# 3次元有効応力解析による杭模型の遠心場における 液状化実験のシミュレーション

## 立石 章・宇野 浩樹

Keywords: 3-dimensional effective stress analysis, liquefaction, pile foundation, centrifuge modelling test, simulation analysis 3次元有効応力解析,液状化,杭基礎,遠心模型実験,シミュレーション解析

## 1. はじめに

兵庫県南部地震による多数の被害を受けて耐震基準が 整備されたが、液状化に関係する構造物の安全性および 液状化対策の評価手法は十分整備されたとは言い難い。 これは、液状化地盤中の構造物の挙動は簡便な手法で評 価することが難しく、実験的手法または有効応力動的F EM解析によらざるをえないためである。

筆者等は、京都大学岡二三生教授、岐阜大学八嶋厚教 授により開発された、砂の繰返し弾塑性モデルを用いた 2次元・3次元有効応力動的FEM解析プログラムLI QCAの応用研究を行ってきたが、今回地盤の液状化現 象だけでなく構造物の非線形挙動も考慮できるよう新た な開発を行った。本論文では、開発したプログラムの有 効性を検証する目的で実施した、杭基礎の遠心模型振動 実験およびシミュレーション解析結果を報告する。

## 2. 遠心模型振動実験

遠心模型実験は、遠心加速度 40G 場において、杭基 礎模型を対象に行った。図-1 に実験模型および代表的 な計測器の配置を示す。

地盤材料は豊浦砂で、Dr=60%の上層(層厚 22cm) と Dr=90%の下層(層厚 10cm)から成る2層地盤とし た。模型地盤は、まずせん断土槽内に6層に分けて振動 締固めにより乾燥砂地盤を作製したのち、脱気槽内で 40cSt のシリコンオイルにより模型地盤表面まで飽和さ せた。

杭は、鋼管杭を模擬した鋼製パイプを用いた。鋼製パ イプは、ステンレス製と鉄製の2種類とし、断面諸元お よび材料特性を表-1 に、引張試験による応力~ひずみ





関係を図-2 に示す。ここに、ステンレス製パイプは降 伏強度が高く、杭を降伏させない実験ケースに用い、鉄 製パイプは降伏強度が低く、杭を降伏させる実験ケース に用いた。以下、それぞれを弾性杭、塑性化杭と呼ぶ。

杭模型は、杭間隔 6D で2×2の4本群杭とした。杭 の境界条件としては、杭頭は建屋模型と剛結し、杭下端 はせん断土槽に設置し、水平方向拘束、回転と引抜きは 自由となる構造とした。建屋模型は、ステンレス製とし、 40G 場における杭の軸応力が、一般的な建築物の鋼管杭 と同程度となるような重量を与えた。

諸元	単位	弾性杭	塑性化杭		
材質	-	ステンレス製	鉄製		
外径	mm	9.50	9.50		
肉厚	mm	0.21	0.25		
密度	t/m <sup>3</sup>	7.85	7.85		
ヤング係数	N/mm <sup>2</sup>	197600	201700		
降伏強度	N/mm <sup>2</sup>	385	183		
降伏ひずみ	.10-6	1947	908		

表-1 杭模型の断面諸元および材料特性 Material property of model pipes



図-2 鋼管杭模型の応力~ひずみ関係 Relationship of stress and strain of model pipes

入力地震動は、レベル2地震動対応として、兵庫県南部地震におけるポートアイランド GL-83m での観測記録のEW成分(最大加速度3.03m/sec<sup>2</sup>)とした。

実験のケースは、地盤のみのケース、弾性杭を用いた 杭の応答が弾性範囲内にあるケース(以下弾性杭ケー ス)、塑性化杭を用いた杭が降伏ひずみをこえるケース (以下塑性化杭ケース)の3ケースである。

実験結果は、後述するシミュレーション解析結果とと もに 40G 場の遠心模型スケールで示す。

## 3. シミュレーション解析

#### 3.1 解析方法

シミュレーション解析には、2次元・3次元有効応力 動的FEM解析プログラムLIQCAを用いた。



図-3 3次元有限要素モデル 3-dimensional finite element model

場の支配方程式は、土骨格の変形と間隙水の浸透の連 成を考慮できる2相混合体理論を用いて定式化している。 数値解析法としては、空間離散化は、土骨格の変位は微 小変形理論に基づいた有限要素法で、間隙水圧は有限差 分法で行い、時間離散化には Newmark のβ法を用いて いる<sup>1)</sup>。

砂の構成則としては、Oka ら<sup>2)</sup>の繰返し弾塑性モデル を用いた。この構成則の特徴は、(1)非線形移動硬化則、 (2)せん断剛性の塑性せん断ひずみ依存性、(3)過圧密境 界曲面および一般化した非関連流動則、等である。

