

グラベルパイルによる水平地盤の二次液状化防止について

ON PREVENTING SECONDARY LIQUEFACTION OF LEVEL GROUND
USING GRAVEL PILES

田中幸久*・国生剛治**・江刺靖行***・松井家孝****

Yukihisa TANAKA, Takaji KOKUSHŌ, Yasuyuki ESASHI and Iyetaka MATSUI

In this research, upward seepage flow tests and analysis have been performed for the model ground with or without a single pile, in order to investigate the effects of gravel piles on the stability of surface soil against so-called secondary liquefaction. The results calculated by analytical procedure are in good agreement with the experimental results for every case tested in this research. Finally, authors estimated the effects of gravel piles against secondary liquefaction by calculating bearing capacity of the improved ground considering excess pore pressure in the ground.

1. はじめに

飽和砂地盤の地震時液状化の問題は、土質工学上の重要な問題として取り上げられてきた。そして、地震を受けた飽和砂地盤が液状化に至るまでのメカニズムの解明と対象とする地盤が設計地震入力に対して液状化するか否かの判定方法の確立に大きな労力が払われてきた。一方、具体的な液状化対策となるとサンドコンパクションパイル工法に代表される締固めによる地盤改良工法が現在に至るまで主流である。しかし、近年になって締固め工法とは改良原理の異なる液状化対策工法が提案されるに至っている。そのうちの1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る礫の柱をグラベルドレインまたは砕石ドレインとよぶことが多いが、近年、柱以外の形体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あらかじめ断っておく。既報において著者らは、地震動に伴う繰り返しせん断による過剰間隙水圧の蓄積速度を小さくする目的でグラベルパイルを設置する際の簡易設計式について述べた¹⁾。本論文においては、いわゆる二次液状化の防止効果について述べる。

地震動終了時に地盤内に残留した過剰間隙水圧は、その後その空間分布を変えながらしだいに逸散してゆく。構造物の沈下や地下構造物の浮上で代表される液状化による被害の多くは、この逸散過程で起こっている。石原²⁾は、相対密度が深さ方向に一樣で、地下水位が地表面下1 mにある水平砂地盤を想定して、水平地震動による過剰間隙水圧の蓄積量を計算によって求めている。その結果から、深さ5~10 m程度の深度で間隙水圧が特に上昇しやすいことを指摘している。また、すでに吉見³⁾が指摘しているようにシード(Seed, H.B.)⁴⁾が行った新潟地震において液状化した代表的な地盤に対する液状化解析の結果をみても最初に液状化するのは深さ4.5 m~12 mの砂層である。こうしたことを考えると、地

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所土木研究所立地部土質基礎研究室担当研究員

(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所研究開発本部原子力部立地技術担当(課長)

(〒100 千代田区大手町1-6-1)

*** 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木研究所耐震構造部長

(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

**** 正会員 (財)電力中央研究所土木研究所立地部調査役(同上)

震動継続中には液状化しなかった地表面近くの地層も、過剰間隙水圧の逸散過程において、地震動継続中に液状化した下部砂層からの上向き浸透流により間隙水圧が上昇し液状化する可能性がある。本論文では、この現象を水平地盤における『二次液状化』とよぶことにする。これに対して、地震時の繰り返しせん断により上昇した過剰間隙水圧によりほぼ非排水条件下で生じる液状化を『一次液状化』とよぶことにする。一方、地下水面が地表面に一致している場合であっても、地表面付近の液状化強度が大きく、深部の液状化強度が小さい場合には、二次液状化が生じる可能性がある。このことは、言い換えると二次液状化さえ防ぐことができれば、地表面近くの砂層のみを締め固めることにより、地表面上の構造物または地表面付近の地中構造物の液状化に対する安全性は、容易に高められることを意味している。こうした方法は、下部砂層の液状化安全率が非常に小さく、グラベルパイルによる一次液状化防止が困難である場合の地盤の支持力確保の手段としては有効であると考えられる。

吉見ら⁵⁾は、非改良地盤に対して2層地盤の液状化解析を行い、上部砂層の透水性を高めることが、本論文でいう『二次液状化』の防止に効果があると述べている。さらに、この解析結果をもとにして、粗粒材料を用いた締め固め杭で表層付近を締め固めることは、液状化の防止に効果があると述べている。

このように、グラベルパイルが二次液状化防止に対して効果があることはすでに指摘されているところであるが効果の定量的な評価となるといまだに行われていないのが現状である。本報告では、グラベルパイルの二次液状化に対する効果を数値解析と実験により確認するとともに解析的な手法により、二次液状化防止効果を定量的に評価することを試みた。

2. 改良地盤の二次液状化防止効果に対する数値解析的な検討

本章では、地震時における間隙水圧の発生・消散を考慮することができる数値解析プログラム GADFLEA⁶⁾を用いて、グラベルパイルによる改良地盤の二次液状化防止効果に対する数値解析的な検討を行う。

解析する地盤は、図-1に示すモデル1～モデル4の4種類である。モデル1は非改良地盤であり、モデル2～モデル4は改良地盤である。モデル2、モデル3は、グラベルパイルを上部砂層にのみ設置した場合であり、モデル2の場合には、グラベルパイルの底が不透水である。モデル4は、グラベルパイルを下部砂層にまで設置した場合である。いずれの場合にもグラベルパイルの透水性は、砂の透水性に比べて十分大きいとしている。なお、実際の計算においてはグラベルパイルの側面は排水

