

締固め砂杭の液状化特性に及ぼす施工時応力履歴の影響

東京大学大学院 学生会員 ○橋本 拓幸  
 東京大学大学院 国際会員 古関 潤一

1. 背景・研究目的

締固め砂杭工法は、砂または類似の材料が入ったケーシングを貫入し、引抜きと打ち戻しを繰り返すことで砂杭を拡径して、よく締固められた砂杭を軟弱地盤中に造成する地盤改良工法である。従来は良質な砂材料を用いて砂杭を作成してきたが、近年では環境負荷や経済性を考慮して建設発生土の再利用も行われている。本工法が液状化対策として十分な効果を発揮するためには砂杭自体が液状化しないことが前提となるが、杭自体の液状化特性に着目した研究は少ない。砂杭の液状化特性に影響を及ぼす要因の1つとして図1に示すような施工時の応力履歴が挙げられるが、その検討例は限定的であり、建設発生土を再利用した場合のように細粒分を含む砂を材料として用いた場合についてはほとんど調べられていない。本研究では、三軸試験装置を用いて砂杭の拡径に相当する大きな異方過圧密履歴を、細粒分を含む供試体と含まない供試体に与えた上で非排水繰返しせん断を行い、応力履歴や細粒分が砂杭の液状化特性に及ぼす影響を調べた。

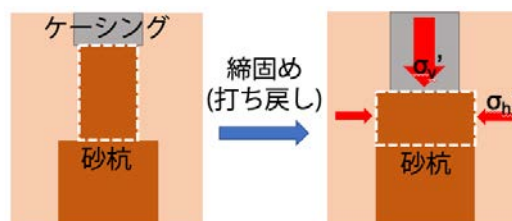


図1 砂杭の施工時応力履歴の模式図

2. 実験手法

実験には応力制御式三軸試験装置を用いた。従来から砂杭に用いられてきた良質材料を珪砂7号で、近年活用されるようになった建設発生土を珪砂7号85%・DLクレー15%混合砂で模擬した(混合割合は乾燥質量比)。珪砂7号はD<sub>50</sub>=0.255mmの細砂で、DLクレーはシルト分が約90%、粘土分が約10%の非塑性シルトである。

表1 実験ケース一覧

ケース名	細粒分含有率 Fc (%)	与えた履歴	応力履歴			繰返しせん断時の相対密度 D <sub>r</sub> cyclic (%)	繰返し応力比 CSR
			応力経路 (図2)	主応力比 K	過圧密比 OCR		
Fc015-NH-1	15	履歴なし	A→B			80.5	0.297
Fc015-NH-2	15	履歴なし	A→B			80.9	0.252
Fc015-NH-3	15	履歴なし	A→B			82.3	0.201
Fc000-NH	0	履歴なし	A→B			79.7	0.248
Fc015-AO	15	異方過圧密	A→B→C→B	0.25	2.00	81.1	0.192
Fc015-SH	15	せん断履歴	A→B→C'→B	0.25	1.00	80.1	0.186
Fc015-OC	15	過圧密履歴	A→B→C''→B	1.00	2.00	80.0	0.200
Fc000-AO	0	異方過圧密	A→B→C→B	0.25	2.00	80.4	0.191

※珪砂7号: e<sub>max</sub> = 1.211, e<sub>min</sub> = 0.722。珪砂7号85%/DLクレー15%混合砂: e<sub>max</sub> = 1.014, e<sub>min</sub> = 0.528。

表1に実験ケースの一覧を示す。16層に分けて乾燥試料を緩く堆積させ、

金属棒を各層に一定回数突き刺して供試体を締固めることで相対密度が約80%で直径75mm、高さ150mmの円柱供試体を作成した。二重負圧法で供試体を飽和させて、B値が0.95以上であることを確認した。その後、図2に示すように、供試体を60kPaで等方圧密してから、排水条件で施工時応力履歴を模擬した種々の応力履歴を与えた。砂杭が施工時に受ける異方過圧密履歴を水平有効応力σ<sub>h</sub>'を60kPaに保ったまま排水単調せん断で供試体が破壊に至る寸前(供試体が正のダイレイタンスを示し、軸ひずみが約3%生じた状態)まで軸差応力を上げたのち、除荷して等方状態に戻すことで模擬した(図2中のA→B→C→B経路)。この異方過圧密履歴を分解して主応力比K=0.25のせん断履歴のみ(A→B→C'→B経路)、過圧密比OCR=2.00の過圧密履歴のみ(A→B→C''→B経路)を与えるケースも別途行った。所定の応力履歴を与えた後、0.05Hzの正弦波で繰返し軸差応力を与えて非排水繰返しせん断を行った。

