

特大跨度混合梁斜拉桥几何控制法参数敏感性

谢明志^{1,2}, 卜一之¹, 张克跃², 王学伟¹, 翁方文³, 彭华军⁴

(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 土木工程系, 四川 峨眉山 614202; 3. 中交第二航务工程局有限公司技术中心, 湖北 武汉 430040; 4. 四川南渝高速公路有限公司, 四川 南充 637000)

摘要:为研究千米级混合梁斜拉桥边中跨结构力学行为特点及施工控制策略, 为后续的参数识别、误差修正及最优控制决策提供研究基础, 以主跨 926 m 的鄂东长江公路大桥为依托, 基于几何控制法, 并充分考虑非线性效应, 分析参数变化对成桥线形、内力的影响, 并明确了结构响应对参数的敏感程度。研究结果表明:千米级混合梁斜拉桥由于边中跨结构自重、刚度的悬殊, 致使边跨索力及应力对参数变化很敏感, 中跨则相反, 线形最敏感; 对主跨需采取几何线形控制为主, 边跨则应以索力控制为主的策略; 无应力状态量是影响边中跨结构响应的最主要参数; 边中跨结构行为及控制手段有别于全钢箱梁斜拉桥。施工实践表明实测值与理论结果吻合很好, 且结构受力状况良好。

关键词:桥梁工程; 混合梁斜拉桥; 几何控制法; 参数敏感性; 特大跨度

中图分类号:U445; U448.27

文献标志码:A

Sensitivity of parameters of super long-span hybrid girder cable-stayed bridge based on geometry control method

XIE Ming-zhi^{1,2}, BU Yi-zhi¹, ZHANG Ke-yue², WANG Xue-wei¹,
WENG Fang-wen³, PENG Hua-jun⁴

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Emeishan 614202, Sichuan, China; 3. Technology Center of CCCC Second Harbor Engineering Co Ltd, Wuhan 430040, Hubei, China; 4. Sichuan Nanyu Express Way Co Ltd, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract: For the study on the mechanical behaviors of the center and side spans of the thousand-meter-scale hybrid girder cable-stayed bridge and their construction control strategies so as to provide research basis for future parameter identification, error correction and optimal control, the Edong Yangtze River Bridge, with a main span of 926m, was used to analyze the structural response to parameter sensitivity on the basis of the geometry control method with full consideration of the structural nonlinear geometrical effect. Moreover, responses of configuration and internal force caused by parameters variation during completion state were studied. The results show that the cable force and girder stress in the side span are highly sensitive to variation in parameters, and the geometric profile in center span is more sensitive, which is attributed to the

differences in girder stiffness and weight between the center and side spans. Therefore, the main strategy of the center span control involves the geometric profile. On the contrary, cable force should be given more priority for side span control. The structural responses in both mid-span and side-span are mainly affected by unstressed constants. Both mechanical behaviors and control strategies in mid-span and side-span are different from the features of steel box girder cable-stayed bridge. Construction experience indicates that the theoretical calculation is in good accordance with the field results, and the structure is under control. 2 tabs, 13 figs, 16 refs.

Key words: bridge engineering; hybrid girder cable-stayed bridge; geometry control method; parameter sensitivity; super long-span

0 引言

传统的以索力和标高为主的斜拉桥施工控制方法因受外界环境、施工荷载、施工工艺等诸多限制,在特大跨度斜拉桥监控中的局限性已愈显突出,已较难满足施工精度及施工安全性等要求^[1]。为解决这一问题,国内外学者进行了大量研究。国外提出了“精度控制”这一理念,以构件的几何形态为基础,加大对制造、安装阶段的控制,这一研究成功地运用于日本多多罗大桥的修建;中国学者在长期深入研究的基础上,以苏通大桥为工程背景,发展了基于几何控制的全过程自适应施工控制系统,将传统的施工控制从主梁安装拓展到制造加工、安装整个全过程,实现了该桥的高质量施工控制^[2-4]。

自适应控制系统的特点在于能通过对关键参数的识别不断进行模型修正,使计算模型与结构实际情况相吻合。为达到该目的,不仅需要对该结构进行精确的计算分析,还需要采取一定的措施消除或限制误差的影响。参数敏感性分析是研究模型参数、模型输入或初始条件发生变化时对系统输出的灵敏度,探明影响结构主、次要参数,不敏感参数,量化结构力学行为与参数变化间的关系,是后续参数识别、误差修正的基础,对全面掌握结构施工和成桥行为特点、制定控制策略十分重要^[5]。鉴于参数敏感性分析的重要性,当前常规斜拉桥参数敏感性研究中,梁重、索力为影响结构力学行为的主要参数^[6-10]。国内外千米级斜拉桥正处于起步阶段,尤其是特大跨径混合梁斜拉桥,与常规斜拉桥、全钢梁斜拉桥相比,其结构、受力行为更复杂,基于几何控制理论进一步研究千米级混合梁斜拉桥参数敏感性,为超大跨度混合梁斜拉桥制造、安装阶段容许误差制定、参数识别、误差修正及最优控制决策提供分析基础,具有重要的理论及实践意义。为此,本文基于几何控制法的基本原理,充分考虑几何非线性影响,研究特大跨度混合梁斜拉桥参数变化对结构的影响,确定

