

1. はじめに

沿岸構造物の地震時被災に関する数値解析による予測や現象解明では、精緻な繰り返し構成関係式を取り入れた有限要素法による有効応力解析が実施されている。既往の解析スキームでは、等方圧密試料による液状化強度曲線など、液状化に至るまでの土挙動に重点を置いた解析パラメータの選定が多く行われている。

一方、例えば河川堤防などの盛土構造物や混成式防波堤の地震時沈下解析事例によると、構造物直下地盤では初期において著しい異方圧密状態にあり、地震による繰り返し負荷の初期段階で変相状態に到達し、以降有効拘束圧の顕著な低下が生じない状況で「ゆれ込み」変形が進行することが指摘されている(例えば Matsuo ら, 2000)。著者らが実施した混成式防波堤の遠心力場震動実験における震動载荷前後の模型形状を図 1 に、また同実験で観測した加振加速度 (A1)、構造物直下浅部での過剰間隙圧(図 1 中 P5)およびマウンド加速度(図 1 中 A3)の時刻歴を図 2 に示す(Sekiguchi ら, 2001)。図 2 の過剰間隙圧応答に注目すると、加振初期段階より負圧が発生し、加振振動波形に同期する形で大きく変動していることから、有効拘束圧が保持された状況で変相状態に至っていることが推察できる。また、マウンド応答加速度に注目すると、液状化発生時のようなスパイク状の加速度応答や極端な振幅減衰が見られず、地盤がある程度剛性を保持していることがわかる。なお本実験ケースにおいて、振動载荷により発生した地盤浅層の鉛直ひずみ(ゆれ込み変形)は 7%程度であった。

上記の解析および実験結果を鑑みると、防波堤や盛土構造物の強震時変状を予測するにあたっては、異方圧密土の「変相後」における繰り返し変形挙動を把握する必要がある。加えて性能設計志向に伴い、安全か破壊かの評価より、崩壊近傍での被災程度の定量的予測に重点が置かれてきており、この点からも地盤材料の繰り返し大変形特性の解明が求められるものである。

