

[文章编号] 1003—4684(2021)02-0061-05

# 植被混凝土—石界面强度及基材 pH 值研究

李 准<sup>1</sup>, 杨智勇<sup>1,2</sup>, 詹 向<sup>1</sup>, 王瀚文<sup>1</sup>

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 湖北省生态道路工程研究中心, 湖北 武汉 430000)

**[摘 要]** 以透水石模拟岩质边坡,通过植被混凝土与透水石界面的直剪试验,研究植被混凝土与岩质边坡界面间的抗剪强度与水泥和绿化添加剂掺量之间的关系,并通过 pH 测试研究植被混凝土在满足界面抗剪强度条件与植物生长条件两者间的相适应性。结果表明,随着水泥掺量的增加,植被混凝土—石界面之间的抗剪强度逐渐增大,植被混凝土的 pH 值也随之逐渐升高;随着绿化添加剂掺量的增加,植被混凝土—石界面之间的黏聚力和内摩擦角呈现不同的发展趋势,植被混凝土的 pH 值逐渐降低。当水泥掺量为 6%,绿化添加剂掺量为 50%至 75%时,相较于普通黏土—石界面,植被混凝土—石界面间的黏聚力降低 80.5%至 60.2%,内摩擦角降低 24.3%至 53.6%,同时又能满足植物生长的条件。

**[关键词]** 植被混凝土; 界面; 直剪试验; pH

**[中图分类号]** S19 ,X37 **[文献标识码]** A

植被混凝土是一种具有一定孔隙率的特殊混凝土。在该混凝土孔隙中填入植物种子以及植物生长所需要的营养物质,则植物可通过依附该混凝土,于孔隙中生根发芽,进而在这种特殊的混凝土中生长<sup>[1]</sup>。待植物覆盖坡面,根系包裹土壤,使得植物、植被混凝土和生态待修复区域连接成为一个整体,从而达到生态修复的目的,并起到护坡固土的作用<sup>[2]</sup>。很多学者对植被混凝土基材的力学性能进行了研究,已有的研究表明植被混凝土的强度受到很多因素的影响。许文年<sup>[3]</sup>等的直剪试验发现水泥掺入比和龄期对植被混凝土的模量和应力峰值有影响。夏振尧<sup>[4]</sup>等分析了水泥比、有机质掺量和水泥对植被混凝土基材早期强度的影响。张少彪<sup>[5]</sup>等研究了水胶比对植被混凝土基材强度的影响。郝红超<sup>[6]</sup>等以秸秆纤维素为改良剂,研究了秸秆掺入物对植被混凝土强度的影响。丁向群<sup>[7]</sup>等,吴光军<sup>[8]</sup>等向植被混凝土中添加矿物掺合料,以研究矿物对其强度的影响。

近年来,随着植被混凝土研究的深入,对向植被混凝土中添加有机质掺入物、矿物掺合料、胶凝材料等物质以探究其强度变化的研究也越来越深入<sup>[9]</sup>。在实际工程中,植被混凝土技术常用于边坡的生态防护工程中,通常作为基材并混合植物种子喷播于边坡表面,起到边坡防护的作用,而作用于岩质边坡

的植被混凝土最容易发生剪切破坏的地方则是位于植被混凝土与岩质边坡的界面之间。因此,研究界面间的力学特性有助于提高植被混凝土的应用效果,所以需就此方向展开研究,但有关于植被混凝土与岩质边坡界面间强度的研究还比较少。因此本文以直剪试验来探究不同影响因素下植被混凝土与岩质边坡界面间的强度变化,同时利用 pH 测试探究界面强度变化与植物生长条件间的相适应性,并为植被混凝土生态修复技术的应用提供参考。

## 1 试验方法

### 1.1 试验条件

试验选用武汉市的普通黏土,采用标准普氏击实试验方法,得到该黏土的最优含水率为 23%,最大干密度为 1.52 g/cm<sup>3</sup>。掺合料选用水泥和绿化添加剂,其中水泥选用 32.5 的普通硅酸盐水泥,其主要成分包括 CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等,pH 值为 10~11。绿化添加剂主要成分包括固氮菌剂、解磷菌剂、硅酸盐细菌菌剂,pH 值为 3~4。黏土的物理指标为:相对密度,2.65;密度,1.88 g/cm<sup>3</sup>;干密度,1.52 g/cm<sup>3</sup>;液限,30.2%;塑限,12.5%;塑性指数,16.6%。

