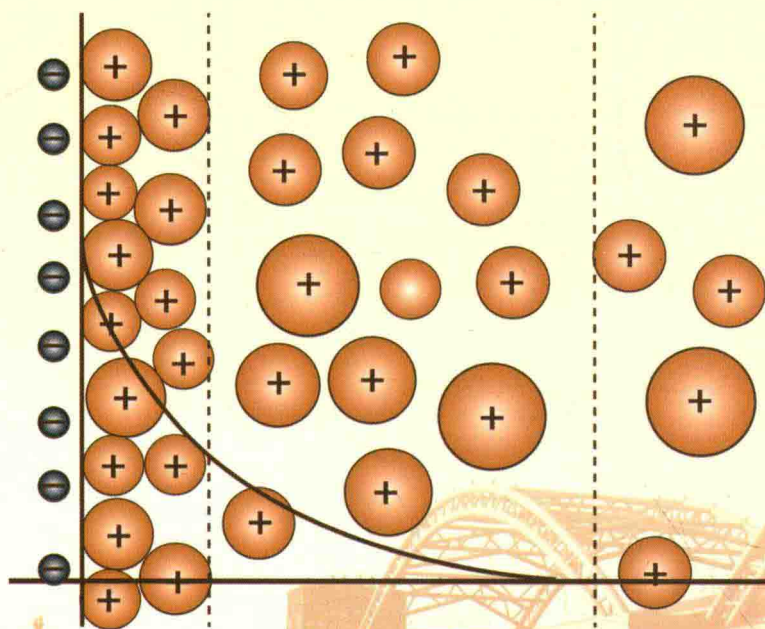


吹填软土的外掺剂和 电渗固化试验研究

刘娉慧 著



地质出版社

吹填软土的外掺剂和 电渗固化试验研究

刘娉慧 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以吹填软土为研究对象,采用量筒沉积试验、室内沉降柱模拟试验和电渗试验等,进行了化学外掺剂、电渗及其联合法固化吹填软土的大量室内试验研究,在物质组成、基本物性指标测试、力学特性试验和微观结构定量分析等基础上,对几种化学外掺剂、电渗、联合加速吹填泥浆沉降和力学特性改善的效果及其影响因素进行了较为系统的研究,得出了一些有意义的结论。

本书可供从事地质工程、岩土工程中软土地基加固工程的设计、施工人员及科研人员和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

吹填软土的外掺剂和电渗固化试验研究 / 刘娉慧著.
—北京:地质出版社,2015.8
ISBN 978-7-116-09350-8

I. ①吹… II. ①刘… III. ①吹填土-软土-工程试验-研究 IV. ①TU449

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第178964号

责任编辑:王春庆

责任校对:张 冬

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)66554528(邮购部);(010)66554578(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554582

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:7

字 数:200千字

版 次:2015年8月北京第1版

印 次:2015年8月北京第1次印刷

定 价:30.00元

书 号:ISBN 978-7-116-09350-8

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

随着城镇尤其是沿海城镇港口建设的迅速发展,土地资源越来越显得缺乏与珍贵,人工填(海)筑地基与吹填造陆技术为解决这一问题提供了新的思路和途径,并且在近二三十年来迅速得以推广应用。以往的填海造陆多以开山石及海运砂作为工程填料,但随着填料资源的日益匮乏及价格的不断上涨,填海工程急需大量廉价的工程材料,而沿海地区有丰富的淤泥资源,以吹填淤泥填海造陆这一综合利用资源的陆地开发技术成为沿海城市土地开发的重要手段。

由于吹填淤泥颗粒很细、固结性能差,吹填以后要经过很长时间才能自然沉积固结,待表面形成硬壳后方可进行加固处理,随着吹填造陆技术的广泛应用,对人工吹填软土地基更快速、更经济地加固处理已成为急需解决的技术课题。近年来,作者针对这一问题,通过室内沉积模拟试验、电渗试验、基本物性指标测试、力学特性试验和微观结构定量分析等,对几种化学外掺剂电渗及二者联合加速吹填泥浆沉降和力学特性改善的效果及其影响因素进行了较为系统的研究。本书内容是作者在这方面工作的阶段性总结。

