

細粒分を含む砂質土の相対密度補正 および液状化強度に関する検討

中澤 博志¹・原田 健二²

¹港湾空港技術研究所耐震構造研究チーム（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

E-mail: nakazawa@pari.go.jp

²不動テトラ株式会社（〒113-0016 東京都中央区小網町7-2）

E-mail: kenji.harada@fudotetra.co.jp

細粒分を多く含む砂の液状化について、1987年千葉県東方沖地震での液状化の発生を契機に検討され始めた。一般に、細粒分含有率あるいは塑性指数の増加に伴い液状化強度が増大するといわれているが、幾つかの既往の研究によると、細粒分含有率の値によっては供試体の相対密度が大きく異なり、同一条件下における液状化強度が評価されていないようである。したがって、本論文では、細粒分含有率が5%以下であるきれいな砂からシルトを対象とした幅広い粒度特性を有する地盤材料を対象に、最大・最小間隙比幅に着目した細粒分を含む砂の相対密度の補正方法および補正された相対密度と液状化強度との関係について検討した。一連の検討から、細粒分含有率が15%以上における相対密度の補正方法の提案および補正相対密度と液状化強度の関係から、液状化強度に対する細粒分含有率の影響について示すことができた。

Key Words : *liquefaction strength, relative density, fine sand, fine content, minimum void ratio*

1. はじめに

1964年に起こった新潟地震以来、細粒分を含まないきれいな砂を対象として地盤の液状化の研究が行われてきた。しかし、その後の被災事例より、細粒分を含む砂や礫質土、あるいは埋立地のまさ土や低塑性のシルトといった様々な地盤材料に関しても液状化することが指摘され、研究の対象が広がってきた。

細粒分を多く含む砂の液状化については、1987年千葉県東方沖地震での液状化の発生を契機として検討され、その後も2000年鳥取県西部地震に発生した低塑性のシルトによる大規模な液状化の事例も確認されている。一般に、細粒分含有率の増加に伴い液状化強度が増大することが知られているが、桑野ら¹⁾が示すように細粒分含有率がある程度大きくなると、試料の塑性指数の値によっては、 R_f にばらつきが見られるようになる。また、細粒分含有率の値によっては供試体の密度が大きく異なり、同一密度における細粒分含有率の液状化強度への影響について検討することが困難である。

このような問題に対し、本論文では、最大・最小間隙比と液状化強度の関係に着目し、これらのデータを既往の研究結果を基に、細粒分含有率が

5%以下であるきれいな砂から低塑性のシルト質砂やシルト等、様々な試料の物理的性質についてまとめ、細粒分を含む砂の相対密度の補正方法についてまとめた。また、これに基づき、既往の液状化強度の推定方法を参考に、細粒分を含む試料の最大・最小間隙比から液状化強度の推定式について検討したので報告する。

2. 液状化強度に関する既往の研究

(1) 砂の相対密度および液状化強度の評価

細粒分含有率 F_c が 5%以下であるきれいな砂の液状化強度に関しては、豊浦砂や新潟砂を始め、数多くの研究がなされている。Ishihara et al.²⁾は、繰返し三軸試験から得られる液状化強度 R_f （繰返し載荷回数 $N_c=20$ 回、軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ ）が相対密度 D_r に対しほぼ比例関係が成り立つとして、次式を与えている。

$$R_f = 0.0042 D_r \quad (1)$$

また、Tatsuoka et al.³⁾は、豊浦砂の繰返しねじりせん断試験を実施し、液状化強度と相対密度の関

係は、 $D_r \geq 80\%$ の範囲では液状化強度が増大する傾向を見せることから、式(1)は D_r が 80%の以下の範囲で成り立つ関係であることや、細粒分を多く含む砂に関しては成り立たないことを指摘している⁴⁾。また、式(2)で表される Meyerhof⁵⁾の N 値と D_r の関係式を用い、式(1)に代入することで式(3)に示す液状化強度 R_l と N 値の関係を得ている。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v'/98 + 0.7}} \quad (2)$$

$$R_l = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v'/98 + 0.7}} \quad (3)$$

ここに、 σ_v' (kPa)は有効土被り圧を示す。さらに、式(1)について、広範囲な粒径まで対応させ、平均粒径 D_{50} による補正項を提案している。

一方、Tokimatsu and Yoshimi⁹⁾も原位置凍結サンプリング試料により、密な砂の D_r と R_l の関係について検討を行い、 D_r が 80%を超える場合における R_l の急増傾向について、式(4)により表現している。

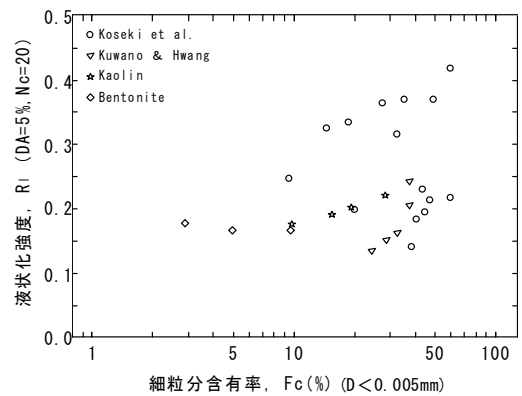
$$R_l = a \left[\frac{D_r}{100} + \left(\frac{D_r}{C} \right)^n \right] \quad (4)$$

ここに、 a 、 n は実験定数、 $C = 97 - \log(DA)$ ($= 83.7$)、および DA は軸ひずみ両振幅(%)を示す。また、細粒分を多く含む砂の R_l について、式(5)に示すように、実測 N 値に細粒分の影響を補正する項 ΔN_f を加えた D_r を用いることで、 R_l の補正方法について提案している。

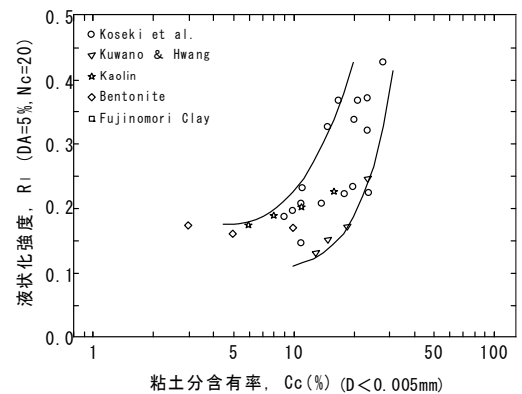
$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v'/98 + 0.7} + \frac{\Delta N_f}{1.7}} \quad (5)$$

