

文章编号:1671-1637(2014)06-0001-09

钢-混凝土组合箱梁抗震性能试验

周旺保¹, 蒋丽忠², 李方方³, 黄志^{2,4}

(1. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 3. 中铁隧道勘测设计院有限公司, 天津 300133; 4. 宾夕法尼亚州立大学 土木工程学院, 宾夕法尼亚 帕克 17050)

摘要:进行了4组不同剪力连接度与腹板高厚比的组合箱梁低周反复荷载试验,对组合箱梁的失效模式、滞回性能、骨架曲线、耗能能力、延性、刚度退化规律等抗震性能进行了深入研究,重点分析了腹板高厚比和剪力连接度对组合箱梁抗震性能的影响。研究表明:由于腹板高厚比和剪力连接度的不同,组合箱梁存在局部屈曲破坏、弯剪破坏、压弯破坏和剪切破坏4种失效模式;荷载-挠度滞回曲线和骨架曲线可分为弹性、弹塑性与破坏3个阶段;不同剪力连接度与腹板高厚比情况下的荷载-挠度滞回环丰满而稳定,没有明显的捏缩现象,体现良好的抗震性能;剪力连接度越大,组合箱梁骨架曲线越饱满,耗能能力越强,但延性变化不明显;腹板高厚比越大,组合箱梁延性越好,耗能能力越强;剪力连接度与腹板高厚比对组合箱梁刚度退化前期有较大影响,后期影响变小。

关键词:桥梁工程;钢-混凝土组合箱梁;抗震性能;剪力连接度;腹板高厚比;延性

中图分类号:U448.34 **文献标志码:**A

Experiment of seismic performance for steel-concrete composite box-beam

ZHOU Wang-bao¹, JIANG Li-zhong², LI Fang-fang³, HUANG Zhi^{2,4}

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 3. China Railway Tunnel Survey and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300133, China; 4. School of Civil Engineering, The Pennsylvania State University, Park 17050, Pennsylvania, USA)

Abstract: Four steel-concrete composite box-beams (SCCBs) with different shear connection degrees and height-width ratios of web were experimentally studied under low-cyclic reversed loading. The seismic performances, such as failure mode, hysteretic behavior, skeleton curve, energy-dissipating capacity, ductility, and rigidity degeneration rule, were deeply studied. The influences of shear connection degree and height-width ratio of web on the seismic performance were mainly analyzed. Study result shows that according to different shear connection degrees and height-width ratios of web, there are four types of failure modes, which are local buckling failure, bending-cutting failure, compressing-bending failure, and shear failure. Load-deflection hysteretic curve and skeleton curve can be divided into three stages that are elasticity, elastoplasticity, and failure. Load-deflection hysteretic loops, with different shear connection degrees and height-width ratios of web, are plump and do not have obvious rheostriction, which shows that SCCBB has good seismic performances. Skeleton curve becomes plumper and energy-

收稿日期:2014-06-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51408449,51378502);道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室开放基金项目(DQJJ201309);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014-IV-049)

作者简介:周旺保(1982-),男,湖南岳阳人,武汉理工大学讲师,工学博士,从事组合结构稳定性与抗震研究。

dissipating capacity becomes higher when shear connection degree increases, but the change of ductility is not obvious. Ductility becomes better and energy-dissipating capacity becomes higher when the height-width ratio of web increases. The influences of shear connection degree and height-width ratio of web on rigidity degeneration are greater at earlier stage and less at later stage. 3 tabs, 12 figs, 22 refs.

Key words: bridge engineering; steel-concrete composite box-beam; seismic performance; shear connection degree; height-width ratio of web; ductility

Author resume: ZHOU Wang-bao(1982-), male, lecturer, PhD, +86-27-87651786, zhwb@whut.edu.cn.

0 引 言

钢-混凝土组合箱梁由混凝土板和槽形钢梁组成,混凝土板和槽形钢梁间通过剪力连接件进行连接,使钢梁与混凝土板共同受力,混凝土板的存在提高了钢梁局部及整体的稳定性;组合梁不但具有自重轻、抗扭刚度大、良好的抗火性和耐久性等优点,而且充分利用了混凝土的抗压能力和钢材的抗拉能力,提高了组合梁的刚度、强度、延性和稳定性;同时,组合梁是一种非常节能环保的材料,不仅钢材能得到非常高效的回收,而且构件截面尺寸小,施工速度快,符合未来建筑发展的要求^[1-6]。

中国是多地震国家,历史上发生过多次灾难性地震,因而准确地分析建筑结构的弹塑性地震反应,构建建筑结构的恢复力模型是需要解决的首要问题^[7-9]。聂建国等对低周反复荷载作用下的钢-混凝土叠合板组合梁变形和耗能进行了研究,在考虑剪力连接度影响基础上,建立了钢-混凝土组合梁的恢复力模型,提出了考虑组合作用的钢-混凝土组合梁滞回模型^[10-12];辛学忠等提出了连续组合梁的骨架曲线模型和恢复力模型滞回规则,并进一步建立了连续组合梁的荷载-挠度恢复力模型^[13];薛伟辰等在国内外首次对预应力钢-混凝土组合梁的抗震性能进行了研究,重点探讨了预应力度和剪力连接度对其抗震性能的影响,研究表明,预应力组合梁具有良好的抗震性能^[14-15];Ayoub等提出了考虑组合作用的弹塑性组合梁单元,通过编写数值计算程序对组合梁的抗震性能进行了模拟分析,并与试验结果进行了比较,结果表明,单元模型能较好地模拟组合梁滞回性能^[16];蒋丽忠等探讨了不同剪力连接度对组合梁抗震性能的影响,并建立了组合梁荷载-挠度恢复力模型^[17-19];程鹏利用纤维模型对组合梁弯矩-曲率滞回曲线进行了数值模拟^[20]。

