

# 粗颗粒盐渍土 路基工程

张莎莎 杨晓华◎著

Coarse-grained Saline Soil  
Subgrade Engineering

张莎莎



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

# 粗颗粒盐渍土路基工程

张莎莎 杨晓华 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书介绍了粗颗粒盐渍土的基本工程特性及其易溶盐测定方法;开展了单因素改变条件下的粗颗粒盐渍土盐胀试验和多因素交互作用下的盐胀试验,分析了土、水、盐、温、力各因素及其交互作用对盐胀的影响,提出了各影响因素对盐胀的敏感权重;通过室内溶陷试验,分析了其作为路基填料的溶陷规律;开展了冻融循环条件下的大比尺粗颗粒盐渍土路基模型试验,分析了其变形特征,揭示了其微观机理及路基土体强度特性。在此基础上,探讨了粗颗粒盐渍土路基填料的适用性;并对无法直接使用的高含盐量粗颗粒盐渍土进行了改良研究。最后介绍了盐渍化软弱土地基处治技术。

本书可供盐渍土地区公路工程研究人员以及勘察、设计、施工、检测等相关技术人员参考,可为其他类似工程的研究治理提供一定的借鉴和思路,也可作为高等学校岩土工程、路基工程等专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

粗颗粒盐渍土路基工程 / 张莎莎, 杨晓华著. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019. 6  
ISBN 978-7-114-15549-9

I. ①粗… II. ①张… ②杨… III. ①盐渍土地区—公路路基—路基工程 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 095844 号

书 名: 粗颗粒盐渍土路基工程

著 者: 张莎莎 杨晓华

责任编辑: 赵瑞琴

责任校对: 刘 芹

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.25

字 数: 404千

版 次: 2019年6月 第1版

印 次: 2019年6月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15549-9

定 价: 56.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

我国盐渍土分布面积约 90 万  $\text{km}^2$ , 占全国总面积的 9.6% 左右。盐渍土按地理区分为滨海盐渍土区和内陆盐渍土区。在我国, 内陆盐渍土区主要为新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏等省, 粗颗粒盐渍土主要分布于上述区域。由于盐渍土具有盐胀、溶陷和腐蚀等工程特性, 对路基会产生一定的危害。如何合理处治、利用盐渍土, 并减少或防止盐渍土造成的工程次生灾害, 直接关系到我国在这些地区投资建设的高速公路、高速铁路等基础工程设施的稳定性和经济性。

本书整理了作者及其研究团队从 2004 年到 2018 年的相关研究成果, 由于时间跨度较大, 引用的部分规范已经更新, 在此说明。基于上述研究成果, 本书重点介绍了粗颗粒盐渍土的基本工程特性和易溶盐测定方法; 开展了单因素改变条件下的粗颗粒盐渍土盐胀试验和多因素交互作用下的粗颗粒盐渍土盐胀试验, 分析了土、水、盐、温、力各个因素及其交互作用对盐胀的影响, 提出了各影响因素对盐胀的敏感权重; 并针对粗颗粒盐渍土作为路基填料进行了室内溶陷试验, 分析了其作为路基填料的溶陷规律; 在常规盐胀和溶陷试验的基础上, 开展了冻融循环条件下的大比尺粗颗粒盐渍土路基模型试验, 分析了其变形特征, 揭示了其微观机理, 明确了冻融循环对粗颗粒盐渍土路基土体强度特性的影响。在此基础上, 探讨了粗颗粒盐渍土地区路基填料的适用性指标; 并对无法直接使用的高含盐量粗颗粒盐渍土进行了改良试验分析, 提出了改良配比方案。同时, 分析了粗颗粒盐渍土路基水盐迁移特征, 提出了粗颗粒盐渍土路基隔断层的设计原则。最后, 介绍了盐渍化软弱土地基的处治措施。

本书相关研究成果得到了国家自然科学基金项目“粗颗粒盐渍土路基变形性状的敏感参数及其路用评判指标研究”(51209006)、中国中铁重大科研项目“德伊高铁盐渍土工程特性及路基修建关键技术研究”、甘肃省交通厅交通建设科技项目“嘉峪关至安西一级公路盐渍土地段路基修筑技术研究”、西部交通建设科技项目“盐渍土地区公路修筑成套技术研究”和新疆维吾尔自治区交通运输厅科技项目“粗颗粒盐渍土公路工程分类研究”等科研课题的资助, 同时也得到了长安大学、中国中铁二院工程集团有限责任公司、甘肃省交通厅、新疆维吾尔自治区交通

厅等相关单位的大力支持与协助,在此表示衷心的感谢。陈伟志、王永威、王龙、刘伟、张林、谢山杰、孔祥鑫、肖飞、周强、金好乾、王岩涛、曾浩、李爱明、李嘉璐、肖靖、赵滨京等参与了部分研究和书稿的整理工作,在此对上述做出贡献的相关人员表示衷心的感谢。

希望本书的出版能够对提高和完善我国粗颗粒盐渍土地地区的路基工程建设贡献绵薄之力。鉴于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,敬请读者批评指正。

