

文章编号: 1006—2106(2010)03—0042—07

大跨度复杂结构桥梁施工全过程结构 空间受力特性研究^{*}

胡国伟^{1**} 张宇宁¹ 张俊兵¹ 施 洲²

(1. 中铁三局集团有限公司, 太原 030001; 2 西南交通大学, 成都 610031)

摘要: 研究目的: 通过建立施工全过程时效和路效分析的三维非线性模型, 对大跨度 V形连续刚构拱组合结构桥的施工全过程空间受力特性进行研究, 解决以往的桥梁设计和施工监控采用的计算方法不能有效分析混凝土箱梁的剪力滞、扭转和畸变等引起的截面应力分布不均匀问题。

研究结论: 分析了大跨度 V形连续刚构拱组合结构桥施工全过程主梁截面顶板纵向正应力、横向压应力、腹板剪应力等截面空间应力分布和变化规律, 其表现在: 主梁截面顶板纵向正应力沿横向分布呈显著的不均匀性, 剪力滞效应明显, 与初等梁理论的预测值相异; 主梁横向压应力普遍不大, 且顶板应力分布不均匀程度大于底板; 单箱双室截面梁三腹板剪应力分布连续变化, 且中腹板的剪应力略大于边腹板剪应力, 整体具有较好的规律性; 施工全过程主梁纵向正应力包络线体现了最大拉应力和最大压应力的施工工况, 为施工控制提供了理论基础。

关键词: 大跨度复杂结构桥梁; 施工全过程; 空间受力特性; 剪滞效应; 截面应力分布

中图分类号: TU44 **文献标识码:** A

Research on the Space Stress—distribution Characteristics of Long—span and Complex Structure Bridge during the Whole Construction Process

HU Guo—wei, ZHANG Yu—ning, ZHANG Jun—bing, SHI Zhou

(1. The Third Engineering Group Co. Ltd. of China Railway Taiyuan, Shanxi 030001, China; 2. Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: Research purposes: By establishing three—dimensional non—linear model with aging and road construction efficiency analysis for the whole construction process, the research is done on the space stress—distribution characteristics of large—span V—shaped continuous rigid frame arch composite structure bridge during the whole construction process to solve the problem of uneven stress—distribution on the cross—section due to the shear lag and distortion of concrete box girder with the previous calculation method for bridge design and construction monitoring.

Research conclusions: The analyses are made for the space stress—distribution and spatial variation of the longitudinal normal stress and transverse compressive stress on the roof and the shear stress on the stem of large—span V—shaped continuous rigid frame arch composite structure bridge and their change regulations during the whole construction process. From the analyses the following conclusions are drawn: Firstly, the longitudinal normal stress on the roof of main girder is distributed along the transverse direction with unevenness, and the shear lag effects of the stress are obvious, which is different from the predicted results with elementary beam theory. Secondly, the transverse compressive stress of the main girder is not big and the uneven level of stress distribution on the roof is more than that on the floor.

^{*} 收稿日期: 2009—11—21

基金项目: 铁道部科技研究开发计划重点课题项目(2007G007)

^{**} 作者简介: 胡国伟, 1980年出生, 男, 工程师。

Thirdly the shear stress distribution on the tri- web of single- box and double- booth section girder continuously changes and the shear stress on centerweb is slightly greater than that on the side web with good regulation. Lastly during construction the envelope of longitudinal normal stress reflects the working condition with the maximum tensile stress and maximum compressive stress and this provides a theoretical basis for construction control.

Key words: large- span and complex structure bridges; the whole construction process; space stress- distribution characteristics; shear lag effect; cross- sectional stress distribution

随着现代组合桥梁结构的形式多样化、结构设计复杂化以及跨河、海、峡谷等桥梁跨度的不断增大,桥梁的空间效应表现得越来越明显。预应力混凝土 V 形连续刚构拱组合桥是拱与 V 形刚构刚性连接,共同承担荷载的新型桥梁体系,具有拱受压、梁受拉的梁拱共同受力的特点。以往的桥梁设计分析和施工监控计算方法主要是基于平面杆系的有限元理论来求解,对于箱梁的剪力滞、扭转和畸变等引起的截面应力分布不均匀问题,常用的方法是通过经典的变分法、扭转微分方程等理论求解,或通过一个内力增大系数或横向分布系数来考虑,或将主梁离散成为一个理想的梁格体系后用空间杆系理论来分析,以上空间受力特性分析的方法存在以下不足:理论计算方法推演繁琐,荷载形式和边界条件有较多限制;理论模型和实际空间结构有出入,存在模型误差,有可能造成设计缺陷;内力增大系数的合理性,与设计工程师的经验和判断有关,带有一定的盲目性。预应力混凝土 V 形刚构拱组合桥由于主梁连续、墩梁固结、梁拱组合,且多采用三向预应力体系,使得桥梁受力复杂,空间效应显著,为了保证桥梁的结构受力安全,有必要对已设计好的结构进行基于实际施工全过程的空间受力特性分析。通过对广珠城际小榄水道 100 m+220 m+100 m V 形刚构拱组合结构桥进行分析研究,利用基于“单元生死”原理模拟其受力机理的施工全过程三维非线性仿真模型,综合考虑了结构自重、施工临时荷载、预应力束空间效应以及收缩徐变效应,得出了一些有用的结论。

