

土壤固化及其应用

——筑路材料与技术的变革

丁 毅 编著



中国大地出版社

土壤固化及其应用

——筑路材料与技术的变革

丁 毅 编著

中国大地出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤固化及其应用: 筑路材料与技术的变革 / 丁毅编著.

北京: 中国大地出版社, 2009. 6

ISBN 978 - 7 - 80246 - 232 - 8

I. 土… II. 丁… III. 道路工程—建筑材料 IV. U414

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 110385 号

责任编辑: 王慧军

出版发行: 中国大地出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号 100083

电 话: 010 - 82329127 (发行部) 010 - 82329113 (编辑部)

传 真: 010 - 82329024

网 址: www. chinalandpress. com 或 www. 中国大地出版社. 中国

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 20

字 数: 500 千字

版 次: 2009 年 6 月第 1 版

印 次: 2009 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 1—500 册

书 号: ISBN 978 - 7 - 80246 - 232 - 8 / G · 249

定 价: 28.00 元

版权所有 · 侵权必究

前 言

近年来,国内外关于土壤固化问题的研究取得了长足的进步,实际的工程应用涉及建筑基础、公路建设、堤坝工程、井下作业、石油开采、垃圾填埋、防尘固沙等多种领域,其良好的固化效果得到了充分的展示。固化土施工过程中直接利用原土,节省大量砂石等日渐匮乏的自然资源及能源,极大地减少废弃物排放,有利于保护自然环境和可持续地科学发展。国内很多地区采用这一技术,不仅经济效益显著,而且环境效益更是意义重大。对于大多数非专业领域的人来说,有关土壤固化的基本原理,有关固化土在道路建设、水利、环境等工程中的应用,有关这一新材料和新技术在节能减排、保护环境等方面的突出优势,是值得关注并令人振奋的事情。

这是一本近似于科普的书。笔者试图以通俗的方式介绍土壤的组成和结构,分析固化土形成的微观机理,阐明无机类、离子类、生物酶等各类土壤固化剂的特点、适用条件及典型的工程案例。在整理综合国内科研院所和部分高校、建设单位研究文献的基础上,集中地介绍了国内目前应用最为广泛的数种土壤固化剂的特征与技术指标,以及应用于道路工程中的施工要求和所取得的成效。期望能够为关注这一新技术和新材料研究与应用的人们提供有价值的参考。

沈阳市在农村村镇道路建设中大规模应用固化土技术,为这一课题的研究提供了案例;沈阳路德建筑材料有限责任公司数年来对土壤固化剂的引进、开发和推广,奠定了本书的基础。

因本人学识有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

丁毅

2009年3月

目 录

概 述	1
第一节 土壤固化的方法	1
第二节 土壤固化剂简介	7
第三节 土壤固化问题的研究进展	15
第四节 本书内容安排	24
 第一章 土壤形成的地质基础	26
第一节 矿物质	26
第二节 岩 石	31
第三节 地质作用和地貌	41
第四节 岩石的风化	42
第五节 搬运与沉积	45
第六节 影响土形成的因素	46
 第二章 土的组成与性质	49
第一节 土的矿物成分	49
第二节 土中的有机质	63
第三节 土壤质地	70
第四节 土壤的物理性质	80
第五节 土壤胶体的性质	82
第六节 土壤中的水	91
第七节 土中的气(气相)	94
第八节 土的三相比例指标	94
第九节 土的物理状态指标	97
第十节 土的工程分类	100
 第三章 无机类土壤固化剂	106
第一节 石灰固化土	106
第二节 水泥固化土	115

第三节	石灰 - 粉煤灰(二灰)固化土	129
第四节	其他无机材料固化土	142
第五节	复合型无机类土壤固化剂	145
第四章	离子类土壤固化剂	208
第一节	离子类土壤固化剂简介	208
第二节	ISS 土壤固化剂加固土的试验研究	211
第三节	离子类土壤固化剂的工程应用	217
第四节	路特固 ROADGOOD 土壤固化剂	219
第五节	路派克 ARP688 土壤固化剂	226
第六节	路邦 EN - 1 土壤固化剂	234
第七节	SK - 1 型土壤固化剂	246
第八节	其他离子类固化剂	249
第五章	高分子类土壤固化剂	258
第一节	中路 TG 系列土壤固化剂	258
第二节	特路达土壤稳定固化剂	271
第三节	澳孚博土壤固化剂	273
第四节	康耐土壤稳定剂	276
第五节	高分子土固化剂	279
第六章	生物酶类土壤固化剂	283
第一节	生物酶固化剂	283
第二节	派酶(Permazyme 派酶生物固化酶)	285
第三节	泰然生物催化酶土壤固化剂(TerraZyme)	291
后 记		312

概 述

第一节 土壤固化的方法

土壤加固是一个古老的课题。早在远古时代，人类最早的建筑活动就涉及土壤的加固。土壤固化是指通过某种措施将散碎状的土壤固结为具有一定强度的整体性固体物质，使土壤变得更加坚固、稳固和密实，获得比天然土更高的强度、更好的整体性和抗渗性，使之满足工程建设的要求。经固化处理的土称为固化土。固化土与自然土的最大不同在于整体性与散碎性的区别。

土壤固化的目的是改善土的形变和强度。目前理论研究与工程上实际使用的土壤固化方法很多，这些方法可按若干原则来分类。从经济性和工程应用出发，根据技术特征和使用目的进行分类是比较常见的两种分类方式。