#### 3.2 解析条件

3次元解析に用いた解析モデルを図-3 に示す。2次 元解析は、3次元解析と同じ要素分割を用いている。

地盤は、繰返し弾塑性モデルを用い、2次元解析で は平面ひずみ要素を、3次元解析では8節点ブリック要 素でモデル化した。地盤の物性値および繰返し弾塑性モ デルのパラメータを表-2 に示す。繰返し弾塑性モデル のパラメータは、非排水繰返しせん断試験による液状化 強度をシミュレーションすることにより設定した。シミ ュレーション結果を図-4 に示す。

杭は、2次元解析、3次元解析とも梁要素とし、ファ イバーモデルを用いた。ここに、弾性杭は弾性材料とし て引張り試験の初期勾配を与え、塑性化杭は図-2の倍 リニアモデルでモデル化した。

杭と地盤の接触面は、二重節点としてばねで結合した。 杭周面の水平方向は剛結し、せん断方向は摩擦強度を極 限とするバイリニアモデルの弾塑性ばねを、杭下端の鉛 直方向には引張りカットの非線形弾性ばねを挿入した。

力学的境界条件としては、両側面はせん断土槽を考慮 して等変位境界とし、底面は完全固定とした。透水の境 界条件としては、両側面および底面は不透水境界、地表 面は排水境界とした。

解析ケースとしては、2次元解析は3ケースすべてに

		豊浦砂 Dr=60%	豊浦砂 Dr=90%	
初期間隙比 e <sub>o</sub>	0.772	0.659		
圧縮指数	0.0025	0.0004		
膨潤指数	0.00050	0.00008		
透水係数 k (m/sec)	3.24 × 10 <sup>-5</sup>	1.51 × 10⁻⁵		
初期せん断係数比 G₀/	3290	1133		
変相角 m(°)	28.0	23.9		
破壊角 <sub>f</sub> (°)	37.4	43.7		
	B <sub>0</sub>	9200	54000	
硬化関数中のパラメータ	B <sub>1</sub>	45	140	
	C <sub>f</sub>	0.0	0.0	
Fading memory	C <sub>d</sub>	2000	2000	
ダイレイタンシー係数	D <sub>0</sub>	0.70	0.12	
	n	2.2	4.0	
基準ひずみ	P	0.00180	0.00117	
	E	0.02000	0.03200	
1.2 <sub>F</sub> ++++++++++++++++++++++++++++++++++++				

表−2	繰返し弾塑性モデルのパラメータ
	Parameters of cyclic elasto-plastic model



図-4 液状化強度のシミュレーション結果 Simulation results of liquefaction strength

対し実施し、3次元解析は塑性化杭ケースのみ実施した。

### 3.3 解析結果

塑性化杭のケースにおける実験結果と2次元・3次元 解析結果の比較を中心に以下に示す。地盤のみのケース は杭のない場合の応答特性の把握を、弾性杭ケースは塑 性化杭の応答の特徴の把握を目的として結果を示す。

3.3.1 過剰間隙水圧および水平加速度

地盤および建屋基礎の全体的な挙動を調べるため、側 方地盤の過剰間隙水圧時刻歴、および側方地盤と建屋の 水平加速度時刻歴を、地盤のみのケース、塑性化杭ケー スについて図-5~図-10に示す。以下に考察する。

 実験結果の過剰間隙水圧時刻歴について見ると(図 -5~図-7 赤線)、塑性化杭ケースにおける杭から離れ た側方地盤の過剰間隙水圧時刻歴は、地盤のみのケー スの同じ位置の応答とほぼ同じであり、Dr=60%の上 層は過剰間隙水圧比が 0.1 秒付近でほぼ 1.0 に達して 液状化し、Dr=90%の下層は 1.0 には達していないこ とがわかる。また、両ケースの比較より、杭の影響は 側方地盤に対しては小さいことがわかる。

- 2) 実験結果の水平加速度時刻歴について見ると(図-8 ~図-10 赤線)、側方地盤地表の応答は、塑性化杭ケース、地盤のみのケースともにほぼ同じであり、0.1 秒 付近から振幅が低下して長周期化しており、液状化に 達していることを裏づけている。一方、側方地盤層境 界の応答は、両ケースとも短周期成分の卓越した応答 となっており、液状化していないことを裏づけている。 塑性化杭ケースの建屋の応答は、上層が液状化に達する0.1 秒付近から応答が低下し長周期化している。
- 3) 解析結果の過剰間隙水圧時刻歴について見ると(図 -5~図-7 青線)、側方地盤上層では、塑性化杭ケース、 地盤のみのケースともに、解析結果は実験結果より若 干早いが 0.1 秒前後で液状化するという結果になって いる。詳しく見ると、塑性化杭ケースでは、液状化直 前に、2次元解析結果では大きな変動が発生している のに対し、3次元解析結果では変動は小さく、3次元 解析結果の方が地盤のみのケースの2次元解析結果あ るいは実験結果に近い挙動を示している。これは、2 次元解析結果の場合、杭の変形がすべて地盤の要素に 伝えられるため、杭から離れた側方地盤まで杭の影響 が及んでいることによるものと考えられる。3次元解 析ではこの問題がないため、実験結果により近い応答 が得られていると考えられる。
- 4) 解析結果の水平加速度応答時刻歴について見ると (図-8~図-10 青線)、側方地盤地表応答は、塑性化杭 の有無および解析次元に関係なく、実験結果と同様に 0.1 秒付近から振幅が低下し長周期化している。これ に対して、塑性化杭ケースの建屋の応答は、3次元解 析の方が2次元解析に比べて 0.1 秒以下の短周期成分 が少なく、実験結果に近い結果となっている。これは、 3次元解析の方がより実際に近い地盤のモデル化とな っているためと考えられる。

