

グラベルパイルによる水平地盤の液状化防止について

ON PREVENTING LIQUEFACTION OF LEVEL GROUND USING GRAVEL PILES

田中幸久*・国生剛治**・江刺靖行***・松井家孝****
By Yukihiisa TANAKA, Takaji KOKUSHO, Yasuyuki ESASHI and Ietaka MATSUI

In this research, liquefaction tests by impact were performed for both improved ground with a single gravel pile and unimproved ground. We found that surface settlement of improved ground was larger than that of unimproved ground. And we obtained some knowledge of distribution pattern of pore water pressure in the improved ground. On the basis of these test results and some assumptions, we proposed a simplified designing formula for gravel piles against liquefaction during earthquakes. Shaking table tests were also performed in this research to represent that the simplified designing formula was proper from engineering point of view.

1. はじめに

1964年の新潟地震以来、砂地盤の地震時液状化の問題は、耐震設計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しては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、地震時に砂層内に発生する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ーンまたは砕石ドレーンと

よぶことが多いが、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。グラベルパイルに関する研究としては、シード (Seed, H. B.)¹⁾が行った解析的研究が挙げられる。彼らは、水平地盤上に等間隔に配置されたグラベルパイルによる改良地盤の問題をいくつかの仮定のもとに有限要素法を用いて解析し、その結果を図にして示している。また、時松・吉見²⁾は、構造物周辺に設置されたグラベルドレーンの効果を実験的・解析的に実証していると同時に水平地盤上に等間隔に配置されたグラベルパイルの問題をシードらと同様に有限要素法を用いて解析している。現場実験によってグラベルパイルの効果を実証した例としては石原らの研究³⁾、竹原らの研究⁴⁾が挙げられる。これはいずれもグラベルパイルの周辺地盤に過剰間隙水圧を発生させ、その後の消散挙動を測定することにより、グラベルパイルの過剰間隙水圧に対する消散促進効果を実証している。

本研究では、まず室内における模型実験を行い飽和砂地盤内に発生した過剰間隙水圧の消散機構を明らかにする。次に、その実験結果に基づいて、グラベルパイルによる水平地盤の液状化防止のための設計方法に関する考察を行った。

* 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)電力中央研究所土木研究所立地部土質基礎研究室室長 (同上)

*** 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木研究所立地部次長 (同上)

**** 正会員 (財)電力中央研究所土木研究所立地部調査役 (同上)

2. 衝撃的外力による液状化試験

地震時に地盤内に発生した過剰間隙水圧の消散速度に与える改良効果を調べるためにグラベルパイルによる改良地盤、非改良地盤に対して衝撃的外力による液状化試験(打撃試験)を実施した。以下に、実験装置、実験方法、実験結果について述べる。

(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-1に示す。

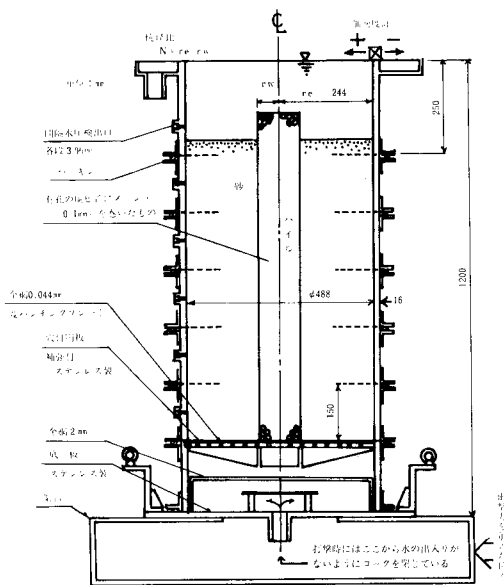


図-1 実験装置本体図

改良地盤は、土槽の中心に設置したグラベルパイルとパイル周辺の飽和砂地盤より成る。上端部分まで水を入れた土槽の上方より乾燥した砂を5 cm 間隔で5段に重ねたふるい(目間隔2 mm)を通して均一に落下させることにより飽和砂地盤を作成した。最下段のふるいと水面との距離は約40 cm(一定)である。グラベルパイルとしては、理想的な条件を満たすことが容易であることから、側面には、ピッチ1.2 cmで正方形配置した無数の穴(直径0.7 cm)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(約0.1 mm)のメッシュを巻きつけたものを用いた(この実験では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にする)。ただし、土槽の底面に接したパイプの端部は、塩化ビニール製の板でふさがれ不透水面になっており、側面には底面より高さ5 cmにわたり、ゴムテープが巻きつけられ不透水帯となっている。また、

パイルの中には、液状化時のパイルの浮き上がりを防止するために金属性のおもりを入れてある。

図-1に示すように土槽を載せている架台にカケヤで打撃を加えることにより地盤内の過剰間隙水圧を発生させた。カケヤは、一定の高さより振り子のように自由落下させることにより、毎回同じエネルギーが加わるようにした。作成時の地盤の相対密度は、10~20%程度である。また、打撃を繰り返しても地盤の相対密度が50%を越えることはなかった。次節以降で議論している実験結果もその多くは相対密度10~30%というかなりゆるい地盤に関するものである。

地盤内に発生する過剰間隙水圧の経時変化を測定する目的で使用した間隙水圧計は、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))である。打撃によってどの程度の加速度が土槽に生じたかを調べるために土槽の上端部に取り付けられた加速度計は、新興通信製の加速度計(BA-5 L、定格容量5 G)である。

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) 実験結果の概要

a) 衝撃の大きさと衝撃により発生する過剰間隙水圧の大きさ

本研究においては、土槽を載せてある架台にカケヤにより打撃を加えて地盤内に過剰間隙水圧を発生させたことはすでに述べた。打撃を加えたときの土槽上端部に設置された加速度計による加速度記録の一例を図-2に示す。

