

海砂土力学特性及其在 路基工程中应用

金明东 李淑娥 徐永福 著

中国建筑工程出版社

海砂土力学特性及其在 路基工程中的应用

金明东 李淑娥 徐永福 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

海砂土力学特性及其在路基工程中应用/金明东, 李淑娥, 徐永福著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-112-20096-2

I. ①海… II. ①金… ②李… ③徐… III. ①海域-砂-岩土力学-研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 277298 号

本书是作者多年的科研和教学研究总结, 书中既有作者的研究成果, 也有作者对于研究对象所提出的疑问和相应的解决方法, 为研究对象在工程中的实际应用提出了坚强的理论支撑。

全书共有 10 章内容, 分别是: 海砂利用的意义和问题、海砂的土力学特性、海砂的动力学特性、海砂的溶陷性、固化海砂的强度特性、海砂路基的填筑技术、海砂路基的液化病害及其防治措施、海砂路基冲刷病害及其防治措施、海砂中盐离子迁移过程模拟、海砂中混凝土的防腐措施。

本书适合广大岩土专业的工程技术人员、科研人员和相关专业的师(生)阅读参考。

责任编辑: 张伯熙

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 王雪竹

海砂土力学特性及其在路基工程中应用

金明东 李淑娥 徐永福 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16¼ 字数: 372 千字

2018 年 9 月第一版 2018 年 9 月第一次印刷

定价: 62.00 元

ISBN 978-7-112-20096-2
(29559)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

海砂，顾名思义，是从海中取出的砂，无论是吹填海砂，还是围堰抽干水后开挖的海砂。本书中如东海砂是吹填而成，启东海砂是围堰开挖而成。由于海洋沉积环境复杂和海洋沉积物来源丰富，海砂虽然名为砂，实际成分很复杂。海砂的颗粒组成符合砂的定义，液塑限指标接近粉土，黏土矿物成分多样，不是纯净的砂，用作建筑材料需要经过有针对性的处理。海砂是滨海地区的丰富资源，若能够加以利用，社会意义和经济价值是无法估量的。

海砂用于路基填筑是最直观、最简单的变废为宝措施。海砂不是好的路基填料，不符合路基填料要求。海砂用作路基填料，既具有砂的缺点，又具有滨海相盐渍土的缺陷。砂用作路基填料，不易压实，易被冲刷；滨海相盐渍土用作路基填料，可能产生湿陷变形，滨海地区易产生次生盐渍化，对埋设其中的钢筋混凝土构筑物存在腐蚀作用。由于海砂用于路基填筑具有以上不足，在道路建设中都弃之不用，避而远之。江苏公路经过二十多年高速发展，取得了举世瞩目的成就。伴随着成就，也带来了问题。由于土地资源的缺乏，路基填料越来越紧张，取土坑费用越来越高。在滨海地区，即使有土地供取土坑之用，土质也很难满足路基填料要求。鉴于取土坑用地紧张和海砂应用的社会经济价值，海砂用作路基填料势在必行。本书在南通市公路管理处直接参与和支持下，集成了江苏省交通运输厅科技课题的研究成果，依托临海高等级公路南通段的海砂路基工程，系统地研究了海砂的土力学特性，归纳总结了海砂作为路基填料存在的问题，并提出问题的解决方法，为海砂在路基填筑中应用提供了坚强的理论支撑。

本书共分 10 章。第 1 章对海砂名称进行界定，总结了海砂用于路基工程中存在的问题，提出海砂的土力学特性的研究方向和关键内容。第 2 章研究了海砂的基本土力学特性，包括颗粒分布特性、含盐性状及按盐渍土类型进行分类、渗透（溶质）吸力和基质吸力、毛细水上升机理和上升高度、强度特性及强度机理。第 3 章研究了海砂的动力特性，主要包括动弹模量和阻尼比，以及含盐量对海砂动力特性的影响。第 4 章研究了海砂的溶陷性，系统地研究了海砂的击实性状对溶陷性的影响及海砂的溶陷等级、水泥固化海砂和石灰固化海砂的溶陷特性、含盐量对海砂溶陷性的影响。第 5 章研究了海砂的固化方法及固化海砂的强度特性，包括水泥固化海砂和石灰固化海砂的应力—应变关系、无侧限抗压强度、三轴剪切强度、固化海砂的延迟击实特性和水稳性。第 6 章研究了海砂路基的填筑技术，包括海砂的路用性能、海砂填筑沟塘和路基的施工方法及质量检测方法、海砂路基碾压工艺、路基包边措施设计和施工方法、海砂路基均匀性评价方法。第 7 章研究了海砂路基液化病害成因机理和防治措施，包括海砂路基在行车动荷载下的超孔隙水压力形成机

