

トンネルの逐次掘削工法による 土圧再配分の評価法

今井 明士¹・西村 和夫²・土門 剛³

¹ 学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail:imai-akihito@ed.tmu.ac.jp

² 正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (同上)

³ 正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (同上)

トンネルの逐次掘削過程において、掘削順序によって土圧がどのように変化するかを観測するために二次元降下床実験を行った。その結果、トンネルの逐次掘削における土圧の再配分量は、掘削履歴のある地山への配分量のほうが、掘削履歴のない地山への配分量よりも多くなることがわかった。実験結果より、Terzaghiの土圧理論に基づき、降下床降下に伴って地山に生じたすべり面に働くせん断力によって土圧の再配分が起これと考え、簡易的な土圧の算定方法を提案した。その結果、算定結果は実験結果とほぼ一致し、精度良く土圧を算定することができた。

Key Words : multi-excavation technique, trap-door test, earth pressure

1. はじめに

トンネルの逐次掘削工法とは、トンネル断面の一部分を先行して掘削し、次に掘削した一部分に隣接した部分を掘削し、最後にトンネルの全断面を掘削してトンネルを構築する工法である。わが国の複雑な地質では、トンネル全長を通じて全断面掘削工法で施工が可能な場合は少ないため、逐次掘削工法は非常に有効な工法である。

また近年、都市部を中心に地下空間の高度利用を目的としたトンネルの超近接施工が要求されている。また、用地幅が制限される条件下でのトンネルの大断面化に伴い、円形もしくは楕円形横断面を有するトンネルの余剰空間を減らすことを目的に矩形のトンネル外郭部を複数の小断面シールドで超近接施工することによって構築し、それを一体化して大断面矩形トンネルを完成させる工法が注目されている。

しかし、これらのような、複数のトンネルの超近接施工では、各トンネルの施工に伴ってトンネルに作用する土圧の変動が予想される。

本研究は多段逐次掘削における地山内変位について解析し、トンネルおよび地下空間における加背割りの設計や、掘削順序の決定材料とする。また、土被りが浅く、しかも地上に民家が密集している場合、トンネル自体の安全性を確保することが重要であるが、第三者に対して被害を未然に防ぐことがさらに重要となる。したがって

トンネル周辺の構造物の安全性を確保することが必要である。一般に単設トンネルの作用土圧の設計には、従来から、全土被り圧、あるいはTerzaghiの式による緩み土圧を用いているが、トンネルの超近接施工がもたらす既設の隣接トンネルに対する影響や、これによって生じる地盤のゆるみがもたらす応力再配分のメカニズムに関しては不明な部分が多い。たとえば、逐次掘削トンネルやMMSTでは、小断面トンネルの掘削に伴って発生するトンネル周辺地盤の緩みの累積が、全断面で掘削した場合とは異なっていると考えられ、トンネルに作用する荷重の評価方法が設計上の大きな課題となる。そこで、工事の安全確保や経済性を追及する上で、これらをさらに的確に把握することが重要になってきている。

本研究では、トンネルの逐次掘削過程において、土圧や地山の緩みが与える影響を掘削順序によってどのように変化するかを定量的に観測しそれぞれの評価法の開発を目的としている。

2. 実験方法

(1) 概要

実際のトンネル掘削は三次元の現象であるが、今回は掘削後の内空変位による静的な地盤応答を観察することを目的としているため、本研究ではトンネル進行方向の

変位は考慮しないものとし、二次元実験とした。簡便で再現性も期待できることを理由に、アルミ棒を地山材料として使用した。5連降下床を逐次掘削トンネルやMMSTトンネルにおける部分掘削トンネルとし、降下床を順に降下させることによって、トンネルの逐次掘削による緩みを模擬した。降下床の降下順序を逐次掘削トンネルの掘削順序とし、様々な順序で降下床を降下させることによって生じる降下床土圧の変化を計測した。土圧はロードセルを降下床にセットすることにより荷重として計測した。本論文では土被り250mmの実験結果のみを示す。

