

# 大跨度拱桥地震反应分析研究现状及进展

邓 暖

(重庆科技学院,重庆 400042)

摘 要:介绍了非一致地震激励的模拟方法,对大跨度拱桥地震反应的分析方法和研究成果进行了总结和评述,并指出了现有研究中的不足。

关键词:拱桥;地震反应分析;非一致激励;非线性

中图分类号:U422.5<sup>5</sup>

文献标识码:A

文章编号:1673-1980(2006)01-0066-04

地震,历来是严重危害人类的一大自然灾害。近年来,地震的活动又处于一个活跃期,全球发生了多次大地震,其中多次破坏性地震都集中在城市,造成了非常惨重的生命财产损失。拱桥是公路桥梁中的主要桥型之一,它具有外形优美、经济适用、承载潜力大等优点。大跨拱桥一般被用于跨越大江大河或高沟深谷,在西南地区特别普遍。它是公路交通运输的枢纽和咽喉,也是公路工程中的生命线工程之一。对大跨拱桥的抗震性能进行全面研究,不仅对保证公路交通的安全有着重要意义,而且对抗震救灾及灾区重建也有重要的影响。笔者对地震荷载作用下大跨拱桥的结构行为,以及大跨拱桥地震反应分析的研究方法作了介绍和评述。

## 1 分析方法

地震反应分析的方法可分为确定性分析法和随机振动法两类。由于确定性分析比较直观,而且数学求解上也相对简单,该法是目前使用较多的方法,它又可分为反应谱法和时程分析法两类。

### 1.1 反应谱法

工程中最易产生惯性的是结构的最大动力反应,尤其是地震内力的最大值。振型反应谱理论提供了用较少计算量求取这种最大反应的方法。它假定<sup>[1]</sup>:(1)结构物的地震反应是线弹性的,可以采用叠加原理进行振型组合;(2)结构各支点所受的激励相同(一致性激励),不考虑基础与土壤的相互作用;(3)结构物的最不利地震反应为其最大地震反应;(4)地震动过程是平稳随机过程。反应谱的确定及振型的组合是反应谱法中的两个基本问题。受震源特性、震中距及传播介质等诸多因素的影响,地

震动特性有很强的随机性,以某一场地的反应谱来计算其它场地的结构反应显然是不合理的。为消除地震随机性的影响,各国规范一般是以大量地震记录输入,分别绘制出反应谱曲线,求其统计平均,并做平滑处理,得到平均反应谱,以此作为设计反应谱。由于各振型并不同时出现,它们对结构反应的贡献也各不相同,因此不可能把各振型反应简单相加来得到结构的反应,振型组合问题是反应谱理论中的难点之一。大量的研究表明,随着拱桥的跨越能力的提高、拱桥的动力特性也发生了变化,主要反映为自振周期长,高阶振型的影响不可忽略。受空间振型耦合效应、长周期反应谱的准确性、振型组合方法以及多点激励效应难以计入等因素的影响,对于跨度大于150m的拱桥来说,反应谱法难以获得准确的计算结果。现在,大跨拱桥一般采用时程分析法进行计算。因为计算量较时程分析法要小得多,在初步阶段仍广泛采用反应谱法计算的结构最大反应。

### 1.2 时程分析法<sup>[2]</sup>

它将连续结构物离散为多节点、多自由度的体系,建立有限元动力方程,将地震动加速度时程直接输入,计算结构的反应,使大跨度桥梁的地震反应分析进入动力分析阶段。与反应谱法只能得到结构的最大反应不同,时程分析得到的是结构在地震动作用下的反应时程,可详细了解结构在整个地震持时内的结构反应。可同时反映出地震动的三要素:振幅、频谱、持时对结构反应的影响。时程分析法适用范围较广,既能处理线性问题,又能处理非线性问题;既能处理一致激励的情况,又能处理非一致激励的情况,并且桩-土结构相互作用也能得

