

# 闭口型组合楼板纵向剪切承载性能的试验研究

王元清<sup>1</sup>, 成钟寿<sup>1</sup>, 石永久<sup>1</sup>, 奥晓磊<sup>2</sup>

(1. 清华大学土木工程系土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 10008;

2. 北京市建筑设计院, 北京 100045)

**摘要:**为研究新型闭口型压型钢板 Econdex65-675 组合板的破坏、挠曲、端部滑移特性及纵向承载能力, 根据欧洲规范对 4 对 18 块组合板进行试验而获得相关系数  $m, k$ 。制作的 18 个试件分别为 115 mm、150 mm、200 mm 3 种厚度 3 组, 每组由 3 块短板与 3 块长板组成。试验结果发现 3 组试件都发生明显的端部滑移, 呈现过早的纵向剪切破坏。将试验结果与欧洲规范和美国规范进行对比, 结果表明欧洲规范更为准确。同时, 给出了该种组合板纵向承载力计算公式及相关曲线, 并与类似的其他组合板进行对比, 结果显示 Econdex65-675 组合板具有较可靠的组合效率。

**关键词:**组合结构; 组合楼板; 压型钢板; 纵向受剪; 受力性能

**中图分类号:** TU398.9; TU317.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2010)06-0001-06

## Experimental Analysis on the Longitudinal Shear Resistance of Flat-type Composite Slab

WANG Yuan-qing<sup>1</sup>, Sung Jong-su<sup>1</sup>, SHI Yong-jiu<sup>1</sup>, Ao Xiao-lei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; 2. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, P. R. China)

**Abstract:** The shear bond behavior of the flat-type composite deck slab, Econdex65-675 is investigated primarily. Based on the Euro code 4, the relevant value,  $m-k$ , is achieved based on the test of 18 composite slab specimens. According to the thickness which is 115 mm, 150 mm and 200 mm respectively, these 18 specimens were divided into three groups with two sets in each group. One set was tested for shorter shear span loading and the other one was set for longer shear span loading. It is shown that the Euro code 4 is more accurate than the American code. Meanwhile, the calculation formula of longitudinal shear resistance of the composite slab as well as its relevant curve is presented. Compared with other similar composite slabs, it is proved that Econdex65-675 possesses reliable composite efficiency.

**Key words:** composite structures; composite slab; flat-type deck plate; longitudinal shear resistance;  $m-k$  value

压型钢板-混凝土组合板的承载力主要由两材料截面滑移引起的纵向水平剪力来控制。但因为两者之间的粘接作用相当复杂, 还没有理想的设计计算方法。因此目前的组合板设计方法都通过足尺试

验或小块推出试验获得相关承载力。中国可以参考《钢-混凝土组合楼盖结构与施工规程(YB 9238-92)》进行组合板的承载性能计算, 规范中纵向承载性能采用系数  $\alpha$ , 如式(1)所示:

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90815004)

作者简介: 王元清(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事结构工程研究, (E-mail) wang-yq@tsinghua.edu.cn.

$$V_t \leq V_u = \alpha_0 - \alpha_1 L_v + \alpha_2 W_r h_0 + \alpha_3 t \quad (1)$$

但式(1)中的系数只适用于开口型压型钢板—混凝土组合板,目前大多数学者都采用欧美规范的  $m-k$  方法对闭口型压型钢板—混凝土组合板进行研究。中国规范条文说明中也建议采用  $m-k$  方法对闭口型组合板进行试验。

文献[5]对 12 块闭口型压型钢板 Bardek 进行了试验研究。结果表明,组合板的破坏形状与剪跨比有关,对于承受均布荷载的组合板,长跨板通常由受弯控制,而短跨板通常由纵向受剪控制。

文献[6-8]也对类似的闭口型压型钢板 Bondek II 进行了试验研究,获得了相应的承载力计算系数  $m$  和  $k$ 。由上述的研究成果可知,虽然压型钢板的形状类似,但其承载性能及破坏特征有所不同。

