

黄泛区 筑路

崔新壮 姚占勇 郭院成 张珂 管延华 著

理论与技术



科学出版社

黄泛区筑路理论与技术

崔新壮 姚占勇 郭院成 著
张珂 管延华

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者多年的研究成果总结。书中系统阐述了黄泛区高速公路冲淤积土地基处理与路基修建中的关键技术及其工程应用。

全书共分九章,内容包括绪论,黄泛区粉土的化学物理和工程特性,黄河三角洲粉土动力特性及微振作用下的物性变异,基于地基动态响应的地基强夯参数确定方法,黄河三角洲水泥土搅拌桩劣化效应及耐久性技术,交通荷载作用下黄泛区低路基累积沉降与控制技术,黄泛区粉土的压实性状与压实技术,黄泛区高填方路基后处理技术及黄泛区路基强度衰变与袖阀管劈裂注浆加固技术。

本书可作为土木工程及相关领域的科研、设计和施工人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黄泛区筑路理论与技术/崔新壮等著. —北京: 科学出版社, 2016
ISBN 978-7-03-048584-7

I. ①黄… II. ①崔… III. ①黄河流域—筑路—工程施工 IV. ①U415

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 125254 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 陶丽荣
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 艺和天下

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 250 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈京华虎彩〉)

销售电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135235 (VP04)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

黄泛区冲淤积土是黄河下游数次改道泛滥形成的一种特殊土，以低液限粉土为主，覆盖面积达 25 万 km^2 ，相当于 2.5 个浙江省的面积，而且分布集中，地跨山东、河南、江苏、安徽、河北、天津六省、直辖市。黄泛区所在区域经济相对发达，交通网密集，由于黄泛区砂石料严重缺乏，粉土就成了该地区最基本的筑路材料。但是，黄泛区粉土独特的颗粒特征及颗粒分布、联结和结构特征决定了它具有很差的宏观工程性质，为不良的筑路材料，如由于水的长距离搬运，黄泛区粉土颗粒粒径均匀，颗粒磨圆度较高，颗粒与颗粒之间缺乏细颗粒填充，不易压实，某些地区粉土的压实度即使达到 97%，仍无法满足《公路路基设计规范》(JTGD 30—2004) 中上路床 CBR 值大于 8% 的要求；地下水位高，毛细作用剧烈，路基常处于过湿状态，稳定性和抗变形能力差；孔隙率高，很多地区是欠固结土，压缩性大；黏粒含量少，颗粒间联结强度低，抗冲刷能力差，振动作用可致液化；水稳定性差，路基冬季易冻胀，春季易翻浆；在很多地区为盐渍土，保湿性和盐胀性加剧了路基路面的破坏。黄泛区土不良的工程特性使得道路建设和养护面临巨大的技术挑战。

本书是作者多年的研究成果总结。通过研究，本书揭示了黄泛区粉土的振动压实机理，解决了难压实和春融期翻浆的技术难题；突破了液化粉土地基强夯和高矿化度地区水泥土桩技术的应用瓶颈；揭示了交通荷载作用下黄泛区低路基累积沉降机理，并提出了有效的控制技术；提出了黄泛区高填方路基后处理技术及黄泛区路基袖阀管劈裂注浆加固技术。这些成果已在数十条黄泛区高速公路修建工程中得到成功应用，为黄泛区道路建设作出了贡献。

本书是集体智慧的结晶。刘正银、商庆森、王成军、张炯、金青、蒋红光、王树英、朱海波、杨永顺、王园、曹卫东、杨为民、郑英杰、王爱营、王涛、朱万生、单红仙、贾永刚、刘为民等参与了项目研究工作。另外，黄丹、侯飞、刘泽群、汤潍泽、楼俊杰、崔社强也参与了本书的部分工作。

在撰写本书过程中参考了国内外许多专家学者的研究成果和文献，同时本书的编辑、出版和发行得到了科学出版社的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

本书出版得到了国家自然科学基金（项目编号：51479105，51279094）、山东

省杰出青年基金（项目编号：JQ201416）、教育部新世纪优秀人才基金（项目编号：NCET-13-0340）、山东大学基本科研业务费资助项目（项目编号：2014YQ013）及中国博士后基金（项目编号：2014M561761）的资助。

