

大跨径自锚式斜拉-悬索协作体系桥非线性随机静力分析

朱巍志*, 张哲, 潘盛山

(大连理工大学 桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 自锚式斜拉-悬索协作体系桥综合了斜拉桥和自锚式悬索桥的特点, 完全取消了庞大的锚碇, 为深海软基建设大跨径桥梁提供了一种理想方案. 对自锚式斜拉-悬索协作体系桥进行了确定性非线性分析并应用响应面法进行了非线性随机静力分析, 算例研究结果表明, 各种随机变量的变异对自锚式斜拉-悬索协作体系桥响应影响规律不同, 同其他随机变量相比, 主缆弹性模量和截面面积的变异对桥梁跨中挠度影响最为显著, 其次是钢主梁参数, 而吊杆参数的变异对其影响可以忽略不计.

关键词: 自锚式斜拉-悬索协作体系; 几何非线性; 随机静力分析; 响应面法

中图分类号: U448.25 **文献标志码:** A

0 引言

目前我国正在规划中的沿海公路上有很多大型的跨海工程, 必须修建超大跨径的桥梁, 这些跨海大桥的基础一般都要建造在水中, 另外有的桥位为软土地基, 有的桥位位于强台风区, 不适合建造大跨度的悬索桥. 还有的桥位处于深水区, 如果建设悬索桥则会使锚碇的造价十分昂贵, 而斜拉桥又受到跨径的限制. 基于以上原因, 为这些跨海桥梁寻找合理的超大跨度体系就显得非常必要^[1].

在桥梁向超大跨径发展的过程中, 国内外专家和学者多次提到斜拉-悬索协作体系桥. 这种桥型能够充分发挥斜拉桥和悬索桥各自的优势, 不仅较大幅度地提高了大跨度桥梁的跨越能力、整体稳定性及结构的自身刚度, 并且提高了结构在施工阶段的安全性, 斜拉部分的加入降低了塔高, 具有很好的结构性能和显著的经济效益. 目前提出的斜拉-悬索协作体系桥梁方案均为地锚体系, 需要庞大的锚碇, 特别是在海上, 会使施工难度增大、工程造价提高. 大连理工大学桥梁工程研究所提出自锚式斜拉-悬索协作体系桥, 不仅可以避免以上问题造成的不利影响, 而且经济性能好, 对地质状况和地形的适应性强^[2].

在进行桥梁结构分析时, 一般都采用简化计

算模型, 但为尽可能地与实际相符合, 考虑外部荷载等因素及结构中物理参数的不安全因素的影响而引入了一些经验系数. 分析时采用的外部荷载等因素和结构参数都是确定的, 因而桥梁结构分析也不是随机的, 是确定性的. 但是建成后的结构与计算分析时所采用的结构几何尺寸和材料必然存在着差异和随机性, 因此在桥梁的设计分析时非常有必要考虑材料、尺寸、外部荷载等的随机性^[3]. 对于大跨自锚式斜拉-悬索协作体系桥这种柔性结构来说, 在设计分析时非常有必要计入几何非线性效应对结构的影响. 目前研究随机性的方法主要是随机有限元, 但其必须通过改造确定性有限元并与随机场理论相结合, 通过考察每个随机变量在均值附近的摄动来研究结构的随机性, 另外为了确定随机响应的统计特性, 需要有足够容量的个体. 因此对个体的计算工作量和计算效率将会直接影响到整个随机统计过程特性计算的工作量和工作效率^[4]. 而响应面法是研究结构随机性的一种有效方法, 它不需改造已有的有限元程序. 本文运用响应面法, 考虑自锚式斜拉-悬索协作体系桥的几何非线性效应及几何尺寸、材料特性等的随机性, 对其进行确定性几何非线性分析和非线性随机静力分析.

1 响应面法

为避免改造确定性有限元程序,龚尧南等用响应面法替代摄动法来提高计算效率,对桁架和板壳的稳定性进行了非线性随机分析^[5]. Hopperstad等采用响应面法将铝构件的屈服应力作为结构响应得到了其与结构随机变量之间的关系,对其材料非线性进行了随机分析^[6].

