

文章编号:1673-2049(2012)03-0049-06

现浇 X 形群桩竖向抗拔特性及影响因素分析

孔纲强^{1,2}, 丁选明^{1,2}, 陈育民^{1,2}, 杨 贵^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:结合南京某污水处理厂软基处理工程,开展了现浇 X 形钢筋混凝土桩(简称 X 形桩)单桩竖向抗拔承载力现场试验,测得了荷载-位移关系曲线;基于 FLAC3D 软件建立了竖向上拔荷载作用下 X 形单桩、群桩特性分析的数值模型,并与现场单桩抗拔试验结果进行对比分析;比较研究了与等效圆形截面桩抗拔承载力的差异,并分析了基桩长度、桩-土摩擦因数以及基桩位置等因素对 X 形群桩力学特性的影响规律。研究结果表明:X 形桩竖向抗拔承载力与其等外包直径的圆形截面桩承载力相近,较等混凝土用量的圆形截面桩承载力提高了近 17.4%。

关键词:软土地基;现浇 X 形桩;抗拔承载力;群桩;轴力;摩擦因数

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Vertical Uplift Capacity Characteristics and Influence Factor Analysis of Cast-in-situ X-section Reinforced Concrete Pile Group

KONG Gang-qiang^{1,2}, DING Xuan-ming^{1,2}, CHEN Yu-min^{1,2}, YANG Gui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai

University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: Based on Nanjing Sewage Treatment Plant soft ground improvement engineering, field tests of X-section cast-in-situ reinforced concrete pile (referred to as XCC pile) under vertical uplift bearing capacity were carried out, in which the relation curves of load-displacement were measured. Numerical models for XCC single pile and pile group under uplift load were built by using FLAC3D software. The simulation result was compared with single pile field test result. Comparing analysis with the bearing capacity of circular piles under uplift load was carried out. Then, the mechanical properties of XCC pile group which were influenced by pile length, pile-soil friction coefficient and pile position were analyzed and discussed. The study results show that the vertical uplift bearing capacity of XCC pile is relatively equals to that of circular pile with the same out-diameters, nearly 17.4% larger than that of circular pile with the same concrete volumes.

Key words: soft soil foundation; cast-in-situ XCC pile; uplift bearing capacity; pile group; axial force; friction coefficient

收稿日期:2012-06-20

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1134207);国家自然科学基金青年科学基金项目(51008116)

作者简介:孔纲强(1982-),男,浙江金华人,副教授,工学博士,E-mail:gqkong1@163.com。

0 引言

桩承式(或桩-网组合)处理软土路基结构形式,由于其处理软弱土地基效果好,工后沉降小,施工便捷等技术经济优势,逐渐得到了工程界的广泛应用^[1-4]。现浇 X 形钢筋混凝土桩(简称 X 形桩)技术是将传统圆形灌注桩横截面形状改良为类似“X”字母形状的横截面形式,通过增加混凝土比表面积、桩-土接触面积的方式来提高桩侧摩阻力的新型桩^[5]。由于其施工效率高、工后总沉降和差异沉降小、处理费用低等综合优势,而被广泛地应用于长江三角洲地区高速公路、高速铁路、岸堤及工业厂区等软土地基处理工程中^[6]。法国 Soletach 公司首先提出壁板桩处治方法,其横截面一般为矩形,有时为了更好地承受外部荷载或与地基上部柱的排列相协调,十字形、T 形、Y 形、L 形、I 形和 H 形等截面形式也被采纳^[7]。杨敏等^[8]针对几种异形截面桩进行了技术特性和承载力特性比较分析,并指出异形桩在理论上可行,其设计及检测等方法有待进一步研究完善。

