

文章编号: 1000-7598(2010)06-1803-06

CFG 桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析

周爱军¹, 栗 冰²

(1. 鲁东大学 土木工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 淄博点石建筑工程设计咨询有限公司, 山东 淄博 255086)

摘 要: 针对 CFG 桩复合地基褥垫层效应问题, 通过 12 根桩的单桩复合地基载荷试验, 研究了不同厚度、不同材料的褥垫层对桩土应力比的影响。试验结果表明, 褥垫层的厚度和刚度对 CFG 桩复合地基的桩土应力比均有影响, 褥垫层过薄及过厚将使桩的承载力得不到有效发挥。利用有限元软件包 ANSYS, 建立了单桩复合地基有限元模型, 分析了褥垫层厚度和变形模量对桩土应力比的影响, 经与试验数据进行分析比较, 得出了与试验结果相一致的结论。通过有限元分析结果与试验结果的对比分析, 确定了 CFG 桩复合地基褥垫层的选用原则, 从而为复合地基设计中褥垫层的设计提供了依据。

关 键 词: CFG 桩; 复合地基; 褥垫层; 有限元; 桩土应力比

中图分类号: TU 472.2+1

文献标识码: A

Experimental study and finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation

ZHOU Ai-jun¹, LI Bing²

(1. School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;

2. Zibo Dianshi Architectural Engineering Design Consultation Limited Company, Zibo, Shandong 255086, China)

Abstract: In light of the effect of cushion on the composite foundation, according to the single pile composite foundation load testing of 12 piles, influences of the cushion on the pile-soil stress ratio have been studied; the test result indicates that both the thickness and rigidity of the cushion have effect on the pile-soil stress ratio, either the excessively thinness or over thick load capacity can not function well. To verify the test data, the single pile composite foundation finite element model is established using ANSYS program; the influences of the cushion thickness and deformation modulus on the pile-soil stress ratio have been analysed. Analysis and experimental results show that the value analysis and test result are consistent. Comparing the finite element analysis and test result, the selection principle of the cushion has determined so as to provide the cushion design basis in the process of composite foundation design.

Key words: cement fly-ash gravel (CFG) pile; composite foundation; cushion; finite elements; pile-soil stress ratio

1 引 言

CFG 桩复合地基是由 CFG 桩、桩间土、褥垫层三部分组成, 它具有施工速度快、工期短、质量容易控制及工程造价低廉等特点, 目前已经得到广泛应用^[1]。CFG 桩可以很好地充当复合地基的增强体^[2], 其加固机制为褥垫层受上部基础荷载作用产生变形后以一定的比例将荷载分摊给桩及桩间土, 使二者共同受力; 同时土体受到桩的挤密而提高了承载力, 而桩又由于周围土的侧应力的增加而改善了受力性能, 二者共同作用形成了一个复合地基的受

力整体, 共同承担上部基础传来的荷载^[3]。褥垫层是构成 CFG 桩复合地基的重要组成部分, 它保证了桩、土共同承担荷载, 还能调整桩、土荷载分担比, 减小基础底面的应力集中^[1,4-5]。褥垫层厚度对桩、土承载力的发挥非常敏感, 不同材料构成的褥垫层及同种材料不同厚度和刚度的褥垫层使得桩、土分担的荷载是不同的, 对复合地基的效应亦有较大影响, 因此, 如何选择合适的褥垫层对复合地基的正常工作有着重要意义^[6-9]。李宁等^[8]利用数值分析方法, 系统研究了 4 种不同模量桩体复合地基施加褥垫后的承载性状。黄生根^[10]结合现场试验和有限元

