

基于分布式应力监测的桥梁支座转角和位移状态多级评估

陈杰¹, 崔燕², 梁缘¹, 姜瑞娟²

(1. 广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东 广州 510623; 2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029)

摘要: 支座病害已成为影响桥梁安全的主要因素之一,但常用的支座监测/检测手段智能化、自动化程度低,时效性差。为实时掌握桥梁支座服役状态,提出了基于分布式应力监测的桥梁支座转角、位移状态多级评估方法。首先,介绍了适用于所提方法的智能盆式橡胶支座结构及应力测点布置;其次,提出了综合考虑橡胶板两主轴方向各测点应力变化特点的测点标准化应力比指标,并基于此设定了服役期支座转角、位移状态多级评估判据,然后以位于广东西南沿海的山竹沟洞中桥实际工程为例,确定了可用的智能盆式支座型号,建立了支座精细化有限元模型;最后,通过数值仿真分析对所提方法进行说明,明确了用于服役期支座转角、位移状态多级评估的各阈值取值。

关键词: 智能盆式橡胶支座;分布式应力监测;转角和位移;多级评估

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)02-0185-08

0 引言

支座作为桥梁上下部结构之间传递荷载、协调变形、保证结构安全的重要构件,其损伤或破坏往往会引起桥梁结构受力偏差或失衡,进而引发其他构件的失效,加速桥梁寿命衰减,对桥梁结构的整体安全性造成威胁。大量工程实践表明,桥梁支座损伤或破坏已成为我国现役桥梁的主要病害之一^[1-3]。

虽然国内外对部分大型桥梁配建了健康监测系统,但监测物理量主要集中于结构变形、应力/应变、振动、索力、缆索断丝、桥梁动荷载作用以及风、温湿度等环境因素^[4-7]。个别工程在支座更换、拉索索力调整等过程中尝试对支座压力进行短期监测,但实际工程中鲜有对桥梁支座压力进行长期监测的应用。同时,布设有健康监测系统的大型桥梁仅占我国桥梁总数约10%,而占我国桥梁总数约90%的中小跨径桥梁,仍以定期人工检测作为获得桥梁支座健康状况的常用手段。但桥梁支座所处环境通常恶劣且隐蔽,人工检测方法的局限性导致很多病害不

能被及时发现和处理^[8-9],突发性结构破坏仍难以避免。在此背景下,针对桥梁支座受力和变形的实时监测技术受到越来越多的关注。目前,关于桥梁智能支座的研究,以实现支座受力长期监测的智能支座结构或构造设计与改进为主。臧晓秋等^[10]提出了一种在常规盆式支座基础上设置测力元件、数据采集和数据处理设备的三向测力盆式支座;裴蓉蓉等^[11]介绍了一种用于支座高度调整的液压式调高测力盆式橡胶支座,该支座具有调高和短期受力监测的功能;Ha等^[12]提出了在支座内部放入压电材料,通过采集能量实现对车流量和支座受力监测的方法;Kim等^[13]采用在板式支座橡胶层预埋PVDF聚合物感测片来实时监测支座受力变化,评估桥梁结构动态特性。现有研究的不足在于:大部分智能支座不具备应力的分布式和长期监测功能,且监测目标较为单一,对支座性能的多维理解需配合使用多类型传感器^[14],但对各类响应数据的分析又相互独立,忽略了它们的内在联系;此外,现阶段的数据处理方法也不具有自分析、自诊断和多维评估的智能化特性。这无形中增加了桥梁智能支座实施的难度和复杂度,降低了智能支座的智能化程度。根据智能支座构造和性能特征,挖掘支座多维受力与支座转角、位移指标的内在关系是准确、实时评估支座服役状态的有效途径,有助于实现对桥梁病害的及时发现和处理,降低桥梁失效风险。因此,有必要研究基于分布式应力监测数据的桥梁支座转角、位移状态

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 深圳市科技计划技术攻关项目(JSJG20180508151728414);广东省省级科技计划项目(2018B020208001);广东省交通运输厅行业研发中心清单支持项目

作者简介: 陈杰(1989—),男,硕士,工程师,从事道路与桥梁工程设计工作。

多级评估方法,为通过监测支座状态来掌握服役桥梁运行状况和评估结构安全提供解决方案,为降低大型、复杂结构健康监测成本提供新思路,为我国大中小型桥梁的智能管养提供一种切实可行的途径。

1 理论方法

1.1 智能盆式橡胶支座结构及应力测点布置

传统盆式橡胶支座主要由盖板、中间钢板、橡胶板和钢盆组成,不具备对橡胶板的应力监测功能。为实现对盆式支座内部橡胶板分散应力的监测,选用了图1所示的智能盆式橡胶支座结构形式^[15]。

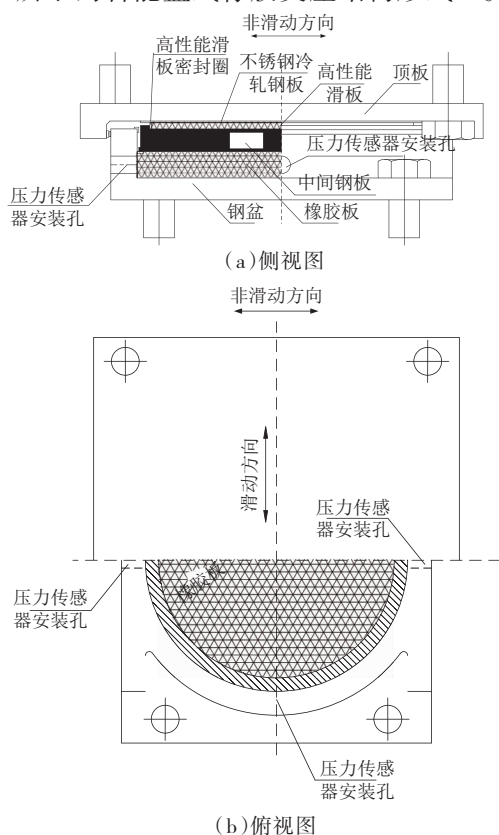


图1 智能盆式橡胶支座结构示意图(单向滑动型)

