

## 摘 要

在对国内外排水设计与设施研究与工程应用经验的基础上,依托具体工程进行应用研究。对西部地区目前常用排水设施及相关材料的工程应用状况进行调研,分析西部地区公路排水设施的类别、设计理论和方法。在调研的基础上,研究(复合)土工合成材料在几种排水设施中的应用方案。对其进行室外试验路验证,结合理论分析,全面系统地评价了在公路排水设施中应用(复合)土工合成材料的设计方法的适用性及使用效果,提出了(复合)土工合成材料应用于各种排水设施时,对土工合成材料的性能及技术要求。

论文综述了国内外公路防排水设施类型及其水力学分析方法,并对所存在的问题进行了分析,同时提出了应用(复合)土工合成材料进行公路防排水设施设计的设计理论。依据室内、外试验测试结果,测试分析应用(复合)土工合成防排水材料的公路排水设施的技术性能、设计方法和质量指标。

论文还初步提出了公路防排水设施应用土工合成材料的施工方法及工艺。

关键词:(复合)土工合成材料 排水设计 设计方法 技术性能

## Abstract

On the basis of drainage design and research of drainage facilities, as well as experiences of projects application interior of country and overseas, the application research is carried out relying on the real highway project. Through the investigation of projects application conditions of the common drainage facilities and relative materials in western regions at present, the design theory and methods, as along as the category of drainage facilities in western highway drainage design are analyzed. According to the investigation, the means of applying the (compound) geosynthetics in the drainage facilities is studied. In connection with the outdoor test road, integrating theoretical analysis, the compatibility and performance in service of design method is evaluated comprehensively and systemically in road drainage facilities with geosynthetics. This paper presents the property and technical standard of geosynthetics in drainage facilities with geosynthetics.

This paper relates comprehensively the road waterproof and drainage facilities, hydraulic analysis method, analysis of the existed problem. The design theory of road drainage applying geosynthetics is presented. Depending on the results of laboratory test and in-site test, the technical property, design method, quality index of geosynthetics in road drainage facilities were tested and analyzed in this paper.

This paper also puts forward as well the construction method and technique of geosynthetics in road drainage facilities.

Key word: (composite) geosynthetics      drainage design  
   design method                      technical standard

## 1 前言

### 1.1 应用(复合)土工合成材料进行公路防排水设施设计的立题依据

随着我国经济的飞速发展,高等级公路的建设规模不断扩大,特别是近十几年来,我国的公路发展迅猛。根据交通部西部开发公路建设总体规划,今后十年,西部地区的公路建设将完成 7000 亿多元的投资,其规模和速度都是空前的。由于西部地区特殊的自然地理条件和经济发展状况,要求公路项目的设计方法和施工技术更加符合当地的环境条件和荷载条件。在公路排水方面,我国已经取得了许多成果,但是,近年来,由于水毁造成的公路损坏问题尤为突出,全国每年公路水毁的直接经济损失达数十亿元。

实际上,水是危害公路设施的主要自然因素。公路的典型病害,如路基沉陷、翻浆、路面剥落、裂缝、错台、断裂等,都不同程度地与地表水和地下水的作用有关。西部地区地质情况复杂,降雨量较大,地表水系发育,地下暗河较多,地下水位高,有些地方甚至长期地表积水。因此,良好的公路排水系统是公路的使用性能和耐久性的重要保证。

本文以研究(复合)土工合成材料在路界排水、地下排水、路面边缘排水以及支挡结构排水中的应用为主,着重于公路防排水设施对(复合)土工合成材料的性能要求,应用(复合)土工防排水材料的路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施的设计方法和施工验收标准。

#### 1.1.1 公路及城市道路排水系统的组成

公路或城市道路排水系统由三部分组成,如图 1.1.1-1 所示。

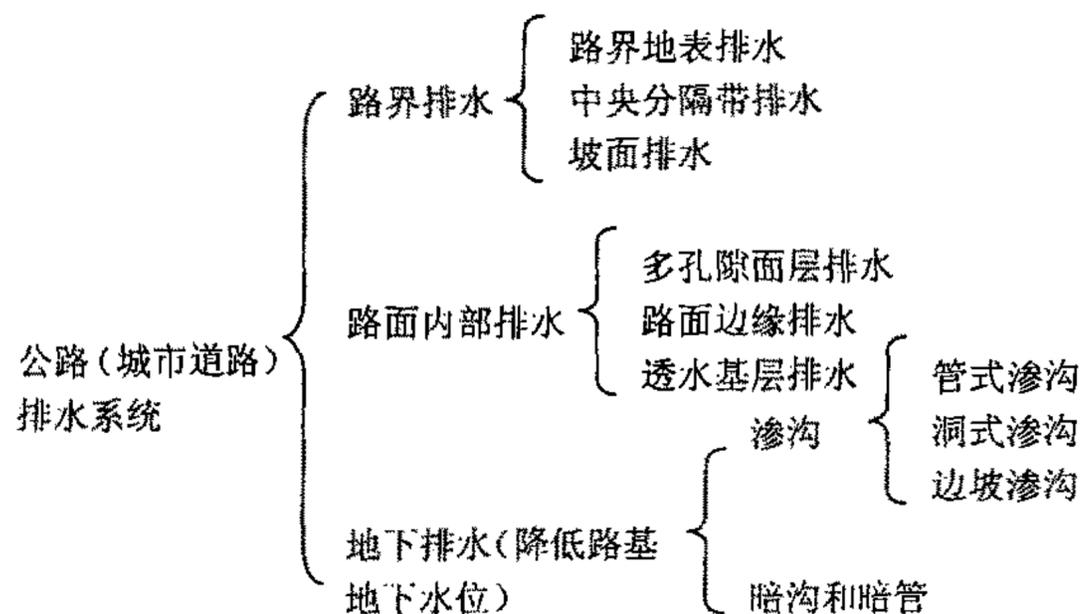


图 1.1.1-1 公路及城市道路排水系统组成

在这三个部分中,运用各种排水措施,如沟渠、管道、涵洞、急流槽、跌水、拦水带、进(出)水口、集水井、渗沟等,以拦截、汇集、拦蓄、输送、或排放地表水或地下水,并采用护坡防水,形成合适的防排水系统。

### 1.1.2 土工合成材料的种类及功能<sup>[2]</sup>

土工合成材料,又称土工布、土工网等各类,它是以合成纤维、塑料、合成橡胶等为原料制成的不同种类产品,使用过程中具有分离、加固、排水、过滤、防护、防渗六大基本功能。国外在三十年代就开始了使用,迄今其产品从单一纺织品发展到其它合成材料及其复合材料。现在土工合成材料已被称作与钢材、水泥、木材齐名的“第四种工程材料”,并广泛的应用于岩土、水利及土木工程等领域中。

土工合成材料种类很多,一般按功能及生产方法分为四大类,即土工织物、土工膜、土工复合材料、土工特种材料。下面概述几种土工合成材料的特点及应用。

#### (1) 机织土工布

机织土工布是我国使用最早的一种土工布。现我国使用较多的机织布材料有长丝机织布和扁丝机织布两种,材料以聚丙烯为主,单位重量一般为100~300克/平方米。它的应用以制作反滤布的土工模袋为多。机织土工布具有强度高、延伸率低的特点,广泛使用在水利工程中,用作防汛抢险、土坡地基加固、坝体加筋、各种防冲工程及堤坝的软基处理等。

#### (2) 经编土工布

用经编机生产经编土工布的方法较少单独采用,经常与其他方法联合使用,如将经编布与非织造布交织形成纤网型缝编土工布,也可与纸带一起编织成可降解的经编土工布。经编土工布主要应用于排水沟、水坝或烟筒过滤,无中间层的海岸保护,阻截自流水压,加固垂直地面、倾斜面和堤岸基层等。

#### (3) 非织造土工布

非织造土工布的出现比织造土工布晚,其生产方法主要有纺粘法和针刺法两种,其中针刺法在我国所占比例较大。非织造土工布具有较大的延伸率,能适应较大的变形,可以根据需要制成适当大小的孔隙,并在水平与垂直方向均具有较好渗透力。因此,非织造土工布的发展速度很快,并已成为土工布的主要组成部分。现已广泛应用于解决路基沉陷及翻浆冒泥问题,用于土石坝的排水系统、地下排水管道、软弱地基加固,各种堤岸的护坡垫层等工程的滤层。此外,还可用

于土加筋材料,使软基加固或修筑轻型挡土墙,同时,还可降低路堤下的孔隙水压。

#### (4) 土工格栅

我国以聚乙烯材料为主的塑料土工格栅居多,有单轴向格栅及双轴向土工格栅两种。土工格栅主要应用于软土基础加固及护坡、护堤等工程中。

#### (5) 复合土工布

复合土工布是由两种或两种以上不同功能、不同种类的土工布及其他材料复合而成,复合材料可以是纺粘或针刺型非织造布、机织布、聚乙烯薄膜、塑料网、塑料管等。其生产方法主要有以下两种:

- 1) 机械方法:采用针刺复合和缝编工艺技术;
- 2) 热熔粘合法:采用超声波粘合及热轧粘合技术。

复合土工布在我国应用较多的是复合土工膜和塑料排水管,可应用于软地基和地基下具有坑洼的路基,堤岸的增强,路边排水,桥座和挡土墙下排水,蓄水池、废物处理池的密封层,传统沙石层排水系统的替代等。复合土工布在原有单层材料基础上使其性能得到很大改善,如层压后的土工布力学性能得到很大提高,机织布与非织造布经针刺复合后的过滤性能得到改善等。

### 1.1.3 土工合成材料在防排水中的应用<sup>[2]</sup>

土工合成材料是一种新型的岩土工程材料。它以人工合成的聚合物,如塑料、化纤、合成橡胶等为原料,制成各种类型的产品,置于土体内部、表面或各层土体之间,发挥加强或保护土体的作用。土工合成材料可分为土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料等类型。目前已广泛应用于水利、电力、公路、铁路、建筑、海港、采矿、军工等各个领域。

据不完全统计,土工合成材料已在数十万项工程中得到成功的运用,取得了良好的经济效益、社会和环境效益;在一些抗御自然灾害的斗争中,更显出其快捷、有效、简便的特点。

以往的防排水系统中,往往仅仅采用碎石、卵石、开级配粒料、砂砾等材料,但这样具有一些固有缺陷,例如性能单一,质量大,寿命不长等,故不能全面满足工程的特定需要。而品种齐全的人工合成材料具有多种能满足工程需要的性能,可制成各种符合实用目的的产品。因而土工合成材料也广泛地应用于道路的防排水系统中,主要有:

- (1) 铺设在路床上,用以防治翻浆冒泥等基床病害——综合利用土工合成

材料的隔离、反滤和排水作用，阻止道碴不楔入路基，路基的土粒不混入道床，通过平面排水快速消散车辆动载下引起的超静孔隙水压力。使用的土工合成材料包括多种类型，但多数采用针刺型无纺土工织物或土工膜。

(2) 用于排水系统——用土工织物包在碎石、卵石透水材料之外或直接包在各种带孔的排水管外，构成排水盲沟；用于线路纵向、横向地面下排水，代替一般要求较高且施工困难的砂砾反滤料，或代替各种材料的排水盲沟管材。这方面主要采用针刺型或热粘型无纺土工织物。近年来，排水软管以其重量轻，易于运输和施工，以及寿命长，质量可靠而得到推广应用。

(3) 用于边坡防护或防冲蚀——利用土工合成材料较高的强度及反滤功能保护路堤或路堑边坡；还可利用土工织物袋装砂石作护坡。

(4) 在挡墙背后或桥台背后铺设土工合成材料排水层以降低水压力。德国最新的路基技术规范明确要求在桥台背后与填土之间铺设土工织物排水层。

(5) 在隧道衬砌内侧设置土工合成材料作为排水层或防水层。

(6) 用于软土地基加固处理——用塑料排水板代替排水砂井以加速软土地基的固结或者铺在基底利用其抗拉强度和水平排水增加软土地基的承载能力。

#### 1.1.4 本文研究的意义<sup>[10]</sup>

虽然在短短的几十年内，土工合成材料在道路的防排水系统中已有了很广泛的应用，但在材料的使用方法性能评价和应用技术上，仍没有得到足够的重视。

江苏省汾（水）灌（云）高速公路是同江至三亚的国道主干线中的一段，地处我国四大软土区之一的连云港地区，从气候分区的角度看，该路段地处我国亚热带和温带的分界线，气候条件复杂，雨量充沛，年温差大。在中央分隔带，用不透水土工布（涂膜有纺土工织物）沿纵向（包括集水槽）在底面及侧壁满铺，形成不透水层，阻止中央分隔带表面下渗的雨雪水继续渗入路基填料及路面结构中；用透水土工布（无纺土工布）在纵向碎石盲沟表面满铺，让下渗水能进入盲沟而泥土进不了盲沟；在纵向盲沟中放置软式透水管，可以通过整个管体全方位过滤以快速有效地排除碎石盲沟中的水分，增加整个排水系统的有效排水路径。

位于云南碧鸡关和车家壁两条冲沟洪积扇上的昆明市南过境一级干道，路基处于地下水的淹没与浸没之中，严重影响路基的强度和稳定性。设计者在路面上设置碎石——无纺布——碎石复合排滤结构，横向设无纺布包碎石作盲沟，两侧路肩下设无纺布覆盖的纵向暗沟，在路堑两侧设无纺布包开孔花管，通过纵向暗沟将盲沟、花管、集水井连成一完整的排水体系。不仅排除了积水，加固了土基，

而且与常规方法相比节约了 12~47%<sup>[19]</sup>。

以上的实例都表明,在道路的防排水系统中,结合工程实际,使用土工合成材料,有助于将积滞在路界范围内的水排除道路面和路基结构外,有利于改善道路的使用性能,大大提高其使用寿命。在防排水中应用土工合成材料可在我国新建和改建的道路及铁路建设中推广应用,在我国道路建设中有很强的实用性和优越性。本文的研究力图对土工合成材料的防排水性能、应用技术进行系统的研究,并针对公路排水设施的特点,研究考虑以防排水性能为主要指标的分类,不同公路排水设施的应用技术,改善道路使用性能,延长道路寿命,降低道路养护和维修费用,为国家节省投资。

## 1.2 土工合成材料在防排水应用上的历史及现状<sup>[2]</sup>

土工合成材料广泛地运用于工程建设的各个方面,但在防排水方面的运用是最早的,也是应用最广的。其最早的应用可追溯到本世纪二三十年代,聚氯乙烯薄膜首先应用在游泳池的防渗。大量塑料防渗薄膜的应用开始于灌溉工程。美国垦务局 1953 年在渠道上首先应用聚乙烯薄膜。原苏联在渠道上使用低密度聚乙烯的历史也是很长远的。塑料防渗薄膜的应用以后又发展到水闸、土石坝和其他一些建筑物。

合成纤维在土工中的应用开始于 50 年代末期。1958 年 R. J. Barrett 在美国佛罗里达州利用聚氯乙烯织物作为海岸块石护坡的垫层,一般认为是应用现代土工织物的开端。实际上在 1957 年以前,以合成纤维织物作成的砂袋已经在荷兰、德国和日本等国家应用了。在 60 年代,合成纤维土工织物在美国、欧洲和日本逐渐推广。所用的土工织物主要是机织型的(俗称有纺织物,即有经、纬线的),大部分用于护岸防冲刷等工程。由于机织型的土工织物的强度具有很大的方向性,而且价格较高,限制了它的发展。

非织造型织物(俗称无纺布或无纺布)的应用,给土工织物带来了新的生命。它的特点是把纤维做成多方面的或任意性的排列,故强度没有显著的方向性。厚的织物不但可以用作滤层,还可以用作导水体,因此更适用于各种土建工程。非织造型土工织物在 60 年代末期开始使用于欧洲,1968 年~1970 年间相继使用于法国和英国的无路面道路、德国的护岸工程、法国的 Valcros 土坝的下游排水反滤层和上游护坡垫层和德国的一座隧洞。在 70 年代,这种土工织物很快从欧洲传到美洲、西非洲和澳洲,最后传播到亚洲。近 20 年来,由于仿粘法织造工艺的推广,生产出大量的成本低、强度高的产品,使非织造型土工织物的应用

飞速地发展起来。

“土工织物”(Geotextile)和“土工膜”(Geomembrane)是1977年J.P.Giroud与J.Perfetti首先提出来的。他们把透水的土工合成材料称为“土工织物”，不透水的称为“土工膜”。这两个名词被使用了许多年。近几十年来大量的以合成聚合物为原料的其他类型的土工合成材料纷纷问世，已经超出了“织物”和“膜”的范畴。1983年J.E.Fluet建议使用“土工合成材料”(Geosynthetics)一词来概括各种类型的材料，最近几年来这一名词已被多数工程师所接受。

随着使用范围的不断扩大，土工合成材料的生产和应用技术也在迅速地提高，使其逐渐称为一门新的边缘性学科。它以岩土力学为基础，与石油化学工程和纺织工程有密切联系，应用于土建工程的各个领域。1977年在巴黎召开了“织物在岩土工程中的应用国际会议”(International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics)。后来人们把这次会议看成是第一届国际土工织物会议。1983年成立了“国际土工织物协会”(International Geotextile Society 简称IGS)。1994年在新加坡召开了“第五届国际土工织物，土工膜及有关产品会议”。在这次会议上，大多数与会代表主张用“土工合成材料”一词来概括各种类型的有关产品材料，并将“国际土工织物学会”更名为“国际土工合成材料学会”(International Geosynthetics Society 仍简称ISG)。这些地区性或专门性的会议，大大促进了这一新材料和新技术的发展。

合成材料在我国的应用开始于60年代中期，当时在市场上已经出现很多种塑料和化纤产品。少数工程技术人员发现这些产品具有良好的工程性质，试用于土建工程，取得了一些成功的经验，但未能及时推广。1979年党的十一届三中全会制定了以经济建设为中心和改革开放的基本国策，工程技术人员的思想日益解放，与世界各国的交流日益增多，引进了无纺土工织物，塑料排水带，化纤模袋等新型材料，才加速了这一新技术在我国的推广。

塑料薄膜是在我国应用比较早的土工合成材料，在1965年前后，开始应用于渠道防渗。主要原料是聚氯乙烯，薄膜厚度由0.12至0.38mm。以后推广到水库、水闸和蓄水池等工程。1965年为了防治桓仁水电站混凝土支墩坝的裂缝漏水，用沥青聚氯乙烯热压膜固定并粘结于上游坝面，取得了良好的防渗效果，是我国利用土工合成材料处理混凝土坝裂缝的首例。同年在河北省子牙新河献县枢纽，曾利用粘土夹塑料薄膜作为进洪闸上游护坦的防渗措施。1980年宁夏石嘴山市修建了一座容积为25万立米的蓄水池，采用厚度为0.1mm的聚氯乙烯薄膜防渗，运用多年，效果良好。较厚的土工膜在我国到80年代中期才起用。1986

年河北省在乱木水库利用 0.8mm 的聚氯乙烯土工膜处理了库区台地到渗漏。近十年来完成的或正施工中的一些较大工程,多数采用单层的较厚的土工膜或复合型土工膜。

土工织物的应用,在我国起步较晚,但发展很快。1976 年在江苏省长江嘶马护岸工程中,首先使用由聚丙烯扁丝织成的编制布,结合聚氯乙烯绳网和混凝土块压重,组成软体排,防止河岸冲刷。类似的软体排相继应用在江苏省都西闸和湖北省长江堤防工程。进入 80 年代,编制布都应用日渐增多,普遍应用于制造土、砂、石袋,土、石枕以及软弱地基加固等工程。进入 90 年代,在东北,华北和长江流域先后发生了几次特大洪水,编制布在防汛抢险重曾发挥了极为突出的作用。非织造型土工织物的应用,开始于 80 年代初期,从 1984~1985 年间,云南的麦子河水库,江苏昆山的暗管排水工程,内蒙古翰嘎利水库,天津的鸭淀水库,黑龙江引嫩工程等都用其作为反滤层,经过几年都考验,效果全都良好。自 80 年代中期以后,无纺织物都应用很快推广到储灰坝、尾矿坝、水坠坝、港口码头、海岸护坡以及地基处理等工程。

另外还有几种土工合成材料在我国发展也很快。一种是加固软土地基的塑料排水带,从 1981~1983 年在天津新港试用以后,到 80 年代末期,已应用于七八个省市的港口码头、高速公路、电厂厂房、飞机场、铁路等工程;一种是浇注混凝土用的化纤模袋,开始试用于江苏省的南官河口岸,到 80 年代末期,已推广到七八个省市三十几项工程;另一种是塑料低压输水管道,70 年代末从外国引进,目前已普遍应用于河北、山东、河南、陕西、东北各省。其他类型的土工合成材料,如橡胶、塑料锚杆、塑料条带、泡沫塑料、土工网,土工隔栅等,也已在我国土建工程中应用。

土工合成材料在道路防排水系统中的应用也较为广泛。1985 年前后,英国、德国用土工织物或土工格栅建筑加筋土陡坡,其上植草或灌木,以防土坡坍塌,并防止噪音。1991 年起至 1997 年止,我国先后在京广、湘黔、焦柳等线的 67 座隧道采用土工织物包裹混凝土渗滤排水管,整治翻浆,收到明显效果。上海市近年来约有 50 万平米的地下连续墙结构用于隧道、地铁等工程,在最易发生渗漏的墙体接缝部分,采用安设涂塑无纺织物的方法,进行排水,并在底板下埋设管道及反滤层,将水引至集水井排出,至今,排水效果良好。1995 年南(宁)昆(明)铁路那厘至百色段采用排水软管代替传统的盲沟排水,确保了膨胀岩地段路基翻浆冒泥工程整治的质量,收效良好。1992 年对哈尔滨至绥芬河铁路下行线应用 EPS 板防治路基冻害,收效良好。特别是 1998 年我国遭受特大洪水

灾害以后，由于国家领导及各有关部门的重视，使土工合成材料的生产、应用、研究等各个方面都发生了巨大的变化，工程应用范围不断扩大，测试技术、施工水平、理论研究、技术创新等方面的发展更为显著。

### 1.3 本文主要研究内容与技术路线

#### 1.3.1 主要研究内容

##### 1.3.1.1 公路防排水设施类型及其对（复合）土工合成材料的性能要求

（1）按照我国公路排水设计规范、路基路面等相关排水设计的技术要求，分析公路防排水对设施的布设形式与防排水材料的性能要求；

（2）针对西部的气候和地理环境，调研该地区现有公路防排水设施及所用材料的应用情况，分析其存在的问题。

##### 1.3.1.2（复合）土工防排水材料性能测试分析及其应用研究

（1）对目前国内外（复合）土工防排水材料的排水性能及其相关物理力学性质、水力学特性进行测试，总结出一些实用的测试方法；

（2）（复合）土工防排水材料在路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施中的应用方案；

（3）铺筑试验路排水设施，验证（复合）土工防排水材料的路用排水性能。

##### 1.3.1.3 应用（复合）土工防排水材料构筑路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施的设计方法与质量评定

（1）根据西部地区的地表径流、地下水、土质等自然条件，结合室内模型实验和试验工程，提出应用（复合）土工防排水材料构筑路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施的设计方法；

（2）应用（复合）土工防排水材料构筑路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施通用图；

（3）通过试验路工程研究应用（复合）土工防排水材料的路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施施工质量评定指标。

#### 1.3.2 实施方案

##### 1.3.2.1 总体技术方案

在国内外排水设计与设施研究与工程应用经验的基础上，依托具体工程进行工程应用研究。全面系统地研究（复合）土工排水材料在路界排水、地下排水、

路面边缘排水与支挡结构排水设施中的应用。通过和贵州交通规划勘察设计研究院的合作,掌握该项目现有研究水平以及材料工业已有成果。结合西部自然条件提出可能的新材料、新结构和使用环境,组织实施试验工程。通过工程效果的分析,总结出科学的(复合)土工防排水材料的成套工程技术。

本项目首先对西部地区目前常用排水设施及相关材料的工程应用状况进行调研,分析西部地区公路排水设施的设计理论和方法、排水设施类别;之后,调研国内外目前已有(复合)土工防排水材料的产品、价格、性能及其应用状况;在此调研的基础上,初步研究(复合)土工防排水材料在路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施中的应用可行性方案。

应用公路排水设计的基础理论和方法分析公路排水设施对(复合)土工防排水材料的技术性能要求,评价目前(复合)土工防排水材料在路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施应用可能存在的问题,提出改进建议。

结合具体依托工程情况,拟定应用(复合)土工防排水材料的路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施方案,修筑试验路。通过实体工程应用研究,测试分析应用(复合)土工防排水材料的路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施的技术性能、设计方法和质量指标。

在以上研究与总结的基础上,研究应用(复合)土工防排水材料的路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施的设计理论和方法,建立通用图。

### 1.3.2.2 野外调查与国内外研究成果调研

贵州地区公路防排水设施情况调研是从2001年10月开始的,其调研过程主要包括以下几个方面:

(1) 调研内容为:土工合成防排水材料工程应用情况;土工合成防排水材料性能试验测试方法与主要结论;土工合成防排水材料应用方式与效果。

(2) 调研方式为:有关研究文献资料收集和综述;国内有关实体工程调研。

野外调查工作是设计理论开展的基础,同时通过调研也可以进一步了解现有排水设施在设计上所需要加强的方面,因此,在贵州省交通勘察设计研究院的大力配合和支持下,对西部地区公路排水设施的进行了多次现场调研,详细的调研内容在第二章里介绍。

### 1.3.2.3 (复合)土工合成防排水材料技术指标研究

采用水力学理论分析(复合)土工合成材料在以下排水设施应用中应具备的性能:

(1) 路界排水;

- (2) 坡面防护;
- (3) 路面边缘排水;
- (4) 中央分隔带排水;
- (5) 支挡结构。

结合室内测试分析结果,对(复合)土工防排水材料进行技术指标和在公路防排水设施中应用的分类研究。

#### 1.3.2.4 试验路工程排水设施方案、施工与后续观测

国道主干线上海至瑞丽公路是国家公路网规划中的“五纵七横”十二条国道主干线之一,是连接华东、中南及西部地区的主要交通运输大通道。贵州省清镇至镇宁段高速公路是上瑞国道主干线的一段,该段公路地质情况复杂,所经地区降雨量较大,地表水系发育,地下暗河较多,在公路建设中常常会遇到由于排水设计的不完善导致各种路基路面病害,甚至路基失稳、边坡滑移等现象。因此本课题的研究主要是针对挡墙、中央分隔带、路面边缘、低洼平坦地段的排水设施应用土工合成防排水材料进行设计并验证的。

## 2 公路防排水设施类型及其水力学分析方法综述及排水设施调研

### 2.1 地下排水<sup>[1]</sup>

在地下水危及路基稳定(包括整体稳定和局部稳定)或者严重影响路基强度的情况下,应根据具体情况采取拦截、排引含水层地下水,降低地下水位或者疏干坡体内的地下水等措施。

路堑开挖截断了坡体内的含水层,或者山坡路堤的基底范围内有含水层出露时,可沿挖方或填方边坡坡脚设置纵向地下排水沟,将含水层内的地下水包括承压水拦截在路基范围外,并排引出路堑或路堤。

填挖方交替路段,接近路堑的路堤基底遇有含水层出露时,须在填挖交替处设置横向地下排水沟,以拦截含水层内地下水并排引出路界。

地下水位高而路堤填土高度又受到限制时,或者路堑开挖后路床顶高程离地下水位很近时,可沿两侧边沟设置渗沟,以降低地下水位,减小路基湿度,提高其承载力。

为拦截地下水或上层滞水的毛细上升阻止其进入路面结构,或者排除因温差作用而积聚在路基上层的自由水,可直接在路床顶部设置排水层,并在其两侧配置纵向集水管。

#### 2.1.1 地下水位高与局部地表积水

##### 2.1.1.1 常用排水设施类型

地下水位高而路堤填土高度又受到限制时,或者路堑开挖后路床顶高程距离地下水位很近时,或者局部有地表积水容易向路基渗透而改变路基土的干湿状态,可沿两侧边沟设置渗沟,以降低地下水位,减少路基湿度,提高其承载能力。

按构造的不同,渗沟大致有三种形式,如图 2.1.1-1 所示。I 式为填石渗沟,也称盲沟;II 式下部设排水管;III 式下部设石砌排水空洞,三种形式均由排水层(石缝或管、洞)、反滤层和封闭层所组成。

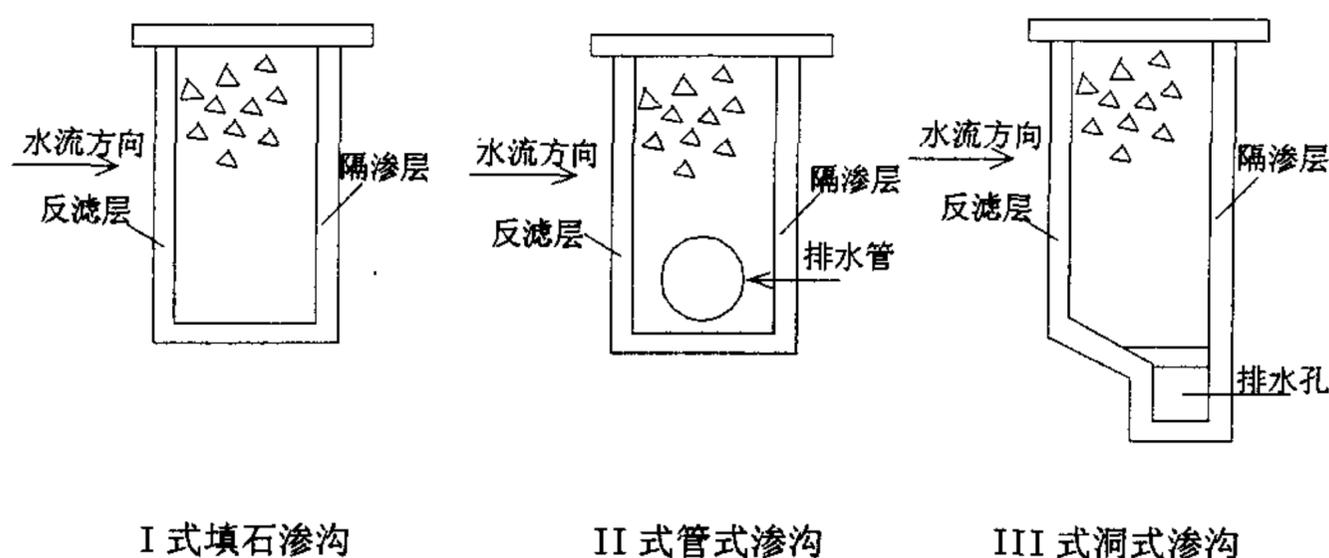


图 2.1.1-1 渗沟构造图

2.1.1.2 水力学计算及分析方法<sup>[3]</sup>

(1) 根据《公路排水设计规范 JTJ018-97》(以下简称《规范》), 渗沟流量计算公式为:

1) 渗沟底部挖至或挖入不透水层, 而不透水层的横向坡度较小时, 可采用地下水自然流动速度近于零的假设, 按下列公式计算单位长度渗沟由沟壁一侧流入沟内的流量:

$$Q_s = \frac{k(H_c^2 - H_g^2)}{2r_s} \quad (2.1.1-1)$$

$$h_g = \frac{I_0}{2 - I_0} H_c \quad (2.1.1-2)$$

$$r_s = \frac{H_c - h_g}{I_0} \quad (2.1.1-3)$$

$$I_0 = \frac{1}{3000\sqrt{K}} \quad (2.1.1-4)$$

式中:  $Q_s$ ——每延米长渗沟由一侧沟壁渗入的流量 [ $m^3/(s \cdot m)$ ];

$H_c$ ——含水层内地下水位的高度 ( $m$ );

