

文章编号: 1002-0268 (2010) 09-0093-05

# 预应力混凝土桥梁产生斜裂缝的设计因素研究

刘长喜<sup>1</sup>, 马伟强<sup>2</sup>

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 兰州 甘肃 730030 2 潍坊市公路勘察设计院, 潍坊 山东 261031)

**摘要:** 本文通过分析设计理论、结构计算及构造、温度、收缩徐变等诸多设计因素对结构耐久性的影响, 以便设计人员在设计过程中减少结构缺陷, 给予结构的耐久性更多保证。

**关键词:** 桥梁工程; 预应力混凝土; 病害; 耐久性

**中图分类号:** U448.35

**文献标识码:** A

## Research on Design Factors for Inclined Cracks on Prestressed Concrete Bridge

LU Changxi, MA Weiqiang

(1. Gansu Provincial Transportation Planning Survey & Designing Institute Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730030 China

2 Weifang Highway Survey & Designing Institute Weifang Shandong 261031 China)

**Abstract:** The influence of design theory, structural calculation and configuration, temperature change, shrinkage creep, and many other design factors on structural durability were analyzed for designers reducing structural defects during the design process to give more assurance on durability of the structure.

**Key words:** bridge engineering; prestressed concrete; disease; durability

## 0 引言

很多桥梁病害经常与施工质量低劣有关, 但在承认施工存在问题的同时, 也不可否认, 在桥梁设计中还有许多可以改进的地方。许多设计人员往往只满足于规范对结构强度计算上的安全度需要, 而忽视从结构体系、结构构造、结构材料、结构维护、结构耐久性以及从设计、施工到使用全过程中经常出现的人为错误等方面去加强和保证结构的安全性。有的结构整体性和延性不足, 冗余性小; 有的计算图式和受力路线不明确, 造成局部受力过大; 有的混凝土强度等级过低、保护层厚度过小、钢筋直径过细、构件截面过薄; 这些都削弱了结构耐久性, 会增加桥梁的病害。

## 1 主拉应力分析

### 1.1 斜裂缝的产生

从理论上讲, 预应力混凝土桥在施工和使用阶段是不应该出现裂缝的: 全预应力混凝土上及部分预

应力混凝土 A 类构件, 允许出现拉应力, 但不超过规定的限值; 部分预应力混凝土 B 类构件, 出现拉应力允许超过 A 类构件规定的限制, 当出现裂缝时, 其裂缝宽度不得超过允许限值<sup>[1]</sup>。

箱梁在各种荷载作用下, 会在相互垂直的方向上产生主压应力与主拉应力, 主压应力值虽然可能大于主拉应力值, 但因混凝土抗压强度高, 故一般的箱梁当其截面尺寸不是太小时, 将不会由于主压应力而引起梁的破坏; 但当主拉应力较大时, 则可能使箱梁沿着垂直于主拉应力的方向产生斜裂缝 (如图 1)。腹板斜裂缝也称主拉应力裂缝, 是预应力混凝土梁桥中出现最多的一种裂缝, 往往首先发生在剪应力最大的支座附近, 与梁轴线成  $25^{\circ} \sim 50^{\circ}$ , 并随着时间的推移不断向受压区发展, 裂缝数不断增加, 且裂缝区逐渐向跨中方向扩展, 最终并导致箱梁沿斜截面发生破坏。

### 1.2 腹板主应力分析

箱梁是一种空间结构<sup>[2]</sup>, 受力复杂, 但箱梁腹板的受力状态仍可简化为平面应力模式进行分析,

收稿日期: 2010-08-18

作者简介: 刘长喜 (1984-), 男, 助理工程师, (changxi553017@sina.com)

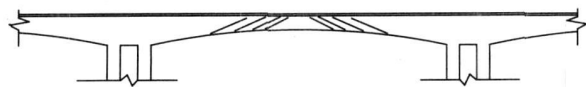


图 1 腹板斜裂缝示意图

Fig 1 Schematic diagram of web inclined crack

主要应力为腹板平面内的纵向正应力  $\sigma_x$ 、竖向正应力  $\sigma_y$  和剪应力  $\tau_{xy}$ ，而横向正应力  $\sigma_z$  及剪应力  $\tau_{xz}$ 、 $\tau_{yz}$  数值极小，可以忽略不计，空间有限元分析的结果也验证了这一点。因此，箱梁腹板可简化为平面应力状态，其处于双向受力状态，如图 2。

