

九州工業大学工学部 正会員 ○永瀬英生  
東京電機大学理工学部 正会員 安田 進  
九州工業大学大学院 学生会員 柳畑 亨

1. はじめに

1964年新潟地震や1983年日本海中部地震では、砂地盤において液状化により数mにも及ぶ大変位が起り、広範囲にわたって甚大な被害が発生している。このような永久変位の発生メカニズムに関し、これまで多くの研究<sup>1), 2)</sup>がなされてきたが、それらの見解はまだ十分に統一されていないのが現状であろう。特に、およそ10mに至る永久変位が引き起こされた砂地盤の液状化特性については明らかになっていないようである。また、1983年日本海中部地震による震害の報告<sup>3), 4)</sup>によると、砂丘や砂丘間低地において、非常に緩い砂地盤が堆積していることが推定されている。ところが、このような砂（以下超緩詰め砂と呼ぶ）の液状化特性については、供試体作製が困難であったこともあり、これまで詳細には明らかになっていない。

本研究では、永久変位に与える砂の密度の影響を明らかにする目的で、相対密度が10%から30%の砂供試体について非排水三軸圧縮試験および繰返し三軸試験を行った。また、排水条件下での初期せん断応力を受けた砂供試体についても非排水三軸圧縮試験を行った。ここではこれらの試験で得られた超緩詰め供試体の変形・強度特性や単調載荷によって液状化に至る場合の供試体および試験の条件について報告したい。

2. 実験方法

実験には、試料として豊浦標準砂 ( $G_s=2.637$ ,  $e_{max}=0.973$ ,  $e_{min}=0.609$ ) を、超緩詰め状態の供試体作製方法として不飽和砂凍結法<sup>5)</sup>を用いた。この手法で作製された砂供試体の内、相対密度が20%以下を超緩詰め砂、20~50%を緩詰め砂と定義することにする。

供試体は高さ15cm、直径7.5cmの円筒形である。供試体を作製・解凍した後、間隙空気を二酸化炭素で置換して脱気水を通水し、背圧を200kPa与えて飽和化している。なお、B値は0.95以上であった。非排水三軸圧縮試験では、所定の有効拘束圧 ( $\sigma'_v=20, 50, 100\text{kPa}$ ) で圧密した後、0.6mm/minの変位速度一定によるひずみ制御方式または、空圧式載荷装置で0.02の増加応力比一定による応力制御方式でせん断試験を行った。また、繰返し三軸試験では、同様に作製された供試体に対して、初期有効拘束圧  $\sigma'_v=100\text{kPa}$  で圧密した後、周波数0.1Hzの1様振幅載荷を行った。

3. 繰返し三軸試験の結果

図1は、相対密度Drが0%と30%の条件における繰返し応力比  $\sigma_{dr}/2\sigma'_v$  と軸ひずみ両振幅が5%に至るまでの繰返し回数の関係を示したものである。図1より、液状化強度比  $R_{20}$  は、Dr=0%の超緩詰め砂で0.07、Dr=30%の緩詰め砂で0.11であることが分かる。これらの値を相対密度Drに対してプロットしたのが図2である。●印は本研究の結果を示し、○印は空中落下法で作製された供試体に関する他の試験<sup>6)</sup>の結果を示す。これらの液状化強度比  $R_{20}$  は相対密度Drが50%以下の緩詰め砂から超緩詰め砂のデータに基づいて得られた1本の曲線上にプロットされるようである。よって、Drが30%以下の砂は特に液状化抵抗が小さいことが分かる。

