

有効応力解析において液状化地盤中の杭基礎の動的応答に及ぼす Rayleigh 減衰の影響

大成建設(株) 正会員 ○谷崎史織 立石章 宇野浩樹

1. はじめに

有効応力解析においては、地盤材料の粘性抵抗と数値解析の安定を目的に Rayleigh 減衰を考慮することが多く、一般にその係数には経験的な値が用いられているが、液状化地盤の変形による被害の予測精度を向上するためには液状化土の粘性抵抗の取り扱い方が重要となる。著者らは、Rayleigh 減衰が液状化地盤の変形量に及ぼす影響について検討してきており、地中構造物の浮上がりに対しては Rayleigh 減衰の影響が顕著に現れることが明らかとなった¹⁾。本報告では、液状化地盤中の杭基礎の遠心模型実験をモデルとした有効応力解析結果より、Rayleigh 減衰が杭基礎の動的応答に及ぼす影響について検討する。

2. 遠心模型実験および有効応力解析方法

解析に用いた遠心実験モデルは、図1に示したように、豊浦砂の $Dr60\%$ と 90% の2層地盤と、鋼管杭を想定した 2×2 の4本群杭（実物換算 $\phi 0.38\text{m}$, $t=10\text{mm}$ ）で構成されている。杭頭、杭下端ともに剛結である。入力地震動は、兵庫県南部地震のポートアイランド観測波 GL-83mEW 成分とした。

有効応力解析には、2次元有効応力解析プログラム LIQCA²⁾³⁾を用いた。地盤は非線形移動硬化モデル³⁾、杭模型はファイバーモデルでモデル化し、杭と地盤とは水平方向剛結、せん断方向は摩擦強度を極限值とするバイリニアールモデルのばね要素で結合した。入力地震動は、遠心模型実験において振動台で計測された加速度時刻歴（図2）とした。なお、実験およびそのシミュレーションの詳細は文献⁴⁾に示してあるので参照されたい。ここで、本来、杭と液状化地盤の動的相互作用は3次元問題であり、本検討も3次元解析または「すり抜けのばね」⁵⁾を用いた2次元解析を行うことが望ましいが、ここでは簡単のため2次元解析としていることに留意すべきである。

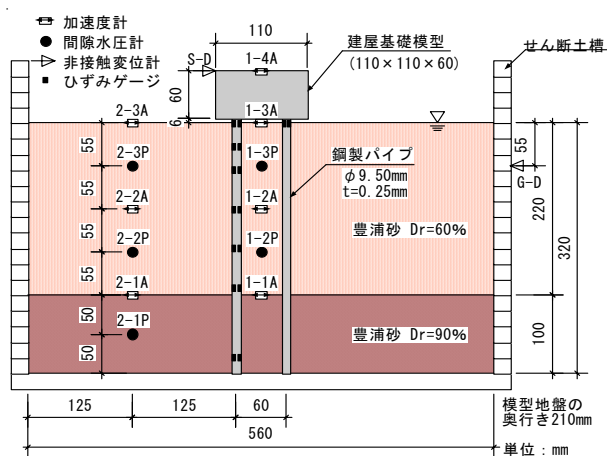


図1 遠心実験模型（1/40 スケール）

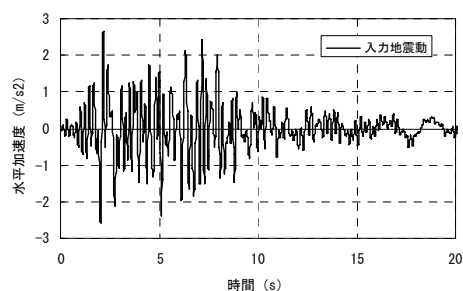


図2 入力地震動

3. Rayleigh 減衰

LIQCA による有効応力解析では、一般に Rayleigh 減衰として初期剛性比例型が用いられており、既往の遠心実験のシミュレーション解析結果を参考に、質量比例減衰用係数 $\alpha 0=0$ 、剛性比例減衰用係数 $\alpha 1=0.003$ 程度とすることが多い。本検討では、Rayleigh 減衰の感度分析として表1に示す係数 $\alpha 1$ を用いて3ケースの有効応力解析を行った。

表1 有効応力解析における Rayleigh 減衰

ケース名	Rayleigh 減衰		減衰定数 h^{*1}
	$\alpha 0$	$\alpha 1$	
01	0.0	0.001	0.6%
02	0.0	0.002	1.2%
03	0.0	0.003	1.8%

*1「道路橋示方書V耐震設計編」による基本固有周期から逆算

キーワード 液状化, 有効応力解析, 杭基礎, Rayleigh 減衰

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 土木技術研究所 TEL 045-814-7236

4. 有効応力解析結果

3 ケースの解析結果を、実物換算して図 3～図 7 に示す。図 7 は、液状化前後で杭の曲率が大きくなる時刻を抽出し、この時刻に対して曲率に関する同時刻深度分布を示したものである。図より以下のことが分かる。