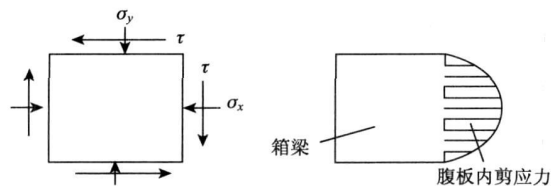


图 2 腹板内应力状态及剪应力分布示意图

Fig 2 Schematic diagram of stress state of web and shear stress distribution

在二向应力作用下，主拉应力  $\sigma_1$  计算公式为：

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \quad (1)$$

式中， $\sigma_x$  为在计算主应力点，由预加力和按作用（或荷载）短期效应组合计算的弯矩  $M_s$  产生的混凝土法向应力； $\sigma_y$  为竖向预应力钢筋的预加力产生的混凝土竖向压应力； $\tau$  为由使用荷载和弯起的预应力钢筋在所计算的主应力点产生的混凝土剪应力。

从式（1）看出，纵向预应力使主拉应力大为减小，如再在竖向施加足够大的压应力，则可全部消除主拉应力，使第 1 主应力和第 2 主应力均为压应力。如果把预应力筋连续箱梁的纵向预应力配成直线束，然后再配竖向预应力筋，从理论上能起到斜截面抗剪的作用，但实际上纵向预应力应设弯起束，这是因为竖向预应力筋过短，其预应力损失很大，会造成斜截面抗剪承载力不足，导致箱梁腹板出现斜裂缝。

## 2 设计因素

### 2.1 设计理论问题<sup>[3]</sup>

现在的桥梁设计仍以正截面受力计算为主，对斜截面受力关心不够。设计时没有充分考虑斜截面抗剪，非预应力钢筋特别是腹板中的箍筋和弯起钢筋设置过少，一旦竖向预应力损失过大，斜截面抗剪承载力将严重不足，从而导致腹板出现斜裂缝。在结构设计中，合理边主跨比、合理的高跨比、合

理的宽跨比及和梁低缘合理线形的确定，根据设计者经验的不同而取值不同，具有较大的随意性；在结构计算中，对宽箱梁的剪力滞、扭转、畸变、结构的锚固区应力计算及非线性计算做了较多的简化假设，与实际不符，必然导致较大的误差，关于这部分的计算理论还在继续完善。另外，高强混凝土的采用有利于减轻箱梁自重，但其脆性和极限应变能力都有所降低，诸如这些对桥梁的受力和安全营运都是很不利。大量外加剂的使用对结构材料永久性能的影响现在还很难估计。

### 2.2 结构分析计算

目前连续梁、连续刚构箱梁桥结构分析计算通常采用平面杆系程序（如桥梁博士）。该类分析软件用于连续梁、连续刚构桥整体计算无疑是一种简单而有效的方法。但对于连续梁、连续刚构箱梁桥，特别是变截面箱梁桥这类复杂的空间结构，沿桥梁纵向箱梁高度、箱梁顶板、底板、腹板厚度是逐渐变化的，故剪力滞效应是变化的，由偏心荷载引起的扭转、畸变的影响也是变化的。但在整体分析计算时，用平面杆系程序很难精确模拟这种变化（计算时往往忽略了一些影响因素）。导致计算结果很难与结构实际受力情况精确吻合。对于分段浇筑和分段施加预应力的连续梁桥，其结构实际产生的主拉应力要比计算的主拉应力偏大。因为现有平面分析电算程序的基本假定与这种结构的实际受力条件不完全一致，因此控制主拉应力时应充分考虑这种差异。

