

钢—混组合斜拉桥长期力学行为随机性分析

郑志辉^{1,2}, 徐泽星³, 柳根金², 张莹莹¹

(1. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221018; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 3. 宁波市建工检测有限公司, 浙江 宁波 315010)

摘要: 斜拉桥在服役期间的长期力学行为是其养护维修必须考虑的问题。考虑到混凝土强度和环境相对湿度的随机性, 建立了有限元随机分析模型, 研究拉索索力、主梁挠度和塔顶偏移量的随机时变特性, 初步建立了拉索索力增量与桥梁变形之间的映射关系。结果表明, 混凝土强度和环境相对湿度的随机性对斜拉桥跨中挠度和主塔塔顶偏移量的影响较大, 对拉索索力的影响较小; 拉索索力分别服从正态分布和韦伯分布, 跨中挠度和塔顶偏移量服从韦伯分布; 跨中挠度、塔顶偏移量分别与拉索索力增量呈线性相关关系。因此, 进行斜拉桥收缩徐变效应分析时, 需考虑参数随机性带来的影响。

关键词: 钢—混组合斜拉桥; 收缩徐变; 索力; 挠度; 随机性

中图分类号: U448

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0169-07

Randomness Analysis of Long-term Mechanical Behavior of Steel-concrete Composite Cable-stayed Bridge

ZHENG Zhihui^{1,2}, XU Zexing³, LIU Genjin², ZHANG Yingying¹

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221018, China; 2. NingboTech University, Ningbo 315100, China; 3. Ningbo Construction Engineering Testing Co., Ltd., Ningbo 315010, China)

Abstract: The long-term mechanical behavior of cable-stayed bridges under service is an issue that must be considered in the maintenance. Considering the randomness of concrete strength and relative environmental humidity, a finite element analysis model of randomness is established to study the random time-varying characteristics of cable forces, girder deflections and offsets of the pylon top. The mapping relationship between the increment of the cable force and the deformation of the bridge has been initially established. The results show that the randomness of the concrete strength and the relative environmental humidity has a significant impact on the mid-span deflections of the cable-stayed bridges and the offsets of the main pylon top, but has a relatively small impact on the cable forces. The cable forces follow the normal distribution and the Weibull distribution respectively, and the mid-span deflections and the offsets of the pylon tops follow the Weibull distribution. Both the mid-span deflection and the offset of the pylon tops exhibit a linear correlation with the cable force increments, respectively. Therefore, when analyzing the shrinkage and creep effects of cable-stayed bridges, it is necessary to consider the influence of the parameter randomness.

Keywords: steel-concrete composite cable-stayed bridge; shrinkage and creep; cable force; deflection; randomness

0 引言

斜拉桥的主塔和主梁受索力作用, 长期处于受压状态。由于混凝土收缩徐变效应, 随着服役时间的增长, 主塔和主梁将产生时变变形, 进而导致斜拉桥跨中挠度逐渐增长、拉索索力产生时变变化^[1-5], 影响桥梁的长期服役性能。同时, 影响混

凝土收缩徐变的关键参数(如混凝土强度、环境相对湿度等)往往存在很强的随机性^[6-7], 导致斜拉桥的力学响应也具有不确定性。因此, 采用确定性分析方法难以准确地预测斜拉桥的收缩徐变效应。

目前, 关于斜拉桥在混凝土收缩徐变下的长期力学行为研究已有大量成果。例如, 陈亮等的研究发现, 桥面板的收缩徐变是斜拉桥跨中下挠的主要原因, 同时会导致拉索索力减小^[8]。黄新等以超宽混凝土主梁斜拉桥为研究对象, 开展了混凝土收缩徐变的参数敏感性研究, 发现加载龄期是影响桥梁线形的关键参数^[9]。对于梁桁组合斜拉桥, 混凝土

收稿日期: 2025-04-01

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQN25E080008)

