

構造異方性が不攪乱砂質土の液状化強度および 静的強度特性に及ぼす影響

内田明彦¹・畑中宗憲²・田屋裕司¹・酒匂教明³

¹正会員 工修 ㈱竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

²正会員 工博 ㈱竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

³正会員 工修 ㈱東京ソイルリサーチ (〒305-0045 茨城県つくば市梅園2-1-12)

原位置地盤凍結法で採取した凍結砂柱より V-供試体と H-供試体を作成し、圧密排水三軸圧縮・伸張試験および繰返し非排水三軸試験を行い、2種の供試体の試験結果を比較して構造異方性が、静的強度・変形特性および液状化強度・変形特性に及ぼす影響を検討した。液状化試験において、両者の時刻歴における軸ひずみの現れ方には相違が見られた。この違いは、原地盤の異方性や、年代効果などが影響していると考えられる。しかし、軸ひずみ両振幅で定義した場合の液状化強度はほぼ同じ値を示した。従って、V-供試体、H-供試体のいずれを用いても原位置の液状化強度をほぼ同等に評価できる。一方、構造異方性の静的強度である内部摩擦角への影響は小さい。しかし、変形特性への影響は液状化試験と同様な傾向が見られた。

Key Words : Sandy soil, Liquefaction, Inherent anisotropy, Internal friction angle, Deformation characteristics, Undisturbed sample, Freezing sampling

1. はじめに

砂質土試料を原位置から採取して、静的三軸あるいは繰返し三軸試験を行う場合、通常供試体は地盤の深さ方向(鉛直方向)を軸として三軸セルにセットされ、試験に供される。しかし、地盤には構造異方性があり、それが力学特性に影響を及ぼすことが指摘されている。例えば、三浦・土岐(1984)¹⁾は、ブロックサンプリングおよび再構成試料を用いて構造異方性が液状化強度に及ぼす影響を調べ、自然堆積地盤および人工的に詰めた試料の構造異方性が、液状化強度に無視できない影響を及ぼしていることを示している。

本報告では、原位置凍結サンプリング法で採取した不攪乱砂質土試料を用いて、供試体の軸が異なる供試体を作成し、静的三軸圧縮・伸張試験および液状化試験を行って構造異方性が砂地盤の静的強度および液状化強度に及ぼす影響を検討した。

2. 試験に用いた試料と供試体作成方法

原位置凍結サンプリング法により採取した直径15cmの凍結砂柱から、図1に示すように供試体(直径5cm、高さ10cm)を切り出し成形した。地盤の深度方向と供試体の軸が一致するものをV-供試体、直交するものをH-供試体とした(図1参照)。静的強度試験および液状化試験に用いた試料の物理特性と原位置特性をそれぞれ表1および表2に示す。砂A,Bは沖積層の試料、砂Cは洪積層の試料である。物理特性については液状化試験の場合は3供試体ずつの平均値としてV,H供試体ごとに示している。N₁値は(1)式によって求めた²⁾。

$$N_1 = N / (\sigma'_v / 98)^{0.5} \quad \sigma'_v : \text{有効上載圧 (kPa)} \quad (1)$$

試験に用いた各試料の粒度特性を表1,2に示している。V-供試体とH-供試体の粒度分布は砂Aではやや差が認められるが、砂BとCではほとんど差がない。

表1 静的三軸圧縮・伸張試験に用いた試料の物理特性、原位置特性と試験条件

砂名	供試体名	No.	採取深度 (m)	有効上載圧 σ'_v (kPa)	N値	細粒分含有率 Fc(%)	相対密度 Dr(%)	間隙比 e	拘束圧 σ'_c (kPa)	50%粒径 D ₅₀ (mm)	均等係数 U _c	試験名
A	V-供試体	1	10.00-10.15	98	17	2.1	62	0.99	108	0.38	2.15	圧縮
		2				3.2	59	1.04	216	0.4	2.27	
		3				4.6	49	1.06	323	0.4	2.46	
		4				0.1	58	0.91	108	0.22	2.08	
	H-供試体	1	9.85-9.95			0.7	65	0.98	108	0.24	2.64	圧縮
		2	9.77-9.85			1.3	56	0.96	216	0.23	2.17	
		3	9.65-9.70			2.2	59	1.08	323	0.24	2.25	
		4	10.22-10.35			0.1	57	0.98	108	0.27	2.31	