上述有关钢-混凝土组合梁抗震性能的研究大

多集中于工字钢-混凝土组合梁,而关于组合箱梁抗震性能的研究目前在国内外尚不多见。此外,目前,关于组合梁的抗震性能试验主要集中于单点加载的荷载-挠度抗震性能研究,对于两点加载的荷载-挠度抗震性能研究较少。本文对4根钢-混凝土组合箱梁试件进行了两点加载的低周反复荷载试验,加载点分别在试件1/3与2/3处,考察了剪力连接度与腹板高厚比对组合箱梁抗震性能的影响,为进一步完善组合梁设计规程与推广组合梁在大跨度结构工程和桥梁工程中的应用提供试验参考。

1 试验概述

1.1 试件设计

本文以剪力连接度和腹板高厚比为主要考察参数,进行了4根组合箱梁试件的抗震性能试验,试件的详细参数见表1,截面见图1,纵向剖面见图2。图1与表1中: r 为剪力连接度, $r=n_r/n_t$, n_r 为剪跨段内实际的剪力钉个数, n_t 为完全剪力连接时所需剪力钉个数; d 为剪力钉直径; l 为剪力钉间距; b_c 为混凝土板宽度; t_c 为混凝土板厚度; b_y 为钢梁上翼缘宽度; t_y 为钢梁上翼缘厚度; b_b 为钢梁下翼缘宽度; t_b 为钢梁下翼缘厚度; b_f 为钢梁腹板高度; t_f 为钢梁腹板厚度。混凝土保护层厚度为15 mm,钢梁底板均设置高度为50 mm的纵向加劲肋,加劲肋厚度为10 mm。根据《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T

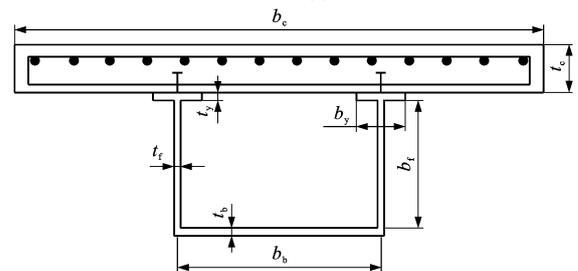


图1 组合箱梁截面

Fig.1 Cross section of composite box-beam

表 1 组合箱梁试件参数

Tab. 1 Specimen parameters of composite box-beams

试件编号	SCB-1	SCB-2	SCB-3	SCB-4
跨度/mm	3 000	3 000	3 000	3 000
b_c /mm	650	650	650	650
t_c /mm	60	60	60	60
b_y /mm	60	60	60	60
t_y /mm	9.42	9.42	9.42	9.42
b_b /mm	280	280	280	280
t_b /mm	9.42	9.42	9.42	9.42
b_t /mm	115	117	116	162
t_t /mm	7.22	7.22	3.36	7.22
d /mm	12.8	12.8	12.8	12.8
l /mm	130	90	90	90
b_t/t_t	15.9	16.2	34.5	22.4
r	0.44	0.71	0.66	0.64
箍筋	22 Φ 6	22 Φ 6	22 Φ 6	22 Φ 6
纵筋	13 Φ 13.4	13 Φ 13.4	13 Φ 13.4	13 Φ 13.4

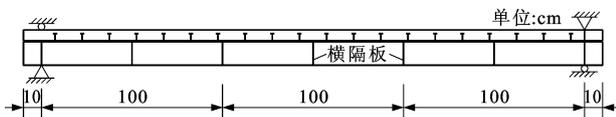


图 2 组合箱梁纵向剖面

Fig. 2 Longitudinal profile of composite box-beam

5085—1999)及现有文献研究成果,当剪力连接度大于 1.00 时,其对组合箱梁抗震性能的影响非常小^[18],因此,本试验取剪力连接度为 0.44~0.71。

钢梁由钢板焊接而成,钢梁翼缘剪力钉采用专用焊机进行焊接,混凝土板采用 C40 商品混凝土,在浇筑过程中采用振动棒对混凝土进行振捣、密实,并对混凝土板覆盖棉絮进行保湿养护 7 d,然后在自然状态下养护,养护时间共计 28 d。同期制作 3 组(每组 3 个)150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土立方体试块,并与组合箱梁试件同条件养护,混凝土立方体试块的力学性能测试与组合箱梁抗震性能试验同期进行。实测混凝土弹性模量 E_c 为 35 765 MPa;混凝土轴心抗压强度 f_c 为 46.56 MPa;混凝土轴心抗拉强度 f_t 为 3.90 MPa;混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 58.20 MPa。钢板抗拉强度由标准试件的拉伸试验确定,栓钉的力学性能由供货商提供,钢板与栓钉力学性能见表 2。

1.2 试验装置

组合箱梁加载装置示意与实物分别见图 3、4。利用分配梁实现对组合箱梁试件的 1/3 与 2/3 处进行两点集中加载,利用锚杆设置连接件实

表 2 钢材力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steels MPa

钢材类型	弹性模量 E_s	屈服强度 f_y	极限强度 f_u
4 mm 钢板	206 000	369	465
8 mm 钢板	200 000	273	400
10 mm 钢板	209 000	301	420
Φ 14 钢筋	206 000	459	560
Φ 6 钢筋	200 000	550	680
Φ 13 栓钉	206 000	350	435

