

(105) 液状化地盤における杭基礎の遠心模型実験とシミュレーション解析

鹿島 技術研究所 福岡篤信、安達直人
小堀研究室 宮本裕司、酒向裕司

1. はじめに

杭基礎が用いられるような軟弱地盤では大地震時には非線形性が現れ、地下水位が高い砂質地盤では液状化が発生する。1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震においても臨海部や人工島で広範囲に起こった液状化による杭基礎の被害が報告されており^{1)・2)}、液状化地盤における杭基礎の耐震性評価を如何に行うかが緊急の課題となっている。本論文では、実地盤内の上載応力状態を再現できる遠心模型実験³⁾により、液状化地盤における杭基礎構造物の地震応答特性と、地震時杭応力に与える上部構造物の慣性力と地盤震動の影響について検討する。また、相互作用ばねに杭と地盤との相対変位による非線形性と有効応力による非線形性を考慮した質点系モデル⁴⁾によるシミュレーション解析を行い、解析モデルの有効性を確かめる。

2. 杭基礎の遠心模型実験

実験に用いた遠心載荷装置は、鹿島技術研究所所有の動的最大遠心加速度50g、有効半径2.7mの装置であり、地震波加振が可能なように小型振動台を搭載している。遠心模型実験は、遠心力場45g(地盤模型中心高さ位置)の状態ではFig. 1に示す杭基礎模型の地震波加振を行った。杭基礎模型は、上部構造物の慣性力を模擬するための剛体ブロックが4本の中空鋼製の群杭で支持されている。杭頭は剛接合とし、杭先端は固定端による応力集中を避けるためピン支持の条件に近くなるようにした。45gの遠心力場と1g場での相似則から、実物スケールで上部構造物の重量は300tonf、杭は直径0.7m、厚さ14mm、長さ20.7mの鋼管杭に相当し、杭間距離は3.7m(杭直径の5.3倍)である。地盤模型は、せん断土槽内に平均粒径0.16mmの豊浦標準砂を用いて厚さ20.5m(実物スケール)の均質な地盤を作成した。間隙流体としては、間隙水の消散に要する時間を実地盤に合わせるようにシリコンオイルで飽和させた。飽和砂の単位体積重量は1.93tf/m³、相対密度は約60%である。実験は、入力加速度レベルを2段階に変えて行った。地盤底部(AH1)で計測した入力最大加速度値は、5.9Gal (Test-A1)と114.3Gal (Test-A2)であった。入力波形は、1940年 El Centro-NS波である。

3. 解析モデル

杭基礎の質点系解析モデルは、Fig. 2に示す群杭を一本の多質点曲げせん断棒にモデル化し、杭頭位置に回転ばねと、各質点に群杭効果を考慮した相互作用ばねを取り付けたモデルである⁴⁾。地震応答解析は、

