

电石渣-煤矸石粉稳定土在高速公路浸水路基中的应用

韩延吉¹, 刘建树², 张永圣¹, 赵全满^{2,3}, 李皓², 简晓辉¹, 赵启琛³

(1. 山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250102; 2. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101;

3. 喀什大学 交通工程学院, 新疆 喀什 844000)

摘要:为解决明董高速公路浸水路基水稳定性不足问题,提高路基承载能力,将工业固废电石渣粉(CS)与煤矸石粉(CG)作为稳定材料用于浸水路基土稳定。对掺量分别为5%、10%和15%及CS-CG配比分别为0:100、30:70、50:50、70:30和100:0的稳定土进行无侧限抗压强度试验、干湿循环试验、浸水试验、pH值试验、X射线衍射试验、扫描电子显微镜试验、压汞试验,分析CS-CG稳定土力学性能及水稳定性,研究水影响下稳定土的微观结构特征,揭示其强度形成机理。结果表明:CS-CG-10%-(70:30)的28d龄期稳定土强度较大为5.87MPa,6次干湿循环试验后的强度为4.77MPa,对比4%水泥稳定土水稳定性占优,CS-CG稳定土具有良好的承载能力和水稳定性;浸水30d后强度随着CS占比增大而增大,CS-CG-10%-(100:0)和CS-CG-10%-(70:30)强度分别为6.29和5.74MPa,相比未浸水时分别增加了54.0%和48.5%,水稳定性良好;pH值随着CS-CG掺量及CS占比增加而增大,但随着干湿循环次数的增加pH值略微减小,CS-CG-10%-(70:30)稳定土的pH值为9.71,呈弱碱性,对环境影响较小;掺加CS-CG后稳定土中产生了大量的C-(A)-S-H凝胶、Ca(OH)₂及钙矾石晶体等水化产物,改善了孔隙结构,稳定土强度增加,干湿循环作用下水化产物进一步增加但孔径有所增大。研究表明CS-CG稳定土具有良好的承载能力和水稳定性,考虑到环境因素pH值不宜过高,建议CS-CG最佳掺量为10%,最佳配比为70:30。

关键词:道路工程;浸水路基;电石渣;煤矸石;力学性能;水稳定性;微观特征

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

The application of carbide slag-coal gangue powder stabilized soil in the immersion subgrade of expressway

HAN Yanji¹, LIU Jianshu², ZHANG Yongsheng¹, ZHAO Quanman^{2,3},
LI Hao², JIAN Xiaohui¹, ZHAO Qichen³

(1. Shandong Road & Bridge Construction Group Co. Ltd, Jinan 250102, China;

2. School of Traffic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. School of Traffic Engineering, Kashi University, Kashi 844000, China)

Abstract: A mixture of carbide slag (CS) and coal gangue powder (CG) was utilized as the stabilizer for the roadbed soil of the soaked subgrade of the Mingdong Expressway in order to increase the water stability and bearing capacity of the subgrade. The dosages of stabilizer were 5%, 10% and 15%, and the quantity ratios of CS and CG were 0:100, 30:70, 50:50, 70:30 and 100:0. Tests of unconfined compressive strength (UCS), dry-wet cycles, water immersion, pH value detection, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP) were conducted to evaluate the mechanical properties, water stability and microscopic

收稿日期:2023-08-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51808322);山东省企业技术创新项目(202160101409)

作者简介:韩延吉(1982—),男,山东济南人,高级工程师,主要从事路基材料方面研究。

赵全满(1987—),男,山东济宁人,副教授,博士,主要从事路基路面结构与材料方面的研究,本文通信作者。

Email:zhaquanman@sdjzu.edu.cn

characteristics of the CS-CG stabilized soil. The results show that the UCS value of CS-CG-10%-(70 : 30) stabilized soil was 5.87 MPa after curing for 28 days, and the UCS was decreased to 4.77 MPa after 6 dry-wet cycles. It was evident that the bearing capacity and water stability were good. With increasing CS percentage, the UCS of the stabilized soil after 30 days' immersion increased. The UCS of CS-CG-10%-(100 : 0) and CS-CG-10%-(70 : 30) stabilized soil were 6.29 and 5.74 MPa respectively. The pH value increased with an increase of CS-CG dosage and CS proportion, but decreased slightly as the dry-wet cycles increased. The pH value of CS-CG-10%-(70 : 30) stabilized soil was 9.71. After adding CS-CG, a large number of hydration products such as C-(A)-S-H gel, Ca(OH)₂ crystal and ettringite were produced in the stabilized soil, which improved the pore structure and increased the UCS. With more dry-wet cycles, the hydration products increased, which was benefit for the properties of the stabilized soil, but the pore diameter also increased. It can be seen that CS-CG stabilized soil has good bearing capacity and water stability. Considering the effects on the environment, the pH value of stabilized soil should not be too high, so it is recommended that the best dosage of CS-CG stabilizer is 10%, and the best ratio of CS-CG is 70 : 30.

Key words: road engineering; soaked subgrade; carbide slag; coal gangue; stabilized soil; water stability; microscopic characteristics

山东省明董高速公路项目区以农田、苗圃为主,地下水位较高,多段路基常年浸水、含水量高,其压实度难以满足规范要求。随着路基土含水量的增加,路基承载能力显著降低,难以满足工程技术要求,路基土水稳定性不足成为制约明董高速工程质量的关键^[1]。目前,我国对浸水路基的研究方法主要有数值计算和现场监测,如刘修宇^[2]利用有限元软件对季节性降雨浸水路基进行研究,提出软土地基应先治理表层土后进行防护加固的措施。近年来,研究人员总结了浸水路基工程的防护措施主要包括干砌片石护坡、浆切片石护坡、骨架植物防护、喷浆防护,以及采用板桩、挡土墙、加筋加固等^[3-4]。这些措施可有效解决浸水路基病害,但仍存在成本较高、维护困难和不易监测、管理的问题。

