

文章编号:1673-2049(2005)04-0027-05

# 大跨度屋盖结构等效静风荷载研究

武 岳<sup>1,2</sup>, 陈 波<sup>1</sup>, 沈世钊<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:**有关等效静风荷载理论的研究,以往多针对高层、高耸结构展开。大跨度屋盖结构与高层、高耸结构形式相比,最大的不同在于要考虑多阶振型的影响。由此带来的问题有:对于结构的不同构件和不同响应类型,其等效原则不是惟一的;结构振动模式与荷载分布形态密切相关;如何考虑多阶振动模态的组合。针对以上 3 个问题,分别探讨了相应的解决思路,并初步给出了关于结构等效背景分量和等效共振分量的确定方法。研究表明:该方法在保证控制点等效的同时,还能使结构其他部位的等效响应更接近于实际可能出现的最不利响应,因而能够更加准确地反映出大跨度屋盖结构风振响应的本质特征。

**关键词:**屋盖结构;等效静风荷载;本征正交分解法;里兹向量叠加法;荷载响应相关系数法

中图分类号:TU312.1

文献标志码:A

## Research on equivalent static wind loadings of large-span roof structures

WU Yue<sup>1,2</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, SHEN Shi-zhao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Concerning equivalent static wind loading (ESWL) theory, people have done a lot of works on high-rise buildings and large-span bridge structures. But compared to these two type structures, the biggest difference lying in the studies of ESWL theory on large-span roof structures is the frequencies of vibration modes which are normally very close, ie, they occur within a narrow frequency range. Consequently, it is impossible to estimate the wind-induced response of a long-span structure's roof in terms of lower frequency vibration modes alone, as is normally adequate for the analysis of high-rise buildings. The problems that bring from this are: for different component of structure and different response, its equivalent principle does not be sole; structural vibration modes and load distribution patterns have some internal links; how to consider the combination of multi-vibration-mode. Authors discussed some solutions to these three problems firstly, then, put forward a preliminarily theoretical framework for deciding the ESWL on large-span roof structures, finally, gave some detail formulas for calculating background components and resonant components of ESWL. It is proved that the method of this paper provides a good characterization of the ESWL distribution with the actual extreme wind loading on large-span structures.

**Key words:** roof structure; equivalent static wind loading; proper orthogonal decomposition method; RITZ vector repeat method; load-response correlation formula method

收稿日期:2005-10-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50338010)

作者简介:武岳(1972-),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学副教授,工学博士,博士后. E-mail:wuyue\_2000@163.com

## 0 引言

等效静风荷载理论研究始于高层、高耸结构。1967 年, DAVENPORT A G 率先引入随机振动理论, 建立了结构抖振响应的理论框架, 并借助阵风荷载因子这一概念将复杂的动力分析问题转化为易于被设计者接受的静力分析问题, 从而开创了等效静风荷载理论研究的先河<sup>[1]</sup>。其后, 各国学者主要针对高层结构的等效静风荷载确定方法提出了一系列改进措施<sup>[2~4]</sup>, 但是基本思想没有变化, 即都是试图用平均风荷载的分布形式来表示等效静风荷载。这样做的优点是表达简洁、使用方便, 但缺点是仅能从数值上保证最大响应点与实际风荷载产生的响应等效, 而无其他明确的物理含义, 更不能反映风荷载的作用机理。该方法的基本过程如图 1 所示。

