

腹板嵌入式组合梁抗剪性能试验

李国强^{1,2}, 司林军^{2,3}, 李现辉⁴, 李亮²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 华北水利水电学院 土木与交通学院, 河南 郑州 450011; 4. 河南徐辉建筑工程设计事务所, 河南 郑州 450008)

摘要: 通过6个嵌入式组合梁抗剪试件的试验, 观测组合梁受剪破坏过程, 研究腹板嵌入式组合梁竖向抗剪承载力的各影响因素. 试验表明, 嵌入式组合梁的抗剪承载力和钢梁腹板截面、混凝土翼板截面、混凝土强度等级、混凝土翼板剪跨比有关. 基于试验结果, 通过参数回归分析, 拟合出混凝土翼板的抗剪承载力的计算公式. 考虑到弯剪相互作用, 提出了嵌入式组合梁受剪承载力简化计算方法; 分析了钢板连接件在嵌入式组合梁受剪时的实际受力. 结果表明, 钢板连接件具有较高的承载力, 易于在组合梁中实现完全抗剪连接.

关键词: 腹板嵌入式组合梁; 抗剪试验; 剪跨比; 抗剪承载力

中图分类号: TU 398.9

文献标识码: A

Experimental Study on Shear Capacity of Embedded Composite Beam with Notched Web

LI Guoqiang^{1,2}, SI Linjun^{2,3}, LI Xianhui⁴, LI Liang²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 4. Henan Sunrise Architectural Design Institute, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Based on a test of 6 shear specimens, a research was made into the bearing capacity and failure process of the embedded composite beam. Test results show that the shear bearing capacity of the beam is influenced by the section of steel web, the section of concrete flange, the concrete grade and the shear-span ratio of concrete flange. Based on the test results and parametric analysis, the formulas to calculate the shear capacity of the concrete flange were developed. A simplified calculation method of shear bearing capacity was

developed by taking the possibility into consideration that the shear bearing capacity of the beam may decrease when it is subjected to a moment and shear force. A study of the bearing capacities of the notched web connector in embedded composite beams shows that the connector is of a higher shear bearing capacity and the full shear connection can be easily achieved in embedded composite beams.

Key words: embedded composite beam with notched web; shear test; shear-span ratio; shear capacity

腹板嵌入式组合梁是在现有普通组合梁基础上发展的一种新型构件形式, 由倒T形钢梁和混凝土翼板组成(见图1), 钢梁和翼板的组合作用通过腹板上端开槽形成钢板抗剪连接件实现^[1]. 腹板嵌入式组合梁主要用来承受正弯矩, 两端简支于其他构件上, 可用于楼盖或平台的次梁^[1]. 当组合梁承受正弯矩时, 下端钢梁受拉, 上部混凝土翼板受压, 充分发挥了钢材受拉和混凝土受压的良好性能^[1-2].

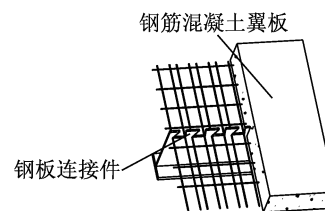


图1 腹板嵌入式组合梁

Fig.1 Web-embedded composite beam

腹板嵌入式组合梁中钢梁省去了上翼缘, 并在腹板上端开槽形成钢板抗剪连接件, 不仅节省了常用栓钉、槽钢等抗剪连接件, 还可以在加工腹板时套切以节省钢材(见图2).

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAJ01B02)

第一作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多、高层钢结构和钢结构抗火、动力检测等.

E-mail: gqli@tongji.edu.cn

通讯作者: 司林军(1980—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为钢-混凝土组合结构抗震. E-mail: 06silinjun@tongji.edu.cn

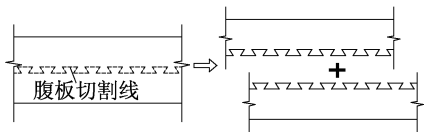


图 2 腹板嵌入式组合梁腹板套切示意图
Fig.2 The staggered cut of the web in the composite beams

由于腹板嵌入式组合梁中钢梁部分比相应纯钢梁的腹板高度小,故在腹板较薄或组合梁的剪跨比较小时,竖向剪力有可能在设计中起控制作用.在剪力起控制作用时,单纯依靠加大腹板厚度和高度是不经济的.实际上,钢梁和混凝土通过连接件共同工作,可以考虑截面抗弯和抗剪的组合作用.国外组合梁抗剪性能试验研究表明,混凝土翼板可以提供总抗剪承载力的 20%左右^[3-4];部分试验显示,钢-混凝土组合梁的抗剪承载力超过钢梁腹板抗剪承载力的 20%^[5].国内的试验研究也表明,钢-混凝土组合