文献[9]对 11 块闭口型压型钢板混凝土组合板 YJ 660-720 进行了试验研究,获得相应的  $m$ 、 $k$  系数。结果表明在组合板中设置的栓定能提高压型钢板和混凝土纵向剪切粘接承载力,在剪跨内设置一定的箍钢对承载力有效大的提高。

该文对百安力公司的新型压型钢板 Econdek65-

675 进行试验,采用  $m-k$  方法验证组合板的承载性能。主要试验内容包括,组合板的纵向剪切-粘结能力、试件板的剪跨比的影响、破坏形式、静力荷载与预循环荷载作用下的挠度特征等。

## 1 试验研究

### 1.1 试验概要

试验目的是测试压型钢板组合楼板的剪切—粘结(纵向抗剪)性能,依据欧洲标准 4 中对组合楼板测试的相关规定,测量组合楼板极限承载力,通过数值处理得出计算组合楼板纵向剪切承载力的经验系数  $m$  和  $k$ 。主要试验参数为组合板的厚度和剪跨。一共制作了 18 块组合板试件,厚度分别为 115 mm、150 mm、200 mm 共 3 组。对于同一种厚度组合板,各有不同长度的 3 块短板试件和 3 块长板试件。试件尺寸及试件参数如图 1 和表 1 所示。

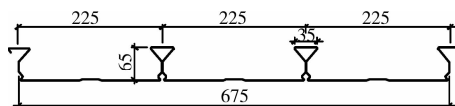


图 1 Econdek 压型钢板

表 1 组合板各试件参数

试件编号	试件尺寸 ( $L \times b \times h$ )/mm	钢板厚/ mm	跨度/ mm	剪跨/ mm	剪跨比	混凝土实测强度/ MPa
A1-S						35.7
A1-C1	1 400×700×115	0.75	1 200	350	3.04	35.3
A1-C2						37.0
A2-S						36.1
A2-C1	3 200×700×115	0.75	3 000	750	6.52	33.9
A2-C2						36.4
B1-S						34.2
B1-C1	1 800×700×150	1	1 600	450	3.00	35.4
B1-C2						37.1
B2-S						35.9
B2-C1	3 700×700×150	1	3 500	900	6.00	34.8
B2-C2						36.6
C1-S						34.4
C1-C1	2 500×700×200	1	2 300	600	3.00	35.1
C1-C2						36.4
C2-S						37.5
C2-C1	4 000×700×200	1	3 800	950	4.75	32.7
C2-C2						34.6

注:按楼板厚度将试件分为 A、B、C 3 类,每一类,按剪跨比分为 1、2 两组,S 代表静力加载(Static Load),C 代表循环加载(Cycle Load)。

## 1.2 试件与测点布置

在每块组合板的加载位置处布设 1.0 mm 厚垂直板肋的通长钢板用作隔板,用以更清晰的定义剪跨,消除混凝土受拉区的拉力。钢板高度为 80 mm,下端紧贴楼承板波谷,遇到板肋处作剪孔处理。然后放置面层钢筋网  $\Phi 8@150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ ,以模拟实际工程情况;最后浇筑 C30 混凝土,同时浇筑 36 个边长 150 mm 的正方体混凝土立方体,以测试混凝土的实际强度(图 2(a))。在组合楼板压型钢板的底部,布置了电阻应变计,测量压型钢板 2 个截面(跨中截面和加载点截面)在不同位置的应力,用导线引到外面,接到应变分析仪上读取应变值(图 2(b))。位移传感器的测量点位于组合楼板跨中,测量跨中相对于地面的位移。在组合楼板的两端部,分别装上 2 个位移百分表,测量混凝土相对于压型钢板的位移(图 2(c))。

