

文章编号: 1001-4888(2005)01-0115-08

新型外包钢—砼组合梁的受力性能分析^{*}

石启印¹, 马 波¹, 李爱群²

(1. 江苏大学 理学院, 镇江 212013; 2. 东南大学 混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 针对普通钢—混凝土组合梁存在的一些问题, 提出了一种新型的组合梁——外包钢—混凝土组合梁。为了研究其受力性能, 进行了三根足尺简支梁的试验研究, 并通过对构件荷载—位移曲线、荷载—应变曲线和应变沿截面高度分布的分析, 认为外包钢—混凝土组合梁有较优越的力学性能和良好的应用前景。基于组合梁弹塑性理论, 推导出梁的正截面承载力的计算公式, 与试验结果比较吻合。最后, 为了便于其工程中的应用, 根据试验结果, 提出了适于该种组合梁的一些构造措施。

关键词: 外包钢; 组合梁; 试验研究; 理论分析

中图分类号: TU398; TU317.1

文献标识码: A

1 引言

钢—混凝土组合梁是在钢结构和混凝土结构基础上发展起来的一种新型梁。普通钢—混凝土组合梁, 其翼缘板采用压型钢板, 在压型钢板上现浇混凝土, 压型钢板既能作为浇注混凝土板时的模板, 又能起到板中受力钢筋的作用。其肋部采用工字钢梁, 通过剪力连接件与翼缘板连接形成整体, 使钢梁和混凝土板共同工作, 详见图 1。钢—混凝土组合结构兼有钢结构和钢筋混凝土结构的优点。混凝土的受压性能较好, 而钢材的受拉性能较好, 钢—混凝土组合梁充分发挥了两种材料的优点, 形成强度高、刚度大、延性好的结构形式, 广泛地用于楼盖体系中。但应用实践表明, 该种形式的组合梁也存在一些问题: (1) 由于受压型钢板跨度的影响, 梁的跨度不宜做得很大, 一般不超过 3.6 米; (2) 混凝土与型钢之间的连接始终没有得到很好的解决, 两者之间的滑移和掀起不容忽视; (3) 这种截面的横向稳定性差, 型钢腹板在支座处容易发生失稳。

针对上面提到的普通钢—混凝土组合梁的一些缺点, 本文提出了一种新型的钢—混凝土组合梁形式。该种结构形式的组合梁与传统组合梁的区别在于: 以较厚钢板做底板, 腹板采用较薄的冷弯薄壁型钢, 二者通过焊缝连接形成 U 形截面, 然后在 U 形截面内浇注混凝土, 作为 T 形组合梁的肋部, 翼缘为现浇楼板, 钢与混凝土通过可靠的剪力连接件共同工作。这种结构形式的优点在于: 钢梁可以在工厂就装配好,

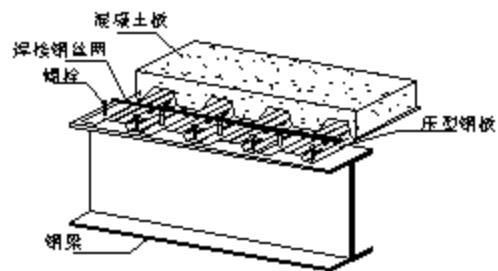


图 1 典型的组合梁结构形式

Fig. 1 Typical type of composite beam

^{*} 收稿日期: 2004-03-28; 修订日期: 2004-09-30

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2004064); 江苏省建设系统科技项目(JS200321)

通讯作者: 石启印(1964—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构工程方面的教学与科研工作, 现在江苏大学土木工程系工作。

且截面形式可以根据需要,做成各种形状,如 Z 型、U 型、L 型等。填充混凝土及布置的拉结钢筋加强了梁的整体性和稳定性,加大了梁的刚度,且对于抵抗板与梁交界面处的纵向剪力起到了一定的作用,在北京银泰中心大楼楼盖体系方案设计中被采用。为了研究该种结构形式组合梁的受力性能,本文进行了三根足尺简支梁的试验研究。

2 试验研究

2.1 试件制作

试件设计详细情况见表 1 和图 2~4,材性试验见表 2。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Designed parameters of samples

