

现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究

王智强^{1, 2}, 刘汉龙^{1, 2}, 张敏霞^{1, 2}, 袁 佶^{1, 2}, 雍 君³

(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. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘 要: X 形桩是一种利用截面形如 X 形的钢模, 经过沉管、浇注混凝土、养护成形之后所形成的现浇混凝土桩。该桩具有承载力高、经济适用、施工方便等优点, 对于高速公路、铁路等工程中的软土地基处理具有较好的适用性。采用河海大学自行研制的大型桩基模型槽试验系统, 通过竖向静载试验, 研究了 X 形桩与圆形桩的极限承载力、桩身侧摩阻力、桩端阻力与桩侧摩阻力的荷载分担比的变化规律。结果表明: 与圆形桩相比, X 形桩在相同混凝土用量下能够显著提高截面利用率及承载力水平。研究成果可为进一步研究 X 形桩的各种工程特性提供重要依据。

关键词: X 形桩; 荷载传递; 足尺模型试验; 承载力; 侧阻荷载分担比

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)06-0903-05

作者简介: 王智强(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事地基基础工程研究。E-mail: zhiqiang0305@163.com。

Full scale model tests on vertical bearing characteristics of cast-in-place X-section piles

WANG Zhi-qiang^{1, 2}, LIU Han-long^{1, 2}, ZHANG Min-xia^{1, 2}, YUAN Ji^{1, 2}, YONG Jun³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, China; 3. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The X-section pile is a kind of cast-in-place concrete pile casted by X-section steel mould. The main steps contain sinking of mould, injection of concrete and conservation. It has the advantages of high capacity, economy and convenience for construction, etc. It is therefore suitable for the soft clay ground treatment for highways and railways. Based on the large-scale model test system developed by Hohai University, the vertical load static tests are carried out. The shaft resistance and the ratio of shaft resistance to point resistance are studied. The results show that the X-section piles can improve the utilization rate of section and the resistance capacity with the same amount of concrete. This study will provide important information for further studies on various engineering characteristics of X-section piles.

Key words: X-section pile; load transfer; full scale model test; bearing capacity; ratio of shaft resistance to point resistance

0 引 言

随着国民经济的快速发展, 高速公路、高速铁路等建设得到大力发展。这些工程难免遇到软土地基等不良地层, 而建于软土地基上的工程, 存在地基承载力不足以及工后沉降变形大等严重影响了高速公路及高速铁路的建设和使用的问题, 因此如何寻找一种经济有效且技术合理的软基处理方法成为一项重要课题之一。目前处理软土地基的方法很多, 而采用桩基是一种非常有效的方法。H 形桩^[1]、三角形桩^[2]、十字形桩^[3]、T 形桩^[4]、Y 形桩^[5]等异形桩作为新型的桩基础与圆形桩相比, 由于异形效应使得桩侧表面积增大, 桩基的竖向承载能力得到提高, 更能贯彻桩基设计的一个重要原则, 即最大程度地发挥地基土和桩本身的

潜在能力。因此得到了广泛的应用。

现浇 X 形混凝土桩技术是由河海大学岩土所自主研发的具有自主知识产权的地基处理专利技术(专利号: ZL200720036892.6)。该技术是利用普通沉管灌注桩机以一种截面如字母 X 形的钢模代替传统的圆形钢模, 经过沉管、浇注混凝土、养护等工序后形成一种 X 形的现浇混凝土桩的工法^[6]。由于 X 形桩是一种新技术, 对其开展的研究较少, 与传统圆形桩的力学性能差异还不清楚, 因此开展 X 形桩与圆形桩的对比试验研究显得尤为重要。由于现场试验条件复杂^[7], 以

基金项目: 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目(BK2008040); 江苏省青蓝工程创新团队资助项目

收稿日期: 2009-03-11

及试验费用较高等条件的限制，因此在技术开发阶段对其开展模型试验研究不失是一种较好的方法。本文依托河海大学大型模型槽系统对X形桩和圆形桩的竖向承载特性开展了对比研究。

