

砂の降伏特性に関する実験的考察

山大工学部 教員 ○安福規之 大林組 佐々木 徹
 復建調査設計 正員 古賀正宏 山口県 田熊利正
 宇部市役所 馬場弘志 同 木村俊夫

1. まえがき 砂中の杭の先端部には 10 MPa に及ぶ圧力が作用するので砂は著しい粒子破砕を生じることが知られている。したがって、砂中の杭の鉛直支持力を解析するためには粒子破砕領域における砂の応力ひずみ挙動を知る必要がある。この問題に寄与すべく、本報は多段的応力経路試験¹⁾によって粒子破砕領域における砂の降伏曲線を定めるとともに、新たに提案した降伏曲線式の適合性について検討したものである。

2. 試料および実験方法 実験試料：実験には豊浦砂を用いた。その主な性質は次のとおりである：土粒子比重 $\gamma_s = 2.64$ ，最大粒径 $= 250 \mu\text{m}$ ，均等係数 $= 1.5$ ，最大間隙比 $= 0.92$ ，最小間隙比 $= 0.58$ ， $e \sim \log p$ 曲線の粒子破砕領域（正規圧密領域）における勾配 $\lambda = 0.141$ ，同じく過圧密領域における勾配 $\lambda = 0.009$ ，摩擦特性を表わす材料定数 $M = 1.30$ ，完全に飽和したゆるい供試体（初期間隙比 $= 0.84$ ）を直径 50 mm 高さ 130 mm の寸法に作製して高圧三軸試験機による多段的応力経路試験に供した。

多段的応力経路試験：供試体を等方的に圧密した後、図 1 に示す 3 通りの応力経路でせん断試験を行った。実験方法は文献²⁾と同じ方法で行ったので詳しい説明は省くことにする。

3. 実験結果 3 種類の応力経路によるせん断試験結果をそれぞれ $\sigma \sim \varepsilon$ 曲線および p （または q ） $\sim \varepsilon$ 曲線にまとめ、これらの応力ひずみ曲線の最大曲率点より降伏応力 p_y および q_y を定めた。ここで σ は軸差応力、 p は平均主応力、 q は応力比 σ/p 、 ε はせん断ひずみ、 ε_v は体積ひずみである。これらの降伏応力を応力経路上にプロットし、関連する応力点との間に引いた線分が降伏曲線の一部となる（図 2 参照）。このようにして描いた降伏曲線の切片群が図 3 に示されている。

さて、粒子破砕領域における降伏曲線の特性は応力比 q のみの関数であることが先の研究³⁾で明らかにされているが、本実験試料についても図 4 に示すように上記のことが確かめられた。この $dp/dp \sim G(q)$ 曲線を数値積分すると $U_p(q) \sim q$ 曲線が図 5 のように定まり、これを用いて降伏曲線全体を描くことができる。すなわち、降伏曲線の式は q を積分定数（ $q = \tau_1$ における降伏曲線上の p 値）とすると次式で与えられることが三浦ら¹⁾によって示されている。

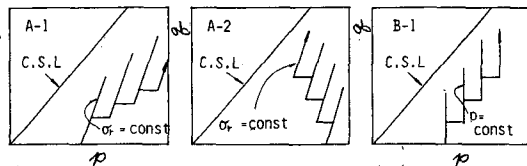


図-1 多段的応力経路試験

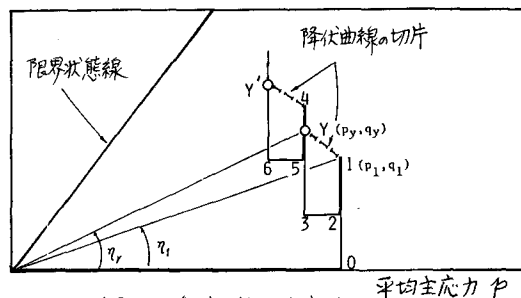


図-2 降伏曲線の決定法

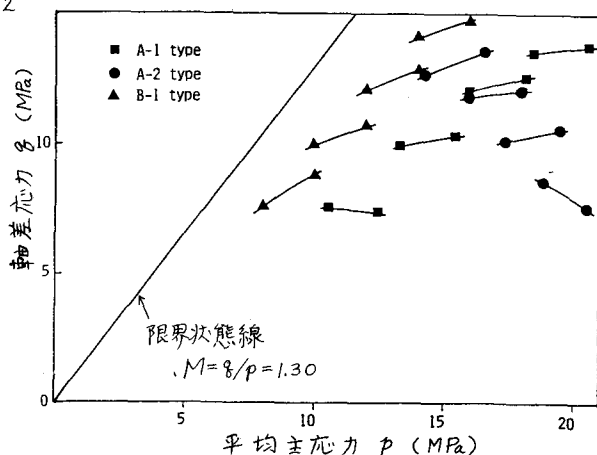


図-3 実験で定めた降伏曲線の切片群

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{p_i}{U_p(\eta_i)} \cdot U_p(\eta) \\ \eta &= \eta p \\ U_p(\eta) &= \exp\left(\int_0^\eta \frac{1}{G(\eta)-\eta} \cdot d\eta\right) \end{aligned} \right\} (1)$$

