

成層傾斜地盤における単設トンネル掘削に関する降下床実験

TRAPDOOR TESTS ON SINGLE TUNNELING FOR THE GROUND OF INCLINED LAYERS

朴 時玄^{*}・足立紀尚^{**}・木村 亮^{***}・岸田 潔^{****}

Si-Hyun PARK, Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA and Kiyoshi KISHIDA

In this study, single tunneling model tests are performed in the mass of an inclined layers of discontinuous ground. The tunneling is simulated by a trapdoor experiment, in which the formations of inclined layers are modeled using aluminum blocks in the shape of rectangles. Distribution of the earth pressure and its variations induced by the descending trapdoor are investigated.

The distribution of earth pressure greatly depends on the angles of the inclined layers. On the outer parts of the trapdoor, maximum normalized earth pressure levels are generally higher on the outer right-hand part than on the outer left-hand part.

Key Words : *Tunneling, Model test, Inclined layers ground, Trapdoor, Aluminum blocks*

1. はじめに

社会基盤施設の整備・拡充が未だ十分とは言えず、様々な分野における数多くの土木プロジェクトとして現われ、多様な目的を持つ地下構造物・地下空間の開発が行われている。地下空間の開発に当たって土木技術者として最も興味深いのは、構造物の安全性である。地下構造物の安全性は、構造物自身と対象とする地山との相互作用である。構造物と対象地山との力学的挙動に関する研究は、様々な視点から検討がなされてきた。トンネル掘削における力学挙動に関する研究は、対象地山を均質・等方性とし、砂質土等で模擬化した研究が多く、さらに、数々の成果が示されている^{1)~5)}。一方、山岳トンネルでは、対象とする地山が、断層・破碎帯・変質帯・節理・層理などを含んで不連続性地山であることが多く、地質構造や不連続性の要因が、トンネル掘削に伴う力学挙動に大きく影響を及ぼす。したがって、トンネル掘削による不連続性地山の力学挙動を明確にすることは、山岳トンネルの設計・施工において非常に重要な事である。

そこで本研究では、地層堆積構造や不連続面群の卓越方向を考慮した地山（以下、成層傾斜地山）を想定し、トンネル掘削に関する模型実験を行った。模型実験には、降下床実験装置を用いトンネル掘削をシミュレートした。降下床実験は、従来から埋設管、トンネルの沈下等の問題に適用され、降下床部の変位によるすべり面の形状と降下床部の土圧を求める有効な方法である¹⁾。村山・松岡は、従来の降下床実験で用いた砂の代わりに、各種直径のアルミ棒を混合し、積上げた積層体をモデル地山として降下床実験を行った²⁾。本研

キーワード：トンネル、模型実験、成層傾斜地盤、降下床、アルミブロック

* 学生員 京都大学工学研究科 土木工学専攻

** フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科 土木工学専攻

*** 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科 土木工学専攻

**** 正会員 工修 京都大学助手 工学研究科 土木工学専攻

究では、地山内部に形成された地層の傾斜（以下、成層傾斜角度）を考慮するためアルミブロックを用い成層傾斜地山モデルを作成して実験を行った。したがって、地山内部の成層傾斜角度と土被りをパラメータとし、トンネル掘削に伴う地山の力学挙動に関する検討を行った。

2. 降下床実験

本研究では、トンネル掘削を模擬する実験装置として、土圧の分布を測定することが可能な装置を用いた⁴⁾。地山材料として、アルミ棒とアルミブロックを用い、成層傾斜地山モデルを作成した。

本研究の模型実験を実施するにあたり、以下のように問題の理想化及び単純化を行った。

- (a) 地山は、不均質で異方性をもち三次元に広がっているが、これを二次元的な問題として扱う。
- (b) 地山材料は通常粘着力を有するが、粘着力のないアルミ棒とアルミブロックを用い成層傾斜地山をモデル化する。これは、すなわち、最も危険な地山状態を仮定にしている。
- (c) 地山は、断層・破砕帯・変質帯・節理・層理などの不連続面を含む非常に複雑な状態であるが、本研究では、地質層構造あるいは不連続群を卓越する二つの方向（一つは連続的、もう一つは非連続的）としてモデル化する。
- (d) トンネル掘削は、実験装置の底面を局所下降させることによる応力解放で表現する。