1 模型试验设计

1.1 模型槽系统

如图1所示，模型槽系统由试验场地（模型槽），加载系统，量测系统等组成。模型槽长×宽×高为5 m×4 m×7 m。加载系统由千斤顶，反力钢架，传力柱，垫块等组成^[8]。由反力计及频率仪量测反力钢架与垫块之间的压力，百分表量测桩顶位移。集线箱与频率仪量测桩身内部钢筋应力计的频率变化。



图1 模型槽系统

Fig. 1 Large scale pile foundation model test system

1.2 土料制备

为了使桩侧摩阻力得到充分发挥，并且便于分析，本次试验土层共设置两层，其中上部土体为砂土，厚2.4 m。因为砂土为河砂，含有少量黏土颗粒，所以其室内试验结果黏聚力偏大。下部为黏土，厚3.9 m。填筑时先在最下层铺设0.3 m的碎石以形成排水通道。上部土体分层夯实填筑。土层及模型桩的布置见图2，土层物理力学性质指标见表1。

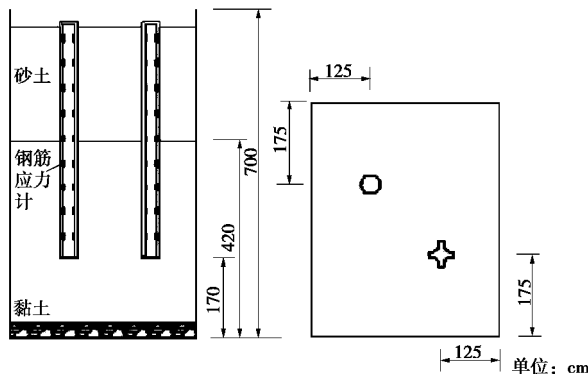


图2 模型桩布置示意图

Fig. 2 Arrangement of model piles

表1 土性质参数

Table 1 Parameters of soils

材料	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\phi/(\text{°})$	含水率 w/%	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
砂土	17.6	25.9	5.1	1.5
黏土	27.6	21.2	16.7	1.9

1.3 模型桩的制作

模型桩所采用的混凝土等级均为C25。X形桩桩长5 m，外包方形边长0.53 m，开弧间距0.11 m，开弧角度90度，具体见图3。圆形桩选用在工程中应用较广的尺寸0.426 m作为其直径，桩长5 m。具体对比参数见表2。两模型桩钢筋笼主筋采用4根直径为12 mm的HRB335钢筋，箍筋直径6.5 mm，间距0.3 m。

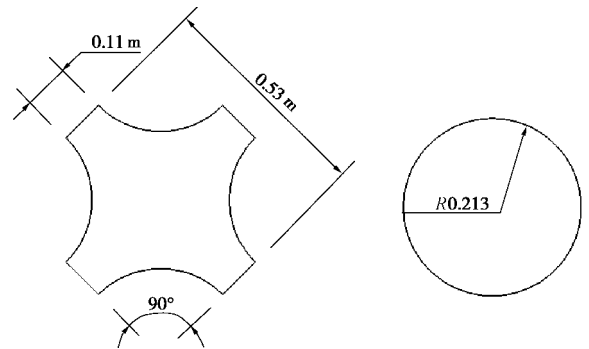


图3 试验桩截面尺寸

Fig. 3 Sectional dimensions of test piles

表2 试验桩截面参数

Table 2 Sectional parameters of test piles

参数名称	X形桩	圆形桩
横截面面积/ m^2	0.1425	0.1425
截面周长/m	1.76	1.34
外包方形边长/m	0.53	—
开弧间距/m	0.11	—
开弧角度/ °	90	—
半径/m	—	0.426

模型桩制作步骤：①在模型桩制作前先测量并记录钢筋应力计焊接前的初始读数。②预先将钢筋笼绑扎好，并且将钢筋应力计点焊焊接到钢筋笼的预定位置，记录钢筋应力计的编号和在钢筋笼内的相对位置。点焊时在钢筋应力计端部外围铺设一个小毛巾，在上面浇冷水对钢筋应力计进行降温，以避免焊接产生的高温对其产生过大的影响。③焊接结束后再次对钢筋应力计的频率进行测量以检验焊接对其频率产生的影响。④制作好桩模后，先将土层铺设到预设高度，然后将桩模在模型槽内进行组装并在模型槽内按照预先设计的方案进行定位并用脚手架进行固定，如图4所示。⑤然后放置预先绑扎好的钢筋笼，调整好位置并

