

砂杭打設によるひずみ履歴の回数が地盤の液状化強度に及ぼす影響

株式会社不動テトラ 正会員

○中出雄也 布川直矢

東京大学大学院

フェロー会員

古関潤一

1. はじめに

これまでサンドコンパクションパイル（以下 SCP）などの締固め工法において、地盤に与えるひずみ履歴が液状化強度に及ぼす影響が研究されてきた。締固め工法は大きく分けて2種類の施工方法が挙げられる¹⁾。図-1に示すように貫入過程のみで改良体を造成する方法と、引抜き・打戻しを繰り返し造成する方法に分類され、後者の方がより多くのひずみ履歴を与えることとなる。

また、既往の研究¹⁾では図-2に示すように4サイクルのひずみ履歴で砂杭の打設を模擬してきたが、実際の施工方法では造成過程で繰返しせん断の履歴をより多く与えることになる。本研究では、ひずみ履歴の繰返し回数が增加することによる影響について中空ねじりせん断試験機を用いて検証した。

2. 実験概要

2.1 供試体作製方法

試験に用いた試料は豊浦砂（ $\rho_s=2.651\text{g/cm}^3$ ； $D_{50}=0.162\text{mm}$ ； $F_c=0.4\%$ ； $e_{\max}=0.957$ ； $e_{\min}=0.592$ ）である。中空円筒供試体（外径 10cm、内径 6cm、高さ 20cm）を空中落下法で、ひずみ履歴載荷直後の相対密度が $D_r=60\%$ 程度（ $\pm 3\%$ 以内）となるよう作製した。また、供試体作製後の実験フローを図-3に示す。

2.2 砂杭の履歴を考慮した載荷方法

2本の砂杭貫入・造成時の杭間における土要素が受ける地盤の応力経路を簡易的に再現するために、ひずみ制御で履歴を与えた。なお、主応力方向角は一定とした。応力経路の設定は文献1)に詳述している。また改良率とせん断ひずみの関係は空洞拡張理論を参考にした。本実験においては、最大せん断ひずみを $\gamma_{\max}=0\% \sim 5\%$ の範囲で設定し、図-3中 step2 の段階で、設定したせん断ひずみの値に至るサイクル数を試験ケース毎に変化させ、液状化試験を行った。サイクル数は「貫入過程のみ」の2サイクル、「貫入過程+造成過程」の4サイクルに加え、実施工での細かい造成を模擬した6サイクル、10サイクルを試験条件とした。ひずみ履歴は非排水条件で載荷し、1サイクル毎に排水を行い相対密度の変化量を算出した。また液状化試験は、繰返し応力比 $\text{CSR}=0.20$ 、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{\text{DA}}=7.5\%$ に達するまで行った。表-1に試験ケースの一覧を示す。代表例として、CASE2-5、3-6、5-2の実験ケースについてひずみ履歴載荷、液状化試験の結果図を次章で示す。

