

NEILU YANZITU GONGCHENG TESHUXING YU DIJI CHULI XINJISHU

内陆盐渍土工程特殊性与地基处理新技术

黄明 著

陕西新华出版传媒集团



陕西科学技术出版社

Shaanxi Science and Technology Press

内陆盐渍土工程特殊性与 地基处理新技术

黄 明 著

陕西新华出版传媒集团
陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

内陆盐渍土工程特殊性与地基处理新技术/ 黄明著.
—西安:陕西科学技术出版社, 2016. 12
ISBN 978 - 7 - 5369 - 6855 - 4

I. ①内… II. ①黄… III. ①盐渍土地区—地基
处理—研究 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 284470 号

内陆盐渍土工程特殊性与地基处理新技术

出 版 者	陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社
	西安北大街 131 号 邮编 710003
	电话 (029)87211894 传真 (029) 87218236
	http: //www. snstp. com
发 行 者	陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社
	电话(029)87212206 87260001
印 刷	陕西天地印刷有限公司
规 格	787mm × 1092mm 16 开本
印 张	25. 75
字 数	536 千字
版 次	2016 年 12 月第 1 版
	2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 5369 - 6855 - 4
定 价	198.00 元

版权所有 翻印必究



内容提要

本书依据内陆盐渍土地基的性质和特征,具体描述了 5 种新的、有效的加固处理软弱盐渍土地基和防腐蚀混凝土桩基的施工方法。在每种方法中还介绍了其作用机理、设计思想、施工工艺、检测方法和工程实例。

本书对于内陆盐渍土地区工程勘察和地基处理方法的描述,既有理论研究和探讨、计算公式的推导和评述,又有几种地基处理方法的工程实践;既介绍了方法的机理和应用范围,又介绍了方法的施工工艺、机具和规程。

书中所介绍的软弱盐渍土地基的加固处理方法和防腐蚀桩基的施工技术和方法,都是作者 20 多年在盐湖地区进行工程勘察和岩土工程的工程实践过程中,带领公司的技术团队,结合内陆盐渍土的特性,研究开发出的专利成果。通过大量的试验和工程实践,经业内专家评审和鉴定:本书中所介绍的软弱盐渍土地基的加固处理方法和防腐蚀桩基的施工技术,在该领域属国内首创。

本书可以为内陆盐渍土地区的岩土工作者实施地基处理和基础工程提供重要参考依据,也可从事内陆盐渍土地区的设计和科研人员及大中专院校的师生提供参考。

前言

我国内陆地区盐湖分布很广,主要集中在西北地区,并以青海和新疆赋存面积最大。内陆盐湖和地层中蕴藏丰富的矿产和稀有元素,是我国化学工业原料的重要基地,尤其是化肥工业的主要原料产地。西北地区也是我国能源集中地区,丰富的矿产和能源储备,为西部大开发提供了坚实的工业基础。

改革开放以来,西北地区交通业和化工业基地建设方兴未艾。然而,盐湖地区浅部主要地层由盐渍土组成,按照《岩土工程勘察规范》(2009年版),被划定为特殊性岩土,这类岩土大部分具有溶陷性、盐胀性和腐蚀性,其工程性能具有多面性、易变性、可逆性和对主要建筑材料的腐蚀性,而且,由于盐分的构成和性质不同,其力学性能和工程性状也明显受控于所含盐的化学性质。作为建筑地基而言,属于不良地基,必须处理成适于建(构)筑物要求的人工地基。盐渍土的腐蚀性对混凝土和钢结构有严重的破坏作用,需要有安全的防腐蚀措施。

位于盐渍土地区的建(构)筑物设计前,在进行建设场地的岩土工程地质勘察的同时,还要进行工程适应性的评价。所以,在盐湖地区建厂选址,首先要按照工程需要对选址地区做详细的工程地质勘察,获取详实的地质资料和岩土工程

性质试验。内陆盐渍土由于成因、成土作用特殊,含盐量高,导致其三相物质组成相对复杂,因此,赋予盐渍土一系列特殊的工程性能,给内陆盐渍土天然地基使用和改造提出了以下难点:

1. 内陆盐湖的湖滨地区,主要是湖积-冲积平原,地下水是矿化度很高的卤水。上部地层大部分由粉土和粉质黏土组成,由于地下水位较高,一般处于饱和状态,具有明显的易变性、可逆性和空间的变异性。因此,天然地基土表现为腐蚀性强,压缩性高,抗剪强度低,承载力特征值低。

