

# 高原环境下连续刚构桥受力和位移影响因素分析

何博文<sup>1</sup>,孙浩<sup>1</sup>,王烁<sup>2</sup>

(1.中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430100;2.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**随着中国建筑行业蓬勃发展以及通行需求不断提高,连续刚构桥因其具备避免体系转换、减少桥跨伸缩缝、行车舒适等优点作为目前大跨度桥梁主要结构体系。但是连续刚构桥梁由于其刚构体系特点及混凝土材料收缩徐变特性,对环境温度、湿度变化较为敏感,严重时将导致桥梁产生裂缝、大变形等工程病害,引起行车舒适性下降,甚至造成安全隐患。该文以雅鲁藏布江大桥为工程背景,通过有限元计算,研究高原环境下温度及湿度对连续刚构桥受力情况的影响。计算结果表明:高原环境温度变化显著影响刚构桥的受力,梯度温度变化易导致结构受力分布不均匀,而整体温度变化明显影响刚构桥的位移;此外,高原环境湿度对桥梁结构的影响主要体现在跨中下挠位移,低湿度环境下连续刚构桥的下挠位移明显增大。

**关键词:**连续刚构桥;受力行为;梯度温度;高原环境;位移

**中图分类号:**U448.25

**文献标志码:**A

## 0 引言

中国现阶段主要运营的桥梁结构体系中,连续刚构桥具备跨径大、抗震储备高及结构应力分布合理等特点,刚构体系不仅能更最大限度地发挥其构件的材料性能,大大节省工程造价,同时刚构体系施工工艺较为成熟,桥梁基础能够根据实际工程地形进行调整,因此连续刚构桥在高速铁路沿线、城市轨道交通等大跨度高难度桥梁工程运用广泛<sup>[1-7]</sup>。为进一步优化连续刚构体系在桥梁工程中的运用,确保桥梁安全性,需要解决连续刚构桥在运营期间因跨中挠度过大导致箱梁腹板出现裂缝等工程病害问题。

连续刚构桥的优势来源于其融合了T形刚构桥和连续梁桥无需支座和体系转换、伸缩缝少、行车平顺舒适等优点。此外,刚构体系给桥梁带来的顺桥向抗弯和横向抗扭能力提升,给予连续刚构桥更大的跨径区间,更易适配各种工程环境及桥梁的功能需求。伴随桥梁施工工艺发展及新型材料构件等不断研发,桥梁的跨越能力、结构外形、功能性实用性等进一步优化。然而日益增长的交通量以及桥梁使用年限的延长,桥梁长期遭受偏载、超载等不利因素影响后易

出现构件老化受损等问题<sup>[8-13]</sup>。同时,桥梁设计上为提升跨越能力、满足通行需求而拓宽桥面,导致目前梁体结构尺寸不断扩大。而混凝土材料制成的主梁构件等在受到室外环境温度变化影响后,构件内会产生非线性的时变温差效应,进而带来不可忽略的温度梯度应力等不利于桥梁正常使用的影响。环境温度带来的构件内力变化将导致桥梁产生变形、局部应力集中等问题,从而削弱桥梁结构承载能力,影响桥梁服役过程行车舒适性、结构耐久性甚至引发安全事故。文献调研表明:大跨径桥梁在施工及服役期,环境温度变化带来的温度效应为箱梁结构产生混凝土裂缝的主要原因,在环境温度差较大的区域,温度应力甚至成为桥梁体系是否安全的主要控制参数,而超静定体系的大跨连续刚构桥梁等更易受到环境温度的影响,由温度变化引起的自应力甚至超过大跨刚构体系的自重荷载、移动荷载等<sup>[14-18]</sup>。

调研国内外研究成果得出:除温度应力外,混凝土材料发生收缩徐变亦是引起连续刚构桥跨中挠度过大的主要原因。低湿度环境下混凝土收缩徐变更易影响构件应力分布,而大跨度连续刚构桥的墩梁固结特性将进一步扩大收缩徐变带来的影响,进而对桥梁服役期间行车舒适性、服役年限以及桥梁结

收稿日期:2023-08-06(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278141)