(2) 細粒分を含む砂の液状化強度特性

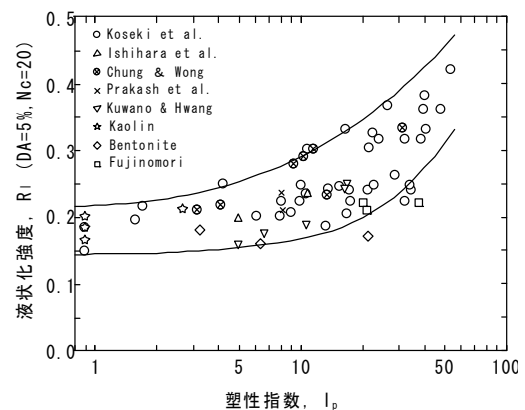
細粒分を多く含む砂の液状化に関しては、1987年千葉県東方沖地震以来、多くの事例が報告されている⁷⁻¹³⁾。いずれも細粒分が非常に多い砂質土の場合、 F_c の増加に伴い R_l が増大することが示されている。しかし、マトリクスの構成粒子の特性によっては、 F_c がある程度大きくなると、 R_l にばらつきが見られることが報告されている⁸⁾。また、桑野ら¹⁰⁾は、細粒分の影響を評価する物理的指標として、粘土分含有率 C_c (%)や塑性指数 I_p を用い、 R_l との関係を図-1のようにまとめている。特に、 F_c と R_l の関係において、 F_c の増加に伴う R_l の単調増加が確認できるが、それらの関係は、地盤材料の違いにより異なる傾向を示している。次に、 C_c と R_l の関係を見ると、 C_c が 10%以上の範囲では R_l が急増する傾向を示し、地盤材料の違いの影響が少ない様子がわかる。一方、 I_p と R_l の関係では、 I_p が小さい範囲では、 R_l のばらつきが少ないものの、 I_p



(a) 細粒分含有率と液状化強度の関係



(b) 粘土分含有率と液状化強度の関係



(c) 塑性指数と液状化強度の関係

図-1 細粒分を含む砂の液状化強度特性 (参考文献⁹⁾を修正加筆)

の値が 10 程度を超える範囲から R_l が増大し、同時にばらつきが多く見られる様子がわかる。このように、細粒分を含む砂の R_l は、細粒分の量と種類に深く関係していることがわかる。しかし、 F_c により R_l を評価する場合、供試体の密度の影響を評価していない場合が多く、供試体の密度を考慮した F_c の影響について統一的に報告されている事例が少ないことが指摘されている¹⁴⁾。

(3) 様々な粒度特性を表す物理的指標の評価

細粒分を含む砂の D_r の評価について、

表-1 検討データ一覧

試料	細粒分含有率 F_c (%)	相対密度 D_r (%)	最小間隙比 e_{min}	最大間隙比 e_{max}	平均粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	塑性指数 I_p	液状化強度 R_l	N 値	供試体の条件	参考文献
1 豊浦砂	0.0	40～70	0.609	0.968	0.180	1.67	NP	0.108～0.327	—	AP	17)
2 相馬砂ほか	≥ 5.0	40～70	0.659	1.028	0.25～0.56	1.35～2.50	NP	0.123～0.245	—	AP	18)
3 Quarts sandほか	0～28	55～95	0.603	1.213	0.065～0.19	2.70～20.0	NP	0.130～0.255	—	AP	19)
4 袖ヶ浦町の噴砂ほか	3～97.2	33～64	0.692	1.172	0.028～0.14	1.50～5.20	3.4～9.1	0.112～0.126	—	AP	20)
5 カオリン混じり豊浦砂	0～80	22.5～157.1	0.602～1.359	0.985～2.456	0.063～0.180	1.667～21.4	NP～39.6	0.072～0.133	—	AP	21)
6 藤森粘土混じり豊浦砂	0～40	65.0～102.4	0.695～0.890	1.275～1.770	0.105～0.170	1.82～70.0	NP～14.3	0.112～0.180	—	AP	22)
7 相馬硅砂 (5号硅砂)	0.8	46.9～55.1	0.685	1.105	0.347	1.88	NP	0.115	—	AP	—
8 石狩砂	2.0～29.4	17.8～94.9	0.853～0.871	1.307～1.488	17.8～94.9	1.90～10.0	NP	0.171～0.367	1～22	AP, UD	23)
9 新潟砂	≥ 5.0	45～53	0.655	1.005	0.230～0.370	1.67～2.34	NP	0.190～0.24	3～37	AP, UD	24)
10 新潟砂他	0.0～5.8	26～115	—	—	0.200～0.490	0.23～2.10	NP	0.130～0.91	1～31	UD (凍結含む)	25)
11 竹内シルト	89.1～98.7	65～100	0.287	0.614	0.031～0.046	2.38～3.25	NP～21.5	0.132	1～4	UD	26)
12 越谷砂	0.8	65	0.771	1.064	0.260	2.73	NP	0.153	3～12	UD	27)
13 曙橋砂	2.3～45.0	24.6～82.0	0.582～0.738	1.224～1.443	0.09～0.16	—	NP	0.150～0.215	2～12	UD (凍結)	28)
14 梅田砂	10.0～33.0	70.5～96.9	0.877	1.551	0.110～0.140	2.60～73.1	NP	0.215～0.260	2～4	UD	29)
15 入谷砂	16.8～20.8	71.6～88.9	0.808	1.427	0.170～0.240	5.0～53.0	NP	0.35～0.57	3～12	UD	29)
16 アダバザルシルト	75.1～99.7	91.4～119.6	1.000	1.909	0.014～0.051	2.59～7.87	5.4～38.4	0.25～0.55	—	UD	30)
17 沖積砂質土	15～31	69.4～107.4	0.694～1.004	1.052～1.658	0.132～0.271	—	—	0.27～0.45	0～21	UD	31)
18 沖積砂質土	0.5～96.0	18.2～156.0	0.496～1.030	0.759～1.830	0.004～2.5	1.60～303	—	0.154～0.750	1～39	UD	32)
19 相馬港他	7.7～65.9	—	0.662～1.000	1.286～1.525	0.036～0.402	9.0～51.4	NP	0.130～0.380	2～6	UD	23)
20 日本海中部地震液状化被害地域	0.3～100	21.0～130.7	—	—	0.003～0.480	—	—	0.148～0.520	1～29	UD	33)
21 釧路港砂他	0～78	30.7-82.1	—	—	0.046～0.730	1.5～9.6	—	0.192～0.345	3～24	UD	34)

