

基于动力性能的 PC 梁有效预应力预测

刘龄嘉,贺拴海,赵小星

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为了对在役混凝土桥梁结构有效预应力进行预测,采用后张法对不同截面形式、不同配束方式和不同材料特性的混凝土简支梁缩尺模型施加纵向预加力,测试其自振频率和振型。试验结果表明,预加力对简支梁振动基频的影响规律与配束方式有关,振动基频变化量值取决于截面形式、材料特性和预应力束偏心距。基于实测数据,回归出混凝土简支梁有效刚度与预加力之间的函数表达式,最终提出预测混凝土简支梁有效预应力的动力测试方法。

关键词:桥梁工程;简支梁;振动频率;有效预应力;后张法

中图分类号:U448.214

文献标志码:A

Effective prestress forecast of PC beam based on dynamic performance

LIU Ling-jia, HE Shuan-hai, ZHAO Xiao-xing

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to forecast the effective prestress in the existing prestressed concrete bridges, the longitudinal prestress was enforced on the scaled model simply-supported beams with different section types, strand arrangement patterns and material characteristics, then the frequencies and mode shapes of the beams were tested. The results indicated that the influence of prestress on the fundamental frequency is related with the tendon arrangement pattern, and the fundamental frequency depends on the section type, material characteristics and the tendon eccentricity. Based on the test data, a regression function between the effective prestress and rigidity is conducted, and a method for forecasting the effective prestress of PC simply-supported beam is presented. 6 figs, 8 refs.

Key words: bridge engineering; simply-supported beam; vibration frequency; effective prestress; post-tensioning method

0 引 言

对 PC 梁有效预应力的研究,目前大多处于探索性研究阶段,仅局限于理论分析的定性研究,还没有一套定量研究结论、完整合理的分析理论和快速有效的测试方法可供工程应用;在现行《公路桥涵养

护规范》^[1]中,对 PC 梁有效预应力的预测也还是空白,而 PC 梁有效预应力值的大小直接反映了 PC 梁的服务水平。为此,本文在分析现有理论和研究方法^[2-8]的基础上,通过混凝土简支梁缩尺模型试验,对不同截面形式、不同配束方式的 PC 梁动力特性进行测试,回归出预加力与 PC 梁基频的关系式,提

出了基于实测基频数据来预测有效预应力的方法。

1 模型试验

1.1 模型设计

以中国预应力混凝土简支梁常用的 T 型梁和空心板梁为研究对象,模型试验参照公路标准图尺寸,按比例缩尺成模型尺寸,同时根据试验需要,选用了实心板梁,并按试验需要设计模型尺寸。T 型梁模型选用 25 m 跨径作为代表跨径,按 1/10 比例缩尺成模型尺寸,纵向预应力筋采用曲线配束,共制作 5 片梁;空心板梁模型选用 16 m 跨径作为代表跨径,按 1/5 比例缩尺成模型尺寸,纵向预应力筋采用偏心直线配束,共制作 3 片梁;实心板梁根据试验需要设计,纵向预应力筋分别采用形心直线配束(形直束)、偏心直线配束(偏直束)和曲线配束(曲线束)共 3 种,每种配束梁分别制作 3 片,如图 1 所示。

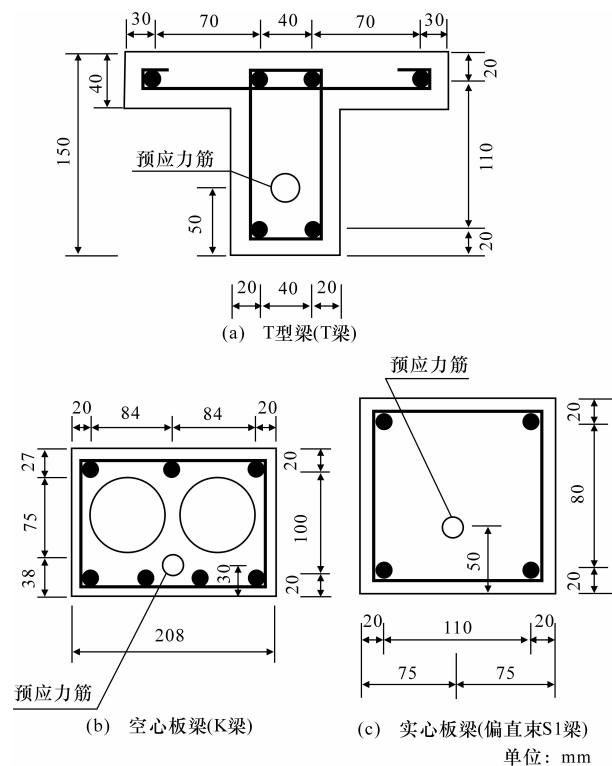


图 1 模型试验梁横截面

1.2 基频与预加力关系的测试

根据在不同预加力 N 作用下的实测基频 ω_c ,分别对 S1-1 ~ S1-3(偏直束)、S2-1 ~ S2-3(曲线束)、S3-2 ~ S3-3(形直束)、T1 ~ T5(曲线束)和 K1 ~ K3(偏直束)共 5 类模型梁进行测试,得如下规律。

