

文章编号:1673-2049(2012)02-0030-06

搅拌桩对复合土钉墙整体稳定系数的影响分析

刘 斌^{1,2}, 杨 敏²

(1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院, 上海 200063;

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:为研究搅拌桩对复合土钉墙整体稳定系数的影响,采用以普通土钉墙整体稳定验算方法为基础并考虑搅拌桩抗剪作用的复合土钉墙整体稳定性验算公式,对分布在深圳和广州等地的 14 个复合土钉墙工程进行了计算,得到了 3 类整体稳定系数与搅拌桩长度之间的曲线规律。分析结果表明:搅拌桩对复合土钉墙整体稳定系数的提高作用明显,建议按照提高比例不大于 30% 进行工程验算。

关键词:复合土钉墙;搅拌桩;整体稳定系数;基坑深度;内摩擦角

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A

Influencing Analysis of Mix Piles on Base Stability Coefficient of Composite Soil Nailing Wall

LIU Bin^{1,2}, YANG Min²

(1. East China Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of

Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the influence of mixing piles on base stability coefficient of composite soil nailing wall, based on the checking method of base stability coefficient of the common soil nailing wall, the checking formula of the composite soil nailing wall was added with the consideration of the shear capacity of mix piles. The calculation was conducted about the 14 projects mainly located in Shenzhen, Guangzhou and other areas. Three types of curve laws between the base stability coefficients of composite soil nailing walls and the length of mix piles were obtained. The analysis results show that it is obvious for the base stability coefficient increment of composite soil nailing walls, and it is suggested that the increment percent should not be more than 30% for mix piles in practice.

Key words: composite soil nailing wall; mix pile; base stability coefficient; depth of foundation pit; internal friction angle

0 引言

复合土钉墙以土钉墙支护技术为基础,采用搅拌桩、微型桩、锚索等支护结构,起到止水防渗、抗滑

加固和控制变形等作用,共同围护边坡稳定,与普通土钉墙相比,其支护深度和场地适用范围更为广泛^[1-2]。

目前,复合土钉墙的设计计算方法仍按照普通

收稿日期:2012-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40972179)

作者简介:刘 斌(1981-),男,山西太原人,工学博士,E-mail:liubin163mail@163.com。

土钉墙考虑,计算内容主要包括土钉抗拉承载力、整体稳定性和变形计算 3 个部分。文献[3]中通过对北京和广州等地 11 个工程实测的土钉最大轴力值和最大轴力值位置的分析,建议采用梯形土压力(土钉最大轴力)分布模式和双折线潜在滑裂面对土钉墙及复合土钉墙中土钉抗拉承载力进行验算。本文中笔者将进一步对复合土钉墙整体稳定性验算方法进行分析。

复合土钉墙整体稳定性验算方法主要以普通土钉墙的失稳模式和验算方法为基础,考虑搅拌桩、微型桩以及锚索的作用。对于预应力锚索,现场测试结果显示^[4-5],当锚索被张拉锁定后,预应力会略有减小,之后基本稳定,而与锚索相邻的土钉轴力随开挖逐步增长,锚索在支护过程中并未分担更大的作用力。对于搅拌桩,实测和模型试验结果表明^[6],水泥土搅拌桩既是防渗帷幕,又是边坡的临时支护,其挡板作用能够有效阻挡边坡内土体的水平位移和垂直位移;当复合土钉支护边坡破坏时,土体绕坡脚翻转,水泥土搅拌桩在基坑底部被剪断,坡脚处土体受挤压破坏,滑裂面以外的土体受反向摩擦力的作用,有微弱向上移动的趋势。因此,在复合土钉墙整体稳定性计算中,锚索可以按照土钉的算法考虑;搅拌桩通过考虑其抗剪作用来计算其对稳定性的贡献,但对其贡献作用的大小仍缺乏统一的认识。