有些软件虽然能够进行桥梁结构空间分析，比较精确的考虑剪力滞、扭转、畸变对结构产生的影响，但因其建模计算相当复杂，受计算机计算能力等客观因素的制约，目前还不能广泛应用于实践。设计理论、假设状态与箱梁实际受力状态不一致是普遍存在的问题，由此而导致的应力把握不准，计算不够精确，会导致箱梁出现裂缝。

### 2.3 混凝土主应力限值

通过将我国公路桥涵设计规范（JTJ023-85）中预应力混凝土结构的混凝土应力限值与国内外规范中有关规定进行对比，发现我国规范规定的运营荷载作用下混凝土主拉应力的限值与国外的规范规定相比明显偏高。规范规定的限值偏高，直接导致设计中对腹板控制应力的取值偏高，结构偏于不安全。因箱梁腹板受力处于复杂应力状态，而公桥规范中简单地用  $\sigma \leq \alpha R_t$  控制不能保证箱梁腹板混凝土主拉应力方向的抗裂安全储备，腹板混凝土主拉控制应力取值偏大且判别式不完善。

对于混凝土主压应力, 如采用 C50混凝土, 达到设计强度的 80%进行张拉, 英国、中国与美国规范比较如表 1。

表 1 三国规范比较

Tab 1 Comparison of three specifications

|       | 英国       | 中国       | 美国       |
|-------|----------|----------|----------|
| 运营阶段  | 20.0 MPa | 17.5 MPa | 22.5 MPa |
| 预应力阶段 | 16.0 MPa | 21.0 MPa | 22.0 MPa |

从表 1 可见, 使用阶段压应力容许值中国规范偏低, 趋于保守; 而施工阶段容许压应力仅次于美国, 两者仅差 4.76%, 比英国大出 31.25%。由于中国施工机械和水平及施工管理、施工质量与美国相

比还存在不足, 理论计算模式及其计算结果与实际结构在许多方面还存在着差距, 也还有许多因素在设计中是很难精确计算的, 若施工阶段容许压应力取值过高, 确实存在着冒险的因素。在具体进行桥梁设计时, 要求结构各截面的应力具有一定的安全储备, 对截面正应力, 一般要求在不利荷载组合下, 还应保持约 2.0~3.0 MPa左右的压应力储备。

2.4 温度作用

由于自然环境条件变化而产生的温度荷载<sup>[4]</sup>, 一般可以划分为 3 类, 即日照温度荷载、年温温度荷载和骤然降温温度荷载, 各种温度变化的影响见表 2。

表 2 各种温度变化影响表

Tab 2 Influence of temperature changes

| 类型     | 主要影响因素 | 时间性  | 分布状态 | 作用范围 | 对结构影响 | 复杂性 |
|--------|--------|------|------|------|-------|-----|
| 日照温度变化 | 太阳辐射   | 短时急变 | 局部性  | 不均匀  | 局部应力大 | 最复杂 |
| 骤然降温变化 | 强冷空气   | 短时急变 | 整体   | 较均匀  | 应力较大  | 较复杂 |
| 年气温变化  | 缓慢气温变化 | 长期缓慢 | 整体   | 均匀   | 整体位移大 | 简单  |

温差荷载在大跨径 PC箱梁桥, 特别是超静定结构体系中, 日照引起桥面或其他部分的温度差会引起内力。理论分析和试验表明, 箱梁内部的温度分布是非线性的, 温度应力可以达到甚至超过活载应力, 已被认为是产生裂缝的主要原因。

(1) 箱梁温度梯度的影响

温度荷载的施加在设计中是通过温度梯度的选取来实现的。一般假定温度梯度在整个桥梁上部结构纵向长度上是恒定不变的, 这与实际情况存在差异。对目前普遍使用的大跨度、变高度箱梁, 随着梁高变化幅度的增大及箱梁长度和支承处约束的增加, 温度梯度应力会有较快增长, 温度梯度应力对腹板高度不大而变化又较明显的 1/4跨径附近的影响最明显。上下板温度梯度应力的作用, 相当于在箱梁上作用了一附加正弯矩, 该弯矩增加了腹板的剪应力和主拉应力。通过实桥观测, 箱梁顶板的温度从上表面到下表面下降的非常快, 其竖向温差比较显著, 对设计起控制作用。箱梁截面的横向温差与其竖向温差相比, 其数值不是那么明显, 主要是因为翼缘板的长度对其腹板有一定的遮挡作用, 因而腹板接受的太阳辐射时间少和吸收太阳辐射的强度小的原因。太阳辐射对箱梁横向的影响主要体现在腹板, 但是一般被忽略考虑。

