

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.015

钢-压型钢板再生粗骨料混凝土组合梁受弯性能

张建伟,刘方方,卡卓乍,曹万林

(城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学),100124 北京)

摘 要: 为了解钢-压型钢板再生混凝土组合梁受弯性能,分别对 5 个钢-压型钢板再生粗骨料混凝土组合梁和 2 个钢-压型钢板普通混凝土组合梁进行重复荷载作用下的受弯试验,对比分析其受弯性能,研究抗剪栓钉布置数量与形式、板厚和型钢尺寸对再生粗骨料混凝土组合梁的承载力、挠度、破坏形态的影响.试验结果表明:钢-压型钢板再生粗骨料混凝土组合梁与普通混凝土组合梁的受弯性能相近、破坏形态相似.在试验基础上,参照现行普通混凝土组合结构设计规范,给出钢-再生粗骨料混凝土组合梁的受弯极限承载力和挠度计算方法,计算结果与试验结果比较表明,其计算误差与钢-普通混凝土组合梁相近,可用于钢-再生粗骨料混凝土组合梁设计.

关键词: 再生粗骨料混凝土;闭口型压型钢板;组合梁;受弯性能;重复荷载试验

中图分类号: TU398. 2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)12-0086-07

Experimental study on flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete composite beams with closed-section steel deck

ZHANG Jianwei, LIU Fangfang, KAZOZA Emery, CAO Wanlin

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, 100124 Beijing, China)

Abstract: The repeated load tests of five recycled coarse aggregate concrete composite beams and two normal concrete composite beams were carried out to investigate the flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete composite beams with closed-section steel deck. Based on the tests, the flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete composite beams with different shear studs' layout, slab thickness and steel shape was analyzed and compared with that of normal concrete composite beams. The analysis working was mainly focused on yield load, ultimate load, deformation, the slippage between the steel shape and composite slab and damage process of the composite beams during the test. The test results show that the failure modes of recycled coarse aggregate concrete composite beams and normal concrete composite beams are similar. Based on the experimental results, the calculating formulas of the bearing capacity and the deformation of recycled coarse aggregate concrete composite beams with closed-section steel deck were presented with reference to the normal concrete composite structure design code. The calculating results are in good agreement with that of the experimental results, so the calculating formulas can be used for designing recycled coarse aggregate concrete composite beams.

Keywords: recycled coarse aggregate concrete; closed-section steel deck; composite beam; flexural behavior; repeated load test

再生混凝土利用是建筑垃圾资源化的重要组成部分,再生混凝土在量大面广的混凝土结构工程中应用,已成为可持续发展的重要战略问题.为推进中国

再生混凝土的应用,国家 2011 年颁布了行业标准《再生骨料应用技术规程》^[1],上海 2007 年颁布了地方标准《再生混凝土应用技术规程》^[2],北京 2011 年颁布了地方标准《再生混凝土结构设计规程》^[3],这些标准的颁布与实施为再生混凝土的应用提供了重要技术支撑.然而,这些标准均未涉及钢-再生混凝土组合结构相关的技术内容.近年来,随着中国高层及大型复杂建筑的快速发展,由于钢-混凝土组合构件具有能充分发挥钢材和混凝土材料特性、抗震性能好、易

收稿日期: 2014-12-16.
基金项目: 北京市自然科学基金(8132016);国家科技支撑计划项目(2014BAL05B04).
作者简介: 张建伟(1971—),男,教授;
曹万林(1954—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 张建伟, zhangjw@bjut.edu.cn.

于快速施工等优点,在工程结构中得到广泛应用,但目前对钢筋再生混凝土构件试验研究相对较多^[4-5],对于钢-再生混凝土组合构件试验研究较少;而且已有钢-再生混凝土组合构件的试验研究主要集中在钢管再生混凝土柱的压弯力学性能研究上,且因其足尺试件的试验对加载能力有较高要求,多数进行的是模型试验^[6-8].钢-再生混凝土组合梁板的力学性能试验研究很少,文献[9]初步对 6 块压型钢板-再生混凝土组合楼板进行了纵向抗剪承载力试验,分析了不同剪跨比对纵向抗剪承载力的影响.为此,笔者对钢-再生混凝土组合楼板^[10]和组合梁的受弯性能开展了足尺试件试验研究,本文介绍其中的钢-再生混凝土组合梁相关研究结果.

