

# 脉动风效应对转体结构的稳定性影响研究

王家伟, 孙全胜\*

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘要:**以往对转体结构稳定性敏感性分析的因素是:静力荷载工况、地震荷载工况、转动速度及加速度等,忽略了脉动风效应对桥梁稳定性的影响。该文通过有限元分析方法,研究了脉动风效应对结构的动力响应。对横向、竖向脉动风对结构产生的弯矩与静力风效应产生的弯矩进行对比分析,利用球铰压应力沿径向变化指标,评价脉动风效应对结构稳定性的影响。结果表明:脉动风效应对结构稳定性影响较大,其产生的横向不平衡力矩是确定桥梁转盘尺寸的重要因素,而非仅由转体重量唯一控制。

**关键词:**转体施工;有限元分析;桥梁稳定性;T形刚构;脉动风;风致振动

## 1 前言

转体工艺始于20世纪40年代,最早在拱桥的拱架施工中采用竖转法使拱架拼装合龙。在竖转法产生30多年后,才在竖转法的启迪下开始了平转法的尝试。1976年,奥地利多瑙河运河大桥施工时,对跨度为(55.7+119+55.7)m的双塔斜拉桥采用了平转施工,转体重量3000 t,成为世界上采用平转施工的第一座斜拉桥。随后桥梁转体施工在世界范围内迅速发展,其转体重量由千吨级上升到万吨级,从有平衡重转体发展到无平衡重转体,从直线桥梁转体发展到曲线桥梁转体。目前转体重量最大的桥梁位于中国山东菏泽市,转体重量为2.48万t。

静力荷载工况对结构稳定性的影响已经有较多报道:主要研究了主梁单侧超重、改变钢束张拉力、静力风、混凝土重度及弹性模量、转盘尺寸等参数的变化对结构的响应。王立峰、袁崇伟以一座斜拉桥转体施工为例,提出自重、斜拉索张拉力、收缩徐变对转体桥梁的稳定性影响较大;鲁锦华在《大吨位连续刚构桥转体施工控制及稳定性》中,以挠度变化率 $\theta$ 、应力变化率 $\omega$ 作为转体桥梁稳定性判断指标,得到静力风荷载对转体结构稳定性的影响。

在动力荷载工况下,主要研究了转动加速度、地震

效应、列车诱发振动效应等对结构的响应。黄伟文采用Ansys软件建立了有限元模型,对比分析了转体桥梁最大悬臂状态和成桥状态的动力特性。结果表明:对转体桥动力稳定性影响起控制作用的是前3阶振型,最不利工况为最大悬臂状态;孙永存在绥芬河斜拉桥水平转体阶段受力研究中提出,改变转动加速度、转动速度对转盘结构、主梁结构稳定性影响有限;高日、张磊等在列车诱发振动对转体施工桥梁稳定性影响分析中,利用加速度传感器测试了不同类型列车通过时球铰附近的地基振动情况,评估了列车诱发的振动对转体桥稳定性的影响。结果表明:列车诱发的振动不会对该转体施工桥梁的稳定性产生很大的影响。

根据目前国内外的研究现状,静力、动力荷载工况对转体结构稳定性影响的研究比较成熟,但对于风荷载效应的研究不够深入,仅对静力风效应进行评价而忽略了脉动风对结构的影响。世界上第一座桥梁因风致振动引起倒塌事故发生在1818年,桥梁设计领域对风致振动效应缺乏认识,导致Dryburgh Abbey悬索桥毁于大风。经过多年的发展,已对风致桥梁振动及其抗风理论做了深入的研究并取得了丰富的成果。目前对风致振动的研究主要针对大跨径的斜拉桥、悬索桥这种横向抗扭刚度较小的结构,风致振动效应会对主梁产生较大的动力反应。对于T形刚构桥来说,结构自重较大,刚度较大,风致振动对结构的响应较小,

收稿日期:2020-05-06(修改稿)

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:2572017AB18)

作者简介:王家伟,男,博士研究生,工程师。E-mail:wjw526@126.com

\*通信作者:孙全胜,男,博士,教授。E-mail:hrbsqs@126.com

一般不进行特别要求。但对于转体桥梁结构:墩高、悬臂大,单点悬臂支撑体系的稳定性差,对风致振动的效应不可忽略。另外目前对结构稳定性评价指标多采用挠度变化率 $\theta$ 、应力变化率 $\omega$ ,而忽略了转体结构最容易失稳的位置——球铰转盘。

