

# 粗粒材料の液状化強度特性評価に関する基礎的研究（その2）

## – 新たなメンブレンペネトレーション除去処理方法の考案と検証 –

### Study on Liquefaction Resistance Properties of Coarse-grained Materials (Part 2) – Development of Procedure for Physically Canceling Membrane Penetration –

笹岡 里衣      岡本 道孝

#### 要 約

地盤材料の液状化強度特性を求める方法として、繰返し非排水三軸試験は最も主要な試験法のひとつである。しかしながら、粗粒材料の再構成供試体を試験に用いる場合、供試体側面の凹凸にメンブレンが湾入（メンブレンペネトレーション）する影響によって供試体の非排水条件が完全には維持できなくなり、液状化強度比が過大に評価されることがある。これに対し、供試体側面の凹凸に微粒な土質材料を塗布することによって、この影響を物理的に除去する方法を考案した。また、この処理方法を施した種々の粗粒材料を対象とした繰返し非排水三軸試験の結果、液状化強度特性を評価する上で、相対密度や間隙比などの密度特性が重要なパラメータであることが明らかとなった。

#### 目 次

- I. はじめに
- II. 新たな MP 処理方法の考案
- III. MP 処理を施した粗粒材料の液状化強度特性
- IV. おわりに

#### 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、発電所建設時の岩盤掘削で生じた粗粒材料（発生土）を用いて造成した敷地地盤の液状化の考慮が求められている。一方で、粗粒材料の液状化強度特性や地震時挙動に関する体系的な研究事例は少ないため、筆者らはこれまでに要素試験や模型実験によって、粗粒材料の地震時挙動に関する検討を行っている。既報<sup>1,2)</sup>では、繰返し非排水三軸試験（以下、液状化強度試験）におけるメンブレンペネトレーション（Membrane Penetration：以下、MP とする）の影響を指摘した。本報では、MP を物理的に除去する処理方法と、それを施した豊浦砂および粗粒材料を対象とした試験によって本処理方法の有効性を検証するとともに、MP の影響を除去した種々の粗粒材料の液状化強度特性を比較した結果を示す。

#### II. 新たな MP 処理方法の考案

##### 1. MP 処理方法

供試体側面に凹凸のある供試体で液状化強度試験を行うと、繰返し载荷中の間隙水圧上昇にともない、メンブレン湾入量が増加し、非排水条件を維持できない場合がある。これによって過剰間隙水圧上昇が抑制されるために、液状化強度が過大に評価される。Tokimatsu and Nakamura (1986)<sup>3)</sup>は、繰返し载荷中の過剰間隙水圧から土粒子骨格の体積ひずみを割り出し、湾入による体積ひずみ減少分の間隙水を供試体に供給することのできる特殊な試験装置を開発し、砂質土の試験結果に基づいた MP の補正式を提案している。一方で、

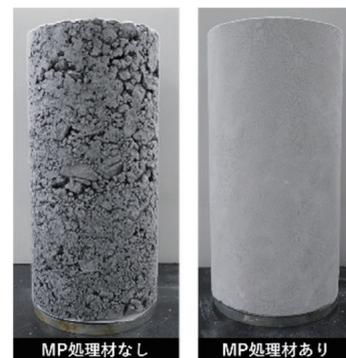


Photo 1 粗粒材料の再構成供試体 ( $D_{max}=37.5$  mm)

(Reconstituted Specimens of Coarse-grained Material,  
 $D_{max}=37.5$  mm)

**キーワード**：粗粒材料，液状化，液状化強度比，繰返し非排水三軸試験，メンブレンペネトレーション

**Keywords**：Coarse-grained Material, liquefaction, cyclic resistance ratio, cyclic undrained triaxial test, membrane penetration

筆者らが対象とする粗粒材料のMPの程度は、既往の補正式で補正可能な範囲を超過する場合があった。そこで、再構成供試体の側面の凹部に微粒土質材料（以下、MP処理材とする）を塗布することによって、側面を平滑化し、間隙水圧変化による供試体の体積変化を物理的に防ぐ方法を考案した（Photo 1）。

