

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.090



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 地质聚合物固化土研究现状及展望

罗正东<sup>1</sup>, 章本本<sup>1</sup>, 苏永华<sup>2</sup>, 蒋波<sup>1</sup>, 李政阳<sup>1</sup>

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105; 2. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

**摘要:** 随着对地质聚合物研究的不断深入, 将其作为固化剂应用于土壤固化领域的研究受到了广泛关注。地质聚合物作为一种新兴的土壤固化剂, 是一种以富硅铝酸盐矿物为前驱体, 在碱激发剂作用下形成的绿色无机胶凝材料, 具有力学性能良好、耐久性优异以及低碳环保等优点, 能够有效克服水泥/石灰等传统土壤固化剂能耗高、污染大以及耐久性差等缺点, 被普遍认为是传统土壤固化剂的理想替代品。为明确地质聚合物对土壤的加固机理和增强效果, 回顾近年来地质聚合物固化土的研究进展, 介绍地质聚合物固化土的反应机理, 详述不同因素对地质聚合物固化土无侧限抗压强度和抗剪强度等力学性能的影响, 讨论地质聚合物固化土在冻融循环、干湿循环以及化学离子侵蚀等作用下的耐久性, 并对地质聚合物固化土技术未来发展方向进行展望。

**关键词:** 地质聚合物; 固化土; 土壤固化剂; 反应机理; 力学性能; 耐久性

**中图分类号:** TU472.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)06-0031-13

## State-of-the-art research and prospect of geopolymer solidified soil

LUO Zhengdong<sup>1</sup>, ZHANG Benben<sup>1</sup>, SU Yonghua<sup>2</sup>, JIANG Bo<sup>1</sup>, LI Zhengyang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

**Abstract:** With fundamental research on geopolymer, the study of using geopolymer as solidification agent in the field of soil stabilization has received extensive attention. Geopolymer, as a new soil solidification agent, is a kind of green inorganic cementitious material formed by aluminosilicate-rich minerals as precursors under the action of alkali activators. It is equipped with the advantages of good mechanical properties, great durability, low carbon and environment friendly, etc. It can effectively overcome the disadvantages of high energy consumption, high pollution and poor durability of traditional soil solidification agents such as cement or lime, and is generally considered as an ideal substitute for traditional soil solidification agents. In order to clarify the solidification mechanism and reinforcement effect of geopolymers on soil, the research progress of geopolymer solidified soil in recent years is reviewed in this paper. Firstly, the reaction mechanism of geopolymer solidified soil is introduced; secondly, the influence of different factors on the mechanical properties such as unconfined

**收稿日期:** 2022-05-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51909086); 湖南省教育厅优秀青年项目(21B0123); 中国水利水电科学研究院水利部水工程建设与安全重点实验室开放研究基金(202109)

**作者简介:** 罗正东(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程及建筑新材料研究, E-mail: 277619580@qq.com。

**Received:** 2022-05-02

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51909086); Outstanding Youth Project of Hunan Education Department (No. 21B0123); Open Research Fund of Key Laboratory of Water Engineering Construction and Safety of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (No. 202109)

**Author brief:** LUO Zhengdong (1982-), PhD, associate professor, main research interests: geotechnical engineering and new building materials, E-mail: 277619580@qq.com.

compressive strength and shear strength is described in detail; thirdly, the durability of geopolymer solidified soil under freeze-thaw cycle, dry-wet cycle and chemical ion erosion is discussed; finally, the future study of geopolymer solidified soil technique is prospected.

**Keywords:** geopolymer; solidification soil; soil solidification agent; reaction mechanism; mechanical property; durability

近年来,地基处理技术与工程应用研究在中国取得了长足发展。根据中国工程院院士龚晓南主编的《地基处理技术及发展展望》<sup>[1]</sup>可知,目前中国地基处理技术主要分为置换法、排水固结法、化学固化法、夯实挤密法、托换与纠倾、迁移、加筋法等。随着社会经济的蓬勃发展,也迎来了基础设施建设高潮,基础工程成为了工程建设的重中之重。在地基处理等工程建设过程中会遇到各种性质多变的土壤,例如软土、膨胀性土、盐渍土、硫酸盐土、淤泥质土、红黏土、湿陷性黄土等,主要受地理环境、气候条件、地质成因以及次生变化等因素影响,具有结构复杂、土体性质难以预测等特征<sup>[2-4]</sup>。针对上述土壤,在目前加固处理技术中,化学固化法因效率高、适应性强、经济性好而被广泛应用。

化学固化法是指将固化剂与待处理土体强制搅拌形成整体,通过物理-化学作用提高土体的微观及宏观性能。目前,在地基处理过程中普遍采用普通硅酸盐水泥(OPC)和石灰作为固化剂,但这两类固化剂均存在能耗高、污染大、碳排放高等问题。据研究报道,生产1 t OPC会向大气中排放0.8~1.0 t CO<sub>2</sub><sup>[5]</sup>,能耗为87.6~116.6 kJ<sup>[6]</sup>,生产1 t 石灰能耗为6.98~9.31 MJ<sup>[7]</sup>。此外,水泥/石灰固化土虽然力学性能较好,但普遍存在易开裂、干缩大、水稳性差、耐久性不足的特点<sup>[8]</sup>。

刘汉龙<sup>[9]</sup>针对传统地基处理技术造价高、能耗高、环境污染大等问题,提出了绿色地基处理技术,并从绿色技术、绿色材料、绿色工艺、绿色装备、绿色检验等方面对其进行了明确的阐述。其中绿色材料是指选用能耗低、无污染或少污染、易回收的材料。因此,基于上述理念,为推进落实中国“2030年碳达峰、2060年碳中和”战略目标以及促进建筑业朝着低碳、节能、环保的方向发展,应用于地基处理之中亟须研发可有效替代水泥/石灰的绿色节能、生态环保的土壤固化剂。

地质聚合物是一种以富硅铝酸盐工业固体废弃物为前驱体,在碱激发剂作用下,经过解聚、单体重建以及缩聚过程形成的三维网状无机胶凝材料<sup>[10]</sup>,被认为是水泥或石灰等传统固化剂的理想替代品。近年来学者们从反应机理、力学性能、工作性以及耐久性等方面对地质聚合物开展了大量试

验研究。研究表明,相对于传统水泥基胶凝材料,地质聚合物具有早期强度高<sup>[11]</sup>、凝结硬化快<sup>[12]</sup>、收缩率低<sup>[13]</sup>、渗透性小<sup>[14]</sup>、耐化学离子侵蚀<sup>[15]</sup>、耐火性强<sup>[16]</sup>、固封重金属离子效率高<sup>[17]</sup>等优势。此外,在制备过程中,地质聚合物比水泥少60%~80%的CO<sub>2</sub>排放和60%的能耗<sup>[18]</sup>。然而,已有的研究主要集中于纯地质聚合物或地质聚合物混凝土等方面,而关于地质聚合物固化土的研究相对较少。为此,笔者综合学者们的研究成果,从反应机理、力学性能以及耐久性等方面对地质聚合物固化土研究进展进行系统综述,并评述地质聚合物固化土今后研究尚待解决的问题,以期对地质聚合物固化土的应用研究提供参考和借鉴。