(2) 実験装置

a) 実験槽

実験槽を図-1と図-2に示す。実験槽は鋼材で枠組みされたものであり、変形が生じないよう十分な剛性を持たせている。また、土圧を計測できる土槽は幅1200mm、高さ800mm、奥行き300mmで土被り750mmまで計測可能である。

底板には、幅50mm、奥行き300mmのアルミ板を25枚使用している。アルミ板3枚で一つの降下床をなしており、5つの連続する降下床の両側に、固定床として左右それぞれ4枚の同じアルミ板と、最左端、最右端にそれぞれ幅20mmと幅10mmのアルミ板が設置されている。5つの降下床は左から順にABCDEとする。

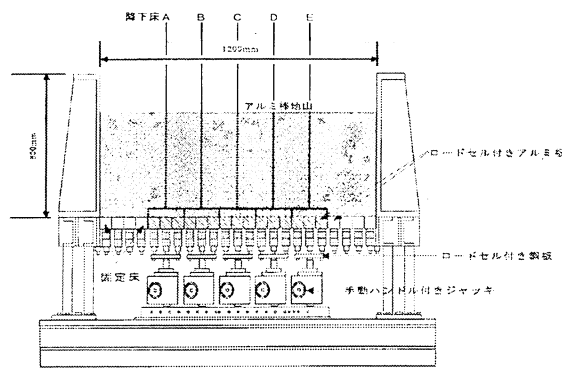


図-1 実験装置の概要

b) 降下床

図-3に降下床を示す。荷重を受ける受圧板となるアルミ板が実験装置の鉄製のフレームに設置されている。幅50mmのアルミ板下部にはあらかじめロードセルが組み込まれており、土圧を荷重として計測する。3枚のアルミ板を鋼板によって一体化させ、幅150mmの降下床となって降下することが可能となる。

降下床は降下ジャッキに手動のハンドルを取り付け、ハンドルを回すことにより降下することができる。

c) 地山材料

地山材料には、粒状体地山を想定して長さ100mmの円形断面のアルミ棒を用いた。これらを実験土槽のアルミ板上に奥行き方向に平行になるように積み重ねた。

アルミ棒の直径については、単一粒径では地山内に粒子が規則配列となる大きな領域がいくつも生じ地山内の変形挙動が断続的になるのを防ぐために、2種類の直径を用いる。アルミ棒を用いた既往の実験が豊浦砂の粒度分布に近くなるように、直径1.6mmと直径3.0mmのものを、重量混合比3:2で混合した混合地山を用いていることから、これらの実験との比較検討を可能にするために、同じものを用いた。地山物性値を表-1に示す。

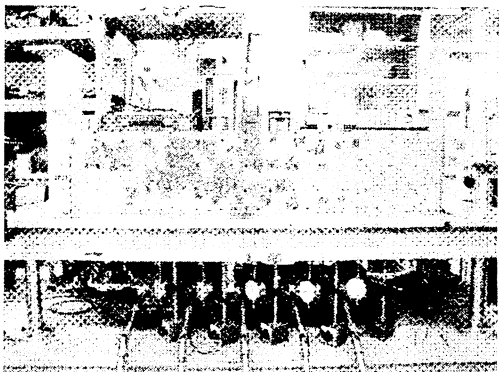


図-2 実験装置の外観

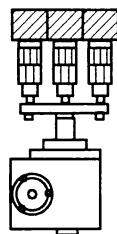


図-3 降下床の概要

表-1 地山物性値

材質	アルミ合金
長さ	100mm
径	1.6mm,3.0mm
混合比（重量比）	3:2
地山密度	$\approx 21.5\text{kN/cm}^3$
粘着力	0
内部摩擦角	30°

