

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201220001

钢纤维全再生粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究*

刘春阳^{1,2}, 顾一凡¹, 高英棋¹, 于桂欣¹, 于 舰³

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东建筑大学建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101; 3. 山东明冉再生资源利用有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 混凝土梁良好的抗弯性能是影响建筑结构安全性的重要因素。为研究加入钢纤维的全再生粗骨料钢筋混凝土梁抗弯力学性能, 设计了4根全再生粗骨料混凝土梁和1根天然粗骨料混凝土梁, 主要设计参数为全再生粗骨料取代率, 钢纤维体积分数, 预损程度以及碳纤维布(CFRP)加固。通过单调加载试验对5根梁的破坏形态、荷载—跨中挠度曲线、钢筋应变变化特征等抗弯性能进行了研究, 采用ABAQUS有限元软件对各试件的加载过程进行了建模分析, 基于现有规范和试验数据对各试件的峰值承载力计算方法进行了研究。研究表明, 各试件梁均发生典型受弯破坏, 掺加纤维后梁的受压区混凝土破碎脱落范围减小; 全再生粗骨料混凝土梁的抗弯承载能力较普通混凝土梁降低约6%, 掺加钢纤维后梁的抗弯承载力较未掺加钢纤维的全再生粗骨料混凝土梁提高约5%, 钢纤维的掺入亦可改善混凝土梁的变形能力; 采用碳纤维布直接加固后的梁承载力提高约20%, 先预损后进行碳纤维布加固后的梁承载力可提高约14%, 碳纤维布还可显著提高试验梁的整体刚度; ABAQUS有限元软件分析结果与试验结果吻合较好, 可较为准确地模拟梁的破坏形态和抗弯性能; 现有规范公式及文中修正方法得到的抗弯承载力计算值与试验值相比误差较小, 二者均可用于钢纤维全再生粗骨料混凝土梁的设计。

关键词: 混凝土梁; 钢纤维; 全再生粗骨料; 预损加固; 数值模拟; 承载力计算

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-0946-08

Experimental Study on Flexural Performance of Concrete Beams with Steel Fiber and Fully Recycled Coarse Aggregate

LIU Chunyang^{1,2}, GU Yifan¹, GAO Yingqi¹, YU Guixin¹, YU Jian³

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering Ministry of Education, Shandong Jianzhu University, Shandong 250101, China; 3. Shandong Ming ran Recycling Resources Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: The good flexural performance of concrete beams is an important factor affecting the safety of building structures. In order to study the flexural mechanical properties of reinforced concrete beams with fully recycled coarse aggregate and steel fiber, four fully recycled coarse aggregate concrete beams and one natural coarse aggregate concrete beam were designed. The main design parameters were the replacement rate of fully recycled coarse aggregate, volume fraction of steel fiber, pre-damaged degree, and reinforcement with carbon fiber sheet (CFRP). The failure characteristics, load-mid span deformation curves, and strain variation characteristics of steel bars of the five beams were stud-

* 收稿日期: 2020-12-20; 修回日期: 2021-02-05

基金项目: 北京工业大学教育部重点实验室开放课题项目(2020B03)资助

作者简介: 刘春阳(1980—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事绿色高性能建筑材料开发及应用方面的研究。E-mail: liucy2011@sdjzu.edu.cn

ied by monotonous loading tests. The finite element software ABAQUS was used to simulate and analyze the loading process of the five beams and the calculation method of peak carrying capacity of each beam was also studied based on the existing design specifications and test data. The results show that flexural failure occurred in all specimens, the broken and fall-off zone of concrete beams with fiber in compression zone was reduced. Compared with concrete beams with ordinary coarse aggregate, the flexural bearing capacity of beams with fully recycled coarse aggregate was decreased by 6%. The flexural bearing capacity of the beam after adding steel fiber is about 5% higher than that of the fully recycled coarse aggregate concrete beam without steel fiber. The addition of steel fiber can also improve the deformability of the concrete beam. The bearing capacity of beams strengthened directly with CFRP could be increased by about 20%, and the bearing capacity of CFRP reinforced beams increases by about 14% when the beam was pre-damaged. The overall stiffness of the beams could also be enhanced by CFRP. The finite element analysis results of ABAQUS were in good agreement with the test results, and the calculation results of the peak bearing capacity of each specimen beam based on the current design code and the proposed formulas in this paper were also in good agreement with the test results. Both bearing capacity calculation methods can be used in the design of concrete beam with steel fiber and fully recycled coarse aggregate.