## 2. 処理効果の評価方法

MPの影響の程度を表す指標として、コンプライアンス比 $C_R$ がある。 $C_R$ は土粒子骨格の体積弾性率 $K_s$ とメンブレン湾入による見かけの体積弾性率 $K_{MP}$ の比（ $C_R=K_s/K_{MP}$ ）で定義される<sup>4,5)</sup>。また、土粒子骨格を等方弾性体と仮定すると、非排水状態でせん断応力が加わったときの土粒子骨格の体積ひずみ増分 $\Delta\epsilon_s$ 、メンブレン湾入による見かけの体積ひずみ増分を $\Delta\epsilon_{MP}$ とすると式（1）が導出される。メンブレン湾入が全くなければ $\Delta\epsilon_{MP}=0$ であり、 $C_R=0$ となる<sup>6)</sup>。

$$C_R = \frac{K_s}{K_{MP}} = \frac{\Delta\epsilon_{MP}}{\Delta\epsilon_s} \dots \dots \dots (1)$$

本報では、以下の2つの方法で $C_R$ を算出し、MPの影響を評価した。なお、 $K_s$ と $K_{MP}$ （もしくは、 $\Delta\epsilon_s$ と $\Delta\epsilon_{MP}$ ）は同符号であることから、 $C_R \geq 0$ となる。このため、いずれの方法についても算出した $C_R$ が負となった場合は、計測誤差の影響と考えて、一律0とみなした。

### 【方法1】変形特性を求めるための繰返し三軸試験による方法

田中ら（1989）<sup>7)</sup>は間隙水圧係数 $B$ 値、軸差応力増分 $\Delta\sigma_1$ 、間隙水圧増分 $\Delta u$ を用いて、式（1）から式（2）を導出した。方法1は、液状化強度試験の直前に、変形特性を求めるための繰返し三軸試験（JGS 0542、以降、変形試験）<sup>8)</sup>を供試体が線形弾性体と見做せる微小なひずみ領域で行い、その際の $B$ 値、 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta u$ を用いて、式（2）から $C_R$ を算出するのである。

本報では、変形試験を両振幅軸ひずみ $DA$ が $1.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ の範囲において3~5段階行った。ここでの繰返し載荷回数は1段階あたり10回とし、載荷回数ごとに求めた $C_R$ の平均値を各ひずみレベルの $C_R$ とした。

$$C_R = \frac{B \Delta\sigma_1}{3 \Delta u} - 1 \dots \dots \dots (2)$$

### 【方法2】液状化強度試験を用いる方法

田中ら（1988）<sup>5)</sup>は液状化強度試験（JGS 0541）<sup>8)</sup>の有効応力経路の平均有効主応力増分 $\Delta p'$ （ $\Delta p' = \Delta\sigma_1/3 - \Delta u$ ）と $\Delta q$ （ $\Delta q = \Delta\sigma_1$ ）を用いて、式（1）から式（3）を導出した。つまり、 $C_R$ は $p' \sim q$ 平面における勾配を表す。本報では、1サイクル目の載荷において $\Delta q$ が圧縮側から伸張側へ移行した際の $\Delta p'$ と $\Delta q$ を用いて $C_R$ を算出した。

$$C_R = \frac{3(\Delta p'/\Delta q)}{1-3(\Delta p'/\Delta q)} \dots \dots \dots (3)$$

## 3. 豊浦砂による有効性検証

### (1) 試験概要

#### (a) 検証内容および試料

新しく考案したMP処理方法の有効性検証として、後述するように、無処理でもMPの影響がほとんどみられない豊浦砂（Photo 2）を用いて、MP処理の有無が液状化強度比に及ぼす影響を確認した。豊浦砂の相対密度 $D_r$ は80%とし、MP処理材にはカオリン粘土を用いた。豊浦砂とカオリン粘土の物理的特性をTable 1、Table 2、粒度分布をFig.1に示す。

