

南方高海拔山区新型无机类生态稳定土壤的耐久性能分析

吕荔炫

(福州市规划设计研究院, 福建 福州 350000)

摘要: 为揭示南方高海拔山区新型无机类生态稳定土壤(JCDK-1 稳定土)的耐久性能,分析了紫外线老化、冻融循环、干湿循环等耐久性条件下稳定土的强度变化规律、水解性以及比表面积和微观形貌等。结果表明:JCDK-1 为含有二氧化硅、钙铝氧化物、钙锌铝氧化物等天然矿物质的无机类土壤稳定剂,不含有害矿物质,且稳定土体中没有产生新的矿物。不同 JCDK-1 掺量下稳定土体显示出良好的耐久性能。JCDK-1 稳定土体的水稳性随着稳定剂掺量的增加而增强。稳定土体的比表面积基本上随着各种耐久性试验的时间/次数增长而增大。现场试验表明喷播 JCDK-1 型稳定剂表现出良好的生态性及耐久性,能有效地满足南方高海拔山区夏季高温、高辐射、高湿度,冬季冻融频繁等气候特点。

关键词: 高海拔山区;新型无机类稳定剂;耐久性;微观特征

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)01-0180-07

Durability Analysis of a New Inorganic Ecological Stabilized Soil in High Altitude Mountainous Area of Southern China

LV Lixuan

(Fuzhou Planning Design & Research Institute, Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: In order to reveal the durability of a new type of inorganic ecological stabilized soil (JCDK-1) in high altitude mountainous area, the strength variation law, hydrolytic property, specific surface area and microstructure of stabilized soil under the conditions of ultraviolet aging, freeze-thaw cycles, and wet-dry cycles were analyzed. The results indicate that JCDK-1 is an inorganic soil stabilizer containing natural minerals such as silica, calcium aluminum oxide, calcium-zinc-aluminum oxide. There are no new minerals and no harmful minerals in the stabilized soil. The water stability of soil stabilized by JCDK-1 increases with the increase of the stabilizer content. The specific surface area of the stabilized soil is substantially increased as the time/frequency of the various durability tests increases, and the wet-dry cycle has a great influence on the specific surface area of the stabilized soil. The effect of UV aging and wet-dry cycle has little effect on the morphology of the stabilized soil, and the morphology of the soil samples after the freeze-thaw cycle had changed greatly. The JCDK-1 stabilizer has better effect than the EN-1 and PAM stabilizer with the consideration of the durability of freezing-thawing resistance, dry-wet cycle, aging and so on. The in-site test shows that the JCDK-1 stabilizer has better ecological performance and durability, which could effectively meet the climatic characteristics such as high temperature, high radiation, high humidity and frequent freezing-thawing in high altitude mountainous area of Southern China.

Keywords: high altitude mountainous area, inorganic ecological stabilizer, durability, microscopic characteristics

福建省北部高海拔山区具有夏季高温、高湿、辐射,冬季短时冻融频繁(属于短时冻区,冻结时间在数小时至数日)的区域特性。受征地拆迁困难等原因,公路沿线存在大量高陡残积土类裸露边坡(坡度超过 1:0.5),在上述不利环境下,每年产生大量坡面浅层剥落现象,严重影响公路的运营安全。现场调查发现存在一个特殊现象:即在冬春少雨的季节,仍有大量坡面浅层剥落现象,可见其原因与地区属于典型的短时冻区息息相关。如福建省武夷山高海拔地区 S303 线,沿线 33 km 共 36 处土坡出现了冬季短时冻融剥落现象。对于此类边坡生态治理,存在以下困难或难点:边坡的高陡以及特殊的气候限制了一些传统挂网客土喷播类等防护形式;植被混凝土技术虽然适用于高陡边坡,但存在造价高等问题^[1-4]。生态型稳定土技术由于其无污染、造价低、施工简便等优点,是近年来逐渐新兴的边坡绿化技术,日益运用广泛。常见的生态土壤稳定剂类型包括有机类(W-OH、PAM 等)、无机类(水泥、石灰等)和离子类(EN-1、ISS 等)^[5-12]。绿化高陡土质边坡表层,有机类土壤稳定剂或是无法有效渗入坡体,或是不能很好与土体较好粘合;传统无机类土壤稳定剂生态性较差,存在与植被不能很好相容等问题;离子类土壤稳定剂存在选择性较大效果不稳定等问题。同时,以上各类稳定剂大多适用于西北或长江以北等气候,对于存在夏季高温、高湿、高辐射,冬季短时冻融频繁特殊气候的福建闽北高海拔地区是否适宜仍未可知。因此,迫切需要寻求一种适用于本地区气候条件高陡边坡防护的生态型土壤稳定剂。

