

文章编号: 1000-7598(2012)10-2947-06

大直径变径桩竖向承载特性模型试验研究(I)

方 焘^{1,2}, 刘新荣^{1,3}, 耿大新², 罗 照², 纪孝团², 郑明新²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013;

3. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 变径桩在桥梁桩基和软土地基处理得到了一定程度的应用, 对其承载特性和工作机制的研究十分必要。通过室内大型模型试验, 对大直径变截面单桩的荷载与沉降关系、桩侧摩阻力分布形式、桩身内力和桩端、变截面处的破坏模式等问题进行了探讨, 试验结果表明, 在桩顶截面相同的情况下, 变截面桩竖向承载特性受变截面比影响显著, 变截面比越小, 竖向极限承载力越小。模型试验 $P-S$ 曲线不存在最优变截面比, 变截面比设计受桩横向受力特性的控制。变截面处土体挤土效应的发挥是以牺牲桩顶位移为代价, 在只有到达一定桩身位移时, 才体现明显的挤土效应, 使承载力提高。

关 键 词: 大直径变截面桩; 模型试验; 竖向承载特性

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Model testing study of vertical bearing behaviors for large diameter pile with variable cross-section (I)

FANG Tao^{1,2}, LIU Xin-rong^{1,3}, GENG Da-xin², LUO Zhao², JI Xiao-tuan², ZHENG Ming-xin²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Large diameter pile with variable cross-sections is applied to the region of bridge engineering and foundation treatment. It is necessary to study the vertical bearing behaviors and working mechanism. The relation between vertical bearing capacity and settlement & distribution of the axial forces and skin friction along pile and failure mode of the pile are discussed based on laboratory test. According to the test, it is concluded that it is clear that the vertical bearing behaviors of the pile is affected by the ratio of variable diameters b value; the b is more smaller, the vertical bearing capacity is more smaller. It is proved that how to choose the b is controlled by the lateral bearing behaviors. The squeezing effect is not clear to improve the vertical bearing capacity unless the top displacement of the pile reaches a certain value.

Key words: Large diameter pile with variable cross-section; model test; vertical bearing behaviors

1 引 言

近年来, 随着深海和越江桥梁工程建设的实践以及高速铁路与公路工程建设经验的积累与发展, 变径桩在桥梁桩基中得到了一定的应用, 如苏通大桥主墩则选用变径桩, 其中斜拉桥通航孔和辅航道桥主墩采用 $\phi 2\ 800\text{ mm}/\phi 2\ 500\text{ mm}$ 变截面钻孔桩, 共有 410 根, 长为 $4.57 \times 10^4\text{ m}$; 王伯惠等^[1]提出的钻埋空心桩即为大直径变截面桩, 该桩以其独有的成桩工艺和特点, 取得了良好的经济和社会效益。

变径桩(又称钉形桩)在处理软土地基时以搅拌桩的形式成桩, 也发挥了较大的效应, 提高了成桩质量, 易耀林等^[2-4]对其进行了较系统的研究, 提出了一套钉形水泥土搅拌桩操作方法, 发明了搅拌桩成桩机械, 同时对路堤荷载作用下钉形搅拌桩复合地基变形特性^[2]、沉降计算方法^[3]和单桩承载力^[4]等进行了详尽的研究。

变截面桩的类型很多, 常见的有扩径变截面桩、锥形桩、扩底桩、爆扩桩、挤扩支盘桩和带翼桩。卢成原等^[5]开展了支盘桩模型试验研究; 钱德玲等^[6]

收稿日期: 2011-05-19

基金项目: 铁道部重点科技基金(No. 2009G010-D); 国家自然科学基金(No. 51068006); 新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-05-0763)。

