

王飞. 多场耦合下超高空心薄壁墩身动力特性优化模型[J]. 华南地震, 2025, 45(1): 138-144. [WANG Fei. Optimized Model for Dynamic Characteristics of Ultra-high Hollow Thin-walled Pier Under Multi-field Coupling [J]. South China journal of seismology, 2025, 45(1): 138-144]

多场耦合下超高空心薄壁墩身动力特性优化模型

王 飞

(中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 400037)

摘要: 受到超高空心薄壁墩身特性的影响, 现有在超高空心薄壁墩身自由端对应的节点上动力关联较为复杂, 传统超高空心薄壁墩身动力模型的分析结果局部参量分析不足, 造成模型应力变化状况与实际偏差较大。为此, 结合现阶段超高空心薄壁墩身结构及其多场耦合条件, 对其动力特性模型展开优化分析。通过多场耦合下超高空心薄壁墩身动力分布模型; 多场耦合模态分析; 墩身动力特性模型计算; 完成对多场耦合下超高空心薄壁墩身动力特性的全局优化。实验对比表明; 经过优化后的模型, 能够更为准确反映多场耦合下超高空心薄壁墩身动力特性, 且在应力响应上表现更为优秀, 稳定性更好, 且兼具更优秀的动力分析能力。

关键词: 多场耦合; 超高空心薄壁墩身; 动力特性优化; 动力分布模型; 模态分析;

中图分类号: U442

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)01-0138-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.01.17

Optimized Model for Dynamic Characteristics of Ultra-high Hollow Thin-walled Pier Under Multi-field Coupling

WANG Fei

(China Railway 11th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Chongqing 400037, China)

Abstract: Influenced by the characteristics of the ultra-high hollow thin-walled pier, the dynamic correlation at the existing nodes corresponding to the free end of the ultra-high hollow thin-wall pier is relatively complex. The analysis results of the traditional dynamic model of the ultra-high hollow thin-walled pier show an insufficiency of analysis on part of the parameters, which results in a large deviation between the stress change of the model and the actual situation. Therefore, given the ultra-high hollow thin-walled pier structure at the present stage and its multi-field coupling conditions, optimization analysis of its dynamic characteristic model was carried out. Through the dynamic distribution model of the ultra-high hollow thin-walled pier under multi-field coupling, multi-field coupling modal analysis and pier dynamic characteristic model calculation, the overall optimization of the dynamic characteristics of the ultra-high hollow thin-walled pier under multi-field coupling was completed. The experimental comparison shows that the optimized model can more accurately reflect the dynamic characteristics of the ultra-high hollow thin-walled pier under multi-field coupling, and has better stress response, stability, and dynamic analysis ability.

Keywords: Multi-field coupling; Ultra-high hollow thin-walled pier; Dynamic characteristic optimization; Dynamic distribution model; Modal analysis

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 中铁十一局集团第五工程有限公司重点项目(ZT11052020B-02)

作者简介: 王飞(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为超高大跨度桥梁耐久性能及质量控制等。

E-mail: zhitoujiy@163.com

0 引言

桥梁作为连接城市、沟通区域的重要交通枢纽,其安全性与稳定性对保障交通运输的畅通至关重要^[1]。桥墩作为桥梁结构的支撑和传递载荷的关键部分,其设计合理性和施工质量的优劣直接影响到桥梁的整体性能和使用寿命。在桥梁设计中,超高空心薄壁墩身作为一种特殊类型的桥墩,具有显著的结构特点。其指的是那些高度较大、截面形状为空心且壁厚相对较薄的桥墩结构。这种设计方式能有效减轻桥墩自重,提高桥梁跨越能力。然而,在实际运营过程中,超高空心薄壁墩身常常面临着复杂多变的多场耦合条件,如动力载荷、温度变化、地质环境等。这些条件之间相互作用、相互耦合,给桥墩的动力特性分析带来了极大的挑战。因此,对超高空心薄壁墩身在多场耦合条件下的动力特性进行深入研究和优化分析,对于确保桥梁的安全运营具有重要意义。

当前,针对超高空心薄壁墩身的动力特性分析,传统模型往往存在以下问题:首先,传统模型在分析时,往往忽略了多场耦合条件对墩身动力特性的影响,导致分析结果与实际情况存在较大的偏差;其次,对于超高空心薄壁墩身这种特殊结构,其自由端节点上的动力关联较为复杂,传统模型在描述这些关联时存在不足,导致分析结果不够准确;最后,传统模型在分析时,对于局部参数的分析往往不够深入,无法全面反映墩身在多场耦合条件下的动力特性。

