

LI Victor C

(Department of Materials Science and Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, USA)

摘要: 高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)是经系统的微观力学设计, 在拉伸和剪切荷载下呈现高延展性的一种纤维增强水泥基复合材料。本文综述了ECC的研究进展, 主要介绍了配筋ECC结构的耐久性、安全性及可持续性对未来混凝土必须满足的关键性能。根据ECC近来的应用情况及将来在工程上推广应用的需要, 总结了ECC长期性能方面的研究结果。

关键词: 复合材料; 纤维; 延展性; 耐久性; 可持续性; 安全性; 设计; 基础设施

中图分类号: TQ172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-5648(2007)04-

PROGRESS AND APPLICATION OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES

LI Victor C

(Department of Materials Science and Engineering, the University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, USA)

Abstract: Engineered Cementitious Composite (ECC) is a fiber reinforced cement based composite material systematically designed on the basis of micromechanics and engineered to achieve high ductility under tensile and shear loading. ECC as an emerging construction material is overviewed. Emphasis is placed on the accumulated knowledge on durability, safety, and sustainability of reinforced ECC (R/ECC) structures, recognizing that the concrete of the future must meet these characteristics. In light of recent and future full-scale field applications of ECC, the limited studies on long-term performance of ECC are also summarized.

Key words: composite; fiber; ductility; durability; sustainability; safety; design; infrastructure

混凝土是一种很优秀的建筑材料, 其性能已经有了一定程度的改善, 但应用于基础设施建设时仍有不足之处, 主要存在以下3方面的问题: (1)极端荷载下的脆性破坏。通常所观察到的破坏模式, 比如开裂、剥落、冲击或爆炸荷载下的破碎均与混凝土不良的拉伸行为有关^[1-3]。(2)正常工作荷载下的破坏。在正常工作荷载下, 钢筋混凝土结构耐久性不足的主要原因是混凝土的开裂引发的钢筋锈蚀及其他相关问题^[4]。(3)钢筋混凝土结构的可持续性问题^[5-7]。基础设施面临的挑战要求未来混凝土必须满足高延展性、高耐久性、高可持续性, 确保人造与自然环境之间的和谐共处。

1 高延性纤维增强水泥基复合材料

高延性纤维增强水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)是经系统设计, 在拉伸和剪切荷载下呈现高延展性的一种纤维增强水泥基复合材料^[8-10]。采用基于微观力学的材料设计方法、纤维体积掺量仅为2%的ECC, 其单轴拉伸荷载下最大应变大于3%^[8-11]。使用掺量适中的短纤维能满足不同的施工要求, 包括自密实ECC^[12]和喷射ECC^[13]的施工。目前, 通过挤压成型已经生产出了ECC结构构件^[14]。在增强结构的安全性、耐久性及其可持续性方面, ECC有很大的优势。

图1是聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维

收稿日期: 2006-12-25。 修改稿收到日期: 2007-01-10。

基金项目: 美国国家自然科学基金会MUSES Biocomplexity计划(CMS-0223971, CMS-0329416)基金资助。

第一作者: LI Victor C (1954~), 男, 教授。

Received date: 2006-12-25. Approved date: 2007-01-10.

First author: LI Victor C (1954-), male, professor.

E-mail: vcli@umich.edu

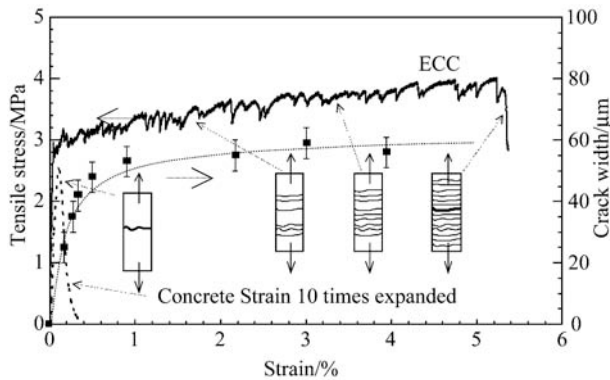


图1 典型的ECC拉伸应力应变曲线和裂缝宽度发展图

Fig.1 Typical tensile stress-strain curve and crack width development of engineered cementitious composite (ECC)