收稿日期: 2008-10-08

基金项目: 鲁东大学学科建设工程资助。

第一作者简介: 周爱军, 女, 1966 年生, 硕士, 副教授, 主要从事建筑结构的研究。E-mail: ldzhaj66@sina.com

分析,对柔性荷载作用下(或褥垫很厚条件下)CFG桩复合地基的作用特性进行了研究。任鹏、王兵等^[11-12]通过现场静载荷试验,研究了褥垫层对复合地基承载特性的影响。本文结合烟台市某高层建筑CFG桩复合地基工程,进行了单桩复合地基静力载荷试验,针对褥垫层厚度和刚度的变化对桩土应力比的影响进行了试验研究和有限元数值分析,以供CFG桩复合地基的应用、设计作参考。

2 试验研究

2.1 工程地质概况

烟台市环海路工业园区,拟建建筑物为现浇钢筋混凝土框架-剪力墙结构,地下1层,地上16层。地质情况如下:①层为杂填土,厚度为3~4 m;②层为含泥粗砂土,厚度为1.5~2.0 m,承载力特征值为160 kPa,③层由黏土、粉质黏土及粉土组成,软可塑状态,承载力特征值为125 kPa,厚度为2~4 m;④层为砂质黏土,软塑状态,承载力特征值为220 kPa,厚度为2.2~4 m;⑤层为软黏土,可塑状态,承载力特征值为170 kPa,厚度为3.5~4.5 m;⑥层为含卵石砾砂,承载力特征值为320 kPa,厚度为2.5~4 m。由于天然地基的承载力不能满足上部结构的荷载要求,因此,采用CFG桩复合地基的方法进行处理。CFG桩桩长为18.0 m,桩径为0.4 m,桩间距为1.4 m,要求处理后单桩地基承载力特征值≥400 kPa。

2.2 试验概述

本次试验共选取12根桩进行试验,褥垫层的材料分别选用了粗砂、砾砂和碎石3种。同一种垫层材料又采用了不同的厚度:粗砂、砾砂褥垫层的厚度分别为0.06、0.1、0.2、0.3 m;碎石褥垫层的厚度分别为0.1、0.2、0.3、0.4 m。

本试验结合单桩复合地基载荷试验进行。在垫层与天然土交接处埋设6个压力盒,量程为1.0 MPa,载荷试验时,对不同荷载下、不同垫层材料及厚度时的桩间土压力进行量测,每加一级荷载 P 均记录压力盒显示的值。最后,求取压力盒显示的压力平均值,求得桩间土的平均应力 σ_s ,然后根据承压板压力与桩间土应力及面积关系得出桩顶应力。

2.3 试验结果分析

单桩复合地基载荷试验结果如表1所示。

2.3.1 褥垫层厚度对桩土应力比的影响

图1分别为不同压力下,褥垫层材料采用粗砂、砾砂、碎石时,垫层厚度与桩土应力比的关系曲线。

表1 单桩复合地基载荷试验结果
Table 1 Single pile composite foundation load testing results

编号	垫层材料	厚度 /m	压力 /kPa	桩顶应力 σ_n /MPa	桩间土应力 σ_s /MPa	桩土应力比 n
1	粗砂	0.06	250	1.655	0.093	17.8
			400	2.814	0.210	13.4
			600	4.433	0.310	14.3
			800	6.156	0.380	16.2
2	粗砂	0.10	250	1.474	0.110	13.4
			400	2.725	0.250	10.9
			600	5.023	0.433	11.6
			800	6.780	0.565	12.0
3	粗砂	0.20	250	0.829	0.143	5.8
			400	1.246	0.328	3.8
			600	2.190	0.466	4.7
			800	3.058	0.624	4.9
4	粗砂	0.30	250	0.566	0.149	3.8
			400	0.628	0.349	1.8
			600	1.079	0.514	2.1
			800	1.615	0.673	2.4
5	砾砂	0.060	250	1.769	0.066	26.8
			400	3.277	0.151	21.7
			600	4.618	0.251	18.4
			800	4.495	0.182	16.7
6	砾砂	0.10	250	1.495	0.084	17.8
			400	2.817	0.197	14.3
			600	4.190	0.287	14.6
			800	6.225	0.375	16.6
7	砾砂	0.20	250	1.240	0.117	10.6
			400	1.678	0.275	6.1
			600	2.844	0.395	7.2
			800	3.947	0.506	7.8
8	砾砂	0.30	250	0.630	0.150	4.2
			400	0.770	0.350	2.2
			600	1.342	0.516	2.6
			800	1.890	0.675	3.0
9	碎石	0.10	250	1.588	0.081	19.6
			400	2.793	0.190	14.7
			600	4.228	0.280	15.1
			800	5.248	0.410	17.8
10	碎石	0.20	250	1.281	0.105	12.2
			400	1.842	0.275	6.7
			600	3.042	0.385	7.9
			800	3.167	0.391	8.1
11	碎石	0.30	250	0.785	0.151	5.2
			400	0.948	0.351	2.7
			600	1.606	0.518	3.1
			800	2.228	0.675	3.3
12	碎石	0.40	250	0.869	0.181	4.8
			400	0.928	0.371	2.5
			600	1.531	0.528	2.9
			800	2.102	0.678	3.1