由于撰写时间紧且水平有限，书中不足之处在所难免，欢迎读者批评指正，以求改进。

作 者

2016 年 4 月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
1.1 黄泛区土的成因与分布	1
1.2 黄泛区粉土的特殊性	3
1.3 黄泛区粉土筑路技术难题	5
第二章 黄泛区粉土的化学物理和工程特性	6
2.1 黄泛区粉土的化学成分及矿物组成	6
2.2 黄泛区粉土的粒径级配特性	9
2.3 黄泛区粉土的物理和工程特性	11
参考文献	16
第三章 黄河三角洲粉土动力特性及微振作用下的物性变异	17
3.1 黄泛区土的动力特性	17
3.1.1 土动力学试验	17
3.1.2 试验结果与分析	18
3.2 黄河三角洲细粒土对微振能量的吸收特性	24
3.2.1 现场试验	24
3.2.2 试验结果与分析	25
3.3 黄河三角洲细粒土微振液化过程	32
3.3.1 微振作用下土体静力触探阻力的变化	32
3.3.2 微振作用下土体十字板剪切强度的变化	34
3.3.3 微振导致土体孔隙水压力变化	35
3.3.4 微振导致原状土样土工实验指标的变化	36
3.4 微振作用下黄河三角洲细粒土成分和结构的变化	37
3.4.1 粒度变化特征	37
3.4.2 矿物成分变化特征	38
3.4.3 微结构变化特征	40
参考文献	42

第四章 基于地基动态响应的地基强夯参数确定方法	43
4.1 强夯试验	43
4.2 地基动力响应和密实状态测试	44
4.3 试验结果和分析	45
4.3.1 动应力	45
4.3.2 动孔压	46
4.3.3 密实度和夯沉量	47
4.4 强夯设计方法的实施程序	48
4.5 工程实例	49
参考文献	49
第五章 黄河三角洲水泥土搅拌桩劣化效应及耐久性技术	50
5.1 黄河三角洲含盐水泥土劣化与材料改性试验	51
5.1.1 试验土水的性质	51
5.1.2 水泥土强度试验	52
5.1.3 强度试验结果与分析	52
5.1.4 水泥土微观结构扫描电镜分析	55
5.1.5 水泥土组分 X 射线衍射分析	56
5.2 水泥土桩长期承载性能预测方法	57
5.2.1 水泥土桩长期性能预测面临的两个关键科学问题	57
5.2.2 基于早期强度试验的水泥土桩劣化深度预测	57
5.2.3 水泥土桩内部材料强度增长规律	59
5.2.4 考虑劣化的含盐水泥土桩长期承载力预测	60
5.2.5 考虑劣化的含盐水泥土桩长期刚度预测	62
5.3 考虑劣化效应的水泥土桩复合地基沉降试验	63
5.3.1 模型试验方案	63
5.3.2 模型试验	65
5.3.3 数值模拟	68
5.3.4 试验结果与分析	69
5.4 工程实例	72
5.4.1 工程概况	72
5.4.2 观测设备与埋设	73
5.4.3 测试结果与分析	75
参考文献	77

第六章 交通荷载作用下黄泛区低路基累积沉降与控制技术	79
6.1 累积沉降的现场模拟试验	80
6.1.1 试验现场概况	80
6.1.2 交通荷载模拟装置及其目标设计参数范围的确定	81
6.1.3 传感器的布设	84
6.1.4 试验方案	84
6.1.5 试验结果与分析	85
6.2 长期累积沉降的数值模拟	94
6.2.1 Chai-Miura 累积变形模型	94
6.2.2 累积沉降计算方法的试验验证	95
6.2.3 累积沉降计算与分析	96
6.2.4 考虑路堤高度和行车荷载的累积沉降模型	100
6.3 累积沉降控制技术	104
6.3.1 生石灰稳定地基技术效果分析	105
6.3.2 土工格栅控制地基累积沉降技术效果分析	106
参考文献	108
第七章 黄泛区粉土的压实性状与压实技术	109
7.1 标准重型击实下的压实规律	109
7.1.1 试验材料与方法	109
7.1.2 粉土的压实性状与压实机理	110
7.1.3 击实功对土的压实度影响	113
7.1.4 黏粒含量对黄泛区粉土压实的影响	114
7.1.5 不同压实度条件下的强度指标与压缩性	115
7.2 黄泛区粉土的振动碾压压实规律与施工工艺	116
7.2.1 粉土的频率响应特性	117
7.2.2 粉土的振动碾压工艺	117
7.3 黄泛区粉土的冲击碾压压实规律与施工工艺	121
7.3.1 冲击压实的优点	123
7.3.2 冲击压实的影响因素	123
7.3.3 冲击碾压试验方案	124
7.3.4 冲击碾压试验结果分析	124
参考文献	129
第八章 黄泛区高填方路基后处理技术	130
8.1 高填方路基后处理技术	130
8.1.1 施工工法	130

