

(155) 三次元解析による液状化時の杭挙動の検討

清水建設(株) (正) ○ 大槻 明、福武 毅芳
(正) 藤川 智、吉見 吉昭

1. はじめに

軟弱地盤中の杭基礎の地震時挙動は周辺の地盤震動に支配され、特に液状化時の地盤変形によって杭に大きなひずみが生じることが指摘されている。これまでの振動実験により液状化を対象とした杭の動的挙動は明らかにされて来ているが¹⁾²⁾、解析面からの検討は種々の制約から十分に行われていない。本研究では、三次元有効応力解析により液状化時の杭基礎の地震時挙動や、液状化対策を目的とした地盤改良の杭応答に与える影響を検討した。

2. 解析手法

著者らは既に三次元の液状化解析ができるコード(コード名: *HiPER*)を開発し、多方向入力の影響を考慮した三次元地盤の液状化防止効果についての解析的検討³⁾や液状化した実地盤の観測記録や土槽振動実験に基づいたシミュレーション解析⁴⁾⁵⁾を行った。地盤を対象としたこれらの解析結果から本手法の有効性を確認したが、さらに強震時の杭などを含む複合基礎の応答を定量的に評価するため、*HiPER*の改良を行った。三次元構造物・地盤系の非線形解析の最近の研究では、石原・三浦⁶⁾はMohr-Coulombを併用した弾性・完全塑性体を構成式として、荷重伝達法(陰解法)により相互作用の検討を行っている。本手法⁷⁾は、有効応力法に基づいた非線形地盤-建屋相互作用解析コードで、ダイレイタンシーや過剰間隙水圧、水圧上昇に伴う地盤剛性の低下などの地盤の非線形性が忠実に表現できる。大規模自由度の運動方程式を高速に解くうえから、空間領域については積分点を1点にした低減積分を用いた有限要素法により定式化し、また時間軸の直接積分法として陽解法を用いている。解析に用いた土の構成式としては、せん断応力・せん断ひずみ関係として修正Ramberg-Osgoodモデルを三次元に拡張し⁸⁾、せん断ひずみ・ダイレイタンシー関係としておわんモデル(Bowl Model)⁹⁾を使用している。水は土粒子骨格に比べて体積変化がないものとして水の体積弾性係数 K_w を十分大きな値で評価し、非排水条件を課することにより過剰間隙水圧を求めている。

表 1 地盤基本物性

深度(m)	未改良部		改良部	
	m/s		m/s	
	V_s	X_l	V_s	X_l
0				
-5	130	0.1	250	0.25
-10	130	0.1	250	0.25
-15	130	0.1	250	0.25
-20	130	0.1	250	0.25
-25	130	0.1	250	0.25
-30	145	-		
-35	160	-		
-40	400	-		
-45	400	-		

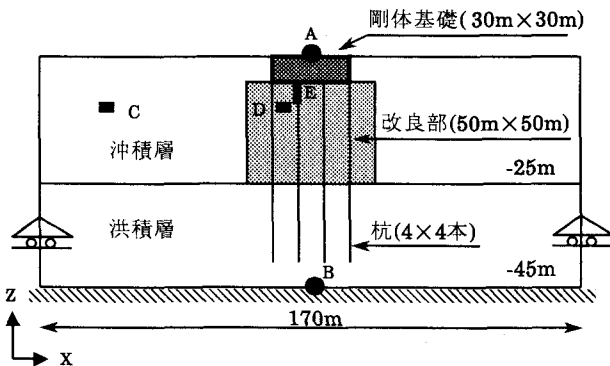


図 1 解析モデルと出力点位置

3. 解析条件

大地震時に地盤応答が杭にどのような影響を与えるかを明らかにするため、軟弱な成層地盤に質量の極めて小さい剛体基礎と16本の杭からなる地盤・杭・基礎系モデルを考えた。地盤の大きさは幅および奥行きは170m、層厚45mで、基礎の幅および奥行きは30m、根入れ深さ5mである。地盤および基礎は、4356個の8

節点ソリッド要素でモデル化した。杭に関しては、杭間隔10m、杭径1.5m、杭長35mのモデルを設定し、112個の梁要素で表現した。解析モデルの側方および下方境界は、それぞれ水平ローラと固定境界とした。図1に解析モデル中央での断面図と解析結果の出力点位置を示す。