为解决上述措施存在的问题,提出利用工业固废改良路基土以解决浸水路基问题,但改良土应用在浸水路基的特性尚不明确,因此需要对其物理力学特性、水稳定性、pH值及微观特性等进行系统研究。对路基土进行改良最常用的方法是掺加水泥、石灰等传统胶凝材料^[5-6],如山东省在高速公路建设时通常在上路床掺加4%~6%的水泥来增强路基土水稳定性和承载能力。但在国家“碳达峰”“碳中和”背景下,各地区环保压力剧增,石灰、水泥等传统胶凝材料生产受限、价格飞涨,一些科研人员开始尝试将电石渣、粉煤灰、硅灰、煤矸石等工业废弃物用于路基土的稳定^[7]。煤矸石(coal gangue,CG)是煤炭开采过程中产生的主要副产品之一,占煤炭开采总量的10%~25%^[8],其主要成分是硅铝氧化物,磨细成粉遇水后具有一定的胶凝特性,可作为稳定材料用于路基土的稳定。随着煤炭的不断开采,废弃煤矸石量与日俱增,不仅占用了大量土地,而且严重污染了生态环境^[8]。许多学者将煤矸石替代天然骨料应用在混凝土中^[9-11],以此解决天然骨料日益短缺的问题。由于煤矸石骨料存在吸水率高、孔隙大等问题,随着煤矸石骨料置换率的增加其抗压强度、劈裂强度降低,但可通过煅烧^[12]、添加催化剂^[13]等方式改善煤矸石骨料混凝土性能。电石渣(carbide slag,CS)是水与电石反应生产乙炔气体的副产品,主要成分为Ca(OH)₂,可以与活性二氧化硅、氧化铝等活性组分发生火山灰反应,具有胶结作用^[14]。电石渣常与粉煤灰^[15]、硅灰^[16]、高炉矿渣^[17]、稻壳灰^[18]等工业废料制备性能良好的地聚物,掺入电石渣后的地聚物抗压强度与水稳定性均有所提高。

CS和CG价格低廉、产量丰富,替代水泥或石灰用于路基土稳定具有一定的可行性。本研究将煤矸石粉与电石渣复掺后对浸水路基土进行稳定,以改善路基土水稳定性,提高其承载能力,实现煤矸石与电石渣工业固废的资源化利用。首先,对掺量分别为5%、10%、15%,CS与CG的配比为0 : 100、30 : 70、50 : 50、70 : 30、100 : 0的CS-CG稳定土进行抗压强度试验、干湿循环试验、浸水试验和pH值测试,测试不同干湿循环次数作用下及浸水30d后的CS-CG稳定土的无侧限抗压强度和pH值,确定CS-CG最佳掺量及配比;然后,利用X射线衍射(X-ray diffraction,XRD)试验、扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)试验、压汞(mercury intrusion porosimetry,MIP)试验研究CS-CG稳定土干湿循环后的微观特性,揭示其强度形成及水侵蚀作用下的劣化机理,评价路基土水稳定性及承载能力改善效果。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1) 路基土

试验用路基土取自山东省明董高速公路项目某路段,通过室内试验测试其基本物理力学性能表明:该路基土的最大干密度为 2.018 g/cm^3 ,最佳含水量为 8.5% ,加州承载比(California bearing ratio, CBR)强度为 5.6% ,弹性模量为 51.5 MPa ,液限为 29.4% ,塑限为 16.2% ,通过颗粒分析试验测得其级配如表 1 所示。根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》^[19]可知,该路基土属于低液限粉质黏土。

2) CS 和 CG

试验用 CS 来自河南省安阳市元亨净水材料厂,细度为 200 目($75 \mu\text{m}$);CG 来自河北省石家庄市行唐县重德煤业有限公司,由鑫磊矿物粉体加工厂代代为加工,细度为 325 目($45 \mu\text{m}$),为增加其活性,将其在 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧^[13],得到煤矸石粉。CS 和 CG 试样如图 1 所示。

利用 ARL Advant'X Intellipower 3600 设备进行 X 射线荧光(X-ray fluorescence, XRF)试验测定 CS 和 CG 的化学成分,结果如表 2 所示。由表 2 可知,CS 主要化学成分为 CaO ,占比 92.24% ;CG 主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,占比分别为 48.33% 和 48.95% 。

表 1 路基用土级配

Table 1 Gradation of the subgrade soil

粒径/mm	累计通过百分率/%
10	100
5	99.71
2	90.20
1	77.84
0.5	60.64
0.25	53.28
0.075	16.70
<0.075	0

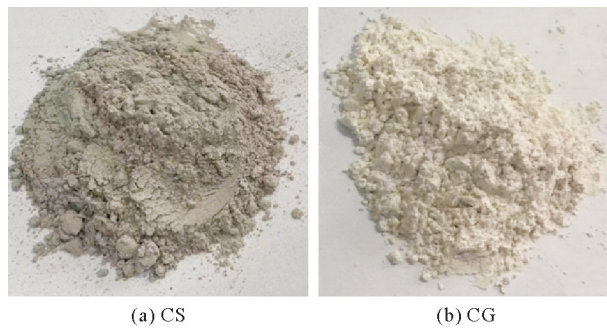


图 1 CS 与 CG 试样

Fig. 1 Samples of CS and CG

表 2 CS 与 CG 化学成分

Table 2 Chemical constituents of CS and CG

材料	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	MgO	SO_3	Na_2O	ZnO	P_2O_5	Cl^-	其他
CS	3.64	2.04	92.24	0.62	0.10	0.04	0.15	1.04	0.02	—	0.02	0.05	0.05
CG	48.33	48.95	0.21	0.66	1.26	0.15	0.14	0.04	0.06	0.01	0.12	0.01	0.07

3) 碱激发剂

为提高 CS 和 CG 中氧化物的活性,改善对路基土的稳定效果,采用碱激发剂 NaOH 与 Na_2SiO_3 混合溶液对稳定土进行碱激发。所用 NaOH 为颗粒固体,产自山东滨化东瑞化工有限责任公司; Na_2SiO_3 呈白色粉末状,产自天津渤海东方红化工有限公司。

4) 水

试验用水取自济南市市政用水。

1.2 配比设计

为分析不同掺量 CS-CG 稳定土力学特性及水稳定性,确定 CS-CG 稳定土最佳配比,设计了 15 种配比。其中,CS-CG 外掺质量分别为 5% 、 10% 、 15% ,CS 与 CG 配比分别为 $0:100$ 、 $30:70$ 、 $50:50$ 、 $70:30$ 、 $100:0$ 。为便于分析对每组试件进行编号,如 CS-CG 掺量 10% 、配比 $0:100$ 的试件编号为 CS-CG- 10% -($0:100$),其余组以此类推。碱激发剂 NaOH 和 Na_2SiO_3 按质量比 $1:1$ 混合后加纯净水溶解,其中 NaOH 浓度为 8 mol/L ,碱激发溶液与 CS-CG 的质量比为 0.5 。

