

无主筋 UHPC 预制简支梁桥荷载试验研究

方明, 赵作富

(广州公路工程集团有限公司, 广东 广州 510075)

摘要: 为检验中国首座无主筋工字形 UHPC(超高性能混凝土)预制简支梁桥(广州北环高速公路沙贝立交 F 匝道桥)成桥后的实际承载能力和工作性能,通过静载和动载试验分别测试不同加载条件下主梁跨中截面的应变、挠度及桥梁自振特性,并将试验结果与 MIDAS/Civil 软件计算结果进行对比,结果表明该桥主梁强度和刚度均满足规范要求,结构具有良好的动力性能,满足使用要求。

关键词: 桥梁;无主筋预制简支梁桥;超高性能混凝土(UHPC);静载试验;动载试验

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)05-0111-05

通常通过荷载试验评定新建桥梁的实际承载能力和工作性能,用于指导桥梁运营和养护。段文杰等对某连续梁桥进行静动载试验研究,结果表明该桥承载能力符合设计要求。张鹏等对单跨下承式钢管混凝土拱桥进行静动载试验,结果表明该桥处于弹性工作状态,整体刚度大于理论值,且吊杆索力分布均匀,其大小与设计值吻合。刘耀东等对六塔七跨波形钢腹板 PC 箱梁斜拉桥进行静动载试验,结果表明该桥主塔具有足够的强度和刚度,斜拉索受力合理,主桥动力性能良好,结构实际受力和理论计算基本一致,满足设计运营要求。广州北环高速公路沙贝立交 F 匝道桥为中国首座无主筋工字形 UHPC(超高性能混凝土)预制简支梁桥,属于特殊结构形式的桥梁,成桥后通过荷载试验对其进行静力和动力特性检测尤为重要。

1 工程概况

广州北环高速公路沙贝立交 F 匝道既有桥梁跨度为 10 m,桥下净空为 4.0 m,限高 3.5 m。拟扩建为跨径 16 m 预应力 UHPC 简支工字形梁桥,桥梁由 6 片梁(4 片中梁和 2 片边梁)组成,梁顶设置

15 cm 厚 C50 混凝土和 2 cm 厚沥青超薄磨耗层桥面铺装。梁体采用预制安装,预制梁宽 0.40 m、高 0.62 m,跨中腹板厚度为 10 cm,支点附近腹板厚度为 40 cm,腹板加厚段长 0.5 m。各片梁之间采用 3 cm 厚预制 UHPC 板连接,每个支点处设置一道端横隔板。桥型和跨中横断面布置分别见图 1、图 2。



图 1 无主筋 UHPC 预制简支梁桥桥型

2 静载试验

2.1 有限元模型

采用 MIDAS/Civil 有限元软件建立沙贝立交 F 匝道桥有限元模型(见图 3),尺寸按照实际结构模拟。建模时作如下假设:混凝土、钢筋为理想弹性材料;截面变形符合平截面假定;考虑混凝土铺装对

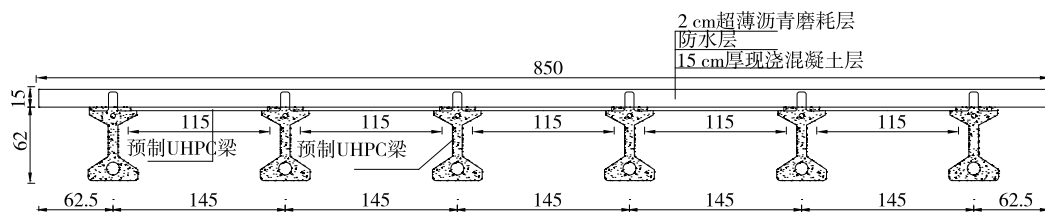


图 2 无主筋 UHPC 预制简支梁桥跨中横断面布置(单位:cm)