作者简介: 郑志辉(1991—), 男, 博士, 讲师, 从事桥梁健康监测研究。

通信作者: 张莹莹(1985—), 男, 博士, 教授, 从事桥梁健康监测研究。电子信箱: zhangyingying85@163.com

收缩徐变会引起显著的跨中挠度,但对拉索索力的影响相对较小,索力变化值均在5%以内^[10]。矮塔斜拉桥在混凝土收缩徐变作用下,也呈现出类似的现象^[11-12]。此外,混凝土收缩徐变会导致斜拉桥钢混结合段产生内力重分布,显著增大了钢结构的应力^[13]。为控制主梁的长期下挠,徐斌等提出增加底板钢束面积和增大拉索索力等具体措施^[10]。秦煜等从材料性能入手,提出采用低徐变混凝土来控制主梁下挠的方法^[14]。也有学者研究发现,现有的混凝土徐变模型难以准确地预测大跨度斜拉桥的长期变形,需根据实际情况修正徐变模型^[15]。然而,由于影响混凝土收缩徐变的参数具有随机性,斜拉桥的长期索力和挠度往往存在不确定性。鉴于此,部分学者对斜拉桥的长期变形和索力开展随机分析。例如,苏成等考虑到参数的随机性,开展了斜拉桥收缩徐变效应的概率分析,获得了斜拉桥跨中挠度和索力的置信区间^[6]。总体而言,现有研究多采用确定性方法,而随机性分析方面的研究相对较少,索力与挠度等的随机分布类型仍未可知。

本文以工程实际案例——清水浦大桥(钢—混组合斜拉桥)为研究对象,考虑到影响混凝土收缩徐变关键参数的随机性,建立有限元随机分析模型,采用拉丁超立方抽样方法获取参数样本,进而对斜拉桥的主梁挠度、拉索索力和塔顶偏移量展开随机性分析,探讨其随机分布类型,并初步建立索力增量与跨中挠度、塔顶偏移量之间的映射关系。

1 工程概况

本文以浙江省宁波市清水浦大桥为研究对象。该斜拉桥为五跨连续半漂浮体系,主跨为468 m,总长为908 m。斜拉桥主梁为钢梁与混凝土桥面板组合梁,两者通过剪力钉相结合。桥面板采用分块预制、现浇湿接缝连接的方式。主塔为双菱形混凝土联塔。桥塔单侧单索面沿塔高设置18根斜拉索,单幅桥梁共配置144根斜拉索。桥梁立面图如图1所示,主梁标准横断面如图2所示。

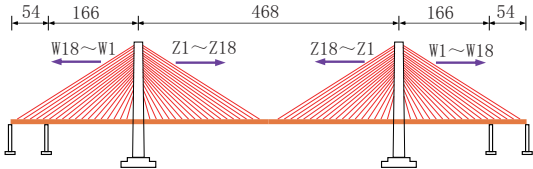


图1 桥梁立面图(单位:m)

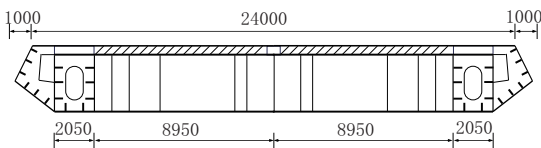


图2 主梁标准横断面(单位:mm)

2 有限元模型建立

2.1 模型基本资料

清水浦大桥的钢主梁、拉索、混凝土桥塔、桥墩及桥面板的材料性能参数如表1所列。桥塔和钢主梁建模采用 Beam188 梁单元模拟;桥面板部分为0.27 m厚的C60预制混凝土桥面板,采用可考虑徐变特性的 Shell181 壳单元模拟;斜拉索采用空间杆单元 Link10 单元模拟。有限元模型如图3所示。

表1 材料性能参数

种类	材料类型	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	线膨胀系数
主梁	Q345Qd	206	7 850	0.3	1.2×10 ⁻⁵
主塔	C50 混凝土	34.5	2 600	0.3	1.2×10 ⁻⁵
桥墩	C40 混凝土	32.5	2 600	0.2	1.0×10 ⁻⁵
桥面板	C60 混凝土	36.7	2 600	0.2	1.0×10 ⁻⁵
拉索	高强、低松弛平行钢丝	205	7 850	0.3	1.2×10 ⁻⁵



图3 有限元模型图

2.2 索力调整

斜拉索的垂度效应会引起非线性效应。因此,为准确模拟斜拉索,有限元建模时一般采用修正的弹性模量。通常采用 Ernst 公式进行修正^[16],表达式见式(1):

E_{eq} = \frac{E_0}{1 + \frac{q^2 L^2 A}{12 T^3} E_0} \tag{1}

式中: E_{eq} 为计算垂度效应后的等效弹性模量; E_0 为斜拉索初始弹性模量; q 为斜拉索自重线荷载; L 为斜拉索水平投影长度; A 为斜拉索横截面积; T 为斜拉索索力。

斜拉索的初始索力在有限元模型中换算成初应变。初应变计算公式见式(2):