作者简介:何博文,男,硕士,高级工程师.E-mail:hebwmall@qq.com

构的外观带来不可恢复的影响。邓宜峰等<sup>[19]</sup>采用有限元计算分析了4种收缩徐变模型对实际桥梁工程在服役期受力变化趋势的预测有效性,计算显示CEB-FIP 90模型准确性较强,精度更高,ACI 209模型预测精度较差;李宁<sup>[20]</sup>通过分析大跨连续刚构桥在收缩徐变下的挠度及应力得出,刚构体系梁体结构更易受到收缩徐变的影响,最大变形区域出现在箱梁悬臂处;朱鹏飞等<sup>[21]</sup>对大跨连续刚构体系产生梁体下挠的原因进行了总结;石磊<sup>[22]</sup>针对连续刚构体系梁体部分深入研究得出,设计阶段收缩徐变产生的影响需重点考虑以确保桥梁使用期限内服役的安全性。从文献调研情况可知:现阶段对于大跨连续刚构体系的设计及使用尚未充分考虑环境因素对桥梁结构受力及耐久性的影响,尤其是环境恶劣的高原地区温差较大,环境湿度较低,环境温度及桥梁收缩徐变对桥梁舒适性、安全性、耐久性影响的问题亟待解决。

针对现有研究工作缺乏对高原环境大跨径连续刚构桥受力特征影响的研究,本文以某实际桥梁工程为研究对象,利用有限元软件Midas/Civil建立计算模型,模拟高原温度变化及不同环境湿度下连续刚构桥在收缩徐变后的跨中应力与挠度,并对计算结果进行分析,所得的结论可为今后高原地区大跨连续刚构桥的设计提供参考。

## 1 项目背景

雅鲁藏布江大桥位于拉萨市尼木县卡如乡卡如村与日喀则市仁布县康雄乡塔热村交界处,属于高原温带亚干旱区,具有空气稀薄、气压气温低、昼夜温差大、气候环境多变、降雨量较少、蒸发量大、气候干燥等特征。沿线4 000 m以上长期处于积雪冰封状态。雅鲁藏布江大桥主梁为(90+170+90) m预应力连续刚构箱梁,单箱单室,梁体按全预应力混凝土设计采用三向预应力。单幅桥面宽12.5 m,三车道,大桥典型断面如图1所示。

为了合理模拟桥梁结构在不同环境下的受力情况,利用Midas/Civil对桥梁进行梁单元划分。考虑到大桥结构对称分幅,本研究对其取半进行建模计算,将单幅桥梁结构划分为210个单元、223个节点。大桥有限元模型如图2所示。

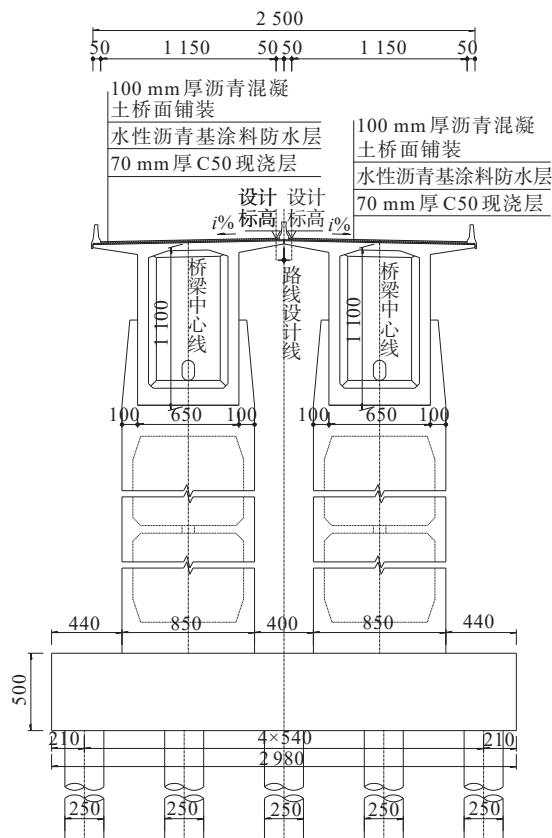


图1 桥梁典型断面(单位:cm)