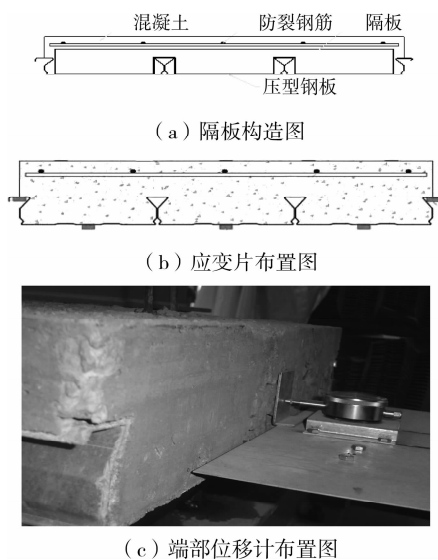


图2 应变片与端部位移计布置图

## 1.3 加载方法

试验的加载方式如图 3 所示,通过 60 t 高精度千斤顶施加荷载,传感器的精度为 0.5 kN,由荷载传感器测量。荷载施加在板跨的 2 个  $L/4$  位置上,这样获得的剪力和弯矩等同均布荷载作用下的结果。



图3 组合板试件示意图

每组试件由 3 块组合板组成,其施加方式如下:

1) 第 1 试件:使用控制台对楼板进行加载。对试件逐渐加压,根据破坏荷载量级每级 10 kN 或 5 kN 不等,每级停留时间为 1 min,在此时间内挠度不再增加时进行下一级加载。直至荷载传感器的数值不再增加时停止加载。当千斤顶传感器的数值达到最大值 ( $W_1$ ) 时,记下板端最大纵向滑移  $S$ 。

2) 第 2、3 试件:先采用  $0.2 W_1$  到  $0.6 W_1$  加载幅度对楼板循环加载,循环次数为 5 000 次。然后对楼板进行逐级加压,使用第 1 试件的方法,记录  $W$  和  $S$ 。第 3 试件,方法同第 2 试件。每组试件测试完毕后,用万能压力机测试混凝土立方体的强度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏特征

试验结果表明在 3 组试件的加载处都出现了混凝土楼板厚度方向的裂缝,通常短跨多斜向发展,长跨多竖向发展。A 组和 B 组试件在加载处出现压型钢板压曲,向外凸出的现象(图 4(a)),但 C 组试件中压型钢板没有明显的压曲。各组试验结果呈现了如下的破坏特征;

1) 对于 A 组试件:不论长短跨,均出现不同程度的压型钢板与混凝土剥离,短跨楼板在端部出现非常明显的外翻(图 4(b)),混凝土楼板完全显露;长短跨板均出现一定量的滑移,滑移程度相近,但短跨端部的滑移两侧较为接近,长跨其中一侧会明显偏大。

2) 对于 B 组试件:楼板端部侧面从压型钢板肋处延伸出斜向裂缝,延伸至楼板上表面,端部压型钢板有一定外翻,但整体的屈曲和脱离还是集中在跨中部位;短跨两端滑移出现一定的不对称,长跨两端滑移严重不对称,破坏时其中一侧滑移量明显较另一侧小(图 4(c))。

3) 对于 C 组试件:混凝土楼板的若干裂缝出现在加载处,开始时竖向发展,后期斜向发展;短跨加载处压型钢板没有明显凸曲,破坏主要集中在跨中。长跨破坏主要集中在加载处,并且只是在一侧,另一侧变化不明显;厚板较薄板破坏滑移大,短跨板两侧滑移较为相近,而长跨板差别明显(图 4(d))。

### 2.2 荷载与端部滑移的特征

图 5 为 3 组试件荷载与楼板端部滑移的关系曲线,从图中可以看出以下特征(图中所列的端部滑移值取左右两端滑移值的较大值);

1) 随着板厚增大,楼板的脆性特征趋于明显。如果最终荷载没有超过滑移为 0.1 mm 时荷载的 10%,则判断它为脆性。根据这个原则,可以判定 B2-C-2、C2-C-1、C1-S 3 块试件为脆性。