8.1.2 无砂混凝土小桩后处理技术机理	133
8.2 高填方路基后处理设计理论与方法	136
8.2.1 路堤临界填土高度计算方法	136
8.2.2 无砂混凝土小桩复合地基的承载力分析	142
8.2.3 无砂混凝土小桩复合地基的竖向变形分析	143
8.2.4 基于变形的无砂混凝土小桩复合地基优化设计	147
8.3 后处理路基工后沉降变形预测	147
8.3.1 无砂混凝土小桩后处理高填方路基的变形计算	147
8.3.2 后处理高填方路基变形的简便计算	152
8.4 工程应用分析	152
8.4.1 高填方路基变刚度后处理技术的工程应用	152
8.4.2 高填方路基扩宽工程中后处理技术的工程应用	156
参考文献	161

第九章 黄泛区路基强度衰变与袖阀管劈裂注浆加固技术

9.1 黄泛区路基含水量现场调查	162
9.2 袖阀管劈裂注浆技术	164
9.3 袖阀管劈裂注浆加固路基模型试验	165
9.3.1 试验模型的制作	165
9.3.2 采样点及传感器布置	168
9.3.3 试验加载系统	169
9.3.4 试验结果及分析	170
9.4 凝固浆液的形态	178
9.5 袖阀管劈裂注浆加固体的形成机理与理论分析	180
9.6 袖阀管劈裂注浆对粉土路基稳定性影响的数值分析	182
9.7 工程实例	184
9.7.1 工程概况	184
9.7.2 工程病害	184
9.7.3 注浆加固方案	184
9.7.4 注浆工艺及其参数	185
9.7.5 注浆加固效果	186
参考文献	186

第一章 绪 论

我国地域辽阔,分布着多种多样的土,其中不少为区域性土,如软土、湿陷性黄土、膨胀土、红黏土、泥炭土、冻土、岩溶、黄泛区粉土、风化壳等。随着我国经济建设的飞速发展,新建基础设施越来越多地遇到区域性土。通过西部交通建设科技项目的实施,已经形成了沙漠、冻土、膨胀土、岩溶、黄土、盐渍土六大特殊地质筑路成套技术,直接支持了特殊地质地区 1.2 万 km 高等级公路建设。而黄泛区粉土是黄河下游数次改道泛滥形成的一种特殊土,覆盖面积达 25 万 km²,相当于 2.5 个浙江省的面积,而且分布集中,地跨山东、河南、江苏、安徽、河北、天津六省、直辖市。黄泛区所在区域经济相对发达,交通网密集,由于黄泛区砂石料严重缺乏,粉土就成了该地区最基本的筑路材料。但是,黄泛区粉土的工程特性差,如某些地区粉土的压实度即使达到 97%,仍无法满足《公路路基设计规范》中上路床 CBR 值大于 8%的要求,导致道路出现了各种各样的病害,道路建设和养护面临巨大的技术挑战。

1.1 黄泛区土的成因与分布

黄河以“善淤、善决、善徙”而著称,向有“三年两决口,百年一改道”之说。据统计,在公元前 602 年至 1938 年间,黄河下游决口 1590 次,大的改道 26 次。改道最北的经海河,出大沽口;最南的经淮河,入长江。周定王五年(公元前 602 年),黄河发生了有记载的第一次大改道。洪水从宿胥口(今淇河、卫河合流处)夺河而走,东行漯川,至长寿津(今河南滑县东北)又与漯川分流,北合漳河,至章武(今河北沧县东北)入海,如图 1.1 所示。汉武帝元光三年(公元前 132 年)黄河在今河南濮阳西南瓠子决口,再次向南摆动,经巨野泽,由泗水入淮河,20 多年后复决向南分流为屯氏河,六七十年后才归故道。王莽始建国三年(公元 11 年),黄河在今河北临漳县西决口,东南冲进漯川故道,经今河南南乐,山东朝城、阳谷、聊城,至禹城别漯川北行,又经山东临邑、惠民等地,至利津一带入海。北宋初期,决口不断,短时期、短距离的分流河道不少。直到宋仁宗庆历八年(公元 1048 年)六月,黄河再次改道,冲决澶州商胡埽(今濮阳城东北 10 余千米昌湖村),向北直奔大名,经聊城西至今河北青县境内与卫河相合,然后入海,这条河宋人称为“北流”。12 年后,黄河在商胡埽下游今南乐西度决口,分流经今朝城、馆陶、乐陵、无棣入海,宋人称此河为“东流”,东流行水不到 40 年便断流。南宋建炎二年(公元 1128 年),为抵御金兵南下,东京守兵在滑州人为决开