作者

2019年5月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 盐渍土的一般定义	2
1.3 盐渍土分类	3
1.4 粗颗粒盐渍土的形成及其分布特点	7
本章参考文献	15
第 2 章 粗颗粒盐渍土的物理力学特性	16
2.1 概述	16
2.2 粗颗粒盐渍土的基本物理性质	17
2.3 粗颗粒盐渍土的击实特点	26
2.4 粗颗粒盐渍土的压缩特性	35
本章参考文献	41
第 3 章 粗颗粒盐渍土易溶盐测定	43
3.1 概述	43
3.2 易溶盐试验方法分类	44
3.3 粗颗粒盐渍土易溶盐测定方法合理性判别	44
本章参考文献	51
第 4 章 粗颗粒盐渍土路基盐胀特性	53
4.1 概述	53
4.2 单因素改变条件下粗颗粒盐渍土的盐胀特点	53
4.3 多因素交互作用下粗颗粒盐渍土的盐胀模型	64
4.4 影响粗颗粒盐渍土盐胀特性的敏感因素	90
本章参考文献	93
第 5 章 粗颗粒盐渍土路基溶陷特性	95
5.1 概述	95
5.2 溶陷试验设计	95
5.3 试验过程及结果分析	99
本章参考文献	111
第 6 章 冻融循环条件下粗颗粒盐渍土路基变形特征	113
6.1 概述	113
6.2 甘肃河西走廊地区粗颗粒盐渍土路基填料盐胀-融(溶)陷特征	113

6.3	新疆奎克高速公路粗颗粒盐渍土路基填料盐胀-融(溶)陷特征	117
6.4	伊朗库姆地区粗颗粒盐渍土路基填料盐胀-融(溶)陷特征	121
6.5	冻融循环条件下盐渍土微观结构特征	134
6.6	冻融循环对盐渍土路基填料的强度影响	136
	本章参考文献	139
<b>第7章</b>	<b>粗颗粒盐渍土地区路基填料适用性指标评判</b>	<b>140</b>
7.1	概述	140
7.2	影响粗颗粒盐渍土用于路基填料的因素及相应指标选取	141
7.3	粗颗粒盐渍土用于路基填料的指标界限值	142
7.4	大型路堤模型试验对粗颗粒盐渍土用于路基填料指标界限值的验证	146
7.5	高速铁路无砟轨道粗颗粒盐渍土路基填料指标初判	148
	本章参考文献	152
<b>第8章</b>	<b>粗颗粒硫酸盐渍土改良</b>	<b>153</b>
8.1	概述	153
8.2	粗颗粒硫酸盐渍土基本工程性质及改良剂的选择	153
8.3	粗颗粒硫酸盐渍土改良效果分析	156
8.4	无机改良剂改良硫酸盐渍土的机理	166
	本章参考文献	169
<b>第9章</b>	<b>粗颗粒盐渍土路基水盐迁移特征</b>	<b>170</b>
9.1	概述	170
9.2	典型粗颗粒盐渍土路基水盐迁移特点	170
9.3	粗颗粒盐渍土水盐迁移模拟方法	182
	本章参考文献	192
<b>第10章</b>	<b>粗颗粒盐渍土地区路基设计</b>	<b>193</b>
10.1	概述	193
10.2	粗颗粒盐渍土路基隔断层设置	193
10.3	盐渍土地区公路路基合理横断面结构形式及其数值模拟	221
	本章参考文献	229
<b>第11章</b>	<b>盐渍化软弱土地基处治技术</b>	<b>231</b>
11.1	概述	231
11.2	盐渍化软弱土地基的基本特点	231
11.3	盐渍化软弱土地基处理离心模型试验	231
11.4	盐渍化软弱土地基处理数值模拟	251
11.5	盐渍化软弱土地基处理工程实例	262
	本章参考文献	268

# 第1章 绪 论

## 1.1 概 述

土地和水是人们赖以生存及一切社会活动的基本条件,是必不可少的物质基础。由于气候变暖等诸多原因,在干旱地区,土壤和水中往往会含有过量的可溶盐,而其将会对人类的生产生活造成重大危害。土壤盐渍化和地下水咸化是土地荒漠化的主要表现形式之一,也是社会发展亟待解决的资源和生态难题。因此,对此类问题需要更加重视。据联合国等国际组织统计,全球有各类盐渍土面积约 10 亿  $\text{hm}^2$ , 约占全球陆地总面积的 10%, 广泛分布于欧亚大陆、非洲和北美洲的 100 多个国家和地区。其在我国分布面积也十分广阔, 总面积约 90 万  $\text{km}^2$ , 约占全国总面积的 9.6%。盐渍土按地理区分为滨海盐渍土区和内陆盐渍土区。在我国, 滨海盐渍土区主要分布在河北、山东、江苏、辽宁等沿海地区; 内陆盐渍土区主要分布在新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏等干旱的内陆省区。从上述盐渍土集中分布地区可以看出, 盐渍土广泛分布于我国“一带一路”倡议的重要始发站和途径地带。如何合理地治理盐渍土和利用盐渍土直接关系到这些地区的社会和经济顺利、快速发展。

