

玄武岩纤维灰土力学特性及扩宽路堤边坡稳定性分析

刘 华^{1,2}, 胡文乐^{1,2}, 何朋立³, 张 超⁴, 孙松松⁵, 胡鹏飞¹, 谷宏全¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;

3. 洛阳理工学院 土木工程学院, 河南 洛阳 471023; 4. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

5. 南京泰克奥科技有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了探明玄武岩纤维与石灰改良黄土的力学特性及作为扩宽路堤填料时的稳定状态, 通过正交设计, 进行固结不排水三轴(CU)试验, 得到含水率、压实度、纤维掺量、纤维长度等 4 因素下的最优水平组合, 在此基础上, 通过控制纤维长度、含水率和压实度不变, 将 4 种不同掺量(0.2%、0.4%、0.6%、0.8%)的 6 mm 长度玄武岩纤维和石灰复合掺入黄土中, 对纤维掺量、纤维长度及龄期对加筋效果的影响进行分析; 其次, 根据室内试验数据, 基于有限元基本原理对纤维灰土扩宽路堤的稳定性进行数值模拟. 结果表明: 纤维加筋灰土能够显著提高黄土的抗剪强度指标, 且黏聚力随纤维掺量增加先增大后减小, 0.6% 时为最优; 7 d 龄期纤维灰土黏聚力较 3 d 龄期有明显提高; 安全系数与填土材料关系特征明显, 安全系数随纤维掺量先增加后减小; 安全系数随扩宽路堤的扩宽宽度和坡度系数增加均呈近似线性增长, 随路堤高度增加呈近似线性减小特征.

关键词: 玄武岩纤维; 黄土改良; 力学特性; 路堤稳定性

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0053-08

Mechanical properties of basalt fiber ash soil and stability analysis of widened embankment slope

LIU Hua^{1,2}, HU Wenle^{1,2}, HE Pengli³, ZHANG Chao⁴, SUN Songsong⁵, HU Pengfei¹, GU Hongquan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Technology Henan, Luoyang 471023, China;

4. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

5. Nanjing Taikeao Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to explore the mechanical properties of basalt fiber and lime improved loess and its stable state as embankment filler, the consolidated undrained triaxial (CU) test was carried out through orthogonal design, and the optimal horizontal combination of four factors, such as moisture content, compactness, fiber content and fiber length, was obtained. On this basis, by controlling the fiber length, moisture content and compactness unchanged, the optimal horizontal combination of four factors was obtained. Six kinds of 6 mm basalt fiber and lime with different content (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%) are mixed into loess, and the influence of fiber content, fiber length and age on reinforcement effect is analyzed. Secondly, according to the indoor test data, based on the basic principle of finite element, the stability of fiber reinforced lime soil widening embankment is numerically simulated. The results show that: fiber reinforced lime soil can significantly improve the shear strength index of loess, and the cohesion first increases and then decreases with the increase of fiber content, and 0.6% is the best. Results show that the cohesion of fiber lime soil at 7 d age is significantly higher than that at 3 d age. The relationship also between safety factor and filling material is obvious, and the safety factor increases first and then decreases also with the increase of fiber content. The safety factor increases linearly with the increase of widening width and slope coefficient, and decreases linearly with the increase of embankment height.

Key words: basalt fiber; loess improvement; mechanical properties; embankment stability

收稿日期: 2019-06-12

修改稿日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608436); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2018JQ5003); 陕西省教育厅专项科研基金资助项目(18JK0478); 河南省自然科学基金科技基金资助项目(162102210277); 河南省高等学校重点科研基金资助项目(18A560016)

第一作者: 刘华(1983—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. 主要从事环境岩土工程研究. E-mail: liuhua029@xauat.edu.cn

通讯作者: 何朋立(1976—), 男, 博士, 副教授. 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作. E-mail: hpl7609@126.com

黄土是在当下基础设施不断建设和完善的过程中经常遇到的独特地质载体,具有疏松、多孔等特点,是工程师亟需解决的工程问题之一^[1].近年来,随着黄土地区经济的快速发展和对交通基础设施的进一步要求,现有的高速公路存在其运载能力达设计极限的状况,能有效解决问题的高速公路改扩建应运而生,但改扩建作为一种新生工程活动,受到较多约束条件的限制.作为本世纪初公路建设领域所面临的重要问题,不可避免的涉及到新老路堤的融合稳定性等问题,并且新老路基相互作用甚至有可能出现道路横坡突变、新填路堤的整体垮塌^[2]等工程病害,给工程中的构筑物及人民生命财产安全造成极大的危害,因此,有关黄土地区拓宽路堤处治技术^[3-5]的研究备受关注.

