

DOI:10.11918/202401034

闭口型再生混凝土组合楼板受弯性能

王杰堂¹,王蕊¹,赵晖¹,刘发起²,张志³

(1. 太原理工大学 土木工程学院,太原 030024;2. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090;
3. 山西二建集团有限公司,太原 030013)

摘要: 闭口型压型钢板-再生混凝土组合板在充分利用组合板优点的同时实现废弃混凝土再利用,为此,针对该新型组合板,开展受弯性能试验,考察不同粗骨料取代率下再生混凝土组合板的破坏形态、荷载-位移曲线和跨中截面应变发展情况。建立闭口型压型钢板-再生混凝土组合板有限元模型,重点分析粗骨料取代率、净跨度与钢板厚度对受弯承载力的影响。最后,基于试验与有限元参数分析结果提出该新型组合板正截面受弯承载力计算公式。结果表明:受弯过程中,中和轴上移幅度随着取代率的增大而减小;不同取代率的闭口型组合板整体呈弯曲破坏形态;再生混凝土组合板的受弯承载力较普通混凝土板下降6.6%~8.9%;考虑钢材截面部分塑性发展及再生骨料取代率影响的简化计算公式可较好预测组合板的受弯承载力。

关键词: 组合板;再生混凝土;闭口型压型钢板;抗弯性能

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)05-0148-09

Flexural performance of recycled aggregate concrete composite slabs with closed profiled steel decking

WANG Jietang¹, WANG Rui¹, ZHAO Hui¹, LIU Faqi², ZHANG Zhi³

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;
3. Shanxi Second Construction Group Co., Ltd., Taiyuan 030013, China)

Abstract: Recycled aggregate concrete (RAC) composite slabs with closed-profiled steel decking not only take full advantages of composite slabs, but also realize the reuse of waste concrete. In this work, flexural tests on this novel composite slabs with different coarse recycled aggregate (CRA) replacement rates were carried out. The failure modes, load-displacement curves and strain development at the mid-span were investigated. Afterwards, a finite element model of the composite slabs was established, and the effects of CRA replacement rate, clear span and thickness of steel decking on the flexural capacity were analyzed. Finally, based on the experimental results and finite element parameter analysis, a calculation formula for the flexural capacity of the new composite slab under positive flexural conditions was proposed. Results indicated that the degree of upward shift of the neutral axis decreases with increasing CRA replacement rate during the whole bending process. The composite slabs with different CRA replacement rates mainly exhibits bending failure. The flexural capacity of recycled concrete composite slabs is 6.6% to 8.9% lower than that of normal concrete slabs. A simplified calculation formula that considers partial plastic development of the steel section and the influence of recycled aggregate replacement rate can effectively predict the bending capacity of the composite slabs.

Keywords: composite slabs; recycled aggregate concrete; closed profiled steel sheeting; flexural capacity

近年来,随着再生混凝土技术的逐渐成熟,其在多高层建筑中的应用逐渐增多,如上海五角镇商业办公楼。相比梁、柱构件,楼板对混凝土需求用量较大且强度要求相对不高,因此,再生混凝土更适合在楼板中推广应用。将再生混凝土与闭口压型钢板相结合,提出兼具组合结构与固废再利用优点的新型

闭口型压型钢板-再生混凝土组合板^[1-3],具有广阔工程应用前景。

目前,针对闭口型普通混凝土组合板的研究相对较多,贺小项等^[4-5]和易卫华等^[6]分别开展了纵向剪切性能和受弯性能的试验与有限元分析。结果表明,闭口型组合板界面滑移量较小,钢材与混凝土

收稿日期: 2024-01-12;录用日期: 2024-02-20;网络首发日期: 2024-06-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240619.1141.004>

基金项目: 国家自然科学基金(52108162);中国博士后科学基金(2020M670656)

作者简介: 王杰堂(1998—),男,硕士研究生;王蕊(1979—),女,教授,博士生导师

通信作者: 赵晖, zhaohui01@tyut.edu.cn

组合效果更好,闭口板的纵剪承载力和受弯承载力较开口型组合板提高。然而,闭口型再生混凝土板的研究目前还处于起步阶段。Zhang 等^[7]对 15 块闭口型再生混凝土组合板开展推出试验,结果表明,相比普通混凝土组合板,100% 取代率组合板的极限黏结应力与刚度分别下降了 4% ~ 20% 和 8% ~ 16%,并根据试验结果建立了该类板界面黏结滑移关系模型;张建伟等^[8]通过开展 4 块 100% 取代率闭口型组合板受弯性能试验研究发现,100% 取代率组合板承载力降低约 7%。此外,基于试验结果建议了考虑 95% 折减系数的受弯承载力计算公式。截至目前,钢板与混凝土在受弯全过程中的协同应变发展并不明确,且尚无考虑再生粗骨料取代率影响的闭口型组合板正截面受弯承载力计算方法。

为此,对闭口型再生混凝土组合板开展试验与有限元分析。首先,通过弯曲试验获得不同取代率组合板的破坏形态、荷载-位移曲线与跨中截面应变发展情况。其次,采用 ABAQUS 软件建立有限元模型,重点分析粗骨料取代率、净跨度与钢板厚度对受弯承载力的影响。最后,基于试验与参数分析结果提出该类组合板的受弯承载力简化计算公式。

