

基于模态振型的预应力混凝土梁损伤检测

罗青松

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:以预应力简支梁为例,通过 Ansys 有限元模型,分析模态振型在预应力混凝土结构损伤检测中的技术可行性。结果表明:模态振型不仅可以明确地确定结构损伤的存在,而且可以较准确地确定结构损伤的位置。所得结果对于预应力钢筋混凝土梁的健康状况检测具有一定的参考价值。

关键词:预应力;损伤;钢筋混凝土梁;模态振型

中图分类号: TU37

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)11-0157-03

0 引言

预应力钢筋混凝土结构健康状态检测是结构剩余寿命评估和维修方案制定的前提。结构的健康状态可以通过结构的频响特性反映出来。在以往研究中,对预应力梁的振动特性已开展了较多研究,如 Ayaho^[1]给出了预应力梁横向弯曲振动的微分方程;Kim 等^[2]通过建立分析模型来确定自振频率的变化与预应力损失的关系,利用反算法,根据自振频率的变化确定了混凝土桥梁中的预应力损失,从而实现利用结构的模态性质来进行健康检测。本文以 Ansys 有限元模型为手段,探讨基于模态振型的有限元分析方法在预应力混凝土结构损伤检测中的技术可行性。

1 基本原理

通过预应力计算,得到修正的总刚度矩阵 $\{\bar{K}\}$ 和总质量矩阵 $\{M\}$;对于线性动力系统的小阻尼结构,可以采用符合阻尼 $[C]$,从而得到结构的振动微分方程^[3]:

$$[M]\{\ddot{\phi}\} + [C]\{\dot{\phi}\} + [\bar{K}]\{\phi\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $\{\ddot{\phi}\}$ 为加速度向量; $\{\dot{\phi}\}$ 为速度向量; $\{\phi\}$ 为节点位移向量; $\{F(t)\}$ 为整体荷载向量。

对结构进行模态分析主要是求解其固有频率和振型参数。一般地,固有模态与外载荷无关,结构阻尼对固有频率的影响很小,可以不考虑阻尼的影响。因此式(1)可简化为如下无阻尼自由振动方程:

$$[\bar{K}]\{\phi\} - \omega^2[M]\{\phi\} = 0 \quad (2)$$

式中: ω 为自振圆周频率。

2 预应力钢筋混凝土损伤检测的数值研究

2.1 模型的选取

钢筋混凝土有限元模型根据钢筋的处理方式主要分为分离式、整体式和组合式3种。把混凝土和钢筋作为不同的单元来处理,即混凝土和钢筋各自被划分为足够小的单元。在本文中,混凝土水平向单元尺寸为50 mm,垂直向单元尺寸为20 mm;钢筋单元尺寸为50 mm,两者的刚度分开来求解。钢筋为细长材料,忽略其抗剪强度,把钢筋作为线单元处理,认为钢筋和混凝土之间黏结很好,两者之间不会发生相对滑移,则两者之间可视为刚性联结,不需要联结单元。一般混凝土是存在裂缝的,而开裂必然导致钢筋和混凝土变形不协调,也就导致了两者之间的黏结失效与滑移,因而采用分离式模型。

2.2 单元选择

混凝土采用 Ansys 单元库中用于模拟混凝土单元的 SOLID65 单元。该单元主要用于模拟三维混凝土和预应力混凝土单元,其实体模型具有拉裂、压碎、塑性变形及徐变、单元生死等性能,同时具有8个节点,每个节点有X、Y、Z 3个方向的自由度,还可对3个方向的含筋情况进行定义。

钢筋单元用 Ansys 单元库中的 LINK8 单元。三维 LINK8 单元可以用于模拟刚杆和斜拉索,单元的2个节点具有3个方向的自由度。LINK8 单元只能承受拉应力和压应力,不承受弯矩和剪力,它具有塑性、膨胀、应力刚化、大变形、大应变和单元生死等功能。

