

大跨径辐射式吊杆提篮拱桥参数敏感性研究

谢明志^{1,2},袁晶莲^{1,2},廖曼^{1,2},黄胜前^{1,2},杨永清^{1,2}

(1. 西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031;

2. 西南交通大学桥梁智能与绿色建造全国重点实验室,四川 成都 611756)

摘要 目的 研究大跨度辐射式吊杆提篮拱桥力学行为特点及控制策略,以主跨255 m无推力系杆拱桥为依托,探明不同设计参数对该体系拱桥结构响应的影响。**方法** 采用 ABAQUS 软件建立全桥有限元模型;采用均匀试验和多元回归分析方法,分析主梁重力密度、吊杆弹模、索力偏差、吊杆间距等结构参数变化对成桥阶段主要控制指标的影响及对结构响应的敏感程度。**结果** 成桥状态下,最敏感响应依次为主拱应力、主梁应力、主梁竖向变形、主拱竖向变形;均匀试验法表明:主梁竖向变形、主拱竖向变形、主梁应力、主拱应力的主要敏感参数分别为主梁重力密度、吊杆间距、吊杆间距、吊杆弹性模量。**结论** 基于均匀试验和多元回归分析法的参数敏感性分析可靠性强,能够揭示参数变化与结构力学行为的内在联系和规律,指导大跨径辐射式提篮吊杆拱桥的施工,为同类桥梁的参数敏感性分析提供参考。

关键词 大跨径拱桥;提篮拱桥;敏感性分析;均匀试验;多元回归

中图分类号 U442.5;U448.22

文献标志码 A

Study on Parameter Sensitivity of Long-span Radial Suspender Basket Arch Bridge

XIE Mingzhi^{1,2}, YUAN Jinglian^{1,2}, LIAO Man^{1,2}, HUANG Shengqian^{1,2}, YANG Yongqing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 611756)

Abstract: In order to study the mechanical behavior characteristics and control strategy of long-span radial suspender basket arch bridge, the influence of different design parameters on the structural response of the arch bridge is explored. The ABAQUS model of tied arch bridge with a span of 255 m is established and based on the uniform test and multiple regression analysis method are introduced. the changes of structural parameters such as main girder weight, boom elastic modulus, cable force deviation and boom spacing are analyzed. The results show that the most

收稿日期:2023-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51978589);中央高校基本科研业务费科技创新项目(2682021CX011)

作者简介:谢明志(1985—),男,高级工程师,博士,主要从事桥梁力学行为及损伤等方面研究。

sensitive response in the bridge state is the main arch stress, the main beam stress, the vertical deformation of the main beam and the vertical deformation of the main arch. The uniform test method shows that the main sensitive parameters of the vertical deformation of the main girder, the vertical deformation of the main arch, the stress of the main girder and the stress of the main arch are the weight of the main girder, the spacing of the hangers, the spacing of the hangers and the elastic modulus of the hangers. The reliability of parameter sensitivity analysis based on uniform test and multiple regression analysis method is strong, which can reveal the internal relationship and law between parameter change and structural mechanical behavior, guide the construction of long-span radial basket handle boom arch bridge, and provide reference for parameter sensitivity analysis of similar bridges.

Key words: long-span arch bridge; basket arch bridge; sensitivity analysis; uniform test; multiple regression

提篮系杆拱桥因结构轻盈、跨越能力大、造型美观,且具有较强的承载能力及横向稳定性,近年来在市政及公路铁路桥梁中得到了广泛的应用^[1-2]。已建成的部分代表性工程包括重庆菜园坝长江大桥(刚构与提篮式钢箱系杆拱、钢桁梁组合结构)^[3]、京沪高铁青阳港大桥(尼尔森体系提篮式钢管混凝土系杆拱桥)、宣城市凤凰桥(双提篮梁拱组合结构)^[4]等。拱桥建造是一个复杂的系统工程,随着跨径的增加、结构空间构型的复杂化,对桥梁设计参数的合理设置是确保拱桥施工及成桥力学行为、安全性及稳定性满足各项指标功能的关键。因此,研究参数变化与结构响应的映射关系,探明其变化规律,厘清内在联系具有理论及实践意义。

