

細粒分を含んだ砂地盤における Steady State に関する実験的研究

Experimental Study on Steady State of Sandy Ground with Fine Contents

仁科晴貴	Haruki NISHINA	(広島大学大学院工学研究科)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究科)
植村一瑛	Kazuaki UEMURA	(広島大学大学院工学研究科)
三上武子	Takeko MIKAMI	(応用地質(株)コアラボ試験センター)
木寺寛	Hiroshi KIDERA	(大分県)

緩く堆積した砂質地盤では地震により液状化が起り、それに伴い流動破壊が発生する。流動破壊では、せん断応力が一定値を保ちながらひずみが累積する現象(定常状態: Steady State)が生じている可能性がある。本研究では、地盤が Steady State に至るまでの応力経路、せん断応力 τ - せん断ひずみ γ の関係が、単調載荷直前の過剰間隙水圧比の値の違いによってどのように変化するかを明らかにすることを目的とし、中空ねじりせん断試験機を用いた要素試験を行った。その結果、繰返し載荷による過剰間隙水圧上昇の程度が大きくなるにつれて、その後の単調載荷時でのせん断応力 τ のピーク値は減少していくことがわかった。

キーワード: 定常状態, 細粒分, 流動破壊

(IGC: A-10, D-6)

1. はじめに

緩く堆積した砂質地盤では地震により液状化が起り、それに伴い流動破壊が発生する。液状化に伴う流動とは、液状化の発生に伴い、非常に大きな変位が発生する現象である。変位のオーダーは m 単位で、液状化層の平均的なせん断ひずみが数十%から 100%を超える事例も報告されている¹⁾。このような大きな変位が、地表面勾配が 1~2% 以下でも生じることが流動破壊の特徴である。流動破壊では、せん断応力が一定値を取りながらひずみが累積する現象(定常状態: Steady State)が生じている可能性がある。

本研究では、液状化した地盤が Steady State に至るまでの応力経路、せん断応力 τ - せん断ひずみ γ の関係が、単調載荷直前の過剰間隙水圧比の値の違いによってどのように変化するかを明らかにすることを目的とし、中空ねじりせん断試験機を用いた要素試験を行った。この結果より、河川堤防などの有効応力解析における解析精度の向上を目指す。

2. 地盤が液状化後に Steady State に至る過程

2.1 試験概要

試験には 6 号硅砂を用い、外径 7cm・内径 3cm・高さ 10cm の供試体を、相対密度 30・40・50・60% になるように水中落下法により作製した。また、細粒分含有率を変え

たパターンとしては、6 号硅砂に非塑性細粒分として碎石粉、塑性細粒分として木節粘土を混ぜた供試体を作製した。なお、塑性細粒分を入れた場合においても、混合試料は非塑性である。飽和させた後、拘束圧 30・50・100・150kPa で等方圧密を行った。このとき、背圧は 100kPa に固定した。一定のひずみで繰返しせん断を与え、過剰間隙水圧を上昇させ、液状化させた後、供試体に乱れを与えるためにせん断ひずみ(最大ひずみ履歴 γ_{max})を一波だけ載荷し、ひずみ速度一定(1.0%/min)で静的単調載荷を行った。図-1 は載荷パターンの模式図を示す。なお、最大ひずみ履歴 γ_{max} は、繰返しせん断時のひずみより十分に大きな値として、全試験において 5.5% に固定した。また、表-1、表-2、図-2、図-3 に用いた試料の物性値、粒径加積曲線を示す。この粒径加積曲線は試料をふるい分析した後、粒径 2mm 未満の土粒子に対して沈降分析を行った結果を合わせて作成した。

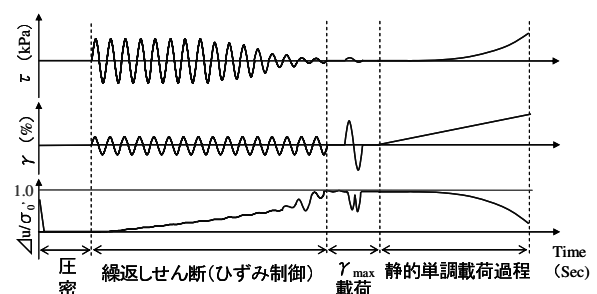


図-1 載荷パターン

表-1 砕石粉を含んだ試料の物理特性

	単位	6号砕砂	6号砕砂 $F_c=5\%$	6号砕砂 $F_c=10\%$	6号砕砂 $F_c=15\%$	6号砕砂 $F_c=20\%$	6号砕砂 $F_c=25\%$	6号砕砂 $F_c=30\%$
比重	-	2.646	2.653	2.663	2.658	2.652	2.652	2.661
最大密度	g/cm^3	1.617	1.681	1.774	1.795	1.867	1.880	1.888
最小密度	g/cm^3	1.336	1.341	1.336	1.317	1.308	1.290	1.252
最大間隙比	-	0.981	0.978	0.993	1.018	1.028	1.056	1.125
最小間隙比	-	0.636	0.579	0.501	0.481	0.420	0.411	0.409
曲率係数	-	0.973	0.841	0.976	0.915	3.144	5.769	3.712
均等係数	-	1.876	2.154	2.056	3.659	9.556	17.333	23.300

