

## 劲性搅拌桩复合地基的抗震性能

鲍鹏<sup>1,2</sup> 盛桂林<sup>2</sup> 姜忻良<sup>1</sup>

(1. 天津大学 建工学院, 天津 300072; 2. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475001)

**摘要** 针对劲性搅拌桩复合地基的抗震性能,以 ANSYS 为工具,考虑桩-土-上部结构之间的相互作用,对劲性搅拌桩单桩复合地基在不同地震波作用下的响应进行了时程分析;对比了该复合地基与桩基础地震响应的差异,并对影响该复合地基抗震性能的因素进行了研究。结果表明:地震波作用下劲性搅拌桩复合地基单桩的最大弯矩出现在距桩顶 0.2L~0.4L 处;芯桩越长、面积置换率越大,最大弯矩越大;桩身最大弯矩、剪力、内外芯桩身应力比及上部结构水平位移等与地震波波形有很大关系。在相同地震波作用下,面积置换率对桩身弯矩、剪力的影响最大,而芯桩长度和水泥土模量对桩身弯矩和剪力的影响很小。

**关键词** 劲性搅拌桩;复合地基;抗震性能;动力分析;ANSYS

**中图分类号** TU 473.1

**文章编号** 1007-4333(2005)06-0079-05

**文献标识码** A

### Study on seismic behavior of a compound foundation with concrete core mixing pile

Bao Peng<sup>1,2</sup>, Sheng Guilin<sup>2</sup>, Jiang Xinliang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering of Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

**Abstract** To understand the seismic behavior of a compound foundation with concrete core mixing pile, the seismic responses in time domain were analyzed under the consideration of the interaction among pile-soil-superstructure through the 3-D finite element method by using the ANSYS software. The difference in seismic responses between a compound foundation of concrete core mixing pile and a pile foundation were analyzed. Some parameters influencing anti-seismic behavior of a compound foundation of concrete core mixing pile were studied. The results showed that the maximum moment of concrete core mixing pile lay in (0.2~0.4)L; the greater the concrete core pile, the greater the area replacing ratio and the bigger the largest moment; and the type of seism wave affected the maximum moment, shear, pile-soil stress ratio and displacement of the top of the pile under the same seismic response to great degree. The influencing extent of area replacing ratio was greater than that of concrete core pile on moment and shear.

**Key words** concrete core mixing pile; compound foundation; anti-seismic behavior; dynamic analysis; ANSYS

混凝土芯水泥土搅拌桩(劲性搅拌桩)<sup>[1]</sup>复合地基是在水泥土搅拌桩复合地基中用静压的方式置入小直径的混凝土预制桩,与地基土形成的复合体。在工程中这种复合地基与基础之间往往铺设一定厚度(一般为 150~300 mm)<sup>[2]</sup>的级配砂石垫层,用以调节桩-土间的荷载分配,使桩与桩间土共同承受荷载,从而对不满足承载力或沉降要求的地基进行

加固。这种复合地基是用于加固软弱地基常用方法之一<sup>[3-4]</sup>,但对此的研究多集中在竖向荷载承载力及沉降计算等方面<sup>[5-9]</sup>,而对于在横向荷载,特别是在不同地震波作用下的动力响应问题涉及甚少。

桩-土动力相互作用的研究在过去 20 多年中提出了许多简化的计算模型以及相应的分析方法:1)最简单的弹性地基梁模型(BDWF)<sup>[10-11]</sup>;2)多质点

收稿日期:2005-04-19

基金项目:河南省科技攻关计划项目(496260015)

作者简介:鲍鹏,副教授,博士研究生,主要从事土-结构相互作用的研究,E-mail:baop@you.com

系模型(Penzien);3)梁和波动场模型;4)动力有限元模型<sup>[12-13]</sup>;5)边界元模型(BEM)和混合模型(Hybridmethod)<sup>[14]</sup>,其中,动力有限元法被认为是最具潜力的分析方法。本研究采用三维有限元方法对劲性搅拌桩复合地基进行不同地震荷载作用下的时程分析。

## 1 计算模型

### 1.1 土体本构关系及单元类型

在用 ANSYS 做有限元计算分析时,土体本构关系的选取不仅要反映土体在动力作用下的应力-应变特性,而且还要考虑到计算机容量、求解速度、求解效果以及结果精度等问题;同时,考虑到工程设计中一般将土体简化为线弹性体的实际,本研究对地基土、混凝土桩芯、水泥土、垫层、桩基础及基础块做同样处理。

