

PP纤维增强生态混凝土的力学性能研究

赵仁银¹, 王业宇², 施翔², 野博超¹, 侯利军¹

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 掺加短切纤维是改善生态混凝土脆性行为的重要方法。以聚丙烯(PP)纤维作为增强纤维, 通过抗压、劈拉和受弯试验研究了不同纤维掺量下生态混凝土的力学性能。试验结果表明, 纤维桥接作用可有效抑制微裂缝扩展, 改善受压破坏试件整体性, 增大劈拉和受弯破坏截面的粗糙度。其次, 掺加纤维略微降低生态混凝土孔隙率。此外, 在力学性能方面, 纤维掺量在0.3%以内时, 抗压强度仅轻微降低, 而掺量0.4%时抗压强度下降23%; 劈拉和抗弯强度随着纤维掺量增大呈先增大后减小的变化规律, 在掺量0.2%时性能较优。随着纤维掺量增大, 受弯荷载-挠度曲线下降段残余荷载增大, 弯曲韧性也相应提高。与纤维掺量相比, 纤维长度对生态混凝土孔隙率和力学性能影响较小。

关键词: 生态混凝土; 纤维; 抗压; 劈拉; 抗弯; 韧性

中图分类号: TV213.4

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)06-0011-0007

Study of mechanical properties of PP fiber reinforced eco-concrete

ZHAO Renyin¹, WANG Yeyu², SHI Xiang², YE Bochao¹, HOU Lijun¹

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, China)

Abstract: The addition of chopped fiber is an important method to improve the brittle behavior of eco-concrete. In this study, using polypropylene (PP) fiber as reinforcing fiber, the mechanical properties of eco-concrete with different fiber fractions are investigated through compression, splitting tension and bending tests. The experimental results show that the fiber bridging action can effectively inhibit the extension of microcracks, improve the integrity of specimens subjected to compression failure, and increase the roughness of cross sections under splitting tension and bending failure. Secondly, the addition of fiber slightly reduces the porosity of eco-concrete. In addition, in terms of mechanical properties, the compressive strength only decreases slightly at a fiber fraction lower than 0.3%, while at a fiber fraction of 0.4%, the compressive strength decreases by 23%. Moreover, the splitting tensile strength and flexural strength increase first and then decrease with an increase of fiber fraction, and the performance is better at the fraction of 0.2%. With an increase of fiber fraction, the residual flexural load in the descending section of the load-deflection curve increases gradually, and the flexural toughness is also enhanced correspondingly. Compared with the fraction of PP fiber, the length of PP fiber has slight influence on the porosity and mechanical properties of eco-concrete.

Key words: eco-concrete; fiber; compression; splitting tension; anti-bending; toughness

收稿日期: 2023-03-18

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020016), 南通市科技项目(JC2021168)

作者简介: 赵仁银(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工混凝土结构研究。E-mail: 1035879784@qq.com

通信作者: 侯利军(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水运工程结构研究。E-mail: hlj2932@hhu.edu.cn

生态护坡护岸是保护河湖生态的重要技术手段^[1-2],其中生态混凝土护坡护岸是重要手段之一^[1]。生态混凝土以多孔混凝土为骨架,孔隙内填充植物生长基质,表层生长的植物根系穿过孔隙扎根于混凝土下方的土壤,形成植物-骨架-土壤有机结合体,具有适应植物生长、绿化环境和透水过滤等优势^[3-4]。

生态混凝土降碱控制是保证植生性能的重要环节,主要通过掺加矿物掺合料、喷涂弱酸性溶液或表面密封有机涂层^[5-7],降低或隔绝氢氧化钙渗入孔隙土中的量,从而满足植物生长需要。此外,尽管相关规范规定了护坡生态混凝土需要满足的最低抗压强度要求^[8],但生态混凝土孔隙率大,力学性能特别是抗拉、抗折强度较低,而且在冻融、硫酸盐侵蚀等物理化学作用下的耐久性较差^[9-11],在长期服役下远比普通混凝土更易于开裂、剥落甚至脆性破坏。

