

III - 7

流動地盤中の単杭の非線形挙動解析

東北大学工学部土木工学科 学生員 ○石丸 真

東北大学大学院工学研究科 正会員 仙頭紀明・渦岡良介・風間基樹

1. はじめに

1964年新潟地震では、砂質地盤の液状化に伴い、数mにも及ぶ側方流動が生じた。例えば、信濃川にかかる昭和大橋では、鋼管杭基礎が流動によって側方変形し、その結果、落橋したことが報告されている。本研究では、地震後の間隙水圧変化に伴う地盤の浸透破壊メカニズムを用いて、側方流動変位を求め、その結果生じる杭基礎の応力・変形を時間を追って解析し、杭基礎の破壊・変形モードを支配した要因について考察した。

2. 解析方法

最終的には、杭の挙動を解析することが目的であるが、解析ではまず地盤の流動変形時刻歴を求めた後、その地盤の変形量を用いて杭の曲げ変形を評価した。解析は非線形であるため、時間ステップごとの増分で定式を行った。

2.1 地震後の地盤の流動変形解析 解析は赤堀らの方法¹⁾を基本にした。そのうち、液状化後の消散過程の体積ひずみ-有効応力比関係については、別途実施した、ひずみ制御繰返し3軸試験における液状化後の排水収縮過程のデータをもとに図-1のようにモデル化した。

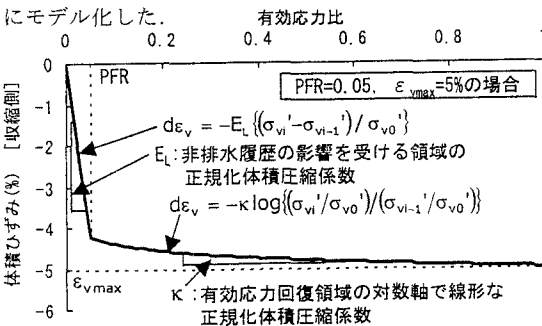


図-1. 体積ひずみ-有効応力比関係のモデル化

ここに、PFR:バイリニア折れ曲がり時の有効応力比、 σ_{v0}' :初期有効応力、 σ_{vi}' 、 σ_{vi-1}' : i 、 $i-1$ ステップの有効応力、 ϵ_{vmax} :最大体積ひずみである。したがって、収縮特性はPFR、 ϵ_{vmax} 、 κ の3変数によって決定される。

2.2 杭と地盤の接続解析 地盤変位によって生じる応力を(1)式に示す荷重分布法を用いて計算する。

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 u_p}{dx^2} \right) + k_{sub} \cdot B \cdot u_p = k_{sub} \cdot B \cdot u_g \quad (1)$$

ここに、EI:杭の曲げ剛性、 x :深さ、 u_p :杭の変位、 u_g :地盤変位、 k_{sub} :地盤反力係数、 B :杭径である。杭-多層地盤系は有限要素法を用いて離散化²⁾した。鋼管杭の杭体の曲げモーメント-曲率関係は、全塑性モーメント M_p を上限值とする弾塑性型とした³⁾。

地盤反力係数は対象土層の平均N値より求めた⁴⁾。地盤反力係数の杭と地盤の相対変位に対する非線形性は文献4)を参考にし、液状化の影響については、有効応力比 $(1 - (u/\sigma_{v0}'))$ のべき乗に比例して低減することが提案されている⁵⁾ことより、(2)式を文献4)の地盤反力係数、塑性地盤反力に乗じることで液状化の影響を考慮した。

$$(1 - (u/\sigma_{v0}'))^\gamma \quad (2)$$

ここに、 γ :パラメータ(0~1.0)である。

3. 昭和大橋 P4 橋脚杭の解析

3.1 地盤変位 解析に用いる地盤物性については文献1)を参照されたい。河床地盤の傾斜、および液状化した層の体積圧縮特性が不明確であるため、傾斜角(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0度)、最大体積ひずみ(1, 3, 5%), PFR(0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07)を変数としてパラメータ解析を行った。なお、 κ については豊浦砂の実験結果から0.006とした。

3.2 杭の変形・応力 解析に用いる杭諸元を表-1に示す。杭の境界条件は杭先端は水平変位を許さないピン、杭頭は水平変位を許すピンである。図-2(a)、(b)に傾斜角1.5度、最大体積ひずみ5%、PFR=0.07の地盤変位が作用した場合の杭の残留変形を示す。

表-1.P4橋脚杭諸元

杭頭からの距離	肉厚(mm)	EI(kN・m ²)	M _p (kN・m)
0~12(m)	16	2.7×10 ⁵	1.29×10 ³
-12~-25(m)	9	1.6×10 ⁵	0.71×10 ³