全书共分十章,具体内容如下:第1章主要总结了吹填软土加固的国内外研究现状及化学外掺剂和电渗法加固软黏土的研究现状及存在的主要问题,指出本研究的主要内容及研究方法和技术路线等;第2章主要对早期阶段模拟试验所用到的两个沿海地区吹填软土的基本物理力学性质进行了概括总结;第3章阐述了化学外掺剂单独加固吹填泥浆的沉降柱模拟试验及试验后吹填软土的物质组成;第4章研究了单独化学外掺剂加固前后吹填软土的变形和强度特性,并运用两种固结理论针对具体算例进行了固结计算;第5章介绍了吹填软土固化后的微观结构特征;第6章简要阐释了化学外掺剂加固吹填软土的物理化学机理;第7章介绍了电渗和化学外掺剂联合加固吹填软土的电渗试验和量筒沉积试验;第8章阐述了电渗和化学外掺剂联合加固前后吹填软土的力学性质对比分析及能耗对比分析;第9章基于碳酸盐含量和孔隙水电导率的测试结果等对比分析,初步阐释了电渗和化学外掺剂联合加固吹填软土的机理;第10章对本研究的主要内容进行了总结,并展望了今后该方面需进一步研究的工作内容。

书中化学外掺剂固化试验研究的许多观点和成果源于作者攻读硕士学位期间受恩师吉林大学王清教授和刘莹博士的启发与指导，书中电渗部分的试验研究得到了加拿大西安大略大学 Julie Shang 教授的悉心指导，在此作者表示最诚挚的感谢！

感谢我的硕士生李帅和赵康同学在大量试验及成果整理分析过程中所付出的辛勤劳动！

感谢作者所在单位领导与同事的关心与支持！

作 者
2015 年 7 月

目 录

前 言

第1章 绪论	(1)
1.1 研究意义	(1)
1.2 吹填软土加固的国内外研究概况	(1)
1.2.1 吹填软土的概念及其工程特性	(1)
1.2.2 吹填软土地基处理的研究概况	(2)
1.3 电渗法加固软黏土的研究现状	(5)
1.4 问题的提出	(6)
1.5 研究的主要内容	(6)
1.6 研究方法及技术路线	(7)
1.7 研究的创新点	(7)
第2章 吹填软土的物质组成和基本物理性质	(9)
2.1 吹填软土的物质组成	(9)
2.1.1 吹填软土粒度成分的测定	(9)
2.1.2 吹填软土矿物成分的测定	(10)
2.1.3 吹填软土化学成分的测定	(11)
2.2 吹填软土基本物理性质	(11)
2.3 小结	(12)
第3章 化学外掺剂加固吹填泥浆的沉降柱模拟试验	(13)
3.1 沉降柱模拟试验	(13)
3.1.1 主要试验装置	(13)
3.1.2 试验内容及步骤	(13)
3.1.3 沉降柱试验分析及堆载模拟试验的设计	(17)
3.2 化学处理后吹填软土的基本组成和物理性质	(19)
3.2.1 粒度成分	(19)
3.2.2 矿物成分	(23)
3.2.3 土体化学成分的测定	(24)
3.3 小结	(25)
第4章 加固前后力学性质对比及固结特性研究	(27)
4.1 引言	(27)
4.2 力学试验结果及分析	(27)
4.2.1 常规三轴试验	(27)

4.2.2	微型贯入试验	(30)
4.2.3	微型十字板试验	(32)
4.2.4	固结试验	(33)
4.3	计算模型	(34)
4.3.1	固结的几种模型	(34)
4.3.2	固结方程及解法	(35)
4.4	计算过程及结果	(37)
4.5	小结	(39)
第5章	吹填软土固化后的微观结构特征	(40)
5.1	引言	(40)
5.2	土样的微观结构定量分析	(41)
5.2.1	结构单元体定量化分析	(41)
5.2.2	孔隙定量化分析	(47)
5.3	土样的微观结构特征分析	(53)
5.4	小结	(55)
第6章	外掺剂加固吹填软土的物理化学机理分析	(56)
6.1	引言	(56)
6.2	相关指标的测定及结果	(57)
6.2.1	水泥和石灰的成分	(57)
6.2.2	反应生成物	(58)
6.3	物理化学机理分析	(58)
6.3.1	水泥处理土的固化机理	(59)
6.3.2	石灰处理土的固化机理	(60)
6.4	小结	(61)
第7章	吹填软土的电渗和化学外掺剂联合处理试验	(62)
7.1	引言	(62)
7.2	土的基本物理力学性质指标	(62)
7.3	电渗试验	(64)
7.3.1	试验目的	(64)
7.3.2	试验装置	(64)
7.3.3	试验方案	(65)
7.3.4	试验步骤	(67)
7.3.5	试验内容	(68)
7.4	量筒沉积试验	(69)
7.5	小结	(70)
第8章	联合加固前后吹填软黏土特性及对比	(72)
8.1	引言	(72)
8.2	加固前后力学试验结果及分析	(72)
8.2.1	微型十字板试验	(72)

