

大林組技術研究所 正員 斉 藤 二 郎
同 同 内 藤 和 章
同 同 ○ 藤 原 紀 夫

1. まえがき

シールドセグメントに作用する土圧については不明な点が多く、実際にセグメントを設計する場合には設計者の判断にまかされているのが現状である。したがって、設計土圧は実際に作用する土圧よりも過大に評価され、セグメントは不経済なものになっていると思われる。一方、シールド工事においてセグメントの占める工事費は総工事費の30～40%といわれている。このような事から筆者等はセグメントに作用する真の土圧を明らかにし、設計を合理化しようとして模型実験および現場測定を行なってきた。^{1) 2)}ここでは粘性土地盤を対象とする模型実験結果についてのみ報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験槽の一般図を（図-1）に示す。高さ：1,400mm、幅：2,500mm、奥行き：315mmの内法寸法をもった鋼鉄板製の箱である。前面は厚さ15mmの透明アクリル板で出来ており、中央下部に $\phi 320$ mmの孔をあけてある。（図-2）はこの孔の中における模型セグメント組立ての詳細図である。模型セグメントを分割した所に鉛直、水平方向の合土圧を測定するためにロードセル（8個）を取付けてある。地中の沈下を測定するために粘土を詰めながら前面のアクリル板と試料土の間に20mm格子に地中沈下板を埋め込んだ。地表面には20mm間隔で地表面沈下を測定するためのダイヤルゲージを取り付けた。またセグメントの変位を測定するために上下左右に1個ずつダイヤルゲージを取り付けた。

2.2 試料土の特性

実験に使用した試料土は東京都朝霞浄水場で発生した粘土である。この粘土を実験の前に土槽の中で均一な粘土となるように練り返してから実験槽の中に詰めた。粘土性であるので実験前と実験終了後とはその特性が異なる。（表-1）はこの粘土の特性を表にまとめたものである。

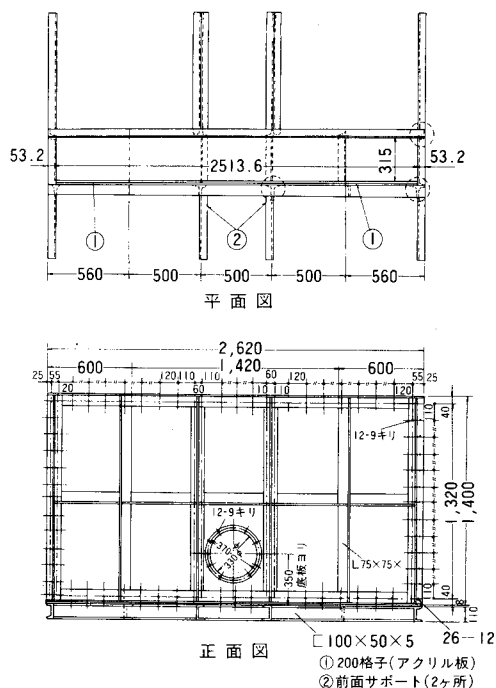


図-1 実験槽

2.3 実験方法

粘土を練り返して実験槽に詰め、所定の土被りま
で詰め終ると上載荷重（土被り30cm相当）をかけて
2日間放置して強制圧密させる。これは試料土をで
きるだけ自然堆積土に近ずけるためである。その後、
上載荷重を取り除き土被りを調整して、ダイヤルゲ
ージ等をセットし、鋼製外筒を引き抜いて測定を開
始する。実験は土被りがD, 2D, 3D, 3D+ 載荷÷4D（D
：セグメント外径）の場合について行ない、その測定
期間は20日間とした。測定項目は次の通りであつた。
(1)セグメントに作用する鉛直、水平合土圧（ロード
セル：8個）、(2)地表面の沈下（ダイヤルゲージ：
13個）、(3)地中の沈下（地中沈下板： $n \times 13$ 個）、
(4)セグメントの変形（ダイヤルゲージ：4個）