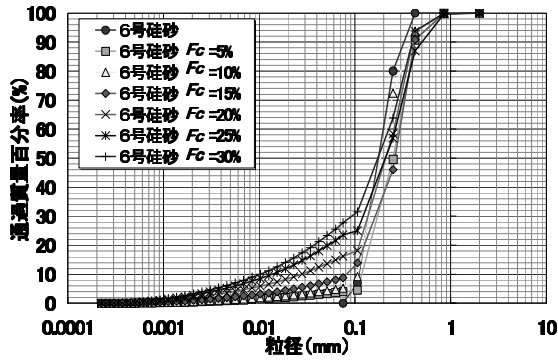


図-2 砕石粉を含んだ試料の粒径加積曲線

表-2 木節粘土を含んだ試料の物理特性

	単位	6号砕砂	6号砕砂 $F_c=5\%$	6号砕砂 $F_c=10\%$	6号砕砂 $F_c=20\%$
比重	-	2.646	2.646	2.647	2.647
最大密度	g/cm^3	1.617	1.689	1.713	1.750
最小密度	g/cm^3	1.336	1.343	1.338	1.332
最大間隙比	-	0.981	0.970	0.978	0.988
最小間隙比	-	0.636	0.566	0.545	0.513
曲率係数	-	0.973	26.667	12.500	1.125
均等係数	-	1.876	60.000	18.000	2.000

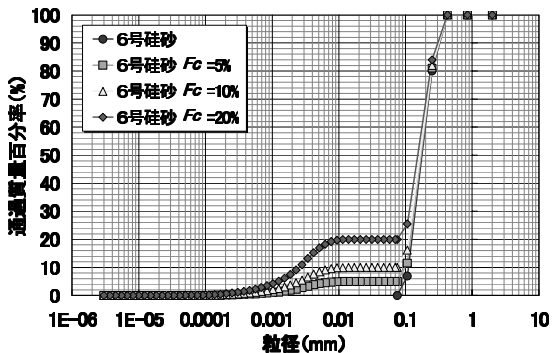


図-3 木節粘土を含んだ試料の粒径加積曲線

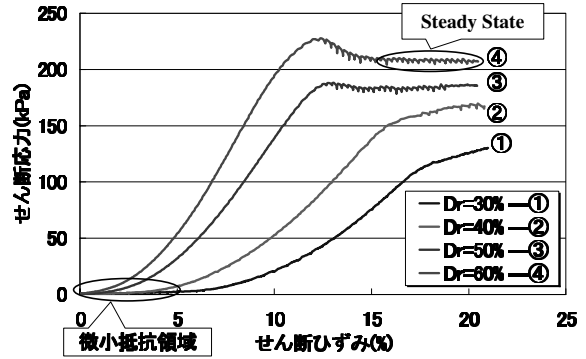


図-4 せん断応力とせん断ひずみの関係
(相対密度の影響)

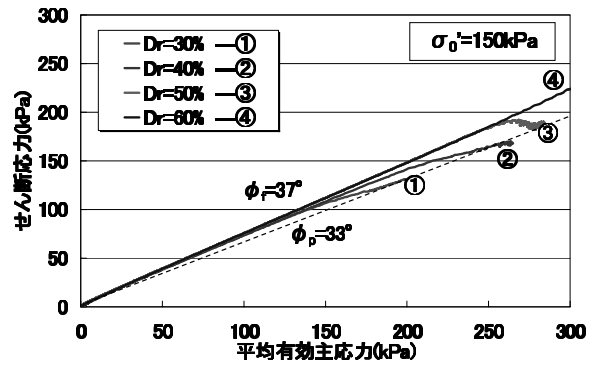


図-5 ストレスパス
(相対密度の影響)

2.2 試験結果および考察

1) 相対密度の影響

図-4 は液状化後に所定のせん断ひずみを一波だけ与えた後に静的単調載荷した場合のせん断応力とせん断ひずみの関係の一例(最大ひずみ履歴 $\gamma_{max} 5.5\%$, 初期有効拘束圧 $150kPa$, 細粒分含有率 0% で相対密度を変化させたケース)を示す。この図より相対密度が小さい方が強度の回復が遅くなっていることが分かる。これは相対密度が小さい方が正のダイレイタンスー特性が発揮されにくいからである。また、この図より強度回復過程には実地盤において大変形が生じる剛性の小さい部分である微小抵抗領域 γ_{5kPa} と、せん断ひずみが大きくなってもせん断応力が一定となる Steady State という特徴的な2つの状態があることが確認できた。

図-5 には、上記の試験のストレスパスを示す。液状化状態の原点から、破壊線に沿って応力が回復し、変相線上の点に収束している。この点が Steady State であると思われる。変相角は 33 度程度となった。

図-6 に Steady State 時のせん断応力と圧密後の相対密度の関係を示す。この図より、相対密度が大きくなるにつれ、

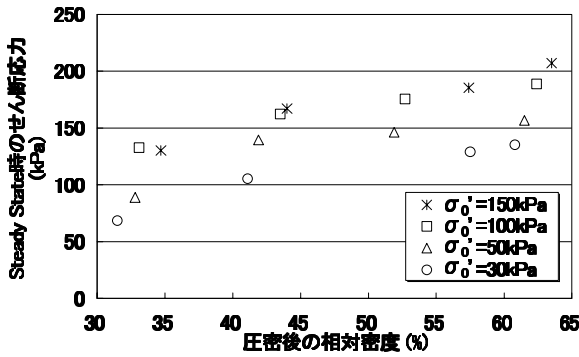


図-6 Steady State と相対密度の関係

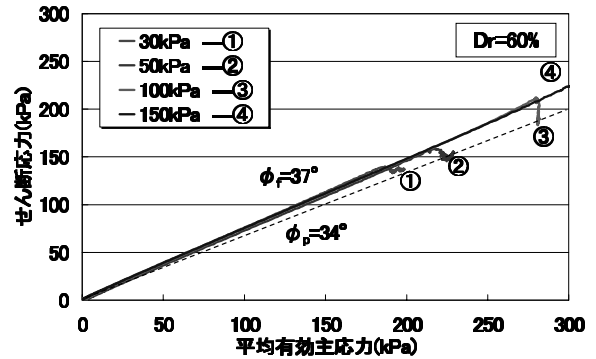


図-8 ストレスパス
(初期有効拘束圧の影響)

