文章编号:1674-2974(2024)09-0133-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024094

地聚物固化黄土力学性能及边坡稳定性研究

唐先习[1],李昊杰[1†],李明泽[1],王之鲁[2]
(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050;
2. 中国铁路兰州局集团有限公司,甘肃 兰州 730000)

摘 要:研究以中国西北地区近年来黄土路基滑坡为背景.通过击实试验和直剪试验,测得不同地聚物掺量下固化土的试验数据,并通过扫描电镜(SEM)和X射线衍射(XRD)对钢渣-粉煤灰地聚物固化土进行微观结构分析,同时结合pF-Meter仪器测定不同地聚物掺量下固化土的基质吸力与体积含水率.后基于强度折减法,将试验数据代入COMSOL Multiphysics中,通过饱和-非饱和理论的Richards方程,建立固化黄土路基边坡有限元模型.分析降雨前后路基层中地聚物掺入量和坡比对路基边坡的整体稳定性的影响.结果表明:当固化土中地聚物掺入量为25%时,内摩擦角为31.2°,内摩擦角增幅相比于重塑黄土提高了62.5%.随着地聚物掺入量的增加,黏聚力呈现出先升后降的趋势,当地聚物掺入量为20%时达到最高峰,为81.09 kPa,相比于重塑黄土提高了75.86%.路基边坡的稳定性随着地聚物掺入量的增加先上升后下降,随着坡比减小而上升.在特定条件下,边坡稳定性会随着降雨时间的延长而降低,随着降雨强度的增大而减小.

关键词:地聚物;有限元法;边坡稳定性;滑坡;固化黄土
中图分类号:TU444 **文献标志码**:A

Study on Mechanical Properties and Slope Stability of Geopolym Solidified Loess

TANG Xianxi[1], LI Haojie[1†], LI Mingze[1], WANG Zhilu[2]
(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: The research background focused on the occurrence of loess roadbed landslides in northwest China in recent years. The test datas of solidified loess with different geopolymer content were measured through compaction and direct shear tests. Additionally, the microstructure of steel slag-fly ash geopolymer solidified loess was examined using the scanning electron microscope (SEM) test and X-ray diffraction (XRD) test, and the pF-Meter instrument was used to measure the matrix suction and volumetric moisture content of the solidified loess with different geopolymers content. The test datas were then imported into COMSOL Multiphysics based on the strength reduction method, and the finite element model of the solidified loess roadbed slope was created using the Richards

* **收稿日期**:2023-09-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11962016),National Natural Science Foundation of China (11962016);中国铁路兰州局集团有限公司资助项目(LTKY2023036-1),Funded Projects by China Railway Lanzhou Group Co., Ltd. (LTKY2023036-1)
作者简介:唐先习(1972—),男,山东济宁人,兰州理工大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail:lihaojie977@163.com

equation of the saturated-unsaturated theory. The impact of geopolymer content and slope ratio in the roadbed layer on the overall stability of the roadbed slope before and after rainfall was analyzed. The results indicate that when the solidified loess contains 25% geopolymer, the internal friction angle increases by 62.5% compared to reshaped loess, reaching 31.2°. The cohesion exhibits a trend of initially increasing and then decreasing as the geopolymer content increases. The highest peak is reached at 81.09 kPa when the geopolymer content is 20%, which is 75.86% higher than the cohesion of reshaped loess. The stability of the roadbed slope initially increases and then decreases with an increase in geopolymer content, while it increases with a decrease in slope ratio. Under specific conditions, slope stability decreases with prolonged rainfall duration and reduces with higher rainfall intensity.

Key words: geopolymers; finite element method; slope stability; landslides; solidified loess

中国黄土广泛分布在西北、华北与东北地区,尤其集中分布在被称为中央黄土高原的陕西、甘肃、山西以及宁夏等省区[1].近些年来我国湿暖线北移,导致西北地区极端降雨频发、汛期延长,陕北黄土地区在2013年、2017年和2021年高频次出现极端降雨,其中2013年连续降雨时长达12天,累计降水量达到568 mm,对人民群众的生命和财产安全构成威胁[2].因此,改善黄土边坡的强度,预防黄土滑坡给人类带来的灾难具有十分重要的实际工程意义.

边坡的加固和防护通常包含物理固坡、生物固坡和化学固坡.物理固坡通常采用锚杆、抗滑桩、高分子化学纤维和植物纤维,以及植物根部对土壤的加筋作用等来提高边坡稳定性;生物固坡则通常是通过生物诱导和催化生成胶凝物质填充土体结构,从而达到固化边坡土体的目的;而化学固化边坡则通常使用化学物质和矿物的一些水化反应等,如水玻璃和废弃矿渣水化产物,以及一些土壤黏合剂等来提高土壤之间的黏结力.随着全球气候不断恶化,采用绿色、低碳、低耗能和经济的工程材料来解决黄土边坡带来的危害并响应国家绿色发展理念变得尤为重要.目前,我国处理废弃尾矿渣仍存在困难,而钢渣作为钢铁企业中利用率比较低的一种大宗固体废物,未利用的钢渣堆放量高达10亿t,其综合利用率仅为20%左右[3-4].钢渣是炼钢过程中的副产品,具有耐磨、抗滑和高碱性等特性,具有作为优质集料的潜质.道路建设是钢渣利用的一个主要途径,欧洲约有39%~62%的钢渣用于道路建设,而我国用于道路建设的钢渣不足8%,与发达国家还存在较大差距[5].1978年,Davidovits首次提出了一种新型的绿色胶凝材料,称为地质聚合物.该材料可使用粉煤灰和一些矿渣作为生产原料,并且广泛应用于道路修复等领域[6-8].研究发现,钢渣是一种水硬性掺合料,通过激发剂作用可形成凝胶,发挥镶嵌和填充作用,因此,钢渣可作为地质聚合物的原材料之一[9].

邓永锋等[10]研究发现,钢渣可用于软土加固,当钢渣掺量为20%时,固化软土28 d龄期无侧限抗压强度可达1.2 MPa.曹娃等[11]在粉煤灰-钢渣地质聚合物的抗压强度试验研究中发现,在粉煤灰和钢渣的协同作用下,制备地质聚合物复合胶凝材料具有较好的早期和后期强度.王旭影等[12]研究发现,利用电石渣激发钢渣-矿渣固化淤泥质土,能使固化后的淤泥质土强度显著提高.Li等[13]研究发现,利用钢渣和脱硫石膏作为土壤固化剂,在碳化的养护条件下,有助于提高固化土的极限抗压强度和缩短养护周期.Cristelo等[14]和Liu等[15]利用碱激发粉煤灰来固化黄土和改良软土,结果表明碱性激活下的粉煤灰能有效提高土体强度和改善微观结构.Cui等[16]为了实现低碳绿色固土,发现利用钢渣代替水泥能有效提高黏土的抗压强度.Syahril等[17]利用火山灰和尾矿来固化路基层土壤,通过无侧限抗压强度试验发现固化土的承载能力大于原状土的承载能力.

