

# 特大跨越江悬索桥龙卷风致静力响应

操金鑫<sup>1,2</sup>, 杨一<sup>2</sup>, 曹曙阳<sup>1,2</sup>, 葛耀君<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于大跨度桥梁主梁龙卷风荷载物理识别结果, 开展大跨径悬索桥龙卷风致响应的计算分析, 将其与常规风荷载下的风致响应进行对比, 探讨桥梁抗龙卷风设计时, 用常规风荷载模式进行结构龙卷风响应等效的可能性。结果表明, 与常规风荷载不同, 龙卷风荷载具有局部影响性且升力作用相对明显。涡流比、龙卷风相对距离以及加载点桥轴向位置都对悬索桥的龙卷风致结构响应有所影响, 不同类型的响应随上述 3 个参数的变化规律不尽相同。常规风致响应与龙卷风致响应本身具有不同的特性, 两者在数值上的表现也有较大不同, 两者的荷载等效方法有待研究。

**关键词:** 龙卷风; 风荷载; 悬索桥; 响应分析

中图分类号: TU312+.1

文献标志码: A

## Tornado-Induced Static Structural Response of Suspension Bridges Spanning Across Large River

CAO Jinxin<sup>1,2</sup>, YANG Yi<sup>2</sup>, CAO Shuyang<sup>1,2</sup>, GE Yaojun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the previous tornado-induced wind load identification results of long-span bridges, the calculation and analysis of the tornado-induced responses of a long-span suspension bridge were conducted, and the tornado-induced responses were further compared with the synoptic wind-induced responses to discuss the possibility of using synoptic wind load in tornado-resistant design of bridges. The results show that, the influence of tornado load is local, and the lift force is relatively significant, which differs from that of the synoptic wind load. The tornado-induced structural responses of the suspension bridge can be influenced by parameters such as the swirl ratio, relative distance of the tornado, and

the axial position of the loading points, whose impacts vary with different types of structural responses. Synoptic wind-induced responses differ both qualitatively and quantitatively from tornado-induced responses, leading to unresolved issues regarding load equivalence between the two.

**Keywords:** tornado; wind load; suspension bridge; response analysis

龙卷风是从积雨云中下垂并伸展到地面的强烈旋转的空气柱, 具有很强的破坏性<sup>[1]</sup>。龙卷风在全球发生频率约为 2 000 次·年<sup>-1</sup><sup>[1]</sup>。世界上龙卷风发生频率最高的是美国<sup>[2]</sup>。1961 至 2010 年间我国各级别龙卷风的平均发生频率仅为 85 次·年<sup>-1</sup>, 不及美国的十分之一<sup>[3]</sup>, 但其造成的破坏却不容忽视。近年来, 我国曾先后在江苏盐城(2016 年 6 月 23 日)和辽宁开原(2019 年 7 月 3 日)出现过 EF4 级的强龙卷, 前者致 98 人死亡、800 多人受伤, 后者致 7 人死亡、190 多人受伤<sup>[4]</sup>。根据相关调研, 我国的龙卷风多发于东部沿海地区, 如广东、江苏、安徽等地<sup>[4-5]</sup>, 这些地区也正是我国大跨度桥梁等重要基础设施最为密集的区域之一。同普通建筑相比, 大跨度桥梁等线状水平结构更易受到龙卷风的作用<sup>[6]</sup>。为了防止这些地区的大跨度桥梁在龙卷风作用下遭受破坏而造成严重事故, 对这些地区的大跨度桥梁进行龙卷风作用下的安全性的研究具有重要意义。

目前关于龙卷风的结构风荷载以及龙卷风致结构响应的大部分研究关注的结构类型是普通建筑物<sup>[7]</sup>、输电塔<sup>[8]</sup>以及核电站冷却塔<sup>[9]</sup>等, 针对桥梁结构的研究还非常少。其中一部分研究仍然采用基于常规边界层风洞实验的风荷载参数<sup>[10]</sup>。最新的一些研究利用同济大学龙卷风模拟器对大跨度桥梁的龙卷

收稿日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(52178502, 51878504); 国家重点研发计划(2022YFC3803002); 土木工程防灾减灾全国重点实验室自主课题(SLDRCE19-B-01)

第一作者: 操金鑫, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁及结构抗风。E-mail: jinxin@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

风荷载进行了物理模拟<sup>[6,11]</sup>,但是对桥梁结构龙卷风致响应,尤其是对龙卷风荷载作用下与常规风荷载作用下的桥梁结构响应方面的异同研究得不够深入。

本文基于前期测试的大跨度桥梁主梁龙卷风荷载识别结果,分析了不同龙卷风涡流比、龙卷风相对距离及加载位置等因素对 1 760 m 特大跨悬索桥的龙卷风致响应的影响,并将其与常规风下的风致响应进行对比分析,为龙卷风多发区重要大跨度桥梁抗龙卷风设计提供参考。

## 1 龙卷风致荷载

### 1.1 荷载模式

与常规风荷载相似,龙卷风荷载也可以在体轴坐标系下被分解为阻力 $f_H$ 、升力 $f_V$ 和升力矩 $m_x$ ,若已知龙卷风设计风速、对应的三分力系数以及主梁几何参数,就可以计算出相应的主梁断面三分力。桥轴向长度为 $l$ 的主梁断面三分力计算公式如下:

$$f_H = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{FH} D l \quad (1)$$

$$f_V = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{FV} B l \quad (2)$$

$$m_x = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{mx} B D l \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $\rho$ 为空气密度,取 $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $U$ 为设计龙卷风风速; $C_{FH}$ 、 $C_{FV}$ 、 $C_{mx}$ 为主梁断面三分力系数,通过实验得到; $B$ 为主梁宽度; $D$ 为主梁高度; $l$ 为加载点间距。