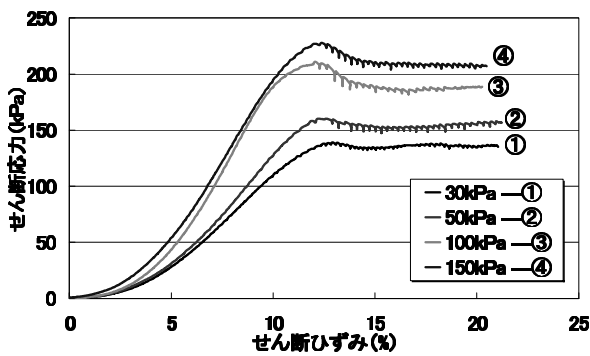


図-7 せん断応力とせん断ひずみの関係
(初期有効拘束圧の影響)

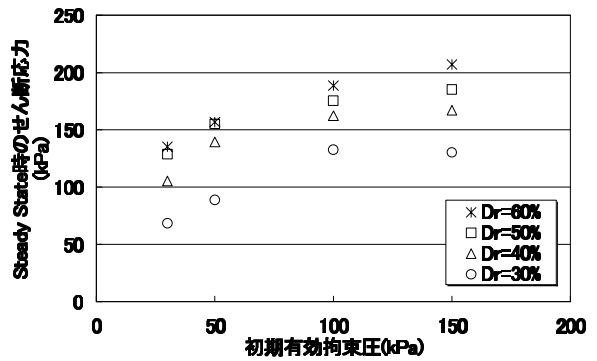


図-9 Steady State と初期有効拘束圧の関係

Steady State 時のせん断応力が大きくなっていることがわかる。なお、図-6 では後述する各初期有効拘束圧の違いも併せて示している。

2) 初期有効拘束圧の影響

図-7 に、初期有効拘束圧を変化させたケースの一例(最大ひずみ履歴 $\gamma_{max} 5.5\%$ 、相対密度 60%、細粒分含有率 0%)の結果を示す。この図より初期有効拘束圧が小さい方が強度の回復が遅くなっていることが分かる。また相対密度の影響に比べ、初期有効拘束圧の影響は少ないことが分かる。さらに応力-ひずみ曲線の形に着目しても、相対密度を変化させたケースでは形そのものが変化しているのに対し、初期有効拘束圧を変化させたケースではそのような変化は見られなかった。

図-8 にストレスパスを示す。相対密度を変化させたケースと同様に、液状化によって平均有効主応力が 0 になった状態から、破壊線に沿って応力が回復し、変相線上に収束している。変相角は 34 度程度となった。

図-9 に Steady State 時のせん断応力と初期有効拘束圧の関係を示す。この図より、初期有効拘束圧が大きくなるに

つれ、Steady State 時のせん断応力が大きくなっていることがわかる。Steady State 時のせん断応力は初期有効拘束圧に依存しないと言われている¹⁾が、本実験では依存するという結果になった。これは、既往の研究に比べて初期有効拘束圧の値が低いことが原因である可能性が考えられる。なお、図-9 における相対密度は図-4 と異なり、圧密前の値を示す。

3) 非塑性細粒分の影響

図-10 に非塑性細粒分含有率を変化させたケース(最大ひずみ履歴 $\gamma_{max} 5.5\%$ 、相対密度 50%、初期有効拘束圧 100kPa)の結果を示す。相対密度は細粒分含有率が大きい場合は指標として問題があるが、ここではその点は無視して各相対密度での細粒分含有率に対して、最大・最小密度試験を行った結果を用いて設定した。この図より、非塑性細粒分含有率が大きいほど強度の回復が遅くなることが分かる。非塑性細粒分含有率を大きくすると砂粒子同士の接触を絶ってしまう。そのため擬似的に相対密度が小さくなったような状態になり、全体的に強度の回復が遅くなったと考えられる。

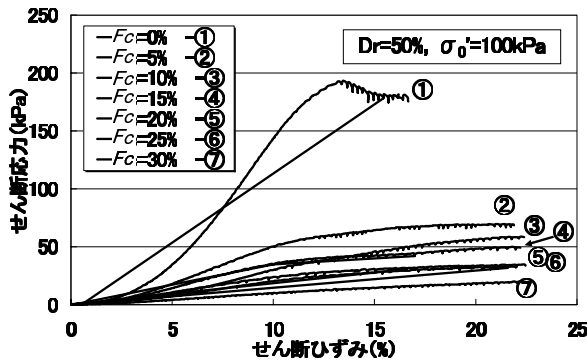


図-10 せん断応力とせん断ひずみの関係
(非塑性細粒分の影響)