黄土地区有关地基的常见处理方式有很多,玄武岩纤维灰土概念的提出为地基处理提供了新的选择.前人就此展开了大量研究,杨广庆等^[6-7]对石灰、粉煤灰、二灰及水泥改良土的力学性能进行了研究,得出了满足高速公路铁路路基要求的最优配比,为石灰改良土的研究提供了理论参考.贺建清等^[8]在荷载作用下石灰改良土道路路基的变形进行了研究.胡斌等^[9]对纤维类材料进行室内试验和数值模拟研究,认为纤维类材料能较好地提高土的力学性能.被誉为 21 世纪绿色环保的高性能玄武岩纤维^[10],具有优良的力学性能且具有价格低、耐腐蚀性强、抗老化等诸多优点.但纵观现有研究^[11-12],针对传统加固材料和环保改良材料联合应用于改良路基方面的研究较少,尤其是采用玄武岩纤维灰土进行路基处理方面的研究.

鉴于此,本文采用玄武岩纤维、石灰对豫西湿陷性黄土进行改良处理,采用正交设计研究土样含水率、压实度、纤维掺量、纤维长度等四个因素对纤维灰土的抗剪强度影响,进行了三轴(CU)试验;并基于最优水平组合进行纤维掺量这一因素对纤维灰土抗剪强度的影响规律进行研究,开展了一系列直剪试验,研究纤维掺量、灰土龄期对改良土的抗剪强度指标的影响,并基于试验结果利用 ABAQUS 对拓宽路堤新老路堤的拼接进行模拟,对改良处理前后的路堤稳定性进行分析,并对拓宽路堤进行不同坡比、坡高等工况下的对比研究,为新老路基的拼接处治对策的选择和优化提供理论数据支撑,并为路堤拼接处理时工程稳定性病害问题的防治提供合理防护建议.

1 试验材料

1.1 供试用土

试验黄土取自洛阳市某基坑工程现场,土质为黄土状粉质黏土,取土深度 4.5~6.0 m.基本物理指标:液限 $\omega_p=30.4\%$;塑限 $I_p=19.1\%$;塑性指标为 11.7;最优含水率为 17.0%;最大干密度为 1.85 g/cm^3 ;湿陷系数为 0.016.颗粒分析曲线见图 1.

1.2 供试纤维和石灰

供试玄武岩纤维为由长度为 6 mm 纤维丝压制而成的未处理条状纤维,如图 2 所示.其基本物理力学参数见表 1.试验所用石灰为试验前已经熟化的新鲜熟石灰,未消化残渣过 2 mm 筛去除,其化学成分见表 2.

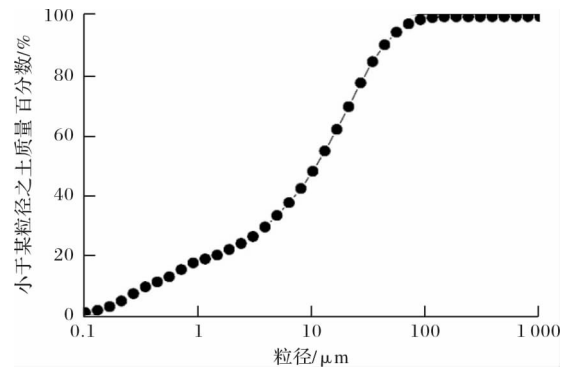


图 1 黄土的颗粒分析曲线

Fig. 1 Particle analysis curve of loess



图 2 玄武岩纤维(6 mm)

Fig. 2 Basalt fiber/6 mm

表 1 玄武岩纤维物理力学参数

Tab. 1 Basalt fiber physical and mechanical parameters

单丝直径/ μm	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	极限延伸率/%	耐酸性
13	2.65	$\geq 2\,000$	90~110	0.113 7	$\geq 99\%$

表 2 石灰化学成分

Tab. 2 Chemical composition of lime

烧失量/%	SiO_2 /%	Al_2O_3 /%	Fe_2O_3 /%	CaO /%	MgO /%
10.38	5.19	1.23	0.44	53.91	17.74

2 试验内容

2.1 试验方案

按照三七灰土制备土样，三轴试验考虑了土样含水率、压实度、纤维掺量、纤维长度等四个因素对纤维灰土强度影响，每个因素考虑三个水平，养护 7 d 龄期再进行试验，且均在 50 kPa 围压下进行。

