

粘钢加固陶粒混凝土梁抗弯性能试验研究

朱红兵^{1,2}, 于亚刚¹, 金伟良¹, 肖宇¹

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065;

2. 武汉科技大学 高性能工程结构研究院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 为研究钢板加固后陶粒混凝土梁的抗弯性能, 对1片未加固的对比梁和3片厚度分别为0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm的钢板粘贴加固梁进行抗弯试验。试验结果表明: 与未加固陶粒混凝土梁对比, 适筋条件下粘钢加固陶粒混凝土梁的开裂荷载、极限荷载最多分别能提高91.3%、39.5%; 加固梁与未加固梁的破坏机理与破坏形态相同; 钢筋与钢板的应变发展规律基本一致, 钢筋与钢板协同作用效果较好, 且钢筋应变表现出一定的滞后效应; 随着粘钢厚度增加, 钢板对陶粒混凝土梁裂缝的发展抑制效果越明显; 普通混凝土粘梁钢加固抗弯正截面计算公式可用于粘钢加固陶粒混凝土梁的抗弯承载力计算。

关键词: 陶粒混凝土梁; 粘钢加固; 抗弯性能; 破坏形态; 承载力计算

中图分类号: TU528.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0156-06

Experimental Study on Flexural Performance of Ceramsite Concrete Beams Strengthened with Bonded Steel

ZHU Hongbing^{1,2}, YU Yagang¹, JIN Weiliang¹, XIAO Yu¹

(1. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China;

2. Institute of High Performance Engineering Structure, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China)

Abstract: To analyze the flexural performance of ceramsite concrete beams reinforced with steel plate, one unreinforced beam and three beams reinforced respectively with 0.5 mm, 1.0 mm and 1.5 mm thick steel plates were conducted for flexural tests. The results are as follows. Compared with unreinforced ceramsite concrete beam, the cracking load and ultimate load of ceramsite concrete beams strengthened with bonded steel plate under the condition of suitable reinforcement could increased by up to 91.3% and 39.5%, respectively. The damage mechanism and damage modes of them were same as that of unreinforced beam. The strain development law of steel rebars and steel plates was similar. There are clear synergistic effects. Besides, the strain of the rebars exhibited a certain hysteresis phenomenon. As the thickness of the steel plate increased, the inhibition effect of the steel plate on the development of cracks in ceramsite concrete beams was more obvious. The formula for calculating the flexural bearing capacity of the positive section of ordinary concrete after bonding steel was able to be used for the calculation of the flexural bearing capacity of ceramsite concrete beams strengthened with bonded steel.

Keywords: ceramsite concrete beam; bonded steel reinforcement; flexural behavior; failure form; bearing capacity calculation

陶粒混凝土具有环境友好、轻质、保温隔热吸音降噪等诸多优良的物理性能^[1-3], 且多项力学性能优于普通混凝土^[4-6]。陶粒混凝土已在工程结构中

得到广泛应用, 国外利用陶粒混凝土修建了休斯顿贝壳广场大厦、杜肯伯格塞桥、Benicia-Martinez 桥、Coronado 桥、Stolma 桥等, 我国的洛河大桥、永定新

河大桥、珠海国际会议中心也是用陶粒混凝土建设而成^[7]。陶粒混凝土的应用已近百年,早期建造的陶粒混凝土结构已进入需修补加固阶段,新建陶粒混凝土结构的大规模推广应用也亟需解决其全寿命周期中的加固问题^[8-9]。因此,对陶粒混凝土结构加固是工程结构界面临的科学及技术问题。

粘钢法是混凝土结构常用的加固方法,在工程实践中应用广泛^[10-11]。由于陶粒混凝土结构与普通混凝土结构存在强度、刚度、开裂等承载特性上的差异^[8,12-13],进行粘钢加固设计、施工时可能与普通混凝土结构存在较大差别,加固以后结构的承载特性可能也有所差别。对粘钢加固后的陶粒混凝土结构承载性能进行研究可揭示其受力性能及承载机理,对后续陶粒混凝土的设计施工均有较好的指导作用^[14]。

