

## 基于应力控制箱梁截面设计数值模拟分析

张兆宁<sup>1,2</sup>, 贺拴海<sup>1</sup>, 赵 煜<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 为了研究箱梁截面尺寸对箱梁力学行为的影响, 分别以梁高、顶板、腹板及底板为参数, 通过建立有限元模型, 分析了各参数变化对箱梁应力变化的影响及敏感性。分析结果表明, 随着顶板厚度的增大, 箱梁顶板横向拉应力逐渐减小, 箱梁顶板适宜厚度为 24~36 cm; 随着腹板厚度的增加, 箱梁斜截面主拉应力逐渐减小, 墩顶截面腹板的适宜厚度约为跨径的 1/260~1/170, 支座截面腹板的适宜厚度为墩顶截面腹板厚度的 1/2.0~1/1.6; 随着顶板厚度的增加, 墩顶截面底板压应力也呈逐渐减小趋势, 墩顶截面底板的适宜厚度约为跨径 1/220~1/140, 跨中截面底板的适宜厚度为 20~31 cm。最后, 建议在箱梁结构设计时, 应通过整体分析、局部分析综合考虑各因素来确定其最优设计参数, 以提高箱梁的承载能力和抗裂性能。

**关键词:** 箱梁; 数值模拟; 截面设计; 主拉应力; 承载能力

**中图分类号:** TU443.35

**文献标识码:** A

### 0 引言

在混凝土梁桥中, 预应力连续箱梁广泛应用于高速公路大、中桥梁之上。由于箱型截面具有良好的抗弯、抗扭性能, 且在偏心荷载作用下受力均匀, 已成为设计人员青睐的截面形式之一。在设计过程中, 设计人员往往以长期积累的工程经验为主进行箱梁截面尺寸的拟定, 即考虑一定的因素在某一给定的区间范围内确定箱梁的高度、顶板、腹板及底板的厚度。在工程设计中, 箱梁截面尺寸尚没有一个统一明确的规定, 其尺寸主要以国内外一些已建类似桥梁结构尺寸、英国水泥和混凝土学会及《日本本洲四国联络桥设计标准》等提出的数值为参考<sup>[1]</sup>。随着结构数值分析水平的不断提高, 有必要对箱梁参数进行优化设计, 以此减小其对桥梁力学行为的影响程度, 避免由于构造设计不合理引起的局部应力过大、混凝土开裂等问题。因此, 通过数值模拟来定量分析箱梁合理截面尺寸及其对应力的影响具有一定的工程价值, 展开这方面的研究是十分有必要的。

### 1 数值分析模型

#### 1.1 有限元模型及加载

为了研究箱梁截面尺寸的变化对桥梁应力挠

度的影响, 以某一 3 跨连续刚构桥 (83.0 m + 156.0 m + 83.0 m) 为例进行分析。该桥截面形式为单箱单室, 主梁混凝土标号为 C50, 预应力钢筋为 15.24 mm 钢绞线, 设计强度 1 860 MPa, 张拉控制应力 1 395 MPa。笔者采用有限元软件 ANSYS 进行模拟分析, 混凝土采用 Solid65 单元模拟, 预应力钢筋采用 Link8 单元模拟, 通过单元降温的方式施加预应力<sup>[2]</sup>。由于结构对称, 分析时只建立 1/2 模型, 其有限元计算模型如图 1 所示。

分析计算时根据承载能力极限状态、正常使用极限状态的要求, 考虑基本组合和短期效应两种组合下箱梁的应力状态。加载时考虑结构自重、二期恒载、预应力、汽车荷载及温度荷载的共同影响。其中, 汽车荷载按照双车道布载, 根据 JTG D 60—2004《公路桥涵设计通用规范》<sup>[3]</sup>, 采用公路—I 级车道荷载, 集中荷载采用 360 kN, 均布荷载采用 10.5 kN/m, 按照最不利位置进行布载。为了避免应力集中, 将集中力及均布荷载等效成面荷载进行加载, 其作用面积分别为车轮与桥面接触面积、3.5 m 车道宽度范围。为了考虑温度的影响, 温度梯度荷载考虑升温 14 ℃。

收稿日期: 2010-07-06; 修订日期: 2010-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50908017)

作者简介: 张兆宁 (1978-), 男, 宁夏固原人, 长安大学讲师, 博士研究生, 主要从事桥梁结构评价及可靠性研究, E-mail: zhangzhn@lut.cn.

