

トンネル掘削時の土圧特性とその予測法に関する基礎的研究

名古屋工業大学大学院 国際会員 菊本統
京都大学大学院 国際会員 岸田潔, 木村亮, 田村武

1. はじめに

地山中でトンネルを掘削すると、必然的に周囲の応力状態が変化する。このとき「トンネルにどの程度の土圧が作用するか」は、支保の設計における重要な検討項目である。現行設計では、掘削に伴ってトンネル上方の地山が周辺地山に支持され、トンネルに作用する鉛直土圧(以下、トンネル土圧)は減少すると考えられている。すなわち、トンネルには、周辺地山のアーチ作用により緩み土圧が作用すると想定されている¹⁾。この緩み土圧の算定には幾つかの手法が提案されている^{2)~3)}が、一般には入力定数が少なく簡便なTerzaghiの理論⁴⁾に基づいた手法が頻用されてきた¹⁾。

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、周辺地山では鉛直土圧が増加する。このとき、「トンネル周辺のどこにどの程度土圧が再配分されるか」は、興味深い問題である。とりわけ、トンネルに近接して構造物が存在する場合には、掘削が既設構造物に及ぼす影響を事前に検討する必要があるため、周辺土圧分布の予測が重要となる。しかしながら、理論的かつ有効なトンネル周辺土圧の算定手法は未だ確立されていない。

以上のような状況を鑑み、本研究ではトンネル周辺地山における土圧分布の評価手法の構築を目指す。この目的に対して、まず土被りをパラメータとして模型実験を行い、トンネル周辺の土圧特性を検討する。つぎに、Terzaghiの理論⁴⁾を概観するとともに、同理論を利用してトンネル周辺における土圧分布の算定式を構築する。最後に、実験値との比較により、提案式の適用性を検証する。なお、本研究で対象としているのは、未固結あるいは低固結な地山の比較的浅い土被りにおけるトンネル掘削問題である。

2. 落とし戸実験によるトンネル掘削時の土圧特性の検討

2. 1. 落とし戸実験の概要

落とし戸実験は、地山底面の床の一部(落とし戸)を下降させることでトンネル掘削時の応力解放を模擬する実験である。落とし戸実験は、トンネル掘削に伴う

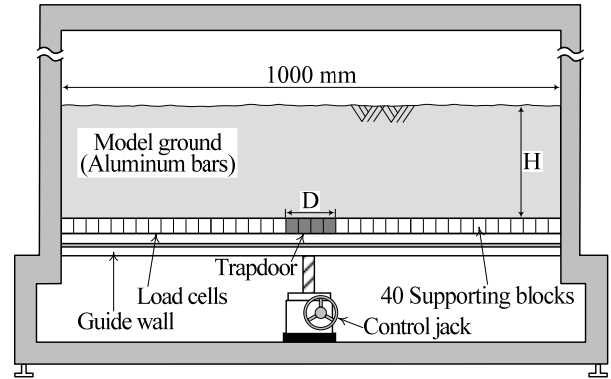


図1 二次元落とし戸実験装置

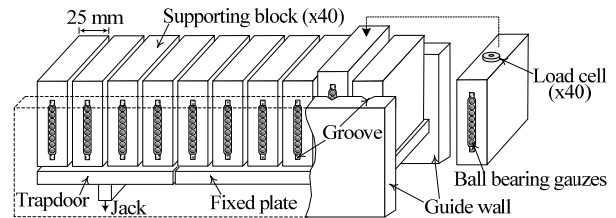
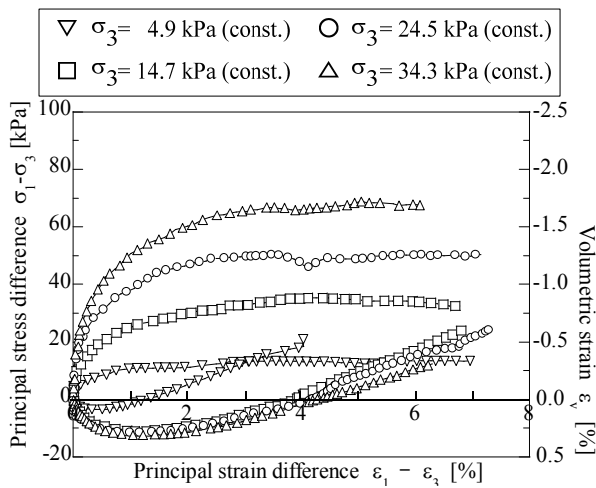


