

大跨度斜拉桥在随机地震激励下的动力可靠性分析*

武芳文^{1,2}, 杨草芳¹, 季正迪¹, 谢礼立²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:以随机振动理论为基础,以苏通长江公路大桥为背景,对超大跨度斜拉桥在随机地震荷载作用下的动力可靠度展开研究。根据结构随机振动分析得到的响应统计量,采用结构可靠度分析的JC法(一次二阶矩法)和首次超越破坏理论,分析苏通大桥主梁关键截面上正应力的动力可靠度,并评价结构的抗震性能,分析结果证明该结构可靠性满足桥梁抗震需求。计算结果可为大跨度斜拉桥抗震可靠性分析提供参考。

关键词:桥梁工程;随机振动;斜拉桥;地震动模型;动力可靠度;跨越理论

中图分类号:TV352

文献标识码:A

文章编号:1000-0666(2014)03-0462-05

0 引言

动力可靠度理论是近年发展起来的随机振动理论的一个新的分支(王光远等,1999,陈兵等,2008)。地震作用具有很强的随机性,用随机振动理论求解结构的随机响应,进而进行结构可靠度分析显然是较为合理的。

Lupoil等(2003)将钢结构地震风险评估的概率统计方法推广应用于钢筋混凝土桥梁体系,考虑了地震载荷激励下具有参数不确定结构抗震可靠度分析问题。欧进萍和王光远(1998)提出了基于模糊破坏准则的抗震结构动力可靠性分析方法,指出结构震害等级具有强烈的模糊性,建议采用模糊界限作为超越界限,并在此基础上利用极限理论和点过程法导出了结构反应不超过模糊界限的概率。赵岩(2003)用随机摄动法对大跨度桥梁结构进行了考虑参数随机性的随机地震响应分析,并对动力可靠度问题进行了研究。刘怀林和赵岩(2008)采用随机振动虚拟激励法分析地震地面运动变化产生的空间效应,并计算分析了结构体系的可靠性。国内外学者在动力可靠度方面做出了很多研究,但针对斜拉桥抗震动力可靠度的研究较少。因此,研究斜拉桥结构的可靠性具有重要的理论意义,可以为桥梁可靠度理论发展提供科学依据。

笔者以随机振动理论为基础,以苏通长江公路

大桥为背景,计算分析其在随机地震荷载作用下的动力响应(武芳文,2008),并获得结构在均值为零的平稳正态随机过程地震动作用下的均方值响应。采用结构可靠度分析的JC法(一次二阶矩法)和首次超越破坏理论计算分析苏通大桥主梁关键截面上正应力的动力可靠度指标。JC法分析是将大跨度斜拉桥结构地震动力响应最大值作为随机变量进行计算,而首次超越破坏理论是将直接将大跨度斜拉桥结构地震动力响应作为随机过程处理。瞄准动力可靠度理论在桥梁工程中的重要性为前沿,对斜拉桥结构进行可靠性分析,期望随机振动理论和动力可靠度理论在大型桥梁工程中得到广泛应用,为桥梁抗震的最新动态提供科学依据。

1 工程简介

苏通长江公路大桥位于长江下游(武芳文,2008),临近长江入海口,是目前世界上最大跨度的双塔双索面斜拉桥,主桥跨径为(100+100+300+1088+300+100+100)m。主桥钢箱梁共分为17种类型、141个梁段,节段标准长度16m、边跨尾索区节段标准长度12m。塔柱采用倒Y形结构,分为下塔肢、中塔肢、上塔肢和横梁4个部分,中、下塔肢为钢筋混凝土结构,上塔肢为钢锚箱—混凝土组合结构,索塔高300.4m。斜拉索为 $\Phi 7$ 平行钢丝体系,全桥共272根斜拉索,主桥结构布置如图1所示。

* 收稿日期:2013-10-10.