1 试 验

1.1 试件设计

试验共设计 7 个钢-压型钢板混凝土组合梁试件,其中 5 个为再生粗骨料混凝土组合梁,其再生粗

骨料取代率为 100%,再生粗骨料由北京市区内某老旧建筑物拆除工程中的废弃混凝土加工而成,最大粒径为 25 mm,细骨料为天然砂,另外 2 个试件为用于对比的普通混凝土组合梁.压型钢板板肋垂直于钢梁放置,栓钉在压型钢板的每个槽中布置形式分为 3 种:1 型(单排单个)、2 型(单排两个)和 3 型(双排两个)(见图 1).压型钢板采用北京多维钢结构生产的 DW66-240-720 闭口型压型钢板,厚度 1 mm.试件几何尺寸 3 400 mm×820 mm×120 mm (150 mm),计算跨度 3 000 mm,压型钢板再生混凝土组合板的厚度分别为 120 mm 和 150 mm.压型钢板上部混凝土内布置 $\Phi 8@160$ 纵向分布钢筋和 $\Phi 4@200$ 横向分布钢筋.5 mm 厚钢板焊接在钢梁两端,组合板上部纵向钢筋两端分别焊接在钢板上加以锚固,见图 2(a).为增强抗剪栓钉的协同受力性能,栓钉上部点焊 $\Phi 8$ 纵向钢筋即形成梯格抗剪连接键,见图 2(b).组合板两侧浇筑 50 mm 宽的混凝土条带,将压型钢板包裹密实,具体设计参数见表 1,钢材力学性能见表 2.



(a) 单排单个



(b) 单排两个



(c) 双排两个

图 1 栓钉布置

1 : 0.36 : 1.51 : 2.17.试件浇筑时同条件制作边长为 150 mm 的立方体试块和 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体试块.实测再生混凝土立方体抗压强度均值为 55.9 MPa,弹性模量为 3.55×10^4 MPa,普通混凝土立方体抗压强度均值为 65.8 MPa,弹性模量为 3.67×10^4 MPa.

表 1 试件设计参数

试件编号	板厚/ mm	栓钉布 置形式	工字钢 梁型号	再生粗骨料 取代率/%	剪跨比
SRCB-120-1-20a	120	1	20a	100	3.125
SRCB-120-2-20a	120	2	20a	100	3.125
SRCB-120-3-20a	120	3	20a	100	3.125
SRCB-150-3-20a	150	3	20a	100	2.857
SRCB-150-3-25a	150	3	25a	100	2.500
SCB-120-3-20a	120	3	20a	0	3.125
SCB-150-3-20a	150	3	20a	0	2.857

注:剪跨比为加载点距支座距离与组合梁梁高之比.

1.2 试件加载方案

组合梁两端采用简支支座.试验加载时采用跨中一个竖向千斤顶加载,该荷载通过分配梁平均分



(a) 纵筋端部锚固措施



(b) 栓钉协同抗剪增强措施

图 2 组合梁的构造措施

试件的混凝土强度设计等级为 C50,混凝土配合比为水泥 : 水 : 砂 : 再生粗骨料(或天然石子)=

配至组合梁的三分点位置处.为防止组合板局部压坏,在分配梁与组合板之间垫有与试件宽度相同、刚度较大的钢轴与厚钢板组合件,钢板与组合板之间铺有细砂,保证在加载位置处线荷载施加均匀;在组合梁型钢与两支座间亦垫有厚钢板,保证在支座处线荷载施加均匀.试验采用单向重复加载以测试组合梁在弹塑性阶段的残余变形.每级加载后稳定 5 min,观察并记录试验现象.组合梁屈服以前采用荷载控制加载,屈服之后采用位移控制加载.使用数据采集系统对荷载、挠度、混凝土应变、钢梁应变和组合梁叠合面相对滑移进行连续采集.

表 2 钢材力学性能				MPa
类别	型号	屈服强度	极限强度	弹性模量
钢筋	Φ8	424	489	2.01×10^5
	Φ4	654	752	2.06×10^5
钢梁	I 20a	298	447	2.05×10^5
	I 25a	291	449	2.02×10^5
压型钢板	DW66-720	235	320	2.00×10^5

1.3 测点布置

在组合梁的钢梁下翼缘底部布置位移计 1、2 和 3,用于测量跨中和加载点处的挠度值,布置位移计 4 用于测量组合板的跨中挠度值.在支座两端各布置一个百分表用于测量组合梁的支座变形;在组合梁支座附近各布置百分表 3、4 以测量组合板和钢梁之间的滑移.沿钢梁的跨中和加载点截面高度方向布置钢梁应变测点(S1~S8),沿混凝土组合板跨中顶面、侧面和混凝土组合板加载点侧面分别布置混凝土应变测点(C1~C11).图 3 为位移测点和应变测点布置情况.