杭径:609mm, 杭長:25mの鋼管杭

図中では被災杭の残留変形 θ も併せて示す。被災杭は-19m付近から右側に大きく変形しており、-15m付近から左側に戻るような変形をしていた。このような変形パターンは、落橋したのち、桁に固定された杭頭の変形が拘束されたために生じたと推定されている⁷⁾。この効果をここではストラット効果と称した。ストラット効果を考慮しない解析結果は、-15m付近の被害がないと仮定した場合の変形パターン θ とよく一致している。解析では、杭頭変位が被災杭と一致した時刻から杭頭変位を拘束することでストラット効果を考慮した。ストラット効果を考慮した場合の杭の残留変形も図-2に併せて示す。図より $\gamma=0.4$ の場合が被災杭とよく一致している。図-3に杭に生じたモーメント($\gamma=0.4$ の場合)を示す。ストラット効果を考慮しない場合では、-19m付近に大きなモーメントが発生しているだけであるが、ストラット効果を考慮した場合には、-12m付近にも大きなモーメントが発生している。この位置は、被災杭において局部座屈が発生していた位置と一致している。図-4に杭頭変位の時刻歴($\gamma=0.4$ の場合)を示す。図よりストラット効果を考慮し始めた時刻は地震終了から68.5秒であり、これは目撃談の落橋時刻(地震終了後1~2分)とほぼ整合している。以上のことから、昭和大橋P₄橋脚杭の被害形態は地震後の地盤変位と落橋した橋桁の影響を考慮することによりほぼ説明できると考えられる。

4. 結論

地震後の地盤変位、および過剰間隙水圧の時刻歴を用いて、杭基礎の破壊・変形モードの進行過程を解析する方法を示した。この手法を昭和大橋P₄橋脚杭に適用し、被災杭の変形パターンを地震後の流動変形によってほぼ説明できることを示した。

参考文献：1)赤堀他:地震後の浸透破壊による流動変形予測, 第36回地盤工学研究発表会, pp.2417-2418, 2001. 2)土質工学学会:「杭基礎の設計法とその解説」. 3)日本道路協会:「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」. 4)日本建築学会:「建築基礎構造設計指針」. 5)濱田他:大型せん断土層を用いた液状化時の地盤反力係数の評価(その2)地盤反力係数の定式化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp667-668, 2001. 6)土木学会:「昭和39年新潟地震震害調査報告」. 7)森他:液状化による地盤の永久変位に起因する杭基礎の被害と解析, 第20回地震工学研究発表会講演概要, pp.25-28, 1989.

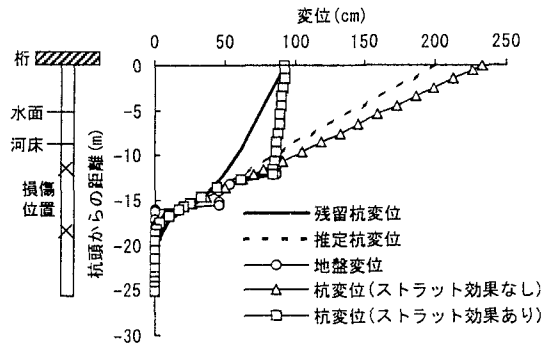


図-2(a). 最終変位量と被災杭の変形量($\gamma=0.0$ の場合)

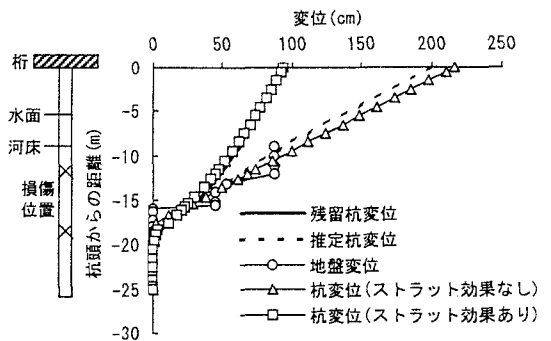


図-2(b). 最終変形量と被災杭の変形量($\gamma=0.4$ の場合)

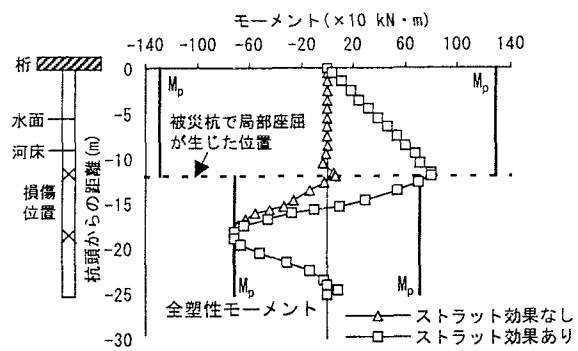


図-3. 杭体の最終モーメント($\gamma=0.4$ の場合)

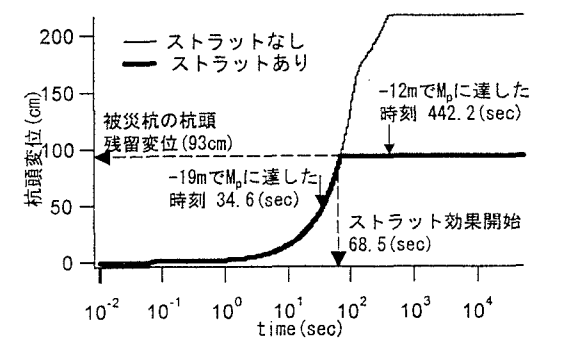


図-4. 杭頭変位の時刻歴($\gamma=0.4$ の場合)