

文章编号: 0451-0712(2005)09-0001-05

中图分类号: U441.4

文献标识码: B

# 连续刚构桥底板纵向裂纹原因分析

李俊, 李小珍, 卫星, 晋智斌, 任伟平, 司秀勇

(西南交通大学土木工程学院 成都市 610031)

**摘 要:** 根据某连续刚构桥主跨跨中附近底板纵向裂纹的特征, 结合桥梁设计参数取值分析、全桥整体空间计算和跨中梁段局部应力分析以及其他桥梁裂纹的分析成果, 认为跨中底板在自重和纵向预应力作用下, 底板将出现横向拉应力, 而波纹管偏离设计位置致使底板混凝土出现更大的局部拉应力, 以及预应力钢束张拉时, 混凝土强度可能尚未达到要求是导致跨中附近底板混凝土出现纵向裂纹的主要原因。

**关键词:** 连续刚构桥; 箱梁底板; 纵向裂纹; 全桥整体空间计算; 局部应力分析

近年来, 部分 PC 连续刚构桥在施工和运营过程中, 由于各种原因出现了一些纵向裂缝, 有关学者、专家对其进行了分析研究。

包立新、杨广来和杨文军分析了一座主跨 170 m 的连续刚构桥底板混凝土向下崩裂的原因<sup>[1]</sup>。该桥箱梁底板宽 8.5 m, 主跨跨中底板厚度为 28 cm, 底板钢筋网间设置间距为 45 cm × 45 cm 的直径为 12 mm 的箍筋, 在施工过程中底板混凝土向下崩出, 预应力钢筋下移。分析认为底板混凝土崩裂的主要原因: 是由于底板纵向预应力钢筋在竖直面内布置为抛物线形的曲线, 纵向预应力筋张拉后产生了向弧心的径向力, 径向力主要由箍筋承受, 而箍筋间距为 45 cm, 间距过大, 箍筋应力超限, 底板上下层钢筋网被撕开, 导致底板混凝土向下崩出。建议在主跨跨中设置横隔板, 跨中合拢段箍筋间距采用 20 cm。

王仁贵、吴伟胜和庞颂贤也认为<sup>[2]</sup>, 由于箱梁截面高度的变化, 底板预应力钢束随之产生径向附加力  $q$ ,  $q = P/R$ ,  $P$  为有效预加力,  $R$  为预应力钢束的曲率半径, 钢束弯曲产生的径向力使预应力管道下缘混凝土承受径向荷载作用, 底板混凝土可能崩裂, 建议底板设计采用大吨位束、单层布束, 钢束中心距离底板下缘不小于 10 cm。

宋雨、项贻强、徐兴和朱益民<sup>[3]</sup>对一座 46.8 m + 72 m + 46.8 m 预应力混凝土 V 形墩连续刚构桥底板纵向裂缝进行了分析。该桥采用双箱双室截面, 跨中梁高为 1.8 m, 边跨和中跨跨中底板厚度均为

24 cm。成桥后, 发现在主跨和边跨跨中箱梁底部存在长度不等但范围较广的纵向裂缝, 裂缝最大宽度约为 0.25 mm。分析认为底板纵向裂缝原因主要为: 中跨和边跨跨中未设横隔板、底板厚度不够、底板中部纵向预应力的泊松效应, 以及施工过程中预应力管道周围混凝土收缩不均匀, 造成底板横桥向拉应力过大(有限元计算值达 11.43 MPa), 导致底板纵向裂缝。

王新敏、王秀伟<sup>[4]</sup>提出, 预应力束张拉时, 混凝土的强度大小也是影响裂缝产生的因素之一。

张丽璞、王昌武<sup>[5]</sup>对一座 70 m + 130 m + 70 m 预应力混凝土连续刚构桥箱梁顶板纵向裂缝的原因进行了分析, 认为如果混凝土及钢筋应力小于容许值, 一般不会产生裂缝, 若预应力束张拉不足、钢束布置存在误差、灌浆质量不好、锚固部位不良以及超载等, 都可能产生裂缝。

