

異方圧密砂の変相時における非排水繰返し 変形挙動に関する中空ねじり試験

北 勝利

東海大学海洋学部助教授 (〒424-8610 静岡県清水区折戸3-20-1)

E-mail:kita@scc.u-tokai.ac.jp

本報告では、防波堤や盛土直下など上載荷重により異方圧密状態にある飽和砂の繰返し変形特性について、非排水繰返しねじりせん断試験により調べた。試験では相対密度および圧密応力比を変化させ、せん断中は鉛直及び水平方向全応力を一定に保ち、ねじりせん断応力振幅一定の繰返し載荷を行った。その結果、圧密応力比(水平/鉛直)が0.5以下では、変相後繰返しとともに割線せん断剛性が漸増し一定値に収束する傾向にあり、圧密応力比の増大とともにその収束値が小さくなった。さらに、履歴曲線より算出した消散エネルギーと割線せん断剛性や鉛直軸ひずみの関係について検討を加えた。

Key Words : *Undrained cyclic torsional shear test, Anisotropically consolidated sand, Phase transformation*

1. はじめに

河川堤防や防波堤など対称性を有する沿岸構造物が地震により大きな沈下を呈する事例は、これまでに多く報告されている^{例えは¹⁾}。著者らは、混成堤や盛土構造物の基礎地盤の強震時における変状メカニズムについて、遠心模型実験や非排水繰返し中空ねじりせん断試験を通して検討を加えてきた^{2)~4)}。その結果、

これら構造物直下地盤では鉛直応力が水平応力に比べ卓越する異方圧密状態にあり、繰返し水平せん断応力の作用に伴い、有効応力がある程度残存している状況で鉛直圧縮および水平伸張ひずみが蓄積する「ゆれ込みせん断変形」が生じること

圧密応力比 $K = \sigma'_{h0} / \sigma'_{v0}$ (σ'_{h0} : 水平圧密応力, σ'_{v0} : 鉛直圧密応力) が小さいほど変相時の平均有効応力が大きく、ゆれ込みせん断変形の蓄積量が小さくなる。これに対応して、強震時には構造物直下地盤浅部に比べ中深部の方が過剰間隙圧が大きく上昇し、大きな鉛直方向圧縮ひずみが発生する場合があること

がわかった。

これまで実施した中空ねじりせん断試験結果によると、ゆれ込みせん断変形は応力状態が変相線に到達の前後より顕著化する。また、Matsuoら⁵⁾の盛土—基礎地盤系の地震応答解析における有効応力経路

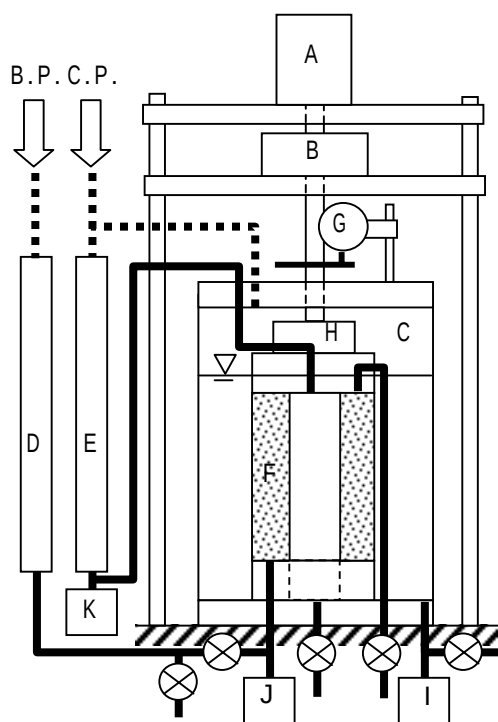
によると、盛土直下地盤浅部では初期において既に破壊線近傍に応力状態が位置し、地震による繰返しせん断に伴い直ちに变相状態に至り破壊線に沿った応力経路をたどる。即ち、盛土や防波堤の沈下過程を正確に予測するには、変相後における基礎地盤土の変形性状を把握することが肝要となる。山根ら⁶⁾は、初期軸差およびねじりせん断応力が残留ひずみ方向に及ぼす影響について検討している。