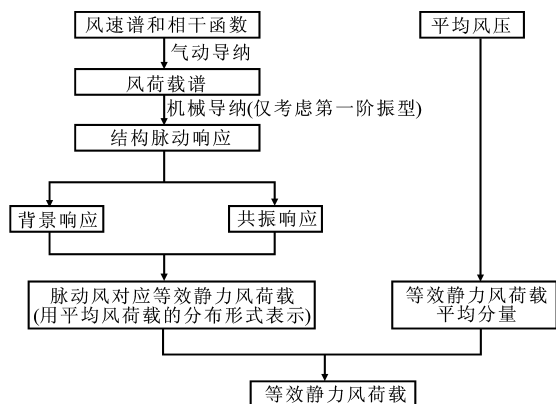


图 1 高层结构等效静风荷载分析

Fig. 1 ESWL analysis of high-rise buildings

中国的等效静风荷载规范在总体思路上与 DAVENPORT 的方法是一致的, 只是在表达形式上略有不同<sup>[5]</sup>, 即从结构基本动力方程出发, 用第一阶振型惯性力表示等效静风荷载(包括背景分量和共振分量)。尽管对该惯性力是否能够精确描述背景分量, 目前尚有争议, 但该方法无疑有助于对等效静风荷载中共振分量的理解, 即从风荷载作用机理来看, 用惯性力表示等效静风荷载的共振分量是较为合理的。真正从风荷载的作用机理出发研究等效静风荷载, 并引起广泛重视的是 KASPERSKI M 提出的荷载—响应相关系数法(LRC 法)<sup>[6]</sup>。LRC 法最初用于确定低矮建筑的最不利极值风压分布, 后来被 HOLMES J D 等推广到等效静风荷载的背景分量研究中<sup>[7]</sup>。LRC 法的优点是: 在保证最大响应等效的同时, 还能保证结构其他点的响应最接近实际可能发生的最不利情况。

需要指出的是: 以上这些方法的研究大多是针

对高层、高耸结构进行的, 即结构的风激动力响应可近似用其第一阶振型来表示, 结构的最大响应往往位于顶点(最大位移)或底部(最大基底弯矩)。而对于大跨度屋盖结构, 由于其几何形状以及内部传力机理的复杂性, 上述假设可能会与结构实际风振情况有较大出入, 因此直接套用上面提到的各种等效静风荷载确定方法是不合适的。也就是说: 有必要根据大跨度屋盖结构的风振响应特点, 重新建立一套系统的等效静风荷载理论体系。为此, 笔者首先探讨了在建立这套理论体系时, 可能会遇到的种种问题; 然后, 针对这些问题提出了一些初步的解决思路, 并给出了具体的结构等效静风荷载各分量的确定方法; 最后, 结合某一平面拱算例, 证明了本文方法的优越性。

## 1 理论研究

### 1.1 面临的问题

大跨度屋盖结构的等效静风荷载研究在总体思路上与高层结构相似, 但由于其结构特性明显有别于高层结构, 因此在研究中还面临不少问题, 主要包括:

(1) 风荷载时空特性复杂。高层结构的形状较为单一, 而且已有丰富的风洞试验数据和实际观测资料, 风荷载的基本特性研究已较为透彻, 可以直接供研究和工程设计参考; 此外, 高层结构表面的风压基本上是由来流特性控制的, 即符合拟定常假设, 因此根据风速谱, 并通过气动导纳修正, 即可直接得到建筑物表面各点的压力谱。但是对于大跨度屋盖结构, 大部分屋面处于气流的分离和再附区域, 由结构自身引起的特征湍流可能对屋面风荷载起主要控制作用。这就需要重新审视拟定常假设在屋盖结构中的适用性, 并结合风洞试验数据和实际观测资料提出一套更为有效的描述屋盖表面气动力的方法。

(2) 结构风致动力响应各分量的计算。由于高层结构可以简化为一悬臂构件, 因此其背景响应可以用影响线很方便地得到, 共振响应也可以仅考虑结构第一阶振型的影响。而大跨度屋盖结构的背景响应和共振响应计算则要比高层结构复杂得多。例如, 当采用准静力分析方法分析其背景响应时, 必须从影响线过渡到影响面; 由于大跨度屋盖结构是多次超静定体系, 影响面的表达常常无解析解, 而必须通过数值计算得到, 因此其背景响应分析是一个复杂的问题。大跨度屋盖结构的共振响应分析则是一个更为复杂的问题。这是因为大跨度屋盖结构的风

致动力响应常常有多阶振型参与,且可能存在一些对振动贡献占主导地位的高阶振型,因此如何选择对结构振动有较大贡献的振型(主导振型),以及估算各振型间的耦合效应,就成为大跨度屋盖结构共振响应分析中十分关键的问题。

(3)等效静风荷载各分量的确定问题。利用LRC法尽管能够得到等效背景分量的真实分布形式,但是其分布形式往往没有明显的规律性,在工程操作上还有一定的困难。而在等效共振分量的确定上,由于存在多阶主导振型,因此必须考虑多阶振型惯性力的联合作用。再有,对于同一结构的不同响应类型,各等效分量的参与程度也是不一样的。因此,如何从方便工程的角度出发合理地组合这些等效分量也是一个十分棘手的问题。

(4)控制点的选择问题。由于高层、高耸结构关心的响应类型有限,控制点明确,如顶点位移和基底弯矩,因此可以直接得到工程需要的若干个等效静风荷载分布形式。但是对于大跨度屋盖结构,构件数量较多,关心的响应类型也较多,响应控制点往往不很明确,若是按照目前的等效静风荷载表示方法,一个响应对应一个等效静风荷载分布形式,显然工程使用上十分不便。