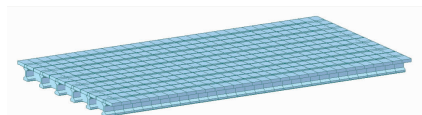


图3 无主筋 UHPC 预制简支梁有限元模型

上部结构抗弯刚度的影响;不考虑防撞墙对边梁抗弯刚度的影响。

2.2 测点布置

(1) 挠度、沉降测点布置。在各片梁体跨中底面设置 1 个挠度测点,共 6 个。在各片梁体桥台底面设置 1 个沉降测点,共 12 个。

(2) 应变测点布置。应变测试断面为跨中截面,测点布置在各片 UHPC 梁底面和 3[#] 梁腹板侧面,其中 3[#] T 梁腹板侧面布置 3 个测点,共 9 个测点。

2.3 试验荷载工况

静载试验采用偏载试验工况,使跨中弯矩达到最大。试验采用 4 辆双后轴载重汽车,车辆的轴距和轴重见表 1,试验荷载加载顺序见表 2。

2.4 加载效率

根据 JTG/T J21—01—2015《公路桥梁荷载试验规程》,结合该项目实际情况,静载试验以跨中截

表 1 试验车辆的轴距和轴重

| 车辆编号 | 车辆总重/t | 后轴重/t | 轴距 1/m | 轴距 2/m |
|------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 27.4 | 22.5 | 3.8 | 1.4 |
| 2 | 27.9 | 21.6 | 3.8 | 1.4 |
| 3 | 27.7 | 22.8 | 3.8 | 1.4 |
| 4 | 27.2 | 22.3 | 3.8 | 1.4 |

表 2 试验荷载加载顺序

| 载位 | 测试内容 |
|--|-------------------|
| 载位 1:1 [#] 车 | 梁体变形 |
| 载位 2:1 [#] 车+2 [#] 车 | 控制截面底面及侧面应变 |
| 载位 3:1 [#] 车+2 [#] 车+3 [#] 车 | 裂缝观测 |
| 载位 4(满载):1 [#] 车+2 [#] 车+3 [#] 车+4 [#] 车 | 支座沉降观测 残余挠度及应变 |

面设计弯矩作为控制弯矩。满载时 3[#] 梁跨中弯矩理论计算值为 722.6 kN·m,试验计算值为 630.0 kN·m,试验荷载加载效率为 0.87。

2.5 试验结果与分析

2.5.1 应变测试结果与分析

各级荷载作用下 UHPC 梁应变实测值见表 3, 3[#] 梁试验弯矩效率见表 4。

表 3 各级荷载作用下各测点应变实测值

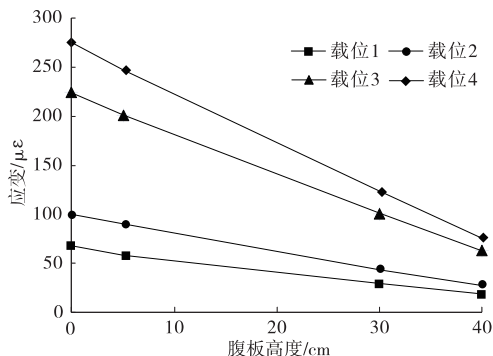
| 梁号 | 测点位置 | 测点号 | 各级荷载作用下应变值/ $\mu\epsilon$ | | | | 卸载时应变值/ $\mu\epsilon$ |
|----|-----------|-----|---------------------------|------|------|------|-----------------------|
| | | | 载位 1 | 载位 2 | 载位 3 | 载位 4 | |
| 1 | 底面 | 1 | 71 | 112 | 147 | 165 | 4 |
| 2 | 底面 | 2 | 78 | 114 | 184 | 224 | 11 |
| 3 | 底面 | 3 | 68 | 100 | 224 | 275 | 17 |
| | 距梁底 5 cm | 3-1 | 59 | 90 | 201 | 247 | 16 |
| | 距梁底 30 cm | 3-2 | 30 | 44 | 101 | 123 | 6 |
| | 距梁底 40 cm | 3-3 | 19 | 28 | 63 | 76 | 2 |
| 4 | 底面 | 4 | 39 | 64 | 203 | 251 | 18 |
| 5 | 底面 | 5 | 19 | 31 | 141 | 178 | 13 |
| 6 | 底面 | 6 | 3 | 5 | 52 | 79 | 5 |