種々の要因が複雑に絡み合った実際問題を、そのまま模型実験で表現し、解明することは容易なことではない。そこで、本研究ではいくつかの要因を取り除いて単純化したモデル地山により基礎的な現象を把握し、トンネル掘削に伴う成層傾斜地山の力学挙動の解明を行う。

2.1 地山材料

成層傾斜地山をモデル化するため、地山材料として Fig. 1 に示すように、アルミ棒とアルミブロックを用いた。アルミ棒は、2 種類（直径が 1.6 mm と 3.0 mm、長さはいずれも 50.0 mm）を重量比 3:2 で混合したものであり、従来実施された砂質地山をモデル化したものと同一である（単位体積重量 $\gamma = 21.1 \text{ kN/m}^3$ 、粘着力 $c = 0.0 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ ）³⁾。本研究における成層傾斜地山構造は、アルミブロックによる積層体となっている。アルミブロックは Fig. 1(b) に示すように、四角柱（25mm×25mm、長さ 50mm）と 3 種類の三角柱を用いた。四角柱は直交する 2 方向の不連続面をモデル化するため、また、三角柱は、地山内部の成層傾斜角度を変化させるためにもちいた。アルミブロックの基本物性として、単位体積重量とすべり摩擦角を求めた。Fig. 2 は 2 つの四角柱を用いた接触面の一面せん断実験の結果であり、拘束圧と破壊時（滑る時）のせん断応力の関係を示す。この実験結果より、アルミブロックの基本物性は、単位体積重量 $\gamma = 26.4 \text{ kN/m}^3$ 、粘着力 $c = 0.0 \text{ kN/m}^2$ 、摩擦角 $\phi = 20^\circ$ であった。

2.2 実験装置

本研究で用いた実験装置は、Fig. 3 に示すものである⁴⁾。この装置は、降下床の上部だけではなく、その周辺部の応力変化まで測定が可能である。土圧分布計測型降下床実験装置の底面は、Fig. 4(a) に示すように 40 個の幅 24.5mm アルミ製の支持ブロックで構成されており、

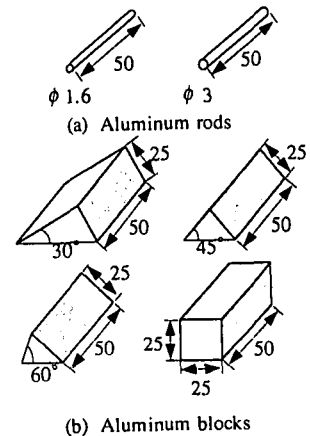


Fig. 1 Ground materials

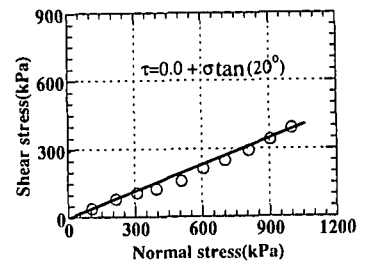


Fig. 2 Result of direct shear tests

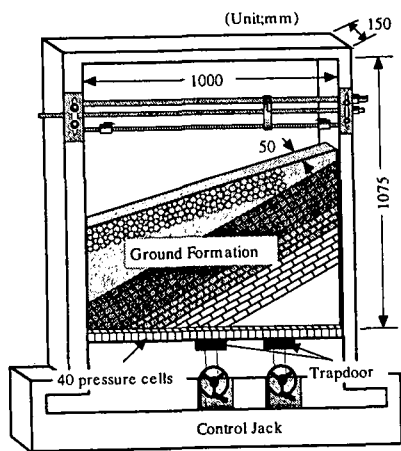


Fig. 3 Trapdoor testing apparatus

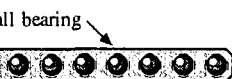
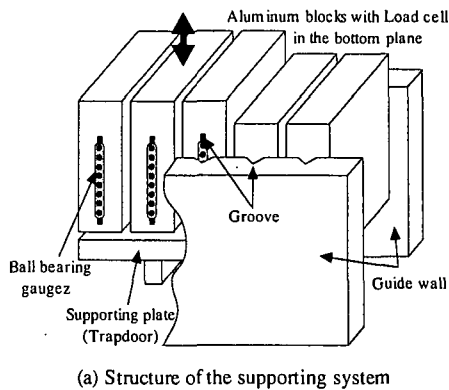


