

「土のう」の変形特性

名古屋工業大学 正会員 松岡 元

名古屋工業大学

○井上 泰介、劉 斯宏、長谷部 智久、島尾 陸

これまで主に土のうの強度特性について解明してきた^{1), 2)}が、実際の土のうの設計・施工にあたっては土のうの変形特性も重要な問題となる。そこで、ここでは土のうの変形量の予測式を求め、実物土のうの実験結果との適合性を示す。

1. 土のう短軸方向と最大主応力方向が一致する場合($\delta=0^\circ$)の変形予測

予測

図-1は土のう中詰め材に作用する応力を示したものである。ここで、 σ_1 、 σ_3 ：土のうに作用する最大、最小主応力、 σ_{1m} 、 σ_{3m} ：土のう中詰め材に作用する最大、最小主応力、 T ：土のう袋の張力、 H ：土のうの高さ、 B ：土のうの幅、 H_0 ：土のうの初期高さ、 B_0 ：土のうの初期幅、 n ：土のうの縦横比($n=B_0/H_0$)とする。

図-1において、鉛直方向と水平方向の力の釣り合いから式(1)を得る。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 + \frac{2T}{B} &= \sigma_{1m} \\ \sigma_3 + \frac{2T}{H} &= \sigma_{3m} \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

また、土のう中詰め材の応力比～ひずみ関係を以下の式(2)のように定める。ここに、 ε_1 は最大主ひずみである。

$$\frac{\sigma_{1m}}{\sigma_{3m}} = f(\varepsilon_1) \cdots (2)$$

この応力比～ひずみ関係は中詰め材の同じ密度での三軸圧縮試験から決定するのが最善である。しかしながら、実際には粒子が大きいなど様々な理由から三軸試験を行なうのが困難な場合が多い。このような場合の応力比～ひずみ関係の予測の仕方としては次のような方法が考えられる。1つは、Cam-clay モデルに代表されるような種々の弾塑性構成式によって予測する方法であるが、この方法は実用的な観点からはあまり取り扱いやしくない。そこで、ここでは指数関数によって中詰め材の応力比～ひずみ関係を近似的に推定し、この関数を具体的に下記の式(3)のように仮定した。図-2は豊浦砂($\phi=40^\circ$)の応力比～ひずみ関係において、実線が三軸試験結果、破線が式(3)の関数である。なお除荷および再載荷時の関数は、式(3)においてひずみ ε_1 がゼロの時の初期勾配を傾きとする直線とした。

$$\frac{\sigma_{1m}}{\sigma_{3m}} = a \exp(-100\varepsilon_1) + K_p \cdots (3) \quad K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) : \text{中詰め材の受働土圧係数}$$

ここに、定数 a は中詰め材の初期状態によって定まる。例えば、初期が等方圧密状態の場合、 $\varepsilon_1=0$ で $\sigma_{1m}/\sigma_{3m}=1$ として $a=1-K_p$ と決定される。

次に、土のう短軸方向のひずみ ε_y は次式(4)で表される。なお、最大主応力 σ_1 の方向が土のう短軸方向と一致する場合($\delta=0^\circ$)は $\varepsilon_y=\varepsilon_1$ である(図-3 参照)。

$$\varepsilon_y = \frac{H_0 - H}{H_0} \cdots (4)$$

ところで、式(1)に示した土のう袋の張力 T と土のう袋のひずみ ε との間には材料特性を調べる実験から次式(5)を得る。

$$T = k\varepsilon \cdots (5) \quad k : \text{材料特性によって決まる定数(N/cm)}$$

このとき土のう袋のひずみ ε は、土のう袋の初期周長 $L_0=2(B_0+H_0)$ と変形時における周長 $L=2(B+H)$ を用いて次式で表せる。

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdots (6)$$

ここで、土のう袋のひずみ ε と土のう短軸方向のひずみ ε_y を関連付けるために、袋に包まれているので破壊に至るまでの体積ひずみが比較的小さい(1%程度)という実験事実から次のような体積一定の仮定を設ける。

$$A = B_0 H_0 = BH \cdots (7) \quad A : \text{単位奥行きあたりの土のう体積}$$

式(1)、(2)より、すでに提案している強度式を含む次式が得られる¹⁾。強度式の場合は、袋の張力 T は袋の破断張力、 $f(\varepsilon_1)$ は K_p となる。

