

パイルド・ラフト基礎による液状化抑止効果に関する水～土連成計算

名古屋大学 (正) 山田英司, 野田利弘, 浅岡 顕
 名古屋大学 (学) 加藤しのぶ

1 はじめに

べた基礎に摩擦杭を併用したパイルド・ラフト基礎は、基礎に上部構造物による荷重が作用したときに沈下量を低減させる基礎工法¹⁾である。砂地盤上にパイルド・ラフト基礎を設置した場合に、上述の観点だけでなく、砂地盤が液状化した際に上部構造物への被害を低減するという観点から、パイルド・ラフト基礎による砂地盤の液状化抑止効果の水～土連成計算により調べた。なお、パイルド・ラフト基礎をべた基礎の場合と比較している。

2 計算条件と設定した砂地盤

(1) 有限要素メッシュと境界条件

パイルド・ラフト基礎は3次元的な配置をしているので、本来は3次元計算が必要であるが、本論文では簡単のため、平面ひずみ条件下で計算する。計算に用いる有限要素メッシュおよび境界条件を図1に示す。地盤の上端面(境界EH)は排水境界で、地表面と水位面が一致するように上端面の水圧は常にゼロと設定する。地盤下端面(境界AD)と側面(境界AE・DH)は非排水境界とした。

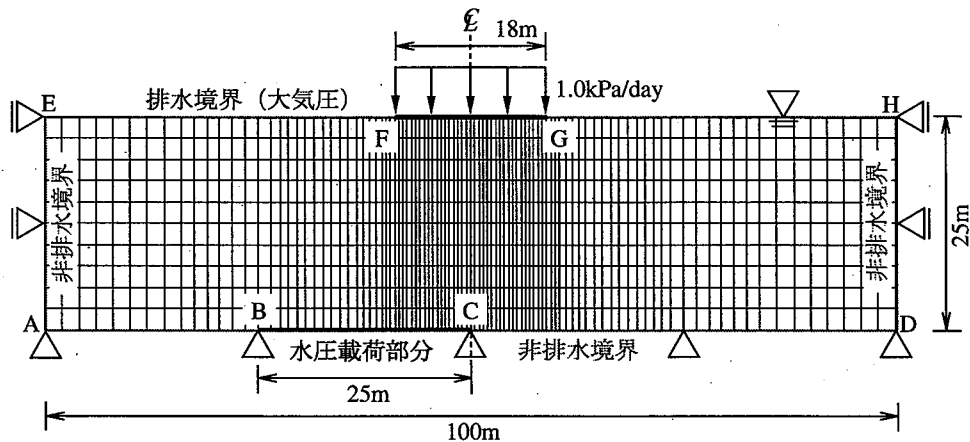


図1 有限要素メッシュ および 境界条件

(2) 砂地盤の初期状態と非排水せん断応答

計算対象として、表1に示す弾塑性パラメータを有し、地盤全体に均質な初期過圧密比 $1/R_0 = 5.0$ 、初期構造の程度 $1/R_0^* = 10.0$ を有する砂地盤を想定した。砂の挙動を表すため、構成式に「上負荷面²⁾ カムクレイモデル」を用いた。土は過圧密状態と構造の程度の組み合わせにより、表2に示すように4つの状態に分類することが出来る。塑性変形が進めば最終的にはどの土も(B)の状態の土になる。上負荷面カムクレイモデルでは、正規圧密状態にある繰り返された土(B)の負荷時の挙動を表すカムクレイ降伏面と、それに相似な

表1 弾塑性パラメータと初期条件

圧縮指数 λ	0.041
膨潤指数 κ	0.008
限界状態定数 M	1.24
$p' = 98\text{kPa}$ における比体積 N	1.97
ポアソン比 ν	0.30
透水係数 k (cm/sec)	1.67×10^{-2}
土の密度 ρ_s (kN/m ³)	25.5
正規圧密土化指数 m	0.04
構造劣化指数 m^*	0.9
初期過圧密比 $1/R_0 = \text{OCR}_{\text{ini}}$	5.0
初期構造の程度 $1/R_0^*$	10.0