在大型的复杂结构中,结构响应 $R(x)$ 与随机变量 x 之间的关系不能显式表达时, $R(x)$ 近似地用 $\tilde{R}(x)$ 代替. Bucher 等建议 $\tilde{R}(x)$ 的表达式使用不含交叉项的二次项表达:

$$\tilde{R}(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (1)$$

式中: $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为随机变量,可以为结构的材料特性、几何尺寸以及外部荷载等; $a, b_i, c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为待定参数. 每一组随机设计变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 都对应一个响应值 $\tilde{R}(X)_i$, 为了确定式(1)右端 $a, b_i, c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 共计 $2n+1$ 个未知参数,需要进行 $2n+1$ 组试验. Bucher 等建议 x_i 的值可以取用均值 μ_i 和 $x_i = \mu_i \pm f_i \sigma_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ^[7]. 其中 μ_i 和 σ_i 分别为随机设计变量 x_i 的均值和标准差, f_i 为任意值,利用确定性有限元分析程序,可以计算出 $2n+1$ 个结构响应值 $\tilde{R}(X)_i$. 求出待定参数后,结构响应 $R(X)$ 与随机设计变量 X 之间的关系可以显式表达得到^[8]. 响应面法可以采用线性或非线性的结构分析模型. 本文对于自锚式斜拉-悬索协作体系桥采用几何非线性力学分析模型.

2 自锚式斜拉-悬索协作体系桥的几何非线性分析

自锚式斜拉-悬索协作体系桥是一种典型的缆索承重桥,该种类型的桥梁是由塔、梁、索这3种基本构件构成的承重结构体系,一般表现为柔性的受力特性^[9]. 随着桥梁跨度的增大,结构刚度急剧下降,将产生明显的非线性效应. 自锚式斜拉-悬索协作体系桥兼具自锚式悬索桥和斜拉桥的特点,所以非线性影响因素更为复杂. 引起自锚式斜拉-悬索协作体系桥几何非线性的因素主要有3个方面^[10]: 缆索自重垂度效应、初始内力对结构刚度的影响及结构大位移影响.

2.1 缆索自重垂度效应

主缆和斜拉索在自由悬挂状态下会产生垂

度,当索的轴力发生变化时,其垂度也会发生变化,垂度的变化又会导致索弦长的变化. 弦长的变化与索轴力的变化是一个非线性的关系^[11]. 在考虑缆索自重垂度时最常用的有限元计算方法是梁单元等代法和 Ernst 公式修正法. 其中 Ernst 修正法是用杆单元来模拟缆索单元,并用 Ernst 修正公式对杆单元进行修正,但是这种近似的方法只适合于小位移、高应力情况;梁单元等代法是用多个刚度很小的梁单元模拟曲线缆索,这样不仅使得求解自由度增多,而且计算不容易收敛. 本文在进行几何非线性计算时采用的是弹性悬链线索单元,在索单元的切线刚度矩阵中已经计入了缆索自重垂度的影响.

2.2 初始内力对结构刚度的影响

在进行自锚式斜拉-悬索协作体系桥的几何非线性分析时,切线刚度矩阵中所包含的单元变形是总变形,其包括初始状态时单元由初始内力引起的变形和由单元初始状态到最终状态的变形两部分. 所以在计算单元的刚度矩阵时必须计入由初始内力引起的单元变形. 由于结构产生了变位,初始状态下结构的内力与外力的平衡条件在新的状态下已经不再成立,不平衡力将会产生,如荷载一样作用于结构,使得外荷载对结构的作用表现出非线性^[12]. 通常初始状态下结构处于稳态平衡,后续的荷载要打破这种平衡而建立新的平衡必须消耗能量. 因此初始内力的影响总是会抵消外力的作用,即初始内力改变了结构刚度,称之为结构的内力刚度. 初始状态的内力一般都是由自重引起的,所以,内力刚度通常又被称为重力刚度^[13].

