

木曾川下流流域低平地の液状化特性の評価

液状化 繰返し三軸 砂質土

中部土質試験協同組合 正会員 ○久保 裕一
 名城大学 国際会員 小高 猛司
 名城大学 国際会員 崔 瑛
 名城大学大学院 学生会員 高木 竜二

1. はじめに

地盤工学会中部支部南海トラフ巨大地震中部地域地盤災害研究委員会では、三重県桑名市内の旧河道若齢埋立地盤における液状化危険度評価を行うための地盤調査を実施した。その一環として、ボーリング採取した砂試料による液状化試験を実施したが、 N 値の小さい若齢の埋立砂層において、比較的大きな繰返し三軸強度比が得られた。一方、同じ砂層の単調載荷の三軸試験においても、中密な砂の挙動を示す試験結果が得られており、サンプリング時の密実化の影響が無視できないと考えられる。本報では、乱れによる密実化の影響を試験結果から極力排除する目的で、変相状態に着目して試験の整理を行った結果を示す。

2. 試験概要

図 1 に採取地点における柱状図を示す。厚い沖積粘土層の上部に緩い砂層がおよそ 15m 堆積している。特に上部の砂層は、旧河道部の若齢の埋立砂層であることを地質学的知見に基づき判断している。これらの砂層から代表的な 3 箇所 (3~4m を 1S-3, 6~7m を 1S-6, 9~10m を 1S-9) でチューブサンプリングを実施して室内試験を行った。図 2 と表 1 にそれぞれ粒径加積曲線と試料の諸元を示す。1S-3 と 1S-6 は比較的均質な砂質土であり、1S-9 は細粒分質の砂である。実施した試験内容は、物理試験と繰返し非排水三軸試験 (液状化試験と称す) と三軸圧縮試験 (CUB 条件, 三軸試験と称す) である。試験条件として液状化試験は載荷周波数を 0.2Hz, 三軸試験はせん断速度 0.05%/min とした。両試験ともに供試体サイズは直径 5cm, 高さ 10cm, 凍結状態で機械成形後にセル内で解冻し、二重負圧法により完全飽和化の後に有効土被りで等方圧密した。

3. 試験結果

図 3 に三軸試験と液状化試験における有効応力経路を示す。液状化試験については、それぞれの深度において、繰返し回数 が 20 回程度となった繰返し応力比での結果のみを示している。三軸試験の結果より、一旦圧縮した後に、正のダイレイタンスが発現する典型的な中密な砂であることがわかる。図中に液状化試験による破壊線を破線で示しているが、細粒分の少ない 1S-3 と 1S-6 では三軸試験の破壊線とほぼ一致している。しかし、細粒分の多い 1S-9 に関しては、液状化試験の繰返しせん断で得られる破壊応力比の方が相当大きな値となることがわかる。

実務における液状化試験では、繰返し回数 20 回における繰返し強度比 $RL20$ が求められることを主眼としているために、規定の繰返し回数で液状化が発生するように試験で設定する繰返し軸差応力の値は、自ずとある範囲に落ち着く。図 3 で示した液状化試験の有効応力経路は、繰返し回数が 20 回に近い供試体を代表として示しているが、この図を見る限り、液状化試験の軸差応力の振幅は三軸試験の変相時の軸差応力の値に近いことがわかる。これは、三軸試験の変相時の応力状態から $RL20$ の値を予測出来る可能性があることを示唆している。

次に、液状化試験の変相箇所を推測する。三軸試験の変相点は密詰めの場合など、間隙水圧が増加から減少に転じるなど比較的明瞭に現れる。一方、液状化試験では間隙水圧が増加と減少を繰返ししながら上昇するのみで、三軸試験のような際立った変化はない。液状化試験の過剰間隙水圧のグラフは、試験開始時の水圧が低い状態では先の尖った山形をしているが、徐々に圧力が上昇すると先のくぼんだ形へと変化し最終的に液状化に至る。この形は細粒分の少ない砂ほど顕著で、細粒分の多い砂では凹形とはならず丸みのある山形となることが多い。液状化試験で変相が起こっているとすれば、過剰間隙水圧の形が凹形になり、液状化に至る手前付近で

