

# 大跨径PC连续刚构桥底板防裂分析与对策

王亮<sup>1</sup> 贾晨霞<sup>2</sup>

(1 重庆交通大学 重庆市 400074 2 内蒙古工业大学 呼和浩特市 010051)

**摘要:**本文针对连续刚构桥箱梁混凝土开裂、底板崩裂等病害,分析其产生的原因,推导了产生这种现象的力学机理,提出了避免这种崩裂的建议及防止病害发生的对策措施。

**关键词:**连续刚构 预应力 底板开裂 控制措施

## 1 前言

近几十年来,随着混凝土分段施工理论的完善及施工技术的发展,预应力混凝土连续刚构箱梁桥因其具有较大的抗弯抗扭刚度、较好的整体性和连续性而被广泛采用,据不完全统计,主跨200m以上连续刚构桥有55座<sup>[1]</sup>,但近几年裂缝问题日益暴露,其中以底板裂缝最常见和最为严重,主要表现为底板纵向裂缝、底板预应力管道处水平裂缝,严重时甚至呈上下分层等形式。近年来,很多学者<sup>[2-3]</sup>对该类桥的底板裂缝成因作了很多专项研究,产生这些破坏形式比较公认的力学机理是预应力筋的空间效应以及材料的泊松效应等。

本文针对混凝土箱梁底板纵向开裂和底板混凝土向下崩出问题,对箱梁受力裂缝形式进行归纳分析,提出设计中应引起重视的关键技术问题,探讨防止病害发生的对策措施,采用新型箱梁断面结构,进而为该类桥梁的设计与施工提供参考。

## 2 底板崩裂的成因及形式

连续刚构桥跨径大、超静定次数高,导致中跨底板正应力束吨位大、布置密集,并且底板正应力束一般是平行于底板布置,竖直面内为抛物线形,如图1所示。因此,力筋张拉后向弧心的径向力是造成许多桥梁底板混凝土向下崩出、底板预应力钢筋下移的主要原因。

### 2.1 底板典型的破坏形式

#### 2.1.1 底板横向挠曲产生的纵向开裂

横向挠曲产生的结果就是:底板横向跨中受正弯矩、两端由于腹板弹性嵌固而承受负弯矩作

用。箱宽愈大、底板钢束离腹板距离愈远,这种效应愈显著。截面拉应力超出混凝土抗裂能力,则导致纵向开裂,见图2所示。

#### 2.1.2 底板上、下层之间分离拉裂

由于钢束管道对截面的削弱及不良构造,导致底板上、下层之间分离,表现为大面积起鼓或大块脱离,见图3所示。

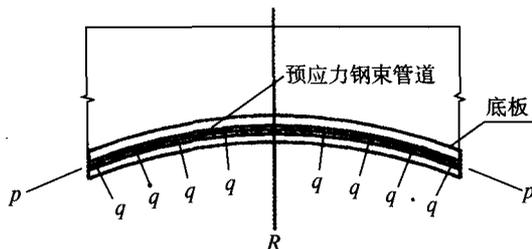


图1 预应力钢束径向力分布图

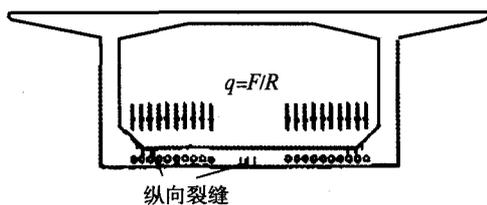


图2 底板横向挠曲开裂

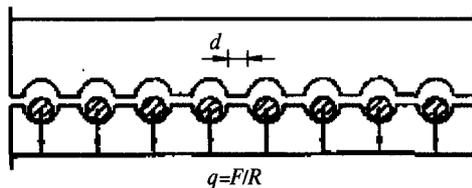


图3 底板上、下层分离

#### 2.1.3 钢束局部崩出(剪出)

曲线段或折点处钢束,由于局部径向力的作用,在外崩方向混凝土保护层厚度较小、受力钢筋配置不佳、混凝土质量存在缺陷时,易出现崩出破坏,其受力形式见图4所示。

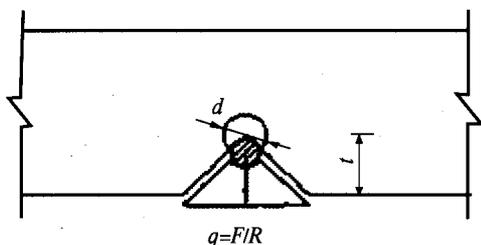


图4 钢束局部崩出(剪出)