1.3 试件制备

参考 JTG E51—2009《公路无机结合料稳定材料试验规程》^[20],根据土样粒径制备尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱形试件,压实度为 98%。试件制备完成后立即放入温度为 $21 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 95% 的标准养护箱养护至所需的龄期。养护后的试件如图 2 所示。

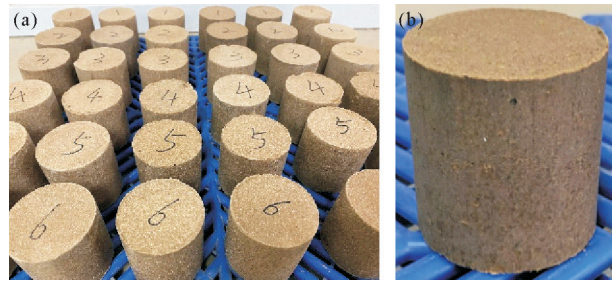


图 2 试验试件

Fig. 2 Test specimen

2 试验结果及分析

2.1 水稳定性试验结果及分析

为评价 CS-CG 稳定土水稳定性及承载能力,对 28 d 龄期试件进行干湿循环试验、浸水试验,分析不同干湿循环次数及不同浸水时间条件下其强度变化。

2.1.1 干湿循环试验结果及分析

干湿循环试验时,浸水 12 h、自然风干 12 h 为 1 个循环,共进行 6 次干湿循环,测试不同干湿循环次数下试件的无侧限抗压强度。不同干湿循环次数作用下,28 d 龄期稳定土强度变化试验结果如图 3 所示。

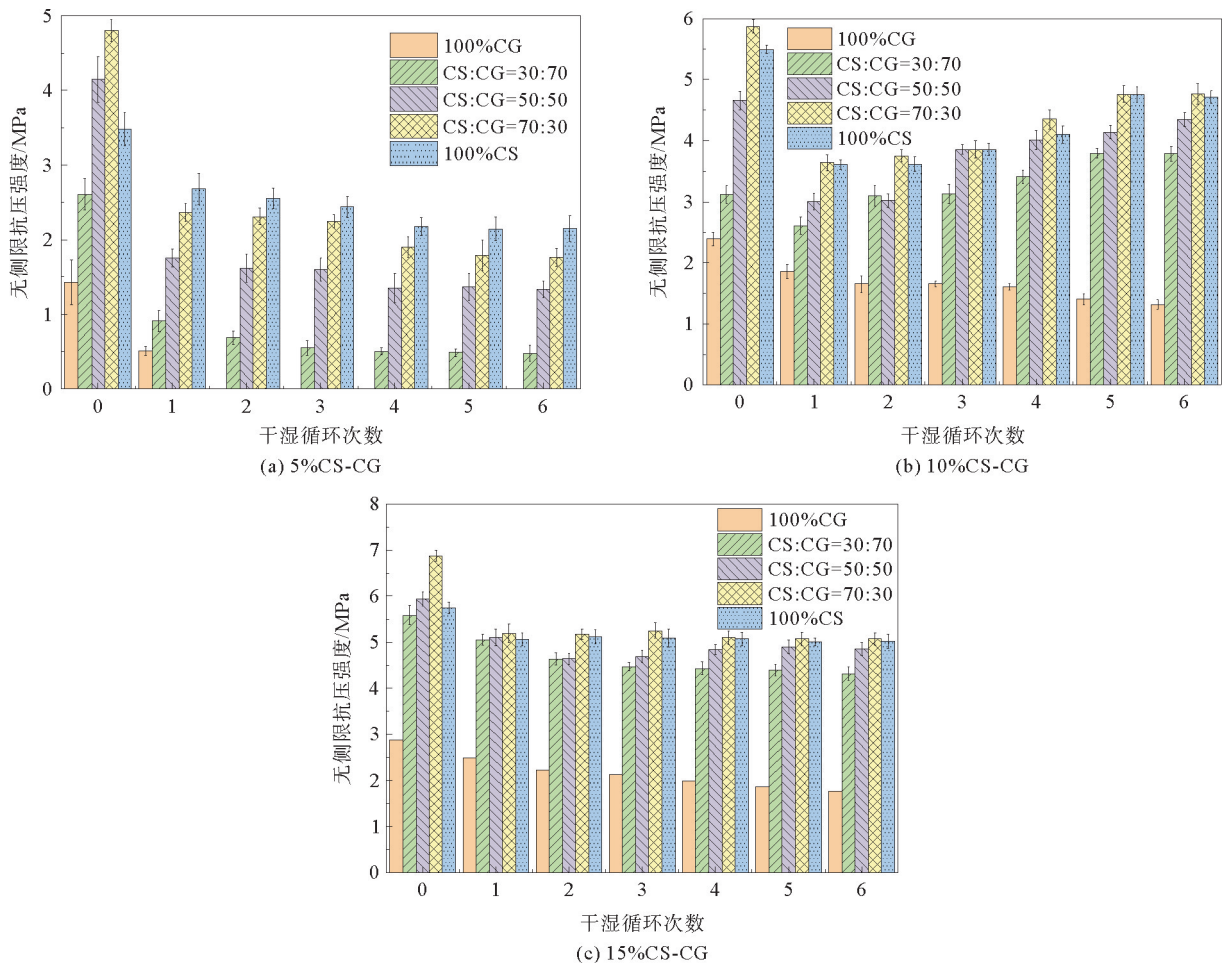


图 3 干湿循环作用下 28 d 龄期 CS-CG 稳定土强度变化试验结果

Fig. 3 UCS changes of CS-CG stabilized soil at 28 d under dry-wet cycles

由图3可以看出,CS-CG掺量为5%时,抗压强度随干湿循环次数衰减显著,其原因是CS-CG掺量较小、28d龄期时水化已完成,干湿循环过程中只存在水侵蚀没有水化过程,导致强度持续降低。CS-CG掺量为10%、CS与CG配比为70:30时强度最大,为5.87MPa,水稳定性最佳;6次干湿循环作用后强度为4.77MPa,衰减18.7%。CS-CG掺量为15%时强度增加明显,但相比CS-CG掺量为10%时的强度增加有限。为进行对比,对28d龄期水泥掺量为4%的稳定土进行了干湿循环试验。结果表明,水泥掺量为4%的稳定土未进行干湿循环时强度为6.13MPa,干湿循环6次后强度为3.18MPa,强度衰减明显。可见CS-CG掺量为10%和15%的稳定土水稳定性优于水泥掺量4%的稳定土。

