

粗粒材料の液状化強度特性評価に関する基礎的研究

A Study on the Liquefaction Resistance Properties of Coarse-grained Materials

笹岡 里衣 岡本 道孝
藤崎 勝利 富樫 昇¹⁾

要 約

東北地方太平洋沖地震を契機として、原子力発電所をはじめとする重要施設の耐震評価基準の見直しが進められており、この一環として、岩盤掘削で得られる粗粒材料（岩ずり）を用いた埋立地盤についても液状化の可能性を考慮した施設の設計が求められている。しかし、従来、粗粒材料の液状化は想定されておらず、液状化強度特性や挙動に関する体系的な研究事例は少ない。今回、種々の方法で粒度を調整した粗粒材料を対象とした非排水繰返し三軸試験を実施し、粒度調整方法が液状化強度特性に及ぼす影響について検討した。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験試料
- III. 物理特性
- IV. 液状化強度特性
- V. まとめ

I. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震を契機として、原子力発電施設の耐震性評価基準の見直しが進められており、これに伴い、岩盤掘削で得られる粗粒材料（岩ずり）を用いた埋立地盤の液状化も考慮する必要に迫られている。一方、粗粒材料の液状化については、1948年福井地震、1983年ボラピーク地震（米国）、1995年兵庫県南部地震などで事例が報告されている¹⁾が、従来、土木構造物の設計において粗粒材料で構成される地盤の液状化を考慮することは少なく、液状化強度特性や挙動に関する体系的な研究事例も少ない。

また、「粗粒土の供試体作製に関する基準」(JGS 0530)には、三軸試験に供することが可能な試料の最大粒径 D_{max} は供試体直径 ϕ の 1/5 未満とされている。基準に準拠して三軸試験で粗粒材料の液状化強度特性を評価する場合、実用上、最も大きな大型三軸試験機 ($\phi 300\text{mm}$) を用いたとしても、試料の許容最大粒径は 53mm に制限される。そこで、粒径 53mm 以上の粒子を含む地盤の液状化強度特性を把握する場

合には、供試体の大きさにあわせて粒度を調整する必要がある。また、多数の大型三軸試験を行うことは、時間やコストの面から現実的ではないため、汎用性の高い中型試験機 ($\phi 150, 100\text{mm}$) や小型試験機 ($\phi 50\text{mm}$) を用いた粗粒材料の液状化強度特性の評価が試みられることも多い。以上のように、粗粒材料の液状化強度特性を評価するには、粒度調整の影響を定量的に評価することが重要となる。そこで、著者らは、種々の方法で粒度調整した試料について物理試験、および非排水繰返し三軸試験を実施し、粒度調整方法が液状化強度特性に及ぼす影響について検討した。

II. 実験試料

1. 原粒度

本検討では、2種類の粗粒材料 ($D_{max}=53\text{mm}$) を用いてい

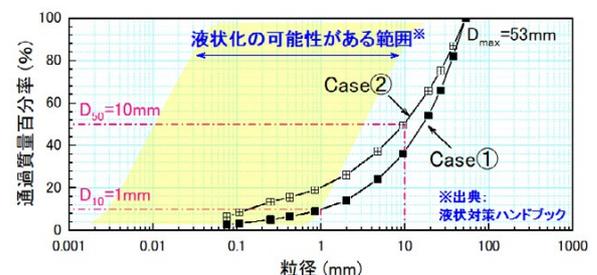


Fig.1 原粒度の粒径加積曲線
(Grain Size Accumulation Curves of the Original Samples)

1) 土木設計本部 Civil Engineering Design Division

キーワード: 粗粒材料, 液状化, 物理特性, 非排水繰返し三軸試験

Keywords: coarse-grained material, liquefaction, physical property, cyclic undrained triaxial test

る。これらの粒径加積曲線を Fig.1 に示す。粗粒側を Case① (10%粒径 $D_{10}=1.0\text{mm}$, 50%粒径 $D_{50}=16.5\text{mm}$), 細粒側を Case② ($D_{10}=0.15\text{mm}$, $D_{50}=9.8\text{mm}$) とした。図中には、埋立地の液状化対策ハンドブックに記載されている液状化の可能性のある範囲 (均等係数 $U_c \geq 3.5$ の場合)²⁾, および道路橋示方書の液状化の判定が求められる土層条件のひとつである, $D_{50} \leq 10\text{mm}$ かつ $D_{10} \leq 1\text{mm}$ ³⁾を示す。なお, Case②は後者において, 液状化の可能性があると判定される。