## 1 地质聚合物固化土反应机理

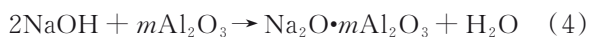
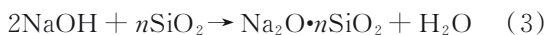
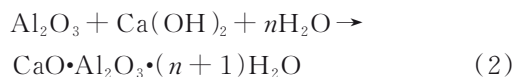
“地质聚合物”这一概念最早是由法国科学家Davidovits<sup>[19]</sup>于1989年提出,其指出地质聚合物是一类以工业固体废弃物作为前驱体,在碱激发剂作用下经过溶解阶段、单体解聚阶段以及单体缩聚阶段,由硅氧四面体[SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup>和铝氧四面体[AlO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup>排列组合而成的三维网状无机胶凝材料<sup>[20]</sup>。其中前驱体为富含硅铝酸盐矿物的大宗工业固体废弃物,主要包括矿渣、粉煤灰、偏高岭土、赤泥以及各类金属尾矿等。而最为常用的碱激发剂主要是NaOH、KOH以及Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>等单一激发剂或复合激发剂。

Lothenbach等<sup>[21]</sup>根据前驱体原料中Ca/Si的比值,将地质聚合物划分为高钙体系、低钙体系以及无钙体系。研究表明,地质聚合物的反应产物和凝结硬化特征均与前驱体种类联系紧密。王爱国等<sup>[22]</sup>通过总结关于地质聚合物相关研究,得出在低钙体系(粉煤灰)或无钙体系(偏高岭土)下,生成的地质聚合物凝胶主要为水化硅铝酸钠(N-A-S-H)与微量水化硅铝酸钙(C-A-S-H),并且随着Ca/Si比值的升高,无定形的N-A-S-H逐渐转变为结构相对有序的C-A-S-H,而在高钙体系(矿渣)下,地质聚合物凝胶主要为C-A-S-H。此外,高钙体系(矿渣)下的地质聚合物凝结速度较快,而低钙体系(粉煤灰)下的地质聚合物在常温环境下凝结速度较为缓慢<sup>[23]</sup>。

地质聚合物对土壤的固化过程主要为富硅铝酸盐前驱体原料在碱激发剂作用下,经过地质聚合

反应(以下简称“地聚反应”)形成地质聚合物凝胶材料,其中一部分地质聚合物凝胶凝结硬化构成聚合物骨架,另一部分地质聚合物凝胶包裹着土颗粒并填满土颗粒间的多余空隙形成土颗粒团聚体。聚合物骨架承托着土颗粒团聚体通过相互连接构成地质聚合物固化土空间结构体系,以此提高土体宏观力学性能<sup>[24]</sup>。Xiang等<sup>[25]</sup>指出地质聚合物与土颗粒间的团聚作用主要是由于土颗粒表面的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 与地质聚合物水化产物中的 $\text{Al}^{3+}$ 发生了等效吸附交换的化学反应,随着吸附和交换的持续进行,土颗粒越来越小,而土颗粒团聚体越来越大。因此,土体强度也会随之显著增大。

Yao等<sup>[24]</sup>研究发现,土壤中的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 通过和地质聚合物中少量存在的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生如式(1)、式(2)的化学反应,生成一种凝胶,用以填充土颗粒间的空隙并相互连接。此外,作者还发现地质聚合物中的碱激发剂会与土壤中可交换的碱金属阳离子发生置换反应,在土颗粒表面附近生成碱金属氢氧化物沉淀。而发生置换反应后残余的碱激发剂会和土壤中的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 发生如式(3)、式(4)的化学反应,在土颗粒表面形成一层薄膜,其主要成分为硅酸钠和铝酸钠。



为了证实上述地质聚合物固化土的反应机理,Li等<sup>[26]</sup>和Wang等<sup>[27]</sup>通过扫描电子显微镜(SEM)观察原状土和地质聚合物固化土的微观结构特征区别。观察结果为原状土骨架疏松,充斥着杂乱无章的不同形状矿物颗粒,且孔隙较多;而地质聚合物固化土中的土颗粒表面附着大量蜘蛛网状的白色晶体,使土颗粒和周围凝胶结合形成致密的整体结构。土颗粒由疏松无序状态转变为胶结有序状态,孔隙显著减少,土体宏观强度大幅增加。

目前,学者们对于地质聚合物固化土的研究主要集中在土体宏观力学性能或微观结构分析等方面,而对于地质聚合物与土壤相互作用的反应机理研究不多。主要原因是,一方面地质聚合物受前驱体、碱激发剂、水胶比等因素影响较大,土壤的存在会改变这些因素,尤其是在地质聚合物-土壤体系中地质聚合物掺量较少的情况下,然而地质聚合物掺量过多则会大幅提高造价,是不经济的。因此,相较于纯地质聚合物体系,在地质聚合物-土壤体系中控制地质聚合物性能困难得多。另一方面,地质聚

合物的高碱性环境也会改变土壤的性质。例如,土壤中硅铝组分也会溶解在碱性溶液中,从而造成土壤性质发生改变。不仅如此,不同土壤的物理性质、结构组分也会有所差别,采用相同的地质聚合物固化不同的土壤时也可能表现出完全不同的性质。针对以上问题,未来应综合考虑土壤类别以及地质聚合物各方面影响因素,对地质聚合物固化土反应机理做进一步的研究,建立更为精确的地质聚合物-土壤体系反应机理模型。

## 2 地质聚合物固化土力学性能

### 2.1 无侧限抗压强度(UCS)

无侧限抗压强度(UCS)是最能直观反映地质聚合物固化土宏观性能的力学性能参数。试验研究表明,影响地质聚合物固化土UCS的因素主要包括前驱体种类、前驱体掺量、碱激发剂以及矿物添加剂等。

#### 2.1.1 前驱体种类

前驱体的种类对地质聚合物固化土UCS有显著的影响。其中,最为常用的前驱体为矿渣、粉煤灰以及偏高岭土等。研究表明,在碱激发剂的激发活化作用下,12.5%掺量的矿渣基地质聚合物固化土28d UCS为4.5 MPa<sup>[28]</sup>,而20%掺量的粉煤灰基地质聚合物固化土28d UCS仅为2.706 MPa<sup>[29]</sup>。主要原因是,一方面矿渣在碱性溶液中溶解的过程伴随着放热的现象,同时溶解产生的 $\text{Ca}^{2+}$ 与碱性溶液中阴离子反应产生附加放热现象,二者共同作用下促使地质聚合物-土壤体系温度上升,地聚反应速率增加,从而促进地质聚合物固化土早强快硬<sup>[30]</sup>。另一方面,粉煤灰结构表面致密,表面活化能较高,在常温环境下凝结硬化速度缓慢<sup>[31]</sup>,导致粉煤灰基地质聚合物固化土早期强度不足。此外,有学者发现矿渣基地质聚合物固化土早期强度高、后期强度增长缓慢<sup>[32]</sup>,而粉煤灰基地质聚合物固化土早期强度不足,而后期强度上升明显<sup>[33]</sup>。针对以上问题,有学者通过复掺的方式制备矿渣-粉煤灰基地质聚合物固化土,并取得了一定研究成果。吴俊等<sup>[34]</sup>研究了矿渣-粉煤灰比例变化对地质聚合物固化淤泥质黏土UCS的影响,结果表明,当矿渣:粉煤灰=9:1时,地质聚合物固化土UCS最高,标准养护14d时可达1.5 MPa。作者将该结果归因为一方面粉煤灰为富硅铝酸盐矿物,可提供大量的活性 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 成分,从而促进矿渣中 $\text{Ca}^{2+}$ 与活性 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 发生化学反应生成大量的水化硅酸钙(C-S-H)、水化硅铝酸钙(C-A-S-H)以及水化铝酸钙(C-A-H)等胶絮状凝胶水化产物。另一方面,粉煤灰为

