

# 大型振動三軸試験装置を用いた レキ質マサ土の液状化試験

ハザマ 平澤 賢治\* 松原 勝己\*  
脇田 和試\* 吉見 憲一\*\*  
大前 延夫\*\*

阪神・淡路大震災では、埋立て地盤において、従来液状化抵抗が大きいとされていたマサ土を代表とするレキ質地盤の液状化現象が確認された。このような背景をもとに、今回レキ質マサ土の液状化強度特性を検討した。

検討方法は、最大粒径 37.5mm 以下のレキ分を含有する材料と最大粒径 2mm 以下のレキ分を含有しない材料に粒度を調整後、相対密度が  $Dr=70\%$  となるように供試体を作成し、大型および小型振動三軸試験装置を用いて液状化試験を実施した。結果として、大型振動三軸試験装置を用いて得られた液状化強度曲線より、レキ分を含有する材料の方が高い液状化強度比を有することが確認された。また、レキ分を含有しない材料の液状化強度は、小型試験装置よりも大型試験装置を用いた場合の方が、小さくなることが確認された。

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災では、近年日本各地で発生した地震においても数多く確認されている、沿岸部や軟弱・埋立て地盤における液状化現象や側方流動といった地盤被害が、六甲アイランドやポートアイランドをはじめとする人工埋立て地において発生した。

これらの人工島は埋立て材料として、これまで液状化しにくいとされていたマサ土を使用していたが、今回液状化が確認されたことより、マサ土をはじめとするレキ分を含有する材料の液状化強度について今後とも検討を進めてゆく必要があると思われる。

従来より地盤の液状化に対する検討手法として、道路橋示方書（以下「道示」と表記）が多く用いられているが、ここでは液状化の判定をする必要がある土層として、平均粒径  $D_{50}$  が 0.02mm 以上 2.0mm 以下の砂質土層が対象となっており、レキ分を含有する材料は検討対象とはならなかった。しかし、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」においては、上記の範囲が 0.02mm 以上 20.0mm

以下に拡張されていることから、今後レキ質土材料の液状化検討が必要となるとともに、レキ質土材料の液状化特性・強度の把握が重要な項目になると考えられる。

本報は、このような背景のもとに、乱されたレキ分を含有するマサ土の振動三軸試験と、当該材料による埋立て地に対し室内試験結果を用いた液状化判定の結果を報告するものである。

## 2. 試験概要

今回実施した試験では、振動三軸試験の基礎的な検討も含め、以下の項目を目的として掲げた。

- ①レキ分を含むマサ土の液状化強度の把握
- ②レキ分の有無によるマサ土の液状化強度の比較
- ③供試体・試験装置の寸法の違いによる液状化強度の比較
- ④試験結果を用いた地盤の液状化判定の実施

レキ分を含むマサ土の液状化試験を実施するにあたり、直径 30cm、高さ 60cm の供試体の試験が可能な大型振動三軸試験装置を使用した。

また、試験に用いたマサ土は、これまでにも埋立て材として使用実績が多数ある淡路島津名産のものを使用した。本材料は、プラントで最大粒径 200mm に粉碎されたものであるが、前述の大型供試体の寸法を考慮して最大粒径 37.5mm に調整した（以降レ

キーワード：振動三軸試験，レキ質マサ土，  
液状化強度曲線，埋立て地

\* ハザマ技術研究所，0298-58-8822

\*\* ハザマ大阪支店，078-322-0501

キ有材料とよぶ)。さらに、試験装置・供試体寸法の違いによる液状化強度を比較するため、小型試験装置の供試体寸法を考慮し、最大粒径 2.0mm に再調整した材料（以降レキ無材料とよぶ）も用いた。図-1 にこれらの材料の粒度分布を示す。

### (1) 検討ケース

試験は、試験装置と材料との組み合わせにより 3 ケース実施し、各ケースの液状化強度曲線求めた。表-1 に試験ケースとその供試体数を示す。

### (2) 供試体特性

レキ有およびレキ無材料については、室内試験において先に示した土の粒度試験とともに密度試験を実施した。レキ無材料については土質工学会（地盤工学会）基準「砂の最大密度・最小密度試験方法」(JSF T 161-1990)に準拠したが、レキ有材料については上記試験で用いるモールドの内法寸法で 5 倍 ( $\phi$  300mm×h200mm)の鋼製容器と大型の漏斗・木づちを用いて同基準に即して密度試験を実施した。これにより得られた試験材料の諸元を表-2 に示す。

