

Y 形沉管灌注桩复合地基荷载变形特性

吴跃东^{1,2}, 戴洪军³, 乐陶^{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 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省电力设计院, 江苏 南京 210024)

摘要: Y 形沉管灌注桩是根据国外先进的 Y 形桩设计理念结合国内传统沉管灌注桩的施工工艺研制出的一种新型沉管灌注桩。结合 Y 形沉管灌注桩在某高速公路桥头软基加固中的应用, 根据理论计算和现场静载试验, 得出同等截面积的 Y 形桩比圆形桩的侧表面积增加了 50% 左右, 证明 Y 形沉管灌注桩侧摩阻力可以显著提高, 从而在等工程量的前提下可以大幅提高桩基的承载能力; 根据其工作机制分析, 表明 Y 形桩是一种以摩擦为主的摩擦桩或端承摩擦桩。通过现场监测, 对 Y 形沉管灌注桩复合地基的桩土应力比、表面沉降、土体侧向变形等变化规律进行研究, 并分析桥头软基加固效果; 监测资料和现场静载试验表明, Y 形沉管灌注桩复合地基具有承载特性好、可显著减小地基的沉降量、路基工后沉降小的特点。根据技术经济比较, 表明 Y 形沉管灌注桩比其他复合地基方法有一定的优势, 具有施工质量可靠、加固效果显著、经济合理的特点, 可以在同类工程中推广应用。

关键词: 桩基工程; Y 形沉管灌注桩; 承载力; 静载试验; 桩土应力比; 沉降; 水平位移

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 3036 - 06

BEARING CAPACITY AND DEFORMATION CHARACTERISTIC OF A COMPOSITE FOUNDATION WITH DRIVEN CAST-IN-PLACE Y PILES

WU Yuedong^{1,2}, DAI Hongjun³, YUE Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: A new driven cast-in-place Y pile, developed according to the innovative design concept of Y pile and the traditional construction technology of driven cast-in-place pile in China, was introduced in this paper. The newly developed piles were used in a ground improvement project for an expressway bridgehead. Based on the theoretical calculation and static load test results, the longitudinal surface area of a Y pile is about 50% more than that of a circular pile for a given cross-sectional area, from which its side friction and bearing capacity is substantially enhanced. The Y pile is either a friction pile or end bearing friction pile from its working mechanism. Based on the field monitoring results and static load test results, the pile-soil stress ratio, surface settlement, lateral deformation of the driven cast-in-place Y pile composite foundation were discussed. The Y pile composite foundation has better bearing characteristics while the foundation settlement and post-construction settlement of embankment are substantially reduced. From the technical and economical point of view, it has certain advantages over other composite foundation on reliable construction quality, significant reinforcement effect and economical rationality. It can be applied to other projects with similar geological conditions.

收稿日期: 2007 - 11 - 01; **修回日期:** 2008 - 01 - 01

作者简介: 吴跃东(1969 -), 男, 1999 年于河海大学岩土工程专业获硕士学位, 现任副教授, 主要从事地基处理与岩土工程测试方面的教学与研究工作。E-mail: wydhdx@yahoo.com.cn

Key words: pile foundations; driven cast-in-place Y pile; bearing capacity; static load test; pile-soil stress ratio; settlement; horizontal displacement

