

文章编号:1673-2049(2014)02-0026-06

## 新型叠合梁端部抗剪性能试验

吴方伯<sup>1</sup>, 刘彪<sup>1</sup>, 邓利斌<sup>1,2</sup>, 李钧<sup>1,2</sup>, 邱祺媛<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南高岭建设集团股份有限公司, 湖南 长沙 410153;  
3. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518048)

**摘要:**通过新型叠合梁、传统矩形叠合梁及现浇对比梁在单调荷载下的足尺模型试验,对试件梁端的破坏形态、整体受力性能、斜截面抗剪承载力与位移延性等进行了研究。结果表明:新型叠合梁与现浇对比梁均发生了剪切破坏;在受力全过程中,新型叠合梁的裂缝特征和破坏形态都与现浇对比梁类似,没有出现沿叠合面发展的水平裂缝;新型叠合梁的倾斜叠合面上预埋抗剪连接件后能进一步提高试件的整体受力性能;新型叠合梁的抗剪承载力比传统矩形叠合梁提高了约12%,与现浇对比梁相当;新型叠合梁的位移延性系数较现浇对比梁的低9%~13%,比传统矩形叠合梁的高8%~13%;所提出的新型叠合梁与现浇对比梁的整体性能较为接近,可满足工程设计要求。

**关键词:**叠合梁;抗剪承载力;位移延性系数;抗剪连接件

**中图分类号:**TU378.2 **文献标志码:**A

## Experiment on Shearing Performances of New Type of Composite Beams' Ends

WU Fang-bo<sup>1</sup>, LIU Biao<sup>1</sup>, DENG Li-bin<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, QIU Qi-yuan<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Hunan Gaoling Construction Group Stock Limited Company, Changsha 410153, Hunan, China; 3. Shenzhen Branch of Arup Engineering Consulting (Shanghai) Co., Ltd., Shenzhen 518048, Guangdong, China)

**Abstract:** Full-scale model test under monotonic load was conducted on a new type of composite beam, a traditional composite beam and a cast-in-place contrast beam to investigate the failure pattern and the overall mechanical behavior of the composite beam's ends, the diagonal shear capacity and displacement ductility of the specimens, etc. The results indicate that both of the composite beam and the cast-in-place contrast beam are failed by shear. The crack features and failure modes of the new type of composite beams are similar to the cast-in-place contrast beam throughout the testing process, no horizontal cracks appear along the combined interface. The overall mechanical behavior of the new type of composite beams can be further increased after putting the pre-embedded shear connector inside the inclined lamination. The diagonal shear capacity of the new style composite beams is about 12% higher than that of the traditional rectangle composite beams, as same as the cast-in-place beam. the displacement ductility of the composite beams is about 9%-13% lower than that of the cast-in-place contrast beam, and 8%-13% higher than that of the traditional rectangle composite beams. In general, the overall behaviors of the new types of composite beams are similar to those of the cast-in-place contrast

收稿日期:2014-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51278179);长沙市科技计划重点项目(K1205229-11)

作者简介:吴方伯(1954-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wfbprof@163.com。

beam, and can meet the engineering design requirement.

**Key words:** composite beam; shear capacity; displacement ductility coefficient; shear connector

# 0 引 言

混凝土叠合梁是在预制梁上后浇混凝土而形成的一种装配整体式混凝土梁,它具有整体性好、施工速度快、综合经济效益显著等优点,近年来在工业与民用建筑、水利水电工程、道桥及港口工程等领域的应用日益广泛。

