

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.04.015

压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板 纵向剪切承载力试验研究

张贺鹏¹ 赵新铭¹ 王喆¹ 胡少伟²

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 南京水利科学研究所, 南京, 210029)

摘要:对 7 块压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板进行了纵向剪切承载力试验,研究了轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力影响因素和计算方法。研究表明:剪跨越小,组合楼板越厚,组合楼板纵向剪切承载力越高;设置横向抗剪钢筋也会明显增加纵向剪切承载力,并且抗滑移能力提高显著。分别采用 $m-k$ 法和部分抗剪连接 (Partial shear connection, PSC) 法得到了计算该类型压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力的重要参数,其中所得 m, k 系数应用于纵向剪切承载力计算时相比其他文献所得值更加准确,交界面纵向剪切强度与剪跨比呈线性相关,两种方法均能较准确预测纵向剪切承载力,为轻骨料混凝土组合楼板的工程设计提供了试验数据及理论基础。

关键词:压型钢板;轻骨料混凝土;纵向剪切承载力; $m-k$ 法;部分抗剪连接法

中图分类号:TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2017)04-0554-07

Experimental Study of Longitudinal Shear Capacity of Lightweight Aggregate Concrete Composite Slabs with Profiled Steel Sheet

ZHANG Hepeng¹, ZHAO Xinming¹, WANG Zhe¹, HU Shaowei²

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, 210029, China)

Abstract: Tests of longitudinal shear capacity of seven lightweight aggregate concrete composite slabs with profiled steel sheet are conducted to study influence factors and computing methods of longitudinal shear capacity of the composite slabs. The results show that shear capacity is higher for the thicker composite slabs and the smaller shear span and transverse shear reinforcements in the composite slabs. Moreover, parameters for the $m-k$ method and the partial shear connection (PSC) method are determined for predicting the longitudinal shear capacity of the composite slabs based on test results, in which the shearing bond coefficients m and k gained from this study are more suitable for predicting the longitudinal shear capacity of the composite slabs than ones from other documents, and the longitudinal shear bond strength is linearly associated with shear-span ratio. The results provided by these two methods have a good agreement with those obtained from tests, and provide references for the design of lightweight aggregate concrete composite slabs.

Key words: profiled steel sheet; lightweight aggregate concrete; longitudinal shear capacity; $m-k$ method; partial shear connection (PSC) method

基金项目:国家杰出青年科学基金(51325904)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2016-06-24; **修订日期:**2016-11-10

通信作者:赵新铭,男,教授, E-mail: xzmzhao@nuaa.edu.cn。

引用格式:张贺鹏,赵新铭,王喆,等.压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力试验研究[J].南京航空航天大学学报,2017,49(4):554-560. ZHANG Hepeng, ZHAO Xinming, WANG Zhe, et al. Experimental study of longitudinal shear capacity of lightweight aggregate concrete composite slabs with profiled steel sheet[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 554-560.

压型钢板-混凝土组合楼板因其施工速度快,能充分利用混凝土耐压、钢材耐拉的特点等优势性能,目前在建筑中被广泛应用^[1],与普通混凝土相比,轻骨料混凝土质量轻、耐火性好,抗冻抗渗性能好,应用在高层结构中能有效减小结构自重,从而减小地震作用和结构造价。因此,在组合楼板中用轻骨料混凝土代替普通混凝土无疑有良好的应用前景^[2]。

目前,国内外对轻骨料混凝土组合楼板的试验研究不多,主要对普通混凝土组合楼板力学性能^[3-5]和轻骨料混凝土组合楼板抗弯性能^[6-7]做了一定研究,但是对轻骨料混凝土纵向剪切性能的试验研究尚未深入^[8],因此对 7 块压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板进行了纵向剪切承载力试验,考察了纵向剪切破坏下,轻骨料混凝土组合楼板应变、挠度以及端部滑移的发展规律,研究了轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力影响因素和计算方法,得到了 YX76-344-688 压型钢板相比其他文献更加准确的 m , k 系数,此外还得到该类型压型钢板与轻骨料混凝土之间纵向剪切粘结强度与剪跨比的关系,为轻骨料混凝土组合楼板的工程设计提供了试验数据及理论基础。

