

成層傾斜角度を考慮した降下床実験とトンネル土圧式

TRAPDOOR TESTS AND TUNNEL LOADS EQUATION CONSIDERED THE ANGLE OF THE INCLINED LAYERS

足立紀尚¹⁾・木村 亮²⁾・岸田 潔³⁾・朴 時玄⁴⁾

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

In this study, tunneling model tests are performed in the ground with inclined layers. Tunneling is simulated by a trapdoor experiment, in which earth pressure acting on both the upper and the outer parts of the trapdoor can be measured. Aluminum rods and blocks in the shape of rectangles are used as the ground materials for the formation of the inclined layers.

Not only variations in earth pressure but also the surface settlements due to the descending trapdoor are investigated. Moreover tunnel loads equation considered the angle of the inclined layers is induced so that comparisons between tests results and theoretical results are also conducted.

Key Words : *tunneling, trapdoor test, inclined-layer ground, aluminum blocks, tunnel loads equation*

1. はじめに

トンネルの特徴を一言で言うならば、掘削断面に比べて延長の大きな地下構造物という表現が適当であろう¹⁾。従って、必然的に良好な地山だけでなく、断層・破碎帯・変質帯・節理・層理や未固結地盤などからなる不良な地山区間も掘進することになり、多様な地山条件の下で建設される。なかでも、山岳トンネルの施工においては、対象とする地山が様々な不連続面を含むことが多く、さらに、これらの不連続面はトンネル掘削時の力学的挙動に大きく影響を及ぼすと指摘されている。このような地山での施工には、均質な地山での施工に比べて多大な費用と時間を要し、トンネルの安全性にも細心の注意が払われる。従って、トンネル掘削に伴う不連続性地山の力学的挙動を解明することは、山岳トンネルの合理的設計・施工における最重要課題であろう。

トンネル掘削時の力学的挙動に関する研究は、掘削に伴って生じる地山のゆるみ領域の発生機構に関する問題として取り扱われ、降下床実験が多く行なわれてきた。降下床実験は、地山下部に設置された水平板を下降させ、その板に作用する土圧の変化や地山の变形メカニズムを調べる目的で実施されてきた。現在までに、多くの実験的・解析的な研究^{2)~6)}が実施され、貴重なデータが示されている。

一方、実地山により近い地山として互層地盤を想定した実験的研究も発表されている。著者ら⁷⁾は、遠心載荷装置を用い、互層地盤における円形降下床実験を行なった。この実験では、土槽の下部に粘土層を、上部に飽和砂質土層を設置し、粘土層の高さを変化させて実験を行なった。小西・新井⁸⁾は、互層地盤における切羽の崩壊挙動に関する検討を行なっている。また、Hagiwaraら⁹⁾は遠心載荷装置を用い、上部層の剛性を変化させ、下部層に設けた円形トンネルの变形挙動を検討した。さらに、蔣・江崎¹⁰⁾は、2次元底面摩擦模型実験装置を用い、水平成層地山を模擬し、深部地盤における地下空洞周辺の破壊挙動に関する研究を行なった。

しかし、これらの研究は、水平成層地層を有する地山に関する研究にとどまり、不連続性地山の挙動に大きく影響を与える地層の傾斜を考慮した研究例はそれほど多くない。そこで、本研究では、成層面が傾斜している地山（以下、成層傾斜地盤）を、その傾斜角度を主なパラメータとしてモデル化を行い、トンネル掘削に関する模型実験を行った。模型実験には、降下床の上部および周辺部の土圧が計測可能な土圧分布計測型降下床実験装置を用い、降下床の下降に伴う土圧の再配分や地表面の沈下を計測した。さらに、成層傾斜地山におけるトンネル掘削により

