

# 土壤固化剂研究现状与展望

樊恒辉<sup>1,2</sup>, 高建恩<sup>1</sup>, 吴普特<sup>1</sup>

(1 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**[摘要]** 阐述了土壤固化剂国内外研究的现状、种类、特点和应用, 分析了土壤固化剂的固化机理和固化性能, 指出了土壤固化剂研究和应用领域中存在的若干问题及研究方向, 最后对其应用前景做了展望。

**[关键词]** 土壤固化剂; 固化机理; 固化性能

**[中图分类号]** P642.1; TU441

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2006)02-0141-06

为了满足生产生活的需要, 人们很早就将植物纤维和姜石应用到改良土壤的工程性质方面<sup>[1-2]</sup>。随着石灰的发明, 石灰便成为土壤的改良材料。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<sup>[3]</sup>。由于石灰土、水泥土具有良好的力学性能和水稳性, 并具有一定程度的抗冻性能, 因此在修建道路、港口、机场等工程中, 得到了普遍应用。但在工程实践中, 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, 开发经济实用的土壤固化新材料, 并系统地研究土壤固化新材料的性能和固化机理, 是目前各国工程师们致力研究的新课题。本研究阐述了国内外土壤固化剂研究的现状, 分析了土壤固化剂的固化机理和固化性能, 指出了土壤固化剂研究和应用领域中存在的若干问题及研究方向, 以期对土壤固化新材料的开发研制提供科学依据。

## 1 土壤固化剂研究现状

### 1.1 国外研究现状

20 世纪 70 年代, 美、日等国家由于工程建设的需要, 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 (Soil Stabilizer)。土壤固化剂是指能改善和提高土壤工程技术性能的复合材料, 其能够克服石灰、水泥和粉煤

灰等单一材料的缺点, 作用对象是各种土壤。现在土壤固化剂已大量应用于水利工程、高速铁路、高速公路、机场跑道等方面, 效益非常明显, 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。在许多国家, 土壤固化剂作为一种品牌商品被专门的企业生产, 如美国生产的帕尔玛固化酶, Soilrock, EN-1 等土壤固化剂; 澳大利亚开发的 Roadbond<sup>®</sup>, Roadpacker<sup>®</sup>; 日本的 UKC 公司, 住友株式会社等也生产各种品牌的土壤固化剂。

在企业生产土壤固化剂的同时, 许多学者也在从事土壤固化剂的研究工作。研究者针对不同土质研制开发出了不同的土壤固化剂, 如 Medina 等<sup>[4]</sup>用磷酸加固红土; Tomohisa 等<sup>[5]</sup>提出用混凝土粉末、纸浆渣、粉煤灰和火山灰土加固处理含水量高和有机质含量高的土壤; Bobrowski<sup>[6]</sup>研究出一种离子类固化剂来加固软基土; Zalihe 等<sup>[7]</sup>用粉煤灰和石灰来固化含有石灰质的膨胀性黏土。

国外学者在研究土壤固化剂时, 研究的对象和思路较宽广, 不仅包括水泥和石灰的各种添加剂、废弃物的再利用研究, 而且对菌类加固剂、昆虫加固技术也进行了深入研究。Shirazi<sup>[8]</sup>认为, 石灰和粉煤灰的混合物可以消除由于水泥土干缩而容易引起的开裂; Bell<sup>[9]</sup>在水泥和石灰中分别添加 PFA(一种添加剂)对其加固黏土的效果进行了研究; Miller 等<sup>[10]</sup>对水泥窑粉尘 (CKD) 加固处理土壤的性能进行了研究; Munjed 等<sup>[11]</sup>用一种沉积物燃烧后的物质作为一种土壤固化剂; Robert<sup>[12]</sup>研究了一种高浓缩的液体土壤固化剂 (CLS); Saboundjian<sup>[13]</sup>对一种有机

\* [收稿日期] 2005-06-07

[基金项目] 国家“863”节水重大专项“新型高效雨水集蓄与利用技术研究”(2002AA2Z4051-2); 西北农林科技大学科研专项 (05ZR042)

