

砂部分の密度を用いた砂礫試料の液状化強度評価について

永瀬英生¹・廣岡明彦¹・清水恵助²・太田稔³

¹正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

³正会員 工修 村本建設株式会社 奈良本店 土木部 (〒635-0822 奈良県北葛城郡広陵町大字平尾 11-1)

1995年兵庫県南部地震では、砂礫土からなる埋立地盤で液状化が発生し、構造物が多大な被害を受けた。これより、巨大地震においては砂礫地盤といえども液状化が発生する可能性は十分あることが明らかになった。筆者らは、2種類の砂に4種類の礫を混合した試料を用いて非排水繰返し三軸試験を行い、それらの液状化強度と、礫粒子から離れた砂の部分の相対密度 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ 、および最大・最小密度試験で得られる通常の試料全体の相対密度 Dr 等の相関性を調べてきた¹⁾。本研究では、 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の計算方法に検討を加え、さらに試料として2種類の砂礫の再構成試料を用い同様の検討を行った。その結果、砂礫試料の液状化強度と $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の間には明確な正の相関があることが明らかになった。

Key Words : Liquefaction, Strength, Sand, Gravel, Relative density, Reconstituted sample

1. はじめに

砂礫地盤は、透水性が高く、静的強度が大きいことより、構造物の耐震性を検討する際、その液状化強度に関しては十分な議論がなされてこなかった。ところが、1995年兵庫県南部地震においては、阪神地域の臨海部埋立地で広範囲に液状化が生じ、岸壁構造物、橋梁基礎および建築物基礎等が多大な被害を受けた。この地域の埋立地盤はまさ土等の砂礫土で構成されている。よって、巨大地震に対しては砂礫地盤といえども液状化の検討が必要であると認識されてきている。

筆者らは、砂礫試料の液状化強度の評価方法を明らかにするため、2種類の砂と4種類の礫の混合試料の非排水繰返し三軸試験を行い、それらの液状化強度と、礫粒子から離れた砂の部分の相対密度 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ 、および最大・最小密度試験で得られる通常の試料全体の相対密度 Dr の相関性を調べてきた¹⁾。その結果、液状化強度と $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の関係は比較的相関性が高いことが認められた。しかしながら、 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の算出方法には検討課題が残されていた。

本研究では、 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の算出方法に新たな検討を加え、これまで得られた結果を再整理するとともに、2種類の再構成試料の非排水繰返し三軸試験を実施し、砂礫試料の液状化強度とその評価方法について検討してみた。なお、この再構成試料は原位置でサンプリングされた不攪乱試料を再構成したものである。

2. 試料および実験方法

用いた試料は、豊浦砂と筑後川砂に4種類の礫を礫分含有率 $GC=0, 10, 30, 50\%$ になるように混合したもの¹⁾と、武庫川および九頭竜川砂礫の再構成試料である。図-1は礫分含有率と砂分の平均間隙比より求められる相対密度 Dr_{matrix} を説明したものである。また図-2(a)~(c)には用いた試料の粒径加積曲線を示している。武庫川および九頭竜川砂礫は自然の中で堆積したものであるため、粒径加積曲線が豊浦砂および筑後川砂と礫の混合試料に

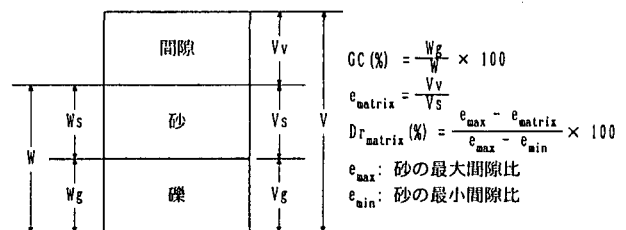


図-1 GCと Dr_{matrix} の説明

比べ滑らかである。ただし、筑後川砂+丸礫 (2:3) の試料は、丸礫 (2~4.76mm) と丸礫 (4.76~9.50mm) を重量比で 2:3 になるように混合したものであり、粒径加積曲線が比較的滑らかになっている。

