

第十篇

土钉墙设计与施工技术

第一章 土钉墙构造

第一节 概 述

一、土钉墙的概念

土钉墙是在土质或破碎软弱岩质路堑边坡中设置钢筋土钉，靠土钉拉力维持边坡稳定的挡土结构。土钉墙是从隧道新奥法基础上发展起来的一门边坡支挡新技术，通过钢筋等高强度长条材料对原位岩土体进行加固，从而提高原位岩土体的“视凝聚力”及其强度，使被加固土体形成了性质与原来大为不同的复合材料“视重力式挡土墙”(图 10—1—1)，用以提高整个边坡的稳定性。土钉技术是一项原位岩土加筋技术，土钉一般是通过钻孔、插筋、注浆来设置的，通过与岩土界面抗剪强度向岩土体提供抗拉强度，而土钉之间的岩土变形通过钢筋网喷射混凝土面板进行约束。目前土钉墙广泛应用于深基坑支护及边坡加固工程中。

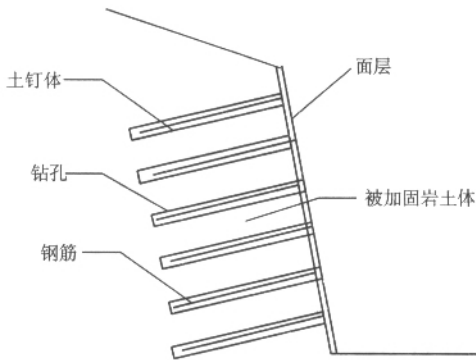


图 10—1—1 土钉墙示意图

二、土钉墙的发展状况

土钉挡墙作为一种挡土技术，是在 20 世纪 50 年代的土层锚杆技术和 20 世纪 60 年代的加筋土技术的基础上发展起来的，是与新奥法(NATM)和加筋土技术的发展紧密相关的。20 世纪 70 年代法国首先进行了土钉墙技术的应用研究和技术推广。1972 年，法国承包商 Bouygues 首先在法国 Versailles 附近的一处铁路边坡开挖工程中成功应用了土钉墙。该边坡最大坡高 21.6m，长 965m，坡度 70°，总加固面积 12000m²，使用了 25 200 根钻孔注浆锚杆。此后，土钉技术很快在法国得到广泛应用。几乎与此同时，德国和美国在 20 世纪 70 年代中期也开展了土钉挡墙技术的应用研究。

土钉挡墙技术的应用推动着基础性的理论和试验研究。法国、德国、美国等国家在 20 世纪 70~80 年代开展了大型足尺试验、离心模型试验、现场土钉内力与支护变形测试、现场抗拔试验及理论研究工作。法国基础性研究工作首先是巴黎路桥学院 (CERMES), 在 Schlosser 教授、Juran 博士主持下完成了土钉支护系统的模型试验和理论研究。德国在承包商 Karl Bauer AG 资助下, Karlsruhe 大学的岩土力学联合研究所从 1975 年开始了一项为期 4 年的研究, 包括其中的 8 项大型足尺试验和上百个抗拔试验, 试验主要在砂土中进行。这一研究的主要结论为: ①土钉墙支护性能与重力式挡土墙类似; ②对于直立墙面和水平地表情况, 土钉长度以墙高的 0.5~0.8 倍为宜(无地下水); ③钉距应小于 1.5m; ④面层压力可视为均布, 大约为库仑主动土压力的 0.4~0.7 倍。此外 Karlsruhe 大学的 Stocker 教授与 Gassler 等人也作了许多理论研究工作。

近年来, 美国联邦公路管理局把土钉技术推广到公路路基边坡稳定和公路桥台挡土结构工程中, 并编制了相应的设计、施工和监理手册的技术文件。法国、德国也编制了相应的技术文件。

我国开展土钉挡墙技术和应用的研究起步较晚, 1980 年山西太原煤矿设计院将土钉技术首次应用于山西柳湾煤矿的边坡工程, 王步云等对此工程曾进行过原位试验和分析。20 世纪 80 年代后期土钉技术在深基坑开挖的支护和加固上有了较多的应用。20 世纪 90 年代中期以后, 土钉技术在我国建筑、公路、铁路等边坡和基坑工程中得到了较大规模推广与应用。

1995 年, 铁道部第二勘测设计院在南昆铁路破碎软岩高边坡开展土钉墙工程试验研究, 进行了有限元、离散元数值计算、大型模型试验及现场试验, 其研究主要结论为: ①喷层后土压力呈上下小、中部大特征, 仅为库仑主动土压力的 0.3~0.4 倍; ②土钉最大轴力所确定的土钉墙总的受力与库仑主动土压力相近, 但分布形式不同, 其受力分布呈上下小、中部大特征; ③土钉墙的潜在破裂面距墙面的距离为墙高的 0.3~0.35 倍, 土钉长度以墙高的 0.4~1.0 倍为宜; ④设计和施工中应遵循“保住中部、稳定坡脚”的原则。该项研究成果广泛应用于内昆、水柏、渝怀、株六复线等铁路边坡土钉墙设计施工中。

目前我国还将土钉技术推广到承压水地区, 并突破了软土地区不宜使用土钉技术的禁区, 取得了一些成功实践经验。这些将对我国土钉挡墙技术的发展起到较大的促进作用。

三、土钉墙的类型、特点及适用性

按施工方法, 土钉可分为钻孔注浆型土钉、打入型土钉和射入型土钉三类。其中钻孔注浆型土钉为最常用的类型。

土钉墙结合了锚杆挡墙与加筋土挡墙的优点, 用于挖方边坡工程, 具有以下特点:

1. 施工的及时性。自上而下, 边开挖边喷锚, 可及时对边坡进行封闭, 从而保护岩土不因边坡开挖暴露而过多降低力学强度。
2. 结构轻巧、有柔性, 可靠度高。通过喷锚, 与加固岩土形成复合体, 允许边坡有少量变形, 受力效果大大改善。作为群体效应, 个别土钉失效对整个边坡影响不大。
3. 施工机具轻便简单、灵活、所需场地小、工人劳动强度低。
4. 材料用量小, 自身成本费用较低。

土钉施工一般应具备以下条件: 一般每层施工面要开挖 1~2m 高, 因此要求边坡有一定的自稳性, 即要求边坡岩土具有一定的天然粘聚力; 要求坡面无渗水或渗水较小, 以便能形成喷射混凝土面层; 要求岩土能够提供一定的界面摩阻力。

因此,土钉墙适用于一般地区土质及破碎软弱岩质路堑地段,在地下水较发育或边坡土质松散时,一般不宜采用土钉墙。

第二节 构造特征

一、土钉墙的结构原理

(一)土钉墙的作用原理

岩土体的抗剪强度较低,抗拉强度几乎可以忽略,但岩土体具有一定的结构整体性,能够以较小的高度即临界高度直立存在。当边坡直立高度超过临界高度或坡顶超载以及其他因素发生变化时,将引起边坡失稳。通常采用设置挡土墙等被动制约机制的支挡结构承受侧压力,防止边坡整体失稳破坏。而土钉墙则是在岩土体内放置一定长度和分布密度的加筋体,与岩土体共同作用,以弥补岩土体自身强度的不足,是一种增强边坡坡体自身的稳定性的主动制约机制为基础的复合岩土体。土钉与岩土体相互作用,使岩土体自身结构强度潜力得到充分发挥,改变了边坡变形和破坏性状,显著提高了边坡整体稳定性。

试验表明:直立的土钉墙坡顶承载力比素土边坡提高1倍以上,且受荷过程中不会发生素土边坡那样的突发性坍塌。它不仅延迟了塑性变形发展阶段,而且有明显的渐进性变形和开裂破坏并存且逐步扩展,直至丧失承受更大荷载的能力,但仍不会发生整体性坍塌。

土钉与岩土体相互作用,一方面体现在钉与土界面间阻力的发挥程度;另一方面,由于土钉与岩土体的刚度比相差很大,在土钉墙进入塑性变形阶段后,土钉自身作用逐渐增强,从而改善了复合岩土体塑性变形和破坏性状。

(二)土钉的作用机理

土钉墙主要是通过钉材来加强岩土体,其加固机理主要表现在以下几方面:

1. 增强原位岩土体强度作用

在岩土体内设置一定长度与分布密度的土钉体,与岩土共同作用,形成复合体,从而提高原位岩土体强度,以弥补岩土体自身强度不足,增强边坡整体稳定性。

2. 土钉对复合体起骨架约束作用

由于土钉本身的刚度和强度,以及它在岩土体内分布的空间组合成复合体的骨架使复合体构成一个整体,骨架有约束岩土体变形作用。另外,通过土钉与岩土间的摩擦阻力的发挥,也具有制约岩土体的变形作用。

3. 土钉对复合体起分担作用

在复合体内,土钉与岩土体共同承担外荷载和自重应力,土钉起着分担荷载作用。与岩土比较,土钉具有很高的抗拉、抗剪强度及抗弯刚度,因此在岩土体进入塑性状态后,应力逐渐向土钉转移。当岩土体开裂时,土钉分担作用更为突出,这时土钉内出现弯剪、拉剪等复合应力,从而导致土钉体中浆体碎裂、钢筋屈服,复合体具有塑性变形延迟、渐近开裂等特点。

4. 土钉起着应力传递与扩散作用

土钉体通过其应力传递作用,将滑裂域内部分应力传递到稳定岩土体中,并分散在较大范围的岩土体内,降低应力集中程度。

5. 对坡面变形起约束作用

土钉与钢筋网喷射混凝土面板连在一起,对边坡变形起约束作用。坡面膨胀变形是开挖卸荷、岩土体侧向滑移以及塑性变形和开裂发展的必然结果,限制坡面膨胀能起到削弱内部塑变,加强边界约束的作用,这对开裂变形阶段尤为重要。

二、土钉墙的构造特征

土钉墙主要由土钉、周围岩土体、面层和排水系统组成。

(一) 面层

土钉墙面层通常采用 120~200mm 厚网喷混凝土做成,为确保土钉和面层有效连接,土钉外端设钢垫板或加强钢筋通过螺丝端杆锚具或焊接进行连接。网喷混凝土面层每隔 15~20m 应设置一道沥青木板伸缩缝。

喷射混凝土面层一般分 2~3 次进行喷射,其强度等级不宜低于 C20。永久工程可在表面喷射 1cm 厚水泥砂浆,使墙面平整美观。为了分散土钉对喷射混凝土面层的剪应力,同时使土钉与面层能很好地连结成整体,一般在面层和土钉交接中间螺母下设置一块 200mm × 200mm × 12mm 承压板(钢垫板)。为加强喷射混凝土面层强度、使面层受力均匀,在面层中配置 1~2 层钢筋网,钢筋网间距为 150~300mm,钢筋直径为 6~10mm,钢筋网搭接宜采用焊接。

(二) 土钉

土钉通常采用钻孔注浆钉,即先在岩土中成孔,置入钉材,然后全孔注浆,钉材与外裹的水泥砂浆形成土钉体(如图 10-12)。钉材一般采用Ⅱ、Ⅲ级钢筋,钢筋直径为 16~32mm,钻孔直径为 70~130mm。钉孔注浆材料宜采用水泥浆或水泥砂浆,其强度不宜低于 20MPa,一般采用 M30 水泥砂浆,常用配合比为水:水泥:砂=0.40~0.45:1:1(水泥砂浆),水:水泥=0.40~0.45:1(水泥浆)。同时注浆材料可防止土钉钢筋锈蚀,为使钢筋位于钻孔中心,每隔 2m 应设定位支架,且保护层厚度一般不小于 25mm。边坡渗水较严重时,宜添加膨胀剂。注浆采用孔底注浆法,宜用低压注浆,注浆压力一般为 0.2MPa,需设置止浆塞和排气管。

(三) 排水系统

为了防止地下水或地表水渗透对混凝土面层产生静水压力和侵蚀,避免岩土体因饱和而降低其强度和岩土与土钉之间的粘结力,土钉结构须设置完善的排水系统。一般视具体情况采用截水、浅层排水及深层排水三种排水方式。

首先应在坡顶外设置截水沟排除地表水。地下水不发育时,在坡面设置浅层排水系统,即沿坡面每间隔 2.5~3m 设置长 1m、孔径 49mm、仰斜 5°~10°的浅层排水孔,孔内设置直径 40mm 透水管或凿孔的 PVC 管。亦可在喷射混凝土面层上设置泄水孔,泄水孔间距 2~3m,其后设无砂混凝土板反滤层。无砂混凝土板尺寸一般为 30cm × 30cm × 10cm,在其下部设置一根长 25~30cm、直径 50mm PVC 管作为泄水孔用。

边坡渗水严重时,应设置仰斜 5°~10°的深层排水孔,排水孔长度视地下水情况而定,

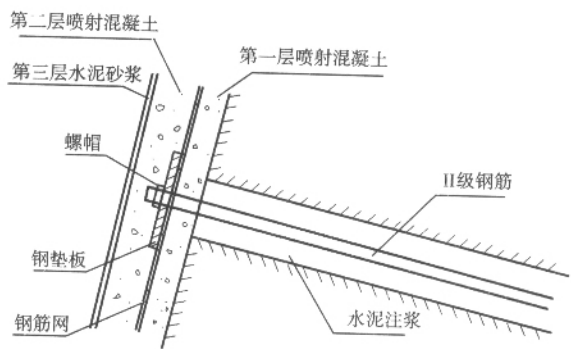


图 10-1-2 土钉细部结构图

一般较土钉略长,孔内设置透水管或凿孔的 PVC 管,并充填粗砂。

第二章 土钉墙设计与计算

第一节 土钉墙稳定计算分析方法

土钉墙稳定性分析是土钉墙工程设计的重要内容,也是土钉墙应用的理论基础。通过稳定性分析,可以验证所选土钉各个参数的合理性、可行性,以及所设计土钉墙的安全性、适用性。根据大量试验研究与工程实践,土钉墙可能破坏的形式分为内部破坏(墙体内整体失稳和局部破坏)、外部破坏(整体侧移、倾覆和整体滑移)和超量变形三种类型。对外部破坏分析,工程中一般采用类似重力挡墙设计方法进行水平滑动稳定、抗倾覆稳定、墙底土承载力和整体抗滑稳定验算;对内部破坏分析,目前尚无工程界普遍认同的方法,各国根据各自的试验研究,提出了相应的分析和计算方法,归纳起来主要有极限平衡法、有限元法、工程简化分析法。

一、极限平衡法

极限平衡法是土坡稳定性计算较早采用的方法,也是目前土钉支护应用最为广泛的方法之一。就极限平衡法而言,许多国家对其进行了大量的理论和试验研究。由于有不同的安全系数的定义,不同的土钉挡墙的破裂面形状假定以及不同的钉—土相互作用类型和土钉力分布的假定,国内外出现了许多种与其相应的试验成果一致的方法。工程中应用较多的并具有代表性的有以下几种:

1. 1979年由 Stocker 等人提出的德国方法,假定潜在破裂面为双曲线形,进行力的极限平衡总体稳定分析,仅考虑土钉的抗拉作用,土的剪切强度由莫尔—库仑准则确定。
2. 1983年由 Schlosser 提出的法国方法,假定潜在破裂面为圆弧形,根据传统边坡稳定中的条分法,进行力矩极限平衡总体稳定性分析。最初仅考虑土钉的抗拉作用,改进后考虑土钉的抗拉、抗剪和抗弯作用。
3. 1989年,由 R. J. Bridle 提出的 Bridle 方法,假定潜在破裂面为对数螺旋线形并通过坡角,用条分法分析滑移土体的平衡,并认为滑动总力矩与抵抗总力矩间的不平衡力矩即为土钉应提供的平衡力矩,进而确定土钉的位置并给出了计算各土钉剪力的经验公式。

二、有限元法

有限元数值计算方法不仅能计算土钉挡墙中土钉内力,土体的应力应变关系,模拟开挖过程等,而且可以考虑土体的非均匀性和各向异性的复杂性态。由于土体的性态和结构的复杂性,这一方法直接用于工程并能得到满意的结果还有一段距离,但仍不乏是目前公认的用来分析不同参数变化时的土工结构性能变化规律的较为有效的一种方法。其计算结果与计算模型及参数的选取有关,目前对土钉内力的计算结果较为满意,但变形计算结果不够理想。

从西南交通大学岩体所对南昆铁路破碎软岩边坡土钉墙进行了平面弹塑性有限元、离散元数值计算分析情况看,有限元法能比较容易地处理各种复杂的几何形状和各种类型的边界条件,解决难以用解析法求解的力学问题,解决了钉土相互作用的难题。此类方法对土钉墙墙体内应力分布、墙面位移变形、土钉受力情况做定性分析较为理想,通过坡体内位移、应力和土钉轴力三种方式确定的土钉墙边坡潜在破裂面与模型试验、现场试验所确定的潜在破裂面较为吻合,为高水平、高质量、高可靠性的土钉设计提供了理论和方法基础。

