文章编号:1674-2974(2024)11-0094-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024111

钢筋陶瓷混凝土黏结性能及梁受弯性能实验研究

许颖†,金淦,郭家驹
[哈尔滨工业大学(深圳)广东省土木工程智能韧性结构重点实验室,广东 深圳 518055]

摘 要:为了将陶瓷混凝土应用于工程结构构件中,通过中心拉拔试验,研究了钢筋与陶瓷混凝土黏结性能,并给出了陶瓷混凝土黏结滑移本构关系及极限黏结强度预测公式;通过四点抗弯试验研究了钢筋陶瓷混凝土梁的受弯性能,从承载力、挠度、纵筋应变、平均裂缝间距及最大裂缝宽度等方面研究了其受弯性能.结果表明陶瓷混凝土黏结性能弱于普通混凝土,极限黏结强度与普通混凝土接近,下降段速率大于普通混凝土,残余黏结强度小于普通混凝土;钢筋陶瓷混凝土梁受弯过程和承载力与普通混凝土梁接近,但平均裂缝间距大于普通混凝土,最大裂缝宽度的计算仍符合我国混凝土设计规范.

关键词:废弃陶瓷;再生陶瓷混凝土;黏结性能;四点抗弯试验;受弯性能
中图分类号:TU375 **文献标志码**:A

Experimental Study on Bond Behavior Between Steel Bars and Ceramic Concrete and Flexural Behavior of Ceramic Concrete Beam

XU Ying†, JIN Gan, GUO Jiaju
(Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To apply ceramic concrete to engineering structural components, the bond behavior of steel bars and ceramic concrete was studied through a central pull-out test, and the bond-slip constitutive model of ceramic concrete and the prediction formula of ultimate bond strength were given. The flexural behavior of reinforced ceramic concrete beams was studied through four-point bending test, and the flexural performance was studied from the aspects of bearing capacity, deflection, longitudinal bar strain, average crack spacing and maximum crack width. The results show that the bond behavior of ceramic concrete is weaker than that of ordinary concrete, the ultimate bond strength is close to that of ordinary concrete, the rate of descent is greater than that of ordinary concrete, and the residual bond strength is lower than that of ordinary concrete. The bending process and bearing capacity of reinforced ceramic concrete beams are similar to those of ordinary concrete beams, but the average crack spacing is

* **收稿日期**:2023-12-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078173),National Natural Science Foundation of China(52078173);广东省土木工程智能韧性结构重点实验室资助项目(2023B1212010004),Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering (2023B1212010004);深圳市高等院校稳定支持项目(GXWD20231129175636001),Shenzhen Higher Education Stable Support Project (GXWD20231129175636001);广东省自然科学基金资助项目(2024A1515011980),Guangdong Provincial Natural Science Foundation General Fund Project(2024A1515011980)
作者简介:许颖(1977—),女,浙江宁波人,哈尔滨工业大学(深圳)副教授,博士
† 通信联系人,E-mail:cexyx@hotmail.com

greater than that of ordinary concrete, and the calculation of the maximum crack width still agrees with Chinese concrete design code.

Key words: ceramic waste; recycled ceramic concrete; bond behavior; four-point bending test; flexural behavior

混凝土作为土木工程最常用的材料之一，具有原料来源广泛、施工方便、成本低等优点，但由于建筑工业的发展和混凝土的广泛应用，也产生了大量对混凝土原料，包括粗细骨料的需求. 我国作为全球规模最大的陶瓷生产与消费国，每年也产生大量陶瓷废料，但针对陶瓷废料的处理方法则多为填埋、露天堆积. 陶瓷属于不可降解材料，这种废料处理方法低效，还会导致空气中可吸入颗粒的比例增加. 水资源与土地资源也会被堆积的废料间接影响，这与可持续发展的理念背道相驰，因此如何对陶瓷废料合理再利用，已经成为一个亟待解决的问题[1]. 因此学术界提出陶瓷混凝土的概念，将陶瓷废料作为骨料应用于混凝土，既能满足建筑工业对混凝土骨料的巨大需求，降低建设成本，也可以解决陶瓷废料的回收利用难题，一举两得，同时满足工业与环保的要求，符合国家可持续发展的理念.

近年来，针对废弃陶瓷混凝土的研究主要集中在其本身性能上. 力学性能方面，Peter等[2]指出再生陶瓷骨料对天然骨料的替代可以满足和易性要求，并给出了50%细骨料替代率与75%粗骨料替代率可以得到较好的混凝土强度. Rajprasad等[3]通过试验也指出骨料替代率提高，混凝土坍落度与抗压强度均提高. Zegardło等[4]尝试使用陶瓷废料配制超高强度混凝土，发现使用再生陶瓷骨料的混凝土相对一般超高强度混凝土有24.74%的抗压强度提升，并指出再生陶瓷骨料高强度、表面粗糙度和孔隙显著提高了混凝土界面过渡区等强度，同样地，Rashid等[5]认为陶瓷骨料较为粗糙的表面提高了界面结合强度，同时骨料较高的孔隙率使水化产物可以渗透进孔隙以提供化学锚固. 除了力学性能，李慧玲[6]模拟了在酸雨溶液侵蚀条件下废瓷砖混凝土的中性化性能，发现瓷砖混凝土相对于天然碎石混凝土在暴露条件下中性化深度最小，质量变化率较小，抗侵蚀能力更好. 而抵抗干湿循环性能上，乔宏霞等[7]则以相对动弹模量为抵抗硫酸盐侵蚀的指标，指出陶瓷粗骨料降低了混凝土试件抵抗硫酸盐干湿循环的能力. 对于陶瓷混凝土应用于结构构件的研究相对较少，Samadi等[8]分别对不同替代率的陶瓷粗骨料、细骨料及陶瓷粉集料浇筑成的钢筋混凝土梁受弯性能进行了试验，结果表明陶瓷骨料浇筑的钢筋混凝土梁受弯性能和整体性能与普通混凝土梁接近. Kavipriya等[9]对使用了陶瓷粗骨料的钢筋地聚合物混凝土梁抗弯性能进行了研究，结果表明陶瓷粗骨料的加入对梁的抗弯强度有最高1.09%的提升. 可以看到，目前对陶瓷混凝土的力学性能、微观特性及耐久性有着较为全面的研究，陶瓷混凝土表现出较好的力学性能，相对致密的微观结构，在替代天然混凝土的方向表现出较多的可能性与较好的前景. 但为了将废弃陶瓷混凝土更广泛地应用于工程结构中，针对陶瓷混凝土与钢筋的黏结性能以及将陶瓷混凝土应用于结构构件如梁、柱的相关研究还比较少，对于普通混凝土与钢筋相互作用的相关理论能否应用于再生陶瓷混凝土仍需要进一步的研究.

