

查文华 范晓秋 著

水泥砂浆 固化土 工程特性 试验与分析

**SHUINI S
GUHUATU
TEXING SHIYAN
YU FENXI**



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

国家自然科学基金项目(51004002)资助

高等学校博士点新教师基金(20103415120001)

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助

水泥砂浆固化土工程 特性试验与分析

查文华 范晓秋 著



合肥工业大学出版社

内容简介

本书是在作者已取得的水泥砂浆固化土工程特性理论与试验研究成果的基础上撰写而成的。全书共分六章,包括绪论、土层性质变化对水泥搅拌桩成桩质量影响的试验研究、水泥砂浆固化土试验方法与物理特性测试、水泥砂浆固化土变形特性的试验研究、水泥砂浆固化土强度特性的试验研究、基于生长函数的固化土本构模型研究。

本书可供土木、水利、交通等部门从事科研、设计工作的科研人员参考,也可作为高等学校土建等相关专业的研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水泥砂浆固化土工程特性试验与分析/查文华,范晓秋著. —合肥:合肥工业大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-5650-0317-2

I. ①水… II. ①查…②范… III. ①水泥砂浆—地基处理—研究
IV. ①TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 226996 号

水泥砂浆固化土工程特性试验与分析

查文华 范晓秋 著

责任编辑 权 怡

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2010 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2010 年 12 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1010 毫米 1/16
电 话	总编室:0551-2903038 发行部:0551-2903198	印 张	10.75
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	165 千字
E-mail	press@hfutpress.com.cn	印 刷	合肥星光印务有限责任公司
		发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-0317-2

定价:25.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

随着我国经济快速发展,基础设施建设规模不断扩大,特别是我国东部沿海地区,修建大量的高速公路、高层超高层建筑物、城市地下轨道交通、港口码头等。这些地区的地基分布多为淤泥、淤泥质土或淤泥土中含薄砂层,属典型的软土地基,这类地基具有含水率高、压缩性大、渗透性差、灵敏度高、强度低、厚度不均匀等特点。含水率高、强度低、处理困难的地基,易造成工程投资大幅增长;压缩性大、渗透性差、稳定时间长的地基,易产生过大的工后沉降和差异沉降。如何更经济、有效的选择软土地基处理的方法,保证建筑物的安全使用,已是工程界长期关注的重点问题之一。

虽然软土地基处理方法较多,如堆载预压法、真空-堆载联合预压法、水泥搅拌桩法、CFG桩法、加筋处理法等,然而工艺简单、造价低廉的水泥搅拌桩复合地基处理方法,仍是运用最广泛并获得巨大成效的处理方法。由于软土地基成因与物质组成多种多样,即使采用相同的处理方法,不同地区甚至同一地区处理的效果也会有所差异,在这方面的失败案例屡见不鲜。因此,原创性的研究影响水泥搅拌桩复合地基工程特性的因素并分析其影响机理,对水泥土掺和料进行优化设计,不仅具有理论价值,而且具有重要的实际应用价值。

本书是在作者已取得的水泥砂浆固化土工程特性理论与试验研究成果的基础上撰写而成的。全书从室内模型试验入手,分析了土层性质变化对水泥搅拌桩成桩质量的影响,并在此基础上提出水泥砂浆固化土的设想,分析水泥砂浆固化土的物理特性、强度特性以及变形特性;在水泥固化土应力应变特性的基础上,建立一

种实用的简单本构模型。全书共分六章,包括绪论、土层性质变化对水泥搅拌桩成桩质量影响的试验研究、水泥砂浆固化土试验方法与物理特性测试、水泥砂浆固化土变形特性的试验研究、水泥砂浆固化土强度特性的试验研究、基于生长函数的固化土本构模型研究。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51004002)、高等学校博士点新教师基金(20103415120001)、煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助。在编写过程中,参考了国内外有关研究成果,均在附后的参考文献中列出,在此对所涉及文献的作者表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2010 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	(001)
1.1 问题的提出	(001)
1.2 水泥桩复合地基研究现状分析	(003)
1.2.1 室内模型试验研究现状	(003)
1.2.2 水泥土力学性质研究现状	(006)
1.2.3 水泥土本构模型研究现状	(010)
1.3 主要研究内容	(013)
第 2 章 土层性质变化对水泥搅拌桩成桩质量影响的试验研究	(015)
2.1 试验仪器与设备研制	(015)
2.1.1 模型地基设计	(017)
2.1.2 成桩系统设计	(022)
2.2 室内试验研究	(024)
2.2.1 模型地基重构	(024)
2.2.2 土性性质变化的影响分析	(027)
2.2.3 互层影响分析	(031)
2.3 本章小结	(033)
第 3 章 水泥砂浆固化土试验方法与物理特性测试	(035)
3.1 原料的物理特性	(035)
3.1.1 软土物理力学特性	(035)
3.1.2 固化剂特性	(036)

