

## 2 円形シールドトンネル模型載荷実験

### LOADING TEST OF MULTI-CIRCULAR FACE SHIELD TUNNEL MODEL

小山幸則\*・米島賢二\*・新井 泰\*・井原俊一\*\*・大原英史\*\*

Yukinori KOYAMA, Kenji YONESHIMA, Yasushi ARAI, Syunichi IHARA, Hidefumi OHARA

The Multi-circular Face Shield Tunnelling Method(MFS)has been developed to mitigate over-excavation of ordinary methods, which construct two or three circular tunnels and join them. In this study, We have conducted model test to consider interaction between the ground and the tunnel linings of MFS in different conditions and we have analyzed the model test by FEM analysis and frame analysis. On the test, We have got deformations and stresses of the linings as loading. We have not observed the ground reaction clearly, however on the simulations it appears that the calculated results by previous described analyses are relatively good agreement with this model test.

Keyword: Multi-circular Face Shield Tunnelling Method, FEM analysis, Frame analysis  
Model test

#### 1. はじめに

都市地下部に駅などの構造物を建設する場合、従来のシールドトンネル間の切り掘げによる構築方法に代わり、多円形シールド工法による構築方法が提案されている。しかし、完成後のこれらのトンネルに作用する土圧およびそれにより発生する断面力については、現段階では施工例も少なく十分把握されていない。そこで本研究ではJR京葉線京橋トンネルのほぼ1/70の縮尺を有する2円形シールドトンネル模型を用いた土槽内載荷実験を行い、実験結果の数値シミュレータをFEM解析および全周ばねモデル解析により試みたので、以下に報告する。

#### 2. 載荷実験

##### 2.1 実験装置の概要

###### (1) 土槽 (図1)

土槽は上蓋、底板および4枚の載荷板から構成されており、任意の方向から油圧ジャッキにより載荷可能

---

\* 正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室

\*\* 正会員 (株) 熊谷組 技術研究所 土木構造研究部

な構造を有する。ジャッキの制御は縦・横方向の2系統からジャッキに付属するロードセルの計測値を常時監視しながら行う。寸法は縦・横75cm、深さ45cmで、平面ひずみ状態の確保とトンネル断面挙動の把握を行うために、上蓋には厚さ 100mmの亚克力板を用いている。

(2) トンネル模型 (図2～図4)

図2に示すように、トンネル模型は大きく分けて土圧計測部および一般部から構成されている。土圧計測部には図3のように半径・接線各方向土圧を計測できる土圧計を左右各16箇所配し、一般部には模型管の表・裏両側に歪みゲージを円周方向に取り付け、曲げモーメントおよび軸力を計測できる構造としている。一方、内空変位については図4に示す治具を模型内部に設置する方法により、水平 (X)・鉛直 (Y) 各方向変位量を計測可能としているほか、左右の受圧部の間には受圧板と同じ長さを有する単純梁構造の縦桁を挿入して、中柱部に作用する荷重値を推定できる構造としている。

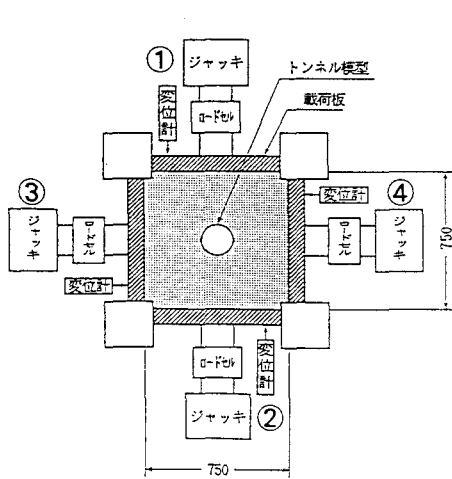


図1 土槽平面図 (単位mm)