用铁丝将其固定。⑥浇筑混凝土时为保证混凝土垂直下落, 在浇筑时设置一挡板以避免砂石料的冲击对钢筋应力计产生破坏。混凝土浇筑完成后用轻型振动棒进行了振捣。直到混凝土不下沉, 不冒气泡, 泛浆, 表面平坦。振动时候不能碰到模板及钢筋应力计。⑦振捣完毕后将桩头进行找平, 以利于加载时仪器的放置。

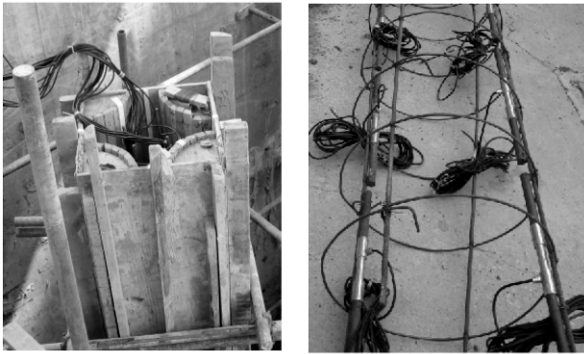


图 4 桩模及焊接好的钢筋笼

Fig. 4 Pile model and welded reinforcing steel cage

浇筑完毕后, 每天向桩身洒水进行养护, 同时避免地面有积水, 土体浸湿后软化, 承载力降低, 引起桩体整体沉陷。浇筑完毕 3 d 后, 进行拆模, 为保证桩身的直立桩身中间和顶部的位置由脚手架进行固定。分层填筑土体至设计标高, 并在预先设定的位置埋设土压力盒以检测土体的固结稳定情况。土体填筑完毕 1 个月后, 每天测量土压盒的频率值。当土压力不再变化时, 可认为土体已经固结稳定。

1.4 仪器的埋设

钢筋应力计采用海岩公司生产的 GJJ-1010 型振弦式钢筋测力计, 仪器规格 $\phi 12$ 。钢筋应力计埋设 2 排, 每排 9 只, 顶端离桩顶 0.28 m, 底端离桩底 0.28 m, 其余均匀布置在中间间距 0.56 m。采用点焊焊接在钢筋笼上面。

2 模型试验

如图 5 所示, 在桩顶与反力架之间依次放置钢板、传力柱、千斤顶、砝码、反力计。百分表架设在传力柱与桩顶之间的钢板上面以量测桩顶在竖向荷载作用下的沉降。反力计量测反力架与砝码之间的压力, 上面直接与反力梁进行连接。试验系统反力架能承担的设计荷载为 2400 kN, 在满载情况下的设计挠度为 0.004 m。本次试验所加最大荷载为 135 kN, 因此其挠度可以忽略不计。现场布置图见图 5。预估极限承载力为 150 kN, 试验共分 9 级进行加载^[9], 每级加载 15 kN。试验终止条件为桩顶累计位移大于 0.04 m。

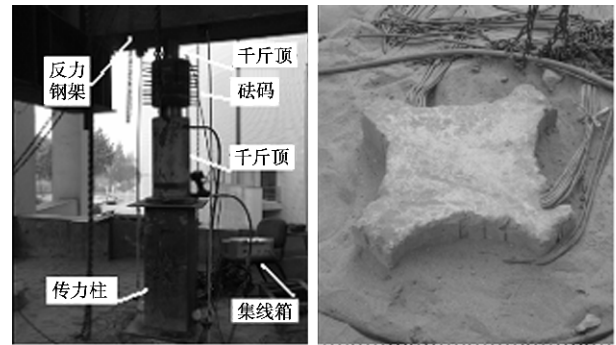


图 5 现场设备布置及 X 形桩桩头

Fig. 5 Arrangement of the field equipments and head of casting piles

3 试验结果分析

3.1 极限荷载的确定

桩基的竖向承载力^[4]受两方面的制约: 一是桩基结构自身的极限承载力; 二是支撑桩基结构的地基土的极限承载力。本次试验所用桩身混凝土强度等级为 C25, 所加最大荷载为 135 kN, 试验前后的小应变测试结果表明试验前后桩身结构完好, 因此本次试验桩基极限承载力是由地基土承载力所制约的。

