

基于时程分析法的刚性桩复合地基地震响应分析

鲍 鹏, 苏彩丽, 张利伟

(河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004)

摘 要: 针对 5×5 刚性桩复合地基三维群桩, 利用有限元分析软件 ANSYS 软件进行了动力特性分析, 计算模型中, 桩体、桩间土、基础和褥垫层均假定为线弹性模型, 并考虑上部结构的反馈作用。通过数值计算研究了结构自振特性, 采用时程分析法对刚性桩复合地基进行了地震响应分析, 研究了复合地基-基础-上部结构三者在不同地震作用下, 其结构的位移、内力的数值大小及分布规律, 对抗震设计具有参考价值。

关键词: 刚性桩复合地基; 时程分析法; ANSYS

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0485-05

作者简介: 鲍 鹏(1964-), 男, 河南开封人, 博士, 教授。研究方向: 土-结构相互作用。E-mail: cnbaop@yahoo.com.cn。

Seismic response of rigid pile composite foundation based on time history analysis method

BAO Peng, SU Cai-li, ZHANG Li-wei

(School Of Civil Engineering and Architecture of Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: For 5×5 three-dimensional composite foundation pile group, using the finite element analysis software ANSYS for the analysis of dynamic characteristics, in the calculation model, the pile, soil between piles, foundation and cushion are assumed to be linear elastic models, and the feedback effect of the upper structure is also considered. Numerical simulation is employed to study the structural vibration characteristics. The time history analysis method is used to analyze the earthquake response of composite foundation. The magnitude of displacement and internal forces and distribution of the composite foundation-foundation-superstructure under different seismic excitations are studied. It may provide reference for seismic design of structures.

Key words: rigid pile composite foundation; time history analysis method; ANSYS

0 引 言

复合地基, 既不同于天然地基, 也不同于传统桩基, 是介于两者之间的一种过渡型基础。由于刚性桩复合地基相比柔性桩, 具有较大的桩体强度, 可以充分发挥全桩的侧摩阻力, 因此刚性桩复合地基的单桩承载力高, 进而复合地基承载力较高, 多用于高层、超高层建筑地基处理之中。

经震害分析, 可以得知, 普通桩基的震害主要与桩的类别、所处地形、土的性质等条件相关。由于普通桩基与基础为刚性连接, 而刚性桩复合地基存在着垫层, 使之与普通桩基在横向工作性能方面有显著不同, 尤其是在抗震设计中不能简单地套用普通桩基的抗震分析设计方法, 因此对刚性桩复合地基抗震性能分析十分必要^[1]。目前对刚性桩复合地基抗震性能的研究大多是针对单桩进行的或者是把群桩问题简化为

二维平面问题进行模拟, 文献[2~5]均对复合地基从不同角度进行了抗震性能研究, 文献[6]提出了无界元的有限元计算方法, 本文则是在三维群桩数值模型基础上, 对刚性桩复合地基进行抗震性能分析。

1 计算模型

1.1 基本假定

为了简化计算, 本文主要做了一下假设: ①对于土体、桩体、垫层和承台的截面类型, 均采用方形截面; ②对于桩体、垫层、承台以及土体各部分, 均看做一个整体; ③假定上部结构为楼板刚度无限大的框架结构; ④在地基一定深度处存在基岩, 其计算深度为自桩底向下取 2 倍桩长, 从基岩输入地震波; ⑤地

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(496260015)

收稿日期: 2011-08-22

下水对刚性桩复合地基抗震性能的影响,不予考虑。

1.2 边界选取

黏性边界是最直观的一种边界处理方法,本文将采用这种形式的传输边界,就是在边界上布置法向和切向的黏滞阻尼器来模拟远区的作用,大量研究证明黏性边界可以提供良好的模拟效果。计算模型中采用 ANSYS 中的弹簧单元模拟传输^[7-8],其中弹簧弹性刚度的计算利用平均分配法进行,其公式为:弹簧刚度(N/m)=土体弹模×接触面积/弹簧数量/1 m。根据此式计算得土体底部约束弹簧刚度约为 5.0×10^6 N/m,模型四周约束弹簧刚度约为 6.0×10^6 N/m。

1.3 计算模型

地基土、垫层、桩体及基础承台均为线弹性体,采用 8 节点实体单元,上部结构采用 Beam4 单元模拟;黏性边界采用 Combin14 单元模拟。桩体采用方桩,桩长 5 m,桩边长 $a=0.2$ m,桩间距为 $5a$,桩数 5×5 。承台板平面尺寸为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,厚度为 1.0 m。上部结构考虑 10 层钢筋混凝土框架结构,层高为 1.5 m,开间 2 m,进深 2 m,纵 2 跨,横 2 跨,框架柱截面为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,框架梁 $0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$,采用 C30 混凝土。模型如图 1, 2 所示。

