

文章编号:1671-8879(2019)01-0061-09

基于钢束应力测试的预应力混凝土 箱梁承载力评估方法

赵 煜,洪路加,周勇军

(长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为了解决在役开裂损伤预应力混凝土箱梁桥安全性能的量化评估问题,在局部预应力钢束有效预应力测试的基础上,开展开裂损伤预应力混凝土箱梁桥承载力评估方法研究。首先,基于参数识别与修正思想,将预应力瞬时损失中的摩阻损失和反摩阻损失值用摩阻损失相关参数表示,提出一种基于表层钢束应力推定内层钢束应力的方法,解决预应力混凝土桥梁钢束沿程实际应力分布的量化表达问题。其次,考虑截面受拉区混凝土抗拉强度影响,推导考虑受拉区混凝土开裂影响的截面分析迭代公式,提出迭代求解方法和步骤。最后,开展 3 片实梁足尺模型试验,采用预应力钢索张力测试仪对开裂损伤的试验梁跨中截面表层钢束进行了应力测试,并将提出的方法应用于钢束有效应力预测,得到了跨中截面所有钢束的应力推定值。进行了桥梁极限承载力试验,得到全过程加载下的结构受力与变形实测值及破坏模式,并将理论算法与试验测试结果进行对比分析。研究表明:各级荷载下的试验梁应变理论计算值与试验测试值具有较好的一致性,提出的钢束应力预测方法和截面分析方法能准确反映开裂损伤预应力混凝土箱梁的力学特征,可用于开裂损伤的预应力混凝土箱梁桥运营期间承载能力的量化评估。

关键词:桥梁工程;预应力混凝土箱梁;钢束有效应力;预测;截面分析;承载力评估

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

Bearing capacity assessment method for PC box girder by testing stress of tendon

ZHAO Yu, HONG Lu-jia, ZHOU Yong-jun

(Key Laboratory of Bridge Detection Reinforcement Technology of Ministry of Communication,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to perform quantitative assessment on the safety performance of PC box-girder bridges with cracks during service period, the evaluation method for the bearing capacity of a damaged PC box-girder bridge was carried out, based on the partial effective stress test of a tendon in PC box-girder bridge. Firstly, based on the principle of parameter identification and the correction method, the variation in transient prestress loss, including frictional loss and anti-friction loss, was represented by the friction loss parameters, and a new method was proposed to

收稿日期:2018-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51678061);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821173401);

山西省交通建设科技项目(14-2-08,15-2-01)

作者简介:赵 煜(1974-),男,陕西西安人,教授,工学博士,E-mail:zhaoyu@chd.edu.cn。

predict the effective stress on the inner tendon from the outer tendon. Then, an equilibrium iteration algorithm and a procedure for considering the tensile strength of concrete in the cross section were developed. Finally, a full-scale experiment was carried out for three girders. The stress on the outer tendon at the mid-span section of the girder was measured using a special stress detector. Using the proposed method, the stress of the inner tendon at the mid-span section was predicted. The measured load, deformation, and the failure mode of the structure during the entire loading process was obtained. A comparison was made between the theoretical results proposed in this paper and the experimental results. The results show that calculated strain of the test girder is in good agreement with the experimental results, which illustrate that the stress prediction method of the tendon and equilibrium iteration method can accurately reflect the mechanical characteristics of a damaged PC box girder. It can be used to quantitatively evaluate the bearing capacity of box-girder bridges with damage during service period. 3 tabs, 9 figs, 22 refs.

Key words: bridge engineering; prestressed concrete box-girder; effective stress of tendon; prediction; cross-section analysis; safety assessment

0 引言

预应力混凝土箱梁桥刚度大、整体性好、跨越能力强、施工方便、经济性好,在 300 m 以下桥梁中极具竞争力,已成为该跨径范围的主力桥型方案。20 世纪 90 年代以来,中国修建了大量的预应力混凝土箱梁桥,最大跨径达 301 m。随着桥梁运营年限的增加,受自然环境、材料劣化、超载等因素影响,部分桥梁出现了主梁开裂、跨中下挠等病害,对桥梁的安全构成威胁^[1-3],急需采用有效方法进行承载能力和安全性量化评估,以保证桥梁的运营安全。

在役桥梁承载力评价受多重因素影响,如材料退化、构件损伤、边界条件变化等,其服役期间的技术状况评价难度远大于新建桥梁。多年来,国内外学者和工程技术人员开展了大量在役桥梁评估方法研究,取得了一系列的研究成果。目前,国内外预应力混凝土桥梁技术状况评价主要有 7 种方法:打分排序法、分析检算法、荷载试验法、专家评定法、可靠度法、层次分析法、模糊综合评价法^[4-6]。此外,国内外学者还提出了灰色理论法、神经网络法等^[7-8],在桥梁安全性评价方面均有所应用。上述研究方法中,荷载试验法通过施加相当于设计(目标)荷载的试验荷载直接作用于桥梁结构,可直接判断桥梁的承载力是否符合要求,是目前唯一可准确判定桥梁承载力的方法,但是荷载试验费时费力,试验费用较高。其他方法均为间接评估法,如打分排序法基于外观检测结果,只能实现桥梁技术状况的定性评价,不能评定桥梁承载力;基于神经网络的方法前期需

针对不同梁桥类型建立大量的评估模型库,暂不适用于实际工程应用;分析检算法、专家评定法等需要准确获得桥梁损伤参数,以反映在役桥梁的损伤特征,通过建立桥梁结构损伤计算模型或评估模型,实现桥梁实际承载力的量化评价。因此,损伤特征的确定就显得尤为重要。

