

MF シールド覆工の設計と現場計測

DESIGN OF MULTI-FACE (MF) SHIELD LINING AND FIELD MEASUREMENT

清水 満* 河内汎友** 滝本孝哉***

By Mitsuru SIMIZU, Hiroto KAWAUCHI and Takaya TAKIMOTO

MF shield tunneling method is an innovative design of construction, differentiated from the conventional circular tunnels, to build tunnels in optional sections such as horizontal or vertical ellipse which will reduce costs of construction. A twin-tunnel was constructed on Keiyosen between Chiba and Metropolitan Tokyo, using this method at the 619-meter section on the side of Tokyo. The design and method of construction were selected based on data collected from various tests. Measuring instruments were placed on the segment ring and columns to collect various field data for approximately one year and to verify the design proficiency and suitability of construction method for future design of the multi-face shield lining. It was evidenced by field measurement that the shield lining produced stresses and behavior as assumed during the design stage. New subjects to be considered in future have been provided as the results of measurement, since great profile drags such as bending moment of center column unexpectedly acted toward the tunnel axis.

1. まえがき

京葉線は千葉方面と都心を結ぶ通勤新線として昭和58年7月に運輸大臣の工事認可を受け、昭和58年10月の工事着工から6年5ヶ月を要して、平成2年3月に東京～蘇我間約43kmが開通した(図-1参照)。

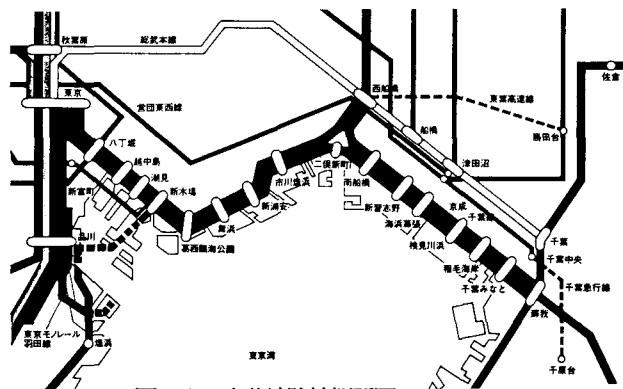


図-1 京葉線路線概要図

- | | | |
|------------------------|---------|---------------------|
| * 東日本旅客鉄道株式会社 | 東京工事事務所 | (〒151 渋谷区代々木 2-2-6) |
| ** 株式会社熊谷組 | 東京支店 | (〒162 新宿区筑土八幡町3-1) |
| *** 日本シールドエンジニアリング株式会社 | 東京事務所 | (〒106 荒川区南千住1-59-7) |

京葉都心線の線路構造形式は、高架部分0.9 km、橋梁部分1.7 km、トンネル部分4.8 kmであり、特に土地利用の高い都心部周辺の越中島以西は全てトンネル形式となっている。

さらに、トンネル形式を工法別に分類すると、開削トンネル工法が29%、シールドトンネル工法が71%であり、最近の道路事情や地下埋設物の混雑等から地下深い位置に線路を敷設しなければならない状況となってきた。

また、最近のシールドトンネルでは、地中応力に対する抵抗力および施工の優位性等から殆どのトンネルが円形の覆工であるが、複線トンネル断面ではトンネル径が大きくなり、輻輳する大都市の地下空間では地下構造物に対処しづらくなっている。

さらに、余空間の処理についても多くの作業を必要とし建設コストを引き上げている（図-2参照）。

これらの問題点を解消するために、京葉線では単線断面を2つ部分的に重ねあわせたMF（Multi-Face）シールド工法を東京駅から八丁堀駅までの619 m区間に採用した（京橋トンネルと称している）。

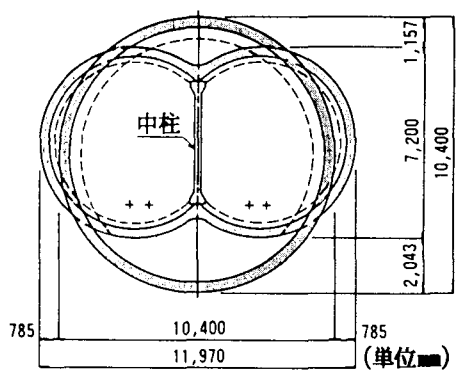


図-2. MF断面と複線断面の比較

MFシールド工法は図-2の比較図に示すように従来の円形複線シールドトンネルとMF形で比較すると、横幅が多少大きくなるものの、高さが大幅に節減でき、このため掘削断面積において13%の減少となり、インバートコンクリートにおいては81%もの減少が可能となっている。また、中央に中柱が存在するため、一次覆工に発生する断面力が従来の単線トンネル程度であり、このため一次覆工も18%の減少となっている。MFシールド工法は表-1に示すような特長、優位点があるとともに、将来的に縦2連断面や横3連断面等の複数断面のシールド工法の適用性を示唆している。

