

# 梁拱体系结构设计参数敏感性分析

曾召军

(洞口县公路建设养护中心, 湖南 邵阳 422300)

**摘要:** 为研究施工控制设计参数对梁拱体系结构响应的影响,以湖南长沙映日路跨龙王港河桥为例,利用 MIDAS/Civil 软件建立有限元模型,采用单一参数调整法分析施工过程中各设计参数变化对结构线形和应力的影响,根据其影响程度判别主、次要设计参数,以便施工过程中进行识别和控制。结果显示,钢箱梁容重及弹性模量为主要设计参数,温度为第二主要设计参数,其余参数均会对拱肋、主梁位移和应力产生影响,吊杆容重为这些参数中的次要设计参数。

**关键词:** 桥梁;梁拱体系结构;参数敏感性;施工控制

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)04-0117-05

梁拱组合体系桥梁的桥面荷载由吊杆传递给拱肋,拱肋承受来自吊杆的荷载,系杆则承受拱肋纵向水平推力,即拱肋与系杆构成组合体系共同承受荷载。尽管梁拱组合体系桥梁受力明确、施工工艺简单,但其实际施工状态与理想设计状态仍会有所偏差,需对桥梁进行施工控制。桥梁施工控制的首要目标是使施工阶段及成桥阶段结构线形一致,受力合理,进而与理想设计状态相一致。为达到上述目标,不仅需对其进行精确的结构分析,还需根据数据分析判定各设计参数对桥梁结构响应的影响程度,从而对其进行有针对性的控制。梁拱组合体系施工中,影响桥梁结构的因素有梁段自重、结构材料参数(容重、弹性模量)、整体温度变化、拱肋倾角等。该文以长沙映日路跨龙王港河桥为背景,通过调整结构容重、拱肋倾斜角度、弹性模量、整体温度等设计参数,对桥梁结构响应进行敏感性分析。

## 1 单一参数调整法

采用单一参数调整法对梁拱组合体系桥梁进行参数敏感性分析。该方法的基本原理:在有限元模型中将某一设计参数变化一定幅度(通常为 5%~10%),其余参数不变,对结构进行仿真分析,得到影响结构响应的变化数值,根据影响程度确定主要及次要设计参数。

步骤如下:1) 在有限元模型中,在一定幅度内调整某一特定设计参数,而不改变其他参数;2) 选定结构控制目标,如结构挠度、应力等,在有限元程序内计算特定设计参数变化前后的控制目标变化值;3) 根据各设计参数改变前后控制目标变化幅度

确定主要及次要设计参数。

## 2 工程概况及有限元模型

映日路桥位于长沙梅溪湖国际新城东部滨湖商务区,是梅溪湖范围内“六纵四横”路网主骨架中的“一纵”,其采用下承式梁拱组合体系结构,跨径为 32 m+58 m+32 m(见图 1)。主梁为单箱八室箱梁截面,采用钢材,处于半径 500 m 圆曲线上,中跨利用镂空挑臂外接曲线小箱梁。主拱肋采用类倒梯形变截面,外弧侧主拱计算跨径 59.42 m,内弧侧主拱计算跨径 56.52 m,主拱倾斜,与竖直面成 12° 夹角。倾斜面拱肋中心线矢高均为 11.00 m,外弧侧主拱矢跨比为 1/5.4,内弧侧主拱矢跨比为 1/5.1,拱轴线为直线和圆曲线的组合。

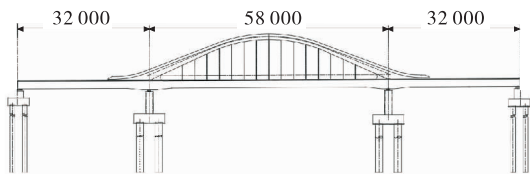


图 1 长沙映日路跨龙王港河桥立面布置示意图(单位:mm)

采用 MIDAS/Civil 软件建立该桥有限元模型(见图 2),模型总计 1 051 个单元,其中主梁约 900

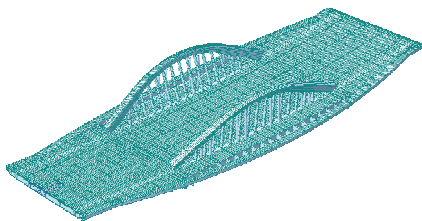


图 2 桥梁有限元模型

个单元,拱肋约 80 个单元,其余为临时施工结构单元。建模时考虑梁拱体系结构桥梁存在的几何非线性因素。

### 3 参数敏感性分析

在梁拱组合体系桥梁施工中,设计参数是导致施工误差的主要原因。但由于结构设计参数繁杂,不可能对所有参数都进行优化处理,需找出施工中对结构状态影响最显著的参数即主要设计参数,并识别和修正设计参数。对桥梁设计参数进行敏感性分析可得到影响其状态的主要设计参数和次要设计参数。该桥设计参数敏感性分析选取拱肋、主梁变形和应力作为控制目标。

