

CS4-10〔I〕

地震時液状化の際の杭基礎構造物の動的応答に及ぼす非線形相互作用バネ特性の影響

飛鳥建設(株) 正会員 ○森 伸一郎  
正会員 池田 隆明

1. はじめに

地震時に杭基礎構造物の動的応答に及ぼす地盤の非線形化や液状化の影響を評価する場合、地盤の非線形特性が応答評価に及ぼす影響は重要であると考えられるが、これまでほとんど研究されていない。

そこで、本論文では、相対密度が約50%の緩い飽和砂地盤中の杭基礎構造物の振動台実験<sup>1) 2) 3)</sup>を対象に、相互作用バネの非線形性に関するパラメータスタディを実施し、解析結果と実験結果を比較検討することにより、その非線形性が地震時液状化状態にある杭に支持された構造物の動的応答に及ぼす影響を議論した。

2. 地盤-構造物連成系の液状化解析手法

地盤の一次元液状化解析で用いた間隙水圧発生モデルは、東畑・石原の有効応力経路モデル<sup>4)</sup>である。せん断応力・せん断ひずみ関係には履歴型のHardin・Drnevich (H-D) モデル<sup>5)</sup>を用いている。用いたバネ・質点系の連成系モデルの概念図を図-1に示す。地震応答解析は、増分量で定式化した逐次積分型の非線形解析である。<sup>2) 3)</sup>

3. 相互作用バネの非線形特性

相互作用バネについては、地盤と杭の相対水平変位に依存するMasing則に従う履歴型のH-Dタイプの非線形バネとした。地盤に関連するバネのパラメータに液状化解析より得られた間隙水圧時刻歴を取り入れることで、拘束圧に依存する非線形性（剛性と強度）の変化を考慮する。<sup>2) 3)</sup>

図-2に相互作用バネの復元力特性を示す。さらに、各相互作用バネの深さにおける過剰間隙水圧に応じてバネのパラメータである $K_{max}$ 、 $F_{max}$ は(1)(2)式に従い変化する。周辺地盤系の質量と相互作用バネの初期値 $K_0$ は、Mindlin-II解を利用して算定した。パラメータ $F_{max}$ の初期値 $F_0$ は(3)式で表されると仮定<sup>3) 6)</sup>し、 $D=25cm, n=1, \alpha=1, 10, 100, 1000$ として、有効応力解析と全応力解析を実施した。図-3に制御用パラメータ $\alpha$ の設定による相互作用バネの非線形特性の変化の模式図を示す。

$$K_{max} = K_0 (1 - u / \sigma'_{v0})^{1/2} \quad (1)$$

$$F_{max} = F_0 (1 - u / \sigma'_{v0}) \quad (2)$$

ここで、 $K_0$  :  $K_{max}$ の初期値  
 $F_0$  :  $F_{max}$ の初期値  
 $u$  : 過剰間隙水圧  
 $\sigma'_{v0}$  : 初期有効鉛直応力

$$F_0 = \alpha \cdot \tau_{max} \cdot n \cdot D \cdot L \quad (3)$$

ここで、 $F_0$  : 最大バネ力 $F_{max}$ の初期値  
 $\alpha$  : 制御用パラメータ  
 (群杭効果も含む)  
 $\tau_{max}$  : 土のせん断抵抗  
 $n$  : 杭の本数  
 $D$  : 杭の直径  
 $L$  : 相互作用バネの負担深さ

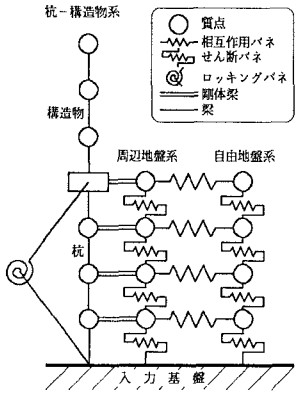


図-1 応答解析用連成系モデル

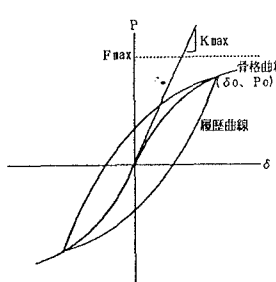


図-2 相互作用バネの復元力特性

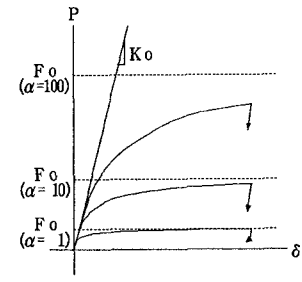


図-3 制御用パラメータによる非線形特性の変化の模式図

4. 振動台実験<sup>1) 2)</sup>

実験では、相似則<sup>1)</sup>に基づき長さの相似比は1/16、時間の相似比は1/8とした。構造物模型には、RC杭で支持されるRC造25階建構造物を想定した。模型地盤は、豊浦標準砂を用いてせん断土槽内に作成した相対密度45.0%の飽和地盤である。図-4に地盤-構造物模型と計器配置を示す。加振には、1983年日本海中部地震の秋田波NS成分を用いた。