目前,大多研究采用单一的钢渣、粉煤灰或水泥等作为地聚物原料,或者将它们组合在一起.但由于这些地聚物原料单一或缺乏激活剂,因此对土的胶结作用非常有限.本文利用钢渣和粉煤灰作为原材料,采用水玻璃溶液作为碱性激发剂制备了地聚物固化黄土路基边坡.通过研究发现,土体黏聚力对边坡安全系数影响最为显著,其次是土体的内摩擦角

和坡比等[18-20].研究利用最大干密度和最优含水率来消除压实度对边坡稳定性的影响,同时考虑固化土的内摩擦角和黏聚力对边坡稳定性的综合影响.对不同地聚物掺量的固化土进行击实试验和直剪试验,测得不同地聚物掺量下固化土的试验数据,并通过扫描电镜(SEM)试验和X射线衍射(XRD)试验对钢渣-粉煤灰地聚物固化黄土进行成分结构分析,同时结合pF-Meter仪器测定不同地聚物掺量下固化土的基质吸力与体积含水率的关系.将试验数据代入COMSOL Multiphysics进行数值分析,在不同的降雨条件下,研究不同坡比和地聚物的掺量对路基边坡稳定性的影响.

1　试验研究

1.1　试验材料

试验土样来自兰州市某路基边坡处,呈黄褐色,属于粉质黏土.将所取的土样进行碾碎和烘干后,过2 mm的筛.根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)[21]对试验用土进行室内土工试验,其基本物理性质指标见表1.本试验使用的原料为黄土、钢渣、粉煤灰和水玻璃溶液(图1).钢渣和粉煤灰的基本化学成分(质量分数)见表2,矿物组成成分和颗粒级配分别见图2和图3.根据林宗寿等[22]、侯云芬等[23]和Zhou等[24]研究发现,随着水玻璃模数降低和波美度增大,水玻璃溶液激发粉煤灰地聚物的抗压强度增大,钢渣和粉煤灰掺入质量比为1∶2,水玻璃溶液掺入量为地聚物总质量的20%为较优条件.试验所用水玻璃溶液购自无锡市某公司,模数为2.31[其中Na_2O质量分数为12.8%,SiO_2质量分数为29.2%,波美度为50 °Be′/(g·cm^{-3})],试验用来调节水玻璃溶液模数的NaOH来自实验室化学物质分析纯试剂.因此,本试验采用的地聚物为粉煤灰和钢渣的质量比2∶1,水玻璃溶液的掺量为地聚合物质量的20%.水玻璃溶液的模数为1.2,波美度为30 °Be′/(g·cm^{-3}).



(a)黄土　(b)粉煤灰　(c)钢渣　(d)水玻璃溶液

图1　试验原料

Fig.1　Test material

表1　土壤基本物理性质指标

Tab.1　Indicators of basic physical properties of soil

塑限/%	液限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm^{-3})	最优含水率/%
21.4	29.7	8.3	1.74	16.45

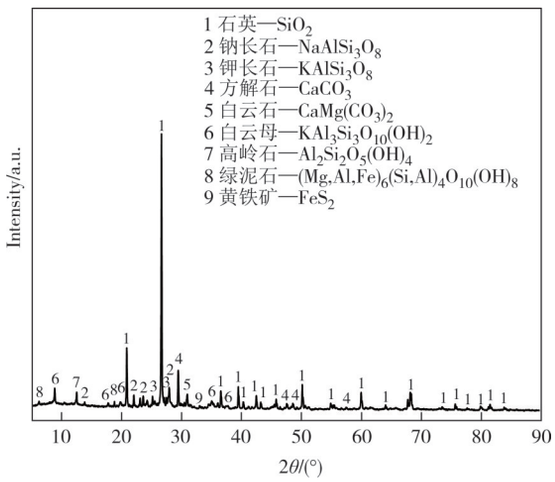
表2　钢渣和粉煤灰的基本化学成分

Tab.2　Basic chemicd compositions of steel slag and fly ash

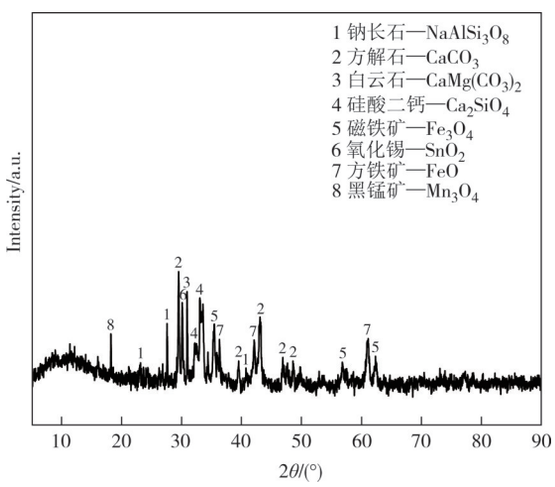
材料	质量分数/%					
	SiO_2	CaO	Na_2O	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3
钢渣	16.28	36.6	2.6	25.1	3.6	4.35
粉煤灰	53.97	4.02	0.9	4.16	1.01	31.2

1.2　击实试验与试样制备

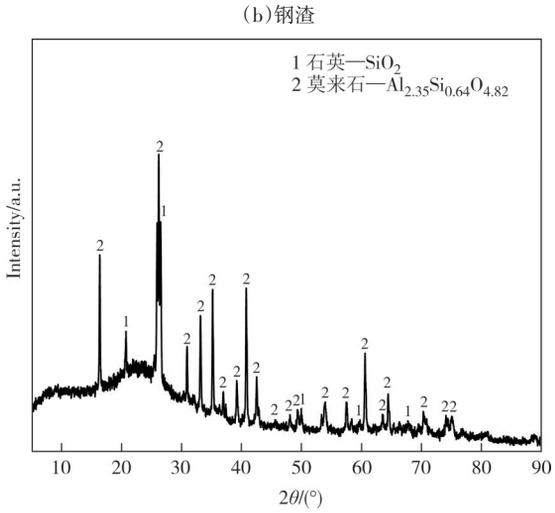
通过控制黄土-地聚物的总质量和改变不同地聚物占总质量的比例[0%(重塑黄土)、5%、10%、15%、20%、25%],研究不同地聚物掺量对黄土路基边坡稳定性的影响.击实试验为轻型击实试验,采用干掺法将固化土搅拌均匀,并将水玻璃溶液和蒸馏水混合后均匀地喷洒在拌合料中,然后将拌合料装入聚乙烯塑料袋密封,在恒温恒湿箱内静置24 h后进行击实试验,测得不同地聚物掺量试件的最大干密度和最优含水率,见图4.采用双向静力压实法,制备Φ6.18 cm×H 2 cm试件,完成制备后迅速将试件用多层保鲜膜密封,然后将试件置于恒温恒湿箱中,设置温度为(20 ±2) ℃,相对湿度为95%进行养护,养护28 d.



(a)黄土



(b)钢渣



(c)粉煤灰

图 2 XRD 分析谱

Fig.2 XRD analysis spectrum

1.3 XRD 及水化反应分析

图 5 为重塑黄土养护 28 d 后的 XRD 图谱,其主要矿物成分为石英(SiO_2),除此之外还有钠长石($NaAlSi_3O_8$)、钾长石($KAlSi_3O_8$)、方解石($CaCO_3$)、白云石[$CaMg(CO_3)_2$]、白云母[$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$]、高岭石[$Al_2Si_2O_5(OH)_4$]和绿泥石[$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$]等晶体物相存在.

