

(57) 細粒分の多い成田層砂の液状化特性

飛鳥建設(株) 正会員 森 伸一郎
 正会員 ○ 関 眞一
 正会員 浅野俊太郎

1. はじめに

近年、重要建造物の建設に伴い、想定する地震力が大きくなり、基礎地盤としての地震時の安定性検討の1つとして、洪積層においても液状化が検討の対象となってきた。液状化を判定するにあたり、原位置の液状化特性を知ることが必要であるが、洪積層の不攪乱砂の液状化特性は、まだ明らかとは言えない。

そこで、本論文は、千葉県印旛郡印西町の洪積層より採取した成田層砂について、繰返し非

排水三軸試験を実施し、固結度の高い不攪乱試料の液状化特性を示すとともに、不攪乱試料と再構成試料の液状化強度の違いについて考察した¹⁾。また、細粒分が液状化強度に与える影響について既往の研究例と比較した。

2. 地層構成およびサンプリング方法

図-1に試料採取地の土質柱状図およびN値、弾性波速度の分布を示す。文献²⁾によると、図-1に示す粘土質細砂層は成田層上部の木下(きおろし)層に相当し、15万年~10万年前の浅海成の堆積層と考えられる。

不攪乱試料は径116mmのトリプルチューブサンプラーによりボーリングNo.5のGL-7.0~8.0mからA試料、GL-11.0~12.0mからB試料を採取した。

3. 採取試料の物理的性質

N値はA試料採取位置で7、B試料採取位置で20程度であり、弾性波速度はA、B共にVs=220(m/s)、Vp=1400(m/s)である。ただし、N値および弾性波速度の値は約30m離れたボーリングNo.6の値を参考にして決定した。

物理試験と静的排水三軸試験(CD)は、土質工学会基準(JSF)³⁾に準拠して実施した。それらの結果を繰返し非排水三軸試験結果と併せて表-1に示す。採取した不攪乱試料は、細粒分が多く、かつ、固結度が高いという特徴を持つ。また、供試体の観察結果では、塊状の