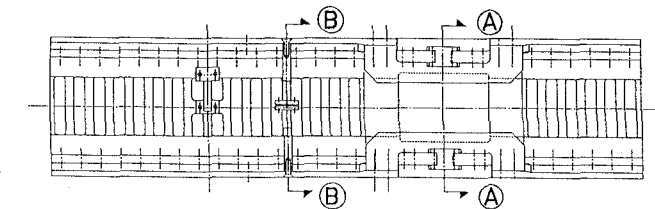


図2 トンネル模型縦断面図

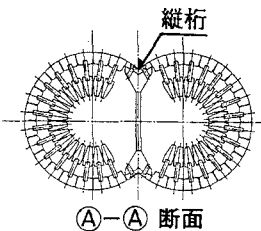


図3 土圧計測部断面図

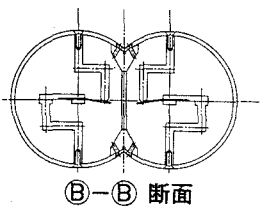


図4 内空変位計測断面図

2・2 地山材料と地山作成方法

本実験では地山材料に豊浦標準砂を用いた。また地山材料と土槽壁面の間に発生する摩擦を低減するために、土槽各壁面にシリコングリスを塗布した後、ラテックスメンブレンを貼り付け、トンネル模型を所定の位置に設置した後、自然落下法により地山を作成した。

2・3 実験ケースと実験パラメータ (表1)

実験ケースは地盤条件、載荷方法および側方土圧係数をパラメータとして合計 9 ケース設定した。なお両押しによる載荷方法は、トンネル下方より高压の被圧水が作用することを想定したケースとし、側方土圧係数の値は大きいほど軟弱地盤であると想定した。

2・4 実験結果 (図5～図8)

各実験ケース間の比較は、表1に記した各実験パラメータに着目して行った。また比較荷重レベルは、トンネル模型の天端荷重計測値が1.0kgf/cm<sup>2</sup>のステップに統一し、検討することとした。

表1 実験ケースと実験パラメータ

| 地 盤 条 件     |              | 密      |        | 緩      |
|-------------|--------------|--------|--------|--------|
| 載 荷 方 法     |              | 片 押 し  | 両 押 し  | 片 押 し  |
| 側 方 土 圧 係 数 | *天端方向<br>載 荷 | CASE 8 |        | CASE 9 |
|             | 0. 5         | CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 |
|             | 0. 7 5       | CASE 4 |        | CASE 5 |
|             | 1. 0         | CASE 6 |        | CASE 7 |

\*1 天端方向載荷：図1の②③④を固定し、①で載荷する方法

### (1) 側方土圧係数 $\lambda$ の相違による比較

#### <半径方向土圧>

$\lambda$  が大きいほどスプリングライン部の計測値が大きくなる傾向を示した。

#### <接線方向土圧>

$\lambda$  が大きいほど計測値が小さくなる傾向を示した。天端方向のみの载荷における  $\lambda$  が、載荷板の制御に用いているロードセルの計測値から推測して約 0.3 程度であることを考慮すると、この傾向は概ね妥当であると考えられる。

#### <曲げモーメント>

$\lambda$  が大きいほど計測値が小さくなる傾向を示した。

#### <軸力>

$\lambda$  が大きいほど計測値の最大と最小の差が小さくなり、 $\lambda=1.0$  では全周にわたり均等分布となった。

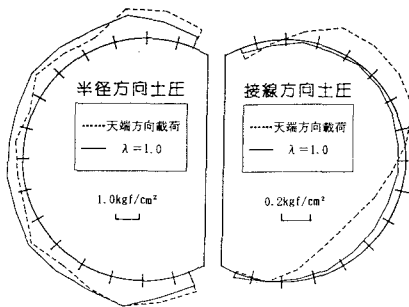


図5 土圧計測結果  
(天端荷重1.0kgf/cm²での比較)

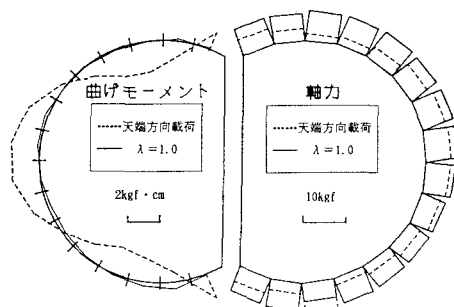


図6 断面力計測結果  
(天端荷重1.0kgf/cm²での比較)

### (2) 地盤条件の相違による比較 (図7)

#### <内空変位>

水平(X)方向の変位量については緩地盤の方が密地盤よりも僅かながら大きくなる傾向がみられたが、鉛直(Y)方向の変位量は中柱の拘束により、その差異はほとんど見られなかった。なおこれらの傾向は載荷方法の相違には依存していなかった。