本文通过试验,探索粘钢加固陶粒混凝土梁的可行性。试验共制作 4 根相同构造的梁试件,采用梁体底部受拉区全截面粘贴不同厚度钢板的方式进行加固,通过陶粒混凝土梁抗弯承载力试验,研究不同钢板厚度对陶粒混凝土梁加固效果的影响,并基于普通混凝土梁粘钢加固公式,验证对粘钢加固陶粒混凝土梁抗弯承载力计算的适用性,为陶粒混凝土结构加固提供参考。

1 试验概况

在采用 LC40 陶粒混凝土,粗骨料为 900 级碎石型页岩陶粒;细骨料为堆积密度为 1 570 kg/m³ 的普通河砂;水泥为 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥;试验用水为自来水;减水剂为 HSC 聚羧酸高性能减水剂,配合比如表 1 所示。

表 1 LC40 陶粒混凝土配合比 单位:kg/m ³				
水泥	陶粒	砂	水	减水剂
510	554	730	152	5.1

陶粒混凝土梁依据“强剪弱弯”的梁体抗弯试验原则进行设计,梁长 1 500 mm、宽 100 mm、高 150 mm,净跨径 1 400 mm。梁纵筋为 Φ12,架立筋为 Φ8,型号为 HRB400;箍筋为 Φ6,型号为 HPB300。梁体配筋率为 1.81%,混凝土保护层厚度为 20 mm,实测 28 d 抗压强度平均值为 40.25 MPa。试验梁浇筑前于受拉钢筋跨中粘贴应变片,应变片位置、试验梁构造及配筋如图 1 所示。试验梁共制作 4 根。

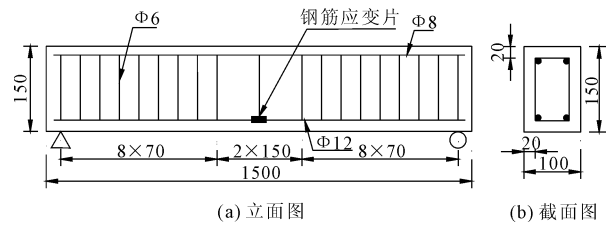


图 1 陶粒混凝土梁构造及配筋(单位:mm)

1.1 陶粒混凝土梁加固

对 4 根陶粒混凝土梁采用不同厚度钢板进行加固。LA 为普通陶粒混凝土梁(不加固);LB、LC、LD 为粘贴钢板加固陶粒混凝土梁,加固所用的钢板厚度分别为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm。钢板长 1 500 mm,宽 100 mm,用点辰粘钢胶将其粘贴于陶粒混凝土梁底。结构胶参数见表 2,加固示意图如图 2 所示。

表 2 点辰粘钢胶参数

胶体性能			粘结能力				
抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	抗弯强度 /MPa	钢对钢拉伸抗剪强度 /MPa	钢对 C45 混凝土正拉粘结强度 /MPa	钢对钢对接粘结抗拉强度 /MPa	钢对钢 T 冲击剥离长度 /mm	
36.7	97.1	79.9	19.9	21.1	3.8	36.5	0.0

1.2 加载前期工作及测量内容

按加固施工规范^[15]完成钢板以及陶粒混凝土梁底面打磨,再用建筑结构胶将钢板粘贴于梁底,并以重物压实保证无气孔,养护一周。加载前,在梁体跨中沿高度方向等间距粘贴 5 片应变片,应变片距离梁体顶面从上至下分别为 1.5 cm、4.5 cm、7.5 cm、10.5 cm、13.5 cm。同时在加固钢板底表面的跨中部位对称粘贴 2 个应变片。试验使用液压式压力试验机加载,加载形式为两点加载,加载方式如图 2、3 所示,使用百分表、程控式静态电阻应变仪分别测量试验梁跨中沿高度方向的应变、跨中挠度。