参数敏感性分析能够厘清模型设计变量对结构的敏感度,探明影响结构主、次要参数及非敏感性参数,对制定控制结构施工和力学行为策略有重要作用^[5-8]。李杰等^[9]以某多拱肋宽幅异形钢管混凝土拱桥为依托,采用单因素设计参数分析方法评价结构静力行为的敏感性,并通过试验设计进行多元回归分析,得到多因素交叉影响的响应值。汪一意等^[10]选取单肋非对称外倾下承式曲线人行钢拱桥的模型设计参数进行敏感性分析,分析结构在成桥阶段影响静力行为的主要设计参数。J. Sun 等^[11]以 Y 形系杆拱桥为对象,研究在成桥阶段的静动力性能以及不同

矢跨比、双拱肋分叉角度对结构静、动力性能的力学变化趋势。龙汉等^[12]以中承式钢管混凝土系杆拱桥为研究对象,采用响应面法对结构设计参数进行敏感性分析,并得出了结构的主、次要和可忽略影响参数。相较于平行式吊杆拱桥,大跨度大倾角辐射式吊杆提篮拱桥空间构造复杂,过大的拱肋内倾角度致使其力学行为与传统拱桥差异较大。因此,探明参数变化与结构响应的内在联系是确保结构设计合理、施工可控、成桥内力及线形满足目标设计状态的重要手段。

传统参数敏感性分析多采用单一参数法,然而实际结构响应与理想状态间的偏差往往是多参数变化下的耦合结果。通过上述文献调研可得,在一定的跨度、拱肋倾角及吊杆形式下,系杆拱桥静力特性具有一定的相似性。鉴于此,笔者采用 ABAQUS 建立大跨度辐射式提篮吊杆拱桥精细化有限元模型,基于均匀试验法,研究参数变化对结构静力性能的影响,探明结构设计参数对成桥状态的敏感性程度,为同类桥梁的设计和施工控制提供参考。