Keywords: concrete beam; steel fiber; fully recycled coarse aggregate; pre-damage and reinforcement; numerical simulation; bearing capacity calculation

引 言

随着中国现代化进程的不断推进,大量的建筑被拆除或改建,同时产生了大量的建筑固废。通过将固体废物重新制成混凝土骨料,可加强生态环境保护,避免对可耗竭自然资源的依赖,从而满足日益增长的建设需求^[1]。因此,合理回收与利用建筑固废,使用再生骨料制造混凝土构件,对实现建筑业的绿色可持续发展具有重要意义。

曹万林等^[2]选定不同再生粗骨料取代率混凝土梁进行试验。研究结果发现,混凝土梁的开裂荷载随着再生粗骨料取代率的增加而降低。陈宗平等^[3]试验结果表明,再生粗骨料取代率为0~100%的混凝土立方体抗压强度随取代率的增大变化不大。许多研究发现粉煤灰,硅灰等矿物掺合料对提高再生混凝土强度有着明显的优势^[4]。此外,混凝土行业的专家和学者发现纤维的桥接作用可以显著提高混凝土的抗拉强度、脆性和耗能^[5]。陈爱玖等^[6]探索了不同混凝土强度下的钢纤维掺量和再生粗骨料取代率对抗压强度的影响。结果表明,适量的钢纤维能明显提高再生混凝土的抗压强度。高丹盈等^[7]发现钢纤维掺量大于1%时,钢纤维天然混凝土梁初始弯曲韧性比稳定上升。外贴碳纤

维布的加固方式因抗拉强度高,重量小,施工方便,耐腐蚀性强等优点,在各种加固方式中受到越来越多的关注。高丹盈等^[8]研究了碳纤维布层数对钢筋混凝土梁极限荷载的影响,结果表明纤维布层数的增加能显著提高混凝土梁的极限承载力。江世永等^[9]选用碳纤维布加固修复预损伤处理的混凝土柱,并在低周反复荷载作用下进行抗震性能试验,证实了碳纤维布能有效地修复服役中的结构构件。

目前试验多针对取代部分天然粗骨料的再生混凝土梁进行抗弯性能试验。本次试验梁使用全再生粗骨料替代天然粗骨料,制作了4个全再生粗骨料混凝土梁和1个天然粗骨料混凝土梁,用硅灰代替部分水泥,并加入1%体积率的钢纤维。研究静力荷载作用下全再生粗骨料取代率、钢纤维掺量、CFRP抗弯加固对全再生粗骨料钢筋混凝土梁抗弯性能的影响,选取1根钢纤维全再生粗骨料混凝土梁进行预损加固修复,探究全再生粗骨料混凝土梁的损伤后可修复性能,以期能为全再生粗骨料混凝土梁的工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 原材料

本次试验中,混凝土设计强度为C30级。胶凝

材料选用 42.5 普通硅酸盐水泥, 活性二氧化硅。细骨料为当地天然河砂。粗骨料包括天然粗骨料和再生粗骨料, 其中天然粗骨料是碎石, 再生粗骨料是济南某处混凝土结构住宅拆除废弃的混凝土加工而成。为提高再生粗骨料的质量, 人工挑除玻璃、木屑等杂质。两类粗骨料粒径均为 5~30 mm。纤维为镀铜高强度钢纤维, 长度 13 mm, 长径比为 65, 抗拉强度不小于 2 850 MPa。碳纤维布为高强度 I 级, 厚度为 0.167 mm, 抗拉强度为 3 400 MPa, 弹性模量为 2.3×10^5 MPa。为满足混凝土和易性的要求, 在混凝土拌和时掺入适量减水剂。实测混凝土材料力学性能见表 1。各试件选用的纵筋和箍筋为 HRB400 级, 实测钢筋材料力学性能见表 2。

表 1 混凝土材料力学性能

混凝土强度等级	全再生粗骨料取代/%	钢纤维体积分数/%	立方体抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
C30	0	0	21.1	1.15	2.6×10^4
C30	100	0	20.9	1.03	2.6×10^4
C30	100	1.0	20.9	1.10	2.6×10^4

