

生石灰パイル打設地盤の 液状化特性に関する振動台実験

山本哲朗¹・松永雄紀²・伊達明彦³

¹正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

²工修 株式会社ニュージェック (〒542 大阪府大阪市中央区島之内 1-20-19)

³山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻

粘性土地盤の静的な改良工法の一つである生石灰パイル工法は、砂地盤の液状化抵抗を高める工法としての利用も考えられる。著者らは今回、生石灰パイルを打設した砂地盤の初回の液状化特性および再液状化特性を調べるために、砂層中央部に直径の異なる生石灰パイルを打設した供試体を作製し、これらについて振動台実験を行った。その結果、生石灰パイルの面積比が増加するにつれて供試体の液状化抵抗は増加することが分かった。また、液状化後の排水圧密による砂層部分の相対密度の増加に起因して生石灰パイルを打設した供試体の液状化抵抗は、それらの初回の液状化抵抗よりも増加することが明らかになった。

Key Words : Liquefaction, Sand, Lime, Partially Saturated Soil, Decomposed Granite Soil

1. まえがき

生石灰パイル工法は、強力な脱水効果と膨張性をもつ生石灰を軟弱地盤中にパイル状に打設することにより、土中水を急速に脱水し、さらにパイル自身の体積を約2倍に膨張させて地盤を強制的に圧密して改良する工法である。本工法は従来、粘性土地盤の静的改良の一つとして用いられてきたが、飽和砂地盤の液状化対策としての適用も考えられる。

著者らは今回、ケルマン型単純せん断箱内に作製した生石灰パイルを打設した供試体について振動台実験を行い、生石灰パイルを打設した砂地盤の初回の液状化特性および再液状化特性を調べた。本論文では、その実験方法と結果を述べる。

2. 土試料および実験装置

実験に用いた土試料は、豊浦標準砂（以下、豊浦砂という）および宇部市のまさ土地山の表層部で採取した宇部まさ土（以下、まさ土という）である。Table 1 および Fig. 1 には、それぞれ両土試料の物理定数および粒径過積曲線を示す。まさ土は 4.75mm ふり通過分の粒度調整試料である。また、生石灰は、(株)カルシード製の特号工業用生石灰を用いた。

Table 1 Physical properties of samples.

	Toyoura sand	Ube decomposed granite soil
Specific gravity G_s	2.655	2.624
Maximum grain size D_{max} (mm)	0.850	4.750
Average grain size D_{50} (mm)	0.185	0.840
Uniformity coefficient U_c	1.82	16.62
Maximum void ratio e_{max}	0.929	0.902
Minimum void ratio e_{min}	0.619	0.569
Fines content FC (%)	0.2	11.2

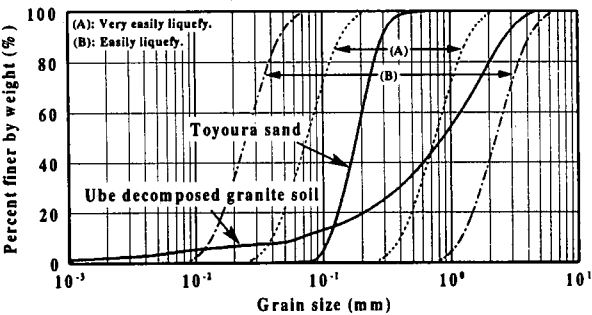


Fig. 1 Grain size distribution curves of samples.

実験には Fig. 2 に示すケルマン型単純せん断箱を用いた。せん断箱の仕様の詳細については先の論文^{1),2),3)}を参照されたい。

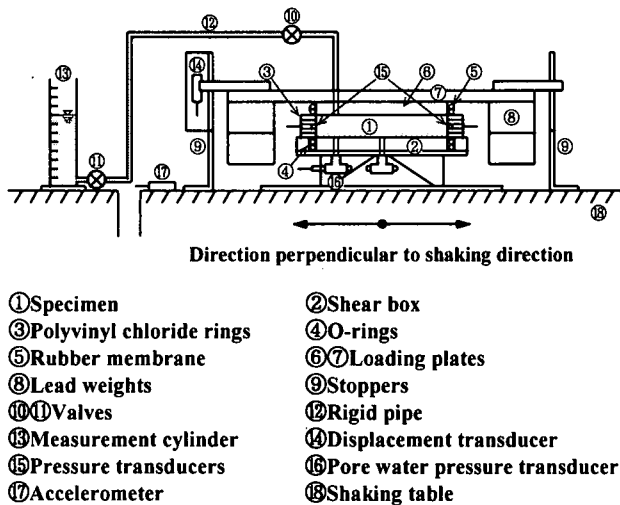


Fig. 2 Test apparatus used in this study.