根据技术特征，土壤固化可分为物理固化和化学固化两种方法。

1.1 物理固化方法

土壤固化的物理方法是不使用任何外掺材料而使土壤性质得到改善，达到稳定固化的方法。例如，利用相应的设备将土壤压实来减少土壤的孔隙体积；由不同的土壤类型混合等等。

导致土壤稳定固化的实际物理变化包括：

- 蒸发：如沥青乳液固化土时的变干。
- 温度变化：如温度降低，使拌入土中的热沥青凝固。
- 吸附：将各种低稠度的沥青、煤沥青或沥青乳液、焦油等物质，与天然状态的土（不加热）拌和，通过沥青与颗粒之间的裹覆和粘附，以及而后在自然因素作用下沥青的稠化过程，减小土粒的吸水性，提高土壤的稳定性。

最简单的物理固化方法是夯实，通过外力击实以使含水率适当的粘土、粉土紧密结合而产生强度。例如，在夹版中填入泥土，用杵夯实的版筑技术，起源于距今 5000 多年前仰韶时代晚期的中原地区，成为古代城垣、宫殿、房屋等土木建筑的基础工程和围护结构的主要手段（图 0-1-1）。这种技术简单、成本低廉的方法至今仍在沿用。在 20 世纪中国的农村，夯土筑墙和压实地基在水泥广泛使用之前还是建筑的主要方式。从人工夯实到机械强力夯实，其基本原理是利用强夯产生的高能量冲击和动应力在土层的某一区域形成加固区。在此区域内，通过土颗粒的相对运动，促使土壤中的气泡和（或）水分排出或压缩，从而减小孔隙体积，土壤得以压实。现代的打桩法也是通过振动、冲击作用将桩四周的土壤压密和挤密，达到加固的目的。

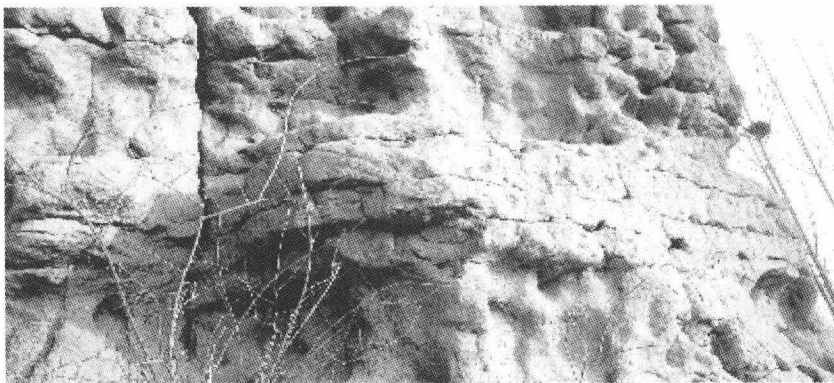


图 0-1-1 河北省易县城墙遗址上战国时期夯土版筑

土的压实是用机械的方法，在压实机具的短时荷载或振动荷载的作用下，人为地使土密度增大，从而导致土的内摩阻力和粘聚力增加，使其受水的影响减小，强度和水稳性相对地得以提高。土的压实加固是各种加固方法中最经济的方法，也是其他加固方法所必须的技术措施。由于加固土是由土粒、水溶液和气体组成的三相体系，其压实过程主要是气体的逸出和土粒的相互错动、紧靠的过程。土颗粒间的引力与斥力的相对大小决定了压实土的结构，土中的含水量直接影响着土颗粒之间的引力、土颗粒的移动以及压实的效果。

热处理也是物理固化的方法之一。热处理是在长时间的高温作用下，土的性质发生根本的、不可逆转的变化，使土获得较高的水稳性和力学强度。土的加热过程包括烘干、预热、焙烧、烧结等阶段。在加热过程中，土中各种水分被驱除，某些矿物分解、氧化，有些化合物生成新的生成物，一些矿物熔化后把未熔化的矿物颗粒牢固地粘结起来，并在冷却过程中重新结合而形成坚硬的石状材料。在距今 7000 ~ 8000 年的新石器时代早期，高温烧结是粘土固化的主要途径，砖瓦成为重要建筑材料，“秦砖汉瓦”是中国古代建筑的一个显著特征。现代的焙烧法是在不破坏土工建筑物或建筑物地基整体性的条件下，通过设在土体内的沟槽、平洞、钻孔，利用燃烧物产生的 600℃ 以上的高温使粘土的塑性消失，变成半岩石类土，从而提高土体的强度、耐水性和抗冻性。这种热处理加固的方法用来加固铁路路基和治理滑坡已有 100 余年的历史。

1.2 化学固化方法

化学固化方法是将某种化学添加物质（即固化类材料）均匀拌入待固化的土壤中，借助固化类材料与土壤之间或固化类材料自身的物理化学作用来改善土壤的组成和结构，从而达到加固土目的的方法。

到目前为止，用于土壤固化的化学反应主要有：

- 水化：利用无机结合料（例如水泥等）自身与水结合成水合物的过程及结合料与土之间的化学反应生成凝胶状水化物，最终在土体中形成网状结晶，把土粒和土的微团粒粘结和硬化。

- 离子交换：利用离子在固相介质与溶液之间的交换以改变土粒的吸附络合物。例如，盐溶液加固土，通过离子交换、降低溶液压力、降低冰点和提高表面张力等作用，使土的结构得到改善，粘聚力得到提高和稳定，抗冻性有所改善。