今回のレキの有無による液状化強度については、相対密度を同一とすることで比較を試み、圧密終了時の供試体の相対密度が  $D_r=70\pm 5(\%)$  となるよう作成した。作成にあたっては、大型供試体については振動締固め装置を用い、小型供試体については突固めによった。

### (3) 試験諸元

振動三軸試験における試験条件は、拘束圧についてはすべて  $\sigma_c=1.0\text{kgf/cm}^2$  と一定にし、繰返し載荷周波数を大型試験装置については  $f_h=0.05\text{Hz}$ 、小型試験装置については  $f_h=0.10\text{Hz}$  とした。

## 3. 試験結果

今回の試験で得られた液状化強度曲線を図-2 に示す。また、小型試験装置により得られた結果と、既往の文献をもとに、小型試験装置で実施された他のマサ土における試験結果<sup>1)2)3)</sup>との比較を図-3 に示す。この結果より、以下のことが確認できる。

①大型試験装置によるレキ有とレキ無材料による液状化強度曲線を比較すると、レキ有の方が高い液

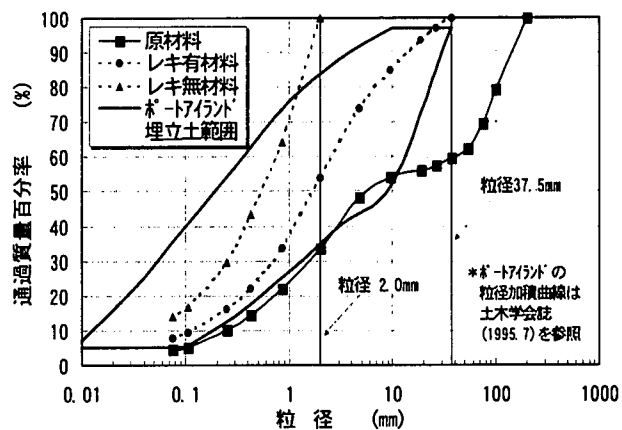


図-1 試験材料の加積粒度曲線

表-1 試験ケース一覧

材料 試験装置	レキ有 (粒径 37.5mm 以下)	レキ無 (粒径 2.0mm 以下)
大型試験装置	○ (8 供試体)	○ (2 供試体)
小型試験装置	×	○ (6 供試体)

\* 供試体寸法 大型 直径 300mm、高さ 600mm  
小型 直径 50mm、高さ 100mm

表-2 試験材料の諸元

	レキ有材料	レキ無材料
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	2.010	1.836
最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$	1.514	1.197
比重 $G_s$	2.668	2.668
最大間隙比 $e_{max}$	0.762	1.229
最小間隙比 $e_{min}$	0.327	0.453

表-3 各供試体の諸元

供試体 No.		乾燥単位 体積重量 $\rho_d(t/m^3)$	相対密度 $D_r(\%)$	締固め度 $\rho_d/\rho_{dmax}$	
大型試験装置	レキ有	1	1.828	70	0.91
		2	1.813	67	0.90
		3	1.824	69	0.91
		4	1.824	69	0.91
		5	1.849	73	0.92
		6	1.811	66	0.90
		7	1.809	66	0.90
		8	1.830	70	0.91
小型試験装置	レキ無	1	1.611	74	0.88
		2	1.600	72	0.87
		1	1.604	73	0.87
		2	1.610	74	0.88
		3	1.590	71	0.87
		4	1.602	73	0.87
5	1.603	73	0.87		
6	1.606	73	0.87		

状化強度比を有することが確認される。

- ②レキ無材料の小型試験装置と大型試験装置による液状化強度曲線を比較すると、小型試験装置を用いた方が、高い液状化強度比を有することが確認される。
- ③小型試験装置を用いて得られた他のマサ土の液状化強度曲線と比較した場合、液状化強度比  $R_L$  ( $N_c=20$ ) はいずれも同等の値 0.16 となっており、レキ分を含まない場合、材料の違いによる有意な差は確認されない。

#### 4. 試験結果を用いた液状化判定

今回の試験により得られた液状化強度比を用いて地盤の液状化判定を実施した。対象となる地盤は、本試験で使用した材料により施工されたT埋立て地である。当該地点は埋立て高さが10mであり、標準貫入試験によりN値分布ならびに地下水位、および砂置換法により地下水位面上の原位置単位体積重量が得られている。これをもとに、液状化判定に用いる地盤条件を次のように設定した。