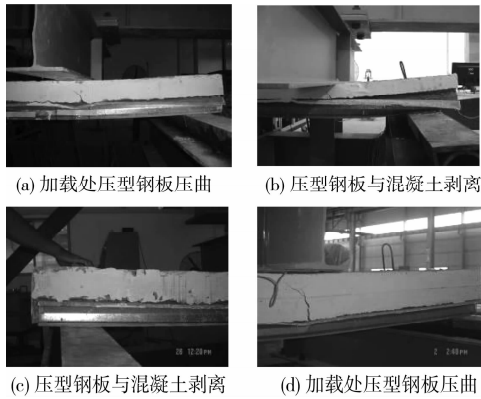
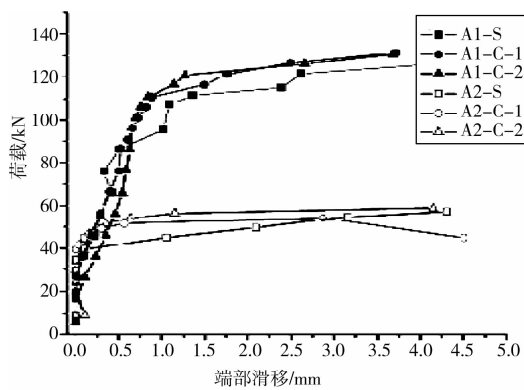
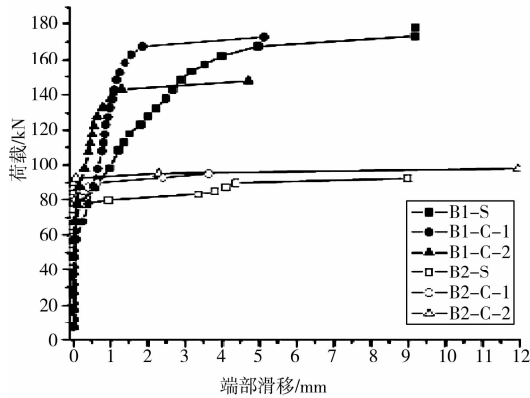


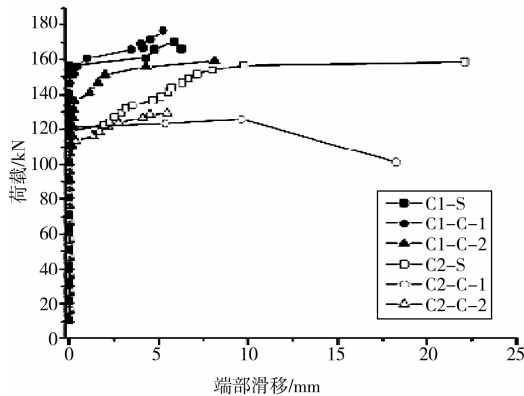
图 4 试件板的破坏特征



(a) A组试件荷载-滑移曲线(115 mm)



(b) B组试件荷载-滑移曲线(150 mm)



(c) C组试件荷载-滑移曲线(200 mm)

