

多方向繰返しせん断を受けた飽和粘土の
過剰間隙水圧および沈下に関する研究Excess Pore Water Pressure and Settlement of Saturated Clay
Induced by Multi-Directional Cyclic Shear

松田 博 Hiroshi MATSUDA (山口大学大学院理工学研究科)

均一な繰返しせん断ひずみ及び不規則な繰返しせん断ひずみを与えることが可能な多軸単純せん断試験装置を用い、地盤が一方向繰返しせん断及び多方向繰返しせん断を受ける場合に生じる過剰間隙水圧および繰返しせん断後の排水過程で生じる沈下について調べた。その結果、多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧とせん断ひずみ振幅の関係は、累積せん断ひずみを用いると繰返しせん断の方向性の影響が低減することを示すとともに、繰返しせん断中に生じる過剰間隙水圧および繰返しせん断後に生じる沈下を累積せん断ひずみを用いて推定する手法を見出した。そして、この手法は不規則な繰返しせん断に対しても適用可能であることを示している。

キーワード：繰返しせん断，粘土，地震，間隙水圧，沈下

(IGC : D6, D7)

1. はじめに

繰返しせん断条件下においては、砂質土は粘性土に比べて安定性が低いとされており、そのために土の動的性質に関する研究は非粘性土を対象に、しかも一方向の繰返しせん断に焦点を当てて進められてきた。図-1 は、兵庫県南部地震において記録されたNS方向およびEW方向の加速度の時刻歴を示したものであり、図-2 は水平面上での加速度の軌跡を示したものであって、地盤内においては土要素は多方向に不規則な繰返しせん断を受けることが推測される。このような繰返しせん断を地盤が受けた場合の安定性について検討するために、通常は繰返し三軸圧縮試験、繰返し単純せん断試験、繰返しねじりせん断試験、振動台試験等が行われる。これらの試験においては、主として供試体には一方向の繰返しせん断力の負荷が行われる。その中で、長瀬等²⁾は多方向に繰返しせん断が可能な単純せん断試験装置を開発し、また、Pyke等³⁾は振動台を用い

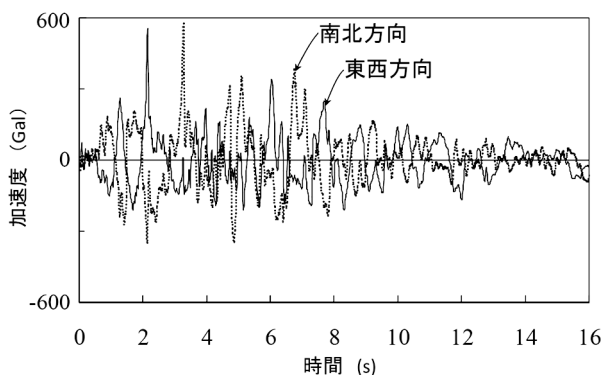


図-1 兵庫県南部地震で記録されたN-S方向及びE-W方向の加速度の時刻歴¹⁾

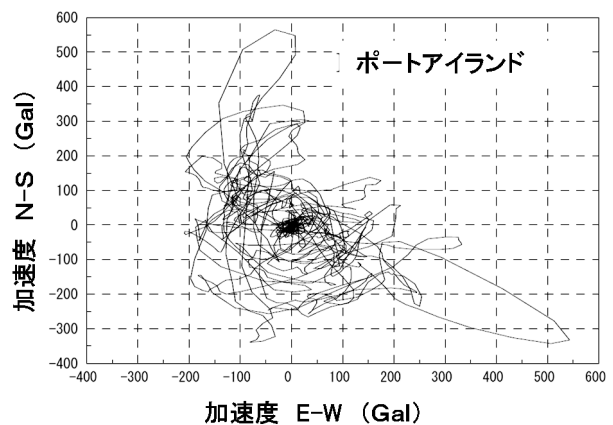


図-2 兵庫県南部地震で記録された地震加速度¹⁾

た実験を行っている。さらに、松田等⁴⁾は、多軸単純せん断試験装置を用い、砂質土が多方向繰返しせん断を受けた場合の有効応力の減少と繰返しせん断後の沈下に関して実験を行い、過剰間隙水圧の上昇過程及び沈下を累積せん断ひずみ及び合せん断ひずみの概念を用いて表す手法を示した⁴⁾。

一方、粘性土が繰返しせん断を受けた場合に生じる過剰間隙水圧の上昇、また繰返しせん断後の沈下についても研究が行われている⁵⁾⁹⁾ものの、多方向繰返しせん断の影響については明確にされていない点が多い。そこで、本研究は多軸単純せん断試験装置を用い、飽和粘土に対して非排水条件下で、ひずみ振幅、繰返し回数を種々変化させて多方向に繰返しせん断を与え、過剰間隙水圧の上昇と繰返しせん断後の沈下の特性を調べ、地震時の地盤の安定性、また地震後の沈下を予測するための新たな手法を見出そうとするものである。

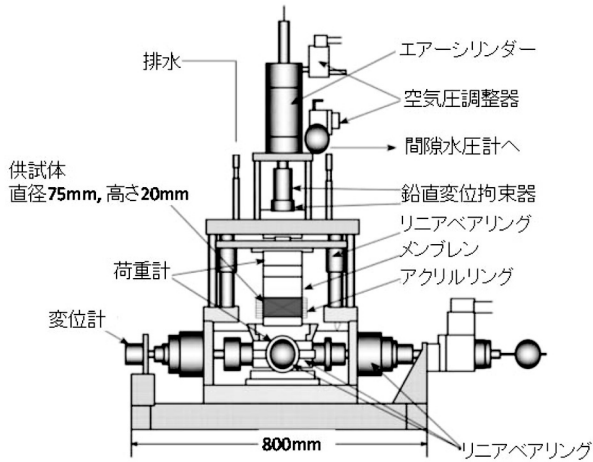


図-3 多軸単純せん断試験装置の概要

2. 非排水多方向繰返し単純せん断試験

2.1 試験装置と供試体

図-3 は多軸単純せん断試験装置の概要を示したものである。せん断箱は Kjellman 型で、供試体は直径 70mm、高さ 20mm の円盤状であり、供試体の側面はゴムスリーブを介してその外側には内径 75.4mm、厚さ 2mm のアクリル製円盤が供試体の状況によって 15-16 枚積み重ねられている。アクリル製円盤表面にはシリカ系のパウダーを塗布することによって、アクリル円盤相互間の摩擦の低減をはかっている。供試体は半径方向の変形は拘束された状態で、鉛直方向の変形と単純せん断変形が可能になっている。

供試体の底部は、下部ペダスタル上にあり、供試体は底面の鉛直方向の変位が無い状態で、水平面上で任意方向に可動できるようになっている。荷重は電気油圧サーボシステムを 2 系統用いることによって、供試体底面の直角 2 方向から独立して任意の水平変位を与えることができ、この時、供試体に作用するせん断ひずみは 0.05% の精度で制御を可能にしている。

供試体上部のペダスタルは、4 本の支柱にリニアベアリングによって支持された載荷板に荷重計を介して固定されている。鉛直方向の荷重は空気圧サーボシステムによって行い、供試体は一定荷重下での圧密と非排水条件下での繰返し単純せん断力の負荷が可能である。

用いた試料は、カオリン粘土 (土粒子の密度 $\rho_s = 2.707 \text{ g/cm}^3$ 、液性限界 $w_L = 47.8\%$ 、塑性限界 $w_P = 22.3\%$ 、塑性指数 $I_P = 25.5$ 、圧縮指数 $C_c = 0.305$) である。供試体を飽和するために、まず試料に脱気水を加え含水比が 80% になるよう調整して所定の期間養生し、さらに真空容器内にて脱気した後、単純せん断箱に詰めた。その後、供試体の底面を非排水とする片面排水条件下で、圧密圧力 49kPa 及び 98kPa