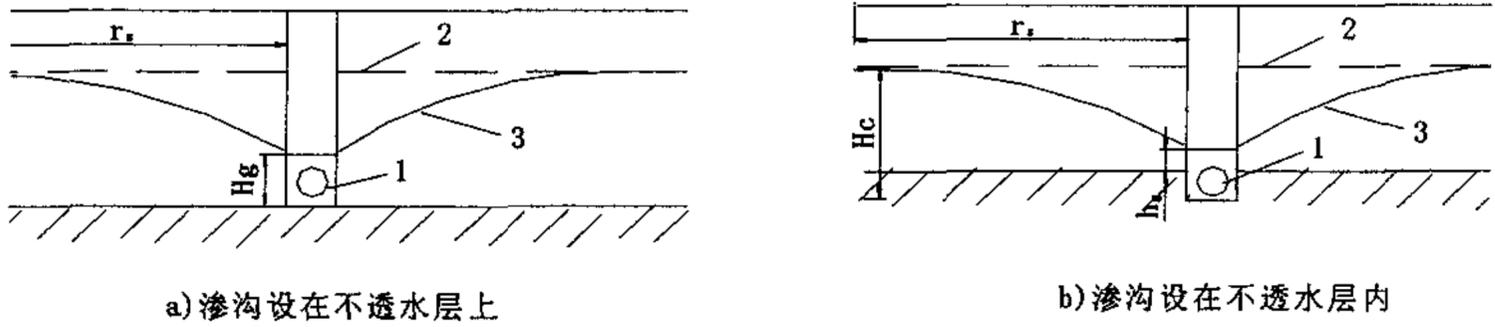
$h_g$ ——渗沟内的水流速度 ( $m$ ), 在渗沟底位于不透水层内, 且渗沟内水面低于不透水层顶面时, 按上式取用;

$k$ ——含水层材料的渗透系数 ( $m/s$ );

$r_s$ ——地下水位受渗沟影响而降落的水平距离 ( $m$ ), 可按上式确定;

$I_0$ ——地下水位降落曲线的平均坡度, 可按含水层材料的渗透系数由近似公式估算。

如果水由两侧流入渗沟内，则上述渗沟流量需乘以 2。



1-渗沟; 2-地下水位; 3-地下水降落曲线

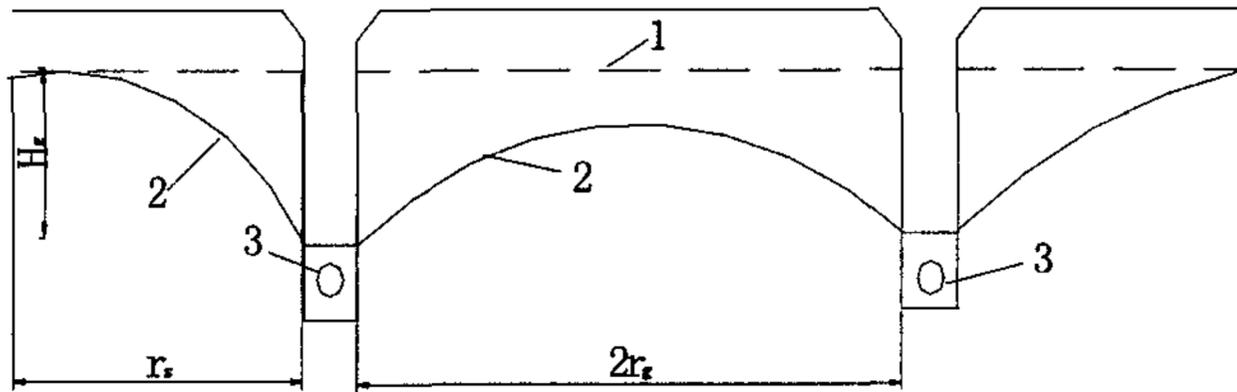
图 2.1.1-2 不透水层坡度平缓时的渗沟流量计算

2) 不透水层深时，位于含水层内的单位长度渗沟的流量按下式计算确定：

$$Q_s = \frac{\pi k H_g}{2 \ln \left( \frac{2r_s}{r_g} \right)} \quad (2.1.1-5)$$

式中： $r_g$ ——两相邻渗沟间距之半 (m)；

$H_g$ ——渗沟位置处地下水位的下降幅度 (m)。



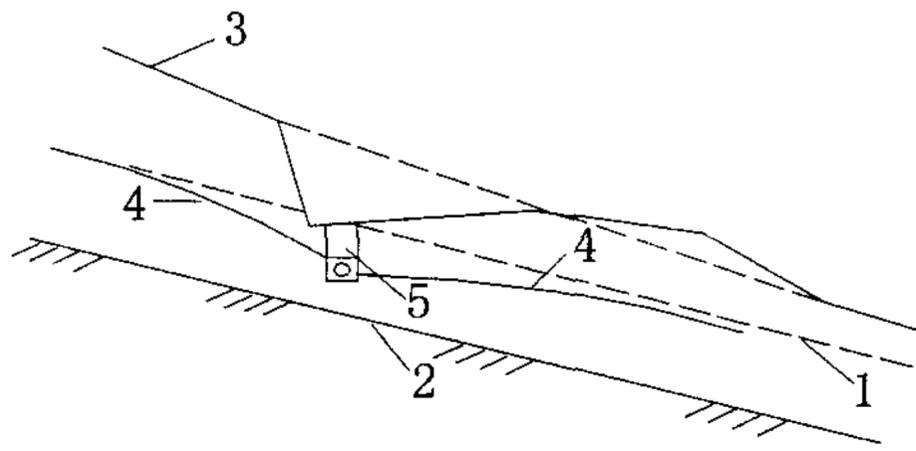
1-原地下水位; 2-降低后地下水位; 3-渗沟

图 2.1.1-3 不透水层深时渗沟流量的计算

3) 不透水层的横向坡度较陡时，按下式计算单位长度渗沟由沟壁一侧流入沟内的流量：

$$Q_s = k i_h H_g \quad (2.1.1-6)$$

式中： $i_h$ ——不透水层横向坡度。



1-原地下水位；2-不透水层；3-坡面；4-设渗沟后地下水位；5-渗沟

### 2.1.1-4 不透水层坡度较陡时渗沟流量计算

#### 4) 分析

①地下水渗入渗沟内的流量计算，主要采用渗流定律。根据以上三种情况列出了三种渗流量计算公式。三种情况的差别在于不透水层的坡度和渗沟（相对于不透水层）的深度。渗流量计算的主要参数为渗透系数和地下水位受渗沟影响而降落的水平距离或平均坡度。地下水位降落的水平距离或平均坡度与含水层岩石的透水性，也即渗透系数有关。式  $I_0 = \frac{1}{3000\sqrt{K}}$  为平均坡降与渗透系数的近似经验关系式，在缺乏试验观测资料时，可利用它来估计平均坡降。这样，主要计算参数便成为一项渗透系数。因此，渗沟的设计流量计算，主要依赖于含水层岩石的渗透系数的正确或合理确定。

②渗透系数是计算渗流量的主要计算参数，可以采用三类方法估计或测定其数值：

1. 各类岩石的渗透系数，随其颗粒组成和密实程度而异，变动范围很大。表 2.1.1-1 所示为代表性岩石渗透系数的经验参考值范围。利用表列数值或其他工程的经验数值，可按含水层介质的岩石类型粗略的估计其渗透系数值。

②渗透系数是计算渗流量的主要计算参数，可以采用三类方法估计或测定其数值：

1. 各类岩石的渗透系数，随其颗粒组成和密实程度而异，变动范围很大。

表 2.1.1-1 所示为代表性岩石渗透系数的经验参考值范围。利用表列数值或其他工程的经验数值，可按含水层介质的岩石类型粗略的估计其渗透系数值。

表 2.1.1-1 岩土渗透系数参考表

岩土名称	渗透系数 (cm/s)	岩土名称	渗透系数 (cm/s)
粘土	$< 6 \times 10^{-6}$	中砂	$6 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$
粉质粘土	$6 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	粗砂	$2 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$
粉土	$1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	砾石	$6 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$
粉砂	$6 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	卵石	$1 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-1}$
细砂	$1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	漂石	$6 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^0$

此外，也可根据岩石上的颗粒组成由经验关系式估计其渗透系数值。

II. 在含水层中钻取岩土试件, 进行室内常水头或变水头渗透试验。常水头渗透试验适用于透水性高的粗粒岩土, 而变水头渗透试验适用于透水性中等或低的细粒土。试验方法可参考《公路土工试验规程 JTJ051-93》, 但所用样筒或试件的直径应为岩土颗粒最大粒径的 8 倍或 12 倍。

III. 在现场对含水层进行抽水试验, 测定抽水量和水位随时间变化的数据后, 可通过计算确定渗透系数。测定和计算方法可参考《工程地质手册》(中国建筑工业出版社, 1992)。对于非饱和松散岩土层, 则可采用渗水试验方法测定其渗透系数。

根据岩土渗透系数参考表, 可以近似估计出平均坡降。

表 2.1.1-2 近似平均坡降计算

岩土名称	渗透系数 (cm/s)	平均坡降	岩土名称	渗透系数 (cm/s)	平均坡降
粘土	$< 6 \times 10^{-6}$	$> 1.36$	粘土	$6 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$	0.0043~0.0024
粉质粘土	$6 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	1.36~0.33	粉质粘土	$2 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$	0.0024~0.0014
粉土	$1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	0.33~0.013	粉土	$6 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	0.0014~0.0011
粉砂	$6 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	0.013~0.011	粉砂	$1 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-1}$	0.0011~0.00043
细砂	$1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	0.011~0.0043	细砂	$6 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^0$	0.00043~0.00033

### ③存在的问题

I. 由于各类岩土的渗透系数的变化范围较大, 因此由此得出的相应的设计渗流量的变化范围也比较大;

II. 由式  $I_0 = \frac{1}{3000\sqrt{K}}$  估算出的平均坡降和实际观测所得的降落曲线的平均坡度也存在着一些误差。

(2) 根据公路设计手册《路基》<sup>[1]</sup> (以下简称《路基》), 渗沟的水力计算公式为:

#### 1) 渗沟底部圆形水管

渗沟底部圆形水管的通过流量  $Q$  与流速  $v$  计算式如下:

$$Q = K\sqrt{i} \quad (2.1.1-7)$$

$$v = S\sqrt{i} \quad (2.1.1-8)$$

式中:  $K$ ——圆管的泄水能力模数 (流量特性) ( $m^3/s$  或  $l/s$ );

$S$ ——圆管的流速特性 ( $m/s$ )。

2) 渗沟底部石砌方形涵洞

$$\text{水流断面 } \omega_0 = b_0 h_0 \quad (2.1.1-9)$$

$$\text{湿周 } p_0 = b_0 + 2h_0 \quad (2.1.1-10)$$

$$\text{水力半径 } R_0 = \frac{\omega_0}{p_0} = \frac{b_0 h_0}{b_0 + 2h_0} \quad (2.1.1-11)$$

$$\text{流速系数 } c_0 = \frac{1}{n} R_0^y \quad (2.1.1-12)$$

当  $R < 1.0m$  时,  $y = 1.5\sqrt{n}$

$$\text{通过流速 } v_0 = c_0 \sqrt{R_0 i_0} \quad (2.1.1-13)$$

$$\text{通过流量 } Q_0 = \omega_0 c_0 \sqrt{R_0 i_0} = k_0 \sqrt{i_0} \quad (2.1.1-14)$$

式中:  $K_0$ ——泄水能力模数 (或流量特性),  $K_0 = c_0 \omega_0 \sqrt{R_0} = \frac{Q_0}{\sqrt{i_0}}$

3) 渗沟的埋置深度计算 (计算图示如图 2.1.1-5 所示):

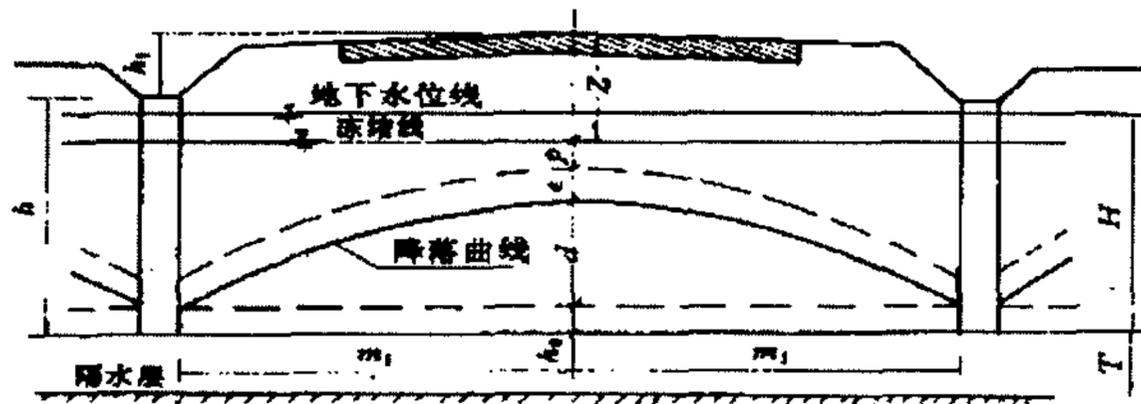


图 2.1.1-5 渗沟埋置深度计算图示

$$h = Z + P + \varepsilon + d + h_0 - h_1 \quad (2.1.1-15)$$

式中:  $h$ ——渗沟埋置深度 ( $m$ );

$P$ ——沿路基中线由路基冻结线至排水后毛细水升高曲线的距离 ( $m$ ), 采用近年内地下水波动的平均数值 (近似值为  $0.25m$ );

$Z$ ——沿路基中线上的冻结深度 ( $m$ );

$\varepsilon$ ——毛细管水上升高度 ( $m$ ), 以实验数值为准, 初步估计时, 下列数值可供参考: 砂土  $0.2 \sim 0.3$ , 砂性土  $0.3 \sim 0.8$ , 粉性土  $0.8 \sim 2.0$ , 粘性土  $1.0 \sim 2.0$ ;

$h_0$ ——渗沟内水深 ( $m$ ), 通常采用  $0.3 \sim 0.4m$ ;

$h_1$ ——路中心至边沟底的高差 ( $m$ );

$d$ ——路基范围内降落曲线的最大矢距 ( $m$ );  
对于双面渗沟, 降落曲线的最大矢距为:

$$d = I_0 m_1 \quad (2.1.1-16)$$

式中:  $I_0$ ——降落曲线平均坡度值;

$m_1$ ——渗沟边缘至路基中线的距离 ( $m$ )。

4) 渗沟反滤层的计算:

①与管壁接触的较粗颗粒层, 其空隙最大尺寸计算式为:

$$e = [0.15 + 1.2(n - 0.26)]d_c \quad (2.1.1-17)$$

式中:  $n$ ——较粗颗粒的孔隙率, 由试验确定;

$d_c$ ——岩块换算成球形颗粒的直径, 计算式为:

$$\frac{1}{d_c} = \sum \frac{g_i}{d_i^3} \quad (2.1.1-18)$$

式中:  $g_i$ ——平均粒径为  $d_i$  的较粗颗粒占总质量的百分数 (以小数表示), 而  $d_i$  则由下式求得。

$$\frac{1}{d_i^3} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{d_{\text{最大}}^3} + \frac{1}{d_{\text{最小}}^3} \right) \quad (2.1.1-19)$$

式中:  $d_{\text{最大}}$ ,  $d_{\text{最小}}$ ——颗粒的最大及最小粒径。

②为了避免最小颗粒渗入较大颗粒中去, 应使两层接触处的渗透速度, 小于或等于容许渗透速度, 因此, 两层接触处应符合下式的要求。

$$p \geq \frac{\xi q}{a_{\text{容}} \sqrt[3]{K_{\text{小}}}} \quad (2.1.1-20)$$

式中:  $p$ ——两层接触处部分的湿周面积 ( $m^2$ );

$K_{\text{小}}$ ——较小颗粒层中的渗透系数 ( $m/s$ )。

$q$ ——每米长渗沟的流入量 ( $m^3/s$ );

$\xi$ ——考虑流入渗沟的水流进路不均匀系数, 一般可用 8~10;

$a_{\text{容}}$ ——试验系数, 若  $v_{\text{容}}$  及  $K$  以  $m/d$  计, 则  $a_{\text{容}} \approx 60 \sim 70$ , 若  $v_{\text{容}}$  及  $K$  以  $m/s$

计, 则  $a_{\text{容}} \approx 0.0307 \sim 0.0370$ 。

### 2.1.1.3 构造设计与材料要求

(1) 渗沟的埋置深度按地下水位的高程, 地下水位需下降的深度以及含水层介质的渗透系数等因素确定。

(2) 管式渗沟设于地下引水较长的地段, 但渗沟过长时, 应加设横向排水管, 将纵向渗沟内的水流, 迅速的分段排除。沟底纵坡取决于设计流速, 最大流速应考虑到水管的构造及其寿命, 且不致冲毁管下垫枕材料, 一般以不大于  $1.0\text{ m/s}$  为宜, 亦不应低于最小流速。最小纵坡为  $0.5\%$ , 以免淤积。

(3) 洞式渗沟地下水位较大的地段, 或缺乏水管时可采用石砌洞口。洞口大小依设计流量而定, 沟底纵坡取决于设计流速。

(4) 在设计渗沟时, 要考虑含水层中土粒堵塞排水层的因素设置反滤层。

(5) 排水管可采用带槽孔的塑料管水泥混凝土管。管径按设计流量确定, 但最小内径宜为  $15\text{ cm}$  (渗沟长度不大于  $150\text{ m}$  时) 或  $20\text{ cm}$  (渗沟长度大于  $150\text{ m}$  时)。

### 2.1.1.4 简要技术要求

(1) 排水管周围回填透水性材料, 管底回填料的厚度为  $15\text{ cm}$ , 管两侧的回填料厚度不宜少于  $30\text{ cm}$ 。渗沟位于路基范围外时, 透水性回填料顶部应覆盖  $15\text{ cm}$  厚的不透水填料。透水性回填料可采用粒径  $5\text{ mm}\sim 40\text{ mm}$  的碎石或砾石, 但粒径小于  $2.36\text{ mm}$  的细粒含量不得大于  $5\%$ 。

(2) 常规设计的反滤层一般尽可能选用颗粒大小均匀的砂石材料, 分层填埋, 相邻两层颗粒直径之比不小于  $1:4$ 。每层反滤层由厚度为  $15\text{ cm}\sim 25\text{ cm}$  的粒料组成, 其级配组成应满足下列排水和反滤的要求:

1) 反滤层集料在通过率为  $15\%$  时的粒径  $d_{15}$  应不小于迎水面沟壁被保护岩土集料在通过率为  $15\%$  时的粒径  $D_{15}$  的  $5$  倍, 即  $(d_{15}/D_{15}) \leq 5$ ;

2) 反滤层集料在通过率为  $15\%$  时的粒径  $d_{15}$  应不大于迎水面沟壁被保护岩土集料在通过率为  $85\%$  时的粒径  $D_{85}$  的  $5$  倍, 即  $(d_{15}/D_{85}) \geq 5$ ;

3) 反滤层集料在通过率为  $50\%$  时的粒径  $d_{50}$  应不大于迎水面沟壁被保护岩土集料在通过率为  $50\%$  时的粒径  $D_{50}$  的  $5$  倍, 即  $(d_{50}/D_{50}) \geq 25$ ;

4) 反滤层集料的不均匀系数 (通过率为  $60\%$  的粒径与通过率为  $10\%$  的粒径的比值) 不大于  $20$ , 即  $(d_{60}/d_{10}) \geq 20$ 。

(3) 渗沟底部的纵坡一般不宜小于  $0.5\%$ , 条件困难时, 主沟的最小纵坡可采用  $0.25\%$ , 支沟的纵坡不得小于  $0.20\%$ 。

(4) 纵向排水沟出水口的间距不得大于  $300\text{ m}$ 。

## 2.1.2 深挖方地段或其他路段承压水

### 2.1.2.1 常用排水设施类型

对于深挖方路段或有承压水的路段,由于地下水的作用,会损害路基,因此为拦截地下水或减少承压水对路基的作用,常在两侧边沟下方设置盲沟,以降低地下水位,减少路基湿度,提高其承载能力。

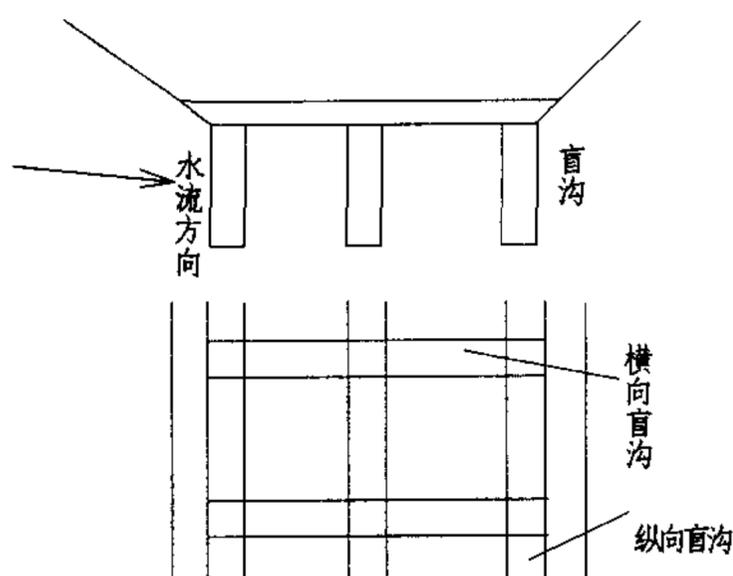


图 2.1.2-1 盲沟横断面图以及平面布置图

### 2.1.2.2 水力学计算及分析方法

由于有地下承压水的作用,通过流量不能按传统的计算公式进行计算,在设计时要根据具体情况来确定。

### 2.1.2.3 构造设计与材料要求

(1) 由于排水层阻力较大,其纵坡不应小于 1%,一般可采用 5%。

(2) 盲沟的排水层可采用石质坚硬的较大颗粒填充,以保证具有足够强度的孔隙度排除设计流量。填充的高度不小于 0.3 米,并应高出原地下水位。

### 2.1.2.4 简要技术要求

同 2.1.1.4 中 (2)、(3)。

## 2.1.3 其他地下排水设施<sup>[1]</sup>

### 2.1.3.1 暗沟

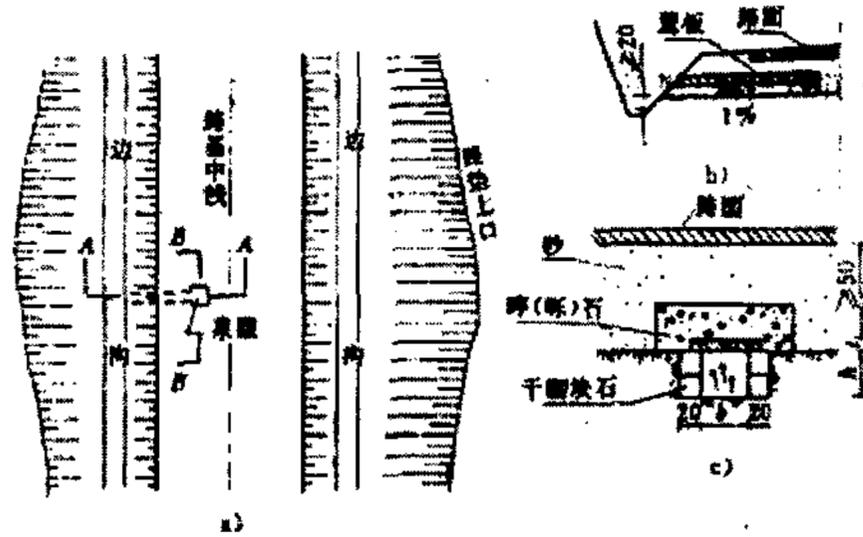
(1) 作用

暗沟是设在地面以下引导水流地沟渠,无渗水和汇水作用。

(2) 构造

暗沟的构造一般比较简单。在路基填土之前,或挖出泉眼之后,按照泉眼范围大小,剥除泉眼上层浮土,挖出泉井,砌筑井壁与沟壁,上盖混凝土(或石)

盖板。井深应保证盖板顶面的填土厚度不小于 50cm，井宽  $b$  按泉眼的范围大小决定。高  $h$  约为 20cm，暗沟宽 20~30cm。如沟身两侧为石质，盖板可直接放在两侧石壁上。



a) 平面; b) 剖面 A-A; c) 剖面 B-B

图 2.1.3-1 疏导路基泉水的暗沟构造图 (尺寸单位: cm)

### (3) 注意事项

应防止泥土或沙粒落入沟槽或泉眼，以免堵塞。

### 2.1.3.2 渗井

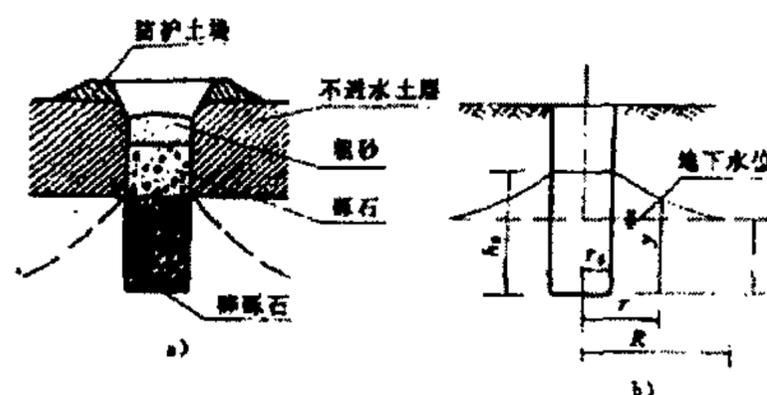
#### (1) 作用

渗井的作用是将地面水通过竖井，渗入地下排除。

#### (2) 构造

上部构造为集水结构，下部为排水结构。

1) 上部构造：渗水井面积的大小，取决于路基表面的流量，一般可采用直径为 0.7m 的圆井，或  $0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \sim 1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$  的方井。渗水井的顶部四周（进口部分除外）用粘土筑堤围护。顶上也可加筑混凝土土盖，严防渗井淤塞，如图 2.1.3-2 所示。



a) 渗水井构造; b) 渗水扩散曲线

图 2.1.3-2 渗水井构造及渗水扩散曲线图

2) 下部构造：渗水井的下部，必须穿过不透水层而深达渗透层。井内填充

材料用碎石或卵石,上部不透水层内填充砂和砾石。透水性土层离地面较深时,可用钻井机钻孔,但钻井的直径不应小于 15cm,有时可达 50~60cm。

### (3) 注意事项

渗井易于淤塞,当地面排水可以采取其它措施时不宜采用。在上述路线经过村落或集市,由于建筑物障碍,边沟不能贯通而以渗井排水,一般限于低等级道路或临时性措施。有可能贯通边沟时,仍以挖通边沟为宜。

## 2.2 路界排水

### 2.2.1 截水沟

#### 2.2.1.1 常用排水设施类型

当路堑或路堤边坡上方流入路界的地表径流量大时,应设置拦截地表径流的截水沟。在坡面汇流长度大的山坡上,应酌情设置一道以上大致平行的截水沟。在坡体稳定性差或有可能形成滑坡的路段,应在滑坡体的周界外设置截水沟。深路堑或高路堤边坡设边坡平台时,在坡面径流量大的情况下可设置平台截水沟,以减少坡面冲刷。

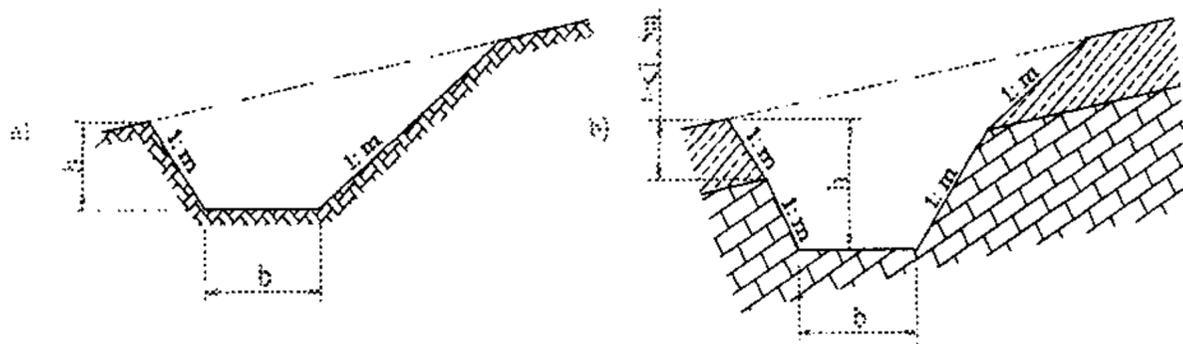


图 2.2.1-1 截水沟的断面形式

#### 2.2.1.2 水力计算及分析方法<sup>[3]</sup>

根据《公路排水设计规范 JTJ018-97》, (以下简称《规范》), 截水沟的水力计算公式为:

$$Q_c = vA \quad (2.2.1-1)$$

式中:  $Q_c$ ——截水沟的泄水能力 ( $m^3/s$ );

$v$ ——截水沟内的平均流速 ( $m/s$ );

$A$ ——过水断面面积 ( $m^2$ )。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.1-2)$$

式中： $n$ ——沟壁的粗糙系数；

$R$ ——水力半径（ $m$ ）， $R = A/\rho$ ；

$\rho$ ——水力断面湿周（ $m$ ）；

$l$ ——水力坡度，可采用沟底的坡度。

### 2.2.1.3 构造设计与材料要求

(1) 截水沟设在路堑坡顶 5m 或路堤坡脚 2m 以外，如土质良好、路堑边坡不高或沟壁进行铺砌时，前者也可不小于 2m。截水沟应结合地形和地质条件沿等高线布置，将拦截的水顺畅地排向沟谷或水道。截水沟长度以 200m~500m 为宜；超过 500m 时，可在中间适宜位置处增设泄水口，由急流槽或急流管分流引出。

(2) 截水沟一般采用梯形横断面，沟坡坡度为 1:1.0~1:1.5；沟底宽度和沟的深度不宜小于 0.5m。

(3) 沟渠需转弯时，其曲率半径不得小于 3 倍水面宽度或 10 倍水深。

## 2.2.2 边沟

### 2.2.2.1 常用排水设施类型<sup>[1]</sup>

挖方路段及填土高度小于边沟深度的填方路段，应在挖方边坡或填方边坡坡脚外设置边沟，以汇集和排泄降落在坡面和路面上的表面水。

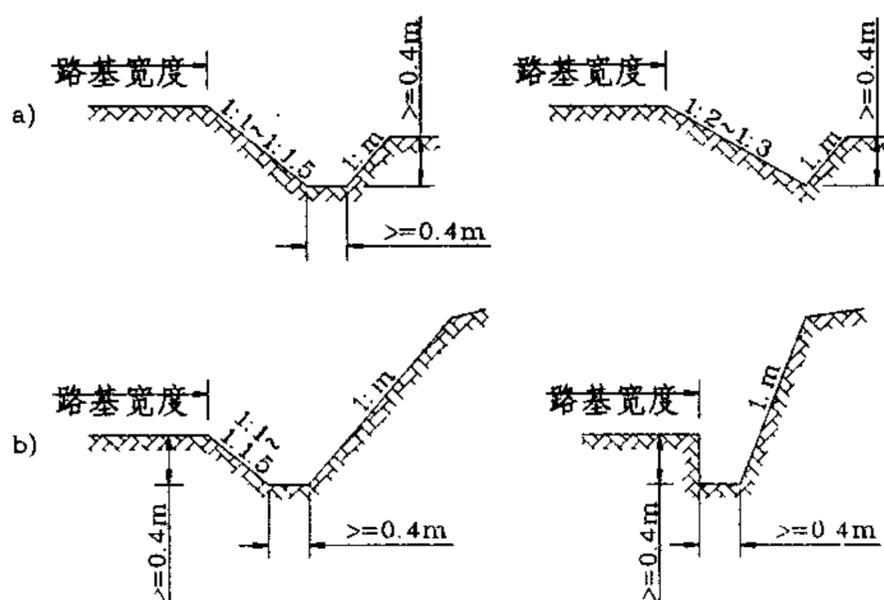


图 2.2.2-1 边沟横断面图

### 2.2.2.2 水力计算及分析方法<sup>[3]</sup>

根据《规范》，边沟所需排泄的设计径流量计算公式为：

$$Q = 16.67\psi qF \quad (2.2.2-1)$$

式中： $Q$ ——设计径流量（ $m^3/s$ ）；

$q$ ——设计重现期和降雨历时内的平均降雨强度 ( $mm/min$ );

$\psi$ ——径流系数;

$F$ ——汇水面积 ( $km^2$ )。

设计降雨的重现期应根据公路等级和排水类型,查表 2.2.2-1 确定。

表 2.2.2-1 设计降雨的重现期 (单位:年)

公路等级	路面和路基 表面排水	路界内 坡面排水	公路等级	路面和路基 表面排水	路界内 坡面排水
高速公路和 一级公路	5	15	二级及二级 以下公路	3	10

降雨历时一般应取设计控制点的汇流时间,其值为由汇水区最远点到排水设施处的坡面汇流历时与在沟或管内的沟管汇流历时之和。在考虑路面表面排水时,可不计及管内汇流历时。

坡面汇流历时计算:

$$t_1 = 1.445 \left[ \frac{m_1 L_s}{\sqrt{i_s}} \right]^{0.467} \quad (L_s \leq 370m) \quad (2.2.2-2)$$