8.2.2 一维压缩试验	(74)
8.2.3 含水率试验	(78)
8.2.4 液塑限试验	(80)
8.3 能耗分析	(84)
8.3.1 实验现象观察	(85)
8.3.2 电流随时间的变化	(86)
8.3.3 土样能耗对比分析	(88)
8.4 小结	(89)
第9章 化学外掺剂和电渗法联合加固吹填软黏土的机理	(91)
9.1 引言	(91)
9.2 电渗加固吹填泥浆的机理分析	(92)
9.3 化学外掺剂作用下电渗法加固吹填泥浆的电化学效应	(93)
9.3.1 化学外掺剂与吹填泥浆之间的反应	(93)
9.3.2 化学外掺剂与吹填泥浆之间在直流电场作用下的反应	(93)
9.3.3 孔隙水电导率变化	(95)
9.3.4 碳酸盐含量变化	(96)
9.4 小结	(97)
第10章 总结及展望	(98)
10.1 几点认识	(98)
10.2 工作展望	(99)
参考文献	(101)

第1章 绪 论

1.1 研究意义

随着城镇尤其是沿海城镇港口建设的迅速发展,土地资源越来越显得缺乏与珍贵,人工填(海)筑地基与吹填造陆技术为解决这一问题提供了新的思路和途径,并且在近二三十年来得以迅速推广应用。以往的填海造陆多以开山石及海运砂作为工程填料,但随着填料资源的日益匮乏及价格的不断上涨,填海工程急需大量廉价的工程材料,而沿海地区有丰富的淤泥资源,以吹填淤泥填海造陆这一综合利用资源的陆地开发技术成为沿海城市土地开发的重要手段。

吹填施工刚完成时,吹填软土一般极为松散,且含水率极高,致使整个场地处于泥浆状态,这种情况如果不进行人工加固处理,吹填软土的物理力学性质也会随时间而自然产生极为缓慢的变化^[1]。尽管当今软土地基处理的方法很多,但针对吹填软黏土,尤其是新近吹填的吹填泥浆,已有的处理方法或者难以适用或者造价太高无法接受。以往的习惯做法是在吹填之后经过2~3年的自然沉淀固结,待表面形成硬壳后再进行加固处理,这种造陆方式在时间和财力上的耗费都很大。如天津乙烯工程,吹填面积达10 km²,可行性报告拟采用上述方法加固,造价高达268元/m²,工期需三年或更久,政府及投资方都表示难以承受。

显然,随着吹填造陆技术的广泛应用,对人工吹填软土地基进行更快速、更经济的加固处理已成为急需解决的技术课题。

1.2 吹填软土加固的国内外研究概况

1.2.1 吹填软土的概念及其工程特性

“吹填”一词过去有称“水力冲填”的,其工艺流程是采用机械挖土,以压力管道输送泥浆至作业面,完成作业面上土颗粒沉积淤填。吹填软土是人类为了改造自然、发展生产所进行的水力搬运与堆积活动的产物。近50年来,出现了利用需大量清除航道、港池淤泥作为港口后方陆域形成的吹填工程用料,在吹填的地方先形成围堰,再把疏浚出来的淤泥用泥浆泵或挖泥船通过高压管道将其吹填至围堰内,沉积下来,形成吹填软土。

吹填软土一般具有以下工程特性:

- 1) 物质和工程性质不均一,且时间对其影响较大。
- 2) 含水率和孔隙比很大,容重小。在吹填施工完成以后较长时间内,含水率高达



100%以上,为超饱和状态。

3) 塑性指数大。一般塑性指数在 15 以上。

4) 强度很低。由于高含水率,且又经过扰动,结构尚未形成,处于流动状态,所以强度极低。

5) 压缩性很高。一般压缩系数 $a_v > 2.0 \text{ MPa}^{-1}$, 沉降量很大。

6) 渗透性小。一般渗透系数为 10^{-6} cm/s 数量级, 沉降速度慢。

7) 黏粒一般为 25% ~ 35%, 有机质含量在 4% 左右。

8) 大变形非线性固结特性。吹填软土的固结系数在较大范围内变化, 固结具有大变形非线性的特点。

一般情况下, 在吹填软土施工后的 3 ~ 6 个月内, 吹填软土的表面会因蒸发脱水而呈灰色且有龟裂状, 称为吹填淤泥硬壳层。该层具有一定的硬度。吹填软土物质组成非常的不均匀, 且细小颗粒成分比较多, 一般黏粒含量比较高, 塑性指数随着黏粒含量的升高而有所增加。同天然软土一样, 吹填软土的孔隙比一般也很大, 通常情况下大于 1.0。其压缩性也比较高, 压缩系数一般大于 1.5 MPa^{-1} 为高压缩性土, 并且它的压缩系数有随着液限的增大而增大的趋势。在外加荷载或者自重应力的作用下, 吹填软土会发生固结沉降, 但是进行的周期较长, 且该沉降对土体的整体强度提高不大; 若当土中含有少量的薄砂层时, 其渗透系数明显提高, 因为薄砂会增大孔隙的渗透性。由于水与土体黏粒间的吸附作用使得正常情况下它的自重沉降固结的速度非常缓慢, 很难在短时间内提高它的强度, 因此靠它的自重沉降加固土体性质在工程上是行不通的。液限范围一般在 34% ~ 58% 之间, 而以 34% ~ 43% 范围内居多, 但有时可以达到 60% 甚至更高, 塑性指数很大, 一般在 15 以上。另外, 吹填软土所含黏土矿物的颗粒较小, 黏土颗粒表面一般带有负电荷, 它能吸附正价水离子从而使水难以排出。土颗粒在自重沉积过程中软土层一般会形成胶体结构, 从而造成吹填软土很难自重固结。