3. 実験方法

供試体の作製方法は以下のとおりである。まず、外径7.8cmの鋼製のパイプを脱気水を満たしたせん断箱の中央部に置き、その外周部に飽和砂層を作製した。せん断箱の内径は29.8cmである。次に、鋼製パイプ内に生石灰を205.8g投入し、パイプを引き抜くことで生石灰によって間隙水を吸収させ、消石灰パイルと不飽和化した砂層からなる供試体を作製した。その際、生石灰の消化反応開始直後に供試体表面上載圧49.0kPaを作用させ、生石灰パイルの強度増加を図っている。以下では、この供試体はLLP-Pと呼ぶことにする。また、生石灰パイルの消化反応が平衡状態になった後、上記の供試体を再び飽和させた供試体を作製した。この供試体はLLP-Sと呼ぶ。さらに、鋼製パイプの外径が5.1cm、投入した生石灰量が87.1gの不飽和供試体も作製され、LLP-P供試体に行ったものと同様の振動台実験が行われた。この供試体はMLP-Pと呼ぶ。なお、生石灰パイルを打設しない砂層単味の飽和供試体についても実験を行ったが、その供試体はNLPと呼ぶ。各供試体の高さは約6cm、砂層部分の相対密度は約70%である。

このようにして作製したいずれの供試体にも周期 $T=1/3$ secで、振幅一定の正弦波状の水平加速度を与えた。

再液状化実験は初回の液状化実験の終了後に、一部の供試体について継続して行われた。すなわち、振動台停止後に供試体が発生した間隙圧を完全に消散させた後、初回の実験の場合とほぼ等しい加速度を供試体を与えた。なお、供試体を与えた水平加速度の大きさは、水平震度 k_h に換算して、豊浦砂供試体の場合には0.15から0.42、まさ土供試体の場合には0.09から0.28の間で数通りに変化した。

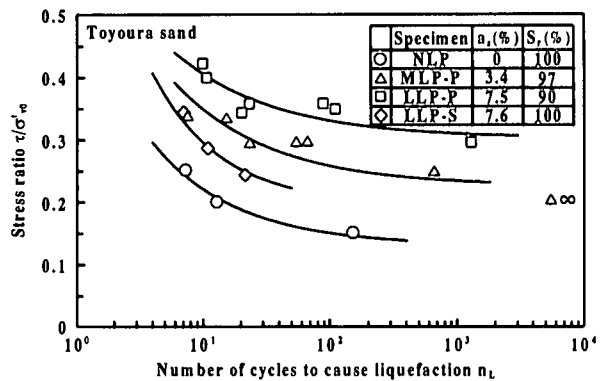


Fig. 3 Liquefaction resistance curves for NLP, LLP-P and LLP-S-test (Toyoura sand).

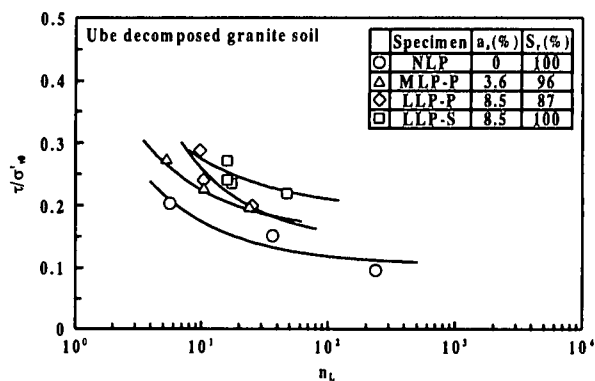


Fig. 4 Liquefaction resistance curves for NLP, LLP-P and LLP-S-test (Ube decomposed granite soil).

