

大跨径三塔缆索承重桥梁力学参数敏感度分析

周云岗^{1,2}, 孙斌¹, 肖汝诚¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 建立了主跨为 1 400 m 的三塔悬索桥、三塔斜拉桥和三塔斜拉-悬吊协作体系 3 种桥型的有限元分析模型. 考虑几何非线性效应, 利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 编制了计算程序, 分析了主梁的最大挠度、索塔塔顶最大位移及主缆抗滑移系数对主梁刚度、索塔刚度、塔梁约束刚度、矢跨比、中央扣等参数的敏感程度, 并进一步确定了主梁刚度和索塔刚度合理取值范围. 结果表明: 主梁刚度对悬索桥影响较小; 主塔刚度是 3 种桥型的核心参数; 塔梁约束可改善 3 种桥型的力学性能; 减小矢跨比或设置中央扣可提高结构刚度, 但会降低主缆抗滑性能.

关键词: 桥梁工程; 三塔缆索承重桥; 力学参数; 敏感度

中图分类号: U448.225

文献标志码: A

Sensitivity Analysis of Structural Parameters of Long-span Three-tower Cable Supported Bridges

ZHOU Yungang^{1,2}, SUN Bin¹, XIAO Rucheng¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Finite element analysis models were established to analyze the variable characteristics of key structural parameters of three-tower suspension bridge, three-tower cable-stayed bridge and three-tower cable-stayed suspension bridge. By using ANSYS parametric design language (APDL), a calculation program was prepared to analyze the maximum deflection of box-girders, the maximum displacement of tower and the anti-slide coefficient of main cable and their sensitivity to the stiffness of box-girders and tower, the appropriate stiffness of longitudinal constrain between box-girders and tower, rise-span ratio and central buckle of main cable in consideration of the effect of geometric nonlinearity. Finally, the reasonable range of the stiffness of box-girders and tower was determined. It is shown that the stiffness of box-girders has little effect on suspension bridge. The stiffness of tower is

the key factor that affects the structural characteristics of the bridges and the appropriate stiffness of longitudinal constrain is beneficial to the structural characteristics of the bridges. The reduction of rise-span ratio or the setting of central buckle of main cable can improve the structural stiffness, but reduce the anti-slide capability of main cable of cable supported bridge.

Key words: bridge engineering; three-tower cable-supported bridge; mechanical parameters; sensitivity

随着经济发展和技术创新, 桥梁工程迈入跨海大桥时代. 由于跨径大、通航要求高, 多塔缆索承重桥梁既要满足通航要求, 在经济上又要具有优势. 国际方案竞赛中多次出现大跨径多塔悬索桥和多塔斜拉桥方案, 但至今未有工程实例, 说明对这种桥型的力学特性尚待深入研究. 我国近年在建的或建成的多座多塔悬索桥和多塔斜拉桥促进了相关理论研究.

目前对多塔缆索承重桥梁的静动力分析基本针对悬索和斜拉 2 种桥型. 文献[1]对比研究了塔梁固结、支座约束、半飘浮与全飘浮 4 种结构体系; 文献[2]研究了三塔悬索桥在汽车荷载作用下的力学特点, 并对纵向弹性索和黏滞阻尼器 2 种附加约束的设置位置及参数优化进行研究; 文献[3]研究了三塔悬索桥的静力特性; 文献[4]分析了三塔悬索桥的适应性, 并对该桥式的中塔选型、主缆与鞍槽间的抗滑移安全系数及整体刚度的取值进行研究; 文献[5]通过增加塔、梁刚度或采用新型缆索体系建立其他模型, 研究了斜拉桥主跨挠度、桥塔内力等力学参数; 文献[6]对比研究了 3 种桥型的力学特性和经济性, 但未对力学参数展开研究. 当前文献基本围绕单一桥型的力学特性展开, 对比分析 3 种桥型力学参数的研究并不多见. 不同桥型的力学参数敏感度对

比分析既可为各桥型的力学参数微调提供方向,又可为合理地选择力学参数提供参考。

本文建立了三塔缆索承重桥3种桥型的有限元计算模型,对比研究了主梁刚度、索塔刚度、塔梁约束刚度、主缆矢跨比、主缆中央扣等参数对关键力学参数的影响规律,并探讨了主梁刚度和索塔刚度合理取值的方法。