(2) 温差应力估计过小。

采用不同的温度梯度模式计算得到的梁内温度应力相差很大, 甚至有可能计算结果是异号的。所以, 如果在设计时温度梯度的模式选用不当, 即使

增大温度设计值, 也不能保证结构的抗裂性。我国过去的桥梁设计规范中, 对温差应力, 仅规定了翼缘与梁体的其他部位有 5℃的温差, 温差偏小。根据国内外的研究, 对于箱梁, 温差应力可以接近甚至达到活载的应力。文献 [1] 中已规定了比过去大得多的温度梯度。另外, 由于箱梁内部散热及吸热较慢, 而外板面特别是在横向上施加了较大的预应力, 刚性较大的上面板升降温较快, 这样形成的上面板强有力的横向胀缩以及箱梁内外壁较大的温差, 会使两侧腹板内外板面出现附加的反复拉压应力, 将削弱腹板的抗剪能力。

2.5 构造尺寸

构造尺寸直接影响结构抵抗荷载的能力, 决定箱梁中的裂缝是否发生、扩展, 因此应确定合理的尺寸, 确保结构安全。

(1) 孔跨布置

孔跨布置是否合适直接影响结构的受力合理性, 边跨与主跨之比过小则边跨支点可能出现向上的拉力, 使交界墩与边跨受力不合理, 且近边跨的墩轴向压力小, 容易造成主墩受力不均衡; 若边跨与主跨之比过大, 连续梁 (连续刚构) 各跨的刚度会有较大的差异, 箱梁顶板、底板、腹板都有可能产生裂缝, 从而影响结构的正常使用。

(2) 箱梁高度

梁高不大时, 可减少结构恒载内力, 但梁高偏小会造成主梁刚度减小而变形加大、预应力筋布置困难、抗剪能力下降、预应力损失影响加大, 降低

预应力的有效作用,使箱梁腹板出现主拉应力破坏。

### (3) 腹板厚度

腹板的受力有正截面法向应力、直接剪应力,由于剪力滞和畸变附带产生的法向应力和剪应力,竖向预应力产生的应力和因箱梁扭转而产生的剪力流等的作用,这些都影响腹板的主拉应力,腹板的厚度则影响箱梁腹板主拉应力的大小。以往 200 m 以上跨径的预应力混凝土连续刚构桥梁为了尽量减少结构自重,往往尽量减少箱梁截面面积。首先,对于宽箱梁,多数桥梁腹板仅仅是有构造决定其厚度。在  $L/4 \sim 3/8$  跨附近一般纵向预应力的腹板束已经锚固完,顶板束则锚固在腹板两边的承托上,从构造上可以减薄腹板厚度。因此,这部分的腹板一般相对较薄,腹板总厚度太小。如与简支梁相比,一般相同宽度的(10片梁)一孔桥梁腹板总厚度在 1.6 m 以上,但其跨度不过才 30~50 m,而孔跨在 200 m 以上的预应力混凝土连续刚构腹板总厚度也不过 1.6 m。两者相比较,后者腹板太薄,难免产生开裂。重庆某大桥为分离式双箱截面,其腹板厚度相对其他桥梁加厚 50% 以上,大大提高了腹板的抗开裂能力,这是其至今未出现开裂的主要原因之一。可以看出,腹板厚度的增加对提高箱梁的抗剪能力、减小主拉应力能起到至关重要的作用。

