

砂の粒度構成による液状化比較

榎戸 源則*・浅野 正生**・柴田 英明***

A Study on Influence of Sands Grading on Liquefaction

Motonori ENOKIDO*・Masao ASANO・Hideaki SIBATA**

Synopsis: Author have carried out an experiment to evaluate influence of grading on liquefaction of artificial continuous soil samples. Main conclusions are as follows.

- (1) If mean grain size increases, liquefaction strength becomes higher proportionally. If river sand contains larger size ones, the strength becomes higher. In land sand, grain contact influences to the strength more than grain size.
- (2) There is no relation between equality coefficient and the strength.
- (3) If room void ratio decreases the strength increases. There is more close relation between the void ratio and the strength.
- (4) In river sand, grain strength influences to liquefaction. In land sand, interlocking influences more than grain strength.

Keywords: liquefaction, void ratio sand, grading

要旨: 砂の粒度構成を連続的に変化させた試料について、液状化強度との関係を室内実験によって検討した結果、次のような結論が得られた。

- (1) 平均粒径が増加すると、液状化強度も増加する。川砂の場合、粒径の大きな砂を多く含むほど液状化強度は大きくなる。山砂の場合は粒径の大小よりも粒子間接触の影響が大きい。
- (2) 均等係数については、川砂、山砂ともに液状化強度との関係は認められない。
- (3) 余裕間隙比が小さくなると、液状化強度は大きくなる。山砂の方がその相関性は高い。
- (4) 川砂の場合、粒子の強度の影響が大きく、山砂では、粒子の強度よりそのかみ合いの影響が大きい。

1. まえがき

さきに、砂の粒子構成が液状化強度に及ぼす影響について、実験研究の検討結果について報告した¹⁾³⁾。前回の実験では、試料として山砂(草木山砂)を使用した¹⁾が、今回は川砂(渡良瀬川砂)を使用した。砂質地盤の主たる構成成分である粗粒分に重点をおき、粗砂と細砂の混合割合を変化させ、液状化強度関係を検討する。その結果を山砂の場合と比較し考察した。

今回は粒度構成が連続的に変化する試料についてのみ実施した。間隙比や平均粒径などの土質定数と液状化強度との関係を検討した。この結果を前回の結果と比較し、

細粒土地盤及び細粒土を含む地盤の液状化の要因解明へ発展させたいと考えている。

現在、地盤工学では、土を粒子の大きさによって、砂、シルト、粘土と分類しており、粒径の大きな砂は粘着力がなく液状化しやすく、粒径の小さい粘性土は、液状化しにくいとされている。しかし、安原教授らが見出したD. L. クレイは、粒径が土質分類のシルトの範囲にある細かな砂であり、このような粘着力のないシルトが発見されている²⁾。また、嘉門教授は、シリカ系の粘着力のない細粒土(クリストバライト)の存在を指摘されている。

細粒土地盤の液状化の要因は、地盤を構成する土の(1)粒度構成・形状と(2)粘着力の有無が主たるものではないか。特に、(2)の粘着力ではないかと推測する。即ち、粘着力のない粘土、粘土と同じ粒径の小さい砂が存在するのではないかと推測する。この仮説を確かめたいと考えている。本稿は(1)の仮定についての一実験研究の報告である。(2)については、現在各種の細粒土の試料を収集し、実験をお

* 土木工学科 教授 工学博士
Professor. Civil Engineering Division. Dr. of Engineering

** 福島県庁 工学士
Fukushima Prefecture

*** 土木工学科 助教授
Associate Professor. Civil Engineering Division.

こなっている。

2. 試験概要

2.1 試料

試料としては、豊浦砂と渡良瀬川砂を用いた。渡良瀬川砂は入手し易く、前回の試験で使用した草木山砂と比較するには、対照的な試料であり、群馬県地盤の安全性評価の調査研究の一環として、適切であると判断されたからである³⁾。

