

超高韧性水泥基复合材料耐久性能研究

熊钱华

(石门县交通运输局, 湖南 常德 415300)

摘要: 针对传统硅酸盐水泥砼低韧性、易开裂的缺陷, 研发超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)。文中从抗冻融循环性能、抗碳化性能、抗渗性能、收缩徐变性能、抗钢筋锈蚀性能和疲劳荷载作用下耐久性能等方面概述了近年国内外对 UHTCC 耐久性能的研究状况, 并对 UHTCC 材料的应用与研究进行了展望。

关键词: 公路; 超高韧性水泥基复合材料(UHTCC); 耐久性; 抗冻融循环性能

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)01-0054-05

硅酸盐水泥砼材料以其广泛的适用性和低廉的价格成为使用范围最广的建筑材料。但水泥基砼材料在应用中存在抗拉强度低、韧性差及裂缝出现后难以控制等缺点, 成为工程事故发生的诱因。研究及工程实践表明, 砼结构性能下降速度很大程度上与砼结构的裂缝相关。裂缝的产生将迅速导致外部环境水、二氧化碳和氯离子渗透到结构中, 为内部钢筋生锈提供通道, 从而导致砼基体进一步破坏。在结构服役过程中不可避免地会出现裂缝, 提高砼材料的韧性和强度以实现裂缝的有效控制, 克服水泥基材料变形差、易开裂的缺陷成为研究热点。

超高韧性水泥基复合材料是通过微观力学性能设计、调整得到的一种短纤维乱向分布的水泥基复合材料。最早由 Li V. C. 教授提出, 命名为 Engineering Cementitious Composites(ECC), 它能实现稳态下的多缝开裂, 提高水泥基材料的韧性。随后, 欧洲、澳大利亚等地区学者对其展开进一步研究和性能改善, 得到应变硬化水泥基复合材料(SHCC), 日本学者也研究提出超高韧性纤维增强水泥基复合材料(UHPRCC)。在国内, 浙江大学徐世烺教授研究出一种在低纤维含量下具有超过 3% 拉应变能力的材料, 它在拉伸荷载作用下会产生多个细裂缝, 裂缝宽度小于 $100\ \mu\text{m}$, 称之为超高韧性水泥基复合材料(Ultra High Toughness Cementitious Composites, UHTCC)。该文对近年 UHTCC 耐久性能研究进行综述, 以提高该材料在土木工程和水利工程中的优势和作用。

1 UHTCC 的抗冻融循环性能

对于吸水饱和的砼, 在其冻融循环过程中, 当砼

中毛细水在负温下由水转变为冰时, 其体积发生约 9% 膨胀, 在膨胀压力作用下, 周围的微观结构中产生拉应力, 砼在重复拉伸作用下发生开裂破坏。

文献[11-12]对普通硅酸盐砼、引气砼、钢纤维砼和 UHTCC 进行冻融循环试验, 发现 UHTCC 材料的抗冻融循环性能最优, 明显优于其他 3 种砼材料。

文献[13]通过对 UHTCC 材料在冻融循环条件下的质量损失、动弹性模量损失、弯曲抗拉强度等性能试验研究, 发现 UHTCC 经过 300 次冻融循环后, 其质量损失小于 1%, 动弹性模量损失不大于 5%, 能满足寒冷地区工程抗冻要求。

文献[14]指出, 在氯盐环境下, UHTCC 材料在冻融循环后期表层会严重剥落, 导致抗冻性能明显降低。

文献[15]研究发现, 经过 300 次冻融循环作用后, 在不掺引气剂的情况下, UHTCC 材料依然可保持较好的力学性能, 且发生的变形较小。

文献[16-18]进一步对 UHTCC 材料抗冻融循环作用性能影响因素进行研究, 发现纤维体积掺量和砂灰比对其影响更显著, 纤维种类的影响很小。

关于粉煤灰对 UHTCC 材料抗冻融循环性能的影响目前尚无定论。文献[20]指出粉煤灰的掺入对 UHTCC 材料抗冻融循环性能的影响甚微。文献[13]指出, 粉煤灰对水泥基材料抗冻性的影响程度有待研究, 认为水灰比的影响更显著, 其取值可基本确定砼的孔结构并决定砼的性能, 孔隙率越大意味着砼的含水越多, 在冻融循环作用下越易发生破坏; 另外, 微细孔能通过减小渗透水压力, 抑制负温下冰晶的形成, 从而提高砼的抗冻耐久性。

