

トンネル周辺地山における土圧分布の算定

Estimation of the Distributions of Earth Pressure around a Tunnel

菊本 統¹・木村 亮²・岸田 潔²・田村 武³

Mamoru KIKUMOTO, Makoto KIMURA, Kiyoshi KISHIDA and Takeshi TAMURA

¹学生会員 工修 京都大学博士課程3年 工学研究科都市社会学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:kikumoto@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市社会学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

When excavating a tunnel, earth pressure acting on surrounding ground increase as the overburden load acting on the tunnel is redistributed to the surrounding ground. Though a lot of theories, from Terzaghi's theory down, have been proposed for estimating the magnitude of earth pressure acting on a tunnel, there's almost no method for predicting the distributions of earth pressure around a tunnel. In this study, a method for calculating the earth pressure distributions around a tunnel is proposed. By comparing calculated value with experimental value, it is found that the explained method can be applied for forecasting the earth pressure distributions around a tunnel support system.

Key Words : tunnel, trapdoor experiment, distributions of earth pressure, estimation, overburden

1. はじめに

トンネルに作用する鉛直土圧(以下、トンネル土圧)は、支保の設計における重要な検討項目である。これに対して、かねてより実験や解析、現場計測など数多くの検討が行われ、様々な土圧評価法が提案されてきた。これらの手法は、トンネル土圧の平均的な大きさの算定を目的として、トンネル上方の地山が周辺地山に支持されることでトンネル土圧が減少する様子を表現したものである。Terzaghiの緩み土圧理論¹⁾はその代表例であり、実際の支保の設計にも頻繁に用いられてきた。

ところで、トンネル土圧の減少分は周囲の地山が負担することになるので、周辺地山では作用土圧が増加する。このとき、どこにどの程度土圧が再配分されるか、すなわちトンネル周辺における土圧分布の予測は、重要かつ興味深い問題である。特に、周辺地山の安定や近接構造物への影響を検討する上では、周辺土圧分布の事前予測は重要である。

これに対して、足立ら²⁾は地山底面での鉛直土圧分布を計測できる実験装置を開発し、アルミ棒を用いて作成した地山で2次元落し戸実験を実施した。Tamura³⁾は、足立ら²⁾が実施した落し戸を上昇させる実験(以下、浮き戸実験)に対して、浮き戸に作用する受動土圧分布の算定式を提案した。しかしながら、

トンネル周辺地山の土圧分布に対しては、理論的かつ有効な評価手法は未だ確立されていない。

以上のような背景から、本研究ではまず模型実験を実施し、トンネル掘削時の土圧再配分特性に考察を加える。つぎに、Terzaghiの土圧理論¹⁾を概観し、同理論の適用性を実験値との比較により検証する。つづいて、Tamuraによる受動土圧分布の算定式³⁾について説明する。最後に、Terzaghi¹⁾とTamura³⁾による2つの土圧算定手法を参考にしてトンネル周辺地山における土圧分布の算定手法を提案する。

2. 落し戸実験の概要と結果

(1) 実験概要

足立ら²⁾により開発された土圧分布を計測できる装置を用いて、落し戸実験を実施し、落し戸周辺地山の土圧特性を検討する。落し戸実験は、地山底面に設けられた落し戸の下降によりトンネル掘削時の応力解放を模擬する実験であり、掘削に伴う地山の特徴的な力学現象を表現しうることから多くの成果を上げてきた。また、同実験は境界条件が単純かつ明確であることから、その結果をもとに土圧評価を目的とした力学モデルも幾つか提案されている^{1), 3)}。

Fig.1に実験装置を示す。落し戸(幅 $D = 100$ mm、

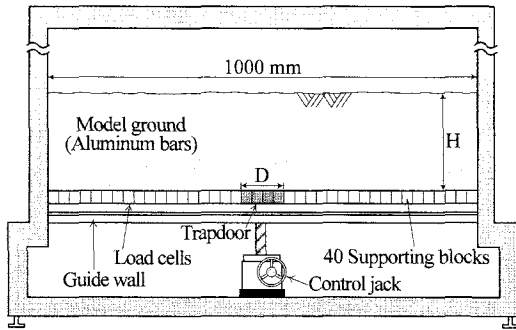


Fig.1 Two-dimensional trapdoor apparatus

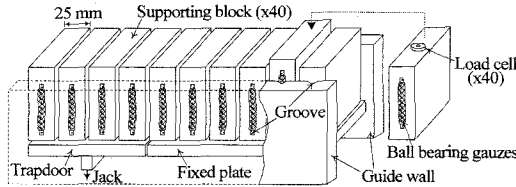


Fig.2 Measuring system of the earth pressure distributions at the bottom of the ground