1 计算模型

1.1 结构计算模型

基于传统缆索承重桥梁研究成果,以主跨为1 400 m的三塔缆索承重桥梁为研究对象。塔、梁典型截面如图1所示,3种桥型的总体布置如图2所示。

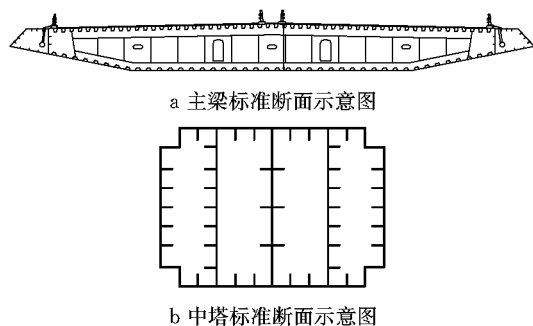


图1 塔、梁典型断面图

Fig.1 Typical cross-section of tower and beam

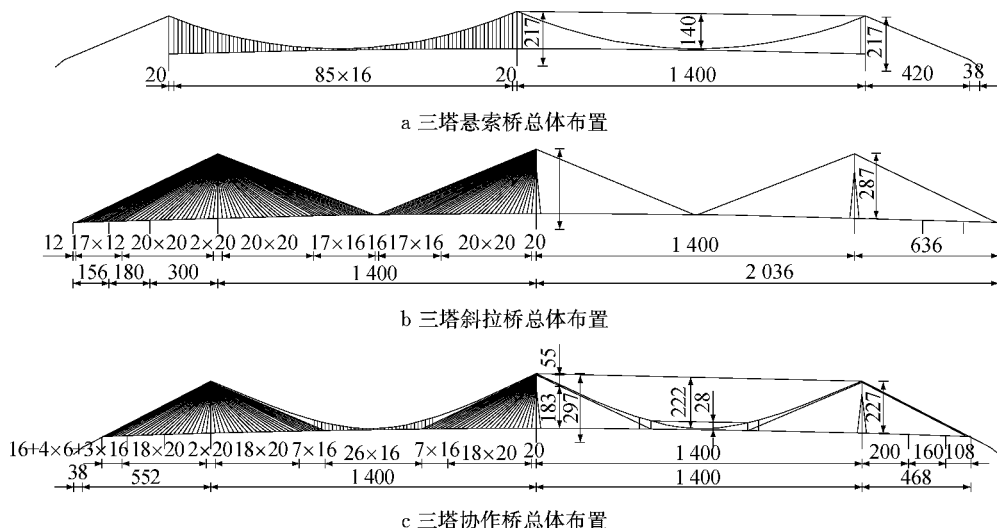


图2 三塔缆索承重桥立面布置(单位:m)

Fig.2 Elevation of three-tower cable-stayed supported bridges (unit: m)

标准抗拉强度为1 860 MPa,运营状态安全系数为2.5;斜拉索采用 $\Phi 7$ mm镀锌平行钢丝成品索,抗拉强度为1 770 MPa,运营状态安全系数为2.5;吊索为销接式,采用 $\Phi 5$ mm镀锌高强预制平行钢丝束,

结构参数如表1所示。索塔和主梁的典型截面几何特性如表2所示。

表1 3种桥梁体系的结构参数

Tab.1 Structure properties of three bridges m					
桥型	L_s	L_m	f	H	h
悬索桥	420	1 400	140	217	147
协作桥	468	1 400	222	297	227
斜拉桥	636	1 400		357	287

注: L_s 为边跨跨径, L_m 为中跨跨径, f 为主缆名义垂度, H 为索塔总高, h 为桥面以上塔高。

表2 3种桥梁体系的塔、梁典型截面参数

Tab.2 Properties of typical cross-sections of three bridges					
构件	截面面积/ m^2	竖弯惯性矩/ m^4	平弯惯性矩/ m^4	抗扭惯性矩/ m^4	
边塔	塔顶	69.420	1 013.260	451.990	1 075.230
	塔底	140.200	8 958.780	2 590.400	6 819.360
中塔	塔顶	164.220	4 671.296	1 441.123	3 808.067
	塔底	355.020	45 117.982	9 006.128	25 947.326
主梁	2.548	8.844	333.920	23.328	

边界条件:主梁与辅助墩和索塔耦合,约束竖向和横向自由度,释放纵向自由度。主缆的锚点、索塔及辅助墩的底部均固结。

结构的材料根据已有工程实例确定,主要构件的材料为:索塔采用C50混凝土;辅助墩采用C40混凝土;主梁采用Q370qd钢材;主缆采用预制平行钢丝索股,每股由 $\Phi 5.3$ mm镀锌高强钢丝组成,钢丝

抗拉标准强度为1 670 MPa。

1.2 几何非线性效应分析方法

缆索承重桥梁的几何非线性效应显著,进行力学参数敏感度分析时必须予以考虑,主要包含3个

方面^[7]:大位移效应、缆索的垂度效应和结构的初内力效应(如梁塔的弯矩-轴力($P-\Delta$)效应、主缆的初内力效应)。

大位移效应可以用基于总体拉格朗日(TL)列式法(总体坐标法)、修正拉格朗日(UL)列式法(拖动坐标法)和更新拉格朗日(CR)列式法的有限位移理论来考虑。ANSYS软件中可采用大位移刚度矩阵考虑结构的大位移效应。

结构初内力效应本质上是指结构现有内力引起的结构刚度变化对后期荷载响应的影响,如梁柱的 $P-\Delta$ 效应、主缆的重力刚度等,可以采用稳定函数法来考虑。ANSYS软件中可采用初应力刚度矩阵考虑初内力效应。

缆索的垂度效应是影响超大跨径缆索承重桥梁计算精度的关键因素之一,其非线性有限元分析方法主要有4种:等效模量法、多段杆单元法、多节点曲线单元法、悬链线单元法。本文采用多段杆单元法来考虑^[8]。

2 力学参数敏感度分析

多塔缆索承重桥的关键力学问题为结构刚度小和悬吊体系中间索塔主缆的抗滑移稳定性差,对应的关键力学参数为主梁主跨最大挠度和主缆抗滑移系数。考虑到3种桥型的关键力学参数响应值差异性较大,不适宜直接比较,而采用比值 r/r_0 (r 为相关力学参数变化后的响应值, r_0 为方案的初始响应值)既反映变化趋势,又具可比性,故文中采用此比值做比较研究。3种桥型的关键力学参数的初始响应值(即比值中 r_0)如表3所示。表3中,抗滑移系数 $k_c = \mu\alpha/\ln(T_1/T_2)$ 。其中, μ 为主缆与槽底间的摩擦系数, α 为主缆在鞍槽上的包角, T_1 为主缆紧边拉力, T_2 为主缆松边拉力。