2.3 钢筋预应力的施加

在预应力钢筋混凝土有限元分析中,钢筋的预应力通常用等效的外载来代替,将其施加到结构

收稿日期:2020-03-28

作者简介:罗青松(1981—),男,硕士,高级工程师,从事市政结构设计工作。

上,然后计算结构应力分布情况,再用叠加内力的方法分析结构中钢筋和混凝土的受力情况。在本文中采用降温法对钢筋施加预应力:首先为钢筋单元设定 1 个初始温度,然后对钢筋施加 1 个降温过程的温度值,使钢筋单元产生 1 个收缩变形,此初始应变将使钢筋产生预拉应力,作为模型中钢筋的预应力。钢筋的降温公式为:

$$\Delta T = P / EA \alpha \quad (3)$$

式中: ΔT 为钢筋降温值; P 为预应力施加值; E 为钢筋弹性模量; A 为钢筋面积; α 为钢筋线膨胀系数。

2.4 程序的收敛设置

Ansys 求解非线性问题要打开 Line search 线性搜索,激活它可以与增量的 Newton-Raphson 方法一起使用,但是不能与 arc-length 方法一起使用。经过多次试算发现,相对于 Ansys 结构分析中力(F)的收敛、位移(U)的收敛、弯矩(M)的收敛、转动(ROT)的收敛准则,位移的收敛准则较容易使计算收敛。所以在本文中用 Ansys 对预应力钢筋混凝土作有限元分析时,采用位移范数来控制非线性迭代过程的收敛,其迭代方程为:

$$\{u\}_{n+1} = -[K_T]^{-1} \{\psi\}_n + \{u\}_n \quad (4)$$

式中: K_T 为切线刚度矩阵; $\{\psi\}$ 为外荷载矢量; $\{u\}_{n+1}$ 、 $\{u\}_n$ 为位移矢量。

2.5 算例及结果分析

预应力钢筋混凝土简支梁跨度为 2 m、宽 0.25 m、高 0.5 m,沿宽度方向布置 5 根通长直线钢筋,钢筋与钢筋间隔 0.045 m。

混凝土材料参数为:弹性模量 $E=3.489\ 8 \times 10^{10}$ Pa,泊松比 $\nu=0.166\ 7$,密度 $\rho=2.5 \times 10^4$ N/m³;其应力-应变曲线见图 1。混凝土的张开裂缝剪切

传递系数为 0.7,闭合裂缝的剪切传递系数为 1。

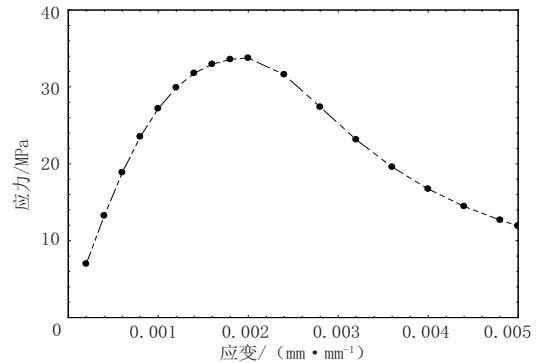
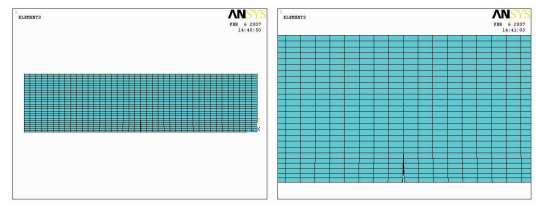


图 1 混凝土本构关系

预应力钢筋的材料参数为:弹性模量 $E=2.0 \times 10^{11}$ Pa,泊松比 $\nu=0.3$,膨胀系数 $\alpha=1.0 \times 10^{-5}$,密度 $\rho=7.8 \times 10^4$ N/m³;单根钢筋的横截面积为 0.000 201 1 m²。

单损伤工况中,梁体预应力钢筋的预应力为 1.61 kN,单损伤工况模型裂缝高度 $h=150$ mm,距坐标原点 $x=1.0$ m。单损伤梁 Ansys 有限元模型见图 2。



