

# 外部纤维缠绕增强 FRP 桥面板受力性能试验研究

冯 鹏<sup>1,2</sup> 叶列平<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 纤维增强复合材料 (FRP) 桥面板是一种新材料桥面结构体系, 具有耐腐蚀、重量轻、施工方便、抗疲劳性能好、耐超载性能好等优点。提出一种采用外部纤维缠绕增强构造的新型 FRP 桥面板, 通过对 3 块足尺桥板构件在 2 种工况下的静载试验, 研究采用外部纤维缠绕增强构造的 FRP 桥面板的受力特点和破坏模式。通过对比, 分析了外部纤维缠绕对 FRP 桥面板刚度、极限承载力以及破坏过程的增强作用。结果表明, 外部纤维缠绕能约束内部的桥板组件, 改善 FRP 组件间的界面性能, 显著提高桥板的极限承载力, 使 FRP 得到充分利用, 从而使这种新型 FRP 桥面板具有优越的受力性能, 能够满足实际桥梁工程应用的需要。

**关键词:** 桥梁结构; FRP 桥面板; 空心板; 剥离; 剪切变形

**中图分类号:** TU381 U443.31 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-131X(2009)09-0061-07

## Experimental study on exterior filament-wound strengthening fiber-reinforced polymer bridge decks

Feng Peng<sup>1,2</sup> Ye Lieping<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. MOE Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A fiber-reinforced polymer (FRP) bridge deck has many favorite properties, such as corrosion resistance, light weight, construction convenience, good fatigue behavior, and over-load endurance. An innovative FRP bridge deck with exterior filament-wound reinforcement is proposed. Three full-scale bridge decks are tested under two load cases, to study the mechanical behaviors and the failure modes of such FRP bridge decks with exterior filament-wound reinforcements. By comparing decks with different configurations of exterior filament-wound reinforcements, the effects of the exterior filament-wound reinforcements on the stiffness, ultimate strength and failure process of the FRP decks are investigated. The results show that the exterior filament-wound reinforcements can improve the interface performance between FRP components through confinement that leads to large increase in the ultimate strength of FRP bridge decks. The innovative FRP bridge decks may achieve preferable mechanical performance and meet the demands for bridge constructions.

**Keywords:** bridge structure; FRP bridge deck; cellular deck; debonding; shear deformation

**E-mail:** fengpeng@tsinghua.edu.cn

### 引 言

FRP (纤维增强复合材料) 桥面板是一种新型桥面结构体系, 与传统桥面板相比, FRP 桥面板具有重量轻、安装速度快、耐腐蚀、维护费用低、抗疲劳性能好、耐超载性好等优点。在工程应用中, 可直接用 FRP 桥面板新建桥梁, 也可在旧桥修复改造中用 FRP 桥面板

替换原有的混凝土桥面板, 一方面减轻桥面结构自重, 另一方面获得更好的耐腐蚀性<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代中期, 随着欧美公路桥梁中桥面结构腐蚀劣化问题的日益严重, 采用 FRP 建造桥面体系获得耐久性和安全性从而提高交通设施的可靠性、降低全寿命周期成本成为一个发展趋势。美国联邦公路局和欧盟委员会都开展了相关研发和应用, 目前已有近百座公路桥梁采用了 FRP 桥面体系<sup>[2]</sup>, 绝大多数都为价格较低廉的玻璃纤维增强复合材料 (GFRP)。

FRP 桥面板在结构中直接承受轮压, 受力状况较复杂: 在整体上沿板跨方向受弯和受剪; 在局部, 需考虑横向弯曲、冲切或挤压作用; 当作用非对称荷载时,

基金项目: 国家自然科学基金 (50238030, 50868004) 和中俄政府间科技合作项目 (CR12-44)

作者简介: 冯鹏, 博士, 副教授。

收稿日期: 2008-01-31

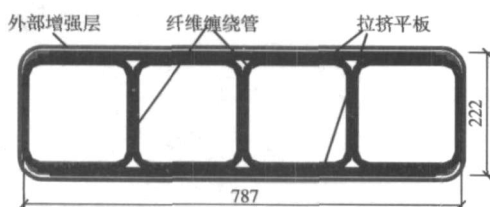
还会有扭矩出现。而且,FRP为各向异性材料,不同受力方向的力学性能参数有很大差异,具有很强的可设计性。由于加工技术的限制,目前还很难一次成型制成整块的可用于公路桥梁的FRP桥面板,因此大部分FRP桥面板都是采用FRP型材组合而成,组件间的连接性能对FRP桥面板的整体受力性能有直接影响。这些与传统结构材料不同的特点,使得FRP桥面板的设计较为复杂,形式多样。目前世界各国已有数十种不同形式的FRP桥面板出现,如美国的DuraSpan系统<sup>[3]</sup>,欧洲的ASSET系统<sup>[4]</sup>和ACCS系统<sup>[5]</sup>等。