### 2.6 预应力设计问题

目前大跨度预应力混凝土连续箱梁的竖向预应力主要布置在腹板厚度的对称线上,目的是为了提提高腹板的抗剪能力,在腹板的竖向施加预应力被认为是防止腹板开裂的主要措施之一。施加了竖向预应力的腹板的抗剪能力主要由 3 部分组成:混凝土和箍筋本身的抗剪能力、纵向预应力筋弯起段的竖向分力、竖向预应力筋的竖向力。竖向预应力筋与纵向预应力筋相比有两个显著的特点:第一,竖向预应力筋短,与纵向预应力筋达到相同的应力水平,其伸长量要小的多;第二,竖向预应力筋锚固端沿腹板轴向排列,而纵向预应力筋锚固端是排列在箱梁的某个界面上。

多数连续刚构桥梁的设计为了施工的方便,取消了纵向竖弯预应力钢束。比较连续刚构与连续梁两种体系,对主梁而言两者受力形式相同,按理其纵向预应力的配索原则也应基本相同。但是,多数连续刚构桥梁取消了下弯预应力索,更无上弯索,仅设置竖向预应力筋;而连续梁桥上下弯索都有,减少竖向预应力索,有效的避免了腹板开裂问题。这充分说明了连续刚构在配索上存在大的缺点。

从式(1)看出,纵向预应力和竖向预应力使主

拉应力大为减小,可全部消除主拉应力,使第 1 主应力和第 2 主应力均为压应力,按理论来讲的话,不应该出现斜裂缝,但事实远非这样,主要是因为预应力损失的准确计算比较困难或者竖向预应力损失较大。

引起预应力损失的因素很多,准确地估算预应力损失值是非常困难的。有些因素,如混凝土的收缩、徐变及钢筋松弛引起的预应力损失值,是随着时间的增长和环境的变化而不断发生变化的。还有些因素之间是互相影响,如混凝土收缩、徐变使构件缩短,预应力筋回缩将导致预应力值降低,它又将减小徐变损失;再如钢筋的松弛也将引起徐变损失的减小等。所以预应力的影响因素太多而又相互影响,很难准确地估算预应力损失值。即使计算理论比较明确但仍不能对预应力损失进行准确的估算,如大跨径连续刚构桥采用挂篮悬臂现浇法施工,各节段的预应力索用波纹管需逐段拼接,在现场难于保证拼接处管道光滑,接缝严密,其漏浆现象确时有发生。波纹管几何定位不准、不光滑、有漏浆等现象均是造成超出设计估算引起预应力附加损失的产生原因。由此引起的附加损失应该是沿程累加,说明预应力附加损失应沿程单调增长。对于长索预应力损失而言,摩阻力成为影响其预应力损失的主要因素。如何合理而准确的给出摩阻损失系数和管道偏差系数,找出其变化规律,应成为长索预应力损失估算研究的主要方向。

竖向预应力的部分损失项计算粗糙甚至是错误的,文献[1]对竖向预应力弹性压缩损失的计算没有特别说明,纵向预应力的弹性压缩损失是基于二维杆件轴向压缩计算得出的,很明显纵向预应力的弹性压缩损失的计算方法不能用于竖向预应力弹性压缩损失的计算。在确定张拉控制应力时必须计算弹性压缩损失,但目前竖向预应力弹性压缩损失的计算大多参照纵向预应力弹性压缩损失的计算方法,结果对竖向预应力弹性压缩损失估计不正确,过大的估计了竖向预应力,箍筋配置不够,从而导致腹板抗剪能力不能达到要求。

理论和实践表明:竖向预应力是抵抗剪应力和主拉应力的关键。没有设置竖向预应力筋或竖向预应力损失严重的箱梁腹板,开裂都相当严重。这些斜裂缝不仅会削弱桥梁结构的刚度和强度,还会加速钢筋锈蚀。而钢筋锈蚀,则会引起体积膨胀,从而使混凝土开裂,破坏混凝土的受力性能,降低材料的耐久性能和桥梁的承载能力,影响桥梁的美观及使用寿命,严重时很可能还会引发桥梁破坏的