2. 粒度調整方法

中型, もしくは小型三軸試験機の仕様にあわせて D_{max} が供試体直径の 1/5 未満 ($D_{\text{max}} < \phi/5$) となるように, 原粒度の試料土を 3 種類の方法によって粒度調整した。3 種類の粒度調整方法とそれらの特徴⁴⁾を以下に述べるとともに, これらの模式図を Fig.2 に示す。これ以降, 調整後の試料を「粒度調整試料」と称する。

(a)せん頭粒度: 許容最大粒径 D_{max}^* を上回る粗粒分を除去する方法であり, D_{max}^* 以下の通過質量分から粒度を算出する。粒度調整作業が最も容易であるが, 細粒分含有率 F_c が大きくなるため, 透水係数が低下しやすい。

(b)相似粒度: 粒径加積曲線を細粒側へ平行移動させる方法であり, U_c の変化が小さいとされている。 D_{max} と D_{max}^* の比を原粒度の粒径に乗ずる。なお, (a)と同様に, F_c が大きくなるため, 透水係数が低下しやすい。

(c)置換粒度: 除去される大粒径分を D_{max}^* 以下の粗粒分で置換する方法であり, 礫分や F_c の変化が小さい。例えば, $D_{\text{max}}=53\text{mm}$ から $D_{\text{max}}^*=19\text{mm}$ へ調整する場合, 原粒度の粒径 19~53mm の通過質量分を粒径 9.5~19mm に置き換える。

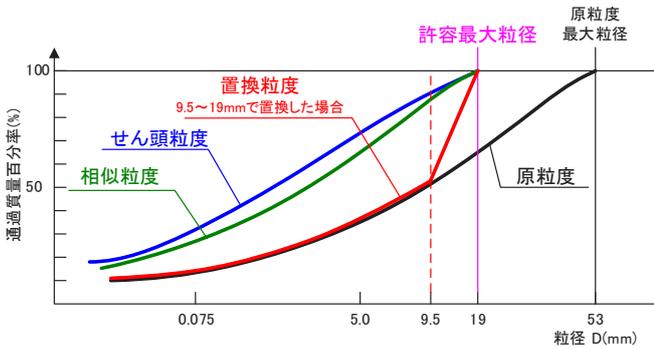


Fig.2 粒度調整方法の模式図 (Diagram of Particle Size Adjustment Methods)

III. 物理特性

検討に用いた試料の物理特性を Table 1(a), (b)に, 粒径加積曲線を Fig.3(a), (b)に示す。ここでは, 単位質量あたりに占める粒径 2mm 以上の礫の含有量を礫分含有率 G_c とした。なお, Table 1において, 括弧で括った U_c は粒径加積曲線を外挿して算出した D_{10} を用いた値である。合成密度 ρ_s は粒径毎に分級し求めた絶対乾密度 ρ_b を用いて算出した。また, 最

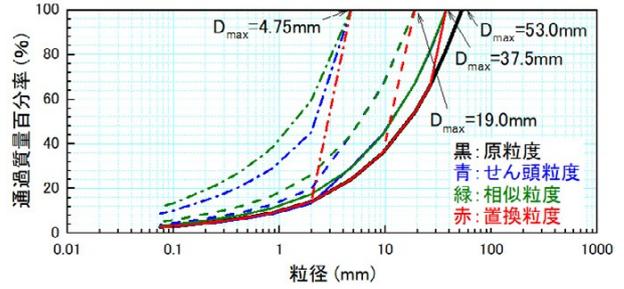


Fig.3(a) Case①の粒径加積曲線 (Grain Size Accumulation Curves of Case①)

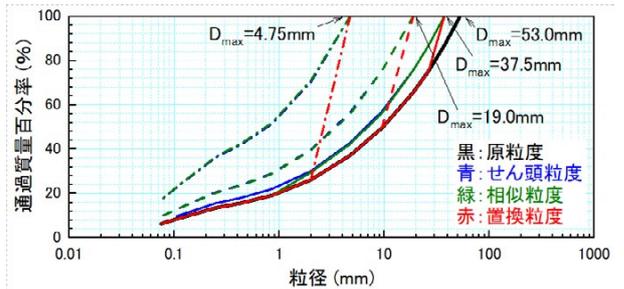


Fig.3(b) Case②の粒径加積曲線 (Grain Size Accumulation Curves of Case②)