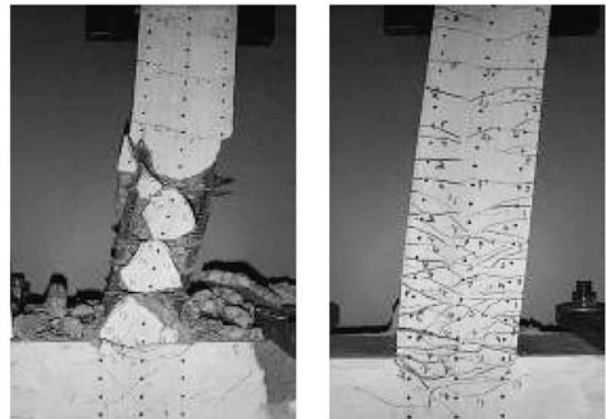
体积掺量为2%的ECC在单轴拉伸荷载条件下的典型应力-应变曲线。初始裂缝之后的应变硬化过程伴随着多缝开裂。从图1中也可看出非弹性应变阶段裂缝宽度的发展趋势。即使是在极限荷载时(应变为5%),裂缝宽度保持在60 μm 左右,当应变小于1%时,裂缝宽度更小。这种细密的微裂缝宽度是由材料自身性质决定的,它与这种复合材料是否配钢筋以及配筋率大小无关。相反地,普通混凝土和纤维混凝土的裂缝宽度与配筋有关。正如在极限状态下拉伸延展性对于结构安全性的重要性一样,ECC的细密裂缝宽度特性对于结构的正常使用是至关重要的。

2 ECC的性能

2.1 安全性

为满足抗震的需要,ECC高性能材料被推广使用^[15]。Billington^[16]指出,使用ECC的结构除了具有抗坍塌能力,还具有高损伤承受能力,遭受地震破坏后的残余裂缝宽度很小,这样能大大减少地震后的修补费用。

关于配筋ECC的耐损伤行为已有大量的实验数据。在完全倒转的循环荷载情况下所测试的结构构件包括梁^[17-18]、柱^[19]、梁柱连接构件^[20]、填充墙^[18,21]、框架^[22]、桥墩^[23]、连梁^[24]、阻尼构件^[25]等。这些关于ECC及其他派生材料的研究都证实了它具有很好的抗震性及最小的震后修补费用。值得注意的是,配筋ECC还表现出了剪应力下的高延性行为、高能量吸收行为、大侧向位移下有稳定的滞回环及结构整体性。图2清晰地显示了循环加载弯曲构件的高损伤承受力^[26]。试验结果还表明,由于ECC优良的剪切延性,箍筋的数量可以减少甚至取消。配筋ECC



(a) R/C

(b) R/ECC

图2 配筋普通混凝土和配筋ECC(无箍筋)在循环荷载下水平位移为10%时的破坏形式^[30-33]

Fig.2 Damage behavior of reinforced ordinary concrete (R/C) and reinforced ECC (R/ECC) without stirrups, shown at 10% drift after reverse cyclic loading^[30-33]

的最大特性是它的拉伸延性,这使得ECC与钢筋之间有一致协调的变形,即使钢筋达到塑性屈服时也是如此^[27]。由于ECC在剪切应力条件下承受斜拉力而呈多缝开裂,因此ECC的拉伸延性好即意味着其剪切延性也好^[28]。

ECC在冲击荷载下的抗碎裂特性已经通过试验得到证实。Maalej等^[29]通过试验证实,经高速射弹冲击作用的ECC板损伤小,整体性好,呈多缝分布开裂,能量耗散力强。