3.1.3	砂料特性	(037)
3.2	试验方法	(038)
3.2.1	试验掺料配比	(038)
3.2.2	试验设备和制样方法	(040)
3.2.3	试验步骤	(041)
3.3	水泥砂浆固化土的物理特性	(042)
3.3.1	水泥砂浆固化土的主要工程特性试验	(042)
3.3.2	固化土重度的变化规律	(045)
3.3.3	固化土渗透系数的变化规律	(047)
3.3.4	固化土水稳定性的变化规律	(048)
3.4	本章小结	(049)
第4章	水泥砂浆固化土变形特性的试验研究	(050)
4.1	单轴应力应变曲线的变化特性	(050)
4.1.1	掺砂量对单轴压缩曲线形态的影响	(052)
4.1.2	水泥掺入比对单轴压缩曲线的影响	(053)
4.1.3	含水率对单轴压缩曲线的影响	(054)
4.1.4	龄期对单轴压缩曲线的影响	(055)
4.1.5	砂料粒径对单轴压缩曲线的影响	(056)
4.2	无侧限抗压强度试验中的破坏应变	(057)
4.2.1	掺砂量的影响	(058)
4.2.2	水泥掺入比的影响	(059)
4.2.3	龄期的影响	(060)
4.2.4	含水率的影响	(060)
4.3	三轴应力应变曲线的变化特性	(061)
4.3.1	应变软化特性	(061)
4.3.2	破坏准则	(063)
4.3.3	孔隙水压力特性	(066)
4.3.4	掺砂量对应力应变曲线的影响	(067)
4.3.5	水泥掺入比对应力应变曲线的影响	(068)

4.3.6	含水率对应力应变曲线的影响	(069)
4.3.7	砂料粒径对应力应变曲线的影响	(072)
4.4	水泥砂浆固化土的变形模量	(073)
4.4.1	无侧限抗压强度试验中的变形模量与抗压强度的 关系	(073)
4.4.2	三轴压缩试验中的变形模量与围压的关系	(075)
4.5	水泥砂浆固化土的压缩变形特性	(076)
4.5.1	不同掺砂量的压缩变形特性	(077)
4.5.2	不同水泥掺入比的压缩变形特性	(078)
4.5.3	水泥砂浆固化土沉降变形与时间的关系	(079)
4.6	本章小结	(080)
第 5 章	水泥砂浆固化土强度特性的试验研究	(083)
5.1	固化土的剪切破坏形式	(083)
5.2	无侧限抗压强度特性	(085)
5.2.1	掺砂量的影响	(086)
5.2.2	龄期的影响	(087)
5.2.3	水泥掺入比的影响	(089)
5.2.4	含水率的影响	(090)
5.2.5	砂料粒径的影响	(091)
5.3	直接剪切强度特性	(092)
5.3.1	掺砂量对 τ - δ 曲线形态的影响	(092)
5.3.2	掺砂量对抗剪强度的影响	(094)
5.3.3	掺砂量对 c 、 φ 值的影响	(096)
5.3.4	水泥掺入比对 τ - δ 曲线形态的影响	(098)
5.3.6	水泥掺入比对抗剪强度的影响	(099)
5.3.6	水泥掺入比对 c 、 φ 值的影响	(101)
5.4	三轴 CU 抗剪强度特性	(102)
5.4.1	掺砂量对抗剪强度的影响	(103)
5.4.2	水泥掺入比对抗剪强度的影响	(106)