1 引言

桩土复合地基是目前国内处理高速公路桥头软土地基常用的方法^[1], CFG 桩^[2]、现浇薄壁管桩^[3]和沉管灌注筒桩^[4]等地基处理方法也引入桥头软基处理, 而异形截面桩的应用较少^[5], Y 形沉管灌注桩作为异形截面桩也开始在高速公路上应用^[6], 它是根据国外先进的 Y 形桩设计理念结合国内传统沉管灌注桩的施工工艺研制出的一种新型沉管灌注桩。Y 形桩始见于法国^[7](原名 Barrette, 译名为壁板桩、巨型桩), 它是用地下连续墙幅拼构成的特大形桩。Y 形沉管灌注桩的断面形状为三段弧线弧面向内组成的曲边三角形, 它采用普通沉管桩的成桩工艺, 仅将原有的圆管形桩模改为 Y 形桩模, 这样既保持了沉管灌注桩施工快捷、价格低廉的优势, 又发挥了等截面非圆形桩侧表面积增大、摩阻力提高的特点, 从而在等工程量的前提下大幅提高了桩基的承载能力。但 Y 形桩的应用时间相对较短, 应用的例子亦较少, 尚未形成一套统一的设计、施工、检测技术标准^[8], 本文结合 Y 形桩在某高速公路软基处理中的应用, 对 Y 形桩复合地基的承载特性、工作机制、在路堤荷载作用下的沉降及桩土荷载分担等规律进行了分析与研究。

2 试验场地概况

2.1 工程地质条件

本试验段的高速公路所在区域地貌上属于杭嘉湖平原区的 2 个亚区: 即钱塘江河口冲~海积平原亚区(II1)和太湖—冲湖积平原亚区(II2)。地势较为平坦, 海拔高度一般为 1.5~5.5 m, 自西向东微微倾斜, 多河塘分布, 河港沟塘纵横连通, 系典型的水网化平原区。

试验段位于嘉兴市秀洲区新塍镇西吴村新塍至乌镇公路北侧, 场地工程地质条件及其具体物理力学指标详见表 1。

2.2 Y 形桩的设计

Y 形桩具体尺寸见图 1, 平面上采用正三角形

表 1 土体物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical parameters of soil

分层代号	土的类别	土层厚度 /m	天然含水量 w/%	孔隙比 e	塑性指数 I _p	直剪	
						c _q /kPa	φ _q /(°)
①	亚黏土	2.0~2.5	34.4	0.948	17.0	-	-
②	淤泥质黏土	10.0~16.5	48.0	1.371	18.0	10	8.0
③	亚黏土	6.5~8.9	32.0	0.893	15.7	23	9.2
④ ₁	亚黏土	9.0~11.5	36.3	1.059	15.9	13	6.8
④ ₂	亚黏土	0.0~3.2	33.8	0.898	15.9	17	9.7
⑤	黏土	0.2~3.4	31.6	0.887	13.9	14	8.2

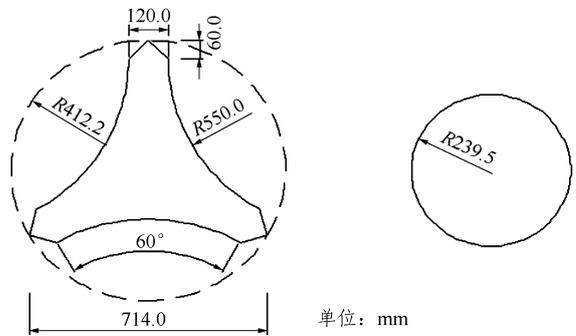


图 1 Y 形桩的截面图
Fig.1 Section of driven cast-in-place Y pile

布置, 采用振动沉管灌注, 桥头路段桩距为 2.3~2.5 m, 过渡段桩距为 2.5~2.8 m, 处理深度为 17~19 m。桩身采用 C25 混凝土浇筑, 桩帽采用 C30 混凝土浇筑, 直径为 1.4 m, 桩帽厚度为 35 cm, 桩帽顶铺设一层断裂延伸率为 3%、抗拉强度为 80 kN/m 的钢塑格栅。Y 形桩施工工艺归纳为“静压贯入、轻振拔出、分级加料、逐斗提升”的施工原则^[9]。

3 Y 形桩承载特性和工作机制

3.1 比表面积计算

根据理论计算, 图 1 所示尺寸的 Y 形桩其截面面积为 0.18 m², 周长为 2.237 m, 同等截面积的圆形桩其周长仅为 1.505 m。对于桩而言, 其侧表面积比圆形桩增加了 50%左右, 相应的桩的侧摩阻力增加, 总承载力也得到有效的提高。