2 UHTCC 的抗碳化性能

砼碳化是指空气中的二氧化碳与砼中的碱性物质发生反应,导致砼 pH 值下降。砼是一种强碱性材料,在这种环境下,钢筋表面的钝化膜不会被腐蚀,但一旦环境中的碱性物质被消耗导致 pH 值下降,则钢筋钝化膜会发生破坏,钢筋被锈蚀,从而造成材料耐久性下降。文献[21]对 UHTCC 分别进行快速碳化和预裂后快速碳化试验,探究不同龄期下 UHTCC 的抗碳化性能,结果表明无裂缝的 UHTCC 在抗碳化性能上的表现与相同强度的砼基本一致,但经过相同荷载的预裂处理后,在裂缝处 UHTCC 的碳化深度与无裂缝处相差不大,仅为同等强度砼碳化深度的 30%~40%。

文献[15]认为根据 UHTCC 材料中原材料的选择及使用环境等进行必要研究很有必要,因为 UHTCC 材料中不掺粗骨料,但会掺入粉煤灰、矿渣等活性材料以减少水泥用量,这会很大程度上影响 UHTCC 材料的抗碳化性能。

3 UHTCC 的抗渗性能

砼具有复杂的多孔结构,水是最常见又最容易与砼接触的介质,水分很容易通过孔隙进入砼内部,同时水又携带其他有害离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 等),会对砼内部造成侵蚀性破坏。因此,砼的抗渗性能与其耐久性密切相关。

文献[15]发现,UHTCC 在抗渗透性能的各方面(抗水渗透性能、抗氯离子渗透性能和抗氯离子扩散性能)均显著优于同等强度的普通砼。

文献[21]对 UHTCC 进行快速氯离子渗透试验,并进行 UHTCC 渗透系数、氯离子渗透系数和自由氯离子含量测定,结果表明早期 UHTCC 的渗透系数为相同强度普通砼的 35%左右,氯离子渗透系数与相同强度普通砼一致。但随着龄期的增长,氯离子渗透系数明显低于相同强度普通砼。

文献[22-23]等指出 UHTCC 的抗渗透性能优良,且发生 1.5%拉应变时的渗透系数仍与未发生开裂时的渗透系数在同一数量级上。文献[24-26]等研究也证实了这一结论,还发现 UHTCC 达到应变硬化阶段时抗渗透性能仍然很好,且随着养护龄期的增长,其抗渗透性能会提高。

文献[27]研究了不同拉应变(1.5%、2.0%、2.5%)、不同试件厚度(10、12、15 mm)情况下水的

渗透能力,结果表明由于 UHTCC 具有对裂缝宽度的优越控制能力,其在微裂缝状态下仍保持着较好的抗渗性能,且 UHTCC 在渗透过程中存在自愈现象,随着渗透时间的增加,UHTCC 的水渗透系数逐渐降低,在渗透初期渗透系数的下降幅度明显,然后趋于稳定。

文献[28]指出,PVA 纤维和基体材料之间界面处的微通道效应为氯离子的渗透提供了通道,如何改善 PVA 纤维界面并调整 UHTCC 配合比以提高其早期抗氯离子渗透性能,消除微通道效应需作更全面、更深入的研究。同时,由于使用粉煤灰等矿物掺合料,这些材料的水化过程和水化机理将对内部纤维和材料整体性能产生影响,也需进一步研究。

4 UHTCC 的收缩徐变性能

文献[29]将 UHTCC 应用到修补旧砼中,并对新旧砼体系的界面收缩性能展开研究,发现 UHTCC 可有效控制修补层的裂缝宽度,并控制裂缝宽度小于 $60\text{ }\mu\text{m}$,基本满足结构的正常使用需求。

文献[30]通过对 UHTCC 及其基体在干缩过程中出现的裂缝进行观测,发现尽管 UHTCC 及其基体的自由收缩值高于普通砼,但 UHTCC 可实现对裂缝发展的有效控制,大大降低裂缝宽度,裂缝宽度仅为普通砼的 20%。

文献[31]的研究结果表明,对于 UHTCC 材料,PVA 纤维的掺入可使其基体在开裂过程中出现多缝开裂现象,并达到应变硬化效果。裂缝数量和宽度与基体材料的性能及 PVA 纤维掺量相关,PVA 纤维体积掺量为 1.5%时裂缝的控制效果最好,裂缝最大宽度小于 $40\text{ }\mu\text{m}$,平均宽度小于 $20\text{ }\mu\text{m}$,裂缝数量增加至未掺 PVA 纤维的 5 倍以上,满足多缝开裂的基本性质。这也表明 UHTCC 具备良好的抗收缩、开裂的性能,有潜力应用于对耐久性要求较高的砼结构中。

