

文章编号:1673-2049(2012)02-0001-06

再生混凝土 U 型叠合梁抗剪性能

肖建庄¹, 朱永明², 王璞瑾¹, 高 歌¹

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 上海城建物资有限公司, 上海 200063)

摘要:通过 3 根再生混凝土 U 型叠合梁和 1 根再生混凝土整浇梁的抗剪性能对比试验,研究了 U 型叠合梁和整浇梁的裂缝发展、破坏形式和抗剪承载力。试验结果表明:再生混凝土 U 型叠合梁的抗剪破坏形式和受力机理与整浇混凝土梁类似,再生混凝土 U 型叠合梁的抗剪承载力计算可参照整浇梁的抗剪承载力计算方法。

关键词:再生混凝土; U 型叠合梁; 界面; 斜裂缝; 抗剪性能; 抗剪承载力

中图分类号: TU378.2 **文献标志码:** A

Shear Behavior of Recycled Concrete U-shaped Composite Beams

XIAO Jian-zhuang¹, ZHU Yong-ming², WANG Pu-jin¹, GAO Ge¹

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Urban Construction Materials Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The shear behavior of three recycled concrete U-shaped composite beams and one whole cast recycled concrete beam were tested and compared. Researches on the developments of cracks, failure modes and shear capacities of the U-shaped composited beams and whole cast beam were developed. The test results show that shear failure modes and mechanisms of recycled concrete U-shaped composite beams are similar to those of whole cast ordinary concrete beams. The calculation method of shear capacity of recycled concrete U-shaped composite beams can be referred to that of whole cast beams.

Key words: recycled concrete; U-shaped composite beam; interface; diagonal crack; shear behavior; shear capacity

0 引 言

再生混凝土是指利用废混凝土破碎加工而成的再生骨料,部分或全部代替天然骨料配制而成的新混凝土。在相同条件下,再生混凝土和易性较普通混凝土差,不便于现场施工,若将其应用于工厂预制构件中则既可以保证其质量也可以保证其生产速度。各国学者对叠合梁的研究主要集中在上下叠合和二次受力上,对于 U 型叠合梁的研究还不多,主要集中在 U 型叠合梁的受弯性能上^[1-2],对其抗剪性能研究也很少,而对于将再生混凝土应用于叠合构件的研究则更少。由于 U 型叠合方式具有叠合

面无法进行人工拉毛处理、预制部分混凝土用量少、对施工要求高等特点,需要对其进行专门研究。本文中笔者通过对 4 根足尺梁(其中 3 根 U 型叠合梁,1 根整浇梁)的抗剪性能试验,以剪跨比为试验参数对再生混凝土 U 型叠合梁的抗剪性能进行研究,试验数据和结论可为再生混凝土应用于叠合结构提供参考和依据。

1 试验设计

1.1 配合比设计

试验采用的再生混凝土骨料由上海市万吉机械施工工程有限公司所生产,符合《再生混凝土骨料应

收稿日期:2012-03-08

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2010BAK69B28);国家自然科学基金项目(51178340)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

用规程》中的规定。天然骨料为碎石,普通河砂。再生混凝土采用室内配合比试配,强度等级为 C35。再生混凝土配合比和钢筋材料力学性能见表 1,2。

1.2 试件设计

以再生混凝土叠合梁为试验对象,共 4 根梁,其中 3 根 U 型叠合梁,1 根整浇梁。以剪跨比为控制

表 1 再生混凝土配合比

Tab. 1 Mix Ratios of Recycled Concrete

试件 编号	再生粗骨料 取代率 $r/\%$	各材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)								水灰比		坍落度/ mm
		水	水泥	粉煤灰	中砂	天然粗骨料	再生粗骨料	高效减水剂	附加水	基础	调整后	
1	70	162	325	57	708	332	775	2.68	21	0.446	0.479	90
2	100	162	337	59	685	0	1 117	2.78	24	0.430	0.469	35

表 2 钢筋材料力学性能

Tab. 2 Material Mechanical Properties of Steel Bars

钢筋直 径/mm	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	断后伸长 率/%	弯曲性能	弹性模量 E_s/GPa
8	290	430	38	合格	220
18	350	540	29	合格	200
25	380	550	26	合格	200

