

# 两跨连续组合板静力性能数值模拟研究

王东, 魏子钧

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

**摘要:** 为考察多个因素对两跨连续钢-混凝土组合板静力性能的影响, 通过 ABAQUS 软件建立组合板静力性能的有限元模型, 用 7 组足尺试验数据验证该模型的可靠性。结果表明: 有限元模型可有效预测钢-混凝土组合板的静力性能, 试件极限承载力的模拟值与试验结果最大相差 8.0%; 在弯矩预测方面, 有限元模拟值与试验结果最大相差 4.0%。

**关键词:** 钢-混凝土组合板; 两跨连续组合板; 静力性能; 有限元模型

中图分类号: TU398

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.06.015

## Numerical Simulation Study on Static Performance of Two-span Continuous Composite Slab

WANG Dong, WEI Zijun

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of multiple factors on the static performance of two-span continuous steel-concrete composite slabs, a finite element model of the static performance of composite slabs was established by using ABAQUS software. The reliability of the model was verified by seven sets of full-scale test data. The results show that the finite element model can effectively predict the static performance of steel-concrete composite slabs, and the maximum difference between the predicted value of the ultimate bearing capacity of the specimens and the experimental results is 8.0%. At the same time, in the prediction of bending moment, the maximum difference between the finite element prediction value and the test result is 4.0%.

**Key words:** steel-concrete composite slab; two-span continuous composite plate; static performance; finite element model

随着工程建设的不断发展, 钢-混凝土组合结构逐渐成为建筑的重要结构<sup>[1]</sup>。钢-混凝土组合板由钢板与混凝土构成, 是目前工程领域中广泛应用的一种新型复合板材。钢板作为外层板, 能有效抵抗外界荷载, 提高构件的刚度和强度, 混凝土作为内层板, 能提供一定的剪切强度和承载能力, 两者相互作用能够增强结构的整体性能。与传统混凝土板相比, 钢-混凝土组合板具有强

度高<sup>[2]</sup>、刚度高、承载能力强、抗震性能好、耐久性好等优点, 广泛应用于建筑物的结构中, 并取得良好的效果。但在使用过程中, 组合板受到内部应力、外界荷载、温度、湿度等因素的影响可能会产生变形, 影响其安全性和结构稳定性。

国内学者对钢-混凝土组合结构进行了很多研究, 包括承载能力<sup>[3-4]</sup>、水平受力<sup>[5]</sup>、纵剪性能<sup>[6-7]</sup>、受弯性能<sup>[8]</sup>等。梁永泽等<sup>[9]</sup>对钢筋-混

混凝土叠合板进行有限元分析,验证了模型的可靠性,并分析了预制钢板-混凝土空心叠合板的受弯性能,为地铁站用空心叠合板提出了合理的截面尺寸。陈旺等<sup>[10]</sup>使用 ABAQUS 软件建立有限元模型,验证了其可靠性并进行参数分析,量化再生粗骨料取代率对闭口压型钢板-再生混凝土组合板纵向剪切承载力的影响,并提出纵向剪切承载力计算方法。王庆贺等<sup>[11]</sup>使用 ABAQUS 软件建立组合板长期性能有限元模型,量化再生粗骨料取代率等因素对两跨连续钢-再生混凝土组合板长期性能的影响,提出两跨连续钢-再生混凝土组合板长期性能设计方法,并对设计方法的可靠性进行评价。

本文采用 ABAQUS 软件建立两跨连续钢-混凝土组合板有限元模型,结合试验结果验证该模型的可靠性,并对两跨连续组合板静力性能进行分析,对其在工程中的应用提出参考意见。

## 1 有限元模型建立

ABAQUS 中的有限元模型建立主要有以下几个步骤。

1) 三维几何建模。可以使用 ABAQUS 提供的几何构造工具来建立模型,也可以通过导入 CAD 模型等方式建立模型。

2) 材料模型定义。选择适当的材料模型,输入相应的材料参数。

3) 网格划分。将几何模型划分为有限元网格,ABAQUS 提供了多种网格划分方法。

4) 荷载和约束定义。定义模型顶部与端部的荷载和约束。

5) 求解计算。输入荷载、网格和材料属性后由 ABAQUS 开始计算,计算完毕即可得到结果。

6) 后处理。使用 ABAQUS 提供的后处理工具,如可视化分析、动画制作等,对计算结果进一步分析和处理。

在建立模型时,需要根据具体问题选择适当的建模方式和方法,同时还需要根据材料特性、结构形态和荷载条件等因素做出合理的假设和简化。

### 1.1 材料力学模型

#### 1.1.1 混凝土

本文主要采用塑性损伤模型描述混凝土的力学行为,该模型用于描述混凝土材料在受载过程中的损伤和破坏行为,通过损伤变量和损伤模量来描述混凝土内部的损伤状态和程度,进而反映