支持ブロック4個分)は装置中央に設置してあり、ジャッキにより下降させることで、トンネル掘削を模擬する。下降量 δ は接触式変位計により計測する。

模型地山を支える装置底面は40個の支持ブロックによって構成されている。Fig.2に示すように、各ブロックの下部には荷重計(CLS-5KA)が取り付けられており、鉛直荷重分布を計測できる。なお、支持ブロックの前後面を支えるガイドウォールとの境界はベアリング機構になっており、摩擦による誤差を極力低減させて正確に鉛直荷重を計測できる。

模型地山は、長さ50 mmのアルミ棒を水平に積み上げて2次元的にモデル化した。アルミ棒は、直径1.6 mmおよび3.0 mmの2種類を重量比3:2で混合した積層体(単位体積重量 $\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$)であり、粒径加積曲線は豊浦珪砂のそれとほぼ平行になる⁴⁾。なお、4種類の拘束圧のもとで行なわれたアルミ棒積層体の二軸圧縮試験の結果⁵⁾より、内部摩擦角 $\phi = 32^\circ$ 、粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$ が得られている。

本実験は、土被り $H = 0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.25D, 1.5D, 2.0D, 4.0D$ の7パターンに対して実施し、所定の上降量で土圧分布を計測しながら、最終的には $\delta = 2 \text{ mm}$ まで落とし戸を下降させた。

(2) 結果と考察

Fig.3に、4種類の土被りについて、落とし戸に作用する鉛直土圧の平均値(以下、落とし戸土圧)の推移を示す。この図より、落とし戸土圧は初期値より急減し、 $\delta = 1 \text{ mm}$ に達するまでにほぼ一定値に収束する。

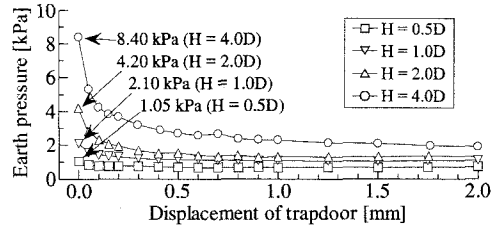


Fig.3 Relationship between displacement of the trapdoor and earth pressure acting on the trapdoor

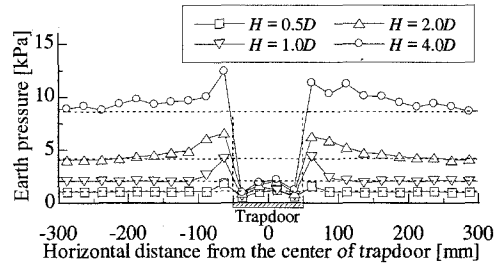


Fig.4 Distribution of earth pressure around the trapdoor

つぎに、Fig.4に最終状態($\delta = 2 \text{ mm}$)での落とし戸周辺の鉛直土圧分布を示す。同図中には、土被り圧を破線で表す。この図より、落とし戸の下降に伴って落とし戸土圧は減少し、周辺地山に作用する土圧は増加する。すなわち、落とし戸土圧が周辺地山に再配分される様子を確認できる。高土被りであるほど、土圧はより広範囲に再配分される。なお、これらの結果は、文献6)に示されているものと同様である。

ところで、落とし戸が1 mm程度下降した時点から、土圧分布はほとんど変化しなかった。これは、落とし戸が1 mm程度下降するまでに地山が塑性崩壊し、それ以降は変形だけが進行するためと考えられる。そこで本研究では、実験終了時点($\delta = 2 \text{ mm}$)は極限平衡状態にあると考えて、筆者らが提案する土圧分布評価手法との比較を行なう。

3. Terzaghiの土圧理論¹⁾と落とし戸土圧の算定

前述のように、Terzaghiの土圧理論¹⁾は、トンネル土圧の平均的な大きさを求める手法として広く用いられている。本研究の最終目的はトンネル周辺の鉛直土圧分布の予測であるが、トンネル土圧は、その減少分が周辺地山での土圧増分の合計と等しくなるため、研究目的に直結する重要な検討項目といえる。本章では、Terzaghiの理論について概観し、同理論により落とし戸に作用する土圧を算定する。

