

双排筒桩海堤受力性状分析

王 哲¹, 许四法¹, 庄迎春²

(1. 浙江工业大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310032; 2. 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 双排筒桩海堤结构是针对筒桩的良好抗弯能力提出的一种结构型式。首先进行模型简化及基本假定, 然后结合一实例运用地基系数法, 结构位移法及自由端作用任意荷载的管桩计算理论进行基桩受力的内力和变位计算, 并分析了桩间距 B_1 、排间距 B_2 的变化对筒桩海堤荷载传递性状的影响。

关键词: 海堤; 筒桩; 抗弯; 荷载传递; 解析解

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0367-06

作者简介: 王 哲(1978-), 男, 山东梁山人, 副教授, 主要从事环境岩土工程及桩基工程方面的研究。E-mail: wangzsd@zjut.edu.cn。

Force analysis of sea embankment with double-row tubular piles

WANG Zhe¹, XU Si-fa¹, ZHUANG Ying-chun²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Department of Structural & Geotechnical Engineering, East China Investigation & Design Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Several kinds of sea wall structures are introduced. The equivalent pile top load of each pile of double-row-pile sea wall is obtained by means of the method of structure displacement. The loads acting on the tip of the sea wall are equivalent to those at each pile top. Bending force and transverse distortion along pile are calculated under three kinds of working conditions, which are single pile under load during construction period, fugacious load domino effect combination during sea wall construction period and permanent load domino effect combination during common operation period. Influences of changes of pile spacing between and row spacing on load transfer characteristics of sea wall are analyzed.

Key words: sea embankment; cast-in-situ tubular pile; bending strength; load transfer; analytical solution

0 引言

大直径灌注筒桩又称大直径现浇混凝土薄壁筒桩, 目前该技术在多项高速公路、工民建、海洋工程中得到成功应用。关于筒桩的承载性状, 国内学者已经展开了一些研究工作^[1-12], 分析了筒桩的荷载传递机理, 并通过数值和解析方法分析了筒桩承载力的制约因素。

双排筒桩海堤结构是针对筒桩的良好抗弯能力提出的一种新结构型式, 此结构型式的特点是受力性能好, 具有良好的耐久性, 能适用于防波堤、围海海堤、护岸等。该新型结构兼顾了板桩和重力式结构的优点, 采用向海侧抛石加固的方法, 有效降低了桩身变形及桩身内力。一些学者介绍了小排距双排筒桩海堤结构(排距为8倍直径以内)的施工工艺并分析了其设计计算原理^[3]。刘汉龙等介绍了大排距双排筒桩海堤结构的施工工艺并分析了其设计计算原理^[4]。它们均是将海堤结构作为重力式挡土结构进行结构分析的, 该

方法将双排桩和排桩间回填物作为一个整体挡墙进行计算, 仅能进行整体稳定验算, 而不能分别计算出前后排桩的受力性状。近年来, 一些学者通过足尺试验和数值模拟对现浇混凝土大直径管桩水平承载形状进行了研究^[5-7]。为了获得双排筒桩海堤基桩承载受力性状, 本文结合某工程算例运用地基系数法及结构位移法求出作用于筒桩海堤的荷载分配给各桩头, 然后根据自由端作用任意荷载的管桩计算理论^[12]进行基桩受力的内力和变位计算, 并对各影响因素进行了分析。

1 模型简化及基本假定

如图1所示, 筒桩海堤采用了直立式混凝土桩板结构, 由双排筒桩和双层桁架梁结构组成的空间格架结构。桩顶采用钢筋混凝土现浇板连接, 两排桩之间

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y1091054); 浙江省科技厅项目(2010C33073)

收稿日期: 2011-08-04

采用横梁、系梁加强两排之间的刚性连接。在内海侧

筒桩的海面以下设置预制挡土板插入，海面以上

表 1 设计波浪要素

Table 1 Design wave elements

波向	水位	重现期/a	$H_{1\%}$	$H_{4\%}$	$H_{13\%}$	波高 H	周期 T	波长 L
NE	设计高水位	50	3.20	2.76	2.29	1.53	6.2	46.1
	设计低水位	50	2.99	2.61	2.22	1.52	5.9	37.8
SW	设计高水位	50	2.80	2.40	1.98	1.31	5.7	41.2
	设计低水位	50	2.57	2.23	1.88	1.27	5.6	33.4
SE	设计高水位	50	3.62	3.15	2.65	1.78	7.4	57.4
	设计低水位	50	2.93	2.57	2.19	1.50	7.4	49.3

