

水平方向の超近接トンネルの土圧評価に関する研究

—施工順序の影響評価—

AN EXPERIMENTAL STUDY OF EARTH PRESSURE ON THE VERY CLOSELY CONSTRUCTED PARALLEL TUNNELS

永谷英基¹⁾・笹倉剛¹⁾・五十嵐寛昌¹⁾

Hideki NAGATANI, Takeshi SASAKURA and Hiromasa IGARASHI

Recently, a new tunneling method, called Outer-shell-driven method, is spotlighted because it can produce large section effectively. Although Terzaghi's formula and total overburden pressure is widely used to design earth pressure in various conditions, they do not clarify the earth pressure mechanism under very closely constructed condition.

To make this point clear, authors have carried out series of centrifuge model tests using trap-door apparatus. An elasto-plastic finite element analysis also was carried out to simulate the centrifuge model test. Obtained results with respect to the application of the optimum construction order can be summarized as follows.

- ・ As for the construction order for the case of very closely constructed 3 tunnels, earth pressure distribution is most stable (small) when the central tunnel is lastly excavated.
- ・ An elasto-plastic finite element analysis with multi-yield surface model can give reasonable earth pressure estimation quantitatively.

Keywords : shield tunnel, centrifuge model test, closely construction, earth pressure, elasto-plastic finite element method

1. はじめに

過密化が増す都市部地下空間において、トンネルの大断面化のニーズが高まっている。そこで、図-1 に示す複数の矩形小断面シールドを超近接施工することによって、トンネル外殻部を先行掘削し、大断面トンネルを構築する外殻先行掘削型シールド工法が注目されている。

筆者らは、上記工法について、合理的な設計・施工法を開発することを目的に、遠心模型実験及び弾塑性 FEM 解析によるトンネル作用土圧の検討を行ってきた¹⁾。

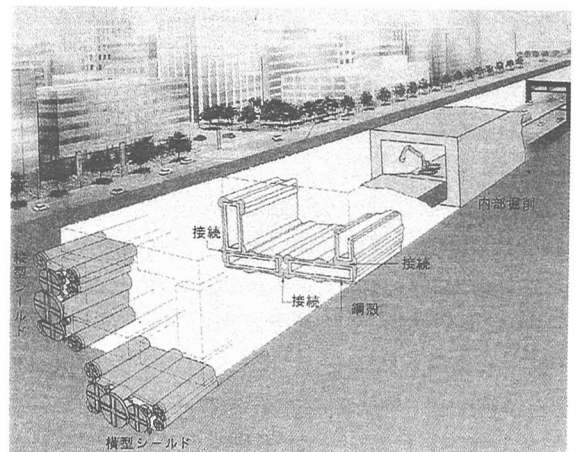


図-1 外殻先行掘削型シールド工法

1) 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部 土質・基礎グループ

今回は、外殻先行掘削型シールドトンネル躯体水平部を構築するために三つのトンネルを超近接施工した場合を対象に、トンネル掘削順序が超近接施工時のトンネル作用土圧に与える影響について検討を行ったので報告する。

2. 遠心模型実験の概要

(1) 遠心場における多連型落とし戸模型実験

セグメントへのゆるみ土圧は、シールド掘進時に発生するテールボイドによるところが大きい。そこで、図-2 に示すように土槽底面に設置した落とし戸を降下させることにより、矩形シールド天端に及ぼすトンネル作用土圧を模擬した。そして、外殻先行掘削型シールド工法における超近接施工を複数個の落とし戸を併設することによって、模擬することにした。なお、実験は、実規模地盤との応力の相似則を満足させるため、100G (≒981m/s²) の遠心場において実施した。

