

大跨度桥梁的抗震分析与地震动输入

陈星烨¹, 余钱华²

(1. 湖南大学, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙交通学院)

摘 要: 文中讨论了大跨度桥梁地震反应的发展与现状;对抗震分析的主要方法进行了简介,并就存在的问题作了探讨;同时,简述了地震波的输入问题,并提出了笔者的观点;最后,笔者就使用软件 ANSYS 应用于桥梁抗震分析谈了体会。

关键词: 大跨度桥梁;地震反应;抗震分析;地震波;软件 ANSYS *

1 大跨度桥梁地震反应研究的发展与现状

桥梁地震反应研究的目的是为桥梁抗震设计提供科学依据和有效手段。早期主要采用简化静力法,50年代后发展了动力法的反应谱理论,近20年来对大跨度桥梁主要采用时程分析法。

1.1 静力法

早在1899年,日本大房森吉提出静力法的概念。它假设结构物各个部分与地面同步运动。因而可把惯性力视作静力进行抗震计算。

1951年,日本佐野倡导震度法,即根据静力法概念提出以结构的10%的重量作为水平地震荷载。

静力法把地震加速度看作是结构地震破坏的单一因素有极大的局限性,由于静力法抹掉了结构的动力特性,同时也就无法反映地震波的频谱特性对结构动力反应的影响。只有当结构物的基本周期比地面运动卓越周期小很多,从而结构物在振动时变形很小并可被当作刚体时,静力法才能成立。若超出这个范围就不能适用。因此它符合传统的力学模式,但对大跨度桥梁的抗震分析而言,静力法完全不适用。

1.2 反应谱方法

反应谱方法是动力分析的方法之一。目前在中小跨度的桥梁抗震设计中,广泛使用。它用于抗震设计主要包括两个基本的步骤:首先根据强震记录统计用于设计的地震反应谱;其次将结构振动方程

进行振型分解,将物理位移用振型广义坐标表示,而广义坐标的最大值由前一步中的设计反应谱求得。最后,反应量的最大值可通过适当的方法将各振型反应最大值组合起来得到。

该方法的优点是一旦设计反应谱确定后,反应谱法的计算工作量主要就集中在振型分解及其反应的组合工作上。用该法做地震响应分析时,须充分重视振型数量的取值。由于大跨度桥梁的自振频率在一个相当宽的频带内密布,而地震波一般都是宽带激励,因此在用反应谱方法做大跨度桥梁的分析时,所取的振型数必须足够,否则极有可能漏掉对局部反应有重大贡献的振型。例如,在安庆斜拉桥的抗震分析时,所取的振型数应为前300阶,一般的作法是先取一定数量的振型试算,然后再增加振型数,进行结果比较,直到前后两次的结果比较接近为止。此外,由于规范给出的反应谱适用于周期小于或等于5s的结构,但大跨度桥梁尤其是大跨度斜拉桥、悬索桥的基本周期一般都超过了5s,因此在用反应谱方法分析大跨度桥梁时,必须研究长周期反应谱,正因如此,现在大跨度桥梁的抗震分析一般采用时程分析法。

反应谱法的最大缺点是原则上只适用于线性结构体系,但结构在强烈地震中一般都要进入非线性状态,弹性反应谱法不能直接使用。为解决问题,有两种方法:一种是研究弹塑性反应谱,另一种是在《公路工程抗震设计规范》中通过一个综合影响系数考虑非线性因素。另外,地震反应谱失掉相位信息,经叠加得到的结构反应最大值是一个近似值,

收稿日期:2001-05-12

作者简介:陈星烨,男,长沙交通学院讲师,湖南大学在读硕士。

尽管可能是一个很好的近似值。反应谱的各种叠加方案都有一定的局限性,不是任何情况下都能给出满意结果。因此,我国桥梁抗震设计规范只适用于跨径 150 m 以下的梁桥和拱桥,不适用用于大跨度斜拉桥与悬索桥的抗震设计。

1.3 时程分析法

20 世纪 60 年代后,大跨度桥梁多采用多自由度的结构有限元动力计算图式,把地震强迫振动的激振——地震加速度时程直接输入,对结构进行地震时域分析。时域分析有三种可用的分析方法:时域内的逐步积分;时域内的标准振型时程的叠加;频域反应的计算变换到时域内叠加。因为对于一个特定的地震地面运动,线弹性时程分析得到的设计信息量很少,因此方法和在总体形式上因依赖于叠加原理而受到限制。

