

(71) 非排水繰返し三軸試験結果に及ぼす各種の要因について

東急建設株式会社研究所 正員 ○岡本 正広
 東京大学生産技術研究所 正員 龍岡 丈夫
 同 上 正員 山田 真一
 株式会社企画コンサルタント 正員 鳥居 剛

1. はじめに

繰返し三軸試験機は、他の繰返し単純せん断試験機と比較して、構造上その取扱いが簡単であり、また不攪乱試料の試験が行い易い等の理由で多数普及している。しかしながら、供試体の直径、直径・高さ比(H/D)、端面条件等の試験条件や試験方法等が統一されていない為に、精度の統一性がなく、各機関間のデータの互換性がない。そこで今回、砂の三軸液化強度に及ぼす各種要因の影響を評価する為に、①供試体作成時の応力状態、②体積変化に関する誤差(いわゆる System Compliance)、③供試体直径、④直径・高さ比(H/D)、⑤端面条件、⑥周波数、等各種の要因を変えて三軸液化試験を実施したので、ここに報告する。

2. 試験方法

試料は豊前標準砂($G_s=2.65$, 土質工学会基準法による $e_{max}=0.977$, $e_{min}=0.605$)を用いた。供試体は空中落下法で作成した。背圧は、 $\sigma_{bp}=2.0 \text{ kg/cm}^2$ とし、飽和化後 $B>0.98$ となるようにした。供試体は $\sigma'_c=1.0 \text{ kg/cm}^2$ で等方圧密後、所定の試験条件で非排水繰返し試験を行った。試験条件は表1に示す。試験方法の詳細については既報⁽¹⁾を参照されたい。

3. 試験結果及び考察

3-1) 供試体作成中の応力状態の影響

供試体作成中には、試験者の不注意によりクランプを締めたまゝ負圧で引いてしまい、軸変位が生じないようにしてしまうことがある。そこで供試体作成中の応力状態が、その後の繰返し非排水せん断特性にいかにか影響するかを調べる為、次のような比較実験を行った。⁽²⁾

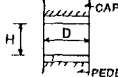
Type A: 供試体を負圧 0.3 kg/cm^2 で自立させる際、クランプを意図的に締めて、供試体に軸変位を生じさせないようにする。

Type B: 供試体を負圧 0.05 kg/cm^2 で自立させる際、クランプをゆるめ、かつこの状態でモールドをはずしてキャップ等が自由落下し、供試体が自由に軸変位できるようにする。

以後は A, B 同様の手順で実験を行った。その結果を図1, 2に示す。図1は有効応力経路を示したものであるが、前述した差が明確に応力経路の差として表われており、Type AはBに比べて初期に Δu が発生しにくいことが分る。

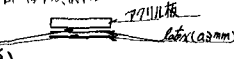
特に Type B では1波目ですでに間隔水圧の飛越し現象が生じている。図2は応力~ひずみ曲線であるが、Type AがBに比べてひ

表1 試験条件

端面 種類 略号	REGULAR ¹⁾				REGULAR			
	IDENTICAL				ENLARGED		IDENTICAL	
	RG-ID				RG-EL		LB-ID	
								
D(cm)	5	7.5	10	30	7.0	7.5	7.0	
H(cm)	10	17.5	15	20	63	15	15	15
H/D	2.0	2.33	2.0	2.0	2.06	2.14	2.0	2.14
f(Hz)	0.1	0.1	0.05	0.1	0.05	0.5	0.5	0.05

注1: Regularはボーストン 同2はアルミ、IL

注2: Lubricationの方法は

シリコンオイル(200cst) (KS-479) (2層)


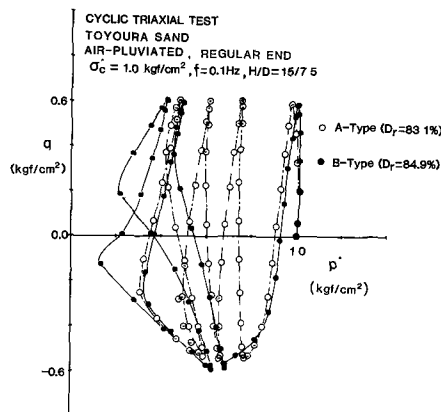


図1 有効応力経路

ずみが発生しにくいことが分る。この傾向はせん断初期 ($\epsilon_a = 0 \sim 2\%$) において著しく、特に Type A の伸張ひずみが出にくいことが分る。以上のことは等圧圧密を確実に行うことの重要性を示しているものと思われる。

