

FRP 桥梁上部结构的撞击破坏实验研究

冯 鹏, 胡 楠, 何水涛, 陆新征

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

摘要: 近年来, 纤维增强复合材料(FRP)已经在桥梁工程中获得了逐步推广和应用, 尤其是在人行天桥的设计和建设中。但是, 超高车辆撞击城市桥梁上部结构的事故频繁发生, 严重威胁城市交通的正常运行。为确保 FRP 结构能更广泛地应用于城市桥梁中, 提高其作为上部结构的抗撞能力, 需要深入研究超高车辆-FRP 结构碰撞机理。本文基于碰撞试验, 对典型的超高车辆-桥梁上部结构碰撞进行了模拟, 确定了此类梁的撞击破坏过程、位移响应、作用方式和损坏机理。分析结果将用于有限元分析和验证中, 从而改进 FRP 上部结构应对此类冲击荷载时的结构响应。

关键词: 桥梁工程; 撞击实验; FRP 结构; 桥梁上部结构; 超高车辆

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2011)05-0024-05

1 引言

近年来, FRP 以其高强、轻质、耐腐蚀等优点, 成为土木工程的一种新型结构材料。除了应用 FRP 片材加固修补结构工程外, FRP 结构和 FRP 组合结构的应用也日益受到工程界的重视^[1]。从上世纪 70 年代开始, FRP 材料就开始在桥梁工程中尝试应用。近年来, FRP 材料的种类和生产手段迅速发展, 产品形式不断更新, 使得 FRP 材料及结构在桥梁工程中应用的形式也更加多样, 如 FRP 人行桥梁、FRP 预应力筋、FRP 桥面板等。由于 FRP 轻质高强的优点, 在桥梁工程中已显现出广阔的应用前景^[2]。

然而, FRP 材料在未来桥梁工程的探索中同样需要考虑传统材料所面对的问题。其中, 超高车辆撞击下桥梁上部结构的损坏就是需要考察的项目之一。随着城市立体交通的发展, 由于驾驶人员素质不高, 加上监管力度不到位, 超高车辆与立交桥的碰撞事故屡见不鲜。超高车辆撞击桥梁上部结构严重威胁城市交通的正常运行。仅以北京为例, 50% 的桥梁上部结构曾遭超高车辆撞击, 由此损坏的桥梁占已损坏桥梁总数的 20% 以上。为减少超高车辆撞击桥梁上部结构造成的损失, 除了采取加强交通管理这类“软手段”, 改进桥梁设计, 提高桥梁上部结构抗撞能力这类“硬手段”也必不可少^[3]。

国内外目前对此类课题已经进行了相关研究, 但结构碰撞多集中于评价车撞桥墩或者车撞护栏等, 对于上部结构研究成果较少。已有的研究成果

也主要集中于混凝土和钢结构^[4-10], 考察 FRP 上部结构碰撞性能文献十分有限。因此, 如何科学评价超高车辆撞击对 FRP 桥梁的破坏, 进而在桥梁的设计、运营、维护等过程中对此类破坏进行正确考虑, 是一个有着重要应用价值的课题。本文基于碰撞实验, 对典型的超高车辆-桥梁上部结构碰撞进行了模拟, 确定了此类梁的撞击破坏过程、位移响应、作用方式、损坏机理以及荷载大小。分析结果将用于有限元分析和验证中, 从而改进 FRP 上部结构应对此类冲击荷载时的结构响应。

2 试验设计

2.1 试验构件

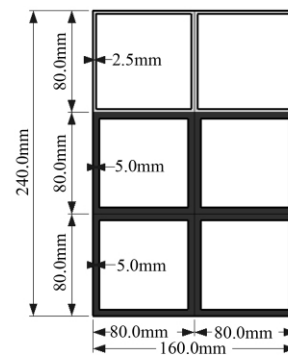


图 1 FRP 梁横截面

试件高 240mm, 宽 160mm, 长 4000mm, 由六个 GFRP 拉挤型材粘结形成, 如图 1 和图 2 所示。六个拉挤型材外部轮廓尺寸相同, 其中顶部层由两个壁厚为 2.5mm 的矩形构件组成, 中部和底部层壁厚分别为 5mm。