表-1は実験ケースを示したものである。供試体は直径 15cm、高さ 30cm の円柱形であり、密度は表-1に

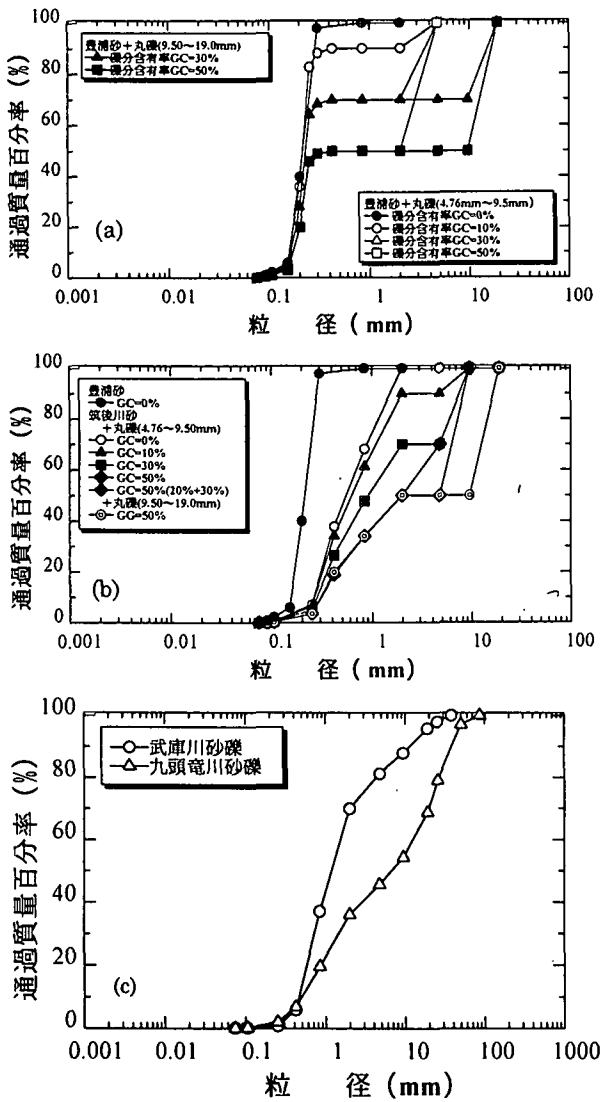


図-2 用いた試料の粒径加積曲線

表-1 実験ケース

試料名	礫分含有率 GC (%)	相対密度 Dr (%)	砂分相対密度 Dr _{matrix} (%)	液状化強度比 R ₁₁₀ (DA=2%)
豊浦砂	0	50	50	0.135
		70	70	0.272
豊浦砂+丸礫 (4.76~9.50mm)	10	42	49	0.140
	30	38	46	0.158
	50	45	41	0.189
豊浦砂+丸礫 (9.50~19.0mm)	30	41	51	0.170
	50	61	52	0.213
豊浦砂+角礫 (4.60~9.50mm)	30	41	47	0.150
	50	51	44	0.172
筑後川砂	0	50	50	0.182
		80	80	0.330
筑後川砂+丸礫 (4.76~9.50mm)	30	51	45	0.251
	50	77	39	0.412
筑後川砂+丸礫 (9.50~19.0mm)	50	75	53	0.412
		95	48	0.314
武庫川砂礫 (2:3)	30	58	59	0.256
九頭竜川砂礫	64	61	20	0.267

示すように豊浦砂および筑後川砂と礫の混合試料の場合、 $Dr_{matrix}=39\sim53\%$ となるように調整している。ただし、GC=0%については、豊浦砂の場合 $Dr_{matrix}=70\%$ 、筑後

川砂の場合 $Dr_{matrix}=80\%$ の試験も行っている。また、武庫川および九頭竜川砂礫の再構成試料の場合、密度は不攪乱試料の値と一致させた。

供試体作製方法は不飽和砂凍結法とした。この方法を採用したのは、①凍結した供試体の表面部の凹凸に不飽和砂を貼り付けることによって、メンブレンペネトレーションの影響を極力防ぐ、②材料分離を抑制する、等の理由からである。ただし、武庫川砂礫の供試体は不飽和砂凍結法と空中落下法で、九頭竜川砂礫の供試体は空中落下法でそれぞれ作製した。なお、空中落下法の場合も、モールドに詰めた試料は、その最下端部を水に浸して湿潤状態にし、その後凍結させている。

作製した供試体は融解させた後、炭酸ガスを一定時間通気し、脱気水を通水して、B値が 0.95 以上であることを確認した後、豊浦砂および筑後川砂の混合試料の場合、有効拘束圧 $\sigma'_v=49kPa$ 、再構成試料の場合、採取深度の有効土被り圧で等方圧密した。その後、周波数 0.1Hz の正弦波荷重による非排水繰返し三軸試験を行った。

