

III-252

液状化後の砂の挙動に関する実験的研究

武蔵工業大学 正 末政直晃
 同上 正 片田敏行
 佐藤工業 正 永尾浩一
 東京電力 正 佐藤 博
 早稲田大学 正 浜田政則

1. はじめに：傾斜した緩い砂地盤は液状化を起こすと、水平方向に大きな変形を呈することがある。このような地盤の側方流動量を予測するために、これまでに液状化地盤を流体と見なした幾つかの研究が報告されている^{1) 2)}。しかしながら、実地盤においては側方流動が発生しても流動後に傾斜面が残留していることもあり、液状化地盤を流体と仮定するだけでは、現象を十分に説明できない。そこで、本研究では側方流動時の砂の挙動を調べることを目的として、大歪まで測定可能な中空ねじり試験機を用いた砂の繰返しせん断試験を実施した。

2. 実験方法及び条件：使用した中空ねじり試験機は、タイミングベルト方式のアクチュエーターを有し、高さ10cmの供試体に対して約90%までのせん断歪を付与できるものである。

実験は、まず豊浦標準砂を空中落下させ、相対密度が30～80%までの供試体を作成した後、これを十分飽和させ、所定圧で等方圧密し、所定のせん断応力を正弦波形で繰返し载荷することにより行った。ここでは、供試体の相対密度、せん断応力振幅 τ_d 、初期有効応力 σ_o' 、振動数を種々変えた計20ケースの実験結果について報告する。実験条件の概要を表1に示す。

3. 実験結果：図1は、せん断応力とせん断歪の関係を示したものである。砂の応力～歪曲線は、初期(①)には弾性的な挙動を示すが、その後(②)塑性変形が卓越した下に凸な形状となる。さらに、過剰間隙水圧が初期有効応力とほぼ一致した液状化時(③)には上に凸な形状となり、液状化後(④)も③とほぼ同じ形状のまま、せん断歪だけが繰返し回数の増加に伴って増大する。図2は、基準条件(表1)下で実施した相対密度の異なる3ケースについて、せん断応力が0.2kgf/cm²時のせん断歪(γ')と繰返し回数との関係を示したものである。図より、せん断歪 γ' は液状化時点から急激に増加するが、ある歪に達するとその増加割合は減少し、一種の降伏点が現れている。この降伏点は、相対密度が小さいものほど大きく

なっている。せん断歪がある限度以上に成長しないこのような現象は、サイクリックモビリティと呼ばれる密な砂に特徴的な挙動として知られている³⁾が、歪量には違いがあるものの、比較的緩い砂においても現れることが確認できる。図3は、载荷時の振動数の違いに着目したものである。図より、振動数は液状化開始時点や降伏点の歪量 γ' にさほど影響を与えないものの、降伏点以降の挙動に影響を与えることが示されて

表1 実験条件の概要

相対密度(%)	30～80
τ_d (kgf/cm ²)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3
σ_o' (kgf/cm ²)	0.5, 1.0, 2.0
振動数(Hz)	0.1, 0.01

注) 太字は基準となる条件

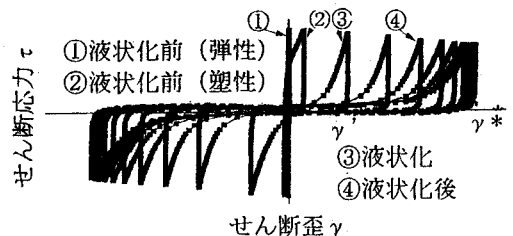


図1 せん断応力～せん断歪関係

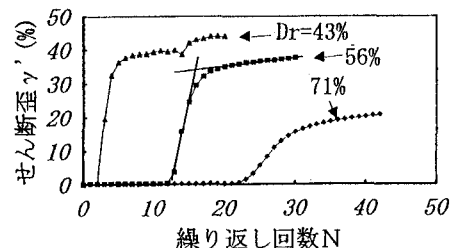


図2 せん断歪 γ' と繰返し回数(相対密度)

いる。降伏点以降の歪の増加傾向は、供試体内部の砂の沈降現象に起因した供試体の不均一化によるであり、振動数の小さなものほど、不均一化が進み、その増加割合が大きくなると考えられる。図4は、せん断応力を0.2kgf/cm²時の値に換算した⁴⁾降伏歪 γ^* と相対密度との関係を示したものである。図中の●は振動数が0.1Hz, ○は0.01Hzのものを指している。図より、降伏点の歪量は、相対密度の低下とともにほぼ直線的に増加していることが分かる。また、同一の相対密度で見ると、振動数の小さいものの方が降伏歪は大きく、降伏点においても不均一化の影響が生じていると思われる。

