

# 软土地基刚性桩复合地基动力离心模型试验\*

杨军<sup>1</sup>, 杨敏<sup>2</sup>, 罗如平<sup>2</sup>

(1. 广州市建筑科学研究院有限公司, 广州 510440; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:**采用离心机-振动台系统对饱和软土地基中连续地震作用下上部结构-刚性桩复合地基体系的抗震问题开展试验研究。试验分析了结构和基础模型在水平输入地震作用下的加速度、位移以及桩身应变等响应规律。结果表明,基础板与桩顶之间设置砂垫层利于削弱传递到上部结构的水平地震力作用,发生较大地震时能有效减小上部结构的加速度响应;地震结束时基础瞬时沉降随地震强度增加而增大,但震后长期再固结沉降随地震强度变化不大;受周围土体地震软化行为影响,群桩荷载分担比例在震后有所降低;桩身峰值弯矩沿桩长分布形式明显不同于传统桩基础,且弯矩峰值较常规桩基减小不少。

**关键词:**刚性桩复合地基;软土;地震响应;动力离心模型试验

中图分类号:TU473.1

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0381-06

## Dynamic Centrifuge Model Test of Composite Foundation with Rigid Pile in Soft Clay

Yang Jun<sup>1</sup>, Yang Min<sup>2</sup>, Luo Ruping<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Building Science Co., Ltd., Guangzhou 510440, P.R. China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China)

**Abstract:** Centrifuge-shaking table tests were performed to study the seismic response of superstructure-composite foundation with rigid pile system under continuous earthquakes in soft clay. The acceleration, displacement and pile strains of superstructure and foundation model under horizontal input earthquake were analyzed. Test results show that: the sand cushion between raft and piles can weaken the horizontal seismic forces transferred to the superstructure, and the acceleration response of superstructure will be reduced effectively under larger earthquake; the immediate settlement after earthquake is increased with earthquake intensity. However, the long-term consolidation settlement is little influenced by earthquake intensity. The load sharing ratio of pile group decreases after each earthquake due to soil softening. The maximum bending moment distribution is rather different from conventional pile foundation, and the maximum bending moments decrease remarkably compared with it under similar conditions.

**Keywords:** composite foundation with rigid pile; soft clay; seismic response; dynamic centrifugal model test

## 0 引言

刚性桩复合地基是一种由较大刚度的群桩、基

础以及二者之间铺设的一定厚度的级配砂石垫层组成的一种人工地基<sup>[1]</sup>。通过改变砂石垫层的厚度和密实度,可以调整桩土之间的荷载分担。由于

\* 收稿日期:2018-09-11(修改稿)

作者简介:杨军(1985-),男,安徽蚌埠人,博士,工程师,主要从事桩基础设计与检测领域的科研工作。

E-mail: yangjun851113@163.com

基金项目:国家自然科学基金(41372274)

桩基不配筋或者仅配少量构造筋,其基础造价通常比常规桩基础减少超过一半,故被大量应用于硬土地区的小高层和高层建筑。

已有不少学者对刚性桩复合地基在静荷载作用下的工作机理进行了理论和试验研究,其研究成果<sup>[2-7]</sup>也基本能满足一般工程应用要求。但是,针对该基础在地震荷载作用下的动力响应规律却认识甚少,仅少数学者对该问题展开了数值与试验研究。文献[1]采用三维有限元方法对刚性单桩复合地基的地震响应进行时域分析,比较复合地基与桩基础地震响应的差异,并对影响其抗震性能的因素进行研究。文献[8,9]采用振动台试验对刚性桩复合地基的抗震性能、桩土变形特性、上部结构影响等问题进行了讨论,并利用经试验验证的数值模型对复合地基地震反应的主要影响因素进行讨论。文献[10]采用动力有限元方法构建完整的地基-基础-上部结构数值计算模型,比较了刚性桩复合地基与普通桩基对上部结构地震反应的影响异同。文献[11]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,并采用拟动力模型试验对地震作用下桩体响应规律进行试验研究。文献[12]建立了刚性桩复合地基-筏板-上部结构体系整体有限元模型,对比分析了复合地基与桩基的地震响应差异。