鉴于此，本文在已有研究基础上，通过中心拉拔试验对陶瓷混凝土与钢筋黏结性能进行了试验研究，对比了陶瓷混凝土黏结性能与普通混凝土的区别，并给出了陶瓷混凝土与钢筋黏结滑移本构关系和极限黏结强度计算公式；通过四点抗弯试验对比了钢筋陶瓷混凝土梁与普通钢筋混凝土梁受弯性能的区别，从承载力、挠度、裂缝间距及宽度等多方面研究了陶瓷混凝土梁的受弯性能.

1　原材料与试验方案

1.1　试验材料性能及混凝土配合比

试验选用惠州市某卫生陶瓷厂家的废弃卫生洁具来制备再生陶瓷细骨料，试验中陶瓷骨料作为细骨料代替天然砂，粗骨料仍然选用天然粗骨料. 将废弃陶瓷材料用水洗净后敲碎，室外风干至陶瓷表面基本干燥，将陶瓷材料放入颚式破碎机中进行破碎. 使用4.75 mm方孔筛对破碎陶瓷进行一次筛分，确保陶瓷骨料粒径小于4.75 mm，筛余的陶瓷骨料放入破

碎机中二次破碎以提高利用率,试验测得陶瓷细骨料细度模数为3.65,颗粒大小处于粗砂范围,比天然河砂粗.

对试验中不同直径的钢筋各取一根分别进行拉拔试验检验其性能指标,试验测得钢筋屈服强度为455 MPa,极限强度为608 MPa,试验所用钢筋材料性能符合标定性能指标.

试验使用其他原料包括水泥、水,水泥选用海螺牌42.5R型号水泥,水即实验室自来水.浇筑混凝土配合比为水泥∶水∶粗骨料∶细骨料=1.00∶0.50∶2.69∶1.79,该配比满足流动性及凝结时间要求,且不存在沉淀、离析、泌水现象.通过改变细骨料中陶瓷骨料的质量占比,分别配置替代率为0%、50%、70%和100%的陶瓷混凝土.

1.2 黏结性能试验方案

采用中心拉拔试验的方法研究钢筋与陶瓷混凝土的黏结性能,参考徐有邻等[10-11]有关钢筋黏结性能研究中采用的黏结性能试验方案,本文试验使用边长为150 mm的立方体混凝土试件,中心穿过不同直径的钢筋.因为研究中将钢筋锚固段的黏结应力近似为均匀分布,所以钢筋与混凝土锚固长度不能过长,本研究将锚固长度定为4d(d为钢筋直径),加载端混凝土设置了一定长度的非锚固区域,使用PVC管将钢筋与混凝土隔开,中间用泡沫胶填充空隙.钢筋在自由端伸出20 mm便于安装位移计,混凝土内用螺旋箍筋约束,箍筋直径6 mm,箍距40 mm,螺旋箍筋外径为110 mm,选用150 mm的可拆卸钢模具对混凝土进行浇筑,试件如图1所示.

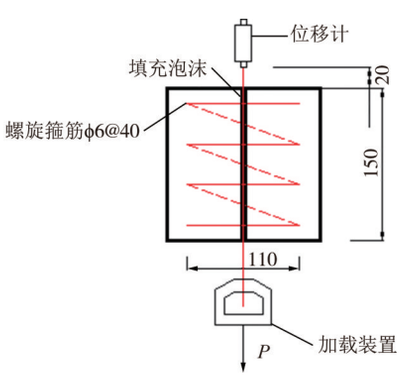


图1 试件示意图(单位:mm)

Fig.1 Sample diagram(unit:mm)

浇筑混凝土时,在模具底部与侧壁涂好润滑油,搅拌前用砂浆润锅,按规范方法搅拌混合物,振捣抹平,使用塑料薄膜覆盖在模具表面减少水分蒸发,静置2 d后拆模,拆模后使用毛毡布覆盖并频繁浇水以养护混凝土.试件设计列表如表1所示,对于不同替代率的陶瓷混凝土试件,为了测量其力学性能,每组浇筑6个尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体抗压试件.

表1 拉拔试件编号

Tab.1 Drawing test piece number

试件编号	替代率/%	钢筋直径/mm	是否加环箍	试件个数
N-0%-12		12	是	3
N-0%-14	0	14	是	3
N-0%-16		16	是	3
C-50%-12		12	是	3
C-50%-14	50	14	是	3
C-50%-16		16	是	3
C-70%-12		12	是	3
C-70%-14	70	14	是	3
C-70%-16		16	是	3
C-100%-12		12	是	3
C-100%-14	100	14	是	3
C-100%-16		16	是	3
总数				42

注:试件编号1-2-3,1为混凝土种类,其中"N"表示普通混凝土,"C"表示陶瓷混凝土;2为再生陶瓷细骨料替代率;3为钢筋直径,mm.

