

上海软土地基超长打入 PHC 桩工程性状研究

Behavior of long PHC piles driven in Shanghai soft clay

朱合华¹, 谢永健¹, 王怀忠²

(1. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 通过对上海软土地基中 64~77 m 的超长打入 PHC 桩打桩过程中锤击数、土塞高度随深度变化的跟踪监测及土塞的标准贯入试验和竖向荷载下的静载试验, 探讨了超长 PHC 桩在上海软土地基中的贯入度与土层的关系, 分析了打入承压水层中对土塞闭塞效应的影响以及桩的竖向承载力性状。这对软土地基中的超长 PHC 桩的设计、施工和深入研究具有重要指导作用。

关键词: 软土地基; 超长 PHC 桩; 土塞; 承载力

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)06-0745-05

作者简介: 朱合华(1962-), 男, 安徽巢湖人, 博士生导师, 工学博士。

ZHU He-hua¹, XIE Yong-jian¹, WANG Huai-zhong²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Baoshan Steel Limited Stock Company, Shanghai 201900, China)

Abstract: The prestressed high strength concrete pipe(PHC) piles of 64~77 m are driven into Shanghai soft clay. The bearing capacity of open-end piles are affected by the degree of soil plugging. There are no reports about the effect of soil plugging and bearing capacity of long slender pile. Based on the results of field tests, the records of driven piles and the results of static load tests with the PHC piles are presented. The records of driven pile show that the blow counts per meter and the length of soil plug vary with the depth of piles in ground. Especially, when piles are driven into fine sandy artesian aquifer, the length of soil plug increases rapidly with the depth of piles driven in ground. A month later after the completion of pile installation, some soil plugs are destroyed under high artesian head. According to the SPT tests in soil plugs, the influence of artesian aquifer on the stability of soil plug is discussed. The vertical load tests are performed posteriorly to the SPT tests of soil plugs. Furthermore, the effect of the soil plug is discussed with respect to their contribution to the bearing capacity of long PHC piles.

Key words: soft soil; long PHC pile; soil plug; bearing capacity

0 前言

PHC 桩, 即预应力高强度混凝土离心管桩, 由工厂流水线生产, 质量稳定可靠, 桩身混凝土强度高。其耐锤打性能好、贯穿能力强、施工速度快、单桩承载力高、造价低于钢管桩。近年来, 在软土地区, 随着经济的发展, 重大工程的兴建, 超长 PHC 桩得到越来越广泛的应用。许多学者也对 PHC 桩进行了研究, 积累了一些经验。王宏祺、陆仁华(1995)^[1]报道了在上海外滩防汛墙外移综合改造工程中 30~50 m PHC 桩的施工技术。陆昭球、高倚山、宋铭栋(1999)^[2]报道了嘉兴电厂使用 50 m 左右 PHC 桩贯入度和土塞高度随深度的变化。项培林、钮建定(2002)^[3]分析了上海港外高桥四期码头 52~60 m 长的 PHC 桩基的地质条件。但随着重大工程的兴建, PHC 桩越打越深, 对 PHC 桩的要求越来越高。

当管桩打入土层中时, 土进入桩中, 形成土塞。土塞的闭塞作用对 PHC 桩的承载特性有重要影响。Randolph 等(1991)^[4]对管桩的土塞进行一维分析, 指出排水条件下、不排水条件下土塞对管桩承载性能

的影响。Paik 等(2003)^[5]利用模型试验详细研究了打桩过程中土塞增长量与桩打入长度增量之比对管桩承载力的影响。Lee 等(2003)^[6]利用试验建立土塞端承载力与静力触探值的关系, 提出确定砂土中的管桩承载力的方法。超长 PHC 桩的打入性状, 土塞效应研究对能否将桩安全打入预定深度, 科学评价承载性能有重要意义。上海市某重要工业厂房的基础采用超长 PHC 桩, 打入深度 64~77 m, 目前还没有直接可供参考的研究成果。本文根据该工程 PHC 桩的试打记录、静载荷试验, 分析土塞的闭塞效应, 尤其是承压水对土塞稳定的影响, 研究超长 PHC 桩的承载机理。

1 工程概况

某工程为重要工业厂房, 位于上海软土地区, 上部结构为门式钢架, 设备及厂房基础对基础的承载力、差异沉降要求极高。场址内地基土在勘察深度内分为 9 个工程地质层, 其土层分布及其土性指标如表 1 所