面 ($u=0$) としている。また、解析に用いたパラメーターの大きさを表-1に示す。

図-2に改良地盤内、非改良地盤内の過剰間隙水圧の経時変化を示す。ただし、改良地盤内の過剰間隙水圧の値は、 $r=r_e$ におけるものである。ここで r_e は、有効円の半径を表わす。図-2によれば、非改良地盤の上部砂層の過剰間隙水圧が液状化近くまで上昇しているのに

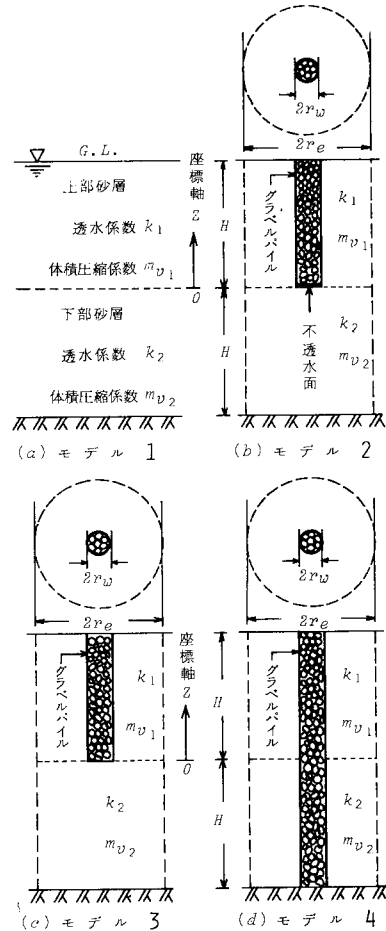


図-1 間隙水圧の発生・消散を考慮した数値解析を行った地盤のモデル

表-1 間隙水圧の発生・消散を考慮した数値解析に用いたパラメーターの値

解析ケース パラメーター	1	2	3	4	5	6	7	8
m_{v2}	4.082 × 10 ⁻⁴ (1/kPa)							
k_2	4.0 × 10 ⁻⁴ (m/sec)							
$(N_{eq}/N_0)_1$	0							
t_d	1.0 (秒)							
m_{v1}/m_{v2}	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1
k_1/k_2	1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	0.1
$(N_{eq}/N_0)_2$	2	2	6	6	2	2	6	6

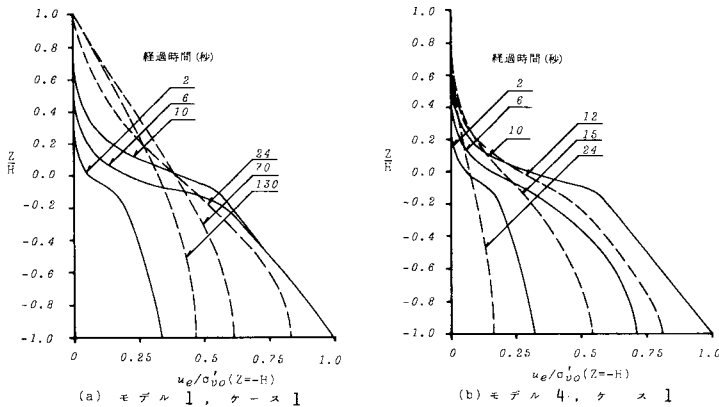


図-2 改良地盤および非改良地盤内の過剰間隙水圧の経時変化

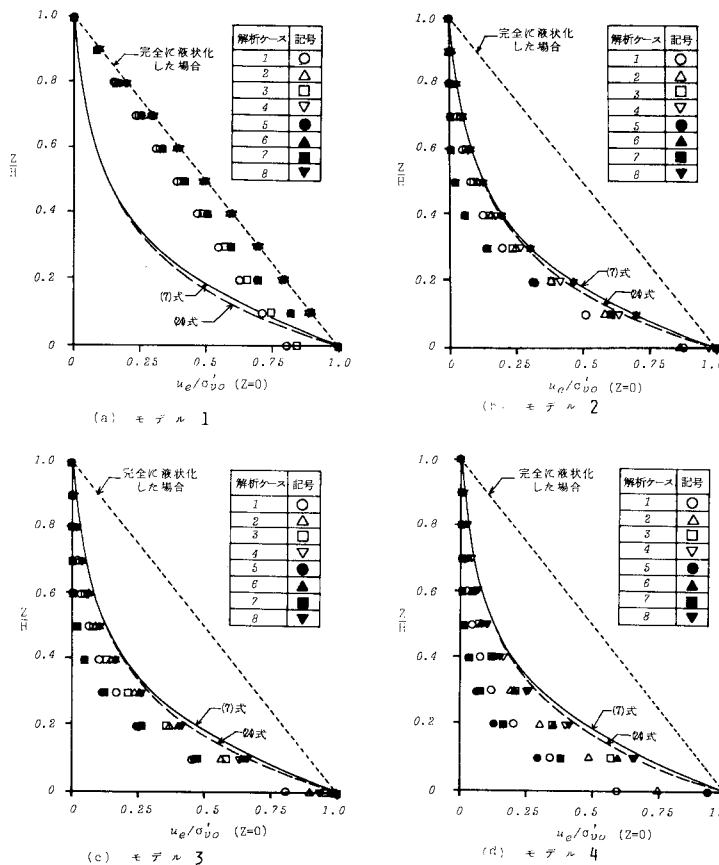


図-3 上部砂層内で上昇する過剰間隙水圧の時間的な最大値の深度方向分布

対して、改良地盤の上部砂層で過剰間隙水圧の時間的な最大値は、比較的小さい。このことは、グラベルパイルにより、上部砂層の二次液状化が防止されていることを示している。モデル1～モデル4の各解析ケースについて、上部砂層の各点における過剰間隙水圧の時間的な最大値をプロットしたものが図-3である。図-3(a)

