

III-217

仕事に着目した飽和砂の排水せん断変形特性

東北大学工学部 正 菅野 高弘
 大林組 樋口 俊一
 東北大学工学部 正 柳澤 栄司
 東北大学大学院 学 田地 陽一

1. はじめに

構造異方性を有する飽和砂の排水せん断変形特性について、中空ねじりせん断試験装置、二方向せん断試験装置を用いて実験を行なった。本報告では構造異方性、応力経路および主軸の回転と仕事の関係について考察する。

2. 実験方法

中空ねじりせん断試験: 試料として豊浦標準砂 ($\rho_s = 2.640$, $e_{max} = 0.989$, $e_{min} = 0.593$) を用い、多重ふるい落下法を用いて相対密度 $D_r = 70 \pm 2.5\%$ のやや密詰めの外径250mm、内径200mm、高さ250mmの中空円筒供試体を作成し実験に用いた。(図-1) 実験に用いた応力経路は縦軸にねじりせん断応力、横軸に軸差応力各々を有効平均応力で正規化した応力平面において、図-2に示すように $\beta = 0^\circ$ から 15° 毎に 90° までの単調载荷応力経路の7実験および図-3に示すように $\beta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ へ所定の応力点まで载荷した後に応力平面上で 90° 方向を変えて主応力軸の方向が

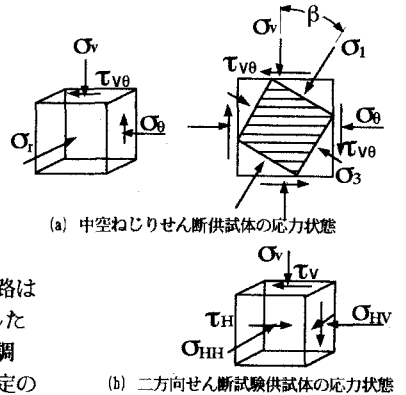


図-1 供試体の応力状態

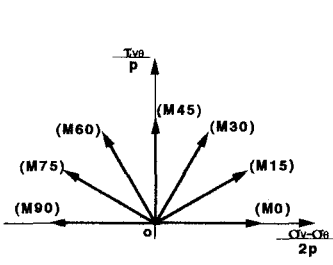


図-2 単調载荷応力経路(中空)

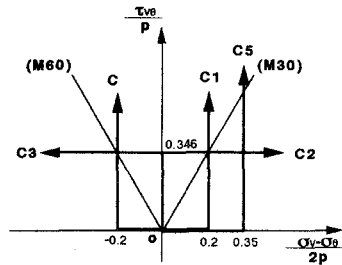


図-3 複合载荷応力経路(中空)

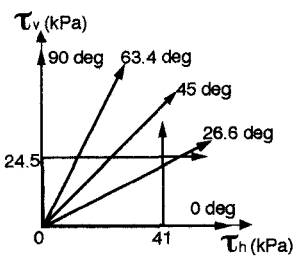


図-4 応力経路(二方向)

連続的に変化するように複合的な载荷を行なった5実験である。供試体は等方圧密圧力 1 Kgf/cm^2 で圧密を行ない、実験中有効平均応力 p' は一定に保っている。**二方向せん断試験:** 試料は中空ねじりせん断試験と同じ豊浦標準砂を用い、空中落下法で相対密度 $D_r = 40 \pm 2\%$ の一辺が約10cmの立方供試体を作成し実験に用いた。(図-1) 実験に用いた応力経路は図-4に示すように $\tau_v - \tau_h$ の応力平面上で τ_h 軸から $0^\circ, 26.6^\circ, 45^\circ, 63.4^\circ, 90^\circ$ の単調载荷応力経路および、所定の応力点まで単調载荷した後に方向を変えて複合的に载荷する2実験である。供試体は上載圧 0.5 Kgf/cm^2 で圧密を行なった。

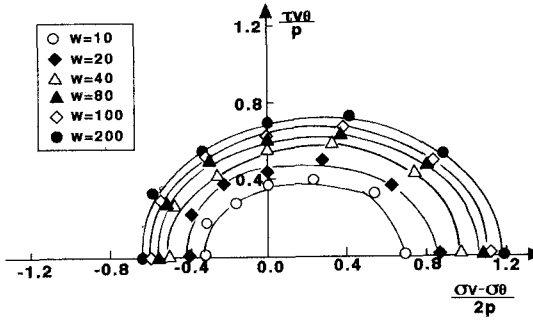


図-5(a) 等仕事線(単調载荷試験・中空)

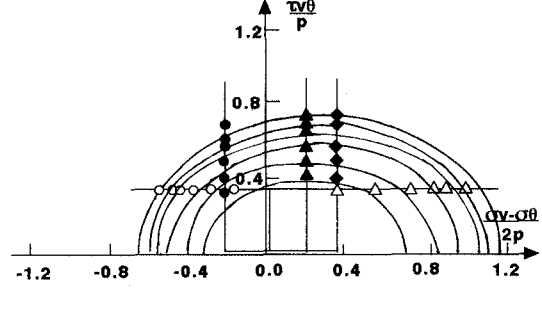


図-6(b) 複合载荷時の仕事と等仕事線(中空)

