

文章编号:1671-1637(2023)02-0047-20

## 中国道路工程中土壤固化技术综述

季 节<sup>1,2</sup>, 梁 犇<sup>1</sup>, 韩秉焜<sup>1,2</sup>, 索 智<sup>1,2</sup>, 王佳妮<sup>1,2</sup>, 于海臣<sup>3</sup>

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京节能减排与城乡可持续发展  
省部共建协同创新中心, 北京 100044; 3. 北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京 100053)

**摘要:**为在道路工程建设中更灵活使用不同土壤固化技术并完善固化土规程, 对比分析了土壤固化剂对不同土壤的固化效果与适用范围; 梳理了道路工程设计和施工规范, 统计其对基层与底基层的强度要求, 并与固化土规范进行对比, 分析了不同等级固化土的强度范围与公路规范要求强度区间的匹配性; 结合实际固化强度效果与规范要求, 建立了有机固化土与无机固化土在强度要求上的内在联系。研究表明: 无机、离子、有机 3 类土壤固化剂对黏土等非特殊土均具有较好的固化效果, 有机土壤固化剂具有更广泛的适用范围, 且对红土等特殊土表现出更好的固化效果; 公路规范中基层不同 7 d 无侧限抗压强度要求的重叠区间和最小 7 d 无侧限抗压强度要求各点位组成的下限区间相结合, 二者区间交集为 [1.5, 5.0] MPa, 三级固化土最小强度要求为 2.5 MPa, 与公路交集区间的 5.0 MPa 差异较大; 结合固化土本身特性和不同道路类型与结构层等对材料力学性能的要求, 建议将固化土分级体系细化, 新增四级 [3.0, 4.0) MPa、五级 [4.0, 5.0) MPa 和六级 [5.0, +∞) MPa 3 种等级; 在现行规范中未有针对有机固化土的技术要求, 而其力学性能基本上接近无机固化土, 适用范围优于无机固化土, 建议后续规范修订中新增有机固化土类别, 以便规范化应用。

**关键词:**道路工程; 土壤固化技术; 7 d 无侧限抗压强度; 基层; 底基层; 固化土等级; 有机固化土  
**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.02.003

### Review on soil solidified technologies in road engineering in China

Ji Jie<sup>1,2</sup>, LIANG Ben<sup>1</sup>, HAN Bing-ye<sup>1,2</sup>, SUO Zhi<sup>1,2</sup>, WANG Jia-ni<sup>1,2</sup>, YU Hai-chen<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Collaborative Innovation Center for Energy Conservation & Emission Reduction and Sustainable Urban-Rural Development, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Guodaotong Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** To enhance the versatility of various soil solidified technologies in road construction and to improve the regulations of solidified soil, a comparative analysis was conducted on the solidified effects and applicability ranges of stabilizers for different soils. Additionally, the specifications of road engineering design and construction were reviewed, and their strength requirements for base and sub-base were analyzed and compared with the solidified soil specifications. The compatibility of strength ranges of different grades of solidified soils and the

收稿日期: 2022-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3803400); 国家自然科学基金项目(52078025); 北京市教育委员会科技计划项目(KZ201910016017)

作者简介: 季 节(1972-), 女, 河南信阳人, 北京建筑大学教授, 工学博士, 从事道路工程研究。

引用格式: 季 节, 梁 犇, 韩秉焜, 等. 中国道路工程中土壤固化技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 47-66.

Citation: Ji Jie, LIANG Ben, HAN Bing-ye, et al. Review on soil solidified technologies in road engineering in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 47-66.

requirements of the road specifications was studied. The internal relation between organic solidified soil and inorganic solidified soil in the strength requirements was established by integrating the solidified strength effect with the specification requirements in real situation. Research results show that inorganic, ion, and organic soil stabilizers display good solidification effects on non-special soils like clay, etc, whereas organic soil stabilizers exhibit a wider range of application and superior performance in stabilizing special soils like laterite, etc. The overlapping interval of the different 7 d unconfined compressive strength requirements for the base specified in the highway regulations and the lower limit interval comprised of various points for the minimum 7 d unconfined compressive strength requirements were combined to form an intersection interval of [1.5, 5.0] MPa. However, the minimum strength requirement for tertiary solidified soil is 2.5 MPa, which greatly differs from 5.0 MPa in the intersection interval in the highway specifications. Considering the characteristics of solidified soil and the diverse requirements of road types and structural specifications on material mechanical properties, it is suggested to refine the grading system of solidified soils by introducing three new grades: Grade IV [3.0, 4.0) MPa, Grade V [4.0, 5.0) MPa, and Grade VI [5.0, +∞) MPa. There is no technical requirement for organic solidified soil in the current specifications and its mechanical properties are basically close to inorganic solidified soil. Its scope of application is better than inorganic solidified soil, so it is suggested that the subsequent revision of the specifications adds organic solidified soil category for standardized application. 13 tabs, 16 figs, 85 refs.

**Key words:** road engineering; soil solidified technologies; 7 d unconfined compressive strength; base; sub-base; solidified soil level; organic solidified soil

**Author resume:** JI Jie(1972-), female, professor, PhD, jijie@ bucea. edu. cn.

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (2022YFC38703400); National Natural Science Foundation of China (52078025); Science and Technology Project of Beijing Municipal Education Commission (KZ201910016017)

## 0 引 言

随着国家交通强国战略顺利实施和不断推进,交通基础设施建设快速发展,道路建设技术逐渐升级换代,道路工程新材料、新方法、新装备、新技术等不断涌现<sup>[1-6]</sup>。交通基础设施如公路和城市道路等通常都是采用砂、石等材料进行填筑,但随着社会经济发展,工程建设砂、石需求量日趋增大,过度开山采石引起了自然环境恶化,不符合当今国家提出的“建设绿色环保、节约型社会”政策理念与道路行业“绿色公路”理念<sup>[1]</sup>。自然界中原始存在土壤的性质千差万别,大部分土壤因工程性质较差而无法直接作为道路材料。另外,部分交通基础设施建设处于特殊地势与地质环境下,使得工程建设面临就近取材困难,远距离调配材料可能导致成本显著增加,因此,无论是出于节约工程建设投入成本,或是充分利用土地资源以减少开山采石对环境产生破坏的现状而言,对就近土壤的固化处理并使其达到可用于道

路建设需要的技术标准,已变得尤为重要。

目前,土壤固化技术通常分为机械力固化、热处理固化、加筋固化、注浆固化和化学固化等方法<sup>[7-9]</sup>。化学固化是加固土壤最常用的方法,向土壤中加入水泥和石灰等无机结合料是固化方法中经济效益最高、固化效果较好的加固方法,因此,被广泛应用于公路和城市道路基层和底基层。以水泥和石灰为主要代表的无机结合料,虽然具有良好的强度、水稳定性和抗冻性能,也已在很多道路工程中得到了广泛应用,但米吉福等<sup>[5,10-15]</sup>分析表明:水泥土收缩较大,开裂风险较高;石灰土早期强度低、发展慢;水泥和石灰对塑性指数高的黏土、有机土和盐渍土固化效果较差,甚至有时无法起到固化作用。已有研究表明<sup>[16-22]</sup>:水泥和石灰的生产过程需要耗费大量自然资源,破坏山体生态环境,每生产 1 t 水泥约产生 510.7 kg CO<sub>2</sub>,石灰石煅烧成石灰过程中会分解出 40%以上 CO<sub>2</sub>,生产过程中排放的气体(CO<sub>2</sub>、CO、氟化物等)和颗粒会污染环境,危害人类健康。故亟需

一种便捷、绿色和高效的新型土壤固化技术来解决当前水泥或石灰固化土壤的技术痛点问题,因此,对土壤进行绿色、高效固化的各种类型技术应运而生。

20 世纪 50 年代,土壤固化剂开始兴起,20 世纪 70 年代后,美国、日本等国家都对土壤固化剂展开研究,并作为专门的产品应用于实际工程中<sup>[7]</sup>。与传统化学固化技术相比,土壤固化剂有着适用范围广、强度高、稳定性好、原材料来源广泛以及现场施工与维护更方便等明显优势。孟建伟等<sup>[23]</sup>使用无机土壤固化剂和水泥-石灰,分别对粉质土、黏性土、盐碱土和砂质土进行固化试验,试验结果表明采用无机土壤固化剂固化土壤的各项性能均优于水泥-石灰固化的土壤;王银梅等<sup>[24]</sup>分别用有机土壤固化剂和水泥对黄土进行固化,发现有机固化土的 7 d 无侧限抗压强度、抗冻融性能均优于水泥固化土;户轩庆<sup>[25]</sup>分别利用生物酶土壤固化剂和水泥固化黏性土,结果表明生物酶固化土的 7 d 无侧限抗压强度高出水泥固化土 20% 以上;杨林等<sup>[26]</sup>使用有机土壤固化剂和石灰对东北地区的黏质土进行固化,探究不同压实度、冻融循环次数对 7 d 无侧限抗压强度的影响,结果显示在相同试验条件下,有机固化土 7 d 无侧限抗压强度优于石灰固化土;Liu 等<sup>[27]</sup>将有机土壤固化剂应用于江苏高速公路边坡固化;张春东等<sup>[28]</sup>针对城市道路上基层和下基层,使用无机土壤固化剂进行固化,发现固化后的土壤可作为城市道路的上基层进行使用;Iyengar 等<sup>[29]</sup>针对卡塔尔等阿拉伯国家地区的研究表明,使用固化剂加固的固化土无侧限抗压强度高于使用水泥固化的土壤,且固化土路基显著减少了车辙;Kushwaha 等<sup>[30]</sup>针对印度公路的研究显示纳米处理废弃物固化土应用于低交通量公路基层和底基层具有良好的适用性;李焕弟等<sup>[31]</sup>研究表明生物酶固化剂除了能有效提升土壤固化强度,还可以为控制水土流失问题做出贡献;李元元等<sup>[32-34]</sup>研究表明,土壤固化剂除有加固土壤作用,还能有效推动生态环保,有

效控制水土流失问题,抑制肥料元素流失,提升种子出苗率,增加农作物产量;李沛等<sup>[7,35]</sup>研究表明固化剂原料生产中 CO<sub>2</sub> 排放较水泥、石灰少,且用固化剂代替水泥能在很大程度上减少能源消耗与 CO<sub>2</sub> 排放。

尽管固化土的应用广泛,但现有文献未对固化剂应用在具体工程领域的固化效果进行针对性总结与分析,因此,有必要针对不同土壤固化技术对不同地区、不同土壤的力学性能,以 7 d 无侧限抗压强度为依据进行规律性分析,探究不同类别的固化土作为公路和城市道路基层、底基层的应用技术依据。

目前,中国指导应用在道路工程的固化土技术规范十分有限,《土壤固化剂应用技术标准》(CJJ/T 286—2018)适用乡村道路,《道路固化土应用技术规程》(T/CECS 737—2020)和《道路复合稳定土应用技术标准》(T/CECS G; D31-01—2017)适用公路、城镇道路和乡村道路,《城镇道路土壤固化剂稳定混合料基层技术规程》(DB42/T 1014—2014)适用城镇道路。另外,现有技术规范中对固化土的力学性能等级分类无法与现行的公路和城市道路路基以及基层技术规范相匹配,不利于固化土在道路工程的进一步推广和发展,因此,结合公路和城市道路工程具体应用场景的规范标准,对固化土等级进一步细化,从而为固化土在道路工程中应用以及相关技术规范修订和完善提供有益参考。

## 1 土壤固化剂和固化土

### 1.1 土壤固化剂的分类

CJJ/T 286—2018 中按是否与无机结合料共同使用,将固化剂分为 A、B 类,A 类为需要与无机结合料共同使用的固化剂,B 类为能够单独使用,不需要无机结合料的固化剂。在此基础上,樊恒辉等<sup>[4-5,11]</sup>按照形态分为固体土壤固化剂和液体土壤固化剂,按照作用机理分为无机土壤固化剂、有机土壤固化剂、离子土壤固化剂和生物酶土壤固化剂,如图 1 所示。