编号	f_{yk} MPa	抗 剪 措 施	其 他 措 施
SBD—1	31.7	翼缘栓钉 $\Phi 18@360$,底板栓钉 $\Phi 18@350$,抗剪钢筋 $\Phi 8@250$	翼缘外翻 80mm,配 $\Phi 18@450$ 的拉条
SBD—2	29.7	翼缘栓钉 $\Phi 18@350$,底板栓钉 $\Phi 18@440$,抗剪钢筋 $\Phi 8@250$	翼缘外翻 80mm,配 $\Phi 18@500$ 的拉条
SBD—3	26.8	翼缘栓钉 $\Phi 18@350$,底板栓钉 $\Phi 18@440$,抗剪钢筋 $\Phi 8@250$	翼缘外翻 80mm,配 $\Phi 18@500$ 的拉条

表 2 钢材的力学性能

Tab. 2 Mechanical character of steel

试件厚度 (mm)	试件宽度 (mm)	计算面积 (mm ²)	拉伸试验			弯曲试验 (180°2a)
			屈服点 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 δ (%)	
$\delta 4$	20	80	410	500	30	合格
			360	450	27	
$\delta 14$	30	300	365	595	16.5	合格
			340	515	4	
$\delta 18$	—	254.34	400	585	23	合格
	—	254.34	380	580	22	

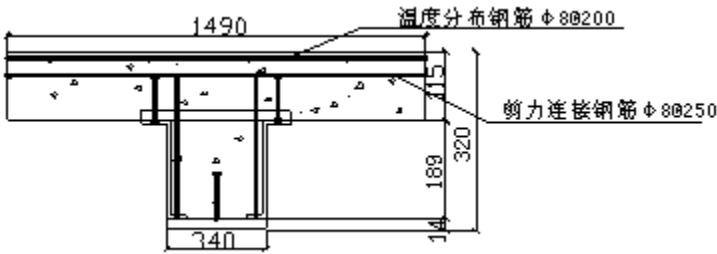


图 2 SBD—1 截面图

Fig. 2 Cross section of SBD—1

设计说明:混凝土强度等级皆为 C30,翼缘板内双向温度钢筋为 $\Phi 8@200$,底部钢板的型号为 Q345,腹板的型号为 Q235,拉条和栓钉型号为 HRB335,横向钢筋为 $\Phi 8@200$ 。

2.2 试验方案

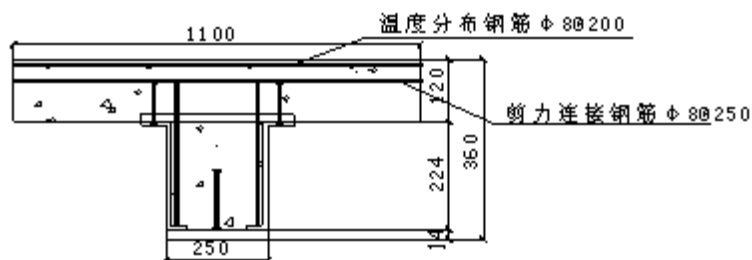


图 3 SBD-2 截面图

Fig. 3 Cross section of SBD-2

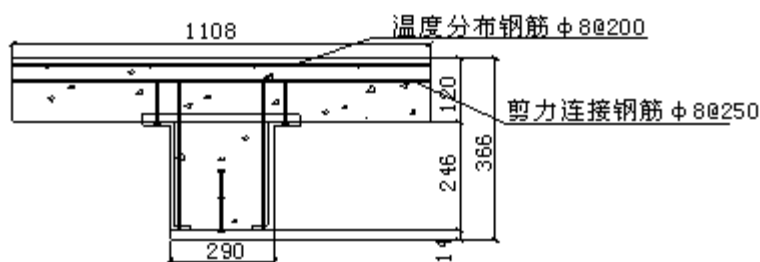


图 4 SBD-3 截面图

Fig. 4 Cross section of SBD-3

2.2.1 加载方式与装置

本试验采用人工加载,加载装置使用量程为 50t 的油压千斤顶,试验准备阶段已使用压力机标定过。在加载位置安放反力架并固定于地槽,千斤顶位于反力架和组合梁之间,通过分配钢梁将荷载传递到梁顶。试验过程中,采用同步加载,在组合梁底部钢板屈服前,以 10kN 为一个加载等级,屈服后改为 5kN 为一个加载等级。

