

## 地下鉄 4 線超近接移行シールドの設計について DESIGNING OF VERY CLOSELY LOCATED FOUR SHIELD TUNNELS

浅賀 博\*, 井戸 澄夫\*, 古川 衛\*, 近藤 哲也\*\*, 松下 惇次\*\*  
Hiroshi ASAGA, Sumio IDO, Mamoru FURUKAWA, Tetsuya KONDO and Junji MATSUSHITA

In this paper, the authors studied design methods of four subway shield tunnels very closely located.

Two different methods of analysis are conducted: One is a conventional tunnel analysis considering total overburden loads and the other is an interactive analysis method where firstly an elast-plastic FEM analysis is conducted stepwisely for 11 step construction of four tunnels and then a frame structure analysis with springs is conducted considering the loads calculated in the FEM analysis.

Both results are compared and evaluated so as to get proper results.

Keyword: very closely located, shield tunnel, design of segment, elast-plastic FEM

### 1、まえがき

京都市高速鉄道東西線（図-1参照、醍醐起点二条終点、延長12.7<sup>km</sup>）の山科～三条京阪間は、京阪電鉄京津線と競合するため、京津線御陵～三条間は廃線となり、御陵駅で東西線に乗り入れる。このため御陵駅の東側は4線区間となる。

東西線山科～御陵間の御陵東工区（延長513<sup>m</sup>）は、路線の道路幅員が狭く、路上占用による路面交通に与える影響や工事用地確保の困難さ等から、地下鉄東西線2線と京阪電鉄京津線2線ともに、シールド工法を採用した。

単線4線シールド（シールド外径 $D = 5,700^{\text{mm}}$ ）の施工は、図-2のように、①号シールドから④号シールドまで順次上下二段で発進し、途中にて②、③号シールドが上下左右に入れ替り、上下二段で到達する。その近接度は、発進部において上下0.8<sup>m</sup> 左右2.5<sup>m</sup>、移行部において約1.0<sup>m</sup> ～ 2.0<sup>m</sup> である。

この論文は、上述のような4線超近接移行シールドの覆工について、後続シールドが先行トンネルに与える影響と相互干渉を考慮した設計を、慣用計算法で構造部材を設定し、トンネル横断面、軸方向ともに、FEMと"はり-バネモデル"解析を連動させた計算法で照査し、考察を行ったものである。

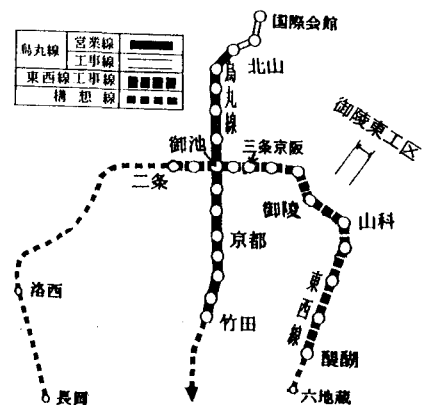


図-1 京都市高速鉄道計画路線図

※ 正会員 京都市交通局高速鉄道本部

※※ 正会員 中央復建コンサルタンツ(株)