逐步积分法包括好几种算法,主要有:有限差分法、线性加速度法、Wilson 法、Newmark 法,前两种方法是条件稳定的,后两种方法是无条件稳定的,根据已有的研究成果条件稳定的算法,当新取的时间步长 Δt 满足: $\Delta t < T_n/2$ 时就可以满足数值稳定性。式中 T_n 表示对应于最高的振型周期。当结构的自由度较大时, T_n 值会很小,为了保证算法的稳定性时间步长就会变得非常小,从而导致计算量大大增加,因而条件稳定的算法只适宜用来求解小规模结构的动力响应。

隐式积分法是一种无条件稳定的积分格式,所以可不必为选取积分步长而烦恼,虽然如此,在选取时间步长时也应考虑到求解的精度问题,时间步长不宜取得太大。

对于非线性时程分析,荷载和反应均可以用一系列的时间间隔 Δt 来划分,在每一个时段,系统是线性的或按线性来计算。系统的特性采用时段开始时刻的特性,并且需要调整时间步长结束时的系统特性以反映新的应力或应变状态,形成新的切线刚度矩阵用于下一个时间步长。非线性时程分析的准确与否关键在于构件非线性模拟的正确与否, Wilson 法和 Newmark 法均可用于结构的非线性时程动力分析,这两种算法也是当今大跨度桥梁结构时程分析的常用算法。

2 关于地震波的输入

目前常用的大跨度结构的地震反应分析方法有多种,有确定性的也有非确定性的,确定性和非确定

性的结构地震反应分析又都可以分为时域分析方法和频域分析方法及相应的简化方法,另外还有一些近似分析方法。不同的分析方法其地震波输入也各有差异。

2.1 时域分析中的地震波输入

大跨度桥梁结构地震反应分析时域方法中比较有代表性的是对结构方程直接进行时程反应分析计算的直接积分法,该方法是一种确定性的动力分析方法,应用这一种方法可以比较精确地描述结构在动力荷载作用下的整个响应历程。地震输入可采用一致激励和多点激励模式,适用于各类桥梁线性和非线性的地震反应分析,当大跨度桥梁结构的跨度与地震波的波长处于相同数量级时,应考虑地震输入时间和空间的变异性,为了能够比较合理地预测未来地震作用下桥梁结构的地震反应,在选择输入地震波时,目前常采用以下方法:一种是类比地震波方法,选择与所建桥梁场址具有类似的地质环境,相近震级(一般采用相同地震加速度峰值)条件下的地震记录作为输入地震波。一般需选择若干条这样的地震波,分别作时程分析,根据计算结果,综合评定桥梁结构的抗震性能。另一种更为科学地确定输入地震波的方法是基于场址地震危险性分析的人工地震波方法。对于重大桥梁工程,常常需要同时选择类比地震波和人工地震波,以使对桥梁结构抗震性能的评价建立在更为合理、可靠的基础上。

2.2 频域分析中的地震波输入

频域内的确定性分析方法是建立在 Fourier 变换计算基础上的,地震动输入方式既可以是一致的震动输入,也可以是多点地震动输入。这一方法的优越性在于可以比较清楚地了解结构自振特性和地震波中频谱分布特性对结构地震反应的影响,但这一方法只能适用于线性问题。此外,在频域分析时应特别注意一个问题,由于地震荷载本身不是一种周期荷载,而且通常假定在 $t=0$ 时刻地震波作用于体系的支承处,此时体系处于静止状态,为了使地震荷载成为一种广义的周期荷载,也为了满足每个周期开始时刻的初始条件,应在地震波总持时上加一段加速度等于零的激励,即地震波总持时 $T_d = T_{动} + T_{静}$, $T_{静}$ 的具体取值应通过试算与时程分析的结果对比确定。

若已知地面各点的功率谱和互动率谱时,即可用频域分析方法根据广义力与各输入点的加速度的关系,求得广义力的功率谱及互动率谱,然后求得结构反应,但此法求得的只是结构地震反应的方差,而