図2 地山底面における鉛直土圧分布の計測機構

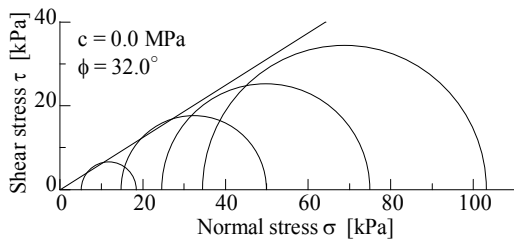
地山の力学現象を端的に表現できることから、多くの成果をあげてきた^{5)~6)}。また、同実験の境界条件は単純かつ明確であるため、その結果をもとに土圧評価を目的とした力学モデルも幾つか提案されている^{4) 7)}。ここでは、足立ら⁸⁾により開発された土圧分布を計測できる装置を用いて落とし戸実験を行う。

図1に実験装置を示す。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。落とし戸(幅 $D = 100$ mm, 支持ブロック4個分)は装置の中央に設置してあり、下部に連結したジャッキにより下降する。下降量 δ は接触式変位計により計測する。本実験では、所定の下降量で土圧分布を計測しながら、 $\delta = 2$ mmまで落とし戸を下降させた。検討ケースは、土被り $H = 0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.25D, 1.5D, 2.0D, 4.0D$ の7ケースである。

図2は、地山底面における鉛直土圧分布の計測機構を示している。鉛直土圧は、各ブロックの下部に取付けた荷重計により計測する。なお、支持ブロックとその前後面を支えるガイドウォールの境界には



(a) 応力 - ひずみ関係



(b) 破壊時のモール応力円と破壊線

図3 アルミ棒積層体の二軸圧縮試験結果⁹⁾

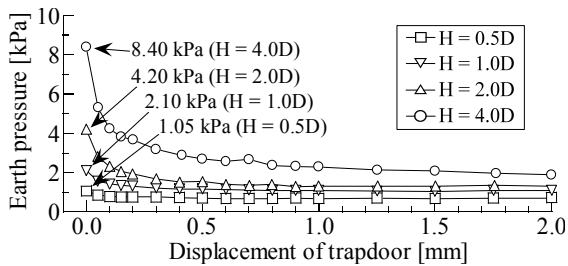


図4 落とし戸に作用する土圧の推移

ボールベアリングが挿入されており、摩擦による誤差を極力低減させて正確に鉛直土圧を計測できる機構となっている。

地山材料には長さ50 mmのアルミ棒を用い、未固結な砂質地山を2次元的にモデル化する。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硅砂のそれとほぼ平行になる⁵⁾。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⁹⁾を図3に示す。内部摩擦角 $\phi = 32^\circ$ 、粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$ である。

2. 2. 実験結果

図3に、代表的な4種類の土被りについて、落とし戸に作用する鉛直土圧(以下、落とし戸土圧)の推移を示す。参考までに、図中には各土被りの初期土圧の大

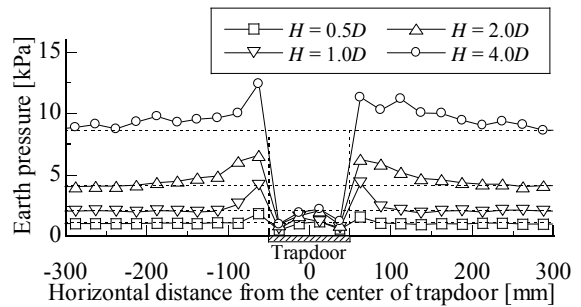


図5 落とし戸周辺の土圧分布 ($\delta_f = 2 \text{ mm}$)