表 4 各级荷载作用下 3[#] 梁试验弯矩效率

| 载位 | 试验弯矩效率 | 载位 | 试验弯矩效率 |
|------|--------|------|--------|
| 载位 1 | 0.29 | 载位 3 | 0.74 |
| 载位 2 | 0.42 | 载位 4 | 0.87 |

3[#] 梁实测弹性应变沿梁高的分布见图 4。从图 4 可见其应变沿梁高基本呈线性变化。

3[#] 梁底实测加载效率—平均应变见图 5。从图 5 可见其实测梁底应变值与理论计算值的变化趋势基本一致。

图 4 各级荷载作用下 3[#] 梁应变沿截面高度的分布

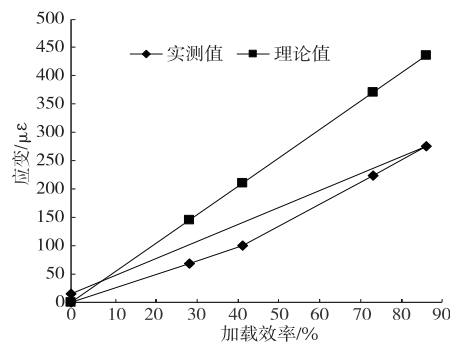


图 5 各级荷载作用下 3# 梁底面梁底加载效率—平均应变

满载时控制截面各梁梁底应变实测值、残余应变、弹性应变、理论计算应变、校验系数及相对残余应变见表 5,实测弹性应变与理论计算应变对比见图 6。根据试验结果,各梁梁底弹性应变均小于理论计算应变,实测应变曲线与理论计算应变曲线的变化规律一致,应变校验系数满足规范要求,表明结构强度满足承载能力极限状态;各梁相对残余应变为 0.02~0.07,表明结构整体弹性状态较好。

表 5 满载时跨中梁底应变值

| 梁号 | 实测应变/ $\mu\epsilon$ | 残余应变/ $\mu\epsilon$ | 弹性应变/ $\mu\epsilon$ | 理论计算应变/ $\mu\epsilon$ | 校验系数 | 相对残余应变 |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------|--------|
| 1 | 165 | 4 | 161 | 375 | 0.43 | 0.02 |
| 2 | 224 | 11 | 213 | 391 | 0.54 | 0.05 |
| 3 | 275 | 17 | 258 | 443 | 0.58 | 0.06 |
| 4 | 251 | 18 | 233 | 360 | 0.65 | 0.07 |
| 5 | 178 | 13 | 165 | 272 | 0.61 | 0.07 |
| 6 | 79 | 5 | 74 | 113 | 0.65 | 0.06 |

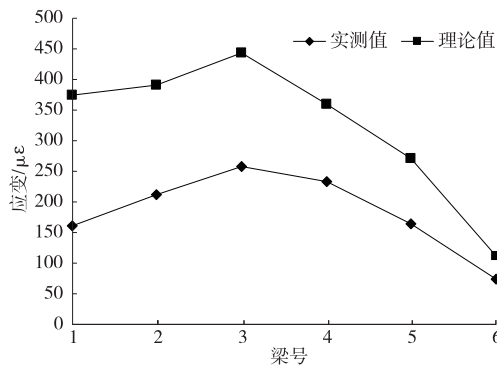


图 6 满载时跨中截面实测弹性应变与理论值对比

2.5.2 挠度测试结果与分析

各级荷载作用下各测点挠度实测值见表 6,满载时跨中截面挠度修正值、卸载后残余变形值、最大弹性挠度、理论计算挠度、校验系数及相对残余位移见表 7,满载时实测弹性挠度与理论计算挠度对比见图 7。根据试验结果,满载时跨中截面各测点弹性挠度均小于理论计算值,实测应变曲线与理论计算应变曲线的变化规律一致,挠度校验系数均满足规范要求,表明结构刚度满足正常使用极限状态;各梁相对残余位移为0.05~0.09,结构整体弹性状态较好。