著者らは、これらの背景を鑑みて京葉線MFシールドの設計、施工状況（シールド機械操作、セグメントの組立等）および覆工の現場計測結果を報告する。

表-1 MFシールド工法の特長および数値比較（単位m当たり）

項 目	単位	円形	M・F	比較
断面外径（縦）	m	10.40	7.20	0.69
断面外径（横）	m	10.40	11.97	1.15
掘削断面積	m ²	87.9	76.1	0.87
一次覆工	m ³	12.6	10.3	0.82
二次覆工	m ³	6.3	5.6	0.89
裏込注入工	m ³	4.4	5.5	1.25
インバートコンクリート	m ³	9.7	1.8	0.19

2. 一次覆工（セグメントおよび中柱）の設計

MFシールドの覆工は、地山に直接接するセグメントの他に2つの円の中央部に中柱と称する柱（京葉線

では鋼材を使用した)が必要となる。セグメントは、A型セグメントとK型セグメントで構成されている。K型セグメントは鷗の様な形をしており、中柱の接続部の両端に使用し、円形断面のKセグメントの動きも兼ねている(図-8参照)。

覆工に発生する断面力の算定に関してはトンネル形状が特殊なためセグメントを多角形の部材の骨組に置き換えてセグメント継手を回転ばねに、リング継手をせん断ばねで表現する2リングモデルによる変形法で計算を行った(図-3参照)。^{1), 2)}

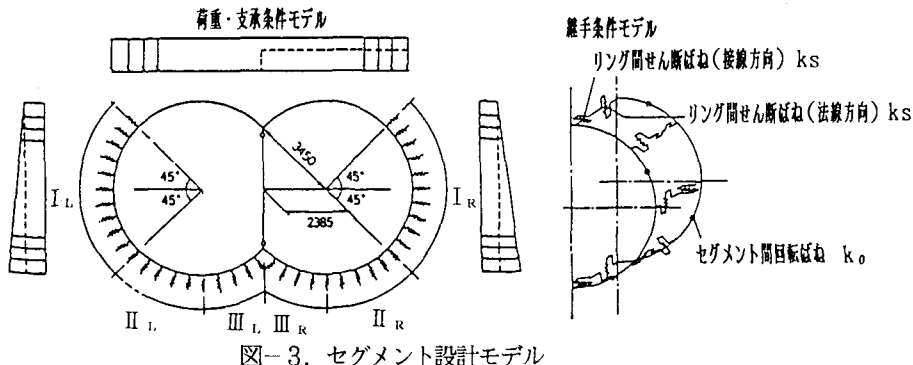


図-3. セグメント設計モデル

この回転ばねとせん断ばねの値の設定にあたっては、事前に実物大の実験を行ない図-4、図-5に示す実験結果を得た。この結果から一次覆工を安全側に設計することを考え、回転ばねについては負曲げ(軸力無)の値 $k_{\theta 0} = 6000 \text{ tf} \cdot \text{m} / \text{rad}$ を採用した。せん断ばねは、継手のフリクションが切れる直前の値 $k_s = 18,000 \text{ tf} / \text{m}$ を採用した。¹⁾