图 5 荷载与端部滑移特征曲线

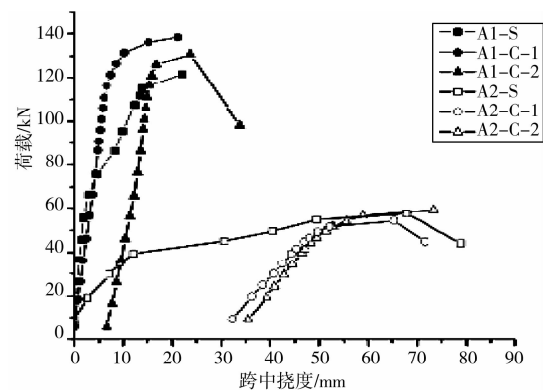
2)从滑移量上看,厚度越大最终滑移量越大,长跨试件要明显大于短跨试件。

### 2.3 荷载与跨中挠度的关系

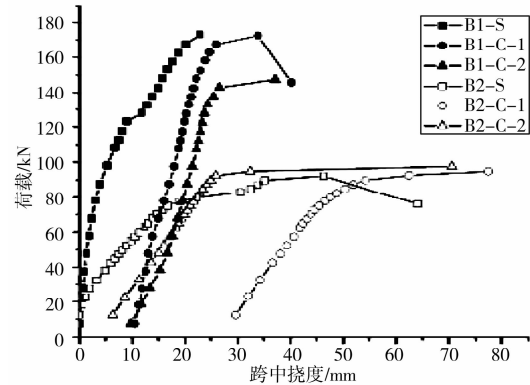
图 6 为 3 组试件荷载与楼板跨中挠度的关系,从图中可以看出;

1)随着混凝土板厚度的增加,剪跨对楼板荷载的影响越小,在 200 mm 试件中长短跨差异相对较小。

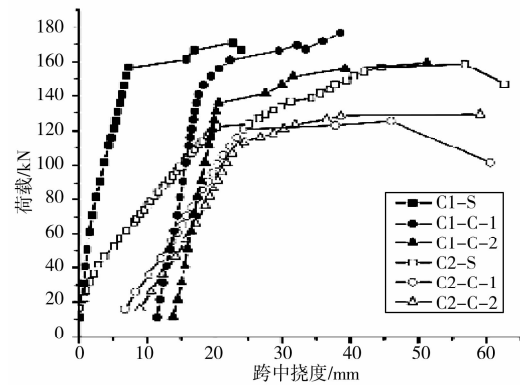
2)循环加载后,试件留有一定的残余挠度,这是因为循环加载后在钢板和混凝土板之间化学粘接剂消失了,剪跨比大的试件表现得更为突出。



(a) A组试件荷载-挠度曲线(115 mm)



(b) B组试件荷载-挠度曲线(150 mm)



(c) C组试件荷载-挠度曲线(200 mm)

图 6 不同试件荷载-端部滑移关系曲线比较

### 3 承载力分析

#### 3.1 纵向剪切承载力

纵向剪切性能一般采用 Eurocode 4<sup>[15]</sup> 或 ASCE<sup>[16]</sup> 的  $m$ - $k$  方法。利用试验结果及组合板几何参数进行线性回归分析可以得到 2 方法的  $m$ 、 $k$  值。计算方法见式(2)和图 7;

$$Y = mX + k \quad (2)$$

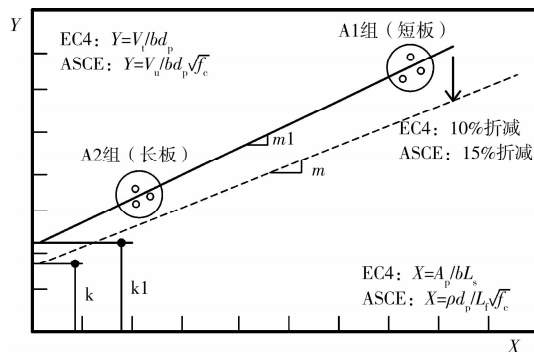


图 7  $m$ 、 $k$  计算方法示意图

计算  $m$ 、 $k$  值时,由于试验数据的离散型,EC4 和 ASCE 分别采用 10%、15% 的折减系数,结果可见表 4。

表 4 经验系数 ( $m$ 、 $k$ ) 计算结果

		$m$	$k$	$R^2$
A 组	EC4	253.76	-0.077 5	0.986
	ASCE	239.91	-0.012 4	0.985
B 组	EC4	191.22	0.052 3	0.927
	ASCE	183.36	0.007 1	0.929
C 组	EC4	103.73	0.264 8	0.398
	ASCE	91.51	0.044 6	0.393
A+B 组	EC4	221.57	-0.012 5	0.936
	ASCE	210.19	-0.002 4	0.937

