

# 鱼腹式箱梁横向受力的数值分析

张慧<sup>1</sup>, 贡力<sup>1</sup>, 刘泾堂<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 甘肃兰州 730030)

**摘要:**介绍了箱梁横向受力的解析法与有限元分析法的特点。结合工程实例, 对预应力混凝土鱼腹式连续箱梁的横向受力进行数值模拟, 通过多工况计算分析, 找出了最不利荷载分布模式, 得到了各工况应力、内力以及裂缝开展的规律。计算表明, 若桥面板横向不配置预应力钢束, 则可能导致箱梁横向开裂, 且裂缝超过规范容许值, 从而影响整体结构的耐久性, 该文计算方法是桥梁纵向设计计算的必要补充, 所提出的合理化建议已被采纳, 经试验及工程实践验证取得了良好的效果。

**关键词:**鱼腹式箱梁; 横向二次内力; 数值模拟; 预应力

**中图分类号:** U441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2007)01-0026-05

## 0 前言

鱼腹式箱梁, 又称为流线型箱梁。在国外, 早在 1966 年, 英国一座跨度为 988 m 的 Serven 桥上就首次采用了这种流线型扁平钢箱梁技术<sup>[1]</sup>。作为一种新型的结构形式, 鱼腹式箱梁除了具有普通箱梁在抗扭、抗弯上的优势以外, 其边腹板的流线型设计使得它较之普通箱梁, 风载体型系数更低, 特别是满足了大跨度桥梁对于抗风性能的要求<sup>[2]</sup>。

国内对鱼腹式箱梁的认识, 始于 90 年代初, 但发展迅速。目前我国已经在十余座大跨度桥梁的设计中采用了该项技术, 一些跨径不大的城市高架道路桥中也相继开始引入。但有关鱼腹式箱梁的结构分析却鲜有报道。

对于箱梁结构, 设计中通常的做法是在计算时使用横向分布系数分析结构的横向效应<sup>[3]</sup>, 再按最不利荷载对梁体进行设计计算和配筋, 对横向应力则往往是根据工程经验估计配筋或进行简化

的闭合框架分析<sup>[2]</sup>。对于鱼腹式箱梁结构而言, 其边腹板为曲面, 结构的受力相当复杂。特别是当箱梁宽度接近其跨径时, 各箱各室和桥面板将共同参与工作。在自重以及车轮荷载作用之下, 结构表现出了明显的空间变形和受力特性。此外钢筋混凝土梁在外荷载作用下的横向受力性能将直接影响到箱梁顶板、腹板的配筋计算与结构尺寸的确定, 只考虑纵向而粗略或简化进行横向影响分析的做法显然已经不能满足设计要求, 特别是对于多车道的城市桥梁。因此必须利用不同的计算模型和计算软件对其进行全面的力学分析, 掌握其横向受力特点, 确保工程建设的可靠性。

本文针对鱼腹式箱梁的特点, 建立了横向受力分析的全三维有限元模型, 进行了箱梁横向内力的多工况分析, 获得了各工况内力和应力分布规律, 找出了最不利荷载工况及对应的应力分布, 发现了原设计可能产生横向裂缝的现象, 并提出了增加横向预应力的建议, 提高了工程建设的质量, 本文计算方法是对桥梁杆系结构纵向分析设计计算的重要补充, 对同类桥梁的建设具有参考价值。

## 1 基本分析理论

收稿日期: 2006-08-30

作者简介: 张慧(1979-), 女, 甘肃兰州人, 助教, 从事桥梁结构教学研究工作。

不规则裂缝作为水泥混凝土路面的一种病害, 只要采取相应的预防措施, 是可以达到减少甚至不产生的目的。一旦出现, 就应及时对其进行处理。一般来讲, 对于 5 mm 以下的非扩展性裂缝可以用低粘性沥青(渣油、胶乳)、或环氧树脂等材料灌注。对于中度及重度断裂, 一般采取切缝后拆除补新(一般为矩形), 至于基层或路基是否需要补强或处理, 就要根据现场情况而定了。

## 4 结语

一条城市道路从建成到通车, 裂缝及断板形成的原因多种多样, 牵涉到各个部门, 如设计单位、施

工单位、监理单位、城市道路管养单位、交警部门等。城市道路是露天结构物, 气候条件是城市道路病害产生的客观重要因素, 科学合理的设计、施工工艺和日常的养护管理也是防治城市道路病害的必要条件。因此, 严格按照国家有关规范、技术标准进行设计、施工、监理, 是保证水泥混凝土路面质量的关键。在运营的过程中, 管养部门的日常管养也相当重要。城市道路管理要加强超载的整治力度, 避免路面负荷超设计使用, 也是至关重要的。我们只有在生产实践中多观察、多比较, 出现问题后要多分析、多总结, 结合多种预防处理措施, 才能行之有效地防治水泥混凝土路面的主要病害, 更好地为经济建设服务。