#### (b) 供試体作製方法と試験手順

試験には直径 $\phi 50\text{mm}$ 、高さ $h 100\text{mm}$ の供試体を用いた。湿潤状態（含水比 $w=6 \sim 10\%$ ）の試験試料を金属製の型枠内において、目標の相対密度となるように5層に分割して締め固めた。締め固め後、型枠ごと冷凍庫（ $-4^\circ\text{C}$ ）で封鎖養生し、供試体を凍結させた。凍結後、型枠から脱型した供試体側面に $w=60 \sim 70\%$ に調整したMP処理材を塗布し、平滑に整形した後、これを再び凍結させることで、供試体とMP処理材を一体化させた。再凍結が完了した供試体を三軸試験装置に設置し、脱気水を通水させながら解凍した。この過程で、 $B$ 値の計測を行い、これが0.96を上回った段階で飽和と解凍が完了したと判断し、有効拘束圧100 kPaで等方圧密した。圧密完了後、非排水状態で既述した方法1のための変形試験を行った。その後、非排水状態にして0.1 Hzの正弦波を用いて、液状化強度試験を行った。なお、試験に使用した変位計および間隙水圧計の分解能はそれぞれ0.03  $\mu\text{m}$ 、0.03 kPaで、サンプリング周期は0.01 Hzである。

### (2) 試験結果

MP処理材の塗布厚さ $t$ を変化させたときの、両振幅軸ひずみ $DA$ と $C_R$ の関係をFig.2に示す。 $t=0.0\text{ mm}$ （無処理）であっても、豊浦砂の $C_R$ は0.1~0.2でありMPの影響は小さい。また、 $C_R$ の最大値と最小値の差は0.04（標準偏差0.02、 $n=3$ ）で、供試体毎のばらつきは小さかった。これに対し、MP処理材を塗布することで、 $C_R$ の算出方法に依らず、 $C_R$ をほぼ0にまで低減することができた。ただし、 $t=0.5\text{ mm}$ 、 $1.0\text{ mm}$ はいずれの算出方法でも $C_R$ は0であったが、 $t=2.0\text{ mm}$ まで厚くすると、 $C_R$ は増加に転じた。このことは処理材の塗布厚さに最適値が存在することを示唆している。

液状化強度試験結果をTable 3およびFig.3に示す。本報では、載荷回数 $N_c=20$ で $DA=5\%$ に至る繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$ （ $\sigma_d$ : 繰返し軸差応力の片振幅）を液状化強度比 $R_{L20}$ とした。Fig.3に示すように、 $t$ が厚くなるほど、同一の $\sigma_d/2\sigma'_0$ に対する $N_c$ が減少（ $N_c \sim \sigma_d/2\sigma'_0$ 関係が左下に移動）した。これに伴って、 $R_{L20}$ も低下し、 $t=0.5\text{ mm}$ の $R_{L20}$ はTokimatsuらの方法による補正值 $R_{L20}^*$ と概ね一致した。

以上の結果から、MP処理材の塗布によってMPの影響を低減できることを確認した。



Photo 2 豊浦砂 (Toyoura Sand)

Table 1 豊浦砂の物理特性 (Physical Properties of Toyoura Sand)

		豊浦砂
物理的性質	最大粒径 $D_{max}$ [mm]	0.43
	細粒分含有率 $F_c$ [%]	0.4
	礫分含有率 $G_c$ [%]	0.0
	均等係数 $U_c$ [-]	21
	土粒子密度 $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.64
供試体諸元	直径 $\phi$ [mm]	50
	高さ $h$ [mm]	100
	相対密度 $D_r$ [%]	80
	乾燥密度 $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.57
	間隙比 $e$ [-]	0.68

Table 2 カオリン粘土の物理特性 (Physical Properties of Kaolin Clay)

		カオリン粘土
	最大粒径 $D_{max}$ [mm]	0.01
	細粒分含有率 $F_c$ [%]	100
	シルト分 [%]	35.8
	粘土分 [-]	64.2
	塑性指数 $I_p$ [-]	24.80
	土粒子密度 $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.73

