

III-31

液状化過程における杭・地盤系の挙動解析

九州大学工学部 正 山内豊聡

東海大学工学部 正 兵動正幸

" " 学 〇 釜瀬敏秀

九州大学工学部 学 田山聡

1. まえがき

近年、飽和砂地盤の液状化を考慮した応答解析手法がいくつか提案され、さらに今後は地中構造物との連成系としての解析が行なわれる傾向にある。その方法の1つとして有限要素法が用いられているが、地盤の間隙水圧上昇を評価する有効応力解析を含めると膨大な計算となる。そこで、本研究ではPenzien系杭・地盤モデル¹⁾を改良し、液状化過程における地盤の変形挙動と側方の相互作用ばねを通して入力すると同時に、相互作用ばねは地盤の有効応力の低下に伴い劣化させるようにした。このような解析を行うことにより、液状化過程における杭・地盤系の応答挙動を調べた。この方法を用いると、有限要素法に比べて計算量もかなり節約できる。なお、地盤の有効応力解析としては、筆者らが提案した等価線形有効応力解析法²⁾を用いて簡略化を図っている。

2. 解析手法

杭・地盤系を、杭系と杭挙動の影響を受けない地盤系とに分けて、これらをばね、ダッシュポットで結び、杭に対する地盤変形の影響を考慮した。図-1は杭・地盤系をモデル化したものであり、杭系の水平方向運動方程式は次のようになる。

$$m_i(\Delta \ddot{u}_g + \Delta \ddot{u}_i^p) + C_i(\Delta \dot{u}_i^p - \Delta \dot{u}_i^s) + f_i(\Delta u_i^p - \Delta u_i^s) + \sum_{j=1}^n D_{ij} \Delta \dot{u}_i^p + D_{i\theta} \dot{\theta} + \sum_{j=1}^n K_{ij} \Delta u_i^p + K_{i\theta} \theta = 0 \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 m_i : i 質点の杭の集中質量(付加質量を含む)、 $\Delta \ddot{u}_g$: 基礎の入力加速度増分、 $\Delta \dot{u}_i^p$: i 質点の杭の変位増分、 $\Delta \dot{u}_i^s$: i 質点の地盤の変位増分、 θ : 杭頭の回転角増分、 C_i : i 質点の地盤-杭間の減衰定数、 f_i : i 質点の地盤-杭間の相互作用ばね定数、 D_{ij} : i 点のせん断力に対する j 点の速度の影響係数、 $D_{i\theta}$: i 点のせん断力に対する杭頭の回転角速度の影響係数、 K_{ij} : i 点のせん断力に対する j 点の変位の影響係数、 $K_{i\theta}$: i 点のせん断力に対する杭頭の回転角の影響係数、 n : 杭系の質点杭数。

上式中の $\dot{u}_i^s$, u_i^s には地盤系の速度、変位が代入されるが、本解析では水平地盤に対して等価線形有効応力解析を行い、その応答結果を入力した。地盤の間隙水圧上昇過程においては、杭と地盤を連結する相互作用定数 f_i , C_i は地盤の有効応力変動を考慮して変化させるべきであり、ここでは地盤系の有効応力変動に応じて変化させた。すなわち、 f_i は地盤のせん断剛性率と同様に有効応力比の平方根に比例させて変化するとし、 C_i は次式に示すような剛性比例型として考慮した。

$$C_i = 2 h f_i / \omega_i \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 h : 減衰定数、 ω_i : 杭系の1次固有円振動数。

解析対象は図-2に示すように、層厚30 mの飽和砂地盤中に先端を基礎に支持された直径1 mの杭が存在する杭・地盤系である。地盤の物性値は同図に示すとおりであり、杭の入力定数は弾性定数 $E_p = 1.9 \times 10^7$ kN/m²、ポアソン比 $\nu = 0.25$ 、単位体積重量 $\gamma_p = 29$ kN/m³ である。杭頭にはフーチング(2 m × 2 m × 1 m)が固定されており、入力定数は杭と同じである。また、初期の相互作用ばね定数は横方向地盤反力係数³⁾ R_h より求めた。入力波としては、図-3に示すようなEl Centro(1940)波 $N-S$ 成分を最大値0.1 gに縮小したものを基礎より10秒間入射した。

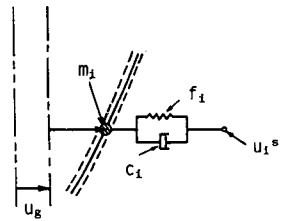


図-1 杭・地盤系モデル

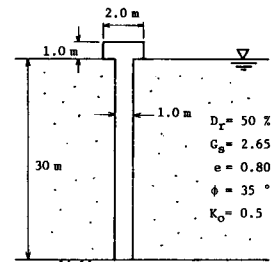


図-2 解析対象の杭と地盤

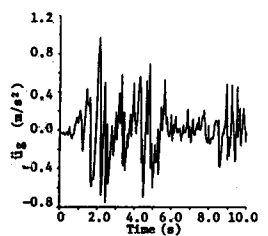


図-3 入力地震波の時刻歴

3. 解析結果

3-1 地盤系の解析結果

水平地盤に等価線形有効応力解析を適用して得

られた結果は次のとおりである。図-4は地盤最上層(深さ1.5m)の間隙水圧比 u/σ'_v の時間変化を示したものであり、2~5秒にかけて急上昇しているが、これは同時間に入力波が大きなせん断応力の応答を持つためである。図-5は最大間隙水圧比の深さ方向分布を示したものであり、完全液状化には至っていないが、上層ではかなりの間隙水圧の上昇が見られ、ほぼ初期液状化に近い状態である。