## 1.1 框架分析法

目前国内箱梁横向受力分析还没有统一的方法,公路《规范》也没有做出明确而具体的规定。文献[5]中提及的由美国《预制节段箱形梁桥手册》推荐的横向内力分析方法——“TYL”法,也称为框架分析法,它是将箱梁空间三维问题转化为平面框架问题求解的一种方法。其原理是将箱梁的长度方向上截取单位长度薄片框架,再按结构力学的方法进行分析。具体做法是先加刚性支承进行框架分析,再释放支承,将支反力以大小相等方向相反的力加到框架上,并将释放的荷载分解为对称荷载与反对称荷载分别进行计算,然后将三部分计算结果叠加而成。此种方法有较严格的理论推导,但计算过程复杂,实际设计中应用困难,而且只限于无伸臂双对称的单箱单室箱梁。

## 1.2 修正的框架分析法

文献[6]由框架分析法的基本原理,提出了适合于一般带伸臂的单对称矩形或梯形截面箱形梁的横向内力分析方法。该法既能反映横向挠曲影响,又能反映纵向挠曲影响,且考虑到了带伸臂的梯形箱梁及变截面箱型梁横向内力分析方法的适用性。但目前的分析研究仅限于单箱单室。

此外还有人提出用板的影响面或有效宽度法,但是此法又忽略了腹板、翼缘板扭曲变形对彼此的影响。事实上,箱梁各部分板件是多个方向受力的复杂应力体系,无论解析法中将各种体系如何组合,都无法准确地反映真实的情况。因而,在实际工程中,为了得到箱梁的真实应力,采用有限元全三维数值模拟的计算方法是最佳的分析方法。虽然目前闭合框架法的理论无法解决鱼腹式箱梁的横向受力问题,但它的建模思路对于有限元计算,仍具有指导意义。

## 2 数值计算

本文以一预应力混凝土鱼腹式连续梁为例,利用 ANSYS 软件建立了横向内力分析的全三维数值仿真分析模型,进行了多工况加载分析计算,作为验证,利用 SAP2000 通用有限元分析软件,建立了能够真实反映鱼腹式箱梁横向受力特性的变截面闭合框架分析模型,在进行数值模拟分析的基础上,按照《桥规》规定进行了横向抗裂性分析,获得了具有工程实用价值的结论。

### 2.1 工程概况

桥梁位于厦门岛中部,仙岳路与金尚路交叉口,为仙岳路上跨金尚路的立交桥。主桥长 430 m,双侧引道各约 15 m,桥梁全长 460 m,桥梁分南北两幅,

桥跨布置为  $5 \times 30 \text{ m} + (2 \times 30 + 40 + 2 \times 30) \text{ m} + 4 \times 30 \text{ m}$ ,每幅桥面静宽 12.25 m,全宽 13.5 m。

厦门市为全岛型城市,每年平均 6 级大风天数为 30.2 d,最多时可达 53 d,热带风暴多集中在 7~9 月,台风过境最大风力大 12 级,平均风速  $38 \text{ m/s}$ ,瞬间可达  $60 \text{ m/s}$ 。因而选用具有流线型的鱼腹式箱梁具有特别重要的意义。

### 2.2 箱梁横向应力分析

#### 2.2.1 有限元模型的建立

采用 ANSYS 通用有限元分析软件,利用 SOLID 单元建立全三维横向分析模型,沿桥纵向取 1 m 长的标准梁段(见图 1),进行鱼腹梁横向应力分析,找出最不利荷载工况及其应力分布情况。考虑荷载为:自重、二期恒载、人行道栏杆与汽车活载。

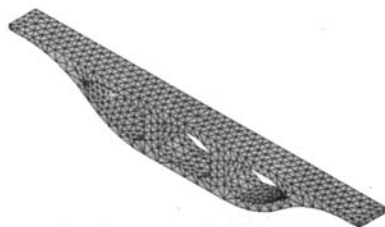


图 1 横向分析有限元模型

边界条件的处理是在杆系结构纵向分析成果的基础上,将所截取的实体段两侧轴力和弯矩换算成压力荷载施加在实体段两侧的顶板和底板上,以模拟本段结构在纵向的受力行为。

单位长梁段横向按三种汽车活载加载方式进行布载:

(1) 非对称加载:3 列汽超 -20 活载作用在鱼腹梁一侧(见图 2),获得最不利偏载效果。

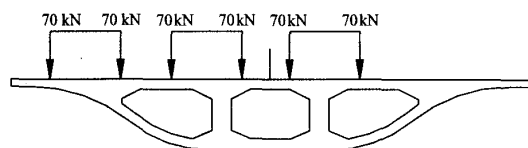


图 2 加载模式 a

(2) 对称加载:2 列汽超 -20 分别加在鱼腹梁两侧对称位置(见图 3)。

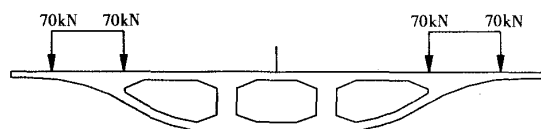


图 3 加载模式 b

(3) 双列偏载:以 2 列汽超 -20 加于一侧(见图 4)。

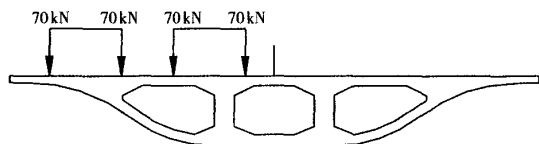


图4 加载模式c

### 2.2.2 横向计算结果及分析

按图2~图4所示3种加载模式情况下梁段横向应力分布,如图5~图7所示,限于篇幅仅给出了横向应力分布图。

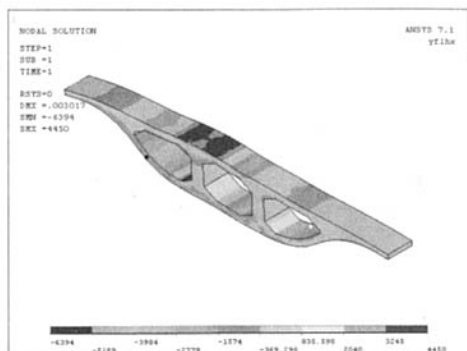


图5 加载模式a横向应力分布图

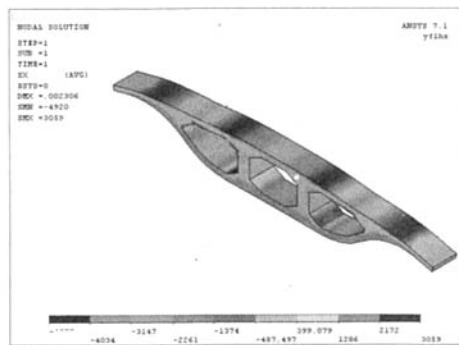


图6 加载模式b横向应力分布图

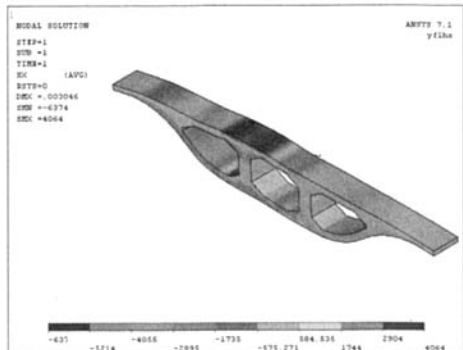


图7 加载模式c横向应力分布图

以上3图显示了3种加载模式下模型的应力分布,可以看出鱼腹梁在横向荷载作用下表现出以下特点:

(1)3列汽车活载偏载(即加载模式a)为横向分析的最不利工况。在此荷载作用下引起的结构变形最大,横向应力亦最大。

(2)中腹板在偏载作用下的应力变化较复杂,主应力较大,这说明原设计在此处考虑不足,建议加强中腹板的箍筋配置,防止中腹板主拉应力超限。

(3)在3列汽超-20荷载偏载作用下,鱼腹梁横向最大拉应力达4.45 MPa,超过了混凝土的容许拉应力值,显然混凝土已经开裂。说明箱梁在横向必须采取抗裂措施,为了消除箱梁横向拉应力,提高横向抗裂性,增加结构的耐久性,建议配置横向的预应力束。

### 2.3 箱梁结构横向闭合框架分析

#### 2.3.1 计算模型

建立实体三维模型可以考察结构应力的分布情况,但是无法确定荷载作用下裂缝的分布情况,鉴于此,在前述ANSYS三维实体分析的基础上利用SAP2000建立能够真实反映鱼腹式箱梁特点的横向框架分析模型并进行数值分析,并按规范进行横向抗裂性分析,以作为前述有限元分析的补充和校验。