基于以上问题,该文以一座2跨62 m连续刚构转体桥为例,通过Ansys建立全桥有限元模型,并采用Matlab软件编程实现脉动风速时程的模拟,最后将脉动风以力的形式加载到有限元模型上进行计算。研究动风荷载对转体结构产生的响应,弥补以往研究中的不足,并且创新性地采用球铰压应力沿着径向变化指标,评价脉动风效应对结构稳定性的影响。并分别对横向、竖向脉动风对结构产生的弯矩与静力风效应进行对比分析。

2 研究背景

桥梁位于青岛新机场内。新机场场址位于青岛市胶州市中心东北14 km,大沽河西岸,北侧紧邻胶济客运专线,南侧紧邻胶济铁路。新机场处于环胶州湾北部的核心区域,市域范围内居中位置,距离东岸城区(青岛)约50 km,距离北岸城区(红岛)约18 km,距离西岸城区(黄岛)约40 km。

新机场主要通过3条高架道路和一条地铁线连接至主城区内。高架桥跨越现状铁路及一条现状河流,现状铁路线交通繁忙,是沟通该区域南北方向客流量的主要铁路交通线。因此如何在不中断铁路交通的情况下进行桥梁施工,成为桥梁设计需要考虑的重要因素。

桥梁桥跨布置为(62+62) m预应力混凝土T形刚构,转体半径56.94 m,转体重量超过10 000 t。桥梁宽度为21.3 m,上部结构采用预应力混凝土单箱三室斜腹板箱梁,下部结构采用墩梁固结,主梁转体墩采用双薄壁截面,下接转体平台,转体平台支撑在承台上,钻孔灌注桩基础。转盘结构采用环道与中心支撑相结合的球铰转动体系,转体角度为50.1°。桥梁布置图如图1所示。

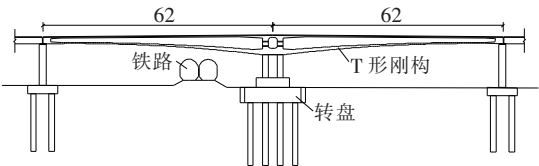


图1 桥梁布置图(单位:m)

3 研究方法

3.1 脉动风荷载的模拟方法

1940年在Tacoma Narrows修建的一座悬索桥,刚通车后出现了在风的作用下强烈振动的倾向,4个月后发生断裂倒塌。广东东海九江公路大桥,结构形式为斜拉桥,在施工中吊机被风吹倒砸坏主梁。上海杨浦大桥斜拉索在涡振和雨振下损坏索套。风致振动对桥梁结构的影响越来越受到专家、学者们的重视。

一般地,在T形刚构桥稳定性分析时,因为结构自重较大,刚度较大,风致振动对结构的响应较小,一般不进行特别要求。但对于转体桥梁结构:墩高、悬臂大,单点悬臂支撑体系的稳定性差,对风致振动的效应不可忽略。风对桥梁的动力效应主要包括:①桥梁颤振与弛振;②桥梁抖振;③桥梁涡激振动。在桥梁转动过程中,脉动风对桥梁的作用主要是抖振力效应。

3.1.1 主梁三分力系数的计算

三分力系数是一个无量纲参数,描述了桥梁在平均风作用下结构断面的气动力特征。与截面形状、风的来流方向及Reynolds Number 3个参数有关。三分力系数对静风荷载、脉动风荷载的计算是一个必不可少的参数,因此在计算桥梁结构风致振动响应之前,首先要确定桥梁结构的三分力系数。由于三分力系数与高宽比相关,高宽比越大,其受风荷载作用越明显。为模拟T形刚构桥梁在环境风作用下的最不利受力工况,取悬臂根部与梁端截面的平均值作为计算截面。

计算采用FEA软件模拟,主梁高度为4 m,宽度为21.3 m。风场模拟既保证计算的准确性,又要考虑计算结果的速率,计算域的选择尤为重要。经过多方案比较后,最终确定2D计算域为25B(B为构件截面宽度)×15B的矩形。在2D计算域中,网格划分采用四边形网格,网格划分如图2所示。

