

云南八丘田无伸缩缝拱桥设计与受力分析

陈宝春^{1,2},孙同庆¹,黄卿维¹,韩玉³,施智⁴

(1.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108;2.福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350108;3.广西路桥工程集团有限公司,广西 南宁 530200;4.广西交科集团有限公司,广西 南宁 530007)

摘要:无伸缩缝桥梁由于取消了伸缩装置,从而可彻底地解决伸缩装置的养护问题,是一种可持续发展的桥梁形式。它的应用以梁桥为主,在拱桥中应用相对较少。该文以云南八丘田桥为例,该桥为上承式拱桥,其拱上桥道结构与两引桥跨直接相连形成连续结构,并延伸至台后的引板(搭板),从而消除了全桥的桥面伸缩缝,使其成为一座无伸缩缝拱桥。该文阐述了无伸缩缝拱桥的主要类型,重点介绍了八丘田桥的设计,并分析了上承式拱的桥面伸缩量、取消伸缩缝对结构受力的影响。

关键词:桥梁工程;拱桥;伸缩缝;延伸桥面板;伸缩量;受力分析

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

0 引言

无伸缩缝桥梁(无缝桥)指两端引板末端范围内桥面结构连续、无桥面伸缩缝(伸缩装置)的桥梁,简称无缝桥^[1]。与之相对应的,是有伸缩缝桥梁(有缝桥)。无缝桥由于取消了伸缩缝,免除了伸缩缝维修与更换等常见的桥梁使用问题,提高了桥梁的服务性能和结构耐久性,也提高了抗落梁等防灾能力^[2],故该桥型自20世纪三四十年代以来,在美国、加拿大等北美、欧洲、大洋洲和亚洲一些经济发达国家得到广泛应用^[3]。近年来,无缝桥在中国得到不断的发展。据调查,截至2022年5月,中国已建的无缝桥有70座^[4],较之2016年4月的40座^[5]有了较多的增加。

无缝桥的应用以梁桥为主,但也可应用于拱桥之中。对于人行小石拱桥,直接在拱背上设台阶供人通行时,全桥可不设伸缩缝,就是一种无缝桥。跨径不大、设有桥面系的实腹式或采用拱式拱上建筑的空腹拱,桥面是由填料和路面组成,也可只设变形缝,不设伸缩缝,做成无缝桥。现代多跨空腹式钢筋混凝土肋拱,常在墩顶和桥台处设置伸缩缝,为有缝

桥。为减少伸缩缝,1926年美国Ashtabula桥设计时提出采用柔性柱以取消墩顶伸缩缝的设想,并付诸实施,但该桥在桥台处仍留有一道伸缩缝,不能视为无缝桥,而是一座少缝桥^[2]。

在梁式无缝桥中,多跨桥墩顶的伸缩缝可通过结构或桥面连续来取消,其设计关键是如何取消桥台处的伸缩缝。根据主梁与桥台的相互关系,无缝桥常用的桥台有整体式、半整体式和延伸桥面板桥台,相应的无缝桥则称为整体桥、半整体桥和延伸桥面板桥^[1]。整体式桥台与主梁固结,不仅取消了伸缩缝,也取消了支座,一般要求桥台及其基础的柔性较大,以减小纵桥向变形约束产生的附加内力。半整体桥台则分为上下两部分,上部分与主梁固结,用支座支承于下部分桥台之上,可应用于桥台刚度较大的桥梁。延伸桥面板桥台与主梁之间仍有伸缩缝隙,但它被引板或延伸而过的桥面板盖住,取消了桥面伸缩缝,适用范围较广。

类似于梁桥中的整体桥,拱桥中也可以采用整体式桥台,形成整体式拱桥(Integral Arch Bridge)^[6]。以上承式拱桥为例,将拱上的桥面结构与引桥连在一起形成连续结构并与引桥桥台固结,取消了桥台处的伸缩缝,同时,桥台向外接出引板,与道路相接;

收稿日期:2022-11-08(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878178)