(3) 実験手順

- ①各アルミ板を隣接するアルミ板と相互に接触しないように厚さ0.3mmのスペーサーを挟んで隙間を調節しながら設置する．とくに底盤外側に幅の調整用として設置している幅10mmおよび20mmのアルミ板は隙間の調整が不十分であると、フレーム、アルミ板同士の接触、フレームとアルミ板の間や、アルミ板間に実験材料のアルミ棒が挟み込まれることが原因で荷重値に大きな影響を及ぼすので、隙間の管理に十分注意する．
- ②降下床の下に降下量を測定するダイヤルゲージを設置し、初期値を計測して値をゼロにセットする．アルミ板をフレームに設置した状態でロードセルの初期値をとる．この状態が荷重ゼロの状態となる．なお、実験ごとにアルミ板に分銅を乗せてロードセルの出力値を確かめる．
- ③アルミ棒が曲がっていないかを確認した後、アルミ板上に積み上げていく．奥行き300mmの実験土槽の、中央100mmの位置に前後に偏らないよう平らに積み上げる．アルミ棒の軸線がアルミ板軸に対して平行に並んでいることが重要である．この実験は二次元のモデルであることから、アルミ棒の軸線がアルミ板に対して斜めになっていると、周辺のアルミ棒から余分な変形拘束を受け、地山挙動を忠実に模擬できないことになるので十分に注意が必要である．
- ④所定の高さまで積み上げたら土圧を測定し、地山を少し持ち上げたり、定規などを差し込むことによって均一化を行い、初期土圧が平滑になるようにする．降下床となるアルミ板下部の降下ジャッキに手動ハンドルを取り付ける．ダイヤルゲージの針はわずかな衝撃でも感知して動いてしまうので、実験中はダイヤルゲージにふれないように十分注意する．
- ⑤静ひずみデータ収録ソフトにより、降下量0.05mmごとに自動計測されるようにデータコンパレータ機能を設定し、降下床を2.0mmまで降下させる．以下、降下順にしたがって各降下床を2.0mmずつ降下させる．

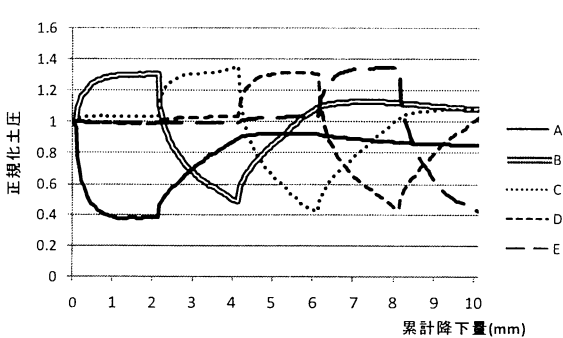


図-4 降下順 ABCDE における降下床土圧の推移

3. 実験結果

実験ケースとしては4つの降下順序3つの土被り計12ケース行っているが、ここでは代表的な例として土被り250mmについて示す．

まず、降下順ABCDEにおける降下床土圧の推移を図-4に示す．

縦軸は正規化土圧(降下床土圧／初期土圧、以下、単純に土圧とする)を示し、横軸は累計降下量を示す．

まず、Aが降下するに伴ってA自身の土圧が0.40倍まで減少している．そして、その影響を受けたBの土圧が1.30倍まで増加している．Cの土圧も増加しているが、Bほどではなく、1.05倍までの増加である．また、D,Eに関してはほとんど変化は見られない．

次に、Bが降下するに伴ってB自身の土圧が0.50倍以下まで減少し、その影響を受けた両隣にあるA,Cの土圧が、それぞれ0.90倍、1.35倍まで増加している．Dの土圧も増加しているがA,Cほどではなく、1.05倍までの増加である．また、Eに関してはほとんど変化は見られない．

そして、Cが降下するに伴ってC自身の土圧が0.40倍まで減少し、その影響を受けた両隣にあるB,Dの土圧が、それぞれ1.10倍、1.30倍まで増加している．Eの土圧も増加しているが、B,Dほどではなく、1.05倍まで増加である．また、A,Eに関してはほとんど変化は見られない．

