

繰返し载荷を受けた砂の液状化特性

福岡大学大学院 学生会員 ○田辺 祐次 城 昌臣
福岡大学 工学部 正会員 佐藤 研一 吉田 信夫

1. はじめに

地震が発生し地盤内の間隙水圧が上昇し、地盤の変形が生じると液状化に至る。さらに、再び地震が発生すると有効応力が著しく低下し再液状化が起こることはよく知られていることである。一方、地震後は過剰な間隙水圧が消散するため地盤は初期の状態に比べて密な状態となり、その後の地震による再液状化は生じにくいと予測される。しかし、これまで日本で起こった地震では液状化した同一ポイントで再液状化したという事例が少なからず報告されている。このような再液状化に関する研究は、Finn et al.²⁾によってその現象を捉える実験が行われているが、未だ不明確な点が多く残されている。また、繰返し履歴後の砂地盤の繰返しせん断特性を正確に把握することは、砂地盤の再液状化に対する地盤の安定性を考えるうえで必要不可欠な問題である。そこで、本研究において水平地盤に地震等の繰返し荷重が作用した後の再液状化現象に着目し、繰返し履歴を受けた砂のせん断特性を明らかにすることを研究目的としている。

2. 実験概要

今回行った実験を模式的に示すと図-1 のようになる。試料には豊浦標準砂($G_s=2.650$, $e_{max}=0.962$, $e_{min}=0.622$)を用い、空中落下法により $Dr=60\%$ を目標にして供試体($D=7.5\text{cm}$, $H=15\text{cm}$)を作成する。供試体作成後、間隙空気を炭酸ガスに置き換え、脱気水により飽和させバックプレッシャー $\sigma_{BP}=98\text{kPa}$ を载荷した後、 B 値が 0.96 以上になったことを確認の上、1 回目の圧密を $p_c'=98\text{kPa}$ として等方圧密で 1 時間行う。その後、繰返しせん断応力 $\tau/p_c'=0.16$ で 1 回目の繰返しせん断を行う。この時、①過剰間隙水圧比 $u/p_c'=0.7$ 付近、② $u/p_c'=1.0$ のそれぞれに達した時点でせん断を中止し過剰間隙水圧を徐々に消散させ、1 回目と同じ圧密圧力で 2 回目の圧密を 1 時間行う。さらに非排水状態において任意の繰返し応力比で繰返し荷重を载荷し、液状化試験を行う。ここで、繰返し履歴時の目標過剰間隙水圧比 u/p_c' を 0.7 , 1.0 としたのは、軸ひずみが発生し始めた時点と初期液状化に達した時点について検討を行うためである。また、繰返し履歴を与える際の繰返し応力比 τ/p_c' を 0.16 としたのは、図-2 に示す相対密度 $Dr=60\%$ の供試体で履歴を加えていない場合において繰返し回数 $N=10$ 程度で液状化に至る繰返し応力比 τ/p_c' が 0.16 であり、履歴を加える段階で任意の発生過剰間隙水圧のコントロールが可能な応力比であることから決定した。今回行った実験条件を表-1 に示す。

表-1 実験条件

Test.No	繰返しせん断応力比 τ/p_c'		繰返し履歴時の目標		1 回目せん断終了時の		相対密度 $Dr(\%)$	
	1 回目載荷	2 回目載荷	過剰間隙水圧比 u/p_c'	両系軸ひずみ $DA(\%)$	初期圧密後	再圧密後	初期圧密後	再圧密後
AD6048	0.16	0.16	0.7	0.71	56.4	57.4		
AD6049	0.16	0.18	0.7	0.66	55.0	56.1		
AD6050	0.16	0.19	0.7	1.58	56.0	57.0		
AD6051	0.16	0.20	0.7	0.93	55.0	56.0		
AD6052	0.16	0.21	0.7	0.66	58.0	58.7		
AD6070	0.16	0.15	1.0	10.34	60.5	65.8		
AD6062	0.16	0.16	1.0	13.90	58.0	64.6		
AD6060	0.16	0.18	1.0	5.68	59.9			
AD6063	0.16	0.19	1.0	8.86	59.1	64.2		
AD6064	0.16	0.20	1.0	4.86	62.4	65.7		
AD6065	0.16	0.21	1.0	3.88	64.2	67.0		