### (3) 載荷方法の相違による比較 (図8)

#### <内空変位>

水平(X)方向の変位量については片押しの方が両押しよりも僅かながら大きくなる傾向がみられたが、鉛直(Y)方向の変位量は中柱の拘束により、その差異はほとんど見られなかった。なおこれらの傾向は地盤条件の相違には依存していなかった。

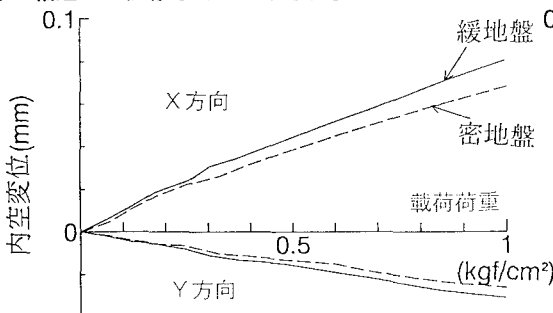


図7 地盤条件と内空変位の関係 ( $\lambda=0.5$ )

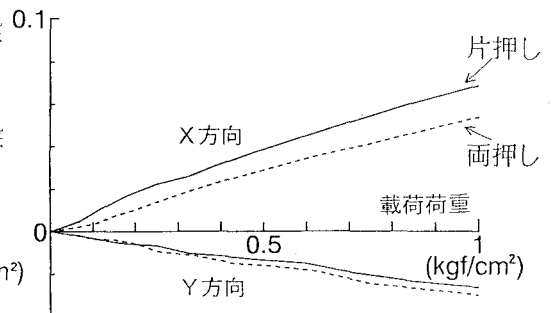


図8 載荷条件と内空変位の関係 (密地盤)

3. FEMによる数値シミュレーション

3.1 FEM解析の概要 (図9)

解析は二次元平面ひずみ問題として扱い、モデルの対称性を考慮して半断面で行った。要素構成は実験土槽を構成する載荷板およびトンネル模型をはり要素、地盤は平面ひずみ要素とした。また、はり要素と地盤要素の間にはジョイント要素を挿入することにより、載荷板近傍ではラテックスメンブレンによる摩擦力低減効果を、トンネル模型近傍では模型に作用する垂直・水平方向各土圧を表現した。さらに地盤材料の非線形性を考慮するためDuncan-Changモデルとし、載荷は実験における載荷方式をモデル化するために、載荷板中央部への点載荷とした。

| 載荷方法         | 天端方向載荷<br>(片押し)      |
|--------------|----------------------|
| 載荷板の<br>境界条件 | 点載荷により①は可動<br>②と④は固定 |

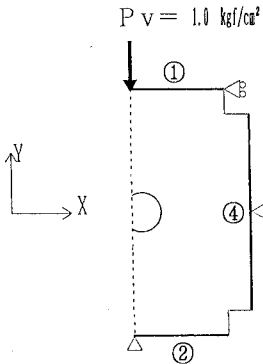


図9 FEM解析概要

表2 入力物性値

|               |        |                                                                                                                                                                                                  |       |           |        |     |
|---------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|--------|-----|
| 地<br>山        | 初期解析時  | ・ $\rho = 0.01 \text{ g/cm}^3$ (水の1/100) 初期解析時には、非線形要素を入れない状態で弾性解析を行う。<br>・ $E = 100.0 \text{ kgf/cm}^2$<br>・ $\nu = 0.33$<br>・ $\phi = 40^\circ$<br>・ $C = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ (土が破壊しないようにした) |       |           |        |     |
|               | 非線形解析時 | ・ $\rho = 0.01 \text{ g/cm}^3$<br>・ $\phi = 40^\circ$<br>・ $C = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$<br>・ Duncan-Changモデルの係数                                                                                    |       |           |        |     |
|               |        | K (K)                                                                                                                                                                                            | n (n) | $\nu$ (G) | $\phi$ | Rf  |
|               |        | 318.0                                                                                                                                                                                            | 0.692 | 0.222     | 40°    | 0.0 |
| ビ<br>ーム<br>要素 | トンネル管  | ・ $E = 7.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$<br>・ $A = 0.3 \text{ cm}^2$<br>・ $I = 0.00225 \text{ cm}^4$                                                                                             |       |           |        |     |
|               | 載荷板    | ・ $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ (補強リブの影響を考慮して厚さ10.0cmの鋼板相当とした)<br>・ $A = 10.0 \text{ cm}^2$<br>・ $I = 83.3 \text{ cm}^4$                                                                |       |           |        |     |
|               | 中 柱    | ・ $E = 7.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$<br>・ $A = 0.0758 \text{ cm}^2$<br>・ $I = 0.000774 \text{ cm}^4$                                                                                         |       |           |        |     |