混凝土的塑性损伤行为。在 ABAQUS 中使用合适的混凝土塑性损伤模型和输入合适的材料参数,可以精确地模拟混凝土的塑性损伤行为,从而预测混凝土在实际工程应用中的性能和行为。

普通混凝土弹性模量  $E_{c,NAC}$  计算式为

$$E_{c,NAC} = 22 \times (f_{cm}/10)^{0.3} \quad (1)$$

式中  $f_{cm}$  为普通混凝土抗压强度。

根据混凝土结构设计规范 GB 50010—2010<sup>[12]</sup>,混凝土单轴受拉的应力-应变曲线按下列公式确定。

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad (2)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2x^5), & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{a_t(x-1)^{1.7} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (4)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_t$  为混凝土单轴受拉的应力;  $d_t$  为混凝土单轴受拉损伤演化参数;  $E_c$  为混凝土的弹性模量;  $\varepsilon$  为混凝土的应变;  $\rho_t$  为考虑混凝土受拉影响的塑性变形系数;  $a_t$  为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值;  $f_{t,r}$  为混凝土的单轴抗拉强度;  $\varepsilon_{t,r}$  为  $f_{t,r}$  相应的混凝土峰值拉应变。

混凝土单轴受压的应力-应变曲线可按下列公式确定。

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (6)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{a_c(x-1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (8)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (9)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (10)$$

式中:  $\sigma_c$  为混凝土单轴受压的应力;  $d_c$  为混凝土单轴受压损伤演化参数;  $\rho_c$  为考虑混凝土受压影响的塑性变形系数;  $n$  为曲线的初始斜率;  $a_c$  为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值;  $f_{c,r}$  为混凝土单轴抗压强度;  $\varepsilon_{c,r}$  为与  $f_{c,r}$  相应的混凝土峰值压应变。

#### 1.1.2 钢材本构模型

ABAQUS 中常用的钢材本构模型有以下

几种。

1) 弹塑性本构模型: 弹塑性模型是 ABAQUS 中最常用的模型之一, 用于模拟钢结构在受力过程中的弹性和塑性变形。

2) 荷载-位移本构模型: 该模型是 ABAQUS 中经典本构模型, 能很好地模拟钢结构受到动态冲击或爆炸时的行为。其基本思想是模拟材料在不同应变冲击下的应力-应变行为, 并根据材料的力学特性来计算其响应。

3) 弹性等效本构模型: 该模型建立在材料的弹性性质上, 假设钢结构的应力与应变服从线性比例关系, 在保证应力和应变之间相互独立性的前提下较好地模拟钢结构的弹性行为。

总之, 在使用 ABAQUS 进行有限元分析时, 要根据具体情况选择适合的本构模型, 并确定其材料参数。

本文采用弹塑性模型建立压型钢板的力学模型。钢材的泊松比为 0.3, 具体的受力及应力-应变曲线见图 1。随着应力的增加, 钢筋首先处于弹性阶段(OA段), OA段斜率为钢筋的弹性模量  $E_s$ 。在 A 点达到屈服强度  $f_y$  之后, 钢筋应变在 B 点达到  $\varepsilon_p$  (强化阶段时的应变), 之后开始进入强化阶段, 强化初始弹性模量为  $E_p$ , 在 C 点达到极限强度  $f_u$ , 对应的应变为  $\varepsilon_u$ 。