\varepsilon = \frac{T}{E_{eq} A} \tag{2}

由于该桥仅有二期恒载施工完成后的成桥索

力,缺少施工阶段索力实测数据。因此,在建模时仅考虑3个施工阶段,分别为合拢前、合拢阶段和二期恒载施工阶段。以成桥索力作为初始索力,通过应力迭代法对索力进行反复修正,保证有限元索力和成桥实测索力基本一致。索力修正表达式见式(3)~式(5)。修正后的索力与实测索力对比如图4所示。

$$\Delta T = T - T_n \tag{3}$$

$$T_{n+1} = T_n + \Delta T \tag{4}$$

$$\varepsilon_{n+1} = \frac{T_{n+1}}{E_{eq}A} \tag{5}$$

式中: T_n 为第 n 次迭代后有限元计算所得索力; ΔT 为第 n 次迭代后的索力与目标设计索力的差值; T_{n+1} 为第 $n+1$ 次迭代时有限元计算所需输入的索力; ε_{n+1} 为第 $n+1$ 次迭代时有限元计算所需输入的初应变。

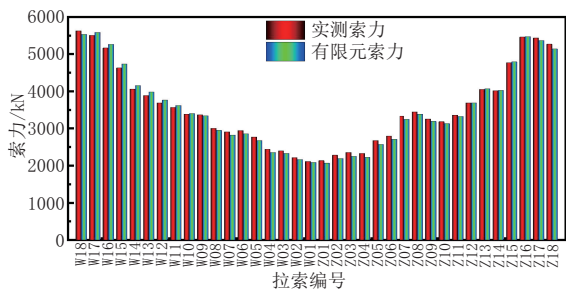


图4 索力对比图

从图4可以看到,经过修正后,斜拉桥的有限元索力值与实测索力值之间的相对差异均在5%以内,最大相对差异仅为4.61%,能够满足有限元模型的后续分析要求。

2.3 混凝土收缩徐变二次开发

ANSYS有限元软件中并没有混凝土徐变计算模块,常用的方法是采用软件自带的金属蠕变计算准则,模拟混凝土的徐变效应^[17]。金属蠕变与混凝土徐变特性类似,都是材料固有的随时间逐渐增长发生变形的属性。因此,通过改写金属蠕变方程来进行混凝土徐变计算是合理的。选取“隐式”方法来模拟混凝土的徐变效应。初始徐变方程表达式如下:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = C_1 \cdot \sigma^{C_2} \cdot t^{C_3} \cdot e^{-C_4\sqrt{T}} \tag{6}$$

采用式(6)进行徐变计算,采用线性徐变理论,徐变应变速率与应力的一次方成正比, $C_2=1$ 。选取应变强化准则并考虑时间对徐变应变速率的影响,取 $C_3=1$ 。此外,计算时并不考虑温度对徐变的影响,取 $C_4=0$ 。因此,式(6)可以简化为:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = C_1 \cdot \sigma \cdot t \tag{7}$$

徐变应变速率可表示为:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = \dot{\phi} \cdot \frac{\sigma}{E} \tag{8}$$

将式(8)代入式(6)可得:

$$C_1 = \frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{1}{t \cdot E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \cdot \frac{1}{t \cdot E} \tag{9}$$

$$C_{li} = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \cdot \frac{1}{t_i \cdot E}, i \geq 1 \tag{10}$$

式(9)与式(10)中的徐变系数采用《公路桥规》(JTG 3362—2018)中的徐变预测模型进行计算。

$$\phi(t, t_0) = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \beta_c(t - t_0) \tag{11}$$

式中: $\beta_c(t - t_0)$ 为徐变随时间发展系数; ϕ_{RH} 为与环境相对湿度相关的系数; $\beta(f_{cm})$ 为与混凝土强度相关的系数; $\beta(t_0)$ 为加载龄期影响系数; t 为计算时刻混凝土龄期; t_0 为加载时刻混凝土龄期; f_{cm} 为强度等级为C20—C50的混凝土28 d立方体抗压强度的平均值。

混凝土收缩采用降温法进行模拟,将收缩应变转化为对应的温度增量,表达式见式(12)、(13):

$$\theta = \frac{\varepsilon_{sh}(t - t_s)}{\alpha} \tag{12}$$

$$\varepsilon_{sh}(t, t_s) = \varepsilon_{sh0}(f_{cm}) \beta_{RH} \beta_s(t - t_s) \tag{13}$$

式中: α 为线膨胀系数; ε_{sh0} 为名义收缩系数; $\beta_s(t - t_s)$ 为收缩随时间发展系数; t_s 为收缩开始龄期; $\varepsilon_{sh}(f_{cm})$ 为与混凝土强度相关的系数; β_{RH} 为与环境相对湿度相关的系数。

2.4 参数随机性

影响混凝土收缩徐变的参数众多,不同模型采用的参数也存在区别。其中,混凝土强度和环境相对湿度是不同模型均要考虑的参数,也是影响混凝土收缩徐变的关键参数。因此,本文考虑这两个参数的随机性对斜拉桥的影响并展开随机性分析。随机参数的统计特征值如表2所列。