3.2 入力物性値 (表2)

地山の物性値については、土槽内にトンネル模型を設置しない状態で行った載荷試験から得られたロードセル計測値と載荷板変位量との関係を別途考察し決定した値を用いた。また解析は天端方向載荷・密地盤の場合 (CASE 8) について行い、検討を加えることとした。

3.3 解析結果 (図10～図12)

<半径方向土圧>

解析値と実験値との間に差はあるが、天端付近の値が大きく、スプリングライン付近の値が小さくなる傾向はおおよそ表現できたと思われる。

<接線方向土圧>

解析値に若干のばらつきはあるものの、解析値も実験値もゼロクロスする箇所は概ね等しく、全体的に値の大きさも適切に表現できたと思われる。

<曲げモーメント>

解析値も実験値もゼロクロスする箇所は概ね等しいが、全体的に解析値が実験値のほぼ2倍の大きさになった。

<軸力>

解析値も実験値もスプリングライン付近を中心にほぼ対称形をなしているが、両者の値の差は著しく大きくなった。

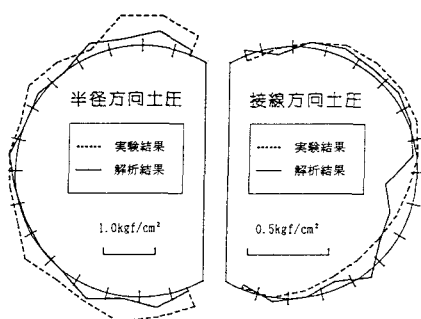


図10 土圧解析結果 (CASE 8)  
(天端荷重1.0kgf/cm²での比較)

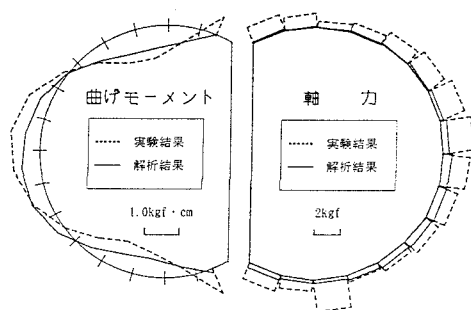


図11 断面力解析結果 (CASE 8)  
(天端荷重1.0kgf/cm²での比較)

#### <内空変位>

実験結果ではどの実験パラメータに対しても、水平(X)方向変位量の方が鉛直(Y)方向変位量より大きくなる傾向がみられたが、解析では水平・鉛直両方向とも増加傾向が概ね等しくなり、実験結果を正確に表現できなかった。

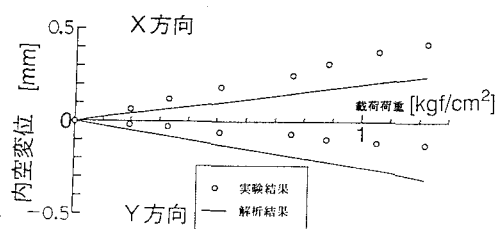


図12 内空変位量解析結果 (CASE 8)

### 4. 全周ばねモデルによる数値シミュレーション

#### 4.1 全周ばねモデル解析の概要 (図13)

全周ばねモデルによる解析は有限要素法のような連続体解析に比して、実験状況を忠実に再現することが困難ではあるが、地盤の受働的な土圧作用を比較的簡便に表現可能であるほか、今後慣用計算法に代わる設計手法としてさらに適用する機会が増えると考えられ、解析を行うこととした。

解析は断面力の検討に主眼を置き、モデルの対称性を考慮して半断面で行うこととした。またトンネル模型をはり、地盤をばねとしたほか、地盤ばねは垂直・せん断の両方向を考慮した。載荷は油圧ジャッキによる載荷荷重をはりの節点荷重に置き換えて行い、入力荷重レベルは傾向の把握を行い易くするために、実験時の最終ステップでのロードセル計測荷重値を入力した。