梁中钢梁的抗剪能力仅占总抗剪能力的 60%~70%^[1,6-7].当混凝土翼板的有效宽度和厚度很大,或钢梁腹板较薄时,混凝土翼板能提供较高比例的抗剪承载力.笔者在试验研究的基础上,探讨了混凝土翼板对嵌入式组合梁抗剪承载力的影响,并提出了适用于工程设计的组合梁抗剪承载力计算公式.

1 组合梁抗剪性能试验

1.1 试验概况

为研究嵌入式组合梁的竖向抗剪性能,共设计制作了 6 个嵌入式钢-混凝土简支组合梁试件.对各试件主要考虑变化的参数有剪跨比 λ ($\lambda = a/h$, a 为组合梁剪跨长度; h 为组合梁截面高度)、混凝土强度等级、混凝土翼板厚度 h_f 和组合梁宽度 b_e .各试件主要参数如图 3 和表 1 所示,表中 L 为梁跨度.

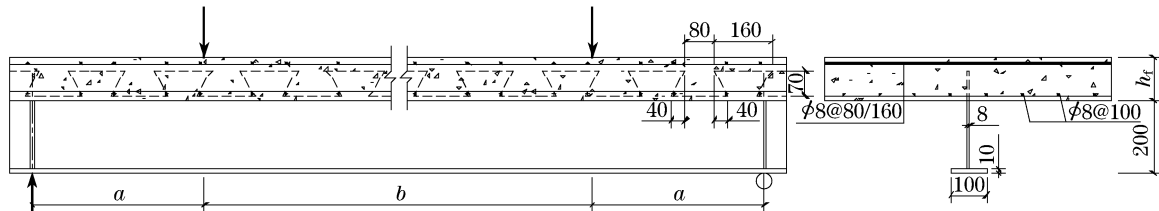


图 3 嵌入式组合梁抗剪试件详图(单位:mm)

Fig.3 Details drawing of web-embedded composite beams(unit:mm)

表 1 嵌入式组合梁抗剪试件参数

Tab.1 Parameters of web-embedded composite beams									
编号	λ	混凝土强度等级	混凝土立方体抗压强度/MPa	b_c/mm	h_f/mm	a/mm	b/mm	c/mm	横向配筋率/%
SCB-1	1.5	C30	30.86	600	120	480	1920	2880	0.70
SCB-2	2.5	C30	30.86	600	120	800	1280	2880	0.70
SCB-3	1.5	C30	30.86	800	120	480	1920	2880	0.70
SCB-4	2.5	C30	30.86	800	120	800	1280	2880	0.70
SCB-5	1.5	C20	24.47	800	120	480	1920	2880	0.70
SCB-6	1.5	C30	30.86	800	130	495	1890	2880	0.65

注:试验中,组合梁试件的剪跨比 $\lambda \leq 2.5$, $b = L - 2a$.

试件中的钢梁为倒 T 形截面钢梁,在腹板上开高度为 70 mm 的等腰梯形槽形成抗剪连接件,连接件间距为 240 mm.倒 T 形钢梁嵌入到混凝土翼板后,组合梁钢梁部分的高度为 200 mm.钢梁采用 Q235A,钢板材性试验结果平均值见表 2.

混凝土翼板为现场浇注,混凝土保护层厚度为 15 mm,混凝土强度等级分别采用 C20 和 C30.试件

的混凝土采用自然养护,养护 28 d 后试验.混凝土单轴抗压强度是通过边长为 150 mm 的标准立方体试块在强度试验机上单向压缩得到的.在翼板的上部和下部均配置钢筋网,纵向钢筋和横向钢筋直径均为 8 mm 的 HPB235 级钢筋,冷拉后使用.