第一作者简介: 方焘, 男, 1976 年生, 副教授, 主要从事岩土工程专业教学与研究工作。E-mail: fangtaolq@163.com

以对接扩支盘桩桩-土相互作用进行了深入的研究,包括抗震特性。文献[7—9]分析了锥形桩的屈曲特性和柔性及刚性承台下锥形变截面桩与地基相互作用。

综上所述,对变径桩的研究成果尚不多见,但在实际的工程中得到一定程度的应用,所以对该类型桩的承载特性和设计方法的研究十分必要。文中试图探讨该类型桩与一般桩比较其横向和竖向承载特性、变截面处桩土挤土效应是否对竖向承载力具有较大影响、桩是如何破坏的、桩身轴力和桩侧摩阻力是如何分布的、在设计中主要受什么因素控制等问题。这些问题在建立设计方法之前是需要弄清楚的,有必要进行深入的分析。本文通过设计不同变截面比的室内大型模型试验,仅对其竖向承载性能和破坏模式与机制进行了初步的分析与探讨。

2 模型试验

2.1 试验设计

2.1.1 模型桩参数

模型桩直径为 15 cm,桩长为 1.5 m,变径比(模型桩变径后的直径与变径前的直径的比值) b 为 0.7、0.8、0.9、1.0。变径位置为距离桩顶 50 cm 处,变径采用突变的形式,模型桩几何比为 20,材料为杉木。桩的模量为 0.8 GPa,泊松比为 0.3,桩与模型内表面接触面进行抛光处理并粘贴光滑膜纸,以减小和玻璃之间的摩擦(见图 1),桩与土介质材料之间粘贴环氧树脂调配洗净的中粗砂,以起到增大桩侧摩阻力的作用。



图 1 不同变径比的模型桩
Fig.1 Model piles with different values of b

2.1.2 模型箱及加载装置设计

模型箱长×宽×高=1.8 m×1.8 m×2.0 m,模型箱高度方向采用厚度为 10 mm 的透明钢化玻璃,外加刚支撑,内贴透明光滑玻璃膜。

模型采用杠杆加载装置(见图 2),利用杠杆原理将杠杆一端固定,然后将支点作用在桩头上达到

施加竖向荷载的目的,同时,另一端进行逐级加载。支撑杆与模型箱外支撑采用螺栓联结,模型箱 4 面采用相同的联接方式设计。试验过程中,可以拆卸下来供另一侧模型桩加载用,半桩紧贴玻璃,一组试验可以同时填埋四根桩,移动加载设备,填筑一次可以完成一组试验,保证了同组试验介质的一致性(见图 3),节省了模型试验时间。

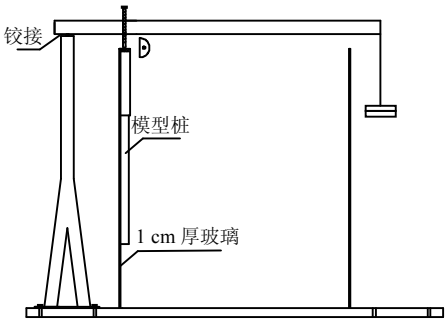


图 2 模型加载装置示意图
Fig.2 Diagram for loading device



图 3 模型试验系统
Fig.3 Model device of test

2.1.3 模型材料

模型填筑材料采用一般黏性土,过 20 mm 筛,剔除杂质和大于 20 mm 的颗粒。物理力学指标如表 1 所示。

表 1 模型材料物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of soil

土粒相对 密度	最大干密度 /(g/cm ³)	最小干密度 /(g/cm ³)	试验填筑压密		
			内摩擦角 /(°)	黏聚 /kPa	E_{vd} /MPa
2.68	1.89	1.75	28.4	21.3	17.8

分层夯填(见图 4),分层填筑厚度为 10 cm,在 50 cm×50 cm×1 cm 钢板上焊接杆件,同时配合 10 kg 穿心锤,自制夯填设备夯填。每层击实 3 下,夯填到桩端和变截面位置后分别作轻型动力触探和 E_{vd} 试验。

