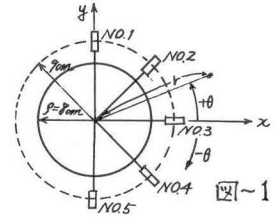


III-131 軟弱地山中の素掘円形トンネルの周辺の変位と応力に関する模型実験について

徳島大学工学部 正員 ○小田 英一
宇部興産 K.K. 正員 金重 叔義

1. まえがき：一粒性土の地山のように軟弱な地山中に素掘円形トンネルを掘削した場合、トンネル周辺の応力分布と変形について著者は理論的に研究してきたが、これを模型実験によって検証するために、地山材料の力学的特性とトンネル周辺応力分布と変形との関係について実験的研究を行った。なお今回トンネル周辺に塑性領域が発生してスベリ線が実験において観測されたので、従来の著者のこれに関する理論との照合についても報告する。



2. 模型実験概要：一内容体積 $60\text{cm} \times 70\text{cm} \times 10\text{cm}$ の鋼製の模型実験箱を作成し、その前面は硬質ガラス厚さ 1cm のものを使用した。この実験箱に土をためて素掘円形トンネル直径 16cm のものを削孔して地山荷重として填充した土の表面に載荷した。この様子を写真-1に示す。なおガラス板をあてる面と反対側に素掘トンネルに当る位置に直径 11.9cm の円孔を鉄板に明け、これより土圧計のリード線を外部に出すようにした。この孔は土をためて地山材料を作るときは鉄製の蓋をする構造となっている。トンネル周辺の接線方向直応力 σ_θ を測定するため大和電業 K.K. 製 PS-2KA の小型圧力変換器を直径 1cm の隣青銅板にはりつけた小型土圧計を作成して、図-1に示すようにトンネル周辺地山中に挿入し

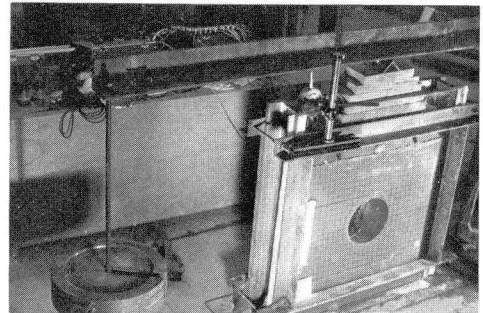


写真-1

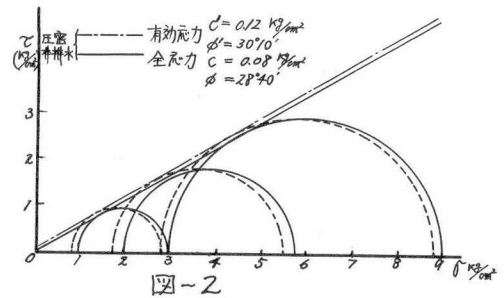


図-2

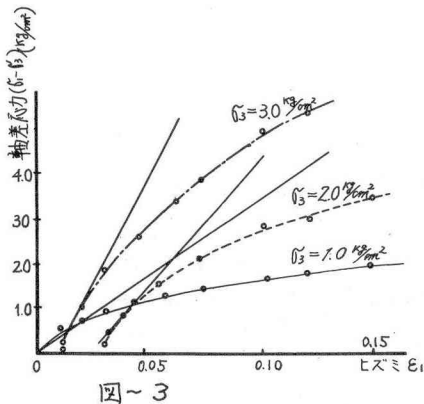


図-3

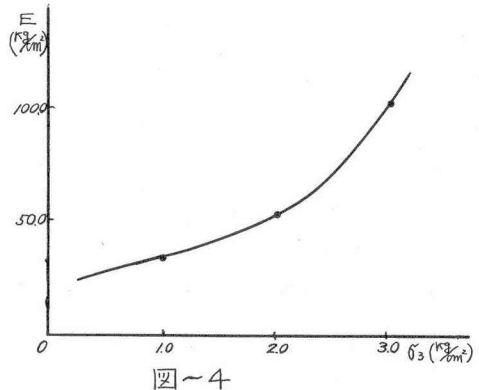


図-4

た。

地山材料として用いた土は $LL = 43.4\%$, $PL = 23.9\%$, $I_p = 19.5\%$, 真比重 $G_s = 2.782$, 粒度分析結果砂合 5.0% ,