表 2 钢筋材料力学性能

钢筋类型	钢筋直径/mm	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	延伸率 δ /%
纵筋/箍筋	8	437	653	13
纵筋	16	498	613	26

1.2 试件设计

试验共设计 5 个试件, 试件编号及参数见表 3。其中, 梁截面尺寸为 200 mm × 400 mm, 梁长 2 400 mm, 净跨 2 100 mm。梁箍筋和顶部纵向钢筋采用直径 8 mm 的钢筋, 底部纵向钢筋采用直径 16 mm 的钢筋, 跨中未设置箍筋, 混凝土保护层厚度为 15 mm。试件尺寸与截面配筋如图 1 所示。

1.3 测点布置及加固方案

试件测量装置及碳纤维布(CFRP)布置位置见图 2。试验主要量测的内容包括: 跨中底部纵向钢筋的应变(S1~S4), 支座、加载点及跨中的竖向位移(LVDT1~LVDT5)。各试件预先在梁两端弯剪

表 3 试件设计参数

Table 3 Design parameters of specimens

试件编号	截面尺寸/mm	取代率	纤维掺量	加固方式
L-1	200 × 400	0	0	—
L-2	200 × 400	100%	0	—
L-3	200 × 400	100%	1%	—
L-4	200 × 400	100%	1%	碳纤维布
L-5	200 × 400	100%	1%	碳纤维布

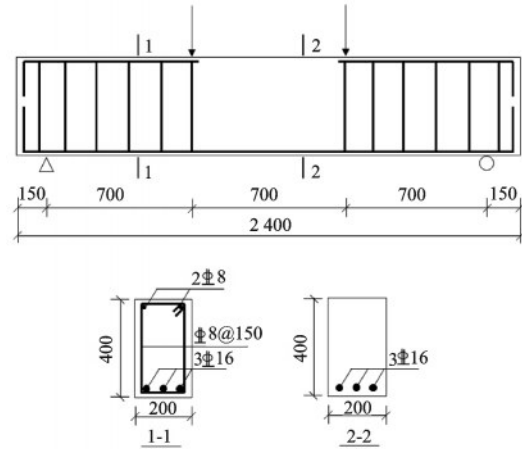


图 1 试件尺寸与截面配筋

Fig.1 Specimen size and reinforcement arrangement

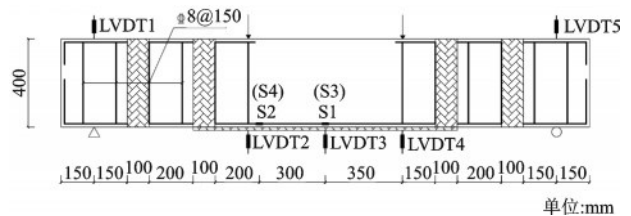


图 2 测点及碳纤维布位置示意

Fig.2 Diagram of measuring point and CFRP position

区内设置 2 道宽 100 mm、间距 200 mm 的碳纤维布 U 型加强箍, 每道 U 型箍处粘贴 2 层 CFRP 布, 以防止梁在加载过程中出现剪切破坏。试件 L-4 直接使用碳纤维布进行受弯加固, 加固时于梁底纯弯区段按照正常加固施工方法粘贴 1 层长 1 200 mm、宽 200 mm 的 CFRP 布; 试件 L-5 为预损加固试件, 预损荷载为试件 L-3 的 0.5 倍峰值荷载, 此时试件中钢筋应变约为屈服应变实测值的 50% 且纯弯段裂缝几乎不再增加, 试件达到纵筋未屈服的预损伤状态, 荷载降至零后按照正常加固施工方法粘贴于梁纯弯区段底面粘贴 1 层长 1 200 mm、宽 200 mm 的 CFRP 布。

1.4 加载装置及加载制度

试验在山东建筑大学建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室进行。加载时利用刚度较大的工字型钢梁作为分配梁实现两点加载,纯弯段长度为700 mm,如图3所示。试验采用力控制的加载方案,加载时,先进行预加载,检查各仪器仪表是否工作正常,排除试件的非结构变形;正式加载阶段,采用分级加载,每级10 kN,待仪器数值稳定后再进行下一步加载;荷载峰值过后加密采集试验数据,直至不能继续加载时,停止加载。