1.2.2 吹填软土地基处理的研究概况

吹填软土在我国上海黄浦江边岸、天津海河两岸、珠江三角洲等地都有分布。其特点是含水率大、呈流塑状态、强度低、压缩性高等。处理方法上, 对含砂量少的吹填软土可采用井点降水处理使其固结, 提高地基承载力。对吹填软土地基的加固处理, 目前常用的方法有真空预压法、堆载预压法、真空堆载联合预压法、强夯法和换填等软基处理技术。

起初的真空预压法是一种在现有陆域上进行软基加固的方法。该方法是在需要加固的软黏土地基内设置砂井或塑料排水板, 然后在地面铺设砂垫层, 其上覆盖不透气的密封材料使其与大气隔绝, 通过埋设于砂垫层的吸水管, 用真空装置进行抽气, 将膜内空气排出, 因而在膜内外产生一个压力差, 这部分压力差即导致土体地基上荷载增加, 地基随着等向应力差的增加而固结。该法由瑞典土工研究所的 Kjellman W 教授于 1952 年提出, 之后很长时间在工程实践中未能获得推广应用。国内外很多研究人员都对此进行了大量的试验研究, 国内从 1957 年开始对其加固机理开展研究, 先后由天津大学、天津港务局、交通部四航局、南京水科院、河海大学等单位对真空预压法加固机理及可行性进行了一系列的室内模型试验、现场试验及现场施工等。20 世纪 70 年代后期, 日本大阪港首次将该法



用于吹填软基的加固处理。在吹填时,先在海底铺设砂垫层,并且以一定的间距打设排水井点管,在吹填的同时就排水管内抽真空排水进行加固^[2]。吹填至设计标高后,再打设排水砂井以加速排水固结,取得了良好的效果。1982年,日本采用真空井点降低水位方法,加固大面积吹填软土取得了成功,加固达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^2$,从而把该技术的应用推向了一个新的阶段。国内于20世纪80年代末也对该法进行了试验研究^[3],探讨了真空作用面的作用位置以及真空井点管间距对预压效果的影响。通过室内研究发现底部抽真空比在表面抽真空加固时间短,且加固效果好,其强度变化较均匀。

堆载预压排水固结法,目前认为是加固处理淤泥质土基较为可靠的方法,工程上一直广泛使用,是行之有效的方法。堆载一般用填土、砂石等散粒材料。堆载预压法最早应用于处理美国加利福尼亚州的海湾公路,该公路有约3.2 km长的一段通过沼泽地,每当高潮时,公路的下部淹没在水中,使面层粗糙和恶化,维护费用很高。1934年11月和12月在该路段选取三个试验断面打了砂井,减小了孔隙水压力,防止了土体的侧向位移,消除了面层的不均匀沉降,保证了公路的顺利修建。我国于1953年首次将砂井堆载预压用于加固船台地基,1959年应用于宁波铁路路堤试验段和舟山、宁波冷库工程,以后推广至水工建筑、工业与民用建筑、铁路路基、港湾工程与油罐的软基工程中,都获得较好的效果。当软基较厚时,必须在软基中插入垂直排水通道,即所谓的砂井-堆载预压法。由于砂井用砂量大,兼之打入设备笨重,为此,在1979年研制成功袋装砂井,1981年开发成功塑料排水带。塑料排水带具有重量轻、施工设备简单、工效高、劳动强度低、经济、对土层的扰动小、适应地基变形的性能好等优点,故塑料排水带-堆载预压法发展很快,将堆载预压法推向新的高潮。

