

「土のう」を用いたアーチ・トンネル覆工に関する基礎的研究

名古屋工業大学 正 会 員 ○松岡 元・劉 斯宏

” 学生会員 飯塚 洋介・中村 潤平

アーチ構造は上載荷重を圧縮力に置き換えて抵抗する構造であるので、ここでは大きな圧縮強度を持つ「土のう」¹⁾を用いてアーチ構造を作ることを試みた。このような「土のう」アーチ構造は将来、後から盛土する場合のトンネル覆工として利用できるのではないかと考えられる。そこで、ここでは「土のう」アーチ構造の上にアルミ丸棒積層体地盤が築造された場合の2次元模型実験を行い、上載荷重の載荷による「土のう」アーチの破壊現象を検討した。

1. 「土のう」によって作られたアーチ模型実験

図-1はアルミ丸棒積層体(直径1.6,3mm,長さ5cm,混合重量比3:2,内部摩擦角 $\phi=25^\circ$)地盤を用いた「土のう」アーチ模型実験を示している。模型地盤全体の幅は60cm、高さは30cmとし、地盤表面には高さ10cmのH型鋼を載せ、その上から油圧シリンダーによって載荷した。中にアルミ丸棒積層体が入った2次元「土のう」模型の袋には、引張強度の非常に弱い材料である書道用紙(横幅 $B=3\text{cm}$ 、高さ $H=1.2\text{cm}$ 、奥行き $D=5\text{cm}$ 、引張強度 1.3kgf/cm)をあえて選択した(でないと上載荷重によって「土のう」が破れてアーチを破壊させることができない)。

図-2に示すように、地盤の中央に「土のう」アーチ(内幅 $2R=10\text{cm}$ 、外幅 $2(R+B)=16\text{cm}$ 、アーチ内側の高さ約7.5cm、外側の高さ約10.5cm)を積み、その後アルミ丸棒積層体をその左右および上に積み上げてトンネル模型とした。そして、油圧ジャッキによって上載荷重 P を徐々に大きくしていき、アーチ構造をなしている書道用紙製の「土のう」袋が破れた時の破壊荷重 P を求めた。図-3に示すように、数回の実験結果より書道用紙が破れる「土のう」袋の位置はアーチの両端部であることがわかった。そこで、ここでは図-4に示すような単純な仮定を置いてみた。すなわち地表面からかかってくる上載荷重 P に対し、アーチではない部分はそのまま分布荷重 $P/(LD)$ (地盤全体の幅 $L=60\text{cm}$ 、奥行き $D=5\text{cm}$)がかかり、「土のう」アーチ部分の半幅 $R+B(=5+3=8\text{cm})$ にかかる荷重 $N=(P/(LD)) \times (R+B) \times D$ が全部アーチ端部の「土のう」にかかることと仮定した。なお、本模型実験では地盤の自重を無視している。

2. アーチ端部の「土のう」に作用する応力状態

実験結果より、アーチ端部の「土のう」に作用する応力状態を考える。図-5において、2次元「土のう」模型の長辺方向に最大主応力 σ_1 、短辺方向に最小主応力 σ_3 が作用し、「土のう」袋の幅 B 、高さ H 、破壊時の単位奥行き当りの張力 T 、中詰め材の内部摩擦角 ϕ とすれば、「土のう」模型破壊時における中詰め材の応力状態は次式のように表される¹⁾。