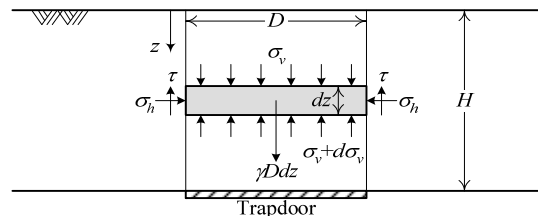


図6 Terzaghiによるすべり面の仮定⁴⁾

さを記載した。同図より、落とし戸を下降させるとすぐさま落とし戸土圧は急減し、 $\delta_f = 1 \text{ mm}$ までにはほぼ一定値に収束することがわかる。

つぎに、図5に最終状態($\delta_f = 2 \text{ mm}$)の落とし戸周辺における鉛直土圧分布を示す。図中の破線は、各土被りの初期土圧である。この図より、落とし戸土圧は減少し、その減少分を受け持つ形で周辺地山では作用土圧が増加することがわかる。また、周辺地山での土圧増加は、落とし戸近傍ほど顕著であり、遠ざかるにつれて初期土圧に漸近する。土被りに関しては、高土被りであるほど土圧がより広範囲にわたって増加することがわかる。なお、以上の結果は、文献⁸⁾で報告されているものとはほぼ同様である。

以上の実験結果より、落とし戸および周辺地山に作用する土圧は、落とし戸が1 mm程度下降するまでにはほぼ収束し、その後はほとんど変化しない。これは、 $\delta_f = 1 \text{ mm}$ までに地山が塑性崩壊し、以降は変形だけが進行するためと考えることができる。そこで、実験終了時点($\delta_f = 2 \text{ mm}$)における落とし戸および周辺土圧を極限平衡理論に基づいて評価する。

3. トンネルに作用する土圧の算定

Terzaghiの理論はトンネルに作用する鉛直土圧の平均的な大きさを求める手法である。ここでは、同理論の梗概を説明し、落とし戸土圧を算定する。

3. 1. Terzaghiの理論⁴⁾

Terzaghiの理論では、まず図6に示すような落とし戸の幅Dに等しい間隔を持つ2つの鉛直なすべり面が仮定される。落とし戸が十分下降し、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

表1 トンネル土圧算定のためのパラメータ

| | |
|---|-------------------------|
| 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 | 0.60, 1.00, 2.00 |

小土柱に働く鉛直力の釣合式は次のようになる。

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

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 は地表面からの土被り深さである。

せん断応力 τ は、すべり面に垂直に作用する水平土圧 σ_h と内部摩擦角 ϕ ($\neq 0$)を用いて次式で表される。

$$\tau = \sigma_h \tan \phi \quad (2)$$

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。さらに、土被り z によらず土圧係数 $K_h = \sigma_h / \sigma_v$ が一定になるとの仮定より、

$$\tau = K_h \sigma_v \tan \phi \quad (3)$$

ここで、式(3)を式(1)に代入して得た微分方程式を、地表面($z=0$)で無載荷($\sigma_v=0$)という境界条件のもとで解き、 $z=H$ を代入すれば落し戸土圧 σ_v の算定式が得られる。

$$\sigma_v = \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(-2K_h \cdot \frac{H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \quad (4)$$

3. 2. 落し戸に作用する土圧の算定

式(4)を用いて、実験終了時点($\delta_f = 2$ mm)の落し戸土圧を算定する。入力定数のうち D, H は地山の幾何条件から、 γ, ϕ は材料試験から一意に決定できる。

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での水平土圧 σ_h と鉛直土圧 σ_v の比であり、静止土圧係数 K_0 と等しいとは限らないことに注意が必要である。落し戸下降時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 σ_v の減少は σ_h の変化に比べて卓越すると推測できる。従って、 K_h は K_0 より大きくなると予測できる。なお、Terzaghiは、乾燥砂を用いた落し戸実験の結果より、 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⁴⁾。また、実際の設計では、一般に $K_h = 1.0$ が用いられている¹⁾。

