

连体结构行波效应的反应谱分析方法

王克峰¹, 李静斌², 丁洁民¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 从振型分解反应谱方法的原理出发, 提出了一种考虑双塔连体结构行波效应影响的反应谱简化分析方法, 其目的旨在通过对振型分解反应谱方法中参与系数的调整, 在分析中合理的引入行波效应的影响. 根据提出的方法, 在算例分析中对比了反应谱简化分析与直接动力分析, 从所得出的结果可以证明, 作者所建立的简化谱该方法是一种行之有效的分析手段.

关键词: 行波效应; 振型分解反应谱法; 参与系数

中图分类号: TU 318.4

文献标识码: A

0 引言

行波效应对大跨度、多点支撑结构体系的影响已经引起工程界广泛注意. 目前, 许多学者已经针对该类问题进行了广泛而深入的研究, 并取得了许多有意义的理论成果^[1~5]. 现有研究成果基本上是从“非平稳随机过程”的角度出发, 重新建立结构的地震反应动力方程来进行分析^[6]. 从随机振动分析的机理来讲, 这种方法是建立在统计学意义之上的一种概率性分析方法, 在没有建立相关的统计资料之前, 其理论上的可行性还不足以直接指导实际应用. 为了解决上述问题, 我国学者提出了“虚拟激励”的方法^[7]. 但是, 这种方法对于分析大型复杂结构过于复杂, 也不利于工程中的应用.

从结构工程中需要考虑行波效应影响的体系形式来看, 对于大多数体系, 其地震的激励点(地震波输入点)的个数是比较少的, 相对于桥梁工程等多点支撑体系, 建筑结构特别是高层建筑结构, 其在行波效应下的反应形式是比较简单的. 因此, 可以采用较为有针对性的简化方法来对其进行分析. 在此类结构中, 双塔连体结构形式是比较有代表性, 如巴黎的台方斯大门, 上海的证券大厦等, 本文也将主要针对该类结构形式进行分析.

1 双塔连体结构的特点

随着建筑结构形式的不断发展, 底部独立、顶

部相连的双塔连体结构形式不断的出现. 由于其两个塔楼之间的跨度很大(一般在数 10 ~ 100m), 而且连体部分的刚度相当大, 可以协调两个塔楼部分的变形, 在地震力作用下, 这些结构同时拥有高层与大跨度结构的受力特性. 由于在大跨度结构中, 行波效应的影响是一个必不可少的研究内容, 因此, 对双塔连体结构进行行波效应的分析就显得十分必要. 但是, 与大跨度、多点支承体系的特性相比, 双塔连体结构在进行行波效应分析时又有着其自身的特点: ①结构的变形协调塔楼顶部能够协调; ②结构的激励输入点少, 一般只有两个; ③结构在行波效应影响下的动力反应特性能够较清楚的把握. 由于上述的特点, 双塔连体结构的行波效应分析可按照一定的简化方法来进行.

由于结构顶部连体结构的变形协调作用, 使得不同塔楼的地震波输入能够通过其进行传递, 从而为行波效应的出现提供了保证. 同时, 由于结构地震波的输入点只有两个, 从而在视波速一定的假设前提下^[6], 地震波在两个激励点的相位差可以认为是一个常数^[8]. 当两点输入波的相位差 $\theta = 0$ 时, 两激励点地震波输入情况相同, 结构不受行波效应的影响, 从而可以将其地震动反应简化为单点激励形式来分析; 而当 $\theta = \pi$ 时, 两个输入点的激励方向正好相反, 从而行波效应达到最大. 根据振型分解反应谱的思想, 在 $\theta = \pi$ 时, 由于地震波输入的正对称性, 结构振型中所有正对

收稿日期 2005 - 09 - 28; 修订日期 2005 - 11 - 29

基金项目: 建设部科技攻关资助项目(01 - 2 - 009)

作者简介: 王克峰(1977 -), 男, 河北省唐山市人, 同济大学博士研究生, 主要从事钢结构振动控制方面的研究.

