

鳥取県境港砂の液状化強度特性—細粒分の影響—

Liquefaction Resistance Characteristics of Tottori Sakaiminato Sand—Effects of Fine Contents—

清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学大学院工学研究科)
 中村公一 Koichi NAKAMURA (鳥取大学大学院工学研究科)
 岡本貴也 Takaya OKAMOTO (鳥取県庁)

鳥取県境港市で採取された砂（境港砂）に対して、単調載荷非排水三軸圧縮試験と繰返し非排水三軸試験を実施して、基本的なせん断変形・強度特性と液状化特性を調べた。境港砂は粘土粒子を主体とする細粒分を約6%含んでいることから、特に細粒分の影響について考察した。その結果、細粒分を除くと静的なせん断強度も液状化強度も低下する、とくに液状化強度に対する細粒分の影響は緩詰めの場合に顕著である、等の知見を得た。

キーワード：鳥取県境港砂，液状化抵抗，繰返し非排水三軸試験，細粒分含有率

(IGC : D-7, D-6, D-3)

1. 序論

鳥取県においては、最近では1943年と2000年に大地震に見舞われた。前者は鳥取地震であり、Mは7.2、鳥取市で震度6であったと推定されている。800人以上が死亡、鳥取市街地は壊滅状態になり、鉄道や港湾にも液状化により大きな被害が生じた。後者は鳥取県西部地震であり、Mは7.3であった。この地震では鳥取県西部の米子市や境港市で、特に弓が浜半島において広い範囲で液状化が発生し、大きな被害を受けた¹⁾。

このように、鳥取県は液状化の危険度が非常に高い地域であるが、地域の地盤を構成する砂の液状化特性について土質力学的研究がほとんど行われていなかった。鳥取県西部地震の調査研究を通して、漸く、弓ヶ浜半島の埋立て土の液状化特性の一端が明らかにされたにとどまる²⁾。そこで、著者らは地域の砂地盤の液状化強度特性を隈なく調べるといふ大きな目標を設定した。

本研究の目的は、境港市で採取された砂（以降、境港砂と呼ぶ）の液状化強度特性を明らかにすることである。境港砂は細粒分を含む。細粒分の有無が液状化特性に与える影響について検討するため、細粒分を含む元の試料と細粒分を除いた試料に対して液状化特性を調べた。

液状化強度は細粒土を多く含むほど大きくなる傾向がある³⁾。また、同じ細粒分含有率でも細粒分に占める粘土の割合が多いほど強度は大きくなることが知られている。液状化の簡易判定法では、細粒分を含まない砂の強度特性に基づいて立てられた基準を、細粒分含有率や塑性指数を用いて補正する方法が採られている^{4),5)}。

細粒分を含む試料と細粒分を除いた試料に対して、緩

詰めおよび密詰め状態で、単調載荷非排水三軸圧縮試験と繰返し非排水三軸試験を実施した。本論文ではそれらの結果を示し、特に細粒分の有無に着目して主に液状化特性について考察する。

2. 試料

試料は鳥取県境港市内で下水道整備事業に際して地表面下深さ約3mから掘削された砂である。ボーリング調査結果⁶⁾によると、地表面から順に表土（厚さ1m未満）、最上部砂層土層（厚さ1~3m）、上部砂質土層で構成される。本研究では上部砂質土層から採取された試料を用いた。この層は微細化した貝殻片と少量のシルトを含む。標準貫入試験N値は両砂質土層で大きな違いがなく9~17（平均約には11程度）である。

試料の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。同表および図における境港砂（細粒分無）は、原試料を75 μ mふるいの上で水洗いして細粒分を除いたものである。また、比較のため豊浦砂のデータ⁷⁾も併せて示した。以降、細粒分の有無を識別する必要がある場合、細粒分を除いた試料を細粒分無（略号SC）、原試料を細粒分有（SF）と記す。また、豊浦砂の略号をTと記す。

粒度について、境港砂の最大粒径、平均粒径および均等係数は豊浦砂と大きな違いがないが、細粒分（75 μ mふるい通過分）を約6%含んでいる点が豊浦砂との主な相違点である（図-1参照）。また、細粒分のうち、約3%は5 μ mより細かい粒子であるが、塑性的な性状を示さず、砂粒子または貝殻が砕けたものであろうと推測される。なお、鳥取県西部地震において弓ヶ浜半島各地で発生し

表-1 試料の物理的性質

試料	境港砂		豊浦砂
	細粒分有	細粒分無	
ρ_s (g/cm ³)	2.634	2.639	2.646
e_{max}	1.438	1.457	0.993
e_{min}	0.871	0.890	0.594
D_{max} (mm)	2.000	2.000	0.850
U_c	1.652	1.583	1.857

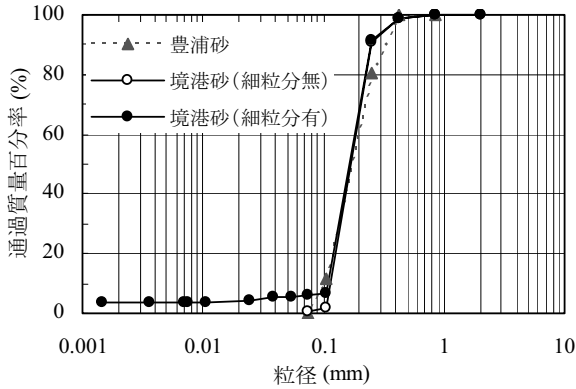


図-1 試料の粒径加積曲線

た噴砂の粒度⁸⁾と比べると境港砂は平均的な粒度である。

最大・最小間隙比を地盤工学会基準 (JGS A1224:2009) に従って求めた。同基準では細粒分含有率が 5% 以下の場合に適用するように定められているが、細粒分を約 6% 含む原試料に対しても同基準を適用した。表-1 に示す結果から分かるように、細粒分を除くことによって最大および最小間隙比がともに大きくなった。また、細粒分の有無によらず、豊浦砂と比べると最大および最小間隙比がともに大きい。