1 三维非线性仿真模型

1.1 背景工程

新建广珠城际铁路小榄水道特大桥主桥为跨度 (100+220+100) m 的 V 形连续刚构钢管拱组合桥,是国内外高速铁路首次采用的桥梁结构型式,也是国内外同类型桥梁结构(预应力混凝土梁桥、梁拱组合桥和连续刚构拱组合桥)应用在高速铁路上跨度最大的桥梁。小榄水道特大桥立面图如图 1 所示。

该桥 V 形墩外侧斜腿与水平面的夹角 34.6° ,采用单箱双室箱形截面,横桥向宽 10 m,高 4 m;内侧斜腿与水平面的夹角 46.4° ,采用单箱双室箱形截面,横

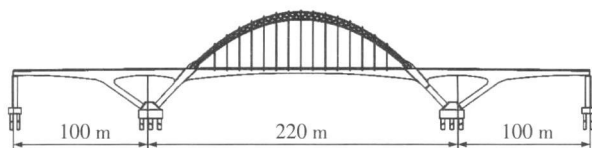


图 1 小榄水道特大桥立面图

桥向宽 13.8 m,高 4 m。

主梁采用单箱双室截面,顶板厚 42 cm,桥面宽 11.6 m,底板宽 10 m。主梁支点处梁高 7.8 m,主跨跨中和边跨支座处梁高 3.8 m, V 形刚构最小梁高 4.8 m。边跨和中跨腹板厚度由根部向跨中依次是 80 cm、55 cm 和 35 cm,与内腿相交区域内主梁腹板厚度局部改为 120 cm,呈折线变化; V 形墩梁段腹板厚度分 80 cm、55 cm 两种,呈折线变化;底板厚度由跨中的 35 cm 按 1.8 次抛物线规律变化到根部的 120 cm, V 形刚构内梁段的底板厚度由跨中 50 cm 按圆曲线渐变到根部的 100 cm,底板在 V 形刚构斜腿与主梁固结处附近局部增厚。

拱肋采用 N 形桁架,靠近拱脚位置采用变高度哑铃形截面,上、下弦管直径为 900 mm,壁厚分 24 mm、22 mm 和 20 mm 3 种,为钢管混凝土结构;腹杆采用 $\phi 600 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的空钢管。拱肋拱的计算跨径 $L=160 \text{ m}$,拱月牙形钢管拱下弦钢管矢高 35 m,上弦钢管矢高 40 m。两楹拱肋之间共设 7 道横撑,靠近拱顶 3 个横撑为米字撑,其余 4 道横撑都为 K 字撑,各横撑由 $\phi 500 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 、 $\phi 300 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、 $\phi 350 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 、 $\phi 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 钢管组成,钢管内部不填混凝土。吊杆顺桥向间距 9 m,全桥共设 15 对吊杆。

1.2 模型建立

利用 ANSYS 软件的单元“生死”功能以及参数设计语言 (APDL) 二次开发功能,结合小榄水道特大桥,建立可适用于 V 形刚构拱组合桥先梁后拱分段施工过程的时效和路效分析模型,该程序可以计算从施工到成桥这一整个过程中任一个时刻结构的内力和变形,从而实现对结构力学性能的跟踪分析。APDL 语言是面向 ANSYS FEM 分析功能的具备较完善的程序设计功能的计算机语言。利用 APDL 语言可以方便地

实现参数化建模完成大量类似设计或施工方案的数值计算。同时,在计算中还利用了 APDL语言的计算控制功能和结果提取功能。

在结构分析中共用到了 ANSYS软件中的 4种单元类型:

(1)空间实体单元:模拟主梁、内外斜腿、承台、桩基础,全桥施工过程中基本不存在材料非线性工况,采用 SOLID45模拟。

(2)空间梁单元 (BEAM44):模拟拱肋、扣索。

(3)索单元 (LNK8):模拟预应力筋、吊杆。

(4)3-D结构表面效应单元 (SURF154):用于各种变化载荷和表面效应,可以覆盖在任意 3D单元面上。模拟施工临时荷载、二期恒载等。

全桥有限元模型总共有 263 133个节点,1 126 921个单元。坐标系以桥梁纵向为 Z方向,横向为 X方向,竖向为 Y方向。图 2~图 3为小榄水道特大桥的仿真计算模型。

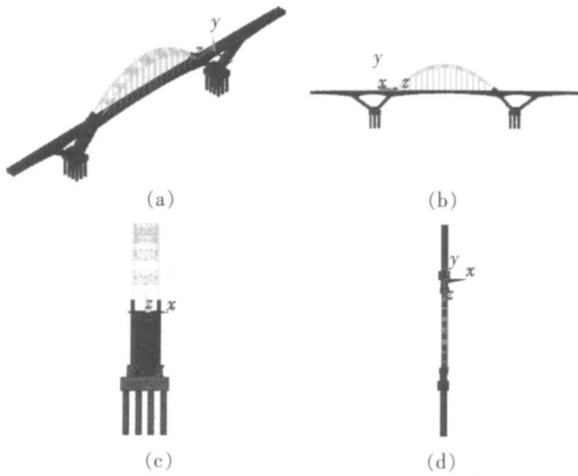


图 2 小榄水道特大桥有限元模型离散图

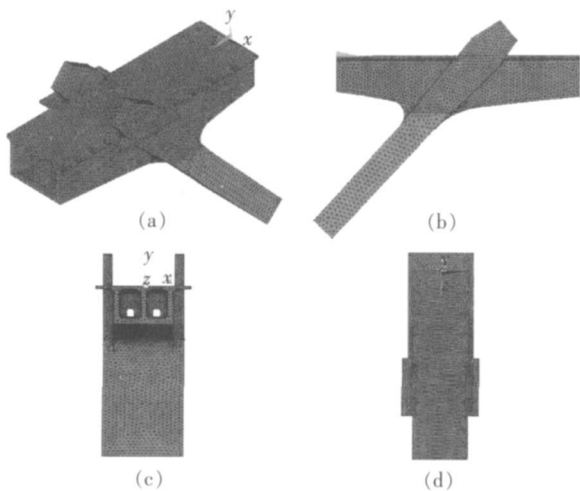


图 3 V形墩梁节点处有限元模型离散图

2 空间纵向正应力特性分析

2.1 主梁施工阶段纵向正应力剪滞效应

主梁各截面的纵向正应力在横向分布并不是均匀的,分别提取截面在顶、底板纵向正应力的横向 5个点,将其中最大应力、最小应力分别与平均应力对比,作为剪力滞分析,代表性的几个截面的横向最大、最小应力与均值的比值如图 4图 5所示。由图可知,刚施工阶段应力相对较小时,顶、底板的剪力滞效应有一定的不规则,随施工阶段的递增,顶、底板的剪力滞效应趋向稳定。顶板剪力滞效应规律:大部分截面的剪力滞值基本在 1.1附近,其中,跨中悬臂根部及其附近截面,随施工过程变化,剪力滞值呈现先平稳在 1.1附近,中间工况增大至 1.5附近,后降低至 1.1附近,但是在中跨跨中合龙段剪力滞值较大,最大达 2.4;底板剪力滞效应规律:主梁各截面的剪力滞值基本在 1.0附近,剪力滞不明显。