土圧算定に用いた入力定数を表1にまとめる。今回は、3種類の K_h を用いて落し戸土圧を算定する。 $K_h = 0.60$ は、実験前に計測した静止土圧係数である。

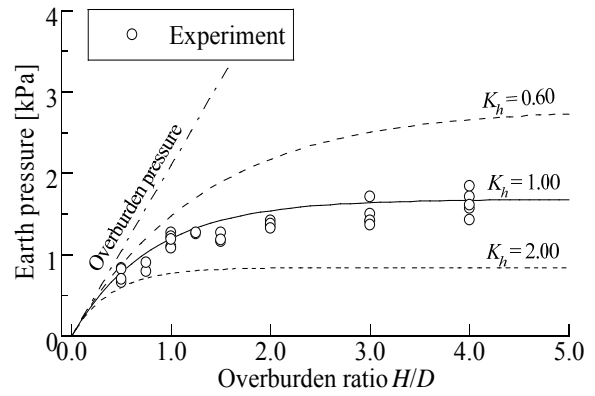


図7 落し戸土圧の算定結果

図7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。なお、同じ土被りに複数の実験値がプロットされているのは、再現性を確認するために各土被りで複数回実験を実施したためである。図7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、図7に示した結果は、先述したTerzaghi⁴⁾の説明や現行設計¹⁾と合致する。

4. トンネル周辺地山に作用する土圧の算定

ここまでの検討により、Terzaghiの式⁴⁾はトンネル土圧を的確に算定することがわかった。ところで、当然のことながら地山の自重の合計は不変であるから、トンネル土圧の減少分は周囲の地山が支持することになる。すなわち、トンネル土圧の減少量は、周囲の土圧増加量の合計と等しい。従って、Terzaghiの式⁴⁾は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できる。このことを利用して、本章では落し戸周辺における土圧分布を算定する。

4. 1. 落し戸周辺における鉛直土圧分布の算定式

まず、図8に示すように水平、鉛直座標を定義し、極限状態での落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。微小土柱に作用する鉛直力のつりあい式を求めると、

$$\gamma H dx + \int_0^H \tau dz - \int_0^H (\tau + d\tau) dz - \sigma_z(x,0) dx = 0 \quad (4)$$

ここに、 γ は地山の単位体積重量、 H は土被り高さ、 $\sigma_z(x,0)$ 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。

$$\sigma_z(x,0) = \gamma H - \int_0^H \frac{\partial \tau}{\partial x} dz \quad (\text{ただし, } x \geq 0) \quad (5)$$

つぎに、Terzaghi⁴⁾に倣って τ を規定する。すなわ

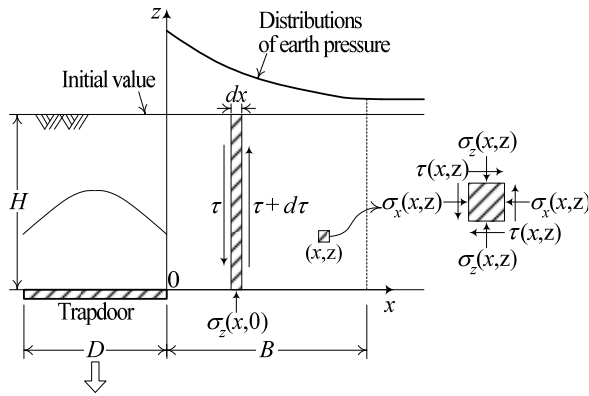


図8 落とし戸周辺地山の微小土柱と鉛直力の釣合

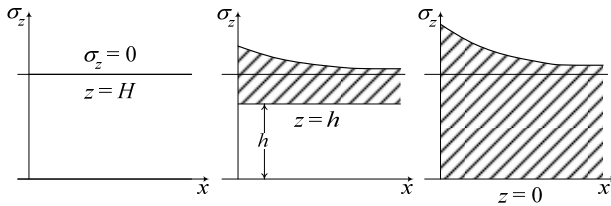


図9 鉛直土圧の分布形状に関する仮定

ち、式(2)、(3)と同様の関係を仮定する。

$$\begin{aligned}\tau &= \sigma_x(x, z) \tan \phi \\ &= K_s \sigma_z(x, z) \tan \phi\end{aligned}\quad (6)$$