表2 液状化試験に用いた試料の物理特性と原位置特性

砂名	供試体名	地質年代	採取深度 (m)	有効上載圧 σ_v' (kPa)	N値	N_1 値	初期せん断剛性 (MPa)	相対密度 D_r (%)	細粒分 F_c (%)	間隙比 e	50%粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_o
A	V-供試体	沖積	9.30 ~ 10.00	98	17	17	—	72	2.8	0.91	0.25	2.0
	H-供試体						46	59	0.2	1.04	0.32	2.2
B	V-供試体	沖積	11.55 ~ 11.90	107.8	37	35	72	87	0.5	0.83	0.15	1.5
	H-供試体						77	75	0.4	0.90	0.16	1.5
C	V-供試体	洪積	11.40 ~ 12.60	117.6	22	20	89	70	3.7	0.84	0.48	3.8
	H-供試体						99	70	3.2	0.87	0.50	4.3

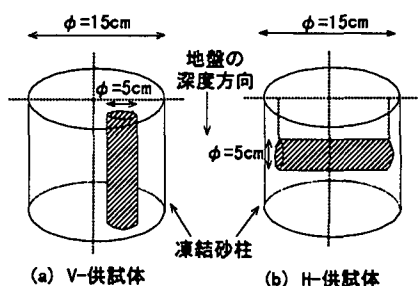


図1 V-供試体とH-供試体の作成方法

3. 試験方法

V-供試体、H-供試体とも、図1のように成形された後、以下に述べる手順で試験に供した。供試体は三軸セルにセットされ、19.6kPaの等方圧のもとで2時間程度放置し融解させた。その後CO₂脱気水を循環させ、196kPaのバックプレッシャーを与えて飽和させた($B>0.95$)後、有効上載圧で等方圧密した。その後、静的三軸試験の場合は軸ひずみ速度一定(=約0.1%/min)で排水三軸圧縮あるいは伸張試験を行った。液状化試験の場合は、微小ひずみ($\gamma \approx 10^{-3}$)の初期せん断剛性を非接触型変位計を用いて測定し、0.1Hzの正弦波で非排水繰返し三軸試験を行った(砂BのV-供試体は0.5Hz)。初期せん断剛性の値は3供試体の平均値として表2に示した。

4. 試験結果及び考察

4.1 静的三軸試験

図2(a)~(b)は、V-供試体、及びH-供試体の圧密排水三軸圧縮試験で得られた軸差応力 σ_d -軸ひずみ ϵ_a 関係の例である。また、図3は圧密排水三軸伸張試験における σ_d - ϵ_a 関係である。図2よりいずれの拘束圧においてもH-供試体の方がV-供試体より最大圧縮強度が5~15%程度小さく、一方、最大伸張強度を比較すると、V-供試体の方がH-供試体に対して15%程度小さい結果となった(図3)。表1に示すV-供試体とH-供試体の物理特性がほぼ同じであることから、このような最大強度の差異は供試体のバラツキによるものだけとは考えにくく、構造異方性の影響を受けているものと考えられる。なお、内部摩擦角 ϕ_d を求めると、V-供試体で $\phi_d=35.1^\circ$ 、H-供試体で $\phi_d=35.7^\circ$ であった。したがって、地盤の構造異方性が内部摩擦角に与える影響は小さいと考えられる。