由图1可知,通过在钢盆侧壁沿两主轴方向同一高度处设置贯穿侧壁的通道,安装与钢盆内橡胶板刚好接触的压力传感器,可实现对支座受力过程中橡胶板侧壁应力的实时监测与获取。

智能支座橡胶板侧壁应力测点布置具体如图2所示。其中,测点1和测点2沿橡胶板 x 轴布置,测点3和测点4沿橡胶板 y 轴布置。橡胶板 x 轴与 y 轴相互垂直,且规定橡胶板 x 轴和 y 轴分别与桥梁纵、横向保持一致。

1.2 标准化应力比指标设计

由基本力学知识可知,当智能支座沿图2所示 x

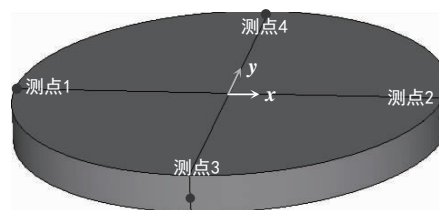


图2 智能支座橡胶板侧壁应力监测点布置图

轴方向发生转动或滑移时,支座沿该方向的测点1、测点2的应力变化明显,同时与其垂直布设的测点3、测点4的应力无明显变化;随着支座转角或滑移量的逐渐增大,测点1、测点2的应力差距逐渐增大,测点3、测点4的应力差距无明显变化。同理,当智能支座沿图2所示 y 轴方向发生转动或滑移时,支座沿该方向的测点3、测点4的应力变化明显,而与其垂直布设的测点1、测点2的应力无明显变化;随着支座转角或滑移量的增大,测点3、测点4的应力差距增大,测点1、测点2的应力差距无明显变化。综合考虑4个测点应力变化特点,构建了测点标准化应力比作为支座状态评估指标。

首先,对橡胶板4个测点的应力监测数据运用均方根运算进行标准化处理,具体公式为:

$$\sigma'_{il} = \frac{\sigma_{il}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sigma_{il}|^2}}, (l=1,2,3,4) \quad (1)$$

式中: σ_{il} 为橡胶板测点 l 在第 i 时刻的应力监测值; σ'_{il} 为橡胶板测点 l 经标准化处理的第 i 时刻的无量纲应力监测值; N 为橡胶板测点 l 处所得应力监测值总数。

然后,基于支座同一主轴两端的标准化应力数据,计算可反映支座沿该主轴方向应力变化特点的测点标准化应力比。测点标准化应力比的通用计算公式为:

$$\beta_i^{lk} = \frac{\max(|\sigma'_{il}|, |\sigma'_{ik}|)}{\min(|\sigma'_{il}|, |\sigma'_{ik}|)} \quad (2)$$

式中: β_i^{lk} 为橡胶板测点 l 和 k 在第 i 时刻的标准化应力比; $|\sigma'_{il}|, |\sigma'_{ik}|$ 为橡胶板测点 l 和 k 在第 i 时刻的标准化应力绝对值。

由于每个支座都有2个主轴,故各支座均可得到2个标准化应力比指标 β, β' 。其中, β 用于反映沿支座转动、位移方向的应力变化,即当 β_i^{lk} 由支座服役过程中发生显著转动、位移方向的测点应力计算得到时,标准化应力比 $\beta_i^{lk} = \beta; \beta'$ 用于反映垂直于支座转动、位移方向的应力变化,即当 β_i^{lk} 由垂直于支座转动、位移方向的测点应力计算得到时,标准化应

力比 $\beta_i^k=\beta'$ 。结合第1.1节对橡胶板侧壁各测点布置位置的具体规定,可知:

(1)固定支座: $\beta_i^{12}=\beta, \beta_i^{34}=\beta'$ 。

(2)沿桥梁纵向布设的单向滑动支座: $\beta_i^{12}=\beta, \beta_i^{34}=\beta'$ 。

(3)沿桥梁横向布设的单向滑动支座: $\beta_i^{34}=\beta, \beta_i^{12}=\beta'$ 。

(4)双向滑动支座:其在两主轴方向的位移量均较明显,为方便起见,可定义 $\beta_i^{12}=\beta, \beta_i^{34}=\beta'$ 。

1.3 基于标准化应力比的支座状态多级评估

根据《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391—2019)对盆式支座容许竖向转角、设计水平位移量的规定,同时考虑支座在承受最不利荷载工况时所能达到的最大转角和位移,结合式(2)计算得到的测点1和测点2、测点3和测点4的标准化应力比,对盆式支座转角、位移状态评估设置如式(3)~式(5)所示的多级评判指标。