上式による降伏曲線は図6に示されており、実験より求めた降伏曲線の切片群と比較的よく一致することがわかる。

4. 降伏曲線式 上述のようにして求めた降伏曲線は、Cam-Clay式あるいはCam-Clay修正式²⁾で予測される曲線とはかなり異なっている。そこで、実験曲線に一番近い降伏曲線の式を得るために以下の検討を行った。

状態境界面上の応力下で変形が進むときの単位体積当りのエネルギー消費式として、Cam-Clayでは $\delta W = M p \delta \epsilon$ も、また Cam-Clay 修正式では $\delta W = p \sqrt{[(\delta v)^2 + (M \delta \epsilon)^2]}$ と仮定することにより降伏曲線式あるいは応力 η へみずみ増分式を導いている。これらの両式による降伏曲線と比べて実験で求めた降伏曲線は中間的な位置を占めることに注目して、次式が成立すると仮定する。

$$\delta W = p \sqrt{(\delta v)^2 + (M \delta \epsilon)^2} - M \eta \delta v \delta \epsilon \quad (2)$$

これより、塑性ひずみ増分式として次式を得る。

$$\frac{\delta \epsilon}{\delta v} = \frac{1}{\phi} = \frac{(2+M)\eta}{M^2 - \eta^2} \quad (3)$$

$p|_{\eta=0} = p_0$ を通る降伏曲線の式は次式で与えられるから、

$$\log_e p + \int_0^\eta \frac{d\eta}{\phi \cdot \eta} = \log_e p_0 \quad (4)$$

これに(3)式の関係を入代することによって次の降伏曲線式が求まる。

$$\frac{p}{p_0} = \left\{ \frac{M^2}{(1+M)\eta^2 + M^2} \right\}^{\frac{(2+M)}{2(1+M)}} \quad (5)$$

上式に基づいて描いた降伏曲線は、図7に示すように Cam-Clay 式およびその修正式による曲線よりもいく分実験曲線に近いものとなる。式(5)は、実験結果を十分な精度で予測し得るものではないが、三軸伸張領域の降伏曲線への適合性ならびに応力 η へみずみ曲線への適合性は Cam-Clay 式およびその修正式と比べて優れていることを確かめている。このことについては次の機会に発表したい。終りに、本研究は山大地域開発工学研究室を中心とする研究グループで討議した結果をもとにまとめたものであり、御指導いただいた三浦教授に深謝いたします。

文献 1) 三浦他：土木学会論文報告集，No.326 (1982)，2) Roscoe 他：Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, (1968)。

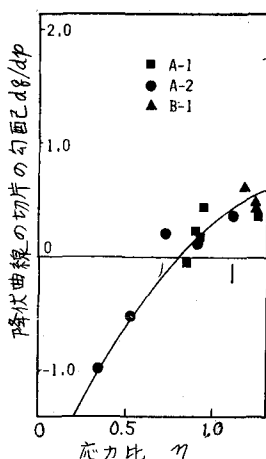


図-4 $dg/dp \sim \eta$ 関係

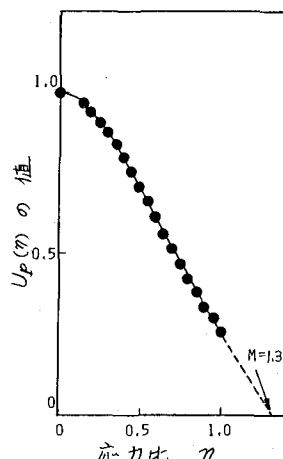


図-5 $U_p(\eta) \sim \eta$ 関係

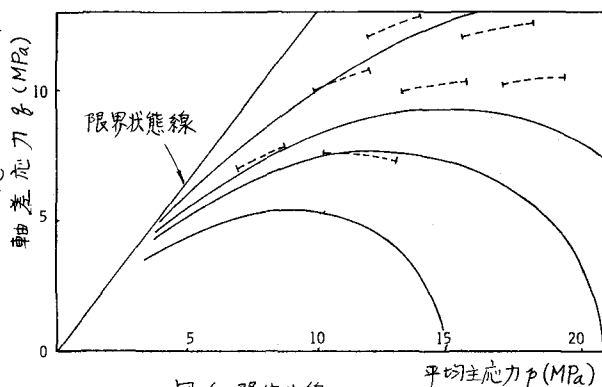


図-6 降伏曲線

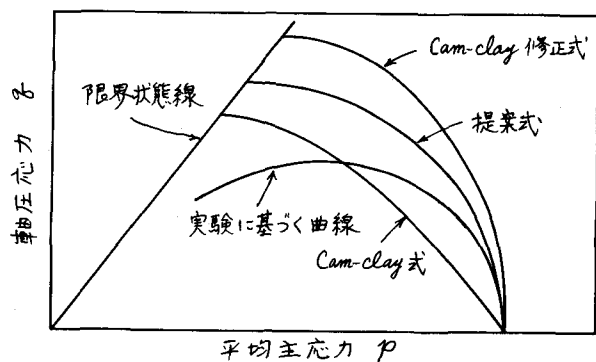


図-7 各種降伏曲線と実験曲線の比較