

文章编号: 1000-7598-(2012)07-2189-07

横向扩展液化土中单桩-土系统的非线性分析

杨 骁, 何光辉

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘 要: 将地震液化场地分为地表的上覆未液化土层、底部的未液化基层以及夹在两者之间的液化土层, 基于桩-土相互作用的非线性 Winkler 模型, 考虑桩弯曲的非线性弯矩-曲率本构关系和桩的几何非线性变形, 建立了液化土层横向扩展下桩非线性大挠度变形的基本控制方程, 并利用打靶法进行了数值求解。同时, 给出了桩线弹性小变形情形下的解析解。通过与非线性有限元解和线弹性小变形解析解的比较, 验证了文中打靶法的有效性和可靠性。用数值方法分析了液化土层横向扩展对桩力学性能的影响, 结果表明: 非线性桩-土相互作用和桩材料非线性效应强于桩的几何非线性效应, 随着液化土层横向扩展位移的增加, 几何非线性效应逐渐增大, 此时, 应采用完全非线性模型进行桩力学行为的分析。

关 键 词: 非线性弯矩-曲率关系; 几何非线性; 桩-土非线性相互作用; 土体液化; Winkler 模型

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Nonlinear analysis of single pile-soil system in lateral spreading liquefied soil

YANG Xiao, HE Guang-hui

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Regarding the seismic liquefied field deposit as being composed of a non-liquefied crust layer at the ground surface, non-liquefied base layer and a sandwiched liquefied layer, based on the nonlinear Winkler model for pile-soil interaction and taking both the nonlinear bending moment-curvature constitutive relationship and geometric nonlinearity of the pile, the fundamental governing equations for nonlinear large deflection deformation of the pile undergoing soil layer's lateral spreading are formulated and are solved numerically with the shooting method. At the same time, the analytical solutions of the pile are presented for the case of small deformation and linear elasticity. The validity and reliability of the shooting method presented in the paper are verified by comparing the results of the shooting method with those of the nonlinear finite element method and analytical solutions. The influence of the lateral spreading of the soil layer on the mechanical behavior of the pile is investigated numerically. The results show that the effects of nonlinear interaction between the pile and soil as well as material nonlinearity of the pile are much stronger than that of the geometric nonlinearity of the pile. The effect of the geometric nonlinearity is increased with the lateral spreading increasing of the liquefied soil layer. And it's necessary to analyze the mechanical behavior of the pile with fully nonlinear model.

Key words: nonlinear bending moment-curvature relationship; geometric nonlinearity; nonlinear pile-soil interaction; soil liquefaction; Winkler model

1 引 言

在众多强震中, 液化土体横向扩展已成为导致桩基础破坏的主要原因之一, 如在唐山地震(1976)、阪神地震(1995)以及普杰地震(2001)等中均发现液化土体中桩基的破坏^[1-2]。为此, 近年来, 人们开始关注液化土-桩相互作用以及液化场地中桩

基础的力学性能。由于桩-土相互作用以及地震液化场地土体横向扩展是导致桩基础破坏的主要因素^[3-4], 同时, 液化场地中的未液化上覆土层横向扩展往往被桩基础设计规范所忽略或者过于近似^[5]。因此, 这方面的研究已成为当今地震工程和土木工程界的研究热点之一。

有两种主要机制导致地震液化场地中桩基础的

收稿日期: 2011-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10872124)。

第一作者简介: 杨骁, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事土-桩-结构相互作用、饱和多孔介质研究。E-mail: xyang@shu.edu.cn

破坏^[6-7], 一种是地震时随着土体的液化, 上部结构惯性力导致桩基的弯曲或失稳破坏; 另一种是土体液化后, 桩基并未随即破坏, 而在随后逐渐发展的液化土体横向扩展过程, 运动的非液化硬壳表面对桩基产生很大的侧向力, 导致桩基发生弯曲变形。此时, 若桩基强度不足以抵抗此侧向力, 则桩由于过大的弯矩而发生破坏。在液化土体发生横向扩展之前, 惯性力是桩基破坏的主要因素, 但随着土体横向扩展的发展, 土体横向扩展对桩的作用成为桩基破坏的主要因素。