根据上面的对比结果可以得到如下结论:

1) 从表 4 可知,试验数据拟合时,随着混凝土板厚度的增加,其偏差越大,A 组和 B 组的拟合结果较好,但 C 组结果的离散性很大,C 组试件的相关系数已经超过了可靠离散范围。

2) 从图 8 可知,欧洲规范对各组试件呈现了 9.2% 的误差,根据 ASCE 规范的计算结果呈现了 12.3% 的误差。与 ASCE 计算结果相比,欧洲规范计算结果较为准确。采用欧洲规范的纵向承载力计算公式对 Econdek65-675 的纵向剪切承载能力如下:

$$V_{L,Rd} = \frac{bd_p}{1.25} \left( \frac{221.57A_p}{bL_s} - 0.0125 \right) \quad (3)$$

式中 1.25 为安全系数。

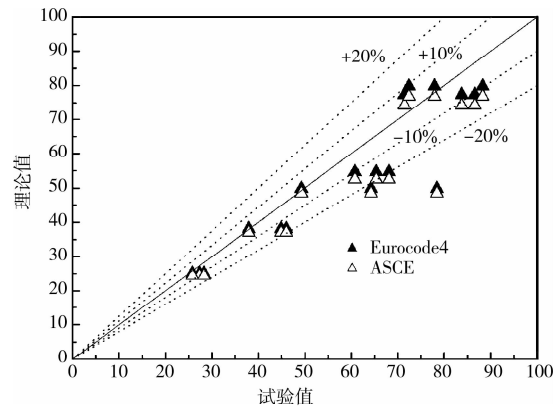


图 8 实测极限结果跟理论计算结果对比

#### 3.2 与其他类似组合板对比

对其他类似的闭口型或缩口型压型钢板的  $m$ 、 $k$  值如表 5 所示。

表 5 对不同压型钢板-组合楼板的  $m$  和  $k$  值

组合板	形状	$m(k)$ 值
Bardek <sup>[5]</sup>		234.85(0.028)
Bondek II <sup>[6]</sup>		258.95(0.002 7)
Bondek II <sup>[7]</sup>		307.53(0.009 2)
Bondek II <sup>[8]</sup>		363.49(-0.030)
YJ660-720 <sup>[9]</sup>		173.84(0.015 0)
Econdek 65-675 该试验		210.19(-0.002 4)

注:表中的  $m$ 、 $k$  值均采用 ASCE 方法进行计算。

从表 5 可以看出:

1) 与已在实际工程中使用的其他组合板相比,试验中采用的 Econdek 具有类似的  $m$ 、 $k$  值,具有较可靠的纵向剪切承载性能,可以应用到实际工程中。

2) 随着压型钢板截面的变化,  $m$ 、 $k$  值也会有所改变。即使同样截面尺寸的组合板进行试验,其  $m$ 、 $k$  值也会有不同的结果。如表 5 中的参考文献[6-8]都采用了同一种压型钢板 Bondek II,可是其  $m$ 、 $k$  值有较大的不同。这可认为,文献[6-7]中的试件数量大于 6,而在文献[6]试验组合板中只采用 3 m 跨度的 4 块试件。

3) Econdex65-625 的  $m$ 、 $k$  值与 Bardek 压型钢板类似, 但与参考文献[6-8]的 Bondek II 相比有较大的差别。可以认为 Bondek II 上布置的压痕影响了组合板的极限承载力。

## 4 结论

1) 试验结果表明, 由于板端部没有布置栓钉等抗剪构件, 在所有的试件中都发生了纵向剪切破坏。在施工中, 为保证 2 种材料的组合作用, 应布置如栓钉等的端部连接件。