1) フェロー 工博 京都大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻

2) 正会員 工博 京都大学大学院助教授 工学研究科 土木工学専攻

3) 正会員 工博 京都大学大学院助手 工学研究科 土木工学専攻

4) 学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

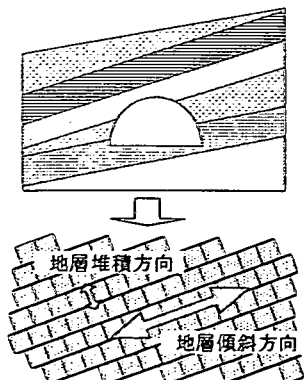


Figure 1 Modeling on the ground with inclined layers

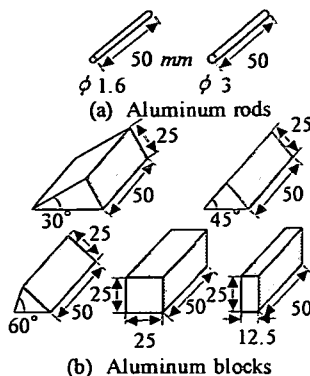


Figure 2 Ground materials

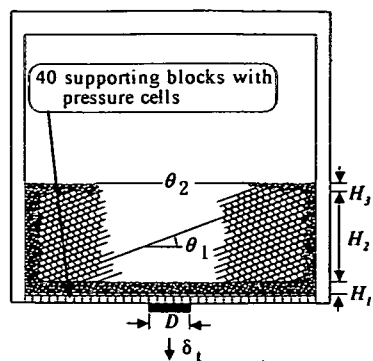


Figure 3 Testing parameters

生じるトンネルゆるみ土圧を算定する簡易理論式を誘導し、実験結果と比較しながらその適用性について検討を行った。

2. トンネル掘削模型実験

本研究の模型実験を実施するにあたり、以下のようにモデル化を行った。

- (a) 実地山は、不均質で異方性をもち3次元的に広がっているが、これを2次元問題として扱う。
- (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ブロックとアルミ棒を用いて、成層傾斜地山をモデル化する。
- (c) 実地山は、多様な地質からなり、さらに断層・破碎帯・変質帯・節理・層理などの様々な不連続面を含む。本研究でのモデル地山は、Figure 1のように、四角形アルミブロックを用いモデル化を行ったため、地層傾斜方向と地層堆積方向の不連続面を有する。
- (d) トンネル掘削は、実験装置底面に設置された降下床を下降させることによって表現する。

本研究で用いた実験装置の主な特徴は、降下床の上面だけではなく、その周辺部の固定底盤上に作用する荷重まで測定可能な点である。即ち、装置底盤は40個の支持ブロック（一つの幅は約2.5 cm）により構成され、各々のブロックが荷重計として機能する。従って、降下床装置の底盤に掛かる土圧の変化を分布形状として捉えることができる。実験装置の詳細な仕組みについては参考文献4)を参照されたい。

(1) 地山材料

成層傾斜地山をモデル化する地山材料として Figure 2 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、直径が1.6 mmと3.0 mmの2種類を重量比3:2で混合したものであり、従来実施されてき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 $\phi = 30^\circ$ ）²⁾。アルミブロックは Figure 2(b) に示すように、2種類の四角柱と3種類の三角柱を用いた。四角柱のアルミブロックを用いて地層を、また、三角柱のアルミブロックを用いて種々の地層傾斜角度を模擬した。アルミブロック積層体の配列は千鳥組になっており、二方向の不連続面（一つは連続的、もう一つは非連続的）を模擬している。なお、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 $c = 0.0 \text{ kN/m}^2$ 、ブロック同士のすべり摩擦角 $\phi' = 20^\circ$ である。

(2) 実験パラメータ

Figure 3 はトンネル掘削実験における実験パラメータを示す。地山の地層傾斜角度（以下、成層傾斜角度） θ_1 を0度から90度まで変化させた。即ち、地層が水平である0度地盤、緩い傾斜の30度地盤、中間傾斜の45度地盤、そして急な傾斜の60度地盤や垂直地層を持つ90度地盤の5パターンである。トンネル幅 D を20 cmとし、土被り H_2 （本研究では、モデル地盤の土被りを、アルミブロック積層体の高さで区分することにした）は $0.5D$ 、