表2 土のカテゴリー

	構造を残した土 ($0 < R^* < 1$)	練り返された土 ($R^* = 1$)
正規圧密土 ($R = 1$)	(A)	(B)
過圧密土 ($0 < R < 1$)	(C)	(D)

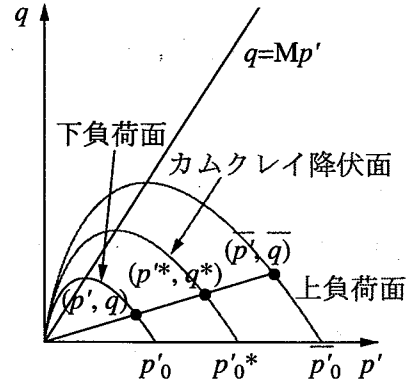


図2 3つの負荷面の関係

上負荷面・下負荷面の3つの負荷面を考える。応力状態が上負荷面上にある土は構造を有する正規圧密土で、カムクレイ降伏面と上負荷面の相似率 R^* が構造の程度を表す。また、下負荷面上に应力状態がある土は過圧密状態にあり、下負荷面と上負荷面の相似率 R は、その逆数 $1/R$ が過圧密比 OCR に相当する。なお表1で、 $1/R_0 = \bar{p}'_0/p'_0$ 、 $1/R_0^* = \bar{p}'_0/p'_{0*}$ である(図2)。

表1に示す弾塑性パラメータ、初期過圧密比 $1/R_0$ 、初期構造の程度 $1/R_0^*$ 、および土被り圧を考慮して決定される砂地盤の初期状態(平均有効応力 p'_{ini} 、間隙水圧 u_{ini} 、比体積 v_{ini})は、図3に示すように深さ方向に分布している。

地盤中央部(図3での点線部分)における土性(間隙比、応力状態等)を初期値として、「上負荷面カムクレイモデル」に非圧縮(非排水)条件下での一様せん断場を与え差分的に数値積分する。設定した地盤内の砂要素の非排水せん断挙動は図4のようになる。図4の $R, R^* \sim \epsilon_s$ 関係はせん断の進展に伴う構造喪失($R^* \rightarrow 1$)が過圧密の解消($R \rightarrow 1$)より早いことを示し、また、 $q \sim p'$ 関係は限界状態線下側で軟化した後に、上側に状態を移して硬化を示している。この設定した砂地盤はかなりゆるい状態であることが分かる^{3), 4)}。