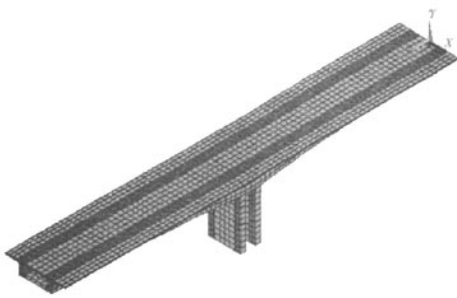


图1 有限元计算模型  
Fig.1 Finite element model

1.2 数值分析参数确定

对于箱梁截面尺寸,桥梁设计规范中没有明确的规定取值.在尺寸拟定过程中,都是参考已建类似桥梁尺寸以及国外一些相关资料及规范来选取.通过长期的工程实践积累,国内一些相关资料里给出了箱梁截面尺寸的一些参考取值范围<sup>[4]</sup>,但不同资料给出的数值差异性较大.

笔者模拟分析中,综合考虑相关情况,墩顶截面箱梁高度的取值范围为7.0~13.0 m,跨中截面箱梁高度的取值范围为3.0~5.6 m;顶板厚度的取值范围为24~40 cm;墩顶截面腹板厚度的取值范围为50~110 cm,跨中截面腹板厚度的取值范围为30~65 cm;墩顶截面底板厚度的取值范围为70~130 cm,支座截面底板厚度的取值范围为20~37 cm,具体分析参数见表1所示.为了准确分析箱梁高度、顶板、腹板及底板厚度变化时梁的应力状态及各参数相互之间的影响,模拟分析时各参数交叉进行.

表1 数值分析参数  
Tab.1 Parameter of numerical analysis

| 类别      | 箱梁截面尺寸 |     |     |      |      |      |
|---------|--------|-----|-----|------|------|------|
| 墩顶梁高/m  | 7.0    | 8.0 | 9.0 | 10.0 | 11.0 | 13.0 |
| 跨中梁高/m  | 3.0    | 3.4 | 3.9 | 4.3  | 4.7  | 5.6  |
| 顶板/cm   | 24     | 28  | 30  | 32   | 36   | 40   |
| 墩顶腹板/cm | 50     | 60  | 70  | 80   | 90   | 110  |
| 跨中腹板/cm | 30     | 35  | 40  | 47   | 55   | 65   |
| 墩顶底板/cm | 70     | 80  | 90  | 100  | 110  | 130  |
| 跨中底板/cm | 20     | 23  | 26  | 29   | 31   | 37   |

2 数值模拟结果分析

2.1 箱梁顶板横向应力分析

箱梁顶板起到承受拉、压、弯的作用,其厚度的确定一方面要满足纵向预应力钢束布置的要求,同时也要达到桥面板横向受弯的要求(永久作用、汽车荷载、日照温差等).以往,在确定箱梁

顶板厚度时都是以工程经验数值为主,很少从理论分析角度来为研究顶板受力情况.笔者为了分析顶板厚度的变化引起的梁体应力变化规律,寻求顶板厚度的合理变化范围,分别以箱梁高度和顶板厚度为变化参数来模拟分析,其顶板横向拉应力随梁高及顶板厚度变化曲线如图2所示.

