

新型 FRP 桥面板及其试验研究

冯 鹏^{1,2} 叶列平^{1,2} 李为中³ 张林文³

(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; 3. 北京玻璃钢研究院, 北京, 100084)

摘要: 本文研制开发了一种新型 FRP 空心桥面板, 采用了外部纤维缠绕构造提高了 FRP 材料的利用效率, 增加了构件的承载能力。通过 3 个试件的静载试验和 1 个试件的疲劳试验, 证明了这种新型 FRP 桥面板的具有优越的受力性能, 可应用于实际桥梁工程。还研究了外部纤维缠绕层的增强作用, 探讨了其增强机理。

关键词: FRP; 桥梁上部结构; 耐腐蚀; 轻质桥梁

引言

在公路桥梁中, 桥面板直接承受轮压并暴露于环境中, 是受超载、腐蚀介质、疲劳荷载等不利条件直接作用的构件。目前, 世界各国都有大量的钢筋混凝土或钢板桥面在没达到设计寿命时就发生了严重破坏。尤其在寒冷地区和沿海地区, 由于除冰盐的使用和空气中高浓度的氯离子, 使得锈蚀问题更为突出。近年来, 具有耐腐蚀能力的纤维增强复合材料 (FRP) 在桥梁上部结构中得到日益广泛的应用, 其中完全采用 FRP 制成桥面板是最直接的方式。用 FRP 制成的桥面板具有显著的优势: 自重轻, 约为传统混凝土板的 20~40%^[1]; 通常在工厂生产, 运输和安装很方便, 甚至可以不用起重设备, 节省工期; 更重要的是耐腐蚀性能好, 维护保养方便。FRP 桥面板用于新建桥梁, 可减小上部结构自重, 并降低后期维护费用; 它也可以在旧桥改造中替代已毁坏的桥面板, 因其自重轻, 相当于给原结构卸载, 并且施工速度快, 综合效益好。因此, 应用 FRP 桥面板提高传统桥梁结构耐久性的一个重要发展方向。

上世纪七、八十年代开始, 国内外就开展了 FRP 桥梁的相关研究, 我国于 1982 年在北京密云建成了世界上第一座 FRP 结构的公路桥^[2], 经过一次维修后, 至今仍在使用。这个阶段应用 FRP 建造桥梁的目的是利用其轻质高强的特点实现更大跨度。九十年代中期, FRP 桥面板因其轻质、高强、耐腐蚀的优点开始得到更广泛的关注, 开始在实际工程中得到应用。近十年, 已有近百座中小型桥梁采用了 FRP 桥面板, 并出现了十多种 FRP 桥面板产品^[3], 绝大部分在欧洲和美

国，在我国还没有。

本文在对现有 FRP 桥面体系分析比较的基础上，研制开发了一种新型 FRP 桥面板产品——HD 板，由国内厂家生产，并进行了静载和疲劳荷载下的试验研究，对该 FRP 桥面板的优越性能进行了比较和分析。

1 FRP 桥面板的受力特点

从应用形式上看，目前的 FRP 桥面板主要有两种形式：一种是板式桥，即用 FRP 桥板直接跨越较大跨度，如图 1(a)所示；另一种是将 FRP 桥面板搁置在梁间，可以是钢梁、混凝土梁或 FRP 梁，如图 1(b)所示。

