

大跨度预应力混凝土箱梁桥开裂病害

俞先林, 叶见曙, 吴文清

(东南大学 交通学院, 210096 南京, yuxianlin7@163.com)

摘 要: 为了研究大跨度预应力混凝土箱梁桥的开裂病害与其空间应力状态的关系, 采用 8 节点实体退化板壳单元编制有限元软件对大跨度预应力混凝土连续箱梁桥进行空间应力分析, 研究恒载、箱梁刚度、有效预应力和温度等因素对箱梁截面最大主拉应力的影响程度和影响规律; 探讨设计中采用的活载应力放大系数的取值合理性; 提出了控制箱梁混凝土开裂的二轴强度准则. 实桥分析表明: 采用板壳单元分析箱梁截面空间应力, 并采用混凝土二轴强度准则进行截面主拉应力验算有利于控制大跨度预应力混凝土箱梁桥的开裂病害.

关键词: 预应力混凝土; 箱梁桥; 开裂; 病害

中图分类号: U441; TU311

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)06-0101-04

Cracking damage of long span prestressed concrete box girder bridges

YU Xian-lin, YE Jian-shu, WU Wen-qing

(College of Transportation, Southeast University, 210096 Nanjing, China, yuxianlin7@163.com)

Abstract: A FEA program using 8-node degenerated solid shell element was developed to analyze the spatial stress of long span prestressed concrete box girder bridges for the purpose of researching the relationship between cracking damage and the spatial stress state. The influences of dead load, box girder stiffness, effective prestress and temperature on the principal stress were researched, the reasonable magnification factors of live load stress were discussed and a two-axis strength criterion was proposed to control the concrete cracking of box girder. An analysis of real bridge shows that the FEA program is helpful to control the cracking damage of long span prestressed concrete box girder bridges.

Key words: prestressed concrete; box girder bridges; cracking; damage

预应力混凝土连续箱梁桥一直是中、大跨度桥梁最常采用的桥型. 近年来, 发现国内大跨度预应力混凝土连续箱梁桥在运营过程中普遍出现箱梁开裂现象^[1-2], 在桥梁工程界影响较大的如主跨 270 m 的虎门大桥辅航道桥和主跨 245 m 的黄石大桥. 文献[3-5]针对大跨度预应力混凝土箱梁桥的开裂病害开展了研究, 但是问题一直未能得到很好的解决.

目前大跨度预应力混凝土箱梁桥的设计大都采用平面杆系程序进行分析, 因而不能很好把握其空间受力特性从而不能准确计算截面主应力. 另外对

于截面主应力, 以往及现行的桥梁设计规范均采用混凝土单轴抗拉强度进行控制, 与箱梁实际的受力状态不符, 这些因素也被认为是抗裂设计满足规范要求的大跨度预应力混凝土箱梁桥在施工及运营阶段的各种作用效应下出现开裂的可能原因.

本文采用基于实体退化板壳单元开发的箱梁桥可视化空间应力分析软件, 对某大跨度预应力混凝土连续箱梁桥进行空间应力状态的精细化分析. 以截面最大主拉应力为对象, 定量、定性分析影响大跨度预应力混凝土箱梁桥开裂的主要因素, 并提出基于混凝土两轴强度准则的箱梁主拉应力控制限值.

1 预应力混凝土箱梁桥空间应力

1.1 计算方法

采用由实体单元退化而来的 8 节点 40 自由

收稿日期: 2010-07-15.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z106).

作者简介: 俞先林(1973—), 男, 高级工程师, 博士研究生;

叶见曙(1948—), 男, 教授, 博士生导师.

度的曲面壳体单元^[6-7],该单元考虑了横向剪切变形影响.单元节点编号及坐标系见图 1.

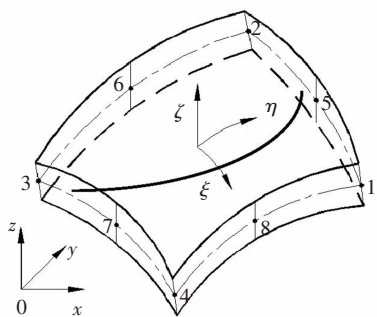


图 1 8 节点板壳单元示意图

节点位移 $\{\delta_i\} = [u_i \ v_i \ w_i \ \alpha_i \ \beta_i]^T$,其中 u_i 、 v_i 、 w_i 分别为节点 i 沿坐标轴方向的平动位移, α_i 、 β_i 分别为节点 i 处法线绕与其垂直的 2 个轴的转角.单元内任一点位移用节点位移表示为

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 \bar{N}_i(\xi, \eta) \{\delta_i\}. \quad (1)$$

形函数矩阵 $\bar{N}_i$ 的形式参见文献[6].有限元求解的基本方程为

$$[K]\{\delta\} = \{F\}. \quad (2)$$

上式中 $[K]$ 为结构刚度矩阵,包括混凝土和预应力钢束对结构的刚度贡献. $\{\delta\}$ 为节点位移. $\{F\}$ 为荷载列阵,由恒载、预应力、收缩徐变、温度、支座位移和活载等引起. $[K]$ 和 $\{F\}$ 均采用高斯积分得到.基于上述实体退化板壳单元,采用面向对象编程技术,在 VC++ .NET 平台下开发了箱型梁桥三维可视化分析软件 BGBVA,可进行大跨度预应力混凝土连续箱梁桥悬臂施工阶段和成桥阶段空间应力分析.