同时,“一带一路”辐射区域包括我国西北和中亚等地区,在上述地区存在着广阔的粗颗粒盐渍土。由已有研究资料可知,粗颗粒土具有压实性能好、透水性能强、填筑密度大、沉陷变形小、抗剪强度高、承载力高、地震荷载作用下不易产生液化等优良的工程特性,它符合就地取材的条件,已在高土石坝、公路路堤、高速铁路路基、建筑物地基、海岸港湾护岸、人工筑岛等工程中得到了广泛应用。其中,级配良好的粗颗粒土通常是路堤填料的首选材料,在中国西北地区,分布面积广阔,将其合理地加以利用可以保证公路工程及铁路工程的施工质量。但是,由于西北地区气候干燥少雨,气温变化大、寒暑悬殊、蒸发量大,且矿化度极高,使其形成了大面积的粗颗粒盐渍土。而盐渍土中的易溶盐会因为温差变化与蒸发作用,产生相态的改变,直接影响了该地区粗颗粒盐渍土的合理应用。在这些地区进行工程设计和施工时,工程技术人员往往因为盐渍土的工程危害而将粗颗粒盐渍土弃置不用,这导致了借弃土方的数量庞大,造成严重的水土流失和生态破坏,如图 1-1 所示。

鉴于上述原因,本书依托国家自然科学基金项目“粗颗粒盐渍土路基变形性状的敏感参数及其路用评判指标研究”(51209006)、中国中铁重大科研项目“德伊高铁盐渍土工程特性及路基修建关键技术研究”(2017-重大-11-04)、甘肃省交通运输厅交通建设科技项目“嘉峪关至安西一级公路盐渍土地段路基修筑技术研究”、西部交通建设科技项目“盐渍土地区公路修筑成套技术研究”和新疆维吾尔自治区交通运输厅科技项目“粗颗粒盐渍土公路工程分类研究”等科研课题,对 10 年来课题组所从事的粗颗粒盐渍土相关研究获得的成果进行了一定的总结归纳,以便为粗颗粒盐渍土地区进行路基工程设计和施工的工程技术人员、科研工作者等相关

专业人士提供一定的技术参考。同时也希望通过本书与各行业专业人士进行技术交流。



图 1-1 弃置盐渍土造成的生态破坏

## 1.2 盐渍土的一般定义

盐渍土作为一种特殊土,是指土中易溶盐超过一定含量的盐化土壤、碱化土壤、盐土及碱土。当土中的盐碱含量超过一定数量时,就会形成盐渍土,从而改变土的物理性质,影响工程建设及正常使用。

土的含盐量通常是用一定土体内含盐的质量与其干土质量之比,以百分数来表示。

我国现行《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2017)中规定盐渍土的界限含盐量标准是易溶盐含量达到 0.3%,并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特性时,应判定为盐渍土;《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中规定,当地基土中易溶盐的含量达到 0.3%时,应根据盐渍土地基的要求进行勘察、设计和施工;《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007 J 124—2007)中规定,土中易溶盐含量大于 0.3%的土,称为盐渍土,当地表 1m 深度内,土体中平均易溶盐含量大于 0.3%,称为盐渍土场地;《盐渍土地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)中规定,易溶盐含量大于或等于 0.3%且小于 20%,并具有溶陷或盐胀等工程特征的土称为盐渍土;《工程地质手册》(第五版)等都将盐渍土含盐量的界限值定为 0.3%。

作为特殊土体的盐渍土,具有异于一般土的特点:一是,易溶盐可以同时以固态和液态的形式存在于土中;二是,盐渍土的含水率增大后,土中易溶盐的相态会发生变化,土体的物理、力学性质会因此发生改变,强度也会因此显著降低;三是,随着环境温度或湿度的降低,土体孔隙中的盐分浓缩并结合水分子析出成为晶体,致使盐渍土地基出现膨胀变形;四是,当盐渍土地基遭水浸时,土体中起胶结作用的结晶盐部分或全部被水溶解,土颗粒之间的胶结联结能力降低,土的原有的结构遭到破坏,土颗粒发生相对滑移,土体中孔隙减小,土体下陷;五是,易溶盐的存在使地基土对混凝土和金属建材具有强烈的腐蚀作用,对建筑物的基础和地下设施的耐久性和安全使用产生很大影响。

## 1.3 盐渍土分类

盐渍土的分类方法很多,但以往其分类原则无非是根据盐渍土本身特点(如含盐的性质、含盐量的多少、盐在水中溶解的难易程度、盐渍土的地理条件等),按其对于工业、农业或交通运输业的影响和危害程度进行分类。例如,农业上是考虑对一般农作物生长有害程度,按可溶盐类别和含量进行分类,而工程上则考虑对工程使用的影响,进行盐渍土分类。