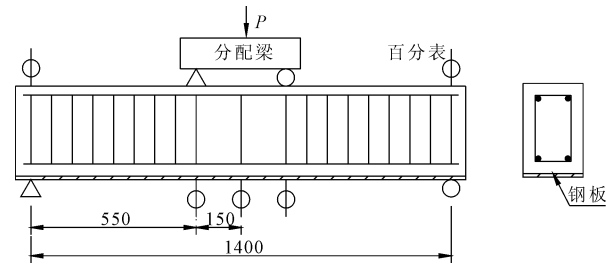


图 2 梁试件加固及加载示意(单位:mm)

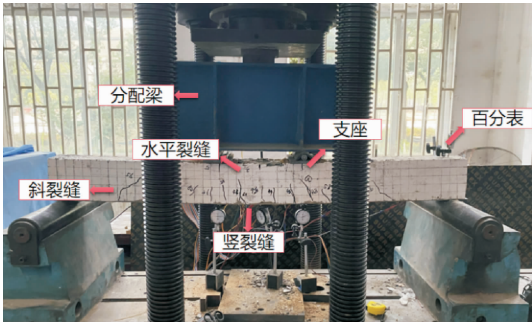


图 3 加载试验装置

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

2.1.1 LA 梁

试验梁 LA 为对比梁。加载初期,试验梁处于弹性阶段,整体无显著变化,当试验荷载加至 23 kN 时,跨中纯弯区首先出现 2 条对称分布的微小竖向裂缝,随着荷载增加其不断向上扩展。当荷载增加至 32 kN 时,弯剪区开始出现明显斜向裂缝,此时竖向纯弯区的竖向裂缝仍然不断向上发展并且宽度扩大。当试验荷载加至 43 kN 时,竖向裂缝基本停止扩展,梁体顶面出现水平裂缝且快速发展,挠度急剧增加,试验荷载陡然大幅下降,随后受压区混凝土被压碎,此时混凝土梁达到极限状态受力破坏,破坏形态为弯曲破坏,如图 4(a)所示。

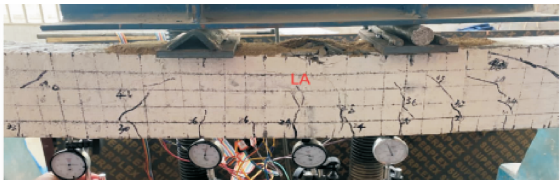
2.1.2 LB 梁、LC 梁、LD 梁

试验梁 LB、LC、LD 分别为厚 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 的钢板加固梁。三种不同厚度钢板加固的试验梁破坏形态及试验现象均类似。以 LB 梁为例,荷载加至 27 kN 前试验梁无明显变化,梁体处于线弹性阶段;加载至 27 kN 时,试验梁开始发出裂缝声响,纯弯区开始出现第一条微小的竖向裂缝,无斜裂缝出现;荷载加至 28 kN 时,梁跨中纯弯区出现两条明显对称分布的竖向裂缝,且随着荷载增加微小裂缝不断增加;当荷载增加至 49 kN 时,开始出现斜裂缝,并且竖向裂缝不断增加,原有的裂缝不断向上发展;当荷载加至 51 kN 时,竖向裂缝基本停止发展,受压区水平裂缝快速发展,受压区混凝土被压碎,机器卸力明显,梁体达到极限状态;破坏形态为弯曲破坏。试验梁破坏形态如图 4(b)—图 4(d)所示。各试验梁的开裂荷载、极限荷载见表 3。

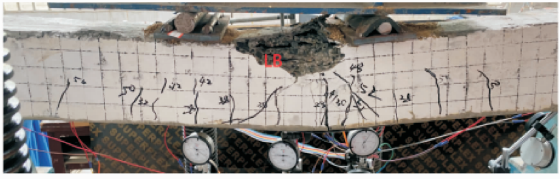
2.2 试验分析

2.2.1 跨中截面混凝土梁应变分析

图 5 为试验梁跨中截面沿高度方向上荷载-混凝土应变图。由图 5 可以看出,荷载较小时,梁 LA、



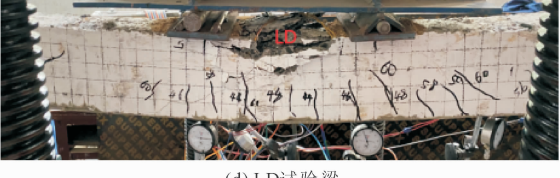
(a) LA 试验梁



(b) LB 试验梁



(c) LC 试验梁



(d) LD 试验梁

图 4 试验梁破坏形态

表 3 试验梁承载力

试件梁	加固前配筋率/%	加固后配筋率/%	开裂荷载/kN		极限荷载/kN
			竖裂缝	斜裂缝	
LA	1.82	1.82	23	32	43
LB	1.82	2.22	28	49	51
LC	1.82	2.62	40	50	60
LD	1.82	3.03	44	54	60