[作者简介] 樊恒辉 (1973—), 男, 山西夏县人, 在职博士, 主要从事岩土工程试验和新材料研究。

土壤固化剂(EMC2)在路基加固中的应用做了报道;Attom 等<sup>[14]</sup>曾报道用燃烧过的橄榄废弃物,可以作为一种新的土壤固化剂;Thecan<sup>[15]</sup>研究了腐生物分解木质素中的担子菌类,认为其在土壤固化过程有着重要的作用;Nene 等<sup>[16]</sup>研究了自然界白蚁用黏土固化筑巢的技术,提出了岩土昆虫学的概念。

## 1.2 国内研究现状

20 世纪 80 年代,国内有关单位开始引进国外土壤固化剂技术,在吸收国外经验的基础上,针对我国土壤性质,开始了土壤固化剂的研究工作。迄今为止,先后有多家科研院所和大专院校对土壤固化剂进行了研究,并先后取得了一系列研究成果,其中部分产品已经在工程建设中得到了应用。

目前,我国土壤固化剂的研制主要集中在无机类方面,且已取得了较大进展,主要以水泥熟料或特种水泥熟料、石灰及工业废渣等为主要原料,添加少量的激发剂制备而成,其固化机理与水泥、石灰相同。黄晓明等<sup>[17]</sup>以石灰、矿渣、水泥等一种或几种互配物作为主固化剂,选用马来酸、胡马酸、碳酸钠、氟化钠、氢氧化钠、硫酸铝钾、三乙醇胺和胺基磺酸盐等作为助固化剂,配制了一种 TR 型土壤固化剂,具有良好的路用性能。梁文泉等<sup>[18]</sup>研制了一种由特殊二氧化硅及活性铝、铁等组成的灰白色粉末状无机胶结材料——GA 新型土壤固化剂,其能固结黏土、淤泥、工业废渣以及粉砂、风化砂等。刘顺妮等<sup>[19]</sup>对石灰固化土的外加剂进行了研究,认为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、石膏和  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  对稳定石灰土有较明显的增强效果。彭波等<sup>[20]</sup>以钢厂工业废渣(水淬渣)为原料,加入少量合成的固态催化剂,经研磨加工制成了一种土壤稳定剂,其稳定的土壤在无侧限饱水抗压强度、水稳定性、冻稳定性、劈裂强度等路用性能方面优于石灰固化土。周明凯等<sup>[21]</sup>研制了一种以矿渣、石灰为主剂,复合几种固化素合成的 HS 干硬性土壤固化剂,该固化剂自身凝结硬化较慢,用于固化土壤时,除延迟碾压时间较长外,还具有强度较高、微膨胀等特点。季节等<sup>[22]</sup>研制了一种水硬性胶结材料固化剂,主要包括  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3$  等化合物,对砂性土和黏性土试验结果表明,经固化剂加固后的土体强度和耐久性均有所提高。

国内在有机类固化剂的研发方面与国外还有很大差距,目前还只是停留在实验室阶段。刘瑾等<sup>[23]</sup>选取丙烯酸等乙烯基单体为主体,经高分子聚合反应合成了一种新型水溶性高分子土壤固化剂,但对

其固化机理尚不明确。

## 2 土壤固化剂的种类、特点和应用

土壤固化剂种类繁多,一般可按照其外观形态或成份大致进行分类。从外观形态可以分为液粉固化剂和粉状固化剂;按照主要成份可以分为无机类、有机类、生物酶类固化剂。

### 2.1 无机类土壤固化剂

一般为粉末状,多采用工业废料作为主固剂,添加各种激发剂配制而成。主固剂包括粉煤灰、各类矿渣、煤矸石或水泥、沸石、石灰等,激发剂主要包括各种硫酸盐类、各种酸类和其他无机盐,也包含少量的表面活性剂等其他有机材料。添加无机类土壤固化剂的固化土性能比较稳定,在正常条件下,其性能可保持 30~50 年基本不变。由于添加了一些工业废料和较易取得的建筑材料,而且施工简便,因而不仅可以降低工程造价,而且还具有环保和节能意义。

目前,无机类土壤固化剂在市场上占据主流,包括 Aught-set 高性能土壤固化剂、“NCS”土壤固化剂、HEC 高强高耐水土体固结剂、HAS 高强耐水土体固结剂等。现以 Aught-set 高性能土壤固化剂为例,来说明无机类土壤固化剂的组成和特点。