盐渍土对不同工程对象的危害特点和影响程度是不同的。如对铁路或公路路基的危害和影响,就与其对建筑物地基和基础的不同,所以各部门都可根据各自的特点和需要来划分盐渍土的类别。此外,尚应指出,各种盐渍土分类方法中的界限都是人为确定的,考虑的因素和角度不同,所以盐渍土分类的界限值也不尽相同。本节将介绍目前国内外几种主要盐渍土的分类方法,同时简单介绍根据颗粒特征对盐渍土进行工程分类,可作为对盐渍土路基工程进行了解和研究参考。

### 1.3.1 按盐的性质分类

地基中常含多种盐类,不同性质盐的含量的多寡,影响着盐渍土的工程性质。如含氯盐为主的盐渍土,因氯盐的溶解度大,遇水后土中的结晶盐极易溶解,使土变软,强度变低,并产生湿陷变形,此外,其盐溶液对钢筋混凝土基础和其他地下设施中的钢筋或钢材产生腐蚀。又如含硫酸盐为主的盐渍土,除了会产生湿陷变形外,其中的硫酸钠(俗称芒硝)在温度和湿度发生变化时,还将产生较大的体积变形,造成地基膨胀和收缩,此外,其溶液对基础和其他地下设施的材料(如混凝土等)将产生腐蚀作用。碳酸盐对土的工程性质的影响,视盐的成分而定,碳酸钙和碳酸镁等很难溶于水,对土起着胶结和稳定的作用,而碳酸钠和碳酸氢钠则使土在遇水后产生膨胀。

因此,需要对盐渍土中含盐成分,按常规方法进行全量化学分析,确定各种盐的含量,然后进行分类,以判断哪种或哪几种盐对盐渍土的工程性质起主导作用。

我国40年来一直沿用苏联的分类方法,但苏联从1972年起,就改用新的分类表,修改后的分类表见表1-1。

盐渍土按盐的性质分类(苏联)

表 1-1

盐渍土名称	$\frac{\text{Cl}^-}{\text{SO}_4^{2-}}$	$\frac{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-}{\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}}$
氯盐渍土	>2.5	—
亚氯盐渍土	2.5 ~ 1.5	—
亚硫酸盐渍土	1.5 ~ 1.0	—
硫酸盐渍土	<1.0	—
碳酸(氢)盐渍土	—	>0.33

目前,《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中按含盐性质分类,见表1-2。

盐渍土按盐的性质分类

表 1-2

盐渍土名称	$\frac{\text{Cl}^-}{\text{SO}_4^{2-}}$	$\frac{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-}{\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}}$
氯盐渍土	>2.0	—
亚氯盐渍土	1.0~2.0	—
亚硫酸盐渍土	0.3~1.0	—
硫酸盐渍土	<0.3	—
碳酸(氢)盐渍土	—	>0.3

注:离子含量以 1kg 土中离子的毫摩尔数计(mmol/kg)。

《盐渍土地地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)中的分类方式见表 1-3。

盐渍土按盐的化学成分分类

表 1-3

盐渍土名称	$\frac{c(\text{Cl}^-)}{2c(\text{SO}_4^{2-})}$	$\frac{2c(\text{CO}_3^{2-}) + c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})}$
氯盐渍土	>2.0	—
亚氯盐渍土	>1.0, ≤2.0	—
亚硫酸盐渍土	>0.3, ≤1.0	—
硫酸盐渍土	≤0.3	—
碱性盐渍土	—	>0.3

注: $c(\text{Cl}^-)$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $c(\text{CO}_3^{2-})$ 、 $c(\text{HCO}_3^-)$ 分别表示氯离子、硫酸根离子、碳酸根离子、碳酸氢根离子在 0.1kg 土中所含的毫摩尔数,单位为 mmol/0.1kg。

《铁路特殊路基设计规范》(TB 10035—2006)和《盐渍土地地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)关于盐渍土分类相同,《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)与《盐渍土地地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)表述方法略有区别。但是总体分类原则相同,都是以一定质量土体中的离子含量来分类。

### 1.3.2 按盐的溶解度分类

盐在水中溶解的难易程度不同,通常可用一定温度下溶解度来衡量,即以 100g 溶液中能溶解该盐的克数来表示。不同的盐,其溶解度差别较大,见表 1-4。土中固态的结晶盐遇水后的溶解程度,直接影响地基的强度和变形特性,所以盐渍土以含盐的溶解度分类,对路基工程和建筑地基有很大实用意义。

不同盐的溶解度表(徐攸在,1998)

表 1-4

盐类的分子式	可结合的结晶水	100g 溶液中能溶解的盐量(g)		
		$t=0^\circ\text{C}$	$t=20^\circ\text{C}$	$t=60^\circ\text{C}$
NaCl	—	35.6	36.6	37.3
KCl	—	22.2	25.5	31.3
CaCl <sub>2</sub>	6H <sub>2</sub> O	37.2	42.7	—
CaCl <sub>2</sub>	4H <sub>2</sub> O	—	—	57.8
MgCl <sub>2</sub>	6H <sub>2</sub> O	34.6	35.3	37.9