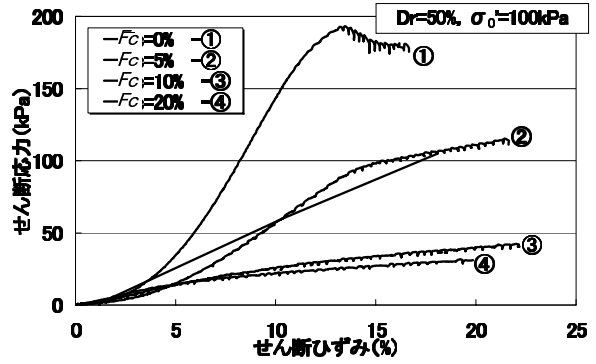


図-12 せん断応力とせん断ひずみの関係
(細粒分の影響)

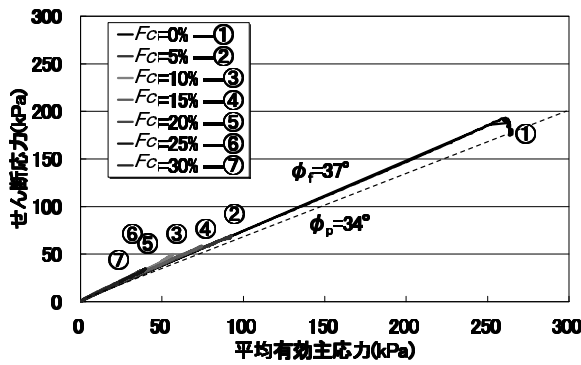


図-11 ストレスパス
(非塑性細粒分の影響)

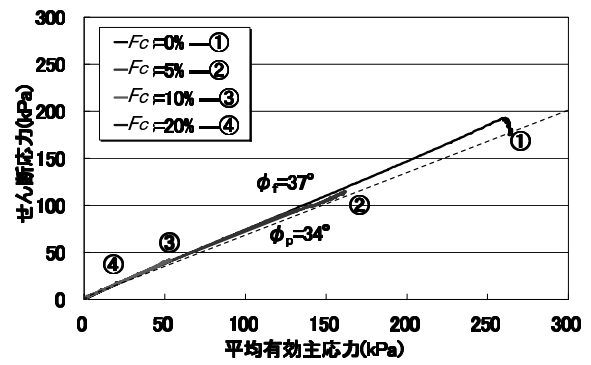


図-13 ストレスパス
(細粒分の影響)

図-11にストレスパスを示す。これより、液状化によって平均有効主応力が0になった状態から、破壊線に沿って応力が回復していくが、細粒分含有率が多くなるにつれて、回復量が減少していることがわかる。

また、変相角は34度程度になっているにもかかわらず、細粒分を含んだ供試体のストレスパスは、変相線上に収束していない。これより、非塑性細粒分を含んでいると、Steady Stateに達するまでのひずみ量が極めて大きい可能性がうかがえる。

4) 粘着力の有る細粒分の影響

図-12に粘着力の有る細粒分含有率を変化させたケース(最大ひずみ履歴 $\gamma_{max}=5.5\%$ 、相対密度50%、初期有効拘束圧100kPa)の結果を示す。ここでの相対密度も先ほどと同様、各細粒分含有率に対して、密度試験、最大・最小密度試験を行った結果を用いて設定したものである。粘着力の有る細粒分含有率を大きくすると強度の回復は遅くなるが、非塑性細粒分のケースとは異なり、細粒分含有率が増加するにつれて、急激に回復が遅れるのではなく徐々に遅くなっているのが分かる。

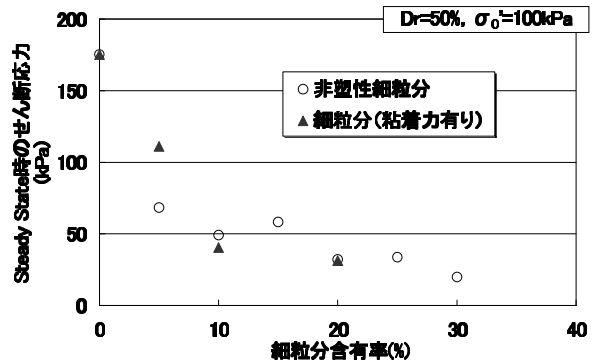


図-14 Steady State と細粒分含有率の関係

図-13にストレスパスを示す。非塑性の細粒分と同様に、液状化状態の原点から、破壊線に沿って応力が回復していくが、細粒分含有率が多くなるにつれて、回復量が減少していることがわかる。

図-14に、Steady State時のせん断応力と細粒分含有率の関係を示す。この図より、非塑性細粒分・粘着力のある細粒分ともに、細粒分含有率が大きくなるにつれ、Steady State時のせん断応力が小さくなっていることがわかる。ここで実験ではせん断応力の値が一定値に収束していない例もあるが、便宜上、Steady State時のせん断応力の値