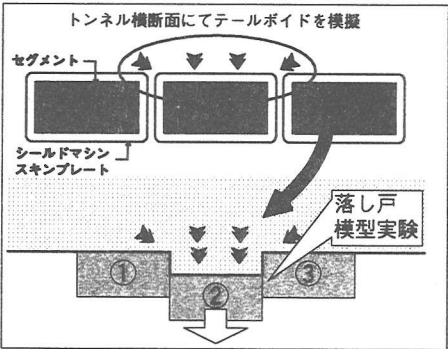


図-2 落とし戸模型実験の概要

(2) 実験方法及び計測項目

図-3 に実験装置概要図を示す。各落とし戸は幅 50mm (実規模換算 5m)、奥行き 350mm とし、内寸で幅 500mm、高さ 400mm、奥行き 350mm の土槽に、底面 10 個 (以下、底板)、側壁 4 個 (以下、側板) 配置した。また、落とし戸制御は遠心場において 1mm/min (実規模換算 10cm/min) を満足する変位制御で行っており、実験では 1mm (実規模換算 10cm) のテールボイドを発生させた。

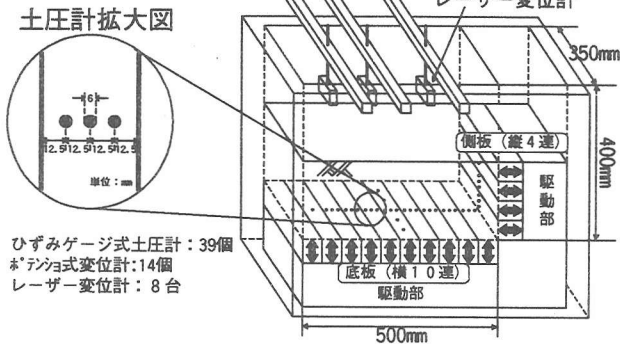


図-3 多連型落とし戸模型実験装置概要図

表-1 実験ケース一覧

土被り		$H_{(cm)}[H/D]$	20.0[4]	底板模式図
落とし戸降下順序	i	②→①→③	case 1	
	ii	③→②→①	case 2	
	iii	③→①→②	case 3	

D: 底板幅 5cm

模擬地盤は気乾状態の豊浦標準砂を用いて、自由落打法により相対密度 90% (平均単位体積重量 1.608kgf/cm³) の砂地盤を作成した。なお、土槽壁面には砂地盤と土槽との摩擦の低減を図るために、グリースを塗布し、メンブレンを貼付している。

(3) 実験内容

実験ケース一覧を表-1 に示す。トンネルの掘削順序がトンネル作用土圧に及ぼす影響を把握するために、土被り 20cm (実規模換算 20m) において、3 ケースの落とし戸降下順序で実験を行い比較を行った。

3. 掘削順序が作用土圧に及ぼす影響

掘削順序がトンネル作用土圧に及ぼす影響を把握するため、土被り 20cm の地盤において表-1 に示した落下降下順序 3 ケースの実験を行った。図-4 に実験結果の一覧を示す。

まず、各ケースの STEP3 に着目すると、case 1 (②→①→③)、case 2 (③→②→①) は、先行底板上の作用土圧が全土被り圧程度にまで回復しているが、case 3 (③→①→②) では、ほぼ最大で全土被り圧の 8 割程度であった。また、その分布形状は、case 1、case 2 が左右非対称な偏りのある作用土圧分布を示すのに対し、case 3 ではほぼ左右対称であった。

Case 3 の STEP2 に着目すると、他のケースと比べて先行底板への応力再配分による作用土圧の増加はほとんど見られない。これは、離隔を設けて後行底板が降下するため、離隔部分の地山が双方のトンネルのアーチ脚部となり、応力集中が生じたものと考えられる。なお、各 STEP の降下底板上の緩み土圧に着目すると、全ケース共に常に最大で全土被り圧の 2 割程度であった。

次に地表面沈下に着目すると、3 ケースとも STEP3 の全底板降下時の沈下量及びその形状はほぼ同じであり、最大値は降下順序に関係なく中心底板②において見られることが分かった。なお、case 3 (③→①→②) の STEP2 においては沈下量が著しく小さいことから、緩み領域の形成範囲はトンネル間の離隔が大きいほど小さいことが伺える。

以上より、超近接した 3 本のシールドを構築する場合、最後に中央のトンネルを施工すると最も応力集中の度合いが小さく、ほぼ左右対称な作用土圧の分布が得られることが分かった。更なる大断面トンネルを構築する場合も同様に、1 ブロックづつ離隔を設けて構築した後、その間隙を掘削するのが合理的であると考えられる。なお、前述の土被りの違いが降下底板の作用土圧分布に及ぼす影響は数値のみであり、分布形状の傾向は同じであった。よって、土被りが違って、掘削順序による作用土圧分布形状は同様の傾向が得られるものと思われる。