以上を踏まえ本文では、異方および等方圧密した飽和砂の非排水繰り返しせん断特性に関する中空ねじり試験結果について報告する。

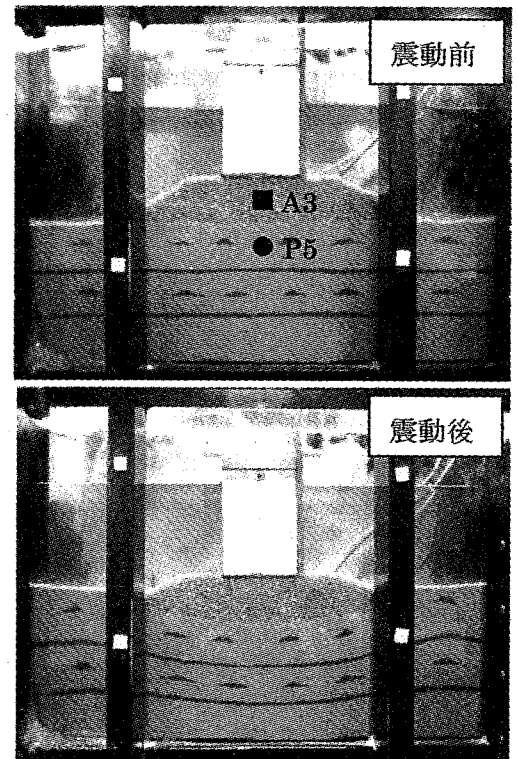


図 1 震動実験における模型変状

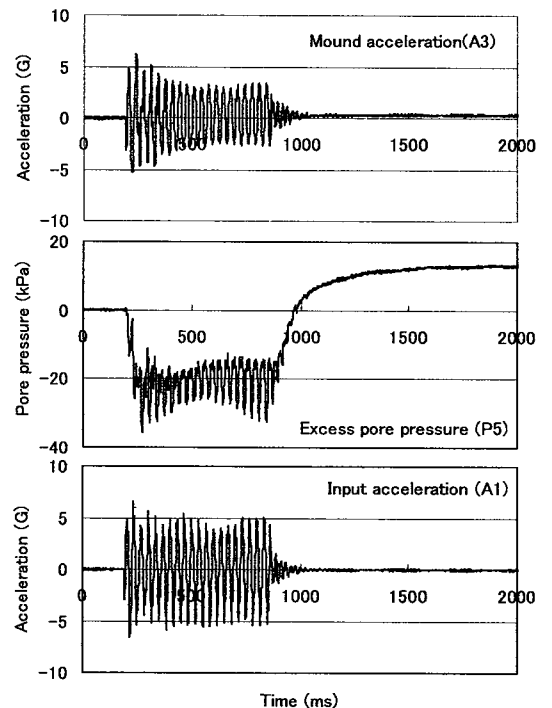


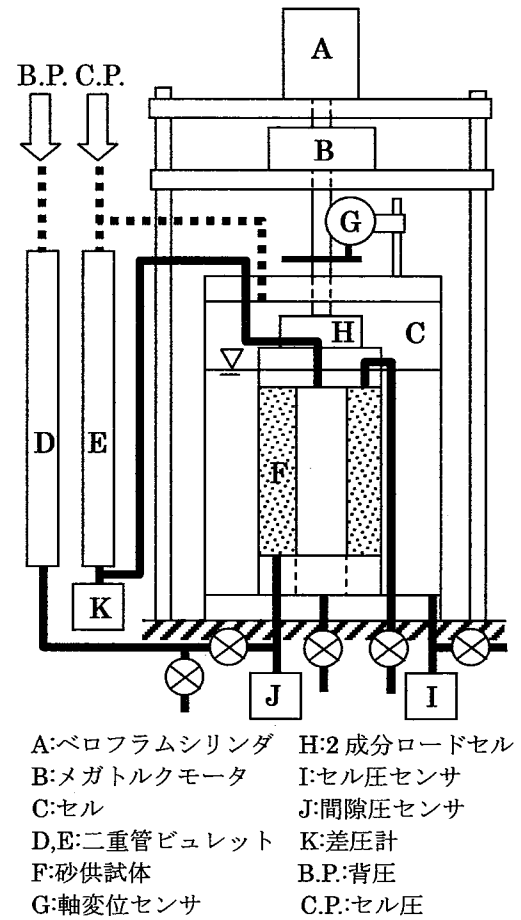
図 2 模型震動実験における加速度および過剰間隙圧の時刻歴

2. 実験概要

実験で用いた中空ねじり試験装置の概要を図3に示す。空気圧源よりレギュレータを介し外セルおよび内セル接続の二重管ビュレットに加圧するとともに、ペロフラムシリンダを介して軸力を負荷する。また供試体排水量計測用ビュレットを介して背圧を加える。所定応力・背圧を作用後、メガトルクモータにより中空円筒供試体上端を一定角速度で回転させる。軸変位、差圧計による内セル体積変化、2成分ロードセルによるねじりモーメントより計算したねじりせん断応力が指定値に達した時点で回転方向を反転させることで、せん断応力振幅一定の繰返し载荷を行った。

実験で使用した砂試料の物理特性を表1に示す。全ての実験で珪砂7号を使用した。バッチの違いにより物理特性が異なる。後出(表2)の実験シリーズAでは漏斗を用いてモールド内に乾燥砂を空中落下させることにより、B、Cでは5段階に分けてモールド内に試料を空中落下投入後に外モールドを木槌で打撃することにより乾燥供試体を作成した。供試体概略寸法は高さ20cm、外直径9.5cm、内直径5.5cmである。乾燥供試体に炭酸ガスを通気、脱気蒸留水を通水した後、背圧を196kN/m²加えることにより供試体を飽和させた。B値が0.95以上であることを確認した上で、所定応力で圧密した。その後、軸圧および側圧(全応力)一定の下で非排水繰返しねじりせん断を実施した。なお圧密・せん断過程を通じて、内外セルの圧力は同一とした。またせん断中の供試体上端ねじり回転角は、メガトルクモータ制御用フィードバック信号より算定した。

