

文章编号: 1000-7598 (2013) 05-1274-06

刚性桩复合地基桩体抗震性能分析

盛桂林^{1,2}, 鲍 鹏¹, 苏彩丽³, 刘德辉¹

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 河南大学民生学院 土木工程系, 河南 开封 475004;
3. 开封大学 土木工程学院, 河南 开封 475004)

摘 要: 建立三维有限模型, 分别采用振型分解反应谱法和时程分析法研究刚性桩复合地基的抗震性能, 并根据相似理论, 建立刚性桩复合地基群桩模型, 采用模型拟动力试验, 对其进行了地震作用下桩体响应规律试验研究, 并对其在不同方法下的结果进行了对比分析, 结果表明: 无论是弯矩值还是剪力值, 都是角桩最大, 其次是边桩, 再次是中心桩; 不同分析方法所得的位移值相差不大, 位移分布比较均匀; 而且通过观察试验现象、分析试验和理论数据可见刚性桩复合地基具有良好的抗震性能; 模型动力试验方法用于研究刚性桩复合地基的抗震性能是可行的, 并且可推广应用到类似性的其他复合地基的抗震性能试验研究。

关 键 词: 刚性桩复合地基; 分解反应谱; 时程分析; 拟动力试验; 地震响应

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Analysis of seismic behavior of pile body in rigid pile composite foundation

SHENG Gui-lin^{1,2}, BAO Peng¹, SU Cai-li³, LIU De-hui¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China; 2. Department of Civil Engineering, Henan University Minsheng College, Kaifeng Henan, 475004, China; 3. School of Civil Engineering, Kaifeng University, Kaifeng, Henan 475004, China)

Abstract: 3D finite element model is built in this paper, and seismic behavior of pile body of rigid pile composite foundation is studied by using response spectrum method and time history analysis method. According to similarity theory, pile group model of rigid pile composite foundation is established to analyze the response pattern with pseudo-dynamic test methods. And compared and analyzed the results which are obtained by different methods, whether bending moment or shear also are: the biggest is the corner pile, next is the side pile, and the smallest is the center pile; the displacement value difference is very little. The result shows that displacement distribution of rigid pile composite foundation is more uniform under seismic response; rigid pile composite foundation has excellent seismic behavior, based on observing experimental phenomena and studying theoretical and experimental data; pseudo-dynamic test method used to study the seismic behavior of rigid pile composite foundation is feasible; and it can be applied to the other test research of composite foundation with similar seismic behavior.

Key words: rigid pile composite foundation; response spectrum; time history analysis; pseudo-dynamic testing; seismic response

1 引 言

刚性桩复合地基是用刚度相对较大的桩(如:混凝土桩或强度等级较高的 CFG 桩等)对强度或变形不能符合要求的地基进行加固而形成的一种非均质人工地基^[1]。由于自身具有相对于柔性桩较大的桩体刚度,可以更好地发挥全桩的侧摩阻力,因此该桩具有较高的承载力,而且还具有沉降小、施工简单、工期短等优点,具有显著的经济和社会效益,在我国被大量地应用到 10~30 层的高层建筑

中^[2-4]。

目前,关于刚性桩复合地基的抗震性能的研究资料还较少。我国是一个多震害的国家,为了正确评价大量建造在这种复合地基上的高层建筑的抗震性能,为今后类似工程的设计提供理论依据,开展对刚性桩复合地基桩体抗震性能的理论 and 试验研究是十分必要的。本文运用分解反应谱法和时程分析法分别对刚性桩复合地基进行了有限元理论分析,并且设计完成了相似比为 1:10 的 3×3 群桩复合地基的振动台模型试验。试验结果表明,本模型动力试