2.2 耐久性

在环境和机械荷载下,基础设施老化的原因是错综复杂的。对桥梁和公路来说,破坏通常是从温度变化、约束条件下的干燥收缩或自收缩引起的开裂开始的^[30-31]。车辆行驶造成的疲劳荷载,使得开裂更为严重^[32-33]。开裂的面层混凝土具有传输特性,氯化物或其他侵蚀性介质易于从面层渗透至钢筋表面,继而钢筋锈蚀产生膨胀应力,最终导致脆性的混凝土保护层剥落。

混凝土的低拉伸应变能力(0.01%)使其易于开裂,裂缝宽度需要由钢筋控制,且毫米级宽度的裂缝是常见的^[31]。一方面,混凝土裂缝宽度需要由钢筋控制;另一方面,侵蚀性介质会通过裂缝渗透而使钢筋锈蚀,这正是目前基础设施破坏的问题所在。混凝土另一大缺陷是脆性破坏特性,这是混凝土保护层易于剥落的原因。

试验研究证实,ECC能够改变上述破坏过程。在限制干燥收缩的条件下,ECC的裂缝宽度限制在

30 μm左右^[34]。特别值得注意的是，ECC的裂缝宽度与结构的尺寸无关^[35]，而普通混凝土则不同。此外，疲劳荷载似乎不会增加裂缝的宽度。图3所示为混凝土和ECC无接缝桥面连接板在疲劳加载情况下的裂纹宽度发展情况^[36]。经十万次循环后，混凝土连接板裂缝宽度超过0.6 mm，而ECC连接板裂缝宽度保持在50 μm左右。

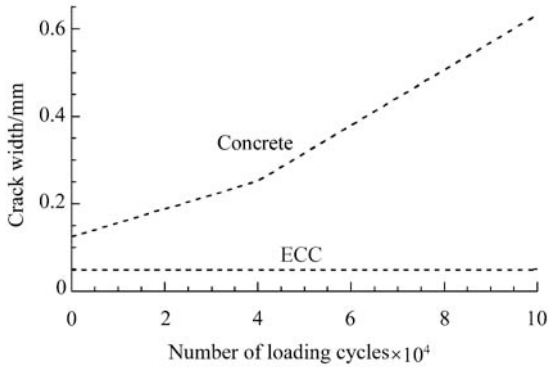


图3 疲劳加载条件下连接板裂纹宽度发展^[36]

Fig.3 Crack width evolution of link slab specimens during fatigue test^[36]

混凝土保护层的传输性质决定了侵蚀性介质渗透至钢筋所需的时间。传输机制包括渗透、扩散和毛细吸附。众所周知，开裂混凝土的渗透性是裂缝宽度的三次幂^[37]，裂缝宽度低于100 μm(对于气体渗透，为50 μm)时，可以认为混凝土渗透性和未开裂混凝土一致^[38]。对预加1.5%拉伸应变(裂缝宽度为60 μm)的ECC试件进行渗透性试验，结果证实：ECC加载至应变硬化阶段的行为与未开裂混凝土相近(见图4)^[39]。

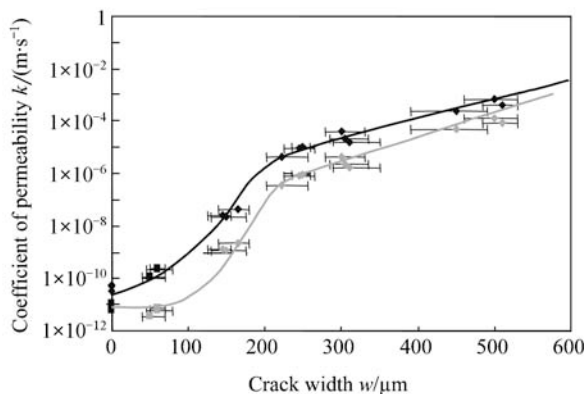


图4 初始应变为1.5%的ECC和配筋砂浆在单轴拉伸下的渗透系数 k 和裂纹宽度的关系^[39]