黄河堤防，造成黄河向东南分由泗水和济水入海，黄河至此由北入渤海改由南入黄海，如图 1.1 所示。在 1855 年前，黄河主要是在南面摆动，虽然时有北冲，但均被人力强行逼堵南流。南流夺淮入海期间，郑州以下，清口以上的黄河主流也是迁徙不定，由泗水，或汴水或涡水入淮，或由颍水入淮，或同时分几支入淮。直到明代后期潘季驯治河以后，黄河才基本被固定在开封、兰考、商丘、砀山、徐州、宿迁、淮阴一线，即今之明清故道，行水达 300 年。近代，黄河在 1841 年、1842 年、1843 年、1851 年发生了 4 次大的溃决。1855 年 8 月 1 日，黄河在河南兰阳（今兰考）北岸铜瓦厢决口。黄水先流向西北，后折转东北，夺山东大清河入渤海，原本穿苏北汇入黄海的大河迅即化为遗迹，这是黄河距今最近的一次大改道，如图 1.1 所示。最近一次大的黄河泛滥是在 1938 年，为阻止日军西侵郑州，蒋介石命令炸开郑州花园口黄河大堤，全河又向南流，沿贾鲁河、颍河、涡河入淮河（如图 1.2 所示），直到 1947 年堵口复堤后，黄河才回归北道，自山东垦利县入海。

黄河流经黄土高原，由于黄土质地均匀，粉粒含量占 60%~70%，缺乏团粒结构，粒间的联结主要依赖硫酸钙质，极易被冲刷流失。大量的黄土被黄河携带至下游，随着黄河下游改道泛滥沉积下来，形成了广袤的黄河下游冲淤积平原，即黄泛区。黄泛区是指北至我国天津市、南至废黄河口、西起河南省巩义市以东黄河冲积泛滥地区，如图 1.3 所示。黄泛区地跨山东、河南、江苏、安徽、河北、天津六省、直辖市，对我国黄淮海平原的地质地貌和地理环境影响巨大。

