

大跨度结构抗震设计的国内外近期发展及趋向

Development and Tendency of the Antiseismic Design of the Large-Span Structure

钟万勰

(大连理工大学工程力学研究所 大连 116023)

一、本学科的研究现状

近 20 几年来,大跨度结构在工程中被日益广泛地应用。它们一般都是十分重要的公共设施,例如超长桥梁、大坝、核电站管线、高架公路、大型体育馆等,其抗震性能对国民经济和生命财产关系很大。但是,震害调查表明中等强度的地震就屡屡造成大跨度结构的严重损坏。实际上,当前各国抗震规范对有关的计算分析显得十分软弱无力。包括美国、日本等技术发达的国家在内,面对频频发生的震害,皆深感问题的严重和迫切,纷纷加强了对有关问题的研究力度。世界著名的美国旧金山海湾大桥,其东段在 1989 年的加州地震中遭到严重破坏。1997 年,加州政府决定拨巨资重建。在国际招标中,一些很权威的人士提出的方案十分美观新颖,被认为是夺标大热门。但由于未能对其抗震性能提供有力的分析验证,最终还是被加州政府组织的专家组否定了。代表政府的都市交通委员会发言人说:对于这座桥要考虑的大事是防地震能力,而不是美学问题;我们要再造一座桥,不是因为现有的桥梁很丑陋,而是为了提高防震能力。大跨度结构抗震分析的重要性在此更是被强调到了很高的地步。

大跨度结构抗震分析之所以比普通跨度结构困难得多,主要是因为必须考虑如下特殊因素。(1) 行波效应 典型的地震波波长为百余米至数百米,而大跨度结构的跨长则为上百乃至几千米。大量研究表明,当结构的跨度达到或超过地震波长的 $1/4$ 时,就不可认为结构的所有地面节点是均匀一致运动的,而必须考虑不同地面节点之间的运动相位差。而且,在任意两个地面节点之间,不同频率的谐波分量之间的相位差并不相同,从而使问题更为复杂。(2) 部分相干效应 由于诸如土壤介质的不均匀性,地震波在土壤介质中不均匀的反射和折射等各种因素造成不同地面节点之间相干性的损失。(3) 局部效应 包围某一个或少数几个支座的场地

性质变化导致局部土层对基岩激励放大作用的突变。

此外,由于地震的持续时间一般只有几十秒,所以其非平稳效应是比较显著的。这种非平稳性不但表现在激励强度上,而且表现在地震波的频率分布上:地震波刚到达某地点时通常含有较强的高频分量,以后低频分量所占比重不断增强,直至高频分量几乎完全消失。为了反映地震动的非平稳性,学术界广泛推崇的数学模型是由 Priestley 提出的演变功率谱模型。这是用 $R-S$ (Riemann-Stieltjes) 积分表示的数学模型。但由于计算上的困难,迄今仍很少见到这类双重非平稳数学模型的实际应用例子。

目前在大跨度结构的工程抗震分析中,由于缺乏更为有效而可行的方法,一般还是采用基于运动微分方程差分格式的动力时程法。这方法的优点是在原理上比较简单,在编程和使用上也比较容易;但是缺点也很多。加州大学伯克利分校(UCB)的工学院院长兼地震研究中心主任 Kiureghian 等(1992)在美国自然科学基金会资助下发表了一篇很有影响的论文。该文对动力时程法基本上持否定态度。指出该法的计算结果过分依赖于所选取的地震记录,用具有同样合法性的不同地震记录所产生的分析结果可能相差悬殊;而且这方法又需要极大的计算量,从而排除了用不同的时间历程集进行分析的可能性。所以,尽管美国目前仍在应用动力时程法来应付桥梁抗震计算,实在是不得已而为之。

近 10 几年来,国内外抗震界一些极具影响力的人士皆在对这一挑战性问题寻求更合理的解决途径。他们一致认识到应按随机振动理论和方法来处理大跨度结构的抗震分析的前景,并作了大量的研究工作。但是可以说,直到现在,随机振动方法还是难以在工程设计中被有效地应用,最根本的障碍应该说是在于计算复杂性太高,因此难以被工程人员所接受。