(a)有限元模型图一

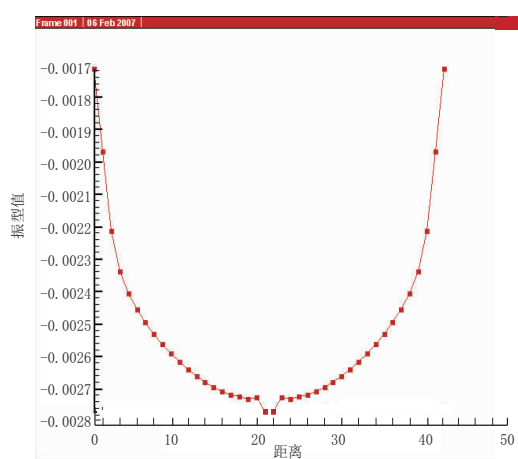
(b)有限元模型图二

图 2 单损伤梁 Ansys 有限元模型

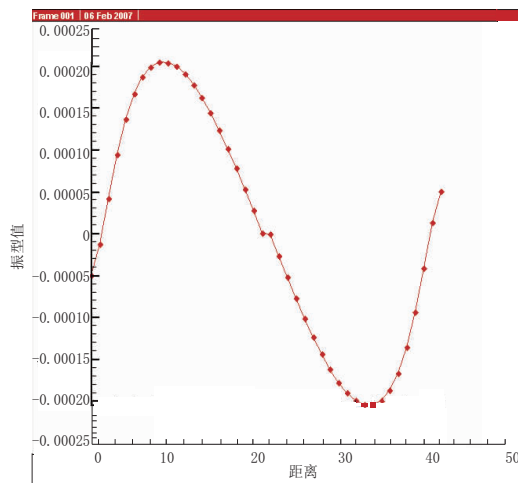
根据损伤结构的有限元模型进行模态分析。取 Y 向即结构竖向模态振型,得到相应结构的振型,在单一损伤工况情形下,梁结构部分节点的前 5 阶模态振型数据见表 1。根据表 1 中的模态振型数据得到梁结构的前 5 阶振型图,见图 3。

表 1 梁损伤工况振型

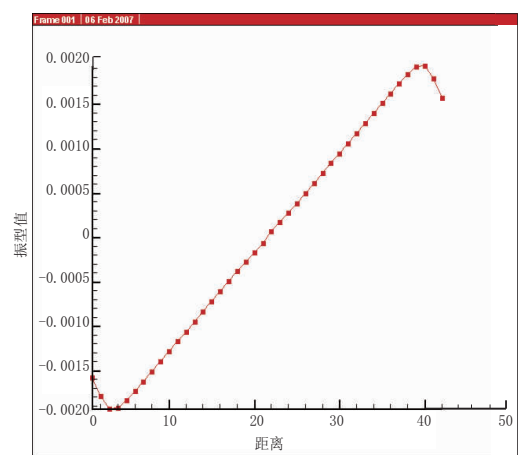
节点号	振型 1	振型 2	振型 3	振型 4	振型 5
1	$-0.171\ 53 \times 10^{-2}$	$-0.505\ 05 \times 10^{-4}$	$-0.157\ 41 \times 10^{-2}$	$0.450\ 22 \times 10^{-2}$	$0.399\ 71 \times 10^{-2}$
2	$-0.196\ 83 \times 10^{-2}$	$-0.131\ 99 \times 10^{-4}$	$-0.178\ 81 \times 10^{-2}$	$0.454\ 61 \times 10^{-2}$	$0.554\ 36 \times 10^{-2}$
3	$-0.221\ 37 \times 10^{-2}$	$0.415\ 47 \times 10^{-4}$	$-0.192\ 90 \times 10^{-2}$	$0.465\ 50 \times 10^{-2}$	$0.711\ 42 \times 10^{-2}$
4	$-0.233\ 81 \times 10^{-2}$	$0.940\ 18 \times 10^{-4}$	$-0.191\ 80 \times 10^{-2}$	$0.454\ 24 \times 10^{-2}$	$0.836\ 96 \times 10^{-2}$
5	$-0.240\ 71 \times 10^{-2}$	$0.136\ 28 \times 10^{-3}$	$-0.183\ 70 \times 10^{-2}$	$0.434\ 11 \times 10^{-2}$	$0.946\ 51 \times 10^{-2}$
6	$-0.245\ 63 \times 10^{-2}$	$0.166\ 84 \times 10^{-3}$	$-0.173\ 31 \times 10^{-2}$	$0.411\ 48 \times 10^{-2}$	$0.104\ 86 \times 10^{-1}$
7	$-0.249\ 64 \times 10^{-2}$	$0.187\ 16 \times 10^{-3}$	$-0.162\ 21 \times 10^{-2}$	$0.387\ 93 \times 10^{-2}$	$0.114\ 55 \times 10^{-1}$
8	$-0.253\ 13 \times 10^{-2}$	$0.199\ 20 \times 10^{-3}$	$-0.150\ 95 \times 10^{-2}$	$0.364\ 15 \times 10^{-2}$	$0.123\ 77 \times 10^{-1}$
9	$-0.256\ 27 \times 10^{-2}$	$0.204\ 55 \times 10^{-3}$	$-0.139\ 69 \times 10^{-2}$	$0.340\ 66 \times 10^{-2}$	$0.132\ 53 \times 10^{-1}$
10	$-0.259\ 12 \times 10^{-2}$	$0.204\ 35 \times 10^{-3}$	$-0.128\ 45 \times 10^{-2}$	$0.317\ 86 \times 10^{-2}$	$0.140\ 80 \times 10^{-1}$
11	$-0.261\ 73 \times 10^{-2}$	$0.199\ 46 \times 10^{-3}$	$-0.117\ 22 \times 10^{-2}$	$0.296\ 08 \times 10^{-2}$	$0.148\ 55 \times 10^{-1}$
12	$-0.264\ 08 \times 10^{-2}$	$0.190\ 50 \times 10^{-3}$	$-0.105\ 97 \times 10^{-2}$	$0.275\ 60 \times 10^{-2}$	$0.155\ 73 \times 10^{-1}$