液状化判定の対象となる層：GL-3m~GL-10m  
(埋立て高さ：10m、地下水位：GL-3m)

地下水位面上の地盤の単位体積重量：

$$\gamma_t = 1.68 \text{ tf/m}^3 (\omega: \text{含水比}, 5\% \text{と設定})$$

地下水位面下の地盤の単位体積重量：

$$\gamma_{\text{sat}} = 2.00 \text{ tf/m}^3$$

##### (1) N値を用いた液状化判定

まず、従来よりN値を用いた液状化判定手法である、「道示」の  $F_L$  法による検討を実施した。液状化強度比は、 $R = R_1 + R_2 + R_3$

$R_1$  : 原地盤のN値と有効上載圧  $\sigma'v$  (kgf/cm<sup>2</sup>) から計算される液状化強度比

$R_2$  : 平均粒径  $D_{50}$ (mm)による補正量

$R_3$  : 細粒分含有率  $F_c$ (%)による補正量

で表されるが、当該材料においては、 $D_{50}$ が8.0mm余であり、本来ならば液状化判定の対象とはならず、 $R_2$ の補正量が設定されていないが、ここでは  $D_{50}=2.0\text{mm}$ における  $R_2=-0.05$ として判定を行うこととした。また、細粒分含有率  $F_c$ は40%以下であるため、 $R_3=0.00$ とした。この判定手法を用いたT埋立て地の液状化判定結果を設計震度  $k_s=0.12$ として表-4に示す。

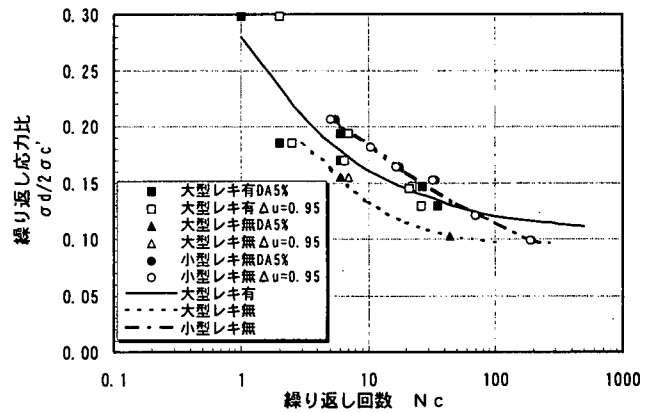


図-2 試験より得られた液状化強度曲線

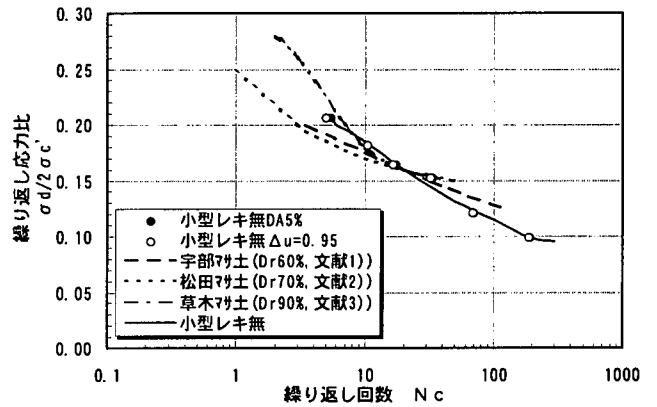


図-3 小型試験装置による他のマサ土との比較

表-4 液状化判定結果 (N値を用いた場合)

深度 (-m)	上載圧 $\sigma_v$ (tf/m <sup>2</sup> )	有効上載圧 $\sigma'v$ (tf/m <sup>2</sup> )	N値	動的せん断強度比 R	応力比 $L$ $k_s=0.12$	液状化抵抗率 $F_L$	等価N値	換算液状化強度比 $R'$
1	1.68	1.68	8					
2	3.36	3.36	8					
3	5.04	5.04	7					
4	7.04	6.04	12	0.228	0.132	1.734	7.4	0.160
5	9.04	7.04	8	0.161	0.143	1.129	8.0	
6	11.04	8.04	8	0.153	0.150	1.020	8.5	
7	13.04	9.04	9	0.159	0.155	1.026	9.1	
8	15.04	10.04	13	0.193	0.158	1.220	9.7	0.196
9	17.04	11.04	15	0.204	0.160	1.273	10.2	
10	19.04	12.04	20	0.236	0.161	1.463	10.8	

表-5 液状化判定結果 (試験結果を用いた場合)

