

复合水泥土

物理力学性质与耐久性能 试验研究

申向东 周丽萍 温永钦 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

复合水泥土

物理力学性质与耐久性能 试验研究

申向东 周丽萍 温永钦 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要针对内蒙古几种典型的粉质黏土,通过室内试验,研究了水泥土在不添加外加剂条件下的强度和变形特性,通过对不同粉质黏土的分析,提出了16种外加剂,并进行单掺试验,确定每种外加剂对水泥土力学性质的影响及改性效果,并结合内蒙古丰富的工业材料和自然资源,研究配制了一种针对寒冷地区粉质黏土的复合水泥材料,提出了它的最佳配合比。试验结果表明:复合水泥土的力学性能及耐久性能均明显优于普通水泥土。本书建立了综合考虑各因素影响的普通水泥土和复合水泥土的强度预测模型,分析了两者的变形特性,推导了普通水泥土及复合水泥土的应力应变上升段和下降段本构方程。

结合SEM试验探讨了复合水泥土的微结构特点,探讨了复合水泥土的固化机理,建立了单轴压缩条件下的弹塑性损伤模型。

本书可供有关专业研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复合水泥土物理力学性质与耐久性能试验研究 / 申向东,周丽萍,温永钦著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013.12

ISBN 978-7-5170-1513-0

I. ①复… II. ①申… ②周… ③温… III. ①复合水泥—水泥土—物理力学—性能试验②复合水泥—水泥土—耐用性—土工试验 IV. ①TV443

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第303829号

书 名	复合水泥土物理力学性质与耐久性能试验研究
作 者	申向东 周丽萍 温永钦 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 237千字
版 次	2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

复合水泥土是以土、水泥、水（在某些特定工程中需要在此基础上加入外加剂）为主要原料，通过一定的配比混合后，经压实、养护形成的一种拌和物，复合水泥土是一种具有特殊工程性能的硬化材料，20 世纪 80 年代以来，水泥土的应用在我国得到广泛地推广，取得了比较满意的效果。特别是在道路软基处理、渠道衬砌、大堤防渗中起到了良好的作用。

复合水泥土在常温下具有较高的强度特性，但在反复冻融循环条件下，水泥土强度衰减严重。在多年冻土和季节性冻土地地区水泥土的推广和应用因其抗冻性差而成为其发展的瓶颈。如何提高反复冻融条件下水泥土的强度，进而保证工程的使用寿命，是水泥土材料在寒区进一步推广应用的关键，寻求改性效果显著的外加剂是提高水泥土强度和耐久性的重要研究内容，提高水泥土强度的有效措施就是掺入添加剂以提高其结构的密实度。水泥土中加入外加剂，可激发、调节水泥水化作用，改善水泥与土颗粒间的作用，从而取得较好的改性效果。国内在水泥土外加剂研究方面已有一些成果，但针对多年冻土和季节性冻土地地区，外加剂对水泥土反复冻融条件下的力学性质影响的试验研究开展得尚不充分。

本书的研究重点是研制适合内蒙古地区的新型复合型水泥土，以期获得价格低廉、性能优良的固化土材料。随着研究的不断深入，复合型水泥土将越来越体现出它的性能优势。因此开展复合型水泥土固化技术的试验研究工作是非常有必要的，有着广泛的实用意义。

本书针对内蒙古几种典型的粉质黏土，通过室内试验，研究了水泥土在不添加外加剂条件下的强度和变形特性，通过对不同粉质黏土的分析，提出了 16 种外加剂，并进行单掺试验，确定每种外加剂对水泥土力学性质的影响及改性效果，并对部分外加剂进行正交试验和补充试验，并结合内蒙古丰富的工业材料和自然资源，研究配制了一种针对寒冷地区粉质黏土的复合水泥材料，提出了它的最佳配合比。为了验证研制的复合水泥土的强度特性和耐久性，通过室内试验，对复合水泥土进行了不同掺量、不同养护龄期的无侧限抗压强度、间接抗拉强度、抗冻性、抗渗性和冻胀量等试验，并与普通水泥土进行了对比分析。试验结果表明：复合水泥土的力学性能及耐久性能均明

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 复合水泥土的研究意义	1
1.2 国内外水泥土研究现状	3
1.3 研究的内容与方法	6
第2章 试验材料、内容及试验方法	8
2.1 试验材料	8
2.2 试样的制备及养护方法	18
2.3 试验内容	19
第3章 普通水泥加固土的力学特性试验研究	24
3.1 普通水泥土的强度特性试验	24
3.2 普通水泥土变形特性的研究	36
第4章 外加剂对水泥土力学性质的影响研究	43
4.1 概述	43
4.2 外加剂在水泥土中的单掺试验	44
4.3 外加剂在水泥土中复掺试验	54
第5章 复合水泥土强度及耐久性的试验研究	61
5.1 复合水泥土强度特性试验	61
5.2 复合水泥土耐久性试验	64
5.3 强度回归预测模型	67
第6章 浮石粉水泥复合土应力应变非线性本构关系	75
6.1 浮石粉水泥复合土单轴应力应变关系	75
6.2 浮石粉水泥复合土三轴应力应变关系	80
6.3 浮石粉水泥复合土三轴应力—应变曲线模型参数的确定	83
第7章 浮石粉水泥复合土的三轴抗剪强度特性	90
7.1 浮石粉复合水泥土的抗剪强度特性	90
7.2 浮石粉水泥复合土试样的剪切破坏形态	95
第8章 复合水泥土微结构及固化机理研究	98
8.1 土的强度和稳定性	98