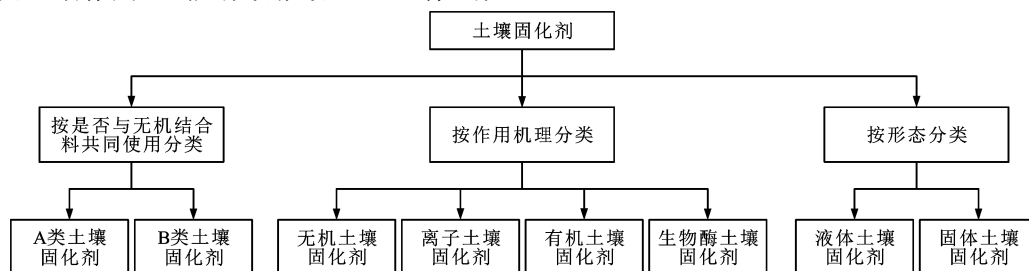


图 1 土壤固化剂分类

Fig. 1 Classification of soil stabilizers

### 1.1.1 无机土壤固化剂

无机土壤固化剂是以水泥、石灰、粉煤灰或者各类矿渣为主要原料,配合激发剂使用的土壤固化剂,多为固体粉末状,如图 2 所示。Latifi 等<sup>[36-38]</sup>为探究 TX-85 固化土强度形成过程与原理,使用 X 射线衍射、能量色散 X 射线光谱、扫描电子显微镜和傅里叶变换红外光谱等方法观察固化剂同土壤反应过程的产物生成与元素变化,研究表明:固化剂同土壤反应过程中新形成的铝硅酸钠水合物(N—A—S—H)的凝胶状胶结物是固化土强度发展的主要原因;在不同固化时间时,土壤颗粒中的 Si—O 官能团几乎没有明显的变化,推断 Si—O 官能团在反应过程

中不作为主要参加元素。Huang 等<sup>[39]</sup>认为,无机土壤固化剂材料本质是具有不同 Si—Al 主链结构的无机物。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和  $\text{SiO}_2$ 在碱性条件下的一系列反应促使生成的胶凝材料结合土壤颗粒,改变土壤的性质并填充土壤内部孔隙是无机固化剂固化土壤的主要作用机制。刘世皎等<sup>[40]</sup>使用不同的固化剂,但得出基本一致的结论:BCS 固化剂在强碱环境下生成水化产物纤维状和网状的水化硅酸钙凝胶(C—S—H)、三硫型水化硫铝酸钙晶体(Aft)和氢氧化钙晶体(CH)等,而其中生成的 C—S—H 和 Aft 是构成提升固化土强度的主体,同时起到包裹土壤颗粒、填充土壤孔隙的作用。



图 2 无机土壤固化剂

Fig. 2 Inorganic soil stabilizers

无机土壤固化剂作用机理<sup>[11,39-42]</sup>可一般地总结为:无机土壤固化剂在水或碱性液体等激发剂的作用下,与土壤迅速发生化学反应生成胶结物,胶结产物包含铝硅酸钠水合物(N—A—S—H)、水化硅酸钙凝胶(C—S—H)、三硫型水化硫铝酸钙晶体(Aft)和氢氧化钙晶体(CH)等。这些胶结物既相互交叉形成空间骨架,将土壤颗粒黏结成一个整体,作为构成提升固化土强度的主体,也起到包裹和黏结土壤颗粒,加强土壤颗粒联系,填充土壤孔隙的作用,同时还改变土壤性质,将土中大量的自由水以结晶水的形式固定下来,填充土壤内部孔隙,提高土壤密实度,其作用机理示意如图 3 所示。

### 1.1.2 有机土壤固化剂

有机土壤固化剂多为液体状,如图 4 所示。Liu 等<sup>[27,43-46]</sup>以增强层形式试验、单孔渗透试验和多孔渗透试验来讨论 PSS 有机土壤固化剂的固化作用机理,得出结论:PSS 固化剂中含有很大比例

的聚氨酯树脂长链大分子和大量的异氰酸酯基团(—NCO),长链大分子通过包裹砂土颗粒将它们相互连接,在砂土表面形成增强层,且可以填补砂土间的空隙并吸附在砂土颗粒表面,以减少或阻塞水的流通,提高砂土的渗透阻力。Mohamed<sup>[47]</sup>认为有机固化剂和土壤作用机制与沥青乳液相似,将固化剂和土壤结合后,固化剂在土壤内部形成薄膜,覆盖土壤表面;在未直接接触的相邻土壤颗粒间形成固化剂“纽带”;相邻土壤颗粒在接触时产生黏性。同时, Mohamed 将水力传导性和力学强度等性能的变化归结于固化剂和土壤结合后内部产生的结构和性质变化,这与 Zhang 等<sup>[48-50]</sup>研究结果一致。

有机土壤固化剂作用机理<sup>[11,36,39]</sup>可一般地总结为:通过离子交换将土壤水分中的电荷与土壤颗粒电荷充分交换,发生化学离子交换反应,破坏颗粒表面双电子层结构,改变颗粒的水力传导性,使得颗

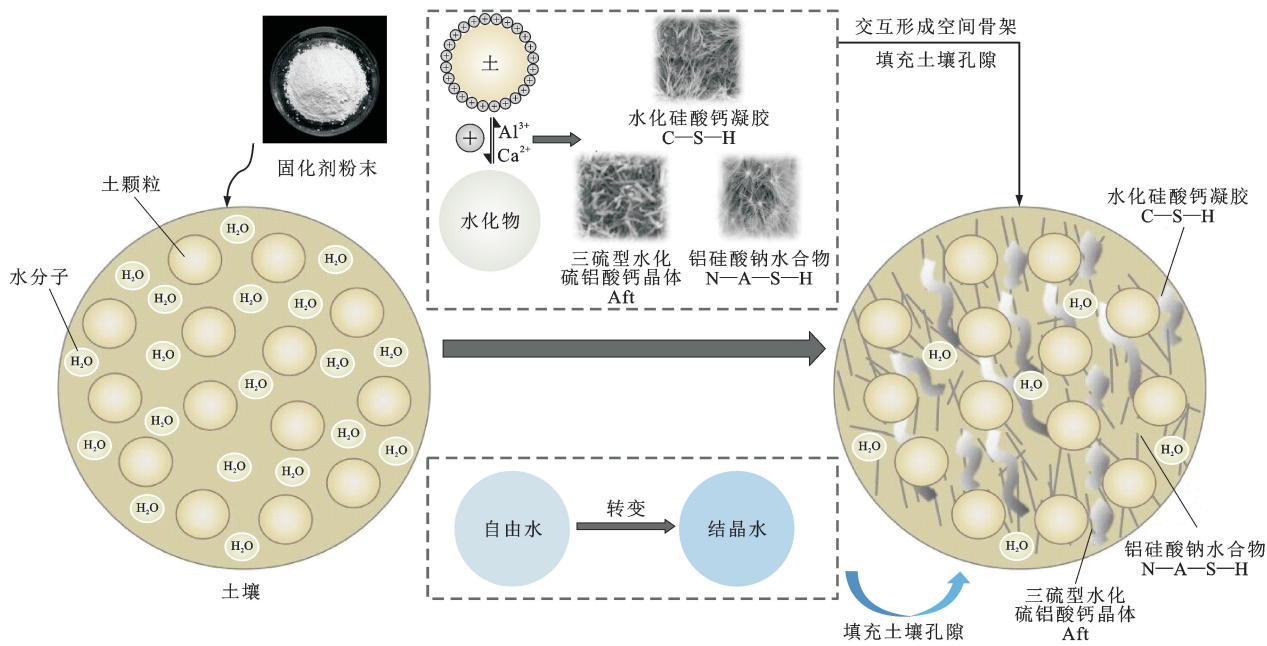


图 3 无机土壤固化剂固化机理

Fig. 3 Solidification mechanism of inorganic soil stabilizer



(a) 高分子固化剂



(b) STW固化剂

图 4 有机土壤固化剂

Fig. 4 Organic soil stabilizers

粒表面吸附水的作用力大幅降低,从而减少土壤孔隙与表面张力所引起的吸水作用,使经过处理的土壤变成“憎水性”。固化后的凝胶物颗粒同时具有较大的表面能和较强的吸附作用,能引起水化物中Ca<sup>2+</sup>离子与土颗粒表面吸附的其他阳离子发生交换反应,生成水化硅酸钙凝胶 C—S—H 和三硫酸型水化硫酸铝钙晶体 Aft<sup>[51]</sup>,形成致密、稳定的整体结构,提升材料密实度和强度。经机械反复平整、振动、夯实等作用,使土壤密实,形成一种新土壤结构,作用机理如图 5 所示。

### 1.1.3 离子土壤固化剂

离子土壤固化剂是由多个强离子组合而成的液体的表面活性剂<sup>[52]</sup>,如图 6 所示,一般加水稀释后使用。吴雪婷等<sup>[53-56]</sup>认为,静电相互作用是离子固化剂固化机理的主要机制之一。土壤矿物表面通常带负电荷,离子土壤固化剂中的阳离子容易吸附到土壤矿物表面和边缘,改变土壤颗粒的水力传导性,并产生大而稳定的絮凝颗粒;而固化剂中的阴离子只有少部分参与吸附,这使得阴离子能“延伸”到更远距离,从而促使土壤内部颗粒间桥接效应,起到更

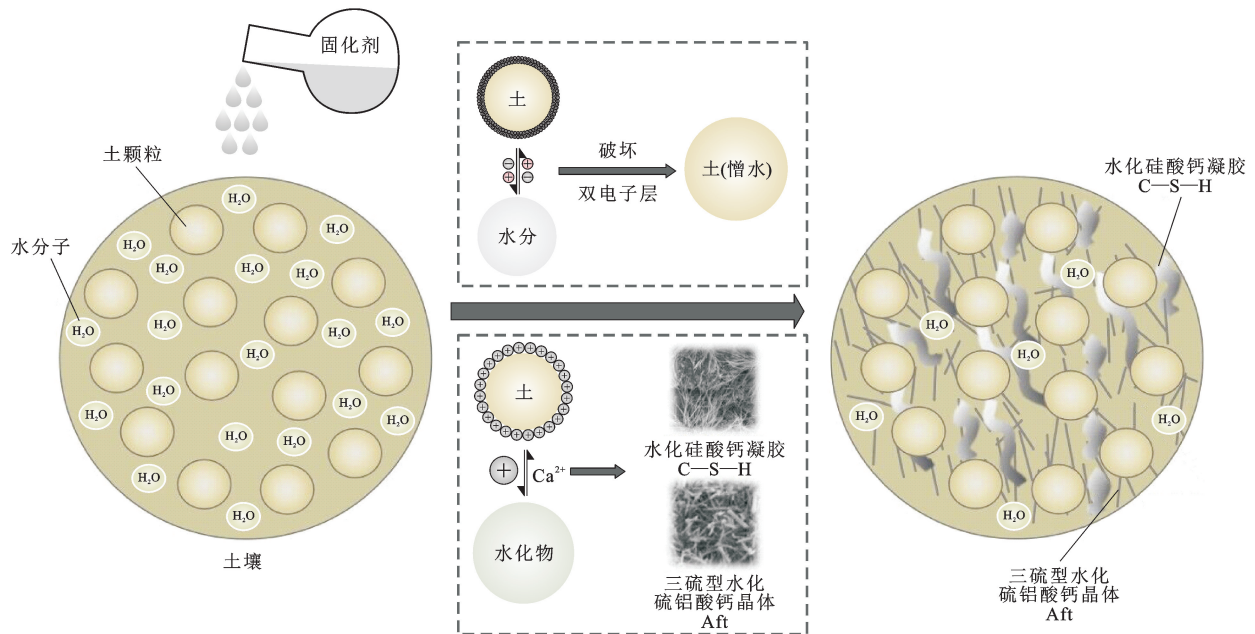
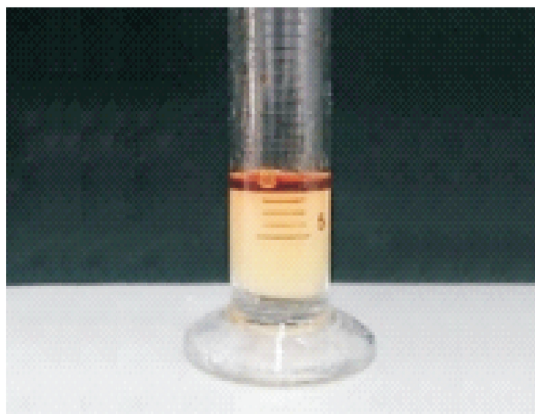
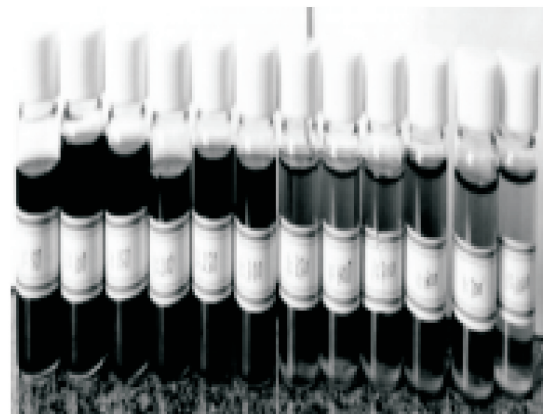