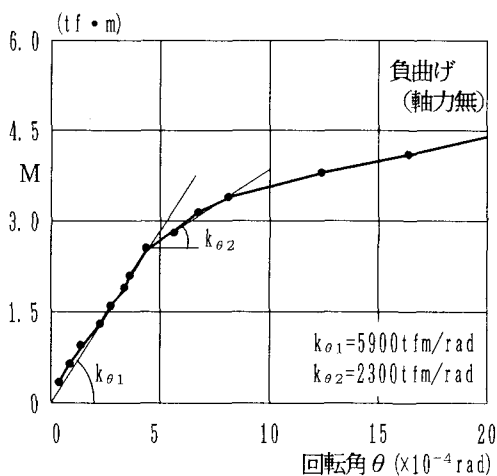


図-4. 2ピース曲げ試験結果

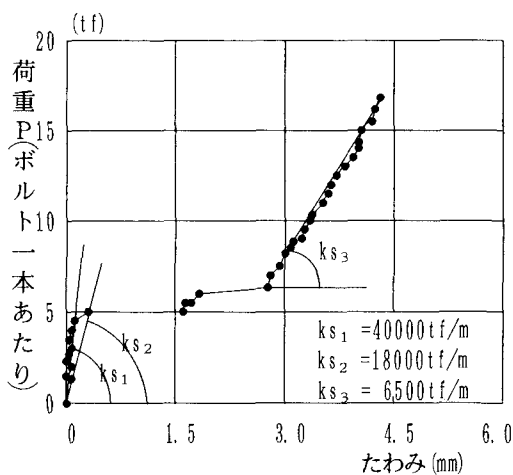
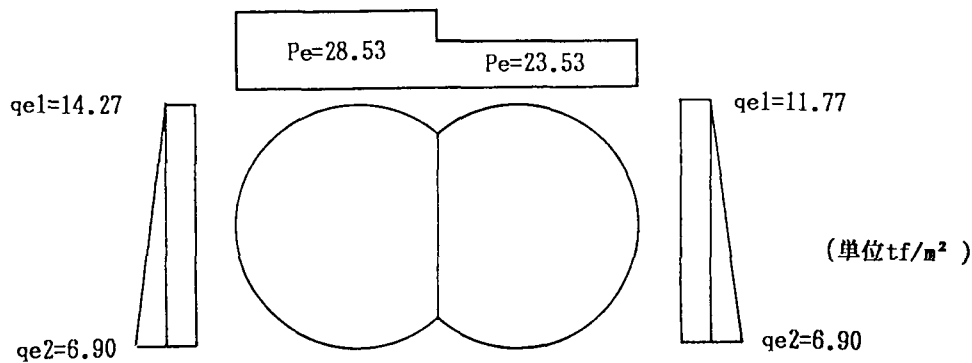


図-5. せん断試験結果

トンネルに作用する土水圧荷重は安全側の設計を考慮して一体として扱い、MFシールドの断面形状から左右のリングに異なる荷重が作用した場合に荷重のアンバランスからセグメントや中柱に影響を及ぼすことを懸念して図-6に示すような偏土圧を考慮している。

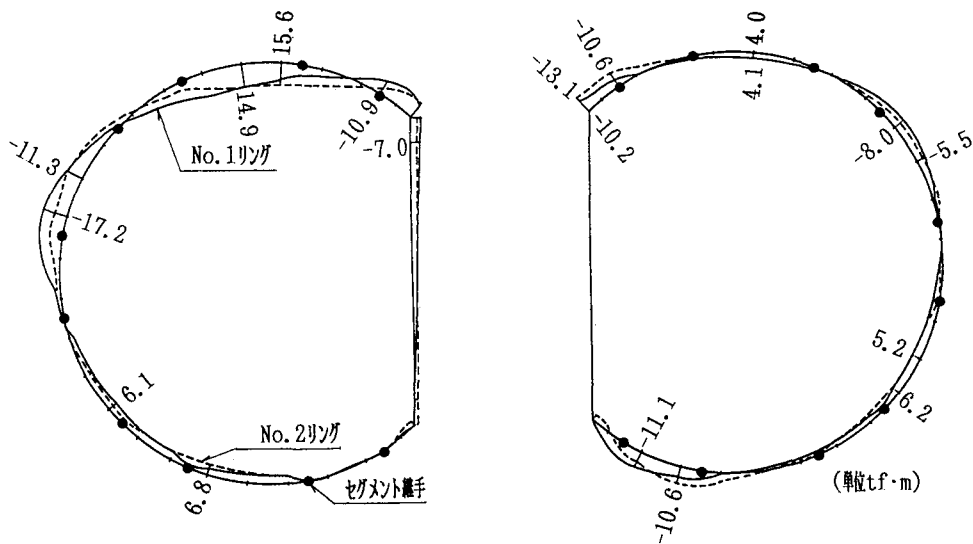
偏土圧量の設定にあたっては、過去に実施した土圧計測の結果を調査し、セグメントリング左右上方の測定値の差が最も大であった東北新幹線第2上野トンネル（φ12.66 m）の計測結果³⁾を参考にして、左右で5 tf/m²として設計を行なった。