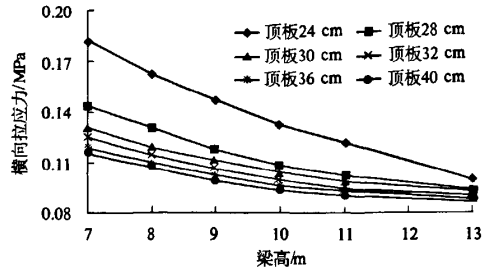


图2 顶板横向拉应力随梁高及顶板厚度变化  
Fig.2 Transverse tensile stress with different height of beam and thickness of top deck

分析结果表明,在承载能力极限状态基本组合作用下,在箱梁高度保持不变的情况下,随着顶板厚度的不断增大,箱梁顶板横向拉应力逐渐减小.当箱梁高度为7.0 m时,不同顶板厚度下,顶板横向最大拉应力分别0.182 MPa,0.144 MPa,0.131 MPa,0.125 MPa,0.12 MPa,0.116 MPa,均小于混凝土轴心抗拉强度设计值,其应力变化减小幅度分别20.9%,9.0%,4.6%,4.0%,3.3%.可见,顶板厚度介于24~28 cm范围时,其变化引起的顶板横向拉应力减小幅度最大,其敏感性最强;顶板厚度介于30~40 cm范围时,其变化引起的顶板横向拉应力减小幅度较小,敏感性最较弱.当顶板厚度保持不变时,随着箱梁高度的变化,顶板横向拉应力总体趋势逐渐减小.当顶板厚度为24 cm,箱梁高度介于7.0~13.0 m时,顶板横向拉应力随着梁高增加1.0 m平均减小10.0%.当顶板厚度介于28~40 cm,箱梁高度介于7.0~10.0 m时,顶板横向拉应力随着梁高增加1.0 m平均减小8.3%;当箱梁高度介于10.0~13.0 m时,顶板横向拉应力随着梁高增加1.0 m平均减小3.7%.从上述分析可知,箱梁顶板厚度取值遵循一定的规律,即增大其厚度对横向应力是有利的.从应力控制角度出发,顶板厚度小于24 cm时,顶板产生的横向拉应力就会超过混凝土轴心抗拉强度设计值;另一方面顶板厚度取值超过36 cm时,其厚度增长对横向应力的减小作用有限,相反会增加梁体自重及混凝土的用量.综合考虑各方面的因素,箱梁顶板的合理厚度范围应控制在24~36 cm之间.

## 2.2 箱梁腹板主拉应力分析

在箱梁设计中,腹板的主要功能是承受弯曲剪应力和扭转剪应力所引起的主拉应力<sup>[5-6]</sup>。主拉应力与正应力及剪应力有关,而这些应力又与箱梁截面尺寸有关。在箱梁截面尺寸中,对腹板主拉应力影响较大的是腹板厚度。由于腹板厚度大于顶板、底板的厚度,使得箱梁全截面收缩不同步,顶板、底板的收缩会受到腹板的约束,最终导致顶板、底板混凝土开裂<sup>[1]</sup>。可见,腹板太厚也未必一定合理,相反,腹板太薄又会影响抗剪能力。为了合理确定腹板厚度,通过模拟分析得到了不同厚度条件下箱梁的最大主拉应力,其变化曲线如图3所示。

