

文章编号:1671-6833(2022)04-0074-06

# 反复荷载下 CRC 梁柱节点纵筋黏结性能试验研究

楚留声<sup>1</sup>, 王启源<sup>1</sup>, 王帅起<sup>1</sup>, 程站起<sup>1</sup>, 王起帆<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401331)

**摘要:**为研究橡胶混凝土梁柱节点的纵筋黏结性能,设计并制作了4个梁柱节点试件,其中1个为普通混凝土足尺节点,3个为橡胶混凝土足尺节点,橡胶取代率为15%。对各试件分别进行低周反复荷载试验,得到不同材料和不同轴压比下的破坏模式、荷载-位移滞回曲线和纵筋黏结应力滞回曲线,并对纵筋平均黏结应力进行分析。结果表明,低周反复荷载下,各节点试件的破坏模式均为核心区的剪切破坏;平均黏结应力与荷载呈线性增长关系,进入屈服阶段后,平均黏结应力达到峰值并逐渐退化,产生黏结滑移;在同等混凝土强度等级下,橡胶的添加使梁柱节点纵向钢筋黏结强度降低了5%;增大轴压比,节点纵向钢筋黏结应力和相对黏结强度均随之增大,黏结性能提高,高轴压比(0.59)下的纵筋黏结强度比中(0.37)、低(0.15)轴压比下的强度分别增大5%、13%;在该橡胶取代率下,高轴压比(0.59)对纵筋黏结性能的提高作用大于添加橡胶对其的减弱作用。

**关键词:**橡胶混凝土;节点;纵筋黏结应力;低周反复荷载试验;轴压比

**中图分类号:** TU375.4

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2022.04.014

## 0 引言

由于车辆数量不断增多,随之产生的报废轮胎及其处理对全球环境的影响越来越大。垃圾填埋场中的废旧轮胎不仅占用空间、易引起火灾,而且由于其不可降解的特点,会进一步污染土壤。在建筑材料中将废料再利用已成为减少环境污染、同时生产具有相似甚至更好性能的新型可持续材料的全球趋势。橡胶混凝土(CRC)是将废旧轮胎切碎或磨碎成颗粒,然后引入混凝土混合物中以代替天然细骨料而形成的材料<sup>[1-2]</sup>,具有优异的性能,如更好的延性和韧性,更轻的重量,更高的抗裂性、耐磨性和抗冻性等<sup>[3]</sup>。由于这些特点,橡胶混凝土在公路<sup>[4]</sup>、路堤<sup>[5]</sup>、轻质保温填充材料<sup>[6]</sup>、路边隔墙<sup>[7]</sup>等方面均有广泛的应用。

橡胶混凝土梁柱节点将橡胶混凝土应用于节点中,其延性及耗能能力等性能均得以提升<sup>[8]</sup>。良好的黏结锚固性能是确保橡胶混凝土梁柱节点中的钢筋能与橡胶混凝土共同工作的前提,也是保证节点抗震性能的关键因素。目前,大多数学

者是通过拉拔试验来研究钢筋与橡胶混凝土间的黏结锚固性能。文鹏<sup>[9]</sup>、薛刚等<sup>[10]</sup>均是通过中心拉拔试验分别研究了冻融循环次数以及橡胶颗粒的掺量、粒径,钢筋直径、外形等对橡胶混凝土黏结锚固性能的影响。但在地震作用下,梁柱节点处于反复受力状态,橡胶混凝土节点的纵筋黏结性能无法通过拉拔试验准确反映。因此,有必要对地震作用下橡胶混凝土节点的纵筋黏结性能进行深入研究。

鉴于此,本文设计制作4个足尺梁柱中节点试件,通过低周反复荷载试验,探讨以下两个方面问题:其一,相同轴压比下添加橡胶集料对节点梁内纵筋黏结性能的影响;其二,不同轴压比对节点梁内纵筋黏结性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制作

4个试件中,1个为普通混凝土试件,3个为橡胶取代率相同的橡胶混凝土试件,设计依据为GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[11]</sup>和GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[12]</sup>,遵循强柱

收稿日期:2021-10-29;修订日期:2022-01-18

基金项目:河南省科技攻关项目(202102310578)

