

陇东黄土与工程论丛

主 编
刘万锋

甘肃省高校黄土工程性质及工程应用省级重点实验室

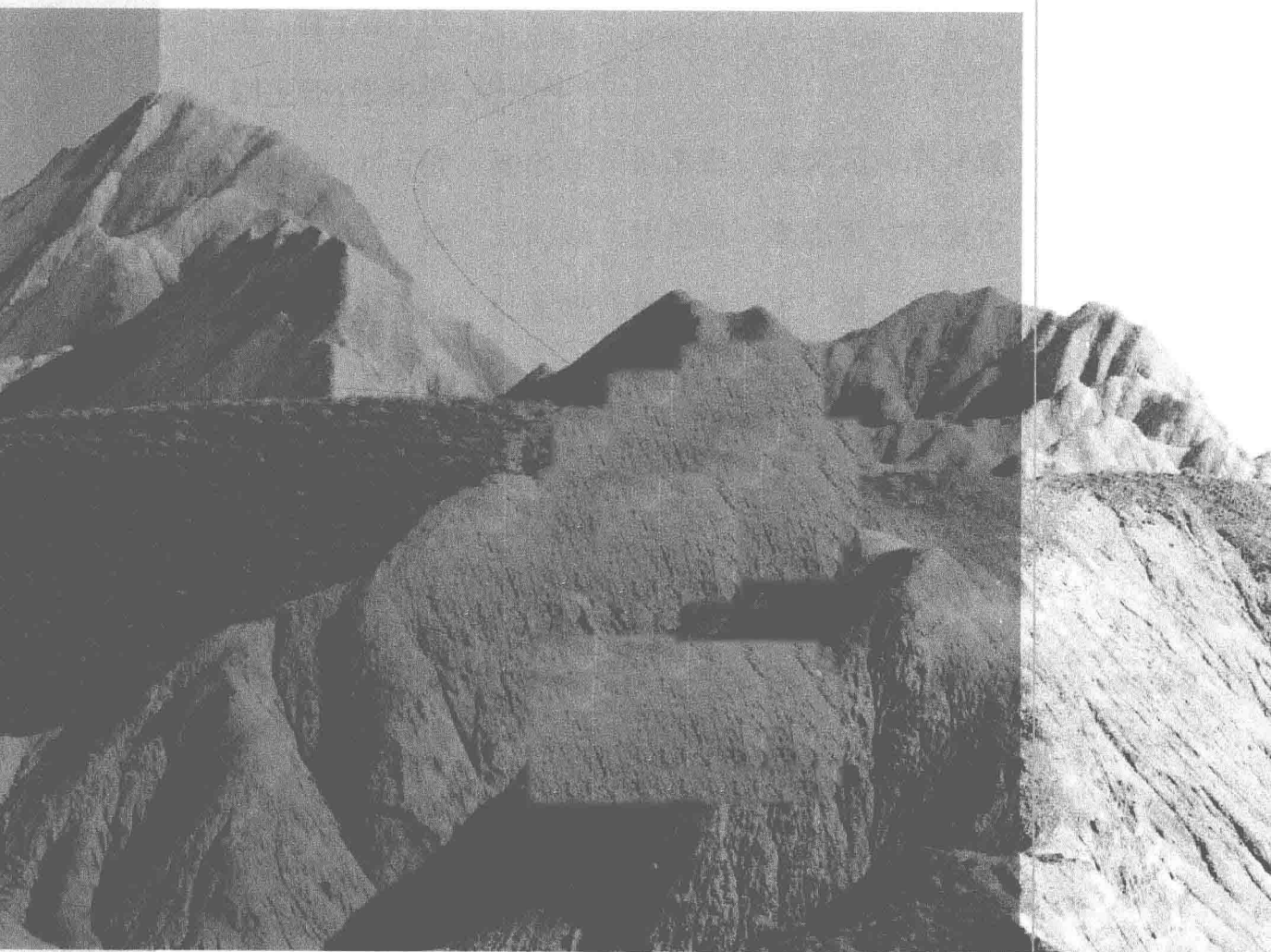


西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

陇东黄土与工程论丛

主 编
刘万锋

甘肃省高校黄土工程性质及工程应用省级重点实验室



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

陇东黄土与工程论丛 / 刘万锋主编. —西安: 西安交通大学出版社, 2018. 3(2018. 8 重印)
ISBN 978-7-5605-9844-4

I. ①陇… II. ①刘… III. ①黄土区—工程地质—研究—甘肃 IV. ①P642. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 165414 号

书 名 陇东黄土与工程论丛
主 编 刘万锋
责任编辑 车向东 贺彦峰

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 北京虎彩文化传播有限公司

开 本 880mm×1230mm 1/16 印张 16.375 字数 397 千字
版次印次 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 8 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-9844-4
定 价 108.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

版权所有 侵权必究

《陇东黄土与工程论丛》编委会

主 任:刘万锋

副主任:张多勇、胡爱萍

委 员:刘万锋 张多勇 朱彦鹏 张虎元 李并成 张 勃
王 旭 米海珍 胡爱萍 李志军 张振宁 周茗如
王秀丽 杜永峰 孙 波 王 博 张斌伟

/ 序言 /

我国黄土高原地区,是西部大开发的主战场、我国重要的农牧业和能源化工基地、“一带一路”战略布局的核心地带,同时,也是地球上黄土分布最集中、面积最大的区域,更是世界上水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区之一。