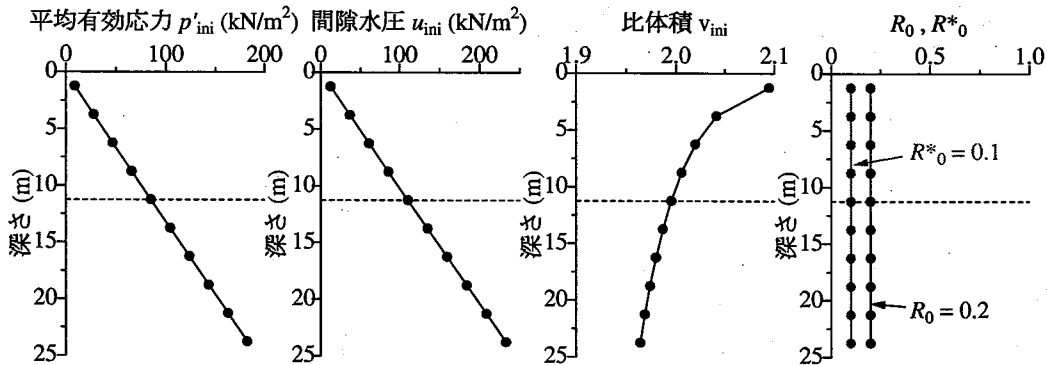


図3 地盤の初期状態

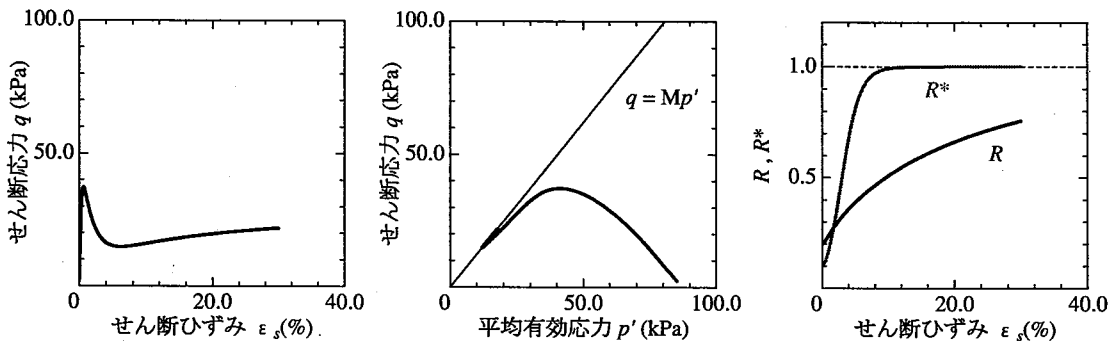


図4 地盤中央部での非排水せん断挙動

(3) 基礎形式

計算で用いた基礎形式は、①「べた基礎」(基礎幅 18m)、②「パイルド・ラフト基礎」(基礎幅 18m のべた基礎+杭長 10m の摩擦杭 6 本、杭間隔 3m でべた基礎に剛結合) の 2 種類である(図 5)。本論文では基礎は地盤に比べて極めて硬く地盤の変形を拘束する役割を果たしていると考えられる。そのため基礎に特殊な要素を入れることなく、図 6 に示すように、地盤の変形場に距離不変・角度不変の制約条件を課すことで基礎の役割を表現した⁵⁾。なお、基礎設置時には砂地盤の初期構造を劣化させないことを仮定している。また、平面ひずみ条件下での計算のため杭は板状になるが、杭を挟んで隣合う要素間には間隙水の移動を許している。

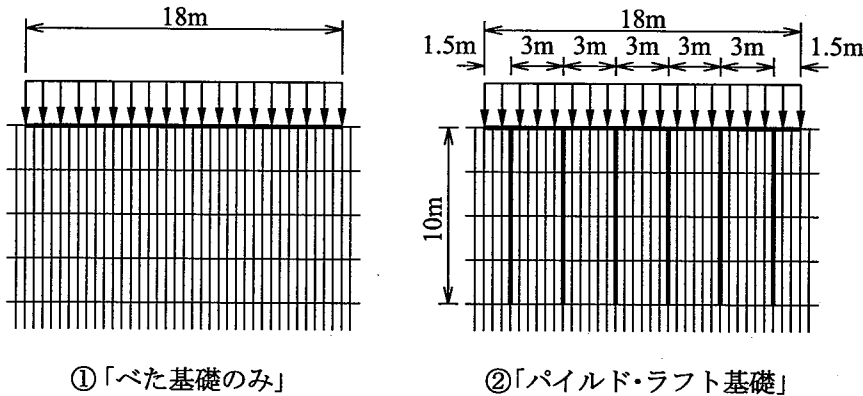


図 5 計算に用いた基礎形式

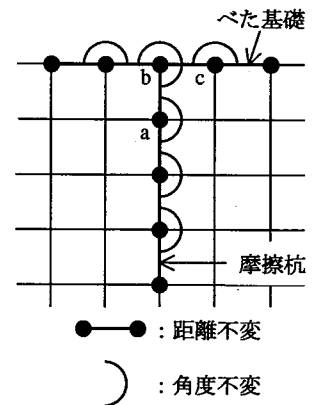


図 6 基礎のモデル化

3 計算結果

(1) 基礎を介して上載荷重が作用する砂地盤の変形特性

設定した砂地盤上に基礎を設置し(図 1 境界 FG)、上部構造物による荷重が砂地盤に作用する場合について砂地盤の変形特性を調べる。上部構造物は等分布荷重に置き換えて表現し、載荷速度 1kPa/day で 200kPa まで載荷する。図 7 に上載荷重と基礎端部(図 1F 点)における沈下量の関係を示す。この砂地盤は構造が発達しているため比較的圧縮性が大きい。本論文の計算条件ではパイルド・ラフト基礎はべた基礎に比べて基礎の沈下量を 1/2 程度に低減している¹⁾。