2.2.2 测点布置

为了了解外包钢—混凝土组合梁构件型钢、钢筋、混凝土的受力状态,在梁跨中截面的型钢底板、腹部、钢筋、混凝土表面都贴有量测应变的应变电阻片。型钢应变片、钢筋应变片标距为 $3 \times 5\text{mm}$,混凝土表面应变片为标距 $5 \times 100\text{mm}$ 。在加载过程中,应变片数据采用应变箱自动采集仪联机获取。在支座、加载点和跨中位置布置百分表测量加载过程中构件的变形,试验装置见图 5,应变片布置图见图 6,从上到下依次为跨中部位沿截面厚度方向、沿混凝土板宽度方向和沿型钢底板宽度方向应变片的布置图。



图 5 试验装置图

Fig. 5 Experimental setting

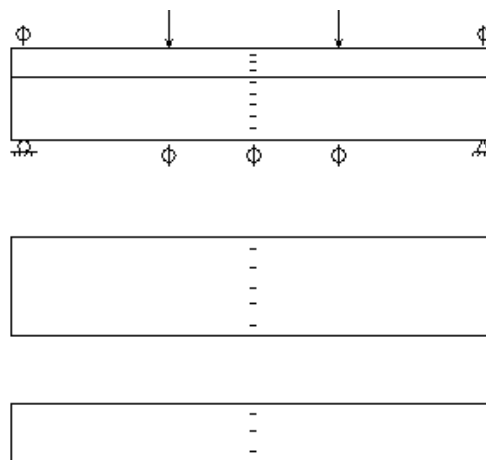


图 6 应变片布置图

Fig. 6 Distribution of strain plate

2.3 试验现象

(1) SBD-1 梁:加载至 165kN ($P/P_u=0.569$, P_u 为极限荷载)时,在梁的端部,混凝土与外包钢之间出

现细小竖向粘结滑移裂缝;继续加载,梁挠度继续增加;加载至 235kN 时($P/P_u=0.81$)时,混凝土翼缘板的侧面出现细小纵向裂缝。加载至 290kN 时($P/P_u=1.0$),梁一侧靠近加载点附近的纯弯段内混凝土翼缘板被压碎。直至破坏,底部钢板与混凝土之间没有出现剪切滑移,但梁的挠度较大。SBD-1 梁的破坏形式为正截面受弯破坏。

(2) SBD-2 梁:加载至 255kN($P/P_u=0.879$)时,梁端部填充混凝土和底部钢板之间出现粘结滑移裂缝,跨中钢梁腹板与混凝土翼缘板之间出现纵向细小裂缝,此时梁的挠度已经较大。继续加载,裂缝开展不大。加载至 290kN 时($P/P_u=1.0$),混凝土翼缘板被压碎,整个加载过程中组合梁的端部粘结滑移裂缝都不明显。SBD-2 梁的破坏形式为正截面受弯破坏。

(3) SBD-3 梁:加载至 130kN($P/P_u=0.464$)时,梁一端钢腹板与混凝土之间出现细微的竖向粘结滑移裂缝,加载至 140kN($P/P_u=0.5$)时,梁的另一端也出现细微的竖向粘结滑移裂缝。加载至 215kN 时,($P/P_u=0.768$)时,梁一端端部填充混凝土与底部钢板之间出现横向粘结滑移裂缝,加载至 235kN($P/P_u=0.839$)时,梁的另一端端部填充混凝土与底部钢板之间出现细微的横向粘结滑移裂缝。加载至 280kN($P/P_u=1.0$)时,混凝土翼缘板被压碎。SBD-3 梁的破坏形式为正截面受弯破坏。