小・最大密度 ρ_{dmin} , ρ_{dmax} は礫の最小, 最大密度試験法 (JGS 0126) によって求めた。

1. 均等係数

Fig.4 に D_{max} と U_c の関係を示す。せん頭粒度と相似粒度については, Case①では D_{max} が小さくなるにつれて U_c は微増したが, Case②では減少傾向を示し, Case①と②とで異なる変化傾向を示した。一方, 置換粒度については, Case①, ②ともに, 原粒度と粒度調整試料の G_c , F_c は等しくなるものの, D_{max} が小さくなるほど U_c も減少する傾向を示した。これは, 試料毎に 60%粒径 D_{60} がわずかに異なったためである。

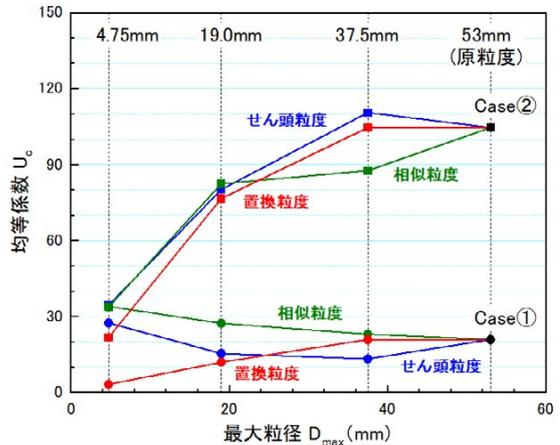


Fig.4 D_{max} と U_c の関係 (Relationships between D_{max} and U_c)

Table 1(a) Case①の物理特性
(Physical Properties of Case①)

項目	原粒度	φ 150			φ 100			φ 50		
		せん頭粒度	相似粒度	置換粒度	せん頭粒度	相似粒度	置換粒度	せん頭粒度	相似粒度	置換粒度
最大粒径 D_{max} [mm]	53.0	37.5	37.5	37.5	19.0	19.0	19.0	4.75	4.75	4.75
細粒分含有率 F_c [%]	2.7	2.6	3.4	2.7	3.8	5.0	2.7	8.7	11.5	2.7
礫分含有率 G_c [%]	86.0	86.7	82.6	86.0	80.1	74.0	86.0	54.9	40.6	86.0
均等係数 U_c [-]	20.9	13.3	23.0	20.9	15.4	27.3	12.0	27.5	(34.0)	3.2
合成密度 ρ_s [g/cm ³]	2.629	2.617	2.625	2.627	2.606	2.617	2.622	2.682	2.663	2.677
最小密度 ρ_{dmin} [g/cm ³]	1.566	1.629	1.646	1.609	1.563	1.581	1.531	1.466	1.480	1.358
最大密度 ρ_{dmax} [g/cm ³]	2.050	2.059	2.061	2.028	2.024	2.051	2.011	1.895	1.894	1.610

Table 1(b) Case②の物理特性
(Physical Properties of Case②)

項目	原粒度	φ 150			φ 100			φ 50		
		せん頭粒度	相似粒度	置換粒度	せん頭粒度	相似粒度	置換粒度	せん頭粒度	相似粒度	置換粒度
最大粒径 D_{max} [mm]	53.0	37.5	37.5	37.5	19.0	19.0	19.0	4.75	4.75	4.75
細粒分含有率 F_c [%]	6.3	8.1	7.1	6.3	10.8	10.6	6.3	17.0	17.1	6.3
礫分含有率 G_c [%]	73.9	69.9	70.6	73.9	60.3	60.7	73.9	29.9	29.1	73.9
均等係数 U_c [-]	104.6	110.5	87.5	104.6	(80.1)	(82.4)	76.6	(34.5)	(33.8)	21.7
合成密度 ρ_s [g/cm ³]	2.635	2.633	2.675	2.676	2.631	2.631	2.630	2.680	2.685	2.673
最小密度 ρ_{dmin} [g/cm ³]	1.792	1.768	1.703	1.713	1.750	1.699	1.741	1.518	1.52	1.542
最大密度 ρ_{dmax} [g/cm ³]	2.180	2.152	2.256	2.270	2.143	2.224	2.152	1.974	2.014	1.955