变量,编号 US-1~US-3 分别代表剪跨比 λ 为 1.5, 2, 3 的 3 根叠合梁,梁 RS 为再生粗骨料取代率 100% 的整浇梁。各梁截面尺寸均为 $200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,梁长 4 100 mm ,有效长度 3 900 mm ,抗拉钢筋配筋率 $\rho=2.47\%$ 。箍筋及架立筋采用直径 8 mm 的 HRB235 等级热轧钢筋,其他钢筋均采用 HRB335 等级热轧钢筋。

叠合梁施工时,先制作梁预制部分,叠合面为自然粗糙面,养护期间梁下有足够支撑。养护 28 d 后,在预制部分上支设模板进行现浇部分施工,再养护超过 28 d 后进行试验。各梁具体信息及编号见图 1~3 和表 3。

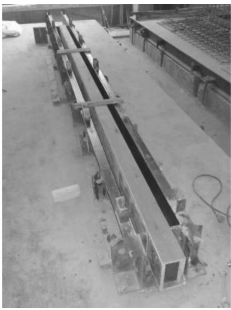


图 1 试件制作

Fig. 1 Specimen Manufacture

1.3 加载装置及量测内容

试验测量了斜截面处箍筋和主筋的应变以及斜截面处混凝土表面的应变和梁的挠度。应变花在梁一侧对称布置,共 4 个;斜截面处测量裂缝宽度的位移传感器在梁一侧对称布置 2 个,同时斜截面处箍筋和主筋上也布置有应变片。梁的挠度由布置在梁上和梁下的 5 个位移传感器测量,见图 4。

根据试验需要和实际情况,采用反力架、千斤顶和分配梁来施加梁上的竖向荷载,按照《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)^[3] 中的要求进行试验,每级荷载加载后停留 5 min。采用分级加载的形式,在加载前进行预加载,使各测量仪表进入正常

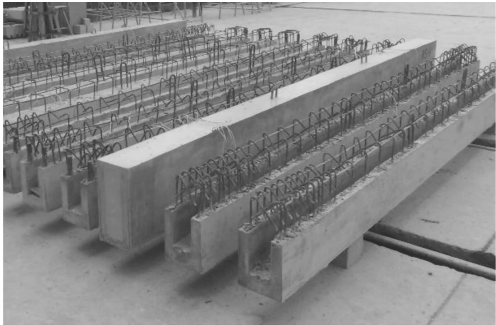


图 2 浇筑完成的 U 型预制构件

Fig. 2 Finished U-shaped Precast Component

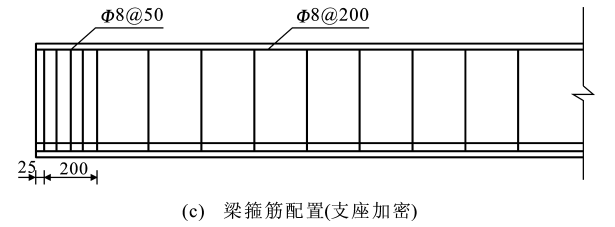
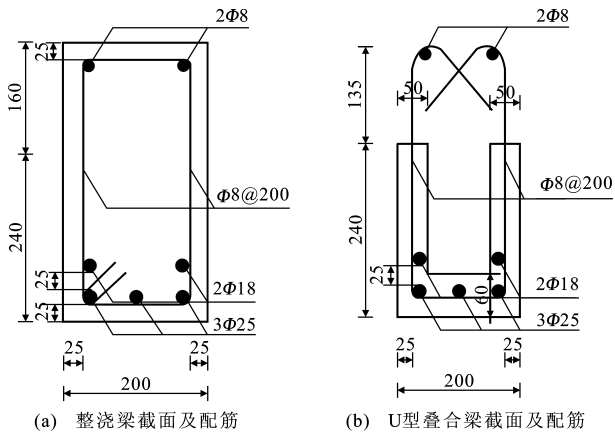


图 3 梁截面及配筋(单位:mm)

Fig. 3 Cross-sections and Reinforcements of Beams (Unit:mm)

工作状态。开裂前以极限荷载的 5% 为荷载增量,开裂后以极限荷载的 10% 为荷载增量,当荷载接近极限时连续加载至破坏。试验数据由计算机自动采集,每秒采集 1 次。测试内容主要包括梁的挠度、箍筋应变、竖向裂缝与斜裂缝的发展以及斜裂缝的