### 1.2 试样制备

根据《土工试验规范》及《GB7859—1987—森林

**[收稿日期]** 2020—06—29

**[基金项目]** 国家科技重大专项(2016YFC05022208);湖北省中央引导地方科技发展专项(2019ZYYD053)

**[第一作者]** 李 准(1996—),男,湖北孝感人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为生态护坡

**[通信作者]** 杨智勇(1982—),男,湖北武汉人,工学博士,湖北工业大学讲师,研究方向为生态岩土工程

土壤 pH 值的测定》制备试样。

1)直剪试样的制备。将普通黏土、水泥、绿化添加剂按照不同的掺量进行混合配置:水泥掺量为 0、2%、6%、10%(掺量为水泥质量与普通黏土质量之比);绿化添加剂掺量为 0、50%、75%(掺量为绿化添加剂质量与水泥质量之比)。按照 25%的含水率与掺合料混合制成母样。

2)从母样中取出部分土样,与透水石一起放入击实仪中制样。制得的试样上部尺寸是直径为 61.8 mm,高为 10 mm 的土样,下部尺寸是直径为 61.8 mm,高为 10 mm 的透水石。组合整体尺寸是直径为 61.8 mm,高为 20 mm 的试样(图 1)。



图 1 试验试样图

3)将试样与母样放置于混凝土放入标准养护室内(养护温度为  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ),养护相对湿度  $\geq 95\%$  至相应的龄期后,可将试样取出进行直剪试验。

4)pH 试样的制备。从母样中取出约 25 g 的土样,风干至恒重后,碾压过筛。筛下的样品再放置于研钵中细磨,通过 100 目的尼龙筛,混合均匀后放入密封塑料袋中贮藏备用,避免样品受到污染。重复上述步骤,一个母样中共制出三组备用样品。

1.3 直剪试验方案设计

参考不同的接触面直剪试验<sup>[10-14]</sup>,透水石作为必不可少的实验用品参与试验的全过程。透水石也是岩质材料,和岩质边坡有一定的相似性,而且透水石方便易得,制样时,植被混凝土与透水石制成的土-石试样能较好的契合直剪仪的尺寸。因此本试验将用透水石模拟岩质边坡。

试验中,为研究水泥掺量、绿化添加剂掺量对植被混凝土与岩质边坡界面间强度的影响,设计了多组试验,每组施加 4 种不同的法向应力,分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa。本试验所用仪器为 DSJ-3 四联应变式直剪仪,该仪器所提供的的剪切速率为  $2.4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.02\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。试验过程中,剪切速率选择 $0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在上述条件下对试样进行直剪试验,在试样破坏时得到的剪切应力,可获得植被混凝土石界面抗剪强度随法向应力的变化,并通过拟合得到抗剪强度指标-黏聚力和内摩擦角。

1.4 pH 值测试方案设计

在工程实践中,应用植被混凝土的目的之一是使裸露的边坡生态得以恢复,所以植被混凝土的土体必须满足生物生长的条件。因为掺入水泥和绿化添加剂会使土体 pH 发生变化,可能不利于植物生长,所以必须要对植被混凝土进行 pH 测试。

将养护中的母样每隔一周进行一次取样并制成待用样品贮藏于密封塑料袋中备用。将三组样品分别取出 10 g 放入三个不同标号的烧杯中,然后向烧杯中倒入 25 mL 的纯水,并用玻璃棒搅拌 2~3 min。搅拌完毕后,放置平台上沉淀 30 min,使其澄清后进行测定。为减小误差,将三组平行试验的 pH 测试结果取平均值,并将其作为最终结果。pH 测试选用的仪器为 pH-B4 型 pH 计。