作者简介:陈宝春,男,博士,教授.E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn

在拱座与引桥桥台之间设置斜撑杆,由桥面的预应力结构来平衡拱的水平推力,使得拱座基础所承担

的水平推力大大减小。主拱、斜撑杆、桥面结构与引桥桥台、拱座及其基础为一整体结构,如图1所示。

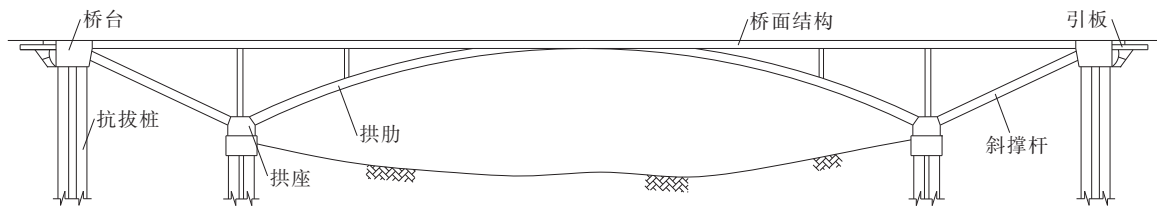


图1 上承式整体式拱桥结构示意图

2016年建成的通惠河桥就是一座整体式拱桥。该桥主结构为60 m跨径、矢跨比1/7的钢拱。桥面结构跨过拱座直接与桥台相接(拱座之上没有立柱,类似于V墩连续刚构),桥台基础为柔性桩,台后接出引板与道路相连,取消了伸缩缝^[7]。整体式拱桥的桥面结构也可采用悬带结构,即悬带拱。福州大学旗山校区卧龙桥为这种结构的实例。该桥计算跨径25 m,桥宽6 m。由于跨径小,将斜撑与桥面板端梁退化为桥台结构的一部分,桥面板与桥台之间不设伸缩缝。由于伸缩量不大,也不设引板,道路与桥梁直接相接^[8]。

除整体式拱桥外,拱桥中的桥面结构可在结构连续或桥面连续的基础上,采用整体式、半整体式或延伸桥面板桥台,取消其在桥台处的伸缩缝,从而建成无缝拱桥^[1,9]。

拱桥在中国有着较多的应用,中国的拱桥技术处于世界领先水平^[10],但无缝拱桥的修建还很少。为促进中国拱桥和无缝桥技术的发展,本文介绍一

座上承式无伸缩缝拱桥——云南八丘田桥。

1 总体设计

八丘田桥位于云南省保山市,是M01县道上跨越昌保高速主线的一座上承式拱桥,桥长59 m,桥宽8 m,桥梁安全等级为2级,采用公路-II级设计荷载,设计车速30 km/h,地震烈度为Ⅷ度,按Ⅲ度设防。主拱计算跨径 $l=34$ m,计算矢高 $f=7$ m,计算矢跨比 $f/l=1/4.86$,拱轴线采用 $m=1.543$ 的悬链线。拱座横桥向长500 cm,纵桥向宽350 cm,左侧拱座拱脚侧高250 cm,背面高369.5 cm,右侧拱座拱脚侧高330 cm,背面高449.5 cm。左侧引桥为桩柱式桥台,采用桩长为800 cm、直径为100 cm的钻孔灌注桩,桩底嵌入中风化石灰岩中;右侧为U形重力式桥台,桥台高484.4 cm,该桥台同样置于中风化石灰岩中,总体布置见图2。