张继尧、王昌将<sup>[6]</sup>认为, 将箱梁底板上的预应力钢筋弯起到腹板上锚固时, 预应力束必然是既平弯又竖弯, 预应力方向的转向必将在底板上产生拉力, 底板可能产生纵向裂缝。

楼庄鸿<sup>[7]</sup>在《现有大跨径预应力混凝土梁式桥的缺陷》一文中, 分析了梁桥出现纵向裂缝的原因, 认为车轮荷载超重引起横向弯矩过大, 引起顶板下缘产生纵向裂缝; 过大的纵向预应力由于泊松效应产生较大的横向拉应力; 中国桥梁设计规范的温差应力估计过小; 混凝土横向收缩引起纵向裂缝; 支座

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278079)

收稿日期: 2005-04-07

中心与腹板中心不一致可能引起顶板裂缝;支座横向布置若都固定,可能引起裂缝;水化热也会导致开裂。

强士中、李小珍、卫星和程海根等<sup>[8]</sup>,对贵阳市中心环北线工程小关水库特大桥合拢段底板崩裂原因提出了分析报告。该桥跨越小关水库沟谷、贵阳~都拉营公路、川黔铁路。主桥孔跨布置采用69 m+125 m+2×160 m+112 m的5跨预应力混凝土双肢薄壁连续刚构桥。梁体为单箱双室截面,梁顶宽21.5 m,底宽12.5 m,根部梁高10.5 m,跨中梁高3.0 m。2003年10月,在张拉箱梁底板合拢段纵向预应力束的过程中,5号、2号、1号合拢段及附近底板共有5个部位先后不同程度地向上或向下崩裂。分析认为,预应力管道偏离设计位置,致使底板混凝土出现较大局部应力,是导致合拢段底板混凝土崩裂的主要原因。

彭运动、孔庆凯<sup>[9]</sup>分析了某T构桥根部梁段底板纵向开裂的原因。该桥主梁为单箱双室,顶板宽22.5 m,底板宽14.5 m,根部1~3号梁段底板厚为100~66.4 cm。采用满堂支架施工。2号梁段浇完养护时,发现1号梁段底板纵向开裂且渗水;对3号梁段横向钢筋加强后,浇完养护时,发现2号梁段底板纵向开裂;3号梁段拆模后,3号梁段底板仍有裂纹。底板混凝土开裂的原因是由于后浇梁段和先浇梁段混凝土存在一定的收缩差,先浇梁段混凝土约束了后浇梁段的收缩变形,导致后浇梁段底板出现较大的横向拉应力。经采取梁段间底板预留后浇段,并在底板中间布置冷却水管的措施后,底板未再发现裂纹。

某连续刚构桥在2004年建成试运营后,发现中跨跨中附近底板存在纵向裂纹。本文通过全桥整体空间计算和跨中梁段局部应力分析,结合类似桥梁的裂纹情况,对该桥底板纵向裂纹原因进行全面分析。

## 2 工程概况

主桥为98 m+180 m+90 m预应力混凝土连续刚构桥,分左右两幅,桥面全宽34 m,净宽31 m,双向8车道,设计荷载为:汽车—超20级,挂车—120。梁体采用全预应力、单箱单室直腹板变高度箱梁。箱梁根部中心高9.30 m,跨中中心高3.30 m,梁高变化采取1.6次抛物线,底板厚度由跨中的0.32 m按照二次抛物线变化到悬臂根部的1.0 m。跨中腹板厚度0.40 m,根部腹板厚0.75 m。

梁体纵向的顶板、腹板、底板束采取22—7φ5

(270级),边跨底板采用19—7φ5(270级)高强度低松弛钢绞线。中跨顶板、腹板钢绞线锚下张拉控制应力为1 357.8 MPa,中跨底板钢绞线锚下张拉控制应力为1 339.2 MPa,边跨底板钢绞线锚下张拉控制应力为1 302.0 MPa。半幅共设246束钢绞线,顶板束146束,腹板束40束,中跨底板束28束,边跨底板束32束。