2.1.4 量测设备选用与设置

模型试验测试参数为桩身位移以及变截面处土压力和桩端土压力。测试元件为电阻应变片: 规格为 $10\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 。选用具有一定防水性能的聚氨酯精密级应变片, 用 502 胶水粘贴, 704 胶防水, 每组选用 10 组 (见图 5)。选用 BX-2 型电阻应变式土压力计, 外形尺寸为 $\phi 17\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 。



图 4 模型填筑
Fig.4 Filling model



图 5 应变片布置
Fig.5 Arrangement of strain gages on piles

2.2 单桩试验结果

2.2.1 桩顶 P - S 曲线

从图 6 中 4 根单桩的荷载 (P)-沉降 (S) 曲线, 可以看出, 变截面比分别为 0.7、0.8、0.9、1.0 的模型桩极限承载力分别约为 3.3、3.8、4.1、4.0 kN, 当桩顶位移超过一定值时变截面比为 0.7 时的承载力大于变截面比为 1.0 时的承载力, 变截面比为 0.8 时的承载力大于变截面比为 0.9 时的承载力, 挤土效应明显, 但承载力的提高是以牺牲桩顶位移为代价。同时也可以看出, 桩的 P - S 曲线都呈陡降型, 与常规桩相比变截面桩达到临塑荷载的位移明显大于不变截面桩, 表明承载力提高有一定的挤土效应。

从 P - S 曲线看, 在同等情况下, 变截面比不宜过大, 其对桩的承载力影响十分显著, 呈减小的趋势。

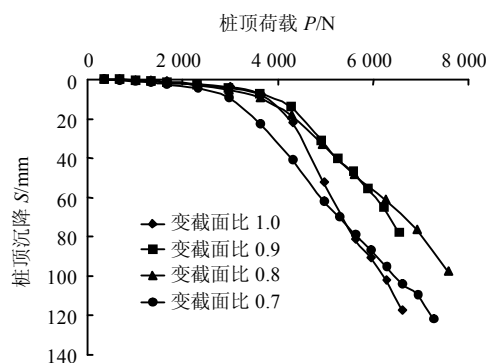


图 6 P - S 曲线

Fig.6 The load-settlement curves for different values of b

2.2.2 桩身轴力分布特征

图 7(a)中, 总的荷载级数为 13 级, 桩顶一组应变片和桩端附近 3 组应变片由于试验过程中测试元件不稳定, 没有测试到试验结果, 但从测试的试验成果看, 对于变截面比为 1.0 的情况下, 0.7 m 以上的桩身轴力分布模式与普通的桩基轴力分布形式基本一致, 随着桩顶荷载增加, 自临塑荷载以后, 桩端土体有明显的刺入土体的位移, 桩身轴力分布大的趋势没有很大的变化, 桩身呈现屈曲变形形态。

图 7(b)中, 总的有效荷载级数为 10 级, 桩顶和桩端各一组应变片数据没有监测到, 在小变形情况下, 桩变截面对桩身轴力的分布有一定影响, 在第 1 至第 5 级荷载时, 变截面上下桩身轴力的分布存在明显的差别, 变截面处桩身轴力小, 但随着桩顶荷载量的增加, 桩身轴力分布趋势与不变截面的情况相比基本一致。

图 7(c)所示, 由于在试验过程中突然停电, 采集到的总有效荷载级数为 8 级, 桩端有一组应变片数据没有监测到, 整体上, 桩身轴力传递的形态非常明显, 规律性也很强, 既反映了变截面桩的传递特征也反映了长桩的轴力传递特性, 变截面对桩身轴力传递影响显著, 变截面处桩身轴力存在明显的突变点。

图 7(d)中采集到的总有效荷载级数为 17 级, 整体上桩身轴力传递的形态更加明显, 变截面对桩身轴力传递影响显著, 变截面处桩身轴力存在明显的突变点, 随着桩顶荷载的增加, 变截面以下附近桩身轴力增加明显, 增长速率大于以上变截面处的轴力增加速度。