1 试验方案

1.1 试件制作

本文试验共设计了 7 块压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板试件,压型钢板采用目前应用比较广泛的 YX76-344-688 型压型钢板,该板型具体参数如图 1 所示,截面特性见表 1。每个试件在端部支座处设置了 6 个 $\Phi 16 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 抗剪栓钉,其中 BW1 和 BZ1 试件在压型钢板剪跨段波峰处焊接 2 根 $\Phi 6 \text{ mm} @ 300 \text{ mm}$ 的横向抗剪钢筋,相关构造措施如图 2 所示。为模拟实际工程中压型钢板和钢梁上翼缘的连接,在压型钢板端部放置 1 块 $10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 688 \text{ mm}$ 的钢板。混凝土采用

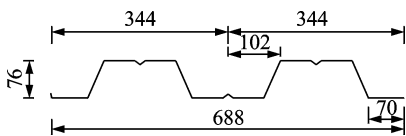


图 1 压型钢板截面尺寸

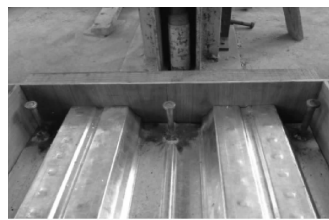
Fig. 1 Cross-sectional dimension of steel sheet

表 1 压型钢板截面特性和材料性能

Tab. 1 Geometric characteristics of cross section and material properties of steel sheet

板厚/ mm	面积/ mm^2	截面惯性矩/ cm^4	截面抵抗矩/ cm^3	屈服强度/ MPa
1.2	1 200	142.01	36.98	390

粘土陶粒、河砂、42.5 普通硅酸盐水泥配置而成,混凝土强度等级 CL40,试件其他参数见表 2。



(a) Studs



(b) Shear reinforcement

图 2 组合楼板抗剪构造措施

Fig. 2 Shear structural measures of composite slabs

表 2 试件参数

Tab. 2 Parameters of specimens

编号	剪跨 a/ mm	板厚 h/ mm	剪跨 比	板宽 b/ mm	长度 L/ mm	抗剪 钢筋/ mm	栓钉/ mm×mm	混凝土 强度 f_{cu}/MPa
BW1	450	151	4.0	694	2 800	$\Phi 6 @ 300$	$\Phi 16 \times 120$	41.4
BZ1	450	152	3.9	692	2 800	$\Phi 6 @ 300$	$\Phi 16 \times 120$	41.4
BZ2	900	150	8.0	695	2 800	无	$\Phi 16 \times 120$	41.4
BZ3	675	150	6.0	686	2 800	无	$\Phi 16 \times 120$	41.4
BZ4	450	149	4.1	690	2 800	无	$\Phi 16 \times 120$	41.4
BZ5	675	132	7.2	693	2 800	无	$\Phi 16 \times 120$	41.4
BZ6	450	129	4.9	689	2 800	无	$\Phi 16 \times 120$	41.4

1.2 加载方案及测点布置

组合楼板两端简支,支座间距 2.7 m,在组合楼板加载处用手动液压千斤顶通过两级分配梁施加集中横向线荷载。试验采用分级加载,每级荷载增量为 2~3 kN,每级持荷 5 min,观察试验现象,直至极限荷载;当荷载下降到极限荷载的 85% 以下或者挠度超过 $l/50$ 时,一次性卸载,试验结束。加载示意图和试验现场如图 3,4 所示。

为了测得组合楼板在各级荷载下的应变值,在压型钢板上、下翼缘和混凝土上表面粘贴应变片;在组合楼板跨中、加载点共布置 3 个位移计来测量试件挠度;在组合楼板两侧端部各布置 2 个位移计,用于测量端部压型钢板与混凝土的相对滑移,位移计的布置如图 5 所示。

