

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231130005

基于F-J-M法的桥梁温度与地震作用效应组合研究*

王力^{1,2}, 潘启仁¹, 周晓夫³, 杨喜娟¹, 唐智勇²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃民航建设集团有限公司, 甘肃 兰州 730099;
3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 目前铁路桥梁设计逐渐由容许应力法向极限状态法转变, 而《铁路桥涵设计规范(极限状态法)》(Q/CR 9300—2018)并未提及地震作用与温度等可变作用的联合作用, 给高寒高烈度区桥梁结构抗震设计带来了较大困难。为了推进桥梁以更经济的抗力方式抵御外荷载作用, 通过目标可靠度指标确定其最优地震设计状况荷载组合分项系数, 从而对现行桥梁设计规范抗震设计进行优化。建立了高寒地区某桥温度作用效应概率模型, 使用Ferry Borges荷载组合理论探究地震和环境温度作用的效应分布特征, 并基于JC法和多灾害荷载系数设计法(MH-LRFD)建立地震、温度作用荷载系数的表达式。依托某桥梁工程实例分别探究了地震、温度以及两者共同作用下的桥梁的失效概率。研究表明: 环境温度引起的桥梁温度内力响应、主要构件材料特性变异均能显著影响桥梁的失效概率; 对于高寒大温差地区, 现行规范忽略环境温度效应将显著低估桥梁在地震作用下的失效概率。本文提出的F-J-M(Ferry Borges+JC+MH-LRFD)方法计算地震、温度作用组合系数, 可为高寒地区桥梁抗震设计提供必要理论依据。

关键词: 温度效应概率模型; 失效概率; Ferry Bordge法; MH-LRFD; 荷载系数
中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0273-10

Study on Combined Effects of Bridge Temperature and Seismic Actions Based on F-J-M Method

WANG Li^{1,2}, PAN Qiren¹, ZHOU Xiaofu³, YANG Xijuan¹, TANG Zhiyong²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. HATG Construction Group, Lanzhou 730099, China;
3. Sichuan Communication Surveying & Design Institute CO., LTD., Chengdu, 610017, China)

Abstract: Currently, the design of railway bridges is gradually transitioning from the allowable stress method to the limit state method. However, the *Code for Design on Railway Bridge and Culvert (Limit State Method)* (Q/CR 9300-2018) does not account for the combined effects of seismic actions and variable factors such as temperature, posing significant challenges for seismic design for bridges in areas of extreme cold and high seismic intensity. In order to promote bridge resistance to external loads in a more cost-effective way, the partial coefficient of the optimal seismic design condition load

* 收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2024-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52068045)、甘肃省高等学校青年博士基金项目(2023QB-045)、兰州交通大学甘肃省重点实验室开放课题(2022055)资助

作者简介: 王力(1993—), 男, 副教授, 博士。主要从事寒区桥梁抗震研究。E-mail: wangli1993@mail.lzjtu.cn

通讯作者: 潘启仁(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事组合结构桥梁抗震研究。E-mail: 1946953861@qq.com

combination was determined by target reliability indices, thereby optimizing the seismic design standards in current bridge design codes. A probability model for temperature effects on a bridge in cold regions was established. The distribution characteristics of the effects of earthquake and ambient temperature were explored using the Ferry Borges load combination theory. Expressions of the load factor of earthquake and temperature effects were established using JC method and multi-hazard load factor design method (MH-LRFD). Taking a practical bridge engineering project as an example, the failure probabilities of a bridge under earthquake, temperature, and their combined actions were explored respectively. The results showed that both the temperature internal force response caused by ambient temperature and the variation in properties of the bridge's main components significantly affected its failure probability. For extreme cold regions with significant temperature variations, ignoring ambient temperature in the current codes would significantly underestimate the failure probability under seismic actions. The proposed F-J-M (Ferry Borges-JC-MH-LRFD) method can be used to calculate the combined coefficients for earthquake and temperature actions, providing a necessary theoretical basis for the seismic design of bridges in extreme cold regions.

Keywords: probability model of temperature effects; failure probability; Ferry Borges method; MH-LRFD; load factor

0 引言

桥梁结构服役期较长,其在全寿命周期内不可避免的会遭受多种灾害的单独作用或共同作用^[1-2]。近年来,地震、台风、极端天气出现频繁,尤其在低温环境下发生了多次强震,如:2011年3月日本9.0级地震,2022年1月中国青海门源6.9级地震,2023年2月土耳其7.8级地震,2024年1月新疆阿克苏7.1级地震等。

传统设计方法主要关注最不利荷载作用,而忽略多灾害对结构的组合效应^[3]。当前,对于单个极端荷载的研究已较深入,极端荷载的组合效应研究(如极端温度与地震作用)逐渐成为当前的热点问题。Y. Deng等^[4]、A.H.M.M. Billah等^[5]研究了低温对铅芯橡胶支座桥梁地震响应的影响,表明低温将改变橡铅芯胶支座的材料特性、力学性能而导致桥梁结构的地震响应发生显著变化。D. Anastasopoulos等^[6]、L. Wang等^[7-8]研究表明低温工况下桥梁边界约束、材料特性及刚度等发生改变,引起了其固有频率变化,而导致桥梁地震响应发生显著改变。H.J. Wu等^[9]发现刚构桥桥墩的温度效应受桥墩高度的影响较大,且在一定程度上,温度作用效应大于自重效应。J. Guo等^[10]分析了均匀温度对斜拉桥桥梁地震效应的影响,表明了考虑均匀温度荷载后,桥梁的地震反应明显增大。S. Maleki等^[11]探