试件养护达到28 d后,使用三思泰捷10 t万能试验机进行加载,试验使用定制的吊篮放置混凝土试件,钢筋穿过吊篮固定于下方夹具,将位移计安装于钢筋自由端用以测量加载过程中钢筋自由端的位移,加载装置如图2所示.试验加载速率设置为0.75 mm/min,通过采集仪测量实时的力与自由端位移,采集频率为60 Hz.

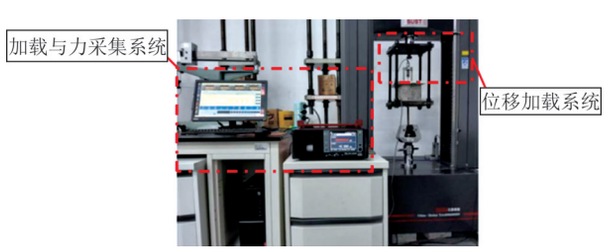


图2 加载装置

Fig.2 Loading device

1.3 钢筋陶瓷混凝土梁抗弯性能试验方案

试验使用混凝土原材料及配合比见1.1节,纵筋为HRB400强度等级的10 mm、12 mm尺寸钢筋,箍筋使用直径10 mm的HRB400钢筋,性能指标同前所述.

设置配筋相同但替代率不同的钢筋再生陶瓷混凝土梁2根以及对照组普通钢筋混凝土梁1根.钢筋陶瓷混凝土梁采用与普通混凝土梁相同的设计方法.为了测试再生陶瓷混凝土梁的受弯性能,将试验中的梁设计为适筋梁,且均为受弯破坏.首先根据普通钢筋混凝土梁正截面设计方法对梁截面及配筋进行设计,截面设计参数见表2.然后根据50%与100%替代率的再生陶瓷混凝土力学性能对梁的最小配筋率与界限配筋率进行验证,计算得到当前配筋率满足最小配筋率与界限配筋率的要求,判断3根梁的破坏模式均为适筋破坏.

表2　梁截面及配筋参数

Tab.2　Beam section and reinforcement parameters

替代率/%	梁截面(mm×mm)	纵筋	架立筋	箍筋	配筋率/%
0	150×250	3Φ12	2Φ10	Φ10@100/150	1.009 2
50	150×250	3Φ12	2Φ10	Φ10@100/150	1.009 2
100	150×250	3Φ12	2Φ10	Φ10@100/150	1.009 2

3根梁试件均设计为净跨1 800 mm、总长2 400 mm的尺寸,保护层厚度为20 mm.梁试件跨中600 mm区域为纯弯区,两侧各有600 mm弯剪区,在弯剪区段箍筋加密,纯弯区段箍筋不加密.

根据设计方案浇筑并养护陶瓷混凝土梁,试验中分别浇筑6个100 mm×100 mm×100 mm尺寸的普通混凝土和不同替代率再生陶瓷混凝土立方体抗压强度试块,和梁在相同养护条件下进行养护,用以测量梁在加载时混凝土的立方体抗压强度,养护完成后测量0%、50%、100%替代率的混凝土试块立方体抗压强度,3个测值中最大最小值与中间值差值均不超过中间值的15%,故可取算数平均值作为强度值,分别为47.827 MPa、52.951 MPa和57.844 MPa,因为采用的试件为非标准试件,考虑尺寸换算系数0.95后得到0%、50%、100%替代率的混凝土试块立方体抗压强度分别为45.436 MPa、50.303 MPa、54.952 MPa.

梁的加载采用四点弯曲试验方法,加载方式如图3所示,梁底面安装位移计测量加载过程中的梁跨中挠度.使用邦威100 t丝杠式电液伺服加载系统加载,加载采用分级加载的方式,加载过程中每级加载10 kN,以位移控制加载速度,直到试件破坏.每级加载中观察梁受弯情况,在梁上标记裂缝并记录裂缝宽度.

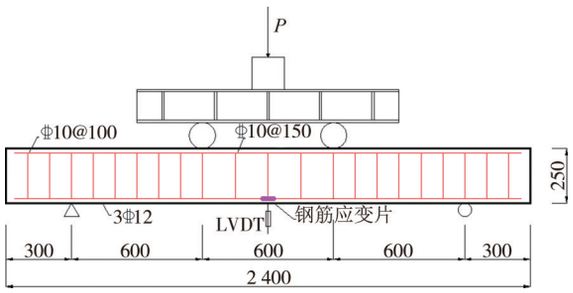


图3　梁加载方案(单位:mm)

Fig.3　Beam loading scheme(unit:mm)

加载过程分别记录荷载、挠度、钢筋应变等数据,并使用裂缝测宽仪测量梁表面的裂缝发展,将梁一侧刷白并绘制50 mm×50 mm正方形网格线,在裂缝产生时刻按顺序在裂缝旁标记编号和对应的荷载,用马克笔绘制裂缝走势,并及时拍照记录.

2　黏结性能试验结果与分析

2.1　破坏模式

试验试件的破坏模式共有两种,如图4所示.图4(a)为拔出破坏:随着荷载的增加,钢筋被缓缓拔出,到达峰值时,肋间混凝土剪碎破坏,随后荷载缓缓下降,试块本身没有劈裂,同时此类破坏模式中也存在钢筋屈服的情况;图4(b)为拔出-劈裂破坏:在拉拔过程中,混凝土突然劈裂,荷载骤降,但由于环箍的存在试块仍保持完整,这种破坏模式多出现在16 mm的拉拔试件,由于其保护层厚度与钢筋直径比相对较小,在未达到峰值拉力前混凝土就已经劈裂.