表 3 梁试件参数

Tab. 3 Parameters of Specimens of Beams

梁编号	剪跨比	叠合面粗糙程度	预制部分	叠合部分	预制部分	现浇部分
			再生粗骨料取代率/%	再生粗骨料取代率/%	再生混凝土强度/MPa	再生混凝土强度/MPa
US-1	1.5	自然粗糙面	70	100	43.9	39.5
US-2	2.0	自然粗糙面	70	100	45.1	43.4
US-3	3.0	自然粗糙面	70	100	38.2	40.8
RS	3.0		100		45.3	

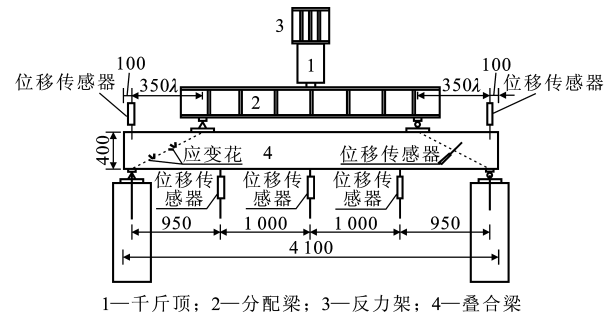


图 4 量测内容及加载方式(单位:mm)

Fig. 4 Measuring Items and Loading Modes (Unit:mm)

平均宽度,荷载由压力传感器量测。

2 试验结果

2.1 试件破坏形式

试验中所有梁均达到斜截面破坏状态,即斜裂缝宽度达到 1.5 mm。试件破坏形态见图 5。

2.1.1 斜拉破坏

$\lambda=3$ 时梁 US-3 和梁 RS 发生斜拉破坏。以梁 RS 为例进行试验现象描述:荷载为 40 kN 之前,梁处于弹性阶段。荷载为 60 kN 时梁跨中区出现数条垂直裂缝,裂缝宽度为 0.02 mm。随着荷载增加,梁跨中附近裂缝数量向两端发展,长度变长,宽度变宽。荷载为 160 kN 时,斜裂缝数量向支座处增加,并且支座与荷载点连线处出现第 1 条 45°斜裂缝。荷载继续增加,斜裂缝发展,竖向裂缝分叉,荷载为 220 kN 时,梁跨中底面沿梁宽出现长度为 200 mm、宽度为 0.1 mm 的贯通裂缝。荷载为 320 kN 时,斜裂缝宽度发展至 0.6 mm,其长度发展至距加载点 5 cm;荷载为 340 kN 时,斜裂缝宽度发展至 1.4 mm;荷载为 350 kN 时,弯剪区上部混凝土发生突然破坏,试验结束。

与梁 RS 相似,梁 US-3 也发生斜拉破坏。在未

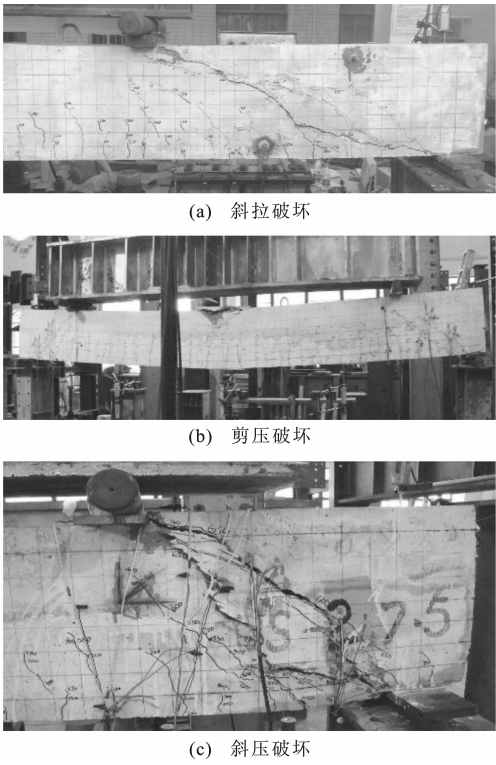


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure Modes of Specimens

出现斜裂缝前,仅梁挠度增加,箍筋应变几乎没有变化;梁斜裂缝出现后箍筋应变增加,有明显拐点。随着斜裂缝的发展,应变加大,出现屈服平台。

2.1.2 剪压破坏

$\lambda=2$ 时梁 US-2 发生剪压破坏,最终破坏形式为纯弯段受压混凝土区被压碎。但其在剪压破坏前斜裂缝宽度已超过 1.5 mm,达到 1.6 mm。在剪压破坏前其裂缝发展方式与梁 US-3 类似,但所承受荷载大于梁 US-3 的荷载。

