

JTG

中华人民共和国推荐性行业标准

JTG/T 3331-07—2024

公路膨胀土路基设计与施工技术规范

Technical Specifications for Design and Construction of
Highway Expansive Soil Subgrade

交通运输部
信息中心
浏览专用

2024-03-04 发布

2024-06-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国推荐性行业标准

公路膨胀土路基设计与施工技术规范

Technical Specifications for Design and Construction of
Highway Expansive Soil Subgrade

JTG/T 3331-07—2024

主编单位：长沙理工大学

批准部门：中华人民共和国交通运输部

实施日期：2024年06月01日

前 言

根据《交通运输部关于下达 2015 年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》(交办公路函〔2015〕312 号)的要求,由长沙理工大学作为主编单位承担《公路膨胀土路基设计与施工技术规范》的制定工作。

编写组在广泛调研的基础上,总结了我国多年来经实践检验、行之有效的公路膨胀土工程理论、方法和技术,特别是 2002 年以来交通部西部交通建设科技项目重大专项“膨胀土地区公路修筑成套技术研究”及其应用推广中取得的系列重大创新成果。本规范以“安全耐久、节约资源、环境和谐”为指导思想,遵循“治土先治水、防水控湿、以柔治胀”的原则,以保证路基整体强度、刚度、稳定性和耐久性为目标,充分考虑膨胀土路基与环境的适应性,力求技术先进、指标合理、可操作性强。

本规范共分为 7 章和 3 个附录,主要内容包括:1 总则、2 术语和符号、3 工程地质勘察、4 构造物膨胀土地基与基础、5 膨胀土填方路基、6 膨胀土挖方路基、7 膨胀土边坡防护与加固,附录 A 膨胀土承载比 EBR 试验方法、附录 B 路基刚度补偿层设计方法、附录 C 室内侧向膨胀试验方法。

本规范第 1 章、第 2 章由郑健龙、张锐起草,第 3 章由吴万平、张静波、付伟起草,第 4 章由章为民、顾行文、任国峰起草,第 5 章、第 6 章、第 7 章由郑健龙、张锐、肖杰起草,附录 A 由张锐、肖杰起草,附录 B 由张锐、张军辉起草,附录 C 由张锐起草。

请各有关单位在执行过程中,将发现的问题和意见,函告本规范日常管理组,联系人:张锐(地址:湖南省长沙市天心区万家丽南路 2 段 960 号;邮编:410114;电话:0731-85258388;电子邮箱:zr@csust.edu.cn),以便修订时参考。

主 编 单 位:长沙理工大学

参 编 单 位:中交第二公路勘察设计研究院有限公司
南京水利科学研究院

主 编:郑健龙

主要参编人员:张 锐 吴万平 章为民 肖 杰 张静波 顾行文
张军辉 付 伟 任国峰

主 审：邓卫东

参与审查人员：王秉纲 于光 汪双杰 马健 张世俊 赵明华
李志勇 李迎春 蔡正银 姚海林 吴立坚 刘怡林
王中文 刘元炜 王豪 黄向京

交通运输部信息公开
浏览专用

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	工程地质勘察	5
3.1	一般规定	5
3.2	工程地质调绘	6
3.3	勘探与测试	7
3.4	工程可行性研究阶段工程地质勘察	9
3.5	初步设计阶段工程地质勘察	10
3.6	施工图设计阶段工程地质勘察	11
4	构造物膨胀土地基与基础	13
4.1	一般规定	13
4.2	地基分类与处理措施选择	13
4.3	换填法	14
4.4	土质改良法	16
4.5	桩基础法	18
4.6	涵洞和通道地基处理	19
4.7	重力式挡土墙地基处理	20
5	膨胀土填方路基	22
5.1	一般规定	22
5.2	膨胀土填料分类及利用	22
5.3	膨胀土填方路基设计	26
5.4	膨胀土填方路基边坡稳定性分析	31
5.5	膨胀土填方路基施工	34
5.6	无机结合料处治膨胀土的施工	37
6	膨胀土挖方路基	39
6.1	一般规定	39
6.2	边坡坡率设计及稳定性验算	39
6.3	路床设计	43
6.4	防水排水设计	43

6.5	挖方路基施工	46
7	膨胀土边坡防护与加固	47
7.1	一般规定	47
7.2	边坡防护与加固措施选择	47
7.3	植物防护	48
7.4	边坡渗沟 + 骨架植草	49
7.5	柔性支护	51
7.6	挡土墙	55
7.7	支撑渗沟	58
7.8	锚杆框架梁	62
7.9	树根桩	64
7.10	抗滑桩	66
附录 A	膨胀土承载比 EBR 试验方法	68
附录 B	路基刚度补偿层设计方法	72
附录 C	室内侧向膨胀试验方法	77
	本规范用词用语说明	81

交通运输部信息公告
浏览专用

1 总则

1.0.1 为指导公路膨胀土路基设计与施工，提高公路膨胀土路基设计与施工技术水平和工程质量，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于各等级公路新建及改扩建工程的膨胀土路基设计与施工。

1.0.3 公路膨胀土路基设计与施工应遵循“治土先治水、防水控湿、以柔治胀”的原则，采取综合措施，保证膨胀土路基具有足够的强度、刚度、稳定性和耐久性，充分利用膨胀土。

1.0.4 膨胀土路基应加强预防性养护，提高路基安全运行水平。

1.0.5 公路膨胀土路基设计与施工应符合国家和行业在安全生产和环境保护方面的有关规定。

1.0.6 公路膨胀土路基设计与施工应积极稳妥地采用成熟可靠的新技术、新结构、新材料和新工艺。

1.0.7 公路膨胀土路基设计与施工除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 膨胀土 expansive soil

含亲水性矿物并具有明显的吸水膨胀和失水收缩特性的高塑性黏土。

2.1.2 大气影响层深度 depth of climate influenced layer

在自然气候影响下,由降雨、蒸发和温度等因素引起地基土胀缩变形的有效深度。

2.1.3 大气显著影响层深度 depth of climate significantly influenced layer

大气影响特别显著的深度,又称为大气影响急剧层深度、干湿循环显著影响区深度。

2.1.4 自由膨胀率 free swelling ratio

松散的烘干土粒在水中和空气中分别自由堆积的体积之差与在空气中自由堆积的体积之比,以百分率表示。

2.1.5 膨胀率 swelling ratio

固结仪中的环刀土样,在一定压力下浸水膨胀稳定后,其高度增加值与原高度之比,以百分率表示。

2.1.6 膨胀力 swelling force

土体在体积不变时浸水膨胀产生的最大内应力。

2.1.7 线缩率 linear shrinkage ratio

天然湿度下的环刀土样烘干或风干后,其高度减少值与原高度之比,以百分率表示。

2.1.8 收缩系数 coefficient of shrinkage

环刀土样在直线收缩阶段含水率每减少1个百分点时的竖向线缩率。

2.1.9 胀缩总率 sum of swelling and shrinkage ratio

环刀土样的线缩率与标准上覆压力下的膨胀率之和。

2.1.10 标准吸湿含水率 absorption moisture content in standard condition

环刀土样在温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(60 \pm 5)\%$ 的标准条件下，土样从天然含水率脱湿至稳定状态的含水率。

2.1.11 边坡柔性支护结构 flexible supporting structure for slope

一种允许支护结构自身产生一定变形以释放坡体增湿产生的膨胀能，并能保证边坡稳定的膨胀土路基边坡支护结构。

2.1.12 膨胀土承载比 expansive soil bearing ratio

通过侧向浸水使试件饱水后，在 20kPa 上覆压力条件下进行标准贯入试验所获得的膨胀土试件的承载比。

2.2 符号**2.2.1 膨胀土工程地质相关参数**

C_s ——膨胀指数；

C_w ——收缩指数；

d_a ——大气影响层深度；

d_r ——大气显著影响层深度；

S_e ——膨胀土地基变形量；

w_f ——标准吸湿含水率；

δ_{ef} ——自由膨胀率。

2.2.2 膨胀土填方路基设计计算参数

C_{sl} ——收缩系数；

EBR——膨胀土承载比；

e_{ps} ——胀缩总率；

K_c ——干燥度；

w_m ——膨胀土路基含水率的下限值；

w_0 ——填料含水率。

2.2.3 膨胀土边坡防护与加固设计计算参数

B_g ——土工格栅单位宽度；

c_e ——筋土界面似黏聚力；

- l_e ——锚固区长度；
 l_f ——自由区长度；
 P_{eh} ——侧向膨胀力；
 P_h ——膨胀土对挡土墙作用的总侧压力；
 ε_{ehf} ——膨胀土的最大侧向应变率；
 ε_{ehi} ——膨胀土的侧向应变率；
 σ_{ehi} ——发生一定侧向变形后的侧向膨胀压力；
 σ_{eh0} ——恒体积侧向膨胀压力；
 φ_e ——筋土界面似摩擦角。

交通运输部信息公开
浏览专用

3 工程地质勘察

3.1 一般规定

3.1.1 当路基通过区域的工程地质特征与表 3.1.1 相符时，应按膨胀土进行工程地质勘察。

表 3.1.1 膨胀土工程地质特征

项目	特征
地层	以第四系中、上更新统为主，少量为全新统及新近系
地貌	地形平缓开阔，具垄岗式地貌，垄岗与沟谷相间，无明显的天然陡坎，自然坡度平缓，坡面沟槽发育
颜色	以褐黄、棕黄、棕红色为主，间夹灰白、灰绿色条或薄膜，灰白、灰绿色多呈透镜体或夹层出现
黏性	土质细腻，手触摸有滑感，旱季呈坚硬状，雨季黏滑
结构	结构致密，易风化成碎块状，更细小的呈鳞片状
裂隙	裂隙发育，呈网纹状，裂面光滑，具蜡状光泽，或有擦痕，或有铁锰质薄膜覆盖。常含灰白、灰绿色黏土
崩解性	遇水易沿裂隙崩解成碎块状
不良地质现象	常见浅层溜塌、滑坡、地裂，新开挖的路堑边坡、基坑易呈现坍塌

3.1.2 膨胀土地区公路工程地质勘察应查明下列内容：

- 1 当地区域地质、水文地质、工程地质、气象及水文条件。
- 2 膨胀土的成因、类型、地质时代、分布范围。
- 3 膨胀土矿物成分、物理力学性质、膨胀与收缩性质、膨胀等级。
- 4 膨胀土的裂隙发育程度和大气影响层深度。
- 5 膨胀土下伏地层及软弱结构面发育情况。
- 6 地表水的汇集与排泄条件，地下水的类型、埋深和水位变化幅度及趋势。
- 7 滑坡、溜塌、地裂等不良地质的分布、规模。
- 8 既有建筑物的使用情况及当地工程经验。

3.1.3 膨胀土地区公路工程地质勘察应分阶段进行，并按各阶段的要求实施，采用

综合勘察方法，按工程地质调绘、勘察、分析及报告编制的程序开展工作，正确反映工程建设场地的工程地质条件，为公路工程建设提供资料完整、评价正确的工程地质勘察报告。

3.1.4 膨胀土应按表 3.1.4 的规定进行分级。

表 3.1.4 膨胀土分级

分级指标	弱膨胀土	中膨胀土	强膨胀土
标准吸湿含水率 w_f (%)	$2.5 \leq w_f < 4.8$	$4.8 \leq w_f < 6.8$	$w_f \geq 6.8$

3.2 工程地质调绘

3.2.1 膨胀土地区工程地质调绘前应搜集下列资料：

- 1 地形地貌、区域地质、工程地质、水文地质等与区域性膨胀土有关的资料。
- 2 遥感图像和解译资料。
- 3 气象资料。包括降水量、蒸发量、地温、气温等资料。
- 4 既有道路、建筑、构造物与膨胀土有关的勘察设计、病害及病害整治相关资料等。

3.2.2 膨胀土地区工程地质调绘应包括下列内容：

- 1 地形地貌、微地貌特征，包括斜坡自然坡度、高度、冲沟、坡面冲刷、剥落、地表植被的生长状况等。
- 2 地层时代、成因、岩性、结构、分布范围，有无软弱夹层等。
- 3 膨胀土裂隙的发育程度、分布密度、形态、充填物性质及裂面特征，下伏基岩的岩性、结构面特征。
- 4 不良地质现象的类型、形成原因、分布范围及规模。
- 5 地表水的积聚和排泄条件，地下水露头情况。
- 6 既有工程的服役状况、变形和破坏情况，基础类型和埋深，边坡高度、坡率以及防治病害的经验等。

3.2.3 膨胀土地区工程地质调绘应符合下列规定：

- 1 膨胀土地区工程地质调绘应与路线及构造物的设置相结合，并辅以必要的挖探和测试手段。
- 2 地层界线、滑坡、溜塌、地裂、垄岗、沟谷、挖方边坡和陡坎等部位应布置工程地质调绘点。
- 3 应选择代表性路段布置挖探点，取样测试膨胀土的湿度状态和膨胀性，调查膨胀土的风化和裂隙发育情况及大气影响层深度。

3.3 勘探与测试

3.3.1 膨胀土地区应采用挖探、钻探、物探等原位测试和室内试验相结合的综合勘探方法。

3.3.2 勘探及取样应符合下列规定：

1 勘探点的布置应在工程地质调绘的基础上，结合现场地形地质条件、构造物的类型，在勘察阶段确定。

2 路基及构造物的浅基础，勘探深度应大于大气影响层深度。当膨胀土厚度较小时，钻孔或探坑的深度应穿过膨胀土至下伏非膨胀土地层；膨胀土厚度较大时，填方路基的勘探深度应达地表以下不小于 5.0m，挖方路基的勘探深度应达设计高程以下不小于 8.0m。

3 膨胀土地段的原状土样应采用挖探或干钻的方法取得，并符合下列规定：

1) 干钻时不得采用振动和冲击方法钻进，取土器的人土深度应小于其直径的 3 倍，土试样直径不得小于 89mm，并保持土样的天然湿度和天然结构，不发生吸水膨胀或失水收缩。

2) 原状土样应从地面以下 1.0m 开始分层采取，在大气影响层深度范围内，取样间距不宜大于 1.0m；在大气影响层深度以下，取样间距不宜大于 2.0m。遇有灰绿、灰白色土层，应增加取样数量。同一地层的取样数量，不应少于 6 组。

3) 应采用边进尺边取土的方法采集原状土样，采集的原状样应密封，避免湿度变化和扰动，并尽快试验。

3.3.3 膨胀土的物理、力学性质指标测试应符合下列规定：

1 膨胀土的判别及分级应测试自由膨胀率、标准吸湿含水率。必要时，还应测定其黏土矿物成分和阳离子交换量。

2 原状膨胀土样应测定天然含水率、密度、相对密度、液塑限、颗粒组成、压缩系数、压缩模量、黏聚力、内摩擦角等。

3 路基填料应测定击实土的最佳含水率、最大干密度、膨胀土承载比、标准吸湿含水率、胀缩总率、膨胀力及浸水抗剪强度等。

4 挖方边坡勘察应进行原状土的抗剪强度试验。对于已变形破坏的边坡应进行残余抗剪强度试验。必要时，应进行结构面的抗剪强度试验、干湿循环和低应力条件下的抗剪试验。

5 膨胀土地基承载力可采用静力触探、动力触探、旁压试验、荷载试验等方法确定。

3.3.4 膨胀土的大气影响层深度宜按下列方法确定：

1 湿度参数法。测定一个地区在一年内各个季节土层含水率，并将土层含水率随深度的变化绘制成曲线，将含水率由急剧变化到基本稳定的临界深度作为膨胀土的大气影响层深度。

2 裂隙深度法。将膨胀土裂隙或地裂的可见深度作为膨胀土大气影响层深度。

3 力学参数法。将静力触探比贯入阻力由小变大并保持相对稳定的临界深度作为膨胀土大气影响层深度。

4 地温参数法。将某一地区膨胀土在一年或多年内地温沿土层深度的变化绘制成曲线，将变化幅度由大变小到基本稳定的临界深度作为膨胀土的大气影响层深度。

条文说明

湿度参数法、裂隙深度法、力学参数法、地温参数法等方法确定的大气影响层深度差异不大，现场根据勘测条件选择相应的判定方法。表 3-1 为我国一些典型膨胀土地区大气影响层深度。

表 3-1 我国典型膨胀土地区大气影响层深度

地区	各种判定方法下的膨胀土临界大气影响层深度 (m)				大气影响层深度 (m)
	湿度参数法	地温参数法	力学参数法	裂隙深度法	
云南鸡街	3				3~4
云南江水地	5				3~5
四川成都	1.5	1.8			1.5
广西南宁	2~3		3	2~2.5	2.5~3
广西南明			3.5	2.5~3.5	3
陕西安康	3			2~3	3
湖北荆门	1.5~2	2	1.5	1.2~1.5	1.5~2
湖北十堰郟阳	2	2		<2	2
湖北宜昌		2.1			2.1
河南南阳		3.2			3.2
河南平顶山	2.5	2.1	3		2.5
安徽合肥	2	2			2
河北邯郸	2				2

3.3.5 膨胀土大气显著影响层深度宜按大气影响层深度的 2/3 进行取值。

条文说明

大气显著影响层深度是受大气降雨和蒸发影响十分显著的深度，随着降雨和蒸发交替作用，此深度范围内膨胀土的含水率急剧变化；大气影响层深度是膨胀土含水率波动由急剧变化到稳定的临界深度。根据合肥、安康、鸡街等地区膨胀土含水率波动多年实

测曲线查得大气显著影响层深度是大气影响深度的三分之二左右，为方便工程应用，推荐采用三分之二。

3.4 工程可行性研究阶段工程地质勘察

3.4.1 工程可行性研究阶段的膨胀土工程地质勘察应以资料收集和工程地质调绘为主，必要的勘探试验为辅，初步查明膨胀土路段的工程地质特征。

3.4.2 工程可行性研究阶段的膨胀土工程地质勘察应包括下列内容：

- 1 搜集沿线的区域地质、工程地质、水文地质、地貌、气象等资料，并进行室内分析研究、整理及解译。
- 2 初步查明沿线是否存在膨胀土，了解并查明膨胀土的地质时代、成因、类型、分布范围以及既有建筑物的变形、破坏情况。
- 3 调查膨胀土的地貌特征，初步查明有无影响路线与工程场地稳定性的不良地质现象。
- 4 初步查明膨胀土物理力学性质以及膨胀土的膨胀潜势等级。

3.4.3 工程可行性研究阶段工程地质调绘应符合下列规定：

- 1 应对区域地质、水文地质以及当地采矿资料等进行复核，区域地层界线、断层线、不良地质和特殊性岩土发育地带、地下水排泄区等应进行实地踏勘，并做好复核记录。
- 2 工程地质调绘的比例尺宜为 1:10 000 ~ 1:50 000，范围应包括各路线走廊或通道所处的带状区域。

3.4.4 应采用挖探、静力触探或标准贯入为主、钻探为辅的方法进行必要的勘探试验。勘探点宜结合地貌单元和构造物分布情况等选择代表性路段进行布置，一般情况下，每个代表性路段不宜少于 1 个勘探点。

3.4.5 工程可行性研究阶段工程地质勘察资料编制应符合下列规定：

- 1 工程地质说明应论述各方案中膨胀土的成因、类型、工程性质、分布范围、与膨胀土有关的不良地质现象和建筑物的变形情况，评价膨胀土对公路工程的影响及危害程度，提出方案比选意见及对于初测阶段的工作建议等。
- 2 全线工程地质平面图应标识膨胀土的分布范围及控制路线方案的大型不良地质体，比例尺宜为 1:5 000 ~ 1:10 000，重要工点比例尺宜为 1:2 000 ~ 1:10 000。
- 3 全线工程地质断面图比例尺宜为 1:5 000 ~ 1:10 000，重要工点比例尺宜为 1:2 000 ~ 1:10 000。
- 4 其他资料应包括试验及测试资料、地质柱状图及有关图件等。

3.5 初步设计阶段工程地质勘察

3.5.1 膨胀土的初步勘察应以工程地质调绘和勘探为主，必要时应进行野外原位测试，基本查明公路膨胀土路段以及沿线各类构造物建设场地的工程地质条件，为工程方案比选及初步设计文件编制提供工程地质资料。

3.5.2 膨胀土的初步勘察应基本查明下列内容，并对膨胀土进行分层判别与分类。

1 地形地貌条件，如自然坡度、沟谷发育程度、植被生长情况等，不良地质现象的性质、成因和范围。

2 膨胀土层次、岩性、厚度、有无软弱夹层，以及土体结构特征。

3 膨胀土裂隙发育程度、成因、类型、产状和充填物性质。

4 有无地下水分布及其埋藏条件和运动规律，地表水汇聚与排泄条件。

5 膨胀土的物理、化学、力学性质及水文地质特点。

6 环境工程地质条件，邻近有无公路、铁路或其他工程的相互影响。

3.5.3 工程地质调绘应沿拟定的路线及其两侧各宽 200m 的带状范围进行。复杂、较复杂场地，应结合路线方案研究适当扩大调绘范围。调绘比例尺宜为 1:2000。

3.5.4 初步勘察阶段膨胀土工程地质勘探点的布置应符合下列规定：

1 勘探点应沿拟定的路线中线布置，平均间距不宜大于 200m，作代表性勘探；陡坡路堤及填挖高度大于 10m 的路堤或路堑，应选择代表性位置布置横向勘探断面，每条勘探断面勘探点的数量不宜少于 2 个。

2 地层单一、弱膨胀土分布路段，涵洞、通道可作代表性勘探；地层结构复杂、膨胀性中等及以上的膨胀性岩土地段，每座涵洞、通道勘探点的数量不宜少于 1 个。

3 每个取土场的勘探点数量不宜少于 2 个，勘探断面数量不宜少于 1 个。

4 每 100m 长支挡结构物，其基础勘探点数量不宜少于 1 个，且每段支挡结构物勘探点数量不宜少于 1 个。

3.5.5 陡坡路堤、填土高度大于 10m 的路堤或挖方深度大于 10m 的路堑、涵洞、通道、支挡结构等工点，其初步勘察资料应包括下列内容：

1 工程地质说明。应阐明场地的工程地质条件，其内容包括土的物理力学性质、分级、分类、场地分类、地基胀缩等级等，并提出基础埋深、地基处理、施工开挖的挡护措施及防水保湿措施等建议。

2 工程地质平面图。比例尺宜为 1:500~1:2000，填绘膨胀土的地质时代、成因、地质分界线、分区界线等。

3 工程地质断面图。比例尺宜为 1:200~1:500，填绘膨胀土的地质时代、成因、

类型、厚度、地下水位线等。

- 4 钻孔柱状图、探井素描图等。
- 5 测试及试验资料。

3.5.6 膨胀土初步勘察综合资料的编制应符合下列规定：

1 工程地质勘察报告应阐明膨胀土区域地质条件、时代、成因、分布范围及规律、主要的物理力学指标、发展趋势及其对路线方案的影响，提出各路线方案评价、比选意见。

2 全线工程地质平面图比例尺宜为 1:2 000 ~ 1:10 000，填绘膨胀土的分布范围、膨胀潜势分级以及控制路线方案的其他大规模不良地质等。

3 全线工程地质纵断面图比例尺宜为水平 1:2 000 ~ 1:5 000，垂直 1:200 ~ 1:1 000；填绘膨胀土的地质时代、成因、类型、厚度、地下水位线等。

4 沿线工程地质分段说明应按地貌单元分段编写，其内容应包括地形地貌、植被情况、气象特征、膨胀土的地质时代、成因、性质、厚度、结构、分布范围、水文地质特征、工程地质条件评价、地质参数、大气影响层深度、工程措施等。

- 5 附件资料应包括试验及测试资料、地质柱状图、其他有关图件等。

3.6 施工图设计阶段工程地质勘察

3.6.1 详细勘察阶段应以勘探与原位测试为主，辅以地质调查，详细查明膨胀土路段沿线各类构造物建设场地的工程地质条件，为膨胀土路基施工图设计提供工程地质资料。

3.6.2 膨胀土的详细勘察应查明下列内容：

1 膨胀土的矿物成分、物理力学性质和与膨胀有关的工程特性及膨胀特性的空间变化规律，判别膨胀潜势大小，确定膨胀岩土地基的胀缩等级。

2 地表水的积聚、排泄情况，地下水的类型、埋藏条件、水位高程及其变化幅度，岩土体含水率的变化规律及植被发育情况等。

3 场地地表形态，天然斜坡高度、坡度及稳定情况、滑坡、地裂、溜塌、小冲沟等特征，有关的不良地质现象发育强度和分布特点。

3.6.3 详细勘察阶段膨胀土工程地质调绘范围应根据工程场地地形条件和地质条件的复杂程度确定，宜位于路线中线两侧 50 ~ 150m。复杂、较复杂场地，应结合路线方案研究适当扩大调绘范围，测绘比例尺宜为 1:2 000 ~ 1:5 000。

3.6.4 详细勘察阶段膨胀土工程地质勘探点的布置应符合下列规定：

- 1 每段填、挖路基勘探点的数量不宜少于 1 个；陡坡路堤及填挖高度大于 10m 的

路堤或路堑，应布置横向勘探断面，每条勘探断面上的钻孔或探坑数量不宜少于2个。

2 弱膨胀土路段，每座涵洞、通道勘探点的数量不宜少于1个；中膨胀土和强膨胀土路段，每座涵洞、通道勘探点的数量不宜少于2个。

3 每个取土场的勘探数量不宜少于3~5孔，勘探断面不应少于2个。

4 每100m长支挡结构物，其基础勘探点数量不宜少于2个，且每段支挡结构物勘探点数量不宜少于2个。

3.6.5 膨胀土工点详细勘察资料应符合本规范第3.5.5条的规定。

3.6.6 膨胀土详细勘察综合资料编制应符合下列规定：

1 工程地质勘察报告应阐明膨胀土区域的地质条件、时代、成因、分布范围、规律、水文地质条件、主要物理力学指标及与各类工程设计有关的地质参数，提出处理措施及施工注意事项等。