(1) 按直线配束的 S1 梁、S3 梁和 K 梁的 ω_c - N 关系均满足同一变化规律, ω_c 随 N 的增加呈直线增大,但每类梁的 ω_c 随 N 增大的量值不同,增大量与

材料性质、截面特性和预应力束的偏心距有关。

(2) 按曲线配束的 S2 梁和 T 梁的 ω_c - N 关系均满足同一变化规律, ω_c 随 N 的增加均呈“曲线 + 直线”规律增大,但 S2 梁和 T 梁 ω_c 随 N 增大的量值不同,该增大量值与材料性质、截面特性和预应力束的偏心距有关。

(3) ω_c - N 关系变化规律与预应力束的设置形状(直线束或曲线束)有关,而与材料特性、截面形式、预应力束偏心距无关。

(4) ω_c - N 关系变化量值的大小与材料特性、截面形式和预应力束偏心距有关;设置同一形状预应力束的梁,截面刚度越大,梁的振动频率越高,预应力的作用越不明显。

2 试验分析

2.1 预加力值研究范围的确定

(1) 研究起点。当 $N < 10$ kN 时,由于结构内部微裂缝的存在和弹性压缩等因素的影响,所测数据应在分析中舍去。因此,研究起点为 $N = 10$ kN,相当于各类模型梁最大张拉力的 8% ~ 12%。

(2) 研究终点。模型梁最大允许张拉力值应考虑几方面因素,并取其中控制者:① 张拉过程中保证模型梁上翼缘混凝土不开裂(试验中混凝土允许最大拉应变控制在 -80×10^{-6});② 模型梁受压翼缘混凝土不被压裂;③ 张拉端混凝土不产生局部承压开裂;④ 模型梁在张拉过程中不产生纵向失稳;⑤ 预应力束(钢绞线)最大允许张拉力为 195 kN。

2.2 有效刚度、静刚度与预加力的关系

由试验测试数据,分别按不同配束方式回归出有效刚度 B_e 与静刚度 B 的比值(B_e/B)随 N 的变化规律,如下页图 2、图 3 所示。

2.3 规律分析

对 ω_c - N 关系应分段分析,本文引入量纲一量 λ ,设 $\lambda = N/N_{\max}$,其中, N_{\max} 为试验梁最大可施加预加力值, $0 \leq \lambda \leq 1$ 。由图 2、图 3 可得出如下规律。

(1) B_e/B - N 的变化规律取决于预应力束的布设形状,直线配束梁按直线规律变化;曲线配束梁当 $\lambda \leq 0.30$ 时按二次曲线规律变化,当 $\lambda > 0.30$ 时按直线规律变化。

