

文章编号 1000-5013(2004)03-0328-03

# 液化侧扩地基中桩基的有限元分析

黄群贤 林建华

(华侨大学土木工程系, 福建 泉州 362021)

**摘要** 运用 ANSYS 有限元分析软件, 建立桩基在侧向荷载作用下的有限元计算模型. 考虑桩土共同工作的非线性关系. 对土弹簧单元施加侧向位移模拟在液化侧扩地基中, 土体产生的侧向位移以及液化侧扩地基中的桩进行非线性有限元分析. 合理地解释了地震液化引起地面大位移, 对桩基产生破坏的实际震害情况.

**关键词** 地震液化, 地面大位移, 侧向扩展, 桩基

**中图分类号** TU 473.1<sup>+</sup>2

**文献标识码** A

地震液化引起地面大位移对地下结构的破坏是液化区地下结构破坏的主要形式之一<sup>[1,2]</sup>. 液化侧扩地基中桩基的震害, 主要表现为受地基永久侧向位移的影响引起桩头大变位式的破坏, 在液化层底和液化层中部由于流动土体对桩的侧向压力, 导致桩身剪切破坏和弯曲破坏. 因此, 液化侧扩地基中桩基受力机理复杂, 在目前有限的研究中, 大部分还处于定性分析阶段. 本文采用简化计算方法, 考虑桩土共同工作的非线性关系, 建立液化侧扩地基中桩基的计算模型. 借助该计算模型, 分析桩基在地震惯性力及液化侧扩产生强迫位移作用下的受力特性.

## 1 计算模型的建立

### 1.1 液化侧扩地基中桩基的计算模型

在地震期间, 液化侧扩地基中桩基采用的计算模型, 如图 1 所示. 桩侧土简化为 3 层, 上覆非液化土层、液化土层及下覆非液化土层. 在地面侧向位移的作用下, 其控制微分方程为

$$\left. \begin{aligned} EI(d^4 y_1 / dz_1^4) &= k_1 b_0 (D - y_1(z_1)), \\ EI(d^4 y_2 / dz_2^4) &= k_2 b_0 (D_z(z_2) - y_2(z_2)), \\ EI(d^4 y_3 / dz_3^4) &= -k_3 b_0 y_3(z_3). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

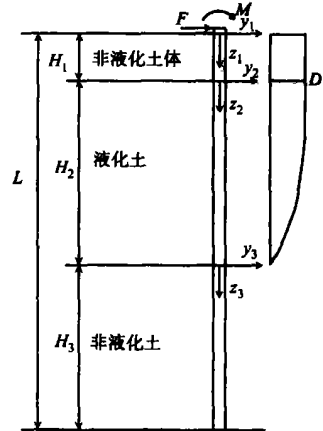


图 1 液化侧扩中桩的计算简图

式(1)中  $b_0$  为桩的计算宽度,  $EI$  为桩的抗弯刚度,  $D$  为地面水平位移,  $D_z$  为液化层某一深度处的水平位移,  $y_i$  ( $i=1,3$ ) 为桩基的侧向位移,  $z_i$ ,  $H_i$  分别第  $i$  层土的局部坐标及土层厚度,  $k_i$  为第  $i$  层土的地基反力系数, 为液化层的刚度折减系数.

### 1.2 地下某一深度处土体水平位移的计算

根据国外大量的震动台和离心机模型试验研究, 地面下某一深度处土体水平位移可近似认为: (1) 上覆非液化层的位移不随深度而改变, 其位移值与地面位移相同; (2) 液化层内不同深度处的水平位移按余弦变化, 液化层顶位移最大, 层底为零, 即

$$D_z(z_2) = D \cdot \cos(z_2 / 2 H_2). \quad (2)$$

$D_z(z_2)$  为距上覆非液化层底  $z_2$  处的水平位移,  $D$  为液化侧扩引起的水平位移,  $H_2$  为液化层的厚度.