本文采用的龙卷风荷载的三分力系数为前期开展的基于同济大学龙卷风模拟器的桥梁主梁断面刚体模型测压实验<sup>[6]</sup>的结果。实验得到了 5 种涡流比、27 个龙卷风相对距离( $r/B$ )条件下的主梁断面平均风力系数。图 1 是涡流比 $S_r=0.09$ 时的主梁断面平均风力系数云图,横轴表征龙卷风相对距离变化(横轴中心表示龙卷风涡核中心与主梁中心重合),纵轴表示桥轴向。图 1a 为阻力系数 $C_{FH}$ 云图,负值向左,正值向右。可以看出阻力方向始终指向龙卷风所在的那一侧,当主梁位于龙卷风涡核半径附近的时候阻力系数取到极值,当主梁位于涡核中心时,阻力系数几乎为 0。图 1b 为升力系数 $C_{FV}$ 云图,图中升力系数均为正值,表示龙卷风产生的升力始终向上,主梁位于龙卷风涡核中心时,升力系数有最大值。图 1c 为扭矩系数 $C_{mx}$ 云图,对于桥梁断面而言,扭矩顺时针为正,逆时针为负,扭矩系数极值在主梁位于龙卷风涡核半径时取得,主梁位于涡核中心时扭矩系数很小。

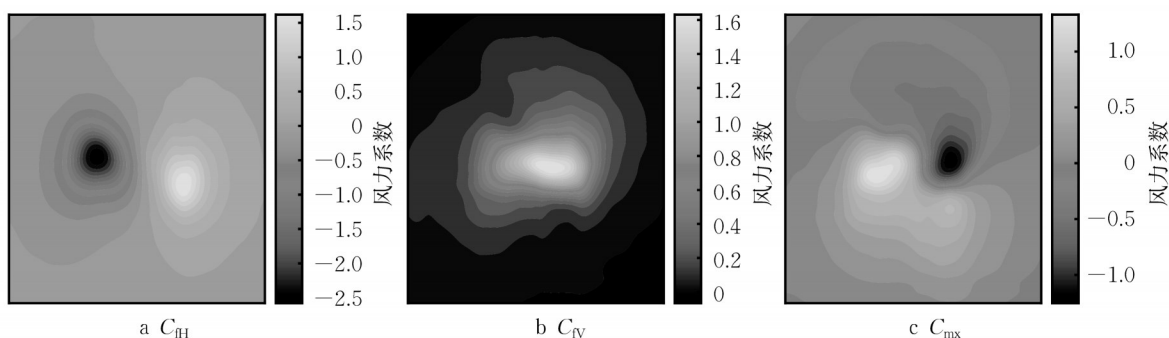


图 1 主梁断面平均风力系数云图 ( $S_r=0.09$ )

Fig. 1 Contours of mean sectional aerodynamic load coefficients ( $S_r=0.09$ )

### 1.2 桥梁模型

桥梁龙卷风致结构响应计算的原型为主跨 1 760 m 的钢箱梁悬索桥,如图 2 所示。加劲梁为扁平流线型钢箱梁,梁高 4.0 m,加劲梁含风嘴全宽 31.5 m,不含风嘴顶部宽 27.7 m;桥塔为混凝土柔性桥塔,塔柱从承台顶至鞍座底高度为 276.3 m;该桥主缆矢高 195.5 m,矢跨比约为 0.11,吊索间距为 18.0 m。

悬索桥的空间杆系有限元模型采用通用有限元计算软件 ANSYS 建立,主梁、桥塔、塔横梁采用

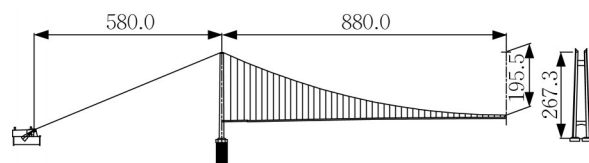


图 2 悬索桥总体布置(单位:m)

Fig. 2 General arrangement of suspension bridge (unit: m)

BEAM4 单元模拟,主缆和吊索采用 LINK10 单元模拟,二期恒载、索夹、吊索锚头采用 MASS21 单元模拟。主梁与吊索之间采用刚臂连接,主缆通过鞍座

固定于塔顶,主缆与塔顶自由度全部耦合,桥塔底部完全固结,边跨主缆底部与锚碇完全固结。悬索桥的三维杆系有限元模型 $x$ 轴方向为桥轴向, $y$ 轴方向为竖向, $z$ 轴方向为横向。

### 1.3 加载工况

桥梁原型所在地江苏省是1961年到2010年间记录到强龙卷次数最多的省份,EF2级28次,EF3级8次<sup>[3]</sup>。强龙卷一旦发生就会造成巨大的破坏。考虑到1760 m跨径悬索桥的结构重要性与江苏省强龙卷的发生频率,故以EF3级龙卷风的风速上限 $74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为龙卷风设计风速。

由于龙卷风荷载具有显著的空间非均匀性,并且在距离龙卷风涡核超过一定距离之后,荷载三分力系数几乎为0,故在计算龙卷风致响应时,风荷载加载点可以限制在一定范围内,而不必像常规风荷载那样全桥加载。前述实验获得的静三分力系数将被施加于主梁模型的28个节点上(节点间距为6 m)。计算中考虑不同涡流比以及龙卷风中心与桥面中心线距离的影响,另外还选取了3个加载梁段轴向位置,分别位于主梁跨中附近、1/4跨附近、3/4跨附近(图3),总计405种工况。龙卷风相对距离 $r/B$ 如图4所示,其中 $r$ 表示龙卷风涡核中心距桥面中心线的水平距离, $B$ 表示主梁宽度。

