

# 某变高度预应力箱梁桥合拢段底板崩裂破坏机制

楼力律

河海大学机电工程学院, 江苏常州 213022

**摘要** 针对某变高度预应力混凝土箱梁桥在施工期间合拢段底板发生崩裂的现象, 通过有限元数值模拟得到了箱梁底板在预应力筋管道剖面上的竖向应力分布情况, 然后对影响底板竖向拉应力的外部因素进行了敏感性分析, 在此基础上探讨了该桥底板崩裂的破坏机制。结果表明: 弯曲预应力束的径向力与预应力束管道偏离设计位置而产生的附加径向力, 是导致底板开裂的主要原因; 在纵向压力作用下, 底板开裂后的箱梁节段最终会发生失稳破坏即出现崩裂。

**关键词** 桥梁工程; 变高度预应力箱梁桥; 合拢段; 有限元法; 崩裂破坏

中图分类号 U448

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.24.008

## Bursting Crack Mechanism of Closure Segment Bottom Slab for the Certain Prestressed Variable Depth Box-section Bridge

LOU Lili

College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu Province, China

**Abstract** Prestressed variable depth box-section bridge has been widely used due to its advantages. In recent years, during the period of construction, some accidents occur, and the bottom slab of these bridges has bursting crack. Up to very recently, the research on the damage causes that could be found in the domestic literatures is only with rough analysis but detailed calculation. The primary reasons are made by these notional studies, however secondary reasons are unclear. In practice, the reason should be considered based on the structure instead of construction errors. With a specified engineering sample, 3D FEM analysis is performed so that the distribution of vertical stress on the section of tendon pipeline in the bottom slab is obtained. Result shows that four main external factors have impact on the vertical stress in bottom slab. They are deadweight of the bottom slab, longitudinal pressure, radial force originated from longitudinal bending prestressed tendon, and additional radial force caused by prestressed pipeline deviating from the design. Therefore, parametric analysis with respect to these four factors is conducted as the base for the discussion of the failure mechanism. Results indicate that the primary reason is the additional radial force produced by the radial force of bending tendon cluster and its position deviation from original design. With the longitudinal pressure is applied to, box beam segment of the cracked bottom beam would eventually burst apart due to instability. Based on the failure mechanism, two solutions are recommended for improving the resistant ability in the bursting crack of the bottom slab. They are setting hooked stirrups, and shortening the distance between the spacer bars of prestressed tendon cluster.

**Keywords** bridge engineering; prestressed variable depth box-section bridge; closure segment; finite element method; bursting crack

### 0 引言

变高度预应力混凝土连续箱梁桥由于其受力合理、结构刚度大、跨径较大、线形美观、桥面行车舒适等优点, 在桥梁建设中得到广泛应用。预应力混凝土箱梁桥多数遵循全预应

力设计原则, 即在理论上要求结构不出现拉应力, 但是, 近几年有不少预应力箱梁桥在施工阶段发生底板崩裂事故<sup>[1]</sup>。关于合拢段底板崩裂破坏的成因, 国内的专家学者对其进行了一些专项研究<sup>[1-10]</sup>, 取得了一些成果。有研究认为, 箱梁中跨底

收稿日期: 2012-07-02; 修回日期: 2012-07-12

作者简介: 楼力律, 讲师, 研究方向为工程力学、计算力学、结构分析等, 电子信箱: loul@hhuc.edu.cn

板混凝土开裂病害主要是钢束张拉出现的径向预应力所引起的<sup>[2-4]</sup>;有学者认为,对底板预应力束引起的径向力估计不足、对底板横向应力重视不够、底板预应力束布置过密使得预应力偏大、底板箍筋或勾筋等防崩钢筋直径偏小及数量偏少等设计与构造因素造成了底板的崩裂<sup>[5-6]</sup>;也有研究认为,预应力钢束定位不准、波纹管间距过小、混凝土振捣不密实、上下层之间的连接钢筋设置较弱甚或未设置等施工缺陷,使底板出现崩裂<sup>[6-9]</sup>。但是,这些研究基本上只是对可能引起底板崩裂的原因进行简单阐述,没有进行详细的计算论证;对于所述成因中哪些是主要原因,哪些是次要原因还没有说明,这方面有待进一步明确;在工程实践中,即使采取一定的技术措施从宏观上来减少施工误差,但底板也会出现崩裂,说明应从结构和构造层面而非施工误差因素来考虑崩裂的成因。本文以某座施工期间发生底板崩裂的预应力箱梁桥为研究对象,通过三维应力分析,得到箱梁底板在预应力筋管道剖面上的竖向应力分布情况;然后对影响底板竖向拉应力的外部因素进行了参数化分析,在此基础上探讨底板崩裂的破坏机制。