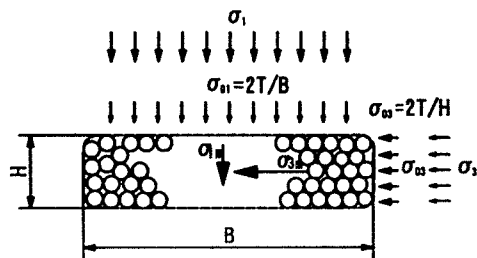


図-1 中詰め材に作用する応力

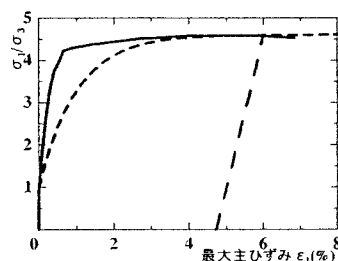


図-2 中詰め材の応力比～ひずみ関係

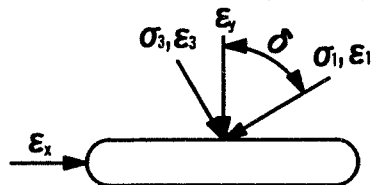


図-3 土のうに作用する傾斜応力と各ひずみ

$$\sigma_1 = \sigma_3 f(\varepsilon_1) + \frac{2T}{B} \left\{ \frac{B}{H} f(\varepsilon_1) - 1 \right\} \quad \cdots (8)$$

上式に式(4)、(5)、(6)、(7)を代入することによって、最大主応力が土のう短軸方向から作用する場合($\delta=0^\circ$)の変形予測式(9)が得られる。これにより最大主応力 σ_1 と最大主ひずみ ε_1 の関係が分かる。なお、この場合前述したように $\varepsilon_y = \varepsilon_1$ となる。

$$\sigma_1 = \frac{f(\varepsilon_1)}{B_0} \left[\sigma_3 B_0 - 2k\varepsilon_y \frac{n+\varepsilon_y-1}{(n+1)(1-\varepsilon_y)} \left\{ \left(1-\varepsilon_y\right) \frac{1}{f(\varepsilon_1)} - \frac{n}{(1-\varepsilon_y)} \right\} \right] \quad \cdots (9)$$

2. 傾斜外力が作用する場合($\delta \neq 0^\circ$)の変形予測

次に、最大主応力 σ_1 が土のう短軸方向から δ 傾いた方向より作用する(ただし、 δ はあまり変化しない)場合の土のうの変形予測式を考える。図-3はこの時の応力とひずみを表したものである。さて、この場合モールのひずみ円と式(6)で述べた体積一定の仮定($\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 = 0$)から次式を得る。

$$\varepsilon_y = \varepsilon_1 \cos 2\delta \quad \cdots (10)$$

ところで、最大主応力 σ_1 が土のう短軸方向から δ 傾いて作用する場合に、その見掛け上の粘着力 $c(\delta)$ が $c(\delta) = c(0) \cos 2\delta$ となる²⁾。この粘着力 $c(\delta)$ は袋の張力 T に比例する¹⁾ので、式(5)を考慮すれば次式(11)が得られる。