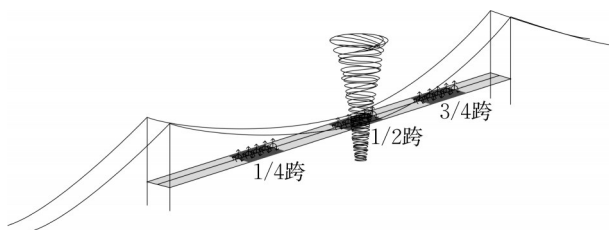


图3 加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of load cases

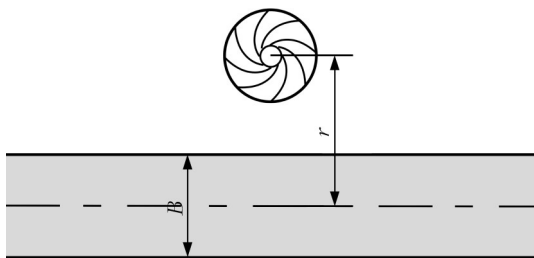


图4 龙卷风相对距离

Fig. 4 Relative distance between tornadic vortices and main beam

龙卷风荷载施加到对应节点之后,按照常规静力计算的方法进行龙卷风致结构响应计算,即计算出的是静力响应,没有考虑动力响应的计算。

## 2 龙卷风致结构响应计算分析

### 2.1 沿桥轴向变化特点

选取了涡流比 $S_r=0.09$ 与 $S_r=0.30$ 时主梁轴线位于龙卷风涡核半径处的情况,并将主梁断面三分力分别施加于悬索桥主梁跨中附近、1/4跨附近。龙卷风致响应结果是指包含恒载与龙卷风荷载作用下的结构响应与恒载单独作用下结构响应的净差值。

#### 2.1.1 主梁变形

主梁在龙卷风作用下的变形如图5所示。从图5a可以看出,龙卷风作用下主梁竖向净位移 $\delta_y$ 为正,主梁抬升,在龙卷风荷载加载点处,主梁竖向净位移达到最大值,当 $S_r=0.09$ 、加载于跨中附近且位于涡核中心时最大竖向位移甚至超过了1.3 m(恒载作用下最大竖向位移约为0.2 m),说明龙卷风的升力作用十分显著;而在远离加载点的区域,主梁竖向位移很小,可见龙卷风对桥梁竖向变形的作用表现出局部性的特征。上述变形特点与陈艾荣等<sup>[10]</sup>的结论一致。

从图5b可以看出主梁位于涡核半径时各工况对应的水平净位移 $\delta_x$ 均比前述的竖向净位移要小,但最大水平净位移也达到了0.8 m以上,依然不容忽视。

主梁在龙卷风作用下绕 $x$ 轴的净转角 $\theta_x$ 如图5c所示。当加载点位于跨中附近时,最大的转角出现在跨中附近,所有工况下的最大值在 $0.35^\circ$ 左右,说明与龙卷风升力作用相比,扭矩作用并不显著。

#### 2.1.2 主梁内力

龙卷风作用下主梁内力沿桥轴向的变化如图6所示。图6a展示了绕 $z$ 轴净弯矩 $M_z$ ,即竖向弯矩的变化。图示工况中 $M_z$ 的最大值达到了 $4 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (成桥状态下跨中弯矩约为 $0.4 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ),同样说明了龙卷风荷载升力作用的显著性及其局部影响性。图6b展示了绕 $y$ 轴净弯矩 $M_y$ ,即横向弯矩的变化。与水平净位移的情况类似, $M_y$ 也是表征龙卷风对悬索桥结构水平作用的量值,可以看出 $M_y$ 的变化较为显著。由图6c可以看出主梁绕 $x$ 轴扭矩 $T_x$ 在龙卷风加载点附近变化较大。主梁在龙卷风作用下产生的净轴力 $N$ 如图6d所示,轴力以受拉为正。当加载点位于跨中附近时,龙卷风作用下主梁产生的净轴力均为正值,而且沿桥轴向基本是均匀分布的(加载点位于跨中附近)。所有加载点位于跨中的工况中 $N$ 的最大值约为2200 kN,而在恒载作用下主梁轴力 $N$ 的最大值约为2000 kN(为了防止主梁纵向过大的位移,有限元建模约束了主梁两端纵向自由度),说明在龙卷风作用下,悬索桥主梁轴力变化