5.4.3	含水率对抗剪强度的影响	(108)
5.4.4	砂料粒对抗剪强度的影响	(111)
5.5	水泥砂浆固化土的屈服应力	(114)
5.5.1	无侧限抗压强度试验的屈服应力与抗压强度的关系	(114)
5.5.2	三轴压缩试验的屈服应力与围压的关系	(116)
5.6	本章小结	(117)
第 6 章	基于生长函数的固化土本构模型研究	(120)
6.1	水泥固化土的应力应变曲线特征	(120)
6.2	Duncan-Chang 模型简析	(123)
6.3	Logistic 函数的性质	(126)
6.4	基于 Logistic 函数的本构模型	(127)
6.4.1	模型建立	(127)
6.4.2	修正模型的拐点性质	(130)
6.4.3	参数 a 、 b 、 c 的物理意义	(131)
6.4.4	对模型的讨论	(134)
6.5	模型求解与验证	(135)
6.5.1	模型中的参数求解	(135)
6.5.2	误差分析	(139)
6.5.3	固化土应力应变曲线拟合	(143)
6.6	本章小结	(154)
参考文献		(155)

第1章 绪论

1.1 问题的提出

随着我国社会经济的迅速发展,机场、码头、高等级公路和高速铁路等工程项目不断兴建,使得软土地基处理成为工程界和学术界关注的热点问题之一。

软土是包括淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉土、泥炭、泥炭质土等类土的简称,主要是静水或缓慢水流中逐渐停积的饱和软弱黏性土,其基本物理力学特征是天然含水量高、天然孔隙比大、渗透系数小、压缩性高、强度低,可呈灵敏性结构^[1]。我国软土分布十分广泛,滨海平原、河口三角洲、湖盆地周围、山间谷地均有分布^[2,3]。水泥搅拌桩复合地基因其工艺简单、施工方便、造价相对较低,在软土地基处理中得到广泛应用并取得了巨大成效。但是软土性质地区差异较大,即使采用相同处理方法,处理效果也会有所差异。因此,原创性的研究影响水泥搅拌桩复合地基工程特性的因素并分析其影响机理,对水泥土掺和料进行优化设计,不仅具有理论价值,而且具有重要的实际运用价值。此外,水泥土的材料特殊性既不同于一般土体,也与岩石存在一定差异,因此建立一种适合水泥土的简单本构模型,也是我们面临的一个重要问题。

影响水泥搅拌桩复合地基质量的因素较多,工程地质条件的复杂性是影响水泥搅拌桩复合地基性能的一个重要的因素。1985年冬,在我国西南地区采用深层搅拌加固沼泽相泥炭土的工程中发现^[4],单一采用水泥加固,即使掺入比达30%,加固土强度也难以达到300kPa,以致使水泥加固泥炭

土丧失经济技术效益。廖建春^[5]通过多个工程的水泥搅拌桩抽芯发现,含砂较多的软土加固后芯样较一般软土更为完整,强度更高,因此得出含砂量是影响水泥土强度的主要因素之一的结论。张震山^[6]在某拟建小区地基处理工程中进一步证实了砂、砾料对水泥土搅拌桩的有利影响。因此,对于进一步开展土层性质变化对水泥土力学特性的研究,可为优化水泥搅拌桩设计提供新的途径。

在水泥固化土的力学效应研究上,虽然对于水泥土的加固机理已有一定认识,但对于适合水泥土本构模型的研究相对较少。

由于水泥土内部或多或少存在孔隙,其应力应变曲线具有明显的压密硬化阶段,与岩石或混凝土不同的是,水泥土在荷载作用下又会产生较大的塑性变形,因此很难用土体本构模型来描述水泥土的力学特性^[7]。陈四利等^[8,9]学者发现,水泥土的应力应变曲线具有显著的水泥土微裂隙压密硬化阶段,该阶段的存在增加了土体本构模型运用于水泥土的难度。虽然许多学者运用经典连续介质力学对其力学特性进行分析,并取得了一定的研究成果^[10~15]。事实上,水泥固化土结构效应十分明显,具有较高的先期固结压力,对应力路线反应也较为敏感^[16]。沈珠江院士曾用逐渐破损理论代替应变软化模型来描述原状土中普遍存在的结构破损现象^[17]。最近有学者在大量试验的基础上,对水泥加固土的损伤模型进行了研究,并建立了不同损伤本构模型^[18~19]。但这些损伤模型较为复杂,参数也不易确定,从而增加了推广运用的难度。因此,对已有模型进行改进,或建立新的适合水泥固化土的简单本构模型,显得十分重要。