文献[32]考察了纤维掺量对水泥基复合材料收缩性能的影响,发现纤维体积掺量对砼基体自由收缩没有明显影响,但纤维的掺入可有效提高水泥基复合材料的裂缝控制率,且可将裂缝最大宽度控制至小于 $40\text{ }\mu\text{m}$,可视为无害裂缝。

文献[33]对 UHTCC 的早期干燥收缩和抗裂性能进行研究,结果表明 UHTCC 的收缩产生在基体硬化早期,这与文献[32]的结论一致;通过对比干、湿养护对 UHTCC 收缩的影响,发现虽然采用

湿养护可避免 UHTCC 水分蒸发引起的收缩,但其收缩最终值会大大增加。

文献[34]对 UHTCC 收缩及徐变特性进行研究,发现基体中的纤维滑移是引起 UHTCC 收缩徐变的主要来源。在相同荷载作用下,带有裂缝的试件的徐变变形比未开裂的试件大得多;荷载的加载速率对 UHTCC 材料的韧性影响不大。

5 UHTCC 包裹钢筋的抗锈蚀能力

通常砼结构中的钢筋是不会生锈的。但在某些条件下,由于砼 pH 值减小和有害介质侵入,会损坏钢筋的钝化膜,钢筋与水 and 氧气接触并发生锈蚀。钢筋锈蚀后,由于钢筋锈蚀产物的存在,会使钢筋与砼之间的接触面发生改变,同时钢筋的体积膨胀可能导致砼开裂甚至剥落,从而使被锈蚀的钢筋与砼之间的黏结性能不断劣化,导致钢筋与砼不能协同工作,结构承载力下降。

文献[35]将 UHTCC 应用于钢筋砼梁的保护层,并在受力侧制作保护层厚度为 15 (不包含受拉钢筋)和 50 mm(包含受拉钢筋)的钢筋砼/UHTCC 复合梁和全梁,在人工加速锈蚀条件下使主筋锈蚀。结果表明 UHTCC 可延缓锈蚀的发生,实现延迟锈胀裂缝出现、限制锈胀裂缝宽度及保持锈蚀后构件较高的刚度和弯曲承载力。

文献[36]通过电化学加速锈蚀方法对 UHTCC 一钢筋拉拔试件进行快速锈蚀,通过直接拉拔试验研究发生锈蚀后钢筋与 UHTCC 的黏结性能。分析发现:腐蚀率小于 2%时,锈蚀钢筋与砼的最大平均结合应力逐渐增加,腐蚀率超过 2%时迅速降低;UHTCC 与钢筋之间最大平均黏结应力在小于 3%的范围内保持线性增加,超过 3%后基本上保持不变;UHTCC 起到类似箍筋作用,对由锈胀产生的锈胀力具有良好的抑制作用。

6 疲劳荷载作用下 UHTCC 的耐久性能

在重复荷载作用下,结构(或部分构件)将产生重复应力和应变,以致在低于静载强度下发生疲劳失效。疲劳荷载作用下的损伤是导致结构失效的主要因素之一,亦是引发结构耐久性破坏的重要原因。

文献[37]通过对 UHTCC 梁进行弯曲疲劳试验,确定在不同应力水平下 UHTCC 梁的疲劳寿命。结果表明:在疲劳荷载作用下,UHTCC 会产生多条裂缝,随应力水平降低,裂缝数目减少,变形能

力减弱;在不同应力水平下,纤维的拔出破坏和拉断破坏比例不同;低循环与高循环疲劳荷载循环作用下,UHTCC 中 PVA 纤维发挥作用的程度有所不同,低循环时纤维以拉断为主,高循环时纤维以拔出为主。

文献[38]对 PE、PVA 及钢纤维水泥基复合材料在疲劳荷载作用下的性能进行对比研究,发现 PVA-UHTCC 和 PE-UHTCC 的疲劳应力与寿命成双线性函数关系,前者倾向于断裂破坏,后者发展的裂缝数量更多且倾向于拔出破坏。

文献[39]通过采用 UHTCC 修复老砼体系,分析新老砼之间界面特性对疲劳荷载作用下弯曲性能的影响,发现使用 UHTCC 修复后的体系不受新老砼特性的影响,且采用 UHTCC 作为路面覆盖层时能有效避免路面反射裂缝产生的破坏。