究了考虑均温和地震同时作用的必要性,并提出了直接在已有极端荷载组合的基础上增加均匀温度作用的组合方式,但该组合方式忽略了温度引起的结构抗力的变化。W.L. Qiu等^[12]提出了将温度、地震两种作用作为随机荷载,并使用Turkstra法对两种荷载作了组合,但V. Piscopo等^[13]研究发现Turkstra法得出的组合结果可能不安全。以上研究表明,环境温度变化使桥梁产生较大的温度作用力,环境温度变化引起的材料特性改变,导致桥梁的地震响应发生显著变化。尽管部分学者对温度和地震的组合效应已经取得了初步的进展,但综合来看,仍十分有限。

惠存等^[14]、J.B. Yan等^[15]研究发现钢管混凝土结构具有优异的抗震性能,但在多灾耦合作用下,受力机理会发生改变,尤其在低温工况下,其承载力提高而延性大幅降低,可见钢管混凝土结构的力学性能受温度影响显著。近年来,随着西部大开发的不断推进,川藏铁路、兰新铁路等大型基础项目在我国西部高原地区建设,钢管混凝土因其良好的力学性能,被广泛应用于这些区域的铁路桥梁及站房中,该地区具有温度低、温差大等气候特点,且大多数区域属于高烈度区域,因此,这些钢管混凝土结构在建设及运用阶段易受极端温度、地震等不利因素耦合作用,然而,目前关于钢管混凝土结构在不同环境温度与地震同时作用下的研究较为有限,《铁路桥涵设计规范(极限状态法)》^[16](Q/CR 9300

—2018)仅提出了桥梁抗震设计基本框架流程,但相关条文中并未提及地震与温度等可变作用的联合作用。故对于桥梁温度效应显著的西部高寒大温差地区,需要进一步研究地震和温度的共同作用对桥梁结构的影响,以保障桥梁结构的安全服役。

基于以上研究现状,本文通过 Ferry Borges 法探究了寒区桥梁在环境温度和地震作用下的组合效应,并基于 JC+MH-LRFD 法提出了合理的温度和地震共同作用组合系数,以期为寒区桥梁抗震设计提供必要的理论依据。

1 荷载效应及结构抗力分布

1.1 温度作用分布模型的确定

桥梁结构温度效应包括整体温度作用效应和温度梯度作用效应。相比于整体温度,温度梯度作用对桥墩的影响较小^[12],因此,本文仅探究整体温度作用效应。整体温度作用与环境气温有关^[17],假设桥梁温度与气温近似相等。对于气温概率模型,范重等^[18]研究表明气温概率模型可能服从广义极值(GEV)、正态、对数正态等概率分布。西北高寒地区极端天气频繁,广义极值分布能够较好地描述极端事件的出现概率和特征,因此,假设气温 $f(t)$ 服从广义极值分布:

$$f(t) = 1 - \exp\left[-\left(1 - \xi \frac{t - \bar{u}}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right] \quad (1)$$

式中, t 为温度; σ 、 \bar{u} 、 ξ 为统计参数。

根据混凝土的材料特性,假定 20℃时温度效应为 0,温度对桥墩产生弹性作用,且均为不利作用($m \geq 0$),即温度作用效应 m :

$$m = B|t - 20| \quad (2)$$

温度作用系数 B ,计算式为:

$$B = \frac{|m_1 - m_2|}{|t_1 - t_2|} \quad (3)$$

式中, m_1 、 m_2 分别为 t_1 、 t_2 对应的温度效应。

基于以上假定,求解温度作用概率密度函数 $f(m)$,设温度 t 产生的温度作用效应为 m ,概率分布函数为 $F_t(m)$ 。由式(2)可知,在 $t < 20$ 和 $t \geq 20$ 均可能发生荷载效应 m ,设 $P_1(m)$ 、 $P_2(m)$ 分别为 $t < 20$ 、 $t \geq 20$ 发生 m 的概率,可得:

$$\begin{aligned} F_t(m) &= P(m \geq M) = P_1(m \geq M) + P_2(m \geq M) \\ &= P(T < t_1) + P(20 \leq T \leq t_2) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{t_1 + t_2}{2} = 20 \quad (5)$$

根据概率密度函数的定义,联立式(4)、(5)得:

$$F_t(m) = P_t(m) = \int_{t_1}^{20} f(t) dt + \int_{20}^{40-t_1} f(t) dt \quad (6)$$

将式(3)代入式(6),并对 $F_t(m)$ 进行求导,得出温度作用效应的概率密度函数表达式:

$$f(m) = \frac{1}{B} \left[f\left(20 - \frac{m}{B}\right) - f\left(20 + \frac{m}{B}\right) \right] \quad (7)$$

根据《建筑结构可靠度统一标准》^[19](GB 50086—2018),将统计时间 t_y 内概率密度函数转换为设计基准期 t_1 的概率密度函数:

$$f(m) = \frac{\partial F_t(m)}{\partial m} = \frac{t_1}{t_y} \cdot [F_t(m)]^{\left(\frac{t_1}{t_y}-1\right)} \cdot f_{t_y}(m) \quad (8)$$

式中, t_1 为设计基准期(100年); t_y 为桥址环境温度统计时间; $F_t(m)$ 为概率分布函数; $f_{t_y}(m)$ 为桥址环境温度统计时间对应的概率密度函数。

