

トンネル外周地盤の応力と変形について

京都大学防災研究所 正員 村山 朔郎

京都大学大学院 学生員 松岡 元

京都大学大学院 学生員 小川 雅裕

前回の報告^{*}に引き続き、トンネル問題についての基礎的研究として、金属棒積層体を地山材料に用いて落し戸模型実験を行ない、地山材料の力学特性を調べることから始めて、落し戸にかかる上圧と地山の変形の問題および地山の沈下現象について現象論的に考察した。

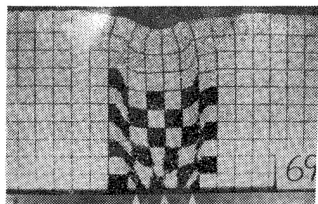


写真-1 地山の変形状態 ($\delta=70\text{ mm}$)

1. 落し戸外周地盤の応力分布について 写真-1は アルミ棒混合積層体 (径1.6と3mm, 混合重量比 6:4, 長さ50mm) を、落し戸幅: $B=9\text{ cm}$, 土板高さ: $h_1=30.7\text{ cm}$ の実験条件で、落し戸を $\delta=70\text{ mm}$ 降下させたときのマス目の変形状態を示しているが、マス目は体積変化をおこしつつせん断変形していることが観察される。図-1は、写真-2の単純せん断試験機によって得られた アルミ棒混合積層体の試験結果の一例であるが、応力比 γ は体積変化をおこさなくても発生する等体積せん断の応力比 $[\gamma]_{cv}$ (図-1中の点線) と表面エネルギー補正によって考慮した体積変化にもとづく応力比 $[\gamma]_d = \frac{\Delta E}{\Delta V}$ の和と考えることにより、実験値をほぼ説明できる。 $\gamma = [\gamma]_{cv} + [\gamma]_d = [\gamma]_{cv} + \frac{\Delta E}{\Delta V}$ この考えを落し戸模型実験にも適用できるとし、マス目が一様な変形をするものとして、地山材料の抵抗カ γ を評価すれば、前回の報告^{*}と同様に逐次計算法で応力分布を求めることができる。図-2は、写真-1のときの落し戸両端の鉛直面上の T_{xz} の分布と底部の σ_z の分布をあらわしている。落し戸上の地山の自重から T_{xz} の分布であらわされるせん断抵抗カを引けば、落し戸にかかる荷重となる。この土圧の計算値は445gであり、これに対して測定値は約500gであった。落し戸周辺部で σ_z が大きくばっているのは、この部分で土を復元させたため落し戸にかかる荷重が小さくなることを示している。

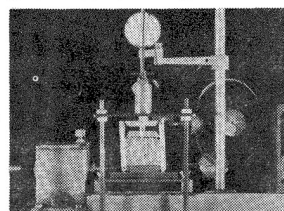


写真-2 単純せん断試験機

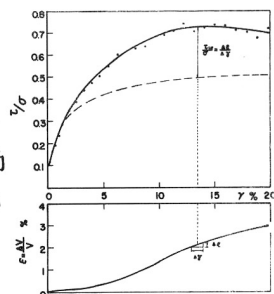


図-1 アルミ棒混合積層体の $\gamma \sim \delta \sim \epsilon = \frac{\Delta E}{\Delta V}$ 関係

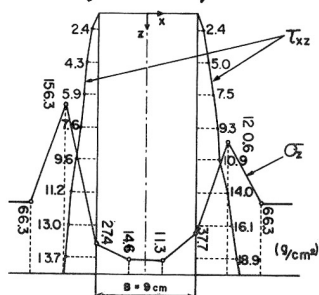


図-2 T_{xz} および σ_z の分布 ($\delta=70\text{ mm}$)