図4は、図2,3に示す三軸圧縮、及び伸張試験の σ_d

- ϵ_a 関係から求めた50%強度時の割線ヤング率 E_{50} と軸ひずみの関係である。図よりそれぞれの供試体を比較すると、圧縮試験における E_{50} はH-供試体の方が小さく、逆に伸張試験における E_{50} はV-供試体の方が小さくなっている。このことは図5に示すように、V,Hそれぞれの供試体を地盤の深度方向に合わせて考えた場合、地盤の深度方向に伸張されやすく、地盤と直交する水平方向に圧縮されやすいという構造異方性を示しているものと考えられる。また上記の傾向は、後述する液状化試験におけるひずみの成長方向と一致するものである。

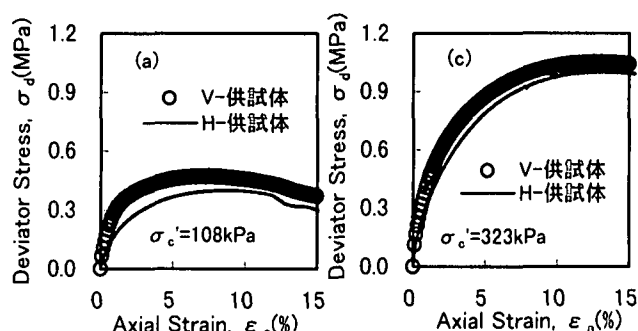


図2 軸差応力-軸ひずみ関係 (三軸圧縮試験)

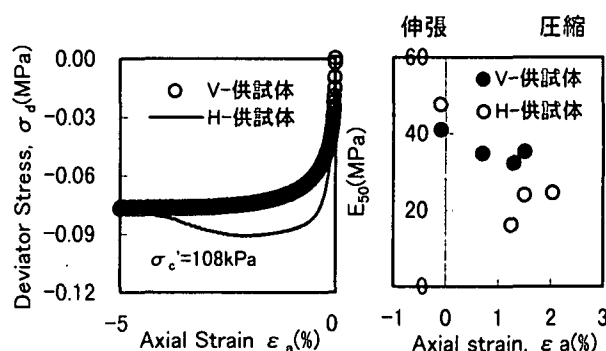


図3 軸差応力-軸ひずみ関係 (三軸伸張試験) 図4 50%強度時の割線ヤング率と軸ひずみの関係

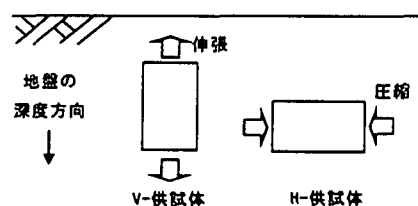


図5 供試体の軸ひずみの卓越方向

4.2 液状化試験結果

4.2.1 時刻歴でのV-供試体とH-供試体の比較

図6,7は、代表例としてBおよびC砂のV-供試体およ

びH-供試体の液状化試験で得られた軸差応力、軸ひずみ(圧縮が正、伸張が負)、過剰間隙水圧比の時刻歴および応力-ひずみ関係と有効応力径路の例である。それぞれのV-供試体、H-供試体はほぼ同じ応力比のもとに行われたものである。なお、有効平均主応力は $(\sigma_v' + 2\sigma_h')/3$ (σ_v' :鉛直有効応力、 σ_h' :水平有効応力)で整理している。

沖積土である砂Bにおいて、V-供試体とH-供試体の軸ひずみの成長方向に大きな違いが見られる。すなわち、V-供試体では繰返し回数の増加に伴い軸ひずみが伸張側へ成長するのに対して、H-供試体では軸ひずみが圧縮側に成長している。これを図示すると図8のようになり、供試体は非排水状態では等体積条件であるので、V-供試体において鉛直方向で伸張側に軸ひずみが成長する時(図中の実線矢印)には、水平方向で圧縮側に軸ひずみが

