

粘土の応力緩和によるトンネル土圧について

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

トンネルが掘削されると地山には変位が生じるが、この変位により発生したトンネル周辺のせん断応力はトンネル土被り重量の一部を受け持ち、残部が支保工あるいは覆工にかかってトンネル土圧となる。こゝろが粘弾性領域^{*}(主応力差が上限降伏値と下限降伏値の間にある領域)にある粘性土には応力の緩和現象があるので、掘削に伴う地山の変形のために地山中に発生したせん断応力が時とともに低下し、したがってトンネル土圧は時とともに増加する。こゝろでは粘土の応力緩和によるトンネル土圧の特性式をレオロジー理論^{*}から導くとともに、粘性土地盤を対象とした円形トンネルの模型実験を行なって考察した。

特性式 応力緩和理論によれば、 γ_0 をトンネル掘削直後におけるせん断ヒズミとすれば、 $t=0$ ではせん断応力： $\tau_{(t=0)} = G_1 \cdot \gamma_0$ ……(1)、 $t \rightarrow \infty$ ではせん断応力： $\tau_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2} \cdot \gamma_0$ ……(2)とあらわされる。こゝろに、 G_1, G_2 は土の力学的モデルの一次および二次せん断弾性係数で、上限降伏値に対応するせん断ヒズミ以下のせん断ヒズミに対しては、一様な粘性土と仮定すれば地山中のどの点でも一定である。トンネル掘削以前にトンネル孔外縁位置のうけていた土被り重量にもとづく応力を σ_0 ——トンネル鉛直軸上では $\sigma_0 = w \cdot h$ (w :地山の単位体積重量、 h :深さ)——とする。いま、図-1に示されているように円形トンネルの頂点(NO.1)について考える。掘削が

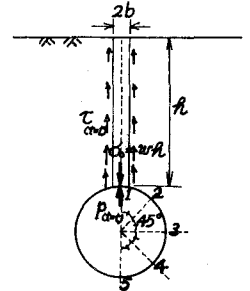


図-1

行われると、掘削直後の地山のせん断ヒズミ γ_0 により地山には $\tau_{(t=0)}$ [式(1)]が生じ、 σ_0 に代って地山の重量を受け持つが、掘削により変形した周壁に沿って支保工を建て込むものとすれば、掘削直後($t=0$)におけるトンネル土圧 $P_{(t=0)}=0$ であるから、 $0 = \sigma_0 \cdot 2b - 2 \cdot \tau_{(t=0)} \cdot h$ ……(3)。(2b:受圧面の)支保工はすみやかに建て込まれて、 γ_0 は時間がたっても一定に保たれるものとすれば、同様に $t \rightarrow \infty$ において釣合式を立てると、 $P_{(t \rightarrow \infty)} \cdot 2b = \sigma_0 \cdot 2b - 2 \cdot \tau_{(t \rightarrow \infty)} \cdot h$ ……(4)。式(1)、(2)、(3)、(4)とトンネルの頂点(NO.1)では $\sigma_0 = w \cdot h$ であることを考慮すれば、

$$P_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \cdot \sigma_0 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \cdot w \cdot h \quad \text{……(5)}$$

したがって小さい円筒形供試体でできる応力緩和試験によって地山の G_1, G_2 を求めれば $t \rightarrow \infty$ における粘土の応力緩和によるトンネル土圧の理論値が計算できる。

試料、実験装置、実験方法 試料は大阪沖積層より採取した $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ の角さないう粘性土を用いた。物性は、 $w_L = 82\%$ 、 $w_p = 33\%$ 、粒度分析：砂15% シルト56% 粘土29%、一軸圧縮強さ 0.28 kg/cm^2 、先行荷重 0.72 kg/cm^2 、上限降伏値 0.20 kg/cm^2 、レオロジー定数： $E_1 = 2G_1(1+\nu) = 20.2 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_2 = 2G_2(1+\nu) = 26.2 \text{ kg/cm}^2$ (ν :ポアソン比)である。実験装置には模型実験本体、土圧計、トンネル掘削装置、土圧測定装置などがあり、実験は供試体のセット、土圧計のセット、トンネルの掘削および土圧計の押入、測定の順で行なうが詳細は講演時に発表する。