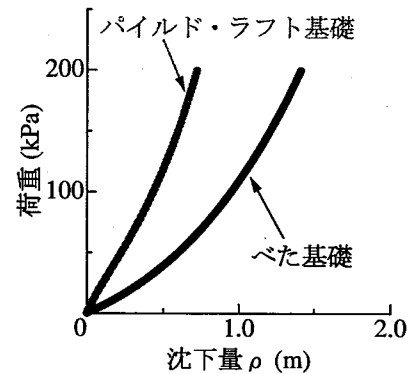


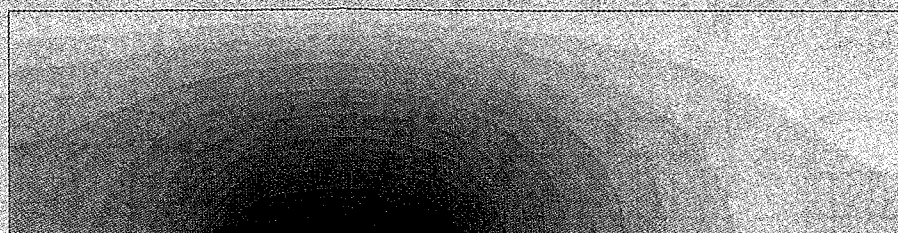
図 7 荷重～沈下量関係

(2) 浸透力による砂地盤の液状化

本論文では砂地盤の液状化を繰り返し載荷ではなく、簡単のため、浸透力載荷によって引き起こす計算で再現する。砂地盤に上載荷重が作用していない場合について、地盤下端部の境界 BC において水圧を 228.6kPa まで急速載荷(載荷速度 9.81kPa/sec)した後にその水圧を持続させる。図 8、図 9、図 10 にそれぞれ過剰間隙水圧 u_e 、平均有効応力 p'/p'_{ini} (p'_{ini} は初期平均有効応力)、初期状態 v_{ini} からの比体積変化 Δv の地盤内分布を示す。水圧を 228.6kPa まで急速載荷すると、図 8(1) に示すように砂地盤下部の水圧載荷部分に過剰間隙水圧の不均一場が発生する。この過剰間隙水圧の発生により水圧の急速載荷直後は平均有効応力は減少する(図 9(1))が、比体積はほとんど変化しない(図 10(1))。その後水圧 228.6kPa のまま一定に保持して放置すると、急激な水頭差の存在によって間隙水は移動してやがて定常浸透場に近づく(図 8(2))が、間隙水は水圧載荷部分の中央真上の地表面に向かって流れ続ける。このためこの部分では平均有効応力が減少し(図 9(2))、膨潤している(図 10(2))。すなわち吸水軟化により(p' も q もゼロとなって)液状化している。これによって応力が再配分されて液状化域は地表面から下へ向かって拡大していく。



(1) 水圧载荷直後



(2) 液状化中

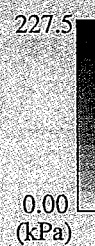
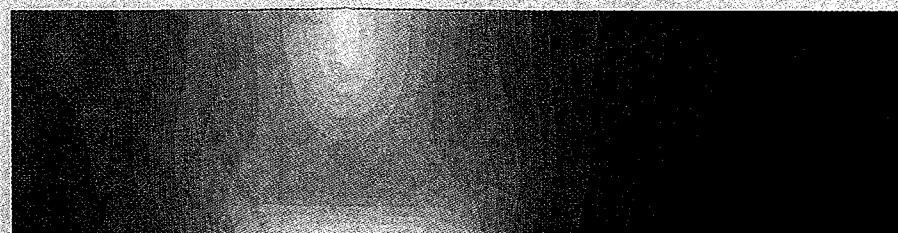