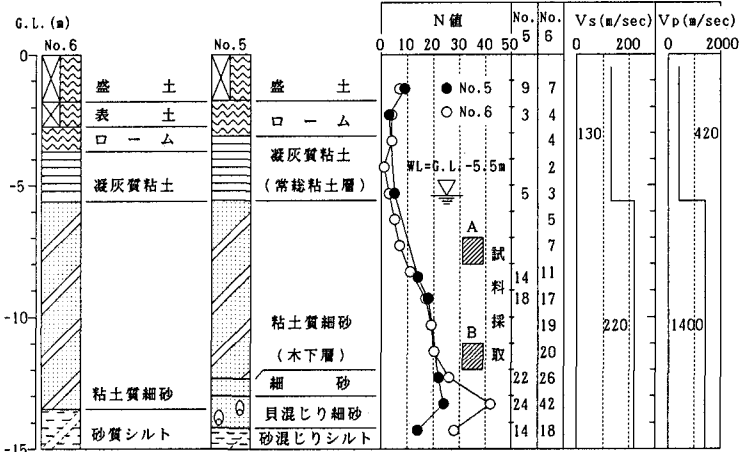


図-1 試料採取地盤の土質¹⁾

表-1 試験結果一覧表¹⁾

試料名	不攪乱 A	不攪乱 B	再構成 B	
土質名	粘土質細砂			
深度 (G.L.m)	-7.0~8.0	-11.0~12.0		
N 値 (Bor.No.6)	7	20		
物理試験結果				
土粒子密度 (g/cm ³)	2.712	2.695		
粒度組成	平均粒径 D ₅₀ (mm)	0.122	0.079	
	シルト含有率 PM (%)	19	33	
	粘土分含有率 P _c (%)	11	14	
	細粒分含有率 F _c (%)	30	47	
	均等係数 U _c	31.88	*	
最大間隙比 e _{max}	1.799	2.038		
最小間隙比 e _{min}	1.096	1.242		
静的三軸試験結果				
粘着力 Cd (kgf/cm ²)	0.17	0.36	—	
内部摩擦角 φd (度)	31.6	33.8	—	
液状化試験結果				
含水比 w (%)	* 39.4	40.7	38.4	
湿潤密度 ρt (g/cm ³)	* 1.809			
	* 1.792			
乾燥密度 ρd (g/cm ³)	圧密前; 圧密後	圧密前; 圧密後	圧密前; 圧密後	
	1.298; 1.312	1.274; 1.290	1.279; 1.310	
間隙比 e	* 1.091	1.067	1.090	
相対密度 Dr (%)	* 100.7	104.1	115.8	
拘束圧 σ'c (kgf/cm ²)	1.0	119.1	118.8	
背圧 B.P. (kgf/cm ²)	2.0			
液状化強度 R _z	DA=2%	0.397	0.443	0.240
	DA=5%	0.528	0.519	0.280
	DA=10%	0.643	0.562	0.293
破壊線の勾配 #=α/p'	圧密側; 引張側	圧縮側; 引張側	圧縮側; 引張側	
	1.27; 0.65	1.18; 0.79	1.21; 0.74	
破壊角 φc, φe (度)	* 31.5; 21.6	29.7; 26.9	30.5; 24.4	
(Δu/σ'c) _{max}	* 0.919	0.854	0.889	

*: 3~4供試体の平均値

シルトが不規則に混入しており、特にB試料では大きな塊の存在が目立った。

図-2にA、B両試料の粒径加積曲線と試料採取地付近の成田層砂質土層の粒径加積曲線の範囲（全33試料）を示す。A試料は採取位置付近の成田層砂の粒度組成を代表していると考えられる。B試料は成田層でも細粒分の多い試料である。

4. 繰返し非排水三軸試験結果

繰返し非排水三軸試験の供試体作成方法、実験方法については、文献1)を参照されたい。

繰返し非排水三軸試験結果として、不攪乱A試料、不攪乱B試料および再構成B試料のそれぞれについて、図-3に有効応力経路を、図-4にせん断応力と軸ひずみとの関係を示す。

なお、本論文には試験結果の時刻歴を示していないが、どの供試体の間隙水圧の時刻歴にも顕著な荷重振動数の2倍の振動数で負の間隙水圧が発生していた。また、軸ひずみは、どの供試体についても繰返しせん断初期から発生し漸増するものの、緩いクリーンな砂のような急激な増加は示さない。試験後の供試体の観察では、再構成した試料が供試体全体にわたり変形しているのに対し、不攪乱試料ではせん断面上で相交わるくさび状に破壊し、変形が局部的に発生しており、破壊形態としては、せん断強さを失い液体状になる液状化とは明らかに異なっている。ひずみで液状化を定義したとしてもこのような破壊形態の違いを考えると、液状化強度という用語より動的強度という用語の方が、設計上の混乱を招かない。なお、ここでは、供試体高さに対する両振幅軸ひずみ(DA)で液状化を定義している。