收稿日期: 2012-07-26

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(No. 49620015)。

第一作者简介: 盛桂林, 女, 1978 年生, 硕士, 讲师, 主要从事结构工程方面的研究。E-mail: shengguilin1214@163.com

验方法用于研究刚性桩复合地基的抗震性能是可行的,可推广应用到类似性的其他复合地基的抗震性能试验研究中。针对刚性桩的动力性能,应用不同的有限元分析方法并与试验结果进行对比分析,研究不同理论方法对刚性桩动力性能的影响程度。几种方法相互印证,得出了一些对刚性桩复合地基抗震设计有益的规律性结论。

2 有限元理论分析

2.1 计算模型

2.1.1 基本假设

本文对模型进行如下假设:①桩体、垫层、承台和土体的截面均为方形截面;②不考虑桩体、垫层、承台与土体各部分之间的脱开和滑移,认为它们之间是完全黏结的;③假设上部框架结构的楼板刚度无限大;④取基岩深度为桩底向下2倍桩长深度,地震波从基岩输入;⑤不考虑地下水对刚性桩复合地基抗震性能的影响^[5-6]。

2.1.2 传输边界

在使用有限元法研究地基等无限域介质的动力响应问题时,其计算模型中必须引入人工边界条件,以消除在边界上非真实的反射波,从而使结果在一定精度上能够模拟实际无限域的解,称为传输边界。在时域内的动力分析中使用的传输边界主要有黏性边界、叠合边界、旁轴边界及插值边界4种类型^[7-8]。黏性边界是最早、最直观的一种边界处理方法。本文采用的是黏性边界,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。实践证明,该边界可以提供良好的模拟效果。计算模型采用ANSYS中的弹簧单元模拟传输,通过计算得到模型四周约束弹簧刚度约为 6.0×10^6 N/m,土体底部的约束弹簧刚度约为 5.0×10^6 N/m。

2.1.3 计算模型

计算模型的上部结构为考虑10层钢筋混凝土框架结构,层高为1.5 m,开间及进深均为2 m,纵、横各3跨,框架梁为0.2 m×0.3 m,框架柱截面为0.5 m×0.5 m,采用C30混凝土。地基土、垫层、桩体及基础承台均为线弹性体,采用ANSYS中的SOLID45单元,上部结构采用Beam4单元,黏性边界采用Combin14单元,黏性边界的弹簧阻尼器参数 $k=6.0 \times 10^6$ N/m,弹性阻尼系数 $c_1=0.4$,非弹性阻尼系数 $c_2=0$ 。承台平面尺寸为6 m×6 m,厚度为1.0 m,桩体采用方桩,边长 $b=0.2$ m,桩间距为 $5b$,桩长为5 m,桩数为5×5,模型如图1、2所示。材料参数见表1。

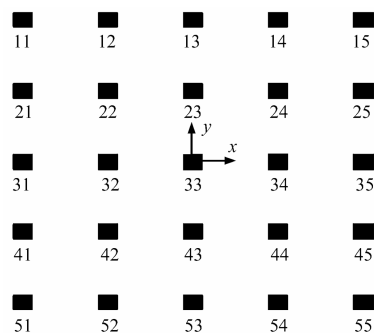


图1 桩位布置图

Fig.1 Arrangement of pile

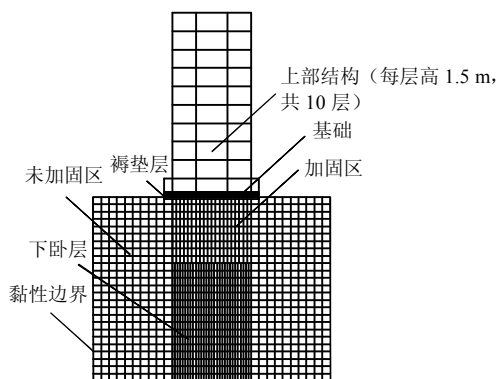


图2 网格立面划分图

Fig.2 Elevation mesh

表1 模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model

名称	重度 γ /(kN/m ³)	弹性模理 E /MPa	泊松比 μ	c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
承台	25	2.55×10^4	0.17		
桩体	25	2.0×10^4	0.20		
褥垫层	20	40	0.20	0	40
桩间土体	20	10	0.25	20	20
桩端土体	20	20	0.25	20	20