图5 有机土壤固化剂固化机理

Fig. 5 Solidification mechanism of organic soil stabilizer



(a) ISS固化剂



(b) EN-1固化剂

图6 离子土壤固化剂

Fig. 6 Ionic soil stabilizers

高效絮凝剂的作用。

离子土壤固化剂作用机理<sup>[41,54,57-58]</sup>可一般地总结为:固化剂融入水中后离子化,离解出阳离子和阴离子,将其加入土壤中时,与土壤颗粒表面吸附的阳离子进行离子交换反应。 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 离子被黏土颗粒截获吸附,土壤颗粒表面之前吸附的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 离子被分离<sup>[49]</sup>,减小了双电层厚度,结合水膜变薄,降低了土壤颗粒之间的排斥力,聚集形成更大的土壤颗粒<sup>[57,59]</sup>,土壤孔隙减小,结构更为紧密,增强了土壤的稳定性;同时,固化剂的疏水尾是油性层,阻止水分进入,固化剂的亲水头与土壤颗粒表面的阳离子形成化学链,使得相互间发生化学反应,土壤颗粒表面形成紊流结构和絮凝结构,增加了固化土

的强度<sup>[51]</sup>,且改变了土壤的水力传导性,使土壤由原来的“亲水性”变成“憎水性”,排出了部分土壤内部的吸附水,改善了土壤的水稳性,其作用机理如图7、8所示。

#### 1.1.4 生物酶土壤固化剂

生物酶土壤固化剂,是由有机物质发酵而成,且属蛋白质多酶基的固化剂产品多为液体状<sup>[11,60]</sup>,如图9所示。对于生物酶固化剂固化机理的研究较少,Huang等<sup>[39]</sup>认为,不同生物酶材料中的官能团大不相同,其组成结构的变化会导致固化剂具有不同的性质。虽然几乎不可能弄清楚所有官能团如何与土壤矿物相互作用以及每种生物酶固化剂的具体表现,但生物酶在一定程度上还是具备相似的物理

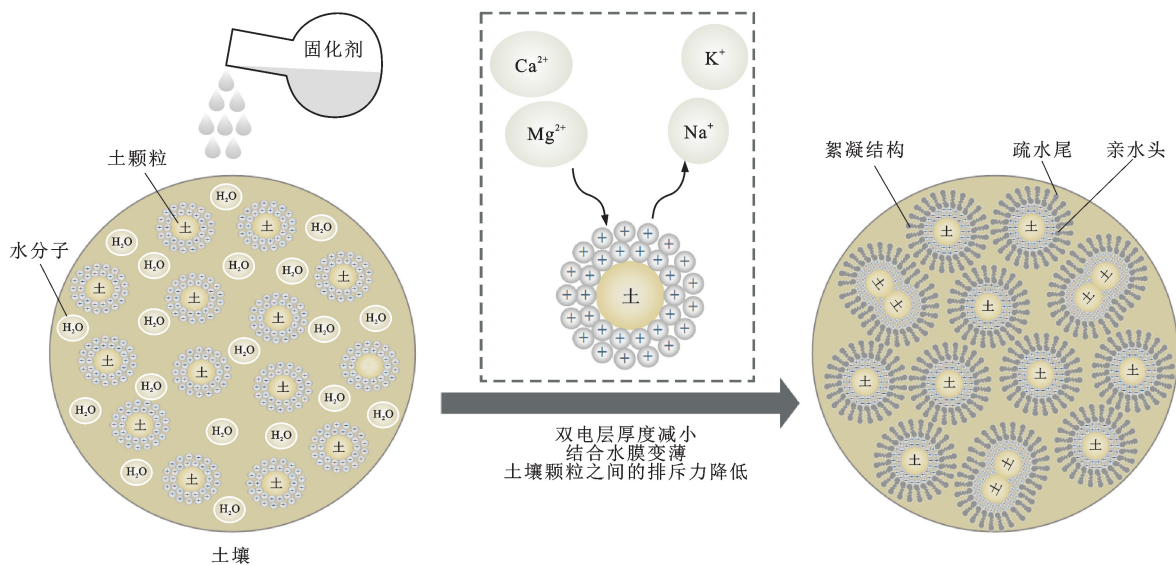


图 7 离子土壤固化剂固化机理

Fig. 7 Solidification mechanism of ionic soil stabilizer

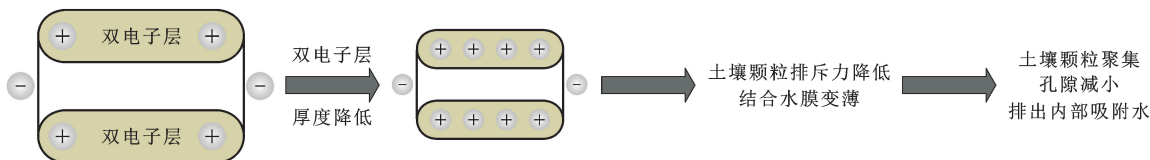


图 8 双电子层厚度降低过程

Fig. 8 Decreasing process of double-electron layer thickness



(a) Parmazyme 固化剂



(b) Terrazyme 固化剂

图 9 生物酶土壤固化剂

Fig. 9 Biological enzyme soil stabilizers

化学性质,即生物酶固化剂和土壤矿物之间的相互作用机制遵循一些一般原理。例如, Moen 等<sup>[61]</sup>发现,分子体积较小的生物酶固化剂作用在土壤时,由于它们具有较强的穿透能力,在土壤内部的固化剂成分会分布更均匀,使得土体表现出更均匀的稳定性。Richardson 等<sup>[62]</sup>发现,分子体积较大的生物酶固化剂可以强化固化剂和土壤的相互作

用,然而受分子体积影响,其对土壤固化的有效性还会受到固化剂对土壤表面的渗透和土壤内部固化剂成分分布的影响;另一方面,他们也发现分子体积较小的固化剂固化后,土体内部会产生更均匀的稳定结构。

目前,较常使用的生物酶固化剂主要作用机理可一般地总结为<sup>[63-66]</sup>:生物酶加入土壤中,可使土壤

中的  $Fe^{3+}$  还原为  $Fe^{2+}$  [67], 使得土壤的吸水膨胀倾向消失, 改变了土壤的分子结构, 减少土壤中所含水分, 消除土壤颗粒之间的无效空间, 通过减小土壤颗粒之间的对抗摩擦力以及土壤颗粒可膨胀的空间, 提高土壤的密实度和承载能力; 同时, 生物酶和

大量有机分子结合生成中间有机物, 同土壤结构交换时破坏土壤原本结构并产生屏蔽作用, 从而防止继续吸附水分; 经机械作用密实后, 能使土壤颗粒之间黏结性增强, 形成牢固的不渗透性结构, 其作用机理如图 10 所示。

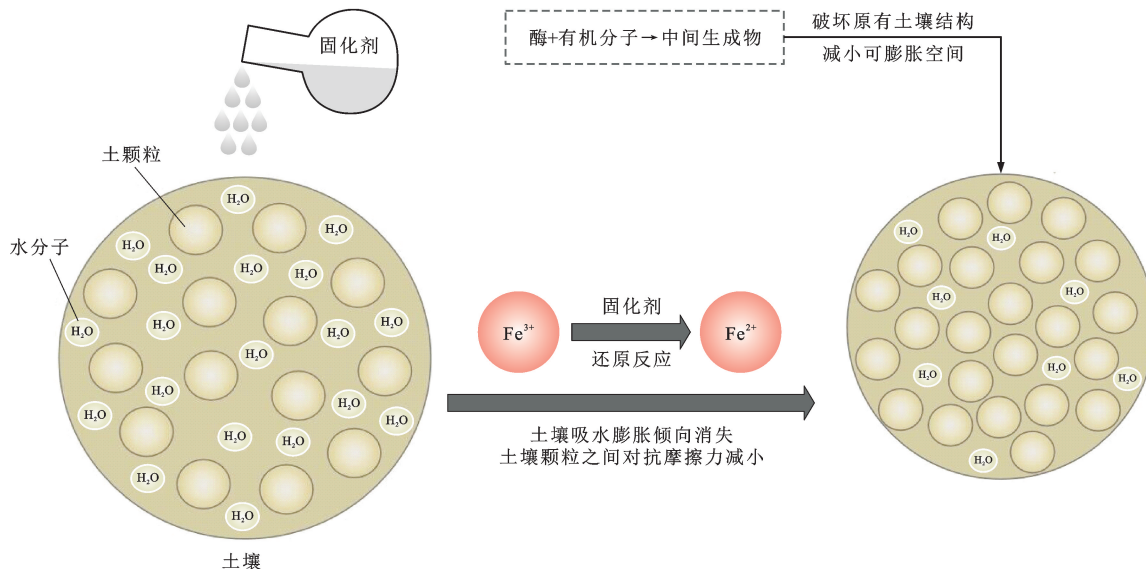


图 10 生物酶土壤固化剂固化机理

Fig. 10 Solidification mechanism of biological enzyme soil stabilizer

### 1.2 固化土的分类

不同技术规范对固化土分类也不尽相同, 如 CJJ/T 286—2018 按照力学性能指标对固化土进行分类, 如表 1 所示。T/CECS 737—2020 分别按照使用胶结料类别、成型工艺和用途将固化土进行分类, 如表 2 所示。

表 1 固化土等级划分与性能指标

Table 1 Classification and performance indexes of solidified soils

固化土等级	一级	二级	三级
7 d 无侧限抗压强度/MPa	[1.5, 2.0)	[2.0, 2.5)	[2.5, +∞)
4 h 凝结时间影响系数/%	≥90		
水稳系数/%	≥80		
28 d 抗冻性能指标/%	抗冻指数不小于 80, 质量损失率不大于 5		

表 2 固化土分类

Table 2 Classification of solidified soils

分类项目	固化土类别
胶结料类别	水泥固化土、石灰固化土、石灰-水泥固化土、石灰-粉煤灰固化土、复合胶结料固化土
成型工艺	压实型固化土、灌注型固化土、流态型固化土、喷播型固化土
用途	道路固化土、墙体固化土、防渗固化土、淤泥固化土、桩基固化土

## 2 土壤固化技术在道路工程中的应用

在道路工程中, 《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)、《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)、T/CECS 737—2020 对不同类型的基层、底基层有不同的力学指标要求, 如粒料类基层为加州承载比, 无机结合料类基层为 7 d 无侧限抗压强度、弯拉强度, 沥青结合料类基层中的沥青混合料为贯入强度等。固化土一般应用在道路基层、底基层中, 多数结合水泥、石灰等无机结合料共同作用, 属于无机结合料基层。故本文以 7 d 无侧限抗压强度为力学指标, 评判不同固化剂对土壤的固化效果与适用性。

### 2.1 不同类型土壤固化技术在道路工程中的应用

#### 2.1.1 无机土壤固化技术

当前无机土壤固化剂种类繁多, 未有统一命名标准, 但根据原材料可大致分为无钙基或低钙基固化剂, 如 F 类粉煤灰 (Class F fly ash) 或偏高岭土 (Metakaolin, MK, 高岭土的煅烧产物), 以及含钙基固化剂, 如工业废渣和矿渣等。这 2 类无机土壤固化剂都可以有效提升土壤无侧限抗压强度, 且提升幅度优于仅用水泥、石灰等传统固化材料的固化效果。虽然无机固化土 7 d 无侧限抗压强度得到显著改善, 但