从图 7 中 4 种情况下桩身轴力传递曲线可以看出, 随着变截面比的增加, 桩身轴力传递模式存在明显的差别, 变截面对桩身轴力传递模式的规律性越来越明显, 以第 8 级荷载监测到的桩身轴力的最大值、最小值为准进行了比较, 见表 2。

表 2 桩身轴力比较

Table 2 Comparison of axial force of piles		
b 值	轴力最大值/kN	轴力最小值/kN
1.0	2.97	0.82
0.9	1.59	0.31
0.8	1.84	0.05
0.7	3.42	0.02

由表可知，桩身轴力分布情况存在明显的差异，变截面比为 0.8、0.9 的情况下桩身轴力分布与其他 2 种情况相比较为均匀，有利于整个桩身受力。但从轴力传递模式看，变截面比也不宜过大，因为轴力值突变明显，并且最大值出现在变截面附近的小桩侧，不利于桩身的受力和稳定。

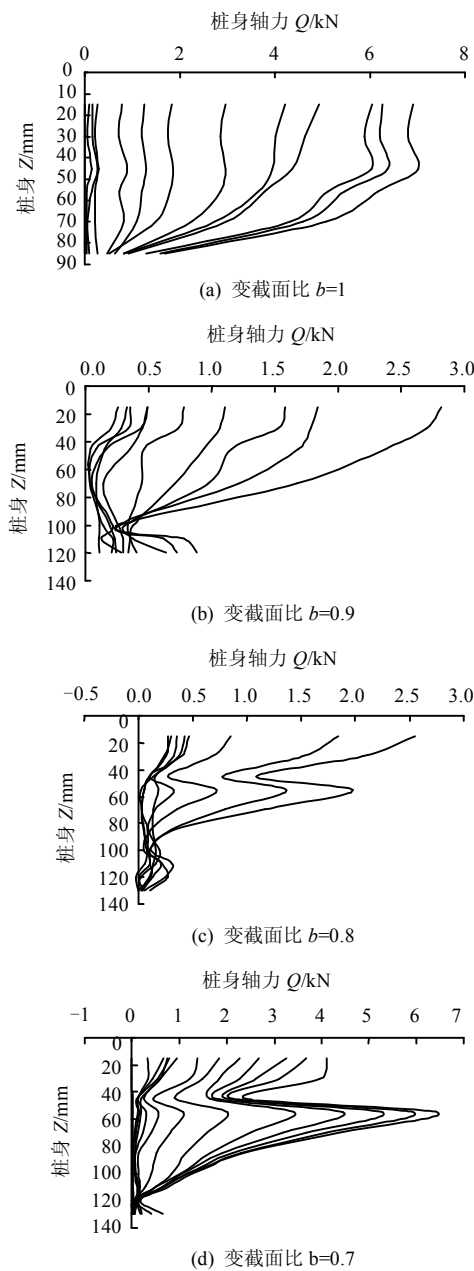


图 7 单桩轴力传递曲线

Fig.7 Transmissions of axial force in single pile

2.2.3 桩侧摩阻力

从图 8 可以看出，摩阻力合力大小依次为变截面比为 1.0，0.9，0.7，0.8 的桩，整体上摩阻力大小还是与桩-土接触面大小成正比的，估计在相同的材料中，在桩达到极限状态位移之前，变截面对桩土挤土效应增加摩阻力是有限的，也进一步证实靠桩土挤土效应提高桩侧摩阻力是以牺牲桩顶和桩身位移为代价的，桥梁变截面桩设计不受竖向承载特性控制。