• 沉淀作用：由于环境的变化引起溶质的溶解度降低，造成固体凝聚物，或溶液中某种组分浓度增加，达到饱和而析出的作用。

• 聚合：在某些条件下，集中简单的化合物相互作用产生新的、大分子化合物，这种化合物起到一种稳定剂的作用。例如，高分子树脂加固土是通过单体在土中发生聚合反应形成高强稳定的高聚物，与土粒之间以物理化学相互作用而构成坚强稳定的集合。

• 氧化：加入水泥或其他具有火山灰活性的物质，通过水泥水化、火山灰作用，生成具有凝聚作用的物质，使土粒之间的连接增强，并提高土体的密实度；通过离子交换，形成吸附交换离子的微集料结构，使土塑性下降，内摩擦力增加，提高土壤稳定性。

土壤化学加固的技术也有悠久的历史。公元5世纪中国南北朝时期，人们将石灰、碎石（或细砂）加入粘土中混和压实（三合土），获得较好的固化效果；明代时，有石灰、陶粉和碎石的三合土；清代时，有石灰、炉渣和砂子组成的三合土，用来作地面、屋面、房屋地基和地面垫层等。由于就地取材，施工方便，造价低廉，所以得到了广泛的应用（图0-1-2、图0-1-3）。古代人在使用石灰的同时，还掺入了有机物如糯米汁、羊桃藤汁、桐油、牛马血等形成复合胶凝材料。有机物的掺入大大提高了土壤加固的强度。史书中记载，用糯米和牛血拌三合土砌筑石桥，凝固后与花岗石一样坚硬。

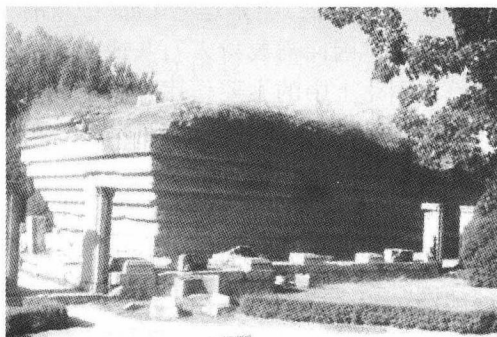


图0-1-2 圆明园中用沙子、白灰和黄土建造的蓄水楼基座



图0-1-3 福建怀南靖县1909年用河卵石和三合土建造的怀远楼

现代的土壤加固方法中，最为常见的化学加固方法是在常温下掺加化学土壤固化剂固化土，以满足工程建设需要的方法。传统的土壤固化剂主要有石灰、水泥、粉煤灰、矿渣等。

石灰对土所起的有效作用是最早被人类熟知的。在我国古代的长城、古罗马一些道路都曾用石灰来稳定固化土。作为土壤改良材料，当石灰加入到含有粘粒的土中时，土孔隙溶液中 Ca^{2+} 离子浓度大幅度增加；由于 Ca^{2+} 离子具有较强的离子交换能力，因此 Ca^{2+} 可以置换出粘土吸附的水合 Na^+ 离子。这个过程可降低粘土颗粒的水膜层厚度，有利于粘土颗粒形成较强的结构连结，促使粘土凝聚作用增加，使粘土微结构团粒化；石灰溶解重结晶形成的水化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对石灰土强度的提高也有正面的影响，是石灰对粘土早期胶结的主要形式；石灰与微细粘粒中活性 SiO_2 和 Al_2O_3 间的火山灰反应和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碳化作用是缓慢的过程，有助于石灰土强度的形成。火山灰反应产物是石灰土后期强度的主要构成因素。石灰固化土具有成本低、适用范围广和施工简便等特点，因而在公路结构中被广泛作为高级和次高级路面的基层、底基层和垫层。有试验表明，用石灰加固粘土、腐殖土及

酸性土以及过湿土效果显著。但石灰土往往早期强度低，强度发展慢，因此单独使用效果不如与其他材料复合使用好。

水泥是继石灰之后胶凝材料史上最重要的发明。自从 1824 年 Aspdin 发明了水泥以后，水泥的使用量和应用范围以及由此带来的人类社会建筑活动的变革都具有划时代的意义。水泥是目前使用较为成功的土壤固化剂，用水泥胶结的土体具有较好的承载力、良好的变形特性、抗水、耐热和抗冻效应。水泥对土固化的作用有：水泥水化产生的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶附着在颗粒表面，并形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。 Ca^{2+} 可与土粒表面吸附的离子发生阳离子交换反应，使土粒改性和团粒化。 Ca^{2+} 、 OH^- 渗透进入土颗粒内部，与粘土矿物发生物理化学反应，继续生成胶凝物质。上述作用使土颗粒表面的颗粒间接触点形成不可逆的凝结硬化，并以水泥新生水化物为界面形成类同相接触，可改善土体的稳定性，增强内部结构连结和抗变形摩擦力，从而提高土体的强度和耐久性。水泥土以其优良的加固效果，逐渐得到了人们的重视。由于水泥本身的适应性强，因此水泥土应用范围广，使用方法灵活多样。但水泥土往往收缩较大，开裂风险较高，且在加固含粘粒较多的土壤时，效果不尽如人意。