2.4 试验结果及分析

(1) 荷载—挠度曲线

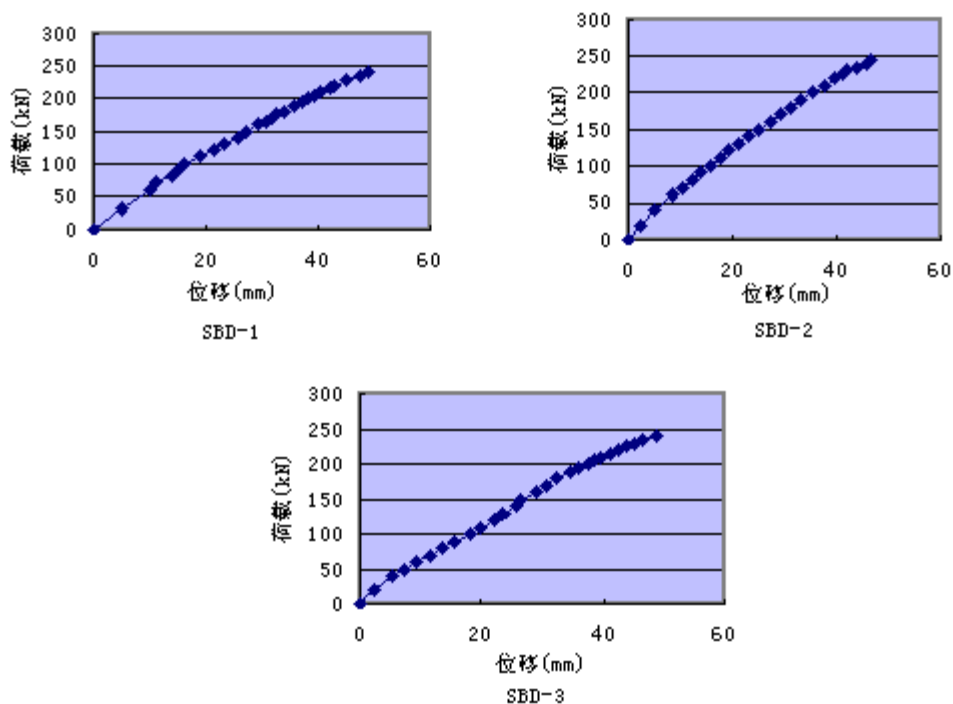


图7 跨中截面荷载—位移曲线

Fig. 7 Load-displacement relationship of cross section at middle span

从图7可以看出,在底部钢板屈服之前,挠度基本上随着荷载的增加呈线性增大;在屈服荷载以后,荷载—挠度曲线的斜率逐渐变小,构件的刚度逐步下降,破坏时,梁的挠度较大,构件表现出良好的延性性能。

(2) 荷载—应变曲线

从图8可以看出,三根梁破坏时钢梁底部均早已屈服,钢材的塑性性能发挥充分,承载能力都较大,说明梁能很好地共同工作。SBD-1、SBD-2 梁有明显的屈服台阶,构件的屈服强度比较小。