现浇混凝土挡土板，并与筒桩及梁系结构用混凝土现浇。海堤筒桩采用梅花型或矩形布置。

假定上层系梁与桩顶上部现浇板合而为一，为绝对刚体，并与桩顶刚性联结，为通俗表达起见，将其叙述为顶板。第二层系梁增强筒桩结构整体效应，计算时忽略其作用，而作为安全储备。桩侧土地地基系数在地面处为零，随深度成线性增大。

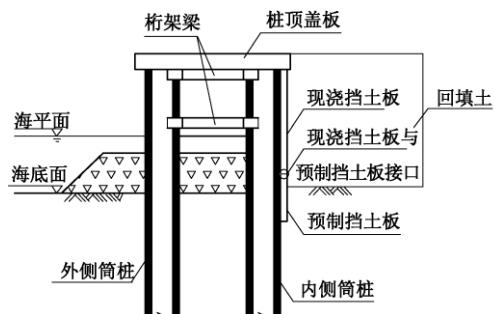


图 1 筒桩海堤结构示意图

Fig. 1 Structure of sea embankment with tubular piles

2 双排筒桩海堤计算

2.1 工程概述

本计算实例为广东省惠州市大亚湾石化工业区海堤筒桩结构工程，本节主要内容计算基桩的受力性状分析，计算模型参见图 1。本工程海堤结构采用直立式混凝土板桩结构，由双排 $\Phi 1500 \text{ mm}$ (壁厚 180 mm) 现浇筒桩和两层截面梁 ($300 \times 500 \text{ mm}$) 的杆系桁架结构组成空间框架结构。远海侧筒桩间设置挡土板，海底以下由预制挡土板插入，海面以上由现浇挡土板与筒桩及梁系结构整浇，有效增大了结构整体刚度。

2.2 计算参数

设计时，首先需要设计资料参数的确定，如水位、波浪海流、工程地质条件、暂时和永久作用荷载、高程设计等资料。堤顶高程设计参考《堤防工程设计规范》，海堤堤顶标高 4.5 m ；大亚湾湾口朝向 SE，波浪要素参见表 1；桩体结构与设计水位参数如表 2；工程地质条件选取断面如图 2 所示。海堤筒桩主要作为横向承载桩，其水平荷载有波浪力、风力、震动力等。

需要说明的是一般海洋结构物所受的载荷如波浪力、冰作用力等均具有动力特性，因此原则上将应该对结构进行动力分析，但是当结构物所处的海域是浅海或结构的高度较低而刚度较大时，其自振频率远大于荷载的频率，这时按静力问题来分析是可行和可靠的。

海堤永久荷载按人性和小型车辆通行要求；耐久性按 50 a 以上；吹填物料为流动性淤泥。填海区地基加固后形成陆域标高最低 4.5 m 。

表 2 筒桩结构部分计算参数与部分设计水位参数

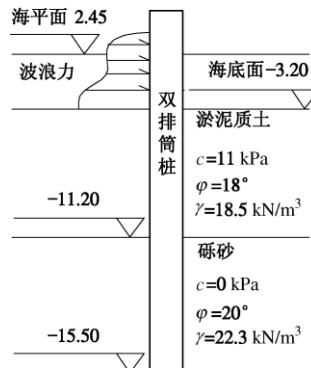
Table 2 Parameters of tubular piles and design water levels

筒桩结构体的部分计算参数	设计水位/m
桩径/m (壁厚/mm)	1.5(180)
排距	设计高水位 0.17
桩间距	校核高水位 3.92
桩长/m (入土深度/m)	校核低水位 -0.40

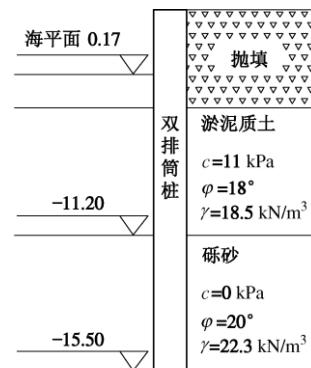
2.3 计算分析

应该根据地形地质条件、断面型式、塘高以及波浪条件基本相同的原则，将全线海堤划分为若干区段，每个区段选择 $1\sim 2$ 个有代表性的断面进行稳定分析。

筒桩海堤结构属于直立护岸结构。在筒桩海堤设计中作 3 种工况的计算，取其中最大弯矩作用截面进行下一步计算：①施工期荷载作用下单桩计算，即要满足单根筒桩完成，在海水波浪力作用下的工况；②施工期短暂作用效应组合：海堤筒桩施工完毕墙后未回填，外海侧水位为设计高潮位并有波浪力作用。此时的计算模型见图 2 (a)；③按正常使用极限状态，采用作用效应的持久组合。既满足整个结构形成后，后背有填土压力，设计低水位时工况，此时的计算模型见图 2 (b)。



