

(財) 電力中央研究所 田中 幸久
三上設計事務所 大谷 俊夫

1. はじめに

近年になって締固め工法とは改良原理の異なる飽和砂の地震時液状化対策工法が提案されるに至っている。その内のひとつに、礫のように砂よりも大きな透水性を有する材料より成る柱を排水工として地中に設置することによって、地震時の砂層内の過剰間隙水圧の上昇を抑えて液状化を防止しようとするものがある。通常、このような目的で設置されている礫の柱をグラベルドレーンまたは碎石ドレーンと呼ぶことが多いが、近年、柱以外の形で用いられることもあるので、本報告においては特に円柱として用いられるものに関しては、グラベルパイルとよぶことにしたことを予め断っておく。地震時に地盤内で蓄積される過剰間隙水圧の大きさを低減させる効果があるということは、既に少なくとも室内振動台実験では確認されている。しかし、地震時安定性に関する他の面（加速度応答特性、地表面の残留沈下量）に関しては、不明な点が多いのが現状であろう。そこで、本研究においては、グラベルパイルを設置した小型模型地盤に対して振動台実験を行い地震時安定性に関する検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いた砂と礫の物理的特性と透水性を表1に示す。また、粒度分布特性

砂の諸定数	高萩砂
土粒子の比重 (Gs)	2.658
最大間隙比 (e _{max})	1.2095
最小間隙比 (e _{min})	0.6080
透水係数 (Dr=42.0)	5.684×10^{-3}
K15 (Dr=53.5)	3.682×10^{-3}
(i=1.180)(Dr=72.4)	1.932×10^{-3}

礫の諸定数	礫(2.0~4.76mm)
土粒子の比重 (Gs)	2.651
透水係数 (i=1.041)	1.103
K15 (i=0.484)	1.935
(i=0.340)	2.486

表1. 実験に用いた砂と礫の物理的特性と透水性

を図1に示す。平均粒径がかなり小さい砂を用いた理由は、非改良地盤については振動中の排水が顕著に生じることを避けるためである。i=0.5の時の礫の透水係数のDr=50(%)の砂の透水係数に対する比は、450倍程度である。グラベルパイルの透水性による圧密遅れを考慮するための補正係数(C α)は、初期過剰間隙水圧分布を三角形分布とすると次式で近似的に計算される¹。

$$C\alpha = 1.0 + 1.1848 \frac{N^2 - 1}{N^2 \left(\frac{N^2}{N^2 - 1} \ln N - \frac{3N^2 - 1}{4N^2} \right)} R \quad (1)$$

ここで、Rは、ウェルレジスタンス係数と呼ばれ次式で表される。また、Nは杭径比 (r_e/r_w) である。

$$R = \frac{8}{\pi^2} \frac{k_r}{k_w} \left(\frac{H}{r_w} \right)^2 \quad (2)$$

(k_w:グラベルパイルの透水係数, k_r:砂の水平方向透水係数, H:砂層の厚さ, r_w:グラベルパイルの半径, r_e:有効円の半径)実際の模型地盤の寸法を考慮して、H=21.0 (cm), r_w=2.65 (cm), k_w/k_r=450, N=2.84を(1), (2)式に代入してC α を計算するとC α =1.25となり、パイルの透水性が地盤内の過剰間隙水圧の消散速度に及ぼす影響