纵观最近十几年的理论研究和工程实践,水泥搅拌桩复合地基的作用机理逐渐明确,然而影响水泥土性质的因素较多,所以查明影响水泥搅拌桩复合地基工程特性各因素,研究影响机理,制定相应对策,进而完善软土地基处理技术,具有重要意义。因此,本文拟采用室内试验研究方法,就土层性质变化对水泥土力学行为的影响进行深入研究。在此基础上,提出采用水泥砂浆固化材料,通过一系列的原创性试验,研究水泥砂浆固化土的材料特性,寻求具有实际工程意义的掺料配合比。另一方面,基于水泥固化土的初始压密硬化的考虑,建立了一种形式简单、参数较少、计算简便,且具有一定物理意义的本构模型。

1.2 水泥桩复合地基研究现状分析

1.2.1 室内模型试验研究现状

复合地基常用的研究手段主要包括原型观测、静载试验、数值分析以及模型试验等四种方法^[20],从已有的文献资料来看,目前关于原型观测、静载试验和数值分析的研究较多,而模型试验的研究则相对较少,然而模型试验是科研工作者开展复合地基加固机理、加固效果以及优化、开发新加固技术研究的重要内容与可靠手段。不少学者采用室内相似模型试验,研究了荷载作用方式、地基土层性质、桩身表面粗糙度、注浆工艺等因素对复合地基荷载传递特性和承载变形特性的影响。

许朝阳、周健等^[21]分析了软黏土中采用静压桩贯入引起的土体位移场变化规律,测试了不同施工顺序引起的地基土体侧移与隆起规律,得出邻桩对挤土效应的“屏障”作用。桩在侧向荷载作用下的变形特性长期以来一直受工程界重视,Saglamer 和 Parry^[22]采用铝合金管制作的模型桩在砂土中进行了不同密度和荷载形式的荷载试验,从而研究初期以及循环加载期间砂土地基侧向基床系数的变化。Allen 和 Reese^[23]为研究成层土层中 $p-y$ 曲线形状,采用内外铝合金管制成的模型桩在成层黏土中进行了相似模型试验。赵明华、侯运秋、曹善仁等^[24]采用铝管在砂箱内进行不同倾角的倾斜荷载作用下的室内模型桩试验,据此建立了倾斜荷载下确定极限承载力的经验公式。徐和、陈竹昌等^[25]在室内钢圆筒中,通过设置不同密实度的模型砂土地基,研究了单桩的轴向抗拔力以及内摩擦角与桩的侧向抗拔系数之间的关系。章连祥等^[26]在室内模型试验中进行静力荷载试验、循环荷载试验和循环荷载后再加载试验,探讨了侧向荷载大小、频率、循环次数和侧向荷载历史等因素的影响,得出了黏性土中沿桩身不同深度的载荷位移曲线。

周国庆、杨维好等^[27]在模型箱内研究了饱和中砂融沉降位移随时间变化的关系以及单桩负摩阻力与融沉位移的关系。谭国焕、张佑启、杨敏^[28]等通过把桩周表面不同粗糙度的3根模型桩置于砂箱中,研究了松砂土层中桩

侧表面粗糙程度对桩承载力的影响。庄心善、杨雪强、何世秀等^[29]进行了压浆桩与非压浆桩的模型试验,研究分析了黏土地基中钻孔灌注桩桩侧压浆、桩端压浆及桩侧桩端联合压浆对提高桩基承载力及改善承载性能的影响。试验结果表明,灌注桩后压浆能改善桩的承载性能,减小沉降,提高桩的承载力。刘云云、陈竹昌、刘利民等^[30]进行了竖向力作用下7组嵌岩桩高桩承台模型试验。模型试验表明,桩顶轴力分布和桩顶弯矩分布不仅取决于作用在承台上荷载的大小,而且在很大程度上还取决于承台顶面外荷载的局部分布。

