

Huangtu Diqu Gaosu Gonglu Shigong Xinjishu

黄土地区

高速公路施工新技术

——宣大高速公路河北段工程实践

河北省宣大高速公路管理处

人民交通出版社

黄土地区高速公路施工新技术
——宣大高速公路河北段工程实践
河北省宣大高速公路管理处

正文设计： 责任校对：宿秀英 责任印制：
人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本：16 印张： 插页：1 字数： 千

2001年5月 第1版

2001年5月 第1版 第1次印刷 总第1次印刷

印数：0001~4000册 定价：30.00元

ISBN 7-114- -

《黄土地区高速公路施工新技术》

编委会

主编单位：河北省宣大高速公路管理处

主 编：白双信

副 主 编：王国清 冯 升 康彦民 徐兆华

编 委：孙保原 赵卫国 赵学勳 张 俊

胡云鹤 杨罗生 赵 钢 王国洲

侯 彪 刘治忠 贾治平 段海军

李以利 刘春雪 李海滨

内 容 提 要

本书主要以河北省宣大高速公路工程实践为基础素材,总结相关科研成果与施工经验编写而成。内容包括黄土地区高速公路路基的湿陷性处治技术、冲击压实技术、注浆技术;土工织物与土工格栅的应用技术;重载交通的路面结构与施工技术;桥涵工程技术等。

本书对在黄土地区从事高速公路的施工、科研、管理、设计的技术人员具有较高的参考价值,也可供其他相关技术人员参考使用。

写书也是基础设施建设——代序

高速公路作为现代化交通基础设施,以其大流量、高速度、深影响、强辐射等显著特点,已经成为促进区域经济发展、带动生产力布局调整、推动社会文明与进步的主干运输通道,并将公路运输提升至综合运输体系中的主导地位。高速公路已经成为现代文明的重要标志。

由于高速公路技术标准高、功能齐全、设施配套、管理严密,而呈现出技术密集、资金密集的特征,解决高速公路建设所遇到的技术障碍和巨大的资金需求,是高速公路快速、健康、持续发展的保证。《黄土地区高速公路施工新技术》就是技术支撑体系的一个杆件。

河北省高速公路从80年代中期起步,至“九五”期末,共建成通车高速公路九条(段)1480公里,初步形成了全省公路交通的主骨架系统。这十几年间,我省高速公路从无到有、由线连网、边建设边运营,遇到了技术、资金、政策、体制等诸多问题,广大干部职工针对出现的问题不断探索、研究,展开了一系列的体制创新和技术创新,保证了高速公路的快速建设和高效运营。宣大高速公路便是其中之一。

宣大高速公路晋煤外运的主要通道,在河北省境内起自张家口宣化,止于冀晋省界阳原,全长127公里,穿越山岭区、重丘区及平原微丘区,沿线地形多变、地质复杂、气候恶劣,给勘察设计和建设施工带来了很大的困难,以运煤为主的重载交通特征也向宣大高速公路提出了特殊的结构和功能要求。宣大高速公路建设者以创新意识解决工程建设中所遇到的诸多问题,积极采用新技术、新材料、新工艺,并先后对湿陷性黄土处理技术、软弱地基处理方法、重载交通路面结构、不良地质边坡防护、桥梁结构物通过能力等分别从勘察、设计、施工、管理等各方面展开科技攻关,解决了工程难题,保证了宣大高速公路的工程质量,取得了一系列科技成果和成套的施工技术,这些成果及技术无疑对处理高速公路建设中的类似问题具有很好的借鉴意义。

国民经济发展和社会进步需要高速公路,高速公路建设需要技术支撑。宣大高速公路建设者们以技术推广和技术创新解决工程建设中的实际问题,对黄土地区高速公路施工技术进行了可贵的探索,值得推崇。但高速公路作为综合运输体系中的现代化基础设施,其建设技术和功能水平也应该是动态发展和不断提高的,而且在高速公路建设发展中肯定还要遇到各种新情况、新问题。实现高速公路可持续发展,尚需广大建设者们持之以恒、不懈努力。从这个意义上讲,《黄土地区高速公路施工新技术》的出版难能可贵。十分希望每项工程竣工之日都有书问世,或深或浅,或短或长都是有益的。