2 结果及分析

2.1 破坏特征

加载初期,组合梁上部混凝土未出现裂缝,各试

件近似弹性变形.加载至 20%~30%极限荷载时,组合板加载点附近混凝土条带底部出现裂缝,裂缝位于压型钢板凹槽附近.此时支座两端滑移大致相等.随着荷载继续增加,混凝土条带底部裂缝逐渐贯通向板侧面发展并向上延伸.每一循环加载完毕卸载时,压型钢板发出回弹的声响.支座两端滑移增长到一定程度时,其中一侧的滑移量增长趋势明显增大,表明由于施工质量问题 and 材料误差原因,组合梁两侧的抗剪承载能力存在一定差异,滑移在相对薄弱的一侧发展明显.抗剪薄弱一侧加载点处的裂缝增多,宽度加大.组合梁较弱一侧的抗剪能力趋于极限时,承载力曲线开始分为两种形态:一种是抗剪较薄弱一侧的端部钢板焊缝突然被撕裂,发出一声巨响,最外侧两至三列栓钉焊缝直接被剪坏,组合梁整体工作性能破坏,承载力急剧下降;另一种是端部钢板焊缝一部分被撕裂,组合梁承载力略有下降后保持不变,可继续加载至焊缝完全撕裂,最外侧至内侧栓钉焊缝逐渐被剪坏,组合梁承载力再次下降.继续加载,承载力保持不变或略有上升.此时组合梁的承载力主要由钢梁提供,组合板受弯抗力贡献较小.部分组合梁的破坏照片见图 4.

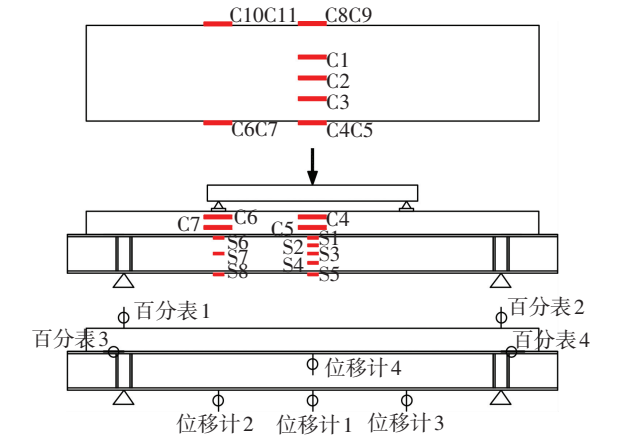


图 3 位移计和应变片布置



(a) SRCB-120-1-20a 加载点裂缝 (b) SRCB-120-3-20a 加载点裂缝 (c) SRCB-120-3-20a 端部滑移

图 4 试件破坏图

试验表明:7 个钢-压型钢板混凝土组合梁破坏过程相似,且在峰值荷载过后的大变形阶段,因纵向剪力较大,加上栓钉焊缝存在一定的施工缺陷,最终出现了栓钉破坏现象,为此应注意加强实际工程中栓钉焊接质量控制与检测;增加栓钉布置数量能够

提高再生混凝土组合梁的承载力;与普通混凝土组合梁相比,再生混凝土组合梁裂缝较宽,变形较大.

2.2 承载力

组合梁的承载力实测值列于表 3,其中 M_y 为组合梁的屈服弯矩; $M_{1/200}$ 为组合梁跨中挠度达 1/200

跨度时对应的弯矩; M_u 为组合梁的极限弯矩。 u_y 为组合梁屈服弯矩对应的挠度; u_u 为组合梁极限弯矩对应的挠度。

由表 3 可知:1)SRCB-120-1-20a 与 SRCB-120-3-20a 相比,屈服弯矩、极限弯矩分别低 13.6%、16.6%,SRCB-120-2-20a 与 SRCB-120-3-20a 相比,屈服弯矩、极限弯矩分别低 2.9%、7.5%,表明增加栓钉数量可明显提高再生混凝土组合梁的屈服弯矩、极限弯矩,栓钉布置形式对屈服弯矩、极限弯矩影响相对较小,每个槽中 2 个栓钉横向双排布置的方案优于纵向单排布置方案;2) SCB-120-3-20a 与 SRCB-120-3-20a相比屈服弯矩提高 2.5%,极限弯矩提高 1.1%;SCB-150-3-20a 与 SRCB-150-3-20a 相比屈服弯矩降低 0.5%,极限弯矩降低 3.4%,表明再生粗骨料混凝土组合梁与普通混凝土组合梁的屈服弯矩和极限弯矩差值均在 5%以内,两者的受弯承载力相近;3)SRCB-150-3-20a 与 SRCB-120-3-20a 相比,组合板厚提高 25%,屈服弯矩提高 27.0%,极限弯矩提高 17.9%;SRCB-150-3-25a 与 SRCB-150-3-20a 相比,钢梁高度提高 25%,屈服弯矩提高 40.2%,极限弯矩提高 46.5%,表明相对于组合板厚度变化,型钢型号对组合梁的受弯承载力影响更加显著,且自重变化相对较小。

