

挡土挡水复合型土钉墙支护技术

黄力平

(深圳市勘察研究院,深圳 518026)

何汉金

(深圳市锦峰实业发展公司,深圳 518031)

【摘要】 依据深圳地区的工程实践,对挡土挡水复合型土钉墙的适用范围、一般特点及结构型式、变形控制技术等进行了研究,并提出了挡土挡水复合型土钉墙的设计计算方法。

【关键词】 复合型土钉墙;截水帷幕;超前支护;变形控制;动态设计

【Abstract】 The applied ranges and general characteristics and structural shapes and deformation-controlled technique etc. are researched on the composite soil-nailing wall with retaining water according to its engineering practice in Shenzhen area, and the calculating method of its design is put forward.

【Key words】 composite soil-nailing wall; water-proof curtain; prebracing; deformation-controlled technique; dynamic design

0 引言

深基坑工程支护问题因其高风险、高投入的特点而成为了工程项目的控制性环节之一。

土钉墙作为一种新型的基坑支护结构型式,自1992年在深圳文锦广场基坑抢险工程中首次成功应用以来,在全国范围内得到了迅速推广,并取得了显著的技术经济效益。

常规的土钉墙由原位土体、设置在土体中的土钉和喷射砼面层组成,根据《深圳地区建筑深基坑支护技术规范(SJG05-96)》^①的规定:深圳地区土钉墙支护基坑开挖深度一般限制在5~12m范围内;土钉墙不适用于含水量丰富的粉细砂层、砾砂卵石层等饱和含水地层;不应用于无临时自稳能力的淤泥等饱和和软弱地层,并不宜兼作挡水结构。

当前深圳地区的土钉墙支护,已经突破了深圳地区基坑支护技术规范对于地层及基坑深度的限制,创造出多种复合支护结构型式,初步形成了复合型土钉墙的配套设计方

法及变形控制技术、施工工艺,初步显示了勃勃生机及广阔的应用前景。

1 挡土挡水复合型土钉墙的结构型式及适用范围

据深圳地区的工程实践,挡土挡水复合型土钉墙是常规土钉墙、预应力锚杆、截水帷幕这三种支护体系相互结合的产物,常用的结构型式有(1)截水帷幕+常规土钉墙;(2)预应力锚杆+常规土钉墙+截水帷幕。其适用范围及一般特点为:

挡土挡水复合型土钉墙可应用于含水丰富的粉细砂、砂卵石地层,亦可应用于厚度一般小于4m、无临时自稳能力的薄层淤泥等饱和和软弱地层,可兼作挡水结构。复合型土钉墙中的帷幕体除了起着挡水、截水作用外,另外一个重要作用是固化饱和和软弱地层,在支护工作面形成一道“屏障”,保证支护工作面不出现流砂或淤泥流动等地层损失现象。

具有预应力锚杆支护体系的复合型土钉

^① 深圳地区建筑深基坑支护技术规范(SJG05-96),深圳市标准,1996

作者简介:黄力平,工程师。深圳市勘察研究院岩土设计研究所副主任工程师。

墙一般应用于对于基坑变形需严格控制的情况。根据统计,复合型土钉墙支护结构的最大水平位移一般在 $0.1\% \sim 0.5\% H$ 之间(H 为基坑开挖深度)。

复合型土钉墙施工与土方开挖密切配合,随挖随支,其基本出发点在于超前支护,尽可能利用岩土体的固有强度,因此复合型土钉墙稳定性及变形控制的成败除了取决于安全可靠、周密的设计外,与施工过程的配合等因素息息相关,这是复合型土钉墙区别于传统的桩锚等支护体系的一个重要特征。

挡土挡水复合型土钉墙揉合了截水帷幕及预应力锚杆技术的优点,与常规的土钉墙相结合,拓展了土钉墙支护技术的工程应用范围。

2 挡土挡水复合型土钉墙支护的设计计算

挡土挡水复合型土钉墙支护的设计计算包括帷幕体的设计、整体稳定性分析、抗拔力验算等内容。

2.1 帷幕体的设计

深圳地区截水帷幕的一般形式为灌浆帷幕、搅拌桩截水帷幕、旋喷桩截水帷幕。灌浆帷幕的整体封闭性差,一般不宜采用;搅拌桩截水帷幕受其施工机具能力所限,一般应用于淤泥等地基承载力标准值 f_k 不大于 120kPa 的地层;高压旋喷帷幕施工工艺适用面广,所形成帷幕体的整体性好、可靠程度高,在深圳地区广为应用。