但是,关于软土地基中刚性桩复合地基水平地震响应规律的研究成果鲜有报道。为此,本文采用土工离心试验机-剪切箱-振动台系统进行刚性桩复合地基动力试验,分析不同强度地震输入条件下模型的加速度、位移和桩身应变响应规律,为刚性桩复合地基的抗震设计和工程应用提供参考。

## 1 试验方案设计

本次试验离心加速度为  $50g$ ,采用叠环式层状剪切箱以缩小模型箱边界效应的影响,有关该试验设备的详细介绍参见文献[13]。试验中地基-基础-上部结构模型体系依次受到小震、中震和大震 3 次地震激励作用(底部实测输入地震峰值加速度 PGA 分别为  $0.052g$ 、 $0.107g$  和  $0.202g$ ),前后 2 次地震作用之间间隔一段时间,以便超孔隙水压力消散和土体强度恢复。图 1 和图 2 分别为模型箱内传感器布置与模型桩应变片布置示意图,图中几何尺寸标注均为模型真实尺寸(单位:mm)。

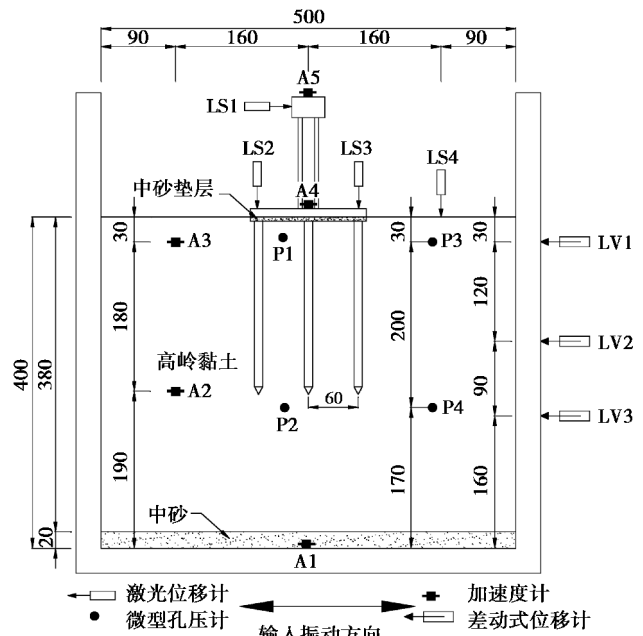


图 1 试验传感器布置

Fig. 1 Layouts of sensors in tests

试验模型体系包括桩、筏板和上部结构。桩、筏基础模型采用铝合金制成,简化的上部质量块和支撑柱体模型采用钢材制成。结构-柱-基础板模型构件之间均采用螺栓连接,可近似视为完全刚性连接。由试验离心加速度可知,结构-土模型与原型的几何尺寸相似比为 50。根据立柱和上部集中质量几何与材料参数估算的结构自振周期约为  $0.44\text{ s}$ 。

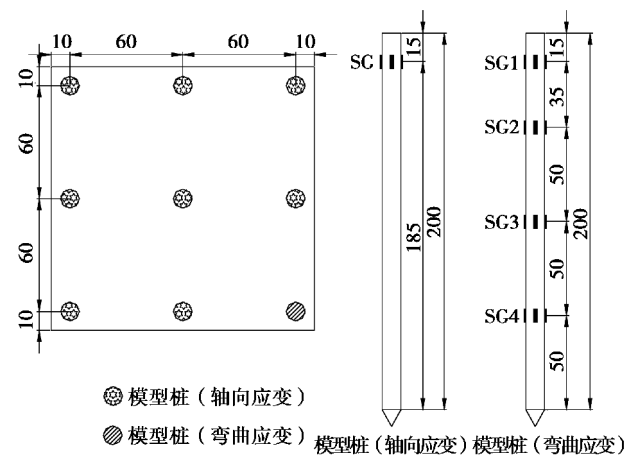


图 2 基础模型与应变测量位置

Fig. 2 Foundation model and position of strain gauges

表 1 给出了本次试验采用的高岭黏土主要物理参数。在土体模型准备阶段,箱内高岭土层底部预先铺设  $2\text{ cm}$  厚中砂,以实现  $50g$  离心加速度下