3.2 静载荷试验

试验段共做了 8 根单桩竖向静载荷试验。各试桩均按慢速维持荷载法进行试桩, 试桩结果如表 2, 图 2 为桩长 17 m 的荷载 - 沉降曲线(Q-S)图。试桩中, 除 Q - 2, U - 2 两桩有明显的第二拐点, 曲线呈陡降型外, 其余曲线均呈缓变型。19 m 的桩荷载 - 沉降曲线均呈缓变型, 除 A2 - 16 桩外单桩极限承载力均大于 1 300 kN, 可取 1 760 kN, 比设计单桩极限承载力(1 300 kN)提高 35.4%。17 m 的桩荷载 - 沉降曲线呈缓变型、陡降型各占一半, 单桩极限承载力均大于 950 kN, 取 950 kN, 比设计单桩极限承载力(740 kN)提高 28.4%。2 个取芯试桩 A2 - 16 和 R - 12 的沉降量都较大, 而荷载 - 沉降曲线均为缓变型, 故单桩竖向极限承载力仍可分别取 1 300 和 950 kN。这与其他试桩结果相比较^[10], 可以说明 Y 形桩的单桩承载能力是比较大的。

表 2 试桩竖向静载成果表
Table 2 Results of vertical static load test of test pile

桩号	桩长/m	最大试验荷载/kN	最大沉降量/mm	极限承载力/kN
A - 19	19	1 300	4.08	>1 300
C - 19	19	1 300	3.89	>1 300
C - 19F	19	1 760	13.67	1 760
A2 - 16	19	1 300	22.03	1 300
S - 2	17	1 300	19.63	1 300
U - 2	17	1 000	55.12	950
R - 12	17	900	51.07	950
Q - 2	17	1 000	18.56	950

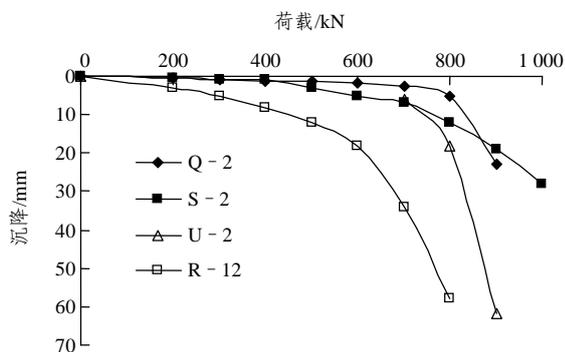


图 2 嘉兴段试桩的 Q-S 曲线

Fig.2 Q-S curves of test piles in Jiaxing section

3.3 工作机制分析

Y 形沉管灌注桩成桩过程中产生强烈的挤土作用, 使桩周土扰动重塑, 侧向压应力增加。对于非

饱和土, 由于受挤压增密, 导致桩侧阻力提高, 土愈松散, 黏性愈低, 其挤效果愈明显。对于饱和黏性土, 由于瞬时排水固结效应不显著, 体积压缩变形小, 引起超孔隙水压力, 土体产生横向位移和竖向隆起^[11]。在靠近桩土界面 5~20 mm 土层, 由于超孔隙水压力最大, 在桩表面形成水膜, 可以降低沉桩贯入阻力, 经静置一段时间, 桩表面土固结形成紧贴于桩表面的硬土层。浇注混凝土时, 水泥浆渗入桩表面土中形成紧贴于桩身的硬壳层。随桩侧土中剪应力的增加, 塑性滑移面沿硬壳层外侧出现破坏, 这相当于增大了有效桩径, 总侧摩阻力因此提高。根据前面竖向静载荷试验资料分析, Y 形桩承载力较大, 其沉降大部分变形属桩端压缩变形。由于桩侧摩阻力先于桩端阻力发挥, 当桩身荷载增加到一定程度后, 桩外侧摩阻力会完全发挥, 这时桩身荷载如继续增大, 所增加的荷载则由桩端承担。桩端阻力增大到一定程度后, 桩端沉降急剧增大, 桩达到破坏。根据前面计算同等截面积的 Y 形桩比圆形桩的侧表面积增加了 50%左右, 以及其工作机制分析, 表明 Y 形桩是一种以摩擦为主的摩擦桩或端承摩擦桩。