2 全线工程地质平面图比例尺宜为1:2000~1:10000，根据各类工点的工程地质资料补充、修改等。

3 全线工程地质纵断面图比例尺宜为水平1:2000~1:5000，垂直1:200~1:500；填绘膨胀土的地质时代、成因、类型、厚度、地下水位线等。

4 沿线工程地质分段说明及附件资料应符合本规范第3.5.6条的规定。

4 构造物膨胀土地基与基础

4.1 一般规定

4.1.1 膨胀土地基应满足上部构造物对承载力和胀缩变形的要求。当不能满足要求时应进行地基处理。

4.1.2 膨胀土地基处理设计之前，应充分了解当地膨胀土的工程性质和病害发生特征，收集场地的工程地质、水文地质及气象资料，查明天然地基的工程性质与技术参数。

4.1.3 膨胀土地基处理设计应综合考虑上部构造物对地基的技术要求、天然地基条件、荷载组合条件、施工条件、材料来源、当地工程经验以及经济环境等因素，采取有效措施提高地基承载力，消除或减小地基胀缩变形和不均匀变形。

4.1.4 膨胀土地基处理不宜在雨期施工，施工过程中应采取必要的防排水措施，防止基坑积水。

4.2 地基分类与处理措施选择

4.2.1 膨胀土地基变形量计算应符合下列规定：

1 基于膨胀试验的膨胀土地基变形量可按式（4.2.1-1）计算：

$$S_e = \sum_{i=1}^n \frac{C_s z_i}{(1 + e_0)_i} \lg \frac{\sigma'_{fi}}{\sigma'_{sc}} \quad (4.2.1-1)$$

$$C_s = \frac{e_f - e_0}{\lg \sigma'_f - \lg \sigma'_{sc}} \quad (4.2.1-2)$$

式中： S_e ——地基变形量（mm）；

σ'_{sc} ——恒体积试验的膨胀压力（kPa）；

σ'_{fi} ——第*i*层膨胀土的最终有效应力（kPa）；

σ'_f ——计算土层层底对应的最终有效应力（kPa）；

C_s ——膨胀指数；

- e_f ——最终孔隙比；
 e_0 ——初始孔隙比；
 z_i ——第 i 层土的初始厚度 (mm)；
 n ——计算深度范围内的分层数。

2 基于收缩试验的膨胀土地基变形量可按式 (4.2.1-3) 计算：

$$S_e = \sum_{i=1}^n \frac{C_w \Delta w_i}{(1 + e_0)_i} z_i \quad (4.2.1-3)$$

$$C_w = \frac{\Delta e_i}{\Delta w_i} \quad (4.2.1-4)$$

- 式中： C_w ——收缩指数；
 Δe_i ——第 i 层土的孔隙比的变化；
 Δw_i ——第 i 层土的初始含水率的变化。

4.2.2 膨胀土地基胀缩变形计算深度应根据大气显著影响层深度确定；有浸水可能时，可将浸水影响深度作为式 (4.2.1-1) 的变形计算深度；有热源影响时，可将热源影响深度作为式 (4.2.1-3) 的变形计算深度。

条文说明

浸水影响深度是指浸水引起土层含水率明显变化的深度；热源影响深度是指热源引起土层地温明显变化的深度。

4.2.3 应根据膨胀土地基变形量按表 4.2.3 对膨胀土地基进行分类。

表 4.2.3 膨胀土地基分类

膨胀土地基分类等级	I	II	III	IV	V
膨胀土地基变形量 S_e (mm)	$S_e \geq 200$	$100 \leq S_e < 200$	$40 \leq S_e < 100$	$15 \leq S_e < 40$	$S_e < 15$

4.2.4 地基处理可采取换填、土质改良、桩基础等技术措施，地基处理方法可按现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 的有关规定进行选择。

4.3 换填法

4.3.1 换填法可用于不同胀缩等级的膨胀土地基。

4.3.2 对于弱膨胀土，换填宽度应大于 1.5 倍基础设计宽度；对于中膨胀土，换填

宽度应大于 1.6 倍基础设计宽度；对于强膨胀土，换填宽度应大于 1.7 倍基础设计宽度。

4.3.3 当膨胀土厚度小于或等于大气显著影响层深度时，应将地基中膨胀土全部挖除换填；当膨胀土厚度大于大气显著影响层深度时，换填深度应按式 (4.2.1-1) 或式 (4.2.1-3) 验算确定，并应满足承载力和胀缩变形要求。

4.3.4 换填层底部为膨胀土且换填材料为透水性材料时，应设置隔水层。

4.3.5 换填材料的选择应遵循环保节约、因地制宜的原则，并符合下列规定：

- 1 砂石宜选用级配良好，不含有机质的砾砂、碎石土。当使用粉细砂时，应掺入不少于 30% 的碎石或卵石，最大粒径不宜大于 50mm。
- 2 工业废渣应选用无污染的矿渣或工业废渣等。
- 3 灰土土料宜选用黏性土或粉质黏土，不具备条件时也可选用塑性指数大于 4 的粉土；土料不应含松软杂质，颗粒粒径不应大于 15mm；掺灰量应通过试验确定。

4.3.6 换填地基应满足地基承载力的要求。换填地基的承载力应通过现场浸水荷载试验确定。初步设计时，可按表 4.3.6 取用。

表 4.3.6 各种换填层的承载力特征值

施工方法	换填材料类别	压实度 K	承载力特征值 f_{ak} (kPa)	
碾压、振密或重锤夯实	碎石、卵石	0.94 ~ 0.97	200 ~ 300	
	砂夹石 (其中碎石、卵石占全重的 30% ~ 50%)		200 ~ 250	
	土夹石 (其中碎石、卵石占全重的 30% ~ 50%)		150 ~ 200	
	中砂、粗砂、砾砂、角砾、圆砾		150 ~ 200	
	粉质黏土		130 ~ 180	
	灰土		0.93 ~ 0.95	200 ~ 250
	粉煤灰		0.90 ~ 0.95	120 ~ 150
	石屑		—	120 ~ 150
	矿渣		—	200 ~ 300

- 注：1. 压实度 K 为土的控制干密度 ρ_d 与最大干密度 ρ_{dmax} 的比值，土的最大干密度宜采用击实试验确定，碎石或卵石的最大干密度可取 $2.0 \sim 2.2t/m^3$ 。
2. 采用轻型击实试验时，压实度 K 取高值；采用重型击实试验时，压实度 K 取低值。
 3. 矿渣垫层的压实指标为最后两遍压实的压陷差小于 2mm。
 4. 压实度小的垫层，承载力特征值取低值，反之取高值。
 5. 原状矿渣垫层承载力特征值取低值，分级矿渣或混合矿渣垫层承载力特征值取高值。

4.3.7 应通过修筑试验段，确定换填施工控制含水率、施工机械、松铺厚度、压实遍数和压实方法。换填施工应符合下列规定：

- 1 松铺厚度不宜大于 0.3m，施工含水率宜控制在最佳含水率 ± 2 个百分点范围以内。
- 2 素土、灰土、矿渣宜采用光轮碾，砂石宜采用振动碾。
- 3 换填层底部存在洞穴、旧基础、暗塘等时，应预先进行处治，经检验合格后，方可进行换填施工。
- 4 换填施工完成后，应及时进行后续作业施工，避免长期暴露。

4.3.8 换填应逐层进行压实度检测，检验合格后，才能进行下一层施工。检测标准和方法应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的有关规定。

4.4 土质改良法

4.4.1 无合适换填土料时，膨胀土地基可采用土质改良法进行处理。

4.4.2 改良材料的选择，应遵循环保节约、因地制宜的原则，可采用水泥、石灰、粉煤灰等材料；当采用新材料时，应经过充分的试验论证。

4.4.3 土质改良地基处理的宽度和深度应按本规范第 4.3.2 和 4.3.3 条确定。

4.4.4 应根据当地气候环境特征与工程施工条件，合理选择湿法或干法击实标准，通过击实试验及现场碾压试验确定施工压实控制参数。

条文说明

工程实践中的改良土常因土料的天然含水率过高，难以达到干法击实确定的最佳含水率状态，造成改良土地基施工时难以满足压实度的要求。

《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020) 中规定确定最大干密度和最佳含水率的试验方法有干法击实和湿法击实两种类型。干法击实是先将试样烘干，然后加水至不同目标含水率，并进行击实的试验方法，一般适用于少雨干旱地区。湿法是通过控制不同风干时间制成不同含水率试样的方法，没有加水的过程，是由湿到干的过程，与多雨潮湿地区路基填筑的实际碾压施工过程类似。土样制备方法不同，所得到击实试验结果不同，这是膨胀土的击实特性所决定的。不同制备方法的击实试验结果见图 4-1，图中 S_r 、 w_{op} 、 ρ_{dmax} 分别表示土的饱和度、最佳含水率、最大干密度。

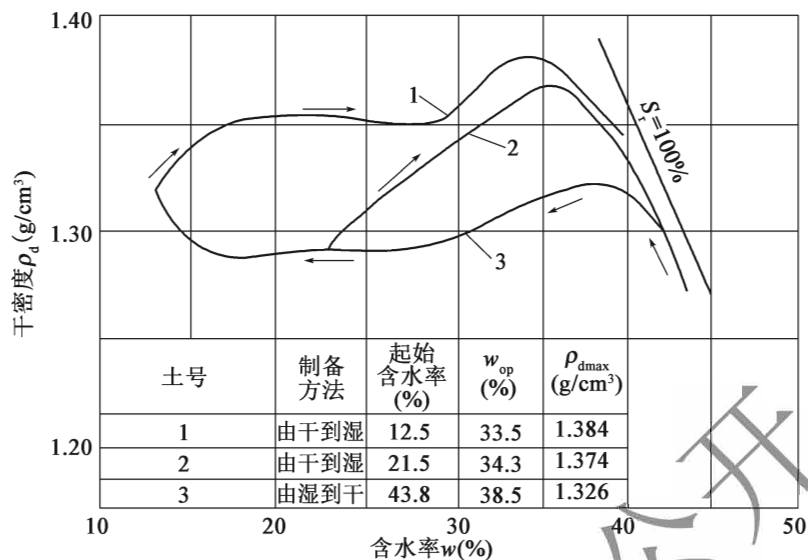


图 4-1 某膨胀土的干法和湿法击实试验结果

4.4.5 应对改良膨胀土进行有荷膨胀试验、收缩试验，计算改良地基胀缩变形，并根据地基胀缩变形要求，确定最佳掺入比。

4.4.6 应通过修筑试验段，确定施工控制含水率、最大粒径、掺入比、闷料时间、摊铺厚度、碾压遍数、机具配置等施工控制技术参数。

4.4.7 土质改良施工应按照测量放线、翻松、粉碎、加改良材料、拌和、闷料、摊铺、碾压、检测及整修、养生的工序进行，并符合下列规定：

- 1 待改良的膨胀土粒径应控制在 50mm 以下。
- 2 在改良土拌和后及摊铺碾压前，应进行闷料，闷料时间可通过对比试验确定，但不应超过 48h。
- 3 改良土的松铺厚度宜为 0.3m。
- 4 改良土地基应分层摊铺、碾压，压实度检测合格后才能进行下一层施工。直线段的碾压应遵循先两侧后中间的原则，曲线段的碾压应先外侧后内侧。碾压过程应连续，并遵循“先轻后重、先静后振，最后再静压”的原则。当日拌好的填料应在当日完成碾压。
- 5 碾压施工完成、经检测各项指标合格后，应及时养生 7d；养生期间应进行覆盖和保护。
- 6 地基改良处理完毕后应及时进行后续施工，不得长期暴露。

4.4.8 在改良土地基的施工过程中应同步开展工程质量检测。压实度可采用环刀法或灌砂法进行检测，每层的检测点数不应少于 3 个。掺灰量的均匀性应按照现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441) 规定的取样频率及方法进行检测。

4.4.9 改良土地基的承载力应通过现场荷载试验确定，初步设计时，亦可参照本规范表 4.3.6 取值。

4.5 桩基础法

4.5.1 在强膨胀土地区，当大气影响层较深、基础埋深较大、换填法与土质改良法不能满足构造物的承载力或变形要求时，可选用桩基础法进行地基处理。

4.5.2 单桩的承载力特征值应通过现场浸水静载试验确定；不具备试验条件时可按式 (4.5.2) 计算；亦可根据当地工程经验确定。

$$[P] = k (C \sum \tau_i l_i + f_{ak} A) \quad (4.5.2)$$

式中：[P] ——单桩轴向受压承载力特征值 (kN)；

k ——土的均匀系数，取 0.7；

C ——桩的周长 (m)；

A ——桩底横截面面积 (m^2)；

l_i ——第 i 层土的厚度 (m)；

τ_i ——第 i 层土的桩侧摩阻力特征值 (kPa)；

f_{ak} ——桩底土的承载力特征值 (kPa)。

4.5.3 膨胀土地基浸水时桩顶上升量可按式 (4.5.3) 计算。

$$S_p = S_{en} + (S_{e0} - S_{en}) \Omega - \frac{\omega}{C} N \quad (4.5.3)$$

式中： S_p ——桩顶上升量 (m)；

S_{en} ——桩底土层上升量 (m)，即桩底土层膨胀变形，可按式 (4.2.1-1) 计算，当穿透膨胀土层时取 0；

S_{e0} ——地表上升量 (m)，即地表土膨胀变形，可按式 (4.2.1-1) 计算；

C ——桩的周长 (m)；

Ω ——与变形相关的经验系数，可参考表 4.5.3 取值。

ω ——与荷载相关的经验系数 ($10^{-5} kPa^{-1}$)，可参考表 4.5.3 取值。

N ——桩顶荷载 (kN)。

表 4.5.3 Ω 和 ω 取值参考

桩长 (m)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ω	0.53	0.44	0.36	0.31	0.26	0.22	0.19	0.17	0.15	0.13
ω ($10^{-5} kPa^{-1}$)	27	15	11	7	5	4	3	2.4	2	1.6

4.5.4 桩端进入大气显著影响层深度以下或非膨胀土层中的长度 L_g 应取式 (4.5.4-1) 和式 (4.5.4-2) 中的较大值，且不小于 4 倍桩径及扩大端的直径，最小长度应大于

1.5m, 并应符合下列规定:

1 按膨胀变形计算时, 应符合式 (4.5.4-1) 的要求:

$$L_a = \frac{V_e - Q}{C \cdot \lambda \cdot q_{sk}} \quad (4.5.4-1)$$

2 按收缩变形计算时, 应符合式 (4.5.4-2) 的要求:

$$L_a = \frac{Q - A \cdot q_{pk}}{C \cdot q_{sk}} \quad (4.5.4-2)$$

式中: L_a ——桩端进入大气显著影响层以下或非膨胀土层中的长度 (m);

Q ——对应于荷载效应标准组合, 最不利工况下作用于桩顶的竖向力, 包括承台和承台土的自重 (kN);

λ ——桩侧土的抗拔系数, 应由试验或当地经验确定; 初步设计时, 可按现行《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的有关规定取值;

q_{pk} ——桩的端阻力特征值 (kPa), 应由试验或当地经验确定; 初步设计时, 可按现行《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的有关规定取值;

q_{sk} ——桩的侧阻力特征值 (kPa), 应由试验或当地经验确定; 初步设计时, 可按现行《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的有关规定取值;

V_e ——在大气显著影响层内桩侧的最大胀拔力特征值 (kN), 按式 (4.5.4-3) 确定;

$$V_e = L_e \cdot C \cdot \tau_e \quad (4.5.4-3)$$

L_e ——主动区长度 (m);

C ——桩的周长 (m);

τ_e ——桩侧胀拔摩阻力 (kPa), 可取为浸水后的桩侧摩阻力。

4.5.5 当桩身承受胀拔力时, 应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 的有关规定, 进行桩身抗拉强度和裂缝宽度控制验算。

4.5.6 桩承台梁下应留有空隙, 其值应大于土层浸水后的最大膨胀量, 且不应小于 0.10m。承台梁两侧应防止空隙堵塞。

4.6 涵洞和通道地基处理

4.6.1 应根据涵洞和通道的用途、受力条件、胀缩变形及地基承载力要求, 通过技术经济方案比较, 选择地基处理措施。

4.6.2 弱、中膨胀土地基可采用挖除、换填、土质改良等方法, 对强膨胀土地基可加大基础埋深, 必要时亦可采用桩基础或扩大基础。

4.6.3 涵洞和通道基础的膨胀土地基处理深度应根据本规范式(4.2.1-1)~式(4.2.1-4)进行试算,处理后的地基变形量应满足本规范第4.2.3条中第V类地基变形量的要求,并应符合现行《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363)的有关规定。

4.6.4 涵洞和通道基础位于地下水位以下或地下水位变幅区间内时,应采用浆砌片石换填处理或采用扩大基础。

4.6.5 涵洞和通道基础位于地下水位以上时,不得采用透水材料回填。

4.6.6 涵洞和通道地基处理施工除应符合本规范第4.3~4.5节的有关规定外,尚应满足下列要求:

- 1 基坑开挖后,应采取截、排水措施拦截地表水,并采取措施疏干地下水。
- 2 基坑开挖后,应及时进行后续施工,避免长期暴露或浸水。

4.6.7 涵洞和通道墙背不得采用膨胀土作为回填料。

4.7 重力式挡土墙地基处理

4.7.1 重力式挡土墙地基应做好排水与隔水措施,基础埋深不应小于1.0m,宜采用砂砾、碎石等作为垫层材料。

条文说明

相对于灰土垫层,砂砾、碎石垫层能对膨胀土地基起到显著的刚度补偿和排水作用,可以显著提升膨胀土地基承载力,并保持地基的水稳性。

4.7.2 垫层厚度不应小于0.3m,宽度应大于挡墙基底宽度各0.3m。

4.7.3 垫层宜采用颗粒级配良好、质地坚硬的中砂、粗砂、砂砾、碎石等,不得含有杂草、树根等有机杂质,含泥量不得大于3%。

4.7.4 铺设垫层前应进行验槽,将基底表面浮土、淤泥、杂物清除干净。

4.7.5 垫层底面高程不同时,土面应挖成阶梯或斜坡搭接,并按先深后浅的顺序施工,搭接处应夯压密实。

4.7.6 垫层应分层填筑和夯实,每层松铺厚度不应大于0.3m,压实前应将松铺面整

平，压实度不应小于95%。

4.7.7 分层压实后，应进行厚度和压实度检验，并应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的有关规定。

4.7.8 垫层施工完成后，应进行现场承载力检测。

交通运输部信息公开
浏览专用

5 膨胀土填方路基

5.1 一般规定

5.1.1 膨胀土填方路基设计前应按本规范的要求进行工程地质勘察，并通过试验获取膨胀土填料的物理力学性质资料。改建公路设计，还应收集既有公路路况、病害类型及其防治措施等资料。

5.1.2 膨胀土填方路基高度不宜大于 20m；当难以避免时，应与桥梁方案进行综合比选确定。

5.1.3 在同时满足路基填料变形、强度和施工可行性要求的前提下，膨胀土可直接用作下路堤填料，否则应采用无机结合料处治或弃土换填。

5.1.4 应采取“防、排、截、疏”相结合的综合措施，构建完善的膨胀土填方路基防排水系统。防排水系统应与路基坡面防护、地基处理以及其他处治措施相结合并相互协调，互为补充。

5.1.5 膨胀土填方路基冬期施工中途停止时，应整平填层和边坡并进行覆盖防冻，恢复施工时，应将表层冰雪清除，并补充压实。

5.2 膨胀土填料分类及利用

5.2.1 膨胀土用作路基填料时，应通过试验确定填料的稠度、最大干密度、最佳含水率、膨胀土承载比和胀缩总率。

5.2.2 膨胀土填料的稠度 w_c 应按式 (5.2.2) 计算。用作路基填料时，膨胀土的稠度应满足 $1.00 \leq w_c \leq 1.30$ 的要求。

$$w_c = \frac{w_L - w_0}{w_L - w_p} \quad (5.2.2)$$

式中： w_L ——液限 (%)；

w_0 ——填料含水率 (%)；

w_p ——塑限 (%)。

条文说明

膨胀土能否用作路基填料，关键是其能否满足施工可压实条件。若填料的含水率接近击实试验确定的最佳含水率，则表明其具有良好的施工压实性能。但最佳含水率是一相对值，其随填料土质和压实功的变化而变化。稠度能综合反映路基填料的相对含水率和可压密性。当膨胀土的稠度小于 1.00 时，即含水率大于塑限时，膨胀土中弱结合水较多，膨胀土呈可塑状态，使得在碾压时容易产生“橡皮土”现象，不易压实。当填料的稠度大于 1.00，即天然含水率小于塑限时，土中弱结合水减少，土呈半固态，才能进行有效压实。

当膨胀土的稠度较大，即含水率较小时，膨胀土容易被压实且能达到较大的压实度。但广西、云南、湖南、海南、江西等省区运营 5 年以上的膨胀土路堤的监测和现场钻孔取样结果表明，受大气温度和土内水汽迁移以及周围环境的影响，新修路堤填芯膨胀土的湿度在三年后会逐渐趋于某一相对稳定的平衡状态，达到路基平衡含水率，该含水率接近土的塑限，即稠度值在 1.00 附近。研究表明，若膨胀土在稠度大于 1.30 的状态下压实，较低的含水率和较大的干密度会使膨胀土从大气中吸水并产生较大的膨胀潜势，经过若干年后随着含水率逐渐增加，会使膨胀土路堤产生较大膨胀变形，从而对路面产生严重破坏。

5.2.3 当膨胀土填料的天然含水率大于干法重型击实的最佳含水率时，应采用现行《公路土工试验规程》(JTG 3430) 中湿法重型击实试验方法确定填料的最佳含水率和最大干密度；当膨胀土填料的天然含水率小于干法重型击实的最佳含水率时，应采用干法重型击实试验方法确定最佳含水率和最大干密度。

条文说明

当膨胀土填料的天然含水率较高时，会通过适当翻晒后再进行压实，填料含水率的变化是由湿变干的过程，且碾压时填料是外干内湿，大部分土颗粒内部蒙脱石矿物晶层间的水处于相对稳定的状态，工后不易因含水率的增大发生膨胀。《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020) 中湿法重型击实试验的试样制备，先将天然含水率状态下的土样逐步降水风干至不同含水率的土样再进行击实，试样也是从湿至干的过程，与现场施工工况一致。因此，当填料的天然含水率大于干法重型击实的最佳含水率时，采用湿法重型击实试验确定压实控制参数。

5.2.4 膨胀土承载比 EBR 应按本规范附录 A 规定的试验方法确定。当膨胀土用作下路堤填料时，EBR 不应小于 4.0%。

条文说明

对于一般路基填料而言，填料的强度是以加州承载比（CBR）进行控制。由于膨胀土直接被水浸泡会在试件表面产生一定厚度的泥浆层，加之膨胀土仅限于填筑于下路堤，且会采取封闭包盖等措施避免其被水浸泡，故常规加州承载比（CBR）试验方法在浸水方式、浸水时的上覆荷载和制件含水率等方面都不能真实反映膨胀土填料在填方路基中所处的实际工作状态。

为此，长沙理工大学根据膨胀土路堤中膨胀土所处的实际工况对传统的 CBR 试验条件进行了改进，提出了膨胀土承载比 EBR 试验方法，即试件饱水过程采用侧向浸水；根据路面自重荷载的作用特征，将浸水时的上覆荷载确定为 20kPa；土样制件含水率采用湿法重型击实的最佳含水率，以此来评价填料的强度。这种新的试验方法的有效性和合理性在广西、河南、云南等省区膨胀土填方路基的工程中均得到验证。

由于试验条件得到了改善，膨胀土承载比 EBR 试验得到的 EBR 值相对于 CBR 值提高了近 30%，见表 5-1。因此，相对于下路堤填料 CBR 的要求，即不小于 3%，相应的 EBR 不小于 3.9%，取为 4.0%。

表 5-1 CBR 与 EBR 试验结果对比

土样	CBR	EBR	提高系数
黏土质砂	25.7	33.3	29.6%
低液限粉土	38.3	49.2	28.5%
高液限黏土	16.7	20.0	19.8%

5.2.5 膨胀土填料胀缩总率 e_{ps} ，应按式（5.2.5）计算。

$$e_{ps} = e_p + c_{s1} \times (w - w_m) \quad (5.2.5)$$

式中： e_p ——有荷载膨胀率（%），按现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）有荷载膨胀率试验方法确定。试验时，制件含水率为重型击实法确定的最佳含水率，上覆压力取 50kPa； e_p 为负时，按负值计算；

c_{s1} ——收缩系数，按现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）收缩试验确定；

w ——填料的压实含水率（%）； $(w - w_m)$ 大于 8% 时，其取值为 8%； $(w - w_m)$ 小于零时，其取值为零；

w_m ——膨胀土路基含水率的下限值（%）；当路基中填料的收缩变形主要受大气降雨和蒸发影响时， $w_m = K_w \times w_p$ ， K_w 为工作条件系数，可按表 5.2.5 选用， w_p 为土的塑限；对于亚湿润和湿热区，采取包边等防水控湿措施的膨胀土路基， w_m 可取为膨胀土的塑限。

表 5.2.5 工作条件系数 K_w

气候干湿状态分区	干燥度 K_c	K_w
亚干旱区	1.50 ~ 3.49	0.70
亚湿润区	1.00 ~ 1.49	0.90
湿润区	< 1.00	1.00

注：干燥度 $K_c = \text{全年蒸发量} / \text{全年降雨量}$ ，计算蒸发量及降雨量时，均取 10 年平均值。

条文说明

根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) 的有关规定，当 $(w - w_m)$ 大于 8% 时，其值取为 8%；当 $(w - w_m)$ 小于零时，其取值为零。

5.2.6 膨胀土填料应根据胀缩总率按表 5.2.6-1 进行填料等级划分。湿润地区的填料可根据膨胀土承载比 EBR 试验中得到的膨胀量 ε_{EBR} 按表 5.2.6-2 划分填料等级。

表 5.2.6-1 膨胀土填料的等级划分

填料等级	I	II	III	IV
胀缩总率 e_{ps} (%)	$e_{\text{ps}} < 0.7$	$0.7 \leq e_{\text{ps}} < 2.5$	$2.5 \leq e_{\text{ps}} < 5.0$	$e_{\text{ps}} \geq 5.0$