(1) Terzaghiの土圧理論¹⁾

Terzaghiの理論¹⁾は、地山の変形を考慮しない剛

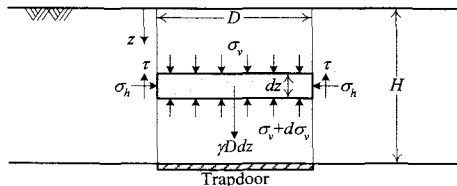


Fig.5 Terzaghi's assumption of two sliding surfaces¹⁾

塑性論に基づいて導かれた理論である。同理論では、落し戸実験の結果をもとに、Fig.5 に示すような落し戸幅 D に等しい間隔を持つ2つのすべり面が仮定されている。落し戸が十分下降し、地山のせん断抵抗力が完全に発揮された時点での、厚さ dz の微小土柱に働く鉛直力の釣合いは次式で表される。

$$(\sigma_v + d\sigma_v)D - \sigma_v D + 2\tau dz - \gamma D dz = 0 \quad (1)$$

γ は地山の単位体積重量、 τ はすべり面に作用するせん断応力、 σ_v は微小土柱に作用する鉛直土圧の平均値、 z は土被りである。

τ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_h \tan \phi \\ &= K_h \sigma_v \tan \phi \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 σ_h はせん断面に垂直に作用する水平土圧、 ϕ ($\neq 0$)は内部摩擦角である。また、Terzaghi¹⁾は土被り z によらず土圧係数 $K_h = \sigma_h / \sigma_v$ が一定になると仮定している。

ここで、式(2)を式(1)に代入して得た微分方程式を、 $z = 0$ (地表面)で $\sigma_v = 0$ (自由境界)という条件のもとで解く。さらに、 $z = H$ とおけば落し戸土圧 σ_v の算定式が得られる。

$$\sigma_v = \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(-2K_h \cdot \frac{H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \quad (3)$$

ここに、 H は土被りである。

(2) 落し戸に作用する土圧の算定

式(3)を用いて、実験終了時の落し戸土圧を算定する。入力定数のうち、 D 、 H 、 γ 、 ϕ は一意に決定できるため、土圧算定の鍵は K_h の設定にあるといえる。

K_h は落し戸が十分下降した極限状態での落し戸直上の地山の σ_h と σ_v の比であるため、静止土圧係数 K_0 とは意味合いが異なる。落し戸下降時の地山の土圧変化を考えると、落し戸上方の地山では、応力解放による鉛直土圧 σ_v の減少が顕著であると推測できる。このため、落し戸上方の地山では、水平土圧 σ_h の変化に比べて、鉛直土圧 σ_v の減少が卓越することになり、 K_h は K_0 より幾分大きくなると予想される。なお、

Table 1 Input parameters for Terzaghi's theory¹⁾

Width of the trapdoor D [mm]	100
Overburden H [mm]	Depends on test pattern
Unit weight γ [kN/m ³]	21.0
Internal friction angle ϕ [°]	32.0
Coefficient of earth pressure K_h	0.47, 1.00, 2.00

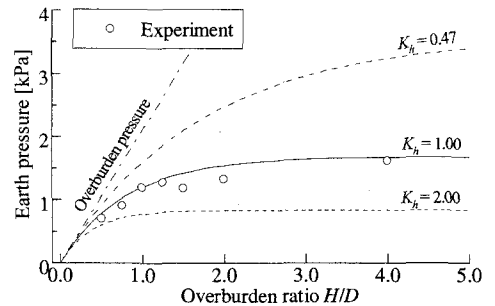


Fig.6 Earth pressures acting on a trapdoor from experiments and Terzaghi's theory¹⁾

Terzaghiは、落し戸実験より、 K_h は落し戸の直上で1.0、落し戸から約 D の高さで1.5、さらに上方では漸減し、 $2.0D \sim 3.0D$ 以上になると $K_h = K_0$ のまま変化しないと述べている¹⁾。また、実際の設計では、一般に $K_h = 1.0$ が用いられている^{7), 8)}。

今回は、3種類の K_h を用いて落し戸土圧を算定する。用いる入力定数をTable 1にまとめる。なお、 $K_h = 0.47$ は、以下に示すJakeyの式⁹⁾を用いて算出した静止土圧係数 K_0 の値である。

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (4)$$

Fig.6に、実験値と算定値の比較を示す。同図は、土被り比 H/D と落し戸に作用する土圧の関係であり、実験値をプロット、算定値をライン、土被り圧を一点鎖線で示した。Fig.6より、 K_h が大きいほど算定値は小さい。また、実験値とよい対応を示したのは、 $K_h = 1.0$ とした算定値である。つまり、Fig.6に示した結果は、先述したTerzaghi¹⁾の説明や現行の設計手法^{7), 8)}と整合する結果といえる。