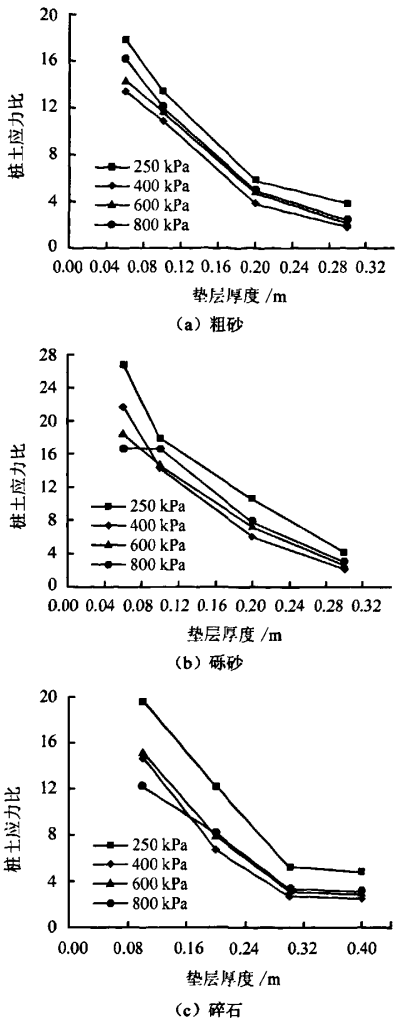


图1 不同压力下褥垫层厚度-桩土应力比的关系曲线
Fig.1 Curves of cushion thickness and pile-soil stress ratio under different pressures

从图1可以看出,褥垫层厚度对桩土应力比具有一定的调节作用,无论是粗砂、砾砂还是碎石褥垫层材料,随着褥垫层厚度的增加,桩土应力比基本呈下降趋势。褥垫层厚度小于0.2 m时,桩土应力比较大,即桩承担的荷载较大,而桩间土承载能力不能充分发挥;褥垫层厚度为0.2~0.3 m之间时,桩土应力比下降趋缓,桩土应力比值适中;超过0.3 m后(如碎石褥垫层),曲线出现拐点,褥垫层厚度对桩土应力比的影响较小,这说明随着垫层厚度的增大,垫层对桩土应力的调整作用逐步减小。因此,褥垫层的厚度应有一个合理值,以便达到调整桩土应力比的作用,充分发挥复合地基中桩和桩间土的共同承载作用。从本次试验结果来看,粗砂、砾砂及碎石褥垫层的最佳厚度为0.2~0.3 m左右。