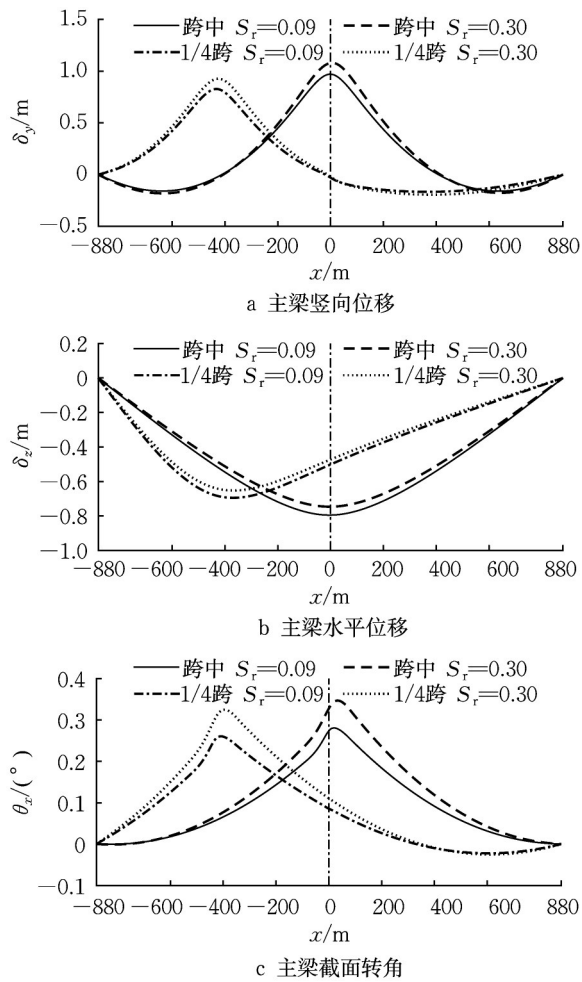


图5 主梁位于涡核半径时沿桥轴向的主梁变形

Fig. 5 Deformation of main beam along bridge axis at radius of the tornadic vortices

是不容忽视的。

此外,内力变形曲线(轴力除外)在龙卷风作用区域及其邻近区域的斜率变化更加剧烈,这与图5中主梁变形曲线不同。例如,图6a中主梁绕 $z$ 轴弯矩曲线的斜率在龙卷风作用区域附近存在明显突变,而图5a中主梁竖向位移曲线的斜率变化则较为平滑。

### 2.1.3 主缆应力

悬索桥在龙卷风作用下主缆应力 $\sigma_c$ 的变化如图7所示,可以看出,在龙卷风作用下, $\sigma_c$ 基本为负值,即主缆应力较恒载作用下减小,这也是龙卷风升力作用的一种表现。图中所有工况下的主缆应力绝对值均小于15 MPa,与恒载作用下660 MPa的最大应力相比,占比不到2.3%,几乎可以忽略。

### 2.1.4 吊索应力

悬索桥在龙卷风作用下吊索应力的变化 $\sigma_s$ 如图8所示,可以看出吊索局部应力变化很大,不能忽略。

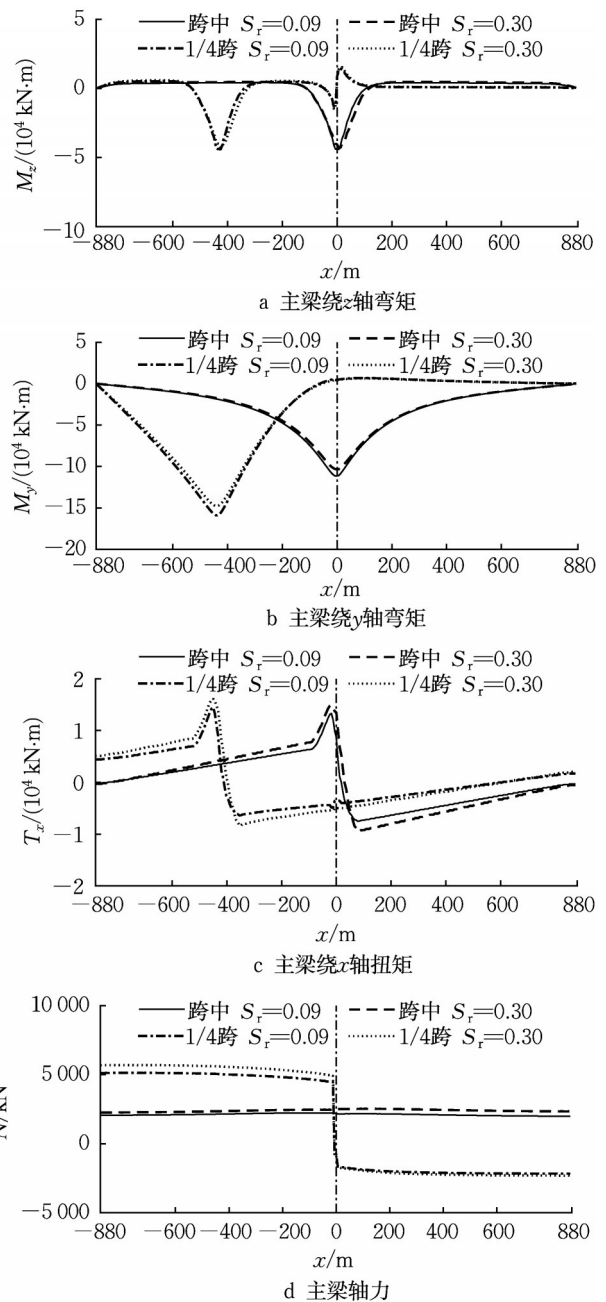


图6 主梁位于涡核半径时沿桥轴向的主梁内力

Fig. 6 Internal forces of main beam along bridge axis at radius of the tornadic vortices

## 2.2 龙卷风荷载加载位置的影响

为了讨论龙卷风加载位置的影响,在龙卷风致结构响应过程中考虑了3种加载点桥轴向位置:跨中附近、1/4跨附近、3/4跨附近,如图3所示。由于悬索桥结构具有对称性,加载点位于1/4跨附近、3/4跨附近时的龙卷风致结构响应具有相类似的特征,故在本节中仅对加载点位于跨中附近和1/4跨附近时的龙卷风致结构响应进行分析讨论。