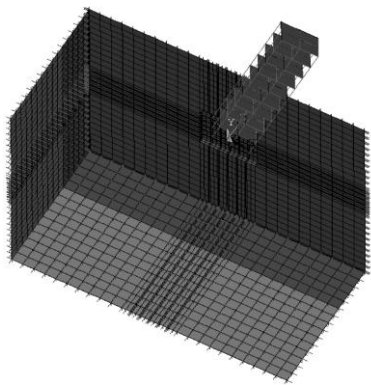


图 1 三维网格划分图

Fig. 1 Three-dimensional mesh

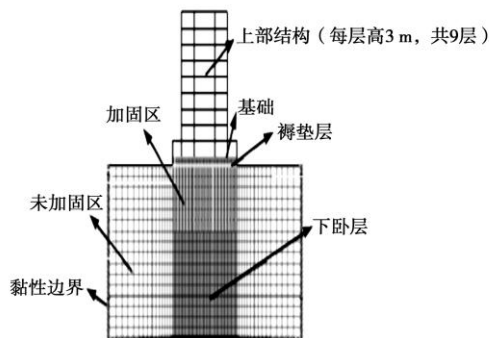


图 2 网格立面划分图

Fig. 2 Elevation of mesh

1.4 分析方法

本文中,先对该有限元模型进行了模态分析,获得 3 阶模态的振型、频率,采用地震波,以基岩波的形式在底部边界从水平方向输入,合理模拟地震情况。采用时程分析法对结构的抗震状况进行分析。时程分析时采用 Taft 波进行计算分析,此波最大加速度在 0.18 m/s^2 附近, Taft 波的波形如图 3 所示。

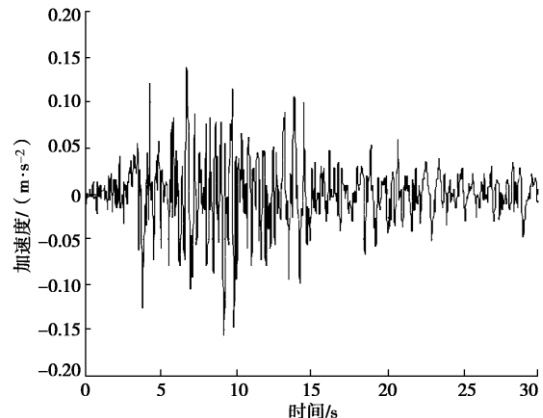


图 3 Taft 波加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time history of Taft wave

2 结构的自振特性

本文对有限元计算模型进行了模态分析,得出系统的前三阶振型及其对应的结构自振频率,见表 1。

表 1 结构前三阶自振频率

Table 1 First three natural frequencies of structure

模态阶数	1	2	3
固有频率	0.93782	1.3608	1.3608

从表 1 中可以看出,系统存在较高的基频,也进一步证明了复合地基和上部结构有较好的刚度。另外,从基频到第二阶频率其变化较大,频率增加也较快,且频率中有共振型存在,该系统具有对称性是其主要原因。

3 刚性桩复合地基在 Taft 波作用下工作性状

为便于对中桩、边中桩和角桩等不同桩位的桩体进行研究,本文对桩体进行编号,分析中取出桩 55、桩 35 及桩 33 作为角桩,边中桩及中心桩的代表。采用 Taft 地震波,以基岩波的形式在底部边界从水平方向输入,计算出不同区域桩体、桩间土、褥垫层、基础及上部框架的力学性能。

3.1 桩体的位移时程曲线

图 4 为不同桩位复合地基的水平位移时程曲线,由图 4 可以得出,在地震波的激励下,桩体各点都存在震动,且有一定周期性,所有桩位的桩震动特点都

很相似, 即桩底产生最小振幅, 桩身次之, 最大振幅出现在桩顶。仅仅在位移曲线的极值点处存在较大的位移差, 其余时间桩体不同位置处其位移相差均不大, 也进一步说明了桩体的变形量较小。从图 4 (a), (b), (c) 中容易得出, 最大位移接近 2.0×10^{-3} m, 各桩位桩体的位移时程曲线均相差不大, 说明在地震作用下, 导致复合地基的位移相对分布较均匀。