以上を踏まえ本報告では、異方圧密飽和砂の変相後における非排水繰返し変形特性を調べることを目的として実施した中空ねじりせん断試験結果に対し、特に繰返しせん断による剛性の変化や減衰、およびゆれ込みによる鉛直ひずみ性状に着目して検討を加える。

2. 試験方法

本実験で使用した中空ねじり試験装置の構成を図-1に示す。

試験手順の概略は次の通りである。炉乾燥した砂を5層に分けて空中落下し、金属製モールド外側より木槌で打撃することで密度を調整しながら、外径95mm、内径55mm、高さ200mm(いずれも概略値)の乾燥供試体を作成する。炭酸ガスおよび脱気蒸留水を通気通水し、背圧(196kPa)を加え、B値が0.95以上であることを確認した後、所定の側圧(セル圧)及び軸圧を負荷して圧密する。その後、供試体排水弁



A: ペロフラムシリンダ H: 2 成分ロードセル
B: メガトルクモータ I: セル圧センサ
C: セル J: 間隙圧センサ
D, E: 二重管ビュレット K: 差圧計
F: 砂供試体 B.P.: 背圧
G: 軸変位センサ C.P.: セル圧

図-1 試験装置

表-1 試料砂の物理特性

試料	A	B	C
土粒子密度(kg/m ³)	2584	2550	2638
最大間隙比	1.148	1.043	1.073
最小間隙比	0.697	0.589	0.652

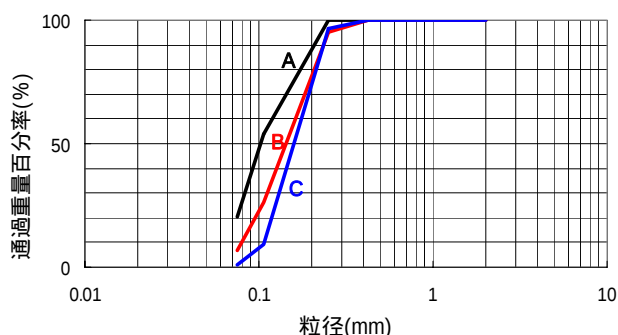


図-2 粒径加積曲線

を閉じ、側圧および軸圧を一定に保った状態で、メガトルクモータにより供試体上面を一定角速度で回転させることにより、ねじりせん断ひずみを加える。各センサデータより計算したねじりせん断応力が所定値に達した時点でモータ回転方向を反転することにより、一定応力振幅による繰返しせん断载荷を行った。なお側圧は、圧密、せん断過程を通して、内

表-2 試験ケース

ケース	Dr (%)	σ'_{m0} (kN/m ²)	K	τ_{amp}/σ'_{m0}
A-1	23.5	97.4	1.00	0.2
A-2	30.0	94.8	0.69	0.2
A-3	20.8	96.1	0.49	0.2
A-4	22.1	94.8	0.69	0.1
A-5	25.0	95.7	0.49	0.1
A-6	22.1	96.1	0.39	0.1
B-1	39.0	97.9	1.00	0.2
B-2	38.7	97.3	0.70	0.2
B-3	35.1	98.2	0.50	0.2
B-4	35.9	98.1	0.40	0.2
B-5	37.3	97.5	0.33	0.2
C-1	46.5	96.2	0.49	0.3
C-2	45.1	96.5	0.33	0.3
C-3	46.5	96.4	0.49	0.2
C-4	44.4	97.4	0.40	0.2
C-5	45.0	96.8	0.33	0.2

セル及び外セルで同一とした。また、ねじりせん断ひずみはメガトルクモータのフィードバック信号より計算した。

本報告で使用した試料砂の物理特性および粒度分布を表-1および図-2に示す。全ての試験ケースで珪砂7号を使用しているが、バッチにより物理特性および粒度に差異がある。