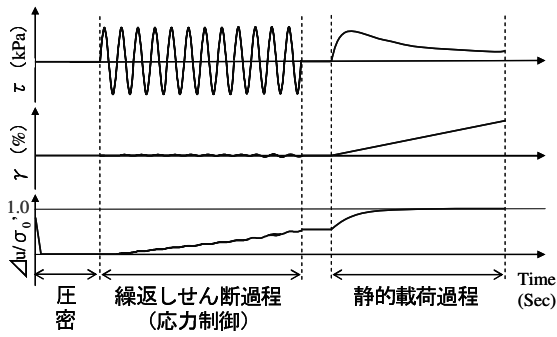


図-15 載荷パターン

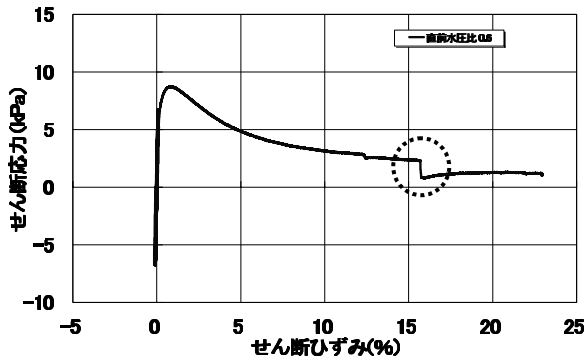


図-16 せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係 (繰返しせん断過程を含む)

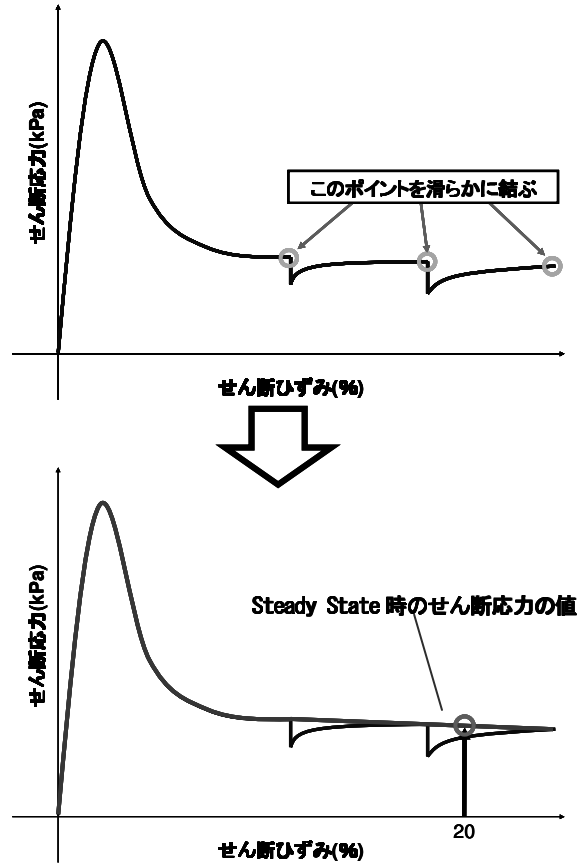


図-17 τ - γ 関係の補正
※せん断応力の低下が生じる直前の地点を、滑らかに結ぶ。

は、せん断ひずみ 20%時のせん断応力の値を用いることとする。よって、細粒分の種類の違いは、Steady State に対応するせん断応力の大きさにはあまり影響を及ぼさないことがわかる。

3. 液状化に至る途中の地盤が Steady State に至る過程

3.1 試験概要

試料には緩く堆積した砂質地盤を再現するために、豊浦砂と細粒分として非塑性細粒分である DL クレーを混合したものを用いた (細粒分含有率 $F_c=40\%$, 相対密度 $D_r=30\%$)。供試体寸法は外径 7cm, 内径 3cm, 高さ 10cm である。本実験では、細粒分を多く含んだ試料を用いるため、均質な供試体の作製が可能な静的締固め法を用いて供試体の作製を行った。そして、飽和化させた後、拘束圧 100kPa で等方圧密を行った。

載荷パターンとして、繰返しせん断載荷 (繰返しせん断応力比 $\tau/\sigma'_0=0.07$ に固定) によって液状化に至る過程を模擬させた後、せん断ひずみ速度 1.0%/min で静的単調載荷

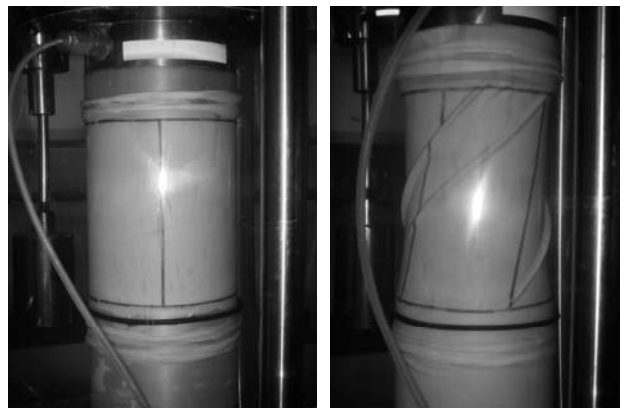


写真-1 載荷前の供試体 写真-2 載荷後の供試体

を行うことによって、液状化発生地盤が流動に至るプロセスを検討した。特に本研究では、繰返し載荷を終了する過剰間隙水圧比の値を変化させることにより、その後の単調載荷時の応力経路、せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係が単調載荷直前の過剰間隙水圧比に応じてどのように変化するかを検討した。図-15に載荷パターンの模式図を示す。