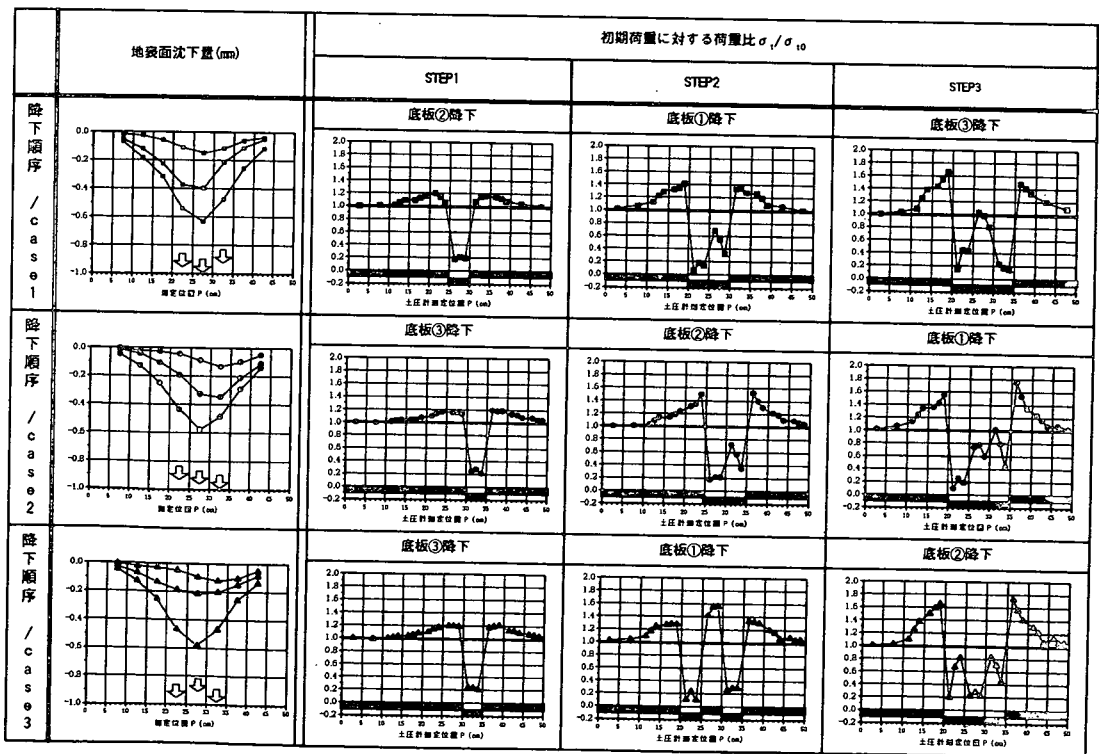


図-4 地表面沈下及び荷重比分布図 (降下順序の影響)

4. 弾塑性FEM解析結果及び考察

(1) 解析方法

外殻先行掘削型シールド工法における複数のシールドによる超近接施工時の地盤挙動は、複雑な主応力の回転を伴うものであり、弾塑性的挙動を示すものと考えられる。そこで、解析的検討を実施するに当たって、筆者らは弾塑性論に基づいた土の構成則を用いて行う必要があると判断し、複数個の降伏曲面によって土の非線形性を表現する Multi-Yield-Surface 理論に基づいた弾塑性FEM解析 Dynaflo²⁾を用いることとした。

応力～ひずみ関係は、林ら^{3) 4)} が砂や礫を対象とした動的単純せん断試験から提案した骨格曲線と Masing 則に基づいて、表現することとした。図-5 に示す。この提案モデルは、従来よく知られている一般的な双曲線モデルである Hardin-Drnevich (H-D) モデルをベースに、土の非線形性を表現するための新しい3つのパラメータを導入して拡張したモデルである。これらから、微小ひずみから破壊ひずみ付近まで土の非線形性を精度良く表現することが可能となった。