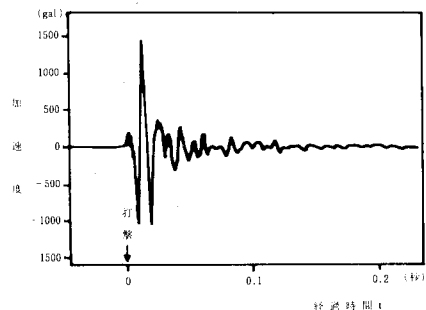


図-2 土槽の上端部に設置した加速度計による測定値

図-2によれば、土槽上端における最大加速度の大きさは約1500(gal)である。

打撃によって生じる過剰間隙水圧の大きさを示したものが図-3である。縦軸は、打撃直後に砂層底部で発生する過剰間隙水圧を有効土かぶり圧で割ったもの(間隙水圧比(r_u)とよぶ)であり、横軸は打撃前の地盤の相対密度である。図-3中の杭径比(N)はこの実験の

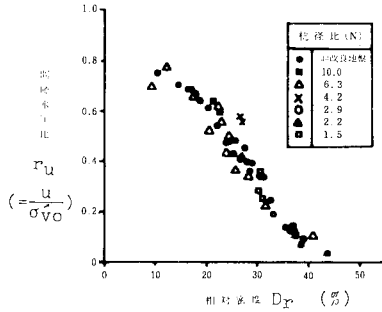


図-3 打撃直後に砂層底部で発生する過剰間隙水圧

場合には土槽の半径 (r_e) とグラベルパイルの半径 (r_w) の比 (r_e/r_w) で定義される (図-1 参照), より一般的な説明は記号の説明を参照されたい, 地盤内で打撃により発生する過剰間隙水圧は, 改良程度によらず打撃前の地盤の相対密度のみにより決まっているといえる。カケヤの打撃による振動は, 図-2 に示すようにごく短い時間の間だけ大きな加速度値を示しその後は急速に減衰するので, 発生する過剰間隙水圧の大きさに及ぼす排水効果はほとんどなかったものと考えられる。

b) 過剰間隙水圧の消散状況

改良地盤および非改良地盤内で発生した過剰間隙水圧の消散してゆく様子について以下に説明する。

非改良地盤に対する実験結果の一例を図-4 に示す。完全に液状化した場合の過剰間隙水圧の深さ方向の分布

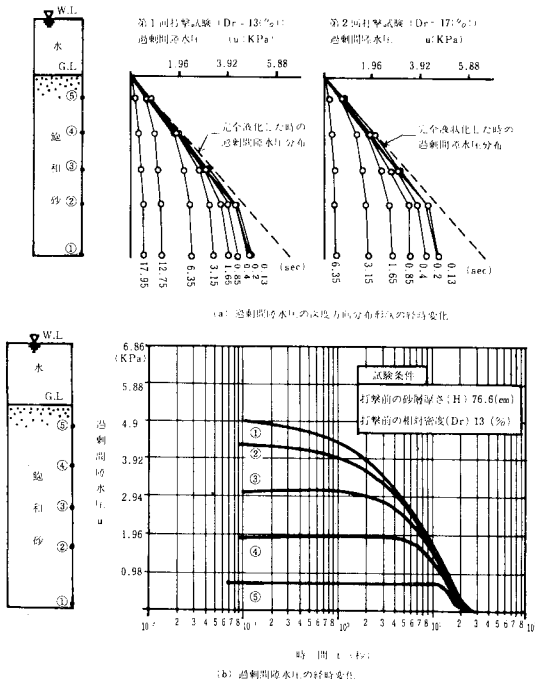


図-4 非改良地盤内に発生した過剰間隙水圧

形状は, 図-4(a)中の破線で示される三角形分布である。第1回目の打撃により発生した過剰間隙水圧の深度方向分布は時間の経過に伴い直角三角形に近い形状から台形に近い分布形状へ変化してゆく。これはすでに多くの研究者の指摘するとおりである。このことは, 地表近くの砂層は, 地震動終了後の過剰間隙水圧の逸散過程においても液状化した深部からの上向き浸透により液状化が引き続き継続することを意味している。

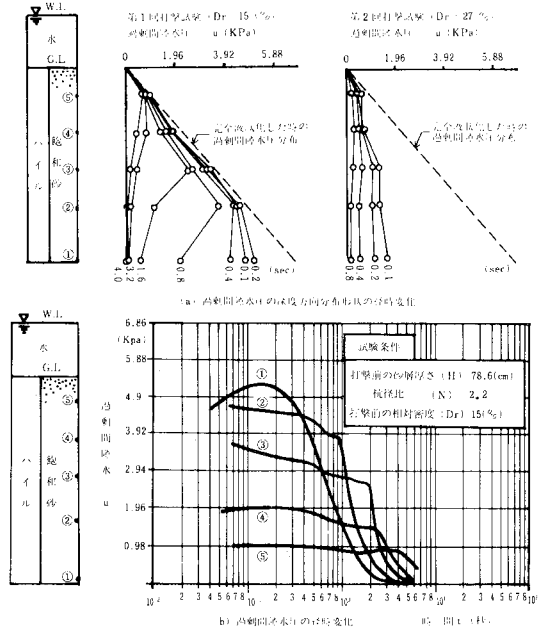
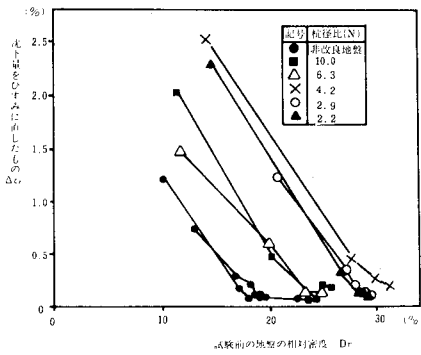


図-5 改良地盤 (N=2.2) に生じた過剰間隙水圧

改良地盤に対する打撃試験の結果を図-5 に示す。ほぼ完全に液状化した場合の過剰間隙水圧の深さ方向の分布形状の経時変化の測定例を図-5(a) 左図に示す。地盤内に発生した過剰間隙水圧の値がほぼ0 (ゼロ) になるのは砂層底部に近いほど早い。これは, 砂層底部に近いほど有効土かぶり圧が大きいこと, および発生する間隙水圧比が小さいことにより砂の体積圧縮係数 (m_v) の値は比較的小さくなり, 砂の圧密係数 (c_v) ($c_v = k / (m_v \gamma_w)$, k : 透水係数, γ_w : 水の単位体積重量) が大きくなるためであると考えられる。それに対して, 図-5(a)右図に示した実験結果では, 砂層底部に近いほど速く間隙水圧が消散する傾向が若干あるが, 図-5(a)左図の場合ほど顕著ではない。

c) 地表面の沈下量について

打撃試験前の平均相対密度と打撃試験後の地盤の平均地表面沈下量を砂層厚さで割ってひずみで表わしたものの ($\Delta \epsilon_z$) の関係を図-6 に示す。図-3 に示したように,