2) 通过承载力试验得到了组合板的纵向剪切承载力曲线及相关系数  $m$  和  $k$ , 并且得到了 Econdex65-625 的纵向剪切承载力计算公式。

3) 与类似的组合板相比, 现行的  $m$ - $k$  方法由于试验条件、试件数量和剪跨比等试验参数的不同, 在结果上会有较大的偏差。为节约新型压型钢板试验成本、减少实行错误等, 中国需要统一标准的试验方法和更正确的理论模型。

### 参考文献:

- [1] REDZUAN ABDULLAH, W SAMUEL EASTERLING. Determination of composite slab strength using a new elemental test method [J]. Structural Engineering, 2007, 133(9): 1268-1277.
- [2] ROGER P JOHSON. Models for the longitudinal shear resistance of composite slabs, and the use of non-standard test data[C]//5th International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete V, South Africa, 2006; 157-165.
- [3] MARCIUKAITIS G, JONAITIS B, VALIVONIS J. Analysis of deflection of composite slabs with profiled sheeting up to the ultimate moment[J]. Constructional Steel Research, 2006, 62: 820-830.
- [4] REDZUAN ABDULLAH, Experimental evaluation and analytical modeling of shear bond in composite slabs [D]. Blacksburg, Univ. of Virginia, 2004.
- [5] 聂建国, 易卫华. 闭口型压型钢板-混凝土组合板的纵向受剪性能[J]. 工业建筑, 2003, 33(12).  
NIE JIAN-GUO, YI WEI-HUA. Longitudinal shearing behavior of closed profiled sheeting concrete composite slab[J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 15-18.
- [6] 杨文平, 杨勇. 闭口型压型钢板-混凝土组合板承载力试验研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(5): 37-42.
- YANG WEN-PING, YANG YONG. Experimental study on bearing capacity of composite slabs with closed profiled steel sheeting[J]. Building Science, 2008, 24(5): 37-42.
- [7] 黄亮. 缩口型压型钢板-混凝土组合楼板的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [8] 左莹. 压型钢板-混凝土组合板的研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [9] 康众举, 张兴虎, 史庆轩, 等. 闭口型压型钢板-混凝土组合楼板剪切粘结承载力试验研究[J]. 浙江建筑, 2007, 24(4): 15-18.
- [10] 刘莉媛, 施刚, 石永久, 等. 压型钢板-混凝土组合板的受力性能及其计算[C]//钢结构工程研究(七)-中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会 2008 年学术交流会论文集, 沈阳, 2008: 174-180.
- [11] MARIMUTHU V, SEETHARAMAN S, ARUL JAYACHANDRAN S, et al. Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic ( $m$ - $k$ ) values of the embossed profiled sheet[J]. Constructional Steel Research, 2007, 63: 791-803.
- [12] JEONG YOUN-JU, KIM HYEONG-YEOL, KOO HYUN-BON. Longitudinal shear resistance of steel-concrete composite slabs with perfo-bond shear connectors[J]. Constructional Steel Research, 2009, 65: 81-88.
- [13] KIM Y J, CHAI H S, KIM W J. A study of the experimental for the shear bond strength of deck plate composite slabs [C]//60<sup>th</sup> Year Anniversary of Architecture Institute of Korea, South Korea, 2005, 25(1): 237-240.
- [14] 成钟寿, 王元清, 石永久. 中韩压型钢板-混凝土组合楼板规程比较 [J]. 低温建筑技术, 2010(2): 10-12.  
SUNG J S, WANG Y Q, SHI Y J. Comparison on the design code of composite steel deck slab in china and south korea [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010(2): 10-12.
- [15] Eurocode4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1. 1, General Rules and Rules for Buildings. ENV 1994-1-1 [S]. 1994.
- [16] ANSI/ASCE 3-19, American Society of Civil Engineer Standard for the Structural Design of Composite Slabs [S]. 1992.