#### 3.1 结构刚度敏感性分析

分别将拱肋、钢箱主梁和吊杆的弹性模量减少 10%,带入有限元模型进行计算,成桥后拱肋、主梁线形及应力变化见图 3~8。

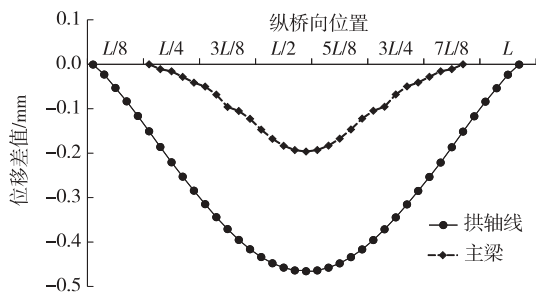


图3 拱肋弹性模量减少 10%时拱肋和主梁的位移变化

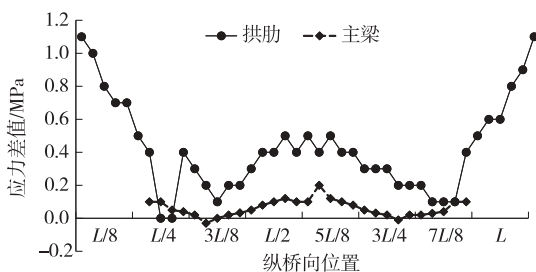


图4 拱肋弹性模量减少 10%时拱肋和主梁的应力变化

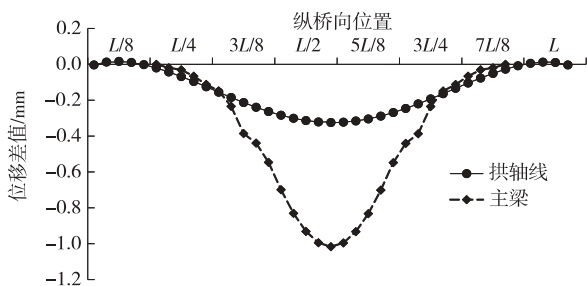


图5 钢箱梁弹性模量减少 10%时拱肋和主梁的位移变化

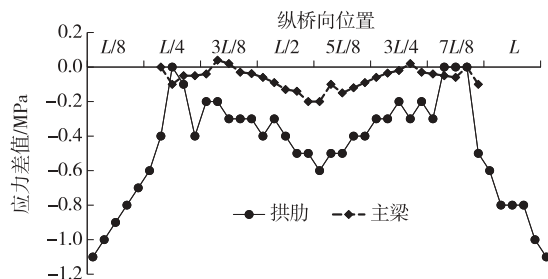


图6 钢箱梁弹性模量减少 10%时拱肋和主梁的应力变化

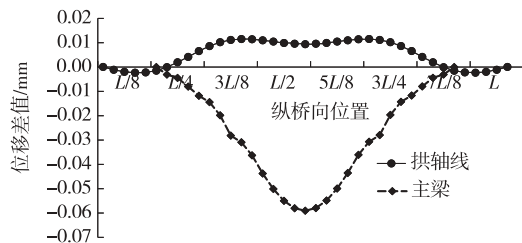


图7 吊杆弹性模量减少 10%时拱肋和主梁的位移变化

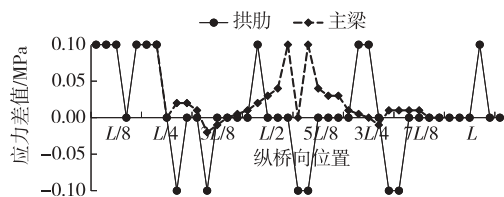


图8 吊杆弹性模量减少 10%时拱肋和主梁的应力变化

由图 3、图 4 可知:1) 拱肋弹性模量减少 10%, 拱肋拱轴线形和主梁线形均会受到影响, 但影响不是很大。拱肋弹性模量发生变化对拱肋拱顶和主梁跨中位置位移的影响最大, 拱肋拱轴线和主梁的位移变化最大值分别为  $-0.47$ 、 $-0.20$  mm, 成桥过程中拱轴线形和主梁线形与理论设计线形基本符合。2) 拱肋弹性模量减少 10%, 拱肋和主梁沿桥梁纵向的应力变化与拱肋弹性模量未发生变化时基本吻合。拱肋弹性模量发生变化对靠近拱脚处拱肋应力的影响较大, 拱脚压应力变化最大值为  $1.1$  MPa; 对主梁跨中处应力的影响较大, 主梁应力变化最大值为  $0.2$  MPa。

由图 5、图 6 可知:1) 主梁钢箱梁弹性模量减少 10%, 拱肋拱轴线形所受影响比主梁线形所受影响小很多, 拱肋拱轴线变化最大值为  $0.32$  mm, 发生在拱肋拱顶处; 主梁线形变化最大值为  $1.00$  mm, 发生在主梁跨中位置。成桥过程中拱轴线形和主梁线形会与理论设计线形有所差别, 施工中需加以控制。2) 主梁钢箱梁弹性模量减少 10%, 主梁沿桥梁纵向的应力变化与主梁钢箱梁弹性模量未发生变化时基本吻合, 而拱肋应力与弹性模量未变化时有所差别。

主梁钢箱梁弹性模量发生变化,对靠近拱脚处拱肋应力的影响较大,拱脚压应力变化最大值为 $-1.1$  MPa;对跨中处主梁的影响不大,主梁应力变化最大值为 $-0.2$  MPa。

由图7、图8可知:1)吊杆弹性模量减少10%,拱轴线形变化最大值为 $0.015$  mm,与上述2种弹性模量变化相比,敏感性迟钝,几乎可忽略不计;主梁线形的最大位移差约 $0.06$  mm,基本不会造成实际线形偏离设计线形。2)吊杆弹性模量减少10%,拱肋和主梁沿桥梁纵向的应力变化与吊杆弹性模量未发生变化时基本吻合。吊杆弹性模量发生变化,拱肋和主梁应力变化均不太均匀,但变化范围不大,为 $\pm 0.1$  MPa,基本可忽略不计。