1 试验

1.1 试件设计

试验共设计 3 块闭口型压型钢板-再生混凝土组合板,尺寸均为 3 800 mm × 510 mm × 115 mm,如图 1 所示。压型钢板采用 DW65-510 型号,钢板厚度为 1.0 mm。距板端两侧 100 mm 处各焊接 3Φ16 抗剪栓钉,板上部双向布置 Φ6@150 的钢筋网片,保护层厚度为 20.0 mm,板下部未配置纵向钢筋。组合板横截面见图 2,试件编号和设计参数见表 1。

1.2 试验材料

依据 GB/T 228.1—2021^[9] 测量压型钢板的力

学性能,压型钢板截面特征值与力学指标见表 2。浇筑前采用饱和面干法对 II 类再生骨料进行预处理,骨料粒径范围 4.75 ~ 9.50 mm、> 9.50 ~ 16.0 mm、>16.0 ~ 19.0 mm 和 > 19.0 ~ 26.5 mm 分别占比 14%、29%、19% 和 38%。再生混凝土配合比及力学指标见表 3。从表 3 可以看出,当取代率 r 从 0 增加到 100%,立方体抗压强度 f_{cu} 和弹性模量 E_c 分别降低了 9.4% 和 31.0%,这是由于再生骨料表面存在残余砂浆^[10]。

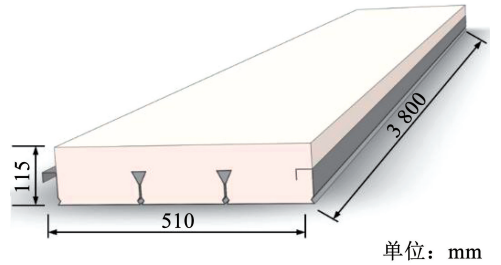


图 1 组合板示意

Fig. 1 Diagram of composite slab

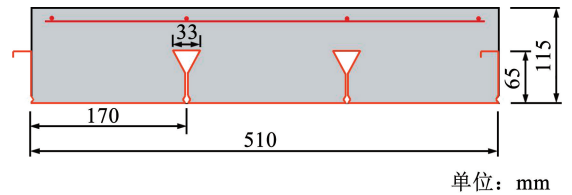


图 2 组合板横截面

Fig. 2 Cross-section of composite slab

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of the specimens

编号	尺寸/ mm × mm × mm	净跨度 l / mm	取代率 r /%	剪跨比
S-0		3 600	0	12.7
S-50	3 800 × 510 × 115	3 600	50	12.7
S-100		3 600	100	12.7

表 2 压型钢板截面特征值及力学指标

Tab. 2 Characteristics of cross-section and mechanical properties of steel

压型钢板 型号	板厚/ mm	截面面积/ mm ²	截面惯性矩/ mm ⁴	弹性中和 轴位置/mm	屈服强度 f_y / MPa	弹性模量 E_s /GPa	极限强度 f_u / MPa	伸长率 Δ /%
DW65-510	1.0	1 062.4	628 575	21.0	316.1	198.6	376.3	33.6

表 3 再生混凝土配合比与力学指标

Tab. 3 Mixture proportions and compressive properties of RAC

类型	水/ (kg · m ⁻³)	水泥/ (kg · m ⁻³)	砂/ (kg · m ⁻³)	天然粗骨料/ (kg · m ⁻³)	再生粗骨料/ (kg · m ⁻³)	减水剂/ (kg · m ⁻³)	r /%	$f_{cu,test}$ / MPa	$E_{c,test}$ / MPa
RAC-0	180.0	383.0	672.7	1 195.9	—	0.38	0	55.6	35 743
RAC-50	180.0	383.0	653.0	580.5	580.5	0.38	50	55.6	29 631
RAC-100	180.0	383.0	634.5	—	1 128.0	0.38	100	50.4	24 660

注: $f_{cu,test}$ 和 $E_{c,test}$ 分别为边长 100 mm 立方体试块试验当天(龄期约 120 d)的抗压强度和弹性模量。

1.3 测点布置及加载方案

试验采用三分点加载方式,两端通过滚轴实现简支边界条件,装置如图 3 所示。参照 GB 50152—2012^[11],首先,通过预加载确定试验装置是否正常工作,预加载值约为开裂荷载的 50% ~ 70%。正式加载按预测破坏荷载的约 1/10 分级加载,每级持荷 5 min。位移计分别布置于支座处和跨中用于测量支座沉降与跨中挠度,并将位移计吸附在试件截面左侧端部外伸肋上测量叠合面的相对滑移。通过跨中布置的 14 个纵向应变片测量钢板与混凝土应变发展,应变片布置如图 4 所示。

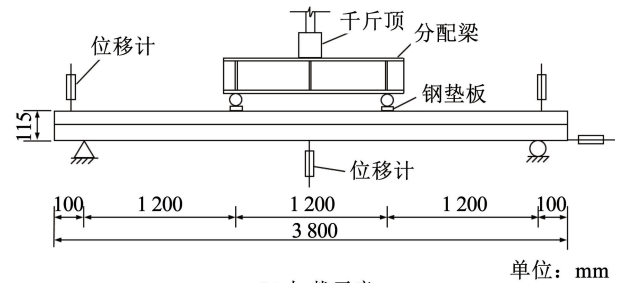
2 试验结果分析

2.1 试件破坏特征

加载初期,组合板处于弹性工作阶段,混凝土与钢板之间保持着较好的相互作用。当荷载达到 $0.1P_u$ (P_u 为极限荷载) 时,楼板发出“噼啪”声,受拉区边缘混凝土开裂。随着荷载继续增加,跨中挠度持续发展。当荷载达到 P_u 时,混凝土与侧面钢板脱开,纯弯段均匀分布的多条裂缝不断向上发展,宽度不断增加。继续加载,组合板荷载缓慢增长甚至保持不变,但跨中挠度持续发展,纯弯段裂缝在向上发展至板底 65 ~ 70 mm 处开始水平发展,宽度为 2 ~ 3 mm,裂缝发展见图 5。3 块组合板最终破坏形态为整体弯曲破坏,如图 5 所示。