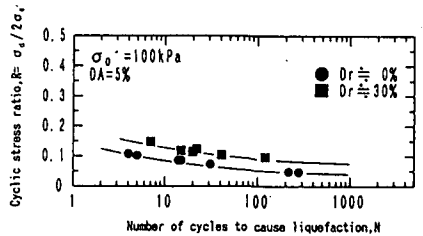


図1 繰返し応力比と繰返し回数の関係

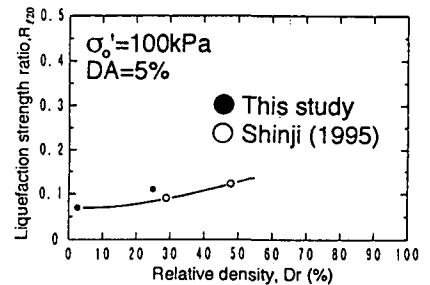


図2 液状化強度比と相対密度の関係

図3は、相対密度 $D_r$ が3.3%の超緩詰め砂の試験結果による偏差応力と軸ひずみの関係を示したものである。この試験では、15%以上の軸ひずみが供試体の破壊時に圧縮側除荷過程において小さい偏差応力により発生している。この繰返し载荷試験は応力制御方式で行われた。したがって、供試体が軸応力载荷に対し非常に小さなせん断強度しか有していなかったため、所定の軸応力が载荷されなかったと考えられる。図4には、相対密度 $D_r$ が28.2%の緩詰め砂の試験結果を用い、偏差応力を軸ひずみに対してプロットしている。この場合も、15%以上の軸ひずみが供試体の破壊時に今度は伸張側において小さい偏差応力により発生している。

#### 4. 非排水三軸圧縮試験の結果

相対密度 $D_r$ が10%から30%の供試体を用いて、応力制御とひずみ制御方式による非排水三軸圧縮試験を行った。ここでは、 $D_r=0\%$ と20%での試験結果を比較してみる。図5、6は、相対密度 $D_r$ がおよそ0%の砂供試体を用い、ひずみ制御方式による試験で得られた偏差応力 $q$ または過剰間隙水圧 $\Delta u$ と軸ひずみの関係および有効応力径路をそれぞれ示したものである。これらの図より、液状化がすべての試験で起こったこと、偏差応力 $\sim$ 軸ひずみ関係および有効応力径路の形状はいずれの有効拘束圧においてもほぼ相似形をなしていることが分かる。よって、偏差応力が0になる時点、すなわち液状化に到達した時点での軸ひずみは有効拘束圧と共に増加している。また、このひずみ制御試験では、液状化に到達したときに供試体上端部が急激に1.5cm程度沈下したことも観測されている。それゆえに、ひずみ制御試験では液状化によって超緩詰め砂に大ひずみが発生するかどうかを確かめることはできないようである。