2. 盐渍土和地下水对主要建筑材料(如混凝土和钢材)具有强腐蚀性,这些材料在处理和加固地基中,被限制有条件使用。

3. 盐渍土地层是由土颗粒和结晶盐组成,结晶盐孕育在土颗粒的孔隙中,具有盐胀性和溶陷性,在某些条件下对地基凸现出破坏性。

内陆盐渍土的这些特性,严重影响建(构)筑物地基的处理和改造,许多常规和成熟的地基加固处理方法不能在这一地区正常使用。近年来,西部地区工业建设发展迅速,要在盐渍土地区修路、修工厂、搞建设,岩土工作者对盐渍土地基处理改造进行了大量的研究和试验,取得了斐然的成绩。本书仅就作者 20 多年的研究试验成果进行介绍和描述,由于对内陆盐渍土的工程地质勘察和岩土工程性能认识尚需不断发展和深化,故而这些成果还有较大的研究发展空间。

内陆盐渍土大多分布于我国西北地区广大的盐湖内,早前这里建筑业开发较浅,大多数业内人士对盐渍土接触少,不熟悉。对其地质成因和演变规律,虽有系统的研究,但是,在工程利用、改造和加固方面,只是从近 30 年才开始重视。由于交通、电力、工业、民用建筑业在盐湖地区逐渐兴起,首先要对盐渍土地基进行处理和加固。虽然,岩土工作者已经取得了一些成果,但是,对盐渍土地基还需要深层次认识和研究。从实践到理论的升华需要不断努力,使盐渍土地基改造利用的方法更安全、更科学、更经济,这是本书出版的目的。

本书共设有 17 章,外加 4 个附录,书中上篇由第一章至第四章组成。从内陆盐渍土的成因类型、盐渍土的物质组成和土的结构特殊性,以及由此而塑造的岩土工程性质特性等进行较为系统的总结,并展开有一定深度的分析评述。希望通过该篇进一步认识盐渍土,揭示盐渍土地基特殊性、易变性,变化的可逆性、全面变化性,以及复杂性、时空变异性、腐蚀性与不确定性等,及与含盐类型、含盐量之内在因果关系,为盐渍土地基加固改造的机理和工程实践提供依据。

第五章至第十章组成本书的中篇。根据前篇对盐渍土的认知,本篇进一步对盐渍

土特殊性对建筑工程的危害进行分析探讨,提出对盐渍土地基治理的措施,重点论述对软弱盐渍土地基处理的加固形式。本篇介绍了裹体碎石桩、网袋法和礅壳法复合地基结构,提出有加筋垫层的双层结构复合地基特点和计算方法,以及盐渍土复合地基承载力和变形的计算公式;处理加固后复合地基的检测结果分析和主要检测方法;分析盐渍土对混凝土和钢筋的腐蚀机理,提出混凝土桩基础防腐蚀对策。

第十一章至第十七章组成本书的下篇。本篇通过对以前的地基处理加固方法利弊分析,提出几种有理论支持、技术效果好、造价经济、施工快捷、确保质量的盐渍土地基加固的处理方法。“裹体碎石桩法”是将散体桩用高强度、抗腐蚀性、使用寿命长的土工布袋包裹起来,以增强桩体的径向支持力,达到提高地基的竖向增强体的强度。以裹体碎石桩法形成的复合地基承载力,比传统的碎石桩复合地基承载力要提高2~3倍;在裹体碎石桩地基的垫层中加入土工网或土工格栅,对地基垫层加筋,得到高强度的横向增强体,增大了地基应力扩散角,克服了地基不均匀沉降,这就是本篇中介绍的“网袋法”和“礅壳法”。其后,本篇还介绍了“防腐蚀裹体混凝土灌注桩法”和“植入式防腐蚀预制桩法”。这两种桩型使用防水、防腐蚀材料将桩体包裹起来,将强腐蚀的盐渍土和卤水隔开,达到防止盐渍土对桩体的腐蚀作用。

下篇是本书的核心,是对作者技术发明专利的应用介绍。在下篇中分章描述了5种专利方法的作用机理、设计思路、施工工艺、检测方法和应用实例,是作者多年来带领自己的团队,在青藏高原的盐渍土地区进行了大量的试验研究和工程实践而取得的研究成果。这些研究成果,在盐渍土地区得到了充分推广和应用,取得了明显的技术效益、经济效益和社会效益。