2 试验结果及分析

2.1 直剪试验结果

在不同法向应力条件下,进行植被混凝土-石界面的直剪试验,得出界面抗剪强度随法向应力变化的拟合图(图 2),并将试验结果绘制成表 2。

表 2 抗剪强度试验结果

水泥/黏土/%	绿化剂/水泥/%	配比编号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	0	A1	16.25	24.00
		B1	31.49	25.43
		B2	26.51	28.77
2	50	B3	20.19	29.93
	75	C1	32.81	28.00
		C2	29.34	29.83
6	50	C3	26.04	36.87
	75	D1	37.74	34.30
		D2	36.24	36.67
10	75	D3	35.53	39.10

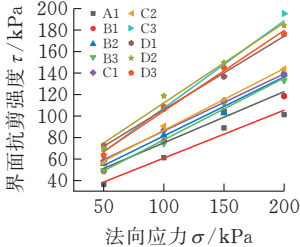


图 2 界面抗剪强度-法向应力变化拟合图

图 2 中 A1 表示  $\tau=0.4454\sigma+16.25$ ; B1 表示  $\tau=0.475\sigma+31.49$ ; B2 表示  $\tau=0.549\sigma+26.51$ ; B3 表示  $\tau=0.576\sigma+20.19$ ; C1 表示  $\tau=0.5319\sigma+32.81$ ; C2 表示  $\tau=0.5737\sigma+29.34$ ; C3 表示  $\tau=0.8128\sigma+26.04$ ; D1 表示  $\tau=0.6825\sigma+37.74$ ; D2 表示  $\tau=0.7445\sigma+36.24$ ; D3 表示  $\tau=0.576\sigma+36.53$ 。从图 2 及表 2 中可以发现,与不添加任何材料的普通黏土

相比,在土中加入水泥与绿化添加剂后,从整体上看,植被混凝土-石界面之间的抗剪强度指标:黏聚力与内摩擦角的大小均有提高,具体变化为:相较于普通黏土-石界面,植被混凝土-石的界面间的黏聚力提高的增量为 3.94~21.49 kPa,提高的比例为 24.2%~132%,内摩擦角提高的增量为 1.43°~15.1°,提高的比例为 6%~63%。

2.2 水泥掺量对土-石界面间黏聚力的影响分析

图 3 为水泥掺量对界面间黏聚力的影响关系曲线。由图可知,在水泥掺量为 0(绿化添加剂掺量同为 0)的普通黏土-石界面间本来就存在一定的黏聚力。当绿化添加剂掺量一定时,随着水泥掺量的增量从 2%→6%→10%的递增过程中,水泥增量间黏聚力增长的幅度逐渐增大。其中,当绿化添加剂掺量为 75%时,水泥掺量由 6%提高到 10%时,黏聚力由 26.04 kPa 提高到 35.53 kPa,其增长幅度较大,可达到 15%。从整体上看,在绿化添加剂掺量相同时,植被混凝土-石界面间的黏聚力随着水泥掺量的增加而增大。

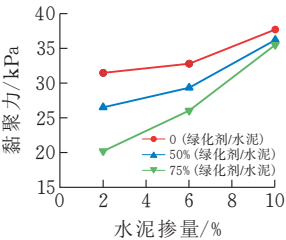


图 3 水泥对黏聚力的影响

2.3 水泥掺量对土-石界面间内摩擦角的影响分析

图 4 为在不同的绿化添加剂掺量下,水泥掺量对界面间内摩擦角的影响关系曲线。

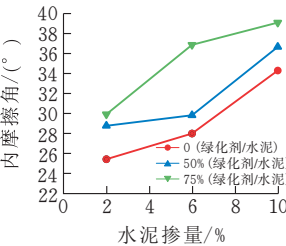


图 4 水泥掺量对内摩擦角的影响

由图 4 可知,植被混凝土在不掺水泥和绿化添加剂时,植被混凝土-石界面间的内摩擦角为 24°。随着水泥掺量的增加,不同绿化添加剂掺量下界面的内摩擦角均呈现增大的趋势。其中,当绿化添加剂掺量为 75%时,水泥掺量从 2%增加到 6%时,内摩擦角增长幅度可达 18%以上。