上述分析表明,CS-CG稳定土较素土(未掺入CS-CG的路基土)承载能力及水稳定性显著提高,且随着掺量的增加,稳定土的强度及水稳定性均有所增加;CS-CG掺量为10%、配比为70:30时,强度、水稳定性、经济效益综合最佳。

2.1.2 浸水试验结果及分析

将28d龄期,CS-CG掺量分别为5%、10%、15%,CS与CG配比分别为0:100、30:70、50:50、70:30、100:0的CS-CG稳定土试件在水中浸泡30d后,测试其无侧限抗压强度,试验结果如图4所示。

由图4可以看出,浸水30d后,CS-CG配比相同时,随着CS-CG掺量的增加,稳定土强度逐渐增加;CS-CG掺量相同时,CS占比越大稳定土强度越大。CS-CG掺量为5%时,浸水30d后只有CS占比100%、70%和50%试件可成型,其余试件均已破坏,其强度由大到小分别为3.49、1.86和1.32MPa,相比同龄期未浸水试件强度分别损失了40.37%、29.94%和45.80%;CS-CG掺量为10%时,浸水30d后各配比稳定土强度比同龄期未浸水稳定土强度分别增加了54.01%、48.49%、39.67%、44.44%和19.99%;CS-CG掺量为15%时,浸水30d后各配比稳定土强度分别比同龄期未浸水稳定土强度分别增加了45.65%、32.31%、12.94%、21.06%和5.29%。

综合以上试验可知,CS-CG掺量越高稳定土抗压强度越高,CS占比越高稳定土水稳定性越好。为保证CS-CG稳定土水稳定性,CS-CG掺量应大于等于5%、CS占比大于50%,推荐CS-CG掺量为10%、配比为70:30。

2.2 pH值测试结果及分析

为分析CS-CG稳定土的酸碱性,根据JTG 3430—2020《公路土工试验规程》^[19],利用pH计测试28d龄期,掺量分别为5%、10%、15%,CS:CG配比分别为0:100、30:70、50:50、70:30、100:0的CS-CG稳定土干湿循环0、3、6次后的pH值,结果如图5所示。由图5可以看出,各组试件pH值均在8.20~10.80,且pH值均随着CS占比的增加而增加;CS-CG掺量为5%时,各试件pH值均在9.5以下,碱性较小;CS-CG掺量为10%时,除CS占比为100%外,其余组试件pH值均在9.8以下,呈弱碱性;CS-CG掺量为15%时,CS占比为100%的稳定土pH值达到了10.75,比同掺量CS占比为0时高出17.77%。

可见,CS掺量及占比是影响pH的重要因素。CS主要成分为Ca(OH)₂,溶于水后可电离出大量OH⁻,致使pH值上升。在进行干湿循环试验后,各掺量配比pH值均有所减少,其原因是火山灰反应不断消耗Ca(OH)₂,使得电离出来的OH⁻不断减少并趋于稳定^[21]。此外,随着水化的进行,电离出的OH⁻重新与Ca²⁺生成Ca(OH)₂结晶,使稳定土强度提高的同时pH值降低。考虑到pH值对环境的影响及强度要求,推荐CS-CG掺量为10%、CS与CG的配比为70:30。

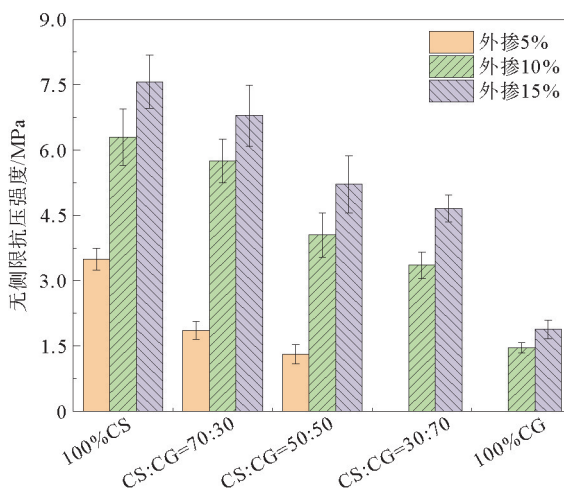


图4 浸水30d后CS-CG稳定土强度试验结果
Fig. 4 The UCS of CS-CG stabilized soil after immersion for 30 days

