繰返し非排水三軸試験によるマイクロスフェアを用いた不飽和化工法の液状化強度特性

(株)大林組 正会員 〇加藤一紀 正会員 樋口俊一

1.はじめに

原子力発電所再稼働に向けた安全審査におい て、設計地震動の加速度レベルの上昇に伴い、 これまで液状化しないと判定されていた比較的 硬い砂地盤に対しても液状化の可能性が指摘さ れるようになってきている。このような背景か ら、比較的密な地盤に対して、追加の液状化対 策を要する場合を想定して、不飽和化工法に着 目し検討した。

図1に示すように、体積弾性係数の小さな人 工材料を地盤中に混入し、不飽和地盤を形成す る。地震時のせん断変形による間隙水圧の上昇 局面において、人工材料が圧縮変形して、過剰 間隙水圧の発生と、これに伴う地盤の変形を抑 制する効果が期待される。検討対象とする人工 材料にはマイクロスフェア(以下、MS と呼 ぶ)を用いる。MS は熱可塑性樹脂の中に膨張 性気体を封入し、加熱膨張により形成される直 径が数 µ~20µm の微小中空球状体である。

望月らは相対密度 Dr=50%の比較的緩い砂を 対象とした繰返し非排水三軸試験の結果から、 MS を地盤の間隙体積の 30%程度注入すること で、レベル1 地震動に耐えられる液状化強度が 発揮されることを示している¹⁾。

本報では比較的密な地盤に対して、MS によ る不飽和地盤の液状化強度特性を把握するため、 繰返し非排水三軸試験(JGS0541)を実施した。

2. 繰返し非排水三軸試験の概要

試験ケースを表1に示す。試験に用いた試料 は岐阜珪砂7号(G_s=2.641, e_{max}=1.225, e_{min}=0.697)である。MS充填率は供試体の間隙 体積に対する MS の総体積の比を表し、珪砂に 所定量の MS を混合して用いた。各供試体(直 径 5cm、高さ 10cm)は湿潤締固め法で作製し、 二重負圧法と 100kPa の背圧によって飽和させ、 100kPa で等方圧密した。無対策供試体は B 値 が 0.95 以上となることを確認した後に圧密し、 MS 対策供試体については、無対策供試体と同 様の飽和化作業を行うことで、MS 以外の間隙 が飽和したと見なして圧密した。繰返し荷重は 0.1Hz の正弦波を応力制御で入力した。

3. 液状化強度曲線と非排水繰返しせん断応答特 性



図1 液状化防止メカニズム1)

計除たっ

衣 武殿ケース							
名称	ケース	相対密度		MS充填率	繰返し軸差応力		D/G
		圧密前 %	圧密後 %	%	$\sigma_{\rm d}$	kPa	D川目
	1-1	64.2	66.1	0		60.7	0.97
無対策	1-2	66.7	68.4	0		74.6	0.98
Dr=65%	1-3	65.7	67.6	0		48.0	0.97
	1-4	65.0	66.5	0		40.9	1.00
	2-1	65.3	67.2	30		60.9	0.37
MS対策	2-2	65.9	67.6	30		99.5	0.37
Dr=65%	2-3	66.1	68.0	30		79.3	0.40
	2-4	65.2	66.9	30		66.3	0.37



図2に繰返し非排水三軸試験による両振幅軸 ひずみ DA=5%の液状化強度曲線を示す。図中 には望月らが実施した Dr=50%での試験結果も 併記した。横軸繰返し載荷回数20回のライン で液状化強度を比較すると Dr=50%の場合と同 様に Dr=65%の供試体間においても MS による 液状化強度の増加が認められる。

MS による液状化対策工法としての特性を把 握するため、図中赤丸で囲った①と②内の供試 体について、過剰間隙水圧比の経時変化(図 3)、有効応力経路(図 4)、応力ひずみ曲線 (図 5)を比較した。