近年来,各国学者针对 X 形桩进行了研究并取得了一定的成果:刘汉龙等^[9]针对 X 形桩横截面几何尺寸进行分析,探讨了桩周长(桩-土接触面)、惯性矩等几何性状与开弧间距、外包圆直径以及开弧角度等参数之间的关系。王智强等^[10]针对 X 形桩的单桩竖向抗压受力特性,进行了大型模型槽试验研究,并与等混凝土用量圆形截面桩进行了对比试验分析。笔者结合现场土性参数和大型模型槽试验情况,基于数值分析软件对 X 形群桩竖向抗压承载力特性进行了研究,并分析了基桩位置、桩-土模量比、桩-土摩擦因数等因素对群桩承载力以及群桩效应的影响^[11]。袁估^[12]基于大型模型槽试验和有限元软件,对在水平向荷载作用下 X 形单桩受力特性进行了分析,并得到了一些有益的结果。雍君等^[13]针对 X 形桩的单桩竖向抗拔特性进行了大型模型槽试验研究,并与等混凝土用量圆形截面桩进行了对比试验分析,有效地验证了等体积混凝土用量条件下,X 形桩竖向抗拔承载力比普通圆形截面桩要提高 24% 左右。尽管对 X 形桩受力特性进行了一定的研究^[14-17],但是针对其抗拔承载力特性方面的研究却相对较少,尚无针对 X 形群桩竖向抗拔承载力进行研究的报道。

本文中结合江苏南京某污水处理厂软基处理工程,开展了 X 形桩单桩竖向抗拔承载力现场试验,

测得了荷载-位移关系曲线;基于 FLAC3D 软件建立了竖向上拔荷载作用下 X 形单桩、群桩特性分析的数值模型,并与现场试验结果进行对比分析;研究了其与等效圆形截面桩抗拔承载力的差异,并分析了基桩长度、桩-土摩擦因数以及基桩位置等因素对 X 形群桩力学特性的影响规律。

1 现场试验

1.1 工程概况及土性参数

该拟建污水处理厂场地位于拟建的苏宁威尼斯水城的北侧,南京市浦泗路南侧,地面吴淞高程约 7.5 m,场地地貌单元为长江漫滩。场地地下水属浅水,地下水稳定水位埋深在地面下 1.89~2.11 m(吴淞高程为 5.25~5.99 m),含水层主要为填土层及新近沉积土层,其富水性、透水性各不相同,变幅为 0.5~1.0 m。场地无可液化土层分布,无岩溶、土洞等不良地质作用存在。现场地面平整、土层分布均匀,具体土性参数如表 1 所示;现场土体 CPT 测试比贯入阻力如图 1 所示。

表 1 现场试验场地土性参数

Tab. 1 Soil Parameters in Field Test Site

土层编号	土层名称	厚度 h'/m	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	孔隙比 e
①	素填土	0.20				
② ₂	淤泥质粉质粘土	1.30	38.60	17.60	3.50	1.11
② _{2A}	粉砂	1.00	25.30	19.20	10.77	0.70
② ₂	淤泥质粉质粘土	1.50	38.60	17.60	3.50	1.11
② _{2B}	粉砂	1.80	26.10	19.30	8.00	0.71
② ₂	淤泥质粉质粘土	2.30	38.60	17.60	3.50	1.11
② ₃	细砂	9.40	26.30	18.90	11.83	0.76

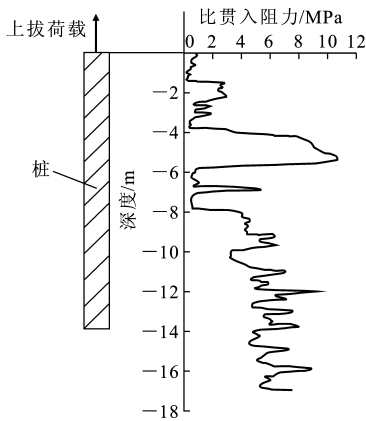


图 1 现场试验场地土性 CPT 测试结果

Fig. 1 CPT Tested Results of Soil for Field Test Site

1.2 工程桩概况

基于文献[5]中的 X 形桩专利技术方法进行现场工程桩施工,施工机具及桩模横截面如图 2 所示, X 形桩截面尺寸及桩长如表 2 所示。钢筋混凝土 X 形桩采用 C25 混凝土浇筑,钢筋笼主筋采用 4Φ12,箍筋采用 Φ6.5@300,钢筋距最外层混凝土间距不小于 250 mm。