帷幕功能的好坏是复合型土钉墙成败的关键,具体设计时应根据场地地质条件,综合安全、经济等因素,选择合理的帷幕体形式。

根据深圳地区的工程实践,截水帷幕宜插入相对不透水层,入相对不透水层的深度 d 可按下式计算:

$$K_s = \frac{\sum C_i l_i S + \sum W_i \cos \theta_i \tan \varphi_i S + \sum T_{Nj} \cos(\alpha_i + \theta_i) + \sum \zeta T_{Nj} \sin(\alpha_i + \theta_i) \tan \varphi_i}{\sum W_i \sin \theta_i \cdot S} \quad (3)$$

$$T_{Nj} = \pi d \cdot L_{Bj} \cdot \tau_j \quad (4)$$

式中: K_s —— 整体稳定性安全系数;

$$d = \frac{h - ba}{2a} \quad (1)$$

式中: h —— 作用水头, m;

a —— 接触面允许水力坡降,当以残积粘性土作为相对不透水层时,可取 $2 \sim 3$;

b —— 帷幕的厚度, m。一般不小于 800mm 。

若上式计算值小于 1.5m , 应取 1.5m ; 如果透水层或淤泥层厚度大, 截水帷幕呈“悬吊”形式未穿过饱和软弱地层或未插入相对不透水层时, 尚应进行管涌及抗隆起等验算。

对于截水帷幕“悬吊”在透水层内的情况, 可按下式简化计算基坑涌水量:

$$Q = \frac{K' L H_0 T_0}{n(H_0 + 2T)} \quad (2)$$

式中: Q —— 基坑涌水量, m^3/d ;

k' —— 土层平均渗透系数, m/d ;

L —— 基坑周长, m;

H_0 —— 地下水水面至基坑底的深度, m;

T_0 —— 帷幕底面至不透水层顶面的深度, m;

n —— 渗径的修正系数, 一般取 $1.1 \sim 1.8$;

T —— 帷幕嵌入基坑底面以下的深度, m。

2.2 整体稳定性分析

复合型土钉墙设计中, 整体稳定性分析是一个控制性环节, 其重点在于分步计算每一开挖阶段的稳定性。一般某一层开挖完毕而该层土钉尚未施工的情况为最不利工况。

整体稳定性分析验算的基本方法为简化的圆弧滑动分析法, 计算公式如下:

W_i —— i 分条的自重, kN/m 。对于地

下水位以下的土条自重,在计算抗滑力矩时用有效重度,计算滑动力矩时用饱和重度;

c_i —— i 分条滑裂面处,土体粘聚力, kPa;

φ_i —— i 分条滑裂面处,土体内摩擦角, ($^{\circ}$);

θ_i —— i 分条滑裂面处,中点切线与水平面夹角, ($^{\circ}$);

α_i —— 土钉与水平面之间的夹角, ($^{\circ}$);

l_i —— i 分条滑裂面处弧长, m;

S —— 计算单元的长度, m;

T_{Nj} —— 第 j 个土钉滑裂面外稳定土体中土钉所提供的摩阻力, kN;

ζ —— 折减系数,根据经验取 0.5;

d —— 土钉孔径, m;

L_{Bj} —— 滑裂面外稳定土体中第 j 根土钉的长度, m;

τ_f —— 土钉与土体界面摩阻力设计值。

整体稳定安全系数建议取 1.4~1.5,视变形控制标准及基坑工程等级而定。整体稳定计算一般通过电算完成。

2.3 抗拔力验算

如何计算作用在土钉墙后的水土压力荷载,不少学者提出了多种模式。根据深圳地区的工程实践,复合型土钉墙土压力的计算按朗肯公式计算是经济可行的。对于砂卵石等透水地层,尚应水土分算,并计及全部水压力。

土钉及锚杆抗拔力验算按下式进行:

$$K_d e_{ai} S_x S_y \leq T_{ti} \cos \alpha_i \quad (5)$$

式中: K_d —— 土钉及锚杆抗拔允许安全系数,一般取 1.5;

e_{ai} —— 第 i 个土钉及锚杆位置处主动土压力强度, kPa;

S_x 、 S_y —— 土钉及锚杆的水平、垂直间距;