结构响应对参数的敏感程度,揭示特大跨度混合梁斜拉桥力学行为及控制特点。

1 基于几何控制的参数敏感性

几何控制法以构件的无应力状态量为纽带,将斜拉桥建造中的过程状态和最终状态连接起来,其基本理论及基本思想为:几何体系一定的弹性结构在某一时刻的内力和变形状态唯一地取决于此刻结构所受的作用体系,而与此前结构构件的安装历程、作用的施加和变迁历程无关^[11-12]。基于此理论对特大跨度混合梁斜拉桥参数敏感性研究的创新性体现在:以结构的设计参数为基准,充分考虑几何非线性的影响,计算成桥内力及线形,并以此内力和线形确定索塔、主梁的无应力线形及无应力索长;以这些无应力关系作为敏感性分析的初始输入值,得到结构的响应为基准值,在敏感性分析中,探讨设计参数在可变化范围内对成桥线形和内力(包括拉索索力、主梁变形、塔偏、结构应力等)的影响,从而确定影响结构的关键参数。因此,需准确计算特大跨度混合梁斜拉桥相关构件的无应力状态量。

1.1 索塔、主梁无应力线形计算

目前计算索塔、主梁无应力线形主要有单元解体法、单元 CR 位移法、结构解体法、切线拼装迭代法。

特大跨度混合梁斜拉桥边跨多为满堂支架现浇、一次落架结构,由于支架的支撑作用,支架上的梁段均处于无应力状态,如下页图 1 所示,将结构在成桥的内力释放即可得到无应力线形,见式(1)。

$$H_t = H_c + \mathbf{K}^{-1}(-\{\mathbf{F}_m\}) \quad (1)$$

式中: H_t 为无应力线形; H_c 为成桥设计线形; \mathbf{K} 为结构刚度矩阵; $\{\mathbf{F}_m\}$ 为与结构内力状态等效的荷载向量;负号表示将其释放,且

$$[\Delta] = \mathbf{K}^{-1}\{\mathbf{F}_m\} \quad (2)$$

式中: Δ 为满足成桥线形在施工期所设置的预拱度。

对于主跨钢结构,主要采取悬臂拼装的方式进行施工。在工厂胎架上预拼装的线形即为钢主梁无

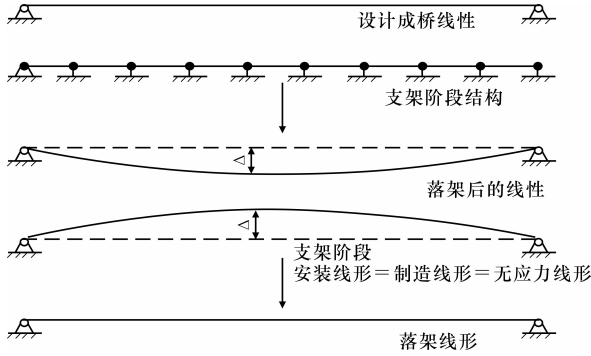


图 1 一次落架无应力线形

Fig. 1 Unstrained geometry with whole support

应力线形。主跨无应力线形计算采用切线位移法,以无重单元(即重度为 0)一次生成(合龙段除外)。施工至某一梁段,施加该梁段的自重及其他相应荷载,其余未施工梁段质量保持为 0,并且按切线方向做相应的刚体平动和转动。计算分析时以设计成桥线形为基础,按切线拼装迭代法求解钢主梁无应力线形。该方法思路清晰,且易于编程计算,与实际施工较符合,应用较广泛。

1.2 拉索无应力长度计算

拉索无应力长度是指斜拉索处于零应力状态下的长度。根据成桥锚点坐标及索力,以拉索两端节点的几何长度减去轴向伸长即为无应力索长。特大跨度混合梁斜拉桥,由于拉索长度增加,拉索的垂度效应明显,按抛物线理论计算会带来较大误差,以悬链线理论可满足千米级混合梁斜拉桥无应力索长精度要求^[13-14]。无应力索长计算如图 2 所示。图中, T_1 为梁端锚固点处拉索索力, H_1 为梁端锚固点处拉索所受的水平分力, V_1 为梁端锚固点处拉索所受的竖直分力, λ_1 为梁端拉索锚点处拉力与其水平分力 H_1 的夹角; T_2 为塔端锚固点处拉索索力, H_2 为塔端锚固点处拉索所受的水平分力, V_2 为塔端锚固点处拉索所受的竖直分力, λ_2 为塔端拉索锚点处拉力与其水平分力 H_2 的夹角。由于混合梁斜拉桥较钢斜拉桥受混凝土收缩徐变的影响很大,故边跨拉索无应力长度需充分考虑混凝土收缩徐变进行迭代计算^[15]。