Fig. 4 Inside view of testing apparatus

各支持ブロックの底面に取付けた荷重計により地山の荷重を測定するようになっている。また、隣接する支持ブロックの間には0.5mmの隙間を取っており、支持ブロック同士が干渉しないようになっている。一方、支持ブロックの側面および支持ブロックを両側から支持する側壁には溝が加工されており、その隙間に Fig. 4(b)に示すボールベアリングを利用したボールゲージを挿入することにより、側壁と支持ブロックとの摩擦が低減されている。

また、支持ブロックは受け皿により支持され、受け皿の幅を変えると降下床の幅、すなわち、トンネルの幅を変えることが可能となる。受け皿はジャッキに接続され、ハンドルを回転させることで降下床が下降もしくは上昇し、トンネル掘削を模擬する形となる。

2.3 実験パラメータと実験パターン

Fig. 5は単設トンネル掘削実験における典型的な地山状態である。地山の成層傾斜角度 θ_1 を 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° の5パターン各々に対して、土被り H_2 (本研究ではアルミブロック積層体の高さで定義する)を10 cm、20 cm、40 cmの3パターンとし、トンネル幅 D を20 cmとして実験を行った。また、地表面の傾斜 θ_2 は水平とした。

アルミ棒積層体はアルミブロック積層体の下部 H_1 と上部 H_3 にそれぞれ2.5 cmと1.5 cmを設置した。下部にアルミ棒積層体を用いず、実験装置の底面に直接アルミブロック積層体を設置すると、局所的荷重の集中現象が生じやすくなる。これは初期荷重分布が不均等になり実験における再現性や実験パターン毎の比較が不可能になる。そこで、これらの問題を緩和するため、模型地山の下部にアルミ棒積層体を用い、初期荷重分布が出来るだけ均等になるようにした。下部のアルミ棒積層体の高さは、アルミブロックの単位寸法と同一の2.5 cmとした。単設トンネル掘削実験における実験パラメータはTable 1に示す。

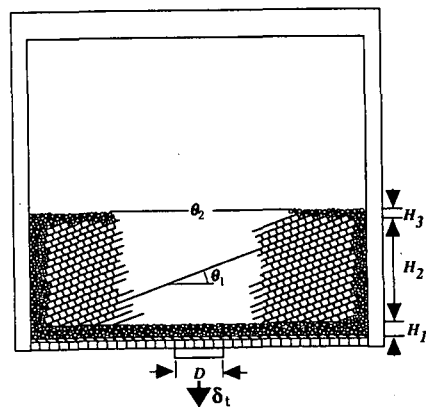


Fig. 5 Typical view of single tunneling

Table 1. Testing parameters

Trapdoor width		D	20 cm
Deposit Height of	Al. Rods	H_1	2.5 cm
		H_2	1.5 cm
	Al. blocks	H_2	10, 20, 40 cm
Angle of layers		θ_1	0, 30, 45, 60, 90°
Angle of surface		θ_2	0°

3. 実験結果

3・1 実験結果の整理方法

土圧分布測定形降下床実験装置により地山作成直後に計測した初期荷重分布の一例を Fig. 6 に示す。縦軸は土圧を、横軸は降下床中心からの水平距離である。本研究に用いた降下床実験装置は、モデル地山を作成しながらリアルタイムで土圧分布形状が計測できるため、均等な初期荷重分布になるよう調節することができる。しかし、地山材料として、四角柱ブロックを用いたため、ブロック同士の接触状態により作用荷重の均等な分