真空堆载联合预压是在真空预压和堆载预压法基础上发展起来的软基加固方法^[4],具有真空预压和堆载预压的双重效果。通过抽真空形成负压,当真空度达80 kPa以上,相当于一次性加4~5 m高度的填土荷载,缩短了加载时间。对于高速公路采用真空堆载联合预压加固软基方法,可利用路基填土作堆载,使土体在真空荷载和堆载联合作用下发生固结,强度能提高2~3倍。同时,由于真空产生负压,使土体产生向内收缩变形,可以抵消因堆载引起的向外挤出变形,地基不会因填土速率快而出现不稳定性问题,因此,真空堆载联合预压比堆载预压安全可靠。另外,真空堆载联合预压加固软基的加固效果影响深度较大,比较适合加固深厚软土层地基,不仅预压效果明显,而且可减少软基的工后沉降。1983年起开展了真空-堆载联合预压法的研究,开发了一套先进的工艺和优良的设备,并从理论和实践方面论证了真空和堆载的加固效果是可以叠加的,已在50多万平方米软基上应用,均取得满意结果。该法在国际会议上已被多次介绍,外国同行给予很高的评价,认为中国在这方面创造了奇迹。该法适用于能在加固区(包括采取措施后)形成稳定负压边界条件的软土地基,如淤泥质土、淤泥、素填土和冲填土等。实际工程表明,对于砂层和粉煤灰,采取措施后也能获得所得的真空度。

强夯法加固软弱地基,是利用强夯降低土的压缩性,消除主固结沉降,提高土的强度与承载力。强夯法加固地基具有效果明显、经济易行、设备简单、节约三材等明显优点,因而得到了广泛应用^[5]。强夯法是通过10~40 t的重锤(最重达200 t)和10~40 m的落距,对地基土施加很大的冲击能,在地基土所产生的冲击波动应力,可提高地基土强度,降低土的压缩性,改善砂土的抗液化条件,提高土层的均匀程度,减小将来可能出现的差



异沉降。通过在多种工程中的实践证明,该方法设备简单,原理直观,适用范围广泛,加固速度快,效果好,投资省,是当前最经济而简便的地基加固方法之一。但到目前为止,还没有一套成熟和完善的理论与设计方法。然而,强夯法对地基土质有一定的要求。一般认为此法特别适合于粗颗粒非饱和土,含水率不大的杂填土与湿陷性黄土,低饱和黏性土与粉土也可采用。对于饱和黏性土,如有工程经验或试验证明加固有效时方可应用。对于软黏土,一般教科书或工程标准中都有明确规定不宜采用或不能采用,因为存在一些工程失败的例子。当前在软黏土地基上强夯失败的例子很多,其突出表现为施工过程中出现橡皮土,此时土体抗剪强度丧失,不能承载,需要以高昂的代价挖除或处理橡皮土。同时不能再起到压密作用,导致强夯失败。其次,表现为软黏土地基上没有完成主固结沉降,工后沉降很大,如20世纪80年代天津某工程,采用强夯砂井排水法加固软黏土地基,夯后仍有大量剩余沉降,强夯失败。当前软黏土地基上强夯失败的原因主要在于现行强夯工艺不适应软黏土的特性。软黏土孔隙比大、含水率高、渗透性差、强度低,而在强夯动力作用下,要求瞬时内从土体孔隙中排出大量水,但由于时间短、渗透性差,水来不及排出,从而导致土中孔隙水压增高,且短时间内难以消散,因而土体抗剪强度大大降低,在这种情况下继续夯击,就必然会出现橡皮土。此外,软黏土具有结构性与结构强度,在现行强夯工艺下,地基表层土结构遭受破坏,不仅损失结构强度还会大幅度地降低渗透性。

当前,加固软黏土地基的处理方法还有传统的加入化学外掺剂的方法,包括加入一定量的水泥、石灰、粉煤灰等进行固结。采用石灰、水泥作为固化剂进行加固软土地基是瑞典岩土所(Swedish Geotechnical Institute)和日本运输省港湾技术研究所(Port and Harbor Research Institute)分别独自于20世纪60年代中期提出的,在1967~1974年进行了室内试验和现场试验研究。Mitechell等人^[6]和Bell^[7]也对石灰和水泥加固软黏土及膨胀土进行了详细研究。其中,通过专用的搅拌机械形成搅拌桩加固地基目前已经广泛运用于我国的铁路、公路、市政工程、港口码头和工业与民用建筑中。我国自20世纪80年代引进水泥搅拌桩以来,由于其具有无污染和加固费用低等显著优点,在水利工程、交通工程和土木工程中得到广泛的应用,并且取得了良好的社会经济效益。但是近年来,搅拌桩在处理有机质含量较高的深厚软基时,不断出现工程质量问题。国内外对有机质土和泥炭土的水泥加固都有很多的研究,Pousette等人^[8]通过室内试验,得出水泥加固强度随养护龄期的增大而增大,并探讨了试块尺寸效应对水泥土加固强度的影响,以及养护过程中通过加载预压试块会提高水泥土强度的有益结论。Ahnberg Holm^[9]通过大量的室内试验研究了不同加固料的种类对有机质土加固强度的影响,并得到了水泥加固强度不仅受加固料的种类和数量的显著影响,而且还受养护温度及养护条件影响的结论。Masaaki Gotoh^[10]研究了土性即含水率、pH、烧失量、黏粒含量对水泥土强度的影响,并得到了水泥用量随着不同的含水率、pH、烧失量、黏粒含量变化的修正公式,该公式为工程上获得较均匀的有机质加固土强度提供了计算公式。Miura等人^[11]通过大量的试验,得到有机质含量小于6%时,石灰加固效果优于水泥加固效果;但当有机质含量超过8%时,水泥加固效果比石灰加固效果好。国内外在含盐量对水泥生石灰加固强度的影响方面也存在着很多的研究。Broms^[12]和三浦哲彦^[13]指出在含盐量较高的海相软土中进行水泥加固时,由于絮凝作用其强度会大大降低。Miura等人^[11]通过将土中加入盐来配制不同含盐量的试料土,进行水泥或者石灰加固试验,得到当含盐量增加到一定程度时,强度会随含盐量增大而减小的结