因此,研究多场耦合条件下超高空心薄壁墩身的动力特性优化模型。该研究可以弥补传统模型在分析多场耦合条件下的不足,提高分析结果的准确性和可靠性,为超高空心薄壁墩身的设计、施工和运营提供更为科学的依据,保障桥梁的安全性和稳定性,延长其使用寿命。

1 模型参量优化与分析

1.1 多场耦合下超高空心薄壁墩身动力分布模型

根据超高空心薄壁墩身结构特点,提出图1所示的多场耦合动力分布模型,墩身结构分布均简化为质量均布的结构梁。

如图1中所示: EI_i 代表第*i*段套管所对应的抗弯刚度等效系数; L_i 代表第*i*段套管长度; \bar{m}_i 代表、

第*i*段套管线性密度; K_θ 代表连接法兰所对应的转动刚度。由图1所示超高空心薄壁墩身结构对应的局部坐标系可以得到其对应动力分布方程如下所示:

$$EI_i = \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式(1)中, $v(x,t) = \Phi(x)Y(t)$,其中, $v(x,t)$ 代表横向偏移响应函数, $\Phi(x)$ 代表分布函数, $Y(t)$ 代表动力空间下的广义坐标。 $\Phi_i(x_i)$ 代表局部函数,其中,对应动力空间下多场耦合局部坐标表达式函数,可以描述为:

$$\varphi_i(x_i) = A_{i1} \cos(a_i x) + A_{i2} \sin(a_i x) + A_{i3} \cosh(a_i x) + A_{i4} \sinh(a_i x), 0 < x < L_i \quad (2)$$

$$a_i = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 \bar{m}_i}{EI_i}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: ω 代表全局分布节点上的自振频率; a_i 为第*i*段套管耦合自振振幅。考虑到多场耦合的场景表达,定义:

$$\Phi_0(x) = 0 \quad (4)$$

自振过程中振型常量直接决定多场景耦合自振形状与振幅。根据上述模型以及函数可知,超高空心薄壁墩身动力分布模型中共包含3类节点,分别为:超高空心薄壁墩身刚性节点、柔性节点以及自由节点^[2];根据3类节点的分布特征,可通过将其引入边界约束来得到动力分布频率方程。

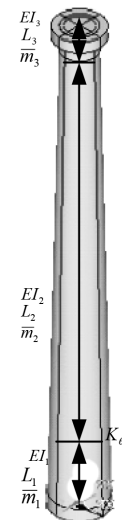


图1 多场耦合动力分布模型

Fig.1 Dynamic distribution model under multi-field coupling

针对刚性节点所对应的参量,可通过该节点与其上下两部分梁段之间的偏移系数相等、内转角相

等、弯矩相等以及应力剪力相等关系^[3],得到:

$$\begin{cases} \Phi_i(L_i) = \Phi_{i+1}(0) \\ \Phi'_i(L_i) = \Phi'_{i+1}(0) \\ E_i I_i \Phi''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} \Phi''_{i+1}(0) \\ E_i I_i \Phi'''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} \Phi'''_{i+1}(0) \end{cases} \quad (5)$$

针对柔性节点所对应的参量,可通过该节点位置的弯矩与其上下两部分梁段内转角系数计算获得,其中柔性节点的计算边界约束为:

$$\begin{cases} \Phi_i(L_i) = \Phi_{i+1}(0) \\ E_i I_i \Phi'_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} \Phi'_{i+1}(0) = K_\theta (\Phi'_{i+1}(0) - \Phi'_i(L_i)) \\ E_i I_i \Phi''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} \Phi''_{i+1}(0) \end{cases} \quad (6)$$

对于自由节点,可通过节点位置所对应的应力与弯矩系数为0计算获得:

$$\begin{cases} E_i I_i \Phi''_i(L_i) = 0 \\ E_i I_i \Phi'''_i(L_i) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中 Φ'_i 代表 Φ_i 的一阶导数; Φ''_i 代表 Φ_i 的二阶导数; Φ'''_i 代表 Φ_i 的三阶导数。