图 6 为固化土养护 28 d 后的 XRD 图.由图 6 可以看出,在添加地聚合物后固化土的主要成分仍为

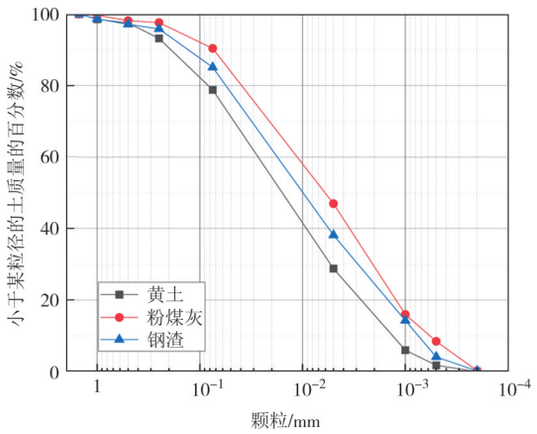


图 3 颗粒级配曲线

Fig.3 Particle grading curves

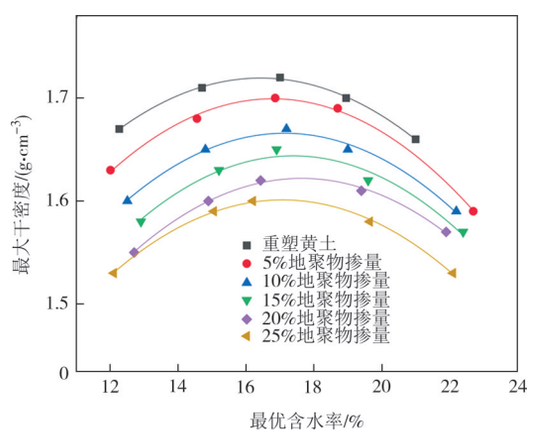


图 4 固化土与重塑黄土的击实曲线

Fig.4 Compaction curve of solidified loess and remolded loess

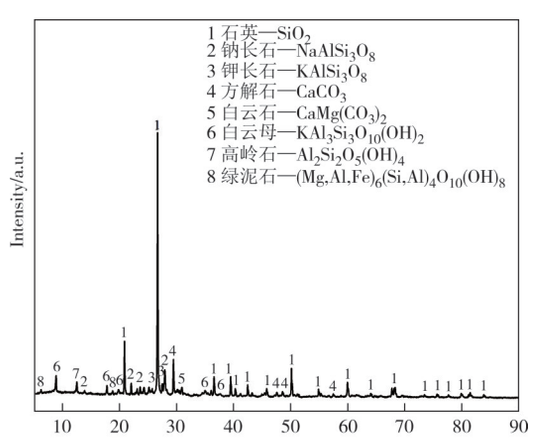


图 5 重塑黄土养护 28 d 后的 XRD 图谱

Fig.5 XRD pattern of remolded loess after 28 days of curing

石英(SiO_2),这与重塑黄土的衍射图样基本一致.而石英(SiO_2)、钠长石($NaAlSi_3O_8$)和方解石($CaCO_3$)等矿物的衍射强度则有所减弱,这是地聚合物比例增加所致.此外,致密和低非晶态峰的存在表明地聚合物发生了水化反应并生成了新的物质.钢渣和粉煤灰表现出协同作用,钢渣释放出大量的Ca^{2+},在水玻璃碱剂的刺激下,这些离子与粉煤灰水化形成的硅(铝)氧四面体结合,形成无定形水化硅酸钙(C—S—H)和水化硅酸铝钙(C—A—S—H)凝胶.具体反应式如式(1)和式(2)所示.

$$Ca^{2+}+\left[SiO_2(OH)_2\right]^{2-}+H_2O\longrightarrow CaO\cdot SiO_2\cdot H_2O \tag{1}$$

$$Ca^{2+}+2\left[(OH)_3Al-O-SiO_2(OH)\right]^{3-}+H_2O\longrightarrow CaO\cdot Al_3O_2\cdot SiO_2\cdot H_2O \tag{2}$$

随着时间的推移,胶凝物质不断增加.特别是当水玻璃溶液作为碱性活化剂时,现象更明显,因为它加速了钢渣-粉煤灰的水化反应,促进了C—S—H和C—A—S—H的更快生成.形成的胶状物质填补了黄土颗粒之间的孔隙,使试样结构更加致密.最终,固化土的整体稳定性和力学性能得到了提高.

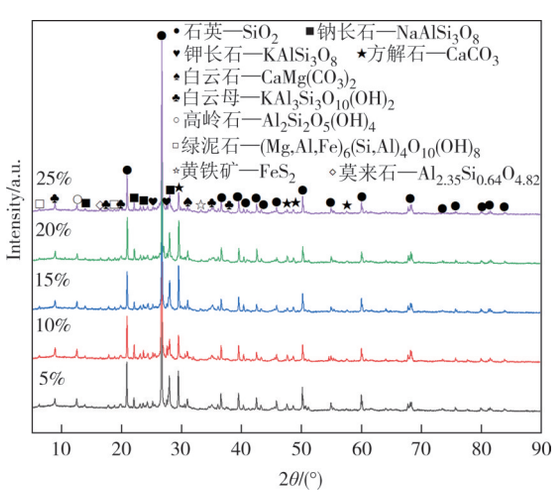


图 6　固化土养护 28 d 后的 XRD 图谱

Fig.6　XRD pattern of solidified loess after 28 days of curing

1.4　直剪试验

将在恒温恒湿条件下养护 28 d 直径为 61.8 mm、高度为 20 mm 的试件,采用 Z-J 型应变控制式直剪仪开展直剪试验,剪切速率设置为 0.08 mm/min,试验中施加的垂直压力为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa.然后测定不同地聚物掺量下固化土的抗剪强度,并计算内摩擦角和黏聚力.

通过比较图 7 中不同地聚物掺量下固化土内摩擦角和黏聚力发现,随着固化土中地聚物掺入量的增加,其内摩擦角先增大后趋于稳定,重塑黄土的内摩擦角为 19.2°,地聚物掺入量为 25% 时固化土内摩擦角为 31.2°,内摩擦角的增幅为 62.5%.黏聚力则先增大后减小,重塑黄土的黏聚力为 46.11 kPa,地聚物掺量为 20% 时达到顶峰 81.09 kPa,增幅为 75.86%.当地聚物掺量为 25% 时,其黏聚力则降为 69.96 kPa.主要是因为钢渣的棱角较为丰富,与土体之间有较强的咬合力,随着钢渣掺入量的增加,钢渣与黄土的总接触表面积增大,有利于增大固化土的内摩擦角.钢渣和粉煤灰在碱性水玻璃溶液的活性激发下能生成C—S—H和C—A—S—H凝胶,形成絮状胶凝物质填充在土颗粒之间,可以增加土颗粒之间的内部结构的联系,从而提高黏聚力.当地聚物加入超出一定量时,黄土的净含量占比减少,使得黄土骨架减少,胶凝材料呈团状,不能很好地对土颗粒之间的空隙进行填充,胶凝材料附着在土体表面,使得固化土的力学性能下降,见图 8(c).因此,在加入地聚物后,固化土的内摩擦角和黏聚力综合性能有所提升.这说明地聚物的掺入对黄土路基边坡的稳定性和抗雨水冲刷能力有明显的提高.