表 6 各级荷载作用下各测点挠度实测值

| 梁号 | 测点位置 | 各级荷载作用下挠度/mm | | | | 卸载时挠度/mm |
|----|------|--------------|------|-------|-------|----------|
| | | 载位 1 | 载位 2 | 载位 3 | 载位 4 | |
| 1 | 0# 台 | 0.04 | 0.10 | 0.15 | 0.19 | 0.13 |
| | 跨中 | 2.89 | 5.16 | 7.89 | 9.67 | 0.50 |
| | 1# 台 | 0.46 | 1.09 | 1.25 | 1.47 | 0.10 |
| 2 | 0# 台 | 0.05 | 0.08 | 0.12 | 0.21 | 0.06 |
| | 跨中 | 3.23 | 5.54 | 10.61 | 13.64 | 0.78 |
| | 1# 台 | 0.49 | 1.00 | 1.52 | 2.03 | 0.21 |
| 3 | 0# 台 | 0.02 | 0.06 | 0.10 | 0.26 | 0.11 |
| | 跨中 | 2.64 | 4.79 | 11.61 | 15.76 | 0.99 |
| | 1# 台 | 0.47 | 0.81 | 1.55 | 2.22 | 0.36 |
| 4 | 0# 台 | 0.02 | 0.06 | 0.12 | 0.33 | 0.08 |
| | 跨中 | 1.79 | 3.27 | 10.55 | 14.67 | 1.05 |
| | 1# 台 | 0.25 | 0.29 | 0.97 | 1.60 | 0.15 |

续表 6

| 梁号 | 测点位置 | 各级荷载作用下挠度/mm | | | | 卸载时挠度/ mm |
|----|------------------|--------------|------|------|-------|--------------|
| | | 载位 1 | 载位 2 | 载位 3 | 载位 4 | |
| 5 | 0 [#] 台 | 0.01 | 0.04 | 0.13 | 0.27 | 0.06 |
| | 跨中 | 0.93 | 1.64 | 7.19 | 10.56 | 0.92 |
| | 1 [#] 台 | 0.10 | 0.19 | 0.80 | 1.27 | 0.14 |
| 6 | 0 [#] 台 | 0.01 | 0.05 | 0.05 | 0.12 | 0.05 |
| | 跨中 | 0.01 | 0.17 | 2.71 | 4.44 | 0.27 |
| | 1 [#] 台 | 0.06 | 0.06 | 0.49 | 0.86 | 0.09 |

注:挠度向下为正。下同。

表 7 满载时跨中截面挠度值

| 梁号 | 支座修正后挠度/mm | 残余变形/mm | 弹性挠度/mm | 理论计算挠度/mm | 校验系数 | 相对残余位移 |
|----|------------|---------|---------|-----------|------|--------|
| 1 | 8.84 | 0.38 | 8.46 | 22.64 | 0.37 | 0.05 |
| 2 | 12.52 | 0.64 | 11.88 | 23.66 | 0.50 | 0.05 |
| 3 | 14.52 | 0.75 | 13.77 | 25.77 | 0.53 | 0.05 |
| 4 | 13.71 | 0.93 | 12.78 | 21.45 | 0.60 | 0.07 |
| 5 | 9.79 | 0.81 | 8.98 | 16.01 | 0.56 | 0.09 |
| 6 | 3.95 | 0.20 | 3.75 | 7.52 | 0.50 | 0.05 |