作者简介:楚留声(1980—),男,河南许昌人,郑州大学副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构研究,E-mail:cls981@163.com。

弱梁、弱节点的设计原则。各个试件尺寸和配筋相同,混凝土强度等级均为 C35。对于橡胶混凝土节点试件,每立方米混凝土中加入粒径 1~3 mm 的橡胶集料 40 kg 替代细集料,橡胶取代率为 15%,此为目前最优的取代率<sup>[13-14]</sup>。根据规范<sup>[12]</sup>,抗震等级为二级时,柱轴压比限值为 0.75,因此本文分别取值 0.59、0.37 和 0.15 来研究高、中、低轴压比下,橡胶混凝土节点纵筋黏结性能的变化规律。各试件的尺寸、配筋等基本参数见图 1 和表 1。

1.2 材料性能

在浇筑试件的同时,预留标准立方体试块,在和试件同等的条件下分别养护 7 d 和 28 d,并测试其抗压强度,结果见表 2。分别对预留的不同直径钢筋进行拉伸试验,得到了其屈服强度  $f_y$ 、极限强度  $f_u$  和弹性模量  $E$  等材性数据,如表 3 所示。

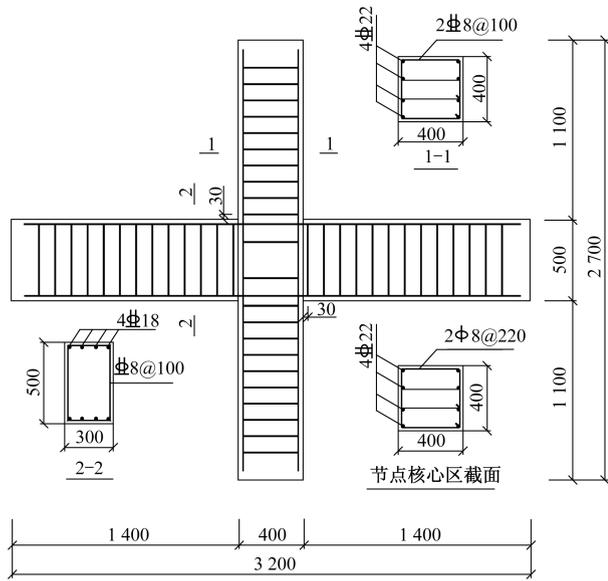


图 1 试件尺寸及配筋详图 (mm)

Figure 1 Size and reinforcement details of specimens (mm)

表 1 试件基本参数

Table 1 Basic parameters of specimens

试件编号	橡胶取代率/%	轴压比	梁端配筋		柱端配筋		核心区			柱梁抗弯强度之比
			纵筋	箍筋	纵筋	箍筋	箍筋	配箍率	剪压比	
BCJ-1	0	0.37	4Φ18	Φ8@100	4Φ22	2Φ8@100	2Φ8@220	0.39	0.21	1.94
BCJ-2	15	0.37	4Φ18	Φ8@100	4Φ22	2Φ8@100	2Φ8@220	0.39	0.21	1.94
BCJ-3	15	0.15	4Φ18	Φ8@100	4Φ22	2Φ8@100	2Φ8@220	0.39	0.21	1.50
BCJ-4	15	0.59	4Φ18	Φ8@100	4Φ22	2Φ8@100	2Φ8@220	0.39	0.21	2.09

表 2 混凝土力学性能试验结果

Table 2 Test results of concrete mechanical properties

混凝土种类	实测抗压强度/MPa	
	7 d	28 d
普通混凝土	25.13	37.41
橡胶混凝土	27.54	38.23

表 3 钢筋材料性能

Table 3 Material properties of reinforcing steel bars

直径/mm	强度等级	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$E$ /GPa
8	HPB300	375	564	210
8	HRB400	441	687	200
18	HRB400	473	604	200
22	HRB400	455	586	200

1.3 加载装置及制度

本文采用拟静力加载方式,在试件的柱顶通过千斤顶提供竖向轴压力来控制轴压比,梁两端由 MTS 作动器提供低周反复荷载,加载装置如图 2 所示。采取荷载与位移混合控制的加载制度:试件未屈服时,以荷载控制逐级加载,每级循环 1 次;试件屈服之后,以位移控制逐级加载,取梁端屈服位移为初级位移,每级循环 3 次,加载至试件