(1)固定支座转角状态多级评估:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{\theta_1}, \quad \theta_1 = a_1[\theta] \\ 2 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{\theta_2}, \quad \theta_2 = a_2[\theta] \\ \vdots & \vdots \\ n \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{\theta_n}, \quad \theta_n = a_n[\theta] \\ \text{同时: } & \frac{|\beta_i - \beta_{i-1}|}{|\beta_i|} \leq \lambda_{\theta}, \lambda_{\theta} = \frac{|\beta_{\max}' - \beta_{\min}'|}{|\beta_{\min}'|} \end{array} \right. \quad (3)$$

(2)单向滑动支座位移状态多级评估:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_1}, \quad v_1 = b_1[v] \\ 2 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_2}, \quad v_2 = b_2[v] \\ \vdots & \vdots \\ n \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_n}, \quad v_n = b_n[v] \\ \text{同时: } & \frac{|\beta_i - \beta_{i-1}|}{|\beta_i|} \leq \lambda_v, \lambda_v = \frac{|\beta_{\max}' - \beta_{\min}'|}{|\beta_{\min}'|} \end{array} \right. \quad (4)$$

(3)双向滑动支座位移状态多级评估:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_1}, \quad v_1 = b_1[v] \\ 2 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_2}, \quad v_2 = b_2[v] \\ \vdots & \vdots \\ n \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_n}, \quad v_n = b_n \cdot [v] \end{array} \right. \quad (5)$$

且

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_1}', \quad v_1' = b_1'[v'] \\ 2 \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_2}', \quad v_2' = b_2'[v'] \\ \vdots & \vdots \\ n \text{ 级: } & \beta_i \geq \beta_{v_n}', \quad v_n' = b_n'[v'] \end{array} \right.$$

式中: $[\theta]$ 、 $[v]$ 和 $[v']$ 分别为现行规范给定的支座容许转角和纵横向位移量; $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 、 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 和 $\{v_1', v_2', \dots, v_n'\}$ 为多级评估时所需的各级转角、位移

限值; $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 、 $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 和 $\{b_1', b_2', \dots, b_n'\}$ 为系数项,且 $0 < a_1 < a_2 < \dots < a_n = a_{\max}$, $0 < b_1 < b_2 < \dots < b_n = b_{\max}$, $0 < b_1' < b_2' < \dots < b_n' = b_{\max}'$; $a_{\max}$ 、 $b_{\max}$ 和 $b_{\max}'$ 为最大系数值,该值根据实际工程需要确定,其值可大于等于1,也可小于1; n 为支座转角、位移状态多级评估的划分等级数; β_i 为沿支座转动、滑移方向的标准化应力比, β_i' 为垂直于支座转动、滑移方向的标准化应力比; λ_{θ} 、 λ_v 为标准化应力比变化范围限值,该值可由多工况数值仿真分析和基于长期实测数据的分析结果综合确定; $\beta_{\max}'$ 和 $\beta_{\min}'$ 分别为垂直于支座转动、滑移方向的标准化应力比最大值和最小值。

根据式(3)~式(5)所示多级评估指标,盆式支座服役期间的转角、位移状态评估具体包括以下内容:

(1)通过式(2)计算固定支座实时标准化应力比 β_i 和 β_i' ,并分别与式(3)所示各级标准化应力比阈值 $\{\beta_{\theta_1}, \beta_{\theta_2}, \dots, \beta_{\theta_n}\}$ 和限值 λ_{θ} 比较,确定固定支座转角当前状态。

(2)通过式(2)计算单向滑动支座实时标准化应力比 β_i 和 β_i' ,并分别与式(4)所示各级标准化应力比阈值 $\{\beta_{v_1}, \beta_{v_2}, \dots, \beta_{v_n}\}$ 和限值 λ_v 比较,确定单向滑动支座位移当前状态。

(3)通过式(2)计算双向滑动支座实时标准化应力比 β_i 和 β_i' ,并分别与式(5)所示各级标准化应力比阈值 $\{\beta_{v_1}, \beta_{v_2}, \dots, \beta_{v_n}\}$ 和 $\{\beta_{v_1}', \beta_{v_2}', \dots, \beta_{v_n}'\}$ 比较,确定双向滑动支座双向位移当前状态。

2 应用工程

2.1 工程概况

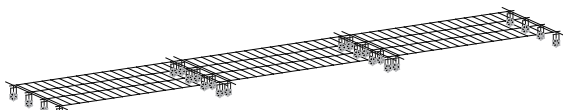
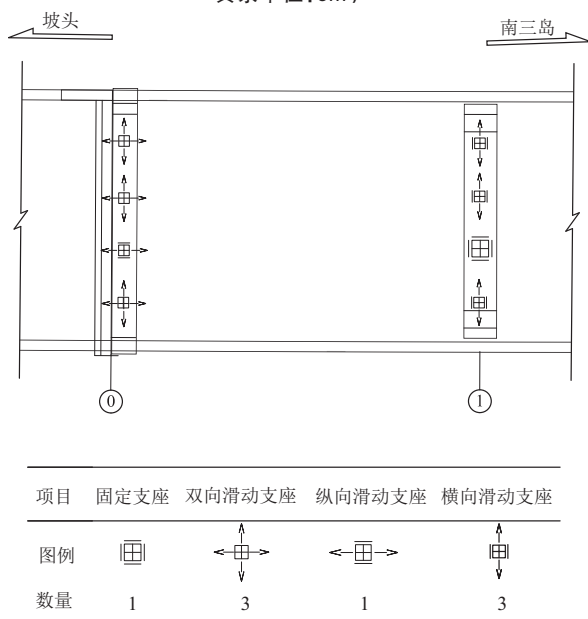
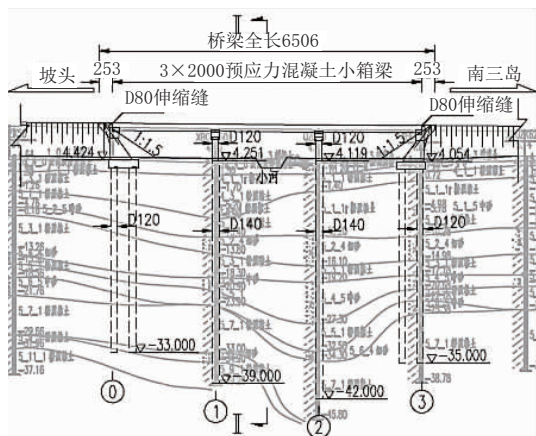
山竹沟洞中桥位于广东西南沿海,全长65.06 m,上部结构采用跨径组合为 3×20 m的桥面连续简支预应力混凝土小箱梁桥,下部结构桥墩为圆柱墩、桥台为肋式台,桩基为钻孔灌注桩基础。该桥桥面左右幅宽均为12.75 m,桥梁总宽度26 m。