对于一般的地锚式悬索桥,只要输入缆索部分的初始拉力来构成其初始的几何刚度矩阵就可以了,也就是说重力刚度只增加了缆索的几何刚度,所以地锚式悬索桥考虑重力刚度计算时得到的加劲梁挠度要小于线性分析的结果,而自锚式斜拉-悬索协作体系桥有所不同,恒载作用下结构的初始内力不但改变了缆索的几何刚度,而且恒载作用下缆索对加劲梁和主塔的轴向压力造成了加劲梁和主塔初始几何刚度的变化. 本文在进行非线性计算分析时发现,不计入加劲梁和主塔初始轴力效应对计算结果影响很大,所以本文在非线性的计算时按自锚式斜拉-悬索协作体系桥成桥状态缆索、加劲梁及主塔的内力构成计算模型的初始几何刚度矩阵,在此基础上进行非线性的迭代分析.

2.3 结构的大位移效应

结构大位移是缆索承重结构最主要的非线性影响因素。自锚式斜拉-悬索协作体系桥在受到外荷载作用时,不仅加劲梁和缆索会发生下挠,而且吊索也将伸长和倾斜,索塔被压缩,都对结构的内力产生影响。因此在进行结构分析时,力的平衡方程必须依据变形后的结构几何位置来建立,力与变形的关系是非线性的^[14]。本文在进行几何非线性分析时采用的是 CR 全量法,该方法没有小转动限制,没有误差累积的缺点,且求解精度与荷载步个数无关,大大提高了计算精度和效率。

3 算例分析

大连港主通航孔推荐方案为主跨 800 m 的自锚式斜拉-悬索协作体系桥(以下简称“大连跨海大桥”),桥梁全长 1 326 m。主塔采用 H 形双塔柱索塔,辐射型索面,其总体布置见图 1。全桥主梁分钢梁和预应力混凝土梁两部分,跨中悬吊部分采用钢箱梁,斜拉部分采用预应力混凝土箱梁。其截面参见图 2 和 3。全桥共设有 288 根斜拉索,31 对吊索。

为研究自锚式斜拉-悬索协作体系桥的材料变异和几何尺寸的随机性对其挠度的影响,结构随机变量可以取为主缆、吊索、斜拉索、主塔、加劲梁的弹性模量 E_i 和主缆、吊索、加劲梁的截面面积 A_i 以及加劲梁的抗弯惯性矩 I_i , 共计 12 个随

机变量,统计参数见表 1,为保证各项参数计算时取值的真实可靠性,各项随机变量根据构件类型和参数类型选择不同的变异系数。由于采用平面模型进行确定性有限元非线性计算,其中主缆和吊索的面积均值分别为横截面上两根主缆和两根吊索的面积。有限元计算采用 MIDAS/Civil 计算软件。

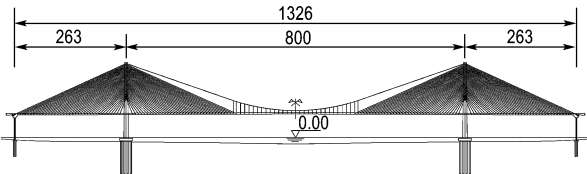


图 1 大连跨海大桥总体布置图(单位:m)
Fig. 1 Arrangement diagram of Dalian Gulf Bridge (unit: m)

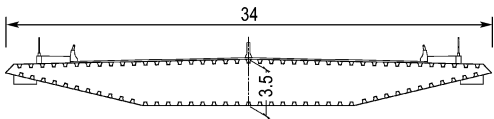


图 2 钢梁截面(单位:m)
Fig. 2 Steel-girder section (unit: m)

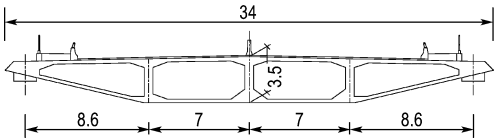


图 3 混凝土梁截面(单位:m)
Fig. 3 Concrete-beam section (unit: m)