4. 結果および考察

Fig. 3, Fig. 4には、それぞれ豊浦砂供試体およびまさ土供試体について、供試体底面に作用する応力比 $\tau/\sigma'₀$ と液状化を生じるまでのせん断応力の繰返し回数 n_L の関係から得られた液状化抵抗曲線を示す。 τ はせん断応力、 $\sigma'₀$ は有効鉛直応力である。図中の表に示す a_v および S_r は、それぞれ生石灰パイルの全断面積を供試体の断面積で除して得られる面積比および砂層部分の飽和度である。なお、液状化を生じなかった結果については記号の横に ∞ の印を付している。両図から、豊浦砂供試体およびまさ土供試体ともに、 a_v の増加および S_r の減少に伴って液状化抵抗が増加していることが分かる。また、LLP-S-testから得られた液状化抵抗曲線は、NLP-testとLLP-P-testの両方の液状化抵抗曲線に挟まれていることが分かる。すなわち、NLP-testとLLP-S-testとの $\tau/\sigma'₀$ の差は生石灰パイル打設による $\tau/\sigma'₀$ の増加量を表し、LLP-S-testとLLP-P-testとの $\tau/\sigma'₀$ の差は飽和度の減少による増加量を表していると考えられる。

また、両図を比較してみると、まさ土供試体の液状化抵抗の方が豊浦砂供試体のそれよりも小さいことが分かる。特に、NLP供試体の $n_L=20$ の時の応力比で比較

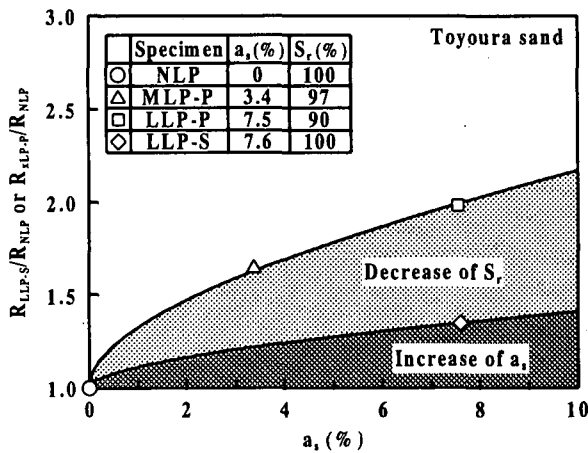


Fig. 5 Relationship between liquefaction resistance ratio, R_{LL-P-S}/R_{NLP} or R_{XLP-P}/R_{NLP} area ratio of quick lime pile a_s (Toyouura sand).

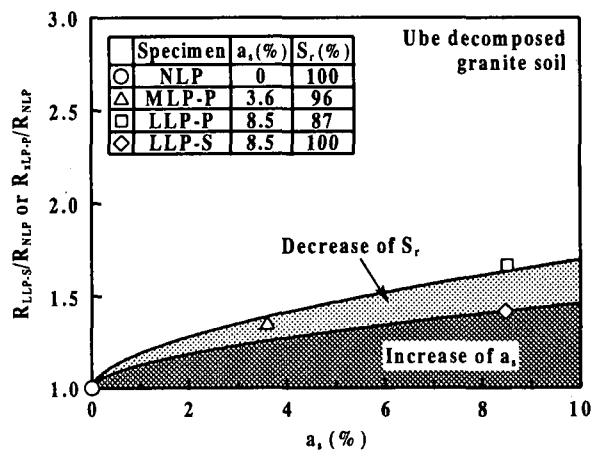


Fig. 6 Relationship between R_{LL-P-S}/R_{NLP} or R_{XLP-P}/R_{NLP} and a_s (Ube decomposed granite soil).

すると豊浦砂供試体の応力比は 0.19 であるのに対し、細粒分を 11.2%含むまさ土供試体の応力比は 0.15 で、豊浦砂供試体の 8 割弱の値となっている。この結果は、まさ土供試体の液状化抵抗が細粒分含有率 $FC=0\sim10\%$ の間で急激に低下し、 $FC=10\%$ の供試体の乾燥密度が最も大きいにも関わらず、その液状化抵抗が $FC=10\%$ の土試料の 70%程度であったという、佐藤ら⁴⁾の研究結果に近いものであった。

Fig. 5, Fig. 6 には、それぞれ豊浦砂供試体およびまさ土供試体の実験結果について、 $n_L=20$ の時の液状化抵抗 $R (=v/\sigma'_{\omega})$ を NLP-test のそれと除して得られる液状化抵抗比と a_s の関係を示す。両図から、 a_s の増加と S_r の減少が生石灰パイルを打設した供試体の液状化抵抗の増加にどのような割合で関与するのかが分かる。すなわち、LLP-S 供試体の液状化抵抗の増加が a_s の増加によるのに対して、MLP-P, LLP-P 供試体の液状化抵抗の増加は a_s