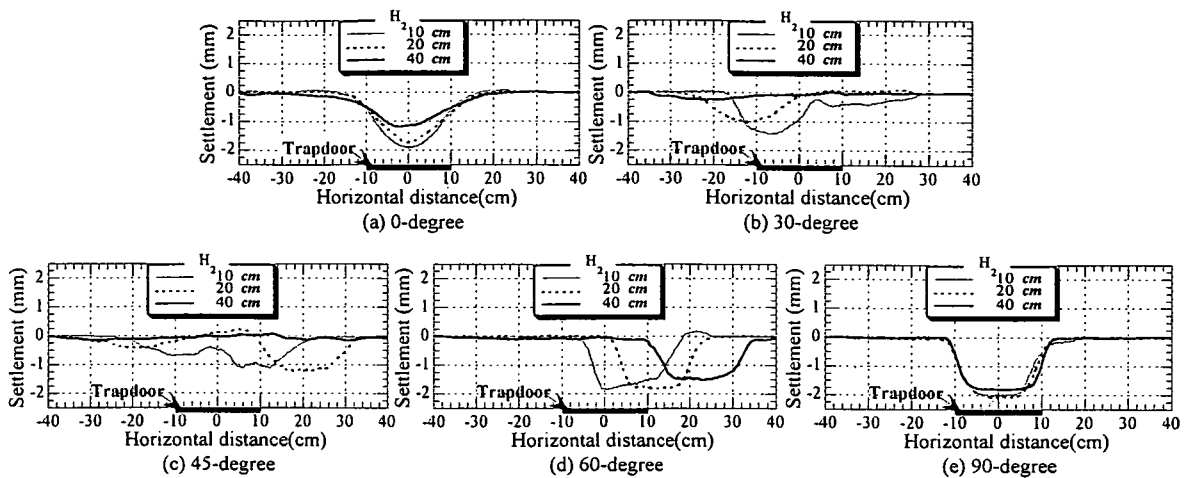


Figure 4 Surface profiles at the trapdoor displacement $\delta_t = 2.00$ mm

1.0D, 2.0Dの3パターンとして実験を行った。ただし、地表面の傾斜 θ_2 は水平とした。

模型地山を作成するにあたって、まず、下部アルミ棒積層体を降下床装置の底面に $H_1 = 2.5$ cm設置する。下部アルミ棒積層体を用いず、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。これによって初期荷重分布が不均一になり、実験における再現性や実験パターン毎の比較が困難になる。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。また、下部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。下部アルミ棒積層体の上に、地層傾斜角度をなす三角柱アルミブロックを設置する。その上に、アルミブロック積層体を想定土被り H_2 まで積み上げる。本研究で用いた降下床実験装置は、地山を作成しながらリアルタイムで荷重状態を計測することが可能になっている。従って、土被りを徐々に大きくしながら、局所的な荷重集中が発生しないよう注意を払った。最後に、アルミブロック積層体の上に上部アルミ棒積層体を $H_3 = 1.5$ cm設置する。上部アルミ棒積層体は地表面の表土を模擬したものであり、地表面の沈下計測をより簡便に実施できる。

降下床の下降は、最大5.00 mmまでとし、平均下降速度は0.33 mm/minであった。また、荷重計による荷重の測定誤差は1%以内、レーザ変位計の分解能は0.003 mmである。

3. 地表面沈下に関する実験結果

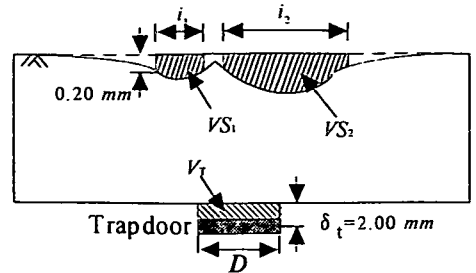
(1) 地表面沈下形状

降下床下降量 $\delta_t = 2.00$ mmにおける地表面沈下形状の一例をFigure 4に示す。Figure 4は、各成層傾斜角度ごとに土被り $H_2 = 10$ cm, 20 cm, 40 cmの結果をプロットした。これらの図より以下のことが言える。

- 成層傾斜角度 0 度地盤：水平地層を持つ 0 度地盤においては、地層堆積方向に地表面の沈下が見れた。沈下形状は、逆コーン形となっており、最大沈下は降下床の中心線上である。また、土被りが大きくなるにつれ、地表面沈下は小さくなる。
- 成層傾斜角度 30 度地盤：地表面の沈下は、土被り $H_2 = 10$ cmの場合、降下床の左上部・右上部の両方に見られた。土被り $H_2 = 20$ cmにおいては、降下床の左上部だけに見られた。また、土被りが $H_2 = 40$ cmに大きくなると、地表面の沈下は少なくなる。緩い傾斜を持つ 30 度地盤においては、地層堆積方向に地表面の沈下が大きく現れることがわかった。
- 成層傾斜角度 45 度地盤：地表面の沈下は主に降下床の右上部に見られた。しかし、土被り $H_2 = 10$ cmと 20 cmの場合は降下床の左上部にも地表面沈下が見れた。土被りが $H_2 = 40$ cmに大きくなると、地表面沈下はほとんど見られず、地山は比較的安定な状態であると考えられる。中間傾斜を持つ 45 度地盤においては、地層傾斜方向の沈下がもっとも大きいことがわかる。
- 成層傾斜角度 60 度地盤：急な傾斜を持つ 60 度地盤においては、土被りによらず降下床右上部に地表面沈下が見られ、地層傾斜方向の影響が大きいことが分かる。土被りが大きくなるにつれ、沈下位置が降下床直上から右へと移行する。生じた沈下がもっとも小さい土被り $H_2 = 40$ cmの場合でも降下床下降量の 70% (1.4

mm) 以上の沈下が発生した。

- (e) 成層傾斜角度 90 度地盤：土被りによらず，降下床の直上の地表面に局部的に大きな沈下が見られた。土被りが大きくなると地表面の沈下は多少減少するが，その差は小さい。