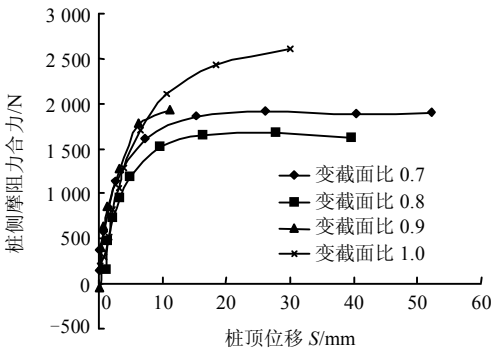


图 8 桩顶沉降和桩侧摩阻力关系曲线

Fig.8 Relationships between the top settlement of the piles and skin friction

2.2.4 桩的破坏模式和桩挤土效应分析

图 9 中，上面两条曲线为桩端土压应力曲线，下方 3 条为变截面处土压应力曲线，鉴于图 9(a)没有变截面，为便于比较，采用图 7(a)曲线为距离桩顶相同位置处，即距离桩顶 50 cm 处的土压应力曲线。

图 9(a)为变截面比等于 1.0 的等截面桩，距离桩顶 50 cm 量测到的土压应力基本为 0，起始段桩-土相互作用呈现典型的非线性，临塑荷载对应的位移约为 3 mm，并且以此为界曲线可以分为两段，前段与后段相比，前段切线斜率大，体现桩端土压密的过程，后段呈现典型的桩-土非线性。

图 9(b)为变截面比等于 0.9 的变截面桩，由于在试验过程中突然停电，测试曲线出现异常。但 30 mm 以前的曲线也能反映桩-土的相关作用。桩端曲线同样具有两段特性，在小变形情况下，变截面处桩-土相互作用并不明显，只是当位移达到较大值，大于 60 mm 时才出现明显的线性增加。

图 9(c)为变截面比等于 0.8 的变截面桩，起始段桩端土的挤密效应没有明显体现，但仍旧可以看出典型的桩-土相互作用的非线性段，极限位移约为 8 mm，后期整个过程桩端与变截面处土压力增量基本为线性。

图 9(d)为变截面比等于 0.7 的变截面桩, 起始端桩段土非线性段非常明显, 极限位移约为 2 mm, 后期整个过程桩端与变截面处土压力增量基本为线性。变截面处桩-土相互作用明显。

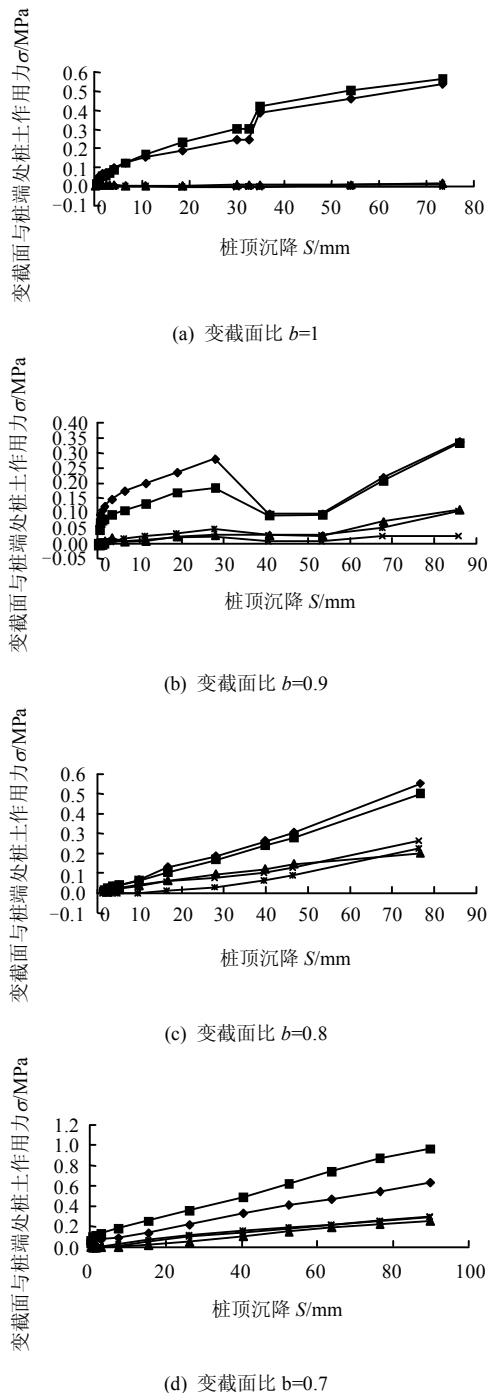


图 9 桩顶沉降和桩端、变截面处桩-土作用应力
Fig.9 Relationships between the top settlement and stress of the end