表3 3种桥梁体系的关键力学参数初始响应值

Tab. 3 Values of key mechanical parameters of three bridges

桥型	v_0/m	k_{c0}	u_0/m
悬索桥	2.351	1.835	0.608
协作桥	2.764	1.278	0.996
斜拉桥	3.433		0.991

为简化表述,采用如下符号标识响应参数: v 和 v_0 为主梁活载最大挠度, k_c 和 k_{c0} 为中塔主缆的抗滑移系数, v 和 k_c 值均为各桥型按活载最不利布置方式求得; u 和 u_0 为中塔纵桥向活载位移, j_b 和 j_{b0} 为主梁抗弯刚度, j_t 和 j_{t0} 为中塔抗弯刚度, K_s 和 K_{s0}

为塔梁间约束弹簧系数, s 和 s_0 为主缆矢跨比。

2.1 主梁抗弯刚度

对于大跨径缆索承重桥,主梁高度的适宜范围为3.0~5.0 m,若假定板厚及其加劲布置不变,则主梁面积 S 、面外惯性矩 I_x 、面内惯性矩 I_y 、扭转惯性矩 I_t 变化如图3所示。由图可知, S 、 I_x 、 I_y 和 I_t 与梁高基本成线性关系。梁高每增加0.5 m, S 递增0.7%左右, I_x 递增1.4%左右, I_y 递增22.0%左右, I_t 递增30.0%左右。

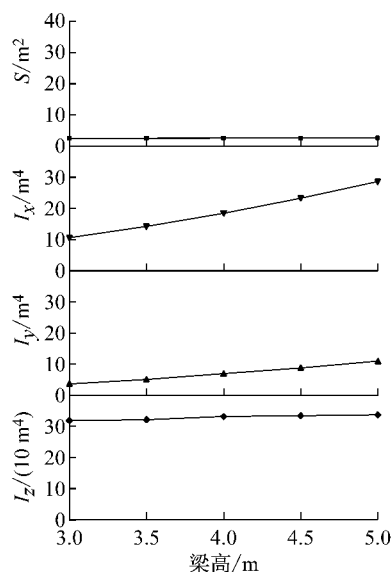


图3 主梁截面几何特性

Fig. 3 Geometric properties of box-girder

根据梁高对主梁截面特性影响的规律,缩放主梁面内惯性矩和扭转惯性矩,即按0.3倍递增或递减,研究 v 、 k_c 和 u 对 j_b 的敏感度,曲线变化规律如图4所示。

由图4可知:①增大 j_b 可减小 v , j_b 由 $0.1j_{b0}$ 增加到 $1.9j_{b0}$ 时,悬索体系的 v 减小3%左右,斜拉体系减小35%左右,协作体系减小11%左右。由曲线斜率可得, j_b 对悬索体系的 v 影响较小,对协作体系的影响较高,而对斜拉体系的影响最为显著。② j_b 对 u 的影响与对 v 的影响相似。③增大 j_b 可提高 k_c ,悬索体系的效果不如对协作体系的效果。梁高从3.0 m增加到5.0 m时,悬索体系的 k_c 增加0.5%左右,协作体系增加6%左右。④比较图4a~c可知,就对 j_b 的敏感度而言, v 最高, u 较高, k_c 较弱。

