

深厚软土地基增强型管桩受力性状试验研究

付贵海^{1,2}, 魏丽敏¹, 郭志广¹

(1. 中南大学土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南益阳 413000)

摘要:增强型管桩采用离心旋转法制作, 并经高温蒸养, 在制桩时预埋应变计难以实现, 本文研制了一种桩身埋设混凝土应变计的新方法, 成功解决了这一难题。通过静载试验研究了深厚软土地基中增强型管桩的荷载传递规律及桩侧摩阻力和桩端阻力的发挥性状, 探讨了增强型管桩桩身肋的荷载分担情况。试验结果表明, 在竖向荷载作用下, 增强型管桩桩身上部的肋比下部的肋先发挥作用, 肋对桩侧摩阻力的发挥起到了明显地加强作用。

关键词:软土地基; 增强型管桩; 应变计埋设; 荷载传递; 桩侧摩阻力; 桩端阻力

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0060-06

Analysis Experimental on the Bearing Behavior of Enhanced Pipe Piles in Deep Soft Soils

FU Gui-hai^{1,2}, WEI Li-min¹, GUO Zhi-guang¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, P. R. China)

Abstract: enhanced pipe piles are made by centrifugal rotation and steam curing under high temperature, so it is very difficult to embed concrete strain gauges during making piles. A new method is used to embed concrete strain gauges in piles. Based on the static loading tests on enhanced pipe piles, the load transferring mechanism of enhanced pipe piles is studied through analysing axial load distribution, behaviors of skin resistance and base resistance of piles, and load sharing of rims of enhanced pipe piles. Experimental results show that when axial load acts on the top of enhanced pipe piles, the upper rims of enhanced pipe piles act on skin resistance of piles before the lower rims do, and the rims of enhanced pipe piles remarkably reinforce skin resistance of piles.

Key words: soft soils; enhanced pipe piles; gauges embed; load transfer; skin resistance; base resistance

目前常用的钢筋混凝土桩, 主要是预制桩和灌注桩, 它们都是通过桩侧摩阻力和桩端阻力来承受上部荷载。为了提高单桩竖向承载力, 人们大都通过提高桩侧摩阻力或桩端阻力的途径来实现。增加端承力的措施目前已有许多种, 如桩底注浆^[1]、扩

底^[2]等。增加侧摩阻力的措施有桩侧注浆^[3]、变截面桩^[4-7]等。增强型预应力混凝土离心管桩(简称增强型管桩)如图 1, 是在传统混凝土预制节桩基础上进行改进的一种新型预应力混凝土管桩, 属于变截面桩的一种。增强型管桩是一种无端板桩, 采用桩

收稿日期: 2011-04-10

基金项目: 铁道部科技研究开发计划重点课题(2009G008-B); 铁道部科技研究开发计划项目(2010G018-E-3); 湖南省教育厅重点项目(09A016)

作者简介: 付贵海(1975-), 男, 博士生, 主要从事软基处理及桩基工程研究, (E-mail) fuguig6666@126.com。

套箍,桩身有 4 条纵向肋及数条环向肋的凹凸型管桩,上下节桩采用卡扣式连接和专用材料密封,使上下节桩成为一个连续、完整的整体。普通型管桩作为常用的桩基形式,应用已经非常普遍。但因其桩身构造制作及施工特点的限制,会给工程质量带来诸多隐患,例如焊接质量无法保证、桩身抗弯强度较小等;与普通型管桩相比,增强型管桩在土层中的竖向抗压及抗拔承载力有明显的增强,施工中解决了桩连接上的焊接缺陷。另外增强型管桩采用张拉连接螺帽制作,保证主筋与张拉板、固定板之间的连接,增加了桩的抗弯性能,坚固了桩的整体结构^[8]。近年来,增强型管桩在江浙地区开始大量应用于高层建筑、桥梁及高速铁路的深厚软土地基处理工程。已有不少学者对灌注桩^[9-10]和普通预应力高强混凝土管桩(简称 PHC 桩)^[11-13]的荷载传递、受力机理开展了研究,而对增强型管桩受力性状的研究鲜有报道。本文研制了 1 种桩身埋设混凝土应变计的新方法,施工前将混凝土应变计根据土层情况埋设在桩身不同部位,通过静载试验量测不同荷载下应变计读数,进而分析在轴向荷载作用下增强型管桩荷载传递规律及桩侧摩阻力、桩端阻力发挥性状。