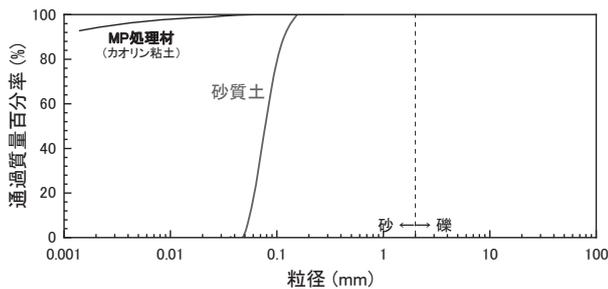


Fig. 1 試料の粒径加積曲線 (豊浦砂) (Grain Size Accumulations of Samples, Toyoura Sand)

III. MP 処理を施した粗粒材料の液状化強度特性

1. 試験試料と試験手順

Photo 3 に示す最大粒径  $D_{max}$  の異なる 3 種類の試験試料 (試料 A, B, C) の液状化強度について検討した。試験試料の物理特性および粒度分布を Table 4, Fig. 4 に示す。MP 処理材には豊浦砂と同様にカオリン粘土を用いた。また、供試体作製や試験の手順は豊浦砂と同様とした。なお、粗粒土の供試体作製に関する基準 (JGS 0530) <sup>8)</sup>に基づき、試料 A と B の供

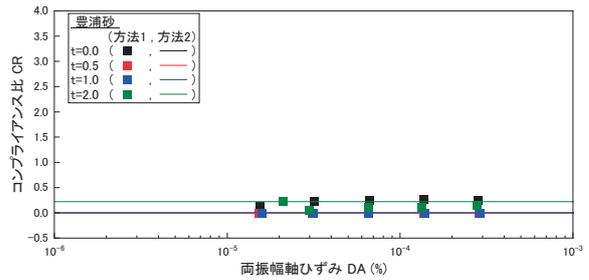


Fig. 2 両振幅軸ひずみとコンプライアンス比の関係 (Relationships between Double Amplitude Axial Strain and Compliance Ratio)

Table 3 豊浦砂の液状化強度比 (Cyclic Resistance Ratio of Toyoura Sand)

		豊浦砂 ( $D_r=80\%$ )			
塗布厚さ $t$ [mm]		0.0 (無処理)	0.5	1.0	2.0
$C_R$		0.11	0.00	0.00	0.07
標準偏差		0.02	0.00	0.00	0.10
$R_{L20}$		0.45	<b>0.40</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>
$R_{L20}^*$		<b>0.41</b>	-	-	-

$R_{L20}$  : 試験結果から算出

$R_{L20}^*$  : Tokimatsu らの方法による試験結果の補正值

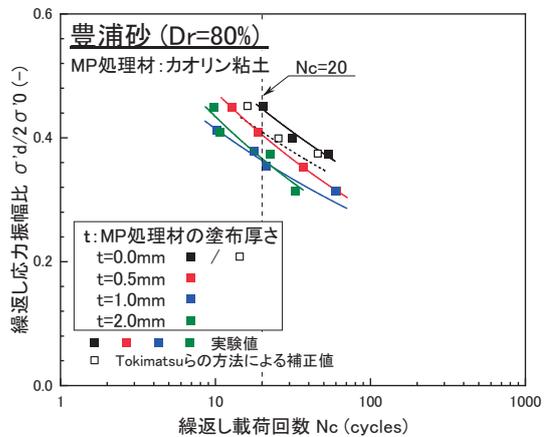


Fig. 3 豊浦砂の繰返し応力振幅比と载荷回数 (Relationships between Cyclic Stress Ratio and Number of Loading Cycles in Toyoura Sand)

試体直径  $\phi$  は 50 mm, 試料 C については  $\phi 150$  mm とした。

2. 試験条件の決定

供試体の試験条件を決めることを目的として、試料 B ( $D_r=60\%$ ) を対象に  $t$  を変化させた試験を行った。 $t$  は 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 mm とした (Table 5)。