新型生态土壤稳定剂 JCDK-1 是一种无机类土壤稳定剂^[13],相比于其他化学类稳定剂,具有以下几个鲜明特点:(1)可改变土壤团粒结构以提高基质附着力,特别适用于残积砂土类高陡边坡坡面绿化;(2)与土壤发生化学反应快,固化时间短(通常十几分钟内),固化形成强度高,施工速度快;(3)提高土壤保水蓄水能力、调节土壤 pH 值以及耐久性强等。虽然 JCDK-1 具有以上特点,但对于存在夏季高温、高湿、高辐射,冬季短时冻融频繁特殊气候的福建闽北高海拔地区的适应性仍不可知。

鉴于此,本文以福建省闽北地区典型残积砂土类边坡为例,通过室内宏细观试验以及现场试验,分析新型无机类生态稳定土壤(JCDK-1 稳定土)的性能及耐久性能,为新型无机类生态稳定剂在南方高海拔山区残积砂土类高陡边坡的实践应用提供依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验用土

试验用土取自福建省闽北地区省道 S303 线 K366+500 处残积砂性土类边坡,基本物理性质如表 1、表 2 所示。

表 1 典型残积土颗粒级配

粒组/mm	>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075
百分比/%	32.58	13.5	26.22	11.88	12.88	2.94

表 2 典型残积土基本物理性质

天然含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%
19.3	1.79	1.73	17.2

1.1.2 土壤稳定剂

JCDK-1 是一种以天然矿物为主原料的绿色环保土壤改良剂,具有保湿保肥、促进生物生长、防止水土流失以及分解土壤中重金属等功能。购自北京中通四维公路桥梁技术咨询有限责任公司,呈灰色粉末状(见图 1),可被土壤微生物分解,不会造成环境负荷。

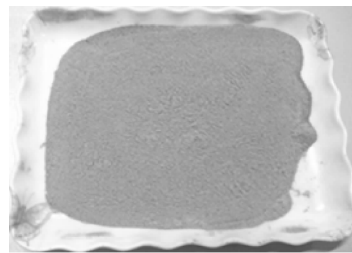


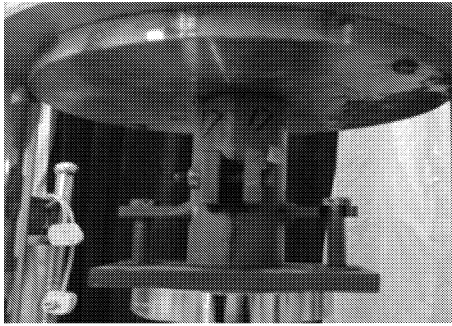
图 1 JCDK-1 型土壤稳定剂

1.2 试验方案设计

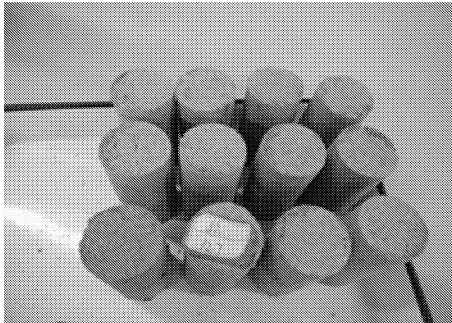
(1) 目 X 射线粉末衍射(XRD)。采用福州大学测试中心的荷兰 PANalytical 公司的 X/Pert3 PRO 型 X 射线粉末衍射仪,本试验主要用于测试稳定土体中所含有的矿物元素^[14]。