这种改善程度根据无机土壤固化剂的成分、掺量和针对的土壤类型而有很大差异,如表 3 所示。

表 3 无机土壤固化技术

Table 3 Inorganic soils solidified technologies

土壤固化剂类型	土壤类型	使用地区	土壤参数			7 d 无侧限抗压强度/MPa		最佳固化剂掺量/%		文献
			液限/%	塑限/%	塑性指数	无机固化土	水泥固化土	固化剂	水泥	
SG-1(矿渣基)	低液限黏土	江苏盐城	22.9	13.8	9.1	4.1	3.5	9.0	1.0	[68]
GGBS(高炉矿渣)	粉质黏土(淤泥质土)	安徽淮南	37.4	23.5	12.9	1.0		17.0	0.0	[42]
BCS(水泥基)	粉质黏土(低液限黏土)	陕西杨凌	32.5	19.0	13.5	1.8	1.8	0.6	15.0	[40]
PS(工业废渣基)	高液限黏土	四川威远	46.0	24.0	22.0	3.0	2.0	8.0	0.0(4.0+4.0)	[23]
PS(工业废渣基)	粉质黏土(盐碱土)	青海盐湖	36.0	20.0	16.0	2.3	1.6	8.0	0.0(4.0+4.0)	[23]
PS(工业废渣基)	砂质土	河北黄骅	26.0	13.0	13.0	2.1	1.5	8.0	0.0(4.0+4.0)	[23]
PS(工业废渣基)	粉质黏土(低液限粉土)	山东东营	30.0	17.0	13.0	1.7	1.5	8.0	0.0(4.0+4.0)	[23]
SH-85(钙基)	红黏土	马来西亚柔佛省	75.0	41.0	33.0	1.0	0.2	9.0	0.0	[37]
TX-85 (NaAlSiFe, pH=12.54)	红黏土	马来西亚柔佛省	75.0	41.0	33.0	1.1	0.2	9.0	0.0	[69]
ASM(炉渣基)	高液限黏土	广东广州				2.5	1.2	7.5	12.5	[70]
MKG(无钙基)	低液限黏土	伍斯特理工学院				3.5	2.5	11.0	0.0(5.0)	[71]

Zhang 等<sup>[71]</sup>使用 MKG 固化剂对伍斯特理工学院的低液限黏土进行固化,试验结果表明 MKG 固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 3.5 MPa,而水泥固化土 7 d 无侧限抗压强度仅达 2.5 MPa,提升幅度达 40.0%;Ghadir 等<sup>[68,72-74]</sup>对低液限黏土进行处理,同样可得到使用无钙基或低钙基等无机固化剂固化土的 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度高于水泥固化土的结论。

中国使用的无机固化剂多是以工业废渣、高炉矿粉等为原材料的含钙基固化剂。孟建伟等<sup>[23]</sup>使用以工业废渣为基础的 PS 固化剂对山东东营的低液限黏土进行固化,发现 PS 固化土 7 d 无侧限抗压强度达 1.7 MPa,较未使用固化剂提升 13.3%;徐学分等<sup>[75]</sup>以矿渣基 SG-1 固化剂和水泥对江苏盐城的低液限黏土进行处理,发现 SG-1 固化土的 7 d 无侧限抗压强度较未使用固化剂提升达 17.1%;孟建伟等<sup>[23,40]</sup>对不同地区的低液限黏土进行处理也可以得到相似的结论,即含钙基固化剂固化土的 7 d 无侧限抗压强度高于水泥固化土。

国内外对其他土壤,如砂质土、高液限黏土、红黏土和盐碱土等都进行过固化剂加固处理<sup>[23,37,69]</sup>,结果显示:无机固化剂对红黏土、盐碱土等特殊土壤与砂质土、高液限黏土等粒径较大或初始含水率较高的土壤加固后,其 7 d 无侧限抗压强度均优于水泥固化土。

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中

指出,当无机结合料稳定类材料用于各等级公路基层建设时,水泥稳定类材料水泥剂量宜为 3.0%~6.0%。根据表 3 可知:以矿渣、炉渣等废渣为原材料的含钙基无机土壤固化剂多是单独使用,起到替代水泥的作用;与水泥掺量相比,含钙基无机土壤固化剂单独使用时掺量一般在 9.0%附近,高时可达 17.0%,但固化土的 7 d 无侧限抗压强度较同掺量水泥固化土平均提升 1.6 倍以上。

根据表 3 中部分数据绘制出不同土壤种类的无机固化土无侧限抗压强度与提升幅度,如图 11 所

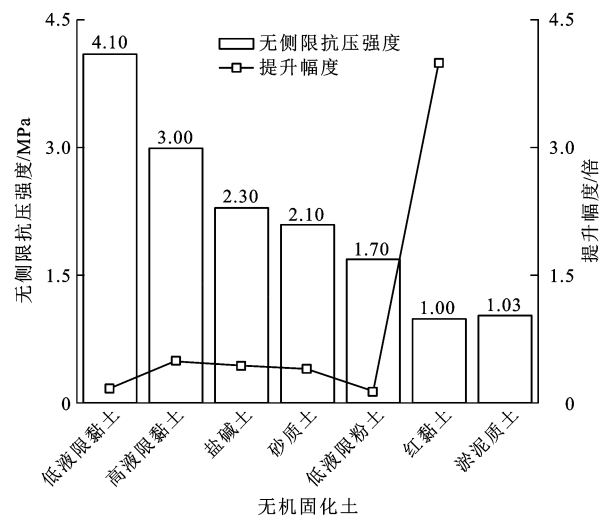


图 11 无机固化土无侧限抗压强度及其提升幅度

Fig. 11 Unconfined compressive strengths and increasing amplitudes of inorganic solidified soils

示。由表 3、图 11 可知：在固化非特殊土和有机质含量较低的特殊土上，无机土壤固化剂固化土壤后 7 d 无侧限抗压强度高于水泥固化土，无机固化土强度多数分布在 1.0 至 4.1 MPa 之间，以 7 d 无侧限抗压强度从大到小对土壤的固化情况进行排序，即固化低液限黏土、固化高液限黏土、固化盐碱土、固化砂质土、固化低液限粉土、固化淤泥质土、固化红黏土；对高、低液限黏土，固化后 7 d 无侧限抗压强度提升显著，平均比水泥固化土高 33.6% 以上；对盐碱土、砂质土，固化后 7 d 无侧限抗压强度较水泥固化土提升 17.4%~41.9%；对粉土、有机质土，固化后较水泥固化土强度有明显提升，但 7 d 无侧限抗压强度过小，无法应用于基层和底基层；以强度提升幅度来判断无机固化剂对不同土壤的固化效

果，从大到小排序为固化红黏土、固化高液限黏土、固化盐碱土、固化砂质土、固化低液限黏土，其中无机固化剂对红黏土产生了极佳的固化效果，较水泥固化提升 4.0 倍，但二者相互作用机理尚未明确，无法判断产生更好固化效果的原因。

2.1.2 离子土壤固化技术

离子土壤固化技术应用较广，如表 4 所示：陈明明等<sup>[76]</sup>用 3 种不同离子固化剂对低液限黏土进行处理，其 7 d 无侧限抗压强度均优于水泥固化土，提升幅度在 1.7 至 2.4 倍；刘蕾等<sup>[41,57,76]</sup>对低液限黏土处理后亦得出相同结论，即离子固化剂固化低液限黏土效果优于水泥；吴雪婷等<sup>[53-54,58]</sup>对黄土、淤泥质土、红黏土等特殊土进行加固，也得到良好 7 d 无侧限抗压强度。

表 4 离子土壤固化技术

Table 4 Ionic soils solidified technologies

土壤固化剂类型	土壤类型	使用地区	土壤参数			7 d 无侧限抗压强度/MPa		最佳固化剂掺量/%		文献
			液限/%	塑限/%	塑性指数	无机固化土	水泥固化土	固化剂	水泥	
EFS	粉质黏土(低液限黏土)	四川绵阳	31.0	18.36	12.7	3.2		0.020	8.500	[41]
ZL-2A	粉质黏土(黄土)	陕西榆林	24.1	12.90	11.2			0.100		[77]
EN-1	黏性土(淤泥质土)	福建宁德	50.7	31.67	19.1	4.6	2.1	0.100	9.000	[54]
YFS	粉质黏土(低液限黏土)	安徽马鞍	37.5	21.00	16.5	3.6	1.5	0.020	5.000	[76]
SA	粉质黏土(低液限黏土)	安徽马鞍	37.5	21.00	16.5	2.8	1.5	0.020	5.000	[76]
HF	粉质黏土(低液限黏土)	安徽马鞍	37.5	21.00	16.5	2.6	1.5	0.020	5.000	[76]
TK-G	黏性土	北京				3.0	2.1	0.020	6.000	[58]
EN-1	低液限黏土	浙江金华	43.1	23.20	19.1			0.020		[57]
EN-1	红黏土	浙江金华	34.9	24.40	19.5	2.9		0.014	5.000+3.000 (水泥+石灰)	[36]
EN-1	淤泥质土	福建宁德	47.8	24.50	23.3	4.6	2.7	0.020	9.000	[53]

根据表 4 中部分数据绘制出离子固化土强度与提升幅度曲线，如图 12 所示。由表 4、图 12 可知：在针对黏土、粉土等土壤时，离子固化剂协同水泥固化土 7 d 无侧限抗压强度较仅使用水泥固化效果有显著提升；固化不同土壤时，离子固化剂掺量多为 0.020%，水泥掺量为 5.000%~9.000%，相比无机固化剂所需水泥少 45.600%，比有机固化剂少 30.400%，且 7 d 无侧限抗压强度也能达到 2.6~4.6 MPa，在达到相同范围强度时，减少材料用量，可有效降低施工成本。

2.1.3 有机土壤固化技术

有机土壤固化剂中的有机成分可以分为 2 类，第 1 类是天然有机物，如树脂等；第 2 类是合成有机物，如丙烯酸酯、乙酸乙烯等。有机土壤固化剂多数同水泥共同使用，固化剂掺量为 0.015%~2.000%，如

表 5 所示。

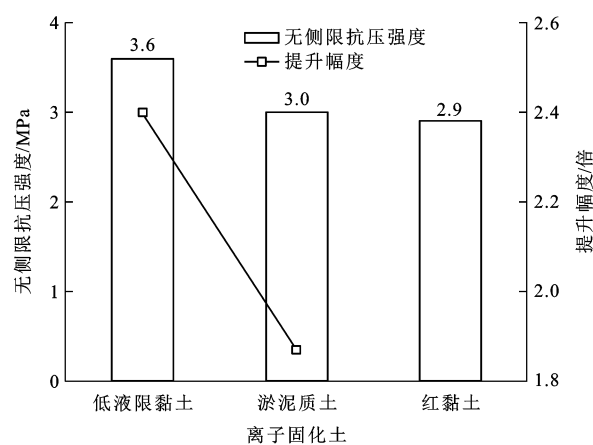


图 12 离子固化土无侧限抗压强度及其提升幅度

Fig. 12 Unconfined compressive strengths and increasing amplitudes of ionic solidified soils