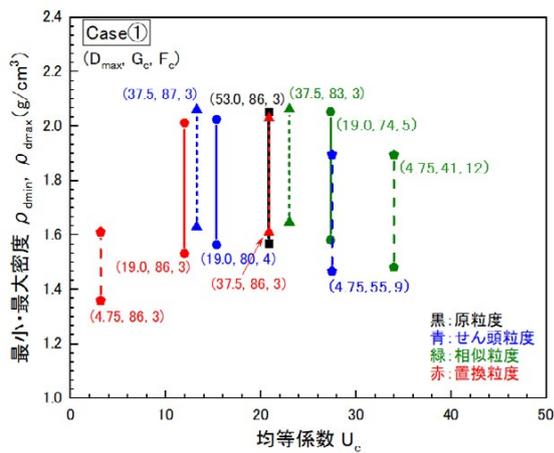


Fig.5(a) Case①の U_c と ρ_{dmin} , ρ_{dmax} の関係
(Relationships between U_c and ρ_{dmin} or ρ_{dmax} of Case①)

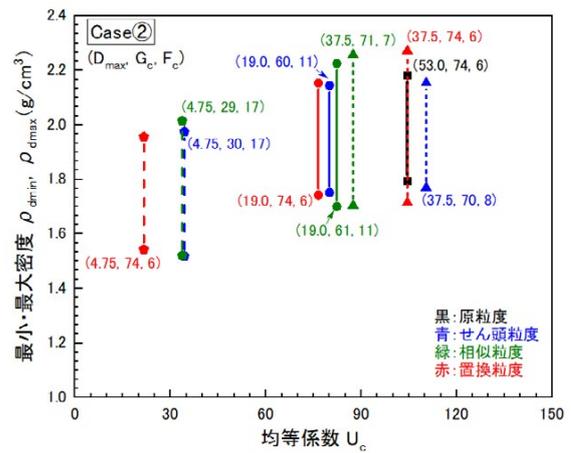


Fig.5(b) Case②の U_c と ρ_{dmin} , ρ_{dmax} の関係
(Relationships between U_c and ρ_{dmin} or ρ_{dmax} of Case②)

2. 最小・最大密度

液状化試験の供試体密度を設定する上で、 ρ_{dmin} , ρ_{dmax} は重要な物理特性のひとつである。そこで、粒度調整により生じる ρ_{dmin} , ρ_{dmax} の変化について検討した。Fig.5(a), (b) に U_c と ρ_{dmin} , ρ_{dmax} の関係を示す。なお、図中に (D_{max} , G_c , F_c) を併せて示す。すべての粒度調整試料で ρ_{dmin} , ρ_{dmax} は原粒度のそれと差異が生じた。以下に詳細を記す。

- Case②においては、試料に依らず ρ_{dmin} , ρ_{dmax} は U_c の増加に従って大きくなる傾向がある。Case①においても、 D_{max} が同一の場合は同様な傾向が確認でき、これらは砂質土に関する既往結果¹⁾と整合している。
- 前述したように、Case①, ②ともに置換粒度の G_c , F_c は D_{max}

に依らず原粒度のそれと等しいものの、 U_c が異なるために、 ρ_{dmin} , ρ_{dmax} に差異が生じたと考えられる。

- U_c が同一の場合 (例えば、Case① : $D_{max}=19.0\text{mm}$ 相似粒度と $D_{max}=4.75\text{mm}$ せん頭粒度) であっても、 ρ_{dmin} , ρ_{dmax} に差異が認められるが、これは G_c や F_c が異なるためと考えられる。
- Case②の原粒度材料と $D_{max}=37.5\text{mm}$ 置換粒度でも同様の現象が認められるが、上述した Case①の結果も考慮すると、 ρ_{dmin} , ρ_{dmax} の大小が必ずしも D_{max} に依存するわけではないという結果になっている。

以上のように、試料の ρ_{dmin} , ρ_{dmax} は U_c , G_c , F_c などの粒度特性の複合的な影響により、試料毎に特有な値が得られた。