シルト分 69.0% , 粘土分 26.0% のもので、シルト質粘土ロームで徳島市内の沖積層の上部粘土層のものである。

これを実験箱につめるには、この土を2週間水浸した試料を実験箱につめて1日放置し、上載圧力 0.0816 kg/cm^2 で8時間

圧密、 0.2516 kg/cm^2 で16時間圧密、 0.4163 kg/cm^2 で22時間圧密、 0.6584 kg/cm^2 で44時間圧密した。なお土をつめるに先だて鉄製実験箱の内壁と土との摩擦を減少するため錫箔を内壁にはった。また圧密中はガラス板の面に濾紙をあてがった。トンネル変形の測定には、地山材料の $60 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ の表面に写真-2、写真-3に示すようにインキによって基準目を入れたものの移動を写真測定することとした。地山自重による鉛直方向圧力としては写真-1に示すように等分布荷重が地山材料表面 $10 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ の面に作用する装置としてレバー方式で載荷した。実験箱に填充圧密された地山材料の含水比は $41 \sim 43\%$ で、飽和度は 100% , 湿潤密度 $w = 0.00194 \text{ kg/cm}^3$ である。

なお小型土圧計の挿入情况は図-1に示す。トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

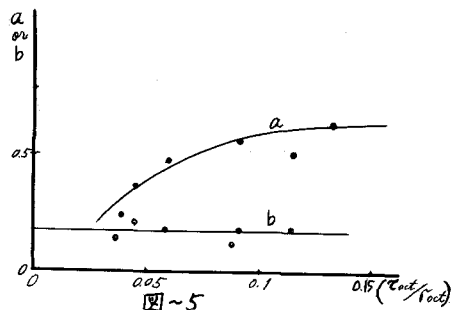
トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

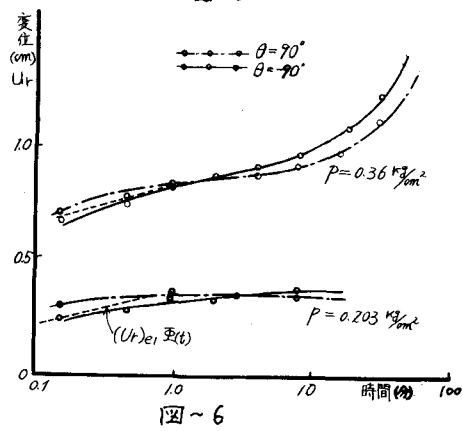
トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。

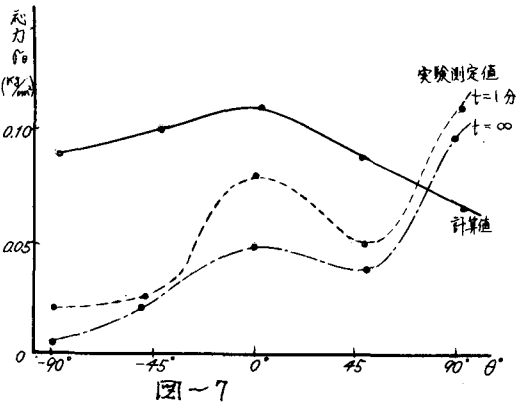
トンネル模型実験の上載荷重 $P = 0.203 \text{ kg/cm}^2$ をかけ、トンネル周辺の変形の写真撮影による測定と土圧 f_0 の測定を時間的に行った。その後更に上載荷重を増加して、 $P = 360 \text{ kg/cm}^2$ のとき、トンネル周辺に塑性領域を生じてスベリ線の発生を観測できた。



