第 29 卷 第 9 期	l	中	玉	公	路	学	报
2016 年 9 月	China	Iour	nal o	f Hic	nwav	and	Tran

China Journal of Highway and Transport

Vol. 29 No. 9 Sept. 2016

文章编号:1001-7372(2016)09-0045-08

钢-GFRP-混凝土组合梁受弯性能试验

王文 h^1 ,黄 μ^1 ,戴建国²,郑宇宙¹

(1. 东南大学 交诵学院, 江苏 南京 210096: 2. 香港理工大学 十木与环境工程系, 香港 999077)

摘要:为研究钢与 GFRP-混凝土空心组合板通过不同连接方式形成组合梁的受弯性能,对 3 根组 合梁试件进行了静载试验研究。3个试件中钢梁与 GFRP-混凝土组合板间的连接方式分别为环氧 树脂胶结及栓钉连接。通过比较不同连接方式下组合梁截面应变、跨中挠度、界面相对滑移的变化 规律,验证了环氧树脂胶层及抗剪栓钉分别作为组合梁界面连接件的可行性。基于不同连接方式 下组合梁的破坏模式,给出了栓钉连接方式下组合梁抗弯承载力的简化计算方法。研究结果表明: 环氧树脂胶结组合梁的破坏模式为剪弯段 GFRP 板沿纵向剪切破坏,栓钉连接组合梁的破坏模式 为典型的弯曲破坏;栓钉连接件较环氧树脂胶层表现出更高的界面剪切刚度;栓钉连接组合梁的抗 弯承载力约为环氧树脂胶结组合梁承载力的2倍。

关键词:桥梁工程;组合梁;试验研究;受弯性能;连接方式;抗弯承载力

中图分类号:U443.321 文献标志码:A

Experiment on Flexural Behavior of Steel-GFRP-concrete Composite Beams

WANG Wen-wei¹, HUANG Hui¹, DAI Jian-guo², ZHENG Yu-zhou¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In order to investigate the flexural behaviors of beams composed of steel girders and GFRP-concrete composite hollow slabs, three composite beams formed with different connection methods were tested under static load. The connection methods between the steel girders and the GFRP-concrete composite slabs were based on epoxy resin adhesive and shear studs for 3 specimens, respectively. The feasibilities of the aforementioned connection methods for interfacial connectors of the composite beams were verified by the comparison of change laws of sectional strain, mid-span deflections and interfacial slips of different specimens. Based on the failure modes for the tested specimens with different connection methods, a simplified calculation method was proposed to analyze the flexural capacity of the composite beams connected by shear studs. The results show that the composite beam connected by epoxy resin adhesive fails in shear fracture of GFRP plate along the length of the beam. While the composite beams connected by shear studs fail with the typical bending failure mode. The shear stud connectors exhibit higher interfacial shear stiffness than epoxy resin adhesive layer. The ultimate load-carrying capacity of the beam connected by shear studs is about twice of that of the beam connected by epoxy resin adhesive.

Key words: bridge engineering; composite beam; experimental research; flexural behavior; connection method; flexural capacity

收稿日期:2015-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51278441,51578135);中央高校基本科研业务费专项资金项目(KYLX15_0142)

作者简介:王文炜(1971-),男,河南洛阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wangwenwei@seu.edu.cn。

0 引 言

桥梁在长期使用过程中,混凝土桥面板会出现 不同程度的病害,如钢筋锈蚀、混凝土碳化、保护层 剥落等。对于出现问题的桥面板,如果能够采用轻 质、高强、耐久性好的 FRP 作为替换或者修补材料, 对于桥面板的快速建造、维修,提升桥面板的耐久性 能将起到至关重要的作用。FRP-混凝土组合桥面 板是一种新型结构形式,由 FRP 型材、混凝土及相 应的横向及纵向钢筋组成¹¹。在浇筑混凝土时, FRP 型材放在组合板下部起到模板的作用,大大减 少了模板支撑及拆除的繁琐工序。在后期运营期 间,FRP 可以发挥抗拉性能好的优点,参与组合板 受力。此外,FRP 耐腐蚀性的特点还可节省大量的 后期维护费用。FRP-混凝土组合桥面板可以单独 作为中、小跨径桥梁的上部结构使用;也可通过铺设 在并行放置的钢主梁间,形成钢-FRP-混凝土组合 结构用于跨径较大的桥梁。