今回の試験は、前回と比較する意味もあるので、その試料の作製方法も前報と同じ方法によったが、その概略は次の通りである。即ち、豊浦砂と渡良瀬川砂を粒径0.42 mm 以下、0.42~0.84 mm, 0.84~2.00 mm にふるいわけたものを、図1及び表1に示す試料Iから試料VIIのような粒度分布に配合した。その配合量及び土質定数も表に示した。各試料の調整方法の重点を説明する³⁾。

試料I：豊浦砂，0.2 mm 以下，0.2~0.3 mm, 0.3 mm 以上の3成分に分けて混合し調整した。

試料II：渡良瀬川砂の粒径2.0 mm 以下の成分を自然状態と同じ粒度分布になるように配合したが、比較するために前の配合割合に合わせた。

試料III：豊浦砂とほぼ同じ分布を示すように、0.10 mm 以下の成分は除外し、0.20 mm 以下(20%)，0.2~0.3 mm (60%)，0.3 mm 以上(20%)に分けたものを混合し調整した。

また0.42 mm 以下についても同じように調整した。

試料IV：試料IIを基準にして細粒分の割合を減少させた。

試料V：試料IIを基準にして細粒分の割合を増加させた。

試料VI：平均粒径 D_{50} が試料IIと同じで、均等係数 D_{60}/D_{10} が異なる。

試料VII：渡良瀬川砂の粒径0.84~2.00 mm 成分だけで構成。大きな粒子のみなので、間隙空間が大きく、最も密な状態(以下最密状態と呼ぶ)での間隙は最も大きい試料である。

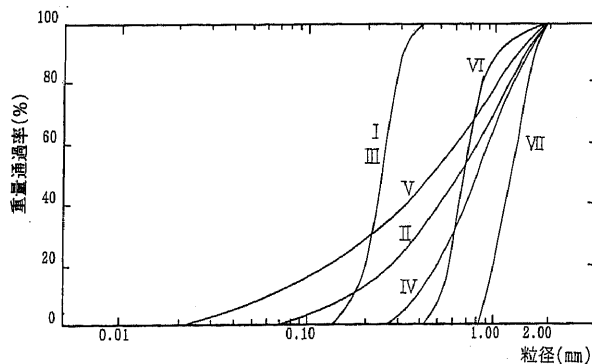


図1 各試料の粒径加積曲線

このように、試料Iから試料VIIまで土粒子径が連続的に変化している。試料IIIは試料Iと比較して、粒子形状の相違による強度比較を目的として、粒度調整した。試料IVと試料Vは試料IIと比較し、細粒分(粒径が0.074 mm 以下であるシルト、粘土を主とする)の割合が液状化に及ぼす影響をみるため、試料IVは均等係数の影響を調べるために、試料VIIは粗粒分の液状化強度を評価するために作製した。

これらの試料は、すべて空中落下法により作製した。

2.2 試験方法

試験方法も前回の場合と同じである。地震時における砂地盤の液状化を、正弦波による繰り返し非排水三軸試験により実施し、土質の相違による影響を検討した。供試体を非排水状態にし、軸荷応力、軸ひずみ、間隙水圧を測定しながら0.1 Hz の正弦波で応力制御の繰り返し載荷を行った。繰り返し載荷時の間隙水圧が供試体の有効拘束圧と等しくなった時点、即ち、供試体の軸ひずみが3%になったときに、液状化が生じたとして試験を終了した。なお、本研究では、メンブレンペネトレーションについては正確な評価が困難であったので、その影響についての補正はなされていない。

3. 試験結果および考察

主として以下の6項目について比較検討し、考察をおこなった。

3.1 同一相対密度の液状化比較

相対密度 $D_r=60\%$ の液状化強度曲線を図2に示す。なお、相対密度の測定法は地盤工学会基準に準拠した。液状化強度としては、繰り返し回数 N_c 5回、3%の両振幅ひずみが生ずる応力比を用いた。これは、各試料とも軸ひずみが2~4%に達すると、ひずみの増大する点

