

JPP 桩不同组合水平承载性能模型试验研究

任连伟, 顿志林, 李 果, 詹俊峰

(河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 高喷插芯组合桩(简称 JPP 桩)是一种新型复合材料桩, 实现了刚性桩的效果、柔性桩的成本, 在基坑支护等工程中得到应用, 但其水平承载性能的研究落后于工程实践。为了研究不同组合形式的 JPP 桩水平承载特性, 利用自主研制的桩基模型试验加载系统进行了 4 种不同组合形式下 JPP 桩水平荷载试验, 研究表明: 分段组合 II 的水平承载能力最高, 上组合与分段组合 I 相近, 下组合的水平承载能力最低, 表明越多的分段组合呈现出整体承受水平荷载的能力。桩身最大弯矩出现在距离桩顶以下 3~4 倍芯桩桩径处, 该部位相对薄弱, 易发生破坏。地面下一定深度范围内的土体特性将直接影响着桩的水平承载能力。

关 键 词: JPP 桩; 模型试验; 分段组合; 水平承载力; 桩身弯矩

中图分类号: TU 473.1+1

文献标识码: A

Model tests research on horizontal bearing behavior of JPP pile under different combinations

REN Lian-wei, DUN Zhi-lin, LI Guo, ZHAN Jun-feng

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: Jet grouting soil-cement-pile strengthened pile (JPP for short) is a new type pile which is composite of jet grouting pile and prestressed concrete core pile, and achieving the powerful effect of rigid pile and low cost of flexible pile. JPP pile is used in excavation protection and other engineering, but its research on horizontal bearing behavior falls behind the engineering practice. In order to study the horizontal bearing behaviors of different combinations JPP pile, horizontal load model tests are carried out by using the home-made model test pile loading system. The test results show that: sub-portfolio II carries maximum capacity, combined with the sub-portfolio I close, under combination carries the lowest capacity level, so the more sub-portfolio combination shows that the overall horizontal bearing capacity appears. Maximum moment of JPP pile occurs at the position of 3 to 4 times diameter under core pile top and this site is relatively weak and prone to damage. So we can conclude that the soil characteristics within a certain depth below the soil surface will have a direct impact on the horizontal bearing capacity.

Key words: JPP pile; model test; segment combination; horizontal bearing capacity; pile moment

1 引 言

复合材料桩是一种新型组合桩, 桩身由两种或两种以上材料组成, 是最近几年地基基础发展的一个趋势。典型的复合材料桩有 Pin Pile^[1]、复合灌注桩^[2], SMW 工法^[3]以及劲性搅拌桩^[4]。高喷插芯组合桩^[5](简称 JPP 桩)属于复合材料桩的一种, 它由高压旋喷水泥土桩和预应力混凝土桩组合而成, 实现了刚性桩的效果、柔性桩的成本。

由于 JPP 桩具有刚性桩的效果, 其在基坑支护

等工程中应用也越来越多, 但其水平承载性能相关的研究和优化设计落后于工程实践, 不同组合形式下 JPP 桩水平承载特性有待进一步掌握, 所以开展 JPP 桩水平承载特性相关研究是非常有必要的。

桩的水平承载特性研究主要有两种方法, 一种是理论法, 但无论是弹性理论法、张氏法, 还是 K 法、m 法^[6]、C 法、双参数法^[7]、 p - y 曲线法^[8], NL 法^[9]都由于加入了一些假设, 往往与实际情况产生较大的偏差; 另一种是试验法: 有现场水平荷载试验^[10]、足尺模型试验^[11-13]、室内模型试验^[14-16], 通

过埋设在桩中的测量仪器可以直观掌握桩的水平承载特性,但存在试验过程复杂、费用高等缺点。

本试验通过埋设在 JPP 桩身应变片、桩身土压力盒等检测仪器对不同组合形式下的 JPP 桩水平承载性能进行了研究,研究成果为 JPP 桩优化设计和进一步推广提供理论参考。