全部试件均为简支,一侧用铰支座,另一侧采用滚轴支座,用两台 500 kN 油压千斤顶在跨中两点对称单调静力加载.为使千斤顶均匀地把力传给组合梁混凝土翼板上,用两个刚度比较大的加载梁来传递荷载.加载梁用密肋 I20 a 型钢制作而成.试验的加载装置如图 4 所示.

表 2 钢板材性试验结果

Tab.2 Material properties of steel plates							
钢板厚/mm	E/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa	ϵ_y	ϵ_{st}	ϵ_u	伸长率/%
8	202	312	372	0.00157	0.0245	0.0930	34.18
10	210	304	375	0.00150	0.0357	0.0774	38.6

注: E 为钢材弹性模量, f_y 为屈服强度, f_u 为抗拉强度, ϵ_y 为屈服应变, ϵ_{st} 为初始硬化时的应变, ϵ_u 为极限应变.



图4 嵌入式组合梁抗剪试验加载装置

Fig.4 Set-up for web-embedded composite beams

加载制度为单调加载,预估试件的抗剪承载力为 P_u ,先预加载到 $0.2 P_u$ 左右,保持荷载一段时间,观察位移计和应变计读数是否正常.卸载后再缓慢单调加载,直到试件破坏,并在试验过程中观测组合梁的开裂荷载、极限荷载及裂缝扩展情况.

试验的目的是研究嵌入式组合梁的抗剪破坏机理和抗剪承载力.试验中测量了组合梁的变形(见图5):①在组合梁的跨中及加载点布置位移计 d_1 — d_3 ,目的是测量组合梁荷载挠度关系;②在半跨均匀布置5个位移计来测量混凝土翼板和倒T形钢梁之间的滑移,对应位移计为 d_4 — d_8 ,用于观测组合梁滑移特征.

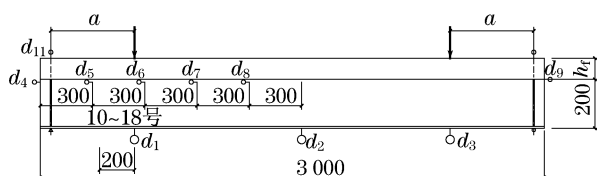


图5 嵌入式组合梁抗剪试验位移计布置(单位:mm)

Fig.5 Arrangement of the measured units(unit:mm)

1.2 主要试验结果

1.2.1 剪力挠度曲线

由于试件(SCB-1,2,3,4,5,6)中的 SCB-2 在数据采集集中出现了故障,未能得到其剪力—挠度的全过程曲线.其余试件的剪力—挠度曲线如图6所示.

从剪力—挠度曲线上可以看出,嵌入式组合梁的受力大致可分为三个阶段.

(1)弹性阶段.将钢梁腹板剪切屈服时所对应的剪力定义为组合梁的弹性抗剪承载力($0.51 \sim 0.61$) V_u (V_u 为极限抗剪承载力实测值).剪力从开始加载到弹性抗剪承载力这一阶段为弹性阶段.在此阶段,构件各截面均处于弹性状态,组合梁表现出整体工作性能,剪力—挠度曲线呈线性.由图6可以看出,在弹性阶段,剪力—跨中挠度曲线的斜率是不同的,斜率随剪跨比增加而减小,随混凝土强度的增加而

增加,随混凝土翼板厚度的增加而增加.

(2)弹塑性阶段.从弹性抗剪承载力($0.51 \sim 0.61$) V_u 到 V_u 为弹塑性阶段.在此阶段,钢梁截面部分进入塑性,截面内力重分布,钢梁与混凝土翼板交界面上滑移增加,挠度发展显著加快,组合梁的剪力—挠度曲线呈非线性.特别是在嵌入式组合梁混凝土板顶出现裂缝后,刚度明显降低,变形发展很快.