1 现场试验

1.1 工程概况

杭甬客运专线上虞北站位于浙江省上虞市境内,车站路基段全长 1 000 多米,属冲海积相平原区,软弱土层深达数十米,地下水丰富,埋深约 0.5~2.5 m,主要受大气降水及地表水的补给。该工程对沉降要求非常严格,铁路正线及其它站线地基采用管桩+筏板结构加固,桩径 500 mm(壁厚 100 mm),桩身混凝土强度等级为 C65,桩间距 2.5 m,桩长 42~45 m,共有 4 节,桩端嵌入细圆砾土层,按正方形布置,采用锤击法施工。本试验选择 2 根增强型管桩(图 1)进行静载试验,试验场地主要土层物理力学性质指标见表 1。



图 1 增强型管桩实物图

表 1 地基土的物理力学性质指标

层号	土层名称	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	含水量 ω/%	孔隙比 e	c _u /kPa	φ _u /°	σ ₀ /kPa	E _s /MPa
(1)1	稍密粉土	15.3	18.8	30.55	0.88	11.2	27.62	100	6.79
(1)3	流塑淤泥质黏土	8.2	17.5	42.94	1.24	7.44	4.57	60	2.93
(2)1	软塑粉质粘土	6.5	17.9	34.55	1.06	12.73	10.22	90	3.86
(2)1-1	稍密粉土、砂土	7.3	18.2	28.29	0.91	—	—	100	10
(2)2	软塑粉质粘土	5.4	18.1	33.15	0.98	16.16	14.38	110	4.56
(3)4	密实细圆砾土	2.33	21.5	20.5	0.36	—	—	450	29.8
(5)2	强风化玄武岩	—	—	—	—	—	—	250	19

1.2 试验方案

1.2.1 测试元件布置 试验桩上预埋测试元件,在静载过程中量测应变,进而确定桩身应力和压缩变形。测试元件采用某公司生产的智能弦式混凝土应变计,精度为 1 με。管桩桩身应变测量元件布置见图 2,测试元件沿桩身对称埋设,有 17 个测试断面,共有 34 个应变计。图中所示每节管桩的排序是按照施工时打入的先后顺序进行编排的,即第 1 节在最下端,第 4 节在最上端。为研究增强型管桩“肋”的作用,分别在图 2 所示的第 4 节桩以及第 1 节桩中靠近肋的上下缘处布置了 2 层应变测试元件,以了解“肋”所分担的荷载。