FRP桥面板通常由以纵向纤维为主的FRP型材组件黏接拼装构成,其极限破坏模式主要为组件间的剥离破坏<sup>[6-7]</sup>、型材横向强度破坏<sup>[8]</sup>和剪切强度破坏<sup>[9]</sup>等。这些破坏模式的承载力较低,且FRP在纤维方向上的高强度特性不能得到发挥,材料使用效率不高。本文提出并发展了一种新型FRP桥面板——外部纤维缠绕增强FRP桥面板,简称为HD板,用了外部纤维缠绕的构造,用少量的纤维大大提高了FRP桥面板的整体性,使其破坏模式发生转变,承载力得到了提高。

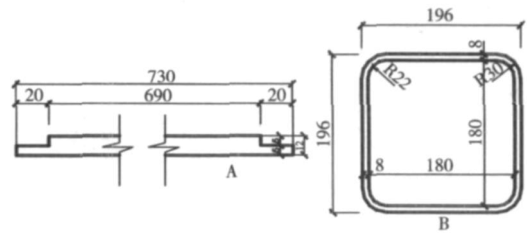
### 1 HD板及其桥面系统

HD板的截面构造如图1(a)和(b)所示,它是由4根GFRP缠绕方管(B组件)并排黏接成核心,上下黏贴GFRP拉挤面板(A组件),再将浸胶后的纤维丝束依次双向缠绕到其表面固化后形成。

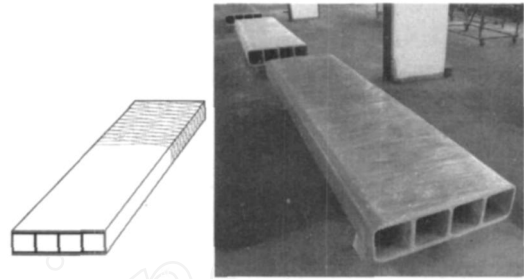
HD板的上下面板是纤维沿纵向(即跨度方向)为主的拉挤平板,能够有效地提供抗弯承载力和抗弯刚度。但面板宽度较大,全部采用纵向纤维容易导致表面开裂,通过分析实际的纵横纤维比例取4:1。芯材采用±45°缠绕的GFRP管,提供充分的抗剪承载力。而外部纤维增强层为±80°缠绕,约束内部组件,增强了组件间的界面黏结性能,并提供一定的横向刚度。这样的纤维配置和构造使HD板中各FRP组件的纤维方向都沿其主要受力方向,从而能得到较为充分的利用,获得较好的受力性能。制成的HD板产品如图1(c)所示。



(a) HD板的截面形状



(b) HD板的主要组件



(c) HD板的成品

图1 外部纤维缠绕增强FRP桥面板(HD板)的构造  
Fig. 1 Configuration and components of exterior filament-wound reinforced FRP bridge deck (HD Deck)

在梁板体系的桥梁中,HD板间通过“Z形剪力件”连接,沿板侧间隔布置,端部与支承的桥台或主梁连接,从而形成桥面体系,直接承受车辆轮压,如图2所示。HD板的使用宽度为0.8m,长度为3m,可承受汽-超20级<sup>[10]</sup>及城-A标准车辆<sup>[11]</sup>荷载,按照变形限值为1/600跨度进行设计。

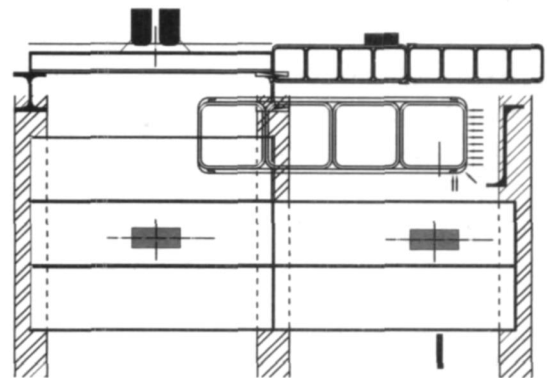


图2 HD板桥面系统  
Fig. 2 HD deck bridge system

### 2 试验研究

#### 2.1 试验方案

为验证HD板的实际受力性能,为理论分析提供依据,制作了3块采用不同外部缠绕增强构造的HD板进行静载试验,研究其受力性能和破坏机理,并分析纤维缠绕增强层的作用。因而除外部纤维缠绕增强层的厚度不同以外,各试件的尺寸和材料都相同。各组件的材料力学性能通过试验测定,见表1。各