図—6 試験後の沈下量の改良程度による違い

打撃直後の地盤内に発生する過剰間隙水圧比は、改良、非改良の別によらず試験前の地盤の相対密度のみによってほぼ決まっている。それにもかかわらず、図—6を見ると打撃時の地盤の沈下によるひずみ ($\Delta\epsilon_2$) は非改良地盤の方が大きいことがわかる。

参考文献5)には、大型振動台実験による液状化試験における振動前後のコーン指数の深さ方向分布の実測例が示されている。また、参考文献6)には、室内における砂箱を用いた液状化実験の前後におけるコーン指数の深さ方向分布の測定例が示されている。ただし、これらの例は、いずれもグラベルパイルを設置していない非改良地盤に関するものである。これらの例によれば、液状化後の表層付近のコーン指数は、液状化前と同程度またはむしろ低下している。このことは、液状化後の表層付近の密度増加が小さいことを意味している。液状化した地盤の表層付近のコーン指数の増加がほとんどないことの原因が、過剰間隙水圧の逸散過程における上向き浸透流による影響であることは、すでに指摘されている⁶⁾。一方、グラベルパイルによる改良地盤のように過剰間隙水圧が主として水平方向に消散する地盤では表層付近の砂層は上向き浸透流をあまり受けなため過剰間隙水圧消散後に改良地盤に比べて大きな密度増加があるものと考えられる。また、改良地盤では、砂層底部に近いほど地盤内に発生した過剰間隙水圧の値がほぼ0(ゼロ)になるのは早いので、地盤内には下向きの浸透流が存在することになる。このことも、非改良地盤の間隙水圧消散後の沈下量を大きくしていることの原因の1つになっていると考えられる。したがって、層厚と密度のほぼ等しい模型地盤において、地盤内で発生する過剰間隙水圧の値が等しければ改良地盤の方が大きな沈下を生じることになる。

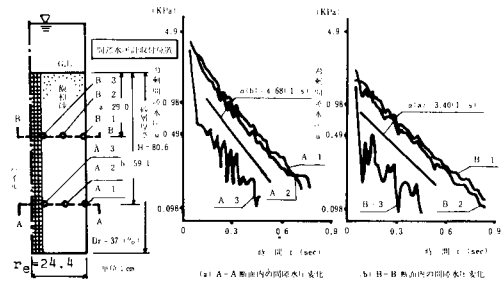
設計上地震時に大きな沈下が許されないような地盤にグラベルパイル工法を適用する場合には、過剰間隙水圧比の設計値を小さくするなどして大きな沈下を生じない

ように注意する必要がある。

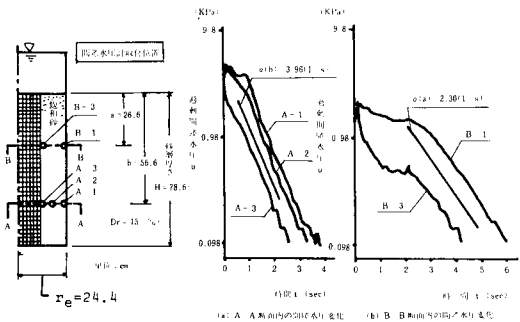
(3) 実験結果の考察

a) 過剰間隙水圧の半径方向分布とその経時変化

図—7、図—8に示すのは、同一深度に土槽の中心よりの距離を変えて設置した間隙水圧計による測定値の経時変化を示した曲線である。ただし、縦軸は過剰間隙水圧 (u) の値の対数であり、横軸は、打撃直後よりの経過時間 (t) である。図—7に示した例は、相対密度37%と衝撃的外力による液状化試験の中では比較的高い密度の地盤に対する実験結果である。この例では、同一水平断面内における過剰間隙水圧の測定値は、打撃後のごく初期を除いて、グラフ上でほぼ同じ傾きの直線となっている。それに対して、図—8に示した例は、相対密度15%とかかなり低い密度に対する実験結果である。この例では、A—A'断面に設置した間隙水圧計による測定値は、図—7の場合と同様にグラフ上でほぼ同じ傾きの直線となっている。しかし、B—B'断面に設置した間隙水圧計による測定値は、約2秒を境にしてグラフ上における勾配が異なっている。 $t \geq 2$ (秒)では、グラフ上でほぼ直線的に過剰間隙水圧が消散しているが、 $0 < t < 2$ (秒)では、過剰間隙水圧は緩やかに減少している。図—7のB—B'断面でこのような勾配の変化がないのは、砂層の上部と下部での圧密係数 (c_v) の差が、



図—7 改良地盤内に発生した過剰間隙水圧の消散過程 (杭径比 $N=6.3$)



図—8 改良地盤内に発生した過剰間隙水圧の消散過程 (杭径比 $N=2.2$)

図-8の場合に比べて小さかったためと考えられる。その原因としては、図-7の地盤と図-8の地盤の相対密度の違いが考えられるが明確ではない。いずれにしても、A-A'断面における過剰間隙水圧の消散はグラフ上で同じ傾きの直線によって表わされる。グラフ上で $\log u \sim t$ 関係が直線であることを式で表わすと次式で示される。

$$\frac{\partial u(r, z, t)}{\partial t} = -\alpha(z)u(r, z, t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\alpha(z)$ を間隙水圧の対数消散速度とよぶことにする。式(1)はまた、過剰間隙水圧の消散過程における半径方向分布形状が時間的に一定であることを示している。

図-9に同一水平断面内の過剰間隙水圧の半径方向分布を示す。改良地盤内の過剰間隙水圧の半径方向の分布形状は打撃後の短い時間を除けば時間的にはほぼ一定であることがわかる。