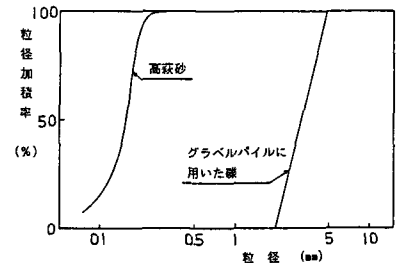


図1. 実験にもちいた砂と礫の粒度分布特性

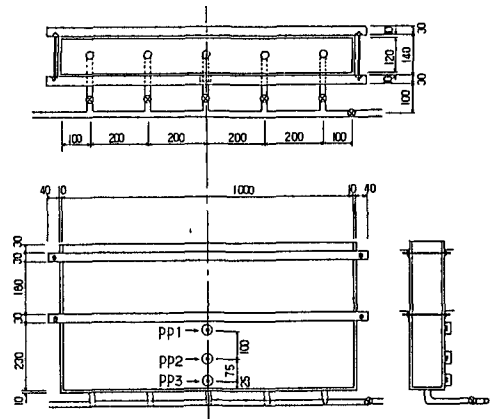


図2. 実験に用いた土槽

は比較的小さい。

図2に実験に用いた土槽を示す。土槽内側の底面には、すべりが生じにくいように粒径1～2mmの礫を接着剤で貼り付けた板をおいている。地盤は、空中落下法により作成した。その際、地盤の密度は砂の吐き出し口の隙間を調節することによりコントロールした。グラベルパイルは、2枚重ねのナイロントッキングを内側に広げてつるした塩化ビニール製のケーシングの中へ礫を投入することにより作成した。ちなみに、ナイロントッキングは、グラベルパイルの目詰まり防止用である。ケーシングの外径は5.3 (cm)であり、グラベルパイルの間隔は14.8 (cm)である。土槽の底面から水を供給し水位を上昇させることにより地盤を飽和させた。

振動台の加振条件は、20 (Hz) , 20波の正弦波入力である。この振動数は、実際の地震動の卓越振動数よりかなり大きい。その理由は、振動台を加振することにより模型地盤中を伝播するSH波の波長(λ_m)の模型地盤の深さ(H_m)に対する比(λ_m/H_m)を実物大の地盤が地震動を受ける場合に近づけ、現象そのものを実際のものに近づけようとしたためである。ただ、具体的に選んだ振動数の値(20 Hz)には特別な根拠はない。

間隙水圧計は、土槽中央の土槽底面から、2.5 (cm) , 10.0 (cm) , 20.0 (cm) の位置に3箇所設置した。また、加速度計は、振動台の部分と地表面の2箇所に設置した。振動終了後の地表面の残留沈下量は、土槽の上端部と地表面との距離を測定することにより求めた。また、加振中の地表面沈下量は、非接触型の変位計により測定した。

3. 実験結果

図3 (a) , (b) は、ほぼ同じ密度の非改良地盤と改良地盤をほぼ同じ台加速度で加振した時の加速度、過剰間隙水圧、沈下量の時刻歴である。改良地盤内の過剰間隙水圧の時間的な最大値は、非改良地盤のそれよりも小さい。また、振動終了後の改良地盤内の残留過剰間隙水圧の消散する速さは、非改良地盤のそれと比べて明らかに大きい。以上の結果から、グラベルパイルには、地盤内で蓄積される過剰間隙水圧を低減させる効果があることは明らかである。図4は、入力加速度レベルがだいたい同じ場合の改良地盤と非改良地盤の最大過剰間隙水圧の値を横軸を地盤の相対密度として示したものである。これを見ても、グラベルパイルの過剰間隙水圧低減効果は明らかである。次に、地表面加速度についてみると、非改良地盤では水圧の値が比較的大きい加振時間後半となると地表面加速度はかなり小さくなる。この理由は、過剰間隙水圧の上昇により地盤が軟弱化し、せん断波が伝播しにくくなるためと考えられる。図5

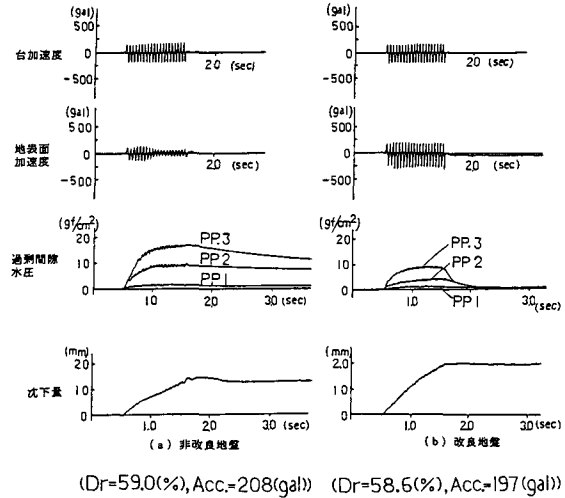


図3. 振動台実験の実測例

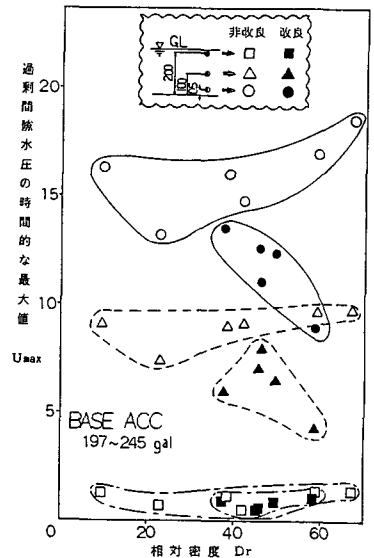


図4. 改良地盤、非改良地盤の過剰間隙水圧の値の時間的な最大値と相対密度の関係

に示すのは、地表面加速度の最大値の台加速度の最大値に対する比（加速度応答倍率）と地盤内の間隙水圧比の最大値の関係である。加速度応答倍率と地盤内の間隙水圧比の間には改良、非改良および地盤の密度にもあまり影響されないユニークな関係があることがわかる。次に、改良地盤と非改良地盤の加振終了後の地表面沈下量の残留値を示したものが図6である。図6は、ノギスで測定したものだけをプロットしたものである。図6によれば、改良地盤と非改良地盤の地表面沈下量にはほとんど差がない。