4 监测结果分析

4.1 桩土应力比

桩土应力比是反映桩体和桩间土协同工作的重要指标。复合地基中影响桩土应力比的因素很多^[12], 包括荷载水平、基础刚度、桩土模量比、褥垫层模量和厚度、桩长、置换率等。

试验段土压力计分别埋设于桩顶和桩间土的中间位置, 不同荷载作用下桩顶和桩间土压力变化见表 3。从表 3 可以看出, 随着路堤荷载的增加, 由于桩间土的沉降大于桩顶的沉降, 路堤中产生土拱效应, 桩间荷载向桩顶转移, 桩土应力比和桩体荷载分担比逐渐增大, 当达到 Y 形桩的极限荷载后, 桩体和桩间土根据荷载分担比来共同承担上部的路堤荷载。

从图 3 看出不同 Y 形桩桩长 - 桩土应力比变化呈现基本相同的规律, 填土初期复合地基受力以桩间土为主, 当桩间土与土工格栅紧密结合后, 随着荷载水平提高, 桩土应力比逐渐增大, 增大的幅度也随着荷载水平提高而增大。桩长为 12 m 时, 桩端

表 3 不同荷载作用下桩顶和桩间土压力变化
Table 3 Changes of soil pressure under different loads kPa

荷载	桩顶压力	桩间土压力
9	19	24
22	39	30
37	66	21
50	95	16
65	122	11
78	151	12

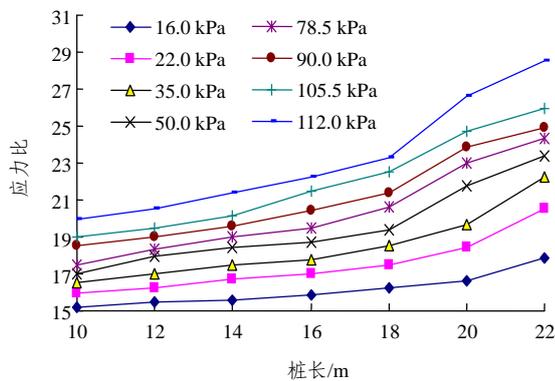


图 3 不同荷载下桩土应力比 - 桩长关系

Fig.3 Relation between pile-soil stress ratio and length of pile under different loads

位于软土层, 在整个加载范围内桩土应力比的值都比较小。桩长由 12 m 增加的 18 m 的过程, 应力比的增长幅度较小, 特别是在较低的荷载水平时, 桩土应力比几乎不变。当桩长达到 20 m 后, 桩体穿透软土层, 桩土应力比在整个加载范围内有较大幅度提高。这也反映了桩端土的模量对桩土应力比也有一定的影响。

4.2 表面沉降

软土地基的沉降是高速公路路堤填筑过程中一个十分重要的指标, 它是确保路堤不产生失稳破坏的关键所在, 同时也是加固效果的最直接反映。

由图 4 可以看出, 沉降增长趋势与荷载施加规律一致, 加载期间沉降增长较快, 说明土体瞬时沉降较大; 预压期沉降曲线逐渐收敛, 但是沉降有滞后效应。该断面右边的沉降管由于前期受施工破坏, 恢复较迟, 造成沉降量偏小。在观测的 392 d 里, 最大沉降量为 223 mm, 加载期间最大沉降速率为 1.5 mm/d, 预压期间最小沉降速率收敛到 0.08