球形玻璃体结构,可显著提高地质聚合物固化剂浆料的和易性,使其在黏土结构中扩散更均匀,使土体空间结构更为致密,从而使得土体UCS得到大幅提高。然而,当粉煤灰含量过高时,地质聚合物固化土UCS反而会下降,原因是在碱性激发剂作用下,粉煤灰会早于矿渣发生Al—O键、Si—O键的断裂,经地聚反应后形成结构更为稳定的水化硅铝酸钠(N-A-S-H)凝胶,从而使其无法再与矿渣水化产物发生二次反应<sup>[35]</sup>,进而造成地质聚合物固化土黏聚力的下降。

根据氧化钙的含量,粉煤灰可分为高钙粉煤灰和低钙粉煤灰<sup>[36]</sup>。两种类型粉煤灰均已被制备成地质聚合物并成功应用于土壤固化中。Cristelo等<sup>[37]</sup>研究发现,高钙粉煤灰固化土早期强度更高,而低钙粉煤灰固化土后期强度更优异。相较于偏高岭土,低钙粉煤灰在改善高塑性黏土膨胀性方面效果更显著<sup>[38]</sup>。Odeh等<sup>[39]</sup>发现,高钙粉煤灰地质聚合物固化高塑性黏土在无侧限压缩试验破坏时会出现显著的脆性破坏特征。同样地,随着矿渣掺量的增加,矿渣地质聚合物固化土也表现出脆性破坏<sup>[40]</sup>,并且相较于水泥固化土,矿渣地质聚合物固化土的收缩系数<sup>[41]</sup>要高出数倍,降低了其控制破坏的能力。针对上述高钙系地质聚合物固化土脆性破坏的问题,Chowdary等<sup>[42]</sup>尝试通过掺入聚丙烯纤维来提高矿渣地质聚合物固化土的延性,研究表明,聚丙烯纤维的加入降低了试样的脆性,有效提高了试样的延性,并且随着纤维含量的增加,试样应力-应变曲线的初始斜率减小,峰值应变增大。此外,玄武岩纤维也可有效提高地质聚合物固化土的延性<sup>[43]</sup>。不仅如此,Pourabbas等<sup>[44]</sup>研究发现,再生玻璃粉地质聚合物也可显著提高原状土的延性。

综上所述,地质聚合物可显著提高土壤UCS,其中高钙系地质聚合物适用于提高固化土早期强度,而低钙系地质聚合物提高固化土后期强度更为出色。为了保证地质聚合物固化土全生命周期UCS,通过协同使用高钙系地质聚合物和低钙系地质聚合物固化土是一种有效的解决手段。另外,高钙系地质聚合物固化土普遍存在脆性破坏的问题。研究证明,通过掺加纤维可有效提高地质聚合物固化土的延性。然而,对于不同类型纤维增强地质聚合物固化土的耐久性问题研究较少。

### 2.1.2 前驱体掺量

地质聚合物固化土UCS随前驱体掺量的变化而呈现出不同的发展规律。周恒宇等<sup>[45]</sup>研究表明,地质聚合物固化土UCS随着地质聚合物前驱体掺

量的变化存在明显的分段区域性特征,如图1所示,主要包括惰性区域和活性区域,并且养护龄期越久特征越显著。当前驱体掺量在10%~20%内,UCS增长缓慢,为惰性区域,当掺量大于20%,UCS开始明显提升,为活性区域。因此,在实际工程应用中,地质聚合物前驱体掺量应大于20%。然而,Arulrajah等<sup>[46]</sup>研究发现,地质聚合物前驱体最优掺量为20%,掺量少于或多于20%均会对地质聚合物固化土UCS产生不利影响。当地质聚合物前驱体掺量为10%时,前驱体在土体间未能形成有效的地质聚合物网络结构,但当前驱体掺量从20%增加到30%时,地质聚合物固化土UCS增长速度较慢,原因是前驱体超过一定掺量时,地质聚合物凝胶并未在土体间形成均匀的网络空间结构,而是形成了絮凝状的晶体颗粒,晶体体积随着龄期的增长而变大并且互相产生排斥力,造成地质聚合物网络结构中一些不均匀或轻微的化学键断裂,从而导致固化土UCS降低。朱月等<sup>[47]</sup>也发现地质聚合物前驱体存在最优掺量,超过最优掺量时,会使土体内部产生较大的孔隙,土体内部密实性会降低。

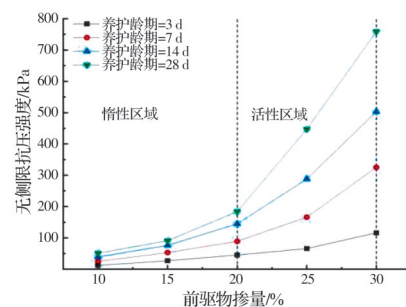


图1 无侧限抗压强度与前驱体掺量之间的关系<sup>[45]</sup>

Fig. 1 Relationship between UCS and precursor dosage<sup>[45]</sup>

总之,针对地质聚合物固化土UCS随着前驱体掺量的变化规律,学者们未达成统一认识。主要原因是,一方面土壤力学性质、内部结构以及矿物成分等差异较大,另一方面地质聚合物原料种类繁多以及成分复杂,造成地质聚合物性质不一。因此,今后应根据不同地区的土壤类别,研发与之对应固化效果最好的地质聚合物,研究地质聚合物固化土UCS与前驱体掺量之间的变化规律,探究地质聚合物前驱体的最优掺量。

### 2.1.3 碱激发剂

#### 1) 碱激发剂浓度、类型、模数

常用的碱激发剂分为苛性碱、碱式硅酸盐、碱式碳酸盐以及碱式硫酸盐4类<sup>[48-49]</sup>。Pourakbar等<sup>[50]</sup>研究了NaOH和KOH对棕榈灰地质聚合物固化土UCS的影响,研究表明,地质聚合物固化土UCS在一定范围内随着碱激发剂浓度的增加而增

大。另外,作者还发现相较于NaOH,KOH激发后的地质聚合物固化土UCS更高。因为 $K^+$ 比其他碱金属离子具有更小的水合微粒,地聚反应后会生成更为致密的地质聚合物凝胶材料。然而,Yaghoubi等<sup>[51]</sup>研究发现,钠基碱激发剂比钾基碱激发剂对地质聚合物固化土UCS的发展提升更大。当使用 $K_2SiO_3$ 、 $KOH+K_2SiO_3$ 和 $Na_2SiO_3$ 时,地质聚合物固化土UCS没有明显提高,而使用KOH、NaOH和 $NaOH+Na_2SiO_3$ 时,地质聚合物固化土UCS随养护龄期增加而显著增大。两位学者得出不同的研究结论,原因可能是土壤的内部结构、物理性质差异较大。因此,在加固土壤时应根据土壤类别采用不同的碱激发剂。

Phummiphan等<sup>[52]</sup>研究了 $Na_2SiO_3$ 和NaOH的比例变化对地质聚合物固化土UCS的影响,研究结果表明,当 $Na_2SiO_3:NaOH=9:1$ 时,地质聚合物固化土UCS最大,为7.143 MPa,而 $Na_2SiO_3:NaOH=5:5$ 时,地质聚合物固化土UCS最小,为5.126 MPa。此外,当 $Na_2SiO_3:NaOH \geq 8:2$ 时,掺入矿渣可有效提高粉煤灰基地质聚合物固化土的早期强度<sup>[53]</sup>。

王东星等<sup>[54]</sup>系统比较了NaOH、 $Na_2CO_3$ 和 $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ 对粉煤灰基地质聚合物固化土UCS的影响,结论表明,对地质聚合物固化土UCS提升效果最好的是NaOH, $Na_2CO_3$ 次之, $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ 最差。Lv等<sup>[55]</sup>分析了水玻璃、石灰以及水玻璃+石灰对粉煤灰基固化盐渍土UCS的影响,结果表明,对地质聚合物固化土UCS的提升效果从大到小依次为水玻璃+石灰、石灰、水玻璃。孙秀丽等<sup>[56]</sup>发现,单独使用 $Na_2SiO_3$ 作为碱激发剂时, $Na_2SiO_3$ 模数在1.0~1.5时,激发矿粉效果最好,而模数大于2.0时,基本上没有激发效果。