破坏即停止试验。

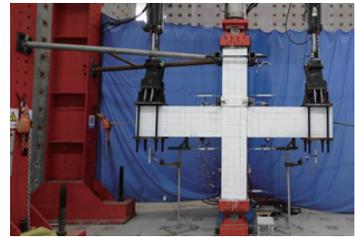


图 2 试验加载装置图

Figure 2 Diagram of test loading device

1.4 测点布置

为了更全面地分析贯穿节点核心区纵筋与橡胶混凝土的黏结性能,选取梁上下 2 根贯穿核心区的纵筋,在柱侧梁端处预先黏结应变片 (BX120-3AA 型),全程记录其应变值。纵筋应变片的预埋位置及代号如图 3 所示。其中,应变片 S1、S2 对应梁上方纵筋,S3、S4 对应梁下方纵筋。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

在低周反复荷载下,4 个节点试件的破坏模

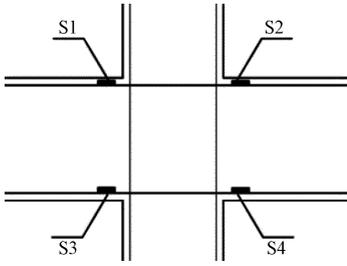


图3 纵筋应变片位置及代号

Figure 3 Position and number of the longitudinal reinforcement strain gauges

式均为核心区剪切破坏。与普通混凝土梁柱节点相似,橡胶混凝土节点破坏过程包括初裂、屈服、极限和破坏4个阶段,不同材料的节点破坏过程如图4~5所示。试件BCJ-3及BCJ-4的各阶段破坏形态与试件BCJ-2非常接近。在该过程中,

柱两侧梁端截面的破坏形式为弯曲破坏,受拉区纵向钢筋屈服。

### 2.2 荷载-位移滞回曲线

通过试验得到各试件在反复荷载下的荷载-位移滞回曲线,如图6所示。其中,初裂阶段的各试件滞回环如图7所示。

从图6~7看出,对比试件BCJ-1与BCJ-2滞回曲线,滞回环大致相同,而节点的残余变形与钢筋黏结性能有较大关系,由此也可初步判断钢筋与橡胶混凝土间的黏结性能和普通混凝土相比大致相当。轴压比不同的情况下,随着轴压比的增大,同一阶段滞回环所围成的面积逐渐增大,且轴压比越大,第一条裂缝出现的时间越晚,因此轴压比增大会抑制裂缝的发展,从而保证混凝土的完整性及混凝土与钢筋黏结的可靠性,提高黏结性能。