表 5.2.6-2 湿润地区膨胀土填料的等级划分

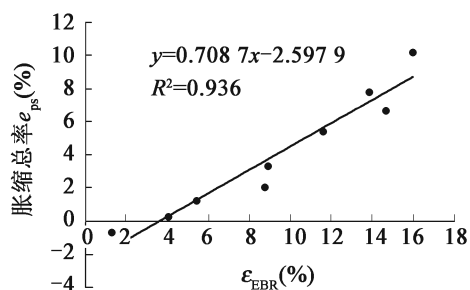
填料等级	I	II	III	IV
膨胀量 ε_{EBR} (%)	$\varepsilon_{\text{EBR}} < 2.1$	$2.1 \leq \varepsilon_{\text{EBR}} < 3.2$	$3.2 \leq \varepsilon_{\text{EBR}} < 4.8$	$\varepsilon_{\text{EBR}} \geq 4.8$

注：我国湿润区是指年均温度在 10℃ 左右，年降雨量在 800mm 左右，秦岭-淮河以南的地区。

条文说明

通过对广西、云南、海南等省区 9 个不同膨胀土土样进行膨胀土承载比 EBR 试验和胀缩总率试验，得出膨胀土胀缩总率与 ε_{EBR} 呈良好的线性关系，如图 5-1 所示。

根据回归公式 $e_{\text{ps}} = 0.7087 \times \varepsilon_{\text{EBR}} - 2.5979$ ，表 5.2.6-1 中 e_{ps} 界限值对应的 ε_{EBR} 分别为 4.7%、7.2% 和 10.7%，由于 ε_{EBR} 是在 20kPa 上覆荷载作用下获得，而 e_{ps} 是在 50kPa 上覆荷载作用下获得，通过对比分析，对应的 ε_{EBR} 需要折减 55%，才可得到 ε_{EBR} 的界限值分别为 2.1%、3.2% 和 4.8%。为了减少试验工作量，对于湿润区，采用 ε_{EBR} 进行填料分类。

图 5-1 胀缩总率与 ε_{EBR} 之间的关系曲线

5.2.7 膨胀土填料的使用范围及处治措施应根据填料等级按表 5.2.7 确定。

表 5.2.7 膨胀土填料的使用范围及处治措施

填料等级	使用范围及处治措施
I	可直接利用，用于路堤各个层位的填筑
II	可用作下路堤填料，但需要进行包边、加筋等物理处治；采用无机结合料处治后可用作下路堤的包边料、上路堤填料和路床填料
III	不可直接利用；采用无机结合料处治后可用作下路堤的包边料、上路堤填料和下路床填料
IV	不应用作路基填料

5.2.8 桥台台背、挡土墙墙背严禁采用膨胀土填筑。

5.3 膨胀土填方路基设计

5.3.1 利用素膨胀土填筑路堤时，填方路基结构应由底部隔水层、膨胀土填芯区、包边或加筋区、刚度补偿区四部分构成，如图 5.3.1 所示。

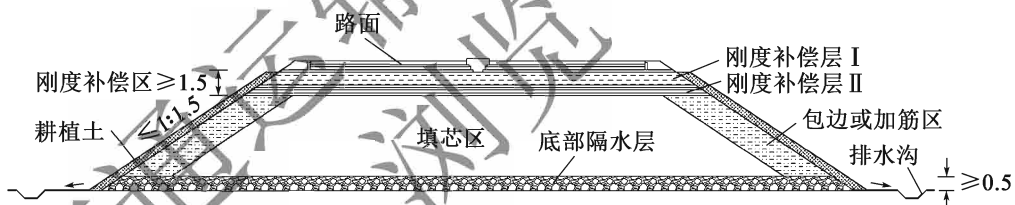


图 5.3.1 膨胀土填方路基结构示意图（尺寸单位：m）

条文说明

膨胀土填方路基结构设计的原则是确保膨胀土填方路基的“湿度稳定、刚度可调”。隔水层的功能是防止地下水上升对填芯区造成影响；包边或加筋区是减小大气干湿循环作用对填芯区填料湿度的影响，并起到控制水平膨胀变形的作用；刚度补偿层主要是为了提升路基整体刚度，使路基顶面的刚度即路基回弹模量达到路基设计或验收的要求，同时兼具防水保湿功能。

5.3.2 膨胀土半填半挖路基宜采用图 5.3.2 所示的结构形式，并应符合下列规定：

1 当原地面横坡大于 1:5 时, 应沿纵向开挖台阶, 台阶高度宜为 0.5~1.0m, 宽度宜为 2.0~2.5m, 台阶应形成 2%~4% 的反向横坡。

2 开挖台阶时, 在渗水处应设置纵向排水渗沟, 并沿纵向每 50.0m 应设横向排水渗沟和急流槽。渗沟内宜铺设软式透水管, 在渗沟的底面和靠路基一侧的侧壁应铺设复合土工膜。

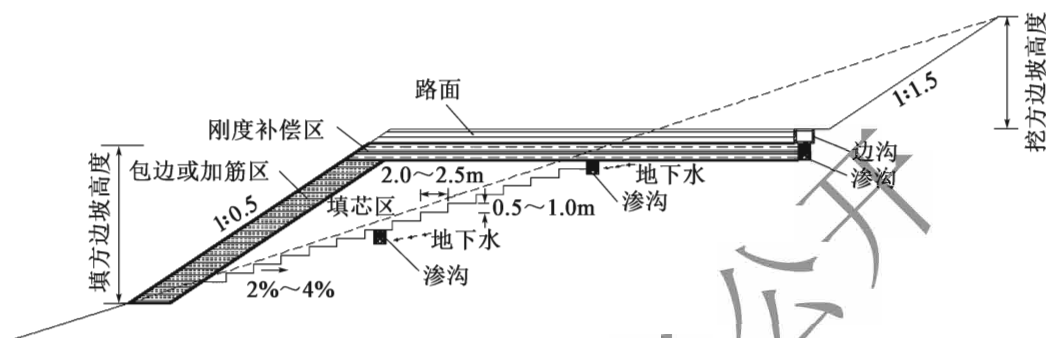


图 5.3.2 膨胀土半填半挖路基结构示意图

5.3.3 底部隔水层材料及其厚度应根据材料压实后潜在的毛细水上升高度和路基基底地质水文条件综合分析后确定, 并应符合下列规定:

1 对于地下水位较高、基底潮湿路段, 隔水层厚度应不小于 0.5m, 当底部隔水层采用砂砾土、碎石土等孔隙大、水稳性好的材料填筑时, 其顶面应铺设复合土工膜; 复合土工膜性能指标应符合现行《公路土工合成材料应用技术规范》(JTG/T D32) 的有关规定。缺乏砂砾土、碎石土时, 隔水层可采用低液限土掺拌无机结合料填筑, 无机结合料剂量宜不小于 3%。

2 对于地下水位不高、地表干燥路段, 隔水层可采用低液限土填筑, 填筑厚度不应小于 0.75m。

5.3.4 填芯区采用 II 级膨胀土填料填筑时, 填芯区高度不宜大于 8.0m; 采用 III 级膨胀土填料填筑时, 填芯区高度不宜大于 6.0m; 当填芯区高度大于上限值时需专门论证。填芯区的压实度不应小于 90%。填芯区边坡坡率不得大于 1:1.5。

条文说明

即使对膨胀土填方路基采取了包边、加筋等处理措施, 在大气干湿循环长期作用下, 填芯区不同部位膨胀土的湿度会发生不同程度的变化, 进而产生不均匀的路基变形。为了避免路基不均匀变形, 通过对广西、湖南、云南等多条高速公路膨胀土填筑路基实体工程的经验总结, 限定了膨胀土在填芯区的填筑高度。

5.3.5 包边区填料可采用非膨胀性填料、无机结合料处治的膨胀土填料。包边区宽度 L_a 应不小于大气显著影响层水平宽度 L_b 0.5m, 由式 (5.3.5) 确定, 且不应小

于 2.5m。

$$L_a \geq L_b + 0.5 = \frac{d_r}{\sin(\arccot m)} + 0.5 \quad (5.3.5)$$

式中： d_r ——大气显著影响层深度（m）；

m ——边坡坡率。

5.3.6 包边区采用非膨胀性填料填筑时，宜采用液限小于 50%、塑性指数大于 6 且不大于 26 的非膨胀土，承载比应符合现行《公路路基设计规范》（JTG D30）的规定。

5.3.7 包边区采用无机结合料处治膨胀土填筑时，处治后的膨胀土的胀缩总率应小于 0.7%，承载比应符合现行《公路路基设计规范》（JTG D30）的规定。

5.3.8 包边区采用土工格栅加筋膨胀土填筑时，其结构可按图 5.3.8 所示设计。加筋间距 h_g 宜为 0.50~0.75m，加筋长度 l_r 应不小于大气显著影响层水平宽度 0.5m。下层的土工格栅应反包至上层，与上层土工格栅重叠长度 l_{ap1} 不应小于 1.0m，并可用连接棒相互连接。每层格栅反包长度宜为重叠长度 l_{ap1} 与坡面格栅长度 l_{ap2} 之和。每层土工格栅的两端与中部应用 U 形钉进行锚固。U 形钉宜为 $\phi 6\text{mm}$ 光圆钢筋，长和宽宜为 0.1m。连接棒长度不宜小于 1m，宽度不宜小于 30mm。

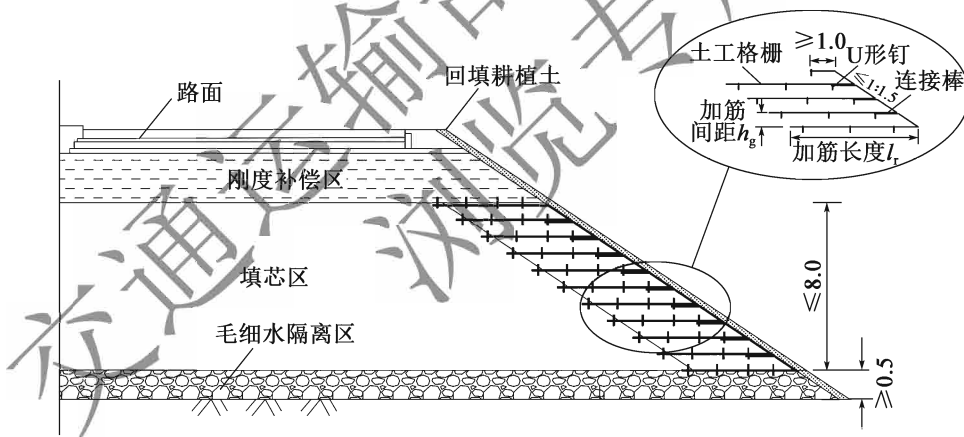


图 5.3.8 土工格栅加筋包边结构示意图（尺寸单位：m）

5.3.9 用作加筋的土工格栅宜采用单向塑料土工格栅。其极限抗拉强度 T_{ult} 不应小于 50kN/m，且断裂伸长率不应大于 10%。土工格栅严禁裸露暴晒，土工格栅加筋膨胀土施工结束后应及时覆土。

条文说明

由于土工格栅容易发生紫外线老化，故要求在土工格栅储藏、运输、施工和服役过程中避免紫外线老化。

5.3.10 刚度补偿层应选用水稳性好、压实成型后回弹模量较高的低液限黏土、砾石土、碎石土、碎石、无机结合料处治土等填料填筑。当选用透水性填料时，其底部应铺设复合土工膜。

条文说明

现场检测结果表明，膨胀土填料通过现场碾压后能满足压实控制的要求，但是路基顶面回弹模量较低，不一定能满足路面对路基刚度的要求。为此，需要进行路基刚度补偿设计。

目前刚度补偿层包括上路堤、下路床和上路床。设置刚度补偿层的目的，一方面是弥补膨胀土路堤刚度不足的缺陷，通过铺筑一定厚度压实性能好、压实后抗变形能力强的填料，使路基结构回弹模量及其长期稳定性达到路面设计要求；另一方面则是隔断路面的下渗水，确保膨胀土填芯区不产生吸湿膨胀。

5.3.11 刚度补偿层的设计应按下列步骤实施：

- 1 初步设计和施工图设计时，可根据膨胀土的胀缩等级、稠度及当地经验预估膨胀土填筑的填芯区顶面的回弹模量。
- 2 确定路床顶面当量回弹模量设计值。
- 3 根据填料来源、性质及供应情况，初拟刚度补偿层的层数及相应的厚度。
- 4 初拟各刚度补偿层顶面当量回弹模量值。
- 5 按本规范附录 B 确定各刚度补偿层填料的回弹模量，据此选择填料。当无合适填料时，应对本条第 3 款或第 4 款进行调整，或进行改良土的配合比设计。

条文说明

如果将加铺了刚度补偿层的路基视为双层弹性体模型，如图 5-2a) 所示，并设刚度补偿层的回弹模量为 E_1 ，厚度为 h ，待补偿层顶面当量回弹模量为 E_0 ，在刚性承载板的垂直荷载作用下，应用双层弹性理论算得其表面的垂直变形为 L 。另一方面，如图 5-2b) 所示，将加铺了刚度补偿层的路基视为弹性半空间模型，并设其顶面的当量回弹模量为 E_2 ，则在刚性承载板的垂直荷载作用下，应用弹性半空间理论亦可算得到其表面的垂直位移为 l 。通过变形等效原理，即令 $L=l$ ，则可以在刚度补偿层厚度已知的基础上计算得到刚度补偿层回弹模量 E_1 ，以此为依据选择刚度补偿层材料；或在已知刚度补偿层回弹模量 E_1 的基础上，确定刚度补偿层厚度 h 。下面以一个算例来对刚度补偿设计进行说明。

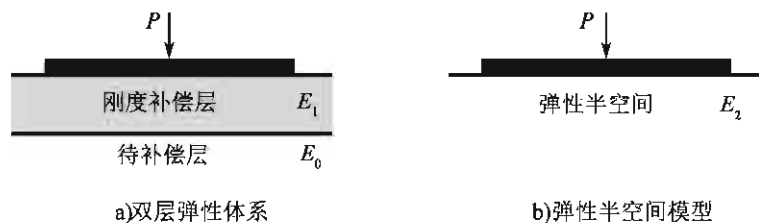


图 5-2 路基刚度补偿计算模型

某高速公路膨胀土路基填芯区根据《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)测得顶面当量回弹模量 E_0 为20MPa,其路床顶面当量回弹模量设计值 E_2 为80MPa。现场可供应填料为低液限黏土、粉土质砂和未筛分碎石。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的回弹模量试验,测得该3种材料的回弹模量 E_1 如表5-1所示。

表5-1 不同刚度补偿层材料的回弹模量 E_1 (MPa)

刚度补偿层材料	低液限黏土	粉土质砂	未筛分碎石
均值	60.3	80.8	202.4
变异系数	0.233	0.043	0.386

初拟刚度补偿层层数为3层,各刚度补偿层从下至上填筑厚度依次为0.7m、0.5m和0.3m,顶面回弹模量设计值依次为60MPa、70MPa和80MPa。按本规范附录B的方法查图B.2.4得到第一、二层刚度补偿层填料的回弹模量为80~90MPa和120~130MPa,而第三层刚度补偿层材料的回弹模量则需远大于220MPa。无论是从现场可供填料的角度还是从工程经济性的角度来说,初拟的刚度补偿方案都不太合适,需要对初拟的补偿方案作出调整。

第一次调整:先拟定各刚度补偿层填料类型,从下至上分别采用低液限黏土、粉土质砂和未筛分碎石。再将各刚度补偿层顶面回弹模量设计值调整为50MPa、60MPa和80MPa。由本规范附录B的方法分别查图B.2.4a)和图B.2.4b),得到第一、二层的补偿厚度分别为0.88m和0.15m。若余下0.47m都用未筛分碎石填,将势必不满足工程经济性的要求。为此需再次调整刚度补偿方案。

第二次调整:在第一层材料和厚度不变的基础上,先将第三层采用未筛分碎石的补偿层厚度定为0.1m,则第二层厚度变为0.52m。由本规范附录B的方法查图B.2.4b),发现0.52m的粉土质砂($E_1=80$ MPa)可将第二层刚度补偿层顶面的当量回弹模量提升至72MPa。若第二层刚度补偿层顶面当量回弹模量按70MPa计,由本规范附录B的方法查图B.2.4b),发现仅需0.07m的未筛分碎石填料就可使得路床顶面当量回弹模量满足设计值的要求,因此第三层刚度补偿层设计厚度定为0.1m是可行的。据此得到最终的刚度补偿区设计方案,见表5-2。

表5-2 刚度补偿区设计方案

膨胀土填芯区 顶面当量回弹模量 (MPa)	刚度补偿区	顶面当量回弹 模量设计值 (MPa)	刚度补偿材料	材料回弹模量 (MPa)	设计厚度 (m)	路床顶面当量 回弹模量设计值 (MPa)
20	第一层	50	低液限黏土	60.3	0.88	80
	第二层	70	粉土质砂	80.8	0.52	
	第三层	80	未筛分碎石	202.4	0.10	

5.3.12 排水沟底部及周边应采用复合土工膜进行防渗处理。

5.3.13 填方路基坡面应铺筑厚度不小于0.1m的耕植土，宜采用草灌结合进行植物防护，其中灌木的根系长度宜大于0.3m。

5.3.14 当填方边坡高度大于3.0m时，应设置截水型骨架护坡，其设置应与边坡支挡、地下排水措施、保湿防渗措施及平台排水沟等结构物相互配合，形成综合防排水系统。

5.4 膨胀土填方路基边坡稳定性分析

5.4.1 当膨胀土填方路基高度大于8.0m时，应进行边坡稳定性分析。

5.4.2 包边区采用非膨胀性填料、无机结合料处治的膨胀土填料填筑时，膨胀土填方路基边坡稳定性分析及包边区填料抗剪强度参数选取可按现行《公路路基设计规范》(JTG D30)的有关规定进行。填芯区膨胀土的抗剪强度指标，可通过塑限、路基压实干密度条件下直剪试验获取。

5.4.3 采用土工格栅加筋膨胀土填方路基边坡时，应根据工程经验初拟土工格栅的加筋间距 h_g 、加筋长度 l_r 、极限抗拉强度 T_{ult} ，逐层进行土工格栅抗拔稳定性验算和抗拉强度验算，并应符合下列规定：

- 1 整体稳定安全系数 F_{sb} 应不小于1.3。
- 2 土工格栅抗拔稳定安全系数应不小于2.0。
- 3 土工格栅所受的总拉拔力应小于容许抗拉强度。

5.4.4 土工格栅加筋膨胀土边坡稳定性分析计算图示如图5.4.4所示。土工格栅的抗拔稳定性可按下列步骤逐层进行验算：

- 1 土工格栅抗拔稳定安全系数可按式(5.4.4-1)计算。

$$F_{si} = \frac{T_{ei}}{T_{si} \cos \theta_i + T_{swi}} \quad (5.4.4-1)$$

式中： F_{si} ——第 i 层格栅的抗拔稳定系数；

T_{ei} ——第 i 层格栅锚固区的抗拉拔力(kN)；

T_{si} ——自由区因下滑引起的拉拔力(kN)；

θ_i ——土体下滑引起的拉力与水平方向的夹角(°)；

T_{swi} ——第 i 层加筋土单元上、下层格栅因膨胀产生的拉拔力(kN)。

- 2 格栅锚固区抗拉拔力 T_{ei} 可按式(5.4.4-2)计算。

$$T_{ei} = 2B_g (c_e + \sigma_{ei} \tan \varphi_e) l_e \quad (5.4.4-2)$$

式中： B_g ——单位宽度，土工格栅取1.0m；

- c_e ——筋土界面似黏聚力 (kPa);
 - φ_e ——筋土界面似摩擦角 ($^\circ$), 按现行《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50) 中拉拔试验确定;
 - σ_{ei} ——第 i 层加筋格栅锚固区的上覆荷载 (kPa);
 - l_e ——锚固区长度 (m), 按式 (5.4.4-3) 计算;
- $$l_e = l_r - l_f = l_r - md_r \quad (5.4.4-3)$$
- l_f ——自由区长度 (m), 即大气显著影响层水平宽度, 根据大气显著影响层深度 d_r 与边坡坡率 $1:m$ 计算;
 - l_r ——加筋长度 (m)。

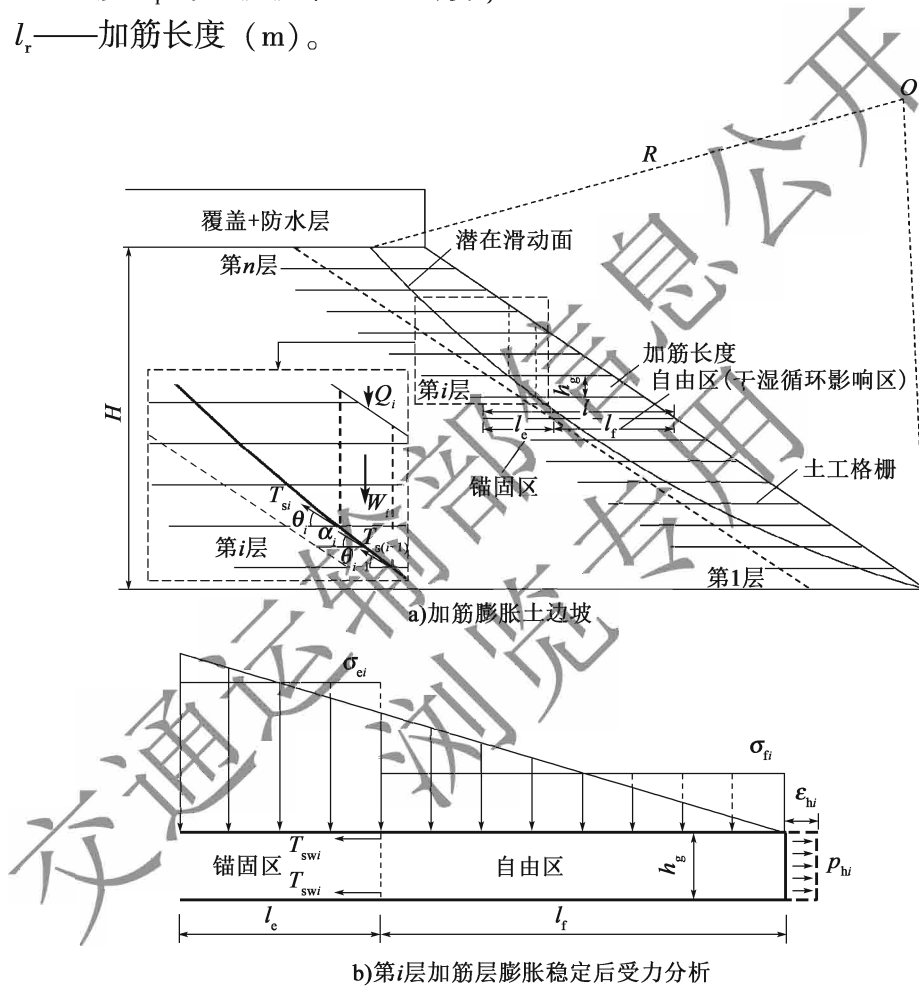


图 5.4.4 膨胀土加筋边坡稳定性验算示意图

3 自由区因边坡土体下滑引起的拉拔力 T_{si} 可按式 (5.4.4-4) ~ 式 (5.4.4-6) 计算。

$$T_{si} = \frac{T_s}{n_g} \quad (5.4.4-4)$$

$$T_s = (F_{SR} - F_{SU}) \frac{M_D}{D_c} \quad (5.4.4-5)$$

$$M_D = \sum (W_i + Q_i) R \sin \alpha_i \quad (5.4.4-6)$$

式中： F_{SR} ——要求达到的加筋边坡整体稳定安全系数，取 1.3；

F_{SU} ——未加筋边坡破坏时的稳定安全系数，按现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 计算，其中大气显著影响层内的膨胀土抗剪强度指标可由饱和条件下固结排水三轴压缩试验或固结慢剪直剪试验获得，试验中设定的围压或上覆荷载不应大于大气显著影响层内的最大上覆土压力；

D_c ——格栅总拉力作用力臂，取为滑弧半径 (m)；

W_i ——土条 i 的重力 (kN)；

Q_i ——作用于土条 i 竖直方向的外力 (kN)；

R ——滑弧半径 (m)；

α_i ——土条 i 底滑面与水平面的倾角 ($^\circ$)；

n_g ——加筋层数。

4 加筋土单元上、下层格栅因膨胀产生的拉拔力 T_{swi} 可按式 (5.4.4-7) 计算。

$$T_{swi} = T(\varepsilon_{ehi}) = \sigma_{ehi}(\varepsilon_{ehi}) h_g \quad (5.4.4-7)$$

式中： h_g ——加筋间距 (m)；

$T(\varepsilon_{ehi})$ ——第 i 层土工格栅产生应变所对应的拉力 (kN)，根据现行《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50) 中拉伸试验测定的格栅拉力与格栅应变的关系，以及膨胀土产生的侧向应变率 ε_{ehi} 确定；

$\sigma_{ehi}(\varepsilon_{ehi})$ ——第 i 层加筋土单元中自由区膨胀土体产生的侧向应变率 ε_{ehi} 所对应的侧向膨胀力 (kPa)，按式 (5.4.4-8) 计算；

$$\sigma_{ehi}(\varepsilon_{ehi}) = \sigma_{eh0} [1 - (\varepsilon_{ehi} / \varepsilon_{ehf})^n] \quad (5.4.4-8)$$

σ_{eh0} ——恒体积侧向膨胀力，由本规范附录 C 侧向膨胀试验测定；

ε_{ehf} ——膨胀土的最大侧向应变率，由本规范附录 C 侧向膨胀试验测定；

n ——拟合参数，由本规范附录 C 侧向膨胀试验测定。

5.4.5 应对土工格栅的抗拉强度进行验算，并应满足式 (5.4.5-1) 的要求。

$$T_{swi} + T_{si} \cos\theta_i < T_a \quad (5.4.5-1)$$

$$T_a = \frac{T_{ult}}{RF} \quad (5.4.5-2)$$

式中： T_a ——土工格栅的容许抗拉强度；

T_{ult} ——土工格栅的极限抗拉强度，根据现行《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50) 中的试验确定；