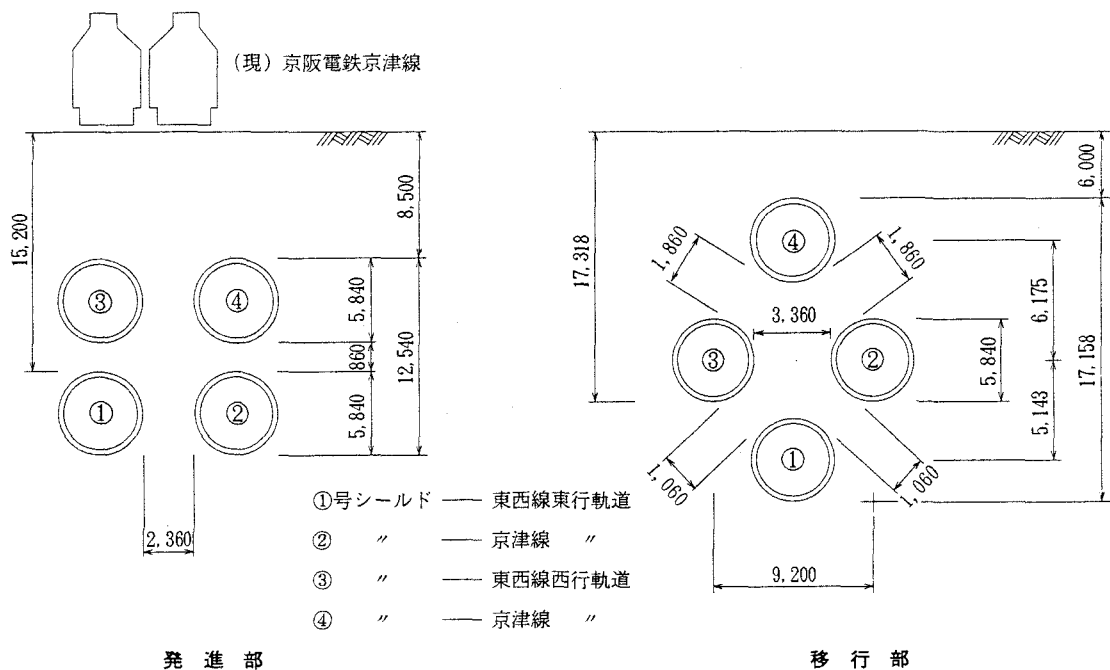


図-2 4線シールド横断面図

## 2、土質と地下水

4線シールド施工部分の土質は、発進部付近に風化した緑色岩あるいは頁岩（圧縮強度 200～400 kgf/cm<sup>2</sup>）があるものの、図-3 土質断面図に示すように、全般的には粘着力が大きく（3～6 tf/m<sup>2</sup>）、N値30以上で細粒分を多く含む自立性の高い砂礫質土である。

地下水位は、GL-2.0<sup>m</sup>付近にあり、透水係数は、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$  cm/sec 程度である。