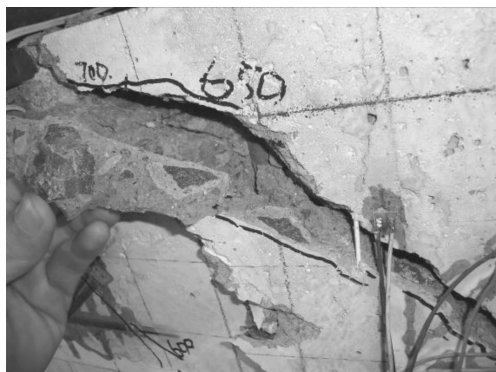
2.1.3 斜压破坏

$\lambda=1.5$ 时梁 US-1 发生斜压破坏,荷载为 220 kN 时弯剪区出现 60°斜裂缝,荷载为 250 kN 时弯剪区中部出现 45°斜裂缝,斜裂缝长约 100 mm、宽为 0.05 mm;随着荷载继续增加,斜裂缝向加载点及支座方向延伸且宽度增大,加载至 700 kN 时剪弯段已形成 2 条大体平行的斜裂缝,宽度较大者其宽度在 1.6 mm 左右。最终弯剪区混凝土发生斜向受压破坏,破坏特征与受压斜向短柱相似。

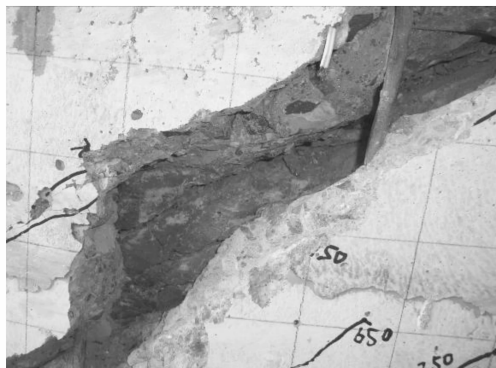
2.2 叠合面破坏形式

已有学者通过大量试验得出叠合面抗剪强度与下列因素有关:叠合面的形式(包括人工粗糙面、自然粗糙面、光滑粗糙面)、箍筋配筋率、混凝土强度、叠合部分与预制部分截面高比、循环荷载等^[4-6]。本

文中由于条件所限,将叠合面的研究集中在一般工程情况下(箍筋采用直径 8 mm 的 HRB235@200 双肢箍,叠合面采用自然粗糙面),通过改变剪跨比来对再生混凝土叠合梁的叠合面抗剪性能进行研究。在梁破坏后,从外观来看,各梁叠合面均未发生滑移,将试验后的梁敲开后,叠合面与箍筋间的连接完好,并未对梁抗剪承载力产生不利影响,具体情况见图 6。图 6(a)为预制部分受剪破坏(骨料被剪坏),图 6(b)为现浇部分(颜色较深部分)与预制部分在受剪破坏时相互脱离。试验结果表明:在不同剪跨比下 U 型叠合形式未对梁抗剪承载力产生不利影响。



(a) 预制部分在弯剪区破坏



(b) 现浇部分与预制部分相互脱离

图 6 再生混凝土 U 型叠合梁破坏后叠合面形式

Fig. 6 Composite Surfaces of Recycled Concrete U-shaped Composite Beam After Shear Failure

2.3 荷载-跨中挠度曲线

各梁的荷载-跨中挠度曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出:

(1)当 $\lambda=3$ 时,叠合梁 US-3 和整浇梁 RS 的荷载-跨中挠度曲线较为类似,可以得出在此剪跨比下叠合与整浇 2 种不同方式制作的梁刚度相同的结论。