$$k(\delta) = k(0) \cos 2\delta \quad \cdots (11)$$

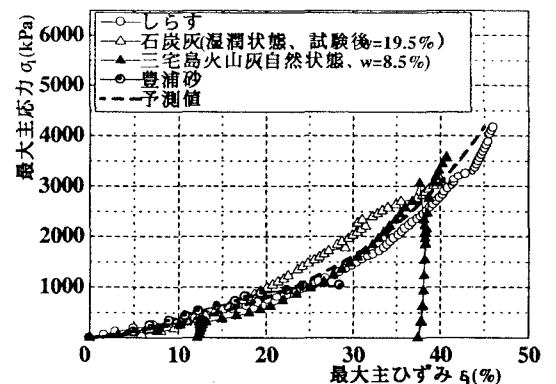
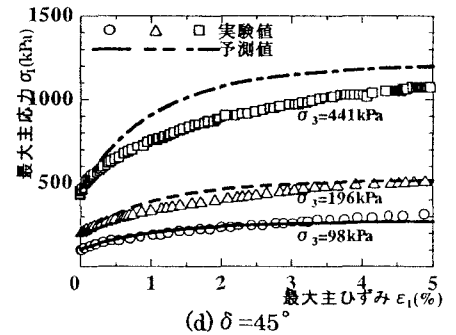
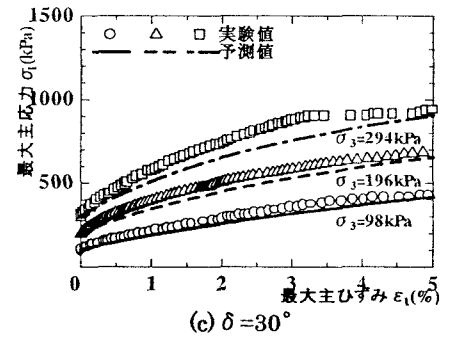
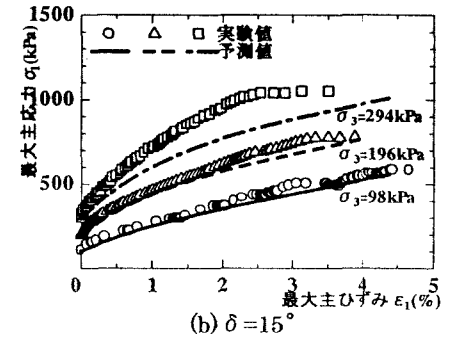
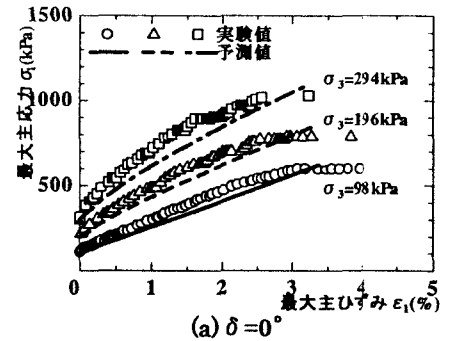
これらの式(10)、(11)を式(9)に代入することによって、最大主応力 σ_1 が土のう短軸方向から δ 傾いた方向より作用する場合の土のうの変形予測式(12)が得られる。これにより式(10)を用いれば最大主応力 σ_1 と最大主ひずみ ε_1 の関係が分かる。

$$\sigma_1 = \frac{f(\varepsilon_1)}{B_0} \left[\sigma_3 B_0 - 2k\varepsilon_y \frac{n + \frac{\varepsilon_y}{\cos 2\delta} - 1}{(n+1) \left(1 - \frac{\varepsilon_y}{\cos 2\delta}\right)} \left\{ \left(1 - \frac{\varepsilon_y}{\cos 2\delta}\right) \frac{1}{f(\varepsilon_1)} - \frac{n}{\left(1 - \frac{\varepsilon_y}{\cos 2\delta}\right)} \right\} \right] \quad \cdots (12)$$

図-4はこの式(12)によって計算した土のうの最大主応力 σ_1 と最大主ひずみ ε_1 との関係を実測値と比較したものである。なお、図-4(a)、(b)、(c)、(d)での実験値は傾斜させた土のう模型積層体($\delta=0^\circ \sim 45^\circ$)の二軸圧縮試験($n=5$ 、 $\phi=25^\circ$ 、 $k=320\text{N/cm}$ 、 $B_0=5\text{cm}$ 、 $H_0=1\text{cm}$ 、 $a=-0.683$)より得たものである²⁾。また、図-4(e)は実物の土のうの耐圧試験結果とその予測値($n=4$ 、 $\phi=40^\circ$ 、 $k=450\text{N/cm}$ 、 $\sigma_3=0$ 、 $B_0=40\text{cm}$ 、 $H_0=10\text{cm}$ 、 $a=-0.278$)を示したものである。この図-4より式(12)で表される予測値は実験値をよく説明していることが分かる。以上より、最大主応力 σ_1 と最大主ひずみ ε_1 の関係が求められた。また、式(7)の体積一定の仮定から最小主ひずみ ε_3 は $\varepsilon_3 = -\varepsilon_1$ として求めることができる。なお、図-4(e)に示すような転圧やプレローディングによって変形量を減少させる効果は、式(12)の関数 $f(\varepsilon_1)$ を図-2に示した除荷および再載荷時における中詰め材の応力比～ひずみ関係に置き換えることによって推定することができる。なお、図-4(a)～(d)では上に凸の曲線のように見えるのに対して、(e)では下に凸の曲線のように見えるのは、(a)～(d)はひずみの範囲が小さい($\varepsilon_1=0 \sim 5\%$)ためであり、ひずみの範囲を大きくすれば(e)と同じような上ぞりの傾向を示すことを確かめている。

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講演集，544，pp.1075~1076，2000.6.
- 2) 松岡 元・山本 春行・劉 斯宏・島尾 陸・長谷部 智久・藤田 健：「土のう」積層体(ソルバック)地盤の強度異方性，第37回地盤工学研究発表会発表講演集。



(e) 実物土のう耐圧試験結果と予測値
図-4 実験値と予測値との比較