表 1 随机变量参数

Tab. 1 Parameters of stochastic variables

随机变量类型	构件类型	随机变量及单位	分布类型	均值	标准差
弹性模量 E_i	主缆	E_1/MPa	正态	2.000×10^5	5.000×10^3
	吊索	E_2/MPa	正态	1.950×10^5	4.875×10^3
	斜拉索	E_3/MPa	正态	2.000×10^5	5.000×10^3
	钢主梁	E_4/MPa	正态	2.100×10^5	5.250×10^3
	混凝土主梁	E_5/MPa	正态	3.450×10^4	1.725×10^3
	主塔	E_6/MPa	正态	3.450×10^4	1.725×10^3
截面面积 A_i	主缆	A_1/m^2	对数正态	2.200×10^{-1}	1.100×10^{-2}
	吊索	A_2/m^2	对数正态	5.620×10^{-3}	2.810×10^{-4}
	混凝土主梁	A_3/m^2	对数正态	28.20	1.410
	钢主梁	A_4/m^2	对数正态	1.830	9.150×10^{-2}
抗弯惯性矩 I_i	混凝土主梁	I_1/m^4	对数正态	40.20	1.004
	钢主梁	I_2/m^4	对数正态	3.580	8.950×10^{-2}

运用响应面法,将 f_i 取为 1.6,随机变量 x_i 的值取用均值 μ_i 和 $x_i = \mu_i \pm f_i\sigma_i (i = 1, 2, \dots, 12)$, 共 25 组数据,按公路 - I 级荷载针对跨中最不利

布载,可以算出 25 个结构响应结果,计算的结构响应取为跨中挠度值,然后求解线性方程组,得出参数 a, b_i, c_i 的值,结果见表 2。

表 2 响应面待定参数值

Tab. 2 Unknown parameters of response surface

随机变量 x_i	a	b_i	c_i
E_1	6.184	-1.026×10^{-5}	1.641×10^{-11}
E_2		-1.974×10^{-6}	4.931×10^{-12}
E_3		-2.781×10^{-6}	5.469×10^{-12}
E_4		-4.855×10^{-6}	4.595×10^{-11}
E_5		-1.109×10^{-5}	1.050×10^{-10}
E_6		-3.554×10^{-6}	6.378×10^{-12}
A_1	6.184	-8.449	11.94
A_2		-18.02	1.484×10^3
A_3		-6.915×10^{-3}	9.824×10^{-5}
A_4		-6.626×10^{-2}	1.633×10^{-2}
I_1		-8.721×10^{-3}	7.750×10^{-5}
I_2		-2.064×10^{-1}	2.194×10^{-2}

数值确定以后可以根据式(1)来计算跨中挠度的结构响应,从而得到跨中挠度随材料、几何尺

寸等的变异而发生变化的规律,得到如图 4 所示的结果. 由于主缆、吊索、斜拉索和钢主梁的弹性模量数值较为接近,将其变化规律绘制于同一图中;主塔和混凝土主梁的弹性模量相近,也绘制于同一图中. 从图中可以看出,主缆的弹性模量和截面面积变化对自锚式斜拉-悬索协作体系桥的跨中挠度影响最大,非线性影响也非常显著;然后是钢主梁的弹性模量和抗弯惯性矩;再次是斜拉索弹性模量的影响;在一定的变化范围内,跨中挠度会随着各项参数数值的增大而减小;吊索弹性模量及截面面积、混凝土主梁的弹性模量和截面面积及抗弯惯性矩、钢主梁的截面面积、主塔的弹性模量变化对跨中挠度的影响较小,其中吊索的参数变化对结果几乎没有影响.