基金项目: 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室资助

收稿日期: 2003-12-14

示,地下水位埋深为 0.4~2.2 m,并且第⑨₁层有承压水。为节约资金,拟采用 PHC 桩代替钢管桩,持力层初步确定为第⑨₁层。试桩采用 4 种型号的 PHC 桩,桩顶标高为 4.2 m,试桩 s1 为 $\phi 600\times 140$,长 77.9 m;试桩 s2 为 $\phi 550\times 105$,长 75.8 m;试桩 s3 为 $\phi 500\times 100$,长 64.7 m;试桩 s4 为 $\phi 400\times 90$ (前面数字表示桩的外径,后面数字表示桩壁厚),长 64.6 m,s3,s4 相距 3 m。试桩桩位在拟建场地的分布见图 1,试桩与锚桩的相对位置如图 2,18 根锚桩分别计为 m1~m18。施工采用引进德国生产的筒式打桩机,型号为 D62,D80,D100,其中 D100 试打直径为 600 mm,长度大于 75 m 的桩,试打桩锤击参数见表 2。

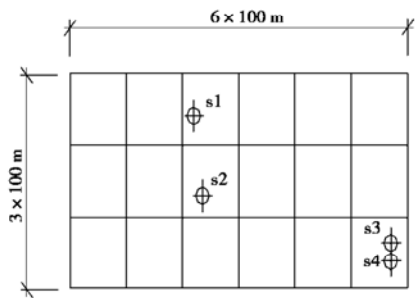


图 1 试桩桩位布置平面图
Fig. 1 Layout of test piles

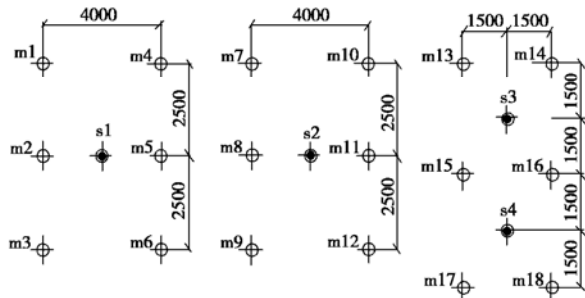


图 2 试桩与锚桩分布图(单位: mm)
Fig. 2 Layout of test piles and anchor piles

2 桩锤击数随打入深度分布规律

本厂区共有 4 根试桩,18 根锚桩,分别采用 4 种不同的锤型打入到预定深度。在施工过程中,将桩身每隔 1 m 作一记号,监测桩贯入每米的锤击数。试、锚桩的最小打入深度为 64.9 m,最大打入深度为 77.9 m,所需的最少锤击数为 719 击,最大锤击数为 4178 击;对打入桩长为 64.7 m 试桩和锚桩,锤击数主要集中于 800~1200 击之间,对打入深度为 75 m 左右的试锚桩,锤击数主要集中在 2200~3000 击之间。以 4 根试桩为例分析锤击数随桩贯入深度的变化规律,如图 3 所示。从图 3 可看出,4 根桩锤击数的增加趋势较一致,在桩打入深度小于 25 m 时,锤击数变化较小,主要集中在 10 击以内,对照土层分布,可知该土层主要为①~④层,标贯击数小于 10 击,打入阻力较小;在桩贯入 25~50 m 时,锤击数逐渐增大,但每米最大锤击数不超过 50 击,该地层主要为⑤₁粉质黏土,标贯击数约 11 击,打桩阻力比①~④层有较大增长;当桩打入 50 m 深度后,锤击数随桩的贯入深度开始显著增加,在 60~80 m 区间内,该土层主要为⑧₁粉质黏土和⑨₁粉细砂层,标贯击数为 20~50 击,每米锤击数为 50~200 击。s1 桩打入到 76 m、s2 桩打入到 73 m 时,即打入⑨₁粉细砂层,每米锤击数达到最大,分别为 203 击、136 击;s3 桩、s4 桩打入到 63 m、即刚打入⑨₁粉细砂层分界面附近,每米锤击数达到最大,分别为 111 击、106 击。总之,当桩打入较深土层(⑤₁粉质黏土)后,锤击数沿桩打入深度的变化与勘察时标贯击数沿深度的变化相似(勘察时标贯击数见表 1)。但 PHC 桩打入⑨₁粉细砂层后,每米锤击数增加较快,打入每米所需最大锤击数可为在⑧₁粉质黏土中的打入每米锤击数的 3~4 倍,比勘察时标贯击数增加快。故对打入⑨₁粉细砂层的 PHC 桩,要慎重选择打桩设备,避免损坏桩材。