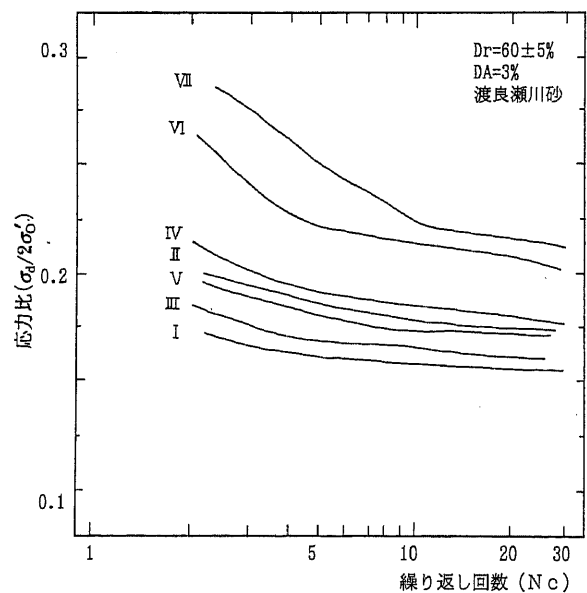


図2 同一相対密度時の液状化強度比較

が不明確になる場合があり、また、繰り返し10回以上で3%軸ひずみに達する場合、載荷強度に対する載荷ロード摩擦の影響があるとみられるからである。なお、図が輻射しているため、実験値のプロットは示していない。図2によると、液状化強度は、試料Ⅶ、Ⅵ、Ⅳ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅲ、の順になっており、粗粒分（粒径0.420~2.00）の割合が多い程、大きくなっていることがわかる。これは、前回の草木山砂（図3）の場合、Ⅵ、Ⅶ、Ⅳ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅲ、の順になっており、ⅦとⅥの順序が入れかわっている。またⅥ、Ⅶの強度曲線は、いずれも渡良瀬川砂の方が草木山砂を上まわっている。しかし、残りの試料Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴについては、渡良瀬川砂と草木山砂とも、ほぼ同じ値を示している。これは、形状の丸い川砂より、粘着力をもつ山砂の方が液状化強度は大きいと推測される結果が逆になっているが、草木山砂の場合、粘性的特性の影響が小さかったと考えられる。

また、図2、図3とも、強度曲線は交叉しておらず、川砂、山砂に限らず、いずれの試料とも、その強度関係は、載荷応力比の相違によって変化していないことがわかる。

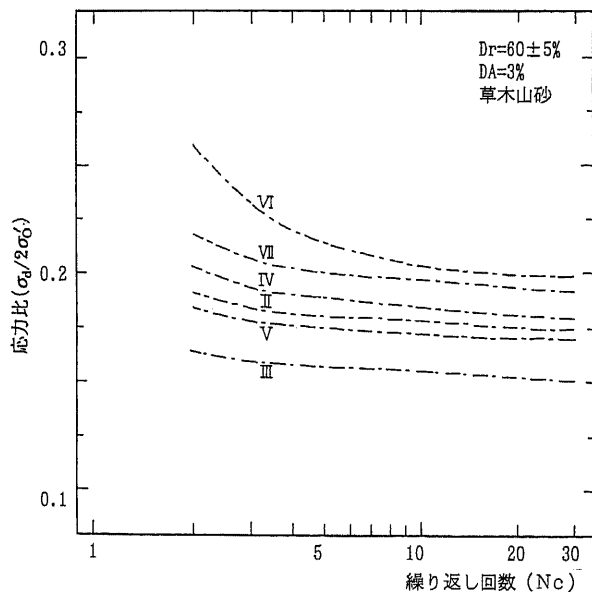


図3 同一相対密度時の液状化強度比較

3.2 平均粒径と最大、最小間隙比の差との関係

各試料の平均粒径 D_{50} と最大、最小間隙比の差 ($e_{max} - e_{min}$) を川砂（図4）と山砂（図5）に示す。いずれの場合も、平均粒径が大きくなるほど、最大、最小間隙比の差は小さくなる傾向がみられる。しかし、川砂の方が、その差が小さい。これは粒子形状の相違によるとみられる。但し、要素成分である試料Ⅰ（豊浦砂）は曲線のグラフよりかなり離れている。特に、山砂の場合、その傾向が著しい。