1 工程概况及有限元模型

1.1 工程概况

工程背景为 255 m 无推力提篮式系杆拱桥,理论计算跨度 243.6 m,主拱内倾角 70 度。主拱曲线采用 1.9 次抛物线,吊杆采用

辐射状布置,其立面、平面及横断面如图1所示。拱肋为单箱单室八边形截面拱箱高度沿拱轴线线性变化。边主梁采用钢箱结构,边

主梁腹板倾斜设置,倾斜角70度与拱肋两侧倾角一致,以便于在拱脚处与两片拱肋固结。

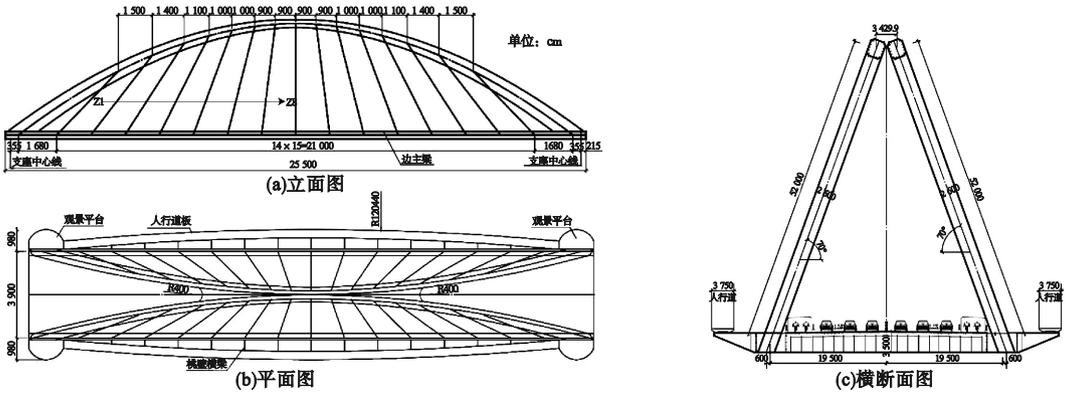


图1 辐射式提篮拱桥布置图

Fig. 1 The layout diagram of radiation basket arch bridge

1.2 有限元模型

该桥空间受力复杂,采用ABAQUS有限元分析软件,建立精细化有限元模型对其进行空间力学行为分析,如图2所示。采用S4R单元(4节点四边形通用壳单元)对钢箱梁、拱、风撑、横梁及人行道进行模拟。采用T3D2单元(2节点线性三维桁架单元)对吊杆进行模拟。全桥拱划分为663 297单元,划分壳单元(S4R)四边形单元网格为663 267个,桁架单元(T3D2)30个。关键节点部位采用相关的固结(rigid)或者耦合(coupling)等连接单元进行模拟。为准确分析参数变化与结构响应间的映射关系,反映结构受力状态,有限元计算时考虑了施工阶段。

2 单参数敏感性分析

为研究大跨径辐射式吊杆提篮拱桥设计参数对结构响应的敏感程度,采用单一调整法,考虑主梁重力密度、吊杆弹模、索力偏差、吊杆间距等参数变化,分别计算桥梁在成桥状态下的主梁线形、主拱线形、主梁应力、主拱应力、吊杆索力等响应值。该试验结合实际工程情况,以参数设计值为基准,选择±5%以内的变化幅值进行设计试验,具体参数:主梁重力密度为78.5 kN/m³;吊杆弹性模量为2.05 × 10⁵ MPa;吊杆索力为2 186 ~ 4 992 kN;吊杆间距15 cm,向跨中偏移±0.5%原间距。各参数的结构响应情况如图3所示。

由图3可知,对成桥线形而言,主梁重力密度、吊杆弹模对主梁竖、横向变形的敏感度最高,吊杆间距对主拱竖、横向变形的敏感度最高;索力偏差对主梁、主拱线形的影响几乎可以忽略,不足5%;吊杆间距对主梁、主拱应力的敏感性较高,为主要影响参数。由此可知,主梁重力密度、吊杆弹性模量对成桥状态的结构行为有显著影响,为主要敏感性参数,吊杆间距为次要敏感参数,吊杆索力偏差

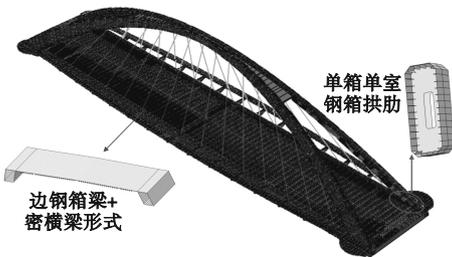


图2 有限元模型图

Fig. 2 The finite element model

为不敏感参数。同时,主梁挠度、主拱挠度、主梁应力、主拱应力较主梁横向变形、主拱横向变形对结构成桥状态下的响应更显著。

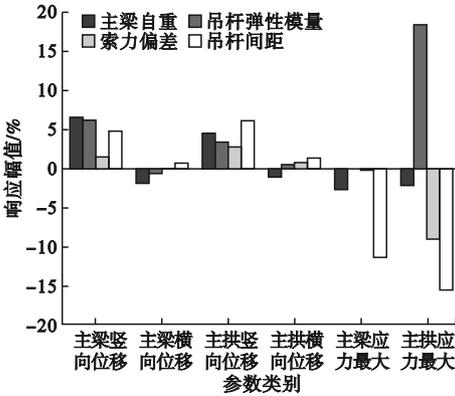


图3 结构响应汇总表

Fig. 3 The summary diagram of structural response

大跨径辐射式提篮吊杆拱桥由于空间结构的复杂性,仅通过单因素分析很难探明结构响应与参数间的关联性。因此,笔者基于均匀试验和多元回归分析方法,进一步厘清大跨辐射式提篮吊杆拱桥力学行为特点,探明多参数耦合敏感性规律。

3 多因素参数敏感性分析

3.1 响应面法基本原理

响应面法 (Response Surface Method, RSM) 能够直接采用设计试验的方法近似模拟真实结构响应情况,具有较高的计算效率,逐渐被应用到工程领域中。刘剑等^[13]、肖春名等^[14]采用 RSM 法构建结构响应与多参数设计之间的响应方程,对桥梁进行参数敏感性分析。笔者考虑到辐射式吊杆拱桥结构较为复杂,结构响应方程采用 F. S. Wong 提出的不包含二次交叉项的多项式构造极限响应方程^[15-16]:

$$\bar{f}(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \leq i}^n c_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