で圧密した。圧密期間は 3t 法によって決定するとともに、圧密終了時に供試体底面での過剰間隙水圧が消散していることを確認した。圧密後の間隙比は、圧密圧力 49kPa の場合、1.11-1.19、98kPa の場合、1.05-1.08 であった。また、圧密後の供試体の B 値は 0.95 以上であることを確認した。

2.2 試験方法

圧密終了後、排水バルブを閉じて非排水とし、繰返し回数 (n)、せん断ひずみ振幅 (γ)、供試体底部の水平面上の直角 2 方向から繰返しせん断波の位相差 (θ) を種々変化させて繰返しせん断を行った。

繰返しせん断は、水平面上の直角 2 方向 (X 方向, Y 方向) から独立した 2 系統の電気油圧サーボシステムを用いてひずみ制御で行い、ひずみ振幅 γ は、 $\gamma = 0.05\%$ から 3.0% の間で変化させ、繰返し回数は 10, 20, 50, 100, 200 回とした。繰返しせん断の波形はサイン波形状で、周期は 2 秒とした。また、後述するように不規則な繰返しせん断波での実験も行った。

繰返しせん断中、供試体底面の間隙水圧、鉛直応力、X, Y 方向の水平変位について 0.05 秒ごとに測定を行った。図-4 は、供試体の変形モードを概念的に示したものであって、供試体の X 方向, Y 方向のせん断ひずみ γ_x, γ_y は供試体底面中心の X 方向, Y 方向の水平変位 δ_x, δ_y と供試体高さの比として定義される。

典型的な繰返しせん断ひずみの時間的変化を示したものが図-5 であり、せん断ひずみ振幅 ($\gamma = \gamma_x = \gamma_y$) = 1.0% として、一方向せん断、位相差を $20^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ とした場合の入力波を示したものである。これらの波を用いて得られた供試体底面中心の軌跡を描いたものが図-6 である。

一方向せん断試験においては、せん断ひずみは X 方向にのみ与えられ ($\gamma_x = \gamma = 1.0\%$)、多方向せん断においては、振幅の等しい繰返しせん断 ($\gamma_x = \gamma_y = \gamma = 1.0\%$) が X 方向, Y 方向から供試体に与えられる。その場合、X 方向, Y 方向からのせん断波に位相差 θ を与えることによって、図-6 に示したように、 $\theta = 20^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ に対応して異なる形状の供試体底面中心の軌跡が得られる。特に θ

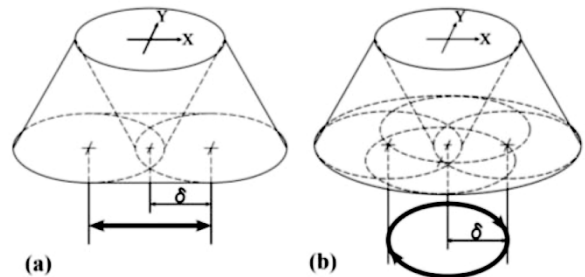


図-4 多軸単純せん断試験における供試体の変形モード

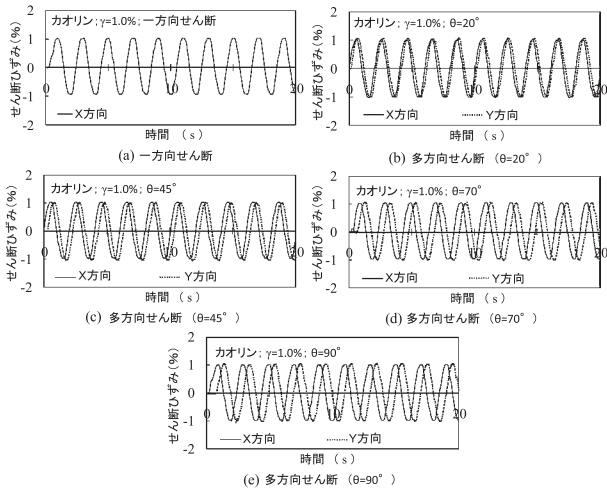


図-5 多軸単純せん断試験において、X方向 Y方向から入力される波形¹⁰⁾

=90° の場合、せん断ひずみの軌跡は円形状となり、この場合、回転せん断 (gyratory shear) と呼ばれる。

繰返しせん断後は、鉛直荷重を一定に保ち、供試体上面の排水バルブを開き、再圧密を行った。再圧密中は、鉛直変位及び供試体底部での過剰間隙水圧の測定を行った。

3. 多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧と繰返しせん断後の沈下

3.1 多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧

供試体に非排水条件で繰返しせん断を与えると、過剰間隙水圧が上昇する。繰返しせん断中に発生する過剰間隙水圧 U_{dyn} と繰返しせん断開始時の鉛直有効応力 σ'_{v0} との比を過剰間隙水圧比 U_{dyn}/σ'_{v0} として、繰返し回数 n との関係を示したものが図-7 であって、 $\gamma=0.1\%$ 、 0.4% 、 2.0% の結果を示している。 U_{dyn}/σ'_{v0} は繰返し回数とともに増加し、繰

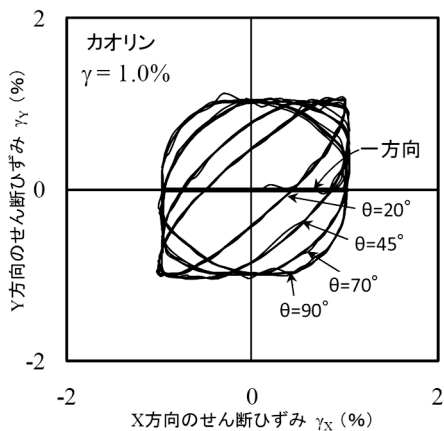


図-6 多軸単純せん断試験における供試体底面中心の軌跡¹⁰⁾

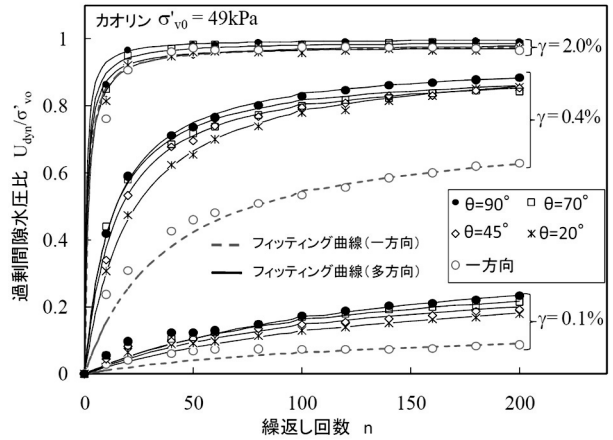


図-7 過剰間隙水圧と繰返し回数の関係¹⁰⁾

表-1 式(2), (3)における実験定数の値¹⁰⁾

繰返しせん断方向	繰返し回数 n	係数			
		A	B	C	m
一方向せん断	10	6.0	-0.090	1.010	-1.8
	20	6.0	-0.089	1.014	-2.0
	50	6.0	-0.085	1.023	-2.2
	100	6.0	-0.080	1.027	-2.4
	200	7.0	-0.080	1.030	-2.5
多方向せん断	10	2.2	-0.068	0.998	-2.2
	20	2.2	-0.065	1.002	-2.2
	50	2.3	-0.058	1.009	-2.2
	100	2.5	-0.050	1.012	-2.2
	200	3.9	-0.050	1.018	-2.2