### 1 工程概况

某变高度预应力混凝土箱梁桥,主跨为 52m+87m+52m。桥梁全宽 36.5m,分左右两半幅,单幅宽 16.25m。梁部为单箱单室的变高度直腹板箱形梁,梁底采用圆曲线,曲线半径  $R=308.992\text{m}$ ,跨中梁高 2.11—2.29m,支点处梁高 4.71—4.89m,箱梁顶板厚 0.3m,底板厚 0.3—0.65m。桥面铺装 6cm 混凝土,8cm 沥青混凝土。箱梁采用纵、横、竖三向预应力体系,主桥现浇箱梁采用 C50 混凝土,主桥箱梁采用直径 15.20mm 的高强低松弛钢绞线。设计荷载等级:城-A 级。图 1 为桥例的主桥立面图,图 2 为桥例的主桥箱梁断面图。

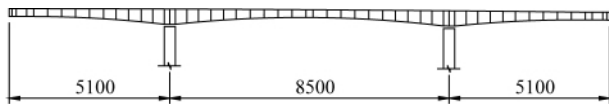


图 1 主桥的立面图(单位:mm)  
Fig. 1 Elevation drawing of main bridge (unit: mm)

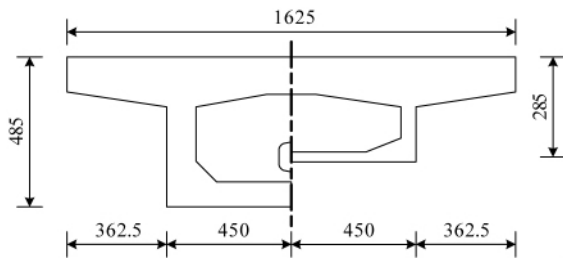


图 2 主桥箱梁截面图(单位:mm)  
Fig. 2 Box beam cross section of main bridge (unit: mm)

中跨合拢前梁体未出现明显裂缝,在施工期间左半幅桥中跨合拢前未出现明显裂缝,待全部张拉完成后底板出现通长裂缝,箱梁底板在 18m(纵向)×9m(横向)范围内出现了大面积崩落和脱空现象,中间无预应力束区域有一小块面积相对较好,无开裂与脱空现象。破坏主要集中在布置波纹管的位置,波纹管之间的混凝土横向断裂,底板内的上下两层钢筋网及其之间的混凝土开裂,进而造成底板和腹板交界处的纵向裂缝,如图 3 与图 4 所示。这说明底板混凝土的破坏是由预应力束张拉后产生下崩力所致。

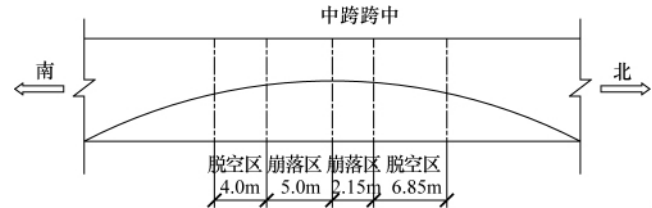


图 3 箱梁底板混凝土破坏区域立面图  
Fig. 3 Elevation drawing of concrete damaged region in the bottom slab of box beam

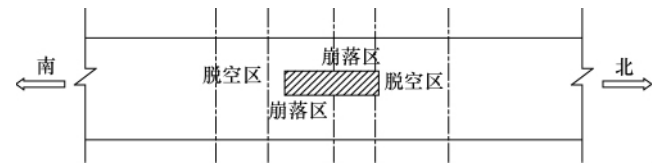


图 4 箱梁底板混凝土破坏区域平面图  
Fig. 4 Planar drawing of concrete damaged region in the bottom slab of box beam