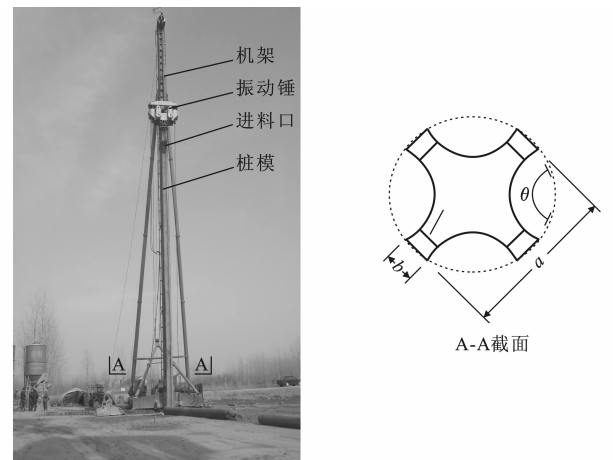


图 2 X 形桩打桩机及桩模截面
Fig. 2 XCC Pile Machine and Section Sizes

表 2 X 形桩截面尺寸

参数	数值
外包圆直径 a/m	0.53
开弧间距 b/m	0.11
开弧角 $\theta/(\text{^\circ})$	90
横截面积 S/m^2	0.142 5
周长 C/m	1.759
桩长 L/m	9.35

1.3 现场试验结果及分析

基于《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[18]对基桩进行静载荷试验,试验结果如图 3 所示,其中, Q 为桩顶竖向上拔荷载, s 为位移。由图 3 可知,工作荷载下, X 形桩单桩 Q - s 关系规律与普通圆形桩类似。

2 数值分析

2.1 模型建立与参数选择

基于 FLAC3D 软件,建立桩深 h 分别为 10, 15, 20 m, 桩身横截面外包圆直径 a 为 0.53 m, 开弧间距 b 为 0.11 m, 开弧角 θ 为 90°(等混凝土用量桩桩径为 0.426 m; 等外包圆桩桩径为 0.53 m), 桩周土为长江三角洲地区典型的可压缩性软粘土、桩端土为砂性土的概念模型。考虑模型的对称性,取 1/4

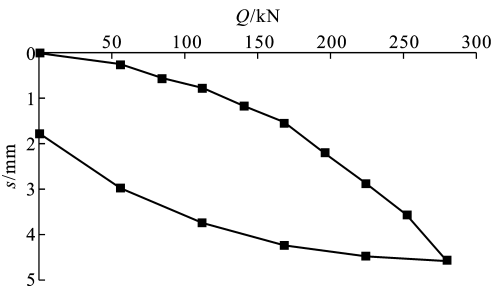


图 3 上拔荷载下 X 形桩 Q - s 关系曲线
Fig. 3 Q - s Relation Curves for XCC Pile Under Uplift Loads

模型作为计算域,具体几何模型及其有限差分网格如图 4 所示。根据现场土层分布和力学特性,把整体土层简化为软粘土层和砂性土层 2 大类,各层土体的力学特性、物理特性根据与厚度的加权平均数得到,具体的材料特性如表 3 所示。桩体采用各向同性弹性模型,土体采用摩尔-库仑弹塑性模型;桩-土接触面采用库仑滑动模型(侧向系数 k_s 、法向系数 k_n 取 $10^7 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{-1}$, 取不同的粘聚力 c_a 和内摩擦角 φ 来模拟不同的桩-土摩擦因数)。边界条件:上边界为自由边界;侧面边界为水平向滑动支座;底面边界为竖向滑动支座。假设地下水位位于地表。