(a) 实际加载图



(b) 加载示意

图 3 加载图

Fig. 3 Test setup

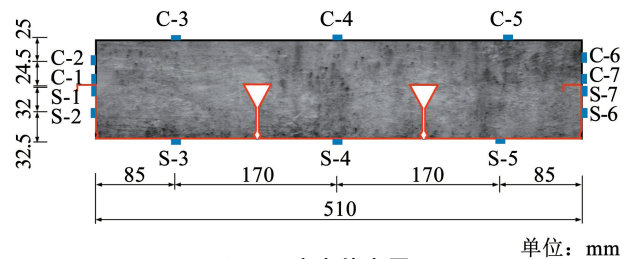
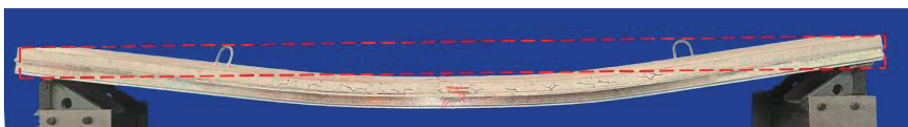


图 4 应变片布置

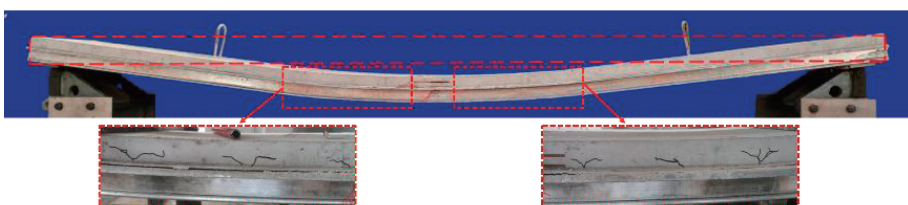
Fig. 4 Arrangement of strain gauges



(a) S-0



(b) S-50



(c) S-100

图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of the specimens

2.2 荷载-位移曲线

各组合板荷载-跨中挠度曲线如图6所示。整体上,曲线发展可分为线弹性阶段(未裂阶段)、开裂后阶段和塑性发展阶段。线弹性阶段,钢板与混凝土共同工作,混凝土未开裂,试件刚度基本保持不变。当达到开裂荷载 P_{cr} 时,受拉区边缘混凝土开裂,原先由其承担的拉应力转由钢板承担,钢板应力突然增大,曲线出现“拐点”。随着荷载继续增加,跨中底钢板达到屈服应变(1.6×10^{-3}),此时对应的荷载为屈服荷载 P_y 。当曲线进入塑性发展阶段后,荷载缓慢增长的同时跨中挠度迅速增加,试件刚度下降。荷载-跨中挠度曲线整体呈上升趋势,未出现下降段,不同取代率组合板均有较好的延性。采用GB 50152—2012^[11]的建议,极限荷载 P_u 取跨中挠度达到 $l/50$ (l 为试件净跨度)时所对应的荷载。表4给出了不同取代率组合板承载力和挠度实测

值,可以看出,当取代率从0增加到100%时,开裂荷载 P_{cr} 、屈服荷载 P_y 与极限荷载 P_u 分别下降了26.6%、3.2%和5.3%。相同荷载时,试件S-100跨中挠度发展更大,这是由再生粗骨料混凝土较低的抗压强度与弹性模量引起的。

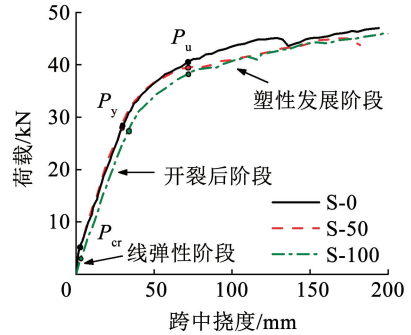


图6 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Load versus mid-span deflection curves

表4 承载力与挠度实测值

Tab. 4 Test results of flexural capacity and deflection

试件编号	P_{cr}/kN	D_{cr}/mm	P_y/kN	D_y/mm	P_u/kN	$P_{1/200}/kN$	P_{cr}/P_u	P_y/P_u	破坏模式
S-0	5.64	2.56	28.33	29.21	40.55	16.10	0.14	0.70	弯曲破坏
S-50	5.53	2.41	27.93	29.32	39.52	16.82	0.14	0.74	弯曲破坏
S-100	4.14	2.01	27.43	33.39	38.40	20.32	0.11	0.87	弯曲破坏

注: P_{cr} 为开裂荷载, D_{cr} 为开裂荷载对应的跨中挠度, P_y 为跨中底钢板屈服时对应的荷载, D_y 为屈服荷载对应的跨中挠度, P_u 为极限荷载, $P_{1/200}$ 为挠度为1/200时所对应的荷载。