と図-3(b), (c), (d)を比較すれば、これからもグラベルパイルに二次液状化防止効果があることがわかる。

吉見ら⁵⁾は、非改良地盤の下部砂層の液状化が上部砂層の安定性に及ぼす影響について、数値解析的な検討を行っている。そして、上部砂層の透水性が小さいほど、上部砂層の圧縮性が小さいほど、上部砂層内で高まる過剰間隙水圧の値が大きいと結論している。グラベルパイルを設置した改良地盤の場合にはどうであろうか。モデル1～モデル4の計算結果について吟味してゆくことにする。各モデルのどのケースについても上部砂層の体積圧縮係数 (m_{v1}) が小さいほど上部砂層における間隙水圧の時間的な最大値はより大きくなっている。この点に関しては、非改良地盤に関する吉見らの結果と一致している。それに対して、各モデルとも上部砂層の透水係数 (k_1) が小さいほど、上部砂層における間隙水圧の時間的な最大値が必ず大きくなっているというわけではない。この点が、非改良地盤の場合と異なる点である。この点に関して、個々の解析ケースの結果についてその理由を述べることは難しいが、定性的には次のような説明が成り立つと考えられる。上部砂層の透水係数が比較的小さい場合には、上部砂層内の水圧の消散速度が小さいため、水圧の値が大きくなりやすいという一面がある。しかし、上部砂層の透水係数が小さいことは、見方を変えたと下部砂層内の水圧が上部砂層内に伝播するのに時間がかかるということである。このことは、改良地盤の場合のように地表面以外にも排水面が存在する場合には、上部砂層内の水圧の値を小さくする要因になり得ると考えられる。

在する場合には、上部砂層内の水圧の値を小さくする要因になり得ると考えられる。

本章で行った数値シミュレーションにより、グラベルパイルの二次液状化防止効果が明らかになった。以下の章では、この効果を定量的に評価することを目的として実験、解析を行っている。

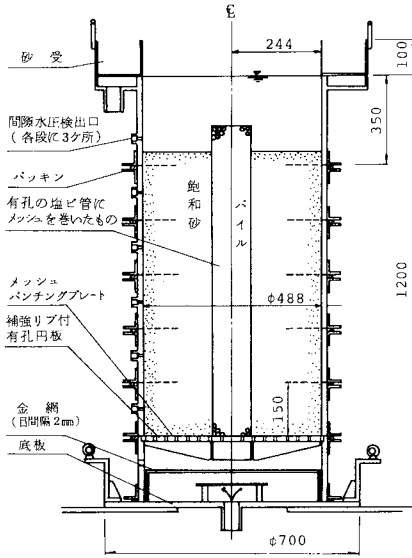


図-4 実験に用いた土槽の断面図

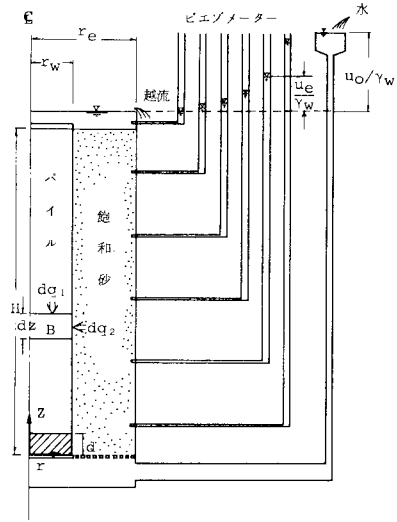


図-5 上向き定常透水試験の説明図

3. 改良地盤および非改良地盤に対する上向き定常透水試験

二次液状化に対するグラベルパイルの改良効果を調べるために改良地盤および非改良地盤に対する上向き定常透水試験を実施した。実験は、地震時に液状化した深部から上向き浸透を受ける地表面近くの非液状化層を模擬する目的で行ったものである。

以下に実験装置、実験方法、実験結果の概要について説明する。

(1) 実験装置および測定装置等

模型地盤を作成した土槽は、内径 488 mm、高さ 1200 mm の塩化ビニール製の円筒である。装置本体の縦断面図を図-4 に示す。

改良地盤は、土槽の中心に設置したグラベルパイルと水中落下法により作成したパイル周辺の飽和砂地盤より成る。グラベルパイルとしては、理想的な条件を満たすことの容易さを考えて、側面に無数の穴をあけた塩化ビニール製のパイプの外側に周囲の砂の平均粒径よりやや小さな目間隔のメッシュを巻きつけたものを用いた（本論文では、以降この有孔パイプをグラベルパイルまたは単にパイルとよぶことがある）。ただし、土槽の底面に接したパイルの端部は、塩化ビニール製の板でふさがれ不透水面となっており、側面には底面より幅 5 cm にわたり、ガムテープが巻きつけられ不透水帯となっている。つまり、この実験は、直接的には図-1 のモデル 2 の上部砂層を模擬して行ったことになる。また、パイルの中には透水試験のときにパイルが浮き上がらないように金属性のおもりを入れてある。また、土槽の底面は、有孔