Kiureghian(1992)认为“虽然随机振动方法以其统计的特性而很吸引人,但是它还不能成为执业工

程师的分析方法”。Vanmarck(1994)更认为“虽然在随机激励场中随机响应分析方法的理论框架已经建立,但是将其应用于地震工程界则还是不现实的,除非是对于只有少量支承自由度的简单结构”。他们都从随机振动的基本方程出发来处理大跨度结构的多点激励响应分析,但是基于常规途径的演绎使他们面对难以接受的庞大计算工作量,最终都只能采用近似的反应谱方法,以绕过求解高自由度随机微分方程时所面对的巨大计算困难。而且其计算过程仍然相当复杂,计算量也还很大。他们(1995)还在美国ASCE学术刊物上公开争辩谁的方法更好。Vanmarcke批评Kiureghian的计算方法效率仍然太低,而Kiureghian则批评Vanmarcke的方法以过大的误差来换取计算效率。其实他们的方法都只是平稳随机振动的近似求解方法,其效率、精度都有很多缺陷,至今未被工程界接受。他们对于更为困难但同样很重要的非平稳随机地震激励问题的计算可以说更是无能为力。

随机振动作为一门近代新兴学科,自从50年代建立以来,由于其广泛的工程背景,吸引了大批科学家和工程人员的深入研究,其基本的理论框架应该说早已经建立起来了。可是在工程中的应用迄今还局限于比较简单的模型,难以应付复杂的结构计算。究其原因,主要是计算方法始终未有大的突破。首先,对于各种不同的结构,即使只受到比较简单的平稳随机激励,人们也得花费不少精力去建立其显式的传递函数(转换函数);而对于一些复杂的结构,例如受到多点不均匀激励的大跨度桥梁,建立或计算这种传递函数本身就比较困难费事。其次,在建立了传递函数之后,为了由外部激励的功率谱计算出各种响应量的功率谱,对于未知数很多的结构体系,其计算量是十分巨大的。通常应用结构的一部分自振振型对高阶随机微分方程进行降阶处理,从而导出含有对于参振振型的贡献进行二重求和的计算式。通常称之为CQC(Complete Quadratic Combination)算法。即使已这样降了阶,所需计算量也仍然是难以接受的。甚至对于小跨度结构,所有地面节点可以假定为受到均匀(互相保持一致)的随机激励,为了计算出对于工程设计有应用价值的有关谱矩,也必须对于大量的频点反复地计算上述二重求和式。这虽然可以求得理论上较为精确的结果,却需要耗费大量的计算时间。为了减少计算时间,工程中往往假定不同参振振型之间的互相关项可以忽略掉,从而把二重求和简化为单重求和,通常称之为SRSS(Square Root of the Sum of Squares)方法。对于普通跨度的结构,参振振型约需要 $q=20\sim 30$ 阶,而对于大跨度悬索桥梁,典型的计算表明,至少需要 $q=150$ 阶参振振型。SRSS法的计算量仅为CQC法的 $1/q_0$ 。这固然可以节省大量的计

算时间,但是这一简化是有严格条件的:结构必须由均匀材料组成,阻尼很小,而且所有参振振型必须稀疏分布(自振频率比须至少达 $2\sim 3$ 倍)。事实上对于绝大部分复杂工程结构而言,单是这第三条就很难满足。因为复杂三维有限元模型的参振振型所对应的自振频率往往是密集分布的,使其全部相邻自振频率分离20%以上几乎不可能。所以学术界已经认定,这种SRSS近似不能够应用于三维分析。也就是说,对于复杂的工程结构而言,仍必须按CQC算法完成二重求和号下的全部计算。此外,对于受到多点不均匀地面激励的大跨度结构来说,还要对地面激励也进行二重求和^[1,2],亦即要完成四重求和号下的全部计算,而且求和号下的每一项计算都比单点或均匀多点激励情况要复杂得多。这就使得人们在浩繁的计算量面前望而却步,而只得借助于近似的反应谱方法处理。行波效应、部分相干效应、局部效应等也都只能近似满足。1994年, Vanmarcke^[2]声称自己的反应谱方法比Kiureghian(1992)的方法好,主要理由是因为他已经将四重求和简化为三重求和;而Kiureghian则严厉地批评他(1995)“表面看来挺有好处,因为这不需要再去计算模态互相关项。但是,这一缩减是以对于每一模态响应进行额外计算为代价的,而且还可能造成很大的误差”。

