

変動水圧作用下における砂層液状化に及ぼす置換法の効果

Effect of Displacement Method on Sand Bed Liquefaction under Oscillating Water Pressure

岡山大学工学部 正員 名合 宏之
岡山大学工学部 正員 前野 詩朗
岡山大学大学院 学生員 安倉 俊雄

1. まえがき

著者らは、従来より、水理構造物周辺の局所洗掘の発生に関して、変動水圧による地盤の脆弱化あるいは液状化が主要な原因になるのではないかとこの観点から、変動水圧作用下における砂層地盤内の間隙水圧分布・有効応力分布特性について基礎的な研究をすすめてきた。その結果、変動水圧による砂層の液状化の発生を実験的に確かめるとともに、その力学機構の理論的説明が可能であることを示した。¹⁾ さらに、砂層の性質と液状化特性について検討し、透水係数が大きくなると液状化は起り難くなることを明らかにした。²⁾ 本研究は、このような成果を踏まえて、液状化を防止するための一つの方法として、透水係数が小さく液状化が発生しやすい砂層の上部を透水係数の大きな砂層に置換する方法を提案し、その液状化防止効果について実験的かつ理論的に検討したものである。

2. 理論解析法の概要

図1に示されるような鉛直1次元砂層モデルを対象として解析する。不透水性地盤上の透水係数が小さな厚さDの砂層の上部を透水係数が大きな厚さD₁の砂層で置換し、砂層表面上に変動水圧水頭h_sが作用している状態を考える。砂層内の水および砂の運動は弾性砂層内の浸透流問題の取り扱いと同様な手法で解析される。すなわち、砂層および水は圧縮性を有しており、水の密度、空隙率および砂層の厚さは変化するものとする。ただし、砂層の水平方向への変形は無視しうるものとする。また、空隙は水およびわずかの空気によって占められており、空隙率λは水および空気の含有率λ_wおよびλ_aの和によって表わされるものとする。砂層内間隙水圧分布の基礎式は、砂層構成材料実質部分の体積変化を無視しうることを、

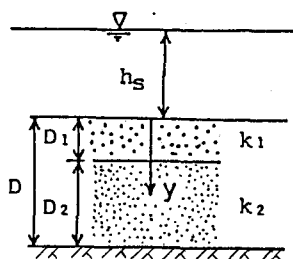


図1 透水係数の変化を考慮した砂層モデル

また、砂の慣性力を無視し、上載荷重が有効応力σ_yと間隙水圧ρghの和と釣り合っていることなどの仮定のもとで浸透流の連続の式および運動の式(ダルシーの式)を用いて次式のように誘導される。¹⁾

$$\left(\beta\lambda_w + \frac{\lambda_a}{\rho gh + p_0} + \alpha\right) \frac{\partial h'}{\partial t} + \left(\beta\lambda_w + \frac{\lambda_a}{\rho gh + p_0}\right) \frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{k}{\rho g} \frac{\partial^2 h'}{\partial y^2} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、α: 砂の圧縮率、β: 水の圧縮率、ρ: 水の密度、g: 重力加速度、h': 過剰間隙水圧水頭、p₀: 大気圧、k: 透水係数である。

上式を以下の境界条件のもとで解くことにより、砂層内の間隙水圧および有効応力σ_yを求めることができる。

$$\left. \begin{array}{ll} y = 0 & \text{で} \quad h' = 0 \\ y = D & \text{で} \quad \frac{\partial h'}{\partial y} = 0 \\ y = D_1 & \text{で} \quad -k_1 \frac{\partial h'}{\partial y} = -k_2 \frac{\partial h'}{\partial y} \end{array} \right\} \text{----- (2)}$$

液状化は次式のもとで発生するものとする。

$$\frac{\sigma_y}{(\rho_s - \rho)gy(1 - \lambda)} \left(= 1 - \frac{\rho gh'}{(\rho_s - \rho)gy(1 - \lambda)} \right) = 0$$