金属板の上に砂の平均粒径よりもやや小さな目間隔のメッシュを置いたものである。図-5 に示すように水面の高さを一定に保った水槽により砂層底部に浸透水圧を加えることにより上向き定常透水試験を実施した。実験装置本体は高さ方向に 6 段に分離することができる。その各段に 3 か所ずつある間隙水圧検出口より挿入したシンフレックスチューブおよびそれにつながるスタンドパイプよりなるピエゾメーターと半導体タイプの間隙水圧計 (TOYODA 拡散形半導体小型圧力変換器 PD 241 (容量 29.4 (kPa) または 49.0 (kPa)) により透水試験時の地盤内の過剰静水圧を測定した。実験に使用した砂は豊浦標準砂 ($G_s = 2.65$, $e_{max} = 0.976$, $e_{min} = 0.612$) である。

(2) 実験方法

モデル地盤の作成は、実験装置本体の上方に設置した多段ふるい式モデル地盤作成装置により、あらかじめ水を満たした実験装置本体内部へ砂を自由落下させて行った。モデル地盤作成時の相対密度は 10~20 (%) 程度であった。モデル地盤作成後、架台に数回~数百回の打

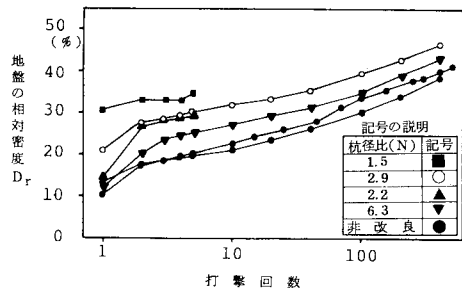


図-6 打撃回数とモデル地盤の相対密度の関係

撃を加えることによって密度を変化させた。打撃と打撃の間に透水試験を行うことにより、さまざまな密度に対する透水特性を調べた。打撃回数と地盤の相対密度の関係を図-6に示す。

(3) 実験結果の概要

本研究において実施した実験ケースを表-2に示す。透水試験を行った際の改良地盤および非改良地盤内の過剰静水圧分布を図-7に示す。ただし、図中の過剰静水圧の値は、砂層底部の測定値によって割り算したものを示している。非改良地盤では当然ながら底部より地表面に向かって直線的に減少しているのに対して、改良地盤では非改良地盤の場合よりも急激に減少している。したがって、砂層底部に大ききの等しい浸透圧を加えた改良地盤と非改良地盤を比較した場合には、等しい深度に

おける有効応力は改良地盤の方が大きいことになる。このことは、改良地盤の上向き浸透に対する安定性が非改良地盤よりも高いことを意味している。

4. 上向き定常透水試験の解析

本章では、本研究で行った上向き定常透水試験の解析を行い実験結果と比較検討する。

(1) 基本方程式とその解の誘導

図-5に示すように座標系を定めると定常透水の基本方程式(連続の方程式)は次式で表わされる。

$$k_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k_r , k_z は、それぞれ水平方向、鉛直方向透水係数である。境界条件は次のとおりである。

$$u=0 \quad (z=H, \quad r_w < r < r_e) \dots\dots\dots (2)$$

$$(\partial u / \partial r)_{r=r_w} = 0 \quad (0 < z < d, \quad r = r_w) \dots\dots\dots (3 \cdot a)$$

$$u=0 \quad (d < z < H, \quad r = r_w) \dots\dots\dots (3 \cdot b)$$

$$u=u_0 \quad (z=0, \quad r_w < r < r_e) \dots\dots\dots (4)$$

$$(\partial u / \partial r)_{r=r_e} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 d は不透水帯(ガムテープを巻きつけた部分)の幅である。(3・a), (3・b)をとともに境界条件として解を得ることは困難であるので次の条件に対する解を得た。

$$u=0 \quad (0 < z < H, \quad r = r_w) \dots\dots\dots (6)$$

式(6)を境界条件として用いることは、不透水帯の存在を無視することを意味している。

式(1)の解は、次式で表わされる。

$$\frac{u}{u_0} = \sum_{m=1}^{\infty} C_m D_0 \left(l_m \frac{r}{r_e} \right) \frac{\sinh l_m K (1-z/H)}{\sinh(l_m K)} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$D_i(s) = J_i(s) - \frac{J_i(l_m)}{Y_i(l_m)} Y_i(s), \quad (i=0, 1) \dots\dots\dots (8)$$

$$C_m = \frac{-\frac{2}{N l_m} D_1 \left(\frac{l_m}{N} \right)}{\left\{ D_0^2(l_m) - \frac{1}{N^2} D_1^2 \left(\frac{l_m}{N} \right) \right\}} \dots\dots\dots (9)$$

であり、 $l_m (m=1, 2, \dots, 0 < l_1 < l_2 < \dots)$ は、次式の解である。

$$D_0(l_m/N) = 0 \dots\dots\dots (10)$$

(2) 実験結果と解析結果との比較

a) 改良地盤内の過剰間隙水圧に関して

式(7)において、透水係数は等方的($k_r = k_z$)と仮定して、 $u_e(r = r_e)$ における u の値)に関して実験結果と解析結果を比較したものが図-8である。実験結果と解析結果は良好に一致している。中心軸を含む縦断面内における過剰静水圧分布に関して実験結果と解析結果を比較したものが図-9である。砂層底部付近の3つの