### 3.2 结构容重敏感性分析

分别将拱肋容重、钢箱主梁容重、吊杆容重减小10%,带入模型进行计算,成桥后拱肋和主梁线形及应力变化见图9~14。

由图9、图10可知:1)拱肋容重减少10%,拱肋拱轴线和主梁线形均会受到影响,但影响不是

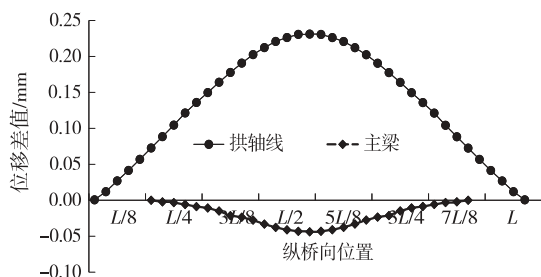


图9 拱肋容重减少10%时拱肋和主梁的位移变化

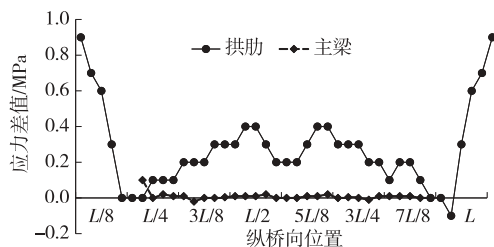


图10 拱肋容重减少10%时拱肋和主梁的应力变化

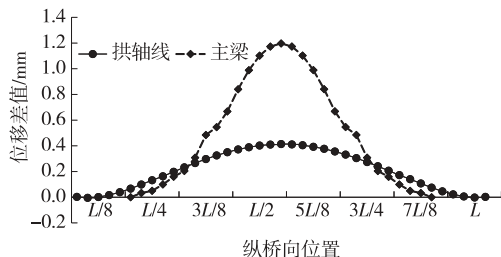


图11 钢箱梁容重减少10%时拱肋和主梁的位移变化

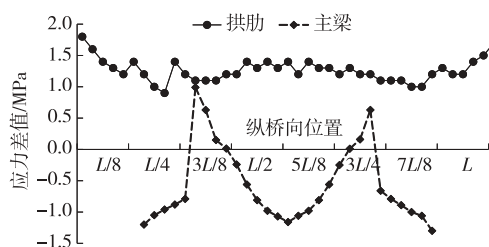


图12 钢箱梁容重减少10%时拱肋和主梁的应力变化

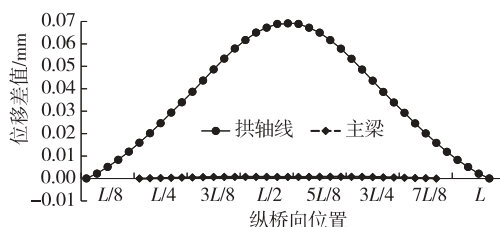


图13 吊杆容重减少10%时拱肋和主梁的位移变化

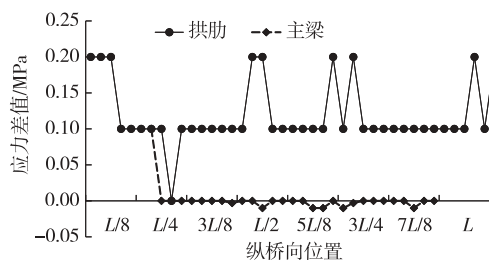


图14 吊杆容重减少10%时拱肋和主梁的应力变化

很大。拱肋容重变化对拱肋拱顶和主梁跨中位移的影响最大,拱肋拱轴线和主梁位移变化最大值分别为 $0.24$ 、 $0.05$  mm,成桥过程中拱轴线和主梁线形与理论设计线形基本符合,可不予控制。2)拱肋容重减少10%,主梁沿桥梁纵向的应力变化与拱肋容重未发生变化时基本吻合,而拱肋应力与容重未变化时有所差别。拱肋容重发生变化,对靠近拱脚处拱肋应力的影响较大,拱脚压应力变化最大值为 $0.9$  MPa,主梁应力变化值几乎为零,对跨中处主梁的影响可忽略不计。