笔者根据文献[2]中建议的复合土钉墙整体稳定性验算公式,对分布在深圳和广州等地的14个复合土钉墙工程进行计算,按照搅拌桩临界桩长^[7]与基坑深度的关系,得到3类整体稳定系数与拌桩长度的曲线规律,对由搅拌桩抗剪作用引起的整体稳定系数提高值进行了统计,并建议按照提高比例不大于30%进行工程验算。

1 整体稳定性计算公式

图 1 中给出了复合土钉墙整体稳定性计算模型,假设滑裂面为圆弧,基坑顶部作用均布荷载 q ,采用条分法计算,土条 k 所受重力为 W_k ,底部法向反力为 N_k ,切向阻力为 $N_k \tan(\varphi_k) + l_k c_k$, l_k 为土条底部滑动面弧长, c_k 为土体的粘聚力。图 1 中, R 为圆弧滑裂面的半径, H 为基坑深度。

复合土钉墙整体稳定系数 K 的计算公式为

$$K = \{ \sum_{k=1}^m [c_k l_k + (\mathbf{W}_k + qd_k) \cos(\beta_k) \tan(\varphi_k)] + \zeta_{\tau_p} A_p / B_p \} / [\sum_{k=1}^m (\mathbf{W}_k + qd_k) \sin(\beta_k)] +$$

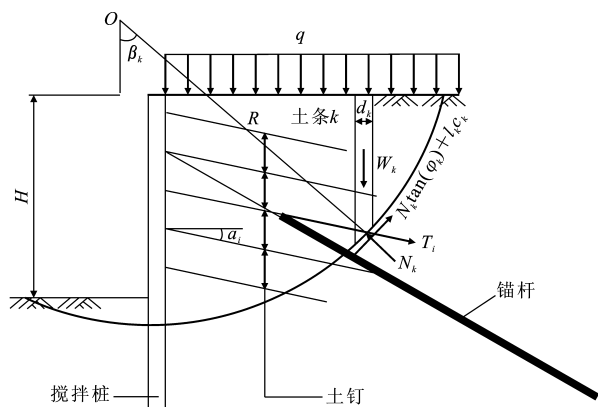


图 1 复合土钉墙整体稳定系数计算模型

Fig. 1 Calculation Model of Base Stability Coefficients of Composite Soil Nailing Wall

$$\frac{\sum_{i=1}^n [T_i \cos(\alpha_i + \beta_i) + \eta T_i \sin(\alpha_i + \beta_i) \tan(\varphi_i)] / S_i}{\sum_{k=1}^m (W_k + qd_k) \sin(\beta_k)} \quad (1)$$

式中: β_i 为土钉或锚杆与滑动面相交处滑动面切线与水平面之间的夹角; m 为滑动体分条数; n 为滑动体内土钉和锚杆数目; φ_k 为土体的内摩擦角; d_k 为土条宽度; β_k 为滑动面处切线与水平面之间的夹角; α_i 为土钉或锚杆与水平方向的夹角; T_i 为土钉或锚杆的拉力值, 取土钉或锚杆在圆弧滑裂面外的有效锚固长度计算; τ_p 为搅拌桩抗剪强度; A_p 为搅拌桩的面积; S_i 为土钉的水平间距; B_p 为搅拌桩间距; 对于土钉, 组合系数 η 仍按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—99) 取 0.5, 对于锚杆, 根据预应力水平取 0.5~1.0; 组合系数 ξ 取为 0.5~1.0。

通过对软土地复合土钉墙算例的分析,文献[7]中认为由于搅拌桩的抗剪能力远大于原状土,故其圆弧破坏滑动面的切土深度比土钉墙要深,搅拌桩存在着临界桩长的上、下限问题,即当圆弧滑裂面绕过桩底,搅拌桩对复合土钉墙不提供抗滑作用时的桩长成为上限值,随着桩长的增加,圆弧破坏滑动面加深,但仍然绕过桩底,随着桩长继续增加到一定程度时,滑动面完全切割搅拌桩,之后稳定系数一定,不再随桩长的增加而提高,此时的桩长为下限值。计算结果表明,土钉的长度对临界桩长影响最大,土钉的布置形式影响较小,桩体的强度对临界桩长的上限值不产生影响,而下限值随着桩体强度的提高而提高,且当复合土钉墙位于内摩擦角较大的地基土(如粉质类土)中时,设置较短的垂直支护桩也能产生很大的整体抗滑作用,而对于内摩擦角较小的淤泥类土,则需要设置较长的垂直支护桩,才能