目前,国内外相关学者对 FRP-混凝土组合结构 开展了相关试验与理论方面的研究工作。一些研究 者开展了不同截面形式的 FRP 板与混凝土形成的 组合构件静力试验^[2-11]、疲劳试验^[12-13]及 FRP-混凝 土界面黏结试验^[14-15]。研究结果表明,FRP-混凝土 组合构件具有较高的抗弯、抗压承载力及较好的抗 疲劳性能;混凝土浇筑时机、混凝土龄期及界面处理 方式对 FRP-混凝土界面剥离承载力影响较大。在 理论研究方面,对 FRP-混凝土组合构件的承载力、 疲劳寿命及界面剥离承载力进行了分析^[7-8,14-17],给 出了 FRP-混凝土组合构件的设计计算方法、界面黏 结一滑移本构关系及界面剥离承载力计算公式。

上述研究成果主要涉及 FRP/FRP-混凝土板、 柱式构件受力性能的研究,对于 FRP-混凝土空心组 合板与钢梁形成的钢-FRP-混凝土组合梁的研究尚 不多见。通过采用合理的连接方式,确保钢梁与 FRP-混凝土空心组合板的协同受力是该组合板推 广应用的重要前提。因此,本文开展了不同连接方 式下的钢-GFRP-混凝土组合梁受弯性能试验研究, 探讨了组合梁的受力性能和破坏特征,给出了组合 梁的正截面抗弯承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 试验梁简介

试验共设计了 3 根 T 形截面组合梁,钢梁与上 部 GFRP-混凝土组合板间采用了不同的连接方式。 组合梁 JZ-1 的连接方式为环氧树脂胶黏结[图 1 (b)];组合梁 DS-2 和 LS-3 的连接方式为栓钉连 接,不同之处在于梁 DS-2 是将分开的 2 块 GFRP 板使用 2 列栓钉与钢梁连接,而梁 LS-3 是将 1 块 GFRP 板通过 1 列栓钉与钢梁连接,如图 1(c)和图 1(d)所示。所有试件具有相同的几何尺寸,梁总长 3.0 m,净跨径 2.8 m;钢梁为 H 形截面,高 150 mm,L、下翼缘板宽度均为 150 mm,厚度为 10 mm,腹板厚度为 7 mm;GFRP-混凝土组合板宽 600 mm,厚 130 mm。FRP 板上部现浇的混凝土内沿横 向及纵向等间距布置直径为 6 mm 的 HRB335 级带 肋钢筋,相邻中心间距为 100 mm。试验梁的相关 尺寸及构造细节如图 1 所示。



1.2 试验材料

试验所用混凝土的设计强度等级为 C30,水泥、 水、砂、石的质量比为 1:0.39:1.33:2.43。其中,水 泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥;细骨料为天然河砂; 碎石最大粒径为 25 mm,连续级配。试验中采用的 GFRP型材由南京建辉复合材料有限公司生产,截 面形状及尺寸经优化设计为带 L 肋的矩形空箱,壁

厚为 $5 \sim 8 \text{ mm}$,如图 2 所 示。GFRP 型材的基体 为聚乙烯树脂,铺层增强 材料为无碱玻璃纤维丝 束(E-Glass)和预定向增 强布,含胶量在 $40\% \sim$ 50%之间。试验中采用 的黏结剂是瑞士西卡公 司生产的 Sikadur-330 双 组分环氧树脂胶,使用时 按 A,B 组分质量比为4:1 配制。栓钉连接件直径