收稿日期: 2011-08-16

本文作者还有叶利平。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50808106); 科技部国际合作项目(2010DFR50400); 清华大学骨干人才计划项目

作者简介: 冯鹏(1977-), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事 FRP 结构应用与新型结构的研究。

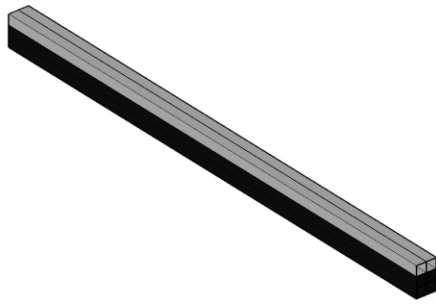


图 2 FRP 梁结构三维模型

油罐车原型为 20t 中型油车,根据相似关系,可计算得到油罐典型尺寸,如表 1 所示。常用油罐内设有防波板,保守地认为,撞击时,油与罐体为一整体,不会产生晃动现象。试验模拟时,仅考虑罐体与箱梁的撞击,油罐车其它部分的质量通过配重形式实现。罐体的具体尺寸如图 3 所示。

表 1 油罐车试验参数

	长度/mm	内径/mm	壁厚/mm
原型典型值	7300	2000	10
模型值	1460	400	2

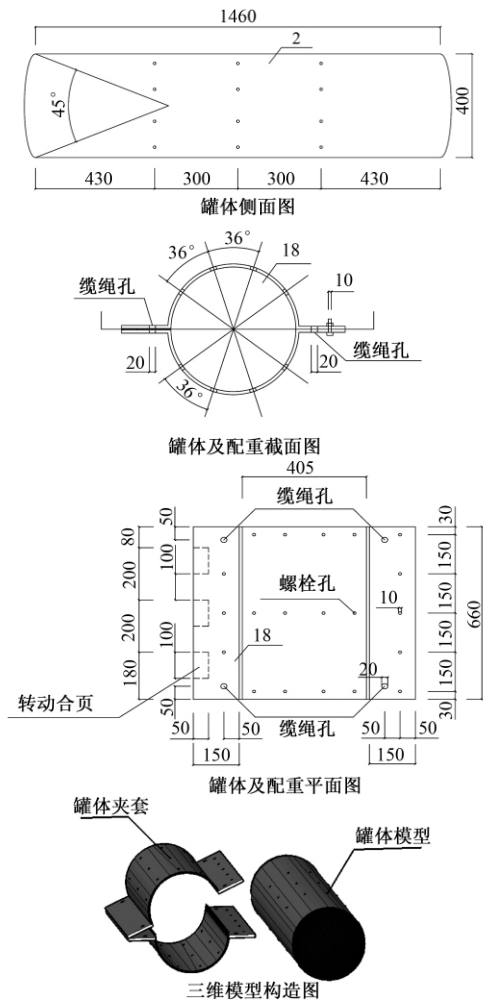


图 3 油罐车模型及尺寸图

2.2 试验安装及数据采集

模型试验采用摆锤的方式使桥梁上部结构模型受到撞击作用,即采用手拉葫芦将罐体提升至相应的高度,然后通过剪断铁丝将其释放,在罐体运动至最低点处撞击桥梁上部结构模型。将油罐车模型提升到一定高度后 ($h = v^2/2g = 2.777^2/2 \times 9.8 = 0.393$) 将罐体释放,在重力作用下,罐体在摆动最低点可获得 10km/h 的水平撞击速度。依据现有场地尺寸及以上模型设计图,场地布置如图 4 和图 5 所示。