掺加短切纤维是一种改善混凝土力学性能和耐久性的行之有效的方法^[12-13]。目前,针对短切纤维增强生态混凝土,相继开展了系列力学性能和耐久性研究。宋文杰^[14]研究发现掺加纤维可以有效提高水泥浆在骨料表面的留存率,改善了混凝土抗压强度。Kim等^[15-16]研究了掺加黄麻纤维的生态混凝土的力学和循环冻融行为。结果表明,抗压强度和抗冻性能随纤维掺量呈先增大后减小的趋势,纤维体积含量为0.1%时效果较优,而在掺量较高时,纤维分散均匀性降低,一定程度影响抗压强度。高文涛^[17]采用塑钢纤维和聚丙烯腈纤维复合增强、并掺加引气剂和减水剂的方法优化配合比,配制得到抗冻等级高达F150级的生态混凝土,力学性能良好。Kim等^[18]研究了掺加PVA纤维的生态混凝土的力学性能并进行了工程应用。结果表明,掺加0.1%PVA纤维的生态混凝土表现出较高的抗压强度,而且保水性显著改善,经历冬季冻融作用后强度基本没有下降。可见,掺加一定量的纤维可改善生态混凝土力学性能和抗冻性能,同时掺加亲水纤

维还能显著提高其保水性,提升植物生长的耐旱性,有利于进一步拓展生态混凝土的应用。

然而,纤维增强生态混凝土的研究尚处于起步阶段,纤维类型、掺量等因素的影响尚不明确。基于此,本文采用PP纤维,开展不同纤维参数下生态混凝土的力学性能研究,为纤维增强生态混凝土在河湖等护坡护岸工程的应用提供支撑。

1 试验概况

1.1 试验材料与搅拌工艺

纤维增强生态混凝土由水泥、硅粉、水、石子、纤维等配制而成,配合比见表1所示。水泥为P·O42.5水泥;硅灰的表观密度为2213 kg/m³,比表面积为21.3 m²/g,SiO₂含量为92%;石子采用石灰岩碎石,粒径为15~30 mm,表观密度为2 750 kg/m³。试验采用聚丙烯(PP)纤维,如图1所示,主要性能指标见表2。此外,为了保证纤维均匀分散和浆体包裹厚度,掺加减水剂和丙乳提高胶凝材料浆体流动性和附着性。聚羧酸类减水剂掺量为胶凝材料质量的0.26%,丙乳掺量为胶凝材料质量的0.5%。

本试验纤维增强生态混凝土采用后掺纤维的拌合工艺,具体如下:

(1)润湿石子。先将全部粗骨料倒入卧式搅拌机中,再加入总用水量的50%搅拌50 s,使全部石子润湿为宜;

(2)加入胶凝材料。胶凝材料的加入分两次进行,每次加入量为胶凝材料总质量的50%,搅拌50 s。加入时,需将胶凝材料分散撒于卧式搅拌机的石子表面;

(3)加入剩余水和外加剂。将丙乳和减水剂分别稀释于剩余拌合水中,然后缓慢加入搅拌机中,搅拌50 s,水泥浆液可均匀包裹石子,表面呈现金属光泽;

(4)加入纤维。将纤维均匀散入生态混凝土中,搅拌60 s,待纤维分散均匀后,停止搅拌。

拌合完成的纤维生态混凝土如图2所示,可见

表1 生态混凝土配合比

水胶比	石子/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	硅灰/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	减水剂/(kg·m ⁻³)	丙乳/(kg·m ⁻³)
0.32	1 500	279	31	96	0.8	1.55

表2 纤维主要性能参数

名称	长度/mm	直径/μm	密度/(kg·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
PP纤维	9、12、15	31	900	646	6.5



图1 PP纤维形态



图2 新拌纤维增强生态混凝土形态

纤维分散较均匀,混凝土表面呈金属光泽,胶凝材料均匀包裹石子。

1.2 试件设计

试验参数包括纤维掺量和纤维长度。纤维掺量为体积掺量 V_f , 设计为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%。纤维长度 l_f 为 9 mm、12 mm 和 15 mm。具体试验分组及参数见表3。

表3 试验参数配置

系列	纤维掺量 V_f /%	纤维长度 l_f /mm
PP0	0	/
PP0.1-12	0.1	12
PP0.2-12	0.2	12
PP0.3-12	0.3	12
PP0.4-12	0.4	12
PP0.1-9	0.1	9
PP0.1-15	0.1	15
PP0.2-9	0.2	9
PP0.2-15	0.2	15