从引入结构损伤模型的角度出发,预应力混凝土桥梁的损伤特征主要体现在两方面:一是结构外观损伤,如主要受力裂缝、结构变形等;二是结构永存预应力程度,如混凝土永存应力、预应力钢束有效应力等。赵煜等基于在役桥梁表面主要受力裂缝的统计特征,提出一种基于外观损伤特征的预应力混凝土箱梁桥刚度和承载力评价方法^[9-10]。该方法以裂缝调查统计结果为依据,引入弯曲段和剪弯段损伤计算模型,采用数值分析方法,实现在役开裂损伤的预应力混凝土桥梁承载力和刚度的量化评价,为该类桥梁使用阶段安全性评价提供了一种有效的量化评价方法^[11-13]。对于外观损伤不明显,但结构体内预应力可能存在缺陷的状况,郭琦等则基于局局限点钢束应力测试,结合沿程预应力损失计算算法,提出了预应力桥梁承载力量化评价方法。该方法的核心是预应力检测方法。目前,预应力检测方法可分为基于动力学的结构预应力测试方法^[14-17]和基于静力学的钢束有效张力测试方法^[18-22]。基于动力学原理的方法主要采用试验方法,寻找结构有效预应力和自振频率的关系,从而建立有效预应力和刚度之间的内在关系,但从研究成果来看,结论的离散性较大,尚不能达成一致意见。基于静力学

的方法^[14-15]通过建立钢束横向张力和有效预应力之间的关系,得到有限点钢束绝对应力,但在目标钢束数量较多时,由于可检钢束数量较少,且为表层钢束,需要建立表层钢束和内层钢束之间的关系,否则其计算方法和步骤过于繁琐,不便于应用。针对以上问题,本文以体内预应力为目标对象,采用参数识别与修正的思想,提出一种基于有限点钢束应力测试的多钢束预应力张力预测方法,并以文献[22]为基础,推导了考虑混凝土抗拉强度的开裂后截面非线性迭代分析算法,通过提出承载力折减系数的方式,实现了基于有限点体内钢束应力测试的在役预应力混凝土桥梁承载力量化评价。结合依托工程桥梁拆除过程中的 3 片 30 m 损伤预应力混凝土箱梁足尺模型试验,验证了本文方法的可靠性。

1 钢束有效预应力预测方法

对于大部分预应力混凝土箱梁,其体内的预应力钢束存在分层布设情况,使位于梁体内的深层钢束不具备应力测试条件,只能由表层钢束的预应力测试值对其进行预测。本文基于参数识别与修正的思想,提出一种基于多钢束应力测试的截面内钢束应力预测方法。

1.1 摩阻损失和反摩阻损失补偿值的近似表达

预应力瞬时损失主要由摩阻损失 σ_{11} 和反摩阻损失 σ_{12} 组成,这两项损失与张拉控制应力 σ_{con} 、摩擦因数 μ 、管道偏差系数 K 、锚固回缩长度 Δl 存在较大关系。

摩阻损失和反摩阻损失的变化量 $\Delta\sigma_{11}$ 、 $\Delta\sigma_{12}$ 可由摩阻损失相关参数的变化量 $\Delta\mu$ 、 ΔK 、 $\Delta(\Delta l)$ 、 $\Delta\sigma_{\text{con}}$ 近似表达

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{11} \approx \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial\sigma_{\text{con}}} \Delta\sigma_{\text{con}} + \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial\mu} \Delta\mu + \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial K} \Delta K \\ \Delta\sigma_{12} \approx \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial\sigma_{\text{con}}} \Delta\sigma_{\text{con}} + \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial\Delta l} \Delta(\Delta l) + \\ \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial\mu} \Delta\mu + \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial K} \Delta K \end{cases} \quad (1)$$

1.2 摩阻损失相关参数的识别与修正

截面内钢束应力预测有以下基本假定。

假定 1: 对于同一桥梁的同一构件,在同一截面内的钢束一般采用相同的钢束类型以及相同的张拉工艺,一般也由同一施工队伍完成,可认为其施工质量具有同一性,即同一截面内的钢束具有相同的摩阻损失相关参数,其值在规范值附近。

假定 2: 根据钢束有效预应力简化分析推论^[13],

由混凝土弹性压缩、收缩徐变、钢束松弛引起的预应力损失可根据规范计算,但计算时需考虑摩阻损失和反摩阻损失补偿值的影响。

将预应力理论值 σ_t 与实测值 σ_r 之差通过摩阻损失相关参数的变化量表示,对截面内任意 1 根钢束,有

$$\sigma_t - \sigma_r = \left[\frac{\partial\sigma_{11}}{\partial\sigma_{\text{con}}} + \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial\sigma_{\text{con}}} - 1, \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial\Delta l}, \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial\mu} + \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial\mu}, \right. \\ \left. \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial K} + \frac{\partial\sigma_{12}}{\partial K} \right] \begin{bmatrix} \Delta\sigma_{\text{con}} & \Delta(\Delta l) & \Delta\mu & \Delta K \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