玄武岩纤维灰土的抗剪强度指标通常可由直剪试验快速得出。基于上述正交试验分析结果，将最优长度 6 mm 的玄武岩纤维按照干土质量百分比分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 的掺量掺入土样，按照三七灰土称取石灰质量，分别养护 3 d 和 7 d。每组试样须制备四个平行试样，分别施加 100 kPa，200 kPa，300 kPa，400 kPa 等 4 个垂直压力，包括原状和重塑的 8 个试样共计 72 个试样。

2.2 土样制备

本试验参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)重塑土样的制备方法。制备试样时，将所取土料风干后过 2 mm 筛，放入保湿缸中备用。

在已有的研究资料中，关于石灰和土拌和制样的方法有两种^[13-16]：一种是将过筛后的土样与石灰拌和均匀，然后再加入蒸馏水，拌和均匀后密封静置 24 h 再在进行制样；另一种方法是根据目标含水率要求加入适量蒸馏水配置土样，密封静置 24 h，再掺入石灰，然后立即制备试样。相关资料表明，石灰的性能与其中的活性氧化物有密切关系，活性氧化物的含量越高，其胶结能力越强。此外，灰土试样拌和均匀后立即制备试样也较为符合实际工程。关于纤维与土拌和的方法也有两种^[10,17]，综合前人的研究经验，本试验首先在室温下风干、碾碎、过 2 mm 筛，放入干燥器中备用，再将称量好的土与适量纤维拌和均匀，再进行含水率的配置，密封 24 h。石灰过 2 mm 筛，与拌和均匀的纤维土配成三七灰土，并立即进行制样。

2.3 试验过程

本文三轴试验采用 TKA-TTS-3S 应力路径三轴试验仪，在围压 50 kPa 下进行固结不排水三轴试验。

本文直剪试验采用的试验仪器为 ZJ-2 型等应变直剪仪，将四级垂直压力对直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀试样依次进行加载。依据土工试验方法标准进行试验，剪切速率为 0.6 mm/min。

3 试验结果与分析

正交试验采用四因素三水平设计，不考虑试验

误差造成的影响，不考虑因素间的交互作用，共 9 组试样，每组设置两个平行试样。试验所用的正交试验因素水平见表 3。试验结果见表 4。

表 3 正交试验的因素水平表
Tab. 3 Factor level table for orthogonal test

编号	因素			
	A 纤维长度 /mm	B 纤维掺 量/%	C 含水率 /%	D 压 实度
1	3	0	23	0.90
2	6	0.4	25	0.93
3	9	0.8	27	0.95

表 4 正交试验结果
Tab. 4 Orthogonal test results

试验 编号	因素				抗剪强度/MPa
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.572
2	1	2	2	2	0.762
3	1	3	3	3	0.751
4	2	1	2	3	0.783
5	2	2	3	1	0.589
6	2	3	1	2	0.777
7	3	1	3	2	0.595
8	3	2	1	3	0.782
9	3	3	2	1	0.604

注：表中抗剪强度为围压为 50 kPa 下得到的抗剪强度均值。

通过极差分析可知， $A_2B_2C_2D_3$ 为正交设计得出的最优水平组合。此时，对应的各因素水平为纤维长度 6 mm、纤维掺量 0.4%、含水率 25%、压实度 0.95。方差分析得到的显著性顺序为：压实度影响>含水率影响>纤维掺量影响>纤维长度影响。

查表知， $F_{0.99}(2, 9) = 8.02$ ， $F_{0.95}(2, 9) = 4.26$ 。对比表 5 中 F 值可对显著性进行判定。其中， S 表示离差平方和， d_f 表示自由度， M_s 为平均离差平方和。

表 5 纤维灰土抗剪强度的极差、方差及影响分析表

Tab. 5 Analysis of the extreme difference, variance and influence of shear strength of fiber ash soil

来源	因素				误差项
	A	B	C	D	S_e
极差	0.056	0.061	0.071	0.184	$D>C>B>A$
S	0.010	0.015	0.019	0.105	$Q_T = 8.734 0$
d_f	2	2	2	2	$S_T = 0.154 5$
M_s	0.005	0.007	0.009	0.053	$S_e = 0.006 1$
F	7.214	10.932	13.873	77.605	$P = 8.579 5$
显著性	显著	极显著	极显著	极显著	$D>C>B>A$
最优值	6 mm	0.4%	25%	0.95	