実施した試験ケースを表-2に示す。供試体作成方法と使用砂試料により大きく3シリーズに分類できる。試験シリーズAでは、表-1、図-2に示す試料砂Aを用い、作成時のモールド打撃を省略することにより、圧密後における相対密度 $Dr=20 \sim 30\%$ のゆる詰め供試体とした。シリーズB, Cではそれぞれ試料砂B, Cを用い、 $Dr=35 \sim 39\%$ 及び $44 \sim 47\%$ のややゆる詰め～中密供試体としている。全ての試験ケースで平均圧密応力 $\sigma'_{m0} = (\sigma'_{v0} + 2\sigma'_{h0})/3 = 95 \sim 98 \text{ kN/m}^2$ を概ね統一し、圧密応力比 K ，繰返しねじりせん断応力振幅 τ_{amp} を変化させ、計16ケースを実施した。

3. 試験結果

試験ケースB-2 (相対密度 $Dr = 39\%$ ，圧密応力比 $K = 0.7$ ，繰返しせん断応力振幅比 $\tau_{amp}/\sigma'_{m0} = 0.2$) において計測した、ねじりせん断応力 τ ，ねじりせん断ひずみ γ ，鉛直ひずみ ε の時刻歴を図-3に示す。繰返しせん断4回目以降せん断ひずみ振幅が大きくなると共に、鉛直ひずみも急増する。せん断ひずみ振幅は、繰返し7回目ではほぼ一定値に収束している。一方鉛直ひずみも繰返しとともに蓄積速

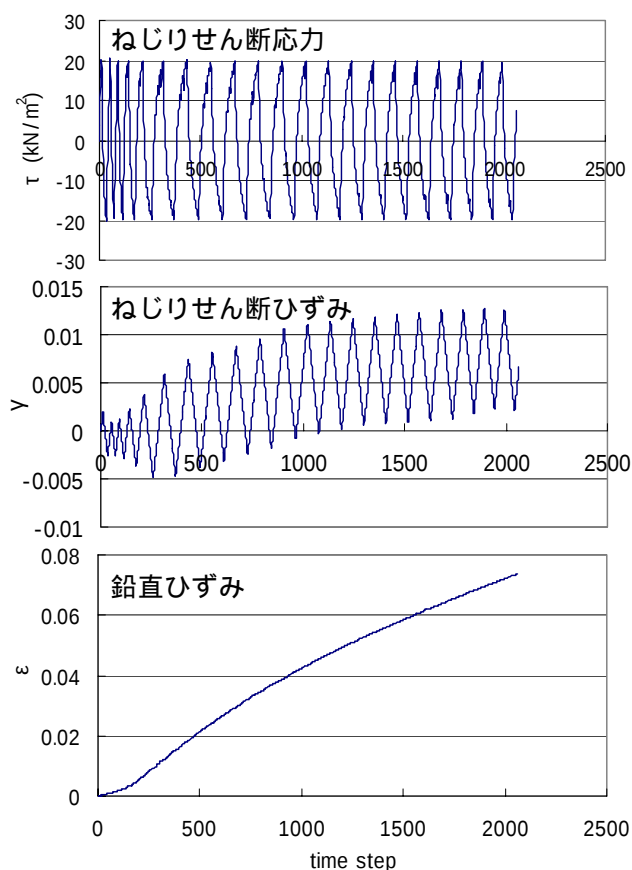


図-3 ねじりせん断応力 τ , せん断ひずみ γ , 鉛直ひずみ ε の時間変化 (ケース B-2)

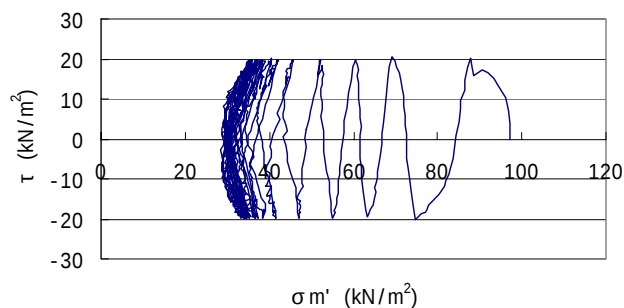


図-4 有効応力経路(ケース B-2)

度が鈍化する傾向にある。本ケースにおける有効応力経路(ねじりせん断応力 τ ~ 平均有効応力 σ'_m 関係)を図-4に示す。繰返し载荷に伴い平均有効応力が減少し繰返しせん断4回目で変相状態に達する。以後、平均有効応力の減少傾向が緩慢となり、 σ'_m 30kN/m²程度で収束している。即ち、応力状態が変相域に到達した後、平均有効応力が残存している状態で、ねじりせん断ひずみ及び鉛直ひずみが急激に成長・蓄積している。