返し回数が等しい時、一方向繰返しせん断に比べて、多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧が大きく、また位相差 θ が大きいほど大きくなっている。

大原等⁹⁾は、非排水条件下で飽和粘土が繰返しせん断を受けた場合に発生する過剰間隙水圧と繰返し回数 n の間に次式の関係が成り立つことを示している。

$$\frac{U_{dyn}}{\sigma'_{v0}} = \frac{n}{\alpha + \beta n} \quad (1)$$

ここに、 α 、 β は実験定数であって、繰返しせん断ひずみ γ との関係で次式によってあらわされる。

$$\alpha = A(\gamma)^m \quad (2)$$

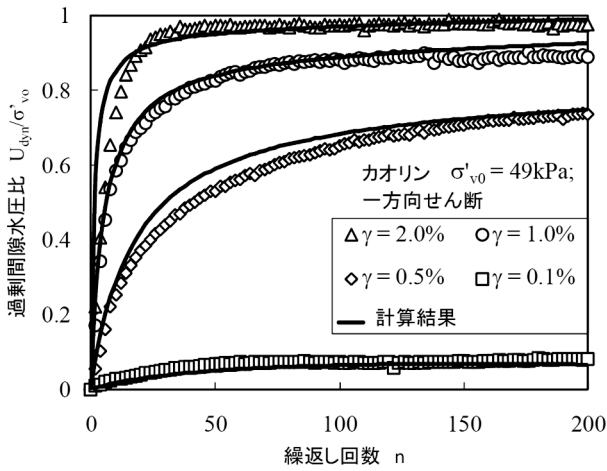
$$\beta = \frac{\gamma}{B + C\gamma} \quad (3)$$

式 (2), (3) における A , B , C , m は実験定数である。

図-7 において、曲線は式(1)によって得た結果であって、ひずみ振幅、位相差が変化する場合にも比較的一致することがわかる。

表-2 式(2), (3)における実験係数と繰返し回数¹⁰⁾

係数	繰返しせん断方向	
	一方向せん断	多方向せん断
A	$A = 0.005n + 5.809$	$A = 0.008n + 1.941$
B	$B = 5 \times 10^{-5}n - 0.088$	$B = 9 \times 10^{-5}n - 0.065$
C	$C = 1 \times 10^{-4}n + 1.013$	$C = 1 \times 10^{-4}n + 1.000$
m	$m = -0.003n - 1.929$	$m = -2.2$



(a) 一方向繰返しせん断試験

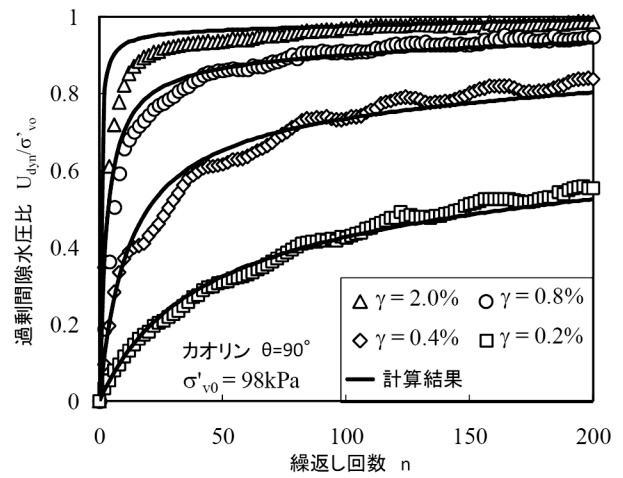
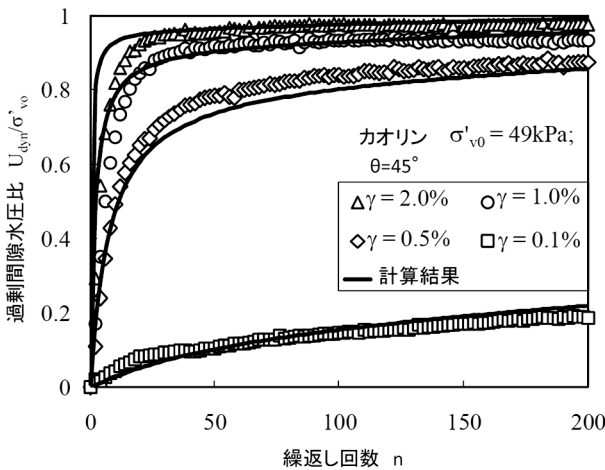
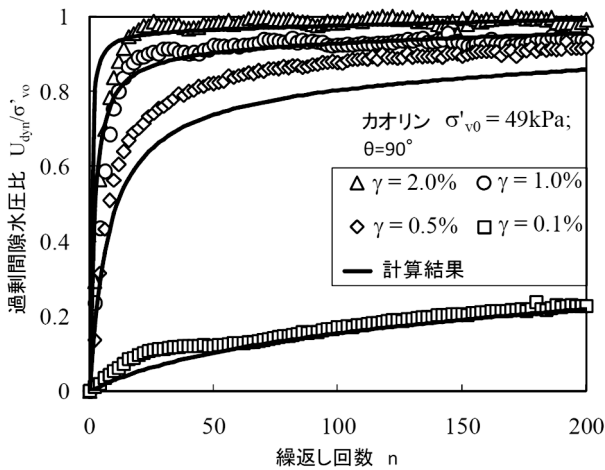


図-9 一方向・多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧の推定¹⁰⁾ ($\sigma'_{v0}=98\text{kPa}$)



(b) $\theta=45^\circ$



(c) $\theta=90^\circ$

図-8 一方向・多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧の推定¹⁰⁾ ($\sigma'_{v0}=49\text{kPa}$)

図-7によって得られた式(2), (3)における実験定数 A , B , C , m について示したものが、表-1 であって、各実験定数と繰返し回数との関係を示したものが表-2 である。

表-2 の結果を用いると過剰間隙水圧の上昇過程を示す

ことができる。その結果を示したものが図-8 (a), (b), (c) であって、図-8 (a) は一方向繰返しせん断の結果であり、図-8 (b) は $\theta=45^\circ$ 、図-8 (c) は $\theta=90^\circ$ についての結果である。また、図-9 は、 $\theta=90^\circ$ について、圧密圧力 $\sigma'_{v0}=98\text{kPa}$ とした場合の結果であって、いずれの場合も実験値と推定値は比較的よく一致しており、実験を行った圧密圧力の範囲では、式(1)は位相差が異なる多方向繰返しせん断中の過剰間隙水圧の推定にも適用できることを示している。

図-10、図-11 は過剰間隙水圧比とせん断ひずみ振幅の関係を示したものである。図中のプロットは実測値であり、曲線は式(1)によって得られた結果である。多方向繰返しせん断 ($\theta=20^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 90^\circ$) によって生じる過剰間隙水圧比は一方向繰返しせん断に比べて大きく、また図-11 では位相差の増加とともに過剰間隙水圧比も大きくなっている。図中には圧密圧力 $\sigma'_{v0} =$

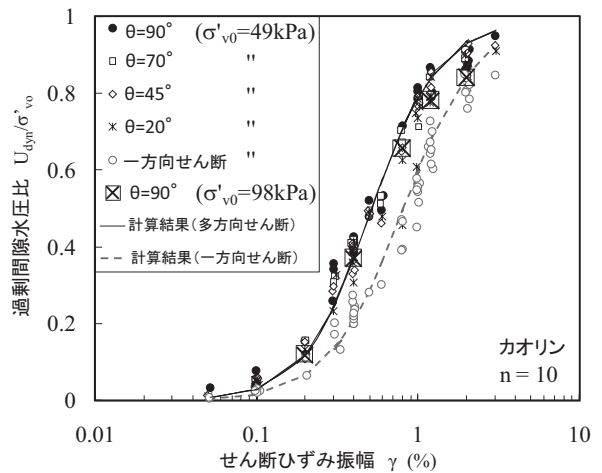


図-10 一方向・多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧とせん断ひずみ振幅の関係¹⁰⁾($n=10$)