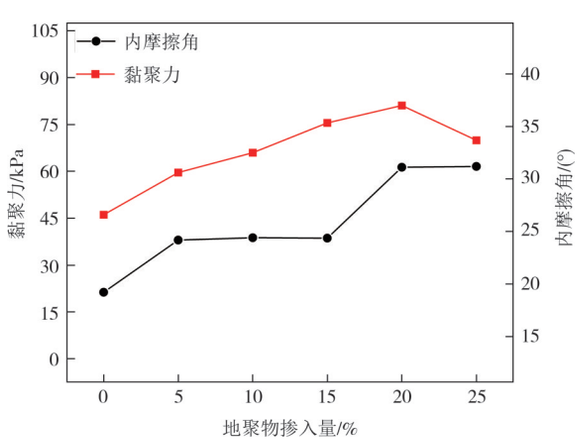
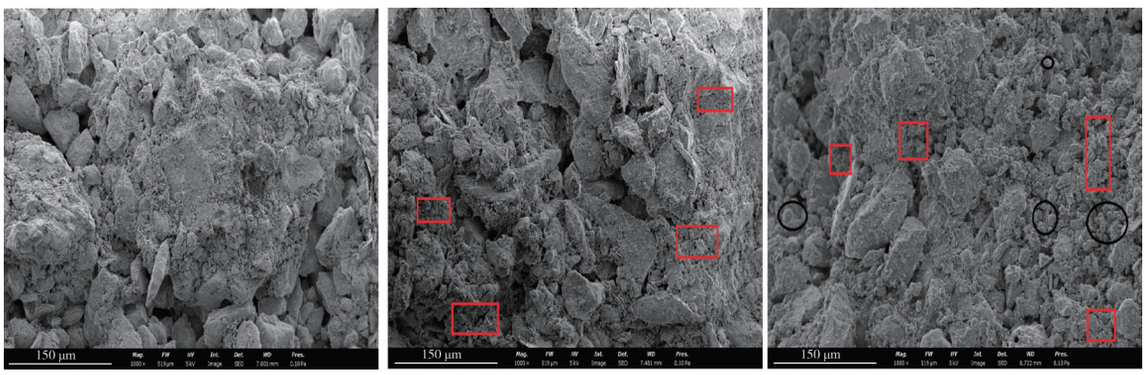


图 7　固化土的内摩擦角与黏聚力

Fig.7　Internal friction angle and cohesion of solidified loess

1.5　基质吸力与土水曲线的测定

pF-Meter 土壤水势传感器采用特殊设计的陶瓷平衡系统,基于摩尔热容原理直接测量热容变化,通过内部微控制器 MCU 转化得到精准的土水势值.pF-Meter 传感器具有测量值不受盐分影响、适用温度范围广的优点,另外,该传感器测量范围广(0 ~ 10^6 kPa).



(a)地聚物掺量0% (b)地聚物掺量20% (c)地聚物掺量25%

图8 养护28 d后不同地聚物掺量下固化土的SEM图

Fig.8 SEM images of solidified loess with different content of geopolymer after 28 days

SM926土壤温-湿-盐传感器可以在同一时间内测量土壤水分、土壤温度和电导率.使用蒸馏水依次配置6种不同地聚物掺入量(0%、5%、10%、15%、20%、25%)的固化土样,随后将土样置于聚乙烯塑料袋密封24 h以保证土样中的水分均匀分布.再将各土样分别装在塑料容器内,使用工具分层捣实,随后在固化土壤中插入pF-Meter传感器和SM926土壤温-湿-盐传感器,采用专用SD60数据采集仪记录试验数据.实时监测基质吸力与体积含水率的变化情况,试验装置见图9.分析计算得出不同地聚物掺入量下固化土的土水曲线见图10.

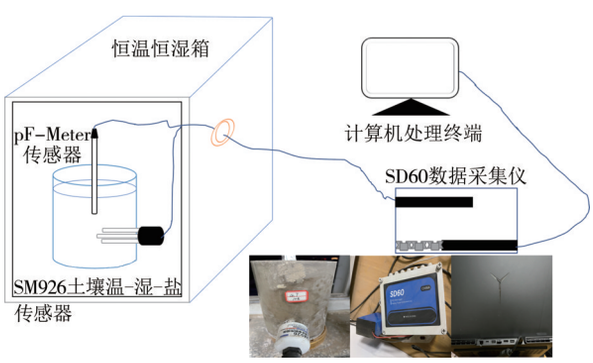


图9 试验装置图

Fig.9 Test device diagram

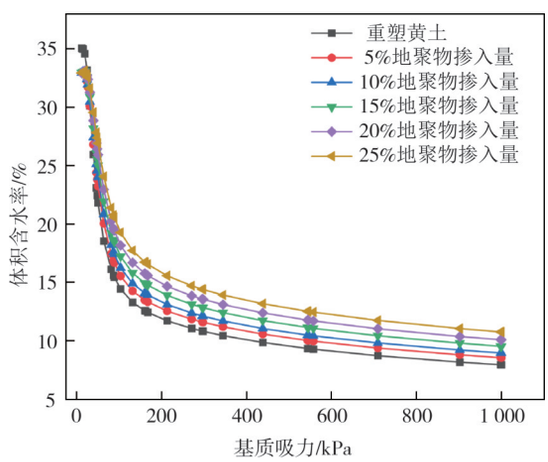


图10 固化土基质吸力曲线

Fig.10 Matrix suction curve of solidified loess

2 边坡理论分析与建模

2.1 理论基础

研究降雨对边坡稳定性影响,需要考虑降雨入渗边坡土体问题.由于雨水入渗是一个非线性变化的量,计算起来十分繁琐,为了避免最大入渗难以确定问题,以空隙水压力p表示Richards饱和-非饱和渗流方程[25],见式(3).

$$\rho\left(\frac{C_{\mathrm{m}}}{\rho g}+S_{\mathrm{e}}\right)\frac{\partial p}{\partial t}+\nabla\rho\left(-\frac{K_{\mathrm{s}}}{\mu}K_{\mathrm{r}}(\nabla p+\rho g\nabla D)\right)=Q_{\mathrm{m}} \tag{3}$$

式中:C_{m}为持水系数;S_{e}为饱和度;K_{r}为相对渗透率;K_{s}为渗透率;Q_{m}为源汇项.

其中非饱和水利参数用C_{m}、S_{e}和K_{r}表示,Van-Genuchten模型[26],如式(4)~式(7)所示:

$$\theta=\begin{cases}\theta_{\mathrm{r}}+S_{\mathrm{e}}(\theta_{\mathrm{s}}-\theta_{\mathrm{r}}), H_{\mathrm{p}}<0\\ \theta_{\mathrm{s}}, H_{\mathrm{p}}\geqslant 0\end{cases} \tag{4}$$

$$S_{\mathrm{e}}=\begin{cases}\dfrac{1}{\left[1+|\alpha H_{\mathrm{p}}|^{n}\right]^{m}}, H_{\mathrm{p}}<0\\ 1, H_{\mathrm{p}}\geqslant 0\end{cases} \tag{5}$$

$$C_{\mathrm{m}}=\begin{cases}\dfrac{am}{1-m}(\theta_{\mathrm{s}}-\theta_{\mathrm{r}})S_{\mathrm{e}}^{\frac{1}{m}}(1-S_{\mathrm{e}}^{\frac{1}{m}})^{m}, H_{\mathrm{p}}<0\\ 0, H_{\mathrm{p}}\geqslant 0\end{cases} \tag{6}$$

$$K_{\mathrm{r}}=\begin{cases}S_{\mathrm{e}}t[1-(1-S_{\mathrm{e}}^{\frac{1}{m}})^{m}]^{2}, H_{\mathrm{p}}<0\\ 1, H_{\mathrm{p}}\geqslant 0\end{cases} \tag{7}$$

式中:S_e为有效饱和度;θ为体积含水率;θ_s为饱和体积含水率;θ_r为残余体积含水率;m、n、a为V-G模型的本构参数.

强度折减法[27-28]是将土体的抗剪强度除以折减系数F_r,代入计算分析.在外界条件不变的情况下,坡体正好被破坏时的折减系数就是坡体的稳定系数,本文以辅助扫描的方法将折减系数从0.7逐渐增大并代入COMSOL Multiphysics有限元中进行分析,来确定坡体的稳定系数,土的强度折减如式(8)和式(9)所示.

$$\varphi_r = \arctan\frac{\tan\varphi}{F_r} \tag{8}$$

$$c_r = \frac{c}{F_r} \tag{9}$$

式中:φ、c分别为内摩擦角和黏聚力;φ_r、c_r分别为折减后的内摩擦角和黏聚力.