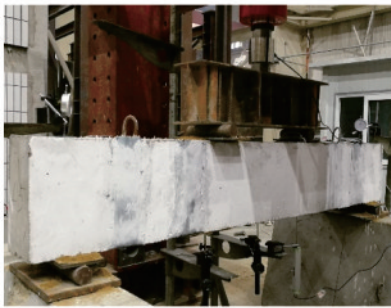


图3 试验加载装置

Fig.3 Loading device of specimens

2 试验结果分析

2.1 试验现象及破坏形态

各试件的破坏形态如图4所示,所有试件梁均发生适筋破坏。对于普通混凝土对比试件L-1,加载至50 kN时,在梁加载点处出现逐步向上发展的竖向裂缝,大约发展至距截面底部1/2的位置;随着荷载继续增加,其他裂缝陆续在梁中出现;加载至

100 kN时,在梁弯剪段出现第一条斜向裂缝,竖向裂缝数量有所增加,在向上延伸的同时具有一定的宽度,扩展速度明显快于弯剪段的斜裂缝;加载至200 kN时,竖向裂缝基本出齐;继续加载,荷载增长缓慢,纯弯段数条裂缝发展剧烈形成主裂缝,受压区出现水平裂缝,最终加载至293 kN时,以跨中混凝土压碎而破坏。试件L-2裂缝发展情况与试件L-1基本相似。试件L-3加载至100 kN左右时,在跨中底部出现竖向裂缝,钢纤维的掺入对梁的开裂荷载影响明显;加载至290 kN时,梁发生破坏,受压区混凝土破碎程度较试件L-1和试件L-2轻。

对于碳纤维布加固试件L-4,加载至100 kN时,在纯弯段出现竖向裂缝,裂缝发展较为缓慢,与未加固混凝土梁相比数量、长度有所减少;直至300 kN左右时,不断有新裂缝出现,裂缝分布趋于对称,在主裂缝附近有若干条细小的短裂缝;随着荷载继续增加,裂缝宽度不断增大,且梁底发出的噼啪的声音越来越响亮,端部U型箍于梁底转角处被剪断,跨中梁底纯弯段的纤维布发生拉断破坏;加载至347 kN时,随着一声巨响,纤维布与混凝土梁分离,最终受压区混凝土被压碎,试验梁丧失承载能力。预损加固构件L-5裂缝发展情况与L-4差别较小,但加载至300 kN时,裂缝数量相较于L-4减少约40%,且构件破坏时最大裂缝宽度增加约50%,受压区混凝土破坏更明显。

2.2 荷载-跨中挠度曲线

各试件的荷载与跨中挠度的关系曲线如图5所示。图5(a)为不同全再生粗骨料取代率试验梁的荷载-挠度曲线对比。加载初期,不同试件梁的变化曲线基本重合,全再生粗骨料取代率对构件开裂荷载以及刚度的影响较小。峰值荷载时,试件L-1、L-2

