

# 含盐水泥土桩 耐久性技术

**Hanyan Shuinituzhuang  
Naijiuxing Jishu**

朱万生 王涛 崔新壮 主编

山东大学出版社

# 含盐水泥土桩耐久性技术

主编 朱万生 王 涛 崔新壮

山东大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

·含盐水泥土桩耐久性技术/朱万生,王涛,崔新壮主编.

—济南:山东大学出版,2011.8

ISBN 978-7-5607-4450-6

I. ①含…

II. ①朱… ②王… ③崔…

III. ①水泥桩—耐用性—研究

IV. ①TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 178900 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 20 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

济南景升印业有限公司印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32 9.625 印张 241 千字

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

版权所有,盗印必究

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

# 前 言

在软弱土上修建高速公路等基础设施会引起大的沉降,特别是在桥头处,会引起“桥头跳车”现象。“桥头跳车”造成的经济损失非常大,例如,在美国大约有 25% 的桥涵(约 15000 座构造物)受到桥头跳车的影响,每年花费的维修费用高达 1 亿美元以上。而在我国,路基高、桥涵密度大是我们的国情,据统计,东南沿海地区修建的公路大约平均每 300~500m 就有一处桥涵。虽然目前我国没有“桥头跳车”经济损失的具体统计数据,但“桥头跳车”造成的危害性及严重的经济损失是不言而喻的。水泥土搅拌桩(含浆喷桩和粉喷桩)技术被广泛用于软弱地基的加固,以防“桥头跳车”现象的发生。

但是,我国很多地区的地表土与地下水中含盐量很高,盐将使得水泥土的力学特性发生劣化,严重影响水泥土搅拌桩复合地基的承载性能。本书系统论述了我国含盐土的分布及工程特性、含盐水泥土的劣化机理与规律。黄河三角洲是我国最年轻的大河三角洲,由于历史上黄河河道变迁、近年来不合理农业灌溉及海平面上升等原因,黄河三角洲地区存在大面积地下咸水,地下水和土的矿化度都很高。除古黄河三角洲有部分淡水和微咸水外,近代和现代黄河三角洲基本都是矿化度大于 3g/L 的咸水和盐水,甚至大于 50g/L 的卤水,而且化学分析表明呈酸性。所以,以黄河三角洲为例,结合多年的工程实践和研究成果,本书还系统论述了含

盐水泥土桩的耐久性技术及复合地基优化设计。

全书由滨州公路局朱万生、王涛、丁冠旭、齐春光、安志村、李明军、刘雁冰,山东大学崔新壮、郑骁、欧金秋、王聪、车华桥等合作编著。

本书在编写过程中引用了国内外许多专家学者的研究成果和文献,在此表示衷心的感谢。该书出版还受到国家自然科学基金(51078222)、山东省自然科学基金(ZR2011EEM012)及山东大学自主创新基金杰出青年培养项目(2010JQ001)的资助,在此一并表示感谢。由于作者水平有限,难免有欠妥甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编者  
2011年8月

# 《含盐水泥土桩耐久性技术》 编委会

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 朱万生 | 王 涛 | 崔新壮 |
| 编 委 | 丁冠旭 | 齐春光 | 安志村 |
|     | 郑 骁 | 欧金秋 | 王 聪 |
|     | 车华桥 | 李明军 | 刘雁冰 |

