

京都大学工学部 学生会員 上田 準也  
 京都大学大学院 フェロー 岡 二三生  
 京都大学大学院 正会員 木元 小百合

京都大学大学院 正会員 肥後 陽介  
 京都大学大学院 学生会員 岩井 裕正  
 京都大学大学院 学生会員 狩野 修志

1. 研究の目的

平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震では、広い範囲にわたって液状化現象が発生し、社会基盤施設や住宅、宅地等において大きな被害がもたらされた。この地震は地震動の継続時間が非常に長く、これにより液状化の発生が助長された可能性が考えられた。

本研究では、継続時間の長い地震動において、地震動の繰返し履歴が液状化の発生に及ぼす影響を調べるために、非排水条件下で中空ねじりせん断試験を行った。まず、応力振幅一定試験を行い、液状化強度を求めた後、応力振幅二段階試験を行い、繰返し履歴が液状化の発生に及ぼす影響について調べた。これらの結果から、繰返し履歴が液状化の発生に与える影響を研究した。

2. 試験概要

本研究では、木津川の吉之見樋門撤去工事(京都府城陽市)で採取した砂質土(以下、木津川堤防砂と呼ぶ)を用いた。木津川堤防砂の物理特性を表1に、粒径加積曲線を図1に示す。

本研究ではまず、液状化強度を求める試験として、応力振幅一定せん断試験を行った。この試験では、側圧と軸圧を一定に保ったまま行った。すべての試験において、供試体作製時の相対密度を60%、背圧を200kPa、有効拘束圧を50kPa、載荷周波数を0.1Hzに統一し、非排水条件下でせん断した。

次に、繰返し履歴を考慮した繰返し中空ねじりせん断試験として、表2に示す条件のもとで、応力振幅二段階せん断試験を行った。この試験では、繰返し履歴が液状化の発生に及ぼす影響を検討するため、2段階の異なる大きさの繰返し応力比でせん断力を与えた。繰返し応力比については、異なる応力比の組み合わせでそれぞれ載荷の順序を入れ替えた4ケースの試験を行った。

3. 試験結果

応力振幅一定試験の試験結果から得られた液状化強度曲線を図2に示す。なお、本試験では、有効応力減少比0.95が液状化の判定基準になるとした。有効応力減少比は、以下の式で表される。

$$ESDR = 1 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}}$$

中空ねじりせん断試験における、繰返し回数20回で液状化に達する応力比を求め、液状化強度比 $R_L^{Tor}$ とした。今回の試験では、 $R_L^{Tor}$ は0.151となった。

表1. 木津川堤防砂の物理特性

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.637
最大間隙比 $e_{max}$	1.221
最小間隙比 $e_{min}$	0.716
平均粒径 $D_{50}$	0.354
均等係数 $U_c$	76.7
細粒分含有率 $F_c$ (%)	26.0
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	10.5
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.90
砂 (%)	74.0
シルト (%)	16.8
粘土 (%)	9.2

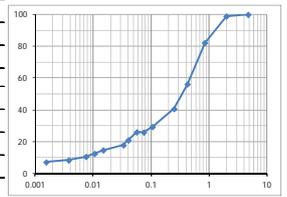


図1. 粒径加積曲線

表2. 応力振幅二段階せん断試験の試験条件

繰返し履歴を考慮した繰返し中空ねじりせん断試験						
ケース名		H-	H-	H-	H-	
圧密応力	$K_0$	1	1	1	1	
	軸方向応力 $\sigma_{v0}$ (kPa)	50	50	50	50	
	平均有効応力 $\sigma_{m0}$ (kPa)	50	50	50	50	
繰返し応力振幅	1段階目	$\tau/\sigma_{m0}$	0.05	0.15	0.20	0.10
		$\tau$ (kPa)	2.5	7.5	10	5
	2段階目	繰返し回数	20	14	2	11
		$\tau/\sigma_{m0}$	0.15	0.05	0.10	0.20
		$\tau$ (kPa)	7.5	2.5	5	10
		繰返し回数	14	20	11	4.5
載荷周波数(Hz)		0.1	0.1	0.1	0.1	
間隙比 $e$	作製時	0.918	0.918	0.916	0.918	
	せん断前	0.816	0.845	0.816	0.829	
相対密度 $D_r$ (%)	作製時	60.019	60.080	60.371	60.080	
	せん断前	80.185	74.540	80.298	77.662	