论;同时指出当土中含有 SO_4^{2-} 时,对水泥的水化将起到阻碍作用。张土乔等^[14]针对地基处理中经常遇到的古海水对水泥土的侵蚀问题,通过室内试验和化学分析,探讨了水泥土中的硫酸根离子和镁离子的四种侵蚀条件下的无侧限抗压强度、应力应变关系、线膨胀特性和侵蚀机理。周承刚等^[15]研究了可溶性盐离子如 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 对水泥土强度的腐蚀,并进行了在试料土中掺入 0.81% 和 1.5% 氯化镁的试验,发现掺入 1.5% 的氯化镁的 28 天强度较掺入 0.81% 的氯化镁强度约低了 1.2 MPa,该结果说明氯化物对水泥土强度起副作用。鉴于含盐量对水泥土强度的影响比较复杂等情况,我国规范做了原则性说明,当使用普通水泥拌制的水泥土受硫酸盐溶液侵蚀会出现结晶性的开裂、崩坏而丧失强度时,如选用抗硫酸盐水泥,使水泥土中产生的结晶膨胀物质控制在一定数量范围内,则可大大提高水泥土的抗侵蚀性能。

1.3 电渗法加固软黏土的研究现状

电渗法是在土体两端通以直流电,使土体在短时间内完成渗透排水,并逐渐固结的一种地基处理方法。渗透、固结和稳定性问题是岩土工程分析与设计的主要内容,对于电渗法的研究包括了岩土工程研究中的两个重要方面:土体的渗透研究和固结研究,其中水在土体中的流动问题最为重要,鉴于土体中孔隙大小和形状的不规则性,土体中水在孔隙中的流动也十分复杂。其中,不同种类土体中的渗流情况也不尽相同,对于黏性吹填软土来说,土体中黏粒含量和胶结状况对土体的性质起着决定性的作用。由于黏土颗粒具有较大的比表面积和带电量,在与水相遇后,将产生复杂的物理化学变化,并具有胶体分散系的一些特征。

俄国学者 Reuss 于 1809 年首先发现电渗现象:将电位差施加在有孔介质上,其孔隙水将通过毛细管移向阴极;若切断电流,孔隙水的流动也立即停止。为了解释电渗现象,若干理论和假说被提出。由 Helmholtz 提出并经 Smoluchowski 修正的 H-S 模型^[16]是最早用于描述电动过程的理论之一,并且至今仍在广泛应用,根据其模型决定电渗速率的电渗渗透系数与土颗粒粒径无关,这也成为日后电渗主要用于黏粒含量高的土中的依据,并被许多试验和实践所证实。Casagrande 于 1949 年首次将电渗成功地应用于德国某铁路挖方边坡工程中。Banerjee 等人^[17]结合电渗仪实验,提出了比一维电渗固结理论更为精确的理论解,用于描述三轴电渗仪内超孔隙水压力的增长过程。此后, Bjerrum 等人^[18]、Shang 等人^[19]和 Mohamedelhassan 等人^[20]提出了高压条件下的土-水电解质理论,并对高压(10~30 kV)直流和交流电作用下的软黏土加固效果进行对比,结果表明直流高压电场下,土体中会产生更高的负孔隙水压力,地基加固效果更佳。同时,在达到某一临界电压前,加固效果随着外界电压的升高而不断加强。Laursen^[21]、Al-Amoudi^[22]、Indraratna 等人^[23]、Mathew 等人^[24]以及 Ho 等^[25]进行了斑脱土和天然黏土的电渗室内实验研究,结果表明,钙基斑脱土的电渗透系数随含水率的增大而不断增大,并且与土体的含盐量无关;丹麦勃土的电渗透系数随含水率的增大而不断增大,但与土体的含盐量有关。之后,Shang^[26]提出了电渗联合堆载预压加固法的理论模型。Burnotte 等人^[27]对电极进行了特殊的化学处理,减小了界面电阻的同时也提高了电能利用率。因传统金属电极在电渗中产生