本文力学性能试验包括抗压试验、劈裂抗拉试验和抗弯试验。抗压、劈拉试件形式为 100 mm 立方体,抗弯试件为 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体。每个系列的抗压、劈拉和抗弯试件各3个。试件制作时,混凝土先装填一半,由边壁向中心轻轻锤捣20次,且使骨料间不出现悬空为度;然后装填剩余一半,并再次轻轻锤捣20次。装填完试块模具后覆盖保鲜膜,减少水分蒸发,硬化1 d后放入标准养护室养护28 d。

1.3 试验方法

抗压试验、劈拉试验、抗弯试验在万能试验机上进行。参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[19],抗压试验和劈拉试验采用力控方式,加载速度分别为 2 kN/s 和 1 kN/s。抗弯试验采用四点弯曲试验,采用位移加载控制,速率为 0.3 mm/min。抗弯试件跨距为 300 mm,通过外接 3 t 荷载传感器精确测量荷载,并在试件跨中两侧对称布置位移传感器,实时测量受弯荷载和跨中挠度。

对于有效孔隙率,采用吊篮称重法以立方体试块进行测定。通过测量生态混凝土试块浸水质量 W_1 和空气中的饱和重量 W_2 ,根据下式计算:

$$p = \left(1 - \frac{W_1 - W_2}{V\rho_{\text{水}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: p 为孔隙率,%; V 为试件表观体积; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度。

2 试验结果与讨论

2.1 孔隙率

图3所示为纤维增强生态混凝土的平均孔隙率随参数的变化关系。其中,平均孔隙率是指3个立方体试块孔隙率的平均值。如图3所示,不管是否掺加纤维,孔隙率均在 23.6%~27% 之间,与设计目标孔隙率 25% 基本相符,满足规范规定的生态混凝土孔隙率不低于 20% 的要求^[8]。此外,随着纤维含量增加,孔隙率基本呈逐渐减小的趋势,尤其是纤维含量 0.4% 时孔隙率减小约 11%。生态混凝土主要依靠包裹于石子的浆体粘结形成整体,纤维的加入使得石子表面粘附的浆体增多^[12],部分纤维水泥浆体侵占粗骨料之间的空隙区,故导致试件孔隙率减小,且纤维掺量越大影响越明显。如图3(b)所示,不同长度纤维工况下,孔隙率基本为 24%~25.5%,纤维长度对孔隙率影响相对较小。这是由于所用纤维为 9~15 mm 的柔性短切纤维,对粘结粗骨料的水泥浆体形态影响较小。

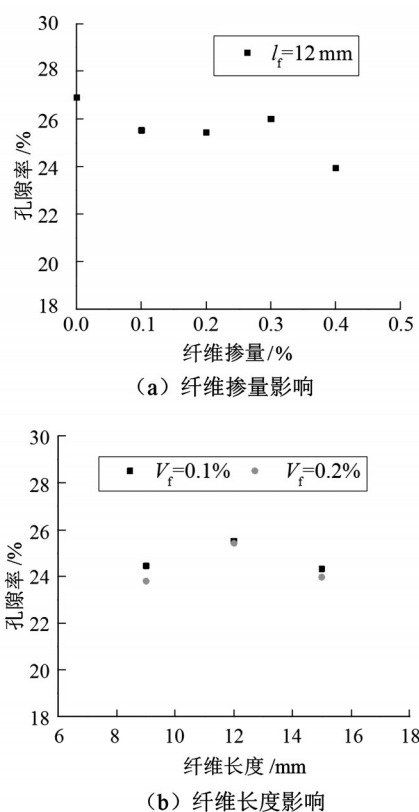


图3 纤维增强生态混凝土平均孔隙率变化

2.2 抗压性能

2.2.1 破坏形态

图4所示为生态混凝土的典型受压破坏形态。由图4可见,素混凝土受压破坏后大部分骨料剥落,基本呈散体状。相比之下,纤维增强生态混凝土试件依靠纤维桥接作用有效抑制骨料剥落,仍然保持良好的整体性,从而一定程度改善生态混凝土的脆性特性。纤维掺量较大时,受压破坏后的整体性相对更好。