理及其影响因素。第8章研究了海砂路基冲刷特性及其防治措施,包括海砂路基冲刷的现场调查和分类、冲刷机理、冲刷模型、冲刷数值模拟和防治措施。第9章研究了海砂路基中氯盐在钢筋混凝土构件的迁移模型和数值模拟,比较了海砂环境和海水环境中氯离子迁移机理,分析了干湿循环、温度周期性变化、裂隙等因素对氯盐迁移的影响。第10章研究了海砂路基中钢筋混凝土构件的防腐蚀措施,通过数值分析方法系统地分析了不同措施的防腐蚀效果,为海砂路基中钢筋混凝土构件的防腐蚀措施提供理论依据。本书不是泛泛的工程实例的介绍,而是对海砂路基填筑技术和海砂路基病害防治措施作了深入浅出的分析,学术价值十分突出。

本专著各章节著写分工:徐永福负责著写前言、第1章和第2章,金明东负责著写第3章、第4章、第6章和第7章,李淑娥负责著写第5章,陈志明负责著写第8章和第9章,江来荣负责著写第10章。在本书相关内容的研究过程中,得到了南通公路管理处陈宁、吉加兵、柏平、康忻峰,江苏省公路管理局宋国森、朱蕾蕾,江苏省交通工程建设局夏文俊、赵阳、周欣,启东市交通运输局瞿键、龚英、龚耀辉,如东县交通运输局胡伟、楼家建,上海交通大学车爱兰、宋晓冰等的帮助和支持,在此一并致以诚挚的谢意!书中部分内容取自上海交通大学研究生乔頔、喻国轩、王培中和高子瑞的学位论文,另外,上海交通大学研究生王驰、项国圣、姜昊、蒋顺强等参与了书中部分内容的研究,感谢他们的辛勤劳动!

在本书相关内容的研究过程中,得到了江苏省交通运输厅科技处、南通市公路管理处、启东市交通运输局、江苏省公路局和江苏省交通工程建设局的帮助和支持,在此深表谢意!

上海大学孙德安教授审阅部分书稿,部分室内试验是孙德安教授的研究生协助完成的,在此表示衷心的感谢!

本书得到了国家自然科学基金重点项目(41630633)的资助!

为了保持研究内容的完整性,书中引用许多学者的研究成果,对书中被引用成果的学者致以深深的敬意!著者尽全力将引用成果的作者作了明确的引用注释,对个别没有能够标注原始成果的出处,请谅解。

由于笔者才疏学浅,书中不当之处肯定存在,恳请读者不吝赐教!

徐永福

2018年6月

目 录

第 1 章 海砂利用的意义和问题	1
1.1 海砂的界定	1
1.2 海砂用于路基填筑的意义	1
1.2.1 海砂利用的社会意义	1
1.2.2 海砂利用的经济分析	2
1.3 海砂路基存在的问题	3
1.3.1 海砂用于路基填筑的可行性	3
1.3.2 海砂填料的不足	3
1.3.3 海砂的腐蚀性	4
第 2 章 海砂的土力学性质	5
2.1 海砂的基本性质	5
2.1.1 颗粒分析	5
2.1.2 稠度界限	6
2.2 海砂的含盐量	6
2.3 海砂的毛细作用	8
2.4 海砂的吸力	11
2.4.1 吸力的概念	11
2.4.2 海砂的吸力测量	13
2.4.3 海砂的土水特征曲线	17
2.5 海砂的剪切强度	20
2.5.1 试样配制	20
2.5.2 三轴试验	21
2.5.3 直剪试验	24
2.6 海砂的强度机理	26
2.6.1 非饱和土的强度理论	28
2.6.2 双电层理论	30
第 3 章 海砂的动力特性	33
3.1 动三轴试验	33

3.1.1	动三轴试验应力状态	33
3.1.2	非饱和土的动三轴仪	34
3.1.3	试验方法	34
3.2	海砂的动应变	36
3.2.1	动应力—应变关系	37
3.2.2	动弹模量	41
3.2.3	阻尼比	43
3.2.4	盐对海砂动力特性的影响	45
第4章	海砂的溶陷性	48
4.1	溶陷试验	49
4.2	启东海砂的溶陷性	50
4.3	东台海砂的溶陷性	53
4.4	不同含盐量的海砂的溶陷性	58
第5章	固化海砂的强度特性	61
5.1	海砂的固化方法	61
5.2	海砂的固化机理	62
5.2.1	水泥固化机理	62
5.2.2	石灰固化机理	63
5.3	固化海砂的无侧限抗压强度	64
5.3.1	水泥固化海砂的无侧限抗压强度特性	64
5.3.2	石灰固化海砂的无侧限抗压强度特性	67
5.3.3	时间延迟效应	68
5.4	固化海砂的三轴试验	71
5.4.1	试样制备	71
5.4.2	试验条件	72
5.4.3	试验结果	72
第6章	海砂路基的填筑技术	80
6.1	海砂的路用性能	80
6.1.1	天然海砂的路用性能	80
6.1.2	水泥固化海砂的路用性能	81
6.1.3	石灰固化海砂的路用性能	82
6.2	海砂用于沟塘填筑的技术	84
6.2.1	设计要求	84