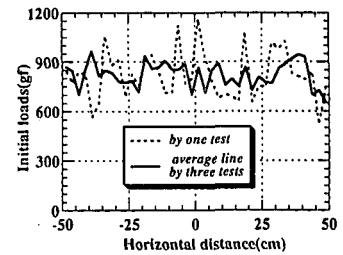


Fig. 6 Measurement example of initial loads

布を得ることが、アルミ棒だけを用いた従来の実験⁴⁾より難しい。しかしながら、実験パターン毎の結果の比較のために、初期荷重を均等にすることが必要である。そこで、作用荷重の不均等分布をなるべく最小化するために実験の回数を増やし、測定結果の平均を取る方法を用いた。本研究では、全ての実験パターンに対して3回の実験を行い、その結果を比較・検討した。Fig. 6は土被り20 cm、成層傾斜角度45度の地山における初期荷重の分布であり、破線は1回の実験結果を、実線は3回の実験の各計測点毎に平均した値を示す。図からわかるように、1回により得られた初期荷重の不均等なる分布は、実験回数を増やし、各計測点毎に計測した荷重を平均化する事によって、多く除去されていることが分かる。以下の考察はすべてこのような平均化したデータを用いたものである。

3・2 土圧分布形状

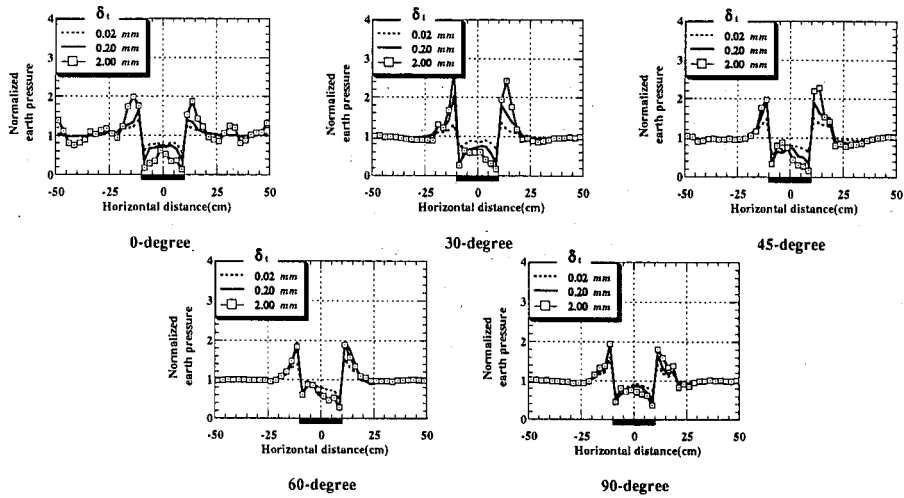
Fig. 7は、成層傾斜角度5パターンに対して土被り比（土被り H_2 /トンネル幅 D ）0.5、1.0と2.0における土圧分布形状を示す。縦軸は規準化土圧、横軸は降下床中心からの水平距離である。規準化土圧とは、降下床の下降段階に測定した荷重を地山作成直後の初期荷重で割ったもので、その値が1.0に近いほど初期荷重から変化していないことを意味する。Fig. 7は、各々の成層傾斜角度地山に対して、降下床の下降量0.02 mm、0.20 mmと2.00 mmでの土圧分布の結果をプロットした。