Cubrinovski and Ishihara¹⁵⁾により、シルトから礫を含む様々なタイプの土質試料の物理的性質について検討されている。最大間隙比 e_{max} および最小間隙比 e_{min} の差で表される間隙比幅($e_{max}-e_{min}$)が、 D_{50} および F_c と相関が高いことが示され、式(6)、(7)で表されている。なお、($e_{max}-e_{min}$)の評価は、 F_c が10～30%の細粒分混じり砂で $0.5 \leq (e_{max}-e_{min}) < 0.7$ 、きれいな砂で $0.3 \leq (e_{max}-e_{min}) < 0.5$ 、および礫質土で $0.2 \leq (e_{max}-e_{min}) < 0.3$ の範囲に区分され、 D_{50} が小さいほど、逆に F_c の増加に伴い($e_{max}-e_{min}$)の値が大きくなる。

$$(e_{max} - e_{min}) = 0.23 + \frac{0.06}{D_{50}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (e_{max} - e_{min}) &= 0.40 + 0.01F_c & (F_c < 30\%) \\ &= 0.61 + 0.003F_c & (F_c > 30\%) \end{aligned} \quad (7)$$

e_{max} 、 e_{min} を求めるための最小密度・最大密度試験¹⁶⁾は、 D_r を求めるために必要な試験であるが、本来、細粒分含有率 F_c が5%以上、最大粒径が2mm以上であると適応範囲外とされている。試験規格適応範囲外の細粒分が多い試料では、団粒化等の無視できない要因があり、砂と同様に最小密度・最大密度試験を実施する場合に問題点はあるのは事実であるが、 D_r を求めるだけでなく、式(6)、(7)に示す様に地盤材料の物理特性を表現できるパラメータとして、粒度分布や粒子形状の異なる試料の物理的性質を客観的に判断できるものと考えられる。

3. 相対密度および液状化強度の評価方法に関する検討

種類の異なる地盤材料の R_l について、($e_{max}-e_{min}$)による評価方法について検討する。まずは、($e_{max}-e_{min}$)、 F_c および D_r 等の地盤材料の物理的性質と液状化強度についてデータを既往の研究より収集し、これらのデータを基に、 F_c が5%以下であるきれいな砂から低塑性のシルト質砂を対象とした相対密度の再評価を目的とした検討を行った。表-1 に収集したデータの取りまとめを示す。なお、表中のAP は空中落下法による再構成試料を意味し、UD は凍結サンプリング試料を含む不攪乱試料を示している。

(1) 物理的性質

表-1 に示すデータは、 F_c が0～100%の広範囲に分布し、 D_r についても概ね20%～100%を超える再構成試料および不攪乱試料を含む緩い～密な供試体の試験結果がまとめられている。

次に、($e_{max}-e_{min}$) と D_{50} および F_c の関係について、図-2 および図-3 にそれぞれ示す。なお、これらの図中には、Cubrinovski and Ishihara¹⁵⁾による土質区分も併記した。図-2 に示す($e_{max}-e_{min}$) と D_{50} の関係については、式(6)の関係に対し、比較的良い相関を示している。また、図-3 に示す($e_{max}-e_{min}$) と F_c の関係については、式(7)に比べ、 $F_c \geq 20\%$ の範囲においてAP の($e_{max}-e_{min}$) が大きな分布を示しているものの、UD に関しては良く一致していることがわかる。

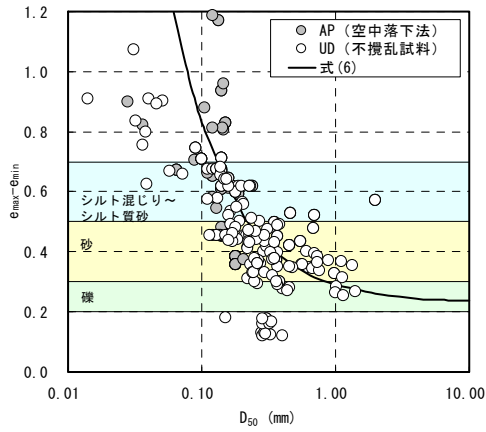


図-2 平均粒径と間隙比幅の関係

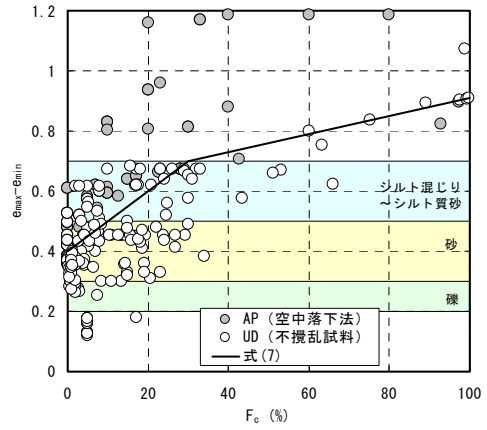


図-3 細粒分含有率と間隙比幅の関係

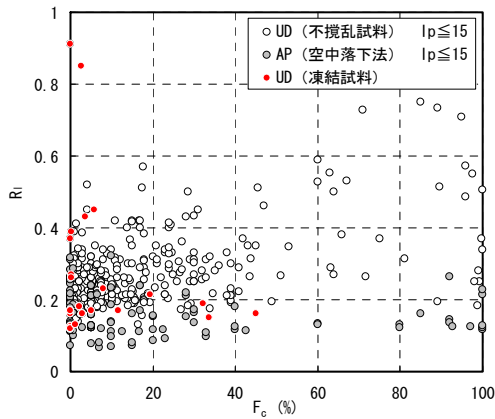


図-4 細粒分含有率と液状化強度の関係

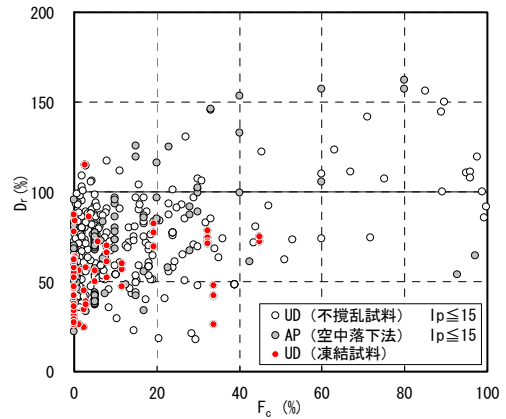


図-5 細粒分含有率と相対密度の関係

(2) 細粒分含有率と液状化強度の関係

表-1 に示す試験結果について、 $L_p \leq 15$ を対象とした F_c と R_l の関係を図-4 に示す。AP, UD とともにプロットのばらつきが大きいですが、AP の傾向として、 F_c の増加に伴い、 $F_c = 10\%$ 程度まで R_l はやや減少傾向にあり、 F_c が F_c が 10% を超えると再び微増に転じているか、または横ばいを示している。一方、UD については、 F_c の増加に伴い、 R_l が単調増加傾向にあることがわかる。また、凍結試料については、細粒分がある程度含まれた状態では、AP と同様な R_l の分布傾向を示しているが、凍結による試料の乱れ等の影響があったものと推察される。