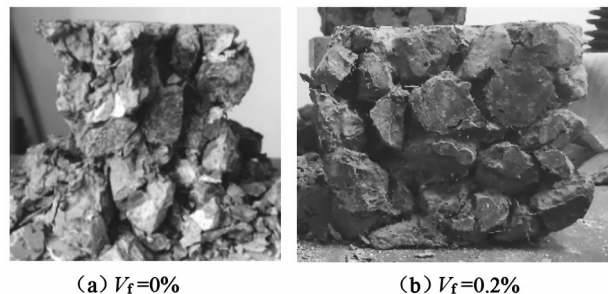


图4 生态混凝土试件受压破坏形态

2.2.2 抗压强度

图5所示为纤维增强生态混凝土抗压强度随不同参数的变化关系。如图5所示,所有生态混凝土

抗压强度都高于5 MPa,满足《生态混凝土应用技术规程》^[20]的要求。但部分纤维增强生态混凝土的抗压强度低于8 MPa,略低于《河湖生态系统保护与修复工程技术导则》^[8]对生态混凝土护坡的强度要求。因此,对于河湖生态护坡工程应用工况,纤维掺量掺量应低于0.3%。

如图5(a)所示,PP纤维掺量在0.3%以内时,生态混凝土抗压强度基本没有下降,但纤维掺量增至0.4%时,抗压强度降幅达23%,低于导则要求的8 MPa。对于多孔生态混凝土,试件的抗压强度主要决定于硬化后骨料间水泥基体的强度和粘结性能。但掺加纤维有一定引气作用,纤维掺量较大时可一定程度降低水泥浆体的密实度^[21],从而减小硬化后骨料间水泥基体的强度和粘结性能,故在掺加一定量纤维后会导致生态混凝土强度下降。对于采用不同长度纤维的混凝土(如图5(b)所示),抗压强度基本保持在8 MPa左右,但纤维长度较小时,强度略低一些。

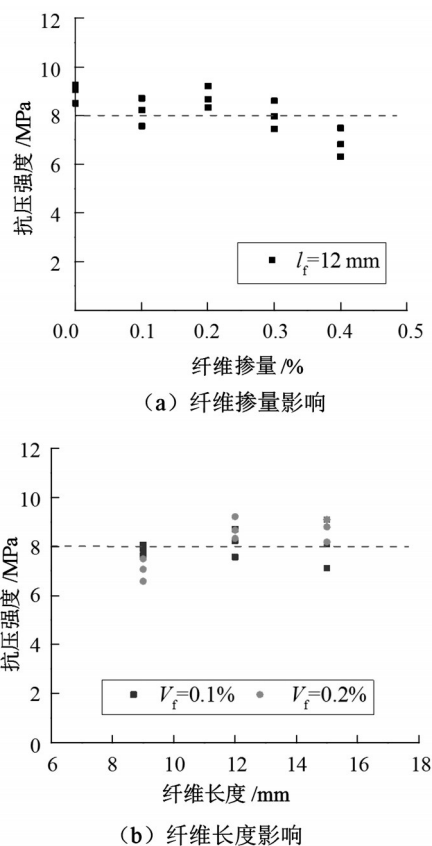


图5 纤维增强生态混凝土抗压强度变化

2.3 劈拉性能

2.3.1 破坏形态

图6所示为生态混凝土的典型劈拉破坏形态。

如图所示,劈拉破坏大多表现为沿试件中部的劈裂破坏,破坏面部分为骨料劈裂断裂,部分为粘结浆体脱粘。生态混凝土是由胶凝材料浆体粘结而成,当骨料劈裂破坏受到纤维桥接抑制或界面粘结强度较低时,常会发生界面脱粘。从素混凝土和纤维混凝土断面破坏形态来看,可以发现掺加纤维后劈裂断面更为凹凸不平,表明骨料-浆体界面脱粘比例相对较大。这主要是由于纤维桥接作用可抑制劈裂微裂缝的扩展,同时纤维的引气效应可能降低胶凝材料浆体密实度,骨料-浆体界面粘结强度略有降低,故部分骨料劈裂破坏转变为粘结破坏。