自 20 世纪 50 年代以来,各国学者都对叠合梁的抗弯强度、斜截面抗剪性能及叠合面抗剪强度进行了大量的研究。结果表明:一次受力叠合梁的正截面受力性能与现浇梁的接近,二次受力叠合梁的变形和裂缝宽度有较明显的增加,但是正截面抗弯承载力受到的影响较小,可按现浇梁的公式计算<sup>[1]</sup>;二次受力叠合梁具有剪应力超前现象,提高了叠合梁的抗剪承载力,且箍筋对抗剪的贡献值大于规范中的计算数值<sup>[2]</sup>;叠合面抗剪强度主要与叠合面粗糙程度、配箍率、混凝土强度等级以及剪跨比等因素有关,其中叠合面粗糙程度和配箍率的影响最为明显<sup>[3-6]</sup>。总体而言,迄今各国对钢筋混凝土叠合梁进行了较多的研究,但是仍存在以下问题:已有的研究成果大部分都是针对矩形截面预制构件叠合梁,对 U 形截面预制构件叠合梁的研究很少;对于 U 形截面预制构件叠合梁的斜截面抗剪性能和剪应力较大的梁端整体受力性能研究很少等。因此,本文中笔者先提出了改进后的新型钢筋混凝土叠合梁(以下简称新型叠合梁),并且开展了 3 种钢筋混凝土叠合梁和现浇对比梁在单调荷载作用下的梁端抗剪试验,对叠合梁的破坏形态、整体协同受力性能、斜截面抗剪承载力及位移延性等进行了较系统的研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本文中笔者在结合 U 形槽预制构件和矩形预制构件优点的基础上,提出了改进后的新型叠合梁(图 1),其主要特点在于:该叠合梁的预制构件由 2 个部分构成,预制构件中部为矩形实心或预埋芯模形成空心结构,强度、刚度较大,吊装施工过程中不易破损,施工时只需要在预制梁下部支设少量支撑或不设支撑,提高了施工速度;预制梁端部开有 U 形槽,为改善连接效果,槽内设垂直、前倾式或后仰式倾斜面,且可在倾斜面上预埋抗剪构造钢筋,以保

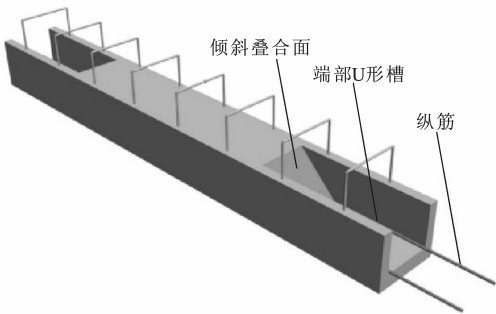


图 1 新型叠合梁

Fig. 1 New Type of Composite Beam

证梁柱节点处整体有效连接。

试验设计了 2 个由端部开 U 形槽预制构件叠合而成的梁式试件(以下简称新型叠合试件 DH-U1,DH-U2)、1 个由端部不开槽的矩形截面预制构件叠合而成的梁式试件(以下简称传统矩形叠合试件 DH-T)及 1 个现浇梁式对比试件(以下简称现浇试件 ZJ)。叠合梁为二次浇筑一次受力的简支试件,预制构件及叠合层混凝土强度等级均为 C30;现浇梁为一次浇筑简支试件,混凝土强度等级 C30。浇筑预制梁时留置第 1 批混凝土试块;浇筑叠合层、柱头及现浇梁时留置第 2 批混凝土试块,试块均为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体。预制构件及叠合梁纵向受力钢筋为 HRB400 级,箍筋选用 HPB300 级,配箍率为 0.27%。现浇梁与叠合梁配筋相同,所有试件长度均为 1.55 m,计算跨度为 1.35 m,箍筋保护层厚度为 15 mm,纵筋保护层厚度为 35 mm,叠合面采用自然粗糙面。试件跨中设置短柱,以模拟框架梁柱节点处梁端受力情况。试验试件设计见图 2,预制构件和现浇混凝土的实测力学性能见表 1,钢筋力学性能实测结果见表 2。

### 1.2 加载方案与测量方案

试验在湖南大学建筑结构实验室进行,试验加载装置及测点布置见图 3,其中,G1~G8,S1~S7 均为钢筋应变测点,M1,M2 均为锚固钢筋应变测点,N1,N2 均为混凝土内埋式应变计。为模拟实际受力情况,采用如图 3(a)所示的加载方案,将试件旋转 180°进行跨中集中加载。在试件的短柱上放置螺旋千斤顶和力传感器,试验采用集中加载方式,剪跨比为 1.83,具体加载步骤按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[7]</sup>中的加载程序执行。力传感器连接静态电阻应变仪,整个装置通