软黏土双向排水固结,通过孔压计和位移计监测土体超孔压与地表沉降变化,离心固结时间约 22 h (对应原型时间大约 6 年)。

为提高浅部土层的承载能力,满足桩土共同承担上部荷载的要求,离心固结前在高岭土顶面铺设一层中粗砂(厚 3 cm),并在埋入基础模型之前将该层土移除,近似实现浅部超固结黏土,深部正常固结软黏土的场地工况。试验地震波选用典型的上海人工波<sup>[14]</sup>,该地震波主震持续时间约 30 s,且以低频长周期成分为主。

表 1 土体模型参数  
Table 1 Parameters of soil model

参数类别	数值
$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	16.4
$d_{\text{avg}}/\text{mm}$	0.038
$G_s/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.67
$e$	1.73
$w/\%$	69
$w_p/\%$	26
$w_L/\%$	54
$I_p/\%$	28
$k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$1.13 \times 10^{-7}$
$c_v/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1})$	12.5

注: $d_{\text{avg}}$ 表示土体平均粒径。

2 试验结果分析

2.1 地震加速度

图 3 为大震输入时不同深度土层实测的地震加速度响应时程曲线,高程±0.0 m 对应黏土层表面。可以看出,输入水平地震加速度自下而上从模型箱底部向软土层表面传递的过程中,不仅峰值加速度降低明显,且地震波中的高频成分也被过滤不少,这与软土场地自振频率相对较低有关。

图 4 为三次地震作用中不同位置加速度峰值放大系数。比较 A1~A3 位置加速度可知,加速度自底部传递到地表附近后大约降低 40%~70%,并且大震时的峰值加速度降低程度比小震和中震时

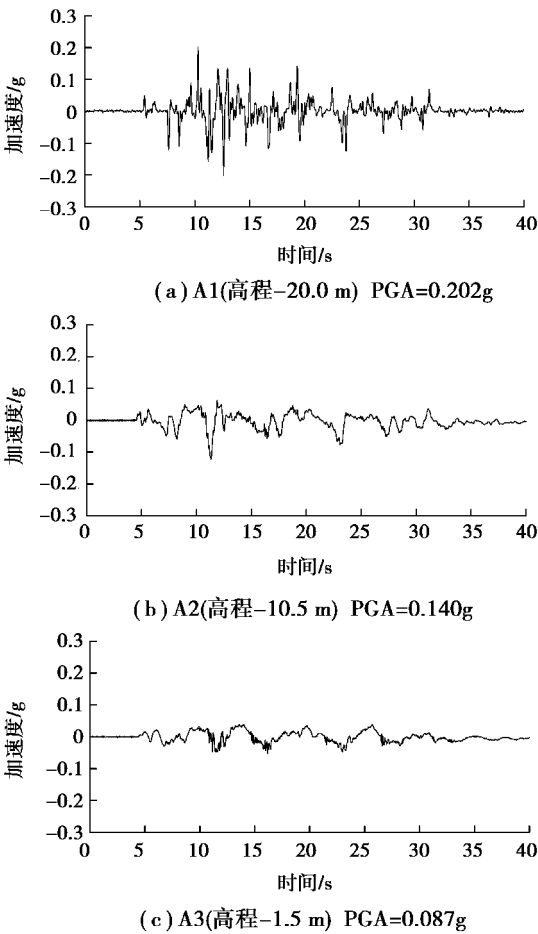


图 3 软黏土地震加速度时程曲线(大震)  
Fig. 3 Time histories curves of acceleration in soft clay (large earthquake)