次に、図-5 に示す F_c と D_r の関係を見ると、特に AP では、 F_c が概ね $15 \sim 40\%$ の範囲を超えると $D_r \geq 100\%$ を示している様子がわかる。一方、UD については F_c の増加に伴い D_r も増加傾向を示し、 F_c が全般的に $D_r \geq 100\%$ を示すプロットが存在するが、凍結試料では、特に増加傾向は確認できないことがわかる。

ここで、細粒分も間隙と見なす骨格間隙比 e_{sk} の概念を用い、 F_c と e_{sk} の関係を検討する。細粒分を含む砂の骨格構造に関しては、既往の研究^{37), 38)}より、土の構造が粗粒土が主体的に骨格を形成する場合と細粒分が主体的で土要素全体が圧縮性を有

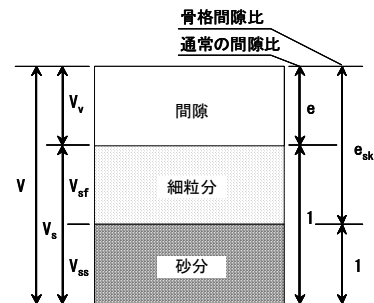


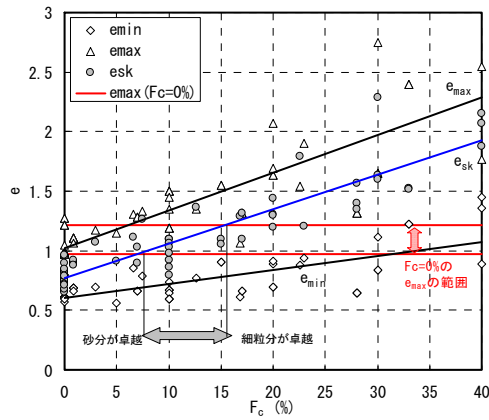
図-6 砂の配合に関する模式図

する場合に分けて考えることが出来る。図-6 に混合土の模式図を示す。通常の間隙比 e は式(8)で示されるが、 e_{sk} は、土粒子の固体部分を粗粒子と細粒分に分類し、砂骨格の影響を定量的に表現するため細粒分を間隙と仮定し、式(9)で示される。

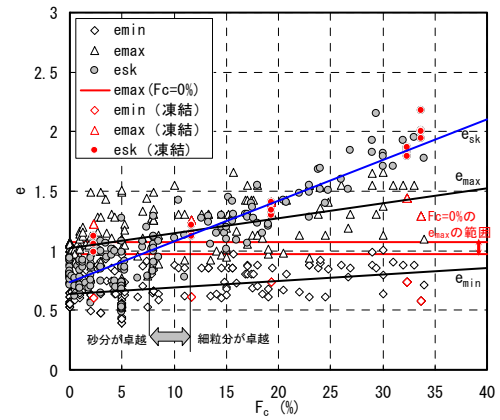
$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_{ss} + V_{sf}} \quad (8)$$

$$e_{sk} = \frac{V_v + V_{sf}}{V_s - V_{sf}} = \frac{V_v + V_{sf}}{V_{ss}} \quad (9)$$

F_c と e_{sk} の関係について図-7 に示す。AP では F_c



(a) AP (空中落下法)



(b) UD (不攪乱試料)

図-7 細粒分含有率と骨格間隙比の関係

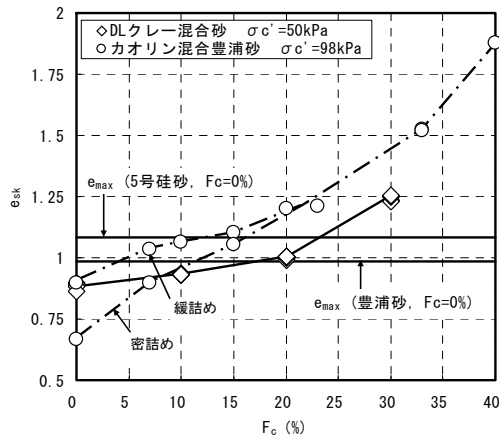


図-8 細粒分含有率と骨格間隙比の関係

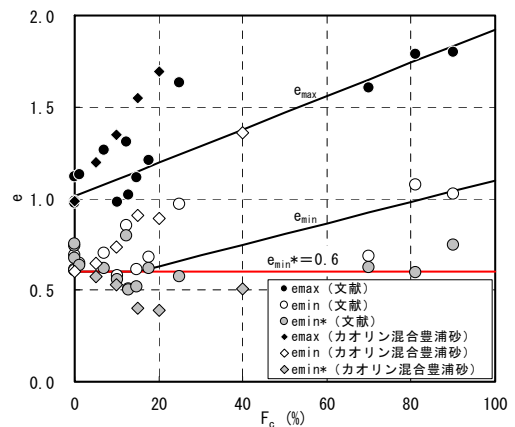


図-9 F_c と e_{max} , e_{min} の関係

が 7~15%の範囲を中心に、UD では概ね 7~12%の範囲を中心として、 e_{sk} が $F_c=0\%$ の時の e_{max} を上回っている様子がわかる。これは、砂分にある程度の細粒分が含まれると、砂粒子同士の接触が減少するためであり、この状態よりも F_c が増加すると、細粒分の性質が次第に卓越すると考えられる。

図-8に相馬5号硅砂にDLクレーを混合したDLクレー混合砂および豊浦砂にカオリンを混合したカオリン混合豊浦砂の F_c と e_{sk} の関係を示す。同図においても、DLクレー混合砂では F_c が22%以上、カオリン混合豊浦砂では5~12%程度以上で e_{sk} が $F_c=0\%$ の時の e_{max} を上回っており、図-7に示した傾向と概ね整合する。

上記の検討より、ある特定の F_c を境界にして骨格構造が変化し、 F_c が小さく砂分の影響が卓越する場合には、 R_l は砂粒子骨格の堆積構造の影響が大きいものと推察される。一方、 F_c が大きい場合には、砂粒子の骨格構造よりも細粒分の影響が支配的となり、 R_l に及ぼす F_c の影響が大きくなるが、 D_r についての妥当な評価が難しいものと考えられる。

(3) 細粒砂における相対密度の補正

図-5からもわかるように、細粒分を含む砂の D_r については、現行の試験規格による最大・最小密

度試験によると、過大評価される傾向にあり、 R_l の評価が困難となる。この原因は e_{min} を過小評価するためと考え、物理的に作り得る最小の間隙比を得るため、締固め試験³⁷⁾により得られる ρ_{dmax} により e_{min}^* を求め、これにより細粒分の影響を考慮した補正相対密度 D_r^* を求めた。