庆阳地处黄土高原核心区,市区所在的董志塬是世界上面积最大、土层最厚、保存最为完整的黄土塬面,被称为“天下黄土第一塬”。但由于历史和现实的各种原因,庆阳黄土塬面临着土壤侵蚀、生态环境脆弱、黄土地质灾害频发等问题。鉴于庆阳黄土在中国乃至全球黄土研究中的典型性和重要性,2016年8月13日至15日,中国科学院地球环境研究所、长安大学、庆阳市委、庆阳市政府、西北大学和兰州大学等多家单位联合举办了“2016中国黄土论坛暨国际黄土研讨会”,6位中科院院士、工程院院士领衔者在内的,包括近百位来自国内外的黄土地质研究领域的专家学者云集老区,共同探讨研究了黄土环境变化与可持续发展的问题。

甘肃省高校“黄土的工程性质及工程应用”省级重点实验室始建于2014年12月,依托陇东学院土木工程学院和陇东学院土木工程省级实验教学示范中心建立。截至目前,重点实验室具有教授或正高级工程师18人,副教授和高级工程师15人,其中具有博士和硕士以上学位研究人员23人,依托该重点实验室获准国家自然科学基金、甘肃省自然科学基金和甘肃省科技支撑计划等省部级以上项目十多项,项目研究经费总计突破500万元。目前该重点实验室具有了以下几个研究方向:(1)陇东黄土的工程性质研究;(2)黄土基坑与边坡支护理论研究及应用;(3)黄土地基处理技术应用研究;(4)黄土工程生态防护及工程后景观设计。在“2016中国黄土论坛暨国际黄土研讨会”上,张多勇教授、张斌伟副教授和张建香讲师代表甘肃省高校“黄土的工程性质及工程应用”重点实验室发表了题为《清代同治年间陕甘回汉冲突与子午岭次生林的形成》、《甘肃庆阳地区黄土滑坡时空特征统计分析》和《陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空格局变化研究》的研究报告,得到了与会专家的高度关注,证明重点实验室在近期内取得了较为显著的研究成效。

在此次大会上,中国科学院安芷生院士和周卫健院士同意依托甘肃省高校“黄土的工程性质与工程应用”重点实验室建立陇东学院院士工作站。该院士工作站的建立将极大促进重点实验室后续研究工作的开展,为将该实验室建设成为国内重要的黄土工

程与黄土环境研究基地打好基础。

黄土工程与黄土环境是十分复杂的综合性课题,陇东学院和甘肃省高校“黄土的工程性质与工程应用”重点实验室地处我国黄土高原腹地,具有相当的地域优势和研究条件,为总结黄土领域的最新研究成果,提升陇东乃至我国黄土工程与黄土环境的研究水平,本着学术交流与思想碰撞的精神,重点实验室组织相关研究人员编撰本论丛,以期对我国黄土工程与黄土环境的研究起到抛砖引玉之效。

本论丛围绕黄土力学与工程性质研究、黄土地基处理技术应用研究、黄土基坑与边坡支护理论及应用、黄土地区桩基础承载性能研究、黄土地质灾害成因与防治和黄土生态环境变化与资源利用改造等五个专题开展了深度探讨和广泛交流。

本论丛既是引进先进科学理念推进黄土工程与黄土环境综合协调的重要举措,也是推动生态文明建设和绿色可持续发展的现实需要,更是面向社会公众普及黄土领域最新研究成果的有益尝试。希望通过本论丛,集百家之长、聚内外之智,找到黄土地区工程建设、生态环境与可持续发展之间的平衡路径,促进国内外黄土领域最新研究成果的交流沟通,切实推动全国特别是陇东黄土研究事业持续健康快速发展。

本论丛顺应了全球共同应对气候变化的大趋势,契合我国全面推进绿色发展的新理念,也完全对接了庆阳市实施“再造一个子午岭”、固沟保塬和资源开发区生态治理三大系统工程,倾力打造黄土高原生态安全屏障和生态文明示范区。同时,本论丛必将进一步深化人们对黄土工程与黄土环境的认知,对加快黄土工程性质研究和黄土生态文明建设,探索新方向,提供新指导。

本论丛研究成果大多系首次公开,对于黄土工程与黄土环境相关领域研究肯定有诸多不足甚至谬误之处,敬请读者批评指正。

刘万锋 教授

甘肃省高校“黄土的工程性质与工程应用”

重点实验室主任

陇东学院土木工程学院院长

2016年12月于甘肃庆阳

/ 目录 /

第一章 黄土力学与工程性质研究

陇东黄土的工程性质及微观结构特征	张虎元	朱江鸿	邵显显	韩淑娴	王喜安/2
陇东地区大厚度黄土结构性微观研究	周茗如	刘万锋	卢国文/12		
基于常规三轴试验的陇东黄土力学特性与分析	张斌伟	刘万锋/19			
试论湿陷性黄土力学与工程研究中的若干新趋向	李平	董芸秀/27			
工程中黄土增湿特性研究的应用	苏星	李平/32			
郑西客运专线改良黄土工程特性试验的模糊聚类分析	杜婷/37				