注:4、8、10 mm 厚钢板实测厚度分别为 3.36、7.22、9.42 mm。

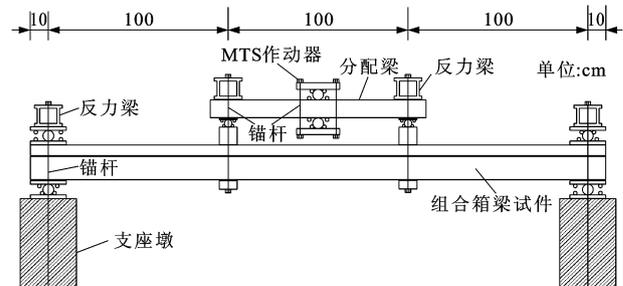


图 3 组合箱梁加载装置示意

Fig. 3 Schematic of loading device for composite box-beam



(a) 整体



(b) 支座

图 4 组合箱梁加载装置实物

Fig. 4 Realistic loading device of composite box-beam

现分配梁与固定在反力架上的 MTS 液压伺服作动器连接,从而可以进一步实现利用 MTS 液压伺服

作动器对分配梁施加竖向反复荷载或位移。在分配梁的梁端设置锚杆连接件,实现分配梁与组合箱梁的连接,从而最终实现对组合箱梁施加竖向反复荷载或位移的目标。组合箱梁两端架在钢筋混凝土支座墩上,利用锚杆设置连接件与实验室地槽连接,使组合箱梁梁端固定,能同时承担向上及向下的反复作用力。

1.3 加载制度

依据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)制定组合箱梁试件的加载方法,采用力-位移混合控制方法对组合箱梁试件进行低周反复循环加载。试件低周反复加载方法见图 5, n 为循环次数, P 为荷载, Δ 为位移。具体加载步骤如下。

(1) 以 0.25 倍负向混凝土开裂荷载对组合箱梁试件分别进行正、负向预加载一次,消除装置内部初始缺陷的影响,并检查各仪器装置是否正常工作。

(2) 正向及负向分别分 4 个等步长匀速加载至负向混凝土开裂,并按 4 个等步长匀速卸载作为第 1 个循环。

(3) 正向及负向分别以等增量荷载控制分 3 级加载至钢梁屈服时荷载 P_y^+ 和混凝土板中钢筋屈服时荷载 P_y^- , 正向及负向屈服位移分别为 Δ_y^+ 和 Δ_y^- , 每级荷载分 4 个等步长匀速加卸载循环 1 次。

(4) 加载方式转为位移控制,正向和负向加载分别按正向和负向屈服位移倍数施加,即正向为 Δ_y^+ 、

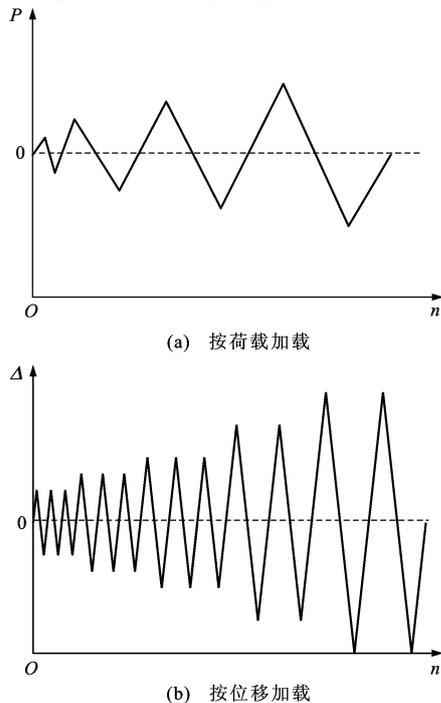


图 5 低周反复加载方法

Fig. 5 Method of low-cyclic reversed loading

$1.5\Delta_y^+$ 、 $2\Delta_y^+$ 、 $3\Delta_y^+$ 、 $4\Delta_y^+$ 、 \dots 、 $n\Delta_y^+$ 。前 3 级荷载每级均等步长分 5 步匀速加卸载循环 3 次,后面的荷载均等步长分 5 步匀速加卸载循环 2 次。

1.4 测试内容

利用分配梁及 MTS 液压伺服作动器对组合箱梁试件的 1/3 及 2/3 处进行两点加载。试验主要测量内容有:试件 1/2、1/3、2/3 及梁段支座处的正向及负向竖向挠度、混凝土板应变、钢筋应变、钢梁及剪力钉应变等,试件竖向挠度测点布置见图 6。

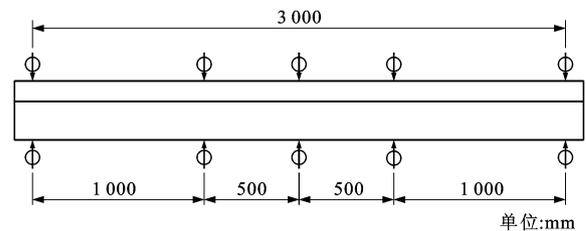


图 6 竖向挠度测点布置

Fig. 6 Arrangement of vertical deflection measuring-points

2 试件破坏形态

在低周反复荷载作用下,由于剪力连接度及腹板高厚比的不同,组合箱梁试件失效模式可归为 a、b、c、d 四类,典型破坏特征分别见图 7(a)~(d)。图 7(a)为纵向剪切破坏,以弯剪区混凝土板与钢梁间发生粘结掀起,混凝土板发生纵向劈裂为破坏特征;图 7(b)为弯剪破坏,以梁端混凝土板压碎,弯剪区混凝土板发生纵向劈裂,混凝土板翼缘被压碎为破坏特征;图 7(c)为局部屈曲破坏,以腹板局部屈曲,弯剪区混凝土板和钢梁间发生粘结掀起,梁端混凝土板被压碎,混凝土板发生纵向劈裂为破坏特征;图 7(d)为压弯破坏,以梁端混凝土板和弯剪区混凝土板翼缘被压碎为破坏特征。