图 2 GFRP 型材尺 寸(单位:mm) Fig. 2 Dimensions of GFRP

Profile (Unit: mm)

分别为 16,19 mm,长度均为 90 mm,相邻栓钉纵向 间距为 100 mm。所有材料的力学性能指标实测值 如表 1 所示。

表1 材料属性

计判勾称	抗压强	抗拉强	屈服强	剪切强	弹性模	
的科白柳	度 /MPa	度 /MPa	度 /MPa	度 /MPa	量/GPa	
混凝土	31.6				30.00	
栓钉(直径 16 mm)				175.00		
栓钉(直径 19 mm)				175.00		
型钢	235.0		235		200.00	
钢筋(直径 6 mm)		455.0	335		210.00	
GFRP 型材		210.0		16.10	30.00	
环氧树脂胶		18.3		10.07	3.81	

Tab. 1 Material Properties

1.3 试件的制作

试验梁 JZ-1 的制作过程为:①制作 GFRP 底模 板[图 3(a)]。在 GFRP 型材 L 肋的预设位置处钻 孔并将直径为 6 mm 的钢筋穿过孔洞纵向拼接成长 度为 2 800 mm、宽度为 600 mm 的 GFRP 底模板。 此外,在相邻 GFRP 型材侧壁之间涂抹厚度均匀的 环氧树脂胶以增强底模板的整体性。②连接 GFRP 板与钢梁。沿着钢梁上翼缘板的纵向每隔 200 mm 焊接尺寸为 6 mm×6 mm 的方钢条,形成尺寸为 200 mm×138 mm×6 mm 的凹槽。将环氧树脂胶









(c) 浇筑上层混凝土

(d) 栓接试验梁的组装

图 3 试件制作

Fig. 3 Fabrications of Specimens

倒入凹槽中抹平,形成厚度为 6 mm 的黏结层[图 3(b)]。然后将 GFRP 板的下表面与钢梁上翼缘黏 结在一起养护 7 d。③浇筑混凝土[图 3(c)]。胶层 养护完毕后,绑扎 GFRP-混凝土组合板内的钢筋, 支立侧模,完成上部混凝土的浇筑。

试验梁 DS-2 与 LS-3 的制作过程为:①沿钢梁 上翼缘纵向等间距焊接栓钉连接件;②在 GFRP 板 预设位置处钻取直径为 40 mm 的孔洞,其位置与栓 钉对应;③将 GFRP 板穿过栓钉放置在钢梁上,如 图 3(d)所示;④通过栓钉与孔洞之间的间隙,在栓 钉周围浇筑细骨料自密实混凝土,然后浇筑上部混 凝土层形成组合梁。

1.4 加载与测量装置

静载试验在实验室 500 kN 反力架下进行,采 用跨中两点对称加载,分配梁加载点与支座的距离 为 1 200 mm,跨中纯弯段长度为 400 mm。静载试 验前先对试件进行预加载,预加荷载 15 kN,持载 15 min,以消除支座及加载点处的间隙,并检查测点及 仪表是否正常工作。正式加载过程中,以荷载等级 为 10 kN • min⁻¹的速率进行加载。当混凝土出现 裂缝后,降低加载速率,直至试件破坏。当荷载值达 到预定的荷载等级且稳定后,依次记录相应测点的 挠度和应变值,并观测裂缝开展变化情况。

在试验梁的跨中、L/4、3L/4 及支座截面处布 置百分表以量测相应位置的挠度变化情况;在组合 梁的右侧支座位置处布置水平放置的千分表以测量 GFRP-混凝土组合板与钢梁翼缘上表面间的相对滑 移。在试验梁跨中截面混凝土板顶面沿横向等间距 布置 5 片电阻应变片,相邻间距为 120 mm,用来量 测混凝土应变分布情况。在跨中截面位置处,分别 在 GFRP 板、钢梁的外表面粘贴电阻应变片以量测 沿梁高的应变分布情况。各测点的应变值均通过 TDS-300 应变采集仪读取。测点的具体布置情况 如图 4 所示。