6.2.2 沟塘填筑 84

6.2.3 压实度的控制措施 86

6.2.4 沟塘底填土的压实度验算 86

6.3 海砂路基的填筑技术 88

6.3.1 填筑方法 88

6.3.2 填筑质量控制 90

6.3.3 碾压组合优化 94

6.4 海砂路基的包边技术 101

6.4.1 包边土的性能要求 101

6.4.2 包边土宽度确定 104

6.4.3 包边土的施工方法 106

6.4.4 包边土施工监测 108

6.5 海砂路基均匀性检测 111

6.5.1 表面波勘探的原理 111

6.5.2 表面波勘探方法 112

6.5.3 现场数据采集 112

6.5.4 数据分析 113

第7章 海砂路基的液化病害及其防治措施 118

7.1 海砂路基液化病害分类 118

7.1.1 海砂路基开裂病害 118

7.1.2 海砂路基翻浆冒泥病害 119

7.2 路基海砂路基内的孔隙水压力 121

7.2.1 控制方程 121

7.2.2 非饱和土的水理性质 123

7.2.3 计算模型 126

7.2.4 模拟结果 128

7.3 海砂路基翻浆冒泥的防治 133

第8章 海砂路基冲刷病害及其防治措施 134

8.1 海砂路基冲刷病害调查 134

8.1.1 冲刷病害类型 134

8.1.2 冲刷的影响因素 136

8.2 海砂的冲刷机理 138

8.3 海砂的冲刷模型 142

8.4 海砂的冲刷等级 144

8.4.1	管涌冲刷等级划分	145
8.4.2	坡面径流冲刷等级划分	145
8.5	路基边坡冲刷的数值模拟	147
8.5.1	计算模型	147
8.5.2	模型参数选取	148
8.5.3	砂土边坡冲刷模拟结果	150
8.5.4	黏土边坡冲刷模拟结果	153
8.6	植物防护分析	156
8.6.1	植物根系土的力学特性	156
8.6.2	植被率的影响	160
8.6.3	植物根系对冲刷的影响	162
第9章	海砂中盐离子迁移过程模拟	164
9.1	离子迁移机理	164
9.1.1	氯离子的迁移机理	164
9.1.2	硫酸根离子的迁移机理	166
9.2	氯离子迁移模型	166
9.2.1	考虑结合作用	166
9.2.2	考虑电场作用	174
9.2.3	考虑毛细作用	180
9.2.4	海砂与海洋环境中氯离子迁移对比	186
9.3	硫酸根离子的迁移模型	189
9.3.1	硫酸根离子的扩散方程	189
9.3.2	计算模型	191
9.3.3	计算结果	191
9.4	氯离子迁移的影响因素	194
9.4.1	温度变化的影响	194
9.4.2	盐分变化的影响	197
9.4.3	裂缝对氯离子迁移的影响	202
第10章	海砂中混凝土的防腐措施	208
10.1	氯离子的扩散系数	208
10.1.1	自然扩散试验	208
10.1.2	电加速试验法	209
10.1.3	氯离子扩散系数	213
10.2	钢筋锈蚀的临界氯离子浓度	213

10.3	海砂中氯离子迁移	218
10.4	海砂中混凝土的寿命	222
10.5	混凝土的防腐措施分析	226
10.5.1	增加保护层厚度	226
10.5.2	提高混凝土等级	228
10.5.3	添加粉煤灰	229
10.5.4	添加炉渣	232
10.5.5	表面防腐涂层	234
10.5.6	电化学保护	240
	参考文献	243

第 1 章 海砂利用的意义和问题

1.1 海砂的界定

海砂的现场取样如图 1-1 所示。如东海砂含泥量高，细粒含量高；启东海砂的含砂量高，性质比较好。砂类土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过全重 50%，粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土。启东海砂在塑性图上落在土和砂混合带上，大于 0.075mm 颗粒含量占总质量的 53%，粒径大于 0.075mm 颗粒超过总重的 50%，但不超过 85%，定义为粉砂。