## 2.2 底板预应力筋产生径向力和集中力的计算

张拉底板预应力筋时,必然使截面产生与使用荷载作用方向相同的附加荷载效应,纵向预应力筋束在张拉过程中会产生对腹板或底板混凝土的径向压力(图5)。

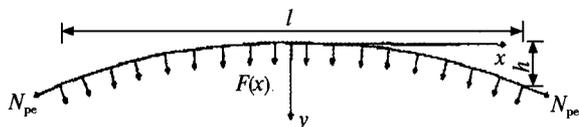


图5 等效预应力计算模型

取微段预应力筋进行分析,其受力情况如图6所示,若划分为无限小,则曲线可近似按圆弧线处理,径向力 $q(x)$ 近似相等,在 $s$ 轴上列力的平衡方程:

$$N_{pe} \sin \theta + N_{pe} \sin \theta = q(x)(\theta + \theta) R$$

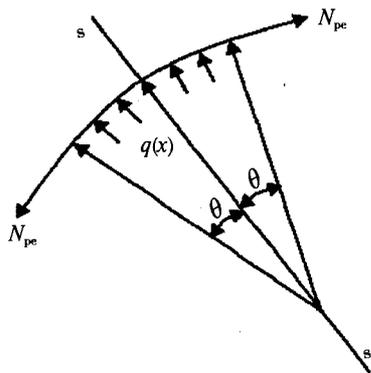


图6 微段力筋径向力分析示意

一般情况 $\theta$ 很小,近似取 $\sin \theta = \theta$ ,则上式简化为:

$$q(x) = N_{pe} / R$$

从上式可以得到,径向力 $q(x)$ 随变截面箱梁底板的预应力筋曲率半径的增大而减小;若刚构桥的箱梁高度以及箱梁底板厚度按抛物线变化,底板预应力筋按底板的形状设计为抛物线线形,且抛物线方程为: $y = ax^b$ ,代入 $(L/2, h)$ ,

得 $y = h(\frac{2x}{L})^b$ ,根据半径公式 $R = \frac{(1-y'^2)^{3/2}}{y''}$ 可得得到预应力筋产生的径向力沿程分布:

$$q(x) = N_{pe} / R = N_{pe} \frac{h(\frac{2}{L})^b b(b-1)x^{b-2}}{(1+(h(\frac{2}{L})^b bx^{b-1})^2)^{3/2}}$$

依据上式可以得到如下结论,如表1。

研究表明,如果底板纵向预应力筋的抛物线形式低于2次( $b < 2$ ),曲率随着 $z$ 的减小而增大,则预应力筋产生的径向力也随着 $z$ 的减小而增大,在力筋顶部(实桥跨中)产生的径向等效荷载最大<sup>[4]</sup>;抛物线的指数越小,跨中位置处预应力束的等效径向力越大,对箱梁底板受力越不利。

## 3 对策与措施

连续刚构桥是一种较为经济合理、施工安全可靠的桥型,在众多的桥型中占有一定的位置。针对连续刚构桥在施工中张拉合龙束时常出现箱梁底板崩裂的事故,在设计和施工中主要采取下列措施。

### 3.1 合理控制结构的预应力度

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)在安全度的控制方面比《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-85)要求高,按规范JTG D62-2004设计的桥梁跨中底板混凝土的压应力储备不宜过大,在最不利荷载组合下,压应力宜控制在1~1.5MPa。

### 3.2 选择合适的墩身刚度并优化梁高变化规律

在强度和稳定性满足要求的前提下,桥墩的纵向刚度不宜过大,以减少混凝土收缩徐变、温度等作用对结构受力的不利影响,尽量减少合龙钢束用量。合理选取梁高变化规律是十分重要的,在根部梁高和跨中梁高确定的情况下,适当减小抛物线次数,能增大 $L/4$ 附近截面的梁高,改善 $L/4$ 附近截面的主拉应力,但是太小的抛物线次数又会带来跨中截面附近底板曲率半径小、径向力增大的问题,因此,建议抛物线次数不宜小于1.8。