4. 地盤条件

当地盤は、せん断波速度 V_s が130m/s前後の砂から成る層厚25mの沖積層があり、その下には硬い洪積層が堆積している。N値等の既往データを基に、表1に示すように地盤のせん断波速度 V_s 、液状化強度の下限值 X_L を設定した。なお、洪積層のダイレクシーは無視し、顕著な地盤改良効果を見るうえから、改良部の地盤剛性および液状化強度の値を高め定めた。本解析では水位を地表面に設定し、杭のみで基礎が支持されている場合(ケース1)と杭と地盤改良を併用した場合(ケース2)の2ケースについて解析を行う。TAFT地震記録(200Gal)を10秒間一方向入力(x方向)した。

5. 解析結果

図2にケース1およびケース2の基礎A点の加速度波形を示す。地盤改良を併用したケース2の応答値はケース1よりも2割程度大きいのが、両者の波形は類似している。図3に基礎B点と基礎A点間の伝達関数を示す。両ケースとも0.29Hz(3.5s)付近にピークが認められるが、この成分は液状化の影響を受けた周辺地盤の卓越振動数である。ケース1に比べケース2の卓越振動近傍の応答倍率は改良効果により押さえられている。後述の図8の波形でもこの0.29Hzの成分が卓越している。なお、地盤を線形とした時の地盤の卓越振動数は0.9Hz(1.1s)である。図4に周辺地盤C点および杭間の地盤D点での過剰間隙水圧比の波形を示す。両ケースとも時刻4秒以降で自然地盤が、ほぼ液状化しているが、C点の過剰間隙水圧比はそれぞれ0.77、0.62となっている。これはC点が杭基礎と加振方向に同一面上にあり、基礎の拘束効果により水圧の発生が若干押さえられたものと考えられる。地盤改良を施した杭周辺地盤D点ではケース1に比べかなり過剰間隙水圧が小さいことが分かる。図5に過剰間隙水圧比の分布を示す。ケース1では-10mから-20m付近の層に過剰間隙水圧比0.9以上の値が認められる。基礎直下の間隙水圧比は0.7~0.8程度である。一方、地盤改良を行ったケース2では、周辺地盤を除き基礎周辺の過剰間隙水圧は極めて小さく、改良効果が現れている。ケース1と異なり改良地盤に沿って過剰間隙水圧比0.5のコンターが、地表に伸びている。