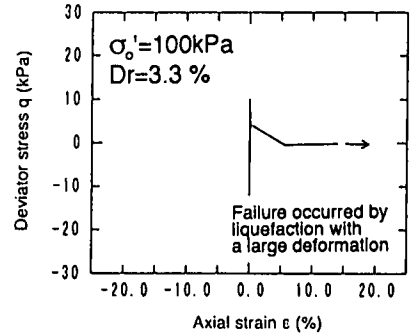


図3 偏差応力と軸ひずみの関係

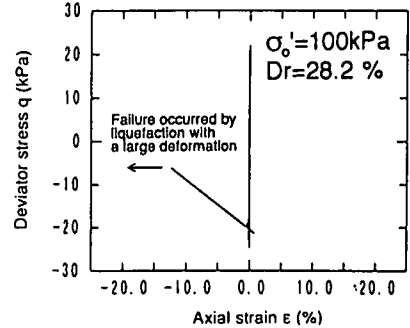


図4 偏差応力と軸ひずみの関係

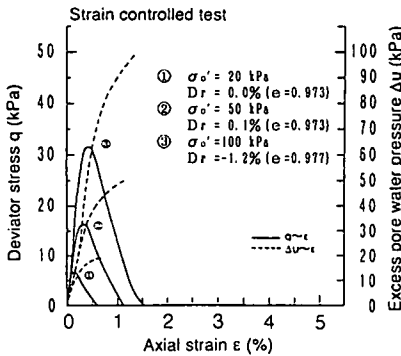


図5 偏差応力、過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

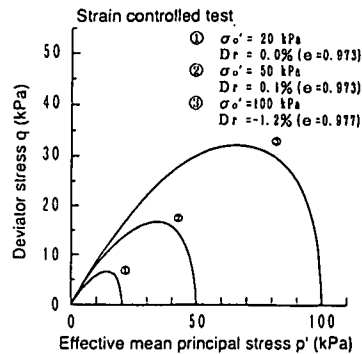


図6 有効応力径路

図7、8には、相対密度がおよそ0%の超緩詰め砂の応力制御試験結果を示している。図7に示したすべてのケースにおいて、偏差応力がピークの値にまで増加した载荷の最終段階において、軸ひずみが急激に増加している。有効応力径路もピークの近くで途切れているが、これは応力制御試験の場合、供試体のピーク後の挙動を再現することは不可能に近いからである。しかしながら、応力制御試験では相対密度が20%以下の場合、液状化発生時に10cm程度鉛直方向に変形したことが観測されている。

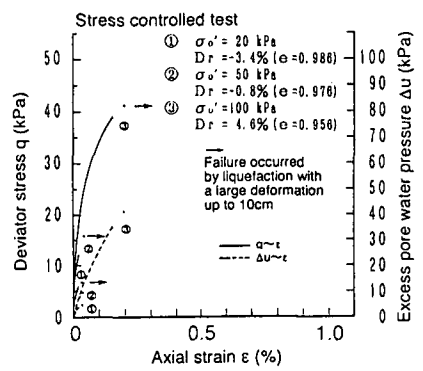


図7 偏差応力、過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

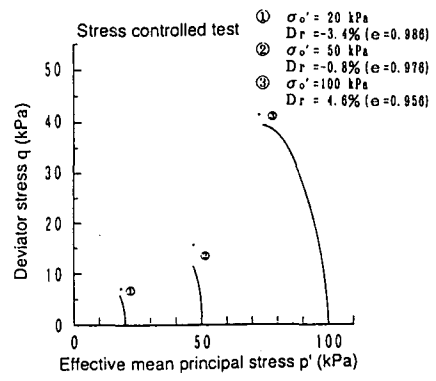


図8 有効応力径路

相対密度がおよそ20%の砂供試体についてのひずみ制御試験で得られた偏差応力と軸ひずみの関係および有効応力径路を同様にプロットしたのが図9、10である。この場合もすべてのケースにおいて液状化に至っている。しかしながら、液状化到達地点における軸ひずみの値は有効拘束圧と共に減少しており、また有効拘束圧が20, 50kPaの条件下では有効応力径路の形状が偏差応力最大地点で変化している。相対密度20%の値は、超緩詰め砂から緩詰め砂の挙動が負から正のダイレイタンス傾向に変化する境界にあるようである。

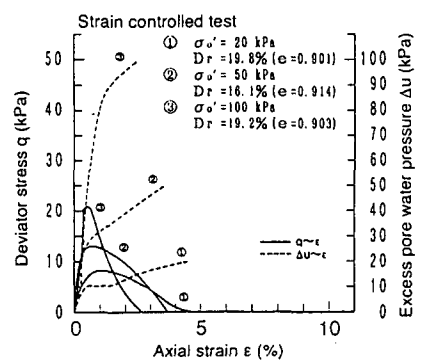


図9 偏差応力、過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

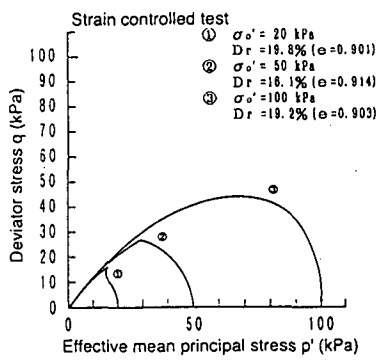


図10 有効応力径路

初期せん断応力を用いたひずみ制御試験の結果を図11、12に示す。供試体の相対密度はおよそ0%である。初期せん断応力の载荷に際しては、有効拘束圧の0.1倍の偏差応力を排水条件で与えている。図11、12より、すべてのケースにおいて液状化に至っており、偏差応力～軸ひずみ関係、有効応力径路の挙動は初期せん断応力を受けていない場合と類似した傾向を示していることが分かる。これらの曲線が有効拘束圧の

