

废旧陶瓷内养护混凝土性能研究分析

邢 键¹, 吴为民¹, 荀爱庚², 徐宇棋³, 闫 畅⁴

(1. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000; 2. 江苏宿迁交通工程建设有限公司, 江苏 宿迁 223800; 3. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211800; 4. 长大桥梁安全长寿与健康运维全国重点实验室, 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘 要: 针对空心板铰缝混凝土收缩易开裂的问题, 探索利用废弃陶瓷作为内养护材料, 以提升其抗裂性能, 实现废弃物资源利用。为此, 以不同替代率将废弃陶瓷粗骨料替代天然花岗岩粗骨料, 制备自密实混凝土试件, 并测试其工作性、抗压强度、干燥收缩及新旧混凝土黏结劈拉强度。研究表明, 当废弃陶瓷替代率不大于20%时, 混凝土工作性能满足规范要求, 28 d抗压强度因内养护作用而略高于普通自密实混凝土, 干燥收缩显著降低, 且新旧混凝土界面劈拉强度提升22.5%; 当废弃陶瓷替代率超过30%后, 因骨料表面釉质影响界面黏结, 导致混凝土力学性能下降。综合结构性能、环保与经济性要求, 20%废弃陶瓷替代率为最优方案, 可在保证强度的同时有效抑制混凝土收缩, 适用于空心板铰缝工程。

关键词: 铰缝; 收缩; 废弃陶瓷; 混凝土内养护

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0115-05

Research and Analysis on Performance of Concrete Curing in Waste Ceramics

XING Jian¹, WU Weimin¹, XUN Aigeng², XU Yuqi³, YAN Chang⁴

(1. CCCC SHEC Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 2. Jiangsu Suqian Transportation Engineering Construction Co., Ltd., Suqian 223800, China; 3. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211800, China; 4. State Key Laboratory of Safety, Durability and Health Operation of Long Span Bridges, JSTI Group Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: In response to the issue of shrinkage-induced cracking in concrete of hollow slab hinge joints, the use of waste ceramics as an internal curing material is explored to enhance its crack resistance and realize the utilization of waste resources. Therefore, the self-compacted concrete specimens are prepared by replacing natural granite coarse aggregates with waste ceramic coarse aggregates at different substitution rates. And the workability, compressive strength, drying shrinkage and bond splitting tensile strength between old and new concrete are tested. The results show that when the replacement rate of waste ceramics does not exceed 20%, the working performance of concrete meets the specification requirements. Due to the internal curing effect, the 28-day compressive strength is slightly higher than that of ordinary self-compacting concrete, the drying shrinkage is significantly reduced, and the split tensile strength at the interface between new and old concrete increases by 22.5%. When the replacement rate of waste ceramics exceeds 30%, the interfacial bonding is affected by the glaze on the surface of the aggregates, resulting in a decline in the mechanical properties of the concrete. By synthesizing the structural performance, environmental protection and economic requirements, a 20% replacement rate of waste ceramics is the optimal scheme, which can effectively suppress the shrinkage of concrete while ensuring its strength and is suitable for hollow slab hinge joint engineering.

Keywords: hinge joint; shrinkage; waste ceramics; internal curing of concrete

0 引 言

空心板铰缝在桥梁结构中常被视为仅传递剪力的构件, 然而其实际受力状态远较理论假设复杂。除承受切向剪力外, 铰缝混凝土还受到因温度变化和材料收缩引起的法向力, 以及温度梯度导致的弯矩作用, 这些因素共同导致铰缝区域易发生开裂^[1]。

收稿日期: 2026-01-04

基金项目: 宿迁市交通运输科技与成果转化项目(2024Y06)

作者简介: 邢键(1984—), 男, 本科, 高级工程师, 从事交通工程技术工作。

通信作者: 闫畅(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁养护技术工作。电子邮箱: 544096576@qq.com

裂缝一旦形成,水分、氯离子等有害物质易于侵入,将加速钢筋锈蚀与混凝土劣化,严重影响桥梁的耐久性和使用寿命^[2]。研究表明,铰缝混凝土在未受外部荷载时即出现开裂,其主要原因在于混凝土自身的收缩变形及因胶凝材料水化产生的温度应力^[3-4]。因此,如何有效控制铰缝混凝土的收缩,提升其抗裂性能,已成为工程实践中的重要课题。