8.2	固化土固化过程及措施分析	99
8.3	复合水泥土微结构	100
8.4	复合水泥土的固化机理分析	113
第9章	复合水泥土变形特性及损伤特性研究	121
9.1	概述	121
9.2	复合水泥土损伤的宏观试验研究	123
9.3	复合水泥土细观损伤机制探讨	129
9.4	复合水泥土弹塑性损伤本构模型	133
第10章	结语	144
10.1	结论	144
10.2	展望	148
参考文献		150

第1章 绪 论

1.1 复合水泥土的研究意义

世界上的冻土主要分布于北纬 45° 以上的高纬度地区。如俄罗斯的广大区域、芬兰、瑞典、挪威、加拿大、格陵兰、美国的阿拉斯加等国家和地区。我国的冻土主要分布于高海拔、高纬度地区，多年冻土主要分布于东北大小兴安岭北部、青藏高原、天山以及阿尔泰山等地区，总面积约为 215 万 km^2 。季节性冻土在我国分布非常广泛，从东北到华北，直至西北、西南，都有分布。纬度高，冻结深；纬度低，地势高，亦有冻结。我国季节性冻土的分布面积远大于多年冻土，遍布长江流域以及北方 10 多个省、自治区，冻结深度大于 0.5m 的季节性冻土区占全国总面积的 68.6%^[1,2]。

内蒙古河套地区位于黄河与狼山、乌拉山之间，东部与包头市相邻，面积 1.16 万 km^2 ，该区为典型的季节性冻土区，土壤类型主要为粉质黏土和黏性土，在地质构造上，内蒙古河套平原是一个长期沉降的封闭断陷盆地，发育巨厚的以细粒为主的内陆湖相泥沙质沉积物，第四系上部的含水层可以粗略地分为两层，顶部为黏质粉砂潜水含水层 (Q_4) 含黏性土夹层，厚度一般小于 20m，下部为细砂承压含水层 (Q_3)，最大厚度可超过 350m，含不连续的黏性土夹层， Q_3 含水层的底板属于 Q_2 上部的巨厚淤泥质沉积物，可见内蒙古河套地区有着丰富的土壤资源优势。

发展“绿色建材”，改变长期以来存在的粗放型生产方式，选择资源节约型、污染最低型、质量效益型、科技先导型的生产方式是 21 世纪我国建材工业的必然出路。

水泥土是指以水泥为主剂，用水泥浆或水泥粉，按用途选取适当的配合比，与土体搅拌均匀混合，使水泥与土起物理化学作用，经机械压实和养护后形成的整体的、坚硬的、水稳性的建筑材料^[3]。它是一种经济效益、社会效益和环境效益明显的建筑工程材料，已被广泛应用于水利工程的大坝地基加固、防渗堵漏、路面基层材料和渠道防渗衬砌及工业与民用建筑、高速公路、铁路、机场等的软基加固。可以看出，水泥土已经取得了广泛的应用，有着诱人的应用前景。水泥土在常温下具有较高的强度特性，但在反复冻融循环条件下，水泥土强度衰减严重^[4]。在多年冻土和季节性冻土地区水泥土的推广和应用因其抗冻性差而成为其发展的瓶颈，如何提高反复冻融条件下水泥土的强度，进而保证工程的使用寿命，是水泥土材料在寒区进一步推广应用的关键，寻求改性效果显著的外加剂是提高水泥土强度和耐久性的重要研究内容，提高水泥土强度的有效措施就是掺入添加剂以提高其结构的密实度^[5]。水泥土中加入外加剂，可激发、调节水泥水化作用，改善水泥与土颗粒间的作用，从而取得较好的改性效果。国内在水泥土外加剂研究方面已有一些成果，但针对多年冻土和季节性冻土地区，外加剂对水泥土反复冻融条件下的力学性质影响的试验

研究开展得尚不充分。

外加剂是混凝土不可缺少的组分之一,是混凝土改性的一种重要方法,在混凝土中的研究和应用已相当成熟,许多国家视外加剂为水泥混凝土的第五种组成材料,即混凝土由水泥、水、细骨料、粗骨料和外加剂所构成。外加剂对混凝土如此重要,原因就在于外加剂用量虽少,但能显著提高强度、改善性能、节约原料和满足某些工程的特殊要求。水泥土的性能不及水泥混凝土,因此借助外加剂来提高材料强度、改善材料性能,稳定材料质量和扩大材料用途的要求尤为迫切。但是适用于水泥混凝土的外加剂不完全适用于水泥土,因为水泥固结的两种集料性质不同、施工方法各异。水泥土外加剂既应激发、催化和调节水泥水化物的化学反应速度、程度及其成分等,也应改良、改善土料的理化性质,朝有利于水泥土质量的方向发展。