成長すること(図中の点線矢印)になる。このことは、H-供試体を図8(b)のようにV-供試体と地盤の深度方向を合わせると、H-供試体でも水平方向で圧縮側に軸ひずみが成長することを示している。従って、V-供試体、H-供試体における軸ひずみの成長傾向は、地盤の構造異方性によるものと思われる。すなわち、B地盤が等方的な構造状態ではなく、鉛直方向より水平方向に圧縮しやすいという構造異方性を有していると考えられる。また、過剰間隙水圧の上昇過程はV-供試体とH-供試体で大きな違いは見られなかった。これは、供試体内の水圧の伝播が等方的で速いためと考えられる。

一方、洪積土である砂CではV-供試体とH-供試体の軸ひずみの成長傾向が沖積土とはやや異なっている。V-供試体では砂Bとほぼ同様に軸ひずみは伸張側に成長する

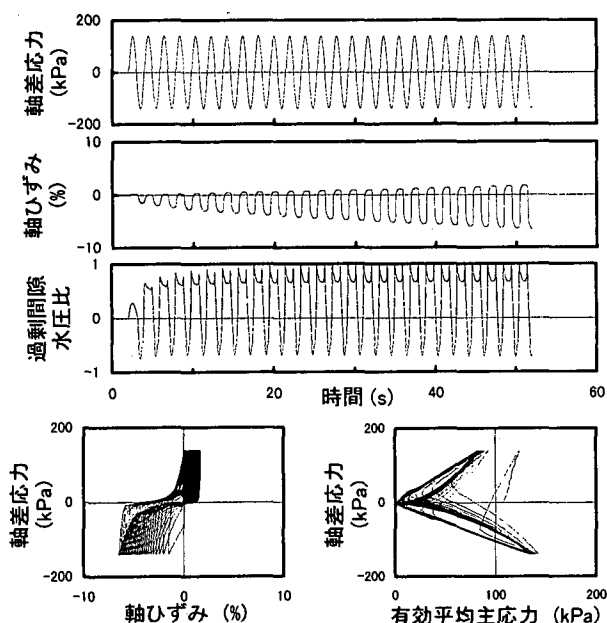


図6(a) 液状化試験結果 (砂B,V-供試体)

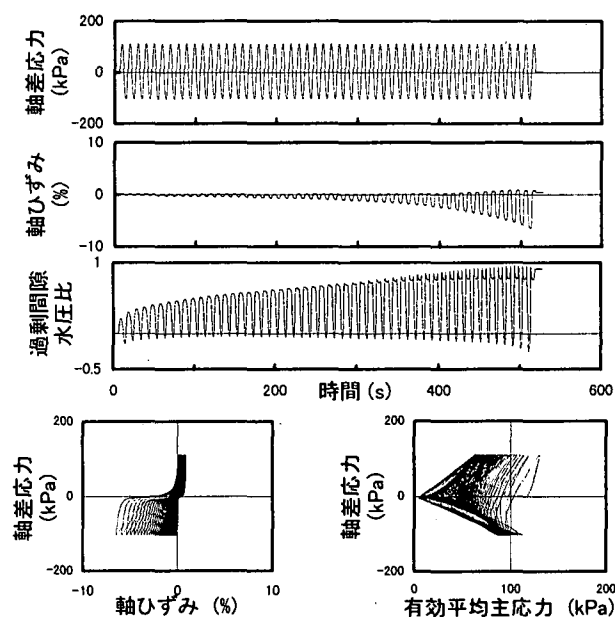


図7(a) 液状化試験結果 (砂C,V-供試体)