(2) 无侧限抗压强度。将 JCDK-1 土壤稳定剂分别按照干土质量的 0.2%、0.3%、0.4% 先与干土均匀拌合后,按照含水率 17.5% 配制土样,再均匀拌合,密封静置 12 h 后,按照干密度 1.56 g/cm³ 分两层装入尺寸为 $\Phi 39.1$ mm \times 120 mm 的模具内进行成型,利用定位圆柱体制作成 $\Phi 39.1$ mm \times 80 mm 的测试试样(见图 2)。室内自然养护后,利用

WDW-10 型微机控电子式制式万能试验测定稳定土体的抗压强度^[15]。



(a) 制样过程



(b) 制作好的试样图

图 2 试样制作

(3) 紫外线老化。采用两个 ULTRA-VITA-LUX 230V 型号紫外线老化灯(功率为 300 W)连续照射^[16]的方法进行试验,照射时间分别为 1 d、3 d、6 d、9 d、12 d、15 d。照射完毕后对土样进行无侧限抗压强度试验。

(4) 冻融循环。设置 1 个冻融循环为在 -15°C 冻 12 h,然后在 $+25^{\circ}\text{C}$ 融化 12 h^[17]。采用全自动低温冻融试验机,每 3 个冻融循环测试一次抗压强度,共测试 18 个循环。为了防止土样含水率变化,采用保鲜膜将土样包裹密实,如图 3 所示。冻融后对试样进行无侧限抗压强度试验。



图 3 冻融循环试样

(5) 干湿循环。设置 1 个干湿循环为放入水中浸泡 1 d,放入烘箱 50°C 下烘 1 d。循环次数分别为 1、2、3、4、5、10、15、20。将试样两端分别放置一块透

水石,并用保鲜膜包裹试样侧边,使土样从上下端进水而达到饱和现象^[18-19](见图 4)。到达指定循环次数后,进行无侧限抗压强度试验。

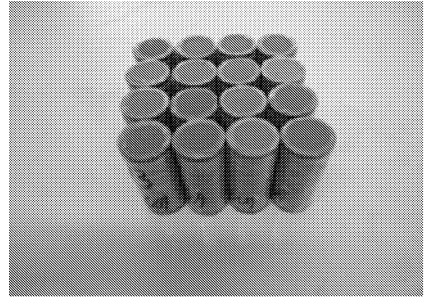


图 4 干湿循环试样

(6) 崩解试验。残积土具有泡水软化的特点,进行崩解试验检验稳定土体的水稳定性^[20]。参考《土工试验规程》^[20](SL 237—1999),采用简易的湿化装置(见图 5)，“1”为量程 250 mL 的量筒，“2”为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的网板,网孔 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 。试验时,试样放置于网板中央,匀速放入水槽中,并立即记下量筒稳定瞬间的刻度,并记录刻度稳定所用时间,试验进行 30 min 结束,未崩解部分从网板取出后继续浸入水中,观察 3 d 后试样的变化。测试未养护(试样成型)和室内自然养护 3 d 稳定土体的水稳定性。

(7) 比表面积。采用福州大学测试中心的美国 Micrometric 公司的 ASAP 2020M^[21],分别测试稳定土样在紫外线老化 6 d、15 d,冻融循环 6 次、18 次,干湿循环 5 次、20 次后的比表面积。

(8) 扫描电镜。采用福州大学测试中心的日本 Hitachi 公司的 S-4800 型场发射扫描电子显微镜,分别对经过紫外线老化、冻融循环、干湿循环后的稳定土体进行扫描电镜测试^[15]。