(a) 施工期短暂效应计算模型



(b) 正常使用持久组合计算模型

图 2 工程地质剖面图及计算模型

Fig. 2 Profile of engineering geology and computing model

(1) 单桩计算

单桩计算模型如图 3。

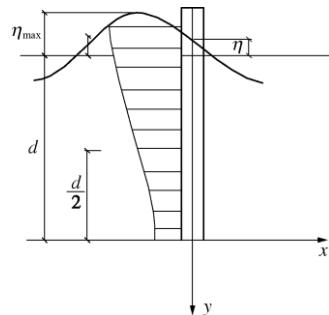


图 3 单桩波浪力计算模型图

Fig. 3 Model for computing wave forces on single pile

波浪力由速度分力和惯性分力组成, 可按下列公式计算:

$$p = \alpha p_D + \beta p_I ,$$

$$p_D = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} C_D D \cdot u \cdot |u| ,$$

$$p_I = \frac{\gamma}{g} C_M A \frac{\partial u}{\partial t} ,$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(h-y)}{L} \right]}{\sinh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)} \cos(\omega t) ,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(h-y)}{L} \right]}{\sinh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)} \sin(\omega t) .$$

上式中计算参数见《海港水文规范》8.3 节。其中 $C_D = 1.2$, $C_M = 2.0$ 。 u , $\partial u / \partial t$ 分别为水质点轨道运动的水平速度和水平加速度。查表可得 $\alpha = 2.18$, $\beta = 1.28$ 。计算可得

$$p = \begin{cases} -62.12 \text{ kN/m}, & y = h - (d + \eta) \\ -52.04 \text{ kN/m}, & y = h - (d + \eta/2) \\ -44.96 \text{ kN/m}, & y = h - d = h - 5.65 \\ -35.44 \text{ kN/m}, & y = h - d/2 \\ -32.63 \text{ kN/m}, & y = h \end{cases}$$

上式中, h 为基桩海底面以上长度, 即为自由长度。应用第 3 章内容, 可得单桩弯矩和变位图, m 值取 5000 kN/m^4 , 如图 4 和图 5。

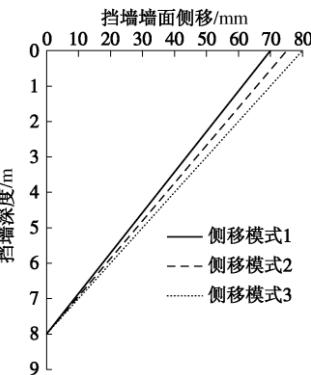


图 4 单桩工况下桩身弯矩曲线

Fig. 4 Curves of bending moment of single pile

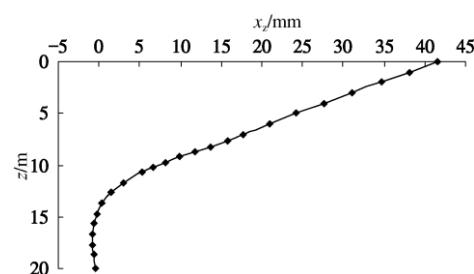


图 5 单桩工况下桩身变位曲线

Fig. 5 Curves of displacement of single pile

(2) 施作用效应的短暂组合

单桩此种工况为海堤筒桩施工完毕墙后未回填, 外海侧水位为设计高水位 (2.45 m) 并有波浪力作用。此种工况计算方法同工况 (3)。靠海侧筒桩按单桩波

浪力模型计算；抛石压力按朗肯主动土压力计算， $c=0$ kPa， $\varphi=40^\circ$ ， $\gamma=20$ kN/m³。靠陆侧直墙式筒桩海堤波浪力的计算参见《海港水文规范》8.1.9 节。海底面-3.2 m。