(a)拔出破坏　　(b)拔出-劈裂破坏

图4　破坏模式

Fig.4　Destruction mode

当试件有足够强度与厚度的混凝土保护时,拉拔过程中钢筋对混凝土产生的斜向挤压力在混凝土内部产生劈裂裂缝,产生内裂缝区,但不足以发展至试件边缘,在黏结应力达到峰值时,肋间混凝土基本

破坏,钢筋拔出,试件为拔出破坏模式.当混凝土保护层厚度不足,混凝土产生较大内胀力,使环向拉应力达到劈裂抗拉强度时,混凝土突然劈裂,黏结力突然下降,但由于环箍的存在试件不会完全失去承载能力,黏结应力降低到某个值后不再迅速下降并随着拉拔的继续进入下降阶段,此时试件为拔出-劈裂破坏的破坏模式.

2.2 黏结滑移曲线结果

假设黏结应力均匀分布在锚固区段上,平均黏结强度τ通过以下公式计算:

$$\tau = \frac{F}{\pi dl} \tag{1}$$

式中:τ为平均黏结强度;F为拉拔力;d为钢筋直径;l为锚固长度.

通过绘制拉拔过程中黏结强度与自由端滑移的关系曲线得到各组试件的黏结滑移曲线,取黏结滑移曲线中的平均黏结强度最大值为极限黏结强度,并取此时对应的自由端滑移为峰值滑移,取各组试件参数的平均值(去掉部分离散性较大的数据)汇总如表3所示.

表3 各组试件黏结性能参数

Tab.3 Bond performance parameters of each group of specimens

试件编号	立方体抗压强度/MPa	极限黏结强度/MPa	峰值滑移/mm	破坏模式
N-0%-12		23.838	1.286	拔出破坏
N-0%-14	38.21	23.317	1.292	拔出破坏
N-0%-16		23.184	1.764	拔出-劈裂破坏
C-50%-12		23.640	1.404	拔出破坏
C-50%-14	43.48	23.205	1.586	拔出破坏
C-50%-16		23.390	1.526	拔出-劈裂破坏
C-70%-12		25.548	1.314	拔出破坏
C-70%-14	55.99	24.854	1.011	拔出破坏
C-70%-16		24.500	0.886	拔出-劈裂破坏
C-100%-12		24.468	1.312	拔出破坏
C-100%-14	43.32	24.103	1.533	拔出破坏
C-100%-16		23.500	1.508	拔出-劈裂破坏

钢筋陶瓷混凝土的极限黏结强度随着替代率的变化规律与其抗压强度与替代率的变化规律基本一致,整体来看再生陶瓷混凝土表现出与普通混凝土较为接近的极限黏结强度,大多数替代率下再生陶瓷混凝土的极限黏结强度都不低于普通混凝土,而70%替代率下再生陶瓷混凝土的极限黏结强度甚至略大于普通混凝土,对于12 mm与14 mm组的试件,70%替代率下陶瓷混凝土的极限黏结强度分别比0%替代率普通混凝土的极限黏结强度增加了7.17%和6.59%.而对于50%与100%替代率的再生陶瓷混凝土黏结性能对比普通混凝土则各有差别,其中50%替代率的再生陶瓷混凝土12 mm与14 mm组极限黏结强度对比普通混凝土分别减少了0.83%和0.48%,100%替代率的再生陶瓷混凝土12 mm与14 mm组试件的极限黏结强度对比普通混凝土则分别增加了2.64%和3.37%,50%与100%替代率下各组试件极限黏结强度对比普通混凝土各有高低,但考虑到试验误差的存在,基本可以认为再生陶瓷混凝土与普通混凝土相比有着相近的极限黏结强度.

对于陶瓷混凝土,其表面有釉面和糙面两类界面,学术界关于其界面强度的性质观点不一,其中釉面较光滑,界面结合强度低,可能导致陶瓷混凝土力学强度降低,进而降低与钢筋的黏结性能.试验结果表明,由于糙面所占比例更大,且糙面表面较为粗糙,提供了更好的界面结合强度,加上内养护效应的影响,在与釉面共同作用的情况下,一定程度上改善了陶瓷混凝土的性能和微观结构,因而陶瓷混凝土和钢筋的极限黏结强度与普通混凝土接近.多个因素综合,陶瓷混凝土表现出了与普通混凝土相近的极限黏结强度.

在上述结果分析的基础上,对比了不同替代率下钢筋与再生陶瓷混凝土的黏结滑移曲线,以12 mm组为例,如图5所示.可以看到,陶瓷混凝土具有较好的黏结性能,其极限黏结强度与普通混凝土极限黏结强度较为接近,虽然陶瓷混凝土与普通混凝土极限黏结强度较为接近,但是再生陶瓷混凝土下降段速率明显更快,这可能是由于拔出破坏的下降段由残余摩擦力控制,且下降段速率与相对锚固长度有关.

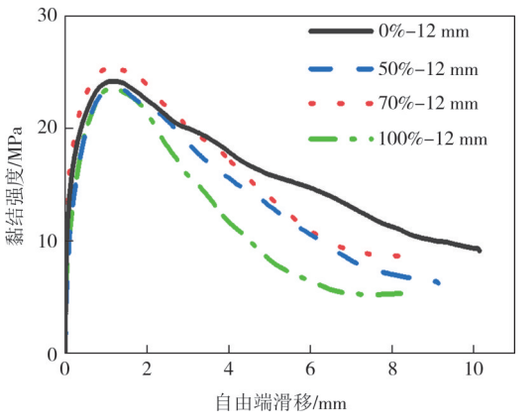


图 5　不同替代率钢筋−再生陶瓷混凝土黏结滑移曲线对比

Fig.5　Comparison of bond slip curves between steel reinforcement and recycled ceramic concrete with different substitution rates

2.3　极限黏结强度的影响因素分析

根据前述的研究与分析,可以看出极限黏结强度的变化与再生陶瓷混凝土强度的变化趋势是一致的,对于相同的钢筋直径,更高的混凝土强度可以提高钢筋拉拔过程中混凝土提供的机械咬合力,继而提高极限黏结强度.根据已有的研究结果,极限黏结强度与混凝土抗压强度的平方根成正比,因此,为了更好地研究黏结强度的影响因素,文献[12−13]排除抗压强度的影响提出了相对黏结强度的概念,即用极限黏结强度除以混凝土抗压强度的算术平方根,从而更好地研究黏结强度与其他因素的关系.相对黏结强度计算式为:

$$\tau^* = \frac{\tau}{\sqrt{f_{cu}}} \tag{2}$$

式中:f_{cu}为混凝土立方体抗压强度,MPa.各组试件的抗压强度及相对黏结强度如表 4 所示.