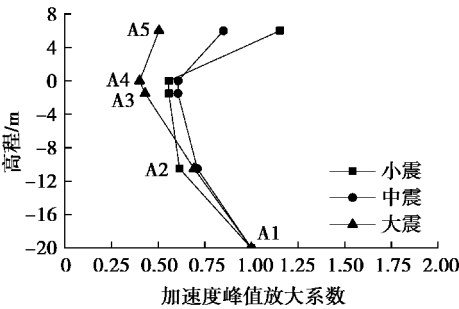


图 4 加速度峰值放大系数(相对底部输入峰值加速度)

Fig. 4 Peak acceleration amplification factors (comparing with peak acceleration in the base)

更大,表明黏土结构强度在地震作用下进一步发生软化。由地表(A3)和筏板(A4)位置峰值加速度值可知,桩-土之间运动相互作用影响各自的振动特性,加速度峰值接近但并非始终完全一致。受上部结构惯性力影响,A5 测得的峰值加速度要高于

A4,这与文献[12]的动力数值分析结果基本一致。

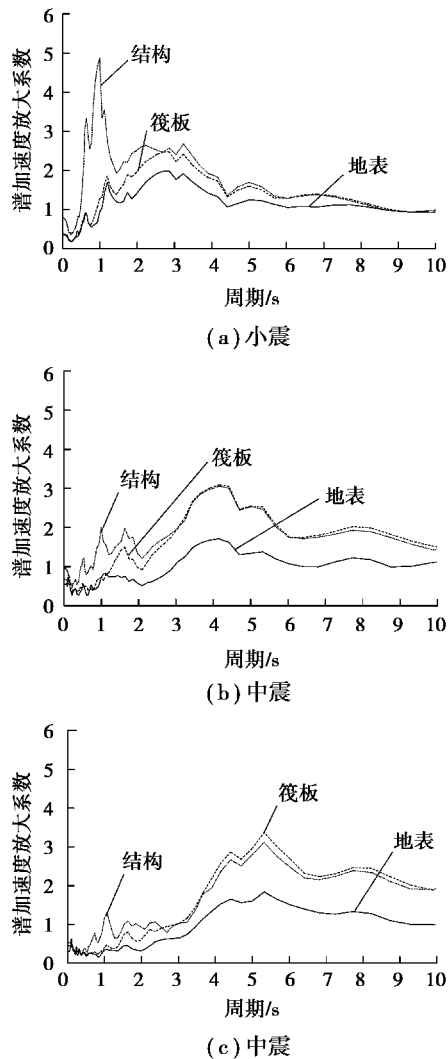


图5 地震加速度反应谱曲线

Fig. 5 Seismic acceleration response spectrum curves

图5是阻尼比取5%时的不同位置地震加速度反应谱曲线(已按基底输入运动进行归一化)。可以看出,地表土体加速度在较长的周期范围内(如3 s以后)普遍被放大,且筏板加速度放大系数总体大于地表。地震强度逐渐增加,对结构有较大影响的地表加速度振动周期也逐渐增加。小震时,筏板和结构加速度在1 s附近放大最为明显,中震和大震时相应周期提高到4 s和5 s,这与土体结构在连续地震作用下不断发生软化、自振周期被延长有关。进一步能够看出,上部结构与筏板的谱加速度放大系数曲线在大部分周期范围内几乎重合,且中震和大震时表现更为显著,表明桩顶与筏板之间设置垫层能有效减小水平地震力向上传递,有利于上

部结构抗震。

## 2.2 基础与地表沉降

图6给出了地震发生时筏板两侧(LS2、LS3)与黏土层表面(LS4)产生的瞬时沉降。由于上部结构-柱-筏板体系附加地震力作用,基础模型比周围地表沉降量相对更大,且筏板两侧沉降差随地震强度增加而变大,说明桩顶与筏板之间设置垫层不能有效控制地震引起的差异沉降。同时,各次地震后软土层表面的瞬时沉降均较小,这与高岭土渗透性低,震后超孔压尚未来得及消散有关。