式中: $X_{i,j}$ 为设计变量; a, b_i, c_j 为待定因子; $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

3.2 取样方法

均匀设计试验可减少样本点的总数,提高工作效率,准确描述结构的实际情况,获得可靠的试验结果。主梁重力密度、吊杆间距、吊杆索力偏差、吊杆弹性模量等参数是施工中易出现偏差的参数,因此,笔者选取这几个参数通过均匀设计试验法优化研究。根据单一参数调整法计算可知,主梁竖向变形、主拱竖向变形、主梁应力、主拱应力成桥状态响应结构参数变化较敏感,选择这四种结构响应作为判断指标。

均匀试验表的表述方法为 $U_n(m^s)$, 其中, U 为均匀试验表; n 为均匀试验次数; s 为选择的设计参数个数; m 为参数的水平数,即对应各设计参数的参数划分情况。针对本工程,选择常用均匀设计表 $U_{13}^*(13^4)$ 。根据选择的因素数和水平数,设计对应均匀设计表下的参数组合,试验组合方案如表 1 所示。

表1 均匀设计组合方案

Table 1 The combination scheme of uniform design

试验方案	重力密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	吊杆弹性模量/GPa	吊杆索力/ kN	吊杆间距/ m
1	74.58	201.58	5 075.20	15.27
2	75.15	210.13	4 867.20	14.90
3	75.72	194.75	5 241.60	14.53
4	76.29	203.29	5 033.60	14.16
5	76.86	211.83	4 825.60	15.52
6	77.43	196.46	5 200.00	15.15
7	78.00	205.00	4 992.00	14.78
8	78.74	213.54	4 784.00	14.41
9	79.48	198.17	5 158.40	14.04
10	80.21	206.71	4 950.40	15.40
11	80.95	215.25	4 742.40	15.03
12	81.69	199.88	5 116.80	14.66
13	82.43	208.42	4 908.80	14.29

注:试验方案中吊杆索力变化包含吊杆 1~8,吊杆 1~8 变化幅度相同;限于篇幅,表中只列出吊杆 1 索力变化情况。

基于均匀设计方案得出的结果具有不确定性,需对其进行线性回归方程拟合。设随机变量 y 与一般变量 x_1, x_2, \dots, x_m 的线性回归模型为

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m. \quad (2)$$

式中: b_0, b_1, \dots, b_m 为 $m+1$ 个位置参数; b_0 为回归常数; $b_i (i=1, 2, \dots, m)$ 称为回归系数。 x_1, x_2, \dots, x_m 是 m 个可以精确测量并可控制的一般变量,即为自变量。

对一个实际问题,获得 n 组观测数据后采用矩阵形式表示多元回归方程。

$$y = X\beta + \varepsilon. \quad (3)$$

$$\text{其中, } y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix},$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \text{ 为随机误差。}$$

为辨明回归方程是否具有良好的显著性,需要对其进行检验。一般引用 F 检验回归方程:

$$F = \frac{S_{\text{回}} / p}{S_{\text{剩}} / (n - p - 1)}. \quad (4)$$

式中: $S_{\text{回}}$ 为回归平方和; $S_{\text{剩}}$ 为残差平方和; 统计量 F 应服从于 $F(p, n - p - 1)$ 分布,即服从显著水平 α 。

在进行多元回归分析检验自变量显著性时,将高显著性的自变量保存,将显著性贡献度不高的自变量剔除,重新构建多元回归方程。从而更好地判断参数的显著性水平,验证拟定参数对结构响应的敏感性程度,并对其进行敏感度排序。

3.3 试验结果

根据均匀试验设计方案,计算出各次试验结构响应值,包括主梁、主拱竖向最大位移及主梁、主拱成桥最大应力值,如表2所示。

依据表中得出的成桥状态结构响应值,并以主梁重力密度、吊杆弹性模量、索力偏差、吊杆间距为自变量进行多元回归分析。采用 F 检验法进行显著性分析,求得各参数的统计特征量的显著水平 P 值,并与显著性水平进行比较。

