

粗粒材料の降伏曲面について

山口大学 工学部

正会員

三浦 哲彦

同 大学院

学生会員

○山本 紀之

広島建設工業

神原 篤志

1. はじめに Roscoe らの応力～ひずみ理論¹⁾は、通常圧力域での正規圧密粘土についての理論であるが、粒子破砕を十分生じるような圧力域では、粗粒材料の応力～ひずみ挙動の予測にも用いられる²⁾。しかし、この理論は、いくつかの点で実験値をうまく近似し得ない。本報は、種々の応力経路に沿って三軸圧縮試験を行なった時の降伏特性と応力履歴との関係を調べ、その結果に基づいて、降伏関数の形状について考察したものである。

2. 試料および実験方法 中部中郊外で採取したまき土の中から、粒径 74～45 μm のものをふるい出して実験試料とした。均等係数は 2.2、比重 2.600 であった。供試体は直径 10 mm、高さ 17 mm で飽和密締め ($e_0 \approx 0.5 \sim 0.6$) とした。本報で用いる応力変数は、平均有効主応力 $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ 、軸差応力 $q = (\sigma_1' - \sigma_2')$ 、応力比 $r = (q/p')$ である。 p' は体積ひずみ v に、 q はせん断ひずみ γ に関与する。成形した供試体は、 $p' = 40 \text{ kg/cm}^2$ まで等方圧密後所定の応力値まで除荷する ($r = 0$ については、全て 1 kg/cm^2 まで除荷後、 $p' = 0$ まで、所定の応力経路上にのせる)。その後せん断過程にはいるが、 $r = 0$ については、 $r = 0.3, 0.6, 0.9, 1.2$ 、 $r = -1$ については、 $r = -0.5, -0.75, -1.0, -1.25, -1.5$ 、 $r = 1.5$ まで $p' = 0$ まで、 $p' = 20, 25, 30, 34, 38 \text{ kg/cm}^2$ の応力経路についてせん断した。

3. 実験結果 三軸圧縮試験 ($\sigma_1' > \sigma_2' = \sigma_3'$) 結果より、次のような材料定数を得た。 $\lambda = 0.43 C_c = 0.0603$, $\kappa = 0.43 C_s = 0.0128$, $P_g = 13.46 \text{ kg/cm}^2$, $M = 1.47$, $C_s = 1915 \text{ kg/cm}^2$ (C_c, C_s は圧縮指数, 膨張指数であり、 P_g は圧密降伏応力, M は破壊時の応力比 r の値, C_s はせん断弾性定数 E から曲線の初期接線勾配より求める。)

$p' \sim v$ 曲線, $q \sim \gamma$ 曲線の勾配が急に変わる点を降伏点と見るが、この点は必ずしも明確ではない。したがって、塑性ひずみが発生し始める点を降伏点と見ることとした。すなわち、せん断ひずみについては、 $\epsilon^p = \epsilon - \epsilon^e = \epsilon - \{q/(3C_s)\} = 0$ 、体積ひずみについては、 $\eta^p = \eta - \eta^e = \eta - \{\kappa \log_e(p')/(1 + e_0)\} = 0$ となる応力点を求めた。これに付添字の r , p' は弾性、塑性成分であることを示し、 e_0 は圧密後開けき比, ϵ , η は測定された全せん断ひずみ、および全体積ひずみである。Fig. 1, Fig. 2 に示した破線は、 $p' \sim v$, $q \sim \gamma$ 関係から求めた降伏点を連ねて描いた曲線である。

4. 考察 Fig. 1, Fig. 2 は、土の降伏特性が応力履歴に影響されることを示している。各応力経路の dq/dp' を比較すると、 $(p' - 0) > (\sigma_2' - 0) > (r = 0)$ の順となる。降伏特性の違いは dq/dp' の大きさの違いを反映しているように見うけられる。すなわち、Fig. 1 の $p' \sim v$ 降伏特性は、応力経路の dq/dp' が大きくなるほど降伏応力が上がっている。一方 Fig. 2 の $q \sim \gamma$ 降伏特性は、 dq/dp' が小さくなっていくほど降伏応力が上がっているのが目される。Roscoe～Burland の修正理論³⁾によると、降伏曲線は、その土が過去に受けた最大の応力値によって唯一に決定でき、過去の応力経路の影響は受けない。その形状は楕円形である。一方、龍岡らは³⁾ $p' \sim v$ 降伏曲線と $q \sim \gamma$ 降伏曲線は一致し、応力経路に無関係な曲線を実験的に求めた。その形状は q 軸方向にゆるやかに上がった後、やや下がる形である。さらに Nova ら⁴⁾ も、 $p' \sim v$ 降伏曲線と $q \sim \gamma$ 降伏曲線は一致するとし、楕円形に類似した降伏曲線を示している。このような従来の理論で本実験を論じるのは、明らかに無理である。そこで筆者らは、この実験結果を説明するための一つの解釈として、次のような考え方を示した。a) 土の降伏特性は、 $p' \sim v$ 関係、 $q \sim \gamma$ 関係で異なり、前者の降伏曲線は楕円形で、後者の降伏曲線は p' 軸方向に開いた曲線で表される。b) 土の降伏特性は、降伏に至るまでの応力履歴、特に過圧密比の影響を受ける。過圧密比が大きくなると、 $p' \sim v$ 降伏曲面は p' 軸方向に収縮し、 q 軸方向に膨張する。一方、 $q \sim \gamma$ 降伏曲面は、 q 軸方向のみ膨張する。