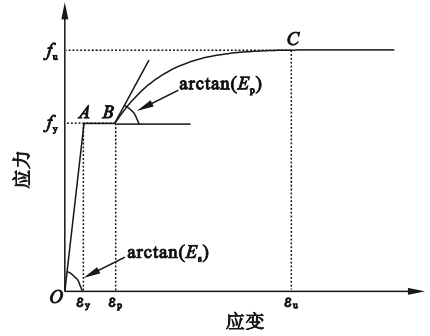


图1 钢筋应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of steel bar

## 2 有限元模型验证

为验证短期荷载下钢-混凝土两跨组合板有限元模型的可靠性, 本文对两跨钢-混凝土组合板进行受弯力学性能试验并进行模拟。共收集 7 组短期荷载作用下钢-混凝土连续组合板足尺试验数据, 具体试验参数如表 1 所示。表中:  $h$  为组合板的厚度;  $L$  为组合板的跨度;  $b$  为组合板宽度;  $f_c$  为混凝土抗压强度;  $f_t$  为混凝土抗拉强度;  $P_{tot,exp}$ 、 $P_{tot,pre}$  分别表示组合板的极限承载力试验值与模拟值;  $M_{tot,exp}$  与  $M_{tot,pre}$  分别表示总弯矩试验值与模拟值。

表 1 短期荷载作用下两跨钢-混凝土组合板力学性能试验参数与主要结果

Table 1 Experimental parameters and main results of mechanical properties of two-span steel-concrete composite slabs under short-term load

试件编号	$h$ /mm	$L$ /mm	$b$ /mm	$f_c$ /MPa	$E_c$ /GPa	$f_t$ /MPa	$P_{tot,exp}$ /kN	$M_{tot,exp}$ /(kN·m)	$P_{tot,pre}$ /kN	$M_{tot,pre}$ /(kN·m)	$P_{tot,pre}/P_{tot,exp}$	$M_{tot,pre}/M_{tot,exp}$
S3-20L-00 <sup>[5]</sup>	145	3 400 × 2	700	43.5	27.5	3.55	82.8	—	86.6	—	1.046	—
S4-30L-00 <sup>[5]</sup>	142	3 400 × 2	700	45.5	27.4	4.75	92.8	—	96.4	—	1.039	—
S5-30L-52 <sup>[5]</sup>	142	3 400 × 2	700	45.0	30.4	3.33	88.9	—	96.0	—	1.080	—
S6-30L-82 <sup>[5]</sup>	145	3 400 × 2	700	45.5	27.4	4.75	98.6	22.6	101.2	21.7	1.026	0.960
S7-40L-00 <sup>[5]</sup>	152	3 400 × 2	700	42.8	33.1	2.73	82.9	—	85.2	—	1.028	—
S8-40S-00 <sup>[5]</sup>	146	3 400 × 2	700	57.8	31.7	3.93	95.7	—	95.8	—	1.001	—
2-C-70 <sup>[13]</sup>	150	3 350 × 2	1 200	47.9	33.05	4.68	212.9	36.1	220	37.8	1.033	1.047

## 3 两跨钢-混凝土连续组合板静力性能预测结果

### 3.1 不同钢纤维用量的组合板预测结果

采用不同钢纤维用量对钢-混凝土两跨连续

组合板在短期荷载作用下的力学响应进行试验, 并进行有限元模拟, 对试验值与模拟值进行比较, 结果如图 2 所示。图中组合板采用长为 60 mm 的钢纤维(Dramix RC80/60BN), 钢纤维用量分别为 20、30、40 kg/m<sup>3</sup>, 对应的试件编号分别为 S3-20L-00、S4-30L-00、S7-40L-00。

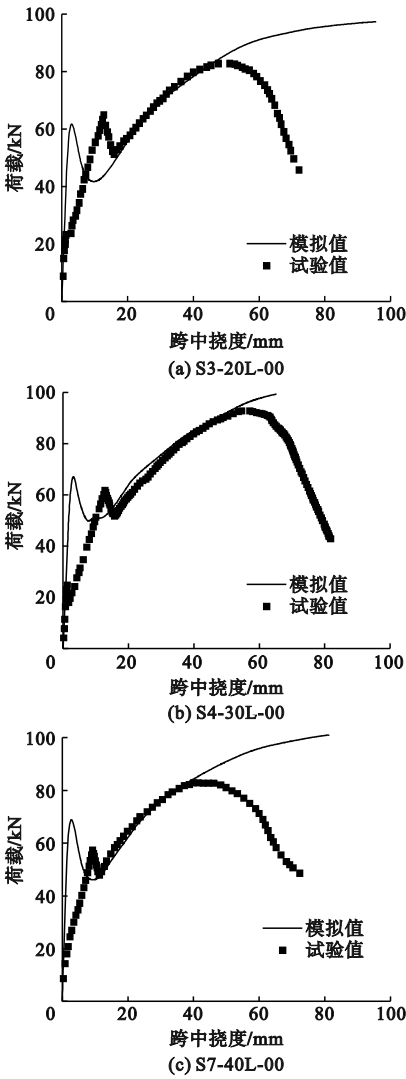


图2 不同钢纤维用量组合板的极限承载力试验值与模拟值对比

Fig.2 Comparison of test values and simulated values of the ultimate bearing capacity of composite slabs with different steel fiber content