山竹沟洞中桥桥型布置图见图3。

智能盆式支座用于山竹沟洞中桥左幅第一跨的8个支座,支座布置如图4所示。具体包括:1个固定支座、3个双向滑动支座、4个单向滑动支座(1个顺桥向滑动和3个横桥向滑动)。

2.2 整体结构分析

采用有限元软件Midas/Civil建立山竹沟洞中桥左幅3跨的梁格模型,如图5所示。该有限元模型共计312个节点,465个单元;预应力混凝土箱梁采用



根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),对图 5 所示山竹沟垌中桥 Midas/Civil 模型,分别进行承载能力极限状态和正常使用极限状态下各荷载组合工况的计算分析,得到各荷载组合下各类型支座反力和位移的最值(见表 1)。

根据表 1 所示各类型支座的响应计算结果,选取满足实际工程需求的 GPZ (II)-2.0 型盆式橡胶支座,作为该桥测力型智能支座雏形。同时选取滑动支座顺桥向容许位移量 50 mm,横桥向容许位移量 40 mm。

通过在 GPZ (II)-2.0 型支座的钢盆侧壁沿两主

表 1 各荷载组合下各类型支座反力和位移的最值

响应		固定支座	双向滑动 支座	单向滑动 支座
竖向荷载 /MN	最小值	0.578 30	0.573 86	0.575 17
	最大值	1.591 12	1.578 19	1.585 86
水平荷载 /MN	最小值	-0.058 15		-0.110 22
	最大值	0.190 84		0.190 87
顺桥向转角 /rad	最小值	-0.003 23	-0.000 97	-0.003 42
	最大值	0.000 79	0.003 38	0.003 18
顺桥向位移 /mm	最小值		-13.150 01	-12.659 63
	最大值		3.549 13	3.404 75
横桥向位移 /mm	最小值		-1.941 88	-1.944 55
	最大值		2.446 75	2.443 57

轴方向开孔、安装压力传感器,得到可实现山竹沟垌中桥支座服役期应力监测的测力型智能支座。

固定智能支座、双向滑动智能支座和单向滑动智能支座主要尺寸及结构示意图见图 6~图 8。

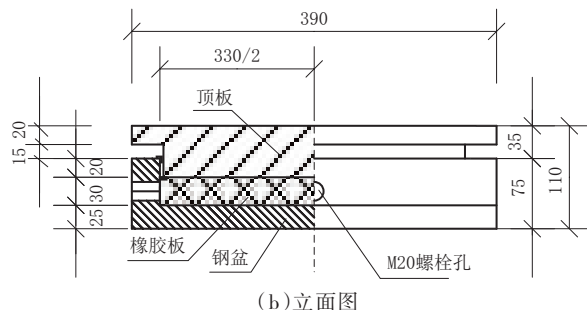
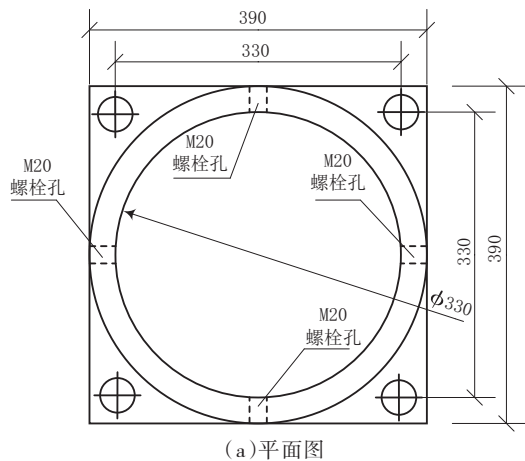


图 6 固定智能支座主要尺寸及结构示意图
(GPZ(II)-2.0-10%-GD)(单位:mm)