续上表

盐类的分子式	可结合的结晶水	100g 溶液中能溶解的盐量(g)		
		$t = 0^{\circ}\text{C}$	$t = 20^{\circ}\text{C}$	$t = 60^{\circ}\text{C}$
$\text{NaHCO}_3$	—	6.9	9.6	16.4
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	—	16.5	16.6	17.5
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$10\text{H}_2\text{O}$	7.0	21.5	31.7
$\text{MgSO}_4$	$7\text{H}_2\text{O}$	—	26.8	35.5
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$10\text{H}_2\text{O}$	4.5	16.1	—
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	—	—	—	45.3
$\text{CaSO}_4$	$2\text{H}_2\text{O}$	0.18	0.20	0.20
$\text{CaCO}_3$	—	—	0.0014	0.0015

根据土中的溶解度,盐渍土通常可分为易溶盐渍土、中溶盐渍土和难溶盐渍土,见表 1-5。

盐渍土按盐的溶解度分类(徐攸在,1998)

表 1-5

盐渍土名称	含盐成分	溶解度(%) ( $t = 20^{\circ}\text{C}$ )
易溶盐渍土	氯化钠( $\text{NaCl}$ )、氯化钾( $\text{KCl}$ )、氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )、硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )、硫酸镁( $\text{MgSO}_4$ )、碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )、碳酸氢钠( $\text{NaHCO}_3$ )等	9.6~42.7
中溶盐渍土	石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、无水石膏( $\text{CaSO}_4$ )	0.2
难溶盐渍土	碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )、碳酸镁( $\text{MgCO}_3$ )等	0.0014

### 1.3.3 按含盐量分类

按土中可溶盐(易溶盐和中溶盐)的含量多少来分类,历来是国内外对盐渍土进行分类的方法,但各部门的规定各不相同,现将国内外主要的几种按含盐量分类的规定简要介绍如下。

苏联在公路方面多数采用别兹鲁克的分类标准。根据不同盐的性质,按表 1-6 规定的含盐量标准,将盐渍土分为四类。

盐渍土按含盐量分类(苏联)

表 1-6

盐渍土名称	含盐量(%)	
	氯盐、亚氯盐	硫酸盐、亚硫酸盐
弱盐渍土	0.3~1.0	0.3~0.5
中盐渍土	1.0~5.0	0.5~2.0
强盐渍土	5.0~8.0	2.0~5.0
超盐渍土	>8.0	>5.0

在建筑工程方面,苏联则采用别特鲁辛的分类标准,根据不同的土类,按表 1-7 规定出含易溶盐和中溶盐总量的最低标准,以区分盐渍土和非盐渍土。分类标准中考虑了不同土类对盐的敏感程度,也考虑了中溶盐的影响,但对含中溶盐为主的土,则不完全适宜,把中溶盐与易溶盐等量齐观有欠妥当。

各类盐渍土可溶盐含量标准(苏联)

表 1-7

土的类别		可溶盐含量(%)
碎石土	含砂土填充物 < 40%	2.0
	含砂土填充物 ≥ 40%	0.5
	含砂土填充物 < 30%	2.0
砂类土		0.5
亚黏土、亚砂土		5.0
黏土		10.0

表 1-6 和表 1-7 中,碎石盐渍土的含量是指填充物的含量,即在计算干土质量时,不考虑碎石或卵石的质量,这是偏于安全的。

我国铁道部门采用的分类标准见表 1-8。在 1992 年出版的《铁路工程设计手册:路基》(修订版)中规定地表土层 1m 内易溶盐含量超过 0.5% 的土称为盐渍土。

盐渍土按含盐量分类

表 1-8

盐渍土	含盐量(%)		
	氯盐、亚氯盐	硫酸盐、亚硫酸盐	碳酸盐
弱盐渍土	0.5 ~ 1.0	—	—
中盐渍土	1.0 ~ 5.0	0.5 ~ 2.5	0.5 ~ 1.0
强盐渍土	5.0 ~ 8.0	2.5 ~ 5.0	1.0 ~ 2.0
超强盐渍土	> 8.0	> 5.0	> 2.0

2001 年,新疆维吾尔自治区交通厅颁布的《新疆盐渍土地区公路路基路面设计与施工规范》(XJTJ 01—2001)中,对盐渍土分类提出了新的方法,考虑了土类对盐渍土工程特性的影响,对盐渍土分类分别采用了细颗粒土和粗颗粒土两种指标,比较符合工程实际。而后,公路行业普遍开始借鉴。