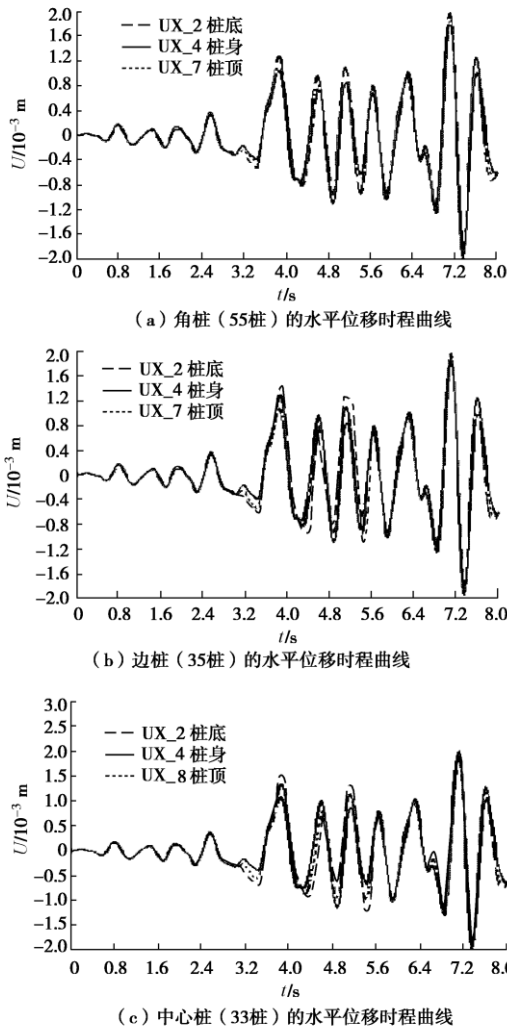


图 4 不同桩位刚性桩复合地基的水平位移时程曲线

Fig. 4 Variation curves of horizontal displacement of rigid pile composite foundation with different pile positions with time

3.2 上部结构的位移时程曲线

图 5 是上部结构的水平位移时程曲线, 从图 5 可以看出在较低等级地震作用下, 其上部结构的水平位移。图 5 (a) 表明, 在框架的底层出现最小位移, 从框架底层到顶层渐渐增大, 并且各层节点出现一致的振动方向, 两条相邻曲线间隔具有间隔很小且均匀的规律。这也进一步说明了在上部框架顶部出现最大水平位移, 且各层间仅有很小相对位移, 且分布均匀, 但是在峰值时刻其相对位移稍有增加。随着时间的推移, 其框架位移与地震时程加速度时程曲线的变化基

本同步, 没有共振情况。各层振动方向均一致, 证明了第一振型在结构震动中的主导作用。图 5 (b) 则表明当结构振动时, 框架顶部在鞭梢效应的影响下, 位移峰值最大, 通过观察前面桩体时程位移曲线图, 不难发现, 其框架顶层位移最大值将近 4 倍于桩体位移最大值。

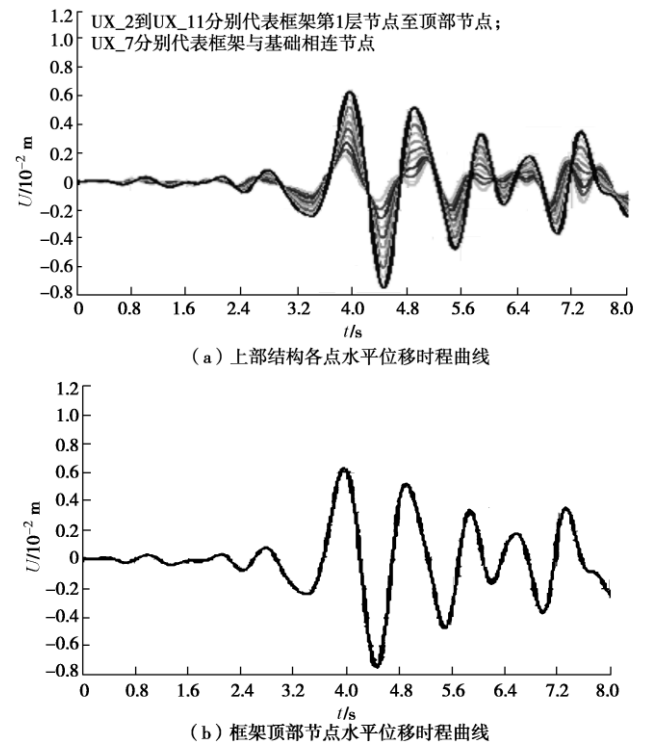


图 5 刚性桩复合地基上部结构的水平位移时程曲线

Fig. 5 Variation curves of horizontal displacement of upper structure on rigid pile composite foundation with time