图6 生态混凝土试件劈拉破坏形态

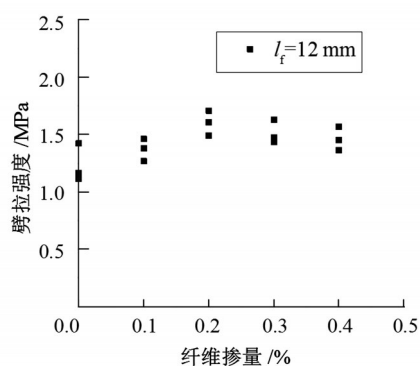
2.3.2 劈拉强度

图7所示为不同参数下纤维增强生态混凝土劈拉强度变化关系。如图所示,随着PP纤维掺量的增加,劈拉强度呈先增大后减小的趋势,纤维掺量0.2%时,平均劈拉强度达1.6 MPa,较素混凝土提高30%。纤维掺量较小时,易于在水泥浆体中分散,纤维桥接作用能较好地抑制劈裂微裂缝的扩展,从而改善劈拉强度。但是纤维掺量较高时,纤维均匀分散难以保证,进而影响水泥浆体的均质性,骨料-浆体界面强度弱化,纤维桥接的有利作用不足以抵消界面弱化,故导致劈拉强度逐渐减小。其次,PP纤维长度对劈拉强度影响不明显,9~15 mm长度纤维对应的平均劈拉强度约为1.47~1.69 MPa。这可能是由于掺加的纤维都是柔性短切纤维,纤维较长时,伸入骨料间空隙的部分也较长,对骨料间界面粘结影响较小,故对劈拉强度影响不大。

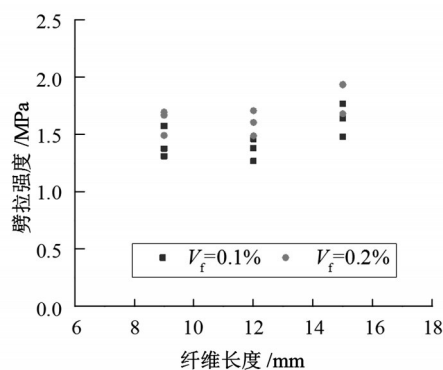
2.4 抗弯性能

2.4.1 破坏形态

所有系列生态混凝土都呈现跨中主弯裂缝的弯曲破坏形态。素混凝土开裂即发生脆性断裂,而掺加纤维能一定程度抑制裂缝扩展,避免直接断裂。图8所示为试件弯曲破坏后的典型断面形态。与劈拉破坏形态相近,弯曲破坏断面也呈现部分脱



(a) 纤维掺量影响



(b) 纤维长度影响

图7 纤维增强生态混凝土劈拉强度变化

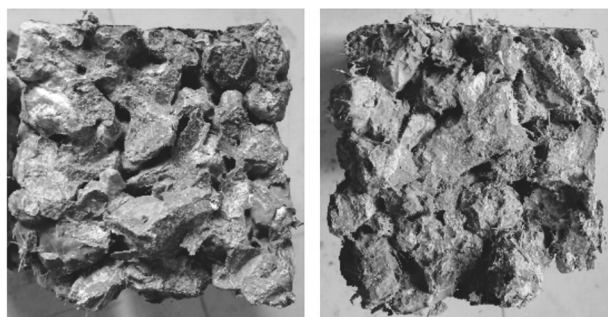
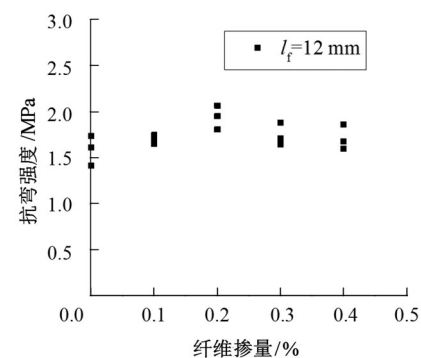