3. 相対密度と有効間隙比の関係

後述する非排水繰返し三軸試験では、相対密度 D_r と有効間隙比 e_b ($e_b = \rho_s / \rho_d - 1$, ρ_d : 乾燥密度) の2つのパラメータに着目して供試体密度を設定した。 e_b は粗粒材料の力学特性を把握する際に用いられることが多い⁵⁾。 D_r と e_b のそれぞれの定義から、両者の関係は以下の式によって表わすことができる。

$$e_b = A \cdot D_r + B \cdots \cdots (1a)$$

$$A = \rho_s \cdot (\rho_{dmax} - \rho_{dmin}) / (\rho_{dmax} \cdot \rho_{dmin}) \cdots \cdots (1b)$$

$$B = (\rho_s - \rho_{dmin}) / \rho_{dmin} \cdots \cdots (1c)$$

Table 2 原粒度の D_r と e_b の関係

(Relationships between D_r and e_b of the Original Samples)

	Case①	Case②
相対密度 D_r [%]	60	
有効間隙比 e_b [-]	0.441	0.313

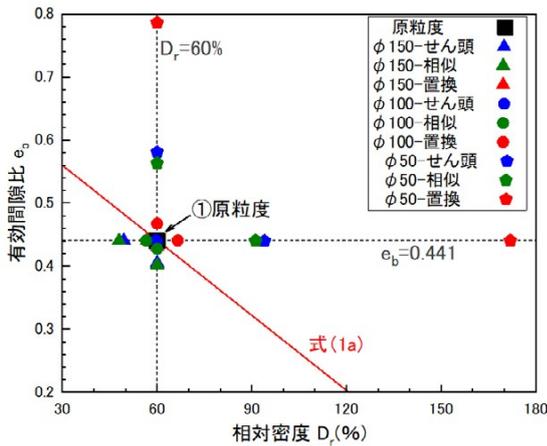


Fig.6(a) Case①の D_r と e_b の関係
(Relationships between D_r and e_b of Case①)

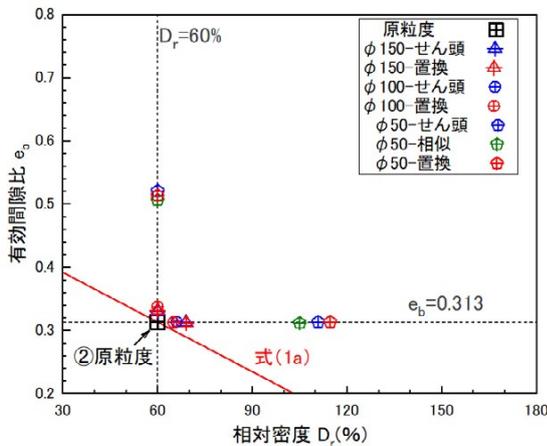


Fig.6(b) Case②の D_r と e_b の関係
(Relationships between D_r and e_b of Case②)

本検討では、後述する液状化強度特性の検討において、 $D_r=60\%$ の原粒度の試料土を想定した。各 Case の粒度調整試料の D_r と e_b を Table 2 に示す。Fig.6(a), (b)には、原粒度、および各粒度調整試料の D_r と e_b の関係を示す。図中の実線が式(1a)を表わし、粒度調整試料供試体の D_r と e_b を当実線上に位置させることが、原粒度供試体を模擬する上での目標となる。しかしながら、 $D_r=60\%$ に合わせて粒度調整試料供試体を作製すると、 e_b は原粒度のそれから乖離する。反対に、 e_b を原粒度に一致させようとすると、 D_r に乖離が生じる。また、原粒度と粒度調整試料での乖離の程度は D_r , e_b ともに D_{max} が小さいほど大きくなる。この要因として、 D_{max} が小さいほど、 U_c が小さくなるためと考えられる。以上のように、原粒度供試体の密度状態 (D_r と e_b) と粒度調整試料の供試体のそれとを完全に一致させることはほぼ不可能と考えられる。

IV. 液状化強度特性

1. 試験条件

前述の方法で調整した試料を対象として、非排水繰返し三軸試験 (以降、液状化試験) を行い、試料の物理特性が液状化強度特性に及ぼす影響について検討した。供試体の密度は、 $D_r=60\%$ の一定とした場合と、これに対応する e_b を一定とした2通りで設定した。