Fig. 5 に  $DA$  と  $C_R$  の関係を示す。方法 1 で算出した  $C_R$  はひずみレベルが大きくなるほど増加する傾向がみられた。この原因として、ひずみレベルに応じてダイレイタンスー特性がわずかに変化したことにより、 $\Delta u$  が減少した影響と考え

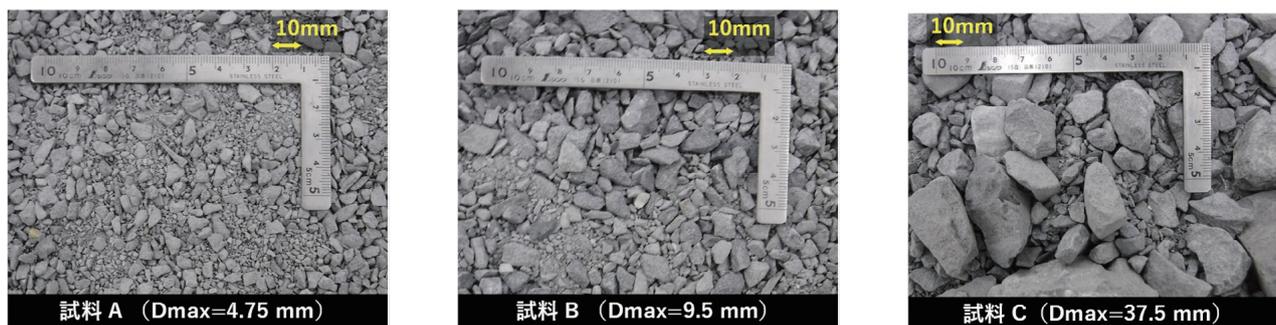


Photo 3 粗粒材料  
(Coarse-grained Materials)

Table 4 粗粒材料の物理特性  
(Physical Properties of Coarse-grained Materials)

		試料A	試料B	試料C
最大粒径	$D_{max}$ [mm]	4.75	9.5	37.5
細粒分含有率	$F_c$ [%]	11.5	7.7	3.4
礫分含有率	$G_c$ [%]	40.6	86.0	82.6
均等係数	$U_c$ [-]	34	32	23
土粒子密度	$\rho_s$ [ $g/cm^3$ ]	2.66	2.61	2.62

Table 5 試料 B のコンプライアンス比  
(Compliance Ratio of Sample-B)

		試料B ( $D_r=60\%$ , $\rho_d=1.98 g/cm^3$ )				
塗布厚さ $t$ [mm]		0.0 (無処理)	0.5	1.0	2.0	4.0
$C_R$ (平均値)	供試体数	8	5	5	4	1
	方法1	<b>0.90</b>	<b>0.20</b>	<b>0.05</b>	<b>0.10</b>	<b>0.17</b>
	標準偏差	0.31	0.21	0.06	0.05	-
	方法2	2.68	1.05	0.40	0.39	0.81
	標準偏差	0.69	0.53	0.20	0.15	-

られる。そこで、方法1については、この影響が最も小さいと考えられる、1段階目のひずみレベル ( $DA \approx 1.0 \times 10^{-5}$ ) で得られた  $C_R$  をもとに検討した。

$C_R$  と  $t$  の関係を Fig.6 に示す。この図から、無処理のケースに比べて MP 処理を行ったケースでは  $C_R$  が低下していることがわかる。ただし、 $t=0.0 \sim 2.0$  mm では  $C_R$  は減少したが、 $t=4.0$  mm ではわずかに増加に転じた。また、豊浦砂と異なり、 $t$  に拘わらず、方法1よりも方法2で算出した  $C_R$  のほうが大きくなった。算出方法によって粗粒材料の  $C_R$  に差が生じた要因として、粗粒材料は豊浦砂よりも小さいひずみ領域においてもダイレイタンスの影響を受けやすいと考えられること、方法2では方法1よりも大きな軸応力を作用させた条件で得られた状態量から  $C_R$  を求めており、対象としているひずみレベルが方法1より大きく、ダイレイタンスの影響も方法1と異なることなどが考えられる。以上を踏まえると、ダイレイタンス特性の影響が最小と考えられる方法1で得られた1段階目の  $C_R$  が、各供試体の MP 影響を評価するのに適切な指標と判断した (Table 5)。その場合、 $t=1.0$  mm (供試体直径  $\phi$  の 2%) が  $C_R$ 、標準偏差ともに最小となった。このことから、以降の粗粒材料の MP 処理については、 $\phi$  に対して 2% の厚さで MP 処理材を塗布することにした。