図-3に示す有効応力経路

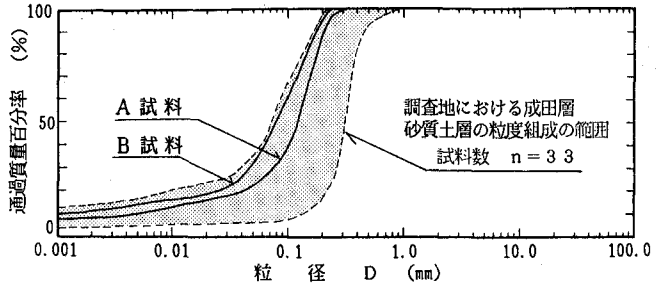


図-2 成田層砂の粒度組成¹⁾

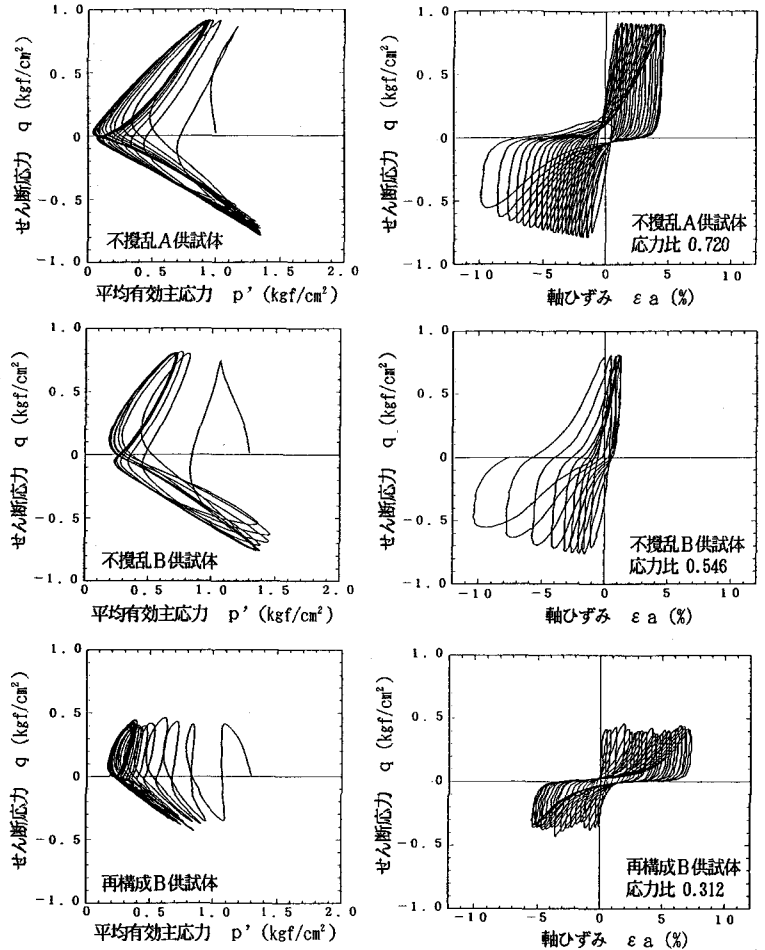


図-3 有効応力経路¹⁾

図-4 せん断応力と軸ひずみとの関係¹⁾

を見て明らかのように、どの供試体も変相した後、サイクリックモビリティ的な挙動を示しており、平均有効主応力 p' は0に達しない。このような傾向は不攪乱試料による試験に基づき石原ら⁴⁾⁵⁾も報告しており、細粒分を含んだ試料の特徴としている。また、安原ら⁹⁾は強制的にセメンテーションを与えた試料でも、同様の傾向があることを示している。今回の試験でも、細粒分は30~47%と多いことから、平均有効主応力 p' が0にならない原因は細粒分含有率が高いためと考えられる。

また、図-3より、破壊線の勾配 M_c (圧縮側)、 M_e (引張側)を読みとり、次式から破壊角 ϕ_c 、 ϕ_e を求めた。 ϕ_c 、 ϕ_e の値は表-1に示す。

$$\text{圧縮側 } \sin \phi_c = 3M_c / (6 + M_c) \quad (1) \quad \text{引張側 } \sin \phi_e = 3M_e / (6 - M_e) \quad (2)$$

ϕ_e 、 ϕ_c は、不攪乱と再構成の両者ともに $\phi_c > \phi_e$ の関係であり、強度的に異方性が強いと言える。また、表-1に示すように ϕ_c は静的三軸圧縮試験(CD)より求めた内部摩擦角 ϕ_d とほぼ一致している。

図-4に示すせん断応力と軸ひずみとの関係では、不攪乱試料と再構成試料の間で軸ひずみの成長に明瞭な違いがみられる。再構成試料については、圧縮側と引張側にはほぼ同程度のひずみが発現、成長しているのに対し、不攪乱試料のいずれにおいても圧縮側の軸ひずみに比較して引張側の軸ひずみが卓越している。このことから不攪乱試料は圧縮側(堆積方向)に強い構造異方性を有する試料であることがわかる。このような傾向は多くの文献⁴⁾⁷⁾⁸⁾でも報告されている。この異方性の原因として考えられるのが時間効果である。時間効果としてはセメンテーションによる粒子間の結合力の増加や続性作用のほか、隆起、地震および波浪による応力負荷、約10万年程度の間のそれらの履歴による噛み合わせの強化等が考えられる。つまり、再構成した試料は不攪乱状態で存在していたセメンテーションによる粒子間の結合力と応力履歴による噛み合わせ(異方性)が失われたものと考えられる。

