

文章编号:1671-8879(2009)01-0059-05

## 横向裂缝对 PC 箱梁结构的影响

景 强<sup>1,2</sup>, 贺拴海<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广州珠江黄埔大桥建设有限公司, 广东 广州 510420)

**摘 要:**针对 PC 箱梁结构正弯矩区段开裂后力学性能复杂、承载力评估困难的问题, 利用裂缝参数统计方法, 将正弯矩区段的实际横向裂缝转化为统计意义下的平均裂缝, 运用数值方法对该统计裂缝进行模拟, 通过对比开裂前后的分析结果, 以达到评估开裂结构的目的, 并对实际开裂的桥梁进行了对比分析。结果表明, 开裂后箱梁结构的承载力只为原设计状态的 80%。

**关键词:**桥梁工程; PC 箱梁; 横向裂缝; 数值分析

**中图分类号:** U448.23 **文献标志码:** A

### Influence of transverse cracks on the bearing capacity of PC box girder structure

JING Qiang<sup>1,2</sup>, HE Shuan-hai<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangzhou Zhujiang River Huangpu Bridge Construction Limited Company, Guangzhou 510420, Guangdong, China)

**Abstract:** The mechanical property of the PC box girder bridge with transverse cracks occurring in the mid-span area is complex, and the evaluation of the bearing capacity is difficult. Based on the statistic parameter of cracks, through converting the real transverse cracks into the statistic average ones, these statistic cracks are simulated with the numerical analysis method. After comparing the analysis results of the uncracked bridge with the ones of the cracked bridge, the variation of the bearing capacity can be estimated. The results show that the bearing capacity of the PC box girder structure with transverse cracks is 80% of the one of original design. 2 tabs, 8 figs, 10 refs.

**Key words:** bridge engineering; PC box girder; transverse crack; numerical analysis

## 0 引 言

预应力连续梁桥和连续刚构桥是公路大中跨径、特大跨径桥梁常用的桥型, 在中国已有相当多的同类型桥型。这些在役桥梁中, 有很多箱梁的腹板、顶板、底板、齿板以及横隔板等部位出现裂缝。对开裂后预应力混凝土梁桥结构性能的评定工作远比新桥

的设计工作复杂得多, 主要采用的方法为: 外观调查评定法、分析计算评定法和荷载试验评定法, 各种方法互有利弊。如何找到一种行之有效的结构性能评定方法, 是近年来国内外有关专家关注的问题<sup>[1, 2]</sup>。

从 20 世纪末到 21 世纪初, 许多外国学者致力于在役桥梁结构性能评估新方法的研究, 提出了很多新的理论。一些学者认为, 裂缝对构件的影响仅

收稿日期: 2008-02-10

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(2005 318 812 15)

作者简介: 景 强(1980-), 男, 内蒙古呼和浩特市人, 广州珠江黄埔大桥建设有限公司工程师, 长安大学工学博士研究生,  
E-mail: jihong981@126.com.

表现为刚度的减小,而忽略构件开裂后质量的变化;也有学者利用一座将要拆除的旧桥进行了破坏性试验,其试验方法是分级加静载,使桥产生不同程度的破损,并进行了静动载试验,随着裂缝的扩展,得出了频率下降、刚度下降、阻尼比逐渐增加的有益结果;还有学者将裂缝归结为等效抗弯惯性矩的下降。基于以上研究成果,本文旨在探索一种可以模拟正弯矩区段横向裂缝的有限元模型,利用现有的计算手段对开裂后的桥梁进行分析,从数值分析的角度定量评估开裂结构承载力,从而为研究预应力箱梁开裂后的性能提供参考。

## 1 研究方法

对于开裂后的预应力结构,其承载能力不应简单的理解为一般意义上的承载能力极限状态<sup>[3]</sup>,而应根据其原有结构在不同外荷载作用下受压侧混凝土的压应力,建立原有结构设计承载力与开裂后结构承载力之间的关系,具体过程如下所述。

(1) 根据设计资料,对原有未开裂结构进行有限元数值分析,得到原有未开裂结构在设计荷载下(车辆荷载)的应力状态和挠度值,分别称之为设计应力状态和设计挠度。

(2) 根据对开裂结构外观调查得到的裂缝统计参数(裂缝平均高度、裂缝平均间距),建立开裂后结构的有限元模型,通过分析得到开裂结构在设计荷载下(车辆荷载)的应力状态和挠度值,分别称之为开裂应力状态和开裂挠度。