以是为序。

河北省交通厅副厅长

前 言

宣大高速公路河北段是晋煤外运的重要通道,地处类同于陕西黄土高原的冀晋黄土地带,其交通载荷为通行运煤车的重载交通。

宣化至大同高速公路(河北省段)是国家干线公路重要组成部分,是河北省公路网中的主骨架,也是京津地区通往西北各省及晋煤外运的重要通道之一。它西起河北阳原县冀晋交界,途经东井集、阳原县城、东城镇、化稍营镇、深井镇、五虎山,东至宣化与京张高速公路相连。线路全长 127km,设计荷载为汽车—超 20,挂车—120,双向四车道,全封闭、全立交,总投资 36.9 亿元。其中重丘区 38.58km,路基宽 24.5m,设计时速 80km/h;平原微丘区 88.42km,路基宽 26m,设计时速 100km/h。

宣大高速公路地形起伏大,相对高差 542m,地质地貌复杂,部分地段沟深坡陡,最大沟深 90m 以上。6m 以上高填方路基近 290 万 m^3 ,最大填高 33.12m,最大挖深 57m。湿陷性黄土路段 61.65km,软土路基段 5.28km,膨胀土、盐渍土分布面广,土质多变。大型构造物多,480m 长的连续刚构大桥和 138m 一跨高 65m 的组合桁架拱桥为河北省同类型桥梁之最。路面结构按重车方向和轻车方向分别设计。重车方向路面厚度为 91cm,其中沥青混凝土面层厚 18cm;轻车方向路面厚为 84cm,其中沥青混凝土面层厚 15cm。水泥混凝土路面重车道板厚 28cm,共铺筑钢纤维等七种类型的水泥混凝土路面。

全线主要工程量:路基土方 1 624 万 m^3 ,石方 186 万 m^3 ;沥青混凝土路面 2 600 千平米,水泥混凝土路面 512 千平米;特大桥 3 座,大桥 27 座,中桥 32 座,小桥 60 座;分离立交 10 座,互通立交 6 处,天桥 11 座;通道、涵洞 413 道;安全防护设施 127km;沿线设主线收费站 2 处,匝道收费站 6 处,养护工区 2 处,服务区 3 处。

宣大高速公路在建设过程中对湿陷性黄土、软基、膨胀土分别采用了冲击压实、注浆、土工织物与换填等技术进行处理,并随之进行了相关的专题研究。对于路面与桥梁承受重载的可靠性除加强施工外也进行了专门验算。

宣大高速公路于 1997 年 5 月至 2000 年 10 月施工,2000 年 12 月全线通车运营。本书即是在工程实践的基础上总结相关科研与施工经验编写而成,共同促进我国黄土地区高速公路修筑技术水平的提高。全书分为八章,第一、第二章专门讨论湿陷性黄土技术问题;第三至第五章是对冲击压实、注浆技术和土工织物的性能进行分析;第六章为重载交通路面结构;第七、第八章为桥涵工程,针对黄土地区特性提出各自的要求。本书内容是针对工程实际问题而论,尤其对黄土地区的公路设计、施工有所裨益。但由于笔者水平所限,疏漏难免,敬请读者指正。

作者

2000 年 12 月

目 录

第一章 黄土地区高速公路路基.....	(1)
第一节 黄土的地质地貌特征.....	(1)
第二节 宣大高速公路黄土的分布、地层、岩性及其湿陷性评价.....	(7)
第三节 湿陷性黄土地基上高填方路堤沉降的电算分析	(23)
第二章 宣大高速公路黄土地基湿陷性处治技术	(38)
第一节 公路构造物分类和湿陷性处治技术方案	(38)
第二节 用冲击压实工艺处治黄土湿陷性的研究	(40)
第三节 复合土工织物在路基防护工程中的应用	(45)
第四节 不良地质路段处治与效果预估	(49)
第三章 高速公路路基(地基)冲击压实施工技术	(51)
第一节 冲击压实工作原理	(51)
第二节 冲击压实排压方案	(55)
第三节 冲击压实效果分析	(55)
第四节 面波法检测路基压实度方法	(67)
第四章 高速公路中的注浆技术	(70)
第一节 压力注浆	(70)
第二节 高压旋喷法	(81)
第三节 锚杆注浆技术	(93)
第四节 混凝土结构物缝隙注浆.....	(101)
第五章 土工织物与土工格栅.....	(107)
第一节 土学要点.....	(107)
第二节 土工织物功能与材性试验.....	(111)
第三节 软土地基土工织物路基施工设计.....	(115)
第四节 土工格栅.....	(123)
第六章 保证重载交通的路面施工技术.....	(125)
第一节 运煤路线重载分析.....	(125)
第二节 运煤专用路线路面结构.....	(128)
第三节 路面铺装纲要.....	(130)