由图11、图12可知:1)主梁钢箱梁容重减少10%,拱肋拱轴线和主梁跨中位移的影响最大,拱肋拱轴线和主梁位移变化最大值分别为 $0.24$ 、 $0.05$  mm,成桥过程中拱轴线和主梁线形与理论设计线形有所差别,施工中对主梁钢箱容重需加以控制。2)主梁钢箱梁容重减少10%,拱肋和主梁沿桥梁纵向的应力变化和钢箱梁容重未发生变化时有所差别。钢箱梁容重发生变化对靠近拱脚处拱肋应力的影响较大,拱脚压应力最大变化值为 $1.9$

MPa;对主梁应力的影响较大且变化不均匀,最大变化值为 $-1.4$  MPa。施工中需对钢箱梁容重进行严格控制,防止出现施工事故。

由图 13、图 14 可知:1) 吊杆容重减少 10%,拱肋拱轴线变化最大值为  $0.07$  mm,主梁线形变化几乎为零,与另外 2 种结构容重变化相比,敏感性均迟钝,不会造成线形偏离设计线形,基本可忽略不计。2) 吊杆容重减少 10%,拱肋和主梁沿桥梁纵向的应力变化和吊杆容重未发生变化时基本吻合,拱肋最大应力变化值为  $0.2$  MPa;主梁应力变化较均匀,变化范围很小,可忽略不计。

### 3.3 环境温度敏感性分析

温度对钢材的影响较大,成桥过程中环境温度会使拱肋拱轴线和主梁发生位移变化,施工中需对环境温度进行监测。该桥拱肋和主梁采用工厂预制、现场吊装成型的施工方法,而施工现场的气候条件会和工厂存在差别,有必要对成拱过程的温度敏感性进行分析。将环境温度增加  $10^{\circ}\text{C}$  带入有限元模型进行计算,以组合结构成型工况的拱肋和主梁线形、应力变化作为控制目标。系统温度发生  $10^{\circ}\text{C}$  变化时,成桥后拱轴线、主梁线形和应力变化分别见图 15、图 16;实际环境温度变化时,成桥后拱肋、主梁线形和应力变化分别见图 17、图 18。

由图 15、图 16 可知:1) 成桥过程中,环境温度变化对拱肋位移的影响不是很大,温度升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,拱肋轴线位移变化量为  $0.6$  mm,拱肋轴线竖向位移影响最大处为拱顶位置;主梁位移变化量为  $0.8$  mm,主梁竖向位移影响最大处为跨中位置。2) 环境温度变