目前,国内应用于水泥搅拌法的水泥掺量一般为 $7\% \sim 25\%$,水泥土无侧限抗压强度一般为 $1.5 \sim 2.0 \text{ MPa}$,国际上的水泥搅拌法工程,以日本为例,水泥掺量仅为 $8\% \sim 10\%$ 时水泥土强度即能达到 2.5 MPa 以上,其主要区别就在于水泥土的外加剂。国内水泥土外加剂研究方面,已经取得了不少成果。但就改性效果来看,与其他发达国家(如日本)的差距还很大。因此,针对不同的土质条件,寻求适宜的外加剂,并探讨外加剂在水泥土中的微观作用机理仍然具有重要意义。

自从1824年Aspdin发明了水泥以后,水泥土以其优良的加固效果,逐渐得到了人们的重视。多年来对水泥土的配比、工程性质、本构模型和微观结构的研究取得了大量成果,但在工程实践中,人们逐渐认识到水泥土的早期强度低、干缩大、易开裂、填充空隙的效率很低,并且其性能受土质影响较大,对塑性指数高的黏土、有机土和盐渍土固化效果较差,甚至有时无固化作用。因此提出掺入其他外加剂以弥补水泥土的不足,从而真正形成了复合水泥材料的概念。复合水泥土是以水泥为主剂、以其他添加剂材料为铺剂、能改善和提高土壤力学性能的复合材料,它克服了石灰、水泥和粉煤灰等单一材料的缺点。复合水泥固化技术的应用由来已久,至今已形成一门综合了力学、结构理论、材料力学、胶体化学、表面化学等理论的综合交叉学科,并应用到基础设施、公路建设、水利工程、铁路工程、机场跑道、防尘固沙等多个领域。20世纪30年代,土力学理论在欧洲率先进入建筑领域,复合水泥土固化这一概念被人们接受。

此后,水泥土壤固化稳定从添加单一的外加剂逐步发展到了添加多种成分的复掺。复合水泥材料是一种性能优良的土工复合材料,是一种由多种无机和有机材料配制而成的水硬性胶凝材料,以专门加固土壤为特性,它通过与土壤混合后产生的一系列物理化学反应,将松散土体转为致密的胶凝材料,大幅度地提高土壤的强度、改善土壤的耐久性等性能。到目前为止,国内外对水泥土添加剂的研究一直没有中断过,用于作为水泥土外加剂的材料也是新品迭出,以适应不同土质的要求或充分利用各地区的工业废料。因此,开发经济实用的复合水泥土壤固化新材料,并系统地研究复合水泥土材料的力学性能和固化机理,是目前各国工程师们致力研究的新课题,相关的资料和数据以及试验效果材料比较少。水泥土工程力学特性的研究可以考虑通过各种配合比水泥土的工程力学试验来完成,由于室外条件的限制,室内水泥土各种力学性质的试验成为室外试验和工程设计中最重要的依据和补充,因此通过室内试验手段研究水泥系加固土的工程特性具有十分重要的

意义。

国内外针对复合水泥加固土的研究主要包括两个方面：一方面是固化措施的研究，在掺入水泥的基础上，根据现场土质的特性添加石膏、粉煤灰和其他化学添加剂，改善固化效果，节约成本；另一方面是对复合水泥土本构模型方面的研究，通过室内试验分析水泥土的强度和变形特性，建立其本构模型。但值得注意的是，目前针对寒区水泥加固粉质黏土在不利的冻融循环条件下力学特性的研究还没有出现，针对这种复合水泥土的损伤本构模型研究更少，从而无法对其损伤特性进行合理数值描述，所以有必要从室内试验出发，分析粉质黏土的固化机理，配制针对粉质黏土的复合水泥土最佳组分，充分研究粉质黏土水泥土的强度和变形特性，探讨复合水泥土的损伤机理，建立可用于粉质复合水泥土的数值计算方法，为矿山、水利等工程中的堤坝、围堰防渗、护坡，土木工程中的地基基础、基坑防渗、挡土墙护坡以及路基改良等工程安全设计和计算提供更准确有效的技术参数，此研究具有重要的工程实际意义和工程应用价值。

目前我国正处于高速发展中，需要建设大量公路、海港、码头、铁路等基础性建设。沙石材料的需求量大大增加，原有的自然供给有限，所以合理利用当地资源极为重要。在兴修公路、铁路路基时可以利用水泥土的优势，就地取材，节约大量沙石材料，同时还避免了远距离开采运输。另外，随着我国交通港口和滩涂设施的大规模建设，需要大量的土石方来进行填海造陆。我国沿海港口城市多位于冲积平原和三角洲地区，土质多为淤泥或淤泥质土等软土。要在当地获得大量的土石方比较困难，远距离开采运输又不经济，而且会影响山体的生态环境。土木工程材料的环境协调问题也日益受到重视，所谓环境协调是指对资源和能源消耗少、对生态和环境污染小和循环再生利用率高。因此，研究新的地基、路基加固处理方法已经成为一个重要的课题。将当地软土通过物理、化学等方法进行处理，使其变为良好的土工填方材料、建筑材料进行利用，是一个比较好的方法。这样既可以减少环境污染，又可产生新的材料加以利用，产生综合技术经济效益，不仅符合国家可持续发展战略，也是一些发达国家广泛使用的技术方法。除了美日及瑞典等北欧诸国外，近10年来东南亚诸国、中国香港及加拿大也对水泥土开展了大量的试验研究和工程应用，如新加坡、马来西亚、印尼、泰国等应用水泥土搅拌桩较多。