第二章 黄土地基处理技术应用研究

基于有限元分析的抗疏力复合地基承载特性研究	刘万锋	杨永东/46			
陇东黄土塬区某办公楼地基处理与检测	胡爱萍/52				
灰土挤密桩法在湿陷性黄土地基处理中的应用	王博/58				
基于孔内深层强夯法的湿陷性黄土地基处理	梁淑红/64				
黄土地区 CFG 桩复合地基中褥垫层作用机理研究	刘莉萍/73				
软土地基加筋的综合应用研究	闫铁成/80				
北赵引黄工程湿陷性黄土地基分析及处理措施	吕圆芳/87				
浅析湿陷性黄土地区地基下沉原因及处理方法	陈香凤	徐建军/93			
陇东湿陷性黄土地基的工程处置案例分析	滕尊莉/98				
CFG 桩在陇东黄土地区高层建筑中的应用研究	张兴元	王博/103			
深厚黄土地基沉降预测方法及工程实例分析	王进玺	王博	王克印/110		

第三章 黄土基坑与边坡支护理论研究及应用

黄土高边坡柔性支挡结构的分析与设计综述	朱彦鹏	周勇	董建华/120		
黄土地区深大基坑支护形式及变形监测分析	郭建博/141				

第四章 黄土地区桩基础承载性能研究

单桩与单桩承台下桩基静载试验对比研究与分析	朱彦鹏 卢 彬 包泽学 董芸秀/148
黄土场地桩基负摩阻力的研究进展	董芸秀 杨永东 李 平/159
黄土地区桩的荷载传递规律及影响因素	曹李祥/166

第五章 黄土地质灾害成因与防治

黄土沟壑区地质灾害时空分布特征	高峙南 刘万锋 张建香 李旭升/172
陇东地区黄土地质灾害特性及防治措施研究	杨 阳/181
叠置分析方法应用于黄土地区公路地质灾害区划	王 昀/187

第六章 黄土生态环境变化与资源利用改造

黄土高原节能住宅全寿命周期费用影响因素仿真研究	王恩茂/194
鄂尔多斯盆地旧石器与黄土地层对照	张多勇/203
黄土高原水土流失强度空间变化及原因分析	张建香/222
黄土高原耕地变化过程及原因分析	王 东/229
陇东地区黄土窑洞在新形势下的空间改造初探	张耀珑/237
庆阳黄土窑洞保护与发展研究	李旭升 高峙南 张建香/243

第一章

黄土力学 与工程性质研究

陇东黄土的工程性质及微观结构特征

张虎元^{1,2}, 朱江鸿¹, 邵显显¹, 韩淑娴¹, 王喜安¹

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省高校黄土工程性质及工程应用省级重点实验室, 甘肃 庆阳, 745000)

摘 要:本文在介绍陇东地区黄土分布、地质地貌、气候等区域地质条件的基础上,通过基本土工试验、扫描电镜及压汞试验,定量分析了陇东黄土的物理力学性质以及微观结构特征。结果表明,在宏观方面,陇东黄土主要以粉土颗粒为主,含量达65%以上;天然含水量较低,基本在20%以下;一般处于坚硬状态,在浸水饱和时具有较强湿陷性,具有较强的工程地质特点。在微观方面,陇东黄土的骨架颗粒形状较圆,排列方向是随机的,其扁圆度和排列熵都在0.8以上,并且陇东Q₃黄土中的孔隙尺寸较为丰富,孔径集中在2~6 μm 。

关键词:陇东黄土;地质条件;物理力学性质;微观结构

中图分类号:TU444 **文献标识码:**A

Engineering properties and microstructure characteristics of loess in Longdong area

ZHANG Hu - yuan^{1,2}, ZHU Jiang - hong¹, SHAO Xian - xian¹, HAN Shu - xian¹, WANG Xi - an¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000 Gansu China;
2. Provincial Key Laboratory of loess engineering properties and engineering application for universities in Gansu, Qingyang 745000, China)

Abstract: This paper intends to introduce the regional geological conditions of Longdong loess such as loess distribution, geological landform and climate condition, and investigate the physico - mechanical properties and microstructure characteristics of loess in Longdong. A series of conventional soil test were conducted on Longdong loess to study its physico - mechanical properties. Scanning electron microscope (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP) tests were performed to quantitative describe the microstructure feature of loess soil. Results show that at the macroscopic aspect, Longdong loess is mainly composed of silt

particles which content is more than 65%, and its natural water content is lower than 20%. Longdong loess has low compressibility at its dry condition, and will collapse and exhibit high collapsibility after being wetted. In the microscopic aspect, the particle shape of Longdong loess is round and its arrangement direction is random in terms of the oblate and permutation entropy are all larger than 0.8. The pore size of Q_3 loess in Longdong is diversity, and the dominant pore diameter ranges from $2\mu\text{m}$ to $6\mu\text{m}$.