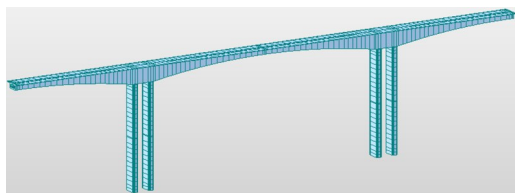


图2 大桥有限元模型

## 2 连续刚构桥受力模拟

### 2.1 计算参数

本研究计算中永久作用包括混凝土自重、混凝土收缩徐变作用、预应力等。体系自重荷载按梁体设计断面尺寸进行计算,主梁部分混凝土的重度统一取 $27.3 \text{ kN/m}^3$ ,其他部分混凝土重度以 $26 \text{ kN/m}^3$ 计算。铺装部分以 $24 \text{ kN/m}^3$ 计算,车道防撞护栏以 $16 \text{ kN/m}$ 总重取值。移动荷载等级为公路-I级,依据设计图纸本桥为三车道,同时考虑横向偏载、冲击等参数对结构受力情况的作用。温度效应按混凝土线性膨胀系数 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ,施工期合龙温度取 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ ,分以下工况输入:整体升温效应 $24^\circ\text{C}$ ,整

体温降效应 $-20^{\circ}\text{C}$ 。梯度温度效应依据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)计算<sup>[23]</sup>,铺装日照正温差 $T_1$ 取 $14^{\circ}\text{C}$ , $T_2$ 取 $5.5^{\circ}\text{C}$ ,日照反温差 $T_1$ 取 $-7^{\circ}\text{C}$ , $T_2$ 取 $-2.75^{\circ}\text{C}$ 。桥位所处区域设计基本风速取 $29.0\text{ m/s}$ ,施工和运营期风荷载按《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)考虑<sup>[24]</sup>。基础差异沉降过渡墩按 $0.01\text{ m}$ 计算,主墩按 $0.02\text{ m}$ 计算。

## 2.2 荷载工况

(1) 自重。自重系数: $-1.04$ 。

(2) 徐变收缩。构件理论厚度由软件计算,公式为:

$$h = a \cdot A_c / u \quad (1)$$

$$u = L_0 + a \cdot L_i \quad (2)$$

式中: $L_0$ 为外轮廓周长; $L_i$ 为内轮廓周长; $a$ 为考虑轮廓周长的比例系数; $A_c$ 为截面面积。

(3) 支座沉降。以各地基及基础最大沉降量的最不利荷载组合考虑。

第17#~20#墩组不均匀沉降分别为: $-10.0\text{ mm}$ 、 $-20.0\text{ mm}$ 、 $-20.0\text{ mm}$ 、 $-10.0\text{ mm}$ 。

(4) 可变荷载。活载:考虑本工程实际受力情况,只计入汽车荷载(公路-I级);纵向整体冲击系数 $\mu$ ,依据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)第4.3.2条按下式计算:

$$\begin{cases} f < 1.5\text{ Hz}, \mu = 0.05 \\ 1.5\text{ Hz} \leq f \leq 14\text{ Hz}, \mu = 0.1767 \ln f - 0.0157 \\ f > 14\text{ Hz}, \mu = 0.45 \end{cases} \quad (3)$$