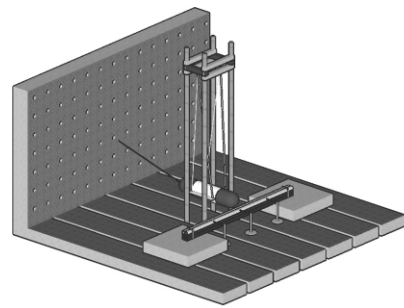


图 4 试验场地三维模拟图

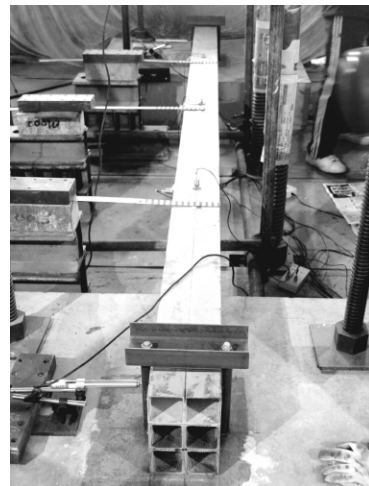


图 5 试验安装现场

为获取箱梁的最大位移响应,撞击方向上箱梁的边界条件为简支,其实现方式为:在竖直(同时垂直于梁轴方向和撞击方向)方向上,用钢棍将箱梁模型固定起来,并在箱梁顶面板连接和固定,如图 6 所示。试验的目的是获取箱梁在撞击后的位移响应和破坏模式,基于此目的,共布置六个测点,分别位于跨中、左右四分之一跨处,每处有竖直、水平方向两个测点,如图 7 所示。高速摄影仪放置于梁顶面上方,对整个撞击过程进行拍摄。

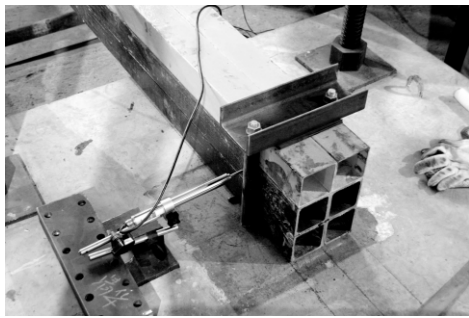


图 6 试验梁支座固定与安装

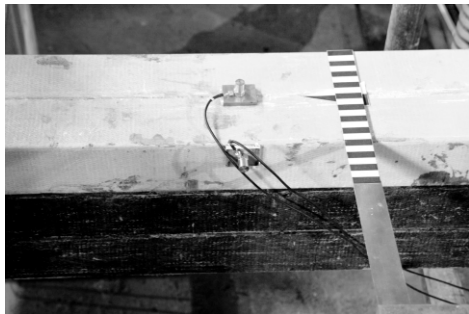


图 7 试验数据采集方式

为确定试验设备采集数据的精度及数据采集设计的可行性,还进行了探索性的模型试验。将加速度传感器和位移传感器安装在同一测点的两侧,通过人工敲击,使被测物体发生振动响应,即获得同一位置的加速度和位移时程曲线,然后分别对加速度和位移进行积分和差分处理,同时获得两组速度数据并对两组数据进行比较以考察测量精度。图 8、图 9 分别为探索性试验所取得的加速度和位移时程曲线。将两组数据分别处理后,进行对比,由图 10 和图 11 结果对比可知,两组数据变化一致,且峰值相差很小,故测量设计可行。