RF——总折减系数，包括施工损伤、老化、蠕变折减，按现行《公路土工合成材料应用技术规范》(JTG/T D32) 确定，宜在 2.0 ~ 5.0 之间。

条文说明

膨胀土挖方边坡柔性支护结构设计按图 5-3 的流程进行。同时按本规范 5.4.4 的方法对膨胀土挖方边坡加筋柔性支护结构逐层进行土工格栅抗拔稳定性分析。

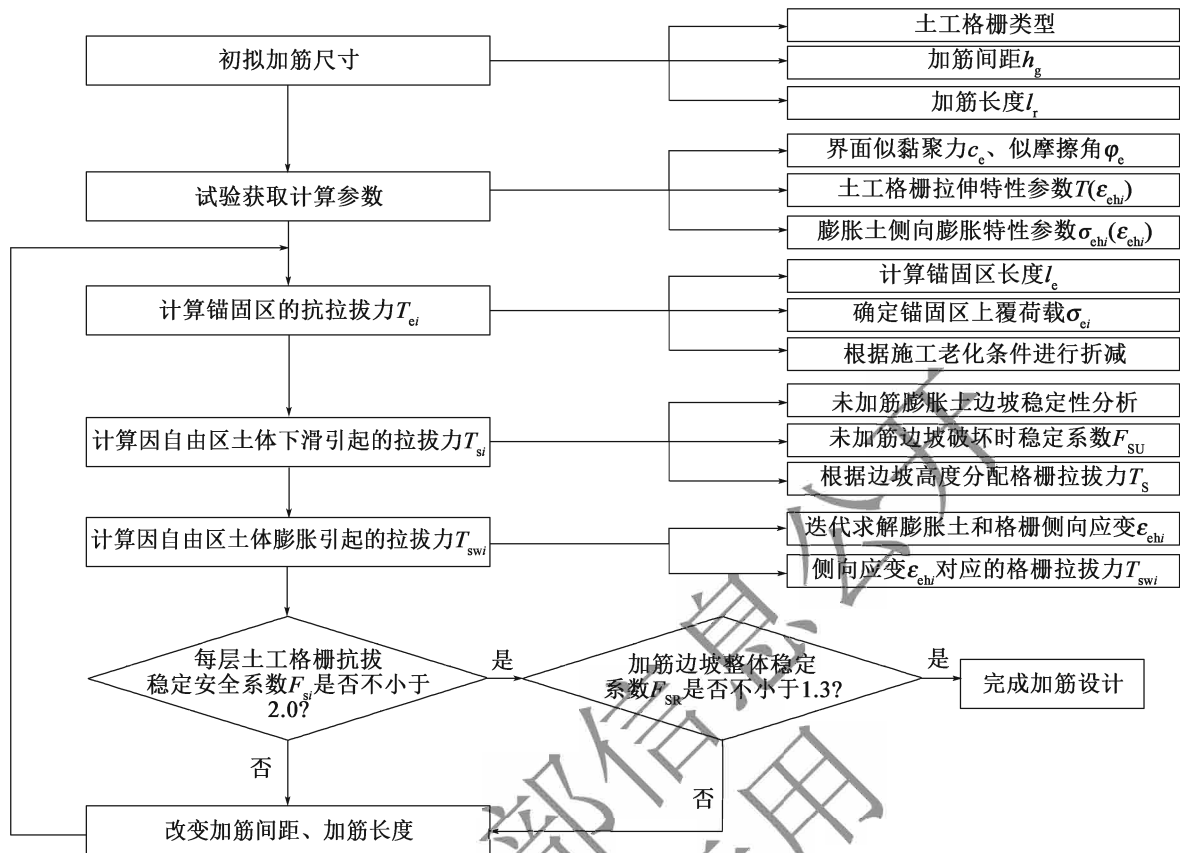


图 5-3 膨胀土挖方边坡加筋柔性支护结构设计流程

5.5 膨胀土填方路基施工

5.5.1 膨胀土填方路基施工前，应先铺筑试验段，试验段铺筑应符合下列规定：

- 1 试验段所用膨胀土填料应具有代表性，试验段长度不应小于 100m。
- 2 应将试验段测定的填料含水率、压实度与室内试验结果进行对比分析，按照本规范附录 A 确定路基压实后现场膨胀土承载比 EBR，并据此确定膨胀土的可用范围、碾压含水率、施工工艺和压实标准等。
- 3 采用无机结合料处治的膨胀土填料填筑路基时，应通过击实试验确定掺入量、压实标准和闷料时间等。
- 4 应根据试验段的现场试验结果，确定掺灰工艺、掺灰间隔时间及闷料时间、土块粉碎及翻拌的设备与工艺要求、土块粒径控制及碾压遍数等要求。

条文说明

膨胀土填料碾压施工工艺包括上料方式、运输、摊铺、松铺厚度、碾压遍数、机具组合、翻晒或洒水量等。

采用无机结合料处治膨胀土时，素土与灰土的最大干密度差异大，因此需要进行灰

土的击实试验，以确定灰土的压实标准。膨胀土掺灰后，土与掺配料在化学与物理化学作用下，随着时间的延长，灰土的干密度和强度随之变化。因此，必要时，可以在试验段开展压实度随龄期变化的试验，为以后抽检提供相应龄期的压实度检测标准。

5.5.2 施工前应核实膨胀土的分布、数量与膨胀等级，并在施工过程中及时掌握膨胀土类型随取土位置的变化。

5.5.3 膨胀土填方路基宜在旱季施工，且应分段施工，各道工序应紧密衔接，快速连续施工，完成一段封闭一段。施工时应设置临时防排水设施，并及时将路基边坡按设计要求修整，进行坡面防护。

5.5.4 位于斜坡路段的膨胀土填方路基应从最低处开始逐层填筑；当沟底有涵洞等结构物时，应在结构物两侧对称填筑。

条文说明

斜坡路段的膨胀土地基稳定性相对较低，当沟底设置有涵洞等结构物时，如在涵洞两侧的斜坡上先填筑路基，在填筑速度过快时可能导致膨胀土地基的整体滑移。

5.5.5 底部隔水层应分层摊铺压实。当采用碎、卵石土填筑且粒径 D_{60} 大于 0.1m 时，应在顶部设置砂砾保护层，再铺设复合土工膜。保护层厚度不应小于 0.3m，最大粒径不应超过 0.1m。

5.5.6 地面纵向地形变化较大，底部隔水层沿纵向无法填筑至同一水平高度时，应设置台阶进行搭接，每级台阶高度不宜大于 0.5m，台阶长度及搭接长度不宜小于 3.0m。

5.5.7 膨胀土填方路基填芯区施工应符合下列规定：

- 1 膨胀土松铺厚度不得大于 0.3m，膨胀土土块粒径不得大于 0.1m。
- 2 宜先采用光轮振动压路机静压和弱振，再采用凸块式振动压路机强振，最后采用光轮压路机静压。每层的压实过程中应防止出现“橡皮土”现象，压实后应形成 3%~4% 横坡。
- 3 每层填土碾压后，宜在 3h 内完成质量检测。当日施工结束时应完成填土的压实。
- 4 松铺层遇雨时，应铲除松铺料，换新料后重新进行摊铺和碾压。压实层遇雨时，若无积水，适当晾晒后可进行下一层填筑施工；若发现积水，应将积水区域的膨胀土层铲除，换新料重新进行摊铺和碾压。
- 5 不能连续施工时，压实层表面应采取保湿防渗措施。

5.5.8 包边区施工应满足下列要求：

1 包边区应与填芯区分层同步施工。宜先摊铺包边区填料，后摊铺填芯区膨胀土。摊铺前应准确测放填方路基边线及膨胀土填料与包边土的分界线。必要时人工整理交界处，避免混杂。

2 包边土和膨胀土碾压重叠范围不得小于 0.5m，结合处要增加碾压遍数 1 遍以上。

3 碾压应从两边往中间进行，超高弯道的碾压应自低处向高处进行。

5.5.9 加筋区的土工格栅加筋反包施工应满足下列要求：

1 应根据设计的土工格栅加筋长度和反包长度进行剪裁。

2 每层铺设前应先进行测量放线，标出边坡线和土工格栅边线。土工格栅主受力方向应沿路基横向布设，采用 U 形钉将其固定于土层之上。相邻土工格栅纵向搭接宽度不应小于 0.1m，搭接处应用 U 形钉固定；张拉铺设的土工格栅应表面平整、无松软隆起。

3 土工格栅铺设后应及时摊铺填料，土工格栅铺设和摊铺填料间隔不应超过 2h。填料摊铺的水平宽度应不大于土工格栅加筋间距。装载车应采用倒车方式将填料卸在土工格栅上，推平铺满后，方可碾压。填料块径不得超过 0.1m。填料的摊铺应避免对排水功能层的污染，压实应沿纵向由外向内推进，加筋体外侧坡面附近 1.0m 范围应采用人工或小型压实设备进行压实。施工机械设备不得直接在土工格栅上碾压。

4 填料压实后，应按加筋边坡设计坡率进行压实层的边部修整。将下层土工格栅沿修好的边坡向上反包，用连接棒与上层土工格栅相连，并对连接后的上层土工格栅用人工或张拉装置进行水平张拉，拉紧后应用 U 形钉锚固。

5 应按照本条第 3 款和第 4 款继续完成后续施工直至加筋边坡坡顶的设计高程。

5.5.10 在土工格栅反包铺设完 24h 内应对路基边坡进行耕植土覆盖，避免坡面土工格栅长时间暴晒。

5.5.11 刚度补偿区施工时，宜在膨胀土填芯区顶面、各刚度补偿层顶面进行弯沉或承载板试验，测试回弹模量，根据本规范第 5.3.11 条的方法对其上层刚度补偿层的设计进行校核和修正。

5.5.12 膨胀土填方路基施工质量与检验应符合下列规定：

1 膨胀土填方路基每层应表面平整，无松软起皮，无开裂现象，无明显碾压轮迹。路拱应满足设计要求，排水良好。

2 填芯区膨胀土和加筋区膨胀土的压实度均不得低于 90%。包边区的非膨胀性包边土、无机结合料处治膨胀土以及上路堤和路床的压实度均应满足现行《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610) 对相应填筑部位压实度的要求。

3 膨胀土压实度应采用灌砂法或环刀法进行检测，每 200m、每压实层的测点数不应少于 4 个。填芯区和包边区填料不同时，填芯区和路基两侧的包边区压实度的测点数均应不少于 2 个。

4 包边土、上路堤和路床施工质量与检验应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的有关规定。

5 土工格栅及其施工应按照现行《公路土工合成材料应用技术规范》(JTG/T D32) 的有关规定进行质量管理及检查。

5.6 无机结合料处治膨胀土的施工

5.6.1 无机结合料处治膨胀土填筑路基的施工应避开雨季。施工现场应设置完善的排水设施，避免地基和已填路基被水浸泡。

5.6.2 水泥强度等级宜为 32.5 或 42.5，初凝时间应大于 3h，终凝时间应大于 6h 且小于 10h。石灰技术要求不应低于现行《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20) 中规定的 II 级技术要求。

5.6.3 当膨胀土含水率大于最佳含水率 2 个百分点以上时，应采用两次掺灰工艺。第一次掺入量宜为设计总掺入量的 40%。石灰改良时应在翻拌均匀后闷料，闷料时间一般不应超过 48h，闷料期间宜 24h 翻拌一次；水泥改良时应拌和均匀后尽快填筑，避免超出水泥的初凝时间。

条文说明

第一次掺灰的目的是使膨胀土“砂化”，降低塑限指数。

5.6.4 第二次掺灰的翻拌深度应达到该层底部。拌和后填料的最大粒径应小于 37.5mm，含水率应均匀。各施工层间应无素土夹层。

5.6.5 第二次掺灰拌和均匀后，应及时测试含水率。含水率大于改良土的最佳含水率 3 个百分点以上时，应采取翻拌晾晒等措施控制含水率。

5.6.6 无机结合料处治膨胀土的碾压应采用合适的压实机具和压实组合工艺，并应连续碾压，当日拌和的灰土应在当日碾压完成。

5.6.7 施工期及养生期的最低气温应在 5℃ 以上，养生时间宜不少于 7d。

5.6.8 无机结合料处治膨胀土的施工质量控制与检测应符合下列规定：

1 每批材料进场时,水泥和石灰均应抽取2个样品,对水泥进行强度等级和初、终凝时间检测。对石灰进行含水率和有效钙、镁含量及残渣含量检测。

2 储存期间,石灰在每天使用前均应抽取2个样品检测其含水率;每半月抽取2个样品进行1次有效钙、镁含量及残渣含量检测。水泥应在料源和强度等级变化时对强度等级和初、终凝时间进行再次检测。

3 进入施工现场的无机结合料应及时使用,防止雨淋;已备掺灰土宜一次用完,未用完或正在备料的掺灰土应及时覆盖。

4 应严格控制拌和过程中的施工质量,确保拌和料的均匀性。掺灰量检测频率每100m宜不少于6点(不足100m取6点),实测掺灰量相对于设计掺灰量的相对偏差不应大于 $\pm 10\%$ 。

5 压实度应按每200m每压实层不少于2处的频次抽检,抽检结果应满足无机结合料处治膨胀土的压实度质量要求。

交通运输部信息公示
浏览专用

6 膨胀土挖方路基

6.1 一般规定

6.1.1 膨胀土挖方路基设计与施工前，应按本规范的要求进行工程地质勘察，对当地地质、地貌、水文、气象、气候条件及生态与环境保护的要求进行调查。

6.1.2 膨胀土挖方边坡稳定性评价宜采取定性定量相结合的原则，先定性判断边坡破坏形式，再进行边坡稳定性计算，边坡稳定安全系数应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30)的有关规定。

6.1.3 挖方路基防排水设计应遵循总体规划、合理布局、节约土地、环境保护的原则，考虑地表水和地下水的影响，做到防、排、截、疏相结合，与坡面防护、地基处理以及其他处治措施相互协调，构建完善的边坡防排水系统。

6.2 边坡坡率设计及稳定性验算

6.2.1 膨胀土挖方边坡坡率应综合考虑膨胀土的性质、结构面和裂隙位置的关系、气候特点、水文地质条件，以及处治方案等因素确定。

6.2.2 膨胀土挖方边坡断面应遵循“宽平台、缓坡率”的原则，其边坡坡率、平台宽度及碎落台宽度可按表 6.2.2 确定。

表 6.2.2 膨胀土挖方边坡坡率、平台宽度和碎落台宽度

膨胀土类别	边坡高度 H (m)	边坡坡率	平台宽度 (m)	碎落台宽度 (m)
弱膨胀土	$H \leq 6$	1 : 1.5	—	1.0
	$6 < H \leq 18$	1 : 1.75	2.0	1.5 ~ 2.0
	$H > 18$	1 : 2.0		
中膨胀土	$H \leq 6$	1 : 1.75	—	1.0 ~ 2.0
	$6 < H \leq 18$	1 : 2.0	2.0	2.0
	$H > 18$	1 : 2.5		

续表 6.2.2

膨胀土类别	边坡高度 H (m)	边坡坡率	平台宽度 (m)	碎落台宽度 (m)
强膨胀土	$H \leq 6$	1:2.0	—	2.0
	$6 < H \leq 18$	1:2.25	2.0~3.0	2.0~3.0
	$H > 18$	1:2.5		

条文说明

广西、云南、河南等主要膨胀土分布区的边坡调查表明,减小膨胀土挖方边坡坡率,会增大膨胀土边坡裸露面以及降雨汇水和入渗面积,在大气干湿循环影响下,即使边坡放缓至1:3甚至1:5同样会发生牵引式滑坍。因此减小边坡坡率不是保证膨胀土挖方边坡稳定的唯一措施,边坡坡率的设计需与边坡的防护与加固措施相结合。

6.2.3 膨胀土挖方边坡稳定性分析应根据边坡工程地质和水文条件或已经出现的变形破坏迹象,定性判断边坡破坏形式和边坡稳定性状态。

条文说明

膨胀土挖方边坡破坏主要有三种形式:

一是受风化节理状胀缩结构面控制的浅层滑坍。该类破坏主要是由于大气干湿循环形成胀缩结构面,雨水入渗后边坡浅层土体湿胀软化,抗剪强度降低,另一方面土体膨胀增加坡体尤其是坡脚处的剪应力,由此产生从坡脚开始、逐渐向上牵引的多次滑坍。其典型破坏形式如图 6-1 所示。

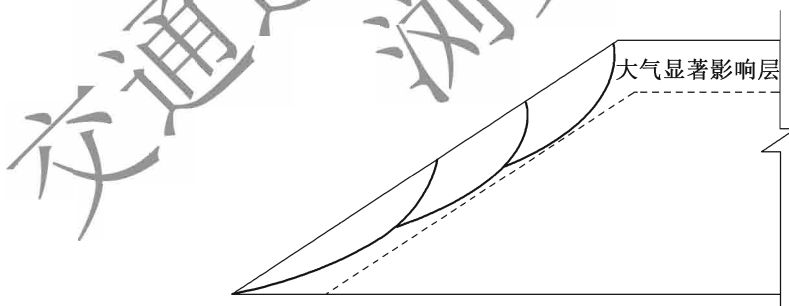


图 6-1 无软弱结构面的膨胀土挖方边坡浅层滑坍

二是受上层滞水界面和层理状结构面联合控制的浅层滑坡。该类破坏主要是由于降雨入渗在节理状胀缩结构面底部和层理状胀缩结构面部位聚集,形成上层局部滞水,增加了土体中的孔隙水压力,降低了土体的有效应力;干湿循环导致不同胀缩等级土层间变形的差异性,形成了新生胀缩活动带;新生胀缩活动导致下部层理状结构面贯通,形成下层胀缩活动带。该类破坏具有浅层性、顺层性、牵引性和逐次发展的特征。其典型破坏形式如图 6-2 所示。

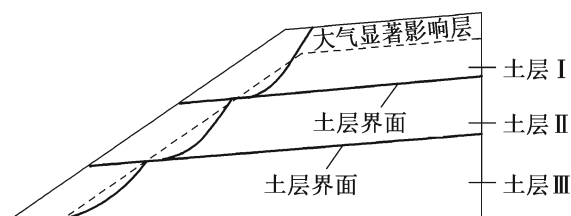


图 6-2 含土层界面的膨胀土挖方边坡浅层滑坡

三是受一般层理状结构面控制的中深层滑坡。该类破坏主要是由于土岩界面上下层渗透系数差别较大，在该结构面上，地下水滞留，导致界面处湿胀软化形成软弱面；深层滑动主要由软弱结构面或软弱带控制，在地下滞水作用下，土体软化导致大规模的滑坡破坏；当软弱结构面顺坡时，膨胀土挖方边坡易沿该结构面发生蠕滑，引起滞后时间长达数年或十几年的深层滑坡破坏。其典型破坏形式如图 6-3 所示。

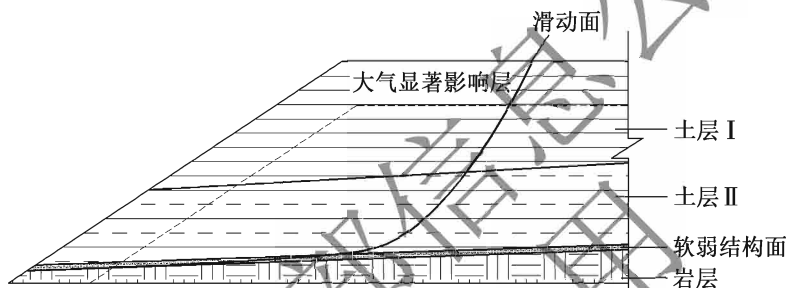


图 6-3 受软弱夹层控制的膨胀土挖方边坡中深层滑坡

6.2.4 挖方边坡无软弱结构面时，宜采用简化 Bishop 方法进行边坡稳定性分析，并应符合下列规定：

- 1 边坡稳定计算图示如图 6.2.4 所示，边坡稳定系数宜按式 (6.2.4-1) 计算。

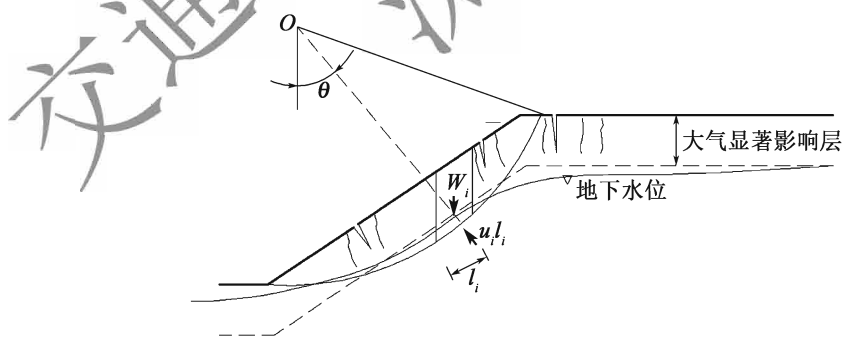


图 6.2.4 无软弱结构面膨胀土挖方边坡稳定性计算图示

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n [(W_i - u_i l_i) \tan \varphi'_i + c'_i l_i \cos \theta_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \frac{1}{m_{\theta_i}} \quad (6.2.4-1)$$

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \sin \theta_i \quad (6.2.4-2)$$

式中： F_S ——稳定系数；

W_i ——第 i 条块的重力 (kN)，浸润线以上取天然重度，浸润线以下取饱和重度；

θ_i ——第 i 条块的重力线与通过此条块底面中点半径之间的夹角 ($^\circ$)；

l_i ——第 i 条块的滑面长度 (m)；

c'_i 、 φ'_i ——第 i 条块滑面有效黏聚力 (kPa) 和有效内摩擦角 ($^\circ$)；

u_i ——第 i 条块底面单位宽度的孔隙水压力 (kN/m)，土条具有上下贯通的裂缝时，大气显著影响层深度内孔隙水压力等于水的重度乘以土条深度；土条底部位于大气显著影响区以外时，孔隙水压力由地下水位确定。

2 对于位于大气显著影响层内的滑面， c'_i 、 φ'_i 应由饱和条件下固结排水三轴压缩试验或固结慢剪直剪试验获得，试验中设定的围压或上覆荷载不宜大于大气显著影响层内的最大上覆土压力，可取重塑土样按原状土的湿密状态制件获得。

3 当滑面位于大气干湿循环显著影响区以下，且位于地下水位以下时， c'_i 、 φ'_i 宜采用有效抗剪强度指标；位于地下水位以上时，宜采用天然含水率状态下抗剪强度指标。

条文说明

坡脚是膨胀土边坡应力最为集中的区域，通常边坡失稳最先从坡脚产生，因此假设滑面通过坡脚。对于无软弱结构面的边坡，其失稳主要是由于大气干湿循环所致。因此对该类边坡进行边坡稳定性分析时，确定大气显著影响层深度并据此对边坡进行强度分区至关重要。当滑面位于大气显著影响区内时，滑面上的土体所受上覆荷载较小，在试验中应力状态的设定需与此相适应。

6.2.5 挖方边坡存在软弱结构面或潜在滑面为折线时，宜采用不平衡推力法进行边坡稳定性分析，并应符合下列规定：

1 边坡稳定计算图示如图 6.2.5 所示，边坡稳定系数宜按式 (6.2.5-1) 计算。

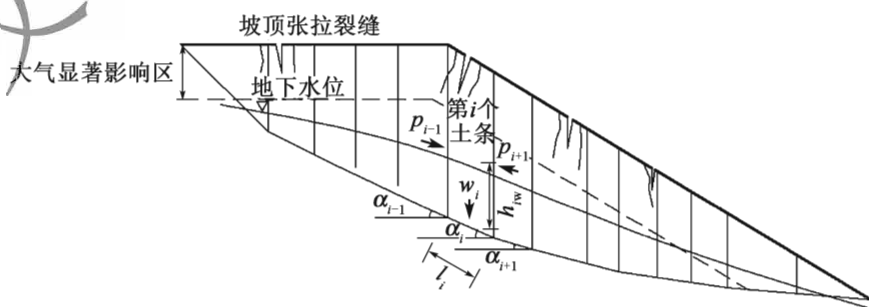


图 6.2.5 不平衡推力法计算图示

$$F_S = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \left[(W_i \cos \alpha_i - N_{wi}) \tan \varphi'_i + c'_i l_i \right] \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right\} + R_i}{\sum_{i=1}^{n-1} (W_i \sin \alpha_i) \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j + T_i} \quad (6.2.5-1)$$

式中： R_i ——第 i 个土条的抗滑力 (kN)，按式 (6.2.5-2) 计算；

$$R_i = (W_i \cos \alpha_i - N_{wi}) \tan \varphi'_i + c'_i l_i \quad (6.2.5-2)$$

T_i ——第 i 个土条的下滑力 (kN)，按式 (6.2.5-3) 计算；

$$T_i = W_i \sin \alpha_i \quad (6.2.5-3)$$

N_{wi} ——第 i 个土条底面受到的孔隙水压力 (kN)，按式 (6.2.5-4) 计算；

$$N_{wi} = \gamma_w h_{iw} l_i \quad (6.2.5-4)$$

c'_i 、 φ'_i ——滑面有效黏聚力 (kPa) 和有效内摩擦角 ($^\circ$)，当滑动面位于土层时采用有效应力抗剪强度指标；当滑动面为软弱夹层及软弱结构面时采用总应力残余抗剪强度指标；

ψ_j ——第 i 块段的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 块段时的传递系数 ($j=i$)，按式 (6.2.5-5) 计算。

$$\psi_j = \cos (\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin (\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \varphi_{i+1} \quad (6.2.5-5)$$

2 宜通过原位直剪试验或室内大型直剪试验，获得软弱夹层及软弱结构面的残余强度，通过回归得到 c 、 φ 值。

条文说明

1 对于折线滑面滑坡稳定性计算，目前国内公认的精度较高的是摩根斯坦法，但我国公路、铁路、建筑部门目前广泛采用的是不平衡推力法，已经积累了大量的经验，鉴于此，本规范推荐采用不平衡推力法。

6.2.6 对重要工程的复杂边坡，宜结合数值方法进行边坡稳定性分析。

6.3 路床设计

6.3.1 对零填和挖方路段，其路床范围内的膨胀土应进行超挖、换填处理，换填深度应视膨胀土的强弱而定，宜为路床底面以下 0.1~0.7m。换填处理后，宜按本规范式 (4.2.1-1) 和式 (4.2.1-3) 进行路基胀缩变形量计算，变形量不应大于 15mm。