3.3.2 水平相対変位および杭の曲率

地盤および建屋・杭の変形を調べるため、土槽底面からの上層地盤および建屋の水平相対変位、および杭頭と 層境界位置での杭の曲率時刻歴を、弾性杭ケース、塑性 化杭ケースについて、図-12~図-17 に示す。さらに、塑 性化杭ケースについては、過剰間隙水圧上昇初期および 液状化後における、杭頭でピークの発生する2時刻の曲 率深度分布を図-18、図-19 に示す。以下に考察する。

 実験結果の水平相対変位時刻歴を見ると(図-12 ~図-14 赤線)、上層地盤、建屋ともに、弾性杭のケースと塑性化杭のケースはほぼ同じ応答を示しており、 上層が液状化に達する 0.1 秒付近から長周期化すると





ともに片側に残留する傾向を示しており、特に杭の違いによる差違は見られない。

2) 実験結果の曲率時刻歴を見ると(図-14~図-16赤線)、全体的には、建屋の変位時刻歴と同様な挙動を示しており、弾性杭、塑性化杭ともに、0.1秒付近から長周期化し、片側に残留する傾向を示している。詳細に見ると、杭頭では弾性杭の方が塑性化杭に比べて

残留値は小さい。両杭で曲率時刻歴の違いが小さかっ た原因は、今回の実験では、塑性化杭が震動により降 伏しているものの、剛性を有している第2勾配までの 範囲で挙動していたためと考えられる。

3) 解析結果の水平相対変位時刻歴および曲率時刻歴を 見ると(図-11~図-16 青線)、いずれの応答も杭種に 関係なく 0.1 秒付近から長周期化している点では実験







図-18 杭頭曲率ピーク発生同時刻分布 (塑性化杭ケース、液状化後) Curvature distribution when peak value at pile top occured (Yield pile case, after liquefaction)

結果と同様であるが、実験結果のように残留が発生し ていない。これは、実験による上層地盤の水平相対変 位に残留が見られることから、建屋の変位および杭の 曲率の残留も、地盤の残留変位によるものと考えられ るが、これが解析では模擬できていないためである。

塑性化杭ケースの2次元解析と3次元解析を比較す ると、建屋の水平相対変位、杭の曲率ともに、片側へ の残留を除けば3次元解析の方が実験結果に近い応答 が得られており、3次元解析の有効性が明らかである。 4) 曲率の同時刻深度分布を見ると(図-17、図-18)、過 剰間隙水圧の上昇初期では、実験結果、解析結果とも に、杭頭で降伏曲率をこえる最大値が発生し、上層内 で極大値が発生する分布となっている。これに対し、 液状化後は、杭頭だけでなく層境界でも降伏曲率をこ える大きな値が発生し、杭頭との間でほぼ直線的な分 布となっている。これは、過剰間隙水圧上昇前は、地 盤抵抗があるため、Changの方法による分布となって いるのに対し、液状化後は上層地盤の抵抗がほぼ0と なるためである。

## 4. 結論

- 遠心載荷装置を用いた鋼管杭模型の液状化実験を行い、Dr=60%の上層地盤が液状化に達し、液状化前および液状化後ともに鋼管杭模型が杭頭および層境界で 降伏するという実験結果が得られた。
- 2) 2次元・3次元有効応力動的FEM解析プログラム LIQCAによりシミュレーションを行い、Dr=60% の上層地盤における過剰間隙水圧の上昇、加速度応答 の振幅低下および長周期化がほぼ模擬できた。また、 建屋の変位および杭の曲率についても、実験結果にお ける片側に応答が残留していく現象は模擬できなかっ たものの、振幅は概ねシミュレーションできた。

2次元解析と3次元解析の結果を比較すると、3次 元解析の方が、建屋の変位、杭の曲率とも実験結果に 近い結果が得られ、3次元解析の有効性が明らかとな った。

3) 杭の曲率の同時刻深度分布から、液状化前は上層地 盤の抵抗があるときの分布が、液状化後は上層地盤の 抵抗が消失したときの分布が実験、解析ともに得られ、 解析結果は、降伏曲率をこえる非線形の領域について も実験結果をよく模擬していた。これより、杭の耐震 安全性の評価に、有効応力動的FEM解析が有効であ ることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) Oka,F., Yashima,A., Shibata T., Kato M. and Uzuoka R. : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-pastic model, Applied Science Research, 52, pp.209-245, 1994.
- 2) Oka,F., Yashima,A., Tateishi,A., Taguchi,Y. and Yamashita,S. : A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique* 49, No.5, pp.661-680, 1999.