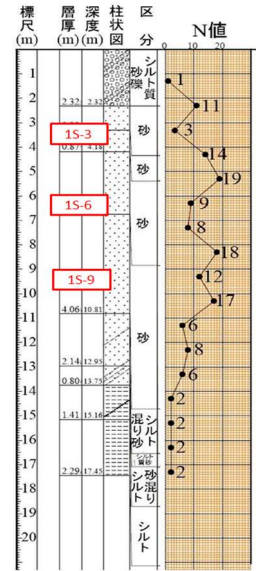


図 1 柱状図

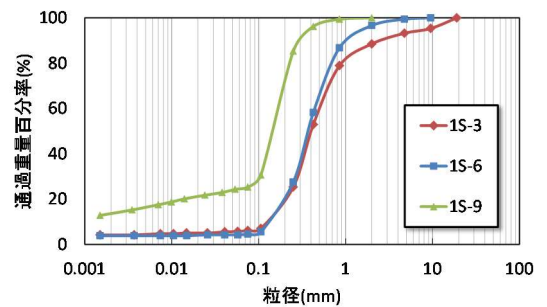


図 2 粒径加積曲線

表 1 試料の物理特性

	1S-3	1S-6	1S-9
土質名称	(S-FG)	(SP)	(SF)
土粒子密度(g/cm^3)	2.662	2.684	2.685
初期含水比(%)	24.0	24.2	31.6
間隙比	0.647	0.731	0.885
飽和度(%)	87.1	87.8	91.4
乾燥密度(液状化)(g/cm^3)	1.614	1.545	1.433
乾燥密度(三軸)(g/cm^3)	1.573	1.554	1.448

起こっていると考えられる。図4は1S-6からの代表的な有効応力経路図を示した図である。実線は過剰間隙水圧比の形が凹形になる直前までを、点線はそれ以降を示した。この図から、凹形に変化する直前でも変相していると考え、変相箇所を凹形に変わる直前と仮定した。

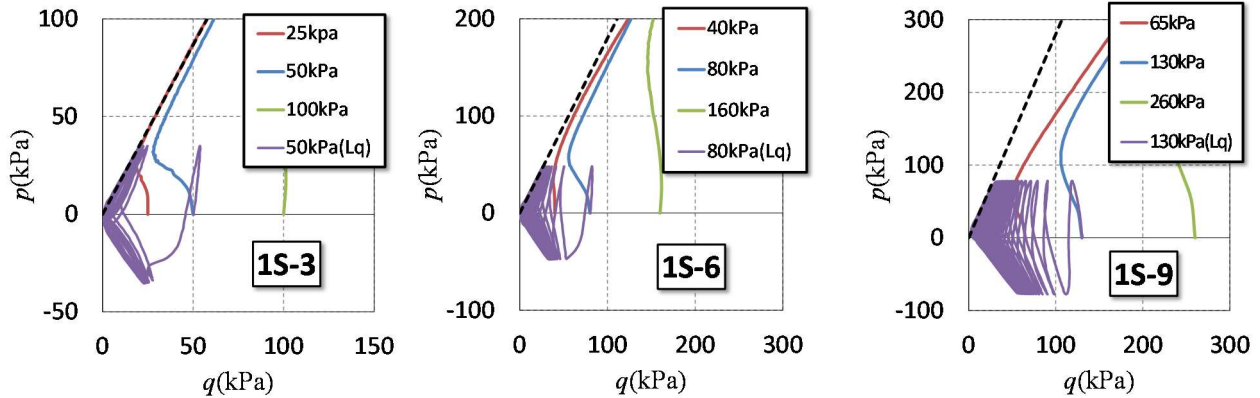


図3 液状化試験と三軸試験の有効応力経路図

図5(a)は学会同様の整理方法、繰返し応力振幅比と繰返し回数の関係に先程仮定した変相までの繰返し回数を加えた図である。図5(b)は、所定の過剰間隙水圧比までの繰返し回数に変相までの繰返し回数を加えた図である。曲線は累乗近似曲線を用い、グラフは紙面の都合上1S-9のみを示した。図5(a)から1S-9(細粒分質砂)は繰返し応力振幅比2%(以下DAと称す)に近似、1S-3と1S-6では同様に整理した結果、1S-9よりやや小さいDA1%と近似していた。図5(b)から、1S-9は過剰間隙水圧比80%(以下Nuと称す)に近似、1S-3と1S-6では同様に整理した結果、1S-9よりやや小さいNu70%を示した。これらから、液状化試験では、軸ひずみが1%~2%で変相状態にあり、その時の過剰間隙水圧比は70%~80%である事がわかった。ただしこれらは細粒分により変化し、細粒分含有率が少ないほど小さな軸ひずみ、低い過剰間隙水圧で変相に至ると考えられる。