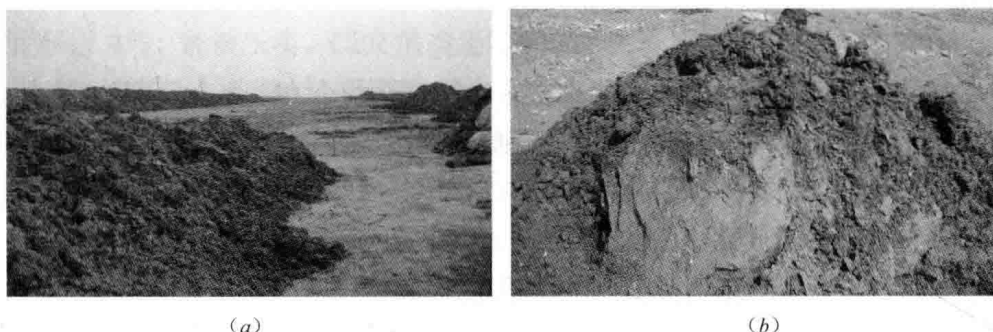


图 1-1 海砂的照片
(a) 如东海砂；(b) 启东海砂

1.2 海砂用于路基填筑的意义

1.2.1 海砂利用的社会意义

路基填料必须满足以下六个条件：①具有足够的强度和刚度；②具有足够的水稳定性和抗冻稳定性；③具有足够的抗冲刷能力；④收缩性小；⑤具有足够的平整度；⑥与面层结合良好。在滨海地区，满足上述六个条件的填土很少。从远地调运满足路用性能的土来填筑路基，极大地增加工程造价，也不符合保护有限耕地的原则。即使不考虑建设成本而从远处取土，不采取防护措施，工程竣工后也同样会因地基毛细水上升、蒸腾，将地基土

中的盐分带至路堤填土中、聚集,填土逐渐盐渍土化,产生盐胀、溶陷等病害。沿海地区吹填海砂资源丰富,吹填海砂的力学性质比沿线滨海相盐渍土的力学好。因此,本着“就地取材”的原则,从技术、经济和环保的角度出发,利用改良的吹填海砂作路基填料,解决沿海地区路基填土不足的实际问题。

通过对吹填海砂改良措施的研究,有效地利用当地丰富的吹填海砂,解决沿海路堤筑材料不足的难题,研究意义深远。不仅解决处理吹填海砂的理论难题,还将吹填海砂改良技术应用于公路路堤填筑中,既有理论创新,又有实用价值;充分利用废弃的吹填海砂,变废为宝,避免远途取材,既保护了当地的生态环境和国土资源,又解决了当地缺乏路基填料的难题,有利于公路建设的可持续发展,具有深远的社会意义、巨大的经济效益和广阔的应用前景。

1.2.2 海砂利用的经济分析

以启东吹填海砂利用的经济效益分析为例,比较海砂利用的经济效益。

1. 吹填海砂利用经济分析

1) 水泥改良海砂的成本分析(水泥土干密度 $1.75\text{t}/\text{m}^3$)

吹砂费用: $13\text{元}/\text{m}^3$ (现场调查)。

32.5 级水泥的单价: $445\text{元}/\text{t}$ (市场价)。

按 4% 掺入水泥,每方水泥土的水泥费用: $31.15\text{元}/\text{m}^3(445 \times 1.75 \times 0.04)$ 。

每方拌合、压实费用: $18.39\text{元}/\text{m}^3$ (交通定额计算)。

每方水泥吹填的单价: $66.44\text{元}/\text{m}^3(13 \times 1.3 + 31.15 + 18.39)$ 。

2) 石灰改良海砂的成本分析(石灰土干密度 $1.7\text{t}/\text{m}^3$)

吹砂费用: $13\text{元}/\text{m}^3$ (现场调查)。

每吨石灰的单价: $345\text{元}/\text{t}$ (市场价)。

按 5% 掺入石灰,每方石灰土的石灰费用: $29.32\text{元}/\text{m}^3(345 \times 1.7 \times 0.05)$ 。

每方拌合、压实费用: $18.39\text{元}/\text{m}^3$ (交通定额计算)。

每方石灰吹填海砂的单价: $64.64\text{元}/\text{m}^3(13 \times 1.3 + 29.32 + 18.39)$ 。

2. 取土坑利用经济分析

征地补偿按 $14100\text{元}/\text{亩}$,复垦补助费 $10500\text{元}/\text{亩}$,青苗补助费 $1200\text{元}/\text{亩}$,耕地开垦费 $8677\text{元}/\text{亩}$,耕地占用税 $1334\text{元}/\text{亩}$,勘测定界及地籍测绘费 $134\text{元}/\text{亩}$,取土坑每亩地的总费用: 35965元 。