2.3 钢材和混凝土应变

图7给出了各试件混凝土与钢材的应变发展,应变片位置见图4。不同取代率组合板的荷载-应变曲线发展趋势相似,随着荷载增加,沿截面高度方向混凝土应变依次由受压(应变为负)变为受拉(应变为正),中和轴不断上移。当达到极限荷载 P_u 时,混凝土顶部应变分别为 -1.307×10^{-3} 、 -1.350×10^{-3} 和 -1.750×10^{-3} ,且随着取代率的增大其应变值增大。钢材应变在整个加载过程中整体呈上升趋势,当荷载达到 P_{cr} 时,应变突然增大,这是因为混凝土

开裂后,开裂部分混凝土承担的拉应力开裂后转由钢板承担。当荷载达到极限荷载 P_u 时,底钢板已屈服(1.6×10^{-3}),而S-1位置钢板未屈服。

图8为组合板跨中沿截面高度的应变分布。可以看出,3块不同取代率组合板的跨中应变沿高度基本呈线性变化。随着荷载不断增加,中和轴持续上移。相比0取代率,100%取代率组合板中和轴上移幅度更小,这是由混凝土抗压强度减小、受压区高度增大导致的。

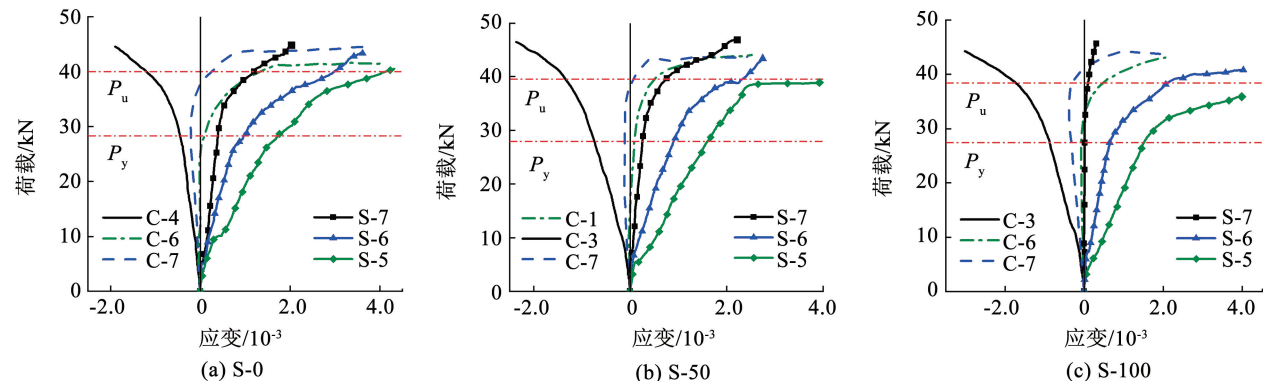


图7 组合板荷载-应变曲线

Fig. 7 Load versus strain curves of slabs

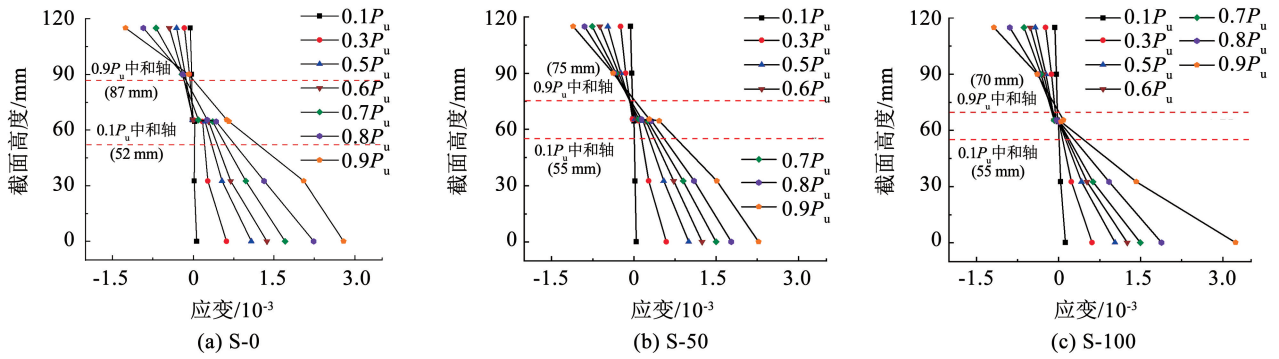


图 8 组合板跨中截面应变沿高度分布

Fig. 8 Strain distribution along cross-section height at the mid-span

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

采用有限元分析软件 ABAQUS 对闭口型压型钢板-再生混凝土组合板进行建模分析,取半结构模型计算。混凝土采用塑性损伤模型,受压本构采用陈杰建议的模型^[12],如式(1)~(8)所示,混凝土抗压强度与弹性模量均取自试验实测值。

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1) + x}, x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_c = \frac{f_c}{E_c \varepsilon_c} \quad (3)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_c}{E_c \varepsilon_c - f_c} \quad (4)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad (5)$$

$$E_{c,r}/E_c = 0.11r^2 + 0.3r + 1 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{c,r}/\varepsilon_c = 0.15r^2 + 0.11r + 1 \quad (7)$$

$$\alpha_{c,r}/\alpha_c = 3.06r^2 + 3.49r + 1 \quad (8)$$

式中: r 为再生粗骨料取代率, E_c 和 $E_{c,r}$ 分别为普通和再生混凝土弹性模量, ε_c 和 $\varepsilon_{c,r}$ 分别为普通和再生混凝土峰值压应变, α_c 和 $\alpha_{c,r}$ 分别为普通和再生混凝土下降段形状参数。