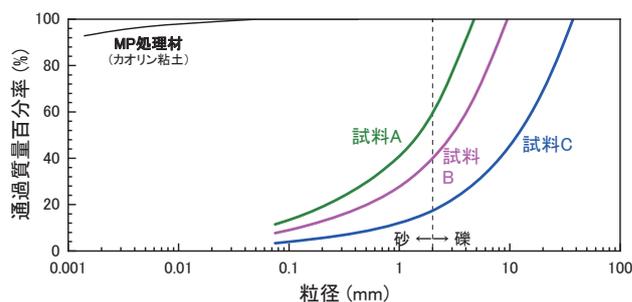


Fig. 4 試料の粒径加積曲線 (粗粒材料)  
(Grain Size Accumulations of Samples, Coarse-grained Materials)

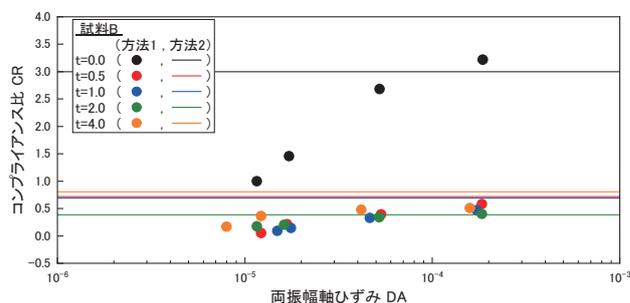


Fig. 5 両振幅軸ひずみとコンプライアンス比の関係  
(Relationships between Double Amplitude Axial Strain and Compliance Ratio)

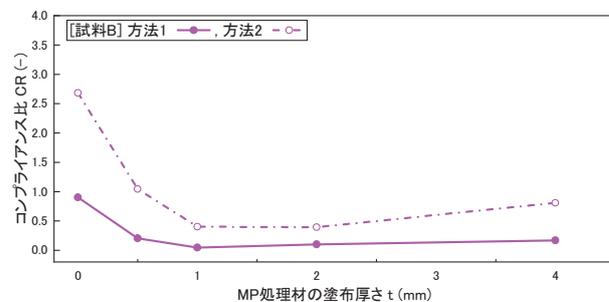
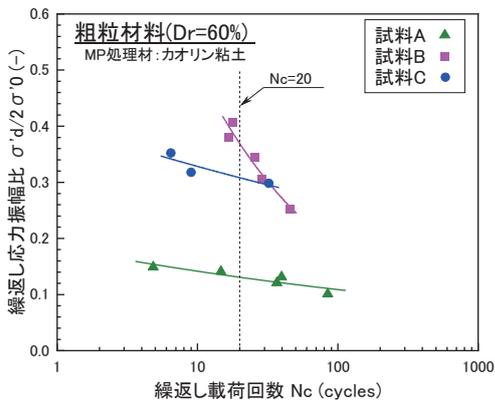


Fig. 6 コンプライアンス比と塗布厚さの関係  
(Relationships between Coating Thickness and Compliance Ratio)

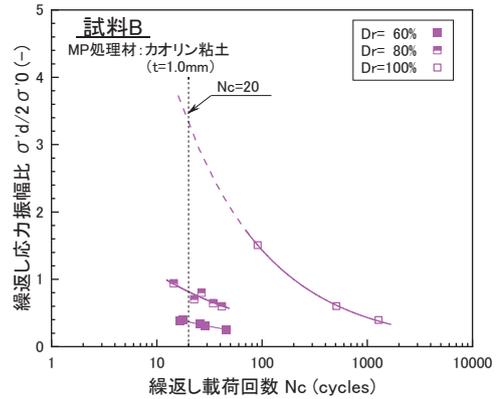
Table 6 粗粒材料の液状化強度比  
(Cyclic Resistance Ratio of Coarse-grained Materials)