次に試験ケース B-5($D_r = 37\%$, $K = 0.33$, $\tau_{amp}/\sigma'_{m0} = 0.2$)における、ねじりせん断ひずみの時刻歴を図-5に示す。繰返し第1波において、せん断ひずみ振幅は最大となり、以後繰返し回数と共にひずみ振幅が漸減している。本ケースにおける有効

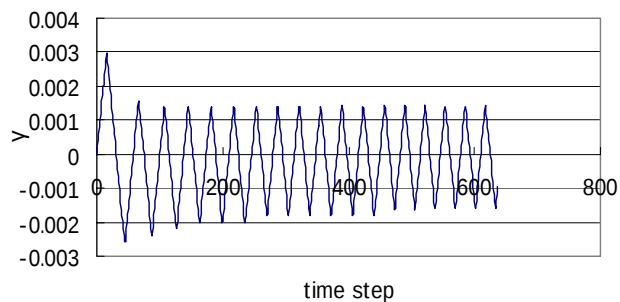


図-5 ねじりせん断ひずみ γ 時間変化 (ケース B-5)

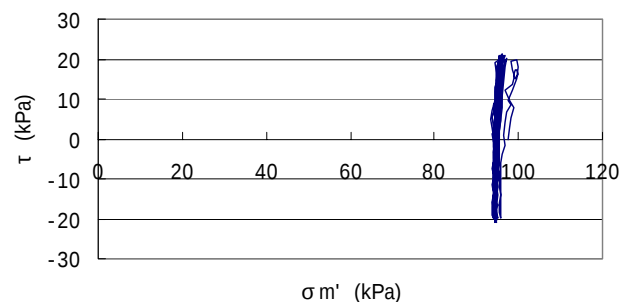


図-6 有効応力経路 (ケース B-5)

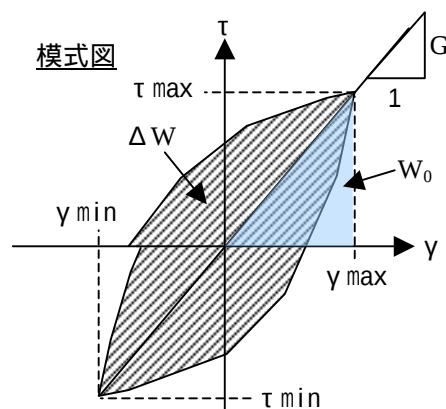
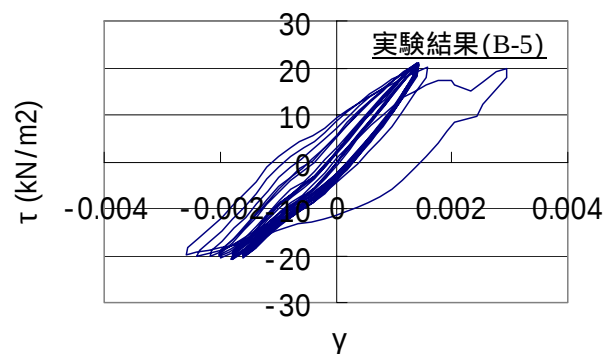


図-7 実験ケース B-5 におけるねじりせん断応力 ~ ひずみ関係(上)と模式図(下)

応力経路を図-6に示す。同図より、繰返しせん断に伴う平均有効応力の変動は小さく、せん断初期より変相状態にあることが推測できる。

図-5において、繰返し载荷に伴いせん断ひずみ振幅が減少していることから、せん断剛性が増大していることがわかる。ケースB-5におけるねじりせん断応力 ~ ひずみ関係とその模式図を図-7に示す。同模式図を参考に、応力 ~ ひずみ履歴周回における割