$\phi (\neq 0)$ は内部摩擦角である。ここで、Terzaghiの理論⁴⁾と異なるのは、落と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 は落とし戸から離れれば静止土圧係数 K_0 に一致する。

次に、鉛直土圧の分布 $\sigma_z(x, z)$ に簡単な仮定を設ける。簡単な仮定とは、水平および鉛直方向に土圧が独立に分布するという仮定である。

$$\sigma_z(x, z) = f(x)g(z)\quad (7)$$

$f(x)$ 、 $g(z)$ は、それぞれ x 、 z 方向への分布モードを表す関数である。これによって、図9に示すように地表面では0であり、深くなるにつれて同じ形状で増幅する鉛直土圧分布を表現する。ここで、式(5)～(7)より次式を得る。

$$\begin{aligned}\sigma_z(x, 0) &= f(x)g(0) \\ &= \gamma H - K_s \tan \phi \cdot f'(x) \int_0^H g(z) dz\end{aligned}\quad (8)$$

ここで、落とし戸上の地山に作用する鉛直土圧の平均値 $\sigma_v(z)$ は、Terzaghiの理論⁴⁾より次式のような z の関数で与えられる。

$$\sigma_v(z) = \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(2K_h \cdot \frac{z-H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right]\quad (9)$$

既述のように、落とし戸上の地山に作用する荷重の

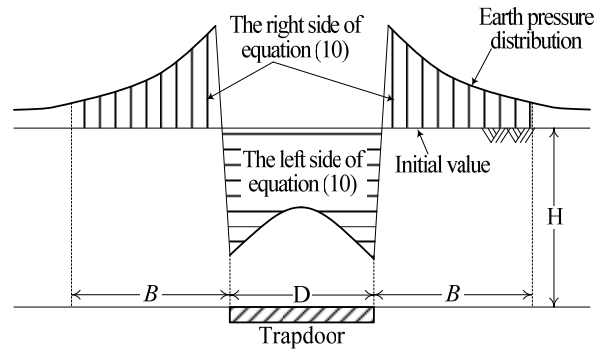


図10 落とし戸土圧の減少量と周辺土圧の増加量

減少分は、図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。

$$D\{\gamma(H-z) - \sigma_v(z)\} = 2 \int_0^B \{\sigma_z(x, z) - \gamma(H-z)\} dx\quad (10)$$

上式の左辺は落とし戸上の地山に作用する土圧の減少分、右辺は落とし戸左右の周辺地山に再配分される土圧の合計を表す。本手法の要諦は、式(10)により Terzaghiの理論⁴⁾と周辺土圧分布の算定を関係付ける点にある。なお、式(10)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、ひとまず落と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。式(10)に式(7)と(9)を代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}2g(z) \int_0^B f(x) dx &= \gamma(H-z)(D+2B) \\ &- \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(2K_h \cdot \frac{z-H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right]\end{aligned}\quad (11)$$

式(11)の両辺を x 、 z に着目して比較すると、式(12)、(13)が得られる。

$$\begin{aligned}g(z) &= \gamma(H-z)(D+2B) \\ &- \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(2K_h \cdot \frac{z-H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right]\end{aligned}\quad (12)$$

$$2 \int_0^B f(x) dx = 1\quad (13)$$

ここで、式(12)より $g(0)$ および $\int_0^H g(z) dz$ を計算する。

$$\begin{aligned}g(0) &= \gamma H(D+2B) \\ &- \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(-2K_h \cdot \frac{H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right]\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}\int_0^H g(z) dz &= \frac{\gamma H^2}{2}(D+2B) - \frac{\gamma D^2}{2K_h \cdot \tan \phi} \\ &\times \left[H - \frac{D}{2K_h \cdot \tan \phi} \left\{ 1 - \exp\left(-2K_h \cdot \frac{H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right\} \right]\end{aligned}\quad (15)$$