(3) 正常使用下作用效应的持久组合

此工况对应整个结构形成后，设计低水位(0.17 m)且后背有填土压力。墙背土压力按朗肯主动土压力计算，抛石压力按被动土压力计算。吹填物为吹填淤泥质混砂， $c=9$ kPa， $\varphi=18^\circ$ ， $\gamma=17$ kN/m³。如图 6 所示。

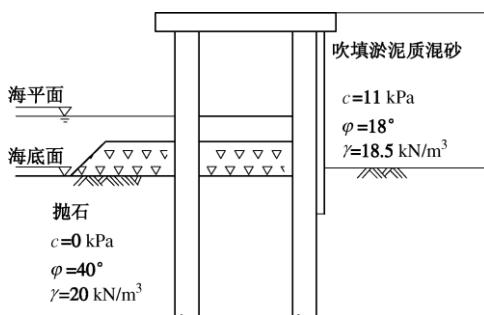


图 6 正常使用下作用效应的持久组合计算模型图

Fig. 6 Model for permanent load effect combination during common operation period

a) 土压力计算

抛石高度为 2 m。参数为 $c=0$ kPa， $\varphi=40^\circ$ ， $\gamma=20$ kN/m³。抛石顶部被动土压力强度 $q_1=0$ ，底部土压力强度 $q_2=-91.97$ kPa，桩的计算宽度为 $W_D=0.9(D+1)=2.25$ m。

墙背后海平面以上顶部主动土压力强度为 $q_1=0$ ，底部土压力强度 $q_2=42.28$ kPa；墙背后海平面以下顶部及底部主动土压力强度为 $q_1=18.28$ kPa， $q_2=32.51$ kPa，桩的计算宽度为桩间距 B_1 ，此处取为 3 m。

b) 基桩受力计算

靠海侧各荷载函数如下，其单位参见文献[12]：

$$T(7.7)=-27.58,$$

$$S(7.7)=68.96,$$

$$R(7.7)=-137.95,$$

$$Q(7.7)=-206.93.$$

靠陆侧荷载函数为

$$T(7.7)=-27.58+371.55+340.59=684.59,$$

$$S(7.7)=68.96-429.03-417.87=-777.94,$$

$$R(7.7)=-137.95+396.33+392.19=650.57,$$

$$Q(7.7)=-206.93+274.59+256.74=324.4.$$

应用结构位移法，可得分配到靠海侧和靠陆侧桩头的力为

$$\begin{aligned} P_H &= 20 \text{ kN}, \\ H_H &= -117.07 \text{ kN}, \\ M_H &= 771.01 \text{ kN}\cdot\text{m}, \\ P_L &= 20 \text{ kN}, \\ H_L &= 117.07 \text{ kN}, \\ M_L &= -771.01 \text{ kN}\cdot\text{m}. \end{aligned}$$

参考文献[12]，可得靠海侧和靠陆侧桩的弯矩和变位图，如图 7~9。

由上面各弯矩和位移图可知，正常使用下作用效应的持久组合工况下靠陆侧桩身有最大值弯矩-1975 kN，可以作为下一步计算依据；正常使用下作用效应的持久组合工况下抛石，较大幅度降低了桩身弯矩和桩身水平变位。

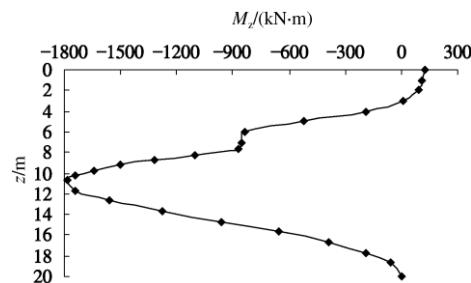


图 7 施作用效应的短暂组合工况下靠海侧桩身弯矩曲线

Fig. 7 Curves of bending moment of seaward piles under short-term load combination during construction period

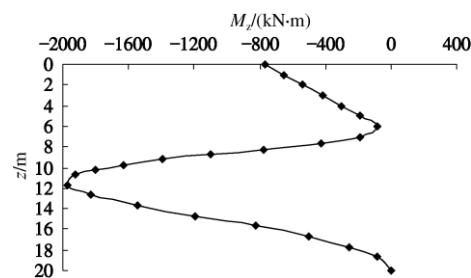


图 8 正常使用下作用效应的持久组合工况下靠陆侧桩身弯矩曲线

Fig. 8 Curves of bending moment of landward piles under permanent load combination during common operation period