Aught-set 高性能土壤固化剂是一种以水泥为基础,由多种无机和有机材料配制而成的水硬性胶凝材料。Aught-Set 土壤固化剂一般包含有 S、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $P_3$  6 种主要成分。(1) S,能胶结土壤颗粒,在固化体中构成网状结构,形成早期强度;(2)  $P_1$ ,具有表面活性作用和缓凝作用,使得  $P_2$  成分更易进入土壤颗粒内部,从而使离子交换反应进行得迅速、彻底,同时还能调整固化剂的延迟时间;(3)  $P_2$ ,能与黏土矿物发生化学反应,弥补网状结构强度的不足,形成后期强度,从而提高固结土体最终强度;(4)  $T_1$ ,当固结土体长期遭受水浸泡时, $T_1$  与水可以形成一种平衡物质,从而避免水对固结土体的浸蚀,使固结土体不泥化,强度稳定;(5)  $T_2$ ,起激发早期强度的作用;(6)  $P_3$ ,可与其他组分反应,使形成的生成物体积增加,并析出凝胶类物质,填充固结土体内部的孔隙,导致固结土体体积发生一定程度膨胀,产生内应力,从而提高了固化土体的抗渗、抗冻、抗冻性及耐疲劳性能。由于这 6 种组分在土壤固化过程中的作用不同,因此,针对不同的土壤,通过调整这几种组分的比例,从而达到最优的固化效果。

Aught-set 土壤固化剂最重要的技术突破是激发素的发现。激发素是添加于土壤固化剂中的低含

量物质,能够激活黏土中的矿物成分,使黏土矿物也成为一种反应物质,从而使黏土发挥出其潜在的活性,使固化效果大幅度提高。添加 Aught-set 于土体后,在成型压力作用下,土壤颗粒紧密接触,在土壤颗粒附近,土壤固化剂水化生成水化碳酸钙、沸石、方钠石及硅酸等,使黏土颗粒表面形成凝结硬化壳。土壤固化剂的激活组分还会以不同方式渗入颗粒内部,与黏土矿物发生物理化学反应,形成水铝酸盐、含水硅酸盐等胶凝物质,使黏土颗粒表面产生不可逆凝结硬化,使其具有水稳性和强度稳定性。同时,土壤固化剂的某种成分可代换土体中凝聚能力低的离子,降低动电电位,促使黏土颗粒凝聚,同时使电解质浓度增加,胶粒双电层减薄,均有利于颗粒凝聚。土壤固化剂的主要水化产物及其与黏土矿物反应的生成物,均能牢固地胶结分散的土壤颗粒,建立空间网状结构,使之成为一个具有较高强度的整体。

Aught-set 土壤固化剂因其优良的性能现已被广泛用于市政、环保、交通、水利等工程中,如北京中南海湖底的固化、昆玉河水系的治理<sup>[24]</sup>和朔黄铁路路基的处理<sup>[25]</sup>。

## 2.2 有机类土壤固化剂

有机类土壤固化剂多为液体状,目前有磺化油、改性水玻璃类、环氧树脂和高分子材料类。一般通过离子交换原理或材料本身聚合加固土壤。此类土壤固化剂在使用时要严格控制土壤的含水量,有些有机类土壤固化剂在使用时要与水泥配合使用,才能达到固化效果。有机类土壤固化剂的使用寿命约为 30 年,但是其随使用的环境的不同而变化较大。

在有机类土壤固化剂中,具有代表性的产品是“路基实”。“路基实”是澳洲国际离子土壤稳固剂实业有限公司(IISS 公司)的主要产品。其实质上是一种催化剂,可以减少土壤中除化合水外其他水分子的二极力矩,如吸附水、表面张力水、毛细管水,这样将导致水分子的裂解,产生氢离子( $H^+$ )和氢氧根离子( $OH^-$ )。此过程将一直持续下去,并伴随着不同的带电(正电及负电)离子产生。土壤中黏土矿物表面离子通常都是负离子,因此,它们能吸引正电离子,如氢、钠、钙、钾、镁离子等。负电荷的氢氧根离子总是会与正电荷的金属离子结合。随着水中来自“路基实”的正电荷减小,足够多的负电荷聚集起来,对吸附水层中的正电荷金属离子产生了足够大的引力,从而打破了静电势垒。当这种反应产生时,金属离子向自由水中运移并伴随着水的排出而排出。吸附水层被减少,土壤颗粒失去了其膨胀特性,从而使