该桥采取悬臂浇注法施工。主墩顶箱梁0号块长12 m,两侧各伸出墩外壁1 m。施工中2个“T”构各对称划分为22对节段,节段长度从悬臂根部往悬臂端分别为:6×3.0 m+6×3.5 m+6×4.0 m+4×5.0 m=83 m,中跨设2 m的合拢段,边跨8.8 m为现浇段。

主梁混凝土标号为C50,桥墩混凝土标号为C40。

## 3 裂纹特征

对该桥进行荷载试验前的表观检查发现,左、右两幅桥的中跨跨中合拢段附近,底板底表面存在顺桥方向裂纹。具体位置为:右幅桥中跨21'、22'、23'、22号节段底板底表面(图1),左幅桥20号节段底板底表面(图2)。在图1中和图2中,从左至右,节段编号为20'、21'、22'、23'、22、21、20,其中23'节段为中跨跨中合拢段,除23'节段长为2 m外,其余节段长均为5 m。

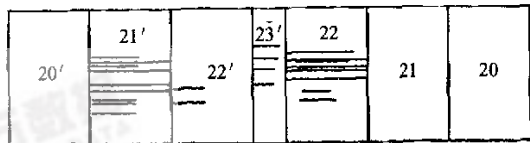


图1 右幅桥中跨跨中附近底板裂纹示意

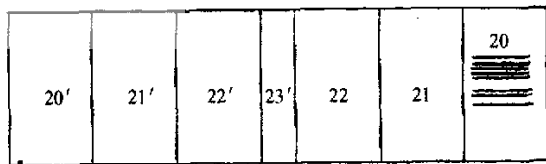


图2 左幅桥中跨跨中附近底板裂纹示意

裂纹有如下特征:

- (1) 裂纹方向,纵桥向,顺直;
- (2) 裂纹位置,中跨跨中合拢段附近底板底表面;
- (3) 裂纹长度,2~6.5 m;
- (4) 裂纹宽度,最大宽度0.58 mm;

(5) 裂纹间距,较密。

## 4 结构计算

### 4.1 全桥整体空间计算

采用MIDAS软件的空间梁单元,建立如图3所示的全桥整体空间计算模型,全部预应力束按照设计图输入平弯和竖弯几何数据,考虑了恒载、活载、温度和地基不均匀沉降。



图3 全桥整体空间计算模型

#### (1) 施工阶段。

施工计算的最终阶段为二期恒载加载后,徐变1 000 d,共划分了81个施工阶段。桥梁在施工阶段,最大顺桥向拉应力为1.07 MPa,出现在中跨跨中梁底,最大顺桥向压应力为13.98 MPa。施工阶段混凝土的应力满足规范要求。

#### (2) 运营阶段。

恒载计算结果为,最小顺桥向压应力为0.710 MPa(跨中梁顶),最大顺桥向压应力为13.42 MPa(悬臂根部梁底)。

承载力极限状态验算,考虑了3种荷载组合:结构重力+汽车,结构重力+汽车+温度+地基不均匀沉降;结构重力+挂车。对各种组合的4种工况(最大轴力工况、最小轴力工况、最大弯矩工况和最小弯矩工况)的梁体重要截面进行了承载力验算,最小的安全系数为1.15,满足规范要求。

正常使用极限状态组合下,梁体截面在顺桥向未出现拉应力,最小顺桥向压应力为0.25 MPa,最大顺桥向压应力为14.90 MPa,满足规范要求。

### 4.2 跨中梁段局部应力分析

为了解主梁的空间应力分布情况,采用大型通用有限元软件ANSYS,选取主跨跨中附近梁段建立空间块体单元模型,进行空间应力分析。计算模型梁长为32 m,包括了主跨20'、21'、22'、23'、22、21和20号节段。

混凝土材料采用块体单元SOLID45来模拟,采用梁单元模拟纵向、横向以及竖向预应力束的作用,梁单元与块体单元在锚固点及转折点处相连,用梁单元中的初应变来控制所施加的预应力模型的单元数为49 056个,节点数67 464个。

