

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.01.011

可自修复的高延性混凝土(ECC) 在机场道面的适用性分析

张志刚^{1,2}, 张仁毅², 张沛², 赵林²

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096;

2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:在飞机荷载与环境荷载长期共同作用下,机场道面易出现裂缝、接缝和竖向位移类病害,使运营阶段维修成本高。提出将具有自修复功能的高延性水泥基材料(ECC)用于机场道面,以控制裂缝发展、实现无缝连接;并利用 ECC 因二次反应而使微裂缝愈合的特性,减少路面维护工作,延长使用寿命。通过试验手段研究了 ECC 材料应用于机场道面的力学行为、自修复行为和早期开裂潜能。试验结果表明:机场道面用 ECC 材料在拉伸荷载作用下,其拉伸应变可达 3.67%(约为普通混凝土的 400 倍);在弯曲荷载作用下,其竖向弯曲变形可达 6.33 mm;抗压强度与弯曲强度分别为 43.9 MPa 和 12.68 MPa,可满足机场道面的使用要求。在受约束条件下,ECC 表现出较低的早期开裂潜能。由于自修复能力,裂损 ECC 的拉伸刚度、拉伸应变与拉伸强度几乎可恢复至未裂时的程度;其水渗透系数随自修复进程逐渐降低,最终达到未裂时的渗透水平。研究结果表明 ECC 材料用于无缝机场道面具有较高适用性。

关键词:道路工程;无缝机场道面;ECC;高延性;自修复行为

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)01-097-09

Feasibility study of engineered cementitious composites (ECC) with self-healing capacity for airfield pavement

ZHANG Zhigang^{1,2}, ZHANG Renyi², ZHANG Pei², ZHAO Lin²

(1. Key Laboratory of Concrete and Pre-stressed Concrete Structure, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Under the effects of mechanical and environmental loading, airfield pavement is prone to distresses of cracking, joints damage and vertical displacement of panels, which results in frequent maintenance. In order to control propagation of cracks and achieve jointless function, this study attempts to use engineered cementitious composites (ECC) as an airfield pavement material for its high ductility and intrinsic self-healing capacity. Damage in ECC can be healed by secondary hydration, thus reducing the maintenance cost and prolonging service life. In this paper, the mechanical properties of ECC and its self-

收稿日期:2020-05-12

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51708061);东南大学教育部重点实验室开放课题(CPCSME2017-09)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51708061) and Opening Funding from Key Laboratory of Ministry of Education(CPCSME2017-09).

作者简介:张志刚(1982—),男,博士,博导,主要从事混凝土结构方向研究,(E-mail)zhangzg@cqu.edu.cn

healing behavior as well as the cracking potential at early age of ECC were investigated. The result shows that the tensile strain of ECC can reach 3.67% under the action of tensile load, (about 400 times higher than that of ordinary concrete) and the vertical deflection can reach 6.33 mm under flexural load. The flexural and compressive strength is 12.68 MPa and 43.9 MPa, respectively, which meets requirements of airfield pavement. Under restrained shrinkage, ECC is expected to have a low tendency towards fracture failure. With self-healing, the tensile stiffness, tensile strain and tensile strength of damaged ECC can almost be restored to the extent that it was not cracked. The water permeability coefficient of pre-damaged ECC decreases gradually to that of a virgin one. It can be concluded that ECC material has strong feasibility for jointless airfield pavement.

Keywords: highway engineering; jointless airfield pavement; ECC; high ductility; self-healing behavior

机场道面铺装是机场基础设施建设的重要组成部分,大多以混凝土道面为主。虽然混凝土具有强度高、耐久性好等优点,但在飞机反复起降和自然环境的侵蚀作用下,机场道面混凝土易出现开裂、接缝料损失、错台、断裂等威胁机场运营安全的不利因素。因此,机场道面混凝土的抗裂、快速修复技术、减少接缝甚至实现无缝一直是机场道面工程研究的热点问题。

国内外主要从施工期预防和破损后修复 2 方面来解决上述问题。施工期的预防措施主要包括在混凝土中加入外加剂、纤维等,以减少混凝土的收缩和提高其抗裂能力^[1-2];加强对混凝土的振捣和养护以保证其质量^[3];配置一定数量的钢筋或预应力筋来控制或预防裂缝产生、延长接缝间距甚至实现无缝^[4]。修复措施主要有采用快速修补材料填补坑槽或换板、压注水泥浆或环氧树脂等化学浆液填充封闭裂缝、及时更换填缝料等^[5]。上述措施虽然提升了混凝土的材料性能,但由于自身的脆性属性和极低的变形能力,在机械荷载及环境荷载作用下,混凝土裂缝依然无法根治。因此,笔者提出利用具有自修复能力的高延性水泥基材料(ECC, engineered cementitious composites)来解决上述问题。