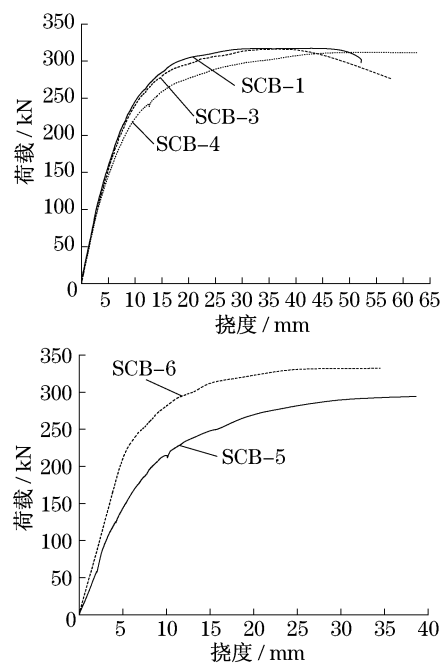


图6 剪力—跨中挠度关系曲线

Fig.6 Load and mid-span deformation curves for test specimens

(3)破坏阶段.从极限承载力 V_u 到卸载阶段为组合梁的破坏阶段.无论剪跨比为1.5还是2.5,嵌入式组合梁都表现出了较好的延性.

1.2.2 破坏特征

当剪力达到($0.51 \sim 0.61$) V_u 时,混凝土翼板底部出现斜向剪切裂缝.随着荷载的增加,裂缝向两侧面扩展.根据剪跨比的不同,试件的破坏形式表现出一定的差异.剪跨比为1.5的嵌入式组合梁 SCB-1, SCB-3, SCB-5, SCB-6,混凝土翼板的破坏呈剪压破坏形态;剪跨比为2.5的试件 SCB-2,破坏接近弯曲破坏形态;同样剪跨比为2.5的试件 SCB-4,由于混凝土翼板宽度增加,破坏特征呈剪压破坏.不同试件的具体试验现象参见文献[2].

从破坏形态上看,钢梁产生了很大的剪切变形,并导致了混凝土翼板的剪切破坏.所以,组合梁受剪时,提高钢梁的抗剪能力对组合梁整体抗剪能力的

提高有显著作用.

2 嵌入式组合梁抗剪试验分析

2.1 嵌入式组合梁抗剪承载力影响因素分析

由试验可知,腹板嵌入式组合梁的受剪和普通组合梁相似,其抗剪承载力由钢梁的抗剪承载力和混凝土翼板的抗剪承载力组成.钢梁承担的剪力主要由腹板受剪提供.影响混凝土翼板抗剪承载力的因素有混凝土强度、混凝土翼板的宽度及其高度,组合梁的剪跨比 λ 及混凝土翼板剪跨比 λ_b .

试验只针对 C20 和 C30 强度的混凝土翼板组合梁.可以看出,随混凝土强度的提高,嵌入式组合梁受剪承载力有所提高.

对两种混凝土翼板宽度和有效高度的嵌入式组合梁试验的结果表明,混凝土翼板的宽度和有效高度越大,嵌入式组合梁的抗剪承载力也越大.

组合梁的剪跨比 λ 是组合梁的剪跨 a 与截面高度 h 的比值,组合梁混凝土翼板的剪跨比 λ_b 指 a 与混凝土翼板截面有效高度 h_0 的比值,即 $\lambda_b = a/h_0$.试验样本虽不多,但可以看出,随组合梁剪跨比和混凝土翼板剪跨比的增加,抗剪承载力在减小.

2.2 嵌入式组合梁抗剪承载力计算

抗剪承载力可以写成如下形式:

$$V_u = V_{uc} + V_{us} \tag{1}$$

式中: V_{us} 为组合梁中钢梁的抗剪承载力; V_{uc} 为组合梁中混凝土翼板的抗剪承载力.

本试验和国内外的试验都表明,当组合梁剪跨比不是很大时,钢梁腹板都能达到受剪屈服,故钢梁的抗剪承载力可以用下式计算:

$$V_{us} = A_w f_v \tag{2}$$

式中: A_w 为钢梁腹板面积; f_v 为钢材抗剪屈服强度.

表 3 给出了试验中各试件的抗剪承载力,以及混凝土翼板和钢梁各自分担的抗剪承载力.可以看出,混凝土翼板抗剪承载力占腹板嵌入式组合梁总抗剪承载力的 10%~20%.