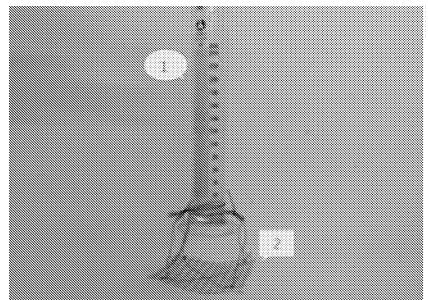


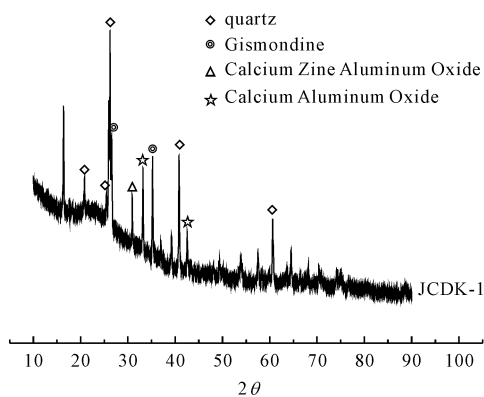
图 5 崩解试验装置

2 试验结果分析

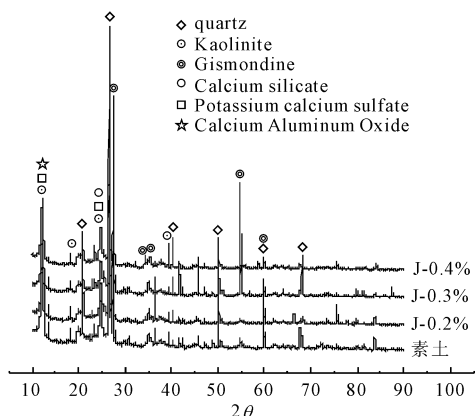
2.1 XRD 测试结果

图 6 为 JCDK-1 土壤稳定剂和稳定土样的 XRD 图谱。由图 6 可见:

(1) JCDK-1 稳定剂衍射图谱中 SiO₂、钙铝氧化物、钙锌铝氧化物等特征衍射峰较明显,表明稳定剂中含有二氧化硅、钙铝氧化物、钙锌铝氧化物等天然矿物质。



(a) JCDK-1 稳定剂



(b) JCDK-1 稳定土

图 6 JCDK-1 稳定剂和稳定土体的 X 射线粉末衍射图谱

(2) 稳定土样中 SiO₂ 的衍射峰很强,且出现钙长石 CaAl₂Si₂O₈·4H₂O 的特征衍射峰,表明土壤内含有石英、长石等矿物;同时含有较明显的高岭石 Al₂Si₂O₅(OH)₄ 的衍射峰,是长石和其他硅酸盐矿物蚀变的产物,而且含有硅酸钙 Ca₂SiO₄ 和铝酸钙 Al₂CaO₄ 等矿物质是花岗岩的重要成分。由此可知,该土壤主要含有石英、长石、花岗岩等矿物。

(3) 不同掺量的稳定土体和素土样的 XRD 图谱中特征衍射峰的位置基本一致,没有新的衍射峰出现,说明未产生新的矿物,但不同矿物的衍射峰的峰强稍有区别。

2.2 耐久性试验结果

图 7—图 9 分别为紫外线老化时间、冻融循环次数、干湿循环次数与 JCDK-1 型生态稳定土样强度的关系。其中,J-0.2%、J-0.3%、J-0.4% 分别表示 JCDK-1 掺量 0.2%、0.3%、0.4% 时的稳定土样。

