

文章编号: 1674—8247(2018)04—0060—07

## 铁路单箱双室连续梁三腹板受力研究

车文庆

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**文章以成昆铁路某三线桥采用的(52+88+52)m单箱双室、变高度、变截面预应力混凝土连续梁为研究对象,运用ANSYS有限元软件建模计算,分析了铁路三腹板连续梁三道腹板的受力,对比三道腹板所受的纵向弯曲正应力和竖向剪应力的大小,并研究其在三道腹板中的分布规律和沿梁长的变化情况。根据分析结果,总结出该梁三道腹板所受的纵向弯曲正应力和竖向剪应力的变化规律,提出梁体截面优化措施,可为类似连续梁三道腹板优化设计提供参考。

**关键词:**三腹板连续梁;弯曲正应力;剪应力;应力分布

**中图分类号:**U441+.5 **文献标志码:**A

## Stress Analysis on Webs of Railway Continuous Single-box Double-cell Girder

CHE Wenqing

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In this paper, (52+88+52)m prestressed concrete continuous girder with single box, variable height and variable section used in a three-line bridge on Chengdu-Kunming railway is taken as the research object, by using ANSYS finite element software, the stress condition of webs in the three-web continuous girder is analyzed. The longitudinal bending normal stress and vertical shear stress are compared, and the regularities of distribution of both stresses in three webs and the variation of these stresses along the girder length are also discussed. The numerical results demonstrate that, the regularities of variation of longitudinal bending normal stress and vertical shear stress are concluded, and optimization measures of beam body section are put up, the results can be served as a reference for the optimism design of webs in the railway continuous box girder.

**Key words:** railway continuous box girder with one box double cells; bending normal stress; shear stress; stress distribution

预应力混凝土箱梁桥具有整体性能好、变形小、结构刚度大、抗震性能好等优点,在工程设计中被广泛采用<sup>[1-2]</sup>。公路预应力混凝土连续梁采用单箱多室的情况较为普遍,一般情况下各腹板在同一个截面上采用等厚设置。而铁路预应力混凝土连续梁由于荷载大,多腹板受力情况复杂,因此多腹板预应力混凝土连续梁较少见。从现有的文献来看,对铁路三腹板预应力

混凝土连续梁腹板受力进行研究的文献较少,现以成昆铁路某三线桥采用的单箱双室连续梁为例,分析研究铁路三腹板预应力混凝土连续梁腹板的受力和力的分布情况。

### 1 工程概况

成都至昆明铁路某三线大桥采用了(52+88+

收稿日期:2017-10-27

作者简介:车文庆(1974-),男,高级工程师。

引文格式:车文庆. 铁路单箱双室连续梁三腹板受力研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(4):60-66.

CHE Wenqing. Stress Analysis on Webs of Railway Continuous Single-box Double-cell Girder [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 60-66.

52) m 单箱双室预应力混凝土连续梁跨越既有铁路和龙川江,该桥梁体为单箱双室、变高度、变截面箱梁,全长 193.5 m。主跨中间主墩顶梁高为 7 m,梁端及主跨跨中梁高 4 m。箱梁顶板宽 14.9 m,直腹板箱体宽 11.0 m。一般梁段顶板厚 45 cm,底板厚 42 cm。腹板在端部由 40~80 cm,中支点两侧由 40~90 cm<sup>[3]</sup>。设计荷载为铁路中-活载、自重、二期恒载<sup>[4]</sup>。1/2 梁体构造剖面示意图如图 1 所示。

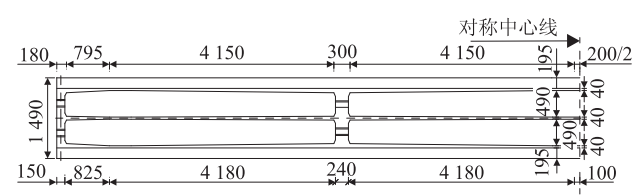


图 1 1/2 梁体构造剖面示意图 (cm)

2 全桥有限元建模

利用 ANSYS 有限元软件建模进行计算,采用实体单元 Solid65 模拟混凝土,用 Link8 模拟钢筋单元,全桥共划分单元 283 706 个<sup>[5]</sup>。二期恒载和铁路中-活载按照等效节点力施加到箱梁顶板上。

预应力钢束数目多、复杂,约束方程容易造成节点的多约束状态,为了施工阶段的生死单元模拟方便,模拟时采用了整体式实体力筋<sup>[6]</sup>中的节点耦合法<sup>[7]</sup>,并通过降温法<sup>[6]</sup>实现预应力筋的数值模拟。

模拟中,应用生死单元法<sup>[8]</sup>模拟桥梁的施工过程,先对整桥进行离散,建立有限元模型,在模拟施工过程前杀死全部单元,然后根据实际的施工顺序和各阶段不同的荷载工况,来激活所需要的单元<sup>[9-10]</sup>。该