事故。

3 结论

综上所述, 导致预应力混凝土结构产生斜裂缝的设计因素较多, 忽视任何一种因素, 都可能给桥梁的安全带来重大隐患, 影响桥梁结构的耐久性。作为设计人员, 必须深入理解各种因素可能给桥梁带来的不利影响, 坚决在设计过程中, 不让桥梁出现设计缺陷, 从而给桥梁结构更多的耐久性保证。

参考文献:

References

[ 1 ] 中华人民共和国交通部. 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  
P. R. China Ministry of Communications. JTG D62—

2004 Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [ S ]. Beijing: China Communication Press, 2004  
[ 2 ] V. 克里斯特克, 著, 何福照, 吴德心译. 箱梁理论 [ M ]. 北京: 人民交通出版社, 1988  
TRANSLATION KY. Box Girder Theory [ M ]. HE Fuzhao, WU Dexin, translated. Beijing: China Communications Press, 1988  
[ 3 ] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥 [ M ]. 北京: 人民交通出版社, 1997.  
FAN Lichu. Prestressed Concrete Continuous Beam Bridge [ M ]. Beijing: China Communications Press, 1997.  
[ 4 ] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析 [ M ]. 北京: 人民交通出版社, 1991  
LU Xingfa. Temperature Stress Analysis of Concrete Structures [ M ]. Beijing: China Communications Press, 1991.

(上接第 74 页)

参照《公路桥梁承载能力检测评定规程》和《城市桥梁养护规范》中对桥梁健康状况的定义办法和标准, 结合本文评估模型分层和评估方法提出了耐久性状评估参考标准, 如表 3 所示。

表 3 耐久性评定标准

Tab. 3 Criterion for durability assessment

| 评定分数            | 评定级别 | 评定说明                         |
|-----------------|------|------------------------------|
| $85 < \leq 100$ | 1 级  | 良好状态, 需要日常保养                 |
| $70 < \leq 85$  | 2 级  | 较好状态, 需要日常保养和小修              |
| $50 < \leq 70$  | 3 级  | 较差状态, 需要中修并要该桥根据试验和在试验进行限速限载 |
| $20 < \leq 50$  | 4 级  | 坏的状态, 需要停运进行大修和加固            |
| $0 < \leq 20$   | 5 级  | 危险状态, 立即封桥, 考虑拆除重建           |

6 结论

(1) 本文给出了青岛海湾大桥耐久性评估指标, 主要包括: 氯离子含量、混凝土碳化、钢筋锈蚀、混凝土强度、钢箱梁涂层劣化、缆索涂层劣化等, 并介绍了采用 ER 环、梯形阳极梯和 ECI-1 埋入式腐蚀监测仪来获取相应的指标。

(2) 采用层次分析变权综合评估法较好的反映出总体评估结果受个别构件的状态变化的影响, 取值相对反应了均衡性的要求, 避免了复杂系统带来

的不确定因素。

(3) 以大沽河航道桥为例确定了耐久性评估的实施方案和评定标准, 对于悬索桥的耐久性评估具有参考意义。

参考文献:

References

[ 1 ] 范立础. 中国桥梁安全、耐久和风险控制 [ M ]. 上海: 同济大学出版社, 2009  
FAN Lichu. Control of Bridge Safety, Durability and Risk in China [ M ]. Shanghai: Tongji University Press, 2009  
[ 2 ] 陈惟珍, 徐俊, 龙佩恒. 现代桥梁养护与管理 [ M ]. 北京: 人民交通出版社, 2010  
CHEN Weizhen, XU Jun, LONG Peiheng. Maintenance and Management of Modern Bridge [ M ]. Beijing: China Communications Press, 2010  
[ 3 ] 项海帆. 中国桥梁的耐久性问题 [ J ]. 桥梁, 2009, 30 (4): 12—13  
XIANG Haifan. Durability Problems of Chinese Bridge [ J ]. Bridges, 2009, 30 (4): 12—13  
[ 4 ] 许志豪. 解读昂船洲大桥耐久性设计施工及养护方法 [ J ]. 桥梁, 2009, 30 (4): 44—45  
XU Zhihao. Durability Design, Construction and Curing Method for Suncutters Bridge [ J ]. Bridges, 2009, 30 (4): 44—45