1.2 地震作用效应分布模型

对于地震作用效应的分布,H.N. Li等^[20]研究表明PGA符合广义极值分布。高小旺等^[21]对我国45个城镇地震危险性进行了统计分析,表明我国地震发生的概率分布符合极值II型分布,即PGA服从极值II型分布:

$$F(a) = e^{-\left(\frac{a-a_0}{a}\right)^k} \quad (9)$$

式中, a 为地震加速度峰值; a_0 为基本烈度对应的峰值加速度; α 为系数,根据高小旺等^[21]统计结果,当基准期分别为50、100年时, α 分别取0.385、0.517; k 为形状系数,取2.35。

W.L. Qiu等^[12]在研究地震与温度效应组合时提出假设 $m = ka$,即地震响应 m 与PGA满足线性关系时可以满足安全性的要求,将该假定代入式(9),可得地震响应与PGA的关系式:

$$F_E(m) = e^{-(a_0/m)^k} \quad (10)$$

m_0 为 α_0 对应的地震荷载效应,对 F_m 求导,得出地震作用效应的概率密度函数的表达式:

$$f_E(m) = \frac{dF(m)}{dm} = k(\alpha m_0)^k m^{-k-1} e^{-(\alpha m_0/m)^k} \quad (11)$$

1.3 恒载分布模型

桥梁恒载效应一般符合正态分布,李铁夫^[17]对我国大量的桥墩的恒载效应分布进行了统计分析,认为恒载效应符合偏差系数为1.03,变异系数为0.023的正态分布。

1.4 结构抗力分布模型

对桥梁进行可靠性分析时,除了明确作用效应的分布模式外,还需确定结构抗力的分布。李铁夫^[17]对我国铁路桥梁抗力分布进行了归纳,提出了桥梁抗力符合对数正态分布,即:

$$f_R(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\sigma\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

式中, $f_R(x)$ 为桥梁抗力概率密度函数; x 表示抗力, σ 、 μ 为统计参数。

2 地震与温度荷载的组合方法

2.1 联合概率密度求解及荷载效应分析

得出荷载作用的概率密度函数后,通过卷积运算可得出各个作用效应的联合概率密度函数:

$$f_{x1,2} = f_1 * f_2 \quad (13)$$

$$f_{x1,3} = f_1 * f_3 \quad (14)$$

$$f_{x1,2,3} = f_1 * f_2 * f_3 \quad (15)$$

式中,*表示卷积运算; $f_{x1,2}$ 、 $f_{x1,3}$ 、 $f_{x1,2,3}$ 分别表示恒载和地震、恒载和温度作用,恒载、地震和温度的联合概率密度函数; f_1 、 f_2 、 f_3 分别代表恒载、地震和温度单独作用的概率密度函数。

2.2 桥梁结构失效概率

根据 Ferry Borges 荷载组合法的规则^[22]可知:桥梁在地震和温度作用下的荷载效应由以下四部分组成:温度、地震作用均不发生、仅发生恒载+温度作用、仅发生恒载+地震作用、恒载+温度+地震作用均发生。可见在恒载、地震和温度作用下,桥梁可能受到恒载和单独地震、恒载和单独温度、恒载+地震和温度共同作用而发生失效,故桥梁失效概率由上述几部分构成,即:

$$P_f = P_{f(T+D)} + P_{f(E+D)} + P_{f(T'+E'+D)} \quad (16)$$

式中, $P_{f(T+D)}$ 为恒载和单独温度作用下的概率; $P_{f(E+D)}$ 为恒载和单独地震作用下的概率; $P_{f(T'+E'+D)}$ 为恒载、温度和地震同时作用下的失效概率。

假定结构失效时的荷载效应为 X ,若桥梁在恒载+单独温度作用下失效,则要求恒载+地震作用、恒载+地震和温度共同作用下桥梁不失效,即:

$$P_{fT} = P(T, \text{only}) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(x) \int_X^{+\infty} f_{T+D}(x) \int_{-\infty}^X f_{E+D}(x) \int_{-\infty}^X f_{E'+T'+D}(x) dx dz dx \quad (17)$$

式中, $f_R(x)$ 为桥梁结构抗力概率密度函数; $f_{T+D}(x)$ 为恒载和温度作用联合概率密度函数; $f_{E+D}(x)$ 为恒载和地震单独联合作用效应概率密度函数; $f_{E'+T'+D}$ 为恒载、地震与温度联合作用概率密度函数; $P(T, \text{only})$ 为恒载和单独温度作用的概率,可以采用 $P(T, \text{only}) = 1 - \frac{n_{T+E}}{N_T}$ 计算, n_{T+E} 为地震和温度共同作用的次数, N_T 为温度作用的总次数。其余项可通过积分求出,就能得出结构的分项失效概率。同理可得出 $P_{f(E+D)}$ 、 $P_{f(T'+E'+D)}$,再由式(16)即得出桥梁的失效概率。