表 3 嵌入式组合梁抗剪承载力

Tab.3 Shear capacity of the tested beams

编号	λ	λ_b	V_u/kN	V_{us}/kN	V_{uc}/kN
SCB-1	1.5	4.8	317	264.5	52.5
SCB-2	2.5	8	290	264.5	25.5
SCB-3	1.5	4.8	316	264.5	51.5
SCB-4	2.5	8	310	264.5	45.5
SCB-5	1.5	4.8	294	264.5	29.5
SCB-6	1.5	4.5	330	264.5	65.5

因此,混凝土翼板的抗剪承载力 V_{uc} 计算较困难,及其由于抗剪机理复杂,难以获得可靠的公式.在试验结果的基础上,考虑抗剪承载力各影响要素,根据非线性最小二乘回归分析^[8-9],采用 $V_{uc} = \phi(\lambda_b) f_t b h_0$ 的计算模型,拟合出 V_{uc} 计算公式

$$V_{uc} = [0.245 + 0.35\exp(-((\lambda_b - 3.072)^2)/1.932)] f_t b_e h_0 \tag{3}$$

式中, f_t 为混凝土抗拉强度,采用混凝土轴心抗拉强度标准值,可利用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)中第 4.1.3 条的条文说明^[10],由立方体抗压强度计算而来.

利用公式(4)计算的各试件混凝土翼板抗剪承载力曲线如图 7 所示.

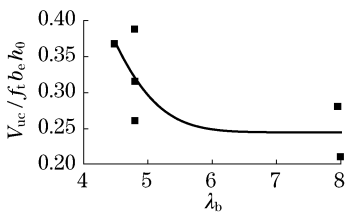


图 7 混凝土翼板抗剪承载力回归曲线
Fig.7 Regression curve of shear capacity for concrete flange

表 4 给出了 λ_b 的计算值 $V_{us,f}$ 和试验值 $V_{us,t}$ 的比较,其中试件 SCB-1 误差偏大.这是混凝土强度的不稳定性造成的.

表 4 嵌入式组合梁抗剪承载力试验值和计算值比较
Tab.4 Comparison between experimental results and calculated results of shear capacity

编号	V_u/kN	$V_{uc,t}/\text{kN}$	$V_{uc,f}/\text{kN}$	$V_{uc,t}/V_{uc,f}$	V_{us}/V_u
SCB-1	317	52.5	39.8	1.32	0.83
SCB-2	290	25.5	30.1	0.85	0.91
SCB-3	316	51.5	51.6	0.99	0.84
SCB-4	310	45.5	40.2	1.13	0.85
SCB-5	294	29.5	34.2	0.86	0.90
SCB-6	330	65.5	63.1	1.04	0.80

现行《钢结构设计规范》中,组合梁的抗剪承载力只考虑钢梁腹板的影响^[11],表 4 给出了钢梁腹板抗剪屈服承载力和整个组合梁抗剪承载力的比值.可以看出,钢梁腹板抗剪承载力占总抗剪承载力的 80%~91%.为了工程中计算方便,嵌入式组合梁抗剪承载力也可以采用普通组合梁受剪承载力计算方法,即只考虑钢梁腹板受剪贡献的计算方法

$$V \leq h_w t_w f_v \tag{4}$$

式中: V 为构件剪力; h_w, t_w 分别为钢梁腹板高度和

厚度.倒T形钢梁的腹板高度为钢翼缘板上部到混凝土板底的距离.

3 相关考虑及抗剪承载力简化公式

简支组合梁在横向荷载作用下同时存在着弯矩和剪力,根据 von Mises 强度理论,腹板中剪应力会降低截面的抗弯承载力. EC4 (Eurocode 4) 考虑弯剪相关作用的曲线如图 8 所示^[12]. 图中 $V_{pl,Rd}$ 为钢梁腹板的抗剪承载力; $M_{f,Rd}$ 为由混凝土翼板和钢梁翼缘承担的弯矩设计值; M_{Rd} 表示当剪力为零时的组合梁截面的弯矩设计值. 当竖向剪力设计值 $V_{sd} \leq 0.5 V_{pl,Rd}$, 竖向剪力对弯矩的影响可以忽略. 当 $V_{sd} = V_{pl,Rd}$ 时, 钢梁腹板不能再承受外荷载引起的弯矩, 弯矩设计值为 $M_{f,Rd}$; 若 $0.5 V_{pl,Rd} \leq V_{sd} \leq V_{pl,Rd}$, 则相关曲线为一抛物线, 抗弯承载力由下式确定:

$$M_{v,Rd} = M_{f,Rd} + (M_{Rd} - M_{f,Rd}) \left[1 - \left(\frac{2V_{sd} - 1}{V_{pl,Rd}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