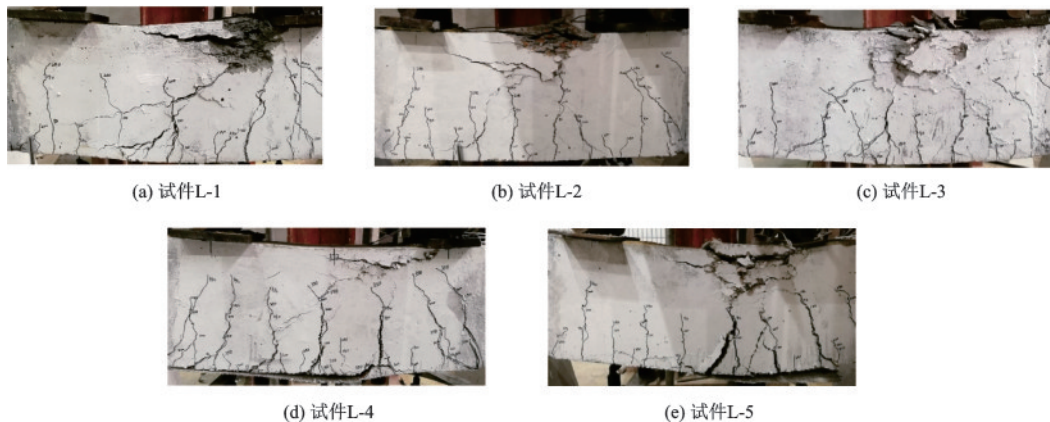


图4 试件的破坏形态

Fig.4 Failure modes of specimens

的峰值荷载分别为292.93、275.79 kN,由于使用全再生粗骨料,试验梁L-2的峰值荷载与L-1相比降低约6%。继续加载,全再生粗骨料混凝土梁受压区混凝土承载力不足,抗弯刚度急剧下降,变形能力弱于普通混凝土梁。图5(b)为不同钢纤维体积分数试验梁的荷载-挠度曲线。试件L-3峰值荷载与试件L-2相比提升了5%,峰值荷载后试件L-3损伤和裂缝的发展更为缓慢,曲线下降段平缓,承载力的稳定性得

到较为明显的提升。这主要是由于钢纤维对全再生粗骨料混凝土抗裂性的改善,裂缝间钢纤维在断裂过程中消耗更多能量,从而使构件变形能力提高。图5(c)为纤维布加固梁的荷载-挠度曲线。加固后梁的刚度明显增大,试件L-4和L-5的峰值荷载比较接近,与L-3相比分别提升约20%和14%,表明采用粘贴碳纤维布方式对全再生粗骨料混凝土梁进行加固可明显提高其整体刚度和抗弯承载力。

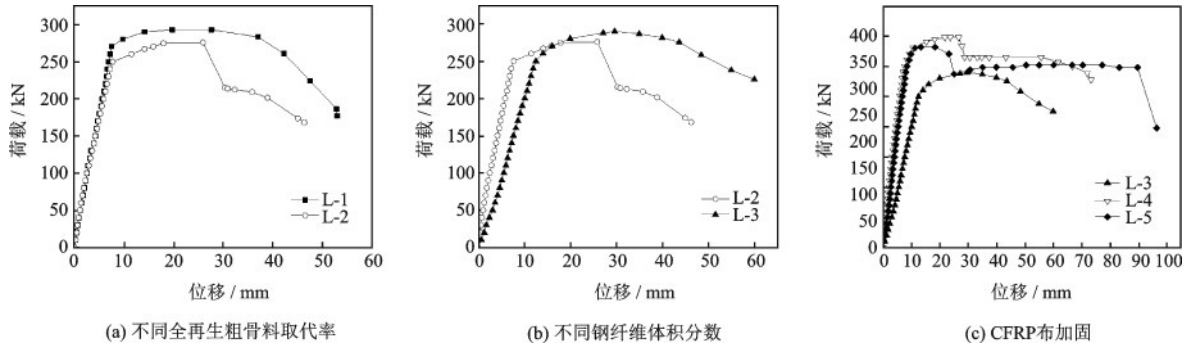


图5 荷载-跨中挠度曲线

Fig.5 Load-mid span deflection curves

2.3 荷载-钢筋应变曲线

图6为各试件纵筋S1应变片的荷载-钢筋应变曲线。加载前期,各构件的纵筋应变差别不大,几乎呈线性增加,这一阶段持续时间较短;随着荷载的增大,跨中梁底出现裂缝后,纵筋的应变快速增大,曲线斜率变小。在同级荷载作用下,试件L-2的纵筋应变值最高;加载至200 kN时,碳纤维布加固试件L-4和L-5纵筋应变相比于L-3约减小46.2%和37.4%,可见纤维布加固使得构件的纵筋应变发展滞后于未加固试件。

