

# 新型空心组合楼板受弯承载力有限元分析

李帼昌,张海辉,杨志坚

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 提出一种新型空心组合楼板,利用有限元软件建立模型单元并分析不同参数对其承载力的影响.方法 应用 ABAQUS 有限元分析软件,选取合适的本构关系和接触关系,建立 14 个新型空心组合楼板有限元模型,研究压型钢板厚度、组合楼板高度以及剪跨比等参数对不同跨度的新型空心组合楼板极限承载力的影响.结果 压型钢板厚度、组合楼板高度以及剪跨比对新型空心组合楼板极限承载力均有影响.通过增大压型钢板厚度和空心组合楼板高度可以提高该新型空心组合楼板极限承载力;增大构件的剪跨比,新型空心组合楼板极限承载力有明显下降,但构件的整体组合性能随着构件剪跨比的增大而提高.结论 不同跨度的新型空心组合楼板在荷载作用下均发生纵向剪切破坏,随着组合楼板跨度的增大,组合效果显著提高.因此在实际工程设计中应根据实际情况和受力要求选择合适高度与跨度的新型空心组合楼板形式.

**关键词** 空心组合楼板;压型钢板;轻骨料混凝土;剪跨比;极限承载力

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Finite Element Analysis of Flexural Bearing Capacity of New Type Hollow Composite Slabs

LI Guochang, ZHANG Haihui, YANG Zhijian

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

**Abstract:** A new type of hollow composite slab is proposed, and the finite element analysis software is used to establish the model element and analyze the influence of different parameters on the bearing capacity of the new hollow composite slab. The finite element models of 14 new composite hollow slabs are established by using ABAQUS finite element analysis software and selecting appropriate constitutive relation and contact relation. The effects of the thickness of profiled steel plate, the height of composite slabs and the shear span ratio on the ultimate bearing capacity of new hollow composite slabs with different spans were studied. Through finite element simulation, the results show that the thickness of profiled steel plate, the height of composite slab and the ratio of shear span have influence on the ultimate bearing capacity of the new hollow

收稿日期:2019-12-03

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703805)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究.

composite slab, which is mainly manifested in the fact that the ultimate bearing capacity of hollow composite slab can be increased by increasing the thickness of profiled steel plate and the height of new hollow composite slab. With the increase of shear span ratio of new hollow composite slabs, the ultimate bearing capacity of new hollow composite slab decreases, but the overall composite performance of members increases with the increase of the shear-span ratio of members. By analyzing the finite element model, it can be concluded that both the small-span new-type hollow composite slab and the large-span new-type hollow composite slab have longitudinal shear failure under load. With the increase of the span of the composite slab, the better the composite effect and the obvious improvement of the overall performance. Therefore, a new type of hollow composite slab with appropriate height and span should be selected according to the actual situation and stress requirements in actual engineering design.

**Key words:** hollow composite slab; profiled steel plate; lightweight aggregate concrete; shear span ratio; ultimate bearing capacity

压型钢板-混凝土组合楼板是指采用某种构造措施使压型钢板和混凝土两种不同性质的材料组合成一体而使其能够共同工作的受力构件<sup>[1]</sup>. 压型钢板-混凝土组合楼板由于其施工速度快, 成本造价低, 能充分利用混凝土和钢材各自的材料性能等诸多优势而被广泛应用于建筑结构当中<sup>[2]</sup>. 传统的压型钢板-混凝土组合楼板是在压型钢板上部浇筑混凝土, 并通过在压型钢板上设置压痕、压型钢板上翼缘焊接横向钢筋或在压型钢板端部设置栓钉连接件等方式使两者组合在一起共同工作<sup>[3]</sup>. 近年来, 随着新建建筑向着大跨度、高层和超高层方向发展, 传统的压型钢板-混凝土组合楼板由于其自重较大, 已难以适应安全、经济、耐久等方面的要求, 因此开发一种整体性能好、重量轻、造价低、满足使用要求且便于装配式施工的新型组合楼板形式已经成为建筑工程领域中亟待解决的问题.