1.2 国内外水泥土研究现状

1.2.1 国外水泥土研究现状

国外对于水泥加固土的研究和应用，从20世纪初就开始了。1915年美国佛罗里达(Florida)州一位大胆的铺路承包人，在修筑奥克街的一段路时将在海湾挖出的贝壳和砂子、水泥混合在一起，经10t蒸汽压路机将表面压实而成，无意识地创造了很可能是世界上首次应用水泥土的实例。

多年来工程师们在试验土和水泥的混合物，试图找到能够以当地土料为主要原料的廉价筑路材料，这就是国外最早应用水泥土的原因。20世纪30年代，美国在铺筑道路、公路、机场跑道方面，已使用了水泥土约1.91亿 m^3 。40年代，水泥土试验标准由美国材料试验协会以D-18编订在工程土壤规程中。当时已有水泥土混合物的含水量与密实度

关系试验方法、压实水泥土干、湿循环试验方法、压实水泥土冻融循环试验方法、用水泥土抗折试件断裂段测定抗压强度的试验方法,以及新混合的水泥稳定土中水泥含量试验方法等。这些均说明了水泥土这种新材料已被该协会认可,并且抓住水泥土材料的主要特性统一了试验方法,为正确地推广应用提供了科学的依据。

美国于1945年首次将水泥土用于一座4.5万 m^3 蓄水池底部的防渗,运行23年未发现渗漏。50年代初,美国曾经在邦奈水库土坝上用水泥土做护坡材料试验,10年后取样检验,材料强度较28d龄期的增长了一倍,而且各层水泥土之间结合的较牢固。由于试验结果是肯定的,所以到70年代中期,美国各地已有55座水库大坝上使用了水泥土护坡,其中加利福尼亚州卡期介克坝坝高102m。这些大坝的水泥土护坡工程量达160万 m^3 。这一成功经验,在第十届和第十二届国际大坝会议上引起重视。水泥土除用作堤坝护坡外,近二三十年来已广泛用于构筑防渗墙体,如1989年在华盛顿某溢流坝砌筑水泥土芯墙,取得显著效果。除美国外,印度、赞比亚、肯尼亚等国也大量使用水泥土作防渗料或建筑材料^[6-14]。

Gotoh研究了pH值、含水量、黏粒含量等对水泥土无侧限抗压强度的影响,并得到了水泥含量随着不同的pH值、含水量、黏粒含量等变化的修正公式,该公式为工程上获得较均匀的水泥混合土强度提供了计算依据。

Shibata对不同养护条件下的水泥土进行研究发现:在龄期小于90d时,水泥土强度持续增长,即使是在含盐较高的水中,其强度仍然持续增长,当龄期大于90d时其无侧限抗压强度达到某一值后,强度增长很慢。

Tremblay和Duchesne在两种不同的土中加入了10%的水泥和13种不同的有机物通过室内试验来分析其胶结作用。结果表明:碳氢化合物、石油等在水中不能溶解的物质会减缓水泥土中水泥水化作用,但对最终强度影响不大。但是当土壤溶液的pH值小于9时,会对胶结产物的生成有很大影响,产生的强度几乎为0。

Yamamoto研究了试件尺寸与水泥土无侧限抗压强度的关系。研究表明,在长径比恒定的情况下,试件的直径越小,强度越大。随着长径比的增加,强度缓慢变小。当压力为无侧限抗压强度的一半时,切线模量随着直径递增。

Kitazume通过试验研究养护条件对水泥土强度的影响,将水泥土分别养护在淡水、海水和软土中,研究了不同养护条件下水泥土的强度变化情况。同时,Kitazume还测定了水泥土中钙含量的分布,找出了钙含量与强度分布之间的关系。

Huat通过试验发现有机质含量高的土对水泥土的力学性质起消极的作用。同时,水泥土的液限和最佳含水量随着水泥含量的增加而降低,而水泥土的最大干密度随着水泥含量的增加而增大。

Shin等人在不同的养护条件下进行室内试验,根据不同的水灰比、不同含水量制作了500个水泥土试件,结果表明:当试件的含水量达到80%以后,无侧限抗压强度的增长趋势并无明显规律,并在此基础上提出了一种现场标准试验的方法。

Gerald和Shahriar的试验研究结果表明:水泥土的pH值与原状土的塑性指数相关,且pH值与水泥含量有紧密联系。同时指出:水泥土的无侧限抗压强度与原状土的塑性指数成反比,塑性指数越高这一结果越明显。

Horpibulsuk 和 Miura 通过试验得出: 可以用 28d 龄期的水泥土强度推求其他龄期的水泥土强度, 同时得出以 28d 龄期下某一水灰比为基准来预测其他水灰比的水泥土强度的方法。

铃木健夫、国藤柞光通过室内试验研究认为: 相同注浆量的水泥土, 水灰比小的水泥土无侧限抗压强度大, 含砂率大的水泥土的无侧限抗压强度也大; 随着含砂率的增大, 水泥土的渗透系数也大; 水泥土无侧限抗压强度大, 则内聚力 c 也大。