式（１）は非線型方程式であり，解析的に解を求めることは困難であり，一般には数値的に解析される。

3. 実験的検討

3. 1 実験装置及び実験方法

実験には図2に示される円筒型の鉛直1次元砂層模型を用いた。砂試料を入れる下部円筒の内径は89 mmであり，高飽和状態の砂試料が容器の底から65 cmの高さまで入られている。砂層表面からの水深 h_0 は約80 cmであり，水面上に周期変動空気圧を作用させている。変動圧振幅は水頭にして約65 cmであり，周波数は1.37 Hzである。砂層材料は透水係数が小さな砂層として50 %粒径が0.25 mmのほぼ一様とみなせる砂を用い，透水係数の大きな置換砂としては，現地採取の砂をふるい分けした粒径が2.00 mm～2.38 mmの砂を用いている。透水係数はそれぞれ約 2.0×10^{-2} cm/sと1.31 cm/sであり，表1に示される4つの場合について実験を行なった。水中および砂層中の圧力は，拡散型半導体圧力変換器によって側方から検出している。

3. 2 実験結果および考察

図3から図6までは，それぞれRun 1，2，3および4に対する間隙水圧の時間変化，図7から図10までは間隙水圧の鉛直分布，図11から図14までは有効応力の時間変化が示されている。Run 1（図3，図7，図11参照）は砂層全体が透水係数の小さい砂で占められている状態である。この場合には液状化に影響を与える要因つまり振幅減衰，位相の遅れとも著しいことを示しており，図11からもわかるように砂層内全体で液状化の発生がみられる。Run 4（図6，図10，図14参照）は砂層全体が透水係数の大きい砂で占められている状態であり，振幅減衰，位相の遅れとも小さく液状化は発生していない。Run 2（図4，図8，図12参照）およびRun 3（図5，図9，図13参照）はRun 1の砂層の上部を透水係数の大きい砂層でそれぞれ10 cmおよび20 cm置換した場合である。これらの場合には置換した透水係数の大きい砂層ではRun 4の場合と同様に振幅減衰，位相の遅れともわずかであるが，透水係数が小さい砂層内でRun 1の場合と同様な振幅減衰と位相の遅れが発生している。しかし，有効応力の時間変化（図12，図13参照）をみると，置換する砂層の厚さが増すにつれ，液状化が起き難くなっていることがわかる。

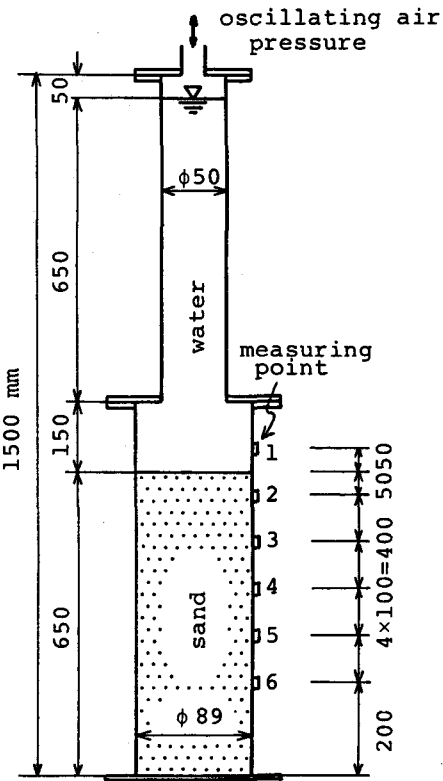


図2 実験に用いた砂層模型

表1 実験対象砂層の厚さおよび透水係数

Run	k_1 (cm/s)	k_2 (cm/s)	D_1 (cm)	D_2 (cm)
1		≈ 0.02	0	65
2	≈ 1.31	≈ 0.02	10	55
3	≈ 1.31	≈ 0.02	20	45
4	≈ 1.31		65	0

が，透水係数が小さい砂層内でRun 1の場合と同様な振幅減衰と位相の遅れが発生している。しかし，有効応力の時間変化（図12，図13参照）をみると，置換する砂層の厚さが増すにつれ，液状化が起き難くなっていることがわかる。