# 目 录

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| <b>第一章 绪 论</b> .....               | (1)  |
| 第一节 含盐土的概念.....                    | (1)  |
| 第二节 含盐土的特点及分布概况.....               | (2)  |
| 第三节 含盐土的成因.....                    | (7)  |
| 第四节 含盐土的分类 .....                   | (12) |
| 第五节 含盐土的工程危害 .....                 | (22) |
| 第六节 水泥土搅拌桩技术现状 .....               | (30) |
| <b>第二章 含盐土的工程性质</b> .....          | (41) |
| 第一节 含盐土的组成与物理指标 .....              | (41) |
| 第二节 含盐土的力学性质 .....                 | (45) |
| 第三节 含盐土的结构特征 .....                 | (55) |
| <b>第三章 地下水污染对水泥土的侵蚀规律与防治</b> ..... | (58) |
| 第一节 水中离子种类对侵蚀的影响 .....             | (58) |
| 第二节 离子浓度对侵蚀的影响 .....               | (67) |
| 第三节 地下水 pH 的影响 .....               | (72) |
| <b>第四章 滨海咸水区水泥土劣化规律与防治</b> .....   | (76) |
| 第一节 国外研究成果 .....                   | (76) |
| 第二节 江苏滨海地区水泥土劣化规律 .....            | (77) |
| 第三节 深圳滨海地区水泥土劣化规律 .....            | (80) |

## 含盐水泥土桩耐久性技术

|      |                                          |       |
|------|------------------------------------------|-------|
| 第四节  | 黄河三角洲滨海地区水泥土劣化规律 .....                   | (81)  |
| 第五章  | 黄河三角洲咸水区水泥土桩复合地基沉降<br>和承载性状研究及现场观测 ..... | (136) |
| 第一节  | 咸水区水泥土桩复合地基沉降和承载性状现场观测<br>.....          | (136) |
| 第二节  | 复合地基沉降和承载特性数值模拟与分析 .....                 | (147) |
| 第六章  | 黄河三角洲咸水区水泥土桩复合地基模型试验研究<br>.....          | (176) |
| 第一节  | 模型试验基本原理 .....                           | (176) |
| 第二节  | 试验方案 .....                               | (180) |
| 第三节  | 模型箱研制 .....                              | (182) |
| 第四节  | 桩体和复合地基模拟 .....                          | (184) |
| 第五节  | 路堤荷载模拟方法 .....                           | (185) |
| 第六节  | 模型试验过程及测试 .....                          | (186) |
| 第七节  | 试验结果与分析 .....                            | (190) |
| 第八节  | 复合地基变形与破坏 .....                          | (197) |
| 第九节  | 小 结 .....                                | (198) |
| 第七章  | 黄河三角洲咸水区水泥土桩耐久性设计方案与论证<br>.....          | (199) |
| 第一节  | 耐久性设计方案 .....                            | (199) |
| 第二节  | 方案论证与分析 .....                            | (202) |
| 参考文献 | .....                                    | (296) |

# 第一章 绪 论

## 第一节 含盐土的概念

水泥土是水泥、土、水以及外加剂等按一定比例掺和,经原位搅拌而成的多相混合体系。常用于处理淤泥、淤泥质土、粉土和黏性土等地基,可根据需要在地基中形成块状、壁状、格栅状等形状的水泥土桩,主要用于形成复合地基、基坑支挡结构、止水帷幕等用途。水泥土搅拌法因为施工速度快、无公害,施工过程无振动、无噪音、无地面隆起,不排污、不排土、不污染环境和对相邻建筑物不产生有害影响等优点,近年来在土木工程中得到应用广泛。

然而,在工程实际中,由于水泥土的应用特点,水泥土常受到地表附近盐渍土及含有一些具有侵蚀性离子的地下水、生活污水和海水等周围环境因素的影响,在此环境条件下,其力学性能必将受到不同程度的影响,如水泥土的强度、变形和耐久性等有可能发生变化。有关环境侵蚀因素对水泥土力学性能的影响方面的研究还鲜有报道。由于其试验技术和手段还不系统、不完善,理论亦不够成熟,还有很多需要探索和研究的工作,部分文献仅仅做了某一环境侵蚀影响的初步探讨。对于受各种环境侵蚀下水泥土力学性能的侵蚀效应、其内部的损伤机理和演化规律等均未研究清楚。