2 模型试验准备

2.1 试验设备

2.1.1 模型槽

本次试验模型槽采用河南理工大学结构试验大厅的大型钢结构反力装置,槽壁用木结构围挡,槽壁一面安设有 60 cm 宽有机玻璃,竖向通长布设,便于观察土的基本性质。模型槽的尺寸为 2 m×2 m×1.5 m。图 1 为模型槽全景图。由于本试验的模型桩的水平承载力不大,利用加固后的模型槽槽墙来提供水平反力。



图 1 模型槽全景图
Fig.1 Full view of model test system

2.1.2 加载系统

本试验中,水平推力通过手动螺旋式千斤顶施加,最大行程为 30 cm,所能提供的最大荷载 32 t,其大小通过上海振丹传感器仪表厂生产的 YLR-3 型荷重传感器和 LMS-1 电脑马歇尔稳定度试验仪读取,来调节控制。为实现千斤顶推力水平加载,在千斤顶和桩头之间放置一钢球。

2.1.3 量测系统

本试验中,使用位移传感器、荷重传感器、土压力盒和应变片等检测仪器,其中应变片用来测读桩身不同位置的拉压应变,通过材料力学公式换算得出不同位置处的桩身弯矩。其应变数据由江苏泰斯特 TST3826 静态应变测试系统采集,采用相应的软件由电脑读取出来。在桩头架设两个位移传感器,该位移传感器的位移数据采用 DM-201 多通道数据采集,然后传输到电脑,通过相应软件读取并记录。

2.2 模型试验

2.2.1 桩体的平面布置

高喷插芯组合桩有多种组合形式,为了作对比分析,制作了同直径、同水泥土长度 4 根组合形式的 JPP 桩。本次试验使用的 JPP 桩是上组合、下组合、分段组合 I 和分段组合 II 4 种组合形式,4 根桩的桩长均为 100 cm,水泥土的长度均为 60 cm,芯桩直径为 11 cm,组合段直径为 20 cm。4 根桩平面布置见图 2,4 根不同组合形式 JPP 桩相关尺寸如图 3 所示,应变片粘贴位置如图 4 所示。

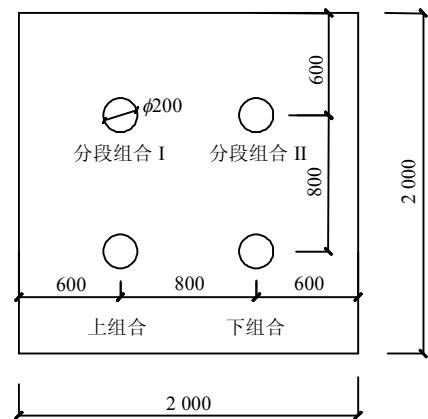


图 2 四根 JPP 桩平面布置 (单位: mm)
Fig.2 Plan layout of four JPP piles (unit: mm)

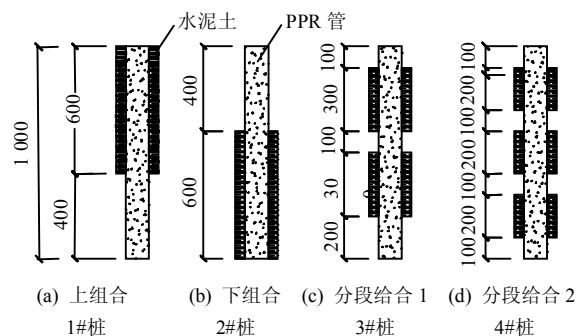


图 3 JPP 桩的 4 种组合形式
Fig.3 Four combinations of JPP pile

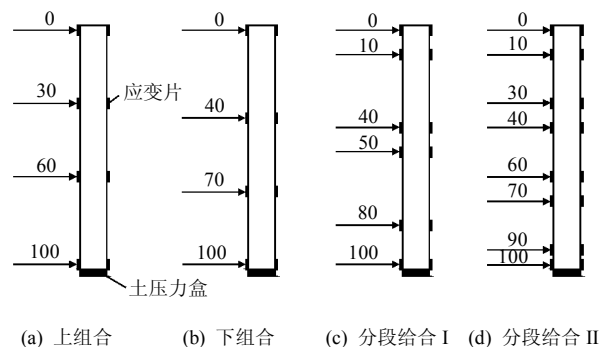


图 4 桩身的应变片粘贴位置示意图 (单位: cm)
Fig.4 Attached schematic of strain gauges (unit: cm)