2.4 绿化添加剂掺量对土-石界面间黏聚力的影响分析

图 5 为绿化添加剂掺量对界面间黏聚力的影响

关系曲线。由图可知,随着绿化添加剂掺量的增加,植被混凝土-石界面间的黏聚力逐渐减小。当水泥掺量为 2%时,随着绿化添加剂掺量由 0 增加到 75%,界面间黏聚力由 31.49 kPa 减小至 20.019 kPa,减大幅度达到 56%;当水泥掺量为 6%时,随着绿化添加剂掺量由 0 增加到 75%,界面间黏聚力由 32.81 kPa 减小至 26.05 kPa,减大幅度达到 26%;当水泥掺量为 10%时,随着绿化添加剂掺量由 0 增加到 75%,界面间黏聚力由 37.741 kPa 减小至 35.531 kPa,减大幅度达到 6.9%。在水泥掺量为 10%时,相较于水泥掺量为 2%或 6%的情况,随着绿化添加剂掺量的增加,黏聚力减小的幅度降低,降低趋势趋于平缓。这也说明水泥掺量的增加,会抵消部分因绿化添加剂带来的负面影响,降低界面间黏聚力减小的程度。植被混凝土中加入的绿化添加剂呈强酸性,能中和水泥水化反应过程中产生的碱性,但也在一定程度上降低了植被混凝土-石接触面间的黏聚力。

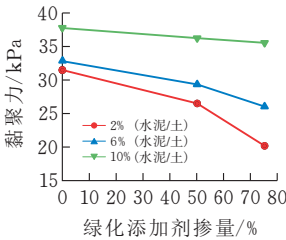


图 5 绿化添加剂对黏聚力的影响

2.5 绿化添加剂掺量对土-石界面间内摩擦角的影响分析

图 6 为在不同的绿化添加剂掺量下,绿化添加剂掺量对界面间内摩擦角的影响关系曲线。

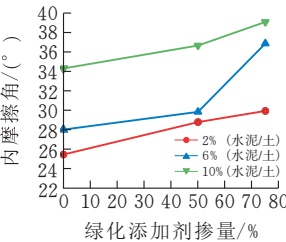


图 6 绿化添加剂对内摩擦角的影响

由图 6 可知,不论水泥掺量是 2%、6% 还是 10%,随着绿化添加剂掺量从 50%增加至 75%,界面间的内摩擦角都随着增大。当水泥掺量为 2%,绿化添加剂掺量从 50%增至 75%,界面内摩擦角最终增大的差值为 1.16,最终增大幅度为 4%。当水泥掺量为 6%,绿化添加剂掺量从 50%增至 75%,界面内摩擦角最终增大的差值为 7.04,最终增大幅度为 23.6%。当水泥掺量为 10%,绿化添加剂掺量从 50%增至 75%,界面内摩擦角最终增大的差值为



0.57,最终增大幅度为 1.5%。因此绿化添加剂掺量对界面内摩擦角变化有影响,整体表现为随着绿化添加剂掺量的增加,植被混凝土-石界面间的内摩擦角也随之增大。

2.6 pH 测试结果

将不同配比的植被混凝土进行 pH 测试,并将试验结果制成表 3 及图 7、图 8。

表 3 pH 测试试验结果

水泥/黏土/%	绿化剂/水泥/%	基材类型	pH 值			
			7 d	14 d	21 d	28 d
0	0	A1	7.14	7.06	7.02	7.00
	0	B1	8.42	8.40	8.37	8.33
2	50	B2	8.30	8.14	8.13	7.87
	75	B3	8.03	7.79	7.70	7.69
6	0	C1	9.09	9.03	9.02	9.00
	50	C2	8.78	8.72	8.70	8.65
	75	C3	8.56	8.54	8.49	8.44
10	0	D1	9.63	9.62	9.56	9.47
	50	D2	9.42	9.37	9.36	9.17
	75	D3	9.15	9.14	9.13	9.10