三、工程简化分析法

在工程实践中人们提出了许多简化分析方法,简化分析的实质就是直接给定临界滑移面的位置,直接给定不同部位的土钉的最大拉力。这种方法作为估算土钉的拉力和有经验者进行土钉的初步设计是一种较为简便的方法。

国内目前常用的简化分析方法有:二分之一分割法、楔形破坏滑移面、双折线滑移面法及王步云方法。

二分之一分割法首先要确定土钉面板上的土压力图形和土的间距 S_V 、 S_H ,然后再按二分法来进行每根土钉的受力情况分析。

假定潜在破坏面的方法,包括楔形破坏滑移面和双折线滑移面法。前者方法是套用重力式挡墙背后的土体楔形破坏的特点,按库仑土压力理论,滑移面的倾角为 $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$,与 c 无关;后者方法是仿照加筋土挡墙滑移面,上为直线、下为斜线。这两种方法的土钉的拉力均由土体侧向土压力分布求出。按前者方法计算数值偏于安全,虽然上部土钉偏长,但在某些基坑支护实际工程中考虑到上部土质多为回填土,结构较松,变形量大和一定量的变形会对建(构)筑和地下管线等周边环境造成较大的影响的原因,为严格控制变形,往往加大上部土钉的长度,但底部土钉长度偏短,存在不安全的隐患。按后者计算偏于不安全,因为加筋挡墙是由下向上构筑的,填土经筛选,滑移面的位置 $S=0.3H$ 的假定比较符合实际,而用于土钉设计可能导致上部土钉长度不够。

王步云建议的方法在实际工程中应用较为普遍,该方法也假定滑移面为双折线,即上为直线,下为斜线,其计算方法如下。

1. 土钉几何尺寸设计

土钉结构尺寸由经验公式确定,其中

(1) 土钉长度设计公式为

$$L = mH + S_0 \quad (2-1)$$

式中: m ——经验系数,一般可取 $m=0.7\sim 1.2$;

S_0 ——止浆器长度,一般为 $0.8\sim 1.5\text{m}$;

H ——边坡的垂直高度(m)。

(2) 土钉间距设计由下式确定

$$S_x S_y \leq K_1 d_h L \quad (2-2)$$

式中: S_x 、 S_y ——土钉行距、列距;

d_h ——土钉孔直径,由施工钻机确定,一般为 $90\sim 200\text{mm}$;

k_1 ——注浆系数,一次压力注浆,取 1.5~2.5。

(3) 土钉钉材直径 d_b 按下式估算

$$d_b = (20 \sim 25) \times 10^{-3} \cdot S_x S_y \quad (2-3)$$

同时按土钉过量伸长或屈服进行土钉直径验算,按界面摩阻力进行锚固力计算。

2. 土钉墙内部稳定验算

(1) 土钉墙土压力计算及潜在破裂面确定

王步云法假定潜在破裂面为双折线,即墙顶至墙顶以下 $0.75H$ 范围内的破裂面为直线,其下为斜线(图 10-2-1)。

土钉墙面层后土压力强度公式为

$$q = m_e k \gamma h \quad (2-4)$$

式中: m_e ——工作条件系数,对临时支护 $m_e=1.1$,对永久支护 $m_e=1.2$;

k ——土压力系数, $k=0.5(k_0+k_a)$, k_0 、 k_a 分别为静止土压力和主动土压力系数;

γ ——土体容重;

h ——土压力作用点到坡顶的距离,当 $h \leq 0.5H$ 时, h 取实际值,当 $h > 0.5H$ 时, h 取 $0.5H$ 。土压力分布见图 10-2-1。

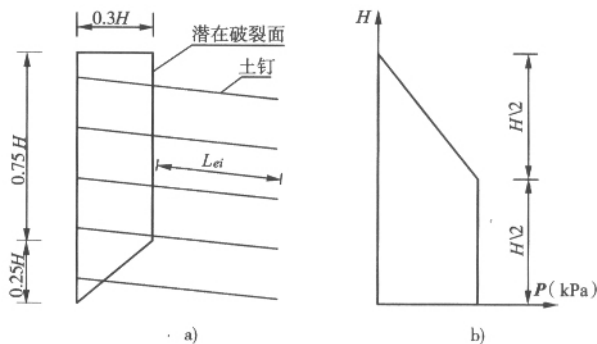


图 10-2-1 王步云法土钉墙破裂面及土压力分布形式

a) 土钉墙潜在破裂面简化图; b) 土钉墙面层压力简化图

(2) 抗拉断裂验算

$$\frac{\pi d_h^2 f_y}{4 E_i} \geq 1.5 \quad (2-5)$$

式中: E_i ——第 i 列单根土钉所承担的土压力, $E_i=q_i S_x S_y$;

f_y ——钉材抗拉强度设计值(kPa);

q_i ——第 i 列单根土钉所在位置面层后土压力强度。

(3) 抗拔验算

在土压力作用下,土钉应具有足够的界面摩阻力而不被拔出,应满足下式

$$\frac{\pi d_h L_{ei}}{E_i} \geq F_s \quad (2-6)$$

式中: L_{ei} ——第 i 列土钉有效锚固段长度;

τ ——锚孔壁对砂浆的极限剪应力(kPa);

F_s ——安全系数,取 1.3~2.0,永久工程取大值。

铁道部第二勘测设计院在王步云方法基础上,结合南昆铁路破碎软岩高边坡土钉墙工程试验研究,提出如下的土钉墙设计方法。

第二节 土钉墙设计

一、土钉墙设计内容

对于一般土钉墙工程,设计内容为:

1. 根据总体设计布置确定土钉墙的平、剖面尺寸;
2. 根据边坡岩土特性确定分层施工高度;
3. 确定土钉布置方式和间距;
4. 确定土钉的直径、长度和倾角;
5. 确定土钉钢筋的类型、直径和构造;
6. 注浆配比和注浆方式;
7. 喷射混凝土面板设计及坡顶防护设计;
8. 土钉墙内部及整体稳定分析;
9. 排水系统设计;
10. 现场监测和质量控制设计。

二、土钉墙的设计步骤

土钉墙设计的基本程序框图如图 10—2—2 所示。

1. 初拟土钉墙参数

根据边坡高度、岩土特性、工程地质条件及工程性质,参照以往经验,初步确定土钉墙结构尺寸、土钉长度、直径、间距及分层开挖高度。

2. 土钉墙内部稳定性分析

土钉墙内部稳定性检算包括土钉抗拉断检算和抗拔稳定检算。

3. 土钉墙整体稳定性分析

土钉墙整体稳定性分析包括内部整体稳定性检算和外部稳定性检算。内部整体稳定性检算应考虑施工过程中不同开挖阶段及使用阶段两种情况,根据潜在滑动面进行分条分块,进行稳定性检算。外部稳定性分析时将土钉墙视为“挡土墙”,进行抗滑稳定性检算、抗倾覆稳定性检算及地基承载能力检算。对于土质边坡、碎石土状软岩边坡,还应进行滑弧稳定性检算。

4. 调整土钉墙参数

通过土钉墙内部及整体稳定性检算,调整土钉参数,再重新进行验算,最后确定土钉长度、直径、间距。

5. 构造及排水系统设计。

6. 现场监测和质量控制设计。

根据土钉拉拔试验、土钉受力及变形监测及边坡开挖揭露情况,反馈信息,修改设计。

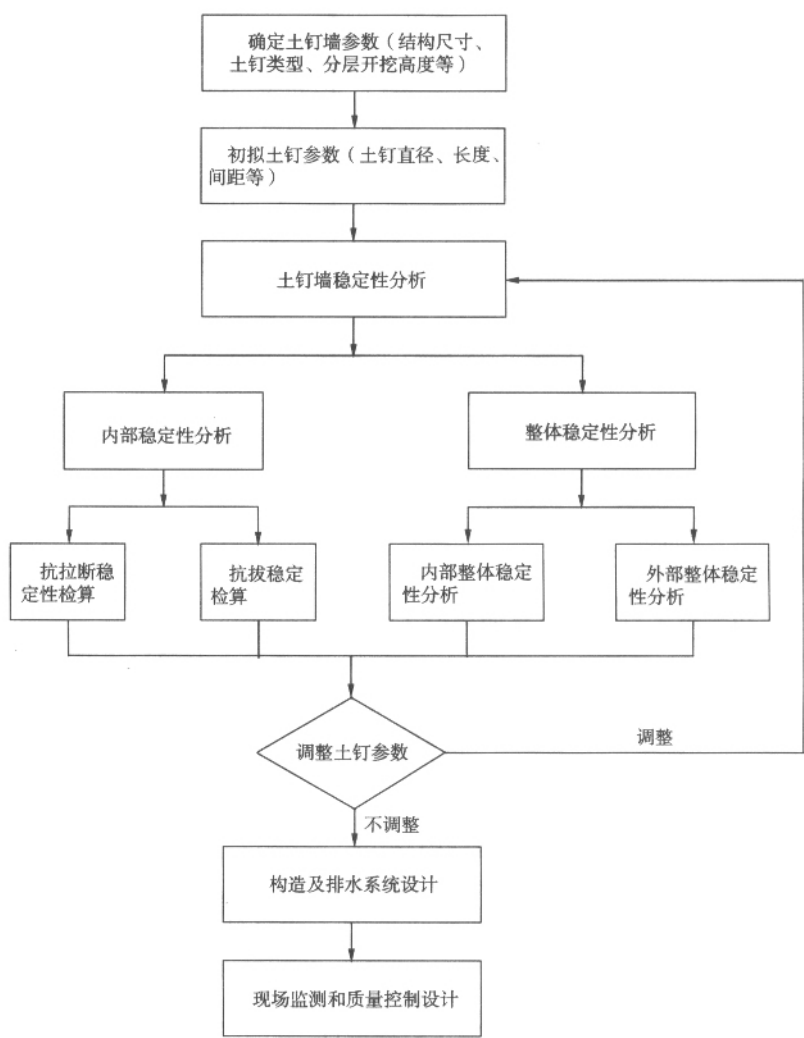


图 10—2—2 土钉墙设计的基本程序框图

三、土钉墙设计一般原则

1. 土钉墙高度宜控制在 20m 以内，墙面胸坡为 1：0.1~1：0.4，根据地形地质条件，边坡较高时宜设多级。多级墙上、下两级之间应设置平台，平台宽度不宜小于 2m，每级墙高不宜大于 10m。单级土钉墙墙高宜控制在 12m 以内。
2. 土钉的长度一般为墙高 H 的 0.4~1.0 倍（即 $0.4H\sim1.0H$ ）。岩质边坡宜为 $0.4H\sim0.7H$ ，岩性较差及地下水发育时取大值；非饱和土土质边坡宜为 $0.6H\sim1.0H$ 。
3. 土钉间距宜为 0.75~2m，与水平面夹角宜为 $5^{\circ}\sim20^{\circ}$ 。
4. 土钉墙设计应遵循“保住中部、稳定坡脚”的原则。现场量测结果表明，沿支护高度上下分布的土钉，其受力为中间大、上部和下部小。而数值分析结果表明，土钉墙坡脚应力集中明显。因此设计时边坡中部的土钉宜适当加密、加长，坡脚用混凝土脚墙加固，并使之与土钉墙连成一个整体。

5. 土钉墙分层开挖高度土层一般为 $0.5 \sim 2\text{m}$, 岩层一般为 $1.0 \sim 3\text{m}$ 。每一层开挖的纵向长度(分段长度), 取决于岩土体维持不变形的最长时间及施工流程的相互衔接。

四、土钉墙的设计计算

1. 潜在破裂面的确定

土钉墙内部加筋体分为锚固区和非锚固区, 其分界面为潜在破裂面。根据大量试验和工程实践, 土钉内部潜在破裂面简化形式如图 10-2-3 所示, 采用以下简化计算方法确定潜在破裂面。

$$h_i \leq \frac{1}{2}H \text{ 时}, l = (0.3 \sim 0.35)H \quad (2-7)$$

$$h_i > \frac{1}{2}H \text{ 时}, l = (0.6 \sim 0.7)(H - h_i) \quad (2-8)$$

式中: l ——潜在破裂面距墙面的距离(m);

H ——土钉墙墙高(m);

h_i ——墙顶距第 i 层土钉的高度(m)。

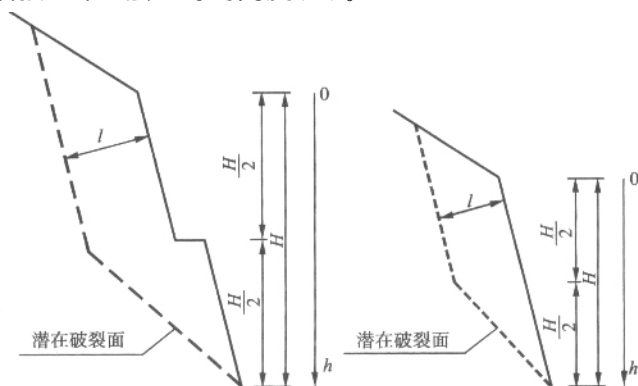


图 10-2-3 土钉锚固区与非锚固区分界面

当坡体渗水较严重或岩体风化破碎严重、节理发育时, l 取大值。

土钉长度包括非锚固长度和有效锚固长度, 非锚固长度应根据墙面与土钉潜在破裂面的实际距离确定。有效锚固长度由土钉内部稳定检算确定。

2. 土压力的确定

作用于土钉墙墙面板上土压应力呈梯形分布(图 10-2-4), 墙高三分之一以上按公式(2-9)计算, 墙高三分之一以下按公式(2-10)计算。

$$h_i \leq \frac{1}{3}H \text{ 时}, \sigma_i = 2\lambda_a \gamma h_i \cos(\delta - \alpha) \quad (2-9)$$

$$h_i > \frac{1}{3}H \text{ 时}, \sigma_i = \frac{2}{3}\lambda_a \gamma H \cos(\delta - \alpha) \quad (2-10)$$

式中: σ_i ——水平土压应力(kPa);

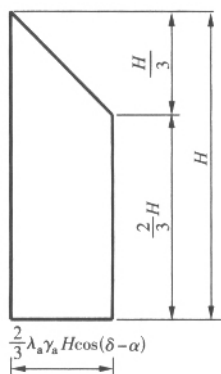


图 10-2-4 土钉墙墙背土压应力分布

- γ ——边坡岩土体容重(kN/m^3)；
 λ_a ——库仑主动土压力系数；
 α ——墙背与竖直面间的夹角($^\circ$)；
 δ ——墙背摩擦角($^\circ$)。

土钉的拉力按公式(2-11)计算：

$$E_i = \sigma_i S_x S_y / \cos \beta \quad (2-11)$$

式中： E_i ——距墙顶度第 i 层土钉的计算拉力(kN)；

S_x, S_y ——土钉之间水平和垂直间距(m)；

β ——土钉与水平面的夹角($^\circ$)。

3. 土钉墙内部稳定检算

(1) 土钉抗拉断检算

土钉钉材抗拉力按下式计算：

$$T_i = \frac{1}{4} \pi d_b^2 f_y \quad (2-12)$$

式中： T_i ——钉材抗拉力(kN)；

d_b ——钉材直径(m)；

f_y ——钉材抗拉强度设计值比(kPa)。

土钉抗拉断检算按下式计算：

$$\frac{T_i}{E_i} \geq K_1 \quad 2-13$$

式中： K_1 ——土钉抗拉断安全系数，取 1.5~1.8，永久工程取大值。

(2) 土钉抗拔稳定检算

根据土钉与孔壁界面岩土抗剪强度 τ 确定有效锚固力 F_{il} ，按下式计算：

$$F_{il} = \pi d_h l_a \tau \quad (2-14)$$

式中: d_h ——钻孔直径(m);

l_{ei} ——第 i 根土钉有效锚固长度(m);

τ ——锚孔壁对砂浆的极限剪应力(kPa),可按表选用。

根据钉材与砂浆界面的粘结强度 τ_g 确定有效锚固力 F_{i2} ,按下式计算:

$$F_{i2} = \pi d_b l_{ei} \tau_g \quad (2-15)$$

式中: τ_g ——钉材与砂浆间的粘结力(kPa),按砂浆标准抗压强度地 f_{ck} 的 10% 取值;

d_b ——钉材直径(m)。

土钉抗拔力 F_i ;取 F_{i1} 和 F_{i2} 中的小值。土钉抗拔稳定检算按下式计算:

$$\frac{F_i}{E_i} > K_2 \quad (2-16)$$

式中: K_2 ——抗拔安全系数,取 1.5~1.8,永久工程取大值。

4. 土钉墙整体稳定性检算

(1) 内部整体稳定检算

检算时应考虑施工过程中每一分层开挖完毕未设置土钉时施工阶段及施工完毕使用阶段两种情况,根据潜在破裂面(对土质边坡按最危险滑弧面)进行分条分块,计算稳定系数(见图 10-2-5)。

$$K = \frac{\sum c_i L_i S_x + \sum W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i S_x + \sum_{i=1}^n \cdot \cos \beta_i + \sum_{i=1}^n P_i \cdot \sin \beta_i \cdot \tan \varphi_i}{\sum W_i \sin \alpha_i S_x} \quad (2-17)$$