2.3 荷载组合系数

在确定结构失效概率后,还需确定“目标抗力模型”,才能求解目标可靠度对应的地震与温度作用的组合系数。求解基本思路(如图1所示)为:依据工程背景,确定桥梁目标可靠度,并通过改变桥梁抗力均值的方法进行可靠度指标的迭代计算,直至结构达到目标可靠度,达到目标可靠度时的抗力模型即为“目标抗力模型”。将目标抗力模型带入 MH-LRFD 荷载系数求解方法^[23]即可得出恒载、地震、温度作用的荷载系数。对于仅有两种极端荷载作用且荷载效应、抗力均服从正态分布时,荷载系数表达式为:

$$\gamma_D = \frac{\phi}{3b_r} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right) \quad (18)$$

$$\gamma_E = \frac{\phi}{3b_r} \left(\frac{b_E}{r_2} + \frac{b_{E'}}{r_3} \right) \quad (19)$$

$$\gamma_T = \frac{\phi}{3b_r} \left(\frac{b_T}{r_1} + \frac{b_{T'}}{r_3} \right) \quad (20)$$

式中, ϕ 为抗力系数,取 1.0; γ_D 、 γ_E 、 γ_T 分别为恒载、地震、温度作用荷载组合系数; b_r 、 b_E 、 b_T 、 $b_{E'}$ 、 $b_{T'}$ 分别为抗力、单独地震作用、单独温度作用、地震与温度共同作用中地震和温度的偏差,计算式为 $b_n = \frac{\mu_n}{\mu_0} b_0$, μ_n 为正态化后的均值, μ_0 为原始模型均值,b₀为初始偏差, $b_0 = \frac{\mu_0}{\mu_N}$, μ_N 为设计值; r 为比值,计算式为 $r = \frac{b_n \mu_n}{b_R \mu_R}$, b_R 为抗力的偏差, μ_R 为抗力

均值。

多数情况下,极端荷载及桥梁抗力并不服从正态分布,因此,需通过合理的方法将荷载、抗力模型进行“正态化”处理。JC法可将荷载效应、抗力概率函数在“失效点”进行正态化处理,使得“正态化”前后结构失效概率不变,可用于荷载效应和抗力概率函数的正态化。根据JC法的定义,编写相关的MATLAB程序即可得出结构的失效点、失效概率及正态化后的函数均值。

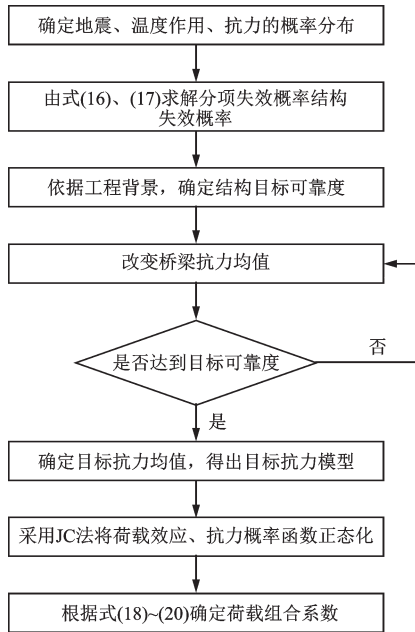


图1 荷载系数计算流程

Fig.1 Flowchart of load factor calculation

3 工程实例分析

以高寒地区某铁路钢管混凝土格构高墩矮塔斜拉桥为背景,探究该桥受温度作用、地震作用、温度和地震共同作用下的失效概率及温度和地震作用组合系数计算方法,并验证所提F-J-M法的适用性。

3.1 工程背景

本桥主墩高155 m,桥墩采用CFST格构式高墩,该斜拉桥采用墩塔梁固结体系,主桥孔跨布置为(72+174+324+174+72) m,属A类桥梁。主墩采用CFST格构式桥墩,按混凝土横梁分为3层,每层由4个柱肢组成,且每层柱肢尺寸不同。钢管采用Q345,混凝土采用C50。各柱肢之间采用斜撑

联系。本桥场地位于高寒区,昼夜温差较大,桥址极端最高温度36.5℃,极端最低温度-32.5℃。地震基本烈度VII度,地震动反应谱特征周期为0.45 s,场地划分为II类。桥梁有限元建模过程和主墩关键截面弯矩-曲率分析结果详见文献[24],图2为背景桥梁有限元模型。

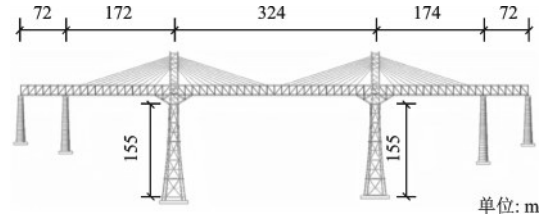


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

3.2 桥墩温度作用效应

为了探究温度引起的荷载效应及后文确定温度效应的标准值(一般选择具有95%保证率,即95%分位对应的温度产生的效应作为标准值^[25]),通过有限元分析得出了依托工程由20℃降至-16℃(温度概率分布函数95%分位对应的温度)下的温度效应沿墩高变化如图3所示。