## 1.2 理论框架特征

综上所述可知:大跨度屋盖结构的等效静风荷载确定问题具有多激振模态、多响应振型和多等效目标的特点。要解决这样一个复杂的问题,其基本理论框架应具备的特征为:

(1)应采用一些更加能够反映风荷载作用机理的精细化方法来描述大跨度屋盖结构的风荷载和风效应。这些方法包括,本征正交分解法(POD法)<sup>[8]</sup>、RITZ向量直接叠加法<sup>[9]</sup>、LRC法等。

(2)应通过大量风洞试验获取典型屋盖结构表面的气动力信息,建立符合大跨度屋盖结构绕流特点的气动力谱(可能是非高斯、非定常的)。

(3)应建立起等效静风荷载各分量与风荷载基本特性(平均风荷载、本征模态)以及结构自身动力特性(RITZ振型)之间的联系。例如,等效背景分量在本质上反映的是脉动风荷载的空间相关特性,该特性是由脉动风荷载的自身特性决定的。因此,可以考虑从脉动风压特性入手,利用POD法来简化对脉动风压场的描述,并用本征模态表示等效背景分量。

(4)应解决好结构主导振型的选取问题,以及主导振型或本征模态的组合问题。

(5)选择合适的等效原则。可以根据经验选择控制点,如跨中弯矩、支座处剪力等;当然也可以考虑从整个结构出发,保证结构应变能等效。

(6)保证工程使用上的可操作性。

基于上述考虑,本文中通过借鉴各国已有的一些等效静风荷载分析方法,初步提出一套有针对性的大跨度屋盖结构等效静风荷载确定方法。现仅给出该方法的基本计算公式。

## 2 等效静风荷载的确定

### 2.1 各分量的确定方法

#### 2.1.1 平均分量

由于大跨度屋盖结构的体型复杂,流场存在明显的三维效应,其平均风荷载常需要通过风洞试验或CFD数值模拟方法来确定。屋盖各点的平均风荷载可以表示为

$$\bar{F}(x, y, z) = C_p(x, y, z) \bar{P}_{\text{ref}} \quad (1)$$

式中: $C_p(x, y, z)$ 为点 $(x, y, z)$ 处的风压系数; $\bar{P}_{\text{ref}}$ 为参考点处的参考风压。

#### 2.1.2 等效背景分量

背景响应是指不考虑惯性力作用时,在脉动荷载作用下结构响应的均方根值。其本质是准静态的,不受结构动力特性的影响,因此可以通过结构的静力平衡方程并引入统计概念,得到结构 $i$ 点处的背景响应为

$$\sigma_{ri, B} = \sqrt{\sum_{k=1}^m a_{ik} \sum_{l=1}^m a_{il} \sigma_{Fkl}} \quad (2)$$

式中: $a_{ik}$ 为结构柔度矩阵 $\lambda$ 的元素,表示沿 $k$ 自由度方向作用单位力时 $i$ 点的响应; $\sigma_{Fkl}$ 为 $k$ 和 $l$ 两个自由度方向的脉动风荷载协方差; $m$ 为结构的自由度数量。

从时域的角度看:当不考虑惯性力作用时, $i$ 点响应出现峰值时刻对应的结构各点脉动风压瞬时分布是一个随机变量。LRC法从统计角度出发,提出用这一随机变量的期望值(最有可能出现的最不利极值风压分布)来表示等效静风荷载的背景分量,即对应于 $i$ 点响应的等效静风荷载的背景分量为

$$F_{e, k}^b = g_B \rho_{ri, Fk} \sigma_{Fkk} = g_B \frac{\sigma_{ri, Fk}}{\sigma_{ri, B} \sigma_{Fkk}} \sigma_{Fkk} = g_B \left( \sum_{l=1}^N a_{il} \sigma_{Fkl} \right) / \sigma_{ri, B} \quad (3)$$

式中: $g_B$ 为背景响应峰值因子,一般在3~4之间; $\rho_{ri, Fk}$ 为 $k$ 点脉动风荷载和 $i$ 点响应的荷载响应相关系数;其余量的符号含义同式(2)。