粉煤灰用于土壤固化，是工业废渣中利用最多的一种。通常粉煤灰必须与石灰或者水泥配合使用。虽然含有 20% ~ 30% CaO 的粉煤灰具有自胶凝性，但是这些 CaO 中仅有一小部分是游离石灰，不足以充分激发粉煤灰的火山灰反应，因而需要掺入石灰或水泥，以发挥改性粘土和激发粉煤灰的双重作用。粉煤灰在石灰固化土中的主要作用是为不具有碱激发活性的粘土提供所需要的火山灰材料，本身具有潜在的水化活性。因此，石灰/粉煤灰综合固化效果比单纯利用石灰好。石灰粉煤灰加固土俗称二灰土，人们从经济和环保角度出发，用其来固化、稳定土体，其固化机理与石灰类、水泥类固化剂的固化机理类似。作为路面基层，除有材料来源广、经济等优点外，同石灰加固土相比更具有强度高、水稳定性和抗冻性好的显著优点，而且在收缩上也较水泥加固土小。但二灰土明显的缺点是早期强度偏低，因此国内外均有研究其早强技术的工作。

在工程实践中，人们逐渐认识到石灰土、水泥土的早期强度低、干缩大、易开裂，并且其性质受土质影响较大；对塑性指数高的粘土、有机土和盐渍土固化效果较差，甚至有时无固化作用。因此，开发经济实用的土壤固化新材料，由传统的水泥、石灰、粉煤灰等升级到专门用来固化土体的固化剂，成为研究的热点。土壤固化剂作为一种新型的固化材料，自 20 世纪 70 年代起，在欧美等发达国家得到广泛使用，取得了显著的成效。90 年代起，我国也开始引进和研制土壤固化剂，并在道路建设、水利工程中推广应用。

几乎所有种类的土壤固化剂与土壤的作用过程都离不开化学反应。

1.3 根据使用目的命名的土壤固化方法

土壤加固的分类方法也可以根据使用目的来进行：

- 不添加任何外来物质对土壤一般性质进行改善的方法。例如增加强度、减小压缩性和渗透性、影响体积变化、抵抗冰冻作用和塑性变形等。这些技术中最重要的是压实。
- 某一种重要的土壤性质的改善方法。最常见的是以增加强度和耐久性为目的，并采用一些添加剂（水泥、石灰、沥青等）来实现这一目的的方法。
- 添加化学物质或材料以改变土壤性质的方法。例如，利用碳氢化合物或不透水薄膜使土壤不渗水，又如添加各种盐类或其他化学剂来减小固化土道路的飞尘或防止冲刷造成

的破坏。

水泥搅拌桩、加筋加固和注浆加固是在工程中常用的土的加固方法。

1.3.1 水泥搅拌桩

水泥土深层搅拌法是软土地基加固和深基坑开挖侧向支护常用的方法之一。利用水泥作为固化剂,通过特制的搅拌机械,在地基深处将软土和固化剂强制搅拌,利用固化剂和软土之间所产生的一系列物理化学反应,使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的优质地基。这种方法 20 世纪 70 年代由日本首创,用于钢铁厂、港口码头岸壁、高速公路等厚壁的软土地基加固工程中。其工法特点是:固化的桩与原地基土构成复合地基,改善了地基的承载力和变形模量;能自立支护挡土,不需要支撑和拉锚;可采用块式、连续墙式、空腹格栅墙式、桩式等任意形状、任意截面、任意深度的结构形式;桩体连接成壁后有隔水帷幕作用;施工中无振动、无噪音、无污染,对周围地基土无扰动、无挤压;施工机具简单,操作方便,造价低。

1.3.2 加筋加固

加筋加固是在土中加入筋带、钢筋、纤维、网状材料等增强筋材,形成土与筋的复合体,借助增强筋的抗拉强度以加强土壤的稳定性。人类很早以前就自发地利用加筋技术加固土体:仰韶文化遗址中曾发现用草泥修筑的墙壁和屋顶;甘肃玉门一带,还保留有用砂、砾石和红柳或芦苇叠压而成的汉代长城。在粘土泥浆中加入铡断的稻草或其他植物秸秆制作土坯,这种技术在我国农村中至今还在沿用;1963 年,法国工程师 Henry Vidal 提出了加筋土的概念及其设计理论,开创了现代加筋土技术的先河。我国于 20 世纪 70 年代后期开始引入现代加筋土技术,1979 年在云南田坝矿区建成了我国第一座加筋土挡墙。20 世纪 50 年代,土工合成材料开始应用于岩土工程中,加筋土技术获得进一步发展。

加筋法是将抗拉能力很强的拉筋埋置于土层中,利用土颗粒位移与拉筋产生的摩擦力使土与加筋材料形成整体,减少整体变形和增强整体稳定。拉筋是一种水平向增强体,一般使用抗拉能力强、摩擦系数大且耐腐蚀的条带状、网状、丝状材料。例如,镀锌钢片、铝合金、合成材料等。

加筋加固的概念比较宽泛,以所加之“筋”而论,粗至钢筋、土钉、锚杆和桩,细至现代的各种纤维。纤维加固土对于解决现在土壤固化中普遍存在的因收缩变形而引起的开裂问题具有重要意义。