2.2　边坡模型建立与参数设定

本文采用COMSOL Multiphysics有限元结合Mohr-coulomb屈服准则对土体位移、变形和破坏进行计算.由于在物理场的作用下,边坡的孔隙压力和初始应力随时间的变化不断发生改变,故采用多层递进的方法,先计算在弹性应变条件下路基边坡的孔隙压力和初始应力,将计算结果作为下一步塑性变形的初始孔隙压力和初始应力.边坡降雨过程属于动态过程,即求解降雨对边坡的影响为瞬态研究.最后利用强度折减法对边坡稳定性进行研究,分别在路基层中掺入不同含量地聚物、不同降雨工况和不同坡比条件下,对边坡稳定性和变形位移进行研究.

2.2.1　算例模型的验证

采用现有文献案例进行验证,该案例由费康等[29]、田泽润等[30]用多种方法进行验证性分析,按极限平衡法最终算出稳定系数F_{OS} = 1.00.验证边坡模型尺寸为高H = 10 m、长L = 20 m、层高比为3/13和坡角β = 45°的均质土坡(图11);土体容重为γ = 20 kN/m^3、黏聚力为c = 12.38 kPa和摩擦角为φ = 10°.验证案例基于本文边坡理论模型建立,稳定性分析结果如图12所示,边坡破坏前最大位移量如图13所示.

由图12和图13可知,基于本文边坡理论模型下得出的边坡稳定系数与理论值相符,当稳定系数接近F_{OS} = 1.02时边坡最大位移发生突变,边坡稳定系数与理论模型验证结果误差仅为0.02,故基于本文建立的边坡理论模型是可靠有效的.

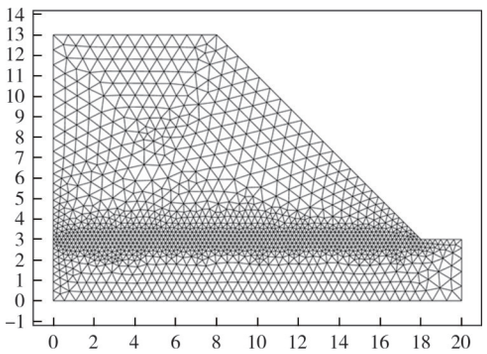


图11　验证模型有限元划分(单位:m)

Fig.11　Verify the finite element division of the model(unit:m)

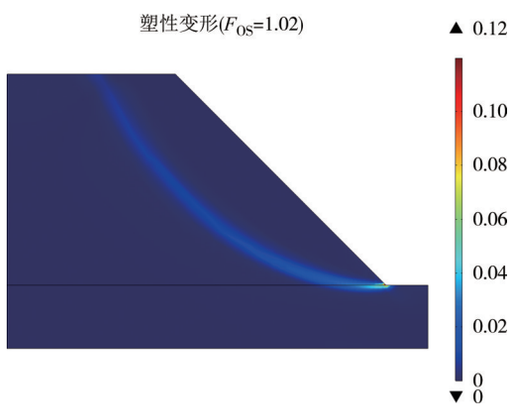


图12　边坡稳定性分析(稳定性失效)

Fig.12　Slope stability analysis (stability failure)

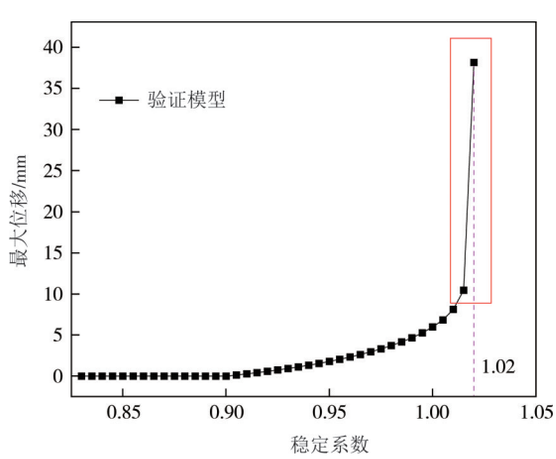


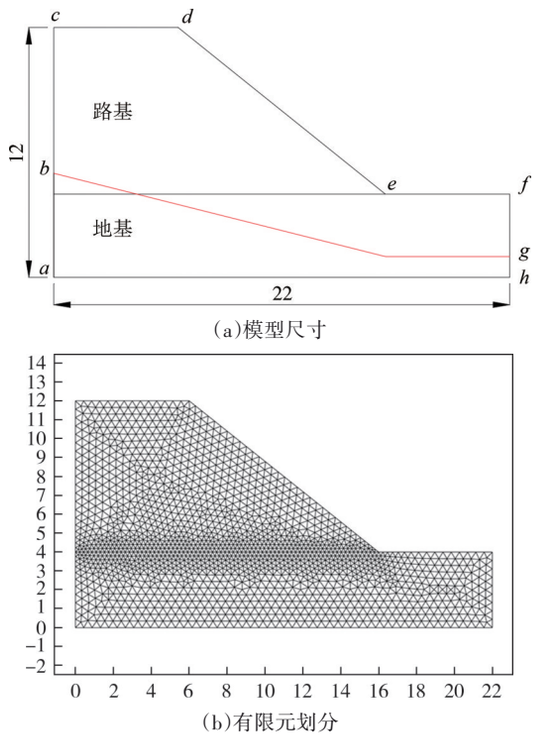
图13　最大位移量随稳定系数变化曲线

Fig.13　Curve of maximum displacement with stability coefficient

2.2.2　数值模型的建立及参数选取

通过实地调查研究和工程分析,用CAD绘制边坡模型,底边长为22 m,上下垂直距离为12 m,坡顶边长为6 m,ef边长也为6 m.后将模型导入有限元软件COMSOL Multiphysics并进行网格划分,网格顶点单元数14,边界单元数229,总单元数3 413.设定以下边界条件:下边界为固定约束,左右边界为水平方向的固定约束,cd、de、ef为降雨入渗边界.模型中地

表水位 ab 为 5 m,hg 为 1 m,位于地下水以上的基质吸力层呈线性分布,详见图 14.



(a)模型尺寸

(b)有限元划分

图 14 模型尺寸及有限元划分(单位:m)