表2 随机参数的统计特征值

随机变量	均值	标准差	分布类型
环境相对湿度/%	70	14	正态分布
C60混凝土强度/MPa	60	6	正态分布
C50混凝土强度/MPa	50	5.5	正态分布

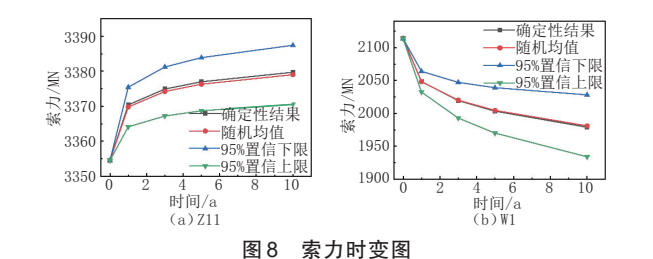
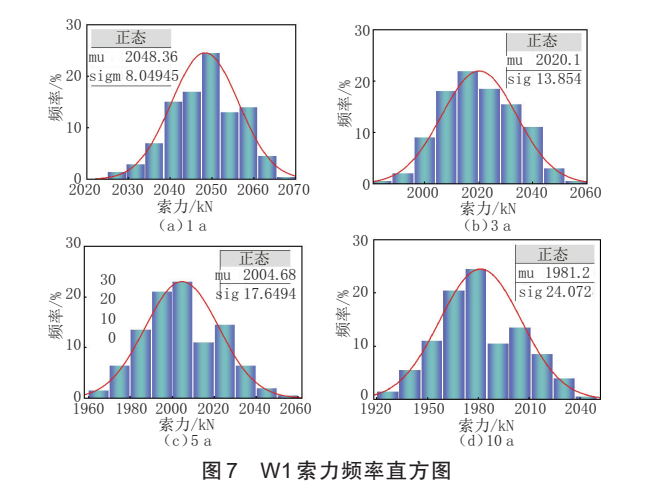
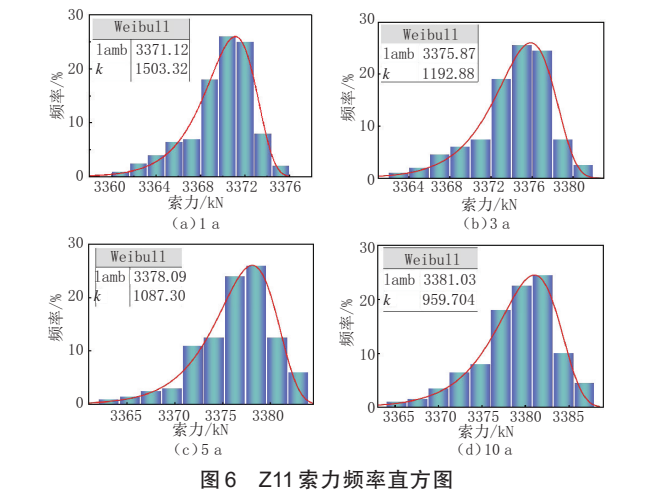
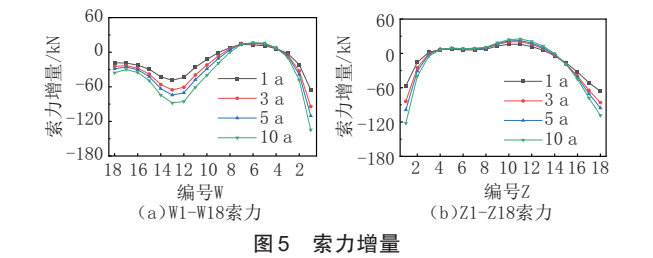
基于ANSYS有限元软件的PDS模块,采用拉丁超立方抽样方法对随机参数进行抽样,然后进行结构力学响应的随机性分析。抽样次数需确保样本均值和标准差与表2中的数据相差不超过5%。

3 有限元模型的结果分析

3.1 时变索力

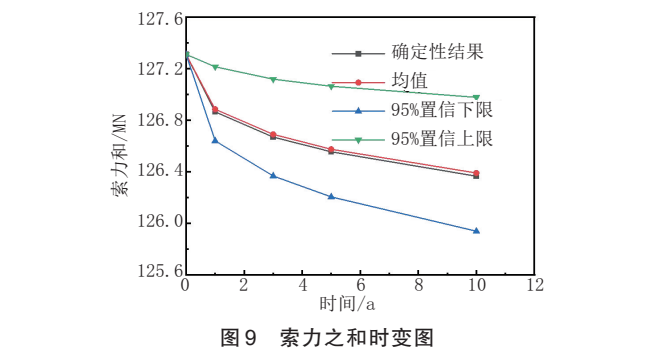
以单根拉索的索力和群索的索力之和的变化趋势来分析索力的时变特性。图5为不同服役时间下