收稿日期:2005-12-06

作者简介:邓暖(1979-),女,湖北十堰人,助教,在读硕士研究生,主要从事结构工程研究。

到合理的处理。在处理非一致激励时,一般将结构的位移分为动位移和拟静位移两项,先分别求解,然后叠加。几何非线性的处理已相对成熟,常用的方法有梁柱理论和有限位移理论。虽然二者的出发点不一样,但其计算精度却相差不大,程序处理也基本相同。时程分析法的概念比较直接,只要给出某点的地震加速度时程,就能计算出在一系列离散的时间点上的结构反应,在算法上也较容易实现;其缺点就是用确定性的时间历程来模拟尚未发生的地震,理论上应取许多条地面运动加速度曲线作为样本分别进行计算后进行统计分析才较为合理。事实上,由于受到计算效率低的制约,又无法取太多的时间历程进行计算,当需考虑多点激励时尤其显得麻烦。

### 1.3 能力谱方法

在 20 世纪 70 年代初,美国学者 Freeman<sup>[9]</sup>在完成一个结构抗震评估项目中的分析中首次提出该方法,并为 TriService 两水准抗震设计规程所采用。该方法是基于结构在预先假定的一种分布侧向力作用下,考虑结构中的各种非线性因素,逐步增加结构的受力,直到在结构中形成机构为止,在整个分析过程中,得到结构的力与变形的全过程曲线。尽管侧向分布力是一种静力荷载,但整个分析过程可以近似反应结构在地震作用下某一瞬间的动力响应。近年来,从国外发生的几次大地震的震害调查来看,由于结构破坏造成了巨大的经济损失,这迫使工程设计人员和科研人员对现有的规程进行重新评估,并进行修正。其中一项内容就是提高了对结构抗震性能的要求。这就要求设计人员在初步设计阶段就应考虑结构的非线性特性,能够把握结构在设计地震下的主要非线性特性和性能。目前,非线性静力分析方法被 ATC-32 所采用,用于桥梁结构的抗震分析。另外,在结构的评估和加固中也引入了能力谱分析方法。该方法有以下特点:(1)允许针对不同性能目标和地震运动准则进行分析;(2)允许考虑不同材料的非线性特性和其它一些条件。

### 1.4 功率谱方法

随机振动方法(主要是其中的功率谱方法),近二十年来在国内外受到了广泛重视。加州大学伯克利分校在 80 年代初曾将核电站管线系统作了较大简化后分别从时间域和频率域研究了其在不均匀场地激励下的安全性问题,并得出结论:忽略参振振型之间的相关性和场地不均匀性都会导致很大

的误差;随机振动方法比反应谱方法更精确,比时间历程更高效。英国土木工程协会主席 R. T. Severn 等后来也分别从时间域和频率域出发研究了多座悬索桥的抗震性能。他认为随机振动方法难于求解,建议用反应谱方法来代替。美国从平稳随机振动的基本方程出发来研究这类多点不均匀随机激励问题,但在计算上同样遇到了很大的困难。

功率谱方法由于较充分地考虑了地震发生的统计概率特性,被广泛地认为是一种较为先进合理的分析工具。所以已被国外的一些抗震规范所采用(如 1995 年颁布的欧洲桥梁规范)。但是它们在分析复杂的桥梁结构模型上,仍然受到计算方法的困扰。我国近年来出现的虚拟激励法作为一种新的随机响应分析方法,可以对被认为很困难的多点非均匀随机激励问题作精确高效的计算,可以在普通微机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结构多点地震激励问题,已达到了工程实用的程度。

功率谱方法还需要进一步研究的问题有:(1)输入地面加速度功率谱的确定;(2)结构位移响应的计算问题(由于地面本身的变形,上部结构的位移必须说明是相对于地面上哪一点);(3)非平稳地面激励问题;(4)非线性随机振动计算问题;(5)地震波的传播方式。

### 1.5 各种分析方法比较

以上讨论的各种设计方法,目前在实际桥梁抗震设计中均得到应用,但要特别注意各种方法的适用范围。在表 1 中对这些分析方法作了一个总结评述。

## 2 大跨拱桥地震反应特征

大跨度桥梁地震反应的复杂性主要表现在两个方面<sup>[1]</sup>:

(1)高阶振型的影响不可忽略。在地震中较易受破坏的细部结构,其地震反应往往是由高阶振型的贡献起控制作用的。

(2)多点不同步激励和竖向地震动的影响不可忽略。

拱桥是多次超静定体系,在大跨度拱桥的地震反应中,多点不同步激励的影响是最受关注的,它将产生由于拱脚相对位移引起的拟静力作用以及激发起对称振型对地震反应的贡献,从而使地震反应增大。增大的程度与地震输入特性,结构本身的刚度、动力特性等因素有关。当桥的刚度较大时,拟

静力反应起控制作用;而结构柔性的增加,对称振型的贡献将起主导作用。另外,考虑竖向地震动的作用,一般也会使桥梁的地震反应有较大增加。以万州长江大桥为工程背景进行的研究表明<sup>[4]</sup>,非一致地震激励对结构的反应有较大的影响,使拱脚内力、拱顶的位移及内力显著增大,其中拱顶弯矩更

是增大 4.2 倍之多。文献[5]进一步研究了波速对拱桥地震反应的影响,表明:拱顶 1/4 跨截面处的竖向位移随波速的增大而减小;横向位移随波速的增大而增大;拱脚截面的内力随波速的增大而减小。

对宜宾南门大桥为工程背景进行的研究表明:地震动空间变化对主拱圈内力响应有重要影响,忽

表 1 不同抗震分析方法总结比较

	分析方法	适用范围	评 述
静力法	弹性静力法	桥台等刚性结构	仅对可视为刚体的结构有效,最为简洁。基本缺陷:忽略结构动力反应。
	非线性 Pushover 分析	复杂桥梁	设计一般不采用,多用于抗震性能评估,可同时计算非线性反应的需求和能力。缺点:静力分析代替动力过程,需要计算忽略高振型的影响。
反应谱法	单振型	规则桥梁	仅对可视为单自由度振子的结构有效,适用于线弹性反应问题,方法简单,可手算,为规范基本分析方法之一。主要缺点:无法反应地震持时的影响。
	多振型	复杂桥梁	规范采用的主要分析方法,一般需要计算机程序完成分析,适用于多自由度线弹性系统。主要缺点:存在振型组合问题,尚难考虑非一致激励,其余同上。
	等效线性化	一般用于规则桥梁	可估计非线性系统的最大反应,一般用于初步设计,方法简单,可手算,在位移设计法中应用更广。主要问题:需要更多的实践检验。
动态时程法	弹性	复杂桥梁	规范采用的主要分析方法,可同时计算结构的弹性反应的需求和能力,一般需要靠计算机程序完成分析。主要缺点:无法考虑非线性反应。
	非线性	特别复杂或关键桥梁	可以考虑 P- 效应和材料非线性,可同时计算结构非线性反应的需求和能力,需要靠计算机程序完成分析。主要缺点:计算结果需分析和校核。
功率谱方法	弹性	复杂桥梁	较时程分析法计算量小,输出数据也比较少。主要缺点:无法考虑非线性。
	非线性	特别复杂或关键桥梁	计算量小,输出数据少,可以考虑非线性。主要缺点:目前尚无现成的计算程序可以考虑非线性影响。

略这种变化将导致对拱内力的严重低估<sup>[6]</sup>。

### 3 研究评述

以上对大跨度拱桥的地震反应分析的研究途径及研究实例做了介绍,从这些研究中可总结出这样一些共同的观点:(1)在进行大跨度拱桥的地震反应分析时应考虑地震动的空间变化;(2)地震波波速对大跨度拱桥的地震反应有较大影响,反应随波速的变化情况与截面的位置有关;(3)非一致激励使大跨度拱桥的地震反应发生显著变化的主要原因是不对称的激励使结构的对称振型都被激发所致。