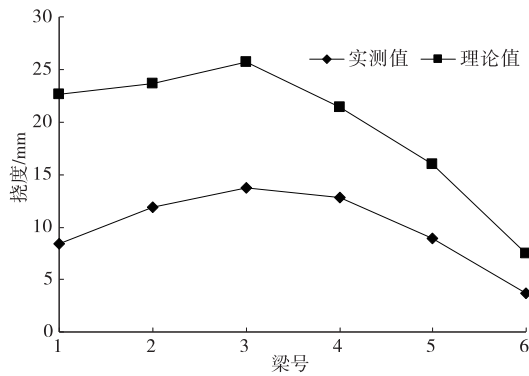


图 7 满载时跨中截面弹性挠度实测值与理论值对比

3.3 动力响应测试结果

桥梁阻尼比测试结果见图 8。该桥阻尼比为 0.04,阻尼比合理。

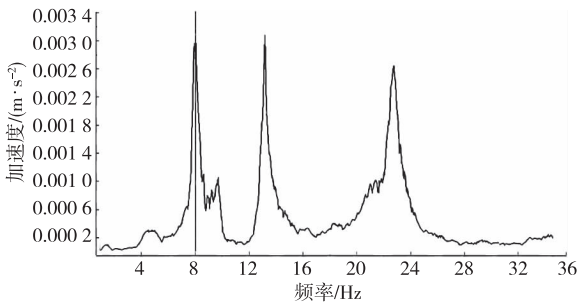


图 8 阻尼比测试结果

3 动载试验

3.1 试验内容

(1) 跑车试验。取一辆 27 t 车辆按 20 km/h、30 km/h、40 km/h 的速度进行跑车试验,测量不同行驶速度下控制截面的动应变和动挠度。

(2) 脉动试验。采用高灵敏度的传感器和放大器测量桥梁结构在环境振动作用下的振动,然后对其进行频谱分析,求出结构自振特性。

3.2 测点布置

在跨中和 1/4 跨布设 3 个竖向加速度传感器,在跨中布设 1 个水平向加速度传感器。

各车速下跨中截面实测冲击系数见表 8,与规范理论计算值 0.351 接近,表明桥面平顺。

表 8 不同车速时跨中截面实测冲击系数

| 速度/(km·h ⁻¹) | 冲击系数 | 速度/(km·h ⁻¹) | 冲击系数 |
|--------------------------|-------|--------------------------|-------|
| 20 | 0.285 | 40 | 0.309 |
| 30 | 0.313 | | |

结构实测频谱见图 9,结构的固有频率为 7.875 Hz。利用 MIDAS/Civil 进行结构动力分析,结果见图 10,结构理论基频为 5.28 Hz。结构的实测固有频率比理论值大,桥梁动刚度满足使用要求。

