

基于均匀试验的大跨悬索桥静力性能参数敏感性分析

刘焕辉, 朱芝苕

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 桥梁挠度和应力作为静力性能的代表性特征, 其大小直接影响结构使用耐久性和安全性。文中以太洪长江大桥为依托, 采用有限元软件 MIDAS/Civil 建立大跨钢结构悬索桥整体空间模型, 采用控制变量法研究矢跨比、不同倍率主缆轴向刚度、吊杆轴向刚度、加劲梁抗弯刚度和桥塔刚度等对竖向挠度和应力的影响, 并采用均匀试验设计法确定各因素的影响程度。结果表明, 矢跨比是悬索桥的重要参数, 在确定矢跨比的前提下, 加劲梁抗弯刚度对静力性能影响最大, 其次是主缆轴向刚度, 然后是桥塔刚度, 影响最小的是吊杆轴向刚度。

关键词: 桥梁; 悬索桥; 挠度; 应力; 均匀试验; 参数分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0125-04

悬索桥以其造型优美、壮观雄伟、跨越能力强等优点, 在大跨度桥梁选型中极具竞争力。但如何使其成桥力学性能达到最优状态成为当下亟待解决的难题。竖向挠度和应力作为静力性能的代表性特征, 对于大跨悬索桥显得尤为重要。李世伟等研究了矢跨比对大跨悬索桥结构刚度的影响, 认为矢跨比较小有利于增大桥梁结构刚度, 矢跨比较大则桥梁结构刚度降低; 唐茂林等比较了不同矢跨比下悬索桥结构受力性能的变化; 崔冰等分析了桥塔刚度对悬索桥受力的影响; 丛霄等分析了矢跨比、边中跨比和主梁抗弯刚度对悬索桥加劲梁内力的影响; 周可夫等对吊索刚度、加劲梁刚度、主塔刚度等结构参数变化对悬索桥力学特性的影响进行了研究; 田芳研究了矢跨比、加劲梁抗弯刚度、桥塔抗弯刚度、荷载集度等对悬索桥静力性能的影响。上述研究基本是针对边中跨比、矢跨比、预拱度和主梁抗弯刚度等开展, 大多仅考虑对力学方面单一性能的影响, 且敏感性研究多采用数据分析, 未考虑多因素多目标函数下的综合影响程度。为此, 该文以太洪长江大桥为依托, 采用有限元分析软件对大跨度钢结构悬索

桥进行空间建模, 以竖向挠度和应力为研究对象, 以矢跨比、主缆轴向刚度、吊杆轴向刚度、加劲梁抗弯刚度和桥塔刚度为主要因素, 运用均匀试验设计法确定各因素的影响程度。

1 工程概况

太洪长江大桥为重庆南川至两江新区高速公路上的关键控制性工程, 主跨 808 m, 桥梁全长 1 456 m, 宽 39.6 m。主缆矢跨比 1/10, 主梁采用流线型扁平钢箱梁, 单箱单室, 梁高 3 m, 桥面采用正交异性钢桥面板, 吊索标准间距 12 m。主塔为钢筋砼门型塔, 横系梁为预应力空心薄壁结构, 塔基采用承台桩基础, 南岸锚碇为隧道式锚碇, 北岸锚碇为埋置式重力锚碇。两岸采用对称约束, 每侧梁端设置 2 个竖向支座、2 个横向抗风支座、2 个纵向粘滞性阻尼器。桥梁立面布置见图 1。

2 有限元模型

采用有限元软件 MIDAS/Civil 建立该桥整体空间模型, 共划分为 947 个节点、931 个单元。主梁

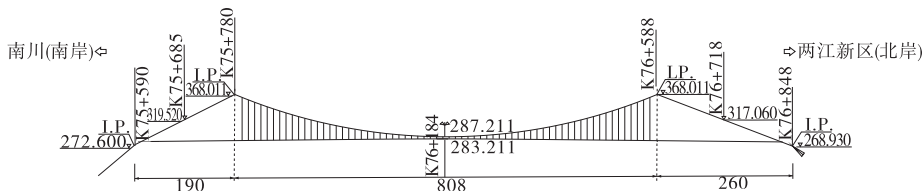


图 1 太洪长江大桥立面布置(单位: m)

结构构件采用三维梁单元模拟,主缆及吊索采用只受拉杆单元模拟,桥墩和桥塔采用梁单元模拟。主塔顶横梁和主缆之间采用刚性连接,塔底及主缆锚固处采用固结。计算荷载包括自重、二期恒载和温

度作用等。采用适用于金属材料的 Mises 屈服准则,即当材料单位体积形状改变的弹性能达到某一常数时质点发生屈服。悬索桥各主要构件材料参数见表 1,有限元模型见图 2。

