

桥梁抗震分析方法

俞琦¹, 陈语², 王家林¹

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 南京金海设计工程有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:介绍了现行桥梁抗震计算分析的几个方法. 确定性方法中的弹性静力法, 静力弹塑性分析, 反应谱法, 时程分析法; 概率性抗震分析方法中的随机振动虚拟激励法. 并对各个方法的优缺点加以说明, 着重介绍了随机振动虚拟激励的基本原理和特点. 最后提出了有待进一步研究的几个问题.

关键词:桥梁抗震; 反应谱法; 时程分析法; 随机振动; 虚拟激励

中图分类号:U441+.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-716X(2006)S1-0032-03

桥梁的振动是引起桥梁破坏的一个重要因素, 引起振动的一个主要原因就是地震引起的振动. 对于地震引起的结构振动, 现在有多种计算方法来进行结构物的抗震设计, 各种方法各有优缺点, 对于不同的问题采用不同的计算方法将会有不同的费效比, 所以有必要清楚的了解各个方法的优缺点和抗震计算方法的发展状况.

桥梁地震响应分析方法可以分为确定性方法和非确定性(概率性)方法两大类. 确定性方法是以确定性的荷载作用于结构, 求解该确定性荷载作用下结构动力反应的方法. 非确定性方法将地震作用视为随机过程, 以此随机地震动作用于结构, 求出桥梁动力响应统计特性.

1 确定性抗震分析方法

1.1 弹性静力法

假设结构物各部分与地震动具有相同的振动规律. 结构因地震力引起的惯性力等于地面运动加速度与结构总质量的乘积, 以此惯性力作为静力施加于结构, 进行结构线弹性静力分析. 该法的缺陷在于: 忽略了结构物本身的动力特性, 只有当结构近似于刚体时, 此法才近似成立.

1.2 静力弹塑性分析(Pushover 法)

基本假定: ①多自由度结构体系的响应与一等效单自由度体系相关, 即结构响应主要由第一振型控制; ②结构物沿高度变形的形状向量, 在整个地震反应过程中保持不变. 具体实施步骤大致如下: ①预假定一个荷载分布模式; ②确定与结构性能目标相对应的位移极值; ③逐渐增大荷载, 计算结构特征荷载和特征位移之间相互关系曲线, 也称能力曲线; ④进行需求/能力比计算, 对结构性能进行评判. 严格来说 Pushover 法不能算作一种结构地震反应分析方

法. 但作为一种简化的评估方法, 能在一定程度上近似描述结构物在强震作用下的弹塑性反应性能, 给出结构从屈服到极限状态的整个非弹性变形过程. 这对于特殊、复杂的实际工程有较大价值. 我国 2001 年颁布的《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)也将此法纳入.

1.3 反应谱法

反应谱法是国内外对不同跨度桥梁进行抗震分析最基本的方法. 此法的基本原理是: 当地震的卓越频率和结构的固有频率相一致时, 结构物的动力反应就会变大. 不同周期单自由度振子在某一地震记录激励下, 可得到体系周期与绝对加速度、相对速度和相对位移的最大反应量之间的关系曲线, 即加速度反应谱、速度反应谱和位移反应谱. 此法概念简单, 将动力问题转变为拟静力问题, 容易为工程技术人员所接受. 但是它假设结构所有地面节点按相同的规律运动, 即均匀一致地面运动. 对于大跨度结构, 地面运动空间变化效应可能相当重要, 反应谱法的计算结果就不一定可靠.

1.4 时程分析法

时程分析法是将实际地震动记录或人工生成的地震波作用于结构, 直接对结构运动方程进行数值积分而求得结构地震反应的时间历程. 只要正确选择地震动主要参数, 且所选用的地震波基本符合这些主要参数, 时程分析法就可以在在一定程度上给出未来地震作用下结构反应. 该法对于线性荷载, 简谐荷载或用简单解析式表达的荷载激励下线性结构的响应能够得到具有计算机精度的数值. 由于地震加速度记录中两个离散时刻之间的加速度值一般假设为线性变化, 因此采用精细时程积分求解是非常有利的. 此方法的主要优点是既可以做线性分析, 又可

以做弹塑性动态分析,概念明确.其主要缺点是计算结果过渡依赖于所选取的加速度时程曲线,离散性很大.为得到较可靠的计算结果常要计算许多时程样本,并加以统计评论,为此需要进行大量的计算.实际上只对特别重要的大跨度结构才使用该法.

2 概率性抗震分析方法及虚拟激励法

随机振动是一门应用概率统计方法研究随机荷载作用下结构动力性态的技术学科.上世纪50年代末,由于航天工程的推动,在工程振动的研究中引入了概率和数理统计理论,极大的推动了对随机振动的研究.随机振动描述了客观存在的不确定性,在土木、机械、航空和航海等工程领域得到了广泛应用.