式中:  $t_1$ ——坡面汇流历时 ( $min$ );

$L_s$ ——坡面流的长度 ( $m$ );

$i_s$ ——坡面流的坡度;

$m_1$ ——地表粗度系数,按地表情况查表确定。

计算沟管内汇流历时,先在断面尺寸,坡度变化点或者有支沟(支管)汇入处分段,分别计算各段的汇流历时后再叠加而得,即:

$$t_2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{l_i}{60v_i} \right) \quad (2.2.2-3)$$

式中:  $t_2$ ——沟管内汇流历时 ( $min$ );

$n$ 和 $i$ ——分段数和分段序号;

$l_i$ ——第 $i$ 段的长度 ( $m$ );

$v_i$ ——第 $i$ 段的平均流速 ( $m/s$ )。

沟管的平均流速可按  $v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$  计算确定,或者按下式近似估算:

$$v = 20i_g^{0.6} \quad (2.2.2-4)$$

式中:  $i_g$ ——该段排水沟管的平均坡度。

当地气象站有 10 年以上自记雨量计资料时, 可利用气象站观测资料按下式整理分析得到设计重现期的降雨强度:

$$q = \frac{a}{t+b} \quad (2.2.2-5)$$

式中:  $t$ ——降雨历时 (min);

$a$ 和 $b$ ——地区性参数。

当缺乏自记雨量资料时, 可利用标准降雨强度等值线图 and 有关转换系数, 按下式计算降雨强度:

$$q = c_p c_t q_{5,10} \quad (2.2.2-6)$$

式中:  $q_{5,10}$ ——5 年重现期和 10min 降雨历时的标准降雨强度 (mm/min), 按公路所在地区查取;

$c_p$ ——重现期转换系数, 为设计重现期降雨强度  $q_p$  同标准重现期降雨强度  $q_5$  的比值 ( $q_p/q_5$ ), 按公路所在地区由表查取;

$c_t$ ——降雨历时转换系数, 为降雨历时  $t$  的降雨强度  $q_t$  同 10min 降雨历时的降雨强度  $q_{10}$  的比值 ( $q_t/q_{10}$ ), 按公路所在地区的 60min 转换系数 ( $c_{60}$ ), 由表查取,  $c_{60}$  则可由图查取。

径流系数按汇水区域内的地表种类由表 2.2.2-2 查取。当汇水区域内有多种类型的地表时, 应分别为多种类型选取径流系数后, 按相应的面积大小取加权平均值。

表 2.2.2-2 径流系数 ( $\psi$ )

地表种类	径流系数	地表种类	径流系数
沥青混凝土路面	0.95	陡峻的山地	0.75~0.90
水泥混凝土路面	0.90	起伏的山地	0.60~0.80
透水性沥青路面	0.60~0.80	起伏的草地	0.40~0.65
粒料路面	0.40~0.60	平坦的耕地	0.45~0.60
粗粒土坡面和路肩	0.10~0.30	落叶林地	0.35~0.60
细粒土坡面和路肩	0.40~0.65	针叶林地	0.25~0.50
硬质岩石坡面	0.70~0.85	水田、水面	0.70~0.80
软质岩石坡面	0.50~0.75		

根据《规范》, 边沟的水力计算为以下公式:

$$Q_c = vA \quad (2.2.2-7)$$

式中:  $Q_c$ ——边沟的泄水能力 ( $m^3/s$ );

$v$ ——边沟内的平均流速 ( $m/s$ );

$A$ ——过水断面面积 ( $m^2$ )。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.2-8)$$

式中:  $n$ ——沟壁的粗糙系数;

$R$ ——水力半径 ( $m$ ),  $R = A/\rho$ ;

$\rho$ ——水力断面湿周 ( $m$ );

$I$ ——水力坡度, 可采用沟底的坡度。

表 2.2.2-1 水力最佳断面的宽深比

边坡率 $m$	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	3
$b/h$	2	1.56	1.24	1	0.83	0.7	0.61	0.47	0.32

### 2.2.2.3 构造设计与材料要求

(1) 边沟可采用三角形、碟形、梯形或矩形横断面, 按公路等级、所需排泄的设计流量、设置位置和土质或岩质选定。高速公路及一级公路, 宜采用三角形或碟形边沟; 受条件限制而需采用矩形横断面时, 应在顶面加带槽孔的混凝土盖板。二级及二级以下公路, 可采用梯形横断面, 边沟内侧边坡坡度按土质类别采用 1: 1.0~1: 1.5; 岩石挖方路段, 可采用矩形横断面, 其内侧坡面用浆砌片石砌筑以保持直立。矩形和梯形边沟的底宽和深度不应小于 0.4m。挖方路段边沟的外侧坡面与路堑下部坡面的坡度一致。

(2) 边沟的纵坡坡度应结合路线纵坡、地形、土质、出水口位置等情况选定, 尽可能与路线纵坡坡度一致。当路线纵坡坡度小于沟底最小纵坡坡度时, 边沟应采用沟底最小纵坡坡度, 并缩短边沟出水口的间距。高速公路及一级公路的土质边沟, 均应采取防护措施。

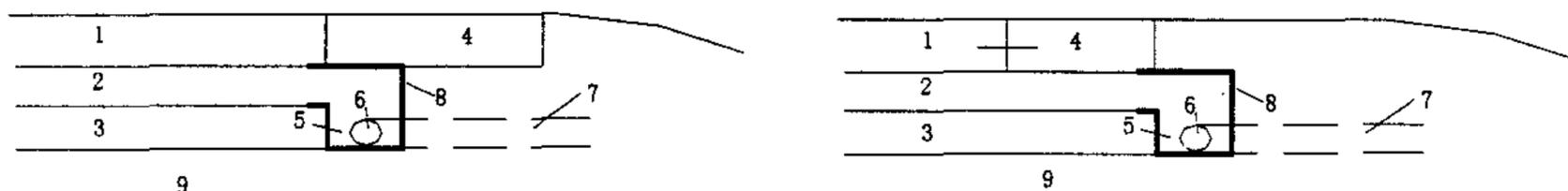
(3) 边沟出水口的间距, 一般地区不宜超过 500m, 多雨地区不宜超过 300m, 三角形和碟形边沟不宜超过 200m。边沟出水口的排放应结合地形、地质条件以及桥涵水道位置, 排引到路基范围外, 使之不冲刷路堤坡脚。

## 2.3 路面内部排水与排水基层路面<sup>[21]</sup>

### 2.3.1 路面内部排水

#### 2.3.1.1 常用排水设施类型

为排除通过路面接缝、裂缝或空隙,或者由路基或路肩渗入并滞留在路面结构内的自由水,可沿路面边缘设置边缘排水系统。路面边缘排水系统由透水性填料集水沟、纵向排水管、横向出水管和过滤织物(土工布)组成。渗入路面结构内的水分,先沿路面结构层中某一透水层次或者层间空隙横向流入由透水性材料组成的纵向排水沟,再由间隔一定距离布设的横向出水管排引出路基。



排水基层排水系统

1—面层; 2—排水基层; 3—不透水垫层; 4—路肩面层或水泥混凝土路肩面层; 5—集水沟;  
6—排水管; 7—出水管; 8—反滤织物; 9—路基

图 2.3.1-1 排水基层排水系统

#### 2.3.1.2 水力计算及分析方法

根据《规范》,表面水渗入路面结构的量,按路面类型分别由下列公式确定:

$$\text{水泥混凝土路面 } Q_i = I_c \left( n_z + n_h \frac{B}{L} \right) \quad (2.3.1-1)$$

$$\text{沥青路面 } Q_i = I_a B \quad (2.3.1-2)$$

式中:  $Q_i$ ——纵向每延米路面结构表面水的渗入量 [ $m^3/(d \cdot m)$ ];

$I_c$ ——每延米水泥混凝土路面接缝或裂缝的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m)$ ], 可按  $0.36 m^3/(d \cdot m)$  取用;

$I_a$ ——每平方米沥青路面的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m^2)$ ], 可按  $0.15 m^3/(d \cdot m^2)$  取用;

$B$ ——单向坡度路面的宽度 ( $m$ );

$L$ ——水泥混凝土路面的横缝间距(即板长) ( $m$ );

$n_z$ —— $B$  长度范围内纵向接缝和裂缝的条数(包括路面与路肩之间的接缝);

$n_h$ —— $L$  长度范围内横向接缝和裂缝的条数。

### 2.3.1.3 构造设计与材料要求

(1) 集水沟可设在行车道路面边缘、硬路肩铺面边缘或者路肩铺面(或路缘石)下,埋设深度视排水要求和气候条件而定。在非冰冻地区,新建路面时,集水沟底通常深达透水层或层面下的不透水结构层底面或更深些;改建路面时,为减少开挖量,集水沟可浅些,但排水管道底应低于透水层或层面下的不透水结构层顶面。在非冰冻地区,排水管应尽可能设在冰冻深度以下。

(2) 集水沟底面的最小宽度,对新建路面,不应小于30cm;对改建路面,应能保证排水管两侧各有至少5cm宽的透水填料。透水填料的底面和外侧围以反滤织物(土工布),以防垫层、基层和路肩内的细粒侵入而堵塞填料空隙或管孔。反滤织物可选用由聚酯类、尼龙或聚丙烯材料制成的无纺织物,能透水,但细粒土不能随水一起透过。

(3) 纵向排水管通常选用聚氯乙烯(PVC)或聚乙烯(PE)塑料管,设在集水沟的底部。排水管设3排槽口或孔口,其开口总面积不小于 $42\text{ cm}^2/\text{延米}$ ,孔口直径不大于透水性回填料透过率为85%时的粒径的1/2。管径可按设计流量出水力计算确定,但选用时还需考虑维护的方便,一般采用100~150mm。

(4) 横向出水管选用不带槽或孔的聚氯乙烯或聚乙烯塑料管,管径与排水管相同。出水管的横坡为2%~5%,视下游出口处的路基排水沟的高程情况选定。

(5) 沿纵向排水管,间隔适当距离设置出水口,透过横向出水管或雨水进水口将排水沟内汇集的水排引出路基外。出水口的间距,可按设计流量、管径和纵坡大小由水力计算确定,但还需考虑养护便利。常用的间距一般为40~60cm,最大间距为75~100m。此外,在凹形竖曲线底部和桥台前均应布置出水口。

(6) 透水性填料由水泥处治开级配粗集料组成,其孔隙率约为15%~20%。粗集料最大粒径不大于40mm,粒径4.75mm以下的细粒含量不应超过16%,2.36mm以下的细粒含量不应超过6%。水泥处治集料的配合比,应按透水性要求和施工要求通过试配确定。

### 2.3.1.5 简要技术要求

(1) 路面内部排水系统中各项排水设施的泄水能力均应大于渗入路面结构内的水量,且下游排水设施的泄水能力应超过上游排水设施的泄水能力。

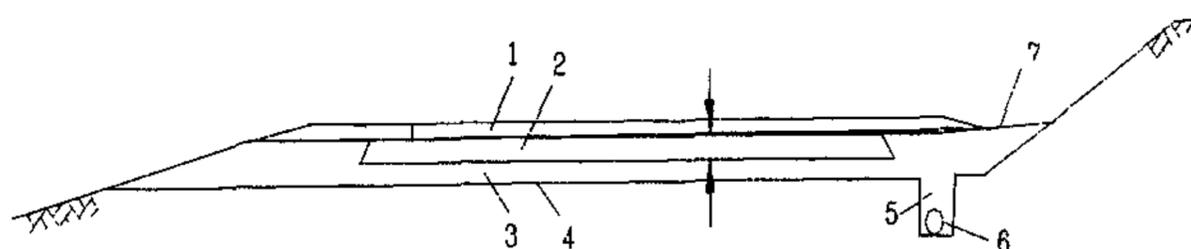
(2) 渗入水在路面结构内的最大渗流时间,冰冻地区不应超过1h,其它地区不应超过2h(重交通时)~4h(轻交通时)。渗入水在路面结构内的渗流路径长度不宜超过45m~60m。

(3) 各项排水设施不应被渗流从路面结构、路肩或路肩中夹带的细粒堵塞, 以保证系统的排水效率不随时间推移而很快丧失。

### 2.3.2 排水基层及其应用<sup>[21]</sup>

#### 2.3.2.1 常用排水设施类型

路面结构采用透水性材料做基层或垫层。直接在面层下设置透水性排水基层, 在其边缘设置纵向集水沟和排水管以及横向出水管等, 组成排水基层排水系统。由于自由水进入排水层的渗流路径短, 在透水性材料中渗流的速率快, 排水效果较好。在高速和一级公路新建路面时可采用此方案。



1-面层; 2-基层; 3-排水垫层; 4-反滤层或反滤织物; 5-排水沟; 6-排水管; 7-边沟

图 2.3.2-1 排水垫层排水系统

#### 2.3.2.2 水力计算及分析方法

根据《规范》, 表面水渗入路面结构的量, 按路面类型分别由下列公式确定:

$$\text{水泥混凝土路面 } Q_i = I_c \left( n_z + n_h \frac{B}{L} \right) \quad (2.3.2-1)$$

$$\text{沥青路面 } Q_i = I_a B \quad (2.3.2-2)$$

式中:  $Q_i$ ——纵向每延米路面结构表面水的渗入量 [ $m^3/(d \cdot m)$ ];

$I_c$ ——每延米水泥混凝土路面接缝或裂缝的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m)$ ], 可按  $0.36 m^3/(d \cdot m)$  取用;

$I_a$ ——每平方米沥青路面的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m^2)$ ], 可按  $0.15 m^3/(d \cdot m^2)$  取用;

$B$ ——单向坡度路面的宽度 ( $m$ );

$L$ ——水泥混凝土路面的横缝间距 (即板长) ( $m$ );

$n_z$ —— $B$  长度范围内纵向接缝和裂缝的条数 (包括路面与路肩之间的接缝);

$n_h$ —— $L$  长度范围内横向接缝和裂缝的条数。

自由水在排水层内的渗流时间按下列公式计算:

$$t = \frac{L_s}{3600v_s} \quad (2.3.2-3)$$

$$L_s = B \sqrt{1 + \frac{i_z^2}{i_h^2}} \quad (2.3.2-4)$$

$$v_s = \frac{1}{n} k_b \sqrt{i_z^2 + i_h^2} \quad (2.3.2-5)$$

式中:  $t$ ——渗流时间 (h);

$L_s$ ——渗流路径长 (m);

$v_s$ ——渗流速度 (m/s);

$k_b$ ——透水材料的渗透系数 (m/s);

$n_e$ ——透水材料的有效孔隙率。

#### 2.3.2.3 构造设计与材料要求

(1) 排水基层由水泥或沥青处治不含或含少量粒径 4.75mm 以下细料的开级配碎石集料组成, 或者由未经结合料处治的开级配碎石集料组成。

(2) 排水基层的厚度应按所需排放的水量和基层材料的渗透系数通过水力计算确定, 通常在 8cm~15cm 范围内选用, 但最小厚度不得小于 6cm (沥青处治碎石) 或 8cm (水泥处治碎石)。其宽度应视面层施工的需要超出面层宽度 30cm~90cm。

(3) 纵向集水沟可设在面层边缘外侧、路肩下或路肩边缘外侧。集水沟中的填料采用与排水基层相同的透水性材料。集水沟的下部设置带槽口或圆孔的纵向排水管, 并间隔适当距离设置不带槽孔的横向出水管。

(4) 集水沟、排水管和出水管的尺寸和布设要求, 同 2.3.1.3。

#### 2.3.2.4 简要技术要求

(1) 排水基层的下卧垫层应选用不透水或低透水性的密级配混合料, 以拦截自由水的下渗和路基中细粒土的上迁。

(2) 为拦截地下水、滞水或泉水进入路面结构, 或者排除因负温差作用而积聚在路基上层的自由水, 可直接在路基顶面设置透水性排水垫层, 并酌情配置纵向集水沟、排水管和出水管等。

(3) 排水垫层选用开级配集料(砂或砂砾石),其级配应满足下列排水和反滤的要求:

1) 排水垫层集料在通过率为 15%时的粒径应不小于路基土在通过率为 15%时的粒径的 5 倍;

2) 排水垫层集料在通过率为 15%时的粒径应不大于路基土在通过率为 85%时的粒径的 5 倍;

3) 排水垫层集料在通过率为 50%时的粒径应不大于路基土在通过率为 50%时的粒径的 5 倍;

4) 排水垫层集料的不均匀系数(通过率为 60%的粒径与通过率为 10%的粒径的比值)不大于 20。

(4) 只有当边缘排水和排水基层同时使用时才能充分发挥作用。

## 2.4 中央分隔带排水<sup>[3]</sup>

### 2.4.1 常用排水设施类型

根据分隔带宽度、绿化要求、交通安全设施的形式、分隔带表面的处理方式等因素要选择不同的排水方案。

中央分隔带宽度小于 3m 时,一般采用带有铺面的横断面形式。在不设超高路段上,中央分隔带铺面采用与两侧路面相同坡度的双向横坡,降落在分隔带上的表面水流向两侧路面,进入路面表面水排水设施。在超高路段上,上侧半幅路面的表面水流向中央分隔带。因此,须在分隔带上侧边缘处设置汇集和排泄上侧半幅路面表面水的排水设施,如碟形或三角形混凝土边沟,或者带格栅的 U 形或带缝隙的圆形混凝土边沟。

中央分隔带宽度大于 3m 且未采用铺面封闭时,采用分隔带内表面排水方案。分隔带可做成向内凹的横断面形式,降落在分隔带上的表面水横向流向分隔带的低凹处,汇集在分隔带的中央部位,并利用纵向坡度排向进水口或桥涵水道中。

中央分隔带宽度大于 3m、表面凸起且无铺面封闭时,并未采用表面排水措施,降落在分隔带上的表面水,一部分形成表面径流流向两侧行车道,由路面表面水排水设施排走;另一部分表面水则向下渗入分隔带土体内。可通过在分隔带内设置地下排水设施(渗沟和管)汇集渗入水,并通过隔一定间距设置的横向排水管将渗沟内的水排引出路界。

### 2.4.2 水力计算及分析方法<sup>[3]</sup>

应根据设计流量和截流要求确定泄水口的尺寸和布设间距。根据《规范》，泄水口水力计算由下列公式确定：

(1) 在凹形竖曲线底部的开口式泄水口，按泄水口处的水深和泄水口的尺寸确定其泄水量。

1) 如开口处设有低凹区，当开口处的净高 $h_0$ 不小于满足堰流要求的最小高度 $h_m$ 时，可利用图表确定开口的泄水量或最大水深 $h_i$ 。

2) 如不设低凹区，则按下式确定其泄水量。

$$Q_0 = 1.66L_i h_i^{1.5} \quad (2.4.2-1)$$

3) 当开口处水深 $h_i$ 超过净高 $h_0$ 的1.4倍时，按下式确定其泄水量。

$$Q_0 = 13.14h_0 L_i (h_i - 0.5h_0) \quad (2.4.2-2)$$

(2) 在凹形竖曲线底部的格栅式泄水口，其泄水量按下述公式计算：

1) 当格栅上面的水深 $h_i$ 小于0.12m时， $Q_0 = 1.66p_g h_i^{1.5}$  (2.4.2-3)

式中： $p_g$ ——格栅的有效周边长，为格栅进水周边边长之和的一半(m)。

2) 当格栅上面的水深 $h_i$ 大于0.43m时， $Q_0 = 2.96A_i h_i^{0.5}$  (2.4.2-4)

式中： $A_i$ ——格栅孔口净泄水面积的一半( $m^2$ )。

3) 当格栅上的水深处于0.12~0.43m之间时，其泄水量介于上述两个计算公式所得的结果之间，可按水深通过直线内插得到。

### 2.4.3 简要技术要求

排水管周围回填透水性材料，管底回填料底厚度不宜少于30cm。透水性回填料可采用粒径5mm~40mm底碎石或砾石，但粒径小于2.36mm的细粒含量不得大于5%。含水层内的细粒含量不得大于5%。

### 2.4.4 分隔带上的过水明槽

处理分隔带旁积水的过水明槽，进口可做成喇叭式，以便收集上半幅路汇集于分隔带旁的雨水。明槽在分隔带上槽位方向是上半幅路的水流合成方向，可用水泥混凝土筑成，底宽20~50cm，槽形的高与分隔带的高相同，每10~20m设一道，根据当地降水量决定。当明槽墙身采用水泥混凝土修筑时，宽可取10cm，一般应与分隔带缘石同宽。

### 2.4.5 雨水井与检查井<sup>[1]</sup>

处理分隔带旁积水的雨水井，可设置于分隔带旁的路缘带内。如无路缘带，则直接设于路面的边缘。雨水井断面尺寸垂直于分隔带方向，一般筑成净宽 38~41.5cm；平行于分隔带方向筑成净宽 65cm，上加铁篦盖板。雨水井井深约 60cm，泥沙杂物在检查井内淤积清除，水流由另一管道排除于路基之外。雨水井的设计图见 2.4.6-1。

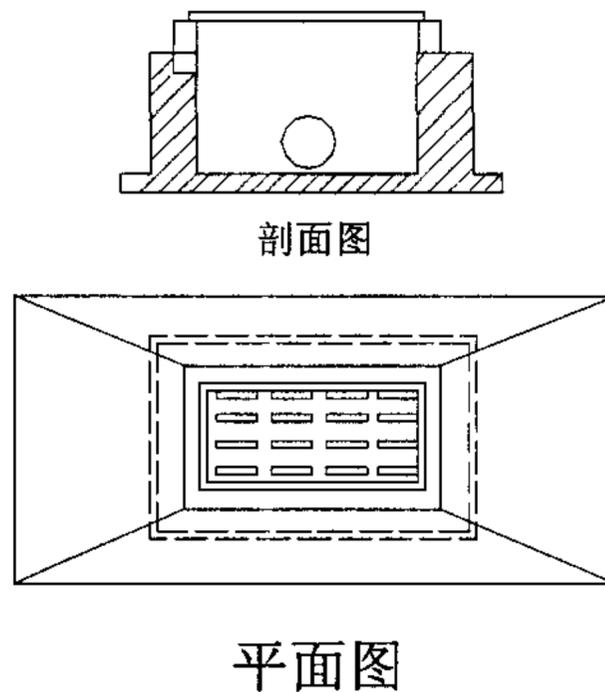


图 2.4.6-1 雨水井设计图

## 2.5 边坡防护与支挡结构排水

### 2.5.1 护坡

#### 2.5.1.1 常用排水设施类型

目前的坡面防护有植草防护、植树、抹面；冲刷防护有护面墙、干砌片石防护、浆砌片石防护、混凝土预制块防护、抛石防护、石笼防护等。

### 2.5.2 挡土墙<sup>[3]</sup>

#### 2.5.2.1 常用排水设施类型

沿挡土墙墙背的底部设置厚 30cm~40cm、高 50 cm 的纵向排水渗沟，并间隔 4m~5m 设置厚 30cm~40cm、宽 30cm~40cm 的竖向渗沟，其顶部用 30cm~50cm 厚的不透水材料封闭。渗沟由透水性粒料筑成。

#### 2.5.2.2 水力计算及分析方法

根据《规范》，流量计算由下列公式确定：

$$\text{流量 } Q = \omega K_m \sqrt{i} \quad (2.5.2-1)$$

式中:  $\omega$ ——渗透面积 ( $m^2$ ),  $\omega = bh$ ;

$K_m$ ——排水层岩块的渗透系数 ( $m/s$ )。

当用平均直径为 5cm 的碎石作为排水层时, 取孔隙度  $n=0.50$ , 则渗透系数  $K_m=0.19$ 。

### 2.5.2.3 构造设计与材料要求

泄水口的间距可依据设计流量确定, 但最大间距不宜超过 20m。泄水口可采用圆形或矩形。圆形泄水口的直径宜为 15cm~20cm; 矩形泄水口的宽度宜为 20cm~30cm, 长度宜为 30cm~40cm。泄水口顶部采用铸铁格栅盖板, 其顶面应比周围路面低 5mm~10mm。泄水管通常采用铸铁管, 最小内径为 15cm。

### 2.5.2.4 简要技术要求

竖向渗沟顶部用 40cm 厚的不透水材料封闭。渗沟回填透水性材料为碎石, 可采用粒径 5mm~40mm 的碎石或砾石, 但粒径小于 2.36mm 的细粒含量不得大于 5%。

## 2.6 西部公路排水设施调研

对西部地区公路排水设施常用防排水材料及其效果调研, 其调研内容包括: 现有排水设施常用结构形式、隔水与防水材料、排水设施构造与材料、反滤材料等; 现行路界排水、边缘排水和中央分隔带等排水设施的设计方法和参数 (以上两项主要通过现有设计资料、竣工资料等调研解决); 现有防排水设施使用情况现场勘察, 包括各类公路设施 (如路基路面、支挡结构、边坡) 及防排水设施本身的主要损坏形式, 是否与所使用的防排水材料有关; 路界排水、地下排水、路面边缘排水与支挡结构排水设施在贵州公路工程中涉及的水的来源、流量等情况, 确定防排水材料的服务对象; 以及当地降雨量和地质资料。

在调研工作中, 主要对贵州省、四川省的一些高速公路排水设施进行了调研。该项内容是通过现场勘察的形式进行的, 主要针对现有防排水材料在防排水设施中的作用进行调研和现有排水设施存在的问题确定新型土工合成防排水材料在今后应用中应具备的性能和可能存在的问题。调查对象主要针对高等级公路, 按照 2001 年 10 月份进行的第一次初步勘察, 选定贵黄公路、贵新公路, 以及成灌公路、内宜公路作为调研对象; 于 2002 年 3 月又对这些公路进行了第二次现场勘察。

## 2.6.1 高速公路与一级公路

### 2.6.1.1 主要采用的排水设施

贵新高速公路从贵阳到新寨全长 258 公里, 由于该路线所处地形、地质条件较复杂, 同时西南地区又是多雨地区, 所以排水设计就显得尤为主要。在对该路进行了调研后, 现对其主要采用的排水设施及应用现状总结如下:

#### (1) 路界排水

主要采用的排水设施为截水沟、边沟。边沟的形式为矩形、梯形和 L 形; 截水沟的形式和边沟的形式相同。边沟设置在挖方路段及填土高度小于边沟深度的填方路段, 在挖方边坡或填方边坡坡脚处设置, 用来汇集和排泄降落在坡面和路面上的水。为了减少水土流失, 对边沟进行浆砌片石加固。截水沟设置在路堑或路堤边坡上方流入路界的地表径流量较大的地段, 用以拦截地表径流。在坡面汇流长度大的山坡上, 设置一道以上大致平行的截水沟。在坡体稳定性较差或有可能形成滑坡的路段也在滑坡体的周界设置了截水沟。在全路段的调研过程中, 共调查了五个桩号所在的地段的路界排水情况:

#### (2) 中央分隔带排水

中央分隔带设纵向地下排水渗沟, 排水渗沟两侧用粘土封闭, 沟顶与路床齐平, 纵向渗沟与横向排水管 (其间距为 30m) 联接, 均采用直径为 8cm 带孔塑料排水管, 管的渗水孔径为 2cm, 管壁带有钢圈、滤布和加强合成纤维组成的加劲软式透水管, 将水引至路基外或桥涵内排除; 设置超高路段的中央分隔带采用缘石预留孔, 孔径 10cm, 间距 10m, 中央分隔带内同高位置采用圆形硬塑料管, 内径 10cm, 安装在路线纵坡与超高坡度组成的合成坡方向, 将超高一侧路面水排向另一侧。每隔 50 米设有检查井。在对全线调查过程中, 绝大部分地段的中央分隔带排水设施情况良好。

#### (3) 支挡结构与护坡排水

对于挖方边坡失稳路段采用了设置上挡土墙 (风化剥落路段采用)、护面墙、浆砌片石护坡及放缓边坡等措施加以防护; 填方路段设置路肩式挡土墙、路堤式挡土墙、菱形方格网、拱形护坡、草皮护坡、浆砌片石路地分界等防护措施。挖方边坡较高地段, 为防止坡面水直接冲刷坡面引起边坡失稳, 在一定高度设置 2 米宽的平台, 平台上设置 30×30 厘米地平台排水沟, 将水排出。填方边坡较高地段, 为防止路面水顺填方边坡坡面流淌冲刷路堤, 采用加固路肩内侧设置拦水埂, 并根据实际需要设置急流槽地措施, 将拦水埂拦截的路面流水排出路基。在挡墙和护面墙上均设有泄水孔, 泄水孔设在高于地面 0.3 米处, 间隔 2~3 米,

上下交错设置。当边坡上有地下水渗出时适当加密泄水孔，泄水孔后面应用碎石和砂作反滤层。护面墙顶部用粘土夯填压实并向外设 5% 的排水坡，防止水流渗入墙后引起破坏。在对全线调研过程中，共对六个桩号附近的路段进行了调查，并进行了图片资料记载。

#### (4) 地下排水

对于地下水位较高或由于地下水长期浸泡所形成的软土地基所采取的措施一般为换填，即先将淤泥（软土）去掉，回填不易风化的石料。对泉眼处设置涵洞或盲沟将地下水排除路基范围外。在该线的 K139 处，有地下承压水从边沟内流出；在贵新线与广西交界处，两侧土路肩下设有盲沟。

#### 2.6.1.2 主要工作现状和存在的问题

通过现场调研，贵新公路的排水设计方面是比较完善的。随着自然的作用，其各项排水设施在使用过程中也暴露出了一些问题。这对今后进行排水设计提供了很好的借鉴。

##### (1) 路界排水

在有些路段，边沟两侧的沟壁上有水渗出，这说明路基中仍然有未被及时排除的水，同时在边坡的排水设计中仍有不完善之处。这些情况如果长期存在会降低路基的稳定性，也会导致边沟由于水的作用而破坏，失去其排水的作用。坡面上的截水沟外沿高于坡面，山坡上流下的水无法汇集到截水沟中去，无法将水从截水沟排出。如果水从坡面渗入，就会影响边坡的稳定，有可能还会影响路基的稳定性。在调查中发现，截水沟并没有起到汇集坡面水的作用。（如图 2.6.1-1 所示）

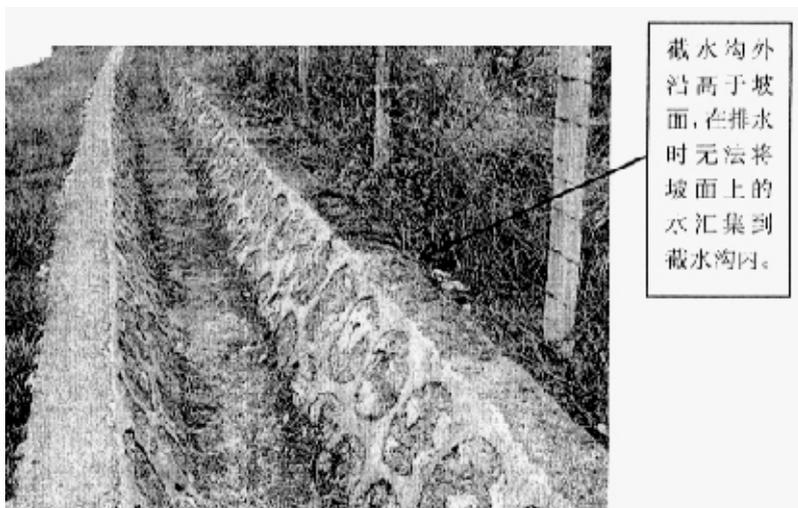


图 2.6.1-1 截水沟全貌

### (2) 中央分隔带排水

中央分隔带排水设施基本可以发挥排水作用,但是在超高路段,中央分隔带的缘石预留孔在雨后有积水,并且排水孔的标高高于路面,无法起到排水的作用。在靠近中央分隔带处的行车路面有潮湿的路段,这说明在超高路段中央分隔带排水设施不能将路面水完全排走。(图 2.6.1-2)