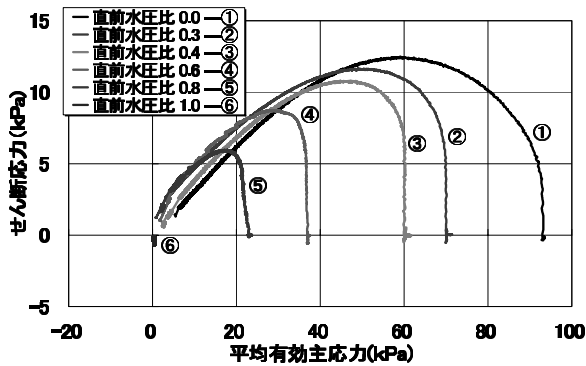


図-18 試験結果：応力経路

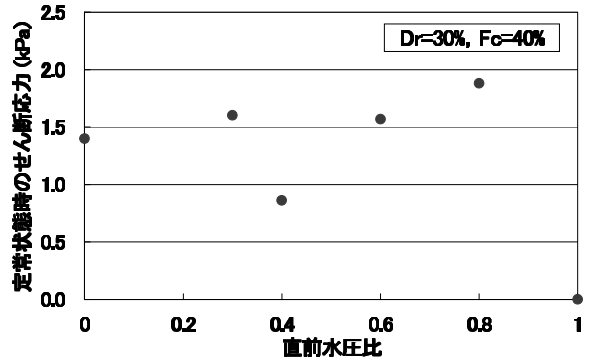


図-20 定常状態と直前水圧比の関係

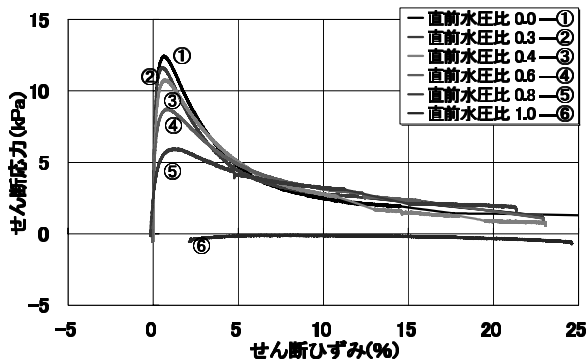


図-19 試験結果：せん断応力-せん断ひずみ関係

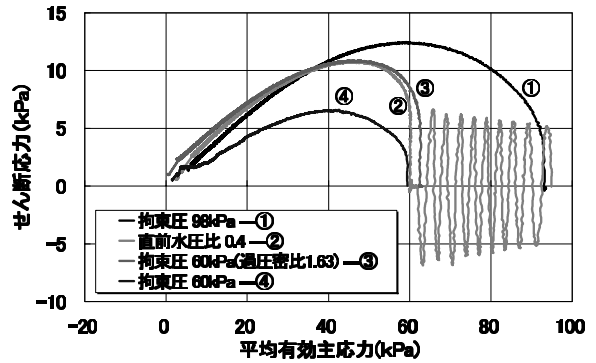


図-21 試験結果：応力経路

3.2 試験結果および考察

1) グラフの補正法

図-16 に相対密度 $Dr=30\%$ ，細粒分含有率 $Fc=40\%$ ，繰返しせん断応力比 $\tau/\sigma'_0=0.07$ ，直前水圧比（単調荷重直前の過剰間隙水圧比） $\Delta u/\sigma'_0=0.6$ のケースにおけるせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係図を示す．単調荷重時には，せん断ひずみ γ の増加に伴い，せん断応力 τ が増加してゆくが，ピークを迎えた後に緩やかに減少し，ほぼ一定値に収束している．この状態が Steady State（流動が生じる定常状態）である．図-16 を見ると Steady State 状態の途中でせん断応力が急激に減少している部分がある（破線で囲んだ部分）．これは，供試体にせん断面が発生したことによるものであると考えられる．

写真-1, 2 に荷重前後の供試体の写真を示す．写真-2 のように，単調荷重終了後の供試体は，大きなひずみを生じている．このメンブレンのねじれに沿って供試体に斜めにせん断面が生じていると考えられる．この現象はすべてのケースで確認された．これにより，Steady State 時のせん断応力の値が不安定になってしまうので，せん断応力の急激な減少が発生しないように，せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係のグラフを補正し，そのグラフからせん断ひずみ

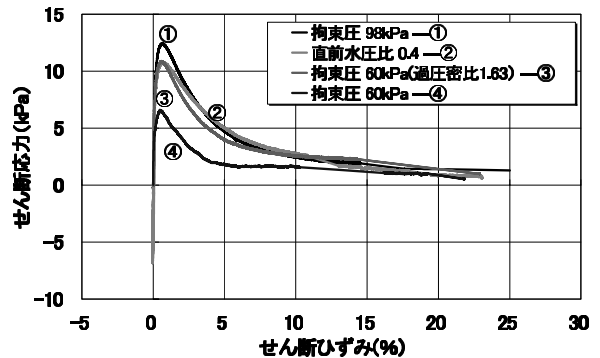


図-22 試験結果：応力経路

$\gamma=20\%$ 時のせん断応力の値を読み取って，Steady State 時のせん断応力の値と定義した．図-17 に補正法を示す．

2) 直前水圧比の影響

図-18, 19 に試験より得られた応力経路，せん断応力 τ -せん断ひずみ γ の関係を示す．この図は単調荷重部分のみの関係を抜き出したものである．また，せん断面の発生によるせん断応力の急激な減少はすべて補正してある．

応力経路では，繰返しせん断により，過剰間隙水圧 Δu が上昇し，それに伴い単調荷重開始時の平均有効主応力 p'