混凝土受拉本构采用双折线模型^[13],抗拉强度取为抗压强度的 0.1 倍,受拉弹性模量与受压相同,如式(9)所示:

$$\sigma = \begin{cases} E_c \varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_{ct} \\ \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{tu}}{\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{tu}} \right) f_t, \varepsilon_{ct} < \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \\ 0, \varepsilon > \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f_t = 0.1f_c$, $\varepsilon_{ct} = f_t/E_c$, $\varepsilon_{tu} = 15\varepsilon_{ct}$ 。 f_t 、 ε_{ct} 和 ε_{tu} 分

别为混凝土抗拉强度、受拉峰值应变与受拉极限应变。

压型钢板和栓钉分别采用韩林海等^[14]建议的五折线模型(如式(10)所示)与理想弹塑性模型,泊松比、屈服强度和弹性模量取试验实测值。

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_1 \\ -A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C, \varepsilon_1 < \varepsilon \leq \varepsilon_2 \\ f_y, \varepsilon_2 < \varepsilon \leq \varepsilon_3 \\ f_y \left(1 + 0.6 \frac{\varepsilon - \varepsilon_3}{\varepsilon_4 - \varepsilon_3} \right), \varepsilon_3 < \varepsilon \leq \varepsilon_4 \\ 1.6f_y, \varepsilon > \varepsilon_4 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $A = 0.2f_y/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^2$, $B = 2A\varepsilon_2$, $C = 0.8f_y + A\varepsilon_1^2 - B\varepsilon_1$; $\varepsilon_1 = 0.8f_y/E_s$, $\varepsilon_2 = 1.5\varepsilon_1$, $\varepsilon_3 = 10\varepsilon_1$, $\varepsilon_4 = 100\varepsilon_1$ 。

模型中压型钢板采用壳单元 S4R,混凝土和栓钉均采用实体单元 C3D8R,分布钢筋采用桁架单元 T3D2。钢板与混凝土交界面采用库伦摩擦模型,法向设置为“硬”接触和切向为“罚”函数,摩擦因数取 0.7。抗裂钢筋与栓钉内置(Embedded)于混凝土中,栓钉与钢板采用绑定(Tie)连接。模型边界条件及加载情况如图 9 所示。

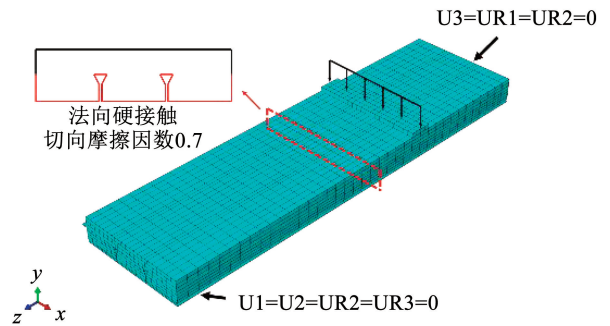


图 9 有限元模型

Fig. 9 FE models

3.2 有限元模型结果校验

试验与有限元荷载-跨中挠度曲线对比结果如图 10 所示。有限元与试验曲线存在一定差异,主要原因有限元材料本构并非完全取自实测、试件本

身加工误差以及混凝土存在较大的离散性。试件 S-0、S-50 和 S-100 的 $P_{u,FE}/P_{u,Test}$ 分别为 0.96、0.94 和 0.94,总体上限元可以较好地预测组合板的荷载-跨中挠度曲线发展。

相互分离的趋势,而钢板闭口的存在限制了二者分离,混凝土受到垂直于叠合面的作用力(见图 13),出现水平裂缝。

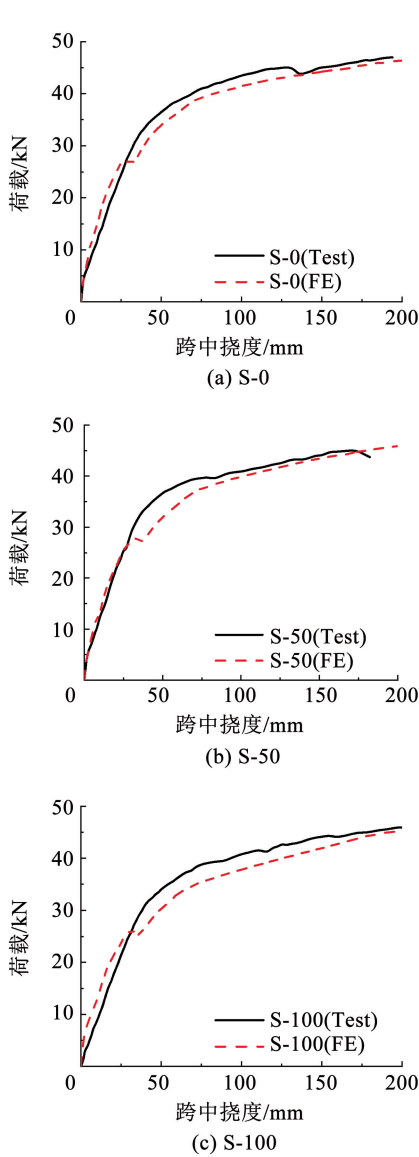


图 10 荷载-跨中挠度试验值与模拟值对比

Fig. 10 Comparison of test and FE results

图 11 为试件 S-50 达到 P_u 时的纵向应力云图。可以看出,组合板呈现整体弯曲破坏形态。跨中底钢板应力为 322 MPa,达到屈服应力,而闭口处钢板应力未达到屈服应力。此外,试件叠合面处滑移量为 1.2 mm(见图 12),组合板保持了较好的整体性。