注：表中极差运算数据根据两次试验结果的均值得出。

通过极差分析和方差分析相结合的分析方法,得出正交设计的最优水平组合为 $A_2B_2C_2D_3$, 即:纤维长度 6 mm、纤维掺量 0.4%、含水率 25%、压实度 0.95。

4 试验结果与分析

基于正交设计的试验分析结果,控制含水率、纤维长度和压实度为最优水平,灰土在养护龄期为 7 d 时不同纤维掺量对抗剪强度指标的影响规律如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,相同含水率和压实度条件下,7 d 养护龄期的抗剪强度指标明显均高于 3 d 龄期,主要原因是土颗粒表面由于石灰水化反应变得粗糙和晶体的生成^[18],进而在土颗粒表面反应生成胶状 $CaSiO_3$,同未反应的 $Ca(OH)_2$ 一起与土颗粒构成团聚体,此时,土孔隙增大,颗粒较为光滑,纤维、石灰及土颗粒间发生相对位移所需的外力较完全反应时偏小。由于 $Ca(OH)_2$ 反应生成胶体 $CaSiO_3$ 是随着时间的增加逐步进行反应的,随着时间增长,水化硅酸钙占比越来越高,土颗粒间的胶结能力增强,再加上纤维的良好的抗拉强度,纤维灰土颗粒间发生相对位移需要较大的外力。对于粘聚力而言,在纤维掺量 0.6% 时达到最大,这是因为正交试验的最优组合为局部最优解。

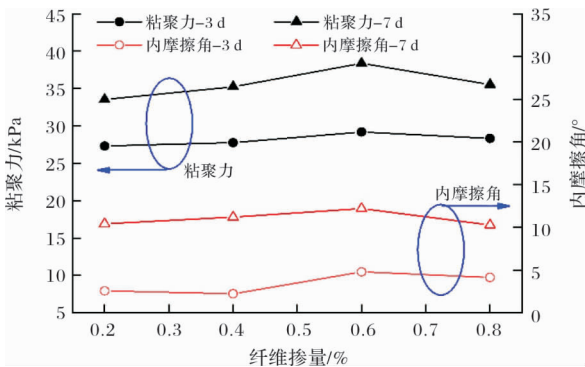


图 3 不同龄期抗剪强度指标随纤维掺量变化
Fig. 3 Shear strength indexes at different ages
varying with fiber content

5 拓宽路堤边坡稳定性分析

5.1 数值计算模型

路堤拓宽黄土地区数值计算模型见图 4,取地基土长 40 m,高 10 m,高速公路路堤填高 H ,考虑路堤填料的物理力学性质及行车荷载,原路堤 26 m 宽,两侧各拓宽 K 断面,双侧以老路中线为轴对称加宽,选取单侧进行分析,路基及下方地基土采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构关系。主要研究纤维掺量 C 、纤维

长度 L 、灰土龄期 D 、坡高 H 、扩宽度 K 、坡度系数 m (坡比 1: m)对路堤边坡的变形和稳定性分析,各影响因素具体因子水平见表 6。

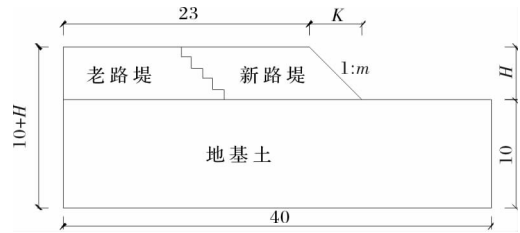


图 4 有限元计算模型/m
Fig. 4 Finite element calculation model/m

表 6 水平因子 Tab. 6 Level factor					
影响因素	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5
纤维掺量 C /%	素土	0.2	0.4	0.6	0.8
纤维长度 L /mm	—	6	—	—	—
龄期 D /d	3	7	—	—	—
坡高 H /m	5	8	10	—	—
扩宽度 K /m	6	8	10	—	—
坡度系数/ m	0.5	0.75	1	1.25	1.5

5.2 材料力学参数设置

依据前述原状、重塑素土以及纤维灰土抗剪强度试验数据,并结合其他相似岩土体的物理力学参数进行取值,综合确定模型的计算参数,见表 7。路堤所受外力荷载等价于路面结构荷载和交通荷载之和,其中,认为路面结构荷载等价于 60 cm 厚填土荷载,交通荷载简化为 10 kPa 均布荷载^[18],综合取值采用 20 kPa 的等效均布荷载。其他模型材料力学参数见表 8。