表 1 太洪长江大桥主要构件参数

构件	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	抗扭惯性矩/ m^4	抗弯惯性矩/ m^4	单元面积/ m^2
主缆	80.53	0.3	1.98×10^8	1.19×10^{-2}	5.98×10^{-3}	0.27
吊杆	78.50	0.3	1.98×10^8	1.77×10^{-6}	8.87×10^{-7}	3.34×10^{-3}
主梁	79.08	0.3	2.06×10^8	7.98×10^{-5}	2.34	1.48
桥塔	25.00	0.2	3.45×10^7	4.65×10^2	2.11×10^2	45.49

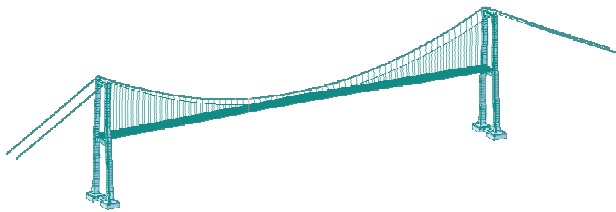


图 2 太洪长江大桥有限元模型

3 各因素对挠度和应力的影响

以靠近桥塔处、1/8 处、1/4 处和跨中处为控制截面,以最不利荷载组合下主梁竖向挠度和下缘应力为研究对象,分析矢跨比、不同倍率主缆轴向刚度、吊杆轴向刚度、加劲梁抗弯刚度和桥塔刚度对大跨悬索桥静力性能的影响。

3.1 矢跨比

矢跨比为主缆垂度与主跨长度的比值,是悬索桥设计中非常重要的参数,其大小直接影响主缆的内力,进而影响结构的竖向刚度。分别取矢跨比为 1/9、1/9.5、1/10、1/10.5、1/11 和 1/12,分析比较该桥挠度和应力的变化。图 3、图 4 分别为不同矢跨比下该桥的竖向挠度和应力。

从图 3、图 4 可看出:该桥竖向挠度与矢跨比成

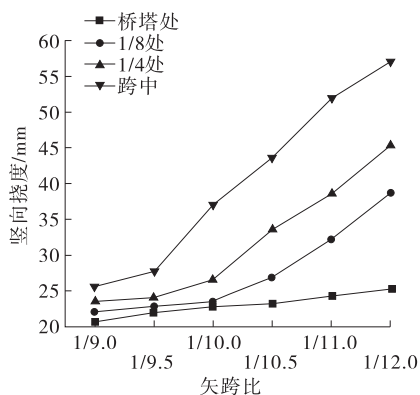


图 3 不同矢跨比下悬索桥竖向挠度

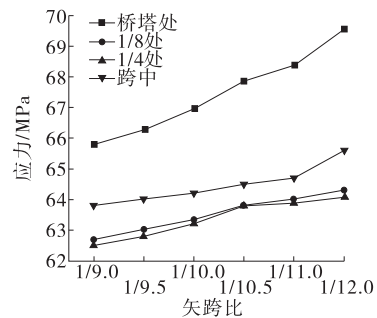


图 4 不同矢跨比下悬索桥应力

反比,矢跨比为 1/10 左右时挠度变化速率较快,1/11 之后变化速率减缓。随着矢跨比的增大,控制截面的拉应力减小;矢跨比为 1/9 左右时曲线斜率最大,下降最快。可见,矢跨比为 1/9~1/11 时,对挠度和应力的影响最大。

3.2 主缆轴向刚度

悬索桥主缆轴向刚度由横截面积和材料弹性模量决定,而主缆材料弹性模量是常数,因而通过改变主缆截面积来改变其刚度。假定设计的主缆轴向刚度为 1,分别取主缆轴向刚度倍率为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 和 2.0,分析比较该桥挠度和应力的变化。图 5、图 6 分别为不同主缆轴向刚度下该桥竖向挠度和应力。

