

阶式土钉墙的工作性状研究

王曙光, 段启伟, 李钦锐

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘 要: 在普通土钉墙的中部设置平台形成阶式土钉墙。与普通土钉墙相比, 由于台阶的存在改变了土压力分布形态, 改变了土体的应力应变状态, 其变形、土钉内力小于普通土钉墙, 稳定性也优于普通土钉墙。台阶位置和台阶宽度是影响阶式土钉墙工作性状的重要因素。根据计算分析及工程经验, 对于均质土边坡, 台阶应设置在 0.6 倍的基坑深度左右的位置处, 效果比较明显; 对于基坑中部有软弱夹层的情况下, 台阶应设置在软弱层顶面处。建议阶式土钉墙的台阶宽度不宜小于 0.1 倍的基坑深度。通过一个实际工程, 将普通土钉墙与阶式土钉墙进行对比, 工程实践表明: 阶式土钉墙可以有效地减小土钉内力和土钉墙变形、提高整体稳定安全度。

关键词: 阶式土钉墙; 土压力; 台阶位置; 台阶宽度; 现场实测

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S1-0207-04

作者简介: 王曙光(1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事上部结构地基基础共同作用、基坑支护、地基处理等研究。

E-mail: wshgcahr@yahoo.com。

Behavior of stepped soil-nail wall

WANG Shu-guang, DUAN Qi-wei, LI Qin-rui

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: Stepped soil-nail wall is formed by setting a platform in the middle part of a typical soil-nail wall. Due to the presence of the platform, the earth pressure distribution of the stepped soil-nail wall is changed, and the stress state and strain of soil are also changed. Compared with those of the typical soil-nail wall, the deformation and soil-nail internal force of the sepped soil-nail wall are smaller, and the stability is higher. Both the position and width of the platform influence the behavior of the stepped soil-nail wall. According to the numerical calculation and engineering experience, for homogenous soil slopes, the position of platform is suggested to be placed at a depth which is 0.6 times the foundation pit. For the slope with weak interlayer, the flatform is suggested to be set on the top surface of the weak interlayer. The step width is suggested to be not less than 0.1 times the depth of foundation pit. Through a practical engineering example, the general behaviour of both the typical soil-nail wall and the stepped soil-nail are compared. It is demonstrated that both the horizontal displacement and the nail force of the stepped soil-nail wall are smaller than those of the typical soil-nail wall, and the stability of the former is higher.

Key words: stepped soil-nail wall; earth pressure; platform position; platform width; field test

0 引 言

土钉发展始于 20 世纪 70 年代, 德国、法国较早地对其进行研究和应用, 20 世纪 80 年代引入中国, 主要用于治理滑坡、隧道支护等大型土木工程中, 20 世纪 90 年代逐渐应用于高层建筑的深基坑工程的支护。目前土钉支护的应用越来越广泛、应用的基坑越来越深, 新的土钉支护形式也不断涌现, 阶式土钉墙也是一种近几年出现的新的土钉支护形式^[1]。

阶式土钉墙是借鉴分级自然放坡、台阶式加筋土挡墙的工程经验, 在普通土钉墙的中部增加平台而形成的土钉墙支护形式, 该支护形式已成功应用于数项

基坑工程中。本文对阶式土钉墙的工作性状进行研究, 分析了影响阶式土钉墙工作性状的影响因素, 并介绍了一个工程实例, 工程实践表明: 阶式土钉墙可以有效地减小土钉内力和土钉墙变形、提高整体稳定安全度。

1 阶式土钉墙的工作性状分析

土钉是土体中进行原位加筋技术的一种^[2], 它是由近乎水平设置于天然土坡或开挖形成的边坡中的加

基金项目: 建设部科技计划项目(2006-K1-18)

收稿日期: 2011-04-13

筋杆件及面层结构组成的挡土体系。用于改善原位土体的性质,并与原位土体共同作用,形成一个原位复合的加固体,用以提高整个原位土体的强度、限制其位移,从而提高整个土坡的稳定性。