ECC 是一种高性能纤维增强水泥基材料,是由美国密歇根大学 Victor C. Li 教授于上世纪 90 年代基于微观力学设计理论提出^[6]。与普通(纤维)混凝土不同的是 ECC 在受拉力作用时展现出了类金属的应变硬化现象,其极限拉应变达 3%~5%,约为普通(纤维)混凝土的 300~500 倍;在拉伸过程中,试件表面呈现多缝开裂现象,且裂缝宽度均在 100 μm 以下^[7-8]。以往研究表明^[9]:当混凝土中的裂缝在 200 μm 以下时,水的渗透能力和氯离子扩散速度与未开裂时相差不大。ECC 的这种高延性与裂缝宽度控制能力可以使其通过多条微裂缝开裂来抵消早期的干燥收缩变形,使得 ECC 机场道面板避免因收缩引起的断裂破坏。即使 ECC 机场道面产生了微裂缝,在雨水作用下,ECC 中未水化的水泥和粉煤灰会继续发生水化反应,其产物可有效填充裂缝,从而提高道面的耐久性,并使其拉伸和弯曲力学特性也得到较程度的恢复。

ECC 的这些特性可使机场道面实现无缝连接,避免预接缝类开裂损坏,大大提高其使用寿命,有效减少机场道面的维护费用。以 ECC 材料在机场道面中的应用为背景,研究无缝机场道面使用 ECC 材料的力学行为,以及自修复现象对该材料力学行为与渗透特性的影响,以期工程应用提供参考。

1 实验

1.1 原材料

ECC 的原材料包括硅酸盐水泥、粉煤灰、石英砂、橡胶粉、减水剂和 PVA 纤维。实验采用 CEM-42.5R 型硅酸盐水泥。粉煤灰类型是 Class F 一级,密度为 2.43 g/cm^3 ,活性系数为 92%。石英砂的平均颗粒尺寸约为 180 μm 左右。减水剂为聚羧酸系高效减水剂,实验采用的纤维为日本 Kuraray Co.生产的 PVA 纤维。机场道面用 ECC 的配合比如表 1 所示。

表 1 机场道面用 ECC 配合比(按重量比)

Table 1 Mixture Proportion of ECC Mixture (by weight).

水泥	粉煤灰	石英砂	水	减水剂	PVA 纤维
1	2	0.8	0.75	0.014	2% (体积掺量)

1.2 ECC 材料制备

将粉煤灰、水泥、石英砂等固态粉体称好后,倒入搅拌机中搅拌 1 min,使原料充分搅拌均匀,然后加水和减水剂,最后加入 PVA 纤维,搅拌 5 min,搅拌时间的终止以纤维浆体不成团、结块为判断依据,保证纤维的充分分散。而且搅拌的时间要适中,时间太短则纤维不分散,时间太长则纤维的分散性不好。将搅拌均匀的浆体装入试模成型,成型 24 h 后拆模,并置于空气中养护至 28 d,养护温度为 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $40 \pm 5\%$ 。

1.3 试验步骤

1.3.1 ECC 的力学性能测试

抗压试验的操作步骤参照美国材料与试验协会标准规范 ASTM C109^[10],其试件尺寸为 $50.8 \times 50.8 \times 50.8$ mm。单轴拉伸试验试件参照日本土木工程协会(JSCE)推荐的“狗骨”状^[11],具体尺寸与加载装置如图 1 所示,为了保证位移数据的准确性,在拉伸过程中的位移采用 2 个外接位移计(LVDT)测量,最后结果取 2 个测量值的平均值。四点弯曲试验的试验尺寸为 $305 \times 76 \times 38$ mm,四点弯曲试验的整体跨径 300 mm,中间压头 2 点间距 100 mm。单轴拉伸与四点弯曲试验均采用位移控制加载,材料处于准静态加载状态,位移加载速率为 0.5 mm/min。