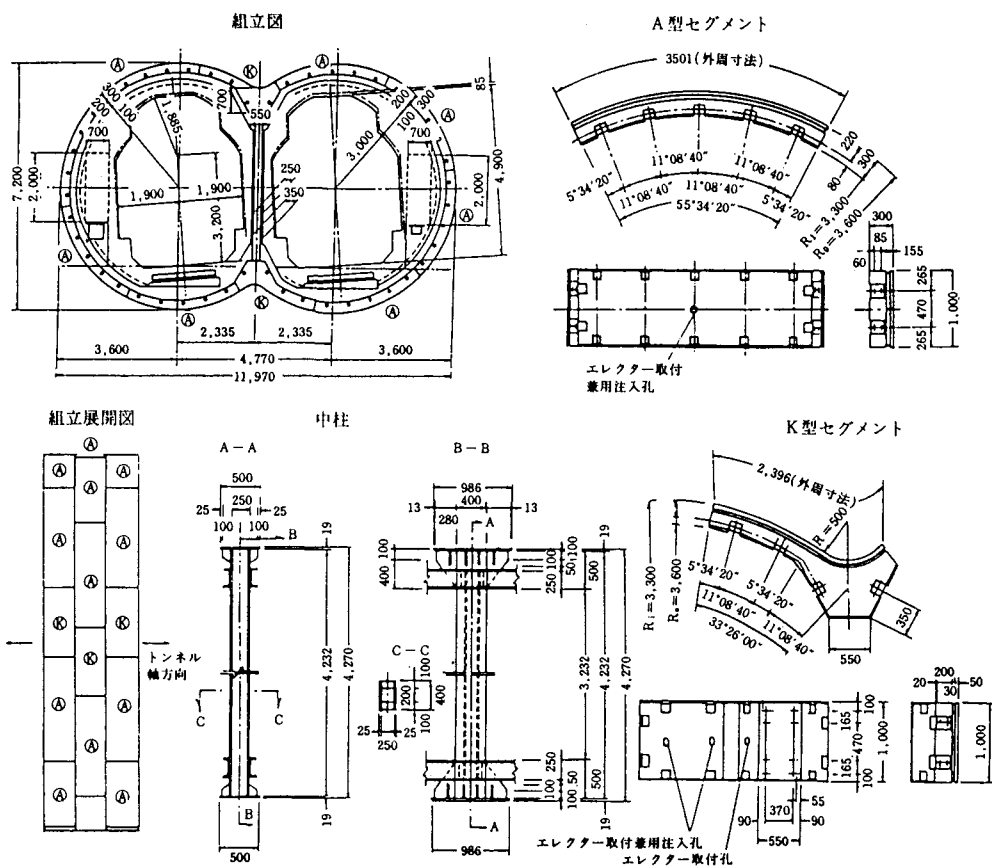
図－6. セグメントに作用させた偏土圧荷重

設計は、セグメントと柱の取付構造が実際には回転ばね状の構造と考えられるが、このバネ値の算定が困難なため、ピンと剛結の両極端なケースで行っている。また、周辺地盤条件として、①MFシールドの構造から、シールドの掘進により生じる地盤のゆるみのアンバランス、②余掘・裏込注入等によるトンネルの支承状態のアンバランスを想定して、図－3に示す地盤ばねを変動させた検討を行っている。地盤ばねの変動方法は、常時5 kgf/cm²とした地盤ばねと、その1/2の値 2.5 kgf/cm²のばねの組合せにより行っている。

以上の計算方法のうち偏土圧を作用させたケースの設計曲げモーメント図を図－7に示す。また、図－8に採用したセグメント構造を示す。⁴⁾



図－7. 設計曲げモーメント図



3. 現場計測結果

MFシールドでは覆工に表-2示ような測定器を埋設し、セグメントリング組立後から約1ヶ年間の計測を行っている。本項目では、主な計測結果について示す。

(1) 土圧計

土圧計の径時変化図を図-9に示す。各測点ともに組立後から約6ヶ月で一定値に落ち着いている。天端における土圧値は、設計値に比較して約80%の値を示している。偏土圧荷重の大きさは、図-10に示すように約10 tf/m²発生している。偏土圧の発生する要因としては、偏心ジャッキ推力、余掘り量のばらつき、

裏込注入の不均一等が挙げられる。どの要因が支配的であるのかは不明であるが、本計測箇所は図-13に示すように周辺構造物の影響を受けず、かつ直線区間を選定しているにも関わらず偏土圧が発生していることを考慮すると、多断面形状のトンネルに作用する荷重についての詳細な検討が必要と考える。⁵⁾