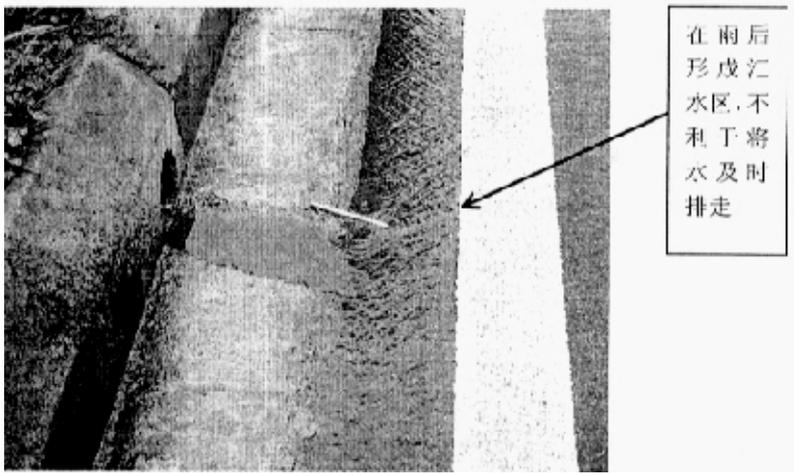


图 2.6.1-2 中央分隔带排水孔

### (3) 支挡结构与护坡排水

在我们的调研过程中,我们发现有一些路段的护坡上没有设泄水孔,右侧边坡剥落现象也比较多,这些现象的产生说明边坡后的填料有水渗出。即使是在有泄水孔的地方,坡面上仍然有大面积的泥沙,这些泥沙都是伴随着泄水孔中的水流出的,有部分泄水孔已经堵塞,失去了排水的能力。边坡的伸缩缝处有带有泥沙的水渗出,如图 2.6.1-3、2.6.1-4 所示。



图 2.6.1-3 边坡塌落

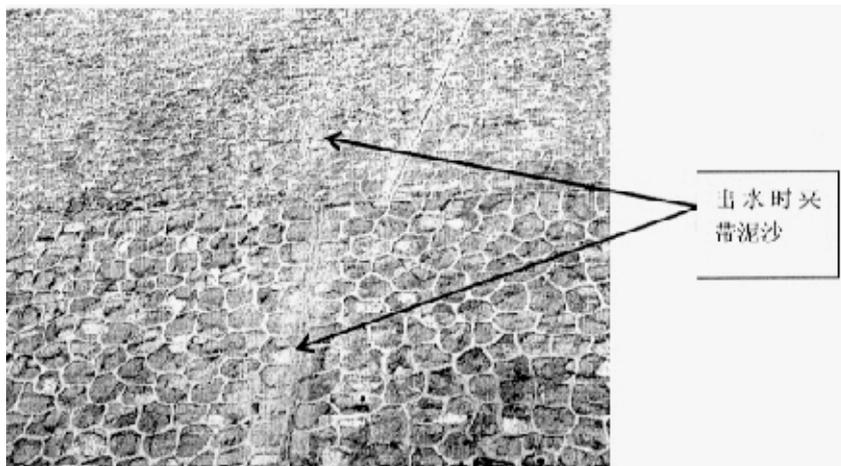


图 2.6.1-4 左侧边坡泄水孔

#### (4) 地下排水

在对地下承压水的处理上,采用设置盲沟的方式来降低地下水位,同时将水从纵向盲沟中排出。在调查中发现,盲沟内一直有水流出,同时路面结构内仍然有水从边沟的沟壁上渗出,这说明有可能在降低承压水的过程中并没有完全解决这一问题。在与广西交界处有还对盲沟的情况进行了调查,发现设在土路肩下的盲沟有在很多地方都没有设置出水口,即使设置了出水口,也没有看到有水流出。

### 2.6.2 其它等级公路

除贵新路以外,在对西部地区公路排水设施调研时,也对内宜公路、成灌公路的排水设施状况进行了调研。由于西部地区多山地,所以高填方、深挖方路段比较多,排水设施构造物比较复杂。现针对几种主要排水设施的工作现状及存在的问题进行分析说明。

在对内宜公路的调研中,边坡排水设施存在着很多问题。高边坡排水设施中的边沟采用片石砌筑,虽然可以保证边沟的稳定性,但是却无法将渗入路面结构内部的水排出;对于深挖方路段,在挖方坡脚截水沟处设置了集水池,集水池的目的是为了汇集坡面和截水沟内的水。集水池在排水中发挥了很大的作用,但是其结构也存在着一些问题,特别是在对集水池底部的处理上未作任何防护措施,由截水沟和坡面流入的水有一部分会渗入坡体,从而影响坡体的稳定;在中央隔带排水设施的设计上,采用集水井来汇集由路面渗入的水,然后通过圆管涵将水排引至路界以外。

在对成灌公路的调研中,边坡排水设施存在的问题和内宜公路的情况类似;

路界排水设施中的边沟也是采用石砌的,无法将渗入路面结构内部的水排出;在超高路段,为排除超高段路面上的水,在靠近超高段的一侧,修筑了纵向排水沟,但砌筑材料采用的水泥混凝土,仍然无法排除由路面渗入结构内部的水;同时,在调查中还发现在成灌公路上混凝土路面的横缝,可以使水可以渗入路面结构内部,部分路段面层有损坏。(图 2.6.2-1)

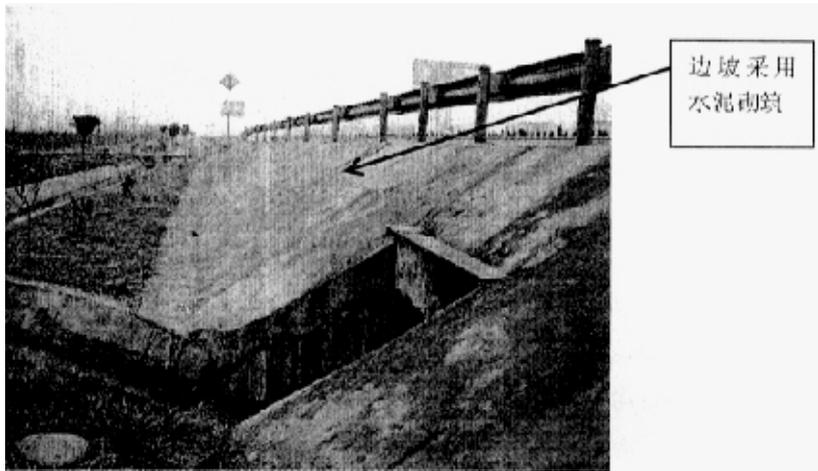


图 2.6.2-1 不当的边坡排水

总之,在对西部地区公路进行调研后,我们对现有的排水设施的工作现状以及所采用的材料都有了较为全面的理解,同时也发现了一些问题,例如,在这些公路的排水设计中都没有考虑路面边缘排水的问题。而降落在路面上的水,除了通过路表面的横向和纵向坡度流向路肩和路基外,总有相当一部分水会沿路面接缝和裂缝的缝隙、路面混合料的孔隙、路面和路肩的接缝以及无铺面的路肩渗入路面结构内部。在我们的调查中,很多损坏问题都是因为由路面渗入结构内的水造成的。因此,在以后的排水设计中,要注意这一问题。同时,应在适当的情况下采用新型土工合成材料来代替传统的排水材料,可以更进一步提高各项排水设施的排水能力。

### 3 (复合)土工合成材料应用于防排水设施的设计方法

土工合成材料的功能是多方面的。综合起来,可以概括为过滤、排水、隔离、加筋、防渗和防护等六种功能。过滤作用是把土工织物置于土体表面或相邻土层之间,可以有效阻止土颗粒通过,从而防止由于土颗粒的过量流失而造成土体的破坏。同时允许土中的水或气体穿过织物自由排除,以免由于孔隙水压力的升高而造成土体的失稳等不利后果。排水作用是在土体中形成排水通道,把土中的水分汇集起来,沿着材料的平面排出体外。隔离作用是把两种粒径的物质,或把土、砂等与地基隔离开来,以免相互混杂。加筋作用是将土工合成材料埋在土体中,扩散土体的应力,增加土体的模量,传递拉应力,限制土体侧向位移,并增加土体和其他材料之间的摩阻力,提高土体及有关建筑物的稳定性。以上的诸多功能往往是不能决然分开的,有时一种土工合成材料用于某一项工程中,同时具备几种功能,有的主要,有的次要,具体应该视具体情况而定。

土工合成材料运用于公路防排水中的运用,主要涉及到土工合成材料防渗、隔离、反滤和排水设计。其中涉及到材料的选择、作用机理、受力分析和设计方法等。

#### 3.1 地下排水

应根据地下排水设施的设计要求,按照地下排水设施的水力学模型推导出相应的设计方法,并对各项技术指标提出建议。使地下排水设施具有符合设计标准的渗滤能力,防止渗流携带的细粒堵塞多孔隙透水材料,致使排水设施失效。

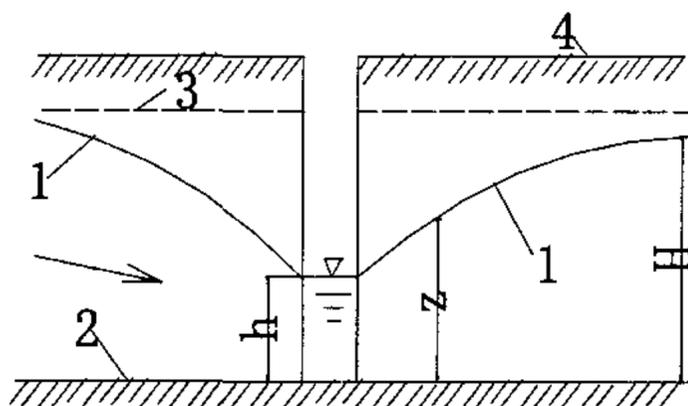
##### 3.1.1 水力学模型

由第二章中的地下排水设施类型综述可以知道常见的排水设施为渗沟,与作为吸取地下水和降低地下水位的构造物——井的作用相似。因此,可以通过分析井的作用原理及水力模型来分析排水设施的水力特性。在水力学中,井可有多种:在具有自由水面的潜水含水层中所开凿的井,称为普通井或潜水井;其井底直达不透水层的,称为完全井;井底未达到不透水层的,则称为不完全井。现在对井的作用原理分析如下。

###### 3.1.1.1 普通完全井

设潜水含水层的厚度为 $H$ ,井内外初始水面原为地下水的天然水面,由于井中抽水,井面下降,可造成四周地下水向井集流,若含水层体积很大,尽管井中抽去一定流量仍可保持含水层厚度 $H$ 恒定不变,当抽水一段时间后,将近似地形

成一个对称于井轴的浸润曲线，流向井的过水断面是一系列圆柱面，其径向各断面的渗流情况相同，除井周围附近的区域外，浸润曲线的曲率很小，可看作恒定渐变渗流，可应用裘皮幼公式计算断面平均流速。示意图如图 3-1-1 所示。



1-浸润线；2-不透水层；3-地下天然水面；4-地面

图 3.1.1-1 普通完全井渗流计算

距井轴  $r$  处的圆柱形过水断面  $A = 2\pi rz$ ，其水力坡度  $J = \frac{dz}{dr}$ ，由  $v$  和  $Q$  的计算公式得：

$$v = k \frac{dz}{dr}$$

$$Q = Av = 2\pi rk \frac{dz}{dr} \quad (3.1.1-1)$$

将上式分离变量，并对  $r_0$  到  $r$  及  $h$  到  $z$  积分，有：

$$\int_h^z z dz = \int_{r_0}^r \frac{Q}{2\pi k} \frac{dr}{r}$$

由此求得浸润线方程为：

$$z^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r}{r_0}$$

$$\text{或 } z^2 - h^2 = \frac{0.73Q}{k} \lg \frac{r}{r_0} \quad (3.1.1-2)$$

式中： $r_0$  ——井的半径；

$h$  ——井中水深；

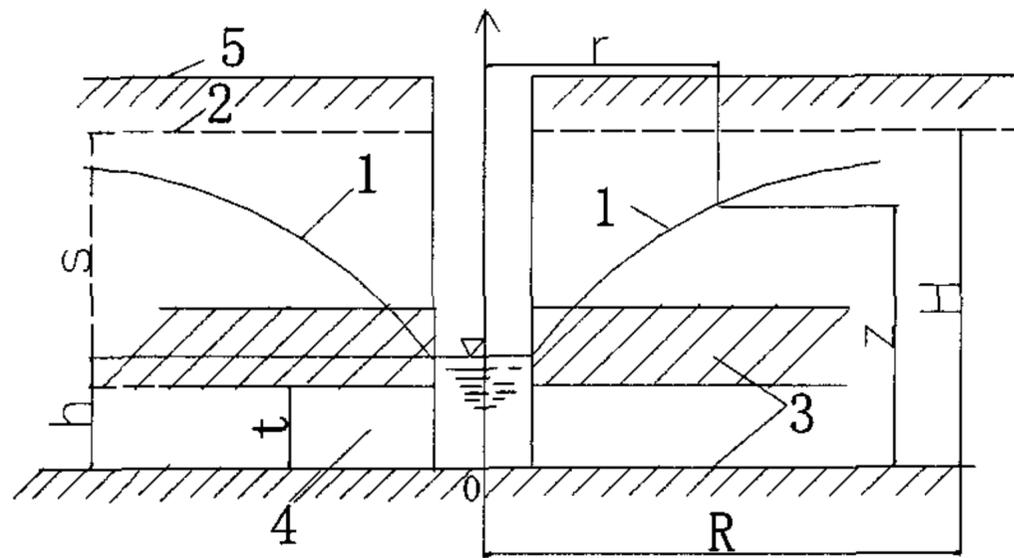
$z$  ——距井中心  $r$  处浸润线高度。

从理论上讲，浸润线应以地下水位的天然水面线为渐近线，即当  $r \rightarrow \infty$  时， $z = H$ 。但从工程实用观点看，可认为井的渗流区是一个有限的范围，存在一个影响半径  $R$ ，在此半径以外，地下水位不再受抽水的影响而降低。为此，可近似令  $r = R$ 。则此处  $z = H$ ，由上式可得：

$$Q = 1.366 \frac{k(H^2 - h^2)}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (3.1.1-3)$$

### 3.1.1.2 自流完全井

设承压含水层（又称自流含水层）的厚度为  $t$ ，井穿过上部不透水层，井底直达下部不透水层表面，水由高度为  $t$  的井壁周围（滤水管）渗入井中，这就是自流完全井。抽水前，井中初始水深  $H$  为此承压含水层的总水头，井中水面即地下水天然水头面，它高于  $t$ ，有时甚至可高出地面。当抽水时，井中水深由  $H$  降至  $h$ ，井外承压含水层各处的测管水头线将近似地形成一个对称于井轴线的漏斗形水头降落曲面。地下水向井汇集的过水断面是一系列高度为  $t$  的圆筒面，径向各断面的渗流情况相同，除井周围附近区域外，测管水头线的曲率很小，可看作恒定渐变渗流。示意图如图 3.1.2-1 所示。



1-浸润线；2-地下天然水面；3-不透水层；4-自流含水层；5-地面

图 3.1.2-1 自流完全井渗流计算

距井轴线为  $r$  处的过水断面  $A = 2\pi r t$ ，断面上各点的水力坡度  $J = \frac{dz}{dr}$ ，由裘皮幼公式，该过水断面的平均渗流速度及渗流流量为：

$$v = k \frac{dz}{dr}$$

$$Q = Av = kA \frac{dz}{dr} = 2\pi r t \frac{dz}{dr} \quad (3.1.1-4)$$

将上式分离变量，并从  $r_0$  到  $r$  及  $h$  至  $z$  积分，有：

$$\int_h^z dz = \frac{Q}{2\pi k t} \int_{r_0}^r \frac{dr}{r}$$

由此得自流完全井（或称承压完全井）的测管水头线方程：

$$z - h = 0.366 \frac{Q}{kt} \lg \frac{r}{r_0} \quad (3.1.1-5)$$

引入影响半径  $R$  的概念, 当  $r=R$  时,  $z=H$ , 由式可得自流完全井的涌水计算公式:

$$Q = 2.73 \frac{ktS}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (3.1.1-6)$$

### 3.1.2 水力学分析及设计方法

结合以上的排水设施的水力学计算方法和水力学模型, 可以看出在实际应用中, 所采用的计算公式是由水力学模型的基本公式推导出来的。在《手册》和《规范》中, 渗井的流量计算公式为  $Q = 1.36 \frac{K(h_0^2 - H^2)}{\lg(R/r_0)}$ , 其中  $K$  为渗透系数,  $h_0$  为井内水深,  $H$  为地下水位高于井底的高度,  $r_0$  为渗水井半径,  $R$  为影响半径,  $S$  为抽水降深,  $S=h_0-H$ ; 和普通完全井的流量计算公式是完全相同的。

在渗沟的计算中, 共列举了三种情况下的计算公式:

#### (1) 不透水层横向坡度较大的情况

不透水层的横向坡度较陡 ( $>25^\circ$ ) 时, 假设地下水位的平均坡降与不透水层的横向坡度相同, 按下式计算单位长度渗沟由沟壁一侧流入沟内的流量:

$$q = ki_h H_k \quad (3.1.2-1)$$

式中:  $q$ ——单位长度渗沟内的排水量 ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ );

$i_h$ ——不透水层横向坡度;

$k$ ——渗透系数 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$H_k$ ——排水管理设位置处的地下水位降低量 ( $\text{m}$ )。

当不透水层的横向坡度较陡时, 地下水的流动方向基本与不透水层的横向坡度相同, 地下水汇集到渗沟内所形成的过水断面的曲率很小, 因此, 在计算时可根据达西定律进行计算, 计算公式如上所述。

#### (2) 不透水层横向坡度平缓的情况

渗沟底部挖至或挖入不透水层, 而不透水层的横向坡度较小 ( $<25^\circ$ ) 时, 可采用地下水自然流动速度近于零的假设, 按下列公式计算单位长度渗沟由沟壁一侧流入沟内的流量:

$$q = \frac{k(H_c^2 - h_k^2)}{2r_k} \quad (3.1.2-2)$$

式中:  $q$ ——每延米渗沟由一侧沟壁渗入的流量 ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ );

$H_c$ ——含水层地下水位的高度 ( $\text{m}$ );

$k$ ——含水层材料的渗透系数 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$h_g$ ——渗沟内的水流深度 ( $\text{m}$ ), 在渗沟底位于不透水层内, 且渗沟内水面低于不透水层顶面时,  $h_g$ 可按下式取用:

$$h_g = \frac{I_0}{2 - I_0} H_c$$

$I_0$ ——地下水位降落曲线的平均坡度, 可按含水层材料的渗透系数由下述近似公式估算:

$$I_0 = \frac{1}{3000\sqrt{k}}$$

$r_s$ ——地下水位受排水沟影响而降落的水平距离 ( $\text{m}$ ), 可按下式确定:

$$r_s = \frac{H_c - h_g}{I_0}$$

如地下水由两侧流入排水沟内, 则上述排水沟流量需乘以 2。

当不透水层坡度较小时, 流入渗沟内的水流为二元渗流, 地下水水面在汇集到渗沟以后所形成浸润曲线。如果假定渗沟挖至不透水层, 那么渗沟底部就不进水, 渗沟垂直于纸面方向单位宽度 ( $B=1$ ) 的单宽流量  $q$ , 按达西定律为:  $q = v h = k J h$ , 根据裘皮幼假定,  $J = \sin \theta = -dh/dl$ , 上式变为:  $q = k h \tan \theta = -k h \frac{dh}{dl}$ ,

经过整理计算得:  $q = \frac{k(h_2^2 - h_1^2)}{2(l_2 - l_1)}$ , 在意义上与第二种情况下的计算公式是相同的。

### (3) 不透水层很深的情况

不透水层很深时, 位于含水层内的单位长度渗沟的流量按下式计算确定:

$$q = \frac{\pi k H_g}{2 \ln[2r_s/r_g]} \quad (3.1.2-3)$$

式中:  $r_g$ ——两相邻排水沟间距之半 ( $\text{m}$ );

$H_g$ ——排水沟位置处地下水位的下降幅度 ( $\text{m}$ )。

当不透水层很深时, 沟底位于含水层中, 沟底也有水渗入, 这类渗沟称为不完整渗沟。假定地下水沟为稳定潜水流, 含水层厚度与长度无限, 储水量无限,

且不考虑地面水渗入。不完整渗沟的流量计算公式为  $q = \frac{\varepsilon H K \varphi}{\ln \frac{L}{C}}$ , 其中  $L$  和  $C$  和

$R_s$ 、 $R_g$  的意义相同。在形式上只有系数的差异，这些系数又和含水层的厚度有关。

### 3.1.3 对采用土工合成材料进行排水设计指标的建议

在对渗沟进行设计时，所涉及的几个技术指标除了流量计算以外，还包括渗沟埋置深度的确定、降落曲线的计算以及在不同情况下渗沟位置的选定和参数影响分析。

#### (1) 渗沟埋置深度计算

在现有的高等级公路设计中，由于填土高度比较高，一般情况下路基土的干湿状态均可以满足设计要求；但是在设计一些特殊的地质条件下或者等级低的公路时，就必须考虑路基土的干湿状态了。因此，渗沟的埋置深度主要取决于路基土在满足设计干湿要求时的临界高度、地下水位下降的矢距以及降低后的地下水产生的毛细上升高度。

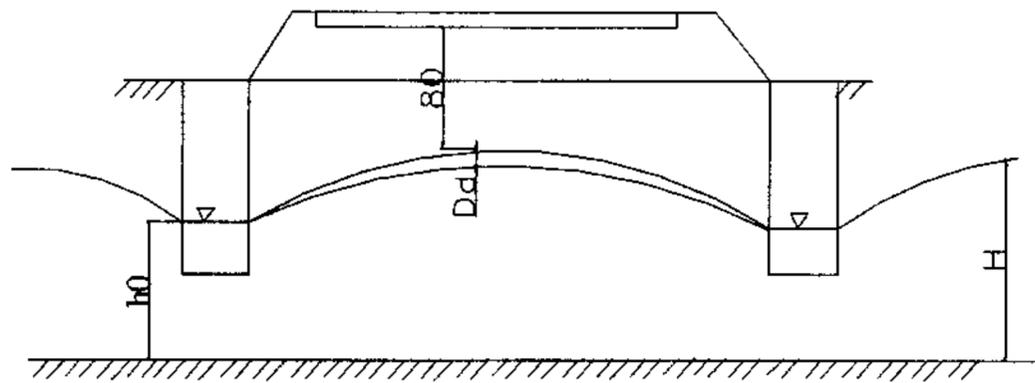


图 3.1.3-1 渗沟深度计算图

根据《路基》设计手册，路基干湿类型，按不利季节路槽底面以下 80cm 深度内的平均含水量确定。一般要求路基处于干燥或中湿状态。因此，在设计渗沟时，要计算渗沟所能降低的地下水位矢距  $H-h_0$ ，在计算时，还要考虑降低后的地下水的毛细水上升高度；同时要计算毛细水上升后的顶面到路槽底面的距离是否满足路基设计所要求的含水量。渗沟内的水深一般为 0.3~0.4 米。计算公式如下：

$$h = 0.3 + H - h_0 + D_d + 0.8 \quad (3.1.3-1)$$

式中： $h$ ——渗沟距路槽底面的深度（ $m$ ）；

$H$ ——距不透水层的未降落前的地下水位深度（ $m$ ）；

$h_0$ ——降落后渗沟内的水距不透水层的深度（ $m$ ）；

$D_d$ ——毛细水上升高度（ $m$ ）。

式中的 0.3、0.8 分别为渗沟内的水深和路槽底面下保持干湿状态的深度。

## (2) 降落曲线的计算

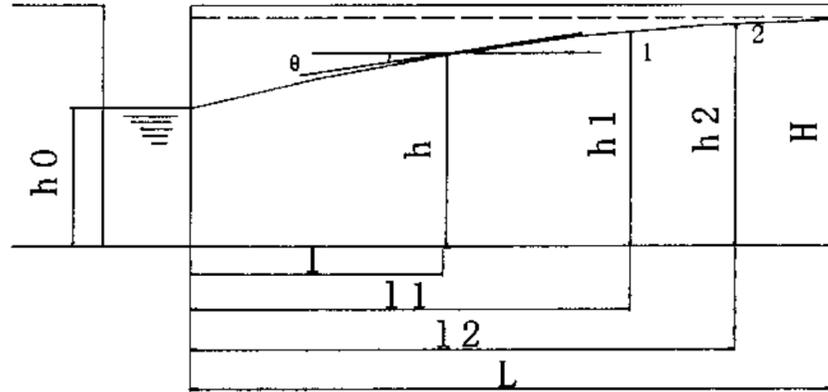


图 3.1.3-2 降落曲线计算图示

图 3.1.3-2 表示流入渗沟内的水为二元渗流, 不透水层水平。地下水水面在渗沟未排水或未抽水前的水面称为地下水静水面, 排水后达到恒定状态时的水面称为动水面。如果假定渗沟开挖到不透水层, 那么渗沟地面就不进水。渗沟垂直于纸面分向单宽流量  $q$ , 按达西定律为:

$$q = kJh \quad (3.1.3-2)$$

根据裘皮幼假定,  $J = \sin \theta = \tan \theta = -dh/dl$ , 上式变为:

$$q = kh \tan \theta = -kh \frac{dh}{dl}$$

如果在距离渗沟  $l_1$  和  $l_2$  处的地下水水深分别为  $h_1$  和  $h_2$ , 对上式从断面 1-1 到 2-2 进行积分, 可得:

$$\frac{2q}{k}(l_2 - l_1) = h_2^2 - h_1^2 \quad (3.1.3-3)$$

式 (3.1.3-3) 为渗沟浸润线方程, 设渗沟内的动水位为  $h_0$ , 地下水含水层厚度为  $H$ , 代入上式, 则有:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{2q}{k}L \quad (3.1.3-4)$$

因此, 可得降落曲线:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{k}{2q}(y^2 - h_0^2) \text{ 或 } x = L \times \frac{y^2 - h_0^2}{H^2 - h_0^2} \\ y &= \sqrt{h_0^2 + \frac{x}{L}(H^2 - h_0^2)} \end{aligned} \right\} \quad (3.1.3-5)$$

## (3) 算例

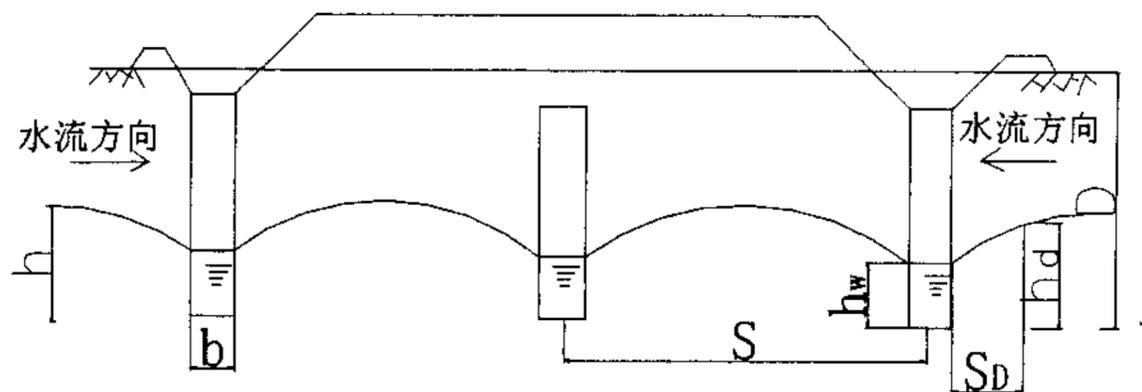


图 3.1.3-3 渗沟布设图

当有地表面长期积水时，并且地下水位又比较高时，一般要在边沟正下方或在路中线位置设置平行的用土工布包裹的渗沟，在迎水面一侧设置反滤层，将水引至渗沟内部，在渗沟靠近路基一侧设置隔渗层，防止沟内的水渗入路基。

应用达西定律， $q = k_s i A$

降落曲线上任一点的水力梯度： $i = \frac{dh_D}{ds_D}$

过水面积  $A = 2h_D L$

因此， $q = 2k_s \frac{dh_D}{ds_D} h_D L$

$$h_D dh_D = \frac{q ds_D}{2k_s L}$$

对上式进行积分，并代入边界条件当  $s_D = 0$  时， $h_D = h_w$ ，得：

$$h_D^2 = \frac{q s_D}{k_s L} + h_w^2 \quad (3.1.3-6)$$

当降雨不能给地下水形成补给时，为建立这一稳定条件，流入渗沟的流量应当等于雨水透过渗沟同等面积进入土的流量。

因此， $q = SrL$  (3.1.3-7)

式中： $r$  为降雨强度。

把式 (3.1.3-7) 代入式 (3.1.3-6) 中，得到：

$$h_D^2 = \frac{s_D Sr}{k_s} + h_w^2$$

当  $s_D = S/2$  时, 降落曲线到渗沟底部最大高度为  $h$ , 因此:

$$h^2 = \frac{S^2 r}{2k_s} + h_w^2 \quad (3.1.3-8)$$

对渗沟内的透水性材料应用达西定律

$$q = k_d i_d A_d$$

由  $q = SrL$  和  $A = bh_w$ , 得:

$$SrL = k_d i_d b h_w$$

$$h_w = SrL / k_d i_d b \quad (3.1.3-9)$$

把式 (3.1.3-9) 代入式 (3.1.3-8) 中, 可得:

$$h = S \sqrt{\frac{r}{2k_s} + \left(\frac{rL}{k_d i_d b}\right)^2} \quad (3.1.3-10)$$

#### (4) 参数影响分析

在计算时, 设定  $i=0.1$ , 降落高度为 3m, 渗沟内水深为 0.5m, 土的渗透系数为粘土的渗透系数, 求得  $L$  为 30m, 因此, 所得  $Q$  值如表 3.1.3-1 所示。

表 3.1.3-1 参数影响分析表

Q	k	i	L	h
$0.01 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{d}$	$1 \times 10^{-7} \text{m/s}$	0.1	30	3
$0.03 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{d}$	$2 \times 10^{-7} \text{m/s}$	0.1	30	3
$0.04 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{d}$	$3 \times 10^{-7} \text{m/s}$	0.1	30	3
$0.06 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{d}$	$4 \times 10^{-7} \text{m/s}$	0.1	30	3
$0.14 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{d}$	$1 \times 10^{-6} \text{m/s}$	0.1	30	3

按照传统设计方法进行计算时, 渗流量主要取决于土的渗透系数, 同一类土的渗透系数  $k$  变化范围就很大, 以粘土为例,  $k$  的取值在  $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{m/s}$  之间, 依据  $k$  值计算出的渗流量也相差很大。

渗沟的反滤层计算比较麻烦, 所设计的反滤层由于尺寸很小, 在施工中操作很困难, 有时不能严格按照设计尺寸执行, 使渗沟的排水作用不能很好地发挥出来。

因此, 在设计渗沟时, 可以采用透水土工布作为反滤层, 用塑料盲沟代替塑料排水管。根据 JTJ/T 019-98 《公路土工合成材料应用技术规范》规定, 用于

反滤层的透水土工布必须满足挡土、保持水流畅通（透水）和防止淤堵三方面的要求。

1) 挡土要求应符合:

$$O_{95} \leq d_{85} \quad \text{粗粒土 (粒径 } d < 0.075 \text{ mm 的颗粒含量小于 50\%)}$$

$$O_{95} \leq 0.21 \text{ mm} \quad \text{细粒土 (粒径 } d < 0.075 \text{ mm 的颗粒含量大于等 50\%)}$$

式中:  $O_{95}$ ——土工合成材料(土工织物)的等效孔径(mm)

$d_{85}$ ——被保护土的特征粒径(mm)

2) 透水性要求应符合:

$$K_G > 10K_S$$

式中:  $K_G$ 、 $K_S$ ——土工合成材料的渗透系数(m/s)和被保护土的渗透系数(m/s)。

3) 防淤堵要求应符合:

$$GR = i_1/i_2 \leq 3$$

式中:  $GR$ ——梯度比;

$i_1$ 、 $i_2$ ——土工合成材料被保护土侧与另一侧的水力梯度。

渗沟底部的塑料盲沟在使用时,外面要包裹土工织物,以免填料中的细粒堵塞盲沟,产生淤堵。外包土工织物的主要作用是过滤。

### 3.2 路界排水

路界地表排水包括路面(含路肩)、中央分隔带、路基边坡坡面和路界范围内地表坡面的表面排水,以及有可能进入路界的公路毗邻地带的地表水和由相交道路进入路界内的地表水的排除。地表排水设施的布设应充分利用地形和天然水系,形成完善的排水系统,并做好进出口位置的选择和处理,使水流畅通,不出现堵塞、溢流、渗漏、淤积、冲刷、冻结等,造成对路基、路面和毗邻地带的危害。路界排水设施主要包括边沟和渗沟,关于中央分隔带排水设施在下一节介绍。

各项排水设施的设计流量和各种沟管和泄水口的泄水能力的水力计算按第二章中所述的方法确定。其断面形状和尺寸应满足排泄设计流量的要求,沟管内水流的最大和最小流速应控制在允许流速范围内。