收稿日期 2003-12-14

作者简介 黄群贤(1977-), 男, 助教, 主要从事工程抗震的研究. E-mail: qxhuang@sina.com

基金项目 福建省自然科学基金资助项目(D020014)

### 1.3 地基刚塑性假设

当桩基承受的外荷载很大或某一土层刚度较弱时,部分土层已经屈服.对于液化侧扩地基,土层的侧向位移较大,桩土共同工作已处于非线性阶段.按照线弹性方法,计算出来的结果会有较大的误差.因此,本文在分析中考虑桩土共同工作的非线性关系,对土体采用刚塑性体假设.设地基反力  $p$  在达到极限抗压强度  $P_u$  以前,地基是按线性弹性体变化的.当达到  $P_u$  以后,地基反力假定为定值(图2).具有这样的应力-应变关系的物质被称为刚塑性体,也称完全弹塑性体.对于砂土地基中的桩受水平荷载时,桩前方地基由地面附近开始屈服.根据许多实测资料,确认在此屈服区内的地基反力相当于 Rankine 被动土压力的3倍.即由地面向下深度为  $x$  处的地基反力为  $P_u = 3 C_p x$ ,  $C_p =$

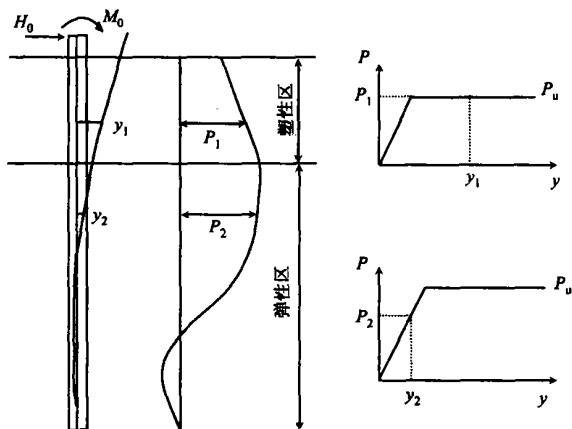


图2 完全弹塑性法

$\frac{1 - \sin}{1 + \sin} = \tan^2(45^\circ + \frac{\alpha}{2})$ . 这里,  $\alpha$  为内摩擦角,  $\gamma$  为土的容重.

## 2 ANSYS 计算模型的建立及求解<sup>[3]</sup>

由于需要考虑到土体应力应变的非线性关系,从数学上严格求解微分方程(1)十分困难,一般采用数值方法得到其近似解.本文采用 ANSYS 有限元软件,建立桩基在侧向荷载作用下的有限元计算模型.考虑桩土共同工作的非线性关系,对土弹簧施加侧向位移模拟由液化侧扩产生对桩身的侧向压力,分析液化侧扩地基中桩基的受力特性.

在有限元分析中依据一定的原则将桩沿深度方向划分成若干个单元,把桩体与地基土的连续接触等效为一系列的弹簧作用于梁单元节点上.即以一系列的弹簧约束来表征土抗力的作用,其中不考虑桩土之间的侧摩阻力.桩结构的有限元基本方程的矩阵表达式为  $K_{pile} \delta = F$ .式中  $K_{pile}$  为桩结构的整体刚度矩阵,  $\delta$  为桩结构节点的位移向量,  $F$  为作用在桩结构节点上的荷载向量.对于常数法,地基反力系数与土层的深度无关.那么,则其弹簧单元的弹性系数为  $k = k_h b_0 h_0$ .对于  $m$  法地基反力系数与土层的深度有关系,则其弹簧单元的弹性系数为  $k = m z b_0 h_0$ ,式中  $z$  为自地面算起的土层深度,  $b_0$  为桩的有效计算宽度,  $h_0$  为划分单元的高度,计算时可根据精度的要求确定划分单元的高度.

利用 ANSYS 软件系统提供了丰富的梁单元库,甚至可以对变截面的任意形状的梁进行计算,在建模中,桩体采用 Beam3 单元.该单元是单轴承受拉力、压力及力矩的元素,每个节点具有  $x$  与  $y$  位移方向及  $z$  轴角度位移 3 个自由度,输出选项有梁单元的弯矩、剪力、最大应力和最小应力等,桩土相互作用单元采用 Link1 单元模拟桩土之间的弹簧单元,也可以用 Combin14 单元进行替换.

## 3 算例及结果分析

某单桩直径  $D = 0.5$  m,入土深  $h = 15$  m,桩的弹性模量  $E = 20$  GPa  $\cdot m^{-2}$ ,作用于桩顶的水平力  $H_0 = 80$  kN,弯矩  $M_0 = 100$  kN  $\cdot m$ .桩侧地基水平反力系数的比例系数  $m = 20$  MPa  $\cdot m^{-2}$ ,地震时从地下 1.5 m 到 6.5 m 的土层液化,计算中液化层地基水平反力系数按比例系数进行折减.6.5 m 以上土层  $m = 15.4$  kN  $\cdot m^{-3}$ ,其它土层  $m = 17.4$  kN  $\cdot m^{-3}$ ,内摩擦角均为  $\alpha = 30^\circ$ ,土层的应力应变关系选用刚塑性模型.为考虑液化侧扩的影响,地面侧向位移 (cm) 分别取 0, 5, 10 和 15,液化土体侧向位移按式(2)进行计算.本文用 ANSYS 简化计算模型分别计算桩基在地基没有液化情况下、有液化无侧向扩展以及液化侧扩情况下的内力,并进行对比分析.