根据规范,计算的结构基频 $f=3.02\text{ Hz}$ ,冲击系数 $\mu=0.180$ 。

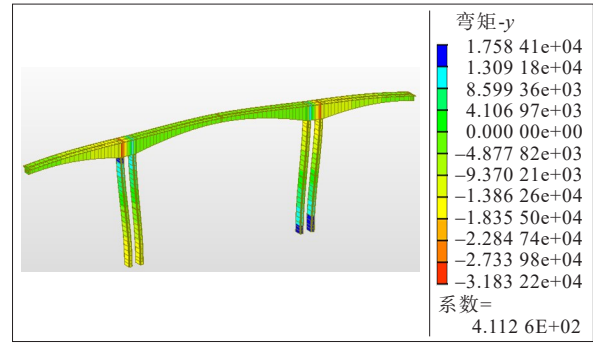
## 3 环境温度及湿度对连续刚构桥受力影响

### 3.1 环境温度对大跨刚构桥受力影响

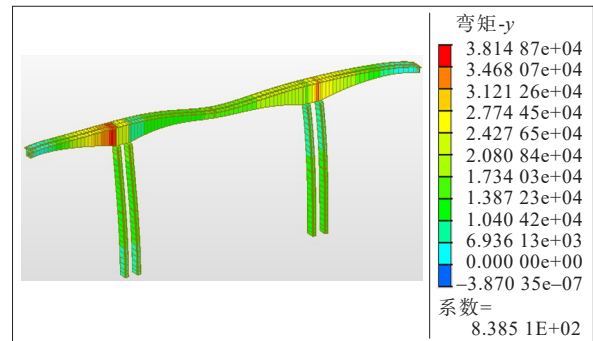
桥梁结构服役工程中,构件以对流、传导和辐射等方式同周边环境中的介质形成热交换,而实际工程中桥梁各构件内部温度自由传导分布不均匀,导致构件会出现自发的温度形变。而在结构的内、外约束下温度变形受到阻碍进一步在结构内产生温度荷载,改变结构内力应力分布情况。

#### 3.1.1 温度对结构内力的影响

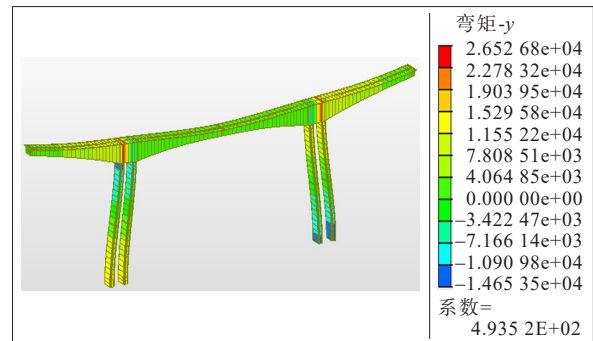
图3为整体温度及梯度温度作用下刚构桥内力。



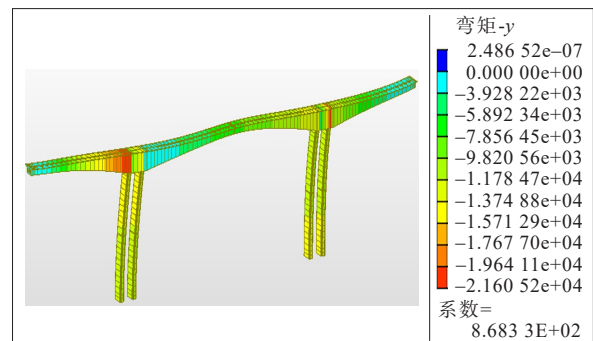
(a) 整体温升



(b) 梯度温升



(c) 整体温降



(d) 梯度温降

图3 不同温度工况内力图(单位:kN·m)

从计算结果可以看出:无论温度升降,弯矩最大处均保持在桥墩附近位置。梯度温升工况下产生的结构最大内力比整体温升工况最大内力值高19.8%,整体温降工况产生的结构内力比梯度温降工况内力

值高 22.7%。整体温升温降工况下,结构内力变化较为稳定,主梁结构受力均匀,且相对于梯度温变工况,整体温变工况产生内力较小。梯度温度改变的工况下,桥梁结构在最大弯矩处内力整体提升较大,结构内力变化趋势不对称,对主梁受力情况影响更明显。

### 3.1.2 温度对结构应力的影响

图 4 为整体温度及梯度温度作用下刚构桥应力情况。对比有限元计算结果可知:温度变化产生的应力分布于主梁一侧;整体温度升降工况对结构应力的影响较为稳定,随温度的改变结构应力分布均

