

(74) 液状化対策としてのグラベルドレーン工法に関する実験的研究

山口大 工学部 正員 大原資生 山口大 工業短期大学部 正員 ○山本哲朗

1 まえがき 飽和砂地盤の液状化対策の一つであるグラベルドレーン工法に関する研究は主に飽和砂内の間隙水圧の上昇量あるいは分布に着目して行われている。^{1)~3)}したがって、グラベルドレーン工法などの程度有差であるのかという点、さらにはグラベルドレーンの設置の方法等には検討の余地が残されていると考えられる。

本研究は図-1に示す振動台を用いた実験装置を用いてグラベルドレーンの効果を実験的に明らかにすることを目的とした。すなわち、砂層内で液状化を生じた領域と液状化を生じない領域の境界線を求めることである。

2. 実験装置 実験に用いた装置を図-1に示す。砂箱①は厚さ4mmの鋼板で作られている。箱の内寸法は長さ、幅、深さが各々100×35×65cmである。

間隙水圧を測定する小型圧力変換器は振動方向に平行な箱の側壁に全部で8個取り付けられるようになっているが、今回の実験では5個を用いた。圧力変換器の取り付け位置は図-1に示すように箱の上端から深さ25cmでは、箱の左端から25cmおよび50cmである。深さ50cmでは、箱の左端から10cm、25cmおよび50cmの位置である。

砂層のせん断変形をできる限り拘束しないようにするために、砂箱の振動方向に直角な壁の内側全面に厚さ5cmのフォームラバーを貼り付けた。このフォームラバーに持して壁のいすれかの端には長さ、幅、深さが各々10×35×65cmのナイロン袋が置かれた。ナイロン袋には縦横1cm間隔に直径3mmの孔があげられており、袋の中にドレーン材としてガラスビーズを詰めた。

3. 試料および実験方法 実験に用いた砂は豊浦砂であり、グラベルドレーン材として用いたガラスビーズの形状は球形ないしやや扁平形で、粒度は粒径が4.5~5.5mmの範囲に入るものである。表-1は豊浦砂およびガラスビーズの物理的性質を示す。

実験は次のようにして行った。まず、砂箱内に深さ約55cmまで水を入れ、その中に湿潤状態の豊浦砂をスコップで水面より静かに流し込む。同時に、砂箱の一方の端に置いた孔あきナイロン袋にガラスビーズを詰める。今回の実験では砂層の厚さは約50cm、長さは80cmで、水位は砂層表面と一致させた。砂箱内に詰めた飽和砂層およびグラベルドレーン層の相対密度の平均値($D_{r,av}$)は各々33.6%、34.2%であった。

このように準備された飽和砂層に振動数が3Hzのほぼ正弦波状加速度を与える振動実験を行った。与えられた加速度は水平震度(k_h)に換算してほぼ0.11、0.16、0.20の3通りである。振動は砂層内のすべての位置の間隙水圧が最大となり、その後1分消散するまで継続された。

実験中に所定の位置での間隙水圧および振動台の加速度を各々小型圧力変換器(容量:1kgf/cm²)、加速度計(容量:10g)で測定した。これらの諸量およびその変形はすべてペンオシロに記録した。

実験はグラベルドレーンがある場合とない場合について行われた。また、グラベルドレーンがある場合はグラベルドレーンを箱の左端あるいは右端に置いた実験を行い、グラベルドレーンと砂層の接触部からの水平距離が10、35、60、75cmの位置での間隙水圧の測定値をうるようにした。

4. 結果および考察 図-2は実験記録の一例であり、水平震度(k_h)が0.20の時の記録である。この実験はグラベルドレーンが図-1に示す位置に

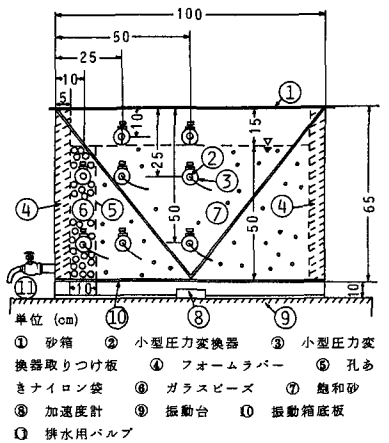


図-1 実験装置

表-1 豊浦砂およびガラスビーズの物理的性質

	豊浦砂	ガラスビーズ
Gs	2.63	2.50
D _{max} (mm)	0.84	5.5
D ₅₀ (mm)	0.27	5.3
U _c	1.6	1.2
e _{max}	1.028	0.812
e _{min}	0.678	0.689
k ₁₅ (cm/s)	0.026	6.55
	(D _r =33.7%)	(D _r =34.1%)