3-2) 体積変化に関する誤差 (いわゆる System Compliance) の影響

④有効応力の変化により排給水をもたらす弾性袋の影響

三軸液状化試験においては、「通常バルブを閉じる」ことによって非排水状態、すなわち等体積せん断状態を作ろうとしている。しかし実際には、試験システムの剛性、Membrane Penetration, Bedding Error 等、いわゆる System Compliance の影響を受け、有効拘束圧の変化に伴って供試体からの排給水が生じ、完全な等体積せん断状態は満足されない。そこで体積変化に関するエラーが砂の三軸液状化強度に及ぼす影響を調べるために、意図的に有効応力の変化により排給水をもたらす弾性袋を供試体に接続して液状化試験を実施した⁽³⁾。弾性袋としてはビニールチューブを用い、間隙水圧が $1/100$ 上昇するとシステム全体で $\Delta V_1 = 4.62 \text{ cc}$ 及び $\Delta V_2 = 1.56 \text{ cc}$ 膨張する 2 つを用意した。図 3 に $DA = 10\%$ の時の $\sigma_{dp}/2\sigma'_c \sim N_c$ との関係を示す。実線で示してあるのが弾性袋のない場合であるが、弾性袋をつけた行った液状化強度は明らかに大きくなっている。例えば図 3 の a のデータでは $N_c = 20$ に対して弾性袋の存在により、応力比が b に示す値から約 1.5 倍増加したことになる。

図 4 は DA と $DA = 2\%$ が発生した後の繰返し回数、すなわち $(N_c - N_2)$ (N_2 は $DA = 2\%$ の時の N_c) との関係を示したものである。 $DA = 2\%$ 以降のひずみの発生は System Compliance の大小によらないことが分る。さらに $DA = 2\%$ から 10% までに達する繰返し回数 ($N_{10} - N_2$) を求めれば、弾性袋がある場合とない場合でも、すなわち System Compliance の大小によらずほぼ同回数であった。(表 2 参照) したがって、System Compliance の影響はいわゆる初期液状化 ($DA = 2\%$ 程度までに対応) までは大きいことが分る。