2.2 分析方法及自振频率

本文采用振型分解反应谱法和时程分析法对结构的抗震性能状况进行分析。用EI波(见图3),以基岩波的形式在底部边界从水平方向输入。此波的最大加速度约为 35 cm/s^2 ,相当于7级地震。

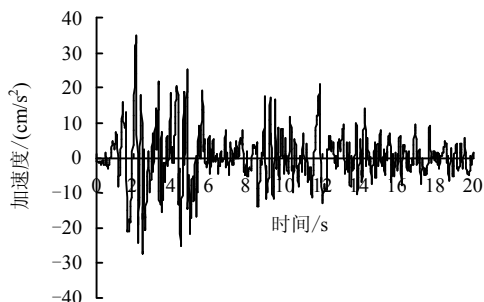


图3 EI波加速度-时程曲线

Fig.3 Acceleration-time history of EI wave

多质点体系的自由振动规律能反映它本身的许多动力特性,对于确定体系的地震反应和地震作用有着非常重要的作用。本文对有限元计算模型进行了模态分析,得出系统的前 6 阶振型及其对应的结构自振频率,见表 2。

表 2 结构的前 6 阶自振频率

Table 2 First six natural frequencies of structure

模态阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率/Hz	0.937 8	1.360 8	1.360 8	1.567 6	1.572 3	1.986 4

2.3 分解反应谱法与时程分析法计算结果对比分析

本文分别取桩 55、35、33 作为角桩、边桩及中心桩的代表,分别以分解反应谱法(7 级地震)和时程分析法(EI 波相当于 7 级地震)对结构进行抗震动力分析,计算出不同方位桩体的力学性能。为了简单明了地说明计算结果,各分析方法的内力均以包络图形式呈现。

图 4 为应用分解反应谱法和时程分析法所得到的不同桩位桩体的剪力和弯矩包络图。从图中可以看出:桩体的最大剪力在桩顶同种地震波作用下,角桩剪力最大,边桩次之,中心桩最小;同一根桩的剪力 EI 波时程分析法与 VII 度分解反应谱法得出结果对比,剪力最大值相差不大,角桩和边桩的剪力值分解反应谱法计算结果略大于时程分析法,而中心桩的则相反。弯矩图规律比较明显,两种分析方法所得的桩体最大弯矩均出现在 $Z/L=0.40$ 处,并且相同桩位的弯矩值大小差别不大。

从图 5 的桩体位移图可见:时程分析法得到的最大位移值在 $Z/L=0.40$ 处,与最大弯矩出现的位置相同;中心桩位移最大,角桩与边桩位移相近;分解反应谱法得到的最大位移在桩顶,角桩、边桩和中心桩的桩身位移几乎相同。分解反应谱法的位移值大于时程分析法的,但相差不大,属同一数量级。

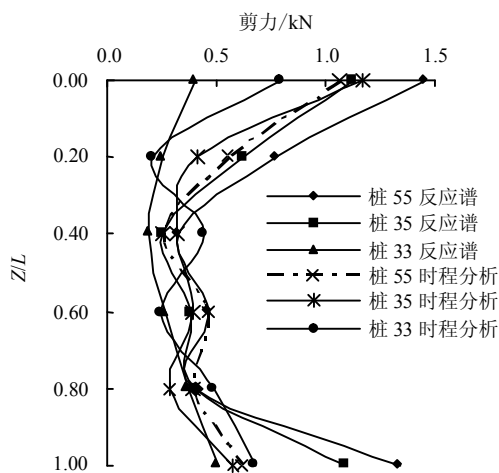
图 6 是 55 号角桩在 EI 波作用下的桩身不同位置的位移-时程曲线,UX-4、UX-9、UX-10 分别代表桩顶、桩身和桩底部位。位移曲线的变化形式近似,大小差别不大,说明刚性桩复合地基地震作用下位移分布比较均匀。桩体位移分布和相应部位的位移大小都与分解反应谱所得位移相似。