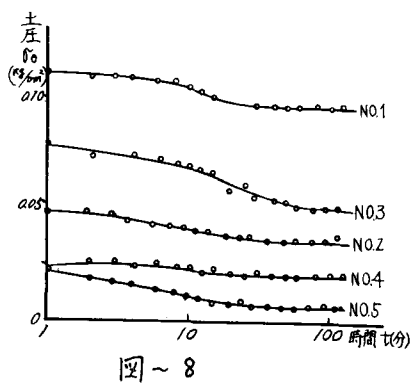
図~5



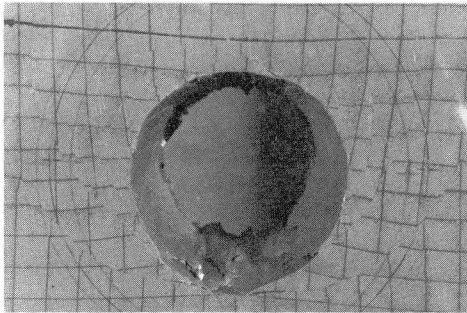
図~6



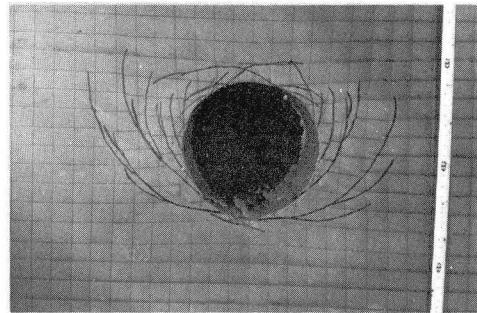
図~7



図~8

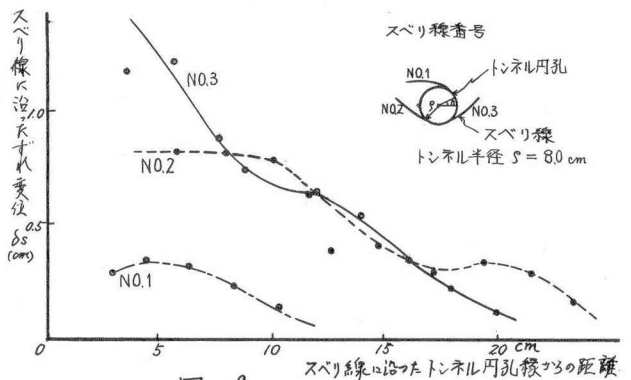


写真~2



写真~3

と $K_0 = 0.95 - \sin \phi = 0.95 - \sin 30^\circ 10' = 0.447$,
ポアッソン数 $\mu = \frac{1}{K_0} + 1 = \frac{1}{0.447} + 1 = 3.23$ となる。
図-3にはこの三軸圧縮試験における軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ と鉛直ヒズミ ϵ_1 との関係の測定結果であって、これより曲線の初期の接線勾配よりヤング率 E を求めたものの側液圧 σ_3 との関係を示したものが図-4である。また三軸圧縮クリープ試験における時間 t における鉛直方向ヒズミ ϵ_{el} とし、最終ヒズミ ϵ_{el} とすれば、 $\frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{el}} = \ln(t) = a + b \log_{10} t$ K おける



図~4

る a と b の値を $\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{oct}}$ に対して関係づけた実測値は図-5に示す。但し τ_{oct} は octahedral shearing stress, σ_{oct} は octahedral normal stress である。

4. トンネル模型実験結果とその考察：一トンネル模型実験において地山荷重として $p = 0.203 \frac{kg}{cm^2}$ を載荷したときのトンネル拱頂 ($\theta = 90^\circ$)、トンネル底部中央 ($\theta = -90^\circ$) の半径方向変位 U_r の時間的变化は図-6に示す。 $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$, $\sigma_{oct} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3)$, $\sigma_3 = K_0 \sigma_1$ なる故 $\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{oct}} = \frac{\sqrt{3}(1-K_0)}{1+2K_0} = \frac{\sqrt{3}(1-0.447)}{1+2 \times 0.447} = 0.41$ となり、図-5より $a \approx 0.700$, $b = 0.165$ となる。これを用いて $p = 0.203 \frac{kg}{cm^2}$ のときのトンネル拱頂の変位 U_r を求めれば図-6の点線のようになって変位の時間的变化は比較的よく一致した。なお図-6の $p = 0.360 \frac{kg}{cm^2}$ のときの曲線はトンネル周辺が塑性状態となっていて、steady flow stage より progressive stage への移行を示している。地山材料のヤング率は図-4より $E = 0.203 \frac{kg}{cm^2}$ のとき、 $E = 29 \frac{kg}{cm^2}$ となった。 $p = 0.203 \frac{kg}{cm^2}$ のときのトンネル周縁半径方向変位 U_r は H. Schmid¹⁾ の計算式を用いて模型箱の制約条件を考慮した計算値と実測値とを示したものが表-1である。この差は土の力学的性質の求め方、模型箱中の地山条件と自然地盤条件の違いによるものと考えられる。図-7には半径 $8cm$ のトンネル円孔近傍で、 $r = 9cm$ の位置に図-1のように埋め込んだ土圧計による σ_r の実測値と H. Schmid の式による表-1