钱建固、高玉杰等^[31~32]以相似理论为基础,设计并完成了一组较大型的室内碎石桩复合地基模型试验,获得了许多有益的试验数据。周成^[33]等以直径25mm的塑料管充填粉煤灰制成桩体,采用扦插成孔的方法制成桩径25mm、桩长40cm的模型碎石桩,据此研究了碎石桩加固软黏土效果,并提出考虑桩、土、承台共同作用的极限承载设计方法。孟广训、沈定贤等^[34]在室内进行碎石桩模型试验,将碎石桩置入粉质黏土中形成模型地基,通过在桩身不同深度的截面和侧面埋设压力传感器,测试不同深度的轴向应力和径向应力。研究发现,表面荷载沿桩的深度迅速衰减,当深度等于3倍桩径时,桩体垂直应力平均值只有表面荷载的27.4%;在桩顶下2~3倍桩径范围内,轴向应力、径向应力均较大,属高应力区,该结论由Hughes和Withers通过试验得到了验证。2倍桩径深度范围内,侧向位移较大,超过2~3倍桩径时,径向位移可忽略不计,这主要是由于桩间土抵抗侧向位移的阻力随深度正比增加引起。叶观宝等^[35,36]通过室内模型试验和现场足尺试验对水泥土搅拌桩复合地基的荷载传递规律进行了分析,结果表明,传到桩端的荷载占桩顶荷载的比重比较小,桩体的变形、轴力和侧摩阻力主要集中在有效桩长范围内,复合地基承载力的发挥程度与地基土土质、桩土相对刚度、桩间土的上覆荷载及桩身质量有关,桩土应力比随荷载变化而变化。

对于加筋地基模型试验,Binquet、Fragaszy及Das等^[37~39]针对土工合成材料加筋基础进行分析,重点研究了加筋地基极限承载力与基础沉降的关系。张道宽、王钊^[40,41]等针对加筋挡土墙和边坡进行了室内模型试验研究,集中分析加筋结构的破坏机制、破坏面的位置及筋材的最大受力点等。胡幼常^[42]通过室内模型试验,对土工格栅加固道路软土地基的效果及机理

进行了研究,除测出四种不同试验条件下基底压力与地基沉降的关系曲线外,还用读数显微镜精确观测了软土地基的位移场,并对试验结果作了初步分析,揭示了土工格栅能有效加固道路软基的某些机理。杨庆等^[43]依据建立土工格栅加筋砂土地基性能模型,通过模型试验测量得到,如果在砂土地基中铺设塑料土工格栅,可以使承载力提高10%~40%、侧向位移量减少20%~50%,地基轴线处竖向沉降减少30%~50%。通过比较分析认为,对于条形浅基础加筋地基,最佳加筋层数为2~3层,加筋长度应为基础宽度的3倍。蒋鹏飞等^[44]根据相似理论,以某高速公路土工格室+碎石桩复合地基为原型,设计完成了一组大型对比室内模型,并在大量试验数据的基础上,对其承载机理进行深入探讨,得到了有益的结论,对土工格室+碎石桩复合地基的作用机理的认识具有一定的参考意义。

此外,吴慧明、龚晓南^[45]通过刚性基础与柔性基础下复合地基模型试验的对比研究,指出刚性基础和柔性基础下复合地基桩土应力比及其发展规律和复合地基破坏机理各不相同。刚性基础下桩土变形一致,在相同变形时,桩首先承受较大荷载,并首先进入极限状态,故随总荷载增加桩土应力比呈现山峰状发展趋势;柔性基础下桩土变形可相对自由发展,土首先承担较大荷载,并随荷载增加率先进入极限状态,故桩土应力比呈现先递减后上升的趋势,但无论刚性基础下的土还是柔性基础下的土,承载力均高于原状土。西南交通大学的苏谦、蔡英、曹新文、罗强和薛双纲等^[46,47]进行了土工格栅、格室加筋砂垫层加固基床的大模型试验,并进行了承载力、抗变形能力和动应力分析。在土工格室和土工网加固基床效果静态模型试验中通过对比发现,土工格室在提高基床刚度和强度方面具有明显效果。在静载试验的基础上,进行定荷载、定频率多次重复加载试验,然后进行变荷载、变频率的动荷载试验,通过这两部分试验,了解动荷载对塑性变形的影响,以及基床动应力分布和铺设土工格后的动应力衰减情况。杨俊杰、章雪峰、彭孔曙等^[48]以相似理论为基础,采用原型粉黏土和微混凝土挤扩支盘桩制作相似模型,通过对桩土共同作用模型中支盘桩的承载能力、变形特征、土层的压力变化和桩土阻力及沉降关系的观测,分析支盘桩支盘的作用特性以及与全桩承载力的关系,为支盘桩的工程应用提供了有价值的参数和试验依据。