3. 実験結果および考察

仕事量の算定は式-1、2に示すように、計測あるいは計算される応力成分とそれに対応するひずみ増分成分を基に行なっている。

$$W = \int dW \quad dW = \sigma_v d\varepsilon_v + \sigma_r d\varepsilon_r + \sigma_\theta d\varepsilon_\theta + \tau_{v\theta} d\gamma_{v\theta} \dots (1)$$

$$dW = \sigma_v d\varepsilon_v + \tau_v d\gamma_v + \tau_h d\gamma_h \dots (2)$$

式-1によって算定された仕事を応力平面上にプロットすると図-5(a)、(b)のようになる。単調載荷の場合、三軸圧縮方向($\beta=0^\circ$)へ張り出した形となり供試体の構造異方性と応力経路の関係を反映している。図5-(b)では複合載荷応力経路でのプロットであるが、単調載荷によって得られた等仕事線とはほぼ一致している。単調載荷と複合載荷では、応力履歴の違い(即ち、ある方向へ載荷した後に方向を変えている)および方向を変えた後の載荷において主軸が連続的に回転するという二点の相違があるが、応力平面上の等仕事線ではほぼ一致している。

同様に、二方向せん断試験結果を式-2によって整理すると図-6のようになり、等仕事線がほぼ楕円で近似でき、複合的な応力経路の結果もほぼ単調載荷の結果と一致している。以上より、単調載荷および除荷を含まない載荷経路においては、中空ねじり、二方向せん断試験装置と異なった試験装置で得られた結果ではあるが、仕事量が応力経路や主応力軸の回転の影響を受けないことが分かった。即ち、仕事量が状態量として評価できることを示唆しているものと考えられる。

次に、実験中の仕事増分を縦軸に八面体せん断ひずみ増分を横軸にとって実験結果を整理すると、図-7(中空ねじりせん断試験)、図-8(二方向せん断試験)のように、応力経路の違いによらずほぼ一本の直線に載ることが分かる。供試体の構造異方性や境界条件から、応力経路の違いによって観測される体積変化量、ねじりせん断ひずみ量は異なるが、仕事増分は八面体せん断ひずみ増分によって一義的に評価できる。即ち、構造異方性、主軸の回転、応力履歴の影響を余り受けないことが分かる。また、図-7、8を比較すると各点から回帰される直線の勾配がほぼ同一勾配となっていることが分かる。砂の弾性ひずみ成分が十分小さいと仮定すると上述の仕事は塑性仕事(消散エネルギー)と考えることができ、いわゆる砂のダイラタンシー特性が、構造異方性等の影響を受けないとされていることと等価であると考えられる。

4. まとめ

本報告は、豊浦砂の排水せん断変形挙動を仕事(エネルギー消散)から整理しており、有効平均応力が一定に近く単調に載荷が続く場合、除荷を含まない場合に限定すれば仕事は主応力軸の回転、応力履歴あるいはひずみ履歴の影響を余り受けないと思われる。即ち、砂が決まれば単調載荷試験で得られた等仕事線によって、他の主軸の回転等を含む応力経路の仕事の評価することができ、仕事増分-八面体せん断ひずみ増分関係の直線回帰式が求められる。

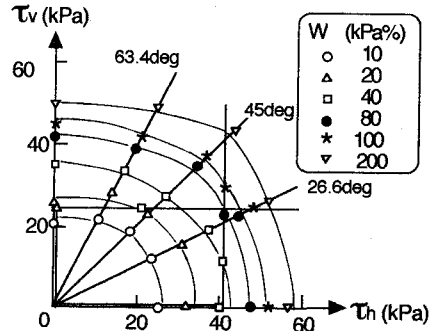


図-6 等仕事線(二方向せん断試験)

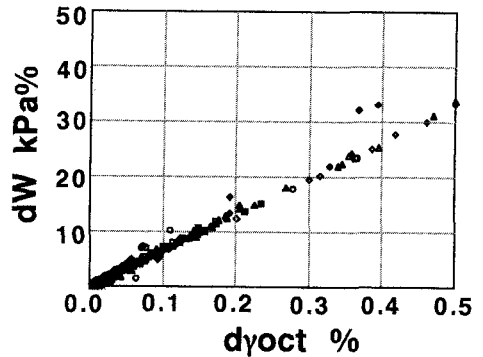


図-7 仕事増分-八面体せん断ひずみ増分関係(中空ねじりせん断試験:全経路)

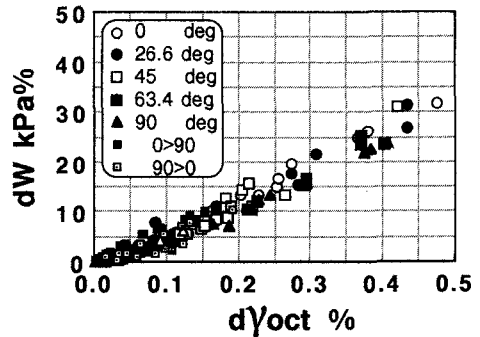


図-8 仕事増分-八面体せん断ひずみ増分関係(二方向せん断試験:全経路)