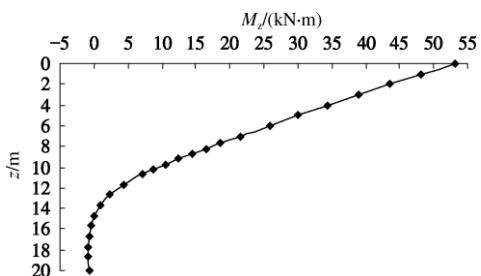


图 9 正常使用下作用效应的持久组合工况下靠陆侧桩身变位曲线

Fig. 9 Curves of displacement of landward piles under permanent

load combination during common operation period

2.4 桩土参数对筒桩海堤工作性状的影响

影响筒桩海堤荷载传递性状的主要参数有 M , H , V , h , E , D , t , m , l , 桩间距 B_1 和排间距 B_2 。本节分析 B_1 和 B_2 的变化对筒桩海堤荷载传递性状的影响。表 3 列出了与各图相应的参数取值, 单

位同前面各表图。以正常使用下作用效应的持久组合工况下靠陆侧桩为例作为计算对象, 波浪荷载同本文计算实例。计算结果如图 10, 11 所示。

图 10 为桩间距 B_1 对桩身弯矩的影响曲线。从图

表 3 图 10 至图 11 中计算参数取值

Table 3 Values for parameters in Figs. 10 and 11

图序	M	H	V	h	l	E	$D(t)$	m	B_1	B_2
10	0	0	40	7.7	12.3	2.7×10^7	1.5(0.18)	5000	变值	3
11	0	0	40	7.7	12.3	2.7×10^7	1.5(0.18)	5000	变值	3

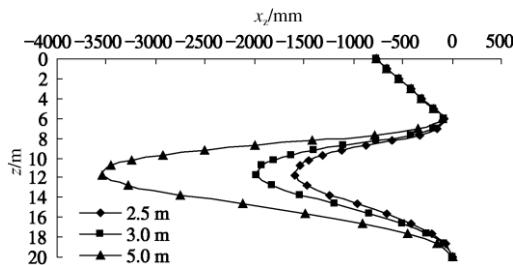


图 10 桩间距 B_1 变化下桩身弯矩曲线

Fig. 10 Curves of bending moment of piles under variable pile spacing B_1

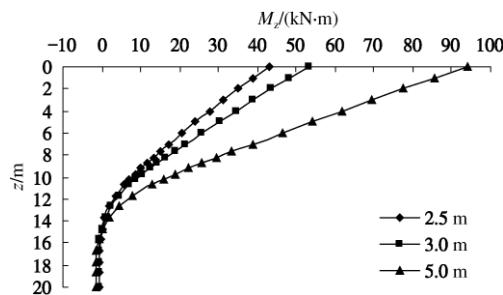


图 11 桩间距 B_1 变化下桩身水平变位曲线

Fig. 11 Curves of horizontal displacement of piles under variable pile spacing B_1

中可以看出, 不同桩间距的桩身弯矩变化趋势相同; 桩身最大弯矩随着桩间距的增大而增大, 最大弯矩点出现在海底面以下 4 m 处; 不同桩间距的 6 m 以上自由段弯矩相同。

图 11 为桩间距 B_1 对桩身水平变位的影响曲线。从图中可以看出, 不同桩间距的桩身水平变位变化趋势相同; 桩身最大水平变位随着桩间距的增大而增大, 最大水平变位出现在桩顶。

通过计算可知, 当堤顶 M , H 为零或较小时, 排间距 B_2 对桩身弯矩和水平变位的影响很小。但要注意的是, 得出此结论的假设是海堤顶板为刚性的; 随着排间距 B_2 的加大, 一方面增加工程材料的使用, 一方面保持顶板的刚性需要更大的厚度, 同时增加了造价。这里面存在一个经济排间距 B_2 问题。

3 结 论

本章结合一实例运用地基系数法, 运用结构位移法及自由端作用任意荷载的管桩计算理论进行基桩受力的内力和变位计算, 并分析了桩间距 B_1 、排间距 B_2 的变化对筒桩海堤荷载传递性状的影响。

(1) 计算了 3 种工况下的桩身弯矩和桩身水平变位: 通过计算表明: 正常使用下作用效应的持久组合工况下靠陆侧桩身有最大值弯矩-1975 kN, 可以作为下一步计算依据; 正常使用下作用效应的持久组合工况下抛石, 降低了桩身弯矩和桩身水平变位; 施工作用效应的短暂组合工况下靠陆侧桩身弯矩是从桩顶至桩头逐渐衰减的, 其他状况下均是海底面以下 3 m 至 4 m 出现桩身最大弯矩点; 桩身水平变位是桩顶处最大, 随着深度逐渐衰减的。

