第 28 卷 第 1 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 28 No. 1
2015 年 03 月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Mar. 2015

响应面法在船撞桥可靠度分析中的应用

张 军[1], 邓旭平[1], 包龙生[2]

(1. 中交一公局公路勘察设计院有限公司,北京 100024; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要: 船撞桥梁的可靠度,其结构响应变量与基本变量之间的函数关系复杂,传统的求解方法难以奏效,需要借助于有限元等数值计算方法来获得。利用 APDL 语言采用两种方法求解船撞桥的可靠度,对比蒙特卡洛法(MCS)的 7 种工况下和响应面法(ODRSM-MCS)的桥墩的失效概率,在 10 000 次 MCS 拉丁抽样与 ODRSM-MCS 法抽样桥墩的失效概率分别是 6.02×10^{-3} 和 2.06×10^{-3}。响应面法达到与 MCS 法同等精度的情况下,MCS 与 ODRSM-MCS 所用的时间分别是 280 min 和 5 min,从而证明响应面法的有效性和高效性。

关键词: 船撞桥可靠度; ANSYS; 响应面法; Box-Behnken 抽样; MONTE-CARLO 法

中图分类号: U442 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2015)01-0028-06

0 引言

随着中国经济的不断发展,交通运输业也在国民经济中扮演者至关重要的作用。而水上运输则是铁路运输、公路运输、空中运输、水上运输中的大宗货物运输的代表。在为了方便公路、铁路运输修建的跨河、跨海(湾)的桥梁,却又是水上船舶的人工障碍物。根据国内外有关资料文献的介绍,世界各地船撞桥事故在一直在不断地发生,船撞桥事故的发生频率更是超出我们的想象。由船撞桥事故所导致的各种损失不计其数,比如:财产损失人员伤亡,环境破坏等。众多船撞桥事故轻则船桥轻微损坏,损失数万元,重则桥塌船沉人亡,损失则以数百万、甚至更多计,大量的间接损失更是无法估量。所以在桥梁建设前后都需要对桥梁进行各项安全风险评估,而评估中非常重要的一部分就是进行桥梁可靠性评估。

目前船撞桥可靠度的代表方法有美国 AASHTO 法[1],Larsen 法[2],欧洲规范法,德国昆兹模型法[3],国内有《公路桥涵设计通用规范》[4] 这些概率模型都是通过统计分析得出的近似模型。概率有限元是近几年发展而来的与有限元结合的数值研究方法,在相关数值特征可知时,它可以得到船撞桥可靠度较为精确的结果。蒙特卡洛模型在概率有限元中被认为是一种比较精确的方法,但是其工作量太大。所以提出了响应面法来进行船撞桥的可靠度计算,来提高计算船桥碰撞可靠度的效率。

1 蒙特卡洛法与响应面法的原理

概率有限元法是为了解决大型复杂结构的可靠度问题而被提出来的。目前常用的是传统的蒙特卡洛法,蒙特卡洛法是一种采用数值模拟方式来解决与随机变量有关的实际工程问题的方法。它能够对确定问题和随机问题进行分析,对随机变量的数值模拟方法相当于“实验”的方法,所以蒙特卡洛法又被称为统计实验法。蒙特卡洛法的抽样方法分为三种,分别为拉丁超立方法、直接法、自定义方法,其中拉丁超立方法避免了直接法中的重复抽样,提高了工程计算效率,拉丁超立方法的模拟次数通常能够比直接法减少 20% ~40%[5]。在目前的结构可靠度计算中,MCS 法在是一种比较精确地方法,该方法首先对随机变量 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 进行大量抽样(抽样次数为 n 次),再将所抽得的随机变量代入功能函数 $Z = g(X_1,$

收稿日期: 2013-10-25 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2015.01.06

作者简介: 张军(1987-),男,硕士研究生,主要从事船撞桥风险概率分析以及振动传播规律的研究。E-mail: feng19870510@qq.com

基金项目: 中交集团科技研发项目(kyht2008-05); 住房和城乡建设部科学技术项目(2010-K3-38)

张军,邓旭平,包龙生. 响应面法在船撞桥可靠度分析中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版,2015,28(1):28-33.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$X_2,\cdots,X_n$) 中,统计 $Z>0$ 的个数 ,当拥有足够大的样本容量时,根据贝努利大数定理,以结构可靠次数 L 占抽样总数 N 的频率来表示结构的可靠性概率 $P_f \approx L/N$。首先将 [0,1] 区间划分成 N 个相互独立且不重叠的等距子区间,然后对这互不重叠的 N 个子区间内进行等概率的独立抽样,这样就避免了进行直接抽样时的重复抽样和繁琐工作[6]。