第四节	探索重载交通的沥青路面结构.....	(146)
第五节	重载交通水泥混凝土路面.....	(155)
第七章	桥梁上部结构.....	(166)
第一节	桥位选择与桥型设计.....	(166)
第二节	常用桥型的设计与施工.....	(172)
第三节	小桥及涵洞工程.....	(185)
第四节	重载交通桥梁的承载状况与运营管理.....	(190)
第五节	桥面铺装与防排水.....	(194)
第八章	桥梁基础与墩台.....	(200)
第一节	桥位工程地质.....	(200)
第二节	桥梁基础与持力层选择.....	(205)
第三节	桥梁刚性扩大基础与湿陷性黄土地基处理.....	(208)
第四节	灌注桩基础.....	(213)
第五节	桥梁墩台.....	(218)
参考文献	(227)
编后语	(229)

第一章 黄土地区高速公路路基

随着国家西部大开发战略的实施,黄土地区筑路问题将成为重要技术研究项目。

宣化至大同高速公路河北省宣化至阳原段地处华北黄土地区,是过去对黄土研究所未触及的地域。宣大高速公路建设所遇到的湿陷性黄土地基压实、路基沉降以及膨胀(岩)土的处理等项工程技术问题的解决,均依托于对黄土的研究。

高速公路路堤总沉降量,特别是工后沉降,至今仍没有合理的理论计算方法,而湿陷性黄土地基上的路基、桥涵工后沉降往往是引起路面开裂、桥涵下沉的主要因素。宣大高速公路所进行的黄土分布及湿陷性评价以及微观电镜分析是了解黄土的重要手段,而试坑试验、电算及观测沉降则提供了采取工程技术对策的依据。

第一节 黄土的地质地貌特征

路基工程的三个基本问题是强度、稳定性和变形。针对黄土地区一般等级公路的建设需要,公路部门对前两个问题已作过研究。现在,由于高速公路对路面平整度和防止路面开裂的要求提高了很多,变形已成为受关注的有待解决的突出问题。宣大高速公路地处冀西北、晋北黄土区,为保证工程质量,需对黄土地基湿陷性问题进行专门研究。

一、黄土的地质地貌特征方面

关于黄土的成因,以往国内外曾有多种学说。经过对我国华北、西北地区的沙尘暴研究,发现沙尘的矿物成分和形态类似于黄河中游黄土的矿物组成,从而为黄土风成说提供了有力的现代科学依据。

通过地貌学的研究认识到,在不同的自然、地质条件下所形成的地形、地貌不同,不同地貌单元上的黄土性质也不同。只有对相同地貌单元的黄土资料进行分析整理,才可能得出其变化规律,这已成为共识。

黄土的垂直剖面、平面分布和其沉积的时间尺度合起来,可看作四维坐标系。

从垂直剖面来看,一个完整的黄土地层自下而上, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 依序排列,如图 1-1 所示。相应地推出三个标准剖面,分别为:

北京斋堂盆地的马兰黄土(Malan loess), Q_3 ;

山西离石县王家沟陈家崖的离石黄土(Lishi loess), Q_2 ;

山西隰县午城镇柳树沟的午城黄土(Wucheng loess), Q_1 。

这些剖面可供鉴别、比较各地黄土特性之用,起到了标本作用,为学术研究和交流工作奠定了基础。

从平面分布来看,我国黄土具有明显的地带性分布规律,自西北而东南,马兰黄土(Q_3)厚度趋于变小,颗粒组成由粗变细, $CaCO_3$ 含量由多变少,物理力学性质不断增强,湿陷性变弱。据此可将其划分为三个带,即自西北向东南,依次为砂黄土、黄土和粘黄土,北纬 36°线是划分

砂黄土和黄土的分界线。我国黄土分布图如图 1-2 所示。

洛川阳术北谷村刘家河剖面

图 1-1 黄土地层层序

1-亚砂土;2-黑垆土;3-钙质结核;4-粉砂层;5-午城黄土;6-三叠纪砂页岩;
7-亚粘土(混合层);8-马兰黄土;9-古土壤(或风化层);10-离石黄土;11-红粘土

从时间尺度来看,展示在我们面前的便是 240 万年以来,黄土是如何堆积而达到 200m 左右的厚度,又是如何经历了各种瞬变地质事件(地震、滑坡)、缓变地质事件(冲刷侵蚀和淤积、断裂蠕动、湿陷沉降)形成为如今的千沟万壑的地形地貌。这既是各种因素综合作用的结果,也是未来地表变迁的基础或起点。