実験結果, 考察 実験結果は図-2～図-4に示す。ただし, 土圧計の受圧面番号は頂点から下へ順番に

45°角筋に NO.1～NO.5 とする。(図-1) 上載圧 q は等分布水圧載荷で 700 (g/cm^2), 550 (g/cm^2), 400 (g/cm^2) の三種類と与えた。次に壁面摩擦の影響を考える。図-5において各上載圧における各受圧面の土圧の終局値 $P_{(t \rightarrow \infty)}$ と結んだ直線が横軸と交わる点の値は, 壁面の摩擦によってうけもたれている ($q + w \cdot h$) の値と考えられる。この壁面摩擦の上載圧と土被り重量への換算量を一般に f であらわすものとし, 受圧面 NO.1 (頂点) のトネル土圧の理論値を求めてみると, 図-5より $f = 355$ (g/cm^2) であるから, 式(5)を用いて,

$$P_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \cdot (q + w \cdot h - f)$$

$$= \frac{20.2}{20.2 + 26.2} \times (q + 1.6 \times 25 - 355)$$

$$q = 400 \text{ (g/cm}^2\text{)}; P_{(t \rightarrow \infty)} = 37 \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

$$q = 550 \text{ (g/cm}^2\text{)}; P_{(t \rightarrow \infty)} = 103 \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

$$q = 700 \text{ (g/cm}^2\text{)}; P_{(t \rightarrow \infty)} = 169 \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

同様にして NO.1 以外の受圧面についても掘削以前の地山の応力 σ_0 を, 鉛直方向の垂直応力: ($q + w \cdot h - f$), 水平方向の垂直応力: $K_0 \cdot (q + w \cdot h - f)$, (K_0 : 静止土圧係数, $K_0 \approx 0.5$), 鉛直方向と 45° をなす面の垂直応力: $\frac{1 + K_0}{2} \cdot (q + w \cdot h - f)$ として計算すれば理論値を求めることができる。

$$\text{NO.2}; P_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \cdot \frac{1 + K_0}{2} \cdot (q + w \cdot h - f) = 0.33 \cdot (q + 1.6 \times 26.5 - 380)$$

$$\text{NO.3}; P_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \cdot K_0 \cdot (q + w \cdot h - f) = 0.22 \cdot (q + 1.6 \times 30 - 410)$$

$$\text{NO.4}; P_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \cdot \frac{1 + K_0}{2} \cdot (q + w \cdot h - f) = 0.33 \cdot (q + 1.6 \times 33.5 - 450)$$

$$\text{NO.5}; P_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \cdot (q + w \cdot h - f) = 0.44 \cdot (q + 1.6 \times 35 - 450)$$

図-5の各受圧面の勾配と上式右辺の係数とはよい対応を示している。

以上のような考えにもとづいて求めた各受圧面の各上載圧における $t \rightarrow \infty$ のトネル土圧の理論値と測定値の比較を図-6に示す。

【参考文献】*) 村山朔郎, 柴田徹: 粘土のレオロジー特性について 土木学会論文集 第40号 1956

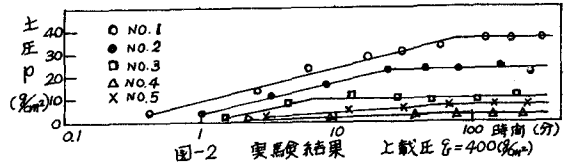


図-2 実験結果 上載圧 $q = 400 \text{ (g/cm}^2\text{)}$

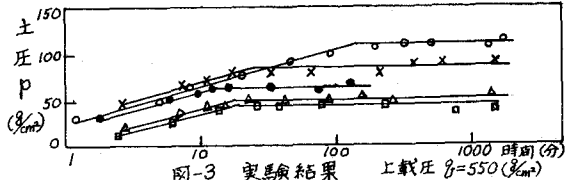


図-3 実験結果 上載圧 $q = 550 \text{ (g/cm}^2\text{)}$

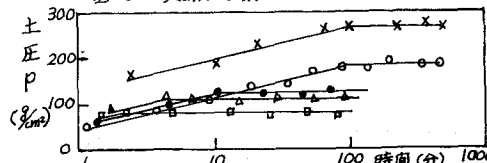


図-4 実験結果 上載圧 $q = 700 \text{ (g/cm}^2\text{)}$

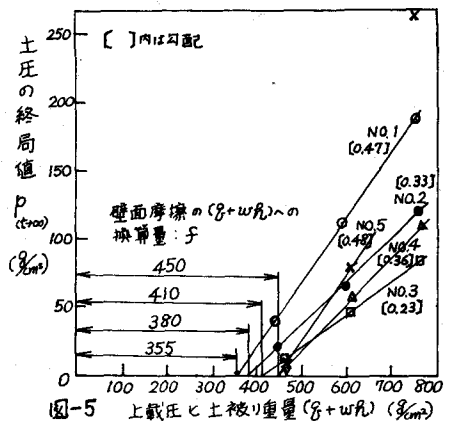


図-5 上載圧と土被り重量 ($q + w \cdot h$) (g/cm^2)

受圧面の位置	上載圧 (g/cm^2)	理論値 (g/cm^2)	測定値 (g/cm^2)
NO. 1	400	37	36
	550	103	115
	700	169	185
NO. 2	400	20	22
	550	70	65
	700	119	120
NO. 3	400	8	10
	550	41	46
	700	74	78
NO. 4	400	1	3
	550	51	50
	700	100	108
NO. 5	400	3	7
	550	69	85
	700	135	270

図-6 理論値と測定値の比較