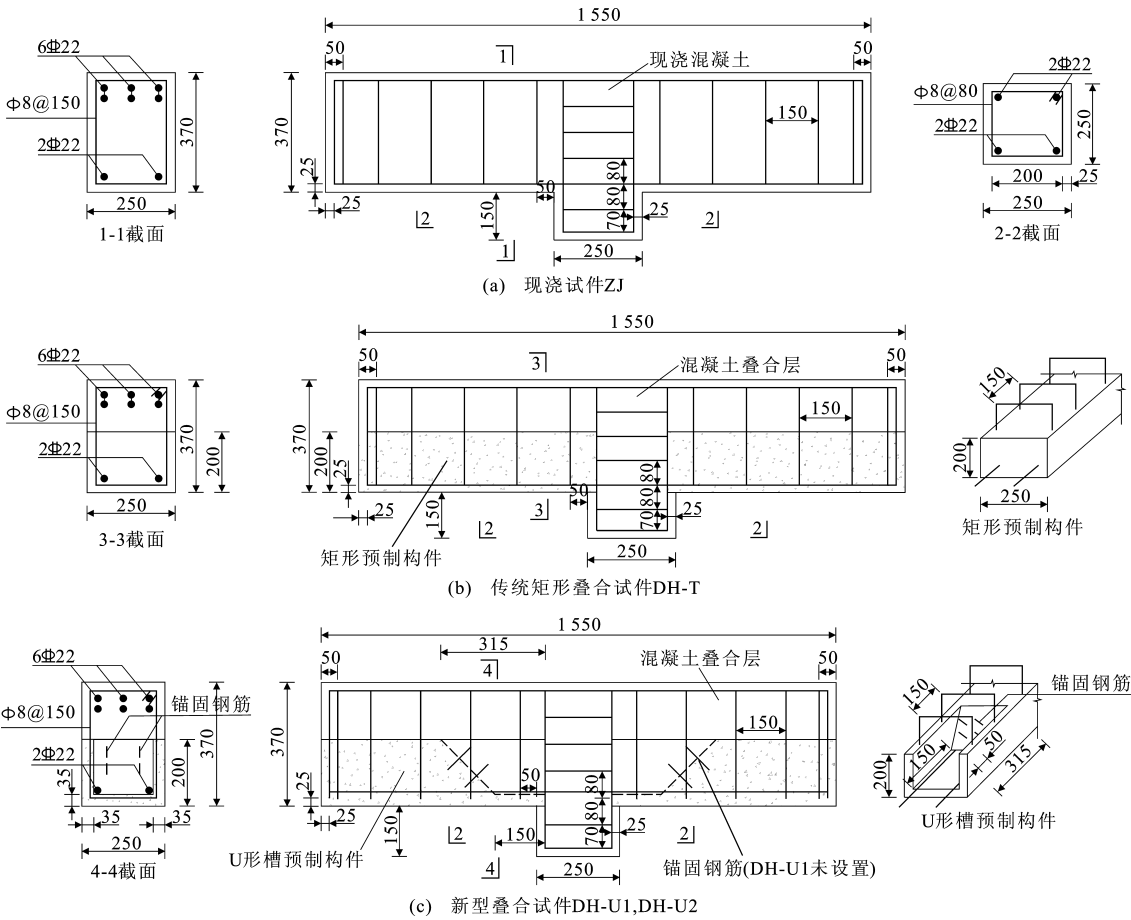


图 2 试件设计(单位:mm)

Fig. 2 Design Details of Specimens (Unit:mm)

表 1 混凝土立方体试块抗压强度实测结果

Tab. 1 Measured Strength Results of Compressive of Concrete Cubes

试块类型	抗压峰值荷载/kN	$f_{cu}$ /MPa	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa
预制构件混凝土	770.87	34.26	30.15	2.18
叠合层混凝土	699.98	31.11	27.38	2.05

注: $f_{cu}$ 为立方体抗压强度; $f_c$ 为棱柱体抗压强度; $f_t$ 为劈裂强度。

表 2 钢筋力学性能实测结果

Tab. 2 Measured Results of Mechanical Properties of Steels

钢筋直径/mm	钢筋强度等级	屈服荷载/kN	屈服强度/MPa	峰值荷载/kN	极限强度/MPa
8	HPB300	15.2	302.19	241	479.13
22	HRB400	175.6	462.11	226	594.74