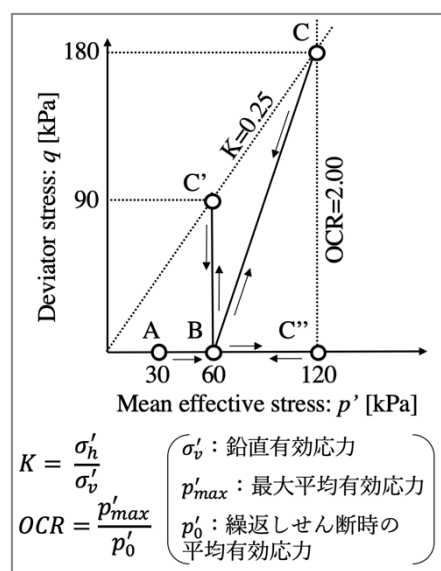


図2 与えた応力履歴の応力経路

キーワード: サンドコンパクションパイル 液状化 応力履歴 細粒分 三軸試験

連絡先: 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学土質地盤研究室 TEL 03-5841-6137

**3. 実験結果・考察** 図3に繰返しせん断回数  $N_c$  - 繰返し応力比 CSR 関係を示す。応力履歴なしで、細粒分あり・なしのケースを比較すると、細粒分を含むケースの方が液状化強度が低くなっていることがわかる。また、 $K=0.25$  のせん断履歴を含む異方過圧密履歴やせん断履歴（のみ）を与えたケースは、細粒分の有無や過圧密履歴の有無によらず、応力履歴なしのケースよりも液状化強度が低下していることがわかる。一方で  $OCR=2.00$  の過圧密履歴のみを与えたケースは液状化強度が上昇している。

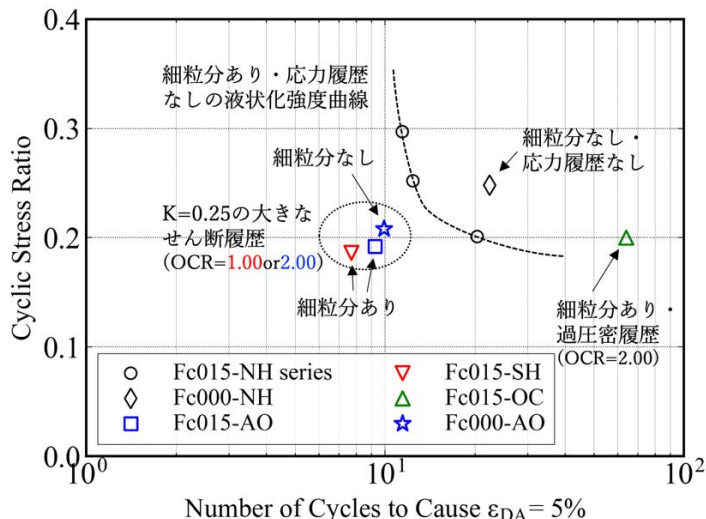


図3 繰返しせん断回数  $N_c$  - 繰返し応力比 CSR 関係

図4に、細粒分ありで CSR が約 0.2 の4ケースの繰返しせん断時の応力経路の最初の1サイクルを示す。異方過圧密履歴を与えた Fc015-AO は、最初の圧縮応力を受ける間平均有効応力  $p'$  が増加し続け、それが除荷される過程でも  $p'$  はあまり減少しない。しかし、伸張応力を 10kPa 程度受けた途端に急激に  $p'$  が減少し破壊包絡線に接した。異方過圧密履歴により、圧縮応力に強いが伸張方向の応力には著しく弱いという誘導異方性が生じ、結果として液状化強度が低下した。この誘導異方性は非排水繰返しせん断で応力履歴を与えた先行研究<sup>1)</sup>と同じ傾向である。また、過圧密履歴を与えた Fc015-OC は  $p'$  がほとんど減少しておらず液状化強度が上昇していることがわかる。 $K=0.25$  のせん断履歴を受けた Fc015-SH は、Fc015-AO とほとんど同じ経路を辿っており、Fc015-AO は異方過圧密履歴に含まれる  $K=0.25$  のせん断履歴の負の効果と  $OCR=2$  の過圧密履歴の正の効果のうち、せん断履歴の負の効果の影響を強く受けていると考えられる。