式中: c_i ——岩地的聚力(kPa);

φ_i ——岩土的内摩擦角(°);

L_i ——分条(块)的潜在破裂面长度(m);

W_i ——分条(块)重量性(kN/m);

α_i ——破裂面与水平面夹角(°);

β_i ——土钉轴线与破裂面的夹角(°);

P_i ——土钉的抗拔能力,取 F_i 和 T_i 中的小值(kN);

n ——实设土钉排数;

S_x ——土钉水平间距(m);

K ——施工阶段及使用阶段整体稳定系数,施工阶段 $K \geq 1.3$,使用阶段 $K \geq 1.5$ 。

(2) 土钉墙外部稳定性检算

1) 按重力式挡土墙方法进行稳定性检算

将土钉及其加固体视为重力式挡土墙,按重力式挡土墙的稳定性检算方法,进行抗倾覆稳定、抗滑稳定及基底承载力检算。

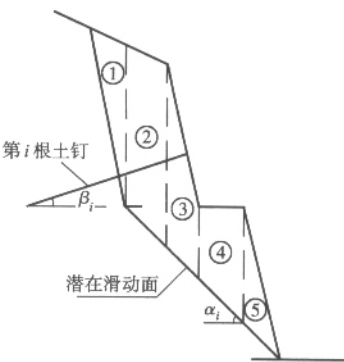


图 10—2—5 分块稳定检算简图

①土压力计算

土钉墙简化成挡土墙,其厚度不能简单地按土钉的长度来计算,只能考虑被土钉加固成整体的那一段,如图 10—2—6 所示。挡土墙的计算厚度一般按照土钉水平长度的 2/3 ~ 11/12 选取。

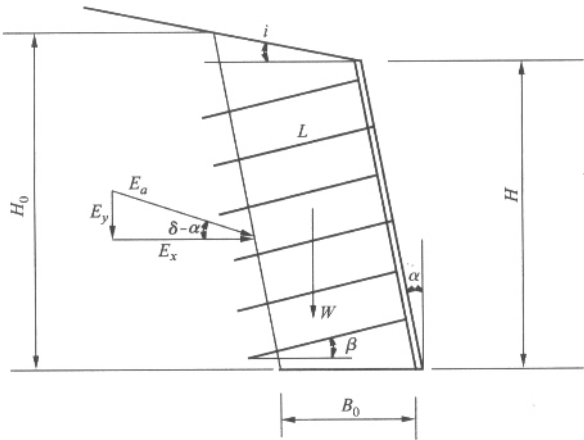


图 10—2—6 土钉墙计算图示

$$B_0 = \left(\frac{2}{3} \sim \frac{11}{12} \right) L \cos \beta \tag{2-18}$$

$$H_0 = H + \frac{B_0 \tan i}{1 - \tan \alpha \cdot \tan i} \tag{2-19}$$

$$E_x = \frac{1}{2} \gamma H_0^2 \lambda_x \tag{2-20}$$

$$E_y = E_x \tan(\delta - \alpha) \tag{2-21}$$

式中: L ——土钉长度,当多排土钉不等长时取其平均值(m);
 β ——土钉与水平面的夹角($^{\circ}$);
 i ——坡顶地面线与水平面的夹角($^{\circ}$);
 H ——土钉墙的设计高度(m);

H_0 ——土压力计算高度(m);

γ ——边坡岩土体容重(kN/m^3);

λx ——库仑主动水平土压力系数。

②抗滑动稳定验算

$$\text{抗滑安全系数 } K_c \quad K_c = \frac{\sum N \cdot \tan \varphi}{E_x} \geq 1.3 \quad (2-22)$$

③抗倾覆稳定验算

$$\text{抗倾覆安全系数 } K_0 \quad K_0 = \frac{\sum M_y}{\sum M_0} \geq 1.5 \quad (2-23)$$

④地基承载力验算

$$\text{基底合力偏心距} \quad e = \frac{B_0}{2} - \frac{\sum M_y - \sum M_0}{\sum N} \quad (2-24)$$

地基承载力 σ

$$\text{当 } e \leq \frac{B_0}{6} \text{ 时} \quad \sigma = \frac{\sum N}{B_0} \left(1 + \frac{6e}{B_0} \right) \leq [\sigma] \quad (2-25)$$

$$\text{当 } e \geq \frac{B_0}{6} \text{ 时} \quad \sigma = \frac{2 \sum N}{3 \left(\frac{B_0}{2} - e \right)} \leq [\sigma] \quad (2-26)$$

式中: $\sum N$ ——作用于土钉墙基底上的总垂直力(kN);

$\sum M_y$ ——稳定力系对墙趾的总力矩($\text{kN} \cdot \text{m}$);

$\sum M_0$ ——倾覆力系对墙趾的总力矩($\text{kN} \cdot \text{m}$);

φ ——土钉墙边坡岩土综合内摩擦角($^\circ$);

e ——基底合力的偏心距(m)。

2) 圆弧稳定性检算

对于土质边坡、碎石土状软岩边坡,还应进行圆弧稳定性检算。最危险滑弧面应通过土钉墙墙底,除下部少数土钉穿过圆弧外,大多数土钉均在圆弧以内,最危险圆弧面确定后,可用简单条分法进行稳定性计算,计算公式同式(2-17)。计算时应计入穿过最危险圆弧面一定长度的土钉作用力,其稳定系数一般按 1.2~1.3 选取。达不到要求时,宜加长土钉或适当设置锚索,以满足外部整体稳定要求。

第三章 复合土钉墙设计

第一节 概 述

土钉墙支护是通过土钉、土体和喷射混凝土面层的共同工作形成复合土体的支护结构。因其工艺简单,经济可靠,在相当范围内得到应用,并取得良好的经济效益和社会效益,但土钉墙支护通常仅适用于地下水位较低,自立性能较好的土层中应用。对于较软弱的淤泥质地层应采用复合型土钉墙支护。

所谓复合型土钉墙支护就是以水泥搅拌桩等超前支护组成防渗帷幕,解决土体的自立性、隔水性以及喷射面层与土体的粘结问题。由超前支护、土钉和土体组成复合型土钉墙支护结构,见图 10-3-1。

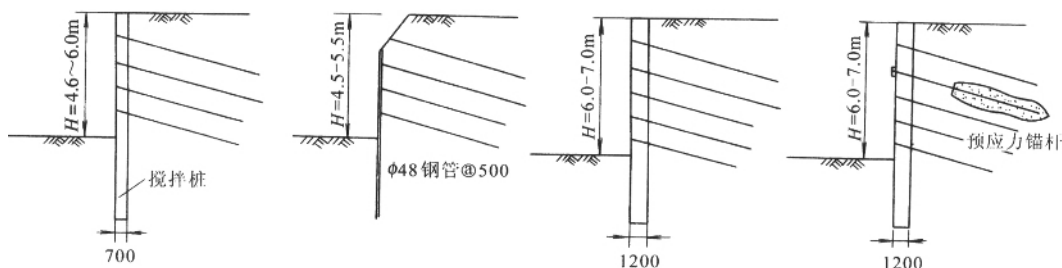


图 10-3-1 复合土钉墙结构的简图

第二节 复合土钉墙设计

复合土钉墙支护设计包括:①土钉设计;②稳定分析;③面层设计;④防渗设计等四个方面。

一、土钉设计

由于复合土钉墙是在软弱土层中应用。软弱土层提供的抗剪能力低,土钉间距应较密布置,一般水平与竖向间距取相同值,间距为 1.0~1.2m 为宜。

土钉要有足够的截面面积和长度,以确保在整个服务期间内不被拉断和拔出。如图 10-3-2 所示。

二、复合土钉墙支护面层

面层在复合土钉墙支护体系中起着较为重要的作用,例如限制土体坍塌,将土钉、水泥土桩连成整体等。面层一般按构造设置,按强度验算。构造上取 $\phi 6.5@150$ 双向或 $\phi 8$

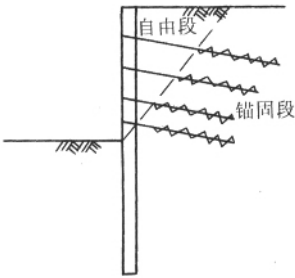


图 10—3—2 土钉长度

@200 双向钢筋网片。喷射厚 100mm, C20 细石砼, 宜分成两次喷射。

面层强度验算, 以一根土钉所承受极限荷载验算土钉与面层联接部位的抗冲剪能力, 使之满足钢筋砼构件的强度要求。把面层看成以土钉为支点的多跨连续梁, 承受主动土压力。按抗弯构件复核强度及网片配筋。

三、稳定性分析

稳定性分析包括内部稳定性分析、整体滑移分析和整体倾覆分析, 如图 10—3—3 所示。

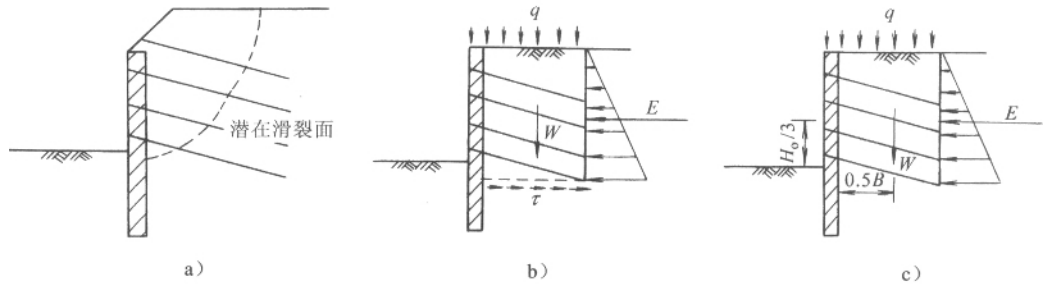


图 10—3—3 复合土钉稳定分析简图

a) 内部稳定性分析; b) 整体滑移分析; c) 整体倾覆分析

复合土钉墙内部稳定分析采用条分法, 如图 10—3—4, 低抗滑动的抗剪力由土体、土钉及泥土搅拌提供。

内部稳定安全系数有下式计算:

$$F_s = \frac{\sum(W_i + Q_i) \cos \alpha_i \cdot \tan \varphi_i + V_i \cos \alpha_i t g \delta_i + (R_k / S_{hk}) \sin \beta_k \cdot \tan \varphi_i + (C_i + D_i) (\Delta_i / \cos \alpha_i) + (R_k / S_{hk}) \sin \beta_k}{\sum[W_i + Q_i \sin \alpha_i]} \quad (3-1)$$

式中 F_s ——稳定性安全系数取 1.25~1.3;
 V_i ——有搅拦桩处作用于第 i 土条的土体自重和地表荷载之和;
 δ_i ——第 i 水泥土搅拦桩土条的内摩擦角;
 D_i ——第 i 水泥土搅拦桩土条的内聚力。

四、防渗帷幕的设计验算

与传统的土钉墙相比复合土钉墙用水泥土搅拌桩等超前支护作防渗帷幕解决抗渗、隔水和土体自立性,保证开挖期间不发生弯折、剪切破坏。

1. 抗渗设计

水泥搅拌桩帷幕和抗渗性依赖水泥渗入量及养护龄期,当水泥掺入比>10%,墙体的防渗性能是保证的,基坑坑渗流稳定性是由水泥土桩的插入深度来保证,见图 10—3—5。

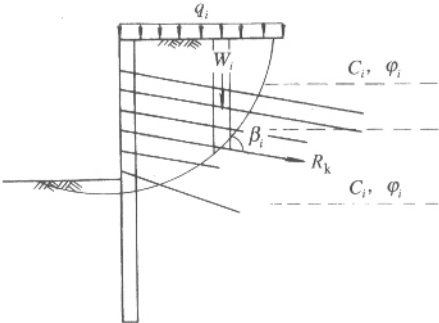


图 10—3—4 内部稳定性分析简图

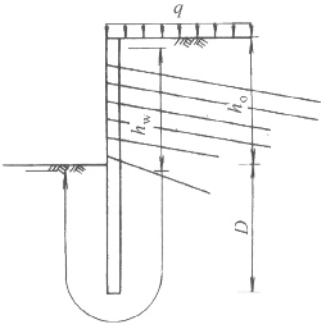


图 10—3—5 抗渗验算

$$K_s = \frac{i_c}{i} \tag{3-2}$$

式中 i_c ——坑底土体的临界水力坡度,根据坑底土的特性计算。

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \tag{3-3}$$

式中 G_s ——坑底土重度;
 e ——坑底土的天然孔隙比;
 i ——坑底土的渗流水力坡度, $i=h/L$;
 h_w ——基坑内外土体的渗流水头(m)取坑内外地下水位差;

L ——最短的渗流路径总长度；

$$L = \sum L_h + m \sum L_v \quad (3-4)$$

式中 $\sum L_h$ ——渗流水平段总长度(m),可取帷幕的宽度；

$\sum L_v$ ——渗流垂直段的总长度；

m ——渗流垂直段换算成水平段的换算系数,取 $m=1.5$ ；

K_s ——抗渗流或抗管涌稳定性安全系数,取 $1.5 \sim 2.0$ 。

2. 抗隆起稳定性分析(见图 10-3-6)

以最下层土钉的着力点为核心,计算主动侧面和被动土的隆起力矩,则坑底部土体的抗隆起稳定性为

$$K_L = \frac{M_{RL}}{M_{SL}} \quad (3-5)$$

式中 M_{RL} ——抗隆起力矩($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)；

M_{SL} ——隆起力矩($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)；

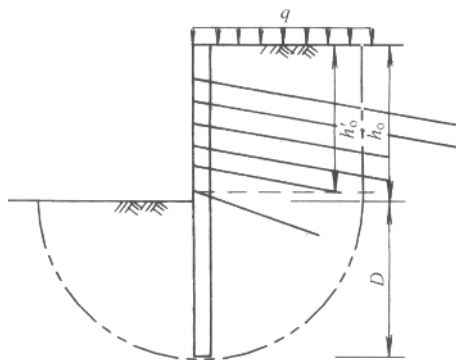


图 10-3-6 抗隆起验算

3. 水泥搅拌桩抗剪、抗弯折计算

当基坑开挖超过一定深度,在墙后主动水土压力的作用下,水泥搅拌桩可能发生冲剪及弯折破坏。水泥土桩底部强度验算见图 10-3-7。

假设：

- ① 计算跨度为最后一层土钉面到开挖面的距离,再加上 0.5 倍的墙体厚度 B 。
- ② 取相应深度处的水土压力为荷载集度,计算水土压力值。

(1) 抗冲切验算 水泥搅拌桩帷幕的抗冲剪能力

$$V = 2AC_{u0} = 2BC_{u0} \quad (3-6)$$

式中 A ——抗冲切面积(三个剪切面) $A=2 \times B \times 1.0$ ；

B ——防渗帷幕墙的宽度；

C_{u0} ——水泥土桩的抗剪强度；

C_{u0} —— $(0.2 \sim 0.3)f_{cu}$ 或

$$C_{u0} = C_0 + \gamma_0 h_0 \tan \varphi_0；$$

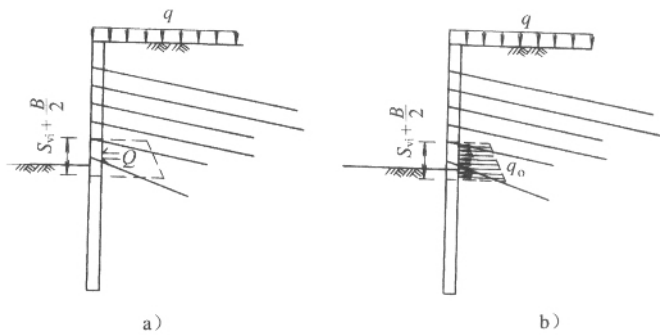


图 10—3—7 混凝土桩底部强度验算

a) 抗冲剪验算 b) 抗弯验算

f_{cu} ——混凝土的无侧限抗压强度；
 C_0 ——混凝土的粘聚力，一般取 0.1~0.6MPa；
 φ_0 ——混凝土的内摩擦角。

水土压力的剪力为

$$Q = [K_a \gamma h_0 + \gamma_w (h_0 - D_w) - 2C_0](S_{vi} + 0.5B) \tag{3-7}$$

式中 γ_0 ——混凝土重度(kN/m³)；
 h_0 ——验算截面的平均深度；
 γ_w ——水的重度取 10kN/m³；
 D_w ——地下水位埋置深度；
 S_{vi} ——最末一排土钉到开挖面之间的距离(m)。