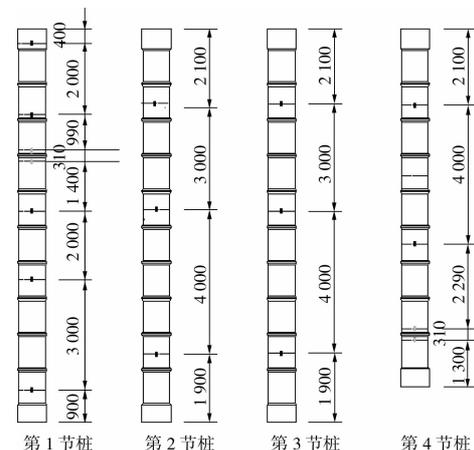


图 2 增强型管桩元件布置图

1.2.2 元件埋设方式和工艺 应变计或钢筋计能否正确埋设对管桩受力性状的测试有至关重要的影响,大多文献未涉及具体的埋设方法。文献[14-16]采用先将钢筋计绑扎在钢筋笼上,再将钢筋笼放进管桩的空芯内,然后用高标号混凝土填充管桩管芯内并捣密实。这种方法埋设钢筋计虽然方便,但有待商榷。管桩测试元件的埋设及施工实际上是一个很复杂的过程,其中任一环节的失误都可能导致试验失败。本文采用埋入式混凝土应变计作为测试元件见图 3,不同于应变片,采用以下方法埋设:预制桩制作时预留孔槽,待桩制作完成运到试验场地后,再在预留槽内安装混凝土应变计,然后采用‘环氧树脂砂浆’填充预留槽,环氧树脂砂浆须按比例进行配制。现场混凝土应变计埋设过程参见图 3 和图 4。为保护试桩内导线,需在试桩底端设置保护桩靴,打桩过程中混凝土应变计的导线先从位于预制槽端部的穿线孔引入桩身内部,后在桩头引出,参见图 5。由于应变计的部分导线留在桩身外部,若不采取措施,打桩过程中打桩机锤头撞击桩头必定会损坏导线,为了避免这种情况发生,并用自制的桩帽加以保护,桩帽参见图 6。打桩前将导线从桩帽侧面穿出,然后将桩帽套在管桩桩头上,再开始打桩。沉桩完成后,对应变计进行量测,发现 2 根试桩桩身埋设的应变计的存活率都在 90%以上。



图 3 预制槽内放置应变计

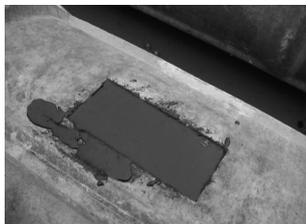


图 4 环氧树脂砂浆封孔



图 5 混凝土应变计导线引出



图 6 自制桩帽实物图

1.3 试验过程

静载试验反力由压重平台堆载提供,并使装置重心与基桩轴线一致,通过千斤顶上顶荷载所产生的竖向作用力逐次传递给试桩,采用慢速维持荷载法加载,该工程设计文件规定管桩单桩承载力设计值为 1 200 kN,根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003)规定试验最大荷载为单桩承载力设计值的 2 倍,故试验最大荷载为 2 400 kN。将试验最大荷载等分为 10 级,首次加 2 级,以后每次加载一级。每级加载后,按第 5、15、30、45、60 min,测读桩顶沉降量及桩身应变,以后每隔 30 min 测读一次。当桩顶沉降量不超过 0.1 mm 1 h,并连续出现 2 次,即达到相对稳定标准时,再施加下一级荷载。

2 试验结果与分析

2.1 试验数据处理

2.1.1 桩身轴力确定 由实测桩身截面处的应变可以求得桩身截面的内力:

$$N_i = E \epsilon_i A \quad (1)$$

式中: N_i 为第 i 截面轴力, kN; E 为桩身混凝土弹性模量, kPa; ϵ_i 为第 i 截面实测应变; A 为桩身截面积, m^2 。

2.1.2 桩侧摩阻力确定 由桩身各截面轴力即可求得桩侧摩阻:

$$F_i = N_i - N_{i+1} \quad (2)$$

根据土层的摩阻力可求出该段桩侧平均侧摩阻力:

$$f_i = \frac{F_i}{U l_i} \quad (3)$$

式中: f_i 为第层侧摩阻, kPa; U 为桩身截面周长, m; l_i 为第截面与第 $i+1$ 截面之间的距离, m。

2.1.3 桩身各应变实测截面的位移 测试面间的轴力差造成该桩层面间桩段的竖向位移或桩身压缩,根据桩顶实测沉降减去桩身的压缩量,可以得到桩身应变测试截面的位移。假定桩身轴力在两应变测试截面是线性变化的,则桩身各应变实测截面的位移 s_j 按下式计算:

$$s_j = s - \sum_{i=1}^j l_i (\epsilon_{i+1} + \epsilon_i) / 2 \quad (4)$$

式中: s 为桩顶位移实测值; l_i 为第 $i+1$ 断面和断面之间的桩长。

2.2 荷载-沉降曲线分析

静荷载试验的荷载-沉降曲线的线型是桩身材料或桩周土破坏机理和破坏模式的宏观反映。试桩的竖向静载试验的 $P-S$ 曲线如图7所示。从7中可以看出,2根增强型管桩的 $P-S$ 曲线均呈缓变型,当加载到2400 kN时,未出现明显的向下弯折的拐点,没有达到极限状态,单桩承载力满足要求。在最后一级加载时,试桩1和试桩2的桩顶最大沉降量分别为9.72 mm、9.41 mm,卸荷后回弹量分别为0.71 mm、0.65 mm,回弹率为92.7%、93.1%。由此可见,2根试桩的卸荷回弹率均较大,说明桩顶沉降基本上为桩身的弹性压缩变形引起,桩端沉降很小。

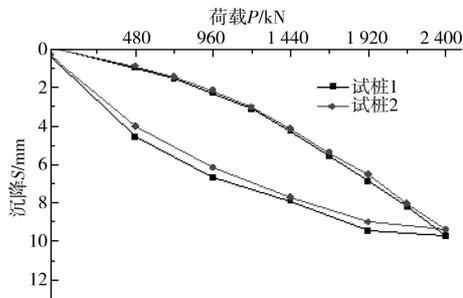


图7 2根试桩的 $P-S$ 曲线

2.3 桩身轴力分析

根据实测的桩身应变值,用公式(1)计算所得2根试桩的桩身轴力分布见图8及图9。

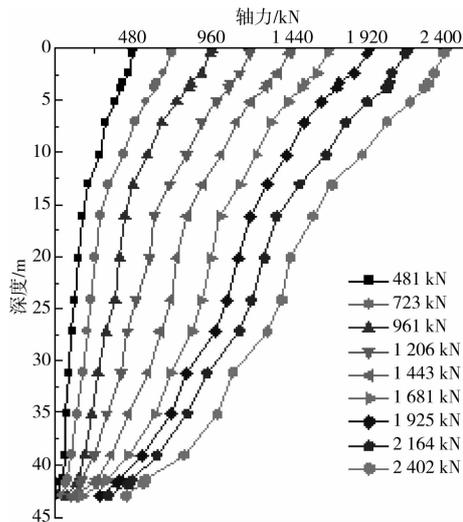


图8 试桩1轴力图

从图8及图9可以明显地看出,2根试桩的轴力图类似,桩身轴力沿深度方向逐步衰减,呈“倒三角形”分布,主要因为桩在竖向荷载作用下,桩身发生轴向位移。同时,置于土中的桩与其侧面土是紧

密接触的,当桩相对于土向下位移时就产生土对桩向上作用的桩侧摩阻力。桩顶荷载沿桩身向下传递过程中,必须不断克服这种摩阻力桩身轴力就随深度逐渐减小。桩身轴力的传递随土层的性状不同而发生改变,在0~16 m范围轴力传递曲线斜率较大,桩身轴力的传递较快,在此范围主要是呈稍密至中密的粉土,而在16~30 m范围内呈流塑状的淤泥质粉质粘土及粉质粘土,桩身轴力传递较慢,在30 m以后的稍密状的粉土、粉砂及软塑粉质粘土中桩身轴力的传递又明显加快。由于淤泥质黏土的压缩模量2.93 MPa小于粉土、粉砂的压缩模量6.79~10 MPa,因此,桩端土层与桩周土层的压缩模量之比 E_b/E_s 在淤泥质黏土处明显大于粉土和软塑粉质黏土处; E_b/E_s 值越小,轴力沿深度衰减越快^[10],所以,桩身轴力在粉土和粉砂中衰减速度比在淤泥质粉质黏土层中要快。