3 模型拟动力分析

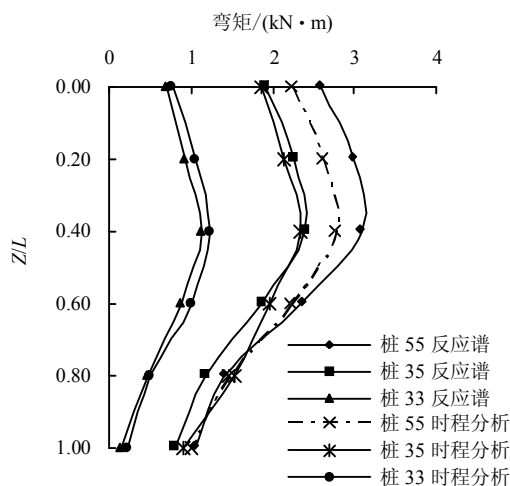
3.1 模型相似关系

综合考虑拟动力试验系统和模型自身性质等因素的影响,根据相似性理论,试验模型选取长度相

似比为 1:10,材料弹性模量、加速度、质量密度和应力与应变的相似比均为 1:1。



(a) 不同分析方法各桩位桩体的剪力包络图



(b) 不同分析方法各桩位桩体的弯矩包络图

图 4 桩体内力包络图

Fig.4 Envelope diagrams of internal force of piles

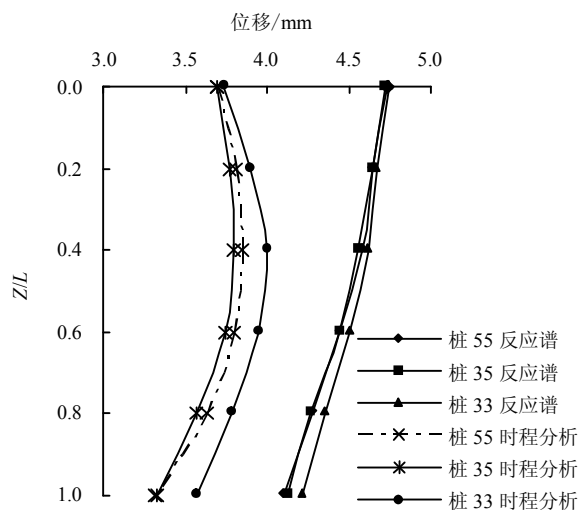


图 5 桩体位移包络图

Fig.5 Displacement envelope diagram of pile body

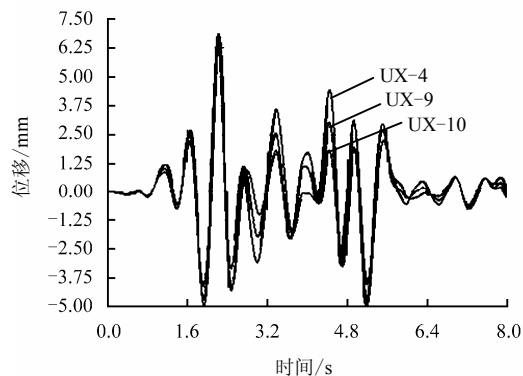


图6 55号桩EI波位移时程曲线

Fig.6 Displacement-time history of EI wave of No. 55 pile

3.2 模型设计

采用含水率为5.7%的开封地区砂土模拟地基情况。试验中的砂箱用10 mm厚钢板加工制作而成,砂桶直径为1.3 m,高为1.8 m。试验采用3×3群桩模型,模型桩采用具有较高强度的三型聚丙烯管材(PP-R),内径为18 mm,外径为25 mm,桩长为900 mm。分别采用拉伸和压缩试验得到模型桩的相关参数:弹性模量为 1.27×10^3 MPa,泊松比为0.36。褥垫层由粒径为0.9~4.0 mm的小碎石铺设而成,厚度为30 mm。

