

降下床実験によるめがねトンネル掘削時の応力再配分メカニズムの検討

京都大学 学生員 ○ 菊本 統

京都大学 正会員 岸田 潔, 木村 亮, 田村 武

1. まえがき 単設トンネルに作用する緩み土圧の予測には, Terzaghi の理論¹⁾が頻用されてきた. 同理論は, 降下床実験の結果に基づいて図-1 に示す降下床境界の鉛直面 ab , cd にせん断面が仮定され, トンネルに作用する荷重の総和 L は直上の地山の自重 W と ab , cd 面に作用するせん断力の合計 $2Q$ の差として求められる. すなわち, 本来降下床に作用していた土圧の一部は周辺地山に分配される. 一方, 近接した双設トンネルを掘削する際には, 掘削の相互干渉により両トンネルに過大な土圧が作用する可能性があるにも関わらず, その土圧再配分特性(特に両トンネルの土圧のやり取り)は未だ解明されていない. 本稿では, (離隔の無い)めがねトンネルの掘削を模擬した双設降下床実験の結果をもとに, 土圧再配分特性に考察を加える.

2. 2次元双設降下床実験の概要 本研究では, 図-2 に示す装置²⁾を用いて, 地山底部に隣接して設けられた2つの降下床(下降順に先行・後続と区別する, 幅 $D = 100 \text{ mm}$)を 2 mm ずつ順次下降させることでめがねトンネルの掘削時の応力解放を表現する双設降下床実験を実施した. 全幅 1000 mm の地山を支える 40 個の支持ブロック全てに荷重計を貼付し, 底面全長に亘って鉛直土圧分布を計測した. また, 水平移動可能(可動範囲 850 mm)なレーザ式変位計により地表面の変位形状を計測した. 模型地山は2種の直径のアルミ棒を混合した積層体(単位体積重量 $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$)により作成し, 4 種類の土被り H ($= 0.5D, 1.0D, 2.0D, 4.0D$)に対して実験を実施した.

3. 結果と考察 図-3 に各降下床下降終了時の降下床周辺における土圧分布の一例を示す. 同図より, 下降した降下床に作用する土圧(以後, 降下床土圧)は減少し, その周辺地山に作用する土圧は増加する. また, 先行降下床下降後はほぼ左右対称な土圧分布形状が, 後続降下床下降後には先行降下床土圧が急増し非対称な分布になった. 特に, 後続降下床直近の先行降下床上には土被りによらず初期土圧を上回る偏圧が作用した.

上述した後続降下床下降時の土圧再配分特性を解明するためには, 先行降下床～周辺地山, 先行降下床～後続降下床, 後続降下床～周辺地山間での土圧の往来を把握する必要がある. そこで本稿では, Terzaghi に倣い図-4 に示す降下床境界の鉛直面 $a-b$, $c-d$, $e-f$ に作用するせん断力 Q_1 , Q_2 , Q_3 に着目する.

まず, 図-5 を用いて地山内の任意の鉛直断面 $m-n$ におけるせん断力 Q の算出方法を説明する. 図-5(a)は模型地山に作用する鉛直力を示す. 変位自由境界となる地表面には力は作用しない($p_{sl} = p_{sr} = 0$). また, 地山の左右側面は平滑面に支持されているため摩擦力 f_{wl} , f_{wr} は発生しない. よって, $m-n$ 面の左右の地山に作用する鉛直力について, 以下のつりあい式が得られる.

$$\text{左: } -Q + \int p_{bl} dx - \int \gamma dV_l = 0, \quad \text{右: } Q + \int p_{br} dx - \int \gamma dV_r = 0 \quad (1)$$

ここに, p_{bl} , p_{br} は左右の地山底面に作用する鉛直力, V_l , V_r は左右地山の体積, γ は地山の単位体積重量である. 本実験では地表面は水平であり, 実験初期の底面にはほぼ一様な土被り圧が作用することを確認しているため, 次式が成立する.