表 4　各组试件的抗压强度及相对黏结强度

Tab.4　Compression strength and relative bonding strength of each group of specimens

替代率/%	抗压强度/MPa	相对黏结强度/MPa$^{1/2}$		
		12 mm	14 mm	16 mm
0	38.21	3.856	3.772	3.751
50	43.48	3.585	3.519	3.547
70	55.99	3.414	3.322	3.408
100	43.32	3.351	3.301	3.218

根据数据结果,建立钢筋−陶瓷混凝土黏结强度的计算公式,通过对先前研究数据的线性拟合,建立相对黏结强度与陶瓷细骨料替代率r、保护层厚度与钢筋直径比值c/d的三维预测模型如式(3)所示:

$$\tau^* = \alpha \times r + \beta \times \frac{c}{d} + k \tag{3}$$

式中:α、β为变量的系数;k为常数.

根据试验数据代入预测模型得到了相对黏结强度的三维拟合结果,如图 6 所示,同时拟合出相关参数的数值,模型拟合的决定系数R^2为 0.956 1,可以看到模型的拟合效果较好.

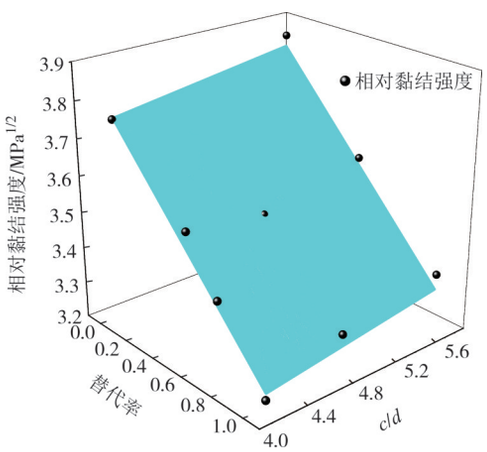


图 6　相对黏结强度三维预测模型

Fig.6　A three−dimensional prediction model for relative bond strength

代入拟合结果得到相对黏结强度的计算公式为:

$$\tau^* = -0.520\,8 \times r + 0.047\,26 \times \frac{c}{d} + 3.557 \tag{4}$$

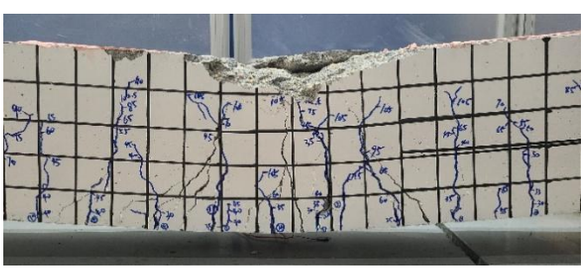
相对黏结强度随陶瓷细骨料替代率增加而减小,原因可能是陶瓷细骨料本身结构多孔,弹性模量偏低,加入陶瓷骨料后,降低了砂浆的弹性模量[14],从而导致砂浆与粗骨料的弹性模量相差更大,在力学性能相同的情况下,导致砂浆与粗骨料的不协调变形更加明显,增大了砂浆内部的应力应变,从而影响了黏结性能.根据汪璇[15]的研究,砂浆弹性模量降低 30%,峰值黏结强度会降低 23.47%,因此在力学性能相同的情况下,陶瓷细骨料的替代率的增加会导致极限黏结强度的减小.而相对黏结强度随着保护层厚度的增加及钢筋直径的减小逐渐增大.

3　钢筋陶瓷混凝土梁受弯性能研究

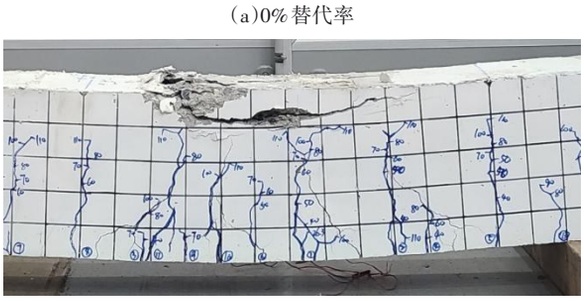
3.1　试验现象

钢筋陶瓷混凝土梁的破坏过程与普通钢筋混凝土梁的受弯破坏过程相似.2 根陶瓷混凝土梁与 1 根普通混凝土梁的破坏过程均表现为如下过程,即加载初期荷载稳定上升,达到开裂荷载后,出现第一条裂缝,然后纯弯段裂缝数量有所增加,继续加载,弯

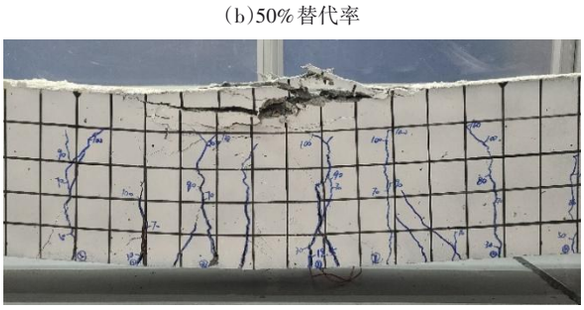
剪区裂缝出现斜向发展的趋势,且主要裂缝基本形成.达到屈服荷载时钢筋屈服,荷载上升速度变慢,梁的挠度和裂缝宽度迅速增加,跨中裂缝开始相交,并产生枝状细裂缝,梁顶部也出现横向裂缝.随着继续加载,受压区混凝土隆起,受压破坏,荷载突然下降,梁失去承载能力.0%、50%、100%替代率的钢筋陶瓷混凝土梁破坏时跨中裂缝如图7所示.在配筋相同的情况下,3根梁的各项荷载值的差异不大,再生陶瓷混凝土梁开裂荷载与普通混凝土梁接近,3根试验梁屈服与破坏的指标也比较接近,在梁构造相同的情况下,其承载力相近表明了再生陶瓷混凝土可以较好地发挥作用,表明了再生陶瓷混凝土应用于结构构件的可能性.



