

多点激励反应谱法研究现状与发展

田仲业, 楼梦麟

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 首先简要地说明了大跨度结构在抗震分析中的特点以及目前常用的计算大跨度结构多点激励地震反应的三种方法, 继而详细地论述了近年来大跨度结构多点地震激励反应谱分析方法的国内外研究现状, 最后对该领域的发展方向以及进一步深入研究时所需要解决的问题进行了初步的探讨。

关键词: 大跨度结构; 多点激励; 反应谱法; 地震反应

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Research in Response Spectrum for Multi-supported Structures: Present Situation and Its Development

TIAN Zhongye, LOU Menglin

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The features of seismic analysis of long-span structures and the three methods used commonly in analyzing the seismic response of long-span structures under multi-support excitations are briefly stated, and then the research developments of multi-support response spectrum method at home and abroad are presented in detail. Finally, some problems in need of a further investigations are proposed.

Key words: long-span structures; multi-support excitation; response spectrum method; seismic response

随着经济与科技的发展, 人们正在以前所未有的速度建设着大跨度的结构, 同时大跨结构的跨度也在与日俱增, 而这些大跨结构, 如大跨桥梁、水坝、大型体育场馆等公共设施, 一旦在地震作用下遭受破坏, 其所造成的人员伤亡、经济损失以及对抗震救灾工作的影响将是极其严重的。然而, 与平面展布尺寸小的结构相比, 地震动的时空变化性对大跨结构的抗震性能的影响是不容忽视的^[1]。1965 年,

Bogdanoff 等^[2]通过数值计算得出结论, 地震动传播的时滞效应对大跨度结构的影响是不可忽略的。多次实际地震的震害也表明了地震动的空间变化性将对大跨结构产生很大影响^[3]。在地震动的多点激励下, 结构的受力情况十分复杂, 不仅受到动力地震作用的影响, 结构各支点还会因输入的位移不一致而出现相对位移, 所以其破坏可能更为严重。

目前研究大跨结构多点激励地震响应的方法主要有三种, 时程分析法、随机振动法和反应谱法。时程分析法发展较为成熟、计算较为精确, 然计算结果强烈依赖于所选取的地震动数据, 不同的地震动输入下所得计算结果可能差别很大, 因此为得到结构反应的统计结果, 必须对多条地震动时程进行计算, 工作量巨大。随机振动分析方法充分地考虑地震发生的统计概率特性, 在确定了地震动场的功率谱后, 计算得到的是结构各反应量的统计规律, 其结果不依赖于某条地震动时程, 使得计算工作量大为减少, 但随机振动法的数学处理复杂, 难以被工程设计人员接受为工程实用计算方法, 而且目前各国的抗震设计规范是以反应谱, 而非功率谱来描述地震动输入的, 因此, 相对于工程实用而言, 反应谱分析方法具有较大优势, 利用反应谱法计算结构地震反应时, 可以方便地将动力问题转化为静力问题求解, 使得复杂的地震反应计算变得简单易行, 而且反应谱本身也包含了地面运动的统计特征, 运用得当仍可得出足够精度的计算结果。然而目前通用的反应谱分析方法是建立在一致地震激励基础上的, 直接将其应用于大跨度结构的抗震分析, 会产生很大误差^[4], 因此, 发展适用于多点激励的反应谱分析方法意义重大。

目前, 发展多点激励下的反应谱分析方法主要有以下三种思路: 一是对现行一致激励反应谱法进行调整, 使其适用于多点激励的情况, 可称之为“直

收稿日期: 2012-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(90915011); 科技部国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE08-A-07)

第一作者: 田仲业(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为建筑结构抗震。E-mail: 10tzy@tongji.edu.cn

通讯作者: 楼梦麟(1947—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为建筑结构抗震。E-mail: lml@tongji.edu.cn

接反应谱法”;二是根据多点激励下结构的运动方程,将结构反应分为拟静力反应与动力反应两部分,得出结构反应在时域内的解的表达式,从而基于零均值平稳随机过程的假定,利用随机振动法得出结构反应的自功率谱密度函数、均方差函数,最终得出结构反应平均最大值的反应谱组合公式,可称之为“功率谱转反应谱法”;三是基于虚拟激励法,构造相应的多点虚拟激励,得出多点激励下的反应谱组合公式。