1.2.2 国内水泥土研究现状

我国水泥土的发展和应用起步较晚, 从 20 世纪 70 年代前期开始在水利工程中研究和应用水泥土, 并取得了迅速的发展。此后, 水泥土被应用于护坡、防渗、农用暗管排灌等方面。这些早期的实践是应用水泥土的大胆尝试, 甚至还是创举。70 年代中后期, 国内有水利科研等单位相继开展了水泥土应用研究工作, 比较深入地研究了材料的一些基本物理力学性能。80 年代以来, 水利部门对水泥土材料的研究试用更为普遍和重视。在地基深部就地将软黏土和水泥浆强制拌和, 使软黏土硬结成具有整体性、水稳性和足够强度的地基土, 是国内建筑部门应用水泥土的一项重要内容, 也是建筑部门 70 年代后期用来加固地基的新技术。

1974 年辽宁省在沈抚南线公路上铺筑了 10km 水泥稳定土作为高级沥青面层的基层, 这是我国公路上第一次正式大规模应用水泥稳定土的工程实例。最近几年, 在一、二级干线公路上用水泥稳定土类做基层和底基层, 有了较快的发展。国内根据生产建设的需要和自己的国情, 不仅将水泥掺入土中视为稳定土、加固土或改善土的措施, 用于强度要求不高、建筑物体积较大的土建工程中, 而且还将这种强度较低的水泥土用于承受水压、承受活载、承受冲刷等强度要求较高、尺寸较薄的水工建筑物上。所以国内对水泥土材料的研究既着眼于水泥稳定土的特性, 又特别关注水泥土水工建筑材料性能, 如抗渗、抗冻、抗冲、抗腐蚀等耐久性能。在研究力学强度和多种耐久性能的同时, 国内还致力于探求提高强度和改善性能的有效措施。虽然水泥土材料的应用较国外晚了许多, 但对材料全面性能的研究并不太迟, 而且在研究内容和方向上还有所发展^[15-22]。

宁宝宽、陈四利等人采用试验的方法研究了水泥土在各种环境因素(水、不同浓度及不同 pH 值、不同化学溶液等)影响下的力学性质, 指出: 环境侵蚀对水泥土力学强度产生了明显的影响, 而对破裂过程影响较小; 碱性环境水泥土强度提高, 酸性环境水泥土强度降低, 水泥土强度的增长与 pH 值的增加呈非线性关系; 水泥土在环境侵蚀下所表现出的力学性质主要是水泥、水泥水化产物及黏土颗粒与酸、碱和不同化学溶液产生了一系列物理—化学反应的结果。

储诚富提出了含水量、龄期、水泥含量、含盐量和有机质含量对水泥土强度影响的定量分析公式, 并通过室内和现场试验, 比较分析了在含水量不同的情况下, 湿喷桩和粉喷桩对于软弱地基的加固效果。

陈甦、彭建忠等人通过试验得出在配比相同的条件下, 水泥土试件的无侧限抗压强度与试件形状有关, 圆柱体试件的强度大于立方体试件的强度, 随着试件尺寸增大, 其强度降低。他们建议室内外水泥土强度检测时使用直径 70mm、长径比 1~2 的圆柱体试件。

汤怡新、刘汉龙等根据 28 种配方试验资料, 提出了一个简便的经验关系。指出水泥

固化土的抗压强度与土的含水量的平方成反比,同时得出结论:对任意一种软质原料土,存在一个最低水泥用量,小于此用量则无固化效果。

高亚成、郑建青通过试验发现声波速度与抗压强度之间具有良好的幂函数对应关系: $V_p=1490R^{0.26}$,这一成果可以为应力波法检测水泥土搅拌桩桩身质量提供强有力的理论依据。

李志平经过室内试验研究,通过对试验结果的分析后建议:在水泥土搅拌桩施工时水泥掺入量宜控制在15%~20%之间,若单纯考虑软土的含水量,则当含水量小于50%时,适合用水泥浆搅拌法加固,若含水量大于50%,则宜用水泥粉搅拌法施工。

孙立川于1994年研究了不同种类的土质对水泥搅拌土工程性质的影响。在试验中,他对比了由粉土、粉质黏土和淤泥质黏土3种不同土质搅拌的水泥搅拌土的抗压强度。试验结果表明:在灰土比为10%时粉土的抗压强度低于粉质黏土的抗压强度,但是随着掺灰量的增加,粉土的抗压强度又高于粉质黏土的抗压强度,说明粉质黏土类的水泥搅拌土抗压强度的增长敏感性比粉土类的水泥搅拌土抗压强度的增长敏感性差;同时,淤泥质黏土的抗压强度最低,要比其他两种水泥搅拌土低的多。

朱大宇从水泥掺量、龄期、试件尺寸和试验条件等对水泥土的无侧限抗压强度进行了定性的分析,并得出了部分回归公式。

曾庆军主要针对珠三角地区淤泥质黏土水泥土进行现场试验与室内试验结合,试验结果表明:现场水泥土28d龄期无侧限抗压强度为130~1000kPa,是天然软土无侧限抗压强度19.1kPa的6.8~52.4倍,同时指出,现场水泥土与室内水泥土无侧限抗压强度之比随龄期增长,28d龄期时,现场水泥土无侧限抗压强度为室内水泥土无侧限抗压强度的一半。