### 3.2.1 流量计算<sup>[3]</sup>

截水沟的水力计算公式为:

$$Q_c = vA \quad (3.2.1-1)$$

式中:  $Q_c$ ——截水沟的泄水能力 ( $m^3/s$ );

$v$ ——截水沟内的平均流速 ( $m/s$ );

$A$ ——过水断面面积 ( $m^2$ )。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

式中:  $n$ ——沟壁的粗糙系数;

$R$ ——水力半径 ( $m$ ),  $R = A/\rho$ ;

$\rho$ ——水力断面湿周 ( $m$ );

$I$ ——水力坡度, 可采用沟底的坡度。

根据《规范》, 边沟所需排泄的设计径流量计算公式为:

$$Q = 16.67\psi qF$$

式中:  $Q$ ——设计径流量 ( $m^3/s$ );

$q$ ——设计重现期和降雨历时内的平均降雨强度 ( $mm/min$ );

$\psi$ ——径流系数;

$F$ ——汇水面积 ( $km^2$ )

根据《规范》, 边沟的水力计算为以下公式:

$$Q_c = vA \quad (3.2.1-2)$$

式中:  $Q_c$ ——边沟的泄水能力 ( $m^3/s$ );

$v$ ——边沟内的平均流速 ( $m/s$ );

$A$ ——过水断面面积 ( $m^2$ )。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.1-1)$$

式中:  $n$ ——沟壁的粗糙系数;

$R$ ——水力半径 ( $m$ ),  $R = A/\rho$ ;

$\rho$ ——水力断面湿周 ( $m$ );

$I$ ——水力坡度, 可采用沟底的坡度。

### 3.2.2 采用土工合成材料的排水设计

当地质或土质条件差时, 截水沟及边沟有可能产生渗漏或变形, 应采取相应的防护措施。截水沟及边沟中的土工合成材料主要是防止沟中的水流渗出沟渠, 故在背离水流方向的一侧采用不透水的土工膜, 而另一侧采用透水的土工织物。如图 3.2.2-1 所示。

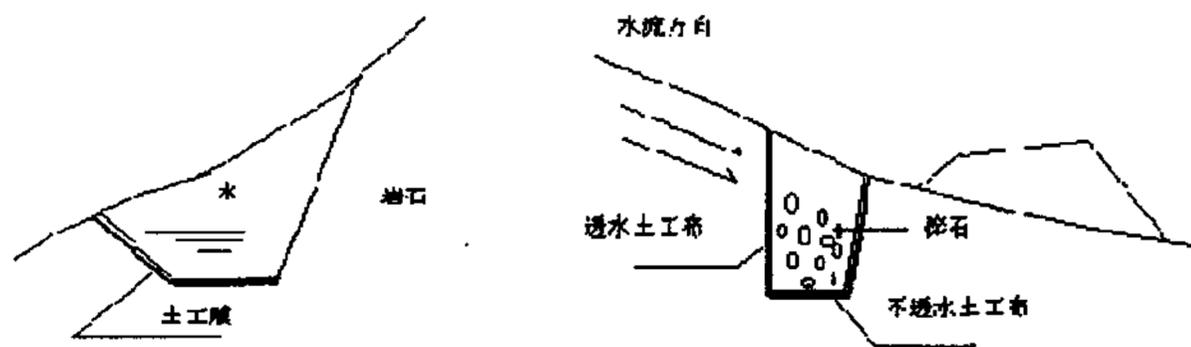


图 3.2.2-1 土工膜在截水沟及边沟中的应用

关于土工膜的渗漏量计算, 《土工合成材料工程应用手册》<sup>[2]</sup> (以下简称《手册》) 提出了以下计算公式。

$$(1) \text{ 土工膜的渗漏量: } Q_g = k_g i A = k_g \frac{\Delta H}{T_g} A \quad (3.2.2-1)$$

式中:  $Q_g$ ——土工膜的渗漏量 ( $m^3/s$ );

$k_g$ ——土工膜的渗透系数 ( $m/s$ );

$i$ ——水力梯度;

$\Delta H$ ——土工膜上的水头差 ( $m$ );

$A$ ——土工膜的渗透面积 ( $m^2$ );

$T_g$ ——土工膜的厚度 ( $m$ )。

(2) 缺陷渗漏量—施工中产生的土工膜的渗漏量

$$1) \text{ 单层土工膜防渗层的缺陷渗漏量: } Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gH_w} \quad (3.2.2-2)$$

式中:  $Q$ ——土工膜缺陷引起单层土工膜防渗层的缺陷渗漏量 ( $m^3/s$ );

$A$ ——土工膜缺陷孔的面积总和 ( $m^2$ );

$g$ ——重力加速度 ( $m/s^2$ );

$H_w$ ——土工膜上下水头差 (m);

$\mu$ ——流量系数, 一般取  $\mu = 0.60 \sim 0.70$ 。

## 2) 复合防渗层的缺陷渗漏量

### 复合防渗层缺陷渗漏量的解析解

#### 一般情况

$$Q = \pi r_1^2 k_s \left( 1 + \frac{H_w}{H_s} \right) + 2\pi \lambda r_1 [BK_1(\lambda r_1) - AI_1(\lambda r_1)]$$

当土工膜下面土层厚度较薄的情况  $Q = \pi R^2 k_s$

#### Giroud 等人的近似解

一般情况  $i_s < 1.0$

对土工膜与下层土接触良好的情况:  $Q = 0.21 i_{avg} a^{0.1} H_w^{0.9} k_s^{0.74}$

$$R = 0.26 a^{0.05} H_w^{0.45} k_s^{-0.13}$$

对土工膜与下层土接触不良的情况:  $Q = 1.15 i_{avg} a^{0.1} H_w^{0.45} k_s^{0.74}$

$$R = 0.61 i_{avg} a^{0.05} H_w^{0.45} k_s^{-0.13}$$

对于圆形孔缺陷:  $i_{avg} = 1 + H_w / [2H_s \ln(R/r)]$  (3.2.2-3)

式中:  $i_{avg}$ ——平均水力坡降;

$R$ ——土工膜下面土内渗透区域的半径 (m);

$a$ ——土工膜上孔的面积 ( $m^2$ );

$H_w$ ——土工膜上水头 (m);

$r_1$ ——土工膜上圆形孔半径 (m);

$k_s$ ——土工膜下面土层的渗透系数 ( $m/s$ );

$H_s$ ——土工膜下面低渗透性土层的厚度 (m);

当  $H_w \leq H_s$  时,  $i_s \approx 1.0$  则

土工膜与下层土接触良好的情况:  $Q = 0.21 a^{0.1} H_w^{0.9} k_s^{0.74}$

土工膜与下层土接触不良的情况： $Q = 1.15a^{0.1} H_w^{0.9} k_s^{0.74}$

### 3.3 中央分隔带排水

在《规范》中对中央分隔带排水的设计要求只涉及到泄水口的水力计算，对于宽度大于 3m 且未采用铺面封闭的中央分隔带排水进行流量和水力计算，但是高速公路的无铺面中央分隔带的设置会由于降水和灌溉水的渗入而影响两侧路基和路面结构的稳定性，进而导致路面病害的发生。

#### 3.3.1 流量计算

中央分隔带的排水量主要包括降水渗入的流量以及灌溉水的渗入量。

降水渗入量：

$$Q = 16.67CIF$$

式中： $Q$ ——设计径流量；

$F$ ——汇水面积 ( $m^2$ )；

$C$ ——径流系数；

$I$ ——在设计重现期和降雨历时内的降雨强度 ( $mm/min$ )。

#### 3.3.2 采用土工合成材料的排水设计

高速公路表面无铺面且未采用表面排水设施的中央分隔带，为排除渗入分隔带内的表面水，可设置纵向排水渗沟，并隔一定间距通过横向排水管将渗沟内的水排引出路界。渗沟周围包裹透水的土工布作为反滤层，以免渗入水携带的细粒将渗沟堵塞。在设计时，要考虑渗沟周围包裹的反滤织物（土工布）的透水性、挡土性、以及淤堵性。渗沟上的回填料与路面结构的交界面处铺设土工膜作为隔渗层。在纵向排水沟底部设置塑料盲沟汇集渗入排水沟内的水。

### 3.4 路面边缘排水

路面边缘排水系统由透水性填料集水沟、纵向排水管、横向出水管和过滤织物（土工布）组成。渗入路面结构内的水分，先沿路面结构层中某一透水层次或者层间空隙横向流入由透水性材料组成的纵向排水沟，再由间隔一定距离布置的横向出水管排引出路基。

### 3.4.1 水力计算

根据《规范》，表面水渗入路面结构的量，按路面类型分别由公式(2.3.1-1)、(2.3.1-2)确定，在这里不做赘述。

在计算渗入路面结构内的水量时，还应该包括路肩表面水的渗入量：

$$Q = 16.67CIF$$

式中： $Q$ ——设计径流量；

$F$ ——汇水面积 ( $m^2$ )；

$C$ ——径流系数；

$I$ ——在设计重现期和降雨历时内的降雨强度 ( $mm/min$ )。

### 3.4.2 采用土工合成材料的排水设计

路面边缘排水系统中采用的土工织物作为反滤层，主要起过滤作用。为了尽快排除渗入路面结构内部的水，一般在纵向集水沟底部采用带孔的塑料管将汇集的水排出路基以外。带孔排水管通常选用聚氯乙烯(PVC)或聚乙烯(PE)塑料管，设在集水沟的底部。排水管设3排槽口或孔口，其开口总面积不小于 $42cm^2/延米$ ，孔口直径不大于透水性回填料透过率为85%时的粒径的1/2。管径可按设计流量由水力计算确定，但选用时还需考虑维护的方便，一般采用100~150mm。在实际工程中，不但施工复杂，而且也不能保证将路面结构内的水全部排除。因此，可以采用塑料盲沟代替带孔排水管。

## 3.5 边坡防护与支挡结构排水

### 3.5.1 护坡

将土工织物用于道路边坡防护，是将土工织物铺设于种植土与排水层之间，起到隔离和防渗的作用，使具有一定压力的裂隙水不得在种植土下形成压力水，而由排水层排出；其隔离作用使降雨和绿化用水不能流入边坡内部。

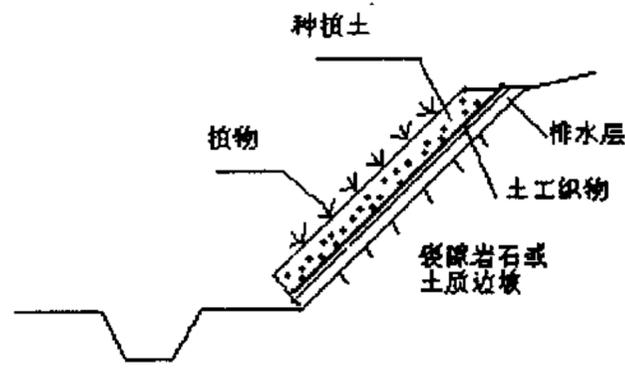


图 3.5.1-1 边坡防护

若道路边坡为土质路堑边坡，坡体的含水量很大（或有上层滞水）而易产生坡体滑动时，可在坡体内设置条形、分岔形或拱形边坡渗沟（或以排水管代替）以疏干坡体，或者设置水平排水孔以降低坡体内的静水压力。见图 3.5.1-2，3.5.1-3 所示。

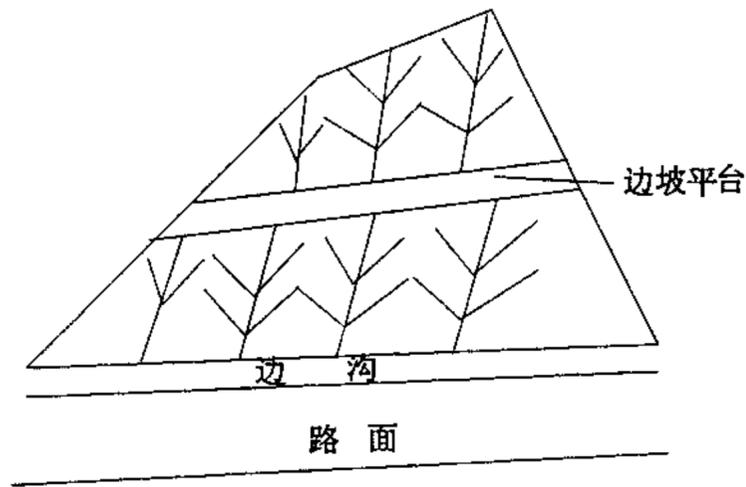


图 3.5.1-2 树枝形排水体

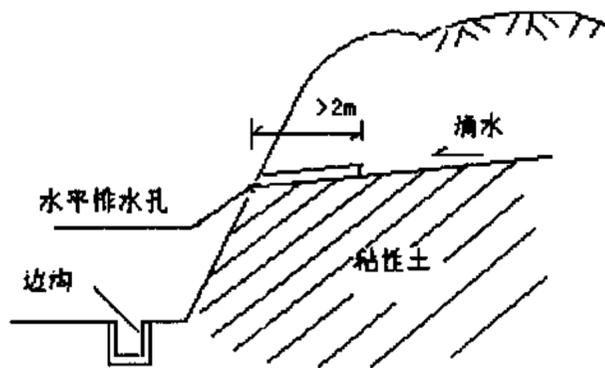


图 3.5.1-3 水平排水孔

### 3.5.2 挡土墙

《规范》中的挡墙排水设施的设计为沿挡土墙墙背的底部设置纵向排水渗沟，并间隔一定距离设置竖向渗沟。渗沟由透水性粒料筑成。由于渗沟的尺寸较小，施工工艺复杂，并且，在实际应用中，不能将挡墙后填土的水完全排除，影

响挡墙结构的稳定性。因此,在设计时,可以采用塑料盲沟代替透水性材料筑成的渗沟。

当遇到较大水流而又不能及时排除时,墙后填土中的水的静水压力就会对挡土墙的稳定产生一定的影响,甚至导致墙体的破坏。因此要对墙后填土中的水的静水压力进行计算,同时要对挡土墙的稳定进行验算。

### 3.5.2.1 水力学模型

在设计时,根据挡墙的结构可以将其水力学模型看作类似于渗沟的结构。对于一元渗流问题,可应用达西定律或裘皮幼公式求解。

### 3.5.2.2 水力学计算及分析方法

#### (1) 半填半挖路段的挡墙式石砌边坡

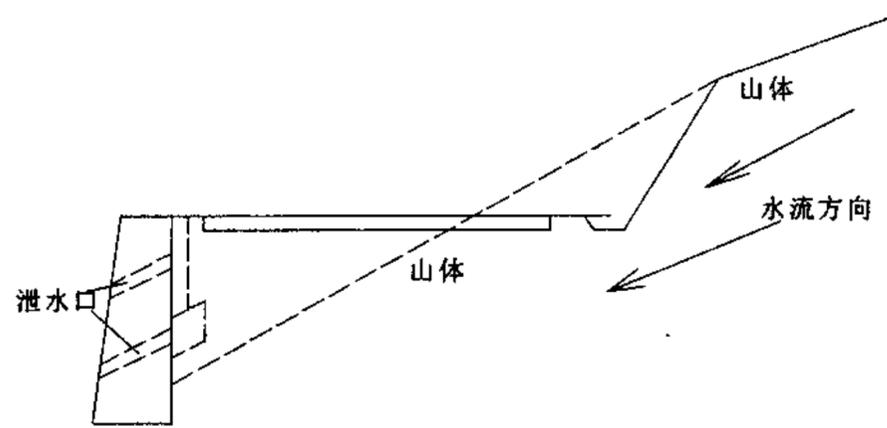


图 3.5.2-1 半填半挖路段挡墙

对于半填半挖路段的挡墙式石砌边坡,路基土内的水只要包括山体内的渗入水和路面由于降雨所引起的渗入水,设计时多采用在墙后回填透水性材料。如果材料的透水性较强,在水的作用下会使路基土中的土颗粒产生重排,一些细粒土会随水流从泄水口渗出,如果泄水口被堵塞,路基土在水的长期浸泡下强度和稳定性会大大降低,甚至会导致挡墙在静水压力作用下坍塌。

因此,在设计时可以采用土工织物包裹塑料盲沟的形式来排除挡墙后填土中的水。土工织物一方面可以起到排水作用,另一方面可以起到过滤作用,即可以将水排出路基以外,同时又可以保护土体不被水流带走。

在计算时,渗入路基的水量可以按照公式  $Q = 16.67CIF$  求得,然后根据流量选择合适的土工布。

#### (2) 深挖方路段边坡防护

在一些山区公路中有很多路段是深挖方路堑,其结构形式如图 3.5.2-2 所示。

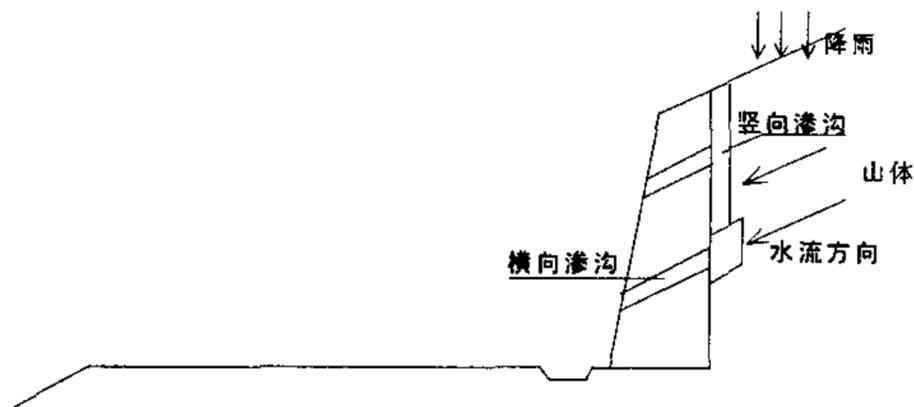


图 3.5.2-2 深挖方路段挡墙

经常在作排水设计时将汇水的坡面上设置截水沟、排水沟等排水设施，但是在实际运用中我们发现只有一部分水从截水沟内排掉了，仍然有相当一部分水渗入到山体中，如果在降雨量很大的情况下，就会对边坡或者路基产生影响，严重时可能会导致塌方、滑坡。

因此，在计算时要对山体内部的水量进行分析。在分析时要考虑水的两方面来源，一方面包括降雨渗入水，另一方面包括岩层内的水。降雨渗入水可以根据公式  $Q = 16.67CIF$  计算，对于岩层内的裂隙水，要根据当地的地质资料查得，如果有条件可以在当地进行取样调查，以确保所设计的排水设施满足要求。

### (3) 高填方路堤

对于高填方路堤，为了加固路基一般在两侧设置挡墙或矮墙，其结构形式如图 3.5.2-3 所示。

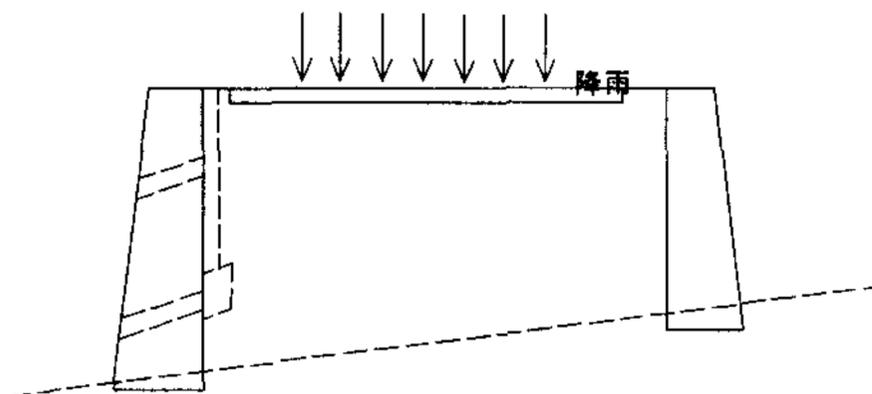


图 3.5.2-3 高填方路基挡墙

在排水设计时主要考虑的因素是从路面渗入的水量能否在最短时间内排出路基，如果有水长时间滞留在路基内，就会对路基的稳定性产生影响。在设计时不仅要考虑排水作用，还要对土工布的反滤要求进行严格分析。

### (4) 挡墙外侧水位很高时

当挡墙外侧始终有水，且水位很高时，要根据泄水口与外侧水位的具体情况来确定排水设施的反滤和排水设计，如图 3.5.2-4 所示。

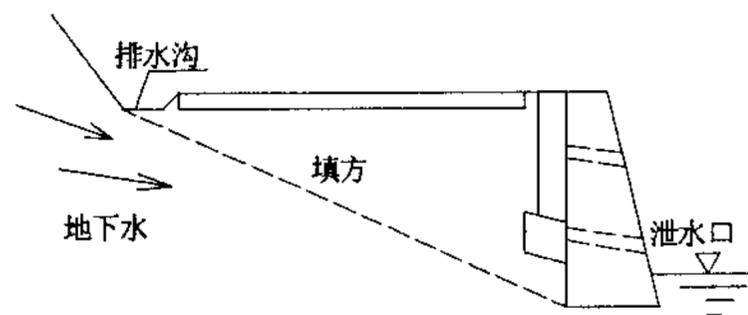


图 3.5.2-4 挡墙外侧有水

从图中可以看到,山体里的水除一部分可以从纵向排水沟排走以外,也会有部分地下水从岩石缝隙渗入路面结构内,如果挡墙外侧水位低于泄水口,那么路面结构内的水就可以从设计的渗沟排掉;但如果外侧水位很高,路面结构内就会有水长期积聚,这些水会形成一种静水压力,对挡墙的安全性会有很大影响,所以在设计时一定要考虑这一点。关于静水压力的计算可以根据水力学公式  $P = P_c A$  求得。如果挡墙外侧的水位突然下降,那么路面结构内的水就会对挡墙形成动水压力。不论是静水压力还是动水压力,都有可能使挡墙产生破坏。因此,在设计时对反滤和排水的要求要严格考虑。

### 3.5.2.3 对采用土工合成材料进行排水设计指标的建议<sup>[31]</sup>

以上几种形式都是在挡墙设计中比较典型的情况,在设计这些排水设施时对于土工合成材料的排水作用是很容易满足设计要求的,但是对于过滤作用要具体问题具体分析。

在工程上,过滤是指在土中呈渗流状态的流体,当流入过滤材料时,流体可以通过,而把起骨架作用的固体颗粒截留下来的现象。工程上对过滤材料的要求是:①能够挡土②保持水流畅通③能够长期工作。其中挡土和过水两方面对过滤材料的要求是不同的,挡土能力要求过滤材料开孔尽量小,而透水能力则恰好相反,因此设计时就要很好地将这两方面统一起来。Giroud (1996) 认为滤层对土粒流失地阻挡,并不意味着要阻挡所有颗粒地流失,只要骨架不受扰动,土层能保持在渗流作用下的稳定性即可。

如前面所述,过滤过程是一个很复杂的发展过程。国内外已开展了大量和长时间的研究工作,取得了许多研究成果。在选择土工织物时可以采用试验的方法也可以运用过滤准则。过滤试验是一种复杂而且很花时间的试验,在设计和使用不太可能普遍地进行这种试验。因此,对于很多工程常用过滤准则进行过滤设计。国内外许多研究者力图通过较为简单的土的颗粒级配试验和土工织物的孔径试验来确定出一些土和土工织物的代表性指标,然后在理论分析和过滤试验的基础上建立这些指标之间的一些关系,如满足这些关系就可以确保土工织物正常地发挥其过滤作用。目前,不同国家的学者根据自己的研究成果、经验和观点提出

了不同的土工织物反滤设计准则,数量很多,使设计者无所适从。我国应用土工织物起步较晚,但近年来发展很快。其反滤设计工作多凭经验借用国外准则。因此,对现有准则进行分析和探讨,以寻求既经济又安全的反滤设计准则是十分必要的。本文利用 N. W. M. JOHN 推导的公式,将一些国家的准则转化为土工织物孔径  $O_{95}$  与被保护土层平均粒径  $d_{50}$  之间的关系,进行各准则间的比较和分析,进而提出合理地选择各国公式的建议,可供工程技术人员在进行土工织物反滤设计时作为参考。

### (1) 过滤准则

选择一种合适的土工织物作为反滤层要满足两个标准,一个是保土准则,一个是渗透准则。保土准则规定了土工织物孔径的上限,而渗透准则规定了土工织物孔径的下限。在实际应用中,还要通过采用防淤堵准则来解决土工织物产生淤堵的问题。

在单向水流作用下,土工织物能够阻止相当一部分大粒径的土体在织物表面形成天然滤层,因此从逻辑上选择土工织物的孔径和土体的不均匀系数  $U$ 、土的平均粒径  $d_{50}$  有关。如果是具有均匀级配的土,那么织物有效孔径根据各国的不同实践得出的  $O_{90}$ 、 $O_{95}$  或  $D_w$  仅是  $d_{50}$  的几倍。另一方面,如果是良好级配的土那么织物有效孔径就是  $d_{50}$  的很多倍。

大多数土都有类似于 S 形的颗粒分布曲线,实际上,极细的颗粒和极粗的颗粒只是占总数的一小部分,对整个反滤过程的影响几乎是可以忽略的。对于过滤应用来说,以土的颗粒分布曲线的中段线性段延长为直线级配曲线作为基准,该线性级配曲线的不均匀系数  $U'$  为:

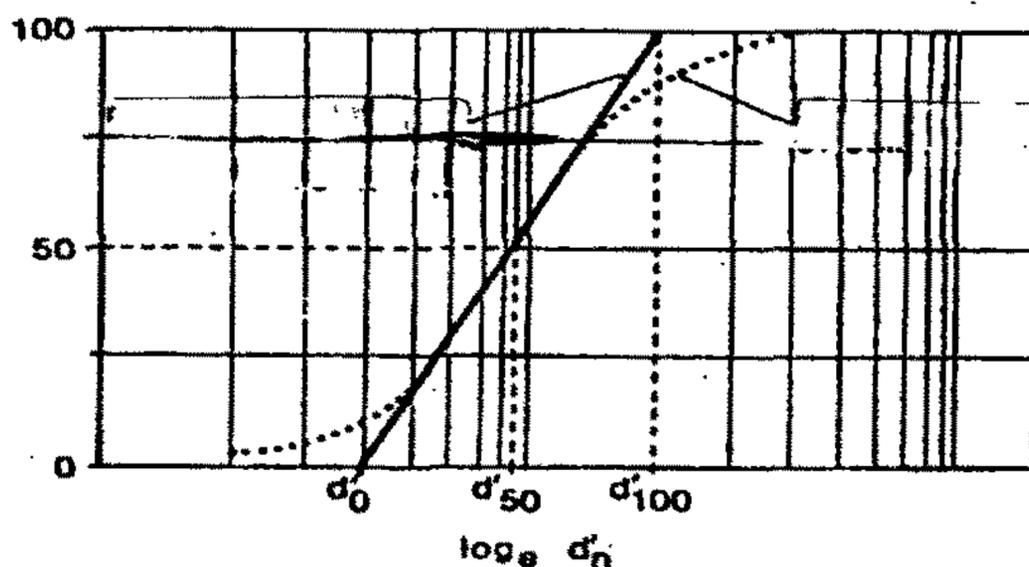
$$U' = \frac{d'_{60}}{d'_{10}}$$

也等于  $\frac{d'_{90}}{d'_{40}}$  or  $\sqrt{\frac{d'_{100}}{d'_0}}$

相比而言,比较常见的不均匀系数  $U$  的表达式为:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

在每一个式子中,没有上标的粒径大小 ( $d_0$ 、 $d_{10}$ 、 $d_{60}$  等) 通常指天然土级配曲线,而有上标的粒径大小 ( $d'_0$ 、 $d'_{10}$ 、 $d'_{60}$  等) 指的是重新建立的土的线性级配曲线。对于线性均匀系数的不同表达式的确切性可以通过考虑其中的一条级配曲线作为研究对象,如图 3.5.2-1 所示。



(图中实线为线性级配曲线、虚线为重建线性级配曲线)

图 3.5.2-1 级配曲线示意图

该图是以线性级配曲线上的通过率作纵坐标、以对粒径  $d'_n$  取对数作横坐标的平面图。设该直线的斜率为  $m$ ，截距为  $c$ ，直线的表达式为：

$$n = m \log_e d'_n - c \quad (3.5.2-1)$$

由此，得：

$$d'_n = \exp\left(\frac{n+c}{m}\right)$$

因此

$$d'_{60} = \exp\left(\frac{60+c}{m}\right)$$

$$d'_{10} = \exp\left(\frac{10+c}{m}\right)$$

由于

$$U' = d'_{60}/d'_{10}$$

$$\begin{aligned} U' &= \exp\left(\frac{60+c}{m}\right) / \exp\left(\frac{10+c}{m}\right) \\ &= \exp\left[\left(\frac{60+c}{m}\right) - \left(\frac{10+c}{m}\right)\right] \\ &= \exp\left(\frac{50}{m}\right) \end{aligned} \quad (3.5.2-2)$$

同理

$$\begin{aligned} d'_{90}/d'_{40} &= \exp\left[\left(\frac{90+c}{m}\right) - \left(\frac{40+c}{m}\right)\right] \\ &= \exp\left(\frac{50}{m}\right) \end{aligned} \quad (3.5.2-3)$$

$$\begin{aligned}
 d'_{100}/d'_0 &= \exp\left[\left(\frac{100+c}{m}\right) - \left(\frac{0+c}{m}\right)\right] \\
 &= \exp\left(\frac{50}{m}\right)^2 \quad (3.5.2-4)
 \end{aligned}$$

比较式 (3.5.2-2)、(3.5.2-3) 和 (3.5.2-4) 可知:

$$U' = \frac{d'_{60}}{d'_{10}} = \frac{d'_{90}}{d'_{40}} = \sqrt{\frac{d'_{100}}{d'_0}}$$

因此, 以上任一表达式都可以用来确定从图所示的重新建立的级配曲线中所得的不均匀系数。式 (3.5.2-1) 可以作为确定土工织物孔径的选择标准:

$$n = m \log_e d'_n - c$$

其中

$$m = \Delta n / \Delta \log_e d'_n$$

式中:  $\Delta n$  和  $\Delta \log_e d'_n$  为  $n$  和  $d'_n$  所对应的相应增量。

求图中  $d'_{10}$  到  $d'_{60}$  的截面上粒径分布线性段的斜率:

$$m = \frac{\Delta n}{\Delta \log_e d'_n} = \frac{50}{\log_e d'_{60} - \log_e d'_{10}} = \frac{50}{\log_e (d'_{60}/d'_{10})} = \frac{50}{\log_e U'}$$

把  $m$  代入式 (3.5.2-1) 中, 得:

$$n = 50 \frac{\log_e d'_n}{\log_e U'} - c \quad (3.5.2-5)$$

由  $d'_{50}$  可以得到连续值  $c$ , 当  $n=50$  时,  $d'_n=d'_{50}$ , 代入式 (3.5.2-5), 得:

$$c = 50 \frac{\log_e d'_{50}}{\log_e U'} - 50$$

将  $c$  代回到式 (3.5.2-5), 得:

$$n = 50 \frac{\log_e d'_n}{\log_e U'} - 50 \frac{\log_e d'_{50}}{\log_e U'} + 50$$

$$\frac{\log_e d'_n}{\log_e U'} = \frac{n}{50} + \frac{\log_e d'_{50}}{\log_e U'} - 1$$

$$\log_e d'_n = \left(\frac{n}{50} - 1\right) \log_e U' + \log_e d'_{50}$$

$$d'_n = \exp \left[ \left( \frac{n}{50} - 1 \right) \log_e U' + \log_e d'_{50} \right]$$

由于土的实际级配曲线上的粒径  $d_{50}$  与重建线性级配曲线上的粒径  $d'_{50}$  位于级配曲线的中部, 二者相等,  $d_{50} = d'_{50}$ , 故:

$$d'_n = \exp \left[ \left( \frac{n}{50} - 1 \right) \log_e U' + \log_e d_{50} \right] \quad (3.5.2-6)$$

一般建议土工织物孔径应该略小于土的粒径  $d'_n$ , 英国和美国采用  $O_{95}$  作为土工织物有效孔径, 德国采用  $D_w$  (近似于  $O_{95}$ ) 作为土工织物有效孔径。因此, 土工织物有效孔径应大于土粒粒径为  $d'_{60}$ , 限制值  $d'_n = d'_{60} \geq O_{95}$ , 将  $n=60$  代入式

$$\begin{aligned} (3.5.2-6), \text{ 得: } \quad O_{95} &\leq \exp \left[ \left( \frac{60}{50} - 1 \right) \log_e U' + \log_e d_{50} \right] \\ &\leq \exp [0.2 \log_e U + \log_e d_{50}] \\ &\leq \exp [\log_e (U' \times d_{50})] \\ \log_e O_{95} &\leq \log_e (U'^{0.2} \times d_{50}) \end{aligned}$$