目前针对铰缝的优化主要集中于构造设计和材料改良两个方面。构造优化包括铰缝内部配筋调整、横向预应力施加^[5]、整体选型设计^[6]及开裂后的修复材料选用^[7]等;材料优化则致力于通过新型混凝土材料的研发,从根本上提升铰缝的服役性能。本文聚焦于材料层面,结合“绿色环保”、“废物利用”的理念,探讨利用工业废弃物——废旧陶瓷作为混凝土内养护材料的可行性,旨在开发一种具有低收缩、高抗裂特性的铰缝专用混凝土。

中国作为陶瓷生产和出口大国,每年产生大量陶瓷废料,仅广东佛山地区年废料量即超过400万t,全国总量可达千万吨级别^[8]。这些废料若得不到妥善处理,将造成严重的环境和土地资源压力。陶瓷废料通常具有较高的物理强度,其主要矿物成分为石英和莫来石,化学组成以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主,展现出作为混凝土骨料或辅助胶凝材料的潜力^[9]。值得注意的是,陶瓷废料的吸水率显著高于天然骨料(可达3%~13%)^[10],符合ASTM对内养护材料吸水率大于5%的要求,因而具备用作混凝土内养护材料的独特优势。

国内外学者已围绕陶瓷废料在混凝土中的应用开展了系列研究。Suzuki等^[11]发现,以多孔陶瓷骨料替代部分粗骨料可显著降低高性能混凝土的自收缩,替代率为40%时甚至实现了“零收缩”,且其后期强度随着替代率的增加而提升。Xu等^[12]的研究进一步表明,陶瓷骨料能有效抑制混凝土早期自收缩,降低幅度最高可达81.8%,并在替代率适当时可提升混凝土抗压、劈裂抗拉强度。Etxeberria等^[13]采用细陶瓷颗粒替代细骨料,改善了浆体-骨料界面结构,提升了混凝土的抗渗性和抗压强度,同时降低了混凝土总收缩。Mohamed等^[14]和王佳骅等^[15]的研究也证实,陶瓷骨料的引入有助于改善混凝土的工作性、降低收缩,并对混凝土长期强度和耐久性产生积极影响。

综上所述,陶瓷废料作为内养护材料在抑制混凝土收缩、提升混凝土后期性能方面表现出显著潜

力,尤其适用于对抗裂性要求较高的铰缝等结构部位。本文在上述研究基础上,系统探讨了不同陶瓷骨料替代率对自密实混凝土工作性、力学性能及收缩行为的影响,以确定其应用于铰缝混凝土的最佳配合比,为实现陶瓷废料的资源化利用及铰缝工程材料的绿色升级提供试验依据和理论支持。

1 试验概况

1.1 原材料及性能表征

铰缝试验混凝土的强度设计标准为C50,除了破碎的陶瓷颗粒外,其余的原料有:PO42.5水泥熟料、I级粉煤灰、聚羧酸系高性能减水剂、连续级配花岗岩粗骨料、细度模数为2.8的Ⅱ区天然河砂细骨料等。混凝土的自密实性能由2个主要特性实现:高流动性和高抗离析性。其中,高流动性通过使用更多的高效减水剂等来保持。高效减水剂释放的游离水过多时易导致混凝土发生离析,此时需要增加微集料的含量,通过优化粒度分布和改善颗粒堆积来增加混凝土的黏结性。在本试验中,选用I级粉煤灰作为半惰性火山灰补充胶凝材料。结合《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)(以下简称《技术规程》)和《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ/T 55—2011),采用绝对体积法设计自密实混凝土的配合比。

试验使用的废弃陶瓷砖来源于瓷砖加工厂的墙砖生产废料。根据《陶瓷砖试验方法》(GB/T 3810.3),测得试验用废弃陶瓷砖的吸水率为4.4%,依照《陶瓷砖》(GB/T 4100—2015)对瓷砖的分类方法,此废弃瓷砖为细炻质砖(吸水率为3%~6%)。使用颚式破碎机破碎瓷砖后得到陶瓷颗粒。根据《技术规程》,用于自密实混凝土的粗骨料最大公称粒径不宜大于20 mm,故选用孔径规格为19、16、13.2、9.5、4.75、2.36 mm的方孔筛对陶瓷颗粒进行筛分以获得级配曲线。