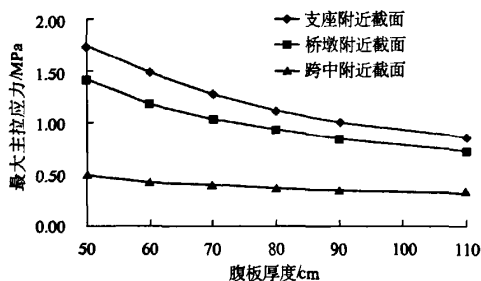


图3 主拉应力随腹板厚度变化

Fig.3 Principal tensile stress with different thickness of web

由图3可知,在正常使用极限状态短期效应组合作用下,随着腹板厚度的增大,支座截面、桥墩截面主拉应力变化曲线曲率较大;跨中截面主拉应力变化曲线比较平坦,但两者均呈减小趋势。由曲线可以看出,腹板厚度的变化对桥墩截面和支座截面主拉应力的影响较大,对跨中截面主拉应力的影响很小。当墩顶截面腹板厚度为50 cm,跨中截面腹板厚度为30 cm时,支座截面、桥墩截面、跨中截面的主拉应力分别为1.73,1.41,0.51 MPa,其中,支座截面和桥墩截面均不满足斜截面抗裂验算要求。由此可见,在考虑梁体预应力钢束布置、普通钢筋布置及混凝土要求下,箱梁桥墩腹板最小厚度不应小于30 cm,与相关资料提出的最小厚度值基本相符。当墩顶截面腹板厚度介于70~110 cm时,跨中截面腹板厚度介于40~65 cm时,支座截面产生的主拉应力均小于容许主拉应力。当墩顶截面处腹板厚度大于60 cm,支座截面处腹板大35 cm时,桥墩截面斜截面抗裂验算满足要求。通过分析发现,当墩顶截面腹板厚度介于50~90 cm,支座截面腹板厚度介于30~55 cm时,腹板厚度每增加10 cm,其主拉应力平均减小

幅度为12.3%左右,腹板厚度变化对主拉应力敏感性表现较强;当墩顶截面腹板厚度介于90~110 cm,支座截面腹板厚度介于55~65 cm时,腹板厚度每增加10 cm,其主拉应力平均减大幅度为7.3%左右,腹板厚度变化对主拉应力敏感性表现较弱。由上述分析可知,综合考虑各种影响因素,从控制箱梁主拉应力角度出发,箱梁桥墩截面处腹板的适宜厚度约为跨径的1/260~1/170,支座截面处腹板的适宜厚度为墩顶截面腹板厚度的1/2.0~1/1.6。

## 2.3 箱梁底板压应力分析

合理的底板厚度不但能节省混凝土用量、减轻自重,同时可以提高箱梁承载能力和抗裂性能<sup>[7-8]</sup>。为了适应箱梁下缘受压的要求,底板厚度随着箱梁负弯矩的增大而逐渐加厚至桥墩。墩顶区域底板厚度太薄,则会引起较大的压应力,同时将使跨中区域梁体产生较大的徐变挠度<sup>[9-10]</sup>。另一方面,为了防止跨中合拢段出现纵向裂缝,跨中底板厚度也不能太薄。经模拟分析,分别得到了墩顶区域底板压应力随底板厚度及梁高变化曲线如图4所示。

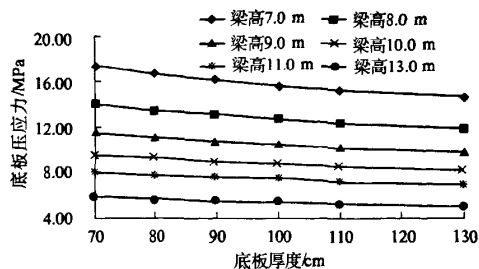


图4 墩顶底板压应力随底板厚度及梁高变化

Fig.4 Compressive stress of bottom slab with different thickness of bottom slab and height of beam

由图4可知,在承载能力极限状态基本组合作用下,当梁高保持不变,墩顶底板压应力随着腹板厚度的增大而逐渐减小;当底板厚度一定时,墩顶底板压应力与梁高成正比。不同梁高参数下,墩顶底板压应力曲线形状一致,均呈递减趋势。当墩顶截面底板厚度为70 cm(约为跨径的1/220)、跨中截面底板厚度为20 cm时,墩顶区域底板最大压应力为17.4 MPa,小于混凝土抗压设计强度。当墩顶截面底板厚度由70 cm递增至110 cm时,随底板厚度每增加10 cm,墩顶区域压应力平均减小幅度为3.1%;当墩顶截面底板厚度由110 cm递增至130 cm时,随底板厚度每增加10 cm,墩顶区域压应力平均减小幅度为1.9%,说明底板厚度的变