7 结论与展望

根据对 UHTCC 耐久性能的已有研究,得出以下结论:1) 对比普通硅酸盐水泥砼、引气砼和钢纤维砼,UHTCC 材料的抗冻融循环性能最好,且在不掺引气剂的情况下可满足寒冷地区工程对抗冻的要求。2) 无裂缝的 UHTCC 碳化深度与同等强度普通砼基本相当,但经过预裂处理后的碳化深度仅为普通砼的 30%~40%,有无粗骨料、外掺活性材料对 UHTCC 抗碳化性能有较大影响。3) UHTCC 的抗渗性能良好,渗透系数仅为同等强度普通砼的 35%左右,且在 1.5%拉应变或应变硬化阶段都能保持较高水准;抗氯离子渗透系数明显低于同强度等级的普通砼。4) UHTCC 材料的自由收缩值比普通砼高,且对裂缝的控制率更高,最大宽度的裂缝仍属于无害裂缝。5) UHTCC 具有延缓锈蚀发生进程、延迟锈胀裂缝出现、限制锈胀裂缝宽度、保持锈蚀后构件较高刚度和弯曲承载力等优势。6) 疲劳荷载作用下,UHTCC 材料仍以多缝开裂和应变硬化为主,纤维种类对其破坏模式有影响,PVA-UHTCC 倾向于发生断裂破坏,PE-UHTCC 倾向于发生拔出破坏。

综上,UHTCC 作为一种新型水泥基复合材料展现出良好的力学性能和耐久性能,具有广泛的应用前景,但仍需更深入的研究。研究可从以下几方面进行:1) 因为 UHTCC 不使用粗骨料,且使用大量粉煤灰等活性物质替代水泥,这能节省水泥用量,但粉煤灰对 UHTCC 的耐久性能的影响不能确定,

不同粉煤灰掺量对 UHTCC 结构耐久性的影响有待进一步研究。2) 中国已建造了大量钢筋砼结构,且 UHTCC 材料价格昂贵,大规模取代普通砼是不可可持续发展的,只能将 UHTCC 作为一种修补材料,以结构外包裹的方式提升现有建筑结构的耐久性。UHTCC 与普通砼的界面黏结性能、包裹在 UHTCC 内的普通砼的耐久性均有待深入研究。3) 已有文献未涉及关于 UHTCC 材料的碱—集料反应及这种反应造成的耐久性受损,也未研究 UHTCC 的冲磨侵蚀,而水坝中砼的冲磨侵蚀是影响结构耐久性的重要原因,相关研究也需进行。

参考文献:

- [1] 徐世焯.超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J].土木工程学报,2008,41(6):45—60.
- [2] LI V C.Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites [C]//Proceedings of 4th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete.London:Chapman and Hall,1992:12—30.
- [3] LI V C, LEUNG C K Y.Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber brittle matrix composites[J].Journal of Engineering Mechanics,1992,118(11):2246—2264.
- [4] LI V C.From micromechanics to structural engineering: The design of cementitious composites for civil engineering applications [J]. Journal of Structural Mechanics Earthquake Engineering,1993,10(2):37—48.
- [5] MARSHALL D B, COX B N.A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites[J].Mechanics of Materials,1988,7(2):127—133.
- [6] LI V C.Engineered cementitious composites-tailored composites through micromechanical modeling [C]//Fiber Reinforced Concrete:Present and the Future.Montreal:Canadian Society for Civil Engineering,1998:64—97.
- [7] LI V C, MISHRA D K, NAAMAN A E, et al.On the shear behavior of engineered cementitious composites [J].Advanced Cement Based Materials,1994,1(3):142—149.
- [8] GIDEON Van Zijl.Improved mechanical performance: Shear behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) [J].Cement and Concrete Research,2007,37(8):1241—1247.
- [9] KANG S T, KIM J K.The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC) [J].Cement & Concrete Research,2011,41(10):1001—1014.
- [10] 徐世焯,李庆华.超高韧性水泥基复合材料在高性能建筑结构中的基本应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [11] LEPECH M, LI V C.Durability and long term performance of engineered cementitious composites [C]//Proceedings of the International Workshop on HPRCC in Structural Applications,2005:23—26.
- [12] LI V C, FISCHER G, LEPECH M.Crack resistant concrete material for transportation construction [C]//Proceedings of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting, Washington D C, Compendium of Papers CD ROM,2004:04—4680.
- [13] 徐世焯.超高韧性水泥基复合材料抗冻耐久性能试验研究[J].土木工程学报,2009,42(9):42—46.
- [14] 张菊.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.
- [15] 蔡新华.超高韧性水泥基复合材料耐久性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2010.
- [16] BAI J.Frost resistance of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites [J].Acta Mechanica Solida Sinica,2011(S1):68—73.
- [17] NAM J, KIM Q, LEE B, et al.Frost resistance of polyvinyl alcohol fiber and polypropylene fiber reinforced cementitious composites under freeze thaw cycling [J].Composites Part B(Engineering),2016,90:241—250.
- [18] SAHMARAN M, LI V C, ANDRADE C.Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams[J].ACI Materials Journal,2008,105(3):243—250.
- [19] AHMED Shaikh Faiz Uddin, MIHASHI Hirozo.A review on durability properties of strain hardening fibre reinforced cementitious composites (SHFRCC) [J].Cement & Concrete Composites,2007,29(5):365—376.
- [20] SAHMARAN M, LI V C.De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites[J].Cement and Concrete Research,2007,37(7):1035—1046.
- [21] 徐世焯.超高韧性水泥基复合材料碳化与渗透性能试验研究[J].复合材料学报,2010,27(3):177—183.
- [22] KIM Y Y, FISCHER G, LI V C.Performance of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite[J].ACI Structural Journal,2004,101(6):792—801.