3.3 监控点布置

为了实时监控模型在关键部位的应变、位移、土压力及褥垫层的变化情况,试验中分别在距离桩顶3 cm处以及第1个应变片以下每隔12 cm处粘贴电阻应变片,共8个;分别在砂桶底部、模型桩底、中部、上部以及砂桶侧面埋设土压力盒(振弦式土压力计,测量范围6.0 MPa);褥垫层中心设置两个水平做动器和两个垂直做动器;在砂箱外侧放置量程为0~150 mm的位移传感器以便测得砂箱的时程曲线。桩位布置及试验装置见图7、8。

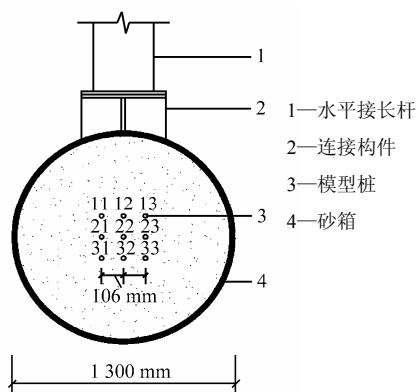


图7 模型拟动力桩位布置图

Fig.7 Pseudo-dynamic arrangement of model pile



图8 模型拟动力试验装置

Fig.8 Pseudo-dynamic test equipment

3.4 试验参数及加载方案

试验前,首先需要确定将在模型试验中用到的3个参数:模型的初始刚度、质量矩阵和阻尼矩阵。

试验对模型进行单周期反复加载,通过加载测得的位移和反力计算出模型结构的刚度值^[5]。本模型试验的初始刚度为 2×10^5 N/m;模型的质量矩阵可根据原型结构的实际质量和原型与模型之间的相似比确定^[9];拟动力试验不同于振动台试验^[10],不必在模型结构上加大质量,只需在操作系统中设置相关参数,使其满足相似性要求即可^[11]。

在拟动力试验中,通过输入上部荷载来模拟上部结构,上部荷载分别是18、28 kN。通过输入不同加速度峰值的地震波(宁河地震波、Taft波、El Centro波、上海人工波)来研究刚性桩复合地基在地震作用下的性能。

3.5 模型试验结果

只对El Centro波(加速度峰值为 35 cm/s^2 ,上部荷载为18 kN,)的作用下模型桩的性能进行分析,并与有限元理论分析结果进行比较。其桩身内力包络图和砂箱位移-时程曲线如图9、10所示。由图可见:

(1) 剪力最大值均出现在桩顶处,剪力最小值出现在 $Z/L=0.43$ 处,相对桩身其他部位而言桩端剪力值也较大,仅略低于桩顶剪力;而最大弯矩值出现在剪力值最小处;无论是弯矩值还是剪力值都是:角桩最大,边桩次之,中心桩最小,这点与有限元理论分析结果相吻合。实际工程中角桩的破坏程度比中桩和边桩严重,这是因为在水平侧向力作用下,结构难免会发生整体扭转,这时角桩所受的剪力最大,同时角桩是双向偏心受压构件,而设计时往往考虑不周。