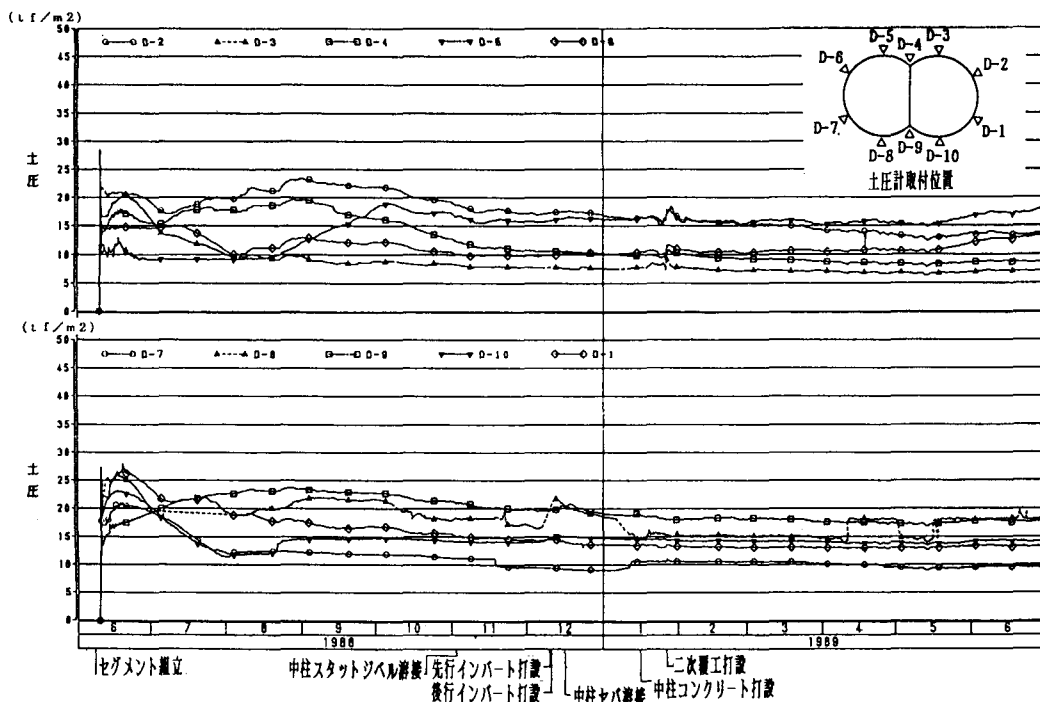


図-9 トンネルに作用する土圧の経時変化

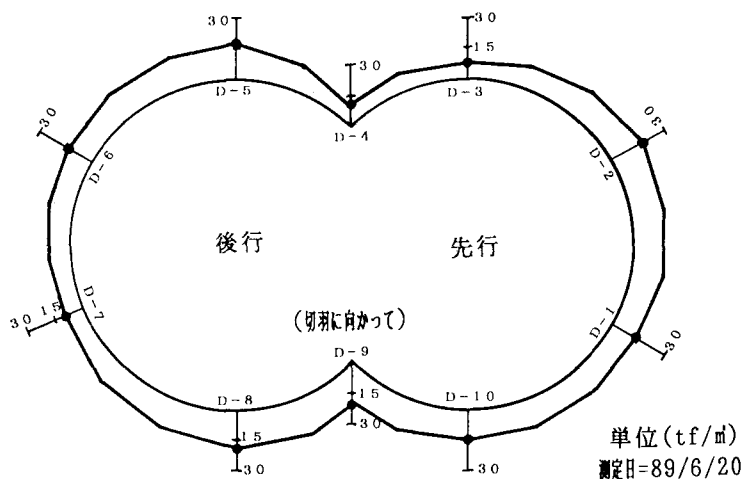


図-10 土圧分布図

(2) 水圧

水圧の測定結果はほぼ静水圧分布を示しており、局所的な過剰間隙水圧の上昇等は見受けられない。

(3) 主筋応力

一次覆工の主筋に発生する応力度は平均で $\sigma \approx 600 \text{ kg/cm}^2$ であり、隣接する2リングでの曲げモーメントの分布を図-11に示す。