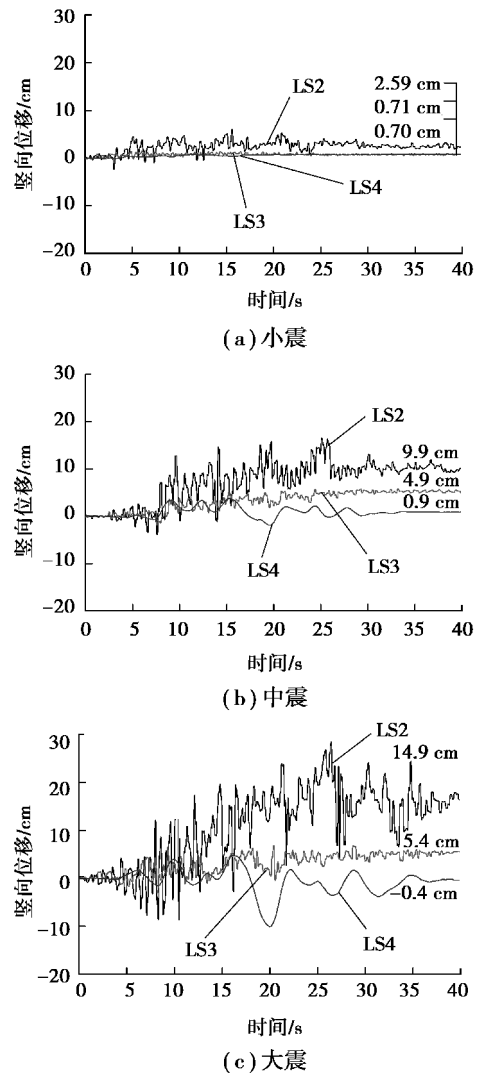


图6 地震瞬时沉降

Fig. 6 Instant settlement during earthquakes

图7给出了3次地震后一段时间内筏板的平均沉降(LS2和LS3的平均值)和地表沉降(LS4)。受超孔隙水压力消散影响,地震结束后软土地表沉降持续发展,但沉降量并未随地震强度增加出现明显变化。小震和中震后基础沉降速率与自由场地



表非常接近,大震后 50 天内基础最大相对沉降尚不足 3 cm,表明刚性桩复合地基能够较有效地控制震后基础再固结变形。

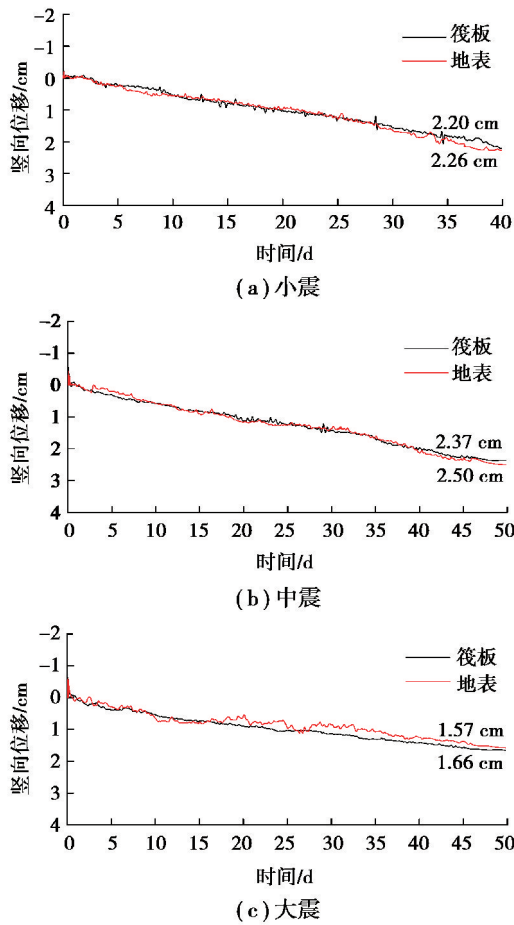


图 7 震后长期沉降

Fig. 7 Long-term settlement after earthquakes

图 8 为 3 次地震结束后拍摄的剪切箱内基础和地基模型的照片。由该图大致可以看出,基础模型在震后发生了较明显的沉降,且筏板向其中一侧发生倾斜,砂垫层从基础侧面挤出,这与正式试验前筏板底面与地表齐平形成鲜明对比。地震作用引起黏土层内部超孔隙水压力上升和消散,故筏板附近与地表较低位置均能看到有孔隙水渗出。