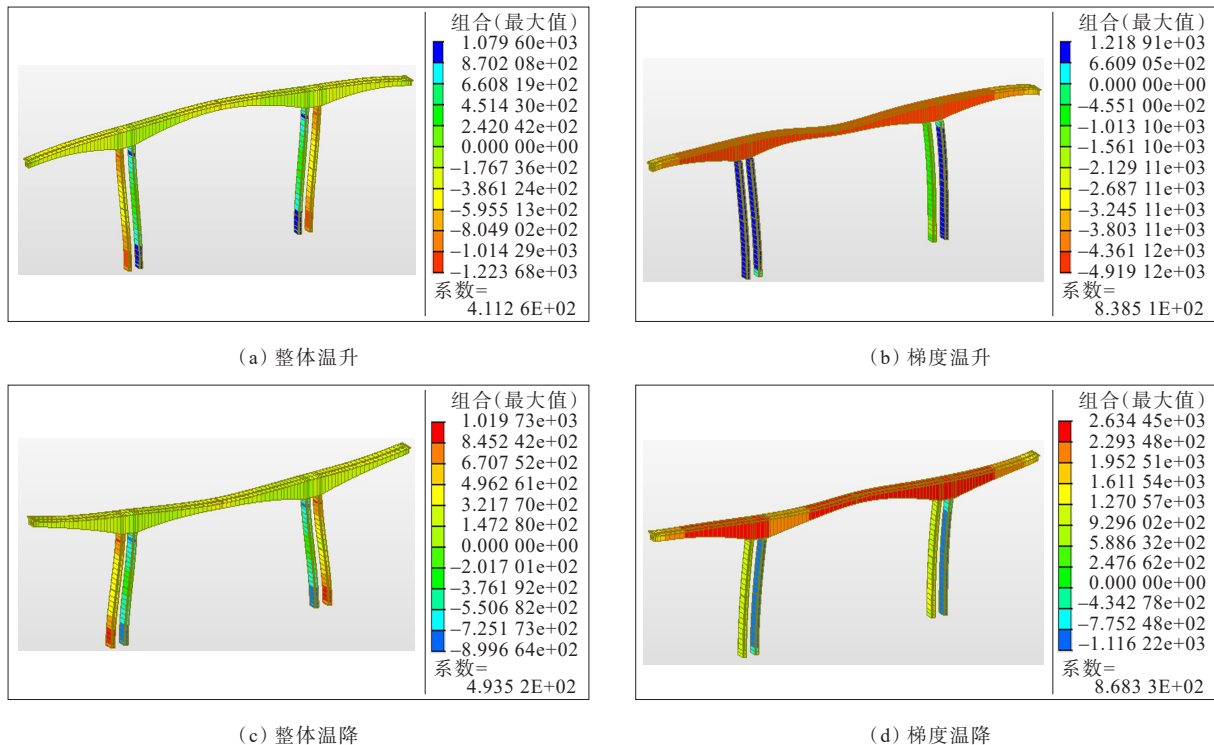


图 4 不同温度工况应力图(单位:kPa)