近年来, 国内外学者对压型钢板-混凝土组合楼板和压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板的力学性能进行了大量深入研究. R. Abdullah 等<sup>[4-6]</sup>对开口型压型钢板-混凝土组合楼板进行了足尺试验, 并利用有限元软件对其进行参数化分析, 提出了一种新的组合楼板弯曲试验和剪切粘结模型. N. Hedao 等<sup>[7-8]</sup>对6组共18块足尺寸简支组合楼板不同剪跨条件下进行了静载和循环往复加载

试验, 研究了组合楼板的纵向剪切粘结性能. A. Gholamhoseini 等<sup>[9]</sup>对4种板型, 不同剪跨的组合板进行了静力试验, 分析了不同剪跨和不同压型钢板板型对压型钢板与混凝土之间的剪切粘结性能的影响. M. M. Rana 等<sup>[10-11]</sup>对开口型压型钢板-混凝土组合板和普通钢筋混凝土板进行静力性能试验研究, 试验考虑了端部锚固、长期徐变与收缩等因素对承载力的影响. 李幅昌等<sup>[12-14]</sup>对开口型压型钢板-混凝土组合楼板进行足尺寸试验, 研究了不同跨度的组合楼板裂缝分布、破坏特征和滑移规律等情况. 周天华<sup>[15]</sup>、谢飞<sup>[16]</sup>、孙岳阳<sup>[17]</sup>、李易林<sup>[18]</sup>等进行了压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板受弯性能试验, 分析了压型钢板厚度、组合楼板高度、剪跨比、抗剪钢筋直径等参数对组合楼板的破坏形态、受力状态以及极限承载力的影响规律.

目前, 国内外各专家学者对压型钢板-混凝土组合楼板的研究主要集中在跨度4 m以下的小跨度组合楼板, 而对于大跨度压型钢板-混凝土组合楼板的受力性能则研究较少. 笔者在普通压型钢板-混凝土组合楼板的基础上, 提出了一种新型空心组合楼板结构形式, 利用有限元软件建立模型并对其进行参数化研究. 研究结果表明, 增大压型钢板厚度和组合楼板高度可以提高该新型空心组合楼板极限承载能力, 增大构件的剪跨比, 组

合楼板极限承载力降低,但其整体组合性能显著提高.

### 1 新型空心组合楼板构造及特点

新型空心组合楼板主要由压型钢板、抗剪栓钉、钢垫板、钢筋、轻骨料混凝土和高强混凝土构成. 结构示意图如图 1 所示. 压型钢板通过抗剪栓钉穿透凹肋与下方的钢垫板焊接. 压型钢板凹肋处共布置 6 根  $\Phi 10$  纵向受力钢筋. 在压型钢板上方浇筑轻骨料混凝土,轻骨料混凝土中开设直径 80 mm 空心孔洞. 在轻骨料混凝土上方铺设  $\Phi 8@200$  纵横向构造钢筋以减小收缩应力、温度应力的影响,同时对集中荷载作用点的集中力起到分散的作用. 最后,在轻骨料混凝土上方浇筑一层高强混凝土,承担主要压应力.

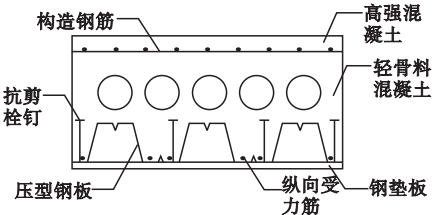


图 1 新型空心组合楼板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of new type of hollow composite slabs

新型空心组合楼板具有以下特点:1)在

组合楼板顶层浇筑高强混凝土,承担主要压应力;2)中间浇筑轻骨料混凝土且在轻骨料混凝土中开设圆形孔洞,可有效减轻组合楼板自重,该新型空心组合楼板与普通压型钢板-混凝土组合楼板相比,可以节省混凝土用量约 15% ~ 21%;3)组合楼板底部为压型钢板和纵向受力钢筋,二者共同承担拉应力且压型钢板可作为施工操作平台和浇筑混凝土的模板,节约了支、拆模板的人工费,降低了施工成本.