1.3 研究的内容与方法

在国内外学者的不断努力下,水泥土及水泥系加固土的研究以及加固土物理力学特性的研究已经取得了很大的进展,无论是在试验研究还是在本构模型和数值计算分析方面都取得了许多成果,为水泥系固化土的进一步研究奠定了基础,但针对内蒙古河套灌区广泛分布的粉质黏土的固化研究还很少,内蒙古河套灌区发育巨厚的以细粒为主的内陆湖相泥沙质沉积物,土壤资源非常丰富,但在工程项目建设中一直没有充分利用这一廉价的资源,究其原因,没有充足的试验研究作为实践的理论依据。

根据总结的水泥土及水泥系固化土研究应用现状,提出研究目标,尝试将几种外加剂掺入水泥土并开展试验研究和理论分析,开展的主要研究工作内容及相应方法有:

(1) 通过室内试验,针对内蒙古河套灌区典型的粉质黏土,在不掺加外加剂的条件下,通过不同掺量、不同龄期及冻融条件下的水泥土无侧限抗压强度试验,探讨水泥土抗压强度的影响因素及变化规律。并可作为掺入外加剂水泥土的对比依据。

(2) 采用二次抛物线,对水泥土强度试验所得的应力—应变曲线进行拟合,通过试验数据回归分析,推导单轴受压状态下水泥土应力—应变曲线上上升段及下降段的表达式。

(3) 通过对河套粉质黏土的分析,提出了若干种外加剂,并进行单掺试验,这15种

外加剂分别为生石灰、硅粉、包钢高炉矿渣微粉（自制）、聚丙烯纤维、玻璃纤维、粉煤灰、闭孔珍珠岩、天然浮石粉（自行磨细）、河砂和风积沙、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 、十二烷基苯磺酸钠、某阴离子表面活性剂、聚丙烯酰胺、水玻璃及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等，确定每种外加剂对水泥土力学性质的影响及改性效果。

（4）通过正交试验，确定各外加剂对水泥黏土的影响，并将作用不大的外加剂剔除，根据单掺和复掺试验及补充试验，确定一个最佳的复合型水泥土的配合比。

（5）针对前述试验确定的复合水泥土，进行不同掺量的无侧限抗压强度试验，通过分析，找到这种新型材料的本构关系，即强度和掺量的关系、强度与龄期的关系等，在此基础上建立综合考虑各因素影响的复合型水泥固化土强度预测模型。

（6）以大量试验数据为基础，应用最小二乘法建立复合水泥土抗压强度与各主要影响因素间的关系。

（7）通过 SEM 电镜扫描及能谱分析，探讨复合水泥土及普通水泥土的微结构特点，分析了复合水泥土的固化机理。通过能谱分析，研究复合水泥土及普通水泥土的水化生成物，找出复合水泥土的强度增长机理的内在原因。

（8）通过对单轴受压及三轴试验下水泥土及复合水泥土的应力—应变关系曲线进行非线性拟合，建立了符合固化土自身特点的非线性经验本构关系模型。同时着重分析不同围压、不同浮石粉掺量下浮石粉水泥复合土的应力—应变曲线变化规律，同时测定浮石粉水泥复合土抗剪强度指标随着强度变化的规律。

（9）在室内试验基础上，基于试验结果建立了浮石粉水泥复合土的应力—应变非线性本构方程，得到了适合浮石粉水泥土自身的非线性本构关系，为进一步深入研究浮石粉水泥复合土的破坏预测、控制等奠定了必要的理论和实验基础。

（10）从损伤角度出发，分析复合材料对水泥土的改性效果。通过反复加卸载试验，求得了复合水泥土的损伤变量，进而求得不同掺量的损伤阈值，得出了复合水泥土的损伤演化规律；分析复合水泥土细观损伤机制，建立单轴受压应力状态下复合水泥土的弹塑性损伤模型。

第2章 试验材料、内容及试验方法

2.1 试验材料

本试验采用内蒙古河套粉质黏土作为试验用土样，普通硅酸盐水泥作主料，以当地廉价的工业材料如生石灰、硅粉、高炉矿渣、聚丙烯纤维、玻璃纤维、粉煤灰、闭孔珍珠岩及当地丰富的自然资源如天然浮石粉、河砂和风积沙及化学药剂 [Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 、十二烷基苯磺酸盐、某阴离子表面活性剂、聚丙烯酰胺、水玻璃、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等] 作为外加剂，来研究水泥土及不同外加剂材料对水泥粉质黏土的固化效果，尝试配制一种针对粉质黏土的高性能水泥系复合加固土的配合比。