4. 考察：液状化した砂にせん断歪がある限度以上に成長しない、言わば“限界歪”があることを説明するために、次のような簡単な2次元モデルを考えた。即ち、粒径が一樣で、円形の砂粒子が液状化時には等間隔で完全に浮遊しており（図5 a）、これがせん断変形を受け、図5 bのように骨格を形成する場合を考える。限界歪 γ^* は、aからbに至るまでに必要な歪とすると、粒径Rに対して次の関係となる。

$$(1 - \gamma^*)^2 = 16R^2 - 1 \dots \dots \dots (1)$$

一方、このモデルの間隙比 e は次式で表される。

$$e = 1 / (2\pi R^2) - 1 \dots \dots \dots (2)$$

従って、式(1)、(2)より

$$\gamma^* = 1 - \sqrt{8 / \{ \pi(1 + e) \}} - 1 \dots \dots \dots (3)$$

式(3)の計算結果と実験結果とを比較したものを図6に示す。図より、式(3)より得られた限界歪は、本研究の範囲では、間隙比の増大に伴ってほぼ直線的に増加しており、実験結果と同様の傾向にあることが示されている。本モデルは、限界歪を定量的に評価するまでには至らなかったものの、液状化した砂が大きな変形を受けると剛性を回復し、せん断歪に限界値があることを示唆するものと考えられる。

5. あとがき：液状化した砂は、流動過程において流体的な性質から固体的な性質に移行することが確かめられた。また、この時のせん断歪にはある限界値があり、この値は砂の間隙比に依存することが示された。

参考文献：1) 佐藤他：液状化による側方流動地盤の挙動と物性に関する実験的研究，第22回地震工学研究発表会，1993 2) Towhata, I. et al.: Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle, Soils & Foundations, vol.32, no.3, 97-116, 1992 3) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂出版 4) 片田他：液状化後の砂の力学挙動に関する基礎的研究，第29回土質工学研究発表会

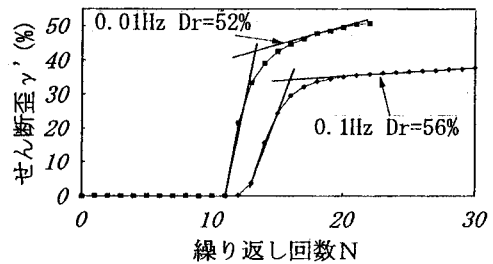


図3 せん断歪 γ' と繰返し回数(振動数)

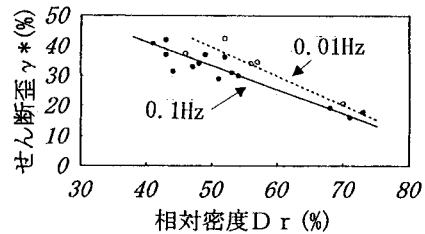


図4 せん断歪 γ^* と相対密度との関係

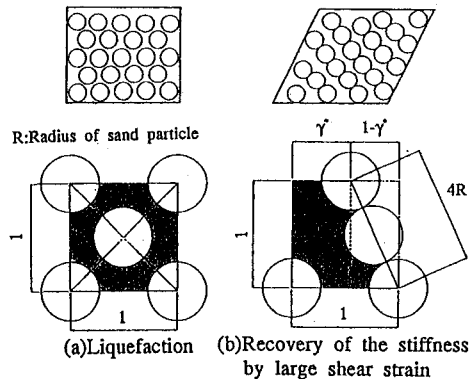


図5 液状化砂の剛性回復のモデル化

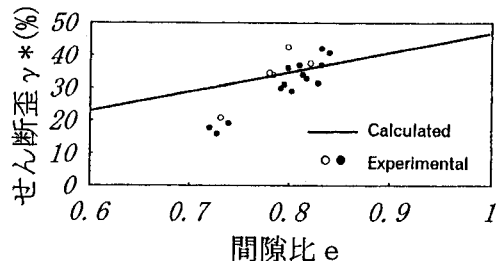


図6 せん断歪と間隙比との関係