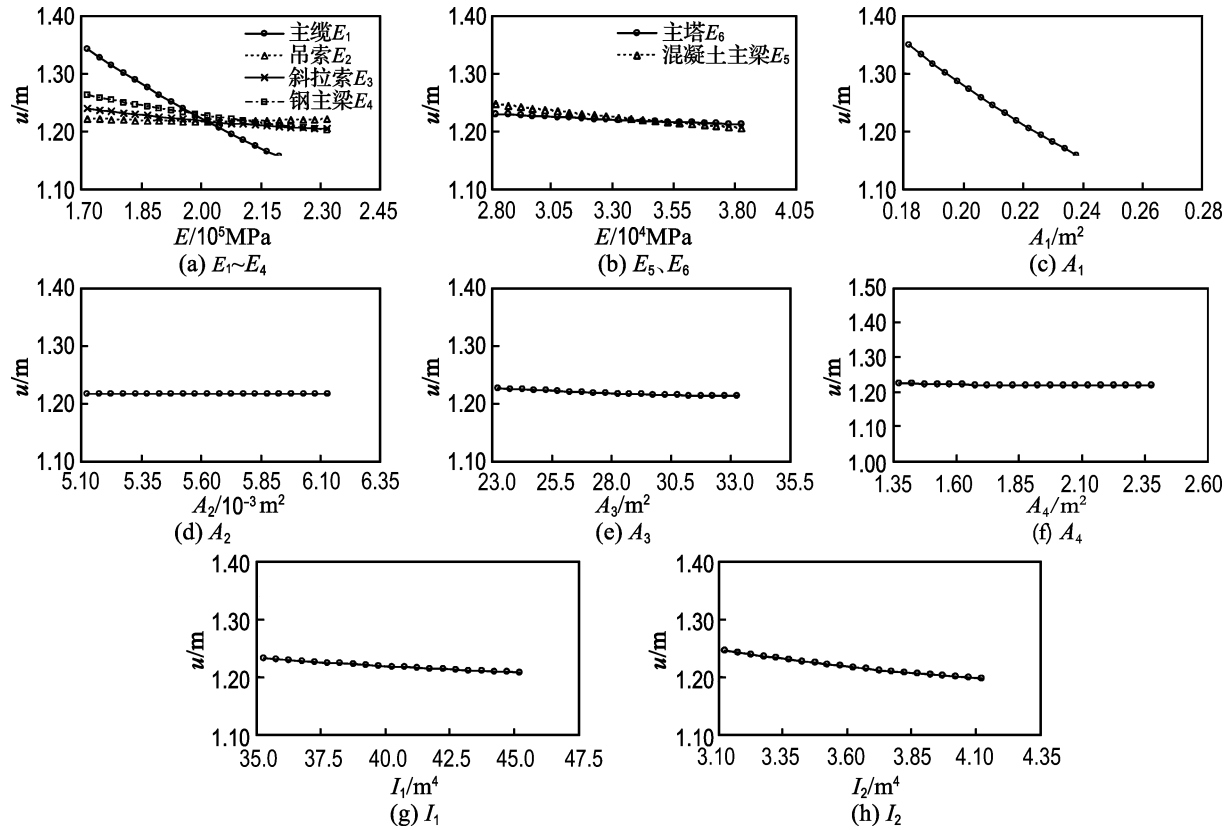


图 4 各项随机变量对跨中挠度的影响

Fig. 4 The change of deflection at the span midpoint with change of stochastic variables

4 结 论

(1)材料特性、几何尺寸等参数的变异对大跨径自锚式斜拉-悬索协作体系桥的结构响应均会产生影响,其中主缆的弹性模量和截面面积变化对结构的影响最大,并且几何非线性的影响也非常显著. 特别是在施工阶段,恒载小、主缆竖向刚度也很小,由于存在材料加工、构件制造等的误

差,结构响应的误差有时更为可观,所以有必要对其进行随机非线性分析.

(2)由于实际成桥时各项参数相对设计时的变异不会达到很大的数值,只需要确定各项参数在一定变化范围内对结构的影响,计算结果表明,在一定变化范围内,大跨径自锚式斜拉-悬索协作体系桥的跨中挠度随各材料的弹性模量及截面面

积和惯性矩等参数值的增大而减小,其中主缆的弹性模量和截面面积变化影响最大,其次是钢主梁的弹性模量和抗弯惯性矩,再次是斜拉索弹性模量的影响,其他各项参数的变化对结果影响较小.