2.2 中塔抗弯刚度

对于纵向单柱式桥塔,在不改变索塔壁厚的前提下,影响其纵向抗推刚度的重要参数是截面纵向尺寸,图5a和b为索塔典型截面特性与其纵向尺寸之间的关系。

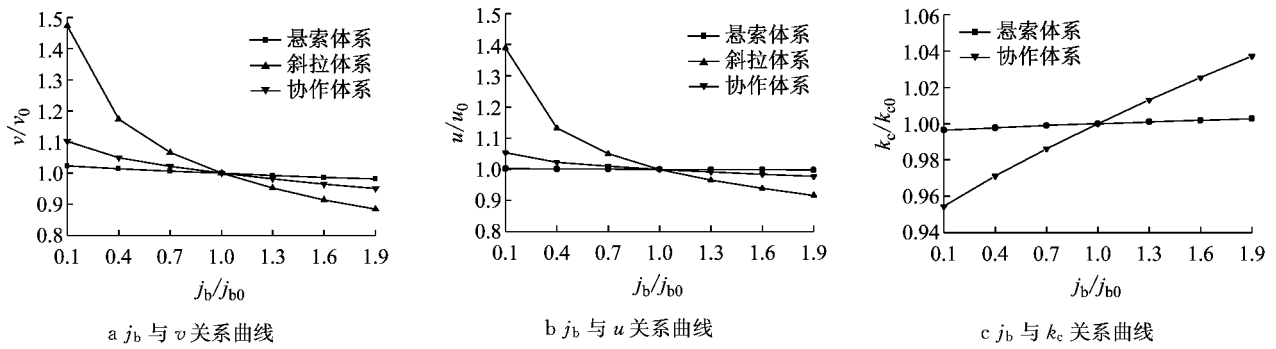


图4 关键力学参数对主梁刚度的敏感度

Fig.4 Sensitivity of key mechanical parameters to box-girder stiffness

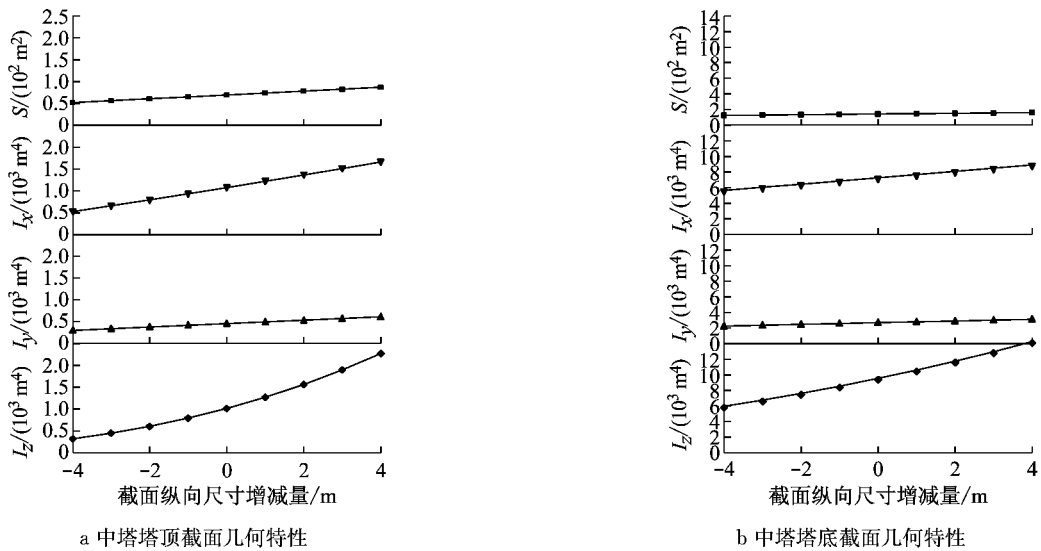


图5 中塔截面几何特性

Fig.5 Geometric property of tower section

由图5可知, S 、 I_x 、 I_y 和 I_z 与纵向尺寸基本成线性关系. 索塔纵向尺寸每增加 1 m, S 递增 5% 左右, I_x 递增 20% 左右, I_y 递增 7% 左右, I_z 递增 11% 左右.

根据索塔纵向尺寸对其截面特性影响的规律, 缩放中塔面内惯性矩和扭转惯性矩, 即分别按 0.2 和 0.1 倍递增或递减, 研究 v 、 k_c 和 u 对 j_t 的敏感度, 曲线变化规律如图6所示.

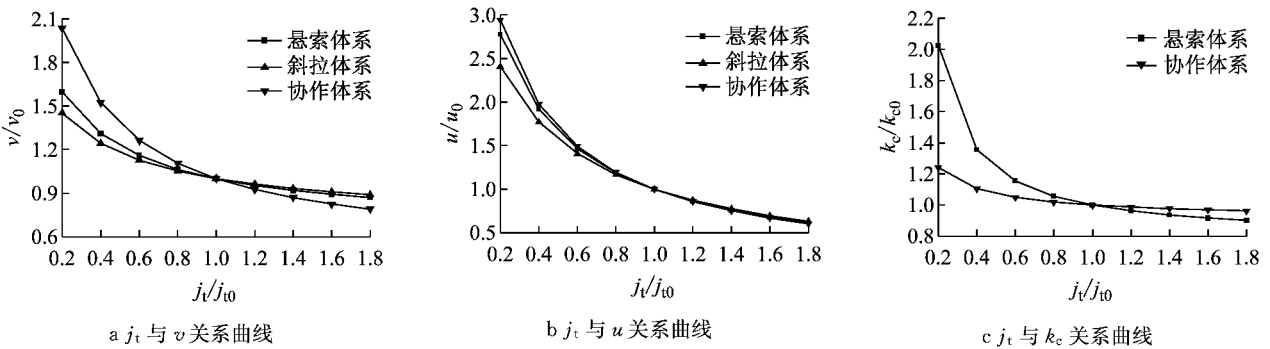


图6 关键力学参数对中塔刚度的敏感度

Fig.6 Sensitivity of key mechanical parameters to middle tower stiffness

由图6可得以下结论: ①增大 j_t 可显著减小 v , 中塔抗弯刚度 j_t 由初始方案的 0.2 倍增加到 1.8 倍时, 悬索体系的 v 减小约 46%, 斜拉体系减小约

39%, 协作体系减小约 62%. 由曲线斜率可得, 协作体系的 v 对 j_t 敏感度最高, 而悬索体系和斜拉体系相对较低. ② j_t 对 u 的影响比 v 的稍大, 且 3 种体系

相近. ③增大 j_t 使 k_c 减小, 且对悬索体系较明显, 而对协作体系影响较小. 中塔纵向尺寸由初始方案的 0.2 倍增加到 1.8 时, 悬索体系的 k_c 减小约 55%, 协作体系减小约 22%. ④比较图 6a~c 关键参数比值可知, j_t 对关键力学参数的影响程度均较显著, 可见 j_t 是多塔缆索承重桥的核心参数.