表-2 本研究において行った実験ケース

杭径比(N)	実験の内容
非改良	透-打-透-打
非改良	透-打-透-打
2.9	透-打-透-打-透
6.3	透-打-透-打
10.0	透-打-透-打
4.2	打-打-打-透-打-打-透
2.2	打-打-打-打-打-打-透
1.5	打-打-打-打-打-打-透
非改良	打撃500回、最後に透水試験を行なう。
2.9	打撃400回、最後に透水試験を行なう。
6.3	打撃400回、最後に透水試験を行なう。
非改良	打撃400回、透水試験は1,2,3,4,5,10,20,40,100,200,400回打撃後にそれぞれ行なっている。

「透」……透水試験, 「打」又は「打撃」……打撃による締固め

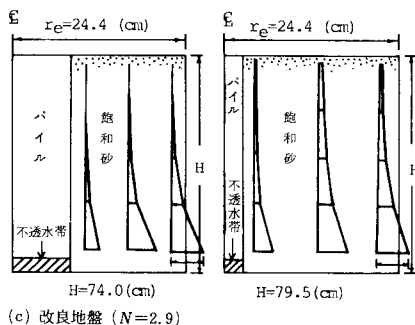
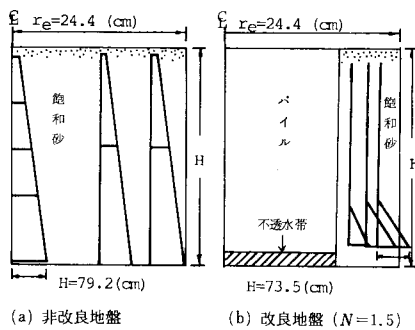
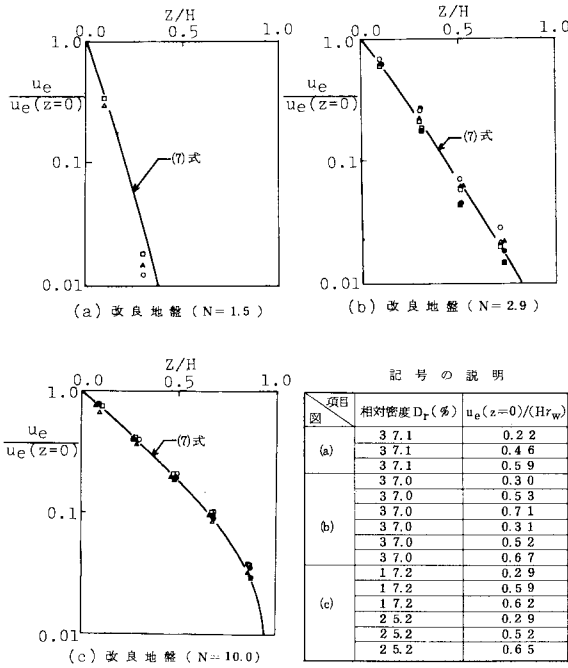
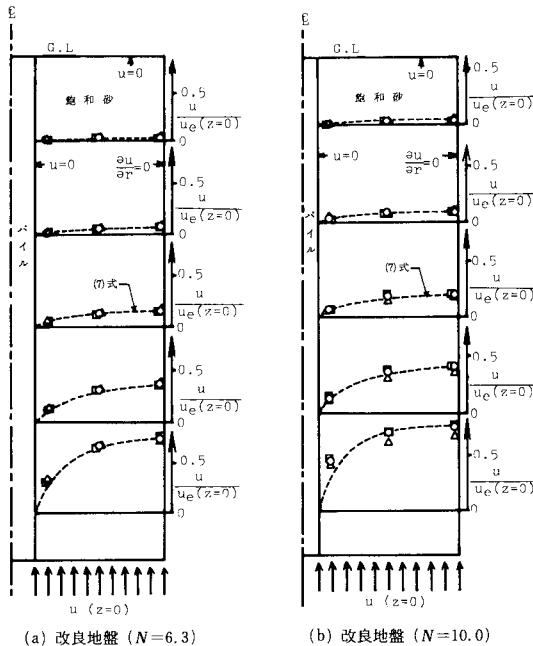


図-7 上向き定常透水試験の際の地盤の過剰静水圧分布の概略



図—8 解析と実験によって求めた改良地盤内の過剰静水圧の深さ方向の分布

項目	相対密度 D_r (%)	$u_e(z=0)/(Hr_w)$	記号	項目	相対密度 D_r (%)	$u_e(z=0)/(Hr_w)$	記号
(a)	—	0.31	○	(b)	17.2	0.29	○
	—	0.56	△		17.2	0.59	△
	—	0.67	□		17.2	0.62	□



図—9 解析と実験によって求めた改良地盤内の過剰静水圧分布の比較

測定点で測定された過剰静水圧のうち、最もパイルに近いものの値は、計算値よりもいくぶん大きな値となっている。これは、パイルの下部に幅5cmにわたり巻きつけた不透水帯による影響である。その他の測定点における測定値は、計算値と良好に一致している。

式(7)による計算結果は、図—3(b), (c), (d)中にも実線で示されている。下部砂層からの上向き浸透の結果上部砂層中で上昇する過剰静水圧の値は、式(7)によって計算された値を上回っていない。すなわち、下部砂層からの上向き浸透により上部砂層で上昇する過剰静水圧の上限値は、式(7)で与えられていることがわかる。

5. 簡便解の誘導

本章では、バロン (Barron, R. A) の圧密理論⁷⁾における等ひずみ条件の解を求めるのと似通った方法により式(7)の簡便な近似解を誘導する。浸透流の基本方程式として示した式(1)は、実は地盤内の微小要素に入り出す