表2 结构成桥状态响应值

Table 2 The state response of structural bridge

试验方案	主梁最大	主拱最大	主梁成桥	主拱成桥
	竖向变 形/m	竖向变 形/m	最大应 力/MPa	最大应 力/MPa
1	-0.290	-0.252	295.5	429.2
2	-0.289	-0.249	296.1	450.6
3	-0.288	-0.254	296.7	394.0
4	-0.287	-0.250	293.8	406.7
5	-0.292	-0.251	303.2	511.8
6	-0.291	-0.255	302.1	422.4
7	-0.289	-0.252	303.2	449.9
8	-0.290	-0.248	298.8	453.4
9	-0.288	-0.252	293.9	380.3
10	-0.294	-0.254	305.3	476.9
11	-0.293	-0.249	303.7	495.8
12	-0.293	-0.255	303.2	421.3
13	-0.291	-0.251	301.0	421.0

根据均匀试验结果,试验方案4的主梁最大竖向变形最小,为 -0.287 m; 试验方案8的主拱最大竖向变形最小,为 -0.248 m; 试验方案4的主梁成桥最大应力最小,为 293.8 MPa; 试验方案9的主拱成桥最大应力最小,为 380.3 MPa。由上述计算结果可知,均匀试验方案结果的规律性及整齐性较弱。因此,采用构建多元回归方程的方法对结果进行校核验证,并根据显著性结果对影响结构响应的主、次要参数、不敏感参数进行识别。

(1) 主梁最大竖向变形的敏感性分析

根据表2中的结构响应值,将成桥状态的主梁挠度设为因变量,进行多元回归分析,

得到回归方程 $\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4$ 的标准化回归系数: $b_1 = -0.769, b_2 = -0.788, b_3 = 0.170, b_4 = 0.163$ 。进一步对其做方差分析,计算得出检验值 $F(\alpha) = F_{4,12}(0.05) = 35.555 > 3.26$,所以回归方程可信。各回归系数的方差分析和显著性分析见表3。由表3中模型1可知,索力偏差和吊杆间距的显著性大于0.05,可认为其对主

梁挠度的显著性较差,需剔除。对剩余参数重新构建多元回归方程,计算结果见表中模型2,各参数的标准回归系数为 $b_1 = -9.980, b_2 = -10.568$,且显著性均为0。由此可知,吊杆弹性模量和主梁重力密度对于主梁挠度的敏感性较高,其中主梁重力密度为主要敏感参数,吊杆弹性模量为次敏感因素,吊杆间距与索力偏差为不敏感参数。

表3 主梁最大竖向变形回归方程显著性检验

Table 3 The significance test of the maximum vertical deformation regression equation of the main beam

模型	自变量	剔除变量	回归方程显著性检验		回归系数显著性检验	
			F 检验	显著性	标准化回归系数	显著性
1	主梁重力密度	无	35.555	0.000	-0.769	0.000
	吊杆弹性模量				-0.788	0.000
	索力偏差				0.170	0.645
	吊杆间距				0.163	0.662
2	主梁重力密度	吊杆间距、索力偏差	86.258	0.000	-10.568	0.000
	吊杆弹性模量				-9.980	0.000

(2) 主拱最大竖向变形的敏感性分析

以表2结构响应中的主拱最大竖向变形为控制指标,进行多元回归分析,各回归系数的方差分析和显著性分析如表4所示。由表

可知,主梁重力密度、吊杆弹性模量和吊杆间距对主拱最大竖向变形较为敏感,其中为吊杆间距主要敏感参数,主梁重力密度、吊杆弹性模量为次敏感参数,索力偏差为不敏感参数。

表4 主拱最大竖向变形回归方程显著性检验

Table 4 The significance test of maximum vertical deformation regression equation of the main arch

模型	自变量	剔除变量	回归方程显著性检验		回归系数显著性检验	
			F 检验	显著性	标准化回归系数	显著性
1	主梁重力密度	无	64.992	0.000	-0.583	0.000
	吊杆弹性模量				-0.439	0.001
	索力偏差				-0.419	0.140
	吊杆间距				-1.439	0.000
2	主梁重力密度	索力偏差	72.198	0.000	-0.553	0.000
	吊杆弹性模量				-0.459	0.000
	吊杆间距				-1.017	0.000

