け安定土圧に到った。数値では、裏込め注入直後に頂部 (0°) の土圧では $15.4[\text{tf/m}^2]$ まで上昇し、安定後は $11.8[\text{tf/m}^2]$ まで低下した。

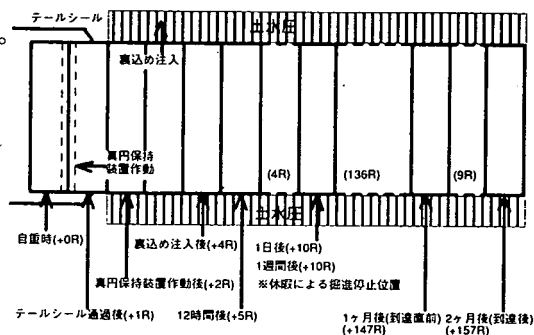


図-4 計測結果の整理時点

計測された土圧は水圧分を含んだものであると考えられる、設計では当該地盤が粘性土地盤であることから土水一体として算出している。計測された土圧は全土被りで算出される設計土圧を下回っている。設計土圧 (全土被り圧) と実際に作用した土圧を比較すれば、頂部で設計土圧 $22.69[\text{tf/m}^2]$ に対して、裏込め注入後は $15.39[\text{tf/m}^2]$ 、1ヶ月後 (到達直前) では $13.19[\text{tf/m}^2]$ である。比率に直せばそれぞれ設計土圧に対して 67.8% 、 58.1% であった。

既往の計測事例³⁾を参考にすれば、硬質粘性土地盤では覆工土圧は裏込め注入によって急上昇するが、その後減少し一定値に収束する。長期間経過後の土圧は設計土圧である緩み土圧より小さく、水圧とはほぼ同程度の値を示す。本計測結果では、これをほぼ踏襲するものとなっている。

b) 水圧

水圧計測開始直後の水圧は $17.2[\text{tf/m}^2]$ であった。これは水位を河面と仮定して算定した水圧 $19.2[\text{tf/m}^2]$ にほぼ一致している。そこから徐々に水圧が抜け $10[\text{tf/m}^2]$ 程度まで低下した。このことは、トンネル掘削による一時的な減少であると考えられる。つまり、計測リング付近の地盤が粘性土であることから、水の透過性が低く水圧が元に戻るためには時間がかかる事や、トンネル掘削が継続している行われている事が原因と考えられる。

(2) セグメント変位 (内空変位及び目開き)

a) 内空変位

計測リング組立て直後の内空変位は $0-180^\circ$ で $-9.35[\text{mm}]$ の横潰れ変形を示していた (図-6、参照)。またこの横潰れ変形量は設計モデルによるものとはほぼ一致していた。その後裏込め注入の影響により、 $0-180^\circ$ で $-1.60[\text{mm}]$ の横潰れ変形まで (図-6では1日後) の潰れ量が減少した。そのあと再び $-5.83[\text{mm}]$ まで横潰れ

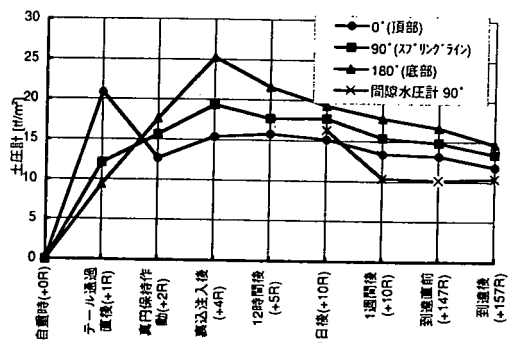


図-5 外荷重の経時変化

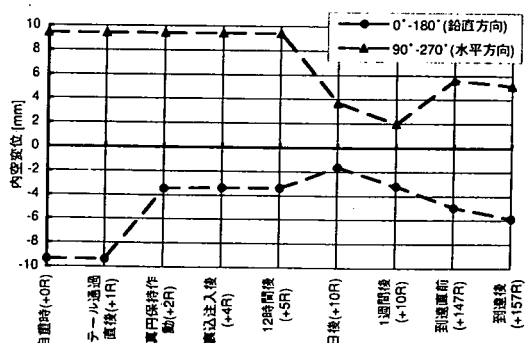


図-6 内空変位の経時変化

変形が進行した。

なお、内空変位の計測はトンネル内に付けられた、アンカーピン間の手動による直接計測に頼っているの
で、後続台車などの障害物がある時には計測は出来ない。この為、計測結果はリアルタイムな結果とはなっ
ていない部分がある。とりわけ、計測リング組立て後数日の期間にはこの傾向が強い。