桥按照设计、施工所确定的施工步骤和基本参数进行施工模拟,操作中按施加一次预应力荷载在施工阶段计算,得到该施工阶段下的结构变形、内力等状态控制数据,挂篮的作用以节点集中力近似模拟。

3 计算结果分析

在进行梁体三道腹板应力规律研究时,选用了梁体特性变化处和具有代表性的 32 个截面进行研究(截面以左侧梁端为计算起点),提取这些截面的代表性点位的计算结果进行分析,点位分布如图 2 所示。

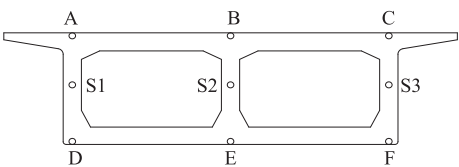


图 2 计算结果提取位置示意图

3.1 分析工况

分析中按以下 3 种工况对纵向弯曲正应力、竖向剪应力的分布和变化规律进行研究,工况描述情况如下:工况 1:施工合龙后、二期恒载作用之前;工况 2:边跨跨中弯矩最大时的布载;工况 3:边跨跨中剪力最大时的布载。

3.2 纵向弯曲正应力分析

(1) 工况 1 作用下纵向弯曲正应力计算

① 梁体施工完毕后,自重和预应力作用下代表性截面的纵向弯曲正应力如图 3 所示。

② 梁体施工完毕后,各考查截面道腹板与中腹板弯曲正应力比沿梁长度上的分布如图 4 所示。

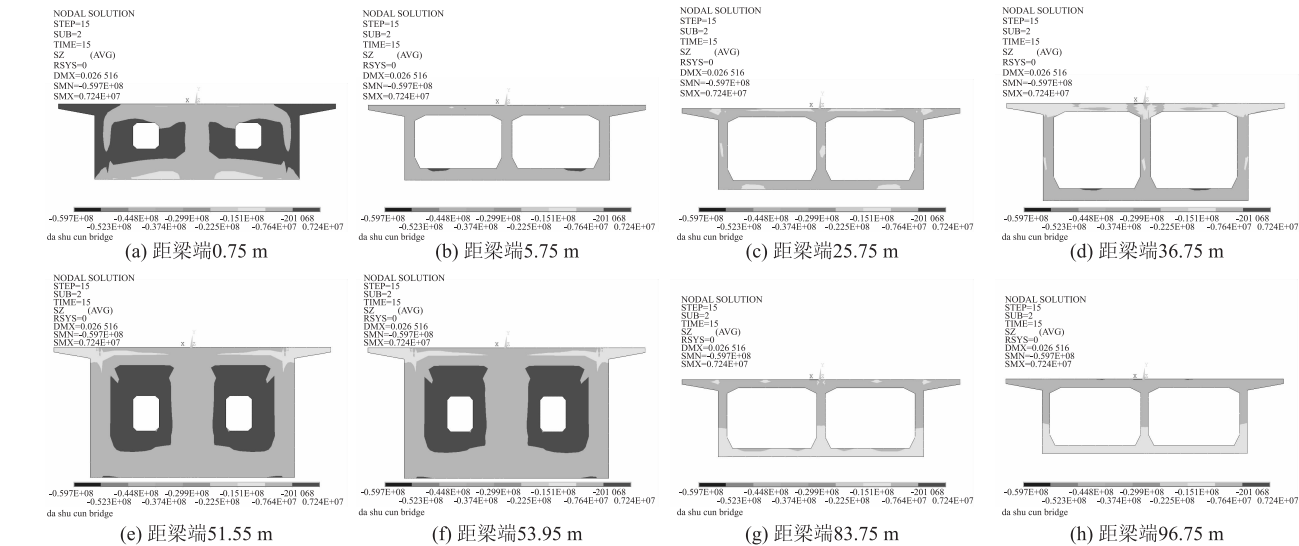
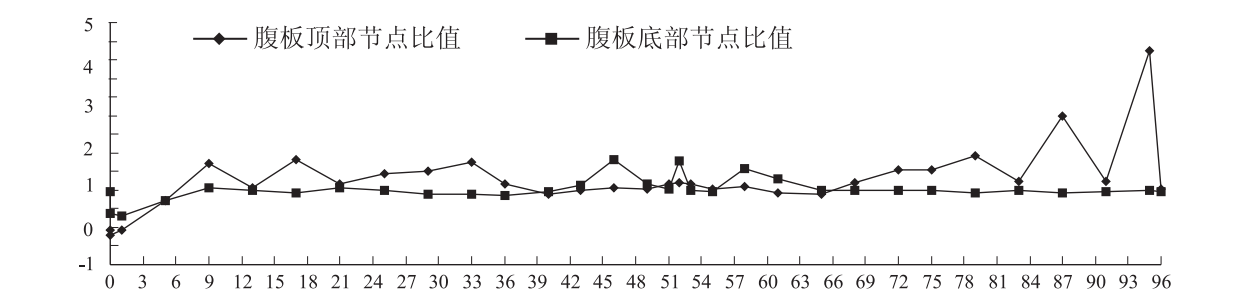


