

923362

加固土 原理

张登良 编著

人民交通出版社



Jiagutu Yuanli

加 固 土 原 理

张 登 良 编著

人 民 交 通 出 版 社

加固土原理

张登良 编著

插图设计：王惠茹

正文设计：周 圆

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张：4.5 字数：114 千

1990年12月 第1版

1990年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3720册 定价：1.15元

ISBN 7-114-00979-8

U·00633

内 容 提 要

本书以化学、土质学及建筑材料科学为基础，主要论述加固土的基本原理以及各种加固土的作用机理，包括反应过程、影响因素和提高加固效果的措施等。

本书为公路与城市道路专业本科生和研究生选修课教材，也可供土木工程技术人员学习参考。

前 言

加固土在土木建筑中的应用历史悠久，但加固土作为一门科学来研究仅有几十年的历史。由于它在国民经济中占有重要的地位，因而这门学科的发展速度相当快，正逐渐形成一门较完整的学科。

《加固土原理》是供公路与城市道路专业本科生和研究生使用的选修课教材。本教材是以化学（物理化学及胶体化学、有机化学和高分子化学）、土质学、建筑材料等课程为基础，着重论述加固土的基本原理，各种加固土的机理及土与结合料之间的相互作用过程，影响加固效果的因素，以及提高加固效果的途径与措施等。

为了更深入地掌握本教材的内容，在学习本课程之前应先学习有关的化学基础知识。在本课程的理论教学过程中，宜安排一定的教学实验，或组织科研小组进行一定的科研试验工作，以资加深理解并提高科研工作的能力。

加固土在道路工程中的应用日趋广泛，其研究工作也日益深化，但在我国目前尚缺少系统论述加固土原理方面的科技参考书，因此本书也可供有关的专业科技人员参考。

本教材在编写过程中广泛地参阅了有关的文献资料，并吸收了作者近几年来在加固土领域的研究成果。由于作者水平有限，错误与不足之处在所难免，敬请读者不吝指正。

目 录

绪 论	1
第一章 土——加固对象	6
§1-1 土的组成	6
§1-2 粘土矿物的组成与结构	12
§1-3 粘土胶粒的电化学性质	19
第二章 加固土的基本原理	28
§2-1 土体的强度与稳定性	28
§2-2 加固土的基本原理	31
§2-3 加固土的基本原则	34
第三章 土的压实	37
§3-1 压实理论	37
§3-2 影响土体压实的因素	42
§3-3 压实土的一般性质	45
第四章 盐溶液稳定土	49
§4-1 盐溶液稳定土的目的与作用	49
§4-2 盐溶液稳定土原理	49
第五章 石灰加固土	57
§5-1 石灰加固土原理	57
§5-2 影响石灰加固土效果的因素	64
§5-3 以石灰为主要结合料的综合加固土	70
§5-4 提高石灰加固土早期强度的措施	76
第六章 水泥加固土	81
§6-1 水泥加固土原理	81
§6-2 影响水泥加固土效果的因素	86
§6-3 以水泥为主要结合料的综合加固土	90

第七章	沥青加固土	94
§7-1	沥青加固土原理.....	94
§7-2	影响沥青加固土效果的因素.....	100
§7-3	改善沥青加固土效果的途径.....	103
§7-4	乳化沥青加固土.....	106
第八章	高分子合成树脂加固土	111
§8-1	高分子合成树脂的基础理论知识.....	111
§8-2	高分子合成树脂加固土的基本原理.....	118
§8-3	糠醛-苯胺树脂加固土	121
§8-4	脲醛树脂加固土.....	124
§8-5	聚丙烯酸钙加固土.....	128
第九章	土的热处理	130
§9-1	土的热处理的反应过程.....	130
§9-2	影响土的热处理效果的因素.....	134
主要参考文献		135

绪 论

一、加固土及其应用

加固土是采用一定的技术措施改善土的物理-力学性质以适应工程技术上的要求。

由于加固土是利用产量多、产地广的当地材料——土作为主要建筑材料，而且土的开采和加工都比较容易，因而采用加固土在技术上和经济上都具有重要的意义。

加固土的应用范围很广，它可用来修建道路的路面，机场道面的基层，铁路的路基，房屋、桥梁等建筑物的地基，以及水利工程中加固土体等。在道路工程中，世界各国广泛利用有机或无机结合料加固类材料修筑道路的基层、底基层和垫层，有时还用于稳定表层土基。实践证明，这类材料完全可以满足工程技术上的要求。在我国，石灰加固土及石灰工业废渣类材料应用最广泛，且取得较丰富的使用经验。近几年来，伴随高等级道路的修建以及水泥工业的发展，我国亦开始在基层中采用水泥加固类材料。