作者在盐渍土地区工作20多年,从事盐渍土工程勘察、盐渍土地基处理加固设计、施工、检测。对内陆盐渍土的工程特征,从理论到实践有较深入且全面的认识。发明了行之有效、技术先进、造价经济、安全可靠的处理和加固盐渍土地基的新技术、新方法。大量的工程实践已经证明了这些处理加固盐渍土地基的新技术和新方法的先进性、安全性、经济性和科学性。

为了更好地使用和推广这些处理加固盐渍土地基的新技术和新方法,在本书的附录中,附录了《裹体碎石桩法处理地基技术规程》DB63/T885-2010、《盐渍土地基防腐蚀裹体混凝土灌注桩施工技术规程》和《某大型工业场地岩土工程勘察报告实例》,同时,还附录了作者5项发明技术专利资料。

由于作者的水平和时间所限,书中对盐渍土特性的认识定有遗漏,对内陆盐渍土地基的处理加固方法和桩基防腐蚀技术尚需不断改进和完善,书中存在的错漏之处在

所难免,敬请各位专家和同行指正。

本书在编著中,引用了龚晓南、周国均、余红发等专家和教授的论著、论文中的内容和计算公式;书中还引用了孙伟、李树奇、郭述军、冯守中、门楷、贺可强、高江平、王刚、高树国、黄仙枝、岂连生、郭伟玲、李小青、段继伟、李少、郭伟玲和陈文华等专家和学者的论著、论文的观点和试验数据等;本书在编著的全过程中,始终得到关文章教授、王为民研究员的关心和指导;书稿在校对过程中,张宪昌高级工程师给予了支持,在此一并表示深深的谢意!此外,在试验研究中,李盛芳、杨芳兵、王建峰、唐亚东、高战红、赵关华、李小红等工程师付出了辛勤的劳动,对他们所做的细致工作也表示感谢!

作者
2015年10月

| 上篇 | 内陆盐渍土工程特性

第一章 盐渍土工程分类命名和特殊性 / 3

- 第一节 盐渍土的双重性及定名 / 3
- 第二节 盐渍土的区域性分层和化学分层定名 / 4
- 第三节 盐渍土按盐性质分类定名 / 6
- 第四节 盐渍土的特殊工程性质 / 8
- 第五节 盐渍土天然状态下的微观结构浅析 / 11
- 第六节 盐渍土 τ 与 D_s 和 ω 的相关分析 / 13
- 第七节 小结 / 16

第二章 盐渍土的成因、岩性与地基性能特点 / 17

- 第一节 盐渍土的地质背景和成因 / 17
- 第二节 内陆、内地和滨海盐渍土各自的特点 / 17
- 第三节 盐渍土形成条件 / 19
- 第四节 内陆盐渍土作为重点研究与利用对象 / 19
- 第五节 内陆盐渍土地层及地基性能分析 / 20
- 第六节 盐渍土地基性能 / 23
- 第七节 载荷试验结果分析和评价 / 26

第三章 内陆盐渍土的腐蚀性及其地基特性 / 29

- 第一节 内陆盐渍土和卤水的化学特征 / 29
- 第二节 普通混凝土在盐渍土地区的腐蚀现状与腐蚀机理 / 32
- 第三节 钢筋混凝土在盐渍土地区的腐蚀现状与失效机理 / 33
- 第四节 盐渍土地基几个特殊性的评价 / 38

第四章 内陆盐渍土的工程勘察与报告书编制要点 / 43

- 第一节 岩土工程勘察的一般要求 / 43

- 第二节 勘察手段 / 46
- 第三节 盐渍土的盐类化学分析项目、物性参数试验 / 48
- 第四节 岩土勘察报告书的编写要点 / 48
- 第五节 盐渍土工程勘察报告书组成的 5 大板块 / 49
- 第六节 编制岩土勘察报告的思维及其过程 / 51
- 第七节 编制勘察报告的 5 个认识深化过程 / 52
- 第八节 分析、综合、经验与勘察报告质量 / 54

丨 中篇 丨 内陆盐渍土的地基与基础探究

第五章 盐渍土复合地基 / 61

- 第一节 盐渍土选用复合地基概述 / 61
- 第二节 软弱盐渍土的复合地基 / 63

第六章 内陆软弱盐渍土复合地基的设计理念 / 68

- 第一节 复合地基承载力计算原理和计算式 / 68
- 第二节 复合地基承载力 f_{spk} 深度如何修正 / 80
- 第三节 复合地基验算软弱下卧层强度分析 / 83
- 第四节 地基压缩层厚度确定 / 84
- 第五节 复合地基压缩模量 / 85
- 第六节 软弱盐渍土复合地基沉降量估算 / 86
- 第七节 软弱盐渍土复合地基优化设计构想 / 93