二、我国学者在多点激励随机振动研究工作上的创新性贡献

近几十年来,我国有关学者在这一领域作出了很大的努力。特别是进入90年代以来,自然科学基金会就从多方面支持对于大跨度结构抗震问题的研究。从国家抗震规范的角度看,这一问题的解决亦已经到了相当迫切的程度。因为我国是地震多发地区,而近10几年来大跨度结构的建造日益增多。对于这些重要工程结构的抗震计算可以说是处于无章可循的状态,在许多情况下还是靠堆积建筑材料、加大安全度来提高设计信心。我国在人力物力资金等方面的投入上和以美国为代表的西方发达国家相比在总体上存在很大差距。但是由于几代科技人员的不懈努力,在地震随机场的现场实测、我国各省区随机地震作用强度以及场地相关性的定量描述、多点随机地震激励下结构响应的分析方法等许多方面,还是作了大量的研究工作,取得了一系列能与国际研究水平接轨的成果。可以说已经有了一支颇有素养的研究队伍和相当的工作基础。

这里特别提出并介绍由我国学者林家浩等发展的结构随机响应分析的新方法——虚拟激励法,它从根本上克服了上述计算困难^[5~7]。对于平稳随机激励问题,它将随机激励转化为简谐激励而不必寻求各种转换函数的显式表达,因此十分便于应

用;反映在计算效率上,对于单点激励或多点均匀地面激励问题,它将传统算法中的双求和式

$$\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q a_i^* a_j \left\{ \phi \right\}_i^* \left\{ \phi \right\}_j^T \text{ 转化为 } \left[\sum_{i=1}^q a_i \left\{ \phi \right\}_i \right]^* \left[\sum_{i=1}^q a_i \left\{ \phi \right\}_i \right]^T$$

的形式,从而将向量乘法的计算次数由 q^2 次降低为 1 次。尽管其计算结果与上述 CQC 算法同样精确,但是计算量却减小至 $1/q^2$,甚至于只是 SRSS 法的 $1/q_0$ 。如果使用 150 阶振型参振,用虚拟激励法计算需要 10 分钟的话,用常规 CQC 法计算则需要连续不断地计算半个多月。计算时间相差 4 个数量级,是极为悬殊的。对于考虑行波效应、部分相干效应与局部效应的多点不均匀随机激励问题,应用虚拟激励法时,则可以转化为有限个单激励问题的迭加。其总计算量不超出单激励分析的 m 倍 (m 为大跨度结构的地面节点数)。这仍然是可以接受的。对于有 3 000 自由度、17 个地面节点的香港青马悬索大桥的分析表明,当采用 200 阶振型进行多点不均匀随机地震激励分析时,为计算 1 800 个位移方差和 300 个内力方差,在奔腾 300 微机上,对于每一个地震传播方向,包括自由振动的分析在内,总共只需 8 分 59 秒计算时间^[7]。应该指出,反应谱方法并未放弃四重或三重求和。只不过对于求和号下的每一项的计算作了简化处理。所以这类反应谱方法不但精度不高,其计算效率在许多情况下可能还不如精确的虚拟激励法。

非平稳问题的计算由于比平稳问题又多了一维(时间变量),所以对于其工程应用更被视为难上加难,而虚拟激励法则已经被有效地推广到非平稳随机振动分析领域。它精确地处理 Priestley 建立的非平稳非均匀调制演变随机激励模型,将非平稳的随机激励转化为确定性的瞬态激励,从而将原来相当复杂的随机微分方程转化为简单的时间域内的逐步积分问题而仍然避免了上述双重或多重求和所造成的巨大计算量。它十分方便精确地考虑了多点激励的双重非平稳性,而且完全避免了直接计算 R-S 积分。通过与精细积分手段的巧妙结合,使计算过程大大简化却仍然保持了数学上与原问题的严格等价,以及计算结果的高度精确和极高的效率,用最简单的计算手段解决了几十年来被认为非常困难的基于 R-S 积分的高维随机微分方程的求解。目前已经在香港青马悬索大桥的设计中将地震激励由平稳而改变成非平稳非均匀调制,用虚拟激励法并结合精细积分方法^[8]作了计算。用同样精细的模型,取 200 阶振型参振,在奔腾 300 微机上,对每一地震方向也只需 56 分 11 秒计算时间^[7]。

