

円形袋詰め補強土(円形土のう)の耐荷応力について

名古屋工業大学 董 鵬
 名古屋工業大学 フェロー 松岡 元
 広島大学 山本春行

1. はじめに

土のうの補強メカニズムの根本は、建物荷重や外力(いわば敵の力)を利用して、摩擦性材料(ϕ 材料)である中詰め材を、袋の張力で拘束することによって粘着成分を有する摩擦性材料(c , ϕ 材料)に変身させることである¹⁾。「本設土のう工法」は、土のうをいままでのような仮設資材ではなく、半永久的な本設資材として活用する工法であって、砕石、現地発生土、コンクリート廃材等を土のう袋で完全に包むことによって支持力を驚異的に増大させる、安価で環境に配慮した地盤補強法である。土のうの耐荷応力については、2次元長方形と3次元直方体の場合にはすでに解かれている^{1), 2), 3)}。ここでは、「円形土のう」の耐荷応力の予測式を導くと共に、これまでの研究成果や実験結果と比較することによって、「円形土のう」の設計に資することを目的とする。

2. 極限耐荷力の解析

土のうが圧縮されると、側方へはらみ出す形へと変わるが、ここでは「円形土のう」の極限破壊状態の形を円柱形(直径： D 、高さ： H 、図-1参照)と考える。その上で、次の条件を仮定する。

- 1) 土のう袋破断時の、袋の各方向の張力は同じとする。
- 2) 土のう袋と中詰め材の間に発生する摩擦力は、土のうの極限耐荷応力に影響を及ぼさない。
- 3) 中詰め材の自重は無視する。

「円形土のう」の上下面および側面に発生する単位幅あたりの張力を T_r , T_θ , T_z とし、それらの方向は図-1に示す。 T_r , T_θ , T_z は破壊時の極限条件下で土のう袋の単位幅あたりの破断張力(kN/m)になるものとする。図-2を参照して、上下面の T_r によって生じる応力を σ_{r1} とし、左右面の T_θ によって生じる応力を σ_{r2} とする。さらに、上下面の T_z によって z 軸方向に生じる応力を σ_z とする。力のつり合い式より、図-2を参照して、

$$\sigma_{r1} = \frac{2T_r D}{DH} = \frac{2T_r}{H} \quad (1)$$

$$\sigma_{r2} = \frac{2T_\theta H}{DH} = \frac{2T_\theta}{D} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{T_z \cdot \pi D}{(\pi/4)D^2} = \frac{4T_z}{D} \quad (3)$$

ここで、破壊時の条件 $T_r = T_\theta = T_z = T$ と考え、「土のう」の外力による主応力を σ_{1f} , σ_{3f} と表せば、中詰め材に作用する主応力は次式ようになる。

$$\sigma_1 = \sigma_{1f} + \sigma_z = \sigma_{1f} + 4T/D \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{3f} + \sigma_{r1} + \sigma_{r2} = \sigma_{3f} + 2T(1/H + 1/D) \quad (5)$$

モール・クーロンの破壊規準式(6)を用いれば、土のうの極限耐荷応力 σ_{1f} は式(7)のように導かれる。

$$\sigma_1 = K_p \cdot \sigma_3 \quad (6)$$

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + 2T(1/H + 1/D) K_p - 4T/D \quad (7)$$

ここに、 $K_p = (1 + \sin \phi)/(1 - \sin \phi)$ (ϕ :内部摩擦角)は受働土圧係数である。さて、 c , ϕ 材料の破壊時の主応力 σ_{1f} , σ_{3f} の間には次の関係式が成り立つ。