D_r の細粒分補正にあたり、主に参考文献³⁸⁾のデータ（以下、文献値）および別途実施したカオリン混合豊浦砂の締固め試験結果をまとめ、 F_c と e_{max} , e_{min} および e_{min}^* の関係を図-9に示す。 e_{min} と e_{min}^* の分布を見ると、カオリン混合豊浦砂では、 F_c が5%を超える範囲から両者に差が生じ、 e_{min} が増加している様子がわかる。一方、文献値を見ると、 F_c が15%を超える範囲では、 e_{min}^* は概ね0.6程度の一定値を示している。文献値とカオリン混合豊浦砂による結果の差については粒度特性等の影響があるものと考えられるが、ある F_c を超えると細粒分が砂骨格よりも卓越し、 e_{min}^* が概ね一定値に落ち着く点で、両者の傾向は一致している。

図-10に e_{min} と e_{min}^* の関係を示し比較すると、 $F_c \leq 15\%$ において、両者は1:1のライン付近にプロットされ、15%を超えるとばらつきはあるものの、 e_{min}^* が小さい範囲に分布する。

以上の結果より、 D_r に対する細粒分補正につい

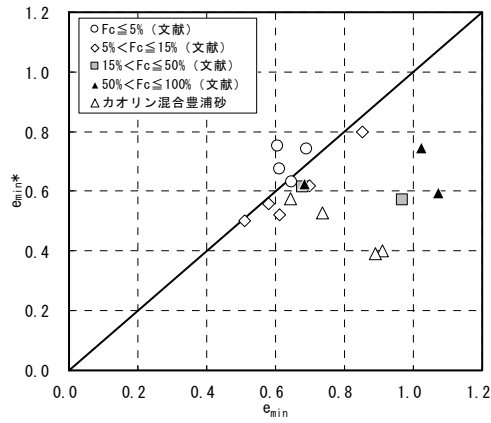


図-10 $e_{\min}$ と $\rho_{d\max}$ より求めた $e_{\min}^*$ の比較

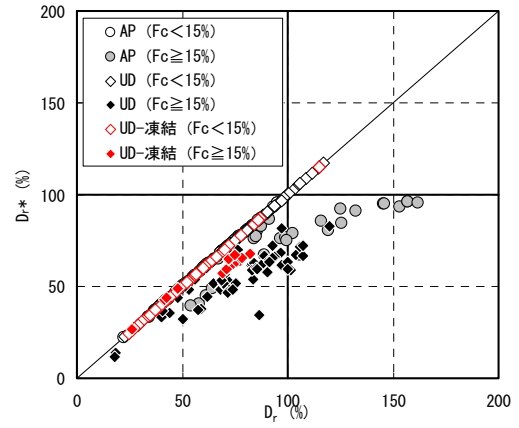
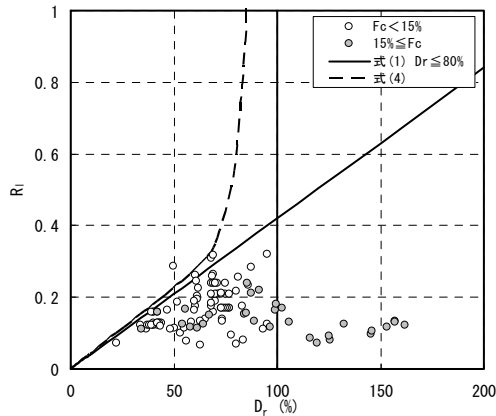
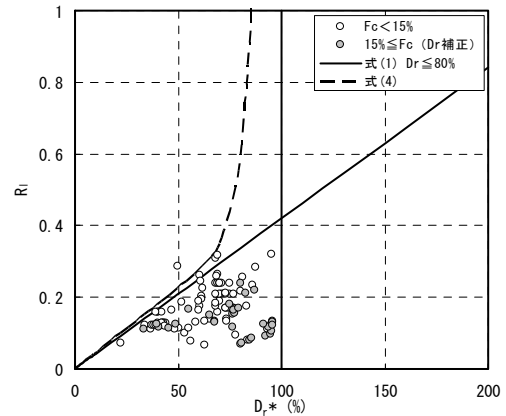


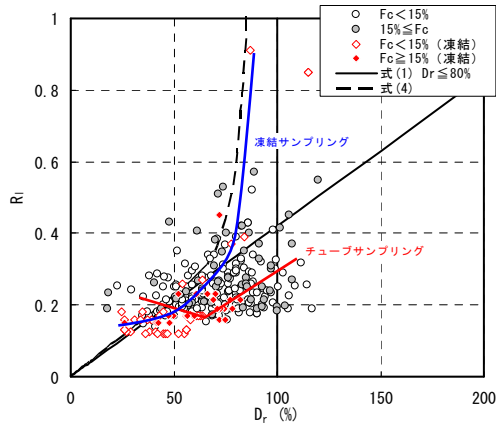
図-11 補正相対密度 D_r^* の評価



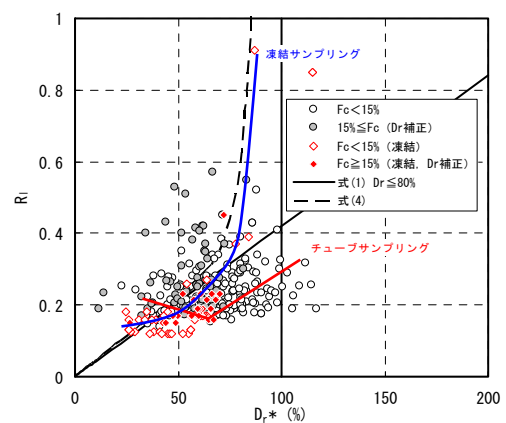
(a) AP (D_r 補正無し)



(b) AP (D_r 補正)



(c) UD (D_r 補正無し)



(d) UD (D_r 補正)

図-12 D_r , D_r^* と R_l の関係

では、 $F_c > 15\%$ の範囲で $e_{\min}^* = 0.6$ として D_r^* を算出することとして、 D_r と D_r^* の比較を図-11 に示す。本補正により、AP、UD および UD-凍結のいずれも、 D_r^* 分布は同様な傾向を示しており、 $D_r \geq 100\%$ のデータが、 D_r^* では 100% 以内に分布し、より現実的な値を示している。

(4) 相対密度と液状化強度の関係

$F_c = 15\%$ を補正の閾値として、図-12 に D_r および $F_c \geq 15\%$ の範囲で $e_{\min}^* = 0.6$ とした補正相対密度

D_r^* と R_l の関係を示す。図中には、 $F_c < 5\%$ における既往の関係式および参考文献²⁵⁾に掲載されている凍結サンプリングとチューブサンプリングによる N_l と R_l の関係について、 N_l を式(2)により D_r に換算し、サンプリング方法の違いによる R_l の傾向について併記した。なお、 $F_c \leq 15\%$ の範囲では D_r の細粒分補正を行わないため、 D_r および D_r^* と R_l の関係は同一である。既往の関係式と試験結果を比べると、AP、UD 共に全体的に R_l が低くなっているものの、 F_c が 15% を超える範囲にある D_r^* と R_l の