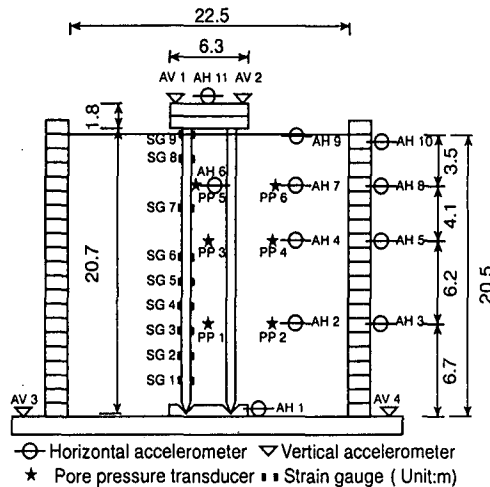


Fig.1 Centrifuge test model in prototype scale

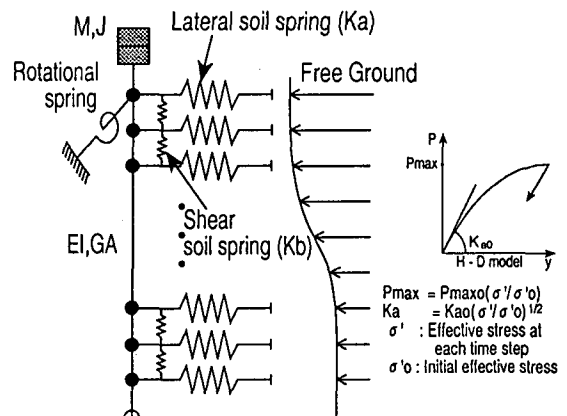


Fig.2 Numerical model
of soil-pile foundation system

自由地盤の地震応答を一次元有効応力解析法DESRA⁵⁾を用いて行い、得られた自由地盤各深さの変位応答波形と過剰間隙水圧波形を相互作用ばねを介して入力することにより時刻歴応答解析を行う。地盤の初期せん断弾性係数 G_0 は、(1)式に示す間隙比 e と初期平均有効応力 σ'_{v0} との関係を用いて、入力レベルが小さいTest-A1の地盤系の共振振動数が一致するように係数 A の値を設定した。Table 1に自由地盤の解析に用いた砂の物理定数と間隙水圧発生パラメータを示す⁶⁾。

Table 1 Physical properties of Toyoura sand

Specific Gravity	Gs	: 2.64
Maximum Void Ratio	e_{max}	: 0.977
Minimum Void Ratio	e_{min}	: 0.605
Permeability (m/sec)	kv	: 1.62×10^{-4}
Relative Density	Dr	: 60%
Internal friction angle	ϕ'	: 36.6°
Coeff. of earth pressure at rest	K_0	: 0.4
Initial Shear Strength (tf/m ²)	G_0	: 970~6020
Parameters of DESRA		
C1=1.0, C2=0.4, C3'=0.161, C4=0.5,		
k2=0.0125~0.0195tf/m ² , m=0.43, n=0.62		

$$G_0 = A \{ (2.17 - e)^2 / (1 + e) \} (\sigma'_{v0})^{1/2} \quad (1)$$

相互作用ばねは、三次元薄層要素法による成層地盤内のリング加振解($f=0.1\text{Hz}$ の値)を用いて算定した群杭全体系のフルマトリックスの地盤ばねを、縮合操作により水平地盤ばね $[K_a]$ とそれを結ぶせん断地盤ばね $[K_b]$ の和として評価している⁴⁾。

4. 杭基礎の地震応答

実験結果と解析結果を比較して最大過剰間隙水圧比をFig. 3に、代表的な時刻歴波形をTest-A1についてFig. 4に、Test-A2についてFig. 5に示す。以下に示す実験結果と解析結果は実物スケールに換算している。なお、入力レベルが小さいTest-A1では過剰間隙水圧の発生は各深さとも認められなかったため、解析は地盤を線形として行った。Test-A2における周辺地盤の過剰間隙水圧(PP2, PP4, PP6)は、入力加速度振幅が大きくなるにつれ上昇し、初期有効応力との比較からGL-3m以浅の表層部で完全液状化を呈している。杭間地盤の過剰間隙水圧(PP1, PP3, PP5)は、各深さとも周辺地盤とほぼ同様に上昇している。なお、周辺地盤の過剰間隙水圧波形には杭間地盤にみられない高振動数成分がみられるが、これはせん断土槽を水平加振した時に多少の回転入力が生じたために発生したP波成分による変動と考えられる。地盤応答は、Test-A1に比較しTest-A2では、過剰間隙水圧の上昇によりAH10(GL-0.52m)とAH8(GL-3.6m)の加速度波形の長周期化がみられ、特に完全液状化した地表付近にあるAH10では高振動数成分がカットされた波形となっている。入力波(AH1)に対するGL-0.52m(AH10)の最大加速度値の比は、Test-A1で3.6倍、Test-A2で0.94倍となり、地盤の加速度増幅は液状化地盤で低減している。Test-A2における上部構造物の加速度波形(AH11)は地盤応答の影響を受け、GL-0.52m(AH10)の加速度波形に似た形状となっている。Fig. 6に示す入力波に対する上部構造物のフーリエスペクトル比から、Test-A1では地盤系の共振ピークが1.6Hzに、地盤-杭基礎-上部構造物連成系の共振ピークが4.2Hzにみられるが、Test-A2では低振動数域に振幅の著しく低下したピークがみられるのみである。杭の曲げモーメント波形は杭頭部と地中部で異なる形状を示し、それぞれ上部構造物と地中部の加速度波形に似た様相となり、杭応力は杭頭部では上部構造物の慣性力に、地中部では地盤震動に起因して生じていることがわかる。