拉索伸长量为

$$\Delta l = \frac{H_1}{EA} \left\{ \frac{H_1}{4g_{cb}} \sinh \left[\frac{2g_{cb}a}{H_1} + 2\sinh^{-1}(\tan(\lambda_1)) \right] - \frac{H_1}{4g_{cb}} \sinh[2\sinh^{-1}(\tan(\lambda_1))] + \frac{a}{2} \right\} \quad (3)$$

斜拉索的应力长度为

$$l = \int_0^a \sqrt{1+y'^2} dx =$$

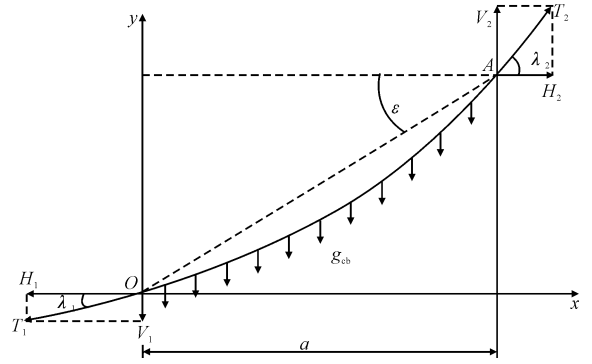


图 2 拉索受力变形

Fig. 2 Cable deformation

$$\frac{H_1}{g_{cb}} \{ \sinh \left[\frac{g_{cb}a}{H_1} + \sinh^{-1}(\tan(\lambda_1)) \right] - \tan(\lambda_1) \} \quad (4)$$

斜拉索的无应力长度为

$$l_0 = l - \Delta l \quad (5)$$

式中: E 为拉索弹性模量; A 为拉索截面面积; g_{cb} 为单位长度斜拉索的质量; a 为拉索右水平方向的投影; l_1 为拉索锚点处拉力与拉索水平分力 H 的夹角。

2. 参数变化对结构的影响分析

2.1 研究对象

鄂东长江公路大桥位于湖北省长江中游黄石市与鄂州市交界区域,主桥跨径布置为 $3 \times 67.5 + 72.5 + 926 + 72.5 + 3 \times 67.5$ m 的九跨连续半漂浮双塔混合梁斜拉桥,如下页图 3 所示。跨径仅次于香港昂船洲大桥,居世界同类型桥梁第 2,也是中国大陆的首座千米级混合梁斜拉桥。该桥采用几何控制法进行施工监控。

2.2 结构分析模型

采用西南交通大学桥梁工程系研发的大型复杂桥梁非线性施工全过程仿真分析软件 NLABS 计算分析,充分考虑了拉索垂度效应、梁柱效应、大位移效应等几何非线性效应,建立平面杆系模型。该模型共 1 534 个单元,1 106 个节点,其中带钢臂单元数为 120 个,用于模拟斜拉索,定义了 306 个截面类型。由于地质条件较好,模型中未考虑地基刚度,近似按塔底固结模拟。

2.3 研究参数选取

特大跨度混合梁斜拉桥体系独特,施工复杂,影响参数较多,如梁重、无应力关系、混凝土收缩徐变等。设计阶段计算分析通常假定这些参数为理想值,以此计算成桥标高及内力,确定合理的成桥状态。但施工过程中,由于种种因素所带来的误差,参数不可能时时处于理想值,若仍以原始理论值计算,