根据荷载沉降曲线(图 6)以及 $\Delta s/\Delta Q-Q$ 曲线(图 7)可以看出, 圆形桩为陡降型破坏, 其极限承载力即为与破坏荷载相等的陡降起始点荷载, 为 90 kN。X 形桩荷载沉降曲线为缓变型。所以其极限承载力宜综合判定: ①根据其 $\Delta s/\Delta Q-Q$ 曲线, 取其第二拐点, 即 $Q-s$ 曲线斜率减小的起始点荷载为极限承载力, 大小为 120 kN。②虽然 X 形桩截面尺寸、所用材料与现场一致, 考虑到桩长的影响, 极限承载力取沉降量 0.04 m 所对应的荷载为极限承载力, 即 119 kN。③拟合其数据点的趋势线^[7, 10], 取其趋势线的交点对应的荷载为其极限承载力 95 kN (图 8)。取其上述 3 种方法的平均值为 111 kN。与圆形桩相比承载力提高了约 24%。

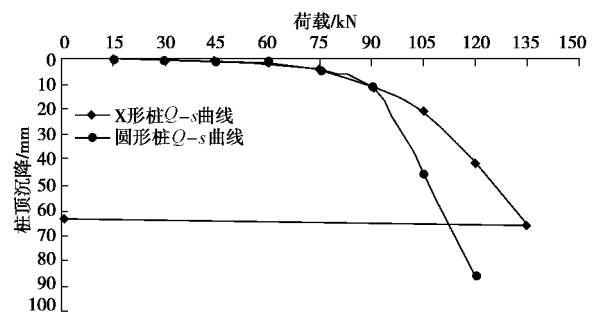


图 6 $Q-s$ 曲线

Fig. 6 Load-settlement curves

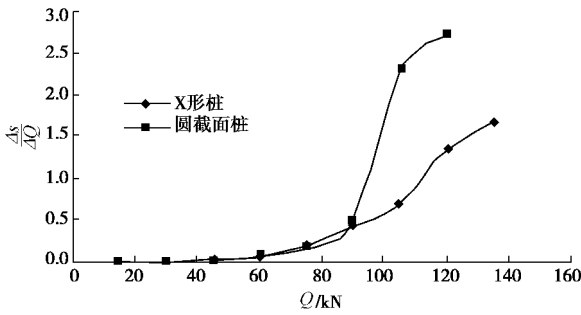


图7 $\Delta s/\Delta Q-Q$ 曲线

Fig. 7 Curves of $\Delta s/\Delta Q-Q$

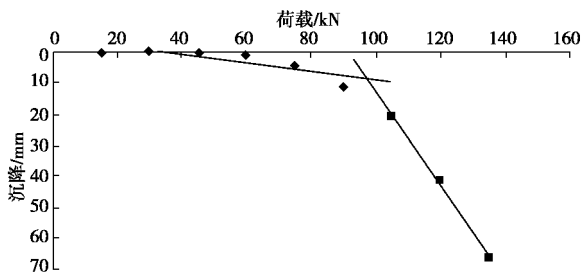


图8 双折线法确定 X 桩极限承载力

Fig. 8 Ultimate bearing capacity by double broken lines

3.2 桩身侧摩阻力

将相邻两断面的桩身轴力相减除以两断面间桩侧表面积，可得到两断面间桩的侧摩阻力为

$$q_{i+1/2}=(N_i-N_{i+1})/A_{i+1/2} \quad (1)$$

式中 $q_{i+1/2}$ 为第 i 个断面与第 $i+1$ 个断面之间的桩身侧摩阻力， N_i 为第 i 个断面的桩身轴力， N_{i+1} 为第 $i+1$ 个断面的桩身轴力， $A_{i+1/2}$ 为第 i 个断面与第 $i+1$ 个断面间的桩侧表面积，由式 (1) 计算的桩身各段侧摩阻力分布见图 9 和图 10。