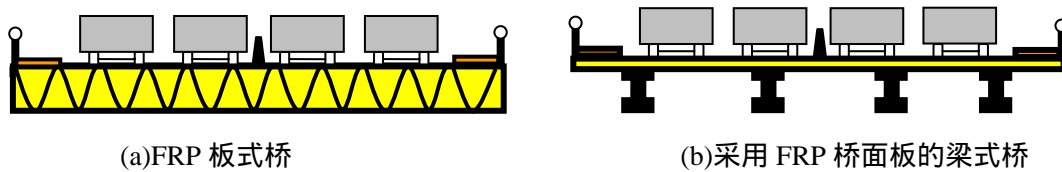


图 1 FRP 桥面板的应用方式

由于 FRP 构件加工技术的限制，几乎不可能一次性制成整块的 FRP 桥面板，因此目前的桥面板都是采用 FRP 部件组合而成。根据组合构造方式可以把目前的各种 FRP 桥面板分为四大类，如图 2 所示：(a)FRP 夹心板，由夹心部分与上下面板组成，上下面板为 FRP，夹心部分为轻质材料和 FRP 隔肋；(b)FRP 型材拼合空心板，由相同形式的 FRP 型材连接组成，每个 FRP 型材都能单独受力，组合后共同受力，一般型材为拉挤工艺制成；(c)FRP 面板 - 型材芯空心板，由 FRP 型材组成核芯，上下再粘贴 FRP 面板；(d)FRP - 混凝土/木材组合板，混凝土或木材布置在受压区内，FRP 主要受拉，它们之间通过剪力连接件或粘结等方式传递剪力。此外还有一些其它形式的 FRP 桥梁上部结构，如 FRP 箱梁、夹心梁等。

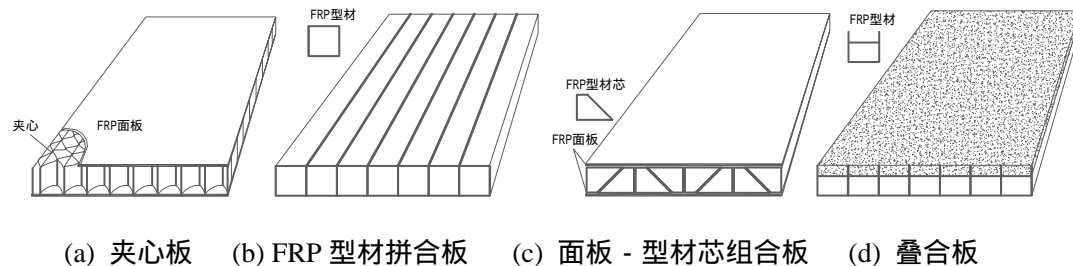


图 2 FRP 桥面板的形式分类

FRP 桥面板在结构中承受轮压，需要考虑弯矩、剪力和局部承压的作用。一

一般在桥面板中，上面板受压和下面板受拉，中间部分主要承受剪力，同时连接上下面板，如图 3 示意；当荷载作用在局部，FRP 桥面板横向还会受弯，且同时受到冲切或挤压；当作用非对称荷载时，截面上还会有扭矩出现。较为复杂的实际受力情况使得 FRP 桥面板的较为复杂。FRP 为各向异性非均匀的材料，在不同的受力方向上或不同的受力条件下，其力学性能参数有很大的差异，并且 FRP 构件的设计还需考虑加工工艺的可行性。这些特点与传统的结构材料有很大的不同，使得 FRP 桥面板的设计较为复杂。虽然目前已有的十多种 FRP 桥面板产品，但形式各异，还没有形成统一的设计方法。

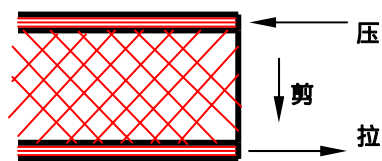
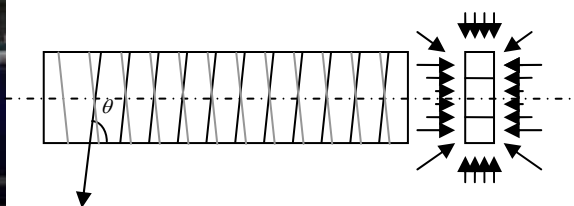


图 3 FRP 空心板受力示意图

从受力性能上看，FRP 空心板近似为线弹性构件，在设计中主要以变形控制，因极限承载力的不同而有不同的安全系数。FRP 桥面板的极限承载力与其破坏模式相关，不同的破坏模式极限承载力不也不同。通常 FRP 材料的纵向强度最高，对应的破坏模式的极限承载力也最大。FRP 桥面板的破坏模式分为以下几类（1）FRP 达到其自身的材料强度而导致的破坏，包括拉伸破坏、压缩破坏、面内剪切破坏、弯曲破坏和层间破坏等；（2）FRP 各组件间的连接构造破坏所导致的 FRP 空心板承载力丧失，如粘接剥离、机械连接件破坏、螺栓孔的局部承压破坏等；（3）桥面板中受压应力板件发生局部屈曲而导致承载力丧失。其中 FRP 材料的剪切强度、横向抗拉强度和层间强度破坏以及 FRP 组件的连接破坏最为常见^[3]。在这些破坏模式下，FRP 材料的很好的纵向强度没有被充分利用。因此，合理、高效的 FRP 空心桥面板应该避免这些破坏形式发生。