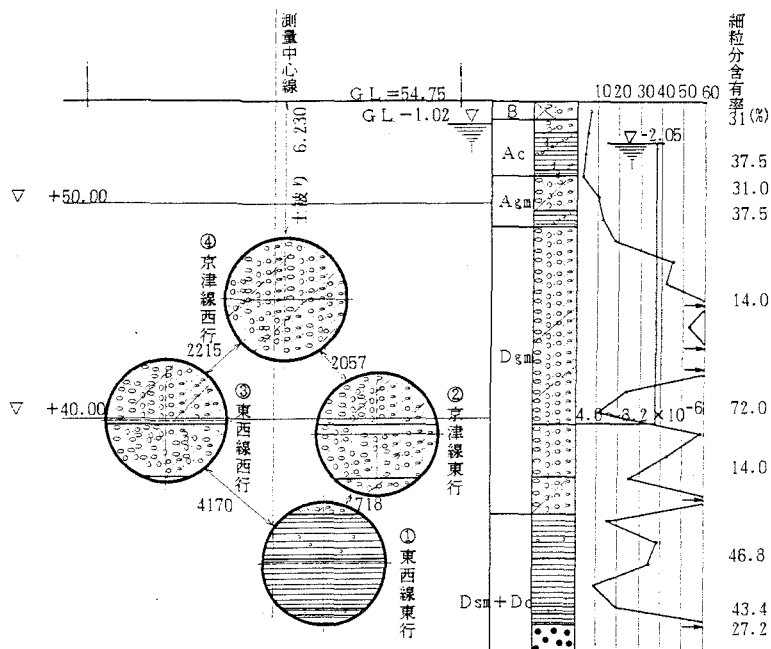


図-3 移行部の土質断面図

### 3、設計手法

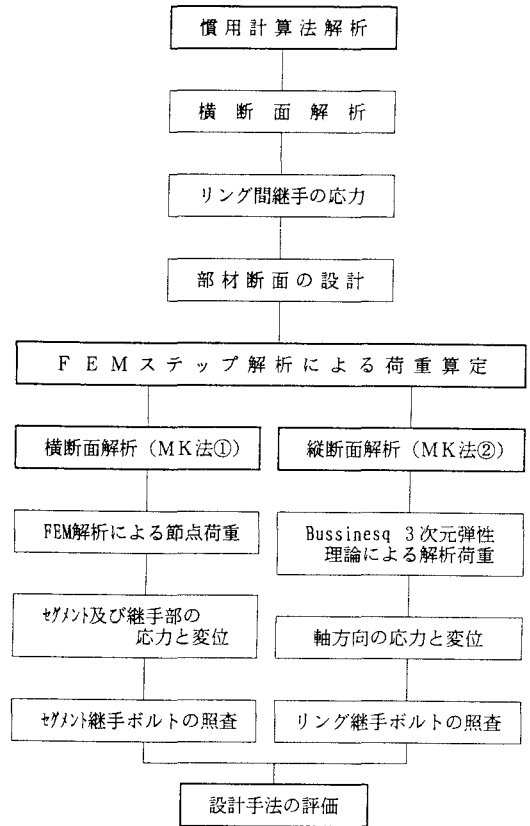
4本の鉄道単線トンネルがシールド工法により近接して併設するのは、国内では初めての事例であり、シールド掘進によるトンネル間の相互干渉や地表面への影響についての詳細が不明である。そのため、解析によって影響をある程度予測した上で、設計方法を検討する事が肝要であり、以下の手順によって考え方を検討した。

まず、従来の慣用計算法を用い、全土被荷重を採り、地盤反力係数を低減し、かつ、シールド掘進時の偏圧を考慮してセグメントと継手を設計する。

次に、慣用計算法では考慮できないセグメント継手の挙動を捕らえるため、セグメント継手を回転バネ、リング間継手をせん断バネにモデル化したセグメントリングの解析（MK法①）とトンネル軸方向の解析（MK法②）を行い、その安全性を照査する。

その荷重は、二次元の弾塑性FEMプログラムで、1号シールドから4号シールドまでのステップ解析を行い、セグメントリングに作用する荷重を算定する。

解析手法のフローチャートを図-4に示す。



### 4、慣用計算法による設計

#### 4・1 セグメントの種類と断面力の算定

RC平板セグメントおよびダクタイルコルゲートセグメントを使用し、ボルト継手とする。断面力の算定にあたっては、剛性一様リングとみなし、曲げ剛性の有効率 $\eta=0.8$ 、曲げモーメント割増率 $\xi=0.2$ とする。

#### 4・2 荷重

鉛直土圧は全土被荷重を採り、一般荷重の主荷重以外に、上載荷重として路面荷重 $W=1.0\text{ tf/m}^2$ とする。

#### 4・3 併設トンネルの影響

離隔 $d=2.0^M$ 以内について、近接トンネルの影響を考慮し、水平地盤反力係数（砂質土 $K=3.0\text{ kgf/cm}^2$ 、粘性土 $K=1.0\text{ kgf/cm}^2$ ）を70%に低減し評価する。

#### 4・4 後続シールドの影響

後続シールドの推進荷重または裏込注入圧による施工時荷重は、裏込注入圧による偏荷重を $P=1.0\text{ kgf/cm}^2$ とみなし、その応力伝播（Bussinesqの二次元の式）は図-5から、 $\sigma=0.30\text{ kgf/cm}^2$ （離隔 $1.0\text{m}$ ）と推定し、先行シールドに偏荷重として作用させる。

また、トンネル軸方向力としては、図-6から $\sigma=0.33\text{ kgf/cm}^2$ と推定し、軸方向張力として $T=30\text{ tf/m}$ を作用させる。

図-4 解析のフローチャート

#### 4・5 セグメントの材質と形状

①号シールドから④号シールドまで各トンネルの応力計算を行った。

その結果は、最深の①号シールドがダクタイルコルゲートセグメント ( $h_0=25\text{cm}$ , セグメント継手ボルト4-M27)、②号シールドと③号シールドがダクタイルセグメントとRC平板セグメント ( $h_0=25\text{cm}$ , セグメント継手ボルト4-M24)の併用、④号シールドがRC平板セグメントとした。