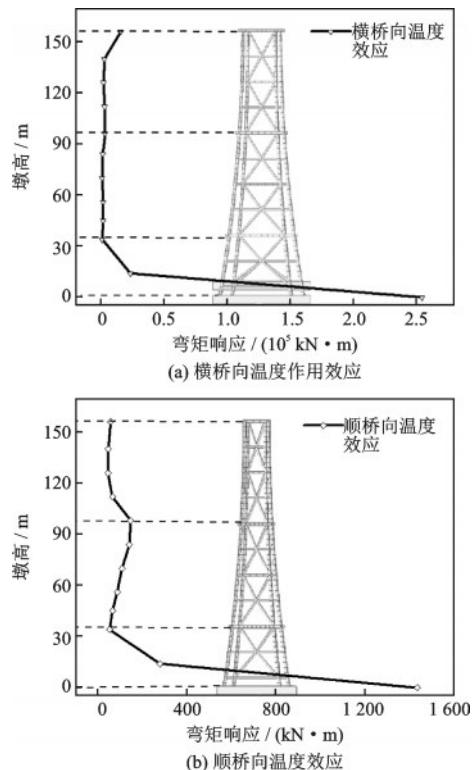


图3 桥墩整体降温效应

Fig.3 Overall cooling effects of the bridge pier

由图3可知:整体降温下的横、顺桥向弯矩沿墩高大致呈“L”形分布趋势,墩顶、墩底弯矩大,中间弯矩小,且墩底截面弯矩远大于其它截面。由于桥墩高度远大于其宽度,温度引起的顺桥向弯矩显著大于横桥向弯矩。

3.3 桥墩地震响应

为探究环境温度改变引起的材料特性变化对结构的影响及后文地震响应的标准值的确定。以弯矩为指标分析了温度对格构式高墩地震响应的影响。分别探究了PGA为0.3g,环境温度为20、-16℃时的地震响应,计算结果如图4所示。

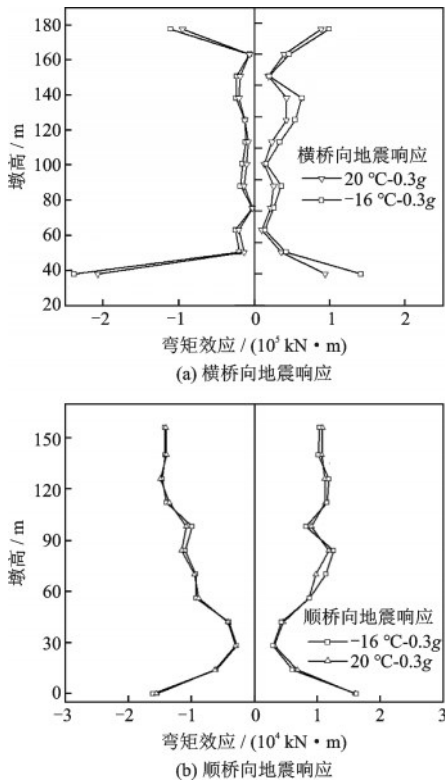


图4 PGA=0.3g的桥墩地震响应

Fig.4 Seismic response of the bridge pier with PGA=0.3g

由图4可知:低温工况(-16℃)下桥墩横桥向弯矩响应均大于常温工况地震响应,且在墩底截面处地震响应值为常温的1.15倍。缀板处,由于缀板的约束作用,缀板处横桥向弯矩分别增加17.0%、28%。相较于横桥向弯矩,顺桥向弯矩变化不大。考虑到温度还会引起巨大的墩底弯矩,因此,以墩底作为控制截面进行温度与地震组合作用的研究。

4 荷载系数计算

4.1 高墩抗力概率模型

低温环境下,钢管混凝土结构的强度增加,而延性下降。由试验结果[26]及X-TRACT软件对墩底钢管混凝土通过截面弯矩-曲率分析可知:是否考虑温度引起材料特性变化时的抗力均值分别为 4.70×10^5 kN·m、 5.69×10^5 kN·m。由依托工程背景及李铁夫^[17]统计结果得均值系数 μ_R 、变异系数 C_V 见表1,代入式(12)得到桥梁抗力概率密度曲线,如图5所示。

表1 抗力均值系数、变异系数

Table 1 Mean coefficient and coefficient of variation of resistance

μ_{km}	μ_{ka}	μ_{kp}	μ_R
1.2	1.0	1.0	1.2
δ_{km}	δ_{ka}	δ_{kp}	C_V
0.1	0.01	0.16	0.19

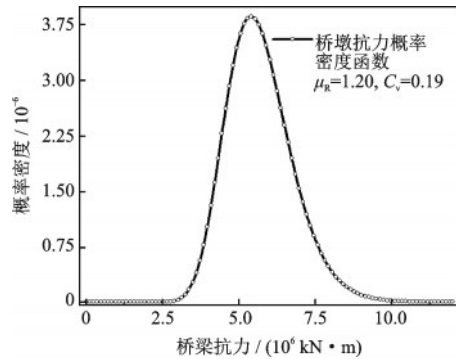


图5 桥梁抗力概率密度分布曲线

Fig.5 Probability density distribution curve of bridge resistance

4.2 荷载效应概率模型

格构式高墩在温度、地震作用下均会产生巨大的横桥向墩底弯矩。因此,以墩底弯矩为控制指标,基准期为100年,研究温度和地震的作用组合系数。

4.2.1 温度效应概率模型

根据前文分析,气温的概率分布服从广义极值分布。统计了桥址5年的时平均气温、日平均气温如图6所示。

由图6可知,日平均气温与时平均气温分布存

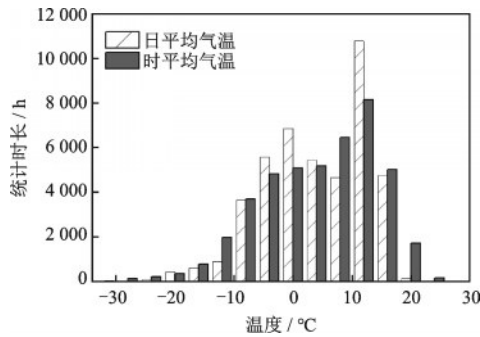


图6 日平均温与日最低温差值频方

Fig.6 Frequency histogram of the differences between daily average and lowest temperatures