每亩地约合 1500m^3 土,每方土的单价为: $23.96\text{元}/\text{m}^3$ 。

平均运距按 5km ,运输费用: $22.66\text{元}/\text{m}^3$; (运距 $30\sim 15\text{km}$ 的汽车运输按照当地交通部门规定的统一运价计算运费)。

按 5% 掺入石灰,每方石灰土的石灰费用: $29.32\text{元}/\text{m}^3(345 \times 1.7 \times 0.05)$ 。

每方拌合、压实费用: $18.39\text{元}/\text{m}^3$ (交通定额计算)。

取土坑每方石灰土的单价: $101.52\text{元}/\text{m}^3(23.96 \times 1.3 + 22.66 + 29.32 + 18.39)$ 。

以临海高等级公路启东北段路基填筑为例,路面底80cm以下路基填方量按200万 m^3 计算,水泥固化节省费用为:7016万元 $[(101.52-66.44)\times 2000000]$ 。石灰固化海砂节省费用为:7376万元 $[(101.52-64.64)\times 2000000]$ 。节省耕地1500余亩。

1.3 海砂路基存在的问题

1.3.1 海砂用于路基填筑的可行性

海砂作为路基填料存在两个问题:①地下水和地表水作用引起盐的淋滤,路基产生溶陷变形;②毛细水上升引起盐的积聚,产生盐胀变形,引起路面结构破坏。滨海地区的地下水位埋藏较浅,约为1.5m;海砂颗粒细小,毛细水上升高度大;春季蒸发作用使盐分随毛细水不断向表层积聚,腐蚀作用增强。海砂中盐的腐蚀作用有限,但盐分随毛细水上升富集是腐蚀性增强的重要原因。

启东海砂的含盐量均小于1%, $[\text{Cl}^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 大于2。按盐渍土类型分类,为弱氯盐盐渍土。启东海砂的击实曲线有两个峰值,符合砂的击实特性,最大干密度为 $1.61\text{g}/\text{cm}^3$,最优含水量为14.4%,能被压实,CBR值满足路床以下路堤填料的要求。海砂的溶陷系数为0.6%,具有不溶陷性。毛细水上升是路基中水分的主要补给来源,滨海地下水含有盐分,在毛细力作用下含盐水溶液上升,地表蒸发导致盐分析出积聚,对路面结构层产生破坏作用。因此,毛细水上升高度决定盐分积聚高度。启东海砂在95%压实度条件下,毛细水上升高度在70~90cm,地下水位的埋深大于毛细水上升高度,盐分不可能在路面结构中积聚,对路面结构层不产生腐蚀作用,路面结构层下不需要设置毛细水隔断层。可见,启东海砂用于路基填筑是可行的,且不需要设置毛细水隔断层。

1.3.2 海砂填料的不足

吹填海砂用于路基填筑国内外很少见到,吹填海砂填筑路基存在两个技术难题:①吹填海砂含盐,与滨海相盐渍土类似。盐渍土存在的缺陷,吹填海砂同样存在。②砂的黏聚力小,填砂路基稳定性和抗冲刷性差,所以砂不是良好的路基填料。鉴于此,吹填海砂填筑路基有如下困难:

1. 盐渍土填料的不足

盐渍土特殊的工程性质会严重影响道路的安全性、稳定性和耐久性。盐渍土道路经常出现路面翻浆、盐胀、溶陷、网裂等现象,以及路基次生盐渍化等病害。国外研究资料表明:高含盐量地区,特别在地下水位浅的地区,基层材料中盐分聚集使路面强度降低,封层作用减弱,导致天然路面的不规则变形,沥青面层会出现起皮、脱落、网裂和坑洼。盐渍土路基常见的主要病害有:

(1) 溶陷与潜蚀。盐渍土中盐类与水溶解后将会影响填土的物理力学性质,降低土的

强度,路基产生溶陷。溶陷程度较大的盐渍土($\Delta > 15\text{mm}$)作路基时,必须采取预防沉降的措施。另外,盐渍土在太阳光照射下,易失去水分,表面呈龟裂状,具有较好的硬度,但其内部相对松软,承载力较低,不容易达到指定的压实度。

(2) 盐胀。不同类型的盐渍土的盐胀机理不同,硫酸盐渍土的盐胀是由 Na_2SO_4 结晶体积膨胀引起的,碳酸盐和氯盐盐渍土中含有大量的吸附性阳离子,具有强亲水性,遇水后与胶体颗粒相互作用,形成稳固的结合水薄膜,引起膨胀。

