

文章编号: 1002-0268 (2008) 01-0064-05

PC 连续箱梁悬臂段空间效应的影响参数研究

江克斌, 郭永涛, 赵启林, 周旺进

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为了分析采用移动模架法进行逐段现浇的 PC (Prestressed Concrete) 连续箱梁悬臂端底板出现纵向裂缝的原因, 结合工程实例, 采用有限元方法建立了 3 种不同计算模型进行比较, 确立了一种高效而又精确的有限元计算模型, 并通过对箱梁悬臂段空间效应及相关影响参数的研究, 分析了底板纵向裂缝的形成原因。研究表明: 端部预应力纵向分量和门形吊架支反力是导致悬臂端底板横向拉应力过大而出现纵向裂缝的主要因素。简单地采用增加底板宽度、厚度等措施并不能有效降低悬臂端底板横向拉应力, 必须从结构、力学及材料 3 个方面采取综合的裂缝防治措施。

关键词: 桥梁工程; PC 连续箱梁; ANSYS; 纵向裂缝; 移动模架法; 空间效应; 影响参数

中图分类号: U448.35

文献标识码: A

Study on Influencing Parameters of Spatial Effect in Cantilever of Prestressed Concrete Continuous Box Girder

JIANG Ke-bin, GUO Yong-tao, ZHAO Qi-lin, ZHOU Wang-jin

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: In order to analyze the cause for longitudinal cracks on the bottom slab of cantilever of PC continuous box girder constructed by sect-by-sect moulding using the MSS (movable scaffold system) method, three different FE models of an actual project were established and compared, and the efficient and exact model was ascertained to study spatial effect and correlative influencing parameters. Further more, the cause for longitudinal cracks was also discussed. It is shows that the main cause for the cracks is the excessive transverse stress of caused by longitudinal part of end prestressing and resistance of door-shape suspensory frame. Simply increasing the width and thickness of bottom slab cannot reduce the bottom slab transverse stress of cantilever efficiently, and integrated measures of structure, mechanics and material must be taken to prevent the cracks.

Key words: bridge engineering; longitudinal cracks; ANSYS; PC continuous box girder; MSS method; spatial effect; influencing parameter

PC 连续箱梁因为其独特的力学特性和构造特点, 具有抗扭刚度大、跨越能力强、外形简洁美观等优点, 在桥梁建设中得到越来越广泛的应用^[1]。在采用先进的桥梁施工方法——移动模架法^[2]进行 PC 连续箱梁逐段现浇施工时, 给移动模架提供后吊点的箱梁悬臂段在多种荷载的共同作用下, 会产生显著的空间效应, 这种空间效应经常会使悬臂端底板的横向拉应力过大而出现纵向裂缝^[3]。本文结合工程实例, 利用有限元软件 ANSYS 对箱梁悬臂段的空间效应进行数

值模拟和相关影响参数的研究, 探讨底板纵向裂缝的形成原因及防治措施。

1 工程概况

某大桥引桥的上部结构主梁为双向预应力单箱单室现浇连续箱梁, 箱顶宽 15.4 m, 底宽 6.2 m, 梁高 2.8 m, 底板厚度为 0.25~0.7 m, 部分现浇施工段采用移动模架法施工。采用移动模架法施工的最大跨径为 58 m, 一次性浇注施工段的最大长度达到 59.8 m,

收稿日期: 2006-08-31

作者简介: 江克斌 (1957-), 男, 湖北天门人, 博士, 博士生导师, 教授, 从事桥梁结构设计理论与方法研究。(kbjiang@sina.com)

混凝土 600 m^3 , 上部结构最大荷载 $1\ 600\text{ t}$ 。

在第一施工段混凝土浇注成型并养生待其强度达到设计强度的 85% 以后, 进行预应力张拉施工。对进行孔道压浆后, 将移动模架纵向移动, 进行下一施工段的施工。施工完毕后, 在第一施工段的悬臂端底板发现了可见的纵向裂缝^[4], 主要分布在底板纵向中轴线及两侧的预应力孔道附近, 裂缝长度为 $2\sim 3\text{ m}$, 宽度为 $0.05\sim 0.7\text{ mm}$, 如图 1 所示。