2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

环氧树脂胶结组合梁 JZ-1 的破坏模式为剪弯 段 GFRP 板沿着纵向剪切破坏,如图 5(a)所示。栓 接组合梁 DS-2 和 LS-3 的破坏模式为底部钢梁截 面大面积受拉屈服后顶部混凝土受压破坏,如图 5(b)和 5(c)所示。试验测得的各试件钢梁下翼缘 受拉屈服、跨中混凝土受压开裂及最终破坏时的荷 载及相应的跨中挠度值如表 2 所示。随着荷载的不 断变化,各试件在试验过程中表现出了不同的结构 响应。



Fig. 5 Failure Modes of Test Beams

表 2 试验与分析结果

Tab. 2 Experimental and Analytical Results

试件	$P_{\rm cr,t}/$	$P_{\rm y,t}/$	$\delta_{\mathrm{y,t}}/$	$P_{\rm u,t}/$	$M_{ m u,t}/$	$\delta_{\mathrm{u,t}}/$	$M_{ m u,p}/$	$M_{\rm u,p}$	$\delta_{\mathrm{u,t}}$
编号	kN	kN	mm	kN	(kN • m)	mm	(kN • m)	$\overline{M_{\mathrm{u,t}}}$	$\delta_{y,t}$
JZ-1		140	15	175	105.0	52			3.67
DS-2	340	280	11	380	228.0	28	198.9	0.87	2.55
LS-3	310	260	14	367	220.2	39	198.9	0.90	2.79

注: $P_{cr,t}$ 为跨中混凝土的受压开裂荷载; $P_{y,t} 与 \delta_{y,t}$ 分别为型钢 底部受拉屈服时的荷载及跨中挠度值; $P_{u,t} = \delta_{u,t}$ 分别为组 合梁破坏时的荷载及跨中挠度值; $M_{u,p} = M_{u,t}$ 分别为极限 弯矩的预测值与实测值; $\delta_{u,t}/\delta_{y,t}$ 为组合结构的延性系数。

加载至 70 kN 时,试验梁 JZ-1 中钢梁与 GF-PR-混凝土组合板间的环氧树脂胶层发出轻微的劈 裂声。加载至 140 kN 时,试件发出连续的劈裂声 响,纯弯段钢梁下翼缘开始屈服,组合梁出现明显的 卸载现象。荷载增加至 150 kN 时,靠近支座附近 的 GFRP 箱室发生了明显的剪切变形,截面形状变 成平行四边形,箱室底板与腹板交角处出现开裂现 象,期间一直伴随着黏结层发出的劈裂声。加载至 175 kN 时,剪弯段的 GFRP 箱室均表现出不同程度 的剪切破坏,钢梁腹板大部分已受拉屈服,GFRP 箱 室的交角处发生断裂,跨中挠度持续增长,标志着结 构已经破坏。试验梁 JZ-1 剪弯段 GFRP 板纵向剪 切破坏的原因在于:荷载引起的剪应力达到 GFRP 材料的抗剪强度时,导致 GFRP 板发生剪切破坏, 引起界面组合效应的丧失。

加载至 170 kN 时,采用栓钉连接的试验梁 DS-2 发出轻微的劈裂声。加载至 250 kN 时,组合梁纯 弯段钢梁下翼缘开始受拉屈服。荷载增加至 280 kN 时,组合梁发出一声脆响,后经验证为 1 根焊接 质量较差的栓钉提前失效所致。持续加载至 340 kN 时,栓钉位置处混凝土表面出现纵向劈裂裂缝, 同时出现横向裂缝。加载至 370 kN 时,纵向劈裂 裂缝及横向裂缝进一步发展,跨中位置处混凝土出 现压碎的迹象。继续加载至 380 kN 时,组合梁纯 弯段混凝土压碎,跨中挠度持续增大,最终失去承载 能力。试验梁 LS-3 同样采用栓钉连接的方式,荷载 作用下的结构响应与试验梁 DS-2 大体相同,不同 之处在于 LS-3 在试验过程中没有观察到栓钉破坏 的现象。