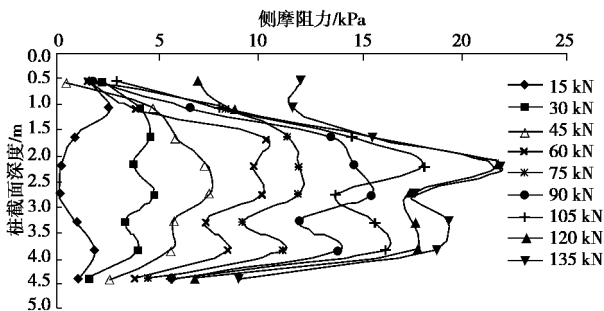


图9 X 形桩侧摩阻力变化曲线

Fig. 9 Curves of side friction of X-section piles

桩侧阻力与桩端阻力的发挥过程就是桩、土体系荷载的传递过程。桩顶受竖向荷载后，桩身压缩而向下沉降，桩侧表面受到土的向上摩阻力。

3.3 桩侧摩阻力及桩端阻力所占比例随荷载变化规律

桩侧摩阻力所占的比例如图 11 所示。刚加载时由

于桩体弹性模量远大于土体，所以桩体变形较小，桩与土体相对位移较小，侧摩阻没有得到充分的发挥。随着荷载的增大，桩身变形变大，桩土相对位移加大侧摩阻得到进一步的发挥，同时桩端土体被压密。随着荷载的进一步加大，桩土相对位移进一步加大，桩土接触面的剪应力达到土体的抗剪强度，侧摩阻得到充分的发挥，桩顶荷载增量主要由桩端土体承担。由图 11 可以看出，相同荷载下，X 形桩侧摩阻力所占的比例一直高于圆形桩侧摩阻力所占的比例。圆形桩与 X 形桩相比其侧摩阻力较早得到了充分的发挥。

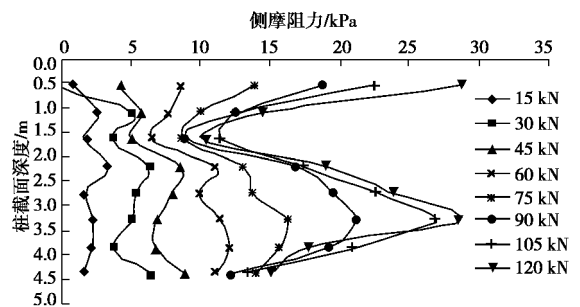


图10 圆形桩侧摩阻力变化曲线

Fig. 10 Curves of side friction of circular section piles

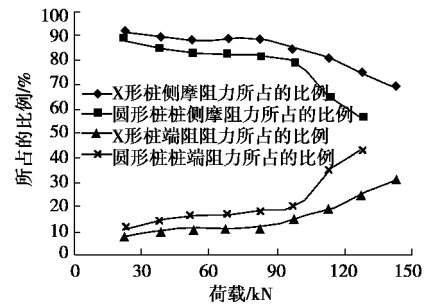


图11 桩周侧摩阻及端阻所占的比例变化曲线

Fig. 11 Curves of ratio of pile side friction to tip resistance

3.4 侧阻荷载增量比的变化规律

桩侧阻力增量与上部荷载增量之比为侧阻荷载增量比，X 形桩与圆形桩的侧阻荷载增量比随荷载的变化规律见图 12。由图可得：①荷载较小时桩顶沉降很小，桩身由于轴力受到压缩，桩端沉降更小，端阻还未被发挥，此时上部荷载主要由侧摩阻力所承担，侧阻荷载增量比变化比较平缓。②随着荷载的增大，桩顶沉降加大，桩端沉降亦加大，桩端土体被压密，端阻增大，侧阻荷载增量比成减小的趋势。对于 X 形桩，在荷载较小时，顶部荷载增量主要由侧摩阻力承担，X 形桩由 60 kN 这一级荷载开始，侧阻荷载增量比减小的趋势开始明显，在最终土体破坏前其增量比一直大于 50%，即上部荷载一直主要由桩侧摩阻力所承担。