由此, 得:  $O_{95}/d_{50} \leq U'^{0.2}$

上式为土工织物有效孔径  $O_{95}$  和土的平均粒径  $d_{50}$  之间的关系式, 现在对各国准则进行比较分析。<sup>[20]</sup>

#### 美国准则

美国土工织物准则, 最早由美国陆军工程师团提出, 后经美国联邦公路管理局等部门修改, 如表 3.5.2-1 所示。

表 3.5.2-1 美国土工织物反滤准则

土粒径大小	土工织物准则
$d_{50} > 0.074 \text{mm}$	$0.297 \text{mm} \leq O_{95} \leq d_{85}$ (织造型土工织物) $0.297 \text{mm} \leq O_{95} \leq 1.8 d_{85}$ (非织造型土工织物)
$d_{50} < 0.074 \text{mm}$ , $U \leq 2$	$O_{95} \leq d_{85}$
, $2 \leq U \leq 4$	$O_{95} \leq 0.5U d_{85}$
, $4 \leq U \leq 8$	$O_{95} \leq 8 d_{85}/U$
, $U \geq 8$	$O_{95} \leq d_{85}$

注： $O_{95}$ ——土工织物等效孔径，表示占总质量 95% 的石英砂或玻璃珠在筛分时滞留在土工织物上的相应粒径；

$d_{85}$ ——被保护土层土粒粒径，小于该粒径的土粒含量占土总质量的 85%；

$U$ ——土的不均匀系数。

#### 法国准则

法国土工织物与土工膜委员会提出的土工织物反滤准则如表 3.5.2-2 所示。

表 3.5.2-2 法国土工织物反滤准则（水力梯度  $i < 5$ ）

不均匀系数	土工织物准则
$U > 4$ 的密实土	$4d_{15} \leq O_f \leq 1.25 d_{85}$
$U > 4$ 的松土	$4d_{15} \leq O_f \leq d_{85}$
$U \leq 4$ 的密实土	$O_f \leq d_{85}$
$U \leq 4$ 的松土	$O_f \leq 0.8 d_{85}$

注： $O_f$ ——土工织物的相应孔径；

$d_{15}$ 、 $d_{85}$ ——被保护土的相应粒径。

当水力梯度  $5 < i < 20$  时，需将表中土工织物孔径  $O_f$  值降低 20%；当水力梯度  $i > 20$  或往复水流情况，需将表中土工织物孔径  $O_f$  值降低 40%。

#### 德国准则

德国土力学与基础学会第 14 工作小组制定的土工织物反滤准则如表 3.5.2-3 所示。

表 3.5.2-3 德国土工织物反滤准则

土粒径大小	土工织物准则
$d_{40} < 0.06\text{mm}$ 稳定土	$D_w < 10d_{50}$ and $D_w < 2d_{90}$
$d_{40} < 0.06\text{mm}$ 非稳定土	$D_w < 10d_{50}$ and $D_w < d_{90}$
$d_{40} > 0.06\text{mm}$ 稳定土	$D_w < 5d_{10}U^{1/2}$ and $D_w < 2d_{90}$
$d_{40} > 0.06\text{mm}$ 非稳定土	$D_w < 5d_{10}U^{1/2}$ and $D_w < d_{90}$

注： $D_w$ ——土工织物孔径，用汉诺威大学弗兰休斯研究所试验方法（湿筛法）测得；

$d_{10}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_{90}$ ——被保护土的相应粒径。

所谓非稳定土，是指不满足下列任一条件的土：

- ① 塑性指数小于 15 的细粒土；
- ② 平均粒径（ $d_{50}$ ）处于 0.02~0.01mm 之间的土；
- ③ 不均匀系数小于 15 并含有粘粒或粉粒的土。

从反滤观点来说,不属于上列三类土者称为稳定土。

荷兰准则 [荷兰奥克金 (Ogink) 准则]

$$O_{90} < d_{90} \quad \text{织造型土工织物}$$

$$O_{90} < (1.8 \sim 2.0)d_{90} \quad \text{非织造型土工织物}$$

式中:  $O_{90}$  ——土工织物的相应孔径;

$d_{90}$  ——被保护土的相应粒径。

英国准则

$$\text{英国的土工织物反滤准则为: } O_{95} < d_{95}$$

式中:  $O_{95}$  ——土工织物的相应孔径;

$d_{95}$  ——被保护土的相应粒径。

还有一些准则不再一一列出。由此可见,现行的过滤准则很多,其形式相差很大,而设计者完全是凭经验选择使用,这为工程实践带来不便。因此,采用同一尺度,进行各准则间的比较分析是必要的。

根据式 (3.5.2-6) 可以方便地导出:

$$d'_{95} = d'_{50} U'^{0.9}$$

$$d'_{90} = d'_{50} U'^{0.8}$$

$$d'_{85} = d'_{50} U'^{0.7}$$

因此,有近似关系:

$$d_{95} = d_{50} U'^{0.9}$$

$$d_{90} = d_{50} U'^{0.8}$$

$$d_{85} = d_{50} U'^{0.7}$$

上述表达式的准确性,取决于粒径分布曲线的形状。当土的粒径分布曲线为直线时,等式成立。

由于各国测量土工织物等效孔径的试验方法不同,加上土工织物本身的复杂性,因此,所测出的土工织物等效孔径存在不少差异。为了进行不同保土准则间的比较,可利用 Faure 等人整理分析的各国所用等效孔径间的关系:

英国  $O_{95} \approx O_{95}$  美国 (ASTM)

荷兰  $O_{90} \approx 0.85 O_{95}$  美国 (ASTM)

德国  $D_w \approx 0.75 O_{95}$  美国 (ASTM)

法国  $O_f \approx 0.7 O_{95}$  美国 (ASTM)

另外, 为了比较的目的, 取土的不均匀系数  $U$  近似等于土的线性不均匀系数  $U'$ 。

根据以上几个近似关系, 可将所列各国保土准则统一转化为美国标准的  $O_{95}$  与被保护土平均粒径  $d_{50}$  间的关系。

例如, 对于荷兰准则  $O_{90} < 2d_{90}$

可转化为  $0.85 O_{95} < 2d_{50} U'^{0.8}$

即  $O_{95}/d_{50} < 2.4 U'^{0.8}$

采用相同方法, 可以方便地将各国准则全部转化为  $O_{95}$  与  $d_{50}$  的比值, 其最大值见表 3.5.2-4 和表 3.5.2-5。

表 3.5.2-4  $O_{95}/d_{50}$  的最大值 ( $d_{40} < 0.06mm$ )

$U'$	荷兰	法 国		美国	英国	德 国	
		密实土	松土			稳定土	非稳定土
1	2.4	1.4	1.1	1.0	1.0	2.7	1.3
2	4.1	2.3	1.9	1.6	1.9	4.6	2.3
3	5.7	3.1	2.5	3.2	2.7	6.4	3.2
4	7.1	3.8	3.0	5.3	3.5	8.1	4.0
5	8.5	5.5	4.4	4.9	4.3	9.7	4.8
6	9.9	6.3	5.0	4.7	5.0	11.2	5.6
7	11.2	7.0	5.6	4.5	5.8	12.6	6.3
8	12.8	7.7	6.1	4.3	6.5	13.3	7.0
9	13.6	8.3	6.7	4.7	7.2	13.3	7.7
10	14.8	8.9	7.2	5.0	7.9	13.3	8.4

表 3.5.2-5  $O_{95}/d_{50}$  的最大值 ( $d_{50} > 0.074mm$ )

$U'$	荷兰	法 国		美 国		英 国	德 国	
		密实土	松土	织造型	非织造型		稳定土	非稳定土
1	2.4	1.4	1.1	1.0	1.8	1.0	2.7	1.3
2	4.1	2.3	1.9	1.6	2.9	1.9	4.6	2.3
3	5.7	3.1	2.5	2.2	3.9	2.7	4.8	3.2
4	7.1	3.8	3.0	2.6	4.8	3.5	4.4	4.0
5	8.5	5.5	4.4	3.1	5.6	4.3	4.1	
6	9.9	6.3	5.0	3.5	6.3	5.0	3.9	
7	11.2	7.0	5.6	3.9	7.0	5.8	3.7	
8	12.8	7.7	6.1	4.3	7.7	6.5	3.6	
9	13.6	8.3	6.7	4.7	8.4	7.2	3.4	
10	14.8	8.9	7.2	5.0	9.0	7.9	3.3	

根据表 4, 5 数值不难看出, 当被保护土为均匀级配 ( $U' \leq 4$ ) 时, 除荷兰准则明显宽松以外, 各国准则相差不大。而当被保护土为不均匀级配 ( $U' \geq 5$ ) 时, 各国的准则差距加大。就总体而言, 当被保护土较细时 (表 4), 荷兰准则最宽松, 美国准则最严谨; 当被保护土较粗时 (表 5), 仍是荷兰准则最宽松, 德国准则最严谨。

此外, 根据发生渗流破坏的难易程度, 法国准则除考虑了水力坡降的影响, 还将被保护土分为密实土和松土区别对待; 而德国准则将被保护土分为稳定土和非稳定土, 松土和非稳定土的标准明显严于密实土和稳定土, 显然这样做是经济合理的。

再者, 当被保护土的平均粒径  $d_{50} > 0.074mm$  时, 美国针对织造型土工织物和非织造型土工织物采用不同的控制标准, 前者明显严于后者。由于织造型土工织物是把交织纵向纱 (经纱) 和横向填充纱 (纬纱) 在梭织机上交织而成的织物, 所以这种织物与非织造型土工织物相比, 具有较高的强度。但由于纤维交织点互不粘结, 使用过程中, 纤维可能串动使孔眼发生变化。因此, 织造型土工织物多用于岸坡防护, 堤坝土体加固等工程, 作反滤时, 可与非织造型土工织物配合使用。鉴于上述特点, 织造型土工织物单独用作反滤时, 除用于较粗的被保护土体外, 自然应当比使用非织造型土工织物时更慎重。对此, 美国准则有可取之处。

$$d_{50} > 0.074mm, \quad 0.297mm \leq O_{95} \leq d_{w5} \text{ (织造型土工织物)}$$

$$0.297mm \leq O_{95} \leq 1.8 d_{w5} \text{ (非织造型土工织物)}$$

$$\begin{array}{ll}
 d_{50} < 0.074\text{mm}, & U \leq 2 & O_{95} \leq d_{K5} \\
 & 2 \leq U \leq 4 & O_{95} \leq 0.5U d_{K5} \\
 & 4 \leq U \leq 8 & O_{95} \leq 8 d_{K5}/U \\
 & U \geq 8 & O_{95} \leq d_{K5}
 \end{array}$$

## (2) 渗透准则

为了确保渗流能畅通地经过土工织物,一些研究者提出了对土工织物的各种渗透准则。从类似于天然过滤层的要求出发,一般认为,土工织物的渗透系数应大于土的渗透系数;由于土工织物不可避免地要产生一定程度的淤堵,导致渗透系数大幅度地下降,因而要求土工织物未淤堵前的渗透系数要大于土的渗透系数若干倍。Giroud 指出土工织物滤层小于砂砾料滤层的 1/100,而要想得到同样数量的水头损失,土工织物的渗透能力为砂砾料滤层渗透能力的 1/100。通常,砂砾料滤层的渗透系数为土的渗透系数的 10 倍,故:

$$k_g \geq 0.1k_s$$

式中:  $k_g$ ——土工织物的渗透系数;

$k_s$ ——土的渗透系数。

对于渗透系数较低的土工织物来说,在一段时间后很容易产生淤堵或堵塞,Heerten 通过 10 年的时间对往复流作用下的土工织物的渗透能力进行了试验,并指出土工织物在使用过程中发生淤堵以后,其渗透系数变为初始值的 5%~60%。因此,很多权威人士建议土工织物的渗透系数要大于土的渗透系数。

美国 AASHTO-AGC-ARTBA 规定了渗透准则,为:

$$k_g \geq 10k_s$$

土工织物反滤层影响因素很多,如渗透系数、土的粒径大小级配、土工织物的孔径大小及分布、土层密度及结构、土工织物的种类和结构、反滤层所受外部荷载及水头等等,而且这些因素中不存在着一两个决定因素,若只用土和土工织物的渗透系数的比值来判断反滤层的工作情况,不免有些片面。利用土工织物的某特征孔径和土的某特征粒径来表达的反滤层的透水性设计准则也很常见,如美国的 Colorado 州大学准则规定为:

$$O_{95}/d_{15} \geq 2$$

式中:  $O_{95}$ ——小于该孔径的土工织物孔隙数量占总孔隙数量的 95%;

$d_{15}$ ——小于该粒径的土质量占土总质量的 15%。

排水作用是利用土工合成材料在土体中形成排水通道,把土中的水汇集起来,沿着材料的平面排出土体之外。较厚的针刺型无纺土工织物和某些塑料排水管道或具有较多孔隙的复合型土工合成材料都可以起排水作用。与过滤作用不同的是,在排水运用中,水流方向是沿着材料平面的,因此一般以水平渗透系数  $k_p$  或导水率  $\theta$  来衡量其导水能力,  $\theta = k_p \cdot \delta_g$ 。

$\psi$ 、 $\theta$  两个参数的提出,是因为考虑到织物厚度  $\delta_g$  不易确定,它和所受的压力有关,随着压力的增大而减小,取透水率  $\psi$  和透水率  $\theta$ ,则无论在实验室确定这两个指标或在排水计算中,都可以避开土工织物的厚度,从而提高计算上的精度。另外土工织物的  $k_n$ 、 $k_p$  和  $\delta_g$  均与土工织物渗透性有关,由二者组合而得的  $\psi$  和  $\theta$  更能反映土工织物的渗透能力。

可用于排水的土工合成材料有土工织物、土工网和复合土工合成材料,然而它们的排水能力却是不同的。虽然土工织物的渗透系数很大,是一种优良的透水材料,但作为排水材料,渗流是沿着土工织物平面进行的,由于土工织物的厚度不大,且受压后变薄,故其导水率在三者中是最小的;复合土工合成材料一般是由各种形状和结构形式的芯板和土工织物外套组成,芯板作为过水通道,阻力很小,具有很大的导水能力,其导水率是三者之中最大的;土工网的导水率则介于以上二者之间。

土工织物的导水能力可以通过水平渗透仪测定。影响织物平面渗透特性的因素很多,如聚合材料的可润湿性、添加剂的种类、织物的结构、孔隙的大小等;此外织物平面上的法向压力大小、水流方向、水位差、水中含气量,以及测试仪器的类型等,都对测试结果有一定的影响。

排水与过滤两方面实际上是相关联的,在排水设计中包含了滤层设计。

1) 目前在整理试验成果和排水计算中均假定水流流态为层流,亦即达西定律  $v = ki$  成立。采用土工织物排水时,该假定一般来说是正确的,但土工织物很厚且水头很高时,流态则可能是紊流或介于两种状态中的过渡阶段(Sluys, 1987 和 Carroll, 1981 等)。为此,流速  $v$  和水力梯度  $I$  的关系一般地写为  $v = ki^n$ , 当  $n=1$  时为层流,  $n=0.5$  时为紊流。

根据公式  $q = vA = ki^n wt$  可得:  $\theta = kt = \frac{q}{i^n w}$

式中： $\theta$ ——导水率 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )；

$k$ ——渗透系数 ( $\text{cm}/\text{s}$ )；

$t$ ——织物厚度 ( $\text{cm}$ )；

$q$ ——沿织物平面输导水流的流量 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )；

$w$ ——织物厚度 ( $\text{cm}$ )；

$n$ ——非线性幂指数，无量纲。

由此可见导水率与水流流态有关，而目前测定导水率时通常按  $n=1$  来整理试验成果，这与实际情况是有偏差的。为此，在设计时，对于较符合层流假定的土工织物采用允许导水率  $\theta_{allow}$  作为设计参数，而对于不符合层流假定的土工网和复合土工合成材料，则采用允许单宽流量  $q_{allow}$  作为设计参数。

2) 土工合成材料的导水能力与作用其上的正应力大小有关：随着正应力的增加，导水能力逐渐下降。对于土工织物正应力的影响尤其明显。因此在测定土工织物的导水率  $\theta_{ult}$  或单宽流量  $q_{ult}$  时，应根据实际工程运用的具体情况来确定试验时所采用的正应力  $\sigma_n$  和水力梯度  $i$ ，以求更精确地反映现场条件。

作用于土工合成材料上的应力通常为土荷载，如果土工合成材料水平或倾斜放置，则正应力等于其上土层的有效应力；如果竖直放置，则正应力等于垂直有效应力乘上适当的土压力系数。土压力系数  $k_0 = 1 - \sin \phi$  计算，式中  $\phi$  为土的摩擦角。但如果  $\phi$  值不知道， $k_0$  可近似取 0.5。

### 3.6 结论

在对《规范》和一些文献中所记载的排水设施的总结基础上，通过对以上五种排水设施应用（复合）土工合成材料的设计方法的研究，可以初步确定设计中所涉及的技术指标的要求。在设计上，力求使设计方法在传统设计的基础上有所改进和完善，并对一些具体的技术指标进行了详细的阐述。现将设计方法和指标的要求总结如下：

#### (1) 地下排水

对于地下排水的设计，通过分析其水力模型，推导出相应的水力学公式，根据这些公式确定地下水的降落曲线，将简化后的结果和《规范》中所给出的公式进行对比分析，因而对地下排水设施的一些技术指标提出建议。

在建议时，主要设计的技术指标有渗沟埋置深度、降落曲线的计算，同时还结合具体的算例对不同情况下渗沟位置的确定进行了分析，并提出了采用塑料盲

沟代替填石渗沟或管式渗沟的设计要求。在设计之前,对可能产生影响的参数进行了分析。

## (2) 路界排水

在路界排水设施的设计时,主要是针对传统截水沟在应用时的破坏情况进行了分析,并提出了相应的解决措施,关于截水沟和边沟的水力计算和第二章相同。本文在设计时主要是对在一些地质条件下较差的情况下的渗沟,为防止沟中的水渗出沟渠或因截水沟变形而导致其它的水毁损失,在截水沟内设置不透水的土工膜,并对土工膜的水力学指标进行了计算。

## (3) 中央分隔带排水和路面边缘排水

关于中央分隔带排水设施的设计,《规范》中尽对泄水口的计算进行了要求,随着高速公路设计标准的不断提高,中央分隔带排水已成为排水设计中不容忽视的一部分。特别是对那些宽度大于 3m 无铺面的中央分隔带,在设计时不但要考虑降雨的水量还要考虑绿化灌溉水的渗入量。关于计算公式见前面的内容。

路面边缘排水设施的设计主要考虑的是计算渗入路面结构的水量时除了计算路面表面水的渗入以外还包括路肩表面水的渗入,同时在设计纵向集水沟时,用土工布作为反滤层,为简化施工工艺,采用了塑料盲沟代替传统的开孔塑料管,并在塑料盲沟外包裹透水土工布。

## (4) 边坡防护和支挡结构排水

在边坡防护中,应用的是土工织物的排水和隔离作用,当边坡为土质路堑边坡,坡体的含水量又很大时,可在坡体内设置条形或树枝形排水体以疏干坡体,防止坡体产生滑动。

在进行挡土墙排水设施的设计时,主要是结合西部地区多山的特点,将设计分为 4 种情况讨论的。由于各种情况下的坡体内水的成因不同,因此对作为反滤层的土工织物的反滤和排水要求也是不同的。

在以上几种排水设施的设计中,都涉及到了采用土工布作为反滤层,在不同设计中对土工布的反滤和排水要求要根据具体情况来确定。对于土工布来说,排水作用是很容易满足要求的,但是过滤作用是一个很复杂的过程,选择合适的土工布是设计的重点。目前,有很多家反滤设计准则,由于数量众多,使设计者在使用时无法选择。本文运用 N. W. M. JOHN 推导的公式,将一些国家的准则转化为土工织物等效孔径  $O_{95}$  与被保护土层平均粒径  $d_{50}$  之间的关系,进行各准则间的比较和分析,从而提出合理地选择各国公式的建议,可供设计者在进行反滤设计时作为参考。

## 4 试验路铺筑与验证

### 4.1 试验路的设计

#### 4.1.1 试验路段的确定

国道主干线上海至瑞丽公路是国家公路网规划中的“五纵七横”十二条国道主干线之一，是连接华东、中南及西部地区的主要交通运输大通道。贵州省清镇至镇宁段高速公路是上瑞国道主干线的一段，该段公路地质情况复杂，所经地区降雨量较大，地表水系发育，地下暗河较多，在公路建设中常常会遇到由于排水设计的不完善导致各种路基路面病害，甚至路基失稳、边坡滑移等现象。因此本课题的研究主要是针对挡墙、中央分隔带、路面边缘、低洼平坦地段的排水设施应用土工合成防排水材料进行设计并验证的。

##### 4.1.1.1 挡墙排水设计试验路段的确定

通过查阅图纸和实地踏勘，在国道主干线上海至瑞丽公路（贵州境）清镇至镇宁段高速公路上第8标段里程桩号为K52+680~K52+880的路段左侧为路肩式挡墙设计，右侧为路堑边坡设计。由于右侧地势较高，土层内含水层较丰富，为能够及时疏干路基土体内的水，采用该路段作为实验路段来进行排水设计。

##### 4.1.1.2 中央分隔带排水设计试验路段的确定

通过查阅图纸和实地踏勘，在桩号为K41+000~K41+200的路段上为超高路段，同时该路段左侧地势较低，雨季汇水面积较大，该路段平曲线半径3200米，超高2%，纵坡较小为0.8%，暴雨季节有地表积水，容易在中央分隔带处产生积水，从而对道路的使用会产生一定的影响。因此选择该路段作为试验路段进行排水设计。

##### 4.1.1.3 路面边缘排水设计试验路段的确定

通过查阅图纸和实地踏勘，在里程桩号为K41+000~K41+200的路段上为超高路段，该路段左侧地势较低，雨季汇水面积较大，在路面边缘进行排水设施的设计可以有效的排除路面渗入的水，因此选择该路段作为试验路段。

##### 4.1.1.4 低洼平坦地段排水设计试验路段的确定

通过查阅图纸和实地踏勘，在里程桩号为K70+600~K70+900的路段为低洼平坦地段，该路段地下水位较高，路基处于较厚的粘土层上。通过取样测定粘土层的物理力学性能表明，土基为含水量较高的褐色粘土夹少量碎石，其物理性能和力学强度均满足路基填筑的要求。该路段右侧地势较高，左侧地势较低，雨季

汇水面积较大,地表积水,地下水位与溪流水位同高。同时在路基左侧有自然沟渠,对排水设计提供了较为便利的条件,因此将该路段作为试验路段。

#### 4.1.2 试验路段排水设施的设计

##### 4.1.2.1 挡墙排水设施的设计

###### (1) 排水设施的形式选择

1) 方案 I: 在里程桩号为 K52+680~K52+760 的路段,挡墙设计保持原设计方案,作为对比;

2) 方案 II: 在里程桩号为 K52+760~K52+820 的路段,挡墙设计采用碎石盲沟的形式;

3) 方案 III: 在里程桩号为 K52+820~K52+880 的路段,挡墙设计采用塑料盲沟的形式。

总体方案如图 4.1.2-1 所示:

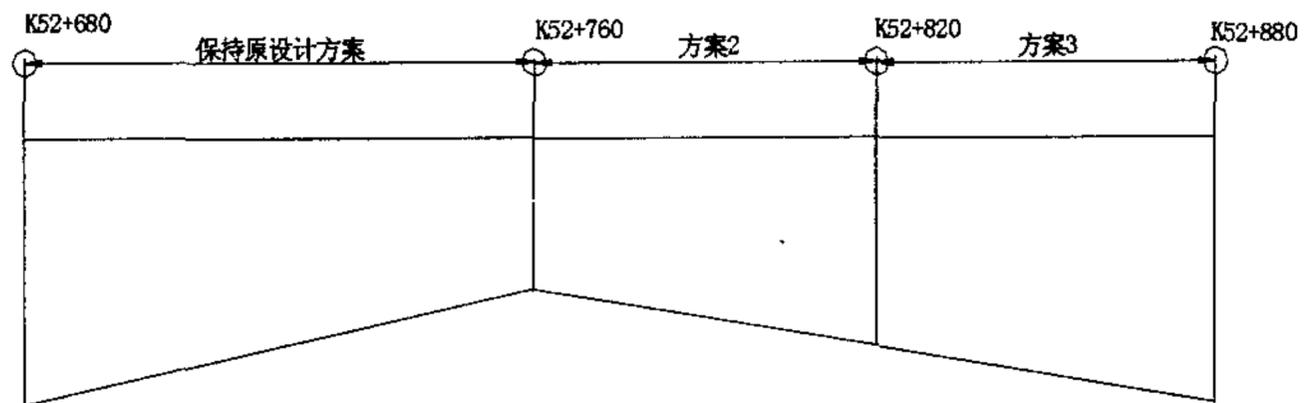


图 4.1.2-1 总体方案布置图

###### (2) 水力计算<sup>[21]</sup>

###### 1) 方案 I 中排水设施的设计径流量

主要包括由坡面渗入的流量和由路面渗入的流量。

坡面设计径流量:

$$Q = 16.67CIF$$

式中:  $Q$  ——设计径流量;

$F$  ——汇水面积 ( $m^2$ );

$C$  ——径流系数;

$I$  ——在设计重现期和降雨历时内的降雨强度 ( $mm/min$ );

其中  $C$  为石质边坡的径流系数,经查表得 0.70;

$I$  为安顺市平均降雨强度计算公式:  $I = \frac{22.53(1 + 0.875 \ln P)}{(t + 13.14P^{0.158})^{0.827}}$

设计降雨重现期  $P$  为 5 年;

计算得降雨历时  $t$  为 1.08 分钟;

查表, 计算  $I = 4.964$  ( $mm/min$ );

汇水面积  $F$  为  $3400m^2$ ;

因此得  $Q = 0.1969m^3/s$ ;

坡面渗入的流量为:  $Q_0 = 0.1969 \times 0.05 = 0.0098m^3/s$ ;

其中 0.05 为取定的渗透率。

由路面渗入的流量:

每延米路面结构表面水的渗入量:

$$Q_i = I_a B$$

式中:  $I_a$ ——每平方米沥青路面的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m)$ ], 可按 (规范)

$0.15m^3/(d \cdot m)$  取用;

$B$ ——单向坡面路面的宽度 (m);

$$Q_i = I_a B = 0.15 \times 14 = 2.1m^3/(d \cdot m);$$

80 米路段渗入量为  $168m^3/d = 0.0019m^3/s$ ;

因此,  $Q_{总} = 0.0117m^3/s$ 。

2) 方案 II 中排水设施的设计径流量

主要包括由坡面渗入的流量和由路面渗入的流量。

坡面设计径流量:

$$Q = 16.67CIF$$

式中:  $Q$ ——设计径流量;

$F$ ——汇水面积 ( $m^2$ );

$C$ ——径流系数;

$I$ ——在设计重现期和降雨历时内的降雨强度 ( $mm/min$ );

其中  $C$  为石质边坡的径流系数, 经查表得 0.70;

$I$  为安顺市平均降雨强度计算公式:  $I = \frac{22.53(1 + 0.875 \ln P)}{(t + 13.14P^{0.158})^{0.827}}$

设计降雨重现期  $P$  为 5 年;  
 计算得降雨历时  $t$  为 0.65 分钟;  
 查表, 计算  $I = 5.064$  ( $mm/min$ ) ;

汇水面积  $F$  为  $800m^2$  ;

因此得  $Q = 0.04727m^3/s$  。

坡面渗入的流量为:  $Q_0 = 0.04727 \times 0.05 = 0.00236m^3/s$  ;

其中 0.05 为取定的渗透率。

由路面渗入的流量:

每延米路面结构表面水的渗入量:

$$Q_i = I_a B$$

式中:  $I_a$ ——每平方米沥青路面的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m)$ ], 可按(规范)

$0.15m^3/(d \cdot m)$  取用;

$B$ ——单向坡面路面的宽度 (m);

$$Q_i = I_a B = 0.15 \times 14 = 2.1m^3/(d \cdot m)$$

60 米路段渗入量为  $126m^3/d = 0.00145m^3/s$

因此,  $Q_{\text{总}} = 0.0038m^3/s$  。

### 3) 方案III排水设施的设计径流量

只包括路面渗入的流量:

$$Q_i = I_a B$$

式中:  $I_a$ ——每平方米沥青路面的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m)$ ], 可按(规范)

$0.15m^3/(d \cdot m)$  取用;

$B$ ——单向坡面路面的宽度 (m)

$$Q_i = I_a B = 0.15 \times 14 = 2.1m^3/(d \cdot m)$$

60 米路段渗入量为  $126m^3/d = 0.00145m^3/s$  。

### (3) 布设形式及分析

1) 方案 I: 如原设计方案, 作为本次试验研究的对比方案。

2) 方案 II: 在距离地面线 30cm 处, 沿挡土墙底部纵向布设水平渗沟, 形式为碎石盲沟。盲沟尺寸为厚 30cm, 高 50cm。(方案见图 4.1.2-2)

$$\text{流量 } Q = \omega K_m \sqrt{i}$$

式中： $\omega$ ——渗透面积 ( $m^2$ )， $\omega = bh$ ；

$K_m$ ——排水层岩块的渗透系数 ( $m/s$ )。

当用平均直径为 5cm 的碎石作为排水层时，取孔隙度  $n=0.50$ ，则渗透系数  $K_m=0.19$ 。

$$Q = 0.00285 m^3/s$$

沿墙背底部每隔 5m 设置厚 30cm，宽 30cm 的竖向渗沟，形式为碎石盲沟。如果施工困难，可以采用塑料盲沟。

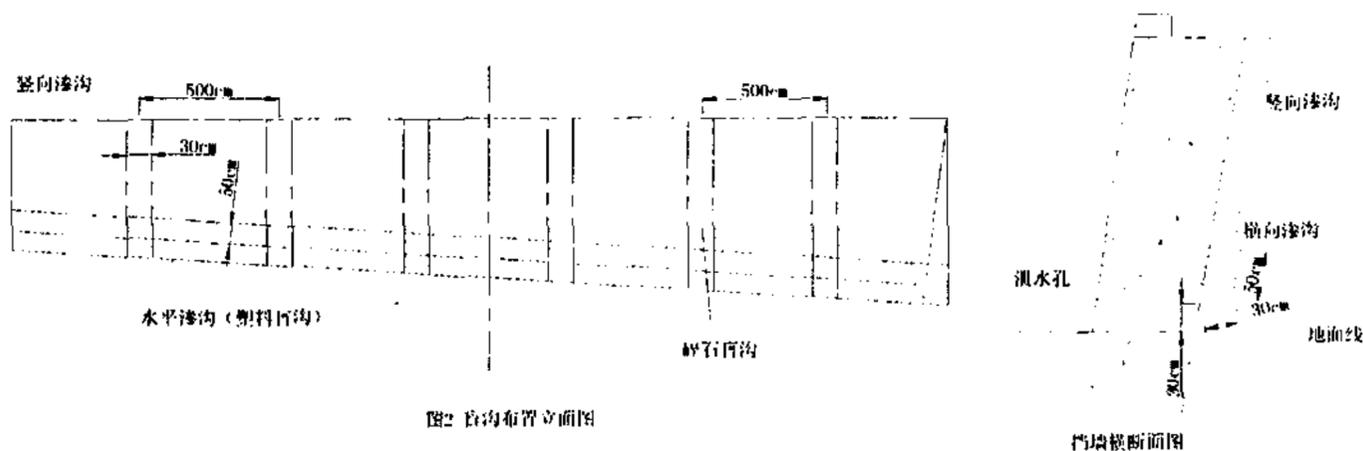


图 4.1.2-2 盲沟布置立面图

3) 方案III：在距离地面线以上 30cm 处，沿挡土墙底部纵向布设水平渗沟。采用塑料盲沟的形式。盲沟为 HMF1435K 型矩形盲沟（或具有同等排水能力的其它型号塑料盲沟），其外型尺寸为  $140 \times 35$  (宽  $\times$  厚  $mm$ )，中空尺寸为  $40 \times 10 \times 2$  (宽  $\times$  厚  $mm$ )，单位长度质量为  $665(g/m)$ 。