化引起的应力变化逐渐减小,敏感性减弱。

由上述分析可知,箱梁墩顶底板的适宜厚度范围约为跨径  $1/220 \sim 1/140$ ,跨中截面底板的适宜厚度范围为  $20 \sim 31$  cm。

### 3 结论

(1)箱梁顶板厚度的变化对横向拉应力的影响较大,当顶板厚度小于 24 cm 时,顶板混凝土拉应力将超过混凝土抗拉强度设计值,在一些特殊条件下,就有可能导致裂缝的出现;当顶板厚度大于 36 cm 时,其厚度的增长对顶板横向拉应力的贡献较小。因此,综合考虑箱梁构造要求及受力性能,箱梁顶板适宜厚度为  $24 \sim 36$  cm。

(2)箱梁腹板厚度的合理选取关系到梁的抗弯、抗剪、抗扭能力,对斜截面斜裂缝的产生及宽度扩展影响较大。当腹板内有预应力钢束管道布置时,综合考虑构造及受力要求因素,腹板的最小厚度为不宜小于 30 cm。从控制梁体主拉应力角度出发,箱梁桥墩截面处腹板的适宜厚度约为跨径的  $1/260 \sim 1/170$ ,支座截面处腹板的适宜厚度为墩顶截面腹板厚度的  $1/2.0 \sim 1/1.6$ 。

(3)箱梁底板厚度不但要考虑构造要求、墩顶底板受压要求,还要考虑跨中合拢段底板可能产生的纵向裂缝的影响。通过分析可知,箱梁墩顶底板的适宜厚度范围约为跨径  $1/220 \sim 1/140$ ,跨中截面底板的适宜厚度范围为  $20 \sim 31$  cm。

(4)综合以上分析,在箱梁设计过程中,必须重视箱梁截面尺寸对结构受力的影响,建议通过整体分析、局部分析以及综合考虑各因素来确定其最优设计参数。

### 参考文献:

- [1] 邵旭东,胡建华. 桥梁设计问答[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 任重. ANSYS 实用分析教程[M]. 北京:北京大学出版社,2003.
- [3] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
- [5] 宋随弟,祝兵. 预应力混凝土连续刚构桥腹板斜裂缝发生机理研究[J]. 桥梁建设,2008,3:71-74.
- [6] 楼庄鸿. 大跨径梁式桥的主要病害[J]. 公路交通科技,2006,23(4):84-87.
- [7] 包立新,杨广来,杨文军. 对连续刚构桥底板开裂问题的探讨[J]. 公路,2004(8):43-45.
- [8] 李俊,李小珍,卫星,等. 连续刚构桥底板纵向裂纹原因分析[J]. 公路,2005(9):1-5.
- [9] 陈宇峰,徐君兰,余武军. 大跨 PC 连续刚构桥跨中持续下挠原因及预防措施[J]. 重庆交通大学学报,2007,26(4):6-8.
- [10] 刘山洪. 克服大跨 PC 连续刚构桥后期下挠设计措施[J]. 重庆交通学院学报,2006,25(6):5-7.

## Numerical Analysis of the Box Girder Sectional Design Based on Stress Control

ZHANG Zhao - ning<sup>1,2</sup>, HE Shuan - hai<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical behavior of the beam caused by different box girder section size, this paper establishes the finite element model and analyzes the sensitivity of stress condition under different parameters, such as height of beam, top deck, bottom slab and web. The analysis result shows that the transverse tensile stress, the oblique section principal tensile stress and the compressive stress of bottom slab decrease with the increase of thickness of the top deck, web and bottom slab. The result also indicates that the reasonable thickness of the top deck is within 28 cm ~ 32 cm and the reasonable thickness of the web and bottom slab situated at pier section is respectively  $1/260 \sim 1/170$  and  $1/220 \sim 1/140$  times as the main span. The reasonable thickness of the web and bottom slab situated at middle span section is respectively  $1/2.0 \sim 1/1.6$  times as pier section's and within 20 cm ~ 31 cm. Suggestion is given that the integral and partial analysis should be adopted in the design of the section size, so as to improve the bearing capacity and crack resistance.

**Key words:** box girder; numerical simulation; sectional design; principal tensile stress; bearing capacity