件的试验参数见表 2,其中 HD0 无外部纤维缠绕增强,HDW3 和 HDW5 中的缠绕增强层的厚度分别为 3mm 和 5mm。

表 1 试件中各 FRP 组件的材料力学性能

Table 1 Mechanical behaviors of FRP components of specimens

组件	纤维体 积含量	纵向弹模 (GPa)	横向弹模 (GPa)	剪切模量 (GPa)	纵向强度 (MPa)	横向强度 (MPa)	剪切强度 (MPa)
A:平板	45.4%	30.4	17.2	5.8	>304*	57.4	48.0
B:缠绕管	60.5%	24.0	24.0	9.3	191	191	>46.6*

注: \*表示试件在测试中未破坏

表 2 各试件的试验参数

Table 2 Experimental parameters of specimens

构件 编号	长度 (m)	净跨 (m)	外部 缠绕	加载次序
HD0	3.0	2.8	无	1:四点弯曲加载到 350kN 2:中心点加载到破坏 (488kN)
HDW3	3.0	2.8	外缠 ±80° 厚度 3mm	1:四点弯曲加载到 350kN 2:中心点加载到破坏 (618kN)
HDW5	3.0	2.8	外缠 ±80° 厚度 5mm	1:中心点加载到 632kN 2:四点弯曲加载到破坏 (1737kN)

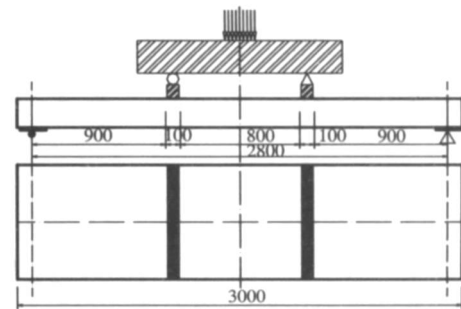
试验在 5000kN 压力试验机上进行,两端简支,净跨 2.8m,进行两种工况下的静载试验。工况 1 为四点弯曲加载,用以获得 HD 板的抗弯刚度和抗剪刚度,试验纯弯段长 0.9m,加载钢梁宽度为 0.1m,下垫水泥砂浆垫层,如图 3(a)所示。工况 2 为中心点加载,用以模拟实际车辆的轮压,在构件平面中心位置施加荷载。我国的桥梁结构设计规范<sup>[10-11]</sup>中,最小的轮压面积为 200mm × 300mm,试验中加载钢块尺寸偏于保守地取 200mm × 200mm,下垫橡胶层,如图 3(b)所示。加载中为防止出现突然破坏,采用分级增大荷载,加到每级的最大荷载后卸载,再加下级的方式。

试验中采用导杆式位移计测量构件变形,构件表面黏贴应变片量测各处应变,应变包括沿纵向、横向以及 45 方向。

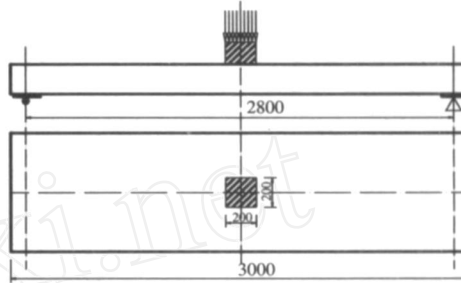
## 2.2 试验现象

### 2.2.1 HD0

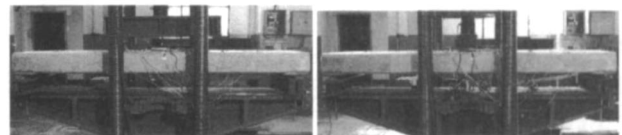
HD0 板外表无缠绕增强层。首先进行四点弯曲非破坏性加载,荷载(两加载梁上的总荷载)加至 350kN,最大弯矩为 158kN · m。加载过程中构件表现为线弹性,跨中最大变形达到 17.1mm,为跨度的 1/164,卸载后变形很快恢复,基本没有残余变形,荷载变形曲线如图 4 所示。