2. 試験手順

供試体の作製および試験機への設置は、「粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法」(JGS 0530) に準拠して行った。供試体は、乾燥試料を金属型枠内に5層に分けて投入し、各層毎に突固めて作製した。型枠ごと水槽に沈めて供試体を浸水させた後、供試体上部に膨張防止のウェイト (約 11kg) を載せた状態で凍結した。脱型後、供試体を試験機に設置して、脱気水を通水しながら解冻させた。供試体の解冻後、間隙水圧係数 B 値を測定し、これが 0.96 を上回ることを確認した後、圧密圧力 98kPa で等方圧密させた。圧密完了後、載荷速度 0.1Hz で繰返し応力を作用させた。

3. 液状化試験結果

本報では、載荷回数 20 回で両振幅軸ひずみ ϵ_{DA} が 5% に達するときの繰返し載荷応力比を液状化強度比 R_{L20} として検討を行った。

Table 3 に試験条件、および試験結果を示す。Fig.7 に圧密後の相対密度 D_{rc} と R_{L20} の関係、Fig.8 に圧密後の有効間隙比 e_{bc} と R_{L20} の関係を示す。なお、 D_{rc} もしくは e_{bc} は R_{L20} 算出に用いた供試体の平均値 ($n=3\sim4$) である。Table 3 や Fig.7, 8 から、 R_{L20} の大小は供試体の密度条件 (D_{rc} や e_{bc}) に因らず、0.20~0.35 の値を示すことがわかる。一方で、Fig.9 に示すように G_c と R_{L20} の関係で整理すると、バラツキはあるものの、 G_c の増加に従って R_{L20} が増加する傾向が確認できた。

4. メンブレンペネトレーションの影響

大きな粒径を含む均等係数の小さな試料の場合、供試体表

面に凹凸が生じやすい。このような供試体を用いて液状化試

験を行った場合、供試体凹部とメンブレンの間に間隙水が流

Table 3 試験結果一覧
(Test Results)

			Case①						Case②					
			φ150			φ100			φ50		φ150		φ100	
			せん頭	相似	置換	せん頭	相似	置換	せん頭	相似	せん頭	置換	せん頭	置換
粒度特性	最大粒径 D_{max} [mm]		37.5	37.5	37.5	19.0	19.0	19.0	4.75	4.75	37.5	37.5	19.0	19.0
	細粒分含有率 F_c [%]		2.6	3.4	2.7	3.8	5.0	2.7	8.7	11.5	8.1	6.3	10.8	6.3
	礫分含有率 G_c [%]		86.7	82.6	86.0	80.1	74.0	86.0	54.9	40.6	69.9	73.9	60.3	73.9
	均等係数 U_c [-]		13.3	23.0	20.9	15.4	27.3	12.0	27.5	(34.0)	110.5	104.6	(80.1)	76.6
Dr一定条件	相対密度(目標値) D_r [%]					60	60	60	60	60				
	圧密後相対密度 D_{rc} [%]					69.7	70.6	74.8	計測不良	計測不良				
	圧密後有効間隙比 e_{bc} [-]					0.403	0.387	0.407	計測不良	計測不良				
	コンプライアンス比 C_R [-]					2.0	4.3	4.4	3.2	2.5				
	液状化強度 R_{L20} [-]					0.271	0.272	0.314	0.222	0.190				
eb一定条件	有効間隙比(目標値) e_b [-]		0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.440	0.441	0.314	0.313	0.313	0.312
	圧密後相対密度 D_{rc} [%]		71.1	70.7	77.8	79.4	78.0	83.5	103.2	101.0	81.3	74.2	91.1	79.1
	圧密後有効間隙比 e_{bc} [-]		0.368	0.368	0.370	0.366	0.359	0.372	0.402	0.402	0.273	0.278	0.252	0.282
	コンプライアンス比 C_R [-]		2.6	3.1	3.8	2.9	3.0	3.4	1.3	2.2	2.6	2.2	2.1	2.7
	液状化強度 R_{L20} [-]		0.288	0.246	0.264	0.266	0.222	0.357	0.236	0.224	0.239	0.250	0.249	0.308