5. 実験結果と解析結果の比較

はじめに、応答の時刻歴について考察する。図-5に $\alpha=10$ の場合の上部構造物の代表的な応答等の時刻

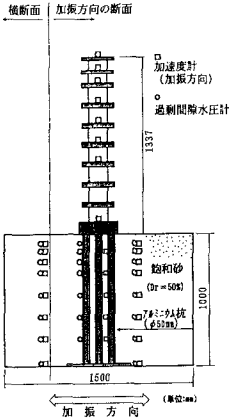


図-4 振動台実験模型と計器配置

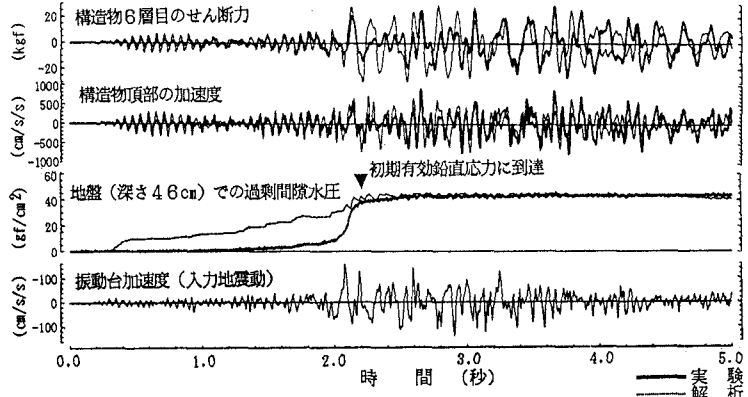


図-5 入力と代表的な応答の時刻歴 ( $\alpha = 10$ )

歴を示す。実験と解析で過剰間隙水圧の上昇の様子が異なるが、ともに2秒頃に液状化に達している。上部構造物の応答は、2秒頃までは両者はどの応答もほぼ一致する。しかし、間隙水圧が急上昇する時間帯では、両者に大きな差があり、液状化過渡期の応答予測は困難であることがわかる。液状化が定常状態となる2.5秒後以降は、長周期成分の卓越する時間帯では、両者の振幅・位相がよく合っている。<sup>3) 5)</sup>

次に、応答の最大値について考察する。図-6に $\alpha = 10$ の場合の上部構造物の応答加速度とせん断力の最大値分布を示す。図には、実験と有効応力解析結果に加えて、相互作用バネに間隙水圧の影響を考慮しない全応力解析の結果も併せて示した。いずれの高さでも、全応力解析の結果は実験結果より応答が大きいが、有効応力解析の結果は実験結果とほぼ一致している。構造物の設計には有効応力解析が有効であると考えられる。

図-7に頂部の加速度、1層と6層のせん断力の最大値と非線形パラメータ $\alpha$ の関係を示す。有効応力解析では $\alpha = 1 \sim 100$ で実験値に近いこと、最大応答は $\alpha$ に対し鈍いことがわかる。一方、全応力解析では $\alpha = 1$ の場合には実験値に近いが、 $\alpha = 10 \sim 100$ では大きく異なる。したがって、非線形パラメータ値の設定よりも拘束圧に依存する剛性と強度の変化を考慮することが本質的に重要であることがわかる。

## 6. 結論

- 地震時に杭基礎構造物の動的応答に及ぼす地盤の液状化の影響を評価する場合、拘束圧に依存する剛性と強度の変化を考慮することが本質的に重要である。
- 全応力解析は応答を過大評価する傾向にあるが、有効応力解析はおおむね適切に評価できると言える。

### [参考文献]

- 森伸一郎, 他: 液状化解析の適用性に関する研究(その1)~(その4), 第25回土質工学研究発表会講演集, 1990.6., pp.987-1002
- 森伸一郎, 他: 地盤-構造物連成系に対する有効応力液状化解析の適用性, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, 1990.12., pp.801-806
- S.Mori et al.: Influence of Soil Liquefaction on Dynamic Response of Structure on Pile Foundation, 10th W.C.E.E., 1992.7. (submitted)
- K. Ishihara, I. Towhata: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective Stress Method, J. of Fac. of Eng., Univ. of Tokyo, Vol. 35, No. 4, 1980
- 森伸一郎, 池田隆明: 杭基礎構造物の動的応答に及ぼす液状化の影響に関する振動台実験と解析, 第27回土質工学研究発表会講演集, 1992.6., pp.1097-1100

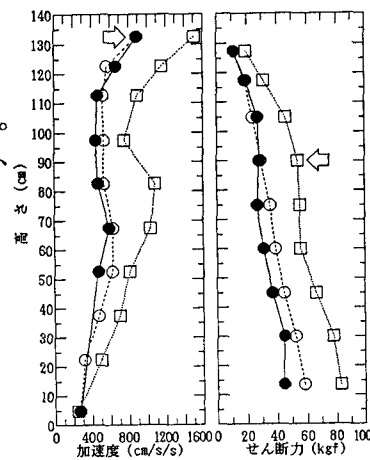
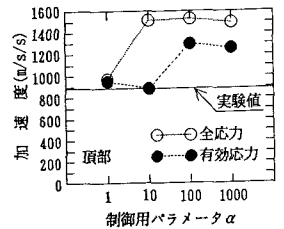
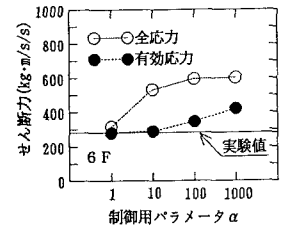


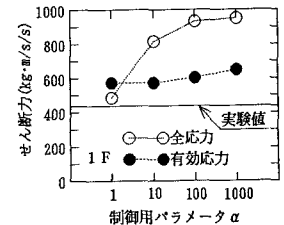
図-6 上部構造物の最大応答値分布 ( $\alpha = 10$ )



(a) 構造物頂部の加速度



(b) 構造物1層目のせん断力



(c) 構造物6層目のせん断力

図-7 非線形制御用パラメータと構造物の最大応答値の関係