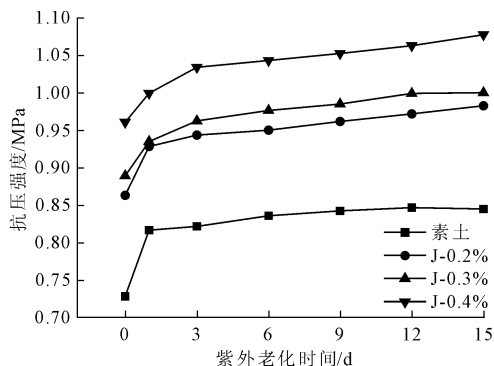


图 7 紫外线老化时间与稳定土样抗压强度的关系

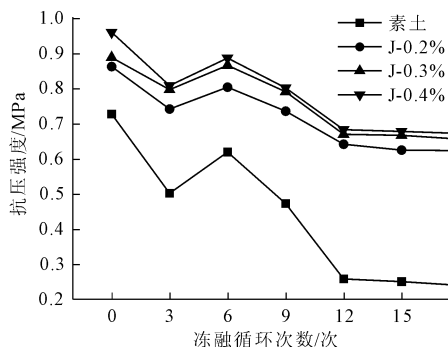


图 8 冻融循环次数与稳定土样抗压强度的关系

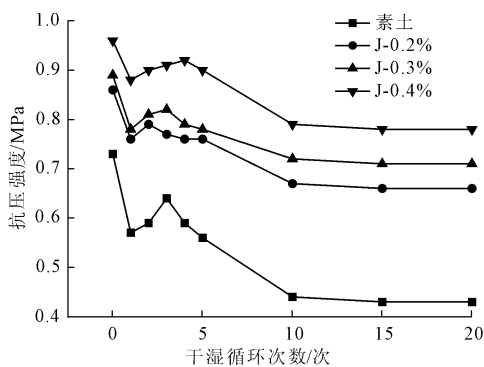


图 9 干湿循环次数与稳定土样抗压强度的关系

由图 7—图 9 可知:

(1) 相比较于素土,0.2%、0.3%、0.4% 掺量下的 JCDK-1 稳定土样在三种耐久性(紫外线老化 15 d、冻融循环 18 次以及干湿循环 20 次)试验后,其抗压强度依次为:提高了 13.81%、12.47%、11.4%;损失了 27.67%、26.08%、29.92%;损失了 23.33%、20.74%、18.63%。表明稳定土抗紫外老化、抗冻融循环、抗干湿循环能力良好,且明显优于素土。

(2) JCDK-1 型稳定土体的抗压强度随老化时间的增长而增加直至趋于平稳,但随冻融循环和干湿循环次数的增加,呈现先降低后增长再降低直至趋于平稳的趋势。造成以上原因是紫外线灯光照射后土样的水分不断蒸发而导致其抗压强度不断增

加;对于冻融和干湿循环,土样的强度变化主要受两个因素控制:稳定土体强度随龄期的增加以及冻融和干湿循环导致土体的损伤,不同时期两者对于强度的贡献不同,因而导致土样的强度随时间/次数的不同不断变化。如在冻融和干湿循环初期,前者因素小于后者因素,因而稳定土强度呈现下降趋势;随着时间/次数增加,前者因素占主导地位,导致稳定土强度呈现上升趋势;当时间/次数不断增加,后者因素再次占主导地位,稳定土强度再次下降直至趋于平稳。紫外老化 6 d、冻融循环 12 次、干湿循环 10 次后土样强度趋于稳定。

2.3 崩解试验结果

表 3 为稳定土体的崩解情况。由表 3 可知:JC-DK-1 稳定土体的水稳性随着稳定剂掺量的增加而增强,且明显优于素土。如 JCDK-1 稳定剂掺量为 0.2%、0.3%、0.4% 时,崩解时长分别增长 1.70 倍、3.43 倍、4.10 倍。养护 3 d 后的稳定土体的崩解速度更快,其崩解时间分别为 JCDK-1 稳定土体未养护时的 89%、67%、86%。原因是自然养护过程中水分散失,造成试样饱和度下降,使其崩解速度加快。