4. 改良地盤内の過剰間隙水圧及び体積変化量の計算式について

第一筆者らは既にグラベルパイルによる改良地盤内の地震時過剰間隙水圧の計算式として次の式を提案している¹。

$$(ru\ ave)_{max} = \frac{Neq}{N_L} \frac{\beta}{e^{\beta}-1} [1 - \exp\{-\frac{Neq}{N_L} \beta - \alpha td\}] \quad (2)$$

また、グラベルパイルによる改良地盤内の地震時残留体積変化量の計算式として次の式を提案している。

$$(\epsilon v)_{max} = mv \cdot \sigma'_{vo} \frac{Neq}{N_L} \frac{\beta}{e^{\beta}-1} [\alpha td - \frac{Neq}{N_L} \beta \{1 - \exp(-\frac{Neq}{N_L} \beta - \alpha td)\}] \quad (3)$$

(ただし、 $(ru\ max)_{max} < 1$)

ここで、 $(ru\ ave)_{max}$: 間隙水圧比の水平断面内平均値の時間的な最大値、 $(ru\ max)_{max}$: 間隙水圧比の水平断面内最大値の時間的な最大値、 td : 地震動の有効継続時間、 α : 間隙水圧の対数消散速度、 Neq : 等価繰り返し回数、 N_L : 非排水条件下で液化に要する繰り返し回数、 β : 非排水条件下の間隙水圧上昇曲線の形状を変化させるパラメータ(図7)、 mv : 砂の体積圧縮係数、 σ'_{vo} : 鉛直有効土カブリ圧である。(2)式による計算結果とシード (Seed, H.B) らによ

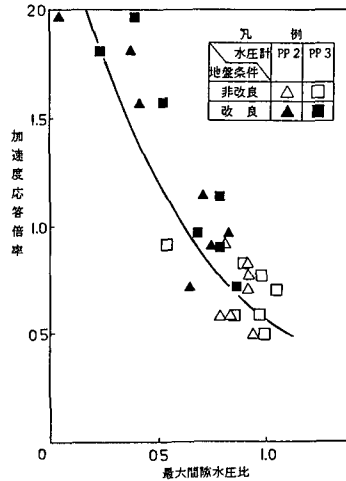


図5 加速度応答倍率と間隙水圧の最大値の関係

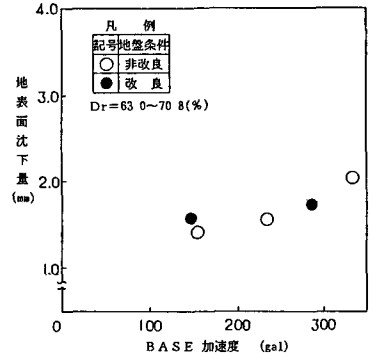


図6 加振終了後の地表面沈下量

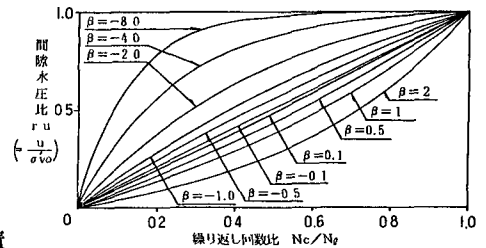


図7 非排水条件下の間隙水圧上昇曲線の形状

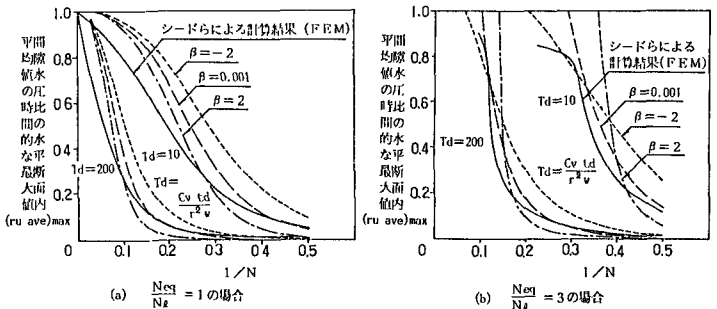


図8 (2)式による計算結果とシード (Seed, H.B) らによる計算結果との比較

る計算結果と比較したものが図8である。なお、(2),(3)式はともに時間的的最大値を求める式であるが、(ru ave)または(ru max), ϵv の値を経時的に計算することも可能である。