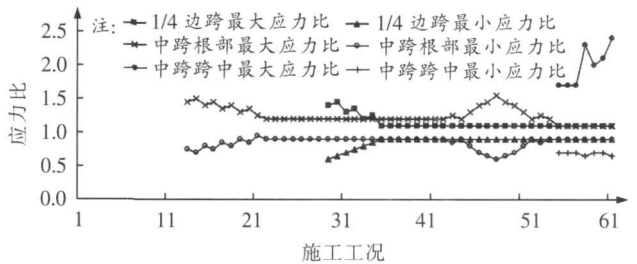


图 4 顶板纵向正应力横向最大、最小应力与均值的比值关系

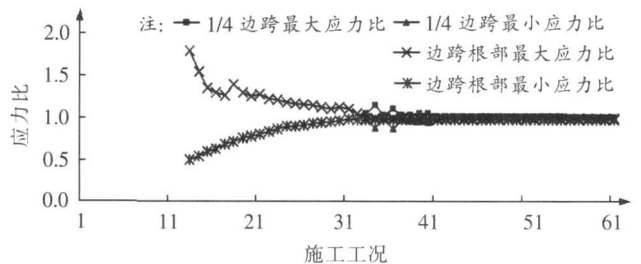


图 5 底板纵向正应力横向最大、最小应力与均值的比值关系

2.2 成桥后纵向正应力在横向分布特性

采用分阶段施工法从梁根部向两侧逐段现浇,施工过程中一期恒载和预应力作用产生的负弯矩对悬臂部分的作用必然导致在梁中产生很大的剪力滞效应。小榄水道特大桥为变截面单箱双室箱形桥梁,其剪力滞效应对顶板和底板正应力有一定影响。成桥后,这种桥式在恒载作用下,受力状态依然接近悬臂梁,其剪力滞效应带来的梁截面上应力变化不容忽视。取桥梁边跨跨中、边跨侧 V形墩梁交接处、V形墩顶部中心、中跨侧 V形墩梁交接处、中跨 1/4中跨跨中 6个具有

代表性的截面分别分析成桥后期在自重及预应力作用下箱梁顶板及底板应力变化情况。为了叙述方便,用 A—A B—B C—C D—D E—E F—F 截面分别代表上述 6 个截面,各截面纵向正应力沿横向的分布如图 6 所示。由图可以看出在成桥后期, A—A B—B D—D 和 E—E 截面顶板纵向弯曲正应力沿横向分布呈显著的不均匀性,与初等梁理论的预测值完全不同,预应力的空间效应和剪力滞效应明显。V 形墩顶部中

心和中跨跨中以及各截面底板纵向正应力剪力滞效应不明显,与初等梁理论的预测值近似。边跨跨中截面 A—A 中跨 1/4 截面 E—E 翼缘与腹板交接处应力大于中心的应力,出现了明显的正剪力滞现象。边跨侧和中跨侧 V 形墩梁交接处截面 B—B 和 D—D 附近箱梁还出现了负剪力滞现象,这是由于此处位于斜支撑附近,位于负弯矩区,墩梁固结处的约束作用使得腹板与翼板交接处往板中心的剪力传递总是滞后的。

