

土钉墙技术及其发展

⑦
2000-27

孔宪宾¹, 任青文²

TU 476.4

(1. 淮阴工业专科学校, 江苏淮阴 223001; 2. 河海大学科技处, 江苏南京 210098)

摘要:根据国内外关于土钉技术及其应用研究的资料,对土钉墙技术及其发展过程、分类、工作机理及工程应用进行分析和归纳,展望了土钉墙技术的发展前景,认为在土钉墙技术方面有待进一步探讨的问题是:进一步认识破坏机理;探讨更加切合实际的力学模型;研究土钉的徐变和松弛及土钉的稳定性分析方法;施工过程中和竣工后的变形监控。

关键词:土钉墙;稳定性分析;试验;监测

中图分类号:TU472.3+4

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2000)02-0024-04

土钉是一种原位土加筋和强化的技术,是在 50 年代的土层锚杆技术和 60 年代的加筋土挡墙技术的基础上发展起来的。早在 60 年代末,加拿大温哥华地区已经用过土钉作为房屋基础开挖的临时支护。70 年代起西班牙、巴西、匈牙利、日本等国家开始对土钉支护技术进行研究和应用。此后印度、新加坡、南非等国家均有土钉的应用和研究的报导。1972 年法国成功地应用了土钉墙技术,同年美国就有了早期应用土钉墙技术的详细记载。1975~1981 年联邦德国耗资 230 万美元进行了 7 个大型足尺土钉墙试验和许多模型试验,另外,还进行了近百个抗拔试验,得到了一些重要结论。1978 年在巴黎第一次将土钉技术用于邻近高层建筑的繁华街道地区开挖施工^[1]。1979 年联邦德国建造了第一个永久性土钉工程,并进行了长达 10a 的连续测量,获得了许多宝贵数据^[1]。1980 年我国在山西柳湾煤矿的边坡稳定工程中首次应用了土钉墙技术,并有许多单位在这方面做了许多研究工作,取得了不少经验。1984 年法国发展了一种高压喷射注浆击入钉技术。1986 年法国开展了土钉支护的基础研究,得到了一些有价值的结论^[1]。80 年代,英国也对土钉的分析方法、程序开发、离心试验,实际工程中的土钉内力测试与支护变形测试以及钉与土相互作用的大型抗剪试验等进行了较多的研究,英国还发展了一种气动射击钉技术。1990 年在美国召开的挡土结构国际学术会议上,土钉支护已作为一个独立的专题与锚杆挡土墙并列,使之成为一个独立的土体加固学科分支。

土钉墙按服务年限可分为服务年限小于 2a 的临

时性土钉墙和服务年限大于 2a 且有防腐措施的永久性土钉墙;按施工工艺可分为钻孔注浆钉、击入钉、注浆击入钉、高压喷射注浆击入钉、气动射击钉;按构造可分为垂直土钉墙、倾斜土钉墙、阶梯土钉墙。

土钉墙适用场合为:①基础托换;②基坑或竖井加固;③斜坡挡土墙;④边坡稳定;⑤与锚杆结合作斜面防护;⑥对已有挡土结构的加固、抢险、维修或改造。

土钉墙与其他各种挡土技术或支护类型相比具有以下明显优点:①用料少、工程量小、施工快;②施工设备轻便、操作方法简单、施工时对环境干扰小;③对场地土层适应性强;④结构轻巧、柔性大、有非常好的抗震性能;⑤随基坑开挖逐层分段作业,不占或少占单独作业时间,施工效率高,开挖完成时土钉墙就能建好(这一点对膨胀土边坡尤为重要);⑥施工不需单独占用场地,对于施工场地狭小的工程,该项技术特别有用;⑦安全可靠,土钉数量众多,并作为群体而起作用,个别土钉出现问题或失效,对整体影响不大,随时可根据现场开挖出现的土质情况和现场监测的土体变形数据修改土钉的间距和长度,万一出现不利情况也能及时采取加固措施,避免出现大事故;⑧经济,根据经验,土钉支护比一般的拉锚支护可节约总造价的 10%~30%(美国一工程表明,采用此项技术可节约 30% 的造价,在我国可节约 20% 左右的造价)。