(3) 通过比较设计应力状态值和开裂应力状态值,得到开裂后结构的承载力折减系数;比较设计位移和开裂位移,得到开裂后结构的刚度折减系数。

## 2 裂缝统计参数的建立

由于裂缝的离散性,对结构开裂后预应力结构的承载力及刚度的研究,只能基于外观调查得到的裂缝特征统计参数而进行。研究的裂缝效应,实际上是一种统计意义下的裂缝实际开裂高度、开裂范围内裂缝实际间距的平均效应。这种裂缝统计概念是目前国内外对裂缝进行数值分析的基础,本文采用的裂缝统计参数表示如下。

$$\text{裂缝平均统计高度 } \bar{h}_{cr} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{cr_i}}{n-1}$$

$$\text{裂缝平均统计间距 } \bar{l}_{cr} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} l_{cr_i}}{n-1}$$

$$\text{裂缝总宽度(梁底)} \Delta_{cr} = \sum_{i=1}^n \delta_{cr_i}$$

式中: $h_{cr_i}$ 为裂缝高度; $l_{cr_i}$ 为裂缝间距; $\delta_{cr_i}$ 为裂缝宽度; $n$ 为统计范围内裂缝数量。

## 3 数值分析的基本理论

### 3.1 平截面假定

国内外大量试验证明,对钢筋混凝土受弯构件,从开始加载到破坏的各阶段,截面的平均应变均较好地符合平截面假定。对于受压区,平截面假定是正确的;对于受拉区,裂缝产生后,裂缝截面处钢筋和相邻的混凝土之间发生了相对滑移,从而在开裂截面附近的区段内,截面的变形已不能较好地符合平截面假定。但是,如果量测的标距相对较长时,其平均应变还是能较好地符合平截面假定,故在本文的分析中仍然采用平截面假定。

### 3.2 小变形假定

预应力结构开裂后的非线性分析,主要包括由于混凝土的非线性本构关系引起的材料非线性、截面刚度与外加荷载间的非线性两方面。这两方面的非线性分析,均不会造成结构大的、不可忽略的几何变形,故在本文的研究中,对于开裂后的结构,仍然采用小变形的假定,这与开裂结构的实际情况也是比较相符的<sup>[4]</sup>。

### 3.3 混凝土开裂后的处理

根据断裂力学的方法,可将裂缝处理为两种模式,即分离裂缝模型和分布裂缝模型。本文对裂缝的处理采用分布裂缝模型<sup>[5-7]</sup>。

假设方向1、2为结构平面上的两个主方向,开裂后混凝土呈各向异性,方向1开裂后混凝土的应力应变关系式为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12}^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{13}^c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2$ 分别为方向1、2的正应力; $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ 分别为不同方向的剪应力; $\epsilon_1, \epsilon_2$ 分别为方向1、2的正应变; $\gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}$ 分别为不同方向的剪应变; $E_h$ 为混凝土弹性模量; $G_{12}^c, G_{13}^c, G_{23}^c$ 分别为开裂后混凝土不同方向的剪切模量。

## 4 开裂前后结构的实体模型分析

本文以石太(石家庄—太原)线的甘陶河特大桥为工程研究背景。该桥于1994年7月建成通车,由

3 联 5 孔 40 m 的连续箱梁组成。箱梁采用 C40 级混凝土,预应力钢绞线采用公称直径 15.20 mm、标准强度 1 860 MPa、弹性模量  $1.95 \times 10^5$  MPa 的钢