表 5 有机土壤固化技术  
Table 5 Organic soils solidified technologies

土壤固化剂类型	土壤类型	使用地区	土壤参数			7 d 无侧限抗压强度/MPa		最佳固化剂掺量/%		文献
			液限/%	塑限/%	塑性指数	无机固化土	水泥固化土	固化剂	水泥	
PS(聚醋酸乙烯酯/聚甲基丙烯酸酯)	砂质土	伊朗加姆萨尔斯市	31.7	20.2	11.5	5.0		3.700		[78]
STW(乙酸-乙烯酯)	高液限黏土	江苏宁淮	52.5	32.8	19.7	2.4		30.000		[27]
SH	黄土	兰州	31.2	20.2	11.0	3.8	1.50	0.800	0.000(10.000)	[24]
GKS	红黏土	马来西亚	75.0	41.0	34.0	5.1	2.10	9.000	0.000(9.000)	[79]
TG-2(高分子聚合物)	低液限黏土	东北季节性冰冻地区	41.1	23.8	17.3	2.1	1.62	0.015	4.000+4.000	[80]
EP-W(环氧树脂)	低液限黏土砂质土	希腊塞萨洛尼基市	32.6	19.4	13.2	4.0		2.000 (ER/W)	30.000	[81]
STW(聚醋酸羧基酯)	膨胀土	江苏宁淮高速			18.9	(24 d;0.2)		1.000	0.000	[82]
E-Polymer(丙烯酸酯基)	粉土质砾-黏土质砾	中东卡塔尔				3.2	2.00	1.000	9.000	[29]
R-Polymer(丙烯酸酯基)	粉土质砾-黏土质砾	中东卡塔尔				1.9	2.00	1.000	9.000	[29]
S-Polymer(丙烯酸酯基)	粉土质砾-黏土质砾	中东卡塔尔				2.2	2.00	1.000	9.000	[29]
L-Polymer(丙烯酸酯基)	高液限粉土	美国佛罗里达州				0.9		2.000	0.000	[14]
L-Polymer(丙烯酸酯基)	高液限黏土	美国伊利诺斯州				3.0		2.000	0.000	[14]

Anagnostopoulos 等<sup>[81]</sup>用以环氧树脂为原料的 EP-W 有机固化剂对希腊砂土进行固化,当 ER/W (环氧树脂和水的比值)为 2 时,7 d 无侧限抗压强度达 1.0 MPa,28 d 无侧限抗压强度可达 5.0 MPa;同时发现,对固化土进行电渗透处理可以有效加速固化反应,提升固化土的早期力学性能。Iyengar 等<sup>[29]</sup>使用以聚丙烯酸酯为原材料的 2 种有机固化剂,即 E-Polymer 固化剂与 R-Polymer 固化剂,分别对中东卡塔尔的粉土质砾-黏土质砾(GM-GC)进行处理,结果显示:E-Polymer 固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 3.2 MPa,比水泥固化土提升 60%;但使用 R-Polymer 固化剂试验结果显示,R-Polymer 固化土和水泥固化土的 7 d 无侧限抗压强度基本一致,无明显变化。杨林等<sup>[26,80]</sup>以有机固化剂固化东北地区的低液限黏土,结果显示有机固化剂固化低液限黏土的 7 d 无侧限抗压强度效果优于水泥固化土。

有机固化土还可以单独对土壤作用,目前主要是对如红黏土、膨胀土等特殊土壤进行研究。Marto 等<sup>[79]</sup>使用 9.0%GKS 固化剂对马来西亚红黏土进行固化,固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 5.1 MPa,是同掺量水泥固化土的 2.5 倍;Kolay 等<sup>[14]</sup>单独使用 L-Polymer 有机固化剂固化高液限黏土,

其 7 d 无侧限抗压强度可达 3.0 MPa,是水泥固化土的 1.4 倍;但 Kolay 等<sup>[14,82]</sup>使用有机固化剂固化高液限粉土后却不能得到良好的固化效果。

根据表 5 中部分数据绘制出有机固化土强度与提升幅度曲线,如图 13 所示。由表 5、图 13 可知:

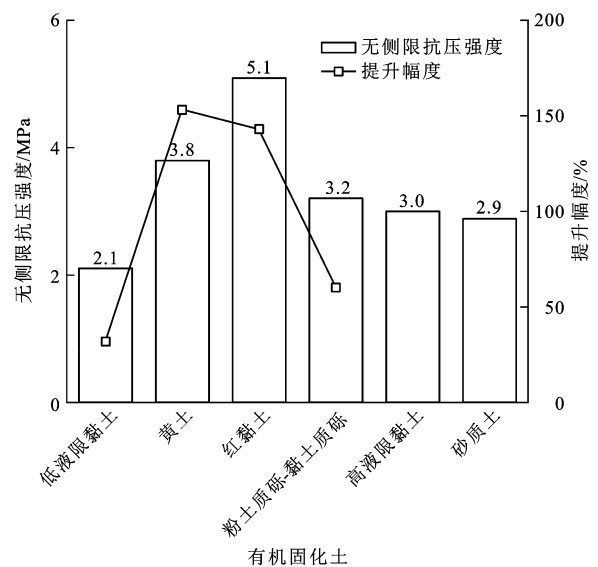


图 13 有机固化土无侧限抗压强度及其提升幅度

Fig. 13 Unconfined compressive strengths and increasing amplitudes of organic solidified soils

不管是以天然有机物还是合成有机物为原材料的有机固化剂,在固化非特殊土(高、低液限黏土等)上,无论是否加入水泥,都能起到良好的固化效果,7 d 无侧限抗压强度为 2.1~5.1 MPa;特殊土同非特殊土的固化效果差别较大,有机固化剂单独加固特殊土时效果较差,协同水泥工作时,能表现出不错的性能提升,但相比非特殊土还是有部分差距;以强度提升幅度来判断有机固化剂对不同土壤的固化效果,从大到小排序为固化红黏土、固化粉土质砾-黏土质砾、固化低液限黏土,其中有机固化剂对如黄土和红

黏土等特殊土产生了较好的固化效果,较水泥固化提升 1.5 倍,但固化剂与特殊土的作用机理尚未明确,无法判断产生更好固化效果的原因。

#### 2.1.4 生物酶土壤固化技术

生物酶土壤固化剂是以糖和聚合物分子构成的组成物<sup>[65,83]</sup>。不同类型的生物酶固化剂原材料包括瓜尔胶、黄原胶、纤维素、淀粉、壳聚糖、葡聚糖、乳酸菌等。不同生物酶土壤固化剂固化效果差异性较为显著,如表 6 所示。土壤固化剂种类虽然较多,但真正应用场景较少,目前多见应用于边坡工程。

表 6 生物酶土壤固化技术

Table 6 Biological enzyme soils solidified technologies

土壤固化剂类型	土壤类型	使用地区	土壤参数			7 d 无侧限抗压强度/MPa		最佳固化剂掺量%		文献
			液限/%	塑限/%	塑性指数	无机固化土	水泥固化土	固化剂	水泥	
路易酶	粉质黏土 (低液限黏土)	河南南阳				5.10(28 d)		0.5	5.1	[36]
复合乳酸菌	低液限黏土	辽宁沈阳	29.2	17.8	11.4	2.10		5.0	0.0	[26]
TerraZyme	高液限黏土	湖南长沙	53.8	26.4	27.4	2.10		4.0	3.0	[67]
TerraZyme	低液限黏土	湖南长沙	47.4	24.6	22.8	1.60		4.0	3.0	[67]
生物酶	单晶质黏土	喀拉拉邦 Quilandy	86.0	49.0	37.0	0.40		200.0 ml · m <sup>-3</sup>		[71]
木质素	低液限粉土	江苏盐城				0.30		12.0	0.0	[72]
葡萄糖	残余黏土(黄土)	韩国				4.30(28 d)	2.7(28 d)	4.9 g · kg <sup>-1</sup>	0.0(10.0)	[83]
黄原胶溶液	低液限黏土	土耳其				0.56		2.0	0.0	[66]
瓜尔豆胶	高液限粉土- 高液限黏土	印度泰米尔 纳德邦				0.33		2.0	0.0	[84]

生物酶协同水泥或单独固化高、低液限黏土都表现出不俗的 7 d 或 28 d 无侧限抗压强度<sup>[25,60,64,82]</sup>。孟子龙<sup>[64]</sup>用 TerraZyme 生物酶土壤固化剂分别固化高、低液限黏土,固化土 7 d 无侧限抗压强度分别为 1.6 和 2.1 MPa;户轩庆<sup>[25]</sup>使用生物酶单独固化低液限黏土,固化土 7 d 无侧限抗压强度亦达 2.1 MPa。但部分生物酶固化剂单独固化土壤效果较不理想<sup>[56,59,63,69,75]</sup>,如 Cabalar 等<sup>[66,84]</sup>使用低剂量生物酶固化黏土,7 d 无侧限抗压强度仅有 0.33~0.56 MPa。

根据表 6 中部分数据绘制出有机固化土无侧限抗压强度,如图 14 所示。由表 6、图 14 可知:不同种生物酶固化剂无论加固相同或不同种类土壤,无侧限抗压强度差异均较大;在固化黏性土时有较好的无侧限抗压强度,平均为 1.8 MPa;在固化粉土时,强度较差,平均为 0.4 MPa。

## 2.2 不同固化剂效果对比

不同固化剂对同种土壤固化效果有所差异,如图 15 所示。综合表 3~6 数据可知:4 类固化剂对非

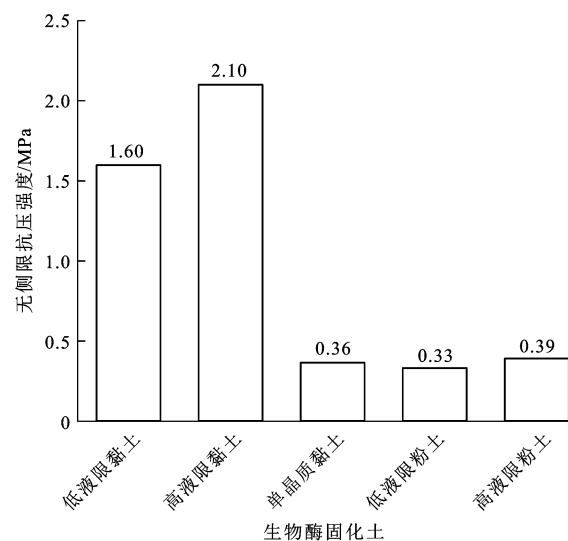


图 14 生物酶固化土无侧限抗压强度

Fig. 14 Unconfined compressive strengths of biological enzyme solidified soils

特殊土都具备较好的固化效果,无机固化土与有机固化土固化强度较好,且十分相似,二者固化低、高液限

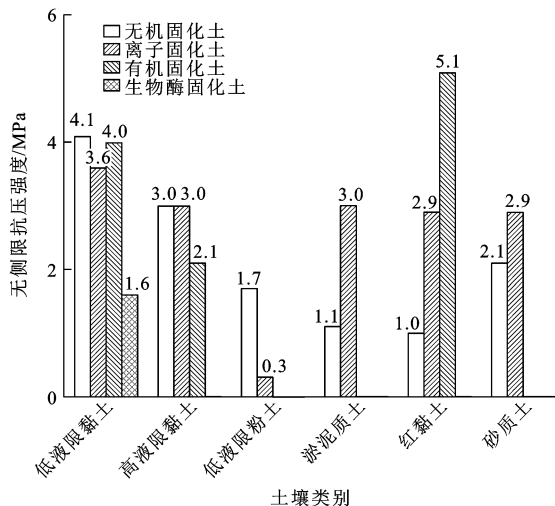


图 15 不同固化剂对土壤的固化效果

Fig. 15 Solidified effects of different stabilizers on soils

黏土的 7 d 无侧限抗压强度均为 4.0、2.9 MPa,其他固化土最小 7 d 无侧限抗压强度均在 1.5 MPa 以上;在固化如红黏土、砂质土等特殊土时,有机固化剂展现出优异的固化效果,特别是针对红土,其 7 d 无侧限抗压强度可达 5.1 MPa,有机固化剂表现如此良好,原因可能是特殊土壤中的有机质含量较大,有机固化剂能充分与土壤中的有机物更好地产生化学反应,生成更多提高固化土强度的产物,并提升土壤密实度;离子固化剂对非特殊土和特殊土都有较好且较均衡的固化效果,固化强度均在 3.0 MPa 附近;生物酶固化土的强度属四者末尾,其固化效果和固化机理还有待进一步研究;4 种固化剂中,有机固化剂对各土壤类型均有良好的固化效果,其发展前景巨大。

### 3 现有道路工程中土壤固化技术性能指标对比分析

表 7 为中外现行公路、城市道路和乡村道路中对无机固化土基层、底基层乃至面层的技术规范。中国公路、城市道路基层、底基层绝大部分以半刚性材料(无机结合料类材料)为主,占据数量达 95% 以上<sup>[85]</sup>,而国外公路、城市道路的基层、底基层多采用沥青稳定碎石等柔性材料,在设计 and 施工验收指标上有很大的差异,对半刚性基层、底基层缺少指导意义,故本文以中国相关规范作为主要分析对象。另外,本文仅将固化土与水泥稳定类基层、底基层进行对比分析。