5. 不攪乱試料と再構成試料の液状化強度の比較

不攪乱A試料と不攪乱B試料の液状化強度は、採取位置でのN値が2倍以上違うことや、細粒分含有率が異なるにもかかわらず、それに相応する違いはなかった。この理由としては、A、B両試料の粘土分含有率にほとんど差がないためであると考えられる。つまり、液状化強度はセメンテーションの強さに影響され、セメンテーションを強める因子はシルト分ではなく粘土分であると考えたと説明ができる。古関・石原ら⁹⁾や森ら¹⁰⁾の再構成試料による液状化試験によれば、液状化強度は細粒分含有率よりも粘土分含有率との間の方が強い相関があるということでも裏付けられる。

図-5にDA=5%で液状化を定義した不攪乱と再構成の液状化強度の比較を示す。図中に示す不攪乱試料の液状化強度曲線は、A、B両試料のデータを基にした。これは、前述した理由によりA、B両試料の不攪乱

液状化強度が変わらなかったためである。また、文献1)で示した理由により応力比SRは、圧縮荷重から求められる軸差応力で整理している。

図-5より、繰返し回数、数回から数100回に及ぶ広い範囲で、不攪乱試料と再構成試料との液状化強度比は2.0であり、これはDA=2.10%でも同様な値である。したがって、液状化をひずみで定義した場合には、不攪乱試料は再構成試料の2倍程度の液状化強度を持っていることがわかる。

6. 細粒分が液状化強度に及ぼす影響

畑中ら¹¹⁾や岡本ら¹²⁾は、今回試験に用いた試料と同じ成田層から不攪乱試料を採取し、繰返し非排水三軸試験を実施している。今回採

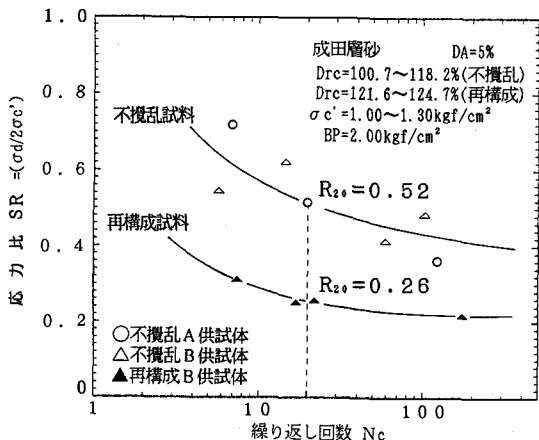


図-5 不攪乱供試体と再構成供試体の液状化強度の比較¹⁾

取した試料と畑中らや岡本らが採取した試料の特徴は、ほぼ同じ間隙比であるが、細粒分含有率 (Fc) が異なることである。なお、両者の文献からは粘土分含有率 (Pc) は不明である。表-2 に畑中らと岡本らが採取した試料の物理特性および液状化強度を示す。

図-6 に細粒分含有率とDA=5%時の液状化強度R20との関係を示す。試験機、繰返し荷重周波数、拘束圧の違いはあるものの、この図によれば、細粒分含有率が大きくなるほど液状化強度が大きくなる傾向が読みとれる。細粒分含有率が粘土分含有率の1つの指標であるとすれば、細粒分(粘土分)は液状化強度を大きくする要因の1つと考えられる。ただし、データ数が少ないため、今後データの蓄積を図る必要がある。

また、岡本らは、再構成した試料についても繰返し非排水三軸試験を実施しており、不攪乱試料と再構成試料の液状化強度の比は平均的に1.9倍程度としている。これは、前述した今回の試験結果(2倍)と同程度である。これによれば、細粒分含有率に差はあるものの、洪積成田層砂は約15~10万年の経年変化により液状化強度が2倍程度になったと考えられる。