3. $Dr_{far-field matrix}$ の算出方法

Fragaszy ら²⁾は、砂礫試料の中で、特に大きな粒子の周辺の小粒子からなるマトリクス (near-field matrix) がそれ以外のマトリクス (far-field matrix) に比べて緩くなることを理論的に証明した。図-3はその概念を示したものである。なおここでは、特大粒子を粒径 2mm 以上の礫、マトリクスを形成する小粒子を砂と仮定した。そこで、この far-field matrix に注目し、この部分の相対密度を $Dr_{far-field matrix}$ とし、これによる液状化強度の評価を試みた。 $Dr_{far-field matrix}$ は以下の式により求められる。ただし、文献1)では間隙比 e を砂分の平均間隙比 e_{matrix} に等しいと仮定し、以下の式より α を求め、 V_0/α を新たな礫の体積と考え、砂部分の間隙比より $Dr_{far-field matrix}$ を求めている。ところが、理論的には β の式にある e は far-field matrix の間隙比 $e_{far-field matrix}$ と一致する必要がある。本研究では、間隙比 e をはじめに e_{matrix} に等しいと

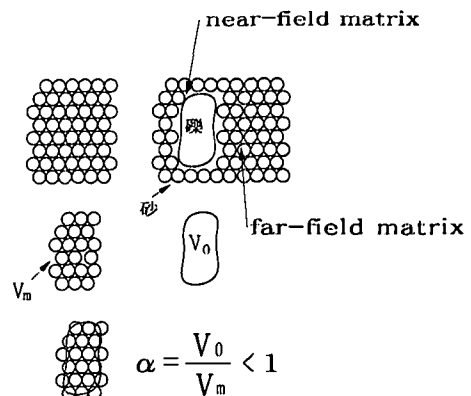


図-3 α の説明

仮定し、その間隙比 e が $e_{\text{far-field matrix}}$ に等しくなるまで繰返し計算を行った。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \beta \kappa} \quad \text{ただし、} D_m(D_0) : \text{砂(礫)の} D_{50}$$

$$\beta = 1.333(e - 0.1) \quad C_m(C_0) : \text{砂(礫)の} U_c$$

$$\kappa = \frac{D_m C_m S_m}{D_0 C_0 S_0} \quad S_m(S_0) : \text{砂(礫)の形状}$$

また、文献 1) では κ の式にある S_0 の値を礫粒子の細長率³⁾ × 偏平率³⁾ より求めているが、このような測定は非常に時間を要するため実用的でない。本研究では、 S_m/S_0 の値として、最大密度試験より得られる砂と礫のそれぞれの最小間隙比を採用した。さらに文献 1) で詳述しているように、粒度の項 C_m/C_0 と粒形の項 S_m/S_0 が砂粒子と礫粒子の表面積比と密接な関係があると考え、粒径の項 D_m/D_0 と同様に長さの比に合わせるため、 $\sqrt{C_m}/\sqrt{C_0}$ 、 $\sqrt{S_m}/\sqrt{S_0}$ の式形も計算に用いた。

4. 液状化強度と相対密度の相関性

図-4(a)~(c)には、繰返し応力比 R と両振幅軸ひずみ $DA=2\%$ に至るまでの繰返し回数 N_c の関係を示している。図-4(a)は豊浦砂、図-4(b)は筑後川砂にそれぞれ礫を混合した場合の $R \sim N_c$ 関係を示したものである。また図-4(c)は、武庫川砂礫と九頭竜川砂礫の試験結果を示したものである。ただし、 $DA=2\%$ としたのは、供試体に生じるひずみの分布を観察したところ、 $DA=2\%$ 以下であればネッキングによる軸ひずみの非一様性が比較的小さかったからである⁴⁾。また、武庫川砂礫の繰返し応力比は供試体作製方法の影響を受け、不飽和砂凍結法の場合の方が空中落下法の場合よりも大きくなっている。これは、不飽和砂凍結法の場合、凍結前の試料を詰める段階で試料が幾分締め固められたためと考えられる。このことより、九頭竜川砂礫(空中落下法)の結果はここでは参考データとする。

図-4(a)~(c)より繰返し回数 $N_c=20$ での繰返し応力比 R_{20} 、すなわち液状化強度比を読み取り、 $R_{20(DA=2\%)}$ と相対密度 Dr および $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の相関性を調べた。図-5には液状化強度比 $R_{20(DA=2\%)}$ と試料全体の相対密度 Dr の関係を示している。多少データのばらつきは見られるものの、液状化強度と Dr の間には、明らかに正の相関が認められる。また、武庫川砂礫のデータもこのばらつきの範囲に収まっていることも分かる。ただし、砂礫試料の最小間隙比の測定においては、材料分離の影響が懸念されることも指摘されている¹⁾。