将式(2)、(4)依次代入式(5)~(7),经过计算得到关于 $A_{i1} \sim A_{i4}$ 线性分布的动力方程:

$$W \cdot A = 0 \quad (8)$$

式(8)中, W 代表多场耦合边界矩阵系数。根据墩身等效刚度决定于其对应截面应力;超高空心薄壁的等效刚度为 $E_1 I_1 = L_3 / (3\delta)$,其中 δ 代表超高空心薄壁柔度系数,按照多场耦合条件下有限元超高空心薄壁标准截面计算,得到系数矩阵 W 的系数值必须为0^[4]。

1.2 多场耦合模态分析

为了进一步确定多场耦合下的动力特性参量,对其进行模态分析。分析主要通过对超高空心薄壁墩身动力分布模型中自由节点对应结构振动的微分方程,利用其对应坐标变换的方法对其解耦计算,通过进一步提取模态信息,得到具体参量数值。其中自由节点所对应结构振动的微分方程为:

$$[M]\ddot{y} + [C]\dot{y} + [K]y = 0 \quad (9)$$

式(9)中, $[M]$ 代表超高空心薄壁墩身质量矩阵;

$[C]$ 代表超高空心薄壁墩身结构阻尼矩阵; $[K]$ 代表超高空心薄壁墩身结构刚度矩阵; \ddot{y} 代表动力特性参量中的加速度; \dot{y} 代表动力特性参量中的速度; y 代表动力特性参量中的位移。

通过对超高空心薄壁墩身多场耦合下动力特性模态分析,可以得到动力特性为:超高空心薄壁墩身振频率与其模态阶数具有正态递增属性,且在递增过程中,幅度与模态阶数成反比关系;超高空心薄壁墩身的几何和物理力学性能参数如下:高度为20 m;厚度为1.5 m;截面形状为圆形;直径为10 m;材料为钢材;弹性模量为200 GPa;密度为7850 kg/m³。计算超高空心薄壁墩身所对应的一阶自振频率为0.522 07 Hz,由于数值偏小极易受到计算过程中墩顶侧移偏差的动力扰动^[5]。

基于上述分析,对其动力特性模态分析过程中偏差扰动进行分析。一般情况下,墩顶侧移偏差是由其结构性能与风压系数所决定的。根据超高空心薄壁三段结构上分布动力的阶数不同,通常将风荷载信息量转化为风压信息量来完成进一步的模态分析。由超高空心薄壁结构内低速运动空气质点所具有的能量,可以得到其对应的伯努利方程为:

$$wV + 0.5mv^2 = C \quad (10)$$

式(10)中: w 代表超高空心薄壁结构内有限面积上所承受的风压; V 代表空气体积; m 代表空气质量; v 代表风速; C 代表矢量。

根据上述模态结果,得到超高空心薄壁墩身多场耦合下动力特性公式如下:

$$W = ((-0.1011h^2 + 6.1014h + 247.3404) \times C(\sin(w \times t))) \quad (11)$$

式(11)中, W 代表多场耦合边界矩阵系数; h 代表高度; w 代表耦合系数; t 代表耦合次数。

1.3 墩身动力特性模型计算

基于上述模态分析结果,对超高空心薄壁墩身多场耦合下动力特性进行模型化计算。根据超高空心薄壁墩身结构特点,分别采用Timoshenko梁算法^[6-7],通过传统Euler梁算法的基础上,引入模态分析中风压部分所产生的剪切变形及其附加挠度,将其转化为简支体系等效力学模型^[8-9],如图2所示。

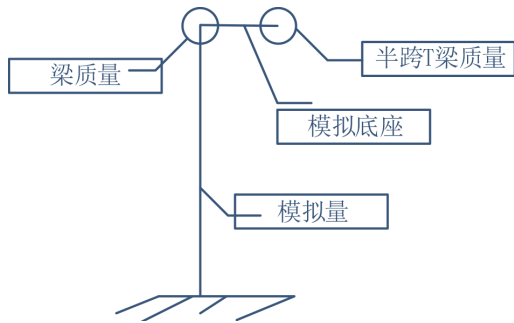


图2 简支体系等效力学模型
Fig.2 Equivalent mechanical model of simply supported system

假设动力结构上自由节点所受力的大小为 P ,根据动力学的弹性理论 Euler 梁自由节点所对应的偏移距离为公式(12),简支体系等效力学总挠度为公式(13)。

$$v = \frac{PL^3}{3EI} \quad (12)$$

$$v = \frac{PL^3}{3EI} \left(1 + 1.56 \frac{h^2}{L^2} - 0.62 \frac{h^3}{L^3} \right) \quad (13)$$