上述研究表明,相较于弱碱激发剂,强碱激发剂对地质聚合物激发效果更显著。然而,采用强碱作为碱激发剂会大幅提高造价成本。因此,在今后的工程实践中应根据具体需求而选用适当的碱激发剂。

## 2) 碱激发剂掺量

陈锐等<sup>[57]</sup>和Chimoye等<sup>[58]</sup>发现地质聚合物固化土UCS随着碱激发剂掺量的增加而增大。吴燕开等<sup>[59]</sup>通过钢渣基地质聚合物固化土试验研究发现,碱激发剂存在最优掺量。当碱激发剂掺量较少时,地质聚合物固化土UCS提升明显,但当碱激发剂掺量过大时反而会不利于地质聚合物固化土UCS的发展。主要原因是NaOH含量过高时,钢渣粉受到强碱剥蚀作用表面结构受到破坏,并且钢渣粉水化产物也会因此而裂解,与土颗粒胶结形成的骨架结

构遭受破坏,造成地质聚合物固化土后期孔隙率增加。另一方面,溶液中过多的 $Na^+$ 会妨碍淤泥质土表面富含的 $Na^+$ 、 $K^+$ 等离子与钢渣粉水化生成的 $Ca^{2+}$ 离子发生交换吸附作用,使土颗粒表面双电层变薄,从而使土颗粒间摩擦力降低,导致地质聚合物固化土UCS降低。俞家人等<sup>[8]</sup>也发现了上述规律,即地质聚合物固化土UCS在一定范围内随着碱激发剂掺量的增大而增大。然而,当碱激发剂掺量超过最优掺量时,地质聚合物固化土UCS提升幅度较低。

### 2.1.4 矿物添加剂

Cristelo等<sup>[60]</sup>研究发现,氢氧化钙可以在短期内提高地质聚合物固化土UCS,而氯化钠和混凝土塑化剂对于地质聚合物固化土UCS没有任何改善。Phetchuay等<sup>[61]</sup>发现粉煤灰基地质聚合物固化土UCS随着电石渣(CCR)取代量的变化呈现明显的区域性特征,主要包括非活跃区,活跃区和准惰性区,如图2所示。当电石渣替代量(此处电石渣仅作为一种提供额外钙源的矿物添加剂。电石渣主要含氢氧化钙和碳酸钙,不包含硅铝矿物组分,不符合作为地质聚合物前驱体的条件。因此,电石渣不能被视为前驱体)小于7%时为非活跃区,地质聚合物固化土UCS随着电石渣替代量的增加先降低后升高;当替代量为7%~12%时为活跃区,地质聚合物固化土UCS显著增加;当替代量大于12%时为准惰性区,地质聚合物固化土UCS随着电石渣替代量的增加而略有增加。主要原因,一方面是电石渣提供的大量 $Ca^{2+}$ ,可与粉煤灰中富硅铝酸盐矿物发生反应,生成更多的C-A-S-H、N-A-S-H等胶凝材料,使地质聚合物固化土结构更为致密<sup>[62]</sup>;另一方面是 $Ca^{2+}$ 在地质聚合物空间结构中也能够作为平衡电荷的阳离子<sup>[63]</sup>,并为地质聚合物凝胶的形成提供额外的成核位点,使凝胶快速硬化<sup>[64]</sup>,促进地质聚合物固化土UCS提高。但是, $Ca^{2+}$ 大多存在于碱性较低的溶液中,当溶液碱性过高时, $Ca(OH)_2$ 的溶解受到抑制。因此,当电石渣替代量超过12%时,地质聚合物固化土UCS提升较为缓慢。

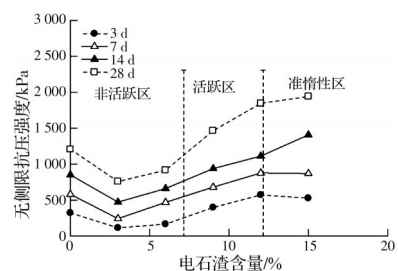


图2 电石渣含量对抗压强度的影响<sup>[61]</sup>

Fig. 2 Effect of CCR content on compressive strength<sup>[61]</sup>

然而,Phummiphan等<sup>[65]</sup>指出电石渣最佳取代量为20%,少于或多于20%均对粉煤灰地质聚合物固化土UCS产生不利影响。Sheikhhosseini等<sup>[66]</sup>研究发现,掺入硅灰可显著提高铜尾矿地质聚合物固化土UCS。由此可见,矿物添加剂可以较好地提高地质聚合物固化土的UCS,然而针对于掺入矿物

添加剂的地质聚合物固化土的其他力学性能和耐久性报道较少。

综上所述,前驱体种类、前驱体掺量、碱激发剂以及矿物添加剂等对地质聚合物固化土UCS的影响规律各不相同。表1列举了近年来关于不同因素对地质聚合物固化土UCS影响的研究概况。

表1 文献中地质聚合物固化土无侧限抗压强度研究概况

Table 1 Summary of UCS of geopolymer solidified soil in literature

土壤种类	前驱体原料	碱激发剂	前驱体掺量/%	UCS	参考文献
软黏土	矿渣	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	12.5	4.37 MPa(28 d)	[8]
软黏土	矿渣	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	12.5	4.5 MPa(28 d)	[28]
黑棉土	粉煤灰(F)	NaOH	20	2.706 MPa(28 d)	[29]
淤泥质土	矿渣+粉煤灰(C)	NaOH	20	1.5 MPa(14 d)	[34]
软土	粉煤灰(C)/粉煤灰(F)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	20	C:0.6 MPa(7 d)、2.6 MPa(84 d) F:0.1 MPa(7 d)、8.5 MPa(84 d)	[37]
黏土	粉煤灰(C)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	10、15、20	1~8 MPa(28 d)	[39]
软黏土	矿渣+聚丙烯纤维	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	10、20、30	400~2 500 kPa(7 d) 800~4 000 kPa(28 d)	[42]
淤泥	偏高岭土	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	25、30	0.447 MPa、0.759 MPa(28 d)	[45]
软土	偏高岭土+水泥	NaOH	10、20、30	160 kPa、230kPa、180 kPa(28 d)	[47]
淤泥质土	矿渣+粉煤灰	NaOH、KOH	20	100~3 700 kPa(7 d) 1 600~5 800 kPa(28 d)	[51]
红黏土	粉煤灰(C)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	30	5~7.5 MPa(7 d) 8.5~10.5 MPa(28 d)	[53]
淤泥	粉煤灰(F)	NaOH、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	15	1 934.3 kPa(90 d)、110.5 kPa(28 d)、 395.7 kPa(90 d)	[54]
盐渍土	粉煤灰(C)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{石灰}$	18	6 MPa(30 d)	[55]
疏浚淤泥	矿渣+粉煤灰(C)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	40	9 806.64 kPa(28 d)	[56]
淤泥质土	钢渣粉	NaOH	10	0.969 MPa(7 d) 1.937 MPa(28 d)	[59]
海相软土	粉煤灰(C)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	25、35、45	100~1 200 kPa(28 d)	[61]
砂土	铜尾矿+硅灰	KOH	10、15、20	6~10 MPa(28 d)	[66]