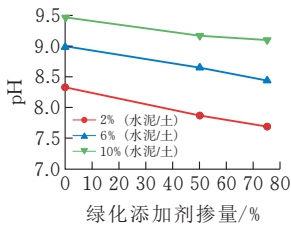


图 7 绿化添加剂对 pH 的影响

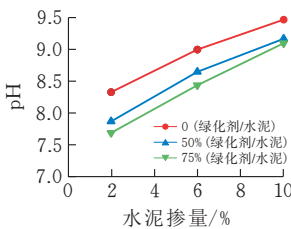


图 8 水泥掺量对 pH 的影响

通过 pH 测试可知,本试验中植被混凝土所选用的土壤为 pH 值在 7 左右的中性土壤。从图 7 及图 8 可以看出,除了对照组(不添加水泥和绿化添加剂)pH 值的变化基本呈现稳定状态外,其他配比类型的 pH 值整体上存在下降的趋势。B1、C1、D1 均为只掺入水泥不掺入绿化添加剂的三类配比,对比三类配比的 pH 值可以发现,随着水泥掺量的增加,基材的 pH 值也随之升高。在三种不同水泥掺量的基材中分别掺入 50%和 75%的绿化添加剂。结果表明,随着绿化添加剂的掺入,不同基材的 pH 值从整体上呈现下降的趋势。

当水泥掺量为 2%时,绿化添加剂掺量为 50%,基材的 pH 值在第 28 d 降低至 7.87;绿化添加剂掺量为 75%,基材的 pH 值在 14 d 养护期时降低至

7.79,随后继续缓慢降低直至 7.69。对比相同绿化添加剂掺量下,当水泥掺量为 6%,养护期到达第 28 d,基材的 pH 分别降至 8.65 和 8.44;当水泥掺量为 10%,养护期到达第 28 d 时,基材的 pH 分别降至 9.17 和 9.17。

当绿化添加剂掺量为 50%,水泥掺量为 2%时,基材的 pH 在 21 d 内由 8.30 下降到 7.87,差值为 0.43,下降幅度达到 5.2%;当绿化添加剂掺量为 50%,水泥掺量为 6%时,基材的 pH 在 21d 内由 8.78下降到 8.65,差值为 0.13,下降幅度达到 1.5%;当绿化添加剂掺量为 50%,水泥掺量为 10%时,基材的 pH 在 21 d 内由 9.42 下降到 9.17,差值为 0.25,下降幅度达到 2.7%。

当绿化添加剂掺量为 75%,水泥掺量为 2%时,基材的 pH 在 21 d 内由 8.03 下降到 7.69,差值为 0.34,下降幅度达到 4.2%;当绿化添加剂掺量为 75%,水泥掺量为 6%时,基材的 pH 在 21 d 内由 8.56下降到 8.44,差值为 0.12,下降幅度达到 1.4%;当绿化添加剂掺量为 50%,水泥掺量为 10%时,基材的 pH 在 21 d 内由 9.15 下降到 9.10,差值为 0.05,下降幅度达到 0.5%。

这些结果表明,在基材中掺入水泥后,通过掺入绿化添加剂可以达到降低基材 pH 的目的,且水泥掺量为 2%和 6%,绿化添加剂掺量为 50%和 75%时,都能将基材的 pH 降低到 7.69 到 8.65 的范围内。但随着水泥掺量的增加,初始 pH 过高,绿化添加剂掺量对基材 pH 的降低作用有限,如水泥掺量为 10%时,掺入 75%的绿化添加剂,在 21 d 内只能将基材的 pH 下降 0.05。

大多数护坡植物所能适应的土壤 pH 值范围很广,能适一定的碱性土壤,但无法适应强碱性土壤。综合来说其适应 pH 范围为 4.7~8.6。因此,在 10 组试验中,A1、B1、B2、B3、C2、C3 的试验结果显示其 pH 值能满足植物的生长,C1、D1、D2、D3 的试验结果显示其 pH 值不满足植物生长的条件。

3 结论

基于植被混凝土-石界面直剪试验以及 pH 测试,可以得出以下结论

1)普通黏土土-石界面间已经具有一定的抗剪强度,而掺入水泥及绿化添加剂的植被混凝土-石界面的抗剪强度相较于土-石界面的抗剪强度发生变化,证明水泥及绿化添加剂对其界面的抗剪强度有影响。