将达不到理想的成桥状态。因此,需全面研究参数变化对成桥的影响,确定结构响应的敏感程度。本文结合实际情况,基于几何控制法,充分考虑特大跨

度混合梁斜拉桥全过程出现的误差,研究的参数及变化范围见表 1^[16]。表中边跨混凝土参数变化范围均以设计值为基准上下浮动。

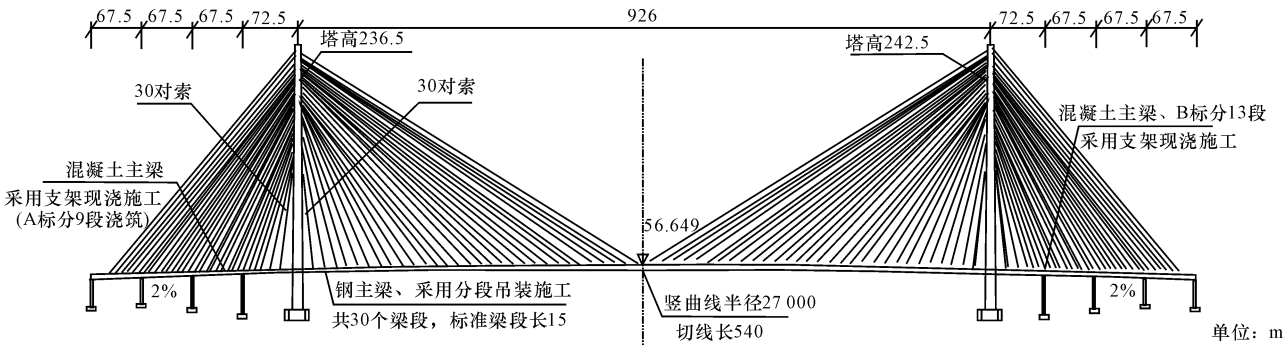


图 3 鄂东大桥总体布置
Fig. 3 General view of Edong Bridge

表 1 参数类别及变化范围

Tab. 1 Sorts and variable ranges of parameters

参数	变化范围	参数	变化范围	参数	变化范围
索塔刚度	$\pm 2\% \sim \pm 8\%$	钢主梁质量	$\pm 2\% \sim \pm 5\%$	混凝土主梁质量	$\pm 2\% \sim \pm 5\%$
钢主梁刚度	$\pm 2\% \sim \pm 5\%$	收缩徐变	参照规范 JTJ 023—85	桥面吊机	增加 10 t、20 t、30 t
混凝土梁锚点 y	$\pm 20 \sim \pm 30$ mm	塔高	$\pm 10 \sim \pm 20$ mm	边跨 H、J 跨支架刚度	减少 20%
拉索弹模	$\pm 2\% \sim \pm 5\%$	拉索质量	$\pm 2\% \sim \pm 5\%$	减少 20%	边跨 I、K 跨支架刚度
混凝土主梁刚度	$\pm 2\% \sim \pm 5\%$	钢梁锚点 x	$\pm 10 \sim \pm 15$ mm	所有支架刚度	减少 20%
无应力索长	误差上下限~2 倍误差上下限	混凝土梁锚点 x	$\pm 20 \sim \pm 30$ mm	塔区支架刚度	减少 20%
塔轴线偏离	塔偏黄石侧 L/2 000、塔偏向岸侧 L/2 000、塔偏向江侧 L/2 000				

2.4 敏感性研究

进行参数敏感性研究过程中,首次迭代的安装线形以基准状态下的无应力线形代入计算,钢主梁一次无重生成(合龙段除外),在此基础上,研究参数变化对结构响应的影响。由于参数的变化,势必导致合龙时两侧出现过大的相对转角,钢主梁无应力夹角发生变化,若不采取任何措施,强行合龙,将影响成桥内力及线形,这亦不符合几何控制的基本原理。因此,需将合龙口两侧 3~5 个梁段调平顺(通过拉索的张拉改变索长实现),合龙以后再将索长调回至调前的对应值,这样即可保证无应力关系与成桥的一致。图 4 以钢主梁质量增加 5% 为例说明合龙前调索。在参数敏感性研究中,分析单个参数变化对结构产生影响时,其余参数与基准模型保持一致。本文研究均按此原则进行。

因南北岸结构、受力对称、钢箱梁质量、拉索无应力长度、拉索弹模、混凝土主锚点坐标变化对结构的影响仅以一半结构分析,如下页图 5~图 9 所示。限于篇幅,其余参数变化对结构成桥内力和位移的

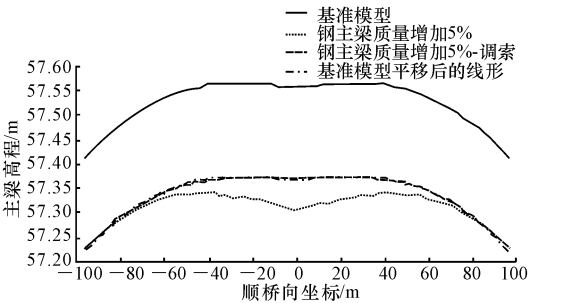


图 4 合龙口调索线形对比

影响汇总于下页表 2。表中的计算数均以参数变化后结构响应与基准状态下的最大绝对差值输出。

从图 5 及表 2 可看出,中跨主梁线形对拉索弹模、钢柱梁质量、无应力索长相当敏感,最大变化均出现在中跨。拉索弹模变化对主跨线形变化量影响达 270.0 mm。对于斜拉索,无应力长度的计算与弹模大小息息相关,两者相互影响,因此提高拉索的制造精度无疑对保证成桥线形满足设计要求至关重要,亦是几何控制法的关键。对边跨混凝土而言,参

数变化范围内,其线形变化微乎其微,不足10 mm。边中跨线形对参数敏感性出现不同差异主要在于中跨钢箱梁刚度小、结构柔,边跨混凝土自重、刚度较大,形成强大的锚跨。对比文献[17],可看出全钢斜拉桥与混合梁斜拉桥对参数变化的不同反应。混合梁斜拉桥边跨可充分发挥自锚作用。

表 2 参数变化对结构成桥的最大响应

Tab. 2 Maximum responses upon completion of bridge caused by parameters variation

参数类别	线形最大变化/mm	索力最大变化/t	应力最大变化/MPa	塔偏最大变化/mm
拉索弹模	270.0	27.244	7.604	58.2
钢主梁质量	227.9	20.167	7.204	46.4
无应力索长	215.4	35.605	10.200	48.3
混凝土梁锚点 y	82.4	34.875	6.215	37.3
混凝土梁锚点 x	77.5	4.420	1.327	35.1
塔高	72.8	27.387	6.942	24.6
收缩徐变	48.3	6.576	4.422	17.9
钢梁锚点 x	38.0	3.261	3.224	0
钢主梁刚度	18.3	3.194	4.389	0
塔轴线偏离	18.3	6.237	3.029	120.3
索塔刚度	17.4	4.303	0.972	5.1
混凝土主梁质量	11.8	6.306	3.114	2.7
混凝土主梁刚度	11.6	2.875	4.252	3.7
拉索质量	11.3	3.591	0.575	2.6
桥面吊机	10.9	2.789	3.617	1.0
支架刚度	0.9	0.925	1.100	0.4