的拉索索力增量图。图6和图7为单根拉索索力变化值最大的频率直方图。图8为单根拉索索力的时变图,索力的变异系数如表3所列。考虑到结果的对称性,以半跨单幅拉索的索力之和分析整桥索力的时变特征,如图9所示。



从图5可以看到,在混凝土收缩徐变作用下,大部分拉索的索力出现明显下降。其中,靠近主塔两侧的拉索索力下降幅度最大。这是由于靠近主塔两

表3 索力变异系数		
时间/a	Z11	W1
1	8.6×10^{-4}	39.3×10^{-4}
3	10.6×10^{-4}	68.6×10^{-4}
5	11.5×10^{-4}	88.0×10^{-4}
10	12.7×10^{-4}	121.5×10^{-4}



侧的拉索长度较小,卸载作用显著。由于主塔变形和主梁变形对跨中区域的拉索索力影响较大,该区域拉索的索力也存在较大的下降。边跨跨中附近的拉索与中间跨1/4、3/4处的拉索索力随服役时间的增长逐渐增大,但增幅较小。这表明在混凝土收缩徐变作用下,斜拉桥发生了内力重分布,当一部分拉索的索力减小时,该处主梁自重将由支座和附近的拉索承担,因此存在拉索索力增大的现象。

从图6和图7可以看出,考虑混凝土强度和环境相对湿度的随机性时,拉索的索力呈现出一定的随机性。Z11的索力呈偏态分布,采用韦伯分布可以较好地拟合;而W1的索力基本呈正态分布。可见,不同位置的拉索索力存在不同的随机分布类型。由表3可知,虽然Z11和W1的索力变异系数随时间的增长而逐渐增大,但数值始终较小。这表明,混凝土强度和环境相对湿度的随机性对拉索索力的影响较小。

如图8所示,95%的置信区间上、下限与均值随时间增长的变化规律一致。拉索的索力变化率随时间的增长而逐渐减小。采用确定性方法分析得到的拉索索力均值与采用随机分析方法得到的拉索索力均值基本一致。成桥10 a,Z11的索力均值为3 379.0 kN,95%的置信区间为(3 370.6, 3 387.5)kN,相较于成桥时刻的索力均值分别增大了0.73%、0.48%和0.98%;W1的索力均值为1 981.2 kN,95%的置信区间为(1 934.2, 2 028.3)kN,相较于成桥时刻的索力均值分别减小了6.27%、8.50%和4.05%。

从图9可以看到,拉索的索力之和总体呈现下降趋势,并且随着时间的增长,下降速率逐渐减小。成

桥 1、3、5、10 a,拉索索力之和的均值分别下降了 0.33%、0.49%、0.58% 和 0.72%;95% 的置信区间上限分别下降了 0.07%、0.15%、0.19% 和 0.26%;95% 的置信区间下限分别下降了 0.53%、0.74%、0.87% 和 1.08%。可见,由混凝土收缩徐变引起的拉索索力之和下降程度十分有限。

3.2 主梁挠度

由于混凝土收缩徐变效应,钢—混组合梁将随时间增长而产生变形。同时,由于拉索的索力减小,主梁也将产生下挠。图 10 为主梁挠度(以向下为正)的变化图。图 11 为跨中挠度的时变图。图 12 为跨中挠度的频率分布图。跨中挠度的变异系数如表 4 所列。