土钉墙的缺点主要有:①施工时会对地下管道等设施产生干扰;②对于软土、无粘结松散砂土以及在地下水丰富的情况下采用,土钉支护有一定难度;

③在软土中设置土钉造价高,国外经验表明要高于连续墙;④土钉支护作为永久性结构时,需专门考虑锈蚀等耐久性问题。

1 土钉墙的功能

土钉墙的各结构要素对土钉墙的贡献为:①土钉,极大地增加了土体的抗剪强度,大大推迟和延缓了土体的塑性流动和滑塌;②注浆,浆液可以渗到土体的孔隙中对颗粒起胶结作用,这种渗入在砂土中尤为明显,改善了土体的松散性,提高了原状土的整体性,保证并加强了土、砂浆和钢筋之间力的传递;③面层,使分散的土钉共同发挥作用,限制坡面膨胀和局部塌落。

关于土钉墙支护的作用机理,目前有代表性的看法有下面三种。

1.1 增强土体强度

1.1.1 筋-土摩擦理论

如图1所示,该理论认为,当墙体破坏时,土钉墙结构内部产生主动区和稳定区。滑动棱体ABC产生的水平推力在土钉中形成拉力,企图将土钉从土中拔出,而滑动面后方的土钉又被稳定区土的自重压住,也就是说稳定区的土与土钉之间的摩擦力阻止土钉拔出,如果稳定区的筋-土之间的摩擦力与主动区土的水平推力平衡,则整个结构内部就是稳定的。

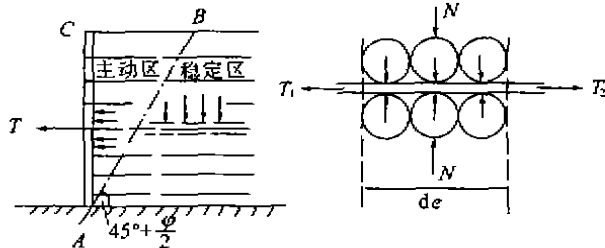


图1 土钉墙结构原理分析

足尺加筋土挡墙测试表明,上述分析是合理的,拉力沿土钉分布情况如图2所示。由土体产生的作

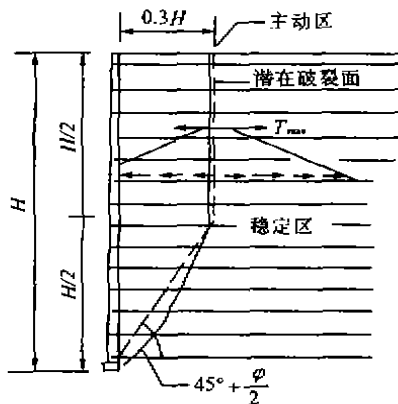


图2 拉力沿拉筋分布

用于拉筋表面的切向剪应力可用下式表达:

$$\tau = \frac{dT}{2bdl} \quad (1)$$

式中: dT 为微拉力; dl 为土钉长度微段; b 为拉筋宽度。

摩擦加筋理论由于概念明确、简单,因而在高模量加筋土中得到广泛的应用。

1.1.2 准粘聚力理论

准粘聚力理论从加筋和未加筋砂圆柱土样进行三轴对比试验的结果出发,根据库仑-摩尔破坏准则,并假设加筋前后土样的土工参数不变,于是由图3可得试验极限平衡状态下的数学表达式:

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (2)$$

式中: σ_{1f} 为加筋土样破坏时的最大主应力; c 为加筋土样的粘聚力。该理论认为,加筋土力学性能的改善是由于新的复合体(加筋土)具有某种“粘聚力”的缘故。这种粘聚力不是土原有的而是加筋的结果,因此称为“准粘聚力”。准粘聚力理论适合于高模量加筋土,因为高模量加筋土变形相对小,只要不断裂就足以阻止土产生边界变形,从而提高加筋土强度。