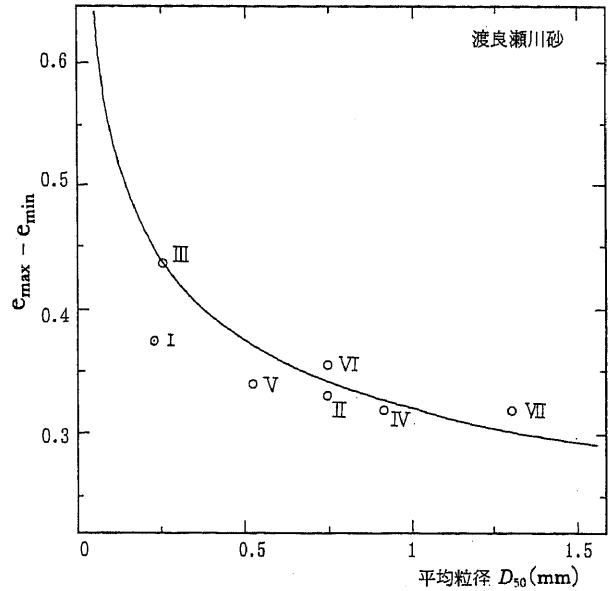


図4 平均粒径と間隙比範囲の関係

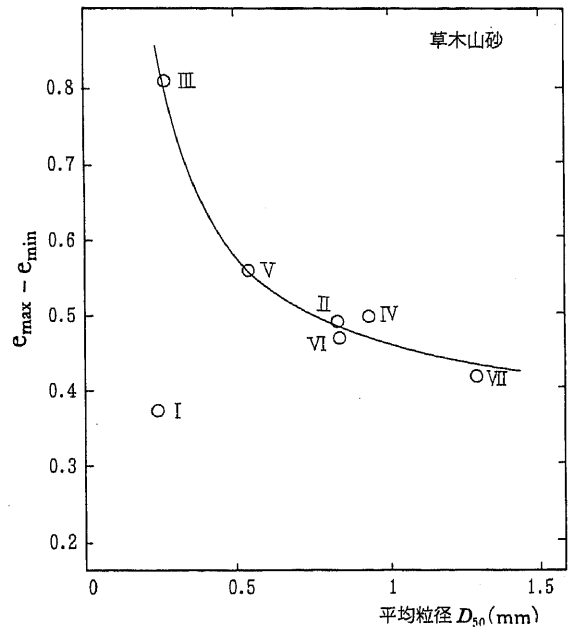


図5 平均粒径と間隙比範囲の関係

3.3 平均粒径と液状化強度

図6（川砂）と図7（山砂）に平均粒径 D_{50} と液状化強度との関係を示した。川砂の場合は、各試料とも平均粒径に比例して、液状化強度がほぼ直線的に増加しており、粒径の大きな砂を多く含むと、液状化強度が大きくなることがわかる。

山砂の場合も、平均粒径にほぼ比例して液状化強度が増加している。但し、試料Ⅵはこの直線よりかなり高い強度を示している。これは、粒子形状の特異性（角張った形状等）の影響によることは、すでに述べた通りである。なお、この直線は、応力比 $\sigma_d/2\sigma'_v$ と平均粒径 D_{50} の関係を最小2乗法で求めた実験式で、次式に示される。