过锚固在刚性地面上的反力门架施加力,通过静态电阻应变仪来控制加载值。

试件两侧刷白,一侧绘制 50 mm×50 mm 的网格,便于在试验时观测并追踪裂缝的出现和开展。用放大镜观测试件开裂情况并记录试件实际开裂荷载  $P_{cr}$ ,开裂后用裂缝测宽仪重点测量箍筋与斜裂缝交接处的斜裂缝宽度,并绘制裂缝分布图。在试件

DH-U1,DH-U2 短柱两侧凹槽内的倾斜叠合面上各预埋 1 个内埋式应变计,用于测量在叠合面位置的混凝土内部应力、应变,了解叠合面上新老混凝土的受力状态,内埋式应变计和钢筋及混凝土的应变测点布置如图 3(b)所示;试验试件的现场加载如图 4 所示。

2 试验结果与分析

2.1 裂缝特征与破坏形态

在单调荷载作用下,试件 DH-U1,DH-U2,ZJ 的破坏均表现出典型的剪切破坏特点,裂缝特征和破坏形态相差不大。加载过程中,第 1 条弯剪型斜裂缝通常首先出现在短柱侧梁的侧面弯剪区底部,随着荷载的增加,多条斜裂缝出现,均位于弯剪区中间偏下位置,弯剪区弯曲正裂缝也持续发展,有些垂直正裂缝斜向逐渐发展成为弯剪斜裂缝。随着荷载继续增加,斜裂缝穿越叠合层向加载点发展,并逐渐形成一条临界斜裂缝。加载后期,新增裂缝数量较少,只是斜裂缝宽度的发展,直至箍筋与斜裂缝交接

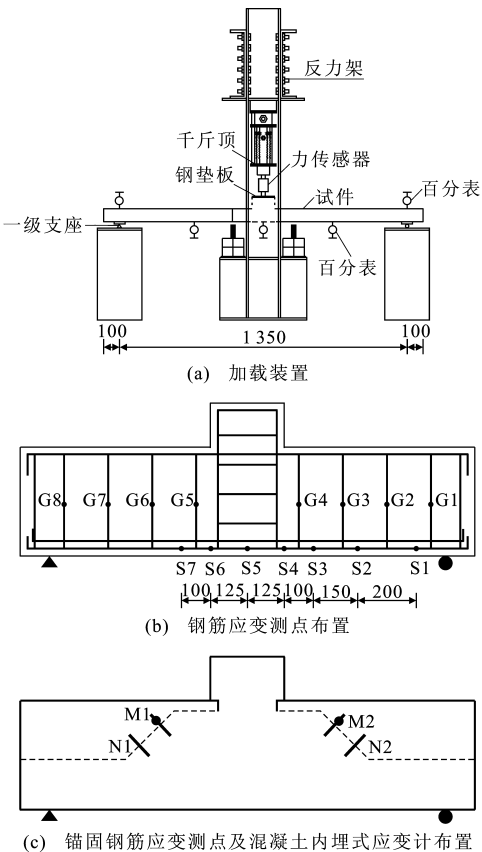


图 3 加载装置及测点布置(单位:mm)

Fig. 3 Loading Equipment and Arrangements of Measuring Points (Unit:mm)



图 4 试件现场加载

Fig. 4 Field Loading of Specimen

处的斜裂缝宽度超过 1.5 mm 而达到承载能力的极限状态。尝试继续加载,斜裂缝贯通严重,剪压破坏特征已非常明显,试件加载点两侧顶部混凝土被压碎而终止加载。试件的裂缝示意和最终破坏形态分别如图 5 和图 6 所示,其中, $P$  为荷载。

试件 DH-T 裂缝特征有一些特殊。加载过程中第 1 条斜裂缝同样出现在剪跨段梁底部,并斜向朝加载点发展。区别于其他试件,试件 DH-T 初始斜裂缝倾角较小,裂缝到达叠合层后,沿叠合面出现