裸露于地表之上的公路为带状工程构造物,长度以数十、数百公里计,其工作状态受到大气、地质地貌环境的制约。这就迫使建设者须从宏观上将公路工程和环境工程、水土保持工程相结合,从根本上防止公路沿线黄土侵蚀切割的发展。

二、黄土构造物的强度变形及稳定性方面

为了保证黄土路基的稳定,设计部门提出了工程地质比较与考虑垂直裂隙影响的与力学验算相结合黄土边坡设计方法和图表,并在建设中得到了广泛的应用,在公路路基设计规范和铁路路基标准图中也已有所反映。

通过对黄土高路堤土的密度、湿度状态及路堤强度与坡度关系的调查分析、黄土路基地表水的处理、黄土路基病害与水土流失综合防治等所进行的研究,得知在确保达到规定的填土密实度的情况下,入渗和冲刷是影响稳定性的两个主要因素。对坡面、边沟进行防护,将边沟水和涵洞出水安全地汇到沟底,并采取措施防止沟头发展是极其必要的。然而,由于受到投资的限制,这项工作往往做得不够彻底,以致事倍功半。

黄土高路堤的变形问题已由铁道部门和公路部门做过长时期的调查分析、沉降观测以及土工离心模型试验研究。但是,对路堤的总沉降量和工后沉降“目前尚无合理的理论计算方法”,而湿陷性黄土地基上的竣工后沉降又是“不可略而不计”。

对于建筑物,根据其重要性、地基受水浸湿可能性的大小和使用上对不均匀沉降限制的严格程度,分为甲、乙、丙、丁四类。其设计措施又分为三种,即:a.地基处理(消除地基的全部或部分湿陷量,或将基础穿透全部湿陷性土层);b.防水;c.结构调整。

湿陷性黄土地基的湿陷等级,系根据基底下各土层累计的总湿陷量和计算自重湿陷量的

大小等因素来判定。计算自重湿陷量大于 7cm,即为自重湿陷性场地。在计算中,有一个因土质地区而异的系数 α_0 ,对陇东陕北地区 α_0 取 1.2,对冀鲁地区、山西地区 α_0 取为 0.5。

对高等级公路如何划分构造物的类别;宣大公路沿线的黄土宜于划入哪个分区, α_0 取多大,都是有待解决的问题。

根据湿陷系数(δ_s)作出黄土分区略图和中国湿陷性黄土工程地质分区略图,如图 1-3、1-4 所示。公路设计规范中黄河中游黄土分区图如图 1-5 所示。图 1-5 中未包括河北省西北部的大片黄土地区。

图 1-3 根据湿陷性(δ_s)黄土分布略图

根据湿陷系数(δ_s)黄土分区略图(据翟礼生,1983;郑晏武,1982)

1-分区界线;2-次生黄土;3-马兰黄土;4-午城—离石黄土;5-基岩

三、黄土地基湿陷性处治技术方面

地基处理技术已有换填(砂砾、灰土)、预浸水、土或灰土挤密桩、强夯、高压喷射注浆(旋喷、粉喷、注浆)等多种,均系成熟技术,已纳入建筑物地基处理技术规范中。但对于高等级公路的大面积处理,因工期限制、造价控制及更高的处理质量等要求,以上技术的适用性尚需实践及论证。冲击压实机在香港新机场应用成功,但其在黄土路基的填前碾压和振碾后的补压效果以及消除湿陷性的有效深度有待验证,提高压实工效的倍数也需要核实。

采用严格的防水措施是必要的也是可能的。实践证明,复合土工薄膜是一种颇为理想的新型防渗材料。它是在工厂将土工薄膜基材(如聚氯乙烯 PVC)和土工织物制成整体结构,既提高了单一土工薄膜的抗拉、抗撕裂、抗顶破及抗穿刺等力学强度及其变形模量,又易于改善单一土工薄膜的受力状态和工程特性。国内已将该材料成功地应用于土石坝工程防渗设计中。根据南京水利科学研究院于 1999 年对浙江锦达土工合成材料公司生产的 TGM - 3 复合土工薄膜进行了试验,其法向渗透系数为 $(1.0 \sim 1.2) \times 10^{-12} \text{ cm/s}$,远比粘土和混凝土的渗透系数小。

复合土工薄膜具有一定的弹塑性变形,可适应土体的沉陷、胀缩、偶然的超载、滑坍和渗漏所造成的变形,可铺设于坡比不陡于 1:1 的边坡之上,为宣大高速公路的广泛应用提供了可能。