不同龙卷风加载位置的结构响应变化情况参见图5~8。龙卷风加载点位置变化并不会影响龙卷风

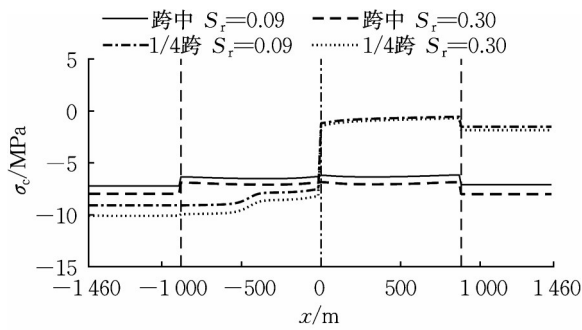


图7 主梁位于涡核半径时沿桥轴向的主缆应力

Fig. 7 Stress of main cable along bridge axis at radius of the tornadic vortices

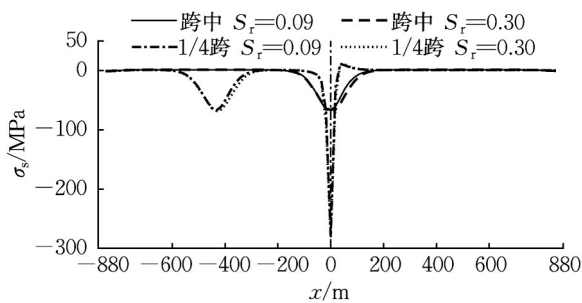


图8 主梁位于涡核半径时沿桥轴向的吊索应力

Fig. 8 Stress of hanger along bridge axis at radius of the tornadic vortices

致结构响应的基本特点,结构响应较为显著的区域是龙卷风荷载作用区域及邻近区域,均体现了龙卷风的局部影响性。值得注意的是,当龙卷风加载点位于1/4跨附近时,某些结构响应除了在龙卷风作用区域及其邻近区域会产生显著变化,还会在跨中出现跳跃式突变,如图6a、图6d、图7、图8所示。对比图6a与图6b可以发现,主梁绕 $z$ 轴净弯矩 $M_z$ 具有前述突变现象,而绕 $y$ 轴净弯矩 $M_y$ 则没有,并且图8中吊索应力在跨中发生了很大的突变,故 $M_z$ 在跨中的突变主要是受到跨中吊索竖向力突变的影响。最后可以得出,吊索力的突变使主梁轴力以及主缆应力均在跨中产生了跳跃式突变。

### 2.3 龙卷风相对距离的影响

分析了加载点在跨中附近时5种涡流比、27个龙卷风相对距离下的静力响应结果,以探究龙卷风相对距离与涡流比对结构响应的影响。

#### 2.3.1 主梁变形

由上述可知,加载点在跨中附近时,主梁在跨中节点的变形最为显著,所以选择跨中节点的变形进行分析。图9是不同龙卷风相对距离、不同涡流比下主梁跨中节点变形的变化曲线,可以看出龙卷风相对距离变化时,主梁竖向位移、水平位移以及主梁

截面转角的变化规律是有明显差别的。

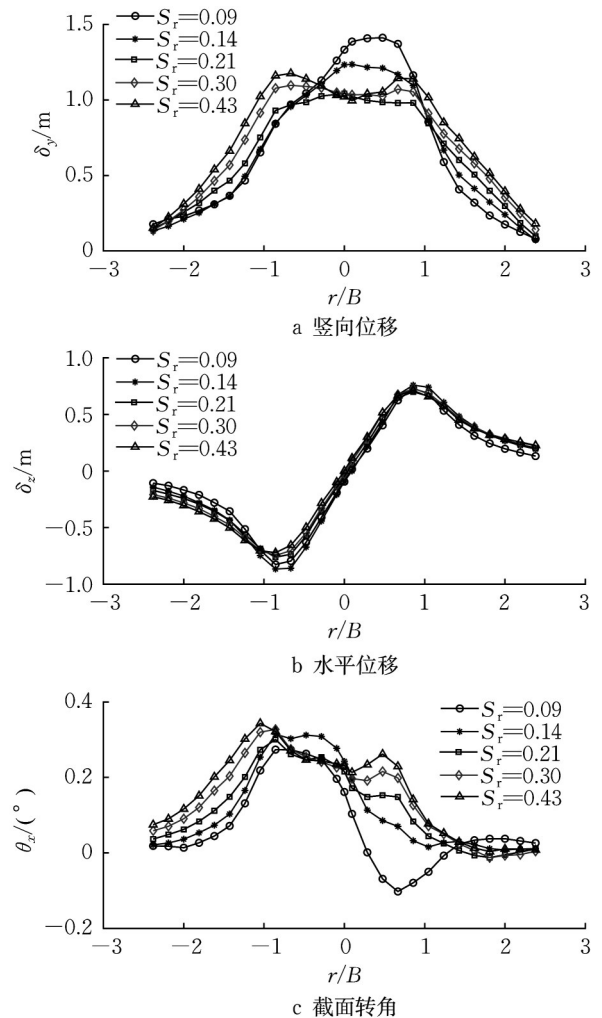


图9 主梁跨中变形随相对距离、涡流比的变化

Fig. 9 Variation in mid-span deformation with relative distance and swirl ratio

竖向位移随 $r/B$ 变化的曲线近似关于 $r/B=0$ 对称。在某一涡流比之下,当 $r/B$ 从2.38开始减小时,竖向位移值会逐渐增大,直至当 $r/B$ 足够小时达到一个极值。

水平位移随 $r/B$ 变化的曲线近似关于 $r/B=0$ 反对称。当 $r/B>0$ 时,水平位移随着 $r/B$ 的增大,先增大再减小,在 $r/B=\pm 0.7$ (主梁位于龙卷风涡核半径处)取到极值,在 $r/B=0$ 时,水平位移几乎为0。

截面转角随 $r/B$ 变化的曲线没有明显的对称性,总体来说,当 $|r/B|$ 从2.38开始减小时,转角先增大,然后当 $r/B$ 达到 $-0.86$ 附近时可以取到极值。不同涡流比下变化规律略有差别,详见2.4节。