《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中将盐渍土按含盐量分为 4 种(表 1-9)。

盐渍土按含盐量分类

表 1-9

盐渍土类型	细颗粒土土层的平均含盐量 (以质量百分数计)		粗颗粒土通过 1mm 筛孔土的平均含盐量 (以质量百分数计)	
	氯盐渍土及 亚氯盐渍土	硫酸盐渍土及 亚硫酸盐渍土	氯盐渍土及 亚氯盐渍土	硫酸盐渍土及 亚硫酸盐渍土
弱盐渍土	0.3 ~ 1.0	0.3 ~ 0.5	2.0 ~ 5.0	0.5 ~ 1.5
中盐渍土	1.0 ~ 5.0	0.5 ~ 2.0	5.0 ~ 8.0	1.5 ~ 3.0
强盐渍土	5.0 ~ 8.0	2.0 ~ 5.0	8.0 ~ 10.0	3.0 ~ 6.0
过盐渍土	> 8.0	> 5.0	> 10.0	> 6.0

注:离子含量以 100g 干土内的含盐总量计。

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2017)及《盐渍土地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)中的分类标准相同(表 1-10)。

盐渍土按含盐量分类

表 1-10

盐渍土名称	平均含盐量(%)		
	氯及亚氯盐	硫酸及亚硫酸盐	碱性盐
弱盐渍土	0.3~1.0	—	—
中盐渍土	1.0~5.0	0.3~2.0	0.3~1.0
强盐渍土	5.0~8.0	2.0~5.0	1.0~2.0
过盐渍土	>8.0	>5.0	>2.0

## 1.4 粗颗粒盐渍土的形成及其分布特点

了解盐渍土的形成过程和大致分布规律,无疑对我们进行勘察、设计和施工以及防止土的进一步盐渍化,都是有很大帮助的。关于盐渍土的成因,曾有不同学说解释其形成过程,这些学说并不相互排斥,可以互为补充,所以本节予以综合并简述如下。

### 1.4.1 盐的来源与迁移

近代的观点认为,盐渍土中的盐,主要来源于三方面:岩石中盐类的溶解,工矿业废水的注入和海水的渗入。而盐的迁移和在土中的重分布,则是靠水流(地表水和地下水)和风力来进行。

#### 1) 盐的来源

盐渍土中的盐主要来自岩石。如火山爆发时,直接喷出盐酸、氯气和各种氧化硫等,与岩石相互作用,产生新的氯盐和硫酸盐。凝固后的岩浆遇水后则逐渐被溶解,导致其矿物成分的改变而生成盐溶液。岩石的化学风化是在氧气、水、碳酸和其他有机酸等作用下,岩石发生氧化、碳化、水化和高岭土化的过程,最后使原来岩石的化学成分发生变化,同时也产生出不同的盐类。此外,含盐的沉积岩也是盐渍土中盐的来源。

工业废水中常含有大量硫酸盐、镁盐、氯盐、钾盐和铵盐以及许多酸类,另外,一些矿(如硫化矿和煤矿等)的矿水,渗入土中后,均会造成土的盐渍化。

海滨地区如果由于某种原因造成海水入侵,例如,大量抽取地下水,使海水倒灌,则盐类会随着海水渗入土中,形成海滨盐渍土。

#### 2) 盐的转移

如前所述,盐的迁移是靠风力或水流来完成的。飓风可以将含盐的海水带到陆地;在沙漠等干旱地区,大风常将盐或含盐的土粒和粉尘吹落到远处,积聚起来,使盐分重新分布。我国西北地区的一些地方,可以见到相当厚度的、较均匀的含盐的细、粉砂和粉土层,即是由于风力迁移的结果。

水流是使盐类迁移和重新分布的主要因素。雨水、冰雪融水等水流,一部分渗入地下,其余的形成地表水,从地势高处流向低处,地表水和地下水将其流动过程中所溶解的盐带至低洼处,有时形成较大的盐湖。在含盐水流经的途中,如遇到干旱的气候条件或地区,水流中的部

分盐分就会因强烈的地面蒸发而析出并积聚在那里。因此,盐分迁移的远近及其重新分布的情况,除与水的流量大小、地形和地质条件、土的渗透性有关外,还取决于当地的气候条件。由于海水入侵而造成的盐分迁移的范围,则取决于陆地地下水下降的程度和范围。

#### 1.4.2 我国粗颗粒盐渍土地理分布

盐渍土是盐土和碱土的总称,水平地带性不明显。我国西北、华北、东北的西部、内蒙古河套地区以及东南沿海一带都有分布。除沿海外,大都处在干旱、半干旱地区。气候干燥,地面蒸发强烈,毛细水所引起的积盐作用显著,因此,不仅在地势低洼处广泛分布着现代盐渍土,就连地势较高的山前平原、古河阶地上也常常保存有残余盐渍土。滨海地区,受海水长期浸渍形成滨海盐渍土。平原灌溉区,因水库位置欠妥,灌溉不当,造成地下水水位上升,也会导致次生盐渍化。

由于各地自然条件的差异性,使盐分在积聚程度和组成上有较大差异。

滨海盐渍土,表层含盐量一般在1%~4%,但华南一带因淋溶作用强烈,含盐量较低,很少超过0.2%,而且盐分以氯化盐、亚硫酸盐为主;华北、东北一带淋溶作用相对较弱,土层盐分淋失较少,所以含盐量较高,可达3%以上,盐分以氯化盐为主,土呈微碱性。