⑤供試体の直径の影響

さらに、System Compliance として不可避的な Membrane

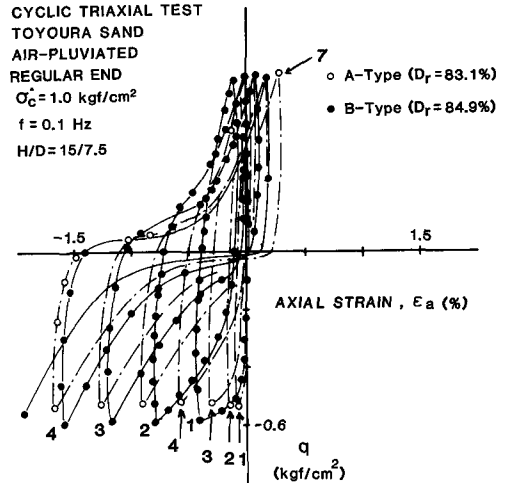


図2 応力～ひずみ曲線

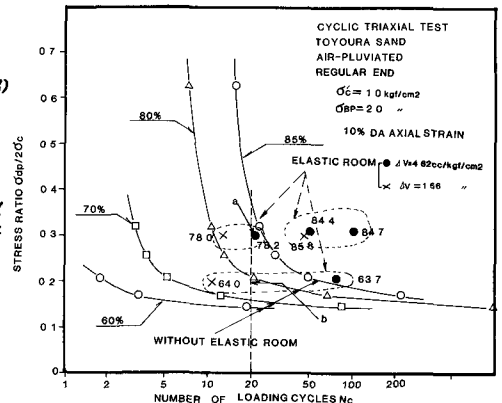


図3 $\sigma_{dp}/2\sigma'_c \sim N_c$ 曲線

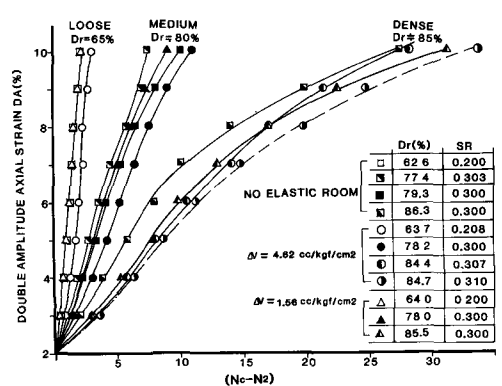


図4 $DA \sim (N_c - N_2)$ 曲線

表 2 表 3 $(N_{10} - N_2)$ 測定結果

	LOOSE			MEDIUM			DENSE		
	Dr = 65%			Dr = 80%			Dr = 85%		
	NO ELASTIC	ΔV 4.62 cc/kgf/cm²	ΔV=1.56 "	NO ELASTIC	ΔV 4.62 "	ΔV=1.56 "	NO ELASTIC	ΔV 4.62 "	ΔV=1.56 "
N10	3.9	77.5	10.7	13.5	21.25	12.6	33.2	101.5	46.5
				10.5				50.5	
	1.7	74	8.5	3.2	10.25	3.75	5.75	67.75	15.2
				2.1				22.25	
N10-N2	2.2		2.2	10.3	11	8.85	27.45	33.25	31.3
				8.4				28.25	

D(cm)	5	7.5	10	30
N10	22	14.7	13.5	—
N2	5	3	2.7	1.5
N10-N2	17	11.7	10.8	—

Penetrationがある。この影響は供試体の直径を変化させることにより判断できる。そこで供試体の直径を、5, 7.5, 10, 30cmの4種類に変えて、 $H/D=2.0$, $RQ-ID$, $f=0.1$ Hzと比較してみた。図5は有効応力経路を示したものであるが、直径の小さい供試体ほど、すなわち比表面積の大きい供試体ほど、せん断初期に Δu が発生しにくい事が分る。

図6は $N_c=1$ 及びこの時の $\epsilon_a \sim \epsilon$ 曲線であり、図7は繰返し回数とその時の圧縮ひずみ、伸張ひずみを各々プロットしたものである。直径の小さい、すなわち比表面積の大きい供試体ほどひずみが発生しにくくなっていることから、Membrane Penetrationの影響は明らかにあることが分る。特に初期液状化($DA=2\%$ 程度に対応)までの影響が大きい。が、 $D=5$ cmの場合には初期液状化以降も多少はあるようである。(表-3参照)~これは前述した意識的に System Complianceを与えた実験結果と対応している。

図8は $DA=5\%$ に達するまでの繰返し回数を $D=7.5$ cmを基準として、各直径の場合と比較して比表面積との関係を示したものである。

ここで、System Complianceを以下のように考える。

$T_{sc} = \text{Total System Compliance} / \text{Sample Volume}$

今、 ΔMP : 単位面積あたりの Membrane Penetration (cm^3/cm^2)

ΔBE : -// Bedding Error (cm^3/cm^2)

ΔSC : M.P, B.E 以外の System Compliance (cm^3)

A_s : 供試体の側面積 ($\pi D H$)

A_b : -// 上下面積 ($2 \times \pi D^2/4 = \pi D^2/2$)

V : 供試体体積 ($\pi D^2 H/4$) とすれば

$$T_{sc} = (\Delta MP \times A_s + \Delta BE \times A_b + \Delta SC) / V$$

$$= 4 \Delta MP / D + 2 \Delta BE / H + \Delta SC / (\pi D^2 H / 4)$$

上式に示すように、Total System Complianceは供試体の直径が小さいほど、Bedding Errorが大きいほど大きくなるが、定量的な検討を加えるに