对截面内 n' 根测试钢束进行联立,有

$$\mathbf{H} = [\mathbf{C}, \mathbf{L}, \mathbf{U}, \mathbf{K}] \mathbf{X} \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = [\sigma_t^1 - \sigma_r^1 \quad \cdots \quad \sigma_t^{n'} - \sigma_r^{n'}]^T$$

$$\mathbf{C} = \left[\frac{\partial\sigma_{11}^1}{\partial\sigma_{\text{con}}} + \frac{\partial\sigma_{12}^1}{\partial\sigma_{\text{con}}} - 1 \quad \cdots \quad \frac{\partial\sigma_{11}^{n'}}{\partial\sigma_{\text{con}}} + \frac{\partial\sigma_{12}^{n'}}{\partial\sigma_{\text{con}}} - 1 \right]^T$$

$$\mathbf{L} = \left[\frac{\partial\sigma_{12}^1}{\partial\Delta l} \quad \cdots \quad \frac{\partial\sigma_{12}^{n'}}{\partial\Delta l} \right]^T$$

$$\mathbf{U} = \left[\frac{\partial\sigma_{11}^1}{\partial\mu} + \frac{\partial\sigma_{12}^1}{\partial\mu} \quad \cdots \quad \frac{\partial\sigma_{11}^{n'}}{\partial\mu} + \frac{\partial\sigma_{12}^{n'}}{\partial\mu} \right]^T$$

$$\mathbf{K} = \left[\frac{\partial\sigma_{11}^1}{\partial K} + \frac{\partial\sigma_{12}^1}{\partial K} \quad \cdots \quad \frac{\partial\sigma_{11}^{n'}}{\partial K} + \frac{\partial\sigma_{12}^{n'}}{\partial K} \right]^T$$

$$\mathbf{X} = [\Delta\sigma_{\text{con}}, \Delta(\Delta l), \Delta\mu, \Delta K]^T$$

式中: σ_t^1 、 σ_r^1 、 σ_{11}^1 、 σ_{12}^1 分别为 1 根钢束的 σ_t 、 σ_r 、 σ_{11} 、 σ_{12} ; $\sigma_t^{n'}$ 、 $\sigma_r^{n'}$ 、 $\sigma_{11}^{n'}$ 、 $\sigma_{12}^{n'}$ 分别为 n' 根钢束的 σ_t 、 σ_r 、 σ_{11} 、 σ_{12} 。

式(3)可用最小二乘法求解,有

$$\mathbf{X} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{H} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F} = [\mathbf{C}, \mathbf{L}, \mathbf{U}, \mathbf{K}]$

1.3 分布式参数识别与修正

实桥检测通常在野外进行,受到的随机干扰因素较大,用式(4)进行摩阻损失相关参数的识别与修正时可能得不到理想结果,这时可对以上参数进行分步识别与修正,方法步骤如下。

(1) 对张拉控制应力进行识别, $\Delta\sigma_{\text{con}}$ 按式(5)计算

$$\Delta\sigma_{\text{con}} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{H} \quad (5)$$

(2) 将 $\sigma_{\text{con}} + \Delta\sigma_{\text{con}}$ 作为张拉控制应力,对锚固回缩长度 Δl 进行参数识别, $\Delta(\Delta l)$ 按式(6)计算

$$\Delta(\Delta l) = (\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{H} \quad (6)$$

(3) 将 $\Delta l + \Delta(\Delta l)$ 作为锚固回缩长度,对摩擦因数 μ 进行参数识别, $\Delta\mu$ 按式(7)计算

$$\Delta\mu = (\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{H} \quad (7)$$

(4) 将 $\mu + \Delta\mu$ 作为摩擦因数,对管道偏差系数进行参数识别, ΔK 按式(8)计算

$$\Delta K = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{H} \quad (8)$$

2 截面分析方法

本文在文献[22]的基础上重新推导了考虑混凝土抗拉强度的截面分析方法。

2.1 基本假定

(1)平截面假定。

(2)受压混凝土采用 CEP-FIP(欧洲-国际合作委员会)标准建议的模型,即二次抛物线加水平直线,如式(9)所示

$$\sigma_c(\epsilon) = \begin{cases} \sigma_0 \left[2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \sigma_0 & \epsilon_0 < \epsilon < \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ϵ_0 为混凝土屈服应变, $\epsilon_0 = 0.002$; ϵ_{cu} 为混凝土极限应变, $\epsilon_{cu} = 0.0035$; σ_0 为峰值应力; σ_c 为混凝土压应力; ϵ 为应变。

(3)受拉混凝土的应力-应变关系为曲线,本文将其简化为直线,弹性模量与初始切线模量相同。

(4)普通钢筋为理想弹塑性材料,即斜直线加水平直线,如式(10)所示

$$\sigma_s(\epsilon) = \begin{cases} E_s \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_y \\ \sigma_y & \epsilon > \epsilon_y \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_s 为普通钢筋割线模量; ϵ_y 为钢筋屈服应变; σ_s 为普通钢筋应力。

(5)预应力钢筋为理想弹性材料。

(6)钢筋和混凝土之间无相对滑移。

(7)对截面分层处理,截面平衡时,第 k 层混凝土割线模量为 E_{ck} ,第 j 根普通钢筋的割线模量为 E_{sj} ,即

$$\begin{cases} E_{ck} = \sigma_c(\epsilon_k) / \epsilon_k \\ E_{sj} = \sigma_s(\epsilon_{sj}) / \epsilon_{sj} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ϵ_k 为第 k 层混凝土中心的应变; ϵ_{sj} 为第 j 根普通钢筋的应变; $\sigma_c(\epsilon_k)$ 为第 k 层混凝土中心的应力; $\sigma_s(\epsilon_{sj})$ 为第 j 根普通钢筋的应力。