1.3.3 注浆加固

注浆加固是采用某种措施将浆液注入土层中达到加固的目的。1802 年,法国工程师 Charles Beriguy 首次运用注浆法修复水闸,如今注浆法成为地基加固的一种常用方法。注浆法可分为静压注浆(亦称灌浆)和高压喷射注浆。静压注浆原则上不破坏土体结构,浆液在静压下循裂缝或者孔隙而进入土层,硬化后形成固结体。高压喷射注浆法首创于 20 世纪 60 年代末期的日本,其基本方法是利用钻机带有的喷嘴喷射出的高压浆液冲击破坏土层,浆液与土壤搅拌混合后形成固结体。近年来,新的注浆材料的应用,如超细水泥、粉煤灰水泥浆、硅灰水泥浆等,扩大了注浆法的应用范围。荷兰正在研究利用生物注浆加固土壤的技术,他们将含有某种细菌的营养液灌注进土壤中,该种细菌能够将尿素降解产生 CO_3^{2-} 。在存在 Ca^{2+} 的情况下,生成碳酸钙晶体沉淀在土颗粒表面,将土壤胶结。据说,该技术已经成功应用于雕像的修复。生物注浆是注浆加固技术的一个开拓性发展,其优势在于增强了人们对固化过程的可控性。通过合理的设计,可以利用这个生物过程去“智能

地”修复和加固结构物的某些特殊部位，如一些人们难以直接修复的管道和渠道；可以在保持原结构物不被破坏的情况下实现加固和修复，其难度则在于如何有效控制菌群的生长和分布。目前，如何保证土体固结的均匀性仍然是该技术需要解决的问题。

1.4 土壤固化的技术途径

土体矿物在一系列物理、物理化学和化学作用下，形成结构连结。对土壤的固化过程就是改善颗粒接触，强化结构连结的过程。当土体颗粒进一步靠近或颗粒间存在有与颗粒表面分子相近的胶结物时，颗粒接触面积增加，过渡接触转化为同相或类同相接触。同相接触的结构和多晶物中边缘部分相似，形成了牢固的多晶粘土集聚体，这样的接触对水来说是不可逆的。

使粘土分散体系产生同相接触（在宏观上表现为具有较高强度）的途径有三种：

1. 挤压

挤压可缩短颗粒间距，增加颗粒接触面积和数量，从而增强颗粒间的结构连结。挤压的措施有两种：一为外力压密，即对粘土分散体系施加很强的压力，这对含水量较低的土的稳定非常有用。若对土体施加 60MPa 以上压力使之永久密实，可使其岩石化。二为固化材料在土结构内部产生膨胀挤密，这对不同含水量的土固化都是有益的，尤其是对湿塑性土、泥浆的固化是至关重要的。

2. 化学胶结

对粘土分散体系加较低的压力，使颗粒间接触表面增加。通过加入一定土壤稳定固化材料，其水化后能很好胶结土粒表面，与粘土矿物的活性成分反应生成胶结物质；而且在水硬化过程中吸收大量水分，产生固相体积膨胀，增加土粒之间的结构连结；同时使颗粒新相位接触处产生结晶或胶结，形成同类相接触。随着压力的提高，颗粒团聚得更加紧密，对土起到较强的稳定固化作用。

3. 调整土中孔隙溶液组成

在土孔隙溶液中，提高 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 等阳离子浓度，可使颗粒表面 ξ 电位降低，颗粒之间的距离缩短。颗粒间的距离缩短，可使水化膜楔入作用力随之减小，结构连结进入分子间相互作用力范畴，促进粘土颗粒凝聚。另外，在土孔隙溶液中引入 K^+ 、 NH_4^+ 等离子，填入粘土矿物层间的六角形网眼中，可加强其层间连结，对土体固化起到一定作用。

土壤固化技术从 20 世纪 40 年代开始蓬勃发展，至今已经形成一门综合性的交叉学科。它涉及建筑基础、公路建设、堤坝工事、井下作业、石油开采、垃圾填埋、防尘固沙等多种领域，包括机械方法、物理作用、土工织物、化学胶结等多种手段，综合了力学、结构理论、胶体化学、表面化学等众多理论，它的处理对象也扩充到砂土、淤泥、工业污泥、生活垃圾等多种固体、半固体；处理的目的也不仅仅是单一的加固，还包括改善渗透性、提高抗冻能力、防止污染物质泄漏等诸多方面。20 世纪 70 年代，美国、日本等国家针对工程建设的需要，对土壤固化技术进行了深层次研发，加固土壤的材料由原来单一的水泥、石灰、粉煤灰发展到专门用来固结土壤的新材料——土壤固化剂。

第二节 土壤固化剂简介

2.1 土壤固化剂

土壤固化剂是在土壤中加入的外加剂。广义上,凡能改善和提高土壤技术性能的材料,都可以称为土壤固化剂。

使用添加剂改善土壤的工程性质已有几千年的历史。至少在 5000 年以前,人类就已经用石灰和火山灰来固化土壤。但是直到第二次世界大战以后,土壤固化这个概念才被广泛接受。如今在美国、德国、日本等国,已普遍使用各种材料进行土壤固化。这主要有两方面的原因:一是传统建筑材料中骨料的短缺。而近几年,由于砂石料的开采受环境及地域等因素的限制,原来有足够骨料的地区也出现了严重缺乏,更不用说其他原来就缺少砂石料的地区。砂石料的价格提高大大增加了公路造价及维护费用,于是人们开始寻找更经济的材料来代替传统砂石料,比如固化土。二是石油的阶段性的短缺引起了能源危机。对工程项目不但要考虑其造价,还要考虑其能源消耗。有研究显示,在公路建设中,处理碎石、混凝土所消耗的能量占公路建设总能耗的 30%~90%。如果采用土壤固化技术,将石灰、水泥、沥青及其他固化剂作为粘结料,直接利用当地的土,则材料生产、处理和施工的能耗将大大减少,从而降低公路的总造价。