2.4 比表面积测试结果

表 4 为 JCDK-1 型稳定剂掺量为 0.3% 时,三种耐久性试验后稳定土体比表面积的测试结果。

表 3 稳定土体崩解试验结果

稳定土体	未养护 用时/s	未养护 崩解情况	养护 3 d 用时/s	养护 3 d 崩解情况
素土	86	完全崩解	48	完全崩解
J-0.2%	134	30min 崩解未完成,网板上残余零星稳定土块,且随着掺量的增加,未崩解稳定土块逐渐增多。	119	崩解规律同未养护,但崩解稳定时间缩短,崩解量增大。

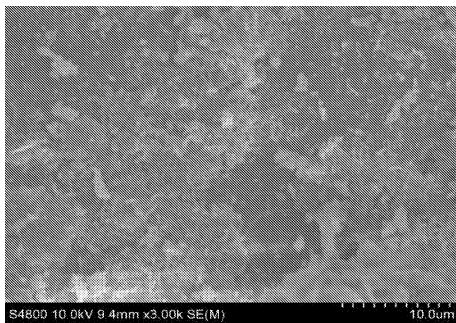
表 4 耐久性试验后各稳定土体比表面积的结果汇总

初始值	紫外线老化 比表面积		冻融循环 比表面积		干湿循环 比表面积	
	6 d	15 d	6 次	18 次	5 次	20 次
15.9530	16.3618	16.9817	15.9195	16.5806	17.6858	18.4746

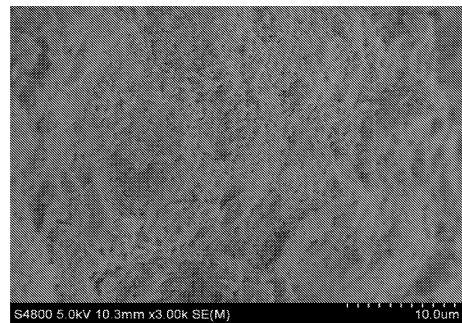
由表 4 可知:稳定土体的比表面积基本上随着各种耐久性试验的时间/次数增长而增大,且变化量均集中在前期。其中,相较于紫外线老化和冻融循环,干湿循环对稳定土体比表面积影响较大。

2.5 扫描电镜测试结果

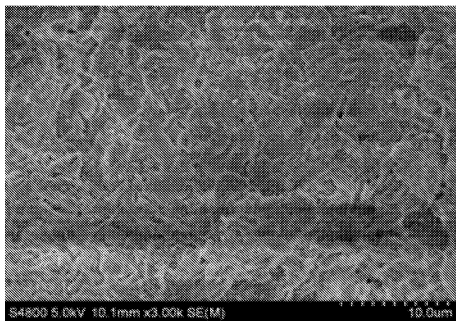
图 10 为 JCDK-1 型稳定剂掺量为 0.3% 时,三种耐久性试验后稳定土体的扫描电镜图。



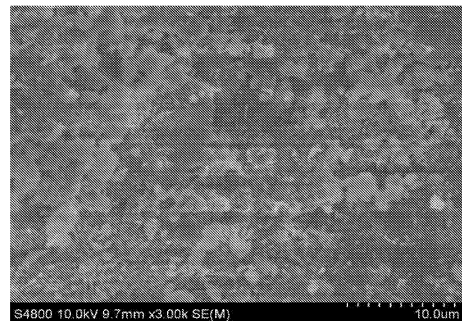
(a) JCDK-1 稳定土体($\times 3000$)



(b) 紫外线老化 15 d($\times 3000$)



(c) 冻融循环 18 次($\times 3000$)



(d) 干湿循环 20 次($\times 3000$)

图 10 JCDK-1 掺量为 0.3% 时稳定土体的扫描电镜图

由试验结果可知,JCDK-1 稳定土体的土颗粒排列非常紧密,密实性好,土颗粒间形成一个整体。紫外线老化和干湿循环对 JCDK-1 稳定土体的形貌影响很小,而冻融循环后土样的形貌产生了较大变化,呈鳞片状。