由图2(a)可知,组合板极限承载力的试验值与模拟值分别为82.8、86.6 kN,两者相差4.6%。由图2(b)可知,组合板极限承载力的试验值与模拟值分别为92.8、96.4 kN,两者相差3.9%。由图2(c)可知,组合板极限承载力的试验值与模拟值分别为82.9、85.2 kN,两者相差2.8%。有限元分析与试验结果吻合较好。

### 3.2 不同钢筋网的组合板预测结果

固定组合板钢纤维用量为 $30 \text{ kg/m}^3$ 、钢筋间距为200 mm,采用直径分别为5、8 mm的钢筋网,对应试件编号为S5-30L-52、S6-30L-82。对钢-混凝土两跨连续组合板在短期荷载作用下的力学响应进行试验,并进行有限元模拟,将试验值与模拟值进行比较,对比结果如图3所示。

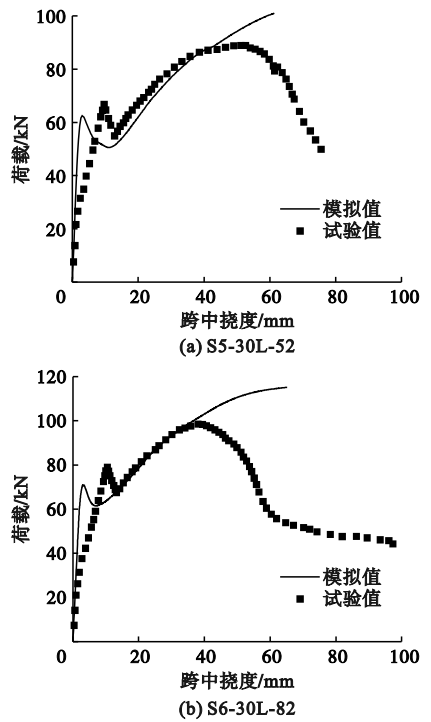


图3 不同钢筋网组合板极限承载力试验值与模拟值对比

Fig.3 Comparison of test values and simulated values of ultimate bearing capacity of specimens using different steel fabric reinforcement

由图3(a)可知,组合板极限承载力的试验值与模拟值分别为88.9、96.0 kN,两者相差8.0%。由图3(b)可知,组合板极限承载力的试验值与模拟值分别为98.6、101.2 kN,两者相差2.6%。有限元分析与试验结果吻合较好。

对组合板弯矩的试验值与模拟值进行对比,结果如图4所示。试件S6-30L-82弯矩试验值与模拟值分别为22.6、21.7 kN·m,两者相差4.0%。由此可得,本文有限元模型可以较好地预测两跨连续钢-混凝土组合板的弯矩。

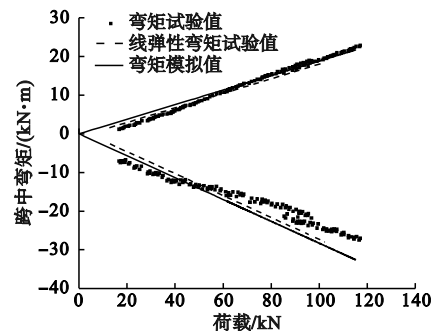


图4 不同钢筋网试件弯矩试验值与模拟值对比  
Fig.4 Comparison of bending moment test values and simulated values of specimens with different steel mesh

### 3.3 不同钢纤维的组合板预测结果

固定钢纤维用量为  $40 \text{ kg/m}^3$ 、纤维长为  $60 \text{ mm}$ ，分别采用 Dramix RC80/60BN 钢纤维(试件 S7-40L-00)和 RC65/35BN 钢纤维(试件 S8-40S-00)，对钢-混凝土组合板在短期荷载作用下的力学响应试验进行有限元模拟，得出不同钢纤维试件极限承载力的试验值与模拟值，对比结果如图 5 所示。