当试件 SCB-1 负向加载至开裂荷载时,混凝土板翼缘出现对称横向微裂缝,裂缝主要集中在弯剪区;当正向加载至试件屈服荷载时,试件开始发出脆响,弯剪区的混凝土板和钢梁间的粘结开始发生破坏,混凝土板开始脱离钢梁并发生掀起;当位移增大到 2 倍屈服位移时,梁端混凝土板开始出现纵向劈裂,裂纹逐渐变宽并向跨中方向延伸;当位移增大到 3 倍屈服位移时,试件支座处的混凝土板上表面开始出现微小拱起;最终弯剪区混凝土板和钢梁间发生粘结掀起,混凝土板发生纵向劈裂,属于 a 类破坏。SCB-1 为纵向剪切破坏的原因为负向加载时,弯剪区剪力钉间距较大,单个剪力钉纵向剪力相对较大,剪力钉附近混凝土板局部压力相对较大,因

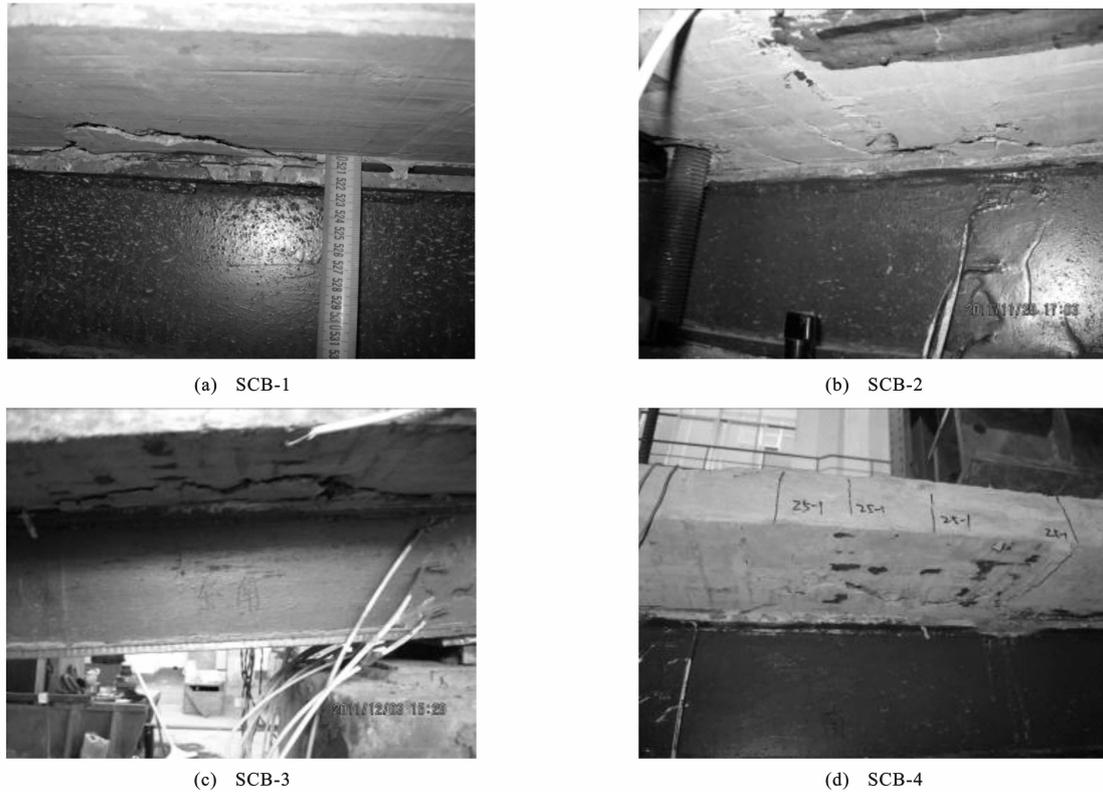


图 7 试件破坏模式

Fig. 7 Failure modes of specimens

此,剪力钉被剪断,发生粘结掀起,剪力钉附近混凝土板发生纵向劈裂。

试件 SCB-2 加载前期现象与试件 SCB-1 大体相同,当位移增大到 2 倍屈服位移时,弯剪区及支座处混凝土板的顶面开始出现纵向微裂缝,最终梁端混凝土板被压碎,弯剪区混凝土出现纵向劈裂,混凝土板翼缘被压碎,属于 b 类破坏。发生 b 类破坏的原因为随着剪力连接度的增大,试件负向加载时,剪压区剪力钉间混凝土受到较大的拉应力,出现劈裂;正向加载时,剪压区混凝土板翼缘及支座混凝土板承受较大的剪压耦合应力,发生剪压破坏。

试件 SCB-3 加载前期现象与试件 SCB-2 大体相同,但在加载后期,钢梁腹板因屈曲而出现鼓起现象,最终腹板出现局部屈曲,弯剪区混凝土和钢梁间发生粘结掀起,混凝土板发生纵向劈裂,属于 c 类破坏。发生 c 类破坏的原因为高厚比增大,导致组合箱梁局部屈曲失稳。

试件 SCB-4 加载前期现象与试件 SCB-2 大体相同,加载至 2 倍屈服位移时,支座和弯剪区出现纵向微裂缝;试件破坏时,梁端混凝土和弯剪区混凝土板翼缘被压碎,属于 d 类破坏。发生 d 类破坏的原因为随着剪力连接度及高厚比的增加,组合箱梁混

凝土板和钢梁整体性能得到提高,正向加载时,剪压区混凝土板翼缘承受较大压应力,混凝土被压碎。

3 试验结果分析

3.1 荷载-挠度滞回曲线

组合箱梁试件的跨中挠度由实测跨中挠度扣除实测支座沉降获得。4 根组合箱梁试件的荷载-挠度滞回曲线见图 8。从图 8 可以看出,4 根组合箱梁试件的荷载-挠度滞回环丰满而稳定,没有明显的捏缩现象。加载过程可以分为 3 个阶段。