(2) B_e/B - N 变化量值的大小取决于材料特性、截面形式和预应力束的偏心距。

(3) 根据上述试验测试回归分析,考虑材料特性、截面形式和预应力束偏心距的影响后,预应力混凝土简支梁有效刚度比 β 可表示为

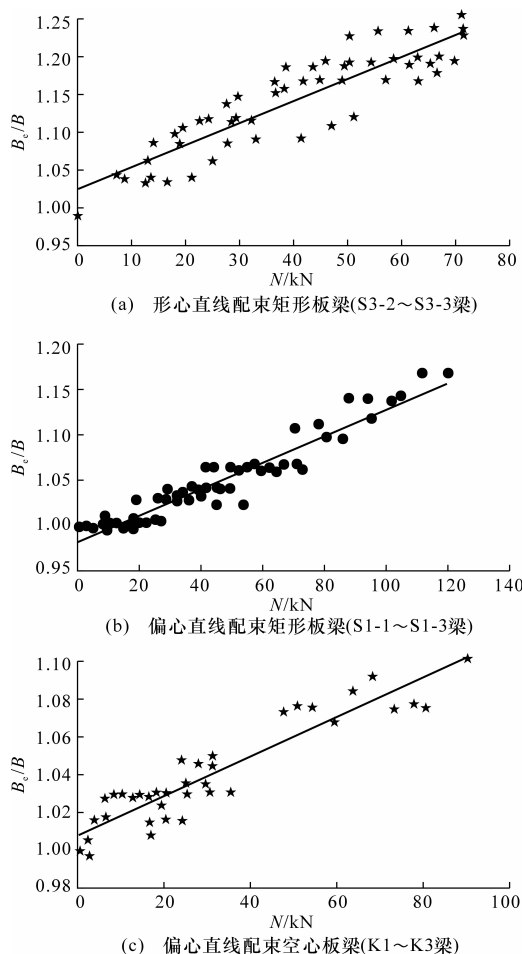


图 2 直线配束梁 B_e/B 与 N 的关系曲线

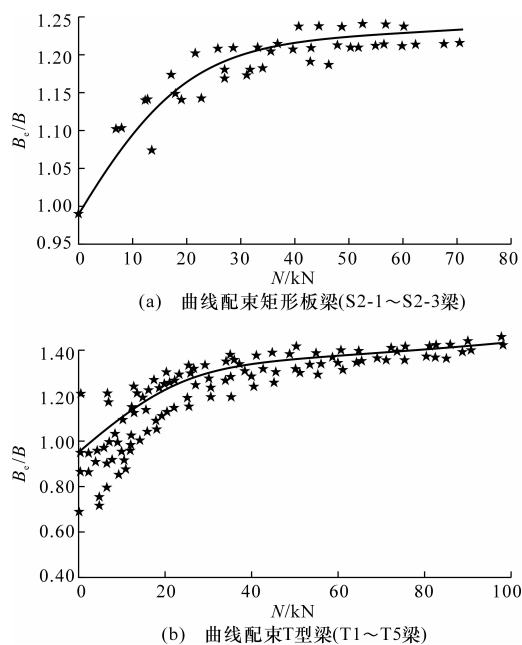


图 3 曲线配束梁 B_e/B 与 N 的关系曲线

曲线配束

$$\beta = 1 + k_2 \left(\frac{N}{A f_{cu}} \right) - k_3 \left(\frac{N}{A f_{cu}} \right)^2 \quad \lambda \leq 0.3 \quad (2)$$

$$\beta = k_4 + k_5 \left(\frac{N}{A f_{cu}} \right) \quad \lambda > 0.3 \quad (3)$$

式中: $\beta = B_e/B$, $B = E_c I$, $E_c = E_d I$, E_c 为混凝土弹性模量, 根据混凝土强度等级按规范查取, E_d 为混凝土不同应力状态下的弹性模量, 通过试验测试确定, 本文由动力试验确定 $E_d I$, I 为毛截面惯性矩; f_{cu} 为边长 150 cm 的混凝土立方体抗压强度; e 为预应力束中心距截面形心的距离; A 为毛截面面积; h 为毛截面高度; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 均为与截面形状有关的试验常数, 本模型选取 $k_1 = 1.8 \sim 1.9$, $k_2 = 8 \sim 10$, $k_3 = 12 \sim 15$, $k_4 = 1.1 \sim 1.2$, $k_5 = 0.8 \sim 0.9$ 。

在实际应用中, 由于边界条件、测试精度等导致的误差, 可通过量纲一系数 k_0 加以修正, k_0 应通过试验测试确定, 即

$$k_0 \beta = B_e/B \quad (4)$$

3 有效预应力预测

通过实测 ω_c 计算 B_e , 再根据预应力束的设置方式, 选用式(1)~式(4)计算有效预应力, 如图 4 所示。计算步骤如下。

(1) 动力测试混凝土梁的基频 ω_c 。

(2) 根据混凝土梁的材料性质、结构尺寸等计算理论基频值 ω_j 。

(3) 由 $\beta = B_e/B = (\omega_c/\omega_j)^2$, 推求 β 。

(4) 由 β 和混凝土梁内预应力束的设置方式, 选式(1)~式(4)计算有效预应力(预加力) N 。

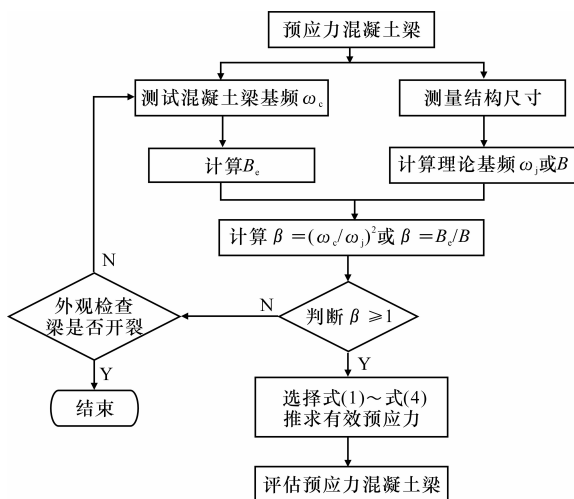


图 4 动力测试法预测有效预应力

直线配束

$$\beta = 1 + k_1 \left(1 - \frac{2e}{h} \right) \frac{N}{A f_{cu}} \quad (1)$$

4 实梁测试验证

某 1 孔 8 m 预应力混凝土后张预制箱梁,采用 C40 混凝土预制,计算跨径 7.7 m,预应力束采用 15.2 钢绞线,每束截面积 140 mm²,采用曲线配束,箱梁的截面尺寸如图 5 所示。