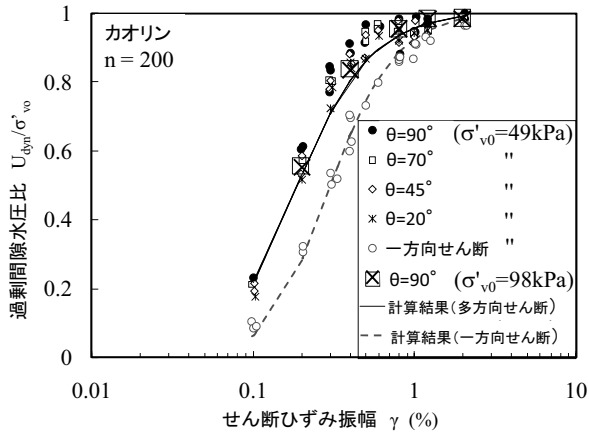


図-11 一方向・多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧とせん断ひずみ振幅の関係¹⁰⁾(n=200)

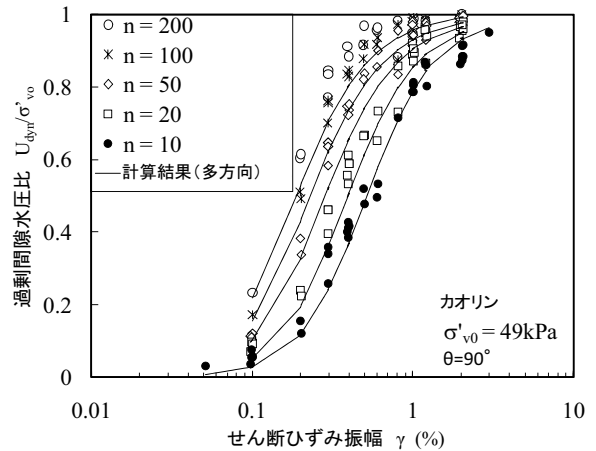


図-13 過剰間隙水圧とせん断ひずみ振幅の関係に及ぼす繰返し回数の影響¹⁰⁾ (多方向せん断 θ=90°)

98kPaの結果も示しているが、圧密圧力 $\sigma'_{v0}=49\text{kPa}$ の結果とほぼ一致している。しかし、図-11からもわかるように、多方向繰返しせん断において、実測値はひずみ振幅の増加とともに式(1)による結果より大きくなっている。そこで、せん断ひずみ振幅と過剰間隙水圧比の関係を繰返し回数ごとにまとめたものが図-12、図-13であって、それぞれ一方向繰返しせん断と多方向繰返しせん断($\theta=90^\circ$)の結果である。安原等¹¹⁾は、一方向繰返しせん断を受けた場合、粘土は攪乱されることを示しているが、図-12においてはひずみ振幅の大きさによらず式(1)による結果と実験値はほぼ一致しており、式(1)による近似が可能である。一方、多方向繰返しせん断の場合、攪乱の影響は繰返し回数とともにさらに大きくなると考えられる。そのため、図-13で示したように、 $n<50$ の場合、実測値と式(1)による結果はほぼ一致するものの、 $n>50$ ではひずみ振幅の増加とともに実測値が式(1)の結果より大きくなることから、多方向せん断に対する式(1)の適用は $n<50$ に限定される

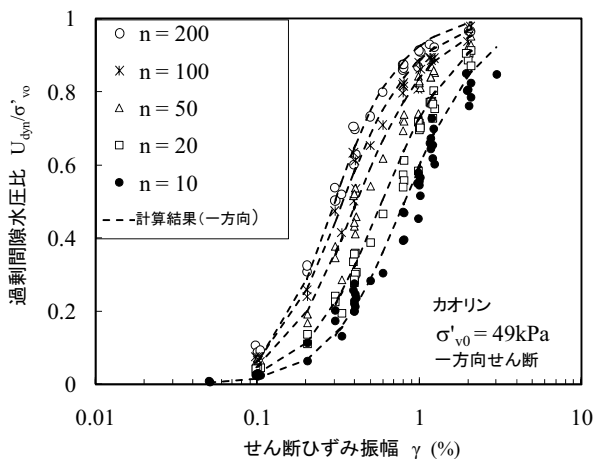


図-12 過剰間隙水圧比とせん断ひずみ振幅の関係に及ぼす繰返し回数の影響¹⁰⁾ (一方向せん断)

ものの、通常の地震時を想定した場合は多方向繰返しせん断に対しても式(1)の適用は可能である。

3.2 多方向繰返しせん断後の沈下

飽和状態にある軟弱な地盤が地震時に繰返しせん断を受けると過剰間隙水圧が上昇する。砂質土において地震時に地盤が液状化した場合、地震直後に沈下が生じる。一方、粘性土においては、過剰間隙水圧が地震時に拘束圧まで上昇しない場合においても、過剰間隙水圧の消散に伴い沈下が生じる。神戸市ポートアイランドにおいては1995年1月17日の兵庫県南部地震の2年以上前から、そして地震後も継続して地表面沈下、層別沈下の計測が行われた。図-14は、埋立て土と沖積粘土層に関する層別沈下-時間関係¹²⁾である。図中の実線は実測値であり、曲線1は地震が生じないとして予測した曲線、曲線2は曲線1を実測曲線において、地震直後の計測値まで下方に平行移動したものであって、地震の影響がないとした場合、曲線2に沿って沈下が進むと考えられる。しかし、地震後は実測沈下が曲線2に比べると時間経過とともに増加しており、沖積粘土層の沈下によるものと推定される。

粘土層に繰返しせん断が作用した場合について、繰返しせん断後の粘土層の沈下を推定するために、大原等⁵⁾は動

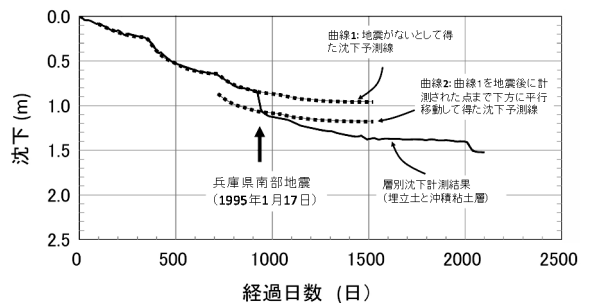


図-14 1995年兵庫県南部地震時にポートアイランドの埋立て土と沖積粘土層で生じた沈下¹²⁾

的圧縮指数 C_{dyn} を用い、繰返しせん断後に生じる沈下ひずみを求める次式を示した。

$$\epsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{C_{dyn}}{1+e_0} \log SRR \quad (4)$$

ここに、 e_0 は初期間隙比、 Δe は間隙比変化、 H_0 は粘土層の初期高さ、 ΔH は沈下量である。式(4)において SRR は応力減少比(Stress Reduction Ratio)で、

$$SRR = \frac{1}{1 - \frac{U_{dyn}}{\sigma'_{v0}}} \quad (5)$$

で与えられる。本研究においては、式(4)をもとに、多方向繰返しせん断時の粘土層の沈下について検討した。

3.3 多方向繰返しせん断後の間隙比変化

一方向繰返しせん断及び多方向繰返しせん断後に生じる間隙比変化 Δe と応力減少比 SRR の関係を示したものが、図-15 及び図-16 で、繰返し回数が $n=10$ 、及び $n=200$ についての結果である。