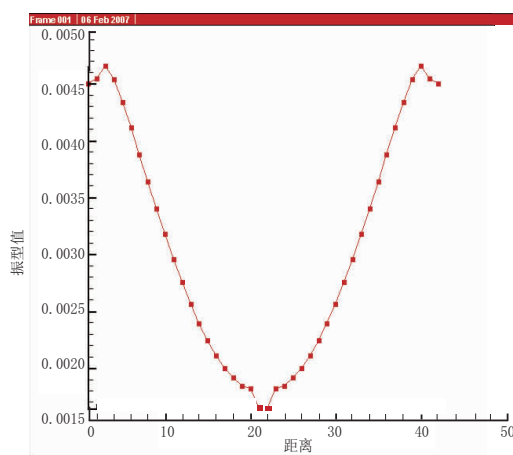
(a) 1 阶振型图



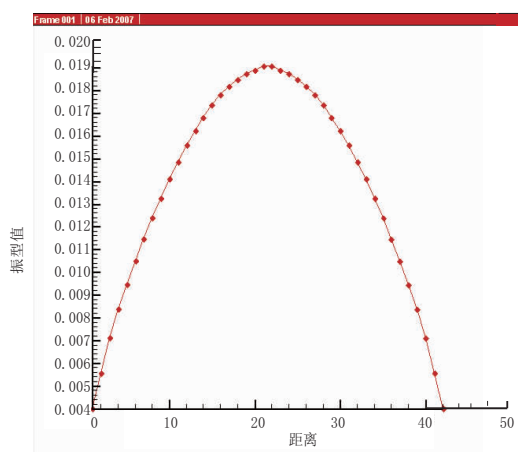
(b) 2 阶振型图



(c) 3 阶振型图



(d) 4 阶振型图



(e) 5 阶振型图

图 3 梁结构前 5 阶模态振型图

图 3(a)和图 3(d)中出现了明显的“尖点”，“尖点”位置即为梁的损伤点；曲线其他平滑部分表明梁没有出现损伤。振型曲线的变化表明了梁结构损伤的存在，同时也能较准确确定梁结构损伤的位置。模态振型曲线分析说明，模态振型能够较好地用于损伤的识别与定位。