解析結果との比較では、地盤の最大加速度値で実験結果とやや差があるが、過剰間隙水圧の上昇過程や液状化後における地盤、上部構造物の加速度応答や杭の曲げモーメントを非常に良くシミュレートしている。

5. 地震時の杭応力

Test-A1とTest-A2の最大曲げモーメント分布をそれぞれ解析結果と比較してFig. 7に示す。なお、図中には、杭応力に与える上部構造物の慣性力と地盤震動の寄与を明確にするため、解析により杭基礎-上部構造物連成系の杭応力(Total)から、上部構造物を無質量とした場合の地盤震動による杭応力(Kinematic)を時刻歴で差し引くことにより上部構造物の慣性力による杭応力(Inertial)を求めそれぞれを併記している。Test-A1, A2の最大曲げモーメント分布は、杭頭部からGL-10m付近にかけて異なる性状となるが、解析結果

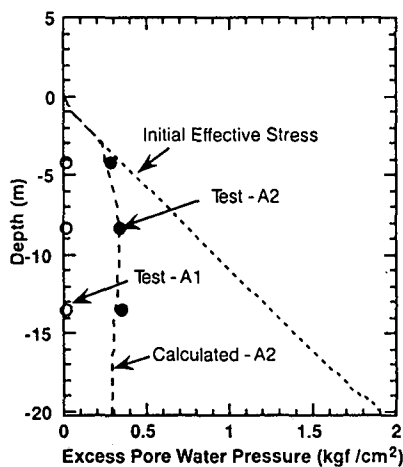


Fig.3 Maximum excess pore water pressures in Test - A1, A2

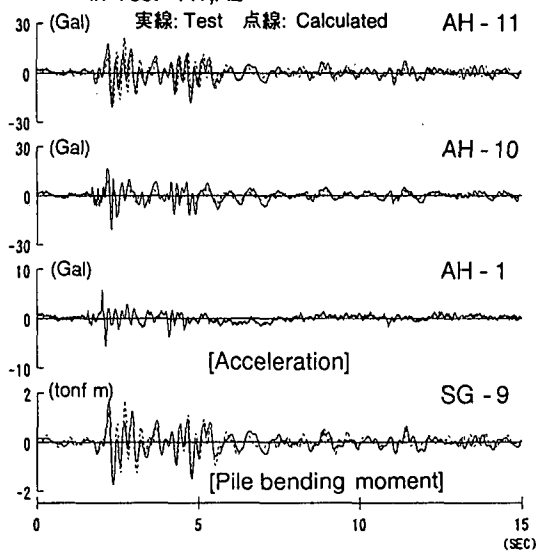


Fig.4 Time histories in Test - A1

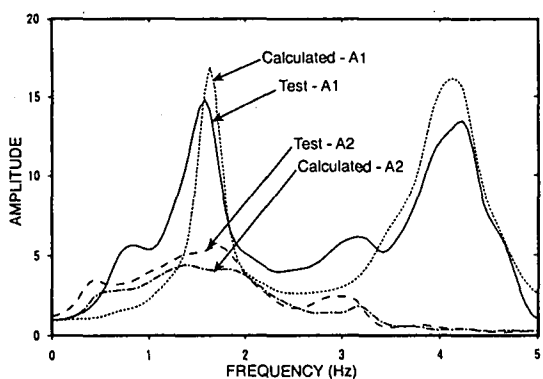


Fig.6 Fourier spectra ratios (AH11 / AH1) in Test - A1, A2 (Hanning windows 10 times)