绞线,其力学性能符合《预应力混凝土用钢绞线的力学性能》的规定。箱梁横、纵断面尺寸及立面布置如图 1 所示。

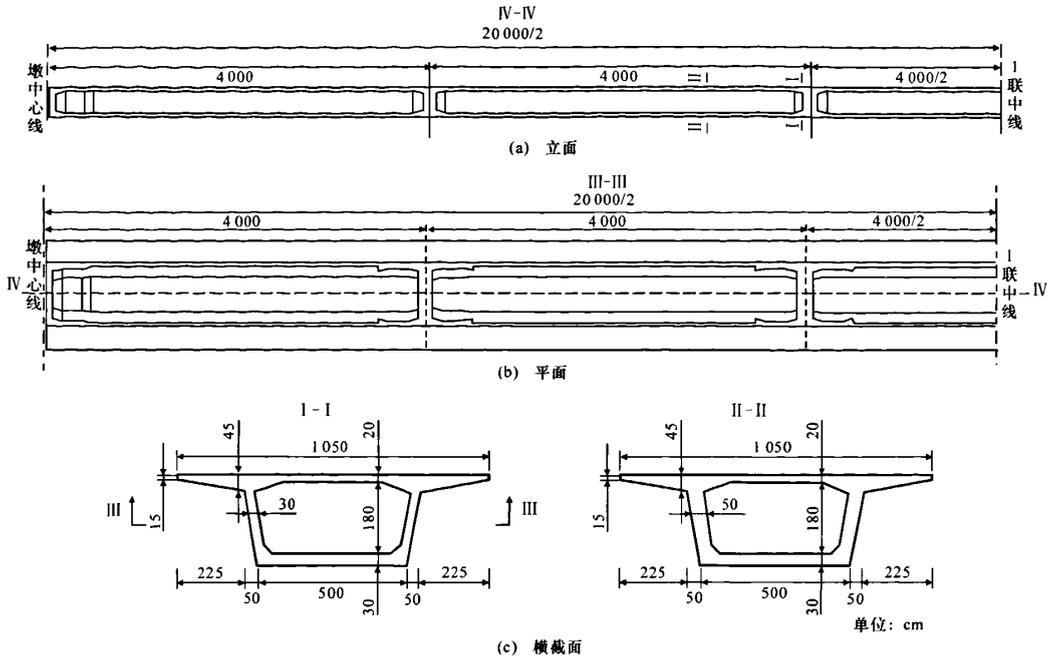


图 1 甘洵河大桥箱梁构造

### 4.1 实桥建模

利用有限元分析软件 ANSYS 对实桥进行有限元建模<sup>[8-10]</sup>,箱梁梁体采用 SOLID65 单元模拟,预应力钢束采用 LINK8 单元模拟,通过给预应力钢筋单元降温的方式施加预应力。考虑结构对称性,建立箱梁有限元模型如图 2 所示。汽车活载等级为公路 I 级,采用 5 跨 40 m 的连续梁自重应力最大截面的弯矩影响线加载的方式,加载方式见图 3。加载后的箱梁应力云图及变形如图 4(见下页)所示。设计状态计算后各主要控制截面计算数据如表 1 所示(见下页)。由表 1 可看出,原有连续箱梁结构在上述的加载模式下满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》对部分预应力混凝土 A 类构件的要求。由此可见,如果桥梁不出现任何损伤而处于正常工作状态时,结构是安全可靠的。

### 4.2 开裂状态的模拟

利用已建立的箱梁有限元模型,采用“挖孔”方式模拟既有裂缝对结构的影响,即把开裂处垂直于裂缝方向的混凝土单元的弹性模量改小 2~3 个数量级。该方法既不需要改变原有结构单元的划分模式,也不需要改变加载位置以及约束条件,只需修改裂缝处单元的参数,就可实现对开裂结构的有限元

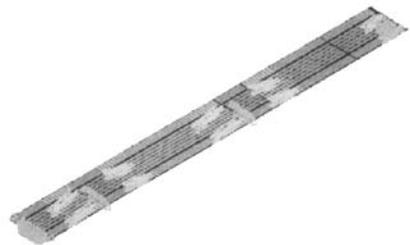


图 2 甘洵河大桥设计状态模型

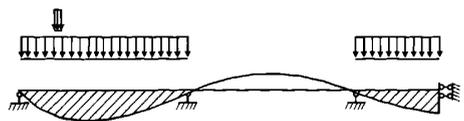


图 3 加载方式

模拟。这种方法在实际操作中很方便且易于实现,但如何选择合适的“孔”宽度,即失效单元宽度是一个关键点。本文对开裂位置、开展高度及开展宽度均相同的一条裂缝,采取 3 种不同失效宽度对其进行模拟,如图 5(见下页)所示。

对上述 3 种不同失效宽度处理后的模型进行计算,将计算结果中首跨跨中以及 1 号墩顶处的最大压应力值绘成折线图(图 6,见下页);首跨跨中最大挠度绘成折线图(图 7,见下页)。