当水力坡降  $i = 0.05$  时，其通水量  $Q = 1.913 m^3/h$ 。采用 3 组同一类型塑料盲沟，其通水量  $Q$  为  $0.00159 m^3/s$ ，施工时在塑料盲沟外包裹透水的土工布构成水平渗沟；沿墙背底部每隔 5m 设置竖向渗沟，形式为塑料盲沟。盲沟为 HMF1435K 型矩形盲沟（或具有同等排水能力的其它型号塑料盲沟），其外型尺寸为  $140 \times 35$  (宽  $\times$  厚  $mm$ )，中空尺寸为  $40 \times 10 \times 2$  (宽  $\times$  厚  $mm$ )，单位长度质量为  $665(g/m)$ 。

当水力坡降  $i = 0.05$  时，其通水量  $Q = 1.913 m^3/h$ 。采用 2 组同一类型塑料盲沟，其通水量  $Q$  为  $0.0011 m^3/s$ ，施工时在塑料盲沟外包裹透水的土工布构成竖向渗沟；泄水孔由预埋在墙身内的 PVC 管组成，直径为 10cm，泄水孔布置在水平渗沟与竖向渗沟的相交处，间距为 5m。

## (4) 材料与技术要求

1) 碎石盲沟: 竖向渗沟顶部用 40cm 厚的不透水材料封闭。盲沟回填透水性材料为碎石, 可采用粒径 5mm~40mm 的碎石或砾石, 但粒径小于 2.36mm 的细粒含量不得大于 5%。

## 2) 塑料盲沟的一般施工要求:

- ①开挖沟槽、填碎石、垫层、铺滤膜;
- ②铺设塑料盲沟体;
- ③将滤膜包裹盲沟体 (如果盲沟体厂方已用合格的土工布包裹, 则此步省略);
- ④塑料盲沟对接;
- ⑤塑料盲沟斜接;
- ⑥在盲沟外回填碎石等。

当塑料盲沟需要固定时, 需要用带有垫片的水泥钉, 以 0.5 米~1.0 米的间距固定在土基上。

## 4.1.2.2 中央分隔带排水设施的设计

## (1) 排水设施的形式选择

以曲线中点为界划分, 设计为两个方案, 进行对比。

1) 方案 I: 在里程桩号为 K41+000~K41+100 的路段, 中央分隔带设计采用原方案, 形式为碎石盲沟。

2) 方案 II: 在里程桩号为 K41+100~K41+200 的路段, 中央分隔带设计采用新方案, 形式为塑料盲沟, 即采用速排笼外包裹土工布, 并在无挖方体内使用不透水土工布。(总体布置方案见图 4.1.2-3)

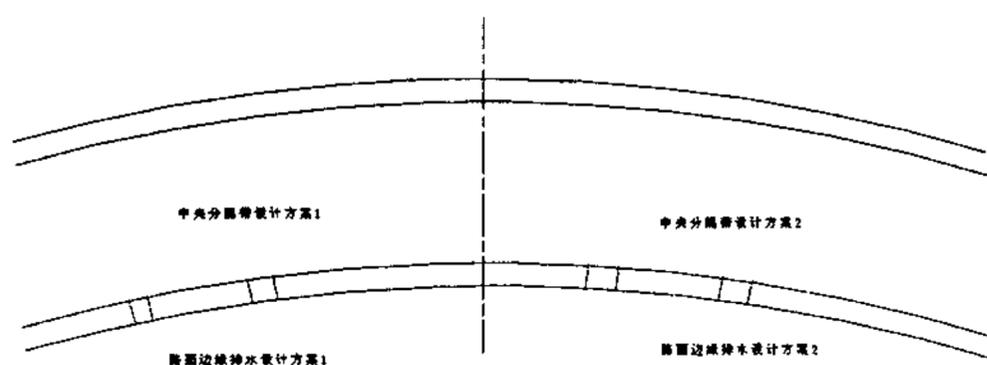


图 4.1.2-3 总体布置方案图

为了防止中央分隔带下渗的降水向两侧行车道路路基扩散、渗透, 应在中央分隔带与两侧行车道的填料交界处采用不透水的土工布来进行防渗设计; 同时为了便于排除超高路段的水, 应在中央分隔带处设置格栅式泄水口。根据公式  $Q_0 = 1.66 p_g h_i^{1.5}$  求得泄水口的泄水量, 可以设计为每隔 50 米设置一个泄水口。(泄

水口设计保持原设计方案)

### (2) 水力计算

设计径流量:

中央分隔带纵向排水沟的排水量主要包括中央分隔带渗入的流量以及为养护中央分隔带中的植物所施加的渗入量。

中央分隔带渗入量:

$$Q = 16.67CIF$$

式中:  $Q$ ——设计径流量;

$F$ ——汇水面积 ( $m^2$ );

$C$ ——径流系数;

$I$ ——在设计重现期和降雨历时内的降雨强度 ( $mm/min$ );

其中  $C$  为植被的径流系数, 经查表得 0.40,  $I$  为安顺市平均降雨强度计算公式:

$$I = \frac{22.53(1 + 0.875 \ln P)}{(t + 13.14P^{0.158})^{0.827}}$$

设计降雨重现期  $P$  为 5;

计算得降雨历时  $t$  为 2.61 分钟;

查表, 计算  $I = 3.02$  ( $mm/min$ );

汇水面积  $F$  为  $450m^2$ , 因此得  $Q = 0.009m^3/s$ 。

分隔带渗入的流量为:  $Q = 0.009 \times 0.1 = 0.0009m^3/s$ , 其中 0.1 为取定的渗透率。

### (3) 布设形式及分析

1) 方案 I: 为原设计方案。

2) 方案 II: 采用 HMY150K 型塑料盲沟 (或具有同等排水能力的其它型号塑料盲沟), 其外型尺寸为  $\phi 120(mm)$ , 中空尺寸为  $\phi 50(mm)$ , 单位长度质量  $1490g/m$ , 当水力坡降为  $i = 0.05$  时, 透水量  $Q = 4.38m^3/h = 0.0012m^3/s$ 。外包土工布需要满足渗水要求。(方案见图 4.1.2-4)

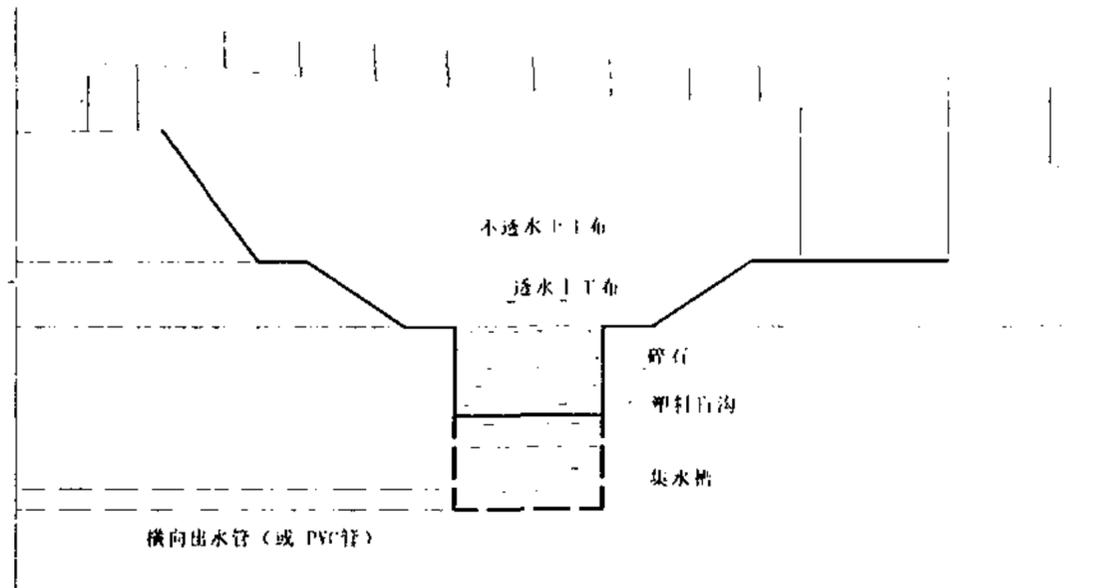


图 4.1.2-4 中央分隔带排水横断面图

(4) 材料与技术要求

1) 透水土工布可采用 H9915 型聚酯纤维连续式长纤非织物, 单位质量为  $150\text{g}/\text{m}^2$ ; 不透水土工布可采用两层土工布中间夹持一层土工膜构成土工膜防渗层。

2) 盲沟回填透水性材料为碎石, 可采用粒径  $5\text{mm}\sim 40\text{mm}$  的碎石或砾石, 但粒径小于  $2.36\text{mm}$  的细粒含量不得大于  $5\%$ 。

4.1.2.3 路面边缘排水设施的设计

(1) 排水设施的形式选择

以曲线中点为界划分, 设计为两个方案, 进行对比。

1) 方案 I: 在里程桩号为  $K41+000\sim K41+100$  的路段上, 路面边缘排水设计方案保持原设计。

2) 方案 II: 在里程桩号为  $K41+100\sim K41+200$  的路段上, 路面边缘排水设计方案采取纵向塑料盲沟的形式, 采用速排笼外包裹土工布。横向每隔 40 米设横出水口, 采用软塑料排水管或 PVC 管。(方案见图 4.1.2-5)

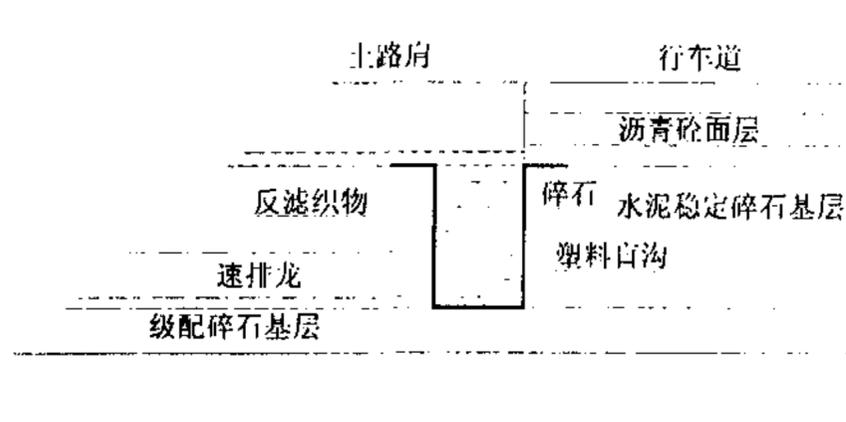


图 4.1.2-5 路面边缘排水横断面图

## (2) 水力计算

设计径流量:

主要包括路面渗入的流量和路肩渗入量:

路面渗入的流量:

$$Q_i = I_a B$$

式中:  $I_a$ ——每平方米沥青路面的表面水设计渗入率 [ $m^3/(d \cdot m)$ ], 可按  $0.15m^3/(d \cdot m)$  取用;

$B$ ——单向坡面路面的宽度 (m);

$$Q_i = I_a B = 0.15 \times 11.75 = 1.7625 m^3/(d \cdot m)$$

50 米路段渗入量为  $88.125 m^3/d = 0.00102 m^3/s$ ;

路肩渗入的流量:

$$Q = 16.67 C I F$$

式中:  $Q$ ——设计径流量;

$F$ ——汇水面积 ( $m^2$ );

$C$ ——径流系数;

$I$ ——在设计重现期和降雨历时内的降雨强度 ( $mm/min$ );

其中  $C$  为土层的径流系数, 经查表得 0.10;

$I$  为安顺市平均降雨强度计算公式:  $I = \frac{22.53(1 + 0.875 \ln P)}{(t + 13.14P^{0.158})^{0.827}}$

设计降雨重现期  $P$  为 5 年;

计算得降雨历时  $t$  为 0.31 分钟;

查表, 计算  $I = 3.208 (mm/min)$ ;

汇水面积  $F$  为  $75m^2$ ;

因此得  $Q = 0.0004 m^3/s$ ;

渗入的流量为:  $Q_0 = 0.0004 \times 0.1 = 0.00004 m^3/s$ ;

其中 0.1 为取定的渗透率。

$$Q_0 = 0.00114 m^3/s$$

## (3) 布设形式及分析

1) 方案 I: 如原设计方案。

2) 方案 II: 采用 HMY120K 型塑料盲沟, 其外型尺寸为  $\phi 120(mm)$ , 中空尺寸

为  $\phi 50(\text{mm})$ ，单位长度质量  $1490 \text{ g/m}$ ，当水力坡降为  $i = 0.05$  时，透水量  $Q = 4.38 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0012 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(4) 材料与技术要求

1) 反滤织物采用 H9915 型聚酯纤维连续式长纤非织物，单位质量为  $150 \text{ g/m}^2$ ；

2) 透水性回填料可采用粒径  $5\text{mm} \sim 40\text{mm}$  的碎石或砾石，但粒径小于  $2.36\text{mm}$  的细粒含量不得大于  $5\%$ 。

#### 4.1.2.4 低洼平坦地段排水设施的设计

(1) 排水设施的形式选择

1) 边沟

其主要目的是用来汇集和排除路基范围内和流向路基的地表水。由于填方路基，在路基两侧设置边沟，尺寸为高  $60\text{cm}$ ，宽  $60\text{cm}$ 。内坡与外坡比例按原设计。

2) 渗沟

具有疏干表层土体，降低地下水位，防止地下细颗粒土被冲移的作用。由于路基右侧地势较高，因此右侧渗沟在迎水一侧设计为采用透水的土工布，另一侧设为隔渗层（即采用不透水的土工布），沿路线纵坡排引至自然沟渠；路基左侧，在靠近路基一侧设计为透水的反滤层（即采用透水的土工布），另一侧设隔渗层（即采用不透水的土工布），沿路线纵坡将水排引至自然沟渠；路基中部也以同样形式设置渗沟。渗沟宽度为  $0.6$  米，深度取  $1.0$  米。渗沟底部采用塑料盲沟。

（方案见图 4.1.2-6）

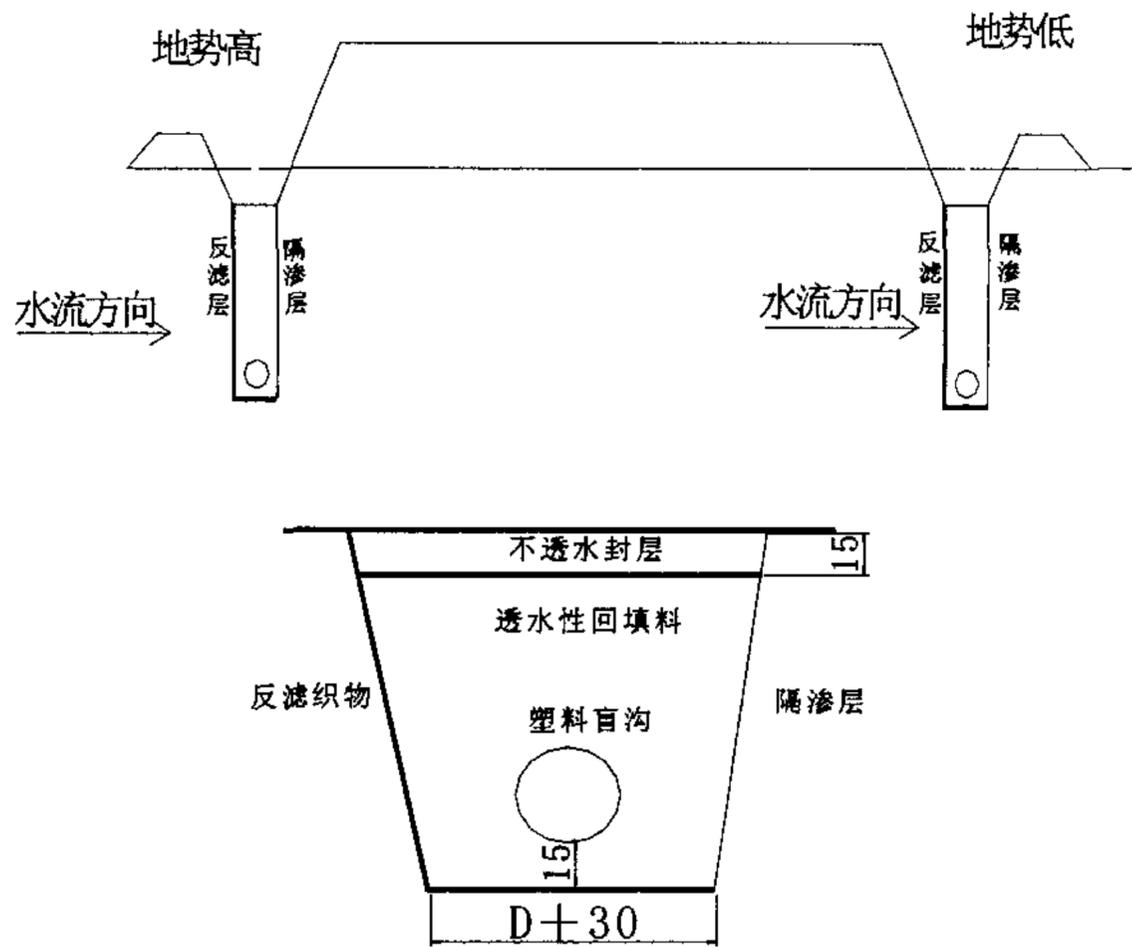


图 4.1.2-6 管式渗沟横断面图

## (2) 水力计算

## 1) 不完整渗沟的流量

假定地下水沟为稳定潜水流, 含水层宽度与长度无限, 且不考虑地面水渗入。

$$\textcircled{1} \text{ 流量: } \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L} = I_0$$

$$\sin \beta \approx \operatorname{tg} \beta = \frac{T}{T+C}$$

$$\varphi = \alpha + \beta$$

$$q = \frac{\varepsilon HK \varphi}{\ln \frac{L+C}{C}} \approx \frac{\varepsilon HK \varphi}{\ln \frac{L}{C}}$$

式中:  $\varepsilon$ ——根据实验资料的校正系数, 约为 0.7~0.8;

$K$ ——渗透系数 ( $m/s$ ), 按粘土取为  $0.0864 m/d$ ,

$I_0 = 0.01$ ,  $L$  取  $30m$ ,  $\alpha = 0.067$ ,  $\beta = 0.267$ ,  $\varphi = 0.334$ , 得  $Q = 0.01 m^3/d$ 。

$$\textcircled{2} \text{ 降落曲线: } y = \frac{q}{K \varphi} \ln \frac{x}{C}$$

$x$  取  $13.5m$ ,  $y=1.33m$ , 故渗沟深度取  $1.5m$ 。

## 2) 渗沟的水力计算

不完整渗沟:  $Q = \omega K_m \sqrt{i}$

$$\omega = bh = 0.6 \times 0.9 = 0.54 \text{ m}^2$$

$$i = 1\% \quad Q = 0.0103 \text{ m}^3/\text{s}。$$

## 3) 透水土工布的性能要求

用于反滤层的透水土工布, 必须满足挡土、保持水流畅通(透水)和防止淤堵三方面的要求。

①挡土要求应符合:

$$O_{95} \leq d_{85} \quad \text{粗粒土 (粒径 } d < 0.075 \text{ mm 的颗粒含量小于 50\% )}$$

$$O_{95} \leq 0.21 \text{ mm} \quad \text{细粒土 (粒径 } d < 0.075 \text{ mm 的颗粒含量大于等 50\% )}。$$

式中:  $O_{95}$ ——土工合成材料(土工织物)的等效孔径(mm);

$d_{85}$ ——被保护土的特征粒径(mm)。

②透水性要求应符合:

$$K_G > 10K_S$$

式中:  $K_G$ 、 $K_S$ ——土工合成材料的渗透系数(m/s)和被保护土的渗透系数(m/s)。

③防淤堵要求应符合:

$$GR = i_1/i_2 \leq 3$$

式中:  $GR$ ——梯度比;

$i_1$ 、 $i_2$ ——土工合成材料被保护土侧与另一侧的水力梯度。

土工织物的单位面积质量宜为  $300 \text{ g/m}^2 \sim 500 \text{ g/m}^2$ , 其强度应符合 II 级所要求的强度。

## 4) 塑料盲沟的要求

采用 HMY120K 型塑料盲沟, 其外型尺寸为  $\phi 120(\text{mm})$ , 中空尺寸为  $\phi 50(\text{mm})$ , 单位长质量  $1490 \text{ g/m}$ 。

当水力坡降为  $i = 0.05$  时, 透水量  $Q = 4.38 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0012 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

5) 透水性回填料可采用粒径  $5 \text{ mm} \sim 40 \text{ mm}$  的碎石或砾石, 但粒径小于  $2.36 \text{ mm}$  的细粒含量不得大于  $5\%$ 。

---

## 4.2 试验路施工与观测

### 4.2.1 试验路施工

#### 4.2.1.1 铺筑前测试

(1) 试验段 4 (低洼平坦地段) 土壤的性能指标 (表 4.2.1-1)

表 4.2.1-1 土壤试验成果表

编号	土样描述	天然状态下的物理性					界限				判别值		力学强度 (峰值)		压缩 (1-3kg/cm)		承载比 CBR	
		含水量 %	容重 g/cm <sup>3</sup>	比重	孔隙比	饱和度 %	液限 %	塑限 %	塑性指数 %	定名	液性指数	状态	内摩 擦角 度	凝聚力 Kpa	压缩 系数 Mpa <sup>-1</sup>	压缩 模量 Mpa	CBR <sub>2.5</sub> %	CBR <sub>5.0</sub> %
1	褐色粘土 夹少量碎 石	36.0	1.69	2.74	1.205	81.9	68.5	36.9	31.6	粘土	-0.03	坚硬	7.7	49.0	0.35	6.0	7.6	5.8
	以下空白																	

## (2) 沟底高程

渗沟起点		渗沟终点		出口
左侧	右侧	左侧	右侧	
1338.00	1338.00	1337.80	1337.90	1337.70

4.2.1.2 施工<sup>[5]</sup>

## (1) 合成材料的一般施工要求

1) 土工织物的联结可根据实际工程情况, 采用缝合法或搭接法。缝合宽度不应小于 0.1m, 结合处抗拉强度应达到土工织物抗拉强度的 60% 以上; 搭接宽度不应小于 0.3m;

2) 土工织物前, 应平整场地, 清理场地杂物(如树根、灌木或尖石等), 以免刺破、损伤土工织物;

3) 土工合成材料应储存在不被日光直接照射和不被雨水淋湿的地点, 根据进度情况, 确定当时用量;

4) 在渗沟中铺设土工织物时, 如果沟内有水, 应当先将水抽干;

5) 土工合成材料上方填石料时, 严禁将石料直接抛落于土工合成材料上;

6) 严禁施工机械直接在土工合成材料上作业;

7) 为避免土工合成材料被刺破, 在施工中可在其上下或左右铺设砂垫层或其它细粒料; 施工中如发现土工合成材料被刺破应及时修补, 修补面积不小于破坏面积的 4~5 倍;

8) 土工合成材料铺设后, 应在 48 h 内及时覆盖或回填。

## (2) 施工阶段

## 1) 天气状况

在试验段 4 施工期间, 天气状况良好。由于在施工前为连绵细雨天气, 地下水位本身又很高, 因此在施工现场有大量积水, 对土工织物的铺设有一定的影响。

## 2) 土工织物铺设

渗沟开挖后, 沟内水位均在 30cm~32cm, 在铺设土工织物前必须疏干沟内积水, 平整沟底及沟壁, 清理尖石、树根等杂物, 避免刺破、损伤土工织物。

土工织物铺设应平顺、松紧适度, 并与沟壁被保护土体密贴, 不得有皱褶。如有破损, 应及时修补, 修补面积不小于破损面积的 4 倍。

反滤层土工织物的搭接宽度不宜小于 20cm。隔水防渗土工膜采用粘接法,其强度不低于材料设计强度,粘接宽度不应小于 10cm。连接面积处不得夹有砂石等杂物。

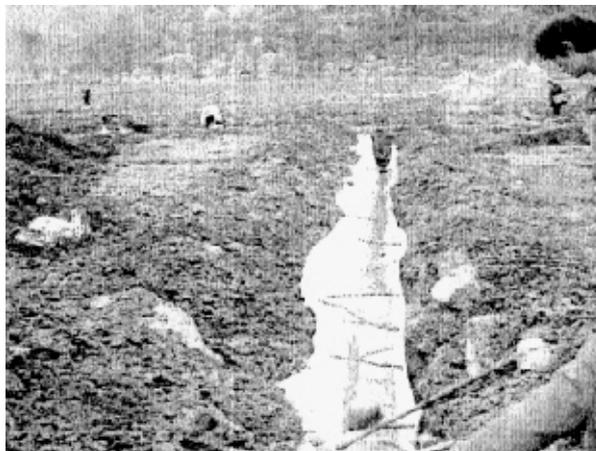


图 4.2.1-1 工人正在铺设土工布和土工膜

### 3) 塑料盲沟铺设

在铺设完土工织物以后,在渗沟底部回填碎石,厚度为 15cm,粒径为 5mm~40mm 的透水性材料,但粒径小于 2.36mm 的细粒含量不得大于 5%。

在碎石上按设计位置铺设塑料盲沟并固定,盲沟接口应牢固,不易松动,并避免土、碎石等嵌入盲沟中。塑料盲沟外的土工布应包裹绑扎牢固,不应脱落、皱褶。



图 4.2.1-2 正在进行塑料盲沟的连接

#### 4) 渗沟回填

土工合成材料铺设完成后要及时回填碎石。在回填碎石填料时,要采取措施避免土工织物或盲沟受到损伤。

### 4.2.2 施工阶段与施工后的观测

#### 4.2.2.1 施工阶段观测

##### (1) 挡墙排水设施的监测

##### 1) 排水效果的监测

①监测指标:排水效果。

②监测方法:在泄水孔观测排出的水量,分别在春季小雨季节和夏季暴雨季节雨后,观测排水设施是否有水排出。效果可按不同图像或测定的流量来表述。

③监测次数:春季小雨季节不少于3次,夏季暴雨季节不少于3次。

##### 2) 流量与流速的监测

①监测指标:流量与流速。

②监测方法:

I.从竖向渗沟注入一定量的有颜色的水,在下一泄水孔处计时量取。

II.从竖向渗沟后土层注入一定量的水,在泄水孔处计时量取排水量和水中所带的土量。

③监测次数:施工中每填土1米,监测1次,直到填土完成(分别取下两个出水口为观测点)

##### 3) 监测要求

以上监测要针对三种方案同时进行,并记录数据及做录像资料记载;在泄水孔处计取流量时,要预先在泄水孔处预埋一个铁钩,用来悬挂容器。

##### (2) 中央分隔带排水设施的监测

##### 流量与流速的监测

1) 监测指标:流量、流速。

2) 监测方法:

①当塑料盲沟铺筑完,直接在盲沟外包的土工布上浇入一定量的水,在集水槽出口处计时量取。

②在盲沟上方回填填料前预先埋置一个圆筒,填土高度每增加0.4米

时在筒内土层上浇入一定量的水，在集水槽出水口处计时量取。

3) 监测次数：重复测量至少不少于 5 次，分析误差，误差  $C_v > 20\%$ ，增加监测次数。

4) 测点布置：以集水槽位置处为起始点，每隔 5 米埋置一个直径为 40cm 的圆筒，共埋置 3 个。(方案见图 4.2.2-7)

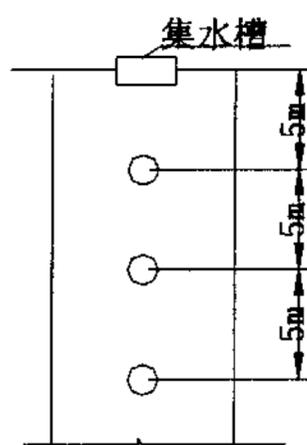


图 4.2.2-7 测点布设图

录像资料证实排水效果。

### (3) 路面边缘排水设施的监测

#### 流量与流速的监测

1) 监测指标：流量与流速。

2) 监测方法：

①盲沟铺设后注入一定量的水，在横向出水口计时量取。

②盲沟回填路基土时注入一定量的水，在横向出水口计时量取。

3) 监测次数：春季小雨季节不少于 3 次，夏季暴雨季节不少于 3 次。

### (4) 低洼平坦路段排水设施监测

#### 渗流速度监测

1) 监测指标：渗流速度。

2) 监测方法：以自然沟渠位置为起始点每隔 10 米预埋 PVC 管 3 根，分别注入一定量的水，在沟渠处出水口计时量取 (方案见图 8)

3) 监测次数：施工过程中 2 次，路基施工完成后 1 次，路面施工完成后 1 次，共计 4 次。

### 4.2.2.2 试验路竣工后的观测

在试验路铺筑完成后，要对所设计的各项排水设施进行后续观测，以证实设计的合理性，要根据监测方案进行数据的整理和录象资料的记载，对原始数据、试验样品进行保存和传输，以便于今后在排水设计方面积累

经验。

#### (1) 挡墙排水设施的监测

##### 含水量的监测

- 1) 监测指标：墙后填土的含水量。
- 2) 监测方法：现场钻芯取样，室内才测试。
- 3) 监测次数：春季小雨季节不少于 3 次，夏季暴雨季节不少于 3 次。

#### (2) 中央分隔带排水设施的监测

##### 含水量的监测

- 1) 监测指标：中央分隔带内土层的含水量。
- 2) 监测方法：现场钻芯取样，室内测试。
- 3) 监测次数：春季小雨雨后不少于 3 次，夏季暴雨雨后不少于 3 次。

#### (3) 路面边缘排水设施的监测

##### 1) 排水效果的监测

①监测指标：排水效果。

②监测方法：在泄水口观测排出的水量，分别在春季小雨季节和夏季暴雨季节雨后，观测是否有水排出，录象资料记录。

③监测次数：春季小雨季节不少于 3 次，夏季暴雨季节不少于 3 次。

##### 2) 含水量的监测

①监测指标：面层、基层土的含水量。

②监测方法：现场钻芯取样，室内测试。

③监测次数：春季小雨季节不少于 3 次，夏季暴雨季节不少于 3 次。

#### (4) 低洼平坦路段排水设施监测

##### 1) 排水设施实际排水量监测

①监测指标：流量。

②监测方法：出水口计时量取。

③监测次数：在无降雨期监测 2 次，路基施工完成后 1 次，路面施工完成后 1 次；降雨期的大雨后连续监测 3 天，每天 1 次。

##### 2) 地下水位监测

①监测指标：地下水位。

②监测方法：以自然沟渠位置为起始点每隔 8 米预埋 PVC 管，埋置 3 排，读取管内水位高程（如图 4.2.2-8）。

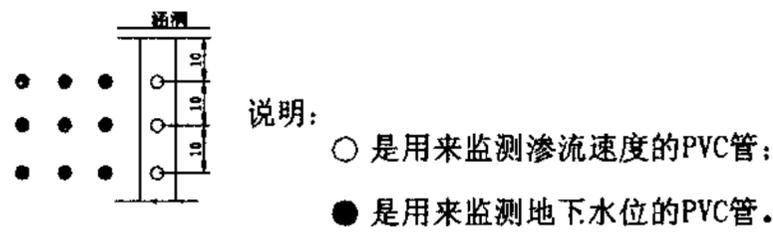


图 4.2.2-8 测点布置图

③监测次数：在埋管后共监测 2 次，时间同上。大雨后连续监测 3 天，每天 1 次。

### 3) 含水量监测

#### ①监测指标：

I. 基层、底基层、路基土含水量。

II. 在同一断面渗沟外侧取芯，钻至同一高程取土，测其含水量。

②监测方法：现场取芯，室内测试。

③监测次数：施工过程中 1 次，施工完成后进行 1 次。

备注：

(1) 监测时如有测点破坏，则尽可能在原位重新补上，以保证数据的连续性；

(2) 每个测点编号由所在断面桩号和断面内数字符号唯一确定，测点编号确定后不得轻易变更。如有变更，要作出说明；

(3) 监测时，应同时记录监测时间和天气情况；

(4) 如有特殊情况，应加以注明，如雨后加测等。

附：各项排水设施监测记录表。

### 4.2.2.3 试验数据整理

在试验路铺筑过程中，对试验段 4（低洼平坦路段）进行了观测，这项工作主要是针对渗沟降低地下水位情况进行的。观测内容有渗沟铺筑前后的水位变化、大雨后渗沟内的水位以及渗沟外侧水位的变化情况。试验结果如表 4.2.2-1、表 4.2.2-2 所示。除此以外，还对渗沟的流量、渗流速度进行了观测，情况良好。