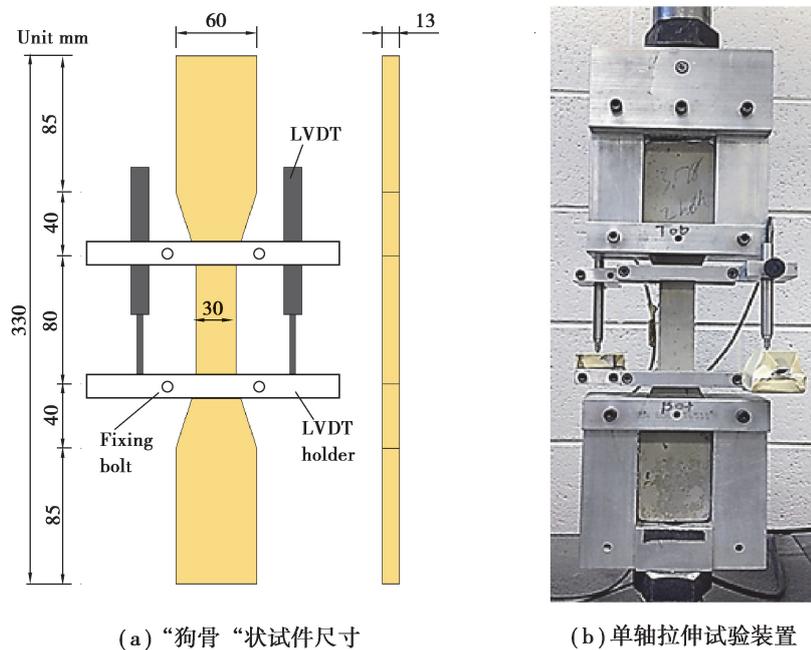


图 1 (a) “狗骨”状试件尺寸;(b) 单轴拉伸试验装置
Fig. 1 (a) Dimensions of the dog-bone specimen; (b) The test set-up of uniaxial tensile test.

1.3.2 自修复行为表征

为了表征 ECC 材料的自修复效果,利用单轴拉伸试验、共振频率测试与水渗透试验研究裂损 ECC 材料的拉伸力学行为、共振频率与水渗透系数的恢复程度。

在研究自修复行为对 ECC 材料的力学行为恢复影响时,首先利用单轴拉伸试验将试件分别预拉伸至 1% 和 2% 的应变,从而使得 ECC 试件表面出现微裂缝。之后将与裂损后的 ECC 试件进行干湿循环养护,试

件浸泡在水中养护 1 d 然后再放置空气中养护 1 d, 这个过程为 1 个干湿循环。这种干湿循环养护条件是为了模拟机场道面的实际工作环境, 即经历下雨与晴天天气交替。在裂损试件自修复之后, 再将试件进行拉伸, 以研究自修复后 ECC 材料的拉伸行为。

在每次干湿循环后, 对 ECC 试件进行共振频率测试, 共振频率测试方法本来是用来确定在冻融循环之后混凝土的损伤状况, 利用此方法表征裂损 ECC 的自修复程度。裂缝的产生将会打断材料的连续性, 从而降低 ECC 材料的共振频率(RF), 随着自修复产物填充在裂缝内部, 其共振频率将会有所恢复, 其恢复程度可由公式(1)计算得出。

$$RF_{\text{恢复程度}} = \frac{RF_{\text{预裂, 水中养护}}}{RF_{\text{未预裂, 水中养护}}}, \quad (1)$$

其中: $RF_{\text{预裂, 水中养护}}$ 为裂损 ECC 试件在每一个自修复养护干湿循环后的共振频率; $RF_{\text{未预裂, 水中养护}}$ 为未裂损 ECC 试件在相同干湿循环养护条件下的共振频率。

在研究 ECC 的自修复行为对其水渗透行为的影响时, 采用变水头水渗透测试试验方法。裂损 ECC 试件的水渗透系数通过达西定律公式计算得出。在以为研究中表面与持载受力状态下相比, 卸载后混凝土试件的裂缝宽度会有 50% 的回缩; 而裂缝宽度直接影响裂损混凝土试件的水渗透系数^[12]。为了模拟机场道面内裂缝的实际张开状态, 利用一种持载装置研究了持载状态下裂损 ECC 在自修复过程中的水渗透系数。图 2 为本试验的装置示意图。如图 3 和图 4 为机场道面用 ECC 材料的拉伸与弯曲行为。在进行水渗透试验之前, 通过拉伸试验将 ECC 试件预拉伸至 1% 的应变, 以在 ECC 表面产生裂缝。通过显微镜观测, 此时 ECC 试件表面产生了 12 条微裂缝, 平均裂缝宽度为 54 μm 。