对其整体稳定性产生作用。文献[8]中通过对北京、广州、深圳和汉口地区 12 个工程实例的计算分析,得到了式(1)中组合系数 η 和 ζ 与整体稳定系数 K 间的规律曲线,并按照 $K \geq 1.2$ 的要求,建议取 $\eta = 0.5, \zeta = 0.3 \sim 1.0$,但是还相对缺乏搅拌桩对整体稳定系数提高比例的定量分析。

2 工程实例计算与分析

2.1 实例概况

工程实例概况如表 1 所示,表 1 中所列 14 个工程主要分布于广州和深圳,从复合支护结构上分类,

包括 5 个搅拌桩(旋喷桩)-土钉复合支护工程、5 个搅拌桩-锚索-土钉复合支护工程、2 个搅拌桩-微型桩-土钉复合支护工程和 2 个搅拌桩-微型桩-锚索-土钉复合支护工程。

2.2 结果分析

由式(1)对表 1 中工程实例进行计算,根据设计要求,水泥土 28 d 的无侧限抗压强度 f_u 应大于 1 MPa,其抗剪强度 $\tau_u = 20\% f_u \sim 30\% f_u^{[20]}$,故计算中取 $\tau_u = 200$ kPa, $\zeta = 1.0$,且考虑地表超载 20 kPa。计算所得搅拌桩的临界桩长以及所对应的整体稳定系数如表 2 所示,表 2 中搅拌桩对整体稳定系数的

表 1 工程实例

Tab. 1 Engineering Examples

实例 编号	工程名称	基坑 深度/ m	支 护 概 况								坑底土层类型	文献 来源
			土钉		锚索		搅拌桩(包括旋喷桩)			微型 桩长 度/m		
			排数	长度/m	排数	长度/m	排数	直径/ mm	长度/m			
1	广州二沙岛政协俱乐部	10.05	9	7.0~15.0				1 200	12.00		粗砂	[9]
2	广州凯华城南边东段	11.48	7	4.5~16.0	2	20,22	1	550	10.00		全风化粗砂岩	[10]
3	广州老城区某基坑	8.75	7	8.0~13.0	3	18	1	600	7.00		粉质粘土	[11]
4	深圳百仕达	17.70	10	6.0~21.0	3	16~24	1	550	14.70		全风化、强风化岩	[12]
5	深圳福田商城	12.50	11	8.0~12.0			1	500	11.50		砂质粘土	[13]
6	深圳长城畔山花园	11.45	7	10.0~12.0	2	17,18	1	500	13.45	13.45	粘土	[14]
7	深圳长城盛世花园	13.45	8	11.0~13.0	3	16~20	1	500	9.13	16.45	全风化、强风化岩	[14]
8	南京玄武湖隧道	10.00	9	15.0~18.0			1	850	18.00		粉细砂	[15]
9	广州番禺某酒店	5.50	4	8.0~24.0			2	550	16.00	9.00	淤泥	[16]
10	深圳得景大厦	8.40	7	8.0~12.0			1	1 200	8.30		中粗砂、粉质粘土	[17]
11	深圳电视中心	11.45	7	8.0~12.0	2	16,18	2	550	11.90		粉质粘土	[13]
12	上海东方肝胆外科医院病房	6.00	6	6.0~12.0			2	1 200	14.90		淤泥质粉质粘土	[18]
13	深圳宏明广场	8.60	6	5.0~10.0	1	17	2	550	15.00		淤泥质粉质粘土	[13]
14	汉口某城市花园	8.00	3	12.0			2	500	12.00	12.00	粉质粘土、粉土	[19]