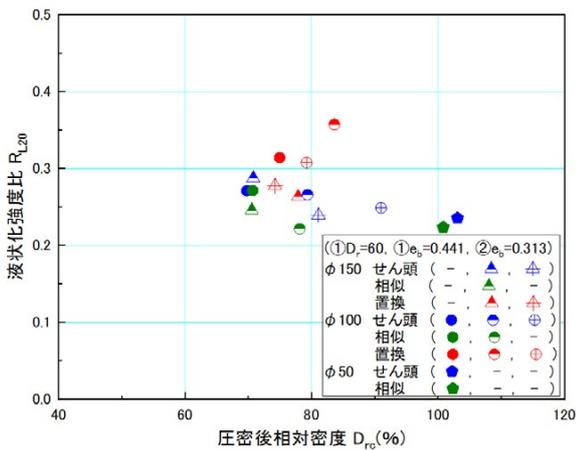


Fig.7 D_{rc} と R_{L20} の関係
(Relationships between D_{rc} and R_{L20})

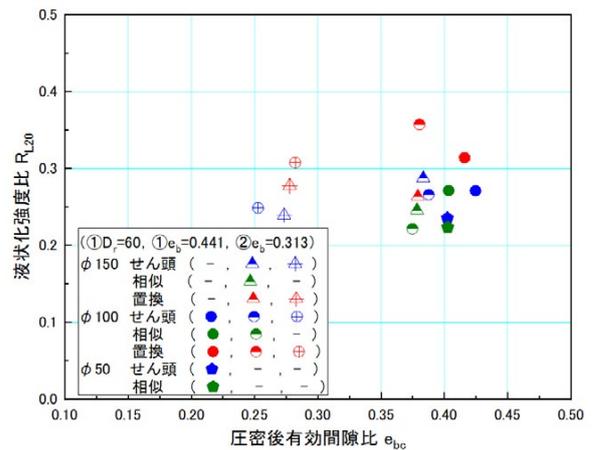


Fig.8 e_{bc} と R_{L20} の関係
(Relationships between e_{bc} and R_{L20})

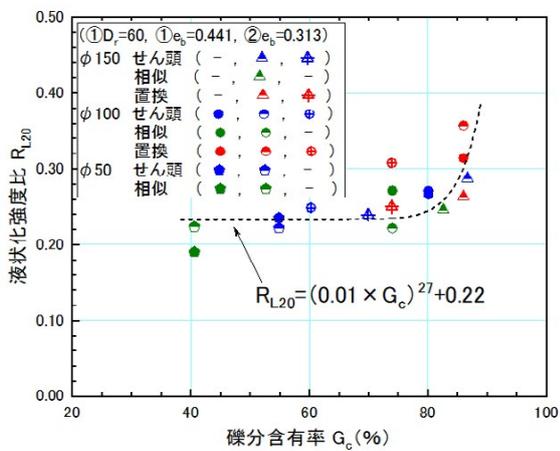


Fig.9 G_c と R_{L20} の関係
(Relationships between G_c and R_{L20})

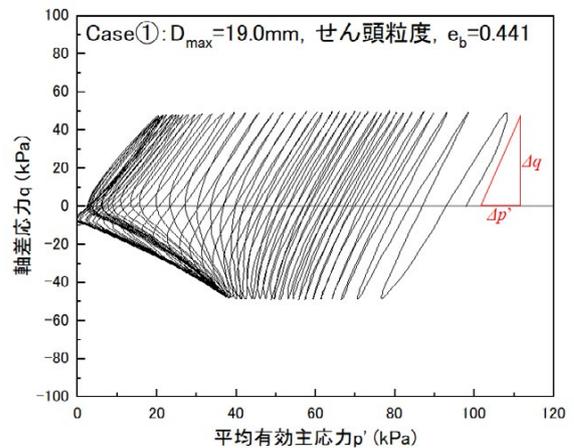


Fig.10 有効応力経路の例
(Effective Stress Path)