联立式(12)、式(13)便可分析得到墩身动力特性模型,经过整理后得到:

$$v = \frac{PL^3}{3EI} + 0.94 \frac{PL^3 h^2 - PL^3 h^3}{L^2 - L^3} \quad (14)$$

2 应用测试

对提出模型性能进行仿真对比实验设计。在设计的仿真实验中,共有3种参测模型;其中,提出模型为验证模型;另外两种模型为对比模型,分别为高空心薄壁墩身剪切变形动力分析模型,标记为参照模型A;耦合体系下高空心薄壁墩身动力分析模型,标记为参照模型B;实验在相同条件环境下,同步完成相关性能指标测试,并对测试结果进行对比分析。

2.1 设置测试条件

根据超高空心薄壁墩身结构特点,测试过程中对其测试参量加以确定,以此保证所得测试指标对应环境的统一,通过确保测试过程更加贴近真实使用场景。通过传感器采集实际的振动数据并进行分析,从中获取频率信息,如表1所示。

根据表1数据,频率指结构振动的周期性变化的速度;动力振型阶数表示结构振型的序号,共4种类型的振型;动力属性特点描述了每个振型的主要变形特征。测试过程中仿真测试工具 matlab 可根据测试需要在表1数据的基础上自行生成多组衍生数据用于特定指标的测试。在此过程中,生成

数据仅对原始参量进行数据叠加、复制、推导、变换等操作,且不考虑扰动因素。

表1 超高空心薄壁墩身结构测试参量配置
Table 1 Configuration of testing parameters for ultra-high hollow thin-walled pier structure

动力振型阶数	频率/Hz	动力属性特点
1	0.76651	侧位偏移
2	4.8834	横向对称弯曲
3	7.0576	顶部扭转/前身倾斜
4	8.9203	局部横向倒S弯曲

2.2 动力偏移测试

由仿真测试工具 MATLAB 基于表1中1阶数据生成一组偏移样本,在样本环境下记录3种不同模型的偏移数据。为了更加准确的对比数据,分别对偏移量的横向与纵向偏移进行同步记录、对比。对比结果如图4~5所示。

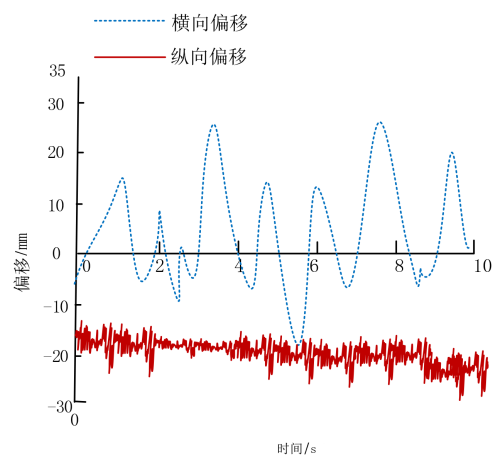


图3 动力偏移测试样本
Fig.3 Dynamic offset test sample

通过对图3、图4所得曲线对比可以发现,3种模型对于偏移分析所得结果差异较大,以下对其进行逐一分析:

(1)由图3与图4a对比可以发现,参照模型A横向偏移曲线的特征及其波动趋势与图3样本差异较大,其中主要表现为波动频率偏大,说明在样本动力参量(振动)条件下,参照模型A所得结果较为积极,造成横向坐标方向上局部扰动偏移错误纳入分析范围,进而出现误差扰动,在频率及其幅度均有表现;对比纵向曲线可以发现,参照模型A的纵向偏移具有线性特征,根据特征周期可以看出,其偏移周期为3,与样本的动态纵向偏移周期差异较大。