本模型中,桩基础、劲性桩、垫层、基础及地基土均采用 8 节点实体单元,其优点是计算速度快,且对线性问题适当划分有限元网格的情况亦能满足精度要求;上部结构简化为集中质量模型,用 Mass21 单元和 Beam4 单元,黏性边界采用 Combin14 单元。

### 1.2 传输边界

在使用有限元方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,从而使计算结果更符合真实情况。

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<sup>[15]</sup>。黏性边界由 Lysmer 及 Kuhlemeyer 等首先提出,是最早也是最直观的一种边界处理方法。该方法就是在边界上布置法向和切向的黏滞阻尼器模拟无限域介质,实践证明其模拟效果良好。本研究亦采用这种形式的传输边界。

### 1.3 基本假定与模型检验

为了问题简化,分析中作如下假定:1)劲性桩、垫层、基础和土体全取为圆形;2)芯桩和水泥土桩、水泥土桩和周围软土之间不考虑脱开、滑移,认为它们之间是完全粘结的;3)根据刚性楼板的假定,将上部结构简化成集中质点串模型;4)假定地基在一定深度处为基岩,计算深度取桩基下 20 m,地震波从基岩输入。利用问题的对称性,网格划分只对其 1/2 进行。网格划分剖面示意图 1。

本研究采用的有限元计算模型形式和文献[12]

中的相同,这种模型的可行性及合理性已验证。

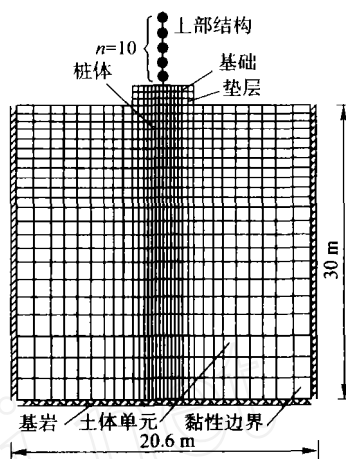


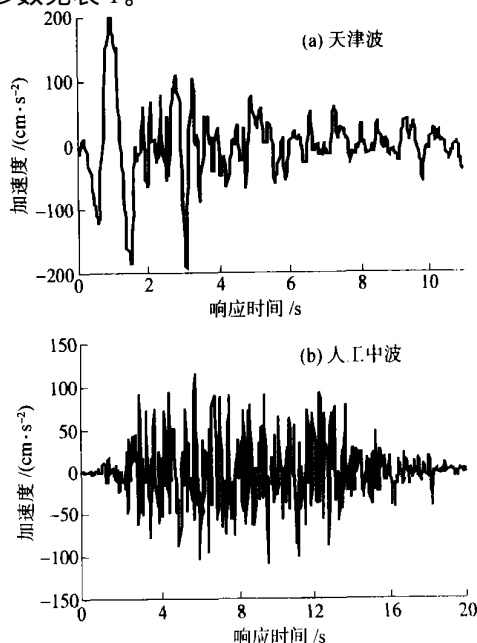
图 1 有限元网格剖面图

Fig. 1 Constructed profile of finite element mesh

### 1.4 地震波输入及计算参数

地震作用下影响桩-土-垫层-上部结构动力响应的因素非常复杂。本研究采用单桩复合地基,上部结构、基础及垫层性质保持不变。以基岩波的形式在底部边界从水平方向输入天津波、人工中波及人工小波等 3 种地震波,其加速度时程曲线见图 2。

上部结构考虑 10 层框架结构并简化为集中质量模型,每个集中质量近似取 12 t,层高 3 m,柱截面 1.0 m × 1.0 m。黏性边界的弹簧阻尼器参数  $k = 2 \times 10^6$ ,弹性阻尼因数  $c_1 = 0.4$ ,非弹性阻尼因数  $c_2 = 0$ 。其他单桩复合地基及单桩桩基础的物理力学参数见表 1。