2.2 迭代方程的建立

截面分析如图 1 所示:预应力混凝土梁全截面高度为 h ;截面开裂后,截面顶缘与开裂截面底缘 oo 轴的距离为 x , oo 轴以上为未开裂部分, oo 轴以下为开裂部分。开裂截面底缘混凝土的拉应变为极限拉应变 ϵ_t ,开裂截面形心轴距截面顶缘的距离为 $y_{co'}$,截面配有 n' 根预应力钢筋和 m 根普通钢筋。第 i 根预应力钢筋面积为 A_{pi} ,弹性模量为 E_p ,距截面顶缘距离为 y_{pi} ,截面处于平衡状态时应力为 σ_{pi} ;第 j 根普通钢筋面积为 A_{sj} ,距截面顶缘距离为 y_{sj} ,截面处于平衡状态时应力为 σ_{sj} ; ϵ_{cu} 为受压混凝土边缘应变, ϵ_{ct} 为受拉区边缘应变; E_c 为混凝土割线

模量。

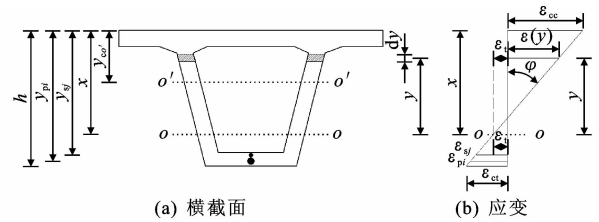


图 1 截面分析

Fig. 1 Section analysis

对受压区高度 x 范围内的截面进行分层,共分为 P 层,第 k 层截面宽度为 b_k ,截面高度为 h_k ,其上缘到整个截面顶缘距离为 y_{uk} ,截面平衡时曲率为 φ 。

(1)几何方程

以未开裂截面底部(图 1 中 oo 轴)向上为正向建立坐标系,截面处于平衡状态后,相对 oo 轴距离 y 处的应变为

$$\epsilon(y) = -\varphi y + \epsilon_t \quad (12)$$

式中: $\epsilon(\cdot)$ 为应变。

(2)物理方程

将钢束预应力 σ_{pi} 分为两部分:一部分为截面未发生偏转时的预应力,即预应力钢筋重心处混凝土压应力为 0 时的钢束预应力 σ_{pi1} ;另一部分为截面经偏转平衡后,预应力随着混凝土共同变形的预应力增量 σ_{pi2} ,有

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pi1} + \sigma_{pi2} \quad (13)$$

截面经偏转达到平衡后,第 k 层混凝土以及普通钢筋、预应力钢筋的应力应变关系可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{ck}(y) = E_{ck} \epsilon(y) \\ \sigma_{pi2} = E_p \epsilon(x - y_{pi}) \\ \sigma_{sj} = E_{sj} \epsilon(x - y_{sj}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\sigma_{ck}(\cdot)$ 为第 k 层混凝土压应力。

(3)平衡方程

N 、 M 分别为外力对开裂截面形心轴(图 1 中 $o'o'$)产生的轴力和弯矩,当截面平衡时,由内外力平衡得

$$\begin{cases} N = \sum_{k=1}^P \int_{x-y_{uk}}^{x-y_{uk}-h_k} b_k \sigma_{ck}(y) dy + \sum_{i=1}^{n'} A_{pi} \sigma_{pi} + \sum_{j=1}^m A_{sj} \sigma_{sj} \\ M = \sum_{k=1}^P \int_{x-y_{uk}}^{x-y_{uk}-h_k} b_k \sigma_{ck}(x - y_{co'} - y) dy + \sum_{i=1}^{n'} A_{pi} \sigma_{pi} (y_{pi} - y_{co'}) + \sum_{j=1}^m A_{sj} \sigma_{sj} (y_{sj} - y_{co'}) \end{cases} \quad (15)$$

将式(12)~式(14)代入式(15)积分化简后可得

$$\begin{cases} N - N_p - N_t = E_c A_{cr} (y_{co'} - x) \varphi \\ M - N_p (y_p - y_{co'}) - M_t = E_c I_{cr} \varphi \end{cases} \quad (16)$$

$$y_{co'} = \left\{ \sum_{k=1}^P b_k \alpha_{E_{ck}} \left[\frac{(y_{uk} + h_k)^2 - y_{uk}^2}{2} \right] + \alpha_{Ep} \sum_{i=1}^{n'} A_{pi} y_{pi} + \sum_{j=1}^m \alpha_{E_{sj}} A_{sj} y_{sj} \right\} / A_{cr} \quad (17)$$

$$A_{cr} = \sum_{k=1}^P \alpha_{E_{ck}} b_k h_k + \alpha_{Ep} \sum_{i=1}^{n'} A_{pi} + \sum_{j=1}^m \alpha_{E_{sj}} A_{sj} \quad (18)$$

$$N_t = \epsilon_t E_c \left(\sum_{k=1}^P \alpha_{E_{ck}} b_k h_k + \sum_{i=1}^{n'} A_{pi} \alpha_{Ep} + \sum_{j=1}^m A_{sj} \alpha_{E_{sj}} \right) \quad (19)$$