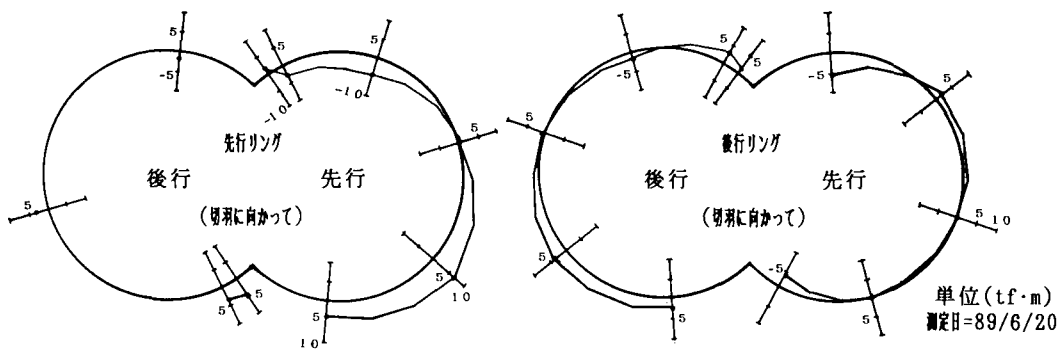


図-11 隣接セグメントリングに発生する曲げモーメント

(4) 中柱応力

土圧計からの偏土圧差が設計値の倍の値を示しているが、中柱に発生する曲げモーメント（断面方向=X軸）は設計値（8tfm）とほぼ同じ値であった。

軸力値は200tf程度であり、設計値（229tf）の約90%であった。また、トンネル方向の曲げモーメント値（Y軸）がリング方向の倍程度の値を発生している（図-12）。

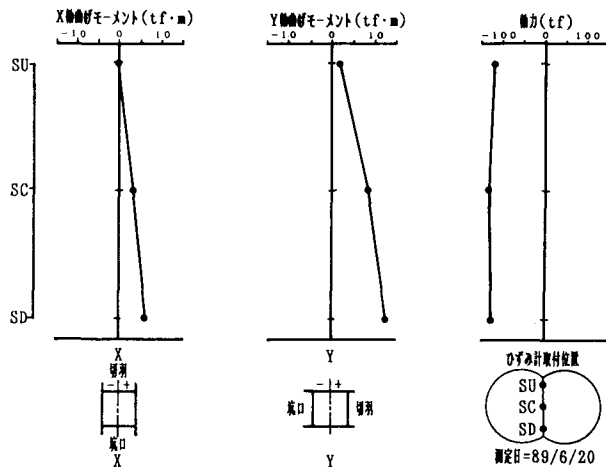


図-12 中柱に発生する断面力分布図

4. 計測値に対する考察

計測区間の土質は図-13に示すようにトンネル通過付近はN値が50以上の洪積砂質土であり、トンネル上部はN値=20～50の洪積層が存在している。これより、鉛直荷重の算定にはゆるみ土圧（=28.53tf/m²）を採用した。

MFシールドの施工前に行なった全体リング挙動実験¹⁾では、2リングモデルの適合性を確認しており、本現場計測におけるセグメントの主筋に発生する応力の大きさや分布状態ならびに中柱の発生応力を見ると、設計上期待したレベルと同程度の値が得られている。これより、2連形状のシールドトンネルの横断方向の設計手法として、荷重系は慣用設計法の考え方を、構造系は2リングモデルを使用したことが概ね妥当であったと考える。

偏土圧量については、①偏土圧値（10t/m²）の上限値を示している土圧計（D-5）の変化がセグメント組立後から2～4ヶ月の期間内で生じている（図-9参照）が、同時期中の柱や近傍のセグメント鉄筋計には呼応した変化が見られない事。②鉛直土圧荷重の計測値は設計荷重の約60%の値を示しているが、中柱の発生軸力は設計荷重の約90%の値を計測している事。ならびに、③事前に行なった全体リング挙動実験¹⁾の結

果における上載荷重に対する中柱の荷重の分担量が、設計値に近い事。以上の3点から、土圧計の出力値は若干の感度低下（原因としては、土圧計の表面が裏込注入材で覆われている等が考えられる）が生じていると推測される。これらのことから、偏土圧値は設計上期待した値に近いものであったと考える。しかしながら、円形よりも横2連形、さらに横3連形と断面縦外径に対する断面横外径の比率が大きくなれば偏土圧は大きくなるであろうと著者等は考えている。そのため、今後の計画においてはモデル実験等を行なうことにより偏土圧の大きさを設定することが必要と考えている。