2. 落し戸外周地盤の沈下現象について 写真-3は、落し戸の降下にともなう積層体の運動状態をみるために、重ね撮りしたものであるが、降下量がある値以上になると定常的な流動領域を形成する。この領域の形を模型的にあらわして、粒子の移動がほぼ平行流となるときの幅を b , その点までの高さを h_b とする。(図-4参照) 図-3は、 b/B と h_b/B の関係をプロットしたものであり、鉄棒の積層体 (X印) をのぞいて、種々の径のアルミ棒積層体および砂はきれいな直線関係を示した。共通点は比重と内部摩擦角 ϕ がほぼ等しいことである。実験式: $b/B = 0.34 \times (h_b/B) + 0.6$ ($b \geq B$)

----- (1) また、実験データから $h_b \approx b$ とする。さて、落し戸が $\Delta \delta$ だけ降下して生じた単位変位 $\Delta \delta$ の受けきによるゆるみ ϵ が地表面まで達すれば、地表面沈下もおこり、ゆるみの一部は地山の向けき率の増加の形で存在する。この向けき率の増加には限度があるという事実および向けき率の増加は

流動領域とその周囲の静止領域の境界面である外側すべり面に沿って顕著にみられるという事実から、図-4に示すように現象を単純化して考えを進める。まず、地表面沈下 β_s について考える。いま、落し戸を δ 降下させたことにより、外側すべり面に沿って長さ l の部分に明確なすべり面があらわれ、限界の向き率増加 Δn_{limit} になっており、地表面は幅 b にわたって β_s だけ沈下しているものとする。この状態で落し戸をさらに $\Delta\delta$ だけ降下させたことにより、すべり面が Δl だけ上昇し地表面は $\Delta\beta_s$ だけ沈下したとすると、一般に、 $B \cdot \Delta\delta = b \cdot \Delta\beta_s + 2 \times (\Delta l \times \delta \times \Delta n_{limit})$ (δ :すべり領域の幅) ----- (2).

(2)式より、 $\Delta\beta_s = \alpha \cdot \Delta\delta - \beta \cdot \Delta l$ ----- (3) 二に $\alpha = \frac{B}{b}$, $\beta = (2\delta \Delta n_{limit})/b$.

次に、地表面にダイヤルゲージを置いて落し戸中心線上における地表面沈下量を測定したが、その結果を δ と $\frac{\Delta\beta_s}{\Delta\delta}$ の関係で整理した一例を図-5に示す。これを見て明らかに、 $\frac{\Delta\beta_s}{\Delta\delta}$ は δ の増加にもとほば直線的に増加し、ある δ のとき($\delta = \delta_c$ とする)ある一定値に達してその後はおよそ一定を保つことがわかる。さらに興味あるのは、 $\delta = \delta_c$ のときに左右の外側すべり面がちょうど地表面に達しており、 $\frac{\Delta\beta_s}{\Delta\delta}$ の一定値は二のとき向き率の増加はそれ以上おこらないとして立てた連続の式: $B \cdot \Delta\delta = b \cdot \Delta\beta_s$ から求めた $\frac{\Delta\beta_s}{\Delta\delta} = \frac{B}{b} = \alpha$ ----- (4) の値とほぼ等しいことである。したがって、 $\frac{d\beta_s}{d\delta} = \frac{\alpha}{\delta_c} \cdot \delta$ ($0 \leq \delta \leq \delta_c$) ----- (5), $\frac{d\beta_s}{d\delta} = \alpha$ ($\delta \geq \delta_c$) ----- (6). (5)式を積分し、 $\delta=0$ のとき $\beta_s=0$ なる条件を入れると、 $\beta_s = \frac{\alpha}{\delta_c} \cdot \frac{\delta^2}{2}$ ($0 \leq \delta \leq \delta_c$) ----- (7). (6)式を積分し $\delta = \delta_c$ のとき (7)式と連続する条件を入れると、 $\beta_s = \alpha \cdot \delta - \frac{\alpha \cdot \delta_c}{2}$ ($\delta \geq \delta_c$) ----- (8). 一方、(3)式の積分形: $\beta_s = \alpha \cdot \delta - \beta \cdot l$ ----- (9) において、 $l \equiv l_i$ とした $\beta_s = \alpha \cdot \delta - \beta \cdot l_i$ ----- (9') なる関係は、すべり面が地表面まで達したとき、 β_s と δ が満たさなければならぬ関係である。(8)式と(9')式は一般化すれば $\frac{\alpha \cdot \delta_c}{2} = \beta \cdot l_i$. α, β にもとの値を入れて、 $\delta_c = (4\delta \cdot \Delta n_{limit}) \times (\frac{l_i}{B})$ ----- (10).