腹板嵌入式组合梁受剪试验表明,一方面,这种梁的实际受剪承载力高于只考虑钢梁受剪屈服时的承载力;另一方面,在组合梁承受弯矩较大时,考虑弯剪相关则会降低组合梁的抗剪承载力;而这两个方面又相互抵消. 所以,从工程应用角度,腹板嵌入式组合梁的抗剪设计可只采用考虑倒T形钢梁腹板受剪屈服时的承载力作为抗剪承载力设计值,即和普通组合梁一样采用式(5)计算. 这样,抗剪承载力的设计偏于安全,符合结构设计中“强剪弱弯”的要求,而且和普通钢-混凝土组合梁采用相同的抗剪设计方法,计算简单且易于理解.

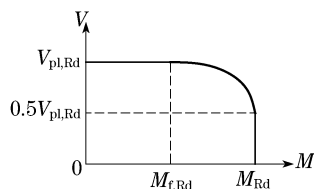


图8 组合梁弯剪相关承载力曲线

Fig.8 Resistance in bending and vertical shear in absence of shear buckling

4 受剪时抗剪连接件的实际受力

为了研究钢板开槽剪力连接件的变形性能,试验中测量了倒T形钢梁与混凝土翼板之间的相对滑移. 试验发现,最大滑移不是出现在梁端,而是出现

在距支座内侧一段距离. 因此,可认为距支座内侧的剪力连接件受力较大. 图9给出了位移计 d_5 点的剪力滑移关系曲线(位移计布置见图5).

由图9可以看出,剪力滑移关系可以分为弹性阶段和弹塑性阶段,没有明显的屈服点. 在计算了剪跨区段内连接件在开裂荷载前的受力后,假定组合梁在开裂前为弹性状态,两点对称加载时,剪跨区沿梁长纵向的分布剪力可按式计算:

$$v_l = (VS_*) / (I_{eq}) \quad (6)$$

式中: V 为组合梁竖向作用剪力; S_* 为交界面以上换算截面对中和轴的面积矩; I_{eq} 为换算截面惯性矩.

所以,单个连接件的受力为

$$N = v_l d = (VS_* d) / (I_{eq}) \quad (7)$$

式中, d 为腹板嵌入式组合梁中连接件的间距.

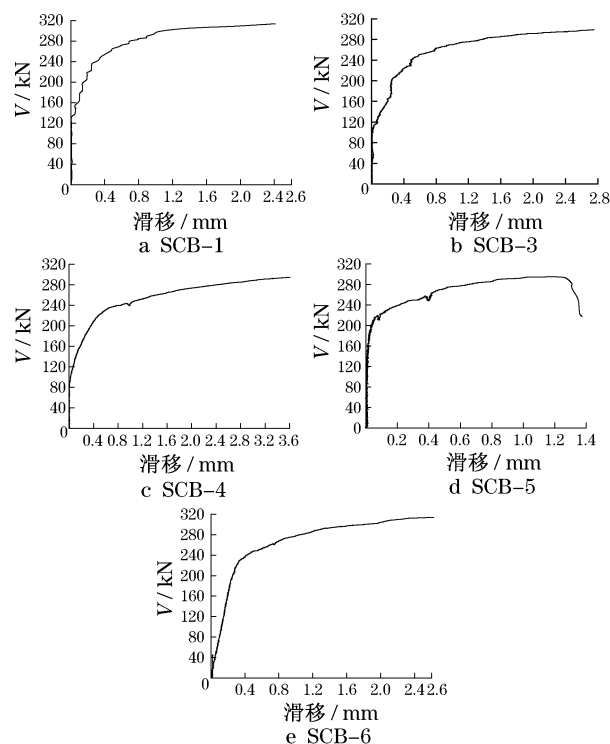


图9 d_5 点的剪力-相对滑移关系曲线

Fig.9 The relationship between the shear-capacity and the relative slip at point d_5

表5给出了各试件在剪跨区段内单个连接件在组合梁开裂时的纵向受力(按式(6),(7)计算),和单个连接件的极限承载力计算值(按文献[14]方法计算)的比较. 从表5可以看出,在荷载达到开裂值时,剪跨区单个连接件的实际受力已大于单个连接件的极限承载力. 这说明,按文献[14]得到的单个连接件极限承载力偏于安全.