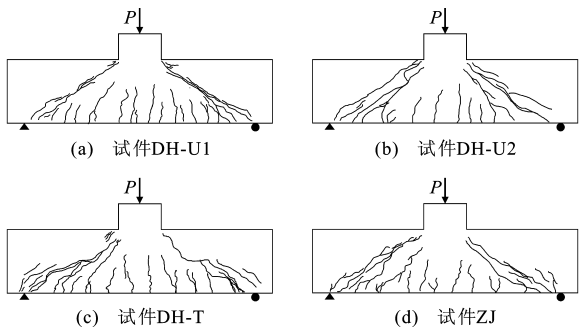


图 5 试件裂缝示意

Fig. 5 Crack Sketches of Specimens

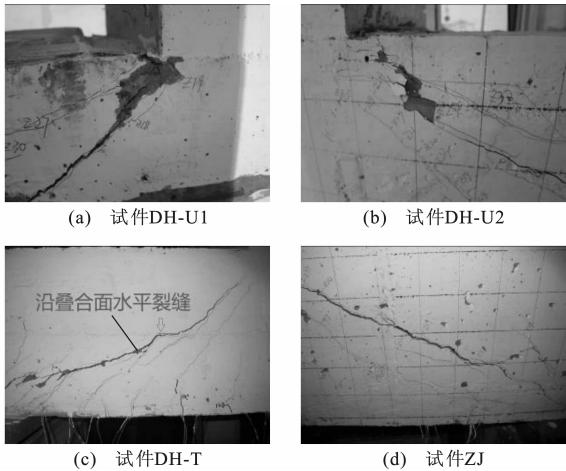


图 6 试件最终破坏形态

约 4 cm 的水平裂缝[图 6(c)],再继续朝加载点发展。箍筋与斜裂缝交接处的斜裂缝宽度超过 1.5 mm 而达到承载能力的极限状态,继续加载到由于加载点附近受压区混凝土被压碎而终止。

2.2 荷载-跨中挠度曲线

试件在单调荷载作用下的荷载-跨中挠度曲线见图 7,其主要包括开裂、屈服、峰值 3 个特征点。

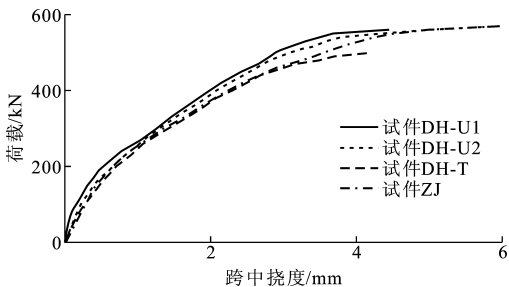


图 7 试件荷载-跨中挠度曲线

Fig. 7 Load Mid-span Deflection Curves of Specimens

由图 7 可见:

(1)开裂前,试件的跨中挠度很小,荷载-跨中挠度曲线近似呈线性关系。

(2)加载至开裂荷载时,4 条曲线均出现第 1 个拐点,试件的刚度有所下降。屈服前,4 个试件的荷载-跨中挠度曲线很接近。

(3)进入屈服阶段后,试件的刚度明显下降,其中试件 DH-U1,DH-U2 的刚度略大于试件 DH-T 及试件 ZJ 的。

(4)矩形叠合梁式试件的峰值荷载均低于其他试件,而试件 DH-U1,DH-U2,ZJ 的峰值荷载十分接近;从对应的挠度来看,现浇试件 ZJ 的峰值挠度要比新型叠合试件 DH-U1,DH-U2 的大,传统矩形叠合试件 DH-T 的峰值挠度最小。

2.3 荷载特征值与位移延性

表 3 为试件在开裂、屈服、峰值时的荷载特征值与位移延性,采用能量法确定初始屈服点位置<sup>[8]</sup>,经计算初始屈服点对应的荷载在 $(0.7\sim0.8)P_{\max}$ ,为了计算方便,本文中统一取荷载-跨中挠度曲线上上升段 $0.75P_{\max}$ 对应的点为初始屈服点。由于未得到荷载-跨中挠度曲线的下降段,取峰值挠度与屈服挠度的比值作为试件的位移延性系数 $\mu$ 。

表 3 试件的荷载特征值与位移延性

Tab. 3 Characteristic Loads and Displacement Ductilities for Specimens				
特征值	DH-U1	DH-U2	DH-T	ZJ
开裂荷载 $P_{cr}/kN$	121.40	101.40	81.40	91.40
开裂挠度 $\Delta_{cr}/mm$	0.23	0.23	0.19	0.25
屈服荷载 $P_y/kN$	421.05	421.05	376.05	428.55
屈服挠度 $\Delta_y/mm$	2.03	2.19	2.07	2.33
峰值荷载 $P_{\max}$	561.40	561.40	501.40	571.40
峰值挠度 $\Delta_{\max}/mm$	4.44	5.01	4.21	5.86
极限荷载 $P_u$	506.40	516.40	461.40	511.40
极限挠度 $\Delta_u$	3.21	3.39	2.99	3.71
$P_y P_{cr}^{-1}$	3.47	4.15	4.62	4.69
$P_u P_y^{-1}$	1.20	1.23	1.23	1.19
$\mu$	2.19	2.29	2.03	2.52
$\Delta_{\max} L^{-1}/10^{-3}$	3.29	3.71	3.12	4.41