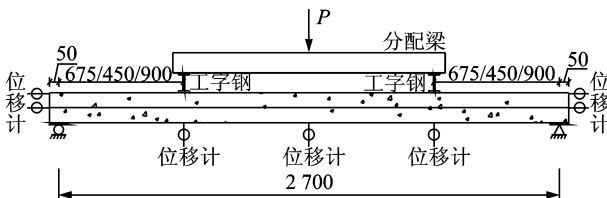


图 3 试验加载示意图

Fig. 3 Test setup



图4 试验现场

Fig. 4 Testing site



(a) Middle span and load point



(b) End

图5 位移计布置图

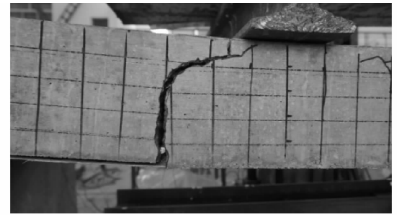
Fig. 5 Layout of displacement transducers

2 试验结果和分析

2.1 试验过程

加载初期,试件处于弹性阶段,混凝土尚未出现裂缝,压型钢板与混凝土组合作用良好,此阶段压型钢板与混凝土之间的粘结应力主要靠化学粘结力提供;当加载到 $15\%P_u \sim 23\%P_u$ 时,试件发出持续嘶响声,试件跨中或者加载点附近出现裂缝,伴随混凝土的开裂,没有横向抗剪钢筋的试件端部压型钢板与混凝土很快出现相对滑移,而有横向抗剪钢筋的试件出现滑移的时间相对滞后,随后新裂缝不断产生,原有裂缝持续发展,剪跨段加载点附近的裂缝斜向上延伸,逐渐形成主裂缝,剪跨段压型钢板和混凝土细微分离,这个阶段压型钢板与混凝土之间的粘结应力主要靠压痕、栓钉和横向

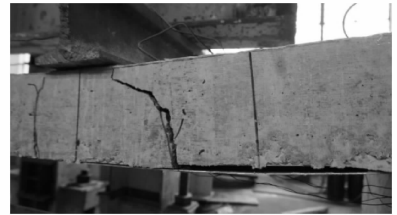
抗剪钢筋等机械咬合力提供;当加载到 $80\%P_u \sim 90\%P_u$ 时,压型钢板下翼缘开始屈服,挠度和端部相对滑移迅速增大;当荷载达到 P_u 时,试件端部相对滑移严重,达到 $2.4 \sim 4.3$ mm,剪跨段压型钢板与混凝土分离明显,加载点处压型钢板下翼缘出现局部压曲,混凝土板顶尚未压碎,主裂缝斜向贯穿,宽度达到 $6 \sim 9$ mm,此时压型钢板与混凝土之间的机械咬合力丧失,试件因相对滑移过大,失去粘结作用而破坏;继续加载,承载力下降,试件严重破坏。试件典型破坏形态如图6所示,试验结果见表3。



(a) Inclined cracks



(b) Interface slip



(c) Separation between steel sheeting and concrete



(d) Interface slip

图6 试件典型破坏形态

Fig. 6 Typical failure modes of specimens

表3 组合楼板试验结果

Tab. 3 Experimental results of specimens

编号	$P_{cr}/$ kN	$P_s/$ kN	$P_{l/250}/$ kN	$P_u/$ kN	$V_u = P_u/2/$ kN	$M_u/$ (kN·m)	$M_p/$ (kN·m)	$M_u/$ M_p	$P_{l/250}/$ P_s	$P_u/$ P_s	$f_u/$ mm	$s_u/$ mm
BW1	22	—	86	129	64.5	29.03	46.17	0.63	—	—	29.43	2.83
BZ1	24	43	79	128	64.0	28.80	46.17	0.62	1.8	3.0	32.13	2.59
BZ2	9	15	28	46	23.0	20.70	46.52	0.44	1.9	3.1	29.50	2.42
BZ3	12	15	33	66	33.0	22.28	46.52	0.48	2.2	4.4	43.53	3.82
BZ4	24	24	55	105	52.5	23.63	46.52	0.51	2.3	4.4	43.79	4.31
BZ5	9	15	30	60	30.0	20.25	37.16	0.54	2.0	4.0	44.50	3.41
BZ6	17	17	40	90	45.0	20.25	37.16	0.54	2.3	5.3	45.46	4.15

注: P_{cr} 、 P_s 、 $P_{l/250}$ 和 P_u 分别为组合楼板开裂、端部出现相对滑移、跨中挠度为 $l/250$ 和极限时对应的荷载; M_u 和 M_p 分别为组合楼板跨中极限弯矩和完全塑性抗弯承载力; f_u 和 s_u 分别为组合楼板跨中极限挠度和端部极限相对滑移。