$$\text{左: } \int \gamma dV_l = \int p_{bl0} dx, \quad \text{右: } \int \gamma dV_r = \int p_{br0} dx \quad (2)$$

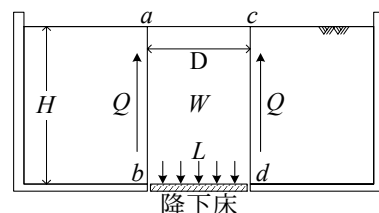


図-1 降下床実験と Terzaghi によるせん断面の仮定¹⁾

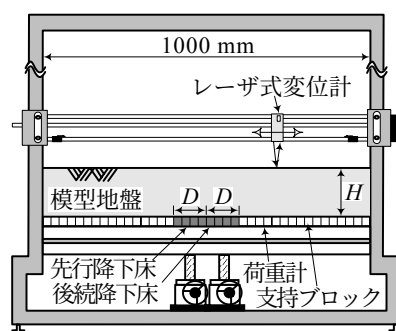


図-2 2次元降下床実験装置

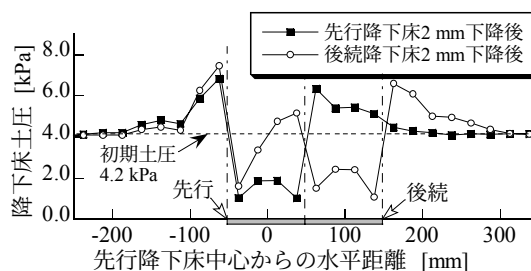


図-3 降下床周辺の土圧分布($H = 2.0D$)

キーワード めがねトンネル, 土圧, せん断力, 降下床, 土被り

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都市社会工学専攻 TEL 075-753-5106

ここに、 p_{bl0} , p_{br0} は p_{bl} , p_{br} の初期値である。(2)式を(1)式に代入して整理すると、 Q は以下の式で表される。

$$\text{左: } Q = \int p_{bl} dx - \int p_{bl0} dx = \int \Delta p_{bl} dx, \quad \text{右: } Q = - \int p_{br} dx + \int p_{br0} dx = - \int \Delta p_{br} dx \quad (3)$$

ここに、 Δp_{br} , Δp_{bl} は p_{bl} , p_{br} の変化量である。ところで本実験では、**図-5(b)**に示すように地山底面全幅に亘って鉛直荷重を計測しているの、地山底面に作用する鉛直荷重は次式となる。

$$\text{左: } \int p_{bl} dx = \sum_{i=1}^k P_i, \quad \int \Delta p_{bl} dx = \sum_{i=1}^k \Delta P_i, \quad \text{右: } \int p_{br} dx = \sum_{i=k+1}^{40} P_i, \quad \int \Delta p_{br} dx = \sum_{i=k+1}^{40} \Delta P_i \quad (4)$$

なお、 P_i ($i = 1 \sim 40$) は各荷重計による計測値、 ΔP_i はその変化量である。(3),(4)より、 Q は実験結果を用いて次式で求まる。

$$Q = \sum_{i=1}^k (\Delta P_i) = - \sum_{i=k+1}^{40} (\Delta P_i) \quad (5)$$

このようにして得た Q_1 , Q_2 , Q_3 の推移を**図-6**に示す。同図では**図-4**の矢印の向き、すなわち先行降下床側の地山を持ち上げる向きを正としてせん断力を示した。図より、先行降下床下降時にはいずれのせん断力も正である。一方、後続降下床下降時に Q_2 のみ正負が逆転する。つまり、後続降下床下降時に Q_2 は先行降下床側の地山に下向き、後続降下床側の地山に上向きに作用し、先行降下床に土圧が再配分されることがわかる。

さらに、後続降下床下降後の Q_2 の絶対値は、先行降下床下降後のそれより小さい。また、後続降下床下降後の Q_1 , Q_3 の絶対値よりも小さい。これは、2つの降下床の下降に伴う応力解放によって、 $c-d$ 面に作用する拘束圧が $a-b$, $e-f$ 断面に比べて小さくなるためと考える。一方、 Q_1 は先行降下床、 Q_3 は後続降下床が下降する際に顕著に増加する。つまり、下降する降下床に隣接した鉛直面でせん断力が急増する。特に $H \leq 2.0D$ では、 Q_1 , Q_3 は鉛直面に隣接する降下床下降時のみ増加し、離れた降下床が下降する際にはほとんど変化しない。