3 结 语

用 Ansys 有限元作为分析工具，通过数值计算得到的梁模态振型能够较好地识别预应力钢筋混凝土简支梁的损伤，所得结果对于预应力钢筋混凝土梁的健康状态检测具有一定参考价值。

(下转第 188 页)



图 1 潍坊市弥河流域普通国省道桥梁防洪提升改造工程涂装后照片

岸边地带,青岛栈桥西侧,由一个扣在海水中的白色贝壳状半球体和一个竖起的贝壳状半球体组成,是青岛的标志性景观之一。该工程由于长期处在潮汐区域,混凝土所处环境十分恶劣,海水、海风、海雾、氯盐等有害物质不断对其侵蚀,海浪、泥沙反复对其机械磨蚀,因此必须对其采取防腐措施。

该工程处于潮汐区域,落潮周期较短,混凝土基层长期处于湿润状态,施工难度大。该工程项目部对多种防腐涂料进行试验对比,发现涂料多存在施工成本高、固化速度慢、污染环境、涂层耐候性差等缺点。通过比选,最终选择了青岛润邦防水建材有限公司研制的专利产品 SHJS 聚碳硅氧烷涂料进行防腐涂装。该涂料体系设计中充分考虑了施工地的潮汐周期因素和规律,经配方调整优化,确保该涂料对基体表面的附着黏结力和固化时间,满足施工地的潮汐周期规律,从而确保涂料各项指标达标。

该水性涂料体系为含环氧树脂的多种高聚物组成,无毒、无味、无污染。海水中多成分的电解质促使该涂料体系中析出的少量乳液更快析出成膜,附着在基体表面,直至全部固化^[7,8]。涂装完毕后,进行外观目视检查,涂层表面均匀,无气泡和裂缝等缺陷。涂装 7 d 后,经验收评定,其质量符合《水运工程质量检验标准》(JTS 257—2008),涂装质量合格。图 2 为青岛海上皇宫底部潮汐区涂装工程照片。



图 2 青岛海上皇宫底部潮汐区涂装工程照片

6 结 语

对 SHJS 聚碳硅氧烷防水防腐防撞耐磨涂料从体系设计定位、设计原则及潜有深层次协同效应等方面分析探讨了其优异性能由来机理,明确了该涂料在海港潮湿环境下施工的优越性,并在实际工程应用中获得业主认可。

该涂料各项指标均符合中华人民共和国交通行业标准《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》(JT/T 695—2007) 要求,2017 年获得中国发明专利,专利号:ZL 2014 1 0168944.X,可作为应用时参考。

参考文献:

- [1] 徐军. 海港工程钢筋混凝土结构的腐蚀机理与防腐对策[J]. 中国新技术新产品, 2013(9):71.
- [2] 周树学. 高耐候性聚硅氧烷涂料的研制[J]. 上海涂料, 2011, 49(3): 5-9.
- [3] 刘洪珠, 李缙成, 赵兴顺. 我国水性氟碳树脂研究综述[J]. 上海涂料, 2010, 48(4):37-40.
- [4] 李田霞, 陈峰. 氟碳涂料国内外现状及发展趋势[J]. 安徽化工, 2012, 38(1):12-14, 18.
- [5] 白云起, 薛丽梅, 刘云夫. 环氧树脂的改性研究进展[J]. 化学与粘合, 2007, 29(4):289-292, 304.
- [6] 彭志强. 水下施工涂料及其涂装工艺研究[J]. 材料开发与应用, 2004(2):27-30.
- [7] 方健君, 覃远斌, 马胜军, 等. 水下施工固化环氧涂料的研究[J]. 涂料工业, 2014(8):1-6.
- [8] 刘宏. 电解质破乳特性研究[J]. 江苏理工大学学报, 2000, 21(2): 27-29.

(上接第 159 页)

参考文献:

- [1] AYAHO M. Behavior of pre-stressed beam strengthened with external tendons[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 126(9):1030-1037.
- [2] KIM J T, RYU Y-S, YUN C B. Vibration-based method to detect

prestress-loss in Beam-type bridges[J]. ASCE, 2003, 5057: 556-559.

- [3] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.