(2) 沈下量・沈下範囲についての考察

トンネル掘削に伴う地表面の沈下によって，地表や地中の構造物に変状等の重大な影響がおよぶことがある。ここでは，地表面沈下の影響を定量的に把握することを目的とする。そこで，降下床下降量 $\delta_t = 2.00 \text{ mm}$ の 10% である 0.20 mm を基準値として，それ以上の沈下が現れた地表面について沈下量と沈下の範囲を求めた。ここで，基準値 10% とは，データスムージングを行う時，最大沈下量との差を考慮して決めた。Figure 5 はこれらを模式的に表したものである。地表面の沈下量と沈下範囲は以下のように定義する。

$$\text{沈下量 (Normalized volume loss)} = \frac{VS_1 + VS_2}{V_T} \quad (1)$$

$$\text{沈下範囲 (Normalized extent)} = \frac{i_1 + i_2}{D} \quad (2)$$

VS_1, VS_2 ; 地表面に発生した地表面沈下面積

V_T ; 降下床下降による降下床下降面積

i_1, i_2 ; 地表面に発生した地表面沈下の水平距離

D ; 降下床の幅

Figure 6 に各土被り H_2 ごとの降下床下降量 $\delta_t = 2.0 \text{ mm}$ における沈下量と沈下範囲を示す。0 度地盤の場合には，地表面沈下量は土被りの増加と共に減少するが，沈下範囲は広くなる。30 度地盤の場合には，土被りが大きくなると地表面の沈下量と沈下範囲が急激に小さくなる。45 度地盤かつ土被り $H_2 = 40 \text{ cm}$ の場合には，地表面の沈下量と沈下範囲がもっとも小さい。また，60 度地盤・90 度地盤の場合には，土被りによらず地表面の沈下量と沈下範囲は一定値であり，沈下量が他の傾斜角度に比べて大きな値を示すことから地表面に大きな影響がおよんでいると考えられる。

4. 土圧に関する実験結果

(1) 土圧分布形状

Figure 7 に，土被り H_2 ごとの降下床下降量 $\delta_t = 2.0 \text{ mm}$ における土圧分布形状の一例を示す。縦軸には規準化土圧，横軸には降下床中心からの水平距離をプロットした。なお，規準化土圧とは降下床下降時に測定した荷重を地山作成直後の初期荷重で除したものである。前述したように，モデル地山は，アルミ棒に比べかなり大きいサイズのアルミブロックにより構成されているので，地山作成直後計測した初期荷重は平均値と多少離れてばらついている。例えば，土被り $H_2 = 20 \text{ cm}$ 地盤の一例として，平均荷重 7.74 N ・標準偏差 1.33 であった。一方，同一土被りのアルミ棒だけを用いた場合は，平均荷重 6.85 N ・標準偏差 0.89 であった。

Figure 7 より，降下床下降時の土圧分布形状は土被りと成層傾斜角度により異なることが分かる。特に，成層傾斜角度 45 度・60 度地盤で土被り $H_2 = 10 \text{ cm}$ と 20 cm 地盤においては，降下床上部及び周辺部は降下床中心に対して左右非対称な土圧分布形状を示している。降下床周辺部においては，右側が左側より土圧の増加が大きく現れた。この結果は，地層が傾斜した地山の場合，トンネル掘削により応力集中や偏圧が発生しうることを表している。このように傾斜を有する地山ではトンネルの設計段階から覆工，支保パターン，掘削工法等について注意を払う必要があると考える。

(2) 降下床上部土圧

Figure 8 に，土被りごとに降下床上部に作用する土圧変化の一例を示す。縦軸に規準化土圧を，横軸に降下床下降量 δ_t をプロットした。この図から，全てのパターンにおいて降下床土圧は，降下床下降初期に大きく減少し，降下床下降量 $\delta_t = 0.50 \text{ mm}$ 前後にほぼ一定値に収束しているといえる。Figure 8 より，降下床下降量 $\delta_t = 2.00 \text{ mm}$ に