注:L 为试件的计算跨度; $\mu=\Delta_{\max}\Delta_y^{-1}$ 。

从表 3 可以看出:

(1)由试件 DH-U1,DH-U2,DH-T,ZJ 的屈服荷载  $P_y$  与开裂荷载  $P_{cr}$  的比值可知,叠合梁的开裂迟于相应的现浇试件 ZJ,这可能与预制构件的混凝土实际抗压强度大于现浇层强度有关。

(2)新型叠合试件 DH-U1,DH-U2 与现浇试件的斜截面抗剪极限承载力相差很小,比传统矩形叠合梁提高了约 12%。传统矩形叠合试件 DH-T 在剪应力较大的梁腹叠合面部位出现的水平裂缝明显

降低了其极限抗剪承载力。

(3)新型叠合试件 DH-U1 的位移延性系数比试件 DH-U2 的低 4%,说明试件 DH-U2 端部 U 形槽内倾斜叠合面上预埋的抗剪连接件对试件延性有一定的提高作用;试件 DH-U1,DH-U2 的位移延性系数与现浇试件 ZJ 的分别相差 13%和 9%,比传统矩形叠合梁的高 8%~13%,表明叠合试件的延性普遍低于现浇试件,但是新型叠合试件的延性比传统矩形叠合试件的延性更好。

(4)由于试验设计为斜截面破坏,故所有试件的极限跨挠比  $\Delta_u/L$  均较小;现浇试件的变形能力较新型叠合试件的约提高 19%,而比传统矩形叠合试件的要提高 40%左右。

2.4 整体工作性能

混凝土叠合结构应用中的关键问题是如何保证预制构件与现浇混凝土共同工作。在新型叠合试件 DH-U1,DH-U2 左右 2 个端部 U 形槽内的倾斜叠合面上各布置 1 个内埋式混凝土应变计,用于研究叠合面位置两侧的预制构件和叠合层混凝土的荷载-应变关系,测试叠合面上新老混凝土的受力状态,了解叠合试件的整体工作性能。根据试验数据,绘制出端部 U 形槽内倾斜叠合面处新老混凝土荷载-应变关系曲线(图 8)及试件 DH-U2 倾斜叠合面内抗剪连接件荷载-应变关系曲线(图 9)。

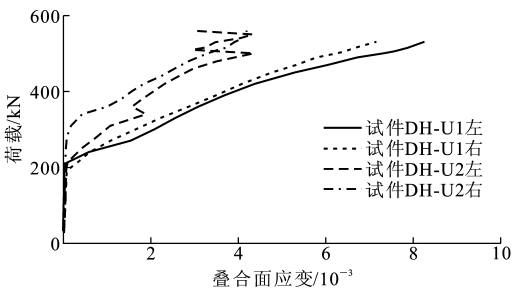


图 8 端部 U 形槽内倾斜叠合面处新老混凝土的荷载-应变关系

Fig. 8 Load-strain Curves Between New and Old Concretes of Inclined Lamination in Ends' U-lag

由图 8,9 可以看出:

(1)预留在预制构件内的抗剪锚固筋都发挥了作用且已屈服,倾斜叠合面处的新老混凝土发生了相对变形,且左右 U 形槽内的倾斜叠合面上混凝土应变变化趋势基本同步,加载到极限荷载的 38% (试件 DH-U2 为极限荷载的 35%) 附近时,应变发生较大突变,试验观测到此阶段恰好是斜裂缝延伸至叠合面附近,叠合面附近混凝土受到拉应力的作用,拉应变增加非常明显。此后应变随荷载的发展