(3) 荷载沿截面高度变化曲线

从图9可以看出,组合梁截面的应变基本符合平截面假定。

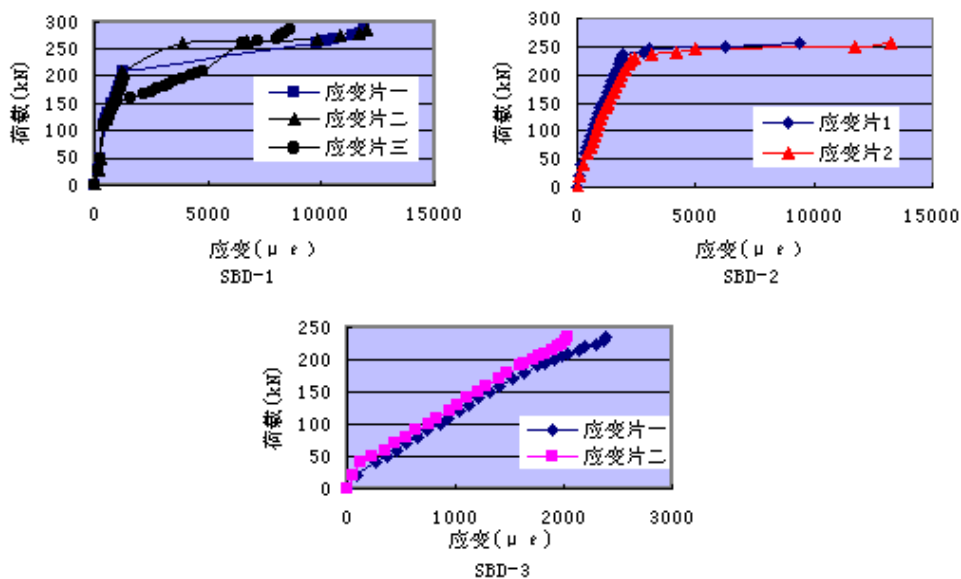


图 8 跨中底部钢板荷载—应变曲线

Fig. 8 Load-strain relationship at middle span of bottom steel plate

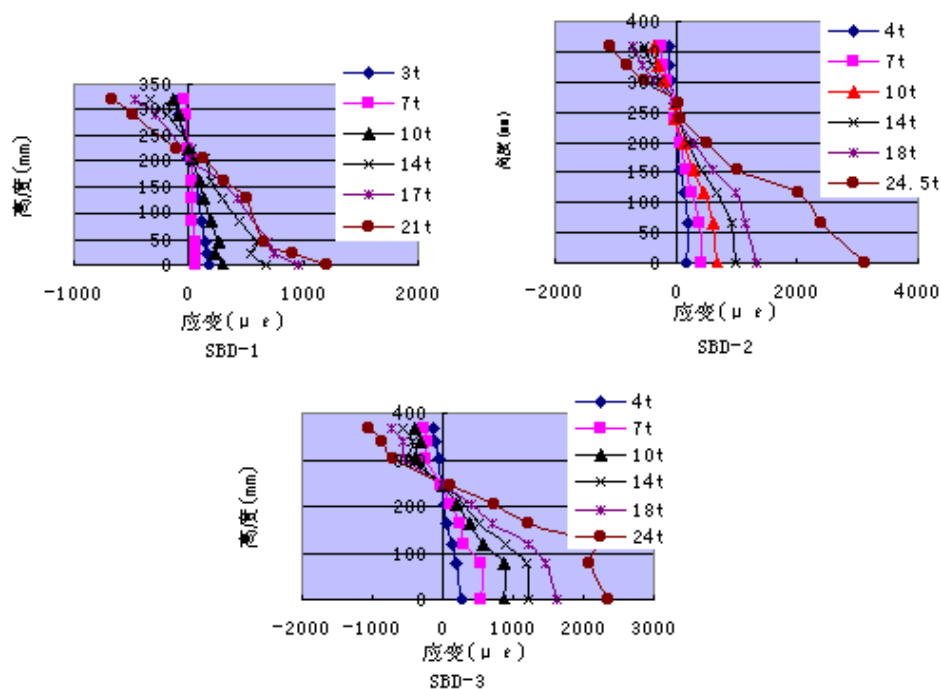


图 9 跨中应变沿截面高度分布

Fig. 9 Distribution of strain along the height of cross section at middle span

3 理论分析

3.1 假定

通过对试验结果的分析,得到如下计算正截面抗弯承载力的假定。

- (1) 平面应变符合平截面假定;
- (2) 混凝土板与钢梁间有可靠的连接,可忽略滑移的影响;
- (3) 不计受拉区混凝土的作用;

(4)材料的应力—应变关系如图 10 所示,其中应变取值为: $\epsilon_0=0.002$, $\epsilon_{cu}=0.0033$, ϵ_y 根据试验结果取值, ϵ_{su} 取 0.025 已考虑钢材的塑性变形的发展,其中 ϵ_0 , ϵ_{cu} 分别为混凝土峰值应变和极限应变, ϵ_y , ϵ_{su} 分别为钢材屈服应变和极限应变。

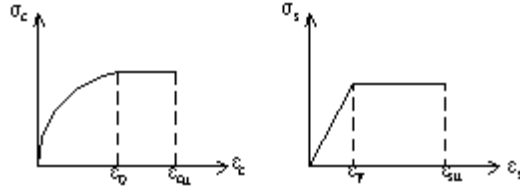


图 10 钢材和混凝土的应力—应变关系

Fig. 10 Stress-strain relationship of steel and concrete

3.2 计算公式

(1) 中和轴在 U 型钢截面内

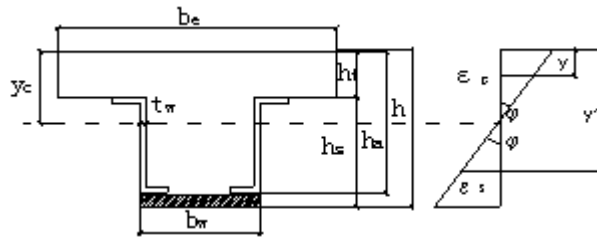


图 11 截面尺寸及应变分布(中和轴在钢梁内)

