

# 复合土钉墙在两类地区稳定性影响因素分析

魏 屏

(昆明学院 城乡建设与工程管理学院, 云南 昆明 650214)

**摘要:**整体稳定性验算是复合土钉墙基坑支护结构设计的重要组成部分. 通过对北京、上海两类不同地质地区 20 余个工程实例计算和对比分析, 得出土体、土钉、锚杆、搅拌桩和微型桩对支护体系整体稳定系数比例的曲线规律; 潜在圆弧滑动面随桩长变化的发展规律曲线和土体强度指标  $c, \varphi$  值与整体稳定性系数的规律曲线; 折减系数  $\zeta, \eta$  与基坑稳定性系数的规律曲线, 为复合土钉墙设计提供科学依据.

**关键词:**复合土钉墙; 两类地区; 整体稳定性; 影响因素

**中图分类号:**TU476.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-5639(2012)06-0091-04

## Analysis on Impact Factors on Stability of Composite Soil Nailing Wall in the Two Kinds of Zones

WEI Ping

(College of Urban and Rural Construction and Engineering Management, Kunming University, Yunnan Kunming 650214, China)

**Abstract:** The overall stability checking is the important part in designing the base holder structure in composite soil nailing wall. After the comparison analysis on more than twenty project cases in two different geologic zones in Beijing and Shanghai, the result showed that soil body, soil nail, soil bolt, mixing pile and micro-pile system as a whole to support the curve of the ratio of stability factor, the potential sliding surface arc length changes with the laws of the development curve and soil strength index  $c, \varphi$  value and the overall stability of the law of curve coefficient,  $\zeta, \eta$  coefficient and coefficient of foundation law of the stability curve. The introduction of two kinds of soil composite soil nailing walls of micro-piles and piles stirring effective pile length  $L, \zeta, \eta$  range gives the scientific basis for the composite in soil nailing wall design.

**Key words:** composite soil nailing wall; two kinds of zones; overall stability; impact factors

复合土钉墙是将土钉墙与深层搅拌桩、旋喷桩、各种微型桩、钢管土钉及预应力锚杆结合起来的一种新型支护形式, 主要适用于砂性土、粉土、粘性土、淤泥及淤泥质土.<sup>[1]</sup> 目前复合土钉墙设计原理采用(1)式进行计算, 即复合土钉墙的整体稳定性系数  $K_s$  由土体贡献稳定性  $K_R$ , 土钉、锚杆贡献的稳定性  $K_N$ , 搅拌桩和微型桩贡献的稳定性  $K_p$  3 部分组成.

$$K_s \leq K_R + K_N + K_p, \tag{1}$$
$$K_N = K'_{N\text{径向}} + \zeta K'_{N\text{切线}}, \tag{2}$$
$$K_p = \eta K'_p, \tag{3}$$

(2)式中土钉、锚杆提供稳定安全系数  $K_N$  分解为圆弧径向  $K'_{N\text{径向}}$  和切线  $K'_{N\text{切线}}$  两部分, 为保证基坑的稳定性, 对切线提供的稳定性系数  $\xi$  通过折减; (3)式中微型桩和搅拌桩提供的稳定性  $K_p$  由  $\eta$  系数考虑折减. 目前未对影响复合土钉墙稳定性系数  $K_s$  的临界桩长  $L$  以及  $c, \varphi, \zeta, \eta$  等系数取值研究和分析. 本文从复合土钉墙各部分相互作用机理和土体特性为出发点, 结合北京、上海等不同地区 20 余个工程实例, 研究临界桩长  $L$  以及  $c, \varphi, \zeta, \eta$  等系数变化时, 复合土钉墙土体、土钉、锚杆、搅拌桩、微型桩部分对基坑

整体稳定性贡献规律, 拟为以北京、上海为代表的两类地质条件不同地区复合土钉墙整体稳定性计算中提供理论依据.