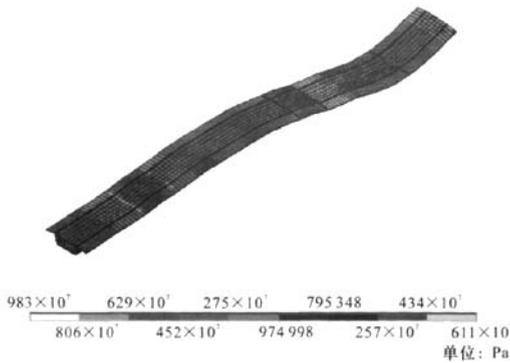
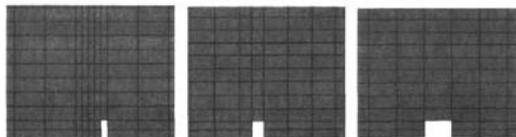


图4 设计状态应力云图

表1 实桥开裂后加载计算结果

状态	位置	最大压应力/ MPa	最大挠度/ m	控制截面	
设计 状态	公路一级 100%	1跨跨中	<b>3.910</b>	0.009 3	1号墩顶
		1号墩顶	<b>4.882</b>		
		2跨跨中	1.743	-0.002 6	
		2号墩顶	2.728		
		3跨跨中	0.712	0.003 8	
开裂 状态	公路一级 100%	1跨跨中	<b>4.816</b>	0.018 3	1跨跨中
		1号墩顶	<b>4.686</b>		
		2跨跨中	1.742	-0.053 1	
		2号墩顶	2.665		
		3跨跨中	1.203	0.054 5	
开裂 状态	公路一级 80%	1跨跨中	<b>3.893</b>	0.014 3	1跨跨中
		1号墩顶	<b>3.740</b>		
		2跨跨中	1.301	-0.041 2	
		2号墩顶	2.118		
		3跨跨中	0.947	0.043 6	

注:黑体数字为控制断面应力。



(a) 失效宽度10 cm (b) 失效宽度25 cm (c) 失效宽度50 cm

图5 不同失效宽度的模型

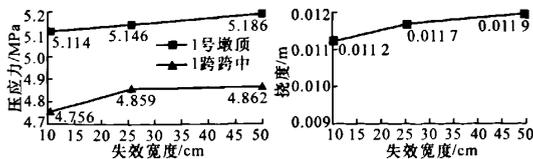


图6 不同失效宽度对压应力的影响

图7 不同失效宽度对挠度的影响

从表1的计算数据以及图6、图7可看出:①单元的失效宽度对最后计算结果的影响不是很大,以

失效宽度10 cm和50 cm的结果为例,两者压应力的计算结果相差不超过3%,这在实际工程结构中是允许的;②从失效宽度10 cm到25 cm过程中,应力和挠度的变化要比从失效宽度25 cm到50 cm过程快,这表明,应该存在一个临界点,在这个点时,计算结果的误差与单元失效宽度的比值最小。

### 4.3 实桥开裂结果的分析

该桥建成通车使用了一段时间后,在箱梁的不同部位出现了裂缝。本文主要针对开裂比较严重的第二联桥的顶、底板以及腹板正裂缝的调查记录,建立裂缝统计参数如表2所示(其中L为跨径)。

表2 裂缝统计参数

开裂位置	裂缝数量/条	平均间距/cm	平均高度/cm
第2跨L/8处	1		200
第2跨L/4处	4	50	28
第2跨L/4处	1		195
第2跨3L/4处	6	40	26

根据表2,在前面建立的设计状态有限元模型上,采用“挖孔”的方式模拟统计意义下的平均裂缝,得到开裂状态有限元模型(图8)。将公路I级荷载按图3的加载方式,分级加载计算,计算结果如表1所示。



图8 开裂后的甘洵河大桥模型

从表1结果可以看出,该桥开裂后全桥压应力控制截面发生了转移现象(从1号墩顶截面转移至1跨跨中截面)。这种变化趋势和多跨连续梁超静定结构的内力与结构刚度成正比原理相符。以开裂后全桥的控制截面(1跨跨中截面)为标准,对比开裂前后该截面的应力状态,可以得出,现有开裂结构的承载力仅为原有设计状态的80%。