Key words: Longdong Loess; geological conditions; Physical and mechanical properties; Microstructure

从全球来看,黄土覆盖面积约占地球陆地表面的 10%,主要分布在两种区域:一种是古冰盖的边缘,另一种是荒漠或半荒漠边缘。其中我国黄土分布广泛,面积达 380840km^2 ,分布在长城以南、秦岭以北、祁连山以东、太行山以西黄河中游陕、甘、晋境内^[1]。由于这些地区气候干旱,存在丰富的碎屑物,在强大的反气旋作用下,许多细小物质被气流带到荒漠外缘地区沉积下来,从而形成丰富的黄土^[2]。

陇东地区位居甘肃省东部,主要是指六盘山以东、子午岭以西、泾河以北一带范围,包括庆阳、平凉两个地区,人口约 490 万人。这一广大的地区是西北黄土高原的核心,黄土层发育非常成熟。从 1960 年代开始,刘东生^[3]等学者对本区黄土地层做了系统的研究,取得了丰富的信息与成果。其中张宗祜^[4]专门研究了该地区黄土颗粒之间接触关系、孔隙特征、胶结物质及胶结特征等,阐明了黄土类土显微结构类型的地区性规律。本文在分析陇东地区地质条件的基础上,通过基本土工试验、电镜扫描和压汞试验,定量分析黄土的物理力学性质和微观结构特征。

1 陇东地区的区域地质条件

1.1 黄土的分布

陇东地区位于华北地台的鄂尔多斯台向斜中部,地层系统属华北地台的一部分,其黄土地层分布广泛,发育良好,土层厚达 150 ~ 200m,连续延展分布,垂直结构良好。陇东黄土由上至下分述如下:

(1) 次生黄土

次生黄土又名“黄土状土”, Q_4 时期形成,是由冲积、洪积、坡积、残积而形成的粉状沉积物。该地区南部次生黄土较薄,一般 2.0m 左右;北部次生黄土较厚,一般 5.0m 左右。颜色呈灰黄、浅褐、黑灰,常相杂或相间;土质不均、松散,有的具有轻微层理,层面上有砂粒;多虫孔,最大直径 0.5 ~ 2cm,有植物根,结构松软。此层黄土具有强湿陷性及高压缩性。

(2) 马兰黄土

马兰黄土又名“新黄土”, Q_3 时期形成,是最晚生成的原生黄土,覆盖在老黄土的面层。该地区马兰黄土厚度 7.0 ~ 30.0m 不等,其底下的第一层埋藏古土壤厚约 3.0m。颜色呈浅黄、灰黄、黄褐,土质软,均匀,大孔发育,具垂直节理,稍密至中密,具有一定的湿陷性。陇东地区南部马兰黄土相对北部较厚。

(3) 离石黄土

离石黄土又名“老黄土”, Q_2 时期形成,期间有显著不整合现象,分为上、下量部分。上部灰黄色,有白色钙质粉末及菌丝;块状结构;大孔退化,仅有少量大孔;土质较均匀,较紧密;有古土壤 4 ~ 5 层,

间距 3 ~ 5m;姜石小而少,零星分布,在古土壤有薄层分布。下部棕红色;稍湿;中密,坚硬 ~ 硬塑;有十余层古土壤,顶部有时连续分布,深红色;姜石大面多,料径 10 ~ 20cm,古土壤下层分布。

(4) 午城黄土

午城黄土又名“古黄土”, Q_1 时期形成。颜色呈微红、深棕、棕红,不具大孔,土质紧密坚硬,柱状节理不发育,不见层理,姜石多呈钙质胶结层分布。其中古土壤密集,但界限不清晰,呈棕红色。

1.2 地质地貌特征

陇东地区的地质构造为中国北方华北地台大地构造单元,属于内陆新华夏系统沉积带的构造盆地,区域内整体变化幅度较小,近几个世纪以来基本没有发生大的构造运动,因而黄土地貌呈盆地状展开。经过数千年地质运动和长时间的雨水、河流冲刷,该区以合道川为界,南北部地貌有较大差异。

(1) 在陇东地区南部,地貌以黄土塬为主。黄土塬是陇东黄土高原受现代沟谷切割后,水土流失轻微,保留下来的大型平坦地面,常以地名命名,如有董志塬、早胜塬、屯子塬、平泉塬、西华池、孟坝塬、宫河塬、盘克等大塬十多个,其中董志塬称为“天下黄土第一塬”。以董志塬为例,可知陇东地区南部的地貌特征。

董志塬地处泾水之北,马莲河和蒲河两大河流之间,塬面面积约合 9 万公顷,南北最长处约 110 公里,东西最宽处约 50 公里,黄土层厚度达 150 ~ 200 米。董志塬是由于地板裂变挤压垄起和黄土移动堆积而形成的,距今约二百万年历史,经过地质不断运动和变迁,在第四纪陆地不断抬升,更新世的大风形成厚达百余米的黄土高原,全新世时期由于地表植物覆盖较少,土质疏松,在河流和沟谷急流冲刷下,董志塬塬面支离破碎,塬边沟壑发育,属典型的剥蚀堆积地貌类型^[5]。整个塬面略微向东南倾斜,中间高,东西低,平面的平均坡度是在 5° 以内,一般靠近边缘的坡度较大。