(a)0%替代率



(b)50%替代率



(c)100%替代率

图7 不同替代率钢筋陶瓷混凝土梁破坏跨中裂缝形态

Fig.7 Mid-span crack morphology for reinforced ceramic concrete beam with different replacement rate

3.2 荷载挠度曲线与荷载应变曲线

跨中挠度变化情况可以较好地反映梁的抗弯过程,采集记录3根不同替代率的钢筋陶瓷混凝土梁的荷载挠度数值,绘制荷载-挠度曲线如图8所示.3根梁均为适筋破坏,试验梁的荷载挠度曲线显示的破坏过程基本相似,且都有3个特征阶段,即未开裂阶段、带裂缝工作阶段及屈服-破坏阶段,各阶段对应荷载和挠度如表5所示.

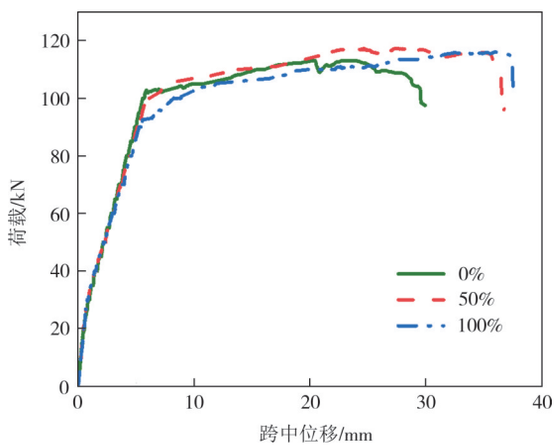


图8 荷载-挠度曲线

Fig.8 Load-deflection curve

表5 构件各阶段荷载与挠度

Tab.5 Load and deflection of components at each stage

替代率/%	开裂荷载/kN	对应挠度/mm	屈服荷载/kN	屈服挠度/mm	极限荷载/kN	对应挠度/mm
0	20	0.547	102	6.008	113.2	29.506
50	26.3	0.661	100	6.018	117.2	35.662
100	19.5	0.517	94	5.544	116.0	37.345

未开裂阶段:3条荷载-挠度曲线接近,在混凝土开裂前,梁可以看作弹性体,在配筋完全相同的情况下,此时梁的抗弯刚度主要由混凝土提供,因而3根梁的抗弯刚度相差不大,表现在图上,3条曲线在5 mm之前几乎重合.

带裂缝工作阶段:混凝土开裂后,由于开裂截面上受拉区混凝土退出工作,拉力主要由钢筋承担,因此梁的抗弯刚度相对未开裂阶段有了明显下降,从图8中可见3根梁的抗弯刚度差别不大,但仍有微小区别,普通混凝土梁(0%替代率)的抗弯刚度最大,50%替代率梁次之,100%替代率梁抗弯刚度最小,相似地进入屈服阶段时荷载大小的顺序也是0%替代率>50%替代率>100%替代率,且相同荷载下挠度大小的顺序是100%替代率>50%替代率>0%替代率.钢筋进入屈服阶段后,荷载上升变缓,挠度增加变快.由此可见3根梁的应力-应变曲线基本一致,但陶瓷再生混凝土梁的挠度增长速度更快且相同荷载下的挠度比普通混凝土更大.

从图8可知,再生陶瓷混凝土梁的极限荷载略高于普通混凝土,从而延迟了由于混凝土压碎导致

的梁极限承载点的到来,使得钢筋能够进一步发挥其受拉性能,提高了梁的变形能力.由此可见,由再生陶瓷混凝土材料和钢筋组成的再生陶瓷混凝土梁很好地结合了再生陶瓷混凝土受压性能和钢筋受拉性能,因此再生陶瓷混凝土梁具有比普通混凝土梁更优越的受力性能.

梁受拉纵筋的应变变化过程采用应变片进行测量记录,测量结果如图9所示.

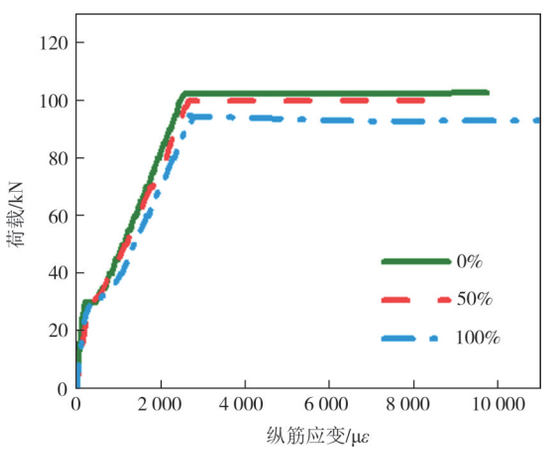


图9　荷载-纵筋应变曲线

Fig.9　Load-longitudinal reinforcement strain curve

由图9可见,纵筋应变随荷载的变化趋势与挠度随荷载变化的趋势基本一致,表现为相似的未开裂阶段、带裂缝工作阶段以及屈服-破坏阶段3个阶段.混凝土开裂前,梁抗弯刚度最大,此时纵筋应变的增加速度较缓.随着荷载进一步增加,混凝土开裂进入带裂缝工作阶段,此时梁截面受拉区混凝土部分失效,其承受的拉应力由钢筋承担,在开裂瞬间,纵筋应变有一个突然的增加,表现为一个较缓的平台,此后钢筋的受拉应变增长速度加快,表现为荷载-纵筋应变曲线的斜率小于未开裂阶段.继续加载,钢筋达到屈服点,3根梁均为2 600 με左右(图9).由图9可以看出,0%替代率、50%替代率、100%替代率梁钢筋的屈服荷载依次为104 kN、100 kN、94 kN.由此可见替代率越大,钢筋越早屈服且应变值越大.此后,梁的加载进入屈服-破坏阶段,荷载几乎不再上升,纵筋应变迅速增加.