2.3 中塔与主梁间约束刚度

大跨径传统缆索承重桥在纵向静阵风作用下主梁将产生较大的纵向位移, 通常在主梁和索塔之间设置纵向限位装置, 实现控制主梁纵向位移的目标. 图 7 为泰州长江大桥中塔处塔、梁之间弹性索装置.

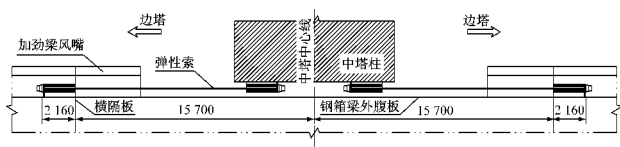
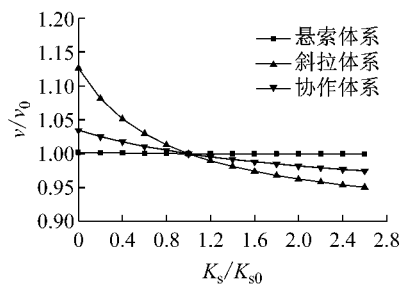


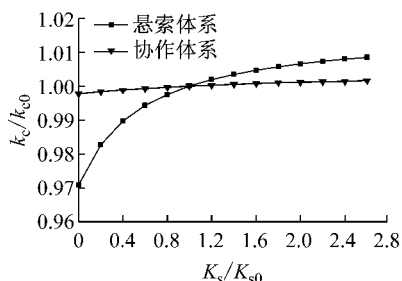
图 7 泰州长江大桥中塔处弹性索装置(单位:m)

Fig.7 Cable between box-girder and tower of Taizhou bridge (unit: m)

K_s 是控制弹性索对结构力学特性影响程度的关键参数. K_s 为零, 相当于中塔与主梁之间纵向无约束, 而 K_s 为无穷大时, 则中塔与主梁之间纵向固结. 初拟 K_{s0} 为 $35 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$, 给出弹性系数与关键力学参数之间的关系, 如图 8 所示.



a K_s 与 v 关系曲线



b K_s 与 k_c 关系曲线

图 8 关键力学参数对弹簧系数的敏感度

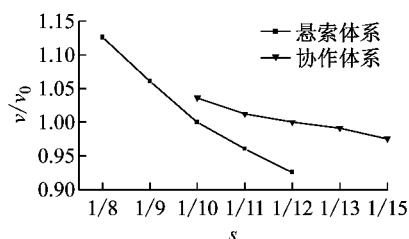
Fig.8 Sensitivity of key mechanical parameters to spring constant

由图 8 可知, 中塔处塔、梁之间的约束对斜拉体系的整体刚度影响较大, 而对悬索体系影响很小. K_s

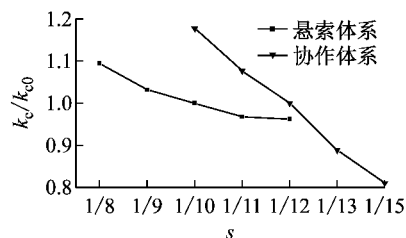
由 0 增大至 $91 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 斜拉体系 v 减小 17.5% 左右, 协作体系减小 5.5% 左右, 悬索体系仅减小 0.3% 左右. K_s 增大有利于提高悬吊体系中塔主缆的抗滑移性能. 相对而言, 悬索体系较为显著, 当 K_s 由 0 增大至 $91 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 悬索体系抗滑移系数增大 3.7% 左右, 而协作体系仅为 0.4% 左右.

2.4 矢跨比

对于悬吊体系, 矢跨比 s 是结构的核心参数. s 越大, 主缆初始轴力越小, 主缆截面尺寸也越小, 但主缆初始重力刚度降低, 使结构整体刚度下降, 并对主缆抗滑移性能产生影响. 图 9a 为 s 变化时 2 种体系的主梁挠度变化曲线, 图 9b 为 s 变化时 2 种体系的主缆抗滑移系数变化曲线. 计算时, 通过增减塔高方式来改变矢跨比.



a v 对 s 敏感度



b k_c 对 s 敏感度

图 9 关键力学参数对矢跨比的敏感度

Fig.9 Sensitivity of key mechanical parameters to rise-span-ratio

由图 9 可知, 与协作桥相比, 悬索桥的 v 对 s 的敏感度较高, 而 k_c 较低. 悬索体系的 s 由 $1/8$ 减小至 $1/12$ 时, 其 v 减小 18% 左右, k_c 减小 12% 左右; 而协作体系的 s 由 $1/10$ 减小至 $1/15$ 时, 其 v 减小 6% 左右, k_c 减小 31% 左右.

2.5 中央扣

悬索体系的中央扣对结构的抗风抗震性能有利^[9], 对结构静力性能也有所改善^[10]. 图 10 为中央扣数目变化时, 悬索体系的关键力学参数与 j_b 及 j_t 之间的关系.

悬索体系设置中央扣时, v 减小, k_c 增大, 设置中央扣比不设置中央扣时 v 减小 12% 左右, k_c 增大

24%左右.然而,中央扣数目对结构关键力学性能的改善基本无影响.图11为中央扣数目变化时,协作

体系的关键力学参数与 k_b 及 j_t 之间的关系.