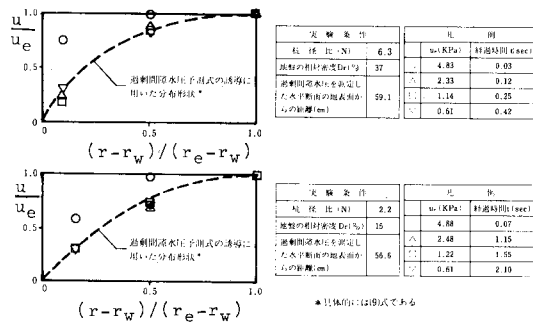


図-9 同一水平断面内における過剰間隙水圧の分布形状

図-7と図-8を比較した場合のもう1つの大きな違いは、間隙水圧の消散曲線に短周期の成分を含むか否かである。図-7では発生した過剰間隙水圧は、短い周期の変動を繰り返しながら平均的に減少してゆく。短い周期で起こる間隙水圧変動の原因は、打撃により土槽内の水自身が振動することである。事実、打撃直後には、水面に同心円状の短い周期の波が生じることが観察された。一方、図-8では、図-7のような短周期の間隙水圧の変動は、グラフ上で現われていない。この原因は、図-8の場合の方が間隙水圧の消散に要した時間が長いことにより流体自身の振動が減衰してしまったこと、およびデータの読み取り時間間隔を図-7の場合より大きくしたためグラフ上では短周期の変動が現われにくかったことであると考えられる。

b) 実地盤における測定例

著者らは、模型地盤内に発生した過剰間隙水圧の消散について議論してきた。次にここでは他の研究者によ

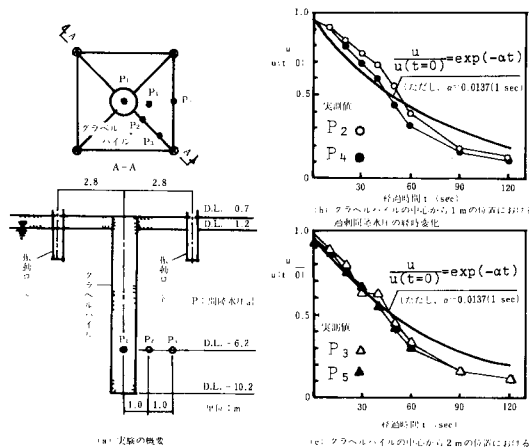


図-10 原位置液状化試験による過剰間隙水圧の測定例(参考文献7)より引用して加筆)

て行われた実地盤における実験結果を引用して、実規模の地盤について式(1)が成立するかどうかを検討する。

図-10は日本鋼管⁷⁾によって行われたグラベルパイルを設置した改良地盤に対する液状化試験結果である。実験は、ベント施工機による掘削により砂地盤中に形成された直径1mの碎石から成る柱のまわりの地盤を振動ロッドにより液状化させるというものである。図-10(b),(c)の中の実測値は、振動ロッドを停止した後の過剰間隙水圧の経時変化である。図-10(b),(c)の中には、 $\alpha(z)=0.0137(1/s)$ とした場合の式(1)による計算結果も描かれている。実測値と計算値は比較的よく一致している。すなわち、グラベルパイルを設置した実地盤に発生する過剰間隙水圧に関しても式(1)はほぼ成立していると考えられる。

3. 改良地盤内に地震時に発生する過剰間隙水圧の簡易予測式について

本章においては、2.で述べた実験事実に基づき、改良地盤内に地震時に発生する過剰間隙水圧の予測式を誘導し、検討する。

(1) 過剰間隙水圧予測式の誘導

地震時に地盤内に蓄積される過剰間隙水圧の蓄積速度($\partial u/\partial t$)は、繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧の発生速度($\partial u_g/\partial t$)と間隙水圧の消散速度($\partial u_a/\partial t$)の和として表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u_g}{\partial t} + \frac{\partial u_a}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、ここで

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = c_{vr} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots \dots \dots (3)$$

である。

実地盤にグラベルパイルを設置した場合には、水平方向の排水距離は鉛直方向の排水距離よりもかなり小さくなり、水平方向の水の流れが卓越することが多いと考えられるので、本論文では、鉛直方向への過剰間隙水圧の消散を無視して以下の議論を進める。この場合、式(3)は次式のようになる。

$$\frac{\partial u_d}{\partial t} = c_{vr} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (4)$$

式(4)によれば、単位時間当たりに消散する過剰間隙水圧は、その時点における地盤内の過剰間隙水圧の大きさと分布形状によって決まる。そこで、次に過剰間隙水圧の発生・消散が同時に進行する場合の地盤内の過剰間隙水圧分布に関して検討を行う。

グラベルパイルの問題を水平一次元放射状流れの問題に置き換え、有限要素法を用いて間隙水圧の発生・消散を考慮した解析を行うことができるプログラム LARF¹⁾を用いて計算した結果を図-11に示す。図-11は、杭径比(N)、非排水条件下で液状化するのに要する繰返し回数(N_i)、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返し回数(N_{eq})を一定にして、地盤の排水性を表わす無次元量(c_{vr}t_i/r_e²)の値をいろいろに変えた場合の地震終了時における地盤内の過剰間隙水圧を表わしたものである。地盤の排水性が大きくなる(無次元量(c_{vr}t_i/r_e²)が大きくなる)に従い地盤内の地震終了時における過剰間隙水圧の半径方向の分布形状がある一定の形状に近づくことがわかる。この形状が、ある適当な初期過剰間隙水圧のもとで消散のみ起こる場合に最終的に近づく形状であろうことは容易に想像することができる。

改良地盤の半径方向に一樣な初期過剰間隙水圧 u₀ を

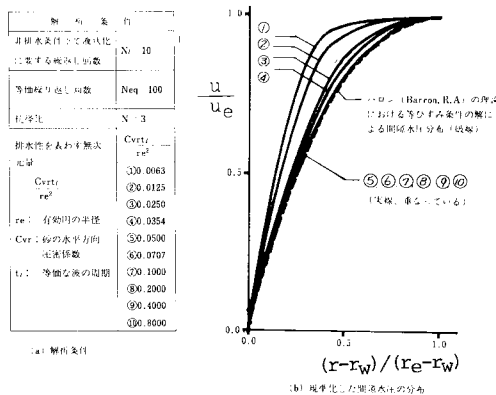


図-11 間隙水圧の発生・消散が同時に進行する場合の地震終了時における過剰間隙水圧分布 (LARF¹⁾ による計算結果)