式(8)に式(14)、(15)を代入すると次式が得られる。

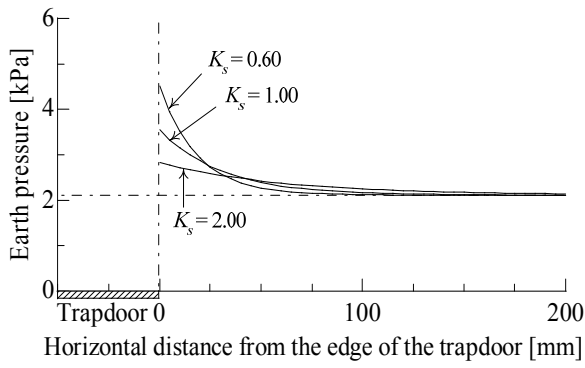


図11 土圧係数 K_s による周辺土圧分布の差異 (土被り $H = 1.00D$ での算定値)

$$f(x)\alpha = \gamma H - \beta \cdot f'(x)z \quad (16)$$

ただし、 $g(0) = \alpha$ 、 $K_s \tan \phi \int_0^H g(z) dz = \beta$ である。式(16)を、式(13)の条件のもとで解けば次式が得られる。

$$f(x) = \frac{\gamma H}{\alpha} - \frac{\alpha - 2\gamma HB}{2\beta} \cdot \frac{\exp(-\alpha x/\beta)}{1 - \exp(-\alpha B/\beta)} \quad (17)$$

式(8)に式(14), (17)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。

$$\sigma_z(x,0) = \gamma H + \frac{\alpha(\alpha - 2\gamma HB)}{2\beta} \cdot \frac{\exp(-\alpha x/\beta)}{1 - \exp(-\alpha B/\beta)} \quad (18)$$

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(18)の B が無限大の極限をとる。

$$\sigma_z(x,0) = \gamma H + \frac{\gamma D}{K_s H \tan \phi} \exp\left(\frac{-2x}{K_s H \tan \phi}\right) \times \left[H - \frac{D}{2K_h \tan \phi} \left\{ 1 - \exp\left(-2K_h \frac{H}{D} \tan \phi\right) \right\} \right] \quad (19)$$

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。

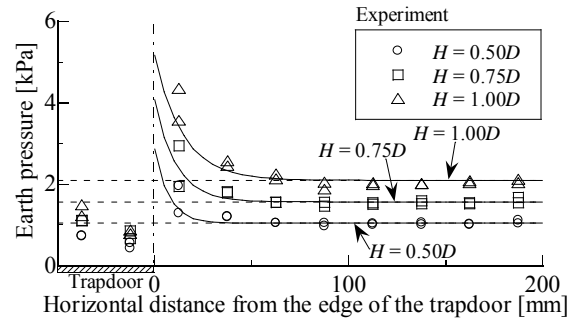
4. 2. 落とし戸周辺の土圧分布の算定

提案式(19)による周辺土圧分布の算定に必要な定数の大半はTerzaghiの式⁴⁾と同一であり、新たに追加されたの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 γ 、内部摩擦角 ϕ 、落とし戸幅 D 、土被り H は一意に決定できる。また、3. 2節での検討により、 $K_h = 1.0$ とするのが適当であった。