非最大值,因此有时可能同采用动力时程反应分析方法得出的结果有较大的差别。

2.3 工程常用近似分析的地震波输入

采用频域方法或时域方法进行结构地震反应分析时,尽管它们的分析结果通常情况下比较精确,但对各种参数的确定比较复杂,计算工作量比较大,所以在具体的结构抗震设计时,常用一些近似方法进行分析,目前比较常用的是现行结构工程抗震规范所普遍采用的结构地震反应分析的反应谱方法。从地震输入的角度来说,现行结构抗震规范所采用的反应谱方法的地震输入是一致输入,且一般只能进行线性结构分析其最大周期不超过 5 s,因此基本上只适用于地震输入时空变化比较小的中、小跨度桥梁的地震反应分析,对于大跨度桥梁,由于地震输入有时间和空间的变异和结构反应有比较大的非线性效应,因此,近年来在大跨度桥梁结构比较精确的抗震分析中反应谱方法已很少使用,一般只在结构初步设计中使用。

如何确定指定桥址处的地震波输入?笔者认为地震波的输入应根据桥址处地震安全性评价工作的结果,再采用类比地震波方法,选择与所建桥梁场址具有类似的地质环境,相近震级(一般采用相同地震加速度峰值)条件下的地震记录作为输入地震波。通常需选择若干条这样的地震波,分别作时程分析,根据计算结果,综合评定桥梁结构的抗震性能。

3 软件 ANSYS 在桥梁抗震中的应用

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件,可广泛用于结构工程、能源、生物医学、机械制造及科学研究。笔者曾使用 ANSYS 软件对岳阳洞庭湖大桥、肇庆西江大桥等进行了抗震分析。下面就使用 ANSYS 对桥梁的抗震分析作一简介。

首先,利用 ANSYS 的图形界面绘出岳阳洞庭湖大桥的有限元图形,定义单元,输入材料特性,输入截面特性等建立岳阳洞庭湖大桥的有限元模型;此过程称为建模。模型建立的正确与否直接关系到结构的动力特性及动力响应是否正确,所以这一步是关键,其中各项工作必须认真、仔细,对于单元的选择应能反映结构的实际,而且能够体现结构的主要性能。

其次,给结构加上适当约束,利用 ANSYS 的模态分析模块对所建立的模型进行结构模态分析;通过模态分析模块的计算,可知道所建模型的动力特性,如自振频率、各阶振型等,通过振型的动画播放,可以很清楚地看到结构的各阶振型,这一方面揭示了结构的动力特性,另一方面也可以用来检验所建模型是否正确。

最后,利用 ANSYS 提供的谱分析模块和瞬态动力学分析模块可分别对中小桥和大跨度桥进行地震响应分析;把地震加速度反应谱及地震加速度时程作为激励输入结构基础,由 ANSYS 提供的计算模块便可求得。再利用 ANSYS 的后处理模块便可取出所需的计算结果,计算结果可以表格形式给出,有些还可以曲线图形形式给出。

总之,ANSYS 的功能非常强大,结构的各种常规动力分析利用它即可完成。而且,其前后处理功能也非常好。但是,对于一些特殊问题,如大跨度桥梁的行波效应就无法解决。

4 结语

笔者对大跨度桥梁的主要形式斜拉桥与悬索桥的发展进行了探讨,阐述了我国大跨度桥梁的发展情况;简单介绍了桥梁抗震分析的一些主要方法,并就存在的问题作了讨论;同时,就地震波的输入问题提出了根据桥址处地震安全性评价工作的结果,考虑防震水准要求,采用类比地震波方法,选择与所建桥梁场址具有类似的地质环境,相近震级条件下的地震记录作为输入地震波。对软件 ANSYS 在桥梁抗震分析中的应用作了简介并谈了体会。

参考文献:

- [1] 范立础编著. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社, 1997.
- [2] 交通部公路规划设计院主编. 公路工程抗震设计规范(JTJ 004-89)[S]. 北京:人民交通出版社, 1989.
- [3] 郭继武编著. 建筑抗震设计[M]. 北京:高等教育出版社, 1990.
- [4] 陈仁福编著. 大跨悬索桥理论[M]. 成都:西南交通大学出版社, 1994.
- [5] 何君毅, 林祥都. 工程结构非线性问题的数值方法[M]. 北京:国防工业出版社, 1994.
- [6] 项海帆编著. 大跨度桥梁的最新进展. 第九届全国桥梁学术会议论文集[C]. 杭州, 1990.