进行可靠性分析的另一种有效的分析方法是响应面法,其思想是通过有限的确定性实验拟合一个响应面函数来模拟真实的结构极限状态曲面,从而进行可靠性分析。在结构可靠性分析中,由功能函数来表达结构的极限状态方程, 其形式为: $Z=g(X)$,其中 $X=(X_1,X_2,X_3,\cdots\cdots,X_n)$ 是工程中的随机因素,例如结构的几何尺寸、结构荷载及材料参数的随机性等。当结构处于安全状态时 $g(X)>0$,结构处于极限状态时 $g(X)=0$,结构处于失效状态时 $g(X)<0$。

从本质上讲,响应面是统计学中的一种综合实验技术,用于处理多个变量对同一结构或体系的综合作用问题,也就是结构或者体系中的随机输入变量值与输出响应值之间的转换关系问题。响应面法用一个一次或二次多项式(即响应面函数) 来近似替代实际状态下的隐式极限状态函数 $Z=g(X)$,再采用一般的可靠度分析方法对近似极限状态函数进行可靠度计算,其中结构的失效概率 $P_f=P(Z)$ 。响应面函数[7] ,采用 Box-Behnken 抽样法进行随机参数向量的 N_s 个样本选取,对这些样本点进行数值分析得到结构响应的一组样本点($\bar{g}(X_1)$,$\bar{g}(X_2)$,$\cdots\cdots$,$\bar{g}(X_n)$) ,回归分析得到响应面函数中的待定因子的最小二乘估计,求解得到 $\bar{g}(X)$,并用 $\bar{g}(X)$ 代替结构的真实响应。

响应面法在进行实验设计时使用到的方法有 3 种: 中心复合设计法(CCD,Central Composite Design) 、Box-Behnken 矩阵设计法(BBM,Box-Behnken Matrix) 、自定义设计法。其中 Box-Behnken 抽样方法是 Box 和 Behnken 在 1960 年提出一些曲线的三水平设计,这些设计式结合了 2k 因子设计与不完全集区设计(Incomplete Block Design) 而成。但是不完全集区设计在某些情形下并不实用,从而通过进一步改良而成的一类三水平的二阶设计[8] 。Box-Behnken 矩阵设计包括一个中心点和 N 维的超立方边上的中心点,如图 1 表示三维立方体。Box-Behnken 矩阵设计对每个因子使用三水平设计,三水平一般设置等距,各个因素的取值空间是 [-1,0,+1],在实际的响应面函数中对应上下限为 [-1,-1]。根据因素数量确定析因点和零点,建立二次响应面回归模型[9] 。

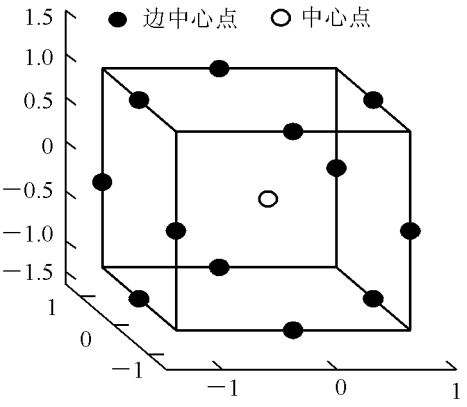

图 1　三概率参数 Box-Behnken 抽样示意图

对随机参数的 N 个样本点进行数值分析,得到 N 个输出点(($\bar{g}_1(X_1,X_2,\cdots,X_n)$,$\bar{g}_2(X_1,X_2,\cdots,X_n)$,$\cdots$,$\bar{g}_n(X_1,X_2,\cdots,X_n)$)) ,对这些数据采用最小二乘法进行回归分析

$$h=\sum_{i=1}^{N}\varepsilon_i^2=\sum_{i=1}^{N}\left[g_i-\left(a_0+\sum_{i=1}^{N}a_iX_i+\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N}a_{ij}X_iX_j\right)\right]^2 \quad (1)$$