解析条件としては、底面を固定、左右の壁面を鉛直ローラーの境界条件で、実験における STEP 毎にそれぞれ底板の変位量（実規模換算 10cm）を 50 分割し、段階的に底板の節点に強制変位を与えて行った。解析メッシュを図-6、入力物性値を表-2 に示す。

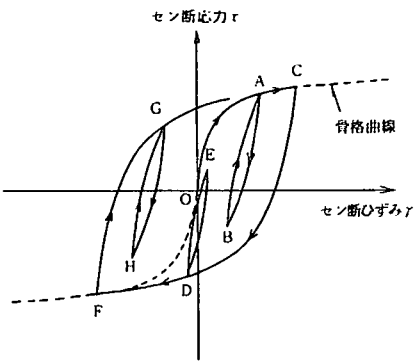


図-5 応力～ひずみ関係概念図

表-2 解析入力パラメータ

解析パラメータ		入力値	備考
土被りH	m	20	実験換算土被り
粘着力C	kgf/cm ²	0	臺灣標準砂
内部摩擦角φ	°	49.4	
乾燥密度ρ _d	g/cm ³	1.608	
静止土圧計算K ₀	-	0.241	K ₀ =1-sinφ
初期せん断剛性G ₀	kgf/cm ²	863	$G_0 = 900 \frac{1.6 \times 10^{-17} \times 0.1^2}{1+e}$ ps-1
体積弾性係数E _v	kgf/cm ²	1869	$E = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G_0$
変形係数E _{s0}	kgf/cm ²	245	
初期ポアソン比ν ₀	-	0.194	
ポアソン比ν	-	0.3	
N _L	-	0.2	微小ひずみ領域の下屈服線を規定するパラメータ
N _U	-	1	大ひずみ領域の上屈服線を規定するパラメータ
α	-	0.136	降下の履歴をひずみの大きさに応じて置換履歴形とするパラメータ
変相角φ	°	30	
Power Exponent X _n	-	0.4	剛性が平均有効応力に依存する度合いを表すパラメータ
最大せん断ひずみe _{max}	%	6	

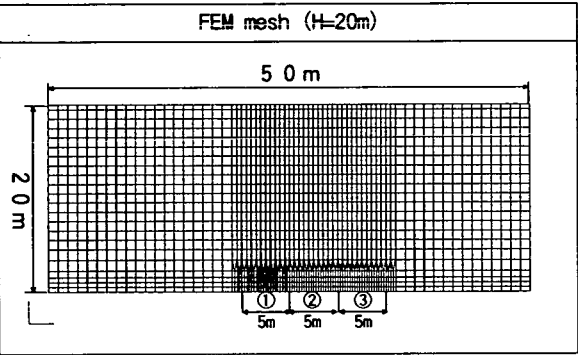


図-6 解析メッシュ図

(2) 解析結果

case 1（底板②→①→③，土被り 20cm）の荷重比分布及び地表面沈下量の解析結果を図-7 に実験結果と併せて示す。

各降下 STEP 時の底板作用土圧について着目すると、全 STEP において荷重比で 0.2 前後となっており、解析結果は実験結果と良く一致していることが分かる。また、STEP2,3 における先行底板②への作用土圧については、解析結果は実験結果よりも大きな値を示すものの、その傾向は比較的良く一致していることが分かる。

降下底板周辺地山への荷重比の分布は、降下の途中段階で降下底板の両側に解析値の方がやや大きい部分が認められるが、STEP3 においては高い精度で評価できている。これらの解析と実験結果の差の原因とし

ては、実験での落とし戸の微小な回転によって、応力の再配分が生じ、実験では大きな土圧が現れなかったものと思われる。地表面沈下に関しては、解析値は非常に精度良く実験値を表現している。

図-8 及び 9 に各 STEP における変形メッシュ及びせん断ひずみ分布を示す。変形メッシュより STEP の進行に伴った緩み領域の拡大が見て取れる。また、せん断ひずみ分布に着目すると、降下底板両端にせん断ひずみが集中しており、アーチの影響範囲が伺える。