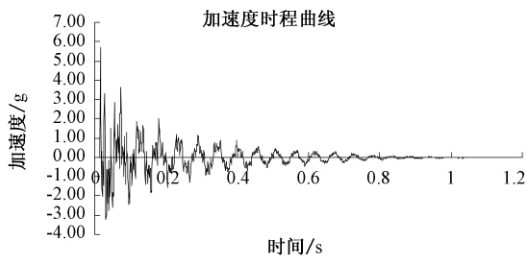


图 8 加速度时程曲线

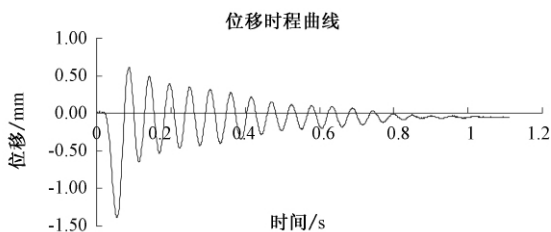


图 9 位移时程曲线

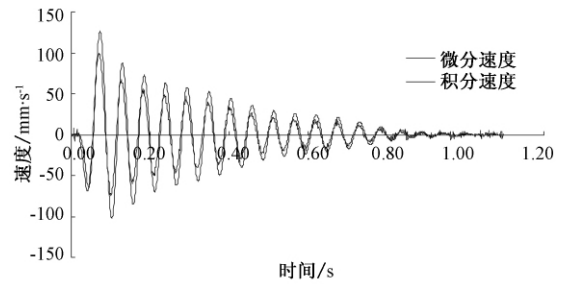


图 10 速度时程对比图

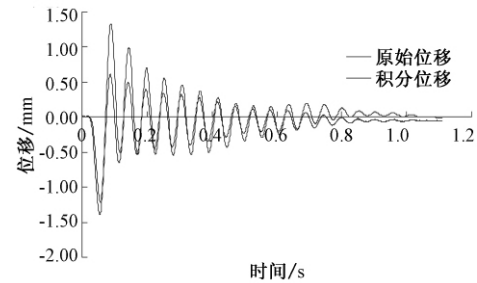


图 11 位移时程对比图

2.3 试验过程

试件架设安装完成后,对数据采集系统进行调试。试验过程即模拟超车辆撞击作用。油罐释放后撞击 FRP 梁的跨中位置,而后发生反弹。图 12 为高速摄像机拍摄的部分画面。在撞击过程中,由于 FRP 梁发生了较大的位移,但油罐的撞击力没有使试件发生整体倾覆,同时支座位置的固定也未发生明显的破坏,如图 13 所示。

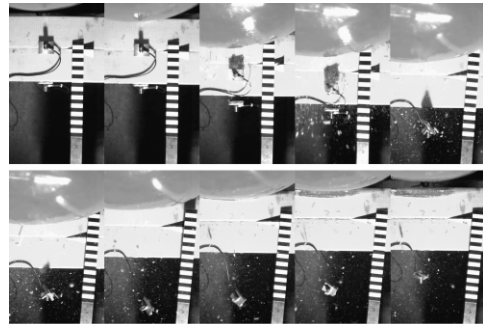


图 12 高速摄影机下的撞击过程



图 13 撞击时刻侧面捕捉图

3 试验结果

3.1 位移时程分析

对于撞击位移时程分析,采用了两种分析手段,并对二者进行了对比:即高速摄影图像分析结果和跨中水平方向加速度计积分结果。在高速摄影图像分析中,摄影速度为每秒1000帧,使用Photoshop对图片进行分析,具体过程为:取图像中与拍摄标记点在同一平面内的标尺(有黑白相间条纹,宽10mm)为对象,取相邻两条纹,查取相应像素数,计算每个像素对应实际尺寸。然后记录每帧图像中标记点所在像素位置,再乘以每个像素对应的实际尺寸,可得到实际位移时程曲线,可得标记点的位移时程曲线,如图14所示。其中,高速摄影分析曲线中位移最大值为72.26mm。加速度积分是采用地震波处理软件SeismoSignal实施的,其中Baseline Correction选用三次;Filtering选用Butterworth;Bandpass为0.01Hz~60Hz。由于加速度位移计在撞击过程时脱落,因此在本实验中未对积分结果进行整理。