T_{ti} —— 第 i 个土钉及锚杆破裂面外土体提供的有效抗拔力, kN; 破裂

面与水平面夹角取 $(\beta + \varphi)/2$;

β 、 φ —— 分别为边坡坡角及土体内摩擦角, ($^{\circ}$)。

预应力锚杆与土钉在立面上应间隔布置,土钉可消除预应力锚杆可能产生的拉应力区;预应力锚杆锚头部位的喷射砼面层中钢筋网应适当加密,以适应张拉锁定时在锚头部位的应力集中;从变形控制的角度,立面上预应力锚杆宜布置在支护墙体的中上部为宜。

2.4 复合型土钉墙的变形计算

复合型土钉墙的变形计算目前尚无解析方法,目前一般采取数值方法或经验类比法进行估算。

比较常用的数值方法为弹性模型及非线性弹性模型有限元等。较好的方法是结合现场实测资料,利用数值方法进行反分析,以提高数值方法预测的精度。我们已开发了相应的反分析计算程序。

经验类比法也是比较常用的方法,根据深圳地区的工程实践,复合型土钉墙的位移一般可控制在 $0.1\% \sim 0.5\% H$ 之内 (H 为基坑深度)。

复合型土钉墙的设计计算还有土钉及锚杆杆材、土钉面层抗冲切等常规验算内容,此处不再赘述。

3 挡土挡水复合型土钉墙的变形控制技术

深基坑工程设计不仅要保证支护体系的稳定,而且要满足变形控制的要求。复合型土钉墙的变形控制是设计施工于一体的综合性措施,既包括设计措施,又包括配套的施工工艺。

3.1 设计措施

复合型土钉墙的变形控制技术在设计方面所采取的措施为截水帷幕体系及预应力锚杆体系。

帷幕体系除了起到挡水、截水作用外,更重要的作用在于它在开挖支护工作面与原土体之间先期形成了超前的“衬砌”屏障,超

前支护了开挖面,避免了流砂、流泥、基底隆起及边坡壁面土体逐层剥落等破坏现象,因而使得复合型土钉墙可应用于自稳能力差的饱和软弱地层。由于帷幕体系起着超前“衬砌”屏障作用,极大地减少了开挖过程中的地层损失,不但增加了边坡支护施工的安全性,而且较好地控制了边坡的变形。

预应力锚杆一般用于对基坑变形需严格控制的场合,立面上宜布置在边坡中上部,平面上锚杆布置以长而疏为原则。

3.2 基坑支护时空效应的利用

基本思路是充分利用基坑开挖的空间效应及饱和软弱地层变形的时间因素,严格制订分层、分块、对称、限时开挖和及时支护的科学施工程序。

根据现场监控反馈信息,合理确定施工进度,调整工序等。对于开挖面需严格分层分段开挖,随挖随支;同一层开挖面的支护施工,可划分为间断断开的施工段,每两个施工段之间预留平衡土体;

结合现场监控措施,建立严格科学的施工程序,可较好地控制地层位移。

3.3 土钉及锚杆的水下施工

对于打穿帷幕的土钉及锚杆,采用常规的成孔方法,在一定的水头压力下,易沿锚孔产生水土流失的现象,从而造成不良环境效应。

为减少地层损失,保护环境,提高工效,可采用高压锚管法施工,即土钉及锚杆的杆体改用 $\phi 48$ 或 $\phi 57\text{mm}$ 套成花管的钢管,管上设出浆口。采用锚杆钻机打管,成孔与土钉杆体的安装一次同步完成。土钉及锚杆被击入到位后,在管口设止浆塞,进行压力灌浆。

3.4 动态设计与信息施工

即在施工中,据现场监控量测情况,及时调整修改原设计及施工进度。

4 工程实例

深圳得景大厦由两幢 32 层塔楼及 4 层

裙房组成,设两层地下室,地下室基坑深度为 8.4m。

该工程地处景田住宅小区内,新洲河边。基坑边坡地层自上而下分别为填土,粘土,4~9.5m 厚的中粗砂层及花岗岩残积土;地下水主要赋存于中粗砂层,水量丰沛,稳定水位埋深 3m。地基土主要物理力学指标见表 1。

表 1 得景大厦基坑边坡地层物理力学指标表

物理指标	填土	冲洪积粉质粘土	中粗砂	残积粉质粘土
平均厚度 m	1.40	2.50	6.20	12.4
$r/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18.5	19.2	19.4	18.8
E_s/MPa		5		9
$N_{63.5}/\text{击}$		11	17	22
$\varphi/(\text{°})$	10	18	30	20
c/kPa	10	15		25