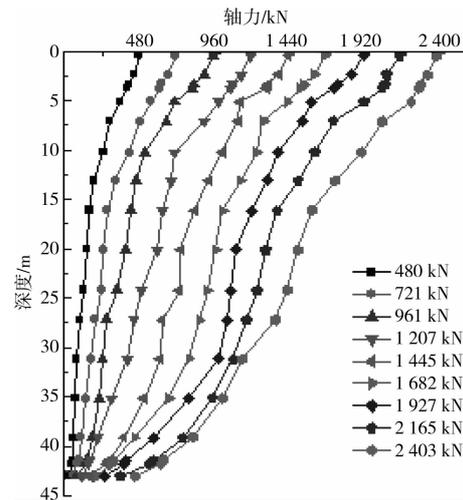


图9 试桩2轴力图

2.4 桩侧摩阻力发挥性状分析

正是由于桩侧存在的侧摩阻力,造成了桩身轴力在任意2桩身轴力测试面间的差值,其差值的大小即为该段桩的侧摩阻力,变化斜率大小反映了桩侧摩阻力的大小。选取轴力图分布更规则的试桩1来说明,试桩1的桩侧摩阻力分布图、桩侧摩阻力及相对位移关系图分别见图10及图11。由图10可以看出,在上部荷载作用下,桩侧摩阻力的发挥是一个异步的过程,上部土层的侧摩阻力先于下部土层发挥作用。加载至481 kN及723 kN时,20 m以上土层侧摩阻力约在13~32 kPa,20 m以下土层侧摩阻力发挥程度较低,约在10~15 kPa;加载至1681 kN时,20 m以上土层的侧摩阻力就已达达到峰值,约在28~54 kPa,20 m下部土层的侧摩阻力尚未达到峰值,约在25~68 kPa。粉土层(0~15.3 m)桩侧摩

阻力沿桩长呈上大下小抛物线形分布,粉土层上半段桩侧摩阻力较大,到了下半段时桩侧摩阻力显著下降;在淤泥质粉质粘土层和软塑状粘土层继续下降,到软塑状粘土层中断降至最低,而在粉砂层和桩端附近的粉质粘土和细圆砾土层,侧摩阻力又显著增大。由图 11 可以看出,随着桩土位移的增加,桩侧摩阻力增大,上部土层的桩侧摩阻力趋于稳定达到峰值,下部压缩模量较大的土层虽然桩土位移较小,但桩侧摩阻力较上部土层的大,而且有继续增大的趋势,这说明桩侧摩阻力的发挥不仅和桩土位移有关,还和土层性质及土层上覆压力等因素有关。为了研究增强型管桩肋的作用而布置的 2 组应变计如图 2 所示,它们的埋深分别为 3.35 m、3.76 m 和 41.42 m、41.78 m,试桩 1 埋设应变计的肋上下缘的摩阻力的分布见图 12。从图 12 中可以看出,在轴向荷载作用下,桩身上部的肋先发挥作用,肋下缘的摩阻力比上缘的大 3~4 kPa;随着上部荷载增大,桩身下部的肋作用逐渐发挥,加载到最大荷载时,肋下缘的摩阻力比上缘的大 6 kPa,并有继续增大的趋势。