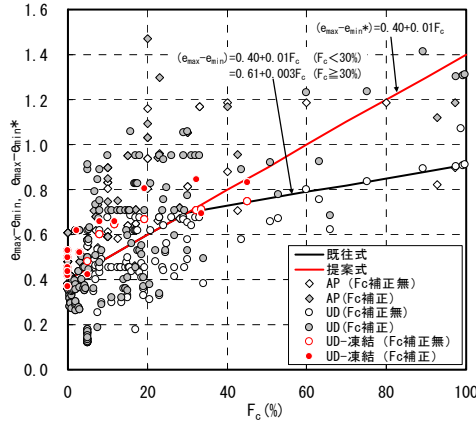


図-13 F_c と $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ の関係

関係は、細粒分補正によりプロットのばらつきが減少していることが確認できる。また、AP では、 $F_c \leq 15\%$ のプロットの分布範囲の下限、一方、UD は細粒分補正をすることで、 $F_c \leq 15\%$ のプロットの分布範囲よりも上位に分布し、 R_l がやや大きくなる様子がわかる。また、ここでは細粒分補正の必要が無い凍結試料に着目すると、 D_r あるいは D_r^* の殆どが概ね 40～70%に分布し、図中の凍結サンプリングとチューブサンプリングの間に R_l が分布している。UD と比較すると、ほぼ平均的な分布傾向を示しているが、 D_r^* が増加すると、 R_l が急増する傾向を示しており、チューブサンプリングにより得られた R_l の傾向と明らかに異なっている様子がわかる。

4. 細粒分が液状化強度に及ぼす影響

(1) 補正相対密度による液状化強度の評価

$F_c \geq 15\%$ を対象に補正した D_r^* と R_l の関係について検討するにあたり、 $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ と F_c の関係および $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ と R_l の関係について整理した。

まず、 $(e_{\max} - e_{\min})$ および $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ と F_c の各関係について、図-13 に示す。 $(e_{\max} - e_{\min})$ と $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ の両者を比較すると、AP および凍結試料を含む UD に拘わらず、補正無しの場合は式(7)と概ね一致するが、 $e_{\min}^* = 0.6$ とした補正有りの場合には、 $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ は F_c に対し、一義的な関係となり、以下に示す式で表される。

$$(e_{\max} - e_{\min}^*) = 0.40 + 0.01F_c \quad (10)$$

一方、 D_r と R_l の関係は、式(4)を参考に、次式で表せることとする。

$$R_l = af(D_r) \quad (11)$$

式(11)より、 F_c の補正を行った a^* と $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ の関係についてまとめ、図-14 に示す。図-14 を見

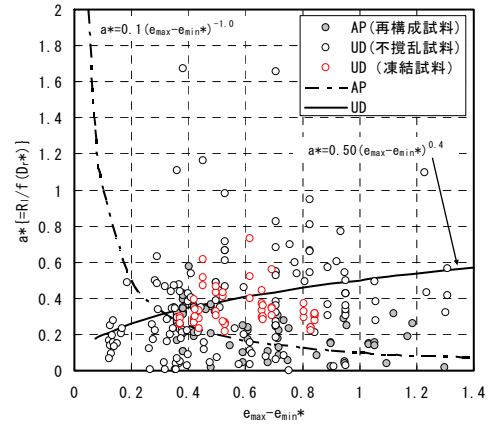


図-14 $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ と a^* の関係

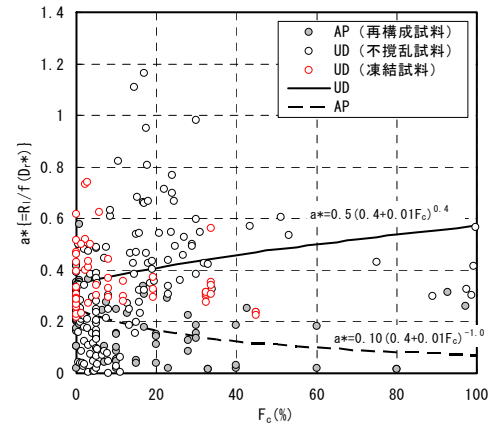


図-15 F_c と a^* の関係

ると、プロットにばらつきが認められるが、AP と凍結試料を含む UD で異なる傾向を示している。AP では $(e_{\max} - e_{\min}^*)$ が小さい程 a^* は大きく、一方 UD は逆の傾向を示しており、これらの関係は、式(12)の様に示すことができる。

$$a^* = b(e_{\max} - e_{\min}^*)^c \quad (12)$$

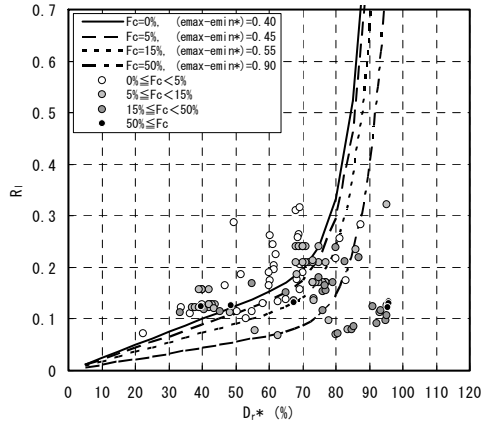
ただし、AP では $(b, c) = (0.10, -1.0)$ 、UD に対し $(b, c) = (0.50, 0.4)$ を示す。また、式(10)を式(12)に代入することにより、 F_c と a^* の関係を導くことができ、次式で示される。

$$a^* = b(0.40 + 0.01F_c)^c \quad (13)$$

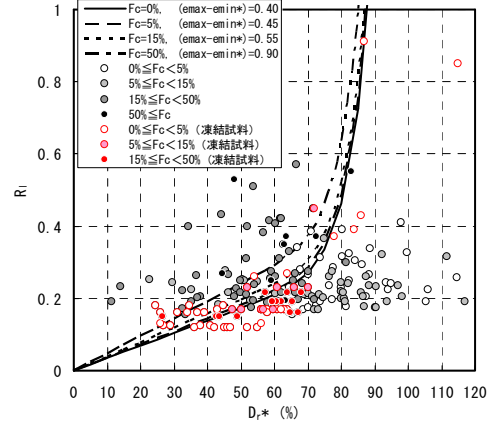
したがって、 R_l と D_r^* の関係は、次式のように表される。

$$R_l = b(0.40 + 0.01F_c)^c f(D_r^*) \quad (14)$$

なお、 $f(D_r^*)$ については、参考文献⁶⁾に示されている次式を用いた。

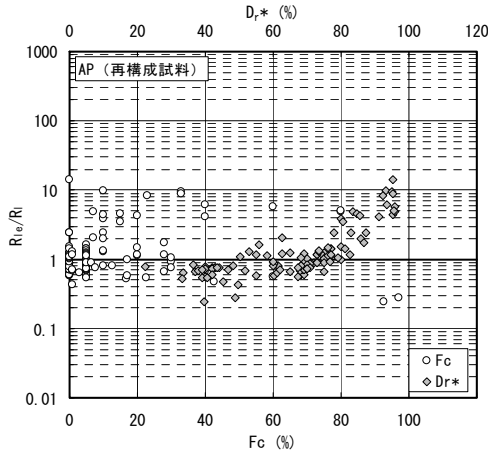


(a) AP (再構成試料)