(1)开裂之前,试件荷载和挠度间基本呈线性关系,挠度很小,试件处于弹性阶段,卸载后基本没有残余变形。

(2)开裂之后,试件荷载-挠度开始呈现非线性关系,随着荷载的增加,荷载-挠度滞回曲线开始向挠度轴倾斜,呈现明显的弹塑性性质,卸载后的残余变形量逐渐增大,滞回环趋于丰满,滞回环所包含的面积逐渐增大,试件的加载及卸载刚度逐渐退化,但刚度退化幅度不大,体现良好的抗震性能。

(3)荷载超过极限荷载后,钢梁屈服部分及钢筋的屈服应变不断增大,试件的加载及卸载刚度进一步降低,但卸载刚度基本保持近似弹性,残余变形进

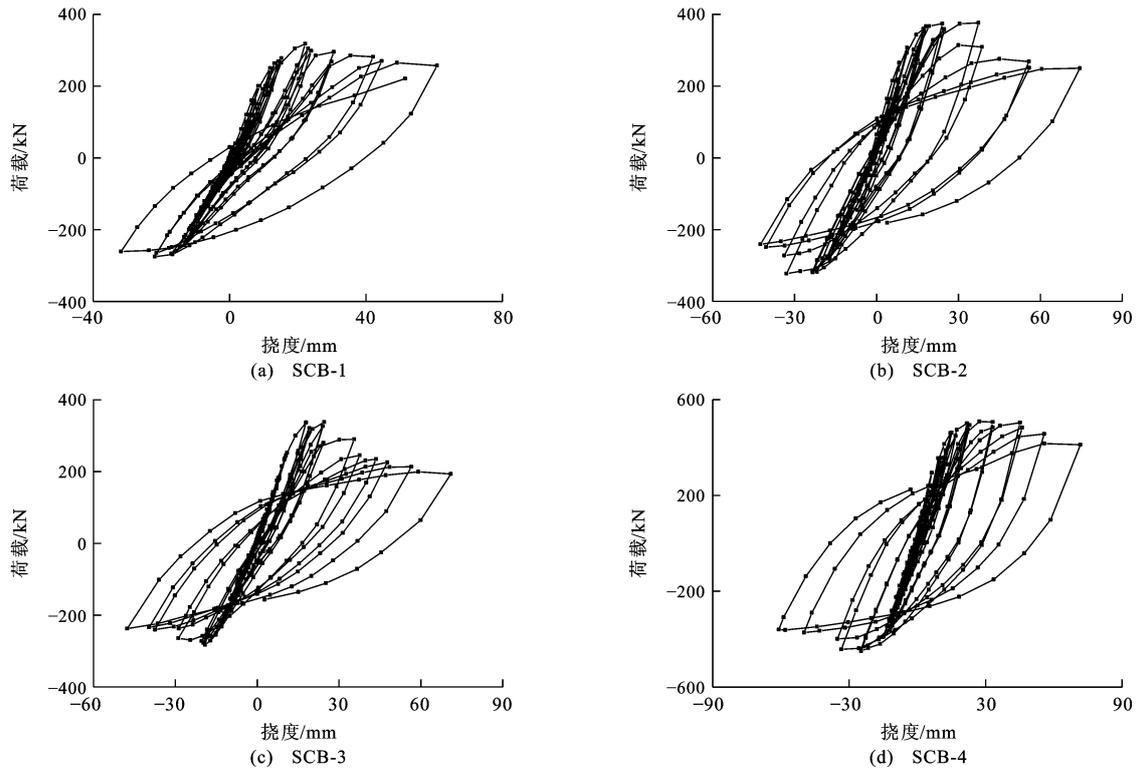


图8 跨中荷载-挠度滞回曲线

Fig. 8 Load-deflection hysteretic curves at mid-spans

一步增大,试件出现明显的近似平台段,近似平台段之后,位移进一步增大,而荷载不断减小,最终破坏。4根组合箱梁试件正向加载时均有较长的近似平台段,负向加载时,近似平台段均较短,说明组合箱梁正向变形能力远强于负向变形能力。

3.2 荷载-挠度骨架曲线

4根组合箱梁试件的荷载-挠度骨架曲线见图9。在低周反复荷载作用下,试件的骨架曲线基本经历了近似弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段。开裂之前,试件的骨架曲线为近似直线;开裂之后,试件骨架曲线开始弯曲;荷载超过极限荷载后,试件骨架曲线出现一定的近似平台段,然后试件刚度进一

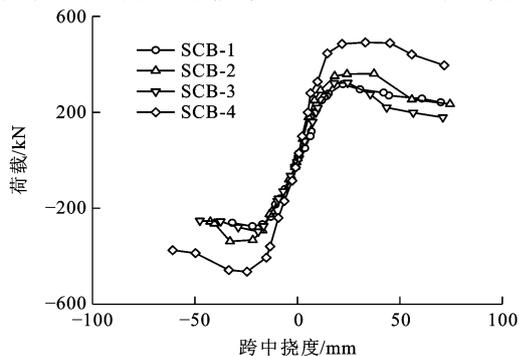


图9 跨中荷载-挠度骨架曲线

Fig. 9 Load-deflection skeleton curves at mid-spans

步降低,最终破坏。试件 SCB-2 和 SCB-4 的骨架曲线相对饱满且正向及负向承载力均比试件 SCB-1 大 13% 以上,说明在同等条件下剪力连接度的增大能提高组合箱梁的抗震性能和极限承载力;试件 SCB-4 比 SCB-2 的极限承载力提高近 30%,说明腹板高厚比对组合箱梁承载力的影响很大,提高腹板高厚比能极大地提高钢-混凝土组合箱梁的极限承载力;试件 SCB-3 承载力相对试件 SCB-4 较低的原因为腹板太薄,导致组合箱梁发生了局部屈曲,使结构整体性能下降。4根组合箱梁试件荷载-挠度骨架曲线正向均有较长的近似平台段,负向近似平台段均较短,进一步说明组合箱梁正向变形能力远强于负向变形能力。