6.3.2 应按本规范第 5.3.11 条的规定进行刚度补偿设计。换填砂砾、碎石等透水性填料时，换填层底部应设置复合土工膜作为隔水防渗层。

6.4 防水排水设计

6.4.1 膨胀土挖方路基地表排水可采用边沟、平台排水沟、坡顶截水沟等排水设施，如图 6.4.1 所示。其断面形式及尺寸应符合现行《公路排水设计规范》(JTG/T D33) 的有关规定，底部应设置复合土工膜等防渗隔水层。挖方边坡坡顶和截水沟之间应先清除 0.3m 厚的表层土，铺设复合土工膜，再回填耕植土。

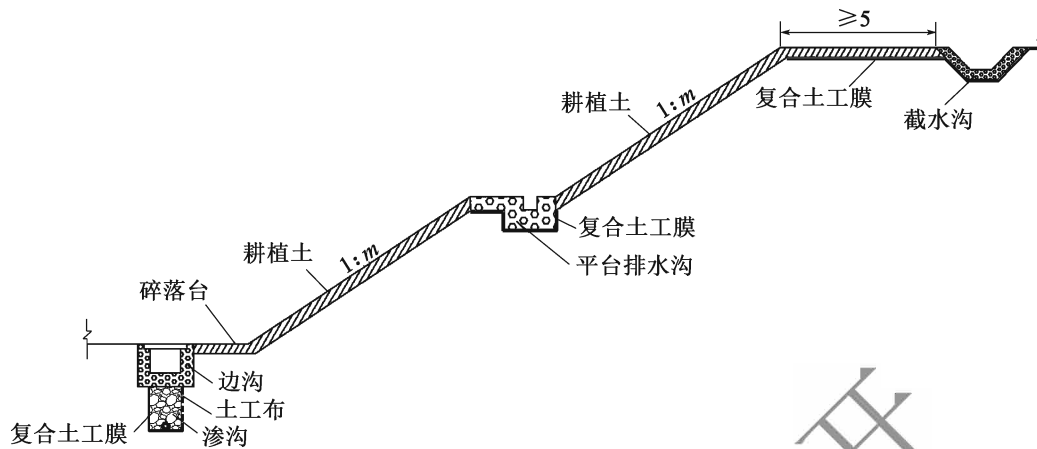


图 6.4.1 挖方路基地表排水系统示意图 (尺寸单位: m)

6.4.2 应采取拦截、引排、疏干、降低或隔离等措施,降低地下水对挖方路基稳定性的影响。

6.4.3 当地下水位较高、存在上层滞水或出现渗水时,在挖方路基的边沟下、路基填挖交界处、坡顶截水沟下宜设置排水渗沟。渗沟设计应符合下列规定:

- 1 渗沟的深度应根据潜在地下水位高度或上层滞水水位确定。
- 2 渗沟应采用透水性粒料填充,沟底可埋设软式透水管或复合防排水材料,沟底以及渗沟靠路基一侧均应设置复合土工膜,如图 6.4.3 所示。软式透水管的管径或复合防排水材料的边长宜为 100 ~ 200mm。

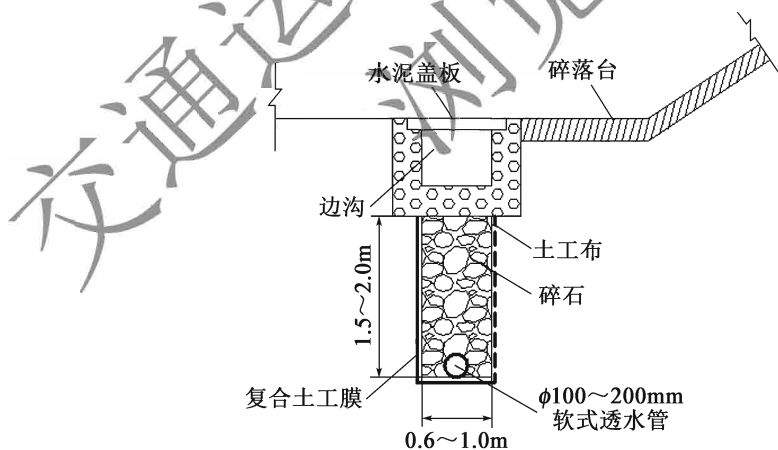


图 6.4.3 挖方路基边沟下渗沟断面形式

6.4.4 对于赋存地下水的坡面,当坡体土质潮湿且地下水会影响挖方边坡稳定时,可设置边坡渗沟以排除和疏干上层滞水。边坡渗沟设计应符合下列规定:

- 1 边坡渗沟应垂直嵌入边坡坡体,可按条带式、分岔形或拱形布置。
- 2 对于较小范围的局部湿土或地下水出露处,宜采用条带式布置;对于较大范围

的局部湿土，宜采用分岔形布置；当边坡普遍潮湿时，宜采用拱形和条带式相结合的布置形式。

3 渗沟断面宜为矩形，间距宜为 6~10m，宽度宜为 1.2~1.5m，深度应不小于大气显著影响层深度以下 0.5m。

4 渗沟基底应做阶梯式，顶面横坡坡度宜为 2%~4%，宜采用 MU20 浆砌片石进行防渗铺砌，最下一个台阶长度宜适当增大，其断面形式如图 6.4.4 所示。

5 渗沟内应回填透水性粒料，回填料外周应设置反滤层。

6 渗沟顶部可采用单层干砌片石覆盖，顶面大致与边坡坡面齐平。

7 下部出水口应采用干砌片石垛支撑，将渗沟中集引的土中水和地下水排入挖方边沟内。

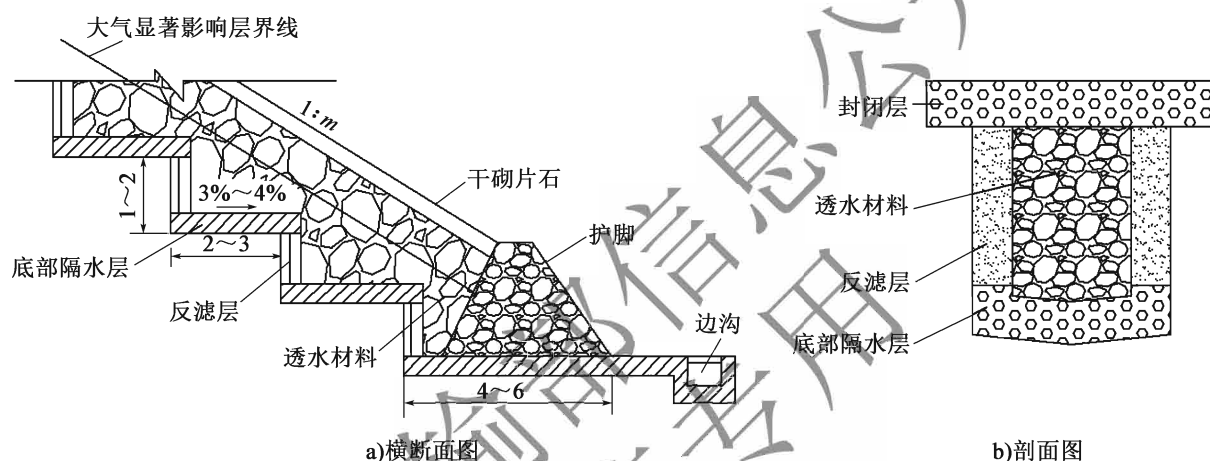


图 6.4.4 边坡渗沟结构示意图 (尺寸单位: m)

6.4.5 对于膨胀土边坡有集中地下水出露的部位，可在渗水出露处设置仰斜式排水孔。仰斜式排水孔设计应符合下列规定：

- 1 应根据地下水分布情况和地质条件确定排水孔的位置和数量，可成群分布。
- 2 排水孔的钻孔直径宜为 75~150mm，其孔内透水管可选用软式透水管或带孔且外覆土工布的 PVC (聚氯乙烯)、PE (聚乙烯)、PP (聚丙烯) 塑料管，如图 6.4.5 所示。

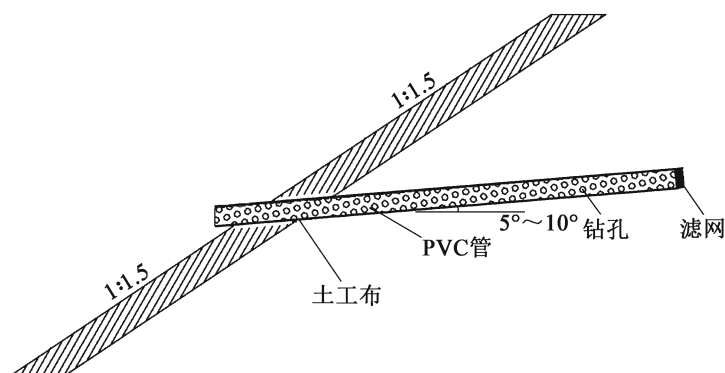


图 6.4.5 仰斜式排水孔结构示意图

- 3 排水孔应伸至地下水富集部位或潜在滑动面，仰坡宜为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。
- 4 排水孔的水宜通过坡面骨架排水沟引入边沟或平台截水沟，防止冲刷坡面。

6.4.6 当渗沟较长时，应根据水文地质条件设置检查井，设置间距不宜大于30m，检查井直径不宜小于1.0m。

6.5 挖方路基施工

6.5.1 挖方路基的施工宜在旱季进行。边坡开挖前，应先设置截水沟，沟底应铺设复合土工膜。施工中应采取有效的临时防排水措施。

6.5.2 挖方路基应连续施工，并及时封闭开挖坡面和路床，减少大气干湿循环对开挖面的影响。

6.5.3 路基的开挖应符合下列规定：

- 1 开挖边坡时，不得一次性挖到设计线，应预留0.3~0.5m保护层，待挖方开挖到预定高程后，再进行修坡，并立即进行边坡防护或加固。

- 2 当挖到距路床顶面以上0.3m时，应停止向下开挖，并应做好临时排水沟。待两边边坡开挖完成后再对路床进行开挖。

6.5.4 渗沟断面宜采用人工配合机械开挖，机械开挖至沟底时宜预留0.1~0.2m采用人工开挖。渗沟填充材料的含泥量不应大于5%。

6.5.5 仰斜式排水孔成孔时应校正孔轴线的偏差。

7 膨胀土边坡防护与加固

7.1 一般规定

7.1.1 膨胀土边坡防护与加固设计前，应按本规范的有关规定进行工程地质勘察，合理确定岩土体的物理力学参数，考虑大气干湿循环对边坡浅层土体强度的作用，以及地下水对边坡稳定性的影响，分析其稳定性以及可能出现的破坏形式。

7.1.2 膨胀土边坡的防护与加固应保证边坡稳定，并与周围环境景观相协调。

7.1.3 膨胀土边坡防护与加固的施工宜在旱季进行。

7.1.4 多雨地区的膨胀土边坡防护与加固应加强防渗处理，采取坡面防护与坡面截排水的综合措施。

7.2 边坡防护与加固措施选择

7.2.1 膨胀土边坡的防护可采用植物防护、边坡渗沟 + 骨架植草等形式，加固可采取柔性支护、重力式挡土墙、桩板式挡土墙、支撑渗沟、锚杆框架梁、树根桩、抗滑桩等措施。

7.2.2 膨胀土边坡的防护与加固根据膨胀土的膨胀潜势、边坡高度、水文和大气显著影响层深度等因素，可按表 7.2.2 选择相应的措施。

表 7.2.2 膨胀土边坡防护与加固措施

防护与加固措施	适用条件
植物防护	①坡高 $\leq 6\text{m}$ ，无地表水汇集，无地下水活动的弱膨胀土挖方边坡可单独使用； ②坡高 $> 6\text{m}$ ，存在汇水面，有地下水活动的中、强膨胀土挖方边坡应配合工程防护或加固措施联合使用； ③坡高 6m 以下的路堤边坡
边坡渗沟 + 骨架植草	①坡高为 $6 \sim 15\text{m}$ ，汇水面积小，偶有地下水出露的弱膨胀土挖方边坡； ②骨架植草可单独用于 6m 以上的非膨胀土包边的膨胀土路堤边坡

续表 7.2.2

防护与加固措施	适用条件
柔性支护	3m≤坡高≤20m的膨胀土路堤边坡和膨胀土挖方边坡
挡土墙	重力式挡土墙：坡高≤6m的膨胀土路堤边坡和无地下水活动的弱、中膨胀土挖方边坡； 桩板式挡土墙：坡高≤6m的无地下水活动的强膨胀土挖方边坡
支撑渗沟	坡高≥6m且有地下水出露的膨胀土挖方边坡
树根桩	无地下水活动、潜在滑动面为浅层的膨胀土挖方边坡
锚杆框架梁	新开挖的膨胀土挖方边坡
抗滑桩	会发生深层滑动破坏的膨胀土挖方边坡

条文说明

柔性支护、树根桩是交通部西部交通建设重大科技项目“膨胀土地区公路建设成套技术”所研发的膨胀土挖方边坡加固技术。树根桩已在广西多条高速公路中得到应用，柔性支护已在广西、云南、河南、湖北、北京、湖南、海南等主要膨胀土分布区内20余条高速公路的膨胀土挖方边坡治理中得到成功应用。

7.3 植物防护

7.3.1 边坡防护应使用本地乡土植物和经长期引种栽培已本地化的植物，所采用的植物不应当地生态环境造成影响。宜构建种类多样、层次丰富的复合型植物群落。

条文说明

尽可能多地选用当地原生植被、有大量分布的乡土植物或在当地有10年以上的引种栽培历史，且已被证明不具强侵入性的外来物种。而且同一层次植物建议选用两种以上植物品种，且不同种类植物的生活习性和生态习性能互相补充。如草本植物均采用浅根性、匍匐型的品种，以免与灌木产生竞争。

7.3.2 边坡植物防护工程应根据植物形态和根系特性进行植种组合设计，应遵循先期绿化与后期稳定、浅根系与深根系相结合以及草本植物、灌木相结合的原则，实现绿化坡面、固土护坡、长期稳定不退化和防止坡体水分急剧变化的目标。

条文说明

根据植物根系长度、直径、面积、体积、根尖细度等根系形态和构造进行合理组合设计，可以使得木本（灌木）与草本不断发展的根系在土壤中穿插交织、牢固团聚土块、植被生长茂盛，组合植物相容相生、相辅相成、长短结合。

7.3.3 乡土植物种类的筛选应遵循“出现频度高、耐贫瘠、耐干旱、酸碱度适应范围广、根系发达、固土护坡效果好”的原则，通过实地调查遴选出适宜膨胀土边坡防护的乡土植物。

7.3.4 植物防护播种前，宜通过回填耕植土或客土等措施，改善坡面植物生长条件，并增施有机肥、复合肥以提高土壤的肥力。

条文说明

膨胀土对植物生长不利，主要体现在以下几个方面：

(1) 膨胀土土质肥力很低，有机质含量一般仅为0.1%~0.5%，严重缺氮，全氮含量较一般种植土低一个数量级，只有0.03%左右，有效磷含量较低。

(2) 膨胀土土质致密，土壤透气性差，有机质分解慢，易于积聚腐殖质，影响种子萌芽、植物根系的发育及吸收水和养分、养分的转化、植物的抗病。

(3) 膨胀土土质细腻，土壤粒间孔隙很小，多为毛细管孔隙和无效孔隙，透水性差，内部排水不良，其保水力强，热容量大，增温降温慢，温差小，土粒间黏结力强，不利于植物生长。

(4) 对于暴露在大气中的膨胀土坡面，坡面土体水分变化较大。雨季期间，坡面土体容易饱和而发生浅层坍塌；旱季水分蒸发，坡面土体裂隙发育，容易产生风化剥蚀，裂隙的产生会破坏植物根系。

7.3.5 植物防护施工可采用液压湿式喷播、客土喷播、人工种植、三维植被网等方法。当发现植被生长的存活率低于80%时，应进行补种。植物防护施工应符合现行《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610)的有关规定。

7.4 边坡渗沟+骨架植草

7.4.1 边坡渗沟+骨架植草防护设计应符合下列规定：

1 坡顶排水设计应以“截、堵”为主，通过设置截水沟和坡顶封闭措施，减少坡后的地表水渗入。

2 坡体应设置具有内部排水功能的边坡渗沟，边坡渗沟深度应大于大气显著影响层深度。

3 边坡渗沟应与边沟下的渗沟连通，使坡体及部分坡面渗水有效排出。

4 坡面骨架可为拱形或菱形，骨架间应填耕植土进行植物防护，减少雨水冲刷。

5 坡脚应设置护脚墙。

条文说明

边坡渗沟+骨架植草是一种膨胀土挖方边坡的综合支护形式，通过防排水措施+植被防护措施相结合的方式，综合利用工程、排水与植被防护的优点，保持边坡稳定。

7.4.2 边坡渗沟+骨架植草防护结构如图7.4.2所示，结构设计应符合下列规定：

- 1 当坡后地表水可能流向挖方边坡时，坡顶以外5m应设置截水沟，在坡顶和截水沟之间铺设复合土工膜，并覆土绿化。
- 2 应在边坡开挖后渗水点处设置边坡渗沟，且宜根据坡面骨架排水沟位置，沿边坡纵向每隔6~10m设置一条边坡渗沟。
- 3 边坡渗沟的宽度和深度可参照本规范第6.4.4条设计。
- 4 两骨架之间应设置纵向排水沟，排水沟间距宜为6~10m，并应与边坡渗沟交替布置。
- 5 骨架内应回填不小于0.2m厚的耕植土，并按本规范第7.3节的要求进行植物防护。

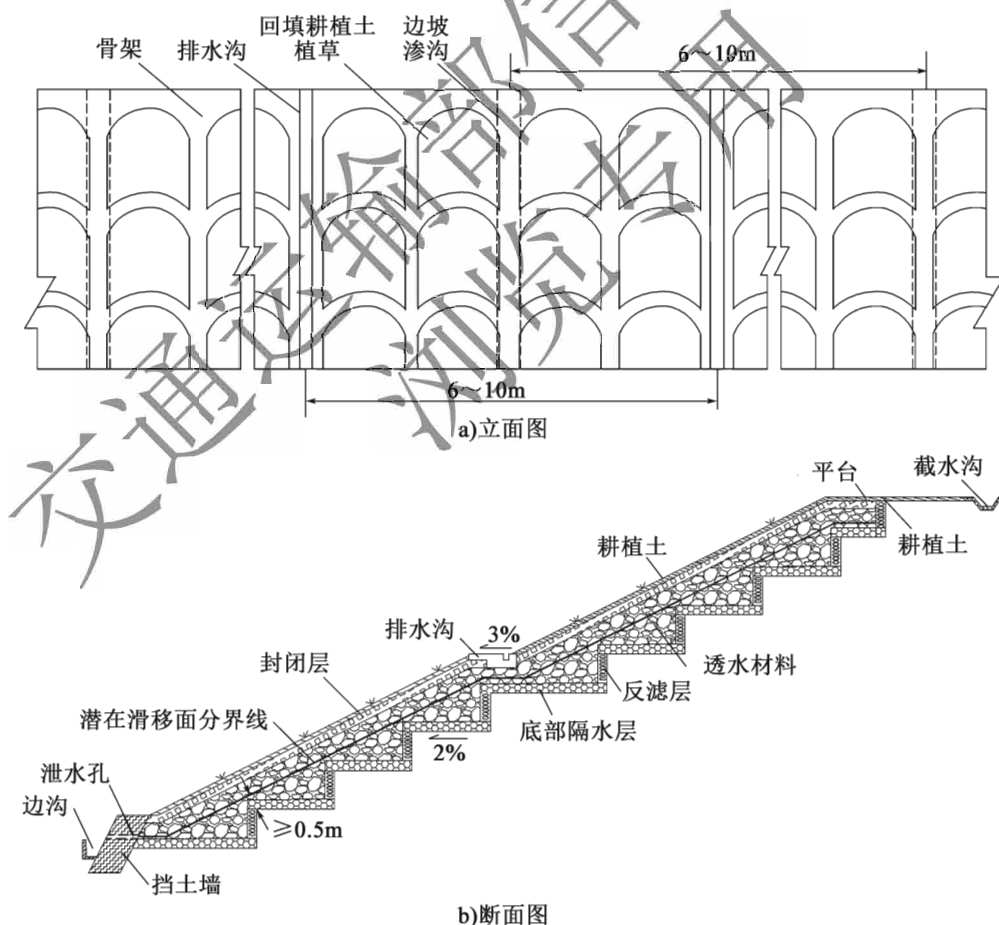


图7.4.2 边坡渗沟+骨架植草防护结构示意图

7.4.3 边坡渗沟 + 骨架植草防护结构施工应符合下列规定：

- 1 边坡开挖成型后，应先进行边坡渗沟的施工。
- 2 渗沟两侧应包裹土工布，施工过程中应保证土工布不受损坏。
- 3 应保证肋拱内支砌表面平整和砌缝密实，减少坡面水的下渗。
- 4 渗沟填充可选用碎石、干砌片石或无砂大孔混凝土等透水材料。

7.5 柔性支护

7.5.1 膨胀土挖方边坡柔性支护结构可由基底渗沟、基底排水垫层、加筋体基础、加筋体背部排水层、土工格栅加筋体、坡面防护层以及坡顶隔水层组成，如图 7.5.1 所示。

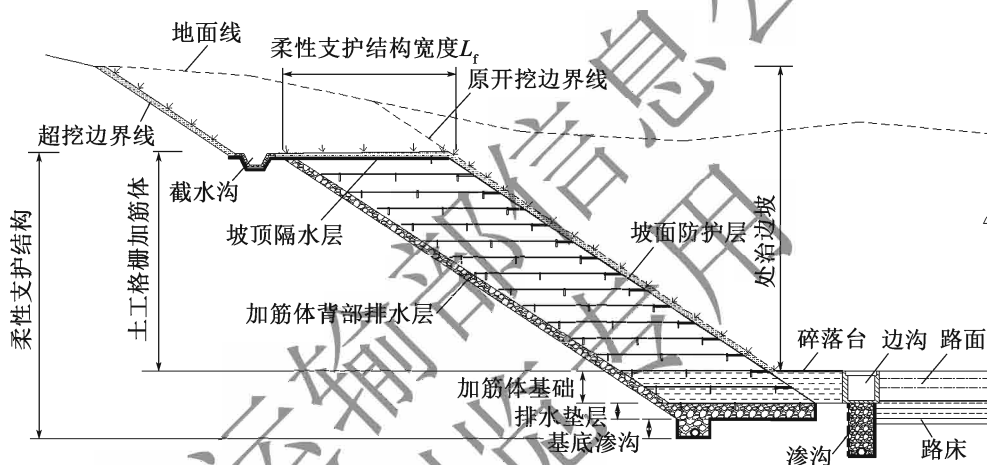


图 7.5.1 膨胀土挖方边坡柔性支护结构示意图

条文说明

柔性支护结构是用土工格栅加筋膨胀土，并分层压实反包，形成足够厚度的加筋体支护结构。柔性支护结构一方面对挖方边坡产生支挡作用，另一方面通过自身的变形对坡内的膨胀土产生变形消能作用，同时通过封闭坡顶的地表水隔离坡面的雨水，疏排坡体内部的地下水，起到保湿防渗的作用。

土工格栅与填土间的相互作用，尤其是各层土工格栅之间的相互连接、包裹为膨胀土加筋体提供足够的框箍作用，使加筋体成为一种能承受一定变形而不破坏的整体结构。该结构可以通过加筋体的变形使坡内的膨胀土释放因增湿而产生的膨胀力，避免因膨胀能的积蓄而导致边坡出现整体或局部滑坍，达到“以柔治胀”的目的。

7.5.2 膨胀土挖方边坡柔性支护处治结构如图 7.5.2 所示，其设计应符合下列规定：

1 对于新开挖的膨胀土挖方边坡，柔性支护结构的水平宽度 L_f 应满足式 (7.5.2)。对于滑坍膨胀土挖方边坡，柔性支护结构的水平宽度除应满足式 (7.5.2) 外，还应根据滑坍体的水平宽度而定。柔性支护结构坡顶高程与处治边坡坡顶高程之差不应小于 3m。当边坡高度大于 10m 时，柔性支护结构应按每 6 ~ 8m 设置一级平台，坡率不应大于 1 : 1.5。

$$L_f \geq L_b + 1.0 \quad (7.5.2)$$

式中： L_b ——大气显著影响层水平宽度 (m)，由本规范式 (5.3.5) 确定。

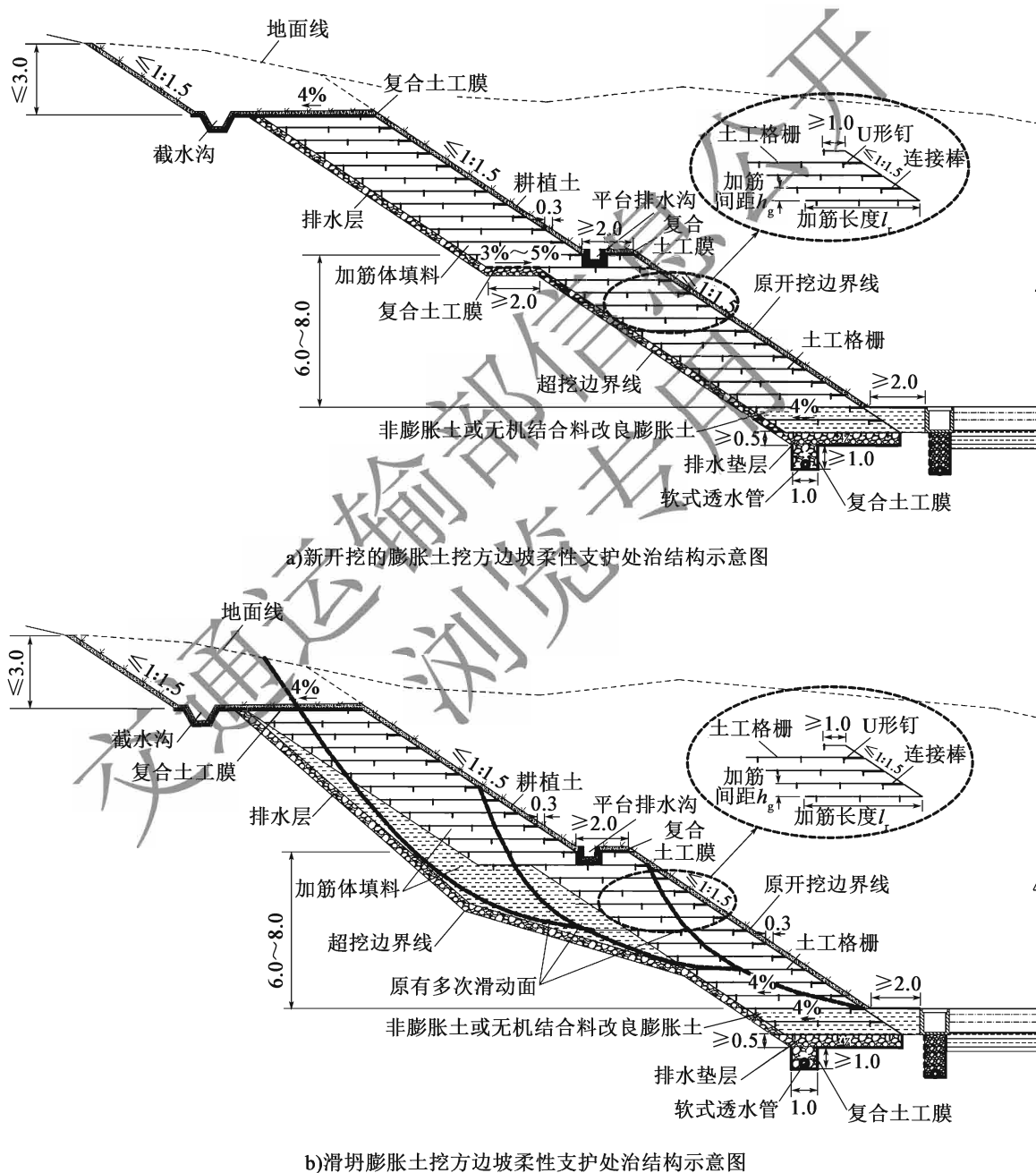


图 7.5.2 膨胀土挖方边坡柔性支护处治结构示意图 (尺寸单位: m)