### 2 有限元分析

#### 2.1 模型建立

考虑到结构的对称性,以及施工时荷载的正对称性,选取箱梁中跨的 1/4 结构进行计算。边界条件为:在切开面均采用对称约束,约束箱梁支座位置节点的全部自由度模拟梁墩临时固结的情况。预应力由杆单元的初应变来模拟,顶板、腹板钢束的节点与离得最近的混凝土单元节点耦合;底板预应力钢束节点与混凝土单元共节点。非预应力钢筋对混凝土结构应力的影响,通过相关的实常数考虑,最终建立的模型如图 5 所示。

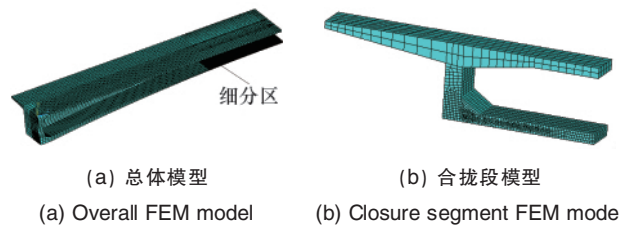


图 5 建立的空间有限元模型  
Fig. 5 Models of three dimensional FEM

## 2.2 计算结果分析

合拢段及与其相邻的块为潜在的破坏区域,其底板的竖向应力如图6所示。从图中可以看出底板上缘的竖向应力最大达到1.6MPa左右,出现的范围在梗腋与底板相交处附近。考虑底板的预应力孔道处横截面是整个底板最薄弱的环节,因此重点考查底板在预应力孔道中心切面上的应力状态,该切面上的横向应力分布如图7所示。从图6、图7可以看出:在预应力孔道中心位置底板剖面上的最大竖向拉应力最大值达到1.9MPa,略大于混凝土的抗拉强度最大值 $f_{td}=1.83\text{MPa}$ ,但尚小于混凝土的抗拉强度标准值 $f_{tk}=2.65\text{MPa}$ ,在当前的竖向应力水平下,底板抗竖向崩裂的可靠度降低。但在施工中,预应力管道可能会偏离设计位置而产生附加径向力,在附加径向力作用下底板的竖向拉应力会局部增大,从而可能会使底板发生竖向崩裂破坏。

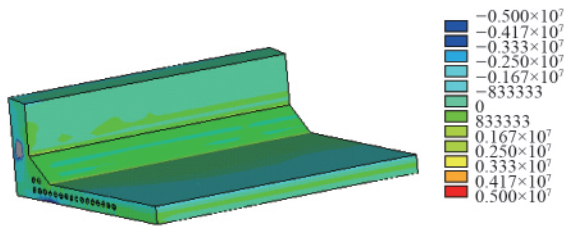


图6 竖向应力云图(单位:Pa)

Fig. 6 Contour diagram of vertical stress (unit: Pa)

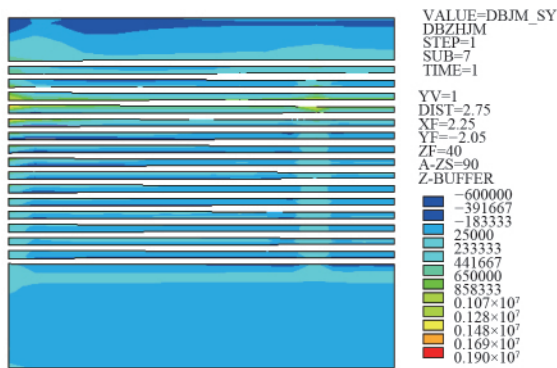


图7 底板剖面竖向正应力云图(单位:Pa)

Fig. 7 Contour diagram of vertical normal stress with bottom slab profile (unit: Pa)

## 3 影响箱梁底板竖向应力的因素分析

悬浇箱梁合拢段底板崩裂必然是底板竖向拉应力过大引起的,则探明引起底板产生竖向拉应力的因素,且确定哪些为主要因素是非常有必要的。以下将从箱梁底板自重、底板预应力束的纵向压力、由于预应力束竖向弯曲而产生的径向力、预应力管道偏离设计位置而产生的附加径向力4个方面探讨影响底板竖向应力的因素。