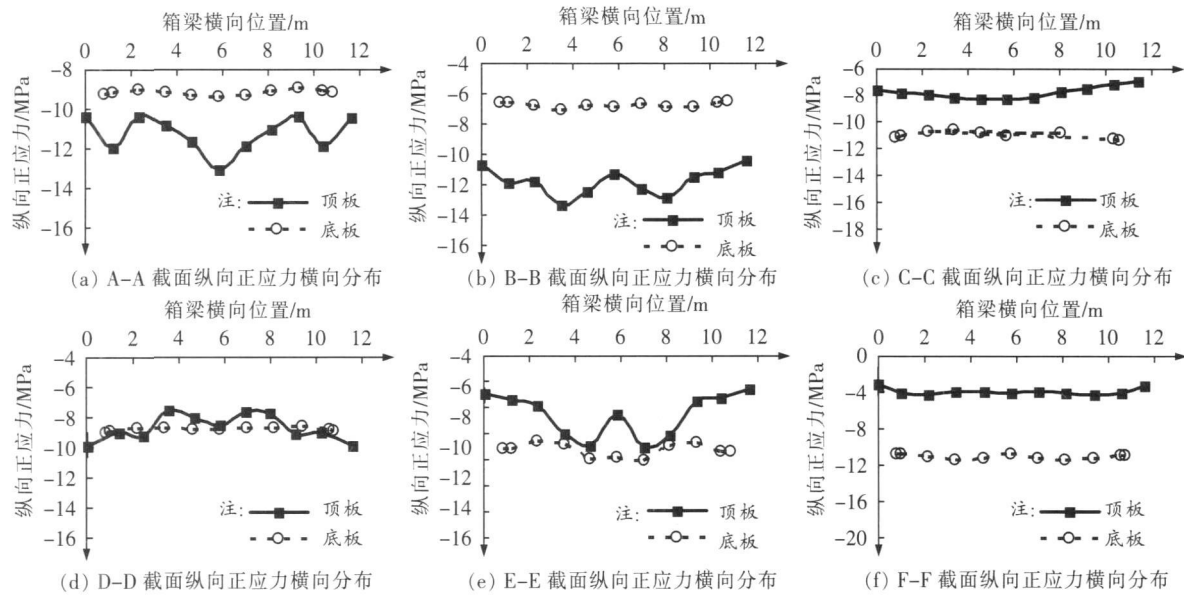


图 6 成桥后纵向正应力横向分布规律

2 3 施工全过程箱梁应力包络结果分析

小榄水道特大桥与常规铁路连续刚构桥相比,其跨度大,支点梁高和跨中梁高较一般更高。箱梁截面的应力分布特征更为复杂。此外,由于刚构拱组合受力状态依靠吊杆实现,而吊杆锚固于箱梁,由此进一步增加了箱梁分析的难度和复杂性。将施工各个阶段每个断面的纵向正应力的最大压应力和最大拉应力取出,绘成施工阶段包络应力如图 7、图 8 所示,“—”为压应力,“+”为拉应力。从图中可以看出:施工阶段主梁包络应力为 -18.60~1.73 MPa;最大拉应力位置在 V 形墩顶部 0 号块之间 C3 号块右箱梁截面底板,发生在浇注 C1—C4 和 C1'—C4 号块且块内预应力钢筋还未张拉时;最大压应力位置在边跨 B4 号块左箱梁截面顶板,发生在浇注中跨合龙块且中跨合龙预应力钢筋还未张拉时。总体上看,施工阶段各截面纵向正应力满足规范要求,说明纵向预应力的施加使得全桥在纵向基本都处于受压状态,达到了预期的目的。

3 空间腹板剪应力特性分析

3 1 施工阶段箱梁腹板剪应力特性分析

为分析单箱双室主梁 3 片腹板的剪应力分布情

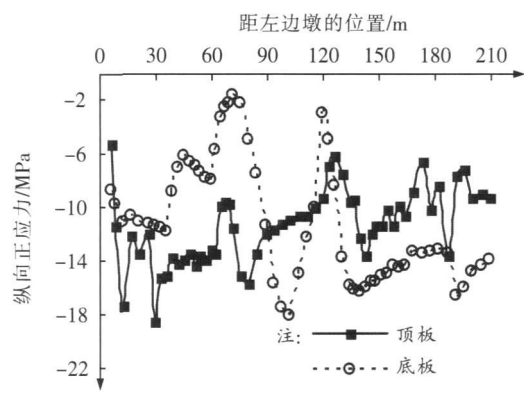


图 7 施工阶段主梁最大压应力包络图

况,提取施工过程中各工况下梁截面重心处剪应力,计算中腹板剪应力比重,即中腹板与 3 片腹板剪应力和的比值,同时计算边腹板比重,即 1 片边腹板与 3 片腹板剪应力和的比值。图 9 为控制截面处的剪应力比重随施工工况的分布,由图可知,从施工过程中 3 片腹板的剪应力分布结果可知,在自重、临时荷载、预应力作用下,箱梁 3 片腹板的剪应力除在剪应力较小或改变方向处存在一定不规则外,基本均匀,中腹板的比重在 0.4~0.5 区间,略大于 1/3 即中腹板的剪应力略大于边腹板剪应力。

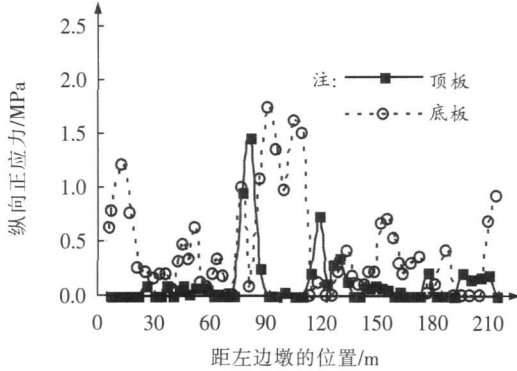


图 8 施工阶段主梁最大拉应力包络图

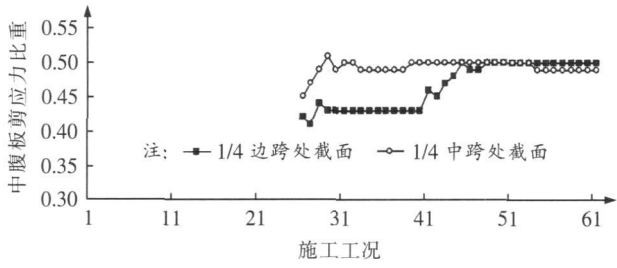


图 9 主梁截面处的剪应力比重分布曲线

3.2 成桥后箱梁腹板剪应力特性分析

由于裂缝主要发生在成桥后，尤其是二期恒载作用后，因此对该桥箱梁空间分析的重点是最后一个施工阶段恒载及预应力作用下的应力。由于腹板主要承担剪力，考察腹板的受力分布也就是考察其在荷载作用下的剪力分布规律。取半桥结构考虑，各断面腹板剪应力分布趋势图如图 10 所示。