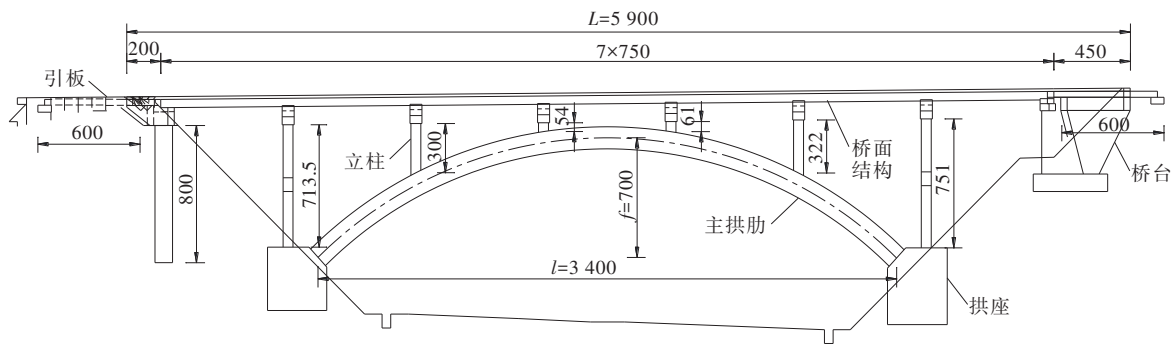


图2 八丘田桥总体布置图(单位:cm)

主拱由2根单箱单室箱形拱肋和4根横系梁组成。拱肋截面高130 cm、宽150 cm,顶、底板厚15 cm,腹板厚8 cm,顶板、底板与腹板相交处设10 cm×10 cm的梗腋,横系梁长300 cm,高80 cm,拱肋内部在横系梁和分段接头位置设置60 cm与70 cm厚的横隔

板,拱肋构造如图3所示。主拱肋与横系梁均为超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC),采用100 mm×100 mm×100 mm立方体抗压强度不低于150 MPa、抗拉强度不低于9 MPa的UHPC,依据文献推荐的多指标分级^[11],该UHPC强度等级为

整体桥和半整体桥均取消了主梁与桥台之间的伸缩缝隙,主梁发挥了抵抗台后土压力的作用,需要

考虑土-结构的相互作用问题。延伸桥面板桥台的受力与有桥面伸缩缝的桥台相似,与主梁相对独立。无缝桥取消伸缩缝后,台后搭板直接与主梁相接,因此,它除了起防止或减缓桥头不均匀沉降引发的跳车问题外,还起到将主梁纵桥向的伸缩变形量引到搭板的末端,因此常将其称为引板(Approach Slab)。

八丘田桥两侧引桥的桥台结构差异较大。根据地形地质条件,一侧引桥采用桩柱式桥台,另一侧采用重力式桥台。该桥桥面采用1%的单向纵坡,2%的双向横坡。同时考虑到该桥地处山区,两侧接线路地质条件好,台后填土范围小,若采用整体或半整体式桥台,在气温上升主梁伸长时,台后土压力上升明显,不利于桥梁结构的受力。因此,该桥两侧引桥均采用延伸桥面板桥台,各设置一块长6 m的引板,见图5。与有缝桥相比,其背墙高度有所降低以便引板和桥面板通过。背墙顶上设置了滑移层,以减小引板纵桥向位移的阻力。引板末端与道路相接处设置了胀缝。引道为15 cm厚C40混凝土路面。

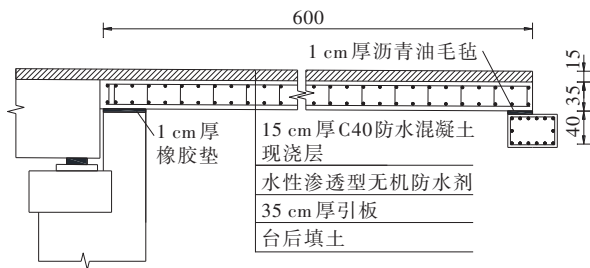


图5 八丘田桥桥台、引板构造图(单元:cm)

两侧引桥的桥台耳墙和侧墙分别长2.0 m和4.5 m。按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)关于桥梁全长的规定,有桥台桥梁为两岸桥台的侧墙或八字墙后端点之间的距离,无桥台的桥梁为桥面系长度。按此规定,八丘田桥全长为59 m。对于无缝桥,引板与上部结构连成一体,上部结构温度变化计算时的结构长度为两引板末端间的长度,因此,应采用两引板末端间的长度作为桥长。《公路无伸缩缝桥梁技术规程》(T/CECS G: D60-01—2020)中定义的桥长即为两引板末端间的长度。按此规定,八丘田桥全长为64.5 m。