### 1 复合土钉墙整体稳定性理论计算公式

复合土钉墙的整体滑移稳定性由滑移面上的土体、滑移面外土钉、锚杆的锚固体、搅拌桩和微型桩共同承担.<sup>[2-3]</sup> 分析图 1, 其整体滑动稳定性系数  $K_s$  为公式:

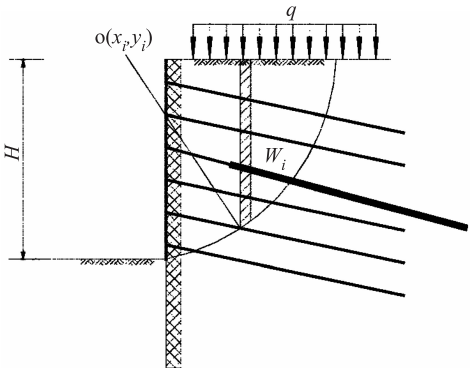


图1 复合土钉墙整体稳定分析图

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n \{ c_i b_i / \cos \theta_i + [ (q_i b_i + \Delta G_i) \cos \theta_i - u_i b_i / \cos \theta_i ] + \tan \varphi_i \}}{\sum_{i=1}^n (q_i b_i + \Delta G_i) \sin \theta_i} + \frac{\sum [ N_{u,j} \cos (\theta_j + a_j) + \zeta \sin (\theta_j + a_j) \tan \varphi_j N_{u,j} ] / S_{k,j}}{\sum_{i=1}^n (q_i b_i + \Delta G_i) \sin \theta_i} + \frac{\eta \tau_p A_p}{\sum_{i=1}^n (q_i b_i + \Delta G_i) \sin \theta_i} \tag{4}$$

式中： $c, \varphi$  为土体的粘聚力和内摩擦角，由基坑土体性质决定； $l_i, \theta_i, W_i$  分别为土条滑动面的长度、切线与水平面之间的夹角和土条的质量； $T_i, a_i, S_N$  分别为土钉或锚杆的承载力、与水平面之间的夹角和水平间距； $\tau_p, A_p, S_p$  为搅拌桩或微型桩的抗剪强度、截面面积和水平间距； $\zeta, \eta$  为土钉或锚杆、搅拌桩或微型桩的作用力折减系数。

分析复合土钉墙计算公式(4)式时， $c, \varphi$ ，桩长  $L, \zeta, \eta$  等影响系数变化，则  $K_s$  的大小随之变化。

2 以北京、上海为代表的两类工程不同地区分析与对比

2.1 以北京、上海为代表的两类工程地质特点分析  
两类不同地区工程地质主要以土层性质和物理力学性质区分。以北京为代表的第 1 类地区土层主要是冲击粉质粘土及粘土、残余粉质粘土及粉土， $c$  值大于 20 kPa， $\varphi$  值一般情况大于 14°；以上海为代表的第 2 类地区主要是淤泥质和淤泥质软土， $c$  值小于 16 kPa， $\varphi$  值一般情况小于 16°。

2.2 以北京、上海为代表的两类工程实例参数对比  
基于复合土钉墙设计计算理论，结合两类不同地质条件下 21 个工程实例，见表 1，应用同济启明星土钉墙设计软件计算了对折减系数在变化时整体稳定性系数的变化规律，以及复合土钉各部分对整体稳定性系数的贡献大小。

表 1 21 个工程实例地区统计表

地区	北京	广州	深圳	上海	其他
工程实例/个	1	3	9	3	5

理论分析是随着  $c, \varphi, L, \xi, \eta$  值的增加， $K_N, K_p$  值应相应增加，共同提高基坑的整体稳定性，但研究表明，参数变化时， $K_s$  曲线在不同地区呈现不同的变化趋势， $K_R, K_N, K_p$  对  $K_s$  的贡献和相互共同作用机理也存在差别，其原因与基坑施加土钉、锚杆、搅拌桩、微型桩后基坑整体失稳滑移面后移范围相关。