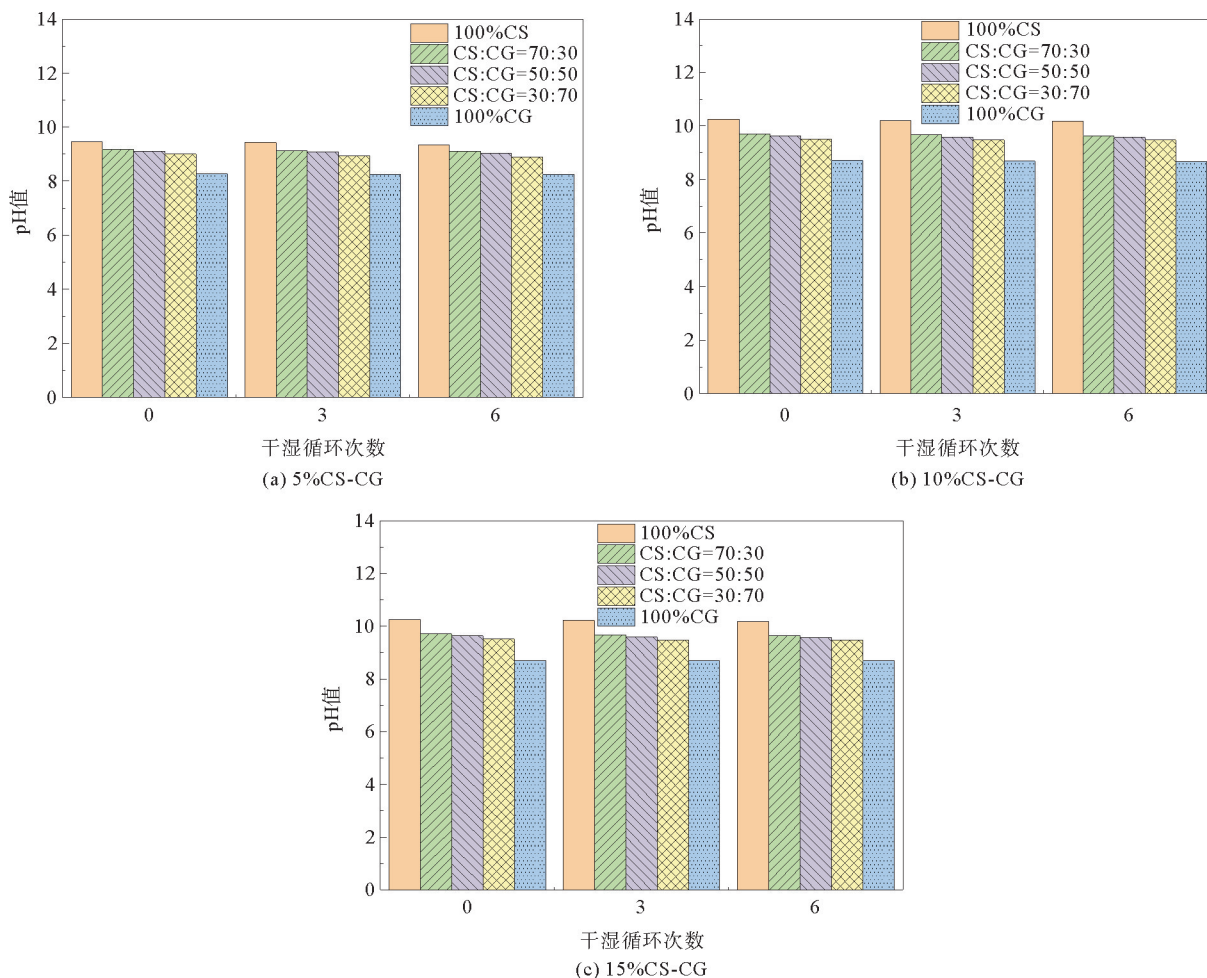


图 5 28 d 龄期 CS-CG 稳定土干湿循环 pH 值

Fig. 5 pH value of CS-CG stabilized soil under dry-wet cycle at 28 d

2.3 微观特性分析

利用 XRD、SEM、MIP 等试验方法,对龄期为 28 d、CS 与 CG 的配比为 70 : 30 且 CS-CG 不同掺量下试件和 CS-CG-10%-(70 : 30)组试件进行干湿循环 0、3、6 次后的微观特性及孔隙分布进行分析,揭示其强度形成机理及水稳机理特性。试验方案如表 3 所示。

2.3.1 XRD 试验结果及分析

CS-CG 稳定土 XRD 试验结果如图 6 所示。由图 6(a)可以看出,试件的主要成分包括石英(Q)、方解石(C)、钙沸石(G)、钙长石(A)、氢氧化钙(P)、钙矾石(E)以及 C-(A)-S-H 凝胶;素土的成分主要包括石英、方解石与钙长石,三者均为土壤中的原生矿物。当 CS-CG 掺量为 5%时,稳定土中生成了一系列的水化产物,包含钙沸石、氢氧化钙晶体、钙矾石以及 C-S-H 凝胶;当掺量为 10%时,与 5%掺量 XRD 结果相比,生成物中增加了 C-A-S-H 凝胶且 C-S-H 凝胶峰相有所增加,C-A-S-H 凝胶主要组成元素为 Si、Al、Ca、O、H,在小掺量中未见,其主要原因为 Al^{3+} 较少,不足以生成该产物;当掺量为 15%时,其产物与 10%掺量基本相同,但 C-S-H 凝胶与 C-A-S-H 凝胶有所增加。

由图 6(b)可以看出,在干湿循环试验开始后 CS-CG 稳定土进一步水化,干湿循环 3 次后 C-S-H 凝胶与钙矾石有所增加,并且 $Ca(OH)_2$ 与 SiO_2 减少,说明水化产物的生成消耗了 Ca^{2+} 与 Si^{4+} ,导致 $Ca(OH)_2$ 与

表 3 微观试验方案

Table 3 Microscopic test scheme

CS-CG 掺量 / %	干湿循环次数	试验方法
0	0	XRD
5	0	XRD, SEM, MIP
10	0, 3, 6	XRD, SEM, MIP
15	0	XRD, SEM, MIP

SiO₂ 含量减少;干湿循环 6 次与 3 次化学产物一致,说明干湿循环后期未产生新的水化产物。

综上分析发现,增大 CS-CG 掺量及干湿循环试验次数均促进了水化产物的生成,其中 C-(A)-S-H 凝胶、Ca(OH)₂ 晶体及钙矾石等的存在大幅提高了 CS-CG 稳定土的强度。