图 3 工况 1 作用下代表性截面纵向弯曲正应力图 (Pa)



注:图中以中腹板的作用为 1。当出现负值时,说明边腹板出现拉应力

图 4 工况 1 作用下边腹板与中腹板弯曲正应力比值沿桥长度上的分布图

(2) 工况 2 的作用下纵向弯曲正应力计算

①当边跨跨中弯矩最大时,代表性截面的纵向弯曲正应力如图 5 所示。

②当边跨跨中弯矩最大时,各考查截面边腹板与中腹板弯曲正应力比沿梁长度上的分布如图 6 所示。

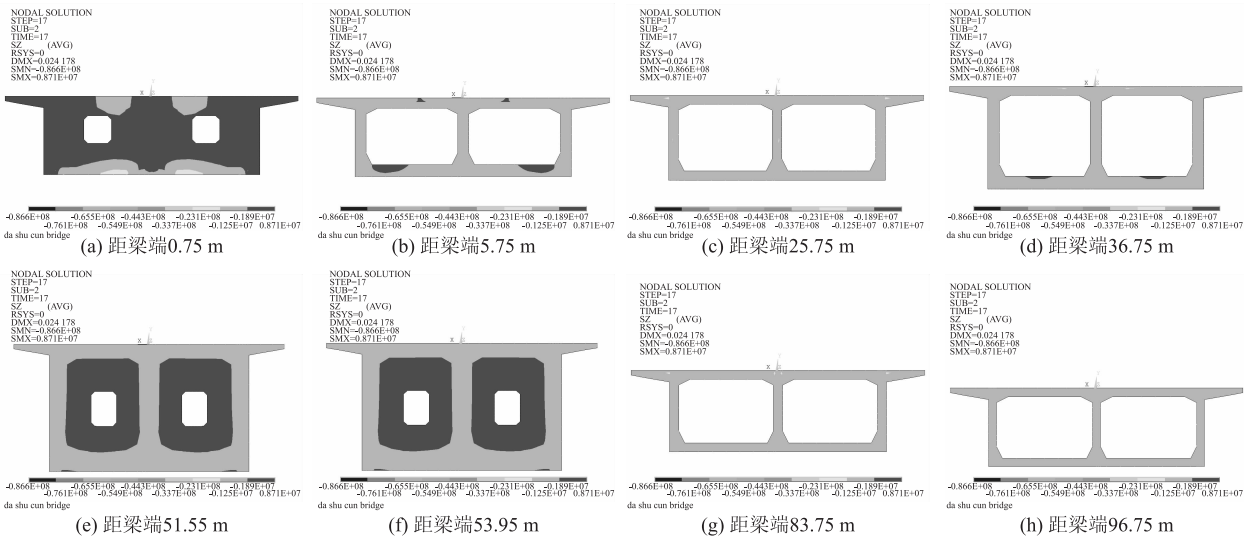
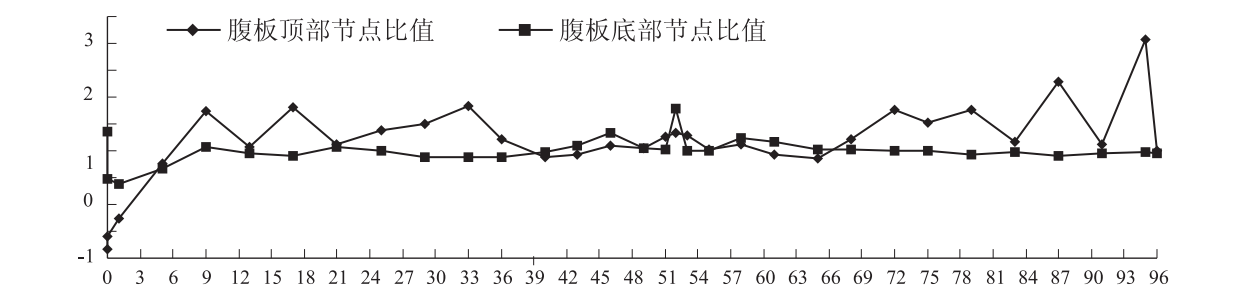


图 5 工况 2 作用下代表性截面纵向弯曲正应力图 (Pa)