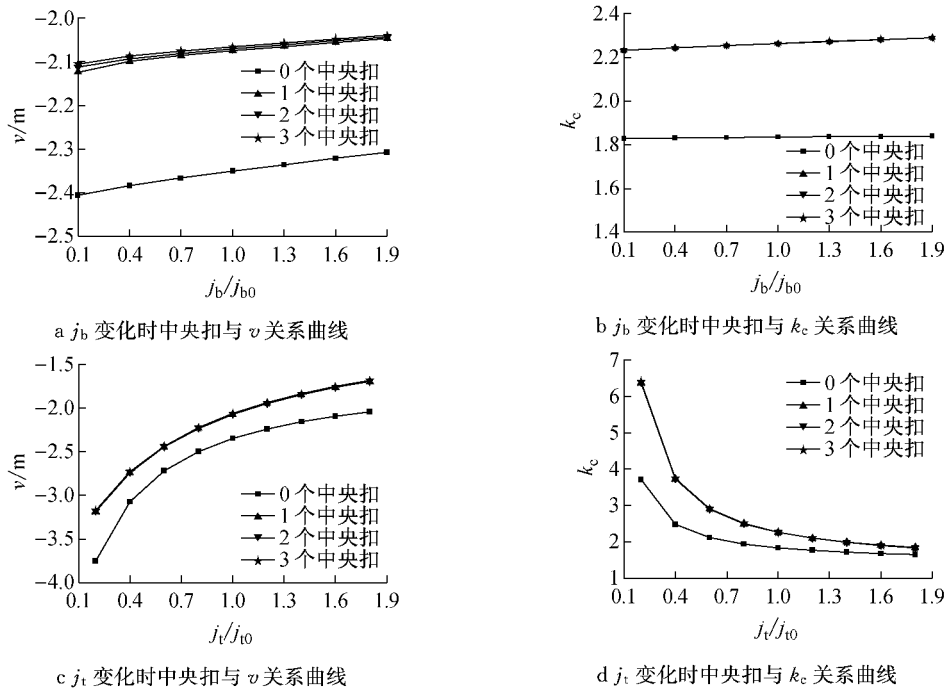


图10 悬索桥关键力学参数对中央扣的敏感度

Fig.10 Sensitivity of key mechanical parameters of suspension bridge to central buckle

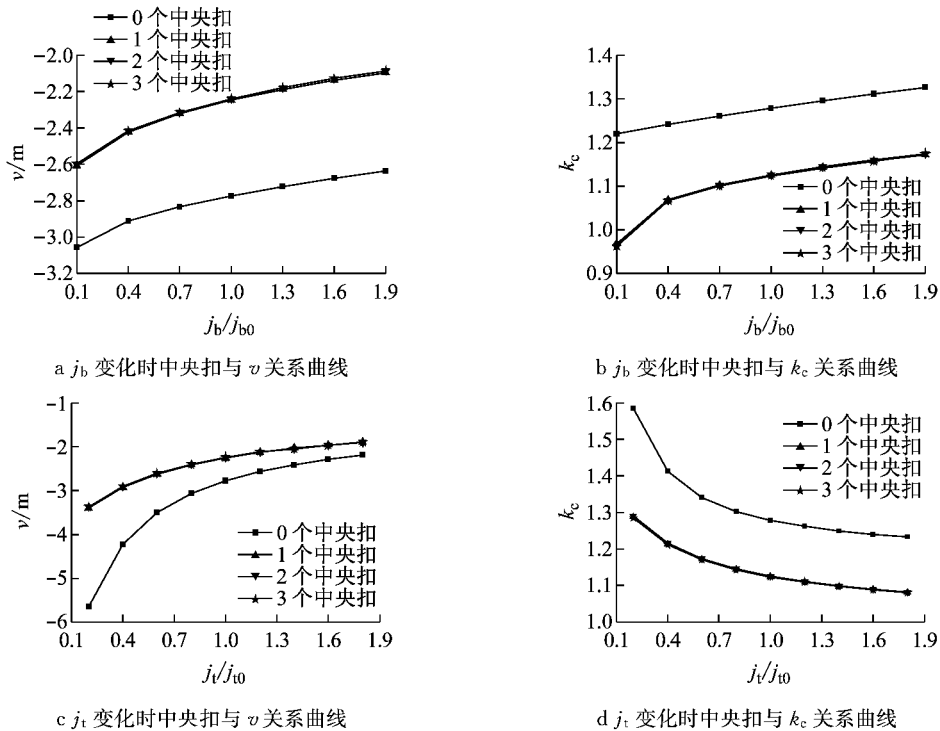


图11 协作桥关键力学参数对中央扣的敏感度

Fig.11 Sensitivity of key mechanical parameters of cable-stayed suspension bridge to central buckle

协作体系设置中央扣时, v 和 k_c 均减小.因此,须谨慎使用中央扣来提高结构整体刚度.设置中央扣比不设置中央扣时 v 减小19%左右, k_c 减小13%

左右.同样,中央扣数目对结构关键力学性能的改善基本无影响.

此外, j_b 和 j_t 的大小影响关键力学参数对中央

扣的敏感程度. 由图 11 可知, j_b 和 j_t 较小时, 关键力学参数对中央扣的敏感度较高.