(a) OFR 加工实景图



(b) OFR 的示意图

图 4 OFR 构造

通过合理的构造手段来防止或延缓这些低承载力破坏模式的发生是提高 FRP 空心板受力性能和承载力的关键。为此，本文提出用外部纤维缠绕（OFR）的方法，来避免组件间界面的剥离和面板的分层破坏，同时增强 FRP 空心板的横向受力性能，使其综合性能得到改善。OFR 的工艺是以 FRP 空心板为内芯将浸胶后的纤维丝束依次双向缠绕到其表面，纤维与构件轴线间的夹角记为 $\pm \theta$ ，如图 4 所示。在缠绕中，纤维丝束具有一定的张拉力，因此缠绕层对原 FRP 空心板有一定的初始约束应力，对其组件间的界面粘结有利。

2 新型 FRP 桥面板——HD 板

HD 板是一种改进的 FRP 面板 - 型材芯空心板，它除了由上下的拉挤平板和纤维缠绕方管组成以外，在构件外部采用纤维缠绕增强工艺，合理的纤维配置和构造使 HD 板的有着优越的受力性能。

HD 板的截面构造如图 5 所示。上下面板厚 12mm，采用 E 玻璃纤维和乙烯基树脂，纤维方向以 0° 和 90° 为主，共有 3 层纱层，8 层纤维布，8 层纤维毡，均沿纵向铺设 对称铺层，各铺层厚度分别为 纱层 1.6mm，双轴纤维布层 0.6mm，缝编毡层 0.3mm。由于面板宽度较大，过高的纵横纤维比容易在拉挤中导致表面开裂，因此实际的纵横纤维比例取 4:1。缠绕方管为 $\pm 45^\circ$ 缠绕，为 E 玻璃纤维和环氧树脂合成，纤维体积含量为 60.5%。缠绕方管平均壁厚 8mm（角部略薄，中心略厚，差别约 1mm），管高度为 196mm。角部和空心处用树脂石英砂填充。组件进行表面处理，用环氧树脂进行粘结，并采用辅助工装保证粘结质量。粘结完成后进行外部纤维缠绕，外部缠绕的纤维体积含量同缠绕管相同。在实际应用中，HD 板间通过“Z”形剪力件连接，沿板侧间隔布置。