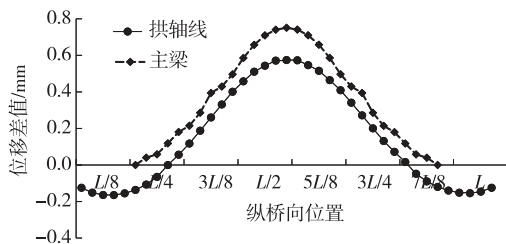


图 15 环境温度升高  $10^{\circ}\text{C}$  时拱肋和主梁的位移变化

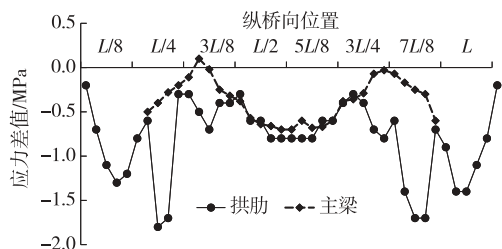


图 16 环境温度升高  $10^{\circ}\text{C}$  时拱肋和主梁的应力变化

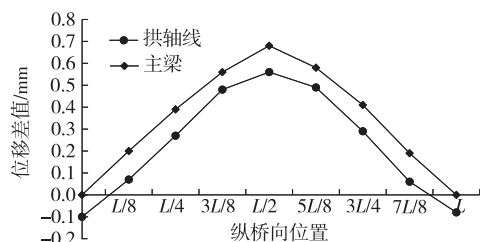


图 17 实际环境温度变化时拱肋和主梁的位移变化

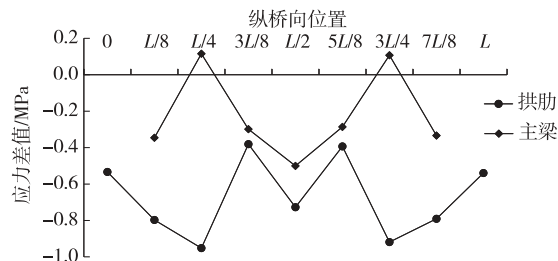


图 18 实际环境温度变化时拱肋和主梁的应力变化

化时拱肋和主梁沿桥梁纵向的应力变化与温度未发生变化时有所差别。温度发生变化,拱肋的应力变化范围较大且不均匀,拱脚压应力变化最大值为  $-1.8$  MPa;对主梁应力的影响也较大且变化不均匀,主梁应力变化最大值约  $-0.8$  MPa。会造成拱肋线形和主梁线形与设计线形产生差别,施工中需对温度加以控制。

由图 17、图 18 可知:温度变化对梁拱体系结构主梁、拱肋位移和应力均有很大影响,施工中需采取措施进行控制,以免出现大的偏差而导致桥梁偏离设计模型。

### 3.4 拱肋倾角敏感性分析

施工误差或控制误差等可能造成成桥过程中拱肋发生向内或向外倾斜。分别对拱肋向内倾斜  $2^{\circ}$ 、向外倾斜  $2^{\circ}$  时成桥后拱肋和主梁线形及应力变化进行分析,拱轴线和主梁的位移变化见图 19、图 20,拱肋和主梁的应力变化见图 21、图 22。

由图 19、图 20 可知:拱肋侧倾对拱肋拱轴线和主梁竖向位移的影响较小,拱肋发生内倾和外倾时,拱肋拱轴线和主梁线形沿桥梁纵向的位移变化基本相同。拱肋发生侧倾后,靠近拱顶拱肋的位移和靠