### 3.1 底板自重的影响

箱梁底板在自重作用下产生横向挠曲变形,两侧的腹板

给其提供了弹性嵌固作用,这样底板就变成了类似两端弹性约束、中部受均布力作用的单向板,靠近腹板位置会存在较大的竖向应力。

当底板厚度分别为30、32、34和36cm时,仅在底板自重作用下,比较底板在预应力孔道中心位置的剖面上的竖向应力。计算结果表明,在底板厚度为30cm时,在自重作用下底板剖面上的竖向拉应力最大为0.6MPa左右,出现范围位于梗腋与底板的交线附近;随着底板厚度的增加,底板剖面的竖向应力有所增加。

### 3.2 纵向压力的影响

在合拢束的作用下,箱梁底板在纵向呈受压状态,由于混凝土的泊松效应,会在箱梁底板产生竖向的拉应力。为了比较底板由纵向压力而产生的竖向拉应力,比较底板预压力增加5%、10%和15%情况下竖向拉应力的变化情况。计算结果表明,在初始纵向预压力作用下,底板剖面上的竖向应力最大有0.3MPa左右,范围处于梗腋与底板的交线附近;随着底板预压度的增大,底板剖面的竖向应力的变化不大。

### 3.3 纵向弯曲预应力束引起的径向力影响

在箱梁底板设计中,设计人员一般仅考虑结构的自重作用,但是对于变截面连续梁或连续刚构箱梁桥,箱梁底板线形一般为抛物线或者圆曲线,而底板预应力筋线形和底板线形基本保持一致,这样使得纵向曲线预应力筋引起了较大的径向力。径向力会引起箱梁底板竖向受拉。考虑径向力提高5%、10%和15%的情况下比较径向力对底板竖向应力的影响,计算结果表明,在初始预压力引起的径向力作用下,底板剖面上的竖向应力最大为1.2MPa左右,出现在靠近腹板的预应力管道位置;随着底板预压度的增大,底板剖面的竖向应力有所增加。

### 3.4 预应力束管道偏离设计引起的附加径向力的影响

施工期间混凝土的浮力会使得预应力筋的管道偏离原来设计的位置,这种偏差会使底板受到附加的径向力作用。施工规范<sup>[10]</sup>规定预应力束管道定位钢筋的间距不大于100cm。根据对多座发生底板崩裂事故桥梁的管道误差观察,定位钢筋之间管道上浮可达到2—3cm,预应力管道的附加变形用二次抛物线模拟,如图8所示。

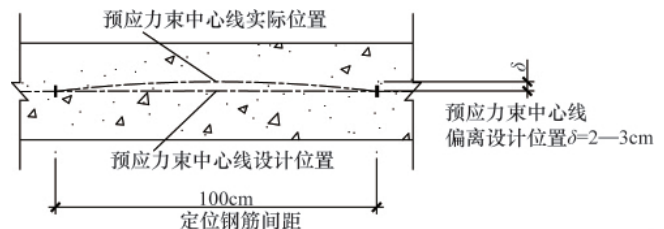


图8 定位钢筋间距为100cm时预应力管道偏离设计位置示意图

Fig. 8 Prestressed tendon pipeline position deviating from original design while the space between positioning steel reinforcement equals 100cm

当预应力筋高于设计位置 2cm 和 3cm 情况下,计算附加径向力在箱梁底板产生的竖向应力。计算结果表明,在附加径向力的作用下,当预应力束管道上浮 2cm 时,底板剖面上的竖向应力最大值达到 1.0MPa 左右;当预应力束管道上浮 3cm 时,底板剖面上的竖向应力最大值达到 1.3MPa 左右。由此可见,预应力管道的定位误差会在很大程度上提高箱梁底板的局部竖向拉应力。

#### 4 底板崩裂的破坏机制

箱梁底板在自重、纵向压力、弯曲预应力束引起的径向力和预应力束管道局部浮起引起的附加径向力作用下,会产生较大的竖向拉应力,从而引起底板在薄弱截面的开裂。底板开裂后,竖向拉应力被释放,此时底板的厚度减半,在纵向压力和面外径向力的作用下可能发生进一步破坏。