1.2 实桥空间应力分析

选取某 5 跨变截面连续箱梁桥进行空间应力分析,跨径布置为 90 m + 3 × 165 m + 90 m,箱梁按 3 向预应力设计,采用挂篮悬臂浇筑施工.图 2 为结构的空壳模型,共有 6 368 个单元、19 136 个节点,共划分 35 个施工阶段进行计算.

分析表明,按板壳单元程序进行计算,箱梁顶底板呈现明显的正、负剪力滞效应,计算出的腹板最大剪应力位置大多出现在腹板与顶板的交界处.计算的截面最大主拉应力主要发生在顶、底板与腹板交界处的位置,以及底板横向跨中附近.采用 Midas 建立了杆系程序进行对比分析.杆系程序的计算结果中,除边跨跨中截面出现了很小的主拉应力外,其余截面均未出现主拉应力.而板壳

单元程序计算结果各截面均出现了主拉应力,其中中跨墩顶截面最大主拉应力 3.006 MPa,已超过了 50 号混凝土的抗拉强度 2.65 MPa.对比分析表明杆系程序计算的主拉应力偏于不安全.

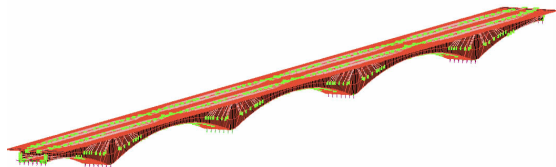


图 2 空间板壳单元计算模型

2 箱梁作用效应

2.1 恒载

图 3 为截面最大主拉应力增幅随恒载变化的关系(增幅均以二期恒载施工完毕阶段设计恒载及预应力作用下的截面最大主拉应力为基准).除边跨跨中截面在混凝土超方 5% 的情况下截面最大主拉应力是减小的情况外,随箱梁混凝土超方,各截面的最大主拉应力均呈增大的趋势,但超方对不同截面的影响程度不一.对墩顶截面及跨中截面影响不大,对边跨靠过渡墩侧的 $L/4$ 截面及次中跨 $L/4$ 截面影响较大,达混凝土超方程度的 2.3 倍.桥面铺装超方情况下,不同截面的最大主拉应力或增大或减小,影响较大的主要有次中跨跨中及顶底板束搭接区截面、中跨跨中截面,影响程度基本与桥面铺装超方程度相当.

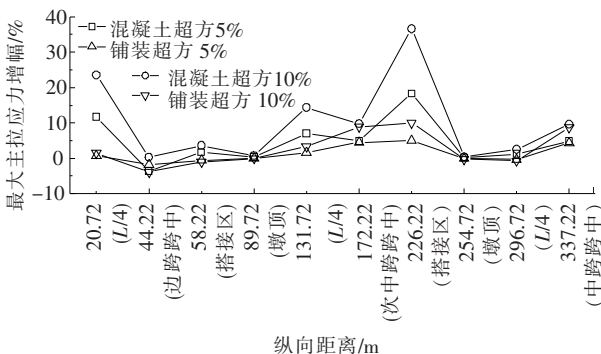


图 3 截面最大主拉应力增幅随恒载变化关系

2.2 箱梁刚度

图 4 为截面最大主拉应力增幅随箱梁刚度变化的关系,以刚度折减近似模拟箱梁板件开裂.腹板刚度折减的情况下,各截面最大主拉应力均呈减小趋势,而底板刚度折减的情况下,各截面最大主拉应力均呈增大趋势.因而,提高箱梁底板相对于腹板的刚度,控制底板不出现开裂将会限制截面最大主拉应力的进一步增长.