在本书中,含盐土是指地表盐渍土、地下咸水区和地下水遭污

染地层对应的土体。

## 第二节 含盐土的特点及分布概况

### 一、盐渍土的主要特点及分布概况

#### (一) 盐渍土的主要特点

盐渍土地基通常在岩土工程中归入特殊地基。盐渍土之所以要作为一种特殊的土来研究,是因为它具有一般土没有的特点,不能按一般土来对待。盐渍土主要有五个特点。

第一,盐渍土的三项组成与一般土不同,液相中含有盐溶液,固相中含有结晶盐,尤其是易溶的结晶盐,它们的三相转变对土的大部分物理指标均有影响。因而,测定非盐渍土物理性质指标的常规土工试验方法对盐渍土不完全适用,对土的颗粒分析、塑限和液限试验结果以及重度、含水量等给出不正确的评价,会导致对土的名称和状态的错误判断。

第二,盐渍土中的盐遇水溶解后,土的物理和力学性质指标均会发生变化,其强度指标明显降低。所以,盐渍土地基不能同一般土的地基一样,只考虑天然条件下的原始物理和力学性质指标。

第三,盐渍土地基浸水后,因盐溶解而产生地基溶解。地基溶解量的大小主要取决于易溶盐的性质、含量及其分布形态,盐渍土的类别、原始结构状态和土层厚度,浸水量、浸水时间和方式,渗透方式和土的渗透性等。

第四,某些盐渍土(如含硫酸钠的土)地基,在温度或湿度变化时,会产生体积膨胀,对建筑物和地面设施造成危害。这种由于盐胀引起的地基变形的大小,取决于土中硫酸钠含量的多少以及土中温度和湿度变化的大小。

第五,盐渍土中的盐溶液会导致建筑物和地下设施的材料腐

蚀。腐蚀程度取决于材料的性质和状态以及盐溶液的浓度等。

除了上述主要的工程特征外,盐渍土还具有许多其他的特点。例如,在盐渍土地区除了低洼处由于地下水位较高能生长盐蒿、芦苇外,一般地表没有植物生长或仅有衰退的植物残体存在。又如,盐渍土一般具有较强的吸湿性,因土中存在吸附性阳离子,所以遇水后能吸收较多水分,使盐渍土变软;反之,失水时土体干缩严重,有时造成地面龟裂。另外,干旱地区的盐渍土由于其特殊的成因和地理条件,其结构常呈现架空的点接触或结胶接触的形式,使盐渍土具有不稳定的结构性。

## (二)盐渍土的分布概况

盐渍土在世界各个地区均有分布。在欧洲的法国、西班牙、意大利、匈牙利、罗马尼亚均存在着盐渍土。在美洲的加拿大、墨西哥、阿根廷、智利和秘鲁的某些区域,也有盐渍土,美国的盐渍土主要集中在加利福尼亚等西部地区。非洲的盐渍土分布在南非、东非和北非,特别在尼罗河三角洲一带,面积相当广泛。盐渍土在亚洲和中东地区分布也很广泛,主要分布在蒙古、印度、巴基斯坦、土耳其、伊朗、伊拉克、叙利亚、科威特、沙特阿拉伯等国。盐渍土在前苏联的分布面积约有  $7.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,主要分布在中亚地区、后高加索地区、乌拉圭地区、黑海地区和西伯利亚地区。

我国的盐渍土主要分布在西北干旱地区,如新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古等地势低平的盆地和平原中。其次,在华北平原、松辽平原、大同盆地以及青藏高原的一些湖盆低洼地中,也都有分布。另外,滨海地区的辽东湾、渤海湾、莱州湾、杭州湾以及台湾在内的诸海岛沿岸,也有相当面积存在。

盐渍土中有一些以含碳酸钠或碳酸氢钠为主的盐类,碱性较大(一般 pH 为  $8 \sim 10.5$ ),称为碱土,湿时膨胀、分散、泥泞,干时收缩,这主要是由于其吸附钠的离子具有高分散作用而造成的。部分碱性盐渍土(或碱土)则零星分散在我国东北的松辽平原,华