第二节 宣大高速公路黄土的分布、地层、岩性及其湿陷性评价

一、沿线黄土的分布、地层及粒径级配

宣大高速公路(河北段)自西向东,依次经过阳原盆地、花报梁山区、深井盆地、五虎山区和宣化盆地。除了花报梁山区外,其余均有黄土分布。

三个盆地的地貌单元为山前微丘和河谷阶地,其地貌景观如图 1-6 所示。

图 1-6 宣化黄土山间、盆地地貌景观

1. 沿线黄土的分布及其工程地质特性

根据勘探资料,对沿线黄土的分布及其工程地质特性综述如下:

阳原盆地, K13 + 052 ~ K18 + 338, 低阶地, 湿陷土层厚度 1.2 ~ 5.0m, 地下水位深 5.8 ~ 7.5m, 天然含水量 6.3% ~ 15.9%, 干密度 1.277 g/cm^3 , 孔隙比 0.581 ~ 1.058, 湿陷系数 s_w 为 0.031 ~ 0.116, 自重湿陷系数 s_{zs} 为 0.014 ~ 0.035, 允许承载力 160kPa, 极限摩擦力 30kPa, 总湿陷量 6.84 ~ 46.65cm, 定为 I-II 级非自重湿陷性黄土。

阳原盆地, K32 + 180 ~ K33 + 920, K38 + 400 ~ K39 + 730, 平原微丘, 黄褐色亚粘土, 大孔隙, 节理发育, 10 ~ 15m 内未见地下水, 天然含水量 9.1% ~ 15.8%, 天然密度 $1.43 \sim 1.56 \text{ g/cm}^3$, 孔隙比 0.832 ~ 1.111, 压缩系数 a_{1-2} 为 $0.37 \sim 1.77 \text{ MPa}^{-1}$, 压缩模量 1.19 ~ 6.11MPa, 允许承载力 180kPa。

深井山间盆地, K83 + 240 ~ K97 + 820, 湿陷性土层厚度 3.0 ~ 7.0m, 10 ~ 25m 内未见地下水, 天然含水量 15.4% ~ 24.2%, 孔隙比 0.90 ~ 1.313, 压缩系数 $0.38 \sim 1.72 \text{ MPa}^{-1}$, 允许承

承载力 130 ~ 200kPa, 极限摩擦力 50kPa, , 自重湿陷系数 0 .020 ~ 0 .052, 总湿陷量 7 .5 ~ 65 .7cm, 计算自重湿陷量 2 .9 ~ 3 .80cm, 定为 I - II 级非自重湿陷性黄土。

五虎山重丘区, K97 + 820 ~ K106 + 566, 湿陷土层厚度 2 .7 ~ 5 .5m, 15 ~ 30m 内未见地下水, 孔隙比 0 .862 ~ 1 .262, 压缩系数为 0 .17 ~ 0 .80MPa⁻¹, 湿陷起始压力 56 ~ 200kPa, 湿陷系数 0 .015 ~ 0 .067, 总湿陷量 15 .0 ~ 30 .0cm, 定为 I 级非自重湿陷性黄土。

宣化山间盆地, K114 + 000 ~ K121 + 995, 湿陷土层厚度 1 .2 ~ 7 .2m, 8 .0 ~ 30 .0m 内未见地下水, 天然含水量 7 .8% ~ 23 .4%, 压缩系数 0 .12 ~ 0 .52MPa⁻¹, 湿陷系数 0 .015 ~ 0 .091, 总湿陷量 10 .89 ~ 32 .72cm, 计算自重湿陷量 1 .47 ~ 6 .29cm, 定为 I - II 级非自重湿陷性黄土。

洋河二级阶地, K124 + 362 ~ K126 + 912, 湿陷性土层厚度 3 .5 ~ 6 .5m, 2 .4 ~ 8 .0m 内未见地下水, 天然含水量 13 .3% ~ 21 .4%, 压缩系数 0 .21 ~ 0 .47MPa⁻¹, 允许承载力 130 ~ 170kPa, 极限摩擦力 50kPa, 湿陷系数 0 .016 ~ 0 .068, 总湿陷量 12 .18 ~ 49 .35cm, 计算自重湿陷量 2 .32 ~ 4 .16cm, 定为 I - II 级非自重湿陷性黄土。

上述各段中, 湿陷性最强烈的地段是深井山间盆地, K83 + 240 ~ K97 + 820, 其总湿陷量达 65 .7cm, 这是由于湿陷系数达 0 .078, 自重湿陷系数达 0 .052 所致。其它几段, 如五虎山岭重丘区, 湿陷系数达到 0 .067; 宣化山间盆地, 湿陷系数达到 0 .091; 洋河二级阶地湿陷系数达到 0 .068, 但总湿陷量分别为 30 .0cm、32 .72cm、49 .35cm, 计算自重湿陷量均小于 7cm。为了准确地判定宣大路沿线黄土的自重湿陷性能, 有必要进行现场大面积浸水试验。