称振型受到的激励最大,其参与系数也将随之增加.由于正对称振型的参与系数变化,导致结构体系中内力分布特性的改变,这种变化往往导致局部构件内力的增大.在上述分析的基础上,工程简化分析中就可以通过调节结构各振型参与系数的方法来实现对双塔连体结构行波效应的分析.本文也正是基于此思想来建立一种对于此类结构简化的行波效应分析方法.

2 行波效应的振型分解反应谱分析方法

由于现有的反应谱分析方法没有提供根据工程需要调节结构振型参与系数的方法,因此,在这里需要建立如下的简化假设:

当地震波在两个激励点之间的相位差为 $\theta = \pi$ 时,假设结构的第一个对称振型达到共振,体系的振动反应完全由其控制,从而其参与系数 $\gamma = 1$;而在时,此对称振型没有贡献,因而 $\gamma = 0$.当相位差 $\theta \in (\pi, 2\pi)$ 时,其变化规律对称于 $\theta \in (0, \pi)$.由于高层建筑结构地震力主要受到反对称振型的影响,所以,上述对于对称振型在其中作用的分析是合理的.上述对于行波激励相位差的分析可以从下图 1 中两个激励点振动圆频率相位差示意图来表示.

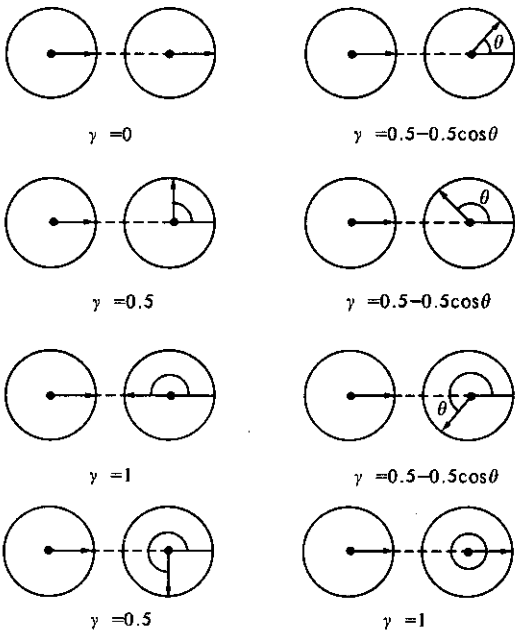


图 1 行波相位差与参与系数关系

Fig.1 Relationship between the phase and the participation

在上述假设的前提下,双塔连体结构的行波效应影响可以归结为:根据激励点相位差的大小,合理调整各参与振型在结构体系地震反应中参与

系数的问题.

根据结构振型分解反应谱分析方法的思路,在弹性分析的前提下,结构各自振型与其在地震反应中的参与系数可以表述如图 2 中的 n 维张量空间中坐标系与坐标值之间的关系.

由 ϕ 组成的 n 维张量空间形成了结构实际振动反应向量 OA 的空间坐标系.其中 ϕ 为单位向量, γ_i 为结构第 i 振型的参与系数,同时在图 2 中表示体系振动向量在第 i 个坐标轴上的坐标值,设 γ_n 为第一个对称振型 ϕ_n 的参与系数.按照空间向量坐标的定义有: $\sin \alpha \cdot \|OA\| = \gamma_n$. ϕ_Σ 轴为除 ϕ_n 振型外的各主要反对称振型综合振型向量, γ_Σ 为其对应参与系数, α 为结构实际振动反应与振型 ϕ_Σ 的夹角.