3 有限元模型

应用Midas分析软件建立了2个八丘田桥的全

桥杆系有限元模型。第一个模型(模型I)为实际桥梁(无缝桥),见图6。模型中包含了引板,它与桥面结构直接相连,采用梁格法模拟引板,引板下方设置节点弹性支撑约束引板。延伸桥面板桥不同于整体桥和半整体桥,不需要主梁发挥抵抗台后土压力的作用,且由于两侧桥台处设有滑动支座,台后土压力并未传递给主梁,故未考虑台-土、桩-土作用。第二个模型(模型II)为有缝桥,不包含引板,其他部分与模型I相同。

拱肋、横系梁、立柱、T梁等均采用梁单元模拟。在拱脚处固结模拟无铰拱边界条件,采用虚拟横梁模拟T梁之间的湿接缝连接,用弹性连接模拟T梁与盖梁之间的板式橡胶支座;立柱与盖梁间采用弹性连接中的刚性连接进行模拟;横隔梁等效成集中力进行模拟。有限元模型共885个节点,1348个单元。

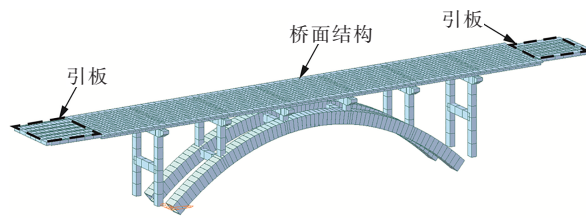


图6 八丘田桥有限元模型示意图

4 桥面结构纵桥向温度变形分析

八丘田桥地处云南保山市八丘田附近,通过近10年温度调查发现,极端温度最高31℃,最低1℃,平均温度15℃,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)温度分区规定为温热地区。根据施工条件,该桥合龙温度选取为8~10℃,全桥按照均匀升温26℃,均匀降温10℃考虑。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)第4.3.12条,取混凝土线膨胀系数为0.000 01/℃。八丘田桥最初设计时为有缝桥。按照全长59 m,计算得升温、降温的自由变形长度为12.36 mm和-5.10 mm。考虑混凝土收缩、安装富余量等因素后,在两桥台处各设置了GQF-C40型伸缩缝。

实际上,在上承式拱桥中,桥面结构的纵桥向变形,不能仅考虑其自身的变形,它还受到主拱以及拱上立柱的影响。对于中小跨径拱桥,拱上立柱固结

于主拱上,桥面结构通过支座支承于立柱上。如图7所示,温升时,主拱和立柱有上升变形(Δl_m 和 Δf_s),它顶起桥面结构的上升,对桥面结构纵桥向伸长有消短作用,因此桥面的伸长要考虑其竖向因素。

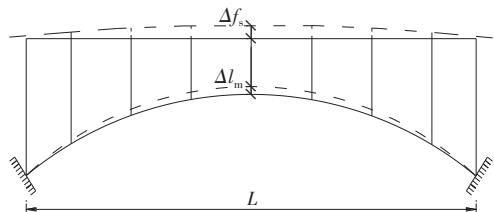


图7 上承式拱桥面温升变形示意图

对八丘田桥,在有限元模型Ⅰ中输入升温 26°C 、降温 10°C ,以拱顶为温度变化零点,计算得桥面结构的自由变形长度每一端为 7.68 mm 和 -2.96 mm ,较之单独考虑桥面板的自由变形长度的 8.39 mm 和 -3.23 mm ,分别减少了 0.71 mm 和 0.27 mm 。换言之,拱与立柱在竖向的变形对上承式拱的桥面伸缩量约有10%的减少量。这个值与有缝桥中计算的伸缩缝处的伸缩量(本桥为 40 mm)相比,更小了。