2 基底渗沟宜设置于靠边坡一侧，其深度和宽度宜不小于0.5m。排水垫层的厚度不应小于0.5m，宽度为柔性支护结构的水平宽度。渗沟沟底及排水垫层层底的纵向坡度应与路线纵坡一致。在渗沟的底部和侧壁、排水垫层的层底和靠路基一侧的侧壁应铺设复合土工膜。渗沟底部宜设置软式透水管，管径宜为0.2m。渗沟和排水垫层应填筑碎石。排水垫层压实度不应小于85%。排水垫层顶部应设置土工布。

3 加筋体基础底面高程宜与路基顶面高程一致，加筋体基础厚度宜为1.0m，横向宜与边沟相接。加筋体基础应用非膨胀土或无机结合料处治的膨胀土回填，并用土工格栅反包加筋。应按本规范第5.3.8条进行反包加筋设计，加筋间距宜为0.5m。加筋体基础回填料的压实度不应小于93%。

4 在加筋体的背部应设置疏排裂隙水和坡体渗水的排水功能层。排水功能层宜用碎石填筑，水平宽度不应小于0.5m，并应上下贯通连为一体，确保排水畅通，避免地下水和裂隙水滞留于坡体中。

5 土工格栅加筋体宽度，应按本规范第5.3.5条确定。可用开挖的膨胀土分层回填，并用土工格栅反包加筋。应按本规范第5.3.8条进行反包加筋设计，加筋间距宜为0.50~0.75m。加筋体回填料的压实度采用湿法重型击实的最大干密度进行计算，且不应小于87%。

6 在柔性支护结构的坡面应回填厚度不小于0.1m的耕植土，耕植土的压实度不宜小于80%；坡面宜采用草灌结合进行植物防护，其中灌木的根系长度宜大于0.3m。

7 截水沟应设置在距柔性支护结构坡顶5.0m以外。柔性支护结构顶面及截水沟沟底应连通设置复合土工膜。顶部的复合土工膜上应回填厚度不小于0.3m的耕植土。耕植土应压实并呈外高内低的横坡，横坡坡率应为4%，压实度不宜小于80%，并应植草绿化。

8 柔性支护结构以上的边坡坡率不应大于1:2.0，并应进行植物防护。

7.5.3 柔性支护结构中采用的加筋材料应符合本规范第5.3.9条的要求。土工格栅加筋体填料稠度 w_c 宜满足 $0.95 \leq w_c \leq 1.30$ 的要求，填料块径不应大于0.1m。渗沟、排水垫层、排水功能层所用碎石的粒径不得大于25mm。复合土工膜的规格宜为织物质量/膜厚/织物质量 = 200 (g/m²) / 1 (mm) / 200 (g/m²)。土工布顶破强度宜大于3kN。

7.5.4 应根据本规范第7.5.2条设计要求初拟土工格栅的加筋间距、长度、强度，按照本规范第5.4.4和5.4.5条分别逐层进行土工格栅的抗拔稳定性验算和抗拉强度验算。

7.5.5 应从上至下，按柔性支护结构的设计轮廓线进行边坡及基础开挖。挖方宜放至附近，但距柔性支护结构坡脚不得小于2m。

7.5.6 渗沟应从路基高程最高处开始开挖，至路基填挖交界处，并与引接边沟水的排水沟相连。排水通道出口应设置一字墙出水口。

7.5.7 基底排水垫层应分层填筑、压实，每层的松铺厚度宜不大于0.3m。

7.5.8 柔性支护加筋体基础应分层摊铺碾压成型，每压实层松铺厚度宜不大于0.3m。加筋体基础压实后应呈外高内低的横坡，横坡坡率宜不小于4%。加筋体基础中土工格栅加筋反包的施工应按本规范第5.5.9条进行。

7.5.9 每结构层应按设计宽度先摊铺背部排水功能层填料，松铺厚度应大于加筋间距。加筋体的施工应按本规范第5.5.9条进行。

7.5.10 每两层柔性支护加筋体施工结束后，应在加筋体坡面铺筑耕植土，并用人工或机械夯实。柔性支护加筋体全部施工结束后，应对坡面耕植土进行修整，并进行植物防护。

7.5.11 柔性支护结构顶部土工格栅反包铺设完24h内应摊铺复合土工膜。截水沟砌筑前应先于基槽内壁铺设复合土工膜，用土回填并捣实再砌筑截水沟。截水沟底部与柔性支护结构顶部应连续摊铺复合土工膜。

条文说明

柔性支护处治膨胀土挖方边坡施工流程如图7-1所示。

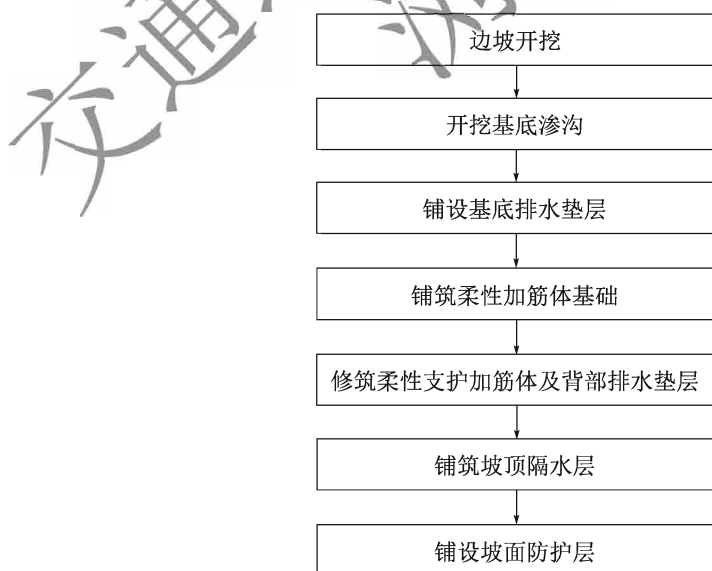


图7-1 柔性支护处治膨胀土挖方边坡施工流程

7.6 挡土墙

7.6.1 重力式挡土墙构造除应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30)的有关规范外,尚应符合下列规定:

1 挡土墙墙背宜采用直立式,挡土墙的埋置深度不应小于1.5m。墙身应设置泄水孔,泄水孔间距不应大于3m,坡率不应小于5%。

2 墙背应设置缓冲层,如图7.6.1所示。缓冲层应与墙背排水层统筹设计,其顶面应与挡土墙顶面平齐,其底面应深入大气显著影响层深度以下,厚度不应小于0.5m。缓冲层材料应具有良好的水稳性、可压缩性和透水性。当选用砂砾时,相应材料要求和厚度可根据膨胀土膨胀性的强弱按表7.6.1确定。

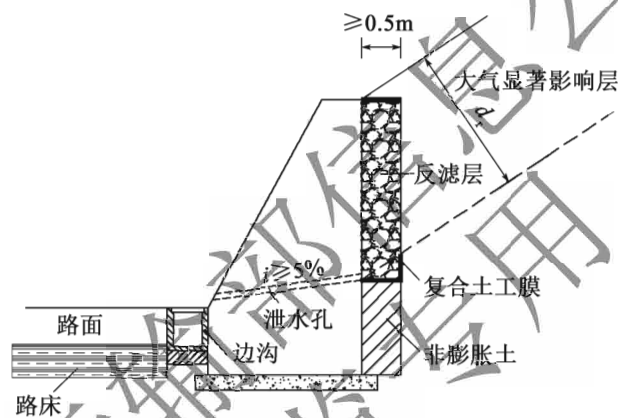


图 7.6.1 膨胀土挖方边坡重力式挡土墙断面形式

表 7.6.1 缓冲层材料及厚度推荐值

材料类型	材料要求	厚度推荐值 (m)	
		弱膨胀土	中膨胀土
砂砾	中砂或粗砂, 填筑后为中密状态	0.50 ~ 0.60	0.60 ~ 0.70

3 缓冲层顶部和底部应铺设复合土工膜,缓冲层底部应设置不小于1%的纵坡。

条文说明

重力式挡土墙的设计包括挡土墙的尺寸及其缓冲层材料、厚度的确定,其设计流程如图7-2所示。

侧向膨胀压力最大值可以参照本规范附录C室内侧向膨胀试验方法进行测定,同时通过该试验可以得到侧向膨胀力随侧向应变的变化规律。据此,可以得到侧向膨胀压力发生不同折减后对应的侧向应变,在已知水平增湿距离(可取大气影响层深度 d_a)的情况下,将两者相乘可以算得此时墙背膨胀土的水平膨胀变形,该变形亦为墙背所设缓冲层在水平力作用下应该达到的压缩量,进而由此选择缓冲层的材料和厚度。

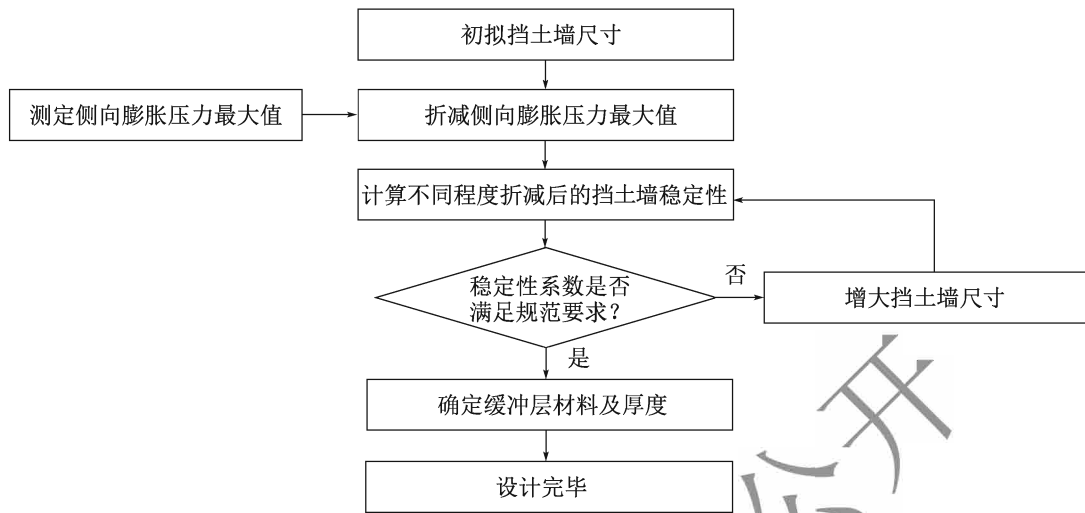


图 7-2 膨胀土边坡重力式挡土墙设计流程

7.6.2 重力式挡土墙稳定性验算应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30)的有关规定。验算时应考虑膨胀土对挡土墙作用的总侧压力 P_h 。 P_h 应包括主动土压力 E_a 与侧向膨胀力 P_{eh} ，如图 7.6.2 所示。侧压力 P_h 与侧向膨胀力 P_{eh} 应分别按式 (7.6.2-1) 和式 (7.6.2-2) 计算。

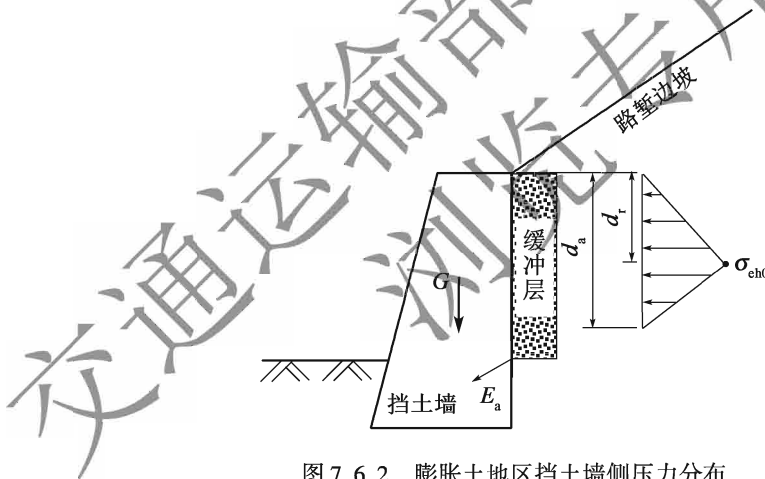


图 7.6.2 膨胀土地区挡土墙侧压力分布

$$\vec{P}_h = \vec{E}_a + \vec{P}_{eh} \quad (7.6.2-1)$$

$$P_{eh} = \sigma_{eh0} \cdot d_a / 2 \quad (7.6.2-2)$$

式中： P_h ——膨胀土对挡土墙作用的总侧压力 (kN/m)；

E_a ——广义库仑主动土压力 (kN/m)，应根据现行《建筑地基基础设计规范》(GB 50007) 的有关规定进行计算，膨胀土抗剪强度参数的取值应按本规范第 6.2.4 条确定；

P_{eh} ——侧向膨胀力 (kN/m)，由图 7.6.2 所示侧向膨胀力分布与挡土墙合围三角

形区域求面积得到；

σ_{eh0} ——恒体积侧向膨胀压力 (kPa)，由室内侧向膨胀试验确定，见本规范附录 C；

d_a ——大气影响层深度 (m)。

条文说明

据安康、西乡、勉西、成都狮子山塹坡的实测，侧向膨胀力随深度大致按抛物线形分布，至大气显著影响层深度 d_r (约 2m) 时达到最大膨胀力，其后随深度的增加，因渗水减少而使膨胀力逐渐减小，呈直线变化降低。当达到大气影响层深度 d_a (约 2.5~3.5m) 时，由于含水率不再波动而使膨胀力为零。因此，一般在实测大气影响层上限 (约 3.5m) 范围内考虑侧向膨胀力的作用。为工程应用方便，将侧向膨胀力的分布视为三角形分布，将大气显著影响层深度 d_r 处视为侧向膨胀力达到最大值的深度，则侧向膨胀力的合力可以由该分布曲线与墙背合围的三角形区域求面积得到。

7.6.3 桩板式挡土墙应由桩、挡土板、反滤层及边沟组成，如图 7.6.3 所示。其构造除应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 桩的截面形式宜采用矩形，桩在路基面以上的部分可设计成“T”形，便于挡土板与桩的搭接。搭接长度每端不得小于板厚。

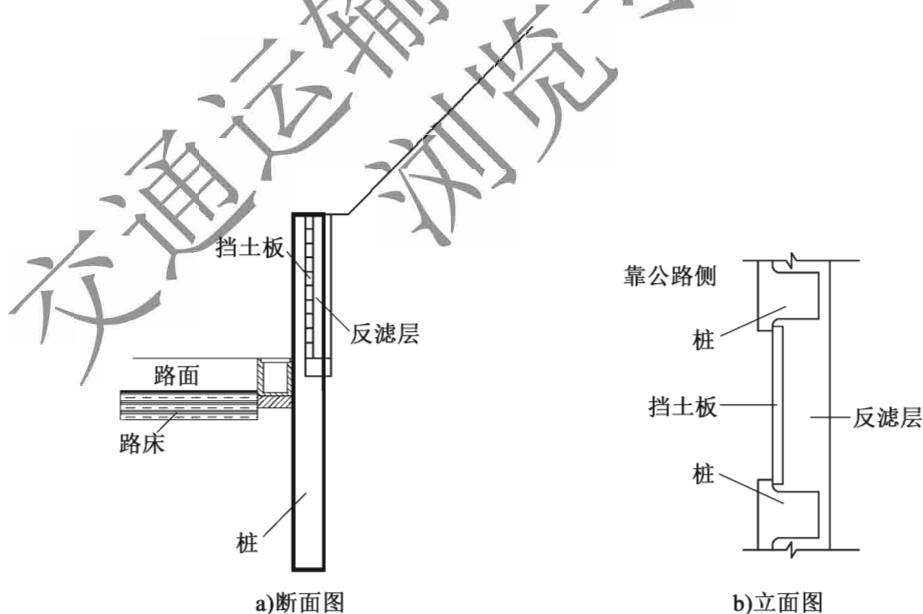


图 7.6.3 膨胀土边坡桩板式挡土墙结构形式

2 桩的受力钢筋应沿桩长方向通长布置，直径应不小于 12mm，钢筋保护层净距应不小于 50mm。

3 锚固桩应锚固在稳定的地基中。加锚杆的锚固桩应保证桩与锚杆的变形协调。

4 挡土板的混凝土强度等级应不低于 C25，挡土板外侧墙面的钢筋保护层厚度应大于 35mm，板内侧墙面的钢筋保护层厚度应大于 50mm。当采用拱形挡土板时，应沿径向和环向配置一定数量的构造钢筋，钢筋直径不宜小于 10mm。

5 挡土板高度应不小于大气影响层深度，顶面宜与桩的顶面平齐。板内应设置坡度不小于 5% 的泄水孔，使坡体内部的水经反滤层排至边沟内。

6 桩与挡土板后、挡土板底均应设置缓冲层，可按本规范第 7.6.1 条缓冲层的有关规定进行设计。

7.6.4 桩板式挡土墙的设计计算除应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30)和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363)的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 临空段或边坡滑动面以上部分桩身内力，应根据侧压力或滑坡推力取两者间的较大值进行设计。其中，侧压力应计入侧向膨胀力，侧向膨胀力应按本规范第 7.6.2 条确定。

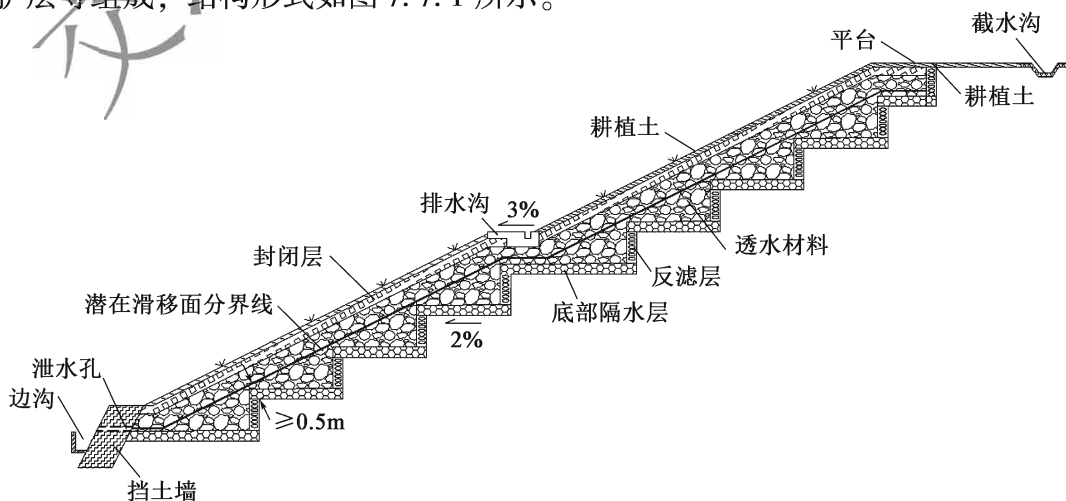
2 嵌入段或滑动面以下部分桩身内力，应参照《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)附录 L 中的“m”法进行计算。

3 作用于挡土板上的荷载宽度可取板的跨度，作用在桩上的荷载宽度可取其左右相邻桩中心间距的一半之和。

7.6.5 重力式挡土墙和桩板式挡土墙的施工应按现行《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610)的有关规定进行。

7.7 支撑渗沟

7.7.1 膨胀土挖方边坡支撑渗沟可由主渗沟、支渗沟、抗滑挡墙、坡顶隔水层、坡面防护层等组成，结构形式如图 7.7.1 所示。



a)断面形式

图 7.7.1

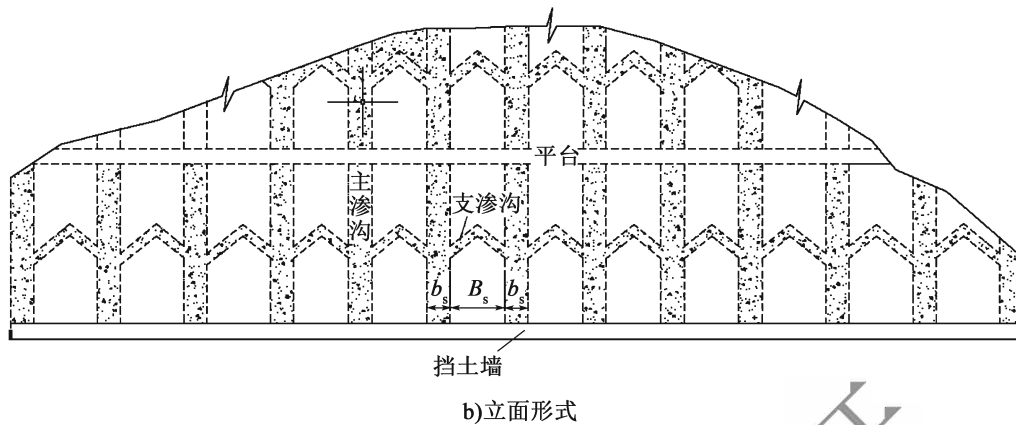


图 7.7.1 膨胀土挖方边坡支撑渗沟结构形式

条文说明

支撑渗沟是沿边坡方向成排布置的重力式排水结构物，用以支撑可能滑动的不稳定边坡土体，并排除滑动面或滑动带附近的地下水和疏干潮湿土体。可以由主渗沟与支渗沟连接构成坡面支护与排水系统，既起稳定边坡的作用又可以疏排坡体滑动面附近的地下水；主支渗沟间坡面通过回填耕植土并植草，可以减少雨水冲刷；设置抗滑挡墙稳固坡脚渗沟，提高边坡整体抗滑能力；支撑渗沟与挡墙相互配合，实现了大面积开挖边坡的分割支挡，利用结构自重产生的摩擦力平衡坡内土体下滑力和膨胀力。在截水沟与坡顶间铺设复合土工膜，再回填一定厚度耕植土封闭并植草，起到“保湿防渗”作用。

7.7.2 膨胀土挖方边坡支撑渗沟结构设计应符合下列规定：

1 边坡高度小于 8.0m 时，支撑渗沟可采用一坡到顶的形式；高度不小于 8.0m 时，应采用多级边坡，每一级均应设置支撑渗沟，边坡坡率宜为 1:2。

2 应沿坡体潜在滑动方向设置若干条平行的主渗沟。主渗沟的布置深度应大于潜在滑动面深度。各主渗沟之间可设支渗沟，以增强主沟之间坡体的稳定性。

3 各条平行主渗沟的间距 B_s 宜为 6.0 ~ 15.0m；支撑渗沟的基底埋入深度应大于潜在滑动面深度 0.5m，并设置 2% ~ 4% 的横坡。

4 支撑渗沟断面宜采用矩形。渗沟排水层可采用干砌片石、无砂大孔混凝土、碎石等透水性材料充填，排水层与两侧壁膨胀土之间应设置反滤层。反滤层可采用碎石和粗砂或透水土工织物。

5 主渗沟的深度 H_s 宜不小于 2.0m，宽度 b_s 宜为 1.5 ~ 2.0m。应沿坡面横向设置台阶，每级台阶垂直深度 h_s 宜为 1.0 ~ 2.0m，沟底可做防渗铺砌，沟底隔水层与沟顶封闭层可采用浆砌片石砌筑。沟底应设置内高外低、坡率为 2% ~ 4% 的排水缓坡，隔水层的厚度不应小于 0.5m，封闭层的厚度不应小于 0.4m，结构形式如图 7.7.2-1 所示。

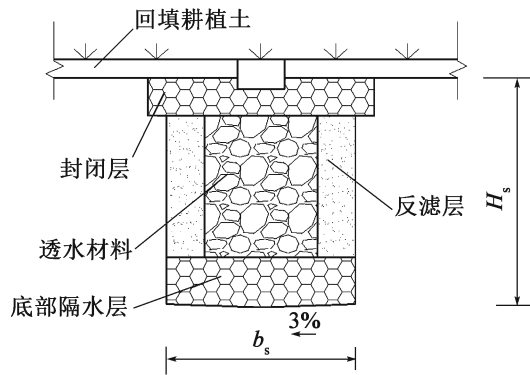


图 7.7.2-1 支撑渗沟主渗沟剖面图

6 坡脚挡墙墙背应设置厚度大于 0.5m 的反滤层。主渗沟与坡脚墙墙背反滤层应直接连通。反滤层底部应设置穿过挡土墙且内高外低、坡率不小于 5% 的泄水孔，泄水孔孔径宜为 50mm，间距宜为 2.0 ~ 3.0m。