2.2.2 土体和桩体的选择

本次试验所用土选自焦作某一住宅小区基坑内,属于黏性土。在模型槽内通过人工分层填筑、整平压实的方法来填筑土料。在填土结束 3 个月后,土压力值基本稳定,孔隙水也基本不再排出。然后,在模型槽取土进行室内物理力学性质试验,试验结果见表 1。

表 1 模型槽土料基本物理力学性质
Table 1 Physico-mechanical properties of soils

项目	w/ %	ρ / (g/cm ³)	c/ kPa	φ /(°)	E_s / MPa	E/ MPa
黏土	29.1	1.93	24.5	28.3	4.68	
水泥土						490

用外径为 110 mm,内径为 78 mm,壁厚为 16 mm,极限抗拉强度为 35 MPa,弹性模量为 801 MPa 的 PPR 管模拟 JPP 桩中的芯桩,按水:灰:土=2:3:12 这个配比搅拌水泥土,水泥土厚度为 45 mm。采用与模型槽内一样的黏土,经过 10 mm 筛盘进筛选,水泥为普通的硅酸盐水泥,标号为 325R,采用实验室自来水。制作试样,总共 4 组每组 3 个,总共 12 个。在标准养护箱进行养护 28 d,然后进行无侧限抗压强度试验,得到水泥土的平均抗压强度为 2.45 MPa 根据相关的经验公式水泥土弹性模量取 490 MPa。

2.2.3 土体和桩体的埋设方法

由于模型槽操作空间有限,为了近似模拟 JPP 桩施工时芯桩插入高压旋喷水泥土桩这一挤土效应,采取模板上拔出土层后,振捣水泥土,使水泥土向桩周土挤压的方式来浇筑水泥土。

施工方法以分段组合 I 为例,如图 5 所示。

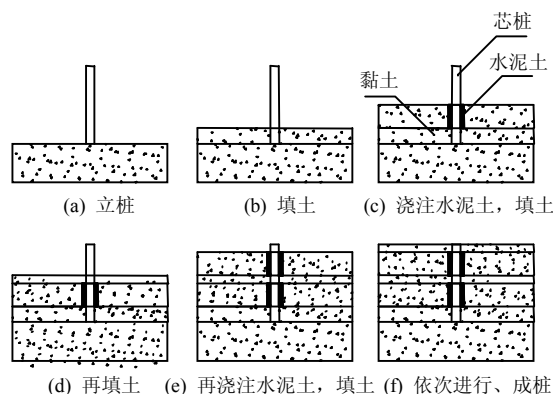


图 5 模型槽中 JPP 桩施工示意图
Fig.5 Construction process of JPP pile

施工顺序如下:①填 50 cm 厚桩端土体,整平

压实,芯桩定位;②填筑 20 cm 厚土体,整平压实;③20 cm 直径的 PVC 管立模定位(与芯桩同心),填筑 30 cm 厚土体,整平压实;然后,浇筑水泥土,振捣密实;④立模往上拔出土层,然后再振捣水泥土,使水泥土与桩周土充分接触;填土高 10 cm,整平压实;⑤立模再定位,填筑 30 cm 厚土体,整平压实,浇筑水泥土,振捣密实;⑥立模往上拔出土层,然后再振捣水泥土,填筑土体,重复④、⑤,直至浇筑成桩。

其他 3 根桩的施工方法与上述 JPP 桩的施工方法相同。

2.2.4 加载方式设计

本试验参照规范^[17],采用快速维持加载的方式,桩头自由。第 1 级荷载为 0.1 kN,此后每级荷载增量为 0.1 kN,稳定后测读水平位移,同时测读应变片的读数。