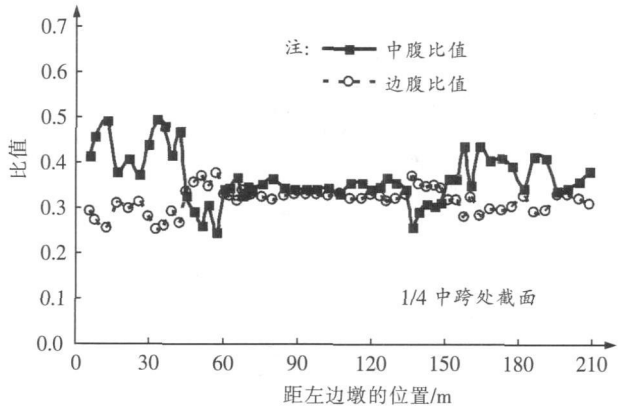


图 10 各断面腹板剪应力分布趋势图

一般空间仿真分析无法考虑结构的施工过程，在墩顶附近梁体的剪应力计算结果偏小，这主要是由于没有模拟施工过程，使得在结构受力分布上提高了拱的效应。单元“生死”非线性仿真分析考虑了结构施工全过程，剪应力计算结果准确可靠。从图 10 中可以看出，各断面剪应力分配连续变化，具有较好的规律

性：中、边腹板剪应力受力比值在边跨各断面较大，约为 1.20 ~ 1.96 在主跨各断面约为 1.03 ~ 1.55。V形墩顶部 0 号块和 V 形墩顶部中心箱梁的三腹板受力较为均匀，符合结构受力。

4 空间横向正应力特性分析

图 11 给出了上述 6 个截面在成桥后顶底板横向正应力沿横向的分布。由图可知，横向压应力在全桥普遍不大，顶板横向压应力分布不均匀程度大于底板。

在恒载及预应力作用下，箱梁顶板虽然全部处于受压状态，但横向正应力沿横向分布也非常不均匀，这是由于顶板上横向预应力和纵向预应力在泊松比下综合作用的结果。在边跨跨中顶板两腹板间位置，最大拉应力为 0.76 MPa 中腹板处，最大拉应力为 0.24 MPa 在边跨侧 V 形墩梁交接处顶板两腹板间位置，最大拉应力为 0.99 MPa 中腹板处，最大压应力为 0.28 MPa 在中跨侧 V 形墩梁交接处顶板两腹板间位置，最大拉应力为 0.19 MPa 中腹板处，最大压应力为 2.18 MPa 在中跨 1/4 顶板两腹板间位置，最大压应力为 2.19 MPa 中腹板处，最大拉应力为 0.94 MPa。可以看出应力变化是很剧烈的。

5 应力计算结果与实测结果对比

该桥应力测试截面共计 28 个，取测试结果平均值作分析，在各施工阶段下 V 形墩顶部 0 号块 12 截面顶、底板应力实测值和仿真分析计算值的对比如图 12 所示。

从以上应力实测值与计算值对比结果可知：在本桥各施工阶段过程中，V 形墩顶部 0 号块 12 和 16 截面顶、底板应力状态发展趋势与计算结果相符，实测值与理论计算值基本吻合，最大相差 1.83 MPa。说明了本文所采用的计算程序的正确性以及采用三维实体有限元法利用“单元生死”技术模拟施工过程的方法是符合实际的，计算结果可靠。经过分析，可以判断计算分析结果和实测数据之间存在的偏差是混凝土收缩徐变、箱梁截面尺寸、桥面施工机械自重及结构温度变化等各种复杂因素而导致，另一方面，应力测试仅能直接观测应变，再通过实测弹性模量的计算才能求得荷载应力，但是混凝土弹性模量一般是通过试件测定，与梁体实际弹性模量有一定偏差。