LB、LC、LD 的荷载应变关系基本呈线性发展并且中性轴位置基本保持不变,这是由于加载初期没有裂缝出现。随着加载值增大,梁体开裂且裂缝逐渐向上发展,导致中性轴上移,部分原先受压状态的混凝土变为受拉状态,试件加载期间跨中截面基本符合平截面假定。试验梁未发生破坏时,相同荷载作用下 4 根试验梁相同部位的拉应变从大到小的顺次依次为 LA、LB、LD、LC,说明粘钢加固后钢板在很大程度上代替了混凝土承受拉应力,钢板与受拉钢筋的协同作用效果良好,实际上底部粘钢加固就是增加梁体配筋率。

2.2.2 钢板及钢筋应变分析

图 6 为试验梁跨中部位处的荷载-钢筋(钢板)应变关系曲线。图 6 可见,加载初期未出现裂缝时,钢筋、钢板应变随荷载增加的发展规律比较接近,均

表现为明显的线弹性,说明钢筋钢板协同作用效果较好。随着荷载的增加,钢板应变发展略快于钢筋,钢

筋应变明显滞后于钢板应变,这是由于钢板阻碍了钢筋应变的发展,钢板加固材料得到更加充分的利用。

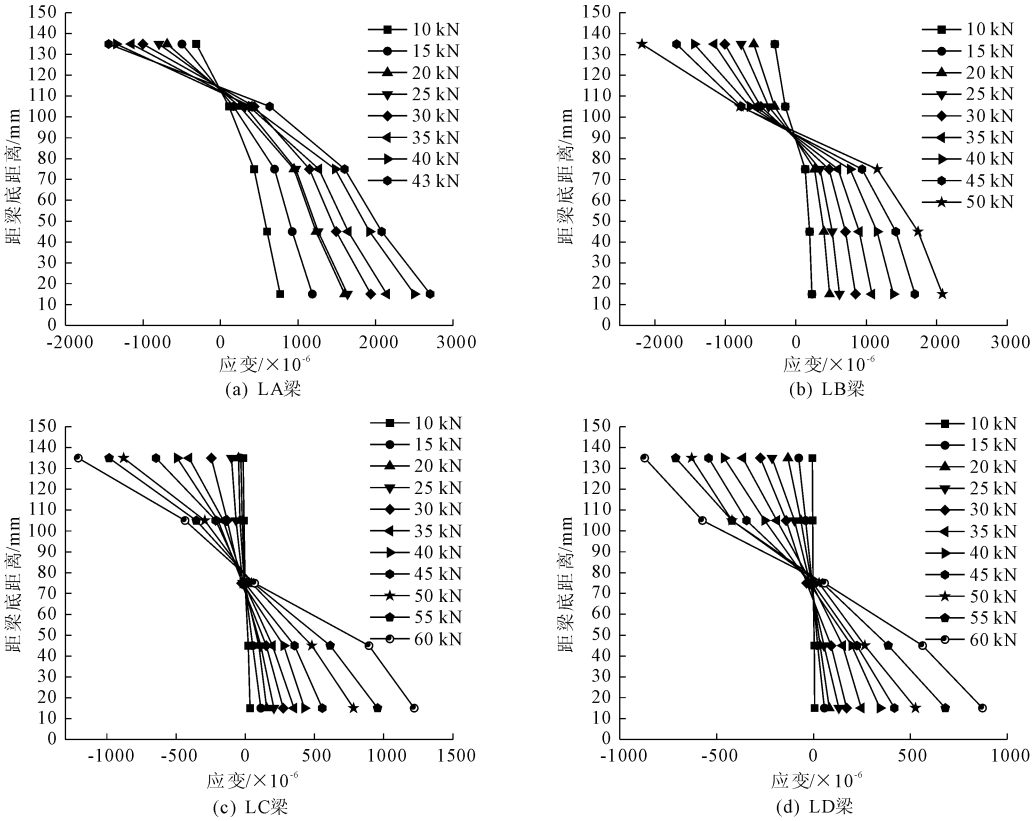


图 5 跨中截面不同高度处荷载-混凝土应变关系

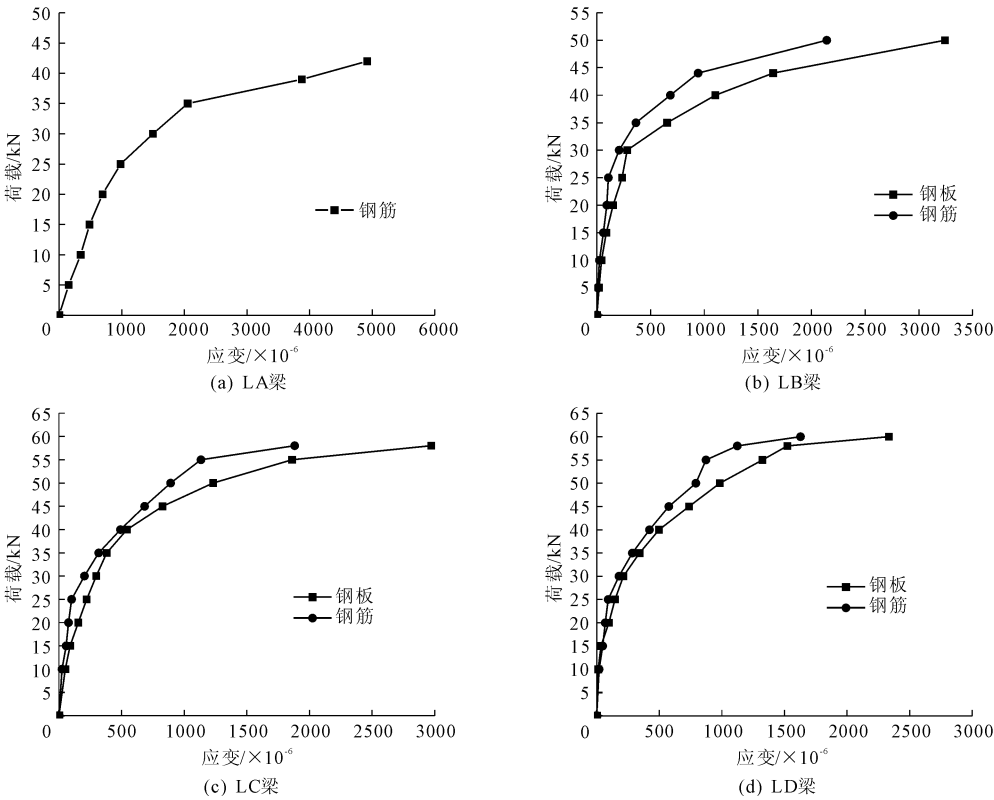


图 6 试验梁跨中荷载-钢筋、钢板应变关系

2.2.3 承载力与位移分析

试验梁实测承载力数据如表 3 所示。由表 3 可知:未经加固的试验梁 LA 的开裂荷载和极限荷载最小,开裂荷载仅为极限荷载的 53.5%;粘钢加固梁 LD 的开裂荷载和极限荷载最大,开裂荷载为极限荷载的 73.3%,这说明粘钢加固能在很大程度延缓裂缝的发生。

由表 3 中 4 根梁的开裂荷载可知:4 根试验梁开裂荷载的大小依次为 LA < LB < LC < LD,这说明随着钢板厚度的增加试验梁的开裂荷载随之增加;与未加固试验梁 LA 比较,梁 LB、LC、LD 的开裂荷载分别提高了 21.7%、73.9%、91.3%,这表明适筋范围内钢板越厚对裂缝发生的抑制效果越明显。