#### 2.3.2 主梁内力

图10是不同龙卷风相对距离、不同涡流比下主梁跨中节点处绕 $z$ 轴弯矩、跨中节点处绕 $y$ 轴弯矩、

跨中附近节点处绕 $x$ 轴扭矩(取的是跨中附近的扭矩最大的节点,参见图6c)以及跨中节点处轴力的变化情况。不难发现,绕 $z$ 轴弯矩与轴力的变化曲线与图9a中竖向位移的变化曲线十分相似;绕 $y$ 轴弯矩的变化曲线与图9b中主梁水平位移的变化曲线相似;绕 $x$ 轴扭矩的变化曲线与图9c中主梁截面转角的变化曲线相似,这也符合基本的力学原理。

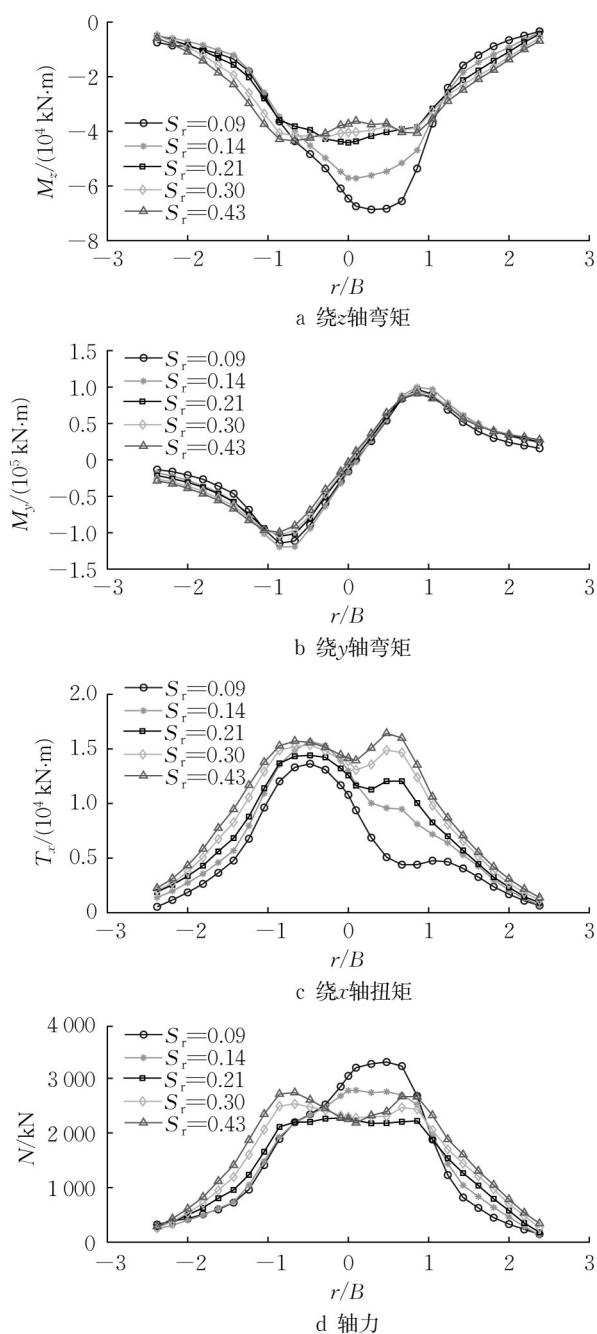


图10 主梁跨中截面内力随相对距离、涡流比的变化

Fig. 10 Variation in mid-span internal forces with relative distance and swirl ratio

### 2.3.3 主缆应力与吊索应力

跨中主缆应力以及吊索应力(跨中附近的某根

吊索)的变化规律与竖向位移相似,这主要是因为龙卷风荷载是直接加载在主梁上,主梁的竖向变形间接引起了跨中主缆以及吊索应力变化。

### 2.4 龙卷风涡流比的影响

由图9a可知,主梁竖向变形在涡流比较大时位移增长率相对也较大。此外,涡流比较大即 $S_r=0.30$ 与 $S_r=0.43$ 时,跨中节点竖向位移在 $r/B=\pm 0.7$ 附近取到极值,这时主梁正好在涡核半径附近;而涡流比较小即 $S_r=0.09$ 与 $S_r=0.14$ 时,跨中节点竖向位移的极值在主梁靠近涡核中心时取得,且极值大于较大涡流比情况下的极值。而对于图9b的主梁水平位移而言,不同涡流比之间的差异不大。

图9c中的主梁截面转角在不同涡流比下的变化规律不同,涡流比较大即 $S_r=0.30$ 与 $S_r=0.43$ 时,跨中节点截面转角在主梁位于涡核半径附近时取到极值;而涡流比较小即 $S_r=0.09$ 与 $S_r=0.14$ 时,跨中节点截面转角的极值在更靠近涡核中心时取得。

## 3 常规风致响应与龙卷风致响应对比

常规风荷载计算<sup>[12]</sup>选取的等效静阵风风速约为 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,本文采用既有常规风条件下主梁静三分力系数,计算了风攻角为 $0^\circ\sim 12^\circ$ 时该悬索桥的风致响应。风致响应仍为包含恒载与常规风荷载作用下的结构响应与恒载作用下结构响应的净差值。

由于常规风荷载在跨中产生的结构响应比较有代表性,龙卷风荷载加载点在跨中附近时跨中的结构响应也最为显著,所以下均以跨中点或跨中附近节点的常规风致响应和龙卷风致响应(龙卷风荷载加载点在跨中附近)作对比分析的对象。