2.3.2 褥垫层材料对桩土应力比的影响

图2为同一垫层厚度下,荷载分别为250、400、600、800 kPa时,采用不同的垫层材料对桩土应力比的影响。

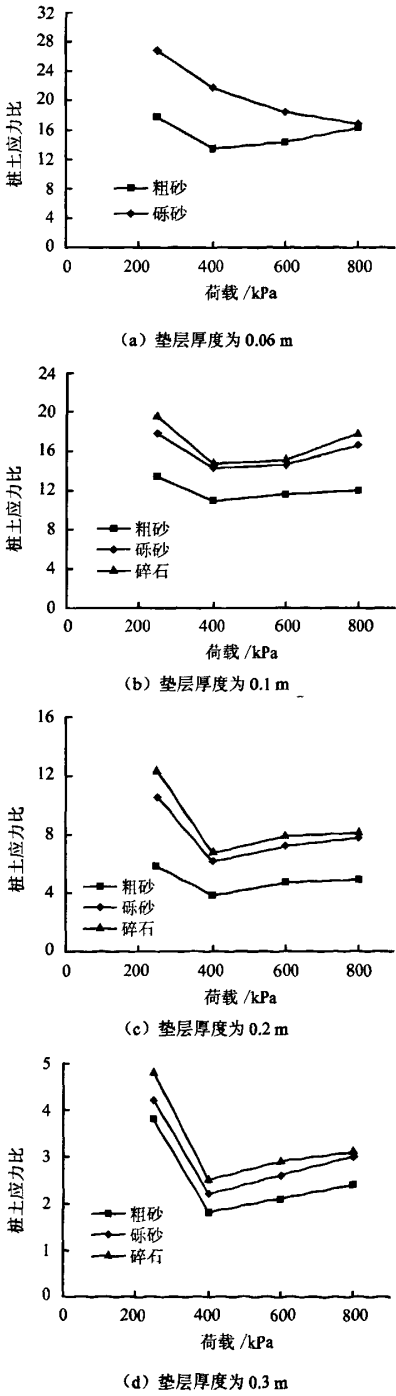


图2 荷载-桩土应力比关系曲线
Fig.2 Curves of load and pile-soil stress ratio

从图 2 可以看出:①在垫层厚度相同的情况下,随着荷载的增大,桩土应力比的变化规律是先减小后又逐步增大。当荷载为 250 kPa 时,桩土应力比较大,因桩顶的褥垫层易被压缩,桩承担的荷载较大;当荷载在 400 kPa 以内时,随着荷载的增加,桩体产生反向刺入,此时桩间土逐渐开始发挥作用,桩土应力比急剧减小;随后当荷载超过 400 kPa 以后,曲线基本呈递增关系,此时桩土应力比略有增大,桩承担的荷载有所增加。但图 2 (a) 中以砾砂为材料的垫层,褥垫层厚度为 0.06 m 时的桩土应力比不符合这一规律。原因是垫层较薄时,组成垫层的材料颗粒较大,易产生较严重的应力集中现象,桩间土的承载力不能得到很好的发挥,因此,垫层调节桩土应力比的作用较小。②当垫层厚度相同时,同一级压力下其他条件不变时,垫层材料的粒径越大(刚度越大),其桩土应力比也较大,图中桩土应力比呈现碎石>砾砂>粗砂的规律。

3 有限元分析

3.1 有限元分析模型的建立

利用软件 ANSYS 建立桩、土、垫层作用的三维有限元接触单元的数值模型,对竖向荷载作用下褥垫层的作用机制进行分析。在建立有限元模型时对土体、桩体、垫层均采用三维 8 节点实体单元——Solid45 单元模拟,同时在桩体与桩间土、桩体与垫层之间均设置了接触单元。刚性面与接触单元分别选用 Target170 和 Contal73 单元模拟,考虑了桩体与桩间土之间的滑移摩擦。桩体采用弹性材料模拟,土体以 Drucker-Prager 本构关系模拟其弹塑性。

结合第 2 节的试验数据,选取单桩的有限元分析模型如下:上部筏板厚度为 0.6 m,褥垫层面积为 2 m×2 m,桩体直径为 0.4 m,桩长为 18 m,土体为 8 m×8 m,深度为桩长的 2 倍,即 36 m。单桩模型根据对称性取 1/4 分析,对称面上加对称约束,土体四周及底部加固定约束。有限元模型采用的各材料参数见表 2,模型几何尺寸示意图见图 3,各数值均参照实际的试验数值选取。