总结上述各类与软土地基处理相关的室内模型试验研究可以看出,借

助模型试验可以研究各种软土地基加固技术的加固机理、加固体强度变形特性,探讨影响加固效果的各种不利因素和相应的影响程度,检验现有复合地基沉降和承载力计算公式,优化各种复合地基的施工工艺等。但是,以上各类模型地基研究中的桩体,几乎都不在模型地基内部完成,成桩过程与现场情况不同,它们都是某种桩体的替代品或者是预制品。产生这种情况的原因,一部分是由于研究的目的不需要考虑实际工程中的相关规律,因此可以对部分试验条件进行简化;另一部分原因是简化使得模型试验结构简单、流程短小、试验过程可控性增强、试验费用降低,但是模型参数的选择以及各个参数之间的关系,常常被试验室条件所左右。因此在进行模型试验研究时,必须根据研究的目的,采用相匹配的试验方法,否则试验成果将难以用于指导工程实践。对于本文关于土层性质变化对水泥搅拌桩成桩质量的研究,试验的重点是在模型中模拟现场条件下水泥搅拌桩的实际成桩过程。

1.2.2 水泥土力学性质研究现状

水泥土力学性质的研究主要包括强度特性与变形特性两个方面的研究。

Shenbaga R. Kharaj、Vasant G 等^[49]建立了固化土强度与龄期、粉煤灰掺量和水泥掺量之间的函数关系。汤怡新等^[50]认为水泥固化土的抗压强度主要取决于水泥用量,其次是原料土的含水量,提出了一个简便的经验关系。陈甦等^[51]分析了水泥固化黑土的强度随水泥掺入比和龄期的变化规律。D. T. Eriktius 等^[52]采用水泥对淤泥质土进行固化,发现随着水泥掺入比的增加,固化土的液塑限降低,无侧限抗压强度和剪切强度显著提高。Horpibulsuk S^[53]对不同龄期时水泥土无侧限抗压强度和似水灰比的关系进行了研究,指出在特定龄期下,水泥土无侧限抗压强度与似水灰比呈负指数相关,即似水灰比升高,无侧限抗压强度呈指数下降。储诚富等^[54]分析了含水量、水泥掺量和龄期对水泥土强度的影响,提出了强度预测公式。S. Kolias 等^[55]采用粉煤灰和水泥对细粒黏土进行固化,随着固化材料的增加,固化土的塑性降低,抗压强度提高,模量增加。G. M. Filz 等^[56]为了考虑原土中的含水量对固化土强度的影响,引入总水灰比的概念预测固化土的强度。Fook-Hou Lee 等^[57]提出,同时引入水灰比和土灰比来反映固化土的

强度和模量的变化。朱龙芬^[58]通过大量无侧限抗压强度试验发现,对于某一特定土性的软土而言,在水泥掺入比确定时,软土含水量存在阈值,但大于阈值时,加固效果不明显。蒋敏敏等^[59,60]通过室内相似模型试验研究发现,黏土层中湿喷桩强度高于粉土层中湿喷桩的强度,主要原因是黏土层中水泥浆液与土体颗粒和水体发生了更强的离子交换和团粒化作用及硬凝反应;土的含水率对湿喷桩强度有显著影响,存在一个最优含水率,在该含水率下,湿喷桩强度显著提高。

彭皖生^[61]通过室内试验得出,水泥土的黏聚力是原状土的 24.0~31.2 倍,内摩擦角是原状土的 7.9~63.0 倍,水泥土抗剪强度的提高在前期最为显著,其 28d 抗剪强度为 90d 的 80% 以上。张家柱等^[62]经过试验研究,得出水泥土的抗剪强度随着水泥掺入量和龄期的增长而提高,而内摩擦角变化不大($20^{\circ}\sim 28^{\circ}$)。