2.6 与其他稳定剂稳定土体耐久性试验结果对比

表 5 为有机类稳定剂 PAM、离子类稳定剂 EN-1 进行同样耐久性试验的结果。

从表 5 可得,JCDK-1、PAM、EN-1 稳定土体

紫外线老化后较素土强度分别平均提高了 20.33%、38.33%、13%;冻融循环分别平均损失了 170%、258.33%、206%;干湿循环分别平均损失了 67.67%、108.67%、59%。由此可得,有机物类 PAM 稳定土体虽然表现出较好的抗干湿循环和崩解能力,但是抗紫外线老化能力较弱;离子类 EN-1 稳定土体在强度提高方面表现一般,且抗崩解能力最差。综合抗冻融、干湿、老化等耐久性方面考虑,JCDK-1 稳定土体效果最好。

表 5 PAM、EN-1 稳定土体的耐久性试验结果

稳定土体	紫外线老化 (15 d) 强度/MPa	紫外线老化 (15 d) 增长率/%	冻融循环 (18 次) 强度/MPa	冻融循环 (18 次) 损失率/%	干湿循环 (20 次) 强度/MPa	干湿循环 (20 次) 损失率/%	崩解试验用时/s	
							未养护	养护 3 d
P-0.2%	1.09	29	0.82	240	0.85	99	285	118
P-0.3%	1.16	37	0.92	281	0.88	106	283	287
P-0.4%	1.26	49	0.86	254	0.94	121	223	412
E-0.1%	0.95	12	0.70	192	0.66	53	189	94
E-0.15%	0.96	13	0.80	229	0.70	64	222	174
E-0.2%	0.96	14	0.72	197	0.68	60	223	225

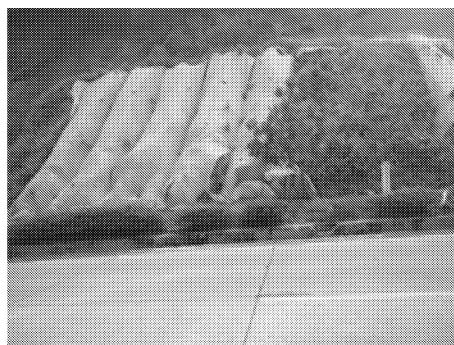
3 现场试验

现场试验点位于福建省闽北境内省道 S303 线 K366+500 处边坡,该处属于高海拔地区(海拔约 1400 m),具有夏季湿热而冻季冻融频繁的特征(年降雨约 2430.9 mm,夏季极端高温 41℃左右,冬季有多达 18 次以上短时冻融循环,最低温达 -8℃)。边坡坡度为 1:0.75,浅层溜坡、水土流失严重(见图

11(a))。试验面积约 200 m²,材料为草种、肥料、土壤、水、JCDK-1 土壤稳定剂等,采用液压喷射法进行现场施工,施工步骤为坡面整平→挂镀锌铁丝网→喷洒第一层种植基层(2 cm~3 cm)→喷洒第二层种植基层(2 cm~3 cm)→喷洒第三层种植基层(3 cm~4 cm)→养护。本次试验为 2016 年 4 月施工完成。图 11 为 JCDK-1 型稳定剂护坡施工前和施工后对比。



(a) 施工前(2016年4月)



(b) 施工后(2017年4月)

图 11 JCDK-1 稳定剂护坡现场效果

由图 11 可见,经历一个湿热季和一个短时冻季后,JCDK-1 稳定边坡植被生长旺盛,植被覆盖率很高,且坡底溜土非常少。说明喷播 JCDK-1 型稳定剂后的边坡保水、保肥效果良好,表现出良好的生态性,可有效防止大雨冲刷造成边坡表层冲沟、溜坡

等灾害以及短时冻融循环诱发边坡浅层剥落。

4 结 论

(1) JCDK-1 为含有二氧化硅、钙铝氧化物、钙锌铝氧化物等天然矿物质的无机类土壤稳定剂,不

含有害矿物质,且稳定土体中没有新的矿物产生。

(2) 不同 JCDK-1 掺量下稳定土体的抗压强度分别在紫外线老化 6 d、冻融循环 12 次、干湿循环 10 次后趋于稳定,其中紫外线老化强度增长 11% 以上,冻融循环强度保留率 76%,干湿循环强度保留率 75% 以上,显示出良好的耐久性能。