流量に関する連続の方程式であった。ここでは見方を変えて図—10中に示される要素Aに入り出す流量に関して連続方程式を考える。

z 軸に垂直な面を通して要素内に流入する水の量 ΔQ_z は次式で近似的に表わされる。

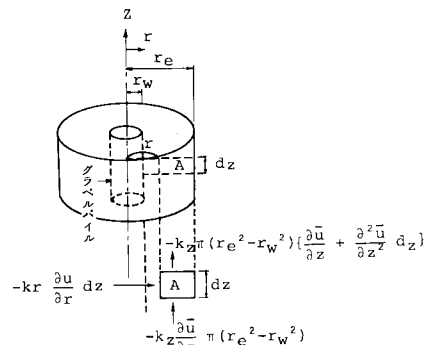
$$\Delta Q_z = \pi(r_e^2 - r^2) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} k_z \Delta z \Delta t \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 \bar{u} は、 $r = r \sim r_e$ における過剰静水圧の空間的な平均値である。すなわち、

$$\bar{u} = \frac{1}{\pi(r_e^2 - r^2)} \int_r^{r_e} u(r, z) 2\pi r dr \dots\dots\dots (12)$$

である。

一方、 r 軸に垂直な面を通して要素内に流入する水の量 ΔQ_r は次式で表わされる。



図—10 砂層内の要素Aに関する水の出入り

$$\Delta Q_r = -(2\pi r \Delta z) \frac{\partial u}{\partial r} k_r \Delta t \dots (13)$$

要素内に入り出す水量の連続性を考えれば次式が成立する。

$$\Delta Q_z + \Delta Q_r = 0 \dots (14)$$

式(11)および式(13)を式(14)に代入すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \left(\frac{1}{2} \frac{k_z}{k_r} \right) \left(\frac{r_e^2}{r} - r \right) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \dots (15)$$

式(7)において、 K が十分大きくかつ z/H が小さければ、第1項の影響が第2項以降の項の影響に比べて大きくなるため近似的には次式で表わされる。

$$\frac{u}{u_0} = C_1 D_0 \left(l_1 \frac{r}{r_e} \right) \dots (16)$$

図-11中に式(16)で表わされる曲線を示す。また、半径方向の過剰静水圧分布が式(16)で表わされるとき \bar{u} の r に対する変化を図-12に示す。 r の変化に伴う \bar{u} の変化は小さいとはいえない。このように \bar{u} の値は r に対して必ずしも一定ではないが、これを常に一定であると仮定して式(15)を解くことにする。式(15)の解は、式(6)を考慮すると次式で与えられる。

$$u = \frac{1}{2} \frac{k_z}{k_r} \left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right) \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) \dots (17)$$

式(17)において $r=r_e$ とした場合には、 $u=u_e$ 、 $\bar{u}=u_e$ 、 $r_e/r_w=N$ などにより次式が得られる。

$$u_e = \left(\frac{1}{2} \frac{k_z}{k_r} r_e^2 \right) \left(\ln N - \frac{N^2 - 1}{2N^2} \right) \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \dots (18)$$

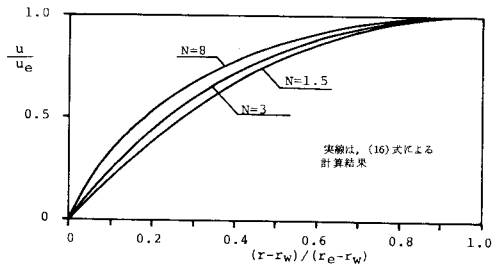


図-11 過剰静水圧の半径方向分布の計算値

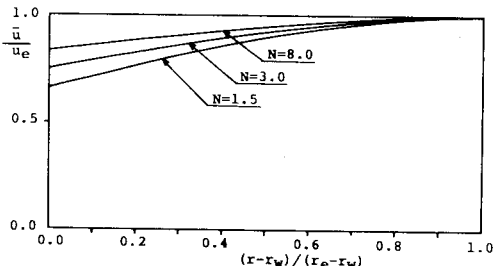


図-12 rの値の変化に伴うu-barの値の変化

式(18)をさらに書き直すと次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = [Kf(N)]^2 u_e \dots (19)$$

ここに、

$$u_e' = u_e / u_e (z=0) \dots (20)$$

$$z' = z/H \dots (21)$$

$$K = \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} \frac{H}{r_e} \dots (22)$$

$$f(N) = \sqrt{\frac{2}{\left(\ln N - \frac{N^2 - 1}{2N^2} \right)}} \dots (23)$$

$z'=0$ で $u_e=1$ であることを考慮して式(19)を解けば次の解が得られる。

$$u_e' = \frac{\sinh\{f(N)K(1-z')\}}{\sinh\{f(N)K\}} \dots (24)$$

図-8中の式(7)による計算結果を含むさまざまな条件に対する式(7)による計算結果と式(24)による計算結果を比較したものが図-13である。 $r=r_e$ における過剰静水圧(u_e)の値は、式(7)を用いなくても比較的簡易な式(24)を用いれば、工学的には十分な精度が得られることがわかる。

式(24)による計算結果は、図-3(b),(c),(d)中にも破線で示されている。式(7)による計算結果とほぼ同じ値となっている。すなわち、下部砂層からの上向き浸透により上部砂層で上昇する過剰静水圧の上限値は、ほぼ式(24)により与えられる。