### 2 建立有限元模型

#### 2.1 构件设计

笔者共设计了 14 个构件,研究不同跨度下新型空心组合楼板中压型钢板厚度、组合楼板高度、剪跨比等参数对楼板承载力的影响. 组合楼板净跨设置为 3 600 mm、4 800 mm、6 000 mm 和 7 200 mm,宽度为 880 mm. 压型钢板选用开口型压型钢板,强度等级为 Q345,轻骨料混凝土等级采用 LC35,高强混凝土等级采用 C60,厚度取为 30 mm,栓钉选用直径为 19 mm 的 D19 型栓钉,长 80 mm. 纵向受力钢筋等级选用 HRB400,直径 10 mm,构造钢筋等级选用 HRB400,直径 8 mm. 各构件具体参数见表 1.

表 1 有限元模型构造参数

Table 1 Finite element model construction parameters

构件编号	净跨/mm	组合板厚/mm	钢板厚/mm	剪跨/mm	轻骨料混凝土等级	高强混凝土等级	剪跨比	栓钉
SFI-1	3 600	260	0.8	900	LC35	C60	3.46	配置
SFI-2	3 600	260	1.0	900	LC35	C60	3.46	配置
SFI-3	3 600	260	1.2	900	LC35	C60	3.46	配置
SFI-4	3 600	280	1.0	900	LC35	C60	3.21	配置
SFI-5	3 600	300	1.0	900	LC35	C60	3.00	配置
SFI-6	3 600	260	1.0	1 200	LC35	C60	4.62	配置
SFI-7	3 600	260	1.0	600	LC35	C60	2.31	配置
LFI-1	7 200	230	1.0	1 440	LC35	C60	6.26	配置
LFI-2	7 200	230	1.2	1 440	LC35	C60	6.26	配置
LFI-3	7 200	230	1.5	1 440	LC35	C60	6.26	配置
LFI-4	7 200	250	1.5	1 440	LC35	C60	5.76	配置
LFI-5	7 200	280	1.5	1 440	LC35	C60	5.14	配置
LFI-6	6 000	230	1.5	1 200	LC35	C60	5.22	配置
LFI-7	4 800	230	1.5	960	LC35	C60	4.17	配置

2.2 材料本构关系模型

采用 ABAQUS 有限元分析软件对各个构件进行模拟分析,其中压型钢板本构关系采用二折线随动强化模型,抗剪栓钉和钢筋的本构关系选取为理想型弹塑性本构模型. 高强混凝土应力-应变关系采用过镇海提出的混凝土单向拉压本构模型<sup>[19]</sup>. 轻骨料混凝土本构参考中南大学丁发兴提出的轻骨料混凝土轴心受压、受拉应力-应变全曲线方程<sup>[20]</sup>.

2.3 单元类型的选取与网格划分

笔者所研究的空心组合楼板共有 8 个部分:压型钢板、抗剪栓钉、轻骨料混凝土、高强混凝土、纵向受力钢筋、构造钢筋、钢垫板以及加载垫板. 其中轻骨料混凝土和高强混凝土选取实体单元(C3D8R)模拟,压型钢板采用壳单元(S4R)进行模拟. 空心组合楼板中的纵向受力钢筋和构造钢筋采用三维桁架单元(T3D2)模拟,端部抗剪栓钉采用三维线性梁单元(B31)模拟. 模型中网格划分方式采用 Mesh 模块中的六面体结构化网格划分.

2.4 接触关系

压型钢板与轻骨料混凝土之间选择面与面的摩擦接触,同时需要考虑压型钢板与轻骨料混凝土界面间的切线方向和法线方向的关系,将法线方向定义为“硬接触”,允许产生竖向分离,切线方向定义为摩擦接触,摩擦系数取为 0.6<sup>[21]</sup>. 抗剪栓钉和钢筋与混凝土之间的接触类型定义为 Embedded,即将钢筋和抗剪栓钉分别嵌入到混凝土内. 抗剪栓

钉与压型钢板、高强混凝土与轻骨料混凝土以及加载垫板和钢垫板与各部件之间的接触均采用绑定约束<sup>[22]</sup>.

2.5 边界条件与加载方式

为了准确模拟新型空心组合楼板在试验时的边界条件,模型采取两端简支的边界条件. 在模型中加载垫板的上方建立参考点,对加载垫板上表面与对应参考点施加耦合约束,将荷载作用于参考点并施加位移荷载控制.