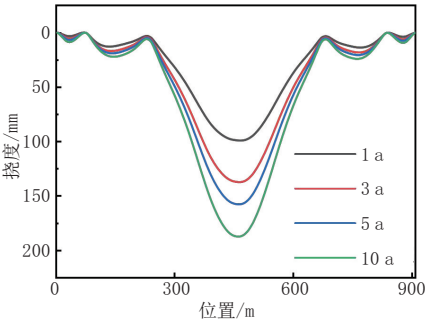


图 10 主梁变形图

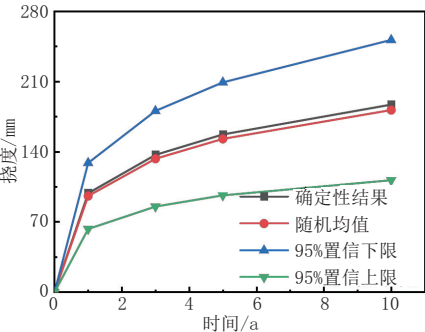


图 11 跨中挠度变化图

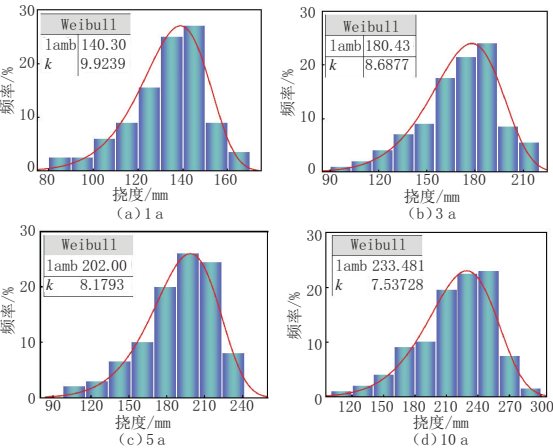


图 12 跨中挠度频率直方图

表 4 挠度变异系数

时间/a	变异系数
1	0.126
3	0.143
5	0.151
10	0.163

由图 10 可知,随着时间的增长,主梁逐渐发生下挠。主梁挠度在中跨跨中位置最大,边跨较小。从图 11 可知,采用确定性分析方法得到的挠度均值和采用随机性分析方法得到的挠度均值基本一致。成桥 1、3、5、10 a 时,跨中挠度的均值分别为 96.1、133.2、153.1、181.8 mm; 95% 的置信区间分别为 (63.2, 129.1)mm, (85.6, 180.9)mm, (96.8, 209.4)mm 和 (111.9, 251.7) mm; 置信区间下限分别为均值的 65.8%、64.2%、63.2% 和 61.5%; 置信区间上限分别为均值的 134.2%、135.8%、136.8% 和 138.5%。图 12 显示,主跨中挠度呈现偏态分布特点,挠度均值靠近 95% 的置信区间上限一侧,采用韦伯分布可以较好地反映主梁挠度的随机分布特性。

表 4 中的挠度变异系数均较大,且随着时间的增长逐渐增大。这表明,混凝土强度和环境相对湿度的随机性对主梁挠度的影响较大。因此,在进行斜拉桥长期挠度分析时,应考虑两种参数的随机性对主梁挠度的影响。

3.3 主塔塔顶偏移

主塔两侧拉索的索力并不完全一致,因此,主塔受不平衡索力作用时会产生偏移。受混凝土徐变作用的影响,随着时间的增长,处于偏心受压状态的主塔将进一步产生偏移。图 13 为主塔往跨中方向偏移的时变图。图 14 为塔顶偏移量的频率直方图。塔顶偏移量的变异系数如表 5 所列。

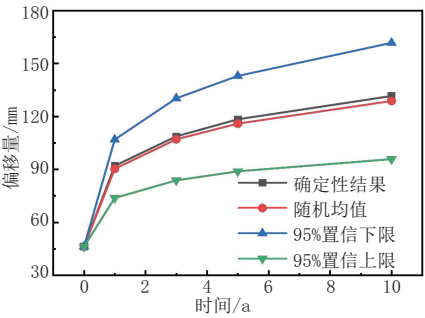


图 13 塔顶偏移量的时变图

由图 13 可知,成桥时刻,主塔往跨中方向偏移 46.4 mm;随着时间的增长,塔顶偏移量逐渐增大,但增长率逐渐减小。采用确定性分析方法得到的塔顶偏移量的均值和采用随机性分析方法得到的偏移均值

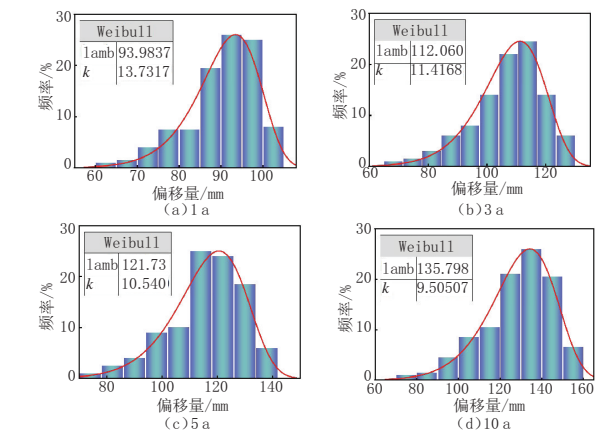


图 14 塔顶偏移量的频率直方图

表 5 塔顶偏移变异系数

时间/a	变异系数
1	0.093
3	0.111
5	0.119
10	0.131

基本一致。成桥 1、3、5、10 a 时,塔顶偏移量的均值分别为 90.4、107.1、115.9、128.8 mm,相较于成桥时刻,塔顶偏移量分别增长了 195%、231%、250% 和 278%;95% 的置信区间下限分别为 73.9、83.9、88.9、95.8 mm,相较于成桥时刻,塔顶偏移量分别增长了 159%、181%、192% 和 207%;95% 的置信区间上限分别为 106.9、130.3、142.9、161.7 mm,相较于成桥时刻,塔顶偏移量分别增长了 231%、281%、308% 和 349%。结合表 5 中的变异系数可知,混凝土强度和环境相对湿度的随机性对主梁偏移的影响显著。