Fig.4 Coefficient of permeability k vs crack width for ECC and reinforced mortar series pre-stressed to 1.5% in uniaxial tension^[39]

Grey symbols indicate data normalized by number of cracks

配筋ECC和配筋混凝土梁中钢筋总的锈蚀速率分别为小于0.0004 mm/a、大于0.008 mm/a(见图5)。由于裂缝宽度小，因此ECC中毛细管传输可能会令人关注。然而最近的一份研究表明，ECC的毛细吸附可通过憎水表面涂层来控制^[41]。

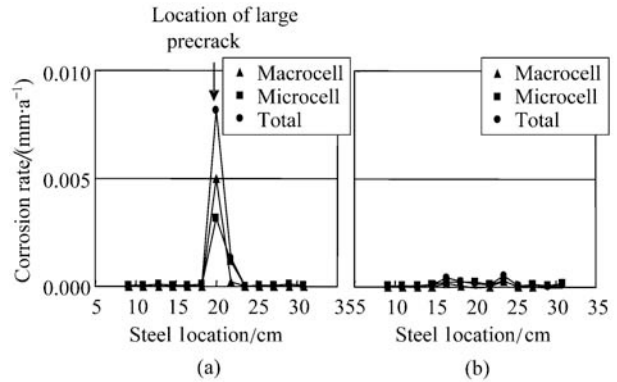


图5 沿钢筋长度方向配筋普通混凝土和配筋ECC中微电池和宏观电池腐蚀速率^[39]

Fig.5 Microcell and macrocell corrosion rate measured for R/C, and R/ECC along the reinforcement bar length^[39]

ECC的抗剥落性测试是通过将锥形钢棒压入ECC板来模拟钢筋锈蚀产生膨胀应力的过程^[39,42]。测试结果表明：ECC通过“塑性屈服”过程来克服膨胀力，并形成放射状的微裂纹，而普通混凝土在膨胀应力的作用下则碎裂。图6所示为试验后ECC板的损伤模式及混凝土板断裂破坏模式。ECC板能承受高达30kN的荷载，而混凝土板所承受的荷载仅7kN。从上面的讨论我们可以清楚的看到，当用ECC取代普通混凝土时，基础设施的缺陷，包括有限条件下收缩开裂、疲劳裂纹扩展、介质在混凝土保护层中的传输、侵蚀性介质通过混凝土保护层迅速渗透至钢筋表面、钢筋锈蚀及保护层剥落等问题，均能够得到减缓甚至避免。因此，ECC因其优异的拉伸延性以及微裂缝宽度控制特性必将赋予基础设施更高的耐久性。

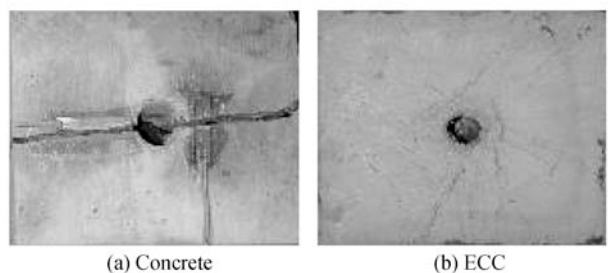


图6 普通混凝土和ECC的破坏形式^[39,42]

Fig.6 Failure modes of concrete and ECC^[39,42]

2.3 可持续性

基础设施的可持续性既要考虑到建筑材料的环境友善性,也应考量基础设施生命周期不同阶段的经济、社会及环境成本。现有的关于环保建材的研究很少考虑全生命周期的成本。即使考虑生命周期的成本时,也仅从经济角度考虑,只关心业主成本,而不从社会及环境角度考虑至关重要的用户成本和其他外部成本。