深度 (-m)	$L/k_s$	動的せん断強度比 R	$k_s=0.12$		$k_s=0.13$		$k_s=0.15$	
			液状化抵抗率 $F_L$	$P_L$	液状化抵抗率 $F_L$	$P_L$	液状化抵抗率 $F_L$	$P_L$
1								
2								
3					* 網掛け部は $F_L < 1.0$			
4	1.096	0.160	1.217	0.00	1.123	0.000	0.977	0.190
5	1.188	0.160	1.122	0.00	1.036	0.000	0.898	0.791
6	1.250	0.160	1.067	0.00	0.984	0.116	0.853	1.066
7	1.291	0.160	1.033	0.00	0.953	0.317	0.826	1.175
8	1.318	0.196	1.239	0.00	1.144	0.000	0.991	0.056
9	1.335	0.196	1.223	0.00	1.129	0.000	0.978	0.127
10	1.344	0.196	1.215	0.00	1.122	0.000	0.972	0.147
$P_L$				0.00		0.433		3.552

## (2) 小型試験装置から得られた液状化強度比を用いた液状化判定

次に、小型試験装置により得られた液状化強度比  $R_L$  を  $F_L$  法に適用することを検討した。これは「道示」において、液状化判定の基礎データとなる試験結果が小型試験装置を用いて導かれていることを考慮したためである。「道示」では、不攪乱試料における室内繰り返し(振動)三軸試験により得られた強度比  $R_L$  と動的せん断強度比  $R$  の関係を  $R_L = R$  としており、今回はこれを参照した。さらに、次のような仮定と手順を想定して検討を実施した。

- ①試験と原位置の材料の締め固め度は同等である。
- ②一様地盤においては、単位体積重量ならび動的せん断強度比  $R$  が一定であると仮定して、試験結果の  $R_L = R = 0.16$  を用いて  $R - R_2 (= 0.21)$  と有効上載圧から「道示」の式より等価な  $N$  値を算出する(表-4参照)。
- ③等価な  $N$  値と現位置における  $N$  値とを比較すると、 $GL-3 \sim 7m$  においては良好な対応を見せているが、 $GL-7 \sim 10m$  においては実際の  $N$  値の方が大きい。これを埋立て下部層の強度増加分として評価する。増加率については、等価な  $N$  値と現位置の  $N$  値の比の平方根とする。
- ④この結果、動的せん断強度比として、検討対象地盤のうち、 $GL-3 \sim 7m$  では 0.160、 $GL-7 \sim 10m$  では 0.196 を用いることとする。  
これにより、 $k_s$  をパラメータとして  $F_L$  法を適用

した結果を  $P_L$  と併せて表-5に示す。これによる埋立て地盤がすべてレキ無材料で構成されている場合、 $k_s = 0.15$  で全層が液状化すると判定されたが、大型試験装置を用いた試験結果で認められた液状化強度比の差異を考慮すると、実際のレキ混じりの地盤に対しては本判定結果よりもさらに改善されることが期待される。

## 5. おわりに

今回の試験において、レキ分の有無により液状化強度比に有意な差異を認めることができたが、今後の課題として、最大粒径や粒度分布の違いによる液状化強度比の検討を進め、レキ質材料の液状化強度に対する定量的な評価手法の確立が挙げられる。また、実際の埋立て地盤においては、レキ質材料が有する排水効果といった振動三軸試験では考慮できない特性が考えられるため、大型せん断土槽を用いた振動試験の実施も検討してゆく必要があると思われる。

## 【参考文献】

- 1) 兵動ら：マサ土の液状化特性について，出典不詳，平成元年
- 2) 永瀬ら：破碎性粒状土の繰り返し非排水試験，第23回土質工学研究発表会，昭和63年
- 3) 永瀬ら：マサ土と火山灰質山砂の非排水三軸試験，第24回土質工学研究発表会，平成元年

## Cyclic triaxial test of gravelly decomposed granite soil using Large Scale Cyclic Triaxial Apparatus

Kenji Hirasawa, Katsumi Matsubara, et al.

The purpose of this paper is to reveal the liquefaction resistance characteristics of gravelly decomposed granite soil using Large Scale Cyclic Triaxial Apparatus. In the results of experiments concerning are the strength curves causing liquefaction, soils containing gravel fractions (maximum grain size 37.5mm) were compared with those not containing (maximum grain size 2.0mm). Then these experiments made it clear that the strength ratio causing liquefaction of soils containing gravel fractions is larger than those not containing gravel fractions.