まず、土被りに着目すると、Fig. 7から以下の知見を得た。

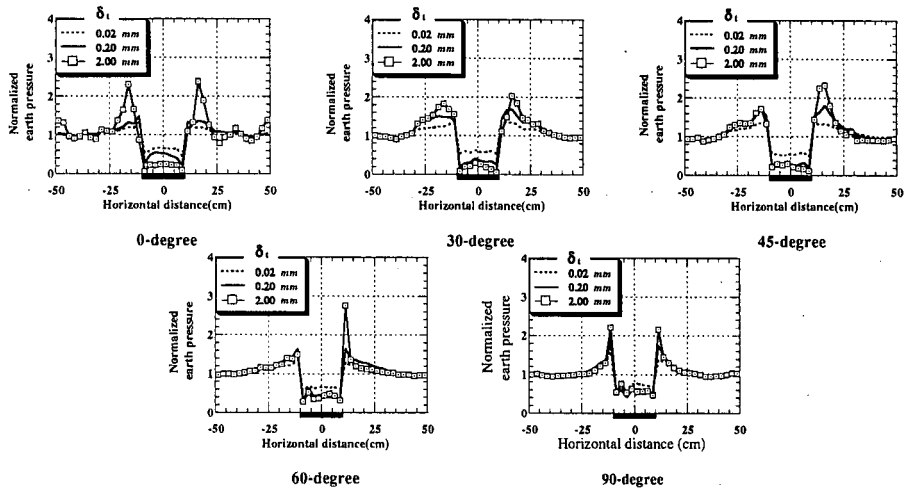
- 降下床の下降により、降下床上部の荷重は減少し、その周辺部の荷重は増加する。すなわち、トンネル掘削により応力の再配分がなされている。
- 土圧分布形状は、成層傾斜角度と土被りにより異なる。成層傾斜角度が0度と90度の地山では、降下床を中心として対称な土圧分布形状になる。しかし、成層傾斜角度が0度の地山では、規準化土圧が基準値1に対して起伏が生じ、さらに実験装置の左右端部で増加している。また、降下床の下降による降下床周辺部の土圧増加範囲は、成層傾斜角度0度の地山の方が90度の地山より広範囲である。
- 成層傾斜角度が30度、45度、そして60度の地山では、土被り比0.5と1.0において降下床上部及び周辺部の土圧分布が非対称で現われる。しかし、この現象は、土被り比が2.0に増加すると確認できず、降下床を中心として対称な土圧分布形状を示している。
- 降下床の下降につれ、降下床の周辺部に作用する土圧の増加範囲と最大規準化土圧は成層傾斜角度により異なる。
- 降下床の下降につれ、降下床上部に作用する規準化土圧は成層傾斜角度と土被り毎に異なる。

つぎに、降下床の下降量に着目すると以下の知見を得る。

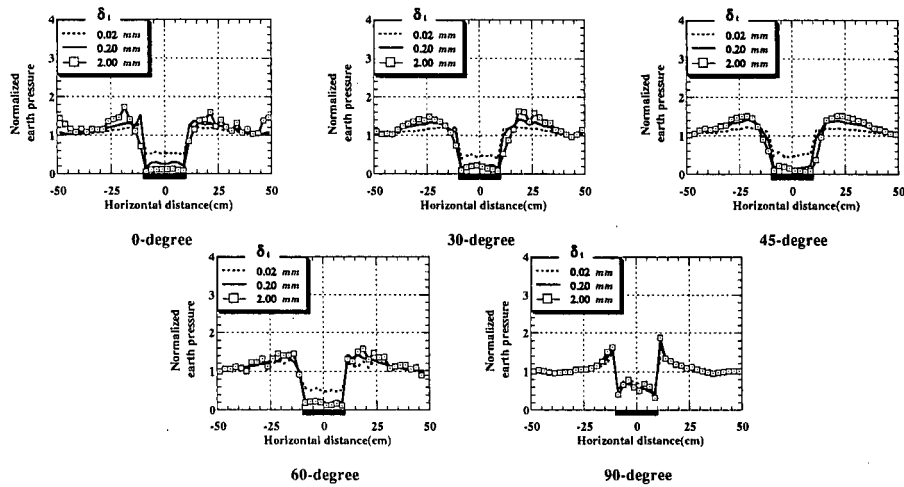
- 降下床の下降量0.02 mm時における土圧分布は、成層傾斜角度によらず、降下床を中心として対称である。
- 降下床の下降量が0.02 mmから、さらに下降すると、応力の再配分もさらに進行し、降下床上部は土圧の減少する傾向が、降下床周辺部は土圧が増加する傾向を示している。
- 降下床の下降量が0.20 mmの時、非対称な土圧分布が成層傾斜角度が30度、45度、そして60度の地山に発生する。成層傾斜角度が0度と90度の地山では、降下床の下降量によらず土圧の荷重分布は対