注:实例 1,12 的搅拌桩直径实为宽度。

提高比例按照临界桩长上、下限对应的整体稳定系数之差与临界桩长上限对应的整体稳定系数的比值进行计算。

根据表 2 中的结果,可将上述实例按照搅拌桩临界桩长与基坑深度的关系分为以下 3 类:

第 1 类:搅拌桩临界桩长上、下限为基坑深度,包括实例 1~8(实例 2,4,5 考虑坑顶放坡修正)。该类实例的场地土强度分布比较均匀,且土体的内摩擦角较大,如粉质粘土、砂质粘土、粉土、砂土以及风化土等,滑裂面始终通过坡脚,当搅拌桩长度小于基坑挖深时,其抗滑作用在式(1)中并未体现,而当搅拌桩长度一旦大于基坑深度,整体稳定系数如图 2 所示会突然增加,图 2 中 L 为搅拌桩长度, B 点对应上限桩长, C 点对应下限桩长。本次算例统计中

稳定系数从 B 点到 C 点的提高值为 $0.1 \sim 0.32$,提高比例为 $10.31\% \sim 31.07\%$ 。

第 2 类:搅拌桩临界桩长上限为基坑深度,下限大于基坑深度,包括实例 9~12(实例 10 考虑桩顶位置修正)。该类实例的坑底土相比上部土体强度低,如实例 9 和实例 12 坑底为淤泥质粉质粘土,实例 10 和实例 11 坑底为粉质粘土,上部土体为砂土,故滑裂面随着搅拌桩长度的增加会由穿过坡脚变为低于坡脚,如图 3 所示,图 3 中 B 点对应上限桩长, C 点对应下限桩长。本次算例统计中整体稳定系数从 B 点到 C 点的提高值为 $0.31 \sim 0.77$,提高比例为 $22.96\% \sim 76.24\%$ 。

第 3 类:搅拌桩临界桩长上、下限均大于基坑深度,包括实例 13 和实例 14。该类实例由于存在软

表 2 整体稳定系数的计算结果

Tab. 2 Calculation Results of Base Stability Coefficients

分类	实例编号	基坑深度/ m	搅拌桩临界桩长/m		整体稳定系数			临界桩长上、下限 整体稳定系数之差	搅拌桩对整体稳定 系数提高比例/%
			上限	下限	取上限桩长	取下限桩长	取实际桩长		
第 1 类	1	10.05	10.00	10.10	1.23	1.53	1.53	0.30	24.39
	2	11.48	8.60	10.50	1.20	1.34	1.28	0.14	11.67
	3	8.75	8.74	8.75	1.03	1.35	1.03	0.32	31.07
	4	17.70	11.90	12.00	0.89	1.02	1.02	0.13	14.61
	5	12.50	10.40	10.50	0.97	1.07	1.07	0.10	10.31
	6	11.45	11.44	11.45	1.21	1.49	1.49	0.28	23.14
	7	13.45	13.44	13.45	1.31	1.46	1.31	0.15	11.45
	8	10.00	9.90	10.00	1.13	1.45	1.45	0.32	28.32
第 2 类	9	5.50	5.40	8.10	1.01	1.78	1.78	0.77	76.24
	10	8.40	4.70	12.70	1.35	1.66	1.45	0.31	22.96
	11	11.45	11.40	13.70	1.00	1.33	1.28	0.33	33.00
	12	6.00	5.90	13.30	0.84	1.19	1.19	0.35	41.67
第 3 类	13	8.60	12.80	13.60	1.08	1.26	1.26	0.18	16.67
	14	8.00	7.90	9.70	1.16	1.36	1.36	0.20	17.24