刘一林^[63]用三轴仪对水泥土-土复合试样进行了固结不排水剪试验,证明在置换率和水泥掺入比较低时,随着围压的增大强度明显提高,且破坏时应变增大;而当置换率或水泥掺入比较大时,破坏应变受围压影响较小。龚晓南^[64]总结发现,由于固结压力的作用,试样在高压三轴剪切试验中得到的破坏特征由原来无侧限条件下的脆性破坏变为塑性破坏,固结压力越大,这种趋势越明显,此外,围压对强度的影响则随着水泥掺入比的增加不断变小。

周承刚、兰凯等发现^[65,66],土层性质对水泥土强度影响较大,过高的有机质含量,使得土壤具有较大的水溶性、塑性,较大的膨胀性、低渗透性以及酸性,阻碍了水泥的水化反应,使得水泥土强度较低。Pousette K. 等^[67]通过室内试验,得到泥炭土水泥加固强度随养护龄期增大而增大,并探讨了试块尺寸效应对水泥土加固强度的影响,发现了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 H.、Holm G.^[68]通过大量的室内试验,研究了不同加固料对有机质土加固强度的影响。Masaaki Gotoh^[69]研究了含水量、pH 值、烧失量、黏粒含量对水泥土强度的影响,得到了一些重要结论。刘增永^[70]通过室内试验表明,固化土的强度随着有机质含量的增加呈指数衰减,随着水泥掺量的增加呈 S 形增加,GR03 添加剂能明显提高固化土的强度。范昭平等^[71]分析得出,有机质含量对水泥固化土强度的影响存在一极限含量,超过该极限,有机质的增加不会对固化效果产生更大

的影响。Helene Tremblay^[72]进一步研究了有机质种类对固化淤泥的固化效果的影响,他把13种有机质物质加入2种不同来源的土样中研究固化淤泥样的力学性质,发现有些有机物质阻碍了固化淤泥强度的形成,有些物质只是延缓了固化淤泥强度的形成,而有部分有机物质对固化淤泥固化效果没有影响。陈慧娥^[73]通过室内力学试验、化学试验、微结构参数的定量化、微结构分形参数提取的基础上对有机质在水泥加固土强度形成过程中的作用机理进行研究,对各试样微观结构的分形特征进行论证,建立了包含有机质因素的损伤变量演化方程及水泥加固土的弹塑性损伤本构模型,并对模型进行了室内试验验证。潘永灿等^[74]采用工业废石膏再配以少量粉煤灰按一定比例掺入水泥中,配制成含工业废料的水泥系固化剂,发现该固化剂对高有机质含量软土有较好的加固效果。曾卫东等^[75]提出用矿渣硅酸盐水泥可以降低有机质的影响。Acosta Hector A. 等^[76]用4种自身具有黏结性的粉煤灰来固化7种软土,认为粉煤灰对加固有机质土是有效的。

宁宝宽等^[77~79]通过模拟试验的方法,探讨了不同浓度、不同pH值条件下各种侵蚀性离子对水泥土力学效应的影响,并对环境侵蚀机理进行了探讨。试验结果表明,水化学作用对水泥土的力学性质具有明显的影响,其中pH值的变化对水泥土的力学效应最为显著,酸性环境水泥土强度降低,碱性环境水泥土强度提高。水泥土强度的增长与pH值的增加呈非线性关系。此外,从环境侵蚀的角度来看,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,且随着水泥土中水泥的水化和水泥固化体的形成侵蚀效应逐渐减弱。黄汉盛等^[80]结合深港西部通道软土深层搅拌桩水泥土抗腐蚀性的室内试验得出,在腐蚀地下水环境中,在水泥土中增加矿渣、粉煤灰可提高水泥土的抗腐性,并提出了抗腐性良好的水泥土配方。裴向军^[81]研究了海水对水泥土的侵蚀作用。谷秋芳等^[82]也通过试验的方法研究了地下水对水泥土强度的影响。

在水泥土的变形特性方面,周国钧、胡同安^[83]对不同掺和量的水泥土进行无侧限抗压强度试验,得出水泥土的变形特性随强度的不同而介于弹脆性体与弹塑性体之间。水泥土受力开始阶段,应力应变曲线基本符合虎克定律,当外力达到极限强度的70%~80%时,应力应变曲线开始呈现非线性特征;当外力达到极限强度时,对于强度大于2MPa的试样很快出现脆性破