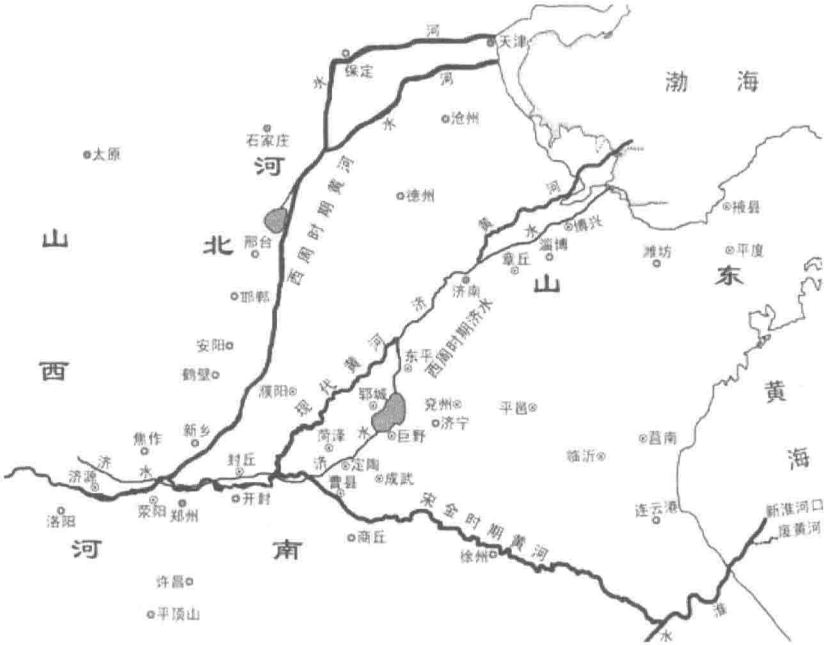


图 1.1 黄河大三角洲示意图

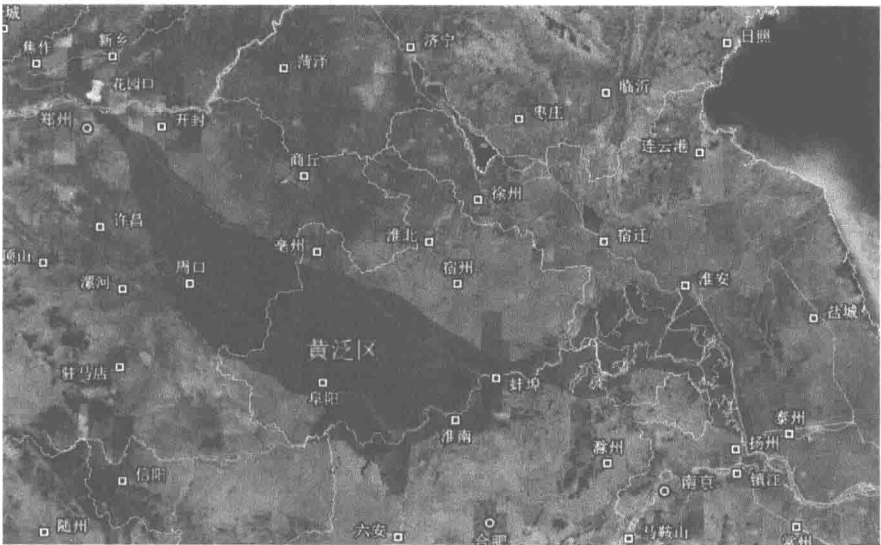


图 1.2 1938 年黄河决口导致的黄泛区范围



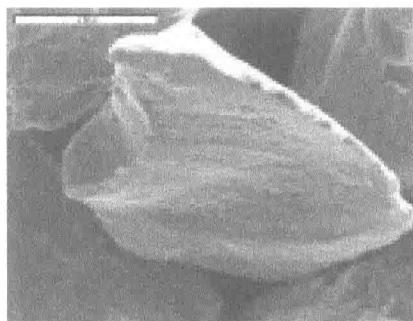
图 1.3 黄河中下游冲淤积平原（黄泛区）总的范围

1.2 黄泛区粉土的特殊性

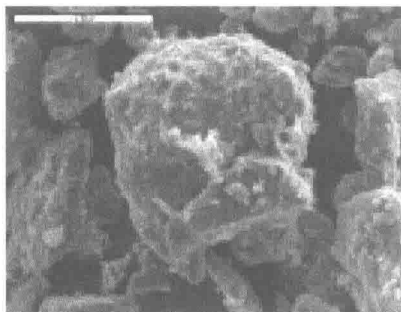
黄泛区地貌上呈垄状起伏，岗洼相间，岸线以上区域，以微斜平地 and 滨海滩地为主，次为河滩地和河滩高地。表层沉积物基本为第四系全新冲积层粉土或含

砂粉土，沉积物形态与物质来源、输运距离及沉积时的水动力环境有关。在几万年的时间里，随着地壳振荡式下沉和河身的反复摆荡，加之全新世的海水侵蚀作用，造就了黄泛区土独特的层理构造。山东黄泛区第四纪沉积物以黄河冲积物为主，沉积厚度多在 180~340m；土呈层状分布，部分区域中间夹杂黏土层；粒径分布上，土颗粒均匀，0.074~0.002mm 的粉粒一般在 80%以上，黏粒含量极低，一般不足总量的 10%。江苏黄泛区第四纪沉积物厚度达 70~80m，可分为三层：表层以低液限粉（黏）土为主，中部为低液限粉（黏）土夹薄层淤泥质高液限黏土，下部为低液限黏（粉）土，粉粒含量高，黏粒含量低。