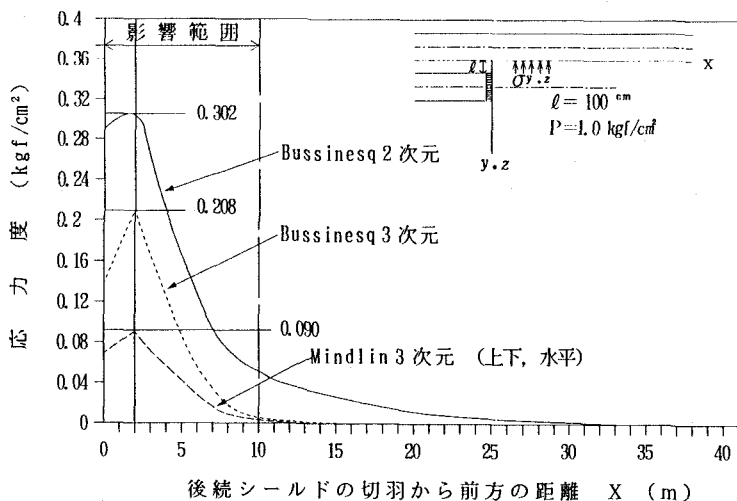


図-5 先行トンネルに作用するトンネル軸直角方向応力度

#### 5、FEMによる荷重算定と"はり-バネモデル"解析

先行シールドトンネルの挙動の検討においては、まず、FEMのステップ解析により全荷重を求め、断面力の算定は、先行トンネルの継手部に変形が生じることが想定されるため、本解析ではセグメント継手を回転バネとした"はり-バネモデル"を採用した。トンネルの縦断方向の解析も、リング継手をせん断バネとし、先行トンネルの軸方向を"はり-バネモデル"にモデル化した。

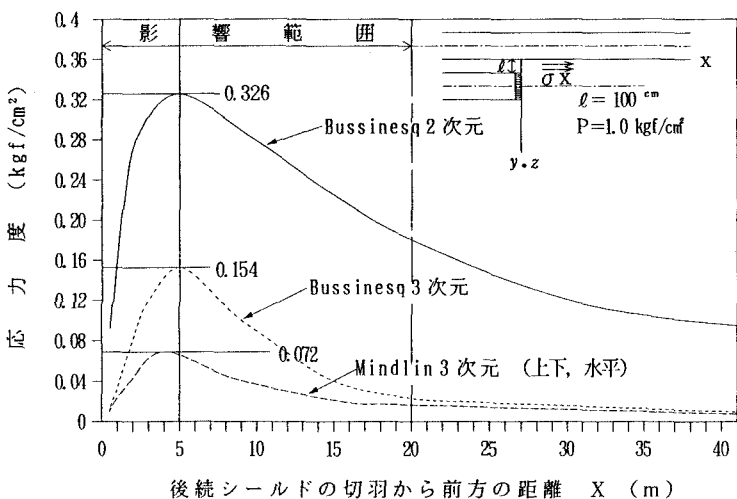


図-6 先行トンネルに作用するトンネル軸方向応力度

FEMにより算定した荷重は、各々のセグメント位置を構成する32個の固定節点の支点反力として抽出され、符号を読みかえて節点荷重として算定する。"はり-バネモデル"に載荷する際にはモデル化の都合からさらに細分化した等価な節点荷重に換算する。

##### 5・1 解析モデルと解析ステップ

4本のシールド相互の位置関係を考慮して、図-2の発進部と移行部の2断面を解析の対象とし、土被り、シールド間の隔離距離は代表値とし、4本のシールドの位置関係は単純にしてモデル化した。各施工段階を図-7の解析ステップで表現する。なお、移行部も同様である。

##### 5・2 横断方向の解析条件

先行トンネルに作用させる荷重は、後続シールドの応力解放 ( $\alpha = 10\%$ ) に伴う偏土圧および後続シールドの掘進荷重または裏込注入圧に相当する施工時荷重 ( $p = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ) の2種類とする。また、これらの荷重は、4本シールドの各施工段階を追って表現した二次元FEMにより、常時の土圧相当荷重と合成した形で算出する。

当該地盤が乱されない場合に期待されるセグメント設計における地盤反力係数の値は、 $k = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度と推定される。しかし、実際には先行トンネルの施工により周辺地盤が乱されるため、その評価としては、乱されない地盤の1/3に低減し、 $k = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

"はり-バネモデル"解析のセグメント継手の回転バネ定数は、正曲げ  $5.32 \times 10^7 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ ，負曲げ  $-1.46 \times 10^7 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$  とした。