2.2 荷载-挠度响应

图 6 为 3 个试验梁跨中截面处的荷载-挠度曲 线。从图 6 可见,组合梁的跨中荷载-挠度曲线可分 为 3 个阶段:①弹性工作阶段——从开始加载至相 应荷载-挠度曲线的第 1 个拐点处(屈服荷载处)。



Fig. 6 Load-deflection Curves

荷载-挠度曲线为线性关系,表明各材料均处于弹性 工作阶段。②弹塑性工作阶段——从屈服荷载至极 限荷载处。组合梁由弹性阶段进入弹塑性阶段后, 钢梁开始屈服,跨中截面挠度增长较弹性阶段快。 荷载-挠度曲线呈现出明显的非线性变化的特点。 ③破坏阶段。达到极限荷载后,荷载-挠度曲线开始 出现不稳定的变化趋势,跨中挠度急剧增长。

结合 3 根试验梁的破坏形态及荷载-挠度曲线 可知:组合梁 JZ-1 的破坏始于剪弯段 GFRP 板的纵 向剪切破坏;随着 GFRP 板退出工作,该组合梁表 现出明显的叠合梁受力特点,其承载能力远低于通 过栓钉连接件形成的组合梁。然而,该试件的环氧 树脂胶层在试验过程中黏结良好,表明了该连接方 式的有效性。试验梁 DS-2 和 LS-3 表现为典型的 受弯构件破坏形态,混凝土和钢梁的材料强度都得 到了充分的发挥,因此它们的承载力较 JZ-1 梁高, 约为 JZ-1 梁的 2 倍。

2.3 应变分布

各试验梁跨中截面沿高度方向的应变分布规律 如图 7 所示。其中 $F_{u,t}$ 为实测极限荷载值, $F/F_{u,t}$ 为各级荷载与极限荷载的比值。从图 7(a)可以发 现:由于组合梁 JZ-1 中 GFRP 板的受剪变形,使得 底部钢梁与上部混凝土层间的组合效应减弱,导致 同一截面上出现 2 个中性轴,进一步证明随着 GFRP 板剪切破坏,该组合梁呈现出叠合梁的受力 特点。

从图 7(b)、(c)可以看出:虽然试验梁 DS-2 和 LS-3 的钢梁与 GFRP-混凝土组合板间连接方式有 所不同,但是跨中截面应变分布规律相似。由于栓 钉的纵向抗剪作用,钢梁与 GFRP-混凝土组合板整 体工作性能较好,不同材料界面间没有出现明显的 滑移应变差值。2 个试件的最终破坏形态均表现为 钢梁大面积受拉屈服后,顶部混凝土压碎;充分发挥 了混凝土材料抗压及钢梁抗拉性能好的特点。





图 8 为各级荷载作用下试验梁 DS-2 混凝土上 表面各测点应变变化规律。其他 2 个试件的混凝土 应变分布规律与 DS-2 相似,此处仅给出试验梁 DS-2 的应变分布。从图 8 可以看出:混凝土的应变沿 着横向均匀分布,没有表现出剪力滞后现象;随着荷 载的增加,应变值逐渐增大,直至最终破坏。

2.4 界面相对滑移

图 9 为钢梁翼缘上表面与 GFRP-混凝土组合 板界面间的相对滑移随着外荷载增加的变化情况。 从图 9 可见:所有试件的荷载-界面滑移曲线在组合 梁加载初期均呈现出线性增长的规律。3 个试件 中,组合梁 DS-2 具有最大的界面剪切刚度,组合梁 JZ-1 的界面剪切刚度最小,组合梁 LS-3 的界面剪 切刚度居中。随着荷载的增加,组合梁 JZ-1 在发生 GFRP 板剪切破坏后,界面滑移保持不变,最大滑移 值为 1.4 mm。组合梁 DS-2 在荷载达到 280 kN 时