### 4 结 论

就分析方法而言,反应谱法计算效率高,又为工程技术人员所熟知,但其基本假定却是大跨拱桥所难以满足的。即使对反应谱法做了改进,将其推广到非线性和非一致激励的情况,但计算精度仍有待改进。时程分析法的适用性较强,它是一种确定性

的方法,如何处理地震随机性的影响、尚需进一步研究。随机振动法现在一般只用于分析线性结构。随机振动虚拟激励法可以精确高效地处理多点非均匀随机激励,具有较大的工程应用前景。

现在对大跨度拱桥地震响应分析一般只考虑了几何非线性的影响,材料非线性对地震反应的影响还有待研究。大跨度拱桥多采用钢管砼,而目前对其抗震性能的研究仍很少,如何建立空间结构材料非线性的分析模型,准确地计算材料非线性的影响,值得进一步研究。

虽然已有不少方法来合成非一致激励的地震动时程,模拟地震动的空间变化,但在使用中如何针对结构特性和具体场地情况,合理地取用相干函数模型及相关参数仍是大跨拱桥地震反应分析中的难点。

考虑或不考虑行波效应,计算结果可以相差一倍甚至于更远。这表明行波效应之重要性。规范反应谱方法难以反映这种影响,对大跨度桥梁可能产生不安全的设计。

大跨度拱桥在多维地震动作用下的结构行为也是工程中关心的问题,这一问题仍有待深入研究。

参考文献

- [1] 李杰,李国强.地震工程学导论[M].北京:地震出版社,1992.102.
- [2] 赵灿晖.大跨度钢管混凝土拱桥的地震响应研究[D].成都:西南交通大学,2002.2-3.
- [3] Freeman S A, Nicoletti J P, Tyrell J V. Evaluations of Existing Buildings for Seismic Risk- A Case Study of Puget

Sound Naval Ship yard Bremerton [A]. Proc. First U.S. National Conf. Earthquake Eng [C]. Washington: EERI, Berkeley, 1975, 113-122.

- [4] 许金华,王向坚.大跨度拱桥在地震行波作用下的响应[J].重庆交通学院学报,1998,17(2):1-5.
- [5] 郑史雄,周述华.大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能[J].成都:西南交通大学学报,1999,30(3):320-324.
- [6] 王君杰,王前信.大跨拱桥在空间变化地震动下的响应[J].振动工程学报,1995,8(2):119-125.

## On Present Situation and Development of Earthquake Reaction Analysis of Long-span Arch Bridge

DENG Nuan

(Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042)

Abstract: This article introduces the simulated method of non-consistent earthquake exciting, concludes the analysis method and research results of earthquake reaction of long-span arch bridge, and at last points out some defects about the research.

Key words: arch bridge; earthquake action analysis; non-consistent exciting; nonlinear

(上接第 51 页)

## Analysis and Prevention on Noise of Hydraulic System

LIANG Yun-feng GUO Xue-dong

(Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: Aiming at the sources of noise of hydraulic system and roads of transmitting radiant noise, in the process of designing hydraulic system, we should adopt appropriate measures to the selection of hydraulic pump, cooling fan of electric engine and shape design of air vent, and the installation of hydraulic pump and electric engine, the selection of hydraulic valves, design of spool and orifice port of valve, the selection and design of reservoir, and the selection and installation design of pipe. The result shows that the measures we have taken could reduce and prevent noise of hydraulic system thoroughly.

Key words: hydraulic pump; hydraulic system; noise

(上接第 54 页)

## On Research and Development of Extrusion Beltline of Aluminium Alloy for Vehicles

CHEN Gong-de

(Southwest Aluminium Group Corporation, Chongqing 401326)

Abstract: Aluminium alloy for vehicles is much-needed material in my country to realize traffic modernization, and also the material for subway or light rail in Chongqing or other western cities. Through the technological reform and modernization of 80MN extruder, the extrusion beltline of aluminium alloy for vehicles are developed and produced. This paper discusses this kind of beltline.

Key words: aluminium alloy; extruder; beltline