

トンネルに作用する土圧に関する移動床実験

京都大学 正会員 田村 武, 木村 亮, 岸田 潔
 京都大学 学生員 ○ 菊本 統, 玉谷 宗一朗

1. まえがき

従来、トンネル土圧の発生機構の解明を目的として、降下床(落し戸)実験が実施されてきた。同実験は、地山下部に設置した水平板の下降でトンネル掘削時の応力解放を模擬する模型実験であり、これを起源としたトンネル土圧理論¹⁾は実際のトンネル支保の設計にも頻繁に用いられてきた。一方、水平板を上昇させる上昇床(浮き戸)実験も、構築されたトンネルが地山を押し上げるような状況、すなわち周辺地盤がトンネルに対して相対沈下する場合の土圧算定手法としてしばしば用いられている。これらの実験(以下、移動床実験と称す)は、実際のトンネルに対する模型実験として位置付けだけでなく、基礎的な土圧発生機構を検討する上でも興味深い問題と言える。これまでも様々な検討がなされてきたが、本研究では特に、浅い土被りにおける土圧特性に着目して移動床実験を行った。本稿では、過去に行われた実験^{2,3)}と併せて土圧に関する結果を総括する。

2. 移動床実験の概要

図-1に実験装置を示す。地山材料には、2種の直径のアルミ棒を混合した積層体(単位体積重量 $\gamma=21\text{ kN/m}^3$)を用いた。装置及び地盤材料は従来用いられてきたものと同一である。機構や物性の詳細は文献^{2,3)}に譲る。

降下床(上昇床)実験では、移動床を5.0 mm 下降(上昇)させながら、各時点で移動床及び周辺地山での鉛直荷重分布、地表面沈下形状、地山内の変位分布を計測した。本稿では、移動床に作用する荷重についてのみ結果を示す。実験パラメータは、土被り H および移動床幅 D である。従来の検討^{2,3)}も含めた実験パターンを表-1にまとめる。なお、本研究では同実験に対して弾塑性有限要素解析を実施し、数値解析による検討も行っている。その概要については別報⁴⁾を参照されたい。

3. Terzaghiの土圧理論¹⁾

Terzaghiの理論は、乾燥砂を用いた降下床実験から推論されたものであり、現場においても実質的なトンネル土圧を求めるために幅広く用いられてきた。同理論では、移動床の下降に伴って、図-2に示すような移動床幅 D と等しい間隔を持つ鉛直面 ae , bf でせん断が生じると仮定することで移動床に作用する平均鉛直土圧 $\bar{\sigma}_v$ を得る。一方、上昇実験では、鉛直面 ae , bf に働くせん断応力を逆向きとすることで $\bar{\sigma}_v$ を得る。本実験では粘着力を持たないアルミ棒積層体で地山をモデル化したことを考慮すると、 $\bar{\sigma}_v$ は次式で与えられる。

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma D}{2K_h \cdot \tan \phi} \cdot \left[\pm 1 \mp \exp\left(\mp 2K_h \cdot \frac{H}{D} \cdot \tan \phi\right) \right] \quad (1)$$

ここで、 $K_h (= \bar{\sigma}_h / \bar{\sigma}_v)$ は水平土圧係数、 γ, ϕ はそれぞれ地山材料の単位体積重量、内部摩擦角である。また、複号の+は降下床実験、-は上昇床実験にそれぞれ対応する。式(1)において、移動床土圧を算定する際に設定すべき実質的な入力定数は K_h と ϕ である。ここでは、アルミ棒積層体の二軸試験結果より $\phi=30^\circ$ と設定し、 K_h を変化させて検討を行った。

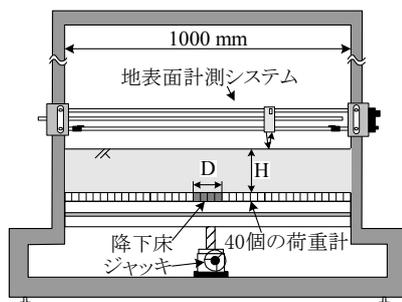


図-1 2次元降下床実験装置

表-1 実験パターン

H/D	0.25	0.33	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	6.00	8.00
50cm	-	-	-	-	○	-	-	○	-	○	-	○
100cm	○ △	○ △	○ △	○ △	○ △	○ △	○ △	○ △	○ △	○ △	○ △	-
150cm	-	-	-	-	○	-	-	○ △	-	○	-	-
200cm	-	○ △	○ △	-	○ △	-	△	○ △	-	-	-	-