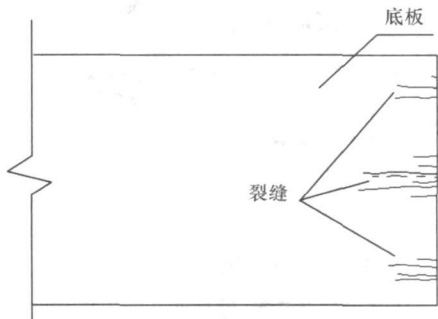


图 1 悬臂端底板裂缝分布示意图

Fig 1 Distribution of cracks in the soleplate of cantilever

经初步分析, 悬臂端底板裂缝的出现是由于底板横向拉应力过大, 超过此时混凝土的抗拉强度所致。

2 悬臂段受力分析

考虑到成桥后桥梁结构的受力要求, 通常将施工接缝(即预应力锚固端面)设置在恒载正负弯矩的交界处, 该处弯矩值接近于零。悬臂段是指从最近的桥梁支座到施工接缝之间的梁段(如图 2)。而文中的“悬臂端”则特指施工接缝附近的局部区域。



图 2 PC 箱梁悬臂段

Fig 2 Cantilever of PC box girder

当 PC 箱梁某一现浇施工段经过钢筋绑扎、混凝土浇注、预应力张拉及孔道压浆等一系列工序后, 需将移动模架沿桥梁纵轴线移动, 进行下一施工段的施工。此时, 已施工完毕的箱梁悬臂段可为移动模架提供后吊点, 如图 3 所示。当下一施工段混凝土浇注完

毕时, 移动模架所承受的荷载最大, 相应地, 箱梁悬臂段所受荷载也最大, 处于最危险工况, 在最危险工况下, 悬臂段受力状态如图 4 所示。

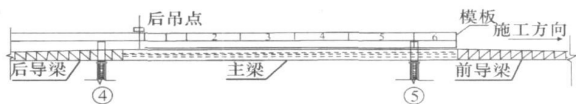


图 3 箱梁悬臂段的最危险工况

Fig 3 Most dangerous working state of cantilever

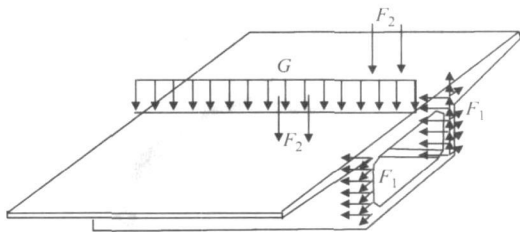


图 4 悬臂段受力图

Fig 4 Loads on the cantilever

悬臂段所受荷载包括:

(1) 端部预应力 F_1

在悬臂段的腹板、底板及腹、顶板交界处, 均布置有纵向预应力束, 施工时, 先张拉腹板、腹和顶板交界处的预应力束, 等到下一施工段混凝土达到一定强度后再张拉底板预应力束。作用在悬臂段端部的预应力可分解为纵向、竖向和横向 3 个分量。

(2) 门形吊架支反力 F_2

移动模架后吊点由门形吊架、油缸及精轧螺纹钢等组成。传力途径为: 下一施工段恒载及移动模架自重 $\rightarrow$ 精轧螺纹钢 $\rightarrow$ 门形吊架 $\rightarrow$ 支撑油缸 $\rightarrow$ 箱梁悬臂段。

(3) 悬臂段自重 G

悬臂段自重作用也会对空间效应产生影响。

3 空间效应影响参数分析

3.1 计算模型的选取

为对最危险工况下箱梁悬臂段的空间效应有直观、定量的认识, 采用大型有限元软件 ANSYS 对悬臂段的受力状态进行三维数值模拟。共有 3 种计算模型可供选用:

模型 1: 对整个施工段建模, 悬臂段附近的支座处采用竖向、横向的铰结约束, 远端支座处为 3 个方向的铰结约束。

模型 2: 对整个施工段建模, 悬臂段附近的支座处采用竖向、横向的铰结约束, 远端支座处的箱梁断面采用固结约束。

模型 3: 只对悬臂段建模, 支座处的箱梁断面采用固结约束。

各模型的构造与实桥情况完全一致, 悬臂段的底板预应力孔道按实际情况抽孔, 并将悬臂端附近底板区域的网格进行细化。根据等效荷载法^[5], 将预应力钢束对混凝土箱梁的作用近似地视为集中荷载施加在箱梁上, 分别对 3 个模型进行计算。图 5 是采用不同模型计算时, 悬臂端底板上缘各点的横向应力情况, 由于悬臂端底板上下缘的应力、变形状态很接近, 仅考察下缘即可反映问题本质。

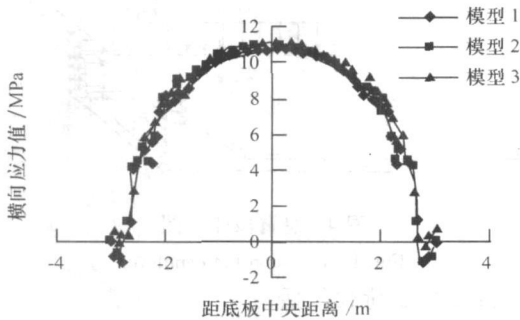


图 5 采用不同模型计算出的悬臂端底板上缘横向应力

Fig 5 Transverse stresses in bottom edge of cantilever calculated by different models

由图 5 可知, 模型 1、模型 2 的计算结果几乎相等, 可解释为: 根据圣维南原理^[6], 远端支座处的约束对悬臂端底板的横向应力影响甚小, 因此不同约束方式对研究内容的影响可忽略。

模型 1、模型 2 与模型 3 的计算结果差别也很小, 可解释为: 在主跨梁体的自重及预应力荷载作用下, 箱梁悬臂段会绕支座发生竖平面内的旋转, 此旋转可近似看成刚性旋转, 对悬臂端底板的横向应力影响比较小。3 种模型之间的相对误差不超过 5%, 处于工程容许误差范围之内。由于模型 3 的单元数目少、计算时间短, 因此后面的计算均在模型 3 的基础上进行。模型 3 如图 6 所示。

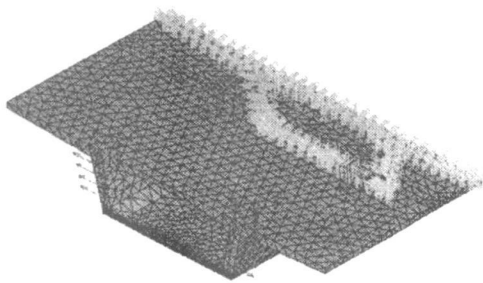


图 6 模型 3

Fig 6 The 3rd model

3.2 荷载效应分析

如前所述, 作用在箱梁悬臂段上的荷载包括端部预应力的 3 个分量、门形吊架支反力及悬臂段自重, 图 7 所示为每种荷载单独作用于箱梁悬臂段时, 悬臂端底板上缘的横向应力分布情况。