注:图中以中腹板的作用为 1。当出现负值时,说明边腹板出现拉应力

图 6 工况 2 作用下边腹板与中腹板弯曲正应力比值沿桥长度上的分布图

(3) 纵向弯曲正应力分布分析

将以上两种工况下梁纵向弯曲正应力图、应力对比图进行分析,可以得到:

①从腹板顶部受力来看,工况 1 和工况 2 作用相比较,工况 2 增加了二期恒载和活载,梁部跨中截面的应力值较工况 1 作用下有所增大,而靠近中支点处的应力值有所减小,但受力分布规律相似,仅局部变化范围不同。在边支点处,受支座约束和横隔板的影响,边、中腹板受力偏差较大,中腹板起主要受力作用,边腹板应力仅为中腹板的 21% 和 59%。边支点边腹板附近出现较小的拉应力,此处可以通过增加钢束,使截面达到全压应力的效果。沿桥长方向,边腹板受力逐

渐加强,边、中腹板受力差值逐渐缩小,在 5.75~9.75 m 间的截面,由中腹板起主要受力作用转变为边腹板起主要受力作用。在 9.75~33.25 m 段(工况 2 为 36.25 m,范围有所增大)和 68.75~95.75 m 段,边腹板起主要受力作用,主要是因顶板长钢束布置在边腹板两侧的距离小于布置在中腹板两侧的距离造成的边、中腹板偏差较大,可以调整顶板钢束布置来优化设计。沿桥长方向,节点上的弯曲正应力先逐渐增大,到零号块两侧截面较大,接近中支点处,因横隔板的添加,截面面积增大,单节点上的弯曲正应力略有减小,后到中跨跨中逐渐减小。从三道腹板分别受力来看,两个边腹板受力相差甚微,最大仅差 0.36%,主要是边腹板受力与中腹板受力产生偏差,边腹板与中腹板弯曲正应力比最大值达 4.73 倍。

②从腹板底部受力来看,工况 1 和工况 2 作用比较,情况与腹板顶部相似。按三道腹板分别受力来看,两个边腹板受力相差甚微,最大仅差 2.2%,主要是边

腹板受力与中腹板受力产生偏差,边腹板与中腹板弯曲正应力比最大值达 1.82 倍。在边支点处,受支座约束和横隔板的影响,边、中腹板受力偏差较大,中腹板与边腹板弯曲正应力比最大值达 2.7 倍,中腹板起主要受力作用。沿桥长方向,边腹板受力逐渐加强,边、中腹板受力差值逐渐缩小,且在 17.75~25.75 m 间的边跨跨中附近截面,三道腹板受力十分接近,此时三道腹板共同受力。在 51.55 m 和 53.95 m 处(工况 2 作用为 46.75 m 和 58.75 m),因受横隔板的影响,同时受支座约束对梁体变形的影响,使边、中腹板受力差值有所增大。靠近中跨跨中,三腹板受力又趋于相等。