基金项目:国家自然科学基金(51308517)和中央高校基本科研业务费专项资金(2013G1211012)联合资助。

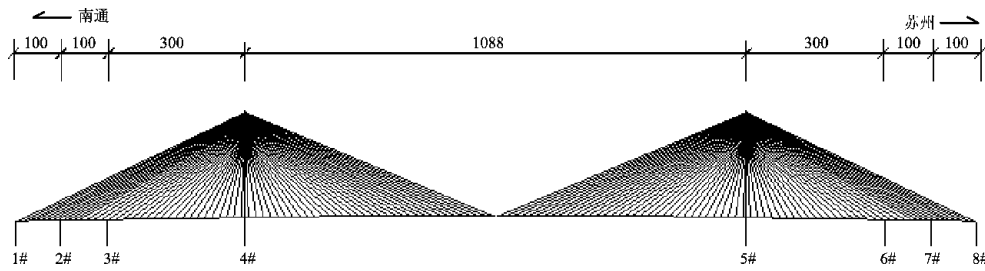


图1 苏通长江公路大桥主桥结构布置图

Fig. 1 Layout of main bridge structure of Sutong Yangtze River Highway Bridge

2 基于首次超越破坏准则的动力可靠性分析

在首次超越破坏准则下,由单个结构响应可知,结构动力可靠性是指响应在指定的时间段内一次也不超越界限的概率。这个概率的计算非常困难,目前还没有精确解,只是在一些假设下得到了相似的近似解,这些假设主要是假定随机响应与超越界限的交叉符合某个过程。

首次超越破坏机制的结构动力可靠性分析的基础是随机过程 $x(t)$ 与某一界限 $x=b$ 的交差次数的统计。在时间 $[0, T]$ 内,随机过程 $x(t)$ 以正、负斜率与界限 b 的交差次数的期望值为

$$N_b(t) = \int_0^T v_b(t) dt = \int_0^T \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{x}(t)| f_{xx}(b, \dot{x}, t) dt d\dot{x}. \quad (1)$$

式中, $v_b(t)$ 为单位时间的交差次数, $f_{xx}(b, \dot{x}, t)$ 为 $x(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 的联合概率密度函数。当 $x(t)$ 为具有零均值的平稳 Gauss 过程时, $x(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 是不相关的,且联合概率密度函数与 t 无关,可表示为

$$f_{xx}(b, \dot{x}, t) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{\dot{x}}} \exp\left(-\frac{b^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\dot{x}^2}{2\sigma_{\dot{x}}^2}\right). \quad (2)$$

同理,交差率 $v_b(t)$ 与时间无关,可表示为

$$v_b = \frac{\sigma_{\dot{x}}}{\pi\sigma_x} \exp\left(-\frac{b^2}{2\sigma_x^2}\right). \quad (3)$$

在以往的首超机制动力可靠性分析中,应用最广泛的是基于 Poisson 跨越假定的动力可靠性计算,即假定 $x(t)$ 时间 $[0, T]$ 内与界限 b 的交差次数服从 Poisson 分布。因此,结构的动力可靠性可以视为随机过程 $x(t)$ 时间 $[0, T]$ 内与界限 b 的交差次数为零次的概率。对于双侧 D 界限:

$$\begin{aligned} P(\max x(t) \leq b_1 \cap \min x(t) \geq -b_2, 0 < t < T) \\ &= \exp\left[-\int_0^T v_{b_1}^+(t) dt\right] \cdot \exp\left[-\int_0^T v_{b_2}^-(t) dt\right] \\ &= \exp\left\{-\int_0^T [v_{b_1}^+ + v_{b_2}^-] dt\right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

对于对称的双侧 D 界限,结构反应为零均值的平稳 Gauss 过程时,其动力可靠性为

$$P_s(b, -b) = \exp\left[-\frac{\sigma_{\dot{x}} T}{\pi\sigma_x} \exp\left(-\frac{b^2}{2\sigma_x^2}\right)\right]. \quad (5)$$

对于平稳正态结构反应,当 $b \rightarrow \infty$ 时,式(5)给出精确的计算结果,当 b 不太大时,此计算结果有一定的误差。对主窄带过程偏于保守(计算可靠度偏低),误差主要来自 Poisson 跨越假设。Vanmarke 提出了对 Poisson 过程法的一些改进,提出交差次数为马尔可夫过程的假定,提出了如下的修正公式:

$$\begin{aligned} P_s(-b, b, T) &= \exp\left[-\frac{\sigma_{\dot{x}} T}{\pi\sigma_x} \exp\left(-\frac{b^2}{2\sigma_x^2}\right)\right. \\ &\quad \left.\frac{1 - \exp\left(-\sqrt{\pi/2} q^{1+a} \frac{b}{\sigma_x}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2\sigma_x^2}\right)}\right]. \end{aligned} \quad (6)$$