が減少していく。さらに、直前水圧比（単調載荷直前の過剰間隙水圧比）が高くなるにつれて、単調載荷時のせん断応力 τ のピーク値、その時点での平均有効主応力 p' の値も、ともに減少していくことがわかる。せん断応力 τ - せん断ひずみ γ 関係では、せん断ひずみ γ の増加に伴い、せん断応力 τ が増加してゆくが、ピークを迎えた後は緩やかに減少し、ほぼ一定値に収束している。直前水圧比（単調載荷直前の過剰間隙水圧比）が高くなるにつれてせん断応力 τ のピーク値は減少しているが、せん断応力 τ がピークを迎えたときのせん断ひずみ γ の値は、すべてのケースでほぼ等しいことがわかる。また、どのケースでも Steady State 状態におけるせん断応力の値は、ほぼ同じ値が得られた。これよりこの値は、単調載荷直前の過剰間隙水圧比の値にはほとんど依存しないことがわかった。

図-20に定常状態でのせん断応力と直前水圧比の関係を示す。この図より、定常状態時のせん断応力は直前水圧比に関係なくほぼ一定であることがわかる。

3) 直前水圧比と初期有効拘束圧・過圧密との比較

直前水圧比を変化させて行った実験では、繰返しせん断載荷により、拘束圧が下がった状態から単調載荷を行う形になっている。例えば、相対密度 $Dr=30\%$ 、細粒分含有率 $Fc=40\%$ 、繰返しせん断応力比 $\tau/\sigma'_0=0.07$ 、直前水圧比 $\Delta u/\sigma'_0=0.4$ のケースでは、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ が 0.4 になるまで繰返し載荷を行うので、平均有効主応力 p' が初期状態の 100 kPa から 60kPa 辺りまで減少した状態から単調載荷を行っている。そこで、初期状態の有効拘束圧（平均有効主応力 p' ）を 60kPa になるように圧密した後、単調載荷を行う場合と、さらには、過圧密状態（有効拘束圧 100 kPa で圧密後、有効拘束圧を 60kPa に下げて圧密）の供試体に単調載荷を行う場合との比較を行った。結果を図-21, 22 に示す。初期状態の有効拘束圧 60kPa の供試体では、単調載荷時の挙動を見ると、最終的な Steady State の値は同じでも、至る過程は他の繰返し載荷の条件等によるものとは異なっていることがわかる。一方、繰返し載荷によって地盤が軟化し、単調載荷時のせん断応力 τ のピーク値は減少するが、はじめから有効拘束圧が低い場合ほどピーク強度は低下しないことがわかる。ここで、過圧密状態の供試体に着目すると、単調載荷時の挙動は直前水圧比 0.4 のケースとほぼ等しくなっていることがわかる。これより、繰返し載荷によって軟化した状態の地盤は、過圧密状態の地盤に近い挙動を示すことがわかる。つまり、Steady State に至る途中のせん断応力 τ のピーク値は、拘束圧と圧密降伏応力 P_c に依存する可能性があると考えられる。

4. Steady State 状態におけるせん断応力の値 (Sus) の既往算定式との比較

Steady State 状態におけるせん断応力の値は Sus 値と呼ばれていて、既に提案式がある²⁾。例えば、間隙比 e および細粒分含有率 F_c から、次式²⁾により、Steady State 状態におけるせん断応力の値 (Sus) を評価する。

$$\ln\left(\frac{p_{su}}{p_a}\right) = -\left(\frac{e - e_a}{1 + e_a}\right) / \varepsilon_{mus}, \quad (1)$$

$$p_{su} = S_{us} / \sin \phi_f \quad (2)$$

但し、

$$p_a = 20 \text{ kPa} \quad (3)$$

$$e_a = 0.000174F_c^2 - 0.01992F_c + 1.015 \quad (4)$$

(F_c は%)

$$\varepsilon_{mus} = 0.015 \quad (5)$$

なお、これらの提案式の背景や説明は本論文では割愛する。参考文献を参照されたい。また、図-23 の破線が、各 F_c に対する $\ln(p_{su})$ の下限値を連ねた線である。この破線は、次式で与えられている。

$$\ln(p_{su}) = \frac{e - 0.3312}{0.1426} \quad (6)$$

(1)式と(5)式の交点における $\ln(p_{su})_{min}$ は、次式で与えられている。

$$\ln(p_{su})_{min} = \frac{\varepsilon_{mus}(1+e)\ln(p_a) - 0.3312 + e_a}{\varepsilon_{mus}(1+e) + 0.1426} \quad (7)$$

そして(1)式で定まる $\ln(p_{su})$ が(7)式で定まる $\ln(p_{su})_{min}$ よりも小さい場合は、(7)式で定まる $\ln(p_{su})_{min}$ の値を $\ln(p_{su})$ の値として採用するとされている。

図-23は、上記の提案式に対し、種々の実験データがプロットされたものである。これに対し、本実験で得られた結果も同様にプロットした。図に示すように、今回の試験結果は細粒分の増加に伴い Steady State の応力レベルの指標 ($\ln(p_{su})$) が減少するという点で整合した結果となった。しかし、細粒分含有率の変化による影響は、提案式ほど大きくない。また、非塑性と塑性の細粒分の違いもあまり大きくなく、今回の実験の範囲では細粒分の違いが影響しているとも考えられない。しかし、図-23に示すように、既往の提案式では細粒分含有率によって Steady State のせん断応力の値が大きく異なる。今後、どのような細粒分の時に細粒分含有率が Steady State のせん断応力の値に大きく影響するのか、詳細に検討していく必要がある。