本実験では、平均圧密圧力 $\sigma'_{m0} = (\sigma'_{v0} + 2\sigma'_{h0})/3 \approx 95 - 98 \text{ kN/m}^2$ で概ね一定とし(σ'_{h0} : 水平圧密圧力, σ'_{v0} : 鉛直圧密圧力)、相対密度 Dr 、圧密応力比 $K = \sigma'_{h0}/\sigma'_{v0}$ 、繰返しせん断応力比 τ_{amp}/σ'_{m0} (τ_{amp} : ねじりせん断応力振幅)を変化させた16ケースについて実験を行った(表2参照)。なお、ケース名のアルファベットは表1中の試料砂名称を示している。



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3 試験装置

表1 試料砂の物理特性

砂名称	A	B	C
土粒子密度(kg/m ³)	2584	2.550	2.638
平均粒径(mm)	0.10	0.13	0.15
最大間隙比	1.148	1.043	1.073
最小間隙比	0.697	0.589	0.652

表2 実験ケース

ケース	Dr(%)	σ'_{m0} (kN/m ²)	K	τ_{amp}/σ'_{m0}	ケース	Dr(%)	σ'_{m0} (kN/m ²)	K	τ_{amp}/σ'_{m0}
A-1	23.5	97.4	1.00	0.2	B-1	39.0	97.9	1.00	0.2
A-2	30.0	94.8	0.69	0.2	B-2	38.7	97.3	0.70	0.2
A-3	20.8	96.1	0.49	0.2	B-3	35.1	98.2	0.50	0.2
A-4	22.1	94.8	0.69	0.1	B-4	35.9	98.1	0.40	0.2
A-5	25.0	95.7	0.49	0.1	B-5	37.3	97.5	0.33	0.2
A-6	22.1	96.1	0.39	0.1	C-1	46.5	96.2	0.49	0.3
Dr: 圧密後相対密度, σ'_{m0} : 平均圧密圧力 K: 圧密応力比 τ_{amp}/σ'_{m0} : 繰返しせん断応力比					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

3. 実験結果と検討

実験ケース B-1(ややゆる詰め、等方圧密)で観測した、(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 の時間変化、有効応力経路($\tau \sim$ 平均有効応力 σ'_m 関係)、せん断応力 \sim せん断ひずみ($\tau \sim \gamma$)関係を図4に示す。有効応力経路図より、繰返し载荷に伴い平均有効応力が減少し、繰返し6回目途中で変相状態に至っていることがわかる。一方せん断ひずみおよび鉛直ひずみの時間変化図に注目すると、6サイクル目以降せん断ひずみ振幅および鉛直圧縮ひずみが加速的に増大していることがわかる。

ややゆる詰め($Dr=38.7\%$)、圧密応力比 $K=0.7$ のケース B-2 におけるせん断ひずみの時間変化および有効応力経路を図5に示す。有効応力経路図に注目すると、5サイクル目において変相状態に至り、以降繰返しに伴う平均有効応力の減少傾向が鈍化、 30kN/m^2 に収束している。せん断ひずみの時間変化に注目すると、変相に達する5サイクル目から7サイクル目の間にせん断ひずみ振幅が急激に増大するものの、8サイクル目以降変動幅(両振幅)は0.01程度でほぼ一定となっている。