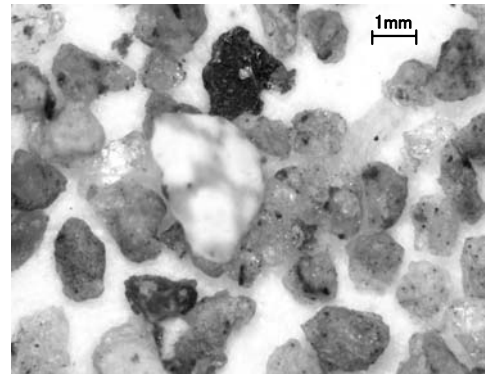
図-2 は粒子の拡大写真である。豊浦砂と比べて色調が黒っぽく、わずかに角張っているように見える。また、少量の貝殻片を含む。貝殻片は偶々視野に入った程度であり、量は多くない。本研究では粒子の形状を定量化していないので、液状化強度特性における粒子形状の影響について定量的に評価することはできないが、結果を比較する上で斟酌すべき要因であると考えている。

3. 三軸試験の方法

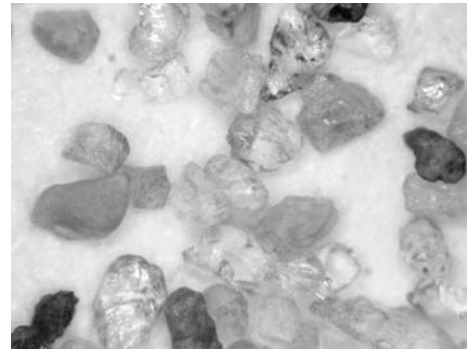
3.1 装置

繰返し三軸試験と単調荷重三軸圧縮試験を行った。用いた装置の概略図を図-3 に示す。

繰返し三軸試験では荷重は油圧で与え、繰返し波形は sin 波に制御する。単調荷重試験はひずみ制御により行う。セル圧は背圧と連動させて調整することができる仕組みになっており、有効拘束圧を変えないでセル圧と背圧を変えることができる。また、荷重棒に連結したエアシ



(a) 境港砂



(b) 豊浦砂

図-2 試料の拡大写真。境港砂の写真の中央部にあるやや大きい粒子は貝殻片である。

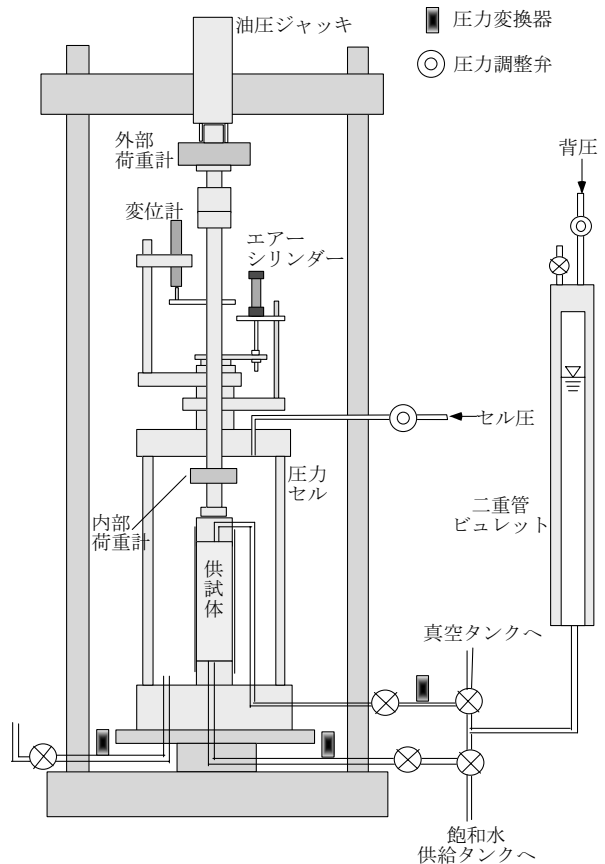


図-3 三軸圧縮試験装置

リンダーの内圧を調整することによって荷重棒の自重が供試体にかからないようにできるので等方応力状態を容

易に実現できる。

3.2 方法

(1) 供試体作成方法

境港砂は、相対密度の目標値を 30% に設定した供試体（緩詰め；Loose）と 60% に設定した供試体（密詰め；Dense）を作成した。密度は締固め法（JGS0520-2009）により調整した。予備実験の結果に基づいて、緩詰め供試体は含水比 5% で、密詰め供試体は含水比 10% でそれぞれ作成した。締固めには試料押し抜き用具（直径 5cm の円盤に垂直な柄が付いたもの）を用いて人力で締固めた。当初、空中落下法で供試体を作成することを試みたが、細粒分を含むことから締固め法で作成することにした。

相対密度実測値の平均値と標準偏差はそれぞれ、緩詰めで 31.9% と 0.66、密詰めで 57.9% と 0.39 である（後述の表-2 のデータに基づく）。緩詰めではばらつきが生じ易いといえる。ただし、細粒分の有無によってばらつきの程度は変わらない。