(3) 主梁成桥最大应力的敏感性分析

同理,以主梁成桥最大应力为控制指标,进行多元回归分析,各回归系数的方差分析和显著性分析如表5所示。由表可知,吊杆

间距、主梁重力密度对主梁成桥最大应力较为敏感,其中吊杆间距为主要敏感参数,主梁重力密度为次敏感参数,吊杆弹性模量和索力偏差为不敏感参数。

表5 主梁成桥最大应力回归方程显著性检验主梁最大竖向变形回归方程显著性检验

Table 5 The significance test of maximum stress regression equation of main girder bridge

模型	自变量	剔除变量	回归方程显著性检验		回归系数显著性检验	
			F 检验	显著性	标准化回归系数	显著性
1	主梁重力密度	无	15.440	0.000	4.510	0.000
	吊杆弹性模量				2.137	0.065
	索力偏差				2.072	0.072
	吊杆间距				6.061	0.000
2	主梁重力密度	吊杆弹性模量、 索力偏差	27.750	0.000	5.234	0.000
	吊杆间距				5.325	0.000

(4) 主拱成桥最大应力的敏感性分析

以主拱成桥最大应力为因变量,进行参数敏感性分析。各回归系数的方差分析和显著性分析如表6所示。由表可知,吊杆弹性

模量、吊杆间距对主拱最大应力敏感度较高,其中吊杆弹性模量为主要敏感参数,吊杆间距为次敏感参数,主梁重力密度和索力偏差为不敏感参数。

表6 主拱成桥最大应力回归方程显著性检验

Table 6 The significance test of maximum stress regression equation of main arch bridge

模型	自变量	剔除变量	回归方程显著性检验		回归系数显著性检验	
			F 检验	显著性	标准化回归系数	显著性
1	主梁重力密度	无	64.529	0.000	0.358	0.730
	吊杆弹性模量				2.425	0.041
	索力偏差				-0.032	0.975
	吊杆间距				9.407	0.000
2	吊杆弹性模量	主梁重力密度、索力偏差	158.613	0.000	11.993	0.000
	吊杆间距				11.439	0.000

4 结 论

(1) 大跨径辐射式提篮吊杆拱桥具有其独特的结构特点,主拱、主梁重力密度差异大,致使主梁、主拱线形对参数变化的敏感度较高;吊杆弹性模量、间距对主梁、主拱的应力响应较敏感,且主梁跨中、主拱拱脚位置容易产生应力集中。因此,施工控制时应重点考虑主梁重力密度、吊杆弹性模量、吊杆间距对结构响应的影

(2) 主梁竖向变形、主拱竖向变形、主梁应力、主拱应力较主梁横向变形、主拱横向变形、吊杆索力更敏感;主梁重力密度、吊杆弹性模量对结构行为有显著影响,属主要敏感性参数,吊杆间距为次要敏感参数,吊杆索力

敏感性较弱。

(3) 通过均匀试验法及多元回归分析法能够将多个设计参数与结构响应进行交叉影响分析,可靠性强,并直观判断出设计参数对结构响应的敏感程度及规律。研究成果可为类似桥梁的施工控制、构件制作、安装、参数识别及索力修正等提供依据。

参考文献

- [1] 郭鑫,颜东煌,袁晟,等. 刚性系杆拱桥吊杆张拉索力施工控制研究[J]. 中外公路,2020,40(5):81-86.
(GUO Xin, YAN Donghuang, YUAN Sheng, et al. Research on construction control of suspender tension of rigid tied arch bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(5):81-86.)
- [2] 张书伟. 大跨度系杆钢箱提篮拱桥动力特性