### 5・3 セグメントおよびセグメントボルトの応力度照査

応力度の照査は、最も厳しい条件を有する①号シールドを主対象とし、セグメント主断面に発生する変位、断面力、応力度は、最大値および各施工段階の変動値に着目する。

また、セグメントボルトの引張応力度は、解析モデルにおいて評価した継手位置に生ずる曲げモーメントと、セグメントリングに生じる最大曲げモーメントに0.6を乗じた値とを比較し、その大きい方で照査する。

### 5・4 縦断方向の解析条件

解析モデルは、最も厳しい条件となる上下近接施工、純離隔距離1.0 mとして行う。

荷重は、横断方向の解析から得られる荷重(二次元FEMより算出)と後続シールドの施工時荷重 ( $p = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ) を応力伝播の弾性理論解(Bussinesq 3次元)から求めた荷重を用いて評価する。そこで後続シールドの施工時荷重は、先行トンネルの軸方向および軸直角方向に分別し、Bussinesq の式からそれぞれ、 $P_{\text{axis}} = 14 \text{ tf/m}$ ， $P_{\text{cross}} = 12 \text{ tf/m}$ とする。

また、後続シールドの応力解放による偏土圧(軸直角方向力)はFEMの結果から、 $P_{\text{ex}} = 5.0 \text{ tf/m}$ とする。

周辺地盤の乱れの評価は、横断方向の挙動解析と同様とし、地盤反力係数を  $k = 3.0 / 3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

"はり-バネモデル"解析のセグメントリングの諸定数は、曲げ剛性  $2.47 \times 10^{14} \text{ kgf/cm}^2$ ，軸剛性  $6.66 \times 10^9 \text{ kg}$ ，回転バネ定数  $1.54 \times 10^{11} \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ ，軸方向バネ定数  $9.17 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$ とした。

### 5・5 先行トンネルの横断方向の影響挙動解析

発進部断面と移行部断面について、①号シールドから③号シールドまでの挙動解析を行った。①号シールドについて、表-1に移行部断面の解析結果(応力と変位)を示す。なお、同表の( )内数値が、地盤反

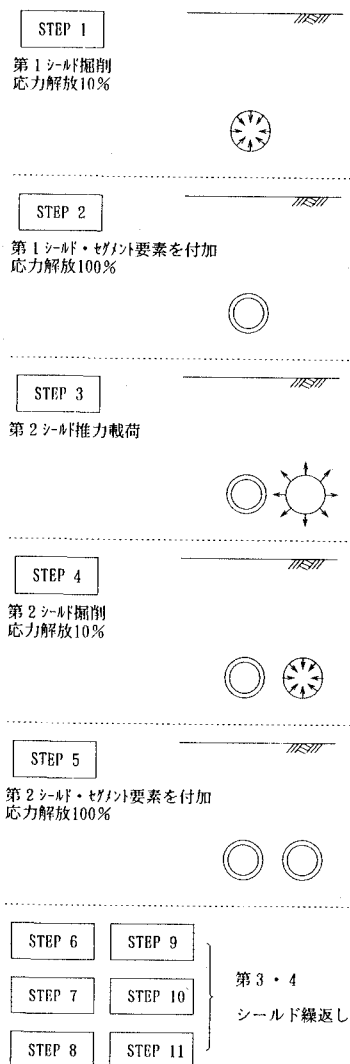
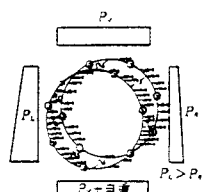


図-7 発進部の解析ステップ

表-1 第1シールドセグメントリングの断面力・変位(移行部)



| 施工段階 | 第1シールドセグメント完了<br>STEP 2 | 第2シールドの掘進力<br>STEP 3 | 第2シールドの掘削力<br>STEP 4 | 第3シールドの掘進力<br>STEP 5 | 第3シールドの掘削力<br>STEP 7 |
|------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|      | ①                       | ① ②                  | ①                    | ③ ② ①                | ② ①                  |