加固土在建筑中的应用虽已历史悠久，但加固土作为一门学科来研究仅有几十年的历史。由于它在国民经济中占有重要的地位，因而发展很快，正在逐步形成一门较完整的学科。我国近20多年来在该领域也进行了大量研究工作，在研究石灰土的强度发展规律和物理-力学性质，工业废料的利用等方面都有了重大的发展，并且在烧土工艺方面积累了丰富的经验。此外，近年来在加固土的强度机理以及新材料的开发利用等方面也取得了可喜的进展。

实践表明，在道路工程中采用加固土，可降低劳动量和动力

的需要量，降低工程造价，且随着石料运距的增加，应用加固土其效益就更为明显。应当指出，即使在当地有石料供应的情况下，有时采用加固土在技术上和经济上还是合理的，因为它工艺较简单，且可根据需要提供必要的强度、刚度及稳定性。

二、加固土方法的分类和简要特征

加固土的方法有多种，按其技术措施的不同可分为：机械方法（如压实），物理方法（如改善水温状况），加入掺加剂法（粒料、粘土、盐溶液、有机结合料、无机结合料、高分子合成树脂、以及其它化学添加剂等），技术处理方法等（如热处理、电化学处理等）。加固方法的选择应根据结构物对加固的要求、掺加剂或原材料的供应情况、施工条件及当地土的性质等进行详细的技术经济比较后确定。

现将各种加固土方法的适用条件及其主要技术性质列于表1。

压实 是一种最简单、最基本的加固方法，也是其它加固方法所必用的技术措施。压实的目的在于，通过一定压实功的作用，使土粒及土团粒相互靠紧，从而土体的空隙率减小、密实度增大、透水性及毛细吸水性降低、强度与稳定性相应得到提高。

粒料加固土 是通过往土中掺加粗粒料（对粘性土）或粘土（对砂土或粗粒土）来改善土的级配组成，从而提高土的骨架作用和内摩阻力或提高土的粘聚力。粒料加固法也可配合其它加固方法使用，即在用某种结合料加固土的同时，掺加一定数量的粒料，以提高加固效果或改善其工程性质。

盐溶液加固土 单一盐溶液加固法仅适于干旱地区，用以提高路面表层的干稳性，从而减少松散与磨损。盐溶液的作用主要有离子交换、降低溶液蒸气压力、降低冰点和提高表面张力等。通过这些作用可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。

无机结合料加固土 是一种经济有效的、也是在生产中应用

表1

加固的方法	使用的加固材料	适宜加固的土	加固土的主要技术性质
压实		各类土及加固土	密实度增大, 强度提高, 稳定性略有改善
掺加粒料或粘土	对粘性土——各种粒料或工业废渣; 对非粘性土——粘土	粘土、亚粘土或砂土、砂砾	内摩阻力增大, 稳定性提高, 或粘聚力增大
掺加盐溶液	氯化钙、氯化镁、氯化钠	低粘性土、砂性土、砂砾	在干旱地区可增加粘聚力和耐磨性, 减少扬尘
掺加无机结合料	各种水泥、熟石灰、磨细生石灰、石膏、水玻璃	各类土。对水泥, 砂性土、砂砾较好; 对石灰, 粘性土较好	强度与稳定性显著提高, 具有较大的刚度, 但性脆, 耐磨性较差
掺加有机结合料	各种沥青及沥青乳液	亚砂土、亚粘土	粘聚力、稳定性、耐磨性提高, 透水性降低
掺加高分子合成树脂	糖醛-苯胺、脲甲醛、聚丙烯酸钙等	各类土, 但砂性土效果较好	粘聚力大幅度增长, 抗水性提高, 透水性降低, 形成体型结构时性较脆
综合加固	掺加无机或有机结合料的同时, 加入其它添加剂或工业废渣	各类土, 但主要是粘性土	强度与稳定性较单一, 掺加有机或无机结合料加固明显提高
热处理	各种热能	粘性土	土的化学-矿物成分发生根本变化, 具有高的强度和稳定性
电化学处理	长时间作用直流电	各类土	土的含水量降低, 其密实度和强度相应提高

最广泛的加固方法。这种方法是利用结合料自身以及结合料与土之间的各种化学反应, 在土体中形成网状结晶, 把土粒和土的微团粒联结成坚强的整体。无机结合料加固土具有高的强度、刚度与稳定性, 但性脆、易开裂。