抗冲切安全系数 $K_c = V/Q$ (3-8)

式中 K_c 抗冲切安全度；
当 $5 < h < 7\text{m}$ 时， $K_c = 2.0$ ；
当 $7 < h < 8\text{m}$ 时， $K_c = 2.5$ 。

(2)抗弯折验算 抗弯折验算是把最末一层土钉的着力点到开挖面之间未经加固的混凝土墙，视为一上下简支的单向受弯板，计算跨度为 $S + 0.5B$ ，支撑条件视为自由支撑。弯矩值为

$$M = \frac{1}{8}q_0(S_{vi} + 0.5B)^2 \tag{3-9}$$

式中 q_0 ——深度 h_0 处的水土压力集度；

$$q_0 = \gamma h_0 \tan^2(45^\circ - 0.5\varphi) - 2c + \gamma_w(h - D_w) \tag{3-10}$$

c 、 φ ——相应深度处土体内聚力和内摩擦角，取固结快剪峰值平均值。抗弯折应力为

$$\sigma_L = M/W = 3q_0(S_v/B + 0.5)^2/4 \tag{3-11}$$

式中 W ——抗弯模量 $W = B^2/6$

验算载面应力应满足

$$\sigma = \gamma_0 h_0 + \sigma_L < 0.5f_{cu} \quad (3-12)$$

$$\sigma = \gamma_0 h_0 - \sigma_L < 0.5\sigma_t = 0.1f_{cu} \quad (3-13)$$

式中 σ_t ——水泥土的抗拉强度(kPa),一般取 $0.2f_{cu}$ 。

第四章 土钉墙施工技术

第一节 概 述

土钉墙是近年来发展起来用于原位土体加固和稳定边坡的一种新型支挡结构。它由被加固土,放置于原位土体中的金属杆件(土钉)以及附着于坡面的混凝土护面板组成,形成一个类似重力式的挡土墙,以此来抵抗墙后传来的土压力和其它作用力,从而达到加固土体和稳定坡面的目的。

土钉技术是一种在原位土体中安置土钉而使土体的力学性能得以改善,从而提高边坡稳定性的新型支挡、支护技术。土钉沿通长与周围土体接触,依靠接触界面上的粘结和摩阻作用,与其周围土体形成复合土体,土钉在土体发生变形的条件下被动受力,并主要通过其受拉工作对土体进行加固。而土钉间土体变形则通过护面板予以约束,其典型结构如图 10-4-1 所示。

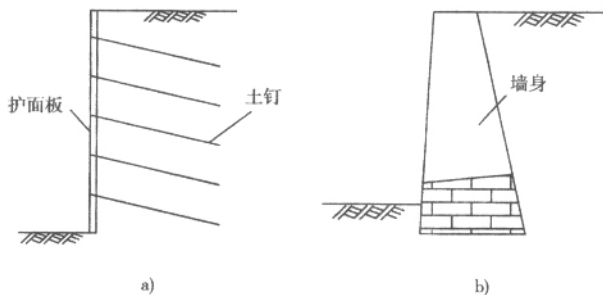


图 10-4-1 土钉墙与重力挡土墙

a)土钉墙;b)重力式挡土墙

现代土钉技术是从 20 世纪 70 年代出现的,德国、法国和美国几乎在同一时期各自独立地开始了土钉墙的研究和应用。土钉在许多方面与隧道新奥法施工类似,可视为是新奥法概念的延伸。新奥法是在 20 世纪 60 年代初期出现的,它采用喷射混凝土和粘结型锚杆相结合的方法,能迅速控制隧洞变形并使之稳定。这对土钉墙的出现给予了积极的影响。此外,加筋土技术对土钉墙的萌生也有一定推动作用;

1972 年法国在凡尔赛附近的一处铁路路堑的边坡开挖工程中首先应用了土钉墙技术。我国首例工程是 1980 年将土钉应用于山西柳湾煤矿的边坡稳定,近年来,在土钉墙的研究开发应用方面也做了不少工作。

土钉墙则是由在土体内放置一定长度和密度的土钉体构成的,由土钉与土共同工作。形成了能大大提高原状土强度和刚度的复合土体,土钉的作用是基于这种主动加固的机制。土钉与土的相互作用,还能改变土坡的变形与破坏形成,显著提高了土坡的整体稳定

性。

直立土钉墙比素土边坡的承载力可提高一倍以上,更为重要的是,土钉墙在荷载作用下不会发生素土边坡那样突发的整体性滑裂和塌落,如图 10-4-2 所示。它不仅延迟了塑性变形发展阶段,而且具有明显的渐进性变形和开裂破坏,在丧失承受更大荷载的能力时,仍可维持较长时间不会发生整体性塌滑。

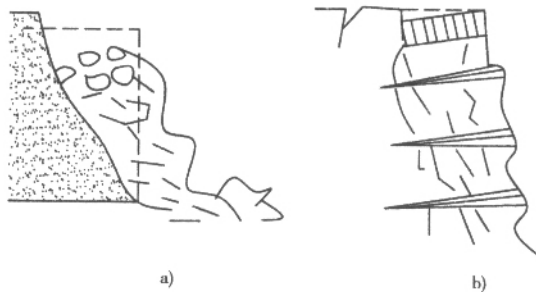


图 10-4-2 土钉墙和素土边坡的破坏形态
a) 素土; b) 土钉墙

土钉墙的这些性状是通过土钉与土体相互作用实现的,这种作用一方面体现在钉—土界面间阻力的发挥程度;另一方面,由于土钉与土体的刚度比相差悬殊。所以,在土钉墙进入塑性变形阶段后,土钉自身作用逐渐增强,从而改善了复合土体塑性变形和破坏性状。

土钉在复合土体内的作用可概括为以下四个方面:

(1) 箍束骨架作用

该作用是由土钉本身的刚度和强度以及它在土体内的分布空间所决定的。它具有制约土体变形的作用,并使复合土体构成一个整体。

(2) 分担作用

在复合土体内,土钉与土体共同承担荷载和土体自重应力。由于土钉有较高的抗拉、抗剪强度以及土体无法比拟的抗弯刚度,所以当土体进入塑性状态后,应力逐渐向土钉转移。当土体开裂时,土钉分担作用更为突出,这是土钉内出现弯剪、拉剪等复合应力,从而导致土钉体中浆体碎裂,钢筋屈服。复合土体塑性变形延迟及渐进性开裂变形的出现均与土钉作用密切相关。

(3) 应力传递与扩散作用

在同等荷载作用下,由土钉加固的土体的应变水平比素土边坡土体的应变水平大大降低,从而推迟了开裂域的形成与发展。

(4) 坡面变形约束作用

在坡面上设置的与土钉连成一体钢筋混凝土护面板,是发挥土钉有效作用的重要组成部分。坡面鼓胀变形是开挖卸荷、土体侧向变位以及塑性变形和开裂发展的必然结果,限制坡面鼓胀能起到削弱内部塑性变形和加强边界约束作用,这对土体开裂变形阶段尤为重要。

与其它支挡、防护结构相比,土钉墙具有以下一些特点:

- (1) 能合理利用土体的自承能力,将土体作为支护结构不可分割的部分;
- (2) 结构轻巧、柔性大,有良好的抗振性和延性;
- (3) 施工设备简单,操作方便,土钉的制作与成孔不需复杂的技术和大型机具,土钉施

- 工的所有作业对周围环境干扰小；
- (4)施工不需单独占用场地,对于施工场地狭小、放坡困难以及大型支挡、防护工程施工设备不能进场的情况,该技术显示出独特的优越性；
- (5)工程造价低,经济性能好。据国内外资料分析,土钉墙工程造价比其它结构类型的工程造价低 $1/3\sim 1/2$ ；
- (6)防腐性能好。土钉由低强度钢材制作,与永久性锚杆相比,它大大地减小了防腐的麻烦。
- (7)施工速度快,基本不占用施工工期。
- (8)有利于根据现场监测的变形数据,及时调整土钉长度和间距。一旦发现异常不良的情况,能立即采取相应加固措施,避免出现大的事故,因此能提高工程的安全可靠性；
- (9)土钉墙自身的变形微小,对地基的破坏也不大。
- 土钉墙可用于路堑边坡的加固,特别适合于有一定粘性的砂土和硬粘土,作为主体开挖的临时支护和永久性支挡结构,高度一般不大于 15m;也可用于挡土结构的维修、改建与加固。不宜用于含水丰富的粉细砂层、砂砾卵石层和淤泥质土。

土钉墙施工工序主要有坡面清理、钢筋网的制作和铺设、土钉制作、钻孔、注浆、喷射混凝土的设计和拌制、护面板混凝土喷射等,其施工工艺流程如图 10—4—3 所示。

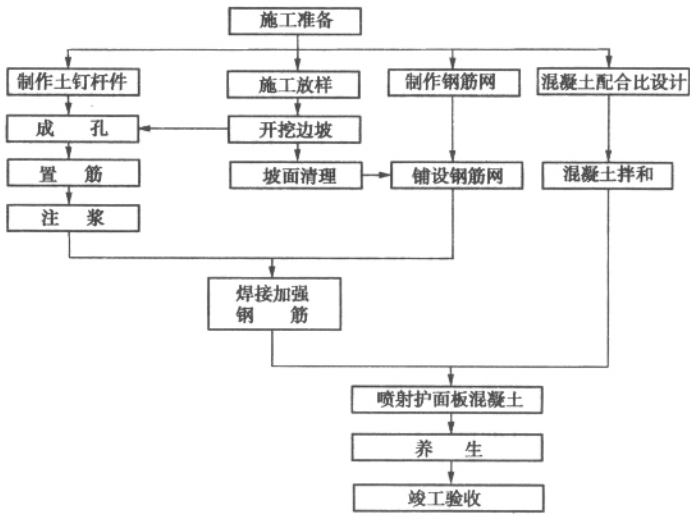


图 10—4—3 土钉墙施工工艺流程

第二节 基本构造

一、总体构造

土钉墙一般用于高度在 15m 以下的边坡开挖工程,常用高度为 6~12m,斜面坡度一般为 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。土钉墙采取自上而下分层修建的方式,分层开挖的最大高度取决于土体可以直立而不破坏的能力,砂性土为 0.5~2.0m,粘性土可以适当增大一些。实际施工中

分层开挖高度一般与土钉竖向间距相同,常用 1.5m。分层开挖的纵向长度,取决于土体维持不变形的最长时间和施工流程的相互衔接,多为 10m 左右。

根据地形地质条件,边坡较高时宜分级设置,上级墙、下级墙之间应设置平台,平台宽度不宜小于 1.5m,每级墙高不宜大于 10m,单级墙高宜控制在 12m 以内。

二、土钉

(1) 土钉类型

土钉按施工方法不同,主要可分为钻孔注浆式土钉、击入式土钉和射入式土钉三类。

① 钻孔注浆式土钉

即先在土体中钻孔,然后置入钢筋或钢绞索等小直径杆件,再沿全长压力注浆充实孔穴。为使土钉钢筋处于孔的中心位置,周围有足够的浆体保护层,需沿钉长每隔 2.0~3.0m 设对中支架。土钉外露端宜做成螺纹并通过螺母、钢垫板与配筋喷射混凝土护面板相连,在注浆体硬结后用扳手拧紧螺母,使土钉中产生约为设计拉力 10% 左右的预应力。因此,钻孔注浆式土钉是通过注浆使杆件与周围土体密实粘合而形成的。最后在土坡坡面设置与土钉端部连接的联系构件,并用喷射混凝土组成护面结构,从而构造一个具有自承能力且能够支挡其后加固体的加筋域。这是土钉中应用最多的类型。

② 击入式土钉

是用专门机械(如气动土钉机)在土体中直接打入角钢、圆钢或钢筋等,不再注浆,长度一般不超过 6m。由于击入式土钉与土体间的粘结摩阻强度低,钉长又受限制,所以要求的钉杆表面积和布置密度均大于钻孔注浆式土钉。击入钉的优点是不需预先钻孔且施工速度快,但由于防腐问题难以解决,因此,多用于临时性支挡工程。它不适用于砾石土和密实胶结土,也不适用于服务年限大于两年的支挡工程。

③ 射入式土钉

由采用压缩空气的射钉机将直径为 25~38mm,长为 3.0~6.0m 的光直钢筋(或空心钢管)射入土中。土钉可采用镀锌或环氧防腐套,土钉头通常配有螺纹,以附设于护面板。这种形式的土钉施工快速、经济,适用于多种土层,具有很大的发展潜力。

此外,还可在击入式土钉中注浆,形成注浆击入式土钉和高压喷射注浆击入式土钉。注浆击入式土钉,即用端部密封、周面带孔的钢管作为土钉,击入后从管内注浆并透过壁孔将浆体渗透到周围土体。高压喷射注浆击入式土钉,即利用高频(约 70Hz)冲击锤将具有中孔的土钉击入土中,同时以一定的压力(20MPa)将水泥浆从土钉端部的喷嘴射出,起润滑作用并渗入周围土体,提高土钉与土体的粘结力。

(2) 土钉长度

已建工程的土钉实际长度 L 均未超过土坡的垂直高度 H 。拉拔试验表明,对高度 H 小于 12m 的土坡采用相同的施工工艺,在同类土质条件下,当土钉长度达到土坡垂直高度时,再增加其长度对承载力无显著提高。土钉长度由计算确定,一般情况下,注浆式土钉长度为 $0.5 \sim 1.2H$,击入式土钉为 $0.5 \sim 0.7H$ 。

(3) 土钉孔直径及间距

根据土钉直径和成孔方法选定土钉孔径 D ,一般取 $D=7 \sim 20\text{cm}$ 。常用的孔径为 12~15cm。选定行、列距的原则是以每个土钉注浆对其周围土的影响区与相邻孔的影响区相重叠为准的。应力分析表明,一次压力注浆可使孔外 $4D$ 的邻近范围内有应力变化。因此可按 $(6 \sim 12)D$ 选土钉行、列距,且须满足式(4-1)的要求。

$$S_x S_y \leq K_1 D L$$

式中： K_1 ——注浆工艺系数，对一次压力注浆工艺，取 $K_1=1.5\sim 2.5$ ；

$S_x、S_y$ ——土钉的水平间距（列距）和垂直间距（行距）（m）。

按防腐要求，土钉孔直径应大于土钉直径加 6cm。土钉倾角一般为 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。

(4)土钉材质和直径

为增强土钉与砂浆（或小石子混凝土）的握裹力，土钉宜选用Ⅱ级以上的螺纹钢筋。

由于土钉端头需进行锚固，用高强度变形钢筋做土钉须焊接高强螺栓端杆，但高强变形钢筋的可焊性较差。近年来，土钉墙中采用Ⅳ级 SiMnV 精轧螺纹钢筋，可在钢筋螺纹上直接配与钢筋配套的螺母，连接方便、可靠。

另外，也可采用多根钢绞线组成的钢绞索作为土钉。由于多根钢绞索的组装、施工设置与定位以及端头锚固装置较复杂，目前国内应用尚不广泛。

土钉直径 d 一般为 16~32mm，常用 25mm，也可按下式估算：

$$d = (2 \sim 25) \times 10^{-3} (S_x S_y)^{1/2}$$

(4-2)

三、护面板

土钉墙的护面板虽不是结构的主要受力构件，但它是传力体系的一个重要部分，也起保证各土钉间土体的局部稳定性以及防止土体被侵蚀风化的作用。护面板应在每一阶段开挖后立即设置，以此限制原位土体的减压并阻止原位土体力学性质的降低，特别是阻止抗剪强度的降低。

护面板通常用 5~10cm 厚的钢筋网喷射混凝土做成，钢筋直径为 6~8mm，网格尺寸为 20~30cm。喷射混凝土强度等级不应低于 C20，一般采用 C20~C35，水灰比控制在 0.4~0.5 之间。与土钉连接处的混凝土层内应加设局部钢筋网以增加混凝土的局部承压能力。此外，为了分散土钉与喷射混凝土护面板处的应力，在螺帽下垫以承压钢板，尺寸一般为 2cm×20cm，厚度约为 8~15cm。也可用预制混凝土板作为护面板。

喷射混凝土护面板的厚度不小于 15~25cm，分两次喷成。为了改善建筑外观，也可在第一次喷射混凝土的基础上现浇一层混凝土或铺上一层预制混凝土板。

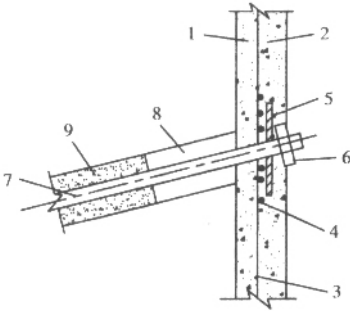


图 10-4-4 土钉墙护面板构造

- 1—第一道喷射混凝土；2—第二道射混凝土；3—钢筋网；4—局部加强钢筋；
- 5—钢板；6—螺母；7—土钉；8—填塞段；9—注浆段

一般情况下，护面板应设泄水孔，泄水孔后应设无砂混凝土板滤层，边坡渗水严重时设置水平排水孔，排水孔宜仰斜 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ，长度应略长于土钉。