さらに、Dが降下するに伴ってD自身の土圧が0.40倍まで減少し、その影響を受けた両隣にあるC,Eの土圧がそれぞれ、1.0倍、1.35倍まで増加している．また、A,Bに関してはほとんど変化は見られない．

最後に、Eが降下するに伴ってE自身の土圧が0.40倍まで減少し、その影響を受けた隣にある降下床Dの土圧が1.0倍まで増加している．Cの土圧も増加しているがDほどではなく、1.10倍までの増加である．また、A,Bに関してはほとんど変化は見られない．

降下順ACEBDにおける降下床土圧の推移を図-5に、降下順BDCAEにおける降下床土圧の推移を図-6に、降下順CBDAEにおける降下床土圧の推移を図-7に示す．

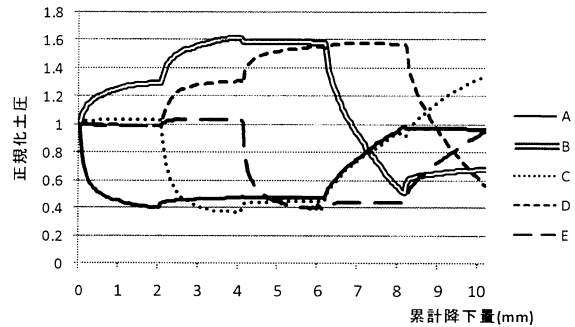


図-5 降下順 ACEBD における降下床土圧の推移

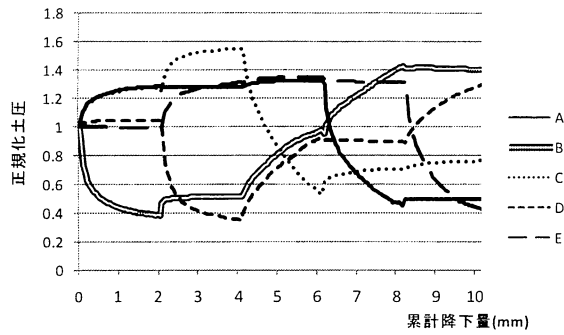


図-6 降下順BDCAEにおける降下床土圧の推移

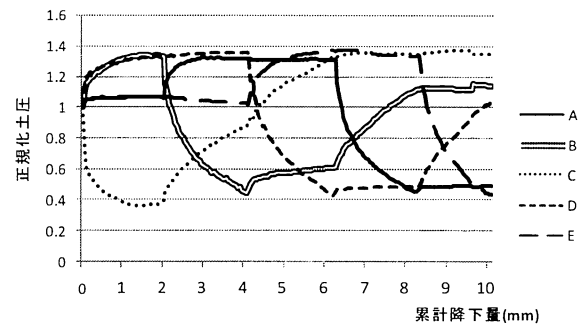


図-7 降下順CBDAEにおける降下床土圧の推移

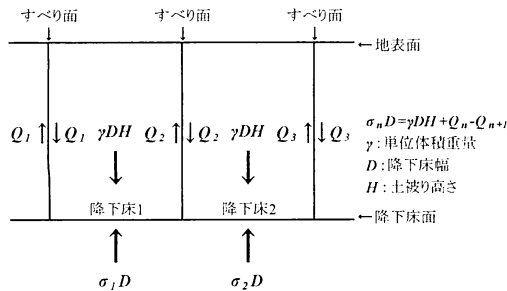


図-8 降下にとまって生じるすべり面モデル

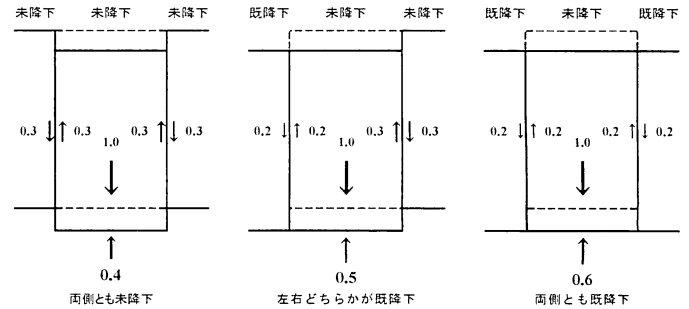


図-9 降下床土圧

模型実験の結果より、一つの降下床が降下することによって、主に隣接する降下床に対してその影響が及ぶことが分かる。左右2つ隣の降下床にも影響が及んでいるが、隣接する降下床への影響と比較すると非常に小さい。また、隣接降下床が既降下の場合は、降下時において緩み土圧に達していない。隣接降下床が両側とも未降下の場合の降下後土圧を σ_{n0} 、左右どちらかが既降下の場合の降下後土圧を σ_{n1} 、両側とも既降下の場合の降下後土圧を σ_{n2} とすると、 $\sigma_{n0} > \sigma_{n1} > \sigma_{n2}$ となっている。これより、降下前に他の降下床降下による影響を受けると、トンネル径150mmに対し、降下量2mmより、トンネル径に対する降下量の割合が約1.3%程度では、緩み土圧に達しないことが分かる。しかし、いずれの降下床土圧も、2mmを超えてさらに降下させれば同じ値の緩み土圧に収束していくと考えられる。

4. 簡易モデルによる降下床土圧の算定