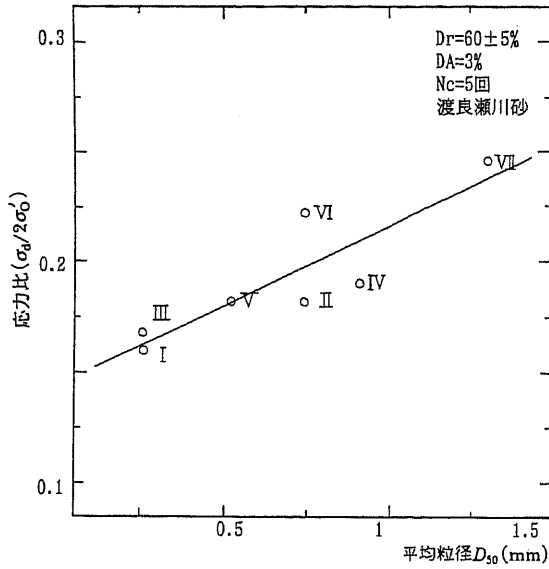


図6 平均粒径と液状化強度の関係

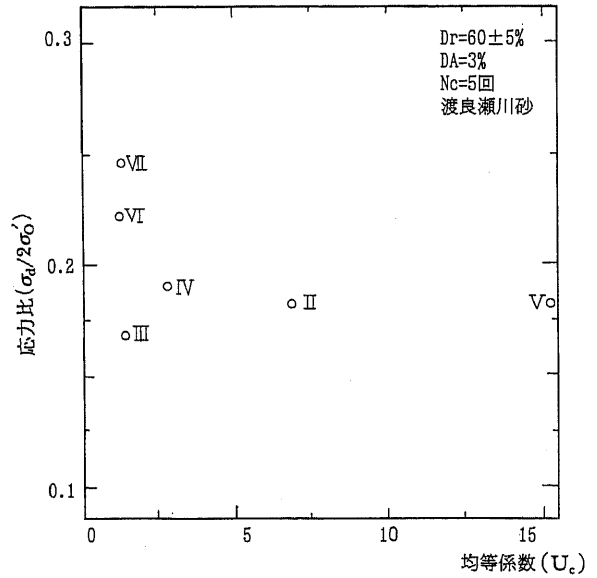


図8 均等係数と液状化強度の関係

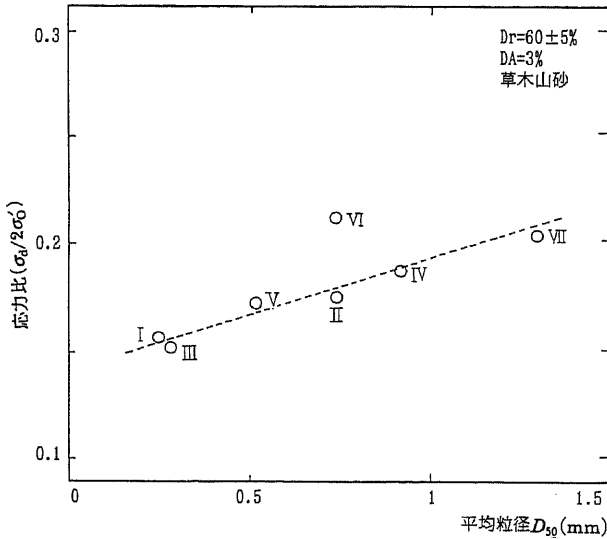


図7 平均粒径と液状化強度の関係

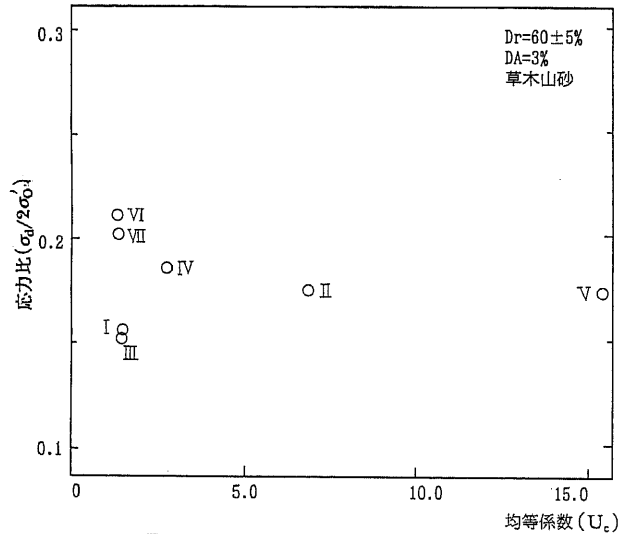


図9 均等係数と液状化強度の関係

渡良瀬川砂 $\sigma_d/2\sigma'_v = 0.074 D_{50} + 0.146$ $r = 0.8350$
 草木山砂 $\sigma_d/2\sigma'_v = 0.045 D_{50} + 0.146$ $r = 0.9884$
 上式からわかるように、川砂の方が強度増加の割合が大きいが、相関係数 r の値から、川砂より山砂の方が相関性は高い。