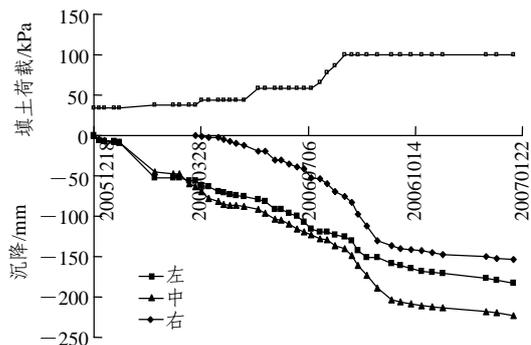


图 4 时间 - 荷载 - 沉降关系图

Fig.4 Relation curves of time-load-settlement

mm/d, 沉降速率已经连续 3 个月小于 5 mm/月, 完全满足规范可以进行路面施工的要求。5 m 高的填土荷载对 Y 形桩复合地基引起的总沉降并不大, 说明 Y 形桩可以有效减小软土地基的沉降。

4.3 深层水平位移

土体侧向位移大小是判别高速公路路堤地基稳定与否的控制指标之一。图 5 为路堤荷载施加后深层水平位移随时间的变化曲线。从图中可以看出, 土体的水平位移整体上是场内向场外移动的, 侧向位移值较小, 与分层曲线相对应, 水平位移主要发生在桩间土的表层。最大的水平位移达到 18.2 mm, 在地基 7.5 m 深处。观测结果表明 Y 形桩加固区内土体向外水平挤出变形较小, 路基不会失稳。

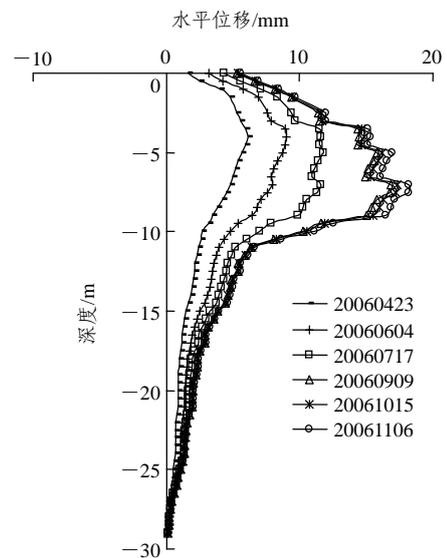


图 5 断面右管水平位移随时间变化曲线

Fig.5 Horizontal displacement-time curves of right oblique tube at cross-section

4.4 分层沉降

分层沉降布置在路堤断面的中间, 上部 8 m 段

每米布置一个磁环，8 m 以下深度每 2 m 布置一个磁环。通过对分层沉降的监测及分析，可以看出路基不同土层的沉降量，对路基的加固影响深度和加固效果以及下卧层变形情况。观测结果如图 6 所示(相对沉降为各磁环相对于 2006 年 1 月 15 日的沉降)，沉降和压缩变形主要发生在表层桩间土约 5~7 m 深处，沉降沿深度逐渐减小。沉降曲线在深部变化趋于平缓，所占比例较小，约为地表总沉降的 10%。从各磁环沉降随时间的变化情况来看，各层土的沉降量都较小，最上面磁环的沉降与表面沉降相比偏小，可能是总沉降量较小监测误差所致。