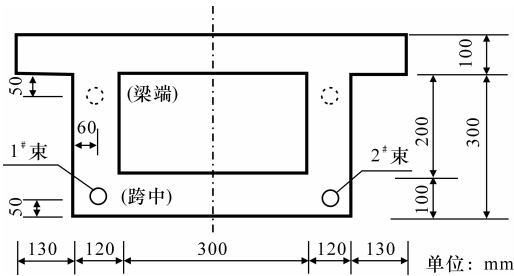


图 5 箱梁横截面

已知:箱梁重力为 38.00 kN,28 d 强度为 41 MPa, $E_c = 3.282 \times 10^4$ MPa,箱梁最大可施加预加力为 390 kN,计算基频为 12.889 Hz,实测基频为 14.282 Hz(图 6)。1[#]束张拉力为 680 MPa(95.20 kN),2[#]束张拉力为 893 MPa(125.02 kN),合计预应力为 220.22 kN。

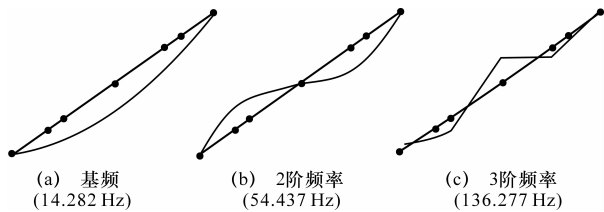


图 6 实测频率

计算:

$$k_0 \beta = \frac{B_c}{B} = \left(\frac{\omega_c}{\omega_j} \right)^2 = (14.282/12.889)^2 = 1.228$$

由于边界条件、测试误差等因素导致的误差,式(4)中的修正系数 k_0 取 1.043。则

$$\beta = 1.228/1.043 = 1.177 > 1$$

$\lambda = N/N_{\max} = 220.22/390 = 0.565 > 0.30$,故采用式(3)计算。

经计算可得 $N = 220.23$ kN,与张拉测试预加力 220.22 kN 相差 0.01 kN。

5 结 语

(1)预加力对简支梁振动频率的影响与配束方式有关:对直线配束梁,振动基频按直线规律变化;对曲线配束梁,当 $\lambda \leq 0.30$ 时,按二次曲线规律变化,当 $\lambda > 0.30$ 时,按直线规律变化。

(2)预加力对简支梁振动频率影响量值的大小与截面形式、材料特性和预应力束偏心距有关。

(3)研究结果适用于装配式预应力混凝土成品单梁出厂验收,以及在役预应力混凝土简支梁有效预应力的预测评估,对于预应力混凝土连续结构和开裂结构还有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] TG H11—2004,公路桥涵养护规范[S].
- [2] 刘龄嘉,赵小星,贺拴海.混凝土模型梁模态试验方法[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):58-61.
LIU Ling-jia, ZHAO Xiao-xing, HE Shuan-hai. Modal test method for concrete beams model[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5):58-61.
- [3] 薛伟辰,胡于明,王巍.预应力混凝土梁徐变性能试验[J].中国公路学报,2008,21(4):61-66.
XUE Wei-chen, HU Yu-ming, WANG Wei. Experiment on creep behaviors of prestressed concrete beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4):61-66.
- [4] 楼梦麟,洪婷婷.预应力梁横向振动分析的模态摄动方法[J].工程力学,2006,23(1):107-111.
LOU Meng-lin, HONG Ting-ting. Mode perturbation method for lateral vibration analysis of prestressed beams[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(1):107-111.
- [5] Hamed E, Frosting Y. Natural frequencies of bonded and unbonded prestressed beams-prestress force effects[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(1/2):28-39.
- [6] 吕中荣,罗绍湘,刘济科.预应力对预应力梁振动的影响[J].中山大学学报:自然科学版,2006,45(2):119-120,128.
LU Zhong-rong, LUO Shao-xiang, LIU Ji-ke. Effects of prestress force on vibration of a prestressed beam [J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006, 45(2):119-120, 128.
- [7] 刘龄嘉,贺拴海,赵小星.在役混凝土简支梁有效预应力计算[J].交通运输工程学报,2005,5(3):47-51.
LIU Ling-jia, HE Shuan-hai, ZHAO Xiao-xing. Effective prestress computation of existing PC simply-supported beam[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3):47-51.
- [8] Mo L Y, Perng F S, Hwang L W. Dynamic behavior of frames containing prestressed concrete beams[J]. Magazine of Concrete Research, 2001, 53(2):101-105.