土钉必须与喷射混凝土中间夹钢筋网的护面板有效连接，可采用外端设钢板或加强钢筋，通过螺丝端杆锚具或焊接进行连接。

护面板的构造及土钉与护面板的连接形式如图 10—4—4 所示。

土工织物也可作护面,即先把土工织物覆盖在边坡上,然后设置造土钉。当拧紧土钉端部的螺母时将土工织物拉向坡面形式成拉膜,同时使坡面受到压力作用。

第三节 喷射混凝土配合比设计

一、组成材料及技术要求

1. 水泥

水泥品种和等级的选择主要应满足工程使用要求,当加入速凝剂时,还应考虑水泥与速凝剂的相容性。

喷射混凝土应优先选用不低于 42.5 级的硅酸盐水泥或普通水泥,因为这两种水泥的 C_3S 和 C_3A 含量较高,同速凝剂的相溶性好,能速凝、快硬,后期强度也较高。矿渣水泥凝结硬化较慢,但对抗矿物水(硫酸盐、海水)腐蚀的性能比普通水泥好。

当喷射混凝土遇到含有较高可溶性硫酸盐的地层或地下水的地方,应使用抗硫酸盐类水泥;当结构物要求喷射混凝土早强时,可使用硫铝酸盐水泥或其它早强水泥;当骨料与水泥中的碱可能发生反应时,应使用低碱水泥。

在选择喷射混凝土的水泥时,应注意下述指标:

(1)铁率(铝氧率)(ρ)

铁率高的水泥易速凝,但若含量过高,掺加速凝剂后,会使喷射物干稠且回弹量大,甚至使施工无法进行。因此水泥的含铁率应控制在 1.2%~1.5% 的范围内。

(2)硅率(n)

考虑到水泥与速凝剂的相容性和强度的发展,喷射混凝土的水泥宜为 $1.9 < n < 2.1$ 。

(3)饱和比(KH)

喷射混凝土用的水泥,其 KH 值宜控制在 0.87~0.89 之间。

2. 细骨料

喷射混凝土中最好采用天然石英砂,而不宜采用人工砂,砂的细度模数应大于 2.5,即平均粒径为 0.35~0.5mm 的中砂或平均粒径大于 0.5mm 的粗砂。一般细骨料颗粒级配应满足表 10—4—1 的要求。细骨料过细,会使干缩增大;细骨料过粗,则会增加回弹。细骨料中小于 0.075mm 的颗粒不应超过 20%,否则由于骨料周围粘有灰尘,会妨碍骨料与水泥的良好粘结。

表 10—4—1 细骨料的级配

筛孔尺寸(mm)	通过率(以质量计)(%)	筛孔尺寸(mm)	通过率(以质量计)(%)
10	100	0.6	25~60
5	95~100	0.3	10~30
2.5	80~100	0.15	2~10
1.2	50~85		

3. 粗骨料

卵石或碎石均可,但以卵石为好。卵石对设备及管路磨蚀小,也不像碎石那样因针片

状含量多而易引起管路堵塞。尽管目前国内生产的喷射机能使用最大粒径为 25mm 的骨料,但为了减少回弹,骨料的最大粒径不宜大于 20mm,且不宜大于输送管道直径的 1/3~1/2。粗细骨料的级配应符合表 10—4—2 的限度。骨料级配对喷射混凝土拌和料的可泵性、通过管道的流动性、在喷嘴处的水化、对受喷面的粘附以及最终产品的表观密度和经济性都有重要影响。为取得最大的表观密度,应避免使用间断级配的骨料。经过筛选后应将所有超过尺寸的大块去掉,因为这些大块常常会引起管路堵塞。喷射混凝土需掺入速凝剂时,不得用含有活性二氧化硅的石料作粗骨料,以免碱—骨料反应而使喷射混凝土开裂破坏。

表 10—4—2 喷射混凝土骨料级配

筛孔尺寸(mm)	通 过 率 (%)	
	级配Ⅰ	级配Ⅱ
20.0	—	100
15.0	100	90~100
10.0	85~100	40~70
5.0	10~30	0~15
2.5	0~10	0~5
1.2	0~5	—

4. 拌和用水

喷射混凝土用水要求与普通混凝土相同,不得使用污水、pH 值小于 5 的酸性水、硫酸盐含量(按 SO_4^{2-} 计)超过水质量 $0.27\text{mg}/\text{cm}^3$ 的水及海水。

5. 外加剂

喷射混凝土用的外加剂有速凝剂、引气剂、减水剂、增粘剂和早强剂等,要根据实际工程情况、材料性质和外加剂的作用综合考虑使用。

(1)速凝剂

使用速凝剂的主要目的是使喷射混凝土速凝快硬,减少回弹损失,防止喷射混凝土因重力作用所引起的脱落,提高它在潮湿或含水岩层中使用的适合性能,并可适当加大一次喷射厚度和缩短喷射层间的间隔时间。

喷射混凝土用的速凝剂同普通混凝土用的速凝剂在成分上有很大不同。普通混凝土常用的氯化钙不能满足喷射混凝土要求的速凝效果,喷射混凝土用的速凝剂一般含有下列可溶盐:碳酸钠、铝酸钠和氢氧化钙。速凝剂一般为粉状。国内常见的速凝剂见表 10—4—3。某一品种速凝剂对某一品种水泥认为可以采纳时,应符合下列条件:

①初凝在 3mm 以内;

表 10—4—3 常用速凝剂的种类

种 类	主 要 成 分	常用掺量 (占水泥量%)
红星一型	铝氧熟料、碳酸钠和生石灰	2.5~4
711 型	矾土、纯碱、石灰和无水石膏	2.5~3.5
782 型	矾泥、矾土、石灰石和碳酸钠	6~7

种 类	主 要 成 分	常用掺量 (占水泥量%)
尧山型	铝矾山、土碱和石灰石	3.5

- ②终凝在 12min 以内；
- ③8h 后的强度不小于 0.3MPa；
- ④极限强度(28d 强度)不应低于不加速凝剂的试件强度的 70%。

(2)减水剂

混凝土中掺入减水剂后,可在保持流动性的条件下显著地降低水灰比,一般减水剂的减水率为 5%~15%。产生减水的原因主要是由于减水剂的吸附和分散作用。

水泥与水混合以及在凝结硬化过程中,由于水泥矿物所带电荷不同,产生异性电荷相吸等原因,会产生一些絮凝状结构,如图 10—4—5 所示。在这些絮凝状结构中,水泥颗粒包裹着很多拌和水,从而减少了水泥水化所需的水量,降低了喷射混凝土的和易性。为了保持混凝土必要的和易性,就必须在混合时相应地增加用水量,这就会在水泥石结构中形成过多的孔隙,从而严重影响硬化混凝土的一系列物理力学性能。

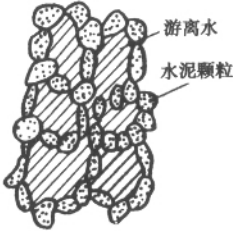


图 10—4—5 絮凝状结构

国内外的实践表明,在喷射混凝土中加入少量(一般占水泥质量的 0.5%~1.0%)减水剂可以提高混凝土强度,减少回弹,并明显地改善其不透水性和抗冻性。

(3)早强剂

喷射混凝土的早强剂也不同于普通混凝土。一般同时要求速凝和早强,而且速凝效果应当与其它速凝剂相当。

喷射混凝土中常用的 TS 早强速凝剂是由工业废渣加工制得的,其主要化学成分是硅酸钙、铝酸钙及部分水化产物,还有少量活性物质,在硫铝酸盐水泥中掺入 6%的 TS 剂,既能使水泥在 5min 内初凝,8min 内终凝,而且有明显的早强作用,8h 后的试件强度达 12.1MPa(如表 10—4—4 所示)。

表 10—4—4 TS 早强剂对硫铝酸盐水泥强度发展的影响

编号	水 泥	气温 (℃)	TS 早强剂	抗压强度(MPa)						
				1h	2h	3h	6h	8h	1d	3d
1	硫铝酸盐水泥	16	0	0	0	0	0	0.29	20.4	23.5
2	硫铝酸盐水泥	16	6%	0.195	0.39	0.59	6.2	12.1	—	24.5

(4)增粘剂

在喷射混凝土拌和料中加入增粘剂,这样可明显地减少施工粉尘和回弹损失。8604 型和 SPR6 型是常用的两种增粘剂。

①8604 型增粘剂

8604 型增粘剂是采用两种具有粘性的工业废料经过适当处理后,配以天然粘性矿物

和少量水溶性无毒有机物,经过一定的工艺配制而成。其外观为灰褐色粉末状固体,无异味,遇水后有粘性,其水溶液的 pH 值为 7,呈现中性,对人体无腐蚀作用。

② SPR6 型增粘剂

该增粘剂具有良好的减少粉尘浓度的效果。对于干法喷射在拌和料中加入水泥质量 3% 的 SPR6 型增粘剂,可以使粉尘浓度分别减少 85% (在喷嘴处加水) 或 95% (骨料预湿)。因为增粘剂与水反应需要时间,所以采用骨料预湿润是很适宜的。

对于湿法喷射,在水灰比为 0.4 的条件下,掺入 SPR6 型增粘剂,其掺量为水泥质量的 3%,可以降低粉尘浓度 90% 以上。

SPR6 型增粘剂还可使回弹损失降低 1/4。但是必须指出,它往往使喷射混凝土的早期强度降低,8h 的抗压强度约降低 10%~20%,28d 的抗压强度约降低 15%。

(5) 防水剂

喷射混凝土用高效防水剂的配制原则是减少混凝土用水量,减少或消除混凝土的收缩裂缝,增强混凝土的密实性。

采用明矾石膨胀剂、三乙醇胺和减水剂三者复合的防水剂,可使喷射混凝土抗渗等级达 P30 以上,比普通喷射混凝土提高 1 倍;抗压强度达到 40MPa,比普通喷射混凝土提高 20%~80%。

(6) 引气剂

对湿法喷射混凝土,可在拌和料中加入适量的引气剂。

引气剂是一种表面活性剂,它通过表面活性作用,降低水溶液的表面张力,引入大量微细气泡,这些微细气泡可增大固体颗粒间的润滑作用,改善混凝土的塑性与和易性。气泡还对水转化成冰所产生的体积膨胀起缓冲作用,因而可显著地提高其抗冻融性和不透水性,同时还可增加一定的抵抗化学侵蚀的能力。

我国使用最普遍的引气剂是松香皂类的松香热聚物和松香酸钠,其次是合成洗涤剂类的烷基苯磺酸钠、烷基磺酸钠或洗衣粉。上述两类引气剂的技术性能基本相同,合成洗涤剂是石油化工产品,料源比较广泛。

需要指出的是,铝粉和双氧水(过氧化氢)与水泥作用也能产生直径为 0.25mm 左右的气泡,但不能形成提高混凝土抗冻性的气孔体系,只能作为生产多孔混凝土的加气剂使用,不能作为湿喷混凝土的引气剂。

(7) 粉尘抑制剂

为了抑制喷射混凝土的粉尘,日本开发的粉尘抑制剂已达实用阶段。它是以“脂化纤维素类材料为主要成分,目前日本市场上有多种产品出售。当粉尘抑制剂掺入量为水泥质量的 0.1%~0.2% 时,可大大降低粉尘。但是加入这种材料后将出现推迟喷射混凝土的硬化,其后期强度的增长比没添加时减小等问题。

应当说明,由于该种材料目前价格较昂贵,因而并没有普及,今后待价格进一步降低,可望得到广泛应用。

6. 硅粉

大量的试验研究和工程应用已经证实,将硅粉掺入喷射混凝土中有许多明显的优点,这主要表现在:

(1) 提高喷射混凝土的抗压强度,改善了喷射混凝土结构的密实性,从而可提高其抗化学侵蚀和抗机械破坏作用的能力;

(2) 增强喷射混凝土与其它介质的粘结效应;

(3) 减少回弹;

(4) 大大减少粉尘的发生。

硅粉是制造硅铁金属的一种副产品。将高纯度的石英和煤在电弧炉内还原,从过滤炉排出的气体中可得到硅粉。这种散发在气体中含有相当多极小的非晶体的二氧化硅,其微粒尺寸为正常水泥颗粒的 1/60。硅粉掺入喷射混凝土混合物的比例一般为水泥质量的 10%。

二、喷射混凝土配合比设计

无论干喷或湿喷,配合比设计必须符合下列要求:

- (1)能向坡面喷射指定的厚度;
- (2)4~8h 的强度应能具有控制边坡变形的能力;
- (3)在速凝剂用量满足可喷性和早期强度的要求下,必须达到设计的 28d 强度;
- (4)有良好的耐久性;
- (5)回弹最少;
- (6)不发生管路堵塞。

1. 胶骨比

喷射混凝土的胶骨比,即水泥与骨料之比,常为 1:4~1:4.5。水泥过少,回弹量大,初期强度增长慢;水泥过多,不仅粉尘量增多,而且硬化后的混凝土收缩也增大。

混凝土的收缩值取决于其配合比及所用原材料的性能。如果水泥用量及用水量增大,则混凝土的收缩变形也会增大。在浆体中引入骨料,可以约束水泥浆体的体积变化,从而减少水泥浆体的收缩。前苏联 P. nepmnt 提出了如下的混凝土收缩与其配合比之间的关系:

$$\frac{S_p}{S_c} = 1 + \beta \frac{V_g}{V_p}$$

(4-3)

式中: S_p 、 S_c ——水泥石及混凝土的收缩变形;

V_g 、 V_p ——骨料与水泥的体积;

β ——与水灰比、骨料粒径及其它因素有关的材料常数, $\beta=1.5\sim3.1$ 。

因此,喷射混凝土中的水泥过多,无论在经济上或技术上都是不可取的。水泥过多,对喷射混凝土后期强度的增长也有不利影响。研究结果表明,当水泥用量超过 400kg/m³ 时喷射混凝土强度并不随水泥用量增大而提高。

水泥用量对喷射混凝土抗压强度的影响,除了因混凝土中起结构骨架作用的骨料太少外,当水泥用量过多,拌和料在喷嘴处瞬间混合时,水与水泥颗粒混合便不均匀,水化也不充分,这也是降低喷射混凝土强度的重要原因之一。

2. 砂率

砂率(即砂子在整个粗细骨料中所占的百分率)对喷射混凝土施工性能及力学性能的影响如表 10-4-5 所示。综合权衡砂率大小所带来的利弊,喷射混凝土拌和料的砂率以 45%~55% 为宜。

表 10-4-5 砂率对喷射混凝土性能的影响

性 能	砂 率		
	<45%	45%~55%	>55%
回弹损失	大	较小	较小
管路堵塞	易	不易	不易

性 能	砂 率		
	<45%	45%~55%	>55%
湿喷时的可泵性	不好	较好	好
水泥用量	少	较少	多
混凝土强度	高	较高	低
混凝土收缩	较小	较小	大

3. 水灰比

水灰比是影响喷射混凝土强度的主要因素,当水灰比为 0.2 时,水泥不能获得足够的水分与其水化,硬化后有一部分未水化的水泥质点;当水灰比为 0.4 时,水泥有适宜的水分与其水化,硬化后形成致密的水泥石结构;当水灰比为 0.6 时,过量的多余水蒸发后,在水泥石中形成毛细孔。对于干法喷射混凝土施工,预先不能准确地给定拌和料中的水灰比,水量全靠喷射手在喷嘴处调节。一般来说当喷射混凝土表面出现流淌、滑移、拉裂时,表明水灰比太大;若喷射混凝土表面出现干斑,作业中粉尘大、回弹多,则表明水灰比太小。水灰比适宜时,混凝土表面平整,呈水亮光泽,粉尘和回弹均较少。经测定,适宜的水灰比值为 0.4~0.5。偏离这一范围,不仅降低喷射混凝土强度,还会增加回弹损失。

4. 速凝剂掺量

在下列情况应掺加速凝剂:

- (1)要求快速凝结,以便尽快喷射到设计厚度;
- (2)要求很高的早期强度;
- (3)封闭渗漏水。

但鉴于国内目前生产的速凝剂都在不同程度上降低混凝土的最终强度,故速凝剂的掺量应严格控制,红星一型及 711 型速凝剂的掺量不应大于水泥质量的 4%,782 型速凝剂的掺量不应大于水泥质量的 8%。

在下列情况下作业,可不掺加速凝剂:

- (1)向下喷射;
- (2)在干燥的边坡(包括岩石或混凝土)上喷射薄层混凝土;
- (3)需要严格限制混凝土收缩开裂的工程。

三、喷射混凝土的技术性能

喷射混凝土的性能除与原材料的品种和质量、拌和物配合比、施工条件等因素有关外,与施工人员的操作方式也有直接的影响。

1. 力学性能

(1)抗压强度

喷射混凝土抗压强度常用来作为评定喷射混凝土质量的主要指标。喷射混凝土的抗压强度是指用喷射法将混凝土拌和物,喷射在 450mm × 350mm × 120mm 的模型内,当混凝土达到一定强度,用切割机锯掉周边,加工成 100mm × 100mm×100mm 的试件,于标准条件下(温度 20±3℃,相对湿度为 90%以上)养生 28d,所测得的抗压强度值乘以 0.95 的尺寸换算系数。

喷射混凝土的强度等级常以 C15、C20、C25、C30、C40、C50 表示,它们分别表示喷射

混凝土的抗压强度为 15MPa、20MPa、25MPa、30MPa、40MPa、50MPa。在施工中,必须保证喷射混凝土的抗压强度符合设计要求的强度等级。

喷射法施工时,当拌和料以较高的速度喷向受喷面时,水泥颗粒与骨料的重复冲击,使混凝土层连续地得到压密,同时喷射工艺可以使用较小的水灰比,因而喷射混凝土一般都具有良好的密实性和较高的强度。

喷射混凝土的抗压强度受多种因素影响。如拌和料设计(用水量、水泥用量、砂率、速凝剂用量等)和施工工艺(喷射压力、喷嘴与受喷面的距离、角度以及拌和料的停放时间等)都对抗压强度有影响。

关于分层喷射混凝土抗压强度的影响问题,研究表明,施工质量良好的喷射混凝土并没有因为分层施作而影响其强度。

(2) 抗拉强度

一般测定喷射混凝土抗拉强度有两种方法,即轴向拉伸或劈裂拉伸试验。拉伸试验是在混凝土试件的两端用夹具夹紧进行张拉,劈裂拉伸试验则在立方体试件中线(圆柱形试件的两侧)施加压力,使喷射混凝土沿加压的平面出现破坏。

喷射混凝土抗拉强度试件的制取方法同喷射混凝土抗压强度试件。测定喷射混凝土劈裂抗拉强度可采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试件。

喷射混凝土劈裂抗拉强度应按下式计算:

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi A} \quad (4-4)$$

式中: f_{ts} ——喷射混凝土劈裂抗拉强度(MPa);

P ——破坏荷载(N);

A ——试件劈裂面面积(mm^2)。

劈裂抗拉强度计算精确到 0.01MPa,以三个试件测值的算术平均值作为该组试件的劈裂抗拉强度值。三个测值的最大值或最小值,如有一个与中间值的差值超过 15%,则把最大及最小值一并舍除,取中间值作为该组试件的劈裂抗拉强度值。如有两个测值与中间值的差超过中间值的 15%,则该组试件的试验结果无效。采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试件取得的劈裂抗拉强度值,应乘以尺寸换算系数 0.85。

根据国内外大量实测资料的统计,喷射混凝土的劈裂抗拉强度约为抗压强度的 10%~12%,约高于中心受拉强度 15%。

喷射混凝土抗拉强度随抗压强度的提高而提高。因此提高抗压强度的各项措施,基本上也适用于抗拉强度。采用粒径较小的骨料,用碎石配制喷射混凝土拌和料,采用铁铝酸四钙(C_4AF)含量高而铝酸三钙(C_3A)含量低的水泥和掺用适宜的减水剂都有利于提高喷射混凝土的抗拉强度。

(3) 抗弯拉强度

抗弯拉强度与抗压强度的关系与普通混凝土相似,即约为抗压强度的 15%~20%。

喷射混凝土抗弯拉试验可采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 试件(由喷射混凝土大板上切割而成),并在三分点处同时施加两个相等的集中力。试件破坏时,如折断面位于两个集中荷载之间时,抗弯拉强度可按式计算:

$$f_t = \frac{PL}{bh^2} \quad (4-5)$$

式中: f_f ——喷射混凝土抗弯拉强度(MPa);

P ——破坏荷载(N);

L ——支座间距,即跨度(mm);

b ——试件截面高度(mm);

h ——试件截面宽度(mm)。

同组试件抗弯拉强度的计算方法与抗拉强度的计算方法相同。采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 试件时,取得的抗弯拉强度应乘以尺寸换算系数 0.85。

(4)弹性模量

由于拌和物设计、混凝土龄期、抗压强度和试件类型不同,并且定义也不相同,因而国内外文献报道的喷射混凝土弹性模量有较大的差异。

同普通混凝土一样,喷射混凝土的弹性模量与下列因素有关:

(1)混凝土的强度和表观密度。混凝土强度和表观密度越大,弹性模量则越高。

(2)骨料。骨料弹性模量越大,喷射混凝土的弹性模量则越高;轻骨料喷射混凝土弹性模量只有相同强度的普通喷射混凝土的 50%~80%。

(3)试件的干燥状态。潮湿喷射混凝土试件的弹性模量较干燥的高。

2. 变形性能

(1)收缩

喷射混凝土的硬化过程常伴随着体积变化。最大的变形是当喷射混凝土在大气中或湿度不足的介质中硬化时所产生的体积减小,这种变形被称为喷射混凝土的收缩。国内外的资料都表明,喷射混凝土在水中或在潮湿条件下硬化时,其体积可能不会减小,在某些情况下甚至其体积稍有膨胀。

同普通混凝土一样,喷射混凝土的收缩也是由其硬化过程中的物理化学反应以及混凝土的湿度变化引起的。

喷射混凝土的收缩变形主要包括干缩和温缩。干缩主要由水灰比决定,较高的含水量会出现较大的收缩,而粗骨料则能限制收缩的发展。因此,采用尺寸较大与级配良好的粗骨料,可以减少收缩。温缩是由水泥水化过程的温升值所决定的。采用水泥含量高、速凝剂含量高或采用速凝快硬水泥的喷射混凝土温缩较大,厚层结构比含热量少的薄层结构温缩要大。

喷射混凝土水泥用量大,含水量大,又掺有速凝剂,因此比普通混凝土收缩大。影响喷射混凝土的收缩值因素,主要是速凝剂和养生条件。

(2)徐变

喷射混凝土的徐变变形是混凝土在恒定荷载长期作用下变形随时间增长的性能。一般认为,徐变变形取决于水泥石的塑性变形及混凝土基本组成材料的状态。

影响混凝土徐变的因素有许多,并且多数因素无论对徐变或对收缩是相类似的。如水泥品种与用量、水灰比、粗骨料的种类、混凝土的密度、龄期,周围界质、混凝土本身的温湿度及混凝土的相对应力值均影响混凝土的徐变变形。

喷射混凝土的徐变变形规律在定性上与普通混凝土的徐变变形规律是一致的,当喷射混凝土的水泥品种与用量、水灰比、粗骨料种类等条件不变时,影响徐变变形的主要因素如下:

①持续荷载时间和加荷应力;

②龄期和周围介质湿度;

③速凝剂。

3. 渗透性与抗冻性

(1) 渗透性

渗透性在一定程度上对材料的抗冻性及抵抗各种大气因素及腐蚀介质影响起决定作用。

喷射混凝土的抗渗性主要取决于孔隙率和孔隙结构。喷射混凝土的水泥用量大,水灰比小,砂率高,并采用较小尺寸的粗骨料,这些基本配置特征有利于在粗骨料周边形成足够数量和良好质量的砂浆包裹层,使粗骨料彼此隔离,有助于阻隔沿粗骨料互相连通的渗水孔网;也可以减少混凝土中多余水分蒸发后形成的毛细孔渗水通路。因而国内外一般认为,喷射混凝土具有较好的抗渗性。

应当指出,级配良好的坚硬骨料,密实度高和空隙率低均可增进材料的防渗性能。任何能造成蜂窝、回弹裹入、分层、孔隙等不良情况的喷射条件都会恶化喷射混凝土的抗渗性。

(2) 抗冻性

喷射混凝土的抗冻性是它在饱和水状态下经受反复冻结与融化的性能。引起冻融破坏的主要原因是水结冰时对孔壁及微型裂缝孔所产生的压力。水的体积在结冰时增长 $9\% \sim 10\%$,而混凝土的刚性骨架阻碍水的膨胀,因此在骨架中产生很高的应力,经多次冻融循环,混凝土将逐步遭到破坏,冻融循环次数愈多,破坏也愈甚。

混凝土试件质量损失小于 5% ,强度降低不超过 25% 的冻融循环次数被定义为混凝土的抗冻等级。

喷射混凝土具有良好的抗冻性,这是因为在拌和料喷射过程中会自动带入一部分空气。空气含量为 $2.5\% \sim 5.3\%$ 。气泡一般是不贯通的,并且有适宜的尺寸和分布状态,这相似于加气混凝土的气孔结构,它有助于减少水的冻结压力对混凝土的破坏。

抗冻性试验表明,在经过200次冻融循环后,试件的强度和质量损失变化不大,强度降低率最大为 11% 。美国进行的冻融试验也表明,有 80% 的试件经受300次冻融循环后,没有明显的膨胀,也没有重要损失和弹性模量的减小。

有多种因素影响喷射混凝土的抗冻性。坚硬的骨料,较小的水灰比,较多的空气含量和适宜的气泡组织等,都有利于提高喷射混凝土的抗冻性。相反,采用软弱的、多孔易吸水的骨料,密实性差的或混入回弹料并出现蜂窝、夹层及养生不当而造成早期脱水的喷射混凝土,都不可能具有良好的抗冻性。

第四节 施工机械

一、干拌法喷射混凝土设备

1. 干拌混凝土喷射机

干拌混凝土喷射机简称干喷机,应用较为普遍,它的主要优点是设备简单,输送距离长,速凝剂可在进入喷射机前加入。目前国内使用的干喷机类型及其主要技术性能如表10-4-6所示。

2. 干喷喷嘴

在干喷喷嘴处,必须使干拌和料同注入水得到均匀的湿润和搅拌,并使料流以最小的扩散喷射在受喷面上。喷嘴的性能和操作在很大程度上影响着喷射混凝土的质量及回弹。喷嘴设计不当或作用不良将会出现水化不完全及回弹增多等现象,并在硬化的喷射

混凝土中产生分层。

表 10—4—6 国产喷射机的主要类型及技术性能

指 标		喷 射 机 类 型					
		HP30—74	PZ—5B	ZP—V	ZP—VⅡ	HPZ—308	治建—65
生产能力 (干混合料)(m ³ /h)		2~6	5~5.5	5~6	5~6	3~5	4
工作风压 (MPa)		0.1~0.5	0.2~0.4	0.2~0.4	0.12~0.14	0.1~0.6	0.12~0.6
耗风量(m ³ /min)		6~10	7~8	5~8	5~8	7~10	7~8
骨料最大料径(mm)		25	20	20	20	25	25
输料管内径(mm)		50	50	50	50	50	50
输送距离	水平(m)	250	200	200	120	200	200
	垂直(m)	100		40	50	80	70
电机功率(kW)		7.5	5.5	5.5	5.5	4	3
外形尺寸	长(mm)	1500	1520	1480	1225	1430	1600
	宽(mm)	1000	820	750	770	868	850
	高(mm)	1600	1280	1280	1170	1375	1630
质量(kg)		800	700	800	820	700	1100

干喷喷嘴的主要组成部分有喷嘴体、水环结构和喷嘴头。水环结构包括水环、控制水量的阀门和输水软管。水环可用钢材、黄铜或尼龙制造,并凿有小孔。水环的小孔直径通常为 1.0mm,每环有 4~16 个小孔,小孔与水环的曲面垂直。喷射手可利用水环结构上的阀门控制注入拌和料的水量,阀门用标准接头接在管套(喷嘴体)和水管上。管套通常为钢制,用以容纳水环结构并将喷嘴头连接在料管上。喷嘴长一般为 30~60cm。

喷嘴按喷嘴头的设计分为四种基本类型:阶梯膛、光面膛、直筒膛和锥形膛。阶梯膛和光面膛的设计是在注入水的同时使料流膨胀。其目的是使注入拌和料内的水有较大的穿透。阶梯膛式喷嘴能使混凝土流比光面膛造成较大的搅动,从而有利于水泥与水的更好拌和。不过这两种喷嘴能使料流在喷出时离散,致使回弹增多。

锥体膛及直筒膛喷嘴能使拌和料与水均匀拌和,且很少离析,故应用较广、锥形膛及带锥形喷嘴头和直筒膛喷嘴使材料在喷出口处有所收敛,射流较集中,有利于减少回弹,但往往易于堵塞。

3. 干喷速凝剂配播器

粉状速凝剂的配播器通常有三种,按其结构分为螺纹钻式、螺纹塞式和齿轮式。这些配播器均装在储有速凝剂的料斗的底面。螺纹钻式和螺纹塞式在运转上基本相同,两者均在一个水平管子里旋转,管子一端在料斗下面开启,粉状速凝剂由重力喂入螺纹塞的螺纹或螺纹钻的叶片。然后将速凝剂传送到管子里面从另一端的管子口排出。速凝剂的掺入率可通过调整螺纹塞或螺纹钻的转动速度加以控制。

齿轮式配播器也是按体积配料,但它有一个外缘带齿的轮子在料斗底面作水平转动。速凝剂从料斗落到齿轮上,并在这里刮成均匀厚度,在两个齿的中间传送到另一条长孔。

速凝剂从这条长孔落入干拌料内。调整长孔的尺寸或控制齿轮的转速,便可将速凝剂按不同速度进行配播。

此外,还有振动式配播器。它是采用一个高频振动的槽,将速凝剂从槽的后端带到前端,速凝剂在槽的前端落入干拌料内。

干喷使用液态速凝剂时,应与水同时注入喷嘴。最简单的方法是将速凝剂和水按需要的配合比加入水箱内再供给喷嘴。不过由于这样一来速凝剂掺量不能随着地层条件的变化而及时调整,故不适用于地层条件多变的场合应用。

另一种办法是半液态速凝剂直接加入水管中,利用控制阀来调整加入的数量。

二、湿拌法喷射混凝土设备

1. 湿拌混凝土喷射机

湿拌混凝土喷射机(简称湿喷机)的明显优点是允许混凝土进入喷射机前或在喷射机中加入足够的拌和水(或扣除液体速凝剂所占的水量),拌和均匀,水灰比能准确控制,有利于水和水泥的水化,因而粉尘较小,回弹较少,混凝土匀质性好,强度也较高。但设备较干喷机复杂,速凝剂加入也较为困难。

国内外主要湿喷机有以下几种:

(1)级压泵(PC08—60M)型湿喷机

挤压泵型湿喷机由搅拌斗、泵送软管、泵体和输料管等部件组成。这是国外应用较广的一种湿喷机。

(2)英国 Compemass—208(利姆佩纳斯)型湿喷机

该机有两个并排的罐,一个用于喷射,另一个用于备料。罐的底部,各有一横卧的螺旋输送器。

(3)TK—961 型混凝土湿喷机

TK—961 型湿喷机是由我国研制生产的,该机应用独特的转子——活塞送料机构成功地解决了混凝土拌和料利用压缩空气实现稀薄流输送。是一种结构新颖、性能优良的湿喷机。

(4)德斯古马恩(テシクマン)型湿喷机

该湿喷机为竖列的两个罐,上罐搅拌,下罐喷射。上下罐均有密封阀门,交替开启、关闭,以实现连续喷射。

下罐底部有一横卧的螺旋,驱动湿拌和料至料管内。

(5)BSM—903 型湿喷机

BSM—903 型湿喷机是在 BSM—603 型干喷机基础上研制而成的。该机由料斗、上室和下室组成。下室为喷射室,料斗和上室内各有一旋转搅拌器,使拌和料呈松散状。

国内外湿喷机的主要类型及其技术性能如表 10—4—7 所示。

表 10—4—7 湿拌混凝土喷射机的技术性能

型 号	日本极东 PC08—60M		美国 EimdoF—2	英国 Compemass —208	中国 TK—961	日本德斯期 古马恩	德国 BSM—903
生产能力 (m ³ /h)	9	20	4	3~6	5	6	3~4
骨料最大粒径 (mm)	15	25	20	25	15	20	15

型 号		日本极东 PC08—60M		美国 EimdoF—2	英国 Compemass —208	中国 TK—961	日本德斯期 古马恩	德国 BSM—903
输料管内径 (mm)		50	152	50	50	50	50	50
压缩空气耗量 (m ³ /mm)		6	6	13~14	8—12	10	8~10	12
最大 输送 距离	水平(m)	100	200	30	200	40	140	50
	垂直(m)				80	20	60	30
机重(kg)		3300		1360	1200	2200	2700	
外形 尺寸	长(mm)	5300				2700	3200	
	宽(mm)	1200				930	1500	
	高(mm)	2100			1700	1420	2660	