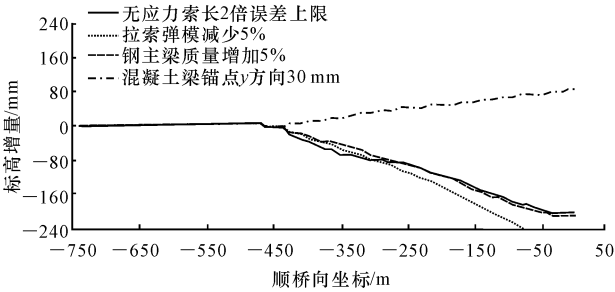


图 5 参数变化对泔水侧成桥线形的影响

Fig. 5 Impact on geometry of Xishui upon completion of bridge caused by parameters variation

混合梁斜拉桥,边跨浇筑过程中振捣混凝土等施工误差对锚点坐标的影响不容忽视。从表 2 可看出,混凝土梁锚点的变化及塔高变化亦是影响主梁线形的重要因素。主要在于锚点坐标的变化势必会导致索长变化,从而索力发生变化,影响主跨的竖向位移。桥面吊机作为临时荷载,对主梁线形的影响仅 10.9 mm,对主跨 926 m 的鄂东桥而言基本可忽

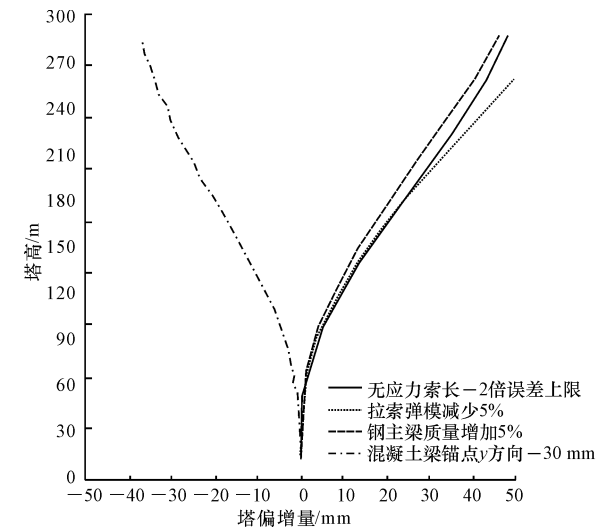


图 6 参数变化对成桥北塔塔偏的影响

Fig. 6 Impact on north pylon top deviation upon completion of bridge caused by parameters variation

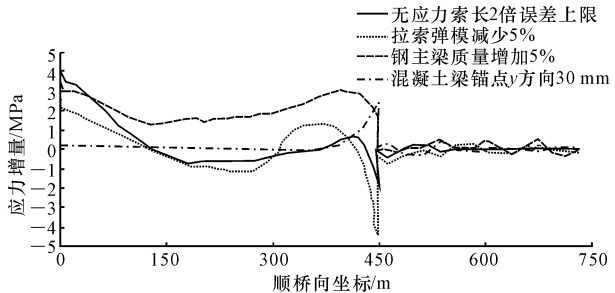


图 7 参数变化对黄石侧主梁成桥上缘应力影响

Fig. 7 Impact on girder stress of top flange of Huangshi upon completion of bridge caused by parameters variation

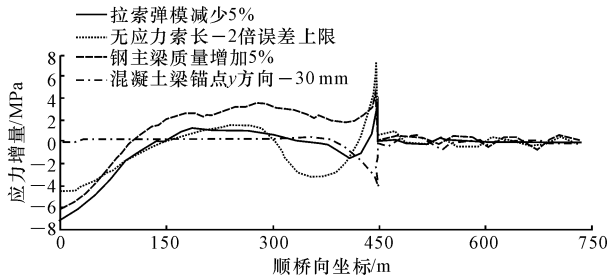


图 8 参数变化对黄石侧主梁成桥下缘应力影响

Fig. 8 Impact on girder stress of bottom flange of Huangshi upon completion of bridge caused by parameters variation

略不计,差异主要来自于调整合龙口时存在的微小偏差,几何控制法基本理论、基本思想亦得到验证。

参数变化对塔偏的影响如图 6 及表 2 所示。成桥塔偏对塔轴线初始偏离最为敏感,其影响可以达到 120.3 mm;对拉索弹模、无应力索长、钢主梁质量、混凝土锚点坐标变化、塔高、收缩徐变较敏感;对其他参数不敏感。由于塔轴线初始偏移改变了塔的无应力线形,从而验证了构件保持精确无应力线形