欧洲规范 4 规定^[9],如果组合楼板的极限荷载 P_u 与端部出现滑移荷载 P_s 的比值超过 1.1,则定义这种破坏为延性破坏,根据破坏形态和 P_u/P_s 比值,7 块试件均属于延性纵向剪切破坏。此外,相关研究^[5,7]表明未设置栓钉的组合楼板将会发生脆性纵向剪切破坏,本次试验中 7 块试件均设置有栓钉,由此可以看出栓钉能有效改善组合楼板受力性能,提高其延性,因此实际工程中建议设置端部栓钉。

2.2 试验结果分析

(1) 荷载-跨中挠度、端部相对滑移曲线和跨中弯矩-跨中挠度曲线

图 7~9 分别为此次试验 7 块组合楼板荷载-跨中挠度曲线、荷载-端部相对滑移曲线和跨中弯矩-跨中挠度曲线。从曲线可以看出,3 种曲线走势基本相同,加载初期,曲线基本重合,呈线性增长;混凝土开裂以后,曲线突变,斜率下降,但基本呈线性增长;快到极限荷载时,曲线斜率再次下降,趋近水平,挠度和相对滑移急剧增大,组合楼板破坏;继续加载,承载力下降,跨中挠度和端部相对滑移继续增加,曲线出现负斜率;当荷载下降到 85% P_u 以下或者挠度超过 $l/50$ 时,一次性卸载,试件回弹,因此,出现荷载-跨中挠度曲线跨中挠度减小的现象。另外,5 块未设置横向抗剪钢筋试件的荷载-跨中挠度、端部相对滑移曲线斜率随着剪跨比增大而减小,在剪跨比相同的情况下,设有横向抗剪钢筋试件的 3 种曲线斜率均更大。

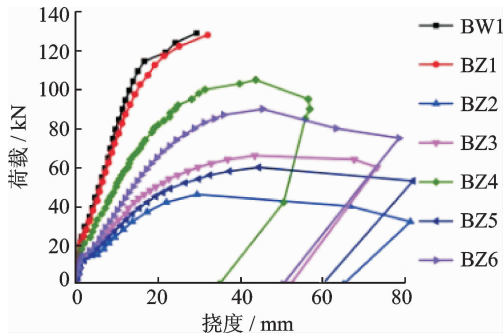


图 7 荷载-跨中挠度曲线
Fig. 7 Load-deflection curves

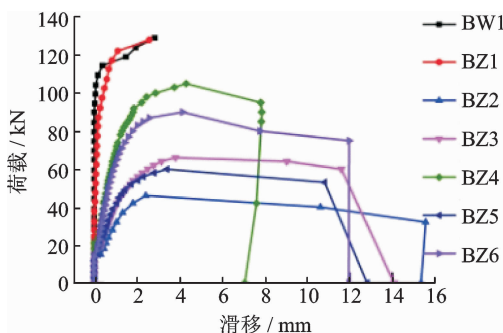


图 8 荷载-端部相对滑移曲线
Fig. 8 Load-slip curves

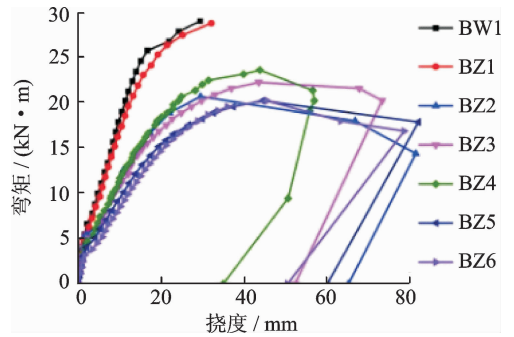


图 9 跨中弯矩-跨中挠度曲线
Fig. 9 Moment-deflection curves

从图 8 和表 3 还可以看出,其他条件相同的情况下,组合楼板剪跨比越大,端部极限相对滑移越小;其他条件相同下,设置横向抗剪钢筋试件的端部极限相对滑移是未设置抗剪钢筋试件的端部极限相对滑移的 60%;经计算,试件 BZ1~BZ6 正常使用极限状态时的荷载 $P_{1/250}$ 与端部出现相对滑移时的荷载 P_s 的比值为 1.8~2.3,并且是随着剪跨比增大和横向抗剪钢筋的设置而变小。这说明剪跨比越大或者设置横向抗剪钢筋,组合楼板在正常使用和承载力极限状态时越不容易出现滑移;横向抗剪钢筋在组合楼板中的抗滑移能力非常显著。