(3) JCDK-1 稳定土体的水稳性随着稳定剂掺量的增加而增强,崩解时长增长 1.70 倍以上,明显优于素土,可有效改善残积土易崩解的缺点。

(4) 稳定土体的比表面积基本上随着各种耐久性试验的时间/次数增长而增大,干湿循环对稳定土体比表面积影响较大。紫外线老化和干湿循环对 JCDK-1 稳定土体的形貌影响很小,而冻融循环后土样的形貌产生了较大变化,呈鳞片状。

(5) 综合抗冻融、干湿、老化等耐久性方面考虑,JCDK-1 稳定剂比 EN-1 型、PAM 型稳定剂固土效果更好。现场试验表明喷播 JCDK-1 型稳定剂表现出良好的生态性,能有效地满足南方高海拔山区夏季高温、高辐射、高湿度,冬季冻融频繁等气候特点。

参考文献:

- [1] 章梦涛,邱金淡,颜冬. 客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用[J]. 中国水土保持科学,2004,2(3): 10-12.
- [2] 杨喜田,赵宁,董惠英. 论厚层客土喷播技术的植物群落目标设定和植物种选配[J]. 中国水土保持科学,2006,4(1):70-74,80.
- [3] 高晓颖,孙冲. 植物纤维类型及用量对土壤渗透性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):121-124.
- [4] 宋凤鸣,刘建华,钱璐璜,等. 8 种乡土植物在边坡植被恢复工程中的应用[J]. 中国水土保持科学,2016,14(4):134-140.
- [5] 王全九,张继红,谭帅. 微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究[J]. 土壤学报,2016,53(4): 1056-1064.
- [6] 冯巧,刘瑾,卢毅,等. 一种复合加固剂改良砂土的强度试验研究[J]. 工程地质学报,2017,25(4): 903-911.
- [7] 苏涛,张兴昌,王仁君. EN-1 对砒砂岩固化土抗剪

强度特征的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(9):86-91.

- [8] Naeini S A, Naderinia B, Izadi E. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(6):943-949.
- [9] Onyejekwe S, Ghataora G S. Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2):651-665.
- [10] Mohammadi A, Dehestani M, Shooshpasha, et al. Mechanical properties of sandy soil stabilized with modified sulfur[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(4):401-414.
- [11] 高卫民,吴智仁,吴智深,等. 荒漠化防治新材料 W-OH 的力学性能研究[J]. 水土保持学报,2010,24(5):1-5,162.
- [12] 王其东,高海鹰,梁止水,等. 新型亲水性聚氨酯对砒砂岩边坡抗降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(3):29-32,114.
- [13] 周应新,谢凤禹,共放鸣,等. 新生态边坡稳固技术在保腾高速公路中的应用研究[J]. 公路,2010(8):93-97.
- [14] 王银梅,杨重存,谌文武,等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2554-2559.
- [15] 彭红涛,张琪,李乃胜,等. 派酶掺入三合土对土体抗压强度影响的探讨[J]. 建筑材料学报,2012,15(3):372-376.
- [16] 和法国. 岩土工程加固新材料试验研究[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [17] 闵敏. 寒区 W-OH 新型渠系材料防渗抗冻胀机理研究[D]. 西宁:青海大学,2012.
- [18] 程佳明,王银梅,苗世超,等. 固化黄土的干湿循环特性研究[J]. 工程地质学报,2014,22(2):226-232.
- [19] 曾召田,刘发标,吕海波,等. 干湿交替环境下膨胀土变形试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(3):72-76.
- [20] 土工试验规程:SL 237—1999[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [21] 王银梅,谌文武,韩文峰. SH 固沙机理的微观探讨[J]. 岩石力学,2005,26(4):650-654.