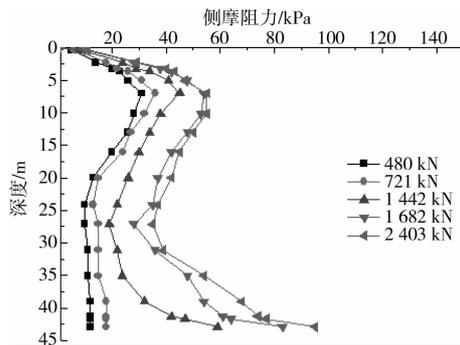


图 10 试桩 1 侧摩阻力分布图

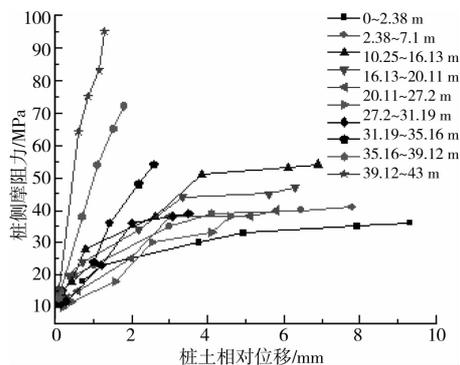


图 11 试桩 1 侧摩阻力与桩土相对位移曲线

2.5 桩端摩阻力发挥形状分析

端阻比随荷载变化的曲线见图 13。由图 13 可以看出,随着荷载水平提高,端阻开始发挥,其所占承载力的比例逐渐提高。荷载较小时,端阻力发挥不明显,荷载达到 1 681 kN 以后,端阻力显著增大,达到最大荷载 2 400 kN 时,试桩 1 的桩端阻力为

431 kN,占总荷载的 17.9%;试桩 2 的桩端阻力为 451 kN,占总荷载的 18.8%。由上述可见,即使在最大荷载作用下试桩桩端阻力占桩顶荷载的比例也不大,桩端极限承载力尚未全部发挥,表现为端承型摩擦桩性状。主要是因为桩端端阻力的发挥在砂性土中一般需要 6~10 mm 的桩端位移,而本试验 2 根试桩的桩端沉降仅有 1.15 mm 和 1.03 mm。

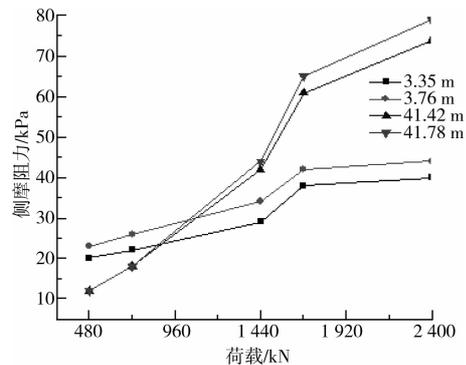


图 12 桩身肋上下缘摩阻力分布图

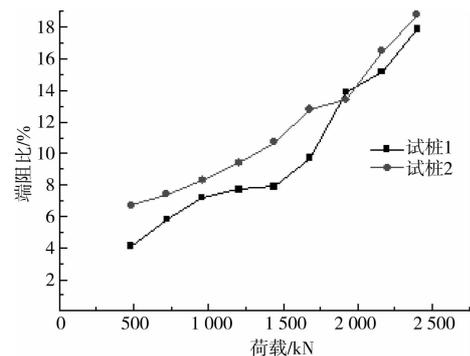


图 13 端阻比变化曲线

3 结论

1)增强型预制管桩采用离心旋转法制作,并经高温蒸养,在制桩时预埋应变计很复杂且很可能造成损坏,本文成功设计了一种预制桩混凝土应变计的埋设方法,使应变计的成活率超过 90%。

2)试桩在竖向荷载作用下,桩身轴力沿深度方向逐步衰减,呈“倒三角形”分布,桩身轴力上部大于下部,桩身轴力衰减的速度和土层的压缩性有较密切的关系,在刚度较小的淤泥质粉质粘土中衰减的最慢。

3)在上部荷载作用下,桩侧摩阻力的发挥是一个异步过程,上部土层的桩侧摩阻力先发挥并趋于稳定达到峰值,下部刚度较大的土层虽然桩土位移较小,但桩侧摩阻力较上部土层的大,而且有继续增大的趋势,这说明桩侧摩阻力的发挥不仅和桩土位移有关,还和土层性质及土层上覆压力等因素有关。另外通过布置在靠近肋的上下缘处应变计的测试结果表明,增强型管桩的肋对桩侧摩阻力的发挥起到