表 1 土的物理力学指标

Table 1 Main characteristics of soil

层序	土层名称	层底标高/m	天然重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	液限/%	含水率/%	塑限/%	标贯击数	压缩性
①1-1	杂填土	4.28~2.15						18	高
①1-2	素填土	3.58~2.55							高
②	粉质黏土	1.89~0.65	10.8	0.88	33.8	32	21.3	7.8	中等
③1	淤泥质粉质黏土	0.39~-0.85	18.1	1.03	36.2	37.8	22.9		高
③2-1	粉质黏土	-0.02~-1.36	19.2	0.79	33.1	31.4	22	6.6	中等
③2-2	砂质黏土	-1.90~-2.85	18.9	0.85	33	32.3	23.3	8.6	中等
③3	淤泥质粉质黏土	-5.14~-6.80	17.8	1.14	37.1	40.8	23.2	5.6	高
④	淤泥质黏土	-14.22~-18.53	17.1	1.32	44.1	47.6	24	3	高
⑤1	粉质黏土	-42.22~-46.07	17.8	1.03	37.6	34.6	23.3	11.6	中等
⑤3	粉质黏土	-48.36~-50.45	18.1	0.96	35.5	32.1	22.2	18	中等
⑦1	砂质黏土	-104.44	18.4	0.85	34	30.7	22.8	23.8	中等
⑧1	粉质黏土	-53.12~-61.92	18.0	0.98	35.4	32.2	22.2	22	中等
⑨1	粉细砂	未钻穿	18.2	0.88	32.5	27.3	20.7	50	低

表 2 柴油锤锤击参数
Table 2 Parameters of diesel hammer

锤型	柴油锤			
	D62	D80	D80	D80
冲击部分重/t	6.2	8	8	8
总重/t	12.2	16.9	16.9	16.9
锤的动力特性	最大冲击压力/kN	12984	14137	14267
	最大冲击拉力/kN	1558	4868	4662
	最大冲程/m	2.5	3.3	2.95
应用的 PHC 管桩型号	400×90	500×105	600×140	600×140

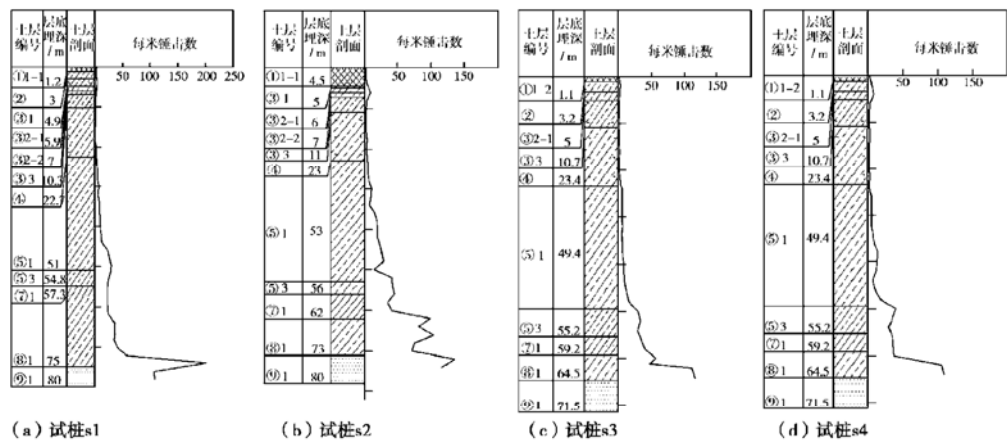


图 3 试桩每米锤击数随桩打入深度的变化曲线

Fig. 3 Curves of blow counts per meter versus depth of pile driven in ground

3 土塞的工程特性

沉桩过程中地基土进入管桩形成土塞是一个复杂过程，它受打桩过程中桩管的振动、地基土中因振动和挤压所产生的超孔隙水压力和地基土性质等诸多因素影响。土塞的稳定对桩的承载性能尤其重要。竖向荷载下，当土塞与管桩内壁摩擦阻力和土塞重量大于桩端地基土的承载力时，破坏产生在桩端土，土塞完全闭塞；当土塞与管内壁的摩擦阻力和土塞重量小于桩端地基土的承载力时，管桩破坏产生在土塞内部，土塞为部分闭塞^[4]。