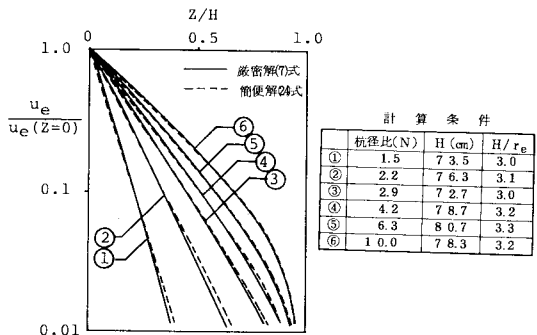


図-13 厳密解と簡便解の比較

6. グラベルパイルの二次液状化防止効果が地盤の支持力に与える効果

すでに他の研究者によって提案され、実用化されている水平地盤の一次液状化の判定方法を用いれば、地震時に非改良地盤内のある深度にある地層が液状化するか否かを予測することができる。地盤の大部分が液状化する場合には、その地盤中の構造物およびその地盤に支持される構造物に大きな被害が生じることは明らかである。

しかし、地盤の一部分だけが液状化した場合には、大きな被害が生じるとは限らない。地盤の一部分だけが液状化すると判定された場合、何らかの対策をすべきか否かについての明確な判断基準はなく、技術者自身の判断に任されているのが現状である。このことは、二次液状化防止のためにグラベルパイルを設計する際に、明確な改良目標が設定できないということの意味している。そこで、本章では、地表面上の構造物の安定に及ぼすグラベルパイルの二次液状化防止効果を定量的に評価するために上部砂層内の過剰静水圧の大きさを考慮した支持力解析を行った。なお、解析にあたっては簡単のために以下のような仮定をしている。

- ① 上部砂層の液状化安全率は十分大きいとする。それゆえ、上部砂層内で上昇する過剰静水圧は地震時の繰り返しせん断によるものではなく、液状化した下部砂層からの上向き浸透によるものとする。
- ② 上部砂層内の過剰静水圧分布は、水平方向に一樣であるとし、鉛直方向には式(24)で表わされるとする。
- ③ グラベルパイルの存在が、支持力に与えるパイルとしての効果は無視し、一樣な摩擦角(ϕ')と水中重量(γ')を有する砂地盤であるとする。
- ④ 地下水面の位置は、地表面と一致している。
- ⑤ 下部砂層の過剰間隙水圧が上昇し、軟弱化した後の上部砂層および構造物の安定を考えているので、上部砂層および上部構造物に加わる水平地震力は小さいとして無視する。
- ⑥ 基礎としては、最も基本的な根入れのない帯基礎を考える。

二次液状化による地盤の破壊形式としては、次の2つが考えられる。

- イ) 上部砂層の厚さ (H_i) の基礎幅 (B) に対する比 (H_i/B) が比較的大きいため、破壊が上部砂層内でのみ起こる場合。
- ロ) 上部砂層の厚さ (H_i) の基礎幅 (B) に対する比 (H_i/B) が比較的小さいために、破壊が上部砂層のみならず下部砂層にも及ぶ場合。

イ) の場合には、上部砂層が締まっている限り、従来の支持力理論に過剰間隙水圧の効果を加えることにより支持力評価が可能である。それに対して、ロ) の場合には、2層地盤の支持力問題となるが、こうした場合の破壊のパターンは不明であり、支持力を算定することはできない。本論文では、イ) の場合を対象として支持力を検討することにする。イ) の場合の支持力を求めるには、過剰間隙水圧を考慮して Kötter 方程式を解く方法が一番厳密な解が得られる方法であろう⁹⁾。しかし、この方法で支持力を求めようとすれば非常に複雑な計算が必要に

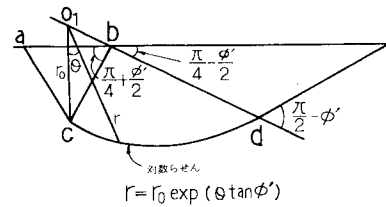


図-14 対数らせんによる支持力の計算

なるので、ここでは比較的簡便な方法を用いることにする。

地盤内の過剰間隙水圧を考慮した支持力の計算方法としては、八木⁹⁾が行ったものがある。八木⁹⁾は、基礎の端部に極のある対数らせんに沿って、塑性つり合い方程式を積分することにより、支持力解析を行っている。しかし、この方法の場合、地盤内の過剰間隙水圧の分布にかかわらず積分経路は一定であるので、最も外側の対数らせんの外側の地盤条件は支持力には影響しないことになる。

本章で解析しようとしているのは、深度方向に過剰間隙水圧が増加する地盤であり、深いすべり線ほど大きな支持力を与えるとは限らない。そこで、ここではテルツァーギの支持力計算方法に基づき、いろいろなすべり線による支持力の最小値を求めることにする。

図-14は、その計算方法を説明したものである。くさび底角 $\angle abc$ は、 $\phi'/2 + \pi/4$ とした。また、線分 cb 上での鉛直土圧は、点 c で最大値、点 b で0(ゼロ)となる三角形分布とした。このようにすることにより、地盤内に過剰間隙水圧が存在しない場合の支持力の計算値は、テルツァーギによるものと一致させた。また、対数らせんの極 O_1 を線分 bd またはその延長上を移動させ各位置での支持力を計算し、その最小値をもって地盤の支持力とした。