了加强作用。

4)随着荷载水平提高,端阻开始发挥,其所占承载力的比例逐渐提高。但对于较长的管桩,由于桩身压缩量占桩顶沉降的较大部分,桩端沉降较小,桩端阻力很难达到极限。

5)对增强型的研究还处于起步阶段,为推进增强型管桩的推广应用,尚应开展增强型管桩和普通型管桩受力性能对比试验研究及增强型管桩的水平承载性能研究。

参考文献:

- [1] 张忠苗,王华强,邹健. 含部分黏性土的卵石层桩底注浆现场试验与分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 308-314.
ZHANG ZHONG-MIAO, WANG HUA-QIANG, ZOU JIAN. In-situ test and analysis of pile end post grouting in gravel strata with cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 308-314.
- [2] DICKIN E A, LEUNG C F. Performance of piles with enlarged bases subject to uplift forces [J]. Canadian geotechnical Journal, 1990, 27: 546-556.
- [3] 蒋建平,高广运. 大直径扩底桩端阻力折减问题探讨[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2282-2288.
JIANG JIAN-PING, GAO GUANG-YUN. Study on modifying coefficient of end-bearing resistance of large diameter belled piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2282-2288.
- [4] DAVIDSON R R. Foundation innovations cut costs[J]. Civil Engineering, ASCE, 1987, 57(12): 54-56.
- [5] RAMASWAMY S D, PERTUSIER E M. Construction of barrettes for high-rise foundations[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1986, 112(4): 455-462.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 吴存富,徐锦锋,颜传国,等. 增强型预应力混凝土离心桩施工技术[J]. 浙江建筑, 2010, 27(10): 39-42.
WU CUN-FU, XU JIN-FENG, YAN CHUAN-GUO, et al. Construction technology of enhanced centrifugal prestr-essed concrete piles [J]. Zhejiang Construction, 2010, 27(10): 39-42.
- [9] 钟闻华,石名磊,刘松玉. 超长桩荷载传递性状研究[J]. 岩土力学, 2006, 25(2): 307-310.
ZHONG WEN-HUA, SHI MING-LEI, LIU SONG-YU. Load transfer performance of overlength piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 25(2): 307-310.
- [10] 朱向荣,方鹏飞,黄洪勉. 深厚软基超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 76-79.
ZHU XIANG-RONG, FANG PENG-FEI, HUANG HONG-MIAN. Research on super-long pile in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 76-79.
- [11] NICOLAA D E, RANDOLPH M F. Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 295-318.
- [12] YASUFUKU NORIYUKI, OCHIAI HIDETOSHI, OHNO SHIRO. Pile end-bearing capacity of sand related to soil compressibility [J]. Soils and Foundations, 2001, 41(4): 59-71.
- [13] 李君. 近海地基大直径PHC管桩竖向承载性状的试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2010(4): 19-21.
LI JUN. Experimental study on the axial bearing capacity distribution of the major diameter PHC pile in coastal foundation [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2010(4): 19-21.
- [14] 施峰. PHC管桩荷载传递的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 95-99.
SHI FENG. Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 95-99.
- [15] 蔡健,周万清,林奕禧,等. 深厚软土超长预应力高强混凝土管桩轴向受力性状的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 102-106.
CAI JIAN, ZHOU WAN-QING, LIN YI-XI, et al. Experimental study on the axial compressive behavior of super-long PHC pipe piles in deep soft soils [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 102-106.
- [16] 张忠苗,喻君,张广兴,等. PHC管桩和预制方桩受力性状试验对比分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3059-3065.
ZHANG ZHONG-MIAO, YU JUN, ZHANG GUANG-XING. Contrastive experimental analysis of bearing behaviors of PHC pile and precast square piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3059-3065.