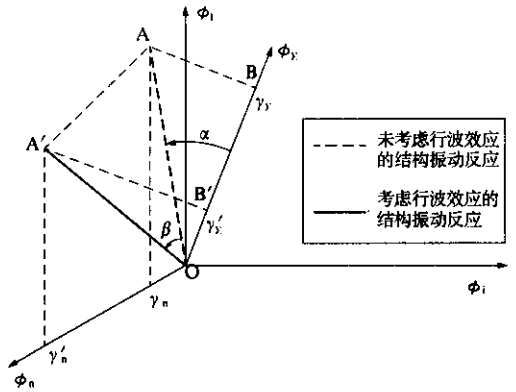


图 2 振型参与系数空间向量分析

Fig.2 Participation Vector Representation

$$\gamma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\gamma_i \phi_i)^2} \tag{1}$$

由于受到行波效应的影响,使得结构的振动向量 OA 与 ϕ_Σ 的夹角从 α 角度旋转到了角度 $\alpha + \beta$, 达到向量 OA' 的位置.由于上述向量的旋转,从而导致了各个振型参与系数的重新调整. OA' 在 ϕ_n 与 ϕ_Σ 上的参与系数分别变为 γ'_n 与 γ'_Σ .从精确分析的角度考虑, OA' 的倾角应该是 α 与行波效应影响的和,但是对于高层结构体系,在不考虑行波效应影响的条件下,对称振型对地震反应的参与性是很小的,因此 α 的影响一般很小.这里从简化分析出发,认为 $\sin \beta \|OA'\| = \gamma'_n$, 即向量 OA' 的 ϕ_n 向坐标只由行波效应 β 引起,而 $\cos \beta \|OA'\| = \gamma'_\Sigma$.

根据振型空间向量的正交性有

$$\begin{aligned} \gamma'_\Sigma \|\phi_\Sigma\| &= \cos \beta \cdot \|OA'\| = \|OB'\| \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\gamma'_i \phi_i)^2} \end{aligned} \tag{2}$$

又因为对正规化向量 $\|\phi_\Sigma\| = 1$, 所以有

$$\gamma'_\Sigma \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\gamma'_i \phi_i)^2} \tag{3}$$

根据式(1)与式(3), 当 γ_Σ 变化为 k 时, 有如下的式(4)成立:

$$\begin{aligned} \gamma'_\Sigma &= k\gamma_\Sigma = k \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\gamma_i \phi_i)^2} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (k\gamma_i \phi_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\gamma'_i \phi_i)^2} \end{aligned} \tag{4}$$

即, 在考虑行波效应时, 各个振型参与系数的变化之间存在着定比关系.

由于 ϕ_n 在其中的参与作用可以忽略, 所以

$$\gamma_\Sigma = \cos \alpha \cdot \|OA\| \approx \|OA\| \tag{5}$$

而考虑行波效应后 $\gamma'_\Sigma = \cos \beta \cdot \|OA'\| \approx \|OA'\|$. 又因为, 对于高层结构, 行波效应的影响不会改变结构总的地震侧向力反应, 所以可以认为 $\|OA'\| = \|OA\|$. 从而 $\gamma'_\Sigma = \cos \beta \cdot \|OA\|$. 所以, 综合反对称振型参与系数 k 的变化率为

$$k = \frac{\gamma'_\Sigma}{\gamma_\Sigma} = \frac{\cos \beta \cdot \|OA\|}{\|OA\|} = \cos \beta \tag{6}$$

从图 1 中可以得到, 考虑行波效应后, 对称振型的参与系数可表示为

$$\sin \beta = \gamma'_n = 0.5 - 0.5 \cos \theta \tag{7}$$

其中, 对于双塔连体结构, 激振力相位差为

$$l\theta = \frac{v}{T_n} \times 2\pi \quad \theta \in (0, \pi) \tag{8}$$

式中: l 为两激励点之间的距离; v 为场地的剪切波速; T_n 为有意义的对称振型的自振周期. 所以

$$\begin{aligned} k &= \cos \beta = \cos[\arcsin(\gamma')] \\ &= \cos[\arcsin(0.5 - 0.5 \times \cos \theta)] \end{aligned} \tag{9}$$

根据上述式(7)(9), 对比综合反对称振型与对称振型参与系数调整规律, 可以得出如下图 3 所示的关系.