注:C为高钙类粉煤灰;F为低钙类粉煤灰。

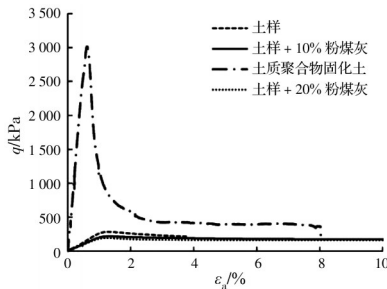
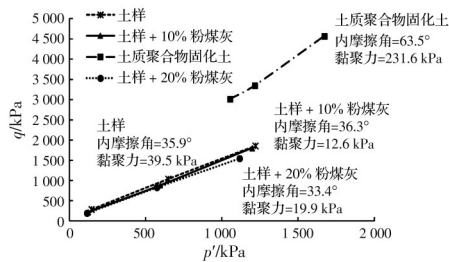
## 2.2 抗剪强度

抗剪强度是土体主要力学性能之一。在评论地质聚合物固化土力学性能时,抗剪强度是一个主要的考虑因素。Ghadir等<sup>[67]</sup>通过比较火山灰地质聚合物固化土和水泥固化土的抗剪强度和生命周期评估,得出地质聚合物固化土和水泥稳定土的抗剪强度均随着前驱体掺量的增加而提高。在同等前驱体掺量条件下,地质聚合物固化土抗剪强度更高,并且在达到同等抗剪强度下,地质聚合物固化土环境影响更小。Khasib等<sup>[68]</sup>也发现了类似规律,即棕桐灰地质聚合物可有效提升膨胀性土抗剪性能。固化土试样抗剪强度随着前驱体掺量的增加而提高。此外,Al-Rkaby等<sup>[69]</sup>进一步研究发现,随着前驱体掺量的提高,矿渣地质聚合物固化土抗剪强度提升更为显著。当矿渣掺量由0%提高到10%、20%、30%、40%和50%时,土体抗剪强度分

别提高了2.7、3.8、6.2、7.5和9.9倍。

有学者研究发现,相较于水泥固化土在抗剪破坏时的脆性破坏,地质聚合物固化土在脆性破坏时还伴随着应变软化现象发生。Rios等<sup>[70]</sup>通过三轴压缩试验测试了粉煤灰地质聚合物固化砂土抗剪强度变化规律,如图3、图4所示。由图可知,单纯添加粉煤灰并不能有效改善土体抗剪性能,主要因为粉煤灰活性未被激活,不具备胶结作用,仅作为矿物添加剂填充在土体孔隙中。而当粉煤灰经过 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ 激活生成地质聚合物凝胶后,可显著增加土体峰值应力,并且土体内摩擦角、黏聚力得到大幅提升。另外,粉煤灰地质聚合物固化土在试验中呈现脆性破坏特征,伴随着应变软化现象。Rios等<sup>[71]</sup>也发现了这一规律,即粉煤灰地质聚合物固化土在抗剪试验发生脆性破坏之后,会出现明显的应变软化现象。Abdullah等<sup>[72]</sup>指出,地质

聚合物固化土在抗剪试验的破坏特征与前驱体掺量有关。随着地质聚合物掺量的增加,地质聚合物固化土应力-应变关系由延性响应逐步转变为峰后脆性响应。此外,作者还发现随着围压的增加,地质聚合物固化土的屈服应力显著增大。其主要原因为地质聚合物的加入改变了重塑黏土的初始特征,使其由准超固结变为重度超固结。因此,地质聚合物固化土呈现出较高的屈服面,具有更高的黏聚力、内摩擦角等抗剪强度参数。然而,这会导致地质聚合物固化土在初始固结阶段发生轻微的结构破坏,从而使地质聚合物固化土结构破坏主要受摩擦作用和胶结作用控制<sup>[73]</sup>。Wang 等<sup>[74]</sup>研究发现,地质聚合物固化土抗剪强度与抗压强度呈正相关。地质聚合物固化土的黏聚力、内摩擦角在一定范围内随着抗压强度的增加而增加。

图 3 应力-应变关系曲线<sup>[70]</sup>Fig. 3 Stress-strain relationship curves<sup>[70]</sup>图 4 抗剪强度包络图<sup>[70]</sup>Fig. 4 Shear strength envelope diagram<sup>[70]</sup>

### 3 地质聚合物固化土耐久性

耐久性指的是地质聚合物固化土抵抗物理作用或化学作用等对其产生显著劣化的性能,对结构长期使用寿命起着决定性的作用。

#### 3.1 抗冻融性

地质聚合物固化土的抗冻融性主要取决于固化土的孔隙结构和空气含量。吴燕开等<sup>[75]</sup>系统比较了水泥、水泥+钢渣粉以及水泥+钢渣粉+NaOH对膨胀性土抗冻融性的影响,研究结果表明,水泥+钢渣粉+NaOH固化土抗冻融性最好,水泥固化土抗冻融性最差。其主要原因是NaOH可有效激发钢渣粉硅铝矿物组分的活性,并使其加快发生

地聚反应,生成更多结构稳定的C-A-S-H以及N-A-S-H等凝胶物质,土体密实度提高,整体性增强,抗冻融性提高。而水泥稳定土内部结构孔隙较多,颗粒间联结不够紧密。柯睿等<sup>[76]</sup>进一步研究发现,水泥固化土在承受6次冻融循环后承载能力达到极限,之后试样孔隙比开始降低,破坏特征由塑性破坏转变为脆性破坏,内摩擦角和黏聚力均减小,强度也随之大幅降低,其根本原因在于冻融循环中水分相变、冰晶生长和水分迁移等作用,造成试样中土颗粒破碎,孔隙结构发生变化以及比表面积增大<sup>[77]</sup>。

Sahoo等<sup>[78]</sup>发现矿渣基地质聚合物固化土质量损失随着冻融循环次数的增加而增加,第1次冻融循环后的试样质量损失最大,之后随着冻融循环次数的增加质量损失率逐渐减小,在第6次冻融循环后趋于稳定。作者将该现象归因于在冻结过程中,冰晶体的形成造成地质聚合物固化土孔隙增大,但在融解过程中,孔隙并不能恢复到原来的体积,并且在反复的冻融循环作用下,地质聚合物固化土的初始孔隙结构被打乱后形成新的孔隙结构。Samantasinghar等<sup>[79]</sup>也发现了上述规律,并指出粉煤灰-矿渣基地质聚合物固化土的抗干湿性优于抗冻融性。这可能是由于冻融作用导致地质聚合物固化土生成多孔基质和弱界面过渡区,二者共同作用下使土壤颗粒间胶结作用减弱<sup>[80]</sup>。

有研究表明,矿物添加剂可有效提高地质聚合物固化土的抗冻融性。邵俐等<sup>[81]</sup>研究发现,在冻融循环作用下,掺入硫酸钠和石膏可有效提高矿渣基地质聚合物固化土的抗冻融性。这是由于加入硫酸钠和石膏可以促进矿渣的水化反应,胶凝产物也会进一步增加。并且相较于石膏,硫酸钠对于矿渣基地质聚合物固化土抗冻融性提升效果更好。

综上所述,水泥固化土的抗冻融性较差,而地质聚合物固化土的抗冻融性更为优异。此外,掺入矿物添加剂有助于提高地质聚合物固化土的抗冻融性,但是针对不同矿物添加剂对地质聚合物固化土抗冻融性增强机理研究较少。

#### 3.2 抗干湿性

吴燕开等<sup>[82]</sup>基于室内模型试验,研究了干湿循环作用对水泥固化膨胀性土(ES-C)、钢渣粉+水泥固化膨胀性土(Es-SSP-C)以及钢渣粉+水泥+NaOH固化膨胀性土(Es-SSP-C-N)的耐久性能影响。研究结果表明,在相同干湿循环次数下,Es-SSP-C-N强度最高、质量变化率最为稳定,Es-SSP-C次之,ES-C最差。其主要原因为NaOH有效激发了钢渣的活性,提高了钢渣的前期水化反应速率。而