1 多点激励下结构运动方程

考虑一线弹性体系,上部结构自由度数共为 n , 支承点处约束自由度数共为 m , 在地面运动的多点激励下,其运动微分方程可写成如下形式^[5]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{u}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C}_c \\ \mathbf{C}_c^T & \mathbf{C}_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为对应于上部结构自由度的 n 阶质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{M}_g 、 \mathbf{C}_g 、 \mathbf{K}_g 分别为对应于支承约束自由度的 m 阶质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{M}_c 、 \mathbf{C}_c 、 \mathbf{K}_c 分别为上部结构自由度与支承约束自由度间的耦合质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 \mathbf{x} 分别为对应于上部结构自由度的绝对加速度、速度和位移的 n 维列向量; $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 、 \mathbf{u} 分别为对应于支承约束自由度的加速度、速度和位移的 m 维列向量; \mathbf{F} 为 m 维支承反力列向量。

通常,可将上部结构的总位移响应 \mathbf{x} 分解为由各支承点的相对位移引起的拟静力位移 \mathbf{x}^s 和由在地震作用下由惯性力引起的动力位移 \mathbf{x}^d 之和^[5-6], 即:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^s + \mathbf{x}^d \quad (2)$$

其中拟静力位移 \mathbf{x}^s 可用静力平衡条件求得,即将式(2)代入式(1)中,除去动力影响,即令速度和加速度项为零计算得到:

$$\mathbf{x}^s = -\mathbf{K}^{-1}\mathbf{K}_c\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{u} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{R} = -\mathbf{K}^{-1}\mathbf{K}_c$, 称为影响矩阵。

将式(2)~(3)代入式(1)中,并忽略与 $\dot{\mathbf{u}}$ 相乘的阻尼力项,得:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}^d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}^d + \mathbf{K}\mathbf{x}^d = -(\mathbf{M}\mathbf{R} + \mathbf{M}_c)\ddot{\mathbf{u}} \quad (4)$$

将动力位移 \mathbf{x}^d 表示为各振型叠加的形式,再引入比例阻尼的假定,得:

$$\mathbf{x}^d = \sum_{j=1}^n \boldsymbol{\phi}_j Y_j(t); \quad (5a)$$

$$Y_j(t) = \sum_{k=1}^m \gamma_{kj} \delta_{kj}(t); \quad (5b)$$

$$\ddot{\delta}_{kj}(t) + 2\xi_j\omega_j \dot{\delta}_{kj}(t) + \omega_j^2 \delta_{kj}(t) = -\ddot{u}_k(t) \quad (5c)$$

式中: $\boldsymbol{\phi}_j$ 、 $Y_j(t)$ 、 ξ_j 、 ω_j 分别表示结构第 j 阶振型的振型向量、正规坐标、阻尼比和圆频率; $\ddot{u}_k(t)$ 表示第 k 个约束自由度处地面运动加速度; γ_{kj} 表示在第 k 个地面运动加速度作用下结构第 j 振型的振型参与系数。于是可从第 k 个支承约束自由度处的地面运动的反应谱中读出 $\delta_{kj}(t)$ 的最大反应 $D_k(\omega_j, \xi_j)$, 再通过一定的振型组合方法,如平方和开平法(SRSS)、完全二次组合(CQC)等,即可得出结构任一自由度上的地震反应 $Z(t)$ 的平均最大值 $E(Z_{\max})$ 。

根据弹性力学理论, $Z(t)$ 可表示为结构各节点位移和支座位移的线性函数^[7], 即:

$$Z(t) = \mathbf{q}_u^T \mathbf{u}(t) + \mathbf{q}_x^T \mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^m a_k u_k(t) + \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n b_{kj} \delta_{kj}(t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{q}_u = \{q_{u,1}, \dots, q_{u,m}\}$, $\mathbf{q}_x = \{q_{x,1}, \dots, q_{x,n}\}$ 为系数向量; $a_k = q_{u,k} + \mathbf{q}_x^T \mathbf{R}_k$, $b_{kj} = \mathbf{q}_x^T \boldsymbol{\phi}_j \gamma_{kj}$ 分别为多点激励时的有效影响系数和有效振型参与系数。