2. 沿线黄土的地层组成

由勘探资料可知, 在 K57 + 000 ~ K106 + 566 和 K114 + 000 ~ K126 + 912 路段内均有作为第四纪上更新世冲洪积层 (Q_3^{al+pl}) 的亚粘土与砂类土互层, 亚粘土与卵石互层以及黄土层分布, 且直接覆盖在湖积层 (Q_1^l) 和侏罗纪 J_2 (凝灰岩、粘灰岩、砂岩) 之上。在低阶地亦伴有 Q_4^{al+pl} 第四纪全更新世的冲洪积层出现。在五虎山重丘区的路堑、地表上分布有第四纪上更新世的坡积洪积层 (Q_3^{dl+pl})。

勘探资料中所提供的地层柱状剖面图具有一定的代表性。K99 + 490 剖面(表 1-1)表示黄土直接覆盖在凝灰角砾岩之上, 黄土厚度 21 .8m, 4m 以上湿陷系数 0 .040, 以下不具有湿陷性。K106 + 800 剖面(表 1-1)表示钻探未到岩面, 黄土厚度 30 .0m, 在 16 .4m 以上具有湿陷性, 湿陷系数 $s_s = 0 .061 ~ 0 .15$, 其中 16m 处夹有 0 .4m 厚的角砾。K120 + 296 剖面(表 1-1)表示黄土厚 5 .3m, 下卧层为卵石。由此可以看出宣大公路沿线的黄土地层与图 1-1 所示的典型黄土地层很不相似, 这将给工程建设带来不同的影响, 需要逐个具体分析。如下透水的下卧层, 易引起边坡滑坍、流泥; 而含砂层虽有利于排水, 但要采取疏导水流、防护坡面的措施, 以减少剥蚀的扩展。

宣大线土质钻孔一览表

表 1-1

孔号	桩号	标高 (m)	层深 (m)	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	含水量 (%)	土层描述
1	K49 + 490	1 052	0		1 .72	18 .9	新黄土, 黄褐色, 硬塑, 具湿陷性 $s_s = 0 .04$
		1 048	1	4			
		1 026 .2	25 .8	21 .8			新黄土, 不具湿陷性, $s_s = 50$
		1 014 .4	37 .6	11 .8			凝灰角砾岩, 棕红色, 岩芯呈土夹砂砾状, $s_s = 40$
		1 012	40	2 .4			岩芯呈碎块石状, 岩质硬, $s_s = 280$

续上表

孔号	桩号	标高 (m)	层深 (m)	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	含水量 (%)	土层描述
2	K106+800	843.3	0		1.49	11	新黄土,黄褐色,硬塑, $s = 0.061 \sim 0.15$, 16~16.4m为角砾
		817.9	16.4	16.4			
		804.3	30	13.6			
3	K120+296	623.48	0				黄褐色,湿陷性亚粘土,具大孔,湿
		618.18	5.3	5.3			
		615.48	8	2.7			卵石,沉积岩,火成岩,成块状,充填砂
4	K106+830 距浸水试坑 22.5m	834.1	0		1.49	11	黄褐色,半干硬,具湿陷性, $s = 0.061 \sim 0.15$
		822.1	12	12			
		816.5	17.6	5.6			
		804.1	30	12.4			角砾,中密,安山岩,孔隙充填砂
							黄褐土,硬塑,夹少量圆砾
5	K106+830 浸水试坑浸水前	827.1	0				黄褐土,稍裂,硬塑,竖向裂隙,孔隙发育
		820.3	6.8	6.8			
		817.8	9.3	2.5			
		816.6	10.5	1.2			黄褐土,湿,硬塑,孔隙发育,含有零星砾石
6	K106+830 浸水试坑浸水后	827.6	0				黄褐土,湿,可塑,孔隙发育
		821.6	6	6			
		816.9	10.7	4.7			黄褐土,很湿,软塑,可见灰白色的钙质结核
7	K89+333	1132.36	0				黄褐色,湿陷性亚粘土,具大孔隙,垂直节理发育,湿
			5.4	5.4			
		1155.46	6.9	1.6			
							卵石,沉积岩碎块,5~8cm混砂
							黄褐色,亚粘土,混多量卵石及砂,湿