整个土壤层结构变得松散,就容易被压实,这个过程是不可逆的。在水分子的裂解过程中排出的氢离子,可以与自由态的氢氧根离子再复合而形成水,或复合成氢气。释放出来的水可以渗透出去或者被羊脚压路机挤出,随后被蒸发。这样,通过改变淤泥或黏土颗粒的 Zeta 电势(动电电势),土体将达到理想的压缩状况。

自 20 世纪 60 年代以来,“路基实”在世界范围内,特别是西方一些发达的国家得到了广泛的推广和应用。目前,在我国也逐步开始应用,在流溪河整治第二期工程沙坝 A 段(长 2 km)中,采用了“路基实”修筑堤顶路面。

## 2.3 生物酶类土壤固化剂

生物酶类土壤固化剂是由有机质发酵而成的多酶基产品。通过酶的催化作用,促进了土壤颗粒间的凝聚力。多数生物酶类土壤固化剂为棕色浓缩液,有轻微的发酵味,无毒,不燃烧。由于生物酶类土壤固化剂有生物降解的特点,因此其固化的土体经水浸泡后,强度会降低。尽管此类固化土的设计寿命约为 8 年,但对其长期的强度和稳定性仍有待实践检验。

“派酶大力浆”是由美国国际酶制品有限公司研制的一种棕色、无菌的液态复合生物酶浓浆,其既能催化土壤的固结反应,又能改变土壤结构,是一种高效的生物酶类固化剂。“派酶大力浆”能增加土壤密度,降低土壤膨胀系数,增强土壤抗渗、防水和防冻性能,从而极大地提高土壤工程性能。

经过多年的发展,用“派酶大力浆”筑路已是一种成熟的筑路技术,在美国、加拿大、墨西哥、澳大利亚、前苏联等国家已修建了几万公里的道路。在我国浙江省新昌县的茶壶皎至五四公路五四大桥段、陈家坞至下朱部公路方口段和小将镇至上海村公路,均采用了“派酶大力浆”,修筑试验路段共计 5.2 km,经过 2 年的雨季检验和实际运行,整体状况良好,能够经受住恶劣气候与环境的考验。

近年来,国外土壤固化剂的应用领域不断得到拓宽,不仅应用在道路、港口、机场、水利等工程,而且还应用到固化有毒害的污染废弃物等方面<sup>[26-28]</sup>。在国内,土壤固化剂主要应用于道路路基、地基加固等方面。尽管国内土壤固化剂的应用还处于起步阶段,利用土壤固化剂的工程还很少,但已有的工程实践证明,土壤固化剂除了在交通道路、地基加固等领域有广泛的应用外,还可大量用于水利工程中的护坡、防渗、简易公路、环保工程和水土保持等领域。

### 3 土壤固化剂的固化机理

目前,对于一些常用的土壤固化剂作用机理研究的较为充分,如水泥、石灰和二灰土等。水泥土在固化稳定土壤过程中的主要作用包括,水泥的水解和水化反应、离子交换和团粒化作用、火山灰反应和碳酸化作用等。石灰土在固化过程中,存在离子交换和絮凝团聚作用、火山灰反应、自身结晶和碳酸化作用。二灰土强度形成过程发生的基本作用除了石灰土的各种作用外,还包括有石灰和粉煤灰之间的火山灰反应。新型土壤固化剂在加固土壤时所表现出来的各种作用非常复杂和多种多样,因土壤的性质和土壤固化剂的不同而异,所以国内外学者对新型土壤固化剂的固化机理研究的比较分散,大部分是针对某种或某一类土壤固化材料进行研究。研究土壤固化剂固化机理的试验方法,多是借助扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射仪,从微观角度来研究土壤结构的变化和新物质的生成。