3 小跨度空心组合楼板有限元结果分析

3.1 破坏形态

通过 ABAQUS 有限元软件的计算和分析,可得到小跨度空心组合楼板构件的应力云图. 笔者选取典型构件 SFI-2,其应力云图如图 2 所示. 由应力云图可以看出,压型钢板最大应力点位于跨中位置,而混凝土最大应力点位于板顶的加载点处. 在荷载加载初期,新型空心组合楼板处于弹性变形阶段,轻骨料混凝土与压型钢板两种材料之间的组合效应尚未破坏,二者共同承担荷载. 当加载至 58.9 kN 时,曲线达到拐点,此时混凝土开裂,压型钢板与轻骨料混凝土之间产生滑移. 当加载至极限荷载时,压型钢板达到屈服应力,但组合楼板顶部高强混凝土最大应力未达到其极限应力状态,由此可以推断构件破坏形态属于纵向剪切破坏.

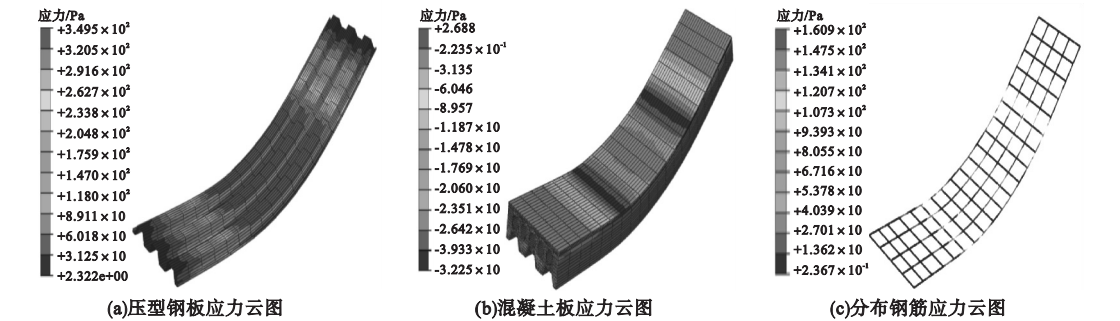


图 2 SFI-2 构件应力云图

Fig. 2 Stress contour plots of SFI-2 component



3.2 参数分析

3.2.1 压型钢板厚度

图3为不同压型钢板厚度下新型空心组合楼板荷载-跨中挠度曲线。从图中可以看出,在弹性和弹塑性工作阶段,压型钢板的厚度对空心组合楼板承载力影响程度较小。在加载后期,随着压型钢板厚度的增加,空心组合楼板的极限承载力随之增加。从对比结果可以看到,压型钢板厚度从0.8 mm增加至1.0 mm时,空心组合楼板承载力增加了6.2%,压型钢板厚度从1.0 mm增加至1.2 mm时,空心组合楼板承载力增加了5.7%。

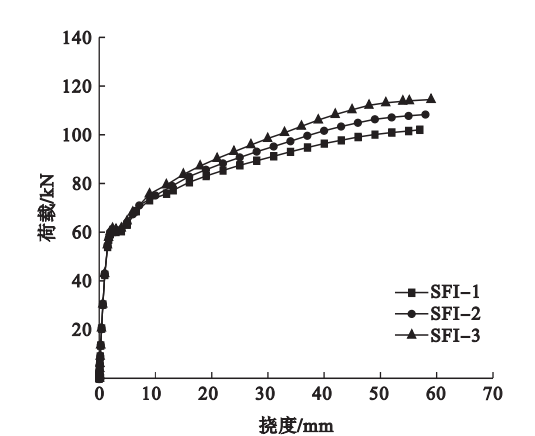


图3 压型钢板厚度对荷载-跨中挠度影响曲线  
Fig. 3 Effect of profiled steel sheet thickness on load-mid-span deflection curves

通过分析压型钢板厚度对新型空心组合楼板的影响可知,增加压型钢板的厚度能在一定范围内提高组合楼板的剪切粘结承载力。这是因为压型钢板厚度增大,其截面面积增加,截面含钢率越大,相应的抗拉作用提高,进而其截面承载能力增强。但如果荷载增大到一定程度时,压型钢板与混凝土间的粘结作用正好完全破坏消失,这时再继续增加压型钢板厚度则对承载力已无有效的影响。