(a) Overburden ratio(H_2/D) 0.5



(b) Overburden ratio(H_2/D) 1.0



(c) Overburden ratio(H_2/D) 2.0

Fig. 7 Distribution of normalized earth pressure

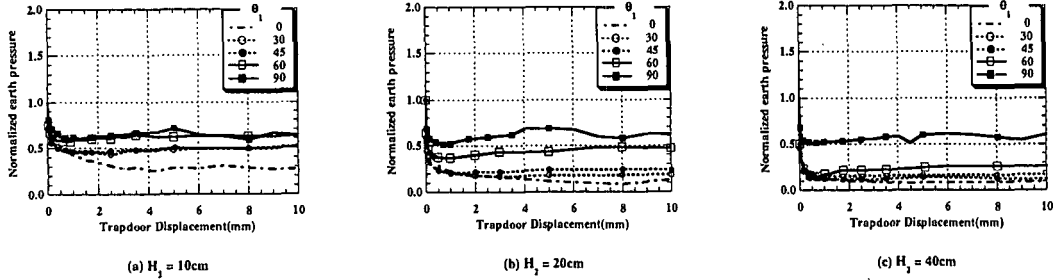


Fig. 8 Variation in normalized earth pressure on the upper part of trapdoor

称である。

4. 土圧結果に対する考察

実験結果の考察は、下降する降下床に作用する土圧とその周辺部に分けて行うことにする。

4.1 下降降下床に作用する荷重

下降降下床に作用する土圧の変化を、土盛り毎に、Fig. 8 に示す。縦軸に規準化土圧を、横軸に降下床の下降量 δ_f をプロットした。降下床の下降量 δ_f は 10mm、すなわち、トンネル幅 $D=20$ cm の 5% に至る下降量までの結果である。これらの結果から以下の知見を得た。

- (a) 全てのパターンに対して降下床土圧は、降下床下降の初期レベルで大きく減少する。
- (b) 降下床の上部に作用する規準化土圧は、成層傾斜角度に大きく依存し、下降量が 0.40 mm 以後からほぼ一定値に収束している。
- (c) 降下床下降量が 0.40 mm における規準化土圧は、土盛り $H_2 = 10$ cm の地山モデルが最も大きい。
- (d) 土盛り H_2 が 10 cm より高くなると、降下床に作用する規準化土圧はさらに減少し、土盛り $H_2 = 40$ cm の地山モデルにおける最小規準化土圧 ($\delta_f = 0.40$ mm の時) は、成層傾斜角度が 90 度の地山を除くとほぼ 0.15 を示す。この値は Fig. 9 に示すように、土盛りの増加により発達したアーチ効果で説明することができる。

ここで述べたアーチ効果についての考察を行う。地山材料として四角柱アルミブロックを用いたため、成層傾斜角度と 90 度をなすもう一つの分離面を考えることができる。土盛りが増加することによって発達したアーチ効果により、Fig. 9(a) のような高さ 2.5 cm のアルミ棒積層体(A 部)とアルミブロック積層体(B 部)の荷重が降下床に作用することになる。また、成層傾斜角度が 0 度の地山の場合は、アルミブロック積層体の幾何学的な配列構造により Fig. 9(b) のように考えることができる。A 部と B 部の荷重(KN)は次のように計算できる。

$$A \text{ 部} = 0.025^m \times 0.2^m \times 0.05^m \times 21.1^{KN/m^3} \quad (1)$$

$$B \text{ 部} = \left\{ \frac{1}{4} \times (0.2^m)^2 \times \sin 2\theta_1 \right\} \times 0.05^m \times 26.4^{KN/m^3} \quad (2)$$