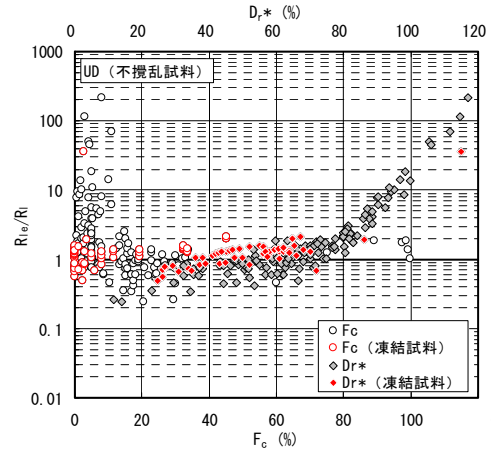


(b) UD (不攪乱試料)

図-16 D_r^* と R_l の関係



(a) AP (再構成試料)



(b) UD (不攪乱試料)

図-17 推定液状化強度の誤差範囲

$$f(D_r^*) = \frac{D_r^*}{100} + \left(\frac{D_r^*}{83.7} \right)^{14} \quad (15)$$

式(13)および式(14)について、図-15 および図-16 にそれぞれ示す。図-15 を見ると、特に $F_c=20\%$ 前後における UD のプロットのばらつきが顕著であるが、凍結試料については式(13)と良く一致している。また、AP についても式(13)が概ね良好な関係にあることが確認できる。

図-16 における各 F_c 毎の D_r^* と R_l の関係を見ると、式(14)については、AP では、 F_c の増加に伴い、 R_l が減少する傾向を示しているが、試験値と比較的良好な相関を示している。一方、UD では、 F_c が比較的小さい 15%以下の範囲では、式(14)に対し R_l の試験値に大きなばらつきが見られるが、凍結試料は良好な一致を見せており、全般的には式(14)と R_l の試験値は調和的であるものと考えられる。

次に、図-16 に示す R_l に対する式(14)の精度を確認するため、同式から得られた液状化強度を R_e として、 (R_e/R_l) と F_c および D_r^* の関係を図-17 に示す。AP については、 F_c が 0~40%の範囲で式(14)は R_e を大きく算定する傾向にあり、いずれも D_r^* が

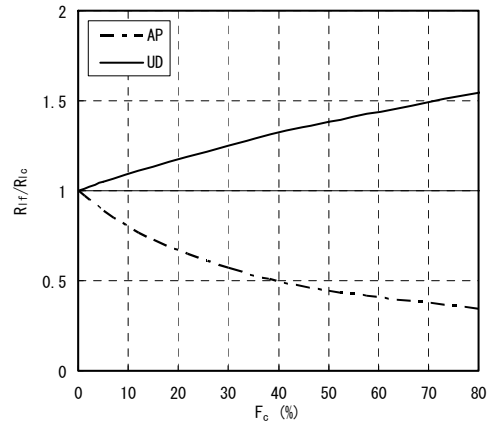


図-18 細粒分による液状化強度増加率

80%以上に相当していることがわかる。一方、UD については、 F_c が 10%以下における (R_e/R_l) のばらつきが大きい、 D_r^* を確認すると、AP と同様に 80%以上の範囲に相当していることがわかる。しかし、凍結試料に限ると、 F_c と D_r^* に拘わらず、 (R_e/R_l) にばらつきが少なく、式(14)と試験値が調和的であると言える。以上より、式(14)の適用範囲について総合的に判断すると、 $F_c < 15\%$ の場合に

$D_r^* < 80\%$ であり、 $F_c \geq 15\%$ では D_r^* の制限は特に無いものと判断される。

式(14)から得られる R_{le} に関し、図-18 に任意の F_c における液状化強度を R_{lf} として、 $F_c = 0\%$ における液状化強度 R_{lc} で除した液状化強度増加率 (R_{lf}/R_{lc}) と F_c の関係を示し、同一の D_r^* における F_c の影響について調べた。同図において、AP については、細粒分が含まれると R_{lf} が減少し、一方、UD では逆に増加傾向にある様子が示されている。この両者の相違は、原位置で採取された試料と再構成試料における構成要素の粒度特性やマトリクスの固結度、あるいは原位置における応力履歴の影響等、様々な要因によるものであると推察される。

5. まとめ

地盤調査で得やすい指標を用い、液状化強度を推定するに当たり、同一条件下における液状化強度の評価が困難であることから、細粒分含有率が5%以下であるきれいな砂から低塑性のシルト質砂およびシルトを対象に文献調査し、細粒砂の相対密度の補正方法について検討し、これを基に液状化強度との関係について示した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 空中落下法による再構成試料については、細粒分が若干含まれることで液状化強度が減少し、ある程度細粒分含有率が増加することで微増する傾向にあった。一方、不攪乱試料では、細粒分含有率の増加に伴い、液状化強度が増加する傾向を確認した。
- 2) 細粒分含有率と骨格間隙比の関係から、特定の細粒分含有率において物理的性質が変化する。砂分にある程度の細粒分が含まれると、この細粒分含有率を境に砂粒子同士の接触が減少し、細粒分の性質が次第に卓越すると考えられる。
- 3) 相対密度に対する細粒分補正については、 $F_c > 15\%$ の範囲で $e_{min}^* = 0.6$ と固定することで、 $D_r \geq 100\%$ のデータであっても、補正相対密度 D_r^* では、100%以内に分布しより現実的な値を示した。
- 4) 既往の試験結果を対象に、補正間隙比幅をパラメータとした検討を行った結果、ばらつきはやや大きかったものの、細粒分含有率が液状化強度に及ぼす影響度合についての傾向を示すことが出来た。