50% 取代率组合板达到极限荷载 P_u 时的混凝土受拉塑性损伤如图 13 所示。均匀分布的裂缝从板底向上发展,达到一定高度后水平发展,与试验结果吻合较好。水平裂缝的出现是因为随着荷载不断增大,钢板与混凝土之间的黏结作用遭到破坏,出现

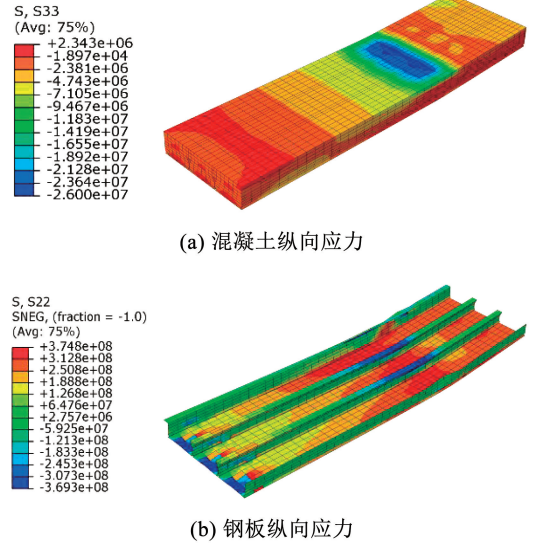


图 11 纵向应力云图(S-50)

Fig. 11 Longitudinal stress nephograms(S-50)

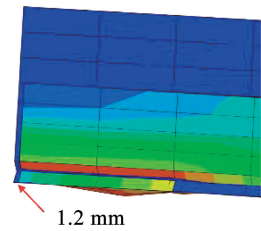


图 12 混凝土与钢板滑移(S-50)

Fig. 12 Slip between steel sheet and concrete(S-50)

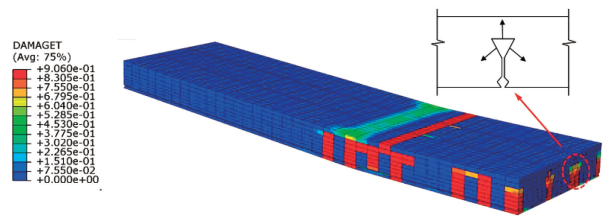


图 13 混凝土受拉塑性损伤云图(S-50)

Fig. 13 Tensile damage nephogram of concrete(S-50)

4 参数分析

本节重点分析粗骨料取代率 r 、钢板厚度 t 和净跨度 l 对受弯承载力 M_u (极限荷载 P_u 下跨中截面弯矩)的影响。楼板厚度为 115 mm,混凝土强度为 C40,压型钢板型号选择 DW65-510,闭口间距和闭口高度分别为 170 mm 和 65 mm。组合板参数与计算结果见表 5,S-50-09-3600 代表组合板 r 为 50%、 t 为 0.9 mm 和 l 为 3 600 mm。

表 5 组合板参数与计算结果

Tab. 5 Parameters of slabs and calculation results

试件编号	l / mm	l / mm	r / %	$M_{u,FE}$ / (kN·m)	$M_{u,Eq}$ / (kN·m)
S-0-08-3000	0.8	3 000	0	23.9	23.5
S-0-08-3600	0.8	3 600	0	18.8	18.3
S-0-08-4200	0.8	4 200	0	18.7	17.6
S-0-09-3000	0.9	3 000	0	26.7	26.2
S-0-09-3600	0.9	3 600	0	21.3	20.4
S-0-09-4200	0.9	4 200	0	21.2	19.6
S-0-10-3000	1.0	3 000	0	29.4	28.8
S-0-10-3600	1.0	3 600	0	23.9	22.5
S-0-10-4200	1.0	4 200	0	23.7	21.6
S-0-12-3000	1.2	3 000	0	34.1	33.9
S-0-12-3600	1.2	3 600	0	27.8	26.4
S-0-12-4200	1.2	4 200	0	26.8	25.4
S-50-08-3000	0.8	3 000	50	23.6	21.6
S-50-08-3600	0.8	3 600	50	18.6	16.9
S-50-08-4200	0.8	4 200	50	17.7	16.2
S-50-09-3000	0.9	3 000	50	26.2	24.1
S-50-09-3600	0.9	3 600	50	20.6	18.8
S-50-09-4200	0.9	4 200	50	20.2	18.1
S-50-10-3000	1.0	3 000	50	29.6	26.5
S-50-10-3600	1.0	3 600	50	23.2	20.7
S-50-10-4200	1.0	4 200	50	23.0	19.9
S-50-12-3000	1.2	3 000	50	33.2	31.2
S-50-12-3600	1.2	3 600	50	27.6	24.4
S-50-12-4200	1.2	4 200	50	27.2	23.4
S-100-08-3000	0.8	3 000	100	23.6	20.0
S-100-08-3600	0.8	3 600	100	17.7	15.6
S-100-08-4200	0.8	4 200	100	17.4	15.0
S-100-09-3000	0.9	3 000	100	25.2	22.2
S-100-09-3600	0.9	3 600	100	20.2	17.4
S-100-09-4200	0.9	4 200	100	19.8	16.7
S-100-10-3000	1.0	3 000	100	26.7	24.5
S-100-10-3600	1.0	3 600	100	22.0	19.1
S-100-10-4200	1.0	4 200	100	21.9	18.4
S-100-12-3000	1.2	3 000	100	30.7	28.8
S-100-12-3600	1.2	3 600	100	26.3	22.5
S-100-12-4200	1.2	4 200	100	25.7	21.6