表 7 土的物理力学性质指标 Tab. 7 Physical and mechanical properties of soil					
土层类别	弹性模量/MPa	泊松比	重度/ $kN \cdot m^{-3}$	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
老路堤	35	0.3	20	25	10.42
新路堤	30	0.35	20	—	—
地基土	16.5	0.34	20	20	21.8

表 8 新路堤填土相关计算力学参数表 Tab. 8 New embankment fill calculation related to mechanical parameters table				
纤维掺量/%	纤维长度/mm	龄期/d	黏聚力 C /kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
0.0	—	—	9.15	13
0.2	6	7	28.64	10.42
0.4	6	7	30.35	11.16
0.6	6	3	29.26	9.9
0.6	6	7	33.39	12.27
0.8	6	7	30.58	10.43

5.3 模型分析方法

有限元强度折减法边坡破坏失稳的判据主要有三种^[19],并且三种判据在理论上具有统一性^[20],虽然将有限元计算的收敛与否作为判据更直接方便,但安全系数不偏于保守,因此,本文以上述有限元计算的特征点位移拐点为失稳判据标准。

6 数值模拟算例结果及分析

6.1 填土材料差异对扩宽路堤稳定性的影响

选取在路堤堤高5 m、坡度系数为1.50、路堤扩宽度为5 m、8 m、10 m的模型,就填土材料差异对扩宽路堤的稳定性展开研究,分别从纤维掺量、纤维长度、养护龄期等方面进行分析。由上述结果可知,素土填筑扩宽路堤的安全系数为1.063,不能满足工程安全要求。因此,下文在进行对比分析时,不再考虑素土填筑对扩宽路堤稳定性的影响。

6.1.1 纤维掺量的影响

图5(a)可见,不同掺量的安全系数均大于设计规范要求的安全系数,且高于素土填筑时的安全系数;安全系数随纤维掺量增加先增大后减小,在0.6%时取到最大。分析其原因,安全系数主要取决于纤维灰土的抗剪强度特性。因此,纤维掺量对安全系数与黏聚力呈现出较为相似的变化规律。从图5(b)中可以看出,随着折减系数的增加,路堤坡顶的位移逐渐增大。从图5(c)中可以看出,随着折减系数的增加,竖向位移增大;在掺量为0.2%~0.6%范围内,随着掺量增加,相同折减系数对应的竖向位移减小,在0.8%掺量时的折减系数与0.4%时的基本重合。从图5(d)中可以发现,坡顶竖向应力随折减系数增大至1.4以后的趋势为先下降再上升,除纤维掺量为0.6%未完成此过程,其余三个掺量均以完成,说明0.6%掺量时的路堤应力上升相对滞后,具有“后强”效应特征,这与前述试验黏聚力变化规律相一致。

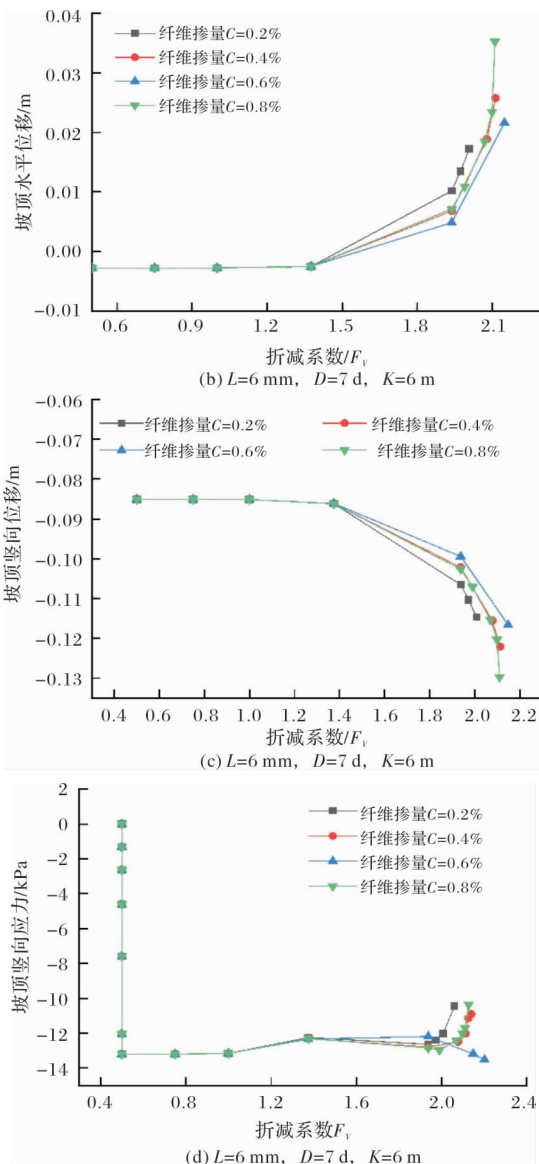
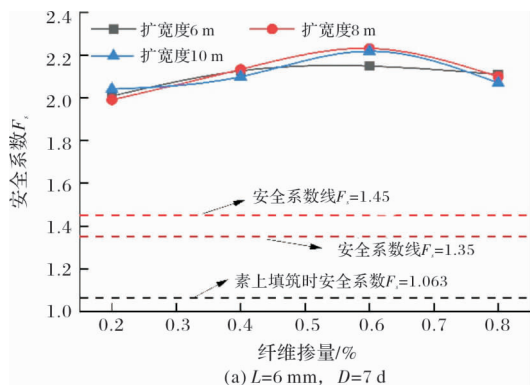