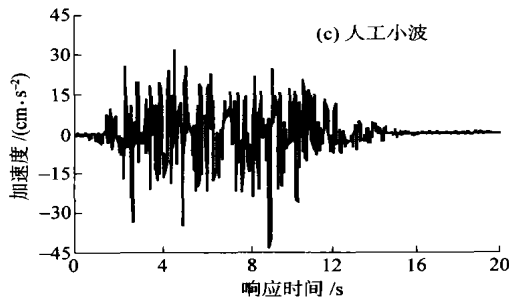


图 2 地震波加速度时程曲线

Fig. 2 Acceleration time-history curve in seismic waves

表 1 劲性桩及桩基础力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the concrete core mixing piles and the pile foundation

组成部分	弹性模量 $E/MPa$	泊松比	重度 $/(kN \cdot m^{-3})$	阻尼比
桩及上部结构	25 500	0.20	25.0	0.025
水泥土	200	0.30	19.6	0.030
软黏土	10	0.35	17.6	0.040
垫层	100	0.30	23.0	0.030

## 2 复合地基的地震响应分析

### 2.1 劲性搅拌桩复合地基与桩基础的地震响应比较

劲性搅拌桩和桩基础在天津波作用下桩身最大弯矩、剪力随深度的变化情况见图 3。劲性搅拌桩

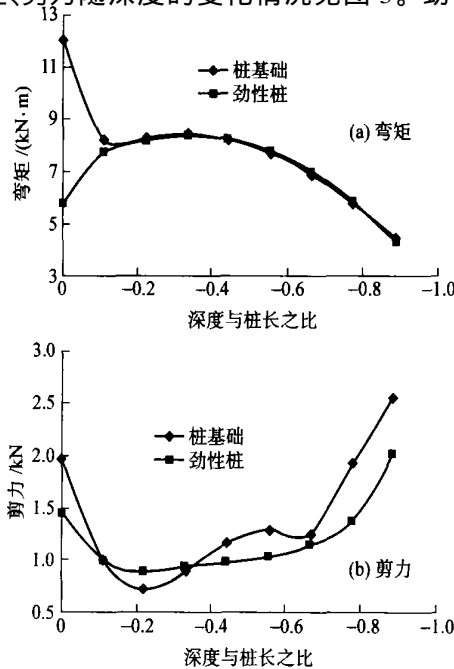


图 3 天津波作用下桩身最大弯矩、剪力与深度的关系

Fig. 3 Relational curves between maximum moment, shear and depth of piles in Tianjin wave

桩身弯矩明显小于桩基础的,最大弯矩约为桩基础的 70%;同时,由于复合地基基层对桩的约束作用远小于桩基础中承台的约束作用,桩基础的最大弯矩出现在与承台连接处,而劲性搅拌桩复合地基的最大弯矩则在桩身中部。劲性搅拌桩桩身的剪力亦明显小于桩基础,最大剪力约为桩基础的 70%。

### 2.2 不同波型作用下的地震响应比较

图 4 示出劲性搅拌桩在相同加速度峰值(0.1g)、不同地震波型作用下,桩身最大弯矩、剪力及内外芯应力比随深度的变化情况。可见:天津波,桩身上各点的弯矩、剪力包络值最大;人工小波,桩身各点的弯矩、剪力包络值最小。对于桩身各点的

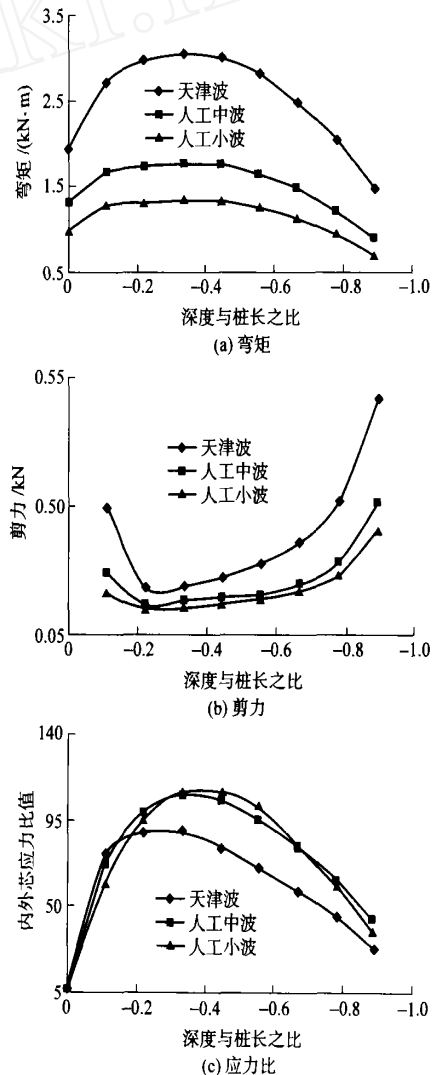


图 4 加速度峰值为 0.1g 时桩身最大弯矩、剪力及内外芯应力比与深度的关系

Fig. 4 Relational curves between the maximum moment, shear and pile-soil stress ratio and depth of piles in peak acceleration 0.1g