图 14 给出了当净跨 l 为 3 600 mm 时,取代率 r 对组合板受弯承载力 M_u 的影响。当 r 从 0 增加到 50% 和 100% 时,受弯承载力 M_u 分别降低了 0.1% ~ 2.9% 和 5.9% ~ 8.4%,这与再生混凝土较低的抗压强度有关。

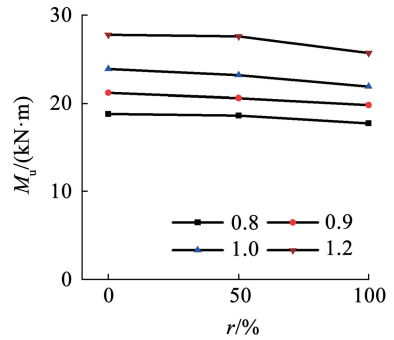


图 14 取代率对受弯承载力 M_u 的影响 ($l=3\ 600$ mm)
Fig. 14 Influence of CRA replacement rate ($l=3\ 600$ mm)

净跨 l 对受弯承载力 M_u 的影响如图 15 所示。随着 l 的增加,组合板的受弯承载力 M_u 减小。当 r 为 50%、 t 为 0.9 mm 时,净跨 l 从 3 000 mm 增加到 3 600 mm 和 4 200 mm,受弯承载力 M_u 减小了 13.8% 和 15.5%。随着 l 增大,闭口位置钢材应变发展越不充分,引起组合板正截面受弯承载力的下降。

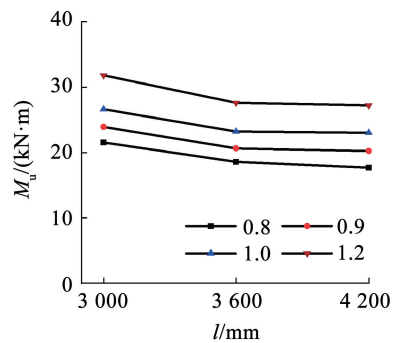


图 15 净跨对受弯承载力 M_u 的影响 ($r=50\%$)
Fig. 15 Influence of clear span ($r=50\%$)

图 16 为钢板厚度 t 对组合板受弯承载力 M_u 的影响。当 r 为 50%、 l 为 3 600 mm 时, t 从 0.8 mm 增加到 1.2 mm,组合板的受弯承载力 M_u 增大了 48.4%。结果表明,增加钢板厚度可显著提高组合板的受弯承载力。

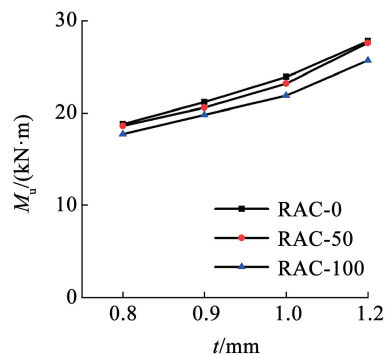


图 16 钢板厚度对受弯承载力 M_u 的影响 ($l=3\ 600$ mm)
Fig. 16 Influence of steel sheet thickness ($l=3\ 600$ mm)

5 受弯承载力设计方法

组合板受弯破坏时,中和轴位于混凝土内,混凝土与钢板之间基本无相对滑移。基于混凝土和压型钢板较好的协调变形与压型钢板全截面屈服的假定,以压型钢板截面重心为合力点对混凝土受压区中心取矩进行推导,得到力和力矩平衡方程,如式(11)、(12)所示,极限承载力计算模型见图17。

$$f_c bx = A_s f_y \quad (11)$$

$$M = \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (12)$$

式中: α_1 为等效矩形应力图系数,取值见GB 50010—2015^[16]; f_y 和 f_c 分别为压型钢板屈服强度和混凝土抗压强度; b 为楼板宽度; h_0 和 x 分别为截面有效高度和受压区高度; A_s 为压型钢板截面面积。

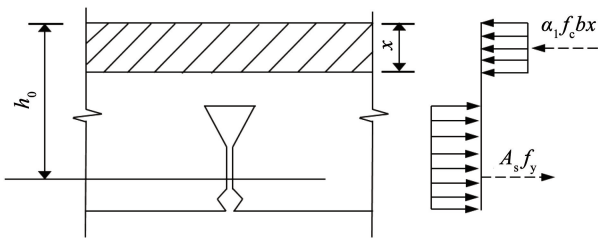


图17 极限承载力计算模型

Fig. 17 Calculation model of flexural load-carrying capacity

由试验与有限元结果可知,当组合板达到极限荷载 P_u 时,闭口处钢板未屈服,不满足全截面屈服假定。此外,再生骨料的存在降低了组合板的正截面受弯承载力。因此,在式(12)的基础上,分别引入受弯承载力折减系数 η 和再生混凝土强度折减系数 α_σ 对组合板正截面受弯承载力进行折减,如式(13)、(14)所示:

$$M = \eta \alpha_\sigma \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (13)$$

$$\eta = 2.64 \times 10^{-7} l^2 - 2.11 \times 10^{-3} l + 4.95 \quad (14)$$

式中: α_σ 为再生混凝土强度折减系数,取值见JGJ/T 443—2018^[15]; l 为净跨度,mm,取值为3 000 ~ 4 200 mm。

式(13)和(14)计算结果 $M_{u,Eq}$ 与有限元模拟结果 $M_{u,FE}$ 对比结果如表6与图18所示。可以看出, $M_{u,FE}/M_{u,Eq}$ 的平均值 μ 为1.10, R^2 为0.94。表6给出了试验值、本文公式计算值和文献[8]公式计算值对比结果,可以看出,本文公式可较好预测闭口型压型钢板-再生混凝土组合板的正截面受弯承载力。