(2)在各剪跨比条件下,荷载-跨中挠度曲线几乎均为直线,刚度降低很少。

(3)随着剪跨比的增大,梁达到相同跨中位移时

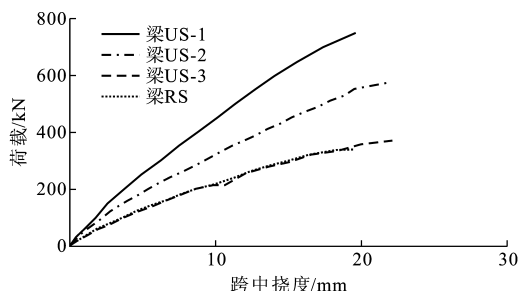


图 7 各梁的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 7 Load-mid-span Deflection Curves of Beams

所需荷载减小,这一特征与普通混凝土整浇梁的荷载-挠度曲线吻合。

2.4 荷载-纵筋应变曲线

各梁的荷载-纵筋应变曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出:

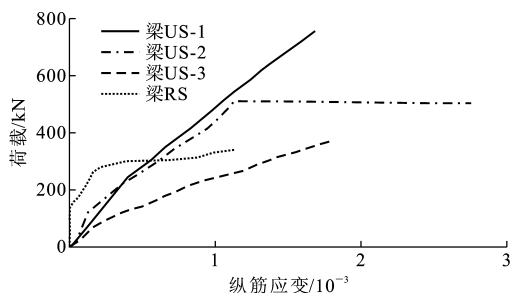


图 8 各梁的荷载-纵筋应变曲线

Fig. 8 Load-longitudinal Reinforcement Strain Curves of Beams

(1)当 $\lambda=3$ 时,梁 RS 的纵筋达到屈服,其他各梁未发生纵筋与混凝土间的滑移现象。

(2)当 $\lambda=2$ 时,梁 US-2 的荷载-纵筋应变曲线近似呈线性,且未发生钢筋与混凝土间的滑移。

(3)梁 US-1~US-3 的荷载-纵筋应变曲线开始段(荷载 0~100 kN 段)均具有一定的斜率,而整浇梁 RS 在荷载接近 150 kN 时曲线才产生斜率,此斜率产生处荷载对应梁 RS 弯剪区开裂荷载,证明整浇梁在剪跨比 $\lambda=3$ 的条件下具有更好的整体性。

2.5 荷载-箍筋应变曲线

各梁荷载-箍筋应变曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出:

(1)在梁斜截面开裂前各梁箍筋几乎不受力,在斜截面开裂瞬间箍筋应变突然变大,图 9 中曲线出现弯曲时的荷载与实际观测到的出现斜裂缝的荷载一致,证明出现斜裂缝后箍筋即参入到梁的抗剪中。

(2)梁 US-1 在弯剪区开裂前箍筋应变有负值产生,而其他各梁无此现象,证明在剪跨比较小时加载初期弯剪区混凝土受剪压共同作用。

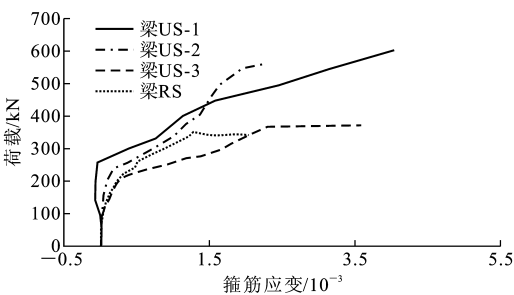


图 9 各梁的荷载-箍筋应变曲线

Fig. 9 Load-stirrup Strain Curves of Beams

(3)在梁斜截面开裂后,随着荷载的增加,箍筋出现屈服平台前箍筋应力与荷载呈线性关系。

2.6 荷载-斜裂缝宽度曲线

由于单条裂缝宽度在实际中极难实时测得(裂缝的发展与走向和条数无法准确预测),该试验所采取的裂缝测量方式如图 4 所示,即在弯剪区布置与水平方向成 45°角的位移计,测量范围贯穿整个弯剪区,此时会发生 3 个导致裂缝测量不准确的因素:①所测区域出现多条裂缝,测量结果为裂缝宽度的总和,会使测量结果偏大;②测量区域内裂缝发展角度与位移计拉丝方向不垂直而呈一定夹角,会使测量结果偏小;③由于拉丝具有一定的弹性,会使测量结果偏小。因此数据分析时采取将实际试验中人工记录的荷载-斜裂缝宽度与数据采集器记录的数据进行综合分析,最终得出较为可靠的数据分析方式。各梁荷载-斜裂缝宽度曲线如图 10 所示。