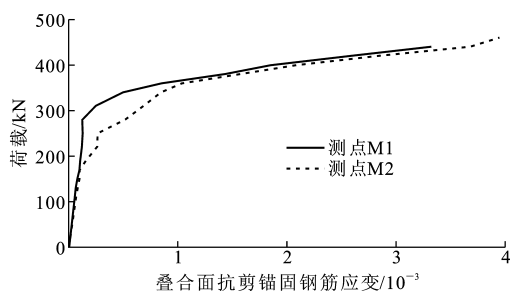


图9 试件 DH-U2 倾斜叠合面内抗剪连接件的  
荷载-应变关系

Fig. 9 Load-strain Curves of Shear Connectors in  
Inclined Lamination of Specimen DH-U2

相对稳定,新老混凝土的相对变形表现为线性发展的趋势,当达到抗剪极限承载力时,倾斜叠合面上新老混凝土相对变形依旧稳定。

(2)在同一荷载水平时,倾斜叠合面上配有抗剪锚固连接件 DH-U2 的混凝土应变明显小于未设置叠合面抗剪连接件 DH-U1 的混凝土应变,表明叠合面新老混凝土的相对变形得到了较为有效的抑制;试件 DH-U1 的混凝土最大应变明显大于试件 DH-U2,测得的最大应变约为图 9 中试件 DH-U2 的抗剪钢筋应变与图 8 中试件 DH-U2 的内埋应变计的最终应变之和。上述试验结果均表明,抗剪连接件在抑制叠合面滑移或相对变形方面发挥了较为重要的作用,有利于在剪应力较大的梁端位置的新老混凝土协同受力,提高梁端的整体工作性能。

### 3 结 语

(1)在剪力流较大的梁端抗剪性能试验中,本文中提出的新型叠合梁与现浇梁表现出相同的受力性能,并且未出现沿叠合面滑移的现象,两者的抗剪承载力比沿叠合面局部滑移开裂的传统矩形叠合梁高约 12%。

(2)在受力全过程中,2 个新型叠合梁的裂缝特征、破坏形态、峰值荷载、斜截面抗剪承载力等都与现浇对比梁相差不大,其整体受力性能优于传统矩形叠合梁。

(3)新型叠合试件 DH-U2 设置的抗剪连接件对斜截面抗剪承载力和叠合试件的位移延性都有一定的提高作用,对位移延性的提高作用更为明显。

(4)本文中研究的新型叠合试件与现浇对比试

件总体性能较为接近,均可满足工程设计要求。2 种叠合梁的综合受力性能指标基本一致,考虑到在端部 U 形槽内设置抗剪连接件后性能更为可靠,工程中可优先采用设置抗剪连接件的新型叠合试件。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 李树瑶,赵顺波,王运霞. 钢筋混凝土迭合梁受力试验研究[J]. 水利发电学报,1994(3):37-47.  
LI Shu-yao, ZHAO Shun-bo, WANG Yun-xia. Experimental Research on the Mechanical Properties of Reinforced Concrete Composite Beam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1994(3):37-47.
- [2] 洪炳钦,杨俊杰,杨 迺,等. 叠合梁斜截面抗剪性能的试验研究[J]. 浙江工业大学学报,2007,35(4):464-468.  
HONG Bing-qin, YANG Jun-jie, YANG Qiu, et al. Experimental Research on the Shearing Resistance Strength of Oblique Section of Composite Beam[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(4):464-468.
- [3] SAEMANN J C, WASHA G W. Horizontal Shear Connections Between Precast Beams and Cast-in-place Slabs[J]. ACI Journal, 1964, 61(11):1383-1408.
- [4] 谢 汉,汪声瑞. 二次受力钢筋混凝土迭合梁迭合面抗剪强度试验研究[J]. 武汉工业大学学报,1988(4):477-486.  
XIE Han, WANG Sheng-rui. The Research on the Interface Shear Resistance of Reinforced Concrete Composite Beam in Two-stage Loading[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1988(4):477-486.
- [5] GOHNERT M. Horizontal Shear Transfer Across a Roughened Surface[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(3):379-385.
- [6] LAWRENCE F K, ADAM S. Interface Shear in High Strength Composite T-beams[J]. PCI Journal, 2004, 49(4):102-110.
- [7] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].  
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [8] 过镇海,孙 礼. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社,1999.  
GUO Zhen-hai, SUN Li. Reinforced Concrete Theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.