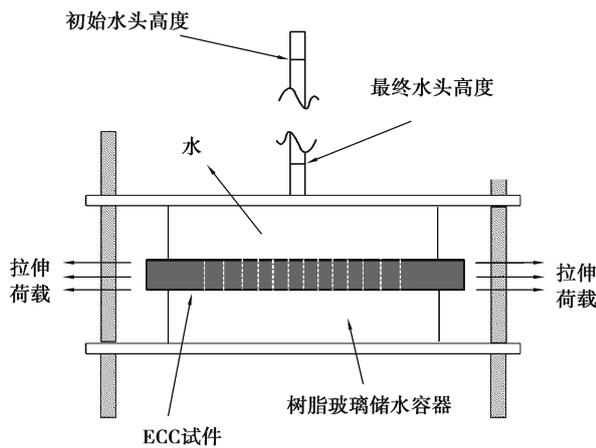


图 2 水渗透试验装置

Fig. 2 Experimental set-up of water permeability test

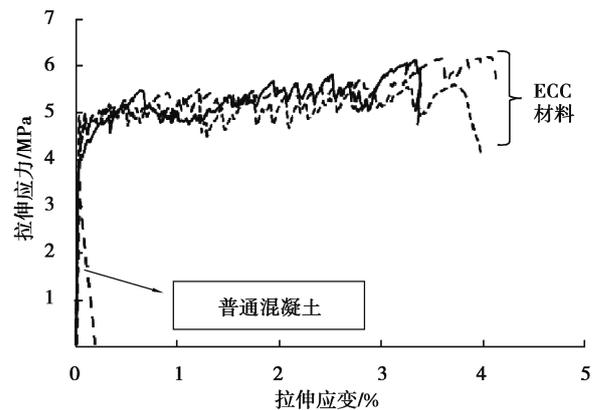


图 3 ECC 材料的拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of ECC

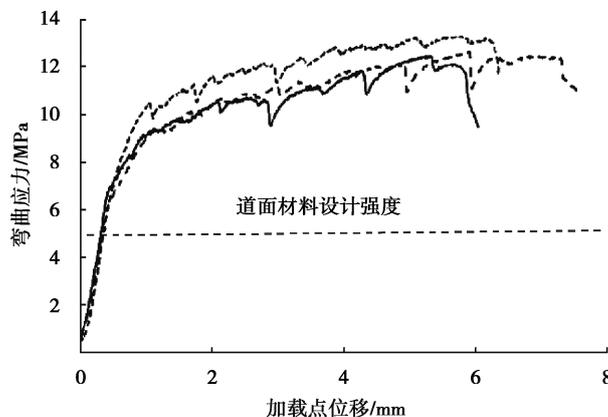


图 4 ECC 材料的弯曲应力-挠度曲线

Fig. 4 Flexural stress-deflection relationship of ECC

2 结果与讨论

2.1 机场道面用 ECC 的力学行为

在机场道面设计时,所使用道面材料的力学性能是一项十分重要的设计指标。根据中国民用机场水泥混凝土道面设计规范^[13],要求混凝土材料的抗压强度与抗折强度分别不得低于 40 MPa 和 5 MPa。在拉伸与弯曲荷载作用下,ECC 表现出了很高的延性,这与普通混凝土的脆性破坏不同。图 3 与图 4 中的曲线均表现出了 3 个受力阶段,即在初始受力阶段,ECC 材料在第一条裂缝出现之前展现出了线弹性特性;随后 ECC 材料展现出了类-金属的应变/弯曲硬化阶段;最后,随着 ECC 试件出现局部集中断裂裂缝,曲线进入应变/弯曲松弛阶段,如图 5 所示。在拉伸/弯曲应力—拉伸应变/弯曲挠度曲线中,曲线上荷载的最大值为 ECC 材料的拉伸/抗折强度,与最大应力点对应的拉伸应变/弯曲挠度定义为 ECC 的最大拉伸应变/挠度变形能力。



图 5 拉伸荷载下 ECC 的开裂形态

Fig. 5 Crack pattern of ECC under tension

表 2 所示为机场道面用 ECC 材料的力学性能参数。如表所示,由于裂缝开裂后的纤维桥接作用,ECC 的拉伸强度为 6.00 MPa,大约是普通 C45 混凝土的 2 倍。ECC 的最大拉伸应变为 3.67%,大约是普通混凝土是 400 倍。ECC 在拉伸应力作用下展现出的高延性 or 大变形能力可使 ECC 机场道面板避免由于干燥收缩或周围温度变化而引起的断裂破坏,可实现机场道面板的无缝连接。如图 5 所示,在拉伸荷载作用下,ECC 试件表面呈现多缝开裂现象,而且平均裂缝宽度可控制在 80 μm 以下。