図8 過剰間隙水圧 u_e の地盤内分布



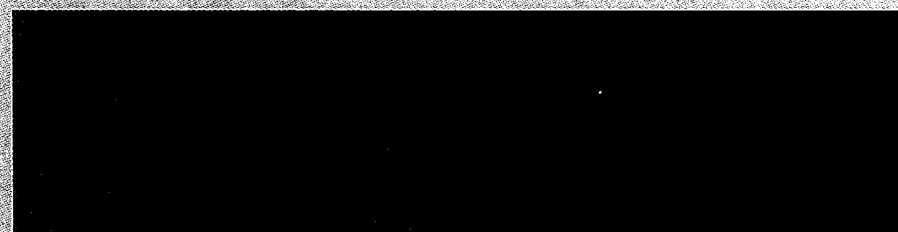
(1) 水圧载荷直後



(2) 液状化中



図9 平均有効応力 p'/p'_{ini} の地盤内分布



(1) 水圧载荷直後



(2) 液状化中

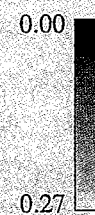


図10 比体積変化 Δv の地盤内分布

(3) パイルド・ラフト基礎による砂地盤の液状化抑止効果

a) 液状化中

基礎を介して上載荷重 200kPa が作用している砂地盤に対し、(2)と同様に地盤下端部から水圧を急速に増加させた後に、その水圧を一定に保って砂地盤を液状化させる。その際に基礎が砂地盤の液状化にどのような影響を及ぼすかを調べる。

① 上載荷重なし、② べた基礎、③ パイルド・ラフト基礎の場合について、図 11 に液状化継続時における平均有効応力 p'/p'_{ini} の地盤内分布を示す。基礎に上載荷重が作用すると地盤内の平均有効応力は初期状態から増加して $p'/p'_{ini} \geq 1$ となるが、この部分は全て同じ区分として処理している。液状化域は平均有効応力 p'/p'_{ini} が減少してほとんどゼロに近づいている部分である。基礎を介して上載荷重が作用している砂地盤では、液状化域は上部構造物から離れた位置に移動し、上載荷重がない場合よりも液状化域は縮小している。また、③ パイルド・ラフト基礎が設置されていると、② べた基礎の場合より上部構造物から離れた位置に液状化域は移動している。