在普通土钉墙的中部设置平台形成阶式土钉墙,与普通土钉墙相比,其变形、土钉内力小于普通土钉墙,稳定性也优于普通土钉墙,其原因主要有以下三个方面:

(1) 台阶的存在改变了土压力分布形态,改变了土体的应力应变状态。

土压力的大小和分布与土的竖向应力的分布是相关的。阶式土钉墙台阶以上部分的土压力分布与普通土钉墙是一致的,但在台阶以下的一定区域内土的竖向应力发生变化,因而土压力分布也相应发生变化。文献[3, 4]提出了台阶式加筋土挡墙土压力计算公式,上级土体荷载引起的下级土体附加垂直应力受台阶宽度的影响较大。根据台阶宽度的大小,可分以下3种情况:

a) 小型台阶,即 $l \leq h_2 \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 时(如图1(a)所示),上级土体荷载 q 对下级土体产生的土压力按下式计算:

$$e_{a1} = \begin{cases} 0 & h_i < l \tan \varphi \\ \frac{h_i - l \tan \varphi}{l[\tan(45^\circ + \varphi/2) - \tan \varphi]} q K_a & l \tan \varphi < h_i < l \tan(45^\circ + \varphi/2) \\ q K_a & l \tan(45^\circ + \varphi/2) < h_i < h_2 \end{cases} \quad (1)$$

b) 中型台阶,即 $h_2 \tan(45^\circ - \varphi/2) < l \leq h_2 \tan(90^\circ - \varphi)$ 时(如图1(b)所示),上级土体荷载对下级土体产生的土压力按式(2)计算:

$$e_{a1} = \begin{cases} 0 & h_i < l \tan \varphi \\ \frac{h_i - l \tan \varphi}{l[\tan(45^\circ + \varphi/2) - \tan \varphi]} q K_a & l \tan \varphi < h_i < h_2 \end{cases} \quad (2)$$

c) 大型台阶,即 $l > h_2 \tan(90^\circ - \varphi)$ 时(如图1(c)所示),上级土体荷载扩散应力全部在下级墙的稳定区之内,对下级墙稳定性无影响。在作下级墙稳定性分析时,可不计上级墙荷载的影响,也就是说上级土体荷载对下级土体不产生土压力。

由此可见,阶式土钉墙台阶以下部分的土压力小于普通土钉墙相应部位的土压力,因此阶式土钉墙总土压力水平降低。由于阶式土钉墙的土压力分布发生变化,土钉的内力也会发生变化,尤其是台阶附近的几排土钉。实测表明,普通土钉墙基坑中部的土钉内力最大,而阶式土钉墙的台阶通常设置在基坑中部左右,因此可以改善土钉的受力,尤其是基坑中部的土钉受力。

(2) 台阶以下的土体既是坡体又是上级土体的被动区,有利于减小上级土体的变形。

土钉墙施工过程中的开挖卸荷,土体的平衡状态被打破,引起土体的侧向位移。当土质较好时,土钉墙的侧向位移以剪切变形为主,主要表现为绕墙趾的转动;当开挖面以下的土质较差时,开挖面以下土体的水平变形不可忽略,变形表现为平动加转动。工程实测表明基坑后面的土体中的水平位移随着与开挖面的距离的加大而逐渐减小。阶式土钉墙由于台阶的存在,在开挖台阶以下部分土体时,上级土体在水平方向上与开挖面有一定距离,开挖引起的土体侧向位移随着与开挖面距离的增大而减小,因此阶式土钉墙与普通土钉墙相比,其坡顶位移减小。