(2) 在陇东地区北部,多条三四级河流构成树枝状、鱼骨状等水系,其中各条河流及其支流的洪水枯水期悬殊很大,形成了各式各样的侵蚀沟。沟谷切穿了整个黄土层,沟层发育在黄土层下面的基岩上,加上区域的重力剥蚀、风力吹蚀、冻融等,将黄土高原分割侵蚀得较为强烈,形成了黄土梁、黄土峁等地貌。在这里,分布着许多平行沟谷的长条状高地,长可达几百米到几公里,宽仅为几十米到几百米,顶面平坦或微有起伏,两侧为深沟;并且常有顶部圆滑、斜坡较陡的黄土小丘成群分布,展现了丰富的丘陵形态。

2 陇东黄土的物理力学性质

由于黄土地层中黄土带颗粒组成、矿物成分、地质年代以及各个地方的温度、湿度等气候条件的差异,陇东地区各地方的黄土物理力学性质有所不同。其中,陇东黄土物理力学性质表现出明显的复杂性,有两种主要因素。首先是含水量,在自然条件下,降水、空气湿度、地下渗水和温度引起的水蒸气流动导致含水量有些不同,而黄土具有较多亲水的可溶性盐类和粘土成分,含水量的微小差异对其性质产生了一些变化。另一重要的因素是时间,黄土体表现出的时间效应包括蠕变变形和松弛,黄土的结构与性质随时间的变化而有所差异^[6]。

本次研究从陇东地区董志塬取 Q_3 马兰黄土试样,采样地点位于甘肃省庆阳市西峰区董志镇冯堡村(见图 2-1)。采用密度计法测定土的颗粒大小及级配情况,烘干法测定土的含水率,蜡封法测定

土的密度,比重瓶法测定土的比重,液塑限联合测定法测定土的液塑限,击实仪法测定土的密度和含水率关系,固结试验测定土的压缩模量,快剪试验测定土的抗剪强度。结合董志塬的马兰黄土试样相关试验数据,与王杰,李朝辉等^[7-10]等学者对陇东地区各个地方黄土物理力学性质研究进行统计分析,得出如下结论。

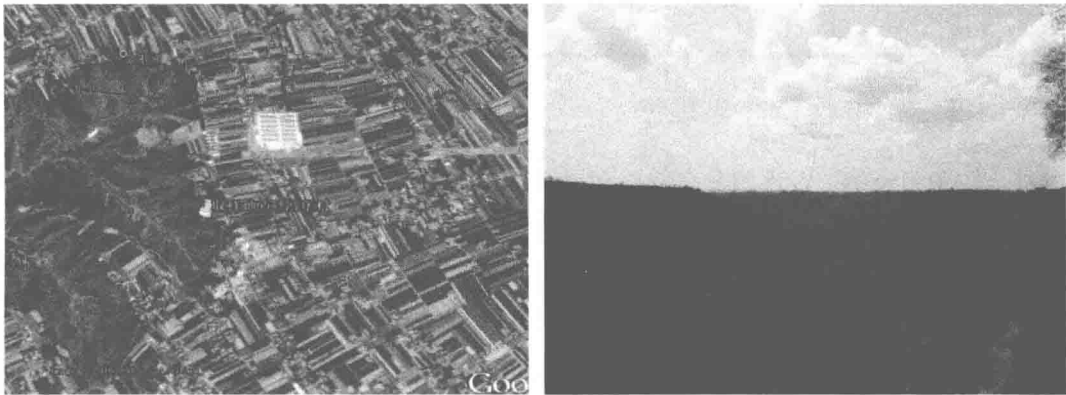


图 2-1 取样地点图

2.1 陇东黄土的性质指标

2.1.1 颗粒组成

陇东黄土,颗粒细,颗粒成分主要是粉土颗粒(5-50m),含量达 65% 以上,粘土颗粒(<5m)及沙土颗粒(>50m)含量较少。见表 2-1。

表 2-1 黄土的颗粒组成统计表

指标	颗粒组成百分比(%)			平均粒径(μm)	有效粒径(μm)
	粒径大小(μm)				
	>50μm	5-50μm	<5μm		
变化范围	5.2~38.20	43.30~79.20	7.40~30.70	18.5~42.6	3.0~19.5
平均值	19.90	67.40	18.60	32.7	8.9

2.1.2 物理性质

陇东黄土天然含水量低,相对孔隙度较大,比重一般在 2.7 左右,垂直节理发育,透水性强,一般处于坚硬状态,具体物理参数见表 2-2。

表 2-2 黄土主要物理性质统计表

指标	含水率(%)	密度(g/cm ³)	比重	孔隙比	饱和度(%)	液限(%)	塑限(%)
变化范围	13.24~20.18	1.42~1.73	2.68~2.73	0.73~1.23	34.21~69.34	28.69~31.32	18.69~21.45
平均值	16.78	1.65	2.71	0.98	48.92	30.10	19.34

2.1.3 力学性质

陇东黄土在天然状态下压实程度较差,土质粘度较强,粘聚力较强,抗剪强度较高,具有较好的工程地质特点。如表 2-3 所示。

表 2-3 黄土力学性质统计表

指标	最优含水率 (%)	最大干密度 (g/cm ³)	压缩系数 (Mpa ⁻¹)	压缩模量 (Mpa)	粘聚力 (Kpa)	摩擦角 (°)	湿陷系数
变化范围	15.40 ~ 17.90	1.81 ~ 1.87	0.12 ~ 0.43	5.29 ~ 20.64	33.70 ~ 24.20	17.40 ~ 27.60	0.032 ~ 0.072
平均值	16.80	1.84	0.27	9.58	29.40	21.90	0.056