3.2.2 组合楼板高度

图4为不同组合楼板高度的新型空心组合楼板荷载-挠度曲线。由图可见,在各个受力阶段,组合楼板高度对构件的承载力都有较大影响。在其他参数不变条件下,组合楼板高度从260 mm增加到280 mm,空心组合楼

板极限承载力提高了12.5%,组合楼板高度从280 mm增加到300 mm,空心组合楼板极限承载力提高了14.8%。由此可见,在一定范围内,组合楼板高度增加能有效提高新型空心组合楼板的极限承载力。这是因为组合楼板高度的增加使楼板截面有效高度增加,混凝土受压区高度随之增大,混凝土能提供更大的抵抗弯矩的作用。但当荷载增大,压型钢板与混凝土之间的粘结作用破坏后,二者之间分别各自承担荷载,组合楼板高度的增加便不再起到作用。

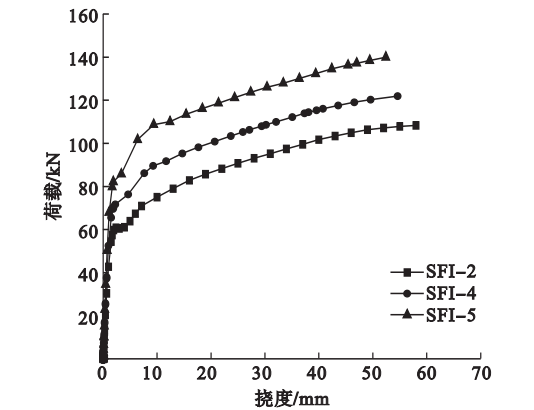


图4 组合楼板高度对荷载-跨中挠度影响曲线  
Fig. 4 Effect of composite slabs height on load-mid-span deflection curves

3.2.3 剪跨比

图5为不同剪跨比的新型空心组合楼板荷载-挠度曲线。

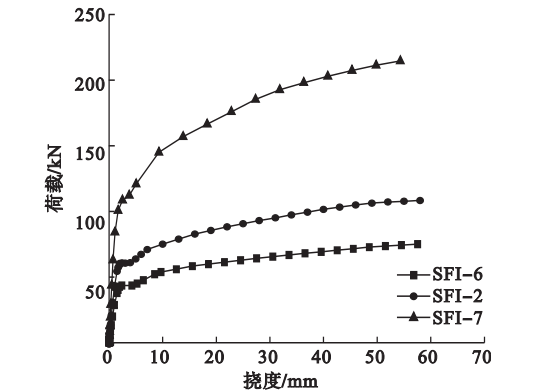


图5 剪跨比对组合楼板荷载-跨中挠度影响曲线  
Fig. 5 Effect of shear-span ratio on load-mid-span deflection curves

由图可以看出,剪跨比对空心组合楼板承载力影响非常显著.剪跨比增大,试件刚度降低,跨中变形加快,承载力也随之降低.剪跨比从2.31增大到3.46,空心组合楼板极限承载力降低了49.5%,剪跨比从3.46增大到4.62,空心组合楼板极限承载力降低了30.7%.大剪跨构件变形能力和延性较好,构件破坏时趋向发生弯剪破坏,小剪跨构件发生明显的纵向剪切破坏,剪跨增大使组合楼

板破坏形态从纵向剪切破坏向弯曲破坏过渡,所以剪跨比越大,构件的整体性能越好,粘结组合效果越好.

4 大跨度空心组合楼板有限元结果分析

4.1 破坏形态

笔者选取典型构件 LFI-3 为研究对象,其应力云图如图6所示.