次に、降下床上の土塊を矩形でモデル化することによって降下床土圧を算定する。このモデルでは、降下床を降下させると隣接する降下床上の土塊との間にすべり面が生じると仮定し、土塊の自重およびすべり面に沿うせん断応力のつりあいを考慮して降下床土圧を算定する。

(1) 概要

この算定方法では、降下床降下による影響は隣接降下床のみに与えられると考え、図-8に示すような簡易モデルを考えることにする。

すべり面に働くせん断力とアルミ棒地山の重量と降下床からの反力の釣り合いを考えると、式(1)が成り立つ。

$$\sigma_n D = \gamma DH + Q_n - Q_{n+1} \quad (1)$$

σ_n は降下床 n の降下後土圧、 Q_n は降下床 n の左側に働くせん断力を示す。

次に、この降下後土圧 σ_n とせん断力 Q_n について説明する。

(2) 降下床土圧 σ_n

土被り250mmにおける実験結果より、隣接降下床が両側とも未降下の場合の降下後土圧を σ_{n0} 、左右どちらかが既降下の場合の降下後土圧を σ_{n1} 、両側とも既降下の場合の降下後土圧を σ_{n2} とすると、 $\sigma_{n0} > \sigma_{n1} > \sigma_{n2}$ となることが分かっている。

また、土被り250mmにおける γDH を1.0とすると、 $\sigma_{n0} D$ は約0.4であることも分かっている。算定を簡単にするため $\sigma_{n0} D$ を0.4、 $\sigma_{n1} D$ を0.5、 $\sigma_{n2} D$ を0.6とする。(図-9)これらの値は実験結果とも近い値となっている。

また、左右どちらかが既降下の場合と両側とも既降下の場合は、図-8のように既降下降下床とのすべり面に生じるせん断力を0.2とすると、 $\sigma_{n1} D = 0.5$ 、 $\sigma_{n2} D = 0.6$ となり仮定の値と一致する。

(3) せん断力 Q_n

a) 隣接降下床が未降下の場合

隣接降下床が未降下の場合、降下により0.3のせん断力が生じ、降下床土圧が0.4まで減少することにより地山にかかる応力は釣り合う。（図-10）

b) 隣接降下床が既降下の場合

隣接降下床が既降下の場合、降下前に0.3のせん断力が生じているが、降下によりせん断力が一度0になり、その後逆方向に増加するので、0.2までしか変化しないと考えられる。