3.3 竖向剪应力分析

(1)工况 1 的作用下竖向剪应力计算

①梁体施工完毕后,自重和预应力作用下的代表性截面的竖向剪应力如图 7 所示。

②梁体施工完毕后,各考查截面边腹板与中腹板剪应力比值沿梁长度上的分布如图 8 所示。

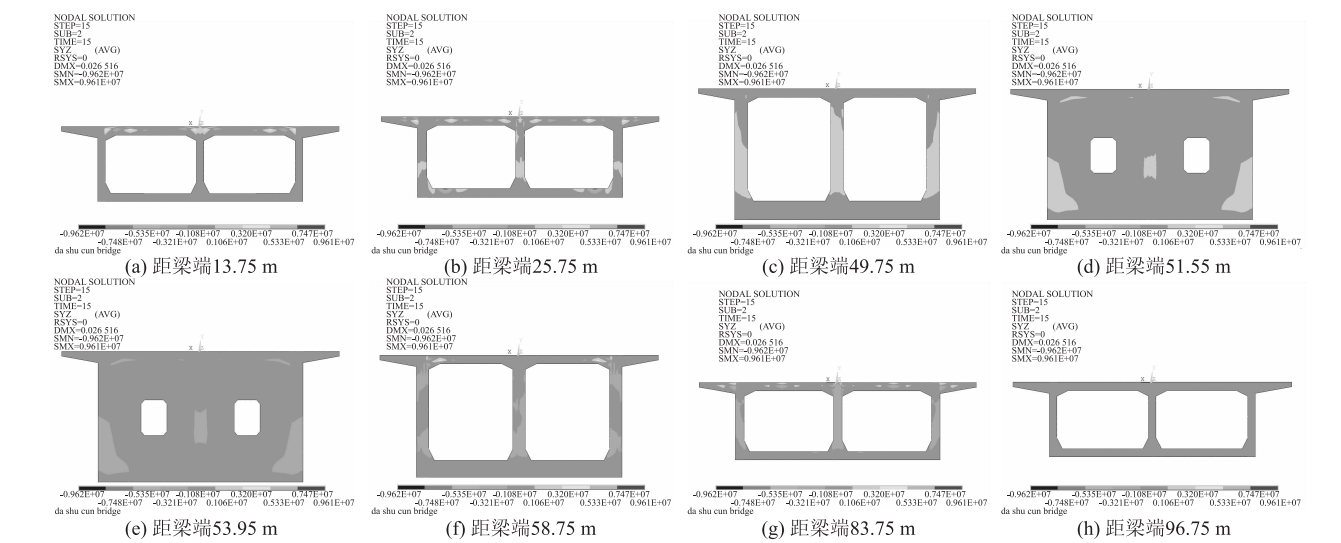
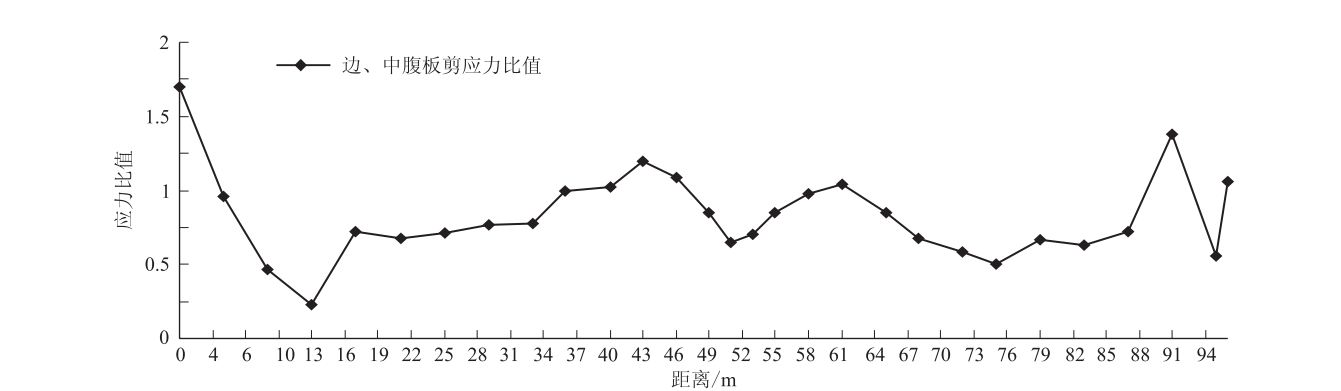


图 7 代表性截面竖向剪应力图 (MPa)