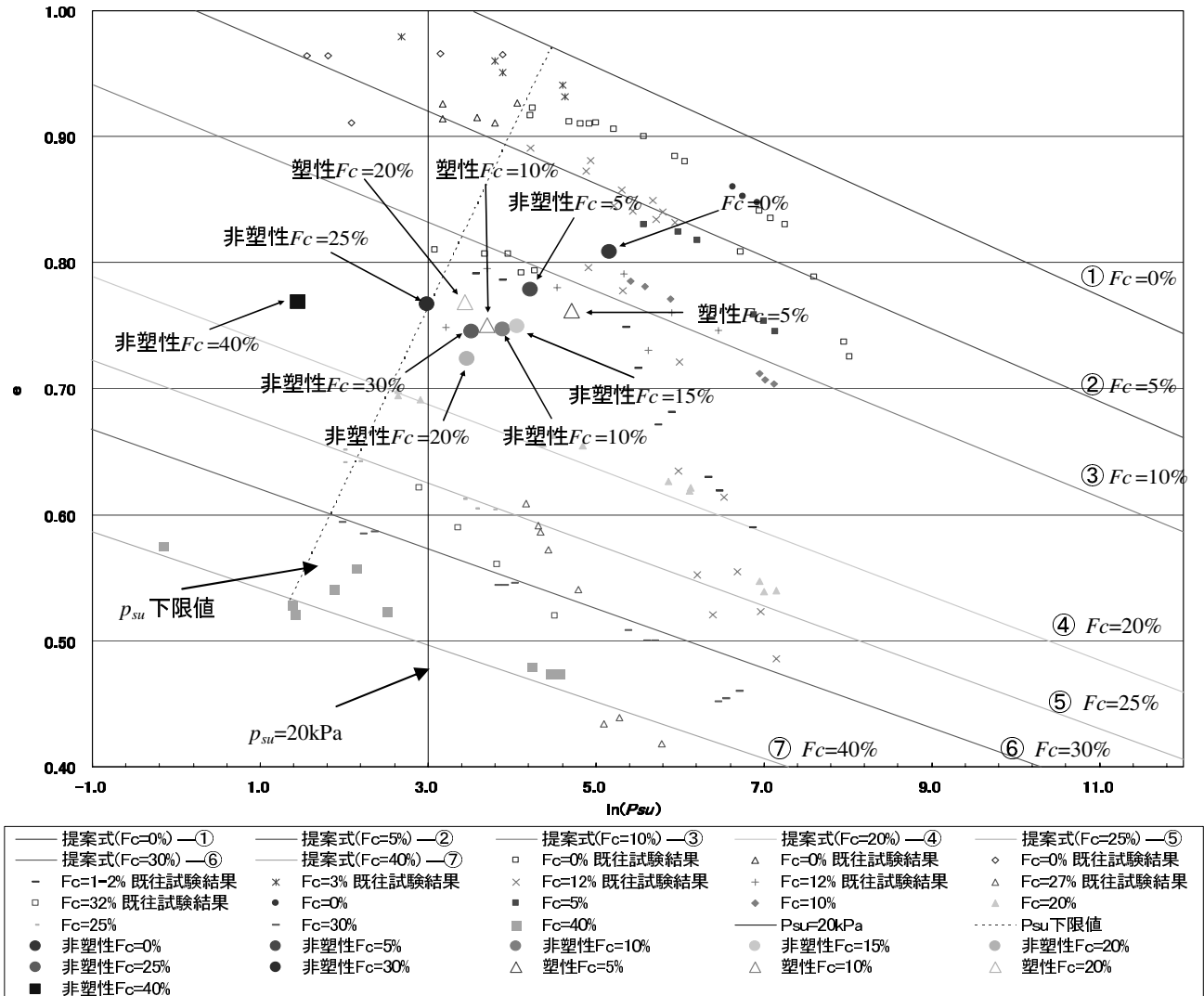


図-23 既往の提案式及び実験結果との比較

5. まとめ

- 1) 繰返し載荷による過剰間隙水圧上昇の程度が大きいほど、その後に単調載荷時を加えた時のせん断応力 τ のピーク値は減少する。
- 2) 単調載荷直前の過剰間隙水圧比の値が大きいほど、単調載荷時のせん断応力 τ のピーク値は減少していくが、Steady State 状態のせん断応力の値はほぼ一定値をとる。
- 3) 単調載荷時のせん断応力 τ のピーク値は、拘束圧と圧密降伏応力 P_c に依存している可能性がある。
- 4) 本実験での Steady State でのせん断応力の値を既往提案式と比較した結果、今回の試験結果は細粒分の増加に伴い Steady State のせん断応力の値が減少するという点で整合する結果を得た。

しかし、細粒分の変化による影響は、既往の算定式ほど敏感ではない。今後、どのような細粒分の時に含有率の違いが Steady State のせん断応力の値に影響を及ぼすか検討していく必要がある。

謝辞

本研究では、FLIP 研究会の方々、特に京都大学の井合先生、明窓社の小堤博士に豊富なアドバイスを頂きました。ここに記して深く感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) Ishihara, K. and Verdugo, R. : The steady state of sandy soils, Soil and Foundations, Vol.36, No.2, pp81-91, 1996.
- 2) 第四期 FLIP 研究会 せん断変形ロック問題作業部会 : FLIP 研究会 せん断変形ロック問題 WG 平成 19 年度 成果報告書, pp.3-1~3-14, 2008.

(2009年10月23日 受付)