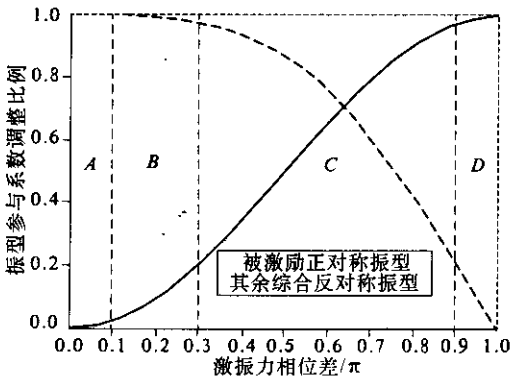


图 3 振型参与系数调整比例分析

Fig. 3 Analysis of regulation to the participation

从图 3 可以看出, 随着地震荷载激励相位差的增加, 体系的振型参与系数变化趋势明显呈现 $A \sim D$ 4 个区域. 在不同的区域内, 对称振型的参与系数与综合反对称振型的参与系数变化规律基本上相反.

在 A 区, 行波的相位差较小, 与之相对应的两种振型参与系数变化都比较小. 这也从另一个的角度说明对于激励点相差较小的两点支承结构, 其行波效应较小. 在 B 区, 综合反对称震振型的参与系数变化较小, 而对称振型的变化较大. 这说明在较小的行波效应下, 对称振型对激励的敏感性高于其它非对称振型. 在 C 区, 地震波激励的相位差已经比较大(0.3 ~ 0.9 之间), 从而导致各振型参与系数发生很明显的变化. 在这一区域内有可能对称振型参与系数超过综合反对称振型参与系数的情况. 在 D 区, 结构综合反对称参与系数的影响变化逐渐收敛于最大值, 结构振动基本上受到正对称振动的控制. 从上面图 3 中可以发现, 如果对于行波效应影响处于 A, B 区时, 由于其影响较小所以, 可以直接采用公式(7)(9)进行分析. 但是如果行波效应影响处于 C, D 区时, 由于这时的对称振型的参与系数与其它振型的影响无关, 所以计算的结果会导致综合反对称振型的参与系数过小, 从而改变了体系的整体地震反应特性. 因此, 为了纠正此情况下的误差, 在行波效应达到 C, D 区时, 不应该考虑综合反对称振型参与系数的折减. 特别是在连体结构跨度较大时, 上述问题更应该引起充分的注意.

综上所述, 采用振型分解反应谱思想进行双塔连体结构的行波效应分析方法可以归纳如下的 4 个步骤:

(1) 通过结构体系的自振特性分析找到对行波效应分析有意义的对称振型及特性;

(2) 通过场地土特性(剪切波速)以及建筑结构激励点的相对位置来确定行波效应的影响大小, 结合对称振型的特点, 根据图 3 确定如何考虑行波效应;

(3) 根据上述数据计算出各个振型的振型参与系数的调整系数.

(4) 根据各个振型计算结果, 得出在考虑行波效应条件下的结构体系综合反应值.

上述过程较行波效应直接动力法的过程与工作量都大为简化, 特别是对于其采用的反应谱方法, 由于广大工程设计人员都能够较熟练的运用, 因此, 此方法对于工程设计人员特别有实用意义.

3 算例分析

根据上述方法,笔者采用了西安某工程中双塔输电线结构作为算例进行考虑行波效应影响的双点激励结构体系地震反应分析,并利用弹性动力时程分析作为检验上述分析方法正确性的手段.为了便于工程人员直接从相关的设计规范中提取对应的参数,本分析中采用的分析参数都为结构设计中所采用的常规数据.由于本工程假设场地土为三类,同时假设场地土厚度大于 50 m,所以,等效剪切波速的范围取为 250 ~ 140 m/s (取平均值 195 m/s)^[6].结构两个地震波输入地点的最大间距为 230 m,最小的间距为 150 m(取平均值 190 m).