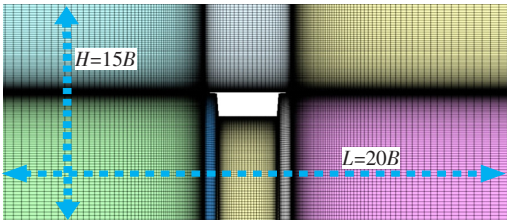


图2 计算域网格划分示意

主梁断面三分力系数在风轴坐标系下随风攻角的变化曲线如图3所示。

计算脉动风速与风荷载的关系时需要气动力系

数,气动力系数是三分力系数的导数,因此对三分力曲线进行拟合。为了保证精度,阻力、升力、扭矩系数采用二次抛物线的方式进行拟合,拟合系数如表 1 所示,拟合曲线见图 4~6。

拟合曲线表达式为:

$$C_i(\alpha)=p_1\alpha^2+ p_2\alpha+ p_3,(i=d,l,m) \tag{1}$$

表 1 三分力系数拟合方程及精度

三分力系数	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$R$
$C_d$	0.004 0	0.027 5	1.232 0	0.991
$C_l$	-0.042 0	0.019 8	0.017 0	0.987
$C_m$	-0.001 9	0.012 2	0.196 0	0.970

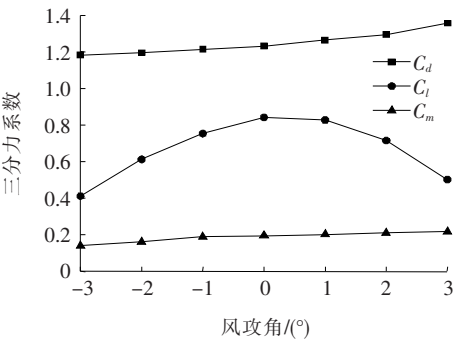


图 3 主梁断面三分力系数

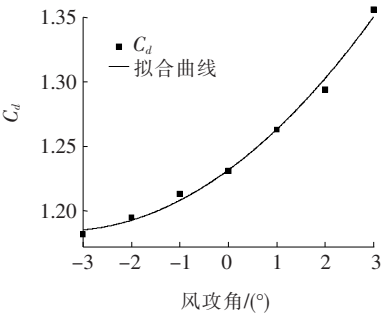


图 4 阻力系数(Cd)拟合曲线

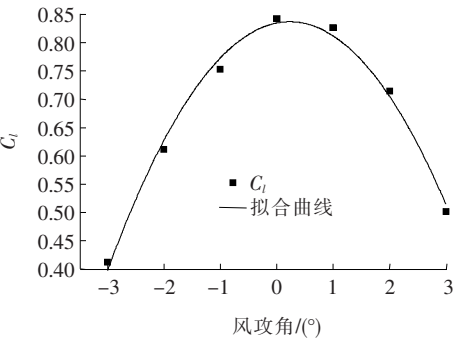


图 5 升力系数(Cl)拟合曲线

分别对阻力、升力、扭矩求导得到气动力系数:

$$C'_i(\alpha)=2 p_1\alpha+ p_2,(i=d,l,m) \tag{2}$$

则在风攻角为 0°时, $C_d=1.231,C_l=0.842,C_m=0.195;C'_d=0.0275,C'_l=0.0198,C'_m=0.0122$ 。

3.1.2 流场的特性

在 0°风攻角下压力矢量云图如图 7 所示,主梁断面在来流作用下,箱梁截面顶部的压强较大,箱梁前、底及背面区的压强较小。从这种压强分布形式看,截面的阻力、升力系数较大。箱梁截面有明显的钝体特征,顶底部速度及压力较大,到达箱梁后部之后逐渐降低。因此脉动风对主梁的作用较大,在转动施工过程中必须要考虑。