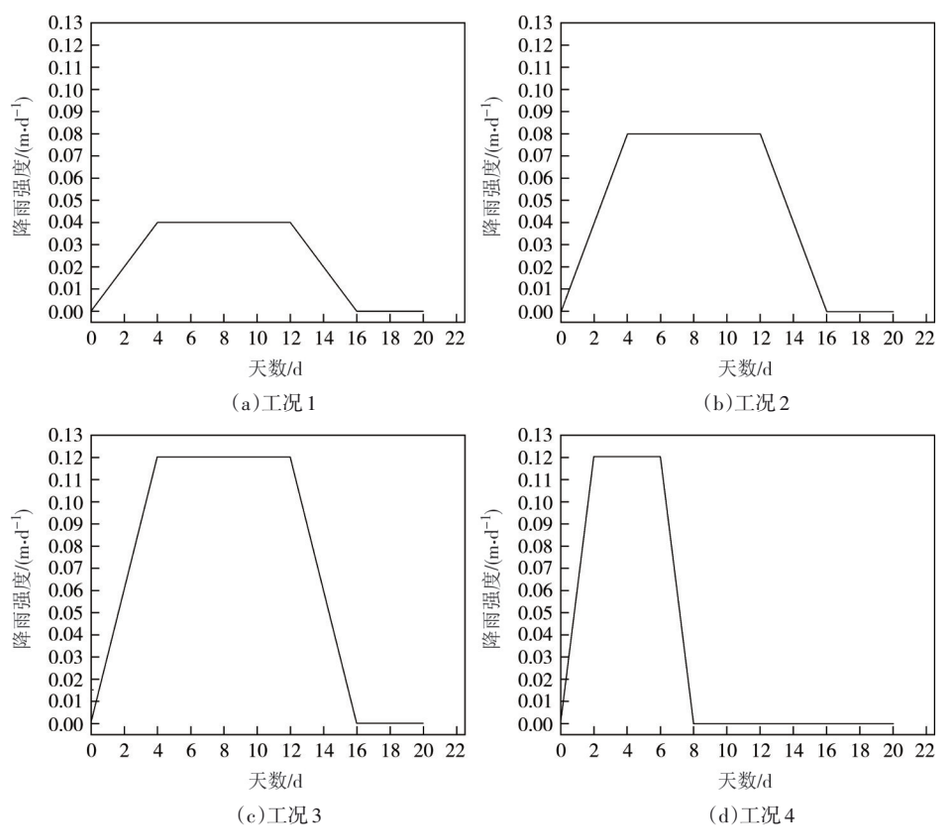
Fig.14 Model size and finite element division (unit: m)

为了研究不同极端降雨条件下路基边坡的稳定性,拟采用 4 种不同的降雨工况,如图 15 所示.在降雨条件下,路基层中固化土的水力参数由土工试验和传感器所得,见表 3.

3 边坡的稳定性分析

3.1 降雨前的边坡稳定性分析

土质边坡的稳定性,常用有限元强度折减法求得.由于无法直接用公式计算出边坡的稳定系数,可通过限值的收敛性来判断边坡是否发生破坏[31-32].当计算出现不收敛时,可认定边坡处于失稳状态,从而得到不同地聚物掺量下边坡的稳定性.试验时通过改变路基层中土体地聚物的掺量,来改变土体的抗剪强度和水力参数.将测得土样的试验数据,代入边坡模型参数设置中,建立三种边坡模型,坡比分别为 1∶1、4∶5 和 2∶3,并计算边坡的稳定系数,绘制如图 16 所示的折线图.由图 16 可知,随着地聚物掺入量的增加,不同坡比条件下的路基边坡稳定系数均呈现先上升后下降的趋势.当地聚物掺入量为 20% 时,路基边坡的稳定系数达到最大值.坡比为 1∶1、4∶5 和 2∶3 时,重塑黄土的稳定系数分别为 2.725、2.885



(a)工况 1

(b)工况 2

(c)工况 3

(d)工况 4

图 15 4 种不同的降雨工况

Fig.15 Four different rainfall scenarios

表 3　试验参数

Tab.3　Test parameters

固化土地聚物掺入量/%	土的容重/(kN·m^{-3})	杨氏模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	饱和含水率/%	残余含水率/%	a	n	l
0	16.45	100	0.26	46.11	19.20	35.0	7.9	1	2	0.5
5	16.88	100	0.26	59.62	24.18	30.0	8.5	1	2	0.5
10	17.19	100	0.26	65.99	24.4	20.0	9.0	1	2	0.5
15	17.64	100	0.26	75.53	24.30	28.5	9.5	1	2	0.5
20	17.90	100	0.26	81.09	31.12	28.2	10.0	1	2	0.5
25	17.30	100	0.26	69.96	31.20	28.9	11.0	1	2	0.5

和 3.03;当路基层掺入 20% 地聚物时,边坡的稳定系数分别为 3.21、3.365 和 3.525,较重塑黄土的稳定系数分别提升了 17.80%、16.64% 和 16.34%.

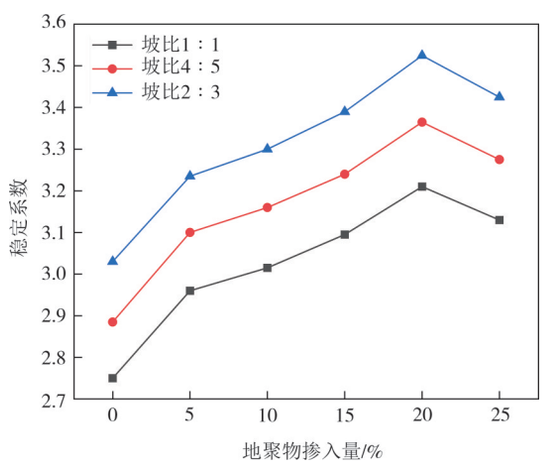


图 16　不同坡比条件下边坡稳定系数随地聚物掺入量变化折线图

Fig.16　Curve diagram of slope stability coefficient with different geopolymer content under different slope ratio

图 17 为路基边坡在发生破坏(即边坡模型失去收敛性)前的最大位移曲线.从图 17 中可以看出,在同一坡比条件下,路基层中掺入地聚物可以提高路基边坡发生破坏前的最大位移量;在相同路基填料条件下,随着坡比的减小,路基边坡发生破坏前的最大位移量也会不断增大.当坡比分别为 1∶1、4∶5 和 2∶3 时,黄土路基在破坏前的最大位移分别为 269.72 mm、634.91 mm 和 903.95 mm;而掺入 20% 地聚物时,路基破坏前最大位移量分别增至 612.0 mm、1 310.35 mm 和 1 482.14 mm.这是因为坡比一定时,掺入 20% 地聚物后,固化土的综合性能(包括内摩擦角和黏聚力)达到了最优值,20% 掺量下的固化土黏聚力最大,与 25% 掺量下的固化土相比内摩擦角几乎没有发生变化.因此,当地聚物掺入量为 20% 时,对路基边坡的稳定性提升最为明显.使得边坡抗破坏强度、抗滑动能力和延展性得到提高.此结果能够在一定程度上起到预警作用,减少滑坡和泥石流对人类的影响.

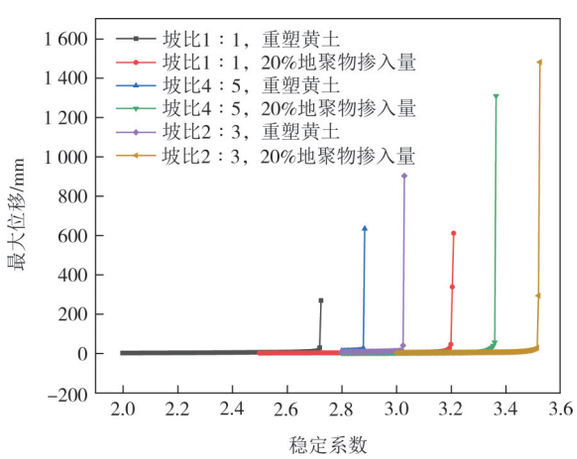


图 17　边坡破坏前最大位移图

Fig.17　Maximum displacement diagram of slope before failure

3.2　降雨对边坡稳定性影响分析

边坡降雨过程使得边坡土体从非饱和状态逐渐趋于饱和状态,含水率分布剖面依次可以分为 4 个区:浅层的饱和带、含水率变化较大的过渡带、含水率分布较均匀的传导区和湿润度随深度减小的湿润区[33].