土壤固化剂的固化机理归纳总结起来,可以概括为物理力学过程、化学过程和物理化学过程 3 大过程。物理力学过程是指土壤固化剂在固化土壤时,土料经过粉碎、拌合和压实,土体的基本单元在外力的作用下彼此靠近,从而减少土体的空隙率,增大密度,降低渗水性,这种过程是可逆的,土体的强度随着外界条件的改变会发生变化。物理力学过程是一种最简单、最基本的加固手段,但该过程是任何类型的土壤固化剂在固化土壤时都必需的,因为固化土壤的密度和土壤固化剂在土体中的均匀性,对强度的形成具有非常重要的作用。

化学过程是指土壤固化剂在固化土壤的过程中,其本身组分发生的化学反应、土体与土壤固化剂中的某些组分发生的反应等。前者包括无机类土壤固化剂材料本身的水解与水化反应、与空气中二氧化碳的碳酸化反应,有机类土壤固化剂的聚合与缩聚反应等;后者如土壤固化剂中的组分与土壤颗粒之间的火山灰反应、有机高分子与土壤颗粒表面间的络合反应等。

物理化学过程主要指土壤颗粒与土壤固化剂中各组分的吸附过程,包括物理吸附、化学吸附和物理化学吸附。物理吸附指在分子力的作用下,土体的基本单元将土壤固化剂中的某些组分吸附在其表面,使其表面自由能得以降低。化学吸附指吸附剂与被吸附物质之间发生化学反应而生成新的不溶性物质,并在吸附剂与被吸附物质之间形成化学键。物理

化学吸附指土壤固化剂中的某些离子与土体基本单元表面的离子发生了离子交换吸附。在土壤固化剂与土体的物理化学作用过程中,无机类土壤固化剂主要是物理化学吸附,如无机类土壤固化剂中的钙盐、镁盐溶解后,钙离子和镁离子与土体基本单元所吸附的钠离子发生交换反应,可以增加土壤颗粒的团聚作用;有机类土壤固化剂主要是物理吸附和化学吸附过程,如高分子材料的某些基团与土壤颗粒之间的物理吸附,高分子材料与土壤颗粒吸附的离子之间可以发生化学吸附。

以上这 3 种过程因土壤固化剂的成分不同而不同,但是这 3 种过程并不是相互孤立的,而是相互联系和相互促进的。在这 3 种过程中,只有化学过程和物理化学过程能使土体的力学性能、抗渗性能、耐久性性能等工程性能得以改善,而物理力学过程则是保证化学过程和物理化学过程更好地发挥作用。

国产土壤固化剂一般为粉状,其研究大多从水泥的加固机理出发,通过在各种基质材料中添加不同激发剂来提高土壤的工程性能。虽然土壤加固剂配方不同,但加固机理却相同。其作用机理一般为:当土壤固化剂与含有一定水分的土壤混合后,即发生一系列物理化学反应。首先,在土壤中大量形成富含结晶水的针状结晶体,穿插在土壤颗粒空隙间形成强度骨架;其次,硅酸盐类水化物填充在强度骨架之中,使固化体系进一步密实;最后,在激发剂的剧烈作用下,土壤固化剂和部分土壤颗粒参加化学反应,使加固土具有不可逆的、良好的耐久性<sup>[17-19]</sup>。

液粉加固剂的加固机理是基于电化学机理,将其溶于水后形成的溶液,喷洒于土壤中,溶液中的高价离子可以改变土壤颗粒表面电荷的特性,降低土壤颗粒间的排斥力,破坏土壤颗粒的吸附水膜,提高土壤颗粒间的吸附力,同时形成结晶盐,在压实的条件下综合提高土壤的承载性能和抗渗性能。

### 4 土壤固化剂的固化性能

土壤固化剂的应用领域很广,而不同领域对固化土的性能要求不同,所以其固化性能的研究也就因工程要求不同而异。土壤固化剂的固化性能可以通过力学性能、耐久性能和变形性能来反映。由于土壤固化剂目前还没有统一的、专门的试验标准,一般还是参考《水泥土材料试验方法》或《土工试验规程》、《水工混凝土试验规程》和《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中的方法进行。