如图 14 所示,塔顶偏移量呈现偏态分布特点,挠度均值靠近 95% 的置信区间上限一侧,采用韦伯分布可以较好地反映主梁挠度的随机分布特性。

3.4 变形与索力增量之间的映射关系

为揭示索力变化与跨中挠度、塔顶偏移量之间的内在关系,本文分别拟合了跨中 W18 拉索索力增量、半跨半幅拉索索力及增量与跨中挠度、塔顶偏移量之间的映射关系。

如图 15 所示,跨中挠度分别随 W18 拉索的索力增量、索力之和的增量的减小而增大,前者与后两者均基本呈线性相关。塔顶偏移量与索力增量之间也呈现类似的规律(见图 16)。这种变形与索力增量间的线性映射关系,可应用于实际工程监测数据的处理。当现场某监测设备失效,导致长期跨中挠度或索力数据缺失时,可基于变形与索力增量之间的线性映射关系反算索力或跨中挠度,补充缺失数据。

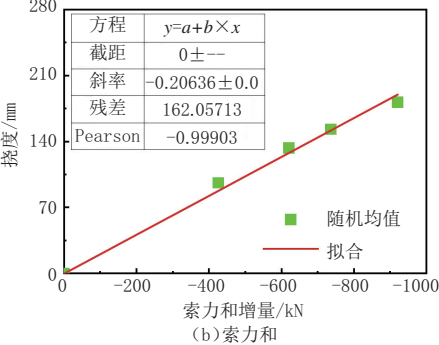
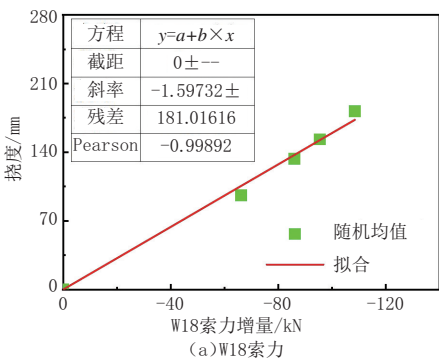


图 15 索力增量和跨中挠度映射关系

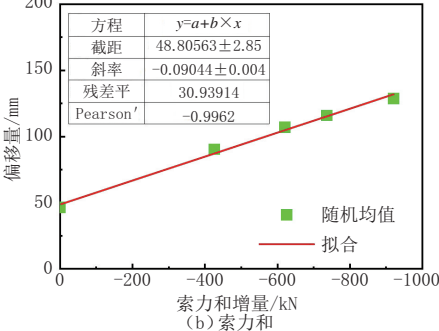
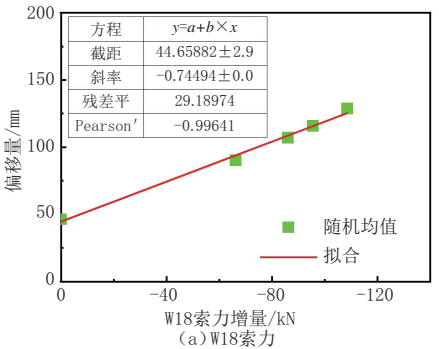


图 16 索力增量和塔顶偏移量之间的映射关系

4 结 语

本文考虑了混凝土强度和环境相对湿度的随机性带来的影响,采用有限元法对混凝土收缩徐变作用下钢—混组合斜拉桥的拉索索力、主梁挠度和塔顶偏移开展随机性分析,并初步建立索力增量与桥梁变形之间的映射关系。主要结论如下。

(1)混凝土强度和环境相对湿度的随机性对拉索索力的影响较小,但对斜拉桥跨中挠度和塔顶偏

移的影响较大。因此,在进行斜拉桥收缩徐变效应分析时,不可忽视参数随机性带来的影响。

(2)拉索索力随时间增长存在增大和减小两种变化情况,但拉索索力之和随时间增长而逐渐减小。单根拉索索力呈对称和偏态两种分布特点,分别服从正态分布和韦伯分布。

(3)主梁跨中挠度和塔顶偏移量随时间增长而逐渐增大,呈偏态分布特点,服从韦伯分布。

(4)跨中挠度、塔顶偏移量随拉索索力增量的减小而逐渐增大,并呈线性相关关系。

参考文献:

[1] CHEN C S, MA Y F, YAN D H, *et al.* Coupled Nonlinear and Time-dependent Analysis for Long Span Cable-stayed Bridges[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(10): 1416-1429.