(a) 四点弯曲加载



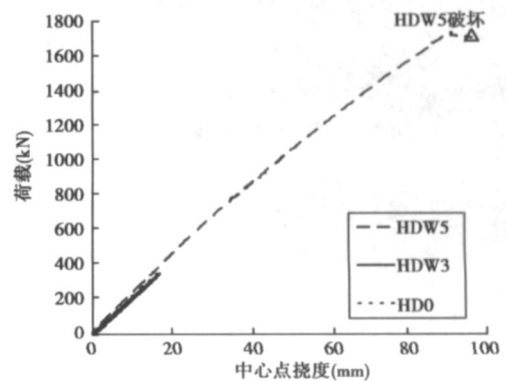
(b) 中心点加载



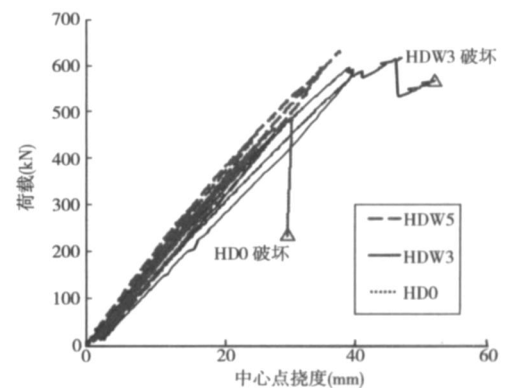
(c) 加载照片

图 3 试验的两种加载工况

Fig. 3 Two load cases



(a) 四点弯曲加载



(b) 中心点加载

图 4 试验加载的荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves of specimens

再进行中心点加载,第一级荷载为 300kN,此后每级增加 150kN。当第一次加载到 200kN 左右时,构件中开始有“噼啪”响声发出,直到 300kN 后卸载;而第二级加载在刚超 300kN 就开始有“噼啪”响声发出。声音说明有损伤发生,这种在首次达到的荷载下才发生新损伤的现象在 FRP 构件的加载过程中很常见,可称之为“首次超越损伤现象”。尽管这时有“噼啪”响声发出,但 HD 的表面没有观察到任何破坏现象,变形

与荷载仍保持线性,卸载后也没有残余变形。第二次加载最大到 450kN。第三次加载至 488kN 时,构件发生突然破坏,破坏模式为下面板与芯管间界面剥离脱开,仅余支座附近有部分面积未完全剥离。卸载后,下面板和芯管间脱开,有约 5mm 的空隙,如图 5 所示。检查构件外表,除底面板剥离以外其他部位无明显破坏。在加载中,构件变形基本随荷载呈线性变化,破坏前跨中最大变形达到 30.6mm,为跨度的 1/92。

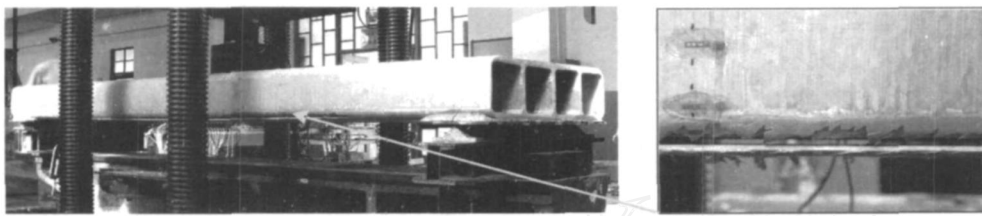


图 5 HD0 的破坏形式:面板与核芯的剥离

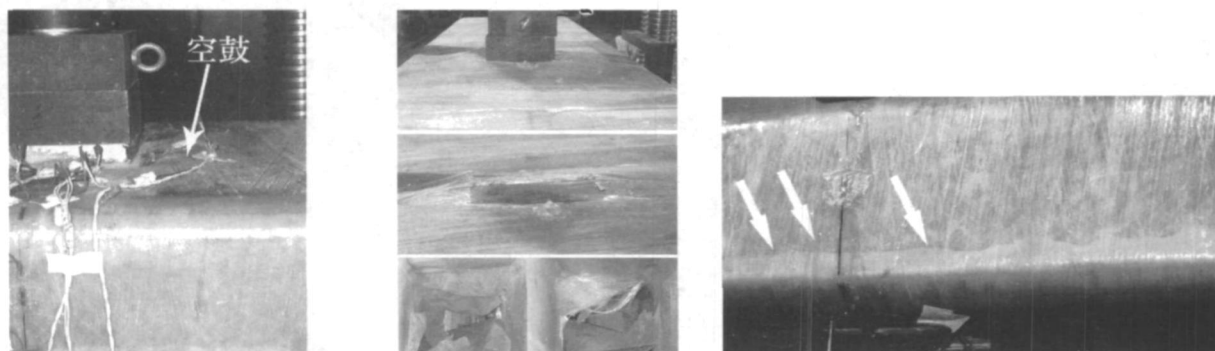
Fig 5 Failure of HD0: debonding between plate and core