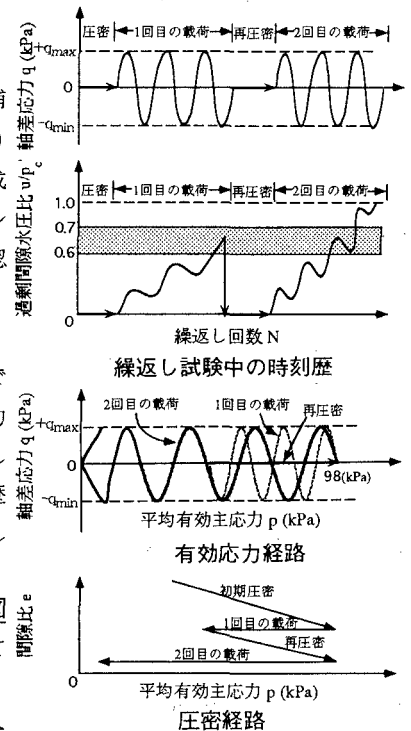


図-1 実験の模式図

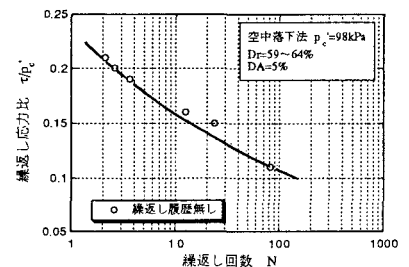


図-2 繰返し履歴なしの液状化強度曲線

3. 実験結果および考察

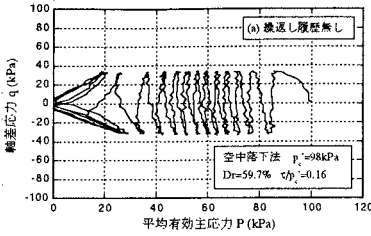


図-3(a) 有効応力経路図

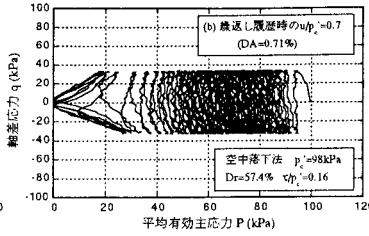


図-3(b) 有効応力経路図

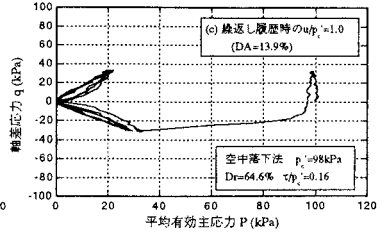


図-3(c) 有効応力経路図

図-3(a),(b)と(c)は同一繰返し応力比 $\tau/p'_c=0.16$ におけるそれぞれ (a)は履歴なし、(b)は履歴時の発生過剰間隙水圧比 $u/p'_c=0.7$ 、(c)は同じく $u/p'_c=1.0$ の有効応力経路図である。また、(b)は履歴時の両振幅軸ひずみ $DA=0.71\%$ であり、(c)は $DA=13.9\%$ である。3つの図を比較すると、履歴時に両振幅軸ひずみの発生がほとんど見られなかった (b)の場合は、繰返し履歴なしの結果に比べ繰返しに対する有効効力の低下量が小さくなり、抵抗力が増加していることが分かる。これに