固化剂掺加到土壤中,能够与土壤发生一系列的物理—化学反应,改善土的物理力学性质,提高土的工程性质,减小土壤的水敏感性,提高土的水稳性,使土壤成为稳固持久的固化土。由于采用土壤固化剂是利用土作为主要建筑材料,土的开采和加工都比较容易,因而用固化剂加固土在技术和经济上都具有重要的意义。

利用土壤固化剂加固土的目的主要有:

- (1) 提高土的力学强度;
- (2) 使土具有适宜的刚度,即适宜的模量;
- (3) 使土具有良好的稳定性,包括水稳定性、冻稳定性等。

近年来,土壤固化剂大量应用于水利工程、高速铁路、高速公路、机场跑道等方面。同传统工艺相比,土壤固化剂用来固化路基或基层时,具有固化速度快、相对强度高、收缩量小、抗渗性好,经固化的土体不会出现二次泥化、路用性能好、污染少、施工周期短和综合成本低的优点,可以解决水泥、石灰等胶接材料在土体中无法解决的问题,效益非常明显。通常固化剂可用于砂石、泥浆、粘土、垃圾、有机物和重金属污泥等材料,固化对象较为广泛;制作工艺无毒、无害,符合环境保护要求;具有很高的性能价格比(工程实践表明与传统技术相比,采用固化剂施工平均可节省 30%~60% 的费用)。

目前国外土壤固化剂的工程应用已经相当普遍。在日本、美国、加拿大、澳大利亚、南非和欧洲固化土研究较为成熟,且得到广泛的应用。土壤固化剂被美国《工程新闻》称为 20 世纪的伟大发明创造之一,日本称之为 21 世纪的新材料。

我国对固化剂产品与技术了解仅有十余年时间。从 20 世纪 90 年代初引进吸收国外技术或代理国外产品方式开始,到初步尝试性试验分析,针对路用材料和特定环境条件,开展有关研究(包括固化剂的材料组成、施工工艺、试验手段与质量标准等);从公路建设、

软弱地基处理、水利防渗工程到淤泥、垃圾及工业废弃物的固化处理，各省份都相继采用土壤固化剂进行施工，在提高土的工程性能方面效果显著。

2.2 土壤固化剂的固化原理

土壤固化剂加入土中，通过离子交换、絮凝、水化、碳化等一系列物理化学反应，产生胶结土粒、填充孔隙等作用，可将软弱土体变成强度较大的土工建筑材料。

土的组成和结构，是影响固化强度的重要因素。

2.2.1 土的组成

天然的土体是地壳表层的岩石经历长期的风化、搬运、磨蚀和沉积作用形成的，是由固体颗粒、颗粒周围的水分和气体所组成的三相体。土的固体颗粒大小和形状、矿物成分及其组成的三相体系在空间的排列与联结特性，是决定土的物理力学性质的重要因素。

土的三相组成物质中，固体部分（土颗粒）一般由矿物质组成，有时含有机质（腐殖质及动物残骸等），构成土的骨架主体，是最稳定、变化最小的部分。固相的化学成分主要取决于组成土的原生矿物、次生矿物和难溶性盐等化学物质。一般组成粗粒土的原生矿物化学性质较为稳定，组成细粒土的次生不溶性粘土矿物，多为粘粒、胶体颗粒，粒径小、比表面大、表面能大，一系列胶体的化学性质决定着土的工程性质。土中的液体部分实际上是化学溶液而不是纯水。水分多少与土粒相互作用可形成不同的状态；而且水中易溶盐的化学成分、浓度、pH 值等对粘粒的化学性质有影响。三相之间的相互作用过程中，固体相一般居主导地位，且不同程度地限制水和气体的作用。本质上，土的工程地质特性主要取决于组成的土粒大小和矿物类型，即土的颗粒级配与矿物成分；土中液相部分对土的性质影响也较大，尤其是细粒土。土粒与水相互作用可形成一系列特殊的物理性质。

自然界的土一般是由各种大小不同的土粒组成，其粒径大小变化范围极大，大到数米以上的漂石，小到粒径为万分之一毫米的粘粒，甚至更小，这些不同粒径的土粒对土的结构和性质影响差异很大。例如，含 10% 粗大的砾石、卵石的土，由于能构成骨架，而表现出粗碎屑土的特性，可压缩性低，力学强度高；土中的细小粘粒，可使其他粒径的土粒具有一定程度的粘结，而表现出粘土的特性，可压缩性大而剪切强度小。

粘粒是指细度小于 0.002mm 的颗粒。土中粘粒由于其颗粒极为细小，表面能很大，在粘粒与水溶液界面上易发生吸附、离解或离子交换作用而带电，具有吸引极性水分子和水化离子的能力，即具有胶体性质和强的亲水性。粘土矿物颗粒与水相互作用时，根据作用力的大小，水可分为强结合水、弱结合水、毛细管水和自由水。土中结合水量是控制形成粘性土的稠度、塑性、膨胀、收缩等水理性质及强度、变形等力学性质的重要因素之一。

土中的结合水量取决于土粒的带电性质，而土粒的带电性质同土粒的矿物成分，粒径大小及水溶液成分等很多因素有关。土粒的矿物成分不同，晶体结构或晶体格架不同，亲水性差别悬殊。矿物亲水性愈强，土中结合水尤其是弱结合水愈多；粘粒愈多，粒径愈小，亲水性将愈强，结合水膜将愈厚。水溶液中的 OH^- 离子有助于粘粒表面层分子的电离，因此溶液的 pH 值愈大，则结合水越多。