从图 9 中 4 种情况下的桩顶位移和桩端、变截面处量测到的土压力关系曲线来看, 在试验所采用的均一介质中, 随着变截面比的减小, 变截面处桩-土相互作用明显, 桩端呈现典型的桩-土作用非线性

性, 但随着桩顶位移的增加, 发生刺入土体, 桩端刺入破坏, 桩-土相互作用呈现明显的线性特性, 桩端土呈现硬化特性。

3 竖向承载力设计理论分析

文献[10]规定: 单桩承载力应通过现场载荷试验确定, 初步设计时可取桩侧摩阻力和桩端阻力之和, 但应不小于桩身材料的强度, 确定单桩承载力, 否则取桩身材料强度确定单桩承载力。根据单桩破坏模式刺入破坏或者桩身破坏确定单桩承载力。文献[11]规定: 单桩(包括管桩)的轴向容许承载力应分别按桩身材料强度和岩土阻力进行计算, 取其较小者。

文献[5]给出变径桩刺入破坏时的单桩承载力计算公式:

$$f_p = \pi d \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \pi d \sum_{j=1}^n q_{sj} l_j + \frac{\alpha_1 q_{p1} \pi (D^2 - d^2)}{4} + \frac{\alpha_2 q_{p2} \pi d^2}{4} \quad (1)$$

式中各符号含义见文献[5]。

根据模型试验观测结果看, 根据变截面处破坏模式, 即变截面处破裂面实际出现在土体里面。可以简化为图 10(c), 土楔体大小与变截面比 b 值关系较大。故此变截面处土体的支撑力和摩阻力实际为土体按照被动极限平衡理论计算的破裂面上摩阻力合力沿竖向的分力。现假定桩顶直径为 D , 则桩端直径为 bD , 变径大小为 $D(1-b)$, 形成的破裂面与竖向方向夹角为 β , 则整个破裂面的长度为 $D(1-b)/\sin\beta$, 设破裂面上土体的强度取室内试验的残余强度为 τ , 则总的强度为 $\tau D(1-b)/\sin\beta$, 亦即沿破裂面方法的合理, 故此段提供的桩承载力为 $\tau D(1-b)/\tan\beta$ 。当发生刺入破坏时, 变截面处土体到达极限平衡状态时, 对应的极限承载力为

$$f_p = \pi b D \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \pi D \sum_{j=1}^k q_{sj} l_j + \tau D(1-b) \tan\beta + \frac{\alpha_1 q_{p2} \pi d^2}{4} \quad (2)$$

式中: b 为变截面比; D 为桩顶直径, (m); β 为变截面处形成的破裂面, 可以近似取土体的内摩擦角; τ 为变截面处土体的残余强度; n 、 k 分别为变截面上、下划分的桩的土层数, 但此处应考虑减去由于变截面产生的土体破裂面长度; q_{si} 为第 i 层土的极限桩侧摩阻力, (kPa); l_i 、 l_j 分别为变截面下、上土层厚度, (m); q_{p2} 为桩端天然地基的极限承载力,