与えた場合、その後の消散過程における過剰間隙水圧 u は次式で与えられる。

$$u(r, t) = \sum_{m=0}^{\infty} c_m D_0 \left(P_m \frac{r}{r_e} \right) \exp(-4 P_m^2 T_r) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、T_rは時間係数、c_m(m=0, 1, ...)は初期過剰間隙水圧の分布と大きさにより決まる係数である。また、D₀()は次式で定義されるものである。

$$D_0(S) = J_0(S) - \frac{J_1(P_m)}{Y_1(P_m)} Y_0(S) \dots\dots\dots (6)$$

P_m(m=0, 1, ... : 0 < P₀ < P₁ ...)は次の方程式の解である。

$$D_0(P_m/N) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

さらに式(5)により消散が十分進んだ場合の過剰間隙水圧の半径方向分布は次式で表わされることがわかる。

$$\frac{u}{u_e} = D_0 \left(P_0 \frac{r}{r_e} \right) / D_0(P_0) \dots\dots\dots (8)$$

一方、バロンの理論における等ひずみ条件の解における半径方向分布は次式で表わされる。

$$\frac{u}{u_e} = \left\{ N^2 \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) - \frac{(r/r_w)^2 - 1}{2} \right\} / \left(N^2 \ln N - \frac{N^2 - 1}{2} \right) \dots\dots\dots (9)$$

式(8)による計算結果と式(9)による計算結果を比較したものが図-12である。杭径比が小さい場合には、両者の一致度は低くなるが、全般的にはまずまずの一致度である。本論文では、式(9)が式(8)の近似解であるとして以下の議論を進めてゆく。

図-11の中には、式(9)で表わされる曲線も描かれている。図-11の計算結果において地盤の排水性が大きくなるに従って地震終了時における過剰間隙水圧の半径方向の分布形状がある一定の形状に近づくことを前述した。図-11より、その一定の形状の曲線は、式(9)で表わされる曲線にほぼ一致することがわかる。また、打撃試験により得られた実験結果と式(9)による計算結果を比較したものが図-9である。両者は、ほぼ一致しているといえる。

ここで、次のような仮定を導入する。

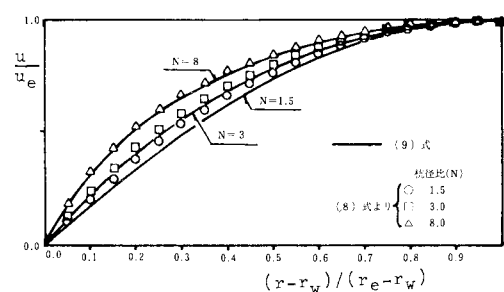


図-12 過剰間隙水圧の半径方向分布

仮定1 「水平1次元問題の場合、間隙水圧の発生・消散が同時に進行する際には、水平方向の過剰間隙水圧分布形状は一定であり、それは、バロンの理論における等ひずみ条件の分布形状によって近似される。」

式(9)は、バロンの圧密理論における等ひずみ条件の解であるから、式(4)に直接代入しても意味のない結果が得られるので、次に示す等ひずみ条件の場合の基本式の形に直してから代入する。

$$\frac{\partial \bar{u}_d(t)}{\partial t} = c_{vr} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (10)$$

式(9)を式(10)に代入して次式を得る。

$$\frac{\partial \bar{u}_d(t)}{\partial t} = \frac{2 c_{vr} u_e}{r_w^2 \left[N^2 \ln N - \frac{N^2 - 1}{2} \right]} \dots\dots\dots (11)$$

式(9)によれば、水平断面内の過剰間隙水圧の平均値 $\bar{u}(t)$ と $r = r_e$ における過剰間隙水圧 u_e の間には次の関係がある。

$$\frac{\bar{u}(t)}{u_e} = \frac{N^2 \left[\frac{N^2}{N^2 - 1} \ln N - \frac{3N^2 - 1}{4N^2} \right]}{N^2 \ln N - \frac{N^2 - 1}{2}} = F(N) \dots\dots (12)$$

式(12)、式(11)より次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}_d(t)}{\partial t} = \frac{2 c_{vr}}{r_e^2} \left(\frac{N^2}{N^2 - 1} \ln N - \frac{3N^2 - 1}{4N^2} \right) \bar{u}(t) \dots\dots (13)$$

式(1)と式(13)を比較すれば、間隙水圧の対数消散速度 (α) が次式で表わされることがわかる。

$$\alpha = \frac{c_{vr}}{r_e^2} \frac{2}{\left(\frac{N^2}{N^2 - 1} \ln N - \frac{3N^2 - 1}{4N^2} \right)} \dots\dots\dots (14)$$

対数消散速度 (α) は、砂の圧密係数 (c_v)、杭径比 (N)、有効円の半径 (r_e) をおのおの定め、その値を式(14)に代入することにより求めることができる。また、杭径比 (N) と有効円の半径をあらかじめ定めて設置した改良地盤に対して現位置液状化試験を行い図-10で示したような間隙水圧の消散曲線から直接対数消散速度 (α) を定めることも可能である。排水効果が十分に発揮されず、過剰間隙水圧の半径方向分布が仮定1で定めたような分布形状をとらない場合には、間隙水圧の対数消散速度 α を式(14)で定義することはどのような意味をもつものであろうか。式(9)で表わされる曲線は、式(5)で示されるバロンの等応力条件の解の一次(第1項)の分布形状に対するよい近似となっている。図-11中の①~④の曲線のような排水効果が十分に発揮されていない場合の半径方向分布形状を表わすには、式(5)の第1項だけではなく、第2項以降に対応する半径方向の分布形状を重ね合わせる必要がある。ところが、($0 < P_1 < \dots$) であるため、式(5)の第2項以上の項の分布形状に対応する間隙水圧の対数消散速度は、第1項のそれよりも大きい。すなわち、式(14)で定義される α より大きな値となる。したがって、図-11中の①~④の曲線に対応する対数消散速度は、式(14)中の α で表わされる対数消散速度より大きい。すなわち、地盤内に発生した過剰間隙水圧の対数消散速度に対して式(14)を仮定することは、間隙水圧の対数消散速度を過小評価するためグラベルパイルの効果を過小評価することになり、安全側の設計につながる。