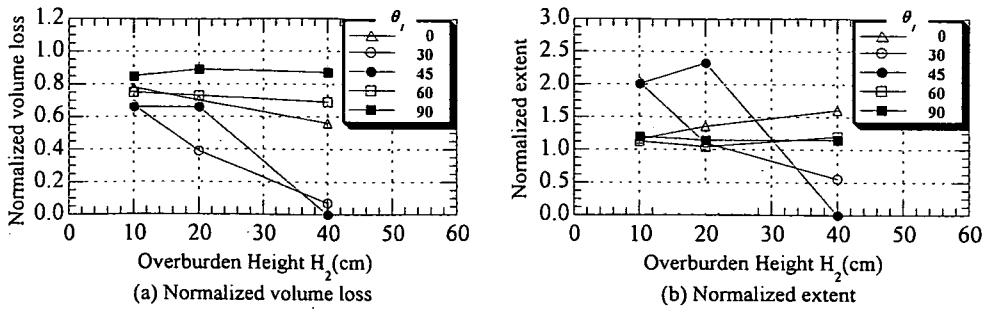


Figure 6 Variations in volume loss and extent of surface settlement

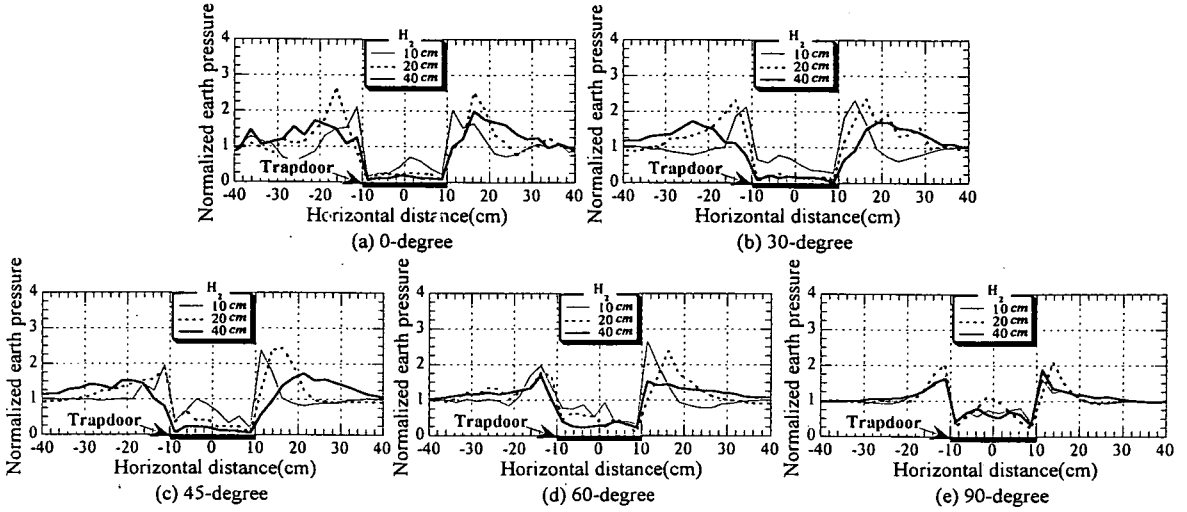


Figure 7 Distribution of normalized earth pressure at the trapdoor displacement $\delta_t = 2.00$ mm

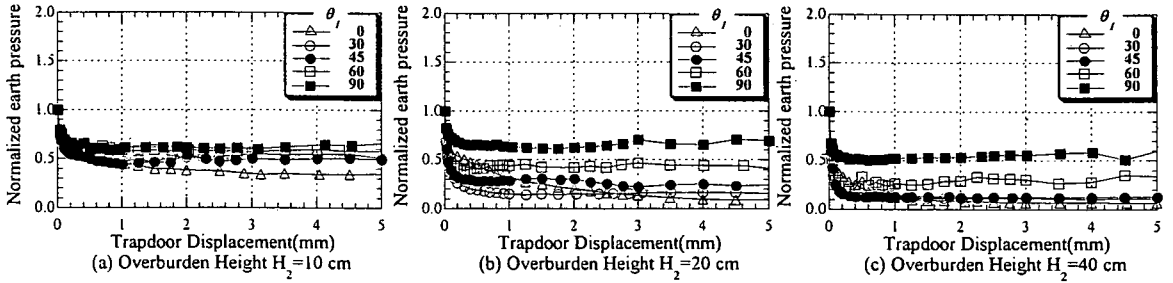


Figure 8 Variation in normalized earth pressure on the trapdoor

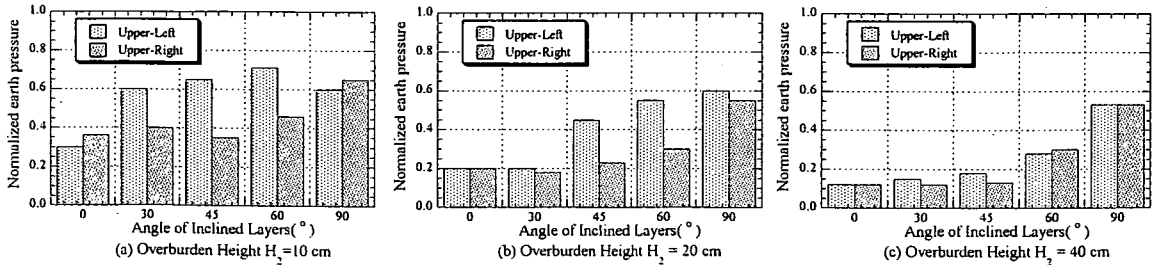


Figure 9 Normalized earth pressure on the upper-left and the upper-right parts of trapdoor