北的黄、淮、海河平原,内蒙古草原以及西北的宁夏、甘肃、新疆等地的平原地区。

根据《中华人民共和国土壤图》以及近若干年来我国各部门在各地进行工程地质勘查的资料,得到了我国盐渍土分布的示意图(见图 1-1),仅供初步参考。随着工程建设的发展和工程地质勘察资料的进一步积累,我国盐渍土的分布图也将会得到补充和完善。应当说明,示意图中的盐渍土的含盐量规定;由于各部门的标准不尽相同,所以其分布面积也不能精确划定;此外,有些已查明的盐渍土分布区,由于面积较小,未能在图上标明。所以,实际的盐渍土分布面积要比示意图中的大。

我国盐渍土不仅地区之间差别很大,而且在同一地区也有很大的不同。前述有关盐渍土的工程特性,在有的地区就不一定都显示出来。例如在盐湖地区的盐渍土,就没有溶陷性,而且也很少表现出游盐胀性。同样,滨海地区的盐渍土也以腐蚀性为主,溶陷和盐胀的问题不严重。相反,在地下水位较深的干旱地区,盐渍土的溶陷或盐胀问题则比较突出。

我国西北的戈壁和沙漠地区,不少地方含盐量较高,属于盐渍土地区,但地基并不都是盐渍土(如河流附近的土含盐量较低),具体情况还有待进一步查明。

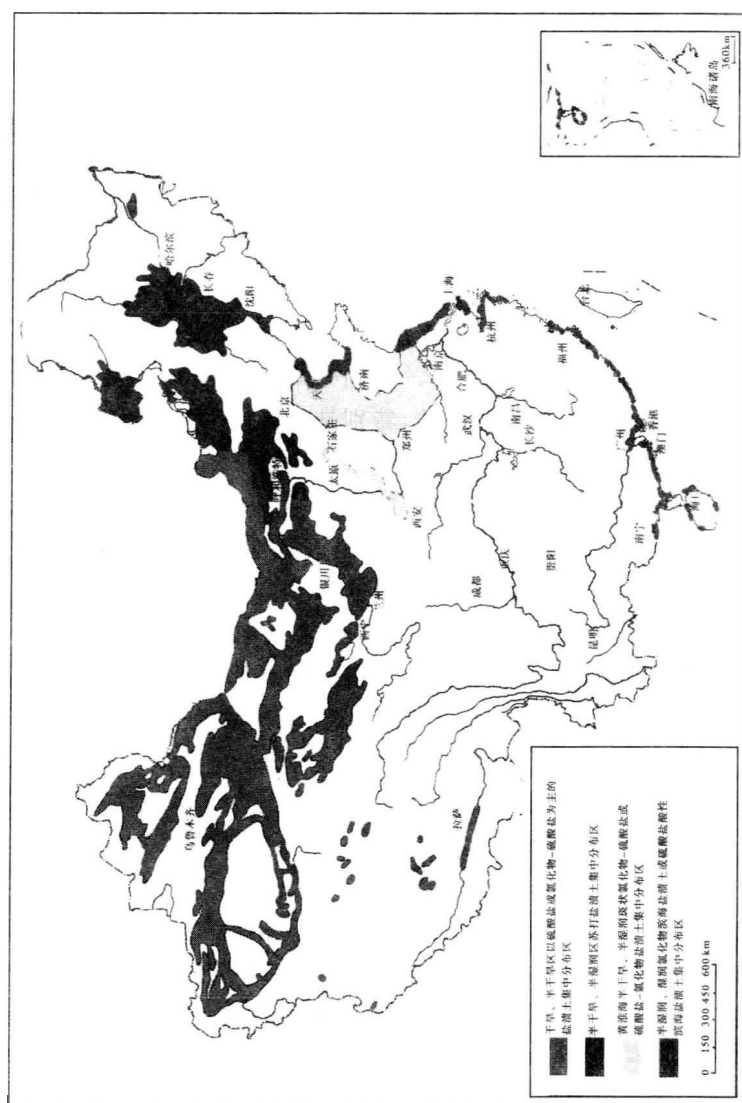


图 1-1 我国盐渍土分布区示意图(根据王遵亲,1993 年改制)