参考文献

- 1) J.Kuwano, K.Takahara, H.Iimura and H.Nakazawa: Undrained cyclic and monotonic shear behavior of sand-kaolin mixture, *1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol.1, pp.165-170, 1995.
- 2) Ishihara, K.: Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.3, pp.1-8, 1973.
- 3) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T.: Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.2, pp.55-70, 1982.
- 4) Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Tsuneta, K., Yasuda, S., Hirose, M., Imai, T. and Konno, M.: A method for estimating under cyclic strength of sandy soils using standard penetration N -values, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.3, pp.43-58, 1977.
- 5) Meyerhof, G.G.: Discussion on research on determining the density of sands by penetration testing, *Proc. of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.110, 1957.
- 6) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N -value and Fines Content, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.53-74, 1983.
- 7) 兵頭正幸, 村田秀一, 河原弘明, 川手伸哉, 米村公貴, 上俊二: 年代効果を有する不攪乱海成粘土の原位置非排水繰返しせん断強度の評価, 第30回土質工学研究発表会概要集, pp.937-940, 1995.
- 8) 桑野二郎, Sapkota, B. K., 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, Vol.41, No.7, pp.23-28, 1993.
- 9) 桑野二郎, Hwang, S.K.: 細粒分を含む砂の非排水繰返し三軸試験, 第24回土質工学研究発表会, pp.829-830, 1989.
- 10) 足立正樹, 安原一哉: 細粒分を含む砂質土の液状化特性(1), 第30回土質工学研究発表会, pp.907-910, 1995.
- 11) Chung, K.Y.C. and Wong, I.H.: Liquefaction potential of soils with plastic fines, *Proc. of International Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Southampton, pp.887-897, 1982.
- 12) 原田光男, 浦沢義彦, 白井伸一: 細粒分を含む砂によって造成された海岸埋立地盤の液状化強度特性(塑性指数と液状化強度の関係), 土と基礎, Vol.38, No.6, pp.21-26, 1990.
- 13) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, Vol.39, No.2, pp.17-22, 1991.
- 14) 田中泰雄: 臨海埋立地の盛土材料の液状化と影響因子, 土と基礎, Vol.47, No.36, pp.33-36, 1999.
- 15) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Empirical correlation between SPT N -value and relative density for sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.5, pp.61-71, 1999.
- 16) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説—第一回改定版— 第2編 物理試験 第8書 砂の最小密度・最大密度試験, pp.136-145, 2003.
- 17) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K. and Huang, Y.: Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.6, pp.93-104, 2002.
- 18) 竹下貞雄: 砂の液状化に関する実験的研究, かもがわ出版, 1998.
- 19) Ishihara, K., Troncoso, J., Kawase, Y. and Takahashi, Y.: Cyclic Strength Characteristics of Tailings Materials, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.4, pp.127-142, 1980.
- 20) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, Vol.39, No.2, pp.17-22, 1991.
- 21) 桑野二郎, 飯村博忠, 中澤博志, 杉原弘一: 粘土分含有

- が砂質土の非排水繰返しせん断特性に及ぼす影響, 粘性土の動的性質に関するシンポジウム発表論文集, pp.143-148, 1995.
- 22) 中澤博志, 桑野二郎, 杉原弘一, 矢部浩史: 細粒分を含む砂の非排水単調及び繰返しせん断特性, 第31回地盤工学研究発表会, pp.991-992, 1996.
- 23) 菅野高弘, 中澤博志: 液状化対策に関する実物大の空港施設を用いた実験的研究, 港空研資料, No.1195, 354p, 2009.
- 24) 例えば, Ishihara, K., Tsuchiya, H., Huang, Y. and Kamada, K.: Recent studies on liquefaction resistance of sand – effect of saturation, *4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, CD-ROM, 2001.
- 25) 吉見吉昭: 砂の乱さない試料の液状化抵抗～ N 値～相対密度関係, 土と基礎, Vol.42, No.4, pp.63～67, 1994.
- 26) 中澤博志, 石原研而, 塚本良道, 鎌田敏幸: 鳥取県竹内工業団地において不攪乱試料の液状化強度と P 波速度の関係, 第58回土木学会年次学術講演会, III-097, pp.193-194, 2003.
- 27) 鎌田敏幸, 石原研而, 塚本良道, 中澤博志: 不完全飽和状態における不攪乱砂質土の液状化強度特性, 第58回土木学会年次学術講演会, III-083, pp.165-166, 2003.
- 28) 建設省土木研究所千葉支所: 東京湾岸道路地盤耐震性調査報告書, 1976.
- 29) 海老根昭, 中川誠志, 黒原一郎: 不カク乱砂の液状化特性と地震時せん断応力の推定について, 土と基礎, Vol.26, No.2, pp.19-24, 1978.
- 30) Y.Tsukamoto, K.Ishihara, H.Nakazawa, S.Yasuda and Y.Horie: Soil properties of the deposits in Adapazari from laboratory tests, *Proc. of 15 ICSMGE Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes*, pp.275-280, 2001.
- 31) 亀井祐聡, 森本巖, 安田進, 清水善久, 小金丸健一, 石田栄介: 東京低地における沖積砂質土の粒度特性と細粒分が液状化強度に及ぼす影響, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.4, 11-110, 2002.
- 32) 建設省土木研究所地震防災部振動研究室: 室内土質試験に基づく液状化強度－細粒分含有率の影響－, 土木研究所資料, 第2590号, 1988.
- 33) 土木学会: 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 第4編 土質・地盤, 1986.
- 34) 善功企, 梅原靖文, 山崎浩之: 振動三軸法による液状化・非液状化地盤の事例解析, 港湾技研資料, No.623, 1988.
- 35) 鬼塚克忠, 吉武茂樹: 粘土・砂の飽和混合土の圧密特性, 土と基礎, Vol.34, No.7, pp.73-79, 1986.
- 36) 柴田英明: 砂・粘土混合土の締め固め後の構造に関する一提案, 土と基礎, Vol.34, No.12, pp.17-22, 1986.
- 37) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説－第一回改定版－ 第2編 物理試験 第8書 砂の最小密度・最大密度試験, pp.136-145, 2003.
- 38) 例えば, 沼田淳紀, 染谷昇, 田雑満孝, 國生剛治: 細粒な土に対する最小間隙比定義方法の提案, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.665-670, 2002.

REVISION OF RELATIVE DENSITY AND ESTIMATION OF LIQUEFACTION STRENGTH OF SANDY SOIL WITH FINE CONTENT

Hiroshi NAKAZAWA and Kenji HARADA

It is generally known that liquefaction strength obtained from undrained cyclic triaxial test is influenced by various factors such as relative densities, fine content, grain size distributions and plasticity indexes. However, It is difficult to estimate liquefaction strength for various soil types from same physical properties. In order to estimate the liquefaction strength of various soil types such as silt, silty sands and clean sands, this study showed a method to revise relative density of sandy soil including more than 15% of fine content and the correlation between revised relative density and void ratio ranges obtained from maximum and minimum void ratio. Then, the relationships between void ratio ranges and liquefaction strengths from other studies was considered. As a result, the difference of liquefaction strength between reconstituted and undisturbed samples was recognized from the correlations revised relative density using void ratio ranges and fine content.