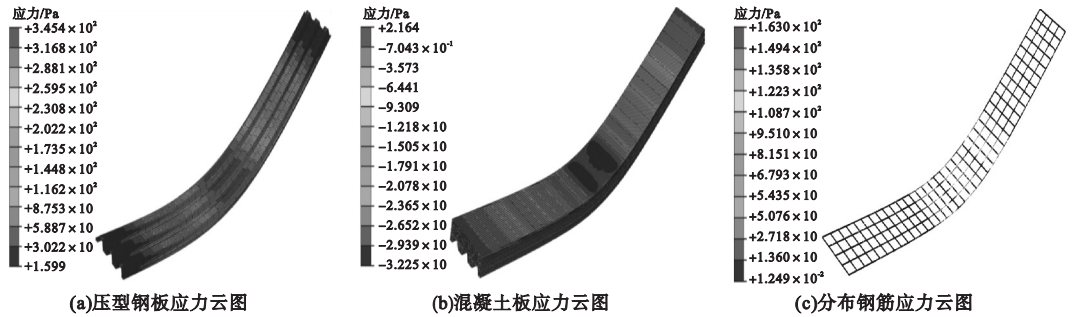


图6 构件应力云图

Fig.6 Stress contour plots of LFI-3 component

由应力云图可以看出,大跨度组合楼板压型钢板最大应力点和混凝土最大应力点均位于组合楼板跨中位置.其受力过程与小跨度空心组合楼板相似.在加载初期,新型空心组合楼板处于弹性工作阶段,当加载至43.6 kN时曲线达到拐点,此时混凝土开裂,压型钢板与轻骨料混凝土之间产生滑移.当加载至极限荷载时,压型钢板达到屈服应力,组合楼板顶部高强混凝土最大应力为32 MPa,未达到其极限应力状态,由此可以推断构件属于纵向剪切破坏.

4.2 参数分析

4.2.1 压型钢板厚度

图7为不同压型钢板厚度的大跨度新型空心组合楼板荷载-跨中挠度曲线.由图可以看出,在弹性和弹塑性阶段时,压型钢板的厚度对空心组合楼板承载力影响程度较小.在加载后期,随着压型钢板厚度的增加,空心组合楼板的极限承载力随之增加.从对比结果可以看到,压型钢板厚度从1.0 mm增加

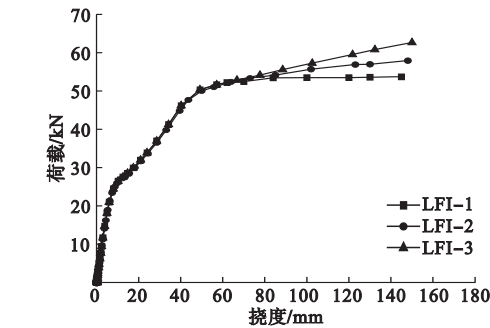


图7 压型钢板厚度对大跨度组合楼板荷载-跨中挠度影响曲线

Fig.7 Effect of profiled steel sheet thickness on load-mid-span deflection curves of long-span composite slabs

至1.2 mm时,空心组合楼板承载力增加了7.9%,压型钢板厚度从1.2 mm增加至1.5 mm时,空心组合楼板承载力增加了8.1%.

对比分析可知,钢板厚度对大跨度组合楼板承载力的影响与小跨度组合楼板相似,即增加压型钢板的厚度能在一定范围内提高组合楼板的剪切粘结承载力.不同的是大跨度组合楼板受钢板厚度的影响时间相对滞

后,影响程度也相对较大.

4.2.2 组合楼板高度

图8为不同组合楼板高度下大跨度新型空心组合楼板荷载-跨中挠度曲线.

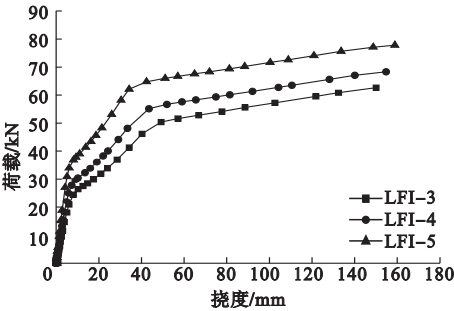


图8 组合楼板高度对大跨度组合楼板荷载-跨中挠度影响曲线

Fig. 8 Effect of composite slabs height on load-mid-span deflection curves of long-span composite slabs

从图中可以看出,组合楼板高度从230 mm增加到250 mm时,空心组合楼板极限承载力提高了9.1%,组合楼板高度从250 mm增加到280 mm时,空心组合楼板极限承载力提高了13.9%.由此可见,在一定范围内,组合楼板高度的增加能有效地提高组合楼板的极限承载力.这与小跨度组合楼板的影响规律和影响程度均相似.

4.2.3 剪跨比

图9为不同剪跨比下大跨度新型空心组合楼板荷载-跨中挠度曲线.