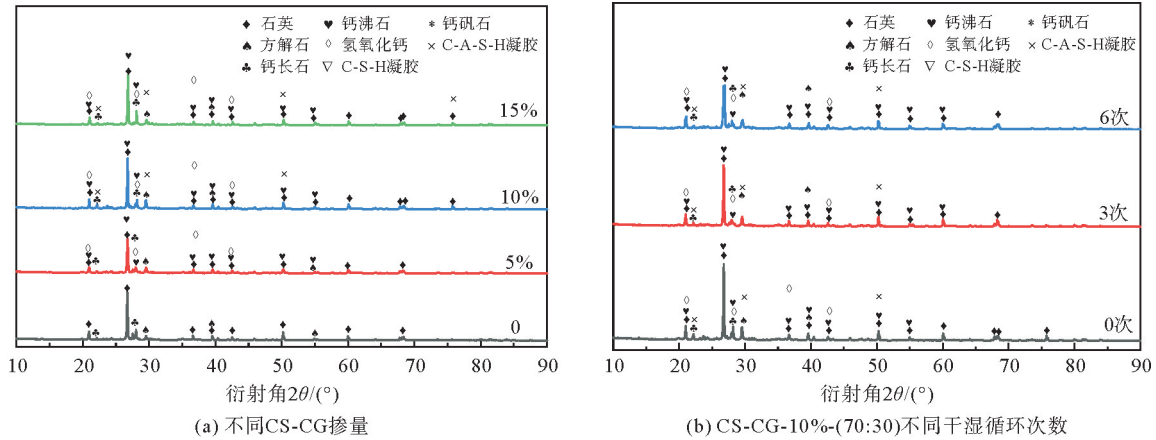


图 6 CS-CG 稳定土 XRD 试验结果

Fig. 6 XRD results of CS-CG stabilized soil

2.3.2 SEM 试验结果及分析

CS-CG 配比为 70 : 30 时,不同 CS-CG 掺量下稳定土的 SEM 试验结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着 CS-CG 掺量的增加,C-(A)-S-H 凝胶不断增加,土颗粒不断被包裹,同时孔隙与裂缝明显改善;CS-CG 掺量为 5% 时,有明显的 C-(A)-S-H 凝胶生成,但土颗粒裸露面积较大,水化产物无法将其包裹,存在明显的裂缝与孔隙,大孔隙较多且裂缝狭长;CS-CG 掺量为 10% 时,C-(A)-S-H 凝胶明显增多,胶凝材料对土颗粒的覆盖面积增大,大孔隙明显减少,裂缝长度也相应减小;CS-CG 掺量为 15% 时,水化产物已基本覆盖土壤表面,大孔隙基本不见,小孔隙逐渐增多。

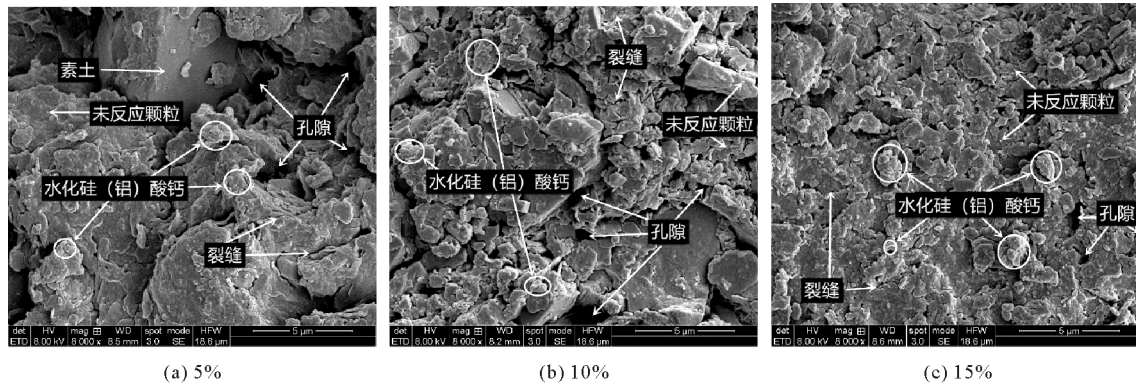
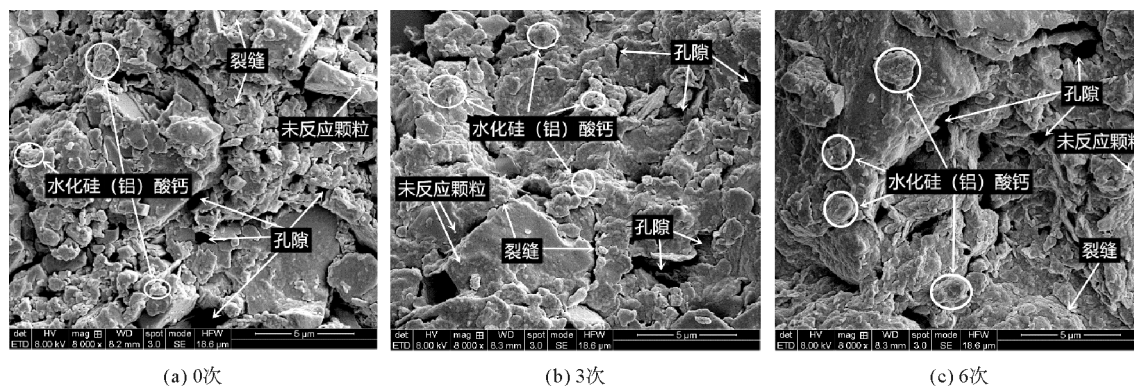


图 7 不同 CS-CG 掺量下稳定土 SEM 试验结果

Fig. 7 SEM images of stabilized soil with different CS-CG dosage

CS-CG-10%-(70 : 30)稳定土干湿循环 0、3、6 次后 SEM 图像如图 8 所示。对比图 8(a)与图 8(b)可知,干湿循环试验前期稳定土水化产物有小幅增加,但裂缝明显增长、孔隙增多,并且有进一步扩大的趋势,表现在宏观试验中其强度明显减小,这与前文结论一致。对比图 8(b)与图 8(c)可知,干湿循环试验前期与后期微观结构相差较大,干湿循环 6 次后,稳定土孔隙明显增大,同时 C-(A)-S-H 凝胶大幅增加并且有明显水侵蚀孔隙,致使许多小裂缝逐渐演化为狭长孔隙。在宏观试验中表现为干湿循环 6 次的稳定土强度大于 3 次的强度,这说明相比水侵蚀对稳定土的危害,大量 C-(A)-S-H 凝胶带来的强度更有效果。对比图 7 与图 8,均发现了未反应颗粒,且未发现 Ca(OH)₂、钙矾石等其他水化产物,原因是大量的 C-(A)-S-H 凝胶交织在一起形成致密的浆体^[22]。



(a) 0次 (b) 3次 (c) 6次

图 8 不同干湿循环次数下的 SEM 试验结果

Fig. 8 SEM images under different dry-wet cycles

2.3.3 MIP 试验结果及分析

结合文献[23],将孔隙按孔径尺寸划分为:小于 10 nm、10~100 nm、100~10 000 nm 和大于 10 000 nm 等 4 类,分别称为凝胶孔、过渡孔、毛细孔和非毛细孔。Powers 等[24]研究指出,在水泥基材料中,过渡孔即为 C-S-H 凝胶、氢氧化钙和钙矾石晶体等水化产物之间的孔隙;凝胶孔为胶凝颗粒之间相互连通的孔隙。CS-CG 配比为 70 : 30 时,不同 CS-CG 掺量下稳定土的 MIP 试验结果如图 9 所示。由图 9(a)可知,CS-CG 稳定土孔隙主要为土颗粒间的毛细孔,CS-CG 掺量分别为 5%、10%和 15%时,毛细孔占比分别为 75.5%、68.7%和 67.7%,过渡孔与胶凝孔占比分别为 17.4%、23.0%、23.9%和 1.7%、2.9%、4.2%。由图 9(b)可知,CS-CG 掺量越大孔隙总体积越小。试验结果表明,随着 CS-CG 掺量的增加,土颗粒间的大孔隙逐渐被填充,被水化产物间的孔隙以及胶凝颗粒相互连通的微小孔隙取代,稳定土强度得到提高。