		試料A	試料B		試料C	
供試体 諸元	最大粒径 $D_{max}$ [mm]	4.75	9.50		37.50	
	直径 $\phi$ [mm]	50	50		150	
	高さ $h$ [mm]	100	100		300	
	MP処理材厚さ $t$ [mm]	1.0	1.0		3.0	
	相対密度 $D_r$ [%]	60	60	80	100	60
	乾燥密度 $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.70	1.98	2.13	2.30	1.87
	間隙比 $e$ [-]	0.56	0.32	0.23	0.14	0.40
試験 結果	液状化強度比 $R_{L20}$ [-]	0.13	0.37	0.81	(3.31)	0.31
	コンプライアンス比 $C_R$ [-]	0.00	0.05	0.00	0.00	0.04



(a) 最大粒径比較

(Comparison among Maximum Grain Size)

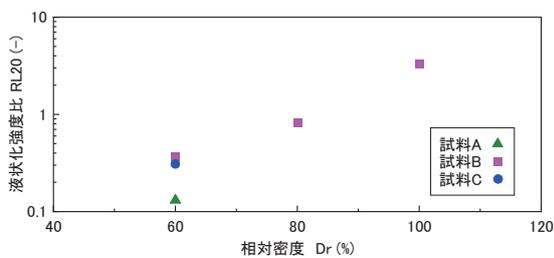


(b) 相対密度比較

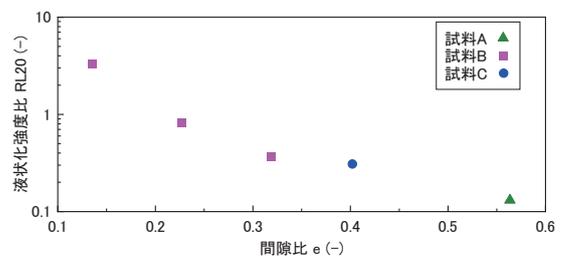
(Comparison among Relative Density)

Fig.7 粗粒材料の繰返し応力振幅比と荷回数との関係

(Relationships between Cyclic Stress Ratio and Number of Loading Cycles in Coarse-grained Materials)



(a) 相対密度  
(Relative Density)



(b) 間隙比  
(Void Ratio)

Fig.8 液状化強度比と物理特性の関係

(Relationships between Cyclic Resistance Ratio and Physical Properties)

### 3. 粗粒材料の液状化強度特性

試験結果の一覧を Table 6 に示す。前述のとおり、 $C_R$  は方法 1 (1 段階目) で評価した。 $D_{max}$  が最大の試料 C においても  $C_R$  は 0.04 であり、 $\phi$  に対して 2% 程度の MP 処理材を塗布することで概ね MP の影響を排除できることがわかった。

Fig.7(a) は  $D_r=60\%$  に調整した 3 種類の粗粒材料の液状化強度特性の比較である。 $R_{L20}$  は試料 A が最も小さく、試料 B と C は同程度であった。 $D_r$  一定条件下においては、 $D_{max}$  と  $R_{L20}$

の大小関係は必ずしも一致しなかった。

Fig.7(b) は試料 B の  $D_r$  を 60%~100% に変化した時の液状化強度特性の比較である。 $D_r=100\%$  については、試験結果の  $N_c-\sigma_d/2\sigma'_0$  関係(実線曲線)から外挿的に  $R_{L20}$  を推定した。 $D_r$  の増加に伴い  $R_{L20}$  は増加し、 $D_r=100\%$  の  $R_{L20}$  は  $D_r=60\%$  の  $R_{L20}$  の約 9 倍であった。