栓钉布置数量与形式对再生粗骨料混凝土组合梁和普通混凝土组合梁的承载力影响试验值比较见

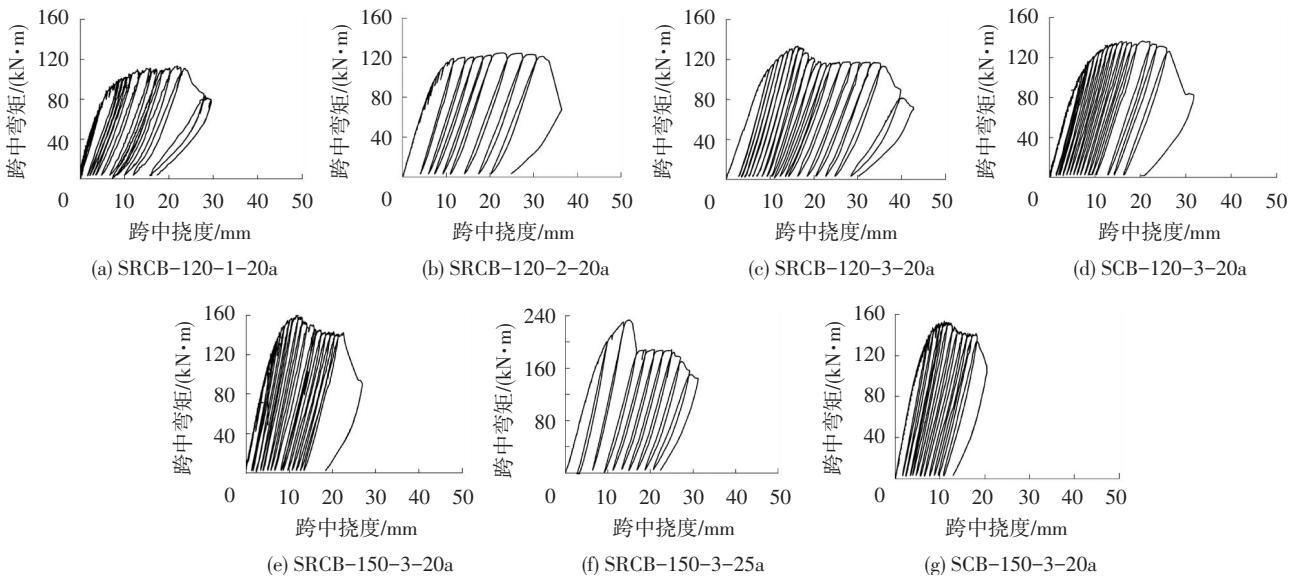


图 5 跨中弯矩-位移曲线

分析试验过程和图 5、6 可知:1)因为再生粗骨料混凝土与普通混凝土的力学性能相近,应力与应变关系曲线在峰值应力前基本一致,只是再生粗骨料混凝土的弹性模量略低些,且峰值应力后再生粗骨料混凝土的延性相对较好,所以 7 个组合梁试件的损伤破坏过程相似,裂缝开展过程及位置接近,最终在栓钉焊

表 4. 栓钉布置数量与形式对再生混凝土组合梁承载力的影响规律与对普通混凝土组合梁承载力的影响规律基本相同。

表 3 组合梁承载力试验值

试件编号	$M_y /$ (kN · m)	u_y	$M_{1/200} /$ (kN · m)	$M_u /$ (kN · m)	u_u	M_y / M_u
SRCB-120-1-20a	105.12	11.22	111.24	113.58	21.85	0.93
SRCB-120-2-20a	118.09	10.84	120.55	126.06	22.80	0.94
SRCB-120-3-20a	121.61	11.97	131.08	136.22	16.28	0.89
SCB-120-3-20a	124.67	10.30	134.27	137.72	20.66	0.91
SRCB-150-3-20a	154.46	9.77	146.87	160.58	11.73	0.96
SRCB-150-3-25a	216.52	11.54	233.84	235.31	15.00	0.92
SCB-150-3-20a	153.68	10.36	142.51	155.05	10.94	0.99

表 4 普通混凝土组合梁的极限承载力试验值

试件编号	$M_u^{[11]} /$ (kN · m)	比值	试件编号	$M_u^{[本文]} /$ (kN · m)	比值
LSBS-1	178.60	1.00	SRCB-120-1-20a	113.58	1.00
LSBS-2	170.53	0.96	SRCB-120-2-20a	126.06	1.11
LSBS-3	193.77	1.09	SRCB-120-3-20a	136.22	1.20

2.3 弯矩-挠度曲线

实测所得试件的跨中弯矩-挠度曲线见图 5,骨架曲线比较见图 6.实测所得部分试件跨中截面应变分布变化规律见图 7.