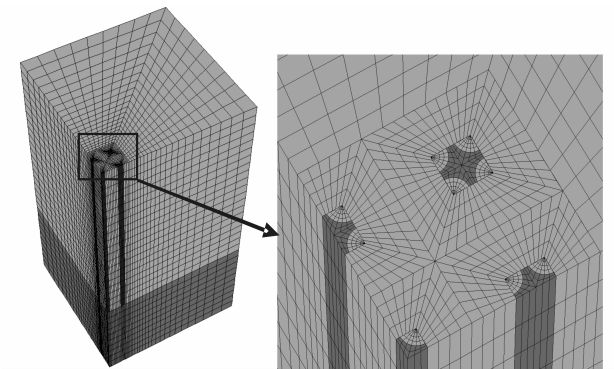


图 4 X 形群桩几何模型和有限差分网格(1/4 模型)
Fig. 4 Geometric Models and Typical Finite Difference Meshes for XCC Pile Group (1/4 Model)

表 3 数值模拟中桩、土体材料特性

Tab. 3 Material Properties of Pile and Soil Used in Numerical Simulation								
材料	本构模型	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\psi/(\text{^\circ})$	K_0	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
混凝土桩	各向同性弹性模型	28.50	0.2				1.00	26.0
软粘土	摩尔-库仑弹塑	5.45	0.3	3.0	15	0.1	0.65	18.2
砂性土	性模型	11.83	0.3	0.1	37	10.0	0.50	18.9

注: E 为弹性模量; ν 为泊松比; c 为粘聚力; φ 为膨胀角; K_0 为侧向系数。

2.2 数值与现场试验结果比较

基于现场 X 形桩竖向抗拔承载力特性试验现场土性参数,建立 X 形桩单桩数值模型,并进行对比分析;由于工程桩现场试验加载未达到极限状态,尚无法准确确定该桩极限值;但是根据工作荷载状态下桩顶 Q - s 关系曲线对比可知(图 5),利用本文数值模型分析 X 形桩竖向抗拔承载力特性是可行的。

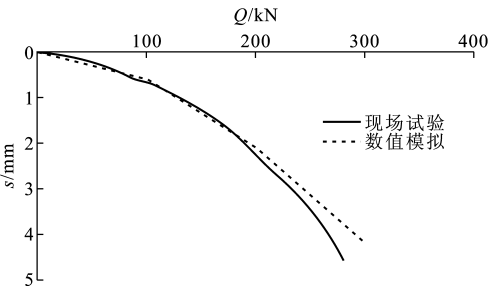


图 5 工作荷载状态下桩顶 Q - s 关系曲线对比
Fig. 5 Comparisons of Q - s Relation Curves of Pile Head Under Working Load

2.3 模拟工况

本文中建立了等外包直径和等混凝土用量的圆形截面桩的对比分析模型,并分析了不同桩长、桩-土摩擦因数作用下 X 形单桩、群桩的力学特性,具体数值模拟工况如表 4 所示。

表 4 数值模拟工况

Tab. 4 Conditions of Numerical Simulation				
桩型	X 形桩		圆形截面桩	
基础类型	单桩	群桩	单桩	单桩
桩长 L /m	10,15,20	20	20	20
桩径 D /m			0.426	0.530
桩间距 S' /m		1.704		
桩-土摩擦因数 u	0.2	0.2,0.3,0.4	0.2	0.2

3 影响因素分析

3.1 X 形桩与等效圆形截面桩的对比

图 6 为 $L=20\text{ m}$ 时 X 形桩与等效圆形截面桩桩顶 Q - s 关系曲线对比。由图 6 可以看出,竖向上拔荷载作用下 X 形桩的 Q - s 移曲线与等外包直径的圆形截面桩相类似;相同荷载作用下,较等混凝土用量圆形截面桩的位移量要小一些。X 形桩与其等外包直径的圆形截面桩及等混凝土用量的圆形截面桩的极限抗拔承载力分别为 1 350,1 350,1 150 kN。即相同混凝土用量条件下,X 形桩抗拔极限承载力较普通圆形截面桩提高了近 17.4%,此结论与文献[13]中的试验所得结果类似;相同抗拔承载力作用