根据不同场地土的性质， $K_s$  曲线不同变化趋势为标准，将 23 个工程分为两类情况分析：第 1 类主要是在北京、广州、深圳（部分）、汉口等地区的工程（见表 2）；第 2 类主要是在上海、深圳（部分）、东莞虎门、杭州萧山等地区的工程（见下表 3）。

3  $c, \varphi$  值变化对整体稳定性系数  $K_s$  影响的对比分析

$c, \varphi$  值的增加对整体稳定性有利，土的性质越好，整体稳定性系数越大，见图 2。 $c, \varphi$  的临界值为 15，以北京为代表的第 1 类地区位于临界点右上方，基坑整体稳定性能好， $\varphi$  提高比  $c$  提高对整体稳定系数的贡献大。以上海为代表的第 2 类地区位于临界点左下方，基坑整体稳定性能差， $c$  增加比  $\varphi$  增加对整体稳定系数的影响大。

表 2 以北京为代表的第 1 类工程计算实例统计

序号	工程名称和基坑深度	土钉和锚杆排数	搅拌桩、微型桩的桩长/m
1	北京地区 12.00 m 基坑	土钉 8 排	微型桩 13.00
2	广州 8.75 m 基坑	土钉 7 排、锚杆 3 排	搅拌桩 7.00
3	广州 12.25 m 基坑	土钉 9 排、锚杆 3 排	微型桩 15.38
4	广州 10.05 m 基坑	土钉 9 排	搅拌桩 12.00
5	深圳 17.70 m 基坑	土钉 10 排、锚杆 3 排	搅拌桩 14.70
6	深圳 13.45 m 基坑 3-3 断面	土钉 8 排、锚杆 3 排	搅拌桩 9.13、微型桩 16.45
	深圳 13.45 m 基坑 4-4 断面	土钉 8 排、锚杆 3 排	搅拌桩 15.45
7	深圳地铁 12.90 m 基坑	土钉 11 排	微型桩 13.45
8	深圳 12.50 m 基坑西、南侧面	土钉 11 排	搅拌桩 11.50
	深圳 12.50 m 基坑东、北侧面	土钉 11 排	搅拌桩 11.50
9	深圳 11.45 m 基坑	土钉 7 排、锚杆 2 排	搅拌桩 13.45、微型桩 13.45

续表

序号	工程名称和基坑深度	土钉和锚杆排数	搅拌桩、微型桩的桩长/m
10	深圳 11.45 m 基坑 1-1 断面	土钉 7 排、锚杆 2 排	搅拌桩 11.90
	深圳 9.60 m 基坑 3-3 断面	土钉 7 排	搅拌桩 13.15
	深圳 9.55 m 基坑 5-5 断面	土钉 5 排、锚杆 2 排	搅拌桩 12.10
11	深圳金地龙华 7.70 m 基坑 1-1 断面	土钉 6 排、锚杆 2 排	搅拌桩 9.00
12	汉口某城市花园 8.00 m	土钉 3 排	搅拌桩 12.00、微型桩 12.00