表 2 机场道面用 ECC 的力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of ECC

拉伸强度	拉伸应变	抗折强度	最大弯曲挠度	抗压强度
6.00±0.29 MPa	3.67±0.28%	12.68±0.34 MPa	6.33±0.63 mm	43.9±1.6 MPa

此外,ECC 的抗折强度与抗压强度分别在 12.68 MPa 和 43.9 MPa,均满足机场混凝土道面材料的设计要求。由于 ECC 较高的抗折强度,在达到相同的疲劳寿命周期内,ECC 机场道面板的厚度可以降为普通混凝土机场道面板的 1/3 左右^[14]。在弯曲荷载作用下,ECC 的最大弯曲挠度可达到 6.33 mm,远远大于普通混凝土的弯曲变形能力。ECC 的这种较大的弯曲变形能力可使得 ECC 机场道面板避免由于温度梯度引起的机场道面板拱起断裂破坏。

综上,根据民用机场水泥混凝土道面设计规范^[13],ECC 的力学行为可使其作为机场道面材料。而且 ECC 的高延性特性可使得机场道面板实现无缝连接,进而避免接缝类破坏病害。

2.2 在受约束条件下 ECC 的开裂潜能

在实际工程应用中,机场道面属于二维混凝土平板结构,受到路基的约束作用,不能随着干燥收缩而自由变化长度;普通混凝土材料为脆性材料,其拉伸应变能力很小且早期强度低,由于干燥收缩的发生会导致混凝土结构在受约束状态下产生拉应力从而产生开裂破坏。Li 和 Stang^[15]于 2004 年基于 2-D 混凝土平板结构在受约束条件下的早期开裂问题提出了开裂潜能(P , cracking potential)的概念,如公式(2)所示。他们

指出混凝土平板在早期是否会出现开裂破坏取决于混凝土材料的自由干燥收缩值(e_{sh})与材料本身抵抗收缩开裂的能力($e_e + e_i + e_{cp}$)。如果 P 值为正,则意味着混凝土平板会出现早期开裂破坏;如果 P 值为负,早期开裂破坏则不会发生。

$$p = \epsilon_{sh} - (\epsilon_e + \epsilon_i + \epsilon_{cp}), \quad (2)$$

其中: ϵ_{sh} 为材料的自由收缩应变; ϵ_e 为材料的弹性拉伸应变能力; ϵ_i 为材料的非弹性拉伸应变能力; ϵ_{cp} 为材料的拉伸蠕变能力; ϵ_{sh} 指由外界周围环境引起的最大干燥收缩应变,而($e_e + e_i + e_{cp}$)指材料总的应变能力。

表 3 列出了普通混凝土材料与 ECC 的材料应变参数及材料的早期开裂潜能(P)。与普通混凝土材料不同,由于 ECC 具有较高的拉伸应变能力, P 值远远小于 0,即 ECC 具有较高的抗干燥收缩开裂能力。ECC 的多微裂缝开裂行为可使 ECC 机场道面板避免因收缩变形而导致其断裂破坏。

综上所述,ECC 作为机场道面材料可使其很好的适应其干燥收缩引起的变形,避免因干燥收缩引起的断裂性的破坏开裂。这一特性可消除由于普通混凝土材料的脆性特性而导致的对机场道面板尺寸的限制,从而实现机场道面的无缝连接。

表 3 普通混凝土与 LMES-ECC 的早期开裂潜能

Table 3 The cracking potential of normal concrete and LMES-ECC at early age.

类别	ϵ_{sh} (%)	ϵ_e (%)	ϵ_i (%)	ϵ_{cp} (%)	P
普通混凝土	0.04~0.1	0.01	0	0.02~0.06	(-0.03) to 0.07
ECC	0.1~0.15	0.015	3.67	0.07	-3.67

2.3 ECC 的自修复行为

2.3.1 自修复行为对 ECC 拉伸力学行为的影响

图 6 所示为未经过自修复过程,经预裂至 2% 拉伸应变试件在二次拉伸时的拉伸行为。从图中可以看出经过二次拉伸试验之后,与预裂时的曲线相比,未自修复的试件二次拉伸试验过程中,其初始刚度有着较大幅度的降低。初始刚度定义为在拉伸曲线中初始弹性阶段的斜率。此外,与表 2 所示的 ECC 材料是拉伸应变相比,未经过自修复的 ECC 试件的最大拉伸应变为 2.95%,降低了 20%;但是其拉伸强度为 5.9 MPa,并没有出现降低的趋势,这是由于当 ECC 预裂至 2% 时,ECC 的纤维桥接应力水平还没有达到最大能力,因此在二次拉伸试验时,纤维桥接应力继续发挥作用,承受外部荷载,直至试件出现局部集中断裂破坏。