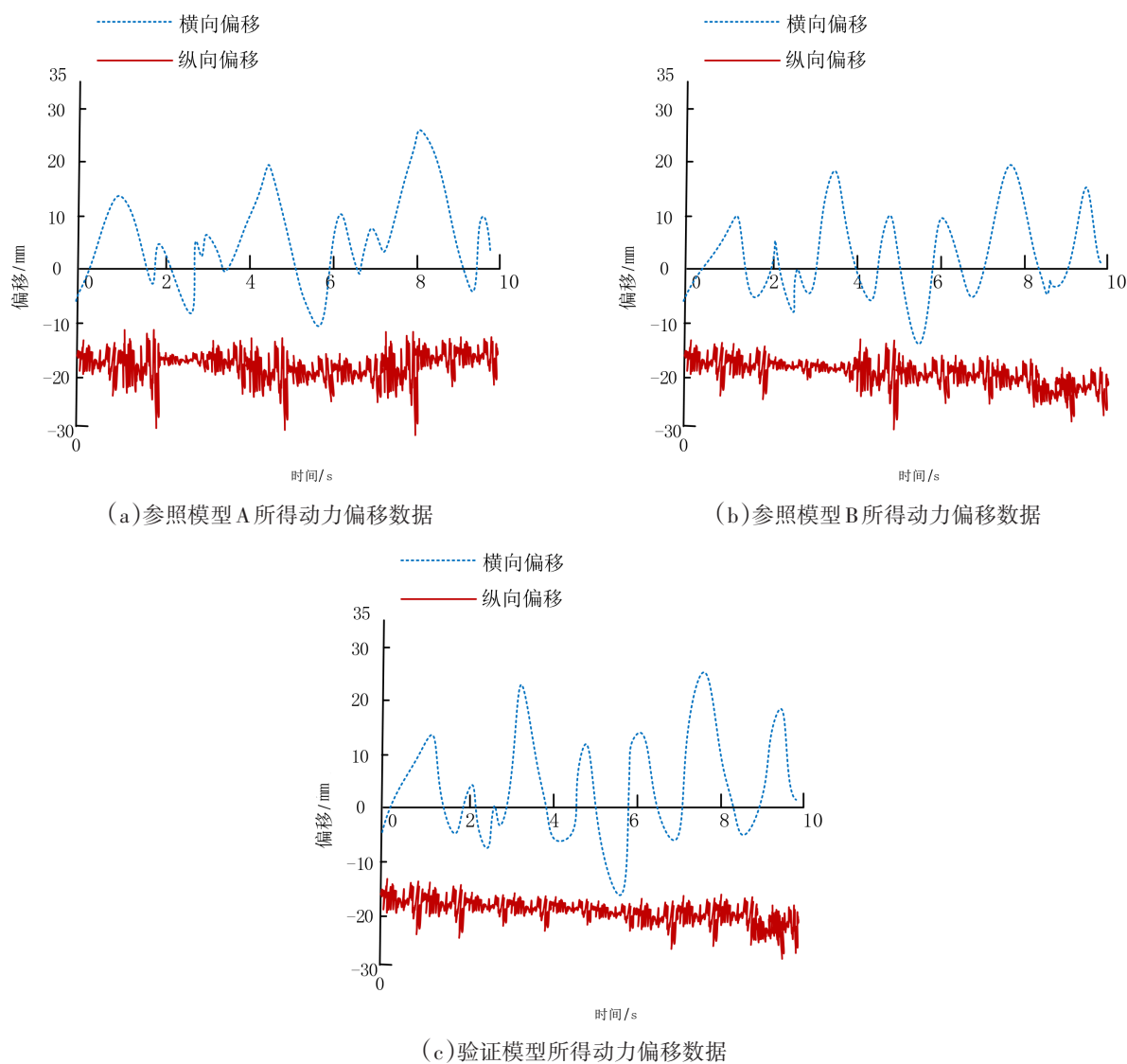


图4 不同模型所得动力偏移数据

Fig.4 Dynamic offset data obtained from different models

(2)由图3与图4b对比可以发现,参照模型B横向偏移曲线的特征及其波动趋势与图3样本特征基本一致,但结合对应指标值分析发现其值整体偏小,说明参照模型B在横向偏移分析过程中动力特征参量(振动)收敛过程中存在过度。观察纵向曲线,其特征较为松散,对应图3样本中部分特征点存在缺失,说明在纵向动力分析过程中,参照模型B的耦合性较差。

(3)由图3与图4c对比可以发现,验证模型横向曲线图像与图3样本曲线相似度较高,对比数值发现,除局部曲线幅度有所差异外,无较大变化;从偏差数值大小上看,结合约束历史经验可知,其差值均在允许范围内;在纵向偏差上,验证模