破碎后的陶瓷颗粒和对应的级配曲线见图1。

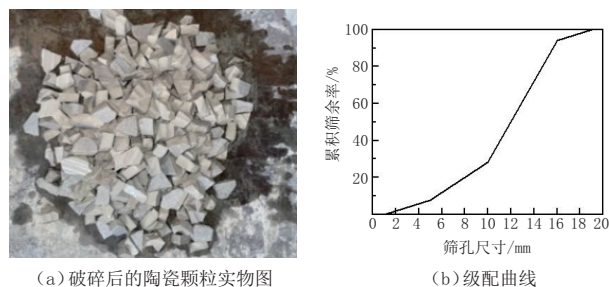


图1 破碎后的陶瓷颗粒和对应的级配曲线

同时,参考《水工混凝土试验规程》(SL352—2006)提供的吸水率、表观密度、松散堆积密度和压碎指标测量方法,获得废弃陶瓷骨料和天然骨料的性能指标,见表1。

表1 原料粗骨料的性能指标

粗骨料 种类	吸水率/ %	表观密度/ (kg·m ⁻³)	松散堆积密度/ (kg·m ⁻³)	压碎指标/ %
废弃陶瓷	6.4	2 530	1 320	15.3
天然花岗岩	1.1	2 810	1 530	7.7

可以看出,与未破碎时相比,破碎后的废弃陶瓷颗粒吸水率提升了约2%,这可以归因为材料的比表面效益和破碎过程造成的颗粒表面缺陷。此外,废弃陶瓷骨料的吸水率显著大于天然花岗岩,满足ASTM C1761/C1761M中“用作内养护的集料吸水率应大于5%”的规定。废弃陶瓷粗骨料的压碎指标在一定程度上反映了骨料的抗压破碎能力,《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)中规定:压碎指标小于20%的粗骨料属于Ⅱ类,适用于强度等级C30~C60的混凝土;用于工程结构水泥混凝土的骨料,其表观密度应大于2 500 kg/m³,松散堆积密度应大于1 350 kg/m³。虽然废弃陶瓷骨料的压碎指标和表观密度满足作为铰缝C50混凝土粗骨料的要求,但松散堆积密度这一指标并不满足。考虑到陶瓷骨料将以内掺方式掺入混凝土内,经试配,当废弃陶瓷骨料对于天然花岗岩粗骨料的替代率小于40%时,粗骨料堆积密度将大于1 440 kg/m³,满足上述规范要求。此外,由于低密度有利于降低结构物自重和增强结构抗震能力,这对铰缝处混凝土而言相当有利,因此应充分考虑废弃陶瓷骨料的实际性能。

1.2 配合比设计

为了探究实现自密实后对比普通混凝土的性能变化,以及陶瓷颗粒对自密实混凝土性能的影响,设置了C50普通混凝土(C0)、C50自密实混凝土(S0)和替代率分别为10%、20%、30%、40%的C50自密实陶瓷废料混凝土(S10、S20、S30、S40)这3个典型试验组进行预试验。对于S组,将陶瓷骨料在拌和前浸水24 h,待达到水饱和状态后用湿润毛巾去除颗粒表面多余水分。

试验混凝土配合比设计见表2。

2 试验流程与结果分析

2.1 自密实混凝土工作性

根据《技术规程》,结合空心板铰缝区域实际的

表2 试验混凝土配合比设计

单位:kg/m³

样品 组别	水泥	粉煤灰	水	石	陶瓷 颗粒	砂	减水剂
C0	460	0	147.2	1 117.0	0	714	4.28
S0	364	156	166.4	714.0	0	822	6.30
S10	364	156	166.4	642.6	71.4	822	6.30
S20	364	156	166.4	571.2	142.8	822	6.30
S30	364	156	166.4	499.8	214.2	822	6.30
S40	364	156	166.4	428.4	285.6	822	6.30

配筋工况(钢筋净间距大于100 mm),以填充性、间隙通过性为必控指标,抗离析性为选择性指标(见表3),对自密实混凝土组的新拌混凝土坍落度和J环扩展度开展测量,结果见图2。

表3 混凝土拌和物自密实性能指标

自密实性能	性能指标	性能等级	《技术规程》 中技术要求
填充性	坍落度/mm	SF1	550~650
		SF2	660~755
		SF3	760~850
间隙通过性、 抗离析性	坍落度与J环扩展 度差值/mm	PA1 PA2	25~50 0~25