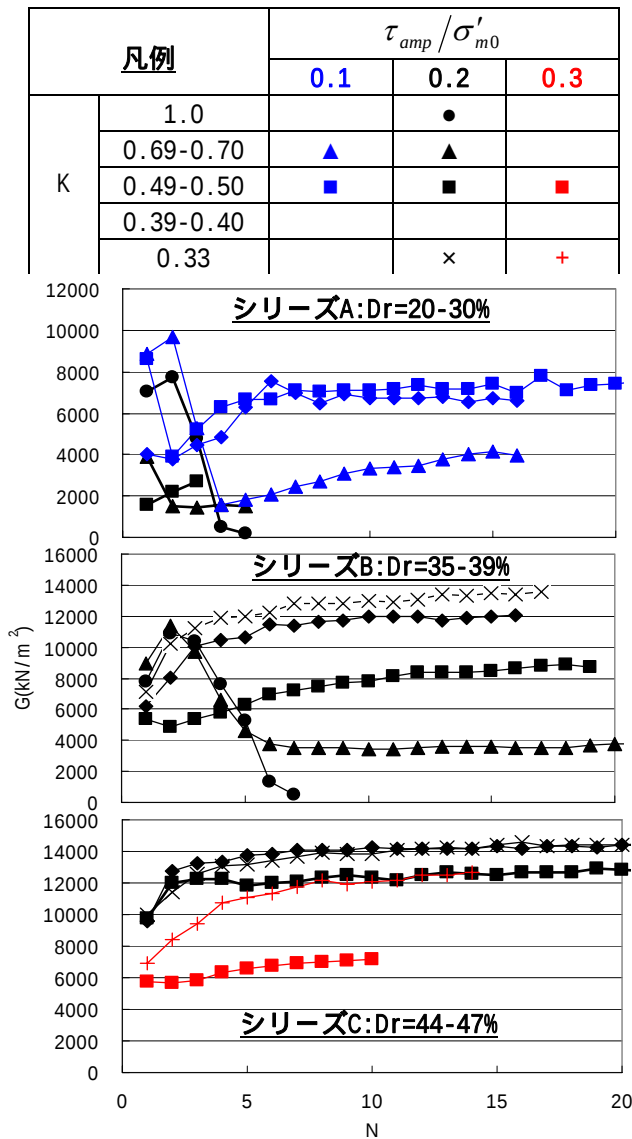


図-8 割線せん断剛性 G ~ 繰返し回数 N 関係

線せん断剛性 G 、エネルギー消散 ΔW 、及び減衰比 h を次式により定義する。

$$G = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}$$

$$\Delta W = \oint \tau d\gamma$$

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_0}$$

$$\text{ここに } W_0 = \frac{1}{2} G \left(\frac{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}{2} \right)^2$$

各試験シリーズにおける割線せん断剛性 G と繰返しせん断回数 N の関係を図-8に示す。シリーズ A ($Dr=20-30\%$) の結果に着目すると、せん断応力振

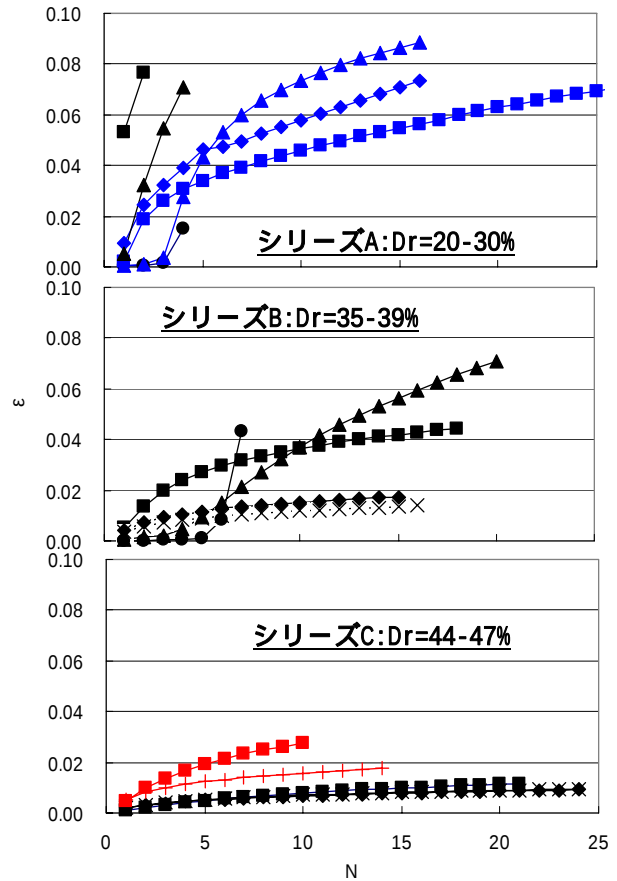


図-9 鉛直ひずみ ε ~ 繰返し回数 N 関係
(凡例は図-8 参照)