由于黄泛区粉土特殊的成因，其颗粒分布和结构具有其独有的特征，不同于一般的粉土。《公路工程地质勘察规范》（JTGC20—2011）对粉土的定义是：粒径大于 0.075mm 的颗粒质量不超过总质量的 50%，且塑性指数等于或小于 10 的土。粉土按其成因可分为风成粉土、水成粉土和残积粉土。风成粉土是由于风力的携带、沉积作用，形成含有较大孔隙的一种疏松土，黄土被认为是风成粉土；水成粉土是在水力作用下，经搬运、沉积形成的，其粒度成分单一，粉粒占绝对优势；残积粉土是岩石经风化作用，一部分被风和降雨搬运带走，另一部分由于重力堆积而未被搬运保留在原地的土。为了比较，采用 JXA-8800R 型电子探针对不同粉土颗粒微观结构进行了分析，如图 1.4 所示。图 1.4（a）所示为普通粉土，取自济南地区山前洪冲积粉土（筛除黏土颗粒）；图 1.4（b）所示为山东黄泛区低液限粉土。发现与普通粉土相比，黄泛区粉土颗粒磨圆度较高，针片状颗粒少，经水的长距离搬运、长时间浸泡侵蚀、颗粒撞击和水流冲刷作用，颗粒表面破碎、剥蚀严重。



（a）山前冲积普通粉土



（b）黄泛区粉土

图 1.4 粉土微观结构图（2k 倍）

黄泛区粉土独特的颗粒特征（大小、形状及表面特征）及颗粒分布、联接和结构特征决定了它的宏观工程性质：

（1）颗粒粒径均匀，颗粒磨圆度较高，颗粒与颗粒之间缺乏细颗粒填充，不易压实。

(2) 毛细管发达,毛细作用剧烈,毛细高度大,且因渗透性大,毛细水上升速度快,导致路基常处于过湿状态,稳定性和抗变形能力降低。

(3) 孔隙率高,在一些地区甚至是欠固结土,压缩性较大;由于压缩性大,且黄泛区地下水位高,使得地基沉降量大。

(4) 黏粒含量少,塑性指数低,黏性小,属低塑性土;由于黏性差,属于可液化土;颗粒间联接强度低,导致抗冲刷能力差。

(5) 液限低,干时呈粉状,浸水时易呈流动状态,遇水泥泞、失水扬尘;保水性差,土料含水量变化较大,导致压实度离散性大;碾压较困难,普通压实条件下不易成型,压实机功能小或压实遍数少即欠压,达不到要求的压实度,过压则松散,特别是在过振压实情况下。

(6) 水稳定性差,路基冬季易冻胀,春季易翻浆。

(7) 在黄泛区一些地域,盐渍土广为分布。氯盐渍土保湿性强,使路床土长期处于潮湿、饱和状态,交通荷载作用下更易产生振动液化,冻土融化时,硫酸盐结晶体脱水也使得翻浆加重。

1.3 黄泛区粉土筑路技术难题

近年来,在黄泛区修建了大量高速公路,京沪、荣乌等多条高速公路主干线经过黄泛区。黄泛区粉土的特殊性使该地区道路工程遇到了很大技术挑战。大量调查发现,由于地基处理和路基压实不当,造成了大量车辙、裂缝、沉陷、水毁等道路灾害和病害,反复的养护维修,严重影响了道路通畅及行车的安全性和舒适性,不仅造成了极大的经济浪费,而且产生了不良的社会影响,如地基处理不当,会导致路基产生过大的工后不均匀沉降,导致路面局部沉陷或开裂,而构造物两端路基沉陷会导致“桥头跳车”现象;再如,路基压实不足或处理不当会导致过大的路面弯沉,产生路面裂缝,导致路面水损坏和路基冻胀翻浆等严重病害,甚至造成路基水毁和垮塌等工程灾害。这些灾害和病害具有反复性和长期性,被称为黄泛区道路建设中的“癌症”。

黄泛区粉土筑路主要技术难题包括:①提出适用于黄泛区的地基处理技术,以减小路基工后沉降;②提出高效的黄泛区低液限压实技术,以增强路基的稳定性,为路面提供良好的支撑层;③针对黄泛区土的一些特点,如毛细作用强烈、可液化性及土中水的腐蚀性等,提出特别技术措施,以保障道路的安全性能,提升道路的耐久性和长期性能。

近 20 年来,黄泛区道路设计、建设单位及研究单位依托实际道路建设和养护工程,对黄泛区筑路技术进行了较系统深入的研究,提出了黄泛区筑路成套技术,为黄泛区道路建设做出了重大贡献。