应力比值,天津波最小,而人工中波和人工小波差别很小。另外,桩上弯矩、剪力、桩身内外芯应力比值变化趋势基本一致,但数值不同。因此桩上各点弯矩、剪力、应力比值和地震波的波型是相关的。

劲性搅拌桩在相同加速度峰值、不同种类地震波作用下,上部结构顶层水平位移时程曲线见图5。可见:天津波顶层水平位移最大为8.38cm,其次是人工中波为4.52cm,人工小波最小为3.84cm。地

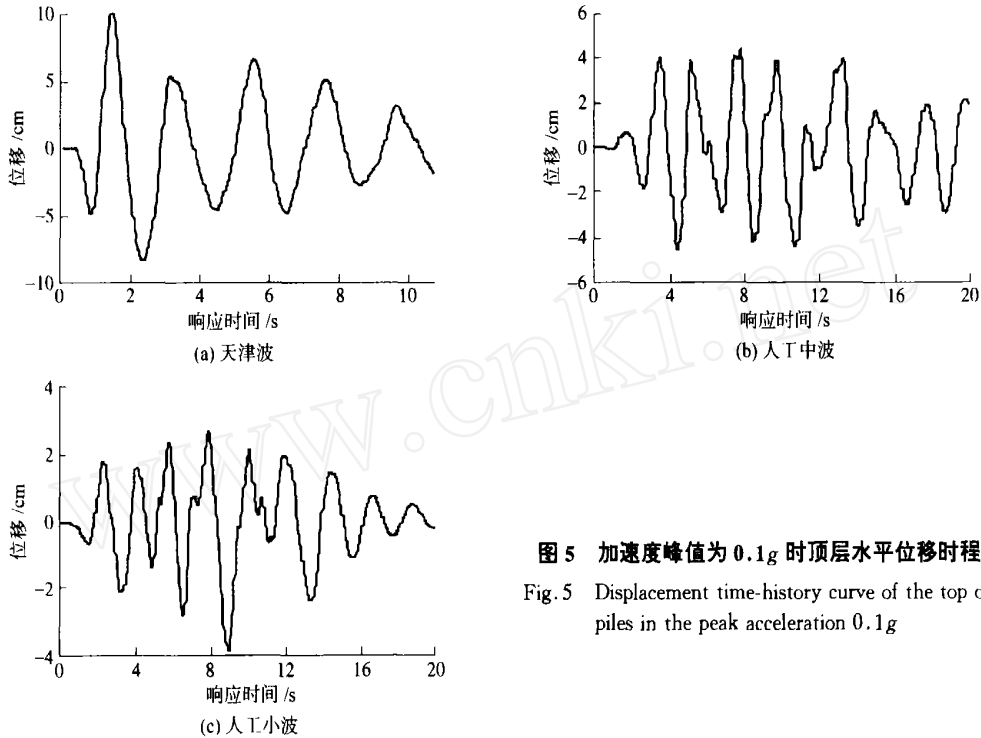


图5 加速度峰值为0.1g时顶层水平位移时程曲线  
Fig.5 Displacement time-history curve of the top of the piles in the peak acceleration 0.1g

震波波型对上部结构的水平位移产生很大的影响。  
2.3 不同芯桩长、不同置换率、不同水泥石模量的地震响应比较

人工中波作用下,不同芯桩长度  $n$  (内芯与外芯桩长之比,  $n = l/L$ ), 桩身最大弯矩、剪力随深度变化情况见图6。桩身弯矩分布具有较强的规律性, 桩尖弯矩最小, 中部弯矩最大, 芯桩越长, 桩身弯矩越大, 但桩端弯矩相差甚小; 芯桩长度对桩身剪力的

影响比弯矩小。  
图7和8示出人工中波作用下, 不同面积置换率  $m$  (芯桩面积与桩的全面积之比,  $m = A_1/A$ ) 和不同水泥石模量  $E_c$ , 桩身最大弯矩、剪力随深度变化情况。可见: 置换率越大, 弯矩和剪力越大, 置换率为0.444的最大弯矩和剪力约为置换率0.111的2.5和6倍, 置换率对剪力的影响更大。水泥石模量对桩身弯矩、剪力影响很小。