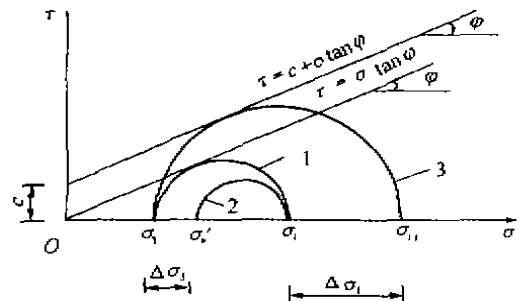


图3 加筋砂和未加筋砂应力圆分析

1—极限平衡;2—弹性平衡;3—新的极限平衡

1.2 改变受力状态

复合结构体的内部约束,改变了边壁临空面土体的受力状态,使其低于临界状态,处于弹性平衡。

1.3 土钉分担荷载

a. 在复合结构中土钉与土体共同承担外荷载和土体自重应力。

b. 土体进入塑性状态后,应力逐渐向土钉转移。

c. 土体开裂时,土钉出现了弯剪、拉剪等组合应力状态,进而浆体碎裂,钢筋屈服。

因而复合土体有塑变延缓,渐进开裂的特性。

1.4 面层约束变形

坡面上设置的与土钉连在一起的钢筋网喷射混凝土层是发挥土钉有效作用的重要组成部分。它有限制坡面膨胀、削弱内部塑变、加强边界约束的作用。

2 土钉墙的破坏形式

2.1 内部破坏

a. 整体破坏,即墙体内产生裂缝与滑移,将加固体分割为滑动区与约束区.由于滑体下移,将同时导致土钉弯曲、剪切与拉伸,最终可能拔出或断裂.产生这种情况的主要原因是土钉的总体抗拉或抗拔能力不够,其次是抗弯、抗剪能力不够.

b. 局部破坏,即墙体的某些个别地方发生的有限损坏.例如面层与土钉结合点的断裂;个别土钉的损坏;面层局部开裂、隆起或背面刷空等.这些破坏的出现多由于施工和材料质量不佳,或排水、防水、防腐蚀不力,设计不好也会造成面层破坏.

2.2 外部破坏

外部破坏指发生于墙体之外的破坏,主要形式有:①土钉墙沿基底平移;②土钉墙绕墙趾倾覆;③墙基土体失稳;④沿深远土层整体滑移.

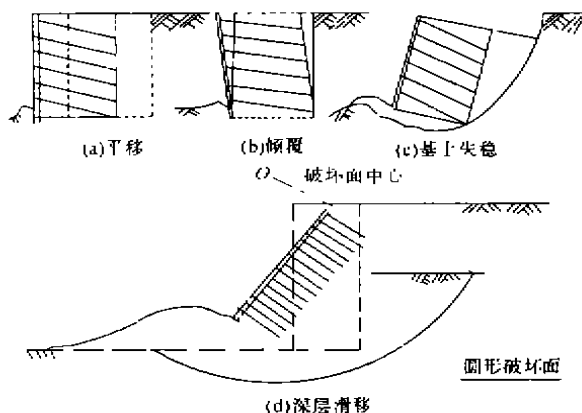


图4 土钉墙外部破坏形式

2.3 超量变形

土钉墙内外虽未滑移破坏,但其水平位移和地表下沉过大达到危及相邻设施或建筑物安全的程度也是不能允许的.

2.4 土体液化

在易液化的土体环境中开挖基坑,在施工中和竣工后都可能在外界的冲击和震动下使土钉墙或深远部土体突然塌落失稳,故一般不宜单独采用土钉墙,而应配以其它土体加固与支护措施.