式(3)在确定等效静风荷载背景分量时主要涉及到两个问题:①*i*点背景响应的计算;②荷载响应相关系数 $\rho_{ri, Fk}$ 的计算。后者可以通过柔度矩阵和脉动荷载的空间相关矩阵确定;而前者则需要计算影响线或影响面,特别是对于大跨度屋盖结构,影响面的计算十分复杂、费时。为此本文中引入 POD 法的概念,将结构表面任意一点的风压表示为

$$p(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \Psi_m(x, y, z) \quad (4)$$

式中: $\Psi_m(x, y, z)$ 、 $a_m(t)$ 分别为风荷载的本征模态和相应的时间坐标。将式(4)代入式(3),可得到利用本征模态表示的等效静风荷载背景分量为

$$F_{e,k}^b = g_B \rho_{ri, Fk} \sigma_{Fkk} = \sum_{m=1}^M \alpha_m \Psi_m(x_k, y_k, z_k) \quad (5)$$

式中: $\alpha_m$ 为各阶本征模态在等效静风荷载背景分量中的权重因子。

当风压场的第一阶本征模态占主要成分时,式(5)可直接表示为第一阶本征模态的函数,即

$$F_e^b = \frac{g_B \sigma_{ri, B}}{\beta_i \Psi_{\text{dom}}} \Psi_{\text{dom}} \quad (6)$$

### 2.1.3 等效共振分量

根据结构动力学方程,等效共振分量 $F_e^r$ 可以表示为各阶振型惯性力的组合

$$F_e^r(t) = \sum_{j=1}^n P_{e0j} q_j(t) \quad (7)$$

式中: $P_{e0j}$ 为第*j*振型对应的惯性力幅值, $P_{e0j} = M \phi_j \omega_j^2$ , $\phi_j$ 为振型向量; $q_j(t)$ 为相应的正则坐标。

式(7)在确定等效静风荷载共振分量时主要存在两个问题:①主要参与振型的选择,这一问题可以通过 RITZ-POD 法予以解决;②式(7)给出的是一个时变荷载,如何组合这些主要参与振型或 RITZ 向量的惯性力仍然是个没有解决的问题。为此,采用谱分析方法,并经过一系列推导,可得到等效静风荷载共振分量的表达式为

$$F_e^r = g_R \sum_{j=1}^n P_{ej} W_j \quad (8)$$

式中: $g_R$ 为共振响应的峰值因子; $P_{ej}$ 为振型向量的惯性力, $P_{ej} = P_{e0j} \sigma_{qj} = M \Psi_j \omega_j^2 \sigma_{qj}$ ;  $W_j$ 为第*j*个振型向量在等效静风荷载共振分量中的权重因子, $W_j = \sum_{k=1}^n \sigma_{rk} \rho_{qjk} / \sigma_r$ 。

从工程应用的角度出发,等效静风荷载的共振分量可近似用主要参与振型(惟一)的惯性力表示。当然,应该评价这种处理方式可能带来的误差。为此,等效静风荷载的共振分量可表示为

$$F_e^r = \frac{g_R \sigma_{ri, R}}{\beta_i \Psi_{\text{dom}}} \Psi_{\text{dom}} \quad (9)$$

### 2.1.4 等效静风荷载各分量的组合

结构等效静风荷载包括:平均分量、背景分量和共振分量 3 个部分,可分别按式(1)、(5)、(8)确定,最终的分布形式为

$$F_e = \bar{F} + \text{sgn}(\bar{r}) \cdot (\omega_b F_e^b + \omega_r F_e^r) \quad (10)$$

式中: $\omega_b$ 、 $\omega_r$ 分别为背景分量和共振分量的权重因子,具体可表示为

$$\omega_b = \frac{g_B \sigma_{ri, B}}{\sqrt{(g_B \sigma_{ri, B})^2 + (g_R \sigma_{ri, R})^2}} \quad (11)$$

$$\omega_r = \frac{g_R \sigma_{ri, R}}{\sqrt{(g_B \sigma_{ri, B})^2 + (g_R \sigma_{ri, R})^2}} \quad (12)$$

## 2.2 分析步骤

总结以上分析过程,确定大跨度屋盖结构等效静风荷载的主要步骤(图 2)为:

步骤 1:进行同步测压风洞试验,获得屋面各点的风荷载时程。

步骤 2:按照式(1)确定等效静风荷载的平均分量。

步骤 3:由于等效静风荷载直接依赖结构响应类型和具体位置,因此应确定对结构影响重要的响应,如跨中弯矩和支座处剪力,并按照式(2)计算其背景响应。

步骤 4:对步骤 1 得到的风压场进行 POD 法分解,得到各阶本征模态和相应的特征值,并按式(5)计算等效静风荷载的背景分量。在实际工程应用分析时,可采用式(6)近似表示等效静风荷载的背景分量。