4. トンネル周辺における土圧分布の算定

前章では、Terzaghiの理論¹⁾において $K_h = 1.0$ とすることで、トンネル土圧を的確に算定できることがわかった。つまり、トンネルから周辺地山へ再配分される土圧の合計を予測することが可能となった。

つぎに重要な課題は、トンネル周辺地山にどのように土圧が分布するかということである。本章ではまず、Tamuraが浮き戸実験に対して提案した受動土圧分布の算定式³⁾の要点を説明する。つづいて、

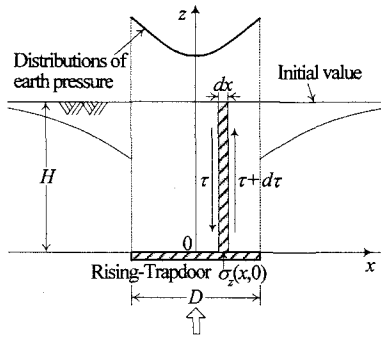


Fig.7 Typical distribution of earth pressure and equilibrium column in the vertical direction of the ground above the rising trapdoor

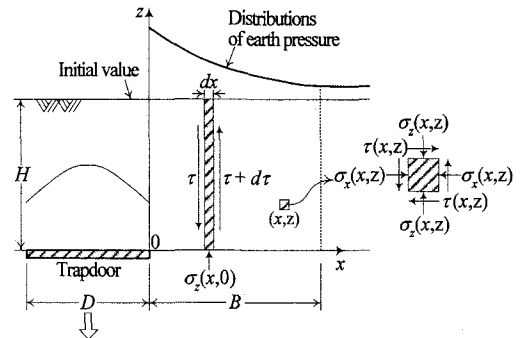


Fig.8 Equilibrium column in the vertical direction of the ground surrounding the tunnel

Terzaghi¹⁾とTamura³⁾の手法を参考にして、落とし戸周辺地山の土圧分布の算定式を構築する。

(1) Tamuraによる受動土圧分布の算定式³⁾

Tamura³⁾は、Fig.7に示すような浮き戸に作用する受動土圧分布の算定法を提案した。まず、浮き戸上の地山に作用する受動土圧の平均値 $\sigma_v(z)$ は、浮き戸実験に拡張したTerzaghiの理論¹⁾より求める。

$$\sigma_v(z) = \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[-1 + \exp\left(-2K_h \cdot \frac{z-H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \quad (5)$$

ここに、 γ は地山の単位体積重量、 D は浮き戸幅、 K_h は浮き戸上の地山における σ_h / σ_v 、 $\phi (\neq 0)$ は内部摩擦角、 H は土被りである。なお、浮き戸上の地山では鉛直土圧 σ_v の増加が卓越し、 K_h は静止土圧係数 K_0 より小さくなると予想される。また、 $K_h = 0.25 \sim 0.50$ であることが、実験値との比較により示されている¹⁰⁾。

つぎに、浮き戸土圧分布 $\sigma_z(x, 0)$ は、Fig.7に示した細長い土柱に作用する鉛直力のつりあいから、次式で表される。

$$\sigma_z(x, 0) = \gamma H + \int_0^H \frac{\partial \tau}{\partial x} dz \quad (\text{ただし、} -D/2 \leq x \leq D/2) \quad (6)$$

なお、 τ は微小土中に作用するせん断応力である。

ここでTamura³⁾は、 τ がTerzaghi¹⁾の理論と同様に次式で与えられることを仮定した。

$$\tau = K_h \sigma_z(x, z) \tan \phi \quad (7)$$

Tamura³⁾が設けたもう一つの仮定は、浮き戸上の地山の鉛直応力 $\sigma_z(x, z)$ が鉛直および水平方向に独立に分布するという次式の仮定である。

$$\sigma_z(x, z) = f(x) \cdot g(z) \quad (8)$$

この仮定は、鉛直土圧 $\sigma_z(x, z)$ が地表面で0であり、土被りが大きくなるにつれて同じモードで増幅される傾向にあることを意味する。

ところで、鉛直土圧 $\sigma_z(x, z)$ の合計が、式(5)より求めた $\sigma_v(z)$ に一致することから式(9)が得られる。

$$D \cdot \sigma_v(z) = \int_{-D/2}^{D/2} \sigma_z(x, z) dx \quad (9)$$

式(9)に式(5)～(8)を代入し、得られた微分方程式を解けば、浮き戸に作用する受動土圧分布の算定式が求まる。

$$\sigma_z(x, 0) = \gamma H \left[1 + \frac{\alpha}{\beta \left\{ \exp\left(\frac{\alpha}{\alpha - \beta}\right) - 1 \right\}} \exp\left(\frac{\alpha}{\alpha - \beta} \frac{2x}{D}\right) \right] \quad (10)$$