Fig. 9 Load-interfacial Slip Curves

出现了界面滑移的急剧增长,主要原因在于部分栓 钉焊接质量较差,过大的界面剪力导致其剪切变形 过大所致。虽然组合梁 LS-3 的界面滑移曲线在试 验过程中出现了一定的波动,但是总体服从线性变 化规律。试件破坏时 DS-2 和 LS-3 的最大界面滑 移值分别为 1.1,1.5 mm。

上述试验结果表明,钢梁与 GFRP-混凝土组合 板界面的抗剪刚度随着连接方式的不同,表现出较 大的差异。虽然试验过程中环氧树脂胶层并没有发 生剪切破坏,但是其剪切刚度相较于栓钉连接件低, 相同荷载作用下界面滑移较大。与此同时,栓钉连 接件则表现出较高的剪切刚度和稳定性,钢梁与 GFRP-混凝土组合板界面间相对滑移较小。

3 抗弯承载力计算

试验结果表明,对于通过栓钉连接件形成的钢-GFRP-混凝土组合梁,其最终的破坏模式为底部钢 梁大部分截面受拉屈服后顶部混凝土的受压破坏。 表现为典型的钢-混组合梁的受弯破坏形态。因此 可以按照简化的塑性理论方法^[18]计算组合梁的受 弯承载力。此外,GFRP型材位于中和轴附近,起到 了类似板托的作用,因此可以忽略 GFRP 的作用,

按图 10 所示的模型进行截面抗弯承载力计算。



图 10 抗弯承载力计算

Fig. 10 Flexural Capacity Calculation

第1种情况:塑性中和轴的位置高于钢梁上翼 缘板,即 $A_s f_s \leq b_c h_c f_c$,截面抗弯承载力可按式 (1)、(2)确定,即

$$M_{\rm u} = A_{\rm s} f_{\rm s} Z \tag{1}$$

$$x = A_{\rm s} f_{\rm s} / (b_{\rm c} f_{\rm c}) \tag{2}$$

第2种情况:塑性中和轴位于钢梁截面内,即 $A_s f_s > b_c h_c f_c$,截面抗弯承载力可按式(3)、(4) 确定,即

$$M_{\rm u} = b_{\rm c} h_{\rm c} f_{\rm c} Z_1 + A_{\rm sc} f_{\rm s} Z_2 \tag{3}$$

$$A_{\rm sc} = (A_{\rm s}f_{\rm s} - b_{\rm c}f_{\rm c}h_{\rm c})/(2f_{\rm s})$$
(4)

式中: M_u 为极限弯矩值; f_s 为混凝土的抗压强度; f_s 为钢材的抗拉屈服强度; f_s 为钢材的抗压屈服强 度; A_s 为钢梁的截面面积; A_{sc} 为受压区钢梁的截面 面积; b_c 为组合梁中混凝土翼缘板的宽度; h_c 为组合 梁中混凝土翼缘板的厚度;h为组合梁高;Z为第 1 种情况下钢梁截面受拉合力作用点至混凝土受压区 应力合力作用点之间的距离;x为受压区高度; Z_1 为 第 2 种情况下钢梁受拉区合力作用点至混凝土翼缘 板合力作用点之间的距离; Z_2 为第 2 种情况下钢梁 受拉区合力作用点之间的距离; Z_2 为第 2 种情况下钢梁

将各材料的实测值代入式(1)~(4)中,可以得 到试验梁 DS-2和 LS-3的抗弯承载力计算值 $M_{u,p}$ 均为 198.9 kN•m,而相应的实测极限承载能力 $M_{u,t}$ 分别为 228,220.2 kN•m, $M_{u,p}/M_{u,t}$ 的比值分别为 0.87和 0.90,如表 2 所示。可见简化塑性计算方法 可以很好地用于计算通过栓钉连接件形成的钢-GFRP-混凝土组合梁的抗弯承载能力。