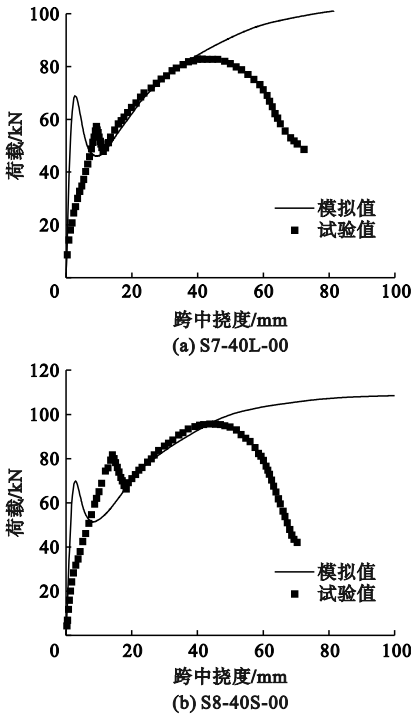


图 5 不同钢纤维组合板极限承载力试验值与模拟值对比

Fig.5 Comparison of test values and simulated values of ultimate bearing capacity of specimens using different steel fibers

由图 5(a)可知,组合板极限承载力的试验值与模拟值分别为  $82.9$ 、 $85.2 \text{ kN}$ ，两者相差  $2.8\%$ 。由图 5(b)可知,组合板极限承载力的试验值与模拟值分别为  $95.7$ 、 $95.8 \text{ kN}$ ，两者相差  $0.1\%$ 。有限元分析与试验结果吻合较好。

### 3.4 组合板静力性能预测结果

对试件 2-C-70 在短期荷载作用下的力学响应试验进行有限元模拟,组合板采用直径分别为  $10$ 、 $12 \text{ mm}$  的钢筋组成的钢筋网,试件试验值与模拟值对比如图 6 所示。

由图 6(a)可知,试件 2-C-70 跨中弯矩的试验结果与有限元分析结果分别为  $37.3$ 、 $37.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，两者相差  $1.3\%$ 。由图 6(b)可知,混凝土跨中应变的试验结果与有限元分析结果分别为  $20.31 \times 10^{-4}$

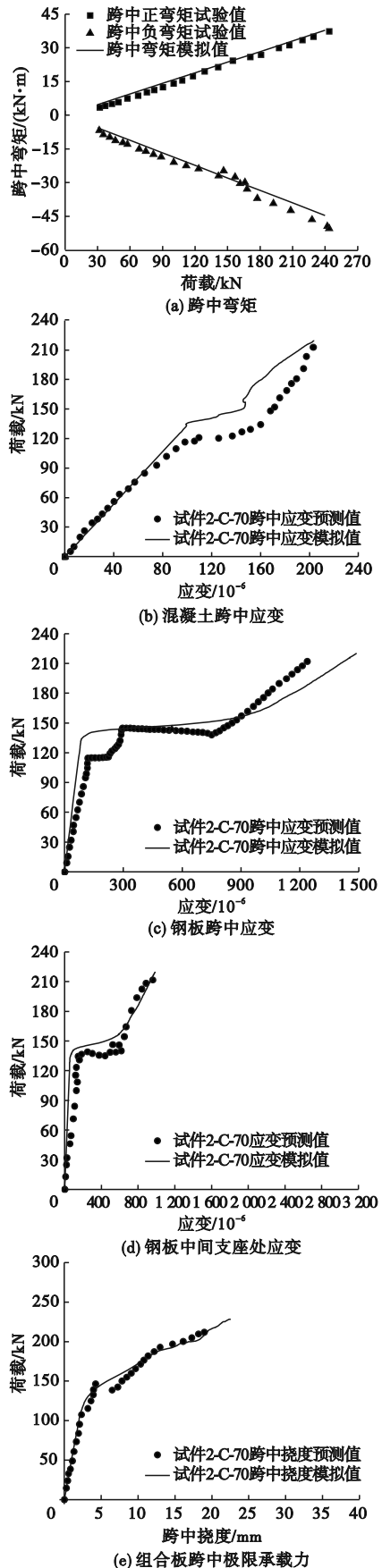


图 6 组合板静力性能试验值与模拟值对比

Fig.6 Comparison of static performance test values and simulated values of composite slabs