3.3　平均裂缝间距与裂缝宽度

加载过程中裂缝基本出齐后,裂缝数量与间距保持不变,本文对不同替代率钢筋再生陶瓷混凝土梁的裂缝间距进行测量并计算平均裂缝间距,得到数据如表6所示.此外,根据《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010)[16],普通钢筋混凝土梁裂缝的平均裂缝间距可以根据以下公式计算:

$$l_{\mathrm{m}} = 1.9c + 0.08\frac{d_{\mathrm{eq}}}{\rho_{\mathrm{te}}} \tag{5}$$

式中:d_{eq}为纵向受拉钢筋的等效直径;c为保护层厚度;ρ_{te}为按有效受拉面积计算的纵向受拉钢筋配筋率;l_{m}为平均裂缝间距.

表6　平均裂缝间距

Tab.6　Average crack spacing

替代率/%	平均裂缝间距l_{m}/mm	与规范比值
0	96.667	1.061
50	100	1.098
100	119.6	1.313

由表6可知,陶瓷混凝土梁平均裂缝间距比普通钢筋混凝土梁大.根据《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010),平均裂缝间距的计算公式亦可表达为:

$$l_{\mathrm{m}} = \frac{3}{8}\frac{f_{\mathrm{t}}}{\tau_{\mathrm{m}}}\frac{d}{\rho_{\mathrm{te}}} \tag{6}$$

式中:f_{t}为混凝土抗拉强度;τ_{m}为平均黏结应力.

根据我国《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010)中轴心抗拉强度的计算公式,近似认为混凝土抗拉强度与轴心抗压强度的算术平方根成正比,即$f_{\mathrm{t}} = a\sqrt{f_{\mathrm{cu}}}$,同时代入式(2)和式(4)可得:

$$l_{\mathrm{m}} = \frac{3}{8}\frac{a}{-0.520\,8 \times r + 0.047\,26 \times \dfrac{c}{d} + 3.557}\frac{d}{\rho_{\mathrm{te}}} \tag{7}$$

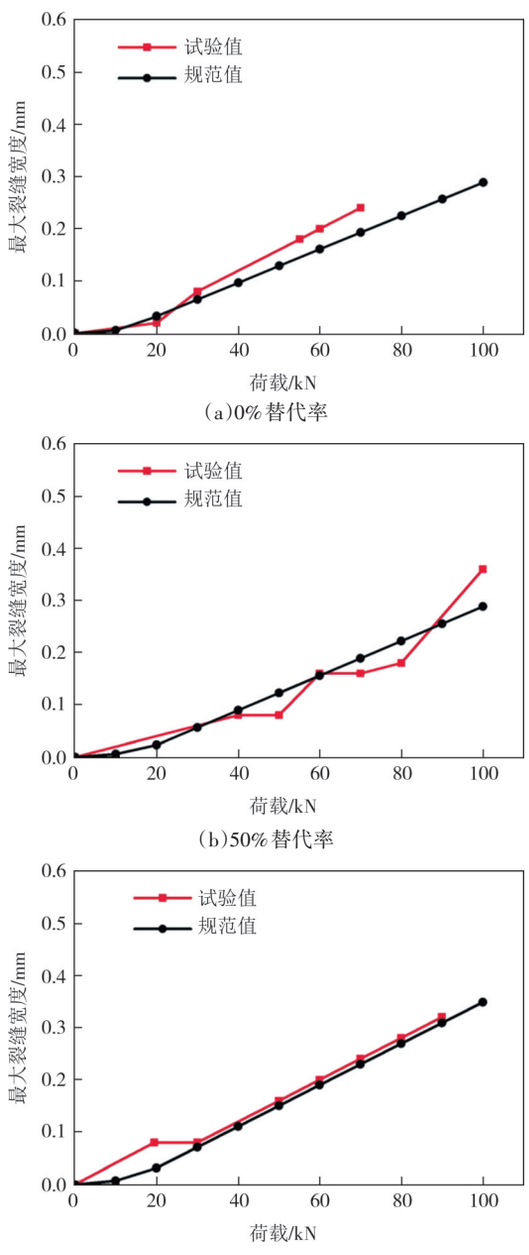
根据《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010),不考虑长期作用的最大裂缝宽度计算如式(8)所示:

$$\omega'_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_1}\alpha_{\mathrm{cr}}\psi\frac{\sigma_{\mathrm{sq}}}{E_{\mathrm{s}}}l_{\mathrm{m}} \tag{8}$$

式中:α_{cr}为构件受力特征系数;ψ为构件裂缝间纵向受拉钢筋的应变不均匀系数;σ_{sq}为按荷载准永久组合得到的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋中心处的应力;E_{s}为钢筋弹性模量;τ_1为考虑长期作用影响的扩大系数.