2.2.2 HDW3

首先对 HDW3 板进行四点弯曲加载,加至 350kN。加载中 HDW3 板表现为线弹性,构件无明显破坏,但总荷载达 300kN 左右时,开始有“噼啪”声音发出,HD0 在这个荷载下则没有响声发出,这是由于外部缠绕纤维表面的树脂断裂而发出的。总荷载达 350kN 时,跨中最大变形为 17.8mm,为跨度的 1/157。可以看到,HDW3 与 HD0 的刚度基本相同,相差 4%,HD0 略大,在试验量测误差的范围内。

在对 HDW3 板进行中心点加载的初始阶段,构件变形基本随荷载线性变化,“首次超越损伤现象”也很明显。荷载达到 400kN 左右,顶面加载点附近的外部

缠绕层鼓起,如图 6(a)所示;荷载接近 600kN 时构件发出了密集的“噼啪”响声,超过了 HD0 的极限承载力。当荷载达到 618kN 时,连续发出较大的声响,承载力开始下降。最终,加载垫板处产生下陷,加载垫板周边的外部缠绕纤维被切断,内部的纤维缠绕芯管被压溃,发生了冲切破坏,如图 6(b)所示。同时还发现构件跨中侧面与底板交角处的外部缠绕增强层出现泛白,并且有细微的裂纹,说明此处纤维增强层与内部 FRP 组件间发生了剥离破坏;观察构件端部,面板与芯管之间没有错动,也没有剥离破坏发生。因此最终导致 HDW3 板承载力丧失的破坏为冲切破坏,同时芯管被压溃。



(a) 外部缠绕层起鼓

(b) 冲切破坏及芯管压溃

(c) 外部缠绕层角部损伤

图 6 HDW3 的破坏形式及局部损伤

Fig 6 Failure and damage of HDW3: bubble; punching failure and collapse of tubes; corner damage of exterior filament-wound layer

2.2.3 HDW5

在 HDW3 的单点加载试验中,最终发生了局部冲

切破坏,其极限承载力比 HD0 高 26.6%,已获得了 HD 桥面板抵抗轮压的承载力,但未获得其抗弯承载

力。为获得更多破坏模式,对 HDW 5 板先进行中心点加载的非破坏性试验,在荷载超过 HDW 3 的极限承载力后卸载,再进行四点弯曲加载至破坏。

对 HDW 5 进行中心点加载,加到 180kN 左右时,有“噼啪”响声发出;加载到 632kN 时,跨中最大挠度达到 37.9mm (跨度的 1/74),超过了 HDW 3 板极限承载力。此时 HDW 5 板顶面加载板附近外部纤维缠绕层略有鼓起,但仍能承受荷载。卸载静置 2h 后,试件最大残余变形为 0.4mm,变形基本得到恢复。在中心点加载过程中,HDW 5 板基本保持线弹性,荷载超过 400kN 后,刚度略有降低。

随后进行四点弯曲加载试验,总荷载达到 700kN 左右时,开始有“噼啪”声发出,声响逐渐密集,直到最

终破坏。破坏时的最大荷载为 1737kN,极限弯矩为 782kN·m,对应的跨中挠度为 91.7mm,约为跨度的 1/30。破坏前 HDW 5 板的变形非常明显,如图 7(a)所示,“噼啪”响声非常密集,并不断有较大的声音发出,最终随着一声巨响构件承载力丧失:在左侧加载点下出现明显的破坏,有一个明显的折断,如图 7(a)所示。构件表面沿加载梁两侧出现环向裂纹,左边加载点内侧约 200mm 附近也出现一道明显的环向裂纹,如图 7(b)所示。芯管内部在加载位置附近 4 个芯管的顶面和侧面都被压溃而鼓出,如图 7(c)所示。HDW 5 板的最终破坏模式为外部缠绕层、上面板以及芯管的强度破坏,FRP 材料的强度得到了充分利用。