由模型的模态分析中可知:在未考虑行波效应时,结构在 X 方向的主要参与振型为第 2、9 阶振型,且都为反对称振型(周期分别为 1.69 s、0.60 s);同时,由结构模态分析也可以发现:在 X 方向有意义的对称振型为第 6 阶振型(第一阶 Z 方向振型,周期为 0.72 s).其在通常的 X 方向未考虑行波效应的反应谱分析中所发挥的作用很小.

为了了解行波效应对上述结构连体部分的影响,首先对其进行了不考虑行波效应与考虑行波效应条件下的动力时程分析.本算例的分析主要针对结构体系中的连体部分弦杆受力进行.根据结构所在的场地条件,选取如下的 3 条地震波作为分析的基础:①1977.2.9. L. H. Array. st. 1;②1986.7.30.台湾;③1986.1.16.台湾.

参考两地震动输入点之间的距离与地震波波速,计算得,在考虑行波效应时,结构的两点地震动输入时间差为 1 s.从而得到连体部分弦杆在未考虑与考虑行波效应影响的条件下,轴向应力动力反应最大值取其绝对值沿着连体方向的相对大小关系如下图 4 中所示.从上述结构的动力分析中可以发现:

(1) 不论是否考虑行波效应的影响,连体部分的受力都是以反对称为主(由于图中数据取绝对值,所以表现为对称情况),说明体系的 X 方向地震反应仍然受到该方向主要参与振型(反对称振型)的控制;

(2) 结构体系在未考虑行波效应影响的条件下,中部杆件的受力很小,而在考虑了行波效应影响后,中部杆件的受力增加较多,而边缘杆件的受力增加较少.说明行波效应的影响主要集中在中部

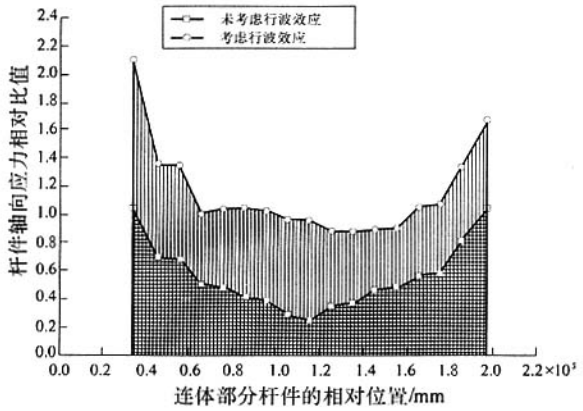


图 4 有/无行波效应影响的综合动力反应

Fig.4 The Influence of the Passage Wave Effect

杆件部分,且其变化影响呈现正对称效果.从而,正对称振型在结构动力反应中的参与作用增加;

通过上述分析,基本上可以定性的确定,对于双塔连体结构,其行波效应的影响主要体现在地震波传播方向对称振型参与作用的增加上.因此,通过合理的调节结构正对称振型在行波效应影响方向上的参与作用,可以在一定程度上引入对行波效应影响的考虑,即本文所提出的分析方法.

为了进一步按照本文所提出的方法在反应谱分析中引入行波效应的影响,根据式(7)计算得,在综合振动反应中对称振型的参与系数为 0.75.根据 SRSS 方法,重新计算得到的连体部分杆件的综合受力反应如下图 5 所示.

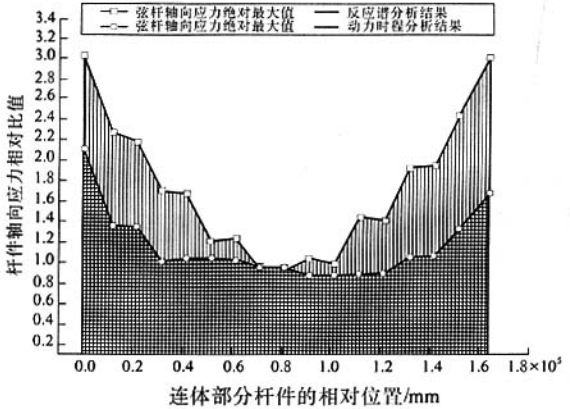


图 5 有行波效应谱分析与有行波效应动力分析平均值比较

Fig.5 Improvement of the Spectrum Method

从上述分析结果中可以看出:

(1) 当按照本文所提出方法对反应谱分析进行了修正后,其对结构连体部分杆件,特别是误差较大的中间部分杆件计算结果的改进是很显著的.从图 6 中可以发现,经过重新计算后,反应谱

方法所得出的结果基本上能够包络动力分析的结果.从设计的角度来说,这样的结果是偏于安全的.

(2)同时,比较连体部分杆件受力的相对关系可以发现,上述改进方法并没有影响到其整体的受力形式,只是调整了中间部分杆件的比例.从其数值的大小中也可以发现,连体部分边缘杆件的受力分析结果基本上没有受到影响,仍然能够满足结构整体反对称变形为主的受力特点.

4 结论

对于双塔连体结构体系,行波效应的影响主要是其正对称振型在其中参与大小的影响.合理的根据结构地震波输入点之间的关系来计算行波效应影响的大小,在反应谱分析中引入正对称振型的影响,能够较好的控制体系连体部分的受力分析,有效的消除振型分解反应谱方法不能够反映行波效应影响的问题.此方法不但对结构的整体受力分析结构影响小、可靠性高,而且,对局部受力分析的改进也十分明显.基本上能够为实际的工程分析相关问题提供有力的参考.

参考文献：

[1] 林家浩,张亚辉,赵 岩.大跨度结构抗震分析方法及近期进展[J].力学进展,2001,31(3):350~360.
[2] 钟万勰.大跨度结构抗震设计的国内外近期发展及趋向[J].科技导报,2000,9(3):7~10.
[3] 许金华,王向坚.大跨度拱桥在地震行波作用下的响应[J].重庆交通学院院报,1998,17(2):1~5.
[4] ASPASIA Z, VASSILIOS Z. Spatial variation of seismic ground motions: An overview[J]. Appl. Mech. Rev. 2002, 55(3):1~18.
[5] HONGNAN L, LI S, GANGBING S. Modal combination method for earthquake-resistant design of tall structures to multidimensional excitation[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings 2004, 12(5):245~263.
[6] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
[7] 林家浩,李建俊,张文首.大跨度结构考虑行波效应时非平稳随机地震响应[J].固体力学学报,1996,17(1):65~68.
[8] SOYLUK K. Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges [J]. Engineering Structures. 2004, 11(8):1573~1583.

Seismic Response Spectrum Method Based Wave – passage Effects Analysis of the Double-Tower Structure

WANG Ke – feng¹, LI Jing – bin², DING Jie – min¹

(1.School of Civil Engineering, Tongji Univesity, Shanghai 200092, China ;2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : Double-tower structure , as a kind of high-rise buildings owned much aesthetic approval , is typically sensitive to the wave – passage effects . It is especially the case when it comes to the long – span ones . Confined by the limits , which is based on the no spatially varying ground motion supposition , the seismic response spectrum method can hardly analyze the spatial effect enlarged by the span parameters . Errors , then , will be inevitable results . More often than not , the errors seriously undermine the safety and reliability of the seismic spectrum method . On the other hand , when the errors are unacceptable , the major and the only method engineers can use is the time history method . But , when it comes to the practicability and reliability , the perfect theory is merely a compromise tool to check the trends of the wave-passage effects and can hardly give the meaningful results to direct the structure design . Based on the analysis above , a convenient and reliable method to solve the wave-passage effects to the double-tower structures is necessary . Accordingly , a seismic response spectrum method based wave – passage analysis of the double – tower structures is recommended . And the validity of the method is proved by the following example .

Key words : wave-passage effect ; seismic response spectrum method ; participation coefficient