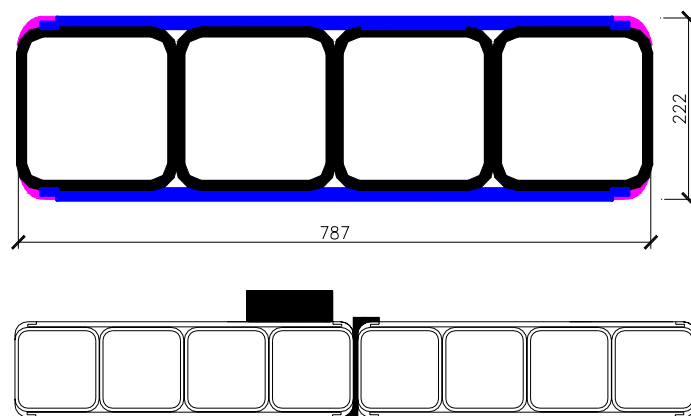


图 5 HD 板构造示意图

为进行试验研究制成了 4 个试件，如图 6 所示。内部构造均相同，其中编号为 HD0 的板在外部无缠绕增强，其它 3 块板的 OFR 层的厚度和缠绕角度不同。

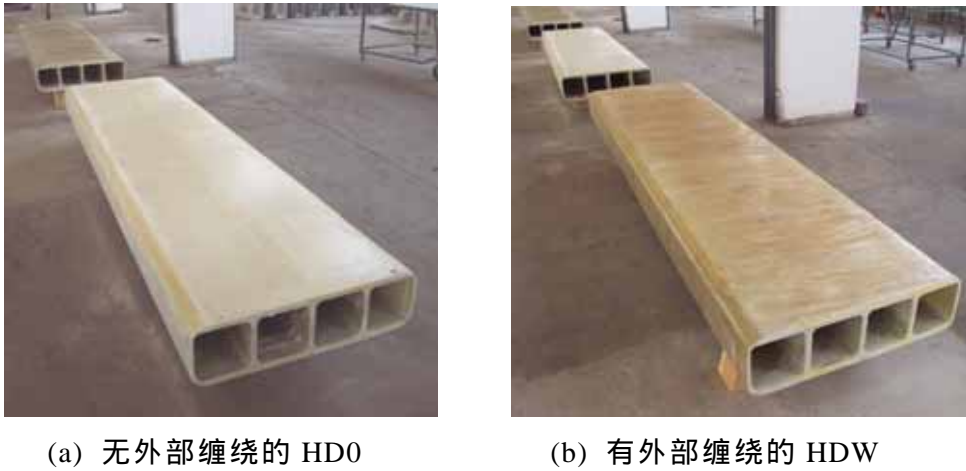


图 6 新型 FRP 空心桥面板 HD

3 试验概述

3.1 试验方案

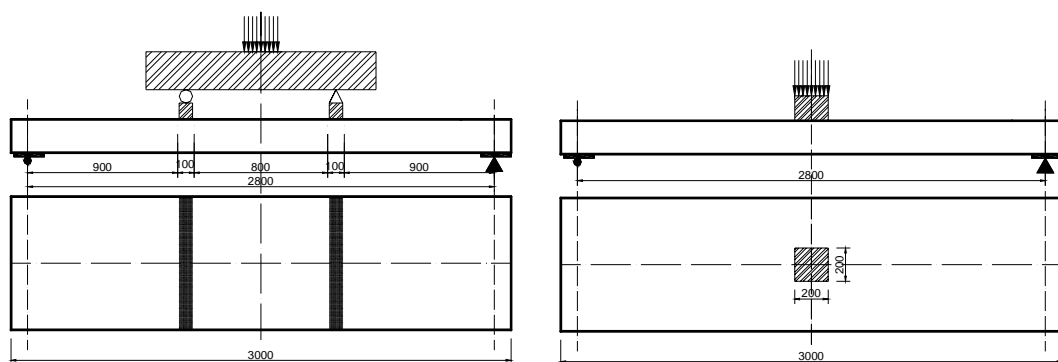
为检验 HD 板的受力性能是否能满足实际工程的需要，并研究 OFR 层厚度及角度对构件性能的影响，对 4 个 OFR 的角度和厚度不同的 HD 桥面板进行了静载和动载试验。各试件的参数和试验内容在表 1 中列出，其中缠绕角度是指与构件轴线的夹角。

表1 HD板的试件及试验方法

构件编号	长度	净跨	外部缠绕	试验方法	量测
HD0	3m	2.8m	无	静载 1：两点加载到 350kN 静载 2：中心加载到破坏	应变片 40 个 位移计 8 个
HDW3	3m	2.8m	$\pm 80^\circ$ 3mm	静载 1：两点加载到 350kN 静载 2：中心加载到破坏	应变片 40 个 位移计 8 个
HDW5	3m	2.8m	$\pm 80^\circ$ 5mm	静载 1：中心加载到 630kN 静载 2：两点加载到破坏	应变片 40 个 位移计 8 个
HDW3-60	3m	2.8m	$\pm 60^\circ$ 3mm	中心加疲劳荷载 2000000 次 取 9 个参考点，静载加至 150kN	应变片 2 个 位移计 3 个

静载试验在 5000kN 压力试验机上进行，两端简支，净跨 2.8m。进行 2 个工况的加载：(1) 两点加载作用钢梁的宽度为 100mm，沿构件整个宽度，下垫水泥砂浆垫层，加载点中线距离支座 0.95m，纯弯段 0.9m，如图 7(a)所示；(2) 中心点加载作用面积为 $200 \times 200\text{mm}^2$ ，钢块下垫水泥砂浆，如图 7(b)所示。疲劳试

验采用 400kN 疲劳试验机，加载频率为 4.4Hz，荷载幅值为 20kN~100kN，正弦波形加载，加载方式与静载中心点加载相同，如图 8 所示。静载试验采用导杆式位移计量测构件变形，表面粘贴应变片（树脂基 15AA）量测应变。疲劳试验采用非接触式电涡流传感器量测构件变形，并辅以应变片量测。