电化学腐蚀,存在造价高、不易控制等缺点,近年来产生了一种被称为电动土工合成材料^[28]的新型合成材料,可作电渗电极使用,大大减少了电极在电渗过程中的损耗。

随着电渗技术的不断发展,国内学者对电渗的研究也越来越多。国内最早研究电渗的是在20世纪50年代,汪闻韶^[29]提出了电渗和水力渗透混合流的公式,并阐述了电渗加固软土的机理。周顺华等人^[30]提出用电渗法对铁路、公路等路基进行处理,并对电渗法经济性进行了讨论。之后,邹维列等人^[28]对电动土工合成材料及其应用进行了详细介绍。胡俞晨等人^[31]应用电动土工合成材料,进行了相关的电渗室内实验研究。庄艳峰等人^[32~35]讨论了电渗过程中的界面电阻问题,给出了界面电阻的近似计算公式,并提出了电荷累积理论和能级梯度理论,用于解释电渗过程中的电现象。由于电渗法处理过程中土体对电能消耗较大,不少学者提出了电渗加固法与其他方法的联合应用。高志义^[2]提出了真空预压和电渗的联合加固方法,并进行了室内模型实验研究。与此类似,房营光等人^[36]应用真空预压与电渗联合加固法对碱渣土进行了室内模型实验研究;符洪涛等人^[37]提出了电渗与强夯联合法用于软弱地基的加固。

综合来看,当前的理论研究不仅提出了电渗的一维、二维固结理论,并给出了相应的解析解和数值解,同时对电渗中的电现象进行了有益的探讨;实验研究一方面对电渗的相关理论进行了验证,另一方面,致力于提高电渗电能利用效率,如发展了电极转换、间歇通电等技术,并通过对电极进行化学处理减小界面电阻、使用堆载预压与电渗联合加固、真空预压与电渗联合加固等实用技术。同时,电动土工合成材料的发明具有十分重大的意义,这种材料既可以作为电渗过程中的排水通道,也可以作为不腐蚀的电极,使电渗加固过程更容易控制。

1.4 问题的提出

吹填造陆工程的历史已相当悠久,但吹填软土工程特性和力学性质的研究工作还不是很充分,仅将其作为一般软土或新近人工堆积土对待,在进行加固改造设计时也多借用海相淤泥的有关性质,尤其对于含水率很大的吹填泥浆而言,这种做法显然具有盲目性。在实际应用中,一些方法的应用还存在诸多问题,例如塑料排水板与真空降水相结合的方法在应用上与工程要求还有一定差距,在吹填软土中打设塑料排水板还需要相当长沉淀时间,这无疑要延长工期;另外,地基内如夹有排水砂层,真空降水的密封性不好,将会大大降低加固效果。尽管地基处理方法很多,不同学者从不同角度都开展了不少研究工作,但是,应用于吹填软土尤其是吹填泥浆时,在泥浆沉积初期大多都无法适用。探索既经济又迅速的吹填软土加固方法十分必要。

1.5 研究的主要内容

针对以上问题,首先提出向吹填泥浆中掺入外掺剂的物理化学加固方法来加速吹填泥浆的沉积落淤,提高吹填软基的工程地质性质,并且开展了一系列相应的室内模拟试验。利用该方法对吹填软土进行加固,不仅造价低廉,而且这一加固方法可以在吹填的同时进

行,这无疑缩短了工期,又方便了施工,是经济效益和时间效益兼得的吹填软基加固方法。同时,以吹填软土为研究对象,主要通过模拟加固方法的室内模拟试验,分别采用化学外掺剂、电渗法和不同类型化学外掺剂联合电渗方法加固吹填软土,对加固前后吹填软土的物质组成(粒度成分、矿物成分、化学成分)、物理性质(土粒密度、土的密度、含水率、孔隙性等)、力学性质等进行详细地测试,从而对加固前后吹填软土的工程地质特性进行对比,从土质学、土力学、物理化学等角度出发,分析其固化过程中变形特性和强度增长的机理,从而确定最佳加固方法、加固时间等。

1.6 研究方法及技术路线

本研究在分析吹填软土基本特性的基础上,首先,针对一地区和二地区土样,采用在吹填泥浆中掺入化学外掺剂,以期促进吹填泥浆的快速落淤和强度增长的试验研究;其次,针对三地区和四地区土样,采取在掺入外掺剂的初期即给土体通上直流电,尝试电渗法和化学外掺剂联合处理吹填软基,对比单独化学法、单独电渗法和二者联合法的加固效果,探讨加固机理。研究的技术路线如图 1.1 所示。