3-2 間隙水圧上昇を伴う杭系の解析結果

地盤系の応答解析結果を入力することにより得られた杭の応答結果は次のとおりである。図-6は杭上部(深さ1.5m)における変位の時刻歴を示したものであり、(a)は有効応力解析、(b)は全応力解析によるものである。地盤の間隙水圧が急上昇した3秒以後における応答には両者の間に顕著な相違がある。全応力解析では、応答変位の最大値が入力加速度が最大となる時刻で生じているのに対し、有効応力解析では、応答変位と入力加速度の時間変化には一義的な関係はなく、地盤の間隙水圧が上昇するに伴い大きな応答を示しており、液状化過程における地盤の剛性低下が杭挙動に及ぼす影響を表わしている。図-7は杭上部におけるせん断力の時刻歴を示したものであり、変位の場合とほぼ同様のことが言える。図-8~10はそれぞれ、杭の変位、せん断力および曲げモーメントの最大応答値の深さ方向分布を示したものであり、実線が有効応力解析、破線が全応力解析によるものである。いずれも全応力解析に比べて有効応力解析の方が大きな応答値となり、この傾向は杭頭に近いほど顕著である。図-8に示すように、両解析の応答変位の相違は約12m以浅に生じており、地盤の間隙水圧比が0.6程度発生し、ほぼ初期液状化に近い状態で現われるものと思われる(図-5参照)。図-9、10に示すように、杭のせん断力と曲げモーメントは全深さにわたり両解析の結果に違いがみられる。これは杭上部の変形挙動の相異による影響と考えられる。以上の結果より、地震時における杭の変位、せん断力および曲げモーメントは、地盤が初期液状化に近づくときより顕著な影響を受けるようになることが明らかにされた。

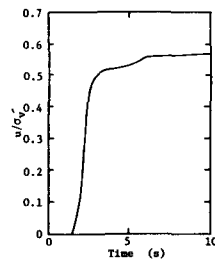


図-4 地盤最上層における
間隙水圧の時間変化

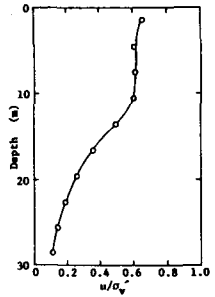
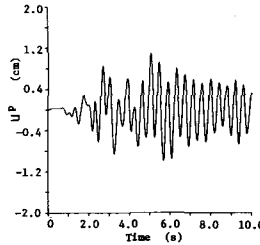
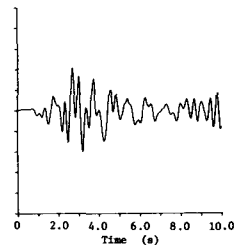


図-5 間隙水圧の深さ分布

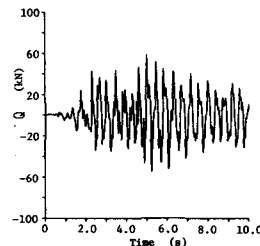


(a) 有効応力解析

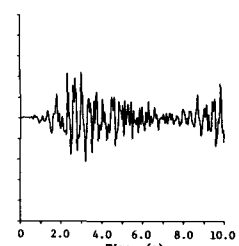


(b) 全応力解析

図-6 杭上部における応答変位の時刻歴



(a) 有効応力解析



(b) 全応力解析

図-7 杭上部における応答せん断力の時刻歴

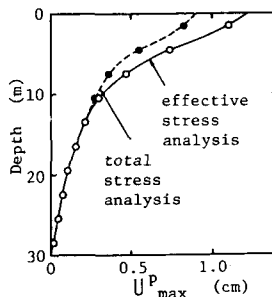


図-8 杭の最大応答変位の深さ分布

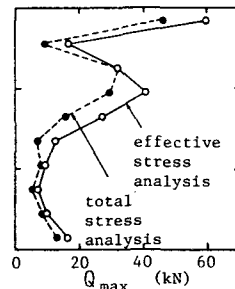


図-9 杭の最大応答せん断力の深さ分布

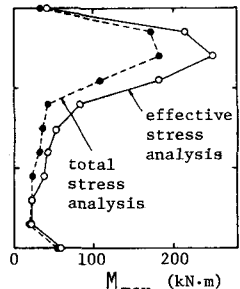


図-10 杭の最大応答曲げモーメントの深さ分布

参考文献: 1) Penzien, J. et al: ASCE, Vol. 90, No. EM3, PP223~258, 1984. 2) 兵動昭一: 第18回土質工学研究発表会講演集, PP603~604, 1983. 3) 運輸省港湾局監修, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 昭和54年3月。