おける規準化土圧をその収束値として Table 1 に示す。この表から、規準化土圧の収束値は、成層傾斜角度が大きいほど、また、土被りが小さいほど大きい。特に、成層傾斜角度 60 度・90 度地山を除いて、土被り $H_2=40$ cm の場合における規準化土圧の収束値は約 0.10~0.13 の間ではほぼ一定値であることが分かる。このことから、水平地層や緩い傾斜の地層を有する地盤では、成層傾斜角度が高い地盤より、土被りが大きくなるにつれ、アーチ効果が発揮し易いと考えられる。

Table 1 Normalized earth pressure on the upper part of trapdoor at trapdoor displacement $\delta_1=2.00$ mm

$\theta_1 \backslash H_2$	10 cm	20 cm	40 cm
0°	0.383	0.203	0.100
30°	0.463	0.148	0.112
45°	0.466	0.305	0.126
60°	0.587	0.421	0.292
90°	0.614	0.613	0.536

次に、降下床上部を降下床中心線から左右 2 つに分け、降下床土圧の非対称性について検討する。Figure 7 に示した土圧分布形状からもわかるように、地層が傾斜を有する場合、降下床周辺部だけでなく降下床上部においても左右非対称である。トンネル覆工に作用する土圧が左右非対称であれば、不利な曲げモーメントが発生し、結局覆工の安全性に問題となる。そこで、降下床上部の左半分と右半分に作用する規準化土圧に着目し、土被りと成層傾斜角度ごとに、降下床上部の左半分と右半分に作用する土圧を Figure 9 に示した。これより、地層が傾斜を有し、かつ、土被りが小さい地山条件では、降下床上部において顕著に左右非対称な土圧が発生し、かつ、降下床土圧は右半分より左半分で大きくなる。しかし、土被りが $H_2=40$ cm と大きくなると左右非対称性による基準化土圧の差は解消される結果を得た。

5. トンネル土圧理論に基づく考察

成層傾斜地盤におけるトンネル掘削を行なう際、トンネル土圧を算定する理論式を誘導し、実験結果との比較を行なう。

(1) 成層傾斜角度を考慮したトンネル土圧理論式

本研究におけるモデル地山では、成層傾斜角度 θ_1 方向に連続的な層を有するため、トンネル掘削により生じるすべり線を成層傾斜角度 θ_1 と同様になす事ができる。模型実験の地表面測定結果によると、成層傾斜角度 45 度以上地盤の場合、地層傾斜方向に沿ったすべりが発生することが確認できる。

したがって、Figure 10(a)に示すように一辺が降下床幅 D に等しく、もう一方の辺が成層傾斜角度 θ_1 に平行な平行四辺形の土塊 $abcd$ を考え、降下床を下降させると土塊 $abcd$ が滑ると仮定する。すると、Figure 10(b)に示すような、降下床上部のせん断すべり面に挟まれた厚さ dz の微小要素に働く力の釣合い条件を考えることができる。

せん断面に沿って作用するせん断応力 τ^L, τ^R は次のように計算される。

$$\begin{cases} \tau^L = c + \sigma_n^L \tan \phi' \\ \tau^R = c + \sigma_n^R \tan \phi' \end{cases} \quad (3)$$

τ^L, τ^R ; 微小要素の左・右側のせん断面に沿って作用するせん断応力

c ; 地山の粘着力 (ここでは $c=0$ とみなす)

σ_n^L, σ_n^R ; 微小要素の左・右側のせん断面に垂直に作用する垂直応力

ϕ' ; すべり面におけるすべり摩擦角 (or 地山の内部摩擦角)

すると、未知数は、 $\sigma_v, \sigma_n^L, \sigma_n^R$ の 3 つである。また、水平力・鉛直力・微小要素中心点でのモーメントの釣合い式によって 3 つの方程式があり、微分方程式を解くことで降下床鉛直土圧 σ_v が求められる。