缝处发生破坏,栓钉焊缝破坏后组合梁的承载力由钢梁提供,组合板的承载力可忽略不计;2)钢-压型钢板混凝土组合梁的屈服荷载会因为钢梁与组合板间的滑移而降低^[12],组合板两端与钢梁焊接成整体的钢板起到了抗剪连接件的作用,在一定程度上阻止了组合板与钢梁之间的滑移,焊接钢板撕裂后形成不同程度

的明显滑移,因此承载力降低程度不同.从图 7 可看出,试件承载力达到栓钉焊缝抗剪承载力极限状态时,混凝土组合板跨中上表面混凝土压应变值为 0.000 5~0.000 9,没有达到其极限压应变值;钢梁下翼缘应变达到 0.001~0.002;3) 承载力达到 $0.6P_u$ 前组合

梁跨中截面应变分布基本符合平截面假定, $0.6P_u$ 之后由于相对滑移,组合板与钢梁接触面之间应变明显不同;承载力达到 $0.8P_u$ 前组合梁跨中截面应变分布基本符合平截面假定, $0.8P_u$ 之后由于滑移效应使组合梁跨中截面应变分布明显不均.

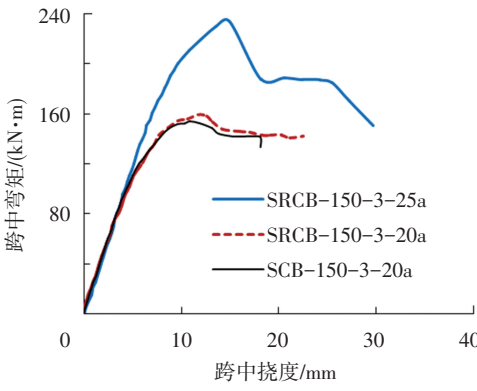
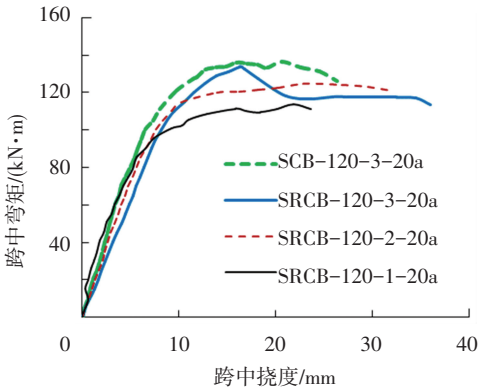


图 6 跨中弯矩-位移骨架曲线比较

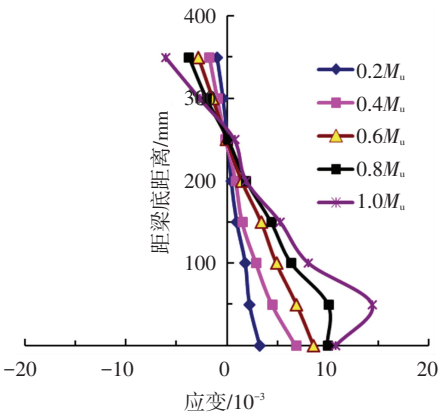


图 7 SRCB-150-3 跨中截面应变分布

3 组合梁连接程度

一个栓钉抗剪件承载力按钢结构设计规范计算^[12]:

$$N_v^c = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s \gamma f$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量, f_c 为混凝土抗压强度设计值, A_s 为栓钉截面面积, f 为栓钉抗拉强度设计值, γ 为栓钉材料抗拉强度最小值与屈服强度之比.

本文采用压型钢板垂直与钢梁布置,栓钉承载力应乘以折减系数:

$$\beta_v = \frac{0.85}{\sqrt{n_0}} \cdot \frac{b_w}{h_e} \left(\frac{h_d - h_e}{h_e} \right) \leq 1.$$

式中: n_0 为梁截面一个肋中布置的栓钉数,多于 3 个时按照 3 个计算; b_w 为混凝土凸肋的平均宽度; h_e 为混凝土凸肋高度; h_d 为栓钉高度.