置かれた状態で行われたものである。6本の記録線は上から順に振動台の加速度、測定点M-2, D-2, M-1, D-1, D-0における間隙水圧の波形を示す。

間隙水圧の測定点の位置を示す、 $l/2L$ および $h/2H$ は各々測定点のドレーンと砂層の接觸部からの水平距離(l)および砂層表面の深さ(h)を砂層の長さ(L)および砂層の深さ(H)の2倍で除した値である。このように、測定点の位置を無次元化し理由は次のとおりである。

図-3に示すように砂層の長さ方向の間隙水圧分布は、間隙水圧がドレーン内で最小で、砂層の端部で最大となると考えられる。このことと破線が示すように、グラベルドレーンが2Lの間隔で配置された状態となしして実験を行っているので、無次元化するための基本量を2Lとした。また、深さ方向についても底面が不透水面となるので同様な考えから2Hを基本量とした。なお、図-3において、測定点を実線の丸印で示した位置および破線の丸印で示した位置は各々グラベルドレーンが砂箱の左端および右端に置かれた場合の間隙水圧の測定位置を示す。

図-2から、各測定点での間隙水圧は一度最大となり、その後次第に減少(消散)していくことがわかる。なお、測定点M-2, D-2は完全液状化(間隙水圧が初期有効鉛直圧に等しくなる)を生じ、M-1, D-1およびD-0(ドレーン内)は完全液状化を生じていない。また、D-0の間隙水圧上昇は他の位置の間隙水圧よりも著しく小さい。これらはドレーンが砂層内に生じた間隙水圧の消散に寄与する結果と考えられる。ところで、D-1での間隙水圧波形は他に比して振幅が大きいが、この原因としては、振動中に壁に作用する動水圧が間隙水圧に重畳しているためと思われる。D-0, M-1でもその傾向がやや見られる。

図-4(a), (b)は水平震度(k_h)が各々0.21, 0.11の実験から得られた、各測定点での間隙水圧比 $u/(\sigma_v)_0$ の、せん断応力の繰返し回数ごとの変化を示す。ドレーンがある場合の実験結果である。図中、 $\tau/(\sigma_v)_0$ は応力比を示す。 u は間隙水圧である。また、 $(\sigma_v)_0$, τ は各々初期有効鉛直圧、せん断応力であり、(1), (2)式で与えられる。

$$(\sigma_v)_0 = \gamma_{sub} \cdot h \quad (1)$$

$$\tau = k_h \cdot \gamma_{sat} \cdot h \cdot \gamma_d \quad (2)$$

ここで、 h , k_h : 前述, γ_{sub} : エの水単重量, γ_{sat} : エの飽和単重量, γ_d : 深さによる低減係数⁽⁴⁾
 今回の実験では砂層厚が50cmで浅いため $\gamma_d = 1$ とする。したがって、砂層に作用する応力比は(3)式で与えられる。