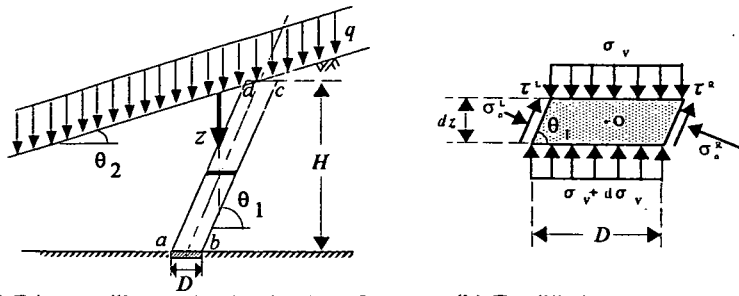
まず、水平方向の釣合いから、次式が導ける。

$$\sigma_n^L = \left(\frac{\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \tan \phi'}{\sin \theta_1 + \cos \theta_1 \tan \phi'} \right) \sigma_n^R \quad (4)$$

鉛直方向の釣合い式から、次式が導ける。

$$d\sigma_v \cdot D = \gamma \cdot D \cdot dz + \frac{dz}{\tan \theta_1} (\sigma_n^L - \sigma_n^R) - \tan \phi' \cdot dz (\sigma_n^L + \sigma_n^R) \quad (5)$$

γ ; 地山の単位体積重量



(a) Diagram illustrating inclined surfaces (b) Equilibrium conditions

Figure 10 Model ground considered the angle of inclined layers

微小要素の中心 O 点におけるモーメントの釣り合いから、次式が導ける。

$$\sigma_n^R = \frac{(2\sigma_v + d\sigma_v)(\sin\theta_1 + \cos\theta_1 \tan\phi')}{2\sin\theta_1 \{1 + \tan^2\phi'\}} \quad (6)$$

式(4)~(6)を整理すると

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \frac{2\alpha}{D}\sigma_v - \gamma = 0 \quad (7)$$

$$\text{ここで, } d\sigma_v \cdot dz \approx 0, \alpha = \frac{\tan\phi'}{\sin^2\theta_1 \{1 + \tan^2\phi'\}}$$

となり、高さ $z=0$ において $q=0$ (即ち、地表面無載条件) なる境界条件により、(7)式を解くと、

$$\sigma_v = \frac{D \cdot \gamma \cdot \sin^2\theta_1 \{1 + \tan^2\phi'\}}{2 \tan\phi'} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2 \tan\phi'}{\sin^2\theta_1 \{1 + \tan^2\phi'\}} \cdot \frac{z}{D}\right) \right\} \quad (8)$$

次に、地表面の傾斜を考慮すると、降下床上部 (即ち、 $z = H - \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} H$) に作用する鉛直土圧 σ_v は次の式となる。

$$\sigma_v = \frac{D \cdot \gamma \cdot \sin^2\theta_1 \{1 + \tan^2\phi'\}}{2 \tan\phi'} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2 \tan\phi'}{\sin^2\theta_1 \{1 + \tan^2\phi'\}} \cdot \frac{H}{D} \left[1 - \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1}\right]\right) \right\} \quad (9)$$

ここで、土被り H は、土塊 $abcd$ を平行四辺形と仮定した時の高さを意味し、鉛直土圧 σ_v を計算するにも同じ仮定に基づいた。式(9)を満足するためには土被り H が存在しなければならない。そのための一つの制約条件として、成層傾斜角度 θ_1 が地表面の傾斜角度 θ_2 より大きくなる必要がある。

Figure 10(a)から $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$ を考えると、従来、砂質地盤におけるトンネルゆるみ土圧を算定する Terzaghi 式¹¹⁾と同様な地山モデルになる。これらの条件を式(9)に代入すると、従来の Terzaghi 式との比較ができる。

ここで Terzaghi によるモデルと本研究によるモデルとの違う点は、側圧係数 K_0 の考え方である。即ち、Terzaghi モデルでは微小要素に働く水平力を計算する場合、側圧係数を仮定するが、本モデルでは、側圧係数を仮定せず、力の釣り合い式から求めた。すると、側圧係数は、式(6)と Figure 10(b)に $d\sigma_v \approx 0$ とみると次のようになる。

$$K_0 = \frac{1}{\{1 + \tan^2\phi'\}} \quad (10)$$

地山の粘着力を無視した場合、側圧係数は地山の内部摩擦係数 (あるいは、すべり摩擦角) だけの関数で表現されることがわかる。アルミブロック同士のすべり摩擦角として $\phi' = 20^\circ$ を代入すると、本研究におけるモデル地山の側圧係数は、 $K_0 = 0.88$ になる。