b) 目開き

組立て直後の目開き(図-7、参照)は、シールドトン
ネルの頂部と底部が最も大きく、横潰れ変形のモード
と一致した。最大値はB1-K間の2.00[mm]、最小値はK-C1
間の0.11[mm]であった。その後、テールシール通過、裏
込め注入と経るに従って目開きが小さくなり且つ安定
した。テールシール通過後は、C2-A間の目開きが
最大値0.83[mm]となった。これは、次リングのセグメント
をここでストックする為であると考えられる。

裏込め注入によって、各セグメント継手の目開きは
最小値となった。その目開きは1日後では、C2-A間が
0.25[mm]で最大、B1-K間が-0.10[mm]で最小であった。その後、裏込め注入による影響の緩和に伴い、目開
きが若干大きくなって安定した。その目開きは、2ヶ月後(到達後)では、最大値が B1-K間(0.97[mm])、
最小値が K-C1間(0.16[mm])であった。この目開きの傾向は、内空変位の傾向とほぼ一致するものであった。

(3) セグメント断面力(軸力及び曲げモーメント)

図-8及び図-9に示すセグメントの断面力は、自重時には、軸力は圧縮側でC1セグメント(-21.08[tF/R])、
引張側でAセグメント(29.00[tF/R])、モーメントは正曲げ側でC1セグメント(3.50[tFm/R])、負曲げ側で
C2セグメント(-3.83[tFm/R])がそれぞれ最大であった。その後、テールシール通過、裏込め注入と経るに従
って圧縮軸力と正曲げのモーメントが増加した。

裏込め注入後は徐々にB2セグメントとC1セグメント及びKセグメントの曲げモーメントが低下し、最終
的には、C1セグメントではほぼ0、B2セグメントとKセグメントでは若干の負曲げの断面力となった。軸力は
全て圧縮側でC1セグメント(-85.61[tF/R])で最大、モーメントは正曲げ側でC1セグメント(7.38[tFm/R])、
負曲げ側でB2セグメント(-0.12[tFm/R])がそれぞれ最大であった。負曲げモーメントが少ない理由として
は、セグメント継手ボルトの締め付け力や、テールボイドの存在と裏込め材注入までのタイムラグが関係し
ているものと考えられる。つまり、セグメントに負曲げが生じる為には地盤反力でセグメントを押し返す必
要がある。しかし、テールボイドの存在と裏込め材注入までのタイムラグによって、セグメントが既に変形
した状態が地盤反力の0点になった事などが考えられる。