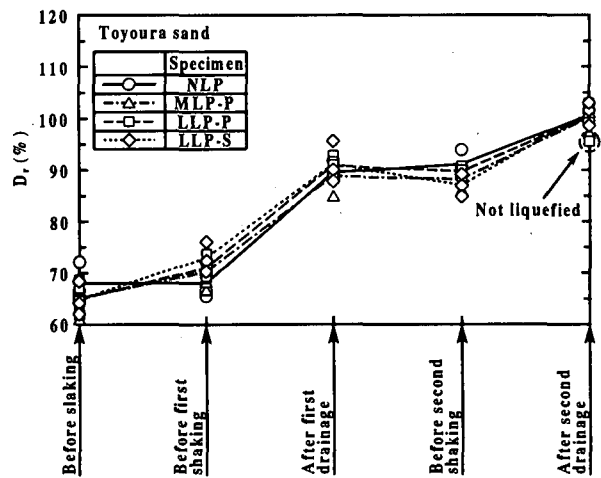


Fig. 7 Variation of D_r of each specimen before slaking, before first shaking, after first drainage, before second shaking and after second drainage (Toyouura sand).

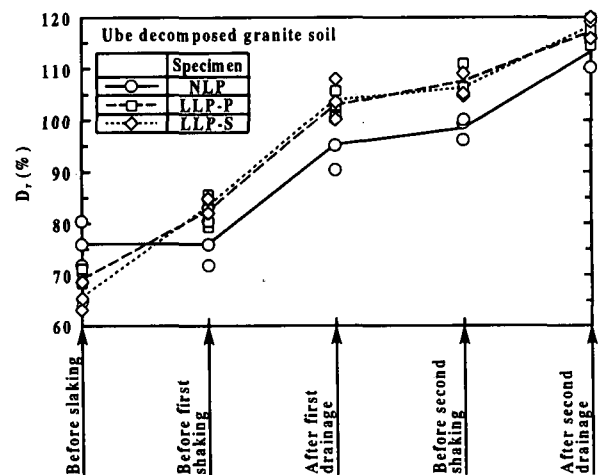


Fig. 8 Variation D_r of each specimen before slaking, before first shaking, after first drainage, before second shaking and after second drainage (Ube decomposed granite soil).

の増加と S_r の減少との相乗効果によることを示している。また、両図を比較すると、まさ土供試体の液状化抵抗の全増加量に占める a_s の増加による増加量と S_r の減少による増加量の割合が、豊浦砂供試体のそれとは大きく異なることが分かる。

Fig. 7, Fig. 8 には、それぞれ豊浦砂供試体およびまさ土供試体について、初回の液状化実験および再液状化実験での相対密度 D_r の変化状況を示す。これらの図には、初期状態として生石灰パイルの消化反応前の D_r も併記している。両図から、各供試体の D_r は、初回の液状化後の排水圧密により 20%程度増加し、再液状化後の排水圧密でさらに漸増していることが分かる。なお、再液状化後のまさ土供試体の D_r は全て 100%を超えている。

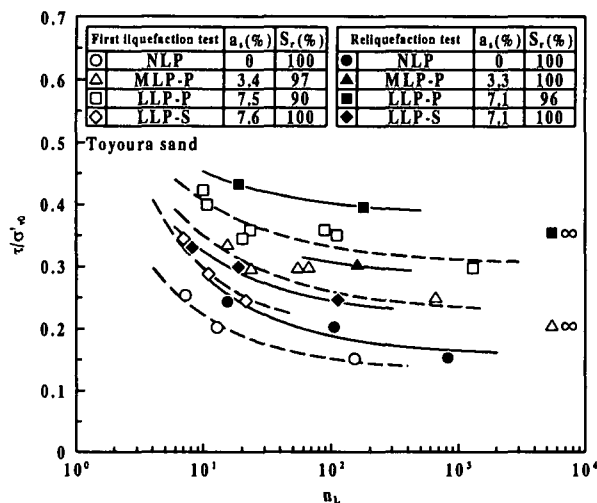


Fig. 9 First liquefaction and reliquefaction curves obtained by NLP,MLP-P, LLP-P and LLP-S-tests (Toyoura sand).