(kPa); α_1 为桩端天然地基承载力的折减系数, 可以根据相关设计规范确定。

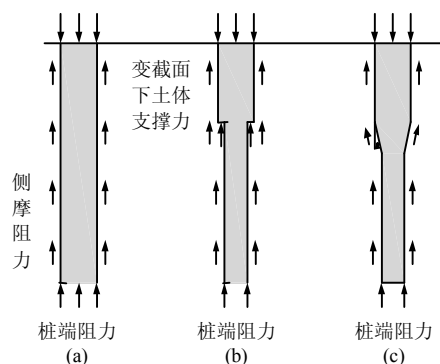


图 10 单桩竖向受力图

Fig.10 Sketches of load of single pile

4 结 论

(1) 在桩顶截面相同的情况下, 变截面桩竖向承载特性受变截面比影响显著, 变截面比越小, 竖向极限承载力越小。在模型试验的情况下不存在最优变截面比, 变截面比设计受桩横向受力特性的控制和桩所处地层特性控制。

(2) 变截面处土体挤土效应的发挥是以牺牲桩顶位移为代价, 只有到达一定桩身位移时, 才体现明显的挤土效应, 使承载力提高。

(3) 鉴于挤土效应的发挥需要产生一定的位移, 在选用变径搅拌桩作为软土地基处理时, 宜配合采用超载预压措施, 增加桩顶位移, 以提高其承载力和处理效果。

(4) 根据模型试验变截面破坏模式, 对变截面桩竖向承载力的计算公式进行了改进。

参 考 文 献

- [1] 王伯惠, 上官兴. 中国钻孔灌注桩新发展[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 易耀林, 刘松玉, 杜延军. 路堤荷载作用下钉形搅拌桩复合地基附加应力扩散特性[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 8—14.
YI Yao-lin, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Additional stress distribution behavior of t-shaped deep mixed column composite foundation under embankment load[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(5): 8—14.
- [3] 易耀林, 刘松玉, 杜延军. 路堤钉形搅拌桩复合地基沉降计算方法—广义桩体法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1180—1188.
YI Yao-lin, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Generalized column method for calculation of settlement of t-shaped deep mixed column composite foundation under embankment load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(8): 1180—1188.
- [4] 易耀林, 刘松玉, 杜延军, 等. 变径水泥土搅拌桩单桩承载力试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 352—356.
YI Yao-lin, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Field tests on bearing capacity of single diameter-varied soil-cement deep mixed column[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(2): 352—356.
- [5] 卢成原, 孟凡丽, 王章杰, 等. 非饱和粉质粘土模型支盘桩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 522—525.
LU Cheng-yuan, MENG Fan-li, WANG Zhang-jie, et al. Test of model piles with branches and plates in unsaturated silty clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 522—525.
- [6] 钱德玲, 李辉, 卢文胜, 等. 变截面桩基础体系高层建筑结构的地震响应[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 98—103.
QIAN De-ling, LI Hui, LU Wen-sheng, et al. Seismic response of high-rise structures by different foundation systems[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(1): 98—103.
- [7] 曹文贵, 刘成学, 赵明华. 变截面桩的屈曲分析[J]. 湖南大学学报, 2004, 31(3): 56—58.
CAO Wen-gui, LIU Cheng-xue, ZHAO Ming-hua. Buckling analysis of the variable section piles[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2004, 31(3): 56—58.
- [8] 刘杰, 张可能. 刚性承台下变截面柔性桩与地基相互作用的线性分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 759—763.
LIU Jie, ZHANG Ke-neng. Linear analysis of interaction of flexible piles with variable cross section and ground soil under rigid pile cap[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(5): 759—763.
- [9] 刘杰, 张可能. 柔性群桩承台下变截面角桩与地基相互作用的线性分析[J]. 水文地质工程地质, 2003, 1: 13—17.
LIU Jie, ZHANG Ke-neng. Linear analysis of interaction for corner piles and soil under flexible grouped piles cap[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 1: 13—17.
- [10] 中国建筑科学研究院. JGJ79-2002《建筑地基处理技术规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [11] 铁道第三勘测设计院. TB10002.5-2005《铁路桥涵地基和基础设计规范》[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.