対し、履歴時に $DA=13.9\%$ まで変形が生じた(c)の場合は、最初の繰返し直後、伸張側で一気に有効応力の低下が生じ、液状化状態に至り、繰返しに対する抵抗力が著しく低下している。次に、この現象をせん断中に発生する最大過剰間隙水圧比(u/p'_c)_{max}と両振幅軸ひずみ DA に着目して整理した結果を図-4, 5に示している。これらの図からも、履歴時に発生したひずみの大きさの違いにより全く挙動が異なっており、 $DA=0.71\%$ の結果は過剰間隙水圧比および両振幅軸ひずみの繰返し回数に伴う発生量が履歴なしに比べ小さくなっている。これに対し、 $DA=13.9\%$ の結果は、繰返し回数3回で $DA=15\%$ と大変形が生じていることが分かる。そこで、これらの結果について $DA=5\%$ に達した時点までを液状化したとして、その時の繰返し応力比と繰返し回数の関係を図-6に示す。この図をみると履歴なしの繰返し強度線から考えて、繰返し履歴時の $u/p'_c=0.7$ は明らかに液状化強度が増加しているが、繰返し履歴時の $u/p'_c=1.0$ のにおいては、液状化強度が増加しているものと低下しているものがあることが分かる。そこでこの影響をさらに明確にするために履歴時に液状化に達した時の両振幅軸ひずみと N_f/N_i の関係を図-7に示す。ここで、 N_f は履歴後の供試体が液状化に達する ($DA=5\%$)までの繰返し回数で、 N_i は履歴なしの供試体が液状化に達する ($DA=5\%$)までの繰返し回数である。図より、繰返し履歴時にひずみが約 6% を超えると履歴なしよりも強度低下してしまうという結果が得られた。

4. まとめ

履歴後の繰返しせん断特性は、履歴時のひずみの発生量に大きく依存し、初期液状化時の両振幅軸ひずみ DA が 6% を超えた砂地盤の液状化強度は、履歴を与えない液状化強度より小さくなることが分かった。

最後に、本研究は、文部省科学研究費援助金(奨励研究 A No.09750583)を受けた研究であることを付記し、謝辞を表す。

《参考文献》1) 安田 進：液状化の調査から対策工まで、鹿島出版会, pp.23~27, 1988. 2) Finn, W.D.L., P.L. Bransby and D.J. Pickering: Effect of strain history on liquefaction of sand. J.SMFD, ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934, 1970.

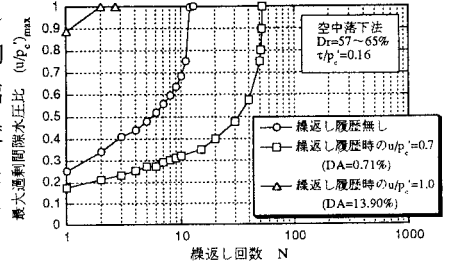


図-4 繰返し回数と最大過剰間隙水圧比の関係

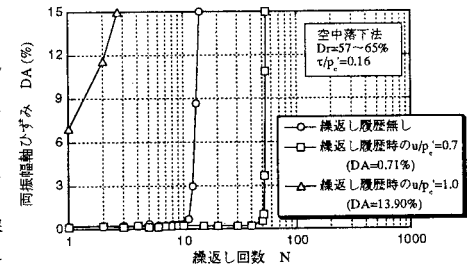


図-5 繰返し回数と両振幅軸ひずみの関係

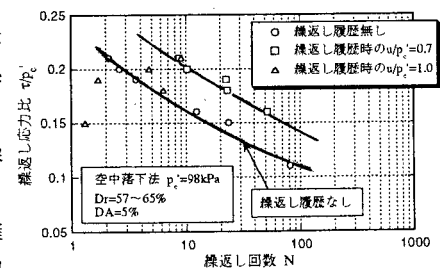


図-6 繰返し履歴の有無による液状化強度曲線

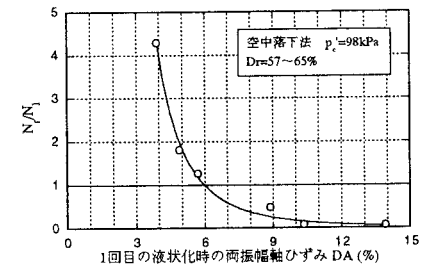


図-7 1回目の液状化時の

両振幅軸ひずみと N_f/N_i の関係