3 试验结果分析

3.1 临界荷载和极限荷载

不同组合形式的 4 根 JPP 桩水平力 H_0 -位移 X_0 曲线如图 6 所示;水平力 H_0 -位移梯度 $\Delta X_0/\Delta H_0$ 关系曲线如图 7~10 所示,表现为 3 条斜率依次递增的直线,由此所产生的 2 个突变点即分别对应临界荷载和极限荷载。

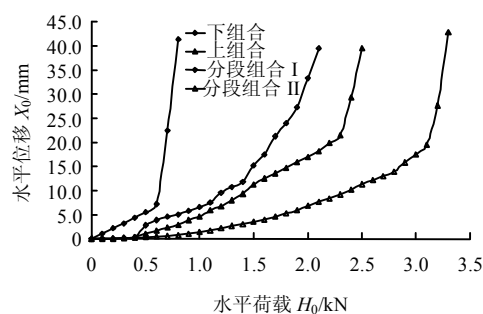


图 6 4 根桩水平荷载 H_0 -水平位移 X_0 曲线
Fig.6 Horizontal load H_0 -horizontal displacement X_0 curves of four different piles

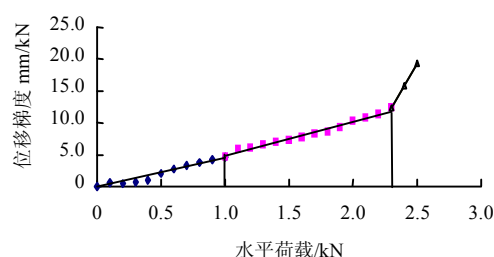


图 7 上组合桩水平力-位移梯度曲线
Fig.7 Horizontal force-displacement gradient of JPP Pile with upper combination

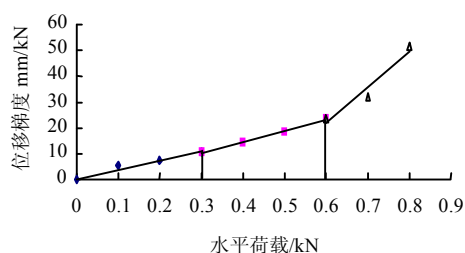


图 8 下组合桩水平力-位移梯度曲线

Fig.8 Horizontal force-displacement gradient of JPP pile with under combination

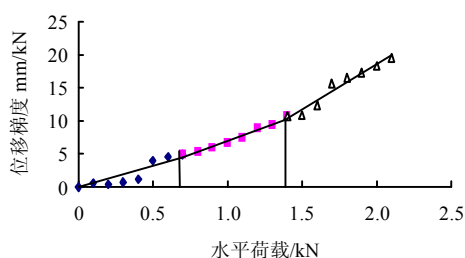


图 9 分段组合 I 桩水平力-位移梯度曲线

Fig.9 Horizontal force-displacement gradient of JPP pile with segmented combination I

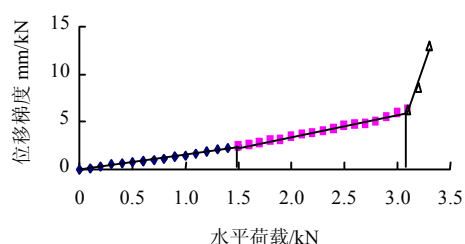


图 10 分段组合 II 水平力-位移梯度曲线

Fig.10 Pile horizontal force-displacement gradient of JPP pile with segmented combination II

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中相关规定,由图 7~9 可以得出水平临界荷载 H_{cr} 和水平极限荷载 H_u ,以及相对应的水平位移,如表 2 所示。

表 2 4 种组合形式 JPP 桩水平承载力及相应位移
Table 2 Horizontal bearing capacity and displacement of four combinations for JPP pile

组合形式	临界荷载 H_{cr}/kN	水平位移 /mm	极限荷载 H_u/kN	水平位移 /mm
上组合桩	0.98	4.65	2.30	21.44
下组合桩	0.30	2.25	0.60	7.25
分段组合 I	0.69	4.66	1.40	11.79
分段组合 II	1.49	3.55	3.09	19.49

由表 2 对比可以得出如下结论:

(1) 下组合的水平承载能最差,由于下组合 JPP 桩上部没有水泥土的加固,桩顶直径较小,在施加水平荷载时下组合桩顶水平位移发展较快,水平承载力很快达到临界状态,桩的临界荷载与极限荷载很小。可见,下部水泥土对水平承载力贡献较小。

(2) 上组合与分段组合 I 的水平承载能力大幅上升,上组合是在桩顶以下 60 cm 范围内有 45 mm 厚的水泥土,在桩顶施加水平荷载时能够加大水泥土与桩周土的挤压面积,提高桩与桩周土的接触面积,使水平承载力得到较大提升;分段组合 I 是上端 30 cm 水泥土,中间间隔 10 cm,下端 30 mm 水泥土,上端的水泥土对水平承载能力贡献较大,另外,分段组合后,改善了 JPP 桩水平承载性能。但分段组合 I 的水平承载力小于上组合的水平承载力。

(3) 分段组合 II 是分段组合的第二种类型:1 m 长的桩以 3 个 20 cm 的水泥土均布桩外,这种组合能使芯桩与水泥土基本构成一个直径 20 cm 的组合桩, JPP 桩整体组合和承载性能更强,很好地结合了管桩的高强度与水泥土对桩周土的作用力,故其水平承载力最大。

(4) 分段组合 II 的水平临界荷载 H_{cr} 是分段组合 I 的 2.16 倍,是上组合的 1.52 倍,是下组合的 4.97 倍。可见,在实际工程中 JPP 桩宜设计成分段组合形式,并且 JPP 桩上部要有较多组合段,形成上部加强、葫芦形整体承载的结构形式。

3.2 桩身弯矩分布

通过桩身应变片的读数,利用材料力学原理计算出 4 种不同组合下的桩身弯矩,如图 11~14 所示。从图中可以看出,在水平荷载作用下,4 种组合桩桩身弯矩沿桩身的分布呈现先增大后减小的规律,弯矩值主要发生在桩身上半部,随着水平荷载的不断增大,弯矩也会逐渐增大。在水平荷载较小时,弯矩增大较慢,而超过一定的荷载后,弯矩值增加较快。在加荷过程中桩身最大弯矩点的位置几乎保持不变,其中上组合发生在桩顶以下 0.35 m 处左右的区域;下组合发生在桩顶以下 0.42 m 处左右的区域;分段组合 I 发生在桩顶以下 0.43 m 左右的区域;分段组合 II 发生在桩顶以下 0.35 m 处左右的区域。4 种 JPP 桩的最大弯矩大约都发生在 3~4 倍芯桩桩径处。说明各组合桩在相应的最大弯矩位置处桩体最为薄弱,在此区域桩体容易发生受拉破坏,应加强此处的水平承载性能以及此处以上的水泥土强度。