一方、本論文で引用する豊浦砂の試験は、空中落下法で供試体を作成された⁷⁾。同じ相対密度であっても供試体作成方法が異なれば液状化特性も異なる⁹⁾ので、次章以降、このことを考慮して結果を考察する。

(2) 供試体飽和

二重負圧法により供試体の飽和度を高めた。飽和化の後、セル圧 220kPa、背圧 200kPa の状態にして、間隙圧係数（B 値）を測定した。B 値が 0.95 以上になれば飽和度が十分高いと判断した。本論文で示す結果はすべて B 値が 95% 以上の供試体のものである。

(3) 単調載荷非排水三軸圧縮試験

境港砂（細粒分有および無）と豊浦砂の基本的なせん断変形・強度特性を調べるためにひずみ制御の単調載荷三軸圧縮試験を行った。所定の圧密応力 σ'_c （100 または 200 kPa）で圧密し、地盤工学会基準「土の圧密非排水（CU）三軸圧縮試験方法」（JGS0523-2009）に従ってせん断した。軸ひずみ速度は 0.1mm/min である。

(4) 繰返し非排水三軸試験

境港砂（細粒分有および無）に対して飽和状態での液状化強度特性を調べるために、繰返し非排水三軸試験を行った。圧密応力 σ'_c は全ての供試体で 100kPa である。地盤工学会基準（JGS0541-2009）「土の繰返し非排水三軸試験方法」に従った。周波数 0.1Hz で、所定の繰返し応力振幅比 R （表-2 参照）で繰返し載荷した。繰返し回数が 1000 回を超えるか、または両振幅軸ひずみ DA が 5% 以上になったら繰返し載荷を終了した。ここに繰返し応力振幅比 R は

表-2 境港砂に対する繰返し非排水三軸試験の条件

No.	細粒分	D_r (%)		σ'_c (kPa)	R
		目標値	実測値		
1	有 (SF)	30 (Loose)	31.7	100	0.100
2			33.2		0.150
3			32.1		0.175
4			31.9		0.200
5		60 (Dense)	57.7		0.200
6			57.8		0.300
7			58.4		0.400
8			57.5		0.500
9	無 (SC)	30 (Loose)	31.0	100	0.100
10			31.6		0.125
11			32.3		0.150
12			31.4		0.200
13		60 (Dense)	57.4		0.200
14			58.1		0.300
15			58.3		0.400
16			58.3		0.500

$$R = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_c} \quad (1)$$

で定義されている（ σ_d は軸差応力の振幅）。

4. 結果および考察

4.1 非排水三軸圧縮試験（単調載荷）の結果

単調載荷による三軸圧縮試験の結果を図-4 と図-5 に示す。図-4 は緩詰め（Loose）、図-5 は密詰め供試体（Dense）の結果である。各供試体の相対密度を表-3 に示す。

表-3 境港砂の静的三軸試験供試体の相対密度

試料	σ'_c (kPa)	D_r (%)	
		Loose	Dense
細粒分有 (SF)	100	29.6	60.4
	200	31.2	57.6
細粒分無 (SC)	100	— ¹⁾	61.5
	200	30.8	57.6

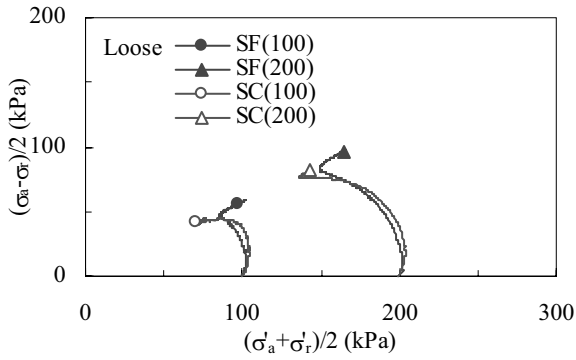
¹⁾過誤により測定できなかった。

各図において (a) は有効応力経路、(b) は応力比 r と軸ひずみ ϵ_a の関係である。ここに応力比 r は

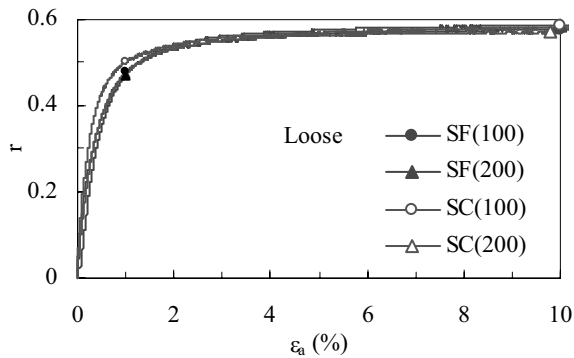
$$r = \frac{\sigma_a - \sigma_r}{\sigma'_a + \sigma'_r} \quad (2)$$

で定義した。各図において応力比 r が最大の点にマークを付して曲線を識別した。そのマークで識別できない場合は小さいマークを付け加えている。

はじめに詰まり方の影響を見る。細粒分の有無によらず、砂試料に一般的に見られる典型的な挙動を示している。即ち、緩詰めの場合に、有効応力径路に変相線が現れ、応力比 r は軸ひずみ ϵ_a とともに増加し続け、 ϵ_a が