3.3 延性

如图 10 所示,对于图 9 中没有明显屈服点的钢-混凝土组合箱梁荷载-挠度骨架曲线,可以按几何作图法确定屈服荷载 P_y 及屈服挠度 Δ_y [21-22]。过坐标原点作试件荷载-挠度骨架曲线的切线,同时过极限荷载 P_{max} 作平行于挠度轴的水平线,两线交点所对应的挠度值即为试件的屈服挠度 Δ_y ,过该交点作位移轴的垂线,该垂线与骨架曲线的交点所对应的荷载即为试件的屈服荷载 P_y 。试件骨架曲线上极限荷载点所对应的挠度值为试件的极限挠度

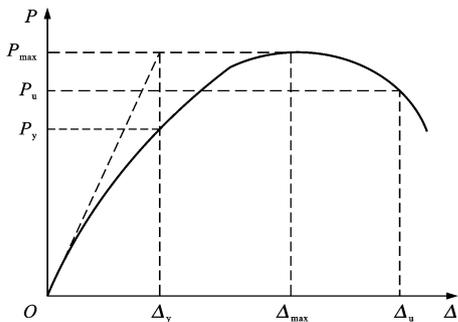


图 10 试件屈服点的确定方法

Fig. 10 Determination method of specimen yield point

Δ_{max}^+ , 正向极限挠度为 Δ_{max}^+ , 负向极限挠度为 Δ_{max}^- , 定义破坏荷载 P_u 为 $0.85P_{max}$, 试件骨架曲线上破坏荷载 P_u 所对应的挠度为破坏挠度 Δ_u , 正向破坏挠度为 Δ_u^+ , 负向破坏挠度为 Δ_u^- 。定义试件延性比 η_u 为破坏挠度与屈服挠度的比值^[14], 即 $\eta_u = \Delta_u / \Delta_y$ 。

由表 3 可以看出: 组合箱梁试件在低周反复荷载作用下, 正向延性比 η_u^+ 为 3.12~6.04, 负向延性比 η_u^- 为 2.35~3.06, 说明钢-混凝土组合箱梁有较好的延性, 是理想的抗震结构; 试件正向延性比均远大于负向延性比, 个别试件正向延性比达到负向延性比的 2.23 倍, 说明组合箱梁正向变形性能要远优于负向变形性能; 在不同剪力连接度条件下, 试件的延性比没有明显变化规律, 说明剪力连接度对试件的正向及负向延性比的影响不显著; 试件的正向及负向延性比均随腹板高厚比的增大而明显增大, 说明增大腹板高厚比能显著提高组合箱梁的延性。

表 3 试件延性

Tab. 3 Ductilities of specimens

试件编号	SCB-1	SCB-2	SCB-3	SCB-4
Δ_y^+ / mm	9.90	9.71	11.39	10.78
Δ_y^- / mm	-13.57	-14.56	-15.70	-15.53
$\Delta_{max}^+ / \text{mm}$	21.25	24.17	24.57	27.30
$\Delta_{max}^- / \text{mm}$	-19.69	-33.30	-19.12	-24.65
Δ_u^+ / mm	52.00	47.06	35.56	65.08
Δ_u^- / mm	-31.84	-37.85	-37.48	-47.50
η_u^+	5.25	4.85	3.12	6.04
η_u^-	2.35	2.60	2.39	3.06

3.4 结构耗能能力

结构耗能性能主要通过滞回曲线体现^[21-22], 结构耗能能力大小一般通过荷载-位移滞回环所包含的面积来衡量。结构荷载-位移滞回环越饱满, 滞回环所包含的面积就越大, 结构的耗能能力就越强。图 11 为 4 根组合箱梁试件的耗能-挠度关系曲线。

由图 11 可以得出如下结论。

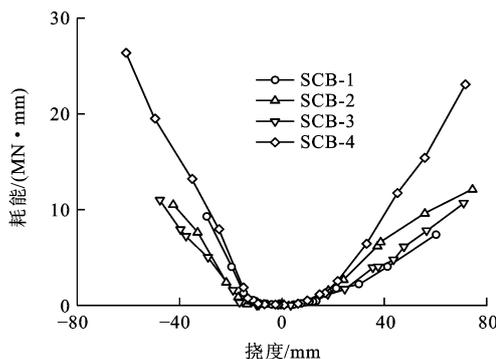


图 11 试件耗能-挠度曲线

Fig. 11 Energy dissipation-deflection curves of specimens

(1) 加载初期, 当组合箱梁试件处于弹性阶段时, 正、负向的耗能均极小, 近似为 0; 当荷载达到试件屈服荷载之后, 组合箱梁进入弹塑性阶段, 由于钢筋和钢梁屈服后产生较大的变形, 同时卸载刚度退化幅度不大, 试件荷载-挠度滞回环相对饱满, 试件正向及负向耗能能力均随位移的增加而迅速增大, 即耗能能力增强; 试件进入下降段后, 荷载虽然有所减小, 但由于滞回环非常丰满, 试件耗能能力还能进一步增强。