有机结合料加固土 是利用各种低稠度的沥青、煤沥青或沥青乳液与天然状态的土(不加热)拌和而成。其结构强度的形成主要依靠沥青与土粒之间的各种吸附过程以及而后在自然因素作用下沥青的“稠化”过程。沥青加固土属凝聚结构, 具有良好的粘弹性和结构可恢复性。

高分子合成树脂加固土 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键合。高分子合成树脂加固土的性质取决于高聚物的

类型。体型高聚物高强、性脆，线型高聚物具有良好的柔顺性。

综合加固土 是在采用某种加固方法的同时掺入另一种添加剂以改善反应作用条件，从而可使加固效果显著提高。综合加固通常是通过改变土的分散度、矿物成分、吸附离子成分或土中溶液的酸值来实现的。综合加固不仅可提高加固土的强度与稳定性，而且还可扩大其应用领域、扩大使用的土类并放宽土的温湿条件，改善加固土的变形性能或工艺过程。

土的热处理 是在长时间的高温作用下，土的性质和成分发生根本的、不可逆的变化，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晶而形成坚强的石状材料。

土的电化学加固 是土体在长时间直流电的作用下，发生一系列变化，使土的性质改变、稳定性提高。土的胶体微粒部分在直流电作用下发生电渗或电泳现象，从而发生许多物理化学变化，如交换反应、水稳性化合物的形成等。

三、加固土的目标与实施

用于道路结构层的加固土，应具备下列工程性质：

(1) 高的力学强度——抗压强度、抗折强度、抗剪强度，作为面层还应具有较高的抗磨强度。

(2) 适宜的刚度——即加固土的模量要适度。一定的刚度可保证路面在行车荷载的作用下不致产生过大的变形，但刚度过大则使加固土脆性增大、收缩系数增大以及荷载应力增大，在行车荷载和自然因素的作用下易产生开裂。

(3) 高的稳定性——包括水稳定性、高温稳定性和低温稳定性。水稳定性是指加固土浸水后其强度降低幅度较小；高温稳定性是指加固土在高温时仍具有足够的强度与刚度；低温稳定性是指加固土在低温时不开裂，且在正负温度交替作用下其结构不致遭

到过大的破坏。

对强度、刚度和稳定性的具体要求视加固土所处的层位、交通量及其组成以及自然因素的综合影响程度而定。一般情况下，加固土愈靠近面层，交通量愈大或重车愈多，以及受水及温差影响愈大时，则要求愈高。

因此，加固土的目标不仅应使土体在正常的条件下具有较高的强度，而且更重要的是在土体浸水时或在恶劣的自然条件下其结构不致遭到过大的破坏。

细分散的粘土胶体颗粒是土中最活跃的组成部分，它们的数量和成分不仅直接影响到土体的强度与稳定性，而且关系到结合料与土之间的相互作用过程和加固土的效果。因此，深入研究粘土胶粒的构造与特性并充分利用这些特性，是搞好加固土的基础。

土体遇水膨胀以及土与结合料之间的相互作用，主要在土粒表面进行。因而积极地和有目的地利用加固时所出现的各种表面性质和现象，是各种加固土方法的理论前提。这些表面性质和现象主要取决于土的胶体-化学状态、土中微粒部分的成分与粉碎程度、掺入土中结合料的性质与剂量。

综上所述，为了保证加固土的质量，必须根据土的物理、化学性质选择适宜的结合料及其剂量，采用正确合理的工艺，以及为加固土结构强度的迅速形成创造适宜的条件。

第一章 土——加固对象

有关土的基本性质已在《土质学与土力学》课程中系统阐述，本章主要论述与其加固有关的一些性质，并着重论述粘土胶体颗粒的结构及其物理-化学性质。

§ 1-1 土的组成

对于道路加固土，主要是指被风化过程和土壤形成过程所形成的不同成分和成因的第四纪表层细屑土和塑性土。这些土均属于含有多矿物成分和粒度成分的分散体系，且通常为包含有固相（土粒）、液相（水及盐的水溶液）和气相（空气）的三相体。随着土中成分及三相比例的不同，土的性质及其加固性质将会有很大的差异。