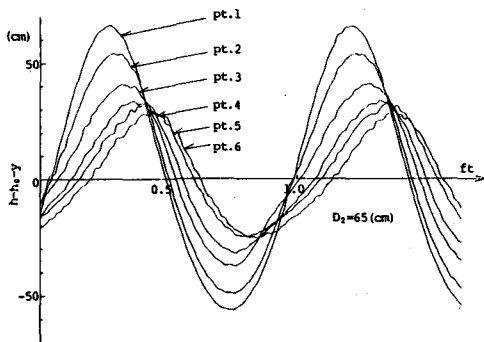


図3 間隙水圧の時間変化 (Run 1)

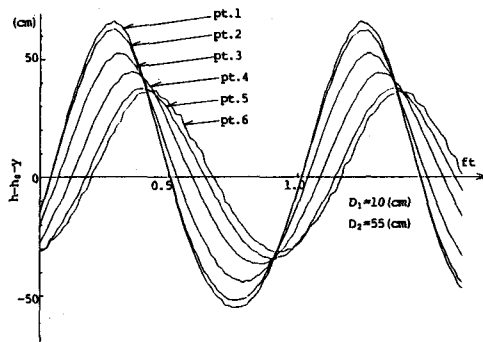


図4 間隙水圧の時間変化 (Run 2)

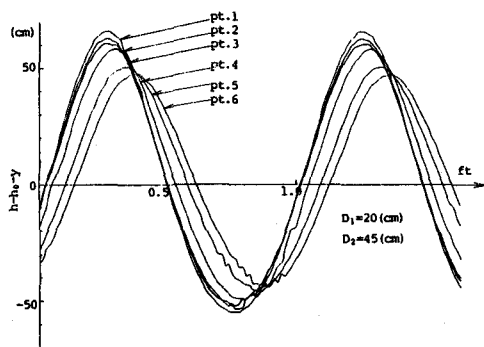


図5 間隙水圧の時間変化 (Run 3)

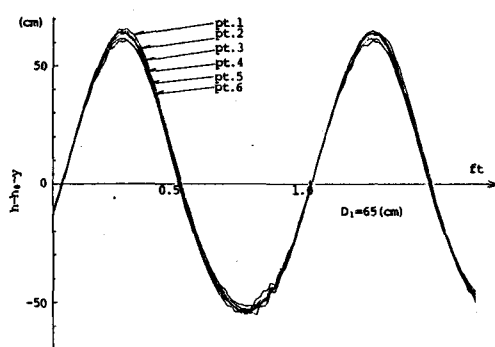


図6 間隙水圧の時間変化 (Run 4)

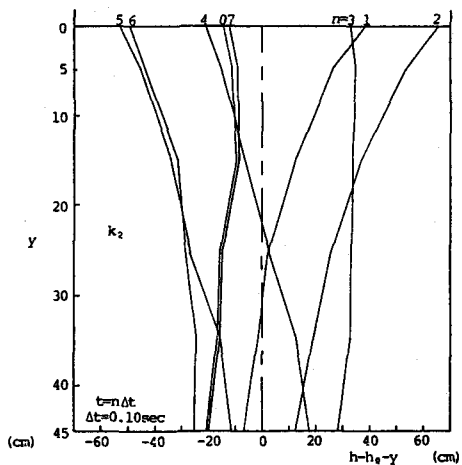


図7 間隙水圧の鉛直分布 (Run 1)

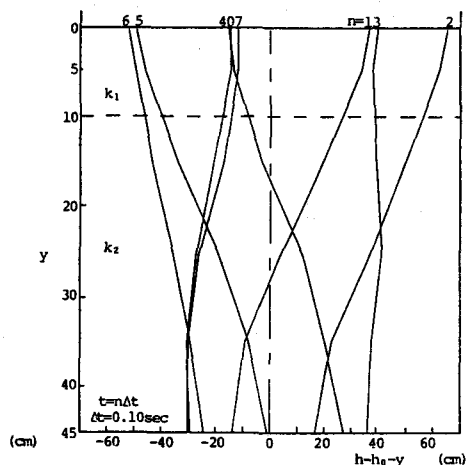


図8 間隙水圧の鉛直分布 (Run 2)