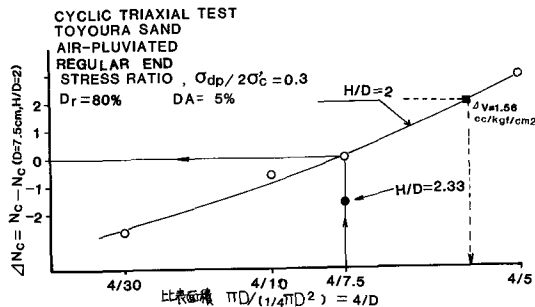


図8 ΔN_c と比表面積との関係

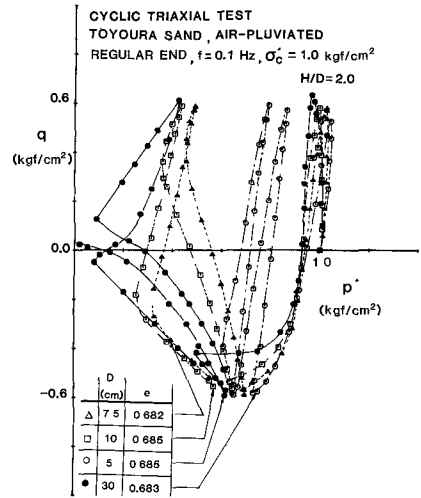


図5 有効応力経路

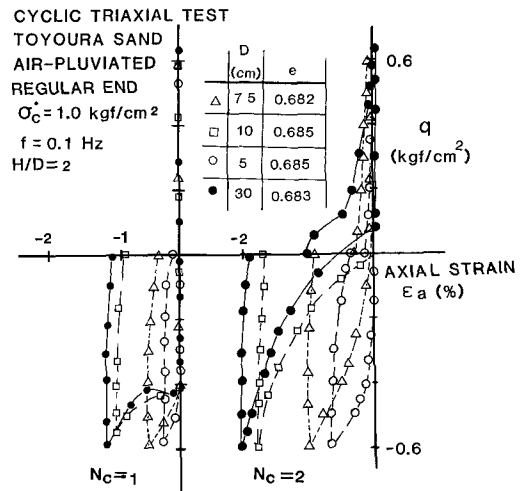


図6 $q \sim \epsilon_a$

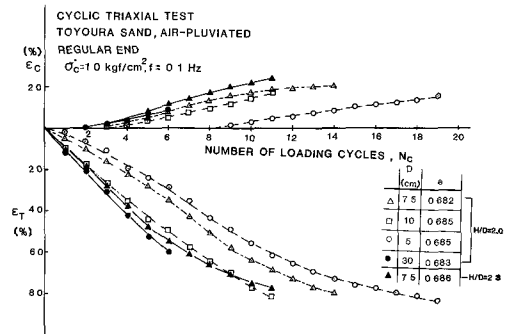


図7 $E_c, E_t \sim N_c$

は数っていない。

また、図9には各供試体の相対密度80%に対応する繰返し回数を求めた結果を示す。補正法については参考文献⁽⁵⁾を参照されたい。図9によれば明らかに直径の小さい供試体ほど液状化強度は大きくなる傾向を示している。

3-3) 直径・高さ比の影響

$D=7.5\text{cm}$ に対して行った $H/D=2.33$ の試験結果によれば、 H/D が大きくなると液状化強度は弱くなる傾向にあるようである。(図9参照)

3-4) 端面条件の影響

図10に $H=150\text{mm}$, $H/D=2.0$, $f=0.5\text{Hz}$ の時の相対密度～応力比の関係を示す。Lubricated End の場合、Regular End よりも正のダイレタンシーが自由に生じうるので、密な砂ほど、ひずみ振幅が大きいほど液状化強度は大きくなるのではないかと考えられるが、正のダイレタンシーが強く発揮される時には、その正のダイレタンシー特性はひずみ振幅の進行にはあまり寄与しておらず、ひずみは $\sigma = \sigma_c - \Delta u \approx 0$ 付近で大きくなる。したがって Δu のわずかな誤差は発生するひずみの値に大きな影響を与える。そこで端面条件の System Compliance を考えると、Lubricated の場合には、Borderline Error があり、"Enlarged" の場合には Corner Error がある。このことを考慮に入れて図10を比較すれば、Regular の場合も Lubricated の場合も、Enlarged の方が Identical の場合よりも液状化強度は大きい傾向を示しており、明らかに、System Compliance の一番大きい LB-EP が最も強い。