两侧焊接钢板的抗剪承载力 N_s 按《钢结构设计规范》中正面角焊缝进行计算:

$$\sigma_t = \frac{N_s}{h'_e l_w} \leq \beta_f f_t^w.$$

式中: σ_t 为按有效面积计算垂直与焊缝长度方向的

应力; h'_e 为焊缝的计算厚度, l_w 为角焊缝的计算长度; β_f 为正面角焊缝强度设计增大系数; f_t^w 为角焊缝强度设计值.

组合梁剪跨区抗剪承载力 F 为剪跨区栓钉抗剪承载力与焊接钢板之和,型钢与组合板界面的纵向承载力 F_u 按钢结构设计规范计算^[12],组合梁的连接程度 F/F_u 计算结果列于表 5.

表 5 组合梁抗剪连接程度

试件编号	栓钉	nN_v^c/kN	N_s/kN	F/kN	F_u/kN	连接程度
SRCB-120-1-20a	4Φ16	225.64	122.98	348.62	1 061.77	0.328
SRCB-120-2-20a	8Φ16	451.28	122.98	509.73	1 061.77	0.480
SRCB-120-3-20a	8Φ16	451.28	122.98	509.73	1 061.77	0.480
SCB-120-3-20a	8Φ16	451.28	122.98	509.73	1 061.77	0.480
SRCB-150-3-20a	8Φ16	451.28	122.98	509.73	1 061.77	0.480
SRCB-150-3-25a	8Φ16	451.28	153.64	540.39	1 411.64	0.383
SCB-150-3-20a	8Φ16	451.28	122.98	509.73	1 061.77	0.480

4 组合梁屈服荷载

滑移效应的存在会降低钢-压型钢板混凝土组合梁的屈服荷载,由换算截面法计算得到的弯矩值与试验值相比明显偏大,因此文献[13]给出了考虑滑移效应的组合梁屈服荷载计算公式:

$$M_y = M_{ys} - \Delta M = M_{ys} \left(1 - \frac{h_s E_s}{6 (EI)_s} \times \xi_s (2A_{ft} + A_w) (2e + h) \right).$$

式中: M_y 为考虑滑移效应时组合梁的屈服荷载, M_{ys} 为由换算截面法计算得到的组合梁屈服荷载, A_{ft} 为钢梁上翼缘面积, A_w 为钢梁腹板面积, ξ_s 为考虑滑移效应时短期刚度折减系数^[14].

由上述公式计算所得各试件屈服荷载值 M_y^c 与试验值 M_y^t 见表 6.再生粗骨料混凝土组合梁与普通混凝土组合梁的屈服荷载计算值和试验值均较接

近,说明可使用文献[13]提出的钢-普通混凝土组合梁屈服荷载计算方法计算钢-再生粗骨料混凝土组合梁的屈服荷载。

表 6 组合梁屈服荷载试验值与计算值

试件编号	$M_y^t/(kN \cdot m)$	$M_y^c/(kN \cdot m)$	M_y^c/M_y^t
SRCB-120-1-20a	105.12	116.36	1.11
SRCB-120-2-20a	118.09	109.22	0.92
SRCB-120-3-20a	121.61	109.22	0.90
SCB-120-3-20a	124.67	109.91	0.88
SRCB-150-3-20a	154.46	139.00	0.90
SRCB-150-3-25a	216.52	192.45	0.89
SCB-150-3-20a	153.68	140.10	0.91

5 组合梁极限荷载

按照钢结构设计规范规定的部分抗剪连接组合梁在正弯矩区段的极限弯矩公式进行计算^[12],各试件的计算结果 M_u^t 见表 7。

进入破坏阶段时,滑移效应对组合梁的极限抗弯承载力有所影响,当 $M < M_{ys}$ 时取

$$M = FH.$$

表 7 承载力实测值与计算值

试件编号	M_u^t	$M_u^1/(kN \cdot m)$	M_u^1/M_u^t	$M_u^2/(kN \cdot m)$	M_u^2/M_u^t	$M_u^3/(kN \cdot m)$	M_u^3/M_u^t
SRCB-120-1-20a	113.58	59.82	0.53	84.13	0.74	97.73	0.86
SRCB-120-2-20a	126.06	153.60	1.22	123.01	0.98	134.65	1.07
SRCB-120-3-20a	136.22	153.60	1.13	123.01	0.90	146.24	1.07
SCB-120-3-20a	137.72	154.48	1.12	122.99	0.89	146.22	1.07
SRCB-150-3-20a	160.58	168.89	1.05	133.17	0.83	158.32	0.99
SRCB-150-3-25a	235.31	238.76	1.01	162.83	0.69	191.94	0.81
SCB-150-3-20a	155.05	169.77	1.09	133.19	0.86	158.34	1.02