幅比 $\tau_{amp}/\sigma'_{m0} = 0.2$ 、圧密応力比 $K = 1.0$ (等方圧密) の場合 (●)、繰返し回数 $N=2 \sim 5$ で急激にせん断剛性が低下し $G \rightarrow 0$ となり、液状化状態に至っている。
 $\tau_{amp}/\sigma'_{m0} = 0.1$ 、 $K = 0.7$ の場合 (▲)、同様に $N=2 \sim 4$ で剛性が低下するものの、 $N = 5$ では繰返し载荷に伴い剛性が回復している。また $K = 0.5$ では、せん断初回より N の増大と共に G も増大している。

シリーズ B ($Dr=35-39\%$) では、せん断応力振幅比を $\tau_{amp}/\sigma'_{m0} = 0.2$ で固定している。割線せん断剛性 G は、圧密応力比 $K = 0.7$ (▲) では繰返し回数 N の増大に伴い減少しながら、 $K = 0.5$ では N とともに増大しながら、それぞれの値に収束する。 K が大きいほど、変相時の残存平均有効応力が小さくなることから、 G の収束値は小さくなっている。

繰返しせん断回数 N に伴う鉛直ひずみ ε の変化を図-9に示す。せん断応力振幅比 τ_{amp}/σ'_{m0} 及び圧密応力比 K が大きくなるに従い、概ね鉛直ひずみ急増以後の蓄積傾向が顕著となっている。

次に、重複反射理論に基づく地震応答解析への適用を考慮して、せん断剛性 G とせん断ひずみ振幅 $(\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/2$ 及び減衰比 h の関係を検討する。せん断剛性は平均有効応力 σ'_m に依存することから、
 $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/2$ 関係および $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim$

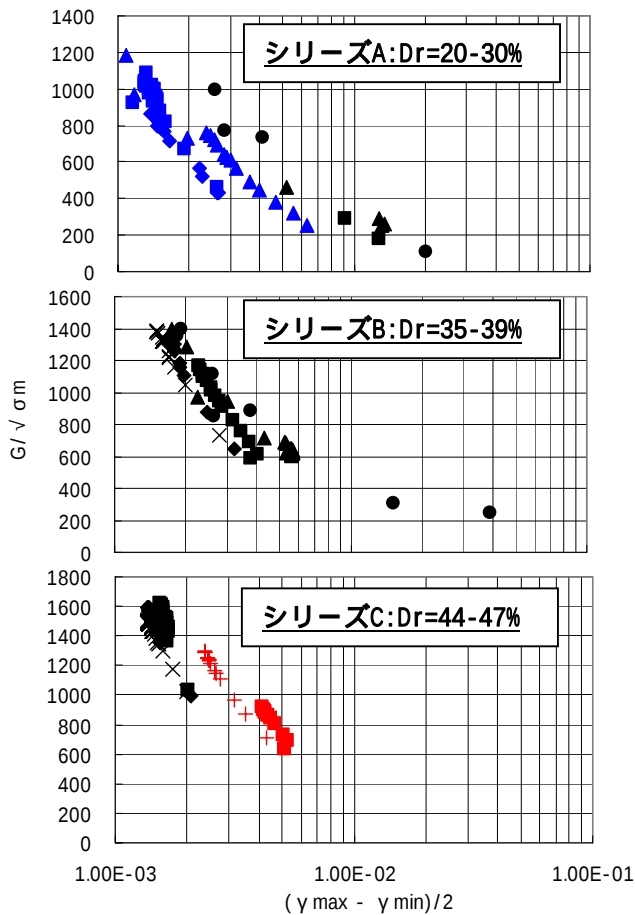


図-10 正規化せん断剛性 $G/\sqrt{\sigma'_m}$ ~ せん断ひずみ振幅 $(\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/2$ 関係 (凡例は図-8 参照)