3-5) 周波数の影響

図10に $H=150\text{mm}$, $H/D=2.0$ の場合で周波数を $f=0.05$ と 0.5Hz に変えた時の相対密度～応力比の関係を示す。図より、この程度の周波数の差ではほとんど影響ないと云える。

4. 結論

以上より、精度の高い非排水繰返し三軸試験を行うには、①供試体作成時には常に等方状態に保つ。② System Compliance の影響は明らかにあるので剛性の高い試験システムを用いる。③ 雙輪砂のような細砂でも Membrane Penetration の影響はあるので、なるべく比表面積の小さい、すなわち直径の大きい供試体を用いる。④ 高さ・直径比 (H/D) は大きくなると液状化強度は弱くなる傾向にある。等々に注意する必要がある。

<謝辞> 本報告は東京工学生産技術研究所、龍岡研究室で、過去数年間にわたって行なわれた研究成果をまとめたものである。研究に携わっていた方々、及び研究室の方々から末筆ながら感謝の意を表します。

<参考文献> ①龍岡、山田：土の動的性質及び実験方法(講義と実習)、生研センターテスト(1982)、②山田、龍岡：圧縮中のひずみ経路と砂の非排水繰返し三軸試験特性、第38回土木学会、③岡本、龍岡：体積変化に伴うひずみ誤差(いわゆる System Compliance)が三軸液状化強度に及ぼす影響、第18回土質工学会、④岡本、龍岡：三軸液状化強度には供試体の寸法効果、第38回土木学会、⑤山田、龍岡：砂の繰返し三軸液状化強度に及ぼす諸条件の影響、第17回土質工学会、⑥佐々木 世：振動三軸試験による試験条件が砂の液状化強度に及ぼす影響、第16回土質工学会。

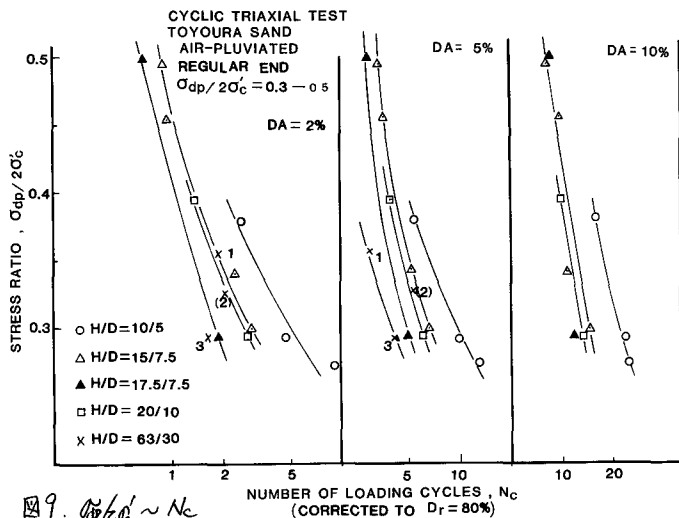


図9. $\sigma_{dp}/\sigma'_c \sim N_c$

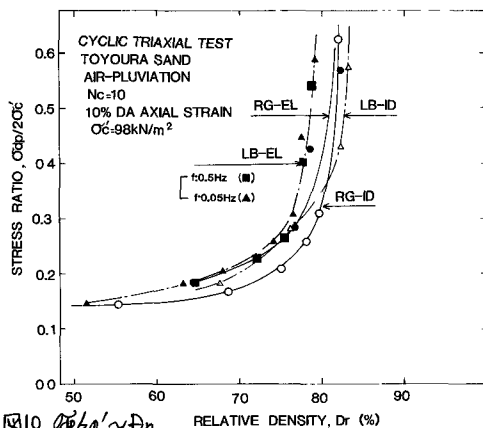


図10. $\sigma_{dp}/\sigma'_c \sim D_r$