不论是对于平稳问题还是非平稳问题,采用虚拟激励法计算不但精确计及了参振振型之间的相关性,而且精确计及了不同激励点之间的相关性,因此在理论上是属于离散问题的精确解,其精确性

与可靠性是反应谱方法所不可比拟的;而其所需要的计算时间也已经完全可以为工程接受。因此,这是大跨度结构抗震设计领域在计算分析方法上的重要突破,是很有发展前途的分析方法。

三、如何将学术上的领先优势转化为工程设计水平上的领先地位

如前所述,大跨度结构的抗震分析方法是当前工程界的挑战性难题之一。笔者曾于 1998 年末出访美国 UCB 等 15 所著名大学及 T. Y. Lin International Ltd. 等 3 所极具知名度的桥梁及建筑设计咨询公司,通过与许多国际著名专家教授进行的广泛交流,对当前国际上的研究及应用水平有了更深刻的认识。在美国,即使世界一流的桥梁设计咨询公司,在对大跨度桥梁进行抗震分析时,迄今也还拿不出更有力的方法。工程师们还只能采用比较粗糙的模型,用费时费力的动力时程法进行近似的计算。通过交流与对比,我们已经可以确认我国在该领域已经具有的优势——基于最先进的理论,进行极其高效而且精确的分析。下一步,更为重要的是如何保持并扩大优势,发展已取得的理论成果,并将其转化为工程的优势。看来必须从修订规范着手,为大跨度工程结构在多点平稳或非平稳随机地震激励下的动态分析提供指导性的设计原则和方法。这不但是在工程以及学术领域内具有国际领先水平的研究课题,而且为当前我国规范中的这一空白提供了重要的解决方案。

在 1998 年 10 月召开的第五届全国地震工程学术会议上,会议主持人,我国国家抗震规范制订单位负责人,国家建研院抗震所所长王亚勇教授在大会报告《我国 2000 年抗震设计模式规范展望》^[9]中专门提到了在这一模式规范中应用随机振动理论和方法的可能性,并指出:“由于虚拟激励法具有计算高效、方法灵活的优点,它有可能被应用于大跨度结构的多点不同相位激励的地震响应”。这表明,我们多年来所开展的基础研究已经引起了工程界的重视。但是要将这些研究成果变成 21 世纪国家规范中用来指导普遍工程抗震设计的原则,仍需花大力气开展相关的基础性研究。主要应包括以下几个组成部分。

1. 设计随机地震荷载强度的确定

当前抗震规范中所规定的我国各地的反应谱分析荷载强度可以作为随机振动方法实际应用的基础。对于均匀地面激励而言,这种荷载转换关系在国内外都已经有了些研究。基于这些工作,我们首先要找到一种最符合我国国情的转换关系,使得按照我国当前规范反应谱方法计算并应用于工程设计的安度与应用随机振动方法所计算出的

结果达到统一协调。这种均匀地面激励荷载强度可直接用于跨度不大的结构。在地震多发地区,如果已经有了当地的强震记录,则应该应用随机荷载识别技术建立当地的随机地震激励功率谱,使得抗震分析建立在更为可靠的基础上。与上述成果同出一脉的随机荷载识别的逆虚拟激励法(IPEM),为解决这一困难问题打好了一个基础。这可能使我国抗震规范更具有我国自己的特色。

2. 地震随机场相关性的定量描述

对于大跨度结构来说,确定了单点激励荷载强度之后,还要进一步确定不同地面点之间的荷载互功率谱和地震波传播速度,以便实现多点激励随机响应分析。这方面,国外的 Harichandran 和 Vanmarcke, Loh 和 Yeh, 我国的冯启民和胡聿贤、杜修力和陈厚群等都提出了在一定范围内适用的计算模型,但是作为更广泛的指导原则,应该如何选用这些模型,是否需要作进一步改进,以及如何确定模型所需要的参数等,则仍然是要花大力气研究的问题。