另外,从图 9 中亦可以看出,其他条件相同的情况下:组合楼板厚度越大,挠度相同时所承受的弯矩越大,极限弯矩也越大,这是由于厚度越大的组合楼板提供的内力臂越大的缘故;组合楼板厚度越大,弯矩相同时的挠度变形就越小,组合楼板刚度越大,这是因为厚度越大,组合楼板截面惯性矩就越大;不同剪跨的组合楼板跨中弯矩-跨中挠度曲线基本一致,经计算 7 块试件跨中最大弯矩与完全塑性抗弯承载力比值在 0.44~0.63,都远小于 1,说明本次试验组合楼板的极限承载能力受纵向剪切能力控制。

(2) 应变发展规律

图 10 为压型钢板上、下翼缘和轻骨料混凝土板顶跨中应变。从图中可以看出,承载力极限状态下,压型钢板下翼缘跨中应变可以达到 3 000 $\mu\epsilon$ ($\epsilon_y = 1\ 893\ \mu\epsilon$),达到屈服状态;轻骨料混凝土板顶应变不超过 1 800 $\mu\epsilon$,并未达到轻骨料混凝土极限压应变 3 300 $\mu\epsilon$,纵向剪切破坏下,轻骨料混凝土性能未充分利用;未设置抗剪钢筋试件的压型钢板上翼缘均为先受拉再受压,说明破坏时轻骨料混凝土和压型钢板分别形成各自的中和轴,设置抗剪钢筋试件的上翼缘始终受拉,说明中和轴一直在混凝土内,压型钢板钢板与混凝土组合作用较强。

(3) 影响纵向剪切承载力的因素分析

从试验结果来看,在其他因素相同情况下:组

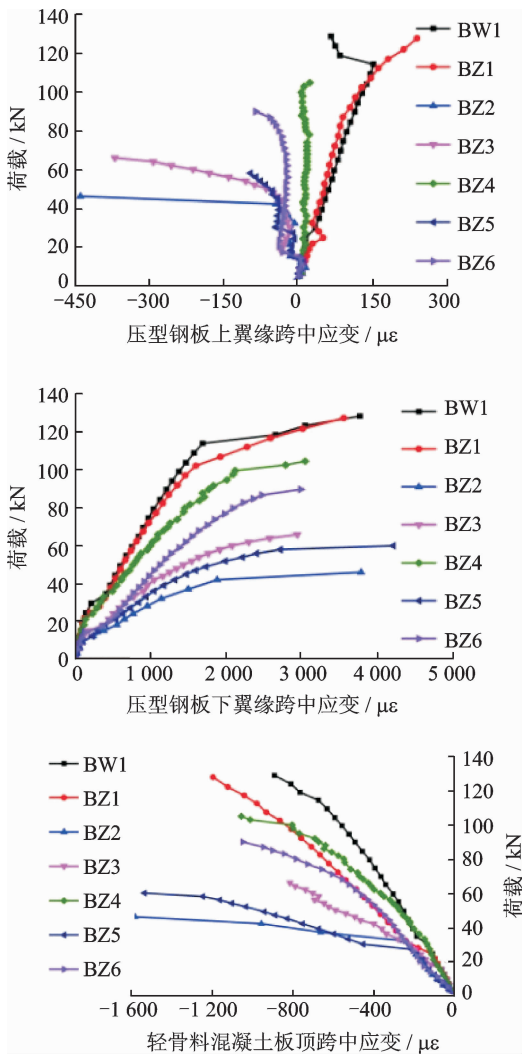


图 10 组合楼板跨中应变图

Fig. 10 Strains of composite slabs at mid-span section of specimens

合楼板剪跨减小,其纵向剪切承载力会显著提高,其中剪跨每减小 225 mm,纵向剪切承载力会平均增加 50%左右,所以在实际工程中,应尽量将较大的集中荷载放置在离支座较近的位置;设置横向抗剪钢筋也会有效提高组合楼板纵向剪切承载力,平均提高 23%;组合楼板厚度增加,其极限承载力同样会相应增加,但是组合楼板厚度每增加 20 mm,纵向剪切承载力仅仅增加 10%~17%,因此仅仅通过增加组合楼板厚度提高其纵向剪切承载力的方法是不经济的。