表6 受弯承载力 M_u 计算结果

Tab. 6 Calculated results of flexural capacity kN·m

试件编号	试验值	本文公式计算值	文献[8]公式计算值
S-0	24.33	22.98	29.47
S-50	23.71	21.18	28.74
S-100	23.04	19.54	28.00

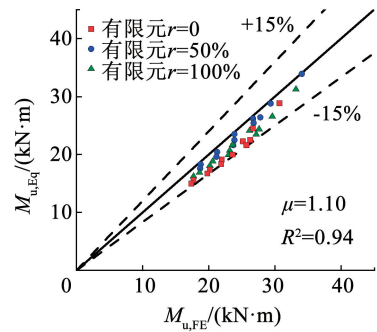


图18 公式预测和有限元模型结果比较

Fig. 18 Comparison between results from formula prediction and FE

6 结论

1) 极限荷载下,不同取代率闭口型压型钢板-再生混凝土组合板均呈弯曲破坏形态,纯弯段裂缝在向上发展距至板底65~70 mm处开始水平发展,整体上混凝土与钢板组合作用保持较好。

2) 组合板受弯过程中荷载-跨中挠度曲线发展分为线弹性阶段、开裂后阶段和塑性发展阶段。当取代率从0增加到100%,组合板开裂荷载 P_{cr} 、屈服荷载 P_y 与极限荷载 P_u 分别降低了26.6%、3.2%和5.3%。

3) 参数分析结果发现,随着再生骨料的掺入,闭口型组合板正截面受弯承载力降低幅度为6.6%~8.9%。增加钢板厚度可显著提高截面受弯承载力,当钢板厚度由0.8 mm增加至1.2 mm时,50%取代率组合板受弯承载力提高了48.4%。

4) 考虑钢材截面部分发展塑性和再生混凝土影响,提出的承载力计算公式可较好预测闭口型压型钢板-再生混凝土组合板的受弯承载力。

参考文献

[1] 吴波, 骆志成. 压型钢板再生混合混凝土组合楼板受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 29
WU Bo, LUO Zhicheng. Mechanical property of composite slabs with profiled steel sheet casted using demolished concrete blocks and fresh concrete[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 29. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.05.004

[2] WANG Yuyin, WANG Qinhe, GENG Yue, et al. Long-term behavior of simply supported composite slabs with recycled coarse aggregate[J]. Construction and Building Material, 2016, 116: 335.

- DOI: 10.1680/jmacr.16.00090
- [3] 王玉银, 王庆贺, 耿悦. 建筑结构用再生混凝土水平构件研究进展[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 1
WANG Yuyin, WANG Qinhe, GENG Yue. State-of-the-art of horizontal structural members using recycled aggregate concrete[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 1. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.ST10
- [4] HE Xiaoxiang, LI Guochang, YANG Zhijian. Experimental study on the bearing capacity of long-span profiled steel sheet-concrete composite slabs[J]. Advanced Steel Construction, 2019, 15(3): 288. DOI:10.18057/IJASC.2019.15.3.9
- [5] 贺小项. 大跨度压型钢板-混凝土组合板的纵向抗剪性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020
HE Xiaoxiang. Study on longitudinal shear behavior of long-span profiled steel sheet-concrete composite slabs[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020
- [6] 易卫华, 聂建国, 彭惠玲. 闭口型压型钢板-混凝土组合板的受弯性能[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 22
YI Weihua, NIE Jianguo, PENG Huiling. Bending behavior of closed profiled sheeting-concrete composite slabs[J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 22. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2003.12.007
- [7] ZHANG Huan, GENG Yue, WANG Yuyin, et al. Experimental study and prediction model for bond behavior of steel-recycled aggregate concrete composite slabs[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 53: 104585. DOI: 10.1016/j.job.2022.104585
- [8] 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
ZHANG Jianwei, ZHU Yantao, CAO Wanlin, et al. Flexural behavior of the recycled aggregate concrete composite slabs with closed-section steel deck[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(8): 1197. DOI:10.11936/bjtxb2014081197
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法; GB/T 228. 1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials tensile testing. part 1: method of test at room temperature; GB/T 228. 1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021
- [10] 刘数华, 冷发光. 再生混凝土技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007
LIU Shuhua, LENG Faguang. Technology of recycled aggregate concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准; GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures; GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [12] 陈杰. 圆钢管再生混凝土轴压构件长期静力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
CHEN Jie. Time-dependent behavior of axially loaded circular steel tubes filled with recycled aggregate concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [13] 延睿. 火灾后方钢管约束钢筋混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
YAN Rui. Post-fire behaviors of axially loaded reinforced concrete stub columns confined by square steel tubes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016: 67
HAN Linhai. Steel pipe concrete structure: theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016: 67
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 再生混凝土结构技术标准; JGJ/T 443—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for recycled concrete structures; JGJ/T 443—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018
- [16] 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, 2015
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, 2015

(编辑 刘彤)