3.4 均等係数と液状化強度

均等係数 U は、重量通過率10%、60%の土粒子径 D_{10} と D_{60} の比 D_{60}/D_{10} で表される。砂のような、その力学的性質が粗粒分の性質によって支配され、細粒分（粘土鉱物など）の影響を受けない場合に適用される。一般的に、均等係数の大きな土ほど粒度分布の範囲が大きく、安定した粒子形状を形成するといわれる。

図8は川砂の均等係数と液状化強度との関係を示すが、両者の間には、特異な関係はみられない。山砂の場合もその関係はみられなかったが（図9）、川砂の強度

が全般的にやや大きな値を示しているのみで、図8、図9はよく似ている。従って既報で述べた試料IIと試料IVの液状化強度に対する均等係数の影響もないと推定される。

3.5 余裕間隙比と液状化強度

余裕間隙比は、現在の間隙比と最小間隙比の差 ($e - e_{min}$) で表される。従って、その値は現在の状態から最も密な状態に至るまでの体積収縮量指標となる数値である。一般に、この数値が大きい程、粒子の配列構造は緩い状態であり、静的あるいは動的強度とも小さくなると考えられている⁵⁾。

相対密度は、各試料固有の最大、最小間隙比をもとに決定する相対的数値であるので、最大、最小間隙比の差が異なる試料を比較する場合、相対密度が同じでも、最密状態を示す最小間隙比に達するまでの体積収縮量は差