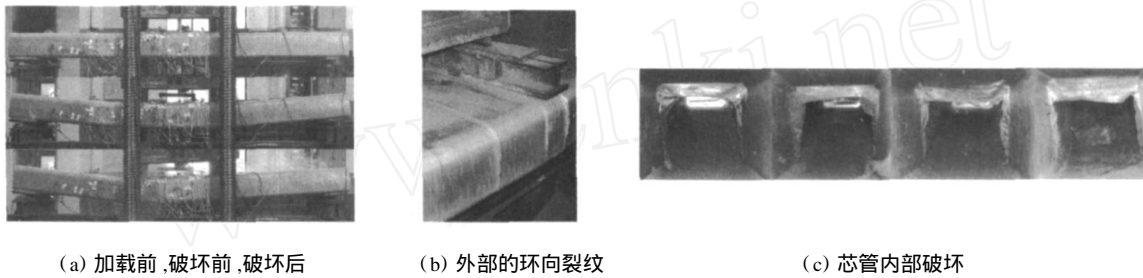


图 7 HDW 5 板的破坏  
Fig 7 Failure of HDW 5

### 3 试验结果分析

#### 3.1 弯曲刚度与剪切刚度

FRP 的弹性模量相对较小,变形控制设计的情况较多,先根据试验结果对各试件的刚度进行分析。

通常 FRP 的剪切模量较小,剪切变形在一般的受弯构件的总变形中可占较大比例,不能忽略。在 HD 桥面板的设计和 分析中需要考虑弯曲变形和剪切变形共同的影响。通过四点弯曲加载试验就可获得 HD 板的纵向抗弯刚度  $D_b$  和抗剪刚度  $D_s$ ,对图 8 所示简支梁的挠度变形有:

$$m = \frac{P}{48D_b} a(3L^2 - 4a^2) + \frac{P}{2D_s} a \quad (1a)$$

$$a = \frac{P}{12D_b} a^2(3L - 4a) + \frac{P}{2D_s} a \quad (1b)$$

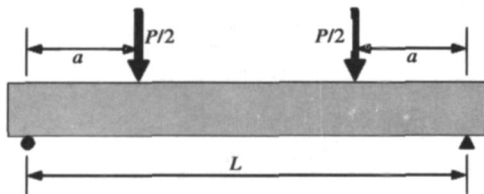


图 8 四点弯曲加载示意图  
Fig 8 Four-point loading scheme

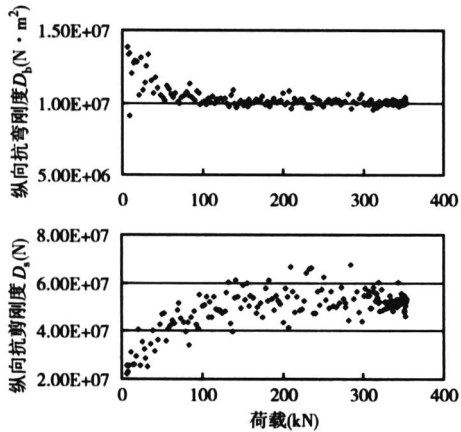
式中:  $m$  为跨中的变形;  $a$  为加载点处变形。根据试验中的每一组荷载和变形的试验结果,联立求解以上两个方程得到  $D_b$  和  $D_s$ ,结果如图 9 所示。当荷载较小时,支座和加载处的微小变形对  $a$  和  $m$  有较大影响,方程解的敏感度较高, $D_b$  和  $D_s$  结果较为离散,荷载达到 110kN 后, $D_b$  和  $D_s$  结果趋于稳定,取稳定阶段的  $D_b$  和  $D_s$ ,结果见图 9。计算可得,这些桥面板中的剪切变形较明显,在跨中总变形中约占 18%。

从结果中可以看到,各构件根据两点加载试验获得的纵向抗弯刚度和抗剪刚度相差不大,说明外部纤维缠绕层对于构件的刚度影响较小。这主要是因为外缠纤维层与轴线夹角为  $\pm 80^\circ$  且厚度很小。

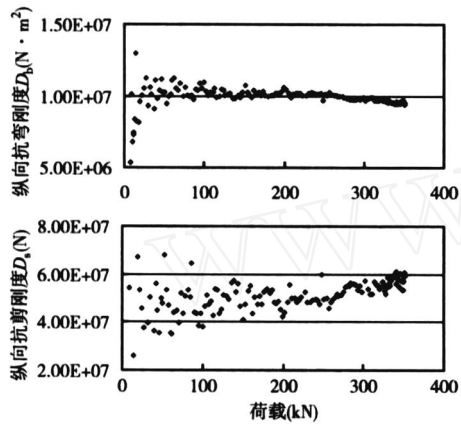
同时,从 HDW 3 的弯曲刚度和 HDW 5 的剪切刚度的变化中可以看到,随着荷载的增加,构件的刚度有一定的降低,但影响有限,不超过 10%。