为实现基础设施的可持续性目标,环保ECC的发展需要一个更全面的生命周期框架模型,综合考虑社会、环境及经济三大要素^[43-44]。Michigan大学正在构建基于土木工程和材料学、环境经济学、工业生态学、公共健康学以及地质科学等学科交叉的模型框架^[45-46]。最初版本的综合生命周期评估及成本模型已经在钢筋混凝土桥面板接缝设计中得到应用:一种设计是采用传统的机械伸缩缝,另一种是采用ECC无缝连接板。考虑桥梁的服务年限为60年,对两个设计系统的生命周期能耗、温室气体排放、建设和修复的费用及社会成本(包括与施工导致的交通延误及环境污染成本)进行量化,结果表明:ECC无缝连接板较传统伸缩缝相比,有37%的经济成本优势,主要能耗减少40%,CO₂排放量减少39%。结果还显示了ECC无缝连接板设计在使用期对减少全生命周期成本和环境负荷方面的优势。此外,尽管每单位质量的ECC成本是普通混凝土的3倍,但由于使用ECC时,修补频率降低,材料用量减少,因此,其生命周期成本较使用普通混凝土低。

上述结论定量描述了在基础设施建设中使用ECC的优势,这是建立在一个有待证实的假设之上的,即使用ECC连接板的桥面服务年限是使用传统的伸缩缝桥面的两倍。但是,从本文前面部分所总结的有关配筋ECC的耐久性的信息和下面将要介绍的长期性能数据,对服务年限作上述假设是合理的,但这仍需进一步研究。

3 ECC的应用及长期性能

ECC的大规模应用工作已经展开。有关实际工程应用的总结详见文献^[47]。工程应用实例有:日本北海道斜拉索桥的钢/ECC复合桥面板,2003年广岛县Mitaka大坝的修复^[48],2005年美国Michigan用ECC连接板用于桥面板以代替传统的伸缩缝。

Mihara斜拉索桥于2005年4月开通,使用了薄的复合钢/ECC板。由于ECC的拉伸延性及微裂缝宽度控制特性,桥的自重减少了40%,预计使用年限

达100 a。据报道,Mihara桥的成本也显著降低。

尽管目前尚未全面检测实际工程条件下ECC的长期性能,但至少有两份研究报告认为,ECC在实际应用条件下性能优异。一份是关于ECC修复被碱骨料反应(ASR)损伤的混凝土挡土墙(宽18 m,高5 m)的研究。决定使用50~70 mm厚的ECC修复层的原因是要阻止由基层混凝土反射到修复层的裂缝。如果使用普通混凝土,这种反射裂缝将难以避免。自从2003年4月修补之后,对这座墙进行了跟踪监测。修补10个月后,ECC修复层的微裂缝宽度保持在50 μm以下,而作为对比的预拌水泥砂浆处的最大裂缝宽度达200 μm。

另一个长期性能检测的对象是2002年10月用ECC修补Michigan的Curtis公路桥桥面板补丁(见图7a)。这个ECC小补丁是在周围混凝土浇注1 d后浇注的。现在,ECC补丁和周围混凝土已经经历了3个冬季的冻融循环。该桥梁承受11轮卡车的重荷载。图7b所示为检测到的最大裂缝宽度与时间的关系。ECC补丁的裂缝宽度一直保持在约50 μm的水