(2) 剪力连接度大的组合箱梁试件正向和负向耗能性能均优于剪力连接度小的试件, 说明剪力连接度越大, 组合箱梁耗能能力越强, 组合箱梁结构抗震性能越好。

(3) 高厚比大的组合箱梁试件正向及负向耗能性能优于高厚比小的试件, 说明腹板高厚比越大, 组合箱梁耗能能力越强, 组合箱梁结构抗震性能越好。

3.5 刚度退化规律

组合箱梁刚度退化利用某次循环荷载下的峰值荷载除以相应的挠度表示^[14-15], 即

$$K_i = P_i / \Delta_i$$

式中: K_i 为第 i 个循环割线刚度; P_i 为第 i 个循环荷载峰值; Δ_i 为第 i 个循环挠度峰值。

随着试件变形挠度的增大, 混凝土的开裂及钢材的屈服等使试件刚度随着循环次数和位移增大而不断减小, 刚度出现退化。组合箱梁试件刚度退化规律见图 12。从图 12 可以得出如下结论。

(1) 组合箱梁正向和负向加载刚度均随挠度的增大而不断下降, 加载初期无论是正向或是负向, 组合箱梁刚度退化速度均较快, 归其原因为初期由于混凝土的开裂、钢筋和钢梁屈服部分的增多、部分剪力钉被剪断及混凝土板和钢梁间的粘结破坏范围的扩大等造成刚度有较大的退化; 当试件达到极限荷

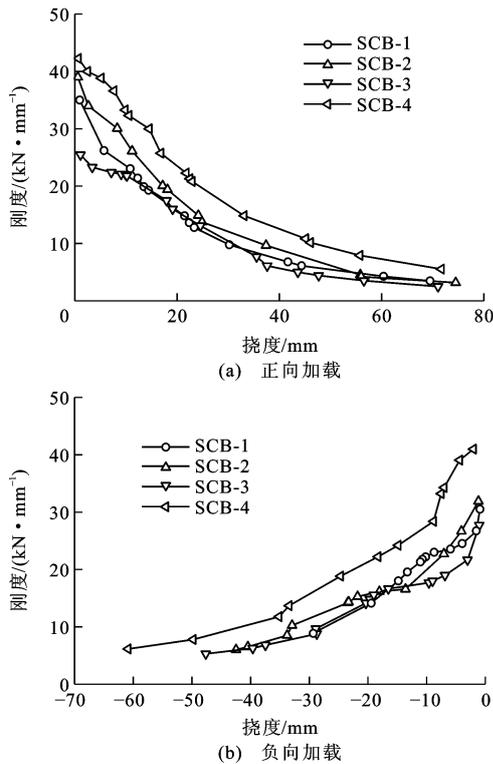


图 12 试件刚度退化

Fig. 12 Rigidity degenerations of specimens

载之后,刚度退化趋势逐渐减缓,刚度-挠度屈曲趋于平缓。

(2)加载前期,不同剪力连接度的组合箱梁刚度有一定差别,达到极限荷载之后,不同剪力连接度的试件刚度越来越接近,试件刚度受剪力连接度的影响减小。

(3)钢梁腹板的高厚比对组合箱梁刚度及刚度退化影响规律同剪力连接度影响规律相似。

4 结 语

(1)低周反复荷载作用下,由于腹板高厚比及剪力连接度的不同,组合箱梁试件失效模式可归为4类:剪切破坏、弯剪破坏、局部屈曲破坏及压弯破坏。

(2)组合箱梁荷载-挠度滞回曲线可近似地分为弹性、弹塑性和破坏3个阶段,滞回环丰满而稳定,没有明显的捏缩现象,组合箱梁具有良好的抗震性能。

(3)组合箱梁骨架曲线经历了近似弹性、弹塑性及破坏阶段3个阶段;在同等条件下,剪力连接度越大,骨架曲线越饱满,组合箱梁抗震性能越好。

(4)组合箱梁正向延性比远大于负向延性比,正向和负向延性比均随腹板高厚比的增大而增大,但

受剪力连接度影响较小。

(5)组合箱梁正向及负向耗能能力均随位移、剪力连接度及腹板高厚比增大而增大,提高剪力连接度及腹板高厚比有利于结构抗震。

(6)组合箱梁正向和负向刚度均随着挠度增大而不断减小;加载初期试件刚度退化速度较快,受剪力连接度及高厚比影响较大;当达到极限荷载之后,组合箱梁刚度退化趋势逐渐减缓,受剪力连接度和高厚比影响变小。

(7)本文为组合箱梁滞回模型的构建提供了部分试验数据,但组合箱梁滞回模型的建立需要大量试验数据,因此,有待进一步对组合箱梁抗震性能进行试验研究,并构建适合组合箱梁的滞回模型。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 聂建国,余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J]. 土木工程学报,1999,32(2):3-8.
NIE Jian-guo, YU Zhi-wu. Research and practice of composite steel-concrete beams in China[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 3-8. (in Chinese)
- [2] 王春生,宋天谕,冯亚成,等. 高强度钢-混凝土组合梁受力性能分析[J]. 交通运输工程学报,2008,8(2):27-33.
WANG Chun-sheng, SONG Tian-yi, FENG Ya-cheng, et al. Structural behavior analysis of high strength steel-concrete composite girders[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 27-33. (in Chinese)
- [3] LIU Xiao-gang, FAN Jian-sheng, NIE Jian-guo, et al. Behavior of composite rigid frame bridge under bi-directional seismic excitations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 62-71.
- [4] 周勇超,胡圣能,宋磊,等. 钢-混凝土组合梁的温度骤变效应分析[J]. 交通运输工程学报,2013,13(1):20-26.
ZHOU Yong-chao, HU Sheng-neng, SONG Lei, et al. Effect analysis of steel-concrete composite beam caused by sudden change of temperature[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1): 20-26. (in Chinese)
- [5] ZHOU Wang-bao, JIANG Li-zhong, LIU Zhi-jie, et al. Closed-form solution for shear lag effects of steel-concrete composite box beams considering shear deformation and slip[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(10): 2976-2982.
- [6] ZHOU Wang-bao, JIANG Li-zhong, YU Zhi-wu. Analysis of free vibration characteristic of steel-concrete composite box-girder considering shear lag and slip[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(9): 2570-2577.
- [7] 周旺保. 钢-混凝土组合箱梁及其框架结构的静动力性能分析[D]. 长沙:中南大学,2013.
ZHOU Wang-bao. Static and dynamic performances of steel-concrete composite box-beam and frame structure[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)