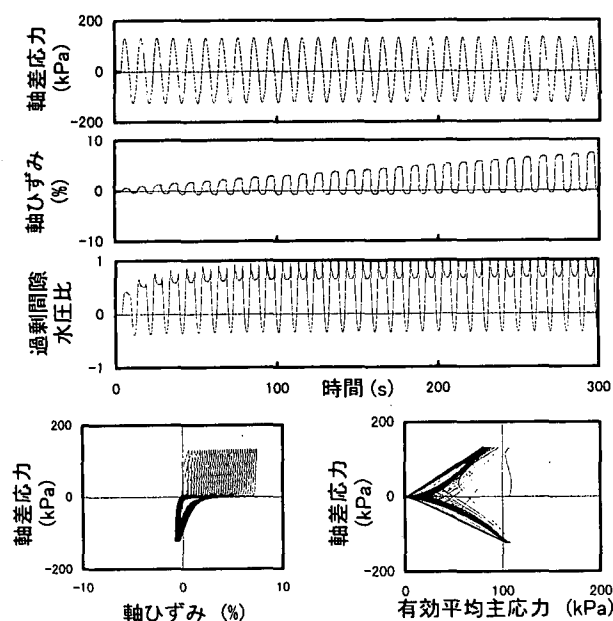


図6(b) 液状化試験結果 (砂B,H-供試体)

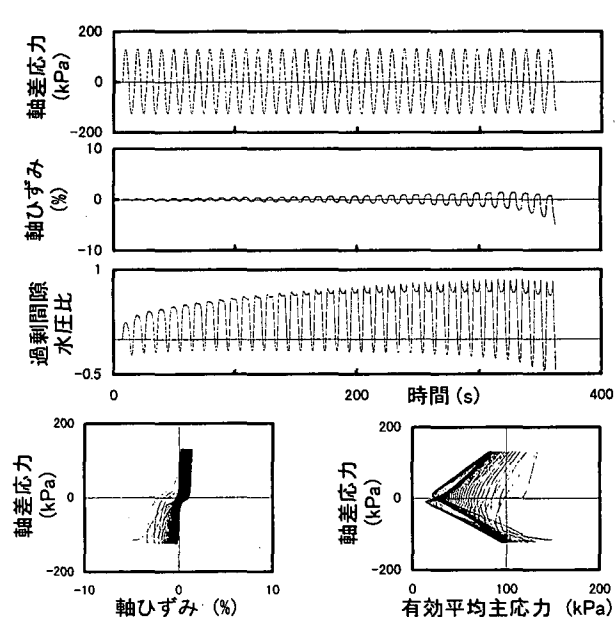


図7(b) 液状化試験結果 (砂C,H-供試体)

が、H-供試体では、軸ひずみが圧縮側と伸張側にほぼ同程度成長している。その後伸張側にシフトし軸ひずみ両振幅5%に達する前に局部的に破壊する現象が見られた。また、過剰間隙水圧はV-供試体でほぼ水圧比が1に達しているのに対して、H-供試体では全ての供試体で水圧比が90%程度までにしか達しなかった。

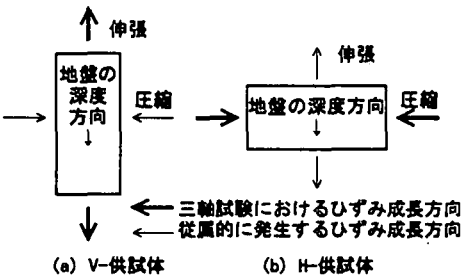


図8 供試体の軸ひずみ成長方向(非排水状態)

4.2.2 液状化強度特性におけるV-供試体とH-供試体の比較

図9は軸ひずみ両振幅(DA)2%,5%における繰返し回数と応力比の関係である。ただし、砂CはDA=5%に達する前に局部的に破壊したものがあつたため、DA=2%のみで整理した。液状化強度はH-供試体とV-供試体で有意な差はない。