土盛り $H_2 = 40$ cm における降下床上部の全ての荷重と、成層傾斜角度毎に分離面による (A+B) 部の荷重を Table 2 に示す。

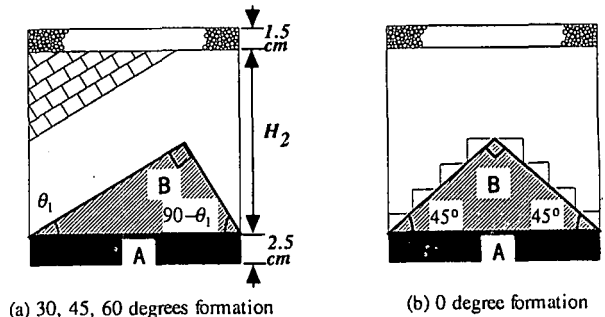


Fig. 9 Separation mode when arching effect developed

Table 2を見ると、成層傾斜角度が0度、30度、45度と60度の地山における(A+B)部の荷重は、降下床上部全ての荷重の15%(0.15)とほぼ等しい。また、これらの値は、(d)で述べた実験結果と一致している。これにより、土被り $H_2 = 40\text{ cm}$ (土被り比 $H_2/D=2$)の地山の場合は、成層傾斜角度が90度以外の地山では明瞭なアーチ現象が現われていると考える。

Table 2. Earth pressure ratio calculated by separation mode in overburden 40 cm

θ_1	Upper part (N)	(A+B) part (N)	Ratio
0°	114.1	18.4	0.161
30°	114.1	18.4	0.145
45°	114.1	18.4	0.161
60°	114.1	18.4	0.145

4・2 降下床周辺部に作用する荷重

降下床の周辺部に作用する土圧の降下床下降に伴う変化の一例を Fig. 10 に示す。Fig. 10(a)は下降降下床の左外側、Fig. 10(c)は右外側での降下床下降量と規準化土圧との関係である。降下床周辺部における土圧の変化を評価するためには、Fig. 7 を参考にしながら、応力集中のピーク計測点を中心として10 cm(降下床幅の半分)幅の区間での土圧により検討を行った。Fig. 10(b)は、応力集中部の土圧変化を検討する際の評価区間を示している。成層傾斜角度が0度、30度、45度、60度の地山では、土被り H_2 が10 cmと20 cmの場合、降下床に隣接する D_1 について、土被り H_2 が40 cmの場合は降下床の両端からそれぞれ1ブロック(2.5 cm)離れた D_2 について評価する。また、成層傾斜角度が90°の地山では、土被りに関係なく、降下床に隣接する D_1 について評価することにする。Fig. 10 から以下のことが言える。

- 降下床両外側の周辺規準化土圧は、降下床の下降に伴い増加する。
- 土被り $H_2 = 20\text{ cm}$ の地山の場合、降下床周辺部における規準化土圧は、成層傾斜角度に大きく依存し、その増加量は下降降下床の左右で異なる。最大規準化土圧は、降下床に対して左外側においては成層傾斜角度が30度の地山、右外側においては45度の地山で現われる。このような結果は、成層傾斜角度が大きい場合、降下床上部に作用する土圧が大きいいため、周辺部における土圧増加はそれほど大きくならないと考える。
- 土被りが大きくなると、降下床周辺部における土圧の左右非対称性は徐々に解消される。

4・3 成層傾斜角度による土圧の大きさ

4・1と4・2から計算された規準化土圧を、成層傾斜角度と土被りと共に Fig. 11 にプロットした。Fig. 11(a)は4・2で計算した降下床の左外側部、Fig. 11(b)は4・1で計算した降下床の上部、そしてFig. 11(c)は4・2で計算した降下床の右外側部の収束値である。

これらの図より、全ての地山モデルにおいて、降下床周辺部の土圧は、降下床右外側(Fig. 11(c))が左外側(Fig. 11(a))より大きい。また、降下床周辺部における最大規準化土圧は、土被り20 cmの地山において降下床の右外側は成層傾斜角度が45度の地山、左外側は成層傾斜角度が30度の地山モデルの実験で出現した。さらに、降下床の上部に作用する規準化土圧は、成層傾斜角度が90度の地山を除くと土被りが増加する事によって大きく減少する。