3. 沿线黄土的颗粒级配情况

一般而言,马兰黄土的粉土粒(0.05~0.005mm)含量占60%~90%,大于0.25mm的基本没有,其中粉土粒级是由粗粉粒(0.05~0.01mm)及细粉粒(0.01~0.005mm)组成的。只有当粗粉土粒含量大于50%时,才能称之为黄土,小于50%时为黄土类土。

宣大公路沿线部分钻孔的黄土颗粒级配如表 1-2 所列。

宣大公路沿线黄土的颗粒级配情况

表 1-2

序号	里程桩号	钻孔编号	取土深度 (m)	粒 径(mm, %)						
				2.0~	0.5~	0.25~	0.074~	0.05~	0.01~	<0.002
1	K9+571	40-1	1.5~1.8	3	2	18	18	29	11	19
2	K10+475	42-2	2.5~2.65		3	8	11	22	22	34
3	K13+715	51-1	1.5~1.65				3	38	30	29
4	K14+586	53-1	1.0~1.15	10	6	19	12	13	10	20
5	K19+894	68-1	0.6~0.75			28	13	27	11	21
6	K20+430	70-1	1.0~1.15	1	6	20	26	36	4	7

续表 1-2

序号	里程桩号	钻孔编号	取土深度 (m)	粒 径(mm, %)				
				2.0~0.5	0.5~0.25	0.25~0.074	0.074~0.002	<0.002
7	K89+333	104-1	2.0~2.15		2	7	78	13
8		104-2	3.5~3.65	1	1	10	74	14
9		104-3	4.5~4.65	1	1	10	78	14
10	K89+972	106-1	2.0~2.15			7	85	8
11		106-2	4.5~4.65	2	1	8	71	18
12	K90+472	108-1	2.0~2.22			8	83	9
13		108-2	4.0~4.22			8	82	10
14	K99+800	132-1	1.0~1.15			9	80	11
15	K101+370	135-1	2.0~2.15		1	7	83	9
16	K114+000	200-1	2.6~2.75			7	83	10
17	K114+332	201-1	1.50~1.65		25	41	24	10
18		201-2	2.90~3.05		5	21	59	15
19	K115+760	204-1	2.00~2.15	3	3	11	62	21
20		204-2	3.40~3.55		2	56	34	8
21	K116+900	205-1	1.20~1.35			4	79	17
22		205-2	3.40~3.55			10	64	26
23	K116+532	206-1	1.30~1.45			7	73	20
24		206-2	2.60~2.75			11	69	20
25		206-3	3.80~3.95			15	72	13

续上表

序号	里程桩号	钻孔编号	取土深度 (m)	粒 径 (mm, %)				
				2.0 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.074	0.074 ~ 0.002	< 0.002
26		206 - 4	6.00 ~ 6.15	3	13	40	33	11
27	K116 + 900	207 - 1	1.50 ~ 1.65		7	12	61	20
28	K117 + 400	208 - 1	1.85 ~ 1.95			10	76	14
29		208 - 2	3.50 ~ 3.65			11	75	14
30		208 - 3	5.00 ~ 5.15	3	7	20	56	14
31		208 - 4	6.50 ~ 6.55			12	78	10
32	K118 + 493	212 - 1	1.50 ~ 1.65		1	9	76	14
33	K118 + 543	213 - 1	1.50 ~ 1.65			11	74	15
34		213 - 2	3.00 ~ 3.15	5	14	31	40	10
35	K120 + 296	223 - 1	1.80 ~ 1.95	2	14	46	29	9

从表 1-2 可知, 序号 1 ~ 6 为阳原盆地内的土样, 其粗粉粒 (0.05 ~ 0.01mm) 的含量仅为 13% ~ 38%, 小于 50%, 属于黄土类土。

序号 7 ~ 15 在深井盆地和五虎山区内, 其粉土粒 (0.074 ~ 0.002mm) 含量为 71% ~ 85%, 大于 0.25mm 的仅为 0 ~ 3%, 基本上没有。

序号 16 ~ 35, 处于宣化山间盆地内, 粉土粒 (0.074 ~ 0.002mm) 含量为 24% ~ 83%, 其中有 10 个样品, 大于 0.25mm 的砂粒没有, 粉土粒 (0.074 ~ 0.002mm) 达到 60% 以上。这些都符合一般情况。其余 10 个样品, 大于 0.25mm 的占 2% ~ 25%, 细砂粒 (0.25 ~ 0.074mm) 的含量达 11% ~ 56%, 粉土粒 (0.074 ~ 0.002mm) 含量不到 60%, 粘粒 (< 0.002mm) 为 8% ~ 20%, 具有砂黄土的特征。