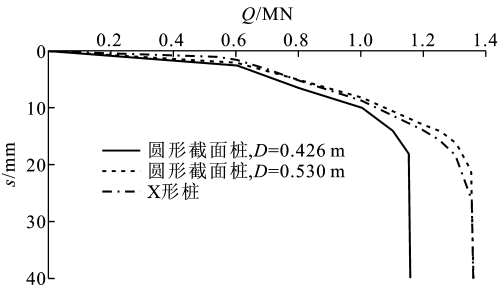


图 6 $L=20\text{ m}$ 时 X 形桩与等效圆形截面桩桩顶 Q - s 关系曲线对比

Fig. 6 Comparisons of Q - s Relation Curves of Pile Head Under Uplift Load for X-section Pile and Circular Piles When $L=20\text{ m}$

下,X 形桩的混凝土用量较普通圆形截面桩节省近 35.4%。

3.2 桩长的影响

图 7 为不同桩长情况下桩顶 Q - s 关系曲线。由图 7 可知,在不同桩长情况下,桩顶 Q - s 关系曲线规律相类似;随着桩长的增加,相同荷载作用下桩顶的位移量减小。由 Q - s 曲线所得到的极限抗拔承载力可知,X 形桩的极限抗拔承载力随着桩长的增加近似呈线性增长。

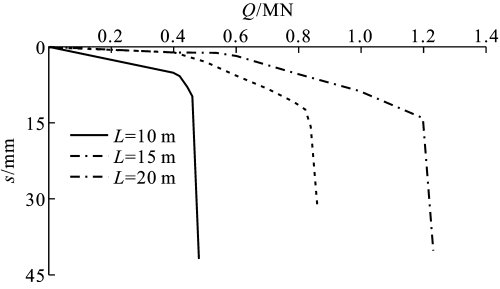


图 7 不同桩长情况下桩顶 Q - s 关系曲线
Fig. 7 Q - s Relation Curves of Pile Head Under Different Pile Length

3.3 桩-土摩擦因数的影响

图 8 为不同桩-土摩擦因素作用下角桩桩顶 Q - s 关系曲线。由图 8 可知,3×3 正方形布置 X 形群桩中的角桩在不同桩-土摩擦因数作用下桩顶 Q - s 曲线变化规律类似;相同上拔荷载下,随着桩-土摩擦因数的增加,桩顶位移量略有下降。图 9 为不同桩-土摩擦因素作用下桩身轴力 F 与桩深 h 关系曲线。由图 9 可知,不同桩-土摩擦因数情况下,桩身轴力沿桩深方向的分布规律基本一致。由此可见,典型长江三角洲地区软弱土地基中,X 形群桩在上拔荷载作用下,表现为整体拔出破坏形式。

3.4 基桩位置的影响

图 10 为不同基桩位置情况下桩顶 Q - s 关系曲

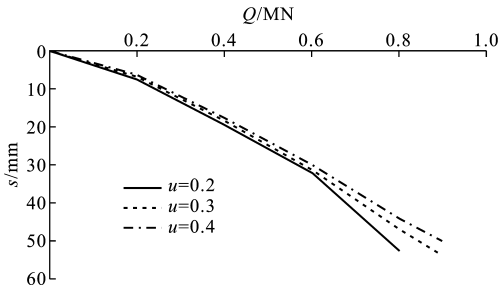


图 8 不同桩-土摩擦因数作用下角桩桩顶 Q - s 关系曲线
Fig. 8 Q - s Relation Curves of Pile Head Under Different Pile-soil Friction Coefficients