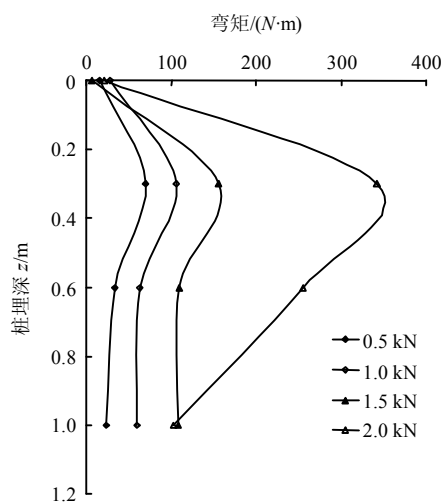


图 11 上组合桩身弯矩图

Fig.11 Bending moment diagram of JPP Pile with upper combination

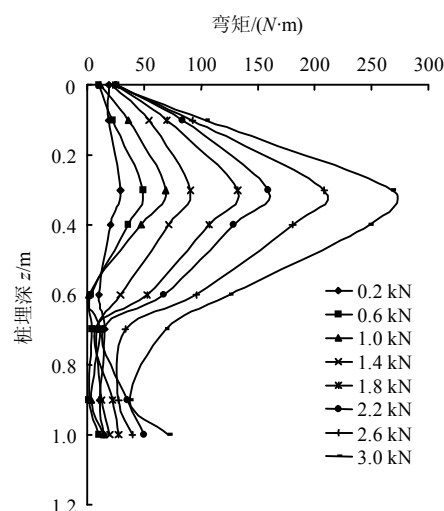


图 14 分段组合 II 桩身弯矩图

Fig.14 Bending moment diagram of JPP pile with segmented combination II

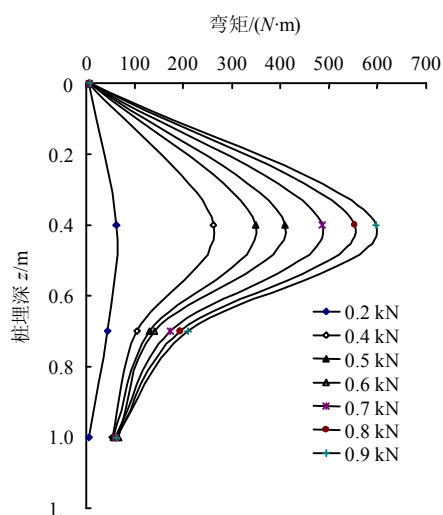


图 12 下组合桩身弯矩图

Fig.12 Bending moment diagram of JPP pile with under combination

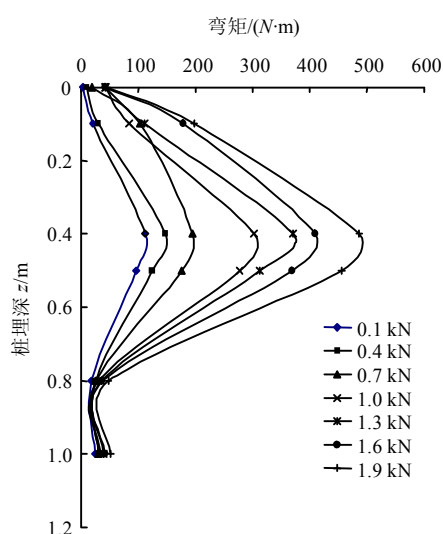


图 13 分段组合 I 桩身弯矩图

Fig.13 Bending moment diagram of JPP pile with segmented combination I

对比 4 种组合下桩身弯矩分布图还可以看出, 在最大桩身弯矩处, 下组合的荷载为 0.9 kN, 但桩身弯矩已经达到了 580 N·m, 而且每一级的桩身最大弯矩都比相同荷载下其他组合的弯矩大很多, 说明下组合桩顶在相同荷载产生的位移比同级荷载下其他组合都要大, 这与前面分析的临界荷载与极限荷载, 以及水平位移曲线可以相互印证。上组合与分段组合 I 水平承载能力相近, 最大弯矩相近。这是由于上组合上部水泥土为 60 cm 长, 分段组合 I 组合段在最大弯矩处与上组合一样都是在水泥土的加固作用下使 JPP 桩抗弯能力提升。分段组合 II 结合了芯桩抗弯强度高以及水泥土分段加固桩周土特性, 形成一个类似直径为 20 cm 的葫芦桩体承担水平荷载, 增强抗水平承载能力整体性, 因此, 在水平承载力上提升较大, 而且在水平荷载为 3.0 kN 时弯矩达到了 270 N·m, 显著提高了 JPP 桩的抗弯能力。

3 结 论

本文对 4 种不同组合形式的 JPP 桩进行了水平荷载模型试验, 对比分析了水平承载力、桩身弯矩、桩侧土压力等的大小和分布规律, 得出如下结论:

(1) 分段组合 II 具有更好的水平承载能力。分段组合 II 的水平临界荷载 H_{cr} 是分段组合 I 的 2.16 倍, 是上组合的 1.52 倍, 是下组合的 4.97 倍。可见, 在实际工程中 JPP 桩宜设计成分段组合形式, 并且 JPP 桩上部要有较多组合段, 充分发挥葫芦形整体承受水平荷载的性能。