坍落度越大,说明自密实混凝土的流动性和填充性就越强。此时混凝土具有良好的和易性,可以很容易地流过和填充有限空间及狭窄间隙而不需要振实。J环试验通过评估混凝土通过钢筋的限制程度来表明混凝土的自密实性能。如果坍落度与J环扩展度的差值很小,则表明混凝土具有良好的通过能力,可以很容易地流过钢筋而不会堵塞。

尽管本试验采用了预润湿的方法内掺陶瓷骨料以避免拌和过程中吸水,仍可观察到S组的坍落度和扩展度差值比对照组S0有略微下降。由图2可见,随着陶瓷骨料替代率的增加,混凝土坍落度近似呈线性递减,由S0组的688 mm递减至S40组的610 mm。这是由于陶瓷骨料的级配与花岗岩粗骨料间存在差距,表面积的差异增大了完全包覆骨料所需的水泥浆含量;随着陶瓷骨料替代率的提升,由于陶瓷骨料表面包覆砂浆起到的骨料颗粒间润滑作用,使骨料间摩擦降低,钢筋的通过性增加,坍落度与扩展度差值也呈明显的递减趋势。根据表3,所有组别的坍落度与扩展度差值均满足《技术规程》规定范围。

2.2 抗压强度试验

参照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50082—2024),将新拌混凝土浇筑于尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的试模中,拆模后将所得立方体试

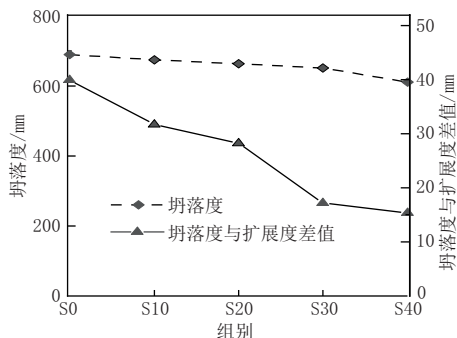


图2 自密实混凝土工作性能试验数据

块标准养护至规定龄期进行抗压强度试验,试验时的加载速度为0.5 MPa/s,结果见图3。

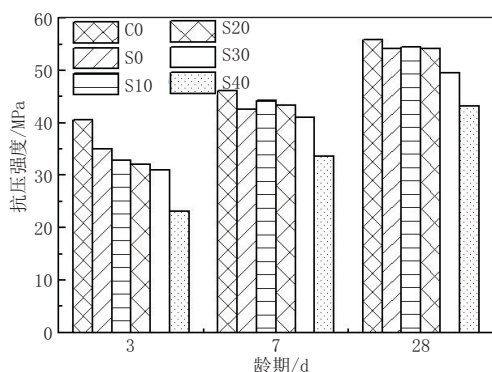


图3 自密实混凝土抗压强度试验数据

由图3可知,尽管使用了粉煤灰作为替代胶凝材料,使S0组的早期强度低于C0组,但C0组和S0组的28 d抗压强度均大于50 MPa,表明了自密实混凝土配合比设计的合理性。陶瓷骨料强度要比天然花岗岩骨料低,因此掺入陶瓷骨料的混凝土抗压强度在早期(3 d)显著低于对照组(S0组);观察到7 d龄期时,S10、S20组的抗压强度相较于S0组有所提升,原因是此阶段水泥水化会消耗大量的水,导致混凝土内部湿度下降,而陶瓷骨料中储存的内部养护水开始释放,能提供水泥水化所需的内部养护水。在养护后期(28 d),水泥水化程度的差距逐渐缩小,宏观表现为陶瓷废料混凝土与对照组的抗压强度差距缩小。由于陶瓷骨料更大的比表面为骨料-水泥结合提供了更多界面,S10、S20组的抗压强度甚至略微高于S0组。然而,观察到S30、S40组的抗压强度有明显下降,分别为48.7、42.2 MPa,不能满足C50混凝土强度设计要求。原因可能是陶瓷骨料上残余的釉质阻碍了骨料与水泥净浆之间的黏结,并且在混凝土内形成脆弱、连续的骨料-水泥界面,在压力作用下产生应力集中,因而降低了混凝土抗压强度。尤其是当陶瓷骨料替代率提升至40%时,这一负面效果更为明显。