第二章 黄泛区粉土的化学物理和工程特性

黄泛区分布范围广，不同地区粉土的物理化学和工程特性略有不同。黄泛区粉土的特性不仅与物源有关，而且受形成条件和环境的影响。化学物理特性的不同决定了其不良的工程特性。依托若干重大基础设施的建设，人们对黄泛区粉土的工程特性进行了广泛勘察分析，取得了大量第一手资料，本章仅对典型黄泛区粉土的化学物理和工程特性进行总结和分析。

2.1 黄泛区粉土的化学成分及矿物组成

现代黄河下游地下水矿化类型、矿化度、盐土特征如表 2.1 所示^[1]。可见，土的盐分在黄河以北平原西部以硫酸盐为主，向东氯化物逐渐增多，至滨州地区以氧化物为主，再往东与黄河三角洲滨海盐土相接。而滨海区又分为滨海盐土和滨海潮滩盐土两类。滨海盐土分布于地面高程 3.5m 以上地区，pH 为 7.2~8.5，有机质含量平均 0.78~0.83，盐分以氯化钠为主，Cl⁻ 占阴离子总量的 80%~90%，阳离子以 Na⁺、K⁺ 为主，Na⁺ 占阳离子总量的 70%~80%，Na⁺:Mg²⁺:Ca²⁺ 为 7:2:1，潜水埋深 2~3m，矿化度大于 3g/L，最高可达 46.7g/L。滨海潮滩盐土布于地面高程小于 3.5m 以下地区。黄河泥沙沉积后，又经海潮多次浸渍而成，土壤盐分以氧化物为主，Cl⁻+Na⁺ 占含盐量的 80% 以上。潜水埋深 1.3~1.5m，矿化度大于 50g/L。

地下水矿化类型随潜水的埋深而变化。埋深大于 3m，矿化类型以 HCO₃⁻、Ca²⁺、HCO₃-SO₄-Na、HCO₃-Cl-Na 为主，Cl-HCO₃-Na 次之；埋深 2~3m，Cl-HCO₃-Na 为主，Cl-Na-Mg 次之；埋深 1.5~1.3m，Cl-HCO₃-Na 型次之，属氯化物钠型、氯化物钠镁型。

表 2.1 现代黄河下游地下水矿化类型、矿化度和盐土特征

地区	地下水				盐土分布面积及类型		
	埋深/m	占地 面积/%	矿化度 / (g/L)	占地 面积/%	氯化物 盐土/亩 ^①	硫酸盐 氯化物/亩	氯化物 硫酸盐/亩
菏泽	<1	0.57	<0.5	2.29	44 238	0	0
	1~2	8.68	0.5~2	92.6			
	2~3	32.31	2~5	4.87			
	3~5	50.79	5~10	0.22			
	>5	7.65	>10	0.003			

续表

地区	地下水				盐土分布面积及类型		
	埋深/m	占地 面积/%	矿化度 / (g/L)	占地 面积/%	氯化物 盐土/亩 ^①	硫酸盐 氯化物/亩	氯化物 硫酸盐/亩
聊城	<1	0.35	<0.5	7.85	38 121	64 652	123 679
	1~2	8.36	0.5~2	75.36			
	2~3	25.54	2~5	16.04			
	3~5	45.54	5~10	0.75			
	>5	20.10	>10				
德州	<1	3.5	<0.5	2.95	0	0	397 930
	1~2	32.70	0.5~2	74.57			
	2~3	37.70	2~5	21.57			
	3~5	19.33	5~10	0.95			
	>5	6.09	>10	0.02			
滨州	<1	1.20	<0.5	0.28	391 892	8 240	0
	1~2	37.03	0.5~2	43.73			
	2~3	31.49	2~5	31.17			
	3~5	16.31	5~10	6.26			
	>5	8.04	>10	12.70			
东营	<1	6.54	<0.5	2.5		滨海盐土 滨海潮滩盐土	
	1~2	31.22	0.5~2	12.21			
	2~3	33.76	2~5	18.87			
	3~5	24.29	5~10	14.18			
	>5	3.80	>10	52.24			