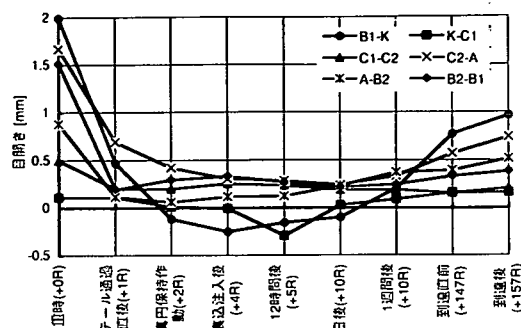


図-7 目開きの経時変化

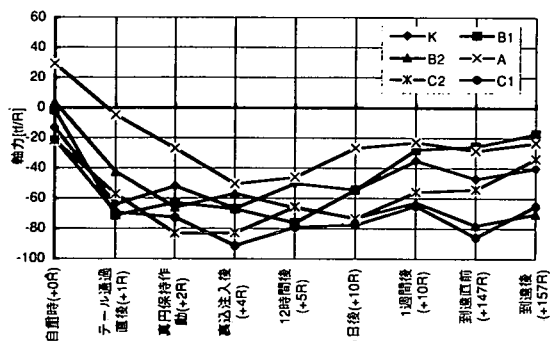


図-8 軸力の経時変化

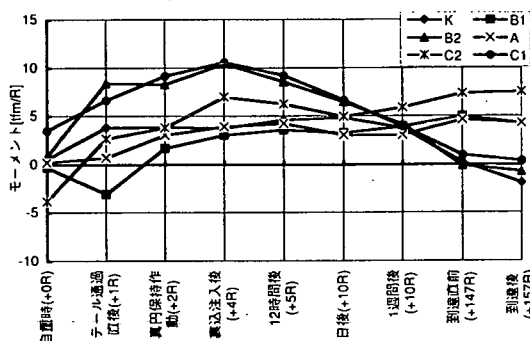


図-9 曲げモーメントの経時変化

5. 再現解析

実測された荷重状態を設計モデルに入力する方法によって、セグメントの応力状態の再現解析を行う。このことで、セグメントの計測結果の妥当性の確認と設計モデルの検証を行う事を目的とした。

(1) 解析モデル

セグメント継手の効果を定量的に把握可能な、梁バネモデル解析を用いて再現解析を行った。モデル化は2リング1ユニットの千鳥組みセグメントとし、裏込め注入後には地盤バネを考慮した。解析した時点は、9つの時点のうちから、自重時と裏込め注入後（図示は省略）、及び1ヶ月後（到達直前）とした。

(2) 荷重設定

計測されたパッド式土圧計の頂部(0°)の結果をもとに、シールドトンネルにかかる外荷重を推定して載荷した。すなわち、パッド式土圧計の頂部(0°)の土圧をシールドトンネル頂部への外荷重と仮定する。次にトンネルの通過する地盤から、側方土圧を示方書などによる通常の設計荷重による側方土圧係数(λ)として算出する。底部(180°)の土圧は、パッド式土圧計の頂部(0°)の計測結果から、通常設計手法と同様に当該地盤の単位体積重量(γ)とセグメントの自重反力(pg)を用いて算出したものとした。最後に、この算定方法によって設定した荷重と計測結果とを比較し確認した。このことで、地盤反力の効果を比較的正しく評価した荷重設定が可能となった。なお、ここで用いた地盤定数とセグメント自重はセグメントの設計条件と同一とし、次の値のとおりとした。

$$\lambda=0.60, \gamma=1.7[\text{tf/m}^3], pg=2.940[\text{tf/m/R}] \quad (g=0.936[\text{tf/m/R}])$$

なお、完成時には再現解析の載荷荷重と計測結果の差異がわずかである事を確認した。裏込め注入圧は、注入直後の状態として、上半部45°方向から左右に裏込め注入圧を三角形分布と仮定して載荷した。

(3) 解析結果

a) 内空変位

解析結果は、計測結果に近い変形状態が得られた。その変位モードは解析結果、計測結果共に、自重時には大きく横潰れ変形で、裏込め注入による縦潰れ変形を経た後、トータルでは依然横潰れ変形のまま安定状態を迎える。解析結果は鉛直変位で、組立て時には10.82[mm]の横潰れ変形であったが、裏込め注入後には3.35[mm]の横潰れまで縦潰れ変形が進み、最終的に1ヶ月後(到達直前)には5.02[mm]の横潰れ変形となった。

b) 軸力

セグメント本体部の断面力の解析結果を、図-10に計測結果と比較して示した。

軸力の解析結果は、Aセグメントの解析結果が若干低かった事を除いてほぼ計測結果を予測しうる値となっていた。組立て時においては、解析結果は全て-10[tf/R]以下の圧縮軸力を示している。それに対して、計測結果ではKセグメント(-13.27[tf/R])、C1セグメント(-21.08[tf/R])、C2セグメント(-21.60[tf/R])と圧縮