和  $20.36 \times 10^{-4}$ , 两者相差 0.2%。由图 6(c) 可知, 钢板跨中应变的试验结果与有限元分析结果分别为  $1.2368 \times 10^{-4}$  和  $1.4894 \times 10^{-3}$ , 两者相差 20.4%。由图 6(d) 可知, 钢板中间支撑处应变试验结果与有限元分析结果分别为  $9.587 \times 10^{-4}$  和  $9.862 \times 10^{-4}$ , 两者相差 2.9%。由图 6(e) 可知, 组合板跨中极限承载力的试验结果与有限元分析结果分别为 212.0、228.2 kN, 两者相差 7.6%。

综上, 有限元分析与试验结果吻合较好, 本文有限元模型可较好地预测钢-混凝土组合板的受弯性能。

## 4 结论

本文使用 ABAQUS 软件建立了两跨连续钢-混凝土组合板的有限元模型, 考察多个因素对其静力性能的影响, 得到如下结论。

1) 采用有限元方法建立组合板有限元模型可准确预测组合板的抗弯性能, 有限元模拟值与试验结果相差 0.1%~8.0%。

2) 有限元模型能够准确地预测组合板的极限承载力, 有限元模拟值与试验结果相差 1.3%~4.0%。

3) 通过模拟计算, 考察了钢纤维用量、不同直径钢筋网及钢纤维种类对组合板性能的影响, 通过与试验结果对比可知, 本文有限元模型均能准确预测组合板的静力性能。

## 参考文献 (References):

- [1] NETHERCOT D A. Composite construction[M]. New York: Spon Press, 2003.
- [2] ABAS F M, GILBERT R I, FOSTER S J, et al. Strength and serviceability of continuous composite slabs with deep trapezoidal steel decking and steel fibre reinforced concrete[J]. Engineering Structures, 2013, 49: 866-875.
- [3] CHEN S. Load carrying capacity of composite slabs with various end constraints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(3): 385-403.
- [4] 杨文平, 杨勇. 闭口型压型钢板-混凝土组合板承载能力试验研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(5): 37-42, 12.

- ty of composite slabs with closed profiled steel sheeting[J]. Building Science, 2008, 24(5): 37-42, 12. (in Chinese)
- [5] 王玉银, 王庆贺, 耿悦. 建筑结构用再生混凝土水平受力构件研究进展[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 1-15.
- WANG Y Y, WANG Q H, GENG Y. State-of-the-art of horizontal structural members using recycled aggregate concrete[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 1-15. (in Chinese)
- [6] 李孝忠. 压型钢板-再生粗骨料混凝土组合板纵向剪切性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [7] 肖妙武, 杨金胜, 张欢, 等. 波纹钢-混凝土组合板纵剪性能试验研究与设计方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(4): 561-568.
- XIAO M W, YANG J S, ZHANG H, et al. Experimental study and design method of longitudinal shear behavior of corrugated steel-concrete composite slabs[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2022, 54(4): 561-568. (in Chinese)
- [8] 杜威, 方敏杰, 周华, 等. 钢-煤矸石混凝土组合板受弯性能分析[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(10): 58-62.
- DU W, FANG M J, ZHOU H, et al. Bending performance of steel-gangue concrete composite slabs for building structure[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2022, 44(10): 58-62. (in Chinese)
- [9] 梁永泽, 张皓, 许怀玉, 等. 装配式地铁站钢板-混凝土空心叠合板受弯性能[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(6): 75-79.
- LIANG Y Z, ZHANG H, XU H Y, et al. Bending performance of steel plate-concrete hollow composite slab for prefabricated metro stations[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2019, 38(6): 75-79. (in Chinese)
- [10] 陈旺, 汪莹, 曾小鱼, 等. 闭口型压型钢板-再生混凝土组合板纵向剪切性能研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(22): 6-12.
- CHEN W, WANG Y, ZENG X Y, et al. Longitudinal shear behavior of closed-section steel deck-recycled aggregate concrete composite slabs[J]. Construction Technology, 2023, 52(22): 6-12. (in Chinese)
- [11] 王庆贺, 魏子钧, 王仕奇, 等. 两跨连续钢-再生混凝土组合板长期性能与预测[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(8): 75-86.
- WANG Q H, WEI Z J, WANG S Q, et al. Long-term behavior and design procedure of two-span steel-recycled aggregate concrete continuous composite slabs[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(8): 75-86. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] GHOLAMHOSEINI A. Experimental and finite element study of ultimate strength of continuous composite concrete slabs with steel decking[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2018, 10(1): 85-97.

(责任编辑: 徐淑姣)