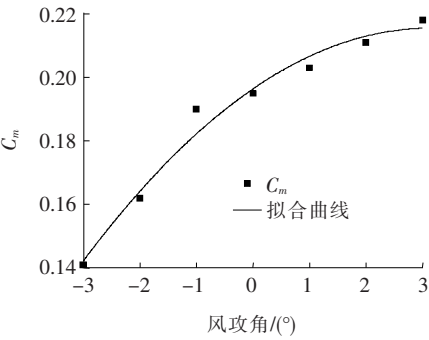


图 6 扭矩系数(Cm)拟合曲线

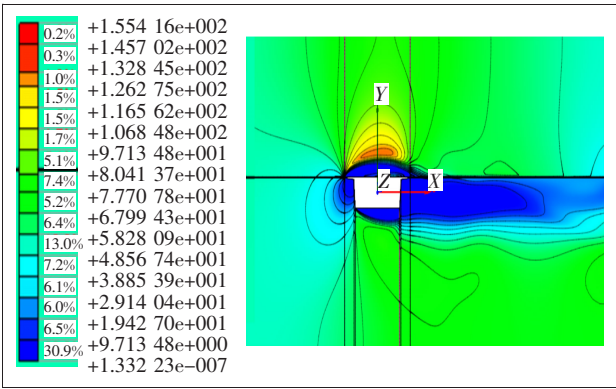


图 7 压力矢量云图(单位:Pa)

3.1.3 桥梁风荷载计算

转体桥梁在转动过程中的刚度较小,在紊流风荷载引发的桥梁结构受迫振动下可能会产生失稳状态,因此需要对转动结构的抖振响应进行计算,目前分析理论有 3 种:Davenport 随机抖动理论、Scanlan 颤抖振理论和抖振反应谱理论。该文的研究基于 Davenport 理论,是目前研究抖振问题的主要方法。桥梁结构所受抖振力具有两个特点:① 三分力特征与脉动风频率特性无关;② 沿桥梁宽度方向的风荷载是完全相关的。

静力风荷载计算:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 C_d(\alpha) D \quad (3)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_l(\alpha) B \quad (4)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho U^2 C_m(\alpha) B \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $U$  为来流平均风速;  $\alpha$  为风攻角;  $D$  为构件截面高度;  $B$  为构件截面宽度。

抖振力计算:

$$L_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left\{ 2C_l(\alpha) \frac{U(t)}{U} + [C'_l(\alpha) + C_d(\alpha)] \frac{W(t)}{U} \right\} \quad (6)$$

$$D_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[ 2C_d(\alpha) \frac{U(t)}{U} + C'_d(\alpha) \frac{W(t)}{U} \right] \quad (7)$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[ 2C_m(\alpha) \frac{U(t)}{U} + C'_m(\alpha) \frac{W(t)}{U} \right] \quad (8)$$

式中:  $U(t)$ 、 $V(t)$ 、 $W(t)$  分别为顺风向、横风向、竖方向速度。

根据式(6)~(8)可知:抖振力与三分力系数及其导数,顺风向速度、竖风向速度有关,其中  $U(t)$ 、与  $W(t)$  风速是时间  $t$  的函数,称之为脉动风。因此需要对脉动风进行模拟。该文主要采用 Matlab 软件编程实现脉动风速时程的模拟,得到风速时程曲线,采用线性滤波法进行模拟。水平向风速谱采用 Davenport 风速谱,竖向风速谱采用 Panofsk 风速谱。此次脉动风模拟作用点按照 12.4 m 间距布置,全桥共计 11 个点,其中悬臂端部为第 1 点、11 点,悬臂根部为第 6 点。作用时间为 600 s,加载步长为 0.1 s。第 1 点风速时程及拟合情况如图 8~11 所示。