## 二、滨海地下咸水区含盐土的主要特点及分布概况

### (一) 滨海地下咸水区含盐土的主要特点

滨海地下咸水区含盐土的特点,一是含盐土和地下水的盐分组成与海水基本一致,都是以氯化钠为主;二是含盐量除表层土壤含盐量稍高以外,以下土层含盐量分布比较均匀。这两点是它区别于其他含盐土最主要的地方。

除上述主要特点外,滨海地下咸水区含盐土的工程性质与一般含盐土、盐渍土均有很大区别。(1)滨海地下咸水区含盐土三相性与一般土类也有较大不同,气相中气体含量很少,液相中含有含盐水,固相中含有大量结晶盐,特别是来自海水的易溶性结晶盐。(2)由于其长期处于地下,受温度的影响较小。(3)因为其长期被海水、地下水浸泡,滨海地下咸水区含盐土的强度指标较低。(4)滨海地下咸水区含盐土会导致建筑物与地下设施的侵蚀,其侵蚀程度受海水温度、含盐量的影响较大。

### (二) 滨海地下咸水区含盐土的分布概况

滨海地下咸水区的含盐土成形时间不长,地面高程一般都在10m之下,因受海潮浸渍,且因海水倒灌的影响而排水困难。地下水位一般为0.5~2m,矿化度为10~50g/L,高的达120~150g/L,高矿化度水的厚度数十米,甚至达200米。唐于银等人的研究表明,东部滨海盐渍土分布在我国约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的海岸线沿岸,其间有着丰富的滨海盐土和地下咸水区含盐土。长江口以北的江苏、山东、河北、辽宁等省份盐土的面积达到 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,随着黄河河口的进一步向东推进,盐土的面积还在逐渐增加,也形成了大量地下咸水区含盐土。江苏沿海地区由于受海潮和海水型地下水的双重影响,土壤具有盐分重、养分含量低、土壤盐分组成以氯化物为主的特性。地下水矿化度高、地上和地下淡水资源缺乏、地下水位高是土壤盐渍化的重要因素。长江口以南如浙江、福

建、广东的滨海盐土分布零星,但也有逐年增加的趋势。由于年降水量大,土壤的淋洗作用强烈,滩地受海潮浸渍而形成盐土,通过雨水淋洗作用,逐渐淡化为盐渍化土壤,1m 土体含盐量小于6g/kg,这里既有以氯化物为主的微碱性盐土,也有在红树林群落影响下形成的酸性硫酸盐盐土。华北平原地区也存在大面积的含盐土,如山东、河北的滨海地区。该地区含盐土主要是在毛细管上升和涝水侧渗双重影响下形成的,也有部分是由于底部积盐层的盐分经重新分配向地表累积而形成的。该区域含盐土面积较大的有山东的聊城、东营、滨州,河北的沧州等地。

### 第三节 含盐土的成因

#### 一、盐渍土的成因

盐渍土的产生是多种因素相互作用的结果,其产生的主要条件有六条。

##### (一)地形条件

地形条件是盐渍土产生的主要条件,盐渍土分布区所处地形多为低平地、内陆盆地、局部洼地以及沿海低地,这是由于盐分随地表、地下径流由高处向低处汇集,使洼地成为水盐汇集中心。如南疆铁路通过的焉耆盆地区为高山环绕的内陆山地盆地,正好形成有利于盐渍土产生的地形条件。

##### (二)气候条件

盐渍土分布区的气候多为干旱或半干旱气候,降水量小,蒸发量大,年降水量不足以淋洗掉土壤表层累积的盐分。由于新疆地区属大陆性气候,表现出干旱的气候特征,蒸发量大于降水量数十倍甚至更多,这就决定了土壤中上升水流占绝对优势,随着地下水体中含盐矿物不断聚积,矿化度增高,为地表积盐提供了物质条