#### 4.1 力学性能

固化土的力学性能试验包括抗压、抗拉、抗折和抗剪等。由于抗压强度是固化土材料最基本的、最具有代表性的指标,其不仅是工程设计的主要依据,而且与固化土的其他性能密切相关。因此,目前对于抗压强度的研究较多,且研究主要集中在抗压强度的影响因素方面。一般而言,影响固化土力学性能的主要因素有土质、土壤固化剂掺量、龄期、密度和含水率及养护条件等。其中土质、土壤固化剂掺量和密度是影响固化土力学性能的 3 大要素。土壤固化剂的掺量越高,密度越大,则固化土的抗压强度越高。即使同种土壤固化剂也会由于土质的不同,而导致其固化性能不同。因此,研究适合不同土质的土壤固化剂,或研究兼容性较强的土壤固化剂,是目前土壤固化剂的研究方向之一。

#### 4.2 耐久性能

土壤固化剂的耐久性能研究主要包括固化土的抗渗性能、抗冻性能、耐干湿循环能力等,在特殊的领域还包括耐腐蚀性能、耐冲刷性能等。土壤固化剂虽然具有较高的力学性能,但是由于土壤中亲水性黏土矿物含量高,所以对固化土的耐久性能具有较大的影响。试验<sup>[29-30]</sup>证明,影响固化土力学性能的因素,对固化土的耐久性能也有显著影响。在固化土耐久性能试验中,研究较多的是固化土的抗渗性能和抗冻性能。有研究<sup>[31]</sup>表明,固化土具有较高的抗渗性能,但抗冻性能较差,这就限制了土壤固化剂的应用领域和区域。由于土壤固化剂的耐久性能是工程设计达到技术经济指标优化的基础。因此,通过改进土壤固化剂的配方或改进固化土的施工工艺,以提高固化土的耐久性能,是今后研究的方向之一。

#### 4.3 变形性能

土壤固化剂的变形性能研究主要包括固化土的受力变形、体积变形等。受力变形指固化土构件在承受拉伸力或压缩力时产生的变形。体积变形指固化土构件在成型后,由于环境变化而引起的变形,如温度、湿度等,一般包括干缩变形、湿胀变形和冻胀变形。固化土的变形性能研究,主要集中在受力变形和干缩变形方面,其他方面的变形研究相对较少。

### 5 存在的若干问题与研究方向

国内土壤固化剂研发、应用起步比较晚,很多土壤固化剂研发生产企业的技术,来源于美、日等发达国家。国内企业和研究单位在引进国外先进技术的同时,自主开发了适合我国国情的土壤固化剂,均取

得了一批重要的科研成果。但是,在土壤固化剂的研究应用领域仍然存在若干亟待解决的问题。

(1)土壤固化剂的研制应同时考虑针对性和兼容性。由于自然界的土质复杂多变,土壤颗粒组成、矿物成分和化学成分往往因成土条件的不同而不同,导致土壤固化剂的固化性能有很大差异。但是,由于自然界中各种土壤分布的不均匀性,造成施工过程中土质的不确定性。因此,在研制土壤固化剂时,应当兼顾土壤固化剂的针对性和兼容性,从而使土壤固化剂具有较大的应用范围。

(2)深入研究土壤固化剂的基础理论。土壤固化学是一门边缘学科,其涉及到土壤化学、岩土力学、有机高分子化学、材料工程、环境工程等众多学科的知识。因此,土壤固化剂的基础理论研究非常复杂。由于土壤固化剂的基础理论,对于生产、施工等具有不可替代的理论指导作用,所以应当加强交叉学科的合作研究,深入研究土壤固化剂的基础理论。

(3)加强固化土的性能研究,制定土壤固化剂的试验规程。由于土壤固化剂的应用领域不同,不同工程要求的固化性能指标也就有所不同。应当根据工程的需求,有针对性的进行固化土的性能研究。目前,土壤固化剂还没有统一的、专门的试验规程,对各种土壤固化剂的研究与比较造成了困难。因此,应制定土壤固化剂的试验规程。

(4)在进行土壤固化施工工艺研究的同时,研制专用的施工设备。土壤固化剂适用范围广,可以应用在水利工程、地基加固、路基处理等领域,但是由于各个领域的要求不同,使得施工工艺也不同,使用的设备也有差异。应进行土壤固化剂施工工艺的研究,并研制专用的施工机具和设备,提高施工效率。