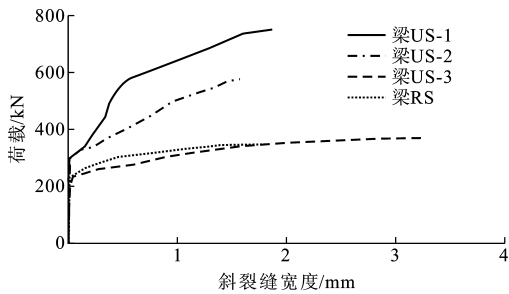


图 10 荷载-斜裂缝宽度曲线

Fig. 10 Load-diagonal Crack Width Curves

由图 10 可以看出:

(1)各梁弯剪区裂缝出现时的荷载恰好为弯剪区箍筋应变也出现变化时的荷载,与实际情况吻合良好。

(2)各梁最终斜裂缝宽度均超过 1.5 mm,达到了定义的梁抗剪破坏状态。

(3)斜裂缝宽度与荷载基本呈线性关系,剪跨比越小,裂缝宽度发展数值与荷载增加数值之比越小,即剪跨比越小,裂缝越不易变宽,而当剪跨比为 3

时,在接近极限荷载时裂缝宽度发展极为迅速。

2.7 斜截面开裂荷载

各试件斜截面开裂荷载 V_{cr} 主要根据试验时的观察记录来确定,同时参考了试验的荷载-箍筋应变曲线。已有学者通过试验证明,再生混凝土整浇梁的斜截面开裂荷载比普通混凝土整浇梁的斜截面开裂荷载小 10%~20%,本文试验的叠合梁均采用再生混凝土叠合梁,各梁斜截面开裂荷载见表 4。

表 4 再生混凝土叠合梁斜截面开裂荷载

Tab. 4 Diagonal Cracking Loads of Recycled Concrete Composite Beams

梁编号	剪跨比	斜截面开裂荷载/kN	斜截面开裂承载力/kN
RS	3.0	164.7	82.4
US-3	3.0	182.6	91.3
US-2	2.0	218.5	109.3
US-1	1.5	257.3	128.7

试验结果表明:在剪跨比 $\lambda=3$ 的条件下,再生粗骨料取代率为 100% 的梁 RS 斜截面开裂荷载低于梁 US-3。随着剪跨比的减小,斜截面开裂荷载增大。

2.8 极限抗剪承载力

已有研究表明:按照普通混凝土设计方法设计的再生混凝土梁偏于不安全^[7-9],本文试验主要研究不同剪跨比的叠合梁与再生混凝土整浇梁的极限荷载。破坏荷载为试验中试件所能承受的最大荷载,极限荷载根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)确定,即受剪试验时,试件在加载或持荷过程中出现下列现象之一时所对应的荷载为极限荷载:①斜裂缝端部受压区混凝土发生剪压破坏;②沿斜截面混凝土发生斜向受压破坏;③沿斜截面撕裂形成斜拉破坏;④斜裂缝宽度可以达到 1.5 mm。该试验所采用加载方式为两点对称加载,故受剪承载力取为极限荷载的 50%。

根据梁斜截面破坏的定义,试验以各梁最大斜裂缝发展到 1.5 mm 的荷载作为梁抗剪承载力。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),梁的抗剪承载力 V_{cs} 计算公式为

$$V_{cs} = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \tag{1}$$

式中: f_t 为混凝土轴心抗拉强度; b 为梁截面宽度; h_0 为梁有效高度; f_{yv} 为箍筋抗拉强度; A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为沿构件长度方向的箍筋间距。