3.3 基础和褥垫层中心点的位移时程曲线

从图 6 中可以发现基本重合的三个节点的时程曲线, 证明了位移在褥垫层的上、中、下部三个部位的变化是同时发生的, 也说明褥垫层在弱震作用下, 其变形量数值很小。这一结果与褥垫层反应谱六度分析结果相一致。然而, 由于存在的褥垫层其厚度较薄, 发生了相对位移, 但是又由于三个节点的位置较为接近, 导致无法区别其结果, 关于这个问题, 需要做进一步的分析研究, 最终确定。

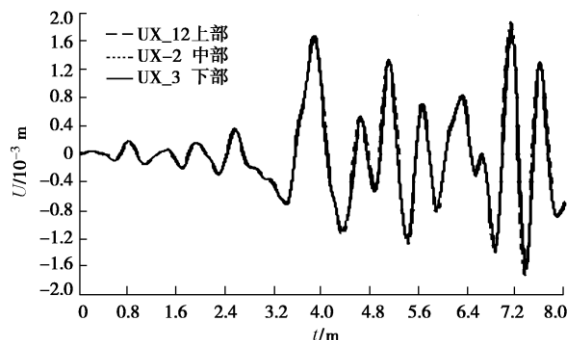


图 6 刚性桩复合地基褥垫层的水平位移时程曲线

Fig. 6 Curves of horizontal displacement of cushion on rigid pile composite foundation with time

图7是基础上下两个节点水平位移随时间变化的情况。褥垫层位移曲线与基础承台位移时程曲线相似,从上至下中心点处,其位移差别很小,但是在位移曲线的拐点处出现细小差别,总体上可以说基础在此地震波作用下,其变形较小,具有比较好的整体性能,且与褥垫层位移在数值上相差较小。

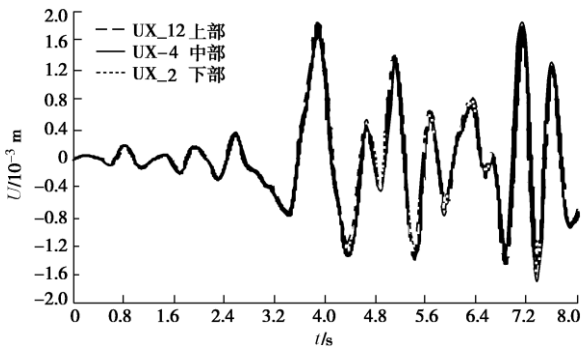


图7 刚性桩复合地基基础的水平位移时程曲线

Fig. 7 Variation curves of horizontal displacement of foundation on rigid pile composite ground with time

3.4 位移包络图

图8是桩体及上部结构的位移包络图,其中图8(a)明显表明角桩与边桩位移相似,中心桩位移最大,各桩桩体竖向中点处出现桩体位移最大值,而反应谱计算结果是在桩顶出现桩体最大位移值。图8(b)是刚性桩复合地基上部结构各点位移包络图,在框架顶层出现最大位移,其最大值约为桩体最大值的3倍。

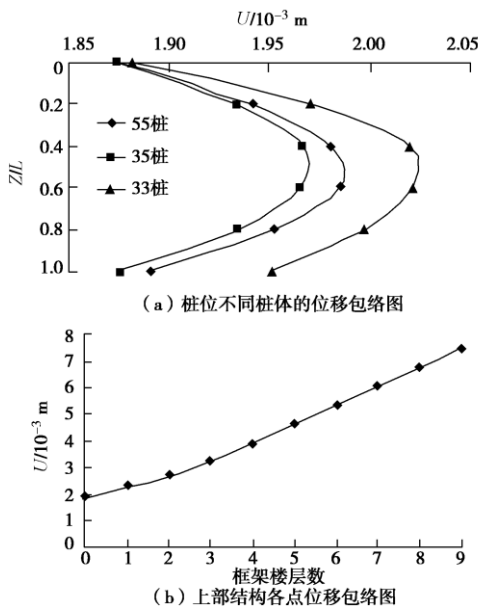


图8 刚性桩复合地基桩体和上部结构位移包络图

Fig. 8 Displacement envelope curves of upper structure and pile in rigid pile composite foundation