図中のプロットは実測値であり、直線はそれぞれ図中に示した式によって得た結果である。図中の式において C_{dynU} は一方向繰返しせん断後の動的圧縮指数、 C_{dynM} は多

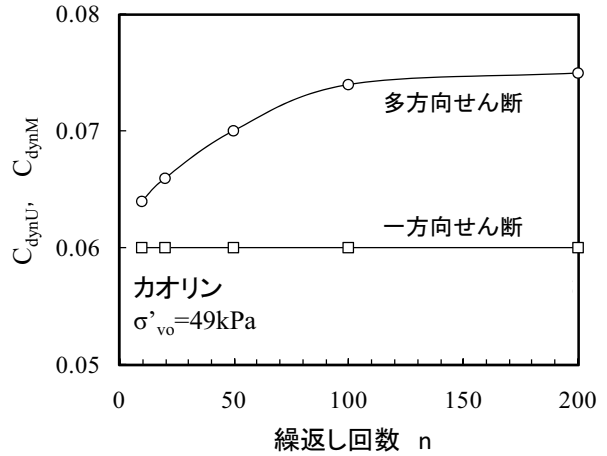


図-17 動的圧縮指数と繰返し回数¹⁰⁾

方向繰返しせん断後の動的圧縮指数である。図-17 は、 C_{dynU} および C_{dynM} と繰返し回数の関係を示したものである。一方向繰返しせん断においては、いずれの繰返し回数においても、 $C_{dynU} = 0.060$ で一定であるのに対して、多方向繰返しせん断においては繰返し回数の増加とともに大きくなる傾向がみられ、 $n=10$ の場合 $C_{dynM} = 0.064$ 、 $n=200$ の場合 $C_{dynM} = 0.075$ が得られた。

一方向及び多方向繰返しせん断後の沈下ひずみとせん断ひずみ振幅の関係を示したものが図-18、図-19 で、図-18 は $n=10$ 、図-19 は $n=200$ の結果を示している。いずれの繰返し回数、せん断ひずみ振幅においても、一方向繰返しせん断後の沈下に比べて多方向繰返しせん断後の沈下が大きくなっている。また、図中のプロットは実測値、曲線は式(5)による結果であって、両者はよく一致している。

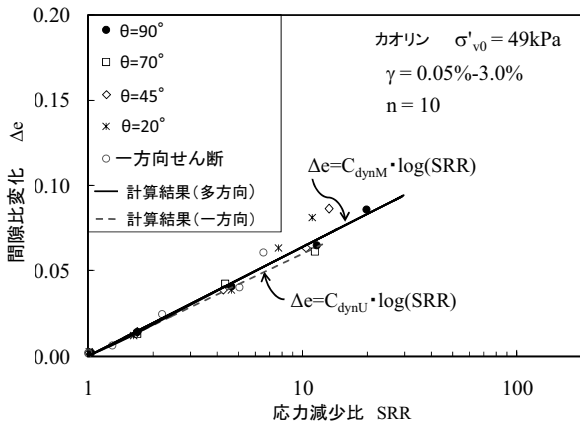


図-15 一方向繰返しせん断後の SRR と間隙比変化の関係

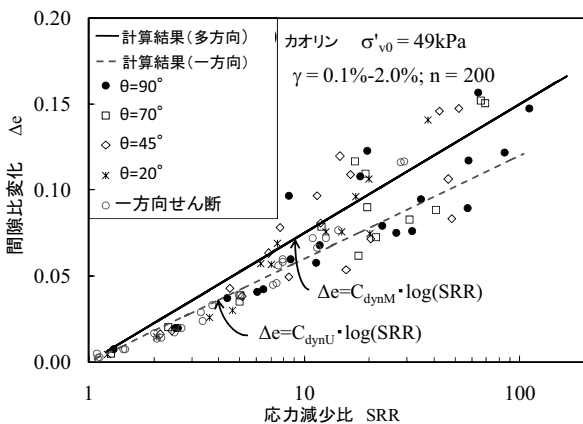


図-16 多方向繰返しせん断後の SRR と間隙比変化の関係

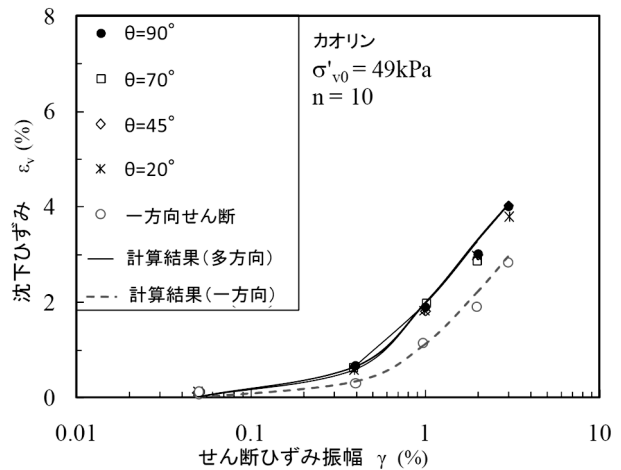


図-18 多方向繰返しせん断後の沈下ひずみとせん断ひずみ振幅の関係¹⁰⁾ ($n=10$)

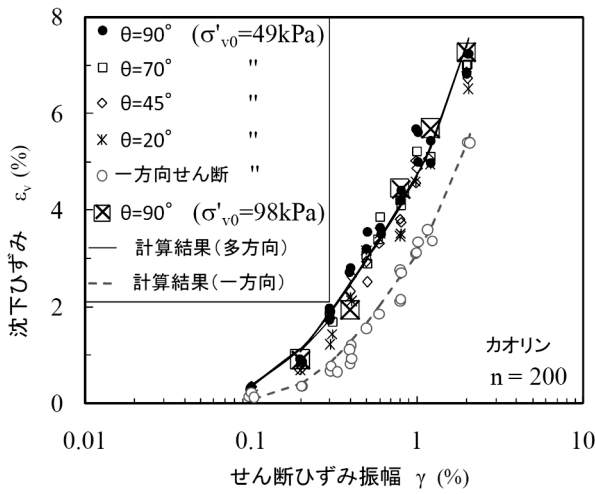


図-19 多方向繰返しせん断後の沈下ひずみとせん断ひずみ振幅の関係¹⁰⁾ (n=200)

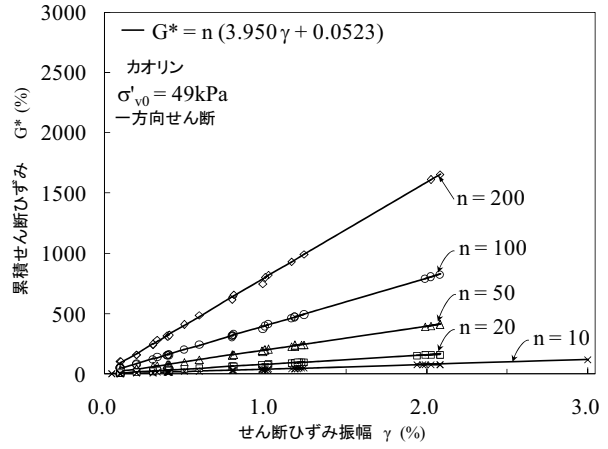


図-21 累積せん断ひずみ G*とせん断ひずみ振幅の関係¹⁴⁾ (一方向繰返しせん断)