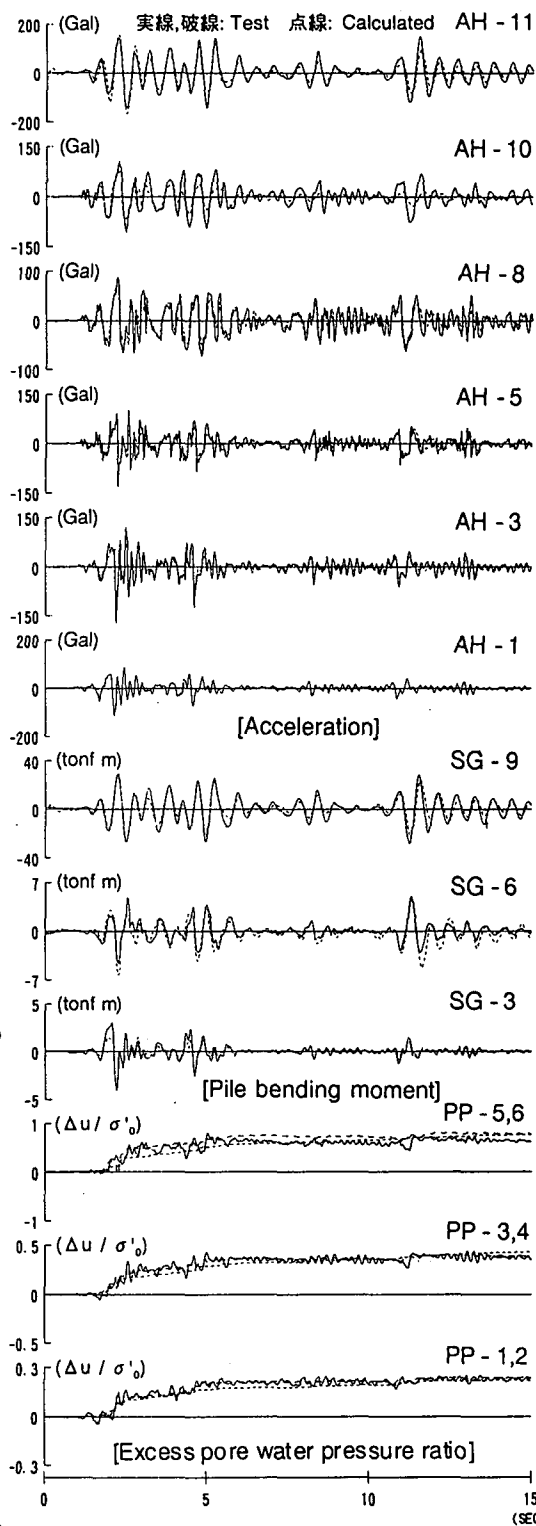


Fig.5 Time histories in Test - A2

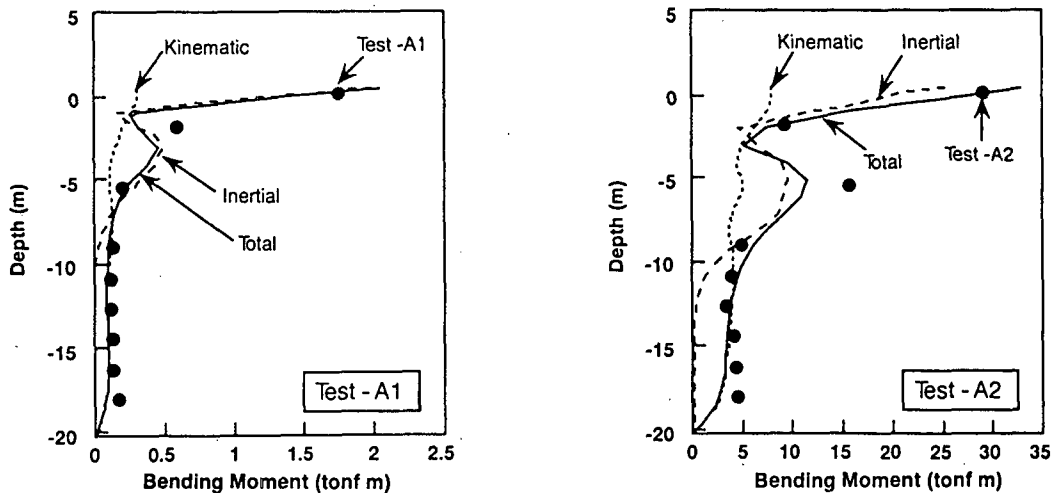


Fig.7 Distributions of maximum pile bending moments in Test - A1,A2

は入力レベルの違いによる分布形状の違いを良くシミュレートしている。上部構造物の慣性力と地盤震動による応力に分離した杭応力で見ると、上部構造物の慣性力による応力は、地盤が線形状態であるTest-A1では杭頭からGL-10m付近まで影響を及ぼし、杭頭からGL-7m付近までの杭応力はこの上部構造物の慣性力による応力に支配されている。地盤震動による応力は杭先端に近い位置から杭頭にかけて生じ、GL-7m付近以深の応力はこの地盤震動に支配されたものとなる。一方、表層部で液状化を呈したTest-A2では、上部構造物の慣性力による応力は杭頭からGL-12m付近にまで影響を及ぼしている。これは、表層部の液状化により地盤剛性が著しく低下し、上部構造物の慣性力を杭部に負担する割合が大きくなったため、Test-A1に比較し地中の深い位置まで達していることによる。地盤震動による応力はTest-A1と同様に杭先端に近い位置から杭頭にかけて生じ、GL-12m付近以深の杭応力は地盤震動に支配されたものとなる。さらに、Test-A2の地盤震動による応力はTest-A1に比較し全体的に大きくなり、杭頭部の応力への寄与も大きくなっている。なお、実験地盤は均質地盤に近い場合、液状化層と非液状化層の境界等の地盤剛性の変化が大きい位置において地盤震動により大きくなる杭応力⁴⁾はみられない。

6. まとめ