3 合理力学参数确定

力学参数敏感度分析为设计方案的优化微调提供依据. 然而, 在初步设计阶段, 结构总体布置完成后, 亟须解决 2 个问题: 其一, 如何确定结构构件的尺寸; 其二, 如何协调不同构件的刚度. 第 2 节分析表明, 主梁刚度和中塔刚度是影响关键力学问题的

主要参数. 合理地选择主梁和中塔刚度是解决关键力学问题的重要途径.

图 12 为三塔悬索桥的 j_b 和 j_t 分别与 v 、 k_c 之间的关系曲线. 由图 12 可知: ①就 v 而言, 当 $j_t \geq 0.1j_{t0}$ 时, 始终满足 $v/l \leq l/300$, 其中 v 为主梁活载最大挠度, l 为主跨跨径. ②就 k_c 而言, 当 $j_t \leq 0.7j_{t0}$ 时, 始终满足 $k_c \geq 2.0$. ③ j_b 对关键力学响应的影响很小. 因此, 可以确定中塔刚度合理取值范围, 即 $0.7j_{t0} \geq j_t \geq 0.1j_{t0}$, 始终满足 $v/l \leq l/300$ 和 $k_c \geq 2.0$. 此时, 主梁刚度可任意取值.

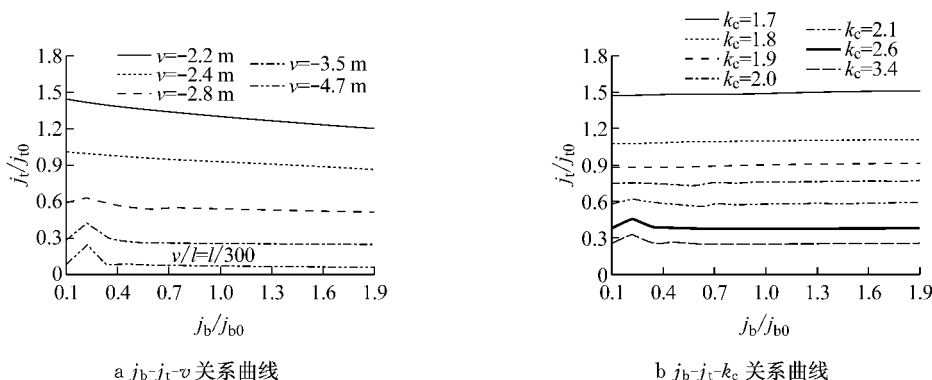


图 12 三塔悬索桥 j_b - j_t - v 和 j_b - j_t - k_c 的关系曲线

Fig. 12 j_b - j_t - v and j_b - j_t - k_c relationship of suspension bridge

图 13 为三塔斜拉桥 j_b 和 j_t 分别与 v 、 u 之间的关系曲线. 由图 13 可知: ①就 v 而言, 挠度为 -3.5 m 以上区域内的 j_b 和 j_t , 均能满足 $v/l \leq l/400$.

② v 曲线的曲率接近 45° , 表明 j_b 和 j_t 对 v 的影响程度相近. ③相对而言, j_t 对 u 的影响较大.

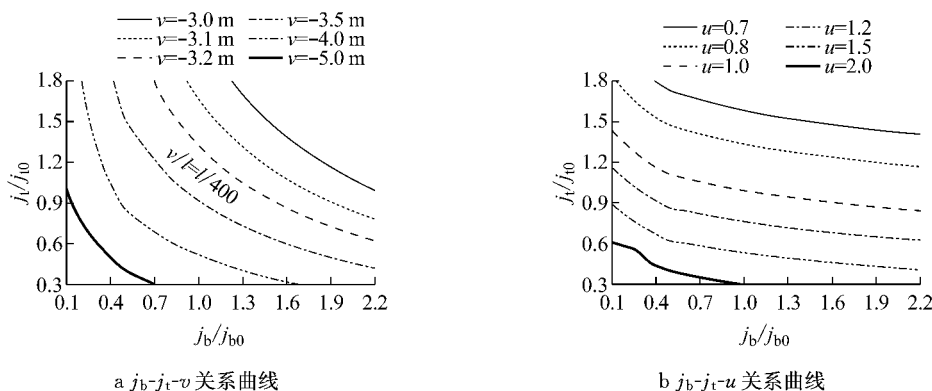
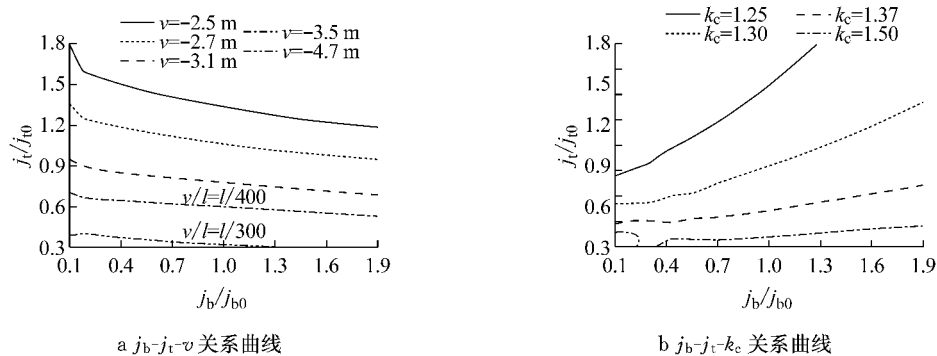