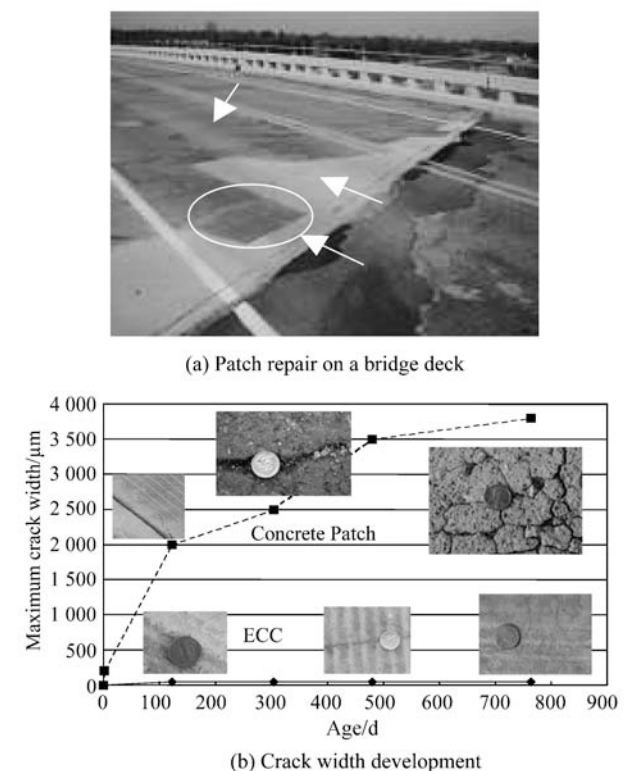


图7 混凝土补丁和ECC补丁的裂缝宽度随时间的变化
Fig.7 Patch repair on a bridge deck and crack width development in concrete patch and ECC patch over time

平,而在相同龄期混凝土的最大裂缝宽度则很高,修补后780 d时测得的混凝土最大裂缝宽度为3.8 mm。

4 结 论

ECC材料具有很好的延性及微裂缝宽度控制特性,可以满足下一代基础设施的要求,但仍需进行大量的研究来全面了解这种新型建筑材料。对ECC的研究已经从实验室发展到大规模的实际工程应用。这些应用将对ECC的再设计提供有益的反馈信息,以便满足不同应用场合的特殊需求。基于微观力学的ECC材料工程学可为ECC的进一步优化提供指导,目前已经发展并成功应用了基于可持续性考虑的环保ECC和基于减轻自重考虑的轻质ECC。最近的工程应用也为结构设计提供了非常重要的指南。

致 谢: 感谢东南大学张亚梅教授为本文所做的中文翻译。

参考文献:

- [1] Reinforced Concrete Committee 1966. Damage Investigation Report on Concrete Buildings, the 1995 Hyogo_ken Nanbu Earthquake (in Japanese). Kinki Branch, Architectural Inst of Japan.
- [2] FEMA, <http://www.fema.gov/hazards/earthquakes/quake.shtm>, accessed, March 14, 2005.
- [3] MALVAR L J, ROSS C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. *ACI Mater J*, 1998, 95(6): 735–739.
- [4] ASCE, <http://www.asce.org/reportcard/2005/index.cfm>. US infrastructure Report Card, 2005.
- [5] WORRELL E, L PRICE, N MARTIN, *et al.* Carbon dioxide emissions from the global cement industry [R]. *Ann Rev Energy Environ*, 2001, 26: 303–329.
- [6] WBCSD. Toward a sustainable cement industry. Draft report for world business council on sustainable development [R]. Battelle Memorial Institute, 2002.
- [7] US EPA. Sources of dioxin-like compounds in the US. Draft exposure and human health reassessment of 2, 3, 7, 8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and related compounds [R], 2000.
- [8] LI V C. ECC-tailored composites through micromechanical modeling [A]. *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future* edited by Banthia *et al*, CSCE [C], Montreal, 1998, 64–97.
- [9] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC)—a review of the material and its applications [J]. *Adv Concr Technol*, 2003, 1(3): 215–230.
- [10] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC [J]. *ACI Mater J*, 2001, 98(6): 483–492.
- [11] LIN Z, KANDA T, LI V C. On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites [J]. *Concr Sci Eng*, RILEM, 1999(1): 173–184.
- [12] KONG H J, BIKE S, LI V C. Development of a self-compacting ECC employing electrosteric dispersion/stabilization [J]. *Cem Concr Compos*, 2003, 25(3): 301–309.
- [13] KIM Y Y, KONG H J, LI V C. Design of engineered cementitious composite (ECC) suitable for wet-mix shotcreting [J]. *ACI Mater J*, 2003, 100(6): 511–518.
- [14] STANG H, LI V C. Extrusion of ECC-material [A]. In: REINHARDT H, NAAMAN A, ed. *Proc eeding, HPRCC 3* [C]. Chapman & Hull, 1999. 203–212.
- [15] RICHMOND A. Year 5 Annual Report: Pacific Earthquake Engineering Research Center [R], 2003.
- [16] BILLINGTON S L. Damage-tolerant cement-based materials for performance based earthquake engineering design: research needs [A]. In: LI V C ed. *Fracture Mechanics of Concrete Structures* [M]. Ia-FraMCos, 2004, 53–60.
- [17] FUKUYAMA H, MATSUZAKI Y, NAKANO K, *et al.* Structural performance of beam elements with PVA-ECC [A]. In: Reinhardt & Naaman, C & H, ed. *Proceeding HPRCC 3* [C], 1999. 531–542.
- [18] KANDA T, WATANABE S, LI V C. Application of pseudo strain hardening cementitious composites to shear resistant structural elements [A]. In: *Proceeding. FRAMCOS-3* [C], AEDIFICATIO, 1998. 1477–1490.
- [19] FISCHER G, FUKUYAMA H, LI V C. Effect of matrix ductility on the performance of reinforced ECC column members under reversed cyclic loading conditions [A]. In: *Proceeding, DFRCC Int'l Workshop* [C], Takayama, Japan, 2002. 269–278.
- [20] PARRA-MONTESINOS G, WIGHT J K. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections [J]. *ASCE J Struct Eng*, 2000, 126(10): 1113–1121.
- [21] KESNER K E, BILLINGTON S L. Investigation of infill panels made from ECC for seismic strengthening and retrofit [J]. *ASCE J Struct Eng*, 2004.
- [22] FISCHER G, LI V C. Intrinsic response control of moment resisting frames utilizing advanced composite materials & structural elements [J]. *ACI Struct J*, 2003, 100(2): 166–176.
- [23] BILLINGTON S L, YOON J K. Cyclic response of precast bridge columns with ductile fiber-reinforced concrete [J]. *ASCE J Bridge Eng*, 2004, 9(4): 353–363.
- [24] CANBOLAT B A, PARRA-MONTESINOS G J, WIGHT J K. Experimental study on the seismic behavior of high-performance fiber reinforced cement composite coupling beams [J]. *ACI Struct J*, 2005.
- [25] FUKUYAMA H, SUWADA H, ILSEUNG Y. HPRCC damper for structural control [A]. In: *Proceeding DFRCC Int'l Workshop* [C], Takayama, Japan, 2002. 219–228.
- [26] FISCHER G, LI V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [J]. *ACI Struct J*, 2002, 99(6): 781–790.
- [27] FISCHER G, LI V C. Influence of matrix ductility on the tension-stiffening behavior of steel reinforced ECC [J]. *ACI Struct J*, 2002, 99(1): 104–111.
- [28] LI V C, MISHRA D K, NAAMAN A E, *et al.* On the shear behavior of ECC [J]. *J Adv Cem Based Mater*, 1994, 1(3): 142–149.
- [29] MAALEJ M, J ZHANG, S T QUEK, *et al.* High-velocity impact resistance of hybrid-fiber ECC [A]. In: LI V C ed. *Proceedings, FraMCoS 5* [C], 2004, 2, 1051–1058.
- [30] MEHTA P K, BURROWS R W. Building durable infrastructures in the 21st century [J]. *Concr Int*, 2001, 23(3): 57–63.
- [31] XI Yunping, SHING B, ABU-Hejleh N, *et al.* Assessment of the cracking problem in newly constructed bridge decks in Colorado [R]. Report No. CDOT-DTD-R-2003-3, Submitted to Colorado DOT, 2003.
- [32] MATSUI S. Technology developments for bridge decks-innovations on durability and construction (in Japanese) [M]. *Kyouryou To Kiso*, 1997, (8): 84–92.