一、土的矿物成分

矿物成分是表征土的成因的最主要特征之一，它对土的性质往往起着决定性作用。在用各种结合料和其它物质加固土时，矿物成分尤其具有特殊意义。

土中的矿物种类很多，它们的来源、组成和性质取决于成土母岩的性质和形成的条件。按其形成条件，可分为原生矿物和次生矿物。

原生矿物由岩浆冷凝而生成，其性质与母岩相近。土中分布最广的原生矿物是长石、云母、辉石、闪石和石英。它们主要集中在大于 $1 \sim 10\mu\text{m}$ 的颗粒中，其特点是化学性质不活泼。

次生矿物是原生矿物经化学风化和造壤过程后所生成的产物，它具有与原生矿物不同的新的性质和特征。土的分散程度变

得越大，矿物组成的质量变化也越显著。

但是，应当注意到，土中最活泼的微粒部分一般是次生矿物，即粘土矿物。土粒表面的特征和性质，也就是土与结合料之间相互作用过程的倾向性，基本上取决于粘土的矿物成分。粘土矿物是由原生硅酸盐和铝酸盐经风化过程后分解出的胶体硅石、氢氧化铝和氢氧化铁所构成。

粘土矿物中的蒙脱石、高岭石、伊利石和石英等，就其性质和含量而论，具有重要的意义。

蒙脱石类矿物，包括蒙脱石、拜来石、绿脱石等。这类矿物有三层晶格，即由中央夹着一片铝氧八面体晶片的两片硅氧四面体所构成。由于这种晶体结构的特征，使其具有高的分散性和较强的吸附能力，以及极高的塑性、亲水性和遇水膨胀性。

高岭石类矿物，包括高岭石、珍珠陶土、迪开石等。这类矿物有二层晶格，即由一片硅氧四面体晶片和一片铝氧八面体晶片构成，层间以氢键紧紧相联。与蒙脱石类矿物相比，高岭石类矿物具有较小的分散度、膨胀性、塑性和离子交换容量。

伊利石类矿物，是类似白云母的粘土矿物。这类矿物属于与蒙脱石同类型的晶格，其两个层面也都是氧原子层，但是层面之间通过钾离子把层片与层片结合起来。因而整个结构比较强，极性离子不能进入中间引起膨胀，水不易渗入层片之间，故其膨胀性和离子交换容量均比蒙脱石小，所以这些矿物的性质处于蒙脱石类与高岭石类之间。

石英类矿物，包括石英、玉髓、蛋白石等。细分散的石英，其性质与高岭石接近，但亲水性比高岭石还要低。

粘土矿物表面常常带有未补偿的电荷（一般未补偿电荷数量越多，则吸附容量越大，且需用较多的结合料来加固），通常它们被处在较游离状态的离子所饱和。这些离子可能是阳离子，也可能是阴离子，但对多数粘土来说主要是阳离子。当土中孔隙被水填满时，所吸附的离子，部分处在液相中，能与对矿物表面具有较大亲合力的离子进行当量吸附交换。上述现象能在很大程

度上掩盖真实矿物成分的作用（削弱或加强土粒与结合料的粘着）。因此，在研究加固土所发生的相互作用过程时，必须加以考虑。

在土的成分中，水溶盐和腐殖质对土的性质亦具有重要的影响。

当土的形成过程是在孔隙被水以不同程度填充的条件下进行时，常常伴随着矿物的溶解，发生组成的浸滤和盐类的堆积。

土中的水溶盐类包括有易溶盐（ NaCl 、 KCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 等），中溶盐（ CaSO_4 等）和难溶盐（ CaCO_3 、 MgCO_3 ）。

土中含有易溶盐，特别是当它们的浓度较高时，会引起交换吸附离子成分的剧烈变化，使电动电位降低，致使土的微粒部分的胶体化学状态发生强烈的变化。土中易溶盐的成分和含量对土的性质，以及土的加固效果、结合料的选择和剂量具有重要的作用。易溶盐对加固土的侵蚀作用取决于所用结合料的种类，一般来讲，对有机结合料加固土的影响较大。

难溶盐的溶解度较小，在土中会起粘结作用，并使粘土胶体颗粒发生不可逆或半可逆的絮凝作用，对于土体的结构强度是有利的。当用有机结合料加固含有高价阳离子的土时，有可能发生化学吸附而生成有机酸盐，使水稳性大大提高。

当土中含有适当的碱性盐类时，可提高土中溶液的碱性，有利于用无机结合料加固土的各种化学反应的进行。

腐殖质是在表土发展过程中自然形成的一类特殊的高聚物，其含量与组成同进入土中的有机遗体的成分和复杂多样的矿物腐殖化作用的强度特点密切相关。因此，处在不同地质、不同气候条件和不同覆盖层下的土，就有不同的腐殖质。