注:图中数值为代表性点位附近多点提取结果的均值的比值。图中以中腹板的作用为 1

图 8 工况 1 作用下边腹板与中腹板剪应力比值沿桥长度上的分布图

(2) 工况 3 的作用下竖向剪应力

①当边跨跨中剪力最大时,桥梁代表性截面的竖向剪应力如图 9 所示。

②当边跨跨中剪力最大时,各考查截面边腹板与中腹板剪应力比值沿梁长度上的分布如图 10 所示。

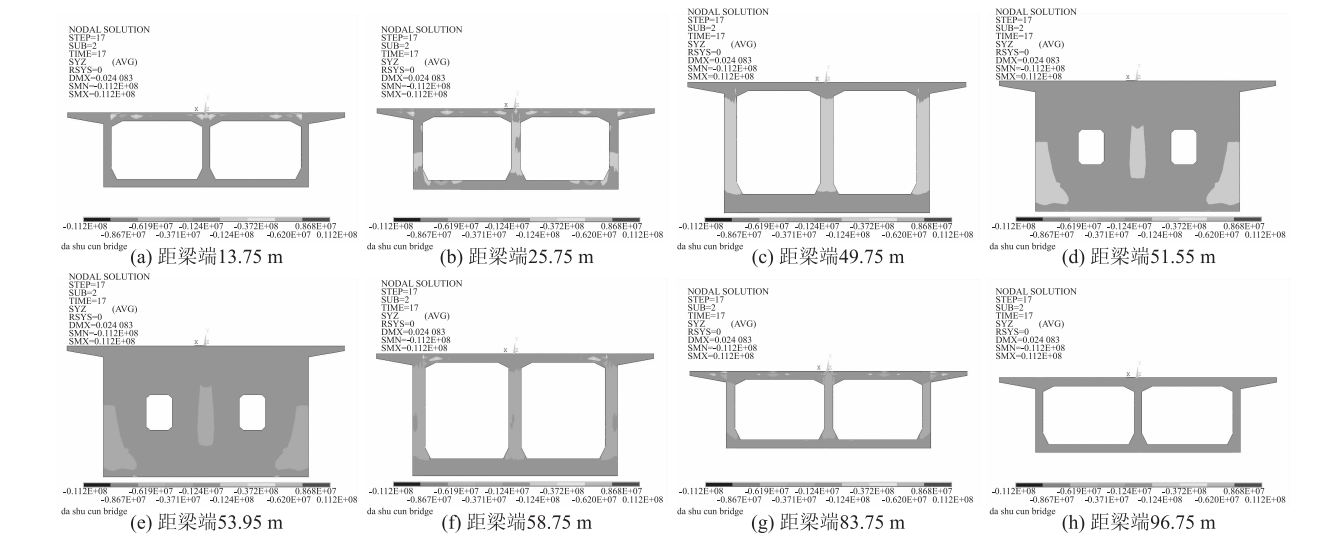
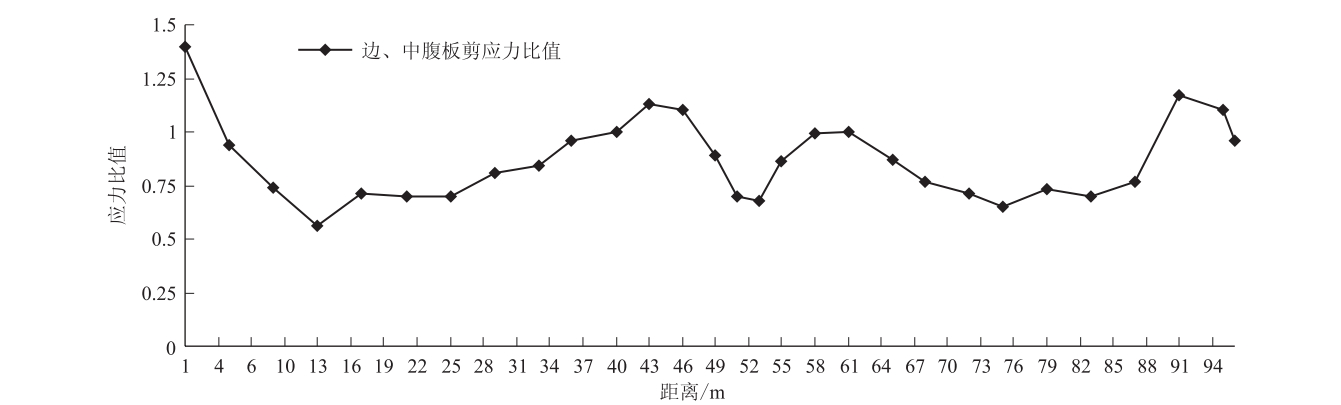


图 9 工况 3 作用下代表性截面竖向剪应力图 (Pa)



注:图中数值为代表性点位附近多点提取结果的均值的比值。图中以中腹板的作用为 1

图 10 工况 3 作用下边腹板与中腹板剪应力比值沿桥长度上的分布图

(3) 竖向剪应力分布分析

将上面的两种工况下梁竖向剪应力图、剪应力对比图进行分析,可以得到:

工况 1 和工况 3 作用下剪应力变化类似,从边支点往中支点,剪应力由负变正并逐渐增大,经过中支点剪应力方向发生改变,由正剪应力变为负剪应力,分布规律变化不大,但各截面剪应力数值在工况 3 作用下有所增大。具体来看,沿桥长方向,在靠近边支点处截面,因支座约束靠近边腹板的影响,致使边腹板相对于中腹板所分配的剪力较大,趋向于两个边腹板有“等效支撑”的趋势。从 5.75 m 处起,中腹板承担的剪应力较边腹板大。在 13.75 ~ 17.75 m 间,截面上剪应力方向发生变化。中支点处,因横隔板的添加,致使中腹

板截面尺寸大于边腹板,中腹板的刚度增大,承担的剪应力大于边腹板。边、中腹板剪应力差值,从中支点向两侧跨中附近增大,但在靠近中跨跨中处减小,中跨跨中处三道腹板的剪应力分配趋向均匀,类似三道腹板下均有“等效支撑”的趋势。在 9.75 ~ 33.25 m (即边跨约 1/5 ~ 3/5 段)、65.25 ~ 87.75 m (即中跨约 1/7 ~ 3/7 段)两段中,中腹板承担的剪应力较边腹板大,可以适当减小该两段中腹板的厚度,减弱中腹板的抗剪能力,使三道腹板的受力更加均衡,达到优化设计目的。

### 3.4 梁体截面优化措施及验证

(1) 梁体截面优化措施

根据纵向弯曲正应力及竖向剪应力的计算分析,



可知箱梁支点处受力复杂,受支座约束和横隔板影响较大,边、中腹板的尺寸大小影响较小。离开支点后采用以下两个措施可使三道腹板受力更加均衡,达到优化梁体截面尺寸和受力的目的:

- ①调整梁体顶板钢束的布置位置;
- ②在边跨约 1/5 ~ 3/5 段、中跨约 1/7 ~ 3/7 段,适当减小中腹板的厚度。

(2) 优化措施验证

①在模型中调整箱梁顶板钢束的布置,使长钢束尽量布置在边、中腹板附近并相对于腹板中心均匀对称,腹板与腹板间的中间部分尽量以梁中心对称布置

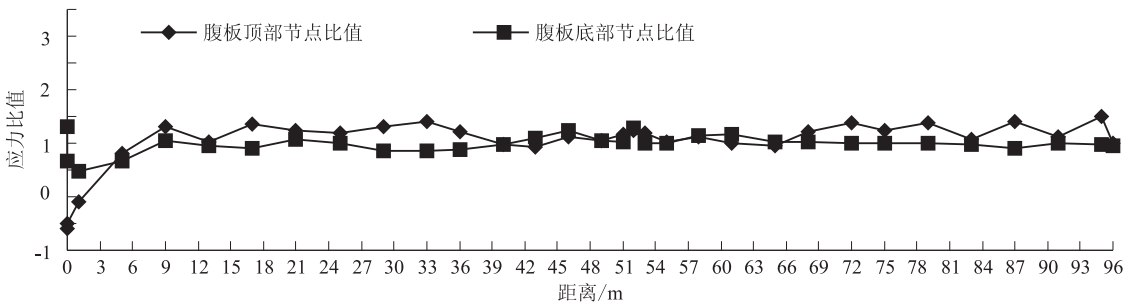
较短钢束。

②在模型中调整中腹板厚度,使边跨约 1/5 ~ 3/5 段、中跨约 1/7 ~ 3/7 段中腹板厚度减小约 5 cm。

通过对工况 2 作用下梁体受到的弯曲正应力和工况 3 作用下梁体受到的剪应力分析计算,结果如下:

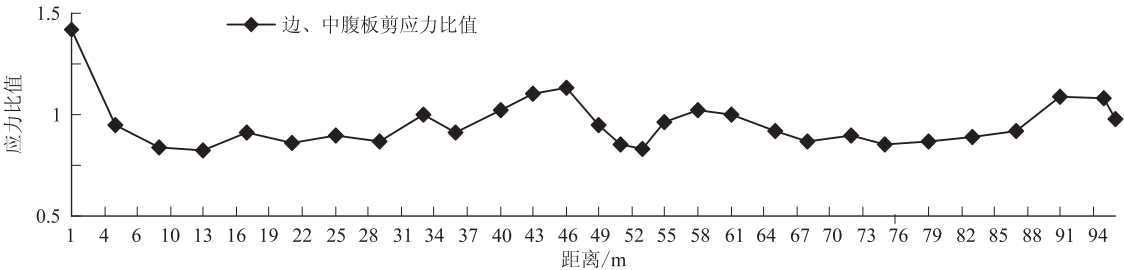
采用工况 2 作用验算,优化后各考查截面边腹板与中腹板弯曲正应力比沿梁长度上的分布如图 11 所示。

采用工况 3 作用验算,优化后各考查截面边腹板与中腹板剪应力比值沿梁长度上的分布如图 12 所示。



注:图中以中腹板的作用为 1。当出现负值时,说明边腹板出现拉应力

图 11 优化后工况 2 作用下边腹板与中腹板弯曲正应力比值沿桥长度上的分布图



注:图中数值为代表性点附近多点提取结果的均值的比值。图中以中腹板的作用为 1

图 12 优化后工况 3 作用下边腹板与中腹板剪应力比值沿桥长度上的分布图

从图 11、图 12 可以看出,边、中腹板受到的纵向弯曲正应力和竖向剪应力分布趋于更加均衡,证明措施是有效的。设计时,在满足构造要求的前提下,可采用以上两个措施对梁体进行优化。

4 结论

本文利用 ANSYS 有限元软件分析 (52 + 88 + 52)m 单箱双室三腹板预应力混凝土连续梁桥各截面的弯曲正应力和剪应力沿桥长方向的分布情况,得出以下结论:

(1)截面上两个边腹板受到的弯曲正应力相差甚微,最大仅差 2.2%,主要是与中腹板产生偏差,边腹

板与中腹板弯曲正应力比最大值达 4.73 倍。在边支点附近,受支座约束和横隔板的影响,边、中腹板受力偏差较大,中腹板起主要受力作用。中支点附近,因受横隔板影响,支座约束对梁体变形的影响,使边、中腹板受力差值增大。跨中附近,三道腹板受力趋于相等。