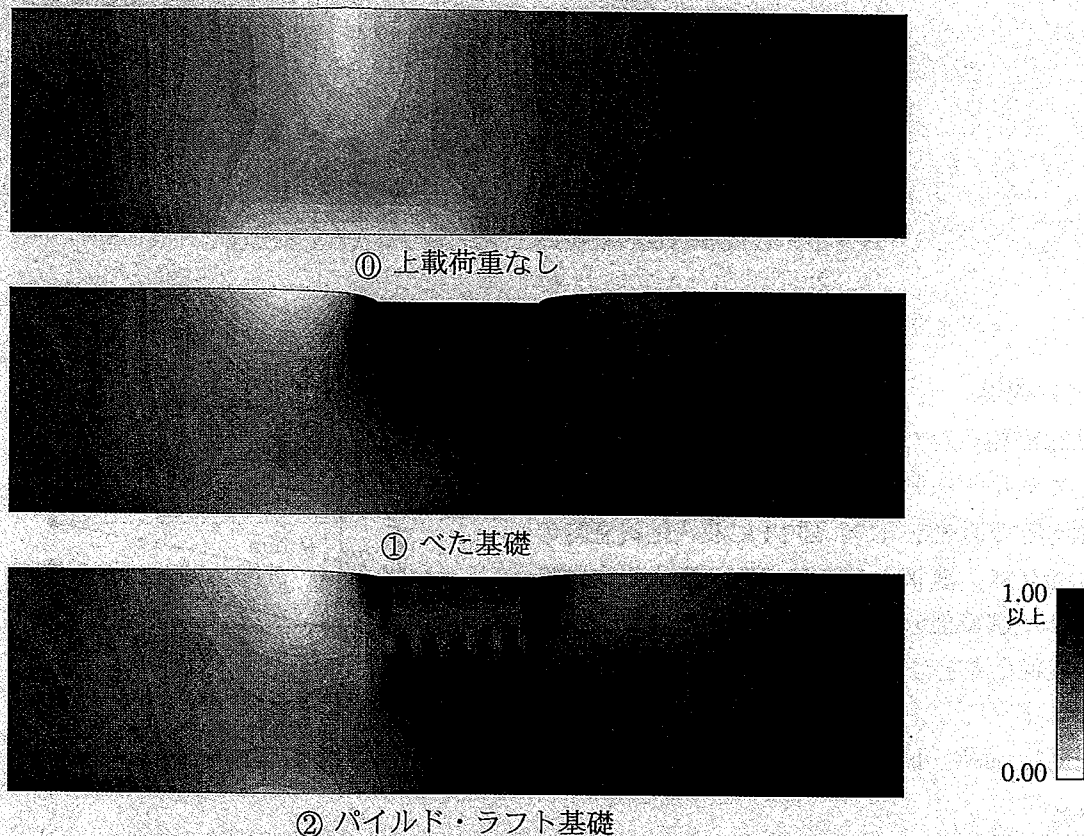


図 11 液状化中における平均有効応力 p'/p'_{ini} の分布

本論文では砂地盤の液状化により上部構造物に及ぼす被害は基礎の傾斜と考える。地盤下端部での水圧を一定に保ち砂地盤の液状化を継続させる場合、水圧荷重部分の地表面では隆起が起こるので、図 12 に示すように基礎は傾斜する。パイルド・ラフト基礎はべた基礎よりも傾斜を小さく抑え、液状化により上部構造物に及ぼす被害を低減している。

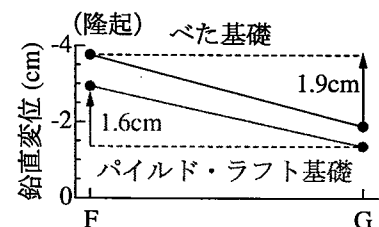


図 12 基礎の傾斜 (液状化中)

図 13 は液状化中の比体積変化 Δv の地盤内分布である。図 11、図 13 に示す液状化時における砂地盤内の応力状態と比体積の変化から、パイルド・ラフト基礎は杭間の地盤を圧縮することなく基礎に作用した上載荷重を杭先端付近の地盤深部に伝達して地盤深部の拘束圧を大きくするとともに、周辺地盤を一体化することによって、砂地盤の液状化によって上部構造物に及ぼす被害を低減していることが分かる。