ES-C强度下降原因在于随着干湿循环次数的增加,试样中钙矾石缺少附着点,排列顺序紊乱,内部结构受到破坏<sup>[83]</sup>。

有学者研究发现,用于干湿循环试验中液体介质的种类对地质聚合物固化土性能具有较大影响。Ngo等<sup>[84]</sup>研究了干湿循环作用下粉煤灰地质聚合物固化土在饮用水,浓度为0.725、6.7、12 g/L的NaCl溶液,以及pH值为4、6的酸性溶液中的耐久性。结果表明,在pH值为4溶液中,地质聚合物固化土UCS在一定范围内随着干湿循环次数增加而增加,当干湿循环次数大于6次时,UCS出现下降。然而,在其他类型溶液中,地质聚合物固化土在干湿循环1~3次时,UCS略有下降,而干湿循环超过3次时,地质聚合物固化土UCS出现大幅下降。发生上述现象的原因为pH值为4的溶液有利于粉煤灰地质聚合物固化土的内部地聚反应。Hoy等<sup>[85]</sup>也发现了上述规律,即粉煤灰地质聚合物固化土在pH值为4溶液中呈现出较好的耐久性。作者指出原因在于粉煤灰地质聚合物固化土在pH值为4溶液中,粉煤灰水化反应较为完全,试样中只存在少量的未反应的粉煤灰颗粒,而在其他溶液中,较多的粉煤灰颗粒未参与水化反应,只起到矿物填充的作用<sup>[86]</sup>,试样内部中存在较多孔隙,密实性下降,使溶液更易侵入试样内部,导致固化土强度下降。此外,作者还发现在干湿循环12次之后,试样在饮用水中质量损失率最高,为5.83,而在pH值为4和0.725 g/L的NaCl溶液中试样质量损失率相对较低。原因主要是粉煤灰地质聚合物固化土在酸性和盐类溶液之间存在相互作用,有利于促进粉煤灰的水化反应,而饮用水对粉煤灰的水化反应具有抑制作用。上述试验结果与Rios等<sup>[71]</sup>以及Rivera等<sup>[87]</sup>研究结果相符合,他们研究发现在干湿循环12次时,地质聚合物固化土质量损失为3.33%~7.45%。相较于粉煤灰地质聚合物,矿渣地质聚合物固化土具备更好的抗干湿循环性。Noolu等<sup>[88]</sup>研究发现,矿渣地质聚合物可显著改善膨胀性土的抗干湿循环性,在12次干湿循环作用下,矿渣地质聚合物固化土UCS仅降低约10%。

### 3.3 抗化学离子侵蚀性

目前,学者们针对地质聚合物抗化学离子侵蚀性能的研究主要集中于抗盐类溶液、酸性溶液以及碱性溶液侵蚀试验。Jiang等<sup>[89]</sup>比较了矿渣地质聚合物固化土(LAC)和水泥固化土(LPC)在硫酸盐侵蚀下的耐久性,结果表明,在Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液全浸泡120 d后,LAC表面完整,几乎没有裂缝。这是由于Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中较高的pH值和Na含量有助于地

质聚合物保持内部孔隙结构的均匀性。LPC表面出现显著的横向和纵向裂缝。LPC的UCS在浸泡28 d前有所增加,后期抗压强度出现急剧下降,然而LAC的UCS随着浸泡时间的增长而缓慢稳定地下降。Rollings等<sup>[90]</sup>指出,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液致使水泥稳定土劣化的原因在于:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>通过毛细吸附作用侵入试样内部与土体中C-A-H、Ca(OH)<sub>2</sub>发生化学反应生成的膨胀性钙矾石晶体(Aft)可填充在土颗粒孔隙中,使土体内部更为致密,强度也随之有所提高。但随着Aft生成量进一步增加,产生的膨胀应力造成土体内部结构发生破坏,联通孔增加,孔隙率提高,试样强度开始骤减。

有学者通过研究粉煤灰地质聚合物固化土的抗硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)和抗氯化钠(NaCl)溶液侵蚀性能发现,粉煤灰地质聚合物固化土表现出较好的抗H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和NaCl侵蚀性,在28 d侵蚀作用下,NaCl和H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>对地质聚合物固化土UCS的降低率分别不超过10%和38%<sup>[39]</sup>。这是由于硫酸根有利于粉煤灰地质聚合物结合相的结构演化和致密化<sup>[91]</sup>。

此外,相较于单元地质聚合物,二元地质聚合物固化土具有更为优异的抗化学离子侵蚀性。Samantasinghar等<sup>[79]</sup>研究发现矿渣-粉煤灰地质聚合物固化土在H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaOH以及NaCl溶液浸泡365 d后,试样UCS仅下降了2.87%、5.17%和8%。试样强度下降的原因主要是地质聚合物固化土在NaCl溶液浸泡后,试样发生钙的析出,生成Friedel's盐<sup>[92]</sup>,以及地聚反应受到稀释效应影响<sup>[93]</sup>,而在H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaOH溶液浸泡后,地质聚合物中化学元素析出而造成固化土基体内生成多孔结构,孔隙增大<sup>[94]</sup>。

## 4 结论与展望

与普通硅酸盐水泥(OPC)/石灰等传统固化剂相比,地质聚合物的广泛使用可以有效提高大宗工业固体废弃物的资源利用率,显著降低二氧化碳等温室气体的排放以及减少煤炭等不可再生能源的消耗,有助于实现“碳达峰、碳中和”战略目标。目前,地质聚合物固化土已取得了较大的研究进展,但还存在以下问题尚待进一步研究探讨:

1)由于地质聚合物原材料、碱激发剂种类繁多以及不同区域土壤性质差异较大,近年来试验研究主要集中在地质聚合物固化土宏观力学性能、微观结构特征和耐久性方面,但对地质聚合物-土壤体系的反应机理模型研究报道不多。此外,今后应针对不同土壤性质的独特性,研发与之对应固化效果最为理想的地质聚合物。



2)学者们针对地质聚合物固化土开展的力学性能试验较为单一,主要以无侧限压缩试验、三轴压缩试验为主,而其他如三轴剪切试验、无荷载膨胀试验、自由膨胀试验、间接剪切试验以及冲蚀试验等具有代表性的岩土试验研究较少。

3)近年来,针对地质聚合物固化土的耐久性研究主要是在冻融循环、干湿循环以及化学离子侵蚀等单因素下开展的,然而,实际情况下固化土往往是在多因素耦合下服役的。因此,今后应根据当地自然环境条件,开展多因素耦合情况下地质聚合物固化土的耐久性研究。

4)地质聚合物固化土纤维加筋材料主要为聚丙烯纤维、玄武岩纤维以及玻璃纤维等传统纤维,对中国储量丰富、生态环保的天然纤维(竹纤维、秸秆纤维、动物纤维等)对地质聚合物固化土的力学性能、耐久性影响以及增强机理研究较少。