その結果、降下後の土圧は緩み土圧には達しないと考えられる。（図-11）

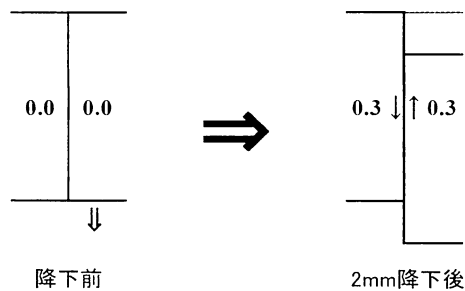


図-10 隣接降下床が未降下の場合のせん断力 Q_n

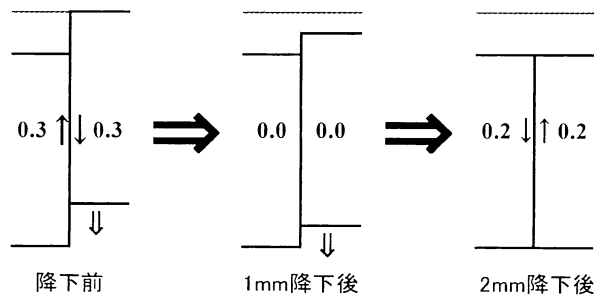


図-11 隣接降下床が既降下の場合のせん断力 Q_n

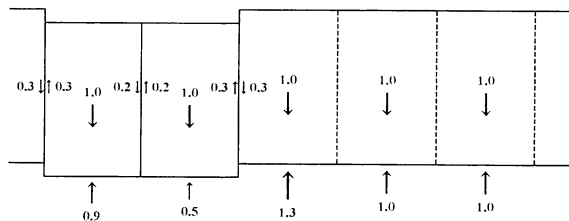


図-13 B降下後の降下床土圧

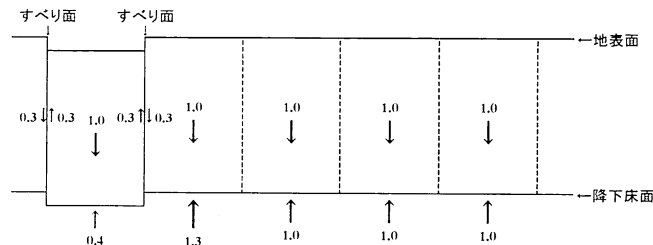


図-12 A降下後の降下床土圧

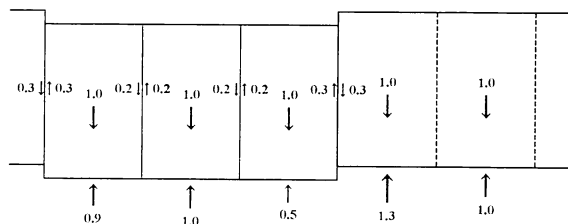


図-14 C降下後の降下床土圧

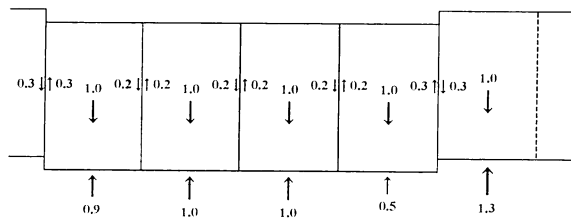


図-15 D降下後の降下床土圧

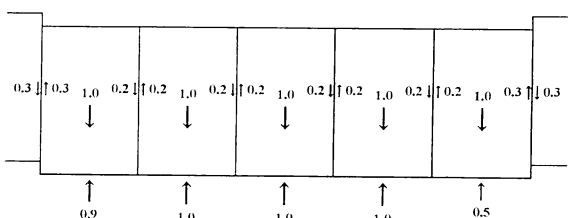


図-16 E降下後の降下床土圧

5. 簡易モデルによる降下床土圧の算定結果

以上のような方法により、降下順ABCDEでの降下床土圧の推移を算定した。

以下、初期土圧を1.0とする。

まず、Aが降下するに伴って、隣接降下床とのすべり面に0.3のせん断力が生じ、Aの土圧が0.4まで減少するとともに、Bの土圧は1.3まで増加する。（図-12）

次に、Bが降下するに伴って、Aとのすべり面に0.2、Cとのすべり面に0.3のせん断力が生じ、Bの土圧が0.5まで減少するとともに、Aの土圧が0.9、Cの土圧が1.3まで増加する。（図-13）