件。而在自然条件下,降水的淋洗作用和脱盐作用就显得十分微弱。

### (三)水文地质条件

水文地质条件也是影响土壤盐渍化的重要因素。盐分的积聚,与地下水水位、矿化度和矿化类型有密切关系,地下水水位越高,蒸发越强,土壤的积盐也越快。同时,地下水矿化度愈高,地下水向土壤输送的盐分越多,土壤的积盐也越重。强烈蒸发的气候条件和地下水矿化度较高的水文地质条件是新疆土壤积盐严重的主要因素。像南疆铁路经过的焉耆盆地为内陆山地盆地,盆地内有博斯腾湖,该湖面积较大,湖水水位较高,也抬高了湖水周围陆地的地下水水位。加之湖周围陆地地势平坦,地表、地下径流不畅,盐分缺乏出路,地下水的矿化度不断抬高,多方面的作用使焉耆盆地成为新疆盐渍化程度最重的地区。

### (四)地层岩性

盐渍土地段的地层岩性多为第四系松软地层,如砂类土和黏性土,大颗粒碎石类土不会产生盐渍化作用。

### (五)植被

大量盐生植物加剧了土壤的盐渍化。象新疆地区胡杨、芦苇等深根植物较多,在它生长过程中的蒸腾作用,消耗了大量地下水,相应加大了地下水的矿化度,间接加强了土的盐渍化。此外常见的盐土植物以及干旱地区的深根性植物或盐生植物,又能从土层深处及地下水中吸收水分和盐分,将盐分累积于植物体中,植物死亡后,有机残体分解,盐分回归土壤,逐渐积累于地表,具有一定的积盐作用。

### (六)人类活动的影响

人类的工程经济活动,如不合理开垦土地而进行的土壤洗盐、农作物大量施用化肥、污水乱排导致下游地段土层含盐量及地下水矿化度的增高,或者不合理的灌溉,引起局部地下水位上升,造

成土壤表层含盐量增高。在这些内外因的综合影响下,导致了盐渍土地区环境条件的不断恶化,盐渍化程度不断加重。

## 二、滨海地下咸水区含盐土的成因

与新疆盐渍土等内陆盐渍土、内陆盐湖地区含盐土的形成原因不同,滨海地区由于其独特的地理位置、自然环境和人类活动的影响,滨海地下咸水区含盐土的形成有其特殊的形成原因及规律。

特殊的地理位置和地质条件也是滨海地下咸水区含盐土形成的原因之一。安永运研究黄河三角洲地下淡水(微咸水)形成与演化结果表明,地下淡水和微咸水的形成、演化与古黄河河道变迁、三角洲形成的早晚、微地貌特征及现代河道与渠系分布密切相关。咸水广布的古黄河三角洲地区一系列古河道中的浅层淡水含水水体由于以下两种因素被咸化,即大气降水渗入补给地下水过程中,对土体中的盐分起淋溶作用,将盐分携带给淡水水体;同时,在水动力场作用下,咸水侵入带状浅层淡水水体。大气降水和引黄灌溉回归水在径流和渗流过程中,把高地土(砂)层的盐分携带到低洼地,从而高地地带土(砂)层的盐分缓慢减少,在长期补给作用下,淡水逐渐将咸水淡化,形成微咸水分布区;而在地形低洼地带则会形成盐分聚集区,造成大面积中等或重盐渍化,最终形成地下咸水区含盐土。

不同类型的海水入侵也是滨海地下咸水区含盐土形成的原因之一。陈鸿汉对海水入侵的方式做了分类,依含水层性质、水文地质条件、入侵区位置和方式,把海水入侵大致分为裂隙岩溶式、第四系松散孔隙式、山前平原扩散型、滨海平原开采型、河流谷底开采入渗型、直接与间接式7种类型,其中以孔隙水含水层海水入侵的发生几率最大。韩、美的研究表明,基岩黄土台地海岸有海蚀崖分布,崖面高出海面几米至几十米,同时透水性都很差。这类海岸海水一般沿着基岩构造裂隙呈线状向内陆侵入,沙质海岸堆积