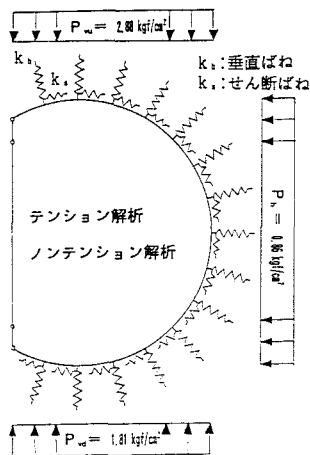


図13 全周ばねモデル解析概要

表3 入力物性値

| 項目             | 種別 | 物性値                                                                                                         |
|----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| トンネル模型<br>(円周) | はり | $E = 7.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$<br>$A = 0.3 \text{ cm}^2$<br>$I = 0.00225 \text{ cm}^4$ (単位幅当たり)     |
|                | 中柱 | $E = 7.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$<br>$A = 0.0758 \text{ cm}^2$<br>$I = 0.000774 \text{ cm}^4$ (単位幅当たり) |
| 地 山            | ばね | 垂直ばね $\cdot k_v^{*1} = 28.46 \text{ kgf/cm}^2$<br>せん断ばね $\cdot k_s^{*2} = 9.49 \text{ kgf/cm}^2$            |

\*1 乾燥密度  $\gamma_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$  相当

\*2  $k_s = k_v / 3$

#### 4.2 入力物性値および地盤ばね定数（表3）

トンネル模型の入力物性値は模型の実寸法から算定し、地盤ばね定数は道路橋示方書に掲載されている地盤反力算定手法を参考に決定した。なお解析は天端方向载荷の密地盤の場合について、引張ばね力を有効とするテンション解析と無効とするノンテンション解析を各々行い、両者の差異についても検討を加えることとした。

#### 4.3 解析結果（図14～図15）

##### <曲げモーメント>

テンション解析結果とノンテンション解析結果を比較すると、ノンテンション解析結果の方が分布形状、解析値とも良く実験結果を表現することができた。

##### <軸力>

曲げモーメントと同様、ノンテンション解析結果の方がテンション解析結果に比して分布形状、解析値とも良く実験結果を表現することができた。

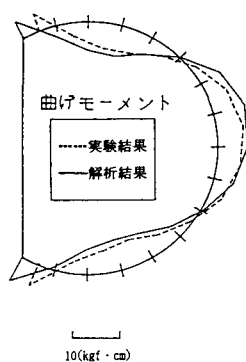


図14 断面力 ノンテンション解析結果（CASE 8）  
（天端荷重2.9kgf/cm<sup>2</sup>での比較）

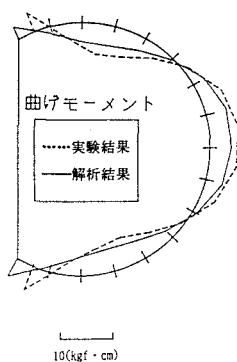
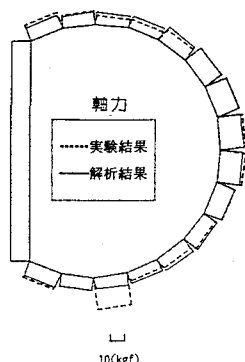
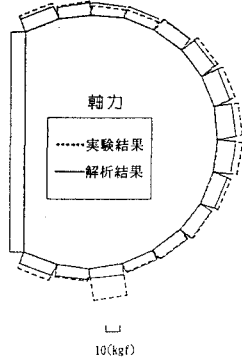


図15 断面力 テンション解析結果（CASE 8）  
（天端荷重2.9kgf/cm<sup>2</sup>での比較）



#### 5. 結論

模型载荷実験および数値シミュレーションにより得られた結論を以下に示す。

- ・実験土槽全体をモデル化したFEM解析により、実験の傾向を概ね把握できることを示した。
- ・トンネル模型に発生する断面力については、全周ばねモデルによる解析手法がFEM解析に比して、実験結果を簡便かつ正確に表現できることを示した。
- ・トンネルの変形に伴い発生する地盤反力をスプリングライン部付近で把握できると思われたが、本実験ではトンネル周辺の作成地山が非常に緩く、それに伴い地盤反力係数も過少となり明確に把握することができなかった。

#### 6. 参考文献

- 1) 米島賢二・新井 泰ほか：小型シールドトンネル模型载荷実験（その1），第48回土木学会年次学術講演会，PP.152～153