(2) 分析了桩间距 B_1 、排间距 B_2 的变化对筒桩海堤荷载传递性状的影响。不同桩间距的桩身弯矩变化和桩身水平变位变化趋势相同, 桩身最大弯矩和桩身最大水平变位随着桩间距的增大而增大, 最大水平变位出现在桩顶、最大弯矩点出现在海底面以下 4 m 处; 计算可知, 排间距 B_2 对桩身弯矩和水平变位的影响很小。

本文计算中没有考虑风荷载, 值得注意的是对于我国东南沿海, 风荷载很大, 对建筑物危害很大, 有时会成为主导荷载。

参 考 文 献:

- [1] 王 哲, 周 建, 龚晓南. 考虑土芯作用的大直径薄壁灌注筒桩轴向荷载传递性状分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1185 - 1189. (WANG Zhe, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Analysis of axial load-transfer of large-diameter tubular pile using cast-in-situ concretes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1185 - 1189. (in Chinese))

- [2] 叶俊能. 沉管灌注筒桩工作性状研究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2003. (YE Jun-neng. Study on the engineering properties of driven cast-in-situ piles[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese))
- [3] 王哲, 龚晓南, 郭平, 等. 大直径薄壁灌注筒桩在堤防工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 121 - 124. (WANG Zhe, GONG Xiao-nan, GUO Ping, et al. Application of large-diameter thin-wall tubular pile with cast-in-situ concrete to embankment engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 121 - 124. (in Chinese))
- [4] LIU Han-long, FEI Kang, DENG An, et al. Erective sea embankment with PCC piles[J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(2): 339 - 348.
- [5] 刘汉龙, 陶学俊, 张建伟, 等. 水平荷载作用下PCC桩复合地基工作性状[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2716 - 2722. (LIU Han-long, TAO Xue-jun, ZHANG Jian-wei, et al. Behavior of PCC pile composite foundation under lateral load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2716 - 2722. (in Chinese))
- [6] 张建伟, 刘汉龙. 多层地基中 PCC 水平荷载桩的数值解. 岩土力学, 2010, 31(5): 1638 - 1644. (ZHANG Jian-wei, LIU Han-long. Numerical solution of laterally loaded cast-in-place concrete large diameter pipe pile installed in multi-layered soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1638 - 1644. (in Chinese))
- [7] 张建伟, 温森, 孙兴亚, 等. PCC 桩与灌注桩的水平承载性能对比分析[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2010, 40(5): 533 - 536. (ZHANG Jian-wei, WEN Sen, SUN Xing-ya, et al. Comparison analysis of the lateral bearing capacity of bored pile and PCC[J]. Journal of Henan University(Natural Science), 2010, 40(5): 533 - 536. (in Chinese))
- [8] 刘汉龙, 费康, 马晓辉. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 164 - 168. (LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui. Cast-in-situ concrete thin wall pipe pile with vibrated and steel tube mould technology and its application (I): development and design[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 164 - 168. (in Chinese))
- [9] 刘汉龙, 郝小员, 费康. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372 - 375. (LIU Han-long, HAO Xiao-yuan, FEI Kang. Cast-in-situ concrete thin wall pipe pile with vibrated and steel tube mould technology and its application (II): application and in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 372 - 375. (in Chinese))
- [10] 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 Xiang-rong, YE Jun-neng, JIANG Xian-fang, et al. Preliminary analysis of load-bearing characteristics of driven-tube cast-in-place piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 538 - 542. (in Chinese))
- [11] 王哲, 龚晓南, 丁洲洋, 等. 大直径薄壁灌注筒桩土芯对承载性状影响的试验及其理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3916 - 3921. (WANG Zhe, GONG Xiao-nan, DING Zhou-xiang, et al. Research on influence of soil core on load bearing character of large-diameter tubular piles using cast-in-situ concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3916 - 3921. (in Chinese))
- [12] 王哲, 龚晓南, 费守明. 竖向力和水平向力同时作用下管桩性状研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 2): 879 - 884. (WANG Zhe, GONG Xiao-nan, FEI Shou-ming. The behaviour of single piles under axially and laterally loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 879 - 884. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)