ここに、 α, β は以下の式で与えられる。

$$\alpha = -1 + \exp \beta \quad (11)$$

$$\beta = \frac{2K_h \tan \phi}{D} H \quad (12)$$

(2) トンネル周辺地山における土圧分布の算定手法

落とし戸実験では、落とし戸周辺の地山は落とし戸に対して相対的に上昇する。このとき、落とし戸周辺の地山には、Tamura³⁾が分布の算定対象とした浮き戸上の土圧と同様に、受動土圧が作用する。よって、落とし戸周辺地山の受動土圧分布は、Tamura³⁾の手法を参考に算定するのが合理的と考える。

まず、Fig.8に示すように座標を定義し、極限状態での落とし戸周辺地山における水平、鉛直、せん断応力を、それぞれ σ_x, σ_z, τ とする。Tamura³⁾と同様に、微小土柱に作用する鉛直力のつりあい式を求める。

$$\gamma H dx + \int_0^H \tau dz - \int_0^H (\tau + d\tau) dz - \sigma_z(x, 0) dx = 0 \quad (13)$$

ここに、 γ は地山の単位体積重量、 H は土被り高さ、

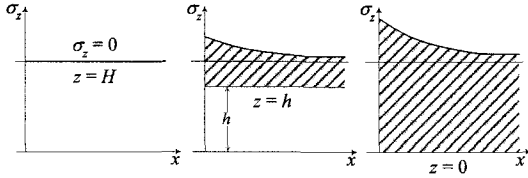


Fig.9 Assumed earth pressure distributions

$\sigma_z(x,0)$ は地山底面に作用する鉛直土圧である。この式を整理すると、式(6)に類似した次式を得る。

$$\sigma_z(x,0) = \gamma H - \int_0^H \frac{\partial \tau}{\partial x} dz \quad (\text{ただし, } x \geq 0) \quad (14)$$

つぎに、Tamura³⁾に倣って τ を規定する。すなわち、各応力について、式(7)と同様の比例関係を仮定する。

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_x(x,z) \tan \phi \\ &= K_s \sigma_z(x,z) \tan \phi \end{aligned} \quad (15)$$

$\phi (\neq 0)$ は内部摩擦角である。ここで、Tamuraの手法³⁾と異なるのは、極限状態での落し戸外側周辺の地山における σ_x/σ_z として、新たに K_s を定義する点である。 K_s は落し戸から少し離れれば、静止土圧係数 K_0 に一致する。

さらに、Tamuraの手法³⁾と同様に、地表面では0であり、深くなるにつれてFig.9に示すように同じ形状で増幅する鉛直土圧分布 $\sigma_z(x,z)$ を仮定する。

$$\sigma_z(x,z) = f(x)g(z) \quad (16)$$

$f(x)$ 、 $g(z)$ は、それぞれ x 、 z 方向への分布モードを表す関数である。ここで、式(14)～(16)より次式を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_z(x,0) &= f(x)g(0) \\ &= \gamma H - K_s \tan \phi \cdot f'(x) \int_0^H g(z) dz \end{aligned} \quad (17)$$

ところで、落し戸上の地山に作用する鉛直土圧の平均値 $\alpha(z)$ は、Terzaghiの土圧理論¹⁾より次式のような z の関数で与えられる。

$$\sigma_v(z) = \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(2K_h \cdot \frac{z-H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \quad (18)$$

一方、落し戸上の地山に作用する荷重の減少分は、Fig.10に示すように、周辺地山における荷重増加の合計と等しくなるので、次式が成立する。

$$D \{ \gamma(H-z) - \sigma_v(z) \} = 2 \int_0^B \{ \sigma_z(x,z) - \gamma(H-z) \} dx \quad (19)$$