(3) 腐蚀性。盐渍土的腐蚀是盐与建筑材料发生化学反应引起的破坏作用。盐溶液在毛细作用下从路基潮湿一侧进入路基,由暴露在大气中的另一端蒸发,路基土孔隙中的盐溶液浓缩后结晶膨胀造成对构筑物内部应力增大,引起破坏。随着人类活动的加剧,如灌溉等,产生干湿交替,导致填土次生盐渍化。由于道路的修建,在一定程度上阻塞地下水补给和排泄的通道,将地下水位抬升,使路基产生次生盐渍化。盐渍土中有害毛细水的上升、蒸腾、积盐,会使路堤填土产生盐渍化,引起路基中构筑物的腐蚀。

2. 砂土填料的不足

砂是一种工程性质差的路基填筑材料,压实难,水稳性差。雨水对路基边坡冲刷严重,在边坡上形成许多冲沟,对填砂路基来说,填筑材料的不稳定性致使工程病害频出。我国现行路基施工技术规范中规定砂砾不宜用作路基填料,国内外大面积采用砂砾填筑路基的工程实例尚不多见,只有在个别工程中的个别路段进行过应用,没有成熟的施工技术规范和质量检验评定标准。

1.3.3 海砂的腐蚀性

混凝土的水泥水化产物中,20%是氢氧化钙,为强碱性,十分容易与其他物质如软水、氯离子、弱酸等发生化学反应引起混凝土结构物的破坏。交通部第四航务局对华南地区使用7~27年的18座海港码头的调查资料表明,混凝土梁、板底部钢筋严重腐蚀,破坏率达89%;东南沿海使用年限为8~32年的22个港口中有55.6%存在明显的腐蚀现象;北部沿海14个港口的使用年限为2~57年的66个码头均出现腐蚀现象,其中部分由于冻融和腐蚀的双重影响已完全破坏。混凝土的腐蚀是内因、外因综合作用的结果,内因是混凝土结构中的化学成分和结构形式,外因主要是环境中侵蚀性介质和水。混凝土劣化的外部原因分为物理因素、化学因素和物化因素。物理因素包括冻融、热膨胀、干缩、火灾等,化学因素包括软水、海水、氯离子、酸、硫酸盐、二次钙矾石形成、碱骨料反应等,物化因素包括钢筋锈蚀、电解反应等。现有研究认为, SO_4^{2+} 、 Cl^- 在对混凝土结构物的腐蚀破坏起主要作用。其中, SO_4^{2+} 主要表现为盐胀性,即失水状态下,发生体积膨胀,造成结构物开裂; Cl^- 是导致钢筋发生腐蚀的重要因素。

第 2 章 海砂的土力学性质

2.1 海砂的基本性质

2.1.1 颗粒分析

海砂颗粒成分是岩石、矿物和非晶体化合物的零散碎屑，颗粒组成指不同粒径的颗粒所占含量的百分数。由于海砂含盐，土中的微粒胶结成小集粒。因此，颗粒分析试验前，先除去其中的盐，保证颗粒分析结果准确。对砂样先洗盐，洗完盐后烘干，对于粒径大于 0.074mm 的试样用筛分法，粒径小于 0.074mm 用比重计分析。启东和如东海砂的颗粒分析结果如图 2-1 所示。海砂洗盐前后的颗粒粒径分配曲线明显不同。在浸水洗盐前，由于盐的胶结作用和结晶盐的存在，细颗粒含量较少；浸水洗盐后，易溶盐溶解，盐胶结成的集粒解体、结晶盐颗粒被溶解、流失，土颗粒分散度高，细颗粒含量明显增大。因此，海砂的颗粒分析前应先洗盐，保证得到真实的颗粒分析结果。

海砂颗粒粒径分布曲线的不均匀系数 (C_u) 反映粒径分布曲线上的土粒分布范围：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{2-1}$$

式中， d_{10} 和 d_{60} 分别对应粒径分配曲线上通过率为 10% 和 60% 的颗粒粒径。颗粒粒径分配曲线的曲率系数 C_c 反映粒径分布曲线上的土粒分布形状：