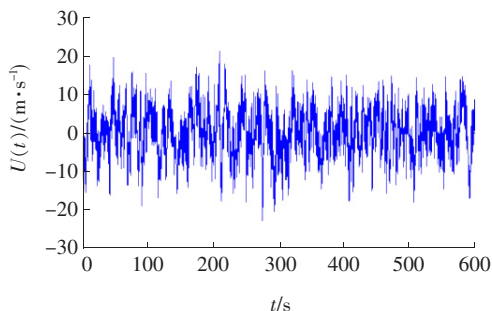


图 8 第 1 点顺风向脉动风速时程曲线

根据脉动风功率谱线,模拟谱与目标谱之间拟合度较高,说明上述脉动风模拟结果合理。通过模拟的顺风向、竖风向风速时程曲线,计算脉动风荷载时程曲

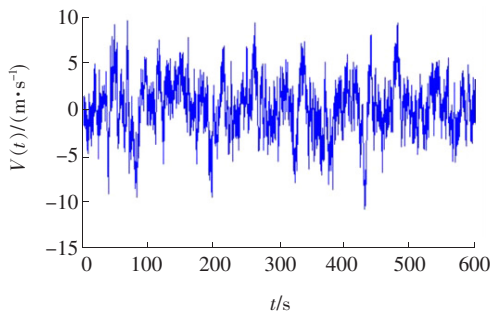


图 9 第 1 点竖风向脉动风速时程曲线

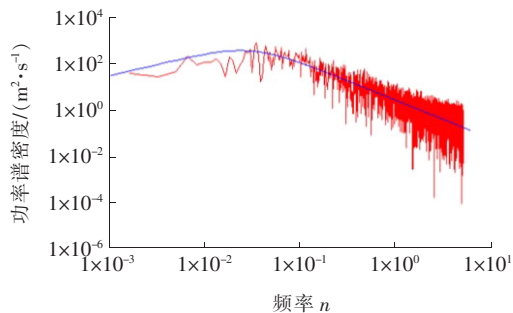


图 10 第 1 点顺风向模拟谱与目标谱比较

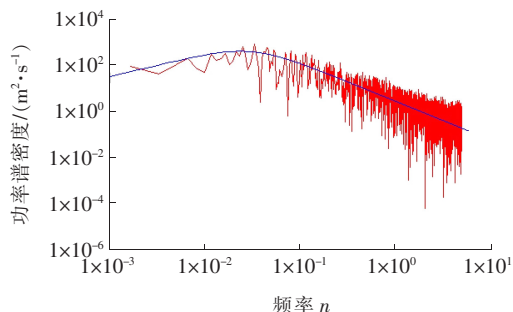


图 11 第 1 点竖风向模拟谱与目标谱比较

线,加载到模型中计算风荷载对转体结构的位移、应力及转盘的响应。

### 3.2 建模方法

桥梁计算采用 Ansys15.0 软件,研究脉动风对主梁的挠度、应力计算时采用全桥整体模型,主梁、桥墩采用 Beam188 单元,如图 12 所示。为了模拟桥墩与主梁之间的固结,墩梁相接的位置采用 MPC184 单元,全桥共计 156 个单元。分析球铰转盘受力时采用局部模型:上、下转盘及桥墩局部采用 Solid95 单元,转盘接触面采用接触单元,模型共计 27 215 个节点,如图 13 所示。由于主梁承受不平衡重等方面的原因,桥墩底会对转盘产生不平衡力矩。力矩对转盘的作用通过接触面来传递,而 Ansys 施加弯矩的方式仅有单点施加。该文采用节点耦合的方式进行处理,转盘施加力矩位置上方设置 Mass21 质量单元,该质量单元有 6 个自由度,与 Solid95 单元自由度一致。将质量



单元与转盘单元各节点之间进行自由度耦合,通过在质量单元上施加节点弯矩的方式将弯矩传递到实体单元转盘结构上,如图 14 所示。

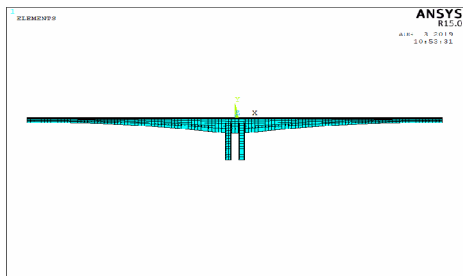


图 12 全桥整体模型

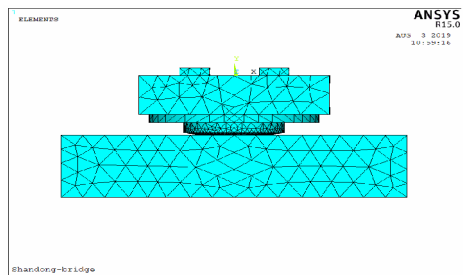


图 13 转盘结构局部模型

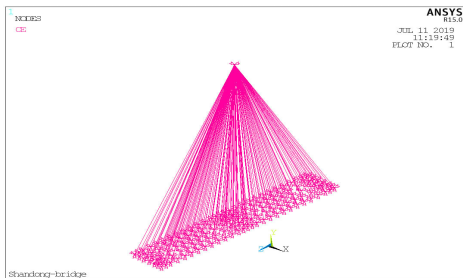


图 14 Mass21 单元与实体单元耦合

## 4 结果及讨论

根据前文介绍,静力风荷载对主梁产生阻力、升力和扭矩作用,通过三项力的作用对主梁产生弯矩的作用。静力风作用采用规范中的计算公式。

主梁单位长度上的静力风荷载计算式为:

$$F_H = \frac{1}{2} \rho V_g^2 C_H H \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $V_g$  为阵风风速;  $H$  为截面高度。