根据研究, 北纬 36 线以北的黄土在砂黄土带内, 此带分布在海原、环县、专丹、绥德、五寨以北, 北与毛乌素沙漠接壤。砂黄土中细砂含量为 23% ~ 72%, 粘粒为 7% ~ 20%, 胶结形式为接触式, 胶结物为薄膜状, 孔隙度为 46% ~ 50%, 粘聚力仅 12.8kPa, 比较疏松, 这些性质决定了砂黄土极易受侵蚀。

表 1-2 试验资料说明, 宣大公路虽位于北纬 40° 附近, 在砂黄土 36 线以北, 但仅有部分地段的黄土属砂黄土, 大部分地段仍为黄土。

二、天然黄土和冲击压实黄土结构的微观分析

1. 微观分析的目的

如前一节所述, 黄土以粗粉粒为主体, 占 50% 以上, 细砂粒有 10% ~ 15%, 这种由砂—粉砂颗粒组成的结构单元是非常松散的三维结构, 如图 1-7 所示。颗粒之间是互相分离的, 仅由胶结物连在一起, 胶结物由粘粒、有机质、CaCO₃ 等组成, 其间的孔隙则包括肉眼可见的大孔

隙、架空孔隙和粒间缝隙。这种结构是宏观不均匀的,当外部作用静水压力时,其内部受到压缩和剪切应力,使结合物受到压缩、剪切和扭转力的作用,发生湿陷变形。因此,要研究黄土湿陷性的规律,仅靠颗粒分析是不够的,尚需进行微观结构分析。

为了对宣大公路黄土的微观结构有所了解,也为了探讨冲击压实后,不同深度处的黄土微观结构有什么变化,在 K106 + 830 处取了天然状态和冲击压实黄土样品各 2 组,深度为 0.3m、0.6m。微观分析工作委托中国科学院地质研究所进行。

2. 手标本的描述

(1) 99 - 1 号样品(天然状态,深度 0.3m)

灰黄—浅灰黄色,风干土松散,用手轻捏即碎,粉砂感强,颗粒较均匀,多孔,肉眼可见大量直径小于 0.5mm 的细孔,大孔直径可达 1 ~ 3mm,可见细小的植物根系,土样遇水即迅速全部崩解。

(2) 99 - 3 号样品(天然状态,深度 0.6m)

灰黄—黄褐色,比 99 - 1 号深,风干土松散,用手很容易掰开,轻捏即碎,粉砂感强,没有明显砂粒,颗粒较均匀,多孔,主要为小于 0.5mm 的小孔,未见植物根系,遇水迅速崩解。

(3) 99 - 2 号样品(冲击压实,深度 0.3m)

灰黄—黄褐色,比 99 - 1 号稍深,有白色斑点,其直径 0.5 ~ 1.0mm,致密坚硬,用手不易捏碎,粉砂感强,颗粒较均匀,肉眼看不到明显孔隙,浸水后立即开始从外向内崩解,速度较慢。

(4) 99 - 4 号样品(冲击压实,深度 0.6m)

黄褐色,可见 0.5mm 黑褐色斑点,较致密坚硬,但比 99 - 2 号松软,用手可以掰开,粉砂感强,颗粒较均匀,肉眼难见明显孔隙,遇水即崩解,但崩解速度比 99 - 2 号快。

按孔隙、坚硬程度和遇水崩解速度,将 4 个样品排列如下:

孔 隙	坚硬程度	浸水崩解速度
多 少	软 硬	快 慢
99 - 1 99 - 3	99 - 1 99 - 3	99 - 1 99 - 3
99 - 4 99 - 2	99 - 4 99 - 2	99 - 4 99 - 2

这表明,天然状态黄土,0.6m 深处的比 0.3m 处的好;而冲击压实土则相反,0.6m 深处的不如 0.3m 处的。这完全符合现场实际情况。

3. 偏光显微镜分析结果

在偏光显微镜下对各样品 0.3mm 厚的薄片进行微形态和微结构的观测和统计,显微镜放大倍数一般为 40 ~ 200 倍,有时大于 200 倍,主要观测内容包括:

- (1) 碎屑矿物: 主要矿物种类、含量、颗粒大小和形态;
- (2) 胶结物: 聚集体形态和分布;
- (3) 孔隙: 大小、分布和类型;
- (4) 显微结构类型等等。

分析结果如表 1-3 所列。

图 1-7 黄土微观结构示意图