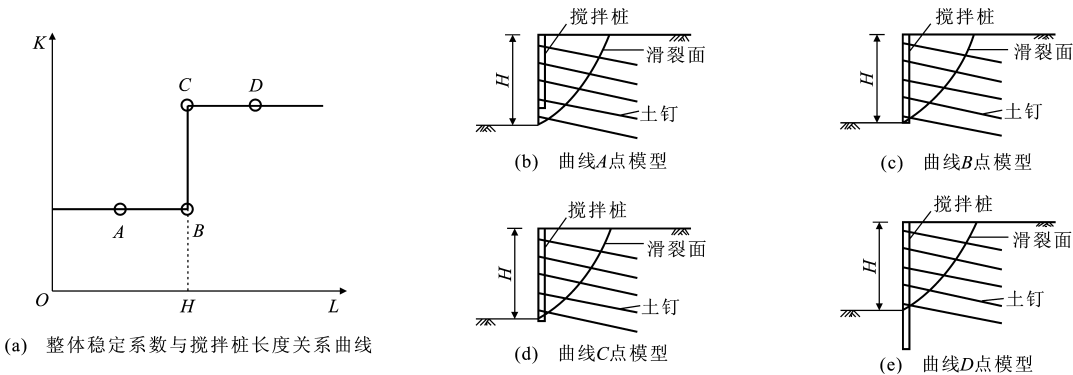


图 2 第 1 类整体稳定系数与拌桩长度的关系

Fig. 2 Relations of the First Type of Base Stability Coefficient and Mix Pile Critical Length

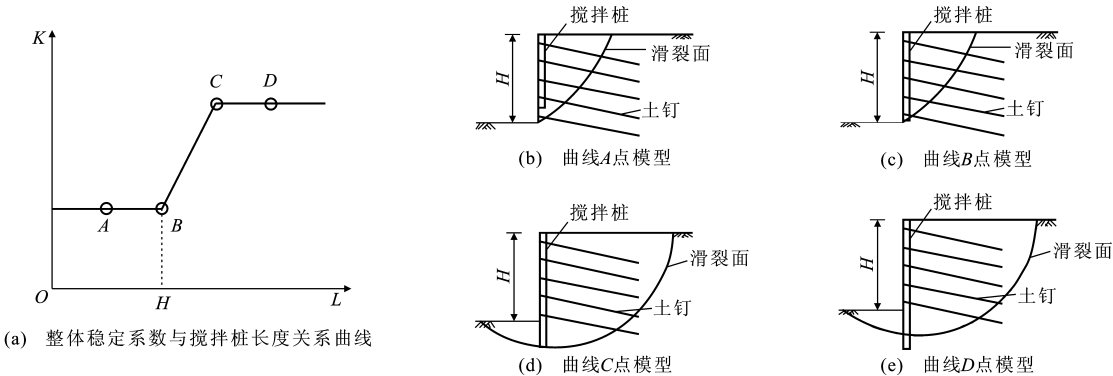


图 3 第 2 类整体稳定系数与搅拌桩长度的关系

Fig. 3 Relations of the Second Type of Base Stability Coefficient and Mix Pile Critical Length

土层(实例 13)或放坡(实例 14)等原因,滑裂面深度始终大于基坑深度,整体稳定系数随搅拌桩长度变化曲线见图 4,图 4 中 B 点对应上限桩长, $C(C')$ 点对应下限桩长。本次算例统计中整体稳定系数从 B 点到 $C(C')$ 点的提高值为 0.18~0.20,提高比例为 16.67%~17.24%。