3 纵向剪切承载力计算

3.1 $m-k$ 法

压型钢板-混凝土组合楼板纵向剪切承载力计算一般采用美国 ASCE 规范建议的公式,通过试验结果回归计算,但是从标准试验方法可知,想用 $m-k$ 法回归得到可靠的拟合曲线,试件须满足一定条件,以保证发生纵向剪切破坏^[10]。对于 YX76-

344-688 压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板,目前相关文献的试验结果大部分是弯曲破坏^[6-7],因此其拟合得到的 m, k 系数用于计算纵向剪切承载力时将会存在不可靠性。综合此次试验结果,采用仅设置栓钉的试件 BZ2~BZ6 以及文献[7]中试件 BV6 的试验结果用于拟合,由于这 6 块试件破坏模式均为纵向剪切破坏,因此所得 m, k 系数可以避免破坏模式不满足带来的不可靠性,可以直接用于轻骨料组合楼板纵向剪切承载力计算。拟合方程为

$$V_u = m A_s h_0 / a + k b h_0 \sqrt{f_c} \quad (1)$$

式中: V_u 为组合楼板纵向剪切破坏时的最大剪力,按表 3 取值; m, k 值由试验结果回归得到。拟合曲线如图 11 所示,拟合相关性系数较高,其中 $m = 190.98 \text{ N/mm}^2, k = -0.00796 \sqrt{N}/\text{mm}$ 。

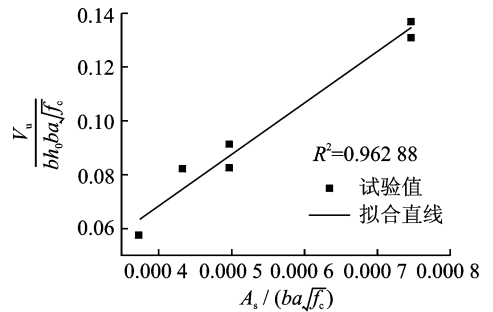
图 11 $m-k$ 法拟合直线

Fig. 11 Regression curve of composite slabs

3.2 部分抗剪连接法

目前大量研究认为^[11-14]延性破坏的组合楼板交界面纵向剪切强度 τ_u 可以用部分抗剪连接 (Partial shear connection, PSC) 法计算,本文组合楼板试件均具有较好延性,适用于该方法计算。PSC 法假定组合楼板交界面剪跨内的纵向剪应力均匀分布,按极限平衡法^[15](图 12),由极限弯矩试验值 M_u 反推出交界面纵向剪切强度 τ_u 。主要过程为

$$M_u = N_{cu} z + M_{pr} \quad (2)$$

$$N_{cu} = \tau_u b (L_s + L_0) \leq N_{cf} = \min(A_s f_y, f_c h_c b) \quad (3)$$

$$z = h - 0.5x - e_p + (e_p - e) N_{cu} / N_{cf} \quad (4)$$

$$M_{pr} = M_{pa} (1 - N_{cu} / N_{cf}) \quad (5)$$

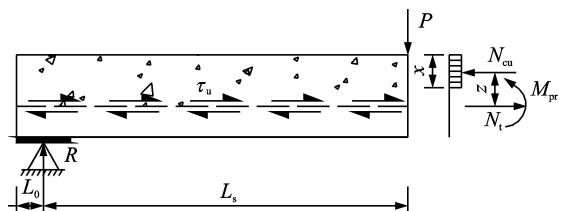


图 12 部分抗剪连接法计算图示

Fig. 12 Computing model of PSC method

式中: N_{cu} 为混凝土板受压区极限合力; N_{cf} 为完全抗剪连接时混凝土受压区极限合力; h_c 为压型钢板肋顶以上混凝土高度; e 为压型钢板截面形心到板底距离; e_p 为压型钢板中和轴到板底距离; M_{pa} 为压型钢板抗弯承载力。已知极限弯矩试验值, 联立式(2~5)求出 N_{cu} , 则 $\tau_u = N_{cu} / [b(L_s + L_0)]$ 。组合楼板交界面纵向剪切强度 τ_u 的计算结果见表 4。