$$\tau/(\sigma_v)_0 = k_h \cdot \gamma_{sat} / \gamma_{sub} \quad (3)$$

せん断応力の繰返し回数 n は、所定の加速度に達するまでの加速度の等価パルス数 n なら、せん断応力の等

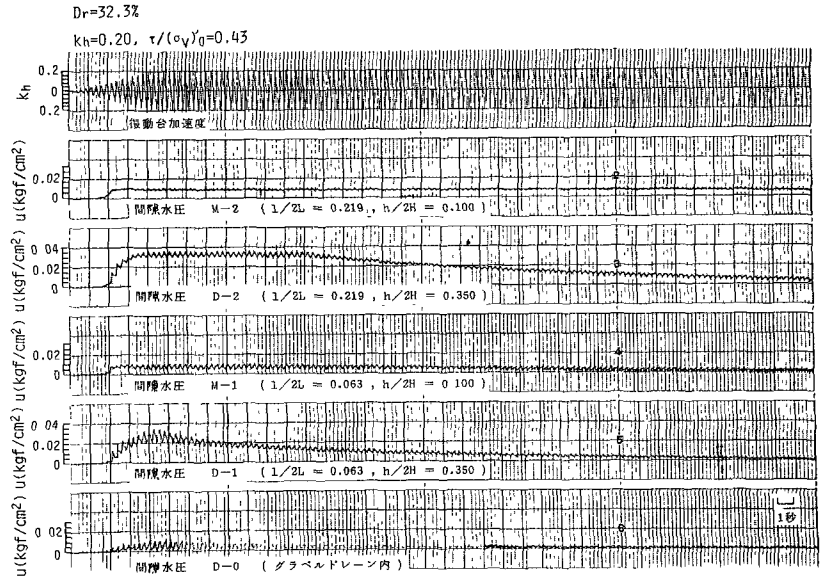


図-2 実験記録の一例

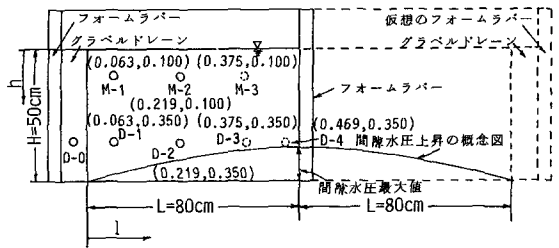


図-3 各間隙水圧測定点での $(l/2L, h/2H)$ の値の一例 (グラベルドレーンが砂箱の左端にあって砂層厚が50cmの場合)

価繰返し回数 n_p を(4)式で求め、それを所定のせん断応力の繰返し回数に加えて求めた。⁵⁾

$$n_p = \sum k_i \cdot n_i / k_h$$

ここで、 k_h : 前述、 k_i 、 n_i は各々加速度を新增する段階での水平震度およびその繰返し回数を示す。

図-4(a), (b)から、 $k_h = 0.21$ (図-4(a)) ではドレーン内および測定点D-1を除けば、各点の間隙水圧比 $u/(\sigma_v \gamma_0)$ が1まで上昇していることから、それらの点での砂層は完全液状化

化を生じていることになる。一方、 $k_h = 0.11$ の場合(図-4(b))には、 $h/2H = 0.100$ (M-1, M-2, M-3) ではない点でも完全液状化を生じ、 $h/2H = 0.350$ (D-0, D-1, D-2, D-3, D-4) では液状化を生じていないことがわかる。 $k_h = 0.21$ および 0.11 でD-1では液状化を生じていないのは砂層内に生じた間隙水圧がグラバルドレーンによって消散されるためと考えられる。

さらに、本実験では砂層の液状化は浅い所から深い所に進行していると思われる。たとえば $k_h = 0.21$ の3回の実験から求めた完全液状化を生じるまでのせん断応力の繰返し回数 n はM-1, M-2, M-3の位置では、各々6.4回(振動時間が約2.1秒)、4.6回(約1.5秒)、2.0回(約0.7秒)で液状化を生じている。一方、D-1では液状化は起こらず、D-2, D-3の位置で各々 $n = 9.2$ 回(約3.1秒)、6.0回(約2.0秒)で液状化を生じている。

次に、間隙水圧比の低下に注目すると、 $k_h = 0.21, 0.11$ において、 $h/2H = 0.350$ (D-1, D-2, D-3の位置)での間隙水圧比の低下速度は $h/2H = 0.100$ (M-1, M-2, M-3の位置)でのそれよりも大きいことがわかる。これは砂層の深い所での間隙水圧の上方向への消散によって、浅い所の間隙水圧の消散が遅れるためと考えられる。

図-5(a), (b)は各々 $k_h = 0.20, 0.10$ におけるグラバルドレーンがない場合の実験から得た $u/(\sigma_v \gamma_0)$ の繰返し回数ごとの値を示す。 k_h がほぼ0.20の場合の結果である図-4(a)と図-5(a)を比較すると、グラバルドレーンの有無によらず、間隙水圧の上昇および消散の様子はほぼ同じであることがわかる。