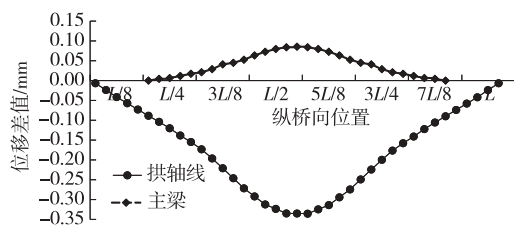


图 19 拱肋向外倾斜  $2^{\circ}$  时拱肋和主梁的位移变化



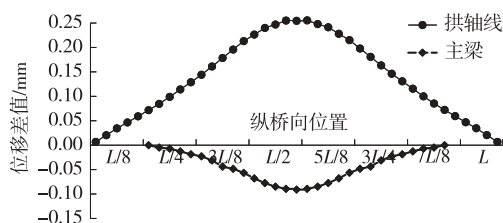


图 20 拱肋向内倾斜 2°时拱肋和主梁的位移变化

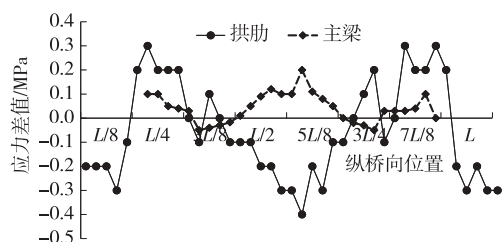


图 21 拱肋向外倾斜 2°时拱肋和主梁的应力变化

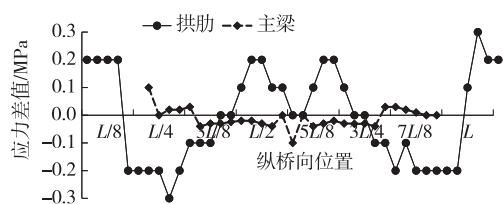


图 22 拱肋向内倾斜 2°时拱肋和主梁的应力变化

近主梁跨中的位移变化较大,拱肋外倾时拱顶和跨中的位移最大变化值分别为-0.35、0.10 mm,拱肋内倾时拱顶和跨中的位移最大变化值分别为0.25、-0.10 mm。

由图 21 可知:拱肋外倾 2°时,拱肋各处的应力都发生不均匀变化,将导致拱肋发生更大角度倾斜,如不加以控制,会造成意外事故;但拱肋外倾 2°对主梁应力的影响不大,跨中处主梁应力变化最大,变化值为 0.2 MPa。

由图 22 可知:拱肋内倾 2°时,拱肋各处的应力均发生不均匀变化,但均在±0.3 MPa 范围内;对主梁应力的影响不大,跨中处主梁应力变化最大,变化值为-0.1 MPa。

## 4 结论

(1) 各项结构参数中,钢箱梁弹性模量及容重、

温度对拱肋和主梁结构的位移、应力影响最大;拱肋弹性模量及容重对拱肋和主梁结构位移、应力有一定影响;其余设计参数发生变化对拱肋和主梁应力的影响很小,几乎可忽略不计,不会造成结构破坏,但拱肋拱轴线和主梁位移产生了不同程度变化,其中拱肋侧倾对位移的影响最大。

(2) 桥梁结构位移和应力对钢箱梁弹性模量和容重变化的敏感性较高,对拱肋和主梁应力的影响较显著,施工中需对结构材料弹性模量和容重进行严格控制,尽量使其逼近设计理论值。

(3) 温度变化对拱肋应力及线形的影响明显,施工中应严格按照规范操作,保证温度处于 1 d 中较稳定的范围。

(4) 钢箱梁容重及弹性模量为主要设计参数,温度为第二主要设计参数,其余参数均会对拱肋和主梁位移、应力产生影响,吊杆容重为这些参数中的次要设计参数,其变化几乎不会对结构产生影响。

## 参考文献:

- [1] 张治成.桥梁施工控制中的结构设计参数敏感性分析[J].武汉理工大学学报,2006,28(10):77-81.
- [2] 冯仲仁,施孝基,陈百奔.独塔混合梁斜拉桥施工控制中的参数敏感性分析[J].世界桥梁,2017,45(6):18-23.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 马显红,余毅.高墩大跨连续刚构桥施工控制参数敏感性分析[J].桥梁建设,2012,42(3):57-62.
- [6] WANG H,TAO T,ZHOU R,et al.Parameter sensitivity study on flutter stability of a long-span triple-tower suspension bridge[J].Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,2014,128(5):12-21.
- [7] 胡名忠,任瑞雪.220 m 主跨连续刚构桥设计参数敏感性分析[J].公路与汽运,2020(6):106-109.

收稿日期:2020-05-09

(上接第 96 页)

- [9] 沈佳.应力吸收带抗反射裂缝试板疲劳试验研究[J].公路,2016(10):47-51.
- [10] 白雪,贾秦龙.高速公路沥青路面病害分析及处治维修[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(9):76-79.
- [11] 黄仰贤.路面分析与设计[M].北京:人民交通出版社,

1998.

- [12] 宿松亚,谢海巍,刘尊青,等.新型防裂基布应用于新疆公路养护工程的效果研究[J].公路与汽运,2021(2):87-89+92.

收稿日期:2021-02-05