#### 3.1 不同类型道路对强度的要求

##### 3.1.1 公路

JTG/T F20—2015、JTG D50—2017、T/CECS G:D31-01—2017、T/CECS 737—2020 对公路中水泥

表 7 基层和底基层相关规范

Table 7 Related specifications of base and sub-base

序号	规范名称	规范号
1	公路路基设计规范	JTG D30—2015
2	公路路面基层施工技术细则	JTG/T F20—2015
3	城市道路工程设计规范	CJJ 37—2010
4	土壤固化外加剂	CJ/T 486—2015
4	道路固化土应用技术规程	T/CECS 737—2020
5	土壤固化剂应用技术标准	CJJ/T 286—2018
6	城镇道路土壤固化剂稳定混合料基层技术规程	DB42/T 1014—2014
7	软土固化剂	CJ/T 526—2018
8	道路复合稳定土应用技术标准	T/CECS G:D31-01—2017
9	公路沥青路面设计规范	JTG D50—2017
10	公路水泥混凝土路面设计规范	JTG D40—2011
11	城镇道路工程施工与质量验收规范	CJJ 1—2008
12	乡村道路工程技术规范	GB/T 51224—2017
13	Stand Specification for Materials for Embankments and Sub-Bases	AASHTO Designation: M 57-80 (2017)
14	Stand Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes	AASHTO Designation: M 145-91 (2008)
15	A Policy on Geometric Design of Highway and Streets 2018 7th Edition	(GDHS-7) ISBN: 978-1-56051-676-7
16	Stand Specification for Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses	AASHTO Designation: M 147-17
17	Standard Practice for Design of Stabilization of Soil and Soil-Like Materials with Self-Cementing Fly Ash	ASTM D7762-11

稳定类基层、底基层的 7 d 无侧限抗压强度,根据不同道路等级以及交通荷载等级提出了不同要求,如表 8 所示,其中“a”为 JTG/T F20—2015,“b”为 JTG D50—2017,“c”为 T/CECS G:D31-01—2017,“d”为 T/CECS 737—2020。

公路作为最高等级与最严格要求的道路类型,应作为主要出发点和分析对象,因此,为进一步得出不同公路基层、底基层 7 d 无侧限抗压强度要求的内在联系,根据 JTG/T F20—2015、JTG D50—2017 对公路基层、底基层的不同道路等级与交通荷载的 7 d 无侧限抗压强度要求进行绘制,以红色透明区域表示不同等级公路基层、底基层强度要求的重叠部分,以红色虚线表示最小应用强度要求,如图 16 所示。

表8 公路基层和底基层7 d无侧限抗压强度要求

Table 8 7 d unconfined compressive strength requirements for bases and sub-bases in highways

类别	结构层	道路等级	规范编号	荷载等级/MPa		
				极重、特重交通	重交通	中、轻交通
水泥稳定材料、水泥 固化土、石灰-水泥 固化土、复合胶 结料固化土	基层	高速、一级公路	a	5.0~7.0	4.0~6.0	3.0~5.0
			b	5.0~7.0	4.0~6.0	3.0~5.0
			c			
			d			3.0~5.0
		二级及以下公路	a	4.0~6.0	3.0~5.0	2.0~4.0
			b	4.0~6.0	3.0~5.0	2.0~4.0
			c	4.0~6.0	3.0~5.0	2.0~4.0
			d		3.0~5.0	2.0~4.0
	底基层	高速、一级公路	a	3.0~5.0	2.5~4.5	2.0~4.0
			b	3.0~5.0	2.5~4.5	2.0~4.0
			c	3.0~5.0	2.5~4.5	2.0~4.0
			d	3.0~5.0	2.5~4.5	2.0~4.0
		二级及以下公路	a	2.5~4.5	2.0~4.0	1.0~3.0
			b	2.5~4.5	2.0~4.0	1.0~3.0
			c	2.5~4.5	2.0~4.0	1.0~3.0
			d	2.5~4.5	2.0~4.0	1.0~3.0

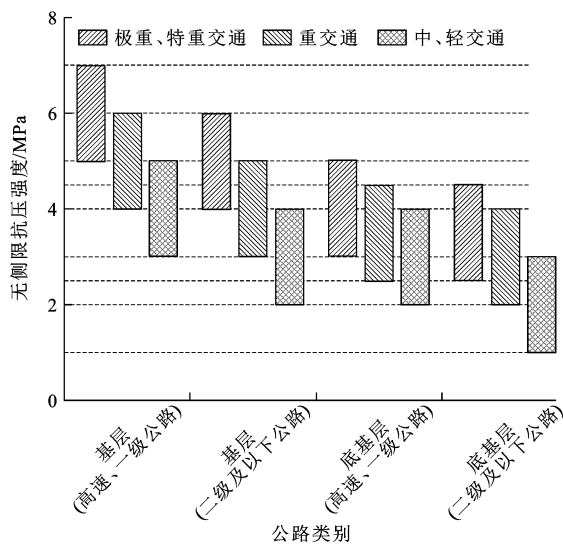


图16 不同道路等级、交通荷载的公路基层与底基层的7 d无侧限抗压强度要求

Fig. 16 7 d unconfined compressive strength requirements for bases and sub-bases with different road levels and traffic volumes

从表8和图16可知:对水泥稳定类材料,2.0 MPa是判断其能否应用于公路基层的最小值,3.0 MPa是区分其能否应用于高速、一级公路或二级及以下公路基层的分界值,5.0 MPa是判断其能否应用于极重、特重交通的高速、一级公路基层的最小值;1.0 MPa是判断其能否应用于公路底基层的最小值,2.0 MPa是区分其能否应用于高速、一级

公路或二级及以下公路底基层的分界值,2.5 MPa是判断其能否应用于极重、特重交通的高速、一级公路底基层的最小值,3.0 MPa是判断其能否应用于重交通的高速、一级公路底基层的最小值,4.0 MPa是判断其能否应用于极重、特重交通的二级及以下公路底基层的最小值;对于应用在公路基层、底基层的水泥稳定类材料,其7 d无侧限抗压强度要求大部分集中在 $[2.0, 6.0]$  MPa,最小7 d无侧限抗压强度要求而构成的阈值区间为 $[1.0, 5.0]$  MPa,将二者区间取交集,结果为 $[2.0, 5.0]$  MPa,该区间表示,在最大重合区域内满足公路所有工况最小7 d无侧限抗压强度要求的范围。

### 3.1.2 城镇道路

《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)、CJJ/T 286—2018和T/CECS 737—2020对城镇道路中水泥稳定类材料上基层、下基层的7 d无侧限抗压强度,根据结构层位置与交通荷载等级也提出了不同要求,如表9所示,其中“d”为T/CECS 737—2020,“e”为CJJ 169—2012,“f”为CJJ/T 286—2018。

以公路作为主要分析对象,对城镇道路则依据公路分析方式进行简要阐述,从表9可知:对于水泥稳定类材料,2.5 MPa是判断其能否应用上基层与特重荷载下基层的最小值,3.5 MPa是判断其能否

表 9 城镇道路上基层和下基层 7 d 无侧限抗压强度要求

Table 9 7 d unconfined compressive strength requirements for bases and sub-bases in urban roads

类别	结构层	规范编号	荷载等级/MPa		
			特重交通	重、中交通	轻交通
水泥稳定材料、水泥固化土、石灰-水泥固化土、复合胶结料固化土	上基层	e	3.5~4.5	3.0~4.0	2.5~3.5
		f			≥2.5
		d		3.0~4.0	2.5~3.5
	下基层	e	≥2.5	≥2.0	≥1.5
		f	≥2.5	≥2.0	≥1.5
		d	≥2.5	≥2.0	≥1.5

应用特重荷载上基层的最小值,1.5 MPa 是判断其能否应用下基层的最小值;对于应用在城镇道路上基层、下基层的水泥稳定类材料,其 7 d 无侧限抗压强度要求大部分集中在 $[1.5, 4.0]$ MPa,最小 7 d 无侧限抗压强度要求而构成的阈值区间为 $[1.5, 3.5]$ MPa,将二者区间取交集,结果为 $[1.5, 3.5]$ MPa。

### 3.1.3 乡村道路

GB/T 51224—2017 和 T/CECS 737—2020 对乡村道路水泥稳定类材料基层和面层,根据道路等级提出了不同要求,如表 10 所示,其中“d”为 T/CECS 737—2020,“g”为 GB/T 51224—2017。

表 10 乡村道路基层和面层 7 d 无侧限抗压强度要求

Table 10 7 d unconfined compressive strength requirements for bases and surfaces in rural roads

类别	结构层	规范编号	荷载等级/MPa		
			干路	支路	巷路
水泥稳定材料、水泥固化土、石灰-水泥固化土、复合胶结料固化土	基层	g	2.0~4.0		
		d	2.0~4.0	1.0~3.0	
	面层	d	≥4.0	≥3.5	≥2.5

乡村道路同城镇道路,依据公路分析方式进行简要阐述,从表 10 可知:对于水泥稳定类材料,1.0 MPa 是判断其能否应用基层的最小值,2.5 MPa 是判断其能否应用面层的最小值,4.0 MPa 是判断其能否应用干路面层的最小值;对于应用在乡村道路基层、面层的水泥稳定类材料,其 7 d 无侧限抗压强度要求大部分集中在 $[2.0, 4.0]$ MPa,最小 7 d 无侧限抗压强度要求而构成的阈值区间为 $[1.0, 4.0]$ MPa,将二者区间取交集,结果为 $[2.0, 4.0]$ MPa。

将表 8~10 所得出的公路、城镇道路和乡村道路交集区间进行合并,即 $[2.0, 5.0]$ MPa  $\cup$   $[1.5, 3.5]$ MPa  $\cup$   $[2.0, 4.0]$ MPa,所得区间为 $[1.5, 5.0]$ MPa。该区间表示,在所属道路种类的最大重合区域内满足该种类所有工况的最小 7 d 无侧限抗压强度力值

要求范围的合集。

### 3.2 对细化固化土等级的建议

现行规范对固化土的等级分类为三级(一级 $[1.5, 2.0)$ MPa、二级 $[2.0, 2.5)$ MPa 与三级 $[2.5, +\infty)$ MPa),其中对三级固化土的分类比较宽泛,导致三级固化土无法与 3 类道路种类最小 7 d 无侧限抗压强度区间 $[1.5, 5.0]$ MPa 相匹配,在应用过程中存在一定的不利性。

为此,结合固化土的进展,考虑区分固化土应用于不同道路结构层和交通荷载等级的强度要求,本文以 3 种不同道路类别中使用要求最大的公路为对象,以其基层、底基层的不同道路等级与交通荷载等级要求的最小强度阈值要求 2.5、3.0、4.0、5.0 MPa 为关键点参考,建议将固化土的等级分类进行细化,即在三级 $[2.5, 3.0)$ MPa 的基础上,新增四级 $[3.0, 4.0)$ MPa、五级 $[4.0, 5.0)$ MPa 和六级 $[5.0, +\infty)$ MPa,以便使固化土等级能更好匹配不同道路等级与交通等级的结构层对强度的技术要求。

根据新增 3 种分类的固化土等级,提出不同固化土等级所对应的不同道路类型、等级和交通等级的公路、城镇道路和乡村道路的应用层位,分别如表 11~13 所示。其中,“√”表示可应用,空白表示不能应用。公路、城镇道路与乡村道路的一级、二级固化土应用范围仍分别与 JTG/T F20—2015、T/CECS 737—2020、CJJ 1—2008 和 GB/T 51224—2017 等规范保持一致。

### 3.3 对新增“有机固化土”的建议

目前,各类固化剂中,因有机土壤固化剂一般不与无机结合料共同使用,故规范未对其进行相关的技术规定,但有机固化土适用性较强,有望在特殊土壤地区广泛推广应用。有机固化土同无机固化土在 7 d 无侧限抗压强度范围差异较小,且二者所适用土壤类别较为相近,可在不同道路类型、等级、交通等级和结构层中进行应用,因此,十分有必要对其进行相关的技术规定,以规范其应用。故建议新增“有机固化土”类别,对其在不同应用结构层中的技术指标可与无机固化土保持一致。