(3)吊索弹性模量和截面面积的变异对跨中挠度几乎没有影响,这与普通悬索桥的计算结果有所不同,这种差异是由两者不同的构造形式造成的.不同于普通悬索桥满跨布置吊索,吊索的长度较长(特别是靠近主塔附近的吊索);自锚式斜拉-悬索协作体系桥的吊索仅在结构跨中一定范围内布置,吊索都较短.吊索参数的变异造成吊索刚度的改变,从而造成吊索应变的改变,在相同的应变状态下,吊索越长则变形值越大,因此对于自锚式斜拉-悬索协作体系桥来说,吊索参数在一定范围内的改变对跨中挠度的影响几乎可以忽略不计.

参考文献:

- [1] 肖汝诚,项海帆.斜拉-悬吊协作体系桥力学特性及其经济性能研究[J].中国公路学报,1999,12(3):43-48
- [2] 王会利.自锚式斜拉-悬索协作体系桥结构性能分析与试验研究[D].大连:大连理工大学,2006
- [3] 陈铁冰,杨炳成,石洞.斜拉桥非线性随机静力分析[J].西安公路交通大学学报,2000,20(2):45-48
- [4] 石磊,刘春城,张哲,等.大跨悬索桥非线性随机静力分析[J].大连理工大学学报,2004,44(3):421-424

- (SHI Lei, LIU Chun-cheng, ZHANG Zhe, *et al.* Nonlinear stochastic static analysis of long-span suspension bridge [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2004, 44(3):421-424)
- [5] 龚尧南,钱纯.非线性随机过程的有限元分析[J].计算力学学报,1994,11(1):9-18
- [6] HOPPERSTAD O S, LEIRA B J, REMSETH S, *et al.* Reliability-based analysis of a stretch-bending process for aluminum extrusions[J]. *Computers & Structures*, 1999, 71(1):63-75
- [7] BUCHER C G, BOURGUND U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems [J]. *Structural Safety*, 1990, 7(1):57-66
- [8] 李生勇.自锚式悬索桥结构可靠性研究[D].大连:大连理工大学,2006
- [9] GIMSING N J. *Cable Supported Bridges* [M]. Chichester: John Wiley, 1997
- [10] ADELI H, ZHANG J. Fully nonlinear analysis of composite girder cable-stayed bridges [J]. *Computers & Structures*, 1995, 54(2):267-277
- [11] 田启贤.悬索桥非线性结构分析[J].桥梁建设,1998(2):63-66
- [12] 邱文亮.自锚式悬索桥非线性分析与试验研究[D].大连:大连理工大学,2004
- [13] 徐君兰,向中富.悬索桥重力刚度[J].重庆交通大学学报,2000,19(2):71-74
- [14] 辛克贵,刘钺强,杨国平.大跨度斜拉桥恒载非线性静力分析[J].清华大学学报(自然科学版),2002,42(6):818-821

Nonlinear stochastic static analysis of long span self-anchored cable-stayed suspension bridge

ZHU Wei-zhi*, ZHANG Zhe, PAN Sheng-shan

(The Institute of Bridge Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Self-anchored cable-stayed suspension bridge combines both merits of self-anchored suspension bridge and cable-stayed bridge, cancels the huge anchorage and provides a better example for other similar construction of huge span bridges under deep-sea soft foundation conditions. The deterministic nonlinearity is analyzed and response surface approach is utilized to analyze nonlinear stochastic static of self-anchored cable-stayed suspension bridge. The results of this example show that the variation of the stochastic variables has a different influence on the structural responses of self-anchored cable-stayed suspension bridge. Compared to other stochastic variables, the variation of elastic modulus and cross-sectional area of main cable has a significant influence on the deflection of self-anchored cable-stayed suspension bridge at the middle of span, and the variation of parameters of steel girder has some effects and the variation of parameters of suspender has little effect on the deflection.

Key words: self-anchored cable-stayed suspension bridge; geometrical nonlinearity; stochastic static analysis; response surface approach