2)水泥掺量对界面间抗剪强度影响较为显著。当绿化添加剂掺量相同时,界面间的黏聚力和内摩

擦角都随水泥掺量的增加而增大。

3)绿化添加剂对界面间的黏聚力和内摩擦角具有不同的影响。当水泥掺量相同时,随着绿化添加剂的掺量的增加,界面间的黏聚力随之降低。

4)水泥和绿化添加剂都能影响植被混凝土的 pH 值。水泥的掺入是植被混凝土 pH 值升高的主要因素,而绿化添加剂则能降低因水泥引起的 pH 值升高。

5)本实验中,水泥的最佳掺量为 6%,绿化添加剂的最佳掺量范围为 50%~75%,如此既能提高界面间的黏聚力与内摩擦角,又可以满足植物生长的 pH 条件。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 胡德熙.植被混凝土[J]. 建筑知识,1997,18(5):39-40.  
[2] 王桂玲,王龙志,张海霞,等.植生混凝土的含义、技术指标及研究重点[J].混凝土,2013(1):105-109.  
[3] 许文年,夏振尧,周宜红,等.植被混凝土无侧限抗压强度试验研究[J].水利水电技术,2007, 38(4):51-54.  
[4] 夏振尧,许文年,王乐华.植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J].岩土力学, 2011(6):124-129.  
[5] 张少彪,石云兴,屈铁军,等.植生混凝土试验研究及工程试用[J].混凝土,2012(8):125-128.  
[6] 郗红超,夏冬,李富平等.秸秆纤维型植被混凝土边坡防护基材初期抗剪强度试验研究[J].金属矿山,2019(4):154-162.

[7] 丁向群,尹思安,孙畅,等.超细矿粉对植生再生混凝土抗压强度及 pH 值的影响[J].硅酸盐通报,2019,38(5):1545-1549.  
[8] 吴光军,陈建国,蒋涛,等.矿物掺合料对植生混凝土抗压强度及 pH 值的影响研究[J].混凝土,2020(3):85-88.  
[9] Waiching Tang,Ehsan Mohseni,Zhiyu Wang. Development of vegetation concrete technology for slope protection and greening [J]. Construction and Building Materials,2018,179:605-613.  
[10] 杨大方,牛双建,葛双双,等.含水量对粘土与结构物接触界面单剪特性影响规律试验研究[J].实验力学, 2019,34(2):258-266.  
[11] 王永洪,张明义,白晓宇,等.剪切速率对黏性土混凝土界面抗剪强度影响的试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):48-54.  
[12] 王俊杰,姬雪竹,张钧堂等.砼-土界面抗剪特性试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(18):261-265.  
[13] Levent Selcuk, Derya Asma..Experimental investigation of the Rock-Concrete bi materials influence of inclined interface on strength and failure behavior[J].International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2019,123:1-11.  
[14] Dong W, Yang D, Zhou X, etc. Experimental and numerical investigations on fracture process zone of rock-concrete interface[J]. FFEMS Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2017;40(5):820-835.

Study on the Interface Strength and pH Value of Vegetation Concrete-Stone

LI Zhun<sup>1</sup>, YANG Zhiyong<sup>1, 2</sup>, ZHAN Xiang<sup>1</sup>, WANG Hanwen<sup>1</sup>

(1 School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China ;

2 Hubei Eco-Road Engineering Research Center , Wuhan 430000,China )

**Abstract:** Rock slope is simulated by pervious stone. Vegetation concrete and direct shear test of permeable rock interface are used to study the interface between concrete and rock slope vegetation of shear strength and the relationship between the cement additive dosage and greening. The pH test is used to study the adaptability between vegetation concrete in the interface shear strength and growth condition of plant. The results show that with the increase of cement content, the shear strength between the interfaces increases gradually, and the pH value also increases gradually. With the increase of the amount of green additives, the cohesion and internal friction Angle between the interfaces present different development trends, and the pH value gradually decrease. When the cement content is 6% and the greening additive content is 50% to 75%, compared with the common clay-stone interface, the cohesion between the vegetation concrete-stone interface is increased by 80.5% to 60.2%, and the internal friction Angle is increased by 24.3% to 53.6%, which can meet the conditions of plant growth.

**Keywords:** vegetation concrete; interface; direct shear test; pH

[责任编辑:裴 琴]