51

4 结 语

(1)使用环氧树脂胶粘结而成的钢-GFRP-混凝 土组合梁的破坏形态为剪弯段 GFRP 箱室的纵向 剪切破坏;鉴于 FRP 型材本身抗剪强度低的特点, 在组合结构设计中应避免出现 FRP 承受过大剪力 的情况。

(2)环氧树脂胶层作为组合结构的连接方式之一,在试验过程中表现出线性的剪切-滑移规律;虽然胶层本身在加载过程中没有发生剪切破坏,但是其抗剪刚度较低的特点在工程实践中应予以考虑。

(3)栓钉剪力键作为有效的界面连接方式,在试验过程中表现出较高的抗剪刚度和稳定性。其良好的受力性能确保了型钢与 GFRP-混凝土组合板良好地协同工作。

(4)本文建议的钢-GFRP-混凝土组合梁的抗弯 承载力计算方法与试验值吻合较好,误差相对较小, 可以有效地计算通过栓钉连接件形成的钢-GFRP-混凝土组合梁的抗弯承载力。

(5)本文试验结果仅可以反映静荷载下组合梁 的受力性能及破坏模式,无法反映动荷载及长期效 应对组合梁受力性能的影响,开展动荷载及长期作 用效应下的组合梁受力性能研究是今后工作的 重点。

参考文献:

References:

 [1] 王文炜. FRP 加固混凝土结构技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2007.
 WANG Wen-wei. Technology and Application of FRP

in Strengthening Concrete Structures [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.

- [2] KELLER T, GÜRTLER H. Composite Action and Adhesive Bond Between Fiber-reinforced Polymer Bridge Decks and Main Girders[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(4): 360-368.
- [3] KELLER T, CASTRO J D, SCHOLLMAYER M. Adhesively Bonded and Translucent Glass Fiber Reinforced Polymer Sandwich Girders[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(5):461-470.
- [4] JI H S, SON B J, MA Z J. Evaluation of Composite Sandwich Bridge Decks with Hybrid FRP-steel Core
 [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(1): 36-44.
- [5] ROBINSON M J, KOSMATKAAND J B. Develop-

ment of a Short-span Fiber-reinforced Composite Bridge for Emergency Response and Military Applications[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(4): 388-397.

- [6] 王言磊,郝庆多,欧进萍.FRP-混凝土组合梁试验研究[J].工业建筑,2007(増):63-66.
 WANG Yan-lei, HAO Qing-duo, OU Jim-ping. Experimental Study on Hybrid FRP-concrete Beam[J]. Industrial Construction,2007(S):63-66.
- [7] 黄 辉,王文炜,戴建国.两跨连续 GFRP-混凝土空 心组合板的受弯性能试验研究[J].建筑结构学报, 2015,36(10):59-65.
 HUANG Hui, WANG Wen-wei, DAI Jian-guo. Ex-

perimental Study on Structural Performance of Twospan Continuous GFRP-concrete Composite Hollow Slabs[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (10):59-65.

- [8] 黄 辉,王文炜,戴建国.双跨连续 GFRP-混凝土组 合板的试验研究[J].东南大学学报:自然科学版, 2015,45(1):139-144.
 HUANG Hui, WANG Wen-wei, DAI Jian-guo. Experimental Study on Two-span Continuous GFRPconcrete Composite Slabs[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2015, 45(1):139-144.
- [9] YU T, TENG J G, WONG Y L. Stress-strain Behavior of Concrete in Hybrid FRP-concrete-steel Doubleskin Tubular Columns[J]. Journal of Structure Engineering, 2010, 136(4): 379-389.
- [10] 刘明学,钱稼茹.FRP-混凝土-钢双壁空心管的截面弯 矩-曲率全曲线[J].清华大学学报:自然科学版, 2007,47(12):2105-2110.
 LIU Ming-xue,QIAN Jia-ru. Moment-curvature Relationships of FRP-concrete-steel Double-skin Tubular

Members[J]. Journal of Tsinghai University: Natural Science Edition, 2007, 47(12): 2105–2110.