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (8)$$

式(7), (8)より、「土のう」の拘束力(張力)による見掛けの粘着力 c は次式のように表すことができる。

$$c = T(1/H + 1/D)\sqrt{K_p} - 2T/(D\sqrt{K_p}) \quad (9)$$

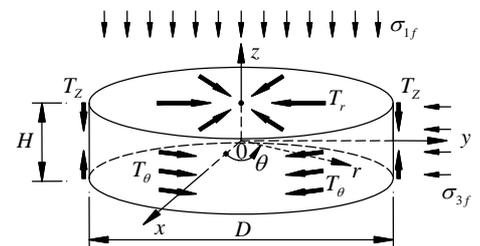


図-1 3次元円柱形モデル

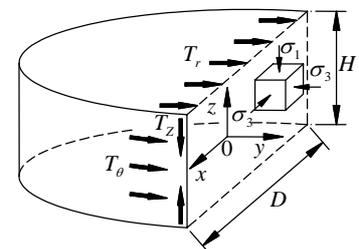


図-2 中詰め材に作用する円柱形袋の張力

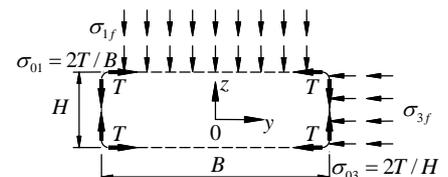


図-3 2次元長方形モデル

キーワード 土のう, 地盤補強, 拘束効果

連絡先 〒486-0811 愛知県春日井市東山町4-8-14 Tel:0568-83-1993 Fax:0568-83-1993

3. 比較と考察

3.1 2次元長方形モデル, 3次元直方体モデルとの比較

参考文献1), 2)により, 2次元長方形と3次元直方体の場合には, 「土のう」の主応力と極限耐荷応力が次のように表せる(図-3, 4 参照).

2次元長方形の場合:

$$\sigma_1 = \sigma_{1f} + 2T/B, \sigma_3 = \sigma_{3f} + 2T/H \tag{10}$$

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + (2T/H) K_p - 2T/B \tag{11}$$

3次元直方体の場合:

$$\sigma_1 = \sigma_{1f} + 2T\left(\frac{1}{B} + \frac{1}{L}\right), \sigma_2 = \sigma_{2f} + 2T\left(\frac{1}{H} + \frac{1}{B}\right), \sigma_3 = \sigma_{3f} + 2T\left(\frac{1}{H} + \frac{1}{L}\right) \tag{12}$$

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + 2T(1/H + 1/L) K_p - 2T(1/B + 1/L) \tag{13}$$

ここで, 直方体の幅を B , 高さを H , 奥行きを L とする. 円柱形モデルの結果と比較するため, $B = L = D$ (直径) と考えれば, 式(12), (13)は式(4), (5), (7)と一致することが分かる. また, 式(12), (13)において $L \rightarrow \infty$ とおけば, 式(10), (11)に帰着することは明らかである. なお, $B = L = D$ の場合の図-4 と図-1を重ねて上(z軸方向)から見れば, 図-5を得る. 同図より, $B = L = D$ の直方体と直径 D の円柱における張力 T が拘束応力 σ_3 に及ぼす効果は同じであることが力のつり合いより理解される. すなわち, $B = L = D$ の時の式(12), (13)と式(4), (5), (7)が一致するのは当然と理解される. 以上より, 3次元直方体モデルの特別な場合として, 2次元長方形モデルや3次元円柱形モデルが位置付けられることも分かった.