- [23] LEPECH M D, LI V C. Water permeability of engineered cementitious composites[J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(10): 744—753.
- [24] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及其应用[C]//中国混凝土与水泥制品协会. 中国混凝土与水泥制品协会纤维混凝土工程材料高峰论坛. 北京: 中国混凝土与水泥制品协会, 2012: 1—6.
- [25] DAI X B, ZHANG P, GAO J X. Review of mechanical properties and durability of pva fiber reinforced cement based composite materials[J]. Advanced Materials Research, 2013, 804: 8—11.
- [26] LEPECH M D, LI V C. Water permeability of engineered cementitious composites[J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(10): 744—753.
- [27] 李庆华. 超高韧性水泥基复合材料的水渗透性能试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 76—84.
- [28] 高栋. 超高韧性水泥基复合材料渗透性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [29] LI V C, HORII H, KABELE P, et al. Repair and retrofit with engineered cementitious composites[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65(2): 317—334.
- [30] LIM Y M, WU H C, LI V C. Development of flexural composite properties and dry shrinkage behavior of high-performance fiber reinforced cementitious composites at early ages[J]. ACI Material Journal, 1999, 96(1): 20—26.
- [31] 赵铁军, 毛新奇, 张鹏. 应变硬化水泥基复合材料的干燥收缩与开裂[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(增刊 2): 269—273.
- [32] 田砾, 荆斌, 赵铁军, 等. 应变硬化水泥基复合材料收缩性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(6): 76—79.
- [33] 刘志凤. 超高韧性水泥基复合材料干燥收缩及约束收缩下抗裂性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [34] BOSHOF W P, VAN Zijl G P A G. Creep and creep fracture of engineered cement-based composites[J]. Restoration of Buildings and Monuments, 2006, 12(2): 133—142.
- [35] 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料取代保护层混凝土梁抗锈蚀性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 79—85.
- [36] 蔡新华. 超高韧性水泥基复合材料与锈蚀钢筋粘结性能试验研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(3): 228—234.
- [37] 刘问. 等幅疲劳荷载作用下超高韧性水泥基复合材料弯曲疲劳寿命试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(1): 119—127.
- [38] SUTHIWARAPIRAK P, MATSUMOTO T, KANDA T. Multiple cracking and fiber bridging characteristics of engineered cementitious composites under fatigue flexure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(5): 433—443.
- [39] ZHANG J, LI V C. Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system[J]. Cement & Concrete Research, 2002, 32(3): 415—423.

收稿日期: 2020—04—16

(上接第 53 页)

青混合料的抗水损害能力最优。

参考文献:

- [1] 黄彬, 马丽萍, 许文娟. 改性沥青的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(1): 137—141.
- [2] 王波. PCL 基环保型增塑剂的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [3] 孔志峰. 增塑剂对路用沥青性能影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [4] 黄春蕾, 杨旗. 低密度聚乙烯(LDPE)对沥青黏弹性能影响[J]. 公路工程, 2014, 39(6): 326—329.
- [5] 许洪彬. 废胶粉及再生低密度聚乙烯复合改性沥青性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [6] 李小燕, 李豪, 关永胜, 等. 中国、美国和欧洲沥青评价指标及试验方法比较研究[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 248—253.
- [7] 孙培, 韩森, 高榕, 等. 适用于 SBS 改性沥青针入度的测试方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2130—2137.
- [8] 高晓伟, 颜薇, 宋琤, 等. 温度与移动荷载作用下特重交通 RCC 基层沥青路面结构响应分析[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 28—33.
- [9] 申万青. 增塑剂 DOA 改性沥青及混合料高低温性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [10] 薛爱新, 王洁光, 王海军, 等. 高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 59—63.
- [11] 徐明非, 郭平, 李俊. 蒙脱土/SBS 复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(1): 4—7.

收稿日期: 2020—05—08