由于规范中所规定的梁抗剪承载力有一定的安全储备,即为了保证在一般荷载条件下梁受弯破坏

(延性破坏)先于梁受剪导致的突然破坏。

表 5 为不同剪跨比下各梁的试验抗剪承载力和按照式(1)计算的抗剪承载力。从表 5 可知:该试验实测结果与规范规定梁抗剪承载力的比值均大于 1,在实际中可保证其安全储备;剪跨比越小,试验抗剪承载力与计算抗剪承载力比值越大,这是在推导式(1)时采用了承载力的下限并采用更低的弯剪承载力所致;由于试验采用叠合方式,按照规范规定,混凝土强度应取预制构件和现浇部分二者中强度较低者进行计算,因此强度较高的部分会导致试验抗剪承载力与计算抗剪承载力的比值进一步提高。

表 5 再生混凝土叠合梁的抗剪承载力
Tab.5 Shear Capacities of Recycled Concrete Composite Beams

梁编号	剪跨比	试验抗剪承载力 V_1 /kN	计算抗剪承载力 V_2 /kN	$V_1V_2^{-1}$
RS	3.0	173.9	138.7	1.25
US-3	3.0	178.8	129.5	1.38
US-2	2.0	262.2	164.6	1.59
US-1	1.5	359.4	179.3	2.00

3 结 语

(1)试验中的再生混凝土叠合梁破坏形式与再生混凝土整浇梁及普通混凝土整浇梁破坏形式相同,破坏时所有梁斜裂缝均超过 1.5 mm,属于剪压破坏。

(2)本文中所用 U 型叠合梁现浇部分混凝土占混凝土总用量的 78.75%,叠合梁试验过后经敲开时,叠合面与箍筋间的连接完好,证明在 U 型叠合时对梁的抗剪承载力无不利影响。

(3)在不同剪跨比下,各梁的破坏形式符合普通混凝土梁抗剪破坏形式的分类,试验抗剪承载力均大于按照混凝土结构设计规范计算的抗剪承载力的 1 倍以上,满足实际应用要求。

参考文献:

References:

[1] YANG K H,OH M H,KIM M H,et al. Flexural Behavior of Hybrid Precast Concrete Beams with H-steel Beams at Both Ends[J]. Engineering Structures,2010,32(9):2940-2949.

[2] 曾垂军,吴方伯,段绍伟. U 形预应力预制构件叠合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑科学,2006,22(2):49-53.
ZENG Chui-jun, WU Fang-bo, DUAN Shao-wei. Experimental Study on Bending Behavior of Composite Beams with U-shaped Prestressed Precast Elements [J]. Building Science,2006,22(2):49-53.

[3] GB 50152-92,混凝土结构试验方法标准[S].
GB 50152-92, Standard Methods for Testing of Concrete Structures[S].

[4] 谢 钰. 叠合梁叠合面抗剪机理分析及抗剪强度计算[J]. 邵阳学院学报:自然科学版,2006,3(3):48-51.
XIE Yu. Analysis on Anti-shear Destroy Mechanism and the Calculation of Shear Resistance in the Combined Interface of Composite Beam [J]. Journal of Shaoyang University: Science and Technology, 2006, 3 (3):48-51.

[5] 林少明,贺采旭. 低周反复荷载下钢筋混凝土连续迭合梁的抗剪性能[J]. 武汉水利电力大学学报,1987(2):73-83.
LIN Shao-ming, HE Cai-xu. The Shear Behavior of RC Continuous Composite Beams Under Low Cycle Loading[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering,1987(2):73-83.

[6] 石建军,孙 冰,杨晓锋,等. 叠合构件结合面的粘结性能探讨[J]. 混凝土与水泥制品,2004(5):50-53.
SHI Jian-jun, SUN Bing, YANG Xiao-feng, et al. Discussion on Bonding Behavior of Interface of Combined Members[J]. China Concrete and Cement Products, 2004(5):50-53.

[7] HAN B C, YUN H D, CHUNG S Y. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Made with Recycled-aggregate[C]//MALHOTRA V M. SP200-31. Farmington Hills: ACI,2001:503-516.

[8] 肖建庄,兰 阳. 再生混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 结构工程师,2004,20(6):54-58,53.
XIAO Jian-zhuang, LAN Yang. Experimental Study on Shear Behavior of Recycled Concrete Beams[J]. Structural Engineers,2004,20(6):54-58,53.

[9] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Shear Strength of Reinforced Recycled Concrete Beams with Stirrups [J]. Magazine of Concrete Research, 2010,62(10):685-699.