随机振动方法较充分地考虑了地震发生的统计特性,被广泛认为是一种较为先进合理的抗震分析工具.已被1995年颁布的欧洲桥梁规范采用.大连理工大学建立的虚拟激励法作为一种新的随机振动分析方法,已对被认为很困难的多点非均匀随机激励问题给出精确高效的计算方法,在普通微机上已可快速而精确地计算有数千自由度、几十个地面支座的大跨度多点地震激励问题,达到了实用要求.

2.1 虚拟激励法的基本原理

虚拟激励法的基本原理可用图1的单源激励问题予以阐述.

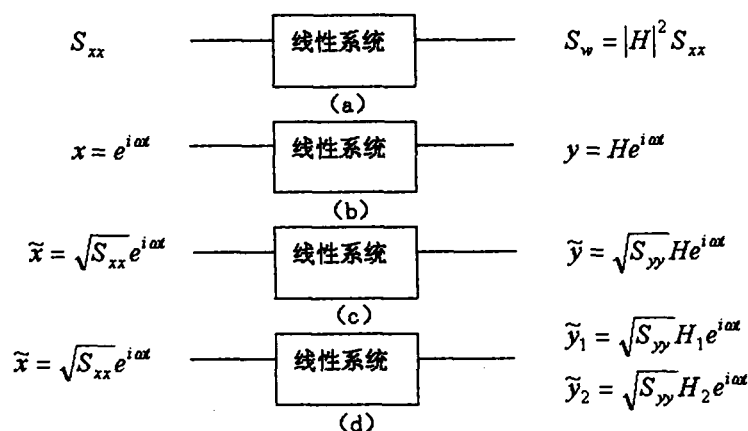


图1 虚拟激励法的基本原理

$S_{xx}(\omega)$ 为一个零值平稳随机激励 $x(t)$ 的自功率谱密度; $H(\omega)$ 为结构频率响应函数,则任意输出响应量 $y(t)$ 也为平稳随机过程,其功率谱密度如图1(a)右端.

当线性系统作用单位简谐激励 $e^{i\alpha t}$ 时,相应的响应为 $H \cdot e^{i\alpha t}$,如图1(b).显然,当作用为简谐激励时 $\tilde{x} = \sqrt{S_{xx}} e^{i\alpha t}$,其相应的响应必为 $\tilde{y} = \sqrt{S_{yy}} H e^{i\alpha t}$,如图1(c).将带“~”的量称为虚拟量.

考虑简谐激励 $\tilde{x} = \sqrt{S_{xx}} e^{i\alpha t}$ 作用于该线性系统,容易证明响应量 \tilde{y} 和自谱密度函数 S_{yy} 有如下关系式

$$\tilde{y}^* \tilde{y} = |\tilde{y}|^2 = |H|^2 S_{xx}(\omega) = S_{yy}(\omega) \quad (1)$$

同样,容易证明互谱密度函数 S_{xy} 、 S_{yx} 同激励 x 和响应 y 之间有如下等式成立

$$\tilde{x}^* \tilde{y} = \sqrt{S_{xx}(\omega)} e^{-i\alpha t} \cdot \sqrt{S_{xx}(\omega)} H e^{i\alpha t} = S_{xx}(\omega) H = S_{xy}(\omega) \quad (2)$$

$$\tilde{y}^* \tilde{x} = \sqrt{S_{xx}(\omega)} H^* e^{-i\alpha t} \cdot \sqrt{S_{xx}(\omega)} e^{i\alpha t} = H^* S_{xx}(\omega) = S_{yx}(\omega) \quad (3)$$

在上述虚拟简谐激励 $\tilde{x} = \sqrt{S_{xx}(\omega)} e^{i\alpha t}$ 作用下,考虑两个响应量 \tilde{y}_1 、 \tilde{y}_2 ,其相应的频率响应函数分别为 H_1 和 H_2 ,如图1(d),则有

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1^* \tilde{y}_2 &= \sqrt{S_{xx}(\omega)} H_1^* e^{-i\alpha t} \cdot \sqrt{S_{xx}(\omega)} H_2 e^{i\alpha t} = H_1^* S_{xx}(\omega) H_2 = S_{y_1 y_2}(\omega) \\ \tilde{y}_2^* \tilde{y}_1 &= \sqrt{S_{xx}(\omega)} H_2^* e^{-i\alpha t} \cdot \sqrt{S_{xx}(\omega)} H_1 e^{i\alpha t} = H_2^* S_{xx}(\omega) H_1 = S_{y_2 y_1}(\omega) \end{aligned} \quad (4)$$

由式(2)~(4)可以看出,通过引入虚拟激励 $\tilde{x} = \sqrt{S_{xx}} e^{i\alpha t}$ 可以很方便地通过简谐振动分析计算结构随机响应的功率谱.

以上通过对单源激励问题的说明对随机振动虚拟激励的基本原理进行了简要的介绍.

2.2 虚拟激励法的特点

以结构受单源同相位平稳随机地震激励为例,此时结构的运动方程为

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{E\}\ddot{x}_g \quad (5)$$

式中, $\{E\}$ ——惯性指示向量; \ddot{x}_g ——地面加速度,其功率谱密度 $S_{xx}(\omega)$ 已知.