$$M_t = \epsilon_t E_c \left\{ \sum_{k=1}^P \left[b_k \alpha_{E_{ck}} \left((x - y_{co'}) h_k - \frac{1}{2} (x - y_{uk})^2 + \frac{1}{2} (x - y_{uk} - h_k)^2 \right) \right] + \sum_{i=1}^{n'} A_{pi} \alpha_{Ep} (y_{pi} - y_{co'}) + \sum_{j=1}^m A_{sj} \alpha_{E_{sj}} (y_{sj} - y_{co'}) \right\} \quad (20)$$

$$I_{cr} = \sum_{k=1}^P b_k \alpha_{E_{ck}} \left[\frac{1}{3} (x - y_{uk})^3 - \frac{1}{2} (x - y_{co'}) (x - y_{uk})^2 - \frac{1}{3} (x - y_{uk} - h_k)^3 + \frac{1}{2} (x - y_{co'}) \cdot \right. \quad (21)$$

$$\left. (x - y_{uk} - h_k)^2 \right] + \sum_{i=1}^{n'} \alpha_{Ep} A_{pi} (y_{pi} - x) (y_{pi} - y_{co'}) + \sum_{j=1}^m \alpha_{E_{sj}} A_{sj} (y_{sj} - x) (y_{sj} - y_{co'})$$

$$N_p = \sum_{i=1}^{n'} A_{pi} \sigma_{pi1}, y_p = \frac{\sum_{i=1}^{n'} A_{pi} \sigma_{pi1} y_{pi}}{\sum_{i=1}^{n'} A_{pi} \sigma_{pi1}}, \alpha_{Ep} = \frac{E_p}{E_c}, \alpha_{E_{sj}} = \frac{E_{sj}}{E_c}, \alpha_{E_{ck}} = \frac{E_{ck}}{E_c}$$

2.3 迭代格式

截面分析迭代算法的变量为未开裂截面高度 x 、截面平衡时每层混凝土的割线模量 E_{ck} 、第 j 根普通钢筋的割线模量 E_{sj} 。设 x 的初值 $x_0 = h/2$, E_{ck} 的初值 $E_{ck}^0 = E_c$, E_{sj} 的初值 $E_{sj}^0 = E_s$, 迭代步骤如下。

(1) 由式(17)~式(21)计算初始截面特性参数 $A_{cr}^0, y_{co'}^0, I_{cr}^0, M_t^0, N_t^0$ 。

(2) 由式(16)计算第 1 次迭代 φ^1, x^1 值。

(3) 按如下步骤迭代计算。

① 用第 n 次迭代的 φ^n, x^n , 计算每层混凝土和普通钢筋的割线模量

$$\begin{cases} \epsilon_{ck}^n = -\varphi^n (x^n - y_{uk} + h_k/2) + \epsilon_t \\ E_{ck}^n = \frac{\sigma_c(\epsilon_{ck}^n)}{\epsilon_{ck}^n} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \epsilon_{sj}^n = -\varphi^n (x^n - y_{sj}) + \epsilon_t \\ E_{sj}^n = \frac{\sigma_s(\epsilon_{sj}^n)}{\epsilon_{sj}^n} \end{cases} \quad (23)$$

② 重新计算截面特性参数 $A_{cr}^n, y_{co'}^n, I_{cr}^n, M_t^n, N_t^n$, 由式(16)计算 φ^{n+1}, x^{n+1} 。

③ 判断误差是否满足一定的限值, 即 $x^{n+1} - x^n < x_{error}$ 。若不满足, 回到①继续迭代计算; 若满足, 得到 $x = x^{n+1}, \varphi = \varphi^{n+1}$, 计算结束。其中限值 x_{error} 可取 h 的 0.1%, 使计算在具有较高精度的同时保证收敛速度, 以满足工程需要。迭代计算流程

如图 2 所示。

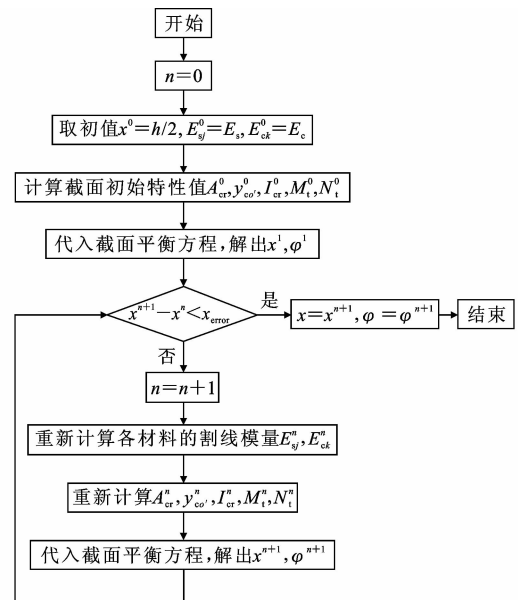


图 2 迭代计算流程

Fig. 2 Iterative computation flow

3 PC 箱梁加载试验

3.1 试验概况

本次试验依托青兰(青岛—兰州)高速公路山西境内黎城—长治段拓宽改造工程。依托工程由于开裂损伤严重, 改扩建时确定采用拆除重建方案, 如图

3 所示。

表 1 预应力钢绞线数量

Tab. 1 Number of prestressing tendon quantity

试验梁 编号	钢绞线数量($f \times g$)		
	N1	N2	N3
Z1、Z2 梁	2×5	2×5	2×4
B1 梁	2×5	2×5	3×5

注： f 为孔道数； g 为每个孔道内钢绞线股数。

(2)试验梁加载试验。在现场设置地锚并采用四分区加载方式,形成跨中附近 8 m 纯弯段。加载过程中采集跨中截面顶缘混凝土压应变。加载系统布置及试验过程如图 5~图 8 所示。