3 基于支座精细化模型的方法验证

3.1 支座精细化有限元模型建立

在此以图 6、图 7 所示的固定智能支座和双向滑动智能支座为例,通过数值仿真分析对所提支座转角、位移状态多级评估方法进行说明。

采用 Ansys 通用有限元软件建立智能支座精细

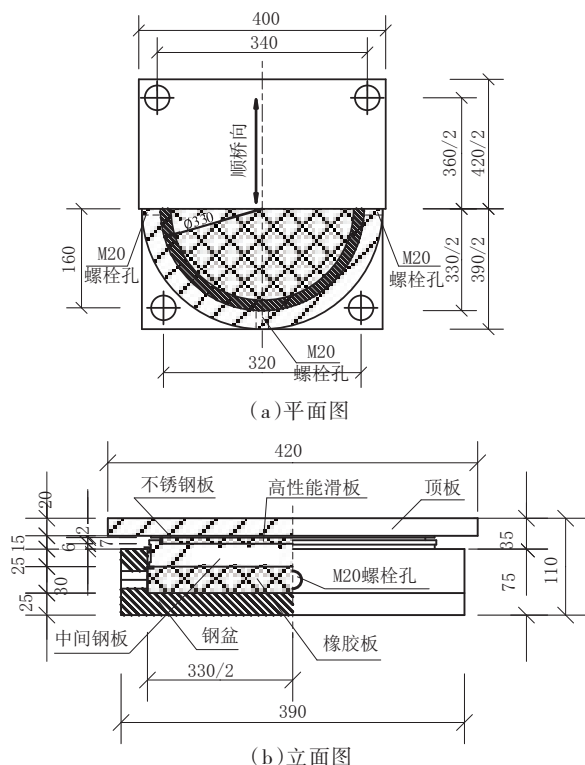


图7 双向滑动智能支座主要尺寸及结构示意图
(GPZ(II)-2.0-SX-±50)(单位:mm)

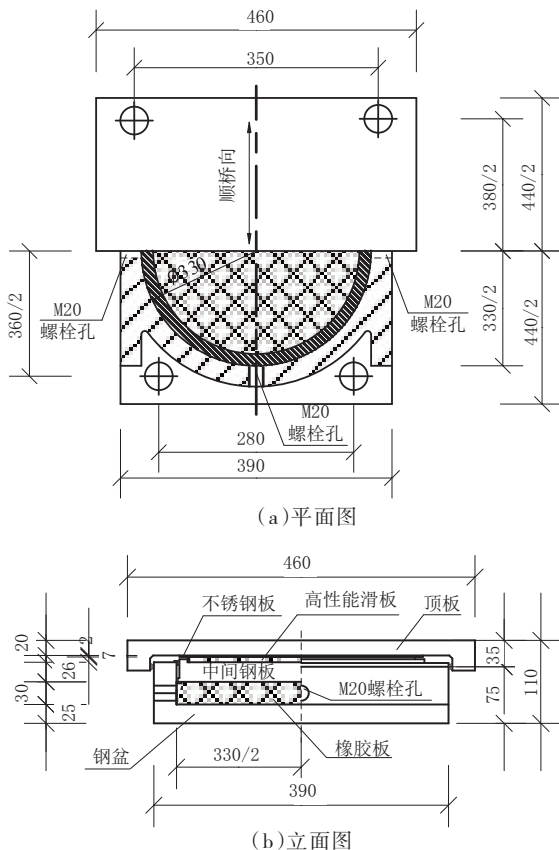


图8 单向滑动智能支座主要尺寸及结构示意图
(GPZ(II)-2.0-10%-DX-±50)(单位:mm)

化有限元模型。其中,选取具有二次位移模式的高阶三维20节点SOLID186单元,模拟智能盆式橡胶支座的

板和底盘等;选取具有任意大位移和大应变的近似不可压缩的HYPER58单元,模拟支座橡胶板。盆式橡胶支座各部分的接触,通过接触单元CONTA174和目标单元TARGE170形成接触对实现。所建立的固定智能支座和双向滑动智能支座精细化有限元模型见图9、图10。

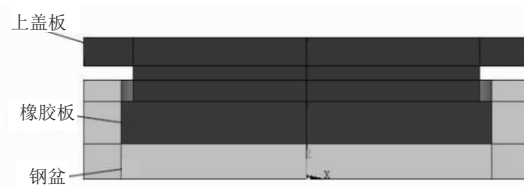


图9 固定智能支座有限元模型

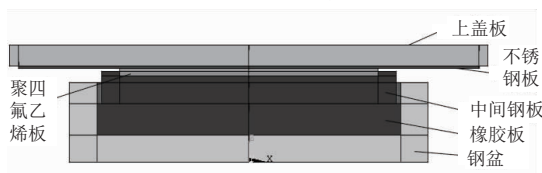


图10 双向滑动智能支座有限元模型

3.2 固定支座转角状态多级评估

根据《公路桥梁盆式支座》第4.1.3条规定,支座容许的竖向转角 θ 为 ± 0.02 rad。给定固定智能支座转角 θ 变化范围 $1.2 \times [-0.02, 0.02]$ rad,并在此区间随机生成60种转角工况,见表2。基于表2所示转角工况,通过对固定智能支座精细化模型的计算分析,可得支座橡胶板在4个测点位置的应力计算结果,见图11、图12。

基于式(1)、式(2)对各测点应力进行标准化处理,计算测点1和测点2、测点3和测点4的标准化应力比,见图13。由于标准对支座转角限定不考虑方向性,故转角限值不区分正负。

由图13可知:测点标准化应力比与支座转角绝对值具有良好的一一对应关系,能够有效反映支座转角变化对各测点应力的影响,说明基于测点标准化应力比 β 进行支座转角状态评估阈值的设定是可行的。进一步地,考虑对山竹沟洞中桥固定支座转角状态进行5级评估,并以 $\theta_1=0.003\ 23$ rad(表1所示转角绝对值的最大值), $\theta_2=0.850\ [\theta]$ 、 $\theta_3=1.000\ [\theta]$ 、 $\theta_4=1.100\ [\theta]$ 和 $\theta_5=1.200\ [\theta]$ 作为评估所需的各级转角限值,则通过图13所示对应关系,可得各级测点标准化应力比与多级转角限值关系,如图14所示。