杭基礎の遠心模型実験から、液状化地盤の杭基礎の地震応答性状は線形地盤と大きく異なること、杭の曲げモーメントは表層部の液状化により上部構造物の慣性力による応力が杭頭部から地中の深い位置まで大きな応力を与え、さらに地盤震動による応力も大きくなる。また、杭基礎を質点系曲げせん断棒にモデル化し、群杭効果を考慮した相互作用ばねに杭周地盤の非線形性と有効応力による非線形性を取り入れた地震応答解析モデルは、実験結果を非常に良くシミュレートできており本解析モデルの有効性が確認できた。

参考文献

- 1) 鹿島：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書(第一報)，1995年2月1日
- 2) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告(速報)，平成7年2月
- 3) Miyamoto, Y., K. Miura et al.: Pile Foundation Response in Liquefiable Soil Deposit during Strong Earthquakes, Centrifugal test for pile foundation model and correlation analysis, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 439, pp. 49-63, 1992. 9
- 4) 宮本裕司, 酒向裕司他: 非線形, 液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 471, pp. 41-50, 1995年5月
- 5) Finn, W.D.L. et al.: An Effective Stress Model for Liquefaction, Jour. of the Geotechnical Engng. Division, ASCE, Vol. 103, No. 6, pp. 517-533, 1977
- 6) 龍岡文夫: 東大生研セミナーテキスト 室内土質せん断試験(第2回), 1986