次に、液状化強度比 $R_{20(DA=2\%)}$ と礫粒子から離れた砂の部分の相対密度 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の相関性について示す。図-6、7は、豊浦砂および筑後川砂と礫をそれぞれ混合した試料の試験結果に基づいてその相関性を調べたもの

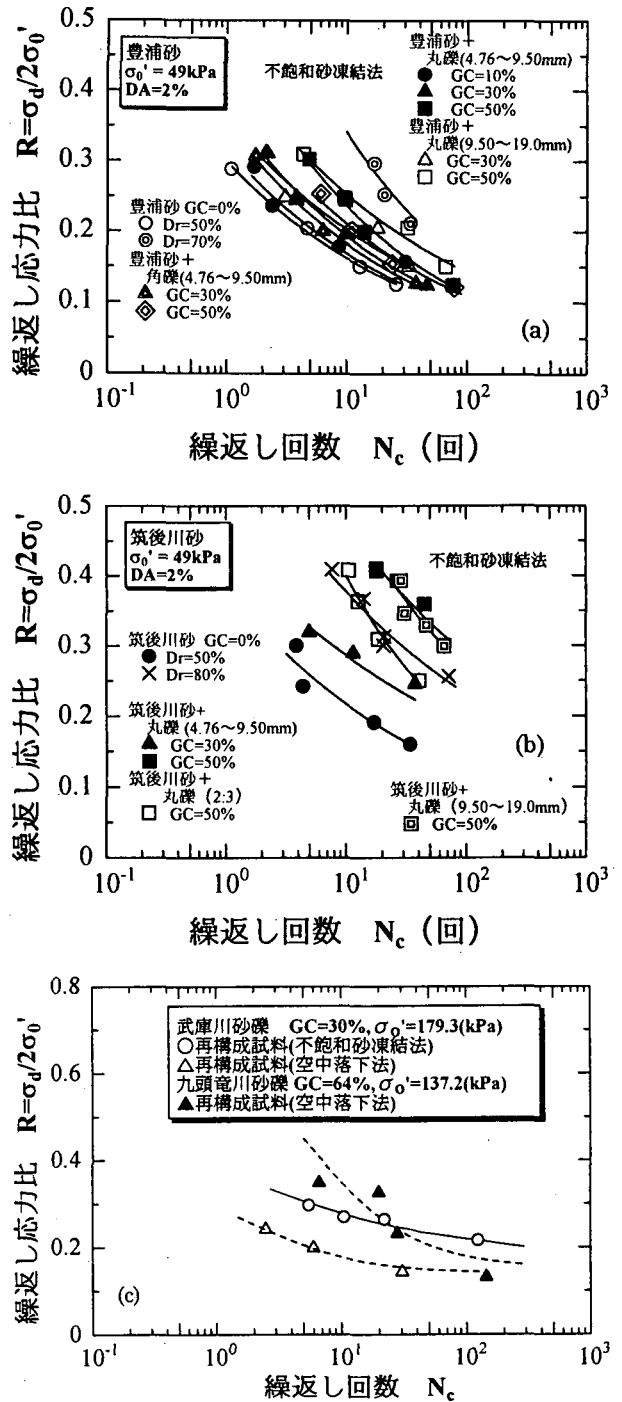


図-4 繰返し応力比と繰返し回数の関係

である。図-6には S_0 の項で礫粒子の細長率³⁾ × 偏平率³⁾ を用いた場合、図-7には S_m/S_0 の項に砂と礫の最小間隙比 e_{min} を用いた場合の結果をそれぞれ示している。 κ の式は C_m/C_0 、 S_m/S_0 の式形とした。これらの図より、 $R_{20(DA=2\%)}$ と $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の間には、図-5と同様に明確な正の相関が認められる。また、図-7の方が図-6に比べて相関性は高い。 e_{min} は S_m/S_0 の計算に有用であると考えられる。図-8は $R_{20(DA=2\%)}$ と $\sqrt{C_m}/\sqrt{C_0}$ 、 $\sqrt{S_m}/\sqrt{S_0}$ の式形を用いた場合の $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の関係を示したものである。 S_m 、 S_0 は砂、礫の最小間隙比の値である。これ