2. 湿喷喷嘴

在湿喷中,压缩空气和速凝剂在喷嘴处注入。压缩空气冲碎了湿拌和料团并为料流加速。湿喷喷嘴有两种基本类型:即风环喷嘴和风管喷嘴。风环喷嘴的风环与干喷喷嘴的水环相似,但加入拌和料内的是风而不是水。风环的风孔与长轴约成 30°角向出口倾斜,使风流方向与料流方向接近平行。由于孔眼易于堵塞,所以加入速凝剂时一般都不使用风环喷嘴。

风管喷嘴允许在喷嘴处向拌和料注入速凝剂。这种喷嘴长 60~90cm,有一个料管和一个风管。料管为钢制,其外径与输料软管的内径相等。为了防止堵塞,管的内侧在连接输料软管处稍成斜面。料管终点有一个橡皮奶头使料流离开孔口时得以集中,风管也是钢制的,半径为 13~25mm,风管与料管长轴约成 30°角,并焊在料管距奶头约 45cm 的孔眼上。

无论风环喷嘴或风管喷嘴,其风压均由喷射手调节风管上的阀门加以控制。喷嘴处的标准风压为 0.15~0.3MPa。

湿喷喷嘴应每日检查,并对磨蚀部分加以修理或更换。尽管湿喷喷嘴的性能并不像干喷喷嘴那样强烈地影响着喷射混凝土的质量,但如维修不良,也会延误喷射作业,使喷嘴难以操作或使所加入的速凝剂有很大波动。

3. 湿喷速凝剂配播器

目前,在喷嘴处以均匀速度直接向湿拌和料散播粉状速凝剂的唯一可靠方法是采用“速凝剂柱喂入系统”。在该系统中,粉状速凝剂被压缩成直径 15cm、长约 30cm 的柱状体,并放入喂入装置内。速凝剂喂入装置有一个液压头。另一端装有钢齿轮。速凝剂柱被按固定速度旋转的钢齿碾成粉末,然后由压缩空气带到喷嘴处与湿拌和料混合。

送到风流内的速凝剂的数量,可用变更液压头的压力加以控制。由于液压头和湿喷机各自单独动作,所以适宜的速凝剂喂入率必须由试验确定。在给定的液压头压力下首先确定速凝剂与水泥的比例,然后调整压力直至取得预期的配比。假如湿拌和料的输送率保持不变,就可用压力计的读数来规定速凝剂的比例。喷射中,这个标定位置应定时校核,以保证速凝剂能按正确比例掺入。

对柱状速凝剂喂入系统应经常进行维修。一般来说,正常维修包括清除筒内和钢制轮内所有积聚的速凝剂,更换或修补钢刷。风管配播粉状速凝剂可能产生的一个问题是风流内水分凝结和随之而来的速凝剂积聚。一般可用木槌打击风管,将积聚物吹出管外。湿喷中配播液态速凝剂的方法实际与干喷法相同。

三空气压缩机、搅拌机及上料装置

1. 空气压缩机

整个喷射混凝土作业取决于有适当的压缩空气供应,空压机不仅要在正确压力下提供足够的风量,而且压力还不应波动。在干喷中,空压机的能力和工作压力取决于:材料输送率;料管直径和长度;喷嘴在喷射机以上的高度。目前,国内使用的干喷机,一般要求压缩空气量为 $9\text{m}^3/\text{min}$,工作压力为 0.6MPa 。

2. 搅拌机

对于干喷,拌和料常采用 JW-375 涡浆式搅拌机,这种搅拌机体积较大,采用这种搅拌机,搅料粉尘少,水泥损失少。JW-375 涡浆式搅拌机的技术性能如表 10-4-8 所示。JW-200 型涡浆式强制搅拌机,为轨轮移动式,投料容量为 $200\text{L}/\text{次}$;出料容量 $110\text{L}/\text{次}$,传动功率 5 kW ,外形尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 $3200\text{mm} \times 1300\text{mm} \times 1650\text{mm}$ 。

表 10-4-8 JW-375 涡浆式搅拌机技术性能

项 目	指 标
投料容量(L/次)	375
出料容量(L/次)	250
最大台时产量(m^3/h)	12.5
搅拌最大骨料(mm)	40/60(碎石/卵石)
传动功率(kW)	10
使用电压(V)	380
外形尺寸(mm \times mm \times mm)	3350 \times 1865 \times 2420

3. 上料装置

上料装置为干法混凝土喷射机添加物料的机具,常用皮带机和螺旋输送机两种形式,国内以皮带机为多见。皮带机一般由机架、皮带和传动机构等部分组成。在加料端,设有一振动筛,能将物料中超过规定粒径的骨料筛除,防止管路堵塞。PS4.5 型带式输送机,加料端除设有振动筛外,并有添加速凝剂的装置。

在需要使拌和料作较长距离运送条件下,可将搅拌和上料结合起来,用一台搅拌上料机完成。安Ⅳ型搅拌上料机,有两个料仓,一个装骨料,另一个装水泥,仓底各设一个螺旋,在两者的下方中部,平行地再设一个螺旋,给喷射机上料,三个螺旋由一台 5.5 kW 电动机经齿轮减速传动。

第五节 土钉墙施工

土钉是一种原位加筋技术,即在土中敷设拉筋而使土体的力学性能得以改善的土工

加固方法,与锚杆、加筋土等加筋技术不同,其施工顺序是随着边坡的开挖,自上而下分段施工的。

1. 作业面开挖

土钉墙施工是随着工作面开挖分层施工的,在未完成上层作业面的土钉与喷射混凝土护面以前,不得进行下一层深度的开挖。每层开拓的最大高度取决于该土体可以站立而不破坏的能力,在砂性土中每层开挖高度为 0.5~2.0m,在粘性土中每次开挖高度可按下式估算:

$$h = \frac{2c}{\gamma \tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (4-6)$$

式中: h ——每层开挖深度(m);

c ——土的粘聚力(直剪快剪)(kPa);

φ ——土的内摩擦角(直剪快剪)(°);

γ ——土的重度(kN/m³)。

开挖高度一般与土钉竖向间距相匹配,以便于土钉施工。每层开挖的纵向长度取决于交叉施工期间保持坡面稳定的坡面面积和施工流程的相互衔接,长度一般为 10m。使用的开挖施工设备必须能挖出光滑规则的斜坡面,最大限度地减少对坡面土层的扰动。松动部分在坡面喷射护面板混凝土前必须予以清除。对松散的或干燥的无粘性土,尤其是当坡面受到外力振动时,要先进行灌浆处理,对附近爆破可能产生的影响也必须予以考虑。当采用挖土机开挖时,应辅以人工修整。

2. 土钉施工

土钉施工包括定位、成孔、清孔、置筋、注浆等工序,一般情况下,可借鉴土层锚杆的施工经验和规定。

(1) 成孔

成孔工艺和方法与土层条件、机具装备及施工单位的手段和经验有关。国内大多采用螺旋钻、洛阳铲等干法成孔设备,也可使用如 YIN—87 型土锚专用钻机成孔。对边坡加固土钉,由于往往要在脚手架上施工且钻孔长度较短,要求使用质量轻、易操作和搬运的钻机。

钻孔前,应根据设计要求定出孔位并作出标记和编号。孔位的容许误差不大于 20cm,成孔的倾角误差不大于 $\pm 3^\circ$ 。当成孔过程中遇到障碍须调整孔位时,不得损害土钉墙原定的安全程度。

成孔过程中取出的土体特征应按土钉编号逐一加以记录并及时与初步设计时所认定的加以对比,发现有较大偏差时,应及时修改土钉的设计参数。

依据土层锚杆的经验,孔壁“抹光”会降低浆土的粘结作用,当采用回转或冲击回转方法成孔时,不应采用膨润土或其它悬浮泥浆做钻进护壁。

显然,在用击入法设置土钉时,不需要进行预先钻孔。在条件适宜时,土钉的安装速度是很快的。直接击入土钉的办法不适用于含块石的土,在松散的弱胶结粒状土中应用时要谨慎,以免引起土钉周围土体局部结构破坏而降低土钉与土体间的粘结力。

(2) 清孔

钻孔后要进行清孔检查,对于孔中出现的局部渗水塌孔或掉落松土应立即处理。可采用 0.5~0.6MPa 压缩空气将孔内残留及松动的废土清除干净。当孔内土层的湿度较低时,需采用润孔花管由孔底向孔口方向逐步湿润孔壁,润孔在管内喷出的水压不超过

0.15MPa。

(3)置筋

钢筋使用前应调直、除锈、涂油。为保证钢筋在孔中的位置,可沿钉长每隔 2~3m 焊置一个对中支架,支架的构造应不妨碍浆液自由流动。支架可为金属或塑料。

(4)注浆

土钉注浆材料一般采用水泥净浆或水泥砂浆,其强度不宜低于 20MPa。

水泥净浆可用 42.5 级普通水泥,水灰比为 0.45~0.50,用搅拌装置进行搅拌;水泥砂浆也可用 42.5 级普通水泥,采用 1:2~1:3 的灰砂比,用砂浆搅拌机搅拌。

土钉注浆可采用注浆泵或砂浆泵灌注,浆液采用水泥净浆或水泥砂浆。为保证土钉与周围土体紧密结合,在孔口处设置止浆塞并旋紧,使其与孔壁紧密贴合。在止浆塞上将注浆管插入注浆口,深入距孔底 0.2~0.5m 处,注浆管连接注浆泵,边注浆边向孔口方向拔管,直至注满为止,放松止浆塞,将注浆管与止浆塞拔出,用粘性土或水泥砂浆充填孔口。为防止水泥砂浆或水泥净浆在硬化过程中产生干缩裂缝,提高其防腐性能,保证浆体与周围土壁的紧密粘合,可掺入一定量的膨胀剂,具体掺入量由试验确定,以满足补偿收缩为准。为提高水泥砂浆或水泥净浆的早期强度,加速硬化,可掺入速凝剂或早强剂。

当第一次注浆浆液终凝后应及时进行孔口补浆,直至浆体充满钻孔与垫板连成一体。

土钉成孔和注浆工艺的一般要求与注浆锚杆相同,可参照《土层锚杆设计与施工技术规范》(CECS 22)。

目前,击入注浆式土钉应用越来越多,它施工速度快,适用范围广,尤其对于粉细砂层、回填土、软土等难以成孔的土层,更显示出优越性。另外,国外报道了高速土钉施工专利方法——“喷栓”系统,它是利用高达 20MPa 的高压力,通过钉尖的小孔进行喷射,将土钉安装或击入土中,喷出的浆液如同润滑剂一样有利于土钉的贯入,在其凝固后还可提供较高的钉土粘结力。但是,喷栓系统目前还未获得广泛应用。目前国内应用较多的击入式土钉,称为锚管,一般是将带孔的建筑用钢管直接击入土中,然后高压注浆形成土钉,这种土钉特别适用于成孔困难的砂层及软弱土层,具有一定的应用前途。

3. 喷射混凝土护面板

包括混凝土的搅拌、喷射面清理、喷射、施工缝处理和表面整修、养生等工序。

(1)喷射混凝土原材料的供应与储存

喷射混凝土的骨料在拌和前一般要清洗。当骨料中的含泥量超过 1% 时则一定要冲洗干净后使用。材料装车及运输过程中,应防止受到污染。料库周边的骨料一般不宜采用,因它们多半受到污染和离析。离析是卵石最易出现的问题,较大的颗粒总有堆积在料堆周边的趋势。为防止离析,卵石应在卸入料库时使用上宽下窄的溜槽,其出口应稍高于料斗顶面,溜槽应前后移到,使料堆顶面保持水平,以免粗骨料坠落和集结在坡脚处如图 10-4-6 所示。对于我国南方多雨地区砂石骨料一般要放在带棚盖的场地,以保持骨料的最佳含水率。

水泥和速凝剂均易受潮,必须放在高出地面至少 5cm 的木板上面。袋子外面要再盖一层塑料薄膜。

(2)喷射混凝土的配料与搅拌

喷射混凝土的骨料应按质量配料,只有在定期校核质量,保证各种成分的正规比例的情况下,才可按体积配料。

对于干法喷射混凝土,骨料的平均含水率应为 5%,如含水率低于 3%,骨料不能被水泥充分包裹,从而喷射时回弹较多,硬化后的混凝土密实性较低。骨料含水率低于 3% 时,应在拌和前加水。当骨料的含水率高于 7% 时,材料有成团结球的趋势,喷嘴处的料

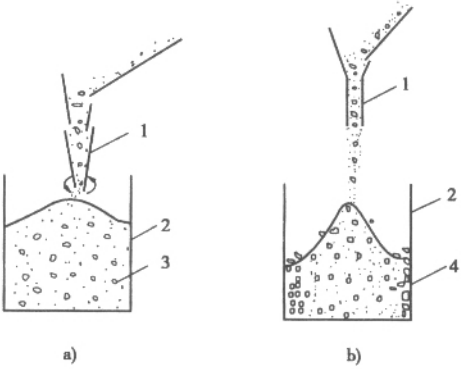


图 10—4—6 用溜槽卸料

a)正确;b)错误

1—溜槽;2—料斗;3—粗细颗粒得到粒匀分布;4—离析的粗骨料

流不均,并容易引起堵管。骨料含水率过高时,可以加热使之干燥或向过湿骨料掺入干料。但不应用增加水泥用量来降低拌和料的含水量,这样会引起混凝土的过量收缩,一旦中断喷射工作时,也会使水泥预水化现象加剧。

对于湿法喷射混凝土,必须进行砂子的含水率试验,用以校正加入的水量,以取得期望的坍落度。

无论干喷或湿喷,配料时骨料与水泥的温度不应低于 5℃。

为了保证拌和物的均匀拌和,拌和料搅拌的最短时间(即自全部材料装入搅拌筒中起,到卸料止)应符合表 10—4—9 的规定。

表 10—4—9 喷射混凝拌和料搅拌的最短时间(s)

喷射方式	搅拌机类型	搅拌机容积(L)		
		<400	400~1 000	>1 000
湿喷	自落式	90	120	150
	强制式	60	90	120
干喷	自落式	150	180	210
	强制式	120	150	180

注:掺有外加剂时,搅拌时间应适当延长。

拌和料可以用车辆、管路、运输带、螺旋输送机、升降机、溜槽运送。在运送过程中,为防止拌和料离析,湿拌和料应在运输终止时进行适度搅拌。采用垂直管路运送干拌和料,离析常常是严重的。这时,应在不致形成堵塞的条件下,连续快速地向管路倾卸拌和料,使已经离析的粗骨料赶上前面的细骨料和水泥并与之混合。

拌和料在运输、存放过程中,应严防雨淋、滴水及大块石等杂物混入,并且装入喷射机前应过筛。

为了防止水泥预水化的不利影响,拌和料宜随搅随用。不掺速凝剂时,拌和料存放时间不应超过 2h。掺速凝剂时,拌和料存放时间不应超过 20min。

(3)待喷面的准备

对接受喷射混凝土的坡面的准备工作可影响喷射混凝土与土体的粘结强度和靠近喷层土体的坚固性。坡面的准备工作主要包括撬落危石和喷水冲洗。采用的方法和准备作业量取决于地层状态和边坡表面特征。在某些情况下,不应撬落危石而仅仅清除表面物

质。

在松动地层中,必须清除松动的岩块,否则有可能暂时稳定的松动岩块在喷敷时会进一步松落给施工人员带来很大危害。如果岩块仅由一层喷射混凝土,会在无任何预警的情况下随着喷射混凝土衬砌一起掉落。

喷射混凝土失败的一个最普通的原因是岩石冲洗不当而造成粘结不良。冲洗不当还可造成喷射混凝土的脱落和下垂。

在喷敷初始层或相继层以前冲洗受喷面或冲洗喷射混凝土表面的最普通方法是用风—水射流。为此可通过料管吹入压缩空气并非喷嘴处加水,采用风—水射流冲洗断层泥最为有效。而断层泥下面会露出坚硬、光滑的岩面。这些岩面不受风—水射流的影响。清除断层泥是有利的,因为喷射混凝土粘结在光滑表面比粘结在断层泥上好得多。射出的水还有利于喷射混凝土底层水泥的水化。

若喷射混凝土紧贴土层表面施作,这时土层表面要严格压实和整平,不能向冻结、松散和积水的地层表面喷射混凝土。

在修理损坏了的结构物时,首先要清除掉所有松散物质。对于混凝土和砖石为基底的受喷面,要用压力水彻底冲洗,再将积水吹走。对于多孔表面,喷射前应保持 2~4h 的湿润。