对于上述问题,传统的CQC算法为

$$[S_{yy}(\omega)] = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \gamma_i \gamma_j H_i^*(\omega) H_j(\omega) \{\varphi_i\}^* \{\varphi_j\}^T S_{xx}(\omega) \quad (6)$$

式中, $\{\varphi_i\}$ 、 γ_i 、 H_i ——第 i 阶振型向量及相应的振型参与系数和频率响应函数.

这是平稳随机响应理论上的精确解,但是此法

的计算量很大,当结构的参振频率分布稀疏且各阶阻尼比很小时,很多文献推荐将式中的交叉项忽略,得到

$$[S_{yy}(\omega)] \approx \sum_{j=1}^q \gamma_j^2 \{\varphi\}_i^* \{\varphi\}_j^T |H_j(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) \quad (7)$$

这一算法称为 SRSS.

如采用虚拟激励法 (PEM),则按式(8) 计算

$$\left. \begin{aligned} [S_{yy}(\omega)] &= \{y\}^* \{y\}^T \\ \{y\} &= \sum_{j=1}^q \gamma_j H_j(\omega) \{\varphi\}_j \sqrt{S_{xx}(\omega)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中,响应 $\{y\}$ 为虚拟激励 $\{f(t)\} = -[M]\{E\} \sqrt{S_{xx}(\omega)} e^{i\omega t}$ 作用下计算得到的简谐响应. 实际上,如果将式(8) 展开就可得到式(6). 两式计算步骤不同,但在数学上是等价的. 故用虚拟激励法求出的响应功率谱矩阵也是理论上的精确解.

若令 $\{z\}_j = \gamma_j H_j(\omega) \{\varphi\}_j \sqrt{S_{xx}(\omega)}$ 则 CQC、SRSS、PEM 三种算法可表示为
传统 CQC 算法

$$[S_{yy}(\omega)] = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \{z\}_i^* \{z\}_j^T \quad (9)$$

SRSS 算法

$$[S_{yy}(\omega)] = \sum_{j=1}^q \{z\}_j^* \{z\}_j^T \quad (10)$$

PEM 算法

$$[S_{yy}(\omega)] = \left(\sum_{i=1}^q \{z\}_i \right)^* \left(\sum_{j=1}^q \{z\}_j \right)^T \quad (11)$$

从式(9)、(10)、(11) 可以看出,三种算法在计算响应功率谱矩阵时,分别要计算 q^2 次、 q 次和 1 次 n 维向量相乘. 对于大跨度桥梁,由于空间振型的耦合作用,参振振型数需要取 10^2 量级,可见三种算法计算量上的差别是巨大的. PEM 算法和传统 CQC 算法都为理论上的精确解,计算效率却相差 2~4 个数量

级. SRSS 算法的假定条件在三维分析时很难满足,计算结果并不准确,其计算量却比 PEM 算法大很多. 以上是平稳随机激励问题为例来说明的,对非平稳随机激励问题也有类似的现象.

3 总 结

本文对现行的抗震设计计算方法大致做了简要的综述,重点介绍了最新的随机振动方法——虚拟激励法. 从中我们可以看出抗震计算方法的演化过程,从确定性到非确定性,从线性到非线性的,得知计算方法越来越接近实际状况. 但是将有效的算法实际付诸工程应用仍有很多基本问题需要探索 and 解决. 比如,如果将随机振动方法列入我国桥梁抗震规范中,那么在地震作用的规定上如何与传统的反应谱方法取得协调? 计算结果怎样处理才能更合理且方便工程设计应用? 在计算结果上和反应谱法符合到何种程度(要考虑结构周期,阻尼等多种因素的影响)? 在对大跨度桥梁进行计算分析时,随机振动方法与时程分析方法在计算结果上协调如何? 以上三种方法如何相辅相成才能构成对不同跨度范围、不同类型桥梁进行抗震分析的完善方法系列? 这些都需要科研人员和工程技术人员继续努力研究.

参考文献:

- [1] 赵 岩. 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,2003.
- [2] GB50011-2001,建筑抗震设计规范[S].
- [3] 陈英俊,甘幼聚,于希哲. 结构随机振动[M]. 北京:人民交通出版社,1993.
- [4] 张 海,阎 石,焦 莉. 桥梁结构振动控制发展综述[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版),2002,18(1):15-18.

Summary of seismic analysis for bridges

YU Qi¹, CHEN Yu², WANG Jia-lin¹

(1. Civil Engineering Academy of Chongqing Jitong University, Chongqing 400074, China;

2. Nanjin Jinhai Engineering Design Ltd., Nanjin 210000, Jiangsu China)

Abstract: This paper summarizes computer method of seismic analysis for bridges. Confirmable method includes: elasticity static method, static-plastic analysis, response spectrum method and time history scheme; Seismic analysis of probability includes: the random vibration and the pseudo excitations method. This paper discuss the virtue and defect about these methods. The keystone and trait of the pseudo excitations method are paticularly presented. At last we bring forward some questions needing further study.

Key words: seismic analysis for bridges; response spectrum method; time history scheme; the random vibration; the pseudo excitations method