5 取消伸缩缝对八丘田桥受力性能的影响分析

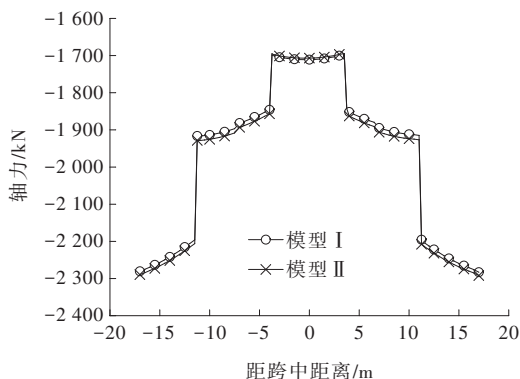
对模型Ⅰ与模型Ⅱ进行受力性能的对比,静力性能包含拱肋在恒载(自重+二期铺装)和荷载组合($1.2\times\text{自重}+1.2\times\text{二期铺装}+1.4\times\text{车辆荷载}+1.05\times\text{温度作用}$)作用下的轴力、弯矩及挠度,动力性能包含振型及频率。静力性能比较结果如图8、9所示。

由图8、9可以看出:在恒载作用下模型Ⅰ与模型Ⅱ的轴力、弯矩和挠度数值上相差不大,变化趋势一致,因此,模型Ⅰ与模型Ⅱ的静力性能没有明显差别,即取消伸缩缝对拱的静力性能没有影响。

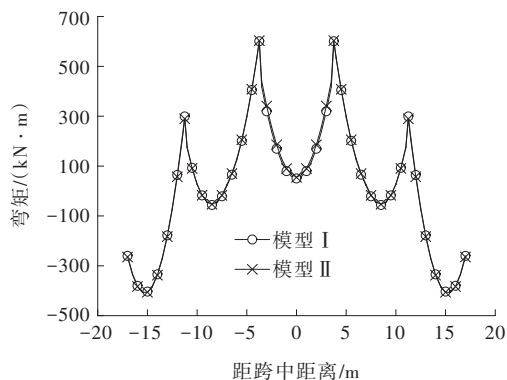
表1仅给出模型Ⅰ的计算结果及其自振频率与模型Ⅱ的比较,从表1可知:模型Ⅰ和模型Ⅱ的振型在6阶内均一致,仅自振频率略有不同,在前6阶内最大仅相差 5.42% ,表明将该桥从有缝桥改为延伸桥面板无缝桥,对结构的自振特性影响不大。