式中, q 为定义的谱参数, $q = \sqrt{1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0^2 \alpha_2}}$, $\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i S_x(\omega) d\omega$; a 为经验参数,可取 $a=0.2$ 。

3 基于 JC 法的动力可靠性分析

JC 法求解结构的地震动力可靠度,需要计算随机过程的最大值。根据结构响应的功率谱和方差,定量估计结构的地震响应,并计算结构随机

地震响应的最大值的均值和均方根值。图 2、图 3 分别为苏通桥在纵向随机地震作用下主梁和主塔的弯矩和轴力最大值的均值和均方根值。

苏通大桥在成桥及运营阶段，主梁上缘最大

压应力为 113.2 MPa，最大拉应力为 20.8 MPa；主梁下缘最大压应力为 125.1 MPa，最大拉应力为 49.3 MPa，其中主梁关键截面内力如表 1 所示。

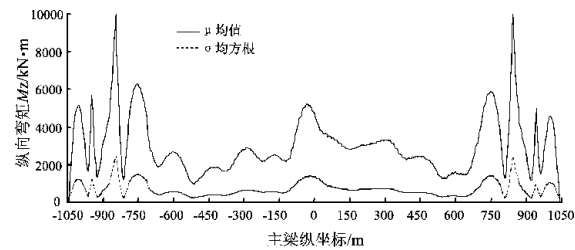


图 2 随机地震作用下主梁弯矩

Fig. 2 Longitudinal bending moment of Girder under stochastic earthquake

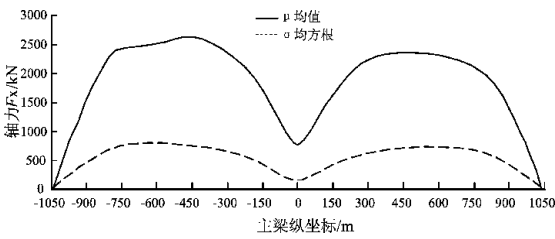


图 3 随机地震作用下主梁轴力

Fig. 3 Axial force of girder under stochastic earthquake

表 1 苏通大桥主梁关键截面内力

Tab. 1 The internal force of key cross sections of girder of Sutong Bridge

关键截面	位置	内力 (N、Q 单位为 kN, M 单位为 kN·m)	恒载	恒 + 活	
				Max	Min
1	1、2 墩跨中	N	-45 751.3	-44 182.1	-53 578.1
		Q	493.1	2 729.7	-1 385.1
		M	-26 376.5	57 342.2	-91 989.0
2	2 号墩	N	-82 903.4	-79 874.4	-97 511.1
		Q	-4 454.2	-320.0	-9 741.3
		M	29 163.6	92 551.0	-37 361.4
3	2、3 墩跨中	N	-116 938.1	-112 277.2	-138 466.3
		Q	230.6	2 767.0	-2 507.7
		M	7 344.6	71 162.9	-31 163.4
4	3 号墩	N	-140 142.9	-133 520.0	-167 524.8
		Q	-6 155.5	-134.4	-12 964.3
		M	-38 967.4	101 159.1	-176 972.3
5	3、4 墩跨中	N	-200 213.9	-196 649.7	-235 130.9
		Q	-2 048.5	-304.5	-4 570.5
		M	1 120.0	70 688.2	-54 587.1
6	索塔处	N	-219 273.6	-218 228.5	-254 747.8
		Q	-395.4	2 145.0	-2 904.4
		M	-24 320.4	16 381.6	-64 901.0
7	1/8 跨中	N	-200 552.6	-199 166.9	-233 878.2
		Q	-2 546.7	-295.2	-5 009.2
		M	-21 072.5	34 291.6	-68 245.8
8	1/4 跨中	N	-155 386.8	-152 911.3	-183 121.8
		Q	-1 245.1	1 208.7	-3 650.7
		M	-8 499.8	66 837.9	-74 614.0
9	3/8 跨中	N	-83 997.8	-80 326.0	-100 345.8
		Q	-2 407.9	-147.1	-5 398.4
		M	8 634.5	112 940.6	-59 307.3
10	1/2 跨中	N	3.4	3 806.0	-2 068.7
		Q	0.0	3 218.9	-3 218.8
		M	-7 647.2	101 375.3	-47 340.3