(a) 两点加载

(b) 中心点加载

图 7 静载试验加载



图 8 疲劳试验加载

3.2 静载试验现象

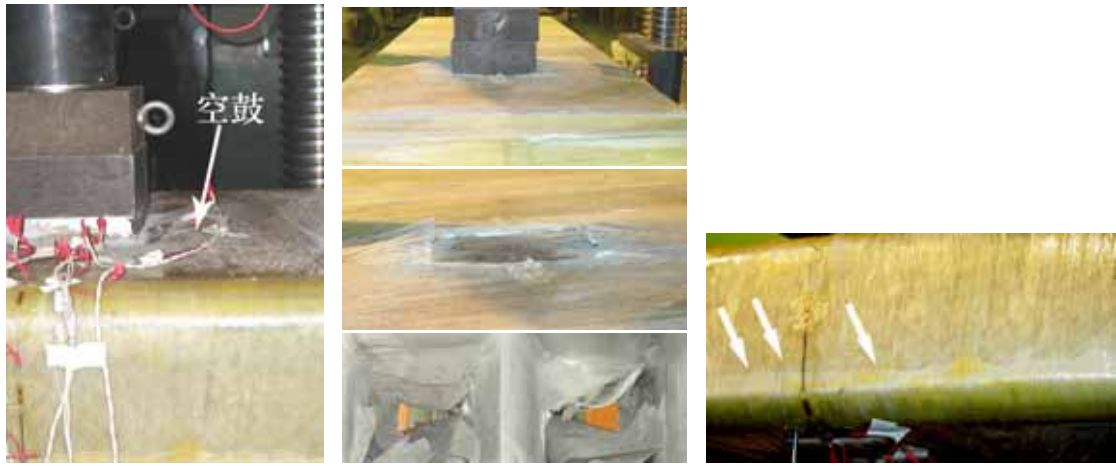
HD0 板首先进行非破坏的两点加载，最大总荷载（两侧分配梁上荷载之和）为 350kN。加载中构件表现为线弹性，跨中最大变形为 17.07mm，为跨度的 1/164，卸载后变形很快恢复。单点加载时荷载逐级施加，加至该级预定荷载值后卸载，再施加下一级荷载。第一级荷载为 300kN，此后每

级增加 150kN。第一级加载到达 200kN 左右时，开始有些“噼啪”响声发出；第二级加载在超过 300kN 时才开始有“噼啪”响声发出，称之为“首次超越损伤现象”^[3]；第三次加载至 488.5kN 时，构件突然发生破坏，下面板与芯管剥离，除支座处没有剥离开以外其它部位都完全剥开；卸载后，下面板和芯管间有宽约 5mm 的空隙，破坏形式如图 9 所示。检查构件外表，除底面板剥离以外其它部位无明显破坏。加载中，构件变形基本随荷载线性变化，当荷载超过 300kN 时，曲线略向下弯。构件中心点在破坏前的最大变形为 30.6mm，为跨度的 1/92。



图 9 HD0 的破坏形式

HDW3 的加载方案和加载制度与 HD0 完全相同。首先进行两点加载试验，加载中 HDW3 保持线弹性，构件无明显破坏，但在总荷载到达 300kN 左右时，有“噼啪”声音发出，而 HD0 板在同样的荷载时没有声音发出。跨中最大变形为 18.01mm，为跨度的 1/155。单点加载初始阶段，构件变形基本随荷载线性变化，“首次超越损伤现象”明显。在 400kN 左右，顶面加载点附近的外部缠绕层鼓起，如图 10(a)。加载接近 600kN 时 HDW3 发出了密集的响声，但没有发生显著的破坏，这时已经超过了 HD0 的极限承载力了。第四次加载到 618kN 时，荷载不再上升，连续发出巨大的声响，承载力迅速下降。在加载位置发生了冲切破坏：加载垫板下陷，外部缠绕层的纤维被切断，同时内部纤维缠绕管也发生了破坏，如图 10(b)。卸载后，还发现跨中附近构件侧面与底板交角处的 OFR 层出现泛白，并且有细微的裂纹，说明此处的 OFR 层发生了剥离破坏，如图 10(c)；但观察构件端部，面板与芯管之间没有错动。因此，最终导致 HDW3 板承载力丧失的破坏为局部冲切破坏，FRP 材料强度得到了利用。