式中, ε_i 为误差项,若要使误差项的平方和 h 最小,则

$$h/a_0=h/a_i=h/a_{ij}=0 \quad (2)$$

式中, $i=1,\cdots,n$, $j=1,\cdots,n$。

求解响应面随机变量的矩阵方程,可得到公式响应面函数中中各个系数的估计值,进而得到响应面函数 $\bar{g}(X)$ 。

2　船撞桥可靠度输入变量参数的选取

对桥梁受船撞击的可靠度分析时,其影响可靠度的输入变量可能有上百上千,这就造成在进行可靠度分析的时候这些输入变量不能全部考虑。美国联邦公路桥梁设计规范在确定船撞力时考虑: 船只类型、每类船的年通航量、船只的航行速度、河道(通航部分以及非同航部分) 的尺寸、桥梁在航道上的几何布置情况等。在计算船撞桥桥梁倒塌的概率的时,还需要考虑船撞力、船只偏航概率、偏航船只撞桥的概

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

率、桥墩的墩身尺寸、墩身壁厚、墩身高度、桥梁上部结构、风荷载、混凝土种类收和缩徐变等的影响[10-11]。肖盛燮、彭凯给出了船桥碰撞结构柔性对碰撞过程的影响,质量分布对碰撞过程的影响以及地基弹性对碰撞过程的影响[12]。桥梁受船的撞击是一个动态的过程,桥墩的破坏判定比较复杂,本文采用强度破坏准则,主要是以钢筋和混凝土材料的应力作为性能指标。该破坏准则的形式如下

$$\sigma_{\max} \leqslant [\sigma] \tag{3}$$

基于承载能力极限状态的结构设计便采用了该准则,我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定的结构的强度破坏准则为

$$S_d(\gamma_g G, \gamma_q \sum Q) \leqslant \gamma_b R_d(R_c R_s/\gamma_c \gamma_s) \tag{4}$$

由于强度破坏准则概念简单,应用方便,因此在结构设计中得到了长期的应用。

3 响应面法(ODRSM-MCS)在船撞桥可靠度中的应用

通过采用蒙特卡洛法和响应面法对北山大桥进行船撞桥可靠度分析。

3.1 北山大桥施工期间船撞有限元模型的建立

北山大桥是庆景青公路范村到张坪段库东段方案的中的一座特大桥。北山大桥的桥跨布置为:2×30(预应力T梁)+(120+3×200+120)(5孔预应力混凝土连续刚构)+2×3(预应力T梁)=960 m。通航要求为Ⅵ级航道,大桥双向通行100 t级海轮,设计最高通航水位161.5 m大桥主墩位于水库深水中。北山特大桥建设工期按2.5 a考虑,即2005年7月项目开工,2007年12月项目建成通车。该桥结构重要性等级为Ⅰ级,即特别重要等级。

选取北山桥主桥桥墩施工期间,桥墩承受船只撞击导致桥墩不能继续承载的概率。北山主桥桥墩采用空心薄壁墩,最高墩7号墩高116 m。在船的撞击下7号桥墩无论在施工期还是在正常使用状态下都是极其容易破坏。

船撞桥梁船撞力的选取,通过对比美国《美国公路桥梁设计规范》与我国《公路桥涵设计通用规范》的计算船撞力的公式可以得出,采用我国《公路桥涵设计通用规范》的公式计算得出的船撞荷载较小。鉴于此,笔者确定以《美国公路桥梁设计规范》的计算方法确定单船船撞力。根据文献《高墩大跨连续刚构桥梁》选取其它影响因素。

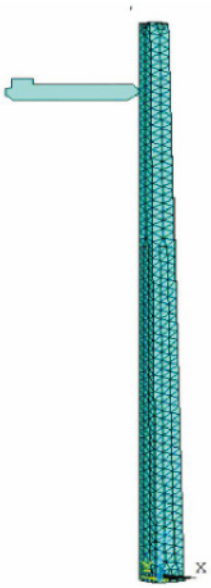

图2 100 t级船撞桥的示意图

桥墩受船舶撞击的位置按照设计最高通航水位进行选取,设计通航水位=161.5 m。桥墩受100 t级船船舶撞击的示意图,如图2。

桥墩的输入变量取桥墩墩高H,墩顶截面形心至桥墩外壁的距离B_1,至桥墩内壁的距离B_2,桥墩材料的等效容重DENSITY,船撞力荷载FORCE为随机输入变量参数,桥墩受到船撞后最大应力为SMAX作为随机输出变量参数。