### 6 结 语

国外发达国家对土壤固化剂的研究起步较早,主要从环境保护的角度出发,综合土力学、土壤化学、有机高分子化学、化学工程、材料工程、环境工程等多学科知识,形成跨领域的交叉科学——土壤固化学。美国、日本等国从各领域的基本要求出发,研制出适合不同要求的土壤固化剂,并且已经取得了巨大的经济效益。近年来,国内工程技术人员开始自主研究开发适合我国国情的土壤固化剂,国产土壤固化剂逐渐形成了一定的规模,许多品牌的土壤固化剂开始在国内推广应用,并取得了良好的效果。但是,应当对土壤固化剂的兼容性或特殊性、固化机理、性能和工艺等继续进行深入的研究。

土壤固化剂作为一种新型的土木工程材料,其产生、发展都需要一个过程。已有的工程实践证明,土壤固化剂在工程领域有着良好的性能和巨大的发

展潜力。相信在未来的工程领域中,土壤固化剂将会发挥更大的作用,有着美好的应用前景。

### [参考文献]

- [1] 缪纪生,李秀英,程荣達. 中国古代胶凝材料初探[J]. 硅酸盐学报,1981,9(2):234-240.
- [2] 刘巽伯,魏金照,孙丽玲. 胶凝材料[M]. 上海:同济大学出版社,1990.
- [3] 肖林,王春义,郭汉生. 建筑材料水泥石[M]. 北京:水利电力出版社,1987.
- [4] Medina J,Guida H N. Stabilization of lateritic soils with phosphoric acid[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1995,13(4):199-216.
- [5] Tomohisa S,Sawa K,Naitoh N. Hedorro hardening treatment by industrial wastes[J]. Zairyo/Journal of the Society of Materials Science Japan,1995,44(503):1023-1026.
- [6] Bobrowski L. Injection of a liquid soil stabilizer into subgrade soil-Research rept[R]. Austin:Texas Dept of Transportation,1992.
- [7] Zalihe N,Emin G. Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments[J]. Journal of Arid Environments,2001,47(4):453-463.
- [8] Shirazi H. Field and laboratory evaluation of the use of lime fly ash to replace soil cement as a base course[J]. Transportation Research Record,1999,1652:270-275.
- [9] Bell F G. Assessment of cement-PFA and lime-PFA used to stabilize clay-size materials[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1994,49:25-32.
- [10] Miller G A,Zaman M. Field and laboratory evaluation of cement kiln dust as a soil stabilizer[J]. Transportation Research Record,2000,1714:25-32.
- [11] Munjed M A,Mousa F A. The use of burned sludge as a new soil stabilizing agent[C]. Missouri:ASCE National Conference on Environmental and Pipeline Engineering, 2000:378-388.
- [12] Robert B R. Concentrated liquid stabilizers for railroad applications[C]//Roadbed Stabilization and Ballast Symposium. Missouri:St. Louis,2000(8-9):349-365.
- [13] Saboundjian S. Subbase treatment using EMC2 soil stabilizer-Final rept1997-2001[R]. Juneau:Alaska Dept of Transportation and Public Facilities,Research and Technology Transfer,2002:1-26.
- [14] Attom M F,Munjed M A. Soil stabilization with burned olive waste[J]. Applied Clay Science,1998,13(3):219-230.
- [15] Thecan C C. Soil binding properties of mucilage produced by a basidiomycete fungus in a model system[J]. Mycological Research,2002,106(8):930-937.
- [16] Nene A S,Paribar Y D. Natural stabilization of expansive soils[C]. Calcutta,Indian Geotechnical Conference,1992:207-209.
- [17] 黄晓明,张书生. TR 型土壤固化剂路用性能试验研究[J]. 公路交通科技,2002,19(3):23-27.
- [18] 梁文泉,何真. 土壤固化剂的性能及固化机理的研究[J]. 武汉水利电力大学电力学,1995,28(6):675-679.
- [19] 刘顺妮,林宗寿,陈云波. 改性石灰黏土固化剂的研究[J]. 矿物学报,1998,18(2):169-173.
- [20] 彭波,李文瑛,陈忠达. 固化剂加固土性能的研究[J]. 内蒙古公路与运输,2001(1):27-29.
- [21] 周明凯,沈卫国. HS 干硬性土壤固化剂的研究[J]. 武汉工业大学学报,1996,18(3):37-40.
- [22] 季节,张志新. 加固土路用性能的评价[J]. 北京建筑工程学院学报,2001,17(2):44-46.
- [23] 刘瑾,陈晓明. 高分子土固化剂的合成及固化机理研究[J]. 材料科学与工程,2002,20(2):230-234.
- [24] 葛立冬. 土壤固化剂技术的应用[J]. 铁道标准设计,2000,20(5):5-8.
- [25] 王云鹏,许兆义. 朔黄重载铁路肃宁北至黄骅港段路基填料改良试验研究[J]. 岩土工程界,2002,5(3):20-22.
- [26] Mehmet A Y,Bilge A. Leaching of metals from soil contaminated by mining activities[J]. Journal of Hazardous Materials,2001,87(1-3):289-300.
- [27] Zhiao S,Larry E. Erickson mathematical model development and simulation of in situ stabilization in lead-contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials,2001,87(1-3):99-116.
- [28] Wang Y M,Chen T C,Yeh K J,et al. Shue stabilization of an elevated heavy metal contaminated site[J]. Journal of Hazardous Materials,2001,88(1):63-74.
- [29] 张金山,薛敏,张学峰. 水泥土力学性能和耐久性能简介与分析[J]. 包头钢铁学院学报,1997,16(3):224-228.
- [30] 宁宝亮,陈四利,刘斌. 冻融循环对水泥土力学性质影响的研究[J]. 低温建筑技术,2004(5):10-12.
- [31] 张海燕,韩苏建,李元婷,等. 土壤固化剂用于渠道防渗工程初探[J]. 水土保持通报,2004,24(1):40-42.