また、まさ土供試体について、生石灰パイルの消化反応前後の D_r の変化量に着目してみると、Fig. 7 に示す豊浦砂供試体のそれよりもかなり大きく、上載圧や生石灰パイルの膨張圧に起因するまさ土供試体の密度変化が、豊浦砂供試体のそれに比べて大きいことが分かった。

Figs. 9, 10 には、それぞれ豊浦砂供試体およびまさ土供試体について、初回の液状化実験および再液状化実験から得られた液状化抵抗曲線を示す。両図から、豊浦砂供試体およびまさ土供試体の再液状化抵抗曲線（実線）は、いずれも初回の液状化抵抗曲線（破線）より上位にあることが分かる。すなわち、初回の液状化後に各供試体の D_r が 20% 程度増加した結果、完全飽和供試体である NLP 供試体および LLP-S 供試体だけでなく、液状化後の飽和度 S_r の増加により、その液状化抵抗の低下が危惧された MLP-P 供試体および LLP-P 供試体の再液状化抵抗も増加していることが明らかになった。また、豊浦砂供試体の MLP-P 供試体および LLP-P 供試体の初回の液状化抵抗および再液状化抵抗に着目すると、 a_s の増加に伴って液状化抵抗が増加することが確認された。さらに、まさ土供試体の初回の液状化抵抗および再液状化抵抗は、豊浦砂供試体のそれらに比べていずれも小さいことが分かった。これらの結果から、砂質土の液状化対策としての生石灰パイル工法は初回の液状化だけでなく再液状化に対しても有効であることが明らかになった。

5. まとめ

生石灰パイルを打設した砂地盤の初回の液状化特性および再液状化特性を調べるために、砂層中央部に生石灰パイルを打設した供試体を作製して振動台実験を行った。結果は以下のように要約できる。

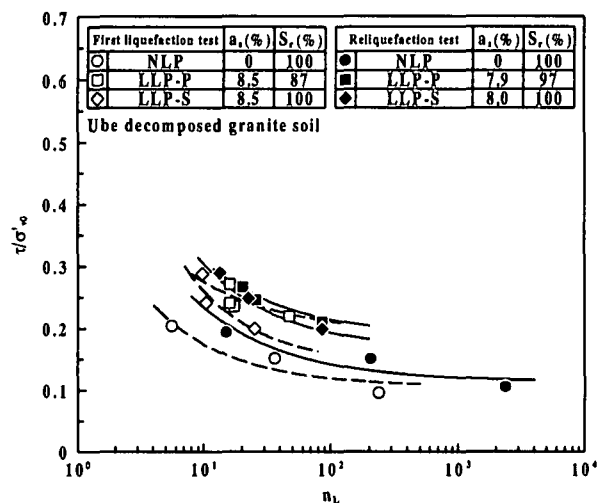


Fig. 10 First liquefaction and reliquefaction curves obtained by NLP,LLP-P and LLP-S-tests (Ube decomposed granite soil).

1) LLP-S 供試体の液状化抵抗の増加が a_s の増加によってもたらされるのに対し、MLP-P 供試体および LLP-P 供試体の液状化抵抗の増加は a_s の増加と S_r の減少との相乗効果によってもたらされる。また、 a_s の増加による液状化抵抗の増加量は豊浦砂供試体の方がまさ土供試体よりも大きい。

2) 豊浦砂供試体およびまさ土供試体の再液状化抵抗曲線は、いずれも初回の液状化抵抗曲線より上位にあり、生石灰パイルは初回の液状化および再液状化対策として効果があることが示された。

3) 細粒分を 11.2% 含むまさ土の NLP 供試体の液状化抵抗は、豊浦砂供試体の 8 割弱の値である。

4) まさ土供試体の D_r の増加に伴う再液状化抵抗の増加量は、豊浦砂供試体のそれに比べて小さい。

謝辞：実験ならびに結果の整理を手伝って頂いた、篠原智士氏に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ohara, S., Yamamoto, T. and Yurino, H. (1992) : Experimental Study on Reliquefaction Potential of Saturated Sand Deposit, Proc. of the 10th WCEE, Vol. III, pp.1425~1430.
- 2) 大原資生, 山本哲朗 (1989) : 繰返しせん断を受けているときの砂の土圧係数について, 土木学会論文集, 第 412 号/III-12, pp. 89~97.
- 3) 山本哲朗他 4 名 (1996) : 生石灰パイル液状化対策に関する振動台実験, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp. 278~279.
- 4) 佐藤正行, 小田匡寛, 柴田昌則他 (1996) : 埋立地盤の液状化特性に及ぼす細粒分の影響 (その 2), 第 31 回地盤工学研究発表会論文集, pp. 975~976.