2.3 桩土荷载分担

桩土荷载分担比是刚性桩复合地基设计的关键问题,本次试验量测了地震前后各模型桩顶部的轴向应变,据此推算桩土荷载分担比变化规律。由表 2 可知,由于筏板底面砂垫层具有调节桩土荷载分担比例的作用,地震前桩间土占上部总荷载比例近 70%。地震发生时,软黏土结构在水平剪切力作用下出现软化,桩-土界面相互作用力被削弱,群

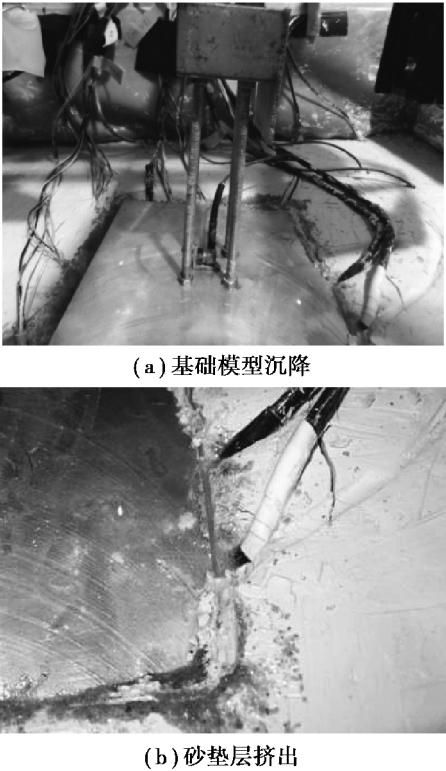


图 8 模型震后宏观特征

Fig. 8 Macroscopic features of foundation model after earthquakes

桩承担的部分荷载向筏板转移,各次地震后群桩荷载比例降低,且降低程度与输入地震强度成正比。但从数量上来看,3 次地震前后桩土荷载分担比变化不大。

表 2 桩土荷载分担比例

Table 2 Load sharing ratio of pile group

工况名称	群桩荷载分担比例/%	桩间土荷载分担比例/%
地震前	32	68
小震后	30	70
中震后	26	74
大震后	21	79

2.4 桩身动弯矩

图 9(a)–(c)为 3 次地震实测的角桩桩身弯矩时程曲线,弯矩换算过程参见文献[15]。可以看出,基桩不同深度处的弯矩变化规律基本一致,仅数值大小有所不同。比较(a)–(c)图可知,桩身弯矩值总体随地震强度提高而增大,但由于土体结构软化和对地震波高频分量的过滤作用,桩身弯