3.1 打桩过程中土塞高度变化规律

在打桩过程中，测量每打入一节桩土塞高度的变化曲线，图 4 为 4 根试桩及其锚桩的土塞高度随桩贯入深度的变化曲线。由图 4 可看出，在打入深度 13 m 内时，各桩的土塞高度相差不大；随着桩的贯入，锚桩 m2，m5，m10，m11 等桩的土塞高度增长较快，试桩 s1，s2，s3，s4 等桩的土塞高度增长较慢。总的趋势是，在土层浅部，土塞刚开始形成，土塞增加较快；随着打入深度的增加，土塞已初步形成，而浅部土层较硬，中部土层较软，土塞增长缓慢；当桩即将打入到⑨₁粉细砂层时，土层压缩模量大于上覆土层，土塞高度增加又变快。当桩打入⑨₁层较大的深度时，各桩土塞均增长较快，如锚桩 m1，m7 在打最后一节

桩时分别增加 8.9 m，3.2 m，这是因为桩打入⑨₁层粉细砂层，桩端土层压缩性小，承载力大于土塞与管壁摩擦阻力，并且土的渗透系数大，地下水补给较快，土塞底部承受较大的承压水压力，土塞增长变得较快。总的看来，桩长 64 m 左右的桩打入结束时，土塞较短，在 10 m 以内；桩长 77 m 左右的桩打入结束时，土塞较长，从 8.4 m 到 29 m 左右。

土塞高度的大小主要受桩的截面尺寸内径与壁厚之比、桩靴类型及土性的影响^[7-9]。试桩 s1 的锚桩全为 φ600×140，试桩 s2，s3，s4 的锚桩主要为 φ600×110，其中 s4 的锚桩有两根为 φ500×100，桩靴类型相同。一般来说，对桩内径与壁厚之比越大的桩打桩结束时土塞高度越大，而试桩 s3，s4 及其锚桩的土塞高度仅为试桩 s1，s2 及其锚桩土塞的一半左右，与该因素的影响不一致。故影响土塞高度不同的主要因素由土性决定。同一场地，相同桩型的试桩土塞高度不一致，主要是因为管内的土塞高度受地表土层影响较大。试验场地原为老厂房的用地，地表层土软硬变化较大，在地表土层硬的地方打入的桩，土塞增长慢、高度小，在地表土层软的地方打入的桩，土塞增长快、高度大。这与文献[2]得出的经验较为一致。

3.2 打桩后土塞的稳定

打桩结束后，桩周土、桩端土、土塞均会固结。一般来说，桩侧摩擦阻力、桩端阻力、土塞与管壁的摩

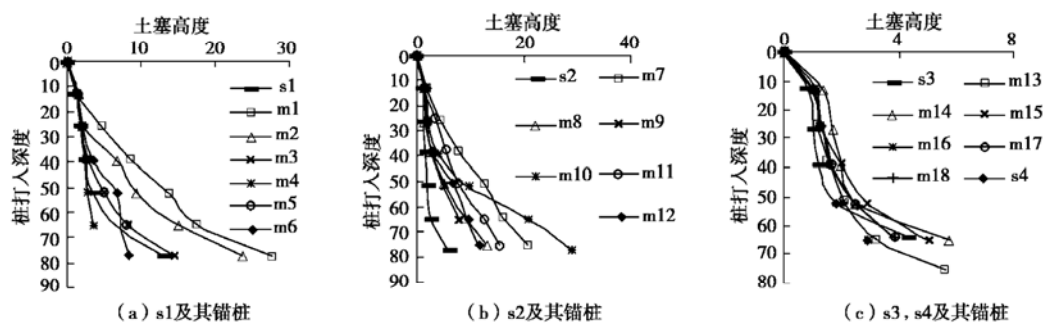


图 4 桩打入深度与土塞高度变化曲线

Fig. 4 Curves of height of soil plug inside piles versus depth of piles in ground

阻力均会因固结而增加，随着时间的增长，土塞的稳定性会逐渐增加，但由于⑨₁粉细砂层存在较高承压水，土塞的工程特性具有特殊性。在打桩结束一段时间后，土塞发生不同程度的涌动。