① 1 亩=666.7m²，下同。

对东营胜利黄河大桥到东营港方向 60km 范围内土样进行了成分分析，取样点示意图如图 2.1 所示。化学成分的特点是高硅（Si）、铝（Al），次为钙（Ca）。钾、钠（K₂O+Na₂O）含量较高，硅铝率高，pH 7.1~8.6，平均为 7.7。水溶盐以 Cl⁻和 Na⁺为主，属氯盐碱性土，矿物组成如表 2.2 所示。可见，矿物成分的特点是：非黏土矿物含量占 74%，最高达 89%，主要有石英、长石、碳酸盐矿物、云母及重矿物，微量角闪石。与黄土高原及黄河中游第四系沉积地层相比，碳酸盐矿物含量较丰富。以 CaCO₃ 为主，含量为 10%，最高为 15%，平均 11.14%。RCO₃ 高的原因，一方面黄土高原第四系沉积物中含有丰富的碳酸盐矿物^[2]，另一方面，黄河三角洲地区降雨量小、蒸发量大，在表层沉积物沉积过程中，受到海水顶托、侧渗以及高矿化度地下水作用，含 Ca（HCO₃）₂ 的溶液在近地表部位由于蒸发而浓缩，形成泥晶方解石沉淀。同时降低了地下水 Ca²⁺和 HCO⁻含量。此外，干旱气候下，通过毛细管蒸发、浓缩作用，下伏含盐量高的滨海冲（淤）泥质沉积物中，盐分含量上升，使表层黄河冲（淤）积物盐碱化，形成碳酸盐及其他盐类矿物，使碳酸盐矿物含量增高。黏土矿物含量低，平均占 26%，最低占 11%。以伊利石、蒙脱石为主，二者平均含量占黏土矿物含量的 79%，最高达 84%，纯伊利石占总

量的 51%；次为绿泥石和高岭石。伊利石含量继承了黄河中游地区黄土中的黏土矿物特征，而蒙脱石含量高则是因三角洲陆相沉积物沉积过程中受海洋顶托、侧渗作用，沉积物间隙水富含 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子，碱性环境下， Ca^{2+} 和 HCO_3^- 结合成 $CaCO_3$ 沉淀^[3]， Mg^{2+} 则易替代伊利石和高岭石晶格中的 Al^{3+} ，而形成蒙脱石。

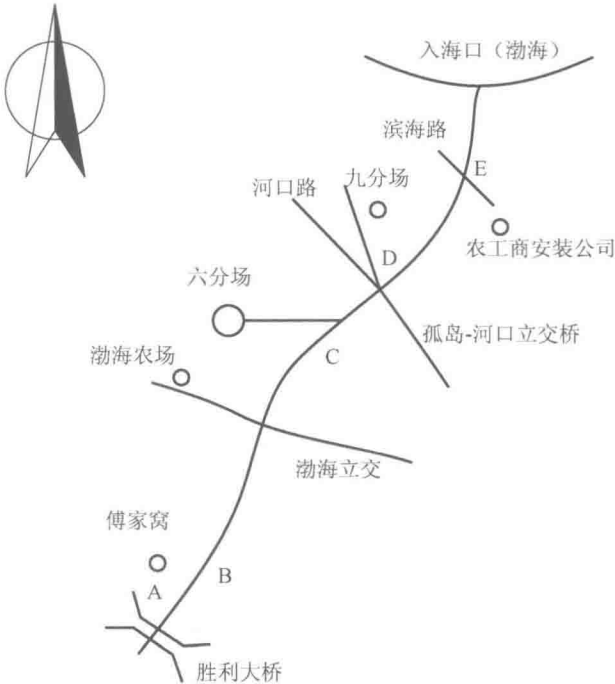


图 2.1 取样地点示意图

表 2.2 东营黄泛区粉土的矿物组成

采样点	非黏土矿物含量/%							黏土矿物相对含量/%				
	总量	石英	长石	云母	方解石	白云石	角闪石	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	
A	60	20	20	10	7	3	微	28	49	10	13	
A	83	30	25	10	10	5	3	27	52	9	12	
C	70	30	20	10	7	3	微	26	53	9	12	
C	78	28	30	10	7	3	微	28	50	10	13	
D	61	21	20	10	10		微	24	53	10	13	
D	89	33	30	10	10	3	3	28	52	9	11	
E	78	33	25	10	7	3	微	29	50	7	11	

苏北黄泛区粉土的化学成分和矿物组成分别如表 2.3 和表 2.4 所示^[4]。可见，该地区粉土化学成分的特点是高硅（Si）铝（Al）， SiO_2 和 Al_2O_3 占总量的 84.84%，其次为铁（Fe），占总量的 6.53%，钾、钠（ K_2O+Na_2O ）占总量的 2.01%，其余化