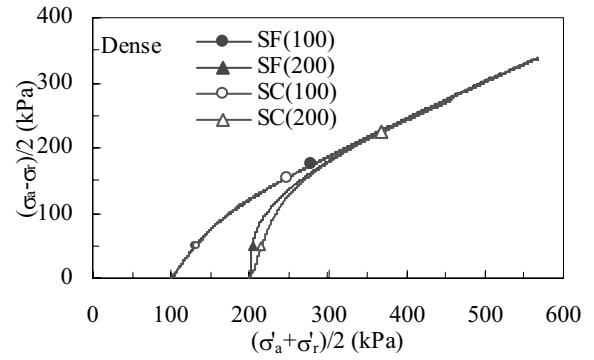


(a) 有効応力径路

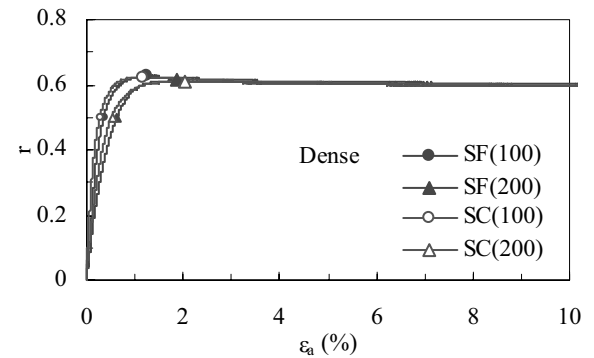


(b) 応力比 (r) と軸ひずみ (ϵ_a) 関係

図-4 単調載荷三軸圧縮試験の結果 (緩詰め)
(凡例()内数値は σ'_c の値 (kPa) を表す)



(a) 有効応力径路



(b) 応力比 (r) と軸ひずみ (ϵ_a) の関係

図-5 単調載荷三軸圧縮試験の結果 (密詰め)
(凡例()内数値は σ'_c の値 (kPa) を表す)

10%に達してもピークに達しない。それに対して、密詰めでは変相点が明らかでなく、 r は ϵ_a が 2%以下でピークに達しその後わずかに低下している。

次に、細粒分を含む試料 (SF) と含まない試料 (SC) の結果を比較する。緩詰めの場合 (図-4), 有効応力径路が細粒分の有無によって異なっている。細粒分を除いた試料では有効応力が変相点に至るまで、原試料に比べて、大きく低下した。応力比-ひずみ関係では細粒分の影響が明瞭ではない。密詰めの場合 (図-5), 有効応力径路および応力比-ひずみ関係において細粒分を除くことによる影響を読み取ることができない。

緩詰めの場合に、細粒分の有無によって有効応力径路が異なると指摘したが、供試体間で詰まり方が異なっていることが影響したかもしれない。表-3を参照して詰まり方の影響について考察する。細粒分無・緩詰め (SC ; Loose) の $\sigma'_c=100\text{kPa}$ の試験で試料乾燥質量の測定に不備があったので、 $\sigma'_c=200\text{kPa}$ の場合に限ると、細粒分無の供試体の相対密度が細粒分有 (SF) に比べて 0.4%低い。この数値の影響度についてはデータが限られているので評価することができない。また、データが欠損しているケース (SC ; Loose, $\sigma'_c=100\text{kPa}$) についても、相対密度の再現性は緩詰めでは劣る (3.2(1)) ことを考慮すると細粒分有の供試体 (SF ; Loose, $\sigma'_c=100\text{kPa}$) より相対密度

が低かった可能性がある。以上のことより、供試体間の詰まり方の違いが影響している可能性を払拭できない。

図-6に各試験で得られた最大せん断抵抗角 ϕ' と相対密度の関係を示す。 ϕ' は応力比 r が最大のとき、 $\phi'=\sin^{-1}r$ で求めた。細粒分無で $D_r=48\%$ の結果と豊浦砂 (T) の結果も併せて示した。この図から以下のことが分かる：

- (1) どの試料も同じ圧密応力であれば相対密度が大きいほど ϕ' が大きい。
- (2) 例外 (細粒分有の緩詰め) もあるが、詰まり方によらず圧密応力が高いとき ϕ' が小さい傾向が見られる。
- (3) 境港砂は、詰まり方と圧密応力の大きさによらず、細

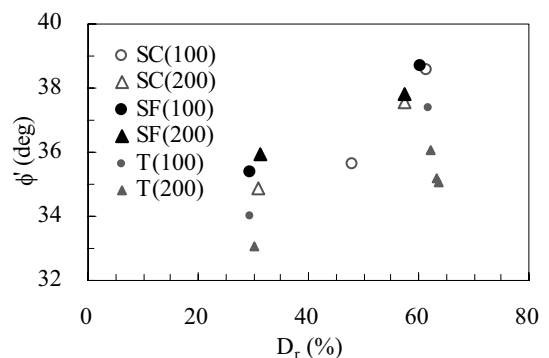


図-6 せん断抵抗角と相対密度の関係 (凡例()内数値は σ'_c の値 (kPa) を表す)