6 结论

(1) 小榄水道特大桥主梁截面顶板纵向正应力沿横向分布呈显著的不均匀性，与初等梁理论的预测值完全不同，剪力滞效应明显，主要表现在：在开始施工

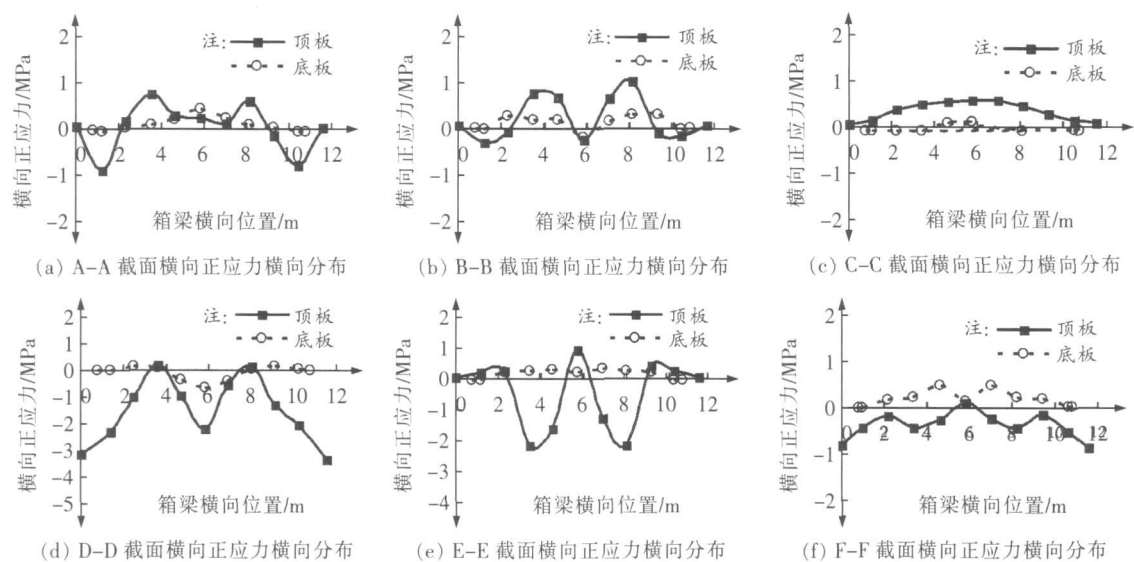


图 11 截面横向正应力横向分布规律

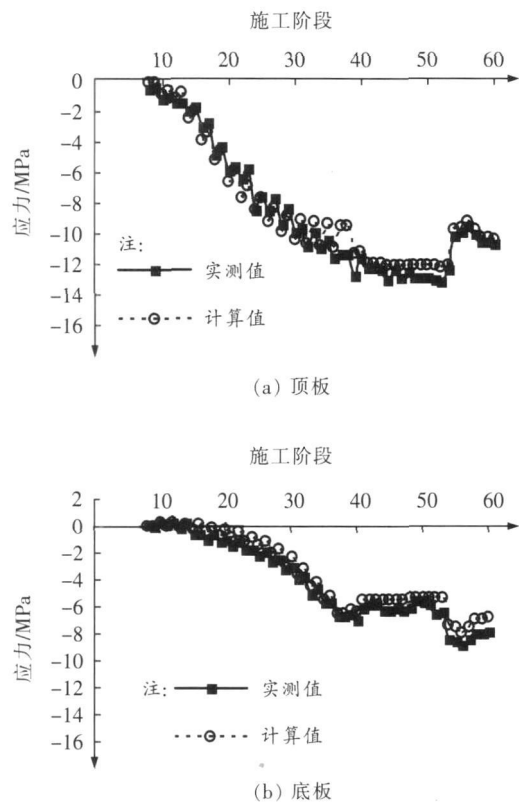


图 12 L2 截面应力实测值和计算值的对比结果

阶段, 顶、底板的剪力滞效应有一定不规则, 随施工阶段的递增, 剪力滞效应趋向稳定; 靠近墩身附近, 剪力滞值呈现先平稳在 1.1 附近, 中间工况增大至 1.5 附近, 后有降低至 1.1 附近; 在墩身与跨中之间, 剪力滞值基本在 1.1 附近; 合拢段的剪力滞值较大, 且不稳定; 成桥后, V 形墩顶部中心和中跨跨中以及各截面底板纵向正应力剪力滞效应不明显, 与初等梁理论的预测值近似, 其它截面的顶板纵向正应力剪力滞效应

明显。

(2) 小榄水道特大桥主梁横向压应力在全桥普遍不大, 顶板横向压应力分布不均匀程度大于底板, 平面分析的结果是很难反映出桥梁的实际受力情况的。

(3) 施工阶段主梁纵向正应力包络为 $-18.60 \sim -1.73$ MPa, 对最大应力的位置及工况能有效计算, 对于施工控制有重要意义。

(4) 各断面剪应力分配连续变化, 具有较好的规律性: 在施工过程中, 剪应力在 3 片腹板的分布除在剪应力较小或改变方向处存在一定的不规则外, 基本均匀; 中腹板的比重在 0.4~0.5 区间附件, 略大于 1/3, 即中腹板的剪应力略大于边腹板剪应力; 成桥后, 两边腹板受力较为一致, 大部分截面中腹板受力较边腹板大; 中、边腹板剪应力受力比值在边跨各断面较大, 约为 1.20~1.96, 在主跨各断面约为 1.03~1.55。V 形墩顶部 0 号块和 V 形墩顶部中心箱梁的三腹板受力较为均匀, 符合结构受力特征。