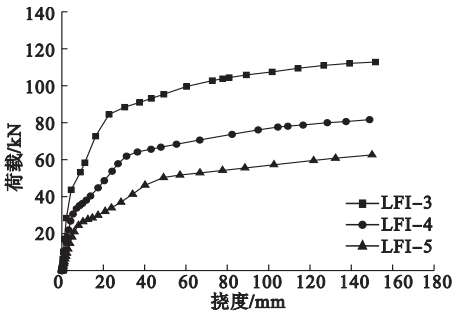


图9 剪跨比对大跨度组合楼板荷载-跨中挠度影响曲线

Fig. 9 Effect of shear-span ratio on load-mid-span deflection curves of long-span composite slabs

由图中可以看出,随着剪跨比增大,试件刚度降低,跨中变形加快,承载力也随之降低.剪跨比从4.17增大到5.22,空心组合楼板极限承载力降低了27.7%,剪跨比从5.22增大到6.26,空心组合楼板极限承载力降低了23.3%.大剪跨组合楼板和小剪跨组合楼板都属于界面黏结破坏,随着剪跨比增大,虽然构件极限承载力下降,但构件的整体性能更好.

5 结 论

(1)对于小跨度新型空心组合楼板和大跨度新型空心组合楼板,增大压型钢板厚度均可以提高组合楼板极限承载力.其中压型钢板厚度变化对大跨度组合楼板极限承载力的影响更为明显.

(2)增大新型空心组合楼板高度对小跨度和大跨度空心组合楼板极限承载力影响均较大,增大组合楼板高度能提高其极限承载力,但组合楼板自重也随之增大,因此在实际的工程设计中应该根据受力要求选择合适的组合楼板高度.

(3)小跨度新型空心组合楼板和大跨度新型空心组合楼板在荷载作用下均发生纵向剪切破坏,其破坏形式与破坏规律基本相似.随着剪跨比增大,构件极限承载力降低,但构件整体性越好.组合楼板破坏形态呈现出逐渐从纵向剪切破坏向弯曲破坏过渡的趋势.

参考文献

[ 1 ] 聂建国. 钢-混凝土组合结构[ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
(NIE Jianguo. Steel-concrete composite structure [ M ]. Beijing: China Construction Industry Press, 2005. )  
[ 2 ] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用[ M ]. 北京: 科学出版社, 2005.  
(NIE Jianguo. Composite steel-concrete beams: experiment theory and application[ M ]. Beijing: China Construction Industry Press, 2005. )  
[ 3 ] 冯建军. 压型钢板与混凝土组合板结构分析与计算理论研究[ D ]. 西安: 长安大学, 2002.  
(FENG Jianjun. Theoretical study on structural