综上所述,搅拌桩对复合土钉墙整体稳定系数的提高作用明显,对于土体强度较高的场地(如粉质

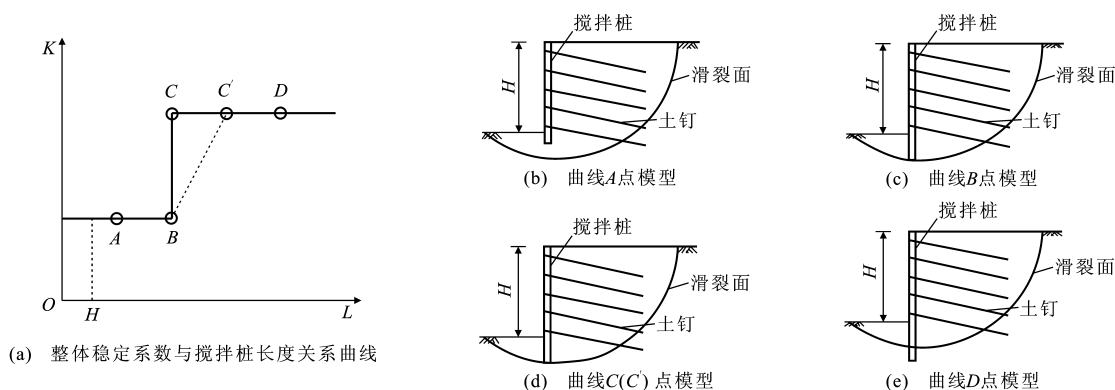


图4 第3类整体稳定系数与搅拌桩长度关系

Fig. 4 Relations of the Third Type of Base Stability Coefficient and Mix Pile Critical Length

粘土、砂质粘土、粉土、砂土以及风化土等),整体稳定系数可提高 10.31%~33%,对于有淤泥质粉质粘土存在的场地可提高 16.67%~76.24%。因此,在设置搅拌桩时,应综合考虑其止水防渗和抗滑加固的作用,根据场地条件和临界桩长进行设置,在采用式(1)设计验算其整体稳定性时,出于安全考虑,建议搅拌桩对整体稳定系数的提高比例不应大于 30%。

3 结语

(1)根据考虑搅拌桩抗剪作用的复合土钉墙整体稳定性验算公式,对分布在广州和深圳等地的 14 个复合土钉墙工程进行了计算,得到 3 类整体稳定系数与搅拌桩长度之间的曲线规律。结果表明:整体稳定系数在搅拌桩长度达到临界桩长上限值之前或达到临界桩长下限值之后都保持定值;在临界桩长上限值和下限值之间,整体稳定系数随搅拌桩长度的增加而增加,当上限值和下限值相等时,整体稳定系数的增加具有突变性。

(2)计算结果表明:搅拌桩对复合土钉墙整体稳定系数的提高作用明显,对于土体强度较高的场地(如粉质粘土、砂质粘土、粉土、砂土以及风化土等),整体稳定系数可提高 10.31%~33%,对于有淤泥质粉质粘土存在的场地可提高 16.67%~76.24%。综合考虑,建议在设计验算中,搅拌桩对整体稳定系数的提高比例不应大于 30%。

参考文献:

References:

[1] 李象范,何之民,徐水根.流砂地层中复合土钉墙的受力及变形性状[J].上海地质,1999(3):16-27.
LI Xiang-fan, HE Zhi-min, XU Shui-gen. Deformation and Mechanical Behavior of Compound Soil-nailed Re-

taining Wall Used in the Ground with Flow Sand[J]. Shanghai Geology, 1999(3):16-27.

- [2] 杨志银,张俊,王凯旭.复合土钉墙技术的研究及应用[J].岩土工程学报,2005,27(2):153-156.
YANG Zhi-yin, ZHANG Jun, WANG Kai-xu. Development of Composite Soil Nailing Walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 153-156.
- [3] 杨敏,刘斌.土钉抗拔承载力经验验算方法[J].建筑科学与工程学报,2010,27(2):18-24.
YANG Min, LIU Bin. Empirical Checking Method for Soil Nailing Anti-pulling Capacity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2):18-24.
- [4] 李厚恩,秦四清.预应力锚索复合土钉支护的现场测试研究[J].工程地质学报,2008,16(3):393-400.
LI Hou-en, QIN Si-qing. Variations of In-situ Forces in Soil Nails and Pre-stressed Ground Anchors as Combined Structure for Excavation of a Subway Station Foundation Pit in Beijing[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3):393-400.
- [5] 刘晓纲.深基坑复合土钉支护结构试验研究与应用[D].重庆:重庆大学,2005.
LIU Xiao-gang. Test Study and Application of Composite Soil Nail of Deep Foundation Pit [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [6] 杨茜,张明聚,孙铁成.软弱土层复合土钉支护试验研究[J].岩土力学,2004,25(9):1401-1408.
YANG Qian, ZHANG Ming-ju, SUN Tie-cheng. Study on Composite Soil Nailing in Soft Subsoil by Model Test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9):1401-1408.
- [7] 屠毓敏,鲁美霞.复合土钉墙中垂直支护桩临界桩长的研究[J].岩土工程报,2006,28(11):2023-2026.
TU Yu-min, LU Mei-xia. Research on Critical Pile Length of Perpendicular Protecting Piles in Com-