分析图14所示对应关系,确定用于山竹沟洞中桥固定智能支座转动状态多级评估的标准化应力比阈值为: $\beta_{\theta_1}=1.173\ 5$ 、 $\beta_{\theta_2}=3.562\ 2$ 、 $\beta_{\theta_3}=5.539\ 0$ 、 $\beta_{\theta_4}=8.386\ 6$ 、 $\beta_{\theta_5}=16.758\ 7$ 。考虑计算分析过程中可能存在的偏差,以及转角工况与阈值设定所需工况对应

表2 随机生成的固定智能支座转角工况

单位:rad

工况编号	转角	工况编号	转角	工况编号	转角	工况编号	转角
1	-0.024 11	16	-0.014 10	31	0.002 30	46	0.012 35
2	-0.023 75	17	-0.013 64	32	0.002 87	47	0.012 65
3	-0.023 25	18	-0.010 95	33	0.003 36	48	0.013 24
4	-0.022 27	19	-0.010 78	34	0.005 10	49	0.013 87
5	-0.021 67	20	-0.008 88	35	0.006 20	50	0.014 82
6	-0.021 27	21	-0.008 28	36	0.006 89	51	0.015 68
7	-0.019 54	22	-0.007 08	37	0.007 35	52	0.015 81
8	-0.018 51	23	-0.006 73	38	0.008 49	53	0.016 03
9	-0.017 03	24	-0.006 07	39	0.008 76	54	0.016 46
10	-0.016 13	25	-0.004 29	40	0.009 06	55	0.017 23
11	-0.015 40	26	-0.00176	41	0.010 19	56	0.020 15
12	-0.015 07	27	-0.001 33	42	0.010 41	57	0.021 82
13	-0.014 99	28	0.001 25	43	0.010 51	58	0.022 47
14	-0.014 43	29	0.001 34	44	0.011 45	59	0.023 48
15	-0.014 32	30	0.001 49	45	0.011 95	60	0.024 09

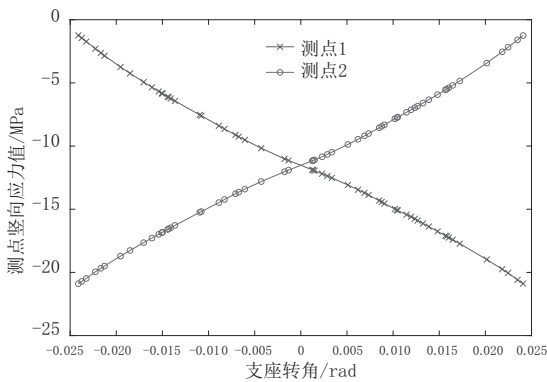


图11 固定智能支座测点1、测点2的应力计算结果

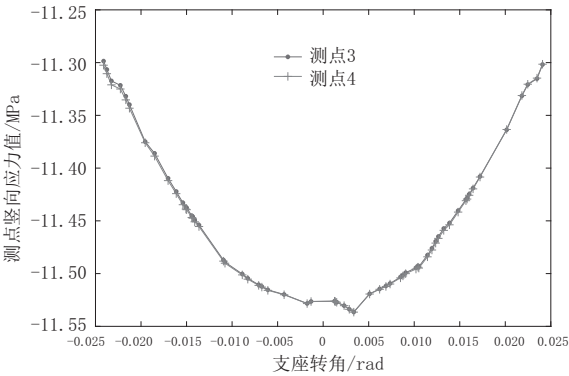


图12 固定智能支座测点3、测点4的应力计算结果

的准确性,可对上述5级阈值进行适当的截断调整,进而偏于安全地评估盆式支座转动状态。另一方面,根据图13所示测点3和测点4标准化应力比的曲线变化特点,确定标准化应力比变化范围限值 $\lambda_\theta=3\%$ 。则固定智能支座转角状态多级评估的通用公式(3)可具体表示为:

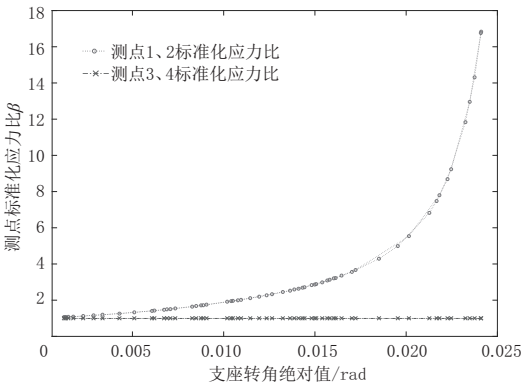


图13 固定智能支座测点标准化应力比与支座转角关系

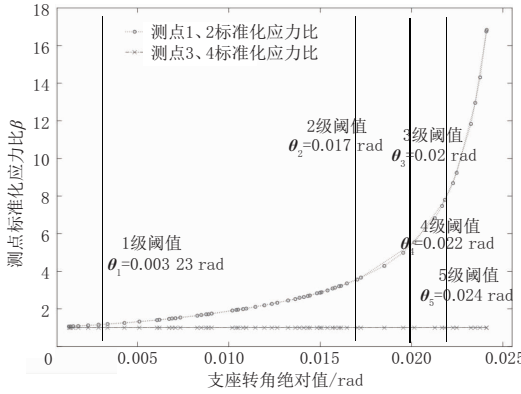


图14 固定智能支座测点标准化应力比与多级转角阈值关系

1级: $\beta_i \geq 1.1$, $\theta_1=0.003\ 23\ \text{rad}$
2级: $\beta_i \geq 3.5$, $\theta_2=0.850[\theta]$
3级: $\beta_i \geq 5.5$, $\theta_3=1.000[\theta]$
4级: $\beta_i \geq 8.3$, $\theta_4=1.100[\theta]$
5级: $\beta_i \geq 16.7$, $\theta_5=1.200[\theta]$
同时: $\frac{|\beta_i - \beta_{i-1}|}{|\beta_i|} \leq \lambda_\theta, \lambda_\theta=3\%$