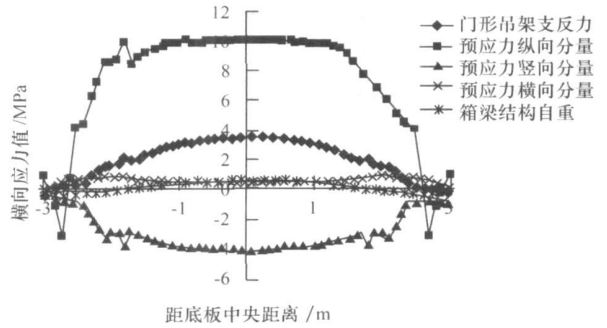


图 7 悬臂端底板上缘横向应力

Fig 7 Transverse stresses in bottom edge of cantilever

从图 7 可知, 各种荷载对底板横向拉应力所做贡献为: 端部预应力纵向分量 > 门形吊架支反力 > 端部预应力横向分量 > 悬臂段自重。端部预应力纵向分量引起的底板横向拉应力占绝大部分, 门形吊架支反力的效应次之, 而端部预应力横向分量、悬臂段自重对底板横向拉应力的贡献很小。

值得注意的是, 端部预应力竖向分量会使底板产生横向压应力, 可部分地抵消其他荷载引起的横向拉应力, 对底板的受力是有利的。

当所有荷载均作用于箱梁悬臂段时, 其横向应力云图如图 8 所示。

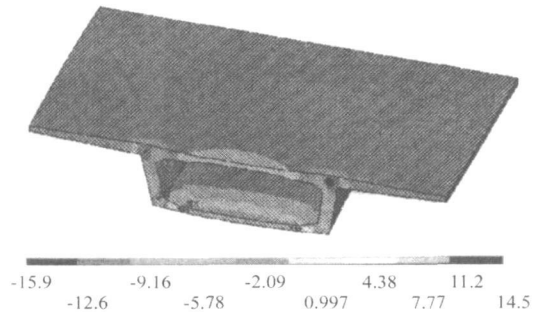


图 8 悬臂段横向应力云图 (单位: MPa)

Fig 8 Nephogram of transverse stress caused by all loads (unit: MPa)

根据图 8 并查询具体的计算结果可知, 悬臂端顶板、底板均出现了横向拉应力。顶板横向拉应力的最大值为 3.58 MPa, 由于顶板内布置有横向预应力钢束, 因此一般不会出现裂缝。底板横向拉应力较大的区域呈扇状分布, 且该区域的纵向分布范围较小, 横

向拉应力大于 2.55 MPa 的区域之纵向长度为 1.3 m。当箱梁悬臂段的最端部出现裂缝后, 由于应力会发生转移, 实际裂缝的纵向长度要比 1.3 m 大些, 这与实际观测到纵向裂缝长度为 2~ 3 m 的情形比较吻合。

所有荷载共同作用下, 底板下缘各点横向应力的具体数值如图 9 所示。

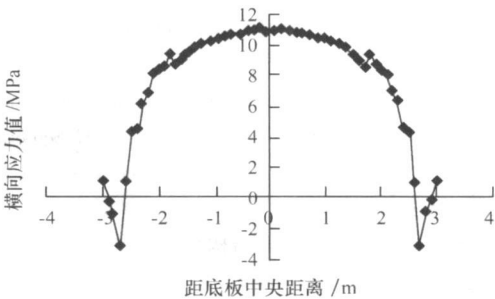


图 9 悬臂端底板下缘横向应力

Fig 9 Transverse stresses in bottom edge of cantilever caused by all loads

由图 9 可知, 底板下缘中间大部分区域的横向应力值均大于 8 MPa。底板下缘中点的横向应力值最大, 达到 10.94 MPa。从中央往两侧, 横向应力值逐渐降低, 预应力孔道附近由于受应力集中的影响, 应力值有所回升, 最大值达 9.43 MPa。由于此时 C50 混凝土的抗拉强度只有设计强度的 85% 即 2.55 MPa, 远远小于上述的计算值, 必然在横向拉应力最大的位置和截面削弱的位置首先出现裂缝, 由于裂缝的出现使应力得到释放, 其他位置并无裂缝出现, 这与实际观测情形完全一致。