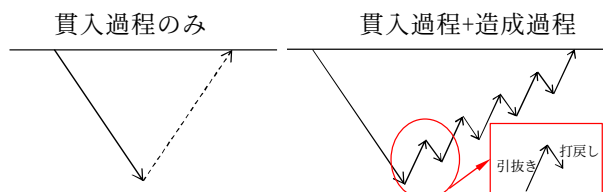


図-1 ケーシング先端の軌跡

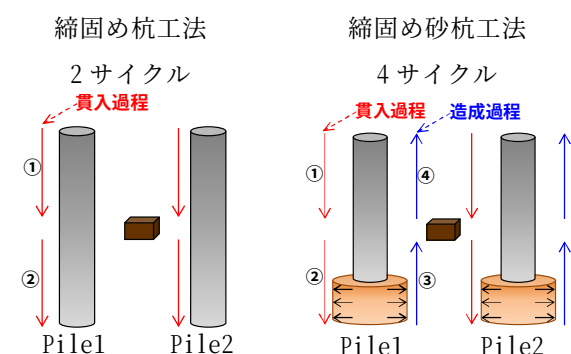


図-2 土要素に与える応力状態¹⁾

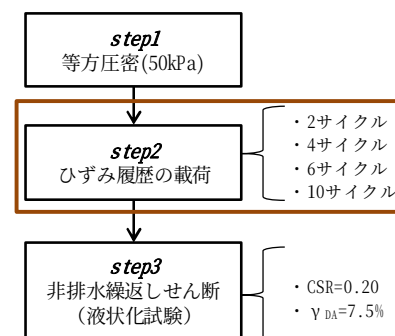


図-3 実験フロー

表-1 試験ケース一覧

サイクル数	ケース	初期	圧密後	ひずみ履歴		
		相対密度 $D_{r0}(\%)$	相対密度 $D_{r1}(\%)$	相対密度 $D_{r2}(\%)$	平均ひずみ $\gamma_{\text{cyc}}(\%)$	最大ひずみ $\gamma_{\max}(\%)$
2サイクル	CASE1	55.9	56.2	56.2	—	—
	CASE2-1	57.0	57.5	58.8	0.25	0.5
	CASE2-2	58.9	59.3	61.3	0.50	1.0
	CASE2-3	55.9	56.4	59.9	1.00	2.0
	CASE2-4	56.1	56.5	60.9	1.50	3.0
4サイクル	CASE2-5	54.0	54.2	62.2	2.50	5.0
	CASE3-1	55.9	56.3	58.8	0.33	1.0
	CASE3-2	56.0	56.4	57.6	0.10	0.4
	CASE3-3	54.6	55.0	57.1	0.20	0.8
	CASE3-4	59.8	60.2	62.6	0.25	1.0
	CASE3-5	53.2	53.6	58.9	0.75	3.0
	CASE3-6	55.2	55.6	61.3	1.25	5.0
6サイクル	CASE3-7	58.1	58.5	62.2	0.50	2.0
	CASE4-1	59.3	59.7	61.5	0.17	1.0
	CASE4-2	56.4	56.8	62.7	0.50	3.0
	CASE4-3	54.8	55.2	62.9	0.75	4.5
10サイクル	CASE5-1	54.9	55.3	61.3	0.30	3.0
	CASE5-2	55.1	55.5	61.3	0.45	4.5

キーワード：豊浦砂、液状化特性、中空ねじり 連絡先：〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町 7-2 TEL 03-5644-8534

3. 試験結果

最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=5.0\%$ におけるひずみ履歴载荷中の有効応力経路を図-4 に、液状化試験の有効応力経路を図-5 に示す。図-4 から、CASE2-5、3-6 ではひずみ履歴载荷中に平均有効主応力 p' が急増するサイクルが存在したが、CASE5-2 では、どのサイクルにおいても p' の増加が緩やかであった。これはサイクル数が少ない場合、1 サイクルで与えるひずみ量が多くなるため、体積膨張傾向が強くなってしまい粒子配列が低位化し力学的に異方性が強く²⁾なるためと考えられる。一方、サイクル数が多いと1 サイクルで与えるひずみ量は小さくなり、体積収縮傾向が比較的強く、粒子配列の高位化が進むためと考えられる。

また、図-5 よりサイクル数が増加するにつれ、液状化に至る回数 N_c が多くなる傾向が確認された。

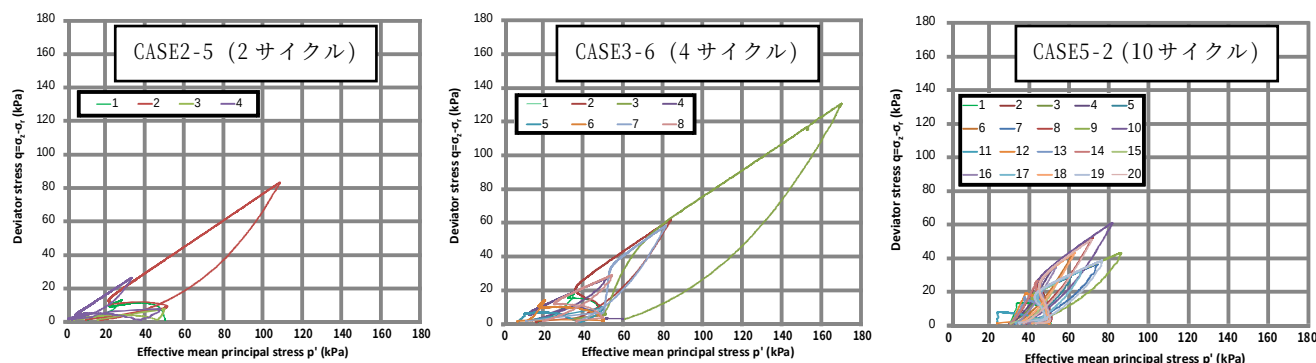


図-4 有効応力経路 (ひずみ履歴载荷)