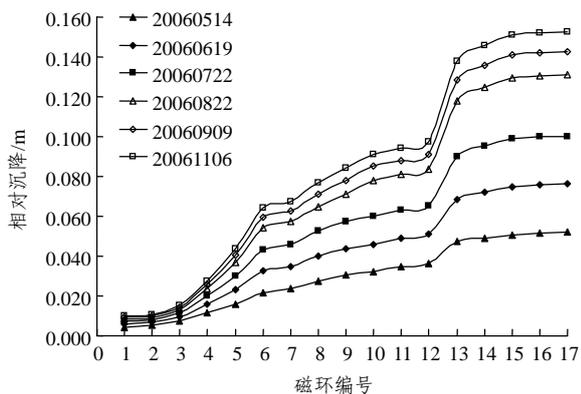


图 6 断面分层沉降曲线

Fig.6 Layered settlement curves of cross-section

4.5 孔隙水压力

孔隙水压力的消散情况可以判别地基的固结状态，监视地基稳定性的发展，防止地基破坏。由图 7 可看出，随着填土荷载的增加孔隙水压力逐渐增大，但是孔压变化幅值随着深度的增大而减小，在 20 m 深处的孔压变化则很小，而地基处理深度为 19 m，这表明 Y 形桩加固区路基荷载主要由加固区桩体来承担，深层土体所受压力较小，未产生较大的压缩沉降。Y 形桩复合地基对竖向荷载的承载能

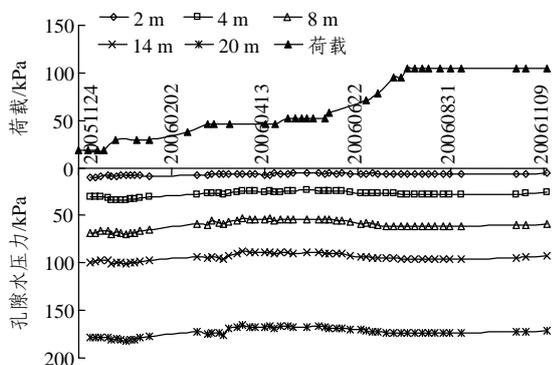


图 7 不同深度下孔隙水压力 - 荷载 - 时间的关系

Fig.7 Relation curves of time-load- pore water pressure

力较好，因此路堤的稳定性较好，在路堤填筑施工中，当外部条件允许时，可以不需要考虑路堤失稳破坏的情况，进行连续填筑。

5 技术经济比较

搅拌桩是目前处理桥头软土地基常规的方法，设备简单，造价合理，但是施工质量不易控制，而且处理深度有限；CFG 桩、预应力管桩形成的复合地基加固效果较好，但是造价较高；而现浇混凝土薄壁管桩尽管单桩承载力较高，但是成桩质量不易控制；Y 形沉管灌注桩复合地基具有承载特性好、可显著减小地基的沉降量、路基工后沉降小特点，而且施工质量容易控制，造价经济合理。取桥头路基长度 50 m、顶宽 35.5 m、填高 5.0 m、软土深度 16 m 的路段进行分析，根据交通设计院的设计参数，几种复合地基处理方法技术经济指标比较见表 4。

表 4 技术经济指标

Table 4 Indexes of technological economy

处理类型	桩长 /m	间距 /m	桩径 /mm	根数	单价 /($\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$)	总费用 /元
浆喷桩	19	1.2	500	356	40	270 440
预应力管桩	19	2.4	400	89	245	414 112
Y 形桩	19	2.4	714	89	180	304 245

从表 4 可以看出，管桩造价最高，浆喷桩造价最低，但是其成桩质量难以保证，而 Y 形沉管灌注桩技术优势明显，经济合理。本试验段试验数据表明，桩间距 2.4 m 时，Y 形桩承载力富裕量较大，还可以增大桩间距，降低工程造价。

6 结论

Y 形沉管灌注桩复合地基是一种新的软基处理技术，该技术在高速公路中应用所积累的经验较少，本文通过某高速公路试验路段现场试验和监测，表明该方法加固后的桥头软土地基具有沉降收敛快、工后沉降小、节省工期的特点。

(1) 通过现场静载试验和理论计算分析，同等截面积的 Y 形沉管灌注桩比圆形桩的侧表面积增加了 50%，表明 Y 形桩是一种以摩擦为主的摩擦桩或

端承摩擦桩, 具有承载能力强的特点。

(2) 本试验段在路堤荷载作用下桩与桩间土的沉降存在着明显的差异, 桩、土应力比随荷载的增加, 呈现出线性增长的趋势。桩间荷载向桩顶转移, 桩土应力比和桩体荷载分担比逐渐增大。