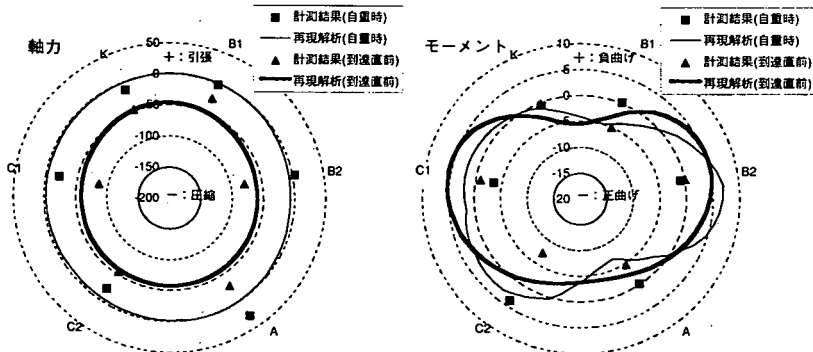


図-10 解析結果と計測結果の比較

軸力にして-10[tf/R]を超える圧縮軸力を示す計測結果が見られた。この軸力はKセグメントを挿入した側であるトンネル左側(切羽矢視)に集中していることから、Kセグメントを押込んだ事が主な原因ではないかと推定される。その他にも、添接リング荷重の伝達や、テールシールによる拘束力などが考えられる。

次に、1ヶ月後(到達直前)の断面力の比較を行った。その軸力の分布モードは解析結果と計測結果ではほぼ一致していた。BIセグメントでは計測結果が-25.76[tf/R]に対して、解析結果が-48.07[tf/R]、Aセグメントでは計測結果が-28.53[tf/R]に対して、解析結果が-57.52[tf/R]と若干両者が離れたものとなっていた。

c) 曲げモーメント

曲げモーメントの解析結果は、そのモーメントの分布モードにおいては、正曲げと負曲げが入れ違っている点が存在するなどの点で、計測結果を予測しきれていなかった。しかしながらその断面力を絶対値で比較すればほぼ妥当な断面力を示したものとなっていた。

自重時においては、計測結果の曲げモーメントの方が解析結果の曲げモーメントよりも若干少なくなっている。計測結果の曲げモーメントは正曲げ3.50[tfm/R](CIセグメント)から負曲げ-0.27[tfm/R](BIセグメント)の間に分布しているのに対して、解析結果においては、正曲げ4.89[tfm/R](BIセグメント)から負曲げ-5.34[tfm/R](B2セグメント)の間に分布していた。その最大断面力を示すセグメントは一致していないが、横潰れ変形を起こすモーメントのモードでは一致していた。

1ヶ月後(到達直前)については、モーメントの分布形状としては、解析結果と計測結果ではほぼ一致しているように見える。言い換えれば計測結果の曲げモーメントを負曲げ側に5[tfm/R]程度平行移動すればこの両者はほぼ一致するものとなっていた。この原因としては、真円保持装置の上げ越しによる残留応力やセグメント継手の組立てボルトの締め付け力や、その増し締めなどがその原因として挙げられる。

6. まとめ

本研究から、ボルトレスセグメント(CONEXセグメント)について以下の結論が得られた。

- ・ 内空変位、目開き、セグメント断面力が通常のボルトセグメントに比して常識的であり、許容値に対して十分な余裕がある。従って、本工事で用いたセグメントの安全性が確認出来た。
- ・ 再現解析においてセグメント断面力が最大値レベルでは一致していた。このことで本工事で用いた梁バネモデルによる設計手法がほぼ妥当であったと考えられる。

また、組立て時から裏込め材固化までの期間は、鉄筋応力や目開きの変動が大きく添接リングにリング継手によって支えられる状態である。この期間にはジャッキ推力、テールシール通過、真円保持装置の作動や裏込め注入などの比較的大きな荷重が頻繁に掛かる環境となっておりその掛け方如何によってはそれがセグメントへの残留応力(又は変位)となる可能性がある事を示唆している。

参考文献

- 1) 西田義則、木原義博ほか;ボルトレスセグメント"コネックス"による海底鉄道トンネルの施工;土木学会第54回年講(II-B);1999.9
- 2) 橋本正、譽田孝宏ほか;粘性土地盤における実測値に基づくシールド掘削時の応力解放率について;第31回地盤工学研究発表会(1096);1996.7
- 3) 太田擴、塩谷智弘ほか;セグメントに作用する土・水圧および応力の計測結果;第7回トンネル工学研究論文・報告会(報告-55);1997.11