表 2 有限元模型材料参数表
Table 2 Material parameters of finite element model

材料	模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
基础筏板	25000	0.15		
褥垫层	20~100	0.25	0	40
桩	12 000	0.15		
桩间土	20	0.30	30	20

注:基础筏板、桩模量为弹性模量,褥垫层、桩间土模量为变形模量。

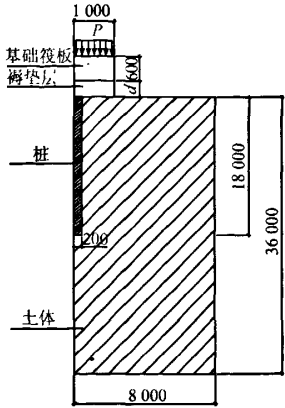


图 3 有限元分析模型几何尺寸示意图 (单位: mm)
Fig.3 Geometry size of finite element model (unit: mm)

有限元分析中,上部所施加荷载分别为 100、250、400、600 kPa;褥垫层厚度分别为 0.06、0.2、0.3、0.5 m;褥垫层变形模量分别为 20、60、100 MPa。

3.2 有限元结果分析

3.2.1 褥垫层厚度对桩土应力比的影响

由有限元计算结果(图 4)可见,随着褥垫层厚度的增加,桩土应力比逐渐减小。褥垫层厚度为 0.06 m 时,桩土应力比较大,表明桩承担了绝大部分荷载。褥垫层厚度超过 0.2 m 后,曲线出现拐点,褥垫厚度对桩土应力比的影响急剧减小;褥垫厚度超过 0.3 m 后,褥垫厚度的影响继续减小;褥垫层厚度大于 0.5 m 时,桩土应力比变化很小,其值接近于 1,表明桩分担的荷载较小,这时桩的作用仅体现了其置换作用,由于 CFG 桩复合地基的置换率较低,褥垫层较厚时,CFG 桩降低桩间土压力及减小基础沉降的作用受到很大影响。褥垫层厚度在 0.2~0.3 m 范围内桩土应力比值较为适中,桩、土荷载分担较为合理。

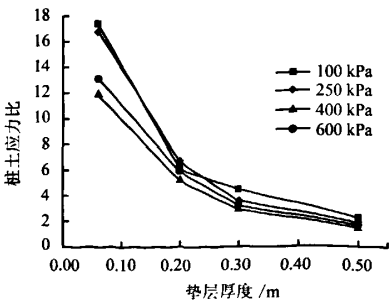


图 4 褥垫层厚度与桩土应力比的关系曲线
(土压缩模量为 20 MPa)

Fig.4 Curves of cushion thickness and pile-soil stress ratio(soil compression modulus is 20 MPa)

3.2.2 褥垫层变形模量 E 对桩土应力比的影响

图5是褥垫层厚度为0.2 m时不同压力下褥垫层变形模量与对应的桩土应力比的关系曲线。可以看出:随着褥垫层变形模量的增加,桩土应力比也逐渐增加。其中荷载为100 kPa时,褥垫模量对桩土应力比影响很大,大体呈线性增长,桩土应力比由6.1增长到16.5;荷载分别为250 kPa和400 kPa时,褥垫模量对桩土应力比有一定影响,桩土应力比分别由6.7增长到12.3和由5.2增长到10.4,但模量超过60 MPa后增长趋缓;荷载为600 kPa时,褥垫模量对桩土应力比影响较小,褥垫模量小于60 MPa时,桩土应力比由5.9增长到6.8,褥垫模量大于60 MPa时,由6.8增长到8.9。以上规律说明,随着褥垫层刚度的增大,桩土应力比也随之增大。分析其原因在于,较大的垫层刚度使得地表的变形受到约束,从而桩分担的荷载较大,而桩间土分担的荷载较小。