2 直接反应谱法

此种方法思路是直接对现行一致激励反应谱法组合公式进行调整,使其适用于多点激励的情况,文中称之为“直接反应谱法”。

2.1 Yamamura N 和 Tanaka H 提出的分组法^[8]

该方法将结构各支承点根据其空间分布和场地情况分为若干组,相距较近且场地条件相同的支承分为一组,假定每组内各支承点的地面运动完全相关且为一致激励,而各组之间的地面运动为互不相关且为非一致激励,先将各组支承单独受到地震激励时结构各振型间的反应采用 CQC 法组合,再将不同组支承在地震激励下的反应采用 SRSS 法组合,以得到结构在多点激励下的总反应。

该方法考虑了地面运动的局部场地效应,没有计及结构反应中的拟静力项及其与动力项的互相关性,没有考虑行波效应和部分相干效应,当行波效应和部分相干效应的影响不显著时,如结构不同支承处场地差异很大,或跨越了断裂带时,该方法则具有一定的实用价值。

2.2 Berrah M 和 Kausel E 提出的修正系数法^[9-10]

该方法引入了两个修正系数,一个用来修正结构各振型反应谱值,一个用来修正振型相关系数,如此,可将一致激励时的 CQC 法推广到多点激励中.为便于工程实践应用,该方法引入地面运动为白噪声的假定,取 Loh 等^[11]所给出的地运动相干函数模型,对频响函数及式中系数进行了简化处理.特别地,针对承受水平地震作用的剪切型框架结构,当各柱刚度相近时,在上述简化工作的基础上,还得到了更进一步的简化形式.

该方法可以利用一致激励时的设计反应谱及组合方法获得结构在多点激励下的反应,考虑了行波效应和部分相干效应,但没有考虑局部场地效应,没有计及结构反应中的拟静力项及其与动力项的互相关性.

2.3 其他直接反应谱法

苏亮和董石麟等^[12]针对两边支承,且具有对称性的大跨度空间网格结构,根据结构的对称性,将结构分为正对称半结构与反对称半结构,并将两边支座处的地震动输入分解为相应的正对称分量和反对称分量,然后将两个半结构的计算结果叠加,即得到原结构的地震反应,并基于随机振动理论提出了两点激励下抗震设计的“平均反应谱法”,如此将两点激励问题转化为一致激励问题,并可同时考虑行波效应和相干效应.

楼梦麟和唐玉^[13]利用拱桥对称性,建立了进行拱桥地震行波反应计算的一致反应谱方法,该方法基于目前工程抗震设计中常用的标准反应谱,概念简单,易于工程设计人员应用.但这一方法的适用面受到限制,还只是适用于单跨的对称结构.

黄明开^[14]根据大质量法近似方法的运动方程,推导出了基于大质量法的直接反应谱方法,该方法认为,大质量体系比原结构体系增加的振型,包括刚体振型在内,就是原结构的拟静力位移的组合,当考虑了这些振型后,也就考虑了拟静力位移的影响,因此,基于大质量法的反应谱法与一般的反应谱法有着同样完备的理论基础,相似的计算公式,相同的计算精度.

3 功率谱转反应谱法

此种方法思路是根据多点激励下结构的运动方程,将结构反应分为拟静力反应与动力反应两部分,得出结构反应在时域内的解的表达式,从而基于零

均值平稳随机过程的假定,利用随机振动法得出结构反应的自功率谱密度函数、均方差函数,最终得出结构反应平均最大值的反应谱组合公式,文中称之为“功率谱转反应谱法”.

3.1 Der Kiureghian A 和 Neuenhofer A 提出的方法^[1]及相应的简化方法

该方法常称之为多点激励反应谱法,简称 MSRS 法,其假定结构各支承处的地面运动 $u_k(t)$ 为一系列零均值平稳随机过程,则结构反应也为零均值平稳随机过程,根据随机振动理论,可从式(6)推导出 $R(t)$ 的自功率谱密度函数 $G_R(\omega)$ 、均方差 σ_R^2 ,最终得出振型组合方法如下:

$$E(Z_{\max}) = \left[\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m a_k a_l \rho_{u_k u_l} \bar{u}_{k, \max} \bar{u}_{l, \max} + 2 \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n a_k b_{lj} \rho_{u_k \delta_{lj}} \bar{u}_{k, \max} D_l(\omega_j, \xi_j) + \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ki} b_{lj} \rho_{\delta_{ki} \delta_{lj}} D_k(\omega_i, \xi_i) D_l(\omega_j, \xi_j) \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中: $\bar{u}_{k, \max}$ 为 k 支承约束自由度处地面运动最大位移的期望; $\rho_{u_k u_l}$ 为 k 支承约束自由度处地面运动位移 $u_k(t)$ 与 l 支承约束自由度处地面运动位移的互相关系数; $\rho_{u_k \delta_{lj}}$ 为 k 支承约束自由度处地面运动位移 $u_k(t)$ 与 l 支承约束自由度处地面运动加速度 $\ddot{u}_l(t)$ 作用下结构第 j 正规模式反应 $\delta_{lj}(t)$ 间的互相关系数.该方法中,各互相关系数的计算最终归结为对地面运动加速度的自功率谱的积分,而工程中常用的是反应谱而非功率谱,因此该方法中建议通过公式将反应谱转化为功率谱.

当地震激励为一致激励时,可发现该方法即退化为一致激励时的 CQC 法,该方法也可视为多点激励下的 CQC 法,因此,该方法也继承了 CQC 法的缺点,即当结构阻尼较小或结构自振周期与地面运动持时相比很长时,其精度会大大降低,且没有计及截断的高频振型的影响,对于窄带地面运动输入的情况,精度也较差,这些缺点在运用该方法对金门大桥的多点激励反应谱分析中已经有所表现^[15].尽管如此,该方法较全面地考虑了行波效应、部分相干效应及局部场地效应的影响,而且较好地反映了各支承点地面运动的相关性和各振型间的相关性,理论严密,是很有发展前景的一种分析方法,但其计算过程复杂,工作量大,难以为工程设计人员接受,因此,如何提高该方法的计算效率并保证其计算精度,很多学者进行了进一步的研究.

3.1.1 Loh C H 和 Ku B D 提出的简化方法^[16]

该方法假定地震波剪切波速与视波速相等,以

简化地面运动相干函数的计算. 在计算各互相关系数时, 将功率谱密度函数分为实部和虚部两部分, 分别对其进行积分运算, 同时引入文献[9]中对传递函数的简化并建议对地面运动自功率谱密度函数进行简化^[17], 使互相关系数的无限积分简化为直接的数值积分计算, 大大减少了计算工作量. 该方法同时指出, 在结构地震反应分析中, 可以忽略拟静力反应和动力反应的相关项, 对计算精度影响不大.

3.1.2 Kahan M 等提出的简化方法^[18]

该方法是针对地震动空间变化性较小的情况所提出的一种计算大跨桥梁结构多点激励的简化方法, 使用该方法时需满足以下几个条件: ①地面运动各分量之间相互独立, 各个方向的地震激励可以单独进行计算; ②结构的拟静力反应和动力反应是完全不相关的, 此时通常需要结构的基本自振频率大于 0.5 Hz; ③结构的各阶自振频率相差较大以至于可以忽略各振型之间的相关性; ④相干损失率小于 $2 \times 10^{-3} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 且视波速大于 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 该方法通过对相干函数进行泰勒级数展开, 分别得到当大跨桥梁承受沿结构跨度方向的水平地震激励、侧向水平地震激励以及竖向地震激励时的振型组合方法. 同时, 文献[18]中提出了如何适当选取参与计算的模态数的方法.

该方法可应用于大跨桥梁的初步设计阶段, 帮助分析大跨桥梁的地震反应, 但当地震动空间变化性较大时, 该简化公式将不再适用, 对此, 文献[18]中给出了地震动空间变化性较大时, 估算桥梁结构最大地震反应的计算公式.

3.1.3 刘先明、孙建梅、叶继红等提出的简化方法^[4, 19]

该方法是针对大跨度空间网格结构所提出的一种简化方法, 其认为, 在实际工程中, 绝大多数的网格结构的自振周期小于 2 s, 此时可忽略结构的拟静力反应与动力反应的耦合; 且结构跨度一般不会超过 500 m, 各支承点可认为处于同一性质场地, 可假定各支撑处的地面运动具有相同的功率谱密度函数.

文献[4]中通过计算对比指出, 在计算相关系数时, 可将地面运动简化为白噪声过程, 并且通过对结构传递函数的研究发现, 结构对于地震波的频率分量具有较强的选择性, 可近似认为地震波中仅有与结构各个振型频率相同的成分对结构的相应振型反应有贡献, 而对其他振型的影响以及其他频率的波对该振型的贡献可略去不计.