表 4.2.2-1 2002 年 11 月试验段 4 地下水观测结果

监测指标	地下水位 (m)	PVC 管														
		1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	1	2	3			
埋管后	做渗沟之前	1339.1	1339.1	1339.1	1340.3	1340.4	1340.4	1341.2	1341.1	1341.1	1338.8	1338.8	1338.8			
	渗沟完成后	1338.5	1338.5	1338.5	1338.9	1338.9	1338.6	1339.2	1339.2	1339.2	1338.3	1338.3	1338.3			
	路基填筑 1m	1338.3	1338.3	1338.3	1338.85	1338.5	1338.5	1338.8	1338.8	1338.8	1338.1	1338.1	1338.1			
雨季大雨后	第 1 天	1340.3	1340.4	1340.3	1340.7	1340.6	1340.7	1340.9	1340.9	1340.9	1340.1	1340.1	1340.1			
	第 2 天	1340.0	1340.0	1340.1	1340.4	1340.3	1340.3	1340.4	1340.4	1340.5	1339.6	1339.6	1339.5			
	第 3 天	1339.3	1339.3	1339.3	1339.5	1339.5	1339.5	1339.8	1339.8	1339.8	1339.3	1339.2	1339.2			

表 4.2.2-2 2002 年 12 月试验段 4 地下水观测结果

监测指标	地下水位 (m)	PVC 管															
		1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	1	2	3				
埋管后	做渗沟之前	1338.9	1338.9	1338.9	1339.0	1339.0	1339.0	1339.1	1339.2	1339.2	1339.2	1338.7	1338.8	1338.7	1338.7	1338.7	1338.7
	渗沟完成后	1338.6	1338.6	1338.6	1338.7	1338.7	1338.7	1338.8	1338.8	1338.8	1338.8	1338.6	1338.8	1338.8	1338.4	1338.4	1338.4
雨季大雨后	路基填筑 1m	1338.5	1338.6	1338.5	1338.5	1338.6	1338.6	1338.6	1338.6	1338.6	1338.6	1338.6	1338.6	1338.6	1338.3	1338.3	1338.3
	第 1 天	1339.2	1339.2	1339.2	1339.3	1339.3	1339.3	1339.3	1339.3	1339.3	1339.3	1339.5	1339.5	1339.5	1339.1	1339.1	1339.1
	第 2 天	1339.1	1339.1	1339.1	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.3	1339.3	1339.3	1339.0	1339.0	1339.0
	第 3 天	1339.0	1339.0	1339.1	1339.1	1339.1	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.2	1339.0	1339.0	1339.0	1339.0

从表 4.2.2-1、表 4.2.2-2 中可以看出,所设计的渗沟可以起到很好的排水作用,各项数据表明在做渗沟之前,地下水位均较高。在做完渗沟以后,地下水位平均下降了 30~35cm;特别是在雨后的观测记录中我们也可以发现,排水设施效果非常显著,通过 3 天的观测,可以看出所设计的渗沟在解决大雨后的排水问题时可以发挥良好的作用。从地下水位观测记录所记录的数据可以推导出水力坡降值  $I$  为 0.1,与设计时所取定的  $I$  值相同,在设计时我们主要是根据土的渗透系数  $k$  来估算  $I$  值,因此,通过试验可以知道,根据试验数据计算出的结果符合要求。

#### 4.2.2.4 室内试验验证

在铺筑完试验路以后,我们又对在试验路中所采用的材料进行了室内反滤试验,试验数据如表 4.2.2-3、4.2.2-4 所示。所采用的单位质量为  $400\text{g}/\text{m}^2$  针刺土工布的渗透系数  $k_{\text{ge}}$  是试验路粘土的渗透系数  $k_s$  的 1.5 倍,与我们在第三章中所讨论的关于土工织物反滤准则的规定相符合。通过试验所测得的梯度比 GR 值为 0.04~0.19,均远远小于 3,可以满足防淤堵准则的要求。因此,可以初步断定,所设计的试验路采用的材料符合设计要求。最终效果有待以后的观测来验证。

表 4.2.2-3 反滤试验记录

12.06# 反滤试验记录及整理													
试验路粘土		针刺 400g/m <sup>2</sup> (试验路)							I=0.015				
土样名称	试验路粘土	试样种类	针刺	T (°C)	试样描述	K <sub>s</sub> <sup>20</sup> (cm/s)	400g/m <sup>2</sup> (试验路)	试样编号	I#	试样面积	78.54cm <sup>2</sup>	试样厚度	试验日期
读数	时间	t (s)	v (cm/s)		产品厚度	K <sub>s</sub> <sup>20</sup> (cm/s)	K <sub>sg</sub> <sup>20</sup> (cm/s)	GR					
序号	Q (cm <sup>3</sup> )				温度校正								
1	32	120	0.003395	13	1.194	0.003107	0.00468	0.07394	0				
2	29	120	0.003077	13	1.194	0.002805	0.004241	0.066961	5				
3	26	120	0.002759	13	1.194	0.002514	0.003859	0.040177	20				
4	22	120	0.002334	13	1.194	0.002195	0.003217	0.124327	50				
5	20	120	0.002122	14	1.163	0.001959	0.002828	0.153161	110				
6	18	120	0.00191	14	1.163	0.001749	0.002545	0.138141	170				
7	21	150	0.001783	13	1.194	0.001676	0.002439	0.138141	290				
8	18	150	0.001528	13	1.194	0.001425	0.002075	0.137061	410				
9	18	150	0.001528	12	1.227	0.001465	0.002117	0.150768	590				
10	18	150	0.001528	12	1.227	0.001488	0.002148	0.153161	770				
11	18	150	0.001528	11	1.261	0.001517	0.002176	0.165769	950				
12	17	150	0.001443	10	1.297	0.001474	0.002084	0.193397	1130				
13	15	150	0.001273	10	1.297	0.0013	0.001892	0.138141	1310				
14	15	150	0.001273	10	1.297	0.001311	0.001892	0.153161	1440				

表 4.2.2-4 反滤试验记录

12.06 反滤试验记录及整理														
试验路粘土														
I=0.015														
土样名称	试验路粘土	试样种类	针刺	试样描述		400g/m <sup>2</sup> (试验路)	试样编号	I#						
试样面积	78.54cm <sup>2</sup>	土样厚度	10cm	产品厚度		0.35cm	试验日期	02.12.06						
测压管水位 (cm)														
序号	读数时间	1		2		4		6	h <sub>12</sub>	h <sub>24</sub>	h <sub>14</sub>	水位差 (cm)		
		2	3	平均	4	5	平均							
1	10:25	48.2	48.45	48.5	48.475	55	55	55.1	0.275	6.525	6.8			
2	10:30	48.2	48.4	48.5	48.45	55	55	55.1	0.25	6.55	6.8			
3	10:45	48.3	48.4	48.5	48.45	55	55	55.1	0.15	6.55	6.7			
4	11:15	48.2	48.4	48.9	48.65	55	55	55.1	0.45	6.35	6.8			
5	12:15	48.2	48.4	49.1	48.75	55	55.1	55.05	0.55	6.3	6.85			
6	13:15	48.2	48.4	49	48.7	55	55.1	55.05	0.5	6.35	6.85			
7	15:15	48.2	48.4	49	48.7	55	55.1	55.05	0.5	6.35	6.85			
8	17:15	48.2	48.4	49	48.7	55.1	55.1	55.1	0.5	6.4	6.9			
9	20:15	48.2	48.4	49.1	48.75	55.2	55.1	55.15	0.55	6.4	6.95			
10	23:15	48.2	48.4	49.1	48.75	55	55.1	55.05	0.55	6.3	6.85			
11	2:15	48.2	48.4	49.2	48.8	55.1	55.2	55.15	0.6	6.35	6.95			
12	5:15	48.1	48.4	49.2	48.8	55.2	55.1	55.15	0.7	6.35	7.05			
13	8:15	48.2	48.4	49	48.7	55.1	55	55.05	0.5	6.35	6.85			
14	10:25	48.2	48.4	49.1	48.75	55	55.1	55.05	0.55	6.3	6.85			

## 5 设计方法总结

### 5.1 各类排水设施的设计原则

通过前面四章的论述,对于在公路排水设施的设计中应用土工合成材料有了一定的掌握,其设计目的也是为了更好地使排水设施发挥其作用,使所设计的公路避免可能的水毁而造成的危害性。

通过对五种排水设施设计方法的总结以及对现有排水设施存在的问题的调研,本文针对这五种排水设施的设计方法提出了新的建议,主旨是为了提供功能完善、造价低廉的最佳排水设施方案。

#### 5.1.1 路界排水

##### 5.1.1.1 排水设施类型

路界排水即是把降落在路界范围内的表面水有效地汇集并迅速排除出路界,同时把路界外可能流入的地表水拦截在路界范围外(但不包括横穿路界的自然水道内的水流),以减少地表水对路基和路面的危害以及对行车安全的威胁。

常用排水设施包括截水沟和边沟。当路堑或路堤边坡上方流入路界的地表径流量大时,应设置拦截地表径流的截水沟;挖方路段及填土高度小于边沟深度的填方路段,应在挖方边坡或在填方边坡坡脚外设置边沟,以汇集和排泄降落在坡面和路面上的水。

##### 5.1.1.2 设计原则

(1) 按排水的功能要求选择沟、管的类型,布置在合适的位置上,并将各项排水设施组合成一个将地表水顺畅地汇集、拦截和排引到路界外的排水系统;

(2) 确定各项表面排水设施的汇水范围并计算其设计流量;

(3) 选择出水口(泄水口)的位置、间距和构造;

(4) 计算满足排泄设计流量要求的沟、管断面形状和尺寸;

(5) 分析沟渠和出水口周围地面冲刷和侵蚀的可能性,并考虑采取相应的有效防治措施。

## 5.1.2 地下排水

### 5.1.2.1 排水设施类型

在地下水危及路基稳定（包括整体稳定和局部稳定）或者严重影响路基强度的情况下，应根据具体情况采取拦截、排引含水层地下水，降低地下水位或者疏干坡体内的地下水等措施。常用排水设施包括暗沟、渗井、和渗沟。暗沟是设在地面以下引导水流的地下沟渠，无渗水和汇水作用。渗沟的作用是将地面水通过竖井，渗入地下排除。结构的作用是在地面以下汇集流向路基的地下水，排到路基范围以外，使路基上保持干燥，不致因地下水成害。例如，路线所经地段遇有潜水、层间水、路堑顶部出现地下水，或地下水位较高，影响路基或路堑边坡稳定，则需修建渗沟将水排出。在深挖方路段可能会遇到承压水或流向路基范围内的水，可以采用承压水渗沟的形式来降低地下水位，并将水排出路基以外，以保持路基土的稳定。

### 5.1.2.2 设计原则

- （1）确定排水构造物的类型、位置与深度；
- （2）计算流入排水构造物的流量，并绘制降落曲线；
- （3）进行水力计算，并确定构造物尺寸；
- （4）设计与计算排水构造物细部：如渗水缝隙、反滤层埋置深度；
- （5）设计地下排水的附属设施，如出水口、引水沟等；
- （6）提出恰当的设计图纸与说明。

## 5.1.3 路面边缘排水

### 5.1.3.1 排水设施类型

沿路面结构的外侧边缘设置纵向边缘排水系统。渗入路面结构内的水分，先沿路面结构层中某一透水层次或者层间孔隙横向流入由透水性材料组成的纵向排水沟，再由间隔一定距离布设的横向出水管排引出路基。路面结构采用透水性材料做成基层或垫层。渗入路面结构内的水分，先通过竖向渗流进入排水层，然后由横向渗流进入纵向排水沟和排水管，再由横向出水管排引出路基。为阻断地下水的毛细上升，或者排除因负温差作用而积聚在路基上层的自由水，可在路床顶面设置由开级配粒料组成的全宽式排水垫层，并酌情配置纵向排水沟和排水管等组成排水系统。

### 5.1.3.2 设计原则

- (1) 确定排水设施的类型、位置;
- (2) 计算坡面水渗入的量;
- (3) 进行水力计算, 确定排水设施的尺寸;
- (4) 设计排水设施的附属设施, 如泄水口的位置、间距和构造。

### 5.1.4 边坡防护与支挡结构排水

#### 5.1.4.1 排水设施类型

用来排除公路构造物(边坡、挡土墙等)的表面径流, 或者渗入其内部自由水。常用排水设施包括边坡渗沟和挡土墙后的纵向及竖向渗沟。

边坡渗沟采用土工织物进行边坡防护, 是将土工织物铺设于种植土与排水层之间, 起到隔离和防渗的作用, 使具有一定压力的裂隙水不得在种植土下形成压力水, 而由排水层排出; 其隔离作用使降雨和绿化用水不能流入边坡内部。

若道路边坡为土质路堑边坡, 坡体的含水量很大(或有上层滞水)而易产生坡体滑动时, 可在坡体内设置条形、分岔形或拱形边坡渗沟(或以排水管代替)以疏干坡体, 或者设置水平排水孔以降低坡体内的静水压力。

沿挡土墙墙背的底部设置纵向排水渗沟, 并间隔 4m~5m 设置竖向渗沟, 其顶部用厚的不透水材料封闭。渗沟由透水性粒料筑成。

#### 5.1.4.2 设计原则

- (1) 确定排水设施的类型、位置;
- (2) 计算坡面水渗入的量;
- (3) 进行水力计算, 确定排水设施的尺寸;
- (4) 设计排水设施的附属设施, 如泄水口的位置、间距和构造。

### 5.1.5 中央分隔带排水

#### 5.1.5.1 排水设施类型

中央分隔带宽度大于 3m、表面凸起且无铺面封闭时, 并未采用表面排水措施, 降落在分隔带上的表面水, 一部分形成表面径流流向两侧行车道, 由路面表面水排水设施排走; 另一部分表面水则向下渗入分隔带土体内。可通过在分隔带内设置地下排水设施(渗沟和管)汇集渗入水, 并通过隔一定间距设置的横向排水管将渗沟内的水排引出路界。

### 5.1.5.2 设计原则

- (1) 确定排水设施的类型、位置；
- (2) 计算表面水渗入的量，超高路段要考虑超高段上路面表面水的量；
- (3) 进行水力计算，确定满足排泄设计流量要求的排水设施的尺寸；
- (4) 选择出水口的位置、间距和构造。

## 5.2 各项排水设施的设计方法

### 5.2.1 路界排水

路界排水设施的设计主要侧重于考虑排水体处于地质条件较差的情况下，为防止排水设施的渗漏变形，而在设计时采用不透水土工膜的形式。在设计时，排水设施的设计流量和各种沟管和泄水口的泄水能力的水力计算按照第二章所提供的方法确定。其设计标准应满足排泄设计流量的要求。

当采用土工膜进行排水设计时，要计算出土工膜的渗漏量以及土工膜在施工中产生的缺陷渗漏量。由于土工膜属于非孔隙介质，目前对土工膜在水力梯度作用下的渗透机理的认识还不完全清楚。为了便于与孔隙介质比较和计算明确，目前绝大多数学者沿用达西定律来描述在水力梯度下液体通过土工膜的渗透规律。施工过程中，由于土工膜接缝、施工机械的破坏、搬运过程中的损坏等原因造成的渗漏也要加以确定。计算公式见第三章。

### 5.2.2 地下排水

在进行地下排水设施设计时，应根据地下水的水位、成因以及当地土质的各项性能指标有所了解，在此基础上利用水力学模型推导出所设计的渗沟对地下水水位的影响，绘制出降落曲线，从而推导出降落曲线方程。

在设计时，主要是运用简化后的渗沟水力学模型进行推导的。本文在公式的推导过程中将现行资料中所应用的公式和经过运用基本原理推导出的公式进行了比较分析，分析结果为本文的设计方法提供了理论依据。

因此，在应用土工合成材料进行地下排水设施设计时，除了计算设计流量以外，还要求计算渗沟埋置深度、降落曲线，本文也根据算例对渗沟

位置的确定进行了分析,同时,也对各项参数对渗沟渗流量的影响进行了分析。

在设计时,所要考虑的重点还包括作为反滤层的土工织物,传统的反滤材料是透水的砂石料,现在则可采用土工织物来代替,或者两者结合使用。对任何过滤材料工程上都有两方面的要求,一方面要求能挡土;另一方面要求保持水流的畅通。用作反滤的土工织物一般是非织造型(无纺)土工织物,有时也可以用织造型土工织物。具体要求见第三章。

### 5.2.3 中央分隔带排水和路面边缘排水

中央分隔带排水和路面边缘排水的排水设施在设计时,主要目的是为了排除传统设计方法中所忽略的渗入路面结构内的水量。在常规的设计中,一般都没有涉及降雨后由中央分隔带渗入的水量和绿化灌溉水渗入的水量,但是随着高速公路等级的不断提高,中央分隔带宽度大多大于3米,上瑞公路的中央分隔带宽度为4.5米,因此,在计算时是不容忽视的。

在路面边缘排水设计中,除了考虑路面表面水渗入的水量以外,还考虑了路肩表面水渗入路面结构内部的水量,在设计时,采用了塑料盲沟代替开孔塑料管,并设置了纵向排水渗沟,渗沟周围包裹透水土工布作为反滤层。具体公式见第三章。

### 5.2.4 边坡防护与支挡结构排水

在边坡防护设计与挡土墙设计时,着重于挡土墙的设计。采用土工合成材料设计的渗沟其简化后的水力学模型和地下排水设施相似,因此,根据西部地区多山的特点,将挡土墙分为4种情况进行讨论。在这些设计中,土工织物所起的作用都是过滤和排水,但由于土工织物所处的土质条件、墙后填土的含水量以及墙后填土对土工织物的作用力不同等原因,在选择土工织物时也要考虑这些原因。

## 5.3 设计准则

### 5.3.1 反滤设计准则

为了让所选用的土工织物能长期发挥反滤作用,对织物应该提出一定的要求。对用作反滤的土工织物,基本要求有:

(1) 被保护的土料在水流作用下, 土粒不得被水流带走, 即需要有“保土性”, 以便防止管涌破坏。

(2) 水流必须能顺畅通过织物平面, 即需要有“透水性”, 以防止积水产生过高的渗透压力。

(3) 织物孔径不能被水流挟带的土粒所阻塞, 即要有“防堵性”以避免反滤作用失效。

### 5.3.1.1 保土性准则

由于要求织物保土, 则织物的孔径与土的粒径之间就必须符合一定的关系。孔径过大, 土粒会穿过孔洞而流失; 过小又妨碍透水和容易被堵塞。

借鉴传统的粒状土反滤层的保土要求, 并依据众多的试验研究表明, 为了保土, 织物的某等效孔径  $O_e$  和被保护土的特征粒径  $d_{85}$  之间应该符合以下关系:

$$O_e \leq n d_{85}$$

式中  $O_e$  是一个由试验测得的等效孔径值。目前国内外采用最多的是  $O_e = O_{95}$ , 或者  $O_e = O_{90}$ 。  $O_{95}$  和  $O_{90}$  之间的统计关系为  $O_{95}/O_{90} \approx 1.2$ 。  $d_{85}$  是被保护土的一个特征粒径, 可从被保护土的颗粒分析试验曲线上查得, 它表明土中粒径小于该值的颗粒的质量是全土质量的 85%。而式中的  $n$  则是与土中的细粒 (土粒粒径  $d \leq 0.075\text{mm}$  的部分) 含量和不均匀系数  $U (= d_{60}/d_{10})$  等相关的经验系数。

由于各国准则所采用的等效孔径值不同, 使设计者很难找到合适的过滤准则作为设计依据, 因此本文将这些准则转化为土工织物等效孔径  $O_{95}$  与被保护土的平均粒径  $d_{50}$  之间的关系, 进行各准则间的比较和分析, 使设计者在设计反滤层时可以采用比较严格的过滤准则。通过论证, 建议采用美国准则。具体推导过程见第三章。

### 5.3.1.2 透水性准则

目前对土工织物透水性的要求, 是以织物和被保护土的渗透系数的相对关系来表示。SL/T225—98 对此作了如下规定:

(1) 被保护土级配良好, 水力梯度低和预计不致发生淤堵 (中粗砂等) 时:

$$K_x \geq K_s$$

(2) 若排水失效会导致土体结构破坏, 且修理费用高, 或水力梯度高, 流态复杂等情况:

$$K_g \geq 10K_s$$

以上两式中的  $K_g$  和  $K_s$  分别为土工织物和被保护土的渗透系数。

有的标准要求比 10 更大的系数, 是考虑土工织物在实际工作中, 其渗透系数可能会由于织物被阻塞或受压变薄而降低的情况发生。但同时应注意, 渗透系数越大,  $O_{95}$  相应增大, 可能会不满足保土性的要求。

为防止由于仅用土和土的渗透系数的比值来表达的反滤层的透水性准则产生的片面性, 美国的 Colorado 州大学准则规定为:

$$O_{95}/d_{15} \geq 2$$

### 5.3.1.3 防淤堵性准则

为防止土工织物在长期工作中被淤堵, 应该选定的织物和被保护的现场土料作较长期试验来检验。这样做费时费力, 因此 SL/T225—98 对于土工织物防堵性提出以下要求:

(1) 被保护土级配良好, 水力梯度低, 流态稳定, 修理费用小及不发生淤堵时:

$$O_{95} \geq 3d_{15}$$

式中:  $d_{15}$ ——被保护土的特征粒径, 即通过率为 15% 的粒径。

(2) 被保护土易管涌, 具有分散性、水力梯度高、流态复杂、修理费用大的情况。

被保护土的渗透系数  $K_s \geq 10^{-5}$  cm/s 时:

$$GR \leq 3$$

式中: GR——梯度比;

$K_s$ ——被保护土的渗透系数。

被保护土的渗透系数  $K_s \leq 10^{-5}$  cm/s 时, 应以现场土料进行长期淤堵试验, 观察其淤堵情况。

另外, JTJ/T 019—98《公路土工合成材料应用技术规范》中指出, 用土工合成材料处治冒泥翻浆或季节性冻融翻浆时, 需在土工合成材料上铺设 10cm~20cm 中粗砂保护层, 在其下铺设 5cm~10cm 的中粗砂垫层, 共同形成一组完善的过滤层。砂间的土工合成材料除满足上述过滤设计准则要求外, 其孔径还需满足下式要求:

$$\text{反滤均匀: } O_{95} < 2d_{50}$$

### 5.3.2 设计要点

采用土工织物作为反滤层时, 首先要求选用的材料必须满足反滤准则; 其次, 它们在铺设后必须是稳定的; 再次, 虽然它们并不是作为受力部件来作用, 但需要有一定的强度, 应能承受施工工应力和可能遇到的其他荷载。因此一般的设计应该包括以下内容。

#### 5.3.2.1 提供基本的必要数据

##### (1) 被保护土的主要物理力学性质指标

被保护土的主要物理力学性质指标包括: 土的分类、颗粒筛分曲线、 $d_{85}$ 与 $d_{15}$ 土的不均匀系数 $U$  ( $=d_{60}/d_{10}$ )、土的渗透系数 $K$ 、土的抗剪强度指标、土的化学成分等, 它们可由试验确定。

##### (2) 填土的性质指标

填土的性质指标即回填土的击实试验曲线, 从曲线上确定填土的最大容重 $\gamma_{dmax}$ 和最优含水率 $W_{op}$ 。

##### (3) 待选土工织物的性质指标

待选土工织物性质指标包括土工织物的单位面积质量 $M$ 、等效孔径 $O_{95}$ 、垂直渗透系数 $K_v$ 、水平渗透系数 $K_h$ 、抗拉强度以及由淤堵试验测得的梯度比 $GR$ 等。

#### 5.3.2.2 一般的强度要求

织物要求的强度 $T$ 很难计算确定, 通常可以根据经验按以下情况取值:

(1) 一般闸坝, 要求无纺土工织物的 $M \geq 300\text{g/m}^2$ ,  $T \geq 8.0\text{kN/m}$ , 纵横强度比为 $2/3 \sim 3/2$  ( $M$ 为单位面积质量,  $T$ 为抗拉强度)。

(2) 预计应力较大时,  $M \geq 400\text{g/m}^2$ ,  $T \geq 10.0\text{kN/m}$ , 纵横强度比为 $2/3 \sim 3/2$ 。

(3) 应力更大时,  $M \geq 500\text{g/m}^2$ ,  $T \geq 12.0\text{kN/m}$ , 纵横强度比为 $2/3 \sim 3/2$ 。

#### 5.3.2.3 材料的选择

选择一种合适的土工织物作为反滤材料, 主要是根据两方面的情况, 然后综合地加以判定。一方面是工程情况, 土工织物的使用目的, 工程的重要性, 结构型式和布置范围。土工织物是单纯地用作反滤材料还是兼顾其它作用, 例如隔离作用等等。当材料失效时对工程的影响程度, 反滤材料是深埋入土体中不可能加以修理, 还是处在表层易于更换等等。另一方面与土工织物有关的各种标定指标和工程指标 (土工织物与土共同作用下

的指标)。这些指标大致可以分为物理特性、力学特性、水力学特性和耐久性四类。哪些指标是关键性的要求要根据使用要求而定。单纯起反滤作用时物理特性和水力学特性是主要的。有些指标在选用时也常参照习惯和经验。例如反滤材料的厚度与挡土能力有关,同样的等效孔径,厚度大的织物其挡土性能就大一些。但这一点并不意味着都应选择厚的土工织物。正相反,对包裹在地下排水材料外面的土工织物,一般都采用薄型的无纺布,其目的不仅要起到挡土的作用,还着重防止淤堵现象的出现。

## 6 研究总结

“应用土工合成材料进行公路防排水设施设施的应用研究”经过 17 个月的室内外试验研究、资料调研、理论分析,对土工合成材料的路用性能、施工工艺要点、力学机理、设计方法与指标等进行了系统的分析与试验研究。研究工作包括应用土工合成材料进行各种类型防排水设施设计的方法、土工合成材料的性能要求及技术指标、试验路铺筑并验证土工合成材料的路用性能、研究排水设施的施工质量评定指标。

### 6.1 研究工作总结

通过以上各项试验研究,得出主要结论如下:

(1) 本文所提出的应用(复合)土工合成材料构筑的路界排水、地下排水、支挡结构排水以及中央分隔带排水设计方法合理,室内外研究表明排水设施具有显著的技术效果。土工合成材料作为一种新型建筑材料用于公路排水设施,有其特殊的作用机理。

(2) 在具体的排水设施设计中,提出了相关的设计指标。例如:对渗沟埋置深度的确定、渗沟的布置形式所需要的相应参数都提供了具体的理论依据。

(3) 对土工织物作为反滤层设计的过滤性准则和透水性准则都提出了新的建议,本文采用同一尺度对各准则进行比较分析,为设计者选择严谨、合理的准则提供了依据;对透水性准则在原有基础上加以补充;

(4) 对中央分隔带排水、路面边缘排水、路界排水设施的设计,在原有设计的基础上进行了补充和完善,从而使提高了排水设施的排水能力;

(5) 在进行排水设计的基础上,提出了各种排水设施的设计通用图,并对施工工艺和方法进行了总结。

### 6.2 建议

通过本项目的研究,取得了一些有益和可以推广应用的成果;但距建立完善的公路防排水设施应用土工合成材料的设计方法还有很多工作要做。建议如下:

(1) 建议对铺筑的试验路做进一步的跟踪调查并总结分析,了解土工合成材料在各项排水设施中发挥的作用,必要时做一些补充观测。

(2) 进行室内试验路铺筑, 力求通过不同试验条件确定土工合成材料的性能指标, 建立土工合成材料技术参数与排水设施的排水能力之间的关系。

(3) 在以上基础上建立完备的应用土工合成材料进行排水设计的设计指标和设计方法体系, 从而最终形成适合于西部地区的(复合)土工排水材料的防排水成套技术。

## 参考文献

- [1]交通部第二公路勘察设计院.路基公路设计手册.北京:人民交通出版社,1997.
- [2]土工合成材料工程应用手册编写委员会.土工合成材料工程应用手册.北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [3]中华人民共和国行业标准.公路排水设计规范(JTJ 018-97).北京:人民交通出版社,1997.
- [4]中华人民共和国行业标准.公路土工合成材料试验规程(JTJ/T 060-98).北京:人民交通出版社,1999.
- [5]中华人民共和国行业标准.公路土工合成材料应用技术规范(JTJ/T 019-98).北京:人民交通出版社,1999.
- [6]中华人民共和国行业标准.水运工程土工合成材料应用技术规范(JTJ/T 239-98).北京:人民交通出版社,1998.
- [7]中华人民共和国行业标准.水运水电工程土工合成材料应用技术规范(SL/T 255-98).北京:中国水利水电出版社,1998.
- [8]中华人民共和国国家标准.土工合成材料应用技术规范(GB 50290-98).北京:中国水利水电出版社,1998.
- [9]第四届国际土工织物、土工膜及有关产品学术讨论会论文译文选集.天津大学水力系译,1990.
- [10]陈小桐,何平等.土工合成材料在江苏高速公路暨示范工程中的应用.交通科技,2000,第4期.
- [11]郭忠印.土工织物在路面工程中的应用技术综述.公路,2000,第9期.
- [12]黄晓明,朱湘.公路土工合成材料应用原理.北京:人民交通出版社.
- [13]胡丹兵,陆士强,王钊.土工织物反滤层透水性设计准则.岩土工程学报,1994,第5期.
- [14]姜启珍,邱赞富.浅谈高速高路的排水设计.广东公路交通,1998,第2期.
- [15]李宝龙,于立忠.用土工织物作反滤层的设计与施工.防渗技术,2000,第6期.
- [16]刘芙蓉,梁志松.土工合成材料在道路工程中的应用.西部深矿工程,2002,第2期.
- [17]任之忠,李学军.土工织物透水性能的研究.西北水资源与水工程,1997,第4期.
- [18]王卫章,储才元.针刺非织造土工布透水性能的探讨.产业用纺织品,第19卷.

- [19]徐晶,周天佑.土工合成材料在西南地区的应用发展.四川水利,1995,第6期.
- [20]徐立波.土工织物反滤设计准则的对比分析.华北水力水电学院学报,1995.
- [21]姚祖康.公路排水设计手册.北京:人民交通出版社,2001.
- [22]郑玉琨,于宗澎,陈志辉.针刺无纺土工织物作滤层的应用研究.工程勘察,1994,第5期.
- [23]周志刚,郑建龙.公路土工合成材料设计原理及工程应用.北京:人民交通出版社.
- [24]周蓉.土工织物反滤机理研究.青岛大学学报,2000.
- [25]AL DiMillio.Durability of Geosynthetics for Highway Applications. FHWA-RD-97-142, 97-143, 97-144, and 00-157.
- [26]Berkhout,H. The use of geosynthetics as vertical screens in road construction. International Symposium on subdrainage in roadway pavements and subgrades. Granada,1998.
- [27]Christopher, B. R. et. al. Geotextile Filtration Principles, Practices and Problems. Geotextiles and Geomembranes , Vol.11. Nos.4-6 ,1992.
- [28]Geoeges.Kozlov. Road subsurface drainage design, construction and maintenance guide for pavement. Division of research and demonstration New Jersey Department of Transportation, 1984.
- [29]Giroud,J.P.Filter Criteria for Geotextiles.2nd Int.Conf.on Geotextiles, Las Vegas,U.S.A.,Vol.1.1982.
- [30]L. David Suits, James B. Goddard, John S. Baldwin. Testing and Performance of Geosynthetics in Subsurface Drainage. ASTM 100 Barr Harbor Drive West Conshohocken, PA 19428-2959.
- [31]N. W. M. JOHN. Geotextiles. Lecture in Civil Engineering.

## 致 谢

本文是在张海涛、郭忠印教授的悉心指导下完成的，在为期三年的学习中，张海涛老师在学术研究方面为我确立了方向，为我提供了广阔的学习空间，在科学研究方面为我打下了良好的基础。在为期一年的论文撰写与课题研究期间，同济大学的郭老师对于整篇论文的写作以及该项目的研究，都给予了极大的关心和帮助。不仅使我在理论水平上有了很大的提高，而且在实践能力方面，也为我在科学研究领域的深入提供了新的思路。同时，郭老师对待工作认真负责、严谨求实的态度，对新方法、新知识的敏锐触角，以及解决实际问题时富于创新的思想，也给我留下了深刻的印象。在此，我向郭忠印教授表示衷心的感谢。

同时，我要感谢在课题研究过程中给予我大量帮助的贵州省交通规划勘察设计研究院的罗强院长、丁志勇主任表示衷心的感谢。他们在现场调研、试验路施工与观测方面给予了积极的配合和支持，使我可以顺利完成论文的撰写。在共同合作的过程中，他们对工作锲而不舍、精益求精的态度，也让我深受鼓舞。

此外，我还要感谢王微、刘建华同学在论文的撰写过程中在室内试验方面帮助我做了很多工作。在此，向他们表示感谢！