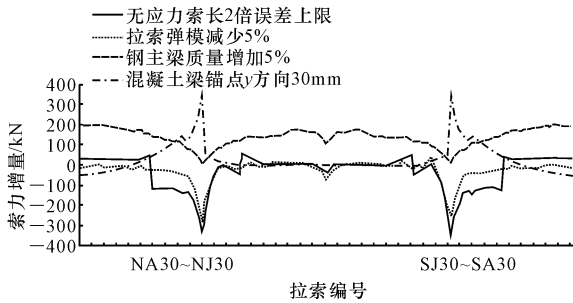


图9 参数变化对成桥索力的影响

Fig. 9 Impact on cable-force upon completion of bridge caused by parameters variation

的重要性;此外,桥面吊机作为临时荷载,其质量的变化对其影响基本为0,再次验证了几何控制法的基本原理。因此,制造阶段需严格控制拉索的无应力长度及弹模,准确确定梁段的质量;施工中,若发现塔轴线发生偏移,可通过调整索长的方式消除或减少其带来的不利影响。

混合梁斜拉桥,由于边跨混凝土自身特点,在施工及成桥阶段需特别关注其应力的变化,建立预警机制。从图7、图8及表2可看出主梁应力对无应力索长、拉索弹模、钢主梁质量、塔高、混凝土梁锚点 y 最为敏感;对收缩徐变的影响、钢主梁刚度、混凝土主梁刚度较敏感;对其他参数不敏感。与基准情况相比,参数变化时,岸侧为压应力,且波动小;对江侧而言数值变化虽比岸侧大,但因钢结构抗拉、抗压能力均比混凝土强,不影响结构安全,对比图5可看出,其变化值对结构的影响相对线形变化不是很明显。计算分析表明,参数变化对钢主梁线形的影响比应力明显、直接;对边跨混凝土线形影响虽不到10 mm,但应力变化占边跨箱梁总应力25%,边主跨的受力相互影响较小,混合梁斜拉桥的结构行为有一定的独立性;全桥应力变化最明显即应力变化最大值均在钢混结合段处,这一结果与混合梁斜拉桥受力特性相对应。这一区域不仅是结构、材料的过渡区,更是受力发生突变的区域。该区域的合理与否很大程度上将决定全桥受力性能,因此在设计、施工时均应展开更深入的研究。

参数变化对成桥索力的影响如图9及表2所示。成桥索力对无应力索长、混凝土梁锚点 y 坐标最为敏感,索力变化达356.1 kN;对塔高、拉索弹模、钢主梁质量、混凝土收缩徐变、混凝土主梁质量、塔轴线偏离、混凝土梁锚点 x 方向、索塔刚度较敏感;对其他参数则不敏感。计算分析表明,索力最大变化在岸侧,均位于岸侧近塔端1~3索之间。主要

由于主跨钢结构较柔,边跨混凝土自重及刚度较大造成,且索力的分配与主梁的刚度、质量息息相关。

参数变化对成桥线形、塔偏、应力及索力的影响分析中可以看出,混合梁斜拉桥因边中跨自重、刚度差异、边跨索力和应力对参数较敏感,中跨则相反,线形最敏感,这就形成主跨采取几何线形控制为主,索力控制为辅,边跨部分则以索力控制为主的控制策略,亦是混合梁斜拉桥与全钢斜拉桥的最大差异。此外,支架刚度对结构的影响较小,原因在于本桥支架设计刚度较高,在可变范围内,其变形小。

3 成桥状态

鄂东桥采取基于几何控制的全过程自适应施工控制,通过敏感性研究,对制造加工、梁段安装、拉索张拉进行严格控制。施工中出现误差时,基于成桥目标线形及索力对模型予以修正。大桥竣工后实测结果与理论值吻合很好,证实上述研究、控制理念的有效性、实用性。

从图10可看出,中跨成桥线形平顺、光滑,与成桥设计目标线形吻合良好。最大线形误差为131 mm,为跨度的1/7 015,满足监控手册中的线形控制目标要求。由下页图11~图13可看出,成桥索力、应力、边跨线形与理论值吻合很好,最大线形误差11 mm,边跨全截面受压,最大应力远小于容许应力。边中跨采取不同的控制策略,对千米级混合梁斜拉桥的施工监控取得很好的效果。大桥的施工经历了气温骤降、风力较大、降雪等复杂环境因素的考验,亦充分体现几何控制法受环境影响小的特点。