由表 3 中 4 根梁的极限荷载可知:4 根试验梁极限荷载的大小依次为 LA < LB < LC < LD,与未加固试验梁 LA 比较,梁 LB、LC、LD 的极限荷载分别增长了 18.6%、39.5%、39.5%,这说明在一定钢板厚度范围内,加固梁的极限荷载随着钢板厚度增加而增加,但并非钢板越厚,加固后的陶粒混凝土梁极限荷载越大。本试验中,加固配筋率为 2.62% 时,钢板利用率最高,加固效果最为明显。

图 7 为试验梁的荷载-跨中挠度曲线。可见,4 根试验梁的挠度均随着荷载增加而不断增加。试验梁破坏时其对应的挠度值由大到小的顺序为 LB > LA > LC > LD,其挠度值分别对应为 11.353 mm、8.308 mm、7.650 mm、7.381 mm,这说明粘钢加固在一定程度上因刚度增加抑制了梁体的变形能力。试验梁未破坏时,相同荷载作用下挠度变化有较明显差异,说明不同厚度的加固钢板对试验梁挠度影响效果不一样;由计算(荷载-挠度曲线斜率,荷载取值均为 0 kN~25 kN)可知 LA、LB、LC、LD 梁的刚度分别为 5.86 kN/mm、5.93 kN/mm、11.43 kN/mm、18.18 kN/mm,0.5 mm 厚的钢板加固对梁体抗弯刚

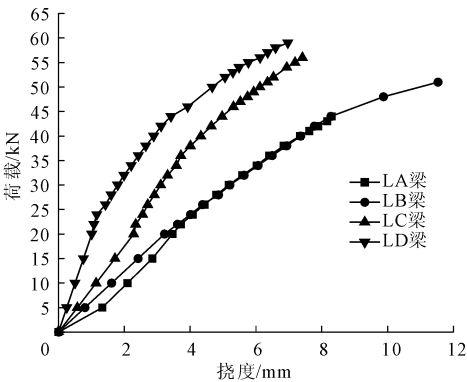


图 7 荷载-跨中挠度曲线

度提升效率最低,1.5 mm 厚的钢板加固对梁体抗弯刚度提升效率最高,说明在一定范围内随着粘钢厚度的增加,梁体刚度逐步提升,但不存在线性增长规律;由于 LB 梁相比于 LA 梁配筋增长率相对较小,故其刚度增加相对较小,而 LC、LD 梁其配筋增长率较大,故 LB 梁与 LA 梁挠度变化趋势接近,而 LC、LD 梁与 LA 挠度变化趋势差异明显。

3 加固梁抗弯承载力计算

据《混凝土结构加固规范》^[15](GB 50367—2013),粘钢加固后的普通混凝土梁弯矩设计值可按下列公式计算:

$$\alpha_1 f_c b x = f_{py} A_{sp} + f_y A_s - f_y' A_s' \tag{1}$$

$$M = (f_{py} A_{sp} + f_y A_s - f_y' A_s') \left(h - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h - a') - f_y A_s (h - h_0) \tag{2}$$

式中: M 为混凝土梁底部粘钢加固后的弯矩设计值; x 为未加固时混凝土受压区高度; b 、 h 分别为矩形截面的宽度和高度; f_y 为钢筋抗拉强度设计值; f_y' 钢筋为抗压强度设计值; f_{py} 为粘贴加固钢板的抗拉设计值; A_{sp} 为粘贴加固钢板截面面积; A_s 、 A_s' 分别为抗拉压钢筋截面面积; a' 为受压钢筋截面中心距离受压顶面距离; h_0 为构件加固前截面有效高度; α_1 为受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压设计值,陶粒混凝土轴心抗压强度设计值按《轻骨料陶粒混凝土设计规范》^[16](JGJ/T 12—2019)取值,本文根据实际情况取值为 26.8 N/mm²。

加固梁弯矩实测值及按式(1)、式(2)计算值如表 4,可知粘钢加固梁弯矩公式计算值与试验实测值较为吻合,说明普通混凝土梁粘钢加固正截面计算公式仍然适用于陶粒混凝土梁。