表 5 开裂荷载前连接件纵向受力
Tab.5 Longitudinal force of the connector
before the beam cracked

受力	SCB-1	SCB-2	SCB-3	SCB-4	SCB-5	ECB-6
开裂荷载/kN	175	161	172	164	150	202
实际受力/kN	194.5	178.3	126.1	118.7	115.6	144.2
连接件的极限承载力/kN	120.2	120.2	120.2	120.2	106.5	120.2
比值	1.618	1.483	1.049	0.988	1.085	1.200

5 结论

(1)腹板嵌入式组合梁抗剪承载力,由钢梁腹板的抗剪承载力和混凝土翼板的抗剪承载力组成,但以钢梁腹板的抗剪承载力为主。

(2)混凝土翼板的抗剪承载力和混凝土翼板有效宽度、截面有效高度、混凝土强度等级以及混凝土翼板剪跨比有关。混凝土翼板的抗剪承载力可采用公式(4)来计算。

(3)对于剪跨比 $\lambda \leq 2.5$ 的腹板嵌入式组合梁,受剪时钢梁腹板可达到剪切屈服,钢梁抗剪承载力可由钢梁腹板抗剪屈服承载力来确定。

(4)腹板嵌入式组合梁整体抗剪承载力虽高于钢梁腹板屈服承载力,但考虑到弯剪相关会降低组合梁的抗剪承载力,所以,在嵌入式组合梁抗剪设计时,可采用钢结构规范中普通组合梁的设计方法,即只考虑钢梁腹板抗剪承载力的贡献。

(5)对于剪跨比 $\lambda \leq 2.5$ 的腹板嵌入式组合梁,按文献[14]确定的单个连接件极限抗剪承载力偏于安全。

参考文献:

[1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHAO Hongtie. Steel and composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2001.

[2] 李现辉. 腹板嵌入式钢-混凝土组合梁结构性能研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009.
LI Xianhui. The study on the structural performance of the web-embedded steel-concrete composite beam[D]. Shanghai: Tongji University, College of Civil Engineering, 2009.

[3] Chapman J C. Experiments on composite beams [J]. The Structural Division, 1960, 86(7): 1.

[4] Barnard P R, Johnson R P. Ultimate strength of composite beams[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1965, 32(10), 161.

[5] Yam L C P, Chapman J C. The inelastic behaviour of continuous composite beams of steel and concrete [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1972, 53 (4): 487.

[6] 朱聘儒, 国明超, 朱起, 等. 钢-混凝土组合梁协同工作的分析及试验[J]. 建筑结构学报, 1987(5): 42.
ZHU Pinru, GUO Mingchao, ZHU Qi, et al. Analysis and experiments of interaction of steel and concrete composite beam [J]. Journal of Building Structures, 1987(6): 42.

[7] 朱聘儒, 傅功义. 考虑钢与混凝土之间相对滑移的组合梁弹性分析与受剪试验[J]. 钢结构, 1988(2): 10.
ZHU Pinru, FU Gongyi. Elastic analysis and experimental study on composite beams considering the relative slip between the steel and concrete[J]. Steel Construction, 1988(2): 10.

[8] 聂建国. 钢-混凝土组合结构[M] 北京: 科学出版社, 2005.
NIE Jianguo. Steel-concrete composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[9] 王沫然. MATLAB 与科学计算 [M] 北京: 电子工业出版社, 2005.
WANG Moran. Scientific Computing with MATLAB [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.

[10] 中国工程建设标准化协会组织. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
China Association for Engineering Construction Standardization. GB 50010—2002 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.

[11] 中国工程建设标准化协会组织. GB 50017—2003 钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
China Association for Engineering Construction Standardization. GB 50017—2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.

[12] The Sector Board for Building and Civil Engineering. Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structures, part1. 1: general rules and rules for buildings[S]. London: The British Standards Institution, 1994.

[13] The Sector Board for Building and Civil Engineering. Eurocode 3 Design of steel structures, part1. 1: general rules and rules for buildings [S]. London: The British Standards Institution, 1993.

[14] 李现辉, 李国强. 腹板嵌入式组合梁中抗剪连接件推出试验[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 78.
LI Xianhui, LI Guoqiang. Push-out experimental study on shear connectors in embedded composite beams with notched web[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 78.