图 3 试验箱梁

Fig. 3 Test box girder

3 片试验梁均取自依托工程,标准跨径 30 m,其中 Z1、Z2 梁为中跨中梁,B1 梁为边跨中梁。试验梁均采用 C50 混凝土、低松弛高强度预应力钢绞线,单根钢绞线直径为 15.24 mm,钢绞线面积 A 为 140 mm^2 。跨中截面几何尺寸及钢束 N1、N2、N3 的布置如图 4 所示。预应力钢绞线数量如表 1 所示。



图 5 钢束应力测试

Fig. 5 Stress test of prestressing tendon

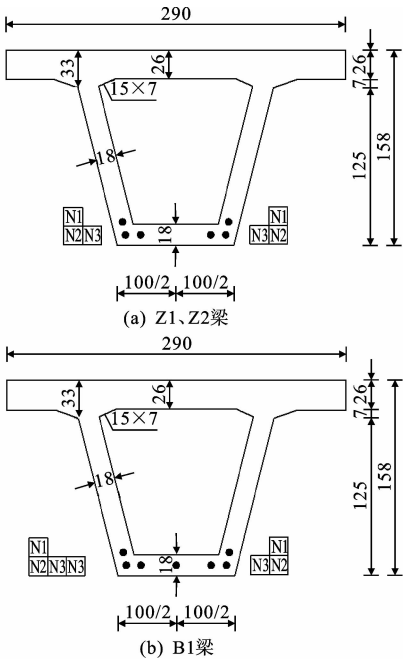


图 4 试验梁跨中横截面示意

Fig. 4 Mid-span cross sections of test girders

3.2 试验内容

(1)钢束应力测试及标定。采用自主研发的预应力钢索张力测试仪(专利号:CN200710018562.9)对试验梁跨中截面表层钢束进行应力测试,得到钢束的有效张力,如图 5 所示。



图 6 加载装置

Fig. 6 Loading device

4 试验分析与承载力评定

4.1 钢束应力预测

根据 3 片试验梁跨中截面表层测试钢束预应力实测值,采用本文方法对深层钢束预应力进行预测,计算结果如表 2 所示。

4.2 跨中截面压应变对比

以跨中截面的钢束预应力预测值为基础,进行截面分析迭代计算,得到试验荷载下的跨中截面顶缘压应变,并与试验实测压应变进行对比,结果见

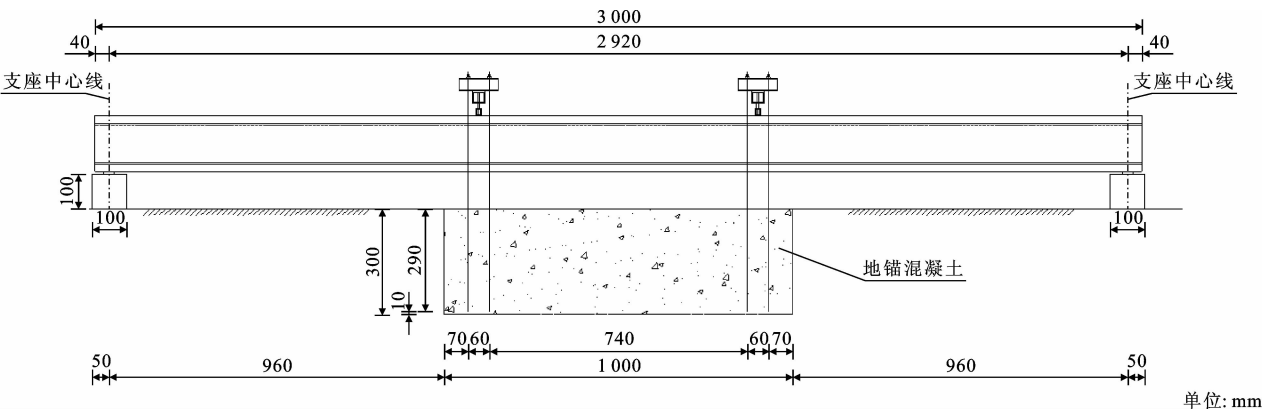


图 7 加载装置布设截面
Fig. 7 Section of loading device layout

表 2 Z1、Z2、B1 梁有效预应力

Tab. 2 Effective prestress of Z1、Z2、B1 girder MPa

钢束			理论值	实测值	预测值
Z1 梁	测试 钢束	左 N2	1 094	1 174	1 086
		左 N3	1 084	1 075	1 068
		右 N3	1 084	1 009	1 068
		右 N2	1 094	1 040	1 086
	预测 钢束	左 N1	1 063		1 051
		右 N1	1 063		1 051
Z2 梁	测试 钢束	左 N3	1 084	959	1 020
		右 N3	1 084	1 027	1 020
		右 N2	1 094	1 079	1 039
	预测 钢束	左 N2	1 094		1 039
		左 N1	1 063		1 003
		右 N1	1 063		1 003
B1 梁	测试 钢束	左 N2	1 094	948	957
		左 N3	1 084	884	964
		右 N3	1 084	1 081	964
		右 N2	1 094	942	957
	预测 钢束	左 N1	1 054		926
		右 N1	1 054		926
		中 N3	1 084		964