○: 降下床実験 △: 上昇床実験

キーワード 移動床実験, 土圧, 土被り, トンネル

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科 TEL 075-753-5106

4. 結果と考察

図-3(a), (b)はそれぞれ降下床, 上昇床実験における移動床土圧の推移を表す. 縦軸に示した規準化土圧は, 移動床に作用する平均土圧 $\bar{\sigma}_v$ を γD で除した無次元量であり, $H/D = 1.00$ での初期土圧が1.0となる. 同図より, 降下床(上昇床)実験における移動床土圧は, 移動床下降(上昇)初期には急激に減少(増加)するが, その後の変化は緩やかである. 続いて, 図-3より降下床土圧の最小値を図-4に, 上昇床土圧の最大値を図-5に示す. それぞれの図には, 種々の K_h を式(1)に代入することで求めた Terzaghi の理論解を実線, 理論初期土圧を破線で示した. これらの図より以下の知見が得られる.

(a) 降下床・上昇床土圧ともに小さな土被りでは土被り圧に近い値を示すが, 土被りが大きくなるほど土被り圧とは異なってくる. 降下床実験では $H/D = 2.0$ 以上でも被り高さはせいぜい $0.5 \sim 0.8D$ であるが, 上昇床実験では移動床土圧は土被りの増加に伴って指数的に急増する.

(b) 降下床実験では $K_h = 1.0 \sim 2.0$ とした Terzaghi 解が実験値を捉える. これは K_h が1.0以上になるとした Terzaghi の指摘と合致する. 一方, 上昇床実験では $K_h = 0.25 \sim 0.50$ とした Terzaghi 解が実験値に近い値を示す. つまり, Terzaghi の理論で移動床土圧を近似することは可能であるが, 上昇・下降に応じて適切な K_h を選定する必要がある.

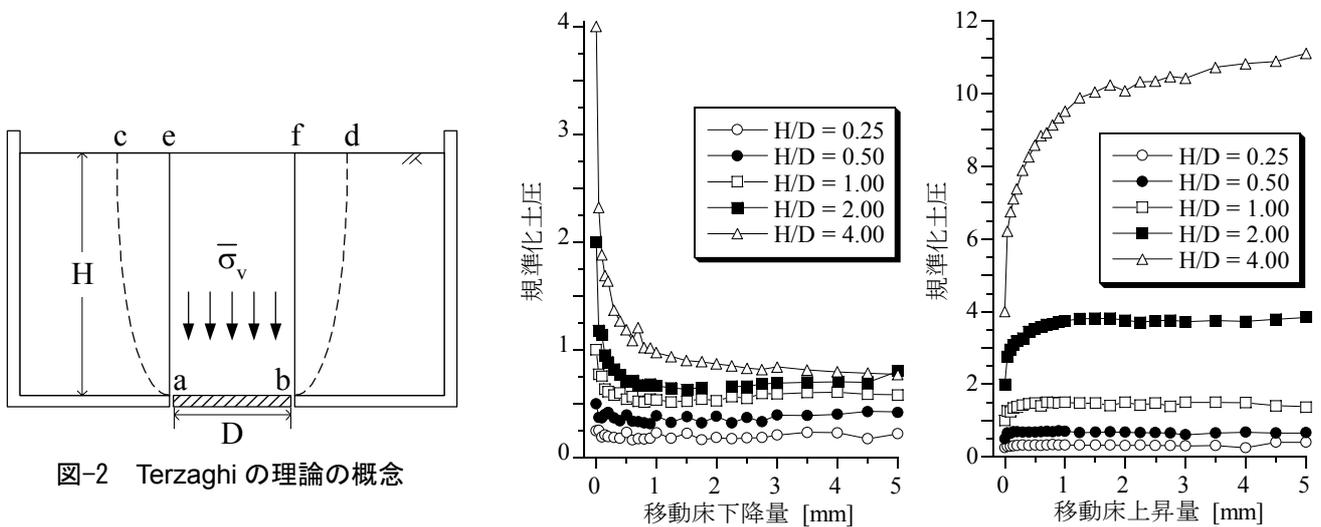
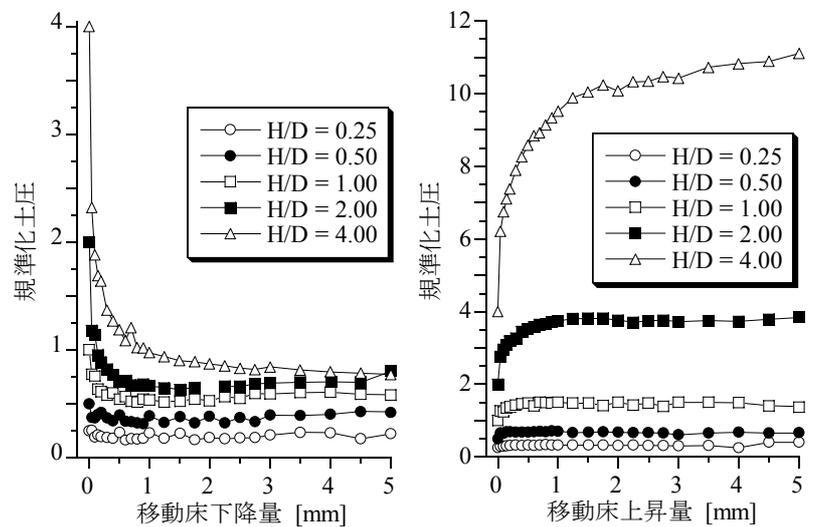