根据全桥整体空间计算结果,选取正常使用最不利内力组合Ⅰ,即恒载+汽车+体系均匀升温+顶板升温+地基不均匀沉降组合,作为跨中梁段局部分析的外力边界条件。各荷载组合中,截面内力包含预应力束引起的二次内力,未包括预应力束引起的一次内力作用,因为一次内力通过计算模型中的预应力束模拟。模型中的预应力为永存预应力。

跨中梁段局部应力分析结果表明,在正常使用荷载组合Ⅰ下,底板顺桥向正应力表现出明显的剪力滞效应,底板中部应力最大,见图4所示。中跨跨中附近底板横桥向最大拉应力为2.5 MPa,底板中部横向拉应力最大,从中部向腹板方向逐渐减小,横向拉应力的分布呈条带状,与实桥裂纹分布位置和方向一致,见图5所示。从箱梁整体来说,若将主梁底板视为部分预应力混凝土A类构件,横向拉应力满足规范要求。

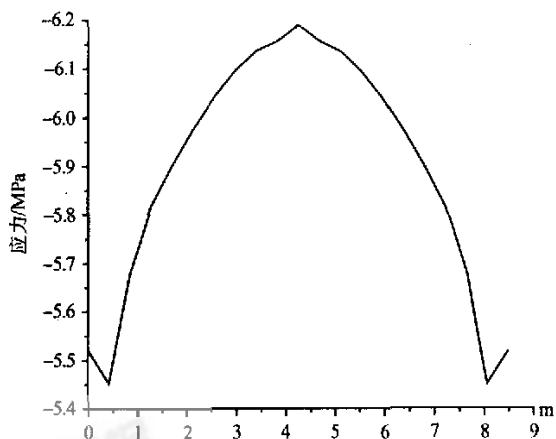


图4 中跨跨中截面底板顺桥向正应力沿横向分布变化

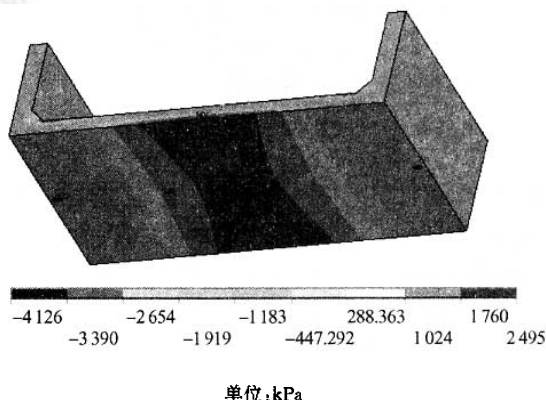


图5 中跨跨中附近底板横桥向正应力

### 4.3 底板裂纹宽度估算

若将主梁底板视为独立构件,则其为钢筋混凝土

土构件。钢筋混凝土构件检算时,假定混凝土不承受拉应力,需评价裂缝宽度。

顺桥向取箱梁 1 m 长度进行分析,截面高度  $h=3.3$  m,截面宽度  $b=1$  m。横桥向受拉钢筋直径为 16 mm,1 m 宽度范围配 10 根钢筋,钢筋面积  $A_s=2\,011\text{ mm}^2$ ,底板下层钢筋网保护层厚度为 2.2 cm,换算截面惯性矩  $I_0=0.280\,33\text{ m}^4$ 。

根据空间局部应力分析,箱梁底板横向拉应力为  $\sigma_t=2.5\text{ MPa}$ ,则使用荷载弯矩:

$$M=\sigma_t \times I_0 / (h/2) = 424.8\text{ kN} \cdot \text{m}$$

横向钢筋拉应力:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \frac{M}{0.87 A_g h_0} = \frac{424.8 \times 10^6}{0.87 \times 2\,011 \times 3\,278} \\ &= 74.1\text{ MPa}\end{aligned}$$

纵向裂缝宽度:

$$\begin{aligned}\delta_{f\max} &= C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_s}{E_s} \left( \frac{30+d}{0.28+10\mu} \right) \\ &= 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times \frac{74.1}{2 \times 10^5} \times \\ &\quad \left( \frac{30+16}{0.28+10 \times 0.006} \right) \\ &= 0.05\text{ mm}\end{aligned}$$