表 3  以上海为代表的第 2 类工程计算实例统计

序号	工程名称	土钉和锚杆排数	搅拌桩、微型桩的桩长/ m
1	上海国安大厦地下车库 4.55 m 基坑	土钉 4 排	微型桩 8.00
2	上海紫都小区 7.10 m 基坑 <sup>[4]</sup>	土钉 6 排	微型桩 15.00
3	上海东方肝胆外科医院 7.00 m 基坑	土钉 6 排	搅拌桩 14.90
4	杭州萧山天辰国际广场 9.30 m 基坑 <sup>[5]</sup>	土钉 6 排	搅拌桩 8.00
5	深圳得景大厦 8.40 m 基坑 <sup>[6]</sup>	土钉 7 排	搅拌桩 13.00
6	深圳电视中心 11.45 m 基坑 2-2 断面	土钉 7 排、锚杆 2 排	搅拌桩 11.90
7	深圳金地龙华 7.70 m 基坑 2-2 断面	土钉 6 排、锚杆 2 排	搅拌桩 9.00
8	深圳宏明广场 8.60 m 基坑	土钉 7 排、锚杆 1 排	搅拌桩 14.00
9	东莞虎门某 4.05 m 基坑	土钉 3 排、锚杆 1 排	搅拌桩 8.95、微型桩 8.95
10	某市新城开发区 6.50 m 基坑	土钉 6 排	搅拌桩 12.00
11	镇海炼化 6.00 m 基坑	土钉 4 排	搅拌桩 11.00、微型桩 11.00

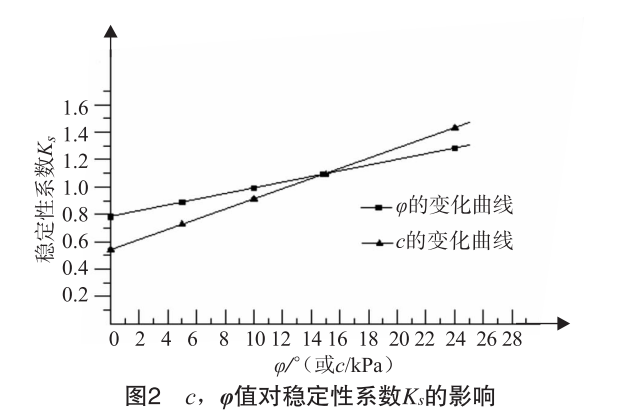


图2  c,  $\varphi$  值对稳定性系数  $K_s$  的影响

长的变化而变化,见图 3.

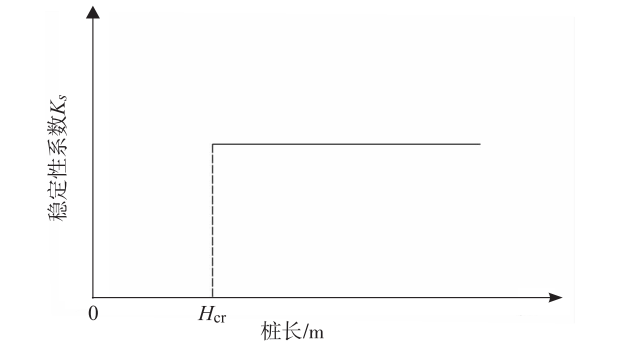


图3  第1类地区稳定性系数  $K_s$  与桩长关系

4  临界桩长  $L$  对整体稳定性系数  $K_s$  影响的对比分析

搅拌桩是复合土钉墙的重要组成部分,实际工程中把它作为止水帷幕来考虑.通过对工程算例的计算发现,搅拌桩的存在,会增大土体的滑裂范围,提高土体的抗滑能力,且随着桩长的增加,这种作用得到加强,但当桩长达到一定长度后,继续增加桩长对稳定性系数基本没有什么贡献.定义稳定系数不再增加时的桩长为临界桩长<sup>[7]</sup>,用  $H_{cr}$  表示.当桩长小于临界桩长时,整体稳定系数随着桩长的增加而增加.

第 1 类地区坑底土层强度较高,特别是坑底土层为风化土层时,坑深即为临界桩长<sup>[8]</sup>,不考虑上部放坡,当桩长等于坑深时,整体稳定性系数就为定值,基坑滑裂面一般过坡脚,支护各个部分对稳定系数的贡献为固定值,此时桩长主要受基坑抗倾覆及止水功能的限制,与整体稳定性系数一样,都不随桩