7. まとめ

今回実施した洪積成田層砂の繰返し非排水三軸試験より、次のことが言える

- 1) 不攪乱試料は、せん断面状で相交わるくさび状に破壊し、破壊形態としては、せん断強さを失い液体状になる液状化とは異なる。
- 2) 不攪乱試料は、引張り側に軸ひずみが卓越し、圧縮側(堆積方向)にひずみがあまり発達しない変形特性を持つ構造異方性を有する。また、強度的にも同様の構造異方性を有する。
- 3) 不攪乱A, B試料は、N値および細粒分含有率に差があるものの、液状化強度に大きな違いが見られない。これは、両試料の粘土分含有率に差がないためと考えられる。
- 4) 試験を実施した洪積成田層砂の不攪乱試料の液状化強度は、再構成試料と比較すると2倍程度である。これは、既往の例と同程度である。したがって、洪積成田層砂は約10万年~15万年の経年変化により液状化強度が2倍程度になったと考えられる。

<参考文献>

- 1) 森伸一郎・関真一・浅野俊太郎: 成田層砂の液状化特性, 第26回土質工学研究発表会講演集, 1991.7
- 2) 日本の地質「関東地方」編集委員会: 日本の地質3 関東地方, 共立出版
- 3) 土質工学会: 土質試験法(第2回改訂版), 1981.10
- 4) 石原研而・田中靖雄: 細粒分を含む不攪乱砂の液状化, 第9回土質工学研究発表会講演集, 1974.6, pp.379~382
- 5) 石原研而・袖川正人: 細粒分を含む飽和砂の液状化, 第8回土質工学研究発表会講演集, 1973.6, pp.323~326
- 6) 安原一哉・兵動正幸・平尾和年: 石灰灰による埋立地盤の液状化特性, 土と基礎, vol.39, No.2, 1991.2, pp.5~10
- 7) 土岐祥介・三浦清一・中垣健: 不攪乱砂の液状化特性, 第18回土質工学研究発表会講演集, 1983.6, pp.555~558
- 8) 畑中宗憲・鈴木善雄: 不攪乱砂のくり返し変形・強度特性, 第22回土質工学研究発表会講演集, 1987.6, pp.611~612
- 9) 古関潤一・石原研而・藤井光久: 細粒分を含む砂の三軸液状化試験, 第21回土質工学研究発表会講演集, 1986.6, pp.595~598
- 10) 森伸一郎・沼田淳紀・境野典夫・長谷川昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, vol.39, No.2, 1991.2, pp.1~22
- 11) 畑中宗憲・鈴木善雄・大原淳良・竹原直人・久保雅平・佐古義人: 不攪乱成田層砂の液状化特性, 第25回土質工学研究発表会講演集, 1990.6, pp.793~794
- 12) 岡本正広・越智健三: 不攪乱成田砂の三軸液状化強度とねじりせん断液状化強度, 東急建設技術研究所報, No.12, 1986, pp.5~10

表-2 試験結果一覧表(既往の報告¹⁾¹²⁾)

	畑中ら ¹⁾		岡本ら ¹²⁾	
	不攪乱		不攪乱	再構成
土粒子密度 (g/cm ³)	2.67		2.663	
細粒分含有率 Fc (%)	6.6~8.0		25.3	
圧密後間隙比 ec	(1.07)		0.9	0.9
サンプリング方法及び供試体作成方法	凍結サンプリング		ブロッカサンプリング後凍結	不飽和突固め
拘束圧 σ'c (kgf/cm ²)	—		1.0	
荷重周波数 (Hz)	0.01		0.1	
液状化強度 R20	DA=2%	0.31	0.24	0.14
	DA=5%	0.31	0.30	0.15
	DA=10%	0.31	0.33	0.16

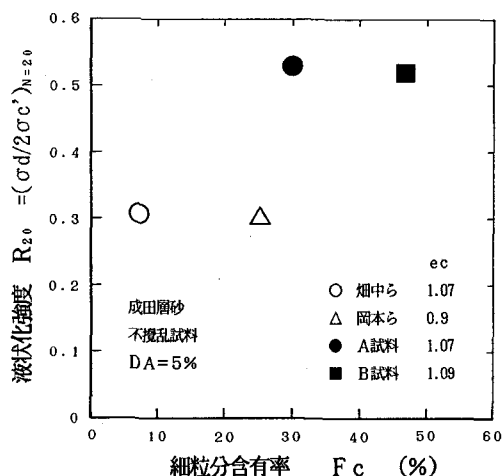


図-6 細粒分含有率と液状化強度との関係