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}} \tag{2-2}$$

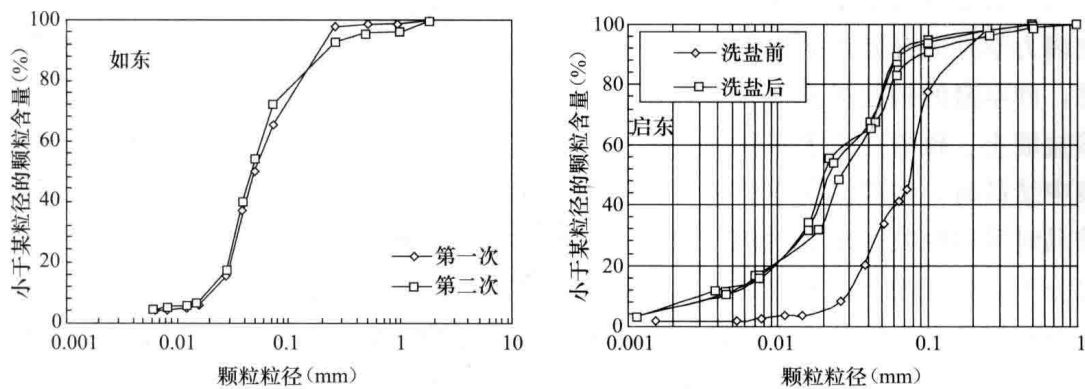


图 2-1 盐渍土粒径分配曲线

式中, d_{30} 对应粒径分配曲线上通过率为 30% 的颗粒粒径。同时满足: $C_u > 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时, 砂类土为良好级配砂。因此, 启东和如东海砂属良好级配的细砂。

2.1.2 稠度界限

采用液、塑限联合测定仪对启东和如东海砂进行液、塑限试验, 液限为 26%~37%, 塑限为 17%~27%, 塑性指数为 10 左右。如东海砂的塑性指数大, 与其中细颗粒含量多有关。启东海砂和如东海砂在塑性图上的分布如图 2-2 所示。

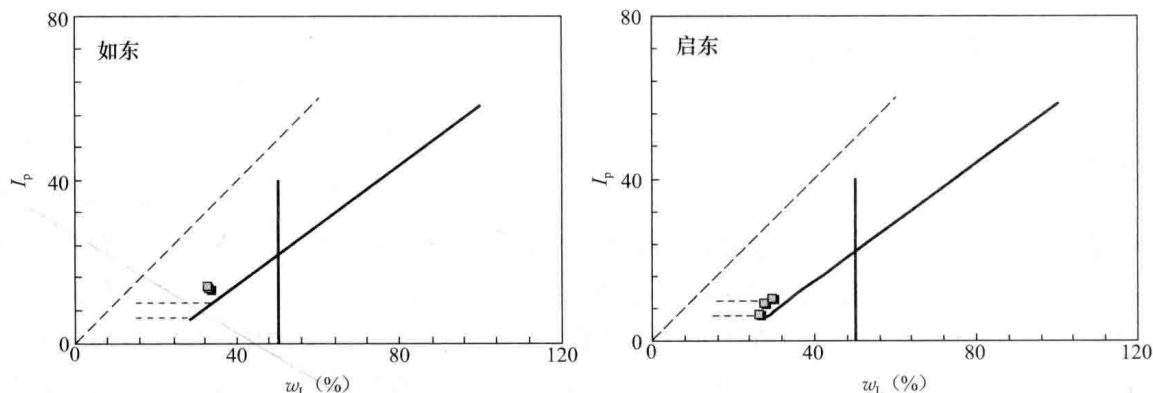


图 2-2 海砂在塑性图上的分布

2.2 海砂的含盐量

易溶盐总量测定采用质量法 (T0152—1993)、易溶盐氯根测定采用硝酸盐滴定法 (T0155—1993)、易溶盐硫酸根测定采用质量法 (T0158—1993)。启东海砂含盐的化学成分主要是氯化物, 总盐含量都小于 2%; 氯离子与硫酸根离子含量之比大于 2, 一般为 5~8。试验装置和试验结晶盐如图 2-3 所示。

海砂含盐, 属于盐渍土。按总含盐量分为弱盐渍土、中盐渍土、强盐渍土和过盐渍土四类。总盐含量小于 0.5% 对砂的物理力学性质没有影响; 含盐量大于 0.5%, 对砂的物理力学性质开始产生影响; 含盐量大于 3.0%, 砂的性质开始取决于盐分和含盐的种类, 砂本身的颗粒组成将居于次要地位。按含盐性质分为氯盐渍土、亚氯盐渍土、亚硫酸盐渍土、硫酸盐渍土和碳酸盐渍土。氯盐类盐渍土溶解度大, 有明显的吸湿性; 从溶液中结晶时, 体积不发生变化; 能使冰点显著降低。硫酸盐类盐渍土没有吸湿性, 但在结晶时可以吸收一定数量的水分子。硫酸钠和硫酸镁重结晶时, 分别带有 10 个和 7 个水分子, 体积增大, 脱水时, 体积明显减小。碳酸盐类盐渍土, 水溶液中有很大的碱性反应; 能使黏土颗粒发生分散; 对土的崩解速度影响大。启东海砂按照盐渍土类型分类如图 2-4 所示。根据易溶盐总量和氯离子与硫酸根离子含量之比, 启东吹填海砂属于弱盐渍土。