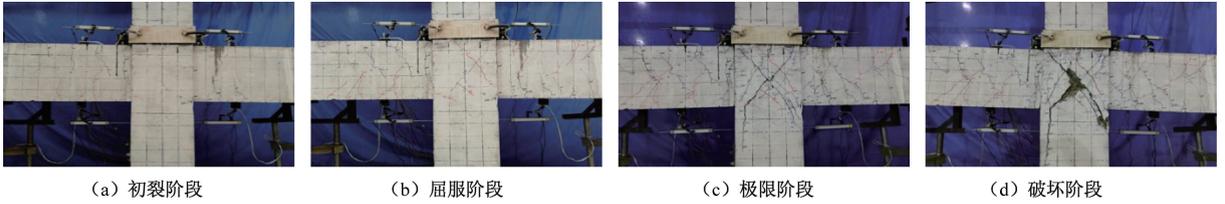


图4 试件BCJ-1破坏过程

Figure 4 Destruction process of specimen BCJ-1

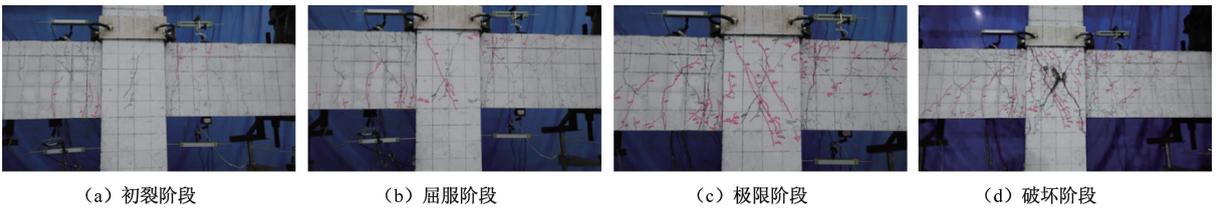


图5 试件BCJ-2破坏过程

Figure 5 Destruction process of specimen BCJ-2

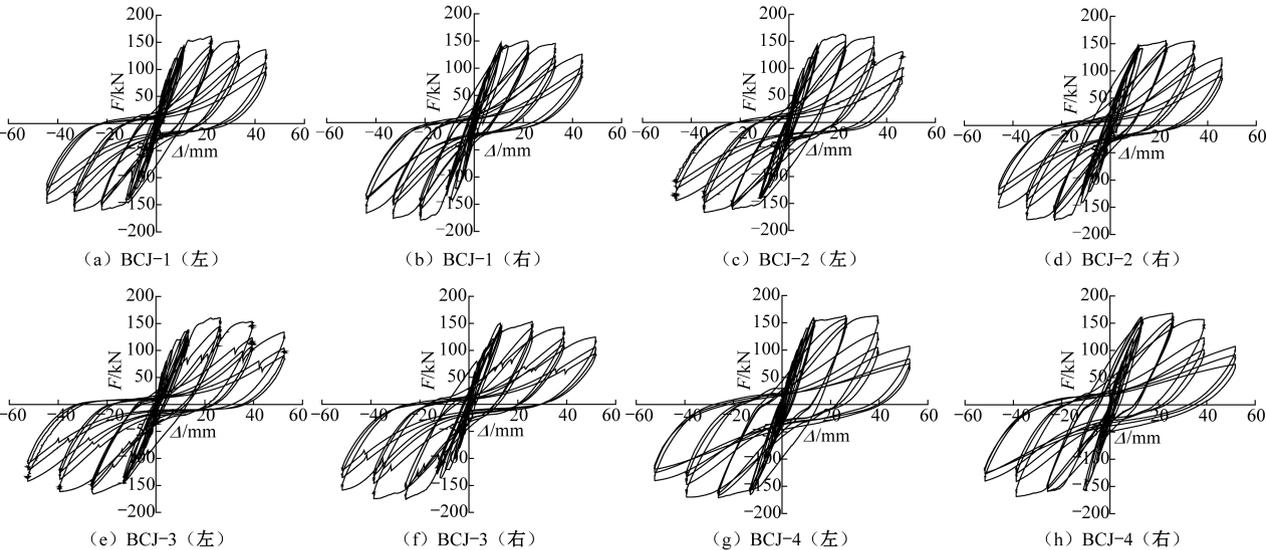


图6 荷载-位移滞回曲线

Figure 6 Load-displacement hysteresis curve

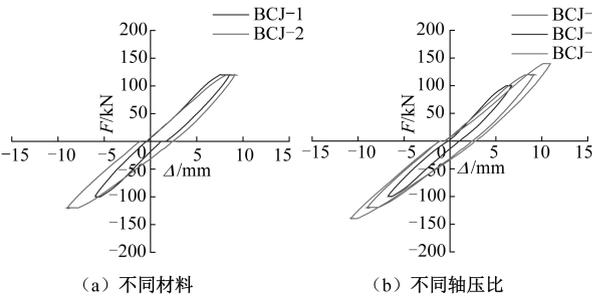


图 7 初裂阶段滞回环对比

Figure 7 Comparison of hysteresis loops in initial fracture stage

2.3 纵筋平均黏结应力滞回曲线

梁柱节点试件在反复荷载下,核心区梁中纵筋一端受拉,而另一端受压,拉压转换就是依靠纵筋的黏结力来实现的<sup>[15]</sup>,即可通过钢筋的应力变化率来反映钢筋与混凝土黏结力的大小。测量整个加载过程中柱侧梁端贯穿节点核心区的纵筋应力变化情况,通过同一根纵向钢筋柱两侧测点的应变差计算该区间内纵筋平均黏结应力,由式(1)分别可得 4 个试件的平均黏结应力  $\tau$ :

$$\tau = \frac{E_s(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)d}{4l} \quad (1)$$