图 7 所示为经过自修复后,不同裂损程度 ECC 的二次拉伸力学行为。与图 8 所示的未经过自修复 ECC 试件的二次拉伸曲线相比,由于自修复现象的发生,裂损 ECC 的初始刚度与最大拉伸应变有着较大程度的恢复,其最大拉伸应变可达到 3.49%,这与 ECC 材料自身的最大拉伸应变值(3.67%)几乎相同。

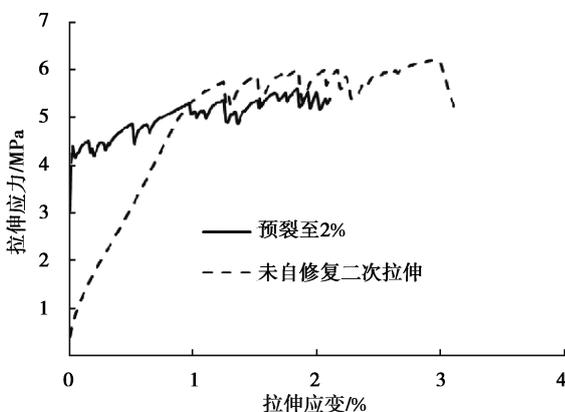


图 6 未自修复预裂试件的二次拉伸行为

Fig. 6 Relationship between tensile strain and stress of pre-load and re-load specimen

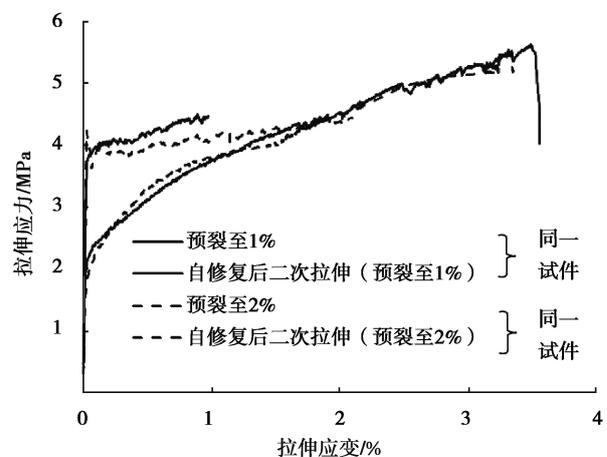


图 7 自修复后 ECC 的二次拉伸行为

Fig. 7 Tensile strain-stress curves of pre-load specimens after self-healing

表 4 所示为自修复之后,裂缝 ECC 试件的拉伸性能的恢复程度值。如表 4 所示,自修复行为使得裂损 ECC 试件的拉伸性能有着较大程度的恢复。对于 2 种不同裂损程度的 ECC 试件,预裂 1% ECC 试件的拉伸力学行为的恢复程度高于预裂至 2% ECC 试件。ECC 的最大拉伸应变分别恢复至原来的 93% 与 89%。经过二次拉伸后,原本裂损至 1% 和 2% 的 ECC 试件的最大拉伸强度分别恢复至 5.61 MPa 和 5.50 MPa,与 ECC 材料自身的拉伸强度相同;而 2 种不同裂损程度的 ECC 试件的初始刚度分别恢复至 95% 和 92%。

综上所述,ECC 的自修复行为可使其拉伸力学行为有较大程度的恢复,从而可以保持 ECC 机场道面板开裂后的整体性与荷载传递的连续性。

表 4 自修复后预裂损 ECC 的拉伸行为

Table 4 The tensile behavior of pre-damaged ECC after self-healing

预裂损程度	预拉至 1% 的拉伸应变			预拉至 2% 的拉伸应变		
拉伸行为	刚度	拉伸应变	拉伸强度	刚度	拉伸应变	拉伸强度
二次拉伸之后	14.4 GPa	3.49%	5.61 MPa	15.7GPa	3.31%	5.50 MPa
恢复程度	92%	95%	94%	87%	90%	92%

2.3.2 自修复行为对 ECC 共振频率的影响

图 8 所示为不同预裂程度的 ECC 试件在自修复过程中其共振频率的恢复程度。在预裂之后,由于产生了多条微裂缝,预裂至 1% 和 2% 拉伸应变水平 ECC 试件的共振频率降至未开裂时的 50% 左右。经过一个干湿循环养护之后,由于 ECC 材料的自修复行为,使得共振频率分别恢复到 74% 和 66.5%。这一现象表明 ECC 机场道面即使由于干燥收缩或温度变化产生了开裂现象,也可在较快的时间得到自修复。