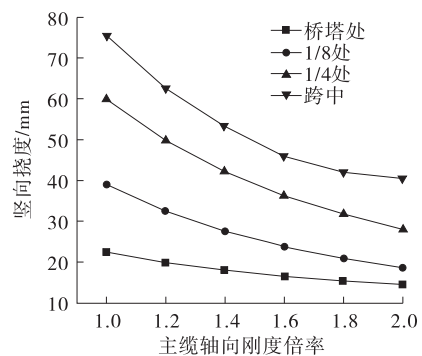


图 5 不同主缆轴向刚度下悬索桥竖向挠度

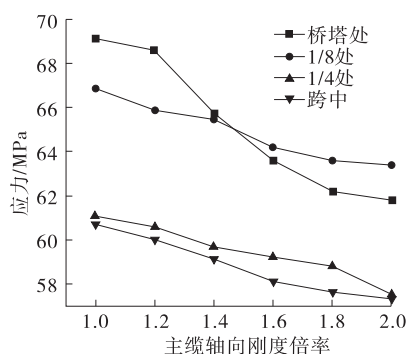


图6 不同主缆轴向刚度下悬索桥应力

从图5、图6可看出:主缆轴向刚度对悬索桥挠度及应力的影响较明显。随着主缆轴向刚度的增大,加劲梁跨中下挠和应力逐渐减小,减小幅度分别为46.5%、6.12%。说明增大主缆轴向刚度,结构体系的总体刚度会增大,结构抵抗变形的能力得到增强,主梁挠度减小。

3.3 吊杆轴向刚度

假定设计的吊杆轴向刚度为1,将吊杆轴向刚度倍率分别设为1.0、1.2、1.4、1.6、1.8和2.0,分析比较该桥挠度和应力的变化。图7、图8分别为不同吊杆轴向刚度下该桥竖向挠度和应力。

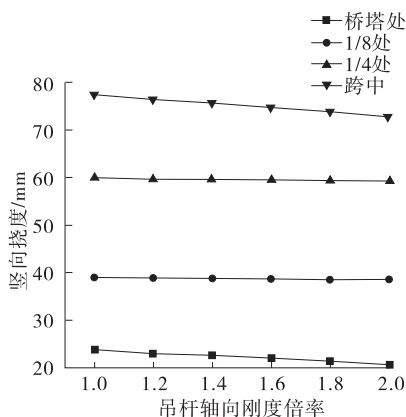


图7 不同吊杆轴向刚度下悬索桥竖向挠度

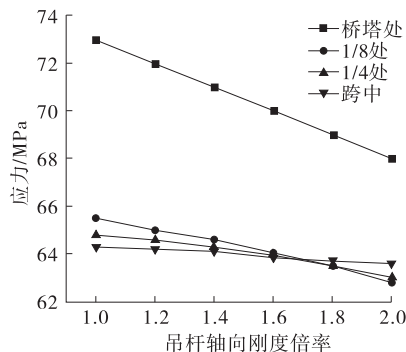


图8 不同吊杆轴向刚度下悬索桥应力

由图7、图8可知:吊杆轴向刚度对该桥竖向挠度和应力的影响较小。随着吊杆轴向刚度的增加,加劲梁跨中挠度和应力逐渐减小,减小幅度分别为5.3%、1.1%,吊杆轴向刚度对加劲梁应力、挠度的影响微乎其微。吊杆只是悬索桥的传力构件,对结构整体受力性能影响较小。

3.4 加劲梁抗弯刚度

加劲梁抗弯刚度直接影响加劲梁的挠度和结构稳定性,在确保其他结构设计参数不变的前提下改变加劲梁抗弯惯性矩,设加劲梁抗弯刚度倍率分别为1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0,分析比较该桥挠度和应力的变化。图9、图10分别为不同加劲梁抗弯刚度下该桥跨中竖向挠度和应力。

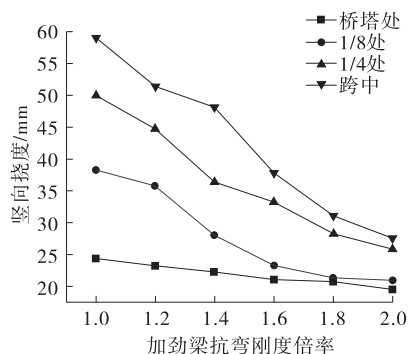


图9 不同加劲梁抗弯刚度下悬索桥跨中竖向挠度

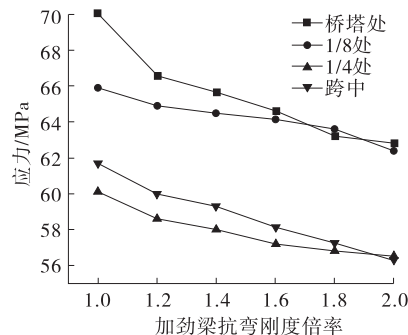


图10 不同加劲梁抗弯刚度下悬索桥应力

从图9、图10可看出:加劲梁抗弯刚度对竖向挠度和应力有一定影响。当加劲梁抗弯刚度倍率为1.0~2.0时,跨中竖向位移和下缘拉应力均不断减小,减小幅度分别为49.1%、8.1%。增大加劲梁抗弯刚度,结构体系的总体刚度和抵抗变形的能力得到增强。