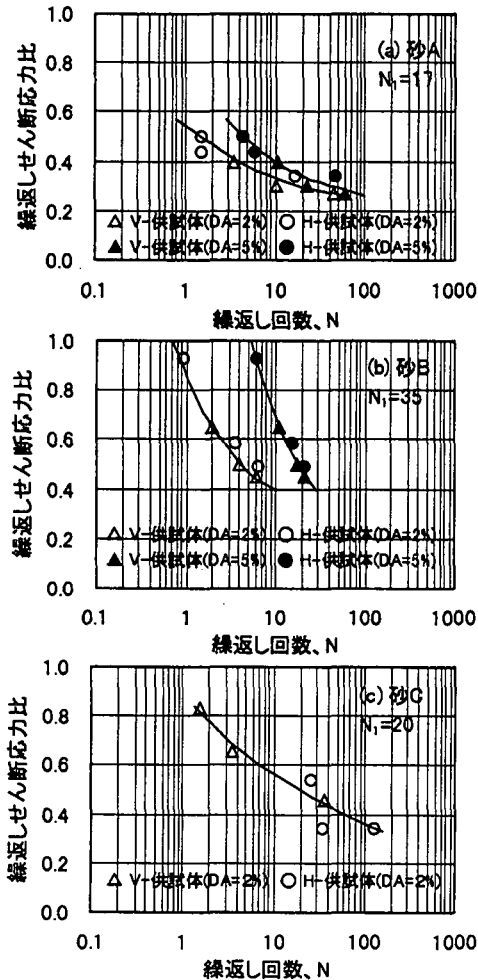


図9 V-供試体とH-供試体の液状化強度の比較

従って、液状化強度を軸ひずみ両振幅で整理する従来の考えに従えば、V-供試体、H-供試体のいずれを用いても、原位置の液状化強度をほぼ同等に評価できると考えられる。砂Cは N_1 値が砂Bより小さいが、液状化強度は砂Bよりもかなり大きい。この液状化強度の差は年代効果による影響と考えられる。

5. まとめ

原位置凍結サンプリング法で採取した砂質試料を用いて、1つの凍結柱から軸の方向が異なる供試体を作成し、三軸圧縮・伸張試験及び液状化試験を行って、地盤の構造異方性が静的及び動的力学特性に及ぼす影響を検討した。その結果以下のことがわかった。

5.1 静的強度・変形特性への影響

- 1) V-供試体とH-供試体の圧縮強度及び伸張強度に若干の違いが見られた。しかし、内部摩擦角はほぼ同じで、地盤の構造異方性が内部摩擦角に与える影響は小さい。
- 2) V-供試体とH-供試体の変形特性の違いから、試料を採取した地盤は鉛直方向より水平方向に圧縮されやすい構造異方性を有していると考えられる。この傾向後述する液状化試験におけるひずみの成長方向の特性と一致する。

5.2 動的強度・変形特性への影響

- 1) 沖積土のV-供試体とH-供試体では、軸ひずみの成長方向に大きな違いが見られた。これらの地盤では鉛直方向より水平方向が圧縮されやすいという構造異方性を有している。
- 2) 洪積土のV-供試体とH-供試体では、軸ひずみの成長方向に沖積土ほどの違いが見られなかった。これは、洪積土が種々の応力履歴を受けて水平方向と鉛直方向の圧縮性が拮抗し、構造異方性の影響が小さいためと考えられる。
- 3) 軸ひずみ両振幅で整理した場合のV-供試体とH-供試体の液状化強度に有意な差は認められなかった。

<参考文献>

- 1) Miura, S. and Toki, S.: "Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits," S&F, Vol. 24, No. 3, pp. 69-84, 1984.
- 2) Liao, S. S. C. and Whitman, R. V.: "Overburden correction factors for SPT in sand," J. GE, Vol. 112, No. 3, pp. 373-377, 1986.
- 3) 田屋・畑中・内田・酒匂: 「不攪乱砂質土の静的力学特性に及ぼす構造異方性の影響」、第34回地盤工学会研究発表会, 1999.
- 4) 内田・畑中・田屋・酒匂: 「不攪乱砂質土の液状化強度に及ぼす構造異方性の影響」、地盤工学会、液状化カズム・予測法と設計法に関するシボゾウム発表論文集, pp. 365-368, 1999.