阴影部分土体还是上级土体的被动区(见图2),该部分土体对上级土体的位移可以起到一定的约束作用,对整个坡体的位移控制是有利的。

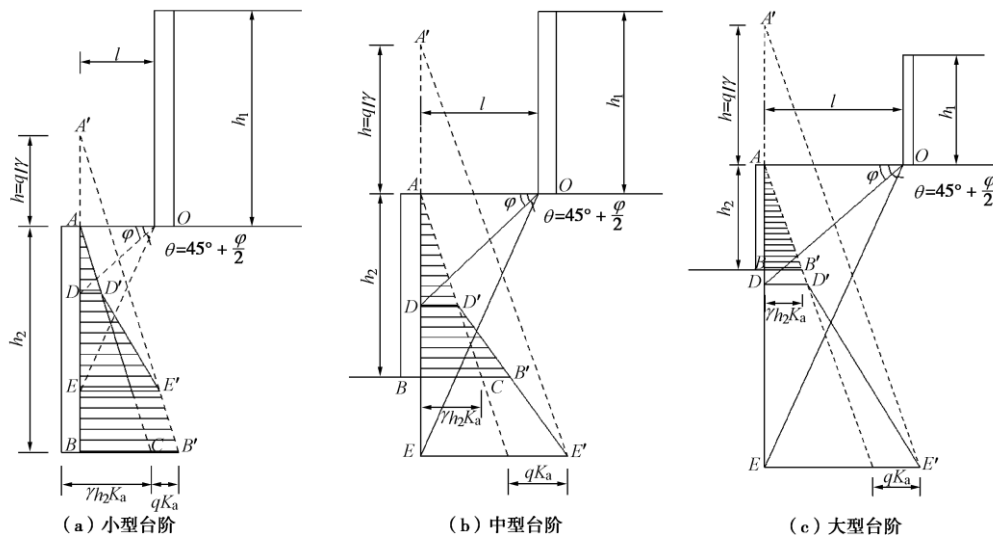


图1 阶式土钉墙台阶以下土体主动土压力分布

Fig. 1 Earth pressure distribution under step of stepped soil-nail wall

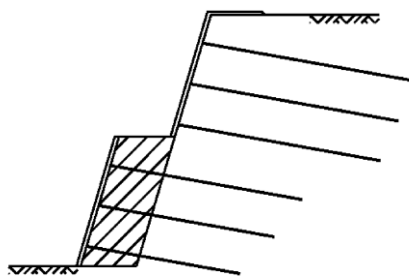


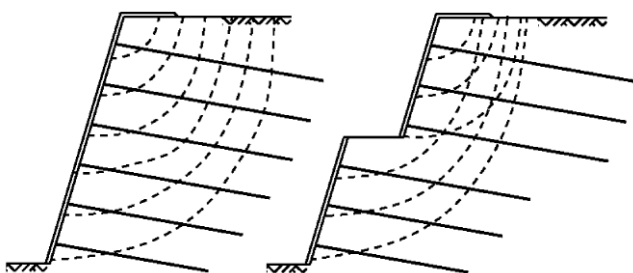
图 2 阶式土钉剖面示意图

Fig. 2 Stepped soil-nail wall

(3) 改变了土钉墙支护结构的渐进性破坏的轨迹。

图 3 为普通土钉与阶式土钉的渐进性破坏模式比较。对于普通土钉而言,随着开挖的进行,土体内的潜在滑动面也逐步发生变化。一方面,潜在滑动面内的土体自重越来越大,而土重作为荷载引起的滑动力矩也越来越大;另一方面,随着潜在滑动面的发展,潜在滑动面外的土钉长度越来越短,土钉所能提高的抗滑动力矩也越来越小。因此随着开挖的进行,坡体的整体稳定安全系数逐步降低。

对于阶式土钉墙而言,台阶以上的部分土体的渐进性破坏规律与开挖深度相同的普通土钉墙的情况相同,在开挖台阶以下部分时,其潜在滑动面的变化轨迹不同于普通土钉墙,如图 3 (b) 所示。一方面,与普通土钉墙相比,潜在滑动面内的土体自重比普通土钉墙小,土重引起的滑动力矩减小;另一方面,当土钉长度相同时,与普通土钉墙相比,上级土体内的土钉穿过潜在滑动面的长度增加,因此抗滑动力矩增加。因此,阶式土钉墙的整体稳定安全度比同条件的普通土钉墙的安全度提高。



(a) 普通土钉墙

(b) 阶式土钉墙

图 3 普通土钉墙与阶式土钉墙的渐进性破坏模式比较

Fig. 3 Comparison of failure models between soil-nail wall and stepped soil-nail wall