- analysis and calculation of profiled steel plate and concrete composite slab [D]. Xi'an: Chang'an University, 2002. )
- [4] ABDULLAH R, EASTERLING W S. New evaluation and modeling procedure for horizontal shear bond in composite slabs [J]. Journal of constructional steel research, 2009, 65(4): 891 - 899.
  - [5] ABDULLAH R, EASTERLING W S. Elemental bending test and modeling of shear bond in composite slabs [C]. Composite Construction in Steel and Concrete VI, 2011.
  - [6] ABDULLAH R. Experimental evaluation and analytical modeling of shear bond in composite slabs [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
  - [7] HEDAOO N, GUPTA L M, RONGHE G N. Design of composite slabs with profiled steel decking: a comparison between experimental and analytical studies [J]. International journal of advanced structural engineering, 2012, 4(1): 1 - 15.
  - [8] HEDAOO N. Composite concrete slabs with profiled steel decking: comparison between experimental and simulation study [J]. British journal of pharmacology, 2015, 3(5): 157.
  - [9] GHOLAMHOSEINI A, GILBERT R I, BRADFORD M A, et al. Longitudinal shear stress and bond-slip relationships in composite concrete slabs [J]. Engineering structures, 2014, 69: 37 - 48.
  - [10] RANA M M, UY B, MIRZA O. Experimental and numerical study of end anchorage in composite slabs [J]. Journal of constructional steel research, 2015, 115(12): 372 - 386.
  - [11] GUTKOWSKI R M, NATTERER J, SHIGIDI A. Investigation of notched composite wood concrete connections [J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(10): 1553 - 1561.
  - [12] 郭丰伟, 李幅昌, 杨志坚, 等. 大跨度开口型压型钢板-混凝土组合楼板抗滑移性能的研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 190 - 195.  
(GUO Fengwei, LI Guochang, YANG Zhijian, et al. Study on slip resistance of long-span open-profiled steel plate-concrete composite floor [J]. Industrial architecture, 2017, 47(11): 190 - 195. )
  - [13] 李幅昌, 郭丰伟, 杨志坚, 等. 开口型压型钢板-混凝土组合楼板抗弯承载力试验研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(4): 18 - 23, 84.  
(LI Guochang, GUO Fengwei, YANG Zhijian, et al. Experimental study on flexural bearing capacity of composite floor slab with open profiled steel plate and concrete [J]. Progress in building steel structures, 2018, 20(4): 18 - 23, 84. )
  - [14] 李幅昌, 王彦开, 杨志坚, 等. 开口型压型钢板-混凝土组合楼板界面黏结性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 100 - 106.  
(LI Guochang, WANG Yankai, YANG Zhijian, et al. Experimental study on interface bonding behavior of open-profiled steel plate-concrete composite floor [J]. Journal of building structures, 2015, 36(S1): 100 - 106. )
  - [15] 周天华, 何左乾, 吕晶, 等. 压型钢板-橡胶轻骨料混凝土组合楼板受弯承载力有限元分析 [J]. 钢结构, 2019, 34(5): 67 - 71, 76.  
(ZHOU Tianhua, HE Zuoqian, Lü Jing, et al. Finite element analysis of flexural bearing capacity of profiled steel plate-rubber lightweight aggregate concrete composite floor [J]. Steel structure, 2019, 34(5): 67 - 71, 76. )
  - [16] 谢飞, 郑晓燕, 张文华, 等. 考虑滑移的压型钢板-轻骨料混凝土组合板抗弯性能研究 [J]. 钢结构, 2019, 34(3): 45 - 49, 85.  
(XIE Fei, ZHENG Xiaoyan, ZHANG Wenhua, et al. Study on flexural behavior of profiled steel plate-lightweight aggregate concrete composite slab considering slippage [J]. Steel structure, 2019, 34(3): 45 - 49, 85. )
  - [17] 孙岳阳, 赵新铭, 赵林, 等. 压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板受弯承载力试验研究 [J]. 建筑结构, 2017, 47(16): 70 - 73, 29.  
(SUN Yueyang, ZHAO Xinming, ZHAO Lin, et al. Experimental study on flexural capacity of profiled steel plate-lightweight aggregate concrete composite floor [J]. Building structures, 2017, 47(16): 70 - 73, 29. )
  - [18] 李易林. 开口与缩口型压型钢板-ECC组合楼板纵向剪切承载力试验研究与有限元分析 [D]. 西安: 长安大学, 2019.  
(LI Yilin. Experimental study and finite element analysis on longitudinal shear resistance of composite slabs with steel sheet and ECC composite floor [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. )
  - [19] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系-原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.  
(GUO Zhenhai. Strength and constitutive relation of concrete-principle and application [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999. )
  - [20] 丁发兴, 应小勇, 余志武. 轻骨料混凝土单轴力学性能统一计算方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1973 - 1979.  
(DING Faxing, YING Xiaoyong, YU Zhiwu. Unified calculation method for uniaxial mechanical properties of lightweight aggregate concrete [J]. Journal of central south university (natural science edition), 2010, 41(5): 1973 - 1979. )
  - [21] 张宇, 冯子才, 李海旺. 压型钢板组合楼板承载力的有限元分析 [J]. 钢结构, 2002(6): 48 - 50.  
(ZHANG Yu, FENG Zicai, LI Haiwang. Finite element analysis of bearing capacity of profiled steel composite floor [J]. Steel structure, 2002(6): 48 - 50. )
  - [22] 朱春光. 考虑栓钉影响的闭口型压型钢板组合楼板纵剪性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
(ZHU Chunguang. Study on longitudinal shear behavior of flat profiled-concrete composite slabs with end studs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. )  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)