表 4 组合楼板交界面纵向剪切强度计算结果
Tab. 4 Results of longitudinal shear bond strength

编号	剪跨比	τ_u /MPa
BW1	4.0	0.437 0
BZ1	3.9	0.429 6
BZ2	8.0	0.083 6
BZ3	6.0	0.138 0
BZ4	4.1	0.235 9
BZ5	7.2	0.137 4
BZ6	4.9	0.200 4

从表 4 中可以看出, 其他条件相同下, 组合楼板交界面纵向剪切强度 τ_u 随着剪跨比的增加而逐渐减小, 并且大致呈线性关系, 经过线性拟合可得 $\tau_u = -0.035 95a/h_0 + 0.376 19$, 拟合曲线如图 13 所示; 设置横向抗剪钢筋时, 组合楼板交界面纵向剪切强度 τ_u 提高明显。

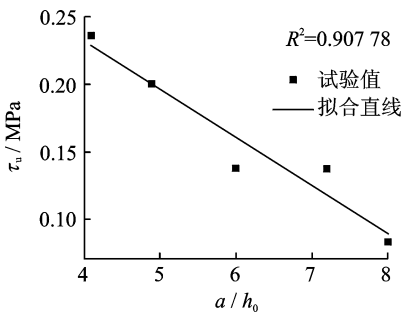


图 13 纵向剪切强度拟合直线

Fig. 13 Regression curve of longitudinal shear bond strength

分别按照 $m-k$ 法(式(1))和 PSC 法(式(2~5))计算仅设置端部栓钉试件 BZ2~BZ5 的纵向剪切承载力, 计算值与试验值对比见表 5。经过分析比较, 上述两种方法均能够准确预测 YX76-344-688 压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板的纵向剪切承载力; 相比之下, PSC 法的计算结果离散性更小一些, 而且它采用简化力学模型, 提出纵向剪切强度概念, 理论概念清晰, 因此该方法相对更加合理; 但是 PSC 法仅仅适用于发生延性破坏的组合楼板, 对于脆性破坏的组合楼板, 采用 $m-k$ 法计算纵向剪切承载力将更加合理。

表 5 组合楼板纵向剪切承载力计算值与试验值

Tab. 5 Comparison between test and calculated results

试件编号	试验值 V_u /kN	$m-k$ 方法		PSC 方法	
		计算值 $V_{u,1}$ /kN	$V_{u,1}/V_u$	计算值 $V_{u,2}$ /kN	$V_{u,2}/V_u$
BZ2	23.0	25.33	1.10	23.40	1.02
BZ3	33.0	34.84	1.06	34.82	1.06
BZ4	52.5	53.85	1.03	51.20	0.99
BZ5	30.0	28.62	0.95	28.79	0.96
BZ6	45.0	44.24	0.98	44.97	1.00
平均值	—	—	1.02	—	1.01
标准差	—	—	0.06	—	0.03

4 结 论

通过对 7 块 YX76-344-688 压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板的纵向剪切承载力试验和分析, 得到如下结论:

(1) 剪跨、组合楼板厚度和横向抗剪钢筋均能不同程度地影响压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力, 并且剪跨越小、组合楼板厚度越大或者设置横向抗剪钢筋, 纵向剪切承载力越大, 其中剪跨对纵向剪切承载力影响最大, 横向抗剪钢筋次之, 组合楼板厚度对其影响相对较小; 横向抗剪钢筋的设置对抗滑移能力提高也非常显著。

(2) 通过试验结果, 采用 $m-k$ 法回归分析得到该类型压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板 m, k 值: $m = 190.98 \text{ N/mm}^2, k = -0.007 96 \sqrt{N}/\text{mm}$ 。该方法能够准确预测压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力, 其中所得 m, k 系数是在保证试验结果为纵向剪切破坏条件下得到的, 相比其他文献中用弯曲破坏试验值拟合得到的 m, k 值计算轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力时更加准确。

