

山口大学工学部 ○三浦哲彦 安福規之
宇部市役所 田原 宏

1. まえがき

筆者らは、粒子破砕領域における粒状材料の降伏特性について実験的研究を行っている。^{1)~3)} 前報ではゆるい砂について多段的応力経路による三軸試験を行い、その降伏曲線が p - q 図上で応力比 q のみに依存するような特性を有することを述べた。³⁾ ここでは、礫について多段的応力経路試験を行い、降伏曲線を定め前報に示した砂の降伏曲線の特性と比較検討する。

2. 多段的応力経路試験

2.1 試料 実験には、まき玉に含まれていた礫分のうち $2 \sim 10 \text{ mm}$ の粒径の試料をふるい出して用いた。三軸試験は、直径 100 mm 、高さ 180 mm の飽和供試体について行った。試料の物理的・力学的性質は表1に示すようであった。ここで材料定数 λ および n は、それぞれ空隙比 e 平均有効主応力曲線 (e - $\ln p$) における正規圧密曲線及び膨張曲線の傾き、また粒子破砕による降伏応力 σ_c は同曲線の折点に相当する応力である。また M は、限界状態における応力比 ($=q/p$, ここに $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$) を意味する。

表1 礫の物理的・力学的性質

初期間隙比 e_0	0.64~0.66
比重 G_s	2.61
粒径 (μm)	2000~10000
均等係数 U_c	2.25
材料定数	λ 0.096
	K 0.016
	M 1.471
粒子破砕による 降伏応力 σ_c (MPa)	1.1

2.2 三軸試験 礫の降伏曲線の形状を調べるために図1に示す5種類の多段的応力経路による三軸試験を行った。各試験において、等方圧密に約20時間、負荷・除荷1サイクルに約2時間を要した。1サイクルの载荷は、4~5段階の応力レベルに分けて応力制御方式で行い、各段階での軸ひずみ速度が $0.01\%/ \text{min}$ 以下にならう次の段階に進むという方法によった。

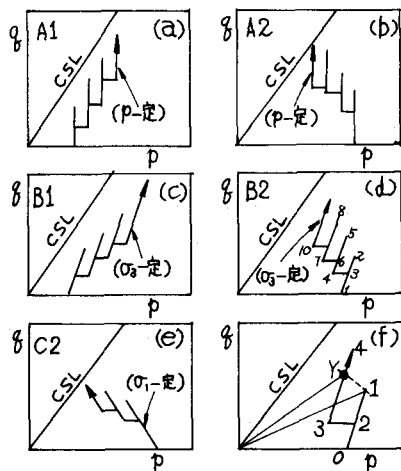


図1 三軸試験における応力経路

3. 降伏応力の決定

降伏応力を定めるにあたって、まず、前報と同様に q - ϵ ($=\sigma_1 - \sigma_3$) および p - ν ($=\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$) 曲線を描き、おのこの曲線について最大曲率点をもって降伏応力を定めた。

次に、降伏応力を定める他り一つの方法として、応力~仕事関係による方法がある。⁴⁾ せん断中に供試体になされた全仕事 W は次式で表わされる。

$$W = \int (\delta d\epsilon + p d\nu) \quad (1)$$

上式をもとに図2(a)に示すような q - W 関係を描き、応力ひずみ曲線の場合と同じように最大曲率点をもって降伏応力を定めようとするものである。この方法によれば、特異な応力経路の試験 (p -定, q -定, σ_1 -定など) において p - ν 曲線または q - ϵ 曲線では降伏点が決まらないといった問題は生じない。

4. 降伏曲線の特性

4.1 実験結果 降伏曲線は、図1(b)に示す方法で定め

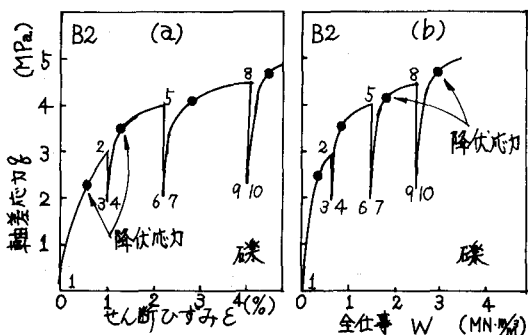


図2 q - ϵ および q - W 曲線に基づき降伏応力

た。まず供試体を点Oまで等方圧密した後、塑性ひずみ γ が十分認められる点1まで負荷する。続いて除荷・再負荷を行い再び塑性ひずみ γ が生じ始める降伏点Yを見出し、線分1Yを引くとこれが降伏曲線の一部を与える。図3は、種々の多段的応力経路試験を行い、 γ - ϵ 、 p - v および γ - w 各曲線より求めた降伏曲線群を示したものである。この図からわかるように、3種類の曲線で定めた降伏点は大体一致するようである。