图 13 三塔斜拉桥 j_b - j_t - v 和 j_b - j_t - u 的关系曲线

Fig. 13 j_b - j_t - v and j_b - j_t - u relationship of cable-stayed bridge

图 14 为三塔协作桥的主梁刚度、中塔刚度和关键力学响应之间的关系曲线. 由图 14 可知: ①就 v 而言, 当 $j_t \geq 0.4j_{t0}$ 时, 始终满足 $v/l \leq l/300$; 当 $j_t \geq 0.7j_{t0}$ 时, 始终满足 $v/l \leq l/400$. ②就 k_c 而言, 当

$j_t \leq 0.3j_{t0}$ 时, 始终满足 $k_c \geq 1.50$. 参考悬索桥容许变形, $v/l = l/250 \sim l/300$, 则 $j_t = 0.3j_{t0}$ 时, $v/l \geq l/250$, 且 $k_c \geq 1.50$, 此时主梁刚度可任意取值.

图14 三塔协作桥 j_b-j_t-v 和 $j_b-j_t-k_c$ 的关系曲线Fig.14 j_b-j_t-v and $j_b-j_t-k_c$ relationship of cable-stayed suspension bridge

4 结论

(1) 对于悬索桥,中塔抗弯刚度是影响 v 和 k_c 的核心力学参数,其值增大时,两者均显著变小.矢跨比和中央扣是影响 v 和 k_c 的重要力学参数,矢跨比减小时,两者均变小,变化范围为 10%~20%.主梁刚度和塔梁间约束刚度对 v 和 k_c 的影响不大,两者变化不超过 3%.

(2) 对于协作桥,中塔抗弯刚度是影响 v 和 k_c 的核心力学参数,其值增大时,两者均显著变小.主梁刚度和中央扣是影响 v 和 k_c 的重要力学参数,增大主梁刚度可使 v 减小, k_c 增大,而设置中央扣虽能使 v 减小但 k_c 亦变小.塔梁间约束对 v 和 k_c 影响不大.矢跨比减小时, v 约减小 6%, k_c 约减小 31%.

(3) 对于斜拉桥,主梁刚度和中塔抗弯刚度是影响结构刚度的核心力学参数,其值增大时, v 变小,最大达 40%左右.塔梁间约束刚度是影响结构刚度的重要力学参数,其值增大时, v 变小,最大达 20%左右.

(4) 对于斜拉桥和协作桥,可通过主梁刚度和中塔刚度合理的配合来改善结构的关键力学性能.

参考文献:

- [1] 唐贺强,张强,杨光武. 马鞍山长江公路大桥三塔悬索桥结构体系选择[J]. 桥梁建设, 2011(1): 5.
TANG Heqiang, ZHANG qiang, YANG Guangwu. Selection of structural system for three-tower suspension bridge of Maanshan Changjiang River highway bridge [J]. Bridge Construction, 2011(1): 5.
- [2] 梁鹏,吴向男,李万恒,等. 三塔悬索桥汽车效应几何非线性[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(4): 45.
LIANG Peng, WU Xiangnan, LI Wanheng, et al. Geometrical nonlinearity under live load for three-tower suspension bridges [J]. Journal of Changan University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 45.
- [3] Yoshida O, Okuda M, Moriya T. Structural characteristics and applicability of four-span suspension bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 453.
- [4] 舒思利,王忠彬. 三塔悬索桥适应性及主缆抗滑移技术探讨[J]. 桥梁建设, 2010(5): 43.
SHU Sili, WANG Zhongbin. Study of adaptability and main cable slip resistance technique of three-tower suspension bridge [J]. Bridge Construction, 2010(5): 43.
- [5] 张燕飞,高宗余,梅新咏. 多塔大跨铁路斜拉桥方案研究[J]. 桥梁建设, 2010(3): 55.
ZHANG Yanfei, GAO Zongyu, MEI Xinyong. Study of options for multi-pylon long span railway cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2010(3): 55.
- [6] 周云岗,肖汝诚. 大跨径三塔缆索承重桥力学与经济性能[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(7): 982.
ZHOU Yungang, XIAO Rucheng. Economic and mechanical properties of large span three-tower cable supported bridges [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(7): 982.
- [7] 刘沐宇,聂俊青,汪峰. 三塔结合梁斜拉桥几何非线性精细化仿真分析[J]. 华中科技大学学报:城市科学版, 2010, 27(3): 1.
LIU Muyu, NIE Junqing, WANG Feng. Analysis on the composite girder cable-stayed bridge with three towers by geometrical nonlinear refined simulation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science, 2010, 27(3): 1.
- [8] 孙斌,肖汝诚. 基于 ANSYS 的桥梁几何非线性活载效应分析[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 51.
SUN Bin, XIAO Rucheng. Geometric nonlinear analysis of live load responses of bridges based on ANSYS [J]. Structural Engineers, 2010, 26(2): 51.
- [9] 焦常科,李爱群,王浩,等. 中央扣对三塔悬索桥地震反应的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2010, 40(1): 160.
JIAO Changke, LI Aiqun, WANG Hao, et al. Influence of central buckle on seismic response of triple-tower suspension bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(1): 160.
- [10] 陈策,钟建驰. 三塔悬索桥关键设计参数对其结构行为的影响[J]. 世界桥梁, 2008(2): 10.
CHEN Ce, ZHONG Jianchi. Impact of key design parameters of three-tower suspension bridge on structural behavior of the bridge [J]. World Bridges, 2008(2): 10.