随机输入变量的概率特征见表1。

表1 随机输入变量及其参数特征表

随机输入变量	分布类型	均值	变异系数
H	GAUSS正态分布		0.03
B_1	GAUSS正态分布	5.5 m	0.01
B_2	GAUSS正态分布	4.5 m	0.01
YOUNG	GAUSS正态分布	3.25×10^4 MPa	0.05
DENSITY	UNIF分布	2.6×10^2 kg/m^3	0.05
FORCE	GAUSS正态分布	4.1 MN	0.11

结合北山大桥有限元模型,对结构运用Monte-Carlo法中的拉丁超立方抽样和响应面法中的Box-Beknhan实验抽样方法分别计算进行桥墩的可靠性计算,并且对两种可靠度计算方法进行对比。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　桥墩受船撞蒙特卡洛法可靠度分析

桥墩受船撞可靠度 Monte-Carlo 模拟分析采用 7 种工况进行抽样,采用拉丁超立方抽样法进行桥墩的失效概率计算。桥墩应力与变形失效概率如表 2 所示。

表 2　桥墩应力应变失效概率表

抽样次数	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
$P_f\{\sigma_m > 3.45\ \text{GPa}\}$	0.00e+0	8.50e-3	5.17e-3	1.05e-2	6.03e-3	6.45e-3	6.02e-3
$P_f\{v_m > 0.7h\}$	0	0	0	0	0	0	0

注: σ_m 为桥墩的最大应力,v_m 为桥墩的最大应变。

从表 2 可以看出,在 100 次抽样桥墩的失效概率为 0,出现这种现象的原因是抽样次数的不足导致抽样随机变量在拟合功能函数 时缺少足够的数据支持。而随着抽样次数的增多,桥墩失效概率逐渐趋于平稳,在 2 000 次后结果开始趋于收敛。由此可以看出,如果要运用蒙特卡洛法得出准确的船撞桥的桥梁失效的概率,必须进行大量的抽样才能保证结果的准确性。蒙特卡洛法根据应变得出的桥墩失效概率为 0,说明在本例中桥墩失效的概率主要是由桥墩中的最大应力 SMAX 控制。

3.3　桥墩受船撞响应面法可靠度分析

对桥墩进行响应面分析得到响应面函数再次进行 Monte-Carlo 数值模拟,可得到桥墩失效的概率。响应面在进行拟合时需要人为控制拟合响应面的置信度为 0.95。桥墩的失效概率如表 3。

表 3　MCS 与 ODRSM-MCS 桥墩的失效概率

抽样类型	$P_f\{\sigma_m > 3.45\ \text{GPa}\}$	$P_f\{v_m > 0.7h\}$
MCS 拉丁抽样($N = 10\ 000$)	6.02e-03	0.00e-00
ODRSM-MCS($N = 10\ 000$)	2.06e-03	0.00e-00

注: MCS 为蒙特卡洛法抽样,ODRSM-MCS 为响应面法抽样。

3.4　MCS 与 ODRSM-MCS 的结果分析

在 4 核 CPU 主频 3.2 Hz 为内存为 4 G 的计算机上进行 MCS 可靠度计算所用的时间是 280 min,进行 ODRSM-MCS 混合模拟的计算的时间是 5 min。

表 4　10 000 次 MCS 与 ODRSM-MCS 法散点图系数

分析方法	Spearman rank-order	Linear	Trendline	Accuracy
10 000MCS	0.192 9	0.202 9	0.925e+06	0.958 8e+04
ODRSM-MCS	0.215 7	0.301 5	0.158e+07	0.909 0e+04

通过图 3 与图 4 得到 MCS 和 ODRSM-MCS 船撞力和桥墩最大应力的散点图的趋势可以看出,结构的最大应力随着船撞荷载的增大而增大。图 3MCS 法所得出的散点图比较饱满,其抽样次数多比较符合实际情况,而 ODRSM-MCS 的散点图则分布的比较集中,其结果是通过抽样后拟合出的响应面函数,再通过响应面函数得出的散点图,由于响应面函数是通过抽样样本得到的,故 ODRSM-MCS 的散点图可以认为接近实际情况。通过表 4 MCS 法与 ODRSM-MCS 法计算 Spearman rank-order 的相关系数、Linear 的相关系数相差,多项式的 Trendline 和精度是非常接近的,由此可见,ODRSM-MCS 法在达到与 MCS 同等精度条件下可以减少工程计算的次数。