次に、地盤内で地震時に繰り返しせん断により発生する過剰間隙水圧に関する考察を行う。デ・アルバラ⁹⁾(De Alba et al.) は、飽和砂に対する非排水繰り返しせん断試験を整理して図-13に示す結果を得ている。シードらは、図-13の曲線のある関数で表わして、有限要素解析に用いている。図-13に示す間隙水圧上昇曲線の最も簡便で比較的妥当な近似は次式で表わされる。

次に、地盤内で地震時に繰り返しせん断により発生する過剰間隙水圧に関する考察を行う。デ・アルバラ⁹⁾(De Alba et al.) は、飽和砂に対する非排水繰り返しせん断試験を整理して図-13に示す結果を得ている。シードらは、図-13の曲線のある関数で表わして、有限要素解析に用いている。図-13に示す間隙水圧上昇曲線の最も簡便で比較的妥当な近似は次式で表わされる。

$$u_g / \sigma'_{v0} = N_c / N_i \dots\dots\dots (15)$$

式(15)によって表わされる間隙水圧上昇曲線を図-13中に示してある。式(15)は、換言すれば、次のような仮定を導入したことにほかならない。

式(15)によって表わされる間隙水圧上昇曲線を図-13中に示してある。式(15)は、換言すれば、次のような仮定を導入したことにほかならない。

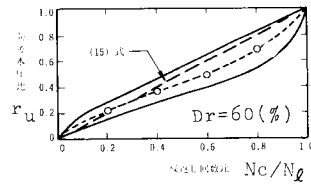


図-13 繰り返し単純せん断試験における過剰間隙水圧蓄積を表わす曲線 (De Alba, Seed, Chan, 1975) (参考文献9)より引用して加筆)

仮定2 「繰り返しせん断により発生する間隙水圧の大きさは等価せん断応力の繰り返し回数に比例する。」

式(15)を用いた場合には、間隙水圧の発生速度 ($\partial u_g / \partial t$) は次式で表わされる。

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = \frac{\partial N_c}{\partial t} \frac{\partial u_g}{\partial N_c} = \frac{N_{eq}}{t_a} \frac{\sigma'_{v0}}{N_i} \dots\dots\dots (16)$$

N_{eq} , N_i , σ'_{v0} は、水平地盤を考える場合には、ほぼ地表面よりの深さ (z) のみの関数があると考えてよい。このことより次式が成立する。

$$\frac{\partial \bar{u}_g(t)}{\partial t} = \frac{\partial u_g(r, t)}{\partial t} = \frac{N_{eq}}{t_a} \frac{\sigma'_{v0}}{N_i} \dots\dots\dots (17)$$

一方、式(2)の両辺を r に関して積分して水平断面内の平均をとれば次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}_g}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_d}{\partial t} (1 - e^{-\alpha t}) \dots\dots\dots (18)$$

さらに、式 (13), (17) を式 (18) に代入すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial t} = \frac{N_{eq}}{t_d} \frac{\sigma'_{v0}}{N_i} - \alpha \bar{u}(t) \dots\dots\dots (19)$$

$\bar{u}(0) = 0$ を考慮して式 (19) を解くと次式が得られる。

$$r_{u\text{ave}} = \frac{N_{eq}}{N_i} \frac{1}{\alpha t_d} (1 - e^{-\alpha t}) \dots\dots\dots (20)$$

さらに、式 (12) より次式が成立する。

$$r_{u\text{max}} = r_{u\text{ave}} / F(N) \dots\dots\dots (21)$$

また、地震動終了時の過剰間隙水圧が最も蓄積したときの $r_{u\text{ave}}$ を $(r_{u\text{ave}})_{\text{max}}$ と表わせば、次式が得られる。

$$(r_{u\text{ave}})_{\text{max}} = \frac{N_{eq}}{N_i} \frac{1}{\alpha t_d} (1 - e^{-\alpha t_d}) \dots\dots\dots (22)$$

もし、非改良地盤についても式 (1) が成立し、間隙水圧の対数消散速度 (α) が定義できれば、式 (20), (22) は非改良地盤についても成立する式である。

式 (22) の妥当性を検討するために、水平軸対称問題に対して有限要素法を適用して得られたシードらの解析結果と比較したものが図-14 である。式 (22) による方がシードらの解析結果よりもほとんどの場合安全側になっており、 $(r_{u\text{ave}})_{\text{max}} < 0.5$ 程度の場合には両者は工学的にみて比較的良好一致する。

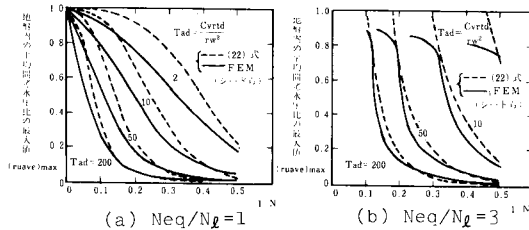


図-14 地震時に改良地盤内で蓄積する過剰間隙水圧に対する予測式の妥当性の検証 (シードらが行った有限要素法による結果との比較 (参考文献1) より引用して加筆)

(2) 間隙水圧比と液状化安全率 (F_l) の関係について

図-15 は水平地盤内のある深度における水平面に加わるせん断応力 (τ_d) と鉛直有効土かぶり圧 (σ'_{v0}) との比 (τ_d/σ'_{v0}) と液状化に要する繰返し回数 (N_c) の関係を表わしている。任意の応力比 $(\tau_d/\sigma'_{v0})_{ex}$ の波が N_{ex} サイクル作用する場合を考える。そのことの破壊に寄与する程度は、次式で定義される累積損傷度 (D) で表わされると仮定する。

$$\text{累積損傷度 } D = N_{ex}/(N_{ex})_i \dots\dots\dots (23)$$

ここで、水平面に加わるせん断応力比と繰返し回数がそれぞれ $(\tau_d/\sigma'_{v0})_{ex}$ と (N_c) と異なっても累積損傷度 (D) が等しければ相等しい損傷を受けると考える。