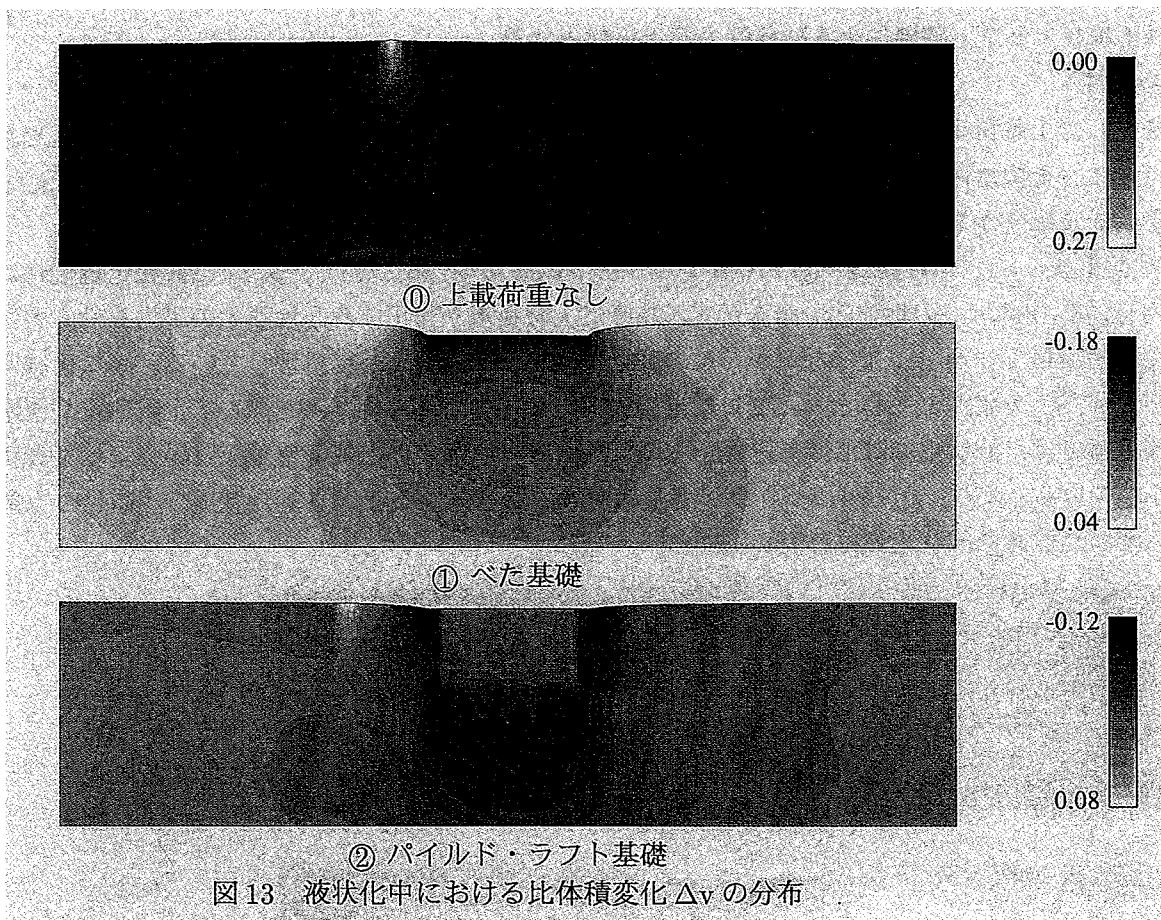


図13 液状化中における比体積変化 Δv の分布

b) 液状化終息時

次に液状化が終息した状態を再現するため、水圧を急速に荷重した後に水圧荷重部分を「非排水境界」に変更し、過剰水圧の消散を待つ。図14に液状化終息時の基礎の傾斜を示す。液状化が終息すると液状化中は隆起していた水圧荷重部分側の基礎端部Fでは沈下が大きくなり、液状化中とは逆向きに基礎は傾斜している。しかしパイルド・ラフト基礎はべた基礎よりも全体の沈下量とともに傾斜を小さく抑えていることが分かる。

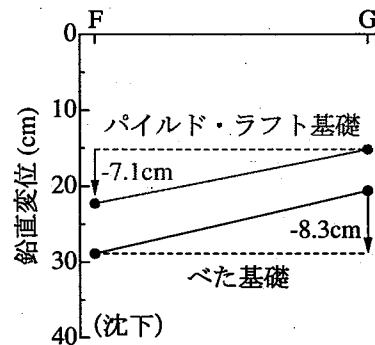


図14 基礎の傾斜 (液状化終息時)

4 おわりに

通常は沈下量低減効果が期待されるパイルド・ラフト基礎は、砂地盤の液状化時に液状化域を構造物から離れた部分へ移動させるとともに、砂地盤の液状化による上部構造物への被害低減に対して有効な基礎形式であることが分かった。

参考文献

- 1) 高稲ら (1999) : 水～土連成解析によるパイルドラフト基礎の沈下抑制メカニズムの検討, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 3-A, pp.478-479.
- 2) Asaoka et al.(2000) : Superloading Yield Surface Concept for Highly Structured Soil Behavior, Soils and Foundations, Vol.40(2), pp.99-110.
- 3) 浅岡ら (2000): 「砂と粘土の違い」に関する構造・過圧密の劣化過程から見た一考察, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp.573-574.
- 4) 浅岡ら (2000): 「砂と粘土の違い」に関する3軸非排水試験の弾塑性解析, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp.575-576.
- 5) 浅岡ら (1999) : 各種構造物の実例にみる地盤改良工法の選定と設計—地盤改良と土質力学, 土と基礎, Vol.47(1),pp.45-50.