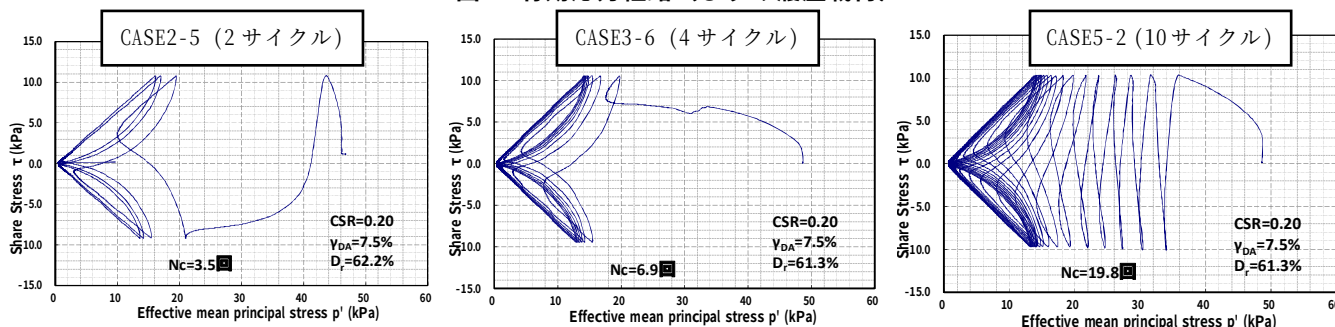


図-5 有効応力経路 (液状化試験)

図-6 は液状化 ($\gamma_{DA}=7.5\%$) に至る回数 N_c 、与えた最大せん断ひずみ量 $\gamma_{\max}$ の関係と同じ履歴サイクル数の試験毎に整理した結果である。今回の結果では、履歴として与えるせん断ひずみ量が小さな範囲 ($0.1\% \sim 0.5\%$ 付近) では N_c が増加し、それ以上の範囲では低下する傾向がみられる。さらに、同じ $\gamma_{\max}$ で比較すると、サイクル数が増加するほど N_c が増加することが判る。実際の施工では 10 サイクルよりも更に多くの履歴を受けるため、今後の研究で検証を行う予定である。

4. おわりに

ひずみ履歴の繰返し回数が液状化強度に及ぼす影響を検証した。同密度の供試体でも、最大せん断ひずみに至るサイクル数が多いほど液状化に至る回数 N_c が増加することが明らかとなった。

実施工においては、本実験で模擬した造成過程 (サイクル数) より更に細かい造成を行うため、そのことが強度の増加にさらに寄与していると予想される。

参考文献

- 1) 原田ら(2014): 締固め工法の密度増加のメカニズムと改良効果に関する考察、第14回日本地震工学シンポジウム
- 2) 鈴木ら(1988): 飽和砂の再液状化に及ぼす密度と構造の変化の影響、土木学会論文報告集 Vol.28, No.2, 187-195

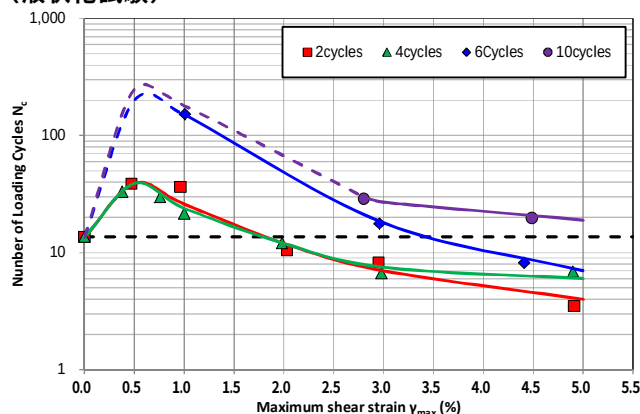


図-6 サイクル毎の液状化強度特性