图5 纤维掺量与安全系数及特征点位移、应力关系曲线

Fig. 5 Fiber blending capacity and safety factor, characteristic point displacement and stress curve

6.1.2 养护龄期的影响

图6可见,7 d养护龄期的安全系数均较同条件下的3 d龄期的大,且都满足安全系数要求,在纤维掺量为0.6%时龄期的增长使得安全系数提升效果显著。由前述(图3)纤维灰土的抗剪强度室内试验进行分析,黏聚力随养护龄期的增加表现出增大的特征,使得纤维灰土的抗剪强度得到提高,从而导致路堤边坡安全系数得到提升。

6.2 不同工况下扩宽路堤安全系数分析

由上述分析可知,填土材料的最优情况为:6 mm长度、0.6%掺量、7 d养护龄期,在该组合下,土样的抗剪强度指标最优,且扩宽路堤的稳定系数最大。基于上述研究,设置不同坡型对扩宽路

堤边坡稳定性进行计算,并基于最不利影响因子进行考察。

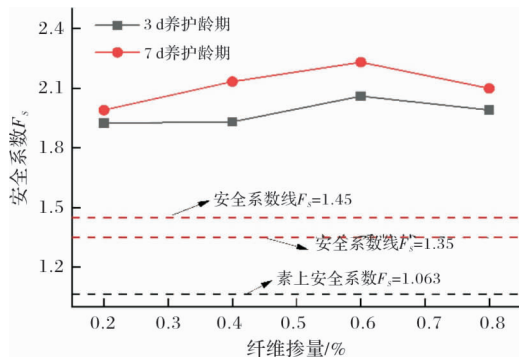


图6 不同养护龄期下安全系数与纤维掺量关系曲线($L=6\text{ mm}$, $K=8\text{ m}$)

Fig. 6 Relationship between safety factor and fiber content under different curing ages ($L=6\text{ mm}$, $K=8\text{ m}$)

6.2.1 扩宽宽度对扩宽路堤边坡稳定性的影响

从图7中可以看出,各扩宽度下的安全系数表现出相似的变化规律,随路堤扩宽度的增加出现小幅度的增长,且增长幅度随坡度系数升高而增大。这说明路堤扩宽度在6~10 m变化对边坡稳定安全系数有影响,扩宽时适当增加宽度有助于提升扩宽路堤稳定性。

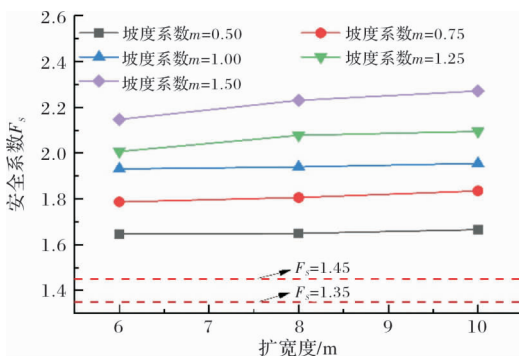


图7 不同坡度系数下安全系数与扩宽度关系曲线($H=5\text{ m}$)

Fig. 7 Relationship between safety factor and expansion width under different slope coefficients ($H=5\text{ m}$)

6.2.2 路堤坡度系数对扩宽路堤稳定性的影响

从图8(a)中可以看出,路堤边坡坡度对路堤边坡的稳定性影响显著,增大坡度系数是防止路堤边坡失稳的有效处置措施。从图8(b)可以看出,安全系数除受坡度系数影响显著,随坡度系数增加,安全系数增大;随路堤高度增加,安全系数显著性降低。在路堤高度为8 m时,坡度系数应大于1.00;路堤高度为10 m时,坡度系数至少应在1.5附近。