在一定差异,为了获取更精确的气温分布概率模型以合理表达极端气温出现的概率,以时平均温度数据进行气温概率分布的研究,拟合结果如图7所示。

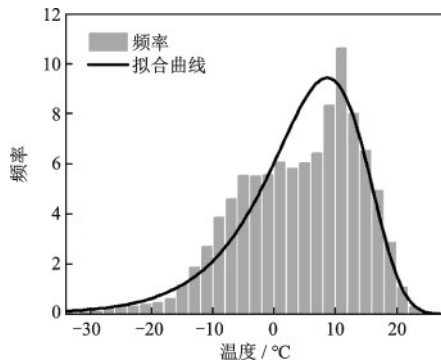


图7 时温频方

Fig.7 Time-temperature frequency histogram

由图7可知,时平均气温 $f(t)$ 符合 Gumbel极小值 I 型分布:

$$f(t) = \frac{1}{7.79} e^{\frac{t-8.7005}{7.79}} e^{-e^{\frac{t-8.7005}{7.79}}} \quad (21)$$

将式(21)代入式(6)、式(7)得统计时长(5年)的温度作用效应计算模型,再通过式(8)转换为基准期内的温度作用概率模型。5、100年的温度效应概率密度、分布曲线如图8~9所示。

4.2.2 地震效应概率模型

该桥设计地震加速度为0.15g,由式(9)得设计基准期为100年时的PGA概率密度函数及概率分布函数如图10~11所示。将环境温度为-16°C,PGA为0.15g时结构地震响应代入式(10)、式(11)得出地震作用效应概率分布曲线和地震作用效应概率密度曲线如图12~13所示。

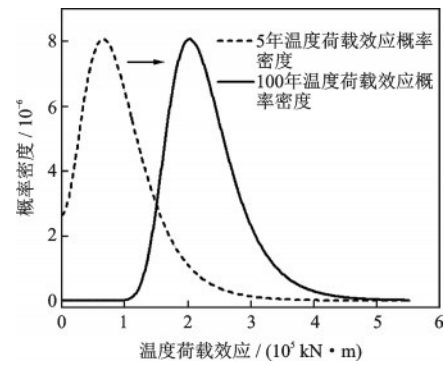


图8 温度效应概率密度曲线

Fig.8 Probability density curves of temperature effects

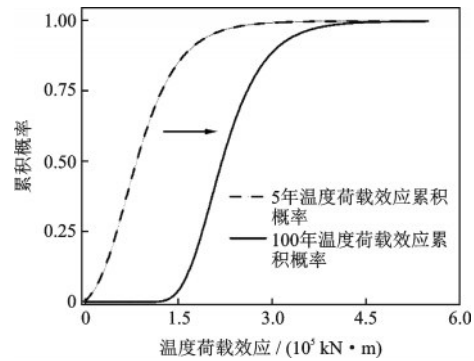


图9 温度效应概率分布曲线

Fig.9 Probability distribution curves of temperature effects

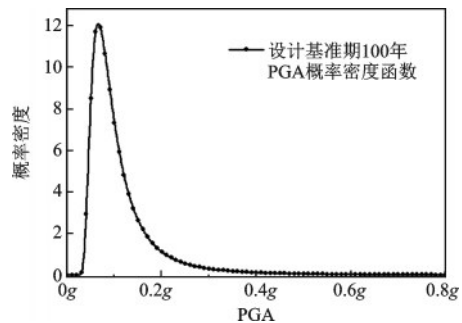


图10 PGA 概率密度曲线

Fig.10 PGA probability density curve

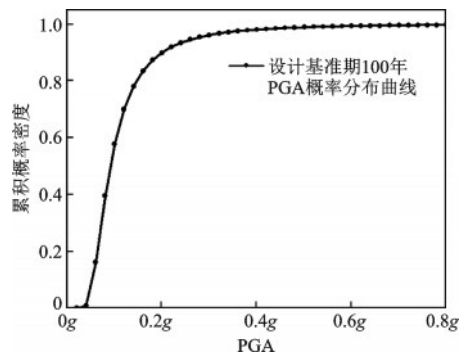


图11 PGA 概率分布曲线

Fig.11 PGA probability distribution curve

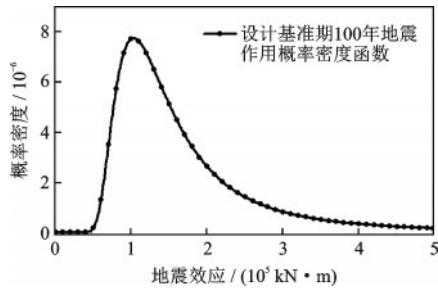


图 12 地震效应密度曲线

Fig.12 Density curve of seismic effects

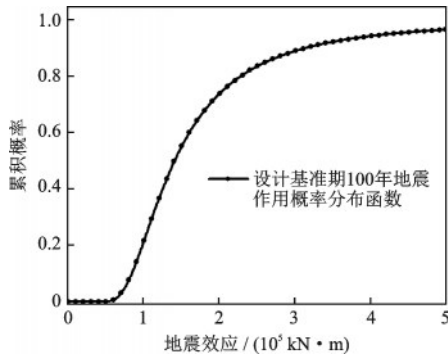


图 13 地震效应分布曲线

Fig.13 Distribution curve of seismic effects

4.3 荷载作用标准值

4.3.1 温度作用的标准值

通过温度作用效应模型得出不同温度下的温度荷载效应,参考文献[25]对标准值的取值方式,以95%分位对应的温度(-16℃)产生的荷载效应作为温度作用标准值,由有限元计算得 $M_{TK}=2.526 \times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