土中的腐殖质，按其性质不同，可分为胡敏酸、富里酸和胡敏素三类。

在胡敏酸的分子组成中，已经确定有两种主要的结构单元——酚型或醌型的芳香族化合物和含氮化合物（氨基酸和醇），此外还可能含有碳水化合物。胡敏酸因含有羧基和酚羧基等原子

团而具有酸性。其中的氢能参加交换反应而游离出来，其官能团的数目越多，则交换量越大。

富里酸包括克连酸和阿克连酸。与胡敏酸相比，富里酸的颜色较淡，含碳量低，含氧量高，易溶于水、醇和酸中。富里酸亦含有羧基，但它的离解度较胡敏酸强，具有强酸性，能够强烈地破坏土壤矿物，与铁、铝氧化形成高度活性的络合物。富里酸的各种盐类的溶解度很大，其对电解质的凝聚作用有很大的稳定性，分散性很强。

胡敏素主要是与矿物牢固结合的胡敏酸，亦可能是经过干燥和冰冻影响而变质了的胡敏酸。胡敏素不溶于碱液，是腐殖质中最不活泼的部分。

腐殖质对土的性质起着很大的影响，且强烈地影响着土与结合料相互作用的特性和键合的强度。这种侵蚀作用，根据腐殖质的成分和含量的不同，表现程度也各异。例如，腐殖酸钠的存在会使沥青起乳化作用，破坏沥青膜与土粒表面的粘着；腐殖质的存在使介质的酸性增大，对水泥的硬化和结构形成过程有强烈的侵蚀作用。

在分析腐殖质对加固土的影响时，仅考虑到腐殖层的总含量是不够全面的，还应进一步研究它们的成分和含量。为了保证加固土的品质，应对土中腐殖质的含量加以限制。

二、土的粒度成分

土的粒度成分表征着土的分散性，它是确定天然土和加固土的强度和稳定性的主要因素之一。但是，粒度成分往往不能充分地表示土在自然条件下的粉碎程度，特别是高分散度的土更是如此。土的微粒部分根据它的胶体-化学状况，在自然条件下一般是凝结成不同尺寸和形状、不同强度和水稳性的微团粒和粗团粒。而在进行土的粒度成分分析时通常要破坏这些团粒结构，这样做的结果，往往会对土的分散程度的真实性造成一种假的概念。

大量的研究表明, 根据塑性指数可以得到有关土的分散程度的全面特征。塑性指数不仅可反映土中粘粒含量, 而且还能反映土的矿物成分和化学成分, 以及土的微粒部分的物理-化学状态。

土中的细分散部分, 由于比表面大且化学活性较高, 对土的工程性质及其加固性质起着决定性的作用。它的成分和含量在加固土中具有十分重要的意义。

土中粘粒含量多对其水稳性不利, 但是当用结合料加固土时, 它又是积极与结合料相互作用形成坚强结构的组成成分。因此, 土中一定数量的粘粒含量, 对任何加固土方法来说都是十分必要的。

三、土中的水分

填充土中孔隙并起溶剂作用的水, 是土的不可分离的组成部分。用结合料加固土时, 根据水的活动性及其与土粒表面的键合强度, 水可能起积极的或消极的作用。当水的含量适当时, 能保证坚固结构和坚固键合的形成过程顺利地进行。

现代土质学将土中水分分为化合水、结晶水、紧密结合水、松弛结合水、游离水、气态水和固态水等。

化合水是以离子型式(OH^- 、 H^+)存在于矿物的结晶格架中的固定位置上, 包含在氢氧化物型的水化物中, 与晶格中其它元素结合较强。因此, 在一般条件下, 化合水并不是水, 而是具有固定位置的离子。但在 $450\sim 500^\circ\text{C}$ 时, 这些离子从结晶格架中析出, 成为真正的水。在析出水的过程中, 原有的结晶格架破坏, 矿物分解转变为新的矿物。

结晶水是以水分子的形式存在于结晶格架的固定位置上, 包含在土中石膏型水化物的成分中。结晶水在 400°C 左右析出, 此时原有晶格破坏, 矿物的性质改变, 但矿物本身并不破坏。

结合水受土粒表面分子力和静电力作用, 极性的水分子定向于土粒或定向于土粒周围的反离子。结合水不服从静水力学规律, 其性质与游离水相比有很大差异, 且越靠近土粒表面差异越