7 主渗沟之间可布设支渗沟，其结构形式如图 7.7.2-2 所示。支渗沟宜布设在主渗沟的中部，宽度和深度宜为 1.0m。

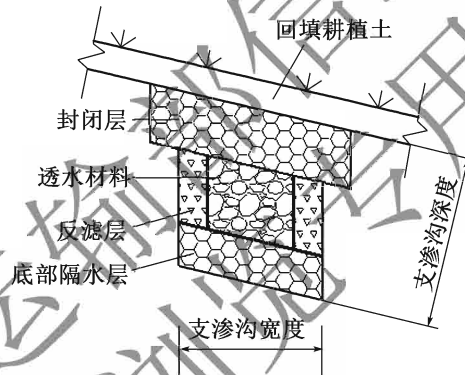


图 7.7.2-2 支撑渗沟支渗沟断面结构形式

8 渗沟的出水口应与纵向排水设施或挡墙上的排水孔紧密衔接，保证排水通畅。其下部设排水孔，排水孔出口应位于挖方路基平台以上，排水孔宜采用直径不小于 0.1m 的排水管。

9 在主、支渗沟之间应进行植物防护。

7.7.3 支撑渗沟材料应符合下列规定：

1 石料应质地均匀、无裂缝、不易风化、遇水后不易软化，抗压强度不应小于 30MPa。

2 挡土墙墙背排水构造物的布置和墙背填料的选用应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 的有关规定。

3 复合土工膜质量不宜小于 500g/m²。

4 反滤层所用的透水土工织物应符合现行《公路土工合成材料应用技术规范》(JTG/T D32) 的有关规定。

7.7.4 支撑渗沟结构设计计算应考虑下滑力 T 、支撑力 R 、作用于挡墙的推力 T_1 等。计算支撑渗沟所承受的下滑力 T 时，应考虑因支撑渗沟布置而形成的土拱作用，如图 7.7.4 所示，并应符合下列规定：

1 下滑力 T 可按式 (7.7.4-1) 计算。

$$T = E_0 + E_1 + E_2 + P \cos \alpha \quad (7.7.4-1)$$

式中： E_0 ——土体 $ABCD$ 的下滑力 (kN)；

E_1 ——土体 $BCEF$ 的下滑力 (kN)；

E_2 ——土体 $ADGH$ 的下滑力 (kN)；

P ——作用在 $FBAH$ 上的水平膨胀力 (kN)，按本规范第 7.6.2 条的方法确定；

α ——土体滑动面与水平方向的夹角 ($^\circ$)。

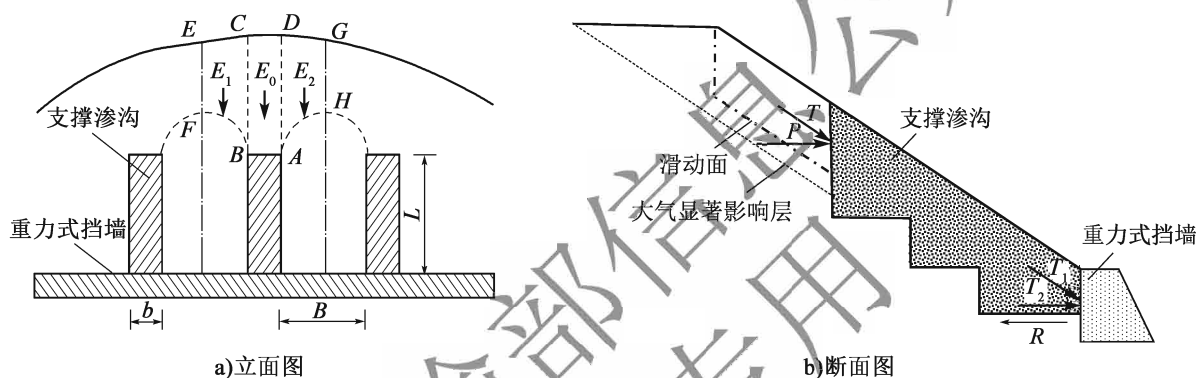


图 7.7.4 支撑渗沟受力计算图示

2 土体的下滑力 E_0 、 E_1 、 E_2 可按式 (7.7.4-2) 计算。

$$E_i = W_i \sin \alpha \quad (i=0, 1, 2) \quad (7.7.4-2)$$

式中： W_0 ——土体 $ABCD$ 的重力 (kN)；

W_1 ——土体 $BCEF$ 的重力 (kN)；

W_2 ——土体 $ADGH$ 的重力 (kN)。

3 每条支撑渗沟的支撑力 R 可按式 (7.7.4-3) 计算。

$$R = L_s \cdot H_s \cdot b_s \cdot \gamma_s \cdot f_s \quad (7.7.4-3)$$

式中： L_s ——渗沟的纵向长度 (m)；

H_s ——渗沟的高度 (m)；

b_s ——渗沟的断面宽度 (m)；

γ_s ——渗沟填充料的重度 (kN/m^3)；

f_s ——支撑渗沟基底的浆砌片石与膨胀土之间的摩擦系数，可取为 0.3。

4 支撑渗沟单位宽度内的支撑力 R' 可按式 (7.7.4-4) 计算。

$$R' = \frac{R}{b_s} \quad (7.7.4-4)$$

5 作用于挡土墙的推力 T_1 可按式 (7.7.4-5) 计算，作用于挡土墙的水平推力 T_2

可按式(7.7.4-6)计算。

$$T_1 = \frac{T}{b_s} - \frac{R'}{\cos\alpha} \quad (7.7.4-5)$$

$$T_2 = T_1 \cos\alpha = \frac{T \cos\alpha}{b_s} - R' \quad (7.7.4-6)$$

7.7.5 抗滑挡墙的抗滑力 T_3 可参照现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 进行计算, 并应满足式(7.7.5)抗滑稳定系数 K 的要求。

$$K = \frac{T_3}{T_2} \geq 1.30 \quad (7.7.5)$$

7.7.6 支撑渗沟的施工应满足下列要求:

- 1 按设计坡比开挖并修整边坡, 清除表面松土。当边坡有坑凹时, 应嵌补填平, 使坡面平顺整齐。
- 2 开挖前应采取临时截排水措施。支撑渗沟开挖到设计高程后, 应将沟底夯实, 并按设计厚度用浆砌片石或混凝土封底, 封底后底面应保证平顺。
- 3 将支撑渗沟按设计开挖到位后, 应将支撑渗沟侧面和底面封闭隔离。
- 4 支撑渗沟施工完毕后应及时回填耕植土并按本规范第7.3节的要求进行植物防护。

7.7.7 渗沟和挡墙基础开挖过程中, 应及时回填片石并进行挡墙基础施工, 防止墙背膨胀土在大气中暴露时间过长。

7.8 锚杆框架梁

7.8.1 锚杆框架梁可与植物防护、重力式挡土墙、桩板式挡土墙等支护结构组合使用。

7.8.2 锚杆框架梁可多级设置, 边坡坡率不宜大于1:1.5, 每级边坡高度不宜超过8m。

7.8.3 框架梁构造要求应符合下列规定:

- 1 框架梁应采用钢筋混凝土现浇, 混凝土强度等级不应低于C30。
- 2 梁截面可采用矩形或T形, 其截面最大宽度不宜小于0.3m。
- 3 框架梁单元形状可按正方形或菱形布置, 矩形梁单元尺寸不宜小于3m×3m, 菱形梁单元尺寸不宜小于5m×3m。
- 4 梁内主筋应分单元配置通长钢筋。

5 梁底嵌入坡面土体深度宜不小于 0.2m。

7.8.4 框架梁设计计算宜分单元进行，梁内力宜按连续梁计算。梁结构设计计算应符合现行《混凝土结构设计规范》（GB 50010）的有关规定，结构重要性系数取为 1.0，永久荷载分项系数取为 1.35。

7.8.5 锚杆的设计构造要求应符合现行《公路路基设计规范》（JTG D30）的有关规定。计算锚杆的锚固力 P_{de} 时，应计入附加膨胀力 P_e 的作用，如图 7.8.5 所示。锚固力 P_{de} 和附加膨胀力 P_e 应分别按式（7.8.5-1）、式（7.8.5-2）计算。

$$P_{de} = P_d + P_e \quad (7.8.5-1)$$

$$P_e = \sigma_{ea0} \cdot S_b \quad (7.8.5-2)$$

$$\sigma_{ea0} = \sigma_{ev0} \sigma_{eh0} / [(\sigma_{ev0} \sin \alpha)^2 + (\sigma_{ev0} \cos \alpha)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7.8.5-3)$$

式中： P_{de} ——膨胀土边坡锚杆设计锚固力（kN/m）；

P_d ——不计膨胀作用时的设计锚固力（kN/m），由现行《公路路基设计规范》（JTG D30）中的方法确定；

P_e ——锚杆受到的附加膨胀力（kN/m）；

σ_{ea0} ——作用于锚固力计算单元底的膨胀压力（kPa），由膨胀力椭圆分布图确定；

S_b ——锚固力计算单元与坡面的接触面积（ m^2 ）；

σ_{ev0} ——恒体积竖向膨胀压力（kPa），由现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）中的膨胀力试验确定；

σ_{eh0} ——恒体积侧向膨胀压力（kPa），由本规范附录 C 确定；

α ——锚固力与水平方向的夹角（ $^\circ$ ）， $\alpha = 90^\circ - \beta$ 。

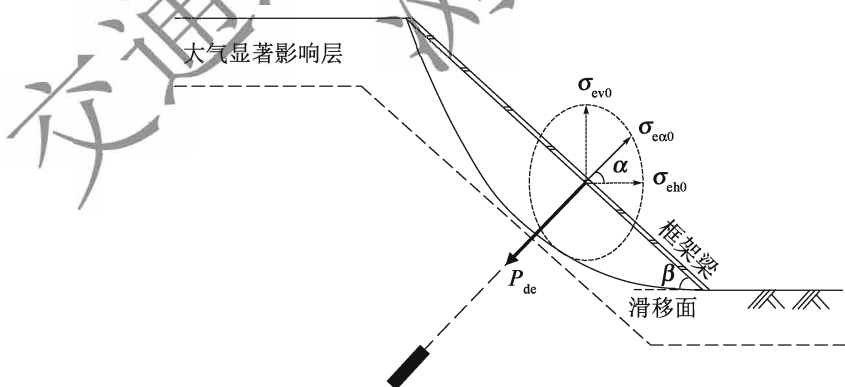


图 7.8.5 膨胀土边坡锚杆锚固力计算图示

条文说明

锚固力计算单元如图 7-3 所示，据此可以计算得到式（7.8.5-2）中的锚固力计算单元与坡面的接触面积， $S_b = 2ab - b^2$ 。

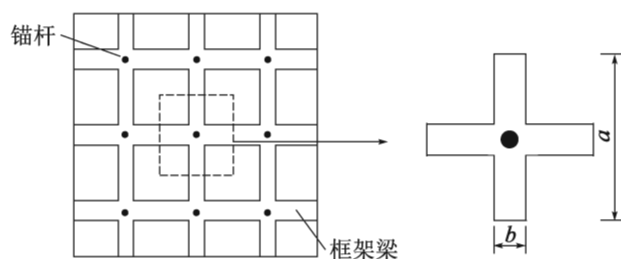


图 7-3 锚固力计算单元

膨胀土的膨胀压力可以视为椭圆分布，其中长轴为竖向膨胀压力，短轴为侧向膨胀压力，由椭圆方程得：

$$\frac{x^2}{\sigma_{eh0}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{ev0}^2} = 1 \quad (7-1)$$

由图 7.8.5 可知，椭圆上任意一点与坐标原点的连线与 x 轴的夹角为 α ，其坐标 (x, y) 为 $(\sigma_{ea0} \cos\alpha, \sigma_{ea0} \sin\alpha)$ ，将该坐标代入上式得：

$$\frac{(\sigma_{ea0} \cos\alpha)^2}{\sigma_{eh0}^2} + \frac{(\sigma_{ea0} \sin\alpha)^2}{\sigma_{ev0}^2} = 1 \quad (7-2)$$

上式化简后即式 (7.8.5-3)。

7.8.6 锚杆框架梁护坡起点、讫点处各 0.5m 宽度应采用现浇混凝土或浆砌片石砌筑镶边加固。坡顶应设置混凝土或浆砌片石镶边，坡脚应设置混凝土或浆砌片石护脚。

7.8.7 年平均降雨量超过 600mm 的地区，框架梁上应设置截水槽，边坡平台应设置截水沟。

7.9 树根桩

7.9.1 树根桩可用于处治岩层走向与边坡方向相反、边坡整体较稳定但局部有软弱夹层（软弱结构面）或局部较破碎、裂隙较发育的膨胀土路堑边坡，如图 7.9.1-1 所示。其加固设计应符合下列规定：

1 树根桩宜布置在土石分界面和边坡软弱夹层处，树根桩的深度应不小于大气影响层深度，树根桩桩孔的直径宜为 100~300mm，纵向间距宜为 2m。

2 树根桩在软弱结构面宜按每组一根竖直布置。在土石分界面宜按每组 3 根布置，其中 2 根宜竖向布置在垂直于地面的平面，余下 1 根宜与坡面垂直。相邻钢筋间的夹角宜为 60°，钢筋端部宜用 C25 混凝土浇筑成 0.5m × 0.5m × 0.5m 的混凝土墩，如图 7.9.1-2 所示。

3 应根据钻孔深度 L_{dh} 及注浆范围设计确定灌浆管的长度，可参照图 7.9.1-3 在距管口以上 1.0m 范围做成花管形状，其孔眼直径宜为 8mm，轴向间距宜为 100mm，排数不宜少于 4 排。

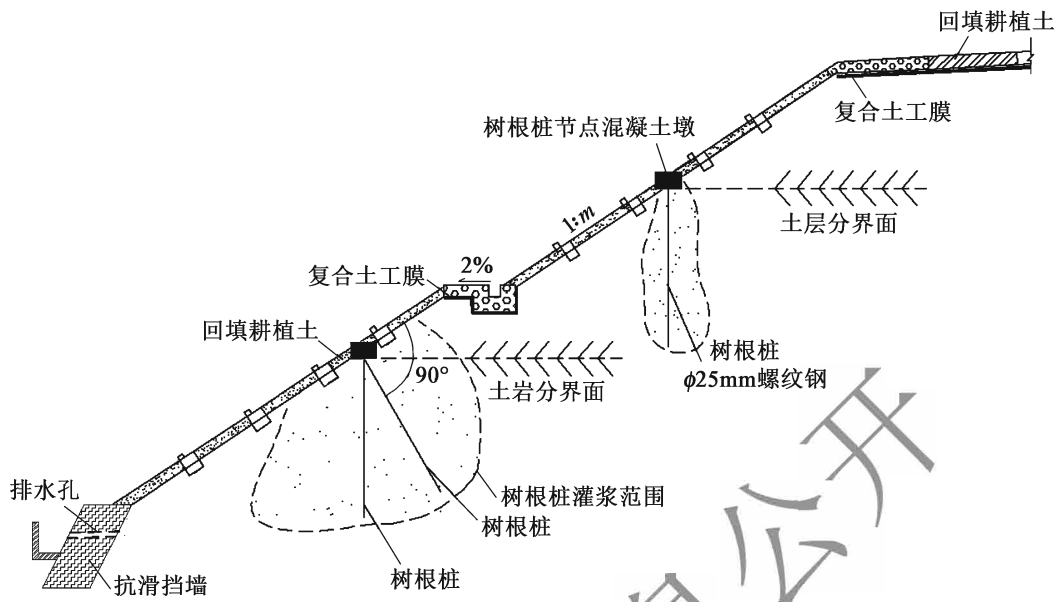


图 7.9.1-1 膨胀土挖方边坡树根桩断面形式

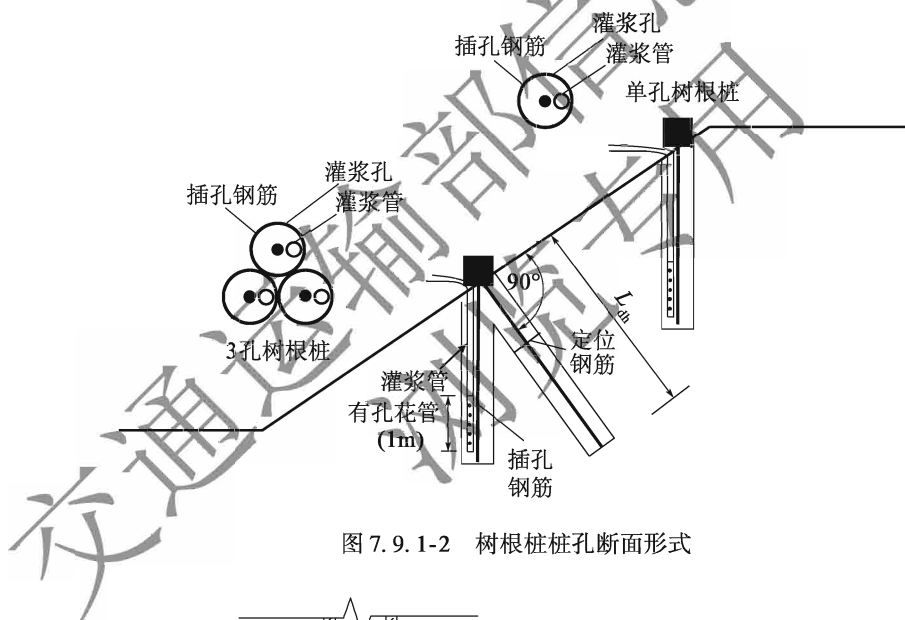


图 7.9.1-2 树根桩桩孔断面形式

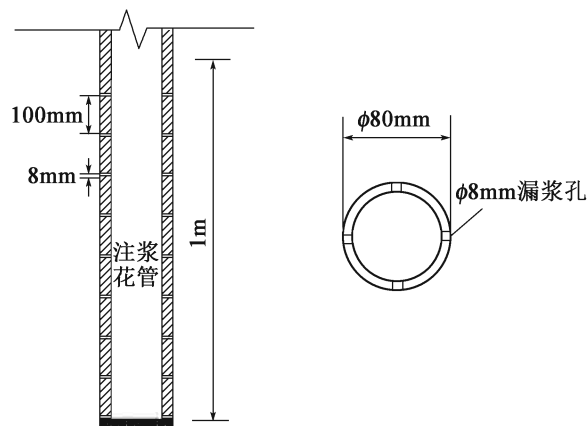


图 7.9.1-3 注浆花管示意图

7.9.2 树根桩材料应符合下列规定：

- 1 树根桩插孔钢筋宜采用 $\phi 25\text{mm}$ 螺纹钢。
- 2 注浆材料可采用水泥浆液、水泥砂浆、细石混凝土或其他灌浆料，也可用碎石或细石填灌再灌注水泥浆。
- 3 水泥灌浆固结体 28d 抗压强度应不小于 30MPa。

7.9.3 树根桩施工应符合下列规定：

- 1 宜采用小型工程地质钻机钻孔。
- 2 钻至设计高程时，应进行清孔。清孔完成后应及时将泥浆抽出，如后序工艺不能及时进行，应将孔口堵塞。
- 3 应采用 $\phi 25\text{mm}$ 的螺纹钢作为插孔用钢筋。插孔前，应在螺纹钢上每隔 2.0m 焊接长度不小于 0.1m 的 $\phi 6\text{mm}$ 钢筋作为定位钢筋；插孔安放时，应将螺纹钢对准桩孔，并徐徐放入，以避免钢筋偏位。
- 4 灌浆应分两道工序进行，灌浆前宜先灌注膨胀土固化改良溶液，然后再灌入低水灰比的水泥浆。灌浆压力宜为 0.5 ~ 5MPa。灌浆管在灌注过程中，应埋入水泥浆中 2.0 ~ 3.0m，以保证桩体的质量。
- 5 应将已灌注成桩的每组钢筋头用电焊焊接在一起，再用 C25 混凝土浇筑桩墩。

条文说明

4 膨胀土固化改良溶液可按膨胀土固化剂：水：石灰 = 1 : 150 : 8 进行配比；水泥浆的水灰比 $w/c = 0.4 \sim 0.5$ ，灌浆压力 $P = 0.5 \sim 5\text{MPa}$ ，掺 6% 高效减水剂，中砂含量 30%。水泥浆固结体 28d 抗压强度要求达到 30MPa。

7.10 抗滑桩

7.10.1 抗滑桩应布设在滑（斜）坡中前部的阻滑段，其具体位置，以及桩间距、桩长和桩身截面尺寸等应根据滑（斜）坡的地层性质、滑（斜）坡推力大小、滑动面坡度、滑体厚度和施工条件等因素综合确定。其构造除应符合现行《公路路基设计规范》（JTG D30）和《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363）的有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 抗滑桩沿横剖面布置方向宜与滑动方向垂直。
- 2 钻孔桩设计直径不宜小于 0.8m；挖孔桩直径或最小边宽度不宜小于 1.2m；混凝土管桩直径可采用 0.4 ~ 1.2m，管壁最小厚度不宜小于 80mm。
- 3 支撑或嵌固在基岩中的端承型钻（挖）孔桩的中距不宜小于桩径的 2 倍。钻（挖）孔扩底灌注桩的中距不应小于 1.5 倍扩底直径和扩底直径加 1m 的较大者。
- 4 抗滑桩桩长不宜大于 35.0m。对于滑带埋深大于 25.0m 的滑坡，采用抗滑桩阻滑时，应充分论证其可行性。

5 抗滑桩应嵌入滑动面以下非膨胀土岩土层中，嵌固深度可按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363)的方法确定。

7.10.2 应根据边坡稳定的要求，按现行《公路路基设计规范》(JTG D30)和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363)的有关规定对抗滑桩加固边坡稳定性进行计算。其中，侧压力应计入侧向膨胀力，侧向膨胀力应按本规范第7.6.2条确定。

7.10.3 对于滑体厚度较薄、推力较小的滑坡，当不宜进行大截面抗滑桩开挖施工时，可选择微型桩。

7.10.4 抗滑桩的施工应按现行《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610)的有关规定进行。

交通运输部信息公开
浏览专用

附录 A 膨胀土承载比 EBR 试验方法

A.1 目的和适用范围

A.1.1 本试验的目的是测定膨胀土的承载比 EBR，以评价其直接用作路堤填料的可行性。

A.1.2 本试验适用于在规定的试筒内制件，并采用侧向浸水，浸水时的上覆压力为 20kPa。

A.1.3 试验用土样的最大粒径宜控制在 20mm 以内。

A.2 仪器设备

A.2.1 圆孔筛：孔径 20mm 筛一个。

A.2.2 试筒：EBR 试筒是通过在 CBR 试筒的侧壁上开出一系列径向进水小孔而形成的金属圆筒。其内径为 152mm，高度为 170mm，厚度为 5mm。试筒的进水孔布置如图 A.2.2 所示，孔径为 3mm，沿筒壁平均分布 11 行、60 列，共 660 个，相邻两孔之间水平夹角为 6° ，竖向间距为 8mm；套环高 50mm；筒内垫块直径为 151mm，高度为 50mm。

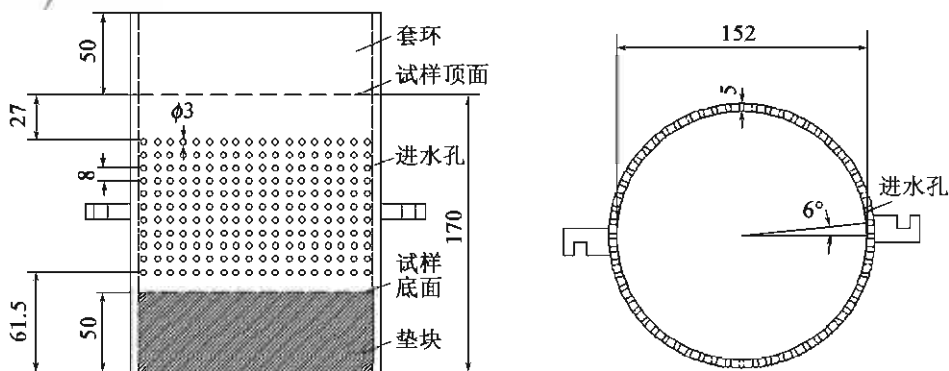


图 A.2.2 改进试筒及进水孔布置 (尺寸单位: mm)

A. 2.3 试筒内的套环及筒内垫块与 CBR 试筒相同。

A. 2.4 电动击实仪：夯锤底面直径 50mm，总质量 4.5kg。

A. 2.5 滤纸条：长 50mm，宽 15mm。

A. 2.6 支架：整体式膨胀量测定支架，可同时测量多个试件；百分表连接杆可在支架上左右和上下移动，满足对不同上覆压力多个试件同时测试的需要。

A. 2.7 荷载板：直径 150mm，中心孔眼直径 52mm，每块质量 1.25kg，并沿直径分为两个半圆块，数量为 6 块。

A. 2.8 荷载块：4 块，每块 8kg。

A. 2.9 贯入杆：端面直径 50mm、长约 100mm 的金属柱。

A. 2.10 路面材料强度仪或其他加载设备：加载范围不小于 50kN，加载速度可调整至 1mm/min。

A. 2.11 百分表：3 个。

A. 2.12 试件顶面的多孔板。

A. 2.13 试件底面的多孔板。

A. 2.14 水槽：浸泡试件用，槽内水面应位于最上一排进水孔与试筒顶面之间。

A. 2.15 其他：台秤，感量为试件质量的 0.1%；木槌；喷水设备；碾土器；拌和盘；铝盒；修土刀；直尺；脱模器等。

A. 3 土样制备

A. 3.1 通过湿法击实试验求得土样的最大干密度和最佳含水率。

A. 3.2 取具有代表性的天然状态下的膨胀土试料 15kg，对高含水率土，可省略过筛步骤，用手拣除大于 20mm 的颗粒。从剩余试料中制备质量约 6.0kg 的试料 1 份，风干至最佳含水率状态。

A.3.3 制试件前应取样测试试料的实际含水率。

A.3.4 当需要测定不同含水率试件的 EBR 值时,可采用湿土法将试料分别风干,使其含水率按 2% ~3% 递减。

A.4 试验步骤

A.4.1 试筒称重后将其固定在底板上,安放滤纸,使之覆盖筒壁上的进水孔。放下垫块并压住滤纸底部边缘使其紧贴试筒壁,在垫块上放一张圆形滤纸,安上套环,夹住滤纸上部边缘使其固定。