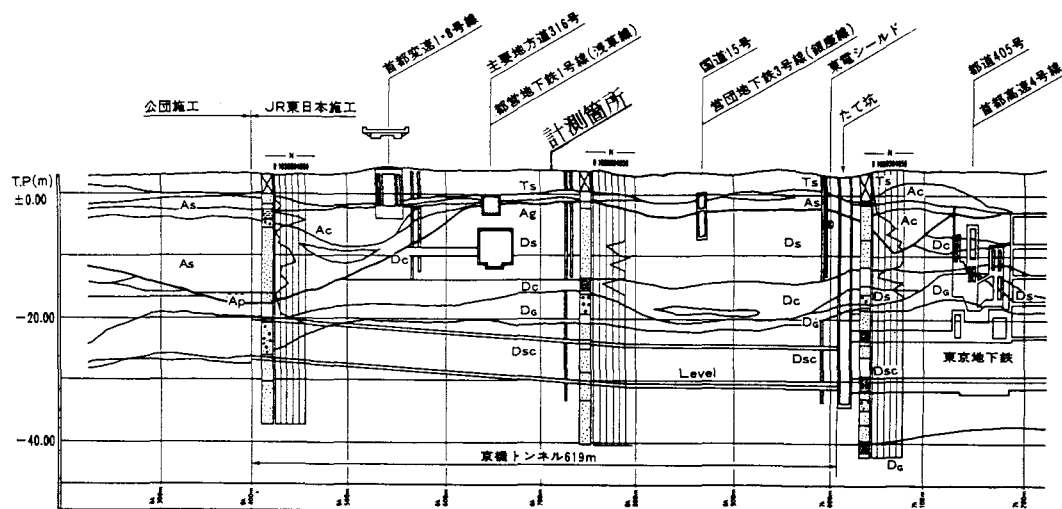


図-13 土質概要

本計測において分った最大の課題は、設計上大きな値は生じないであろうと判断していた中柱のトンネル方向の曲げモーメントが横断面方向に比較して2倍程度の値を生じたことである。今回の設計では、中柱にトンネル方向に偏した荷重を与えた場合に発生する曲げモーメント量を判断の基準としたが、実際には、中柱とK型セグメントの取付具合やトンネル全体の勾配ならびにジャッキの偏心荷重等を原因として予想以上の曲げモーメントの発生に至ったと思われる。今後は、実験や数値解析等によりトンネル方向の柱（または壁）に対して横断面方向と同程度の設計手法の確立を行なう必要があると考えている。

5. 施工上の整理

MFシールドではシールド機械の装備および操作方法に対して事前にモデル実験等を行なっているが、実際に施工した結果と必ずしも一致しない点もあった。本項目では施工経験のなかで特徴的な項目を示し、今後のMFシールドの改善点等を示す（図-14参照）。

（1）シールド機械の操作性^{6)・7)}

- ①方向修正のための安全対策用として可動ソリを装備したが、ジャッキ操作や面板の回転方向による修正方法で可能なため数回の使用のみで済んだ。但し、可動ソリが不必要である確証は本施工では得られていないため、経験を積むまでは必要と考える。
- ②曲線施工（最小曲率半径 $R=400$ m）においてMFシールドの上部凹み部分がセグメントと競り合うと予想されたが殆ど影響はなかった。但し、急曲線の場合には凹み部分の競り合いを検討する必要がある。
- ③マシンのローリングについては、掘進時に推力を多く作用させた面板の回転方向に支配されることが分った。このような特長を把握するには最低100 リングの掘進が必要である。

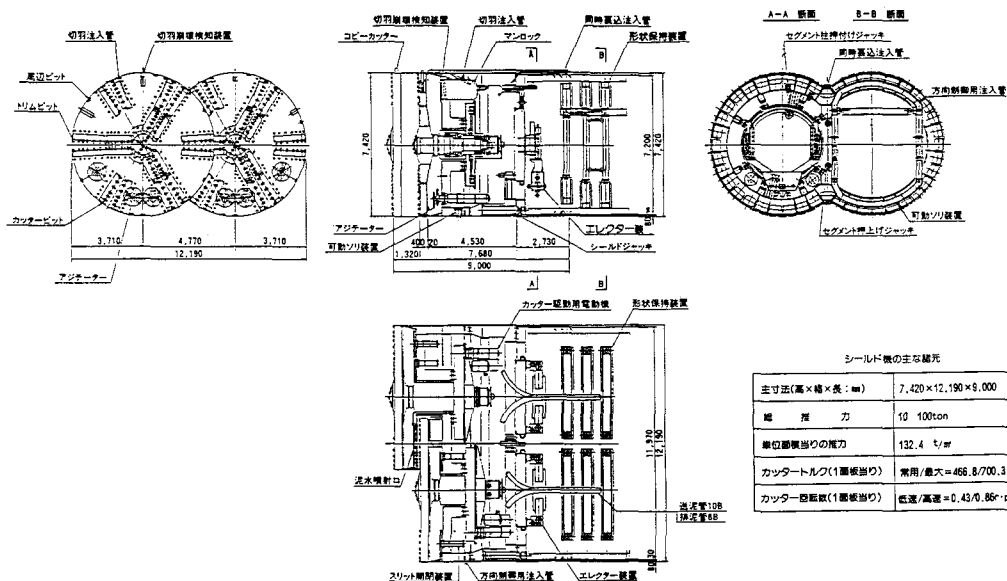


図-14 MFシールドマシーン概要図

(2) 泥水管理

- ①チャンバーは施工中のトラブル等を考慮すると、独立（バイパス配管）が良い。
- ②独立チャンバーであっても前後の面板の泥水圧は同じになる。
- ③前後のチャンバーからの排土量は、面板が切羽に接している面積に比例している。