2.3 混凝土收缩试验

参照《普通混凝土力学性能试验方法》,将新拌混凝土浇筑于尺寸为515 mm×100 mm×100 mm的试模中,24 h后拆模并将所得棱柱体试块用于干燥收缩试验,试块两端埋有不锈钢金属测头协助测量,试验结果见图4。

在相同强度等级下,对比普通混凝土,自密实混凝土的粗骨料含量低、胶凝材料含量大,因此通常具有更大的收缩值。适量的粉煤灰内掺对自密实混凝土的收缩抑制表现为降低水泥浆的净含量、优化浆体孔隙率和孔隙结构等。本文的自密实混凝土使用粉煤灰替代34%的水泥熟料。由图4中S0组、C0组的收缩试验数据(分别为513、466 $\mu\text{m}/\text{m}$)可知,尽管存在粉煤灰对收缩的抑制作用,自密实混凝土在长期干燥收缩试验中的收缩值仍比相同抗压强度等级的普通混凝土高约10%。观察到不同陶瓷骨料替代率下,混凝土的收缩均集中在养护早期,1 d的收缩值普遍约占28 d收缩值的40%。内养护效率受内养护材料分布影响,随着陶瓷骨料替代率的增加,陶瓷废料混凝土展现出了全龄期内收缩抑制,在28 d龄期时,S10、S20、S30和S40组的干燥收缩值分别较S0组降低了21.4%、28.3%、37.0%和45.8%。

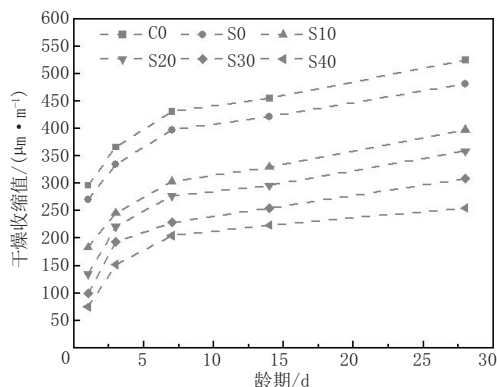


图4 自密实混凝土干燥收缩试验结果

2.4 劈裂抗拉强度

参考《普通混凝土力学性能试验方法》,通过劈裂抗拉强度试验(见图5)来检验新旧混凝土的黏结强度。

尽管与工程实际所要求的直接抗拉强度有一定差距,但是有研究表明,通过劈裂抗拉试验获得的劈裂抗拉强度与通过直接拉拔试验获得的拉拔强度存在着比例关系,因此可采用劈裂抗拉强度来反映新旧混凝土的黏结强度。具体试验流程为:对养护28 d的C50混凝土进行劈裂抗拉强度试验,然后将被劈裂试块的劈裂面作为黏结面,再分别浇筑C50混凝土