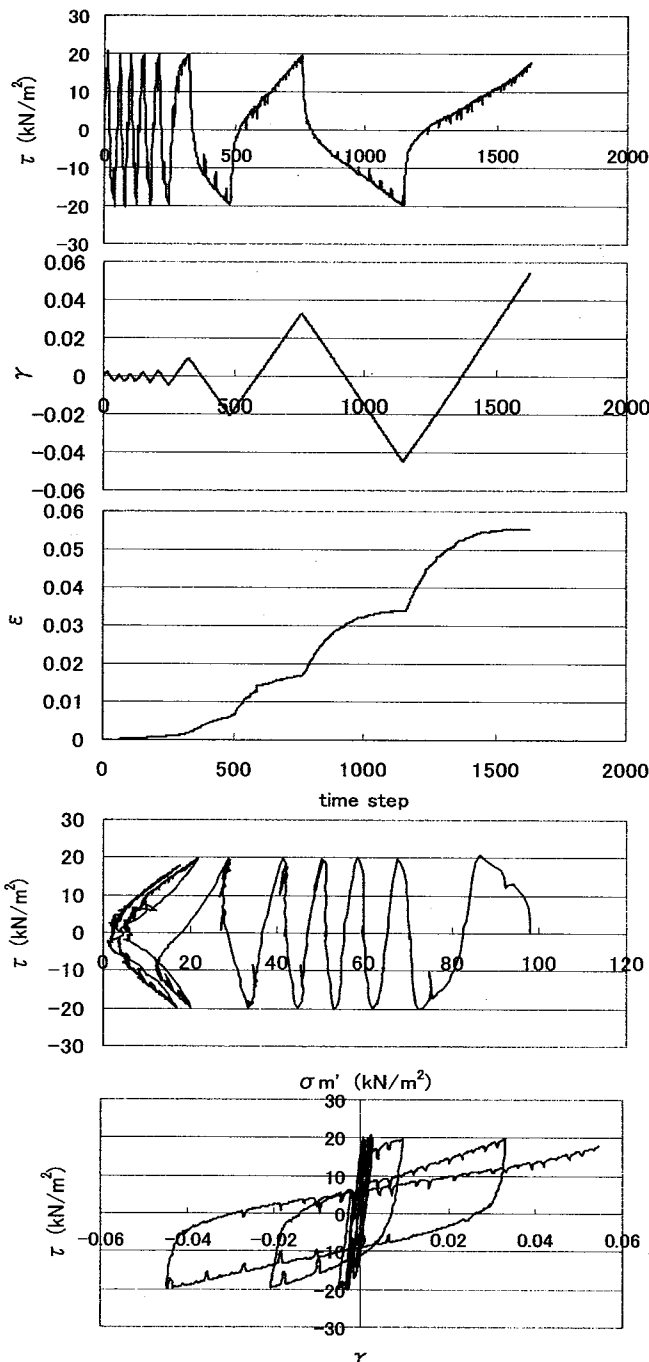


図4 実験結果(ケース B-1 ; $Dr=39\%$, $K=1.0$)

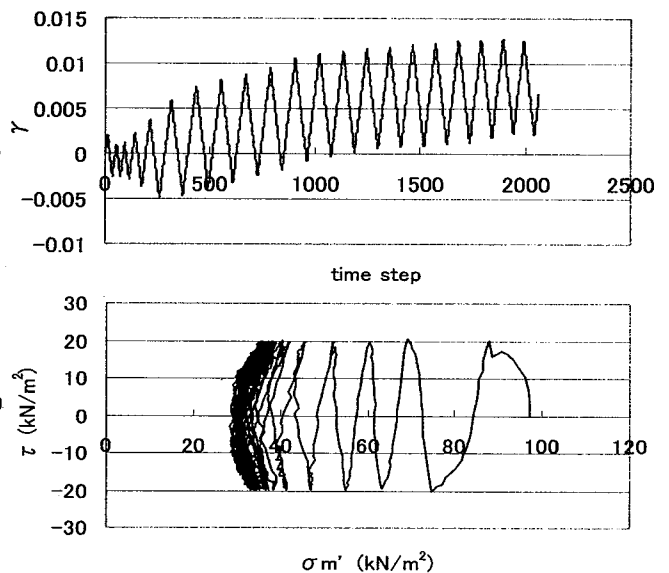


図5 実験結果(ケース B-2 ; $Dr=39\%$, $K=0.7$)