2.2 陇东黄土物理性质变化规律

2.2.1 陇东黄土物理性质的分布特点

陇东黄土物理性质指标由西北部向东南部的变化具有一定规律,大致为天然含水率、天然容重、液限、塑性指数等指标由小变大,而孔隙比的变化规律则相反:从东南向西北,天然容重由 1.45g/cm³ 变为 1.70g/cm³,天然含水率由 13.5% 变为 20%,液限由 28.7% 变为 31.2%,塑限由 18.7% 变为 21.5%,孔隙比由 1.2 变为 0.7。从整体上来看,陇东地区黄土物理性质差别并不是很大,并且与陇西黄土的物理指标相近^[7]。

2.2.2 陇东黄土物理性质随深度而变化的规律

随着地层深度增加,陇东黄土的天然容重逐渐增大;比重和深度的关系并不大,一般稳定在 2.7 左右;含水率通常随深度的增加而增加,但由于地下水位、降水量的影响,有一定的差异;孔隙比和饱和度随深度增加而变小;塑性状态指标的变化与深度的变化并没有规律性,没有具体的关系。

3 陇东黄土的微观结构特征

3.1 试验方法

董志塬的黄土层厚度达 150m 以上,塬面面积 910km²,其马兰黄土的微观结构具有很强的代表性。因此对董志塬的马兰黄土试样做扫描电镜试验和压汞试验。

本次扫描电镜试验首先采用 FD-2A 型冷冻干燥机对试样进行冷冻干燥和脱水,并采用日立 E-1010 型离子溅射仪对黄土试样表面镀金,最后通过日本日立公司 SU-1500 型扫描电子显微镜对陇东黄土试样的微观结构进行观察。该显微镜由成像系统、电子束系统和真空系统组成,利用二次电子和背散射电子信号成像来观察样品表面放大的形貌图像,放大倍数可达 5~300000 倍。本次试验对黄土试样分别放大了 300 和 800 倍进行观察。

本次压汞试验采用美国 Quantachrome 公司生产的 PoreMaster-60 型压汞仪。压汞仪主要由低压系统和高压系统两部分组成,可以利用压汞法来测定黄土内部微观孔隙结构。在试验之后,再利用软件 Prowin 软件分析试验结果,得出陇东黄土的孔径分布。

3.2 微观结构形貌

黄土的微观结构指颗粒的大小、形状及其之间的相互排列和相互联系等,一般由土的颗粒骨架、胶结物和孔隙组成。图 3-1、图 3-2 是陇东黄土试样放大 300 倍与 800 倍的扫描电镜照片。从整体来看,陇东黄土是以粒径为 5~50μm 的粗粉粒为主构成颗粒骨架,而细粉粒、胶结物、黏粒和有机质等附着在砂粒表面,特别是聚集在骨架颗粒周围和它们的接触物上,从而由胶结物质包围着,形成了

基质胶结。其中起胶结作用的主要是碳酸盐类、黏粒和有机质等。从放大 800 倍的结构图像上可以看到,土颗粒排列较为松散,形状以棱角状、次棱角状为主;颗粒之间存在许多架空孔隙,孔隙有圆形、方形等形状,孔隙较大,与周围中等颗粒的大小接近,且分布较不均匀。