箱形截面的阻力系数  $C_H$  计算如式(10)所示:

$$C_H = \begin{cases} 2.1 - 0.1 \left( \frac{B}{H} \right) & 1 \leq \frac{B}{H} \leq 8 \\ 1.3 & 8 < \frac{B}{H} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)可知:静力风荷载对主梁产生最大横向弯矩  $M_z = 3\,104.08 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,最大竖向弯矩  $M_y = 11\,029.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。脉动风在悬臂根部的弯矩时程曲线如图 15、16 所示。

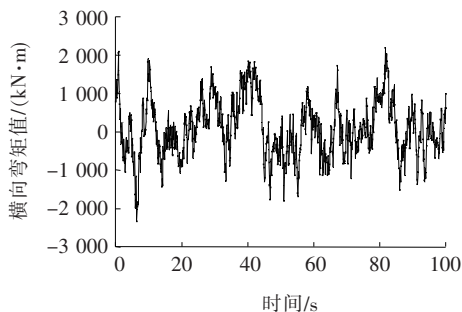


图 15 悬臂根部横向弯矩时程曲线(脉动风)

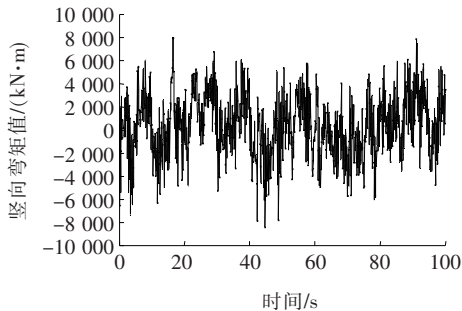


图 16 悬臂根部竖向弯矩时程曲线(脉动风)

由图 15、16 可知:脉动风在 6.4 s 时产生的最大横向弯矩为  $-2\,330 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,是静力风的 75.2%;脉动风在 44.7 s 时产生最大竖向弯矩为  $-8\,416.02 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,是静力风的 76.3%。如不考虑风荷载的影响,或仅考虑静风荷载的影响,对结构进行受力分析是不严谨的。该文计算脉动风效应时,采用 CFD 有限元分析方法,计算量较大,为了减小工程设计中的计算量,建议对式(9)进行优化,用以考虑脉动风与静力风叠加作用,详见式(11):

$$F_H = \frac{1}{2} k \rho V_g^2 C_H H \quad (11)$$

式中:  $k$  为静力风放大系数,根据该文的计算结果,  $k$  值取 0.76,对于更大跨度的转体结构,应适当放大  $k$  值。

在横向风、竖向风作用下,球铰不同位置的径向压力如图 17 所示。

由图 17 可知:在横向风作用下,球铰外沿最大压应力增加 3.3 MPa,另一侧压应力减小 3.02 MPa。竖向风作用下,球铰外沿最大压应力增加 11.8 MPa,另一侧压应力减小 11.4 MPa,竖向脉动风对球铰压应力影响较大,应力最大增加 60%。脉动风荷载对转体结

构稳定性影响比较敏感。

文献[22]中提出了主梁单侧超重5%情况下对悬臂根部、球铰压应力的影响。当主梁一侧产生自身重量的5%不平衡重时,悬臂根部产生的弯矩为77500 kN·m,球铰最大压应力变化为14.9 MPa。脉动风效应在悬臂根部产生的弯矩是单侧超重效应的11%,球铰压应力为79%。目前国内外研究普遍认为:单侧超重情况为转体桥梁结构的最不利情况,施工前如不进行配重,桥梁将发生严重的倾覆事故。通过对比分析,进一步证明了脉动风效应对转体结构稳定性影响较大,设计时应进行严格计算,适当加大球铰摩擦矩来提高结构的稳定性。