表1是龙卷风荷载加载点位于跨中时5种涡流比以及27个龙卷风相对距离情况下跨中节点(或跨中附近节点)的结构响应的取值范围与13个风攻角情况下跨中节点常规风致结构响应取值范围的对比汇总表。为了更直观地展示取值范围的对比情况,基于表1绘制了图11。其中 $\sigma_z^u$ 、 $\sigma_z^l$ 、 $\sigma_y^u$ 、 $\sigma_y^l$ 分别表示主梁截面上缘应力、下缘应力、左缘应力、右缘应力。

从表1和图11可以看出,常规风荷载下的主梁跨中变形可以达到龙卷风荷载情况下取值范围的同等水平,而且常规风作用下主梁的水平位移最大值与龙卷风作用下的最大水平位移相差了近10倍,说明常规风荷载相较于龙卷风荷载阻力作用十分显著。对于主梁内力,龙卷风的升力明显,加载点均在跨中附近,其主梁跨中产生的绕 $z$ 轴弯矩的绝对值

表1 结构响应对比  
Tab. 1 Comparison of structural response

响应名称	常规风致响应值范围	龙卷风致响应范围
$\delta_y/m$	[-1.06, 1.56]	[0.65, 1.41]
$\delta_z/m$	[0.84, 7.05]	[-0.87, 0.76]
$\theta_x/(\circ)$	[-0.38, 1.89]	[-0.10, 0.34]
$N/kN$	[-5 896.75, 20 958.68]	[1 410.74, 3 298.54]
$M_y/(kN\cdot m)$	[21 790.08, 197 344.76]	[-119 635.21, 99 869.04]
$M_z/(kN\cdot m)$	[-2 355.94, 1 659.76]	[-68 616.48, -25 769.01]
$T_x/(kN\cdot m)$	[-357.72, 1 474.98]	[4 402.72, 16 431.09]
$\sigma_z^u/MPa$	[-5.31, 17.29]	[12.63, 33.11]
$\sigma_z^l/MPa$	[-3.11, 14.19]	[-57.89, -21.54]
$\sigma_y^u/MPa$	[-11.50, -2.65]	[-12.11, 18.45]
$\sigma_y^l/MPa$	[-0.82, 44.00]	[-15.33, 16.00]
$\sigma_c/MPa$	[-30.45, 29.90]	[-11.18, -4.04]
$\sigma_s/MPa$	[-40.41, 25.23]	[-130.10, -38.42]

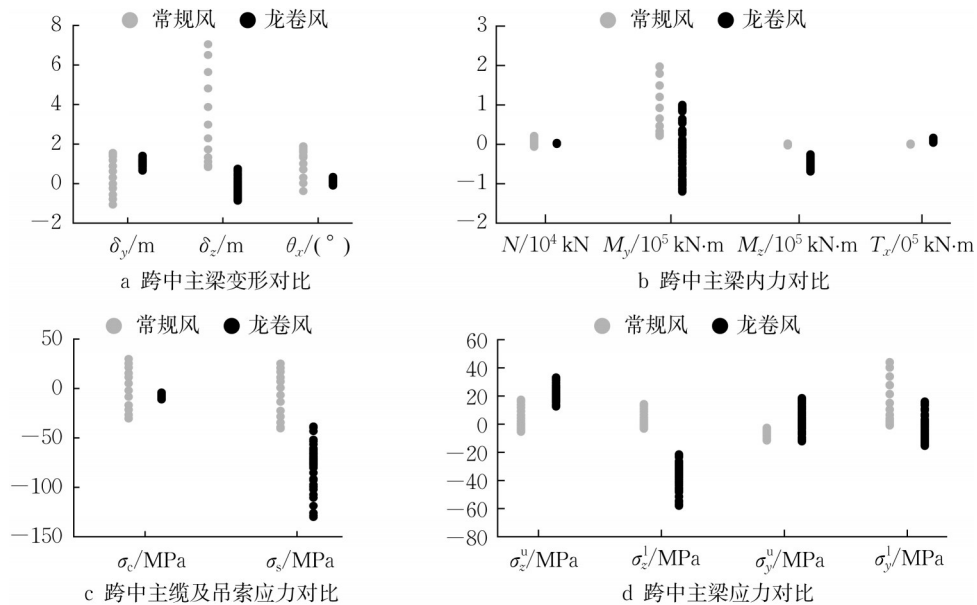


图11 龙卷风致响应与常规风致响应对比

Fig. 11 Comparison of tornado-induced response and synoptic wind-induced response

的最大值要比常规风作用时大几倍。常规风作用时绕y轴的弯矩绝对值的值域包含龙卷风荷载各工况下绕y轴的弯矩绝对值的最大值。龙卷风各个工况的主梁跨中绕x轴扭矩均比常规风作用下的大,说明龙卷风扭矩的局部作用相对较强。常规风下轴力值域包含了龙卷风下轴力的值域。此外,常规风作用下跨中吊索应力绝对值较小,无法达到龙卷风作用下吊索应力的同等水平,而且龙卷风作用下主梁下缘压应力最大值也比常规风作用下大得多,这可以在一定程度上体现出龙卷风荷载作用的较强的局部影响性以及升力作用明显的特征。

综上所述,常规风荷载与龙卷风荷载产生的各个结构响应之间并没有统一的大小关系,也并不存在某种常规风荷载工况可以包含所有龙卷风荷载工

况产生的最不利结构响应情况,两者的特性有着较为明显的不同,常规风荷载的阻力效应非常突出,而龙卷风荷载的升力作用突出,并且具有局部影响性。

## 4 结论

现阶段对于桥梁在龙卷风荷载作用下的响应的研究还很少,相关研究对龙卷风与常规风荷载作用下的大跨度桥梁结构响应的对比分析还不够深入。本文在前期大跨度桥梁主梁龙卷风荷载识别结果的基础上,进行了1 760 m特大跨悬索桥的龙卷风致响应的计算分析,将其与常规风荷载下的风致响应进行对比,探讨在进行桥梁抗龙卷风设计时,用常规风荷载模式进行结构龙卷风响应等效的可能性,为实