粒分を含む方が ϕ が大きい傾向がある。

(4) 境港砂と豊浦砂を比較すると細粒分の有無や圧密応力の大きさによらず境港砂の ϕ が大きい。

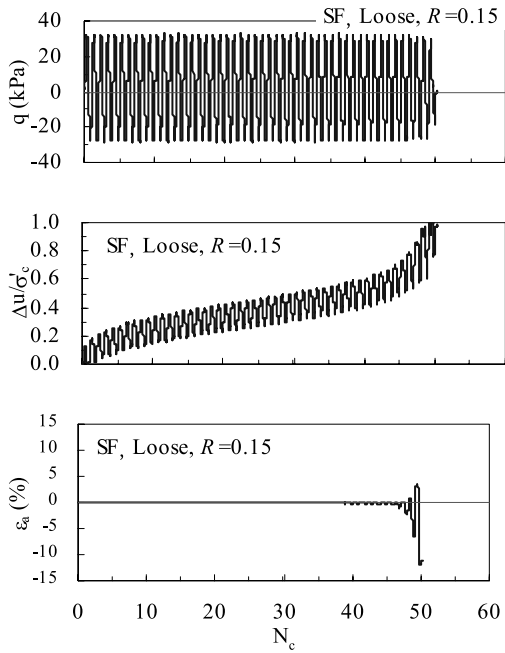
これらの知見のうち、(1)と(2)は砂のせん断抵抗角に関する従来の知見に矛盾しない。(3)は細粒分を含むという境港砂の特徴を示唆するものである。(4)は、3.2.(1)で述べたように供試体作成方法が異なるので注意しなければならないが、境港砂と豊浦砂の粒子形状の違いを反映

している可能性がある。

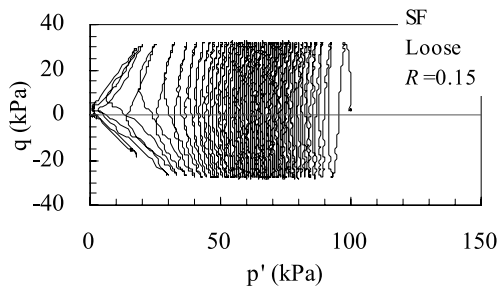
4.2 繰返し非排水三軸試験の結果と考察

(1) 緩詰め

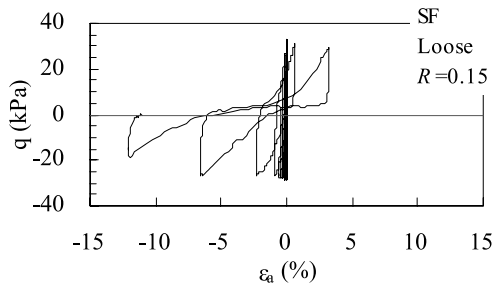
図-7と図-8に、それぞれ境港砂(細粒分有;SF)と同(細粒分無;SC)の緩詰め供試体(Loose)に対する繰返し非排水三軸試験の結果を示す。例として繰返し応力振幅比 $R=0.15$ の場合を示した。



(a) 軸差応力 (q), 過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_c$) および軸ひずみ (ε_a) と繰返し回数 (N_c) との関係

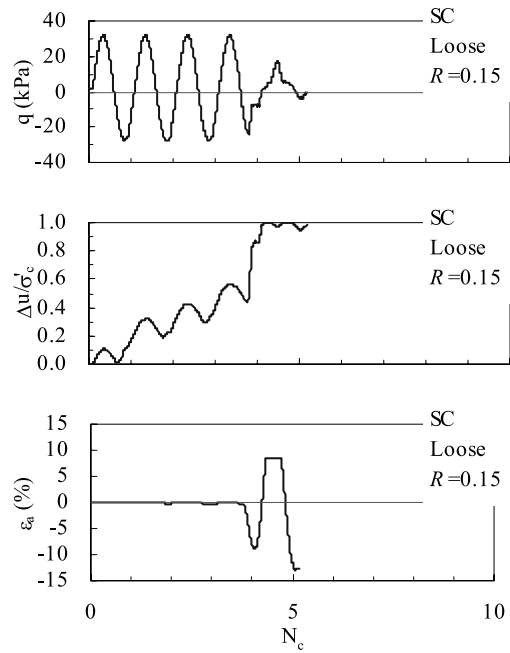


(b) 軸差応力 (q) と平均有効応力 (p') の関係

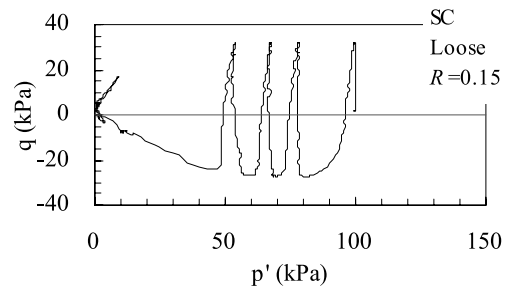


(c) 軸差応力 (q) と軸ひずみ (ε_a) の関係

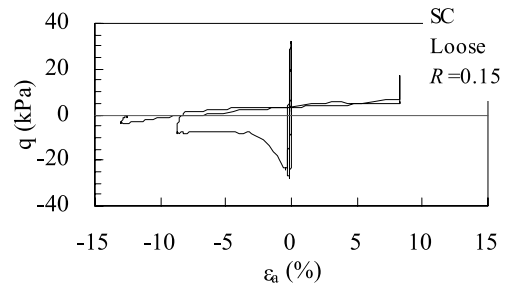
図-7 境港砂(細粒分有)の繰返し非排水三軸圧縮試験の結果(緩詰め, $R=0.15$)。



(a) 軸差応力 (q), 過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_c$) および軸ひずみ (ε_a) と繰返し回数 (N_c) との関係