孙建梅等^[19]在计算时, 将频响函数的乘积写成实部和虚部和的形式, 根据频响函数对地震波的频率分量有很强的选择性的性质, 进行简化处理, 并假定地面运动为理想白噪声过程, 简化后省去许多积分运算.

此外, Allam 和 Datta^[20-21]通过与文献[1]中相同的理论推导过程, 得出了地震动多点多维输入下计算斜拉桥地震反应的反应谱法公式, 并在分析中适当地考虑了各支承点地震动的相干性、反应的拟静力分量和不同模态间的相关性, 但忽略了地震动的行波效应和局部场地效应.

3.2 Heredia-Zavoni E 和 Vanmarcke E H 提出的方法^[22]及相应的简化方法

该方法常称之为“组合法”, 其假定各支承自由度处的地面运动为零均值联合平稳随机过程, 并认为地面运动持时足够长以使结构的反应达到平稳状态, 由此基于随机振动理论, 推导出了任意两个结构反应 $R(t)$ 和 $R'(t)$ 间的协方差, 并且在推导过程中指出, 该方法适用于结构相邻两阶模态的自振频率之比小于 0.7 或大于 1.2 的情况, 最后根据协方差公式, 导出 $R(t)$ 的方差, 并得到相应的反应谱法振型组合方法如下:

$$E(Z_{\max}) = \left[\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m a_k a_l \rho_{u_k u_l} \bar{u}_{k, \max} \bar{u}_{l, \max} + 2 \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n a_k b_{lj} \rho_{u_k \delta_{lj}} \bar{u}_{k, \max} D_l(\omega_j, \xi_j) + \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n (\alpha_{kli} \Gamma_{0, kli} - \theta_{kli} \Lambda_{1, kli} - \phi_{kli} \Lambda_{3, kli}) D_k(\omega_i, \xi_i) D_l(\omega_i, \xi_i) \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中: α_{kli} , θ_{kli} , ϕ_{kli} 为仅与结构自身特性有关的系数; $\Gamma_{0, kli}$, $\Lambda_{1, kli}$, $\Lambda_{3, kli}$ 称为谱参数, 其取值与地面运动特性和结构自身特性有关.

将此方法与“MSRS 法”相比可以看出, 在拟静力反应项、拟静力反应与动力反应的耦合项, 两种方法基本相同, 只是在动力反应上有所区别. Der Kiureghian 认为, 虽然此方法计算效率有所提高, 但却是以牺牲计算精度为代价的, 为此, 双方曾就各自方法的计算精度和效率进行过争论^[23-24], 而至今也未得出确切结论, 尚有待于进一步的理论研究和实际应用加以验证.

3.2.1 刘洪兵、朱晞等提出的简化方法^[25-27]

文献[25]通过略去结构拟静力反应与动力反应的耦联项, 并采用文献[9]中的相干函数模型及其简化的频响函数模型, 以及地面运动过滤白噪声模型,

以简化式(8)的计算。

文献[26-27]中提出了一种相关系数的“离线计算方法”,即在三维空间内,在一定的阻尼比及场地条件下,相关系数随结构自振频率、地震动在结构各支承间的传播时间变化的三维曲线可以事先求得,并将其存储起来,对不同结构进行分析时可对其直接调用。

3.2.2 李杰等提出的简化方法^[28]

该方法根据文献[22]的思路和推导过程,不仅得出了结构峰值反应的均值的组合公式,还得出了结构峰值反应的标准差的组合公式,在计算公式中的谱参数时,假定结构各支撑自由度处的地面运动均为理想白噪声过程,并采用文献[9]中的相干函数以及文献[1]中的反应谱与功率谱的转换关系,再进行积分运算,进而通过观察总结以及回归分析,得出了相关系数的近似计算公式。

文献[28]通过对一双塔斜拉桥的抗震分析表明,该方法的计算结果与 Monte Carlo 模拟给出的结果比较接近,且具有 MSRS 法所无法比拟的计算效率,该方法解决了既有的多点激励反应谱法计算量大、不能给出结构峰值反应的标准差这两个缺点,并可以推广应用到结构在多点激励下的抗震可靠度分析中。