|         |            | 第1シールドセグメント完了<br>STEP 2 | 第2シールドの掘進力<br>STEP 3          | 第2シールドの掘削力<br>STEP 4           | 第3シールドの掘進力<br>STEP 5           | 第3シールドの掘削力<br>STEP 7          |
|---------|------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 曲げモーメント | M1         | 12.1 (22.8)             | 8.9 (19.2)                    | 10.6 (21.4)                    | 11.3 (22.4)                    | 11.3 (22.4)                   |
|         | M2         | -10.8 (-14.6)           | -11.7 (-17.1)                 | -11.3 (-16.1)                  | -10.9 (-14.5)                  | -11.3 (-15.6)                 |
|         | M3         | 17.0 (29.9)             | 17.9 (31.6)                   | 17.6 (31.6)                    | 17.5 (31.0)                    | 17.8 (31.6)                   |
|         | M4         | -9.8 (-25.6)            | -9.3 (-24.8)                  | -9.6 (-25.8)                   | -11.1 (-27.8)                  | -10.5 (-27.0)                 |
| 軸力      | N1         | 67.8 (59.6)             | 70.1 (62.3)                   | 70.0 (61.9)                    | 71.2 (62.9)                    | 71.0 (62.6)                   |
|         | N2         | 102.5 (100.4)           | 103.4 (100.3)                 | 103.3 (101.5)                  | 102.7 (100.4)                  | 103.3 (101.3)                 |
|         | N3         | 83.9 (73.1)             | 83.0 (71.5)                   | 83.6 (71.8)                    | 83.5 (72.1)                    | 83.6 (72.1)                   |
|         | N4         | 101.3 (109.1)           | 100.6 (109.8)                 | 101.5 (111.1)                  | 104.0 (112.1)                  | 102.3 (110.5)                 |
| 変位      | $\delta 1$ | 7.6 (14.6)              | 増減<br>(-0.1)<br>7.5 (14.7)    | 増減<br>(-0.1)<br>7.4 (14.2)     | 増減<br>(0.3)<br>7.7 (15.3)      | 増減<br>(-0.2)<br>7.5 (14.6)    |
|         | $\delta 3$ | 7.9 (14.6)              | 0.1<br>(0.3)<br>7.7 (14.9)    | 0.3<br>(1.1)<br>8.0 (16.0)     | -0.2<br>(-1.1)<br>7.8 (14.9)   | 0.4<br>(1.1)<br>8.2 (16.0)    |
|         | $\delta 2$ | -5.5 (-12.6)            | -0.2<br>(0.4)<br>-5.7 (-12.2) | 0.0<br>(-0.8)<br>-5.7 (-12.8)  | -0.1<br>(-0.3)<br>-5.8 (-13.1) | 0.0<br>(0.0)<br>-5.8 (-13.1)  |
|         | $\delta 4$ | -5.8 (-12.6)            | 0.0<br>(-1.0)<br>-5.8 (-13.6) | -0.1<br>(-0.1)<br>-5.9 (-13.7) | -0.3<br>(0.7)<br>-6.2 (-13.0)  | 0.0<br>(-0.8)<br>-6.2 (-13.6) |

力係数  $k = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合を示したものである。

変位に着目すれば、後続シールドの応力解放と掘進圧が作用すれば、発進部 step6で2.4mmの増、step7で2.8mmの減、移行部 step6で1.1mmの増、step7で0.7mmの減の変形が生じている。

#### 5・6 先行トンネルの縦断方向の影響挙動解析

先行の1号シールドの直上に後続シールドが、離隔距離1.0 mで上下近接した場合をモデル化して解析した。最大変位量は、後続シールドの掘進に伴い  $\delta = -1.0\text{mm}$  の浮上りが、切羽前面で  $\delta = 1.6\text{mm}$  の沈下が生じている。その解析モデルと変位、応力を図-8に示す。

### 6、解析結果の考察

#### 6・1 横断面のFEMを主体とした荷重の算定

FEMによる荷重の実状を把握するために、図-9は節点荷重を分布荷重に換算して図化したもので、①号シールドの第2ステップ(①号シールドセグメント完了時)の荷重を、当該断面において慣用計算法で用いている荷重と合わせて整理したものである。

慣用計算法における鉛直土圧の考え方、側方土圧係数の評価、FEMにおける物性値の設定、応力解放率等の工学的議論は別にして、荷重の大小だけについていえば、"はり-バネモデル"でも地盤反力の発生により鉛直荷重は下方からの荷重と等しくなるので、結局ほぼ同等の荷重で慣用計算法と"はり-バネモデル"で解くことになる。