3 常用的分析方法

土钉墙结构的稳定性分析方法有许多种,这些方法对破裂面形状、界面特性、钉-土相互作用模型均有不同的假定,下面介绍几种典型分析方法.

a. Davis 法.①安全系数的定义:整体安全系数即为土的强度安全系数.②钉-土相互作用,充分调动了拔出阻力,为边坡稳定作贡献,没有弯曲效应;

③破坏面为抛物线滑移面,通过结构的坡趾;④界面特性,适用莫尔-库仑准则.

b. 德国法.①安全系数的定义:安全系数仅由锚固力定义;②钉-土相互作用,充分调动了拔出阻力,为边坡稳定作贡献,没有弯曲效应;③破坏面为双线性形状;④界面特性,适用莫尔-库仑准则.

c. Scholesser 法.①安全系数定义为局部安全系数;②钉-土相互作用,充分调动了拔出阻力为边坡稳定作贡献,弯曲效应按横向受载桩在极限状态下考虑;③破坏面为圆弧或其它破坏形状;④界面特性,根据土的类型引入单位界面摩擦强度.

d. Juran 法.①安全系数定义为局部安全系数;②钉-土相互作用,工作拉应力在一定的假定下与土锚传感器的力相平衡,弯曲效应按横向受载桩在极限状态下考虑;③破坏面对数螺旋线或圆弧;④界面特性,根据土的类型引入单位界面摩擦强度.

e. 运动极限分析法.

f. 王步云法.①根据土的类型引入单位界面摩擦强度;②土钉端部抗拉断裂极限验算,要求在面层土压力作用下,不使土钉端部产生过量拉伸或屈服;③土钉锚固力极限验算,要求在面层土压力作用下,土钉内部潜在滑裂面后的有效锚固段应具有足够的界面摩擦力而不被拔出.

4 目前国内外对土钉墙的研究动向

近年来我国许多学者和工程技术人员对土钉墙结构的稳定性分析做了大量的研究,提出了一些有实用价值的新观点.文献[2]对考虑土钉抗剪作用的分析方法进行了探讨,并利用圆弧滑动法分析了影响土钉加固边坡稳定的若干因素,提出了土钉抗剪作用在稳定性分析中是次要的,简化计算时可以忽略的新观点.文献[3]提出了用几何控制参数确定最危险滑动面的计算机算法,通过计算表明安全系数是几何控制参数的单峰函数,用黄金分割法分步对几何控制参数进行了优化,提高了计算速度.王安宝等采用优化理论中的复形调优法对滑移面进行分析,建立了搜索最危险滑移面的计算模式,克服了条分法需要大量计算且难以找到真正危险滑移面的缺点,提高了工作效率^[4].张群等将土体离散为具有平面内旋转自由度的三角形膜,土钉离散为平面梁元,对深基坑土钉支护做线弹性有限元分析,得出了土体和土钉的内力都获得改善的结论^[5].此外,胡建冰等在施工现场对土钉的受力进行了监测^[6];刘治安等根据深基坑施工过程中变形破裂观察资料、位移监测资料及土钉应变测试资料对土钉支护的作用机理作了初步探讨,也有不少文章对土钉加固支护体

系的设计方法及应用进行了深入的研究^[7~11]和对土钉支护体系事故进行分析^[12]等,这些研究对土钉墙支护技术的理论探讨和工程应用都起到了很大的推动作用。

目前,在国外对土钉墙的研究中,对永久性土钉防腐措施的研究,提出了密封防护、环氧树脂覆盖防护、灌浆防护等。在土钉试验研究方面,对极限试验、设计试验、施工试验、徐变试验进行了研究,并制订了试验验收规范。

有待进一步探讨的问题是:①破坏机理有待进一步认识;②更加切合实际的力学模型有待进一步探讨;③对土钉徐变和松弛的研究;④稳定性分析方法的进一步研究;⑤施工过程中和竣工后的变形(位移)监控等。

5 结 语

土钉墙技术是一项具有广阔发展前景的新技术,随着国民经济的发展和建设事业的兴旺发达,土钉墙技术在建设工程中的应用将越来越广泛,土钉墙技术的研究也将越来越深入,许多新的科研成果将会在工程中得到应用,从而将更有力地促进国民经济的发展。

参考文献:

[1] 万金山.土钉墙技术及其应用前景[J].江苏地矿信息,

1997(2):87~95.

[2] 高印立.土钉加固边坡稳定性分析与计算[J].岩土工程技术,1998(2):9~11.