图8 受弯生态混凝土试件断面破坏形态

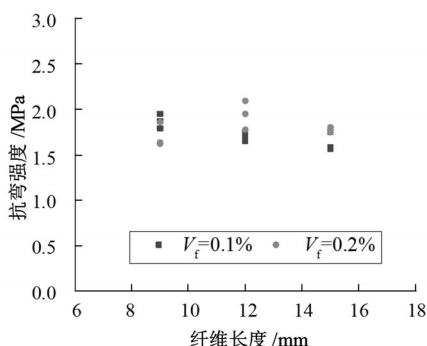
粘部分骨料断裂的形态。

2.4.2 抗弯强度

图9所示为纤维增强生态混凝土抗弯强度变化关系。如图9所示,随着纤维掺量的增加,抗弯强度呈先增大后略微减小的趋势,纤维掺量0.2%时,平均抗弯强度较高,达1.94 MPa。这是由于纤维掺量较小时,可提高胶凝材料基体的抗拉性能,进而改善弯曲强度。但在纤维掺量较高时,纤维均匀分散较为困难,产生轻微结团现象,影响胶凝材料浆体粘结和抗拉性能,导致抗弯强度也相应降低。随着纤维长度从9 mm增至15 mm,同等纤维掺量下抗弯



(a) 纤维掺量影响



(b) 纤维长度影响

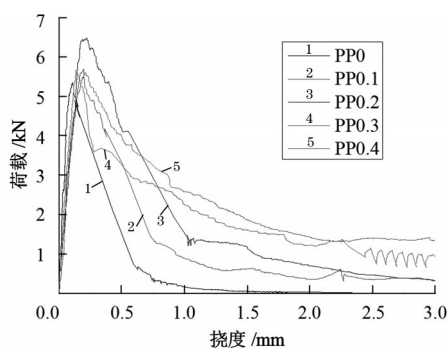
图9 纤维增强生态混凝土抗弯强度变化

强度先基本保持不变,而后轻微下降。纤维长度较大时,纤维根数相对减少,在低纤维掺量下,纤维的桥接约束效应下降,导致抗弯强度略有降低。

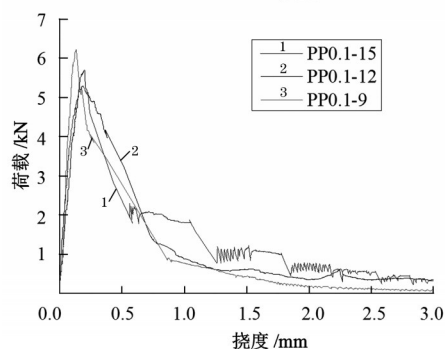
2.4.3 荷载-挠度曲线

图10所示为不同工况下纤维增强生态混凝土的荷载-挠度曲线。如图10所示,所有试件均表现为弯曲软化现象,开裂荷载即为最大荷载,开裂后随即发生荷载下降。荷载-挠度曲线都表现为3个阶段,即开裂前上升段、开裂后下降段和残余段。相比于素混凝土试件,不同掺量纤维混凝土试件的曲线形态均有所改善,下降段趋缓,残余荷载相对较高,脆性有所改善。

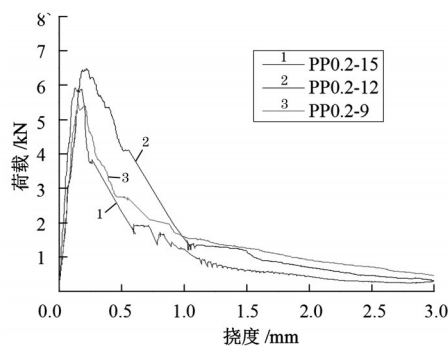
如图10(a)所示,随着PP纤维掺量增大,上升段弯曲刚度变化较小,而峰值后荷载下降速率逐渐减小,残余荷载水平(以挠度2 mm处荷载)约从0 kN增至1.8 kN。这些均得益于桥接纤维对裂缝的抑制效应,有效延缓裂缝扩展,提高弯曲韧性。其次,如图10(b)和(c)所示,在相同纤维掺量下,不同长度纤维试件的曲线形态基本相同,下降段斜率基本相近,而残余荷载的差异约在0.6 kN范围之内,且有一定离散性,但总体相差较小。可见,纤维长度对抗弯性能曲线影响较小。



(a) 不同纤维掺量



(b) 不同纤维长度 (掺量 0.1%)



(c) 不同纤维长度 (掺量 0.2%)

图10 不同工况下纤维增强生态混凝土的荷载-挠度曲线

2.4.4 弯曲韧性

弯曲韧性是反映材料韧性的重要指标。根据ASTM C 1609混凝土弯曲韧性评价方法,以荷载-挠度曲线下包面积作为评价指标,可通过下式计算:

$$T_{\delta} = \int_0^{\delta} Pd\Delta \quad (2)$$

式中: δ 为韧性评价点对应的弯曲挠度,常以挠度为 $L/600$ (0.5 mm)和 $L/150$ (2 mm)的点对应的下包面积进行评价,分别记为 $T_{0.5}$ 和 $T_{2.0}$ 。