3.3 相关参数分析

当悬臂段处于最危险工况时, 变化相关参数, 考察悬臂端底板下缘中点横向应力的变化情况。

3.3.1 泊松比

虽然混凝土材料的泊松比基本上为定值, 但为方便研究问题, 可假设其可以变化。

从图 10 可知, 随着泊松比取值的增加, 悬臂端底板下缘中点的横向应力也随之增加, 但增幅不是很明显。且当泊松比取为 0 时, 底板下缘中点仍然有 10 MPa 以上的横向应力, 由此可说明, 底板横向拉

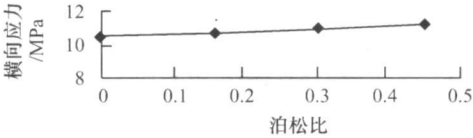


图 10 底板下缘中点横向应力与泊松比

Fig 10 Variation of transverse stress of midpoint in bottom edge of cantilever according to Poisson ratio

应力过大不仅仅是由所谓的泊松效应引起的。事实上, 悬臂段在各种荷载的共同作用下, 会产生复杂的应力状态, 必须参考变形体的弹性力学进行分析。

3.3.2 底板宽度

由图 11 可知, 底板宽度从 5.2 m 变化到 10.2 m 时, 悬臂端底板下缘中点的横向应力有所降低, 但降幅不大, 仍然处于 10 MPa 左右。由此可见, 底板宽度对横向应力的影响并不明显。

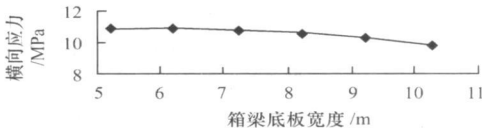


图 11 底板下缘中点横向应力与底板宽度

Fig 11 Variation of transverse stress of midpoint in bottom edge of cantilever according to width of soleplate

3.3.3 底板厚度

从图 12 可知, 当底板厚度从 0.2 m 增加到 0.4 m 时, 底板下缘中点横向应力由 11.72 MPa 下降至 9.26 MPa, 下降趋势基本呈线性。与增加底板宽度相比, 增加底板厚度对于减小底板横向拉应力更为有效。但是, 底板横向拉应力仍然处于较高水平, 况且增加底板厚度会使箱梁自重加大。

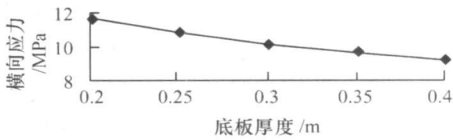


图 12 底板下缘中点横向应力与底板厚度

Fig 12 Variation of transverse stress of midpoint in bottom edge of cantilever according to thickness of soleplate

由上述分析可知, 单纯增加底板宽度、厚度, 对于底板横向受拉状况的改善非常微小。原因在于端部预应力的作用实在太过集中^[7], 简单的措施无法大幅度地降低悬臂端底板的横向拉应力, 裂缝的出现还是难以避免。

4 悬臂端底板裂缝防治措施

底板纵向裂缝对箱梁的外观、耐久性会带来危害, 必须采取一定的防治措施消除空间效应的不利影响, 防止裂缝的出现。悬臂端底板裂缝的防治措施基本可分为 3 类:

第 1 类, 构造措施。从结构角度讲, 底板横向应力值过大的一部分原因在于悬臂端横向抗拉刚度不足, 因此, 可通过增加底板厚度、加密底板钢筋^[1]、

增设端部横隔板^[8]进行改善。

第2类,力学措施。门形吊架支反力是造成悬臂端底板受拉的第二大荷载。从直观上讲,若能使该支反力远离悬臂端,其对悬臂端底板的影响将会减弱。另外,可在悬臂端设置横向预应力钢束^[9],用直接施加横向压应力的方式来抵消横向拉应力。

第3类,材料措施。对悬臂端附近的底板区域采用钢纤维混凝土^[10]或钢纤维高强混凝土^[11]进行浇注,提高该区域底板材料的抗拉强度。

在进行实际施工时,施工单位可结合自身的具体情况和建设、施工以及监理等单位的要求,采取上述3类措施的不同组合,将悬臂端底板横向应力控制在容许范围之内,保证工程质量。