2 影响阶式土钉墙工作性状的因素

影响阶式土钉墙工作性状的因素很多,例如台阶位置、台阶宽度、放坡系数、土质情况等。下面主要讨论台阶位置和台阶宽度的影响。

2.1 台阶位置

阶式土钉墙的台阶位置对其工作性状影响较大,台阶设置位置较高或较低都不是最优选择。我们采用有限元分析软件 FLAC^{3D} 对台阶设置在基坑不同位置处的阶式土钉墙进行了分析,分析结果如图 4 所示。

根据计算分析及工程经验,对于均质土边坡,台阶设置在 0.6 倍的基坑深度上下的位置处,效果比较明显。对于基坑中部有软弱夹层的情况下,台阶应设置在软弱层顶面处。

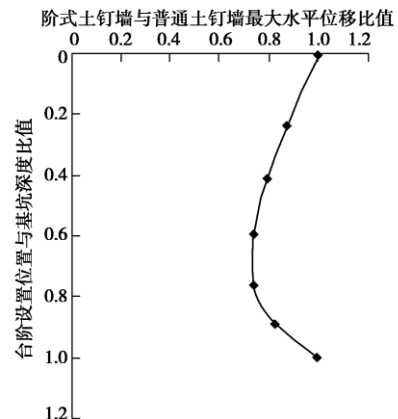


图 4 阶式土钉墙台阶设置位置对土钉墙顶水平位移的影响

Fig. 4 Variation of horizon displacement with step position of stepped soil-nail wall

2.2 台阶宽度

台阶的宽度对阶式土钉墙的内力、变形、稳定性的影响很大。从土压力计算的角度,可将台阶分为小型台阶、中型台阶和大型台阶。

大型台阶是理想情况,整个边坡可以按照两个独立的边坡进行计算。通常阶式土钉墙的台阶以小型和中型台阶为主。台阶越宽,减小土钉墙变形、提高整体稳定安全度的效果越好,如果台阶太小,则起不到明显的作用。根据工程经验,本文建议阶式土钉墙的台阶宽度不应小于 0.1 倍的基坑深度。当台阶下面存在软弱夹层时(图 5),台阶设置宽度 l 不应小于 l_1 ,一方面减小上级土体荷载引起的软弱土层中的竖向及水平向应力的增量,另一方面也减小开挖引起的软弱土层的侧向位移对上级土体位移的影响。

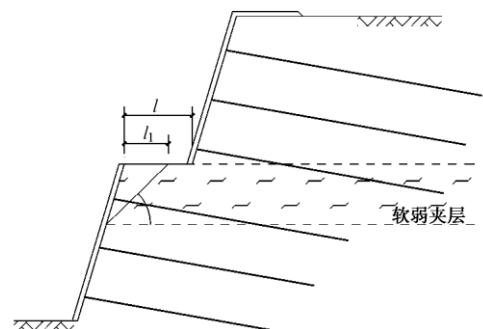


图 5 存在软弱夹层时阶式土钉墙的设置宽度图

Fig. 5 Suggested step width of stepped soil-nail wall for slope with weak interlayer

3 工程概况

某小区地下车库工程为一层纯地下建筑、框架结构、筏形基础,基础埋深约为-8.5 m。该工程同时采用普通土钉墙支护结构(1-1剖面见图6(a))、阶式土钉墙支护结构(2-2剖面见图6(b))^[5]。