A.4.2 采用标准重型击实方法。试件分 3 层击实,每层需试样 1 600g 左右。第一层击实完后,将试样层面“拉毛”,然后进行第二层击实,重复上述方法进行其余每层试样的击实。

A.4.3 卸下套环,用直刮刀沿试筒顶部修平击实的试件并削去多余滤纸,表面不平整处用细料修补。取出垫块,称取试筒和试件的质量。

A.4.4 泡水测膨胀量应按下列步骤进行:

- 1 试件制成后,在修平的表面放一张滤纸,并在其上安装多孔底板。
- 2 将试件放入整体式膨胀量测定支架下的水槽里,先不放水,在试件顶面安装一块没有调节杆的多孔板,使试件受力均匀。在多孔板上先加 6 块荷载板,再加 3 块荷载块。所加荷载板累计厚度高于试筒上边缘,避免因较大荷载引起试件压缩使荷载块与试筒接触。
- 3 调整支架的拉杆,安装百分表,并读取初读数。
- 4 向水槽内放水,使水自由从试件的侧向和底部入渗,放水时注意不要让水溅到试件顶面,槽内水面应位于最上一排进水孔与试筒顶面之间。按规定时间间隔读百分表,并计算膨胀量。泡水 4d,卸载后取出试件静置 15min,让其排水,并称量,计算试件的湿度和密度。

A.4.5 贯入试验应按下列步骤进行:

- 1 将泡水试验终了的试件放到路面材料强度试验仪的升降台上,调整偏球座,使贯入杆与试件顶面全面接触,在贯入杆周围放置 4 块荷载板。
- 2 先在贯入杆上施加 45kN 荷载,然后将测力和测变形的百分表的指针都调整至零点。
- 3 加荷使贯入杆以 1 ~1.25mm/min 的速度压入试件,记录测力计内百分表某些整读数(如 20、40、60)时的贯入量,并注意使贯入量为 2.5mm 时,能有 5 个以

上的读数。

A.5 结果整理

A.5.1 应按《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中 T 0134—2019 的规定进行试验结果的整理,得到膨胀土承载比和膨胀土承载比对应的膨胀量。

交通运输部信息公开
浏览专用

附录 B 路基刚度补偿层设计方法

B.1 目的和适用范围

B.1.1 本方法用于路基回弹模量不能达到设计要求时，通过合理确定刚度补偿层填料类型和填料厚度，使之达到路基回弹模量设计要求。

B.1.2 本方法在已知待补偿层下卧等效弹性半空间体回弹模量、补偿后等效弹性半空间体顶面回弹模量目标值的基础上，可用于设计刚度补偿层的材料及其回弹模量（前提是已确定了刚度补偿层的厚度）；也可用于设计刚度补偿层的厚度（前提是已确定了刚度补偿层的材料及其回弹模量）。

B.2 操作步骤

B.2.1 根据现行《公路路基设计规范》（JTG D30）中推荐的方法测定待补偿结构顶面的回弹模量 E_0 ，或通过测定回弹弯沉后再反算其回弹模量。

B.2.2 确定刚度补偿后等效弹性半空间体顶面回弹模量的目标值 E_2 。

B.2.3 选择刚度补偿层材料并确定其回弹模量 E_1 ，可按现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）中的方法对材料的回弹模量进行测定，或按表 B.2.3 进行预估。

表 B.2.3 刚度补偿材料静态回弹模量参考值

填筑材料	填料模量 (MPa)
级配碎石	180 ~ 400
未筛分碎石	180 ~ 220
级配砾石	150 ~ 300
天然砂砾	100 ~ 140
黏土质砂	80 ~ 100
灰土	80 ~ 120
低液限黏土	50 ~ 70

B.2.4 根据补偿前的回弹模量 E_0 、补偿后的回弹模量目标值 E_2 以及选择的补偿材料的回弹模量 E_1 ，可按刚度补偿层设计诺谟图（图 B.2.4）确定补偿层厚度。

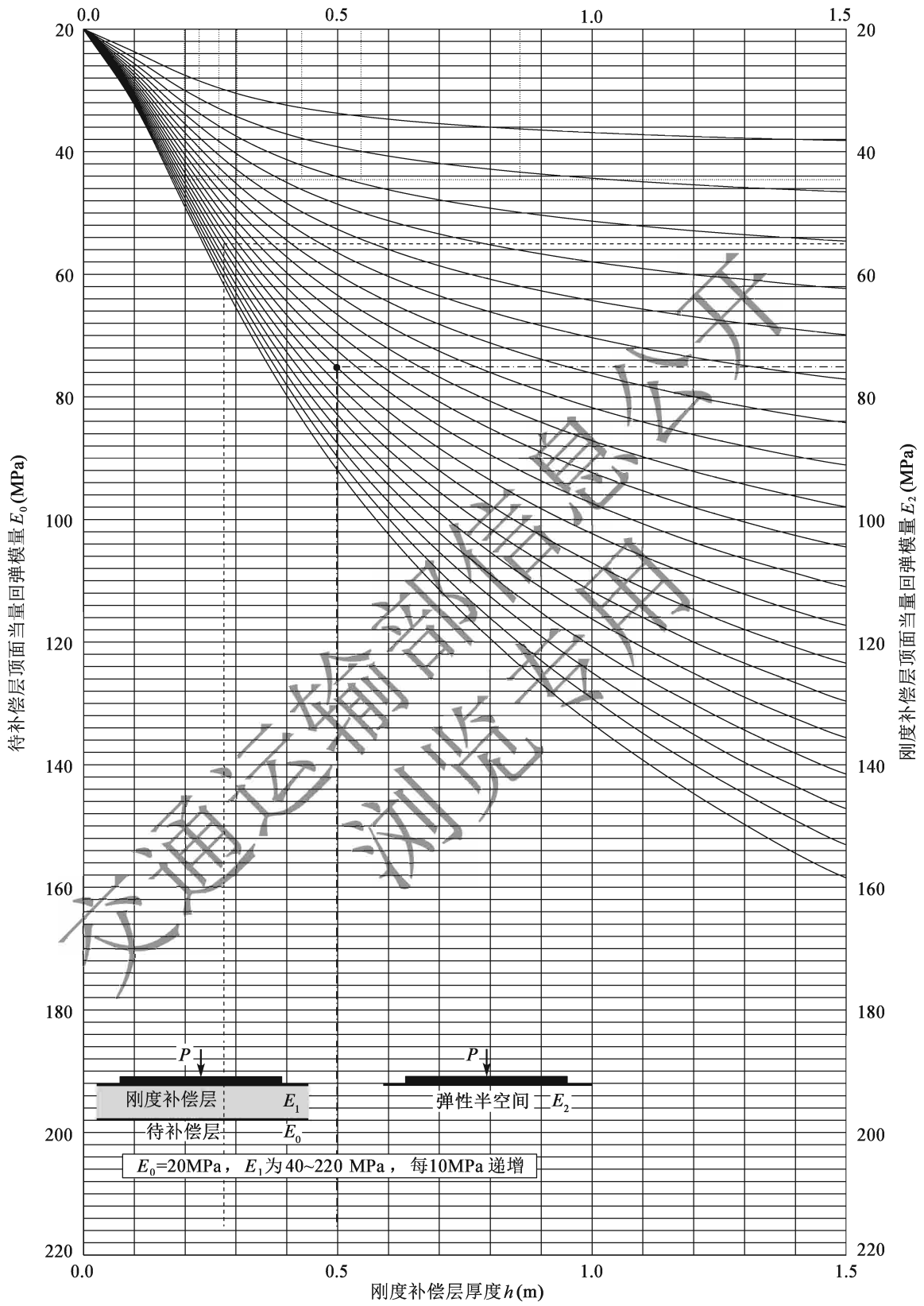
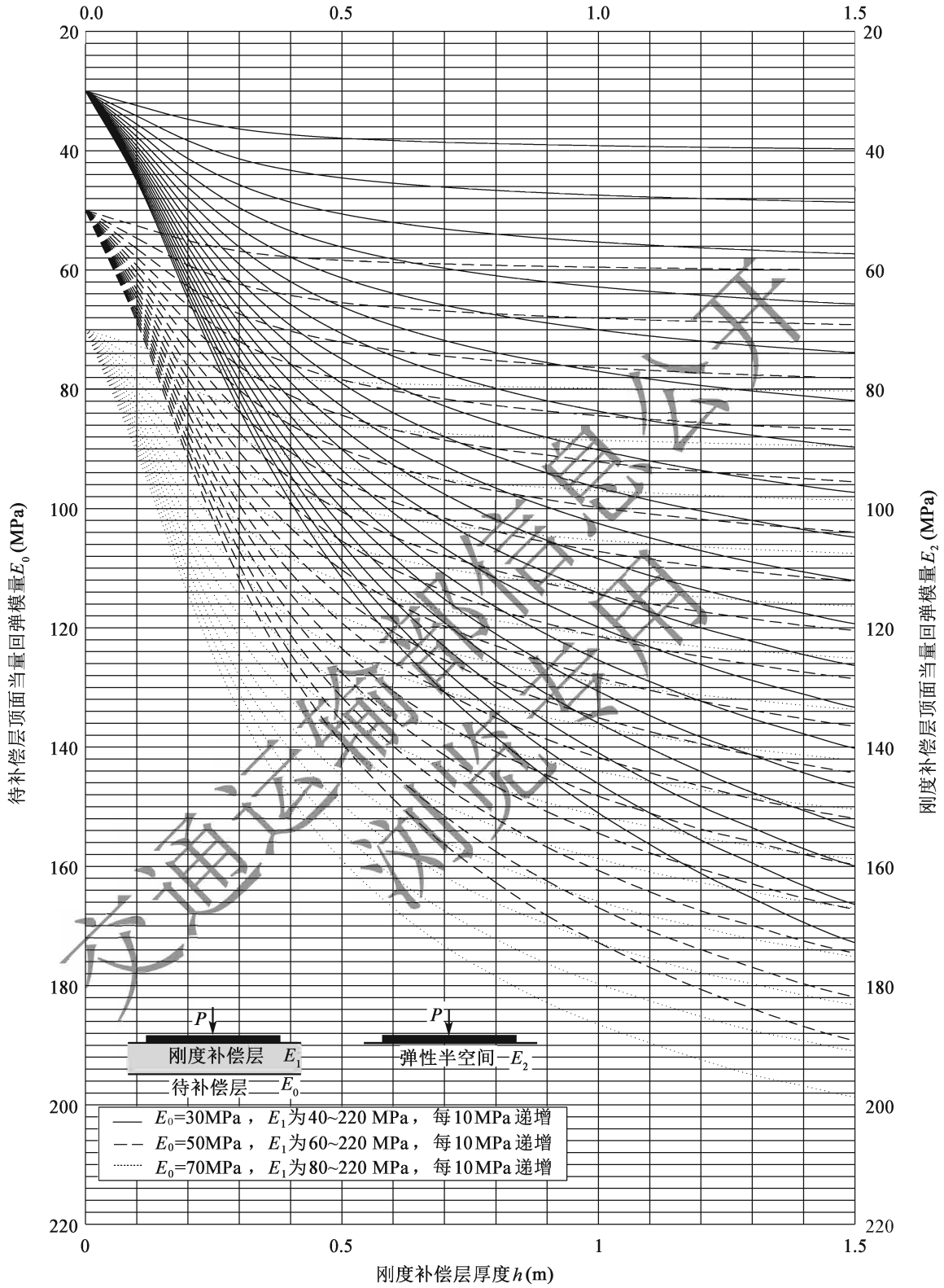


图 B.2.4



b)
图 B.2.4

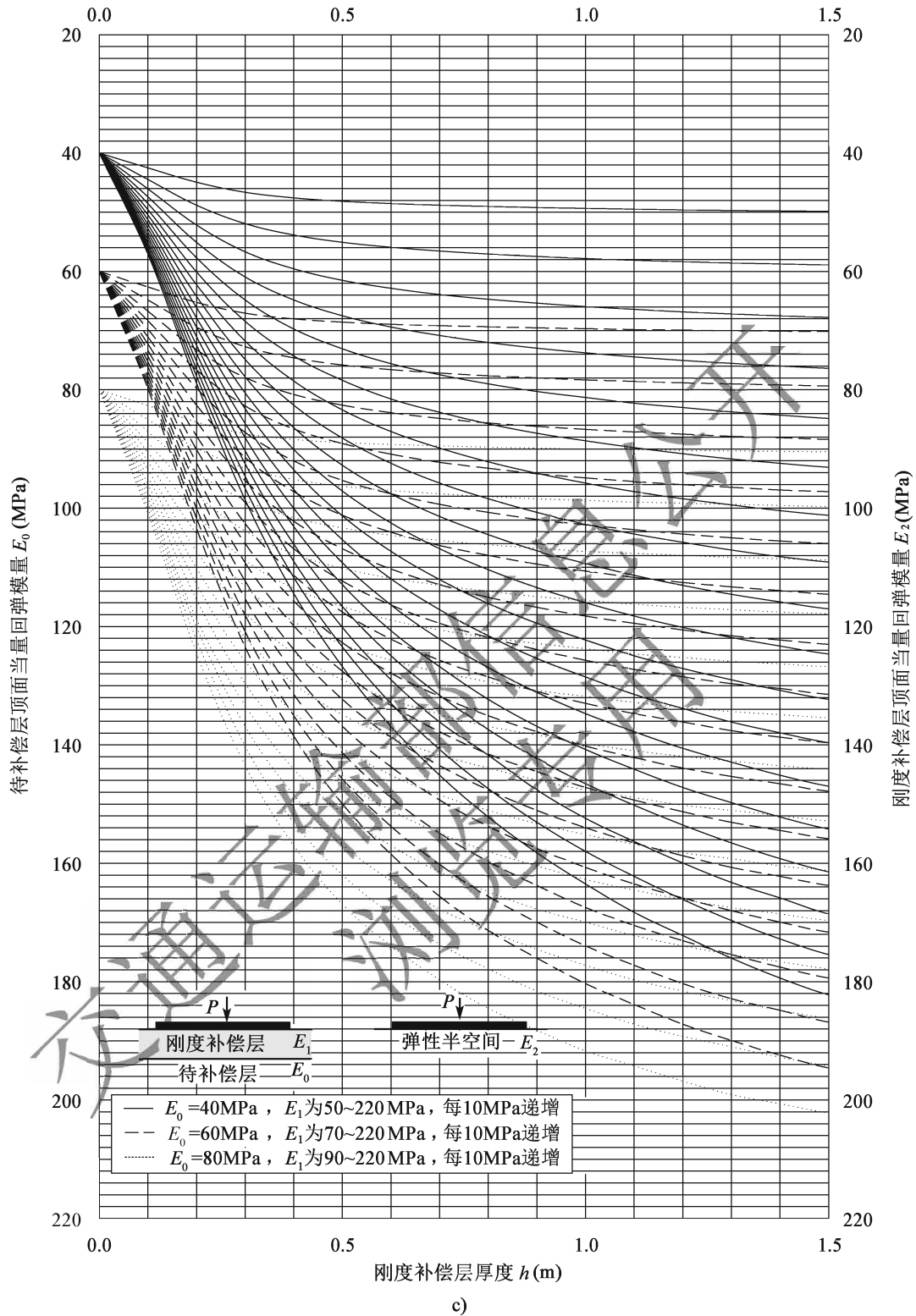


图 B. 2. 4 刚度补偿层设计诺谟图

B. 2. 5 如受高程限制，待补偿层厚度已限定，则在已知目标回弹模量 E_2 、补偿前的回弹模量 E_0 和补偿层厚度 h 的基础上，可由图 B. 2. 4 查得刚度补偿层材料应达到的回弹模量要求值 E_1 。

B.2.6 根据刚度补偿层回弹模量 E_1 的要求,由表 B.2.3 选择合适的材料,或通过室内试验和试验路的试验检测,选择改良土等更为合适的刚度补偿层材料。

B.3 刚度补偿层设计诺谟图的使用说明

B.3.1 已知待补偿层顶面当量回弹模量 E_0 、刚度补偿层顶面当量回弹模量目标值 E_2 和刚度补偿层厚度 h 的基础上,确定刚度补偿层的回弹模量 E_1 。具体操作应按下列步骤进行:

- 1 已知 $E_0 = 20\text{MPa}$, $E_2 = 80\text{MPa}$, $h = 0.5\text{m}$, 于图 B.2.4a) 右侧纵坐标 80MPa 处作垂线。
- 2 于图 B.2.4a) 底部横坐标 0.5m 处作垂线。
- 3 两线交于一点,该点所处曲线即为刚度补偿层材料的回弹模量 E_1 , 此时 $E_1 = 170\text{MPa}$ 。

B.3.2 已知待补偿层顶面当量回弹模量 E_0 、刚度补偿层顶面当量回弹模量目标值 E_2 和刚度补偿层材料回弹模量 E_1 的基础上,确定刚度补偿层的厚度。具体操作应按下列步骤进行:

- 1 已知 $E_0 = 20\text{MPa}$, $E_2 = 60\text{MPa}$, $E_1 = 200\text{MPa}$, 于图 B.2.4a) 右侧纵坐标 60MPa 处作垂线。
- 2 再过该直线与 $E_1 = 200\text{MPa}$ 的对应曲线的交点作垂线,交于底部横坐标轴。
- 3 横坐标的值即为刚度补偿层的厚度,此时 $h = 0.28\text{m}$ 。

B.3.3 已知待补偿层顶面当量回弹模量 $E_0 = 20\text{MPa}$, 刚度补偿层顶面当量回弹模量目标值 $E_2 = 50\text{MPa}$, 根据图 B.2.4a) 进行加铺层方案比选和优化设计。具体操作应按下列步骤进行:

- 1 沿右侧纵坐标 50MPa 处作垂线与曲线簇相交。
- 2 再过这些交点分别作垂线交于横坐标轴。
- 3 得到一系列刚度补偿层材料回弹模量 E_1 和厚度 h 的设计组合,见表 B.3.3。

表 B.3.3 刚度补偿层设计组合

刚度补偿材料回弹模量 E_1 (MPa)	刚度补偿层厚度 h (m)
60	0.88
70	0.55
80	0.43
110	0.32
130	0.27
170	0.23
220	0.21

附录 C 室内侧向膨胀试验方法

C.1 目的和适用范围

C.1.1 本试验目的是在垂直于试样成型压力方向上用环刀取样后测得膨胀产生的上覆压力与膨胀变形之间的相关关系。

C.1.2 本试验方法适用于原状土、击实土试样，试验时应依次采用平衡加压法和逐级卸荷法。

C.2 仪器设备

C.2.1 单轴固结仪：试样面积 30cm^2 ，高 2cm 。附杠杆式加压设备。为了加荷方便准确，宜用标准砂和盛砂桶代替砝码和吊盘。

C.2.2 环刀：直径为 61.8mm ，高度为 20mm 。环刀应具有一定的刚度，内壁应保持较高的光洁度，宜涂一薄层硅脂或聚四氟乙烯。

C.2.3 透水石：顶部透水石和底部透水石。顶部透水石直径应等于环刀外径，使得在加压瞬间试件的初始体积不发生变化。

C.2.4 变形量测设备：量程 10mm ，最小分度为 0.01mm 的百分表。

C.2.5 其他：天平、秒表、烘箱、钢丝锯、刮土刀、铝盒等。

C.3 试样制备

C.3.1 根据工程需要，对场地膨胀土钻芯取原状样，或采用湿法重型击实法制备具有相同湿密状态的扰动土样。钻入深度不应小于大气作用显著影响层深度。钻芯取样完成后，应立即对钻芯样采取必要措施防止水分损失。

C.3.2 将脱模后得到的圆柱形钻芯样或击实样旋转 90° ，用钢丝锯将上下两个曲面

削平。然后用手轻轻将环刀垂直下压，边压边修，直至环刀装满土样为止。再用刮刀削去两端余土，得到环刀样（ $\phi 61.8\text{mm} \times 20\text{mm}$ ），如图 C.3.2 所示。

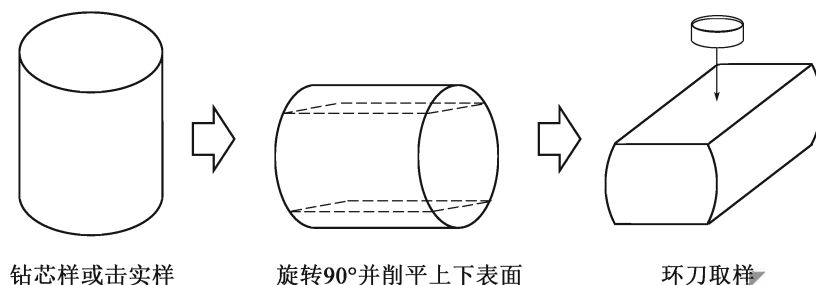


图 C.3.2 环刀样制备方法

C.3.3 擦净环刀外壁，称量环刀与土总质量，精确至 0.1g，并取环刀两侧修下的余土测量含水率。

C.4 试验步骤

C.4.1 在环刀样外壁涂一薄层凡士林，然后刀口向下放入固结盒护环内。将底板放入容器内，底板放底部透水石、滤纸，借助提环螺栓将土样环刀及护环放入容器内，土样表面覆滤纸、顶部透水石，然后放下加压导环和传压活塞，使各部密切接触，调整杠杆平衡系统，使之水平，保持平稳。

C.4.2 施加 1kPa 的预压力，使试样与仪器各部接触。安好百分表，调节指针位置，记下初读数。随后自下而上地向容器内注入蒸馏水，直至水面与环刀顶面齐平。

C.4.3 当百分表指针顺时针转动时，说明土体开始膨胀，立即往盛砂桶加适量标准砂，使百分表指针回到初读数。加标准砂时要避免冲击力。

C.4.4 及时称余砂重（标准砂总重 - 余砂重 = 平衡荷重）。如平衡荷重可能导致仪器变形，在加下一级平衡荷重时，百分表指针应反方向转动以扣除与该级平衡荷重相应的仪器变形量。

C.4.5 当测试时间过长需要中断试验时，可用杠杆上下的固定螺栓或磅秤上的制动栓，在维持百分表指针不变的情况下将其固定，以保证中断期间试样不发生膨胀变形。

C.4.6 维持某级平衡荷重达 2h 以上而得到恒定试样高度时，表明试样在该级平衡荷重下达到稳定。此时的试样高度应为原初始高度 20mm。记录此刻的余砂质量。

C.4.7 用量杯将桶中砂逐步减少至零，开始逐级卸荷的膨胀试验。

C.4.8 维持某级平衡荷重达 2h 以上而试样膨胀高度不再发生变化时，表明试样在该级平衡荷重下达到稳定。记录每级减荷至稳定时的余砂质量和膨胀高度。

C.4.9 试验结束后，吸去容器内水，卸除荷重，取出试样，称试样质量，并测定含水率。

C.5 结果整理

C.5.1 各级膨胀力按下式计算：

$$\sigma_{\text{ehi}} = \frac{W_i \times m}{A} \quad (\text{C.5.1})$$

式中： σ_{ehi} ——各级膨胀力 (kPa)，计算至 0.1；

W_i ——各级平衡荷重 (N)；

m ——加压设备的杠杆比；

A ——试样面积 (cm^2)。

C.5.2 各级膨胀率按下式计算：

$$\varepsilon_{\text{ehi}} = \frac{R_u + R_{\text{pi}} - R_{0i}}{H_0} \times 100 \quad (\text{C.5.2})$$

式中： ε_{ehi} ——各级平衡荷重作用下的膨胀率 (%)，计算至 0.1；

H_0 ——试样的初始高度 (mm)；

R_u ——各级平衡荷重作用下膨胀稳定后的百分表读数 (mm)；

R_{pi} ——各级平衡荷重作用下仪器的变形量 (mm)；

R_{0i} ——各级平衡荷重减荷前的百分表读数 (mm)。

C.5.3 本试验应做两次平行测定，取其算术平均值，其平行差值应为： $\varepsilon_{\text{ehi}} \geq 10\%$ 时不大于 1%； $\varepsilon_{\text{ehi}} < 10\%$ 时不大于 0.5%； σ_{ehi} 不大于 2kPa。否则，应重新制样测定。

C.5.4 将各级平衡荷重下的膨胀力和膨胀应变进行归一化处理，分别除以最大膨胀力 σ_{eh0} (对应最大平衡荷重) 和最大膨胀率 ε_{ehf} (对应无平衡荷重) 后点绘于图，如图 C.5.4 所示。图 C.5.4 的变化规律可按式 (C.5.4) 拟合。

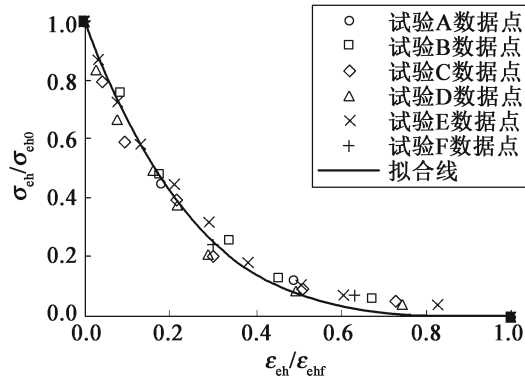


图 C.5.4 归一化后的膨胀力随膨胀变形变化规律

$$\sigma_{ehi} = \sigma_{eh0} [1 - (\epsilon_{ehi}/\epsilon_{ehf})^n] \quad (C.5.4)$$

式中： σ_{ehi} ——各级平衡荷重下的膨胀力 (kPa)，即发生一定侧向变形后的侧向膨胀压力；

σ_{eh0} ——恒体积条件下的最大膨胀力 (kPa)；

ϵ_{ehi} ——各级平衡荷重下对应的膨胀率 (%)；

ϵ_{ehf} ——无平衡荷重下对应的最大膨胀率 (%)；

n ——拟合参数。

本规范用词用语说明

1 本规范执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。
- 3) 当引用本规范中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”、“应符合本规范第×.×节的有关规定”、“应符合本规范第×.×.×条的有关规定”或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。