(4) 钢筋的安设

当设计和配置的钢筋对喷射混凝土工作干扰最小时,才能获得最致密的喷射混凝土。尽可能使用直径较小的钢筋,当必须采用大直径钢筋时,应特别注意使混凝土将钢筋握裹好。

图 10-4-7 表示了正确和不正确的配筋方法。当喷射两层或多层配筋结构时,则外层钢筋不应正对内层钢筋[如图 10-4-7a) 所示],而应交错的排列[如图 10-4-7f) 所示],或采用分次配筋,即里层钢筋埋入第一层喷射混凝土内,再敷设第二层钢筋和施作第二层喷射混凝土。钢筋不应当拼接,而应当在一定搭接长度范围内,使钢筋间距不小于 5cm,平行钢筋的间距不小于 8cm。

喷射砂浆时,钢筋网与受喷面的间距不小于 12mm[如图 10-4-7d) 所示];喷射粗骨料混凝土时,钢筋网与受喷面的距离不小于两倍最大骨料粒径 d [图 10-4-7e) 所示]。

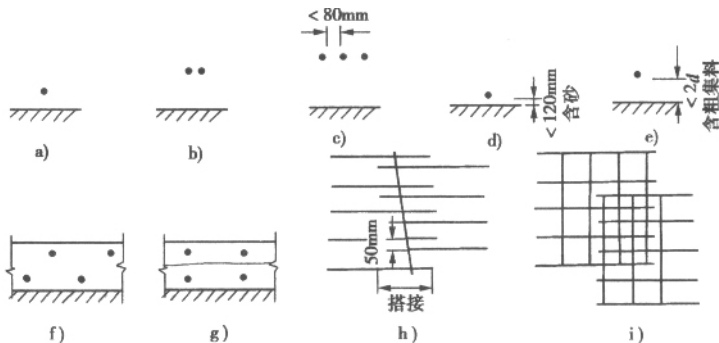


图 10-4-7 喷射混凝土内的钢筋配置

a)、b)、c)、d)、e) 为不正确的钢筋位置; f)、g)、h)、i) 为正确的钢筋配置

(5) 混凝土喷射

根据喷射混凝土拌和料的搅拌和运输方式,喷射方式一般有干式和湿式两种,常采用干式。图 10-4-8 和图 10-4-9 是干式与湿式喷射混凝土工艺流程图。

干式喷射是用喷射机压送干拌和料,在喷嘴处加水。湿式喷射是用喷射机压送湿拌和料(加入拌和水),在喷嘴处加入速凝剂。

湿式喷射时,水与其它材料拌和较均匀,产生的粉尘和回弹少。为了将湿式的长处引

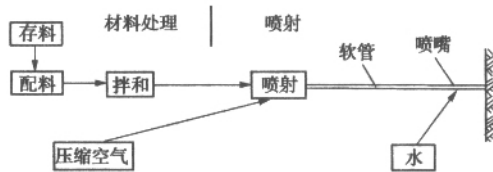


图 10-4-8 干式喷射工艺流程

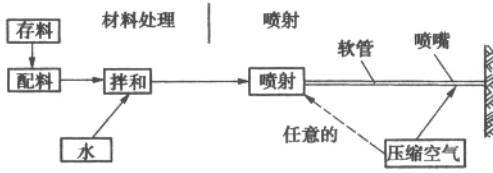


图 10-4-9 湿式喷射工艺流程

入干式中,采用在喷嘴前几米的管路处预先加水的方法,有时把这种方式叫半湿式喷射。但从本质上说,还是属于干式。表 10-4-10 为干式喷射与湿式喷射的加比较。

表 10-4-10 干式与湿式喷射的比较

项 目	干 式 喷 射	湿 式 喷 射
混凝土质量	拌和水在喷嘴处加入,混凝土质量在一定程度上取决于作业人员的技术熟练程度	能事先将包括水在内的各种材料正确计量,充分拌和,故质量容易保证。
压送距离	能进行远距离压送	不适宜远距离压送
粉尘	粉尘多	粉尘少
回弹	回弹较多	回弹少
机械设备	小型、轻型、购置费用低	较复杂,购置费用较高
喷头操纵	喷头操纵方便	流料喷射时,常有脉冲现象,喷头操纵较费劲
保养	保养容易	保养较费事

近年来,由于包括混凝土泵、活塞式速凝剂计量泵和喷射臂在内的稠流湿喷技术的出现,使湿喷法的应用大大拓宽。在意大利,湿喷约占喷射混凝土总量的 90%,日本的湿喷约占喷射混凝土总量的 65%以上。湿法喷射已成为世界各国喷射混凝土技术的发展趋向。

在我国,由于研制开发的 TK-961 型湿喷机的出现,必将大大推动我国湿喷技术的发展。

一般情况下,为了防止松弛和崩解,必须尽快做第一层喷射混凝土。根据地层的性质,可以在安设土钉之前做,也可以在放置土钉之后做。对于一般性支护来说,面层可以做一层,厚度 5~15cm;而永久性支护则多用两层或三层,厚度为 15~25cm。

为了保证施工时的喷射混凝土厚度达到规定值,可在坡面上垂直击入短钢筋作为标志。当面层厚度超过 12cm 时,应分两次喷射。当继续进行下步喷射混凝土作业时,应仔细清除施工缝接合面上的浮浆层和松散碎屑,并喷水使之潮湿。两次喷射作业应留一定

的时间间隔。为使施工搭接方便,每层下部 30cm 暂不喷射,并做 45°的斜面形状。为了使土钉同护面板能很好地连成整体,一般在护面板与土钉交接中间加一块 150mm × 150mm × 10mm 或 200mm × 200mm × 12mm 的承压板,承压板后一般放置 4~8 根加强钢筋。在喷射混凝土中,配置的钢筋网能对护面板起加强作用,并对调整护面板应力有着重要的意义。有时,用粗钢筋将各土钉相互连接起来,这样护面板的整体作用得到进一步加强。

喷射混凝土完成后应至少养生 7d,可根据当地环境条件,采取连续喷水、织物覆盖浇水或喷涂养护剂等养生方法。

土钉墙喷射混凝土的其它一般要求可参照《锚杆喷射混凝土技术规范》(BGJ 86),和《喷射混凝土施工技术规范》(YBJ 226)。

(6)施工缝与伸缩缝的设置

在新建工程中,要使喷射混凝土使用成功,合理地设置施工缝是重要的。施工缝的形式如图 10-4-10 所示。图 10-4-10c)图为标准施工缝。对于厚度为 7.5cm 的喷层,宜在 20~30cm 的宽度范围内喷筑成斜面。当喷层厚度增大时,斜面宽度应相应增加。在倾斜的喷射面上,清除浮沫和回弹物后,不要另行切割和压抹,只要用压力水冲洗湿润,即可接受后续的喷射混凝土。

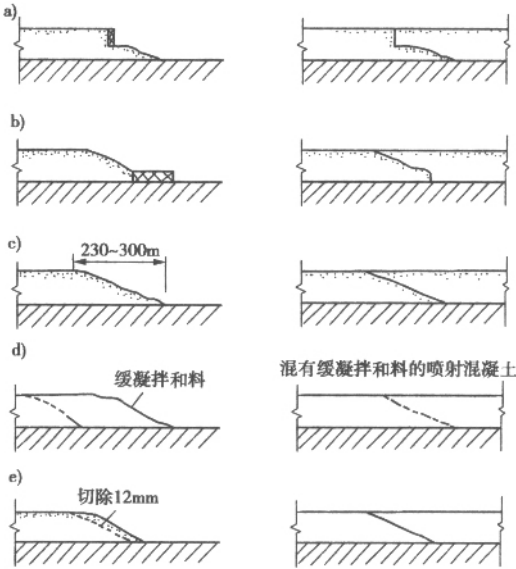


图 10-4-10 喷射混凝土结构的施工缝

a)型模施工缝;b)止端施工缝;c)标准施工缝;d)整体施工缝;e)切割施工缝

图 10-4-10a)和图 10-4-10b)图的施工缝的处理基本相同,都是为了使接缝更为整齐。图 10-4-10a)图的接缝大都出现于喷射工作终止于分段样板的情况。图 10-4-10a)、图 10-4-10b)和图 10-4-10c)图的接缝可以作进一步改善,就是在喷筑之前,在斜面上涂刷一层环氧树脂、聚氯乙烯或乳胶等结合剂。

图 10-4-10d)图的接缝是一种富有专门操作技术的做法,在一天施工的最后一批拌和料中掺有缓凝剂并喷筑在接缝线上,使第二天最先施作的喷射混凝土与这一层仍处于塑性状态的混凝土凝结成整体,形成均一的接缝。

图 10-4-10e)图的接缝与图 10-4-10c)图的接缝相似,只是把斜面凿去一层,以

免斜面受水的浸蚀而影响接缝质量。

(7) 喷射混凝土表面的整修

对土钉墙而言,不仅要求喷射混凝土与坡面有很好的粘结,而且边坡表面还应考虑美观的要求,有时使用预制板或喷涂。

喷射面自然整平,不论从结构强度和耐久性方面来讲,都是可取的。进一步追加整修往往是有害的,它会损害喷射混凝土与钢筋之间或喷射混凝土与坡面之间的粘结,且在混凝土内部产生裂缝。然而,喷射面自然整平过于粗糙,要求表面光滑和外形美观的地方,必须使用特殊的整平方法,即在混凝土初凝后(即喷射后 15~20min)用乱刀将基线以外多余的材料乱掉,然后再用喷浆或抹灰浆找平。

在喷敷最后一层混凝土时,喷射手常常借助导线和导板取得一致的断面。导线是临时设置的最后表面标志。

另一控制厚度均匀的方法是先喷筑一些混凝土条,然后在它们之间喷至适当厚度。这些条带先要硬结,随后在条带中间区域用新鲜混凝土填充。硬结的条带作为抹平时的导轨。

(8) 喷射混凝土的养生

良好的养生,对于水泥含量高、表面粗糙的薄喷射混凝土层显得更为重要。喷射后的 7d 内对于养生是最关键的时期。此后喷射混凝土已形成足够的抗拉强度来抵制收缩应变。并且靠近暴露面的渗透率也降低到足以使混凝土内部失水最少。

喷射混凝土终凝 2h 后,应喷水养生;养生时间,一般不少于 14d。当相对湿度大于 85% 时,也可采用自然养生。

冬季施工时,喷射混凝土作业区的气温不应低于 5℃,拌和料进入喷射机时的温度也不能低于 5℃。骨料可在配料时加热,而温水则用于拌和时或在喷嘴处加入。喷嘴处和拌和时的水温应在 10~20℃ 之间。水温高于 20℃ 会造成水泥的预水化。

喷射混凝土受冻前必须具有足够的强度。普通水泥配制的喷射混凝土低于设计强度的 30%,以及矿渣水泥配制的喷射混凝土低于设计强度的 40%,不得受冻。

4. 排降水措施

当地下水位较高时,应采取人工降低地下水措施,一般沿坡顶每隔 10m 左右设置一个降水井,常采用管井井点降水法,效果较好。

在降水的同时,也要做好坡顶、坡面和坡脚的排水,应提前提前沿坡顶挖设排水沟并在坡顶一定范围内用混凝土或砂浆护面以排除地表水。坡面排水可在喷射混凝土护面板中设置排水管,一般使用 30~50cm 长的带泄水孔的塑料管,向上倾斜 5~10°,排除护面板后的积水。在坡脚设置排水沟和积水坑,并应将排入积水坑的水及时抽走。

排水系统的作用还可以防止可能发生的冻害。

5. 土钉防锈

在正常环境条件下,对于普通工程,一般仅由砂浆做锈蚀防护层,有时可在钢筋表面涂一层防锈涂料。

对于重要的永久性工程,可采取以下防锈措施:

(1) 加大土钉钢筋的截面。即根据现场情况,预测钢筋的锈蚀率,按照规定的使用年限,确定可能的最大锈蚀深度,并将其加到土钉钢筋的直径上。

(2) 在钢筋表面上涂锌或涂环氧以增加抗锈蚀能力。但这种方法一样需要考虑锈蚀率并加大截面,而且这种涂层容易受碰损伤,在连接处也较难处理。

(3) 采用水泥砂浆保护层。即采用一般注浆钉,保护层厚度不小于 3~4cm。由于土钉受拉会引起砂浆保护层开裂,所以仍需考虑锈蚀,适当加大钢筋截面。

(4)采用封套防锈钉。在钢筋外加塑料波纹管,套管壁厚不小于 1mm,套管与钢筋之间留有不小于 5mm 的间隙并注入水泥净浆,而在套管与钻孔之间仍注浆封填,这种措施最为可靠。

第六节 工程质量检验与监测

土钉墙工程质量检验包括土钉抗拔力试验原材料的进场检验、喷射混凝土强度和护面板厚度检验等。

1. 土钉抗拔力试验

严格来说,每种地层均应分别做抗拔力试验,为土钉墙设计提供依据或用以证明设计中使用的粘结力是否合适,由于土钉的整体作用是主要的,不像锚杆那样要求高,所以只有重要的工程在设计或施工前需要进行土钉的抗拔力试验,以确定土钉界面摩阻力的分布形式及土钉的极限抗拔力等。土钉抗拔力试验可采用循环加荷的方式,第一级取土钉钢筋屈服强度的 10% 为荷载,进而以土钉钢筋屈服强度的 0.15 倍为增量来增加荷载,同时用退荷循环来测量残余变形,每一级荷载持续到变形稳定为止。土钉破坏标准为:在同级荷载下,变形不能趋于稳定,即认为土钉达到极限荷载。必须量测荷载和位移,提出荷载变形曲线。在土钉上安设钢筋计或贴片,可以量测土钉应力分布及其变化规律。

对于土钉墙工程,施工结束后,还应进行土钉抗拔力检验,试验数量应为土钉总数的 1%,且不少于 3 根。土钉检验的合格标准可定为:土钉抗拔力平均值大于设计极限抗拔力,抗拔力最小值应大于设计极限抗拔力的 0.9 倍。土钉抗拔力设计安全系数;对一般性工程取 1.5,对重要工程可取 2.0。

2. 喷射混凝土强度检验

由于喷射混凝土施工工艺与现浇混凝土不同,因而其力学强度的检验也有区别,它主要表现在试块的制取方法上。采用在铁模内直接喷射制取喷射混凝土试块的方法是不可取的,因为在这种条件下喷射,回弹物势必受到铁模壁的约束,不能自由溅出,而堆集于试模边角,造成测得的强度值要比在结构上的真实强度低。检验喷射混凝土强度可用大板切割法、钻取芯样法、拉拔法和回弹法等方法。有条件时,应优先采用大板切割法,相对而言,它属于标准试验法;为了确定实际结构的喷射混凝土的强度,则采用钻取芯样法;拉拔法可用于测定实际喷射混凝土的早期强度;回弹法实际上是测定的喷射混凝土的硬度,属于间接试验法。

3. 护面板厚度检验

喷射混凝土施工时,可用测针等方法作为大致标准来控制护面板厚度。工程结束后可按钻孔法和测针法检查护面板厚度。

当设计厚度为最小厚度时,则检验厚度应大于设计厚度,当设计厚度为平均厚度时,护面板厚度的平均值应大于设计厚度。

4. 原材料的检查

原材料质量的优劣,对喷射混凝土质量影响极大。对每批进库、进场的材料,应按规定进行质量检查,包括目测检查或取样试验,检验合格后方可使用。

5. 喷射混凝土现场质量检查

在混凝土喷射过程中,要及时检查喷射的混凝土表面,检查是否有松动、开裂、下坠、滑移等现象,如有发生应及时清除重喷。当喷射混凝土达到一定强度后,可用锤击听声方

法进行检查,对空鼓、脱壳处应及时进行处理。在喷射过程中应及时测定回弹率和混凝土实际的配合比,以指导施工。

6. 土钉墙监测

对于土钉墙,监测工作是非常必要的。最为直观和最为重要的监测是土钉墙顶面的水平位移和垂直位移。对土体内部变形的监测,可在坡面后不同距离的位置上布置测斜管,用测斜仪进行观测。其它的监测项目,如土钉应力、土压力和护面板应力等,可根据实际工程的需要进行选择。做好施工期间的监测,可以达到信息化施工的目的,对保证工程质量和安全都具有重要的意义。

(1) 位移观测

土钉墙顶面的水平位移和垂直位移的观测点的布置原则是与应变测试剖面尽可能一致,并覆及潜在的危险区域。此外,还应对地表地物进行变形观察,如发现异常,应及时反馈,以便修改设计并指导下一步施工。

(2) 土钉变形测试

将应变片与导线焊接,导线在角钢保护下,随土钉击入土体后,引导线至地表,用 YJ—25 型静态电阻应变仪测试,每开挖一个台阶,测试时间由密到疏,如遇有外界条件变化,再适当加密。土钉击入土体后,测试应变随时间、深度等的变化规律。

(3) 地表变形观测

主要观测裂缝的产生位置、时间、发育、发展、分布状况等,为判断潜在破裂面提供依据,同时有助于土钉的受力机理分析。