(2)在靠近边支点处截面,因支座约束靠近边腹板的影响,致使边腹板相对于中腹板所分配的剪力较大,趋向于两个边腹板有“等效支撑”的趋势。中支点处,因横隔板的添加,致使中腹板截面尺寸大于边腹板,中腹板的刚度增大,承担的剪应力大于边腹板。中跨跨中处三道腹板的剪应力分配趋向均匀,类似三道腹板下均有“等效支撑”的趋势。

(3)在边跨约1/5~3/5段、中跨约1/7~3/7段,腹板顶的纵向弯曲正应力主要由边腹板承受,而竖向剪应力主要由中腹板承担。

(4)采用“调整梁体顶板钢束的布置位置”的措施可有效调整边、中腹板顶部受到的纵向弯曲正应力的比值;采用“在边跨约1/5~3/5段、中跨约1/7~3/7段,适当减小中腹板的厚度”的措施,可有效调整竖向剪应力在中腹板和边腹板的分配。设计时,在满足构造要求的前提下,可采用以上两个措施对梁体进行优化。

通过对三腹板连续箱梁三道腹板和顶底板受力规律的研究,便于全面了解截面的弯曲正应力和竖向剪应力的分布规律,验证梁体截面优化措施,以指导优化设计,为类似的工程设计提供参考。

参考文献:

[1] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社, 1999.  
FAN Lichu. Prestressed Concrete Continuous Beam Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.

[2] 王攀峰. 大跨径连续梁桥三向预应力设计与施工工艺优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.  
WANG Panfeng. Research on Three Dimensional Prestress Design and Construction Technics Optimization of Long Span Continuous Beam Bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

[3] 罗超. 预应力混凝土连续梁桥施工阶段内力分析[D]. 成都:西南交通大学, 2010.  
LUO Chao. The Construction Inter Force Analysis of the Prestress Concrete Continuous Girder Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

[4] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].  
TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].

[5] 叶九发. 曲线连续刚构桥0号块实体分析研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(6): 70-71.  
YE Jiufa. Analysis on No. 0 Segment of Curved Continuous Rigid-framed Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(6): 70-71.

[6] 张立明. Algor, Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.  
ZHANG Liming. Application Methods and Examples of Algor and Ansys in Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[7] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.  
WANG Xinmin. ANSYS Numerical Analysis of Engineering Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[8] 颜毅, 杜鹏, 高英祚, 等. 桥梁施工过程分析在 ANSYS 中的实现方法[J]. 重庆交通大学学报, 2007, 26(S1): 18-21.  
YAN Yi, DU Peng, GAO Yingzuo, et al. Method of Bridge Construction Process Analysis in ANSYS [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007, 26(S1): 18-21.

[9] 武肖福. 高速铁路预应力混凝土连续梁施工工艺研究[D]. 成都:西南交通大学硕士论文, 2008.  
WU Xiaofu. Study on the Construction Technology of High-Speed Railway Prestressed Concrete Continuous Beams [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Master's Thesis, 2008.

[10] 刘飞鹏. 连续梁桥施工控制与 ANSYS 仿真分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2006.  
LIU Feipeng. Construction Controlling and Simulation of Continuous Bridge with ANSYS. [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.

(编辑:赵立红 苏玲梅)

(上接第49页)

[2] TB 10091-2017 铁路桥梁钢结构设计规范[S].  
TB 10091-2017 Code for Design on Steel Structures of Railway Bridges[S].

[3] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].

[4] S. P. 铁摩辛柯, J. M. 盖莱. 弹性稳定理论(第二版)[M]. 张福范, 译. 北京:科学出版社, 1965.  
Timoshenko, S. P., J. M. Gere. Theory of Elastic Stability (2nd Edition)[M]. ZHANG Fufan. Beijing: Science Press, 1965.

[5] 许大光. 钢箱拱肋局部稳定的分析方法[J]. 铁道标准设计, 2009, 55(5): 28-31.  
XU Daguang. Analysis Method on Local Stability of Steel Box Arch Ribs[J]. Railway Standard Design, 2009, 55(5): 28-31.

[6] 吴冲. 现代钢桥[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.  
WU Chong. Modern Steel Bridge[M]. Beijing: China Communication Press, 2006.

[7] 张立青, 隋明国. 客运专线大跨度、大吨位钢桁梁顶推架设技术及应用[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(6): 48-52.  
ZHANG Liqing, SUI Mingguo. Launching Technology and Application of Large Span and Large Tonnage Steel Truss Girder for Passenger Dedicated Lline [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(6): 48-52.

[8] 日本道路协会. 日本道路桥示方书[M]. 日本:丸善株式会社, 2001.  
Japan Road Association. Specifications for Japanese Highway Bridges [M]. Japan: Maruzen-Yushodo Co., Ltd., 2001.

(编辑:车晓娟 苏玲梅)