4.3.2 地震作用标准值选取

由《铁路工程抗震设计规范》^[27](GB 50111—2006)规定可知,依托工程取PGA为0.3g时的地震响应作为地震作用标准值,通过有限元模型计算得地震作用标准值 $M_{EK}=2.381 \times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

4.4 失效概率和荷载系数计算

4.4.1 失效概率计算

为深入探究温度引起结构失效概率的变化,依式(16)对依托工程如下4种工况进行研究:恒载+地震作用(工况1)、仅考虑温度荷载+恒载+地震作用(工况2)、考虑材料温变特性+恒载+地震作用(工况3)、考虑材料温变特性+恒载+温度荷载+地震作用(工况4)桥梁的失效概率见表2。

现行规范在抗震设计中忽略了温度作用,导致

表 2 不同工况下桥梁失效概率

Table 2 Probabilities of bridge failure under different conditions

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
失效概率(10^{-2})	1.38	1.86	2.24	4.48

设计工况接近于工况1。然而,在实际服役期间,桥梁在遭受地震作用时势必也将受到温度作用,其实际状态接近于工况4。由表2可知,工况4的桥梁失效概率为状态1的3.24倍,表明现行规范中的抗震设计中忽略了温度作用,将严重低估桥梁的实际失效概率。此外,工况4下的失效概率为工况2的2.41倍。工况4下失效概率为工况3的2倍。表明除了温度荷载以外,温度引起材料特性变化也会使桥梁的失效概率显著增加,因此,高寒地区进行工程设计时应综合考虑温度作用。

4.4.2 分项失效概率计算与荷载系数计算

依托工程未考虑温度效应前的设计可靠度兼顾了安全、经济的要求,因此本次选择该可靠度作为目标可靠度(失效概率为 1.38×10^{-2} ,即可靠度为2.20),对工况4作用下桥梁进行荷载组合系数设计,计算得出的各失效概率见表3。

表 3 桥梁失效概率

Table 3 Probabilities of bridge failure

P_{E+D}	P_{T+D}	P_{E+T}	P_{all}	β
2.89×10^{-4}	2.31×10^{-3}	1.12×10^{-2}	1.38×10^{-2}	2.20

经计算,该桥在恒载+地震+温度组合中的温度作用部分下结构失效概率为 6.4×10^{-7} ,远小于其实际失效概率,因此计算时可忽略^[28]。各计算参数见表4。

表 4 计算系数

Table 4 Calculation Factors

偏差	b_E	b_T	$b_{E'}$
	0.51	0.9	0.11
比值	r_1	r_2	r_3
	0.24	0.40	0.59

将恒载、温度、地震与温度共同作用中地震、温度的比值及响应的偏差带入式(18)~(20)后,即可得出各荷载系数。为了保持与规范的联系性,计算时规定恒载的作用系数为1.0,求解得出地震作用系数为1.17,温度作用系数为1.33,即地震和温度的组

合效应为:

$$M = M_{GK} + 1.17M_{EK} + 1.33M_{TK} \quad (22)$$

5 结 论

以位于高寒、高烈度区某矮塔斜拉桥为背景,基于F-J-M法提出了温度与地震作用效应组合系数计算方法,主要结论如下:

(1)针对高寒高烈度区桥梁抗震设计过程中未考虑环境温度作用的不足,提出了Ferry Borges+JC+MH-LRFD(F-J-M法)相结合的方法,为该地区桥梁的抗震设计荷载组合提供了理论依据。

(2)基于现行规范所得背景桥梁的失效概率为 1.38×10^{-2} 。考虑了温度作用效应后,基于Ferry Borges组合方法所得失效概率为 4.48×10^{-2} ,为设计工况的3.24倍,可见忽略温度作用将显著低估桥梁的实际失效概率,因此,在高寒高烈度地区的工程设计中应综合考虑温度的影响。

(3)对本文依托工程中桥梁考虑温度作用时地震设计状况的设计,选取2.20作为目标可靠度时,建议地震作用系数取值1.17,温度作用系数取值1.33。

参考文献:

- [1] 李钢,秦佩瑶,董志筹,等.地震与洪水作用下结构风险分析与设计研究进展[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):237-250.
Li G, Qin P T, Dong Z Q, et al. research progress on risk analysis and design for structures under multiple hazards of earthquake and flood[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 237-250. (in Chinese)
- [2] 雷虎军,朱广平,孙昱坤,等.波浪-地震联合作用下跨海斜拉桥横向减振控制研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(4):650-657,673.
Lei H J, Zhu G P, Sun Y K, et al. Lateral vibration control of offshore cable-stayed bridge under combined earthquake and wave loads[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 650-657, 673. (in Chinese)
- [3] 李宏男,李钢,郑晓伟,等.工程结构在多灾害耦合作用下的研究进展[J].土木工程学报,2021,54(5):1-14.
Li H N, Li G, Zheng X W, et al. Research progress in engineering structures subject to multiple hazards [J].