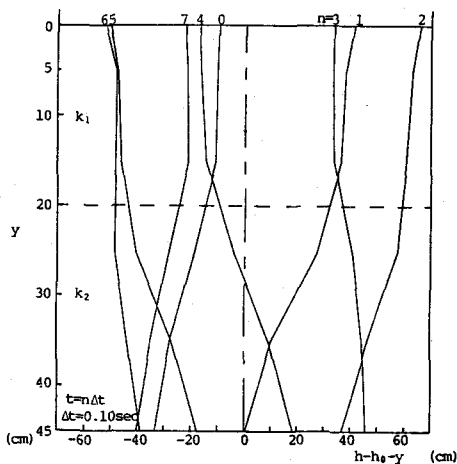


図9 間隙水圧の鉛直分布 (Run 3)

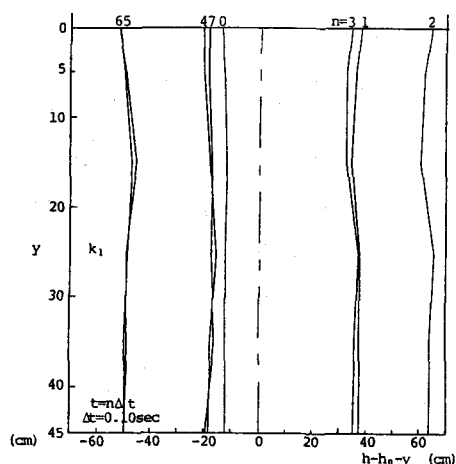


図10 間隙水圧の鉛直分布 (Run 4)

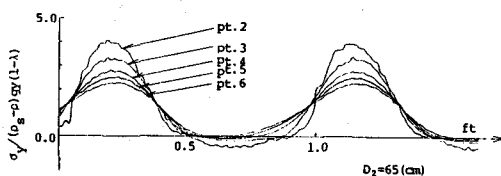


図11 有効応力の時間変化 (Run 1)

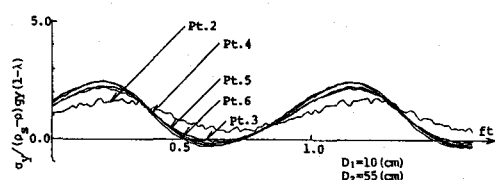


図12 有効応力の時間変化 (Run 2)

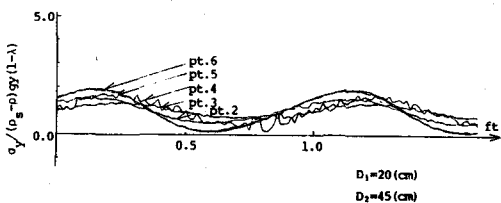


図13 有効応力の時間変化 (Run 3)

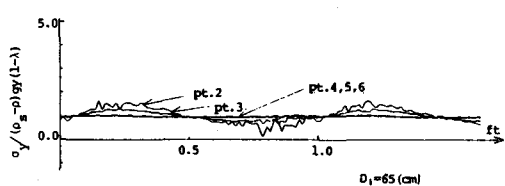


図14 有効応力の時間変化 (Run 4)

3.3 理論解析結果

式(1)で示した砂層内間隙水圧分布の基礎式を適用し、実験で行なった4つの場合について理論解析を行ない、実験結果との比較を行なった。計算条件として透水係数は $k_1 = 1.31 \text{ cm/s}$ 、 $k_2 = 0.02 \text{ cm/s}$ とし、砂層表面に作用する変動水圧 h_s は実験により得られた値を境界条件として用いた。その他の計算条件は $\bar{\lambda}a = 0.003$ 、 $\lambda_w = 0.4$ 、 $\alpha = 5.17 \times 10^{-4} / \text{atm}$ 、 $\beta = 4.38 \times 10^{-5} / \text{atm}$ を用いた。