5 结论

(1) 在进行悬臂段空间效应分析时,只对悬臂段建模即可满足计算精度要求,无需对整个施工段建模。

(2) 端部预应力纵向分量是导致悬臂端底板横向拉应力过大而出现纵向裂缝的第一主要因素,门形吊架支反力是第二主要因素。端部预应力横向分量、悬臂段自重所导致的底板横向拉应力较小。

(3) 端部预应力竖向分量会使悬臂端底板产生横向压应力,可部分抵消其他荷载产生的横向拉应力,对于底板的横向受力而言,它为有利因素。

(4) 由于悬臂端底板的横向拉应力太大,增加底板宽度、厚度等简单措施并不能有效降低悬臂端底板横向拉应力,必须从结构、力学及材料的角度采取综合的裂缝防治措施。

(5) 悬臂段空间效应难以用解析理论精确求解,在进行类似桥梁设计时,建议对悬臂段进行数值模拟,以便对悬臂端底板的受力有定量的了解,将裂缝出现的可能性预防在设计阶段。

参考文献:

References:

- [1] 王子健. 薄壁箱梁剪力滞效应研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2004.
WANG Zi-jian. Study of Shear Lag Effect of Thin-walled Box Girder [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2004.
- [2] 徐泽亚, 毛奎. 润扬大桥40米PC连续箱梁移动模架施工技术 [J]. 江苏交通工程, 2002 (6): 24-29.
XU Ze-ya, MAO Kui. Construction Technology of Moving Mould Used in PC Continuous Box Girders of Runyang Bridge [J]. Jiangsu Transportation Engineering, 2002 (6): 24-29.
- [3] 曹三鹏, 刘钊, 岳力强. 移动模架施工PC连续梁桥悬臂段箱梁空间效应不利影响及其防治措施 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (12): 86-90.
CAO San-peng, LIU Zhao, YUE Li-qiang. Impact Analysis and Crack Prevention for PC Continuous Box Girder Arising from Movable Scaffolding System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (12): 86-90.
- [4] 周旺进. 基于FBG传感技术的PC连续箱梁桥施工力学研究 [D]. 南京: 解放军理工大学, 2006.
ZHOU Wang-jin. Research on Construction Mechanics of PC Continuous Box Girder Bridge Based on FBG Sensing Technique [D]. Nanjing: PLA University of Science & Technology, 2006.
- [5] 孙宝俊. 预应力混凝土结构原理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
SUN Bao-jun. Prestressed Concrete Structure Theory [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [6] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
XU Zhi-lun. Elastic Mechanics Concise Tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [7] 区丽端. 预应力混凝土梁桥的裂缝分析 [J]. 公路与汽运, 2005 (3): 105-107.
OU Li-duan. Analyze of Cracks on Prestressed Concrete Girder Bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2005 (3): 105-107.
- [8] 施颖, 郑健群. 从设计层面探讨预应力混凝土连续箱梁桥裂缝控制 [J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24 (4): 13-18.
SHI Ying, ZHENG Jian-qun. Cracking Control of PC Continuous Box Girder Bridges from the Design Point of View [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24 (4): 13-18.
- [9] 李方东. 预应力混凝土连续箱梁桥常见裂缝成因分析 [J]. 公路与汽运, 2004 (3): 81-83.
LI Fang-dong. Causes for Common Cracks of Prestressed Concrete Continuous Box Girders [J]. Highways & Automotive Applications, 2004 (3): 81-83.
- [10] 程庆国, 高路彬, 徐蕴贤, 等. 钢纤维混凝土理论及应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
CHENG Qing-guo, GAO Lu-bin, XU Yun-xian, et al. Steel Fiber Concrete Theory and Application [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997.
- [11] 林小松, 杨果林. 钢纤维高强与超高强混凝土 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LIN Xiao-song, YANG Guo-lin. Steel Fiber High Strength and over High Strength Concrete [M]. Beijing: Science Press, 2002.