China Civil Engineering Journal, 2021, 54 (5) : 1-14. (in Chinese)

- [4] Deng Y, Yan C, Liu S, et al. Curvature response of bridge pier subjected to earthquake action in a saline soil environment [J]. Engineering Structures, 2022, 258: 114106.
- [5] Billah A H M M, Todorov B. Effects of subfreezing temperature on the seismic response of lead rubber bearing isolated bridge [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105814.
- [6] Anastasopoulos D, Maes K, De R G, et al. Influence of frost and local stiffness variations on the strain mode shapes of a steel arch bridge [J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115097.
- [7] Wang L, Yu L, Du X, et al. Seismic response of a PC continuous box girder bridge under extreme ambient temperature[J]. Sustainability, 2023, 15(20): 14763.
- [8] 王力,虞庐松,刘世忠,等.极端温度对高寒高烈度区连续梁桥地震响应的影响[J].桥梁建设,2022,52(2):89-96.
Wang L, Yu L S, Liu S Z, et al. Effect of extreme temperatures on seismic response of continuous girder bridges in cold and high-seismicity area[J]. Bridge Construction, 2022, 52(2): 89-96. (in Chinese)
- [9] Wu H J, Zhang H, Lu P. Brief analysis of temperature effect on the low pier continuous rigid-frame bridge [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255: 911-915.
- [10] Guo J, Zhong J, Dang X, et al. Seismic responses of a cable-stayed bridge with consideration of uniform temperature load [J]. Applied Sciences, 2016, 6(12): 408.
- [11] Maleki S, Maghsoudi B A. Effects of concurrent earthquake and temperature loadings on cable-stayed bridges [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016, 16(6): 1550020.
- [12] Qiu W L, Zhang Z. Research on combination of seismic and temperature action effects of bridge structures [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(4): 540-544.
- [13] Piscopo V, Scamardella A. Sensitivity analysis of hull girder reliability in intact condition based on different load combination methods [J]. Marine Structures, 2019, 64: 18-34.
- [14] 惠存,李永刚,李克,等.多灾耦合作用下钢管混凝土柱承载性能研究进展[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):259-268.
Hui C, Li Y G, Li K, et al. Investigation on the load bearing capacity of concrete filled steel tube columns under the couple of multiple disasters [J]. Journal of Disas-

- ter Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42 (2):259-268. (in Chinese)
- [15] Yan J B, Dong X, Wang T. Axial compressive behaviours of square CFST stub columns at low temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 164: 105812.
- [16] 铁路桥涵设计规范(极限状态法): Q/CR 9300—2018 [S].北京:中国铁道出版社,2019.
- [17] 李铁夫.铁路桥梁可靠度设计[M].北京:中国铁道出版社,2006.
Li T F. Design on reliability for railway bridges [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [18] 范重,吴雨璇,贡金鑫,等.温度作用概率分布与可靠指标研究[J].工程力学,2022,39(增1):296-311,319.
Fan Z, Wu Y X, Gong J X, et al. Study on probability distribution and reliability index of temperature effect [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39 (Sup1): 296-311, 319. (in Chinese)
- [19] 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [20] Li H N, Zheng X W, Li C. Copula-based approach to construct a joint probabilistic model of earthquakes and strong winds[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2019, 19(4): 1950046.
- [21] 高小旺,鲍霁斌.地震作用的概率模型及其统计参数[J].地震工程与工程振动,1985,(1):13-22.
Gao X W, Bao A B. Probability model and its statistical parameters for seismic load [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1985, (1): 13-22. (in Chinese)
- [22] 周枚,赵威,刘阳,等.公路桥梁地震设计状况荷载组合分项系数研究[J].中国公路学报,2021,34(2): 317-330.
Zhou M, Zhao W, Liu Y, et al. Partial coefficient of load combination in seismic design of highway bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (2):317-330. (in Chinese)
- [23] 孙得璋,孙柏涛,George C L. 桥梁多灾害设计荷载系数确定方法探讨[J].土木工程学报,2012,45(增2): 76-79.
Sun D Z, Sun B T, George C L. Method of load factor determination for multi-hazards bridge design [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup2): 76-79. (in Chinese)
- [24] 李於钱,王力,杜新龙,等.极端温度对钢管混凝土格构式高墩抗震性能影响研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(5):123-129.
Li Y Q, Wang L, Du X L, et al. Study on the impact of extreme temperatures on the seismic performance of concrete-filled steel tubular lattice high piers [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19 (5): 123-129. (in Chinese)
- [25] 欧祖敏,孙璐,周杰,等.基于概率需求的高速铁路无砟轨道板温度荷载取值研究 I:轴向均匀温度作用[J].铁道学报,2016,38(2):96-104.
Ou Z M, Sun L, Zhou J, et al. Probability value of temperature loads for ballastless track slab of high speed railway: axial uniform thermal actions [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38 (2): 96-104. (in Chinese)
- [26] 虞庐松,刘彪,王力,等.高寒环境温度下圆钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J].土木工程学报,2023,56(10):20-31.
Yu L S, Liu B, Wang L, et al. Experimental study on axial compression performance of CFST stub columns under very-cold ambient temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10):20-31. (in Chinese)
- [27] 铁路工程抗震设计规范:GB 50111—2006[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [28] 孙得璋.地震和重卡车荷载作用下桥梁多灾害设计理论研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2012.
Sun D Z. Study on multiple hazards design theory for bridge under earthquakes and heavy truck loads [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)