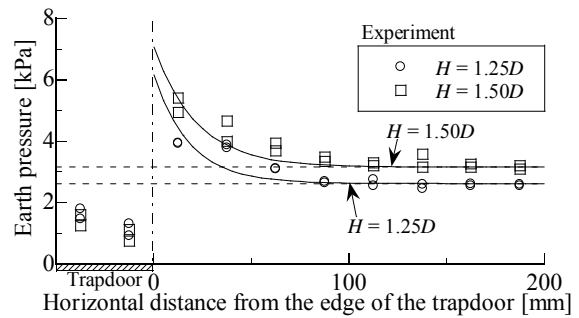
ここでは、まず土被り $H = 1.0D$ について、 K_s に関するパラメトリックスタディを行い、提案手法の特徴を把握する。図11に、 $K_s = 0.6, 1.0, 2.0$ の3種類に対する算定値を示す。この図より、算定した土圧分布

表2 周辺土圧分布の算定のためのパラメータ

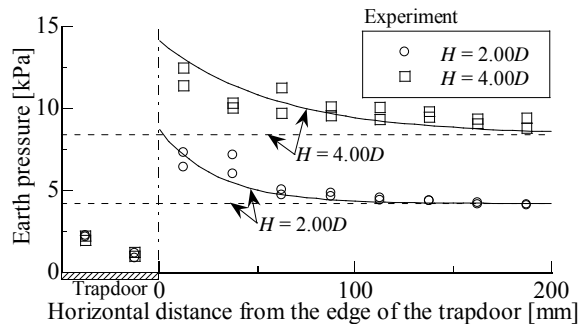
| | |
|---|-------------------------|
| Width of the trapdoor D [mm] | 100 |
| Overburden H [mm] | Depends on test pattern |
| Unit weight γ [kN/m ³] | 21.0 |
| Internal friction angle ϕ [°] | 32.0 |
| Coefficient of earth pressure in the ground above trapdoor K_h | 1.00 |
| Coefficient of earth pressure in the surrounding ground of trapdoor K_s | 0.60 |



(a) 土被り $H = 0.50D, 0.75D, 1.00D$



(b) 土被り $H = 1.25D, 1.50D$



(c) 土被り $H = 2.00D, 4.00D$

図12 周辺土圧分布の算定結果

は、落とし戸付近では土圧増加が顕著で、落とし戸から離れるほど土被り圧に漸近するなど、実験結果と類似した特徴を有していることがわかる。また、 K_s が小さいほど落とし戸付近での土圧増加が顕著である。一方、 K_s が大きいほど、落とし戸からより離れた位置で土圧増加が確認できる。

続いて、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。 K_s は落とし戸から少し離れれば、静止土圧係数 K_0 に一致することを考慮して、 K_s

= K_0 とした。算定に用いる定数とその値を表2にまとめる。図12に、すべての土被りについて算定値と実験値の比較を示す。図中のプロットは実験値、実線は算定値、破線は初期土圧を表す。この図より、提案手法はどの土被りにおいても実験値とよく対応する。つまり、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。

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⁴⁾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⁴⁾を利用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するとともに、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、落とし戸を下降させると落とし戸に作用する土圧が周辺地山に再配分される。再配分特性は土被りにより異なり、高土被りほど周辺地山における土圧増加が広範囲にわたる。

Terzaghiの土圧理論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、現行設計¹⁾で標準的に用いられている $K_h = 1.0$ とした算定値が実験値を捉えた。これは、Terzaghi⁴⁾の K_h に関する説明にも合致する結果である。

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⁴⁾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。本手法で、Terzaghiの式⁴⁾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_0 のみである。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。

参考文献

- 1) 例えば、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.
- 2) 例えば，Kommerell, O.：Statische Berechnung von Tunnelmauerwerke, 1940.
- 3) 例えば，Szechy, K.：トンネル工学 - 理論・設計・施工 - (島田隆夫訳)，鹿島出版会，1971.
- 4) Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 66-75, 1943.
- 5) 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.
- 6) 足立 紀尚，木村 亮，小坂 馨太，神谷 信毅：砂質および粘性地盤の遠心場降下床実験，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp.2149-2150, 1997.
- 7) Tamura, T.：Active and Passive Earth Pressure on the Trapdoor, *Proc. of Int. Conf. on Modern Tunneling Science and Technology (IS-KYOTO 2001)*, pp.1189-1197, 2001.
- 8) 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.
- 9) 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.