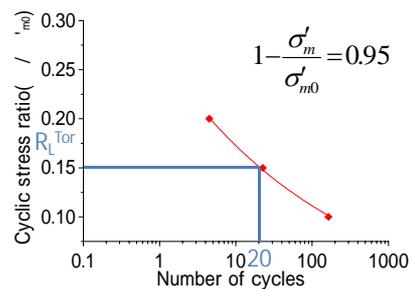


図2 液状化強度曲線

続いて、応力振幅二段階せん断試験の試験結果を示す。H- ~H- のせん断応力 せん断ひずみ関係と有効応力径路を図3~6にそれぞれ示す。

H- は、1段階目の応力比0.05での弱いせん断では、せん断ひずみはほとんど発生せず、有効応力減少比も0.05程度までしか上昇していない。2段階目のせん断で

は、繰返し载荷をしている間に過剰間隙水圧は次第に上昇し、有効応力減少比が0.6程度になると、急激にせん断ひずみが発生し、液状化に至っている。

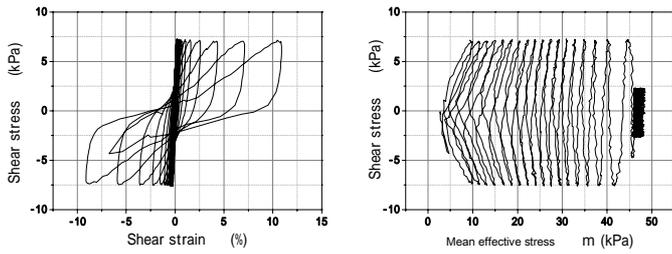


図3.H- の試験結果

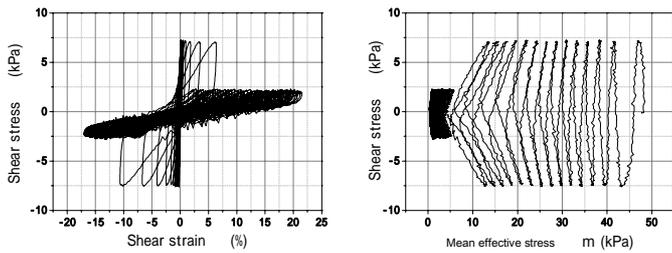


図4.H- の試験結果

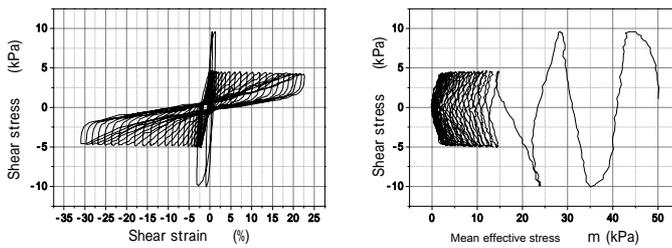


図5.H- の試験結果

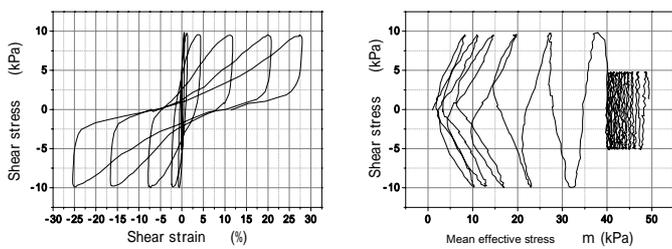


図6.H- の試験結果

H- では、1段階目の応力比0.15のせん断により、繰返し回数14回の時点で両振幅ひずみ(以降、DAと呼ぶ)が15%程度生じ、有効応力減少比が0.9付近まで増大している。ここから応力比を0.05に変えてせん断を続けると、2段階目のせん断では、DAは徐々に大きくなり、せん断回数が20回に到達するころには、DAは25%程度になっている。

H- では、1段階目の応力比0.20のせん断で、有効応力減少比が0.7程度まで増大し、せん断ひずみはDAが5%ほど発生している。ここから応力比を0.10に変えてせん断を続けると、せん断ひずみは徐々に増大し、また有効応力減少比は、応力比の変更後緩やかに増大し、やがて

1.0に漸近していることが読み取れる。

H- では、1段階目の応力比0.10のせん断で、有効応力減少比が0.2程度まで増大し、せん断ひずみはほとんど発生していない。ここから応力比を0.20に変えてせん断を続けると、せん断ひずみと有効応力減少比は徐々に増大した。

H- とH- ,H- とH- の各組み合わせにおいて、各繰返し応力比での繰返し回数を統一し、各载荷段階での有効応力減少比の上昇量を比較することで、繰返し応力履歴が液状化の発生に与える影響について調べた。表3に示す。

表3.各段階での有効応力減少比の上昇量

	1段階目繰返し 応力比 / $m_0$	繰返し回数 (回)	1段階目による 有効応力減少 比の上昇量	2段階目繰返し 応力比 / $m_0$	繰返し回数 (回)	2段階目による 有効応力減少 比の上昇量
H-	0.05	20	0.05	0.15	14	0.76
H-	0.15	14	0.93	0.05	20	0.06
H-	0.20	2	0.70	0.10	11	0.25
H-	0.10	11	0.19	0.20	2	0.51

H- とH- を比較する。応力比0.15のせん断について、H- の2段階目のせん断による有効応力減少比の上昇量は0.76であるのに対して、H- の1段階目のせん断によるそれは0.93であり、液状化の発生に及ぼす影響に違いがあることが確認できる。1段階目で微小な応力比でせん断することによって、供試体が塑性ひずみによって構造が変化し、液状化の発生に対して強くなった。これは、pre-strain効果<sup>2)</sup>であると考えられる。この傾向は、H- とH- にも見られた。

また、H- とH- の応力比0.10でのせん断について、H- の2段階目のせん断による有効応力減少比の上昇量は0.25であるのに対して、H- の1段階目のせん断によるそれは0.19であり、わずかではあるがH- の方が大きい。これについて、H- の1段階目の繰返し応力比が0.20と大きいため、せん断後に液状化しにくい構造とはならなかったと考えられる。

#### 4. 結論

応力振幅二段階試験では、1段階目で微小な応力比でせん断することによって、供試体が塑性ひずみによって構造が変化し、液状化の発生に対して強くなった。これは、pre-strain効果であると考えられる。また、1段階目の繰返し応力比が大きい場合、そのせん断によって地盤の強度が小さくなる傾向が見られた。

以上から、二つの異なる応力比でのせん断を順番に入れ替えて载荷すると、液状化に対する強度に違いがあることが分かった。このことから、繰返し履歴は液状化の強度に影響を与える要因の一つであると考えられる。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, 耐震設計編, 丸善, 2012.
- 2) Ishihara, K., Okada, S., *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 4, pp. 31-45, 1978