2.1.1 试验用土样

内蒙古河套平原是一个长期沉降的封闭断陷盆地，发育巨厚的以细粒为主的内陆湖相泥沙质沉积物，第四系上部的含水层可以粗略地分为两层，顶部为黏质粉砂潜水含水层 (Q_4) 含黏性土夹层，土壤资源非常丰富，本试验土样取自内蒙古河套灌区临河某工地，并去除表面 30cm 的表土，将土样风干、碾散、过 2mm 筛，按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 规定进行了含水率及界限含水率试验、比重试验、颗粒分析试验、击实试验、渗透试验、固结试验、三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验及土的化学性试验，试验结果见表 2-1、表 2-2、表 2-3，土样的颗粒分布见图 2-1。

1. 土样的基本物理性质

表 2-1 试验用土的物理参数

Table 2-1 The physical parameters of the experiment soil

比重 (g/cm^3)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	最优含水率 (%)	击实最大干密度 (g/cm^3)	土的种类
2.63	28.81	17.24	11.57	17.01	1.764	低液限粉质黏土

表 2-2 试验用土样的八大离子测定

Table 2-2 The cations and anions of the test soil

Ca^{2+} (cmol/kg)	Mg^{2+} (cmol/kg)	CO_3^{2-} (cmol/kg)	HCO_3^- (cmol/kg)	Cl^- (cmol/kg)	SO_4^{2-} (cmol/kg)	K^+ (cmol/kg)	pH 值
0.74	1.6	0	0.67	4.475	5.95	8.755	9.07

表 2-3

粉质黏土的颗粒组成

Table 2-3

Grain distribution of the silty clay

$D(\text{mm})$	$2 < D < 5$	$1 < D < 2$	$0.5 < D < 1$	$0.25 < D < 0.5$	$0.075 < D < 0.25$	$0.075 < D < 0.005$	$D \leq 0.005$
$P(\%)$	0.02	0.23	5.74	11.50	26.72	38.95	16.84

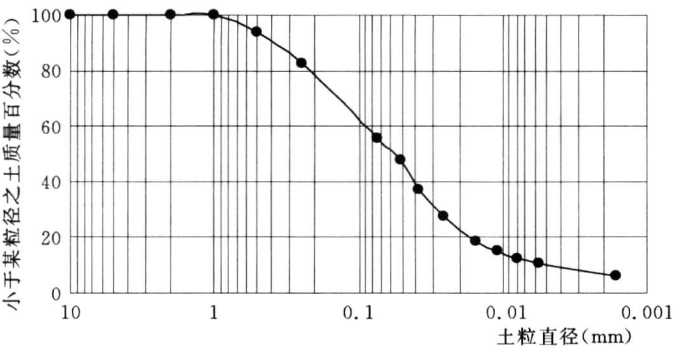


图 2-1 土样的颗粒分布曲线

Fig. 2-1 Grain distribution curve of soil

2. 土样的能谱分析

能谱分析的原理是在扫描电子显微镜对形态进行观察的同时，对扫描电子显微镜图像中的任意点或面用一束细小的电子束轰击，通过打击以后产生的一系列分析光谱，确定样品在该点的化学成分。

将少量土样放在 SEM 电镜下做能谱分析，可以测得土样中主要的矿物质成分，土样的微结构见图 2-2，能谱分析结果见图 2-3，矿物质成分含量见表 2-4。从图 2-2 可看到，是由人们肉眼很难看清的粒径很小颗粒组成，土样的化学成分主要是 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、K 长石、钙长石等组成，其中 SiO_2 中的 O 元素占到总质量的 54.65%，其次是 Si，占总质量的 16.73%，各元素含量见表 2-4。

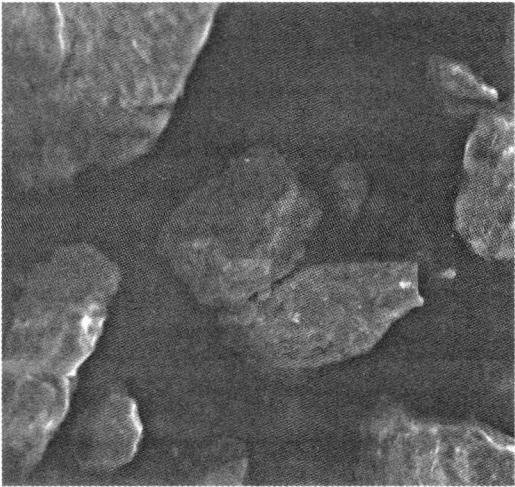


图 2-2 土样的微结构

Fig. 2-2 The micro-structure of soil samples

表 2-4

土样的化学元素含量

Table 2-4

The chemical elements of the soil samples

元素	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Fe	Ca	总计
重量百分比(%)	54.65	1.43	4.5	8.13	16.73	0.54	0.87	10.35	2.8	100.0
含量百分比(%)	70.39	1.28	3.81	6.21	12.28	0.32	0.46	3.82	1.44	100.0

