

III-10 多軸応力下の砂の変形特性

名古屋工業大学 正員 中井 照夫
 名古屋工業大学大学院 学生員 松岡 元
 石崎 仁

多軸応力下の種々の応力経路に沿う土の変形・強度特性が空間滑動面(SMP)¹⁾の概念を導入することによって統一的に説明できることを、①平面ヒズミ条件下のせん断試験結果、②多軸応力下および平面ヒズミ条件下の異方圧密試験結果、③各種降伏条件に沿う応力経路下の試験結果、に基づいて検証した。なお、実験に用いた試料はすべてヤマト泥(初期向けさ比 $e_0 \approx 0.68$)の重積砂である。

1. 平面ヒズミ条件下の砂のせん断特性

まず、SMPに基づく新たな考察より得られたせん断時の応力・ヒズミ関係式²⁾の要点を述べる。主応力と主ヒズミ増分方向が一致する、つまり主ヒズミ増分空間が主応力空間に対応する場合には、平均的な土粒子の滑動方向は主ヒズミ増分ベクトル $d\vec{\epsilon} = (d\epsilon_1, d\epsilon_2, d\epsilon_3)$ に一致するものと考えられる。そして主ヒズミ増分ベクトル $d\vec{\epsilon}$ のSMP(応力空間内で土粒子が平均的に最も滑動しやすい面)に平行な成分および垂直な成分を $d\epsilon_{SMP}^*$ 、 $d\epsilon_{\perp SMP}^*$ とすれば、従来の関係式¹⁾と同様にSMP上の応力・ヒズミ関係式は次式で与えられる。

$$d\epsilon_{SMP}^* = \{ \gamma_0^* / (\mu^* - \mu^*) \} \cdot \exp \{ (X - \mu^*) / (\mu^* - \mu^*) \} \cdot dX \quad \dots (1)$$

$$d\epsilon_{\perp SMP}^* = \{ (\mu^* - X) / \lambda^* \} \cdot d\epsilon_{SMP}^* \quad \dots (2)$$

ここに、 X : SMP上のせん断・有効垂直応力比 $\tau_{SMP} / \sigma_{SMP}$

$\lambda^*, \mu^*, \gamma_0^*$: 土質パラメーター

主応力と主ヒズミ増分方向が一致するという仮定より、 $(d\epsilon_{SMP}^*, d\epsilon_{\perp SMP}^*)$ の3主ヒズミ増分への変換式は次式で与えられる。

$$d\epsilon_i = a_i \cdot d\epsilon_{SMP}^* + b_i \cdot d\epsilon_{\perp SMP}^* \quad (i=1,2,3) \quad \dots (3)$$

ここに、 a_i, b_i : σ_{SMP} および τ_{SMP} の方向余弦

なお、(3)式の軸対称応力下および多軸応力下($\theta = \text{const.}$)での実験データによる検証は前報²⁾で行なっている。したがって(3)式に $d\epsilon_2 = 0$ なる条件を付加することによって平面ヒズミ条件下の応力・ヒズミ関係式が得られる。

図-1は平均主応力一定条件下の平面ヒズミ試験結果(プロット)と計算曲線を示している。なお、計算曲線は三軸圧縮試験結果より決められた重積砂の土質パラメーターによって得られたものである。図-2は平面ヒズミ試験における応力経路の実測値(プロット)と計算曲線を表わしている。計算曲線はよく報告されているように $\theta = 15^\circ \sim 30^\circ$ の間に位置する。実測値の θ が小さく出ているのは、せん断初期において多軸試験機の機構上 ϵ_2 方向の拘束板と試料との接触が不十分であるため、三軸圧縮的な変形をしたことによると考えられる。

2. 多軸応力下および平面ヒズミ条件下の砂の異方圧密特性

すでに、多軸応力下の各種せん断試験(平均主応力一定)結果がSMP

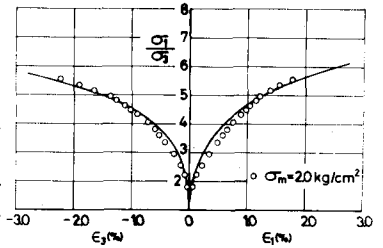


図-1. 平面ヒズミ条件下のせん断時の主応力比(σ_2/σ_1) ~ 主ヒズミ比(ϵ_2/ϵ_1)関係

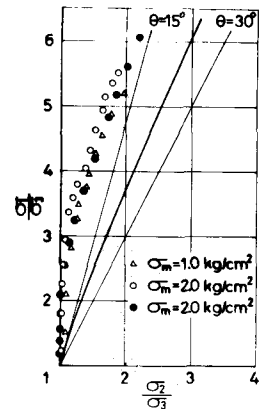


図-2. 平面ヒズミ条件下のせん断時の応力経路

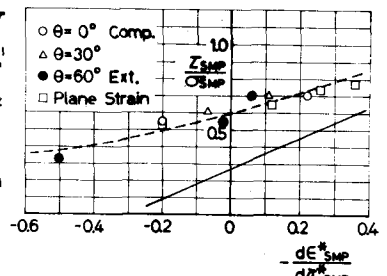


図-3. 異方圧密時の応力比(τ_{SMP}/σ_{SMP}) ~ ヒズミ増分比($d\epsilon_{SMP}^*/d\epsilon_{\perp SMP}^*$)関係