#### 参考文献

- [1] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
GONG X N. Advances of ground improvement technologies [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [2] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.  
LIU H L, ZHAO M H. Review of ground improvement technical and its application in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115. (in Chinese)
- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49.  
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's subgrade engineering Research·2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49. (in Chinese)
- [4] 师旭超, 孙运德, 士贺飞. 长期反复荷载作用下软黏土地基的变形特性 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 23-29.  
SHI X C, SUN Y D, SHI H F. Deformation characteristics of soft soil foundation under long-term repeated loading [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 23-29. (in Chinese)
- [5] SIDDIQUE R, KHAN M I. Supplementary cementing materials [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2011.
- [6] SAINI G, VATTIPALLI U. Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica [J]. Case Studies in Construction Materials, 2020, 12: e00352.
- [7] TANER T. A lime production of the fluidized bed boiler's energy and exergy analyse [J]. Journal of Thermal Engineering, 2017, 3(3): 1271-1274.
- [8] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 364-371.  
YU J R, CHEN Y H, CHEN G, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 364-371. (in Chinese)
- [9] 刘汉龙. 绿色地基处理技术探讨 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 121-128.  
LIU H L. Study on green ground improvement technique [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 121-128. (in Chinese)
- [10] 赵人达, 成正清, 文甜, 等. 早龄期低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变特性 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 111-117.  
ZHAO R D, CHENG Z Q, WEN T, et al. Tensile creep characteristics of early-age low-calcium fly ash-based geopolymer concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 111-117. (in Chinese)
- [11] BAI T, SONG Z G, WANG H, et al. Performance evaluation of metakaolin geopolymer modified by different solid wastes [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 114-121.
- [12] LEE W K W, VAN DEVENTER J S J. The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(4): 577-584.
- [13] ZHANG M, GUO H, 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.
- [14] YAGHOUBI M, ARULRAJAH A, MIRI DISFANI M, et al. Compressibility and strength development of geopolymer stabilized columns cured under stress [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(5): 1241-1250.
- [15] PALOMO A, BLANCO-VARELA M T, GRANIZO M L, et al. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 997-1004.
- [16] CHENG T W, CHIU J P. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(3): 205-210.
- [17] WEN N N, ZHAO Y D, YU Z Y, et al. A sludge and modified rice husk ash-based geopolymer: synthesis and characterization analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 805-814.
- [18] AMER A A, EL-HOSEN S. Properties and performance of metakaolin pozzolanic cement pastes [J]. Jour-

- nal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 129(1): 33-44.
- [19] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials [J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2): 429-441.
- [20] 余春松, 张玲玲, 郑大伟, 等. 固废地质聚合物的研究及其应用进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(4): 529-546.
- YU C S, ZHANG L L, ZHENG D W, et al. Research progress of geopolymer materials prepared from solid waste and their applications [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2022, 52(4): 529-546. (in Chinese)
- [21] LOTHENBACH B, SCRIVENER K, HOOTON R D. Supplementary cementitious materials [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1244-1256.
- [22] 王爱国, 王星尧, 孙道胜, 等. 地质聚合物凝结硬化及其调节技术的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 5-14.
- WANG A G, WANG X Y, SUN D S, et al. Research progress on setting and hardening of geopolymers and their control [J]. Materials Reports, 2021, 35(13): 5-14. (in Chinese)
- [23] KAJA A M, LAZARO A, YU Q L. Effects of Portland cement on activation mechanism of class F fly ash geopolymer cured under ambient conditions [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 1113-1123.
- [24] YAO J L, QIU H J, HE H, et al. Application of a soft soil stabilized by composite geopolymer [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35(4): 04021018.
- [25] XIANG J C, LIU L P, HE Y, et al. Early mechanical properties and microstructural evolution of slag/metakaolin-based geopolymers exposed to Karst water [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 140-150.
- [26] LI N, FARZADNIA N, SHI C J. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 214-226.
- [27] WANG Y S, ALREFAEI Y, DAI J G. Influence of coal fly ash on the early performance enhancement and formation mechanisms of silico-aluminophosphate geopolymer [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 127: 105932.
- [28] YU J R, CHEN Y H, CHEN G, 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.
- [29] MURMU A L, DHOLE N, PATEL A. Stabilisation of black cotton soil for subgrade application using fly ash geopolymer [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(3): 867-885.
- [30] WANG S D, SCRIVENER K L. Hydration products of alkali activated slag cement [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(3): 561-571.
- [31] PROVIS J L, YONG C Z, DUXSON P, et al. Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 336(1/2/3): 57-63.
- [32] MOZUMDER R A, LASKAR A I. Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using artificial neural network [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 291-300.
- [33] CRISTELO N, GLENDINNING S, FERNANDES L, et al. Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation [J]. Acta Geotechnica, 2013, 8(4): 395-405.
- [34] 吴俊, 征西遥, 杨爱武, 等. 矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 647-655.
- WU J, ZHENG X Y, YANG A W, et al. Experimental study on the compressive strength of muddy clay solidified by the one-part slag-fly ash based geopolymer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 647-655. (in Chinese)
- [35] PALOMO A, GRUTZECK M W, BLANCO M T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8): 1323-1329.
- [36] 王璐瑶, 谢潇. 浅谈粉煤灰地质聚合物的发展进程及应用[J]. 科技与创新, 2019(9): 154-155.
- WANG L Y, XIE X. Discussion on development process and application of fly ash base gopolymer [J]. Science and Technology & Innovation, 2019(9): 154-155. (in Chinese)
- [37] CRISTELO N, GLENDINNING S, FERNANDES L, et al. Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 167-174.
- [38] KHADKA S D, JAYAWICKRAMA P W, SENADHEERA S. Strength and shrink/swell behavior of highly plastic clay treated with geopolymer [J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(52): 174-184.
- [39] ODEH N A, AL-RKABY A H J. Strength, durability, and microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00988.
- [40] SARGENT P, HUGHES P N, ROUAINIA M. A new low carbon cementitious binder for stabilising weak ground conditions through deep soil mixing [J]. Soils and Foundations, 2016, 56(6): 1021-1034.
- [41] COLLINS F, SANJAYAN J G. Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete [J].

- Cement and Concrete Composites, 2001, 23(4/5): 345-352.
- [42] CHOWDARY B, RAMANAMURTY V, PILLAI R J. Fiber reinforced geopolymer treated soft clay: An innovative and sustainable alternative for soil stabilization [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 32: 777-781.
- [43] WANG S N, XUE Q P, MA W, et al. Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized clay soil [J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121914.
- [44] POURABBAS BILONDI M, 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.
- [45] 周恒宇, 王修山, 胡星星, 等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2089-2098.
- ZHOU H Y, WANG X S, HU X X, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2089-2098. (in Chinese)
- [46] ARULRAJAH A, YAGHOUBI M, DISFANI M M, et al. Evaluation of fly ash- and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(6): 1358-1370.
- [47] 朱月, 陈锐. 碱激发材料加固软土强度的影响因素试验研究[J]. 公路, 2020, 65(3): 23-28.
- ZHU Y, CHEN R. Experimental study on factors affecting strength of soft soil stabilized with alkali-activated material [J]. Highway, 2020, 65(3): 23-28. (in Chinese)
- [48] PROVIS J L, PALOMO A, SHI C J. Advances in understanding alkali-activated materials [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78: 110-125.
- [49] LE V Q, DO M Q, HOANG M D, et al. Effect of alkali activators to engineering properties of geopolymer-based materials synthesized from red mud [J]. Key Engineering Materials, 2018, 777: 508-512.
- [50] POURAKBAR S, HUAT B B K, ASADI A, et al. Model study of alkali-activated waste binder for soil stabilization [J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2016, 2(4): 1-12.
- [51] YAGHOUBI M, ARULRAJAH A, DISFANI M M, et al. Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(3): 716-728.
- [52] PHUMMIPHAN I, HORPIBULSUK S, SUKMAK P, et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4): 877-891.
- [53] PHUMMIPHAN I, HORPIBULSUK S, RACHAN R, et al. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 341: 257-267.
- [54] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(Sup 1): 3197-3205.
- WANG D X, WANG H W, ZOU W L, et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activated fly ash [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup 1): 3197-3205. (in Chinese)
- [55] LV Q F, JIANG L S, MA B, et al. A study on the effect of the salt content on the solidification of sulfate saline soil solidified with an alkali-activated geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 68-74.
- [56] 孙秀丽, 童琦, 刘文化, 等. 碱激发粉煤灰和矿粉改性疏浚淤泥力学特性及显微结构研究[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(6): 622-628.
- SUN X L, TONG Q, LIU W H, et al. Study of microstructure and mechanical properties of dredged silt solidified using fly ash and slag stimulated by alkali [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2017, 57(6): 622-628. (in Chinese)
- [57] 陈锐, 郝若愚, 李笛, 等. 碱激发材料固化低液限粉黏土路用性能及抗冻融特性研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 327-337.
- CHEN R, HAO R Y, LI D, et al. Study on road performance and freeze-thaw resistance of alkali activated material stabilized low-liquid-limit silty clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 327-337. (in Chinese)
- [58] CHIMOYE W. Strength of soft bangkok clay improved by geopolymer from palm fuel ash [J]. International Journal of Engineering and Technology Research, 2014, 2(5): 1-10.
- [59] 吴燕开, 胡晓士, 胡锐, 等. 烧碱激发钢渣粉在淤泥质土中的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2187-2194.
- WU Y K, HU X S, HU R, et al. Experimental study on caustic soda-activated steel slag powder in muddy soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2187-2194. (in Chinese)
- [60] CRISTELO N, GLENDINNING S, MIRANDA T, et al. Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 727-735.
- [61] PHETCHUAY C, HORPIBULSUK S, ARULRAJAH A, et al. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer [J].