上式の左辺は落し戸上の地山に作用する土圧の減少分、右辺は落し戸左右の周辺地山に再配分される土圧の合計を表す。本手法の要衝は、上式でTerzaghi

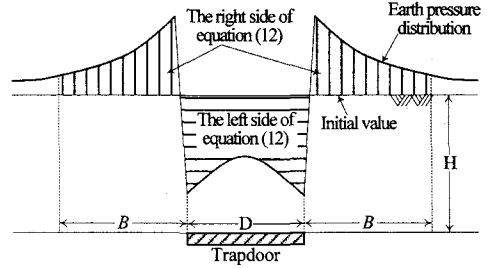


Fig.10 Balance of increment and decrement of earth pressure

の理論¹⁾と周辺土圧分布の算定を関係付ける点にある。なお、式(19)の右辺では、無限遠まで積分して周辺地山全体としての土圧増分を求めるべきであるが、ひとまず落し戸左右の再配分領域の幅を B として算定式を誘導する。

さて、式(19)に式(16)と(18)を代入して、整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} 2g(z) \int_0^B f(x) dx &= \gamma(H-z)(D+2B) \\ &\quad - \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(2K_h \cdot \frac{z-H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)の両辺を x 、 z に着目して比較すると、式(21)、(22)が得られる。

$$\begin{aligned} g(z) &= \gamma(H-z)(D+2B) \\ &\quad - \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(2K_h \cdot \frac{z-H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$2 \int_0^B f(x) dx = 1 \quad (22)$$

ここで、式(21)より $g(0)$ および $\int_0^H g(z) dz$ を計算する。

$$\begin{aligned} g(0) &= \gamma H(D+2B) \\ &\quad - \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(-2K_h \cdot \frac{H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \int_0^H g(z) dz &= \frac{\gamma H^2}{2}(D+2B) - \frac{\gamma D^2}{2K_h \cdot \tan \phi} \\ &\quad \times \left[H - \frac{D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left\{ 1 - \exp\left(-2K_h \cdot \frac{H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

式(17)に式(23)、(24)を代入すると次式が得られる。

$$f(x)\alpha = \gamma H - \beta \cdot f'(x)z \quad (25)$$

ただし、 $g(0) = \alpha$ 、 $K_s \tan \phi \int_0^H g(z) dz = \beta$ である。式(25)

を、式(22)の条件のもとで解けば次式が得られる。

$$f(x) = \frac{\gamma H}{\alpha} - \frac{\alpha - 2\gamma HB}{2\beta} \cdot \frac{\exp(-\alpha x/\beta)}{1 - \exp(-\alpha B/\beta)} \quad (26)$$

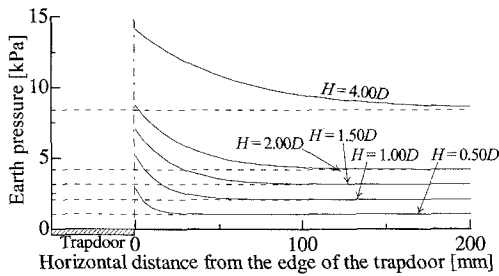


Fig.11 Distribution of earth pressure around trapdoor for various overburdens

式(17)に式(23), (26)を代入すれば, 落とし戸周辺の地山底面における鉛直土圧分布が得られる。

$$\sigma_z(x,0) = \gamma H + \frac{\alpha(\alpha - 2\gamma HB)}{2\beta} \cdot \frac{\exp(-\alpha x/\beta)}{1 - \exp(-\alpha B/\beta)} \quad (27)$$

上式に含まれる B は, 土圧が再配分される領域の幅であるが, 先述したように, 周辺地山における土圧増分は無限遠までの積分値とするべきである。そこで最後に, 式(27)の B が無限大の極限をとる。

$$\sigma_z(x,0) = \gamma H + \frac{\gamma D}{K_s H \tan \phi} \exp\left(\frac{-2x}{K_s H \tan \phi}\right) \times \left[H - \frac{D}{2K_h \tan \phi} \left\{ 1 - \exp\left(-2K_h \frac{H}{D} \tan \phi\right) \right\} \right] \quad (28)$$

かくして, 落とし戸周辺地山における鉛直土圧分布の算定式が得られた。

(3) 提案手法による算定値と実験値の比較

本提案手法で, Terzaghiの土圧理論¹⁾に対して新たに追加された定数は, 周辺地山における水平土圧係数 K_s のみである。入力定数のうち, 単位体積重量 $\gamma (= 21.0 \text{ kN/m}^3)$, 内部摩擦角 $\phi (= 32^\circ)$, 落とし戸幅 $D (= 100 \text{ mm})$, 土被り H は一意に決定できる。