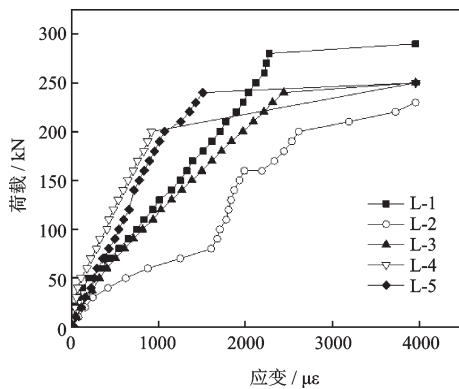


图6 荷载-钢筋应变曲线

Fig.6 Load-reinforcement strain curves

3 数值模拟分析

全再生粗骨料混凝土本构模型采用肖建庄等^[10-11]根据试验数据拟合得到的混凝土应力-应变曲线。钢纤维全再生粗骨料混凝土受压本构模型依据高丹盈等^[12]SFRCAC轴压本构模型,受拉本构模型采用卢钦旺等^[13]的研究成果。采用混凝土塑性损伤模型(CDP, concrete damage plastic)来定义混凝土的塑性特性。钢筋本构采用理想弹塑性的双直线模型。CFRP布的应力-应变为线弹性关系,当应力超过纤维布极限抗拉强度时认定材料破坏。在垫块底部设置耦合约束,左侧支座对X、Y、Z方向的位移自由度进行约束,右侧支座对Y、Z方向的位移自由度进行约束。加载时,采用力控制加载方式。

有限元分析得到的试件破坏时的混凝土等效应变如图7所示。由图7可见,有限元分析结果与试验结果吻合较好。有限元模拟得到的5个试件的跨中荷载-挠度曲线与试验结果对比如图8所示。由图8可知各试验梁的跨中荷载-挠度模拟曲线与试验曲线变化趋势吻合,峰值荷载与试验结果较为接近。L-1~L-5峰值荷载数值模拟结果分别为298.47, 285.74, 290.41, 350.64, 340.53 kN,与试验结果相差均小于10%。有限元计算结果与试验结

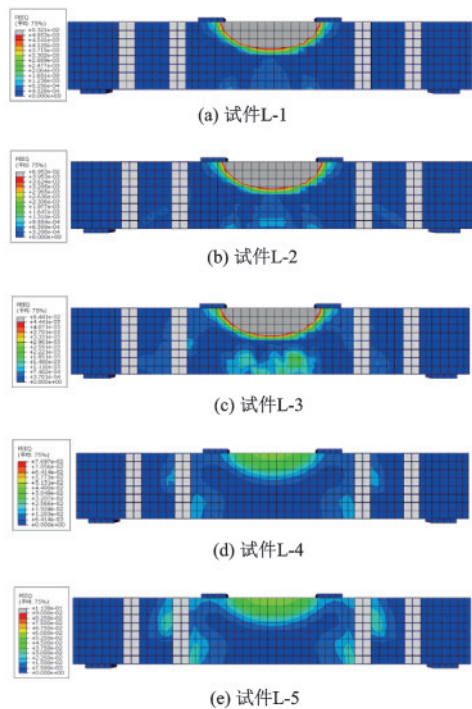


图7 混凝土等效塑性应变

Fig.7 Equivalent plastic strain of concrete

果均吻合较好。

4 抗弯承载力计算

文中选取各试件梁达到荷载峰值时的受力状

态为抗弯承载力计算参考状态,参照现行《混凝土结构设计规范》^[14]、《纤维混凝土结构技术规程》^[15]和《混凝土结构加固设计规范》^[16]的计算公式(1)~(3):

$$M_u = \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (1)$$

$$M_{fu} = f_{fu} b x (h_0 - \frac{x}{2}) - f_{fu} b x (\frac{x_1}{2} - a) \quad (2)$$

$$M_u = a_1 f_{c0} b x (h - \frac{x}{2}) - f_{y0} A_{s0} (h - h_0) \quad (3)$$

得出的规范值与试验值见表4。从表4中可以看出,对于试件L-1和试件L-4,规范值小于试验值;对于试件L-2、试件L-3和试件L-5,规范值略大于实测值,说明可采用现行规范计算公式对钢纤维全再生粗骨料混凝土梁抗弯承载力进行计算。同时,本文考虑全再生粗骨料取代率对再生混凝土梁承载力的影响,基于试验数据分析对式(1)、(2)进行如下修正:

$$M_u = (1 - ar) \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (4)$$

$$M_{fu} = (1 - ar) f_{fu} b x (h_0 - \frac{x}{2}) - f_{fu} b x (\frac{x_1}{2} - a) \quad (5)$$