3.5 桥塔刚度

桥塔刚度分为横向、竖向和扭转刚度。通过改变主塔整体刚度分析桥塔刚度对悬索桥静力特性的影响。假定设计的桥塔刚度为1,将桥塔刚度以1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0倍率变化,分析比较该桥挠度

和应力的变化。图 10、图 11 分别为不同桥塔刚度下该桥竖向挠度和应力。

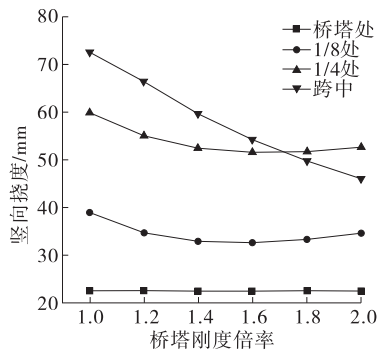


图 11 不同桥塔刚度下悬索桥竖向挠度

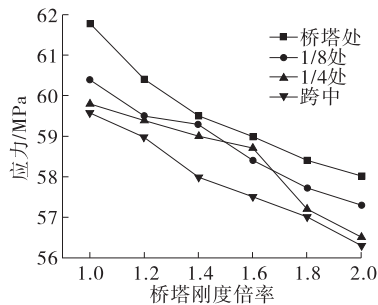


图 12 不同桥塔刚度下悬索桥应力

从图 10、图 11 可看出:桥塔纵向刚度对竖向挠度和应力有一定影响。随着桥塔刚度倍率的增大,跨中竖向位移和下缘拉应力逐渐减小,减小幅度分别为 36.5%、5.6%。增大主塔刚度,结构的总体刚度得到增强。

4 均匀试验

采用均匀试验法分析上述因素对该桥静力性能的影响程度。鉴于实际工程中悬索桥的矢跨比是确定的,选取主缆轴向刚度、吊杆轴向刚度、加劲梁抗弯刚度和桥塔刚度作为试验因素,以最具代表性的跨中截面竖向挠度和下缘应力为研究对象,选用 $U_6^*(6^4)$ 作为设计表,分析这些因素对悬索桥挠度和应力影响的敏感程度。均匀试验方案见表 2、表 3。采用统计分析软件 SPSS 对均匀试验结果进行回归分析,结果见表 4。

表 2 均匀试验使用表

因字数 S		列号		均匀度偏差 D	
2	1	3		0.187 5	
3	1	2	3	0.265 6	
4	1	2	3	0.299 0	4

表 3 均匀试验因素与方案

试验号	主缆轴向刚度	吊杆轴向刚度	加劲梁抗弯刚度	桥塔刚度	跨中挠度/mm	跨中应力/MPa
1	1(1.0)	2(1.2)	3(1.4)	6(2.0)	722	70.2
2	2(1.2)	4(1.6)	6(2.0)	5(1.8)	481	65.3
3	3(1.4)	6(2.0)	2(1.2)	4(1.6)	336	69.1
4	4(1.6)	1(1.0)	5(1.8)	3(1.4)	198	56.7
5	5(1.8)	3(1.4)	1(1.0)	2(1.2)	97	61.6
6	6(2.0)	5(1.8)	4(1.6)	1(1.0)	35	55.8

表 4 各因素权重分析结果

因素	自由度	贡献值	显著性
主缆轴向刚度	3	0.851	✓
吊杆轴向刚度	3	0.189	
加劲梁抗弯刚度	3	1.043	✓
桥塔刚度	3	0.621	

根据表 4,贡献值从大到小依次为加劲梁抗弯刚度、主缆轴向刚度、桥塔刚度、吊杆轴向刚度。一般来说,因素对试验影响越大,回归分析的贡献值就越大。影响悬索桥静力性能的最主要因素为加劲梁抗弯刚度,次要因素为主缆轴向刚度,然后是桥塔刚度,影响程度最轻微的是吊杆轴向刚度。实际工程中应优先通过贡献值较大的因素来控制桥梁竖向挠

度和应力,保证结构的安全运营,也可通过同时提高几种因素的共同作用来达到使用要求。

5 结论

(1) 针对静力性能的显著特征,控制矢跨比、主缆轴向刚度、加劲梁抗弯刚度、吊杆轴向刚度和桥塔刚度可减小悬索桥的竖向挠度,改善主梁应力情况。

(2) 加劲梁抗弯刚度对挠度和应力的综合影响程度最大,其次是主缆轴向刚度,然后是桥塔刚度,影响程度最小的是吊杆轴向刚度。可通过以上 4 个因素来控制悬索桥的竖向挠度和应力,改善结构受力,进而保证桥梁的安全。

(下转第 134 页)