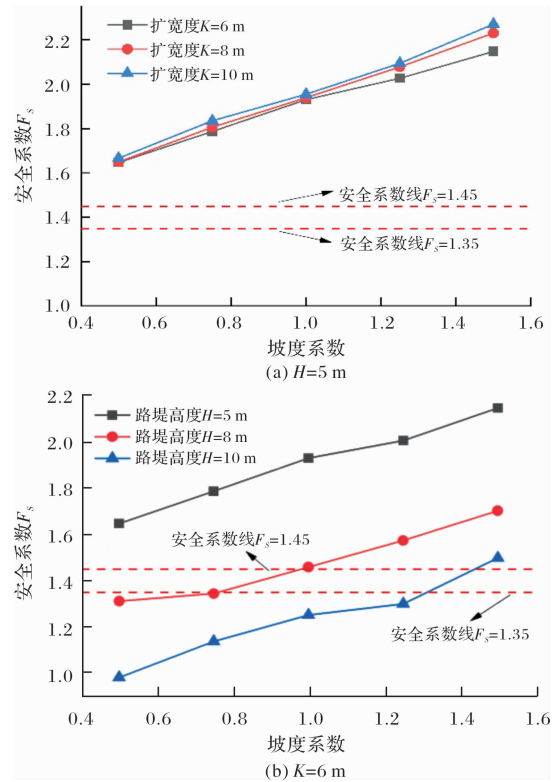


图8 路堤坡度系数与安全系数关系曲线

Fig. 8 Curve of embankment slope coefficient and safety factor

6.2.3 路堤高度对扩宽路堤稳定性的影响

从图9中可以看出,安全系数随路堤高度增大而迅速减小,主要是由于路堤增高,滑移面更易形成贯通。这说明改变路堤高度不失为防治路堤边坡失稳的一种措施;在路堤高度受到约束时,考虑增加坡度系数也是有效的工程对策。

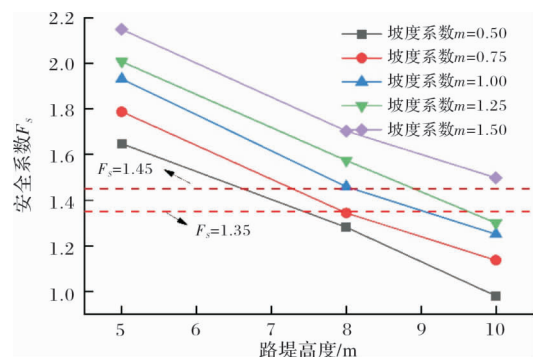


图9 不同坡度系数下安全系数与路堤高度关系曲线($K=6\text{ m}$)

Fig. 9 Relationship between safety factor and embankment height under different slope coefficients ($K=6\text{ m}$)

7 结论

(1)影响玄武岩纤维灰土抗剪强度的主次因素顺序为:压实度、含水率、纤维掺量、纤维长度。

正交试验最优水平组合为 $A_2B_2C_2D_3$, 即: 纤维长度 6 mm、纤维掺量 0.4%、含水率 25%、压实度 0.95。

(2)玄武岩纤维灰土路堤边坡安全系数随纤维掺量先增加后减小, 最佳掺量为 0.6%, 结合直剪试验结果, 工程应用建议纤维掺量为 0.4% ~ 0.6%。7 d 龄期安全系数较 3 d 龄期养护时大, 且较为显著。这与纤维灰土黏聚力随纤维掺量的变化规律是一致的。

(3)选取最优纤维灰土组合作为填土材料进行分析, 安全系数随扩宽路堤的扩宽宽度增加呈现小幅增加, 随扩宽路堤的坡度系数增大呈近似线性增加特征, 随路堤高度增加呈急速降低趋势。