为了探究底板的最终破坏形态,对底板开裂后的箱梁节段进行稳定分析和抗压强度分析。分析的梁端模型取为合拢段两侧对称的 B8—B10 各 3 个梁段,包含合拢段的总长为 26m,如图 9 所示。为了控制计算的规模,底板预应力钢束采用等效荷载的方法施加预应力,钢束与混凝土板共节点。在梁端按照静力等效原则施加按平面杆系程序算得的内力,模拟边界条件。

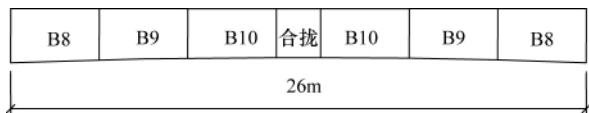


图 9 计算模型选取的梁段示意

Fig. 9 Beam segment selected by the analysis model

##### 4.1 开裂后底板的抗压强度分析

经计算可以得到箱梁底板开裂后的纵桥向应力,合拢段的底板存在较大的压应力区域,压应力的最大值接近 C50 混凝土的抗压强度设计值 22.4MPa,但小于混凝土的抗压强度标准值 32.4MPa。因此可以推断:即使箱梁底板开裂成两侧,底板尚不会发生强度破坏,还需考察底板开裂后的稳定性能。

##### 4.2 开裂后底板的稳定分析

结构的稳定性分析是确定结构开始变得不稳定时的临

界荷载和屈曲模态形状。实际结构都不是理想的完善结构,而是有初始缺陷的非完善结构,一般都表现为第 2 类极值点稳定问题。为了考查悬浇箱梁在底板开裂后的稳定性,对箱梁节段进行了几何、材料的双重非线性分析。经分析可以得到,底板跨中处的轴力与跨中截面中心点的荷载位移曲线,如图 10 所示,结构在强度分析时得到的底板跨中处的轴力为 2692.94kN,如图中虚线所示。

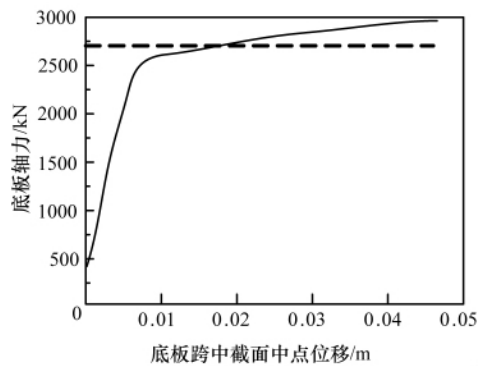


图 10 荷载位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curve

由图 10 的荷载位移曲线可以看出,在底板跨中处的轴力达到强度计算的轴力 2692.94kN 之前,荷载-位移曲线存在明显的拐点。可以推断出箱梁底板开裂后在预应力合拢束作用下,将会发生底板失稳的破坏,表现形式为跨中底板向外突出,形成类似“两张皮”的破坏,如图 11 所示。综上所述,悬浇箱梁底板崩裂的破坏机制如图 12 所示。



图 11 箱梁底板失稳形态示意图

Fig. 11 Instability form of box beam bottom slab

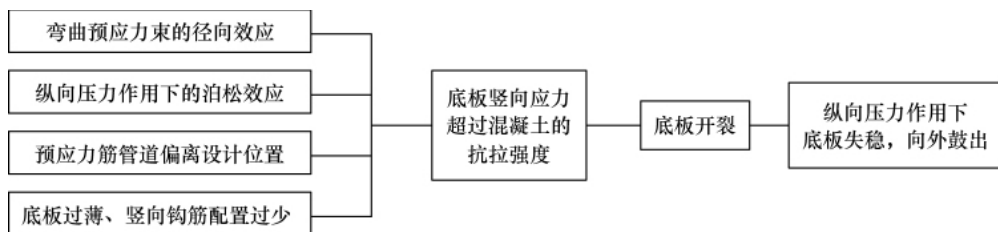


图 12 底板崩裂的破坏机制示意

Fig. 12 Schema of failure mechanism due to bottom slab bursting crack

## 5 结论及建议

(1) 在底板重力、纵向压力和纵向弯曲预应力束引起的径向力作用下,底板在预应力束管道中心位置剖面上的竖向应力超过了混凝土的抗拉强度设计值。

(2) 由于弯曲预应力束的径向效应、纵向压应力的泊松效应,当预应力筋管道偏离设计位置、底板过薄、竖向勾筋配置过少时,合拢段底板极易出现开裂;且在纵向压力作用下,底板开裂后的箱梁节段最终会发生失稳破坏。其中,弯曲预应力束的径向力与预应力束管道偏离设计位置而产生的附加径向力,是导致底板崩裂的主要原因。