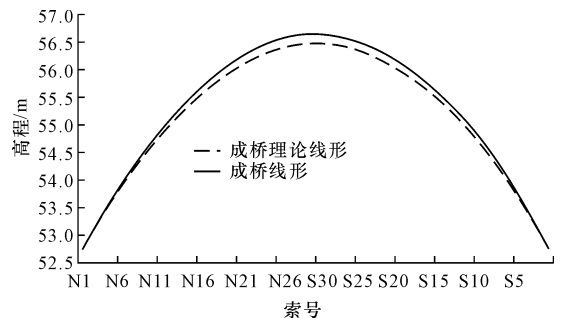


图10 中跨成桥线形对比

Fig. 10 Comparison of profiles of middle span upon completion state

4 结 语

(1)大跨度混合梁斜拉桥其独特的结构特点,边中跨刚度、自重差异大,致使主跨主梁线形对参数的变化相当敏感,边跨的索力对参数变化很敏感,且边

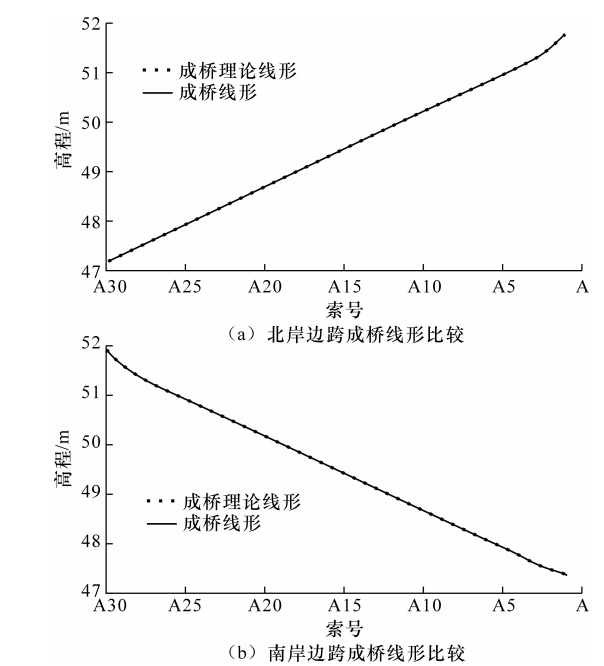


图 11 边跨成桥线形对比
Fig. 11 Comparison of profiles of side spans upon completion state

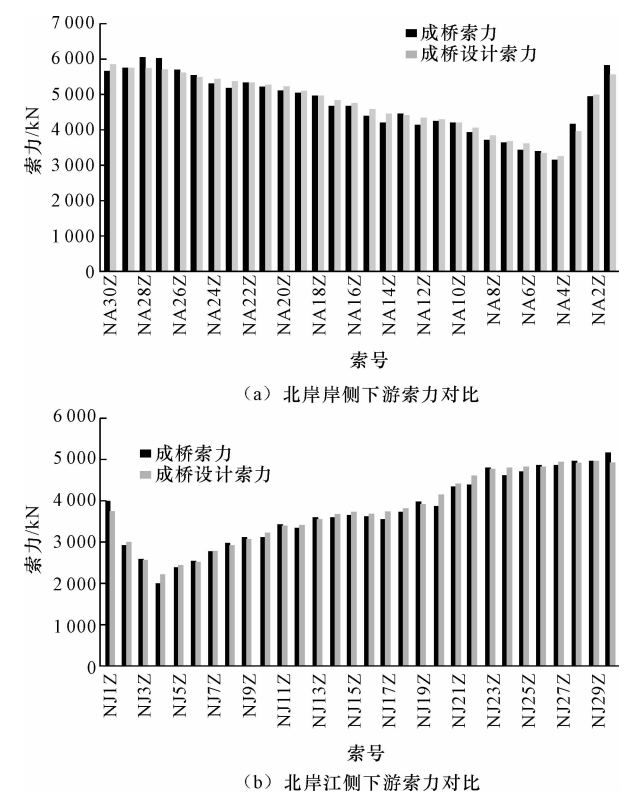


图 12 北岸索力对比

Fig. 12 Comparison of cable forces in north side

跨混凝土在施工及成桥需严密关注应力的发展情况;与全钢梁斜拉桥不同,边、主跨在受力上具有相对的独立性。这就形成对主跨采取几何线形控制为主,索力控制为辅,边跨则以索力控制为主的原则。

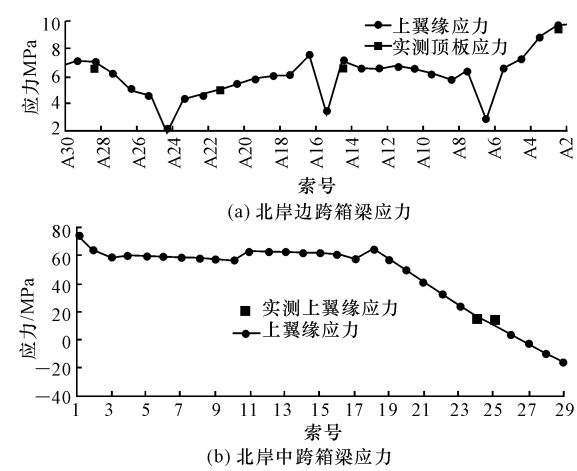


图 13 北岸应力对比
Fig. 13 Comparison of girder stresses in north side

(2)与全钢斜拉桥不同,混合梁斜拉桥边跨的自重、量刚度很大,锚固作用强,混凝土自重、刚度在实际可变化范围内对边主跨线形、塔偏、索力、应力的影响较小,属不敏感参数。

(3)混合梁斜拉桥收缩徐变按新旧桥梁规范计算对结构响应的影响不容忽视,在进行无应力线形的迭代求解,以及收缩徐变对锚点坐标的影响从而影响无应力线形的求解时,需充分考虑收缩徐变。