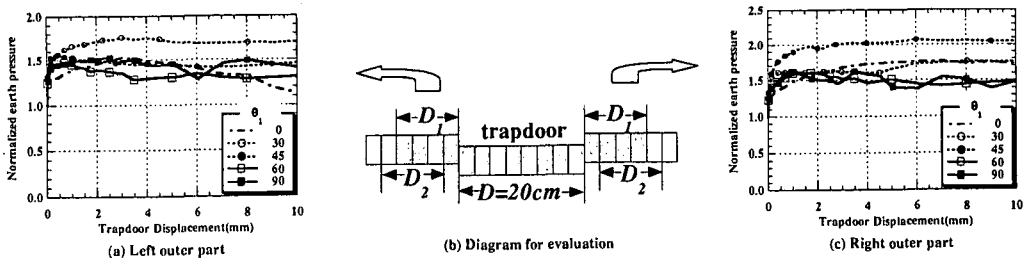


Fig. 10 Variation in normalized earth pressure on the outer parts of trapdoor($H_2/D = 1.0$)

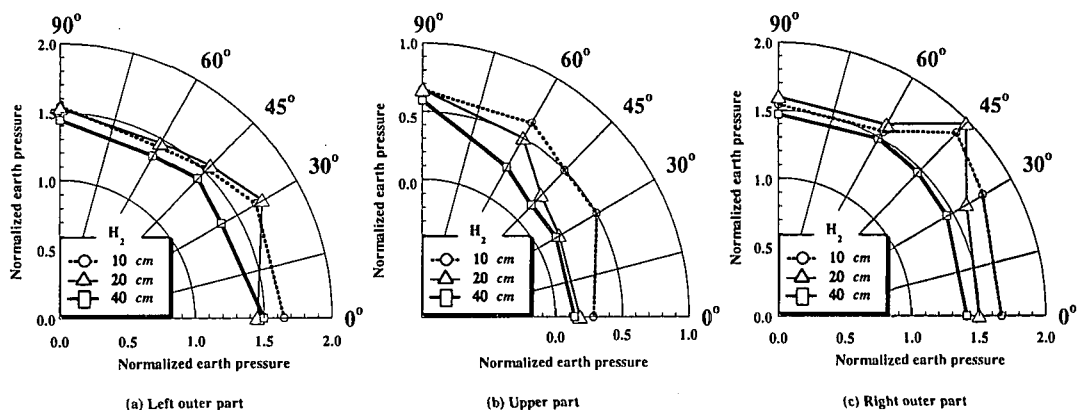


Fig. 11 Relationship between overburden height and the angle of the inclined layers

5. まとめ

本研究では、不連続性地山の一種類として成層傾斜地山をアルミ棒とアルミブロックで表現し、降下床実験によりトンネル掘削をシミュレートした。成層傾斜角度と土被りをパラメータとして、降下床下降に伴う土圧の分布や変化特性に対して検討を行った。降下床上部及び周辺部に作用する土圧は、成層傾斜角度と土被りに大きく依存している。また、降下床の周辺土圧の分布は、成層傾斜角度により偏りが生じることが確認出来た。特に、成層傾斜角度が 30 度、45 度、そして 60 度の地山において、降下床両外側の規準化土圧は、左右非対称であり、降下床右外側が左外側より大きく現われた。以上より、成層傾斜構造地山あるいは斜面地形にトンネルを掘削する場合、偏圧が生じることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Litwiniszyn, J. : An Application of the Random Walk Argument to the Mechanics of Granular Media, Rheology and Soil Mechanics, IUTAM SYMPOSIUM GRENOBLE, 1964, pp. 82-89.
- 2) 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.
- 3) 足立 紀尚・田村 武・八嶋 厚・上野 洋：砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究，土木学会論文報告集，第 358 号，pp.129-136, 1985.
- 4) Adachi T., Kimura M., Tamura T. and Aramaki S. : Experimental and Analytical Studies of Earth Pressure, *Computer Methods and Advances in Geomechanics(Balkema)*, pp.70-75, 1994.
- 5) Adachi T., Kimura M., Tamura T. and Aramaki S. : Earth Pressure Distribution in Trap Door Test, *Proc. of 29th Japan National Conference on SMFE*, pp.1989-1992, 1994.