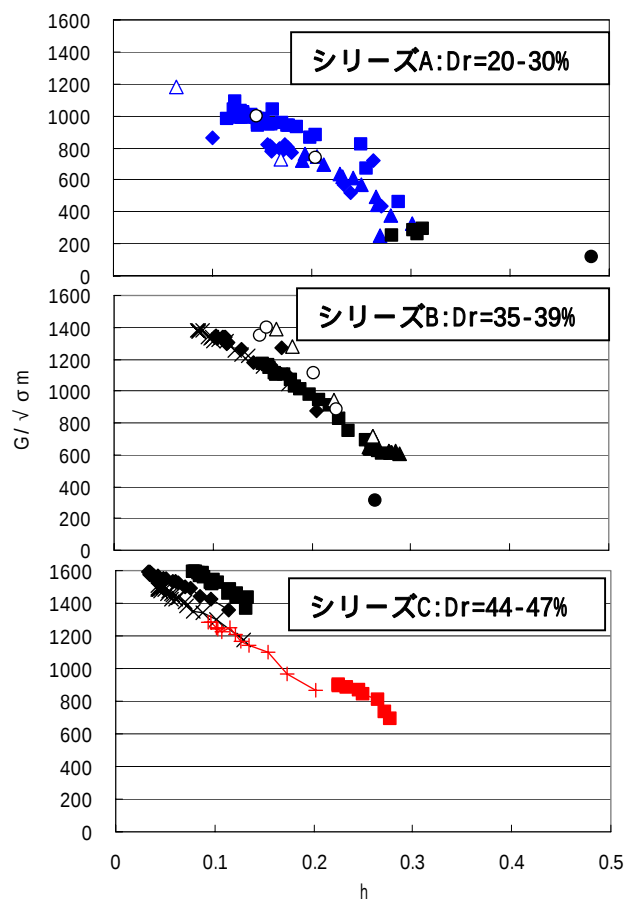


図-11 正規化せん断剛性 $G/\sqrt{\sigma'_m}$ ~ 減衰比 h 関係 (凡例は図-8 参照)

h 関係として整理した結果を図-10, 11に示す。なお σ'_m としては、繰返しせん断各周回開始時と終了時の平均値を採用した。 G および σ'_m の単位は共に kN/m^2 である。また $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim h$ 関係については繰返し1波目のデータを除いている。

試験シリーズ、即ち相対密度別に整理すると、 $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/2$ 関係、 $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim h$ 関係共に、圧密応力比 K やせん断応力振幅比 τ_{amp}/σ'_{m0} による差異が比較的小さい。 $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim h$ 関係は概ね直線で近似でき、シリーズA~Cで近似直線の傾きはほぼ同一となっている。なお図-11では、変相に至る前に数回のせん断繰返しを経た4ケース (A-1, A-4, B-1, B-2) について、変相前の $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim h$ 関係を白抜きマークでプロットした。シリーズBでは、変相前後で $G/\sqrt{\sigma'_m} \sim h$ 関係の傾きが異なる結果となった。

ゆれ込みせん断変形の進展性状の把握を目的として、ねじりせん断応力~ひずみ履歴より計算した消散エネルギーの積算和 $\sum \{\Delta W\}$ と鉛直ひずみ ε の関係を図-12に示す。相対密度が同じ場合には、圧密

応力比 K やせん断応力振幅比 τ_{amp}/σ'_{m0} に依存せず、両者は概ね高い相関性を示している。

4. まとめ

異方圧密飽和砂の変相後における非排水繰返し変形挙動について、中空ねじりせん断試験を通して検討した。得られた知見は、次の通りである。

異方圧密状態からの非排水繰返しせん断において、応力状態が変相域に到達後、繰返し载荷に伴いせん断剛性が有限値に収束した。特に圧密応力比 K 0.5 の場合には、せん断剛性は漸増した。圧密応力比が大きいほど、せん断剛性の収束値は小さくなった。

変相後における正規化割線せん断剛性 $G/\sqrt{\sigma'_m}$ と履歴消散エネルギーより計算した減衰比 h の関係は、一次式で近似しうる結果となった。相対密度が同じ試験ケースでは、圧密応力比やせん断応力振幅比に係わらず、鉛直ひずみと履歴消散エネルギーの積算和の間に高い相関性が認められた。