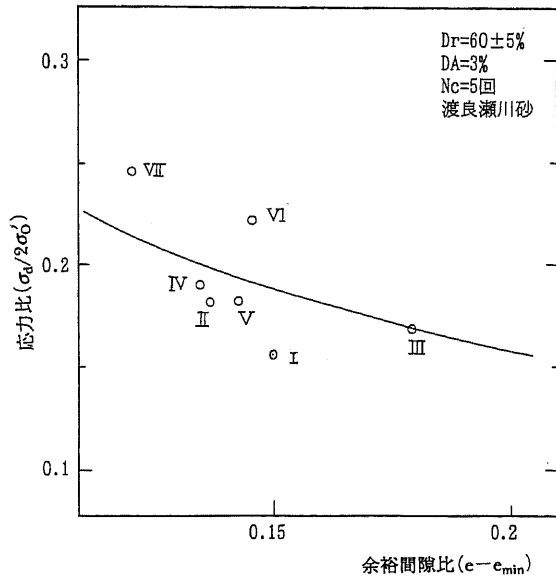


図10 余裕間隙比と液状化強度の関係

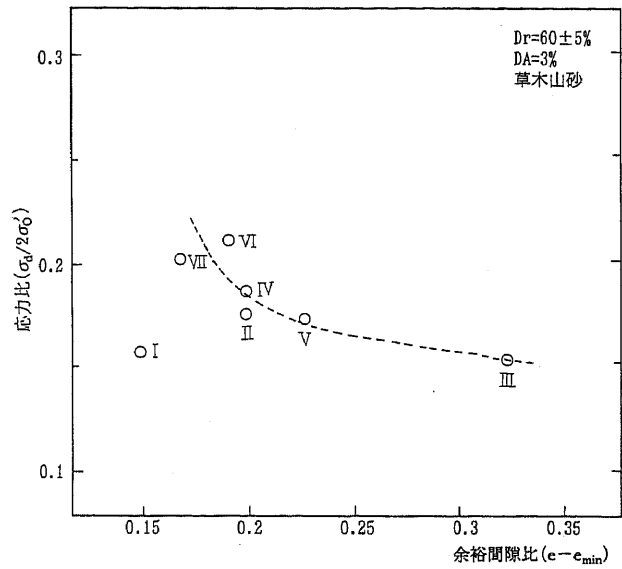


図11 余裕間隙比と液状化強度の関係

表1 各試料の配合量及び土質定数

	試料番号	I	II	III	IV	V	VI	VII
配合量	0.840~2.000 mm	豊浦砂	45.1%		55.0%	35.0%	27.2%	100%
	0.420~0.840 mm		24.5%		30.0%	25.0%	72.5%	
	~0.420 mm		30.4%	100%	15.0%	40.0%	0.3%	
土質定数	GS	2.640	2.669	2.693	2.655	2.664	2.664	2.663
	e _{max}	0.977	1.143	1.688	1.161	1.141	1.273	1.271
	e _{min}	0.605	0.650	0.879	0.664	0.576	0.801	0.854
	D ₅₀ (mm)	0.250	0.744	0.255	0.910	0.520	0.744	1.300
	D ₁₀ (mm)	0.172	0.137	0.175	0.400	0.061	0.592	0.970
	D ₆₀ (mm)	0.260	0.944	0.262	1.150	0.940	0.780	1.360
	U _c	1.52	6.89	1.50	2.86	15.40	1.32	1.40

が生じる。これがせん断強度に影響を与えるので、最密状態にいたるまでの体積収縮量と液状化強度との関係を比較するためには、余裕間隙比の方が適切な指標になると考えられる。ここで、余裕間隙比を用いた理由は以上の通りである。

以下に、相対密度60%の場合の余裕間隙比と液状化強度との関係を検討する。図10に、川砂についての関係図を示した。試料Iがやや曲線から離れているが、他の試料については、余裕間隙比が小さい程液状化強度は大きい。この図は相対密度60%における余裕間隙比と応力比の関係を余裕間隙比と応力比の相関係数が最も大きいべき乗回帰分析で求めた次式から描かれた。

$$\sigma_d / 2\sigma'_v = 0.0498(e - e_{min})^{-0.707} \quad r = 0.696$$

試料VIは、試料II, IV, V, より余裕間隙比が大きいにも関わらず、応力比の値が大きくなった。これは、試料VIが細粒子(粒径0.42 mm以下)を殆ど含まないことによると推定される。試料Iについて、その余裕間隙比と液状化強度との関係が、他の試料におけると同じよ

うに現れたならば、上式より試料Iの余裕間隙比0.147に対して、応力比は0.193となり、実測値0.161より応力比が0.03大きくならなければならない。試料Iと他の試料との強度関係の相違は、粒子形状か粒子構造の相違によるとみられる。

図11に前回の草木山砂の場合を示した。この曲線は、次式で表された。

$$\sigma_d / 2\sigma'_v = 0.0880(e - e_{min})^{-0.477} \quad r = 0.890$$

川砂とほぼ同じ傾向を示しているが、相関係数rが1.0に近く、約0.2程度川砂の場合より大きく、山砂の方が相関性が高いことがわかる。また、山砂の方が、余裕間隙比の減少に伴う強度増加も著しい。試料Iの曲線からの離れも山砂の方が顕著に現れている。

3.6 粒度構成の液状化強度

川砂の試料のなかでは、液状化強度は、試料VII, VI, IV, II, V, III, I, の順序になっており、特に、VII, VIが他の試料に較べてかなり高い値となっている。これは、試料VIIは平均粒径が1.30と他の試料がすべて1.0未

満である中で一番大きい。このため、試料の圧密中の密度変化が大きく、圧密中に粒子の接触が進行し、よりかみ合いの強い状態となった結果、供試体の変形抵抗が大きくなったので、液状化強度も大きくなったとみられる。

粒子構成上、粗粒子(粒径0.840~2.000 mmの土粒子)のみの試料Ⅶは最も大きい。反対に、細粒子(粒径0.420 mm以下の土粒子)のみの試料Ⅲは、液状化強度は最も小さい。しかし、試料Ⅰ(豊浦砂)よりも大きな値となっている。その他、粗粒子割合が55%の試料Ⅳ、同じく45%の試料Ⅱ、35%の試料Ⅴの順序に、粗粒子の割合が大きいほど、液状化強度は大きくなる。また、試料Ⅵは、中間粒子(粒径0.420~0.840 mmの土粒子)が、72.5%でかつ粗粒子割合は27%と少ないが、液状化強度は、試料Ⅶ(粗粒子100%)について、2番目の液状化強度を示している。この事実は、川砂の場合、粗粒子のみでなく、中間粒子も液状化強度に寄与していることが理解される。