図15から図26はそれぞれ図3から図14に対応する数値シミュレーション結果である。これらの図より、理論解析結果は実験値とよく一致していることがわかる。また、有効応力の時間変化の図からも示されるように、置換する砂層の厚さが増すことによる液状化防止効果もよく説明されている。なお、Run 1の有効応力の変化の図にみられる測点2および測点3の液状化継続時間の実験値と理論値のちがいについては、

理論解析では液状化後も上載荷重が有効応力 σ_y と間隙水圧 ρgh の和とつり合っているという平衡状態が成立するとしているが、実際には砂層が浮遊状態となり、この関係が成立していないことに起因するものであり、液状化後の砂層の力学機構の取り扱い法に問題があると考えられる。

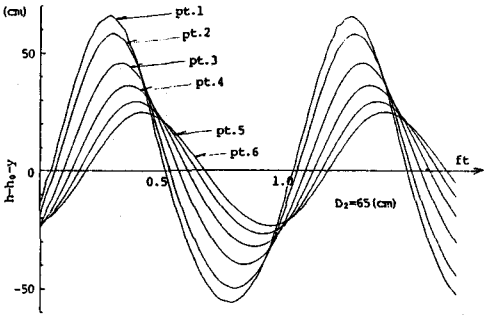


図 15 間隙水圧の時間変化 (Run 1)

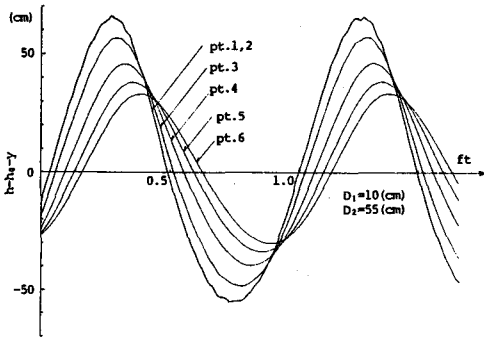


図 16 間隙水圧の時間変化 (Run 2)

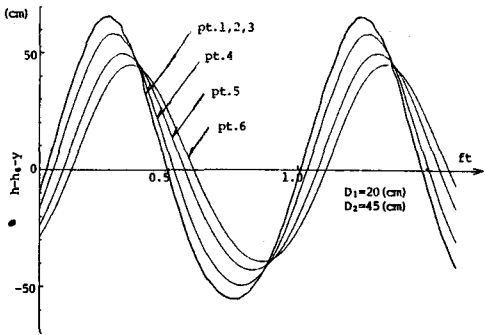


図 17 間隙水圧の時間変化 (Run 3)

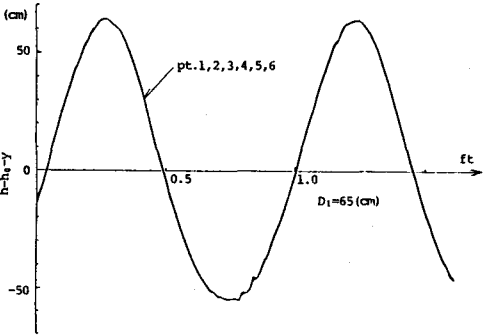


図 18 間隙水圧の時間変化 (Run 4)

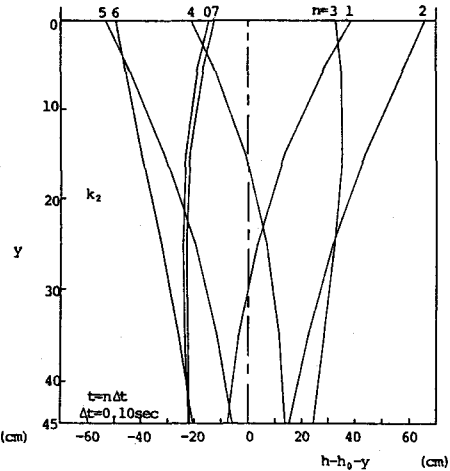


図 19 間隙水圧の鉛直分布 (Run 1)