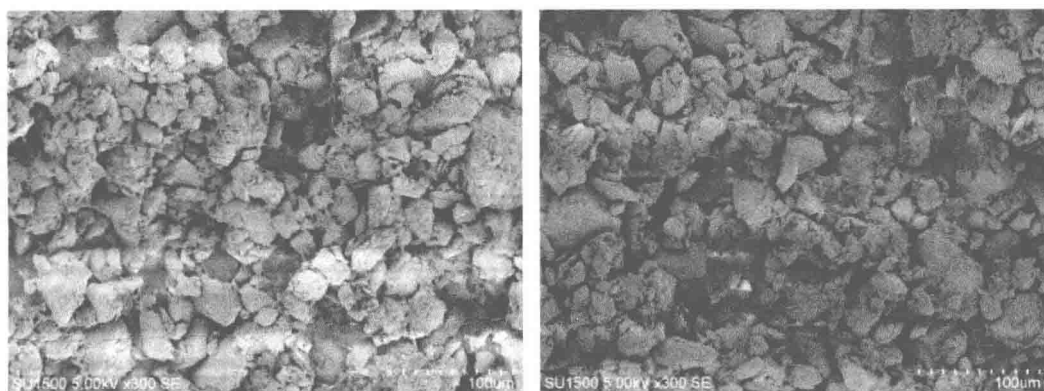


图 3-1 陇东 Q3 黄土 300 倍扫描电镜照片

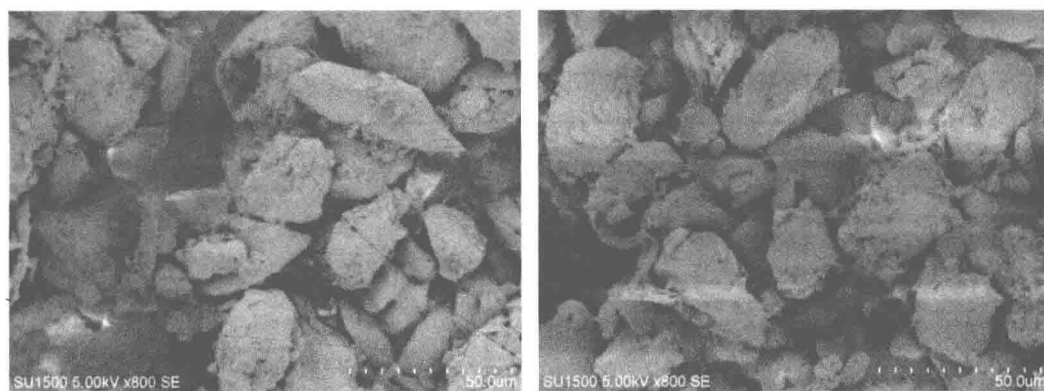


图 3-2 陇东 Q3 黄土 800 倍扫描电镜照片

3.3 颗粒形态定量分析

采用 ImageJ 软件对放大 800 倍的扫描电镜照片进行图像处理,定量分析陇东黄土颗粒大小、颗粒扁圆度和颗粒排列定向性。首先采用软件对扫描电镜照片进行调整对比度、去噪、中值滤波等预处理(见图 3-3);再将扫描电镜照片二值化,调整阈值,选取最佳(见图 3-4);最后分析二值化照片中陇东黄土颗粒的轮廓,获取颗粒面积、颗粒周长、颗粒长短轴的方向等信息。

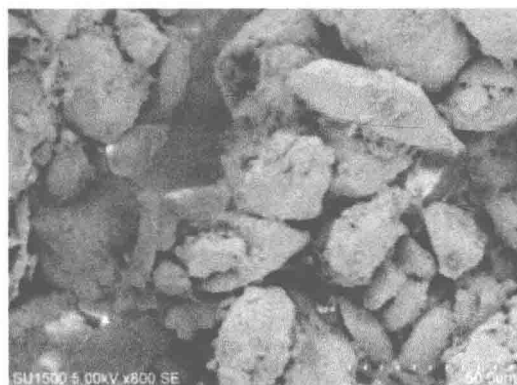


图 3-3 扫描电镜图预处理

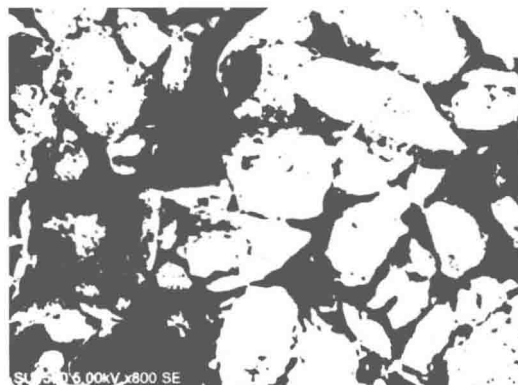


图 3-4 扫描电镜图二值化

3.3.1 颗粒大小

从图 3-5、3-6 可以看出,陇东黄土试样的粒径大致在都在 2~56μm 之间,其中颗粒主要分布在 10~40μm,占 75% 以上,而 <10μm 和 >50μm 的黄土颗粒较少

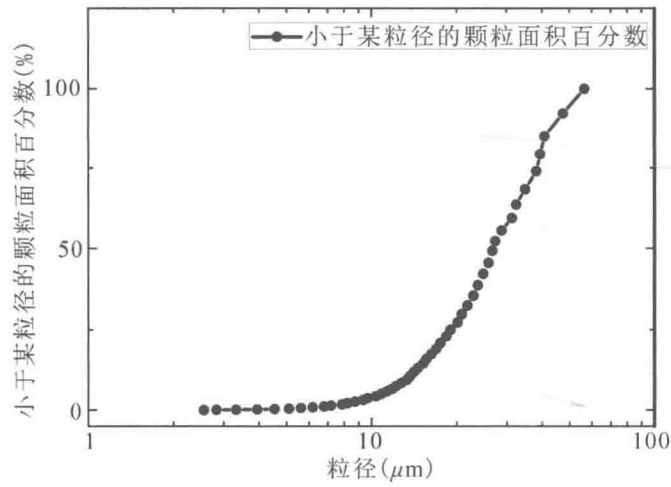


图 3-5 颗粒分布曲线图

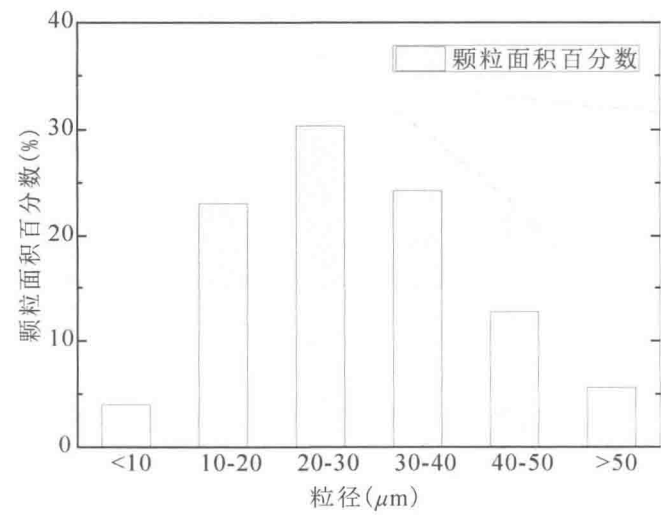


图 3-6 颗粒面积百分数图

3.3.2 颗粒扁圆度及排列的定向性

黄土颗粒的扁圆度,可由公式 3-1^[11] 给出:

$$F = \frac{C}{S} \tag{3-1}$$

式中 C——与颗粒等面积的圆周长;

S——颗粒的周长,

F——颗粒扁圆度,取值范围[0,1]之间,当 F=1 时颗粒形状为圆形;F 取值越小,形状越狭长;当 F 趋于 0 时,颗粒形状趋于直线。

吴义祥^[12]认为在二维条件下,土颗粒的排列混乱度即排列的定向性可以采用排列熵函数来表示。排列熵由公式 3-2 给出

$$E_0 = - \sum_{k=1}^n P(k) \log_n P(k) \tag{3-2}$$

式中, n ——在 $[0^{\circ},360^{\circ}]$ 区间划分的方向区间数;
 $P(k)$ ——颗粒在第 k 区间定向的概率;
 E_0 ——颗粒排列熵,取值范围在 $[0,1]$ 之间,熵值越小表示颗粒及颗粒集合体的排列混乱度越小,熵值越大则颗粒排列越随机; $E_0=0$ 时,颗粒在某一方向完全定向; $E_0=1$ 时,颗粒完全随机排列。

表 3-1 黄土试样颗粒信息

名称	数目 (个)	总面积大小 (μm^2)	平均面积大小 (μm^2)	面积分数 (%)	平均周长 (μm)	平均长轴 (μm)	平均短轴 (μm)	扁圆度	排列熵
陇东黄土试样	276	553577	2005.714	45.1	115.05	19.487	10.178	0.809	0.886

将扫描电镜照片中获取的基本颗粒信息,按照公式 3-1、3-2 进行统计计算,得到陇东黄土试样颗粒平均扁圆度和排列熵,如表 3-1 所示。表中,黄土颗粒的扁圆度和排列熵都在 0.8 以上。这说明,陇东黄土的骨架颗粒形状较圆,排列方向是随机的,并没有特定的方向。

3.4 孔径分布

黄土孔隙的分类有很多种,按照雷祥义^[13]的说法,孔隙可以分为四类,大孔隙的直径大于 $32\mu\text{m}$,面积大于 $804\mu\text{m}^2$;中孔隙的直径范围是 $8\sim32\mu\text{m}$,面积范围是 $50\sim804\mu\text{m}^2$;小孔隙的直径小于 $8\mu\text{m}$,面积小于 $50\mu\text{m}^2$ 。根据以上的分类标准,对陇东黄土的孔隙描述如下。

(1) 孔径分布与累计进汞量的关系

图 3-7 反映了陇东黄土的孔径分布与累计进汞量的关系。在图中,孔径为 $6\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 附近,曲线明显有一转折点;直径为 $2\sim6\mu\text{m}$ 的孔隙时累计进汞量迅速增加,当直径小于 $2\mu\text{m}$ 和直径大于 $6\mu\text{m}$ 的时候,累计进汞量变化较小。这些特点表明,在陇东黄土中,直径为 $2\sim6\mu\text{m}$ 的孔隙较多,即中孔隙最多,大孔隙相对较少,小孔隙最少。

(2) 孔径分布密度

图 3-8 反映了陇东黄土的孔径分布的集中范围。孔径分布曲线是多峰状,分别在孔径为 $0.12\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 左右曲线突出明显,说明孔隙的直径主要集中在这六个范围内。当孔径为 $4\mu\text{m}$ 左右的时候,曲线达到最高点,反映了孔隙在孔径为 $4\mu\text{m}$ 左右的范围内分布集中。而这六个范围与图 3-7 中累计进孔量的突变点基本一致,进一步证明了陇东 Q3 黄土中的孔隙尺寸较为丰富。

4 结论

本文选取陇东的地区 Q₃ 马兰黄土,采用扫描电镜和压汞仪定量分析了陇东黄土颗粒形态及孔隙结构,得到以下结论:

(1) 陇东黄土是以粗粉粒为主构成颗粒骨架,而细粉粒、胶结物、黏粒和有机质等附着在砂粒表面,形成了基质胶结。陇东黄土颗粒排列较为松散,颗粒的扁圆度和排列熵都在 0.8 以上,这说明陇东黄土的骨架颗粒形状较圆,排列方向是随机的,并没有特定的方向。

(2) 陇东黄土颗粒中存在许多大的架空孔隙,孔隙有圆形、方形等形状,孔隙较大,与周围中等颗粒的大小接近,且分布较不均匀;孔径集中在 $2\sim6\mu\text{m}$,其中中孔隙最多,大孔隙和小孔隙相对较少。