地山荷重 $p = 0.203 \frac{kg}{cm^2}$ のときのトンネル周縁半径方向変位 U_r (cm), [負号はトンネル中心に向う]

θ の値	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°
実測値	-0.315	-0.279	-0.309	-0.349	-0.297	-0.324	-0.385
計算値	-0.128	-0.103	-0.064	-0.034	-0.068	-0.121	-0.162

向を示している。図-8はトンネル周縁の変位 δ の時間的進行に伴い δ は応力緩和をしていることを示している。地山荷重 $p = 0.360 \text{ kg/cm}^2$ K/t ときトンネル周辺は塑性域が発生し、スベリ線を生じた。これを写真-2、写真-3に示す。図-9はこのスベリ線に沿ったずれ変位量を示している。また図-10は実測のスベリ線(点線)と著者の理論³⁾によるスベリ線(実線)との比較を行ったもので、著者の理論の妥当性を裏付けている。トンネル拱頂附近地山のスベリ線は計算によるスベリ線より下降しているのはスベリ線が生じた後、拱頂附近が *progressive stage* の変形下著しく下降したためと考えられる。

参考文献

- 1) H. Schmid : Statische Probleme des Tunnel- und Druckstollenbaues und ihre gegenseitigen Beziehungen, Berlin 1926
- 2) 土木学会第24回年次学術講演会講演集才3部, II-98

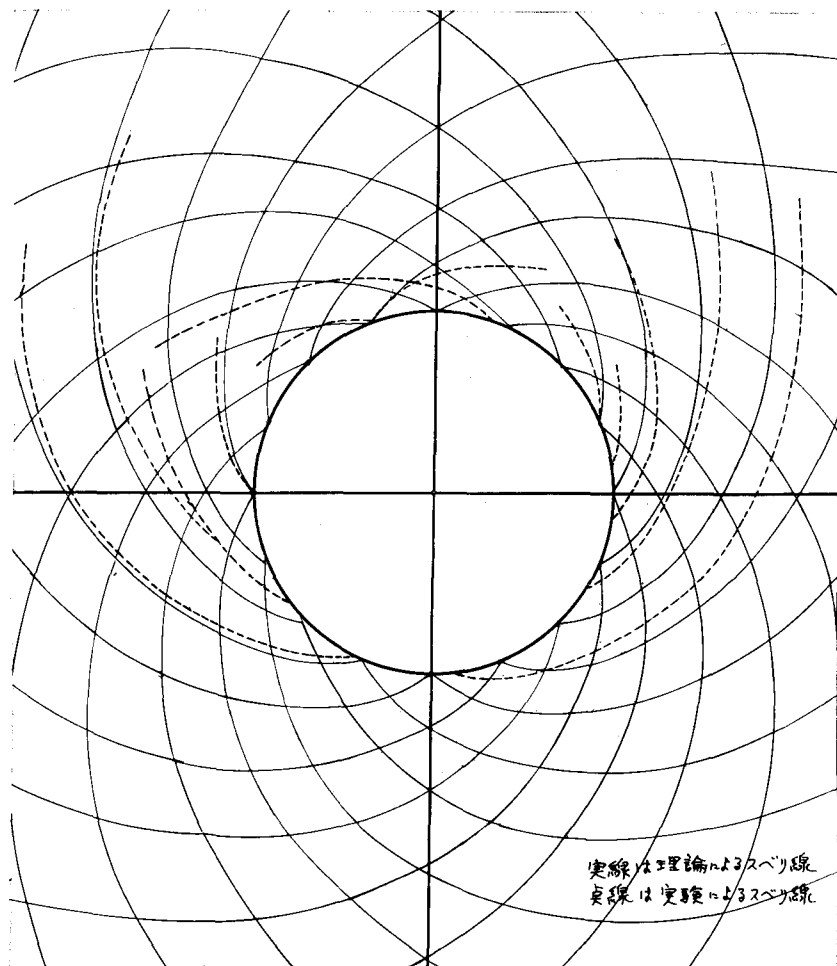


図-10 スベリ線の理論と実験の比較