通过进行敏感性分析,可以得到随机输入变量与输出变量的灵敏度图。灵敏度图可以直观反映不同随机输入变量对船撞桥概率的影响程度大小。其中,输入参数对输出参数影响水平在 2.5% 以下的可以看作相对影响不大的因素; 影响水平在 2.5% 以上的看作有显著影响的因素。

从图 5 和图 6 可以看出,通过对 10 000 次 MCS 和响应面法两种方法灵敏度分析得出船撞力是影响桥墩最大内力最主要的影响因素,灵敏度系数都在 0.2 左右,两者相差 14% ,墩顶截面形心至内壁的距离 B_2 灵敏度系数在 0.1 左右,两者相差 0.2% 。而第三灵敏度参数在图 5 墩高 H 的与图 6 墩顶截面形心至外壁的距离 B_1 不同,这是由于抽样方法的不同,而且响应面法是通过拟合出响应面函数再通过这个函数输出所求参数,这就导致在拟合响应面函数时在参数确定的时有微小误差,进而导致第 3 个影响参数的不同。在进行船撞桥可靠度时,墩高、墩顶截面形心至外壁的距离对结构可靠度的计算影响较小,所以桥梁进行结构可靠度分析时响应面法具有很大的优越性。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

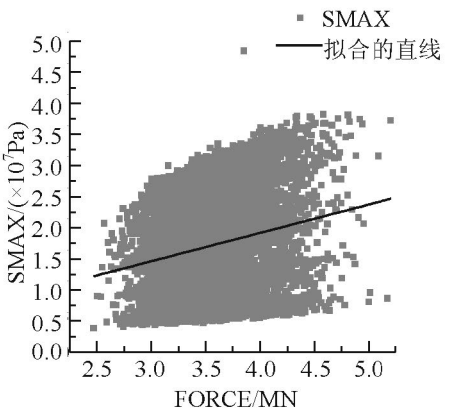

图3 10 000MCS FORCE-SMAX 散点图

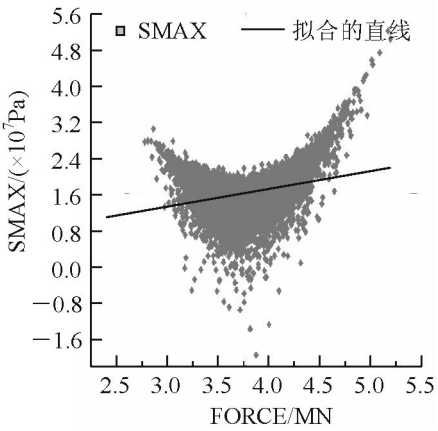

图4 ODRSM-MCS 散点图

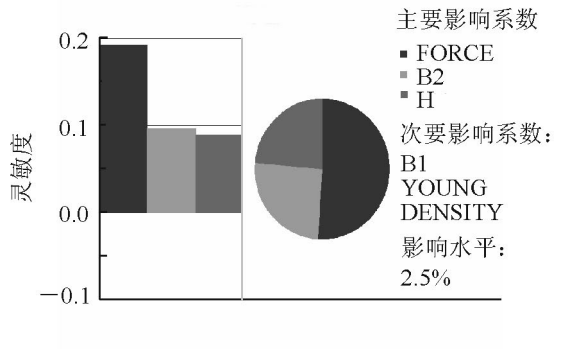

图5 10 000 次 MCS 最大应力 SMAX 灵敏度

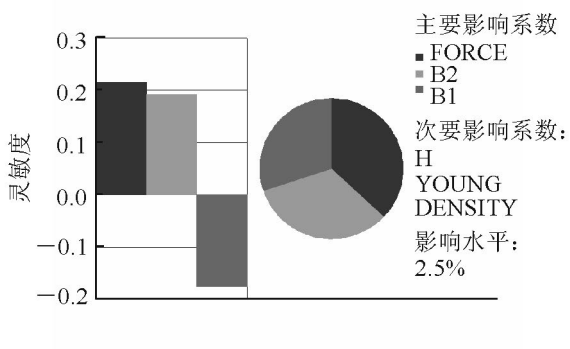

图6 响应面法最大应力 SMAX 灵敏度

4 结语

(1) 在实际工程的结构可靠度计算中,当结构的失效概率小于 10^{-3} 时,传统蒙特卡洛法的抽样次数是非常庞大的,占据非常大的计算时间。而基于响应面蒙特卡洛法由于是计算响应面函数的值而不是对整个有限元模型进行计算,所以效率非常高,它的计算效率是传统蒙特卡洛法的 58 倍,优势非常明显。