表1 箱梁下缘跨中附近曲率半径与 $q(x)$ 

主跨/m	l/m	$h_c/m$	$h_1/m$	$k$	$x/m$	$y/m$	$y'$	$y''$	曲率半径R/m	钢束拉力F/kN	$q_1/kN \cdot m^{-1}$
				1.6	4.0	2.103	0.04101	0.00615	163.0		21.6
80	33.0	5.0	2.0	1.8	4.0	2.067	0.03025	0.00605	165.5	3515.4 ( $\phi 15.24-15$ )	21.2
				2.0	4.0	2.044	0.02204	0.00551	181.6		19.4
				1.6	4.0	3.565	0.02608	0.00391	255.9		17.4
				1.8	4.0	3.537	0.01650	0.00330	303.1	4452.8 ( $\phi 15.24-19$ )	14.7
160	71.0	10.0	3.5	2.0	4.0	3.521	0.01032	0.00258	387.8		11.5
				1.6	4.0	3.856	0.02231	0.00335	299.0		14.9
				1.8	4.0	3.830	0.01345	0.00269	371.8	4452.8 ( $\phi 15.24-19$ )	12.0
200	90.5	12.0	3.8	2.0	4.0	3.816	0.00801	0.00200	499.5		8.9

### 3.3 设置防崩钢筋

底板防崩钢筋应根据径向力的大小计算确定,对于管道比较集中的跨中附近几个节段,应采用闭合箍筋,因为单肢箍筋施工时易忽视,且应确保箍住最外层钢筋。在施工过程中,严格保证闭合箍筋合理布设。如文献<sup>[6]</sup>所述,因未设置防崩钢筋,使得预应力束在节段线处产生的下崩力(合力)导致各预应力孔道的混凝土承受的局部竖向拉应力过大,致使底板崩裂。

### 3.4 优化钢束配置,采用预应力钢束底板调平处理

在保持跨中下缘安全度基本不变的情况下,增加负弯矩束可减少底板合龙束,从而减小径向力,或者将预应力钢束底板调平处理,减小预应力曲率效应的增大作用,从源头上防止底板崩裂。

本研究课题采用了措施4进行了连续刚构桥的结构形式探讨,并对新型结构采用有限元模型做了详细的受力分析,以证明结构的合理性。

## 4 工程概况

云南龙腾大桥为跨越龙江而设,全桥有三联组成:龙陵侧 $5 \times 30$ m预应力混凝土T梁、 $(58+102.25+63)$ m连续刚构和腾冲侧 $5 \times 30$ m预应力混凝土T梁。起止里程K12+95~K13+438,全长523.25m,设计桥宽12.0m,最大桥高约70.0m,箱梁顶宽12m,底宽7m,根部断面梁高8m,跨中和边跨现浇段梁高3.0m,腹板厚40~70cm,底板厚30~80cm,设支点横隔板,不设跨中横隔板。箱梁采用C50混凝土,三向预应力结构,箱梁高度及底板厚均按二次抛物线变化。对于0~5号块,在距梁顶300cm处均设置厚30cm的水平板,如图7。下部结构采用薄壁空心墩,墩

台采用桩基础。跨中位置的预应力钢束采用图8的布置形式。

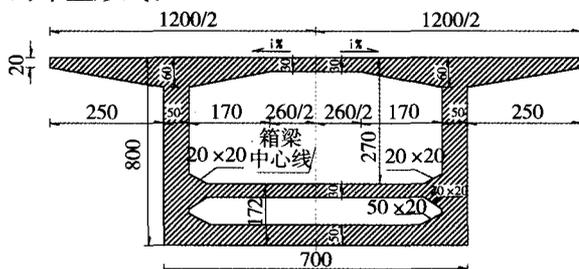


图7 箱梁断面形式



图8 预应力钢束布置图

### 4.1 主要技术标准如下:

- (1) 设计荷载:公路-II级;
- (2) 桥面宽度:1.5人行道+9.0行车道+1.5人行道=12.0米;
- (3) 地震烈度:地震基本烈度8度,按8度设防。

本桥桥址位于云南省龙陵县与腾冲县交界处,紧邻原龙腾公路,距老腾龙桥约300m,交通便利,但地形起伏较大。

### 4.2 分析模型

变截面预应力混凝土连续刚构桥合龙时出现底板崩裂往往是预应力钢束储备偏高、截面尺寸偏小、构造措施不完备以及施工中钢束定位不准确、振捣养护不到位等不利情况叠加的结果。

根据连续刚构桥出现崩裂的位置,利用大型通用有限元软件ANSYS建立了计算模型,如图9,混凝土采用solid65单元模拟,预应力采用link10单元,有效预应力取1023MPa。设纵桥向为X方向,竖桥向为Y方向,横桥向为Z方向。