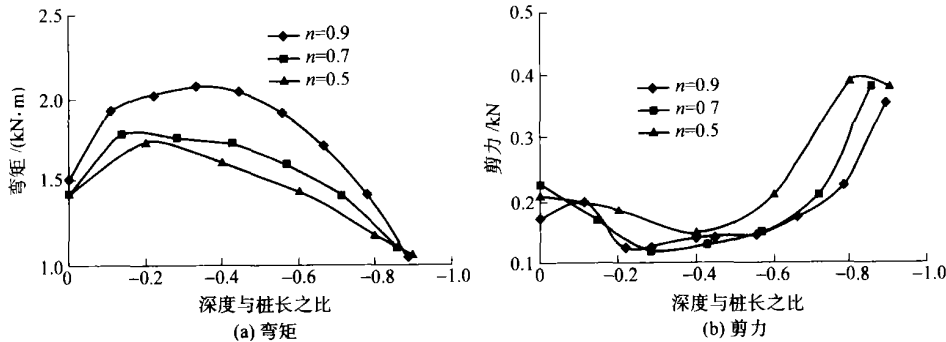


图6 人工中波作用不同芯桩长度下桩身最大弯矩、剪力与深度的关系  
Fig.6 Relational curves between moment, shear and the depth of the piles in different length of the core-pile in artificial wave (moderate earthquake)

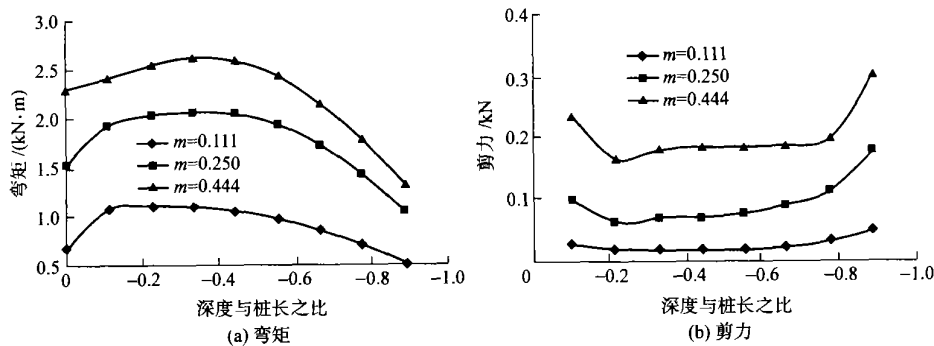


图 7 人工中波作用不同面积置换率下桩身最大弯矩、剪力与深度的关系

Fig. 7 Relational curves between moment, shear and the depth of the piles in different replacement ratios in artificial waves (moderate earthquake)

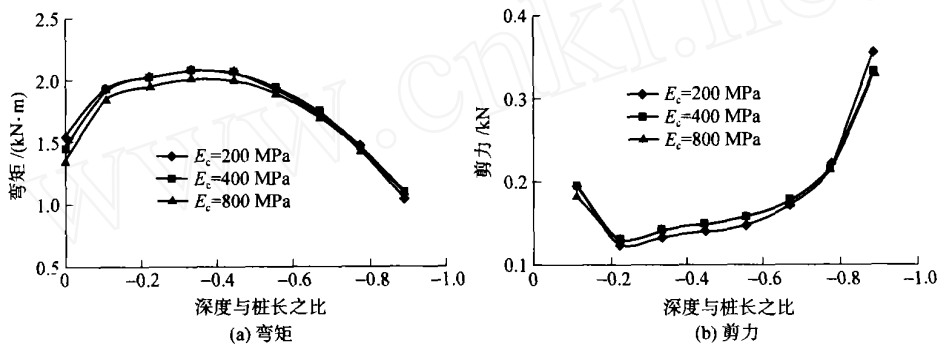


图 8 人工中波作用不同水泥石模量下桩身最大弯矩、剪力与深度关系曲线

Fig. 8 Relational curves between moment, shear and the depth of the piles in different modulus of the cement-soil in artificial waves (moderate earthquake)