## 4 结 语

(1)在固化非特殊土(高、低液限黏土等)时,4 类固化剂都表现出优于同掺量水泥的固化效果,无机固化剂和有机固化剂固化效果最佳;在固化粉土和特殊土(红土、盐渍土、软土等)时,有机固化剂相比其他 3 类固化剂,表现出较好的固化效果。

表 11 公路固化土等级要求

Table 11 Grade requirements for highway solidified soils

固化土等级	结构层	道路等级	荷载级别		
			极重、特重交通	重交通	中、轻交通
六级[5.0,+∞)MPa	基层	高速、一级公路	√	√	√
		二级及以下公路	√	√	√
	底基层	高速、一级公路	√	√	√
		二级及以下公路	√	√	√
五级[4.0,5.0)MPa	基层	高速、一级公路		√	√
		二级及以下公路	√	√	√
	底基层	高速、一级公路	√	√	√
		二级及以下公路	√	√	√
四级[3.0,4.0)MPa	基层	高速、一级公路			√
		二级及以下公路		√	√
	底基层	高速、一级公路	√	√	√
		二级及以下公路	√	√	√
三级[2.5,3.0)MPa	基层	高速、一级公路			
		二级及以下公路			√
	底基层	高速、一级公路		√	√
		二级及以下公路	√	√	√

表 12 城镇道路固化土等级要求

Table 12 Grade requirements for urban road solidified soils

固化土等级	结构层	荷载级别		
		极重、特重交通	重交通	中、轻交通
六级 [5.0,+∞)MPa	上基层	√	√	√
	下基层	√	√	√
五级 [4.0,5.0)MPa	上基层	√	√	√
	下基层	√	√	√
四级 [3.0,4.0)MPa	上基层	√	√	√
	下基层	√	√	√
三级 [2.0,3.0)MPa	上基层			√
	下基层	√	√	√

表 13 乡村道路固化土等级要求

Table 13 Grade requirements for country road solidified soils

固化土等级	结构层	荷载级别		
		干路	支路	巷路
六级 [5.0,+∞)MPa	面层	√	√	√
	基层	√	√	√
五级 [4.0,5.0)MPa	面层	√	√	√
	基层	√	√	√
四级 [3.0,4.0)MPa	面层		√	√
	基层	√	√	√
三级 [2.0,3.0)MPa	面层			√
	基层	√	√	√

(2)无机、有机和生物酶 3 类固化剂既可以协同水泥使用,也可以单独使用,起到代替水泥的作用。无机土壤固化剂单独使用掺量一般为 9.000%;有机和生物酶土壤固化剂掺量根据土壤不同有较大出入;离子土壤固化剂都是协同水泥作用,固化剂掺量多为 0.020%,水泥掺量为 5.000%~9.000%。

(3)有机固化剂对固化特殊土有较好的适用性,且其与无机固化剂对固化非特殊土的 7 d 无侧限抗压强度范围差异较小,但现行规范中均没有对有机固化土的技术规定,建议后续规范修订时,新增“有机固化土”这一类别,其技术指标可与无机固化土保持一致。

(4)结合固化土的研究进展,建议进一步细化固化土的等级,在原有三级的基础上,新增四级[3.0,4.0)MPa、五级[4.0,5.0)MPa 和六级[5.0,+∞)MPa 3 种,并提出不同固化土等级所对应的不同道路类型、等级和交通等级的公路、城镇道路和乡村道路的应用层位。

(5)土壤种类繁多,相同类型土壤内部组分均有不小差异性,后续可针对内部组分不同的同类别土壤展开更为深入的研究;有机固化剂与作用于特殊土的固化机理尚未明确,生物酶固化剂的整体固化机理还有待研究,探明不同固化剂的固化机理有助于更好提升固化效果以及对不同土壤的适配性;同

时,有机固化剂与特殊土的适配性较好,后续应拓展有机固化剂与更多种类特殊土的强度研究。

### 参考文献:

### References:

- [1] 张正一,王朝辉,张廉,等.中国绿色公路建设与评估技术[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):76-86.  
ZHANG Zheng-yi, WANG Chao-hui, ZHANG Lian, et al. Construction and assessment technology of green road in China[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(5): 76-86. (in Chinese)
- [2] 高志伟,刘鲁清,肖绪荡,等.热阻沥青混合料研究进展[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1):125-134.  
GAO Zhi-wei, LIU Lu-qing, XIAO Xu-dang, et al. Research progress of thermal resistance asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 125-134. (in Chinese)
- [3] 王朝辉,刘鲁清,韩晓霞,等.路用多孔页岩陶粒表面修饰优化[J].中国公路学报,2019,32(4):196-206.  
WANG Chao-hui, LIU Lu-qing, HAN Xiao-xia, et al. Optimization of surface modification of porous expanded shale[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 196-206. (in Chinese)
- [4] 樊恒辉,高建恩,吴普特.土壤固化剂研究现状与展望[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2):141-146, 152.  
FAN Heng-hui, GAO Jian-en, WU Pu-te. Prospect of researches on soil stabilizer[J]. Journal of Northwest Science Technology University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, 34(2): 141-146, 152. (in Chinese)
- [5] 米吉福,汪浩,刘晶冰,等.土壤固化剂的研究及应用进展[J].材料导报,2017,31(增1):388-391,401.  
MI Ji-fu, WANG Hao, LIU Jing-bing, et al. Research and application progress of soil stabilizer[J]. Materials Review, 2017, 31(S1): 388-391, 401. (in Chinese)
- [6] 张冠华,牛俊,孙金伟,等.土壤固化剂及其水土保持应用研究进展[J].土壤,2018,50(1):28-34.  
ZHANG Guan-hua, NIU Jun, SUN Jin-wei, et al. Soil stabilizer and its application in soil and water conservation: a review[J]. Soils, 2018, 50(1): 28-34. (in Chinese)
- [7] 李沛,杨武,邓永锋,等.土壤固化剂发展现状和趋势[J].路基工程,2014(3):1-8.  
LI Pei, YANG Wu, DENG Yong-feng, et al. Status quo and trend of soil stabilizer development[J]. Subgrade Engineering, 2014(3): 1-8. (in Chinese)
- [8] 周永祥,阎培渝.土壤加固技术及其发展[J].铁道科学与工程学报,2006,3(4):35-40.  
ZHOU Yong-xiang, YAN Pei-yu. Soil reinforcement techniques and their evolvement[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 35-40. (in Chinese)
- [9] 王银梅,高立成.黄土化学改良试验研究[J].工程地质学报,2012,20(6):1071-1077.  
WANG Yin-mei, GAO Li-cheng. Experimental research on chemical improvement of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 1071-1077. (in Chinese)
- [10] 周海龙,申向东.土壤固化剂的应用研究现状与展望[J].材料导报,2014,28(9):134-138.  
ZHOU Hai-long, SHEN Xiang-dong. Application research situation and prospect of soil stabilizer[J]. Materials Review, 2014, 28(9): 134-138. (in Chinese)
- [11] 力乙鹏,李婷.土壤固化剂的固化机理与研究进展[J].材料导报,2020,34(增2):1273-1277,1298.  
LI Yi-peng, LI Ting. Stability mechanism and research progress of soil stabilizer[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1273-1277, 1298. (in Chinese)
- [12] REZAEIMALEK S, NASOURI A, HUANG Jie, et al. Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2017, 4(2): 145-155.
- [13] ZHU Yan, YU Xiang-juan, GAO Lei, et al. Unconfined compressive strength of aqueous polymer-modified saline soil[J]. International Journal of Polymer Science, 2019, 2019: 1-11.
- [14] KOLAY P K, DHAKAL B. Geotechnical properties and microstructure of liquid polymer amended fine-grained soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(3): 2479-2491.
- [15] ONYEJEKWE S, GHATAORA G S. Effect of fiber inclusions on flexural strength of soils treated with nontraditional additives[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(8): 04014039.
- [16] 刘竹,关大博,魏伟.中国二氧化碳排放数据核算[J].中国科学:地球科学,2018,48(7):878-887.  
LIU Zhu, GUAN Da-bo, WEI Wei. Carbon emission accounting in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(7): 878-887. (in Chinese)
- [17] 朱淑瑛,刘惠,董金池,等.中国水泥行业二氧化碳减排技术及成本研究[J].环境工程,2021,39(10):15-22.  
ZHU Shu-ying, LIU Hui, DONG Jin-chi, et al. Mitigation technologies and marginal abatement cost curves for cement industry in China[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 15-22. (in Chinese)
- [18] 张桂珍.水泥生产过程中二氧化碳减排潜力分析[J].四川水泥,2016(2):5.  
ZHANG Gui-zhen. Potential analysis of carbon dioxide emission reduction in cement production[J]. Sichuan Cement, 2016(2): 5. (in Chinese)
- [19] ZUBERI M J S, PATEL M K. Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction potentials in the Swiss cement industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 4294-4309.
- [20] 何峰,刘峥延,邢有凯,等.中国水泥行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J].气候变化研究进展,2021,17(4): 400-409.

- HE Feng, LIU Zheng-yan, XING You-kai, et al. Co-control effect evaluation of the energy saving and emission reduction measures in Chinese cement industry[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(4): 400-409. (in Chinese)
- [21] LIU Zhu, CIAIS P, DENG Zhu, et al. Carbon monitor, a near-real-time daily dataset of global CO<sub>2</sub> emission from fossil fuel and cement production[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 392.
- [22] 刘姚君,汪 澜.水泥窑协同处置固体废物技术减排潜力与成本分析[J]. *水泥*, 2018(3):11-14.  
LIU Yao-jun, WANG Lan. Emission reducing potential and cost analysis of technology of co-processing of hazardous wastes in cement kilns[J]. *Cement*, 2018(3): 11-14. (in Chinese)
- [23] 孟建伟,华苏东,姚 晓.废渣基土壤固化剂与不同土质的适应性研究[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(8):77-80,91.  
MENG Jian-wei, HUA Su-dong, YAO Xiao. Research on the adaptation to different soils with waste residue-based soil solidification agent[J]. *New Building Materials*, 2016, 43(8): 77-80, 91. (in Chinese)
- [24] 王银梅,韩文峰,谌文武.新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(11):1761-1765.  
WANG Yin-mei, HAN Wen-feng, CHEN Wen-wu. Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1761-1765. (in Chinese)
- [25] 户轩庆.生物酶固化剂在边坡工程中的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.  
HU Xuan-qing. The experimental study on soil stabilizer of biological enzyme in slope engineering[D]. Shenyang: Shenyang University, 2018. (in Chinese)
- [26] 杨 林,朱金莲.冻融条件TG固化剂石灰土无侧限抗压强度影响因素试验研究[J]. *中外公路*, 2016, 36(5):238-242.  
YANG Lin, ZHU Jin-lian. Experimental study on influencing factors of unconfined compressive strength of lime soil with TG curing agent under freezing and thawing conditions[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2016, 36(5): 238-242. (in Chinese)
- [27] LIU Jin, SHI Bin, JIANG Hong-tao, et al. Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer[J]. *Engineering Geology*, 2011, 117(1/2): 114-120.
- [28] 张春东,丁永明,苗 华,等. EFS 固化道路基层路用性能试验研究[J]. *施工技术*, 2020, 49(3):14-17.  
ZHANG Chun-dong, DING Yong-ming, MIAO Hua, et al. Experimental study on pavement performance of EFS solidified road subgrade[J]. *Construction Technology*, 2020, 49(3): 14-17. (in Chinese)
- [29] IYENGAR S R, MASAD E, RODRIGUEZ A K, et al. Pavement subgrade stabilization using polymers; characterization and performance[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(4): 472-483.
- [30] KUSHWAHA P, CHAUHAN A S, SWAMI S, et al. Investigating the effects of nanochemical-based ionic stabilizer and co-polymer on soil properties for pavement construction[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 15(3): 379-388.
- [31] 李焕弟,缴锡云,李 江,等.基于 MICP 及 EICP 技术的土壤固化试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(7):59-65.  
LI Huan-di, JIAO Xi-yun, LI Jiang, et al. Using microbe-induced calcite precipitation and enzyme-induced carbonate precipitation to cement slopes of earth ditches[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(7): 59-65. (in Chinese)
- [32] 李元元,王占礼,刘俊娥,等.喷施中性多聚糖对黄土坡面降雨入渗的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4):844-853.  
LI Yuan-yuan, WANG Zhan-li, LIU Jun-e, et al. Effect of spraying jag S on rain water infiltration on loess slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 844-853. (in Chinese)
- [33] 姬红利,颜 蓉,李运东,等.施用土壤改良剂对磷素流失的影响研究[J]. *土壤*, 2011, 43(2):203-209.  
JI Hong-li, YAN Rong, LI Yun-dong, et al. Effects of soil ameliorants on phosphorus loss[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 203-209. (in Chinese)
- [34] 杨明坤,王芳辉,姚 洋,等.一种新型环保固沙剂的制备与性能研究[J]. *材料研究学报*, 2012, 26(3):225-230.  
YANG Ming-kun, WANG Fang-hui, YAO Yang, et al. Preparation and sanding-fixing properties of a new-type environment friendly sand-fixing agent[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2012, 26(3): 225-230. (in Chinese)
- [35] DAVIDOVITS J. Geopolymer chemistry and sustainable development[C]// *Geopolymer Institute: Proceedings of the World Congress Geopolymer*. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2005: 9-15.
- [36] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(2): 04016204.
- [37] LATIFI N, MARTO A, EISAZADEH A. Physicochemical behavior of tropical laterite soil stabilized with non-traditional additive[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(2): 433-443.
- [38] LATIFI N, MARTO A, EISAZADEH A. Structural characteristics of laterite soil treated by SH-85 and TX-85 (non-traditional) stabilizer[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 18: 1707-1718.
- [39] HUANG Jian-xin, KOGBARA R B, HARIHARAN N, et al. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 305: 124685.
- [40] 刘世皎,樊恒辉,史 祥,等. BCS 土壤固化剂固化土的耐久性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(12): 214-220.  
LIU Shi-jiao, FAN Heng-hui, SHI Xiang, et al. Durability of stabilized soil by BCS[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 214-220. (in Chinese)
- [41] 刘 蕾,姚 勇,陈代果,等. EFS 固化道路基层经济指标分析[J]. *施工技术*, 2020, 49(3):22-25.  
LIU Lei, YAO Yong, CHEN Dai-guo, et al. Analysis of