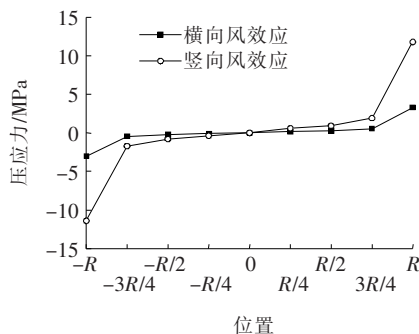


图 17 球铰沿径向压应力变化

## 5 结论

采用有限元方法,对转体桥梁在转动过程中可能遇到的动力风荷载进行模拟,得到以下结论:

(1) 转体结构承受的水平向风速谱采用 Davenport 风速谱,竖向风速谱采用 Panofsk 风速谱进行模拟。利用 Matlab 软件实现对脉动风速时程的模拟,得到风速时程曲线,模拟谱与目标谱之间拟合度较高,模拟结果准确可靠。

(2) 根据计算:脉动风效应产生的横向弯矩约为静力风效应的 76%,其效应不可忽略。

(3) 脉动风效应对球铰产生较大的不平衡力矩,其不平衡力矩大小将影响球铰的稳定性,在球铰设计时应考虑两者产生的效应。

## 参考文献:

- [1] Gharpure, D. R., Biyani, Sachin R. Poir Bridge: Construction of India's First Horizontal Swing Bridge[J]. Indian Concrete Journal, 2007, 81(8): 33-35.
- [2] J. Zhang, T.E. El-Diraby, Constructability Analysis

of the Bridge Superstructure Rotation Construction Method in China[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2006, 132(4): 353-360.

- [3] Siwowski, Tomasz, Wysocki, et al. Horizontal Rotation Via Floatation as an Accelerated Bridge Construction for Long-Span Footbridge Erection: Case Study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(4): 124-126.
- [4] 唐晓. 浅谈转桥梁体施工的发展及在连续刚构桥运用[J]. 城市地理, 2017(6).
- [5] 杜嘉俊. 桥梁转体法施工技术创新与展望[J]. 铁道建筑技术, 2012(4).
- [6] 张健峰, 钟启宾. 桥梁水平转体法施工的成就及发展[J]. 铁道标准设计, 1992(6).
- [7] 王立峰, 袁崇伟, 孙永存. 转体斜拉桥施工控制中的参数敏感性分析[J]. 东北林业大学学报, 2007(6).
- [8] 鲁锦华. 大吨位连续刚构桥转体施工控制及稳定性研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2016.
- [9] 卢彭真. 民间桥梁震害分析及防治对策[J]. 科学技术与工程, 2005(1).
- [10] 黄伟文. 转体施工 T 形刚构桥抗风性能研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2014.
- [11] 孙永存. 绥芬河斜拉桥水平转体阶段受力研究[D]. 东北林业大学学报, 2007.
- [12] 孙永存. 转体桥梁特征构件受力分析[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2013(2).
- [13] 王二强, 孙永存. 万吨级斜拉桥转体施工过程的力学特性[J]. 交通运输工程学报, 2015(3).
- [14] 高日, 胡志波, 高涛, 等. 列车诱发振动对转体施工桥梁稳定性影响分析[J]. 铁道建筑, 2014(5).
- [15] 张磊. 列车诱发振动对大悬臂平转梁稳定性的影响[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2011.
- [16] 瞿景东. 风致动力效应对 T 构桥梁转体施工的影响研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2018.
- [17] 翟鹏程. 转体梁施工中的不平衡问题及风致振动研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2008.
- [18] 顾明, 陈甦人. 大跨桥梁气动耦合抖振响应分析的实用方法[J]. 土木工程学报, 2004(2).
- [19] Davenport A G. Buffeting of a Suspension Bridge by Storm Winds[J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1962, 88(ST3): 233-268.
- [20] 袁波, 应惠清, 徐佳伟. 基于线性滤波法的脉动风速模拟及其 MATLAB 程序的实现[J]. 结构工程师, 2007(4).
- [21] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [22] Wang Jiawei, Sun Quansheng. Parameter Sensitivity Analysis of Stability of T-Shaped Rigid Frame Bridge by Adopting Swivel Construction Method[J]. International Journal of Structural Integrity, 2020, 16(5).