(6)

3.3 滑动支座位移状态多级评估

根据《公路桥梁盆式支座》第5.1.6条规定,以及所选滑动支座型号,可知山竹沟洞中桥滑动支座的

顺桥向设计位移量为 ± 50 mm。在此给定滑动智能支座顺桥向位移变化范围 $1.2 \times [-50, 50]$ mm,并在此区间内随机生成55种位移工况,如表3所示。

表3 随机生成的滑动智能支座顺桥向位移工况

单位:mm

工况编号	位移量	工况编号	位移量	工况编号	位移量	工况编号	位移量
1	-58	15	-29	29	2	43	35
2	-54	16	-26	30	4	44	37
3	-51	17	-24	31	5	45	39
4	-50	18	-21	32	7	46	41
5	-49	19	-19	33	10	47	42
6	-48	20	-17	34	13	48	44
7	-46	21	-14	35	15	49	47
8	-43	22	-13	36	19	50	49
9	-41	23	-11	37	21	51	51
10	-38	24	-7	38	23	52	53
11	-37	25	-6	39	25	53	56
12	-35	26	-5	40	28	54	59
13	-32	27	-2	41	30	55	60
14	-31	28	0	42	32		

基于表3所示顺桥向位移工况,通过对双向滑动智能支座精细化模型的计算分析,可得支座橡胶板在4个测点位置的应力与顺桥向位移关系,如图15所示。

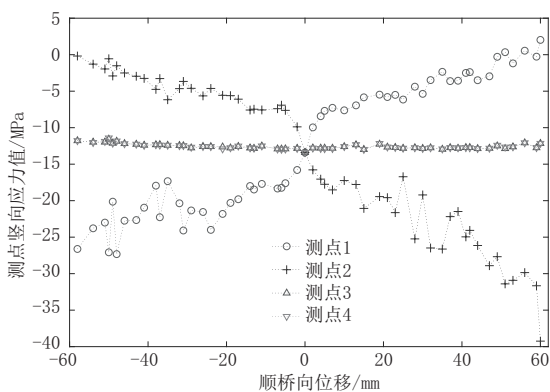


图15 滑动智能支座橡胶板测点应力与顺桥向位移关系

由图15可知:当双向滑动智能支座发生顺桥向位移时,沿支座滑动方向的测点1、测点2的应力变化明显,垂直布设的测点3、测点4的应力无明显变化。同时,随着支座顺桥向位移的逐渐增大,测点1、测点2的应力差距逐渐增大,而测点3、测点4的应力差距无明显变化,这与评估方法建立时的假设一致。

基于式(2)计算测点1和测点2、测点3和测点4的标准化应力比,根据其与位移限值关系,得到图16。

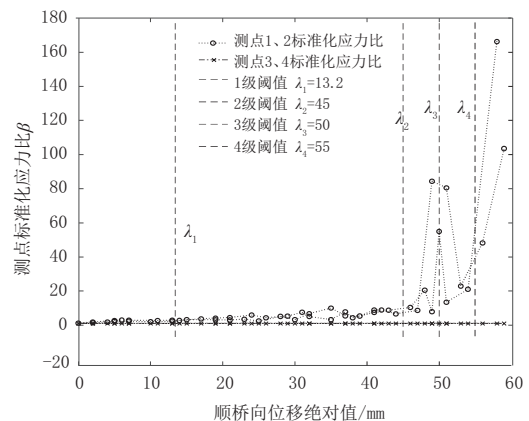


图16 滑动智能支座测点标准化应力比与多级位移阈值关系

由图16可知,对滑动智能支座顺桥向位移设置4级限值,分别为 $v_1=13.2$ mm(表1所示顺桥向位移绝对值的最大值), $v_2=0.90[v]$ 、 $v_3=1.00[v]$ 、 $v_4=1.10[v]$;通过分析图16所示对应关系,确定用于山竹沟洞中桥滑动智能支座顺桥向位移状态多级评估的标准化应力比阈值分别为: $\beta_{v_1}=2.01$ 、 $\beta_{v_2}=11.81$ 、 $\beta_{v_3}=19.05$ 、 $\beta_{v_4}=48.12$ 。考虑计算分析过程中可能存在的偏差,对上述4级阈值进行适当截断调整,进而偏于安全地评估滑动智能支座顺桥向位移状态。另一方面,根据图16所示测点3、测点4标准化应力比的曲线变化特点,确定标准化应力比变化范围限值 $\lambda_v=3\%$ 。则滑动智能支座仅顺桥向发生位移时,其位移状态多级评估的通用公式(4)可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ 级: } \beta_i \geq 2.0, & v_1 = 13.2 \text{ mm} \\ 2 \text{ 级: } \beta_i \geq 11.5, & v_2 = 0.9[v] \\ 3 \text{ 级: } \beta_i \geq 19.5, & v_3 = 1.0[v] \\ 4 \text{ 级: } \beta_i \geq 48.0, & v_4 = 1.1[v] \\ \text{同时: } \frac{|\beta_i - \beta_{i-1}|}{|\beta_i|} \leq \lambda_v, \lambda_v = 3\% \end{array} \right. \quad (7)$$