表 4 试验梁抗弯承载力

试件梁编号	公式计算值 ^[15] (kN·m)	试验实测值 (kN·m)	误差/%
LB	13.5	14.0	3.6
LC	15.9	16.5	3.6
LD	16.1	16.5	2.4

4 结 论

(1) 在适筋条件下,粘钢加固梁与未加固梁的破坏机理、破坏形态基本一致。均表现为随加载值增大,梁体开裂且裂缝逐渐向上发展,导致中性轴上移进而受压区混凝土压碎破坏,属于弯曲破坏。

(2) 粘钢加固能够明显提升陶粒混凝土梁的承

载能力,适筋范围内钢板越厚对裂缝发生的抑制效果越明显,开裂荷载及极限荷载随钢板厚度增加而增加。钢板厚度为0.5 mm~1.5 mm范围内,加固梁较未加固梁的开裂荷载提升了21.7%~91.3%,极限荷载提升了18.6%~39.5%。本试验中加固厚度为1 mm(配筋率为2.62%)时,钢板利用率最高,加固效果最明显。

(3) 经钢板加固后的陶粒混凝土梁的刚度有所提升,钢筋、钢板荷载应变发展规律基本一致,钢筋与钢板协同作用效果较好。钢板厚度越大,钢筋应变滞后效应越明显,钢板对既有梁体内钢筋的荷载分摊效应更好。

(4) 通过公式与试验数据对比分析,两者吻合较好,普通混凝土粘钢加固正截面计算公式仍然适用于粘钢加固陶粒混凝土梁。

参考文献:

- [1] 朱 然. 轻骨料混凝土尺寸效应研究现状综述[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(1): 40-46.
- [2] 栾皓翔, 吴 瑾, 朱万旭, 等. 再生陶粒混凝土吸音板的制备与声学性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1299-1308.
- [3] Yao Weijing, Pang Jianyong, Liu Yushan. Performance degradation and microscopic analysis of lightweight aggregate concrete after exposure to high temperature [J]. Materials, 2020, 13(7): 1566.
- [4] 朱红兵, 张 娜, 余志武, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维陶粒混凝土与螺纹钢的黏结力学特性[J]. 工业建筑, 2022, 52(2): 32-36, 114.
- [5] Shen Yinong, Huang Jiantao, Ma Xiaobing, et al. Experimental study on the free shrinkage of lightweight polymer concrete incorporating waste rubber powder and ceramsite [J]. Composite Structures, 2020, 242: 112152.
- [6] 李晓光, 侯鑫鑫, 梁保真, 等. 铁尾矿陶粒混凝土的制备与性能分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 929-935.
- [7] 王 杰, 宁 宁, 蒋 娜, 等. 轻质混凝土性能及应用现状研究[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(10): 22-25, 29.
- [8] 于周平, 杨伟军, 詹培敏. 陶粒混凝土梁裂缝及延性的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 1991-1996.
- [9] 范利丹, 李培涛, 余永强, 等. 轻骨料混凝土性能、本构关系和破坏机理研究进展[J]. 混凝土, 2017(11): 44-49.
- [10] Szewczyk Piotr, Szumigala Maciej. Optimal design of steel-concrete composite beams strengthened under load [J]. Materials, 2021, 14(16): 4715.
- [11] 褚少辉, 赵士永, 郝军兵, 等. 粘钢加固达到承载力极限状态混凝土梁试验研究与有限元分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(4): 40-45.
- [12] Wang Xiaojuan, Liu Lu, Zhou Hongyuan, et al. Improving the compressive performance of foam concrete with ceramsite: Experimental and meso-scale numerical investigation [J]. Materials & Design, 2021, 208: 109938.
- [13] Ma Shaochun, Li Lianghui, Bao Peng. Seismic performance test of double-row reinforced ceramsite concrete composite wall panels with cores [J]. Applied Sciences, 2021, 11(6): 2688.
- [14] 王 涛, 洪 雷. 长周期干湿交替下预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 170-176.
- [15] 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.
- [16] 轻骨料混凝土应用技术标准: JGJ/T 12—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.