粘土及粉土等细颗粒土，因其孔隙率和含水量一般较大，相应地可压缩性大而剪切强度小，同时具有粘性及塑性性质；重塑后由于絮状构造被破坏，剪切强度降低。当外力作用时，土颗粒不易稳定，容易形成软土，成为土壤固化技术的重点和难点。

砂土由于土粒直径大,质量相对较大,比表面积较小,微弱的水连结不足以粘持土粒的重力,土粒间有相互脱离的趋势,所以砂土都呈松散状态,无粘着力。

2.2.2 土的结构

土的结构是土粒的大小、形状、表面特征、相互排列及其连结关系等方面的综合反映。但土的力学性质并不决定于基本结构单元的强度,而决定于土粒之间的结构连结力。结构连结是在一系列物理、物理化学和化学作用下形成的,这些作用促使颗粒接触带上产生不同性质和能量的相互作用。在土体中作用在颗粒之间的粘聚力本质上是一种表面力,属物理粘结,比颗粒内原子间的坚固的化学粘结小得多。土的固化和稳定的基本原理就是强化颗粒间结构连结,改善颗粒接触。

土中颗粒与颗粒之间的连结主要有如下几种类型:

(1) 接触连结

接触连结是指颗粒之间的直接接触,接触处基本上没有粘粒和无定形物质,接触点上的连结强度主要来源于外加压力所带来的有效接触压力。这种连结方式在砂土、粉土中或近代沉积土中普遍存在。

(2) 胶结连结

胶结连结是含可溶性盐较多或老土层中常见的一种连结形式。颗粒之间存在着许多胶结物质,将颗粒胶结连结在一起,一般其连结较为牢固。胶结物质一般有粘土质,可溶盐和无定形铁、铝、硅质等。可溶盐胶结的强度是暂时的,被水溶解后,连结将大大减弱,土的强度也随之降低;无定形物胶结的强度比较稳定。

(3) 结合水连结

结合水连结是指通过结合水膜而将相邻土粒连结起来的连结形式,又称为水胶连结,这是粘性土所特有的连结形式,使其具有粘着性。当相邻两土粒靠得很近时,各自的水化膜部分重叠,形成公共水化膜,这种连结的强度取决于吸附结合水膜厚度的变化,土越干燥则结合水膜越薄,强度越高;水量增加,结合水膜增厚,粒间距离增大,则强度就降低。即连结力随着土的干湿状态而发生变化,是粘性土力学强度的主导因素。

(4) 毛细水连结

毛细水连结是砂土和粉土常具有的一种连结形式,是毛细力所形成的微弱的暂时性连结力。一般认为砂土中含水率为4%~8%时,毛细水连结力最强;但随着砂土的失水或饱和,这种连结力即消失。

(5) 冰冻连结

冰冻连结是冻土所特有的一种连结形式,指含冰土的暂时性连结,融化后即失去这种连结。土的强度随着冻结和融化发生很大变化。土层极不稳定,也使土的工程性质复杂化。

在粘土体系中,对结构连结有重要影响的有毛细管力、离子-静电力以及化学键力等,它们属吸引力;与其相反的力是水化膜的楔入作用力,此种力一方面可降低粘土体系的表面能,另一方面可扩大颗粒之间距离,从而降低了粒间的吸引力。

粘土体系的结构连结不是沿土颗粒所有相界面进行的,而只是在其最靠近的地方(接触点上)进行。因此,粒间结构连结特性又受其接触的类型控制。当粘土体系经凝聚和压实作用时,便产生颗粒间的凝聚接触的结构。这类接触形成的连结主要是靠分子长距离的相互作用力,连结作用极弱,几乎不具有强度。在外荷载或干燥作用下,随着粘粒的接

近,水膜可能变薄,继而破裂,形成过渡类型接触。此种接触的基础是离子-静电相互作用力和毛细管力。过渡接触的重要特性是其对水的非稳定性,亦即在去掉外加压力或粘土湿化时,容易吸附水分子,并转化为凝聚接触。当粘土体系的压力或温度进一步增大或在新相位接触处结晶,使得粘土颗粒间接触面积增加时,过渡接触变成同相接触。同相接触是靠化学键力和离子-静电的相互作用而形成的,其大小可达 $10^{-3} \sim 10^{-7} \text{N}$ 。同相接触的粘土,对水来说是不可逆的,其强度不会因湿化而消失,浸水时也不会塑化。由此可见,由化学作用力而形成同相接触是提高粘土体系强度的关键技术。

因此,在研究土体的增强改性时,必须研究土中矿物的基本颗粒与其微集聚体之间相互作用的性质与本质。

2.2.3 土体的工程性质

对于工程来说,土体的性质主要体现在以下几个方面:

(1) 体积稳定性

粘性土中水气含量的变化会导致其膨胀和收缩。稍微改变土体的含水量,也会产生有害的膨胀,导致道路出现灾难性的破坏。土体的季节性水气变化可以深达3m,但通常主要影响表面以下1~1.5m的范围。含水量较低的粘土出现问题的可能性最大,它们的膨胀潜势最大。防止或减少水气入侵到基层土体中有很多方法,其中完全压实就可以阻止水气的运移,因为它可减小其内部的空隙体积,从而限制了土体中水的体积。

(2) 强度

土体的强度主要与其水气的含量有关。湿土的强度及承载能力都会下降,如果这种土体含有大量的有机物,其强度及承载能力会进一步下降。当含粘土较多的土体完全干燥时,它将变成很紧密的团块,被压实后,其承载能力将可与岩石相媲美。土体中水的含量过大是很多实际问题的主要根源。减少水气含量和加强压实可以大大提高土体的强度及形变。