同理,得滑动智能支座仅横桥向发生位移时的4级评估阈值为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ 级: } \beta_i \geq 1.6, & v_1 = 2.44 \text{ mm} \\ 2 \text{ 级: } \beta_i \geq 8.4, & v_2 = 0.9[v] \\ 3 \text{ 级: } \beta_i \geq 9.2, & v_3 = 1.0[v] \\ 4 \text{ 级: } \beta_i \geq 20.0, & v_4 = 1.1[v] \\ \text{同时: } \frac{|\beta_i - \beta_{i-1}|}{|\beta_i|} \leq \lambda_v, \lambda_v = 3\% \end{array} \right. \quad (8)$$

当双向滑动智能支座同时发生顺桥向和横桥向位移时,其位移状态多级评估的通用公式(5)可具体表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{顺桥向} \\ \text{横桥向} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ 级: } \beta_i \geq 2.0, & v_1 = 13.2 \text{ mm} \\ 2 \text{ 级: } \beta_i \geq 11.5, & v_2 = 0.9[v] \\ 3 \text{ 级: } \beta_i \geq 19.5, & v_3 = 1.0[v] \\ 4 \text{ 级: } \beta_i \geq 48.0, & v_4 = 1.1[v] \\ \text{且} \\ 1 \text{ 级: } \beta_i \geq 1.6, & v_1' = 2.44 \text{ mm} \\ 2 \text{ 级: } \beta_i \geq 8.4, & v_2' = 0.9[v] \\ 3 \text{ 级: } \beta_i \geq 9.2, & v_3' = 1.0[v] \\ 4 \text{ 级: } \beta_i \geq 20.0, & v_4' = 1.1[v] \end{array} \right. \quad (9)$$

4 结 语

(1)基于智能支座各测点应力随支座转动、位移量不同而变化的特点,提出了综合考虑盆式支座橡胶板4个测点应力变化的标准化应力比指标。基于此,给出了智能盆式支座转角、位移状态多级评估的理论方法。

(2)以实际工程山竹沟垌中桥为例,通过桥梁整体模型力学分析,实现了对该桥智能盆式支座选型。

(3)建立了用于支座多种工作状态模拟的全实体精细化有限元模型,基于该模型,明确了支座转角、位移变化与标准化应力比指标之间的内在关系;给出了针对山竹沟垌中桥支座转角、位移状态多级评估的各级标准化应力比阈值,实现了对服役期支座转角、位移状态的多级评估。

(4)感谢深圳市科技计划技术攻关项目“重

20180126 桥梁结构智能健康监测和安全评估系统研发”、广东省省级科技计划项目“基于纳米导电橡胶传感技术的桥梁智能支座健康监控系统研发”、广东省交通运输厅行业研发中心清单支持项目“基于纳米导电橡胶传感技术的桥梁智能支座健康监控系统研发”的资助;感谢广东省南粤交通投资建设有限公司——湛江环城高速南三岛大桥(坡头至南三岛段)项目的支持。

参考文献:

- [1] 刘山洪,刘毅.桥梁病害种类及处理方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(增刊1):902-905.
- [2] 王钧利.曲线箱梁桥的病害分析及设计对策[J].中外公路,2005(4):102-105.
- [3] 宋长斌.公路桥梁支座常见病害浅析[J].青海交通科技,2012(2):28.
- [4] KO J M, NI Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges [J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1715-1725.
- [5] 贺叙龙,胡柏学,曾威,等.矮寨特大桥结构健康监测系统[J].中外公路,2011,31(6):10-13.
- [6] 丁幼亮,王晓晶,王高新,等.珠江黄埔大桥钢箱梁温度长期监测与分析[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(5):945-949.
- [7] CUNHA A, CAETANO E, MAGALHES F, et al. Recent perspectives in dynamic testing and monitoring of bridges [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20(6): 853-877.
- [8] 魏存杰.桥梁橡胶支座常见的病害及原因分析[J].化学工程与装备,2010(8):124-125.
- [9] 张勇,侯广伟,庄军生.既有铁路桥梁支座病害调查及原因分析[J].铁道建筑,2011(12):51-53.
- [10] 臧晓秋,李学斌,李东昇,等.三向测力盆式橡胶支座的设计及试验研究[J].铁道建筑,2012(4):1-5.
- [11] 裴蓉蓉,李金保,田建德,等.液压式调高测力盆式橡胶支座调高性能试验[J].公路,2008(10):50-53.
- [12] HA D H, KIM D, CHOO J F, et al. Energy harvesting and monitoring using bridge bearing with built-in piezoelectric material [C]//IEEE the 7th International Conference on Networked Computing. Gumi, Korea (South), IEEE, 2011: 129-132.
- [13] KIM J, PARK Y, CHOI I, et al. Development of smart elastomeric bearing equipped with pvdf polymer film for monitoring vertical load through the support[J]. VDI Berichte, 2002, 1685: 135-139.
- [14] CHANG S J, KIM N S. Development of smart seismic bridge bearing using fiber optic bragg-grating sensors [C]//SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. San Diego, California, United States: International Society for Optics and Photonics, 2013, 8692: UNSP 869228.
- [15] 聂新民,盖卫明,陈宜言,等.一种智能盆式支座及支座监测系统:CN211446575U[P].2020-09-08.