(4)结构响应对无应力索长、混凝土锚点坐标、塔高及塔轴线偏移等无应力状态量相当敏感,临时荷载对成桥状态未产生影响,进一步阐明基于几何控制的全过程自适应施工控制的重要性、方便性,需对构件无应力状态量严格控制。工程实践表明,该方法对环境的依赖性较小,适合千米级混合梁斜拉桥的施工监控,对其他大型结构的施工控制具有重要的借鉴和参考意义。

(5)参数敏感性分析为超大跨度斜拉桥制造、安装阶段容许误差制定、参数识别、误差修正及最优控制决策提供分析基础。本文研究的重点在于单参数最不利变化对结构的影响,未计入多参数概率组合、相互耦合的变化。考虑上述效应,更具有普遍意义的参数变化对结构的影响将是下一阶段研究的重点,也是特大跨度桥梁研究的关键课题。

参考文献: References:

[1] 石雪飞,项海帆. 斜拉桥施工控制方法的分类分析[J]. 同济大学学报,2001,29(1):55-59.
SHI Xue-fei, XIANG Hai-fan. Analysis of construction control systems of cable-stayed bridge[J]. Journal of Tongji University,2001,29(1):55-59. (in Chi-

- nese)
- [2] Hirahara N. Erection of superstructure of tatara bridge (report I)-tower erection and large block erection of deck at tower[J]. Honshi Technical Report, 1997(21):33-40.
 - [3] 李 乔, 卜一之, 张清华. 基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7):69-77.
LI Qiao, BU Yi-zhi, ZHANG Qing-hua. Whole-procedure adaptive construction control system based on geometry control method [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7):69-77. (in Chinese)
 - [4] Liu X G, Fan J S, Nie J G, Li G. Behavior of composite rigid frame bridge under bi-directional seismic excitations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(1):62-71.
 - [5] Lüdtke N, Banzeri S, Brown M, et al. Information-theoretic sensitivity analysis; a general method for credit assignment in complex networks[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2008, 5(19):223-235.
 - [6] 赵 雷, 孙才志, 陈文元. 大跨度结合梁斜拉桥的参数敏感性分析[J]. 世界桥梁, 2011(6):38-41.
ZHAO Lei, SUN Cai-zhi, CHEN Wen-yuan. Analysis of parameter sensitivity of long span composite girder cable-stayed bridge[J]. World Bridges, 2011(6):38-41. (in Chinese)
 - [7] 刘旭政, 黄平明, 许汉铮. 独塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(6):63-66.
LIU Xu-zheng, HUANG Ping-ming, XU Han-zheng. Analysis of parameters' sensitiveness of cable-stayed bridges with single tower[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2007, 27(6):63-66. (in Chinese)
 - [8] 武芳文, 赵 雷. 大跨度斜拉桥施工力学行为参数敏感性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(6):124-130.
WU Fang-wen, ZHAO Lei. Analysis of sensibility of constructional mechanical behavior of large-span cable-stayed bridges to constructural parameters[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(6):124-130. (in Chinese)
 - [9] 秦顺全. 无应力状态控制法——斜拉桥安装计算的应用[J]. 桥梁建设, 2008(2):13-16.
QIN Shun-quan. Application of unstressed state control method to calculation for erection of cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2008(2):13-16. (in Chinese)
 - [10] 李 乔, 卜一之, 张清华, 等. 大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2009.
LI Qiao, BU Yi-zhi, ZHANG Qing-hua, et al. Introduction and application of geometric control in whole construction process of the long span cable-stayed bridge[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009. (in Chinese)
 - [11] 孙立山. 大跨度混合梁斜拉桥几何控制计算方法[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
SUN Li-shan. Geometry control method in long-span hybrid girder cable stayed bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
 - [12] 孟庆成, 齐 欣, 李 乔, 等. 千米级斜拉桥斜拉索相关参数计算方法[J]. 桥梁建设, 2009(2):58-60, 75.
MENG Qing-cheng, QI Xin, LI Qiao, et al. Algorithm for relevant parameters of stay cables of cable stayed bridge with span length of 1 000 m scale[J]. Bridge Construction, 2009(2):58-60, 75. (in Chinese)
 - [13] 梁 鹏, 肖汝诚, 徐 岳. 超大跨度斜拉桥的安装构形与无应力构形[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(4):49-53.
LIANG Peng, XIAO Ru-cheng, XU Yue. Assembled geometry and unstrained geometry of super long span cable-stayed bridges[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(4):49-53. (in Chinese)
 - [14] 赵灿晖, 卜一之. 超大跨混合梁斜拉桥施工控制技术[R]. 成都:西南交通大学, 2011.
ZHAO Can-hui, BU Yi-zhi. Construction control technology of large span hubrid girder cable-stayed brige [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
 - [15] 谢明志. 特大跨度混合梁斜拉桥全过程监控中的误差控制 [D]. 成都:西南交通大学, 2011.
XIE Ming-zhi. Error-control of whole-procedure construction control in super Long-span hybrid girder cable-stayed bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
 - [16] Li Q, Dong X W, Huang C, et al. Sensitivity analysis of structural parameters for super-span cable-stayed bridge and its application[C]//EASEC. The Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11). Taipei: EASEC, 2008:305-312.