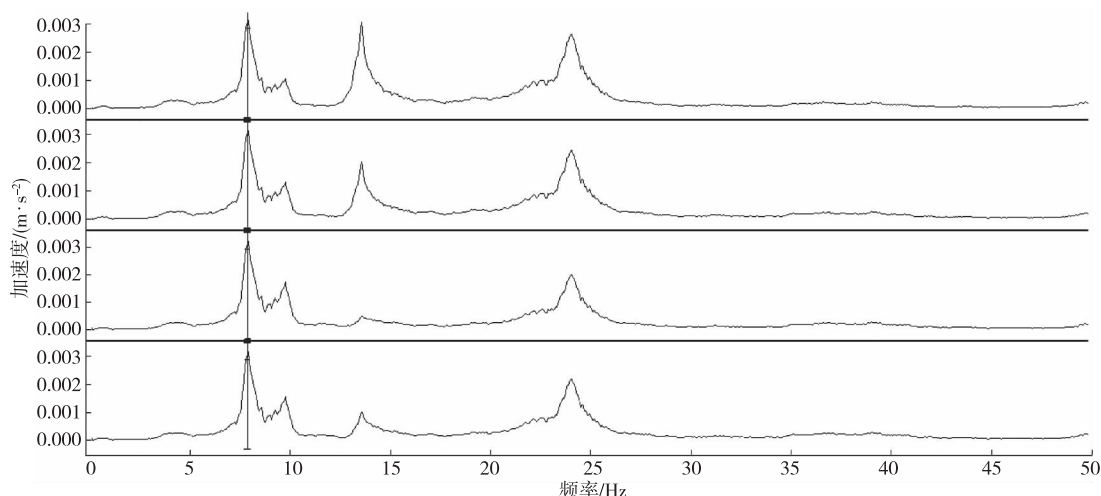


图9 实测频谱

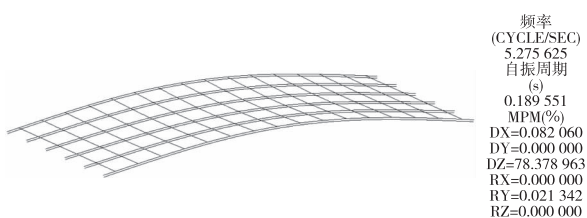


图10 一阶阵型

4 结论

(1) 静载作用下,广州北环高速公路沙贝立交F匝道桥各跨中截面的应变和挠度校验系数均满足规范要求,各梁相对残余应变为0.02~0.07,相对残余位移为0.05~0.09,该桥满足承载力极限状态和正常使用极限状态,且结构整体弹性状态较好。

(2) 动载作用下,广州北环高速公路沙贝立交F匝道桥实测固有频率为7.875 Hz,比理论固有频率5.28 Hz大,该桥具有良好的动力特性,满足使用要求。

参考文献:

- [1] 段文杰,裴强.某连续梁桥静动载试验研究[J].中外公路,2014,34(4):208-211.
- [2] 张鹏,赵展,钟晓林,等.从化大桥静动载试验研究[J].广州建筑,2018,46(6):28-32.
- [3] 刘耀东,聂闯,唐齐.南昌朝阳大桥静动载试验研究[J].施工技术,2018,47(增刊4):662-665.
- [4] 郑凯.大跨径中承式钢管砼拱桥荷载试验分析[J].公路与汽运,2020(5):110-115.
- [5] 瞿柯飞.公路桥梁荷载试验检测在桥梁养护中的作用分析(上)[J].建材发展导向(上),2020,18(4):211.

- [6] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [7] 长安大学.公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21-01-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [8] 住房和城乡建设部.城市桥梁检测与评定技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [9] 广东省建筑科学研究院.城市桥梁检测技术标准:DBJ/T 15-87-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [10] 杨茂华,黎东龙.某矮塔单索面斜拉桥荷载试验分析[J].公路与汽运,2019(4):139-142+145.
- [11] 陈亮.大跨双曲拱桥安全检测及动载试验分析[J].公路与汽运,2020(2):115-118+121.
- [12] 刘耕,邢丙东,赵庆伟,等.钢-混组合梁斜拉桥施工过程静力特性研究[J].公路与汽运,2020(2):122-126.
- [13] 金凌志,王龙,周家亮,等.无腹筋部分预应力 UHPC 薄腹梁抗剪性能试验研究[J].铁道学报,2019(2):105-116.
- [14] 陈超.无腹筋 RPC 简支梁抗剪承载力试验研究[D].桂林:桂林理工大学,2013.
- [15] 张阳,党祺,穆程.UHPC加固箱梁顶板受弯性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(3):8-18.
- [16] 程东辉,郑文忠.无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土简支梁试验与分析[J].中国铁道科学,2008,29(2):59-66.
- [17] 朱力.UHPC-T型梁受力性能的试验与数值研究[D].北京:北京交通大学,2021.

收稿日期:2021-12-17