式中, α 为调整系数(建议数值0.1); r 为全再生粗骨料取代率;其余参数选取同现行规范。将文中材料力学性能试验数据代入公式(4)、(5),计算结果见表4。从表4可以看出,试验梁的建议公式计算值与

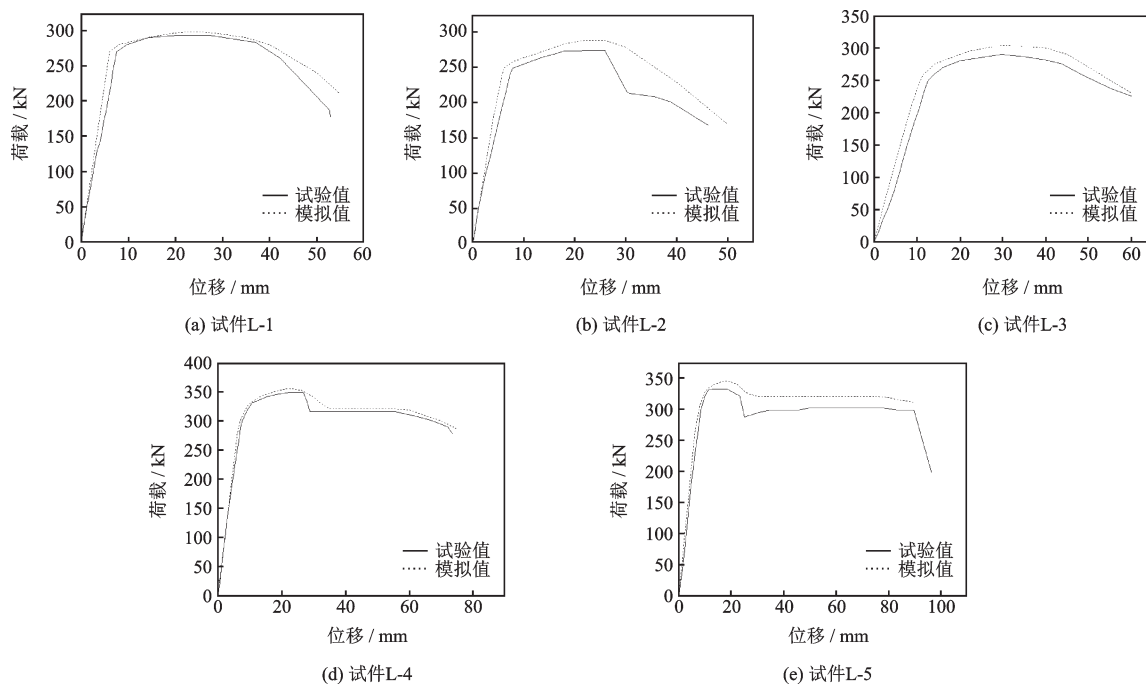


图8 跨中荷载-挠度曲线对比

Fig.8 Comparison of load-mid-span deflection curves

表 4 计算值与试验值对比分析

Table 4 Comparison of experimental and calculated values

试件 编号	试验值/ (kN·m)	规范值/ (kN·m)	试验值/ 规范值	计算值/ (kN·m)	试验值/ 计算值
L-1	102.53	99.52	1.03	99.52	1.03
L-2	96.53	99.42	0.97	89.48	1.08
L-3	101.48	110.63	0.94	98.84	1.03
L-4	121.72	120.86	1.01	120.86	1.01
L-5	116.09	120.86	0.96	120.86	0.96

规范值相比,安全储备有所提高。

5 结 论

(1)全再生粗骨料混凝土梁破坏形态和普通混凝土梁差别不大,均为典型的适筋梁受弯破坏;掺入钢纤维后,梁受压区混凝土破碎脱落范围减小;采用CFRP加固后,试件裂缝数量和延伸高度减少;

(2)全再生粗骨料混凝土梁承载能力和变形能力均弱于普通混凝土梁;钢纤维的使用能够改善梁的变形能力和极限承载能力;粘贴CFRP布可以明显提高梁的抗弯承载力和刚度,相同荷载下对应跨中挠度和受拉钢筋应变值有明显的降低;

(3)ABAQUS有限元分析模型能够得到与试验结果吻合较好的模拟结果,可较好的模拟钢纤维全再生粗骨料混凝土梁的破坏特征和受力性能;现行规范公式和文中修正方法均适用于钢纤维全再生粗骨料混凝土梁的抗弯设计。

参考文献:

[1] Knaack A M, Kurama Y C. Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(3): 014009.