基坑三面邻近既有建筑物,一面邻近新洲河辅道,场地周围埋有煤气管、上水管等管网。经方案对比,采用三重管高压旋喷桩帷幕与常规土钉墙相结合的复合型土钉墙对基坑垂直支护。

旋喷桩设计桩径 1.2m,桩中心距 1m,桩与桩相互搭接形成连锁状帷幕。本工程作用水头 $h=5.4\text{m}$,帷幕厚度 $b=1.2\text{m}$,取 $a=2$,代入(1)式,帷幕入相对不透水层(残积土层)深度 $d=0.75\text{m}$,实际取用 $d=1.5\text{m}$ 。

本工程取地面超载为 20kPa,按公式(3)编制程序多次试算,取定的支护剖面见图 1。各分步开挖的 K_s 计算值均大于 1.5。

由各土层 c, φ 值可画出水土压力沿深度分布图(见图 2)。以第 5 层土钉为例,由公式(5)进行抗拔力验算:

$$e_{a5} = 38 + 22 = 60, \text{kPa}, S_x = S_y = 1.2\text{m};$$

土钉长 $L=10\text{m}$,破裂面内长度 $L_f=1.5\text{m}$,锚固段长 $L_m=8.5\text{m}$;根据经验,取土层每米抗拔设计值为 18kN/m;即

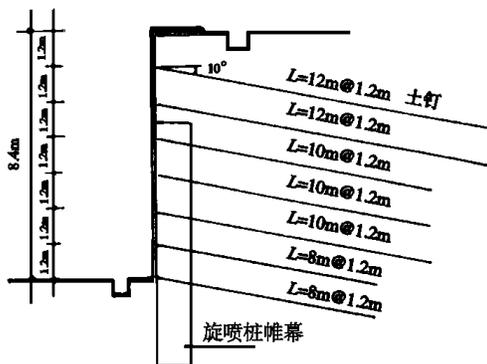


图1 复合型土钉墙剖面

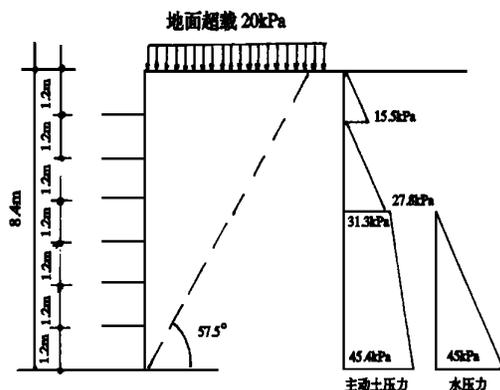


图2 土钉抗拔力验算简图

$$T_{1i} \cos \alpha_i = 8.5 \times 18 \times \cos 10^\circ = 150, \text{ kN};$$

$$K_d e_{a5} S_x S_y = 1.5 \times 60 \times 1.2 \times 1.2 = 130, \text{ kN}$$

所以满足。

本工程土钉杆体分别采用单根 $\phi 25 \sim 32$ 螺纹钢筋。

本工程采用非线性弹性模型有限元程序计算,预估边坡坡顶最大水平位移为 2cm;由工程经验类比,坡顶水平位移一般不超过 3cm。实际上,从基坑施工至地下室施工完毕,实测基坑边坡位移均小于 1cm。

5 效益分析

复合型土钉墙施工可与基坑土方开挖同步进行,随挖随支,基本不占或少占独立工期,因而可大大缩短建筑总工期;同时造价也比较便宜,深圳地区复合型土钉墙每平方米支护面积单价约 500~700 元。以得景大厦

基坑为例,与常规的桩锚支护体系相比,造价便宜 15%~20%,工期节省 50~60d。因此,复合型土钉墙的技术经济效益是显著的。

6 结语

复合型土钉墙综合了截水帷幕及预应力锚杆的优点,在设计、施工中贯彻了超前支护、动态设计、信息施工的基本思想,推动了土钉墙支护技术的发展,显示了勃勃生机及广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 刘建航,侯学渊主编·基坑工程手册·北京:中国建筑工业出版社,1997
- 2 余志成,施文华·深基坑支护设计与施工·北京:中国建筑工业出版社,1997

收稿日期:1998-10-06