## 5 结语

(1) 在利用分散实体单元模拟实际正裂缝时,可以在原有结构已经划分好的单元上采取“挖孔”的方式形成。

(2) “挖孔”形成裂缝时,“孔”的宽度对最终计

算结果有影响,但影响并不很大,一般在工程误差允许范围内,故在建模时可根据开裂状况以及电脑资源等实际状况,尽量选取小的失效宽度。

(3) 采用本文方法对甘洵河特大桥开裂状态进行分析,在只考虑实际结构中正裂缝的影响时,现有开裂箱梁结构的承载能力仅为原设计状态的 80%。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 李建峰,黄永刚. 钢筋混凝土梁裂缝原因及对策[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):71-73.  
LI Jian-feng, HUANG Yong-gang. Reasons and countermeasures of cracks in steel reinforced concrete beam[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 71-73.
- [2] 崔 军. 混凝土结构性能评估的损伤模型[D]. 西安:西安公路交通大学,1999.
- [3] Razaqpur A G, Nofal M, Mirza M S. Nonlinear analysis of prestressed concrete box girder bridges under flexure[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1989, 16(6): 845-853.
- [4] 周世军,朱 晔. 钢筋混凝土箱梁的非线性有限元分析及模型试验研究[J]. 土木工程学报,1996,29(4): 21-30.  
ZHOU Shi-jun, ZHU Xi. Nonlinear finite element analysis and model tests of reinforced concrete box

girders[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(4): 21-30.

- [5] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [6] Fukumoto Y, Nishida S. Ultimate load behavior of curved I-beams[J]. ASCE J Eng Mech Div, 1981, 107(2): 367-385.
- [7] 陈惠发, A F 萨里普. 混凝土和土的本构方程[M]. 余天庆,译. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [8] 彭大文,林志平,邓丽琼,等. 整体式桥台的曲线箱梁剪滞效应研究[J]. 公路,2006(12): 9-14.  
PENG Da-wen, LIN Zhi-ping, DENG Li-qiong, et al. A study on shear lag effect for integral abutment and curved box girders[J]. Highway, 2006(12): 9-14.
- [9] 王钧利,贺拴海. 高墩大跨径弯桥在悬臂施工阶段刚结构的非线性稳定分析[J]. 交通运输工程学报,2006,6(2): 30-34.  
WANG Jun-li, HE Shuan-hai. Nonlinear stability analysis of long-span curve bridge with high piers during cantilever construction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 30-34.
- [10] 方 志,李红芳,彭 波. 体外 CFRP 预应力钢筋混凝土梁的受力性能[J]. 中国公路学报,2008,21(3): 40-47.  
FANG Zhi, LI Hong-fang, FENG Bo. Mechanical behaviors of concrete beam of external prestressed CFRP tendons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 40-47.

(上接第 44 页)

角 3 个方向变换的缺陷,提高了路基检测成像分析的精度和准确度,更容易测出路基中的脱空和裂缝。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 赵茂才,刘德海. 探地雷达在公路工程无损检测中的试验研究[J]. 辽宁交通科技,2005(7): 1-3.  
ZHAO Mao-cai, LIU De-hai. Experiment research on the ground penetrating radar in non-destructive testing of highway engineering[J]. Liaoning Communication Science and Technology, 2005(7): 1-3.
- [2] 潘 欣,刘国栋,付 军. 探地雷达在公路路基检测中的应用[J]. 交通科技,2006(2): 51-53.  
PAN Xin, LIU Guo-dong, FU Jun. Application of ground penetrating radar in subgrade inspection[J]. Transportation Science & Technology, 2006(2): 51-53.
- [3] 邹海林,宁书年,林 捷. 小波理论在探地雷达信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展,2004,19(2): 268-275.  
ZOU Hai-lin, NING Shu-nian, LIN Jie. Application of wavelet theory in ground penetrating radar signal processing[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2):

268-275.

- [4] 肖艳军,李建勋. 基于小波变换的信号滤波在探地雷达中的应用[J]. 电波科学学报,2006,21(1): 140-145, 149.  
XIAO Yan-jun, LI Jian-xun. Signal filtering based on wavelet transform and its application in ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of radio Science, 2006, 21(1): 140-145, 149.
- [5] 王晋国,宁宇蓉,田 丰,等. 基于相干数据体的裂隙检测方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(1): 107-110.  
WANG Jin-guo, NING Yu-rong, TIAN Feng, et al. Cranny detection methods based on coherence of data cube[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 107-110.
- [6] Kingsbury N G. Image processing with complex wavelets[M]. London: Phil Trans Royal Society, 1999.
- [7] 唐良瑞,蔡安妮,孙景鳌. 二元树复小波变换及其在图象方向滤波中的应用[J]. 中国图象图形学报,2003,8(4): 434-440.  
TANG Liang-ru, CAI An-ni, SUN Jing-ao. Dual-tree complex wavelet transform and it's application to directional filter of image[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(4): 434-440.