[2] 曹万林, 巩晓雪, 叶涛萍, 等. 不同再生骨料取代率的再生混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 10-18.

Cao W L, Gong X X, Ye T P, et al. Experiment of the flexural performance of recycled concrete beams with different recycled aggregate replacement ratios[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4): 10-18. (in Chinese)

[3] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 24-32.

Chen Z P, Xu J J, Zheng H H, et al. Basic mechanical properties test and stress - strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 24-32. (in Chinese)

[4] Berndt M L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate [J]. Construction and building materials, 2009, 23 (7) : 2606-2613.

[5] 方圣恩, 张培辉, 洪华山. 纤维混凝土梁受弯试验及开裂弯矩计算公式[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 567-574.

Fang Sh E, Zhang P H, Hong H Sh. Bending Test and Calculation Formula of Cracking Moment of Fiber Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 567-574. (in Chinese)

[6] 陈爱玖, 王静, 杨粉. 钢纤维再生混凝土抗压强度试验研究[J]. 混凝土, 2012(4): 64-66.

Chen A J, Wang J, Yang F. Experiments of compressive strength mechanical properties of steel fiber recycled concrete[J]. Concrete, 2012(4): 64-66. (in Chinese)

[7] 高丹盈, 赵亮平, 冯虎, 等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 783-789.

Gao D Y, Zhao L P, Feng H, et al. Flexural toughness and it's evaluation method of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (5): 783-789. (in Chinese)

[8] 高丹盈, 王廷彦, 何亚军. 碳纤维布加固钢筋混凝土短梁受弯试验及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 122-131.

GAO D Y, WANG T Y, HE Y J. Flexural test and calculation on capacity of reinforced concrete short beam strengthened by CFRP sheets [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 122-131. (in Chinese)

[9] 江世永, 陶帅, 飞渭, 等. 碳纤维布加固震损CFRP筋高韧性纤维混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6): 109-124.

Jiang Sh Y, Tao S, Fei W, et al. Experimental study on seismic performance of damaged engineered cementitious composite columns reinforced with CFRP bars and strengthened by CFRP sheets [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(6): 109-124. (in Chinese)

[10] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35

- (11): 1445-1449.
- Xiao J Z. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(11): 1445-1449. (in Chinese)
- [11] 肖建庄, 兰阳. 再生混凝土单轴受拉性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 154-158.
- Xiao J Zh, Lan Y. Investigation on the tensile behavior of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 154-158. (in Chinese)
- [12] 高丹盈, 朱倩, 刘杰. 单轴受压下钢纤维再生骨料混凝土本构模型 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 396-406.
- Gao D Y, Zhu Q, Liu J. Constitutive model of SFR-CAC under uniaxial compression [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(2): 396-406. (in Chinese)
- [13] 卢钦旺, 桂雷, 胡晓斌. 再生混凝土轴心受拉应力-应变关系 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(5): 418-423.
- Lu Q W, Gui L, Hu X B. Relationship between axial tensile stress and strain of recycled aggregate concrete [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(5): 418-423. (in Chinese)
- [14] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38: 2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- Technical specification for fiber reinforced concrete structures: CECS 38: 2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)
- [16] 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)



(上接第 927 页)

- [20] 陈红磊, 王彦博, 陈琛, 等. 某模块化钢结构大学生公寓结构设计 [J]. 钢结构, 2019, 34(8): 46-49, 61.
- Chen H L, Wang Y B, Chen Ch, et al. Structural design of a modular steel university apartment [J]. Steel Construction, 2019, 34(8): 46-49, 61. (in Chinese)
- [21] 徐亚冲. 钢模块柱-柱组合框架结构及其抗震性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Xu Y Ch. Seismic performance analysis of column-to-column combined modular steel frame buildings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] 杨超. 钢模块柱-柱及梁-梁组合耗能减震框架支撑结构分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Yang Ch. Analysis of steel module column-column and beam-beam combined energy dissipation and vibration absorption frame brace structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [24] 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Technical specification for steel structure of tall buildings: JGJ 99—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [25] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)