第七章 复合地基有关设计参数及其技术效果评述 / 98

- 第一节 复合地基构成要件和作用条件 / 98
- 第二节 桩平面排列、置换率与复合地基性能 / 103
- 第三节 复合地基中的垫层 / 109
- 第四节 铺设垫层及其技术要求 / 116
- 第五节 复合地基质量检测 / 119

第八章 软弱盐渍土复合地基质量检测 / 124

- 第一节 地基处理质量检测报告的作用 / 124
- 第二节 地基处理质量检测报告的责任 / 125
- 第三节 地基处理质量检测报告与岩土报告的差异 / 125
- 第四节 地基质量检测工作的特点 / 126
- 第五节 实践中广为采用的地基处理方法 / 127
- 第六节 地基处理质量检测工作的重点 / 128

第九章 软弱盐渍土复合地基载荷试验及曲线分析与评价 / 131

第一节 现场载荷试验 / 131

第二节 地基发生破坏的3种情况及 $P-S$ 曲线特征 / 135

第十章 内陆盐渍土地区防腐蚀桩基础 / 137

第一节 防腐蚀桩基础概述 / 137

第二节 用防腐蚀建筑材料制作混凝土桩 / 139

第三节 防腐蚀混凝土桩(裹体混凝土桩) / 140

下篇 | 处理软弱盐渍土地基的新方法

第十一章 早期处理软弱盐渍土地基的几种方法评述 / 161

第一节 振冲碎石桩加固效果分析与评述 / 161

第二节 堆载预压试验效果分析与评价 / 167

第十二章 裹体桩加固处理软弱盐渍土地基 / 176

第一节 裹体桩法加固处理盐渍土地基的基本原理 / 176

第二节 裹体桩加固地基方法的理论和机理 / 178

第三节 裹体桩专题研究试验结果分析 / 181

第四节 3种不同地基 $P-S$ 曲线的对比分析 / 184

第五节 裹体桩复合地基质量检测成果及分析评述 / 185

第六节 裹体桩复合地基设置边桩的作用 / 188

第七节 裹体桩施工方法 / 188

第八节 裹体碎石桩复合地基设计 / 190

第九节 裹体碎石桩复合地基施工 / 194

第十节 裹体碎石桩复合地基质量检测 / 196

第十一节 工程实例 / 196

第十三章 网袋法处理软弱盐渍土地基 / 204

第一节 网袋法概述 / 204

第二节 网袋法处理软弱盐渍土地基机理 / 205

第三节 网袋法处理软弱盐渍土地基承载力计算 / 216

第四节 网袋法处理软弱盐渍土地基的沉降计算 / 217

第五节 土工格栅加筋碎石垫层的设计 / 218

第六节 网袋法处理软弱盐渍土地基施工工艺和检验 / 223

第七节 工程应用实例 / 227

第十四章 礅壳法处理软弱盐渍土地基 / 236

第一节 礅壳法处理软弱盐渍土地基方法概述 / 236

第二节 礅壳法处理软弱盐渍土地基加固机理 / 236

第三节 礅壳法处理软弱盐渍土地基的设计 / 239

第四节 施工方法和工艺 / 248

第五节 质量检测 / 252

第六节 应用实例(化工原料罐区地基处理) / 253

第十五章 防腐蚀裹体混凝土灌注桩基础 / 256

第一节 防腐蚀裹体混凝土灌注桩基础概述 / 256

第二节 防腐蚀裹体混凝土灌注桩基础防腐蚀机理 / 257

第三节 防腐蚀裹体混凝土灌注桩基础设计 / 261

第四节 防腐蚀裹体混凝土灌注桩基础施工工艺 / 263

第五节 防腐蚀裹体混凝土灌注桩的质量检验和验收 / 272

第六节 工程实例 / 274

第十六章 植入式防腐蚀预制桩 / 300

第一节 植入式防腐蚀预制桩概述 / 300

第二节 植入式防腐蚀预制桩防腐蚀机理 / 301

第三节 植入式防腐蚀预制桩制作和设计 / 303

第四节 植入式防腐蚀预制桩施工 / 306