图11所示为不同类型纤维增强生态混凝土的弯曲韧性。如图11所示,不论掺加纤维与否,韧性指标 $T_{0.5}$ 均在1.63~2.25之间,相差较小。但是对于指标 $T_{2.0}$,掺加纤维的试件要远高于素混凝土试件,约为后者的1.58~2.86倍。这主要是由于挠度为0.5 mm时,韧性指数的贡献主要来自于荷载-挠度

曲线上升段,掺加纤维对弯曲刚度和峰值荷载影响较小,故曲线下包面积相对接近。相比之下,挠度 2.0 mm 已经进入曲线残余段,掺加纤维极大改善曲线下下降段斜率和残余荷载水平,故表现出较高的韧性水平。其次,随着纤维含量的增大,韧性指标 $T_{2.0}$ 基本呈逐渐增大的趋势,这与其逐渐增加的残余荷载相一致。

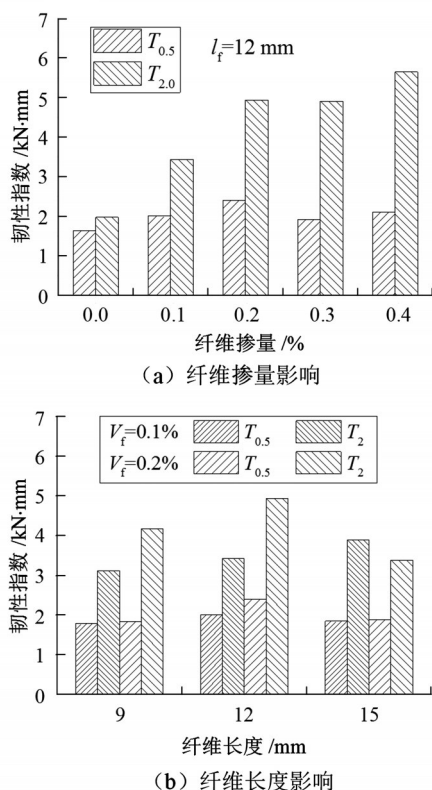


图 11 纤维增强生态混凝土弯曲韧性对比

3 结 语

(1)掺加短切纤维一定程度降低生态混凝土的孔隙率,PP纤维体积掺量为0.4%时,试件孔隙率降低约11%,纤维长度15 mm以内对孔隙率影响较小。

(2)掺加短切纤维可抑制胶凝材料浆体裂缝扩展,改善生态混凝土脆性,受压破坏时的整体性显著改善。劈拉和受弯作用下,掺加纤维试件的破坏面粗糙度增大,部分骨料劈裂破坏转变为骨料间界面破坏。

(3)PP纤维掺量在0.3%以内时,抗压强度基本没有下降,而后随着纤维掺量增大逐渐下降。PP纤维长度较短(9 mm)时,抗压强度相对较低。劈拉和抗弯强度随着纤维掺量增加先增大后减小,在0.2%掺量时性能较优,而纤维长度的影响较小。

(4)随着PP纤维掺量增大,纤维增强生态混凝土的荷载-挠度曲线下降延缓,残余荷载水平逐渐提高。对于弯曲韧性,挠度0.5 mm对应的韧性指标都基本相近,挠度2 mm对应的韧性指标随纤维含量增加而增大。

参考文献:

- [1] 陈丙法,黄蔚,陈开宁,等.河道生态护岸的研究进展[J].环境工程,2018,36(3):74-77,168.
- [2] 王艳颖,王超,侯俊,等.木栅栏砾石笼生态护岸技术及其应用[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(3):251-254.
- [3] 高建明,许国东,吕锡武.多孔混凝土综合生态效应的试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2008,38(5):794-798.
- [4] AHN T W, CHOI I S, OH J M. A study on water quality purification function by using planting concrete and porous concrete[J]. Environmental Impact Assessment, 2008, 17(5):271-278.
- [5] 李荣伟,汪守淳,舒国志,等.植被型生态混凝土孔隙内碱环境改造方法研究[J].新型建筑材料,2014,41(9):11-14.
- [6] 齐强.植被混凝土降碱植生技术优化研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(3):429-432.
- [7] 王志鹏,张伟锋,韦未,等.硅烷浸渍对大孔隙生态混凝土的降碱效果研究[J].混凝土,2019(3):157-160.
- [8] SL/T 800—2020.河湖生态系统保护与修复工程技术导则[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [9] 潘志峰,高建明,许国东,等.植生型多孔混凝土抗冻性试验研究[J].混凝土与水泥制品,2017(1):11-13.
- [10] 李秋义,汲博生,岳公冰.大孔生态混凝土强度与抗硫酸盐侵蚀性能[J].沈阳工业大学学报,2014,36(5):578-584.
- [11] 潘文佳,高建明,宋文峰,等.多孔混凝土在干湿交替作用下加速硫酸盐侵蚀的耐久性评价[J].混凝土与水泥制品,2007(6):5-8.
- [12] 李悦媛,许巍,张俊,等.纤维网格布表层强化混凝土早期开裂特性[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):114-122.
- [13] 胡成,翁兴中,朱懋江,等.纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):84-92.
- [14] 宋文杰.边坡生态防护的植生混凝土研究[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [15] KIM H H, KIM C S, JEON J H, et al. Void ratio, compressive strength and freezing and thawing resistance of natural jute fiber reinforced non-sintering inorganic binder porous

(下转第21页)

3 工程效果

通过以上的质量控制措施,鱼巢生态框组合挡墙的施工质量较佳,主要体现在以下几方面:①墙身砌体稳定,经对钢筋混凝土挡板进行沉降位移观测,墙体稳定无位移和沉降;②无水土流失,墙后土体回填密实,钢筋混凝土挡板起到挡土作用;③外形美观,相比桩板护岸、管桩护岸等,结构形式更丰富,为水岸生物提供栖息、生长的条件,实现仿拟自然、接近自然的功能^[3];④预制构件结构耐久性好,不会随着时间的推移而发生腐蚀或被磨耗,比密排木桩护岸时间更耐久^[4]。

4 结 语

在亭石河治理工程中将阶梯式生态框挡墙进行优化形成鱼巢组合挡墙,该新型技术确保了墙体

稳定,避免了以往预制块挡墙的缺点,外观性、亲水性、挡土性较好,后期维护成本低,临水侧的孔洞为鱼类的生存设置了良好环境。该技术宜在农村河道护岸建设中加以推广,以打造更加生态优美的水环境。

参考文献:

- [1] 施红兵,张宇亮,王涛. 阶梯式生态框挡墙在南通中创区水系整治中的应用[J]. 江苏水利,2020(1):27-30.
 - [2] 淮安市水利勘测设计研究院有限公司. 南通市通州区亭石河治理工程施工变更图[R]. 淮安:淮安市水利勘测设计研究院有限公司,2022.
 - [3] 高国明,董建伟. 复合(鱼巢)生态混凝土墙式护岸技术的研究与应用[J]. 吉林水利,2009(1):1-4.
 - [4] 姜圣军,汤小建,翁泽炎,等. 密排管桩在河道整治工程中的应用[J]. 江苏水利,2019(7):54-57.
-
- (上接第17页)
- concrete[J]. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers,2015,57(2):67-73.
 - [16] KIM H H, KIM C S, JEON J H, et al. Effects on the physical and mechanical properties of porous concrete for plant growth of blast furnace slag, natural jute fiber, and styrene butadiene latex using a dry mixing manufacturing process[J]. Materials,2016,9:84-94.
 - [17] 高文涛. 新型抗冻植被混凝土关键技术及性能研究[D]. 泰安:山东农业大学,2016.
 - [18] KIM H H, KIM C S, JEON J H, et al. Performance evaluation and field application of red clay green roof vegetation blocks for ecological restoration projects [J]. Sustainability, 2017, 9(3): 357-372.
 - [19] GB/T 50081—2019. 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
 - [20] CECS361—2013. 生态混凝土应用技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
 - [21] 张菊,刘曙光,闫长旺,等. 氯盐环境对PVA纤维增强水泥基复合材料抗冻性的影响[J]. 硅酸盐学报,2013,41(6):766-771.