- ・ 側方地盤の過剰間隙水圧比は、3 ケースともおよそ 4 秒で 1.0 となり完全液状化に達する。
- ・ 側方地盤地表の絶対水平加速度は、完全液状化までは $\alpha 1$ が大きいほど振幅が小さいがその差異は小さい。完全液状化直後は $\alpha 1$ が大きいほど振幅が大きい。これは、液状化によって地盤の剛性が非常に小さくなるため粘性抵抗が主たる抵抗力として働き、Rayleigh 減衰が大きいほど短周期成分が卓越した絶対加速度応答が大きくなったためである。側方地盤地表の相対水平変位は、完全液状化前後ともに $\alpha 1$ が大きいほど振幅が小さく、その傾向は液状化後の方が顕著である。これは、完全液状化後は Rayleigh 減衰が大きいほど長周期成分による地盤の相対変位が抑えられたためである。
- ・ 杭頭の曲率は完全液状化前で最大となる。その値は $\alpha 1$ が大きいほど小さいが、液状化前の杭の応答は慣性力の大きさに決まるため、地盤の絶対加速度応答と同様 $\alpha 1$ の影響は小さい。一方、完全液状化後の杭の応答は地盤の相対変位量で決まるため、地盤の相対変位応答と同様 $\alpha 1$ の影響が顕著であり、 $\alpha 1$ が大きいほど曲率は小さい。

有効応力解析において Rayleigh 減衰は、1) 完全液状化までは絶対加速度応答の短周期成分を抑える、2) 完全液状化後は準静的な相対変形（浮上がり、沈下、杭横抵抗）に対し抵抗する、という働きをしている。本モデルでの杭の動的応答に関しては、完全液状化後の 2) の働きに対する感度の方が大きいという結果となった。なお、本検討では杭基礎を 2 次元でモデル化しているため、Rayleigh 減衰を大きくしたときの杭横抵抗の増大は、3 次元的にモデル化した場合より大きめに評価していると考えられる。

今後は、2 次元解析における杭と地盤の相互作用のモデル化と、有効応力解析における Rayleigh 減衰の取り扱い方について検討していく予定である。

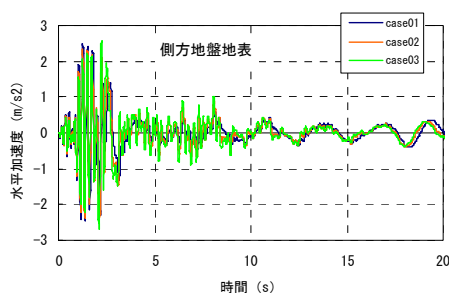


図 3 絶対水平加速度時刻歴

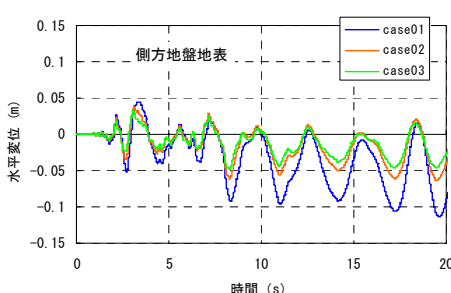


図 5 相対水平変位時刻歴

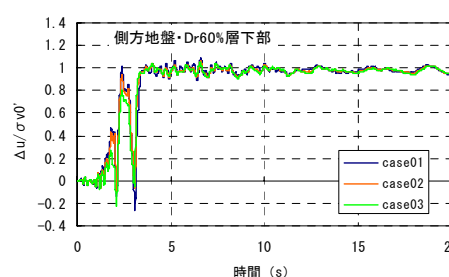


図 4 過剰間隙水圧時刻歴

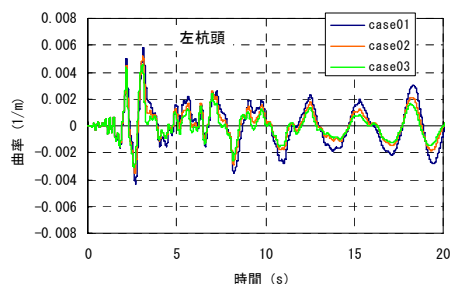


図 6 杭頭の曲率時刻歴

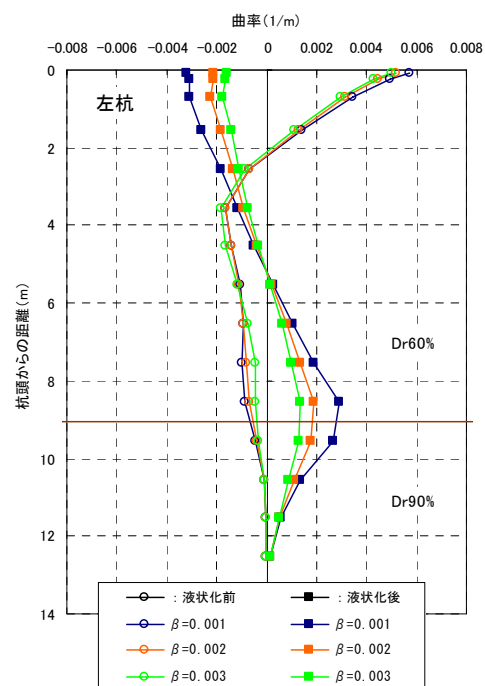


図 7 杭の曲率（同時刻深度分布）

参考文献 1) 谷崎・立石・宇野・田中：有効応力解析において Rayleigh 減衰が地中構造物の液状化による浮上がりに及ぼす影響，第 41 回地盤工学研究発表会，2006（投稿中）。2) Oka, F. et al. : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Science Research, 52, pp.209-245, 1994. 3) Oka, F. et al. : A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique* 49, No. 5, pp. 661-68, 1999. 4) 立石・宇野：地震時に塑性化する杭模型の遠心場における液状化実験と 2 次元・3 次元有効応力解析，土木学会地震工学論文集報告，2003. 5) 小堤・溜・岡・井合・梅木：2 次元解析における杭－液状化地盤の動的相互作用のモデル化，土木学会第 58 回年次学術講演会，2003.