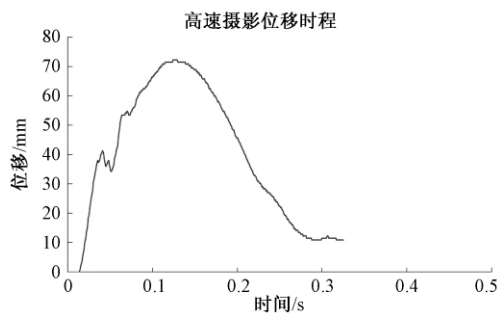


图14 Photoshop分析结果

3.2 破坏模式

在对一系列超高车辆撞击桥梁上部结构典型事故的有限元仿真中表明,超高车辆撞击导致桥梁上部结构的损坏主要包括整体型损坏和局部型损坏两类^[4]。局部型损坏是由局部冲剪作用引起的碰撞区域损坏,而整体型损坏与整体位移响应相关。在油罐车的撞击下,FRP梁桥模型没有明显的整体型破坏,FRP试件未发生因扭转变形而导致的扭转损伤,也没有因水平弯曲和竖直弯曲的变形而导致弯曲损伤。油罐表面上有一定的凹陷,但是没有钢梁撞击试验中明显。整个撞击区域最大长度约140mm。因此,FRP梁的损伤应以局部破坏为主。在已有的撞击试验中发现^[11],GFRP型材较CFRP型材更脆,但是能在破坏前承担更多的撞击能量。从图15可以看出,顶层FRP型材与底部两层型材发生了明显

的错动,层间粘结面已经破坏。但是由于型材在两侧支座位置获得了良好的固定,梁体本身并未发生脱落。撞击区域的纤维发生了一定程度上的断裂,接触面积约为54mm²,如图16所示。

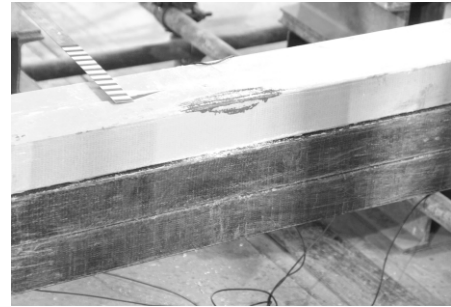


图15 试件梁的层间错动

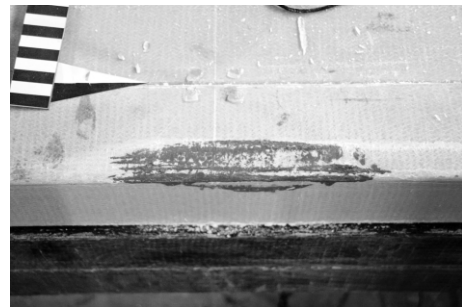


图16 FRP梁撞击位置的纤维破坏

4 不同材料上部结构破坏模式对比

不同材料的上部结构在撞击荷载下表现出不同的破坏模式,对于今后FRP梁结构在体系和构造方面的改进同样值得借鉴。清华大学结构与振动实验室进行了一系列油罐车撞击桥梁结构试验,其中包括钢箱梁、混凝土梁以及钢板梁。经油罐车模型撞击后,钢板梁模型在撞击局部产生较为明显的局部破坏,最大残余变形约为40mm。其他部位尤其是钢板梁的另一边腹板几乎没有任何破坏痕迹。而油罐车模型在撞击接触位置仅出现了刮痕,变形很小。可见,在超高车辆的撞击下,钢板梁以局部破坏为主要破坏模式。在油罐车的撞击下,钢箱梁桥模型没有明显的局部破坏,油罐车有明显的凹陷,最深处达30mm。整个撞击区域最大长度约为250mm,故钢箱梁应以整体破坏为主。在对钢箱梁桥进行撞击防护时,应把重点放在防止其落梁破坏上。混凝土梁破坏主要也是由局部型损坏引起,在局部冲剪作用下,碰撞区域混凝土和钢筋严重受损,甚至出现预应力筋屈服,从而导致被撞梁竖向刚度减小,正常使用承载力下降。

根据超高车辆撞击导致的桥梁上部结构破坏模式分析和事故案例调查,可以确定桥梁上部结构各种位移响应中,绕纵轴扭转变形、水平刚体平动和水平弯曲变形是主要的有害位移。竖向承载力损失是局部型损坏和整体型损坏综合作用的结果,为评价桥梁上部结构损坏程度提供了宏观指标^[4]。但是,桥梁上部结构即使未出现竖向承载力明显损失,也仍然存在由整体变形引起的各种损伤,从而对桥梁正常使用与安全产生隐患。因此,还需根据不同的整体变形模式,评价不同撞击作用大小对应的损伤程度,从而有针对性地进行防护与修复。工程设计需要针对这两类损坏模式,采用不同的设计对策。