图 8 箱梁加载
Fig. 8 Loading box girder

图 9。

由图 9 可见:在开裂荷载(Z1 梁约 300 kN,Z2 梁约 200 kN,B1 梁约 400 kN)前,由于试验梁截面刚度基本不变,应变实测值基本呈线性增加,且增加较为缓慢;在开裂荷载后,由于试验梁未开裂截面高度减小,截面刚度降低,应变实测值增长速度总体呈加快趋势。应变理论值也能较准确地反映这一变化规律,与实测值也比较接近。

4.3 承载力评定

对于有损结构,其承载力定义为达到对应无损结构控制截面在设计荷载 P_0 下相同的应力(应变)状态所需的荷载值 P_1 。将两者的比值定义为承载力折减系数 $C^{[22]}$,即

$$C=\frac{P_1}{P_0}\times 100\%$$
 (24)

对本次试验梁,取其开裂荷载为设计荷载,计算在预应力衰减后达到设计荷载下梁顶混凝土压应变所需的荷载值,并计算承载力折减系数,计算结果如表 3 所示。

5 结 语

(1)基于参数识别与修正的思想,提出一种截面内钢束应力预测方法,对 3 片开裂损伤的预应力混凝土箱形试验梁有效预应力进行了测试及预测。结果表明:3 片试验梁均存在不同程度的预应力衰减,对结构承载力产生较大影响。

(2)在文献[22]的基础上,本文考虑截面受拉区混凝土抗拉强度影响,重新推导了开裂预应力混凝土箱梁截面平衡公式,提出迭代求解方法和步骤。结合依托工程的模型试验对比分析结果表明,本文提出的钢束应力预测方法和截面分析方法能够较准

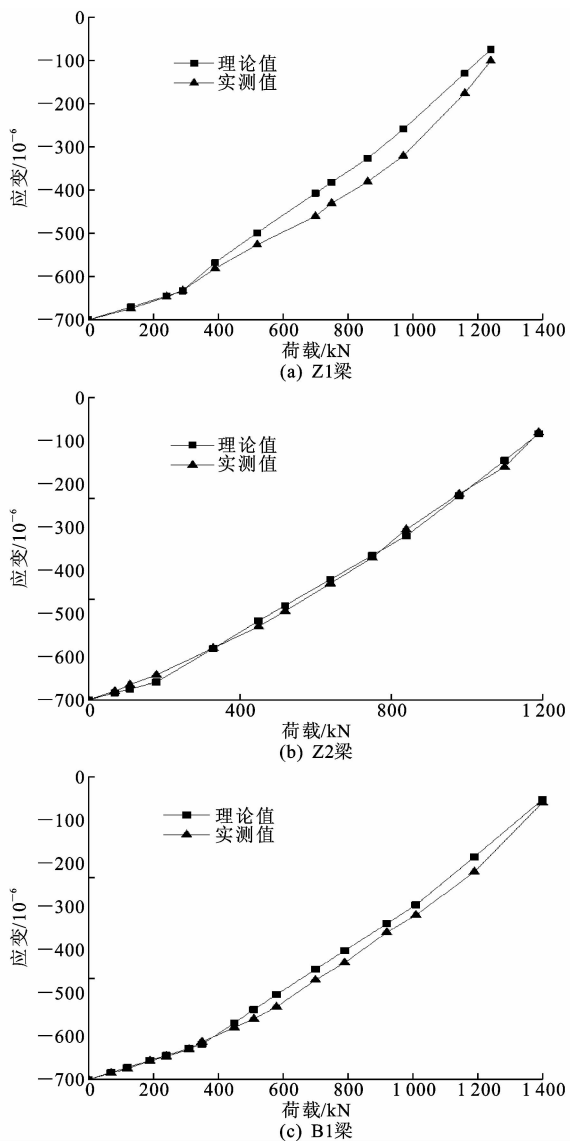


图9 三片梁的压应变对比

Fig.9 Strain comparisons of three girders

表3 三片梁的承载力折减系数

Tab.3 Reduction coefficients of bearing capacity of each beam

试验 梁编号	预应力 衰减/%	衰减前		衰减后	承载力 折减 系数/%
		开裂 荷载/kN	梁顶 应变/ 10^{-6}	对应荷载/ kN	
Z1	1.0	370	-192	360	99
Z2	5.5	370	-192	310	84
B1	11.8	560	-222	425	76

确地反映开裂损伤预应力混凝土梁的力学特征,可为基于钢束应力测试的预应力混凝土箱梁桥承载力评定提供参考。

(3)本文仅对简支试验梁进行了基于有限点钢束应力的结构承载力评价,当应用于其他开裂损伤的超静定桥梁结构时,由于开裂损伤造成刚度变异和内力重分配,需要进一步开展研究。

参考文献:

References:

[1] 吕志涛,潘钻峰.大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题[J]. 土木工程学报,2010,43(1):70-76.
LU Zhi-tao,PAN Zuan-feng. Issues in design of long-span prestressed concrete box girder bridges [J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(1):70-76.

[2] 俞先林,叶见曙,吴文清.大跨度预应力混凝土箱梁桥开裂病害[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(6):101-104.
YU Xian-lin, YE Jian-shu, WU Wen-qing. Cracking damage of long span prestressed concrete box girder bridges[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2011,43(6):101-104.

[3] 谢峻,王国亮,郑晓华.大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技,2007,24(1):47-50.
XIE Jun, WANG Guo-liang, ZHENG Xiao-hua. State of art of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(1):47-50.