内陆盐渍土分布面积广,含盐量高,类型繁多,成分复杂。其含盐量一般高达10%~20%,甚至超过50%,尤以青海柴达木盆地、新疆塔里木盆地的盐渍土为最高,而且地表常结成几厘米至几十厘米厚度不等的盐壳。内陆盐渍土的盐分以氯化盐、亚氯化盐、亚硫酸盐为主,但在内蒙古西部,则以氯化盐为主,很少见到硫酸盐。

碱性盐渍土分布面积小,且分散,比较集中的地区是在东北松嫩平原、三江平原及宁夏银川平原等,其形成与当地成土母质有直接关系。黄、淮、海河地区碱性盐渍土多呈岛状分布,穿插于其他盐渍土之间。新疆、青海、甘肃、内蒙古等地则与沙丘成复域分布,其表面常成龟裂状,一般质地黏重。

我国盐渍土分布虽广,但大都集中在西北内陆盆地中,不仅危害着当地的农业生产,同时还给公路及铁路建设带来一系列困难。

以下分别介绍河西走廊、准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地的盐渍土分布情况,上述地区也是我国粗颗粒盐渍土分布的主要区域。

##### 1) 河西走廊

河西走廊属于祁连山地槽边缘拗陷带。喜马拉雅运动时,祁连山大幅度隆升,走廊接受了大量新生代以来的洪积、冲积物。自南而北,依次出现南山北麓坡积带、洪积带、洪积冲积带、冲积带和北山南麓坡积带。河西走廊东西长近1000km,南北宽数公里至近200km,海拔一般为1~1.5km,为祁连山的山前洪积—冲积缓坡平原。本区属温带干旱荒漠,降水量自东向西迅速减少。

河流属内陆闭流水系,主要有石羊河水系、黑河水系和疏勒河水系,都是来源于祁连山的冰雪融水和中高山降水,自南向北流,形成祁连山山前广大的洪积-冲积平原。在河流的下游有自成单元的平原、湖盆和洼地,这些湖盆成为化学径流的归宿。

从山麓至盐湖,随着不同的地貌部位,形成不同的土壤盐演化类型。在祁连山山前扇形地,砂砾堆积厚度达700~800m。在洪积-冲积扇的中、上部,为广阔的砾质戈壁,植被稀疏,分

布有残余盐土;在洪积-冲积平原的前缘,土壤颗粒变细,并有泉水出露,分布着盐化草甸土和草甸盐土等,镁质碱化土壤多数分布在扇缘地下水溢出带的部位上。镁质碱化土壤的主要特征是,在剖面10~80cm处,普遍有青白色或青灰色土层,其化学组成主要为 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ ,pH在9以上,由于具有特殊的青白土层,当地人称之为青白土。从东到西,由民勒到玉门镇均有镁质碱化土壤的分布,但以酒泉、边湾、玉门等地较为集中。

在扇缘之外,地下水水位又随之降低,主要分布着普通盐土(原称典型盐土)和其他盐渍化土壤。

在河流的中下游,如石羊河、黑河和疏勒河的中下游平原地带,地下径流缓慢,矿化度增高,土壤普遍发生盐渍化,多盐土。在疏勒河下游有大面积坚硬结壳的盐土,其厚度为5~10cm,含盐量极高。

## 2) 准噶尔盆地

准噶尔盆地位于新疆天山以北,在天山与阿尔泰山之间。西北、东北和南面均被高山所包围,成为一个不等边的三角形。盆地四周的山岭有许多缺口,来自北冰洋的水汽可以进入盆地,因而降水量在150~200mm。气候干燥,冬季寒冷,盆地内景观较为多样,有草原、沙漠、盐湖、沼泽,还有大片盐碱化土壤等。

除额尔齐斯河流注入北冰洋的喀拉海之外,其余皆是内流水系。在盆地北部,额尔齐斯河和乌伦古河流域,因河流下切,河滩狭窄,只在小河流的沿岸和干三角洲的下部以及在泉水出露、湖泊沼泽周围有盐渍土的分布。由于额尔齐斯河和乌伦古河的水化学类型是属于苏打水, $\text{HCO}_3^-$ 离子占阴离子含量总数的60%~90%,苏打-硫酸盐盐渍化土壤有广泛的分布,土壤中苏打的累积与河水和地下水含有苏打有关。塔城地区的额敏河亦有类似的情况。

在乌伦古河的左岸,有龟裂碱化土的分布,通常为光板地,地面龟裂成不规则的多角形,具有碱化特征,pH在9.0左右,就整个盆地而言,玛纳斯河以东,为古尔班通古特沙漠,它占据很大的面积(4.73万 $\text{km}^2$ ),发源于天山的许多河流的尾圆或尖灭在沙漠的边缘,或形成沼泽,或注入艾比湖和玛纳斯湖。盆地的绿洲主要分布于盆地的南缘(即天山北麓)。