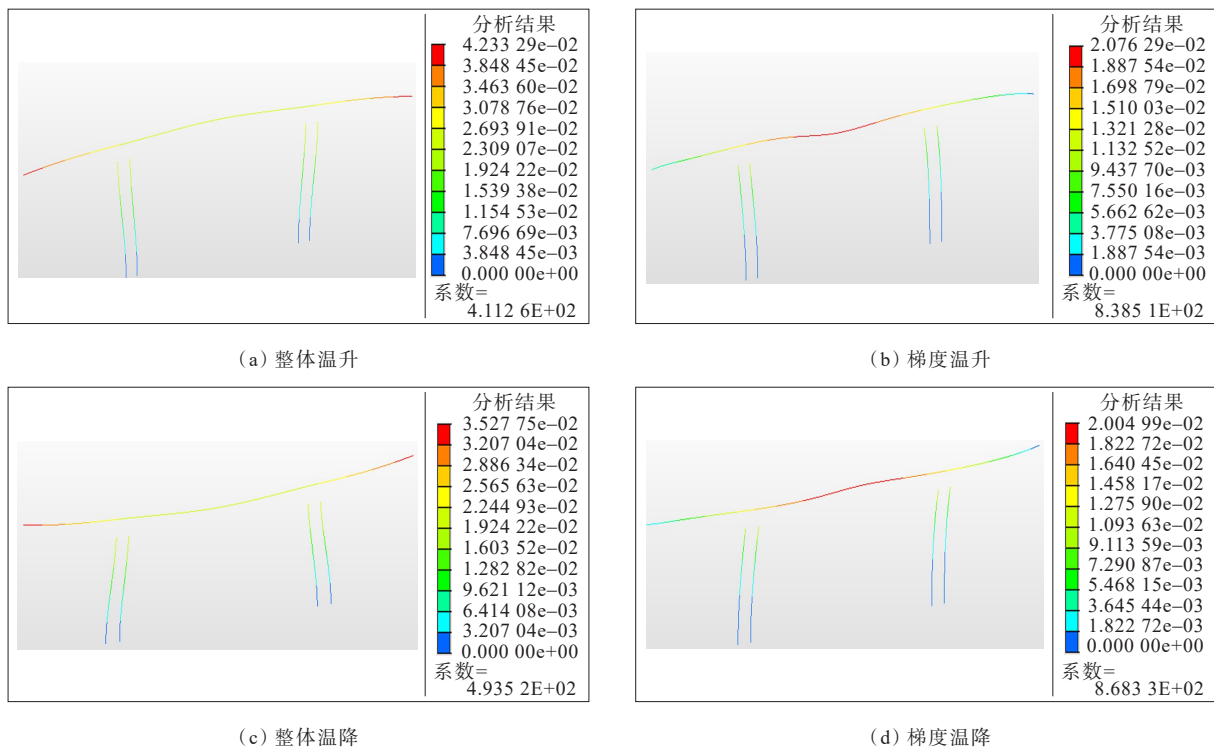


图 5 不同温度工况位移图(单位:m)



匀;梯度温度改变产生的应力达到整体温度改变产生应力值的2.5~4倍;梯度温度升降工况下应力变化明显,主梁所受应力显著提升。

### 3.1.3 温度对结构挠度的影响

图5为整体温度及梯度温度作用下刚构桥位移情况。从有限元显示的位移趋势可以看出:因刚构体系下部结构为双支薄壁墩,具有柔性结构属性,导致梯度温度变化情况下体系出现应力重分布,最大变形位置发生改变;整体温度升降工况产生的结构位移主要发生在梁端部位,而梯度温度升降工况产生的结构位移主要发生在主梁跨中部位;梯度温度升降工况下桥梁结构位移较小,为整体温度升降工况产生位移的48.9%~56.8%,外界环境温度升降给大跨刚构体系带来的整体温度变化导致结构产生的位移更明显。

## 3.2 环境湿度对大跨刚构桥受力影响

以模拟的连续刚构桥有限元模型为基础,定义外界环境湿度为低湿度(40%)和高湿度(70%)两类情况进行分析研究,将实际工程中普遍环境湿度70%湿度值作为参照,分析对比低湿度环境条件下大跨度连续刚构桥服役期间发生收缩徐变效应对结构体系所受的内力、应力及挠度产生的影响趋势。

### 3.2.1 环境湿度对结构内力的影响

图6为不同环境湿度下刚构桥内力分布情况。从计算结果可以看出:在不同环境湿度下结构最大弯矩值仍出现在桥墩位置附近。低湿度环境下结构负弯矩值比高湿度环境下结构负弯矩值高3.8%,环境湿度变化未造成刚构体系内力分布情况改变且内力值变化不大,环境湿度对连续刚构桥结构内力分布的影响较小。

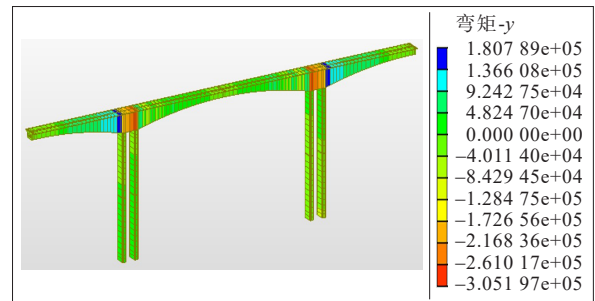
### 3.2.2 环境湿度对结构应力的影响

图7为不同环境湿度下刚构桥应力分布情况。有限元计算结果表明:低湿度环境下主跨跨中位置附近结构应力呈现增大趋势,而低湿度环境下结构最大应力值较高湿度环境下结构应力值降低2.0%,环境湿度条件对连续刚构桥应力分布情况影响较小。