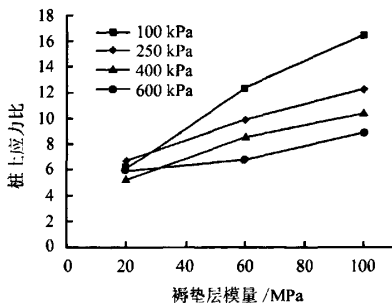


图5 褥垫层变形模量与桩土应力比的关系曲线
(褥垫层厚为0.2 m)

Fig.5 Curves of deformation modulus and pile-soil stress ratio(cushion thickness is 0.2 m)

4 试验结果与有限元分析结果的对比

将现场静载试验结果与有限元结果进行对比分析,见图6。比较两者相同加载部分(250~600 MPa)和相同褥垫层厚度部分,可以看出,两者结果基本接近,理论值与实测值具有相似的变化规律。褥垫层厚度对桩土应力分配具有良好的调节能力,随着褥垫层厚度的增加,桩土应力比逐渐减小,但随着垫层厚度的增大,垫层对桩土应力比的调整作用逐渐减弱,故褥垫层的厚度既不能太大,也不能太小;在相同荷载、相同厚度的情况下,褥垫层选用的材料不同,即刚度的变化也具有调整桩土应力比的作用,褥垫层的刚度越大,复合地基的桩土应力比也越大,反之则越小。

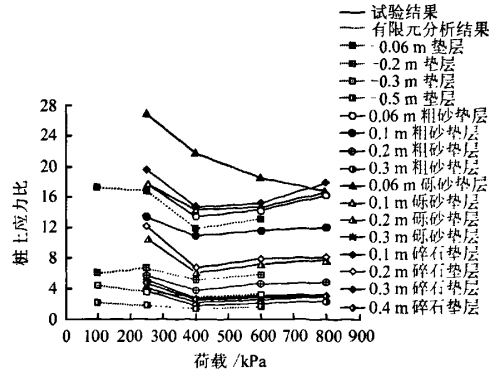


图6 试验结果与有限元分析结果对比曲线
Fig.6 Comparison curves of test result and finite element analysis result

5 结论

通过 CFG 桩试验研究和有限元分析可得出如下结论:

(1) 现场静载试验表明,在桩长一定的条件下,通过调整褥垫层的厚度,可以控制桩土应力比,调整桩土荷载分担比例。桩土应力比随垫层厚度的增加而减小,褥垫层厚度小于0.2 m时,桩土应力比较大;褥垫层厚度为0.2~0.3 m之间时,桩土应力比下降趋缓,桩土应力比值适中;超过0.3 m后,曲线出现拐点,褥垫层厚度对桩土应力比的影响较小。为充分发挥桩的承载作用,提出合理的褥垫层厚度应为0.2~0.3 m。

(2) 垫层材料对桩土应力比的调整作用亦很明显。垫层材料粒径越大(即刚度越大),其桩土应力比也较大,可充分发挥桩的承载力,但桩间土承载力不能充分利用。

(3) 根据有限元分析结果,随着褥垫厚度增加,桩土应力比减小。褥垫厚度超过0.2 m后,褥垫厚度的影响急剧减小;褥垫厚度超过0.3 m后,褥垫厚度的影响继续减小,特别是当褥垫厚度大于0.5 m时,桩土应力比变化很小。

(4) 褥垫层的变形模量对桩土应力比有一定的影响,随着褥垫层的刚度的增加,桩土应力比也逐渐增加。在垫层厚度相同的情况下,荷载较小时,褥垫模量对桩土应力比影响很大,基本呈线性增长;随着荷载增大,褥垫模量对桩土应力比的影响减小。

参考文献

- [1] 栗冰. CFG 桩复合地基褥垫层作用机理及按变形控制设计方法的研究[硕士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [2] 阎明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M].