6 组合梁挠度

有关钢-压型钢板混凝土组合梁抗弯刚度和挠度的分析,滑移效应对组合梁正常使用极限状态时挠度计算的影响较大.按钢结构设计规范采用的换算截面法计算所得结果虽考虑了滑移效应^[12],但与试验值相比误差较大,原因是型钢梁与组合楼板之间的滑移考虑不够充分,导致组合梁的抗弯刚度计算值偏大,计算挠度偏小.文献[13]从原理上考虑了钢梁与压型钢板-混凝土组合板之间的滑移效应,建立了钢-压型钢板混凝土组合梁的挠度公式,计算结果表明其具有良好的计算精度。

本文采用文献[13]提出的修正折减刚度法计算再生粗骨料混凝土组合梁挠度:

$$B_s = B_e / (1 + \xi_s).$$

式中: B_s 为考虑滑移效应时钢-压型钢板混凝土组合梁的短期刚度, B_e 为换算截面刚度, $B_e = B_1 w + B_2 (1 - w)$, B_1 和 B_2 表示压型钢板带肋截面和薄弱截面的刚度, w 表示压型钢板整个波形中带肋部分所占的比例, ξ_s 表示考虑滑移效应时短期刚度折减系数。

式中: M_{ys} 表示按照换算截面法计算得到的组合梁屈服荷载; F 为抗剪承载力计算值, $F = nN_v^c + N_s$, n 为栓钉的数目, N_v^c 为每个栓钉的纵向抗剪承载力, N_s 为焊接钢板的抗剪承载力; H 为压型钢板混凝土组合板与钢梁合力作用点的距离。

当 n 取组合梁弯剪段内栓钉数时,其极限弯矩计算结果表示为 M_u^2 ;当 n 取距组合梁两端 $1.4B$ (混凝土板宽) 范围内栓钉数时,其极限弯矩计算结果表示为 M_u^3 , M_u^2 、 M_u^3 以及试验值 M_u^t 见表 7。

由表 7 可知:1) SCB-120-3-20a 与 SRCB-120-3-20a 相比,SCB-150-3-20a 与 SRCB-150-3-20a 相比,其极限弯矩差值均在 5% 以内,表明再生粗骨料混凝土组合梁与普通混凝土组合梁的极限承载力较为接近,可以按照普通混凝土组合梁的极限承载力计算方法计算再生粗骨料混凝土组合梁;2) n 取组合梁弯剪段内栓钉数计算抗剪承载力时,其计算结果均小于试验结果,具有较好的设计可靠度。

在计算构件使用阶段变形时, M/M_u 在 0.5~0.7 区域内的弯矩-曲率关系相对稳定^[15],因此本文采用 $0.6M_u$ 所对应的弯矩和挠度进行计算比较.按照中国钢结构设计规范^[12]和文献[13]提出修正折减刚度法,计算所得再生粗骨料混凝土组合梁的挠度列于表 8。

由表 8 可知:按《钢结构设计规范》计算,其计算值均低于试验值,说明其可靠性相对偏低;按文献[13]提出的修正折减刚度法计算所得挠度与试验值吻合较好;栓钉布置形式对再生粗骨料混凝土组合梁短期刚度和挠度影响较大;再生粗骨料混凝土组合梁挠度相对于普通混凝土组合梁略大;提高组合梁的板厚和型钢型号均使挠度有所减小;可以参照文献[13]的修正折减刚度法计算再生粗骨料混凝土组合梁挠度。

分析试验结果和相关文献,再生粗骨料混凝土梁的抗弯刚度和挠度与普通混凝土组合梁的差异主要表现在:相同强度等级条件下,再生混凝土弹性模量较低、裂缝宽度较大,其抗弯刚度相对小些,挠度变形较大.因此,参照普通混凝土组合梁挠度计算方

法,计算再生粗骨料混凝土组合梁挠度,可考虑对其抗弯刚度乘以适当降低系数加以修正,本文根据试验结果,建议折减系数暂取 0.9(待试验数据丰富后进一步修正),计算结果列于表 8.