[3] 张明聚,宋二祥,陈肇元.基坑土钉支护稳定分析方法及其应用[J].工程力学,1998,15(3):36~43.

[4] 王安宝,史维汾,王国俊.土钉支护的稳定分析(条分法结合复形调优法)[J].地下空间,1997,17(1):1~8.

[5] 张群,崔京浩.土钉支护边界位移控制法有限元分析[J].工程力学,1997(增刊):524~528.

[6] 胡建林,钟映东.深基坑土钉支护技术[J].建筑施工,1997,19(4):13~14.

[7] 和瑞堂.喷锚网综合支护技术在深基坑支护工程中的应用[J].防护工程,1998(2):70~76.

[8] 高伯华,樊有维,毛丽珠.深基坑的喷锚支护设计[J].土基基础,1998,112(2):28~32.

[9] 武秀彦,田再琦.土钉支护体系在深基坑复合支护中的设计[J].哈尔滨建筑大学学报,1996,29(3):117~120.

[10] 周开发.土钉加固公路边坡和路垫技术简介[J].国外公路,1997,117(3):11~15.

[11] 张同江,薛千明.一套比较经济的深基复合支护设计方案[J].岩土钻凿工程,1996(2-3):79~87.

[12] 张鑫,盛去复,孙剑平,赵黎明.一起深基坑支护事故分析[J].工程力学,1996(增刊):363~366.

(收稿日期:1999-06-07 编辑:马敏峰)

·简讯·

自溃式闸门在美国和非洲的应用

1999年,南非的艾肯霍夫(Eikenhof)坝成功地安装了自溃式闸门后,南部非洲又有2座坝将安装由Hydroplus公司制造的自溃式闸门。

第一座是马拉维(Malawi)卡穆祖(Kamuzu)II号坝,用于为首都利隆圭(Lilongwe)市供水。坝的加高将增加主要用水户与灌溉的供水量。安装14个5m高的混凝土自溃式闸门(现场浇筑)将使现有的蓄水能力($9 \times 10^6 \text{ m}^3$)增加1倍多。在500m长的土坝的坝顶上建造1.5m高的胸墙,为特大洪水提供所需要的安全超高。

另一座是津巴布韦的卢提(Ruti)坝,该坝1976年建成,作用是为马尼卡兰干旱贫困的农村提供灌溉用水。该坝当时的库容仅为平均年径流量的54%,即1.26亿 m^3 。为最大限度地利用径流量,请求Hydroplus公司提出一项增加库容的经济、快捷的方法,为此,对宽700m的溢洪道稍加降低和改造后,将设置240个1.6m高的自溃式闸门,可增加库容25%。

1998年成功地安装了自溃式闸门的艾肯霍夫坝始建于1977年,1988年曾使用传统方法将原坝加高1m,并增建了1座宽47m的辅助溢洪道。1998年业主将通过安装自溃式闸门来加高坝的合同授予了Hydroplus公司,工程于1998年年底完工。加高工程包括在宽15m的主溢洪道上建一固定的高2m的迷宫式混凝土墙和在辅助溢洪道上安设10个1.8m高的自溃式闸门。原坝不用加高,新建的迷宫式混凝土墙与自溃式闸门联合作用不仅能增加库容460万 m^3 (19%),而且能改善整个溢流系统的运行和安全。

与此同时,在美国的一个无闸门坝上安装自溃式闸门的模型试验正在进行之中。在加利福尼亚卡维亚(Kaweah)河上建造的特尔米努斯(Terminus)坝主要用于防洪,但也提供灌溉用水。1998年,美国工程师团与Hydroplus公司签定了设计6.5m高混凝土自溃式闸门的合同。自溃式闸门安装的溢流槽上,可增加蓄水5000万 m^3 并能提高防洪能力。

自溃式闸门的设计为工程师提供了一种替代方案,即通过一个坝肩替代大量开挖岩石的设计方案,这种方案能节省投资和施工时间。

(张惠英摘自《水力发电与坝工建设》1999年第2期)