3.3 王君杰等提出的方法^[29]

文献[29]从平稳随机振动理论出发,基于对复模态物理意义的解释,提出了计算一个适用于多点多维地震动作用下的一般阻尼体系的反应谱分析方法(GRSM)。一般阻尼体系的反应不仅与模态位移反应有关,而且与模态速度反应有关,因此反应谱分析方法中增加了与速度反应谱有关的项,经典阻尼体系的反应谱分析方法即为 GRSM 表达式中的一项。文中进一步研究表明,对于上部结构分析以及系统内无调谐作用的土-结构相互作用分析,与模态速度反应有关的项对结构反应的贡献可以忽略,此时一般阻尼体系的反应谱方法与经典反应谱方法在数学格式上完全相同,只是一般阻尼体系仍需求解复特征值问题。

4 基于虚拟激励法的多点激励反应谱法

此种方法思路是基于虚拟激励法,构造相应的多点虚拟激励,得出多点激励下的反应谱组合公式。林家浩等人根据随机振动原理提出了一种计算大型

结构随机响应的高效算法,即虚拟激励法^[30],为计算多点激励下大跨度结构的地震响应提供了快捷的计算方法,一些学者将此方法与反应谱法相结合,建立了基于虚拟激励法的多点激励反应谱法。

4.1 王淑波提出的振型组合法^[31]

文献[31]中认为,前文所述的适用于多点激励的反应谱法,都是基于地面运动和结构反应为零均值平稳随机过程的假定而导出的,然而对于自振周期长、自振频率密集、阻尼比较小的大跨结构而言,起主要贡献的振型响应在地震持时内多数处于非平稳过渡态,而非平稳状态,因而在此种情况下,前述方法的精度会大大下降。但是,即使对于非常简单的体系,确定非平稳过程的均方响应也是非常复杂的,难以为工程实践所接受。为此,文中从虚拟激励法入手,通过释放一些平稳过程的假定,推导出了一一种可以近似考虑结构反应非平稳性的振型组合法,即 HOC 法。该方法可近似考虑结构反应的非平稳性,计算简便,但无法考虑地震动的局部场地效应。

4.2 孙建梅、叶继红等提出的方法^[32-33]

该方法假定结构各支承处地面运动功率谱密度函数为常数,并忽略拟静力反应与动力反应的耦合项,将频响函数的乘积成实部与虚部的和的形式,根据积分表达式的特性,对相关系数的计算进行了简化,简化后,虽然表达式比较复杂,但积分次数明显减少,并通过对北京飞机维修工程有限公司(AMECO)维修机库的数值计算表明,简化后计算精度没有损失,计算结果仍为精确解,但计算时间大大缩短,并且随着振型个数的增加效果越加明显。

5 其他多点激励反应谱法

Zembaty 和 Krenk^[34]考虑地面运动的空间相关性,基于随机振动理论提出了结构抗震分析的剪力反应谱法,该方法体现了修正反应谱思想,通过适当相干函数考虑地面运动的空间变化,粗略地反映了不同支承处的地面运动对拟静力反应和动力反应的影响。

Jeng 和 Kasai^[35]基于随机振动理论提出了计算地震动行波效应下相邻结构最大相对位移的谱差法,该方法考虑了时滞效应且应用方便,但不适用与结构自振周期较小、支承相距较远的情况。

Trifunac 等^[36-37]提出了一种用于计算大跨结构在多点激励下底层柱的地震反应的相对位移反应谱法(可称之为 SDC 法),该方法直接用物理特性、几

何特性来描述结构各柱的运动及地面运动,将各柱的刚度作为权重来确定各柱运动的参考点,将多点激励问题转化为一致激励问题,可用传统的一致激励反应谱法来考虑,保持了传统反应谱法的简便性.文献[37]提出的6参数SDC法还可考虑地震动转动分量的影响.

夏友柏等^[38]提出了一种多点激励下基于改进振型位移法的反应谱法,可用较少的振型即可得到结构的地震反应,但精度不高.