(3) 根据崩裂机制,建议采取配置钩筋、减小预应力管道定位钢筋间距等降低由预应力管道定位误差产生的附加径向力所引起的底板竖向应力,从而提高底板抗崩裂能力。

### 参考文献 (References)

- [1] 罗文林. 连续箱梁(刚构)桥合拢段底板束张拉破坏成因研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.  
Luo Wenlin. Research of closing segments breaking in bottom slab of continuous box girder (rigid-frame) bridges during stretching prestressing tendons[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [2] 张顺忠. 某大桥连续梁跨中底板混凝土崩裂事故的处理[J]. 铁道建筑, 2007(5): 18-20.  
Zhang Shunzhong. Railway Engineering, 2007(5): 18-20.
- [3] 郭丰哲, 钱永久, 李贞新. 预应力混凝土连续刚构桥合拢段底板崩裂原因分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 68-70.  
Guo Fengzhe, Qian Yongjiu, Li Zhenxin. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(10): 68-70.
- [4] 彭元诚. 连续刚构箱梁底板崩裂原因分析与对策[J]. 桥梁建设, 2008(3): 67-70.  
Peng Yuancheng. Bridge Construction, 2008(3): 67-70.
- [5] 严允中. 连续刚构桥箱梁底板崩裂原因及预防措施[J]. 公路交通技术, 2006(6): 101-104.  
Yan Yunzhong. Technology of Highway and Transport, 2006(6): 101-104.
- [6] 陈露晔, 陈瑶. 预应力混凝土连续刚构桥底板外崩及对策研究 [J]. 华东公路, 2008(1): 43-46.  
Chen Luyue, Chen Yao. East China Highway, 2008(1): 43-46.
- [7] 冯鹏程, 吴游宇, 杨耀铨, 等. 连续刚构桥底板崩裂事故的评析 [J]. 世界桥梁, 2006(1): 66-69.  
Feng Pengcheng, Wu Youyu, Yang Yaoquan, et al. World Bridges, 2006(1): 66-69.
- [8] 徐郁峰, 梁立农, 宋神友. 某连续刚构桥底板崩裂后的修补方法及其有限元仿真分析[J]. 桥梁建设, 2007(4): 70-74.  
Xu Yufeng, Liang Linong, Song Shenyou. Bridge Construction, 2007(4): 70-74.
- [9] 姜海波, 赵人达. 富力桃园大桥箱梁合拢区域裂缝成因分析及加固[J]. 桥梁建设, 2007(6): 72-74.  
Jiang Haibo, Zhao Renda. Bridge Construction, 2007(6): 72-74.
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵施工技术规范 JTJ041—2000 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.  
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical specification for construction of highway bridge and culvert JTJ041—2000[S]. Beijing: People's Transportation Press, 2000.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·

## “2012 年全国博士生学术论坛 (系统科学)”征文

“2012 年全国博士生学术论坛(系统科学)”由国务院学位委员会办公室、教育部学位管理与研究生教育司主办,青岛大学承办,将于 2012 年 11 月 2—5 日在山东省青岛市召开。

征稿范围:1) 一般系统理论;2) 复杂系统分析;3) 复杂网络;4) 系统生物学与医学;5) 经济社会系统分析;6) 复杂行为系统;7) 交通系统工程;8) 系统建模与仿真;9) 管理科学与工程;10) 系统科学的应用与实践;11) 信息科学与工程。

全文截稿日期:2012 年 10 月 12 日

联系电话:0532-85953820

电子信箱: xtkxlt@qdu.edu.cn

会议网站: <http://zdh.qdu.edu.cn/UploadFile/xitongkexue/index.htm>