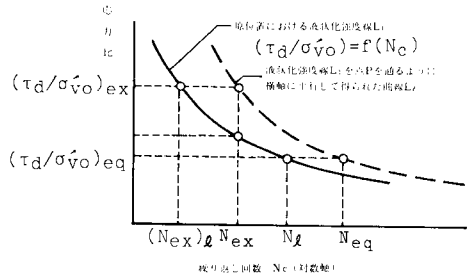


図-15 原位置における応力比と繰返し回数の関係

そうすれば、あらかじめ定めたせん断応力比 $(\tau_d/\sigma'_{v0})_{eq}$ に対応する繰返し回数 (N_{eq}) は次のように求めることができる。

$$N_{eq} = (N_{ex}/(N_{ex})_i) N_i \dots\dots\dots (24)$$

一方、岩崎ら¹¹⁾は、不攪乱砂質土の非排水動的強度を振動三軸試験の結果に基づき正規化して表示した。それによれば軸ひずみ両振幅 (DA) が5(%) のときには、次の関係式が成立する。

$$R_l(N_c) = R_l(20) \times (N_c/20)^{-0.17} \dots\dots\dots (25)$$

ここに、

N_c : 繰返し回数

$R_l(N_c)$: 繰返し回数 N_c を加えたときに軸ひずみ両振幅 (DA) が5% 生じるときのせん断応力比 ($= \sigma_d/2\sigma'_c$)

軸ひずみ両振幅が5(%) のときに間隙水圧比が1となること、および原位置におけるせん断応力比 (τ_d/σ'_{v0}) が式 (25) における R_l に比例すると仮定すれば、式 (24), (25) により次式が得られる。

$$\frac{N_{eq}}{N_i} = \left(\frac{1}{F_l} \right)^{5.89} \dots\dots\dots (26)$$

式 (26) は、安田ら¹²⁾が用いたものと結果的には同じ形のものである。

式 (26) は、非改良地盤の地震時液状化判定において求められる頻度の高い液状化安全率 (F_l) を用いて式 (21) 中の繰返し回数比 (N_{eq}/N_i) を表わすことができたという意味において、工学的に有用な式である。

式 (25) を式 (21) に代入すれば次式が得られる。

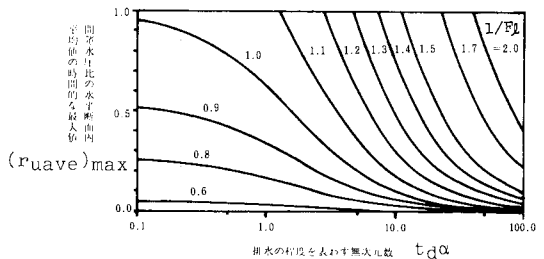


図-16 間隙水圧比と地盤の排水性、地震動の有効継続時間および液状化安全率の関係

$$(r_{u \text{ ave}})_{\max} = \left(\frac{1}{F_t}\right)^{5.89} \cdot \frac{1}{\alpha t_d} (1 - e^{-\alpha t_d}) \dots \dots \dots (27)$$

図-16は、式(27)に具体的な数値を代入した結果を表わしたものである。図-16は、液状化安全率が小さくなるほどグラベルパイルによる改良が困難なることを示している。

(3) 振動台実験結果との照合例

改良地盤内に発生する間隙水圧予測式の妥当性を検討するために振動台実験を行ったのでその結果を述べる。

実験に用いた土槽は、内側の寸法が、深さ50cm、横幅300cm、奥行53cmの鉄製の容器であり、長手方向に水平加振した。土槽内に層厚約48cmの飽和砂地盤を作成し、直径約6cmのグラベルパイル(ナイロントッキング内に $D_{50} \approx 4(\text{mm})$ の礫を詰めたもの)を一定ピッチの千鳥の配置にしたものを改良地盤とし、設置

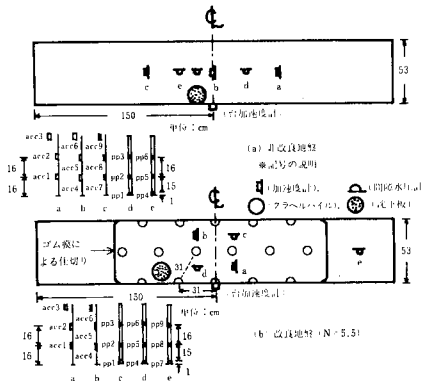


図-17 振動台実験におけるピックアップの配置

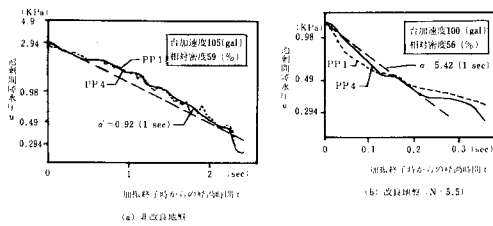


図-18 加振終了時に地盤内に残留した過剰間隙水圧の消散過程

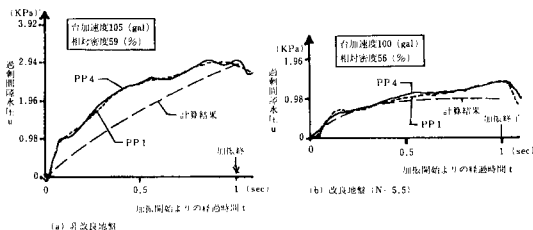


図-19 加振中の過剰間隙水圧の経時変化

しないものを非改良地盤とした(図-17)。図-17にピックアップの位置を示す。用いた砂は、豊浦砂である。台を加振した際の振動数は、実際の地震動の卓越振動数よりかなり大きな値を用いている。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振動を受ける場合に近づけ、現象そのものを実際の現象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には特別な根拠はない。地盤の相対密度および加振したときの台加速度がほぼ等しく、振動数(20 Hz)の等しい2つの実験ケースを選び出し、加振終了時からの地盤内の過剰間隙水圧の経時変化を示したものが図-18である。図-18より改良地盤および非改良地盤内の間隙水圧の対数消散速度 α 、 α' をそれぞれ、 $\alpha=5.42(1/s)$ 、 $\alpha'=0.92(1/s)$ と定めた。また図-19に示すのは、図-18と同じ実験ケースにおける加振中の過剰間隙水圧の変化である。非改良地盤の結果より N_i を求めるために次の値を式(20)に代入する。

$$\begin{cases} u=2.89(\text{kPa}) \Rightarrow \text{実測値} \\ \sigma'_{v0} = \gamma' \times z = \rho'gz = 4.26(\text{kPa}) \\ N_{eq} = 20 \\ \alpha' t_d = 0.92(1/s) \times 1.0(\text{s}) = 0.92 \end{cases}$$