JC 法的特点是：

- (1) 能考虑随机变量的实际分布类型，并通过“当量正态化”途径，把非正态变量当量化为正态变量；
- (2) 线性化点不是选在平均值处，而是选在失效边界上，并且该线性化点（设计验算点）是与结构最大可能失效概率相对应的。

采用 JC 法计算苏通桥主梁的地震可靠度指标和失效概率，其计算步骤如图 6 所示。以主梁在正常使用极限状态下的应力失效模式为基础，建立极限状态方程：

$$Z = R - S$$
$$= \sigma_b - \sigma_G - \sigma_Q - \sigma_D.$$

(7)

式中， σ_b 为主梁极限强度，对数正态分布； σ_G 为恒载产生的应力，正态分布； σ_Q 为活载产生的应力，极值 I 型分布； σ_D 为随机地震产生的应力，极值 I 型分布。

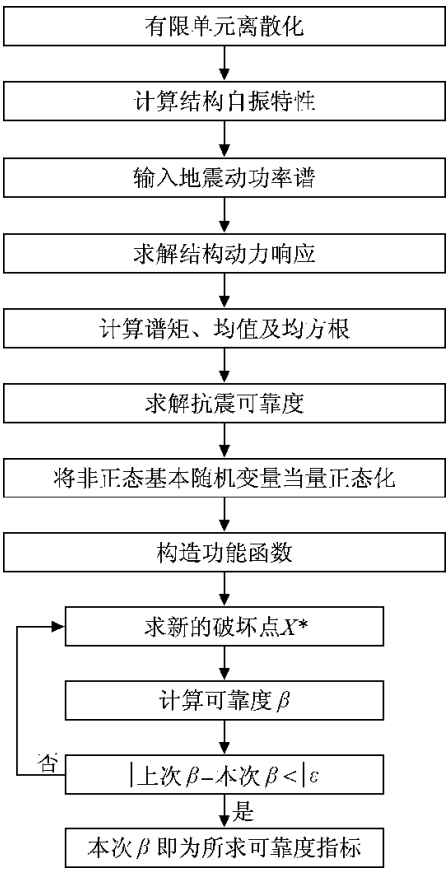


图 4 JC 法求在随机地震作用下抗震可靠度计算框图
Fig. 4 Calculation diagram of aseismic reliability under stochastic earthquake by JC method

当 $Z > 0$ 时，即抗力 R 大于荷载效应 S 时，结构处于安全状态；当 $Z < 0$ 时，即抗力 R 小于荷载效应 S 时，结构处于失效状态；当 $R = 0$ 时，即抗力 R 等于荷载效应 S 时，结构处于极限状态。

根据《钢结构设计规范》(2003) 选取钢箱梁强度的变异系数取 0.1、正态分布 σ_G 、 σ_Q 、 σ_D 的变异系数分别取 0.1、0.2、0.22，其应力均值如表 2 所示。

基于首次超越破坏准则和 JC 法，苏通大桥在 7 级地震作用下，采取最大响应计算结构关键截面的动力可靠度指标如表 3 所示。

从表 3 计算结果可见，苏通大桥在随机地震荷载作用下，结构有足够的安全度。不同位置的可靠度指标不同，2 号墩位置的可靠度大于 3 号墩位

表 2 变量统计参数表

Tab. 2 Variable statistical parameters table

关键截面	位置	平均值/MPa		
		σ_G	σ_Q	σ_D
1	1、2 墩跨中	32.66	45.50	10.12
2	2 号墩	48.65	34.69	12.59
3	2、3 墩跨中	77.39	43.65	10.13
4	3 号墩	76.80	46.56	17.65
5	3、4 墩跨中	93.51	29.65	9.14
6	索塔处	78.79	23.94	6.50
7	1/8 跨中	91.20	33.98	8.15
8	1/4 跨中	77.37	44.61	10.05
9	3/8 跨中	60.30	61.51	8.40
10	1/2 跨中	12.90	55.66	9.55