6 结论

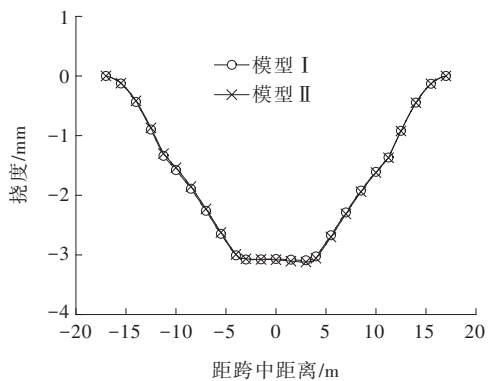
八丘田桥已于2021年建成。该桥根据实际情况



(a) 拱肋轴力



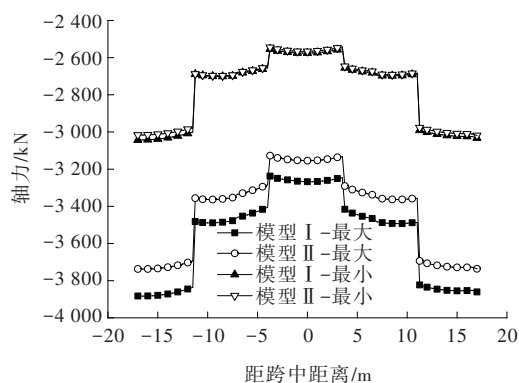
(b) 拱肋弯矩



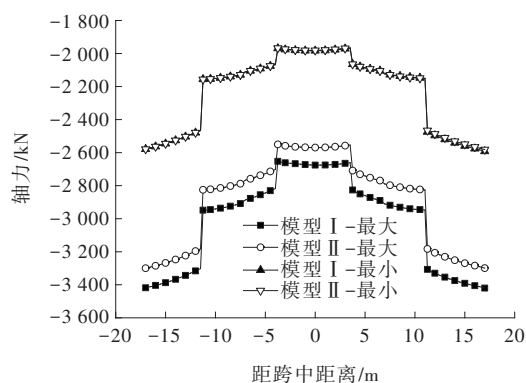
(c) 拱肋挠度

图8 恒载作用下拱肋内力与挠度比较图

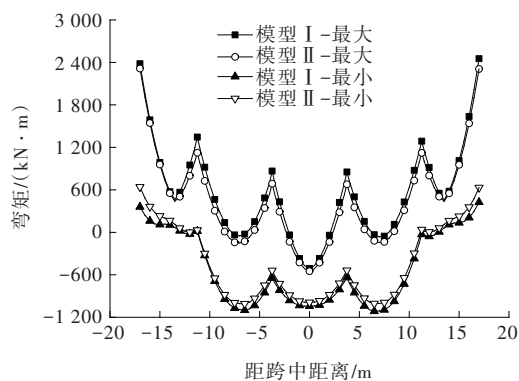
采用了延伸桥面板桥台,取消了桥台处的伸缩缝,消除了伸缩缝对桥梁使用性能与耐久性的不利影响。分析表明:上承式拱的桥面纵桥向伸缩量计算时应考虑主拱与立柱变形的影响,它要小于伸缩缝设置时所考虑的伸缩量。伸缩缝取消对主拱的结构内力和动力特性影响很小,结构计算可按有缝桥计算。由于从有缝桥改为无缝桥,取消了伸缩缝,不仅建设费用略有减少,而且后期的养护、维修费用大大降低。从已有的无缝桥的分析^[12]可以推断,本桥无缝化后全寿命周期的社会效益会得到明显提高。



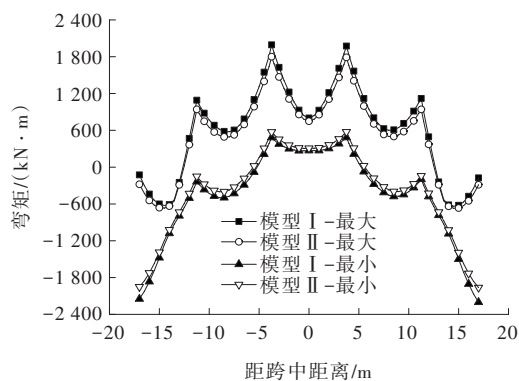
(a) 均匀升温荷载组合下拱肋轴力



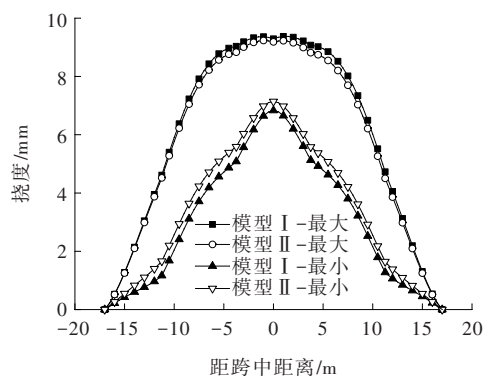
(b) 均匀降温荷载组合下拱肋轴力



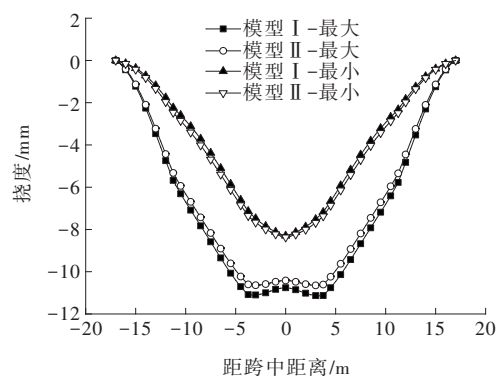
(c) 均匀升温荷载组合下拱肋弯矩



(d) 均匀降温荷载组合下拱肋弯矩



(e) 均匀升温荷载组合下拱肋挠度



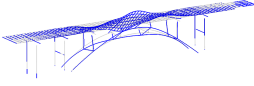
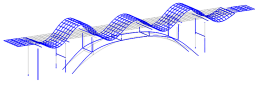
(f) 均匀降温荷载组合下拱肋挠度