図5に、細粒分あり・なしの供試体に異方過圧密履歴を与えたケースの繰返しせん断時の応力経路の最初の1サイクルを示す。ともに伸張応力を約 10kPa 受けたところで急激に  $p'$  が減少して破壊包絡線に接している。細粒分の有無によらず異方過圧密履歴に含まれる  $K=0.25$  のせん断履歴の効果で伸張応力に対して弱体化すると考えられる。

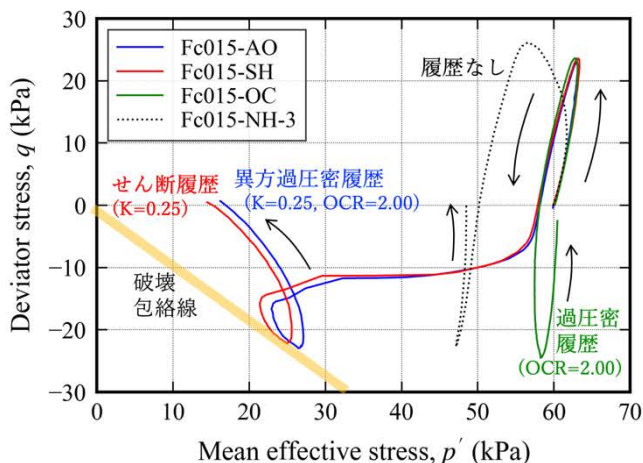


図4 応力経路の最初の1サイクル(細粒分あり)

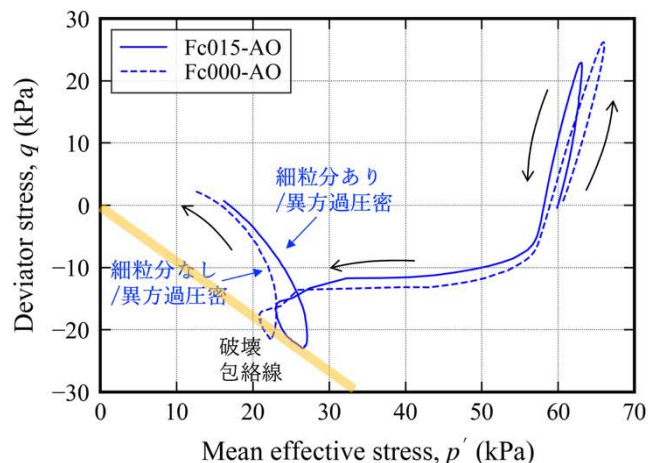


図5 応力経路の最初の1サイクル(異方過圧密履歴)

**4. まとめ** 三軸圧縮試験により施工時応力履歴や材料中の細粒分が締固め砂杭の液状化特性に及ぼす影響を調べた。施工時応力履歴を模擬した供試体のピーク強度に相当する大きな異方過圧密履歴を与えると、細粒分の有無にかかわらず、伸張応力に対して弱くなり液状化強度が低下した。これは  $K=0.25$  のせん断履歴の影響を強く受けていると考えられる。一般に締固め砂杭の改良効果は  $N$  値から算出される地盤の密度増加によって判定されるが、同じ密度であっても施工時応力履歴の影響で砂杭の液状化強度が大きく変化する可能性があることが示された。なお、応力履歴により液状化特性が変化する要因については、文献<sup>2)</sup>で個別要素法を用いて微視的な考察している。

**参考文献** 1) Towhata, I., Ishihara, K. Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes. Soils and Foundations, 25(2), 135-147. 2) 橋本拓幸、大坪正英、古関潤一. 細粒分混じり砂の応力履歴による液状化特性の変化についての微視的考察, 第57回地盤工学研究発表会, 2022.