表 3 苏通大桥主梁可靠度指标

Tab. 3 Reliability index of girder of Sutong Yangtze River Highway Bridge

关键截面	位置	可靠度指标	
		JC 法	首次超越
1	1、2 墩跨中	5.47	5.83
2	2 号墩	5.51	5.78
3	2、3 墩跨中	5.13	5.48
4	3 号墩	4.51	4.85
5	3、4 墩跨中	4.69	5.02
6	索塔处	5.40	5.54
7	1/8 跨中	4.84	5.12
8	1/4 跨中	4.97	5.23
9	3/8 跨中	4.89	5.31
10	1/2 跨中	5.81	6.02

置, 索塔处主梁的可靠度达 5.4; 1/2 跨中位置可靠度最大, 由于恒载应力占总应力的比值较大, 主梁动力可靠度的变化趋势与恒载应力变化趋势比较接近, 表明苏通大桥主梁设计比较合理。因此, 根据主梁可靠度随位置的变化趋势可以辅助优化主梁设计, 以达到可靠度计算的目的。两种计算动力可靠度指标的方法不尽相同, 但其计算结果比较接近, 最大差值为 9% 左右。

通过可靠度分析可知, 可靠度指标随主梁位置的变化而变化, 并且可靠度指标都满足要求, 证明苏通大桥在 7 级地震作用下有足够的可靠度。因此, 公路桥梁结构应用概率意义上的可靠度来衡量结构的安全程度, 可以说是公路桥梁结构计算方法上很大的进步。

4 结 论

通过对斜拉桥结构可靠性分析的研究, 能够对桥梁关键部位可靠度有充分的定性认识, 可以进一步对斜拉桥结构进行整体优化设计, 从而对深入探讨超大跨度斜拉桥设计中的技术问题给予辅助作用, 比如对结构安全性或耐久性评估、现有结构剩余寿命预测以及对结构进行风险评估和决策等。其主要结论如下:

(1) 采用 JC 法计算了苏通大桥在随机地震荷载作用下最大响应的可靠度指标, 证明苏通大桥在 7 级地震作用下有足够的可靠度, 该桥设计满足抗震要求。

(2) 采用首次超越破坏理论分析了苏通大桥的可靠度。与 JC 法的结果较一致, 虽然两种计算动力可靠度指标的方法不尽相同, 但其计算结果比较接近, 最大差值为 9% 左右。

参考文献:

- 陈兵, 赵雷, 陈思孝. 2008. 高墩大跨连续刚构铁路桥抗震可靠度分析[J]. 铁道学报, 30(2): 113 - 117.
- 刘怀林, 赵岩. 2008. 多点地震激励下大跨度桥梁动力可靠度研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 25(3): 113 - 120.
- 欧进萍, 王光远. 1998. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 王光远, 程耿东, 邵卓民, 等. 1999. 抗震结构的最优设防烈度与可靠度[M]. 北京: 科学出版社.
- 武芳文. 2008. 大跨度斜拉桥随机地震响应分析及其动力可靠度研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- 赵岩. 2003. 桥梁抗震的线性/非线性分析方法研究[D]. 大连: 大连理工大学.
- Lupoil A., Franchinl R., Schotanus M. 2003. Seismic Risk Evaluation of RC Bridge Structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32(8): 1275 - 1290.
- GB50017 - 2003, 钢结构设计规范[S].

Dynamic Reliability Analysis of Long-span Cable-stayed Bridges under Stochastic Earthquake

WU Fang-wen^{1,2}, YANG Cao-fang¹, JI Zheng-di¹, XIE Li-Li²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shannxi, China)

(2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

Based on stochastic vibration theory and combined with SuTong Yangtze River Highway Bridge, we studied the dynamic reliability of super-long-span cable-stayed bridges under the action of earthquake loads. According to response statistics obtained from the structure random vibration analysis, we analyzed the dynamic reliability of the normal stress on the key section of Sutong Yangtze River Highway Bridge by the JC method in structural reliability analysis (afosm method) and the first excursion failure theory, and evaluated the seismic performance of the structure. The analysis results show that the reliability of the structure meets the seismic requirements of the bridge. It could provide an important theoretical reference for improving seismic reliability analysis of super-long-span cable-stayed bridges.

Key words: bridge engineering; stochastic vibration; cable-stayed bridge; earthquake motion model; dynamic reliability; over-crossing theory