2.3 有效预应力

图 5、6 分别为截面最大主拉应力增幅随有效

的情况,我国现行的 2004 版桥梁设计规范对原 85 版桥梁设计规范的斜截面强度验算中的主拉应力限值做了大幅度减小,但仍然采用混凝土单轴抗拉强度作为控制指标,没有考虑其他方向主应力对混凝土开裂的影响.在正常运营情况下,箱梁板件通常可视为处于二向应力状态.从混凝土二轴强度包络线可以看出,在拉压状态下,混凝土主压应力较大时,即使主拉应力小于文献[8]规定的限值时,也可能发生开裂.因而决定箱梁是否会开裂的混凝土应力限值应在二向应力状态下制定,这样才符合箱梁实际的受力情况.结合文献[8-9]中对混凝土强度验算的规定,建议控制箱梁开裂的应力限值 $[f]$ 按图 10 进行取值.

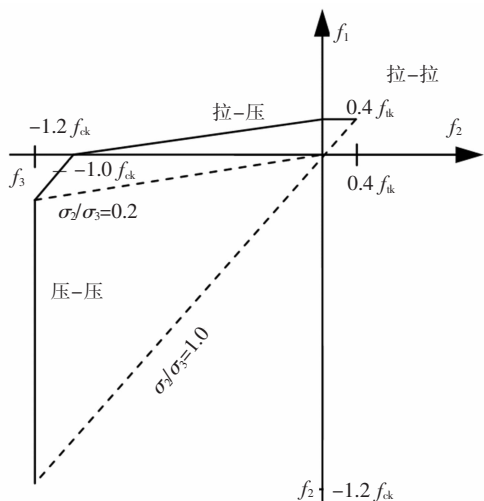


图 10 箱梁开裂混凝土二轴强度

图 10 中 $f_i (i = 1, 2, 3)$ 为混凝土多轴强度. $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 为验算点从大到小排列的 3 个主应力,受拉为正,受压为负.由于验算点 6 个应力分量已知,3 个主应力可由应力张量的特征方程求出.求出主应力后,主拉应力按下式进行验算.

拉-拉区: $\sigma_1 \leq [f] = 0.4f_{tk}$;

拉-压区: $\sigma_1 \leq [f] = \frac{0.4sf_{ck}f_{tk}}{sf_{ck} - 0.4f_{tk}}$. (4)

式中 $s = \sigma_1/\sigma_3, f_{ck}, f_{tk}$ 分别为混凝土轴心抗压强度和轴心抗拉强度.按以上二轴强度准则,对所选实桥成桥阶段恒载和预应力作用下的腹板应力进行验算,结果表明多个截面主拉应力超限.超限点位均位于箱梁腹板与顶、底板交界处的内侧.实桥检测出多个截面在靠近箱梁腹板与顶、底板交界位置出现了腹板斜裂缝,与本文计算结果较为吻合.超限截面在纵向除边跨位于靠过渡墩一侧的半跨外,次边跨和中跨都位于跨中附近.

5 结 论

1)采用 8 节点实体退化板壳单元编制了箱

型梁桥三维可视化分析软件 BGBVA,并对大跨度预应力混凝土连续箱梁桥施工和运营阶段的箱梁空间应力进行了分析.计算的截面最大主拉应力主要发生在顶、底板与腹板交界处的位置,以及底板横向跨中附近.这些位置是控制箱梁截面开裂的关键位置,应适当加强普通钢筋的配置.

2)恒载是大跨度预应力混凝土箱梁桥所受的主要荷载,施工中应严格控制混凝土超方.底板开裂比腹板开裂更易造成截面最大主拉应力增长.底板预应力束损失对截面主拉应力影响相对较大.箱梁内外表面温差对截面最大主拉应力影响显著.

3)设计中采用的 1.2 倍的活载正应力放大系数对于底板较为合适,而用该系数控制顶板活载应力则偏小.活载偏心导致的剪应力增大在墩顶位置截面较为显著,放大系数一般都在 1.1 以上,设计中常用的 1.05 放大系数偏小.

4)提出了箱梁主应力验算的二轴强度准则.采用板壳单元分析箱梁截面空间应力,并采用混凝土二轴强度准则进行截面主拉应力验算比按公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范方法验算偏于安全,有利于控制大跨度预应力混凝土箱梁桥的开裂病害.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王国亮,谢峻,傅宇方.在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J].公路交通科技,2008,25(8):52-56.
- [3] 刘山洪,钱永久.大跨 PC 箱梁桥腹板裂缝的控制研究[J].重庆交通学院学报,2005,24(4):19-22.
- [4] 钟新谷.预应力混凝土连续箱梁桥裂缝防治与研究[J].铁道科学与工程学报,2006,3(3):7-14.
- [5] 陈宇峰,罗玲,王维红,等.PC 连续刚构桥运营阶段箱梁开裂机理及预防措施[J].重庆交通大学学报,2007,26(6):43-45.
- [6] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [7] HOFSTETTER G, MANG H A. Computational mechanics of reinforced concrete structures[M]. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr Vieweg & Sohn, 1995.
- [8] JTG D62—2004.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [9] GB 50010—2002.混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

(编辑 魏希柱)