矩的变化频率则有所降低。

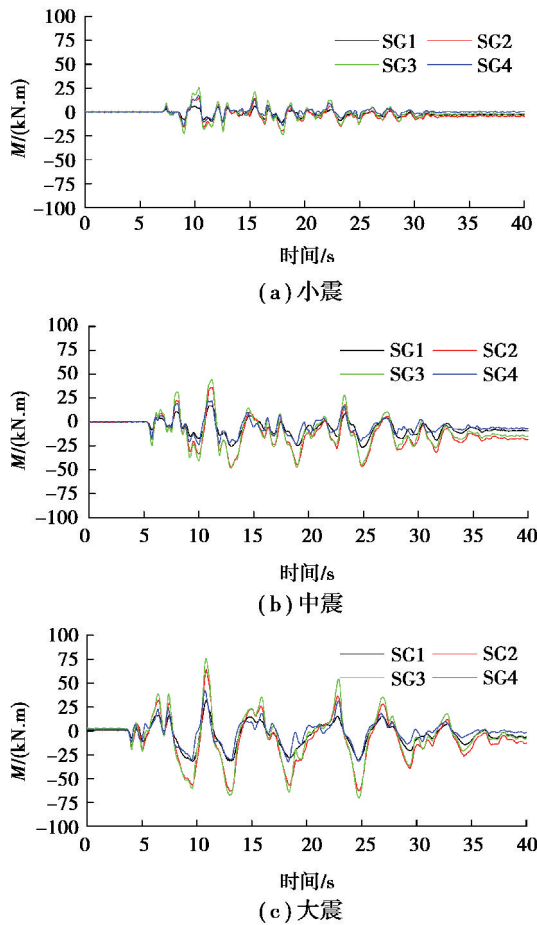


图9 桩身弯矩时程曲线

Fig. 9 Time history curves of bending moments for model pile

图10给出了角桩桩身峰值弯矩沿深度的分布曲线。可以看出,桩身峰值弯矩随基底地震强度的增加而增大,最大弯矩位置靠近桩身中部,这与文献[8]的刚性桩复合地基振动台试验结果基本一致。由于桩顶与筏板被垫层隔开,结构与筏板惯性作用对桩身内力的影响显著降低,相同深度位置桩身峰值弯矩比桩头刚接时普遍更小。但为了降低地震时因桩身结构发生破坏而导致的基础承载力降低或失稳的风险,建议基础抗震设计时仍应考虑适当提高桩身中部的结构抗剪切性能。

### 3 结论

(1)在桩顶与基础板之间设置砂垫层,将削弱向上传递的水平地震力作用,有利于减小上部结构的加速度响应。输入地震动强度越大,垫层发挥的减震效果越显著。

(2)由于筏板与桩顶并非刚性连接,基础竖向刚度和水平向抗侧刚度均有所降低,地震结束时筏

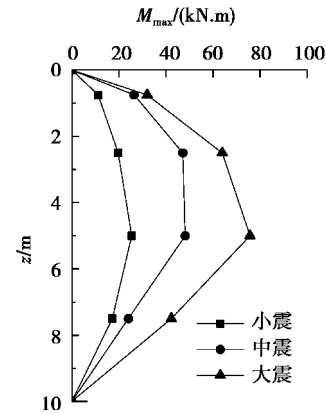


图10 桩身峰值弯矩分布曲线

Fig. 10 Maximum bending moments for model pile

板产生较大的瞬时沉降与倾斜,但基础震后长期再固结沉降量始终不大。

(3)受土体软化行为影响,震后桩基承载力降低,降低程度与输入地震强度成正比,但地震前后桩土荷载分担比变化不大。

(4)刚性桩复合地基的桩身弯矩分布形式与传统群桩基础有明显区别,最大弯矩位置靠近桩身中部,且峰值弯矩较常规桩基础减小不少。

### 参考文献 (References)

- [1] 徐自国, 宋二祥. 刚性桩复合地基抗震性能的有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 179-184. (Xu Ziguo, Song Erxiang. Finite element analysis for seismic response of rigid pile composite foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 179-184. (in Chinese))
- [2] 刘润, 闫澍旺. 带褥垫层减沉桩作用机理及现场实验研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(4): 76-80. (Liu Run, Yan Shuwang. The mechanism of settlement reducing pile foundation with bedding layers and in site experiments[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(4): 76-80. (in Chinese))
- [3] 陈龙珠, 梁发云, 严平, 等. 带褥垫层刚-柔性桩复合地基工程性状的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(3): 125-128. (Chen Longzhu, Liang Fayun, Yan Ping, et al. Experimental study on behavior of rigid-flexible pile raft foundation with cushion[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(3): 125-128. (in Chinese))
- [4] Liang F Y, Chen L Z, Shi X G. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6): 443-453.

(下转第401页)