このようにして得られた支持力強度 (q_u) を次のようにして表わす。

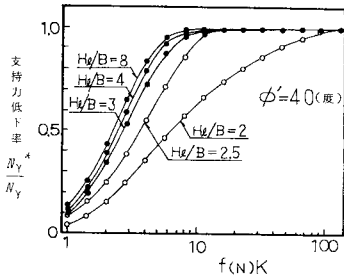
地盤内に過剰静水圧がない場合

$$q_u = \frac{B\gamma'}{2} N_\gamma \dots\dots\dots (25)$$

地盤内に過剰静水圧がある場合

$$q_u^* = \frac{B\gamma'}{2} N_\gamma^* \dots\dots\dots (26)$$

$\phi' = 40$ (度) のもとに N_γ^*/N_γ を計算し図にしたものが図-15である。対数らせんの極は、対数らせんが下部砂層を通過しない範囲で移動させた。図-15中の白丸は、上部砂層と下部砂層の境界面に接する対数らせんが支持力の極小値を与える場合に対応している。すなわち、白丸印で表わされた場合は、ロ) の破壊形式で破壊する可能性の高いものであるということが出来る。図-



図一五 二次液状化による改良地盤の支持力低下

15を用いれば、グラベルパイルの二次液状化防止効果を支持力の面から評価することが一応は可能である。しかし、支持力を計算するに際して簡単のためにいくつかの仮定を導入したため、支持力計算自体を更に精密に行うことができる余地がある。さらに、支持力計算自体を精密にしたとしても、実際問題に支持力解析の結果をそのまま適用してよいかどうか判断するには、実験的な裏付けが必要であろう。

7. ま と め

以下に、本論文により得られた主な結論を記す。

- (1) 数値解析を行うことにより、グラベルパイルに二次液状化防止効果があることを明らかにした。
- (2) グラベルパイルを設置した改良地盤に対して上向き透水試験を実施し、上向き透水に対するグラベルパイルの効果を実証した。さらに、基本方程式を解くことにより、解析解を得て実験結果と比較し、よく一致することを確かめた。
- (3) 上向き透水解析の結果得られる上部砂層の過剰静水圧分布は、下部砂層が液状化した場合、上部砂層で上昇する過剰静水圧の上限値を与えていることがわかった。
- (4) 上向き透水を受ける上部砂層内の過剰静水圧を簡便に表現できる式を導いた。
- (5) 上向き透水を受ける上部改良地盤内の過剰静水圧を考慮した支持力解析を行い、グラベルパイルの二次液状化防止効果を支持力の面から評価した。

謝 辞：本研究の計画段階において、東京大学石原研而教授のご指導を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。また、本研究における実験は、当時の日本大学卒業生 高野 仁君（現・牛久町役場）の助力を得ました。末筆ながらここに深く感謝致します。

本論文で使用した主な記号の説明

- r_w : グラベルパイルの半径
- r_e : 有効円の半径*1

- N : 杭径比 (r_e/r_w)
- H : 上部砂層の厚さ
- r : 改良地盤の半径方向の座標 (中心で $r=0$)
- t : 時間
- z : 深さ方向の座標

$u(r, z)$: 半径方向の座標 r , 深さ方向の座標 z における過剰静水圧の値

$u_0 : (=u(r, 0))$

$u_e : (=u(r_e, z))$

$u_e(z=0) : (=u(r_e, 0))$

k_z, k_r : それぞれ砂の鉛直方向水平方向透水係数

m_v : 砂の体積圧縮係数

k_w : グラベルパイルの透水係数

$K : (= \sqrt{k_r/k_z} \cdot H/r_e)$

σ'_{vo} : 鉛直有効土かぶり圧

$$f(N) : \left(= \sqrt{\frac{2}{\ln N - \frac{N^2 - 1}{2N^2}}} \right)$$

N_i : 非排水条件下で液状化に要する繰り返し回数

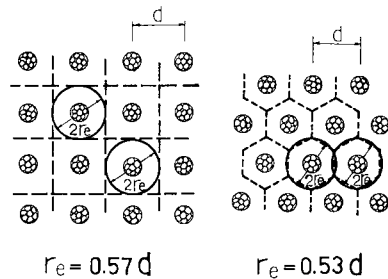
N_{eq} : 不規則に加わるせん断応力波と等価な一定振幅せん断応力の繰り返し回数

t_a : 地震動の有効継続時間

$J_0(), J_1()$: それぞれ第0次, 第1次の第1種ベッセル関数

$Y_0(), Y_1()$: それぞれ第0次, 第1次の第2種ベッセル関数

* 1



参 考 文 献

- 1) 田中・国生・江刺・松井：グラベルパイルによる水平地盤の液状化防止について，土木学会論文集，No. 347/III-2, pp. 89~98, 1984.
- 2) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp. 286~288, 1976.
- 3) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂出版，1980.
- 4) Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J. : Pore-Water Pressure Changes During Soil Liquefaction, J. GED, ASCE, Vol. 102, No. GT 4, pp. 323~346, 1976.

- 5) Yoshimi, Y. and Kuwabara, F. : Effects of Subsurface Liquefaction on the Strength of Surface Soil, *Soils and Foundations*, Vol.13, No.2, pp.67~81, 1973.
 - 6) Booker, J.R., Rahman, M.S. and Seed, H.B. : GADFLEA—A Computer Program for the Analysis of Pore Pressure Generation and Dissipation During Cyclic or Earthquake Loading, *EERC 76-24*, 1976.
 - 7) Barron, R. A. : Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, *Trans. ASCE*, Vol.113, pp.718~742, 1948.
 - 8) 山口柏樹：土質力学，技報堂，pp.260~280，1969.
 - 9) 八木則男：繰り返し荷重を受けた砂の力学特性とその応用に関する研究，京都大学学位論文，pp.101~106，1974.
(1984.11.27・受付)
-