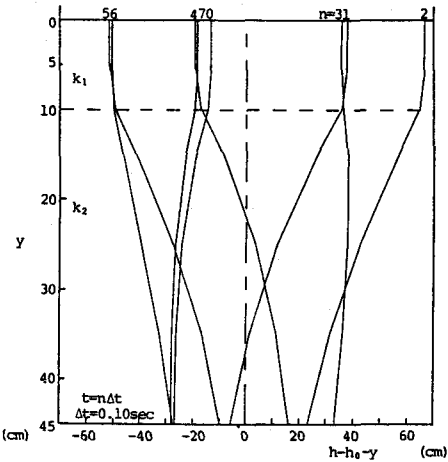


図 20 間隙水圧の鉛直分布 (Run 2)

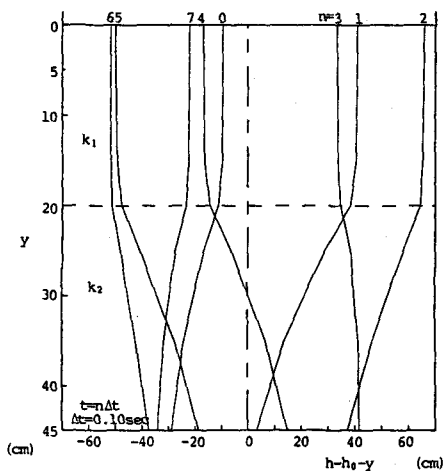


図 21 間隙水圧の鉛直分布 (Run 3)

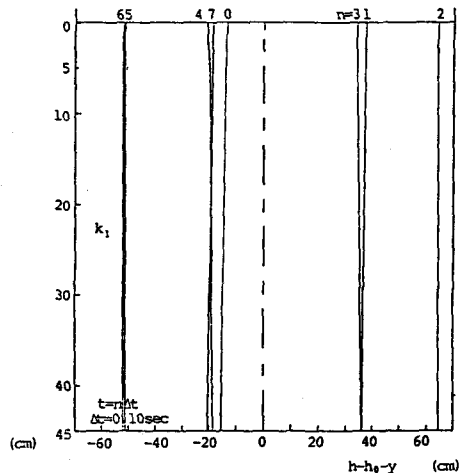


図 22 間隙水圧の鉛直分布 (Run 4)

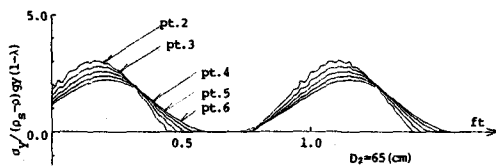


図 23 有効応力の時間変化 (Run 1)

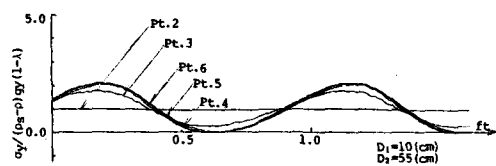


図 24 有効応力の時間変化 (Run 2)

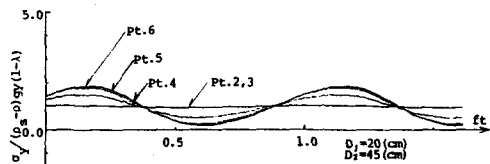


図 25 有効応力の時間変化 (Run 3)

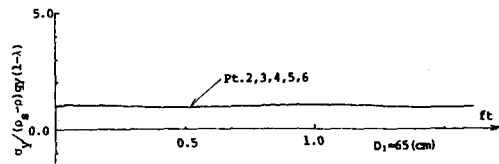


図 26 有効応力の時間変化 (Run 4)

以上述べてきたように、ここで提案した置換法の液状化防止効果は実験的に確かめられ、また、その理論的説明もほぼ妥当であることが明らかにされた。今後は、提案した置換法の原理あるいは手法を実際の洗掘防止の問題、たとえば護床工の設計等に応用していくかが検討課題である。

参考文献

- 1) 名合宏之：変動水圧による砂層の液状化に関する研究，第26回水理講演会論文集，1981，P.P. 589-594
- 2) 名合宏之，安倉俊雄，高井欽次：変動水圧による砂層の液状化に関する基礎的研究，土木学会第34回中国四国支部年次学術講演会概要集，Ⅱ-16，1982