Fig. 11 Dimensions of cross section and distribution of strain (neutral axis in steel beam)

由图 11,可知混凝土及钢截面纤维的应变分别为:

$$\epsilon_c = \varphi \times (y_c - y) \quad \epsilon_s = \varphi \times (y' - y_c) \quad (1)$$

φ 为截面曲率, y_c 为中和轴到混凝土翼缘板顶部的距离, ϵ_c 为距离混凝土板顶部距离为 y 处的混凝土应变, ϵ_s 为距离混凝土板顶部距离为 y' 处的钢材应变, f_c 为混凝土抗压强度设计值。

混凝土的应力—应变方程:

$$\begin{cases} \sigma_c = f_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] & \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ \sigma_c = f_c & \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1),(2)可得到:混凝土所受压力 $C_1 = \int_{A_c} \sigma_c dA$, 钢材所受压力 $C_2 = \int_{A_x} \sigma_s dA$, 钢材所受拉力 $T = \int_{A_{xs}} \sigma_s dA$, 式中 A_c 为受压的钢材的面积, A_{xs} 为受拉的钢材的面积, σ_c 为距离混凝土板顶部距离为 y 处的混凝土应力, σ_s 为距离混凝土板顶部距离为 y' 处的钢材应力。

由 X 方向平衡方程 $\sum X = 0$, $C_1 + C_2 = T$, 即 $\int_{A_c} \sigma_c dA + \int_{A_x} \sigma_s dA = \int_{A_{xs}} \sigma_s dA$ 计算出 y_c 。

对混凝土和钢截面分别取矩得到: $M = \int_{A_c} \sigma_c (y_c - y) dA + \int_{A_s} \sigma_s (y - y_c) dA$ (4)

(2) 中和轴在混凝土板内

由图 12 知混凝土及钢截面纤维的应变分别为:

$$\epsilon_c = \varphi \times (y_c - y) \quad \epsilon_s = \varphi \times (y' - y_c) \quad (5)$$

混凝土的应力—应变方程:

$$\begin{cases} \sigma_c = f_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] & \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ \sigma_c = f_c & \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (6)$$

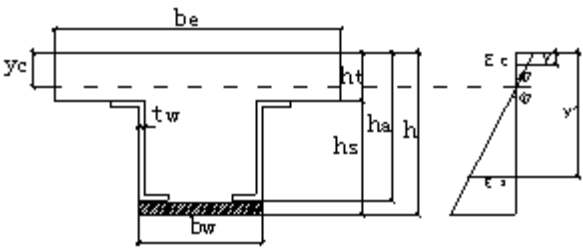


图 12 截面尺寸及应变分布(中和轴在混凝土板内)

Fig. 12 Dimensions of cross section and distribution of strain (neutral axis in concrete plate)

由(5),(6)可得到混凝土所受压力 $C = \int_{A_c} \sigma_c dA$, 钢材所受拉力 $T = \int_{A_s} \sigma_s dA$

由 X 方向平衡方程 $\sum X = 0, C = T$, 即 $\int_{A_c} \sigma_c dA = \int_{A_s} \sigma_s dA$ (7)

计算出 y_c 。

对混凝土和钢截面分别取矩得到: $M = \int_{A_c} \sigma_c (y_c - y) dA + \int_{A_s} \sigma_s (y - y_c) dA$ (8)

3.3 理论计算值与试验值比较

应用上面推导的理论计算公式,对三根试件的屈服荷载、极限荷载进行计算,与相应试验值进行了对比,详见表 3,可以发现,两者符合的较好。

实际设计中,建议组合梁最大弯矩截面的正截面极限抗弯强度,可按照《钢结构设计规范》(GB50017)建议的等效矩形应力块的方法计算。

表 3 理论计算值与试验值对比

Tab. 3 Comparison of calculated and tested results

试件	屈服荷载			极限荷载		
	计算值 M_y^f (kN · m)	试验值 M_y^t (kN · m)	计算值/试验值 M_y^f / M_y^t	计算值 M_u^f (kN · m)	试验值 M_u^t (kN · m)	计算值/试验值 M_u^f / M_u^t
SBD—1	444.2	416.4	1.067	611.7	638.0	0.959
SBD—2	392.8	403.0	0.975	590.1	638.0	0.923
SBD—3	450.1	430.3	1.050	614.3	616.0	0.997