表 8 钢-压型钢板再生粗骨料混凝土组合梁挠度计算值与实测值

试件编号	$0.6M_u/$ (kN·m)	$f_{\text{实测}}/$ mm	$B_s^{[12]}/$ (kN·m ²)	$f^{[12]}/$ mm	$f^{[12]}/$ $f_{\text{实测}}$	$B_s^{[13]}/$ (kN·m ²)	$f^{[13]}/$ mm	$f^{[13]}/$ $f_{\text{实测}}$	$B_s/$ (kN·m ²)	$f/$ mm	$f/f_{\text{实测}}$
SRCB-120-1-20a	68.15	4.08	23 786	3.06	0.75	16 752	3.90	0.96	15 076	4.33	1.06
SRCB-120-2-20a	75.64	5.10	23 786	3.16	0.62	15 578	4.65	0.91	14 020	5.17	1.01
SRCB-120-3-20a	81.73	6.35	23 786	3.54	0.56	15 578	5.03	0.79	14 020	5.58	0.88
SCB-120-3-20a	82.63	4.91	23 993	3.55	0.72	15 726	5.03	1.03			
SRCB-150-3-20a	96.35	4.24	30 585	3.27	0.77	21 465	4.30	1.01	19 319	4.78	1.13
SRCB-150-3-25a	141.19	4.12	49 551	2.99	0.73	34 170	3.96	0.96	30 753	4.40	1.07
SCB-150-3-20a	93.03	3.94	30 817	3.13	0.80	21 801	4.09	1.04			

注: $B_s^{[12]}$ 是按中国《钢结构设计规范》计算的刚度, $B_s^{[13]}$ 是按文献[13]计算的刚度, B_s 是再生粗骨料混凝土组合梁按 $0.9B_s^{[13]}$ 计算的刚度.

7 结 论

1)再生粗骨料混凝土组合梁与普通混凝土组合梁破坏过程基本一致,即几何尺寸、配筋和混凝土强度等级相同条件下,再生粗骨料混凝土组合梁与普通混凝土组合梁的屈服荷载与极限荷载较为接近,但跨中挠度相对较大.

2)栓钉布置形式及数量对再生粗骨料混凝土组合梁承载力的影响与对普通混凝土组合梁承载力影响基本相同.

3)增大组合板厚及型钢高度能提高组合梁承载力,相对于组合板厚度变化,型钢高度变化对组合梁的受弯承载力影响更加显著,且自重变化相对较小.

4)与普通混凝土组合梁相比,再生粗骨料混凝土对组合梁的承载力影响较小,可采用普通混凝土组合梁承载力计算方法计算再生粗骨料混凝土组合梁的承载力.

5)参照普通混凝土组合梁考虑滑移效应的挠度计算方法,考虑抗弯刚度折减系数 0.9,计算再生粗骨料混凝土组合梁挠度,可得符合工程要求精度的计算结果.

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T240—2011 再生骨料应用技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[2] 上海市建设和交通委员会. DG/TJ08—2018—2007 再生混凝土应用技术规程[S].上海:同济大学出版社,2007.

[3] 北京市规划委员会,北京市质量技术监督局. DB11/T803—2011 再生混凝土结构设计规程[S].北京:北京市城乡规划标准化办公室,2011.

[4] AJDUKIEWICZ A B, KLISZCZEWICZ A T. Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate

concrete and natural aggregate concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(2): 259-273.

[5] XIAO Jianzhuang, LI Wengui, FAN Yuhui, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)[J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 364-383.

[6] KONNO K, SATO Y, KAKUTA Y, et al. Property of recycled concrete column encased by steel tube subjected to axial compression[J].Transactions of the Japan Concrete Institute, 1997, 19: 231-238.

[7] 王玉银,陈杰,纵斌,等. 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 35(5):88-96.

[8] YANG Youfu, HAN Linhai. Experiential behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62: 1310-1324.

[9] 肖建庄,李宏,金少慧,等. 压型钢板-再生混凝土组合板纵向抗剪承载力试验[J]. 结构工程师,2010, 26(4): 91-95.

[10] 张建伟,祝延涛,曹万林,等. 闭口型压型钢板-再生混凝土组合楼板的受弯性能[J]. 北京工业大学学报, 2014,40(8): 1197-1203.

[11] 唐亮,聂建国,CAI C S.钢-缩口型压型钢板混凝土组合梁试验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(增刊): 226-229.

[12] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[13] 聂建国,王挺,樊健生. 钢-压型钢板混凝土组合梁计算的修正折减刚度法[J]. 土木工程学报,2002,35(4):1-6.

[14] 聂建国,沈聚敏,余志武. 考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁变形计算的折减刚度法[J]. 土木工程学报,1995, 28(6):11-17.

[15] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理与分析[M].北京:清华大学出版社,2003.

(编辑 赵丽莹)