増加に対し相対的に拡大していく性質、すなわち図5、6でも見られた超緩詰め砂の液状化特性は初期せん断応力の存在には影響を受けなかったようである。

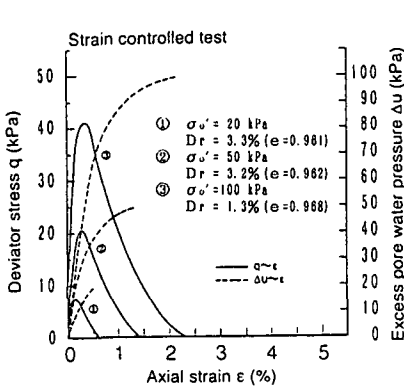


図11 偏差応力、過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

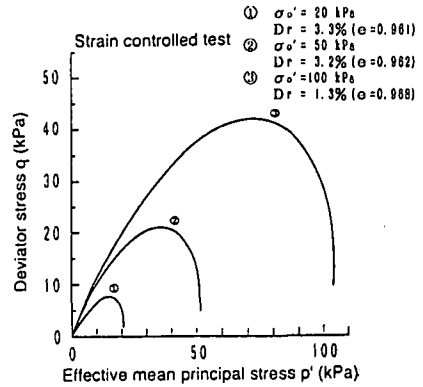


図12 有効応力経路

以上、図1～12で見られたように、超緩詰め砂から緩詰め砂にかけては液状化に対して非常に抵抗が小さく、非排水圧縮試験におけるそれらの液状化特性はせん断試験以前に与えられた初期せん断応力の影響を受けなかったことが分かる。したがって、繰返し試験の結果からも分かるように、このような超緩詰め砂から緩詰め砂によって構成された傾斜地盤では非常に大きな変位が起こる可能性があると考えられよう。

## 5. 結論

本研究では、相対密度が-10%から30%の超緩詰め砂および緩詰め砂の液状化特性を調べるため、非排水三軸圧縮試験および繰返し三軸試験を行ってみた。その結果、以下のような挙動が観測されている。

- (1) 相対密度が0%と30%を有する砂供試体の液状化強度比は非常に小さく、0.07から0.11の値であった。
- (2) 相対密度が20%以下の砂供試体は、非排水三軸圧縮試験で常に液状化した。また、供試体が液状化する場合の境界相対密度は有効拘束圧が増加するほど大きくなるようである。
- (3) 単調載荷条件下における超緩詰め砂の液状化特性は、せん断試験以前に受けた初期せん断応力の影響を受けなかった。

## 参考文献

- 1) Yasuda, S., Nagase, H., Kiku, H. and Uchida, Y.: The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 149-160, 1992.
- 2) Sasaki, Y., Towhata, I., Tokida, K., Yamada, K., Matsumoto, H., Tamari, Y. and Saya, S.: Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 3, pp. 79-96, 1992.
- 3) 陶野郁雄・安田進・社本康広: 日本海中部地震における液状化現象とその被害状況、土と基礎、Vol. 31, No. 12, pp. 13-20, 1983.
- 4) 古藤田喜久雄・若松加寿江: 日本海中部地震による液状化現象と地形条件との関係、土と基礎、Vol. 32, No. 9, pp. 59-63, 1984.
- 5) 佐々木康・松本秀應・石川昭: 非常にゆるい砂の非排水せん断試験、第23回土質工学研究発表会講演集、Vol. 1, pp. 467-468, 1988.
- 6) 宍道玲: 過圧密履歴を受けた砂の液状化強度に関する基礎的研究、九州工業大学修士論文、1995.