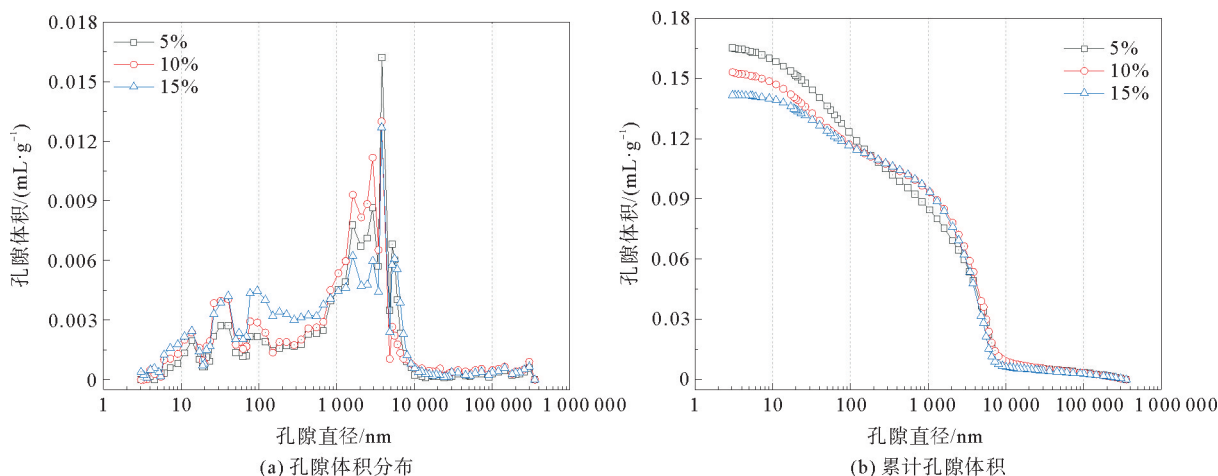


图 9 最佳配比不同掺量 MIP 试验孔径分布

Fig. 9 Pore distribution of MIP test under different CS-CG dosage

CS-CG-10%-(70 : 30)稳定土干湿循环 0、3、6 次后 MIP 试验结果如图 10 所示。由图 10(a)可知,干湿循环后稳定土的非毛细孔增加,0、3、6 次循环后占比分别为 5.4%、5.7%、6.0%,同时过渡孔与胶凝孔占比也增加,分别为 23.0%、23.5%、23.6%和 2.9%、3.0%、4.0%。说明经过干湿循环后大孔隙与微小孔隙均有所增加,干湿循环作用下稳定土受到水侵蚀的同时也促进了水化产物的生成。由图 10(b)可以看出,干湿循环次数增加,孔隙总体积略有增加,说明干湿循环大孔隙的出现并没有对总体孔隙体积产生较大影响,CS-CG 稳定土水稳定性良好。

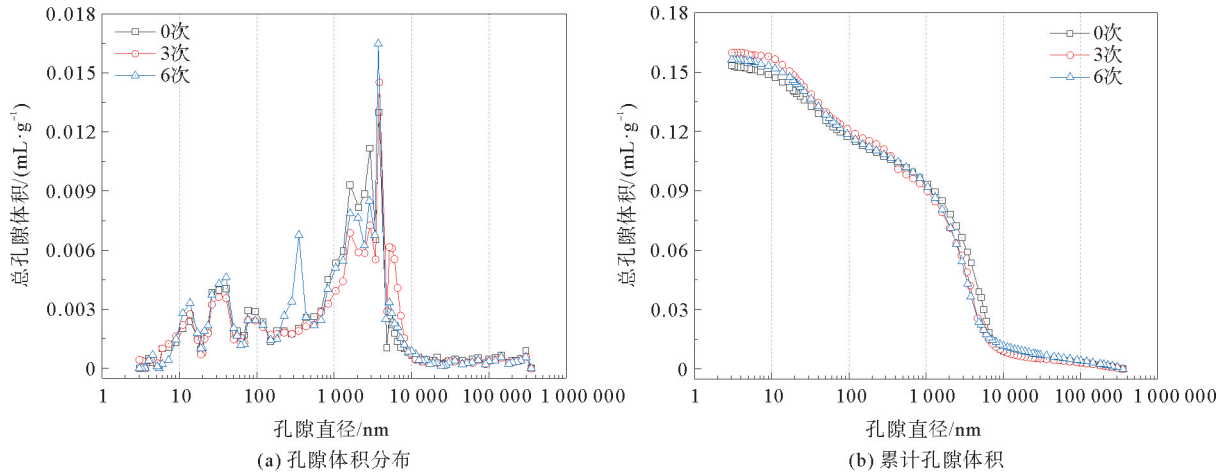


图 10 CS-CG-10%-(70 : 30) 稳定土干湿循环 MIP 试验孔径分布

Fig. 10 CS-CG-10%-(70 : 30) stabilized soil MIP test results after dry-wet cycles

3 结论与展望

本研究对 CS-CG 稳定土的力学特性、水稳定性、pH 值和微观特性进行研究,主要得出以下结论。

1) CS-CG 稳定土具有良好的水稳定性及承载能力,CS-CG-10%-(70 : 30)为最佳配比,其 28 d 无侧限抗压强度可达到 5.87 MPa,干湿循环 6 次后强度达到 4.77 MPa,其水稳定性优于水泥掺量 4% 的稳定土。

2) CS-CG 稳定土浸水 30 d 后强度随着 CS 占比的增加而增大,外掺 CS-CG-10%-(0 : 100)和 CS-CG-10%-(70 : 30)稳定土的强度分别为 6.29 和 5.74 MPa,相比未浸水分别增加了 54.01% 和 48.49%,强度均有大幅度增加。