按照前述闭合框架理论的思想,建模时沿桥纵向取单位长度(1m)宽的箱梁,将箱梁空间三维问题转化为平面框架问题进行结构分析。沿横桥向将模型划分成46个变截面单元(见图8)。考虑荷载为:自重、二期恒载、人行道栏杆与汽车活载。

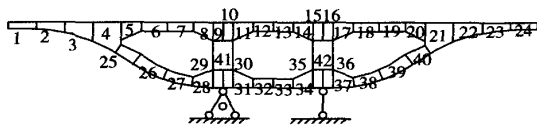


图8 横向闭合框架计算模型

荷载作用模式:

(1)恒载(包括自重、二期恒载以及人行道荷载)

C50混凝土容重:26.0 kN/m<sup>3</sup>。桥面铺装层厚度取11 cm,容重 $\gamma=21$  kN/m<sup>3</sup>。栏杆及底座按6.1 kN/m施加在两侧人行道中心位置。

(2)活载(汽车活载的3种加载模式)

为充分考虑各种可能的加载模式,寻找最不利荷载工况,除人群荷载外(人群荷载一侧人行道取 $3.5 \times 0.5 \times 1=1.75$  kN/m),汽车活载采用3种

加载模式。

- a. 3 辆汽超 -20 重车偏载(见图 9)。
- b. 2 辆汽超 -20 重车横向对称布置(见图 10)。
- c. 2 辆汽超 -20 重车偏载布置(见图 11)。

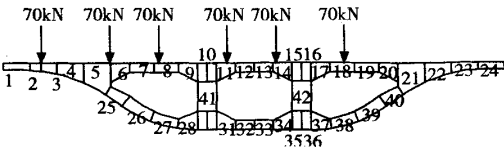


图 9 3 辆汽车布置示意图

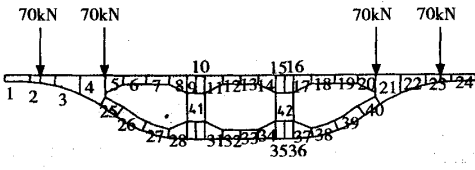


图 10 2 辆汽车对称布置示意图 □

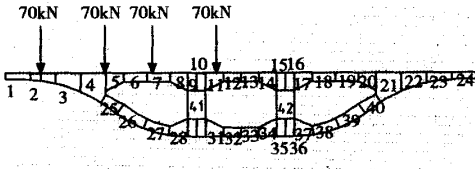


图 11 2 辆汽车偏载布置示意图

(3) 荷载组合

荷载组合:  $S_1 = 1.2 \times S_k + 1.4 \times S_q$

其中,  $S_k$  表示恒载, 主要是箱梁自重及二期恒载等,  $S_q$  表示汽车荷载。

(4) 计算结果

闭口的鱼腹式箱梁属于超静定结构, 因桥面相对较宽, 其结构行为接近于板的结构行为。为节约篇幅, 以下仅给出 3 种荷载组合按桥规规定所计算的顶板最大裂缝宽度示意图。

- a. 三辆重车偏载顶板裂缝宽度分布(见图 12)
- b. 两辆重车对称布置顶板裂缝宽度分布(见图 13)
- c. 两辆重车偏载顶板裂缝宽度分布(见图 14)

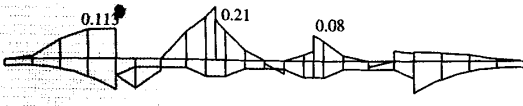


图 12 三辆重车偏载布置顶板裂缝宽度图(单位:mm)

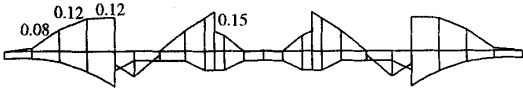


图 13 两辆重车对称布置顶板裂缝宽度图(单位:mm)

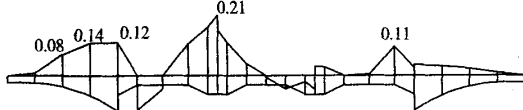


图 14 两辆重车偏载顶板裂缝宽度图(单位:mm)

图 12 ~ 图 14 表示按汽车活载最不利位置加载后, 桥面顶板裂缝的开展程度, 数字表示裂缝宽度的数值大小。从左向右看, 由 0 开始增加, 到左边腹板位置达到第一个峰值点, 此时三种活载作用下的裂缝宽度分别为 0.113、0.12、0.12 (mm); 之后裂缝宽度值开始下降, 直到第一个直边腹板位置时, 达到了横向最大的峰值点, 分别为 0.213、0.15、0.211 (mm); 在第二个直腹板以及右边腹板位置处又各出现一次峰值点; 最后到顶板最右端时裂缝为 0。显然, 按当地海洋性气候条件的特点, 最大裂缝宽度值超过了规范所规定的 0.1 mm 的限值, 因此桥面板横向不满足抗裂性要求, 结构存在安全隐患, 这与前述三维实体分析结果相吻合, 两种计算方法均显示了提高箱梁横向抗裂性的必要性。