(b) 軸差応力 (q) と平均有効応力 (p') の関係



(c) 軸差応力 (q) と軸ひずみ (ε_a) の関係

図-8 境港砂(細粒分無)の繰返し非排水三軸圧縮試験の結果(緩詰め, $R=0.15$)。

同じ繰返し応力比であるが、細粒分の有無によって挙動が大きく異なっていることがわかる。細粒分を除くと少ない繰返し回数で液状化に至っている。

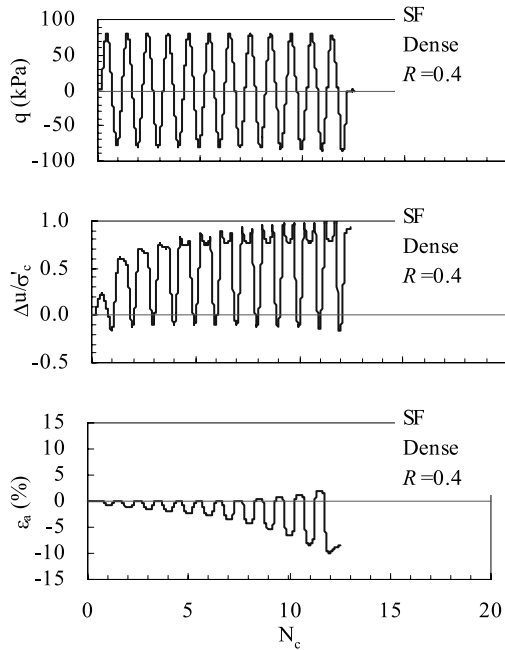
細粒分を除いた供試体は、有効応力径路や軸ひずみの挙動に見られるように、伸張側で一気に液状化した。過剰間隙水圧は、繰返しの初期には、細粒分の有無によらず、ほぼ一定の振幅をもって上昇している。その後、細粒分の無い供試体では、ある繰返し回数に達すると間隙

水圧が一気に上昇して液状化したが、細粒分を含む供試体ではそのような挙動が見られない。

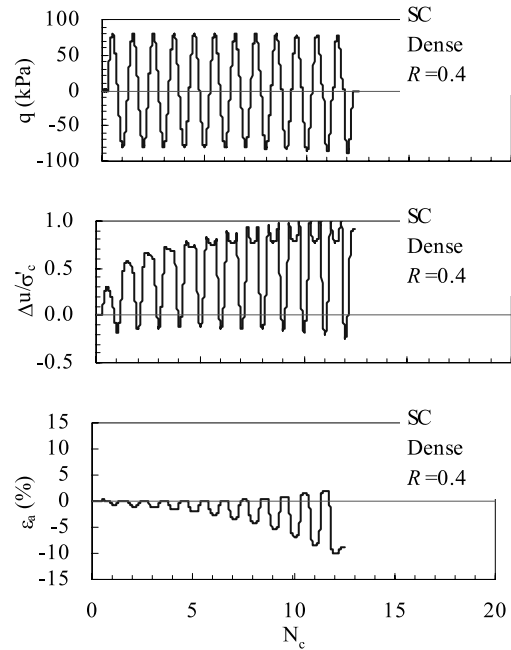
このような細粒分無の挙動は桑野ら³⁾による結果や豊浦砂の挙動と同じで、細粒分のない砂の緩詰め供試体の特徴¹⁰⁾と言える。

(2) 密詰め

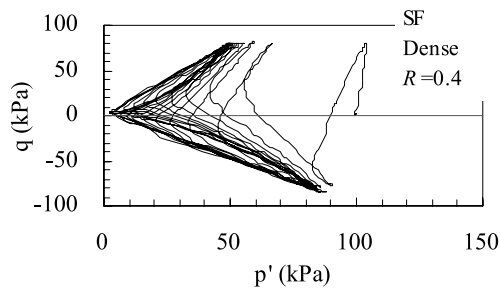
図-9と図-10は、それぞれ境港砂細粒分有(SF)と同細粒分無(SC)の密詰め供試体(Dense)に対する繰返し



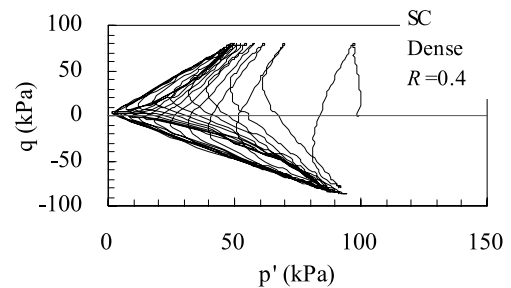
(a) 軸差応力 (q), 過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_c$) および軸ひずみ (ϵ_a) と繰返し回数 (N_c) との関係



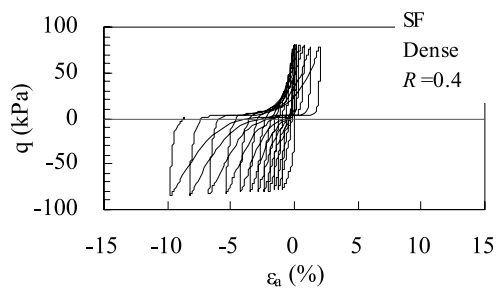
(a) 軸差応力 (q), 過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_c$) および軸ひずみ (ϵ_a) と繰返し回数 (N_c) との関係