まず式(28)に関してパラメトリックスタディを行い, 提案手法の特徴を把握する。Fig.11に, 種々の土被りにおける落とし戸周辺土圧分布の算定値を示す。なお, K_h には1.00, K_s には0.47を用いた。図中の実線は算定値, 破線は初期土圧を示す。この図より, 落とし戸に隣接する地山には応力集中が発生する。一方, 落とし戸から離れるほど初期土圧に漸近する。また, 土被りが大きいほど, 土圧が広範囲にわたって再配分される。これらの傾向は, 実験における傾向と同様である。つまり, 本提案手法は, 実現象における定性的傾向を捉えている。

つぎに, 土被り $H = 1.00D$ の場合について, K_h および K_s に関するパラメトリックスタディを行なう。

Fig.12に, $K_h = 0.47, 1.00, 2.00$ の3種類に対する算定

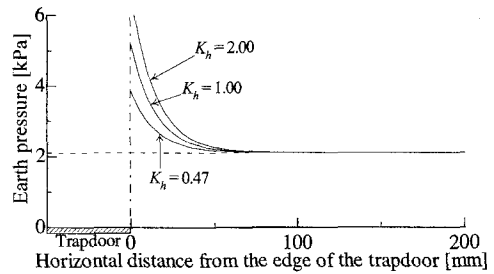


Fig.12 Distribution of earth pressure around trapdoor for various values of K_h (Overburden $H = 1.00D$)

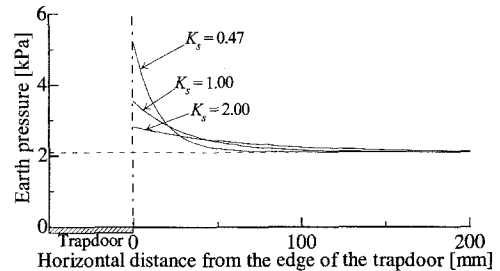


Fig.13 Distribution of earth pressure around trapdoor for various values of K_s (Overburden $H = 1.00D$)

Table 2 Input parameters for Calculating distributions of earth pressure acting on the surrounding ground of the trapdoor

Width of the trapdoor D [mm]	100
Overburden H [mm]	Depends on test pattern
Unit weight γ [kN/m ³]	21.0
Internal friction angle ϕ [°]	32.0
Coefficient of earth pressure in the ground above trapdoor K_h	1.00
Coefficient of earth pressure in the surrounding ground of trapdoor K_s	0.47

値を示す。 K_s には0.47を用いた。この図より, K_h が変化すると周辺土圧の大きさは変化するが, 分布形状は変化しない。つまり, K_h は落とし戸に作用する土圧の大きさ, 更には周辺地山に再配分される土圧の合計を決定する入力定数といえる。

Fig.13に, $K_s = 0.47, 1.00, 2.00$ の3種類に対する算定値を示す。 K_h には1.00を用いた。この図より, K_s が変化すると周辺地山の土圧分布形状は変化する。これは, K_s が土圧増分の合計を決定するTerzaghiの理論¹⁾とは無関係な入力定数であり, 土圧分布形状のみに影響を及ぼすためである。

最後に, 落とし戸周辺地山における土圧分布を算定し, 実験値と比較する。土圧分布の算定に用いる定数をTable 2にまとめる。Fig.14に, すべての土被りに対して算定値と実験値の比較を示す。同図には, 実験値をプロット, 算定値を実線, 初期土圧を破線で示した。この図より, 提案手法はどの土被りにお

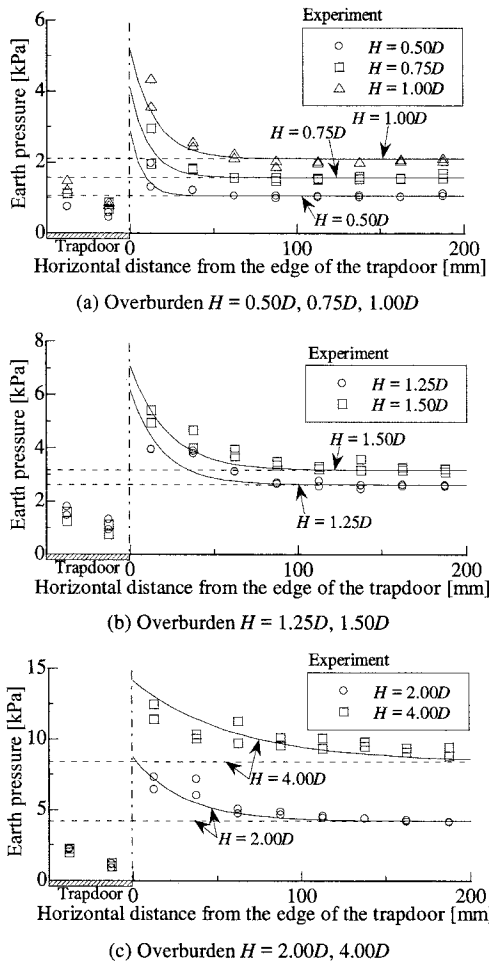


Fig.13 Comparison of experimental and calculated distribution of earth pressure around the trapdoor