#### 3.2 挠度变形

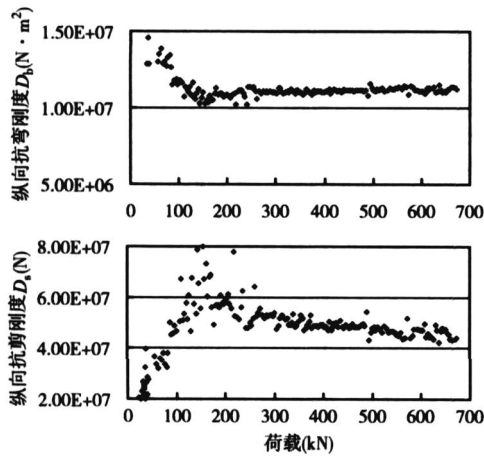
各 HD 板在模拟轮压的单点加载下的荷载挠度曲线如图 4(b)所示。根据汽超 20 级荷载条件,最大单轮压力为 70kN,中心点挠度不应超过 1/600 跨度,即 4.67mm。图 10 为试验中各试件最后一次中心点加载的荷载挠度曲线的局部,根据设计条件,各曲线都应达到或穿过图中阴影区域,才能满足承载力和变形的 基本设计要求。



(a) HD0;  $D_b = 10.1 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,  $D_s = 53.0 \times 10^6 \text{ N}$



(b) HDW3;  $D_b = 10.0 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,  $D_s = 52.9 \times 10^6 \text{ N}$



(c) HDW5;  $D_b = 11.1 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,  $D_s = 53.7 \times 10^6 \text{ N}$

图9 弯曲刚度和剪切刚度

Fig. 9 Bending stiffness and shear stiffness

### 3.3 承载力及破坏过程

试验中获得了 HD 板的 3 种不同的破坏模式,承载力和破坏过程也有所不同。

HD0 在中心集中加载下发生了面板与芯管的剥离破坏,承载力为 488kN,而 HDW3 和 HDW5 在该荷载下没有发生剥离破坏,表明外部缠绕纤维可有效避免剥离破坏,提高 HD 板的受力性能。

HDW3 在集中加载下发生冲切破坏,承载力为

618kN,而 HDW5 在该荷载下没有发生冲切破坏,表明增加外部缠绕纤维可进一步提高抗冲切受力性能。

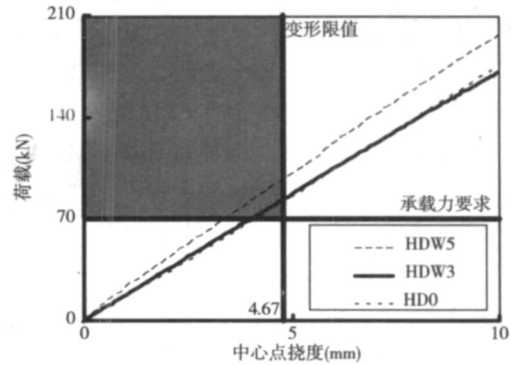


图 10 中心点加载的荷载 挠度曲线 (前半段)

Fig. 10 First half of load-deflection curves of specimens under central wheel load

HDW5 在四点弯曲加载下发生弯曲破坏,对应的荷载为 1737kN,破坏截面的弯矩为 782kN·m,文献 [7] 和文献 [12] 中性能最好的 FRP 桥面板在相同宽度下的极限弯矩仅为 537kN·m 和 439kN·m,分别为 HDW5 的 68.7% 和 56.1%。

我国桥梁设计规范<sup>[10-11]</sup> 中最大的轮压为 100kN。根据试验得到的各构件极限承载力计算,考虑 1.3 的动力冲击系数,HD0 板的安全系数达到 3.75,而 HDW3 板为 4.75,提高了 26.7%;HDW5 则更高,按照中点受弯的简支梁考虑,安全系数达到 8.59,说明这种纤维缠绕增强 FRP 桥面板有着较高的安全性。

从图 4 的荷载 挠度曲线上看,加载过程中各 HD 板基本为线弹性,但 HD0 的破坏很突然,相对变形仅为跨度的 1/92;HDW3 则出现了一段“伪延性”,出现了一个阶跃的平台段;从破坏过程上看,HDW3 比 HD0 要缓慢一些,这是由于破坏模式不同而造成的,这对于构件的破坏有预警作用,极限变形能力达到跨度的 1/62。而 HDW5 也保持着较好的线性受力特征直到破坏,破坏前构件已发生了非常显著的变形,达到 1/30 跨度,变形能力很好,能够有效的起到预警作用。

### 4 外部纤维缠绕增强的效果分析

采用外部纤维缠绕对于提高 FRP 桥面板的受力性能的效果非常显著,但材料的用量增加不多。实测 HD 板重量为 105kg/m<sup>2</sup>,HDW3 为 119kg/m<sup>2</sup>,HDW5 为 129kg/m<sup>2</sup>,分别增加了 13.4% 和 22.6%。但通过试验可以看到通过外部纤维缠绕,构件的极限变形能力提高了 74.4% 和 221.6%,极限承载能力则提高了 26.6% 和 129.1%。对比如图 11 所示。