[2] 涂光亚,邹磊,石洋.后期收缩徐变对结合梁斜拉桥受力影响研究[J]. *中外公路*, 2021, 41(5): 150-154.

[3] 李铭伟.大跨度高铁斜拉桥钢—混结合主梁收缩徐变研究[J]. *铁道勘察*, 2021, 47(2): 109-113.

[4] 方汝峰.徐变对大跨铁路混凝土斜拉桥长期服役性能的影响与评估[D].杭州:浙江大学 2023.

[5] SUN H H, CHEN W Z, CAI S Y, *et al.* Tracking Time-varying Structural Responses of In-service Cable-stayed Bridges with Model Parameter Errors and Concrete Time-dependent Effects[J]. *Structures*, 2022(37): 819-832.

[6] 苏成,陈兆栓,徐郁峰,等.预应力混凝土斜拉桥收缩徐变效应的概率分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 8-14.

[7] 王玉清,孟苏牙拉吐,刘曙光,等.加荷龄期与持荷应力对PVA-FRCC受压徐变性能的影响[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(3): 46-52.

[8] 陈亮,邵长宇.结合梁斜拉桥混凝土收缩徐变影响规律[J]. *桥梁建设*, 2015(1): 74-78.

[9] 黄新,贾祥,李建慧,等.超宽混凝土主梁斜拉桥收缩徐变效应分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(2): 155-159.

[10] 徐斌,卢皓,张浩.梁桁组合结构高铁斜拉桥的收缩徐变分析:以西十高铁汉江特大桥为例[J]. *铁道标准设计*, 2024, 68(5): 60-67.

[11] 王英飞,董伟.混凝土收缩徐变效应对矮塔斜拉桥索力的影响评价研究[J]. *中外公路*, 2018(3): 168-173.

[12] 鲍英基,蒋斌松,李文斌.PC矮塔斜拉桥运营阶段参数敏感性分析[J]. *公路*, 2020, 65(8): 216-222.

[13] 姚亚东,么超逸,杨永清.铁路斜拉桥钢混结合段的收缩徐变行为分析[J]. *铁道学报*, 2020, 42(7): 148-154.

[14] 秦煜,张鑫,曾永平,等.收缩徐变对高速铁路斜拉桥单箱单室混合梁位移的影响及调控[J]. *中国铁道科学*, 2024, 45(2): 41-47.

[15] 陈英贵.大跨度铁路混凝土斜拉桥收缩徐变计算方法研究[J]. *世界桥梁*, 2020, 48(增刊1): 89-93.

[16] 钱森,朱运河,何东升.斜拉桥斜拉索有限元模拟方法的比较[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(1): 8-11.

[17] 许世展,马浩凯,马迎港.基于精细模型的波形钢腹板斜拉桥收缩徐变效应分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(11): 27-36.

(上接第 162 页)

参考文献:

[1] 董丕灵.我国大城市道路系统存在问题及其更新改造研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2001.

[2] 杨林华,丁伟,欧阳波,等.超深地下连续墙施工案例分析[J]. *建筑结构*, 2023, 53(2): 2625-2628.

[3] 骆杭文.单级超限加筋土挡墙现场测试与数值模拟分析[D].杭州:浙江大学, 2023.

[4] 林彤.超限三级加筋土挡墙的有限元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 21(11): 1651-1654.

[5] 张红章,何丽娟.台阶式超限加筋土挡墙的应用及后评价[J]. *陕西理工学院学报(自然科学版)*, 2016, 32(4): 34-38.

[6] 余建华.单级超限加筋土挡墙的原型观测及数值计算分析[D].成都:四川大学, 2002.

[7] 任非凡,徐超,许强,等.山区超限加筋土路基力学行为的有限元分析[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(3): 101-105.

[8] 祝天根.“超限”“超近”悬臂式路肩挡土墙的工程实践[J]. *铁道勘察*, 2008(1): 77-79.

[9] 白莲森,黎强,李海南,等.特大城市核心区地下道路改造设计实践与思考[J]. *交通与运输*, 2023(增刊1): 48-51.

[10] 赵思成,胥彝,李晓军,等.山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 70-78.

[11] 潘有旺,王楠,张宗盛,等.复杂地层中深大基坑开挖变形特征和优化设计[J]. *建筑结构*, 2024, 54(13): 141-148.

[12] 郭宇超.道路改扩建工程对周边环境影响的研究[D].沈阳:沈阳建筑大学, 2018.