第 2 类地区的基坑底部土层的强度比较低,特别存在软土层的情况,滑裂面可能通过坡脚,或滑裂面底部位于软土层中,整体稳定系数随桩长的变化分为 3 个阶段:AB 阶段,桩体与滑裂面没有相交,搅拌桩和微型桩稳定系数  $K_p$  为零,整体稳定系数随桩长增加保持不变;BC 阶段,搅拌桩和微型桩的桩长度大于初始滑裂面深度  $H_1$  (当滑裂面通过坡脚时,等于基坑深度  $H_0$ ),随着桩长的增加,滑裂面不断加深,土体滑裂范围不断扩大,土体自身的抗滑稳定性得到了提高,整体稳定系数  $K$  增大;CD 阶段,桩长大于临界桩长  $H_{cr}$ ,滑裂面通过桩体,整体稳定系数不再随着桩长的增加而变化,见下图 4.

5   $\xi, \eta$  对整体稳定性系数  $K_s$  影响的对比分析

第 1 类地区计算  $\xi, \eta$  变化时,对  $K_R, K_N, K_P, K_S$  系数有相同的变化规律和发展趋势.在  $\eta = 0$  时,随

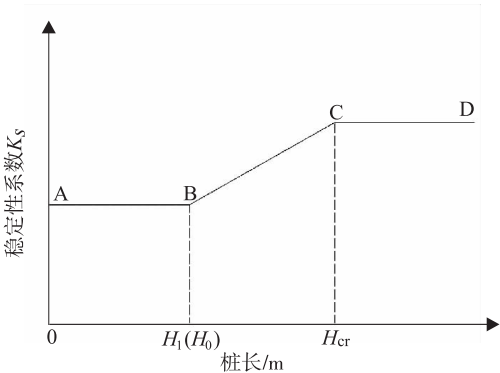


图4 第2类地区稳定系数 $K_s$ 随桩长的变化关系

$\xi$  的增加  $K_N, K_s$  系数值逐渐递增. 在  $\xi = 0$  时, 随  $\eta$  的增加,  $K_p$  与  $K_s$  系数值也逐渐递增. 当土钉、锚杆、微型桩完全发挥作用时, 即  $\eta = \xi = 1.0, K_s$  增加到最大值、 $K_N$  增加到最大值、 $K_p$  减少. 基坑滑移面的变化趋势基本一致. 结合基坑滑移面分析得出: 土钉和锚杆的设置, 能够很大程度提高基坑整体稳定性系数, 保证基坑稳定性; 设置搅拌桩和微型桩能起到止水帷幕、加固底层、稳定开挖面和限制基坑的变形过大目的. 见图 5.

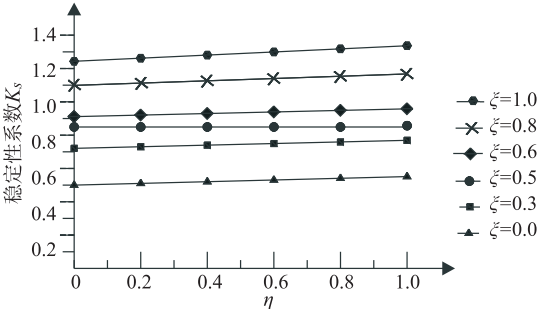


图5 第1类型地区 $\xi, \eta$ 变化时稳定系数 $K_s$ 曲线图

第 2 类地区基坑整体滑移稳定性和滑移面上的土体对基坑稳定性贡献与施加的土钉和微型桩发挥作用有关, 见图 6.