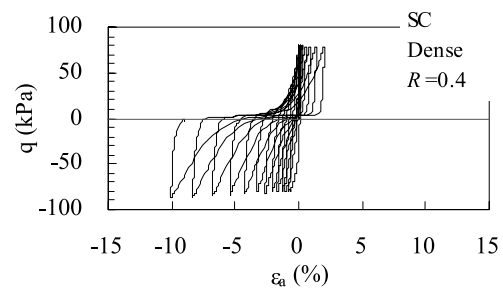
(b) 軸差応力 (q) と平均有効応力 (p') の関係



(b) 軸差応力 (q) と平均有効応力 (p') の関係



(c) 軸差応力 (q) と軸ひずみ (ϵ_a) の関係



(c) 軸差応力 (q) と軸ひずみ (ϵ_a) の関係

図-9 境港砂(細粒分有)の繰返し非排水三軸圧縮試験の結果(密詰め, $R=0.4$)

図-10 境港砂(細粒分無)の繰返し非排水三軸圧縮試験の結果(密詰め, $R=0.4$)

非排水三軸試験の結果である。例として $R=0.40$ の場合を示した。

各図の (a) より、軸ひずみと過剰間隙水圧の挙動は、細粒分の有無による違いが見られない。ひずみは伸張側で大きくなり、過剰間隙水圧は繰返しとともに振幅が徐々に大きくなって液状化に至っている。また、各図 (b) や (c) においても細粒分の有無による違いはほとんど見られない。

4.3 液状化強度

図-11 に境港砂（細粒分有）、同（細粒分無）および豊浦砂の、繰返し応力振幅比 R と繰返し回数 N_c との関係（液状化強度曲線）を示す。両振幅軸ひずみ DA が 1, 2 および 5% の場合について示している。(a) は密詰め、(b) は緩詰めである。ただし、(a) 図の豊浦砂の結果は本研究とは別に行ったものである⁷⁾。また、(b) 図の豊浦砂のデータは文献⁵⁾に引用された山本ら¹¹⁾の結果であり、 $DA=5\%$ の場合のみ示している。

(1) 密詰めの場合

図-11(a) において、繰返し応力振幅比 R が相対的に大きい試験では、細粒分の影響はほとんど見られない。 R が小さい試験においては細粒分を含む方が液状化抵抗が大きい。

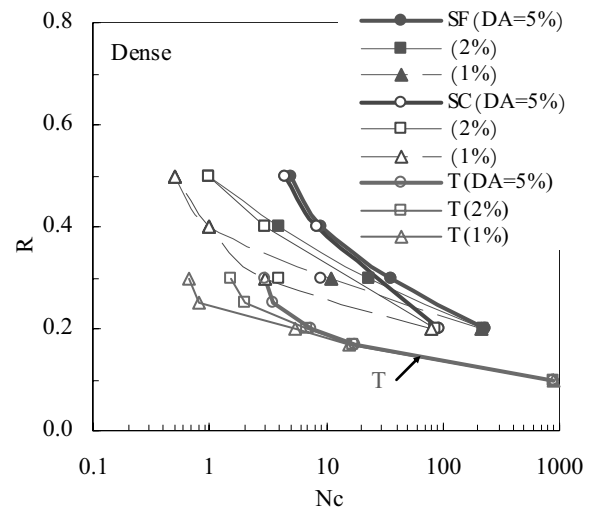
密詰めでは繰返し荷重回数の少ないところにおける顕著な強度の立ち上がりが見られる。これは、密な砂で発揮されるサイクリックモビリティを反映したものであると考えられている^{4), 5)}。

(2) 緩詰めの場合

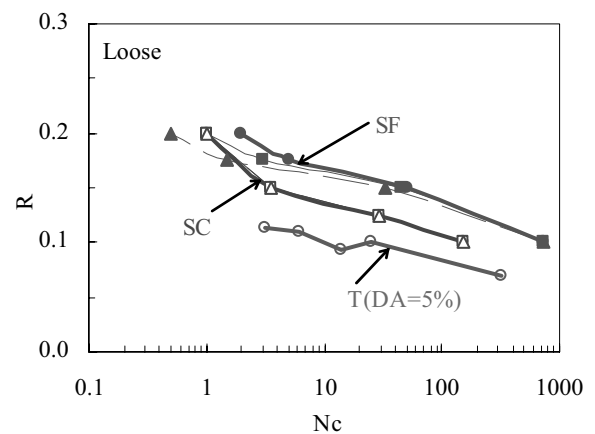
図-11(b) において、細粒分を含むと、 $DA=1\%$ を除いて、各 DA に対応する曲線が、細粒分を含まない場合より、右・上に位置して液状化強度が大きいことがわかる。

細粒分無の試料は、 R の大きさによらず、 $DA=1, 2, 5$ (%) のひずみを生じるのに必要な N_c が図上で識別できないほど近い値になった。これは、先に図-8 において指摘したように、液状化が起こると（間隙水圧比が 1 になると）ひずみが一気に発達することを表している。それに対して、細粒分有の試料は、 DA が異なれば対応する N_c も明らかに異なっている。ただし、 R が低い試験における場合には N_c は大きくなり、横軸が対数であることから、その傾向が明瞭ではない。

このように、特に緩詰めの場合に、細粒分を除くと液状化強度が低下すること、換言すると、細粒分を含むと液状化強度が高くなることが分かった。液状化強度に細粒分含有率が影響することは従来の研究において既に明らかにされているが、その影響度が詰まり方に依存するという点が重要である。