図 2 の①について、**Dr**=50%の **MS** 対策供試体と **Dr**=65%の無対策供試体の液状化強度はほぼ等しい。これは飽和度を下げることで密な地盤に近い液状化強度になることを示しており、

キーワード 不飽和、液状化特性、繰返し非排水三軸

連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 (株)大林組技術研究所構造技術研究部 TEL042-495-1264



不飽和地盤を対象とした既往の試験結果とも整合する^{例えば 2)}。一方、DA=5%に至るまでの過程に着目すると図3(a)に示す過剰間隙水圧比の応答より、MS対策供試体では無対策供試体と比較して、過剰間隙水圧比が0.5に達するまでの上昇が緩やかである。同様に図4(a)に示す有効応力経路より、平均有効主応力p'が50kPa以上ではその減少過程が緩やかである。上記のことから、液状化強度が同等でもMS対策した地盤では、平均有効主応力が初期有効応力の半分程度以上に維持されている間は、地盤の変形が無対策の場合よりも抑制されると考えられる。

図2の②について、応力振幅比0.4 近辺で、 Dr=65%の無対策供試体とMS対策供試体の繰 返し回数は概ね等しい。図3(b)に示すように MS対策供試体の過剰間隙水圧比の立ち上がり が緩やかな点は①と共通しているが、DA=5% に達しても過剰間隙水圧比は1.0に到達してい ない。このことは図5に示す応力ひずみ曲線か ら以下のように考えられる。

図2の繰返し応力振幅比が比較的小さい MS 対策供試体では、図5(a)に示すように応力ひ ずみ曲線は無対策供試体と同様に逆S字形を描 き、繰返し軸差応力が伸張から圧縮に移行する 局面で、軸ひずみが急激に増大する。一方、繰 返し応力振幅比の大きい MS 対策供試体では、 図5(b)に示すように応力ひずみ曲線は無対策 供試体とは異なり、繰返し軸差応力が伸張から 圧縮に移行する局面で、軸ひずみの増加が緩や かである。この圧縮側における軸ひずみの応答 の差が、過剰間隙水圧の上昇抑制に寄与してい ると考えられる。

図 4(a), (b)の有効応力経路より、無対策供 試体では圧縮・伸張に伴って平均有効主応力 p' は 100kPa から 0kPa に向かっている。一方 MS 対策供試体では、50kPa 近傍までは初期載荷時 の傾きと平行に p'が圧縮側で増加、伸張側で減 少を繰り返しながら OkPa に近づいていく。こ の傾向は 50kPa を下回ったところから崩れだし、 p'の減少過程が変化する。有効応力経路の初期 載荷時の傾きは、側圧一定の三軸試験であるこ とから、全応力では $\Delta p = \Delta \sigma_d/3$ となり、仮に 排水条件とすると応力経路は図中赤線で示すよ うに p=100kPa を通る傾きが 3 の線分となる。 MS 対策供試体における初期載荷時(圧縮)の p'の増加は、過剰間隙水圧の上昇局面において、 MS が圧縮変形し、水圧上昇を抑制することで 排水条件に近い応答になるためと考えられる。

4. まとめ

繰返し非排水三軸試験より、MS 対策した砂 質地盤について以下の特徴が示された。

- ・無対策との液状化強度が同等でも、MS 対策 した場合、平均有効主応力が維持されやすく、 その間は地盤の変形抑制効果が期待できる。
- 大きなせん断力が作用する場合では、圧縮側の軸ひずみの増加が緩やかになるため、過剰間隙水圧の上昇を抑制しうる。

謝辞:本試験実施について㈱アースプライムの佐々木氏にご協力いただきました。 末筆ながらお礼申し上げます。

参考文献:1) 望月他:マイクロスフェアを用いた新しい液状化対策工法の開発,土 木学会第70回年次学術講演会,pp.147-148,平成27年9月.

2) Tsukamoto, Y. et al: 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.