2 つの試験から、粗粒材料の密度特性が液状化強度特性に大きく影響することが明らかとなった。Fig.8 に  $R_{L20}$  と(a)相

対密度  $D_r$  および (b) 間隙比  $e$  の関係を示す。  $R_{L20}$  は  $D_{max}$  の大小関係とは一致しなかったが、  $D_r$  や  $e$  の大小関係とは一致し、特に  $e$  は液状化強度比を決定づけるパラメータのひとつであることがわかった。今後、データの蓄積と検証が必要であるが、異なる種類の粗粒材料の液状化強度特性を評価あるいは推測する上で、MP の影響を考慮するとともに、相対密度や間隙比などの密度特性は重要なパラメータであることが示唆される。

#### IV. おわりに

粗粒材料の再構成供試体を用いた液状化強度試験はMPの影響を受け、液状化強度比を過大評価することが既往研究から明らかとなった。このため、供試体側面に微粒な土質材料を塗布し、平滑化することでMPの影響を物理的に除去する方法を考案し、その妥当性について検討した。また、この方法を施した最大粒径の異なる粗粒材料の液状化強度特性を比較した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ・新しく考案したMP処理方法を豊浦砂に施し、繰返し非排水試験を行ったところ、MP処理の有無が液状化強度比に与える影響は小さかった。
- ・粗粒材料 ( $D_{max}=9.50$  mm,  $D_r=60\%$ ) の  $C_R$  を2つの方法で算出したところ、ひずみレベルや算出方法によって  $C_R$  が異なった。この要因には、ひずみレベルによるダイレイタンス特性の違いが挙げられる。 $C_R$  の評価の際には試料のダイレイタンスの影響を考慮する必要があり、極力小さいひずみレベルにおいて  $C_R$  を算出するべきである。
- ・粗粒材料を対象とした液状化試験において、供試体径に対して2%の厚さの微粒分を塗布したところ、おおむねMPの影響を除去することができた。

- ・  $D_{max}$  の異なる粗粒材料の  $R_{L20}$  を比較したところ、  $R_{L20}$  と供試体の密度特性 ( $D_r$  および  $e$ ) の大小関係が一致した。
- ・ 特に  $e$  が液状化強度比を決める重要なパラメータであることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 笹岡里衣ほか；粗粒材料の液状化強度特性評価に関する基礎的研究，鹿島技術研究所年報，第67号，2019.12，pp.29-34.
- 2) 笹岡里衣ほか；粗粒土の液状化に関する試験および評価方法の検討(その2)，第54回地盤工学研究発表会，2019.7，pp.1619-1620.
- 3) Tokimatsu, K. and Nakamura, K. ; A liquefaction test without membrane penetration effects, Soils and Foundations, Vol.26, No.4, 1986.12, pp127-138.
- 4) Martin, G. R. et. al. ; Effects of system compliance on liquefaction tests, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, 1978, pp.463-479.
- 5) 田中敬三ほか；液状化試験に対する Membrane Penetration の簡便な評価方法，土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム，1988.12，pp.85-88.
- 6) 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.
- 7) 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，電力中央研究所報告，No.89040，1989.12.
- 8) (公社)地盤工学会；地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），2020.

## Study on Liquefaction Resistance Properties of Coarse-grained Materials (Part 2) - Development of Procedure for Physically Canceling Membrane Penetration -

Rie Sasaoka and Michitaka Okamoto

The cyclic undrained triaxial test is one of the most major testing methods for evaluating seismic liquefaction resistance. However, it is generally known that the liquefaction resistance ratio is often overestimated because of the membrane penetration (MP) effect when a reconstituted specimen of coarse-grained material is used. The mechanism of this effect is understood to be that the undrained condition is not completely kept due to the amount of change in MP during cyclic loading. To cancel this effect, the authors developed a method for preparing coarse-grained material specimens by filling side voids with fine soil.

In this study, the effectiveness of this method is verified by conducting a cyclic undrained triaxial test on a sandy soil specimen. After the verification, a series of triaxial tests was carried out on coarse-grained material specimens prepared by using the method.