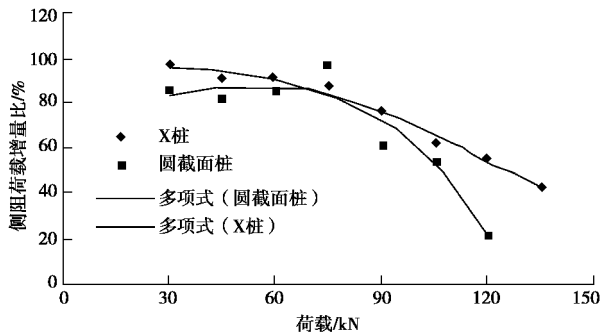


图 12 侧阻与荷载增量之比

Fig. 12 Curves of ratio of load increment ration to tip resistance

圆形桩 75 kN 这一级荷载时桩侧阻力增量达到最大值, 荷载增量主要由侧摩阻力所承担。在 105 kN 这一级荷载以后, 桩周土体接近破坏状态, 侧摩阻力增量所占比例开始小于端阻增量所占比例, 上部荷载增量开始主要由桩端阻力承担。在 120 kN 这一级荷载下, 荷载增量的 79% 开始由桩端阻力分担, 此时侧摩阻力已达到其极限, 得到充分发挥。从侧摩阻力分布图也可以看出, 105 kN 与 120 kN 这两级荷载下的侧摩阻力分布变化不大。

4 结 论

X 形混凝土桩由于具有较大的周长面积比, 因而可以在不增加混凝土用量的前提下大大提高单桩承载力, 从而提高性价比。可广泛应用于高速公路、高速铁路、市政、机场及水利等领域的地基基础工程。通过试验得到如下主要结论:

(1) 由于 X 形桩的异形效应使得桩周侧表面积与圆形桩相比增大了 31%, 作为一种摩擦桩, 其承载力提高了 24%。

(2) X 形桩侧摩阻力所占的比例在整个加载过程中一直高于圆形桩侧摩阻力所占的比例。圆形桩与 X 形桩相比侧摩阻力较早得到充分发挥。

(3) 在荷载较小时两种桩型的侧阻荷载增量比变化比较平缓, 在荷载较大时侧阻荷载增量比成减小的趋势。

参考文献:

[1] 艾传井. 深圳某电厂 H 型钢桩沉桩与效果测试[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 284 - 287. (AI Chuan-jing. Installation of H-shaped and test of its effectiveness at a power plant in Shenzhen[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(3): 284 - 287. (in Chinese))

[2] 林天健. 现代异形桩及其力学特点的理论评述[J]. 力学与实践, 1998, 20(5): 7 - 11. (LIN Tian-jian Theoretical discussion on modern special form piles and their mechanical characteristics[J]. Mechanics and Engineering, 1998, 20(5): 7 - 11. (in Chinese))

[3] 金宝森, 何颐华, 谭永坚. 北京大北窑地铁站超大型十字桩垂直承载力分析[J]. 建筑科学, 1996(3): 33 - 35. (JIN Bao-sen, HE Yi-hua, TAN Yong-jian. Vertical bearing capacity analysis on large cross pile for Beijing Dabeiyao subway station[J]. Building Science, 1996(3): 33 - 35. (in Chinese))

[4] 李安洪. 变截面 T 形桩板墙的设计及应用[J]. 路基工程, 1995(5): 21 - 23. (LI An-hong. Design and application of T-shaped pile wall [J]. Subgrade Engineering, 1995(5): 21 - 23. (in Chinese))

[5] 王新泉, 陈永辉, 刘汉龙. Y 型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 615 - 623. (WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, LIU Han-long. In-situ study on load transfer mechanism of Y-shaped vibro-pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 615 - 623. (in Chinese))

[6] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 形混凝土桩截面几何特性的分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 17 - 23. (LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Analysis on section geometry character of X style vibro-pile[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 17 - 23. (in Chinese))

[7] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (Compilation Committee of Pile Foundation Book. Pile foundation handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995. (in Chinese))

[8] 刘汉龙, 谭慧明, 彭 劫, 等. 大型桩基模型试验系统的开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 452 - 457. (LIU Han-long, TAN Hui-ming, Peng Jie, et al. Development of large scale pile foundation model test system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 452 - 457. (in Chinese))

[9] JGJ 94—94 建筑桩基规范[S]. 1995. (JGJ 94—94. Technical code for building pile foundations[S]. 1995. (in Chinese))

[10] EMILIOS M. COMODROMOS CHRISTOS T. ANAGNOSTOPOULOS, MICHAEL K. GEORGIADIS Numerical assessment of axial pile group reponse based on load test[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 505 - 515.