经过 3 次干湿循环养护后其随后的共振频率恢复程度增长较为缓慢,经过 15 个干湿循环后,ECC 裂缝内已被白色结晶物(即自修复产物)填满,如图 9 所示,其标准化共振频率分别达到 90% 和 81.5%,即所有预裂拉伸程度的 ECC 试件的自修复恢复程度均达到 80% 以上。由此可看出 ECC 的自修复行为有望减少机场道面的维护次数,从而延长其使用寿命。

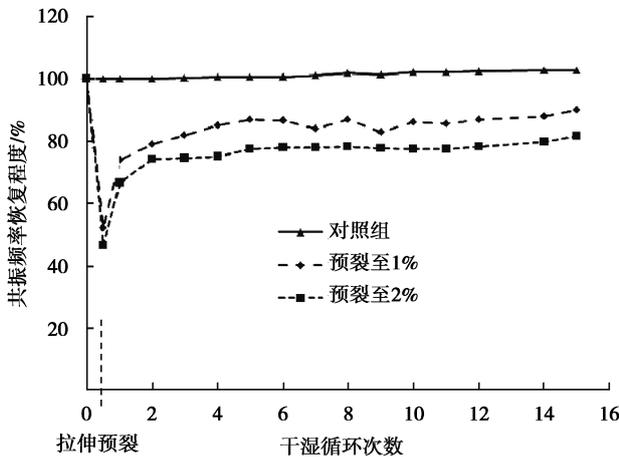


图 8 ECC 试件的共振频率随自修复进程的变化

Fig. 8 The RF recovery of ECC under wet-dry cycles for different preload strain levels

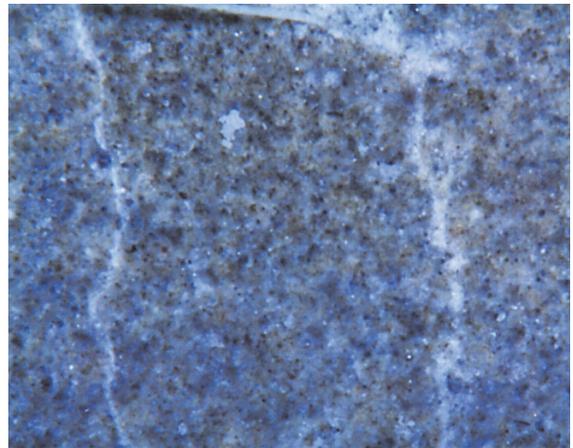


图 9 ECC 裂缝内的自修复产物

Fig. 9 The self-healing products in cracks of ECC

2.3.3 自修复行为对 ECC 水渗透系数的影响

图 10 所示为裂损 ECC 试件的水渗透系数随着自修复的进程的发展过程。如图所示,随着测试时间的发展,裂损 ECC 试件的水渗透系数由 8.7×10^{-8} m/s 逐渐降低至 1.0×10^{-10} m/s,这个现象说明自修复产物填充在裂缝内,从而有效的堵住了水的渗透通道。15 d 后,裂损 ECC 的水渗透系数趋于稳定,说明裂缝已基本被自修复产物填满。

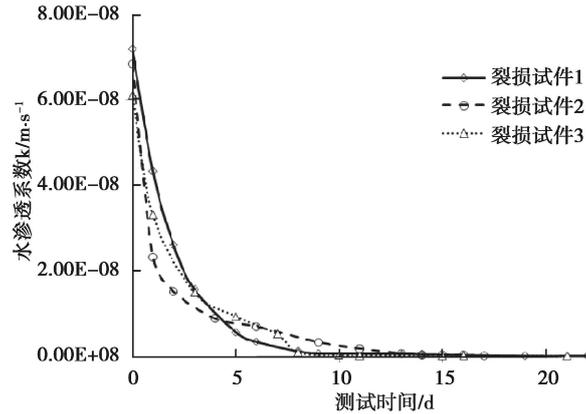


图 10 裂损 ECC 试件的水渗透系数

Fig. 10 The water permeability coefficient of pre-cracked ECC (test time: days)

作为对照组,同时测试了未开裂 ECC 试件的水渗透系数,并发现未开裂 ECC 试件的水渗透系数为 0.9×10^{-8} m/s,与经过 20 d 自修复后的裂损 ECC 试件的水渗透系数基本相同。