(a) 密詰め



(b) 緩詰め

図-11 境港砂の繰返し応力振幅比 R と繰返し回数 N_c の関係

液状化特性に影響を及ぼす最少の細粒分含有率は試料によって異なるようである。例えば、桑野ら³⁾は細粒分含有率が 10% 以上で液状化強度が増加するという結果を示しており、港湾関係の技術基準では 5% 以上で細粒分の影響を考慮している⁵⁾。境港砂の細粒分が約 6% であることを考慮すると、境港砂は、液状化特性に影響する細粒分含有率の範囲の下限に近い細粒分含有率を有しているようである。

(3) 液状化強度比 R_{20}

繰返し荷重回数 20 回で $DA=5\%$ に達する時の繰返し応力振幅比 (R_{20}) の値を表-4 に示す。一般に相対密度が高くなると液状化強度が大きくなる^{4), 5), 10)} が、同表に示したどの試料においても密詰め (Dense) ほど R_{20} が大きい。相対密度を上げることによる R_{20} の増加量を細粒分の有と無で比べると、細粒分有の方が大きい。

(4) 豊浦砂との比較

境港砂と豊浦砂を比較すると、詰まり方によらず、境港砂は豊浦砂に比べて液状化強度が大きいことが明らか

表-4 液状化強度比 R_{20}

試料	境港砂	詰まり方	R_{20}
境港砂	細粒分有	Loose	0.150
		Dense	0.336 (0.186)
	細粒分無	Loose	0.130
		Dense	0.262 (0.132)
豊浦砂	Loose	0.095*	
	Dense	0.170** (0.075)	

注：() 内数値は、 R_{20} の Dense と Loose における差である。*は文献¹¹⁾から、**は文献⁷⁾から引用した値である。

である。また、相対密度を上げることによる R_{20} の増加量も境港砂の方が大きい。ただし、両試料で供試体作成方法が異なっているので、その影響を含んでいることに注意しなければならない。

5. 結論

鳥取県境港市で採取された砂（境港砂）に対して、単調載荷非排水三軸圧縮試験と繰返し非排水三軸試験を実施して、基本的なせん断変形・強度特性と液状化特性を調べた。境港砂は、 $5\mu\text{m}$ 以下の粒子を主体とする細粒分を約 6% 含んでおり、細粒分の影響について考察した。また、豊浦砂の特性とも比較した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 細粒分を含んだ試料と除いた試料でせん断変形・強度特性が異なった。特に緩詰めの場合に、細粒分を除いた試料では、変相点に至るまでに有効垂直応力がより大きく低下するような有効応力径路が見られた。また、細粒分を除くと静的なせん断強度はわずかに低下するという傾向が見られた。

(2) 液状化特性は細粒分の影響を受ける。とくに緩詰めの場合に細粒分の影響が大きい。細粒分を除くと液状化強度が低下し、間隙水圧と軸ひずみは繰返し載荷に伴ってきれいな砂の典型的な挙動を示した。

(3) 細粒分の有無に関わらず、相対密度を 30% から 60% に上げると液状化強度が増加した。このことから、現地盤における液状化対策として締固めが効果的であると推測される。

本研究の問題点および今後の課題について述べる。

1) 緩詰めの場合に細粒分の影響が大きいことを示唆する結果を得たが詰まり方の影響を明確に評価できなかった。

2) 砂の粒形が液状化特性に与える影響について今後定量的な検討をしたい。

謝辞

本研究で用いた境港砂は、境港市役所のご好意により、採取したものである。本研究は鳥取大学技術職員岩成敬介氏の技術的補助を受けて遂行した。また、本論文で参照した豊浦砂の試験結果は橋本司氏が鳥取大学工学部土木工学科卒業研究として実施したものの一部である。記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、鳥取県公式ホームページ：鳥取県西部地震ホームページ、鳥取県西部地震の概要。
- 2) 後藤聡・清水正喜・丸山貴弘・山邊恵太：鳥取県西部地震において干拓地で発生した噴砂試料の液状化特性，第 36 回地盤工学研究発表会，No.1093，pp.2155-2156，2001。
- 3) 桑野二郎・S. Binod・橋爪秀夫・高原健吾：細粒分を含む砂の液状化特性，土と基礎，41-7，pp.23-28，1993。
- 4) 岡二三生・角南進・山本陽一：講座「液状化メカニズム・予測法と設計法」，4.液状化判定法（その 1），土と基礎，50-8，pp.51-52，2002。
- 5) 岡二三生・角南進・山本陽一：講座「液状化メカニズム・予測法と設計法」，4.液状化判定法（その 2），土と基礎，50-9，pp.53-58，2002。
- 6) 境港市：境港 1 号汚水幹線地質調査ボーリング柱状図 BP-1，2010。
- 7) 清水正喜・橋本司・中村公一：砂の液状化特性における気泡水の効果に関する研究，土木学会中国支部研究発表会，III-24，2011。
- 8) 清水正喜・木越健二・南部啓太：鳥取県西部地震による液状化発生地域の地盤形成史と噴砂の性質，第 36 回地盤工学研究発表会，No.1094，pp.2157-2158，2001。
- 9) Ishihara, K.: Liquefaction and flow failure during earthquakes, Geotechnique, Vol. 43, pp. 351-415, 1993.
- 10) 永瀬英生・岡二三生：講座「液状化メカニズム・予測法と設計法」，3.液状化のメカニズムと定義，土と基礎，50-8，pp.47-50，2002。
- 11) 山本陽一・兵動正幸・黒島一郎・谷垣正治：砂および粘土の繰返しせん断強度に基づく有効応力モデルとその液状化解析への適用，土木学会論文集，No. 561/III-38，pp.298-308，1997。

(2011 年 6 月 27 日 受付)