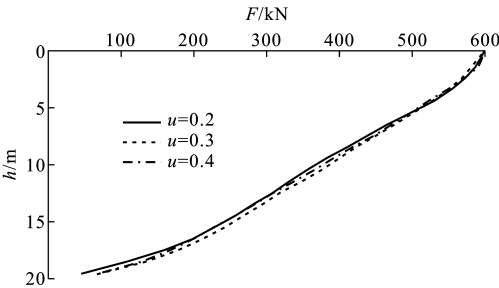


图 9 不同桩-土摩擦因数作用下中心桩桩身 F - h 关系曲线
Fig. 9 F - h Relation Curves of Pile Under Different Pile-soil Friction Coefficients

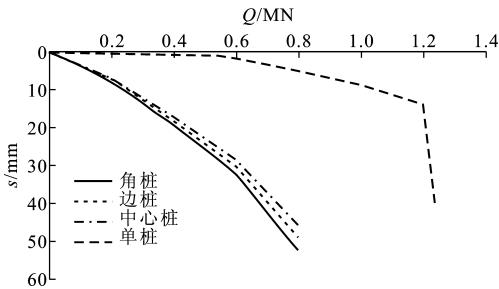


图 10 不同基桩位置下桩顶 Q - s 关系曲线
Fig. 10 Q - s Relation Curves of Pile Head Under Different Pile Locations

线。由图 10 可知,X 形群桩中角桩、边桩和中心桩的 Q - s 曲线规律类似,但与单桩形式相差较大;该特征在一定程度上说明软弱土中 X 形群桩的群桩效应较明显。图 11 为 $u=0.2$ 时不同荷载等级作用下桩身轴力沿桩深分布关系曲线。由图 11 可知,不同荷载等级作用下,桩身轴力沿桩深方向的分布规律基本一致,且随着荷载等级的增大而增大。

由图 7 还可知,X 形桩的极限抗拔承载力约为 1 350 kN,取安全系数为 2,X 形单桩的承载力特征值约为 600 kN。不同桩-土摩擦因数条件下,群桩中各位置基桩的桩顶位移量如表 5 所示。相同桩-土摩擦因数条件下,角桩桩顶位移量大于边桩、中心桩和单桩;相同位置桩,随着桩-土摩擦因数的增大,

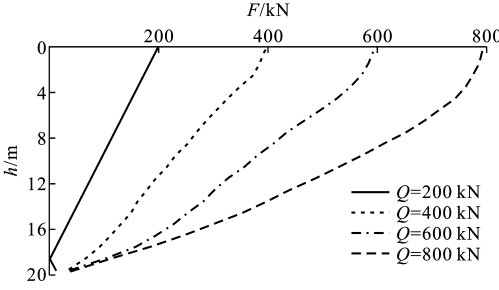


图 11 $u=0.2$ 时不同荷载等级作用下 F - h 关系曲线
Fig. 11 F - h Relation Curves of Pile Under Different Loads when $u=0.2$

表 5 $Q=600$ kN 时不同桩-土摩擦因数条件下各位置基桩的桩顶位移量

Tab. 5 Pile Head Displacement Versus Pile Location Under Different Pile-soil Friction Coefficients when $Q=600$ kN

u	s/mm			
	中心桩	边桩	角桩	单桩
0.2	32.219	30.385	28.593	1.675
0.3	31.601	29.736	27.850	1.594
0.4	30.108	28.470	26.648	1.583

桩顶位移量却逐渐减少。

4 结 语

(1)X 形桩竖向抗拔承载力与其等外包直径的圆形截面桩承载力相近,较等混凝土用量的圆形截面桩承载力要大。即相同混凝土用量条件下,X 形桩抗拔极限承载力较普通圆形截面桩提高了近 17.4%;相同抗拔承载力作用下,X 形桩的混凝土用量较普通圆形截面桩节省近 35.4%。

(2)本文现场情况下,4 倍桩径 X 形群桩在竖向上拔荷载作用下,表现为整体拔出特性。

参考文献:

References:

[1] ABUSHARAR S W,ZHENG J J,CHEN B G,et al. A Simplified Method for Analysis of a Piled Embankment Reinforced with Geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes,2009,27(1):39-52.