桩-土相互作用的连续介质模型将土介质视为连续体, 在一定的简化假定下, 可较精确地揭示桩-土间的相互作用机制, 该模型可用解析法^[8-10]或者数值方法^[11-13]进行研究分析。另一种较为简单实用的模型是基于线性、非线性 Winkler 基础梁模型, 即基于 $p-y$ 曲线的一维分析模型, 尽管该模型只能近似分析桩-土相互作用, 但由于其数学模型相对简单, 计算量小, 且能较好地给出符合实际工程的解答, 已广泛应用于实际工程中^[14-15]。对于液化场地中的桩-土作用研究, Martin 等^[16]利用 FLAC^{3D} 研究了弹性桩在液化土层横向扩展作用下的力学性能, 而 Lu 等^[17]、Cheng 和 Boris^[18]基于土体的弹塑性本构, 考虑孔隙水的影响, 利用非线性有限元法研究了液化场地两层土-单桩-结构系统在地震激励下的响应, 数值分析了土层物理性质等参数对系统响应的影响。基于桩-土相互作用的 $p-y$ 曲线, 考虑桩非线性弯矩-曲率本构关系, Cubrinovski 等^[3]利用等效线性化方法研究了土层横向扩展对桩基弯曲的影响。Bhattacharya 等^[7]提出了液化场地桩基的失稳破坏机制, 而 Meera 等^[19]基于非线性 $p-y$ 曲线, 分析了轴向和侧向载荷共同作用下桩的弯曲性能。这些研究中均假定桩为 Euler-Bernoulli 梁, 即桩发生小变形弯曲。然而, 在强地震中, 液化场地土体横向扩展往往具有较大的位移, 可能导致桩体发生大挠度弯曲变形, 而作者尚未见到相关的研究分析报道。

本文将土体视为理想弹塑性体, 基于桩-土相互作用的非线性 $p-y$ 曲线, 考虑桩弯曲的非线性弯矩-曲率本构关系, 在桩大挠度弯曲变形的假定下, 研究了地震液化场地土体横向扩展中端承桩基的力学行为, 考察了桩几何和材料非线性等对其变形的影响。首先, 给出了土体横向扩展下端承单桩大挠度弯曲变形的基本控制方程, 为便于数值求解, 将其改写为等价的一阶非线性常微分方程组的边值问题。其次, 为考察非线性因素的影响, 给出了桩线

弹性、小变形时的解析解。在此基础上, 应用打靶法求解上述非线性常微分方程组边值问题, 用数值方法研究了液化土体横向扩展对桩力学性能的影响。数值分析结果表明: 当液化土体横向扩展位移较小时, 线性解答完全可以满足工程需要; 当液化土体横向扩展位移适中时, 桩非线性本构关系和非线性桩-土相互作用因素对桩弯曲变形的影响大于桩几何非线性因素的影响; 而当液化土层横向扩展位移较大时, 几何非线性因素对桩弯曲的影响较大。此时, 应采用完全非线性模型进行分析。

2 桩-土相互作用的计算模型

在大多数情况下, 具有横向扩展的地震液化场地中端承单桩-土系统可简化为如图 1 所示的物理模型^[3, 7], 土体从桩顶到桩底分为 3 层, 分别为表层的未液化上覆层、液化土层和未液化基层, 设其厚度分别为 H_1 、 H_2 和 H_3 , 总厚度为 $H = H_1 + H_2 + H_3$, 且建立如图 1 所示坐标系 oyz 。通常, 上覆土层的横向扩展位移为一常数, 记为 U_G , 而液化土层的横向扩展位移与位置有关, 记为 $U_g = U_g(z)$ 。设直径为 D_0 的圆柱桩在其顶部承受竖向压力 P_0 、弯矩 M_0 以及横向力 F_0 的作用, 且土层阻碍桩弯曲变形的横向作用力为 q 。

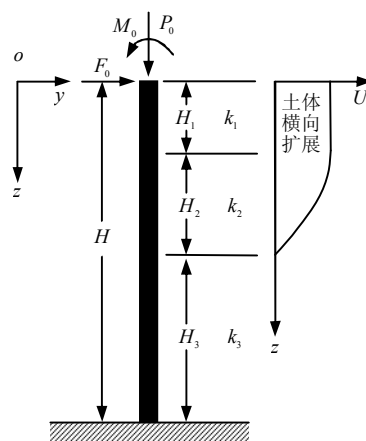


图 1 横向扩展液化土中端承单桩计算模型
Fig.1 Calculation model of single end-bearing pile in lateral spreading liquefied soil

2.1 桩大挠度非线性弯曲模型

忽略桩表面的侧向摩阻力, 设端承桩在 oyz 平面内发生弯曲变形, 其横向位移 (挠度) 和竖向位移分别为 $w(z)$ 和 $v(z)$, 横截面的转角为 $\theta(z)$, 而横截面上的轴力、剪力和弯矩分别为 $F_N(z)$, $F_s(z)$ 和 $M(z)$ 。如图 2 所示, 则桩大挠度弯曲变形在 oz 方向、 oy 方向以及弯矩的平衡方程为