3) 随着 CS-CG 掺量的增加及 CS 占比的增大,稳定土 pH 值逐渐增加;随着干湿循环次数的增加 pH 值略微减小,考虑到对土壤及环境的影响,CS-CG-10%-(70 : 30)的 pH 值较为合理,此时 pH 值为 9.71,呈弱碱性。

4) 掺加 CS-CG 后稳定土产生了大量的 C-(A)-S-H 凝胶、Ca(OH)₂ 及钙矾石等水化产物,改善了孔隙结构,进而促使稳定土强度增加;干湿循环后水化产物进一步增加,但孔径有所增大,干湿循环后期水化作用大于侵蚀作用,孔径尺寸分布及孔隙率得到改善,因此无侧限抗压强度未进一步减小。

此外,CS-CG 稳定土的工程应用潜力和对环境影响的深入分析仍然有待进一步研究,如修建试验路段、对水质影响等,以确保其可持续性和环境友好性。

参考文献:

[1] ZUO S, LI J, CUI X Z, et al. Study of the distribution and change law of stress in subgrade immersed in water in the Hetao irrigation area[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2021, 49(6): 4540-4549.

[2] 刘修宇. 季节性浸水软土区路基稳定性研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LIU Xiuyu. Investigation of embankment stability in soft soil area with seasonal soak[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[3] 韩延吉, 张永圣, 李皓. 高速公路浸水路路基稳定性研究综述[J]. 山东交通科技, 2022(4): 1-4.
HAN Yanji, ZHANG Yongsheng, LI Hao. Review on stability of soaking subgrade for expressway[J]. Shandong Transportation Technology, 2022(4): 1-4.

[4] 贾春峰. 山西省典型地貌区公路边坡水土流失及水土保持效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
JIA Chunfeng. Study on soil erosion and soil and water conservation effect of highway slope in typical geomorphic area of Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[5] 符策岭, 曾召田, 莫红艳, 等. 石灰改良膨胀土的工程特性试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 524-533.
FU Celing, ZENG Zhaotian, MO Hongyan, et al. Experimental study on the engineering characteristics of the improved expansive soils with lime[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(2): 524-533.

- [6] 吴燕开,王浩,苗盛瑶,等. 钢渣粉水泥改良膨胀土干湿循环下力学性能及机理分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021,40(2):41-50.
WU Yankai,WANG Hao,MIAO Shengyao,et al. Mechanical properties and mechanism of expansive soil modified by steels lag powder cement under dry-wet cycles[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021,40(2):41-50.
- [7] SUN C Y,ZHANG J,YAN C W,et al. Hydration characteristics of low carbon cementitious materials with multiple solid wastes[J/OL]. Construction and Building Materials,2022,322. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126366.
- [8] 关毓,陈霖溪,朱梦宇,等. 微波活化煤矸石对水泥基材料的性能影响[J]. 材料导报,2023,37(4):95-101.
GUAN Xiao,CHEN Jixi,ZHU Mengyu,et al. Effect of microwave activated coal gangue on properties of cement-based materials[J]. Materials Reports,2023,37(4):95-101.
- [9] WANG S B,LUO K L,WANG X,et al. Estimate of sulfur,arsenic,mercury,fluorine emissions due to spontaneous combustion of coal gangue:An important part of Chinese emission inventories[J]. Environmental Pollution,2016,209:107-113.
- [10] 冯春花,陈钰,黄益宏,等. 煤矸石骨料及其改性技术研究进展[J]. 硅酸盐通报,2023,42(1):133-143.
FENG Chunhua,CHEN Yu,HUANG Yihong,et al. Research progress on coal gangue aggregate and its modification technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(1):133-143.
- [11] LI Y F,LIU S H,GUAN X. Multitechnique investigation of concrete with coal gangue[J/OL]. Construction and Building Materials,2021,301. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124114.
- [12] XU B H,LIU Q F,AI B D,et al. Frost,thermal decomposition of selected coal gangue[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2017,131(2):1413-1422.
- [13] LU M,XIONG Z H,FANG K J,et al. Effect of promoters on steam reforming of toluene over a Ni-Based catalyst supported on coal gangue ash[J]. ACS Omega,2020,5(41):26335-26346.
- [14] 安赛,王宝民,陈文秀,等. 电石渣激发矿渣-粉煤灰复合胶凝材料的作用机制[J]. 硅酸盐通报,2023,42(4):1333-1343.
AN Sai,WANG Baomin,CHEN Wenxiu,et al. Interaction mechanism of carbide slag activating slag-fly ash composite cementitious materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(4):1333-1343.
- [15] CONG P L,MEI L N. Using silica fume for improvement of fly ash/slag based geopolymers activated with calcium carbide residue and gypsum[J/OL]. Construction and Building Materials,2021,275. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.122171.
- [16] GUO W C,ZHANG Z Y,ZHAO Q X,et al. Mechanical properties and microstructure of binding material using slag-fly ash synergistically activated by wet-basis soda residue-carbide slag[J/OL]. Construction and Building Materials,2021,269. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121301.
- [17] ZHANG H Z,HE Y C,GUAN Y H,et al. Statistical mixture design for carbide residue activated blast furnace slag foamed lightweight concrete[J/OL]. Construction and Building Materials,2022,342. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127840.
- [18] LIU Y,CHANG C W,A. NAMDAR A,et al. Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue[J]. Construction and Building Materials,2019,221:1-11.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程:JTG 3430-2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51-2009[S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [21] 杜延军,刘松玉,魏明俐,等. 电石渣改良路基过湿土的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6):1278-1285.
DU Yanjun,LIU Songyu,WEI Mingli,et al. Micromechanism of over-wet clayey soils stabilized by calcium carbide residues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(6):1278-1285.
- [22] CHEN K L,LIN W T,LIU W D,et al. Microstructures and mechanical properties of sodium-silicate-activated slag/co-fired fly ash acementless composites[J/OL]. Journal of Cleaner Production,2020,277. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124025.
- [23] HORPIBULSUK S,RACHAN R,CHINKULKIJNIWAT A,et al. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations[J]. Construction and Building Materials,2010,24(10):2011-2021.
- [24] Powers T C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste[J]. Journal of the American Ceramic Society,1958,41(1):1-6.