在打桩一个月后进行复查，发现一部分桩土塞发生涌动，具体数据如表 3 所示。总体来说，桩长为 64 m 左右，打入⑨₁粉细砂层深度不大的桩，土塞涌动更严重，土塞涌动高度最大的是锚桩 m18，高度增加 29.2 m，为原土塞高度的 7 倍多；桩长为 77 m 左右的桩土塞涌动高度较小，由于打入承压水层较深，打桩过程中土塞已经充分承受高承压水作用，形成较高土塞，故打桩过后土塞增加高度不大。尽管在同一场地，不同位置的桩土塞涌动高度、最终稳定高度不一样，这说明土塞稳定主要受土塞土性与土塞端部水压力共同决定。当进入管桩的土体土性较好，与管壁摩擦力较大，桩端处水压力不高，土塞就不会发生涌动；当进入管桩的土塞土性较差，与管壁摩擦力较小，桩端维持较大的承压水时，土塞就不易稳定。

为研究涌动后土塞的工程性质，特对部分桩的土塞取样观察，并在管内进行标贯试验。试桩 s3 涌动后的土塞具有代表性。试桩 s3 桩长 64.7 m，在桩长 40.53 m 处为涌动后土塞顶部，桩长 40.53~43.50 m 处，钻探未取到样，土体流塑；在桩长 43.5~46 m 处，为黄褐色粉质黏土，软塑；在桩长 46~51.6 m 处，由淤泥质粉质黏土及下部粉质黏土组成，流塑状态；桩长 51.6~64.2 m 处，由石英、云母组成的粉细砂，松散，标贯击数小于 10 击；桩长 64.2 m 以下，由石英、云母组成的粉细砂，密实，标贯击数显著增大，达 50

击。通过土塞的破坏情况看出，土塞在打桩后一段时间发生涌动，主要是因为打桩时产生挤土效应促使孔隙水向四周扩散，或者打桩扰动土体，土塞及桩端土的孔隙严重扰动，使桩端土的承压水的补给有一个过程。在打桩刚完毕时，土塞经长期扰动，孔隙水密闭，土塞作为一个整体抵抗端部高承压水压力；打桩后一段时间，土塞静止，超孔隙水压力扩散，土体中的孔隙逐步连通，高承压水透过土塞底部的砂层向上渗透，当达到土塞上部的黏土层时，黏土层失去平衡，首先被逐渐掏蚀而失去平衡，黏土层下的砂土层随后也逐渐失去平衡，随着土塞深度的增加，水头梯度逐渐减小，土塞砂土层由上到下由松散到密实。土塞涌动使土塞的闭塞作用严重削弱，在工程中应采取措施控制土塞的稳定。

4 单桩竖向承载力静载荷试验

4.1 试验方法

本工程 4 根试桩均为 PHC 桩，s1 长 77.9 m，s2 长 75.8 m，s3 长 64.7 m，s4 长 64.6 m，持力层为⑨₁粉细砂层。其中 s1 加载到破坏，s2，s3，s4 最大加载量分别为 5440，4640，3200 kN，为设计荷载 1.6 倍。静载试验按上海市《地基基础设计规范》(DJG - 11 - 1999) 第 14.2 - 3 条有关规定，采用慢速维持荷载法进行，s1，s2 采用六锚桩反力架装置，s3，s4 采用四锚桩反力架装置，利用电动油泵带动 3 台 5000 kN 油压千斤顶加荷，用 0.4 级精密油压表显示荷载，采用电测位移计和机械百分表二种手段同时测量沉降

表 3 打桩结束时与一个月后土塞高度的变化

Table 3 Comparison of height of soil plugs

桩号	m14	m16	s3	m18	s2	s1	m2	m10	m6
桩型	600×110	600×110	500×100	500×100	600×110	600×140	600×140	600×110	600×140
桩入土深度/m	64.9	64.9	64.7	64.7	75.9	77.9	77.9	75.9	77.9
打桩结束时土塞的高度/m	7.2	3.7	5.4	4.8	11.9	12.9	23.8	29	8.4
复查时的高度/m	26.8	12.8	25.5	34	42.7	17.7	31.3	31.3	10.7
增加倍数	3.68	3.45	4.72	7.08	3.58	1.37	1.31	1.07	1.27