从图3至图5可以看出,在无液化地基中,桩基主要受桩顶惯性力的作用,桩身最不利位置在桩顶

处.在有液化无侧扩地基中,由于没有考虑到土层运动对桩身产生的内力,在已液化土层与下卧的非液

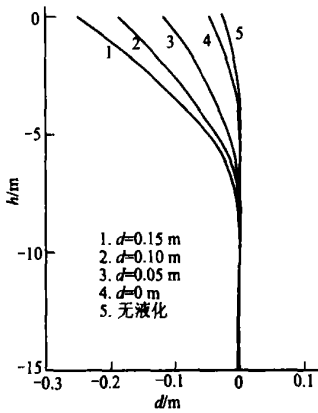


图 3 桩侧向位移计算值

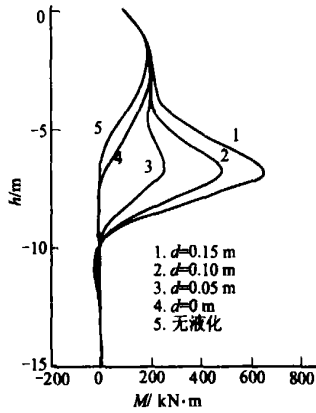


图 4 桩弯矩计算值

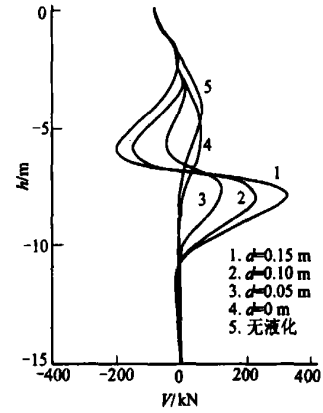


图 5 桩剪力计算值

化土层的界面,桩身所承受的内力较小,不能反应桩身的实际受力情况.但从文献[2]可以得到在液化层界面处桩身的内力与桩顶处接近,因此桩身的最不利位置处在桩顶和软硬交界处.在液化侧扩地基中,桩在很小的土层侧向位移作用下,如侧向位移取 5 cm,液化层及软硬交界处桩身的内力急剧增大,并且其内力值与桩顶处的内力接近.同时上部土层在惯性力及强迫位移的双重作用下,部分土体已经达到屈服状态,桩身缺少有效的侧向支撑,因此引起桩顶出现较大的变位.随着地面侧向位移的增大,以软硬交接处桩身的内力增加最快,与桩顶地震水平力的作用相比,越来越占主要地位.桩身可能承受了超出桩本身极限抗弯能力的弯矩,很容易发生弯曲破坏,这与在液化侧扩桩基的宏观震害吻合.

## 4 结束语

计算结果表明,地基的侧向位移是与液化有关的桩基震害的主要原因之一.在软硬交界处桩可能承受了超出桩本身极限抗弯能力的弯矩,容易发生弯剪破坏.计算结果合理地解释了地震液化引起地面大位移对桩基产生破坏地实际震害情况.

## 参 考 文 献

- 1 高玉峰,刘汉龙,朱伟.地震液化引起地面大位移研究进展[J].岩土力学,2000,21(3):294~298
- 2 刘惠珊.桩基抗震设计探讨——日本阪神大地震的启示[J].工程抗震,2000,(3):27~32
- 3 陈精一,蔡国忠.电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南[J].北京:中国铁道出版社,2001.5~10

## Finite Element Analysis of the Pile in Foundation of Laterally Extending Liquefaction

Huang Qunxian Lin Jianhua

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** By using ANSYS as the software of finite element analysis, a model is set up for calculating finite element of pile foundation with lateral load. Considering the nonlinear relation between pile and soil which jointly operate, the authors simulate lateral displacement of soil mass in pile foundation of laterally extending liquefaction by exerting pressure on soil spring unit to cause its lateral displacement; and carry out nonlinear finite element analysis of the pile in foundation of laterally extending liquefaction. The reckoning rationally interprets the extensive ground displacement induced by seismic liquefaction; and the actual seismic damage as shown by the destruction of pile foundation.

**Keywords** seismic liquefaction, large ground displacement, lateral extension or lateral spread, pile foundation