盐渍土主要集中分布于广大的古老冲积平原上,如奇台、石河子、乌苏、精河和博乐之间,都有连片的分布;在玛纳斯湖和艾比湖的周缘也有大面积分布;在湖滨阶地有残余盐土分布。此外,在古老的冲积平原上,有大片的龟裂碱化土的分布,其中以玛纳斯河平原较为集中。

## 3) 塔里木盆地

塔里木盆地位于天山以南,昆仑山和帕米尔高原之间,近似一个菱形的内陆盆地,盆地东西长约1500km,南北宽约600km,是我国最大的一个盆地。盆地年降水量小于10mm,其中若羌、吐鲁番的年降水量只有10mm多一些。蒸发量为2000~3000mm,蒸发强烈,干旱少雨,易溶性盐类大量积累。

## 4) 柴达木盆地

柴达木盆地是由昆仑山、阿尔金山和祁连山所环抱的大盆地。东西长约850km,南北宽约250km。

发源于昆仑山和祁连山的河流有40多条,为内陆向心水系,它们都是注入湖泊或中途湮灭于戈壁荒滩之中,其中比较大的,包括巴音河、香日德河(又称为柴达木河)、格尔木河、诺木

洪河等,是对农业有影响的河流。

盆地四周山地的风化物质,有经常性水流和间歇性的水流(有时为山洪)带入盆地,与所有极端干旱地区类似,山前洪积倾斜平原十分发育。盆地的主要特点是由于地质构造运动的剧烈变化,盆地内部隆起地段与沉陷地段发生了逆变,原来的古柴达木湖解体,使盆地湖泊遍布,盐类的化学沉积相当广泛,形成丰富多彩的盐类矿床。自第三纪晚期以来,盆地内出现过两次聚盐期:①在上新世,主要在盆地西部的塌陷区,大约在马海、冷湖、油沙山、芒崖、里平所围绕的范围,硫酸盐类;②到了晚更新世至全新世时期,西部反而隆起,原来的大潮解体,而盆地的中部偏东南的广大地区反而塌陷,这样,原来西部的盐类和晶间卤水,变成了一个很大的盐源,流向盆地的中部和东南部,大量氯化物盐类沉积,形成石盐矿床和内陆钾盐矿床。

“柴达木”蒙语为“盐泽”,整个盆地实质上是个大湖盆,从四周汇集来的化学径流,全部汇集在盆地,无论是大量可溶性盐类还是微量元素都呈富集状态。

上述情况,说明了柴达木盆地的湖泊演变过程与盆地盐滩的广布、土壤盐渍化普遍(其中许多是残余的)及各种盐类富集有密切的关系。

目前,柴达木盆地的湖区,还在进行着化学沉积,随着湖水面的日益缩小,盐泥、盐壳也随之逐渐发育,所以盐渍土总是围绕着湖区呈环状有规律分布。就大的湖区而言,从湖中心算起,向山麓一侧延伸,可以依次发现如下的顺序:化学沉积仍在进行的湖泊水体—盐淤泥出露—盐壳—沼泽盐土—沼泽草甸盐土—草甸盐土—砾质戈壁石膏盐盘残余盐土。

### 1.4.3 粗颗粒盐渍土的形成条件

盐渍土的生成、发展与演变,是所在地区的自然条件(地形、地质、水文地质、气候等)综合作用的产物。人类活动也有着较大影响。其中气候条件是引起土质盐渍化的主要外在因素,内在因素则是易溶盐的存在,并通过地形、土质、水文、水文地质等条件发生迁移和积聚。

西北地区属于荒漠生态环境,由于缺乏降水的淋溶作用,土中积累的易溶盐较其他区域更多;加上强烈的蒸发,不仅地表水蒸发浓缩,同时矿化的地下水借助毛细管作用上升到地表,所以盐渍化就成为西北地区的普遍而突出的特点。

西北地区绝大多数河流为内陆河,河流所携带的盐分汇集于下游低洼处,成为盐沼或盐湖。地下径流至盆地低洼处接近地表,导致水分持续大量蒸发,因此,各个盆地斜坡的中部或中下部都是盐渍土的分布地带,是水、热不平衡造成盐、水不平衡的结果。

#### 1) 西北盐渍土形成的气候条件

我国西北深居内陆腹地,四周又有高山阻挡,来自海洋的潮湿气流很少能够到达,故具有强烈的大陆性气候特点,降水稀少,蒸发量大,气温变化剧烈,成为我国最干旱的地区。

(1)降水稀少,蒸发量大:本区除北疆和高大山地之外,年降水量均在200mm以下,柴达木盆地最大年降雨量只有60mm,塔里木盆地10mm左右,河西走廊西部地区不足30mm,但蒸发量极大,达3000mm以上,干燥度也高达80左右,相对湿度只有40%左右。极端干旱的气候条件有利于盐分在土层中的积累。

(2)气温变幅大:本区夏季酷热,冬季严寒,年温差、日温差都很大,素有“早穿皮袄午穿纱”之说。如新疆地区极端最高温度多在40℃以上,极端最低温度在-30℃以下,日温差25℃