图 9 荷载组合作用下拱肋内力与挠度包络图

表 1 模型 I 自振特性计算结果

模态阶数	振型特征	振型图	计算频率/Hz	计算频率相差/%	模态阶数	振型特征	振型图	计算频率/Hz	计算频率相差/%
1	桥面系和拱肋面内反对称		7.95	0.34	4	桥面系和拱肋面内对称		13.73	0.55
2	桥面系和拱肋面内对称		10.03	0.04	5	桥面系和拱肋面外反对称		14.09	1.20

续表1

模态阶数	振型特征	振型图	计算频率/Hz	计算频率相差/%	模态阶数	振型特征	振型图	计算频率/Hz	计算频率相差/%
3	桥面系和拱肋面外对称		12.71	1.41	6	桥面系和拱肋面内对称		15.07	5.42

注:相差=(模型Ⅰ-模型Ⅱ)/模型Ⅱ。

本桥的设计经验表明,观念上的转变是应用推广无缝桥技术的重要因素。

八丘田桥除了采用无缝桥技术外,还具有以下几个特色:

(1) 该桥的主拱通过控制弯拉应力和考虑UHPC的抗拉性能,采用了不配筋的UHPC结构,以避免今后钢筋锈蚀问题,提高了结构的耐久性。

(2) 因地制宜、就地取材,采用当地的机制砂进行UHPC制备,在保证强度要求的情况下,降低了UHPC工程造价,落实了环境友好的理念。

(3) 主拱肋采用工厂预制+现场干接拼装的快速施工工艺,符合中国新时期建筑工业化发展方向。同时,工厂预制可以充分发挥工厂蒸养设备作用,减小UHPC预制拱肋的收缩、徐变。

八丘田桥是综合了无伸缩缝新结构、UHPC新材料、快速施工新技术的环境友好型、可持续发展的桥梁。有关其在UHPC材料与结构方面的研究,将另文介绍。

参考文献:

[1] 陈宝春,庄一舟,黄福云,等.无伸缩缝桥梁[M].2版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[2] BURKE M P. Integral and semi-integral bridges[M]. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell, 2009.

[3] 陈宝春,黄福云,薛俊青,等.无伸缩缝桥梁研究综述[J]. 交通运输工程学报,2022,22(5):1-40.

[4] 陈宝春,王晨辉,薛俊青,等.中国无伸缩缝桥梁调查与分析[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(5):13-21.

[5] 陈宝春,付磊,庄一舟,等.中国无伸缩缝桥梁应用现状与发展对策[J]. 中外公路,2018,38(1):87-95.

[6] STRASKY J, ROMPORTL T, KOCOUREK P, et al. Integral arch bridges[C]//Proceedings of 7th International Conference on Arch Bridges, Trogir-Split, Croatia, 2013: 333-340.

[7] 高超,朱琳.全无缝桥梁接线道路的研究与应用[J]. 特种结构,2019,36(6):58-62,92.

[8] 陈宝春,林航,王远洋.福州大学旗山校区中轴线景观人行桥设计[J]. 中外公路,2014,34(5):115-118.

[9] TEMOR I, MANSOUR S, SHAGHASI A, et al. Alternative designs of concrete arch bridge with semi-integral abutment approach[C]//Proceedings of the 1st International Symposium on Jointless and Sustainable Bridges, Fuzhou, China:2016:83-95.

[10] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J]. 交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.

[11] 陈宝春,杨简,吴香国,等.UHPC力学性能的多指标分级[J]. 中国公路学报,2021,34(8):23-34.

[12] SHI C C, WANG Y F, CHEN B C, et al. Life-cycle environmental and economic benefits of jointless bridges considering climate change[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(6):745-759.