4. 累積せん断ひずみと過剰間隙水圧、繰返しせん断後の沈下

4.1 累積せん断ひずみ G*

福武・松岡¹³⁾は、排水条件下において粒状土が多方向繰返しせん断を受けたときの変形過程を表すために、累加せん断ひずみ(本報告では累積せん断ひずみと呼ぶ) G*と合せん断ひずみ Γを用いたボ-ルモデルを導入した。G*とΓはそれぞれ次式であらわされる。

$$G^* = \sum \Delta G^* = \sum \sqrt{\Delta \gamma_x^2 + \Delta \gamma_y^2} \quad (6)$$

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2} \quad (7)$$

ここに、 $\Delta \gamma_x$ 、 $\Delta \gamma_y$ は X 方向および Y 方向のひずみ増分である。多方向せん断において、G*、Γと X 方向および Y 方向のせん断ひずみとの関係は概念的に図-20のようにあらわされる。

一方向及び多方向繰返しせん断によって得られた累積せん断ひずみ G*とせん断ひずみ振幅 γ の関係を示したも

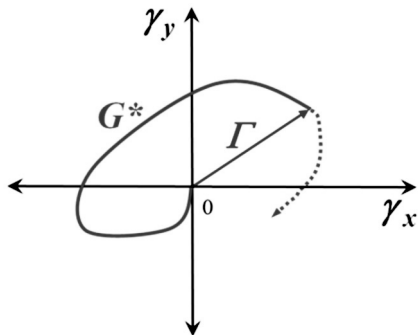


図-20 累積せん断ひずみ G*と合せん断ひずみ Γ¹³⁾

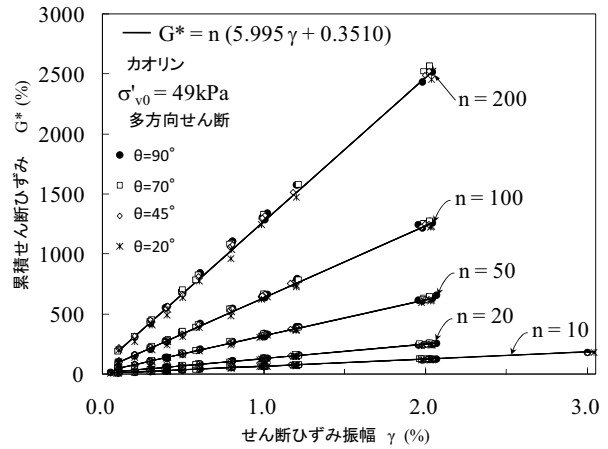


図-22 累積せん断ひずみ G*とせん断ひずみ振幅の関係¹⁴⁾ (多方向繰返しせん断)

のがそれぞれ図-21、図-22 であって、特に図-22 においては位相差の異なる結果を示しているが、いずれの場合も実測結果は同一直線上にあり、位相差の影響は見られない。また、累積せん断ひずみ G*とせん断ひずみ振幅 γ には繰返し回数毎に線形関係がみられ、一方向繰返しせん断及び多方向繰返しせん断に対して次式が得られる。

一方向繰返しせん断に対して

$$G^* = n(3.95\gamma + 0.052) \quad (8)$$

多方向繰返しせん断に対して

$$G^* = n(6.00\gamma + 0.351) \quad (9)$$

4.2 累積せん断ひずみによる過剰間隙水圧の推定

図-23 は繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係を n=50 について示したものである。同一の累積せん断ひずみにおいて生じる過剰間隙水圧は、多方向繰返しせん断の場合が一方向繰返しせん断に比べて大きく、位相差の増加とともに大きくなっている。図中には、繰返し回数が 50 回後の過剰間隙水圧に対して

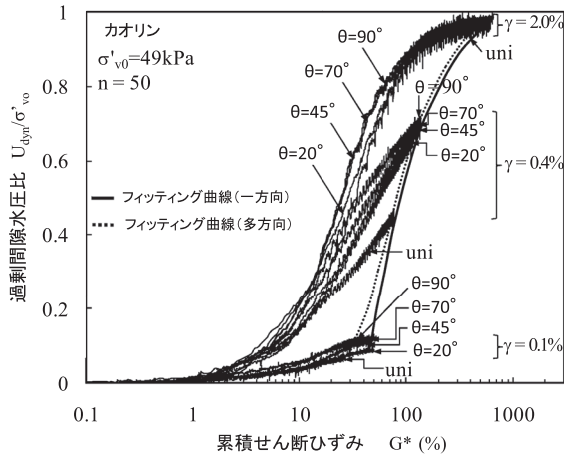


図-23 累積せん断ひずみと繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧比¹⁴⁾

フィッティング線を示している。点線は一方向繰返しせん断、実線は多方向繰返しせん断についての結果である。特に $\gamma=0.4\%$ においては両者はほぼ一致しており、このことは累積せん断ひずみを用いることによって、せん断の方向性の影響を低減できることを示している。

粒状土が多方向繰返しせん断を受けた場合に生じる有効応力変化と累積せん断ひずみの関係として次式が提案されている⁴⁾。

$$\left| \frac{\Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \right| = \frac{G^*}{\alpha + \beta G^*} \quad (10)$$

式(10)において、 $U_{dyn} = |\Delta\sigma'_v|$ とすると、

$$\frac{U_{dyn}}{\sigma'_{v0}} = \frac{G^*}{\alpha + \beta G^*} \quad (11)$$

が得られる。

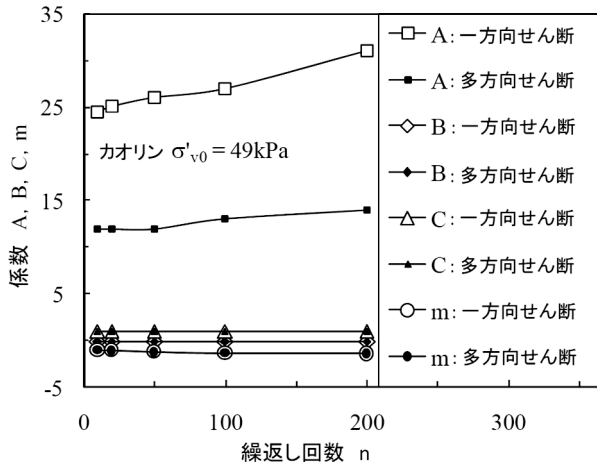


図-24 式(11)で用いられる係数と繰返し回数¹⁴⁾

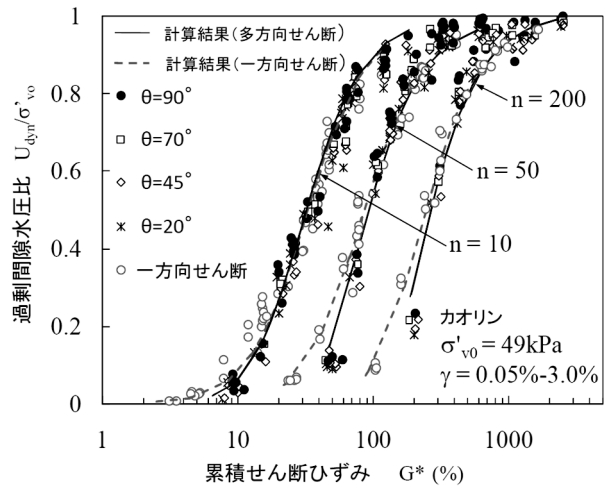


図-25 繰返し回数が異なる場合の累積せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係¹⁴⁾

式(10)、(11)において、 α, β は式(2)、(3)で与えられ、その場合、係数 A, B, C, m は改めてカーブフィッティングによって得られる。係数 A, B, C, m と繰返し回数の関係を示したものが図-24である。式(11)および図-24によって、任意のせん断ひずみ振幅、繰返し回数に対して、累積せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係を示すことができる。図-25は、一方向及び多方向繰返しせん断に対する過剰間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係を $n=10, 50, 200$ について示している。図-25と図-10、図-11を比較すると、図-25では一方向繰返しせん断と多方向繰返しせん断の曲線はほぼ一致しており、いずれの繰返し回数においても繰返しせん断の方向性の影響は減少することがわかる。