- [33] PERDIKARIS P C, BEIM S. RC Bridge Decks under pulsating and moving load [J]. *J Struct Eng*, 1988, 114(3): 591–607.
- [34] WEIMANN M, LI V C. Drying shrinkage and crack width of ECC [A]. In: BRANDT A M, LI V C, MARSHALL I H, eds. *Proceeding BMC-7* [C], Warsaw, Poland, 2003. 37–46.
- [35] LI V C, STANG H. Elevating FRC material ductility to infrastructure durability [A]. In: PRISCO M D, ed. *Fiber-Reinforced Concretes. Proceeding BEFIB* [C]. 2004. 171–186.
- [36] KIM Y Y, FISCHER G, LI V C. Performance of bridge deck link slabs designed with ductile ECC [J]. *ACI Struct J*, 2004, 101(6): 792–801.
- [37] TSUKAMOTO M. Tightness of fiber concrete [J]. *Darmstadt Concr*, 1990, 5: 215–225.
- [38] WANG K, JANSEN D, SHAH S, *et al*. Permeability study of cracked concrete [J]. *Cem Concr Res*, 1997, 27(3): 381–393.
- [39] LEPECH M, LI V C. Permeability of ECC [J]. *ACI Mater J*, 2005.
- [40] MIYAZATO S, HIRAISHI Y. Transport properties and steel corrosion in ductile fiber reinforced cement composites [A]. *Proceeding. ICF 11*[C], Torino, Italy, 2005.
- [41] MARTINOLA G, BAEUML M F, WITTMANN F H. Modified ECC by means of internal impregnation [J]. *J Adv Concr Technol*, 2004, 2(2): 207–212.
- [42] KANDA T, SAITO T, SAKATA N. Tensile and anti-spalling properties of direct sprayed ECC [J]. *J Adv Concr Technol*, 2003, 1(3): 269–282.
- [43] LI V C, LEPECH M, WANG S, *et al*. Development of green ECC for sustainable infrastructure systems [A]. In: WANG K ed. *Proceeding Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology* [C], Beijing, China, 2004. 181–192.
- [44] LEPECH M, LI V C, KEOLEIAN G. Sustainable infrastructure material design [A]. *Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems* [C], Florida, US, 2005.
- [45] KEOLEIAN G, KENDALL A, CHANDLER R, *et al*. Life-cycle cost model for evaluating the sustainability of bridge decks [A]. *Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems* [C], Florida, US, 2005.
- [46] KEOLEIAN G A, KENDALL A, DETTLING J E, *et al*. Life cycle modeling of concrete bridge design: comparison of ECC link slabs and conventional steel expansion joints [J]. *ASCE J Infrastructure Systems*, 2005, 51–60.
- [47] LI V C. Strategies for high performance fiber reinforced cementitious composites development [A]. *Workshop on Advanced FRC* [C], Bergamo, Italy, 2004.
- [48] KOJIMA SAKATA N, KANDA T, HIRAISHI M. Application of direct sprayed ECC for retrofitting dam structure surface-application for Mitaka-Dam [J]. In *JCI Concr J*, 2004, 42(5).
- [49] Construction of the Mihara Bridge (in Japanese). <http://nissei-kensetsu.co.jp/bihara.html>.
- [50] ROKUGO K, KUNIEDA M, LIM S C. Patching repair with ECC on cracked concrete surface [A]. To appear in *Proceeding. CONMAT 5* [C], 2005.
- [51] LI V C, LEPECH M. Crack resistant concrete material for transportation construction [A]. *TRB 83rd Meeting* [C], Washington, D C, CD ROM, 2004, Paper 04–4680.
- [52] WANG S, LI V C. Materials design of lightweight PVA-ECC [A]. In: NAAMAN A E, REINHARDT H W eds. *Proceeding. HPRCC* [C] *Ann Arbor MI*, 2003, 379–390.