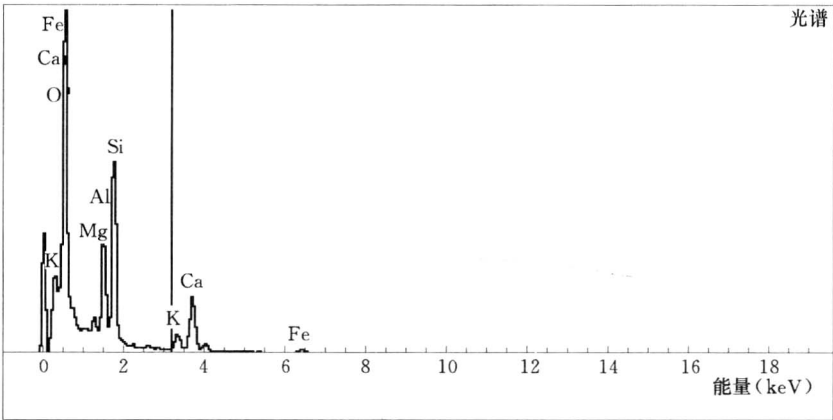


图 2-3 土样的能谱分析

Fig. 2-3 Energy spectrum analysis of soil samples

2.1.2 试验用水泥

本试验所用水泥为内蒙古乌兰水泥厂生产的普通硅酸盐水泥 P. O. 42.5，其成分、性能指标及粒度分析结果分别见表 2-5、表 2-6、表 2-7，水泥的激光粒度分布图见图 2-4。

表 2-5 P. O. 42.5 硅酸盐水泥的主要成分表

Table 2-5 The main component of P. O. 42.5 portland cement

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃
含量 (%)	22.12	5.11	63.98	1.06	2.23	5.50

表 2-6 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥性能指标

Table 2-6 Performance indicators of P. O. 42.5 portland cement

检测项目	细度 (%)	初凝时间 (时:分)	终凝时间 (时:分)	安定性	烧失量 (%)	抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)	
						3d	28d	3d	28d
实测	1.2	2:15	2:55	合格	1.02	26.6	54.8	5.2	8.3

表 2-7 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥激光粒度分析结果表

Table 2-7 Laser particle size analysis of P. O. 42.5 portland cement

项目	D3 (μm)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	D97 (μm)	Dav (μm)	S/m (m ² /g)	<10μm (%)	<20μm (%)
水泥	3.583	7.867	22.194	45.723	60.704	25.113	0.143	14.46	43.35

2.1.3 试验用外加剂

1. 生石灰

分析纯，天津市化学试剂三厂生产，主要成分见表 2-8。

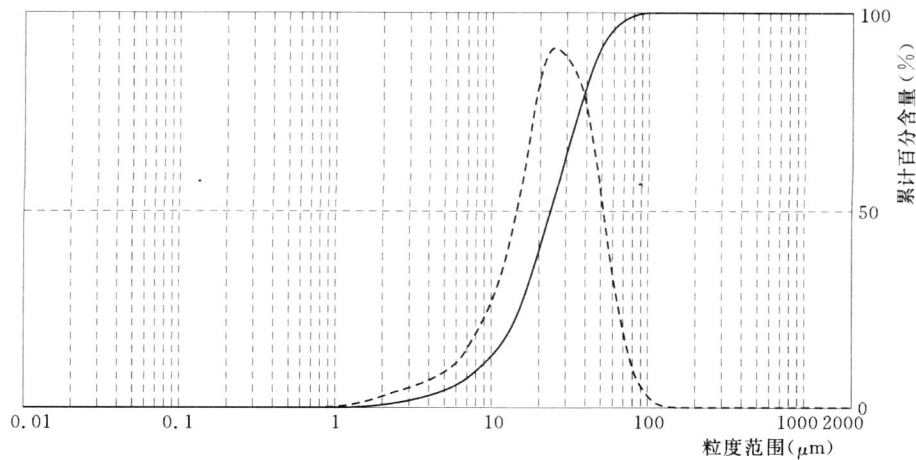


图 2-4 试验用硅酸盐水泥激光粒度分布图

Fig. 2-4 Laser particle size distribution of portland cement used in the experiments

表 2-8 生石灰主要成分表

Table 2-8 Major lime components

成分	CaO	NO ₃ 盐	Fe	MgO	乙酸不溶物	氯化物	硫酸盐	Pb	氨沉淀物	烧失量
含量 (%)	98.0	0.004	0.015	0.5	0.05	0.003	0.1	0.005	0.2	1.123

2. 硅粉

硅粉为普通微硅粉，由内蒙古容升达新型材料建筑有限公司提供，硅粉是一种非结晶相无定型圆球状颗粒，表面光滑，比表面积较大，比表面积是粉体材料，特别是超细粉材料的重要特征之一，粉体的颗粒越细，其比表面积越大，其表面效应，如表面活性、表面吸附能力、催化能力等越强。硅粉的主要成分及粒度分析结果见表 2-9、表 2-10，硅粉的激光粒度分布图见图 2-5。

表 2-9 硅粉主要成分表

Table 2-9 Major components of silica fume

成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
含量 (%)	80.9	8.92	4.72	0.3	0.7	0.64	1.41	0.52	1.86

表 2-10 硅粉激光粒度分析结果表

Table 2-10 Laser particle size analysis of silica fume

项目	D3 (μm)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	D97 (μm)	Dav (μm)	S/m (m ² /g)	<10μm (%)	<20μm (%)
硅粉	3.164	4.859	11.751	22.654	29.351	13.036	0.276	36.53	84.09

3. 包钢矿渣粉

矿渣粉，是新型高强度、高性能混凝土不可缺少的一种无机矿物掺加料，属建材高新