参考文献:

[1] 赖国政, 吕容涛. 基于梁格法及板壳有限元法的立交桥空间分析[J]. 武汉工程大学学报, 2008(1): 37—40
Lai Guozhen, LV Rongtao. The Overpasses Spatial Analysis Based on Girder Method and Shell Element of Finite Element Method[J]. Wuhan University Journal, 2008(1): 37—40

[2] 刘小燕, 张欣, 李斌. 基于能量变分原理的槽型宽翼受压构件剪滞效应和影响参数[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2009(1): 10—14
Liu Xiaoyan, Zhang Xin, LI Bin. Shear Lag Effect of Wide-flange Beam under Axial Loading Based on Energy-

- variation Principle and Parameter Analysis[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2009(1): 10—14
- [3] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报, 2001(3): 41—46
Cao Zhiyuan. Construction Mechanics and Time-varying Mechanics in Civil Engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2001(3): 41—46
- [4] 孙庆新, 陈旭勇, 杨冬波. 刚构连续弯板桥空间有限元分析[J]. 武汉工程大学学报, 2009(5): 41—47
Sun Qingxin, Chen Xuyong, Yang Dongbo. Control Technique of Linear form in High Bridge Piers Construction[J]. Wuhan University Journal, 2009(5): 41—47
- [5] 陈丹华, 陈水生, 程海根. 预应力混凝土箱梁桥腹板主应力影响因素研究[J]. 铁道工程学报, 2006(6): 34—38
Chen Danhua, Chen Shuisheng, Cheng Haiqen. Research on the Influence Factor of Web's Principle Stress for Box Girder Bridges[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(6): 34—38
- [6] 薛伟辰, 王巍. 轨道交通预应力混凝土梁施工阶段徐变性能研究[J]. 铁道学报, 2008(1): 53—59
Xue Weichen, Wang Wei. Study on Creep Behavior of Prestressed Concrete Beams for Rail Transportation during Construction Stage[J]. Journal of the China Railway Society, 2008(1): 53—59
- [7] 林丽霞, 吴亚平, 丁南宏, 等. 考虑剪滞效应下计算钢筋混凝土箱梁应力的换算截面法[J]. 兰州理工大学学报, 2009(2): 122—126
Lin Lixia, Wu Yaping, Ding Nanhong, etc. Transformation-section Method for Stress Calculation of Reinforced Concrete Box Beams with Shear Lag[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009(2): 122—126
- (上接第 23页)
- [14] 王恕, 张亦飞, 郝春玲, 等. 一种区间数多属性决策新方法及其工程应用[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 54—58
Wang Shu, Zhang Yifei, Hao Chunling, et al. A New Method of Multi-attribute Decision-making for Interval Numbers and Its Engineering Application[J]. Hydro-science and Engineering, 2006(3): 54—58
- [15] 易平. 对区间不确定性问题的可靠性度量的探讨[J]. 计算力学学报, 2006(2): 152—156
Yi Ping. Discussions on Reliability Measure for Problems with Bounded-but-unknown Uncertainties[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2006(2): 152—156
- [16] 党耀国, 刘思峰, 刘斌, 等. 多指标区间数关联决策模型研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004(3): 403—406
Dang Yaoguo, Liu Sifeng, Liu Bin, et al. Study on Incidence Decision Making Model of Multi-attribute Interval Number[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004(3): 403—406
- [17] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003
Qin Shoukang. Theories and Applications of Comprehensive Evaluation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003
- [18] 兰继斌, 刘芳. 区间数可能度的二维定义[J]. 数学的实践与认识, 2007(24): 119—122
Lan Jibin, Liu Fang. A New Two-dimensional Definition of Possibility Degree for Interval Numbers[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007(24): 119—122
- [19] 曹文贵, 张永杰, 赵明华. 基坑支护方案确定的区间关联模糊优化方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008(1): 66—71
Cao Wengui, Zhang Yongjie, Zhao Minghua. Study on Interval Relative Fuzzy Optimization Method to Determine Support Schemes for Foundation Pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(1): 66—71
- [20] 张方伟, 姚炳学. 区间数综合评判模型的改进与应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006(8): 1185—1187
Zhang Fangwei, Yao Bingxue. Improvement and Application of Comprehensive Evaluation Model of Interval-numbers[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006(8): 1185—1187
- [21] 胡承毅, 徐山鹰, 杨晓光. 区间算法简介[J]. 系统工程理论与实践, 2003(3): 59—62
Hu Chengyi, Xu Shanying, Yang Xiaoguang. A Brief Introduction to the Interval Methods[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2003(3): 59—62