4.3 累積せん断ひずみと繰返しせん断後の沈下の関係

式(11)より、応力減少比 SRR は累積せん断ひずみ G^* を用いると次式で与えられる。

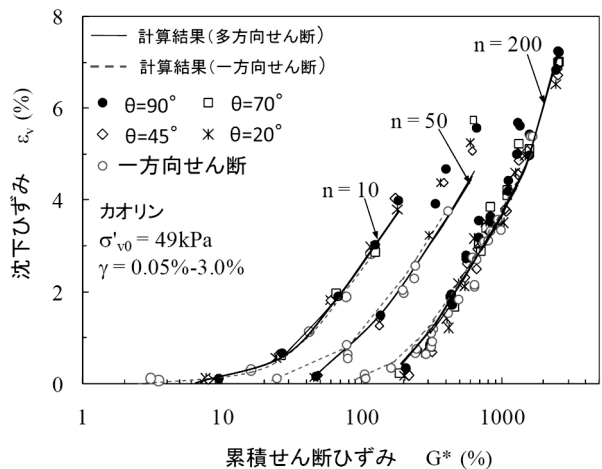


図-26 一方向繰返しせん断後の沈下ひずみと累積せん断ひずみの関係¹⁴⁾

$$SRR = \frac{1}{1 - \frac{u_{dyn}}{\sigma'_{v0}}} = \frac{\alpha + \beta G^*}{\alpha + (\beta - 1)G^*} \quad (12)$$

式(12)を式(4)に代入すると繰返しせん断後の沈下ひずみ ε_v は累積せん断ひずみ G^* を用いて表すことができる。

図-26 は沈下ひずみ ε_v と累積せん断ひずみ G^* との関係で示したものであって、一方向及び多方向繰返しせん断の結果を示している。図中の記号は実測値であり、破線は一方向、実線は多方向繰返しせん断に対して得られた計算結果である。図-18、図-19と図-26を比べると、図-26では一方向繰返しせん断と多方向繰返しせん断の相違の影響もみられず、累積せん断ひずみを用いることによって、繰返しせん断の方向性の影響を低減できることがわかる。また、一方向及び多方向繰返しせん断のいずれについても、計算結果は実測値とほぼ一致しており、多方向繰返しせん断に対しても式(4)が適用できる。

4.4 累積せん断ひずみの実地震波への適用

地震時に生じる繰返しせん断ひずみを供試体に与え、過剰間隙水圧と排水に伴う沈下を計測した。そして、先述の手法で累積せん断ひずみを求めて、過剰間隙水圧と沈下を推定し、その結果を実測値と比較した。

ここでは、図-1に示した兵庫県南部地震において計測されたNS方向、EW方向の加速度時刻歴をもとに、応答計算によってせん断ひずみの時刻歴を求め、このせん断ひずみ波に所定の倍率をかけて供試体底面の直角2方向から供試体に与えた。この場合、供試体の高さは一定であることから、供試体は入力波に対応した単純せん断変形をすることとなる。

図-27は計測されたせん断ひずみ時刻歴である。同図は $\gamma_{maxNS}=0.57\%$ 、 $\gamma_{maxEW}=0.34\%$ とした結果であるが、他に $\gamma_{maxNS}=1.15\%$ 及び $\gamma_{maxEW}=0.68\%$ 、 $\gamma_{maxNS}=2.30\%$ 及び $\gamma_{maxEW}=1.51\%$ とした実験も行った。

図-28は過剰間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係を示したものである。せん断ひずみ振幅のレベルが増加すると

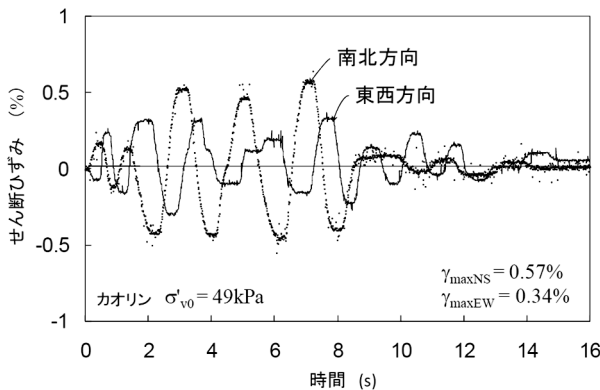


図-27 多軸単純せん断試験装置で供試体に負荷したせん断ひずみ時刻歴¹⁴⁾

累積せん断ひずみも大きくなり、また過剰間隙水圧の大きさも大きくなっている。

ここでは、累積せん断ひずみを実地震波に対して適用する方法について検討した。まず、地震時の不規則なせん断ひずみ-時間の関係を等価な一樣振幅(γ_{dyn})かつ等価な繰返し回数(N_{cy})に変換するにあたり、等価な繰返し回数への変換についてはMalhotra¹⁵⁾によって提案された手法を用いた。その結果、等価な繰返し回数としてEW方向については4.7回、NS方向については4.2回が得られた¹⁴⁾。

一方、等価な繰返しせん断ひずみに関しては、松田等が提案した次式¹⁶⁾を用いた。

$$\gamma_{dyn} = F(\gamma_{max})^G \quad (13)$$

ここに、 γ_{max} は不規則なせん断ひずみ時刻歴におけるせん断ひずみの最大値、 F 、 G は、

$$F = N_{cy}/(H + IN_{cy}) \quad (14)$$

$$G = 1 - \log F / \log 0.05 \quad (15)$$

で与えられる。ここに、 H 、 I は実験定数で、本研究で用いた試料についてはそれぞれ $H = 12.25$ 、 $I = 0.21$ が得られた¹⁴⁾。

式(13)は一方向の繰返しせん断に対して見出されたものであるが、多方向せん断に対する適用に関しては報告がみられないことから、ここではEW方向、NS方向それぞれについて等価な繰返しせん断ひずみ振幅を求めた。

このようにして求めた等価な繰返し回数及び等価な繰返しせん断ひずみ振幅を用いて各試験ごとに累積せん断ひずみを求め、過剰間隙水圧の推定を行った。そして、過剰間隙水圧の推定値の妥当性を検証するために実測値との比較を行った。図-28、図-29は、EW方向、NS方向の最大せん断ひずみをもとに等価なせん断ひずみ振幅 γ_{dyn} を