(2) 桩身最大弯矩出现在桩顶以下 3~4 倍芯

桩桩径处, 该部位相对薄弱, 易发生破坏, 所以在此处以上范围内的桩周土应提高其强度, 并提高芯桩此范围内的抗弯能力。

(3) 桩顶下一定深度范围内的土体特性将直接影响着桩的水平承载力, 在工程中应加固上半桩身范围内的土体来提高水平承载力。

参考文献

- [1] XANTHAKOS P P, ABRAMSON L W, BRUCE D A. Ground control and improvement [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [2] 刘金砺, 刘金波. 水下干作业复合灌注桩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 536—539.
LIU Jin-li, LIU Jin-bo. Experimental study on dry-bored composite pile under groundwater[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 536—539.
- [3] 王健, 夏明耀, 傅德鸣. H 型钢与水泥土搅拌桩维护护的设计与计算[J]. 同济大学学报, 1998, 26(6): 636—639.
WANG Jian, XIA Ming-yao, FU De-ming. Design and calculation of c structure with H shaped steel and cemented-soil-pile[J]. **Journal of Tongji University**, 1998, 26(6): 636—639.
- [4] 凌光容, 安海玉, 谢岱宗, 等. 劲性搅拌桩的试验[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 92—96.
LING Guang-rong, AN Hai-yu, XIE Dai-zong, et al. Experimental study on concrete core mixing pile[J]. **Journal of Building Structures**, 2001, 22(2): 92—96.
- [5] 任连伟, 刘汉龙, 雷玉华. 高喷插芯组合桩技术及其应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 518—522.
REN Lian-Wei, LIU Han-long, LEI Yu-hua. Technology and application of JG soil-cement-pile strengthened pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(Supp.): 518—522.
- [6] FAN H J, LIANG R Y. Performance-based reliability analysis of laterally loaded drilled shafts[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2013, 139(12): 2020—2027.
- [7] 戴自航, 沈蒲生, 张健伟. 水平梯形分布荷载桩双参数法的数值解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2632—2638.
DAI Zi-hang, SHEN Pu-sheng, ZHANG Jian-wei. Numerical solution of piles under lateral load of trapezoid-distribution by biparameter method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2632—2638.
- [8] 张建伟, 刘汉龙, 戴自航. 分布荷载推力桩计算的 $p-y$ 曲线法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3370—3374.
ZHANG Jian-wei, LIU Han-long, DAI Zi-hang. Study of $p-y$ curve method for computing laterally loaded piles under horizontally distributed loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3370—3374.
- [9] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法—NL 法[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 98—102.
YE Wan-ling, SHI Bei-ling. A practical non-linear calculation in method of piles lateral bearing capacity—NL method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(2): 98—102.
- [10] 王俊林, 王复明, 任连伟, 等. 大直径扩底桩单桩水平静载试验与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1406—1411.
WANG Jun-lin, WANG Fu-ming, REN Lian-wei, et al. Horizontal static load test and numerical simulation of single large diameter under-reamed pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(9): 1406—1411.
- [11] 刘汉龙, 张建伟, 彭劼. PCC 桩水平承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 161—165.
LIU Han-long, ZHANG Jian-wei, PENG Jie. Full-scale model test for the behavior of cast-in-place concrete large diameter pipe pile under lateral load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(2): 161—165.
- [12] 郑浩, 刘汉龙, 雷玉华, 等. 高喷组合插芯桩水承载特性大尺寸模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 31(1): 217—223.
ZHENG HAO, LIU HAN-long, LEI Yu-hua, et al. Large-scale model test analysis of behaviors of jet grouting(JG) soil-cement-pile strengthened pile under lateral load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 31(2): 217—223.
- [13] 张敏霞, 丁选明, 陈育民. 现浇 X 形混凝土桩竖向承载特性试验及其极限承载力预测[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 267—271.
ZHANG Min-xia, DING Xuan-ming, CHEN Yu-min. Test on vertical behavior of cast-in-situ X-shaped concrete pile and its ultimate bearing capacity prediction[J]. **Journal of China coal society**, 2011, 36(2): 267—271.