[2] HAN J,GABR M A. Numerical Analysis of Geosynthetic-reinforced and Pile-supported Earth Platforms over Soft Soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2002,128(1):44-53.

[3] POULOS H G. Design Charts for Piles Supporting Embankments on Soft Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2007,133(5): 493-501.

[4] LO S R,ZHANG R,MAK J. Geosynthetic-encased

- Stone Columns in Soft Clay; a Numerical Study[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 28 (3): 292-302.
- [5] 刘汉龙. 现浇 X 形混凝土桩施工工法: 中国, ZL200710020306. 3[P]. 2007-02-17.
LIU Han-long. A Construction Method for X-section Cast-in-place Pile; China, ZL200710020306. 3 [P]. 2007-02-17.
- [6] 丁选明, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 现浇 X 形桩桩-土荷载传递规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 489-493.
DING Xuan-ming, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Field Test Study of Pile-soil Load Transfer Characteristics of X-shaped Cast-in-place Pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 489-493.
- [7] RAMASWAMY S D, PERTUSIER E M. Construction of Barrettes for Highrise Foundations[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1986, 112(4): 455-462.
- [8] 杨敏, 曹方成, 张齐兴. 介绍几种异形截面桩[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(1): 58-60.
YANG Min, CAO Fang-cheng, ZHANG Qi-xing. Introduction to Some Kinds of Abnormal Section Piles [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(1): 58-60.
- [9] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 型混凝土桩截面几何特性研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 17-23.
LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Study on the Geometric Characteristics of the Cast-in-place X-type Vibro-pile Section[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 17-23.
- [10] 王智强, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 903-907.
WANG Zhi-qiang, LIU Han-long, ZHANG Min-xia, et al. Full Scale Model Tests on Vertical Bearing Characteristics of Cast-in-place X-section Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 903-907.
- [11] KONG G Q, CHEN Y M, LIU H L, et al. Numerical Analysis of X-section Cast-in-situ Concrete Pile Groups Under Vertical Load[C]//SEVI A F, LIU J Y, CHEN C W, et al. Geohunan 2011 Advances in Pile Foundations, Geosynthetics, Geoinvestigations, and Foundation Failure Analysis and Repairs. Changsha: ASCE, 2011: 162-168.
- [12] 袁 佶. 现浇 X 形混凝土桩水平承载特性足尺模型试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
YUAN Ji. Research on the Full-scale Model Test for the Behavior of X-section Pile Under Lateral Load [D]. Nanjing: Hohai University, 2009.
- [13] 雍 君, 陆晓敏, 刘汉龙. X 形混凝土桩抗拔特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3430-3434.
YONG Jun, LU Xiao-min, LIU Han-long. Model Test Study on Anti-pulling Property of X-shaped Concrete Pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3430-3434.
- [14] 胡新民. 粉喷和浆喷水泥桩加固软土地基的力学特性[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(6): 42-44.
HU Xin-min. Mechanical Characteristics of Soft Soil Foundation Reinforced with Powder-jetting and Grout-jetting Cement Piles [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(6): 42-44.
- [15] 余子明. 嵌岩桩竖向承载力计算[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 96-99.
YU Zi-ming. Calculation of Rock-socketed Pile s Vertical Bearing Capacity [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 96-99.
- [16] 孔纲强, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形桩复合地基桩土应力比及负摩阻力现场试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 8-12.
KONG Gang-qiang, LIU Han-long, DING Xuan-ming, et al. Field Test of Pile-soil Stress Ratio and Negative Skin Friction of Composite X-section Cast-in-place Pile Foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 8-12.
- [17] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明. 加固软土路基的现浇 X 形混凝土桩力学特性[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 11-17.
ZHANG Min-xia, LIU Han-long, DING Xuan-ming. Mechanical Property for Cast-in-situ X-shaped Concrete Pile of Reinforced Soft Roadbed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 11-17.
- [18] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94—2008, Technical Code for Building Pile Foundations[S].