4 结 论

通过对三根组合梁进行的试验研究,可以得到以下结论:

- (1) 外包钢混凝土组合梁具有较优越的工作性能,其抗弯承载力高,延性好,适用于跨度较大的结构;
- (2) 填充混凝土对防止钢梁发生局部失稳起到了良好的作用;
- (3) 梁截面应变符合平截面假定。在完全剪切连接情况下,抗弯承载力可以根据弹塑性理论计算,并可忽略滑移的影响。
- (4) 试验研究发现,外包钢—混凝土组合梁在受力过程中存在两个受力薄弱面,一是钢与填充混凝土的交界面,二是翼缘板与梁的接触面,这两处的滑移过大容易导致梁发生粘结滑移破坏和纵向剪切滑移破坏。为了保证混凝土和钢梁共同工作,对该组合梁的工程设计提出一些构造措施。对于第一处薄弱面,主要构造措施有:①在钢底板焊接栓钉,一方面增加底板与梁内混凝土的剪力传递,另一方面可以提供组合梁端部的抗拔力;②在 U 型钢截面顶部增加角钢拉接,其角的竖肢可有效地传递腹板剪力给混凝土。对于

第二处薄弱面,主要构造措施为预设穿过第二薄弱面的竖向抗剪钢筋。

参考文献:

- [1] 严正庭,严立. 钢与混凝土组合结构计算构造手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996(YAN Zhengting, YAN Li. Calculation and Construction Booklet of Steel—Concrete Composite Structure. Beijing:China Construction Industry Press, 1996 (in Chinese))
- [2] 周起敬,姜维山,潘太华. 钢与混凝土组合结构设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991(ZHOU Qijing, JIANG Weishan, PAN Taihua. Design and Construction Booklet of Steel—Concrete Composite Structure. Beijing:China Construction Industry Press,1996 (in Chinese))
- [3] 朱聘儒. 钢—混凝土组合梁设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1989 (ZHU Pingru. Design Principle of Steel—Concrete Composite Beam. Beijing:China Construction Industry Press,1996 (in Chinese))
- [4] 张耀春,毛小勇,曹宝珠. 轻钢—混凝土组合梁的试验研究及非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报,2003年2月,24(1):26~33(ZHANG Yaochun, MAO Xiaoyong, CAO Baozhu. Experimental study and nonlinear finite element analysis of light weight steel—concrete composite beam. 2003, 24(1):26~33 (in Chinese))
- [5] 林于东,宗周红. 帽型截面钢—混凝土组合梁受弯强度[J]. 工业建筑,2002, 32(9):1~13,59(LIN Yudong, ZONG Zhouhong. Bending strength of cap—style section of steel—concrete composite beam. Industrial Construction, 2002, 32(9):11~13,59(in Chinese))
- [6] 沈蒲生,梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:高等教育出版社,2002 (SHEN Pusheng, LIANG Xingwen. Beijing: Design principle of concrete structure, 2002 (in Chinese))
- [7] Shun-ichi Nakamura P E, M. Bending behavior of composite girders with cold formed steel U section[J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, Sep. 2002, 1169
- [8] Betti R, Gjelsvik A. Elastic composite beams [J]. Computers and Structures, 1996, 59(3):437~451
- [9] Oehlers D J. Composite profiled beams[J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1993, 119(4):1085~1100
- [10] Leskela M L. A composite T-section—steel U-section composite beam[J]. Proceedings of the Engineering Foundation Conference, 1996:157~171

Analysis of Flexural Behavior of Steel—encased Concrete Composite Beams

SHI Qiyin¹, MA Bo¹, LI AiQun²

(1. Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Key Lab of RC&PC Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Aiming at some problems of common steel—concrete beams, this article puts forward a new type of composite beam—steel—encased composite beam. To study its mechanical character, three simple supported samples with full size were tested. The load—deflection curves, load—strain curves, and strain distribution along beam height were analyzed. From the results we can draw the conclusions that this kind of beam has good mechanical performance and application prospect. Based on elastic—plastic theory of composite beam, a formula for bearing capacity of normal section was derived. The theoretical results are in good agreement with the measurement ones. Finally, to facilitate its application in engineering, some suitable construction measures are brought forward according to the test results.

Key words: steel—encased; composite beam; experimental research; theoretical analysis