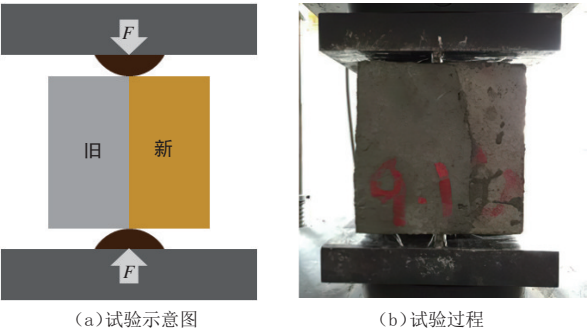


图5 新旧混凝土劈裂抗拉强度试验

土和陶瓷废料混凝土并标准养护3、28 d。为了探究收缩对旧混凝土黏结性能的影响,对这2种混凝土再进行劈裂抗拉试验,加载速度为0.04 MPa/s,结果见图6。

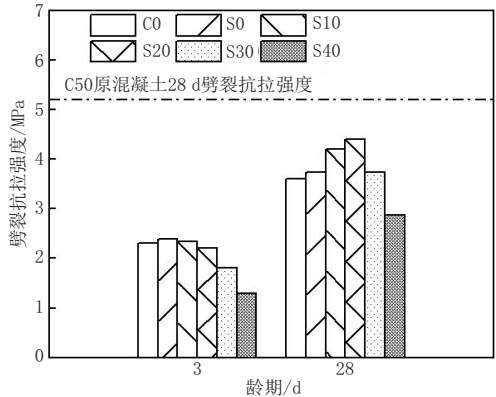


图6 新旧混凝土劈裂抗拉强度试验结果

普遍认为,由于混凝土的亲水性,浇筑新混凝土时会在旧混凝土表面形成水膜,界面处的局部水灰比要高于设计值,使得新旧混凝土界面层疏松多孔,导致界面黏结强度低于原生混凝土^[16]。由图6可知,S0组的劈拉强度优于C0组,这是由于自密实混凝土配合比中引入了更多高性能减水剂,释放的游离水实现了对旧混凝土表面更好的浸润效果,增强了界面的化学作用力和机械咬合作用,从而提高了其界面黏结强度。对比3 d龄期,28 d龄期下S10、S20组的劈拉强度出现了显著增长,相较于对照组C0而言分别提升了16.7%和22.5%。这是因为旧混凝土存在收缩差,在黏结面层中会有微裂缝产生而减少了黏结强度,而在合适的陶瓷骨料替代率下,其内养护作用会降低混凝土的收缩值,从而抑制黏结面处的微裂缝。与抗压强度结果类似,S30、S40组相对低的劈拉强度可能源于陶瓷骨料釉面对浆体-骨料界面连续性和完整性的削减。

3 结 语

(1)废弃陶瓷骨料替代天然骨料后,可以保持一

定的工作性能,当替代率不大于30%时,自密实混凝土坍落度与扩展度差值均符合《技术规程》要求,适用于钢筋密集的铰缝区域。

(2)当陶瓷骨料替代率不大于20%时,自密实陶瓷废料混凝土28 d抗压强度因内养护促进水化而略高于普通自密实混凝土,满足C50要求;但当陶瓷骨料替代率不小于30%时,因骨料表面釉质会削弱界面黏结,致使C50自密实陶瓷废料混凝土的抗压强度显著下降,不满足设计要求。

(3)废弃陶瓷粗骨料的高吸水特性可有效释放内部水分,抑制混凝土早期收缩。替代率每增加10%,混凝土28 d干燥收缩平均降低约10%,可以显著缓解铰缝混凝土因收缩导致的裂缝问题。

(4)对陶瓷骨料替代率为20%的S20组而言,其新旧界面的劈拉强度较普通混凝土提升22.5%,归因于收缩减少了界面微裂缝;但替代率达30%以上的自密实陶瓷废料混凝土会因陶瓷骨料釉面对界面完整性的削弱而导致强度下降。

(5)考虑环保与经济优势,以20%废弃陶瓷骨料替代天然粗骨料为最优方案。该方案在维持混凝土强度、提升抗裂性的同时,可降低天然骨料消耗,实现陶瓷废料资源化利用,符合绿色建造目标。

参考文献:

[1] XIN L T, A.AS, DAGMAR S. Estimation of bond strengths and design parameters for precast concrete-UHPC shear key interface in box beam bridge[J].Engineering Structures, 2022, 250: 113397.

[2] 康省楨. 预应力混凝土空心板梁桥破坏机理试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.

[3] 韩根生, 张娟秀, 叶见曙. 空心板自密实微膨胀混凝土铰缝抗剪性能研究[J]. 公路, 2014, 59(3): 53-57.

[4] 侯天宇. 在役公路桥梁性能演化与可靠性评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

[5] YUAN J, GRAYBEAL B A, ZMETRA K. Adjacent box beam connections: Performance and optimization[R]. United States: Federal Highway Administration, Office of Infrastructure, 2018.

[6] HUSSEIN H H, SARGAND M S, RIKABI A T F, et al. Experimental validation of optimized ultra-high-performance concrete shear key shape for precast pre-stressed adjacent box girder bridges[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 178-190.

[7] CHENG F, WANG T, LIU D, et al. Strengthen method of the shear keys in adjacent concrete box-beam bridges using high performance grouting material[C]//Proceedings of the 4th 2016 International Conference on Material Science and Engineering (ICMSE 2016), Guangzhou: Atlantis Press, 2016: 239-245.

[8] 林珊. 浅析陶瓷废料资源化综合利用的研究现状[J]. 佛山陶瓷, 2018, 28(7): 4-6; 16.

[9] LI L, LIU W, YOU Q, et al. Waste ceramic powder as a pozzolanic

(下转第129页)