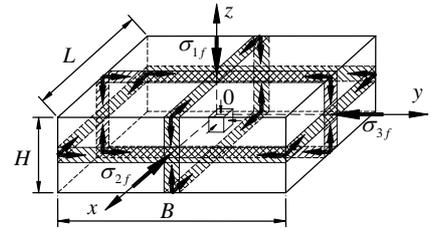


図-4 3次元直方体モデル

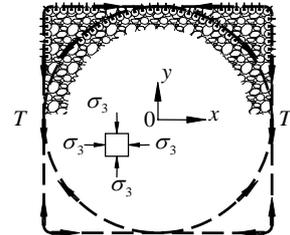


図-5 直方体($B=L=D$)と円柱形(直径 D)の張力 T が拘束応力 σ_3 に及ぼす効果

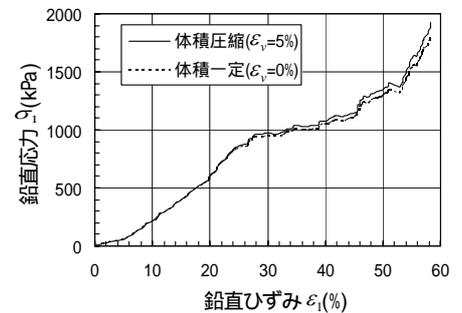


図-6 応力~ひずみ関係図

3.2 「円形土のう」の耐圧試験結果との比較

碎石($\phi = 44^\circ$)入りポリエステル製のラッセル網地の「円形土のう」($D=33\text{cm}$, $H=7.9\text{cm}$)の耐圧試験を実施した. 網のひもの 1m 当りの破断張力は, 縦方向 8.84kN/m , 横方向 6.65kN/m である. 実験前と実験終了後に定規を用いて測定した体積から, 約 5% の圧縮体積ひずみが生じたことが分かった. 本実験での体積圧縮の主な原因は大きな載荷によって碎石が圧潰したためと考えられる. ここでは, 中詰め材の体積一定, および体積ひずみ $\epsilon_v = 5\%$ まで鉛直ひずみに対して直線的に圧縮するという 2 条件のもとで断面補正をして図-6 の応力~ひずみ関係を算出した. 図-6 より推察できるように, 鉛直ひずみ $\epsilon_1 = 28\sim 52\%$ の辺りで網のひもが次々と破断して, 応力があまり上がらずに大きなひずみが発生した. よって, これらのひずみに対応する応力約 $1000\sim 1400\text{kPa}$ を破壊応力(耐荷応力)と考えた. しかし, その後それ以上ひもが破断せずに, 1900kPa 程度まで応力が上がったが, そこで実験を終えた. ひもが次々と破断した $\epsilon_1 = 28\sim 52\%$ において, 供試体として破壊したと判断したからである. なお, $\epsilon_1 = 0\sim 25\%$, $54\sim 58\%$ の部分で少し上ゾリの応力~ひずみ関係となるのは, 鉛直応力 σ_1 の増加と共に袋(網地)がびんと張って拘束応力が増大するためであって, 「土のう」の応力~ひずみ関係としては自然な形である¹⁾. 表-1 の予測値は, 破断張力を $T = 6.65\sim 8.84\text{kN/m}$, $\sigma_{3f} = 0$ (大気圧)として, 式(7), (11), (13)より算定したものである.

表-1 予測値と実験値の比較

予測モデル	極限耐荷応力(kPa)
2次元長方形:式(11)	894~1188
3次元直方体:式(13)	1077~1432
3次元円柱形:式(7)	1077~1432
実験結果	1000~1400

4. 結論

- 1) 2次元長方形モデルも3次元円柱形モデルも, 3次元直方体モデルの特別な場合として位置付けられる. 3次元直方体モデルにおいて $B = L = D$ の時に, 3次元円柱形モデルの結果と一致する.
- 2) 本例の場合には, 2次元モデルより, 3次元モデルの方が約 20% 程度の耐荷応力の増大をもたらすことが分かった. 円形土のうの耐荷応力予測式(7)による計算値は実測値とほぼ適合した.

参考文献

- 1) 松岡元: 地盤工学の新しいアプローチ 構成式・試験法・補強法, 京都大学学術出版会, pp.244~249, p.267, p.277, 2003.6.
- 2) 山本春行・松岡元: ソルパック工法における中詰め材の 3次元拘束効果について, 2003年日本建築大会学術講演梗概集, 構造 I(B-I), pp.451~452, 2003.9.
- 3) 陳越: 二次元「土のう」模型の変形・強度と「土のう」を活用した補強地盤の設計法. 平成10年度 VBL 成果報告書, 1999.