(2) 在分析船撞桥可靠度精度方面,响应面法和蒙特卡洛法的结果分别为 6.02×10^{-3} 和 2.06×10^{-3},两者相差不大。响应面法中的响应面函数由于是经过函数逼近近似接近极限状态函数,其精度可以通过增加模拟次数来进行控制。在一些大型复杂的可靠度计算工程中,响应面函数是通过对结构进行抽样分析得到的,它能够反映出结构的基本特征,具有较高的精度,在某些的情况下,响应面的可靠度甚至单纯采用蒙特卡洛模型计算的数值还要精确。

参 考 文 献

[1] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specification [S]. Washington DC: AmericanAssociation of State Highway and Transportation Officials, 2005.

[2] Prucz Z. Ship collision aspects unique to inland waterways [M]. Rotterdam: AABalkema, 1998: 103-114.

[3] Pedersen P T, ZHANG Shengming. The mechanics of ship impacts against bridges [M]. Rotterdam: A A Balkema, 1998: 41-52.

[4] 中交公路规划设计院. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[5] 博弈创作室. ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[6] Mckay M D, Beckman R J, Conver W J A. Comparison of three methods for selecting values in the analysis of output from a computer code [J]. Technometics, 2009, 2: 239-245.

[7] Bucher C G, BourgoundU. Fast and response surface approach for structure reliability problem [J]. Structural Safety, 1994, 7

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1):57.
[8] Box G E P,Behnken D W. Some new three designs for the study of quantitaive variables [J]. TECHNOMETRICS,1960,2(4):455-460.
[9] Box G E P,Cox D R. An analysis of transformations [J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series B,1964,26:211-252.
[10] 马保林. 高墩大跨连续刚构桥梁 [M]. 北京: 人民交通出版社,2001.
[11] 石雪飞,白午龙. 基于稳定性的高墩大跨连续刚构桥极限墩高研究 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版,2013,26(3):13-17.
[12] 肖盛燮,彭凯,蔡汝哲. 船只/桥梁多柔体系统碰撞问题求解的 Lagrange 方程 [J]. 重庆交通学院学报,2001,20(3):7-8.

Application of Response Surface Method in Reliability Analysis of Ship Collision

Zhang Jun[1], Deng Xuping[1], Bao Longsheng[2]

(1. CCCC Highway Survey&Design Co. LTD of FHEC,Beijing 100024,China;
2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The structure response variables and basic variables for reliability against ship collision are very complex. The traditional methods of solving the problem is difficult. APDL language of two methods are used to solve the reliability at ship collision against the bridge. With seven MCS method conditions and ODRSM-MCS, the probability of failure of bridge pier of 10 000 MCS Latin sampling and ODRSM-MCS Box-Behnken sample is 6.02×10^{-3} and 2.06×10^{-3} respectively. While achieving the same accuracy, 280 minutes is used for calculation with MCS and 5 minutes with the ODRSM-MCS. So the ODRSM-MCS method is much more efficient.

Key words: pier reliability analysis of ship collision; ANSYS; response surface method; Box-Behnken; Monte-Carlo method

(上接第 5 页)

Study on Steel Frame Node Capacity of Mortise and Tenon Connection

Yu Yan[1], Duan Shujin[1], Zhang Yu[2]

(1. School of Civil Engineering,Shijiazhuang Tiedao University,Shijiazhuang 050043,China;
2. Institute of Architecture and Engineering, Hebei University of Science and Technology,Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: A new connection method used between beam and column in steel structure named square steel tube mortise and tenon joint is presented in this paper. The displacement curve of the beam span and end node load is got after the static load test of the steel frame structure connected by the nodes, as well as the load and strain diagram of the different parts of the framework,and then test results are analyzed. What's more, nonlinear finite element analysis with computer is carried out according to the test model, and the influence of different section size of the node elements on the bearing force of node is also analyzed. The calculation formulas of bearing capacity of square steel tube joints put forward are approximate to the test results. The experiments indicate this new type of mortise and tenon joints is of high bearing capacity and acceptable from the angle of design philosophy.

Key words: square steel tube; mortise and tenon joints; the ultimate bearing capacity; experimental study; nonlinear finite element

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net