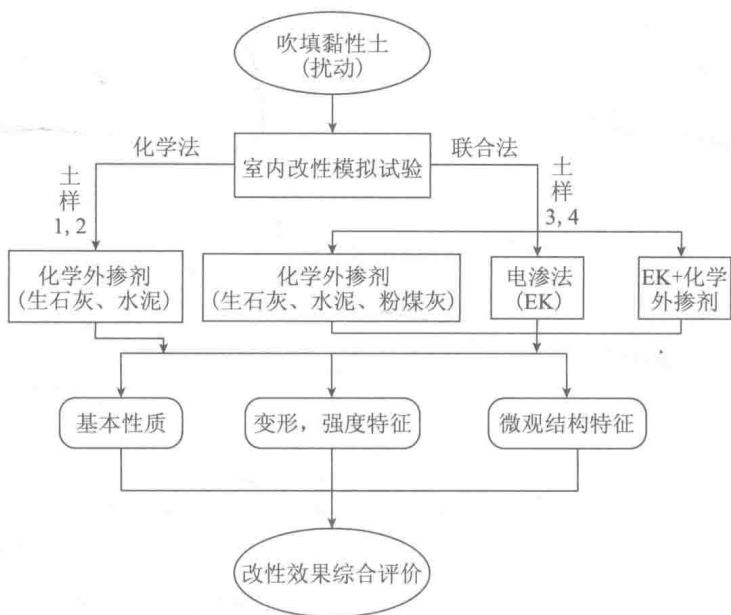


图 1.1 研究技术路线图

1.7 研究的创新点

本研究尝试采用新的方法来处理吹填软土,即除了给吹填泥浆中掺入化学外掺剂,同时尝试在此基础上给土体通上直流电,尝试用化学外掺剂和电渗法联合处理吹填软基。研究的目的是探索化学外掺剂、电渗及其二者联合加固吹填软土的有效性。尽管电渗用于软黏土的加固已经有几十年的历史,我们注意到,当直流电位差施加到插入湿土中的金属电极之间时,除了水的运动外,还发生有诸如离子扩散、离子交换、渗透梯度和 pH 梯度形



成、矿物分解、盐分或次生矿物沉淀、电解、水解、还原、氧化、物理和化学吸附、电极处产生热而引起干燥以及组构变化等效应^[16]。在这些效应中,有些效应从引起土的强度和塑性特性发生永久性变化的土的电化学硬化角度来看是非常有利的,但其他效应,如加热和气体产生则会削弱电渗效应。那么,从固化吹填软黏土的角度出发,如何最大限度地利用这些效应,是值得探索的课题,而且,在有化学外掺剂的情形下,这些效应是否能在化学外掺剂单独作用的基础上继续发挥正面作用,化学外掺剂和电渗对吹填淤泥的联合加固效果是否能够进一步提升等问题都是值得深入研究的。本研究的创新之处也在于此。

第2章 吹填软土的物质组成和基本物理性质

2.1 吹填软土的物质组成

土的工程地质性质与某物质组成有密切的关系，土的结构和矿物成分与粒度成分之间也有一定的关系，也影响着土的性质。该阶段试验研究的吹填软土取样分别在连云港和青岛两地进行，并对两地区吹填软土进行了主要成分和基本物理化学性质的测定。

2.1.1 吹填软土粒度成分的测定

土粒大小是描述土的最直观和最简单的标准。常用的分析土粒大小的方法有两种。对于粒径大于0.075 mm的土粒常采用筛分的方法，而对于小于0.075 mm的土粒则用沉降法。

土的粒度成分是指土中各种不同粒组的相对含量（以土的质量分数表示），它可用来描述土的各种不同粒径土粒的分布特性。

本文用静水沉降法进行粒度成分测定，对每个土样分别采用两种方法进行试验，即加分散剂和不加分散剂的静水沉降法两种。选用六偏磷酸钠为分散剂。其中，不加分散剂时测定的是土中团聚体的粒度成分，加分散剂后测定的是土中颗粒的大小，通过两种试验结果的对比可以看出土体颗粒的团聚性。

连云港（1号土样）和青岛（2号土样）两地吹填原土粒度成分表及粒度成分累积曲线如表2.1及图2.1所示，据曲线所求相关指标见表2.2。

表 2.1 吹填原土粒度成分表

粒组/mm	粒度成分（以质量分数计）/%			
	连云港		青岛	
	不加分散剂	加分散剂	不加分散剂	加分散剂
>0.100	2.20	1.50	2.26	2.16
0.100~0.050	25.10	13.45	45.13	42.98
<0.050~0.010	26.90	11.25	51.10	47.46
<0.010~0.005	45.80	18.90	1.51	7.40
<0.005~0.002		26.10		
<0.002		28.80		

可以看出，在粒度成分上连云港和青岛两地的吹填土有很大差别，而且加分散剂对两种土的影响程度也不同，连云港地区吹填软土加分散剂前后粒度成分有较大区别，说明该