型的表现与其横向偏差表现一致,局部偏差,且在允许范围内。

综上所述,3种不同模型在超高空心薄壁墩身偏移分析方面,验证模型分析效果最接近实际参量,参照模型B略逊于验证模型,参照模型A效果最差。

2.3 应力响应测试

基于表1数据,生成20组动力样本,分别由参照模型A、参照模型B、验证模型对其进行连续性分析,由仿真测试工具matlab响应指标模块配合solidworks工具完成各自应力响应指标的记录,并生成表2数据。

表2 应力响应测试结果
Table 2 Test results of stress response

样本振型阶数	指标值	参照模型A	参照模型B	验证模型C
1	0.8	1.2	1.4	0.8
3	1.2	1.1	1.2	1.2
2	1.0	1.3	1.4	1.1
2	1.0	1.3	1.4	1.0
3	1.2	1.1	1.6	1.1
4	1.5	1.4	1.6	1.5
1	0.8	1.4	1.3	0.8
2	1.0	1.3	1.4	1.0
3	1.2	1.1	1.6	1.2
4	1.5	1.4	1.6	1.5
4	1.5	1.4	1.5	1.5
3	1.2	1.1	1.3	1.1
2	1.0	1.3	1.4	1.0
3	1.2	1.1	1.3	1.2
1	0.8	1.4	1.3	0.8
3	1.2	1.1	1.6	1.1
4	1.5	1.4	1.4	1.5
3	1.2	1.1	1.6	1.1
2	1.0	1.3	1.2	1.0
2	1.0	1.3	1.3	1.0

通过对表数据的观察发现，3种不同动力特性优化模型所得应力响应指标差距并不大。其中，参照模型A的应力响应偏差在4阶样本环境下均有出现；参照模型B在相同条件下，响应表现极不稳定，整体偏差系数波动区间较大，为[0.1，0.4]；相比之下，验证模型的数值与样本数值一致性较高，个别样本存在响应0.21偏差，根据上述优化可知，其偏差值在允许范围。因此，可以判定验证模型在不同条件下的应力响应最好，同时也验证了其多场耦合性能较强。

3 结束语

根据超高空心薄壁墩身多场耦合下动力特性，对其模型展开分析优化，通过对比结构动力参量

的优化，实现了提升模型分析能力，降低模型误差的效果。提出模型为超高空心薄壁墩设计及其应力研究，提供了更为详细的解决方案。但是，受到超高空心薄壁墩上梁结构与应力分布差异的影响，并不能保证提出模型能够满足所有变量场景。因此，为了提升提出模型的自适应性，可以在未来的研究与使用中，引入多种变量训练算法、数据融合优化算法，不断提升模型的变量自适应能力，以此带动变量下决策信息的自我学习能力，提升模型整体自适应性，使其实时处于最佳状态。

参考文献

[1] 罗金标,张恒靖,钟长裕.薄壁墩桥梁临时支护体系的施工监测及安全性分析——以高增大桥为例[J].科学技术与工程,2022,22(34):15284-15290.

- [2] 彭银飞,罗如登,杨雪霞,等.连续梁桥型钢骨架—混凝土桥墩静动力对比分析[J].科学技术创新,2022(36):131-134.
- [3] 杨学林.超高柔性薄壁空心墩身垂直度控制研究[J].工程技术研究,2022,7(22):27-29.
- [4] 史菁霞,许凯.预制节段拼装桥墩的动力特性研究[J].低温建筑技术,2022,44(10):121-124+129.
- [5] 陈亚东,孔定新.桥梁群桩基础附近三维流场水动力特性试验研究[J].中国高新科技,2022(16):58-63.
- [6] 刘健,宁晓骏,伍曾,等.桥墩类型对连续刚构桥抗震及稳定性影响分析[J].科技通报,2022,38(07):73-78+87.
- [7] 张正琦,程高,姬子田,等.钢箱混凝土空心薄壁墩抗震性能研究[J].甘肃科学学报,2022,34(03):83-87+111.
- [8] 王鹏程,许维炳,王瑾,等.基于PET的灌浆套筒—预应力组合连接装配式混凝土桥墩抗震加固研究[J].工程抗震与加固改造,2022,44(03):139-148.
- [9] 刘振峰,陈敏.高速公路桥梁工程中空洞薄壁墩施工技术的应用[J].建筑技术开发,2022,49(06):45-48.