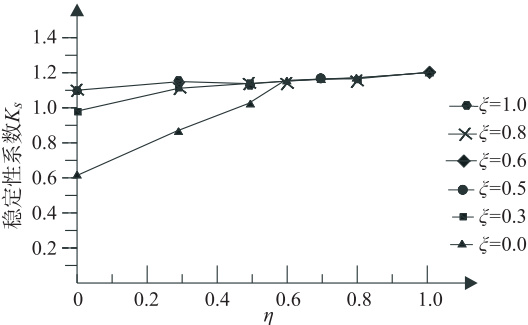


图6 第2类型地区 $\xi, \eta$ 变化时稳定系数 $K_s$ 曲线图

如图 6 所示, 计算分析得出, 基坑不施加土钉、锚杆, 基坑不能自稳. 施加土钉和微型桩后, 不考虑土钉切相和微型桩提供的稳定性时, 即  $\xi = \eta = 0$ , 基坑也不能保持稳定. 当进一步发挥土钉的作用, 即  $\xi \geq 0.5$  后, 土钉将滑移面的范围向后扩大, 滑移面上土体体积突然增加为原来 2 倍, 此时滑移面上的土体对基坑

整体稳定性贡献增加 100%, 而土钉全部在滑移面内, 则不在提供稳定性.  $\eta > 0.6$ , 微型桩将基坑滑移面向后大范围推移, 增加滑移面上土体体积, 此时滑移面上的土体对基坑整体稳定性贡献增加到 93% 左右, 微型桩提供作用降低到 7%, 土钉全部在滑移面内, 则不在提供稳定性. 在同时发挥土钉和微型桩作用时, 微型桩对滑移面向后推移的范围更大, 证明植入微型桩对基坑稳定性提高优于土钉.

6 结论

基于北京、上海为代表的两类不同工程地质地区工程实例的计算, 确定临界桩长  $L$  以及  $c, \varphi, \xi, \eta$  等系数变化时对基坑整体稳定性系数  $K_s$  有不同程度的影响, 得到下述结论:

1)  $c, \varphi$  值影响.  $c, \varphi$  值的增加土的性质越好,  $K_s$  越大. 第 1 类地区  $\varphi$  提高比  $c$  提高对整体稳定系数的贡献大; 第 2 类地区基坑整体稳定性能差, 软土地区  $c$  值的变化对整体稳定性系数的影响比  $\varphi$  的变化影响更显著.

2) 临界桩长  $L$  的影响. 第 1 类地区, 对  $K_s$  为定值, 桩长的增加不会提高基坑整体稳定性; 对第 2 类地区  $K_s$  随桩长的变化分为 3 个阶段. 当搅拌桩或微型桩桩长介于基坑深度和临界桩长之间时, 随桩长增加,  $K_s$  增加.

3)  $\xi, \eta$  影响. 第 1 类地区设置土钉和锚杆能够使得  $K_s$  迅速提高, 保证基坑稳定性, 设置搅拌桩和微型桩能起到止水帷幕、加固底层、稳定开挖面和限制基坑的变形过大目的; 第 2 类地区施加土钉、锚杆、搅拌桩和微型桩能够将基坑滑移面大幅度向后推移, 增加滑移面上土体的体积, 加固了土层, 改善了土体的物理力学参数, 从而提高了  $K_s$ , 保证基坑稳定性. 微型桩和搅拌桩滑移面推移范围大于土钉和锚杆, 则植入搅拌桩和微型桩比土钉、锚杆作用优势明显.

[参考文献]

[1] 王立峰, 何俏江, 宋向荣, 等. 土钉墙支护结构综述[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1681-1686.  
[2] 杨志银, 张俊. 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.  
[3] 黄力平, 何汉金. 挡土挡水复合土钉墙支护技术[J]. 岩土工程技术, 1991(1): 17-21.  
[4] 李元亮, 李林, 曾先明, 等. 上海紫都 C 楼基坑喷锚网(土钉支护)变形控制与稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 78-81.  
[5] 陈东, 黄博, 刘兴旺, 等. 土钉墙支护技术在杭州某深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1748-1751.  
[6] 杨志银, 张俊. 复合土钉墙技术在深圳的应用和发展[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1673-1676.  
[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]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 2023-2026.  
[8] 王媛媛, 秦四清. 土钉与复合土钉支护结构数值模拟对比分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 271-275.