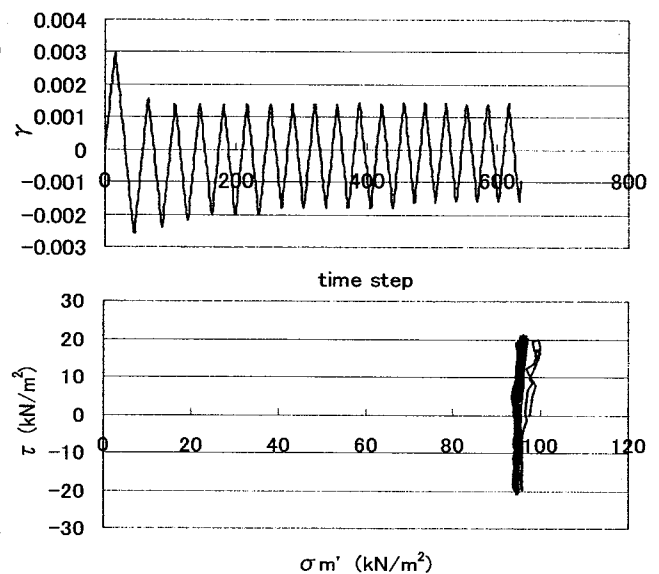


図6 実験結果(ケース B-5 ; $Dr=37\%$, $K=0.33$)

同じくややゆる詰め($Dr=37.3\%$)で、圧密応力比 $K=0.33$ のケース B-5 におけるせん断ひずみの時間変化および有効応力経路を図 6 に示す。有効応力経路に着目すると、本ケースでは大きな初期せん断(軸差)応力の作用により初期応力状態が変相線近傍に位置し、せん断初期より変相状態に到達していることから、繰返しせん断に伴う平均有効応力の変化がほとんど見られない。またせん断ひずみの時間変化に注目すると、ひずみ振幅は第 1 サイクルで最大となり、以降繰返し回数と共にひずみ振幅が徐々に減少している。

ここで、ねじりせん断応力振幅(繰返し 1 サイクル中の最大値と最小値の差)とねじりせん断ひずみ振幅の比より割線せん断剛性 G を定義する。本実験における繰返し载荷(繰返し回数 N)に伴う G の変化を図 7 に示す。等方圧密供試体(ケース A-1, B-1)および圧密応力比 $K=0.7$ (A-2, A-4, B-2)の場合には、せん断開始数回程度まで変相状態に至らないため、繰返しに伴う過剰間隙圧の上昇に起因した剛性の低下が生じる。その後 $K=1$ の場合には液状化に至り剛性が 0 となるのに対し、 $K=0.7$ の場合には変相後一定値に収束する(A-2, B-2)、もしくは剛性が増大する(A-4)挙動が見られる。 $K=0.33\sim 0.5$ の場合にはせん断初期より変相状態に達し、繰返し回数と共にせん断剛性が増大・収束してゆく結果となった。また同程度の相対密度で比較した場合、圧密応力比が大きいほど、変相時の残留平均有効応力が大きくなるため、変相後のせん断剛性も概ね大きくなっている。変相後の剛性上昇は、山根ら(1992)の実験結果においても認められる。Matsuo ら(2000)は、地震応答解析結果と実験結果の対比を基に、既往構成モデルにおける変相後の剛性劣化の取り扱いに関する問題点について言及しており、今後とも詳細な検討が必要となる。

B 砂試料を用いた実験における繰返し载荷に伴う鉛直圧縮ひずみの蓄積状況を図 8 に示す。異方圧密試料($K<1$)において、圧密応力比 K 値が大きいほど鉛直ひずみの蓄積傾向が顕著となっている。砂試料 A、C を用いた実験においても、圧密応力比と鉛直ひずみの蓄積挙動の関係について概ね同様の結果を得ている。

参考文献： Matsuo, O. et al., Soils and Foundations, Vol.40, No.2, pp.21-39, 2000. Sekiguchi, H. et al., Proc. 4th Int. Conf. Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Paper No.9.09, 2001. 山根行弘ら, 第 47 回土木学会年次学術講演会, III-88, 1992.