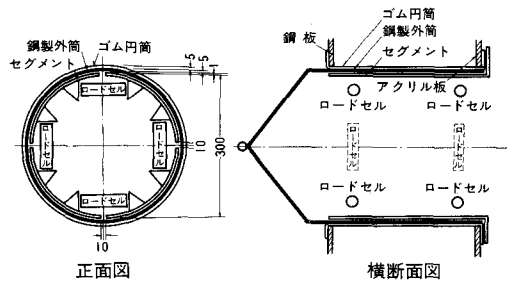


図-2 模型セグメント配置図

名 称	実 験 前	実 験 終 了 後
粘着力(室内ベーン)(k_g/cm^2)	0.051	0.280
含 水 比 (%)	268~200	237~190
単位体積重量 (q/cm^3)	1.24~1.25	1.25~1.26

表-1 試料土の特性

3 実験結果とその解析

3.1 セグメントに作用する土圧

模型セグメントにはさんだ8個のロードセルによつて測定
した合土圧を、(図-3)に示すような一般の設計に用いられ
ている土圧分布に直すと次式のようになる。

$$P_1 = \frac{1}{D \cdot L} (L_{3,4} + L_{7,8} - 2W) \dots\dots\dots (1)$$

$$P_2 = \frac{1}{D \cdot L} (L_{3,4} + L_{7,8} + 2W) \dots\dots\dots (2)$$

$$P_3 = \frac{2}{D \cdot L} (2 \times L_{1,2} - L_{5,6}) \dots\dots\dots (3)$$

$$P_4 = \frac{2}{D \cdot L} (2 \times L_{5,6} - L_{1,2}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、D：模型セグメントの外径、L：模型セグメント
の長さ、 $L_{1,2}$ ：ロードセル①と②の測定値の和、 $L_{3,4}$ 、 $L_{5,6}$ 、
 $L_{7,8}$ ： $L_{1,2}$ に準ずる、W：模型セグメントピース1個の重量。

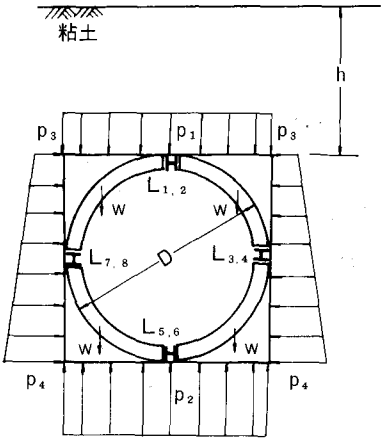


図-3 土圧計算図

(図-4) , -5) , -6) , -7) は P_1 , P_2 , P_3 , P_4 の測定の測定結果を示したものである。 P_1 , P_2 ,
 P_3 , P_4 ともに土被りが大きくなるにつれて増加している。これらの測定値のうち8日後の測定値を代
表値として選び、これと計算土圧を比較すると(図-8) , -9) , -10) , -11)となる。ここで言う計算土圧²⁾
とは P_1 は土被り重量そのまま、 P_2 は P_1 にセグメントの重量を加えたもの、 P_3 と P_4 は横方向土圧係数0.5
として求めたものである。 P_1 , P_2 の測定値は計算土圧の約80%、 P_3 は約60%、 P_4 は約120%を示している。
ここで新しくセグメントに作用する土圧を考え直してみることにする。土圧は前述と同じように分

布すると考えるが、その式を以下のようにおいて考える。

$$P_1 = k_1 r h \quad (5)$$

$$P_2 = k_2 r h + \pi g \quad (6)$$

$$(k_1 = k_2)$$

$$P_3 = k_3 r h \quad (7)$$

$$P_4 = k_4 r (h + D) \quad (8)$$

ここで、 $k_1, k_2, k_3,$

k_4 : 定数、 r : 粘土の単位体積重量、 h : 土被り、 g : セグメントの単位面積当りの重量、 D : セグメントの外径。

上式に P の測定値を代入すると、他は既知量であるので $k_1, k_2,$

k_3, k_4 の値が求まる。

このようにして求めた k は次のような意味を持っている。すなわち

P_1, P_2 の測定値はそれぞれ計算土圧の $k_1 \times$

100%, $k_2 \times 100\%$ であり

P_3 と P_4 の実測した横

方向土圧係数はそれぞれ k_3 と k_4 である。したがって、理論的には k_1

、 k_2, k_3, k_4 は土被り

に関係なく一定した値となる。(図-12) は k の値と土被りとの関係を示したものである。 k_1, k_2, k_4

は土被りに関係なくほぼ一定した値を示しているが、 k_3 は土被りが大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。