第五节 植入式防腐蚀预制桩桩壁外间隙充填 / 310

第六节 工程实例 / 311

第十七章 盐渍土复合地基的使用及病害预防和治理 / 321

第一节 概述 / 321

第二节 盐渍土复合地基不均匀沉降原因分析 / 321

第三节 预防盐渍土复合地基不均匀沉降措施 / 325

第四节 盐渍土复合地基的病害治理 / 328

第五节 工程实例 / 330

附录部分

附录一 裹体碎石桩法处理地基技术规程 / 339

附录二 盐渍土地基防腐蚀裹体混凝土灌注桩施工技术规程 / 356

附录三 某大型工业场地岩土工程地基岩土勘察报告实例 / 370

附录四 专利 / 388

参考文献 / 400

上篇

内陆盐渍土工程特性

我国内陆分布有上千个盐湖和大面积盐渍土,这些盐湖能为化工等产业提供丰富的原料。随着盐湖地区的开发建设,交通和工业、民用建筑业也陆续兴起,这些建(构)筑物的基础都座落在盐渍土地基上或埋置于盐渍土地基中。

盐渍土是由内陆湖积和冲积形成的特殊土,在土体的孔隙中含有丰富的各种盐类,它是在特定的地质环境和特定的物质条件下形成的特殊土层,两者的特殊耦合铸就内陆盐渍土地基的特殊性和对工程构件的腐蚀性。显然,选择和设计盐渍土地基的处理和加固方法,首先要认识盐渍土的特殊性。

第一章 盐渍土工程分类命名和特殊性

第一节 盐渍土的双重性及定名

盐渍土的双重性将分类及定名融为一体。从岩土工程性能上看,盐渍土既有和一般土一样的属性,同时,因其含有的盐分制约和赋予了盐渍土另外一种特别属性。两种属性各具特点,互有因果关系,但又不能合并代替。为了全面分析和评价盐渍土作为地基和工程填料等各种工程用途之需求,双重性分类和定名不可偏颇。

一、定名的标准探讨

1. 据地基基础设计规范有关规定分类定名

按岩性定名的标准,执行地基基础设计规范第4.1和第4.2的分类和定名的有关部分(岩石等除外),如碎石、黏性土定名。工程特性上,如压缩性(a_{1-2})分低、中和高3类等。

2. 按含盐量分类定名

有的规范将易溶盐含量与干土重量之比值超过0.5%的土定名为盐渍土,该标准与苏联铁道部的规定相一致。而苏联建设部规定该比值为0.3%便定名为盐渍土。

根据易溶盐含量0.5%或0.3%来确定是否属于盐渍土有其优点,方法简单,但欠全面。原因在于没有和建(构)筑物等级以及建筑物对溶陷的敏感性相联系,还有一个比较重要之点在于它应当把含盐土中的易溶盐和中溶盐含量及其溶解度纳入定名中,如易溶盐NaCl、KCl溶解度高达264~340mg/L,而中溶盐 $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 CaSO_4 溶解度只有2.0~2.1mg/L。溶解度高低对地基土的一系列性能有不可忽视的影响,如腐蚀性程度、速度和对地基强度的改变影响等。所以,对等级高的建(构)筑物,对溶陷敏感度高的工程,取易溶盐含量超过0.3%定为盐渍土;对建筑等级低(丙类建筑)、对地基溶陷变形要求不太敏感的工程,取易溶盐含量超过0.5%的定为盐渍土,这样的定名对工程有实际价值。

二、双重定名分类

例如, $10 < I_p \leq 17$ 定名为粉质黏土,易溶盐含量超过0.5%,这时宜定名为粉质黏

土盐渍土。从工程勘察和地基岩土工程分析评价的角度讲,在盐渍土前面加上土分类名称,与岩性相联系。盐渍土可以是粉土盐渍土、粉质黏土盐渍土、黏土盐渍土,也可以是砂盐渍土、砾石盐渍土等,从而把两个和地基性质直接有影响的岩性和含盐量结合起来,既全面又完整,地基性能分析也就有理有据,评价结论会更全面、确切、实际可用。此外,地基加固处理方案和把盐渍土作为工程地基填料等,也需要双重定名和评价作为技术措施的依据。为此,将在后面有关章节中进一步讨论。