- [8] 周旺保,蒋丽忠,李书进,等. 钢-混凝土组合框架地震响应有
限元时程分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2014,
42(7):61-65.
ZHOU Wang-bao, JIANG Li-zhong, LI Shu-jin, et al. Finite
element time history analysis on seismic response of steel-concrete
composite frame structure[J]. Journal of Huazhong University
of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014,
42(7): 61-65. (in Chinese)
- [9] 戚菁菁,蒋丽忠,周旺保. 钢-混凝土组合框架结构恢复力模型
研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(9):3863-
3872.
QI Jing-jing, JIANG Li-zhong, ZHOU Wang-bao. Restoring
force model of steel-concrete composite frame structure[J].
Journal of Central South University: Science and Technology,
2013, 44(9): 3863-3872. (in Chinese)
- [10] 聂建国,黄 远. 钢-混凝土组合梁非线性地震反应分析模型[J].
清华大学学报:自然科学版,2009,49(3):329-332.
NIE Jian-guo, HUANG Yuan. Nonlinear model for seismic
analysis of steel-concrete composite beams[J]. Journal of
Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(3):
329-332. (in Chinese)
- [11] 聂建国,余洲亮,叶清华. 钢-混凝土叠合板组合梁抗震性能的
试验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(10):35-37.
NIE Jian-guo, YU Zhou-liang, YE Qing-hua. Seismic behaviour
of composite steel-concrete beams[J]. Journal of Tsinghua
University: Science and Technology, 1998, 38(10): 35-37.
(in Chinese)
- [12] 聂建国,余洲亮,袁彦声,等. 钢-混凝土组合梁恢复力模型的
研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1999,39(6):121-123.
NIE Jian-guo, YU Zhou-liang, YUAN Yan-sheng, et al. Research
on restoring force model of composite steel-concrete beams[J].
Journal of Tsinghua University: Science and Technology,
1999, 39(6): 121-123. (in Chinese)
- [13] 辛学忠,蒋丽忠,曹 华. 钢-混凝土连续组合梁的恢复力
模型[J]. 建筑结构学报,2006,27(1):83-89.
XIN Xue-zhong, JIANG Li-zhong, CAO Hua. Research of
restoring force model on steel-concrete composite continuous
beams[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1): 83-89.
(in Chinese)
- [14] 薛伟辰,李 杰,李 昆. 预应力钢-混凝土组合梁抗震性能试
验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(4):656-660.
XUE Wei-chen, LI Jie, LI Kun. Experimental studies on
seismic performance of prestressed steel-concrete composite
beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,
39(4): 656-660. (in Chinese)
- [15] 薛伟辰,李 昆,李 杰. 钢-混凝土组合梁低周反复荷载试验
研究[J]. 地震工程与工程振动,2002,22(6):65-70.
XUE Wei-chen, LI Kun, LI Jie. Study on steel-concrete
composite beams under low-reversed cyclic loading[J].
Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002,
22(6): 65-70. (in Chinese)
- [16] AYOUB A, FILIPPOU F C. Mixed formulation of nonlinear
steel-concrete composite beam element[J]. Journal of Structural
Engineering, 2000, 126(3): 371-381.
- [17] 蒋丽忠,余志武,曹 华,等. 钢-混凝土简支组合梁的恢复力
模型[J]. 工业建筑,2007,37(11):85-87,96.
JIANG Li-zhong, YU Zhi-wu, CAO Hua, et al. Research on
restoring force model of steel-concrete composite beams[J].
Industrial Construction, 2007, 37(11): 85-87, 96. (in Chinese)
- [18] 蒋丽忠,余志武,曹 华,等. 剪力连接度对钢-混凝土组合梁
抗震性能的影响[J]. 建筑结构,2008,38(3):52-54,120.
JIANG Li-zhong, YU Zhi-wu, CAO Hua, et al. Effect of
shear connection degree on seismic resistant performance of
steel-concrete composite beams[J]. Building Structures, 2008,
38(3): 52-54, 120. (in Chinese)
- [19] 蒋丽忠,邹 飞,余志武. 低周反复荷载作用下钢-混凝土组合
梁的延性[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(5):23-27.
JIANG Li-zhong, ZOU Fei, YU Zhi-wu. Ductility of composite
steel-concrete beams under repetitive and cyclic loading[J].
Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(5): 23-27.
(in Chinese)
- [20] 程 鹏. 组合梁截面弯矩-曲率滞回性能分析[J]. 河北工业大
学学报,2009,38(3):111-113.
CHENG Peng. Analysis of moment-curvature hysteresis
behavior of composite beams[J]. Journal of Hebei University
of Technology, 2009, 38(3): 111-113. (in Chinese)
- [21] 王文达,韩林海. 钢管混凝土框架实用荷载-位移恢复力模型
研究[J]. 工程力学,2008,25(11):62-69.
WANG Wen-da, HAN Lin-hai. Research on practical resilience
model of load versus displacement for concrete filled steel
tubular frame[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 62-
69. (in Chinese)
- [22] 王文达,韩林海,游经团. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点
滞回性能的实验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(9):17-25.
WANG Wen-da, HAN Lin-hai, YOU Jing-tuan. Experimental
studies on hysteretic behaviors of steel beam to concrete filled
SHS column connections with stiffening ring[J]. China Civil
Engineering Journal, 2006, 39(9): 17-25. (in Chinese)