- pound Soil-nailing Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 2023-2026.
- [8] 魏 屏, 杨 敏, 刘 斌. 复合土钉墙整体稳定性计算中折减系数 ξ 和 η 的研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(4): 74-79.
- WEI Ping, YANG Min, LIU Bin. Study on Reduction Coefficient ξ and η for Base Stability of Composite Soil-nailed Walls [J]. Structural Engineers, 2010, 26(4): 74-79.
- [9] 曾宪明, 黄久松, 王作明, 等. 土钉支护设计与施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- ZENG Xian-ming, HUANG Jiu-song, WANG Zuo-ming, et al. Soil Nailing Design and Construction Manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [10] 陈晓文, 杨光华, 张君禄, 等. 广州凯华城基坑采用土钉墙支护设计实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3021-3029.
- CHEN Xiao-wen, YANG Guang-hua, ZHANG Jun-lu, et al. Support Design Practice Using Soil Nailing Wall in Guangzhou Kaihuacheng Deep Foundation Pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 3021-3029.
- [11] 杨志明, 杨凯华, 戴真印. 土钉及超前桩墙复合支护技术的应用[J]. 工程勘察, 2003(2): 34-35, 65.
- YANG Zhi-ming, YANG Kai-hua, DAI Zhen-yin. Application of Composite Bracing Technique with Soil Nail and Leading Pile-wall [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003(2): 34-35, 65.
- [12] 廖智明. 百仕达花园基坑支护优化设计与数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- LIAO Zhi-ming. Optimum Design and Numerical Simulation of Foundation Pit Support About Baishida Garden [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [13] 杨志银, 冯申铎. 新型土钉墙技术的研究与应用[R]. 北京: 冶金工业部建筑研究总院, 1999.
- YANG Zhi-yin, FENG Shen-duo. Research and Application of a New Soil Nail Wall Technology [R]. Beijing: Building Science Research and Design Academy, Ministry of Metallurgical Industry, 1999.
- [14] 姜晓光. 复合土钉墙设计关键技术研究[D]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2009.
- JIANG Xiao-guang. Research of Key Technique of Composite Soil Nailing Wall [D]. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction, MCC, 2009.
- [15] 段建立, 谭跃虎, 樊有维, 等. 复合土钉支护的现场测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2128-2132.
- DUAN Jian-li, TAN Yue-hu, FAN You-wei, et al. Field Testing Study on Composite Soil Nailing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2128-2132.
- [16] 冯 涛. 搅拌桩与预应力土钉复合支护体系的稳定与变形分析[D]. 广州: 广州大学, 2007.
- FENG Tao. Stability and Deformation Analysis of Mixing Pile and Prestressed Soil Nail Composite Supporting System [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2007.
- [17] 黄力平, 何汉金. 挡土挡水复合型土钉墙支护技术[J]. 岩土工程技术, 1999(1): 17-21.
- HUANG Li-ping, HE Han-jin. Protecting Technique of Composite Soil-nailing Wall with Retaining Water [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999(1): 17-21.
- [18] 杨林德, 李象范, 钟正雄. 复合型土钉墙的非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 149-152.
- YANG Lin-de, LI Xiang-fan, ZHONG Zheng-xiong. The Nonlinear Analysis of FEM on Composite Soil-nailed Retaining Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 149-152.
- [19] 司马军, 刘祖德, 徐书平. 加筋水泥土墙复合土钉支护的现场测试研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 371-375.
- SIMA Jun, LIU Zu-de, XU Shu-ping. Field Testing Study on Composite Soil Nail with Reinforced Cement Retaining Wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 371-375.
- [20] 叶书麟, 叶观宝. 地基处理[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- YE Shu-lin, YE Guan-bao. Ground Improvement [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.