际工程中的大跨度桥梁抗龙卷风设计提供参考。

(1)龙卷风风荷载作用具有局部影响性,且升力作用相对明显,与常规风荷载作用明显不同。由于悬索桥本身在恒载作用下轴力较小,龙卷风作用下主梁轴力变化对于悬索桥来说不能忽略。龙卷风作用下主缆应力变化几乎可以忽略,但吊索应力变化很大。龙卷风荷载加载点位于1/4跨时,对于某些结构响应的影响不止局限在加载点附近区域,这些结构响应还会在跨中附近突变。

(2)绕 $z$ 轴弯矩、轴力、主缆应力、吊索应力关于龙卷风相对距离 $r/B$ 的曲线基本与竖向位移关于 $r/B$ 的曲线的变化规律一致,基本关于 $r/B=0$ 对称,响应值总体上随着 $r/B$ 绝对值的减小而增大;不同涡流比下的变化规律略有差异,主要体现在不同涡流比下极值点的位置不同。主要受龙卷风荷载扭矩控制的主梁绕 $x$ 轴扭矩与主梁截面转角的变化规律相同。主梁绕 $y$ 轴弯矩与主梁水平位移规律相似,响应值关于 $r/B$ 的变化曲线关于 $r/B=0$ 呈反对称。

(3)在变形、左右缘应力、主缆应力方面,常规风致响应的值域基本可以包含龙卷风荷载产生的最不利响应值,而在内力、上下缘应力、吊索应力方面,两者相差较大,常规风致响应一般无法到达龙卷风致响应的同等水平。常规风致响应与龙卷风致响应本身具有不同的特性,两者在数值上的表现也有较大不同,故在荷载等效方面存在诸多问题,暂时没有得出有效的荷载等效结果。

#### 作者贡献声明:

操金鑫:提出研究主题,设计研究框架,模型构建指导,论文撰写与审阅。

杨 一:模型构建,数据处理与分析,论文撰写。

曹曙阳:针对研究内容与方法进行指导。

葛耀君:对研究主题进行建议与指导。

#### 参考文献:

- [1] 郑永光,刘非凡,张恒进.中国龙卷研究进展[J].气象,2021,47(11):1319.  
ZHENG Yongguang, LIU Feifan, ZHANG Hengjin. Advances in tornado research in China [J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(11): 1319.
- [2] GOLIGER A M, MILFORD R V. A review of worldwide occurrence of tornadoes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/76: 111.
- [3] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特征[J].气象,2015,41(7):793.  
FAN Wenjie, YU Xiaoding. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China [J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(7): 793.
- [4] 李彩玲,谭浩波,蔡康龙,等.2016—2020年中国龙卷过程和灾情特征[J].热带气象学报,2021,37(增刊1):733.  
LI Cailing, TAN Haobo, CAI Kanglong, et al. Tornado process and disaster characteristics in China from 2016 to 2020 [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 37(S1): 733.
- [5] 俞小鼎,赵娟,范雯杰.中国龙卷的时空分布与关键环境参数特征[J].热带气象学报,2021,37(增刊1):681.  
YU Xiaoding, ZHAO Juan, FAN Wenjie. Temporal and spatial distribution of tornadoes in China and characteristics of key environmental parameters [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 37(S1): 681.
- [6] CAO J, REN S, CAO S, et al. Physical simulations on wind loading characteristics of streamlined bridge decks under tornado-like vortices [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 189: 56.
- [7] 甘文举,何益斌.Rankine 涡平移模型下低层房屋龙卷风荷载的分析[J].四川建筑科学研究,2009,35(1):84.  
GAN Wenju, HE Yibin. Analysis of tornado forces on low-rise buildings according to the model of transmitting Rankine vortex [J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(1): 84.
- [8] 张维伦,黄日星,晏孝强.EF2级龙卷风作用下输电铁塔力学响应研究[J].山西建筑,2020,46(16):104.  
ZHANG Weilun, HUANG Rixing, YAN Xiaoqiang. Study on mechanical response of transmission tower under the action of EF2 tornado [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(16): 104.
- [9] 王美珍,吕令毅.基于流固耦合龙卷风作用核电常规岛主厂房响应研究[J].工程建设,2017,49(3):23.  
WANG Meizhen, LÜ Lingyi. Tornado-induced response analysis for main power house in conventional island of nuclear power plant based on fluid-solid coupling method [J]. Engineering Construction, 2017, 49(3): 23.
- [10] 陈艾荣,刘志文,周志勇.大跨径斜拉桥在龙卷风作用下的响应分析[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(5):569.  
CHEN Airong, LIU Zhiwen, ZHOU Zhiyong. Tornado effects on large span cable-stayed bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(5): 569.
- [11] 操金鑫,任少岚,曹曙阳,等.大跨度桥梁龙卷风荷载物理模拟的关键相似参数[J].空气动力学学报,2019,37(1):107.  
CAO Jinxin, REN Shaolan, CAO Shuyang, et al. Key similarity parameters in physical simulation of tornado-induced wind loads on long-span bridges [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(1): 107.
- [12] 同济大学.公路桥梁抗风设计规范:JTG/T 3360-01—2018 [S].北京:人民交通出版社,2018.  
Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018 [S]. Beijing: China Communication Press, 2018.