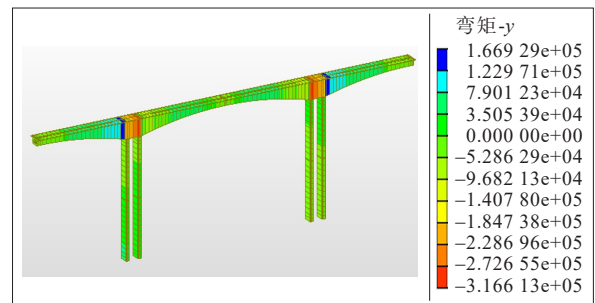
### 3.2.3 环境湿度对结构位移的影响

图8为不同环境湿度下刚构桥位移趋势。从刚构体系结构位移分布情况可以得出:不同湿度环境对桥梁结构最大下挠位移影响较大。长期荷载工况

下低湿度环境下结构跨中下挠位移增大23.5 mm,且低湿度环境下主跨跨中位置附近结构下挠范围明显增大。环境湿度对连续刚构桥跨中挠度的影响最明显。

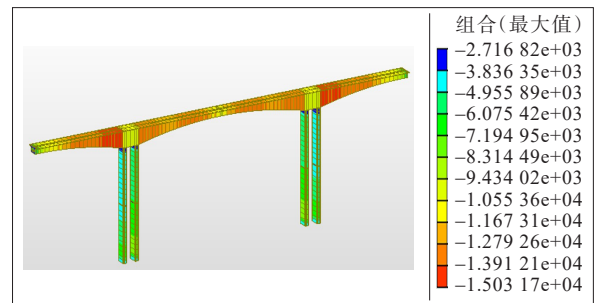


(a) 环境湿度 70%

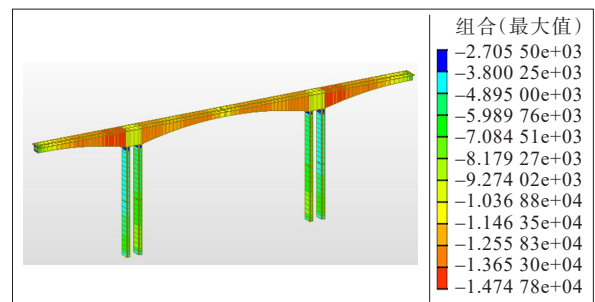


(b) 环境湿度 40%

图6 不同湿度工况下结构内力图(单位:kN·m)

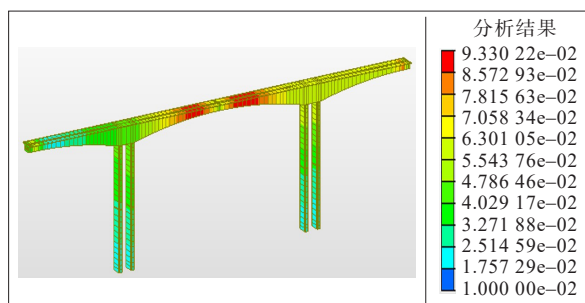


(a) 环境湿度 70%

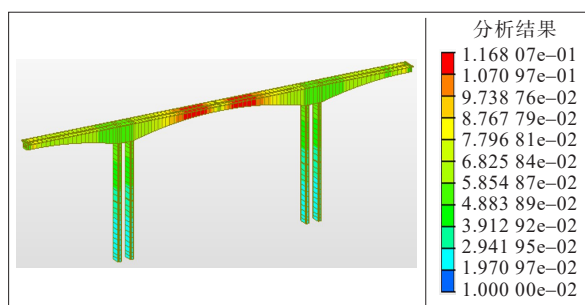


(b) 环境湿度 40%

图7 不同湿度工况下结构应力图(单位:kPa)



(a) 环境湿度 70%



(b) 环境湿度 40%

图 8 不同湿度工况下结构位移图(单位:m)

## 4 结论

以雅鲁藏布江大桥为工程背景,研究了高原环境温度及湿度对连续刚构桥受力情况的影响,得出以下结论:

(1) 通过 Midas 软件计算分析得出,环境温度的改变对刚构桥受力影响明显。其中梯度温度的变化对内力及应力的影响更为突出,易导致结构受力分布不均匀。整体温度变化,结构位移主要出现在桥梁端部,而梯度温度变化引起的结构位移主要出现在桥梁跨中区域。其中整体温度变化对刚构桥位移的影响更大,更易引发桥梁安全事故。

(2) 环境湿度对连续刚构桥内力及应力的影响不明显,湿度对桥梁结构受力的影响主要体现在跨中下挠位移,低湿度环境下连续刚构桥下挠明显增大。

## 参考文献:

- [1] 刘福才.高速铁路大跨度预应力混凝土连续梁桥施工监控研究[D].烟台:烟台大学,2022.
- [2] 陈爽,唐慧琪,李继芸,等.低湿环境对连续刚构桥收缩徐变影响分析[J].施工技术(中英文),2022,51(18):34-38.
- [3] 胡志礼.某预应力混凝土连续刚构桥收缩徐变效应研究

- [J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(9):174-176.
- [4] LUCAS J M, BERRED A, LOUIS C. Thermal actions on a steel box girder bridge[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 2003, 156(2): 175-182.
- [5] 谢阳福,叶远盛,桂水荣,等.曲率半径对中小跨径连续刚构桥施工阶段力学性能的影响[J].中外公路,2023,43(1):99-103.
- [6] 解亚东,王少辉,吕志强,等.多跨连续刚构桥边中跨同时合龙关键技术[J].中外公路,2021,41(5):85-89.
- [7] 陈诚,杜磊,杜晶.山区连续刚构桥边跨现浇段施工技术[J].中外公路,2021,41(3):151-155.
- [8] 帅一师,周亮.高速公路服役连续梁桥质量评价及病害修复[J].公路工程,2021,46(3):308-313.
- [9] 王技,钟海辉.某跨铁路连续梁桥病害分析与加固技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(7):203-205.
- [10] 蒋玮,周群,李莘哲.基于正交试验大跨PC连续刚构桥主梁参数优化研究[J].中外公路,2020,40(3):129-133.
- [11] 肖龙,冯仲仁,陈百奔,等.基于修正反应谱高墩连续刚构桥地震响应研究[J].中外公路,2022,42(1):115-122.
- [12] 刘畅,朱巍.T形刚构桥基础隔震设计方法研究[J].中外公路,2021,41(S2):110-113.
- [13] 刘华全,杨得海,蔡成奇,等.高墩连续刚构桥车桥耦合振动分析[J].中外公路,2023,43(2):133-139.
- [14] 陈伟利,梁艳,任海萍.大跨度预应力混凝土连续梁桥悬臂施工中温度效应的研究[J].混凝土,2020(7):153-155,160.
- [15] 王宫涛.混凝土连续梁桥温度影响研究[D].济南:济南大学,2021.
- [16] 林志斌.连续刚构箱形梁腹板早龄期裂缝成因及防裂措施仿真分析[J].中外公路,2022,42(5):124-131.
- [17] 杨战勇.基于温度修正徐变模型的公路大跨连续刚构桥结构状态影响分析[J].中外公路,2021,41(4):151-156.
- [18] 冷文华.基于七自由度大跨预应力曲线刚构桥分析[J].中外公路,2020,40(2):107-110.
- [19] 邓宜峰,吕鹏飞.连续刚构桥施工控制中的混凝土收缩徐变计算分析[J].低温建筑技术,2018,40(3):57-60.
- [20] 李宁.基于有限元的预应力混凝土桥梁徐变效应研究[J].公路工程,2017,42(3):58-63.
- [21] 朱鹏飞,李睿,李华,等.大跨度连续刚构桥跨中下挠影响因素研究[J].低温建筑技术,2017,39(1):53-55.
- [22] 石磊.预应力混凝土连续刚构桥上部结构分析[J].四川建筑,2020,40(2):190-191,194.
- [23] 中交公路规划设计院.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [24] 中交公路规划设计院.公路桥梁抗风设计规范:JTG/T 3360-01—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.