図-2 Terzaghi の理論の概念



(a) 降下床実験

(b) 上昇床実験

図-3 移動床土圧の推移 ($D = 10$ cm)

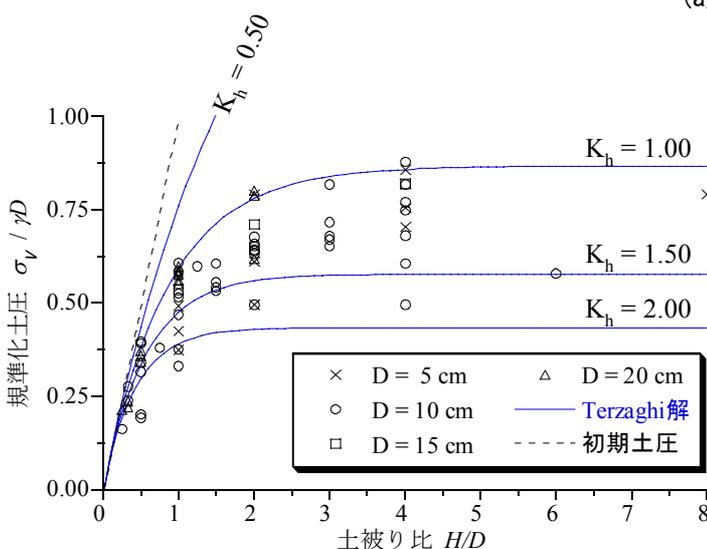


図-4 降下床土圧の最小値と Terzaghi の解

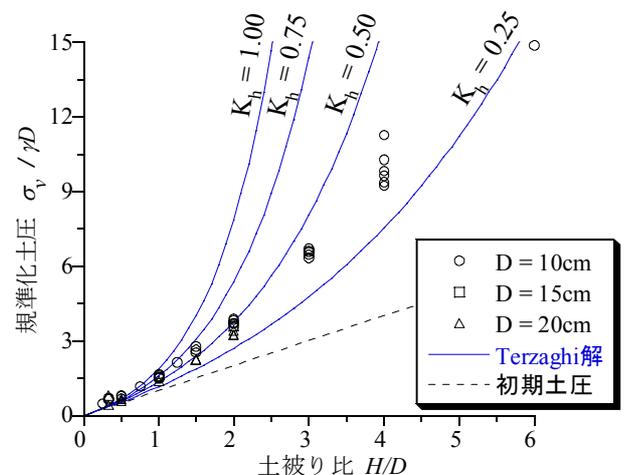


図-5 上昇床土圧の最大値と Terzaghi の解

参考文献 1)Terzaghi, K. : *Theoretical Soil Mechanics*, pp.66-75, 1943. 2)足立ら : 落し戸実験における土圧分布, 第29回土質工学研究発表会, pp.1989-1992, 1994. 3)足立ら : 双設降下床の力学挙動, 第30回土質工学研究発表会, pp.1977-2980, 1995. 4)田村ら : ダイレイタンスーを考慮した地山の力学挙動の評価, 第38回地盤工学研究発表会, 2003(投稿中).