図-6は、種々の実験条件に対して $\frac{l_i}{B}$ と δ_c とをプロットしたものであるが、ほぼ直線関係を示し、勾配が $4\delta \cdot \Delta n_{limit} \approx 11 \sim 12$ (δ :mm) と推定できる。また、実験写真の読み取りから $\Delta n_{limit} \approx 0.1$, $\delta \approx 30$ mm とする。以上のことより、地表面沈下量 β_s は計算できる。

計算例: $B=9$ cm, $l_i=30.1$ cm の場合、(1)式より $\frac{b}{B} = 0.34 \times \frac{30.1}{9} + 0.6 = 1.74$

$\therefore b = 9 \times 1.74 = 15.7$ cm (4)式より $\alpha = \frac{9}{15.7} = 0.57$ (10)式より

$\delta_c = 12 \times \frac{30.1}{9} = 40$ mm. ゆえに、例えば、落し戸降下量: $\delta = 70$ mm のときの

地表面沈下量: β_s は (8)式より $\beta_s = 0.57 \times 70 - \frac{0.57 \times 40}{2} = 28.5$ mm. 二に対してダイヤルゲージによる実測値は 28.3 mm であった。次に、読み取り望遠鏡によって地山中の一点の沈下量を測定したが、測定値は図-5と同じ傾向を示し、 α も δ_c も全く同様の考え方で説明できるので、この解析法は地山中の各点の沈下量予測にも拡張できる。

* [村山, 松岡: トンネル土圧の発生機構について 土学会関西支部講演概要 (昭和42年) この報告中、アルミ棒積層体の等体積せん断試験結果の $\tau_0 \approx 0.35$ は $\tau_0 \approx 0.5$ に訂正しよ

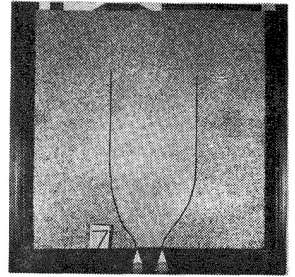


写真-3 積層体の運動状況 $\delta=50-70$ mm

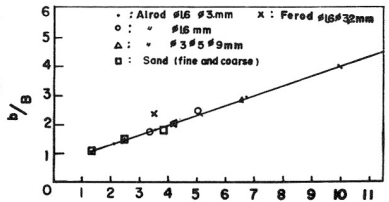


図-3 $\frac{\beta}{\delta} \sim \frac{l_i}{B}$ 関係

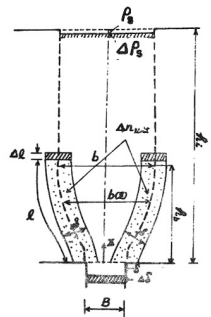


図-4 地表面の沈下と向き率の増加

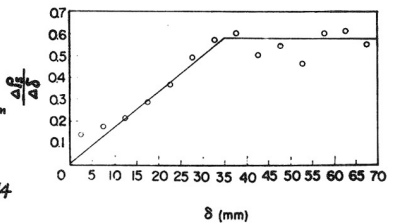


図-5 $\frac{\Delta\beta_s}{\Delta\delta} \sim \delta$ 関係 ($B=9$ cm, $l_i=30.1$ cm)

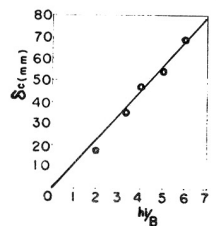


図-6 $\delta_c \sim \frac{l_i}{B}$ 関係