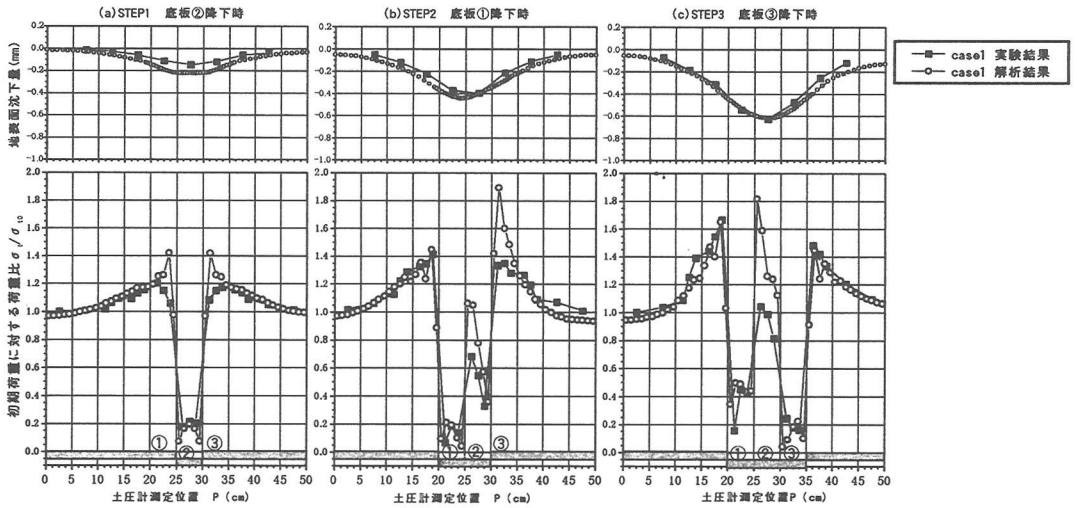


図-7 地表面沈下及び荷重比分布図（解析値と実験値の比較—case1—）

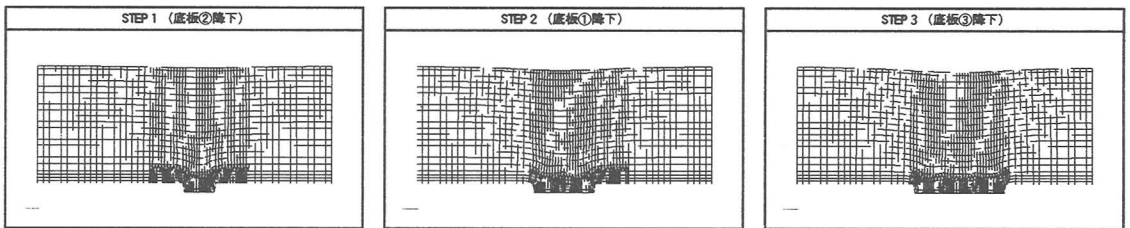


図-8 変形メッシュ図

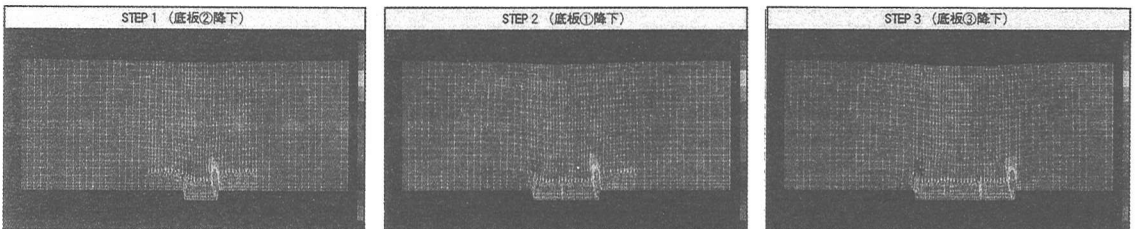


図-9 せん断ひずみ分布図

次に、図-10 に底板②中心部の直上 1 D（D：底板幅）の位置に作用する主応力差とせん断ひずみの関係を示す。ここで、せん断応力は反時計回りを正とした。STEP1 では、底板②自体が降下するためせん断応力は概ね 0 で推移していたのが、STEP 2 で左側の底板①が降下することにより、正のせん断応力が作用し、STEP3 で右側の底板③が降下するため、負のせん断応力が作用する。よって、このせん断方向の反転により、主応力方向の回転が伺える。なお、STEP2,3 においてせん断ひずみが進行しているにもかかわらず、せん断応力が一定になるのは、局所的に地山要素が破壊しているものと思われる。