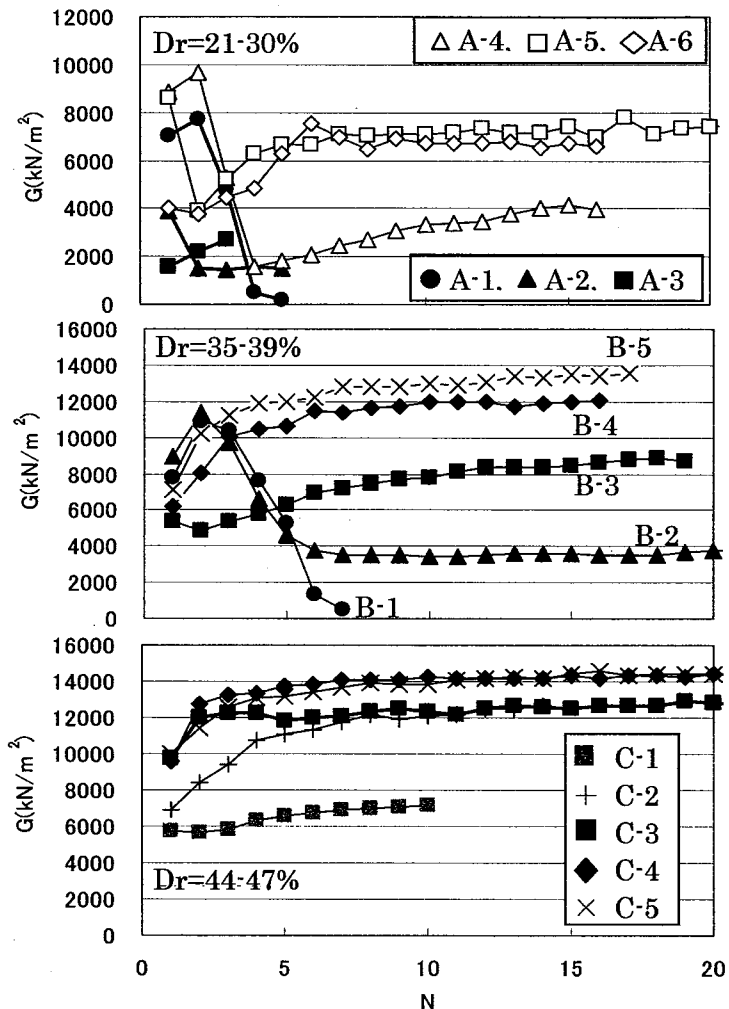


図 7 割線せん断剛性と繰返し回数の関係

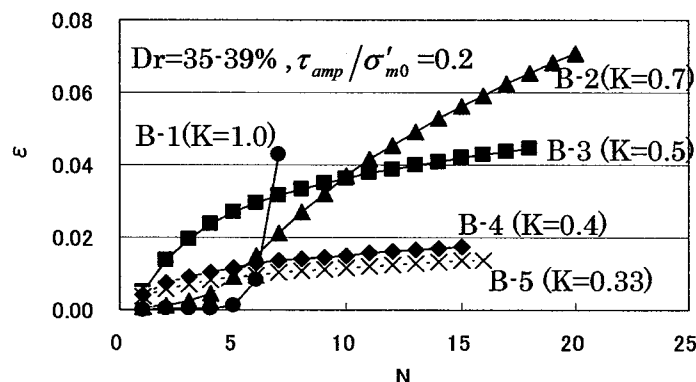


図 8 鉛直圧縮ひずみと繰返し回数の関係