(3) セグメントおよび中柱の組立

- ①リング継手の分割は通常よりも1～2度程度細かく設定した（中柱が挿入できない場合を想定して、中柱を取り外した場合に頼りになるのはリング継手であるとした）が、施工結果からみると通常の分割数でもよさそうである。
- ②K型グメントの付根部分に若干のひび割れが生じた箇所がある。 エレクションに問題があると思われるが、K型セグメントの大きい方の片羽部分に補強の必要がある。
- ③中柱挿入時にK型セグメントの片側落ち込みがあったが、問題とはならなかった。
- ④ボルトの緩み具合や締付けの程度は、円形シールドの要領と全く同じである。

(4) 裏込注入状況

- ①下側のK型セグメント部分の凹み部分にも注入は十分されていた。
- ②泥水のトンネル内への噴かれはあったが、円形シールドと同じ程度の量であった。
- ③同時裏込注入管を上部中央の凹み部分に取付けた（凹み部分に空気貯まりが生じることを懸念した）が、テールシールの弱い部分であったため裏込注入材が出てきてしまったため使用を中止した。その後はセグメントからの即時注入に変更した。同時注入管は凹み部分よりも各々の円の天端に取付けた方が良く、凹み部分にも十分に裏込注入材は充填されている。

(5) 二次覆工の施工

- ①中柱が壁であれば（京橋トンネルではトンネル内の換気上から柱とした）、二次覆工の打設を左右別々に

施工でき、施工性が良くなる。

②中柱はビルトアップH鋼材のコンクリー巻きを採用したが、型枠組み等に手間を要した。

(6) ピン継手の採用について

①セグメントの自動組立には有効な手段と思われるが、セグメントのストック数が増えるため都市内でのストックヤード（例えば立体駐車場のようなもの）の確保が必要である。

②継手をピン化した場合にはセグメントの種類が増えるとともに組立が複雑になる。

6. まとめ

京橋トンネルは供用を開始してから7ヶ月を経過したが、トンネル内への漏水等も少なく順調な運行をしている。しかしながら著者らは施工を終えて、設計・施工の両面において種々の改善点および新たな課題を与えられた。設計面については、中柱の存在がセグメントリングの計算を複雑にし、トンネル方向についてもリング方向と同程度の1リング単位の簡易な解析手法の開発が必要であることを示唆された。施工面については、形状の複雑さからカッター面板の回転方向や速度等に関して厳密な施工管理を要求された。

今後これらの課題を1つ1つ解決し、横2連形状のMFシールドを確立してゆくとともに、土地利用の制約が厳しい地域に有効な縦2連形状や駅部の同時施工に有用な横3連形状のMFシールドの適用性（セグメント、中柱の規模、周辺地山への影響、駅部の柱の盛り交え手法等）も同時に検討してゆくつもりである。

最後に、この報告をまとめるにあたって、設計から施工まで貴重なご意見をいただいた東京理科大学教授松本嘉司博士をはじめ、関係各位に深くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 清水、他2名：複円形特殊断面（MFシールド）のセグメント載荷実験。土木学会第42回年次学術講演会，昭和62年9月，Ⅲ-297
- 2) 半谷哲夫：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学的特性に関する研究。鉄道技術研究報告，No.1303(施工編第571号)，1985年10月
- 3) 飯田、他2名：第2上野トンネルにおける土圧および鉄筋応力度の測定結果（その2），土木学会第41回年次学術講演会，昭和61年11月，Ⅲ-417
- 4) 松本、他3名：多円形断面シールドトンネル（MF S）工法の研究および開発。土木学会論文集，第397号／VI-9，1988年9月
- 5) 松本、他5名：多円形断面シールド（MFシールド）の模型実験その5，土木学会第44回年次学術講演会，平成元年10月
- 6) 渡辺、他3名：多円形断面シールド（MFシールド）の施工その1，土木学会第44回年次学術講演会，平成元年10月
- 7) 高瀬、他3名：多円形断面シールド（MFシールド）の施工その2－姿勢制御性について，土木学会第44回年次学術講演会，平成元年10月

(1990年10月12日受付)