3. 随机响应分析结果应用于工程设计的研究

对于每一种多点激励模型,都可以作用到一定的结构上,并用虚拟激励法求出其随机动力响应。但是由此计算出的以概率统计方式表达的结果(例如平均值、方差等)应该如何转化为工程设计所便于使用的量素,则还应通过多种途径来予以检验。例如通过与其它计算方法(逐步积分法、蒙特卡罗法等)的对照,或通过实验手段(利用大型地震模拟试验台阵)的检验。这一问题的解决在技术上并无实质的困难,但是需要投入相当的研究工作量。

4. 复杂情况下动态分析方法的研究

地震机制是十分复杂的,即使是对于我们已经具备了优势的结构随机响应分析方法本身,也不能够说已经解决了一切问题。现有的方法还需要继续完善、充实提高。特别是对于地震强度和频率分量都是非平稳的问题,以及在罕见大震下结构出现局部非线性区域时的动力性态分析,等等,都还需要一一予以深入研究。

5. 进行多点地震激励实验研究

在进行理论和方法研究的同时,还应该进行实验验证。应利用大型地震模拟试验台阵,通过实桥

模型的多方案实验,与理论研究进行比较分析,以确定出指导大跨度结构抗震设计的可靠方法和步骤,并对这些成果先作小范围试用(例如先在桥梁工程甚多的交通部应用)。鉴于这一问题的研究对工程设计的紧迫性,交通部已经确定从1999年起编制“公路桥梁抗震规范”(部级规范),并已经投资数千万元,在重庆公路科学研究所建造达到国际上90年代末期先进水平的可以模拟多点地震激励和地震波行波效应的大型地震模拟试验台阵。这无疑为迅速将我国在这一领域的研究及应用水平推进到国际最前沿提供了重要的物质条件。有关各方是应该充分加以利用的。

参考文献

- [1] Kiureghian A D and Neuenhofer A. Response Spectrum Method for Multi- Support Seismic Excitations, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1992: 713~ 740
- [2] Ernesto H Z and Vanmarcke E H. Seismic Random Vibration Analysis of Multi- support Structural Systems, ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1994(5), 1107~ 1128
- [3] Kiureghian A D and Neuenhofer A. A discussion on «Seismic random Vibration Analysis of Multi- support Structural Systems», ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1995(9): 1037
- [4] Ernesto H Z and Vanmarcke E H. Closure by Ernesto Heredia- Zavoni and Eric H. Vanmarcke, ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1995(9): 1038
- [5] J. H. Lin, W. S. Zhang and J. J. Li, Structural responses to arbitrarily coherent stationary random excitations, Computers & Structures, 1994: 629~ 633
- [6] Lin J H, Li J J, Zhang W S and Williams F W. Non- stationary Random Seismic Response of Multi- support Structures in Evolutionary Inhomogeneous Random Fields, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1997: 135~ 145
- [7] 张亚辉. 复杂结构在多种荷载工况下的屈曲及动力分析. 大连理工大学博士论文, 1999
- [8] Zhong W X and Williams F W. A Precise Time Step Integration Method, Proc. Inst. Mech. Eng. 208C, 1995: 427~ 430
- [9] 王亚勇. 我国 2000 年抗震设计模式规范展望. 第五届全国地震工程学术会议论文, 北京, 1998 年 8 月, 10~ 24 (责任编辑 王宏章)

科技动态

美国研制用单个分子存储信息的存储器

据英《新科学家》1999 年 11 月 13 日报道: 美国耶鲁大学的电子工程学教授马克·里德在哥伦比亚特区华盛顿国际电子装置会议上介绍了他发明的一种新型的计算机存储器。它可以用单个的分子存储一个信息单位,并且可以写、读和像普通计算机中的随机存取存储器一样用电子学方法存取。里德说,这种存储器的外观和性能几乎完全和普通计算机存储器一样,但体积却小得多。

现在世界上也有许多研究人员在研究用于分子存储的

元件,但大多数研究人员研制的分子存储器不是用单个的分子而是用分子团存储信息;并且大多数是用光学方法存储和读取,取用一束激光照射这些分子看它们是否发光。而新的分子存储器是用 2'-氨基-4-乙炔基苯基-4'-乙炔基苯基-5'-硝基-1-苯硫醇盐这种分子,它可以用电子学方法存储和读取。由里德和得克萨斯赖斯大学的化学家詹姆斯·图尔研制出的这种存储器中的分子可以带电也可以不带电,因此它的状态可以通过电压差来测定。(刘先曙)