式中:  $E_s$  为纵筋弹性模量,MPa;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  为两个测点应变值;  $d$  为纵筋直径,mm;  $l$  为两个测点之间的距离,mm。

各试件荷载-纵筋平均黏结应力滞回曲线如图 8 所示。由图 8 可知,在前期加载阶段,平均黏结应力与荷载呈现线性增长关系。加载至屈服阶段,平均黏结应力达到最大值,试件出现塑性变

形,受压区纵筋产生拉应力,钢筋附近混凝土损伤,黏结作用逐渐被破坏,开始相对滑移,也因此,部分正反荷载下的纵筋平均黏结应力出现不对称现象;黏结应力虽开始退化,但整体黏结性能仍处于稳定状态。进入极限阶段,梁内纵筋的黏结滑移较为明显,平均黏结应力随之快速退化,曲线越来越贴近横轴。综合考虑各试件曲线斜率的大小及变化程度、后期曲线向横轴靠拢的程度等方面,可以认为添加橡胶会降低黏结性能,增大轴压比可提高黏结性能。

2.4 纵筋平均黏结应力

当贯穿节点的纵筋屈服时,可由式(2)计算其设计黏结应力  $\tau_c$ :

$$\tau_c = \frac{f_y d}{4l} \quad (2)$$

式中:  $f_y$  为纵筋实测屈服强度,MPa;  $d$  为纵筋直径,mm;  $l$  为两个测点之间的距离,mm。

表 4 和表 5 分别为纵筋平均黏结应力相关数据和相对黏结强度。其中,  $\tau_{yc}$  为设计屈服黏结应力,  $\tau_m$  为实际黏结应力均值,  $\tau_m/f_{cu}$  为相对黏结强度。设  $R_{ij}$  为试件 BCI- $i$  与 BCI- $j$  的相对黏结强度之比,则由表 5 可知,  $R_{21}$  为 0.95,  $R_{23}$  为 1.07,  $R_{42}$  为 1.05,  $R_{43}$  为 1.13。

由表 4 及表 5 中数据可知,橡胶混凝土节点实际黏结应力值在 4.13~4.65 MPa,相对黏结强度在 0.108~0.122;在同一轴压比下,普通混凝土中钢筋的黏结性能更好,加入橡胶集料使梁柱节点纵筋黏结性能下降约 5%;轴压比不同时,提高