值。s1 加载到 13000 kN, 维持一小时左右, 桩头压裂中止, 其余试桩加载到设计荷载的 1.6 倍, 桩材完好。

4.2 试验结果

从图 5 可看出, 4 根试桩的荷载-沉降曲线呈缓变型。s1 加载到 13000 kN 桩身破坏, 荷载-沉降曲线没有出现明显的向下转折段, 如果桩身材料没有破坏, 荷载-沉降曲线可能会仍然缓慢的向下发展, 桩还有较大的承载潜力。由此可见, 在承载力设计时除计算端阻和侧阻来满足上部结构所传递的荷载外, 必须考虑桩身强度^[10]。

在桩的设计荷载的 1.6 倍以内, 桩的荷载-沉降曲线基本成直线。试桩 s2 加载到 5440 kN 时, 桩顶沉降 31.72 mm, 卸载后残余沉降 5.01 mm, 回弹率 84.2%; 试桩 s3 加载到 4640 kN 时, 桩顶沉降 30.12 mm, 卸载后残余沉降 7.35 mm, 回弹率 75.5%; 试桩 s4 加载到 3200 kN 时, 桩顶沉降 24.8 mm, 卸载后残余沉降 3.82 mm, 回弹率 84.5%。这说明在 1.6 倍设计荷载下, 桩主要发生弹性变形, 桩身压缩量占桩顶沉降的比例较大。

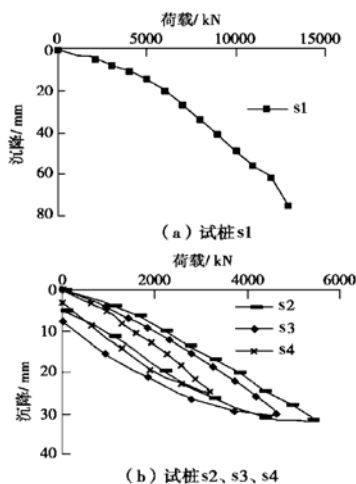


图 5 4 根试桩单桩静载荷试验曲线

Fig. 5 Static load test curves of four piles

5 结 论

(1) 在本工程中, 当桩打入较深土层时, 锤击数沿桩打入深度的变化与勘察时标贯击数沿深度的变化相似。但 PHC 桩打入⑨₁ 粉细砂层后, 每米锤击数增加较快, 打入每米所需最大锤击数可为在⑧₁ 粉质黏土中

的打入每米锤击数的 3~4 倍, 比勘察时标贯击数增加快。故对打入⑨₁ 粉细砂层的 PHC 桩, 要慎重选择打桩设备, 避免损坏桩材。

(2) 当 PHC 桩打入承压水层时, 打桩时形成的土塞较短。打桩过后, 承压水会对土塞产生较大水压力, 可能促使土塞失稳, 桩端土涌入管内, 对工程不利。

(3) 超长 PHC 桩的荷载-沉降曲线为缓变型, 承载潜力较大, 并且破坏荷载极有可能由桩身材料决定。

参考文献:

- [1] 王宏祺, 陆仁华. PHC 桩在水工工程中的应用—上海外滩防汛墙外移综合改造工程[J]. 港工技术与管理, 1995, 4(1): 1-11.
- [2] 陆昭球, 高倚山, 宋铭栋. 关于开口管桩工作性状的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 111-114.
- [3] 项培林, 钮建定. 上海港外高桥四期码头桩基地质条件分析[J]. 上海地质, 2002, 1: 27-31.
- [4] Randolph M F, Leong E C, Houlsby G T. One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles [J]. Geotechnique, 1991, 41(4): 587-198.
- [5] Kyuho Paik, Rodrigo Salgado. Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(1): 46-57.
- [6] Lee Junhwan, Rodrigo Salgado, Kyuho Paik. Estimation of load capacity of pipe piles in sand based on cone penetration test results [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(6): 391-403.
- [7] Richard D R, Ugaz G, O'Neill W. Driving characteristics of open-toe piles in dense sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(1): 72-88.
- [8] Randolph M F, Leong E C, Hyden A M, Murff J D. Soil plug response in open-ended pipe piles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(5): 743-759.
- [9] Nicola D E, Randolph M F. The plugging behaviour of driven and jacked piles in sand [J]. Geotechnique, 1997, 47(4): 841-856.
- [10] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪敏. 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.