(2) 実験結果との比較

成層傾斜角度を考慮に入れた理論式の適用性を検討するために、実験より得られた降下床土圧との比較を行う。実験結果及び理論式の結果を Figure 11 に示す。ここでは、地層傾斜方向 (降下床右上部) に沿って地表面沈下が見られた成層傾斜 45° 以上の地盤に対してプロットした。縦軸および横軸はそれぞれ無次元化した土被り比 H/D と降下床鉛直土圧 $\sigma_v/\gamma D$ である。プロットは実験結果を、実線は理論式による結果を示している。理論式における地山の内部摩擦角 ϕ' はアルミブロック同士のすべり摩擦角度として 20° を代入した。地山は、アルミブロック積層

体による地盤と仮定し、 $\gamma = 26.4 \text{ kN/m}^3$ を用いた。一方、実験値をプロットする際には、数回（3～5回）実施した結果の幅とその平均値を同時にプロットした。また、理論値と実験値との比較においては、モデル地盤の土被り H を $H_1 + H_2 + H_3$ として計算した。

理論式によると、土被り比 $H/D \leq 3.0$ では、土被りが大きくなると降下床鉛直土圧は非線形的に増加する。また、成層傾斜角度が大きくなると降下床土圧は増加する。成層傾斜角度 90° と理論式はよく一致している。しかし、 90° 以外の地盤では理論値より実験値のほうが小さく、理論値と一致していない。このような結果に関する一つの理由としては、模型実験の地山材料として用いたアルミブロックの寸法による影響が考えられる。即ち、アルミブロックの大きさはトンネル幅の 12.5% に達し、その結果、地層が傾斜した場合、ブロック同士のかみ合わせが生じやすくなるため、トンネル作用土圧が顕著に小さくなると推定される。

以上から、本研究では、成層傾斜角度を考慮した理論式を導いたが、 $\theta_1 = 45^\circ, 60^\circ$ といった傾斜地盤では実験値と一致してないことが分かった。

6. まとめ

本研究では、不連続性地山の範疇に分類される成層傾斜地盤をアルミブロックとアルミ棒で模擬し、トンネル掘削模型実験を実施し、成層傾斜角度と土被りごとに降下床上部に作用する土圧の分布特性や地表面沈下特性について実験的に解明した。さらに、降下床土圧を評価する簡易式を誘導し、従来の Terzaghi 式・実験結果との比較・考察を行い、その妥当性を検討した。現在は、本研究の続きとして、成層傾斜地盤における双設トンネル掘削に関する模型実験を行い、既設トンネルと新設トンネルの相互干渉に関する検討を行っている。

<参考文献>

- 1) 土木学会：「トンネル標準仕方書（山岳工法）・同解説」平成 8 年版。
- 2) 村山 朔郎・松岡 元：粒状土地盤の局部沈下現象について，土木学会論文報告集，第 172 号，pp.31-41，1969.
- 3) 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.
- 4) 足立紀尚・田村武・木村亮・神谷信毅：双設降下床の力学挙動，第 30 回土質工学研究発表会講演集，pp.1977-1978，1995.
- 5) 相山孝司：砂地盤におけるゆるみ鉛直土圧の基礎的な研究，前田建設技術研究所報，Vol.35-2,129p1994.
- 6) 徐連民・中井照夫・山崎久孝：3次元降下床問題のモデル実験と解析，第 30 回土質工学研究発表会講演集，pp.1323-1326，1995.
- 7) 足立紀尚・木村亮・小坂馨太：砂質及び粘性地盤の遠心力場降下床実験，第 32 回土質工学研究発表会講演集，pp.2149-2150，1998.
- 8) 小西真治・新井泰：トンネル上部に粘性土層が介在する砂地盤の切羽崩落実験について，第 34 回土質工学研究発表会講演集，pp.1733-1734，1999.
- 9) Hagiwara T., Grant R.J., Calvell M. and Taylor R.N. : The Effect of Overlying Strata on the Distribution of Ground Movements Induced by Tunneling in Clay, Soil and Foundations, Vol.39, No.3, pp.63-73, 1999.
- 10) 蔣宇静・江崎哲郎：不連続性岩盤内空洞の安定機構の実験による解明，第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.371-375，1993.
- 11) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, pp.66-75, 1943.

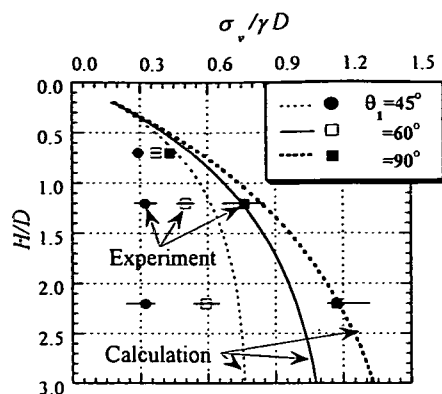


Figure 11 Comparison with test results