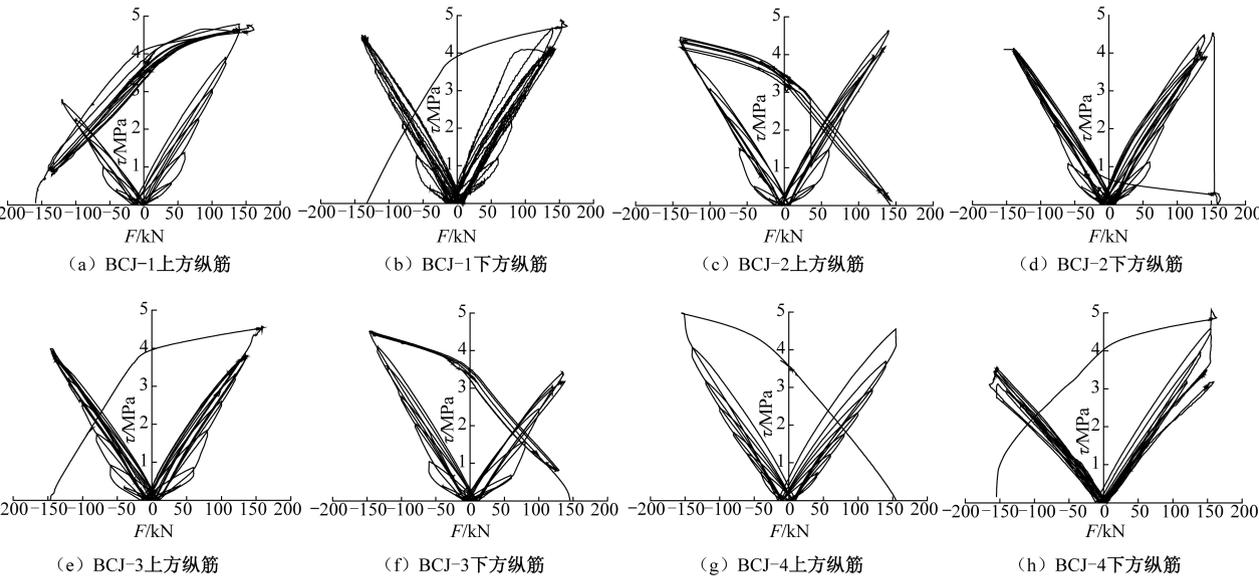


图 8 荷载-纵筋平均黏结应力滞回曲线

Figure 8 Hysteresis curve of load-average bond stress of longitudinal bars

表4 纵筋平均黏结应力相关数据

Table 4 Data about the average bond stress of longitudinal bars

试件编号	$\tau_{yc}/\text{MPa}$	$\tau_m/\text{MPa}$	$\tau_m/\tau_{yc}$
BCJ-1	4.09	4.57	1.12
BCJ-2	4.09	4.44	1.09
BCJ-3	4.09	4.13	1.01
BCJ-4	4.09	4.65	1.14

表5 纵筋相对黏结强度

Table 5 Relative bond strength of longitudinal bars

试件编号	$f_{cu}/\text{MPa}$	$\tau_m/f_{cu}$
BCJ-1	37.41	0.122
BCJ-2	38.23	0.116
BCJ-3	38.23	0.108
BCJ-4	38.23	0.122

轴压比,纵筋黏结应力和相对黏结强度均随之变大。相对于试件 BCJ-2 及 BCJ-3,试件 BCJ-4 的纵筋黏结强度增大了 5%、13%,表明增大轴压比可提高钢筋的黏结性能;对比试件 BCJ-2 及 BCJ-1,由于前者添加了 15% 橡胶,相对黏结强度变小;试件 BCJ-1 分别与 BCJ-2、BCJ-4 相对比,试件 BCJ-2 由于橡胶的掺入,相对黏结强度变小,试件 BCJ-4 同样添加了橡胶,但相对黏结强度却变大,证明高轴压比(0.59)对黏结强度的增大作用要大于橡胶对黏结强度的减小作用,由此也可说明高轴压比较大程度地提高钢筋的黏结性能。

### 3 结论

通过对橡胶混凝土梁柱节点进行低周反复荷载试验,分析节点破坏形态及纵筋黏结性能变化规律,有以下结论。

(1)低周反复荷载下,各节点试件的破坏模式均为核心区的剪切破坏。

(2)平均黏结应力与荷载呈现出线性增长关系,进入屈服阶段后,平均黏结应力达到最大值并开始逐渐退化,但试件仍具有较稳定的黏结强度;加载至极限阶段,梁内纵筋出现明显的黏结滑移,黏结应力退化速率加大。

(3)橡胶混凝土中纵筋黏结性能劣于普通混凝土,橡胶取代率为 15% 时,梁柱节点纵筋黏结强度下降了约 5%。增大轴压比可提高钢筋的黏结性能,相对于试件 BCJ-2 及 BCJ-3,试件 BCJ-4 的纵筋黏结强度分别提高了 5%、13%。