#### 6・2 横断面の設計手法の評価

計算手法としての慣用計算法と"はり-バネモデル"の関連については、前項で述べたように、双方の荷

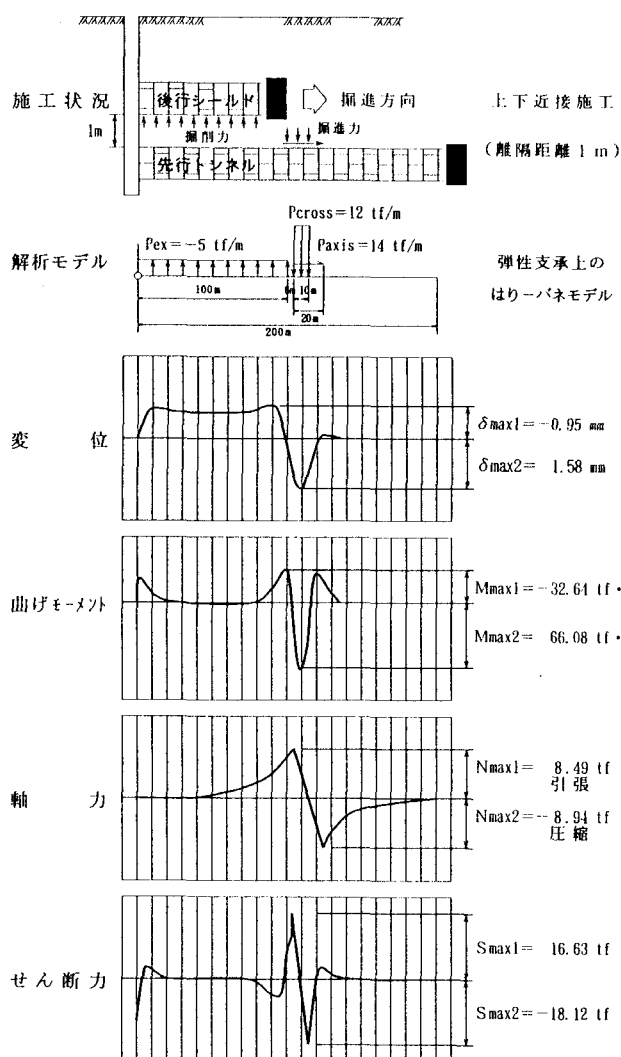


図-8 縦断方向の解析モデルと応力

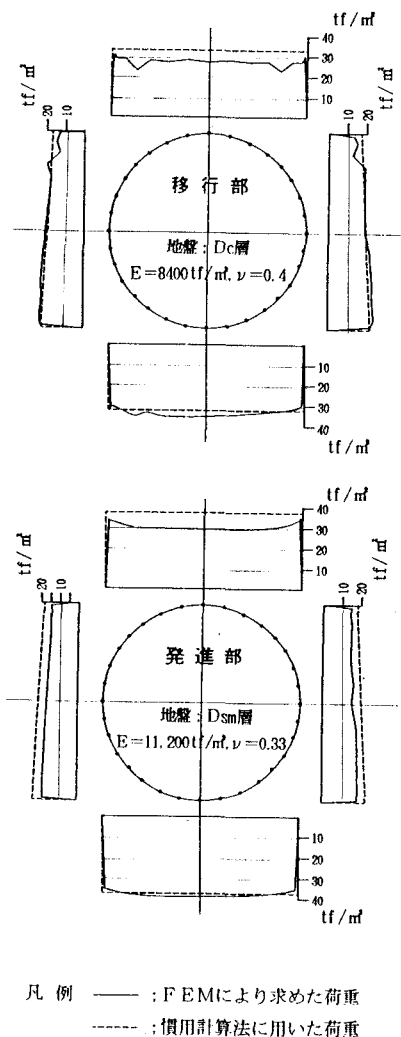


図-9 FEMにより求めた荷重と慣用計算法に用いた荷重

重はよく一致しており、同等の荷重を2種の計算方法で解いたことになる。

計算結果は慣用計算法が大きくなっており、応力的に安全側をとっているといえる。"はりーバネモデル"の荷重はFEMによって各施工段階の各種荷重を拾っているわけであるが、移行部ステップ2の"はりーバネモデル"の計算値が、慣用計算法の計算結果を少し上回っただけで、他は慣用計算法の計算結果が大きくなっている。