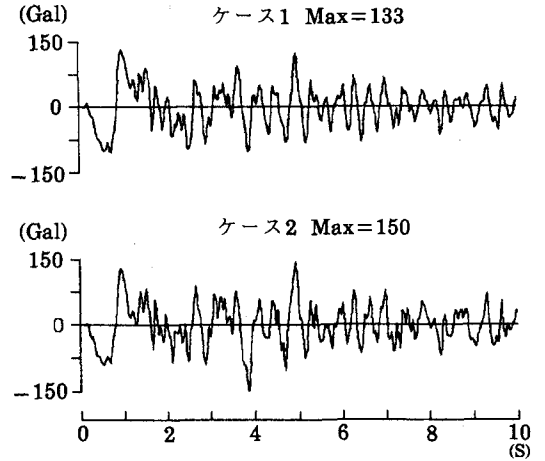


図2 基礎A点の加速度波形

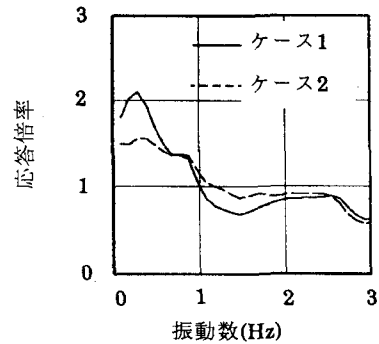


図3 基礎B点と基礎A点間の伝達関数

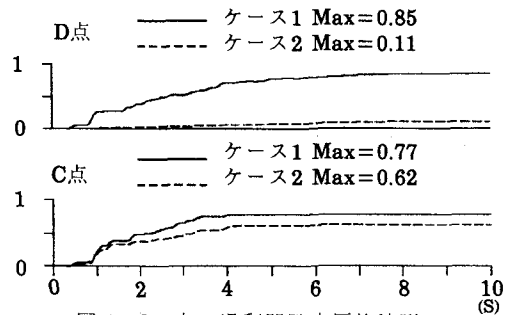


図4 C,D点の過剰間隙水圧比波形

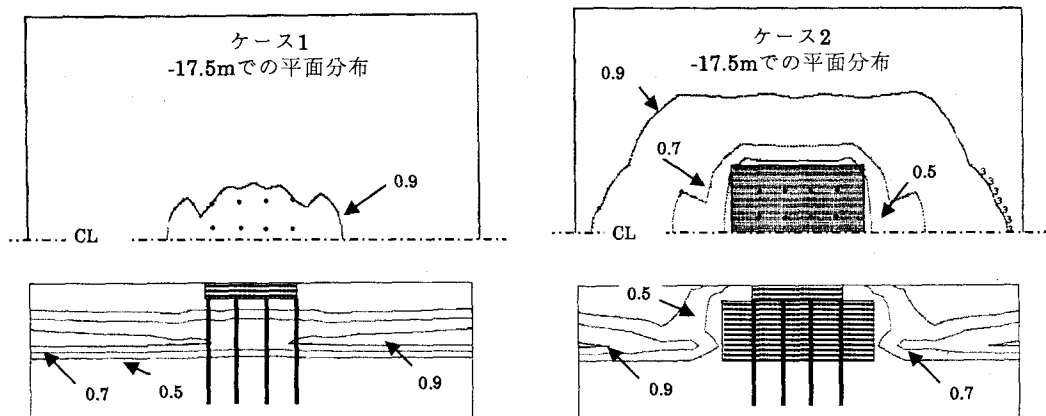


図5 過剰間隙水圧比分布 (時刻10秒)

当図より杭および改良地盤の存在の影響を受け、過剰間隙水圧分布に三次元的広がり認められる。ケース1では間隙水圧比0.9の範囲が基礎近傍から発生しているが、ケース2では改良効果により基礎よりかなり離れた地点に認められる。図6に地盤改良を行わないケース1の地盤・杭・基礎系モデルの時刻10秒における変形を示す。地表から4、5番目の層に液状化に伴う大きな変形が認められる。図7に杭間の地盤D点のせん断応力(τ_{zx})とひずみ(γ_{zx})および有効応力経路を示す。ケース2では顕著な非線形性は生じていないが、ケース1では杭間地盤の接線せん断剛性は、液状化時に初期剛性の1/5から1/10程度まで低減している。図8、9に杭E点の曲げモーメントの波形とそのフーリエスペクトルを示す。両ケースとも時刻4秒付近から0.29Hzの成分が卓越している。0.5Hz付近のピークは入力波に含まれている成分と考えられる。図10に基礎中央部の杭4本について最大曲げモーメントの分布を示す。ケース1では杭頭および洪積層上面で1600tmおよび950tm程度の曲げモーメントが生じているが、この値は許容応力度内にある。図6の変形図からも分かるように液状化層の影響により杭頭および沖積層と洪積層の境界付近で杭の断面力が大きくなっている。これに対し、ケース2では杭の曲げモーメントは概ね300tmから700tmの間にあり、改良効果が現れている。本解析モデルと類似した二次元解析⁹⁾の結果からも、改良により杭の断面力が半分程度低減する傾向が認められた。この低減率

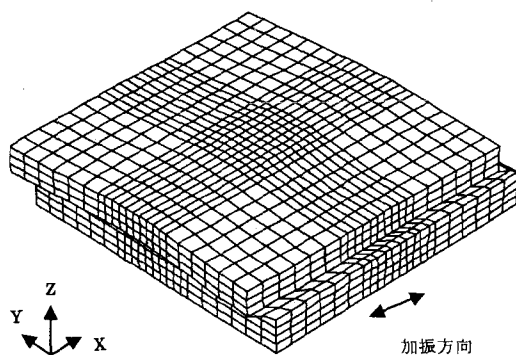


図6 ケース1の変形分布 (時刻10秒)