3.2 地表面の沈下

地表面沈下の測定を約20日間にわたって行なったが、外筒引抜き(シールド通過)による地表面の沈下は1日でほぼ完了した。2日目以降の測定値は粘土の自然自重圧密沈下を示していると思われる

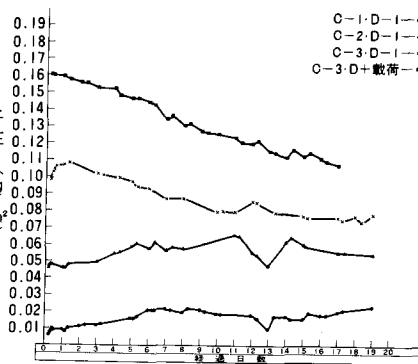


図-4 セグメント土圧測定結果 (P_1)

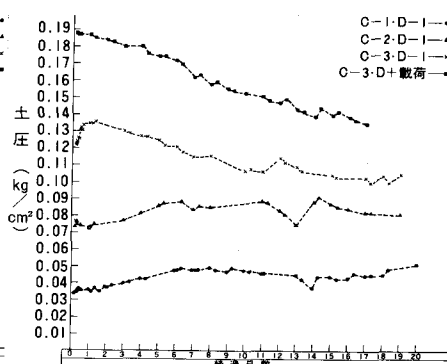


図-5 セグメント土圧測定結果 (P_2)

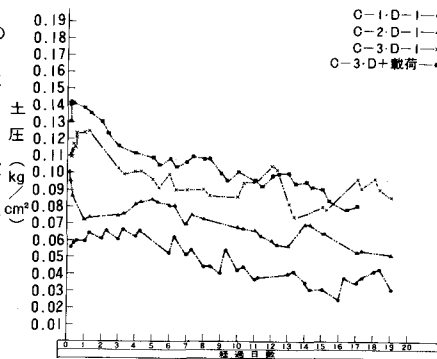


図-6 セグメント土圧測定結果 (P_3)

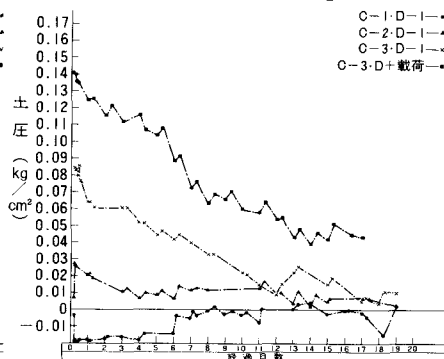


図-7 セグメント土圧測定結果 (P_4)

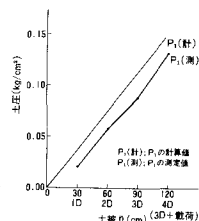


図-8 土圧測定値と計算土圧 (P_1)

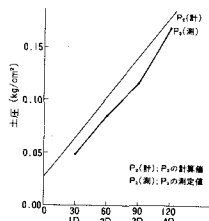


図-9 土圧測定値と計算土圧 (P_2)

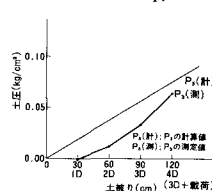


図-10 土圧測定値と計算土圧 (P_3)

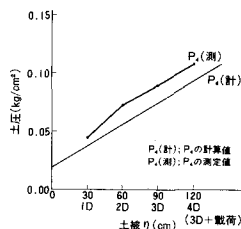


図-11 土圧測定値と計算土圧 (P_4)