估算的纵向裂缝宽度为 0.05 mm,满足规范要求。

## 5 底板开裂原因

### 5.1 PC 连续刚构桥设计

公路桥涵设计手册—梁桥(下册)指出:近年来,连续刚构桥多采用大悬臂单箱单室箱梁,箱宽 8~9 m,桥面宽 15~18 m,宽桥用分离式单箱;一般的变截面箱梁根部高度与跨径比为 1/18~1/22,跨中梁高不小于 2.5~3.0 m,底板跨中厚 25~30 cm;由于箱梁抗扭刚度大,主梁一般只在端部和根部设横隔板,其余位置一般不设横隔板。

周军生、楼庄鸿<sup>[1]</sup>收集和分析了国内外大跨径连续刚构桥的数据和资料,国外主跨超过 190 m 的 6 座连续刚构桥,主跨跨径在 190~298 m,边跨与主跨跨径比在 0.499~0.591 之间,根部梁高与主跨跨径比为 1/15.7~1/20.6,跨中梁高 3.5~5.2 m,主跨跨中梁高与跨径比为 1/47.5~1/85.1,其箱梁底板厚度在 26~180 cm 之间变化。国内主跨超过 120 m 的 25 座连续刚构桥,边跨与主跨跨径比在 0.52~0.727 间,根部梁高与主跨跨径比为 1/14.5~1/20,跨中梁高 2.5~5 m,主跨跨中梁高与跨径比为

1/29.1~1/73.7,其箱梁底板厚度在 25~150 cm 之间变化。分析认为,大跨径连续刚构桥边跨与主跨跨径比大部分在 0.55~0.58,根部梁高与主跨跨径比大部分在 1/18~1/20,主跨跨中梁高与主跨跨径比大部分在 1/54~1/60,主跨跨中箱梁底板厚度多数为 32 cm,少数桥底板厚度采用 25 cm 或 28 cm。

文献[12]也指出 PC 连续刚构桥箱梁根部的高跨比一般为 1/15~1/20,多数为 1/18 左右,跨中箱梁的高跨比通常为 1/50~1/60。

本桥边跨与主跨跨径比为 98/180=0.544,根部梁高与主跨跨径比为 9.3/180=1/19.4,主跨跨中梁高与跨径比为 3.3/180=1/54.5,边跨与主跨跨径比、根部梁高与主跨跨径比、主跨跨中梁高与跨径比均在常用值范围内。本桥主跨跨中箱梁底板厚度为 32 cm,底板厚度取值是合适的。全桥只在墩顶和边跨端部设置横隔板,国内大多数桥梁也没有在跨中设置横隔板,运营良好,没有出现可见的纵向裂缝。本桥底板箍筋间距为 10 cm,直径 16 mm,在正常情况下,底板箍筋应该能够承受纵向预应力筋张拉后产生的径向力。箱梁底板采用单层布束,钢束中心距离底板下缘为 12 cm,钢束中心至底板下缘距离是足够的。可以认为,本桥的设计同国内梁桥设计手册的设计建议以及国内外大跨径连续刚构桥实桥设计比较,是符合一般设计的。前面的结构计算也表明,结构承载能力、应力和裂缝宽度满足规范要求。

根据设计单位提供的施工图纸进行的设计参数取值分析、全桥整体空间静力分析与中跨跨中合拢段空间局部应力分析,尚不能解释目前跨中合拢段底板出现纵向裂纹的原因。

### 5.2 裂纹原因分析

(1)箱梁底板不施加横向预应力,在自重和纵向预应力作用下,将出现横向拉应力,若正常的横向拉应力再叠加其他一些非正常的横向拉应力,导致横向拉应力过大,将出现可见的纵向裂纹。

箱梁底板横向较宽,局部范围内可视为双向板,在自重作用下,底板将产生横向拉应力。底板纵向预应力钢束施加纵向预应力后,由于泊松效应,将在底板横向产生拉应力。纵向预应力钢束的平弯也要在底板产生横向拉应力。若底板的纵向预应力钢束呈竖曲线布置,其产生的向弧心的径向力也要在底板产生横向拉应力。这些底板横向拉应力,均为正常出现的横向拉应力。实桥设计和施工时,需控制横向拉应力的数值,防止出现纵向裂纹。