(3) 渗透性

渗透性是衡量水从土体中运移的参数。如果土体的渗透性很高,有水渗入时就会产生软化,也会因为渗流而造成破坏。水的运移最通常的方式是由于重力作用。渗透产生的问题主要有两个:一是孔隙压力的消散,二是渗流。高渗透性可能是由于低压实度引起的,因为土中存在大量的空隙。空隙也会由于某些物质流失及土体团聚而产生。

(4) 耐久性

耐久性指的是土层表面抵抗因风、雨、交通而引致的风化及侵蚀的能力,耐久性关系到道路的表面问题及维护成本。道路或基础设施的耐久性取决于土体的机械稳定性,土体必须尽可能地在范围比较宽的气候及环境条件下保持这种稳定性。土只有在压实时其强度最高,所以稳定性又取决于其密度。大多数的土体会因为潮湿而使强度降低,即稳定性还取决于排水情况。因此,足够的压实及排水情况对道路或基础设施的耐久性至关重要。

2.3 土壤固化剂的分类及固化机理

土壤固化剂作为一种新型的建筑材料,其不同的物理和化学组成成分决定了不同的类别、特点和固化方法。如果将对土壤有固化稳定作用的材料统一称之为土壤固化剂,那么土壤固化剂可分为标准固化剂和非标准固化剂两大类(图0-2-1)。

标准固化剂就是传统的无机结合材料水泥、石灰等。非标准固化剂又可分为复合固化剂和化学固化剂两种。复合固化剂的主要成分仍然是水泥或石灰，只是添加了一些改善性能（强度、收缩等）的添加剂。化学固化剂种类繁多，主要有生物酶类、表面活性剂类、聚合物类、无机盐类等。

土壤固化剂种类繁多，从不同的研究角度分析，有不同的分类方法。

2.3.1 按固化剂形态分类

按照固化剂的外观形态区分，可分为粉状固化剂和液态固化剂两类。在化学构成上又可分为主固化剂和助固化剂。

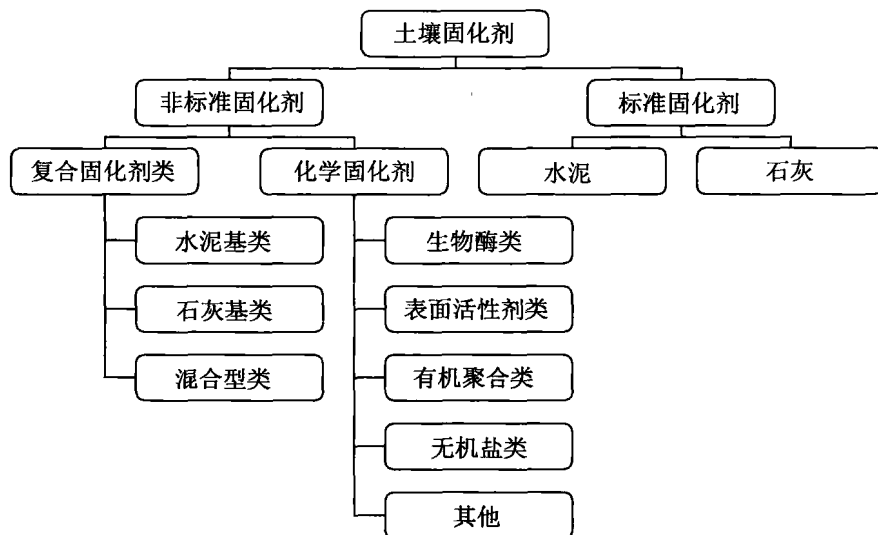


图 0-2-1 土壤固化剂的分类

1. 粉状土壤固化剂

对于粉状固化剂，主固化剂一般为水泥、石灰、粉煤灰或石膏等无机结合料，而助固化剂为少量的高聚物激发剂（如聚丙烯酰胺、聚丙烯酸）或无机激发剂，以激发土壤的潜在活性；或添加合成的吸水材料，来降低土壤的含水量，适用于表层或浅层土的固化。

粉状固化剂的一般固化机理为：

（1）固化剂中所包含的水泥、石灰等无机稳定材料，在水作用下产生各种化学反应生成凝胶状的水化物，如水化硅酸钙（C-S-H）、水化铝酸钙（C-A-H）或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，包围土壤颗粒。在这些水化物中有的自行继续硬化形成骨架，有的与土颗粒作用生成络合物，最终相互连接形成稳定的空间网状结构，从而增强土粒间的粘结强度和稳定性。

（2）粉状固化剂与水作用后产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 或 Al^{3+} 能与土胶粒吸附层中的 Na^+ 、 K^+ 离子进行交换，从而降低土胶粒 ξ 电位，减薄土胶粒双电层的厚度，使土颗粒相互靠近产生凝聚。

（3）对于某些固化材料，与土混合作用后还会产生含 32 个结晶水的钙矾石针状结晶体 $[\text{3CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{3CaSO}_4 \cdot \text{32H}_2\text{O}]$ ，将土壤中大量的自由水以结晶水的形式固定下来。这种水化反应成的结晶体使得材料的体积增加，它有效地填充土团粒间的孔隙，使固化土变得致密起来。此外，钙矾石晶体为针状，它交错穿插于土团粒中，起“显微加筋”的作用，增加固化土的强度。