图 18 为不同条件下,坡比为 4∶5 的边坡稳定系数随着降雨时间变化曲线图.由图中可以看出,在不同降雨工况下,边坡的稳定性主要受路基层地聚物掺入量的影响,随着路基层中地聚物掺入量的增加,边坡稳定性先提高后减弱.在降雨第 12 d,对于工况 1、工况 2 和工况 3,路基层中掺入 20% 地聚物时,边坡稳定系数分别为 3.19、2.94 和 2.675,分别是黄土边坡稳定系数的 1.18 倍、1.2 倍和 1.23 倍.从图 18(a)、18(b)和 18(c)中可以看出,在降雨第 12 d,路基边坡在工况 3 条件下,路基层中地聚物掺入量为 20% 时,

边坡稳定系数分别是工况2和工况1的92%和84%.由此可知,边坡的稳定性受降雨强度影响,随着单位降雨量的增加而下降.在工况4条件下,从第6 d开始降雨强度逐渐减小,直至第8 d降雨结束.第6 d时边坡的稳定性最低,随着降雨强度的减小直至结束,边坡稳定性缓慢恢复,但在短期内未完全恢复至初始状态.这是因为受土体含水率的影响,降雨引起边坡发生变形位移和塑性变形,短时间内难以恢复,因此周期性的降雨对边坡破坏具有不可逆性.

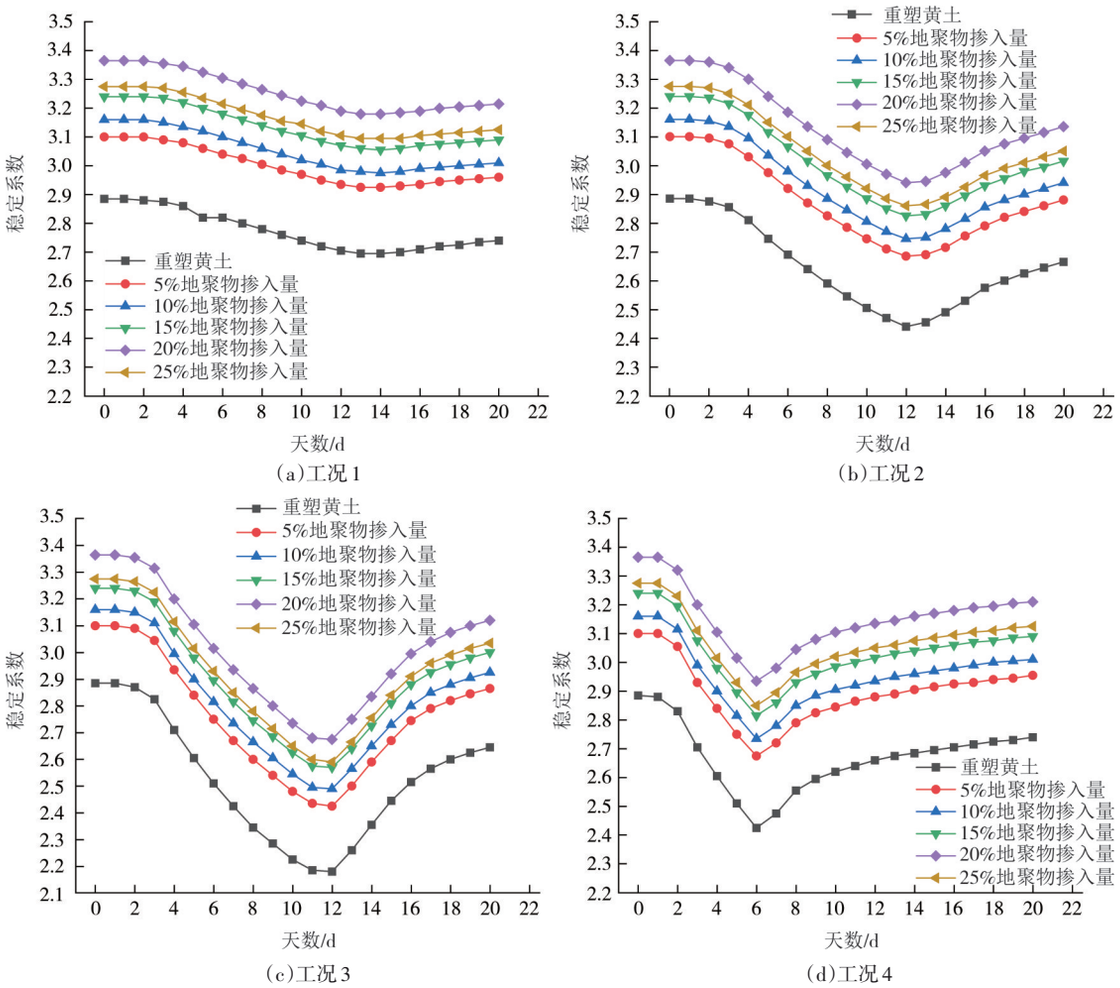


图18 降雨条件下边坡稳定系数随降雨天数变化

Fig.18 Slope stability coefficient variation with rainfall days under rainfall conditions

4 结 论

本文利用土工常规试验测得不同地聚物掺入量下固化土的试验数据,并通过扫描电镜(SEM)和X射线衍射(XRD),对钢渣-粉煤灰地聚物固化土固化机理进行分析.同时结合pF-Meter传感器测定不同地聚物掺入量下固化土的水力参数.探究以钢渣-粉煤灰为主要原料,在水玻璃碱性环境下通过水化反应生成胶凝物质来固化黄土的可行性.并建立固化黄土路基边坡有限元模型,分析降雨前后路基层中地聚物掺入量以及坡比对路基边坡整体稳定性的影响,得出以下结论:

1)经XRD成分和SEM结构分析发现,在水玻璃溶液的碱性激活下,钢渣和粉煤灰产生协同作用,相互促进水化反应,生成C—S—H、C—A—S—H胶凝物质,填充了黄土颗粒中的孔隙,使得固化土微观结构更加紧实,从而提升了力学性能.经试验可知,在养护28 d后,地聚物掺入量为20%的固化土的黏聚力最大,为81.09 kPa,比重塑黄土提升了75.86%,内摩擦角为31.12°,比重塑黄土提升了62.08%.掺入20%地聚物既能提高固化土的力学性能,又符合绿色环保和经济合理的理念.

2)在降雨前后,路基层掺入地聚物能提高路基

边坡的综合性能,包括内摩擦和黏聚力等,从而提高路基边坡发生破坏前的最大位移量,使得路基边坡破坏延展性得到提高,有效提高了边坡的整体稳定性.经模拟分析可知,当地聚物掺入量为20%时,边坡的稳定性最高,在相同路基填料条件下,路基边坡整体稳定性随坡比的减小而上升.因此,地聚物的掺入和减小坡比,在一定程度上可以提高边坡的稳定性,减轻滑坡和泥石流对人类的危害.

3)本试验以我国西北地区铁路黄土路基改良为研究背景,研究结果对西北地区黄土路基边坡的固化具有一定的指导意义.由于西北地区黄土的种类略有差异,并且地下水位和温度变化对路基边坡的稳定性均有影响,因此在固化土中掺入地聚物的量应根据当地具体工程特性进行相应调整.