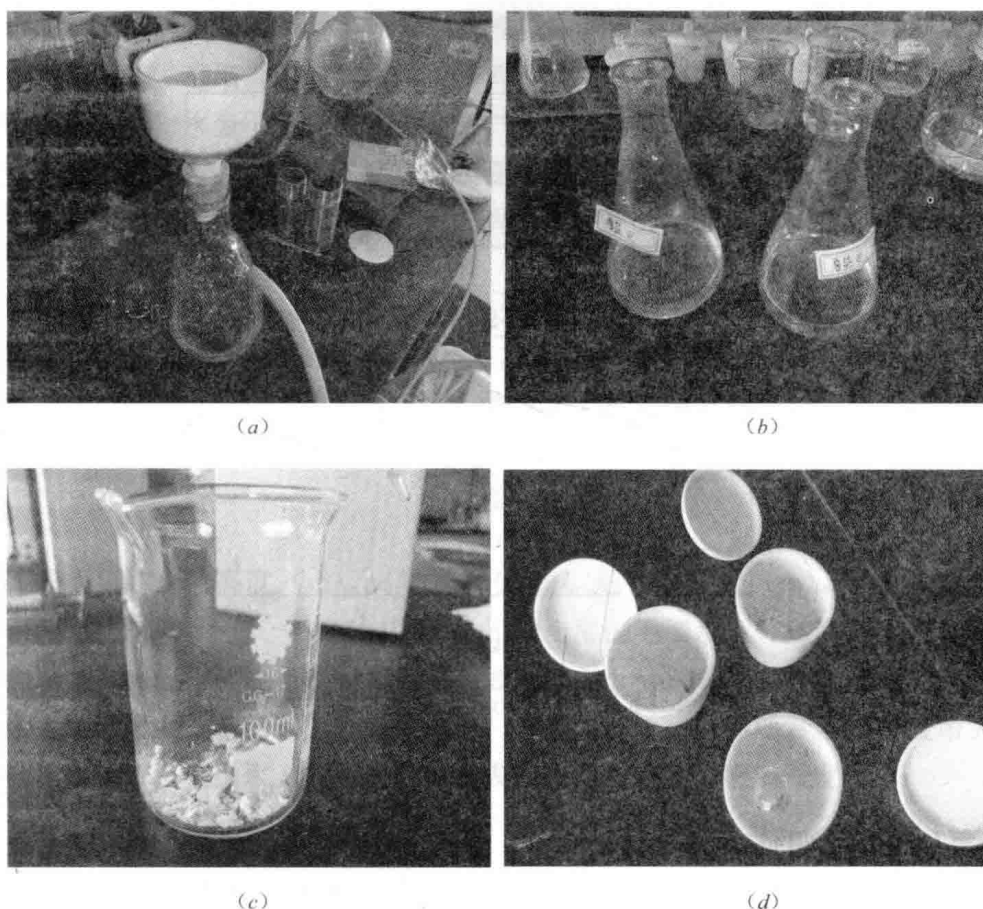


图 2-3 含盐量测定过程

(a) 抽滤装置；(b) 待滴定液；(c) 总易溶盐；(d) 烤干的硫酸钡

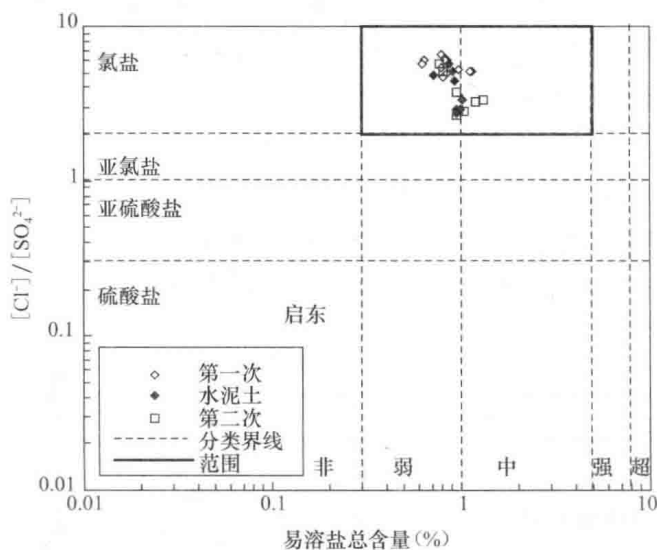


图 2-4 临海高等级公路盐渍土分类图

海砂中氯离子含量与含盐总量的相关关系如图 2-5 所示，氯离子含量与含盐总量呈线性正相关关系，相关公式为 $[\text{Cl}^-] = 0.53C$ ，式中 C 是含盐总量。海砂的含盐特性，就