第二节 盐渍土的区域性分层和化学分层定名

盐渍土有区域性差别,盐渍土化学定名有层次之分。区域性和化学性质不同,与盐渍土成因及其物质组成关系密切,因而导致其工程地质和岩土性质迥异。

一、盐渍土的区域性分类和分层

1. 盐渍土平面和剖面分区定名

内地盐渍土、滨海盐渍土和内陆盐渍土相比较,前两者盐渍土分布范围、工程上的重要性及其危害性都不能和内陆盐渍土相提并论。

内陆盐渍土的最大特殊性之一,是存在着空间分带性和分层性,于是,在平面上有氯盐渍土、硫酸盐渍土和碳酸盐渍土的分区分带性,如图 1-1。

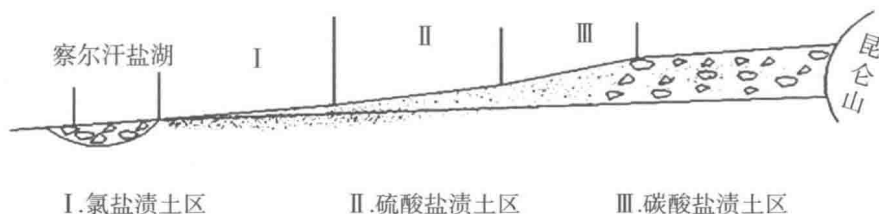


图 1-1 盐渍土分布平面示意图

平面存在分区性的同时,在深度上还存在分层性。

2. 不同盐类、盐渍土的平面分区规律

盐渍土含有易溶盐(NaCl 、 KCl 、 CaCl_2 、 MgSO_4 、 NaHCO_3)、中溶盐(Na_2SO_4 、 $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)和难溶盐(CaCO_3 、 MgCO_3)化合物。这三类化合物在水中的溶解度相差悬殊,并有明显的规律性。各种可溶盐在温度 20°C 的条件下的溶解度:

易溶盐溶解度高达 $300 \sim 400\text{g/L}$;

中溶盐溶解度只有 $2.0 \sim 2.1\text{g/L}$;

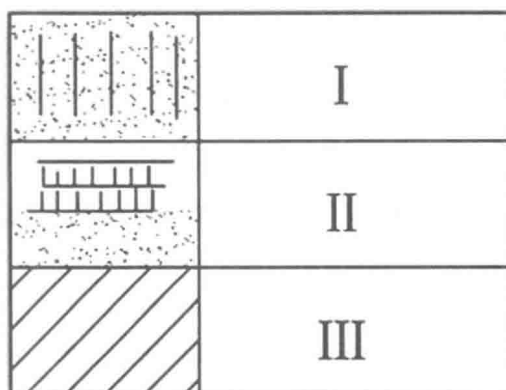
难溶盐溶解度为 1.15g/L 。

溶解度的不同,在水中溶解量和溶解速度上也各不相同,溶解度高的,先于中溶盐

和难溶盐溶解为离子,溶解速度和溶解数量都有差别。于是,中溶盐和难溶盐在靠近含盐层附近堆积,扩散距离和范围小,易溶盐扩散范围最大,中溶盐扩散范围在两者之间,故在平面上形成3种不同类型的盐渍土分区。

3. 不同盐类、盐渍土的分层规律

在盐渍土的形成过程中,难溶盐最早结晶随土(岩)颗粒沉积;中溶盐紧随其后结晶沉积;最后结晶离析沉积的是易溶盐类。从而,在深度上,溶解度低的难溶盐,因其溶解度很小,以离子、分子状态存在比例各不相同。以分子状态的难溶盐最先析出沉积在最下层,易溶盐最后析出沉积在最上层,于是出现不同盐类的分层规律(如图1-2)。



I. 氯盐渍土 II. 硫酸盐渍土 III. 碳酸盐渍土

图1-2 盐渍土垂直分带示意图

由于盐渍土在平面上分带和垂直深度上分层形成的结果,于是,在工程上首先接触到的绝大多数是易溶型氯盐渍土,而硫酸盐型盐渍土在地表很少遇上。

二、各种离子析出难易度与分层的关系

盐渍土的分层规律和成因除了受其溶解度影响外,同时,还受元素的迁移能力控制。

土的盐渍程度和土中所迁移的离子种类有密切的关系。

苏联学者波雷诺夫等提出了常见元素迁移系列,在风化过程中化学元素迁移能力的强弱次序如表1-1。

表1-1 化学元素迁移强弱系列

元素迁移系列	迁移系列组成
1. 极强烈迁移的元素	Cl、(Br、B、I)S
2. 易迁移的元素	Ca、Na、Mg、F、Sr、Zn、U
3. 可迁移的元素	SO ₂ (硅酸盐的)、K、Mn、P
4. 略可迁移的元素	Al、Fe、Ti
5. 实际不迁移的元素	SO ₂