2.3.2 数值计算结果分析

在建立箱梁闭合框架的基础上, 考察 3 种布载方式作用下的内力结果及由此产生的裂缝, 由图 12 ~ 图 14 可以看出:

(1) 在 3 种加载模式下, 最大裂缝宽度均大于 0.1 mm, 悬臂部分受力基本相同(指最不利一侧), 其裂缝宽度相差不大。

(2) 比较 3 种情况下的裂缝宽度可以发现: 三车偏载时, 危险裂缝出现在直边腹板顶, 为 0.213 mm; 两车偏载行驶时, 直边腹板顶裂缝宽度为 0.211 mm; 与三车作用时非常接近。两车对称行驶时最大裂缝宽度为 0.15 mm, 也发生在直边腹板上。

(3) 按《公桥规》规定: 在一般正常大气(不带高浓度侵蚀性气体)条件下, 钢筋混凝土受弯构件在荷载组合 I 作用下算得的最大裂缝宽度不应超过 0.2 mm; 在荷载组合 II 或 III 作用下不应超过 0.25 mm。处于严重暴露情况(有侵蚀性气体或海洋大气)下的混凝土构件, 容许裂缝宽度不应超过 0.1 mm。结合本桥的实际情况(地处沿海城市), 3 种加载方式下横向裂缝的宽度均大于 0.1 mm, 说明横向配筋设计所得到的裂缝宽度无法满足规范要求。

从原设计的资料来看,横桥向并无配置预应力钢筋,建议在箱梁桥面设置横向预应力筋,不仅可以防止横向裂缝的产生,而且可以增加其横向刚度。所建议的横向预应力布置为每 m 4~7 $\phi$ 5 预应力钢绞线一束,扁锚锚固。

### 3 结语

箱梁横向应力的研究对于掌握箱梁横向的受力,考察箱梁的横向刚度,了解桥面板横向裂缝抗裂性,从而保证桥梁的耐久性都具有十分重要的意义。利用有限单元法可以很好地考虑箱梁结构板件的整体受力性能,比较准确地计算出鱼腹式箱梁的应力分布情况。同时通过数值模拟,对于鱼腹式箱梁的横向内力分布,特别是顶板内力的分布以及由此引起的裂缝的开展情况有了更直观地认识和更精确的分析数据,为设计提供了科学的依据。

本文为该预应力混凝土鱼腹式连续梁桥的建造提出了设计修改意见,并且已经被设计方采纳。施加预应力后的闭合框架全三维分析结果显示:桥面板在各种荷载作用工况下,纵横双向均处于

受压状态,达到了全预应力混凝土桥梁在各种荷载工况下均不应出现拉应力的要求。成桥后,通过对静动载试验前后箱梁内外的全面检测发现,桥面板混凝土光滑性良好,从而映证了桥面板在各种荷载工况下均不出现拉应力的理论分析结论。显然本文方法是对桥梁纵向设计的必不可少的补充,横向预应力的设置不仅提高了桥面板的抗裂性、增大了桥面板的横向刚度,而且大大提高了整体结构的耐久性,保证了桥梁结构质量。目前全桥运营状况良好。

#### 参考文献

- [1] 刘丽萍.南京长江第二大桥南汊主桥流线形薄壁扁平钢箱梁分析的新方法[J].公路交通科技,2004.21(7).
- [2] 苏庆田,吴冲,董冰.斜拉桥扁平钢箱梁的有限混合单元法分析[J].同济大学学报,2005.33(6).
- [3] 方志,张志田.钢筋混凝土箱梁横向受力有效分布宽度的实验研究[J].中国公路学报,2001.14(1).
- [4] 郑振.连续刚构弯梁桥横向内力计算方法[J].中国公路学报,2000.13(4).
- [5] 陶舍辉.预应力混凝土箱梁横向受力分析方法的研究比较[J].公路交通科技,2005.22(7).
- [6] 郭金琼.箱型梁设计理论[M].北京:人民交通出版社,1991.

## 热烈祝贺

上海市政工程设计研究总院荣获

上海市总工会颁发的

“2004~2005 年度职工最满意企业”称号