[4] 贺拴海,赵祥模,马建,等.公路桥梁检测及评价技术综述[J]. 中国公路学报,2017,30(11):63-80.
HE Shuan-hai, ZHAO Xiang-mo, MA Jian, et al. Review of highway bridge inspection and condition assessment[J]. China Journal of Highway and Transport,2017,30(11):63-80.

[5] 王彬,徐秀丽,李雪红,等.基于自适应模糊推理和RBF网络的桥梁安全评估[J]. 中国安全科学学报,2017,27(5):164-168.
WANG Bin, XU Xiu-li, LI Xue-hong, et al. Safety assessment of bridge based on RBF neural network and adaptive fuzzy inference [J]. China Safety Science Journal,2017,27(5):164-168.

[6] 张一鸣,宋庭新,朱清波,等.基于四层评估模型的桥梁损伤安全评估方法[J]. 湖北工业大学学报,2016,31(5):30-35.
ZHANG Yi-ming, SONG Ting-xin, ZHU Qing-bo, et al. Bridge damage safety evaluation based on four-layer fuzzy comprehensive evaluation model with its application[J]. Journal of Hubei University of Technology,2016,31(5):30-35.

[7] 卜建清,王海云.PRC简支梁桥有效预应力识别的BP神经网络方法[J]. 振动与冲击,2011,30(12):154-159.
BU Jian-qing, WANG Hai-yun. Effective prestress

- identification for a simply-supported PRC beam bridge by BP neural network method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12): 154-159.
- [8] HASANCEBI O, DUMLUPINAR T. Detailed load rating analyses of bridge populations using nonlinear finite element models and artificial neural networks[J]. Computers & Structures, 2013, 128: 48-63.
- [9] 赵 煜,任 伟,李春风,等. 预应力混凝土简支箱梁裂缝损伤参数影响分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(2): 58-63.
- ZHAO Yu, REN Wei, LI Chun-feng, et al. Parameter influence analysis of existing simply-supported box girder bridge based on crack feature[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 58-63.
- [10] 赵 煜,贺拴海,李春风,等. 在役预应力混凝土箱梁开裂后承载力评估[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(9): 1271-1275.
- ZHAO Yu, HE Shuan-hai, LI Chun-feng, et al. Evaluating system of bearing capacity for existing cracked prestressed concrete box girder based on crack feature[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(9): 1271-1275.
- [11] 郭 琦,贺拴海. 大跨度 PC 桥梁有效预应力衰变行为监测与评估模型研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 61-67.
- GUO Qi, HE Shuan-hai. Research on monitoring and evaluating effective prestress decay behavior of long-span PC bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(5): 61-67.
- [12] 郭 琦,尹海军. 缺陷 PC 梁式桥刚度退化-预应力损失的耦合评估模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 75-81.
- GUO Qi, YIN Hai-jun. Coupling evaluation model of stiffness deterioration & prestress losses for deficit PC beam bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 75-81.
- [13] 郭 琦. 复杂预应力体系梁式结构有效预应力预测理论与方法研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- GUO Qi. Theory and methodology of predication on effective prestress for beam structures with complicated prestressing systems[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [14] XU J L, SUN Z. Prestress force identification based on forced vibration tests of eccentrically prestressed concrete beam[J]. Advanced Materials Research, 2012, 479: 733-738.
- [15] KIM B H, KIM S J, YEO K S, et al. Estimating effective prestress force on grouted tendon by impact responses[M]. New York: Dynamics of Civil Structures, 2011.
- [16] CHENG S Y, YAN D J, LI Y Z, et al. Experimental study on PC beams dynamic performance with the initial effective prestress[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 268: 749-752.
- [17] PARK J H, KIM J T, HONG D S, et al. Autonomous smart sensor nodes for global and local damage detection of prestressed concrete bridges based on accelerations and impedance measurements[J]. Smart Structures and Systems, 2010, 6(5/6): 711-730.
- [18] ZHAO Y M, LI H X, WANG X W. Estimation method for prestress loss of externally prestressed composite girder bridges[J]. Advanced Materials Research, 2014, 919: 547-550.
- [19] 周勇军,韩智强,赵 煜,等. 基于横张法有效预应力测试仪的计算方法[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2013, 36(2): 248-252.
- ZHOU Yong-jun, HAN Zhi-qiang, ZHAO Yu, et al. Computing method for effective pre-stress tester based on transverse tensioning method[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 36(2): 248-252.
- [20] 李世安,贺拴海,娄 诚,等. 基于横张增量法的 PC 梁桥现存应力测试与评估[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2012, 32(2): 70-73.
- LI Shi-an, HE Shuan-hai, LOU Cheng, et al. Detection and assessment on existing stress of PC girder bridge based on horizontal tension-increment method[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(2): 70-73.
- [21] 黄 颖,房贞政. 在役预应力混凝土简支梁现存预应力的有限元模拟研究[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2013, 41(6): 1110-1114.
- HUANG Ying, FANG Zhen-zheng. The finite element simulation analysis of the extant prestressed force of in-service prestress concrete simply-supported beam[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2013, 41(6): 1110-1114.
- [22] 赵 煜,周 博,贺拴海,等. 基于裂缝特征的 PC 简支梁损伤刚度评估方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(4): 39-44.
- ZHAO Yu, ZHOU Bo, HE Shuan-hai, et al. Damage stiffness assessment method based on fracture characteristics of PC simply-supported beam[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 39-44.