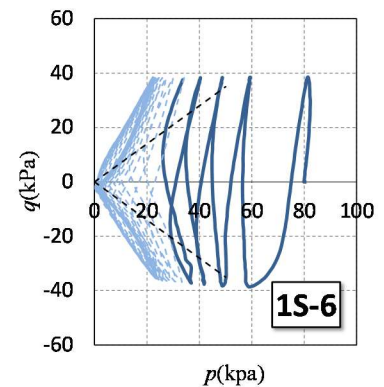


図4 返送箇所とした応力経路

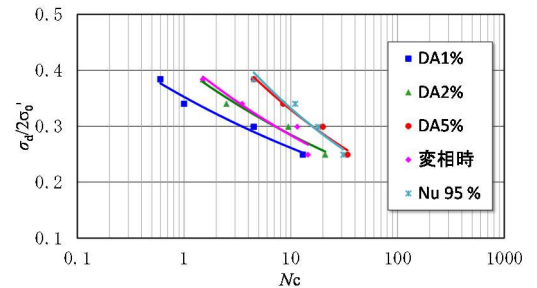
表2は、図5から求めた変相状態での液状化強度と、通常通りのDA5%、Nu95%から求められた液状化強度とを比較したものである。カッコ内の数値は変相状態の何倍であるかを示した。また、右には道路橋示方書(2012)のN値から求められた液状化強度を示した。DA5%とNu95%の値は上記と同様に累乗近似曲線から求めた。表から、最も高い値がDA5%、次にNu95%である。変相状態と道路橋示方書の値には一見相関性はなさそうに見える。

道路橋示方書からの液状化強度は基本的にN値に比例した値となっているため、N値の小さかった1S-3は極端に小さい。もし、ここでN値から求められた道路橋示方書の値を正解とするのであれば、1S-3はサンプリングに伴い密実化したと考えられ、DA5%、Nu95%の値はかなりの過大評価となる、しかしながら、変相状態の値は道路橋示方書の値よりは相当大きいものの、幾分密実化の影響を軽減できている。また、道路橋示方書の値に近い1S-6と1S-9に関しては、やや小さめの安全側の数値となり、実用的にそれほど大きな問題ないと考えられる。

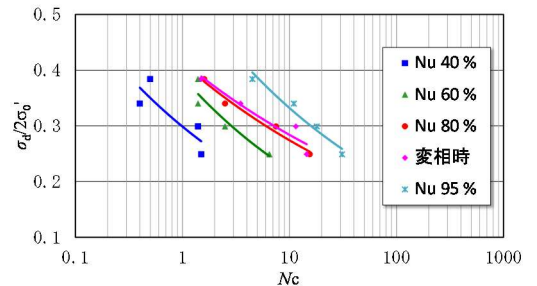
4. まとめ

液状化試験を中心に変相状態について試験整理を試みた。変相はDA1%~2%付近、Nu70%~80%付近で発生するが、細粒分含有率により幾らか変化すると考えられる。また、変相状態の液状化強度の値はDA5%やNu95%の通常設計に使われる数値よりやや小さな値となり、密実化された試料でも幾分軽減できる可能性を示唆した。今後はこれらのデータが確かなものにするため、多数の条件で試験を重ね、確かなものとしていきたい。

参考文献:1)小高ら:河川堤防の安定性照査に用いる適切な強度定数の検討,第59回地盤工学シンポジウム論文集,2014.



(a) 軸ひずみで整理



(b) 過剰間隙水圧比で整理

図5 繰返し回数と繰返し応力振幅比の関係

表2 道路橋示方書から求められる液状化強度との比較

	DA5%	Nu95%	変相状態	道路橋示方書
1S-3	0.44(1.6)	0.34(1.3)	0.27	0.14
1S-6	0.23(1.2)	0.21(1.1)	0.19	0.22
1S-9	0.29(1.2)	0.28(1.1)	0.25	0.27