5 结 论

本文基于一项撞击试验,对 FRP 桥梁上部结构在超高车辆撞击下的破坏模式进行了探讨,为研究超高车辆-桥梁上部结构碰撞机理提供了有力的实验基础。随着 FRP 材料在桥梁设计和建设中的不断推广,超高车辆撞击引起的桥梁上部结构破坏问题值得进一步关注。通过本实验中的 FRP 型材层间错动表明,在撞击荷载作用下,此类结构形式或构造细节仍需进一步改进。在今后 FRP 桥梁上部结构的开发中,一方面需要充分考虑到冲击荷载对桥梁的影响,另一方面需要充分利用 FRP 材料自身的优势。这样一来,FRP 材料才能在桥梁建设中获得更广泛的推广和应用。

参考文献

- [1] 叶列平,冯鹏. 纤维增强复合材料在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 25-37.
- [2] 冯鹏,叶列平. FRP 材料及结构在桥梁工程中的新应用[C]. 第十五届全国桥梁学术会议论文集[A]. 上海: 同济大学出版社, 2002. 555-560.
- [3] 陆新征,张炎圣,叶列平,何水涛. 超高车辆-桥梁上部结构碰撞的破坏模式与荷载计算[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 60-67.
- [4] 张炎圣. 超高车辆-桥梁上部结构碰撞: 机理分析与荷载计算[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [5] 刘建成,顾永宁,胡志强. 桥墩在船桥碰撞中的响应及损伤分析[J]. 公路, 2002, 10(10): 33-41.
- [6] 张炎圣,陆新征,宁静,江见鲸. 超高车辆撞击组合结构桥梁的仿真分析[J]. 交通与计算机, 2007, 3(25): 65-69.
- [7] BARAN Eray, ROHNE Ryan, FRENCH Catherine E., SCHULTZ Arturo E. Experimental Determination of Resistance Characteristics of Support Details Used in Prestressed Concrete Bridge Girders [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2009, 14(5): 319-326.
- [8] CHUNG C. Fu, BURHOUSE J. Ross, CHANG Gang-Len. Over-height vehicle collisions with highway bridges [J]. Journal Transportation Research Record, 2007, (1865): 80-88.
- [9] EL-TAWIL Sherif, SEVERINO Edward, FONSECA, Priscilla. Vehicle Collision with Bridge Piers [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2005, 10(3): 345-353.
- [10] YANG Mi-jia, QIAO Pi-zhong. Analysis of Cushion Systems for Impact Protection Design of Bridges against Overheight Vehicle Collision [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(12): 1219-1227.
- [11] HOSSEINZADEH Ramin, MEHRDAD SHOKRIEH Mahmood, LESSARD Larry. Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts [J]. Composites Science and Technology, 2006, (66): 61-68.

COLLISION TEST OF A FRP BRIDGE BEAM

FENG Peng, HU Nan, HE Shui-tao, LU Xin-zheng

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry,
Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the increasing expansion in civil engineering in recent years, fiber reinforced polymer (FRP) has been recognized as a competitive material to those conventional materials in bridge structures, especially for footbridge design and construction. However, collision accidents between over-high trucks and bridge superstructures frequently happened, which seriously threaten the safety of bridges and traffic system of city. To ensure FRP structure can be more widely used for bridge construction, FRP structure-vehicle collision mechanism should be studied, so as to improve collision-resisted ability of bridge superstructure. In this paper, a collision testing between over-high trucks and bridge superstructure was carried out, including failure process, displacement response, and failure mode and mechanism. The test results will be used for finite element analysis and further verification, so as to improve structural performance of FRP superstructure under such impact load.

Key words: bridge engineering; collision test; FRP structure; superstructure; over-high truck