$$s_1 + 2T/B = \frac{1 + \sin f}{1 - \sin f} (s_3 + 2T/H) \quad (1)$$



図-1 「土のう」アーチ模型実験

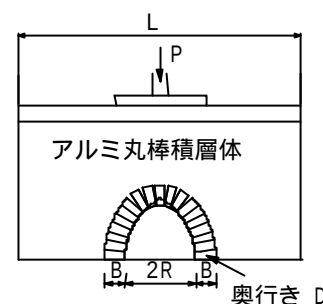


図-2 「土のう」アーチ模型実験概略図



図-3 アーチ端部の「土のう」の破壊状態

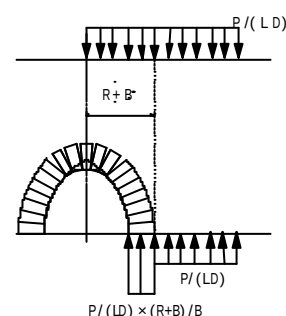


図-4 アーチ端部の「土のう」にかかる分布荷重

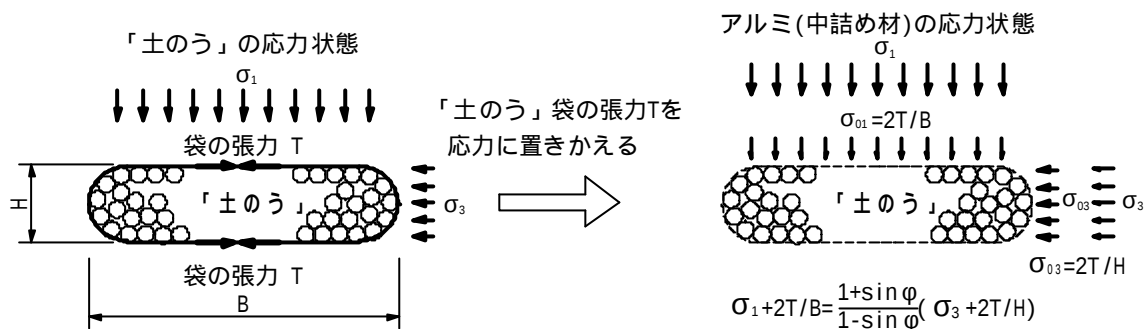


図 - 5 アーチ端部の「土のう」の応力状態¹⁾

載荷幅 L に対して上載荷重 P をかけていくと、アーチを構成している「土のう」袋が破れることにより、アーチ構造が崩れる。上記の仮定より、破壊時のアーチ端部の「土のう」に作用する荷重 N は次式で表される。

$$N = P(R+B) / L \quad (2)$$

アーチ端部の「土のう」(幅 B 、高さ H 、奥行き D) にかかる荷重 N は $\sigma_1 BD$ に等しいから式(1)、(2)より、

$$N = \sigma_1 BD = BD \left\{ \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \left(\sigma_3 + \frac{2T}{H} \right) - \frac{2T}{B} \right\} \quad (3)$$

なお、ここでアーチ端部の「土のう」に作用する $\sigma_3 = 0$ とする。したがって、「土のう」破壊時の上載荷重 P は、

$$P = \frac{BLD}{(R+B)} \left\{ \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \times \frac{2T}{H} - \frac{2T}{B} \right\} \quad (4)$$

3. 実験結果と計算結果の比較

「土のう」アーチの破壊時の上載荷重 P は、2 回の実験結果より $P = 467 \text{ kgf}$ と 523 kgf であった。一方、「土のう」の横幅 $B = 3 \text{ cm}$ 、高さ $H = 1.2 \text{ cm}$ 、奥行き $D = 5 \text{ cm}$ 、地表面の載荷幅 $L = 60 \text{ cm}$ 、トンネル空洞部分の半幅 $R = 5 \text{ cm}$ 、引張試験より求めた書道用紙の破壊時の張力 $T = 1.3 \text{ kgf/cm}$ 、中詰め材のアルミ丸棒積層体の内部摩擦角 $\phi = 25^\circ$ として、破壊荷重 P を求めると $P = 503 \text{ kgf}$ となった。この値は実験による 467 kgf と 523 kgf の平均荷重 495 kgf とほぼ一致している。「土のう」に用いた奥行き $D = 5 \text{ cm}$ の書道用紙の張力 $1.3 \times 5 = 6.5 \text{ kgf}$ と比較すれば、「土のう」破壊時の上載荷重 $P = 503 \text{ kgf}$ の大きさに驚かされる。

4. 実際の「土のう」を用いたアーチの製作

図-6 に示すように、横幅 $B = 40 \text{ cm}$ 、高さ $H = 10 \text{ cm}$ 、奥行き $D = 40 \text{ cm}$ 、引張強度 $T = 12 \text{ kgf/cm}$ のポリエチレン製の普通「土のう」を用いて、内幅 $2R = 2 \text{ m}$ 、内側の高さ 1.73 m の「土のう」アーチを実際に製作してみた。なお、「土のう」の中詰め材には 6 号砕石 ($\phi = 44^\circ$)、砂、水砕スラグ他を用いた。ここで、もし「土のう」の中詰め材に 6 号砕石 ($\phi = 44^\circ$) を用いて、この普通「土のう」アーチの上に単位体積重量 1.8 tf/m^3 の地盤材料を盛土するとすれば、およそ何 m の高さまで耐えることができるかを計算する。

$$\gamma z \times (R+3B) \times D = 3B \times D \left\{ \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \times \frac{2T}{H} - \frac{2T}{B} \right\}$$

$$1.8z \times (1+1.2) \times D = 1.2 \times D \left\{ 5.55 \times \frac{2.4}{0.1} - \frac{2.4}{0.4} \right\} \quad (5)$$

$$\therefore z = 38.5 \text{ m}$$

以上のように、概算であっても高さ 38.5 m (約 40 m) まで盛土できるというのは驚きである。この辺のところに人間の直感を超える「土のう」の面白さがあるのであろう。

参考文献：1) 松岡 元・陳 越・児玉 仁・山路 耕寛・田中 竜一：「土のう」の力学特性および耐圧試験、第 35 回地盤工学研究発表会発表予定、2000。



図 - 6 実際の「土のう」を積み上げたアーチ