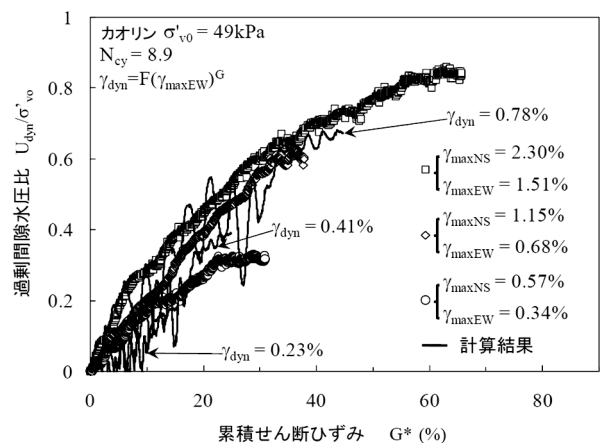


図-28 不規則な繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧の実測値と計算値の比較¹⁴⁾

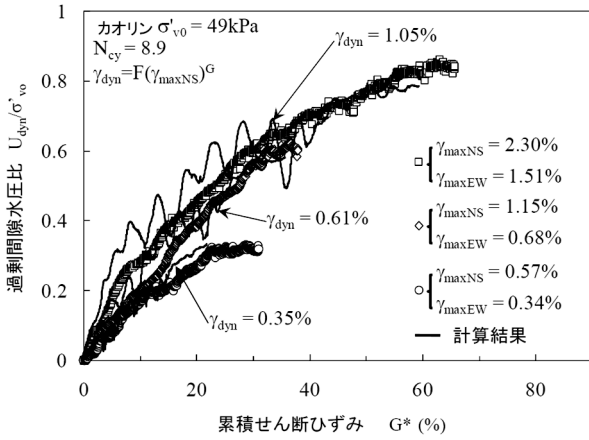


図-29 不規則な繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧の実測値と計算値の比較¹⁴⁾

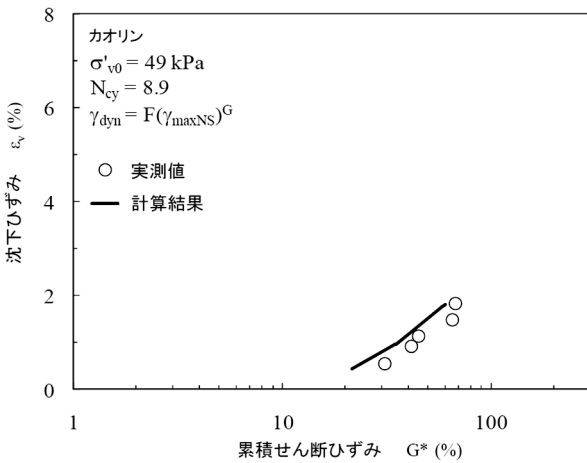


図-30 不規則な繰返しせん断によって生じる沈下ひずみと累積せん断ひずみの関係¹⁴⁾

求め、過剰間隙水圧と累積せん断ひずみとの関係で整理したものである。図中のプロットは実測値であり、実線は式(11)に加えて合せん断ひずみ Γ (図-19) の影響も考慮した次式によって得た結果である。

$$\frac{U_{dyn}}{\sigma'_{v0}} = \frac{G^*}{\alpha + \beta G^*} - D\Gamma^\eta \quad (16)$$

ここに、 D 、 η は実験定数である。式(16)を用いることによって、繰返しせん断中の各サイクルにおいて見られる過剰間隙水圧の波打ち現象を表現することも可能である¹⁴⁾。

図-28、図-29 を比較すると、NS 方向の最大ひずみ振幅を用いた場合の方がより実測値に近いことがわかる。

そこで、NS 方向の最大ひずみ振幅を用いて沈下ひずみを推定し実測値と比較したものが図-30 である。実測値と計算値はほぼ一致しており、提案した手法は、実地震に対しても適用できる可能性があることを示している。

5. まとめ

多方向に繰返し単純せん断が可能な多軸単純せん断試験装置を用いて、非排水条件下で正規圧密粘土に対して一様振幅及び不規則な繰返しせん断波を直角 2 方向から独立して与え、繰返しせん断の方向、せん断ひずみ振幅、繰返し回数等が過剰間隙水圧の上昇及び繰返しせん断後の沈下に及ぼす影響を調べた。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) せん断ひずみ振幅、繰返し回数が同じ条件下では、多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧、繰返しせん断後の沈下は一方繰返しせん断の場合に比較して大きい。
- (2) 一方繰返しせん断に対して見出された過剰間隙水圧を予測する手法は、繰返し回数に制限はあるものの多方向繰返しせん断に対しても適用可能である。
- (3) 圧密圧力 49kPa、98kPa で圧密した供試体においては、多方向繰返しせん断によって生じる過剰間隙水圧比、繰返しせん断後の沈下ひずみに及ぼす圧密圧力の影響は小さい。
- (4) 累積せん断ひずみ G^* を用いることによって多方向繰返しせん断を受けた供試体の過剰間隙水圧および繰返しせん断後の沈下ひずみを予測する手法を見出すとともに、実地震時の不規則な繰返しせん断ひずみに対しても適用可能であることを示した。

謝辞

本報告は、飽和粘土に多方向繰返しせん断が作用した場合の過剰間隙水圧の上昇特性、繰返しせん断後の沈下特性、それらの予測手法について現在までに得られた知見をもとに再整理したものである。実験データの取得、整理、まとめにあたっては研究室の学生の多大な協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 関西地震観測研究協議会, 1995.
- 2) Nagase H. and Ishihara K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.65-76, 1988.
- 3) Pyke, R., Seed, H. B. and Chan, C. K.: Settlement of sands under multidirectional shaking, J. Geotechnical Eng., ASCE, Vol. 101, No. GT4, pp. 379-398, 1975.
- 4) Matsuda H., Andre Primantyo Hendrawan, Ishikura R. and Kawahara S.: Effective stress change and post-earthquake settlement properties of granular materials subjected to multi-directional cyclic simple shear, Soils and Foundations, Vol.51, No.5, pp.873-884, 2011.
- 5) Ohara S. and Matsuda H.: Study on the settlement of

- saturated clay layer induced by cyclic shear, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.3, pp.103-113, 1988.
- 6) 松田博, 大原資生: 繰返しせん断に起因した粘土層の沈下に及ぼす周期の影響, *土木学会論文集*, No.418/III-13, pp.173-179, 1990.
 - 7) Matsuda H. and Ohara S.: Geotechnical aspects of earthquake-induced settlement of clay layer, *International Journal of Sea-Floor Science and Engineering, Marine Geotechnology*, Vol.9, No.3, pp.179-206, 1990.
 - 8) 松田博, 安原一哉: 非排水繰返しせん断を受けた飽和粘土の圧密, *土質工学会誌*, Vol.39, No.12, pp.71-77, 1991.
 - 9) 松田博: 粘土層の地震後沈下過程の推定, *土木学会論文集*, No.568/III-39, pp.41-48, 1997.
 - 10) Matsuda, H., Tran Thanh Nhan, and Ishikura R.: Excess pore water pressure accumulation and recompression of saturated soft clay subjected to uni-directional and multi-directional cyclic simple shears, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol.7, No.4, pp.1250027-1-1250027-22, 2013.
 - 11) 安原一哉, 松田博: 粘性土の動的性質, 粘性土の動的性質(その 2), *地盤工学会誌, 土と基礎*, Vol.46, No.12, PP.59-64, 1998.
 - 12) 松田博, 柳原英希: 繰返しせん断によって生じる飽和粘土の有効応力減少と再圧密沈下, *土木学会論文集*, No.659/III-52, pp.63-75, 2000.
 - 13) 福武毅芳, 松岡元: 任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈, *土木学会論文集*, 第 412号/III-12, 143-151, 1989.
 - 14) Matsuda H., Tran Thanh Nhan, and Ishikura R.: Prediction of excess pore water pressure and post-cyclic settlement on soft clay induced by uni-directional and multi-directional cyclic shears as a function of strain path parameters, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49, pp.75-88, 2013.
 - 15) Malhotra, P. K.: Cyclic-demand spectrum, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp.1441-1457, 2002.
 - 16) Matsuda, H. and Hoshiyama, E.: Uniform strain series equivalent to seismic strain, *Proc. of 10th World Conf. on Earthquake Engineering*, Rotterdam, pp.1329-1334, 1992.

(2013年11月17日 受付)