これに対して、 k_h がほぼ0.10の場合の結果である図-4(b)と図-5(b)に示すように砂層の浅い所だけが液状化を生じる場合には、グラバルドレーンがない場合の深い所の間隙水圧比の最大量はグラバルドレーンがある場合のそれより大きい。たとえば、その比率はD-1, D-2の位置において、各々2.1, 1.4となる。また、図-4(b)と図-5(b)を比較して間隙水圧の消散の速度はグラバルドレーンが

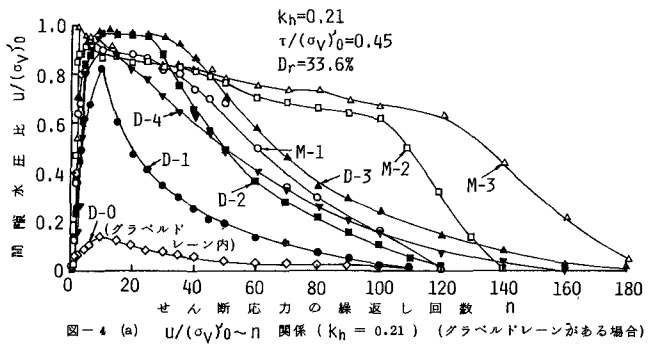


図-4 (a) $u/(\sigma_v \gamma_0) \sim n$ 関係 ($k_h = 0.21$) (グラバルドレーンがある場合)

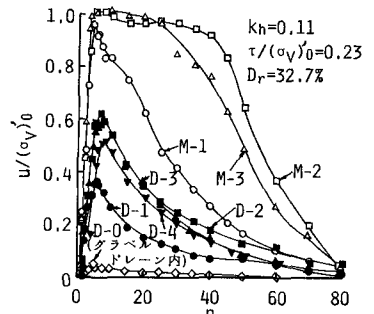


図-4 (b) $u/(\sigma_v \gamma_0) \sim n$ 関係 ($k_h = 0.11$) (グラバルドレーンがある場合)

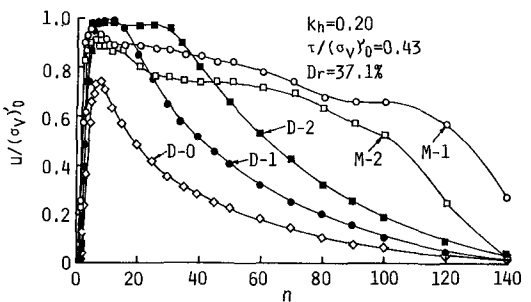


図-5 (a) $u/(\sigma_v \gamma_0) \sim n$ 関係 ($k_h = 0.20$) (グラバルドレーンがない場合)

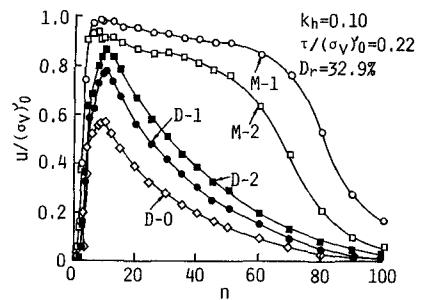


図-5 (b) $u/(\sigma_v \gamma_0) \sim n$ 関係 ($k_h = 0.10$) (グラバルドレーンがない場合)

ある場合の方が大きいことがわかる。この結果は、グラベルドレーンの砂層内の間隙水圧の消散へ及ぼす、効果はある震度以下の振動の場合に有効であることを意味する。このことについては震度が大きい場合はドレーンに間隙水が移動する余裕を与えない形で液状化が急速に生じるといったことであろう。

図-6は $l/2L$ 、 $h/2H$ を各々横軸、縦軸に取って、各震度毎に液状化を生じた結果および液状化を生じない結果を区別して示した。図中、 $(D_r)_{av}$ は各震度での実験の砂層の相対密度の平均値を示す。