- [34] 祁生文. 边坡动力响应研究及应用[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2002.
- [35] 刘春玲,祁生文,董立强,等. 利用 FLAC<sup>3D</sup>分析某边坡地震稳定性[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2 730-2 733.
- [36] 孙进忠,陈 祥,王余庆. 岩土边坡地震崩滑的三级评判预测[J]. 地震研究,2004,27(3):256-264.
- [37] 辛鸿博,王余庆. 岩土边坡崩滑及其初判准则[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):591-594.
- [38] 王余庆,辛鸿博,高艳平,等. 预测岩土边坡地震崩滑的综合指标法研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(3):311-314.
- [39] 王存玉,王思敬. 边坡模型振动试验研究[M]//王思敬. 岩体工程地质力学问题(七). 北京:科学出版社,1987.
- [40] 张 平,吴德伦. 动荷载下边坡滑动的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报,1997,19(2):80-86.
- [41] 李海波. 地震作用下岩体力学的响应及工程安全[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2005.

## The evaluation of seismic dynamic stability of rock slope

SHI Dan, CHEN Yun-sheng, HAN Xin, CHEN Gang

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** Landslides are the usual disasters induced from earthquake. The mechanical properties of rock and the response and stability of rock slope under seismic loads are very important in study. The development, application and characteristics of the contents are summarized in this paper. The current researches for the stability analysis of rock slopes under seismic loading are systemically discussed at home and abroad. The pseudostatic method, Newmark method, numerical simulation and method of comprehensive evaluation combined with post-seismic-hazards survey, experimental research, probability analysis, reliability mathematics, and other methods are included. Meanwhile, the application and property of those methods are summarized. The main contents, the existing problems, and the research direction are proposed to give some suggestions for further studies.

**Key words:** rock slope; dynamic load; seismic load; slope stability

(上接第 146 页)

Abstract ID:1671-9387(2006)02-0141-EA

## Prospect of researches on soil stabilizer

FAN Heng-hui<sup>1,2</sup>, GAO Jian-en<sup>1</sup>, WU Pu-te<sup>1</sup>

(1 Research Centre of Soil and Water Conservation & Eco-environment, Chinese Academy of Sciences and Education Ministry, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Water Coservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** This paper introduces researches of soil stabilizer home and abroad and the research types, character and application, then analyzes the mechanism and solidifying capability of soil stabilizer, next points out some problems in the research and application and the direction of research, finally puts forward the prospect.

**Key words:** soil stabilizer; solidifying mechanism; solidifying capability