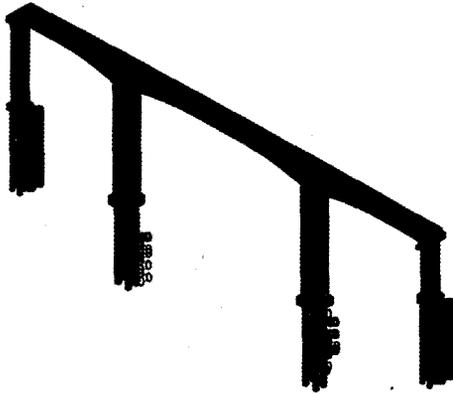


图9 龙腾大桥平面图

### 4.3 计算结果

从静力分析的结果（见图10~13）可以看出：在张拉中跨合龙段预应力束后，桥梁结构在恒载（自重+预应力）、施工临时荷载作用下，全截面受压，上下缘应力均满足规范要求。

合理设计箱梁底缘的曲线，使曲线在靠近跨中位置的曲线半径尽可能大，使钢束径向力降低到最小，可以避免箱梁底板出现过大横向拉应力，防止纵向裂缝产生。本桥通过调平预应力钢束达到了减小钢束径向力的目的。

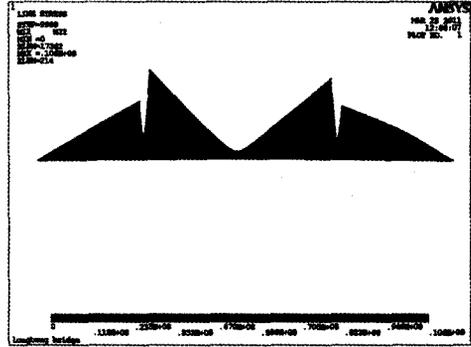


图12 主梁竖向弯矩

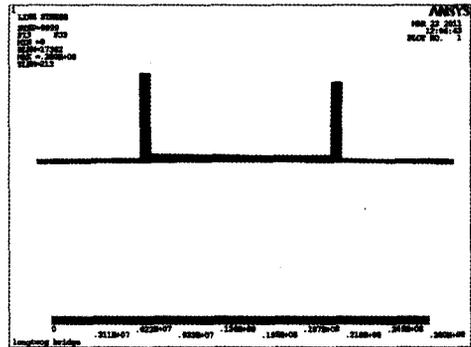


图13 主梁横向剪力

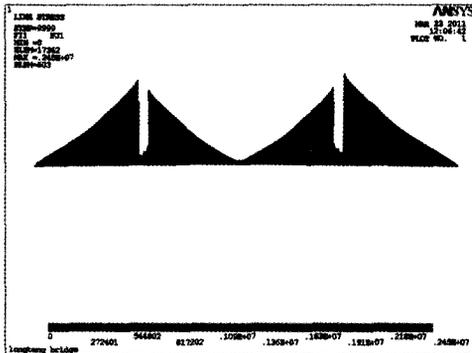


图10 主梁轴力图

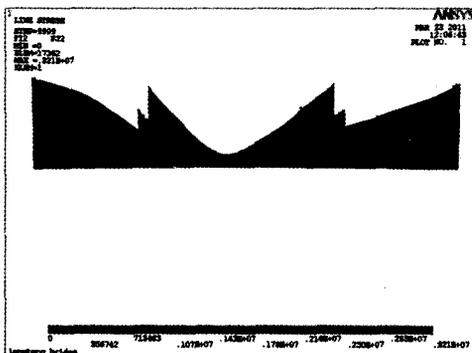


图11 主梁竖向剪力图

### 5 结论

底板力筋产生的径向力在力筋顶部最大，纵向箍筋的间距应从合龙段向其他段逐渐增大。本文对大跨度预应力混凝土连续刚构箱梁桥典型裂缝产生的原因及其防治措施，做了尝试性的探讨，针对最常见的底板裂缝做了详细的分析。对于底板裂缝，通过力学分析，得到不使底板开裂的底板预应力钢束曲线半径公式、钢束定位成折线产生的转角以及合龙段高差的合理范围。通过构造措施，如合理设计箱梁底缘的曲线、将底板预应力钢束调平等来避免过大底板横向拉应力出现，防止底板纵向裂缝产生，效果显著。

#### 参考文献

- [1] 楼庄鸿. 超大跨径桥梁的建设与发展[J]. 桥梁, 2009, (1).
- [2] 赵启林, 周旺进, 江克斌. 预应力混凝土箱梁桥施工中的裂缝成因分析与修补[J]. 公路交通科技, 2006, 23(6): 85—88.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 彭元斌. 连续刚构箱梁底板崩裂原因分析与对策[J]. 桥梁建设, 2008,(3).
- [6] 王标新, 马希田. 变截面连续刚构桥跨中底板崩裂的防范措施[J]. 中外公路, 2010, (2).