(a) 外部缠绕层起鼓 (b) 冲切破坏 (c) OFR 层角部损伤

图 10 HDW3 的破坏形式及局部损伤

在 HDW3 的单点加载试验中，最终产生了局部冲切破坏，为能获得更多破坏模式，HDW5 首先进行单点加载非破坏性试验，再进行两点加载直至破坏。单点加载同样为逐级加载，最大荷载加至 630kN，超过 HDW3 单点加载时的最大荷载。第一次加载到 180kN 左右时，开始有“噼啪”的响声发出；第四次加载到 632kN，最大挠度变形达到 37.9mm（跨度的 1/74），变形显著，且顶面加载点附近 OFR 层鼓起，但 HDW5 仍能承受荷载。卸载静置 2 小时后，最大残余变形为 0.44mm。构件在单点加载中基本保持线弹性，在荷载超过 400kN 后曲线略向下弯，刚度略有降低。两点加载至破坏，在荷载达到 700kN 左右时，又开始有“噼啪”声发出，并逐渐密集，直到最终破坏。破坏时达到的最大荷载 1737kN，对应的跨中挠度为 91.7mm，约为跨度的 1/30。破坏前 HDW5 板的变形非常明显，“噼啪”响声非常密集，并且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。HDW5 在左侧加载点下出现明显的破坏，有一个明显的转角，呈折断状，如图 11(a)。构件表面上，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 11(b)。用数码相机拍摄芯管内部，发现在加载位置附近 4 个芯管的顶面和侧面都发生了破坏，可以看到有部分纤维断裂，如图 11(c)。构件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。



(a) 加载前，破坏前，破坏后



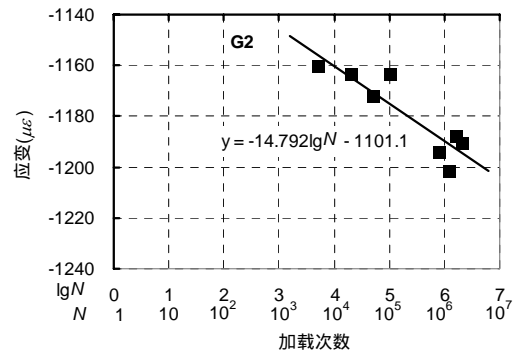
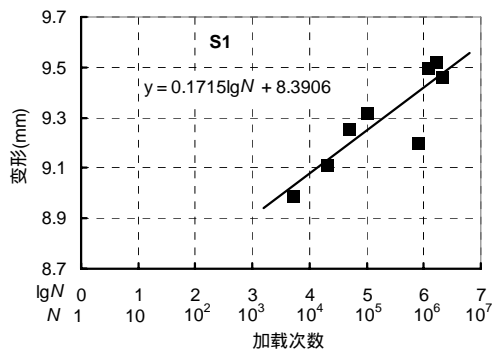
(b) 外部破坏形式



(c) 芯管内部破坏

图 11 HDW5 板的破坏

3.4 疲劳试验



(a) 跨中变形与疲劳试验次数的关系

(b) 上表面应变与疲劳试验次数的关系

图 12 HDW3-60 板疲劳试验的结果

在 HDW3-60 的疲劳试验加载中，构件基本处于弹性，挠曲变形明显，但没有明显的破坏现象，而且在整个试验过程中也一直都没有听到“噼啪”响声发出。加载结束后构件的残余变形较小，最大约为 0.3mm；观察构件外表与加载前没有差别。从量测结果来看，构件变形和应变随加载次数增多而增大，图 12(a)为经过不同加载次数后静载试验施加 150kN 时对应的跨中变形的变化，图 12(b)静载试验施加 150kN 时对应的上表面应变的变化。可以看到，在加载 1k 以后，随着加载次数增多，变形增大，应变增大。用对数函数形式对构件变形以及应变随加载增长的关系进行了拟合。试验结果表明，经过 2M 万次加载后，HDW3-60 的刚度有所降低，但 200 万次疲劳荷载对 FRP 空心桥面板的影响幅度相对较小，

挠度最大增幅仅为 6.8%，应变最大增长了 10.3%。

3.5 试验分析

对于 FRP 空心桥面板，变形是主要的设计控制因素，因此主要对各个构件的变形和刚度进行比较分析。比较各 HD 板单点加载的初始段的变形，如图 13(a) 所示。根据汽超 20-级荷载条件，最大轮压荷载为 70kN 时，变形不应超过 1/600 跨度(4.67mm)，满足该条件构件的荷载 - 位移曲线应达到或穿过图中阴影区域。可见，各构件都满足设计要求。同时，构件在工作段的荷载 - 位移关系保持较好的线性，且刚度相差不大。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最大为 10.8%。因此，厚度小于 5mm 的外部纤维缠绕层对 HD 板的刚度影响不大；60° 和 85° 的缠绕角度的差别也不明显。图 13(b) 为构件最后一次单点加载的荷载位移曲线的对比。可以看到，没有加载到破坏的 HDW5 和 HDW3-60 保持着较好的线性；HD0 在破坏前也基本保持线性，破坏突然；HDW3 则出现了一段“伪延性”，出现了一个平台段。