(2) 砂箱最大位移为12 mm,发生时间在地震波最大加速度之后,有限元理论分析中的结论亦是如此,即最大位移和最大加速度不是同时发生的,

而是滞后于最大加速度。

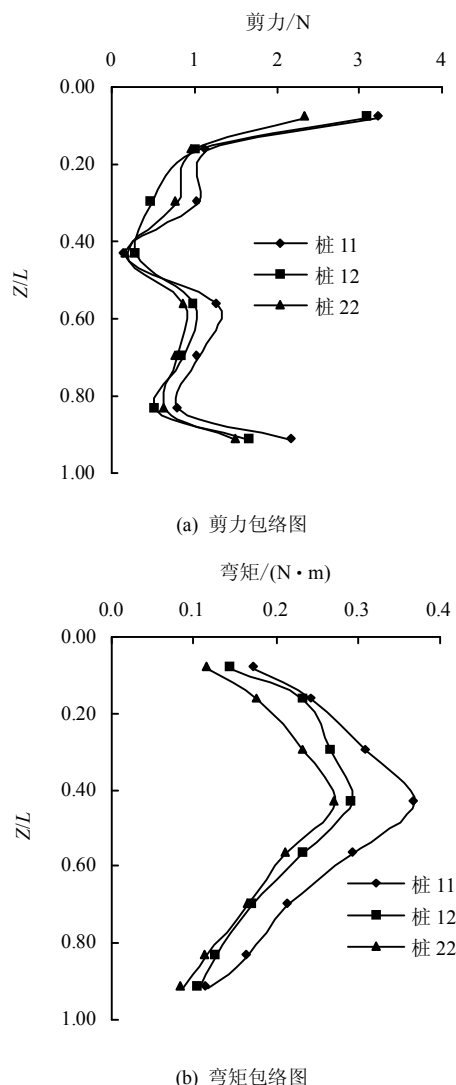


图9 模型桩桩身内力包络图

Fig.9 Internal force envelope diagrams of model piles

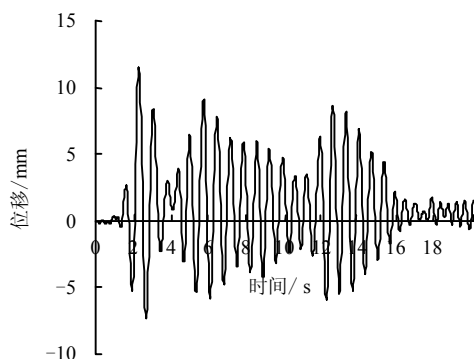


图10 砂箱位移-时程曲线

Fig.10 Displacement-time history of flask

4 结 论

(1) 无论是有限元计算还是模型试验桩体的最

大剪力均发生在桩顶, 桩端的剪力也较大, 因此, 在工程中应该重现加强桩体两端的抗剪能力; 而最大弯矩有限元分析计算出现在 $Z/L=0.40$ 处, 模型试验结果出现在 $Z/L=0.43$ 处, 无论是弯矩值还是剪力值都是: 角桩最大, 边桩次之, 中心桩最小; 所以设计时应加强角桩抗弯、抗剪及抗扭的计算及构造措施; 分解反应谱法与时程分析法所得的弯矩图规律比较明显, 并且相同桩位的弯矩值大小差别不大。

(2) 不同地震分析方法所得位移值相差不大, 属同一数量级; 最大位移和最大加速度不是同时发生的, 而是滞后于最大加速度; 同种地震作用下不同桩位的位移曲线的变化形式近似, 大小差别不大, 说明刚性桩复合地基地震作用下位移分布比较均匀。

(3) 通过有限元理论分析与模型拟动力试验的对比分析可以看出, 本模型动力试验方法用于研究刚性桩复合地基的抗震性能是可行的, 可推广应用到类似性的其他复合地基的抗震性能试验研究; 通过观察试验现象和分析试验和理论数据, 可见刚性桩复合地基具有良好的抗震性能。

参 考 文 献

- [1] 武思宇, 宋二祥, 刘华北, 等. 刚性桩复合地基抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 77—82.
WU Si-yu, SONG Er-xiang, LIU Hua-bei, et al. Rigid pile composite foundation seismic performance of the shaking table test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 77—82.
- [2] 池跃军. 刚性桩复合地基工作性能及沉降计算方法的研究[硕士学位论文 D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [3] 阎明礼, 吴春林, 杨军. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1—2.
YAN Ming-li, WU Chun-lin, YANG Jun. Study on the composite foundation with cement-flyash-gravel pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(2): 1—2.
- [4] 阎明礼, 张东刚. CFG桩复合地基技术及工程实践(第2版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [5] 赵捷. 刚性桩复合地基三维数值分析与模型试验研究[硕士学位论文 D]. 开封: 河南大学, 2007.
- [6] 盛桂琳. 劲性搅拌桩复合地基性状研究[硕士学位论文 D]. 开封: 河南大学, 2005.