- 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [3] 邓跃光, 黄荣. CFG 桩复合地基的原理和设计[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(3): 69—72.
DENG Yue-guang, HUANG Rong. The theory and design of CFG composite foundation[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2002, 13(3): 69—72.
- [4] 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): 55—62.
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): 55—62.
- [5] 潘纪顺, 刘志伟, 姬计法, 等. CFG 桩复合地基承载性状的试验研究[J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 92—94.
PAN Ji-shun, LIU Zhi-wei, JI Ji-fa, et al. The test research about the loading behavior of CFG pile composite foundation[J]. *Geology and Prospecting*, 2001, 37(4): 92—94.
- [6] 马时冬. 水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[J]. 土木工程学报, 2002, 21(2): 48—51.
MA Shi-dong. Test on pile soil stress ratio of composite foundation with cement-soil pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 21(2): 48—51.
- [7] 王长科, 郭新海. 基础-垫层-复合地基共同作用原理[J]. 土木工程学报, 1996, 29(5): 30—35.
WANG Chang-ke, GUO Xin-hai. Interaction of foundation cushion composite ground soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1996, 29(5): 30—35.
- [8] 李宁, 韩煊. 褥垫层对复合地基承载机理的影响[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 68—73.
LI Ning, HAN Xuan. Study on mechanism of cushion in composite pile foundation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(2): 68—73.
- [9] 化建新, 董长和, 孙东晖. CFG 桩垫层效应研究[J]. 岩土工程技术, 1998, (1): 48—50.
HUA Jian-xin, DONG Chang-he, SUN Dong-hui. The study of cushion influence on CFG piles[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 1998, (1): 48—50.
- [10] 黄生根. CFG 桩复合地基现场试验及有限元模拟分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1275—1279.
HUANG Sheng-gen. Test study and finite element analysis of CFG composite foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1275—1279.
- [11] 任鹏, 邓荣贵, 于志强. CFG 桩复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 81—86.
REN Peng, DENG Rong-gui, YU Zhi-qiang. Experimental research on composite foundations with CFG piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 81—86.
- [12] 王兵, 杨为民, 李占强, 等. 褥垫层对复合地基承载特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 403—407.
WANG Bing, YANG Wei-min, LI Zhan-qiang, et al. Test study on influence of cushion on loading behavior of composite foundations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 403—407.

上接第 1802 页

- [5] 王志坚, 叶阳升, 王仲锦. 击实试验标准不同对试验结果的影响[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 53—57.
WANG Zhi-jian, YE Yang-sheng, WANG Zhong-jin. The effects of different hitting test standards on test results[J]. *China Railway Science*, 2003, 24(2): 53—57.
- [6] 张志权, 王志勇. 最大干密度和最优含水率的准确性探讨[J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2004, 21(2): 7—10.
ZHANG Zhi-quan, WANG Zhi-yong. Discussion on precision of biggest dry density and optimum water content[J]. *Journal of Chang'an University (Architecture and Environment Science Edition)*, 2004, 21(2): 7—10.
- [7] BRAJA M DAS. Principles of geotechnical engineering[M]. Southwick: Thomson Engineering, 2001.
- [8] 林亚超, 王邦楣. 砂性土中单桩和桩基的模型试验[J]. 桥梁建设, 1997, (2): 58—70.
- [9] 王晶颖, 梁仁旺. 砂性土中桩基模型试验研究[J]. 山西建筑, 2006, 32(7): 105—106.
WANG Jing-ying, LIANG Ren-wang. Experimental investigation of pile foundation model in sand soil[J]. *Shanxi Architecture*, 2006, 32(7): 105—106.
- [10] 刘恩龙, 沈珠江. 人工制备结构性土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 679—683.
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Experimental study on mechanical properties of artificially structured soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 679—683.
- [11] 王伟, 冯小平, 邹昀, 等. 黏性土力学强度与微结构动态环境能场内在关联分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2219—2224.
WANG Wei, FENG Xiao-ping, ZOU Jun, et al. Analysis of intrinsic correlation of mechanical strength with microstructure dynamic environmental energy field of clayey soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2219—2224.
- [12] 万玉珍, 林德明. 重塑黄土的应力-应变关系[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 106—110.
- [13] 卢廷浩, 刘祖德, 等. 高等土力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.