### 3 结论

1) 地震波作用下, 劲性搅拌桩复合地基单桩的最大弯矩出现在距桩顶  $0.2L \sim 0.4L$  处; 芯桩越长、面积置换率越大, 最大弯矩越大; 桩身最大弯矩、剪力、内外芯桩身应力比及上部结构水平位移等与地震波波型有很大的关系。地震波类型对弯矩的影响程度较对剪力的影响程度大; 在天津波作用下劲性搅拌桩的最大弯矩和剪力均小于桩基础, 因此劲性搅拌桩复合地基的抗震性能在同等条件下优于桩基础的抗震性能。

2) 在相同地震波作用下, 芯桩长度、面积置换率及水泥石模量对桩身弯矩、剪力都有影响, 但面积置换率对桩身弯矩、剪力的影响最大, 芯桩长度和水泥石模量对桩身弯矩和剪力的影响较小。工程中可以通过改变面积置换率和芯桩长度来改善劲性搅拌桩复合地基的抗震性能。

3) 本研究只在弹性范围内对于匀质土质情况的单桩复合地基进行了不同地震波输入的动力有限元分析, 进一步应针对群桩复合地基, 考虑土体塑

性、桩 - 土接触面等非线性因素以及不同土质情况进行分析, 以求对劲性搅拌桩复合地基的地震响应规律有更全面深入的认识。

### 参 考 文 献

- [1] 凌光容, 安玉海, 谢岱宗, 等. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 92~96
- [2] 白晓红, 葛忻声, 解秀娟. 两种桩体材料复合地基性状的对比研究[J]. 岩土力学, 1997, 9(3): 75~81
- [3] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 3~4
- [4] 孔峻清, 马海燕. 刚性桩复合地基的原理与应用[J]. 安徽建筑, 2001(1): 53~54
- [5] 池跃君, 宋二祥, 陈肇元. 刚性桩复合地基竖向承载力特性分析[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 9~14
- [6] 池跃君, 宋二祥, 陈肇元. 性桩复合地基在不同荷载下的桩土分担特征[J]. 天津大学学报, 2003, 36(3): 359~363
- [7] 池跃君, 宋二祥, 陈肇元. 刚性桩复合地基沉降计算方法的探讨及应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 19~23

(下转第99页)

- [12] Wackernagel M, Deumling D, Monfreda C, et al. Ecological Footprint of Nations DECEMBER 2001 UPDATE [R]. Oakland, CA: Redefining Progress(RP), 2001
- [13] Wackernagel M, Monfreda C, Deumling D. Ecological Footprint of Nations NOVEMBER 2002 UPDATE [R]. Oakland, CA: Redefining Progress(RP), 2002
- [14] Venetoulis J, Chazan D, Gaudet C. Ecological Footprint of Nations 2004 [R]. Oakland, CA: Redefining Progress(RP), 2004
- [15] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607-616
- [16] 徐中民, 陈东景, 张志强, 等. 中国 1999 年的生态足迹分析[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 441-445
- [17] 李金平, 王志石. 澳门 2001 年生态足迹分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 197-203
- [18] 赵慧霞, 姜鲁光. 济南市城市居民生活消费的生态足迹[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 178-181
- [19] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹—可持续发展的重量及面积观念[M]. 北京: 经济科学出版社, 2003. 166
- [20] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2257-2262
- [21] 国家统计局. 中国统计年鉴 1998[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998. 105
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴—2005[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005. 93

(上接第 83 页)

- [8] 张明, 温立新, 赵正军. 刚性桩复合地基的设计及承载力评价[J]. 岩土工程技术, 2001(1): 21-24
- [9] 池跃君, 宋二祥, 高文新, 等. 刚性桩复合地基承载及变形特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 237-241
- [10] 王立忠, 柯瀚, 陈云敏, 等. 地震荷载作用下水泥土搅拌桩的动力分析[J]. 振动工程学报, 1998, 11(4): 416-423
- [11] 刘宗贤, 李玉亭. 单桩基础在无限层地基中的横向地震反应分析[J]. 四川地震, 1994(3): 32-44
- [12] 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
- [13] Wu Guoxi, Liam Finn W D. Dynamic nonlinear of pile foundations using finite element in the time domain [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34: 44-52
- [14] 王松涛, 曹资. 现代抗震设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 117-127
- [15] 宋二祥. 无限地基数值模拟的传输边界[J]. 工程力学, 1997(增刊): 613-619