- economic indicators of EFS solidified road subgrade[J]. Construction Technology, 2020, 49(3): 22-25. (in Chinese)
- [42] 鲁惠中. 利用响应面中心组合法固化淮南瓦埠湖软土优化研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2020.
- LU Hui-zhong. Optimization research for stabilizing the wabu lake soft soil in Huainan using central composite design of response surface methodology[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020. (in Chinese)
- [43] LIU Jin, WANG Yong, LU Yi, et al. Effect of polyvinyl acetate stabilization on the swelling-shrinkage properties of expansive soil[J]. International Journal of Polymer Science, 2017, 2017: 1-8.
- [44] LIU Jin, CHEN Zhi-hao, KANUNGO D P, et al. Topsoil reinforcement of sandy slope for preventing erosion using water-based polyurethane soil stabilizer[J]. Engineering Geology, 2019, 252: 125-135.
- [45] LIU Jin, CHEN Zhi-hao, SONG Ze-zhuo, et al. Tensile behavior of polyurethane organic polymer and polypropylene fiber-reinforced sand[J]. Polymers, 2018, 10(5): 499.
- [46] LIU Jin, QI Xiao-hui, ZHANG Da, et al. Study on the permeability characteristics of polyurethane soil stabilizer reinforced sand[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1-14.
- [47] MOHAMED S W A. Stabilization of desert sand using water-borne polymers[D]. Al Ain: United Arab Emirates University, 2004.
- [48] ZHANG Tao, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt[J]. Engineering Geology, 2015, 196: 1-11.
- [49] INDRARATNA B, MUTTUVEL T, KHABBAZ H, et al. Predicting the erosion rate of chemically treated soil using a process simulation apparatus for internal crack erosion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(6): 837-844.
- [50] CHANG I, IM J, CHO G C. Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(10): 1658-1670.
- [51] 何国平,蔡天德,陈 双,等. 土质固化剂对水泥土力学特性的影响及机理研究[J]. 中国测试, 2021, 47(6): 63-67.
- HE Guo-ping, CAI Tian-de, CHEN Shuang, et al. Research on the effect and mechanism of soil curing agent on mechanical properties of cement soil[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(6): 63-67. (in Chinese)
- [52] LUO Xiao-hua, XU Wen-yi, QIU Xin, et al. Exploring the microstructure characteristics and mechanical behavior of the ionic soil stabilizer-treated clay[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(15): 729.
- [53] 吴雪婷,齐 一,吴 迪,等. EN-1 型离子土固化剂固土效果对比研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(8): 1-7.
- WU Xue-ting, QI Yi, WU Di, et al. Comparative study on the effect of EN-1 ionic soil stabilizer on soil solidification[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021, 49(8): 1-7. (in Chinese)
- [54] 吴雪婷,程明峰,唐 杉,等. ISS—水泥联合固化淤泥的微观机理研究[J]. 工程勘察, 2020, 48(1): 14-19.
- WU Xue-ting, CHENG Ming-feng, TANG Shan, et al. Micro-mechanism of combined solidification for silt with ISS and cement[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(1): 14-19. (in Chinese)
- [55] ROBERTS K, KOWALEWSKA J, FRIBERG S. The influence of interactions between hydrolyzed aluminum ions and polyacrylamides on the sedimentation of kaolin suspensions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1974, 48(3): 361-367.
- [56] ZHI Xi-lan, WANG Wei-na, CAI Yi-chang. Cost-benefit timing for applying slurry seal on actual roadway tests in China[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2394-2402.
- [57] 杨 青,罗小花,邱 欣,等. 离子土壤固化剂固化土的微观结构特征及固化机理研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 33-40.
- YANG Qing, LUO Xiao-hua, QIU Xin, et al. Analysis of microstructure characteristics and stabilization mechanism of ionic soil stabilizer treated clay[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 33-40. (in Chinese)
- [58] 游庆龙,邱 欣,杨 青,等. 离子土壤固化剂固化红黏土强度特性[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 64-71.
- YOU Qing-long, QIU Xin, YANG Qing, et al. Strength properties of ionic soil stabilizer treated red soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 64-71. (in Chinese)
- [59] 杨富民,何军利,孙成晓,等. TK-G 型液体土壤固化剂的研制及其固化机理[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 242-246.
- YANG Fu-min, HE Jun-li, SUN Cheng-xiao, et al. Development and curing mechanism of TK-G soil solidified agent[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 242-246. (in Chinese)
- [60] 吕寒雪,冯瑞莹,王 浩. 土壤固化剂在现代路面基层和底基层中的应用[J]. 环渤海经济瞭望, 2019(7): 198-200.
- LYU Han-xue, FENG Rui-ying, WANG Hao. Application of soil curing agent in modern pavement base and subbase [J]. Economic Outlook the Bohai Sea, 2019(7): 198-200. (in Chinese)
- [61] MOEN D E, RICHARDSON J L. Ultrasonic dispersion of soil aggregates stabilized by polyvinyl alcohol and T403-glyoxal polymers[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(3): 628-631.
- [62] RICHARDSON J L, GUNNERSON W T, GILES J F. Influence of in situ two-phase polymers on aggregate stabilization in various textured North Dakota soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1987, 67(1): 209-213.
- [63] EUJINE G N, SOMERVELL L T, CHANDRAKARAN S, et al. Enzyme stabilization of high liquid limit clay[J]. 2014, 19: 6989-6995.
- [64] 孟子龙. 生物酶固化技术在道路基层中的应用研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2012.
- MENG Zi-long. The research on application of bio-enzyme stabilizer on road base construction[D]. Changsha: Changsha

- University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [65] CHANG I, LEE M, TRAN T P A, et al. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 24: 100385.
- [66] CABALAR A F, AWRAHEEM M H, KHALAF M M. Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(8): 04018170.
- [67] 孙振平, 吕文斌, 孙广花. 派酶改善土壤密实性和强度的效果及其机理研究[J]. *新型建筑材料*, 2010, 37(10): 87-90.  
SUN Zhen-ping, LYU Wen-bin, SUN Guang-hua. Investigation on the enhancing efficiency and acting mechanism of PERMAZYME on densification and strength of soil[J]. *New Building Materials*, 2010, 37(10): 87-90. (in Chinese)
- [68] GHADR P, RANJBAR N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 361-371.
- [69] LATIFI N, EISAZADEH A, MARTO A. Strength behavior and microstructural characteristics of tropical laterite soil treated with sodium silicate-based liquid stabilizer[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(1): 91-98.
- [70] YU Jia-ren, CHEN Yong-hui, CHEN Geng, et al. Experimental study of the feasibility of using anhydrous sodium metasilicate as a geopolymer activator for soil stabilization[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105316.
- [71] ZHANG Mo, GUO Hong, EL-KORCHI T, et al. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 1468-1478.
- [72] ZHANG Mo, ZHAO Meng-xuan, ZHANG Guo-ping, et al. Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 108: 199-207.
- [73] DU Yan-jun, YU Bo-wei, JIANG Ning-jun, et al. Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(2): 04016217.
- [74] BILONDI M P, TOUFIGH M M, TOUFIGH V. Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 170: 302-313.
- [75] 徐学分, 潘志华, 李洪马. SG-1 型土壤固化剂固化土的实验研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(16): 126-129.  
XU Xue-fen, PAN Zhi-hua, LI Hong-ma. Experimental study on soil stabilized by SG-1 soil stabilizer[J]. *Materials Review*, 2014, 28(16): 126-129. (in Chinese).
- [76] 陈明明, 黄伟, 邱鹏, 等. 离子型土壤固化剂固化土基层试验研究[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(1): 97-103.  
CHEN Ming-ming, HUANG Wei, QIU Peng, et al. Experimental study on solidification of soil base with ionic soil solidification agent[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2021, 38(1): 97-103. (in Chinese)
- [77] 邢明亮, 梁志豪, 关博文, 等. 离子型土壤固化剂在公路工程应用中均匀性评价与控制[J]. *公路*, 2019, 64(10): 34-40.  
XING Ming-liang, LIANG Zhi-hao, GUAN Bo-wen, et al. Evaluation and control of uniformity of ionic soil curing agent in highway project application[J]. *Highway*, 2019, 64(10): 34-40. (in Chinese)
- [78] ZANDIEH A R, YASROBI S S. Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(2): 139-145.
- [79] MARTO A, LATIFI N, SOHAEI H. Stabilization of laterite soil using GKS soil stabilizer[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 18 C: 521-532.
- [80] 杨林, 张秉夏. TG-2 型土壤固化剂水泥石灰土的强度和稳定性试验[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(9): 27-32.  
YANG Lin, ZHANG Bing-xia. Strength and stability test for cement-lime stabilized clay with TG-2 soil solidifying agent[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(9): 27-32. (in Chinese)
- [81] ANAGNOSTOPOULOS C A, KANDILIOTIS P, LOLA M, et al. Improving properties of sand using epoxy resin and electrokinetics[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(4): 859-872.
- [82] 江臣, 施斌, 刘发, 等. 宁淮高速公路膨胀土边坡生态土壤稳定剂土质改性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(5): 507-512.  
JIANG Chen, SHI Bin, LIU Fa, et al. Study on soil improvement of expansive soil slope with ecotypic soil stabilizer in Ning-Huai expressway[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(5): 507-512. (in Chinese)
- [83] CHANG I, CHO G C. Strengthening of Korean residual soil with  $\beta$ -1, 3/1, 6-glucan biopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 30-35.
- [84] SUJATHA E R, SAISREE S. Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(6): 2155-2166.
- [85] 蒋亮. 长寿命沥青路面基层适应性以及设计与施工控制一体化研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.  
JIANG Liang. Study on basement adaptability and integration of basement design and construction of long-life asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)