3.5 内力绝对值包络图

桩体剪力包络图中,在时程分析中桩顶剪力为负值,由于仅限于研究桩体的抗剪性能,所以此处只利用剪力的绝对值进行比较。从图9(a)中不难发现,同一桩体时桩顶剪力最大,桩顶下0.4L处出现另一剪力最大点。对于不同桩位桩则是中心桩剪力最小,边桩次之,角桩剪力最大。由图9(b)可知,在桩顶下(0.2~0.4)L处出现弯矩最大值,也是中心桩最小,边桩次之,角桩最大。弯矩图最大值是在Z/L=0.2~0.4时达到。

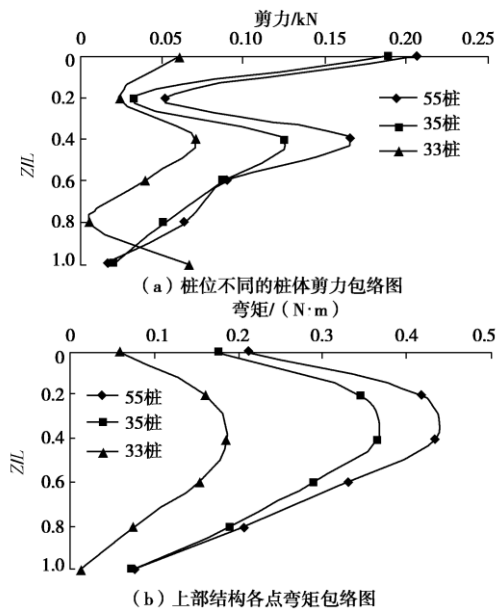


图9 刚性桩复合地基内力绝对值包络图

Fig. 9 Envelope curves of absolute value of internal force in rigid pile composite foundation

4 结 论

(1) 刚性桩复合地基有较高第一阶自振频率,而且从第一阶到第二阶增长较大,高阶频率增长较快;由于系统具有对称性,频率谱中有共扼振型,因此振型也具有对称性;自振特性比较简单,低阶阵型的主导作用非常明显,低阶阵型一般是不同方位水平振动与竖向振动的组合。

(2) 刚性桩复合地基在地震作用下,桩体位移以角桩最小,边桩次之,中心桩位移最大。但所有桩体变形较小,且桩体位移比较均匀;上部结构在地震作用下顶部位移最大,最大值约是基础位移的5~10倍。基础上、中、下中心点处及褥垫层的位移时程曲线几乎重合,也说明了各点位移相差均较小。

(3) 刚性桩复合地基在地震作用下,桩体最大弯矩出现在距桩顶约0.3L处,桩体剪力一般较小,最大值出现在桩体的两端,因此在工程中应该加强桩体两

端的抗剪能力十分必要。

参考文献:

- [1] 范福平. 上部结构 - 基础 - 地基相互作用问题分析[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(2): 35 - 39. (FAN Fu-ping. Interactional analysis of structure, foundation and soil[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2006, 27(2): 35 - 39. (in Chinese))
- [2] 赵 捷. 刚性桩复合地基三维数值分析与模型试验研究[D]. 开封: 河南大学, 2007. (ZHAO Jie. Three-dimensioned numerical analysis of rigid pile composite foundation and modal experimental study[D]. Kaifeng: Henan University, 2007. (in Chinese))
- [3] 盛桂林. 劲性搅拌桩复合地基性状研究[D]. 开封: 河南大学, 2005. (SHENG Gui-lin. A study of compound foundation characteristic of reinforced mixing pile[D]. Kaifeng: Henan University, 2005. (in Chinese))
- [4] 胡再强, 王军量, 刘兰兰, 等. 褥垫层作用下复合地基抗震性能有限元分析[J]. 岩土力学, 2008(增刊): 587 - 592. (HU Zai-qiang, WANG Jun-liang, LIU Lan-lan, et al. Finite element analysis of seismic behaviors of composite foundation with bedding cushion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(S0): 587 - 592. (in Chinese))
- [5] 鲍科峰, 姜忻良, 盛桂林. 劲性搅拌桩复合地基承载性能静动力分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 63 - 68. (BAO Peng, JIANG Xin-liang, SHENG Gui-lin. Static and dynamic analysis of bearing capacity of composite foundation of concrete core mixing piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 63 - 68. (in Chinese))
- [6] ANDSON D L, UNGLNESS R L. Infinite element int symp on innovative numerical analysis in applie engineering science[R]. France, 1997.
- [7] 鲍科峰. 正交空腹网壳结构的静、动力性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (BAO Ke-feng. Study on static and dynamic performance of orthogonal vierendeel latticed shells[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))
- [8] 张 波, 盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (ZHANG Bo, SHENG He-tai. ANSYS finite element numerical analysis theory and engineering application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))

(本文责编 明经平)