以上试验结果表明:由于 ECC 具有自修复能力,ECC 机场道面即使出现了裂缝也可有效的防止水渗透到基层,从而避免由于水的下渗造成的下面道面结构的损坏。

鉴于 ECC 在出现微裂缝后所表现出的类金属的应变硬化行为、超高的延性、与未开裂混凝土同等级的抗渗性及其远低于零值的开裂潜能(P 值),即使机场道面因为温度应力或收缩导致了其基体开裂,ECC 的微裂缝可被视为“无害”裂缝,这些微裂缝也可将存在于机场道面板内的温度应力释放,加之微裂缝在自然环境下可自我修复,ECC 的这些特殊材料行为为机场道面实现无缝提供了可行性。

3 结 语

提出用高延性水泥基复合材料(ECC)作为机场道面材料,以取消道面板间接缝的设置,实现无缝连接,从而可避免接缝类损坏病害,进而提高其使用寿命。研究了 ECC 的力学行为,并对其自修复行为进行了研究与讨论。根据试验结果可得出:ECC 在抗压与弯拉强度上可满足机场道面材料的设计要求,在受约束条件下,不会因为干燥收缩或周围环境温度变化而引起断裂破坏的现象,同时即使 ECC 机场道面出现开裂,ECC 的自修复能力可有效的恢复其力学行为,阻止水通过裂缝下渗到基层。综上,ECC 材料在无缝机场道面应用领域具有较高的适用性。具体研究结论如下所示:

1) ECC 克服了普通混凝土材料的脆性断裂的特性,在拉伸与弯曲荷载作用下展现了较高的拉伸应变与弯曲变形能力。在 28 d 养护龄期时 ECC 的抗压强度与弯曲强度分别可以达到 43.9 MPa 和 12.68 MPa,可满足机场道面材料的设计强度。

2) 由于 ECC 的高延性特性,其具有较低的早期开裂潜能(P 值),使得 ECC 在受约束条件下不会因为干燥收缩或周围温度变化而出现断裂破坏的行为。这一特性可消除由于普通混凝土材料的脆性特性而导致的对机场道面板尺寸的限制,从而实现机场道面的无缝连接。

3) 由于 ECC 的自修复行为,裂损 ECC 的拉伸性能(刚度、拉伸应变能力和最大拉伸强度)、共振频率与水渗透系数几乎可恢复至与未开裂 ECC 相同的程度。

参考文献:

- [1] Demir, Sevim Ö, Tekin E. The effects of shrinkage-reducing admixtures used in self-compacting concrete on its strength and durability[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 153-165.
- [2] 杨进, 王发洲, 黄劲, 等. 不同类型减缩剂减缩效果比较分析[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 53-58.
Yang J, Wang F Z, Huang J, et al. Comparative analysis of reduction effects of different shrinkage reducing agents in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 53-58. (in Chinese)
- [3] Park J J, Kim S W, Ryu G S, et al. The influence of chemical admixtures on the autogenous shrinkage ultra-high

- performance concrete[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 452/453: 725-728.
- [4] 八谷好高. 机场道面设计与维修[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Ba Guhaogao. *Airport pavement design and rehabilitation airport pavement design and rehabilitation*[M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [5] 肖卫. 磷酸镁水泥机场快速修补材料的物理力学性能和耐久性[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Xiao W. *Then mechanical properties and durability of magnesium phosphate cement for rapid repair material in airfield pavement* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [6] Li V C, Lleung C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [7] Zhang Z G, Zhang Q, Qian S Z, et al. Low E modulus early strength engineered cementitious composites material[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015, 2481(1): 41-47.
- [8] Zhang Z G, Zhang Q. Matrix tailoring of engineered cementitious composites (ECC) with non-oil-coated, low tensile strength PVA fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 420-431.
- [9] Wang K J, Daniei C, Surendra P. Permeability study of cracked concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(3): 381-393.
- [10] ASTM C109. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars[S]. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, 2012.
- [11] JSCE. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks [S]. Tokyo: Japan Soc. of Civil Engineers; 2008.
- [12] Li K F, Ma M J, Wang X M. Experimental study of water flow behaviour in narrow fractures of cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(10): 1009-1013.
- [13] MH/T5004. 民用机场水泥混凝土道面设计规范 [S]. 中国民用航空局, 北京, 2010.
MH/T5004. *Specifications for airport cement concrete pavement design* [S]. Civil aviation administration of China, Beijing. 2010. (in Chinese)
- [14] Qian S Z, Li V C, Zhang H, et al. Life cycle analysis of pavement overlays made with engineered cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1): 78-88.
- [15] Li V C, Henrik Stang. Elevating FRC material ductility to infrastructure durability[EB/OL]. 2004. <http://www.doc88.com/p-8022280528594.html>

(编辑 侯 湘)