4.2 降伏曲線の特性 先の研究により、ゆるい砂の粒子破砕領域における降伏曲線は、 $d\gamma/dp = G(\eta)$ なる特性を有することからわかっている。³⁾そこで本実験試料についても、図3の部分的降伏曲線群について $d\gamma/dp$ と η の関係を調べた。その結果(図4)、ある程度のばつぎは見られるものの、ゆるい砂の場合と同じように、降伏曲線の支配 $d\gamma/dp$ と応力比 η の間にユニークな関係が存在し次式のように表わせることがわかった。

$$d\gamma/dp = F(\eta) \quad (0 \leq \eta \leq 1.47) \quad (2)$$

4.3 降伏曲線 $\gamma = \eta p$ なる関係より次式を得る。

$$d\gamma = \eta dp + p d\eta \quad (3)$$

上式を用いて式(2)を積分すると、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} p &= \{p_i / \eta_i(\eta_i)\} \eta p(\eta) \\ \gamma &= \eta p \\ \eta p(\eta) &= \exp \left[\int_0^\eta \{d\eta / (F(\eta) - \eta)\} \right] \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに p_i は積分定数で、 η_i は η のとき降伏曲線上の平均有効主応力を意味する。図4の $d\gamma/dp$ - η 関係を数値積分して $\eta p(\eta)$ - η 関係を求めておけば、初期値(p_i, η_i)を適当に与え、式(4)を用いることによって降伏曲線群は図5のように描ける。³⁾このように、降伏曲線群と実験した部分的降伏曲線との一致性は比較的良好である。また破線で示したゆるい砂の降伏曲線と本実験試料の降伏曲線はよく類似している。以上のような性質の異なる2種類の試料についての実験結果から、一般に粒子破砕領域における粒状材料の降伏曲線は、 $d\gamma/dp = F(\eta)$ なる特性を有し、図5に示すような形状をしていることが推察される。

4. 結論

(1) 3種類の曲線、 γ - ϵ 、 p - v および γ - w のおののから定めた降伏点は p - γ 図上ではほぼ一致する。

(2) 本実験で調べた礫の降伏曲線群、ゆるい砂の場合と同じく $d\gamma/dp = F(\eta)$ なる特性を有している。

(3) 性質の異なる2つの試料についての実験結果から、一般に粒子破砕領域における粒状材料の降伏曲線は、図5に示されたような形状をしていると推定される。

文献：1) 三浦他：山工大学研究報告，Vol.32，No.2，1981。2) 三浦・木本：第16回土工学会研究発表会，1981。

3) 三浦・安柄：第17回土工学会研究発表会，1982。4) Tavenas et al.; Geotechnique, vol.29, No.3, 1979。

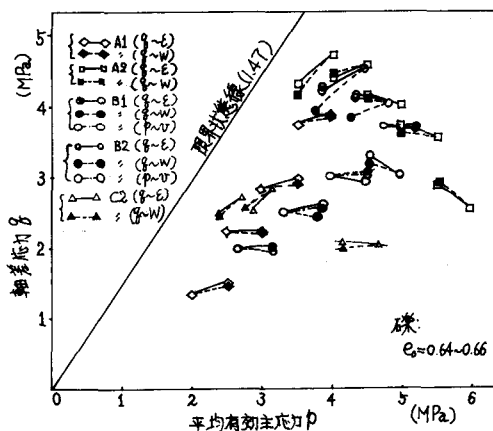


図3 実験で定めた部分的降伏曲線群

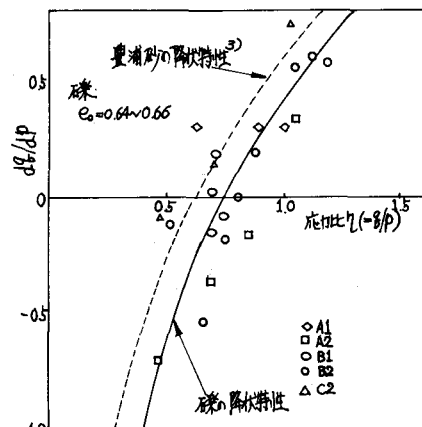


図4 降伏曲線の特性

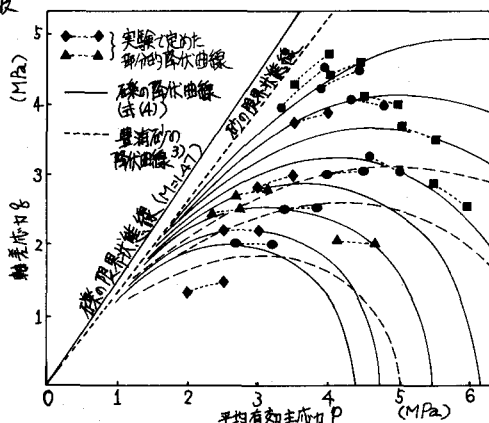


図5 部分的降伏曲線と $d\gamma/dp$ - η 特性に基く降伏曲線の比較