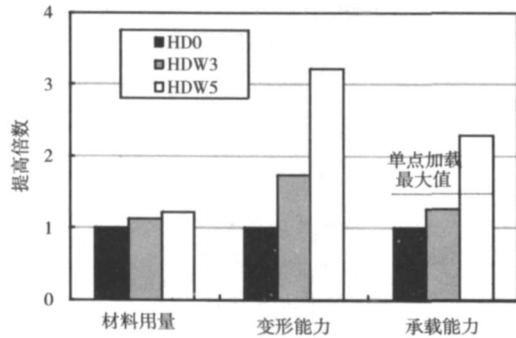


图 11 外部纤维缠绕的增强效果

Fig 11 Strengthening effects of exterior filament-wound reinforcement

可以看出,外部纤维缠绕增强层厚度越大,受力性能的提高越明显,增强效率也越高。但实际应用中,不可能无限制增加缠绕层的厚度来提高构件的性能。因为一方面随着缠绕层的增加给生产加工带来较大的难度,另一方面在 HD 板中 5mm 厚的缠绕增强层已能获得非常显著效果,较好地满足工程需求。因此,建议在实际应用的 HD 板中采用 3~5mm 的外部缠绕增强层。

## 5 结 论

通过静载试验,研究了一种新型 FRP 桥面板——HD 板的受力性能,主要结论如下:

(1) HD 板能够满足汽超 20 级及城 A 标准车辆公路桥梁的受力性能要求,并且具有较高的安全系数,性能优于国外文献中的 FRP 桥面板;

(2) 外部纤维缠绕增强层是一种有效的增强构造方式,虽然对刚度影响不大,但能用很少量的 FRP 改变整个 FRP 桥面板的破坏模式,大大提高其承载力,改善其受力性能,与未缠绕 HD 的桥面板相比,承载力提高 129.1%,变形能力也大大提高;

(3) 无缠绕增强的 HD0 板承载力较低,破坏为剥离破坏,材料不能得到充分利用,而且破坏突然;而有缠绕增强的 HD 板具有较高的承载力和较合理的破坏模式,其 FRP 材料能够得到充分的利用;

(4) 根据试验结果,综合考虑生产工艺和实际需求,建议 HD 桥面板采用 3~5mm 厚的缠绕增强层。

## 参 考 文 献

[1] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展 [J].

土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36 (Ye Lieping, Feng Peng Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36 (in Chinese))

- [2] American Composites Manufacturers Association (ACMA). Global FRP use in bridge applications [OL/R]. [http://www.mdacomposites.org/mda/bridge\\_statistics.htm](http://www.mdacomposites.org/mda/bridge_statistics.htm), 2003
- [3] Cassity P, Richards D, Gillespie J. Compositely acting FRP deck and girder system [J]. Structural Engineering International, 2002, 12(2): 71-75
- [4] Luke S, Canning L, Collins S, et al. Advanced composite bridge decking system: project ASSET [J]. Structural Engineering International, 2002, (2): 76-79
- [5] Lee J, Hollaway L, Thome A, et al. The structural characteristic of a polymer composite cellular box beam in bending [J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(6): 333-340
- [6] Brown R T, Zureick A H. Lightweight composite truss section decking [J]. Marine Structures, 2001, 14(1-2): 115-132
- [7] Keller T, Scholmayer M. Plate bending behavior of a pultruded GFRP bridge deck system [J]. Composite Structures, 2004, 64: 285-295
- [8] Wu Z H. Prestressed FRP tubular deck system [D]. Raleigh, NC, USA: North Carolina State University, 2003
- [9] Coleman J T. Continuation of field and laboratory tests of a proposed bridge deck panel fabricated from pultruded fiber-reinforced polymer components [D]. MS Thesis, Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Inst and State University, 2002
- [10] JTJ 021-89 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1989 (JTJ 021-89 General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 1989 (in Chinese))
- [11] CJJ77-98 城市桥梁设计荷载标准 [S]. (CJJ77-98 The standard of loadings for the municipal bridge design [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998 (in Chinese))
- [12] Williams B, Shehata E, Rizkalla S H. Filament-wound glass fiber reinforced polymer bridge deck modules [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2003, 7(3): 266-273

冯 鹏 (1977-), 男, 博士, 副教授。主要从事新型结构和新材料结构方面的研究。

叶列平 (1960-), 男, 博士, 教授。主要从事新型结构与工程抗震方面的研究。