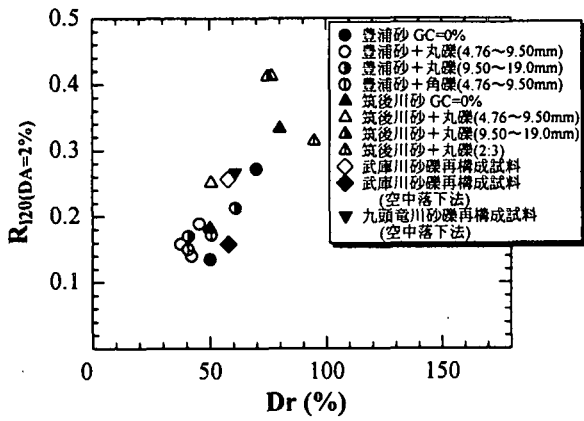


図-5 液状化強度比と Dr の関係

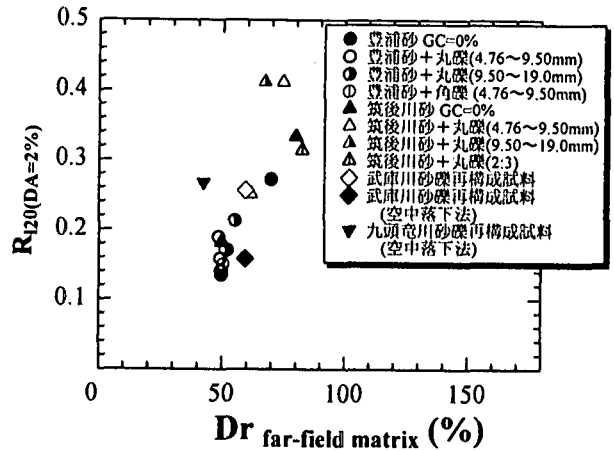


図-8 液状化強度比と $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の関係

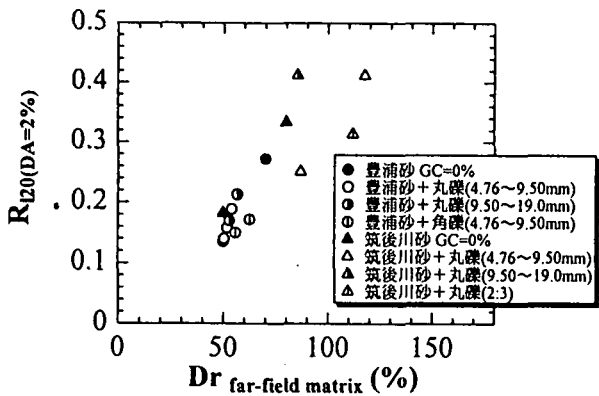


図-6 液状化強度比と $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の関係

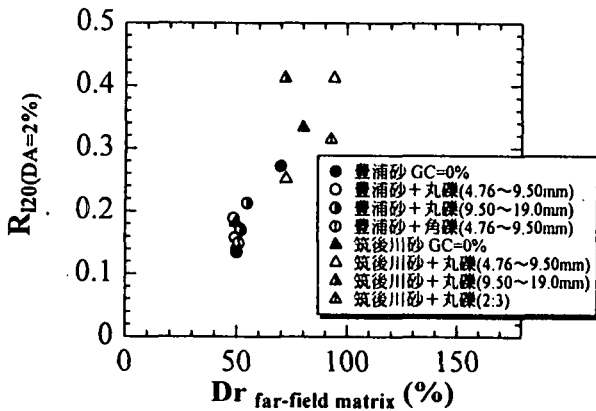


図-7 液状化強度比と $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の関係

5. まとめ

2種類の砂に4種類の礫を混合した試料と2種類の再構成試料の非排水繰返し三軸試験結果に基づいて、液状化強度と試料全体の相対密度 Dr 、および礫粒子から離れた砂の部分の相対密度 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の相関性について検討した。その結果、 $Dr_{\text{far-field matrix}}$ は、適切な算出方法で求めるならば、液状化強度を評価する状態パラメータとして有用になると考えられる。ただし、相対密度が50%以下の緩い範囲や粒度が良い場合についてはさらにデータを蓄積する必要がある。なお、再構成試料は、建設省土木研究所 耐震技術研究センター動土質研究室松尾修室長よりご提供いただいた。関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 永瀬英生・他：礫を含む砂の液状化特性，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1433-1438，1998。
- 2) Fragaszy, R.J. et al. : Effects of oversize particles on the density of clean granular soils, Geotechnical Testing Journal, Vol.13, No.2, pp.106-114, 1990。
- 3) 最上武雄編著：土質力学，第8章，pp.893-1036，1969。

には武庫川および九頭竜川砂礫のデータもプロットしてある。この場合も、 $R_{120(DA=2\%)}$ と $Dr_{\text{far-field matrix}}$ の間には明確な正の相関関係があることが分かる。武庫川砂礫の結果もデータのばらつきの範囲に収まっている。図-6～8の結果を比較すると、図-7または8に示した関係の相関性が高くなっていることも分かる。