6 需要进一步研究的问题

综上所述,国内外诸多学者已就多点激励反应谱分析方法进行了许多研究工作,并取得了许多有意义的成果.反应谱法因其简便性以及各国规范的紧密连接,在结构抗震分析中有着不可取代的作用,因而发展适用于多点激励下的反应谱法是有着广泛的应用前景的,在这方面,还有着以下问题需进一步加以研究:

(1)地震动输入的确定.作为结构地震反应分析的最基础的问题,地震动输入的误差和不确定性是制约多点激励反应谱法发展的一大问题,关于地震波的传播机理和相干机制,以及地震动的空间变化效应,还需要进一步深入的研究.

(2)长周期反应谱的确定.随着大跨结构跨度的不断增长,结构的自振周期也越来越长,而目前规范反应谱的长周期分量已不能满足需求.

(3)计算效率的提高.目前提出的多点激励反应谱法公式大多过于复杂,计算过于繁琐,尚只能作为科研手段,难以在工程设计中推广,如何在保证计算精度的前提下提高计算效率,将是多点激励反应谱分析方法的研究中的热点之一.

(4)非线性反应谱的研究.目前提出的多点激励反应谱法尚只能应用于线性系统,如何计算结构进入非线性之后的地震反应,还需要进行大量的研究工作.

(5)输入的非平稳性和反应的非平稳性的影响.目前的多点激励反应谱法公式的推导多是基于结构反应已达到平稳响应的假定,但对于大跨度结构来说,在地震作用下结构反应很可能尚未达到平稳状态,如何考虑地震动的非平稳性以及结构反应的非平稳性,尚有待于进一步研究.

(6)统一格式的反应谱组合公式的确定.尽管目前多点激励反应谱法的研究有很多思路,但若想将

其广泛应用于工程设计,则需推出一个统一格式的反应谱组合公式,既要保证计算精度,又要足够简明、方便,这还需要科研工作者与工程设计人员的通力合作与不懈努力.

参考文献:

- [1] Der Kiureghian A, Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic excitations [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21: 713.
- [2] Bogdanoff J L, Goldberg J E, Schiff A J. The effect of ground transmission time on the response of long structures [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1965, 55(3): 627.
- [3] 苗家武, 胡世德, 范立础. 大型桥梁多点激励效应的研究现状与发展[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 1999, 27(2): 189.
MIAO Jiawu, HU Shide, FAN Lichun. State of art and development of study on seismic performance of long span bridges under multiple-support excitations [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 1999, 27(2): 189.
- [4] 刘先明. 大跨度空间网格结构多点输入反应谱理论的研究与应用[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2003.
LIU Xianming. Response spectrum theory on long span space truss under multiple-support excitations[D]. Nanjing: College of Civil Engineering of Southeast University, 2003.
- [5] Clough R, Penzien J. *Dynamics of structures*[M]. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [6] Der Kiureghian A, Keshishian P, Hakopian A. Multiple-support response spectrum analysis of the bridges including the site response effect and the MSRS code[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of University of California, Berkeley, 1997.
- [7] Konakli K, Der Kiureghian A. Extended MSRS rule for seismic analysis of bridges subjected to differential support motions[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011, 40: 1315.
- [8] Yamamura N, Tanaka H. Response analysis of flexible MDF systems for multiple-support seismic excitations [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1990, 19: 345.
- [9] Berrah M K, Kausel E. Response spectrum analysis of structures subjected to spatially varying motions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21: 461.
- [10] Berrah M K, Kausel E. A modal combination rule for spatially varying seismic motions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22: 791.
- [11] Loh C H, Yeh Y. Spatial variation and stochastic modelling of seismic differential ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1988, 16: 583.
- [12] Su L, Dong S L, Kato S. A new average response spectrum method for linear response analysis of structures to spatial earthquake ground motions [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28: 1835.
- [13] 唐玉. 考虑行波效应的抗震设计反应谱[D]. 上海: 同济大学