計算手法自体が相対的に安全側をとっているという前提に立てば、慣用計算法の計算結果と"はりーバネモデル"の計算結果が近似しているケースでは、FEMで算定した荷重が厳しい条件のものも拾っているということであり、各種荷重を評価したなかで妥当な設計となっていると考えられる。

以上のように、影響解析の手法として、FEMと"はりーバネモデル"を連動させた解析手法は、妥当な方法と思われる。

### 6・3 縦断方向の検討

掘進力または裏込め注入圧の影響についての荷重の評価は、セグメント横断面の照査で荷重を算定したのと同じFEMおよびBussinesq, Mindlin等の土中応力伝播の理論による解を相互に比較することにより行った。なお、FEMによる荷重とは、掘進力を載荷するステップとその前のステップ間の全節点荷重の差分の総和を意味する。おおよそ妥当と考えられる値として、Bussinesqの3次元の解を軸直角方向荷重 $P_{cross}$ として採用した。なお、軸方向力 $P_{axis}$ もBussinesqの3次元の解とした。

テールボイドの応力解放に関しては、もっぱらFEMによる荷重を採用しており、後続シールドの掘削が生じる（応力解放10%）ステップとその前のステップ間の全節点荷重差分の総和として算定している。考え方は前記と同様である。

以上のような条件で計算した結果、最大変位は $\delta_{max} = 1.6\text{mm}$ となり、トンネル軸方向の相対変位でみると軸方向約10m区間でこの値が生じており、断面力は $M_{max} = 66.1\text{tfm}$ 、 $N_{max}$ （引張） $= 8.5\text{tf}$ 、 $S_{max} = 18.1\text{tf}$ であり、応力度でみれば、縦リブ $\sigma_{max} = 31\text{kgf/cm}^2$ 、リング継ぎボルトが $\sigma_{max} = 270\text{kgf/cm}^2$ 、 $\tau_{max} = 123\text{kgf/cm}^2$ と小さな値となった。

## 7、おわりに

一般に、水圧にも影響するが、慣用計算法の設計は、セグメント周辺の地盤条件がよい、すなわち、期待できる地盤反力が十分に大きい場合にはやや過大設計になり、地盤条件が悪い、すなわち、期待できる地盤反力が小さい場合には過小設計になる傾向があると言われている。

当該地盤は良好であるものの、4本のシールドが近接し相互に影響する状況を、解析に反映しているかどうか明らかでない。そこで、慣用計算法による設計結果の照査を目的として、FEM解析で求めた荷重に対する"はり-バネモデル"解析を行った。

今回の慣用計算法と"はり-バネモデル"の計算結果を比較すると、双方の荷重はよく一致しており、応力は相対的に慣用計算法の方が大きく、応力的に安全性が照査された。

しかし、解析に用いた地山の物性値、解析条件、相互干渉の影響度等は、不明な点が多く、今後、実際の挙動を計測し、フィードバック解析を行い、解析手法の妥当性を実測値との比較検討により検証したい。

なお、当検討は、京都市高速鉄道東西線御陵東工区シールド工法検討委員会の指導を得た。委員ならび関係者各位に謝意を表する次第である。

## 8、参考文献

- 1) 土木学会；トンネル標準示方書（シールド編）・同解説，昭和61年5月
- 2) 日本鉄道施設協会；シールドトンネルの設計施工指針，昭和58年8月
- 3) 木村 孟；土の応力伝播，土木工学基礎叢書5，鹿島出版会
- 4) 村上博智，小泉 淳；シールドセグメントリングの耐荷機構について，土木学会論文報告集，No.272, 1978、4、
- 5) 小泉 淳，村上博智，西野建三；シールドトンネルの軸方向特性のモデル化，土木学会論文報告集，No.394, 1988、6、
- 6) 木村定雄，矢田 敬，小泉 淳；併設して施工されるシールドトンネルの影響解析，トンネル工学研究発表会論文報告集，No.1, 1991、12、
- 7) 高速鉄道東西線御陵東工区シールドトンネルの設計・施工計画に関する検討報告書；京都市交通局高速鉄道本部，1993、3、
- 8) 塚本浩一；四ツ目シールドトンネルの計画，トンネルと地下，Vol 24, No.10, 1993、10、