に基づけば統一的に説明できることを示してきたが、ここでは、多軸応力下の各種異方圧縮試験（主応力比一定）結果についても SMP に基づいて整理を行なう。

図-3 は軸対称応力下、多軸応力下および平面ヒズミ条件下の異方圧縮試験結果について、応力比（ τ_{smp}/σ_{smp} ）～ヒズミ増分比（ $-d\epsilon_{smp}^*/d\sigma_{smp}^*$ ）関係で整理したものである。試験条件は、三軸圧縮条件下の $\sigma_1/\sigma_3 = R = 3, 4$ (○印)、三軸伸張条件下の $R = 2, 3, 4$ (●印)、多軸応力条件下 ($\theta = 30^\circ$) の $R = 4, 4.79$ (△印) および平面ヒズミ条件下の $R = 3, 4, 5, 5.5$ (□印) の11種である。

図中実線で示している直線は、平均主応力一定条件下のせん断試験における $\tau_{smp}/\sigma_{smp} \sim -d\epsilon_{smp}^*/d\sigma_{smp}^*$ 関係（ $\tau_{smp}/\sigma_{smp} = \lambda^* (-d\epsilon_{smp}^*/d\sigma_{smp}^*) + \mu^* \dots (4)$ ）を表わしている。同図より、試験条件にかかわらず異方圧縮試験結果がほぼユニークに整理されるのが見られ、せん断時同様の变形特性を SMP に基づいて考える事の妥当性を示している。

さて、図-4 は図-3 中の4種の平面ヒズミ条件下の異方圧縮試験における応力経路の実測値を中間主応力 σ_2 ～最小主応力 σ_3 関係で示したものである。同図にみられるように平面ヒズミ条件下の異方圧縮試験において、その応力経路は最大・最小主応力比の大きさや異方圧縮開始時の3主応力の値にかかわらず、3主応力増分 ($d\sigma_1, d\sigma_2, d\sigma_3$) が一定比率になるのが見られ、土の異方圧縮特性を考えると興味深い実験事実と思われる。

3. 土の降伏条件についての考察

降伏条件の内側 ($d\sigma \leq 0$, f : 降伏関数) では塑性ヒズミは生じないという弾塑性降伏の立場から次の3種の降伏条件（あるいは破壊規準）について検討した。

1) SMP に基づく降伏条件¹⁾

SMP 上のせん断・垂直応力比 $\tau_{smp}/\sigma_{smp} = \text{const.}$ より

$$f = J_1 J_2 / J_3 = \text{const.} \quad (J_1, J_2, J_3: \text{有効応力の不変量}) \dots (5)$$

2) Mohr-Coulomb の降伏条件

$$f = \sin \phi = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) = \text{const.} \quad (\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3) \dots (6)$$

3) Lade の降伏条件³⁾

$$f = J_1^3 / J_3 = \text{const.} \dots (7)$$

図-5 は正八面体面 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) 上のこれら3条件を示したものである。実験では三軸圧縮状態で $\sigma_1/\sigma_3 = 4$ までせん断した後、平均主応力一定のもとで $\theta = 0^\circ$ (三軸圧縮, $b=0$) から $\theta = 60^\circ$ (三軸伸張, $b=1$) まで各降伏条件に沿って応力を変化させた。図-6, 7 は3種の降伏条件に沿う応力経路下での最大主ヒズミ ϵ_1 、体積ヒズミ ϵ_v の変化を示している。SMP に沿う応力経路下のヒズミは他の応力経路下のヒズミに比べ小さいことが両図より見られる。

以上の結果から、SMP に基づく土の降伏関数 (5) 式は多軸応力下の土の变形強度特性を規定する降伏条件と考えられよう。

謝辞 多軸試験とその整理に協力していただいた元名工大土質研究室 紀本一郎、中内雅三君に感謝いたします。

参考文献 1) 松岡・中井: ICSMFE Speciality Session 9 (1977). 2) 中井・松岡・中島・山内: 第13回土質工学研究発表会 (1978). 3) Lade・Duncan: ASCE GT70 (1975).

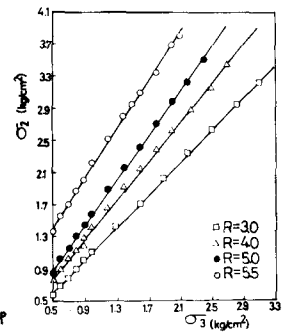


図-4. 平面ヒズミ条件下の異方圧縮時の応力経路。

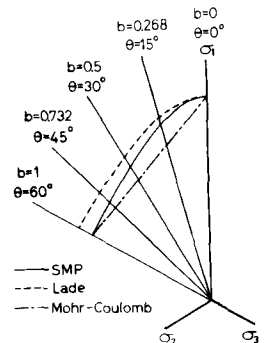


図-5. 正八面体面から見た各種降伏条件。

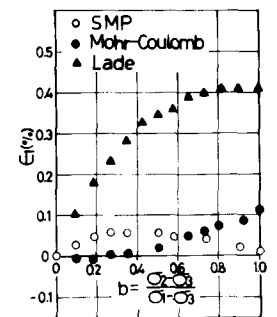


図-6. 各種降伏条件に沿う応力経路下での最大主ヒズミ ϵ_1 の変化。

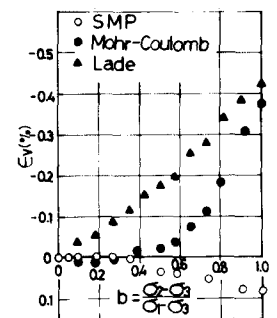


図-7. 各種降伏条件に沿う応力経路下での体積ヒズミ ϵ_v の変化。