そして、Cが降下するに伴って、Bとのすべり面に0.2、Dとのすべり面に0.3のせん断力が生じ、Cの土圧が0.5まで減少するとともに、Bの土圧が1.0、Dの土圧が1.3まで増加する。（図-14）

さらに、Dが降下するに伴って、Cとのすべり面に0.2、Eとのすべり面に0.3のせん断力が生じ、Dの土圧が0.5まで減少するとともに、Cの土圧が1.0、Eの土圧が1.3まで増加する。（図-15）

最後に、Eが降下するに伴って、Dとのすべり面に0.2、右隣とのすべり面に0.3のせん断力が生じ、Eの土圧が0.5まで減少するとともに、Dの土圧が1.0まで増加する。（図-16）

以上の結果より、土被り250mm・降下順ABCDEにおける降下床土圧の推移は以下ようになる(図-17)。

図-4の実験結果を見ると、C降下時のBのように算定結果よりも変化が大きい部分もあるが、最終的には図-17の算定結果に近い値に収束している。

実験結果では2つ以上離れた降下床まで影響が及んでいる部分がある。しかし、土被り250mmでは2つ隣の降下床への影響は僅かなので、隣接降下床間の影響のみを考慮したモデルによる算定結果と比較しても大きな違いにはなっていない。

実験結果における正規化土圧の最大値は1.35であるが、算定結果における正規化土圧の最大値も1.3と実験結果に近い値となっている。

全体的に見ると、算定結果は実験結果の土圧の推移を上手く捉えていると考えられる。

同様の方法で算定した、降下順ACEBDにおける降下床土圧の推移を図-18に、降下順BDCAEにおける降下床土圧の推移を図-19に、降下順CBDAEにおける降下床土圧の推移を図-20に示す。

各算定結果と実験結果を比較すると、算定結果は実験結果の土圧の推移を上手く捉えていることが分かる。

6. まとめ

本論文の目的は、トンネルの逐次掘削過程において、土圧や地山の緩みを与える影響が、掘削順序によってどのように変化するかを定量的に観測し、その評価法を提案することである。

そこで今回は、従来行われてきた降下床実験と、Terzaghiの土圧理論に基づいたすべり面モデルによる算定方法による結果を比較検討し、すべり面モデルの検証と適用性について調べた。

すべり面モデルでは隣接降下床間のせん断力のみを考慮しているため、2つ以上離れた降下床の降下による土圧の変化を算定することはできない。しかし、土被り250mmの場合、模型実験の結果において2つ以上離れた降下床の降下による土圧の変化は小さいので、実験結果とすべり面モデルによる算定結果は非常に近い値となっている。

土被りが大きくなると、2つ以上離れた降下床の降下による土圧の変化が大きくなるので、実験結果とすべり面モデルによる算定結果との誤差は大きくなると考えられる。

しかし、土被り250mmでの比較結果を見ると、実験結果とすべり面モデルによる算定結果は非常に近いことから、トンネルの逐次掘削による応力の再配分にはすべり面に生じるせん断力が大きく関わっていると考えられる。