上述の解釈は、Fig. 1, Fig. 2 の実験結果から、また別の異なる実験事実から示唆された。すなわち、等方

正規圧密後、除荷し再び載荷すると、 p ～ q 曲線は、ヒステリシスループを描くが、これにより降伏応力 q_y は小さくなる。この傾向は、除荷過程が長いほど、すなわち過圧密比が大きくなるほど顕著となる。さらに、過圧密比が大きくなると、破壊時および降伏時の応力値 q_y , q_f は、大きくなる傾向にある。Fig. 1 の場合、 e 一定の曲線①は、最も大きな過圧密比 40 を有するため、過圧密比の小さな e '一定 (2.7~1), p '一定 (2~1) より、 p '軸方向に収縮し、 q 軸方向に膨張している。 e '一定と p '一定で同一過圧密比の降伏点をつらねた降伏曲線④, ⑤, ⑥, ⑦についてと同様な傾向が認められる。 e 一定の降伏曲面の過圧密比の値は、40 となるが、これより大きな過圧密比になっても更質は $1 \log$ 未満の除荷をさらに行ったにすぎず、この過圧密比 40 の曲線①に収束してゆくものと思われる。また、降伏曲線の形状は、ほぼ楕円形とみなしてよく、Roscoe らの理論¹⁾と一致する。Fig. 2 の場合、降伏応力 q_y は過圧密比の増加とともに大きくなっている。先と同様に、 e '一定、 p '一定の同一過圧密比の点をつらねた線④, ⑤, ⑥, ⑦についてと同様な傾向が認められる。図中の曲線④は、正規圧密後、直ちに e '一定せん断試験を行ない、 q ～ e 初期せん断段階²⁾、その接線勾配が明らかになり一定とみられる弾性領域の最大応力点 (p , q) をプロットしたもので、これが過圧密比 1 のときの降伏曲線と考えられる。

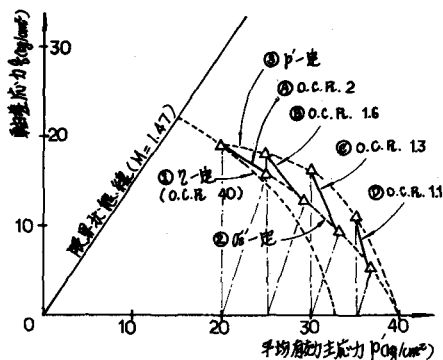


FIG. 1 p ～ q 降伏曲線

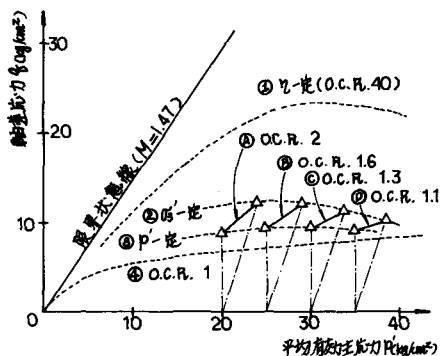


FIG. 2 q ～ e 降伏曲線

る。先に述べた理由により、 e 一定過圧密比 40 の曲線①を上限の降伏曲線とし、過圧密比 1 の降伏曲線④を下限の降伏曲線とすれば、過圧密比が大きくなるに従い、降伏曲線は、降伏曲線④より徐々に上がり、最終的に①へ近づくものと考えられる。また、その形状は p 軸方向に開いた曲線となる。以上述べた傾向は、 K_0 圧密せん断試験結果についても認められた。しかし、この場合には K_0 圧密過程で、 q 軸方向の応力履歴を与えられるため、降伏曲線は p ～ q , q ～ e 降伏曲線先に q 軸方向に上がる。この異なる圧密せん断試験結果については、別の機会に詳しく触れる。

5. あとがき 粗粒材料の三軸圧縮試験結果を基に、土の降伏特性について述べてきたが、従来の理論では本実験結果はうまく説明されないため、一つの解釈として次のような考えに基づいて土の降伏特性を論じた。

- 1) p ～ q 降伏曲線は、Roscoe らの理論と同様、ほぼ楕円形となる。しかし、 q ～ e 降伏曲面は、 p 軸方向に開く曲線となり、Roscoe らの理論と異なる。
- 2) 土の降伏特性は、降伏に至るまでの応力履歴、特に過圧密比の影響を受ける。過圧密比が大きくなるほど、 p ～ q 降伏曲線は p 軸方向に収縮し、 q 軸方向に膨張する。一方 q ～ e 降伏曲線は、過圧密比が大きくなるほど q 軸方向に膨張する。今後の詳細な実験によって、上記の解釈の妥当性を確かめていきたい。

(1) Roscoe & Burland: "On the Generalized Stress-strain Behaviour of 'Wat' Clay" Engineering Plasticity, Cambridge University Press, P.P. 535~609 (1968)

(2) 三浦哲郎・山根紀之: 「ロックス材の応力-ひずみ特性に関する考察」, 山口大学工学部研究報告 Vol. 30, No. 2 (1980)

(3) F. Terzuola & K. Ishihara: "Yielding of Sand In Triaxial Compression", Soils & Foundations Vol. 14, No. 2 (1974)

(4) R. Nova & D.M. Wood: "An Experimental Programme To Define The Yield Function For Sand", Soils & Foundations Vol. 18, No. 4 (1978)

5 柳原篤志: 「粗粒土の降伏特性について」, 山口大学工学部研究報告, 昭 55, 3