参考文献

[1] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297-1312.
XU Z J, LIN Z G, ZHANG M S. Loess in China and loess landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312.(in Chinese)

[2] 孙萍萍,张茂省,贾俊,等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. 西北地质,2022,55(3):96-107.
SUN P P, ZHANG M S, JIA J, et al. Geo-hazards research and investigation in the loess regions of western China [J]. Northwestern Geology,2022,55(3):96-107.(in Chinese)

[3] 王吉凤,付恒毅,闫晓彤,等. 钢渣综合利用研究现状[J]. 中国有色冶金,2021,50(6):77-82.
WANG J F, FU H Y, YAN X T, et al. Research status of comprehensive utilization of steel slag [J]. China Nonferrous Metallurgy,2021,50(6):77-82.(in Chinese)

[4] 赵立杰,张芳. 钢渣资源综合利用及发展前景展望[J]. 材料导报,2020,34(Z2):319-322.
ZHAO L J, ZHANG F. Comprehensive utilization and development prospect of steel slag resources [J]. Materials Reports,2020,34(Z2): 319-322.(in Chinese)

[5] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research·2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66.(in Chinese)

[6] 余春松, 张玲玲, 郑大伟, 等. 固废基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)

[7] 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.

[8] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2): 429-441.

[9] 许远辉, 陆文雄, 王秀娟, 等. 钢渣活性激发的研究现状与发展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(1): 91-95.
XU Y H, LU W X, WANG X J, et al. Research and development in activation of steel slag activity [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2004, 10(1): 91-95.(in Chinese)

[10] 邓永锋,赵余,刘倩雯,等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报,2018,31(11):11-20.
DENG Y F, ZHAO Y, LIU Q W, et al. Na_2SiO_4-and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 11-20.(in Chinese)

[11] 曹娃,伊元荣,马佐,等. 碱激发粉煤灰-钢渣地质聚合物的抗压强度实验研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(12): 205-208.
CAO W, YI Y R, MA Z, et al. Experimental study on compressive strength of geo-polymer made of alkali-excited steel slag and fly ash[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(12): 205-208.(in Chinese)

[12] 王旭影,乔京生,赵建业,等. 电石渣激发钢渣-矿渣固化淤泥质土的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2022,41(2):733-739.
WANG X Y, QIAO J S, ZHAO J Y, et al. Solidification of muddy soil with steel slag and ground granulated blast-furnace slag activated by calcium carbide slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2): 733-739.(in Chinese)

[13] LI M, WANG Q, YANG J D, et al. Strength and mechanism of carbonated solidified clay with steel slag curing agent[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(3): 805-821.

[14] CRISTELO N, GLENDINNING S, TEIXEIRA P A. Deep soft soil improvement by alkaline activation [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2011, 164(2): 73-82.

[15] LIU Z, CAI C S, LIU F Y, et al. Feasibility study of loess stabilization with fly ash-based geopolymer [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04016003.

[16] CUI C Y, YU C Y, ZHAO J Y, et al. Steel slag/precarbonated steel slag as a partial substitute for Portland cement: effect on the mechanical properties and microstructure of stabilized soils[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(9): 3803-3814.

[17] SYAHRIL S, SOMANTRI A K, HAZIRI A A. Study of stabilized soil clay soil characteristics using vulcanic ash and tailing as subgrade layers [J]. IOP Conference Series Materials Science Engineering, 2020, 830(2): 022043.

[18] 夏元友，熊海丰．边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]．岩石力学与工程学报，2004，23(16)：2703-2707.
XIA Y Y，XIONG H F．Sensibility analysis of slope stability based on artificial neural network[J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(16)：2703-2707.(in Chinese)

[19] 顾婕，张孟喜．基于强度折减理论的加筋土边坡稳定性分析[J]．上海大学学报(自然科学版)，2019，25(6)：990-1002.
GU J，ZHANG M X．Stability analysis of reinforced slopes based on strength reduction theory[J]．Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)，2019，25(6)：990-1002.(in Chinese)

[20] YE S H，HUANG A P．Sensitivity analysis of factors affecting stability of cut and fill multistage slope based on improved grey incidence model [J]．Soil Mechanics and Foundation Engineering，2020，57(1)：8-17.

[21] 公路土工试验规程：JTG 3430—2020 [S]．北京：人民交通出版社股份有限公司，2020.
Test methods of soils for highway engineering：JTG 3430—2020 [S]．Beijing：China Communications Press Co.，Ltd.，2020.(in Chinese)

[22] 林宗寿，陶海征，涂志厚．钢渣粉煤灰活化方法研究[J]．武汉理工大学学报，2001，23(2)：4-7.
LIN Z S，TAO H Z，TU Z H．Research for increasing the activation of steel slage and fly ash [J]．Journal of Wuhan University of Technology，2001，23(2)：4-7.(in Chinese)

[23] 侯云芬，王栋民，李俏，等．水玻璃性能对粉煤灰基矿物聚合物的影响[J]．硅酸盐学报，2008，36(1)：61-64.
HOU Y F，WANG D M，LI Q，et al．Effect of water glass performance on fly ash-based geopolymers [J]．Journal of the Chinese Ceramic Society，2008，36(1)：61-64.(in Chinese)

[24] ZHOU M K，CHENG X，CHEN X A．Studies on the volumetric stability and mechanical properties of cement-fly-ash-stabilized steel slag[J]．Materials，2021，14(3)：495.

[25] 年庚乾，陈忠辉，张凌凡，等．边坡降雨入渗问题中两种边界条件的处理及应用[J]．岩土力学，2020，41(12)：4105-4115.
NIAN G Q，CHEN Z H，ZHANG L F，et al．Treatment of two boundary conditions for rainfall infiltration in slope and its application[J]．Rock and Soil Mechanics，2020，41(12)：4105-4115.(in Chinese)

[26] VAN GENUCHTEN M T．A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]．Soil Science Society of America Journal，1980，44(5)：892-898.

[27] 张鲁渝，郑颖人，赵尚毅，等．有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]．水利学报，2003，34(1)：21-27.
ZHANG L Y，ZHENG Y R，ZHAO S Y，et al．The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability [J]．Journal of Hydraulic Engineering，2003，34(1)：21-27.(in Chinese)

[28] 郑颖人，赵尚毅，张鲁渝．用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]．中国工程科学，2002，4(10)：57-61.
ZHENG Y R，ZHAO S Y，ZHANG L Y．Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]．Engineering Science，2002，4(10)：57-61.(in Chinese)

[29] 费康，彭劼．ABAQUS岩土工程实例详解[M]．北京：人民邮电出版社，2017：268-274.
FEI K，PENG J．Detailed explanation of ABAQUS geotechnical engineering example[M]．Beijing：Posts & Telecom Press，2017：268-274.(in Chinese)

[30] 田泽润，张彦洪，周茂定，等．双层均质边坡临界高度研究及其稳定性分析[J]．岩土工程学报，2023，45(2)：426-432.
TIAN Z R，ZHANG Y H，ZHOU M D，et al．Critical height and stability of two-layered homogeneous slopes[J]．Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2023，45(2)：426-432.(in Chinese)

[31] 谢承煜，刘承波，朱佳妮，等．多场耦合作用下天然土质边坡安全性数值仿真研究[J]．湘潭大学学报(自然科学版)，2021，43(3)：94-105.
XIE C Y，LIU C B，ZHU J N，et al．Study on safety of natural soil slope under multi field coupling [J]．Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)，2021，43(3)：94-105.(in Chinese)

[32] 栾茂田，武亚军，年廷凯．强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]．防灾减灾工程学报，2003，23(3)：1-8.
LUAN M T，WU Y J，NIAN T K．An alternative criterion for evaluating slope stability based on development of plastic zone by shear strength reduction FEM[J]．Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2003，23(3)：1-8.(in Chinese)

[33] 石振明，沈丹祎，彭铭，等．考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]．水利学报，2016，47(8)：977-985.
SHI Z M，SHEN D Y，PENG M，et al．Slope stability analysis by considering rainfall infiltration in multi-layered unsaturated soils[J]．Journal of Hydraulic Engineering，2016，47(8)：977-985.(in Chinese)