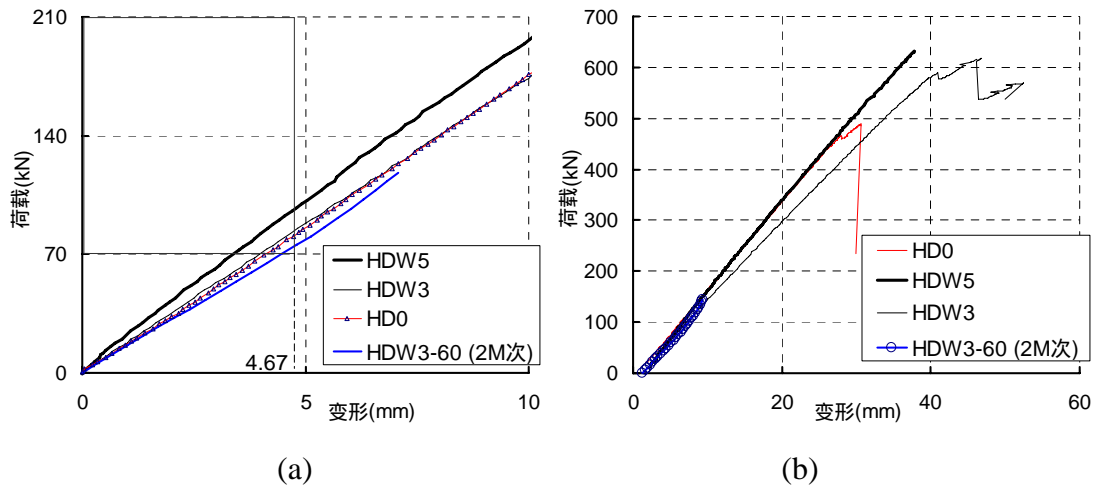


图 13 HD 系列板单点加载的荷载位移曲线对比

4 结论

通过 4 个 HD 系列空心桥板的试验（3 个静载破坏试验，1 个疲劳试验），有以下主要结论：

- (1) HD 板系列能够满足汽 - 超 20 荷载（70kN 轮压）作用下的变形要求，并且具有较高的承载能力，均在最大轮压荷载（100kN）4 倍以上；
- (2) HD 板具有较好的疲劳性能，HDW3-60 经过 200 万次模拟轮压加载，构件的最大变形和刚度的增幅都小于 7%；

- (3) 外部纤维缠绕层对于构件极限承载力的提高作用显著,承载力可提高 26.4% (HDW3 相对 HD0) 以上,极限变形能力提高 74.7%,并且使过于突然的破坏过程变缓,而构件重量仅增加 13.5%,即对于 HD 空心桥面板,3mm 厚的 OFR 即能达到防止底面板剥离破坏的目的。
- (4) 外部纤维缠绕层对于 HD 板的破坏模式影响明显,可以有效的防止面板剥离破坏模式的发生,使 FRP 材料的强度得到充分利用。

参考文献

- [1] Aixi Zhou, J. T. Coleman, J. J. Lesko and T. E. Cousins. Structural Analysis of FRP Bridge deck system from Adhesively Bonded Pultrusion. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd.2001:1413-1420
- [2] 杨允表, 石洞. 复合材料在桥梁工程中的应用. 桥梁建筑, 1997, (4):1-4
- [3] Feng P, Ye L P, Zhang L W, et al. Experimental study on outside filament winding reinforced FRP decks. In: El-Badry M M, Dunaszegi L, eds. Proc. 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-4). Calgary, Alberta, Canada: CSCE, 2004.(CD-ROM)

本文为国家自然科学基金重点资助项目(50238030)和国家 863 计划(编号:2001AA336010)资助。

第一作者:冯鹏 男 1977 年 10 月出生 博士 讲师。