4. まとめ めがねトンネル掘削時の土圧特性を検討するため双設降下床実験を実施した。実験結果をもとに降下床境界の鉛直面に作用するせん断力を算出し、周辺地山～先行降下床～後続降下床～周辺地山間における土圧の再配分特性について考察を加えた。その結果、2つの降下床に挟まれた中間の地山においては先行降下床下降時と後続降下床下降時で地山に作用するせん断力の方向が逆転することがわかった。また、その大きさは先行降下床下降後よりも、後続降下床下降後のほうが小さくなることがわかった。なお、著者らは今回の実験結果を参考にめがねトンネル掘削時のトンネル土圧算定式を提案している。概要については、別報を参照されたい³⁾。

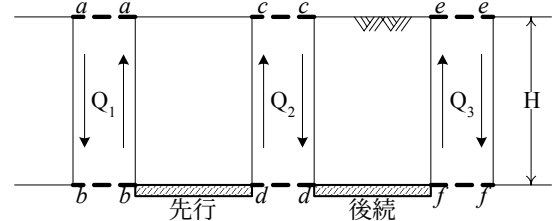
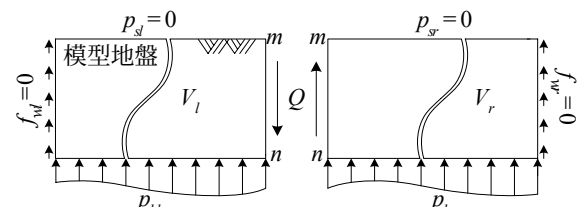
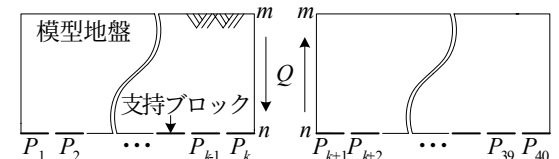


図-4 双設降下床実験におけるせん断面の仮定



(a) 地山に作用する鉛直力



(b) 計測項目

図-5 せん断力の算出方法

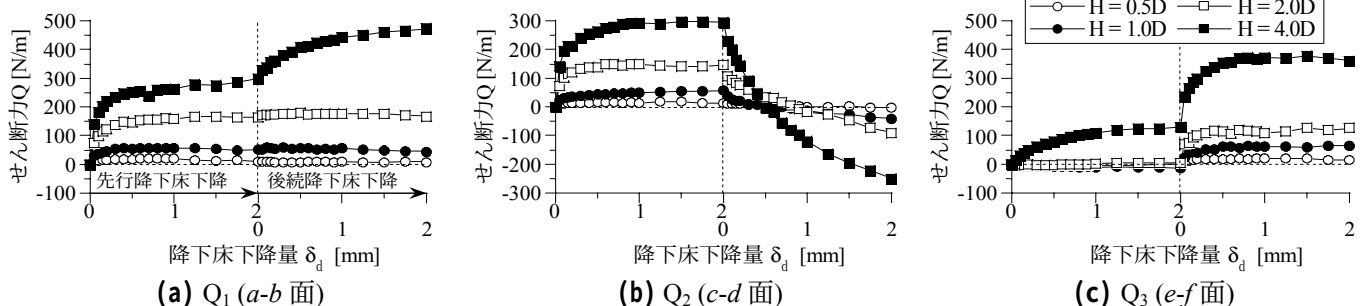


図-6 鉛直面におけるせん断力の推移

参考文献 1) Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, pp.66-75, 1943. 2) 足立ら: 第29回土質工学研究発表会, pp.1989-1992, 1994. 3) 菊本ら: 第39回地盤工学研究発表会, 2004(投稿中).