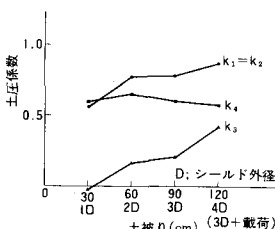


図-12 土圧係数(k)と土被りとの関係

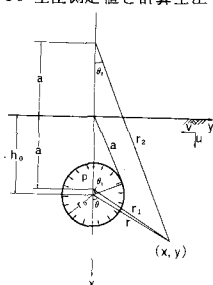


図-13 モデル化したシールドトンネル

ので、測定開始1日後の実測沈下曲線と以下に紹介する LIMANOVの理論沈下曲線とを比較検討する。

LIMANOVはシールドトンネルを(図-3)に示したような等分布圧Pを受ける深さ h_0 の円形地下トンネルとモデル化して考え、地下を堀削することによって引き起こされる半無限体内部のある点の動きWを考え、このWの x 、 y 方向に平行な成分を各々U、Vとし、このU、Vを土を完全な弾性体と仮定して求めた。この解を基にしてシールドトンネルの坑頂の真上で起る横断方向の沈下曲線を次式で表わすことが出来るとしている。³⁾

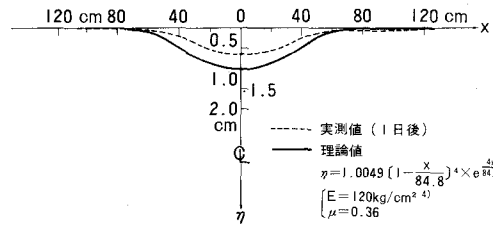


図-14 地表面の沈下(土被り: D)

$$\eta = (1 - \mu^2) \frac{P}{E} \frac{4r_0^2 h_0}{h_0^2 - r_0^2} \left[1 - \frac{x}{2a} \right]^4 \cdot e^{\frac{2x}{a}} \dots \dots (9)$$

但し $0 \leq x \leq 2a$
ここで、 μ : 土のポアソン比、 E : 土のヤング率、 r_0 、 h_0 、 P は(図-13)参照、 x : 中心から左右横断方向の距離。

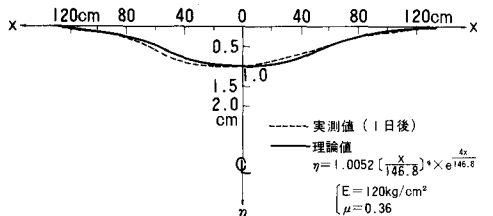


図-15 地表面の沈下(土被り: 2D)

(図-14) - (15) - (16) は各々土被りがD, 2D, 3Dの場合について上式より求めた理論沈下曲線(クリアランス分だけ修正してある)と実測した沈下曲線を比較して示したものである。

3.3 地中の沈下

地中の沈下は前面のアクリル板と試料土の間にはさんだ地中沈下板の動きをノギスで測った。この測定結果を整理してみると、セグメント周囲の土の移動範囲はセグメント底部に頂点を有する下に凸な次式で示される二次曲線の中で大きく起った。

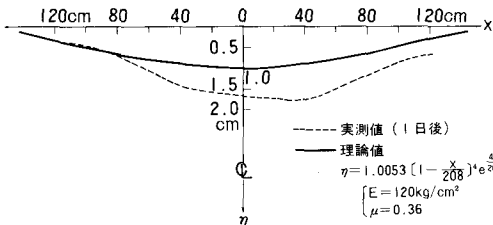


図-16 地表面の沈下(土被り: 2D)

$$y = \frac{D+H}{H^2} X^2 \dots \dots \dots (10)$$

ここで、D: セグメント外径、H: 土被り

3.4 セグメントの変形

セグメントは全体に下がると同時に多少左右に広がる変形を示し、下がりの最大値は20mmであり、左右の広がりの最大値は15mmであつた。

参考文献

- (1) 斉藤、内藤、芳賀: シールドセグメントに作用する土圧に関する実験的研究(第1報)
大林組技術研究所報 Ⅻ 3, 1969
- (2) 斉藤、内藤、藤原、芳賀: 同上(第2報) 大林組技術研究所報 Ⅻ 4, 1970
- (3) K, SZECHY: THE ART OF TUNNELLING, AKADEMAI KIADO BUDAPEST