入するメンブレンペネトレーション (MP) 効果によって過剰間隙水圧の上昇に遅延が生じ、液状化強度特性に影響を及ぼすことが知られている。MP の影響を表わす指標としてコンプライアンス比 C_R があり、様々な C_R の推定方法が提案されている (例えば 6, 7, 8)。ここでは、載荷開始から比較的初期の段階 (弾性体領域) の平均有効主応力 $\Delta p'$, 軸差応力 Δq から C_R を求める方法⁷⁾を用いて MP の影響を検討した。Fig.10 に本試験で得られた有効応力経路の一例を示す。MP の影響がない理想的な条件 ($C_R = 0$) では、1 回の載荷において、 $\Delta p'$ がほとんど変化せずに Δq が増加し、有効応力経路は横軸に対しほぼ直交する。しかし、Fig.10 に示すように、本検討で実施したすべてのケースにおいて 1 回の載荷中に $\Delta p'$ の変化が生じた。Table 3 に全試験条件の C_R を掲載するが、 C_R は約 2~4 であり、 D_{max} かつ G_c が大きいほど C_R も大きくなる傾向がみられた。MP 補正として Tokimatsu & Nakamura の手法⁹⁾が知られているが、Table 3 に示した C_R は Tokimatsu & Nakamura の研究で確認された C_R を大きく上回っており、これに従った場合、粗粒材料の液状化強度は著しく小さく評価される。過去の地震において粗粒材料の液状化が確認されてはいるものの、砂質土の液状化ほど頻繁に生じる現象ではないことに鑑みると、この評価結果は現実的ではないと考えられる。したがって、粗粒材料を対象とした液状化試験結果の MP 補正方法について、新たな検討が必要と考えられる。

V. まとめ

従来、液状化が考慮されていなかった粗粒材料に対し、粒度調整を行い汎用試験機で液状化強度特性を把握することを目的として、粒度調整が物理特性や液状化強度特性に及ぼす影響を検討した。種々の物理試験、および非排水繰返し三軸試験 (液状化試験) から以下の知見を得た。

- ・ 粒度調整試料で供試体を作製する場合、原粒度の密度条件 (D_r , e_b) と粒度調整試料のそれを完全に一致させること

は、ほぼ不可能である。

- ・ 粒度調整試料の液状化強度比と礫分含有率は相関性がある。
- ・ 粗粒材料に対し液状化試験を行う際、メンブレンペネトレーションの影響を受けやすい。また、既往の研究と比較してメンブレンペネトレーションの影響は大きく、粗粒材料に適した補正方法を検討する必要がある。

以上のように、粗粒材料の液状化強度特性の評価には、未だ多くの課題がある。今後もデータを集積し、検討を続ける予定である。

参考文献

- 1) 國生剛治；地震地盤動力学の基礎 エネルギー的視点を含めて、鹿島出版会、2014.
- 2) (財) 沿岸開発技術研究センター；埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版)、1997.
- 3) (社) 日本道路協会；道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説、2012.
- 4) (社) 土質工学会；粗粒材料の現場締固め、1990.
- 5) 赤司六哉；ロック材料の密度管理と強度確認試験、土と基礎、33(6)、1985、pp.19-24.
- 6) 中村幸司ほか；非排水せん断強度に与える Membrane Penetration の影響、第 22 回土質工学研究発表会、1987、pp.563-564.
- 7) 中村幸司ほか；非排水試験結果に対する Membrane Penetration の影響の簡便な補正方法、第 23 回土質工学研究発表会、1988、pp.657-658.
- 8) 田中幸久ほか；システムコンプライアンスによる砂礫の動的強度測定誤差の評価方法、(財) 電力中央研究所報告、1988.
- 9) Tokimatsu, K. & Nakamura, K. : A Liquefaction test without membrane penetration effects, Soil & Foundations, 26(4), 1986, pp.127-138.

A Study on the Liquefaction Resistance Properties of Coarse-grained Materials

Rie Sasaoka, Michitaka Okamoto, Katsutoshi Fujisaki and Noboru Togashi¹⁾

Since the Great East Japan Earthquake in 2011, the criteria for evaluating the seismic safety of important facilities such as nuclear power plants have been reviewed. In such reviews, it is necessary for the design to consider the liquefaction of coarse-grained materials which are generated due to excavation of rock foundations. However, the conventional criteria for evaluating seismic safety do not consider the liquefaction of coarse-grained materials, and so the liquefaction behavior of such materials has not been investigated sufficiently.

In this study, coarse-grained materials of which the grain size was adjusted by various methods were subjected to undrained triaxial cyclic shear tests and the effects of the methods on the characteristics of the liquefaction behavior were investigated.