参考文献 References

- [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 Zhangjian, LIN Shouguan, ZHANG Maosheng. Chinese Loess and Loess Landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312.
- [2] 唐朝生, 刘义怀, 施斌, 等. 新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2):13-17.
TANG Chaosheng, LIU Yihuai, SHI Bin, et al. Numerical simulation of differential settlement in new and old roadbed splicing[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 13-17.
- [3] 龚晓南. 地基处理技术及其发展[J]. 土木工程学报, 1997(6):3-11.
GONG Xiaonan. Ground treatment technology and its development[J]. China Civil Engineering Journal, 1997 (6): 3-11.
- [4] 周健, 张健, 姚浩. 真空降水联合强夯法在软弱路基处理中的应用研究[J]. 岩土力学, 2005(s1):202-204.
ZHOU Jian, ZHANG Jian, YAO Hao. Application of vacuum precipitation combined with dynamic compaction method in soft subgrade treatment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(s1): 202-204.
- [5] 苏超, 徐泽中. 高速公路拼接段地基处理设计分析方法与工程实践[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1):81-85.
SU Chao, XU Zezhong. Analysis method and engineering practice of foundation treatment design for expressway splicing section[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(1):81-85.
- [6] 杨广庆, 管振祥. 高速铁路路基改良填料的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6):682-685.
YANG Guangqing, GUAN Zhenxiang. Experimental study on improved filling of high-speed railway subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 682-685.
- [7] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7):1156-1156.
YANG Guangqing. Experimental study on dynamic characteristics of cement improved soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (7): 1156-1156.
- [8] 贺建清, 张家生. 石灰土填料动力特性试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(4):58-63.
HE Jianqing, ZHANG Jiasheng. Experimental study on dynamic characteristics of lime soil filling[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 20(4): 58-63.
- [9] 胡斌, 王新刚, 连宝琴. 纤维类材料改善膨胀土工程性能的适用性探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 615-618.
HU Bin, WANG Xingang, LIAN Baoqin. Discussion on the applicability of fiber materials for improving engineering properties of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (S2): 615-618.
- [10] 高磊, 胡国辉, 杨晨, 等. 玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1):231-237.
GAO Lei, HU Guohui, YANG Chen, et al. Shear strength characteristics of basalt fiber reinforced clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1):231-237.
- [11] 马闫, 谢婉丽, 彭淑君, 等. 加筋方式对黄土动力特性影响三轴试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 50-56.
MA Yan, XIE Yuli, PENG Shujun, et al. Influence of the reinforce scheme on dynamic properties of the reinforced loess with dynamic triaxial test[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(4): 50-56.
- [12] 杨晴雯, 裴向军, 吴梦秋, 等. 不同加固技术在散粒体斜坡表层的应用对比研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 143-151.
YANG Qingwen, YAN Xiangjun, WU Mengqiu, et al. Comparative study on the application of different

- reinforcement techniques in the surface of granular slopes[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(1): 143-151.
- [13] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- GUAN Wenzhang. A new chapter on the engineering performance of collapsible loess[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992.
- [14] 胡文乐, 何朋立, 刘华. 玄武岩纤维黄土抗剪强度变化规律与最优配合比分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 96-101.
- HU Wenle, HE Pengli, LIU Hua. Experimental study on optimization of shear strength parameters of basalt fiber loess[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 96-101.
- [15] 胡文乐, 何朋立, 刘华, 等. 玄武岩纤维加筋黄土力学参数优化试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 222-227.
- HU Wenle, HE Pengli, LIU Hua, et al. Experimental study on optimization of mechanical parameters of reinforced loess with basalt fiber[J]. Yangtze River, 2020, 51(5): 222-227.
- [16] 胡文乐, 何朋立, 刘华, 等. 玄武岩纤维灰土抗剪强度参数优化试验研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2348-2353.
- HU Wenle, HE Pengli, LIU Hua, et al. Experimental study on optimization of shear strength parameters of basalt fiber lime soil[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(6): 2348-2353.
- [17] 李广信, 陈轮. 纤维加筋粘性土的试验研究[J]. 水利学报, 1995(6): 31-36.
- LI Guangxin, CHEN Lun. Experimental study on fiber reinforced cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(6): 31-36.
- [18] 董玉文, 张伯平. 养护龄期对灰土工程性能的影响试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2002(3): 38-42.
- DONG Yuwen, ZHANG Boping. Experimental study on the influence of maintenance age on the performance of lime soil engineering[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002(3): 38-42.
- [19] 陈力华, 靳晓光. 有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J]. 土木工程学报, 2012(9): 136-146.
- CHEN Lihua, YAN Xiaoguang. Applicability of three failure criterions for slope in finite element strength reduction method[J]. China Civil Engineering Journal, 2012(9): 136-146.
- [20] 裴利剑, 屈本宁, 钱闪光. 有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3337-3341.
- PEI Lijian, QU Benning, QIAN Shanguang. Uniformity of slope instability criterion with finite element strength reduction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3337-3341.

(编辑 沈 波)