- 及地震响应分析[D]. 绵阳:西南科技大学,2022.
(ZHANG Shuwei. Dynamic characteristics and seismic response analysis of long-span tied-rod steel box basket arch bridge [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.)
- [3] 张杰. 中承式钢箱提篮拱桥结构敏感性分析及意外荷载下鲁棒性评估[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
(ZHANG Jie. Structural sensitivity analysis and robustness evaluation for accidental loads of half-through steel box basket arch bridge [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.)
- [4] 秦世强,胡佳,徐训,等. 大跨度提篮拱桥动力特性参数分析[J]. 公路工程,2018,43(2):1-5.
(QIN Shiqiang, HU Jia, XU Xun, et al. Parametric analysis of the dynamic property of a large-scale basket handle arch bridge [J]. Highway engineering, 2018, 43(2):1-5.)
- [5] 谢明志,卜一之,张克跃,等. 特大跨度混合梁斜拉桥几何控制法参数敏感性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014,34(3):66-73.
(XIE Mingzhi, BU Yizhi, ZHANG Keyue, et al. Sensitivity of parameters of super long-span hybrid girder cable-stayed bridge based on geometry control method [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2014, 34(3):66-73.)
- [6] 桂水荣,雷鸣宇,陈水生,等. 矮塔斜拉桥动静力特性对结构参数敏感性影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(1):79-87.
(GUI Shuirong, LEI Mingyu, CHEN Shuisheng, et al. Analysis of influence of structural parameters on dynamic and static characteristics of extradosed cable-stayed bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(1):79-87.)
- [7] ZHANG Y, HUANG W, TANG X. Sensitivity analysis of the main structural parameters of the four-tower partially cable-stayed bridge [J]. Applied sciences, 2023, 13(6):3831.
- [8] 张宪堂,余辉,秦文彬,等. 钢箱梁斜拉桥结构参数敏感性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(5):41-47.
(ZHANG Xiantang, YU Hui, QIN Wenbin, et al. Sensitivity analysis of structural parameters of steel box girder cable-stayed bridge [J]. Journal of Shandong university of science and technology (natural science), 2020, 39(5):41-47.)
- [9] 李杰,杜鑫,张波,等. 多拱肋宽幅异形钢管混凝土拱桥结构参数敏感性分析[J]. 中外公路,2020,40(5):105-112.
(LI Jie, DU Xin, ZHANG Bo, et al. Sensitivity analysis of structural parameters of multi-arch rib wide special-shaped steel tube concrete arch bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(5):105-112.)
- [10] 汪一意,陈建兵,熊秉贤. 外倾单肋下承式异形钢拱桥静力参数敏感性分析[J]. 中外公路,2017,37(4):180-184.
(WANG Yiyi, CHEN Jianbing, XIONG Bingxian. Sensitivity analysis of static parameters of inclined single-rib through special-shaped steel arch bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2017, 37(4):180-184.)
- [11] SUN J, TAN Z, ZHANG J, et al. Parameter sensitivity study on static and dynamic mechanical properties of the spatial Y-shaped tied arch bridge [J]. International journal of steel structures, 2023, 23:458-479.
- [12] 龙汉,刘剑. 钢管混凝土系杆拱桥静力参数敏感性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(2):419-425.
(LONG Han, LIU Jian. Static parameter sensitivity analysis of concrete-filled steel tubular tied arch bridge [J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(2):419-425.)
- [13] 刘剑,王达. 基于响应面法的大跨径斜拉桥静力参数敏感性分析[J]. 公路交通科技,2015,32(8):100-106.
(LIU Jian, WANG Da. Analysis of static parameter sensitivity of long-span cable-stayed bridge based on RSM [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2015, 32(8):100-106.)
- [14] 肖春名,廖盛荣,赵晨光,等. V字形矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析研究[J]. 公路,2023,68(1):187-193.
(XIAO Chunming, LIAO Shengrong, ZHAO Chenguang, et al. Sensitivity analysis of structural parameters of V-shaped extradosed cable-stayed bridge [J]. Highway, 2023, 68(1):187-193.)
- [15] WONG F S. Slope reliability and response surface method [J]. Journal of geotechnical engineering, 1985, 111(1):32-53.
- [16] BUCHER C G, BOURGUND U A. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems [J]. Structural safety, 1990, 7(1):57-66.
- [17] 郭宇. 基于响应面法的节段预制拼装梁桥施工线形预测研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2021.
(GUO Yu. Research on construction alignment prediction of segmental precast assembled girder bridge based on response surface method [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)