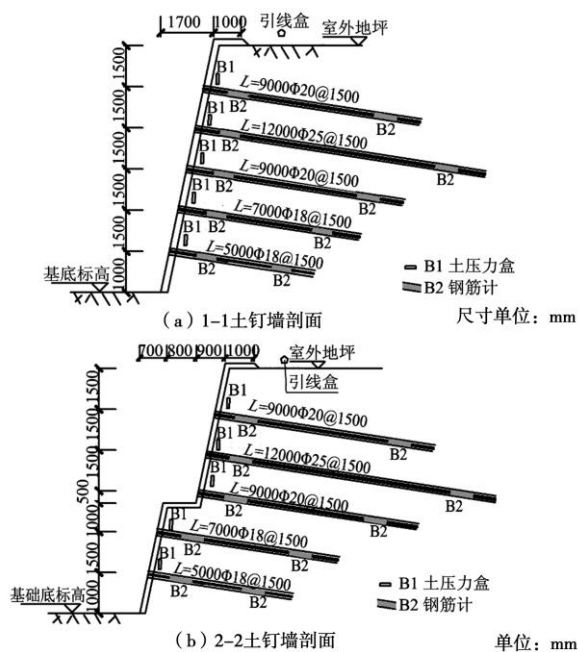


图6 土钉墙剖面图

Fig. 6 Profiles of soil-nail wall

阶式土钉墙(2-2剖面)与普通土钉墙(1-1剖面)相比,土压力计算值减小23.4%。阶式土钉墙中土钉的内力水平小于普通土钉墙,但在开挖至台阶以上部分时二者是相当的。这主要是因为阶式土钉墙由于台阶的存在,导致土压力的分布形态发生了改变。对于阶式土钉墙,在台阶下一定范围内,土压力水平小于普通土钉墙相应部位的土压力,因此开挖引起的土钉内力增量小于普通土钉墙的土钉内力增量。

采用有限元分析软件FLAC^{3D}进行了分析,2-2面最大水平位移比1-1剖面减小26%。施工至基坑底部时,2-2剖面基坑顶部水平位移为5 mm,水平位移与基坑深度的比值为0.6%。1-1剖面基坑顶部水平位移为30 mm,水平位移与基坑深度的比值为3.5%。由此可见,其他参数相同时,阶式土钉墙的变形量小于普通土钉墙。

1-1剖面计算整体稳定安全系数为1.32。2-2剖面计算整体稳定安全系数为1.34。

4 结 语

在普通土钉墙的中部设置平台形成阶式土钉墙,与普通土钉墙相比,由于台阶的存在改变了土压力分布形态,改变了土体的应力应变状态,其变形、土钉内力小于普通土钉墙,稳定性也优于普通土钉墙。

影响阶式土钉墙工作性状的因素很多,例如台阶宽度、台阶位置、放坡系数、土质情况等。根据计算分析及工程经验,对于均质土边坡,台阶设置在0.6倍的基坑深度上下的位置处,效果比较明显;对于基坑中部有软弱夹层的情况下,台阶应设置在软弱层顶面处。阶式土钉墙的台阶宽度不应小于0.1倍的基坑深度。

参考文献:

- [1] 王曙光, 叶 焱, 段启伟, 等. 阶式土钉墙支护结构变形机理及设计方法研究[R]. 北京: 中国建筑科学研究院地基所, 2008, 12. (WANG Shu-guang, YE Yan, DUAN Qi-wei, et al. Research on displacement and design method of stepped soil-nail wall[R]. Beijing: Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, 2008, 12. (in Chinese))
- [2] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 第2版. 中国建筑工业出版社, 2000. (CHEN Zhao-yuan, CUI Jing-hao. The application of soil nailing supporting in the foundation pit[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [3] 杨广庆. 台阶式加筋土挡土墙设计方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 695 - 698. (YANG Guang-qing, Study on design method of tiered reinforced earth retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 695 - 698. (in Chinese))
- [4] 赵星民, 李 明. 台阶式加筋土挡墙土压力计算研究[J]. 西部探矿工程, 2008(4): 34 - 36. (ZHAO Xing-min, LI Ming. Study on calculation methods of tiered reinforced earth retaining wall[J]. West-China Exploration Engineering, 2008(4): 34 - 36. (in Chinese))
- [5] 王曙光, 段启伟, 王艳永. 某土钉墙工程现场实测研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(1): 93 - 96. (WANG Shu-guang, DUAN Qi-wei, WANG Yan-yong, Research on the soil-nail wall by field tests[J]. Building Science, 2010, 26(1): 93 - 96. (in Chinese))