对于式(7),由文献[17]可知50%和100%替代率的陶瓷混凝土抗拉强度与抗压强度的比例系数a均大于普通混凝土,同时随着替代率的增加,公式分母所表示的相对黏结强度减小,平均裂缝间距增大,

导致陶瓷混凝土梁的平均裂缝间距大于普通混凝土.因此初步认为黏结性能的减小会弱化混凝土梁的抗弯性能.将式(8)计算所得最大裂缝宽度与试验实际测得裂缝宽度进行对比,如图10所示.可见3根梁最大裂缝宽度变化规律与规范公式的计算值吻合较好,即陶瓷混凝土平均裂缝间距大于普通混凝土梁,但是最大裂缝宽度的变化规律仍与普通混凝土梁一致,且从图10可以看出陶瓷混凝土公式计算值拟合度更高,可能是由于试件较少,具有一定偶然性,确切原因需要进一步试验验证.



(a)0%替代率

(b)50%替代率

(c)100%替代率

图10 最大裂缝宽度与规范公式计算值对比

Fig.10 Comparison between maximum crack width and calculated value using standard formula

4 结 论

1)通过理论分析及中心拉拔试验,对比了不同替代率再生陶瓷混凝土及普通混凝土与钢筋的黏结性能,结果表明:陶瓷混凝土极限黏结强度与普通混凝土极限黏结强度较为接近,具有较好的黏结性能.

2)建立不同替代率再生陶瓷混凝土相对黏结强度与陶瓷细骨料替代率、保护层厚度与钢筋直径比值的三维预测模型,给出了陶瓷混凝土黏结滑移本构关系及极限黏结强度预测公式,分析了相对黏结强度随陶瓷细骨料替代率的变化趋势及机理.

3)对3根不同陶瓷细骨料替代率的钢筋陶瓷混凝土梁受弯性能进行了试验研究,结果表明:钢筋再生陶瓷混凝土梁适筋受弯破坏过程与普通的钢筋混凝土适筋受弯梁相似,分为未开裂阶段、带裂缝工作阶段和屈服-破坏阶段,适筋破坏的钢筋陶瓷混凝土梁同样可以表现出充分的塑性变形能力.钢筋陶瓷混凝土梁受弯过程和承载力与普通钢筋混凝土梁较为接近,其差异性主要表现为替代率的增加会导致跨中挠度增长变快,平均裂缝间距变大(但最大裂缝宽度发展规律仍符合规范的计算公式),跨中钢筋较早屈服且应变值较大.此外,再生陶瓷混凝土梁的极限荷载略高于普通混凝土,从而延迟了由于混凝土压碎导致的梁极限承载点的到来,提高了梁的变形能力.

参考文献

[1] 孙琛.基于陶瓷废料的混凝土的力学性能研究[D].烟台:烟台大学,2014:1-3.
SUN C. Study on mechanical properties of concrete based on ceramic waste [D]. Yantai: Yantai University, 2014: 1-3 (in Chinese).

[2] PETER D M, AWANG A Z, SAM A M, et al. Eco-efficient concrete containing recycled ceramic wastes aggregate [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 849(1): 012035

[3] RAJPRASAD J, SARATH B K, PANNIRSELVAM N. Experimental investigation on partially additional of coarse aggregate with ceramic in concrete [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 912(6): 062074.

[4] ZEGARDŁO B, SZELĄG M, OGRODNIK P. Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes-the method of production and the interfacial transition zone [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 736-742.

[5] RASHID K, RAZZAQ A, AHMAD M, et al. Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 829-840.

[6] 李慧玲. 酸雨侵蚀下废瓷砖再生混凝土中性化性能研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2016:17-30.
LI H L. Neutral performance research of the waste ceramic tile recycled concrete under acid rain erosion[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016:17-30.(in Chinese)

[7] 乔宏霞,彭宽,陈克凡,等. 干湿循环条件下陶瓷粉再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能及可靠性分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(3):752-760.
QIAO H X, PENG K, CHEN K F, et al. Resistance and reliability analysis of ceramic powder recycled concrete to sulfate dry-wet cycle erosion[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(3): 752-760.(in Chinese)

[8] SAMADI M, BAGHBAN M H, KUBBA Z, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams under instantaneous loading: effects of recycled ceramic as cement and aggregates replacement[J]. Buildings, 2022, 12(4): 439.

[9] KAVIPRIYA S, DHAVASHANKARAN D, RAMKUMAR S, et al. Flexural strength characteristics of high performance geopolymer concrete using ceramic waste aggregates and silica fume[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 6879-6883.

[10] 徐有邻. 并筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1996, 26(5): 34-37.
XU Y L. Experimental study of bond-anchorage properties for bundle of bars[J]. Building Structure, 1996, 26(5): 34-37.(in Chinese)

[11] 徐有邻, 刘立新, 管品武. 螺旋肋钢丝粘结锚固性能的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1998(4): 22-27.
XU Y L, LIU L X, GUAN P W. Experimental study on bond and anchorage performance of spiral rib steel wire[J]. China Concrete and Cement Products, 1998(4): 22-27.(in Chinese)

[12] ZHANG J W, TAO X Y, LI X Y, et al. Analytical and experimental investigation of the bond behavior of confined high-strength recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125636.

[13] PRINCE M J R, SINGH B. Bond behaviour of normal- and high-strength recycled aggregate concrete[J]. Structural Concrete, 2015, 16(1): 56-70.

[14] ALVES A V, VIEIRA T F, DE BRITO J, et al. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 103-113

[15] 汪璇. 粘结界面细观损伤演化及其对钢筋混凝土结构性能退化作用机理[D]. 南京:东南大学,2016:38-41.
WANG X. Meso-damage evolution of RC bonding interface and its action-mechanism to RC property pegradation[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 38-41.(in Chinese)

[16] 混凝土结构设计规范(2015年版):GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
Code for design of concrete structures(Version 2015): GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.(in Chinese)

[17] 王帅. 废弃卫生陶瓷再生骨料混凝土常温及高温的力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 37-40.
WANG S. Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete with waste sanitary ceramics at room temperature and high temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 37-40.(in Chinese)