次に、前回の山砂と比較してみる。試料Ⅱ、Ⅳ、Ⅴについては川砂も山砂も殆ど同じ強度となっているが、粗粒子100%の試料Ⅶと、粗粒子は27.2%であるが、中間粒子が72.5%と多い試料Ⅵは、川砂の方が山砂より液状化強度は、かなり大きくなった。また、川砂は試料Ⅶ、Ⅵの順序であるが、山砂は、試料Ⅵ、Ⅶと逆になっている。これは、川砂は、粗粒子、中間粒子という個々の粒子の強度の影響が大きいので、強度の大きな粗粒子100%からなる試料Ⅶが、中間粒子割合の多い試料Ⅵより液状化強度は大きくなった。しかし、個々の粒子強度が川砂より小さな山砂の場合、個々の粒子強度より、粒子のかみ合いによる供試体全体の強度への影響力の方が大きかったことによると推定される。特に、山砂の粒子は角ばっており、粒子が丸味の形状をしている川砂より、粒子のかみ合い力が大きかったことが原因であると考えられる。さらに、草木山砂の粘着力が小さかったことが、山砂の方が川砂より液状化強度が小さくなった要因の一つであるとみられる。

4. 結 論

砂の粒土構成を連続的に変化させた試料について、液状化強度との関係を室内実験によって検討した結果、本研究の範囲内で次の結論が得られた。

(1) 平均粒径との関係

平均粒径が増加すると、液状化強度もほぼ比例して増加する傾向がみられた。川砂の場合、粒径の大きな砂を

多く含むほど、液状化強度は大きくなる。山砂の場合は、粒径が大きく1—2 mmになると、粒径より粒子間接触の影響が大きい点が異なる。

(2) 均等係数との関係

川砂の場合も、山砂と同じように、均等係数と液状化強度との間には関連が認められなかった。

(3) 余裕間隙比との関係

余裕間隙比が小さくなると、液状化強度は大きくなる。この関係は、川砂と山砂のいずれについてもみられるが、その相関性は山砂の方が高く、余裕間隙比の減少に伴う強度増加も著しい。

(4) 粒度構成との関係

川砂の場合、個々の粒子の強度の影響が大きいので、粗粒子や中間粒子の割合が大きい試料が大きくなった。山砂では、個々の粒子の強度より粒子のかみ合いにより供試体全体への影響が大きいので、粒子形成の角張った粒子の影響やかみ合い力の大きくなる粒度構成の供試体の強度が大きくなったと推定される。

以上の個々の結論を総合すると、砂の液状化強度は、砂の粒径のみでなく、砂の粒子構成、個々の砂の強度特性、形状、粘着力の有無・大小など種々の要因が複雑に影響しあっていると考えられる。従って、これらの要因を系統的に整理し、定性的な評価から、より定量的な評価を可能にすることが、重要であると思われる。

(原稿受付 平成9年9月29日)

参 考 文 献

- 1) 榎戸源則・上田高博(1997): 砂の粒子構成と粒度構成が液状化に及ぼす影響, 「地盤工学会論文報告集」Vol. 37, No. 4, pp. 149~154
- 2) 安原一哉・足立正樹・福島正明(1995): 塑性を有しないシルトの液状化特性, 第30回土質工学研究発表会, pp. 911~912
- 3) 群馬県企画部, 榎戸源則(委員長)他(1992): 産業施設の立地安全性に関する調査研究報告書
- 4) 吉見吉昭(1991): 砂地盤の液状化, 第二版, 技報堂出版, pp. 38~40
- 5) 石原研而(1981): 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp. 256~257
- 6) T. Shibata, F. Oka, Y. Ozawa(1996): Characteristics of Ground Deformation due to Liquefaction, Special Issue of Soil and Foundations, pp. 65-79, Jan., 1996
- 7) S. Yasuda, K. Isihara, K. Harada, N. Shinkawa: Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Special Issue of Soils and Foundations, pp. 99-107, Jan., 1996
- 8) 榎戸源則(1997): 国士館大学理工学研究所報告 第9号 pp. 49~55