測定点が限られているので、砂層が液状化を生じる場合とそうでない場合の境界線は厳密には決定することはできないが、その境界線はほぼ図中の破線でお示されよう。すなわち、 $k_h=0.11$ の場合、ほぼ点M-1、D-2、D-3を結ぶ曲線より下方では液状化を生じていない。また、 $k_h=0.16$ 、 0.20 の場合にはほぼM-1とD-1を結ぶ曲線よりグラベルドレーンに近い側では液状化を生じていない。

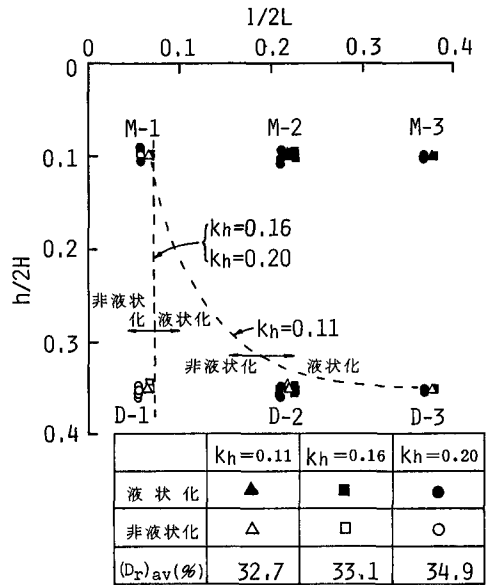


図-6 各震度における液状化発生の境界線

5. 結論 飽和砂層の液状化対策の一つであるグラベルドレーン工法に関する実験的研究を振動台を用いて行った。砂箱に詰められた飽和砂層は長さ、幅、深さが各々 $80 \times 35 \times 50 \text{ cm}$ である。また、箱の隅に置いて長さ、幅、深さが各々 $10 \times 35 \times 50 \text{ cm}$ のグラベルドレーンはカラスビーズ（粒径 $4.5 \sim 5.5 \text{ mm}$ ）で作られた。振動中、砂層内の間隙水圧の変化を砂箱の側壁の5ヶ所に取り付けた小型圧力変換器で測定した。

その結果、砂層の液状化は浅い所から生じ、また浅い所での間隙水圧の消散は深い所のそれよりも遅いことが示された。グラベルドレーンが砂層内に生じた間隙水圧を消散させる効果は、振動の加速度が大きくなると減少する。この原因は大きい加速度が加わったときの砂層の液状化が急速に生じるため、間隙水圧がドレーンに移動する余裕がなくなると考えた。本実験では水平震度 (k_h) が0.2の加速度で、グラベルドレーンの効果は認められなかった。

$l/2L$ 、 $h/2H$ を各々横座標、縦座標に取ったグラフ上で、 $k_h=0.11$ 、 0.16 、 0.20 において液状化を生じる場合とそうでない場合の境界線をほぼ決めることができた。ここで、 L 、 l 、 h 、 H は各々砂層の長さ、間隙水圧の測定点のグラベルドレーンからの水平距離、砂層表面からの深さおよび砂層の全層厚である。

最後に実験を手伝ってくれた本学技官鈴木隆氏、学生田本真一君に謝意を表す。

本研究の一部は昭和57年度文部省科学研究費（奨励研究（A））で行われたことを付記する。

参考文献 1) Seed, H.B. and Booker, J.R.: Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, Jour. of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 103, No. GT 7, pp. 757-768, 1977
 2) Tokimatsu, K and Yoshimi, Y.: Effect of Vertical Drains on the Bearing Capacity of Saturated Sand During Earthquakes, Proc. Int. Conf. on Eng. for Protection from Natural Disasters, pp 643-655, 1980
 3) Sasaki, Y and Taniguchi, E.: Shaking Table Tests on Gravel Drains to Prevent Liquefaction of Sand Deposits, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 3, pp 1~14, 1982 4) Seed, H.B and Idriss, I.M.: Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Jour. of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp 1249-1273, 1971 5) O-hara, S.: An Experimental Study on the Liquefaction of Saturated Soil, Using Shaking Table, Technology Reports of the Yamaguchi University, Vol. 1, No. 2, pp 261-270, 1973