(3) 本试验段试验数据表明, 在 5 m 高路堤荷载作用下, Y 形沉管灌注桩间距 2.4 m 时, 承载力富裕量较大, 还可以适当增大桩间距, 降低工程造价。

(4) Y 形沉管灌注桩复合地基沉降量随深度逐渐减小, 能有效减小下卧层的附加沉降, 同时使桩的承载能力也得到充分的发挥, 有效控制工后沉降。

(5) 根据技术经济比较, Y 形沉管灌注桩与其他复合地基加固桥头软基方法相比, 具有施工质量可靠、加固效果显著、经济合理的特点, 可以在同类工程推广应用。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 94 - 94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 94 - 94 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.(in Chinese))
- [2] 林 智, 王 跃. CFG 桩技术在高速公路软土地基中的应用[J]. 水运工程, 2007, 7(7): 98 - 101.(LIN Zhi, WANG Yue. Application of CFG pile technique in expressway's soft soil ground treatment[J]. Port and Waterway Engineering, 2007, 7(7): 98 - 101.(in Chinese))
- [3] 张 波, 刘汉龙. 现浇薄壁管桩复合地基竖向承载特性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1 251 - 1 255.(ZHANG Bo, LIU Hanlong. Analysis of bearing performance of composite foundation with cast-in-situ concrete thin-wall pipe piles under vertical loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1 251 - 1 255.(in Chinese))
- [4] 朱向荣, 叶俊能, 姜贤放, 等. 沉管灌注筒桩的承载特性浅析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 538 - 542.(ZHU Xiangrong, YE Junneng, JIANG Xianfang, et al. Preliminary analysis on load-bearing characteristics of driven-tube cast-in-place[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 538 - 542.(in Chinese))
- [5] 唐传政, 李受祉, 申俊甫, 等. 异型截面水泥土桩墙在基坑支护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1 760 - 1 763.(TANG Chuazheng, LI Shouzhi, SHEN Junpu, et al. Application of cement-soil retaining walls with irregular section in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1 760 - 1 763.(in Chinese))
- [6] 徐立新, 杨少华, 段 冰. 高速公路 Y 形沉管灌注桩软基处理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 120 - 124.(XU Lixin, YANG Shaohua, DUAN Bing. Field tests on Y-shaped vibro piles to improve soft clay ground under the expressways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 120 - 124.(in Chinese))
- [7] 雷国辉. 壁板桩基础[M]. 北京: 科学出版社, 2006.(LEI Guohui. Barrette foundations[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 陆见华, 陆小曼. Y 形—异形沉管灌注桩的试验研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, (4): 18 - 22.(LU Jianhua, LU Xiaoman. Field tests on Y-shaped vibro piles[J]. Chinese Journal of Zhejiang Water Power School, 2002, (4): 18 - 22.(in Chinese))
- [9] 陆见华, 凌兰芳, 张广兵, 等. Y 形沉管灌注桩现场工艺试验报告[J]. 浙江建筑, 2004, 21(1): 19 - 21.(LU Jianhua, LING Lanfang, ZHANG Guangbing, et al. The field test report of technology of Y-shaped vibro-piles[J]. Zhejiang Construction, 2004, 21(1): 19 - 21.(in Chinese))
- [10] 李海芳, 温晓贵, 龚晓南. 路堤荷载下刚性桩复合地基的现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 419 - 421.(LI Haifang, WEN Xiaogui, GONG Xiaonan. Field study of a composite road foundation with low strength piles under embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 419 - 421.(in Chinese))
- [11] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [12] 费 康, 刘汉龙, 高玉峰. 路堤下现浇薄壁管桩复合地基工作特性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1 390 - 1 396.(FEI Kang, LIU Hanlong, GAO Yufeng. Performance of cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile composite foundation under road embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1 390 - 1 396.(in Chinese))