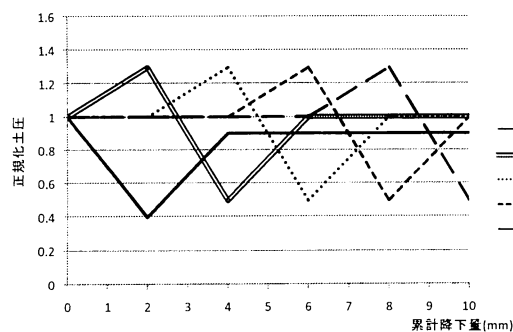


図-17 降下順 ABCDE における算定結果

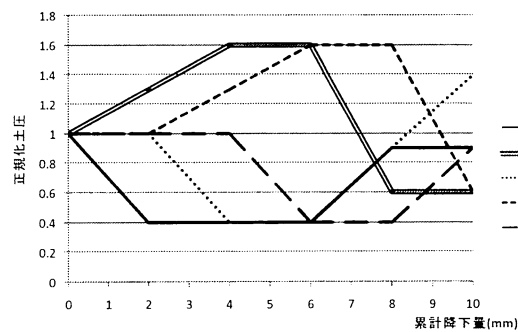


図-18 降下順 ACEBD における算定結果

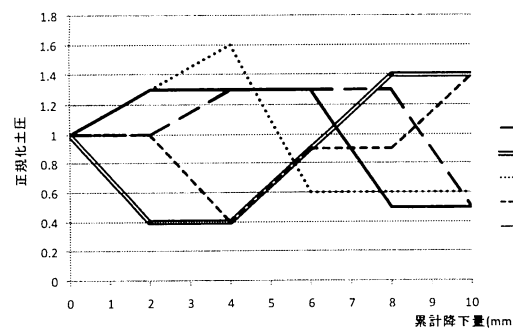


図-19 降下順 BDCAE における算定結果

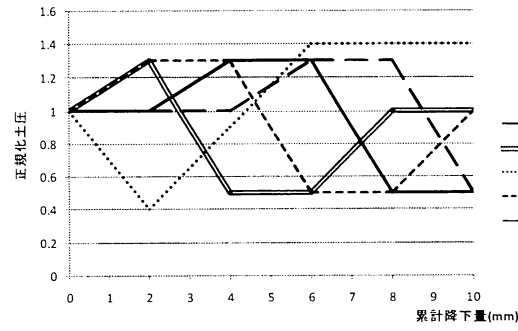


図-20 降下順 CBDAE における算定結果

参考文献

- 1) 吉川浩央：DEM 解析の多段逐次掘削モデル実験への適用，東京都立大学平成 14 年度卒業論文，2003.
- 2) 松原功明：トンネル逐次掘削による静的地盤応答に関する研究，東京都立大学平成 12 年度修士論文，2001.
- 3) 吉川浩央：多段降下床実験による応力再配分と地山の変形に関する研究，東京都立大学平成 12 年度卒業論文，2001.
- 4) 松原功明：降下床実験における応力再配分のメカニズムに関する研究，東京都立大学平成 10 年度卒業論文，1999.
- 5) 森真人：MMST 工法の覆工に作用する土圧に作用する土圧に関する研究，東京都立大学平成 9 年度卒業論文，1998.
- 6) 菊本統，岸田潔，木村亮，田村武：降下床実験による離隔のない双設トンネルに作用する土圧の評価手法の構築，土木学会論文集 No.799/III-72, pp25-36, 2005.
- 7) 足立紀尚，木村亮，岸田潔，伊藤浩志：降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明，土木学会論文集 No.694/III-57, pp277-296, 2001.
- 8) 村山朔郎，松岡元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集 第 187 号，pp.95-108, 1971

MECHANISM OF THE GROUND RESPONSE INDUCED BY THE TUNNELING OF MULTI-EXCAVATION TECHNIQUE

Akihito IMAI, Kazuo NISHIMURA and Tsuyoshi DOMON

A new simplified model for predicting the ground response induced by the tunneling of multi-excavation technique is introduced in this study. The investigation was conducted using a series of model tests of multi-trap doors. The ground response occurred in ground on each step of small-size tunnel excavation was carefully observed in order to verify the applicability of conventional prediction of earth pressure of Terzaghi's theory for the new model of tunnel excavation.