- 土木工程学院, 2008.
- TANG Yu. The seismic design spectra considering the wave traveling effect[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2008.
- [14] 黄明开. 非一致激励下大跨空间结构地震反应分析[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009.
- HUANG Mingkai. Seismic responses analyses of long-span space structure under non uniform excitations[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2009.
- [15] Nakamura Y, Kiureghian A D, Liu D. Multiple-support response spectrum analysis of the golden gate bridge[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of University of California, Berkeley, 1993.
- [16] Loh C H, Ku B D. An efficient analysis of structures response for multiple-support seismic excitations [J]. Engineering Structures, 1995, 17(1): 15.
- [17] Kaul M. Stochastic characterization of earthquakes through their response spectrum [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, 6: 497.
- [18] Kahan M, Gibert R J, Bard P Y. Influence of seismic waves spatial variability on bridges[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25: 795.
- [19] 孙建梅, 叶继红, 程文灏. 多点输入反应谱方法的简化[J]. 东南大学学报, 2003, 33(5): 647.
- SUN Jianwei, YE Jihong, CHENG Wenrang. Simplification of the multi-support response spectrum method [J]. Journal of Southeast University, 2003, 33(5): 647.
- [20] Allam S M, Datta T K. Seismic behavior of cable-stayed bridges under multi-component random ground motion [J]. Engineering Structures, 1999, 21: 62.
- [21] Allam S M, Datta T K. Seismic behavior of cable-stayed bridges under multi-component random ground motion by response spectrum method[J]. Engineering Structures, 2000, 22: 1367.
- [22] Heredia-Zavoni E, Vanmarcke E H. Seismic random-vibration analysis of multisupport-structural systems [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(5): 1107.
- [23] Der Kiureghian A, Neuenhofer A. Discussion on "seismic random-vibration analysis of multi-support structural systems" [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(9): 1037.
- [24] Heredia-Zavoni E, Vanmarcke E H. Closure on the discussion on "seismic random-vibration analysis of multi-support structural systems" [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(9): 1037.
- [25] 刘洪兵, 朱晞. 大跨度斜拉桥多支承激励地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 38.
- LIU Hongbin, ZHU Xi. Seismic response analysis of long-span cable-stayed bridges under multi-support excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 38.
- [26] 刘洪兵, 朱晞, 郑峰. 基于三维相关系数谱的多支承激励反应谱法[J]. 世界地震工程, 2005, 21(4): 106.
- LIU Hongbin, ZHU Xi, ZHENG Feng. Multi-supported response spectrum method based on 3D spectrum of correlation coefficients. [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2005, 21(4): 106.
- [27] 刘洪兵. 大跨度桥梁考虑多点激励及地形效应的地震响应分析[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2000.
- LIU Hongbin. Seismic analysis of long-span bridges for multi-supported excitations and topographic effects [D]. Beijing: School of Civil Engineering and Architecture of Beijing Jiaotong University, 2000.
- [28] 李杰, 李建华. 多点激励下结构随机地震反应分析的反应谱方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3): 21.
- LI Jie, LI Jianhua. A response spectrum method for random vibration analysis of structures under multi-support excitations [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(3): 21.
- [29] 王君杰. 多点多维地震随机模型及结构的反应谱分析方法[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1992.
- WANG Junjie. Stochastic models of multi-support and multi-dimension seismic inputs and response spectrum method[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics of China Earthquake Administration, 1992.
- [30] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- LIN Jiahao, ZHANG Yahui. Pseudo excitation method for random vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [31] 王淑波. 大型桥梁抗震反应谱分析理论及应用研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 1997.
- WANG Shubo. Response spectrum theory for long-span bridges [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 1997.
- [32] 孙建梅. 多点输入下大跨空间结构抗震性能和分析方法的研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2005.
- SUN Jianmei. Research on seismic behavior and analysis method of long-span space structures under multiple support excitations [D]. Nanjing: College of Civil Engineering of Southeast University, 2005.
- [33] 孙建梅, 叶继红, 程文灏. 多点输入反应谱中相关系数 ρ_{ijkl} 的简化[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 124.
- SUN Jianmei, YE Jihong, CHENG Wenrang. The simplification of the coherency coefficients ρ_{ijkl} in the multi-support response spectrum[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 124.
- [34] Zembaty Z, Krenk S. Spatial seismic excitations and response spectra [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119 (12): 2449.
- [35] Jeng V, Kasai K. Spectral relative motion of two structures due to seismic travel waves [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(10): 1128.
- [36] Trifunac M D, Todorovska M I. Response spectra for differential motion of columns[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26: 251.
- [37] Trifunac M D, Gicev V. Response spectra for differential motion of columns paper II[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 26: 1149.
- [38] 夏友柏, 王年桥. 多点地震激励下基于改进振型位移法的反应谱方法[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 164.
- XIA Youbo, WANG Nianqiao. The response spectrum method based on modified modal displacement method for multi-support structure[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 164.