(3) 采用 PSC 法得到了计算该类型压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板的纵向剪切承载力的重要参数: 交界面纵向剪切强度 τ_u , 它与剪跨比呈线性相关。该方法也能够准确预测压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板纵向剪切承载力, 而且离散性较 $m-k$ 法更小, 因此更加合理, 但是 PSC 法仅适用于延性破坏。

参考文献:

[1] 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. Steel concrete composite beam structure-experiment—Theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[2] 胡曙光, 王发洲. 轻集料混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

- HU Shuguang, WANG Fazhou. Lightweight aggregate concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [3] 聂建国,唐亮,黄亮. 缩口型压型钢板-混凝土组合板的承载力及变形(一):试验研究及纵向抗剪承载力[J]. 建筑结构,2007,37(1):60-64.
- NIE Jianguo, TANG Liang, HUANG Liang. Load-carrying and deforming capacities of composite slabs with re-entrant trough profiled steel sheeting (I): Experiment and longitudinal shear capacity [J]. Building Structure, 2007, 37(1): 60-64.
- [4] 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(9):37-48.
- [5] 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,S(1):100-106.
- LI Guochang, WANG Yankai, YANG Zhijian, et al. Study on bond property between opened profiled steel sheet and concrete composite slabs [J]. Journal of Building Structures, 2015, S(1): 100-106.
- [6] 张燕坤,刘阳花,宋小软. 压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板受弯承载力试验研究[J]. 工业建筑,2008,38(8):83-85.
- ZHANG Yankun, LIU Yanghua, SONG Xiaoruan. Experimental study on flexural bearing capacity of profiled steel sheet-light-weight aggregate concrete floor slabs [J]. Industrial Construction, 2008, 38(8): 83-85.
- [7] 张燕坤,靳海江,姜德民,等. 轻骨料混凝土组合楼板力学性能试验研究[J]. 北方工业大学学报,2008,20(1):80-84.
- ZHANG Yankun, JIN Haijiang, JIANG Demin, et al. Research on mechanical properties of lightweight aggregate concrete composite slabs [J]. Journal of North China University of Technology, 2008, 20(1): 80-84.
- [8] 杨勇,聂建国,杨文平,等. 闭口型压型钢板-轻骨料混凝土组合板受力性能及动力特性试验研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(6):49-55.
- YANG Yong, NIE Jianguo, YANG Wenping, et al. Experimental study on mechanical behavior and vibration characteristic of re-entrant trough profiled steel sheeting light weight concrete composite slabs [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6): 49-55.
- [9] European Committee for Standardization. BS EN 1994-1-1:2004. Design of composite steel and concrete structures, Part 1. 1: General rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [10] American Society of Civil Engineers. Standard for the structural design of composite slabs [S]. ANSI/ASCE 3-91. New York: American Society of Civil Engineers, 1992.
- [11] MARIMUTHU V, SEETHARAMAN S, JAYACHANDRAN S A, et al. Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic ($m-k$) values of the embossed profiled sheet [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(6):791-803.
- [12] PATRICK M, BRIDGE R Q. Partial shear connection design of composite slabs [J]. Engineering Structures, 1994, 16(5):348-362.
- [13] ABDULLAH R, KUEH A B H, IBRAHIM I S, et al. Characterization of shear bond stress for design of composite slabs using an improved partial shear connection method [J]. Journal of Civil Engineering & Management, 2015, 21(6):720-732.
- [14] HICKS S J, PENNINGTON A F, JONES A S. Longitudinal shear resistance of composite slabs [J]. Structures & Buildings, 2014, 167(10):610-617.
- [15] 吴先芝,童乐为. 压型钢板-混凝土组合楼板纵向抗剪承载力计算[C]//第十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 海南:工业建筑,2013:1443-1449.
- WU Xianzhi, TONG Yuewei. Computing of load-carrying capacities of composite slabs with profiled steel sheeting [C]//The Proceedings of 13th National Modern Structural Engineering Conference. Hainan: Industrial Construction, 2013: 1443-1449.