- [11] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管柱抗震性 能试验[J]. 土木工程学报,2008,41(3):29-36.
 QIAN Jia-ru,LIU Ming-xue. Tests of Seismic Behavior of FRP-concrete-steel Double-skin Tubular Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2008,41 (3):29-36.
- [12] MOON F L, GILLESPIE J W. Experimental Validation of a Shear Stud Connection Between Steel Girders and a Fiber-reinforced Polymer Deck in the Transverse Direction [J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(3):284-287.

[13] 杨 勇,刘玉擎,范海丰. FRP-混凝土组合桥面板疲

劳性能试验研究[J].工程力学,2011,28(6):66-73. YANG Yong, LIU Yu-qing, FAN Hai-feng. Experimental Study on the Fatigue Behavior of FRP-concrete Composite Decks[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(6):66-73.

[14] 王文炜,黄 辉,赵 飞.湿技术条件下 GFRP 板-混 凝土界面黏结性能试验研究[J].土木工程学报, 2015,48(3):52-60.

> WANG Wen-wei, HUANG Hui, ZHAO Fei. Experimental Study on Bonding Behavior of GFRP Plate and Concrete Interface Based on Wet Bonding Technique [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(3): 52-60.

- [15] ZHANG L, WANG W W, HARRIES K A, et al. Bonding Behavior of Wet-bonded GFRP-concrete Interface[J]. Journal of Composites for Construction, 2015,19(6):1-14.
- [16] 范海丰,刘玉擎,代 亮.GFRP-混凝土组合桥面板设

(上接第 44 页)

- [7] GB 6722—2011,爆破安全规程[S]. GB 6722—2011,Blasting Safety Regulations[S].
- [8] VAN IMPE W F, DE COCK F, VAN DER CRUYS-SEN J P , et al. Soil Improvement Experiences in Belgium: Part II. Vibrocompaction and Stone Columns [J]. Ground Improvement, 1997, 1(3): 157-168.
- [9] HECKMAN W S, HAGERTY J M. Vibrations Associated with Pile Driving[J]. Journal of the Construction Division, 1978, 104(4): 385-394.
- [10] PECK R B, HANSON W E, THORNBURN T H.

计及试验研究[J].防灾减灾工程学报,2010,30(增): 356-360.

FAN Hai-feng, LIU Yu-qing, DAI Liang. The Design and Experimental Study on GFRP-concrete Composite Bridge Deck[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(S): 356-360.

- [17] 邓宗才,李建辉.新型 FRP-混凝土组合桥面板的初步 设计[J].玻璃钢/复合材料,2007(6):40-42,56.
 DENG Zong-cai, LI Jian-hui. Preliminary Design on New Type Hybrid FRP-concrete Bridge Super Structures[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2007 (6):40-42,56.
- [18] 聂建国,李红有,唐 亮.高强钢-混凝土组合梁受弯 性能试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(2):64-69.

NIE Jian-guo, LI Hong-you, TANG Liang. Experimental Study on HSS-concrete Composite Beams[J]. Journal of Building Structures,2009,30(2):64-69.

Foundation Engineering[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1974.

- [11] MASSARSCH K R. Effects of Vibratory Compaction [C]//HOLEYMAN A, VANDEN B J F, CHARUE N. Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction—TRANSVIB2002. Rotterdam: A A Balkema, 2002:33-42.
- [12] WALLAYS M. Deep Compaction by Vertical and Horizontal Vibration [J]. Geotechnical Engineering, 1983,14(1):55-78.