これより、 $N_i=19.3$ を得る。

式(20)に上で定めた数値を代入して過剰間隙水圧の上昇曲線を描いたものが図-19(a)中の破線である。さらに $N_i=19.3$ 、 $\alpha=5.24(1/s)$ として、改良地盤中に発生する $r=r_e$ における過剰間隙水圧の上昇曲線を描いたものが図-19(b)中の破線である。この例に限って言えば、式(21)を適用しても大きな矛盾はなく、比較的妥当な結果が得られたといえる。

4. まとめ

以下に本研究によって得られた結果および成果を列挙する。これらのうち(1)、(2)、(3)は、主にきわめてゆるい砂(その大半が相対密度10~30%)に関して行われた室内実験結果に基づいている。

(1) 層厚、密度、発生する過剰間隙水圧の大きさが等しい場合、改良地盤の地表面沈下量は非改良地盤のそれよりも大きい。

(2) 改良地盤内に発生した過剰間隙水圧の対数消散速度は、打撃波の短い時間を除けば時間的にほぼ一定である。また、改良地盤内の同一深度であれば、グラベルパイルよりの水平距離によらず相等しい対数消散速度となった。

(3) 改良地盤における過剰間隙水圧の半径方向分布形状は、打撃後の短い時間を除けば時間的にほぼ一定で

ある。また、その形状は、バロンの理論における等ひずみ条件の解の分布形状によってよく近似された。

(4) 以上の実験事実のほかさらにいくつかの仮定を導入して、改良地盤内に地震時に発生する過剰間隙水圧の予測式を提案した。

最後に、本研究における実験の遂行に協力していただいた工藤康二氏（電力中央研究所）、田中栄治氏（電力技術整備）、当時の日本大学学生であった高野 仁氏（現・牛久村役場）、同じく古賀俊宏氏（現・(株)東海工業）の諸氏に感謝の意を表します。

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 : 有効円の半径または、円筒形の土槽の半径

N : 杭径比 (r_e/r_w)

H : 砂層の厚さ

r : 改良地盤の半径方向の座標 (中心で $r=0$)

z : 深さ方向の座標 (砂層表面で $z=0$)

t : 時間

c_{vr}, c_{vz} : それぞれ半径方向、鉛直方向の圧密係数

$u(r, z, t)$: 半径方向への座標 r , 深さ方向の座標 z , 時刻 t における過剰間隙水圧の値

$u(r, t)$: 鉛直方向への流れを無視した場合の半径方向の座標 r , 時刻 t における過剰間隙水圧の値

$\bar{u}(t)$: 水平断面内の過剰間隙水圧の平均値

σ'_{v0} : 鉛直有効土かぶり圧

τ_u : 間隙水圧比。地盤内にある点における過剰間隙水圧 u を鉛直有効土かぶり圧 σ'_{v0} で割ったもの。

$\tau_{u\text{ ave}}$: 間隙水圧比の水平断面内平均値 ($=\bar{u}(t)/\sigma'_{v0}$)

$(\tau_{u\text{ ave}})_{\text{max}}$: $\tau_{u\text{ ave}}$ の時間的な最大値。すなわち、地震動終了時の過剰間隙水圧が最も蓄積されたときの $\tau_{u\text{ ave}}$ 。

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

$\tau_{u\text{ max}}$: 間隙水圧比の水平断面内最大値 ($=u_e/\sigma'_{v0}$)

$(\tau_{u\text{ max}})_{\text{max}}$: $\tau_{u\text{ max}}$ の時間的な最大値

$u_d(r, t)$: 繰り返しせん断により発生する過剰間隙水圧

$\bar{u}_d(t)$: $u_d(r, t)$ の水平断面内における平均値

$\partial u_d(r, t)/\partial t$: 単位時間当たりに消散する過剰間隙水圧

$\partial \bar{u}_d(t)/\partial t$: 単位時間当たりに消散する過剰間隙水圧の水平断面内平均値

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

N_c : 繰り返し回数

α : 間隙水圧の対数消散速度

t_d : 地震動の有効継続時間

F_i : 液状化安全率

$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

参考文献

- 1) Seed, H. B. and Booker, J. R. : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposit using Gravel Drain Systems, Report No. EERC 76-10, EERC, 1976.
- 2) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Effects of Vertical Drains on the Bearing Capacity of Saturated Sand During Earthquakes, Proc. Int. Conference on Engineering for Protection from Natural Disasters, pp. 643-655, 1980.
- 3) 石原研而・斉藤 彰・有馬 宏 : 護岸液状化対策としての砕石パイルの適用例, 土と基礎, Vol. 28, No. 4, pp. 9-15, 1980.
- 4) 竹原有二・田中靖雄・大平正勝 : 砕石ドレーンパイロ打設地盤の原位置液状化試験, 第35回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 263-264, 1980.
- 5) 谷口栄一・佐々木康・小笠原久 : 砕石ドレーンによる液状化対策に関する大型振動台実験, 第16回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 633-636, 1981.
- 6) 足立紀尚・龍岡文夫 : 土の力学 (III), 一圧密・せん断・動的解析一, 新大系土木工学 18, 技報堂出版, pp. 308-310, 1981.
- 7) 斉藤 彰・大野義郎, ほか4名 : 砕石ドレーン工法の液状化対策効果に関する実験的研究, 日本鋼管技報 No. 92, pp. 66-78, 1982.
- 8) Barron, R. A. : Consolidation of fine-Grained Soils by Drain Wells, Trans. ASCE, Vol. 113, pp. 718-742, 1948.
- 9) De Alba, P., Chan, C. K. and Seed, H. B. : Determination of Soil Liquefaction Characteristics by Large-Scale Laboratory Tests, Report No. EERC 75-14, EERC, 1975.
- 10) Annaki, M. and Lee, K. L. : Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics, J. GED. ASCE, Vol. 103, No. GT 6, pp. 549-564, 1977.
- 11) 岩崎敏男・龍岡文夫・安田 進 : 不攪乱砂質土の非排水動的強度の正規化表示, 第13回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 465-468, 1978.
- 12) 安田 進・山口 勇・田中 猛 : 液状化と沈下量, 過剰間隙水圧, 第36回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 94-95, 1981.

(1984. 2. 16・受付)