また、図-10 と同一地点の応力経路を図-11 に示す。STEP1 で底板②自体の平均応力が低下した後、両側底板の降下によって生じたアーチング効果によって、再配分された作用土圧を受けたため、平均主応力は増加していることが分かる。なお、実験終了時付近の平均応力の低下は地山が破壊状態にあるためと考えられる。

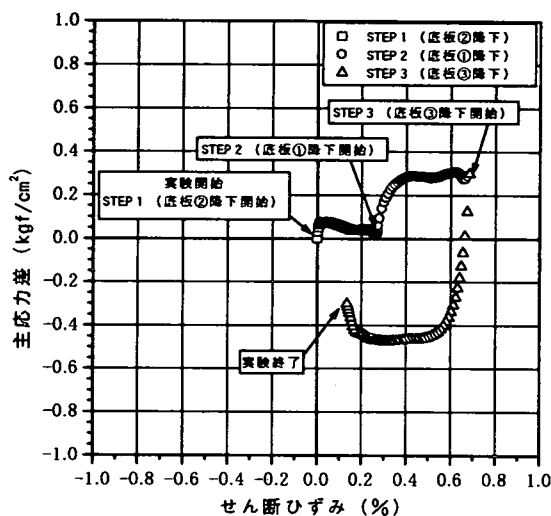


図-10 せん断応力～せん断ひずみ関係図
—底板②直上1 D部分—

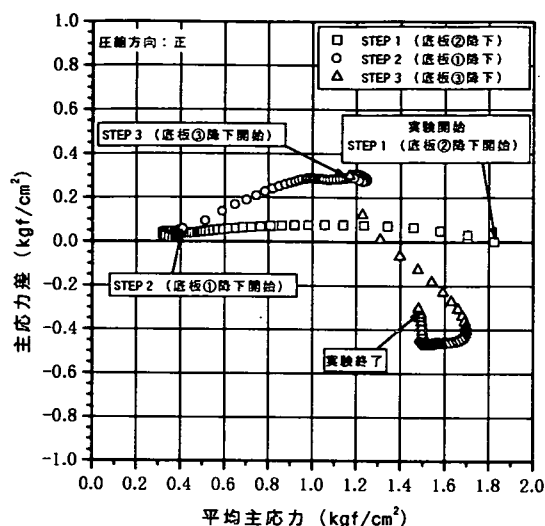


図-11 応力経路
—底板②直上1 D部分—

5. まとめ

本論文では外殻先行掘削型シールド工法におけるトンネル躯体水平部を三つのシールドトンネルで超近接施工した場合を想定して、掘削順序の影響について実験的・解析的検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ①超近接した3本のシールドを構築する場合、最後に中央のトンネルを施工すると最も応力集中の度合いが小さく、比較的バランスの良い左右対称型の作用土圧の分布が得られる。
- ②弾塑性FEM解析 Dynaflow を用いて検討を行った結果、掘削部両端の作用土圧を弱冠過大評価する傾向にあるが、地表面沈下等を含めて極めて高い精度で実験結果を再現できることが確認できた。

【参考文献】

- 1) 永谷, 杉原, 五十嵐; 水平方向の超近接トンネルの土圧評価に関する研究, 鹿島技術研究所年報, Vol. 46, pp. 13-18, 1998.
- 2) Prevost, J.H.: DYNAFLOW ; A nonlinear transient finite element analysis program, Princeton University, last Update 1994.
- 3) 菅原, 林, 山田; 土の応力～ひずみモデルに関する研究(その2), 鹿島技術研究所年報, 第39号, 1991.
- 4) 林, 山田, 龍岡 ; Modeling of nonlinear stress strain relations of sands for dynamic response analysis, 第10回世界地震工学会議 招待論文, 1992.