(4)在 15% 的橡胶取代率下,高轴压比(0.59)对黏结性能的增强作用要大于橡胶对其

黏结性能的减弱作用。

(5)橡胶取代率为 15% 的橡胶混凝土节点试件实测黏结应力值为 4.13~4.65 MPa,相对黏结强度在 0.108~0.122。

### 参考文献:

- [1] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate[J]. Journal of materials in civil engineering, 1993, 5(4): 478-496.
- [2] TOPÇU I B. The properties of rubberized concretes[J]. Cement and concrete research, 1995, 25(2): 304-310.
- [3] ROYCHAND R, GRAVINA R J, YAN Z G, et al. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete[J]. Construction and building materials, 2020, 237: 117651.
- [4] AZIZIAN M F, NELSON P O, THAYUMANAVAN P, et al. Environmental impact of highway construction and repair materials on surface and ground waters: case study: crumb rubber asphalt concrete[J]. Waste management, 2003, 23(8): 719-728.
- [5] TANCHAISAWAT T, BERGADO D T, VOOTI-PRUEX P. 2D and 3D simulation of geogrid-reinforced geocomposite material embankment on soft Bangkok clay[J]. Geosynthetics international, 2009, 16(6): 420-432.
- [6] ELTAYEB E, XING M, YAN Z G, et al. Influence of rubber particles on the properties of foam concrete[J]. Journal of building engineering, 2020, 30: 101217.
- [7] ELCHALAKANI M. High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers[J]. Structures, 2015, 1: 20-38.
- [8] 李高举. 橡胶混凝土框架节点抗震性能试验与理论研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.  
LI G J. Experimental and analytical study on seismic behavior of rubber concrete frame joints[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [9] 文鹏. 橡胶混凝土与钢筋粘结性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.  
WEN P. Experimental research on bond strength properties between rubberized concrete and steel bars[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [10] 薛刚, 张悦. 冻融循环作用后橡胶混凝土与钢筋锚固性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 1-6.  
XUE G, ZHANG Y. Experimental study on the anchorage performance of rubber concrete and steel after freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of the Chinese ceramic

society, 2019, 38(1): 1-6.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[13] 赵秋红, 王菲, 朱涵. 结构用橡胶集料混凝土受压全曲线试验及其本构模型[J]. 复合材料学报,

2018, 35(8): 2222-2234.

ZHAO Q H, WANG F, ZHU H. Compression test on curves and constitutive model of crumb rubber concrete for structural purposes[J]. Acta materiae compositae sinica, 2018, 35(8): 2222-2234.

[14] LI D D, ZHUGE Y, GRAVINA R, et al. Compressive stress strain behavior of crumb rubber concrete (CRC) and application in reinforced CRC slab[J]. Construction and building materials, 2018, 166: 745-759.

[15] 肖景平, 付佳丽, 周卫东, 等. 改性再生混凝土框架中节点纵筋粘胶性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(5): 77-84.

XIAO J P, FU J L, ZHOU W D, et al. Experimental study on longitudinal reinforcement bond behaviors of modified recycled aggregate concrete frame interior beam-column joints [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2016, 38(5): 77-84.

## Experimental Study on the Bonding Performance of Longitudinal Reinforcement in CRC Beam-column Joints under Cyclic Loads

CHU Liusheng<sup>1</sup>, WANG Qiyuan<sup>1</sup>, WANG Shuaiqi<sup>1</sup>, CHENG Zhanqi<sup>1</sup>, WANG Qifan<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Civil Engineering, Army Logistics Academy, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** In order to study the longitudinal reinforcement bonding performance of crumb rubber concrete beam-column joints, four beam-column joints specimens were designed and fabricated, including one full-scale joint of ordinary concrete and three full-scale joints of rubber concrete. The rubber replacement rate was 15%. Low cyclic loading tests were carried out on each specimen to obtain the failure modes, load-displacement hysteresis curves and bond stress hysteresis curves of longitudinal bars under different materials and axial compression ratios, and the average bond stress of longitudinal bars was analyzed. The results show that under low cyclic loading, the failure mode of each node specimen is the shear failure of the core area. The average bond stress increases linearly with load. After entering the yield stage, the average bond stress reaches the peak and gradually degenerates, resulting in bond slip. At the same concrete strength grade, the bond strength of longitudinal reinforcement in beam-column joints is reduced by 5% by adding rubber. With the increase of axial compression ratio, the bond stress and relative bond strength of longitudinal reinforcement increase, and the bonding performance is improved. The bond strength of longitudinal bars at high axial pressure ratio (0.59) is 5% and 13% higher than that at medium (0.37) and low (0.15) axial pressure ratios, respectively. Under the rubber replacement rate, the effect of high axial pressure ratio (0.59) on the bond performance of longitudinal reinforcement is greater than that of adding rubber.

**Keywords:** crumb rubber concrete; joint; longitudinal reinforcement bond stress; low cyclic loading test; axial compression ratio