(2)合拢段底板预应力筋实际位置发生偏离,预应力管道的保护层厚度可能不足,导致合拢段底板混凝土局部应力过大。

(3)若预应力钢束张拉时,混凝土强度尚未达到要求,混凝土可能被劈裂,而由劈裂产生的裂纹较顺直。

(4)施工过程中,温度变化过大,可能引起较大的局部温度应力。

(5)管道压浆密实与否,对纵向裂纹也有一定的影响。

(6)预应力管道周围混凝土收缩,可能会出现纵向裂纹。

(7)混凝土的水泥、粗细骨料、添加剂、水等材料的性质是否稳定合格。

## 6 结论和建议

根据本桥裂纹特征,结合设计参数取值分析、结构计算结果以及其他桥梁裂纹的分析成果,提出如下结论和建议。

(1)在自重和纵向预应力作用下,底板将出现横向拉应力,而波纹管偏离设计位置,致使底板混凝土出现更大的局部拉应力,以及预应力钢束张拉时,混凝土强度可能尚未达到要求是导致跨中附近底板混凝土出现纵向裂纹的主要原因。

(2)由于合拢段的内力较小,混凝土纵向正应力水平较低,建议通过对合拢段底板混凝土裂纹位置进行加固、补强,从而使结构满足使用要求。

(3)底板加固方法,可以采用粘贴碳纤维布或粘贴钢板,在底板顶、底面粘贴钢板,须用螺栓固定,通过压浆使之密实。

(4)建议启用预应力备用束,应注意考虑备用预应力筋的固定措施,保证力筋在张拉时横向力平衡,从而使力筋处于设计位置。

(5)如补强加固设计需要增加体外束时,建议增设横隔板及锚固块。

## 参考文献:

- [1] 包立新,杨广来,杨文军. 对连续刚构桥底板开裂问题的探讨[J]. 公路,2004,(8).
- [2] 王仁贵,吴伟胜,庞颂贤. 预应力混凝土连续刚构桥设计[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会2003年全国桥梁学术会议论文集[C]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 宋雨,项贻强,徐兴,等. 预应力混凝土V形墩连续刚构箱梁桥的空间分析[J]. 中国市政工程,2003,(2).
- [4] 王新敏,王秀伟. 某连续刚构桥施工阶段开裂原因的空间分析[J]. 铁道标准设计,2001,(4).
- [5] 张丽璞,王昌武. 某连续刚构桥桥面裂缝的原因分析[J]. 公路与汽运,2004,(3).
- [6] 张继尧,王昌将. 悬臂浇注预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [7] 楼庄鸿. 现有大跨径预应力混凝土梁式桥的缺陷[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会2003年全国桥梁学术会议论文集[C]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [8] 强士中,李小珍,卫星,程海根,等. 贵阳市中心环北线工程小关水库特大桥合拢段底板崩裂原因分析报告[R]. 成都:西南交通大学,2003.
- [9] 彭运动,孔庆凯. 连续刚构桥箱梁根部施工阶段底板开裂机理研究和对策措施[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会2004年全国桥梁学术会议论文集[C]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [10] 刘效尧,赵立成. 公路桥涵设计手册—梁桥(下册)[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [11] 周军生,楼庄鸿. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J]. 中国公路学报,2000,(1).
- [12] 强士中. 桥梁工程(下册)[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

## 甘肃临清高速公路建成通车

2005年8月10日,甘肃交通实施的“挺进西部”战略工程之一的临泽至清水高速公路建成通车。

临泽至清水高速公路是连霍国道主干线和甘肃四纵四横公路主骨架的重要组成部分,全长99.7 km,始于张掖市临泽县化音,止于酒泉市清水镇,分别与山丹至临泽和清水至嘉峪关高速公路相接。该路设计标准为全立交、全封闭,控制出入双向四车道高速公路,路幅全宽26 m,设计速度为100 km/h,项目总投资为18.48亿元,自2002年11月开工建设。