5. 実験結果と計算結果の照合

地盤内の間隙水圧の発生・消散に関する基本方程式は次式である。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}_g}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_d}{\partial t} \quad (4)$$

グラベルパイルによる改良地盤の場合、同一水平断面については、ほぼ次式が成立することを筆者らは既に実験的に示している³。

$$\frac{\partial \bar{u}_d}{\partial t} = -\alpha \bar{u} = f(r_{u \text{ ave}}) \quad (5)$$

一方、3.において、地表面加速度の台加速度に対する応答倍率は、改良、非改良および地盤の密度にあまり影響されないほぼユニークな関係があることを指摘した。地表面の加速度の大きさと地盤内に作用するせん断応力には、強い相関関係がある。だから、今回行った実験に関しては、台加速度と密度が等しければ、改良、非改良を問わずにほぼ次式が成立する。

$$\frac{\partial \bar{u}_g}{\partial t} = g(r_{u \text{ ave}}) \quad (6)$$

このことは、(2),(3)式を用いる場合、両式に含まれている $N_{eq}/N_k, \beta$ は、対象としている改良地盤と相等しい密度、台加速度の非改良地盤に対する実験結果から定めてよいことを意味している。非改良地盤に対する結果から求めた $N_{eq}/N_k, \beta$ と改良地盤の加振後の間隙水圧の消散曲線から求めた α (図9)を用いて改良地盤内の間隙水圧の経時変化を計算したものが図10である。更に、図9に示すように α の深度方向分布を仮定し、 α と k から mv を逆算し、それを使って ϵv を求め更に深度方向に積分することにより改良地盤表面の沈下量を計算して実測と比較したものが図10である。この際簡単のためにグラベルパイルの透水性は充分大きいとしている。

図10を見ると間隙水圧に関しては、計算結果は実測値よりも大きい。沈下量に関しては、計算結果は実測結果に比べて小さい。この原因はあまりはっきりしないが、計算仮定が妥当でなかったこと他にも地表面付近の砂の物性に対する仮定が妥当でなかったこと、地盤作成時に地表面近くがゆるんだり、沈下測定用のターゲットが若干埋没したこと等の実験的な誤差も考えられる。

6. まとめ

本研究により得られた知見を以下に記す。

- ①飽和砂地盤にグラベルパイルを設置することは液状化の防止に対して有効であるが、その反面地表面の応答加速度は、過剰間隙水圧の上昇を抑えたがために非改良の場合よりもかえって大きくなる。
- ②地表面の残留沈下量の大きさに関しては、改良、非改良の差はあまりなかった。
- ③第一筆者らの提案する過剰間隙水圧および沈下量の計算式を適用したところ、間隙水圧については実験結果に比べて大きく、沈下量については実測値よりも小さかった。

参考文献

- 1) 田中、他3名(1985),グラベルパイルによる改良地盤の地震時安定性の簡便な検討方法について、電力土木、第196号、pp.46-55。
- 2) Seed, H.B. and Booker, J.R. (1977), Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, J. GED, ASCE, Vol. 103, No. GT 7, pp.757-768
- 3) 田中、国生、江刺、松井(1984),グラベルパイルの液状化防止効果、電力土木、第188号、pp.11-20。

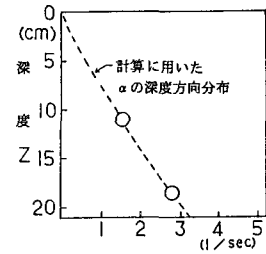


図9 間隙水圧の対数消散速度

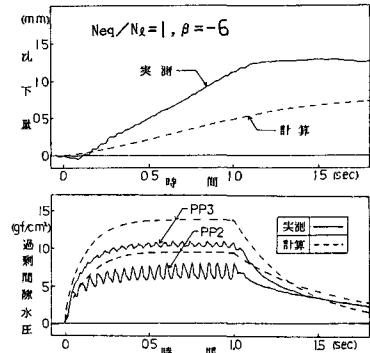


図10 計算と実測との比較
($D_r=45.5(\%)$, $Acc=220(gal)$)