- Applied Clay Science, 2016, 127/128: 134-142.
- [62] YIP C K, LUKEY G C, PROVIS J L, et al. Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(4): 554-564.
- [63] LI C, SUN H H, LI L T. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(9): 1341-1349.
- [64] VAN DEVENTER J S J, PROVIS J L, DUXSON P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(3): 506-513.
- [65] PHUMMIPHAN I, HORPIBULSUK S, PHOONGERNKHAM T, et al. Marginal lateritic soil stabilized with calcium carbide residue and fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(2): 04016195.
- [66] SHEIKHHOSSEINI LORI I, TOUFIGH M M, TOUFIGH V. Improvement of poorly graded sandy soil by using copper mine tailing dam sediments-based geopolymer and silica fume [J]. Construction and Building Materials, 2021, 281: 122591.
- [67] GHADIR P, ZAMANIAN M, MAHBUBI-MOTLAGH N, et al. Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: A comparative study [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100639.
- [68] KHASIB I A, NORSYAHARIATI N, DAUD N, et al. Strength development and microstructural behavior of soils [J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3572.
- [69] AL-RKABY A H J. Evaluating shear strength of sand-GGBFS based geopolymer composite material [J]. Acta Polytechnica, 2019, 59(4): 305-311.
- [70] RIOS S, RAMOS C, VIANA DA FONSECA A, et al. Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 23(2): 245-267.
- [71] RIOS S, CRISTELO N, VIANA DA FONSECA A, et al. Structural performance of alkali-activated soil ash versus soil cement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(2): 04015125.
- [72] ABDULLAH H H, SHAHIN M A, WALSKE M L. Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag [J]. Soils and Foundations, 2019, 59(6): 1906-1920.
- [73] COOP M R, ATKINSON J H. The mechanics of cemented carbonate sands [J]. Géotechnique, 1993, 43(1): 53-67.
- [74] WANG H C, YAO J L, LIN Y, et al. Research of geopolymer deal with the strength of soft soil and microstructure test [M]// SHU S Z, HE L K, KAI Y. New developments in materials for infrastructure sustainability and the contemporary issues in geo-environmental engineering. Cham: Springer, 2019: 204-214.
- [75] 吴燕开, 苗盛瑶, 李鑫, 等. 冻融循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 851-861.
- WU Y K, MIAO S Y, LI X, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of expansive soil improved by steel slag powder cement under freeze-thaw cycle [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 851-861. (in Chinese)
- [76] 柯睿, 汪洪星, 谈云志, 等. 冻融循环对固化淤泥土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 136-139, 145.
- KE R, WANG H X, TAN Y Z, et al. Effect of freeze-thaw cycle on mechanical properties of solidified silt [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 136-139, 145. (in Chinese)
- [77] 郑娜, 马巍, 邴慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294.
- ZHENG Y, MA W, BING H. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294. (in Chinese)
- [78] SAHOO S, PRASAD SINGH S. Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127078.
- [79] SAMANTASINGHAR S, SINGH S P. Strength and durability of granular soil stabilized with FA-GGBS geopolymer [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(6): 06021003.
- [80] ALLAHVERDI A, ABADI M M B R, ANWAR HOSSAIN K M, et al. Resistance of chemically-activated high phosphorous slag content cement against freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 103: 107-114.
- [81] 邵俐, 李佩青, 王彬杰. 冻融循环对碱激活高炉矿渣微粉加固软土强度的影响[J]. 公路交通科技, 2022, 39(1): 40-47.
- SHAO L, LI P Q, WANG B J. Influence of freeze-thaw cycle on strength of soft soil solidified by alkali-activated ground granulated blast furnace slag [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(1): 40-47. (in Chinese)
- [82] 吴燕开, 乔晓龙, 李丹丹, 等. 干湿循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报

- (自然科学版), 2021, 53(3): 319-329.
- WU Y K, QIAO X L, LI D D, et al. Experimental study on expansive soil improved by steel slag powder-cement under dry-wet cycles [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 319-329. (in Chinese)
- [83] ZHANG R, LONG M X, LAN T, et al. Stability analysis method of geogrid reinforced expansive soil slopes and its engineering application [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1965-1980.
- [84] NGO T P, BUI Q B, PHAN V T A, et al. Durability of geopolymer stabilised compacted earth exposed to wetting-drying cycles at different conditions of pH and salt [J]. Construction and Building Materials, 2022, 329: 127168.
- [85] HOY M, RACHAN R, HORPIBULSUK S, et al. Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement - Fly ash geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 624-634.
- [86] LE H B, BUI Q B, TANG L. Geopolymer recycled aggregate concrete: from experiments to empirical models [J]. Materials, 2021, 14(5): 1180.
- [87] RIVERA J F, OROBIO A, CRISTELO N, et al. Fly ash-based geopolymer as A4 type soil stabiliser [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 25: 100409.
- [88] NOOLU V, RAO G M, REDDY B S K, et al. Strength and durability characteristics of GGBS geopolymer stabilized black cotton soil [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 2373-2376.
- [89] JIANG N J, DU Y J, LIU K. Durability of lightweight alkali-activated ground granulated blast furnace slag (GGBS) stabilized clayey soils subjected to sulfate attack [J]. Applied Clay Science, 2018, 161: 70-75.
- [90] ROLLINGS R S, BURKES J P, ROLLINGS M P. Sulfate attack on cement-stabilized sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(5): 364-372.
- [91] DŽUNUZOVIĆ N, KOMLJENOVIĆ M, NIKOLIĆ V, et al. External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite [J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 737-747.
- [92] QIAO C Y, SURANENI P, WEISS J. Damage in cement pastes exposed to NaCl solutions [J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 120-127.
- [93] LI X, RAO F, SONG S X, et al. Deterioration in the microstructure of metakaolin-based geopolymers in marine environment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(3): 2747-2752.
- [94] TEMUJIN J, MINJIGMAA A, LEE M, et al. Characterisation of class F fly ash geopolymer pastes immersed in acid and alkaline solutions [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(10): 1086-1091.

(编辑 胡玲)