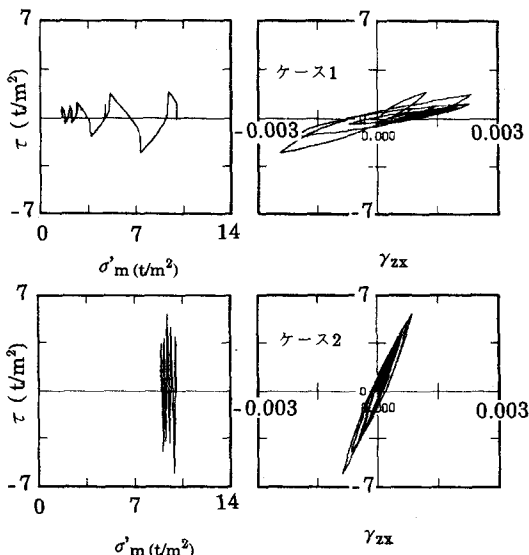


図7 D点の有効応力経路とせん断応力・ひずみ

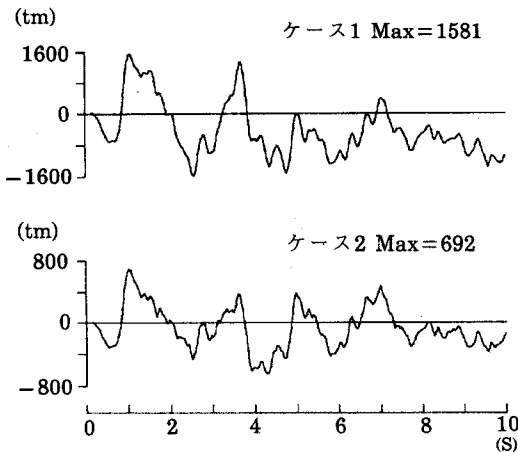


図8 杭E点の曲げモーメント波形

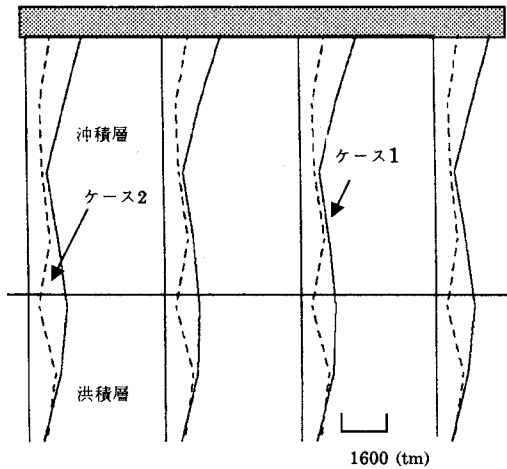


図10 最大曲げモーメント分布図

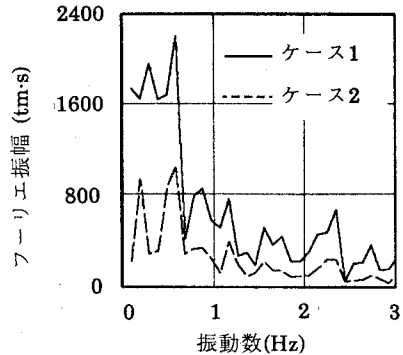


図9 杭E点のフーリエスペクトル

は周辺地盤の条件や改良の程度により変化するものと考えられる。地盤の剛性を地震前の初期剛性とした場合と時刻10秒の有効応力を用いて地盤剛性を設定した場合の2ケースについて、基礎中央A点に静的な水平荷重を作用させ、線形解析により基礎の水平変位を求めた。有効応力の低減を考慮して設定した地盤剛性に対する基礎の水平変位は、ケース1では初期剛性を用いた場合の1.8倍、ケース2では1.2倍であった。このことから杭周辺の平均的な静的地盤剛性は、ケース1では液状化の影響により初期剛性の0.56倍に低減されている。

6. おわりに

液状化時の杭応答と地盤改良の関係について三次元解析を通して把握した。本解析では顕著な地盤改良効果を見るうえから、改良部の地盤剛性および液状化強度の値を高めに設定したが、杭周辺の地盤改良あり無しにより杭断面力に顕著な差異が認められた。一解析例であるが本手法を用いることにより大

地震時の杭構造物の定性的な検討が可能であることを示している。今後さらに上部構造の影響を含めて検討する予定である。

参考文献 1) 岩崎敏男・龍岡文夫・坂場義雄「砂層中の杭の挙動に関する模型振動実験」第14回地震工学研究発表会(1981) 2) 佐藤正義・社本康広「群杭基礎の液状化時の挙動に関する模型実験と解析」清水研究報告,第49号, pp.23-30(1992) 3) 福武毅芳・大槻 明「三次元液状化解析による部分改良地盤の効果の予測」地盤の液状化対策に関するシンポジウム,土質工学会編,pp.205-210(1991) 4) 福武毅芳・大槻 明・藤川 智「三次元液状化解析による実測記録のシミュレーション」第27回土質工学研究発表会, pp.1103-1106,(1992) 5) 藤川 智・福武毅芳・大槻 明「二方向同時入力による液状化実験のシミュレーション解析」第22回地震工学研究発表会,(1993) 6) 石原哲哉・三浦房紀「三次元構造物-地盤系の非線形地震応答解析」土木学会論文集, No.465/1, pp.145-154(1993) 7) 大槻 明・福武毅芳「地震時における超々高層建築物-地盤系の有効応力解析(その1、2)」日本建築学会大会学術梗概集(1993) 8) 福武毅芳・松岡 元「任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈」土木学会論文集, No.412/III, pp.240-248(1989) 9) 大槻 明・吉見吉昭・横山一智・福武毅芳「液状化時の杭挙動の解析的検討」第47回土木学会年次講演会 CS4, pp.156-157. (1992)