いても実験値とよく対応する。換言すると、提案手法は、実験における高土被りほど広い範囲で土圧が増加する傾向や、低土被りほど落とし戸直近部に土圧が集中する傾向を定量的に表現できる。また、周辺地山における土圧分布を精度よく予測するためには、周辺地山での水平土圧係数 K_s に静止土圧係数 K_0 を設定すればよいと考えられる。

5. まとめ

本研究では、2次元落とし戸実験によりトンネル掘削時の土圧再配分特性を検討した後、Terzaghiの土圧理論¹⁾を用いて落とし戸に作用する土圧の算定を行った。つづいて、Terzaghiの理論¹⁾とTamuraによる受動土圧分布の算定式³⁾を参考にしてトンネル周辺地山における土圧分布の算定手法を構築し、その適用

性を実験値との比較により検証した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

2次元落とし戸実験により、落とし戸の下降に伴って落とし戸に作用する土圧が周辺地山に再配分される現象を確認した。再配分される領域は、土被りが大きいほど広がった。

Terzaghiの土圧理論¹⁾を用いて落とし戸に作用する土圧の算定を行なう場合には、落とし戸上の地山における土圧係数 K_h の設定が重要となる。算定値を実験値と比較した結果、 $K_h = 1.0$ とした算定値が実験値に近い値を示した。これは、Terzaghi¹⁾の K_h に関する説明や、現行の設計^{7), 8)}で用いる K_h の値と合致する結果といえる。

落とし戸周辺の地山における土圧増分の合計は、Terzaghiの理論¹⁾をもとに算定できる。このことを利用して、落とし戸周辺地山における土圧分布の算定手法を提案した。式の誘導は、Tamuraによる受動土圧分布の算定手法³⁾を参考にしている。本手法で、Terzaghiの土圧理論¹⁾に対して新たに追加された定数は、周辺地山における水平土圧係数 K_s のみである。 K_s は周辺地山全体としての土圧増分の大きさには無関係な定数であり、土圧の分布モードのみに影響を与える。提案手法による算定値と実験値を比較した結果、提案手法は土被りによらず、模型実験における落とし戸周辺の土圧分布を予測することができた。なお、 K_s の値には、静止土圧係数 K_0 を代入するのが適当と考えられる。

参考文献

- 1) Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 66-75, 1943.
- 2) 足立紀尚, 田村 武, 木村 亮, 荒巻 智: 落とし戸実験における土圧分布, 第29回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 1989-1992, 1994.
- 3) Tamura, T.: Active and Passive Earth Pressures on the Trapdoor, Proc. of Int. Conf. on Modern Tunneling Science and Technology (IS-KYOTO2001), pp.1189-1197, 2001.
- 4) 村山朔郎: 砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧, 防災研究所年報, 第11号B, pp. 123-138, 1968.
- 5) Yashima, A., Shibata, T., Sekiguchi, H. and Kohno, M.: Soil Movements Associated with Tunneling and Their Effects on an Adjacent Pile Foundation, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute Kyoto Univ.*, Vol. 35, Part 4, No. 316, 1985.
- 6) 神谷信毅, 足立紀尚, 田村 武, 木村 亮: 降下床実験における土圧分布, 第50回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(B), pp. 1164-1165, 1995.

- 7) 鉄道総合技術研究所：SI単位版 鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル， pp. 48-55, 2002.
- 8) 鉄道総合技術研究所：SI単位版 鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル， pp. 307-308, 2002.
- 9) Diaz-Rodrigues, J.A., Leroueil, S. and Aleman, J.D. : On Yielding of Mexico City Clay and Other Natural Clays, *Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 981-995, 1992.
- 10) 菊本 統，玉谷宗一郎，田村 武，木村 亮，岸田 潔：トンネルに作用する土圧に関する移動床実験，第58回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部， pp. 877-878, 2003.