参考文献

- 1) Sekiguchi, H., Kita, K., Hashimoto, K. and Katsui, H. : Deformation of composite breakwaters due to ground shaking, *Special Issue on Geotechnical Aspects of the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations*, pp. 169-177, 1996.
- 2) Sekiguchi, H., Tanaka, K., Sassa, S. and Kita, K. : Performance of undrained cyclic torsional shearing of saturated sands, *Proc. First JSPS-NTU Seminar on Integrated Engineering, Vibration*, pp. 50-59, 1996.
- 3) Kita, K. and Yamada, H. : Centrifuge modeling of seismic settlement of composite breakwaters, *Proc. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.2, pp. 1171-1174, 2001.
- 4) Kita, K. : Seismic deformation of saturated sandy ground below embankment, *Proc. 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (Joint Conference)*, Vol.2, pp. 268-274, 2004.
- 5) Matsuo, O., Shimazu, T., Uzuoka, R., Mihara, M. and Nishi, K.: Numerical analysis of seismic behavior of embankments founded on liquefiable soils, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp. 21-39, 2000.
- 6) 山根行弘, 島津多賀夫, 古関潤一, 古賀泰之: 初期拘束応力状態及び繰返しせん断応力を変えた飽和砂の永久変形特性, 第47回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, pp. 216-217, 1992.

(2005. 6. 16 受付)

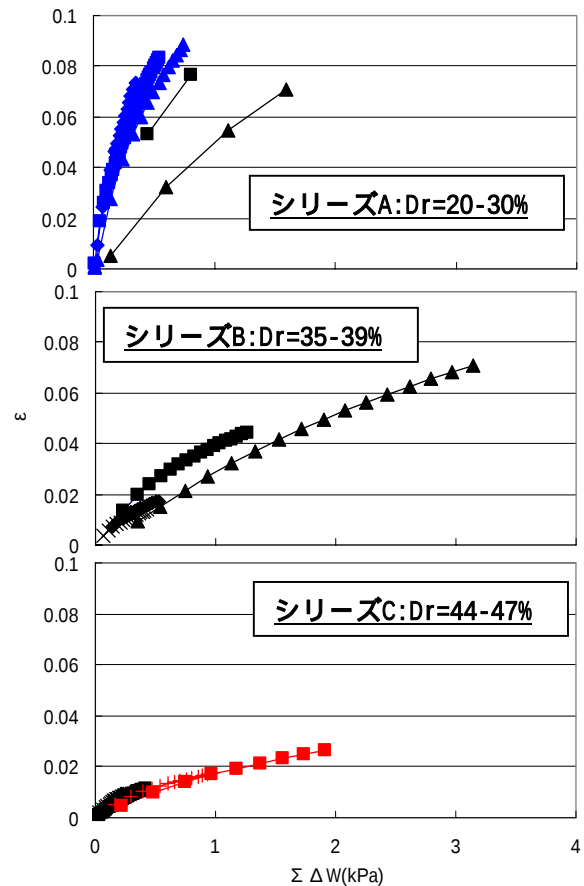


図-12 鉛直ひずみ ε ~ 履歴消散エネルギー蓄積量 $\Sigma \Delta W$ 関係 (凡例は図-8 参照)

UNDRAINED CYCLIC TORSIONAL SHEAR TESTS ON DEFORMATION BEHAVIOR OF ANISOTROPICALLY CONSOLIDATED SAND AFTER PHASE TRANSFORMATION

Katsutoshi KITA, Tokai University

Torsional shear tests were conducted to study the cyclic behavior of anisotropically consolidated sand, focusing deformation characteristics after phase transformation. Loose to medium-dense sand specimens were subjected to undrained cyclic shearing under constant vertical and horizontal total stresses with various consolidation stress ratios $K = \sigma'_{h0} / \sigma'_{v0} = 0.33$ to 1.0. For cases with $K = 0.5$, stresses reached phase transformation state during the first cycle of shearing, then the secant torsional shear modulus increased asymptotically with the number of cyclic repetition. The normalized shear modulus correlated with damping ratio, which was calculated from energy dissipation in torsional stress-strain loops.