步骤 5:采用 RITZ-POD 法分析结构的共振响应,并挑选出对结构振动贡献较大的主导振型。

步骤 6:按照式(8)计算等效静风荷载的共振分量。在实际工程应用分析时,可采用式(9)近似表示等效静风荷载的共振分量。

步骤 7:按照式(10)组合等效静风荷载的平均分量、背景分量和共振分量。

## 3 算 例

为便于表达,本文中选取某一平面拱来进行验证。该拱跨度为 50 m,矢跨比为 1/3,如图 3 所示。图 4 给出了等效背景分量的计算结果,从图 4 中可以看出:等效背景分量体现了结构前两阶荷载本征模态的叠加结果,其最大等效风压系数为 2.4(风吸)。图 5 给出了等效共振分量的计算结果,同样从

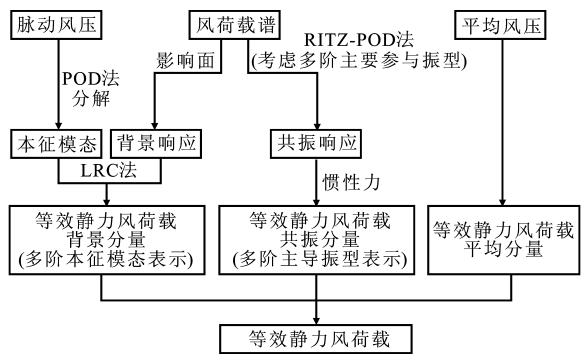


图 2 大跨度屋盖结构等效静风荷载分析

Fig. 2 ESWL analysis of large-span roof structures

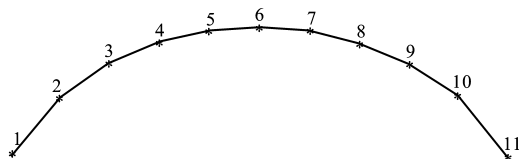


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model

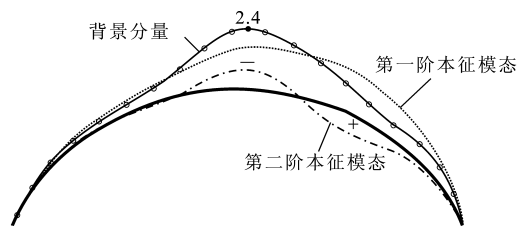


图 4 等效背景分量计算结果

Fig. 4 Calculation result of equivalent background components

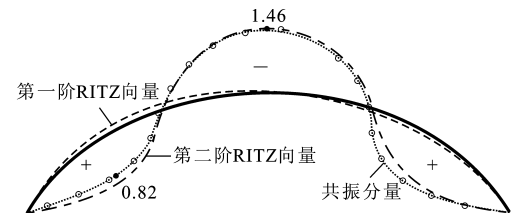


图 5 等效共振分量计算结果

Fig. 5 Calculation result of equivalent resonant components

图 5 中可以看出:等效共振分量体现了结构前两阶 RITZ 向量的叠加结果,其最大等效风压系数为 1.46。图 6 给出了总的等效静风荷载计算结果,从图 6 中可以看出:结构上各点的等效风压系数都是不一样的,如果按照荷载规范中提出的风振系数概念来定义(动风压比静风压),则各点的风振系数均不相同,说明用风振系数来定义大跨度屋盖结构的等效静风荷载不甚合理。图 7、8 分别给出了采用本文的方法和采用阵风荷载因子法(DAVENPORT 法)所得到的等效静风荷载结果与在此等效荷载作

用下的结构响应结果。从图 7、8 中可以看出:采用本文的方法所得到的等效静风荷载结果明显小于阵风荷载因子法的结果,但应用这两种方法所得到的结构等效静风响应结果在控制点(跨中)上是完全一

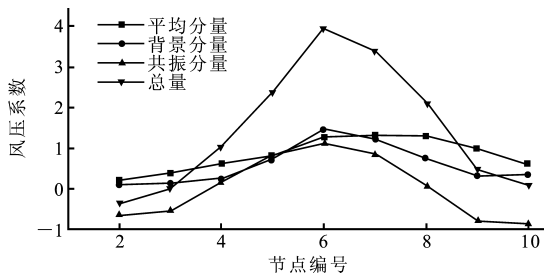


图 6 等效静风荷载计算结果 1

Fig. 6 Calculation result 1 of ESWL

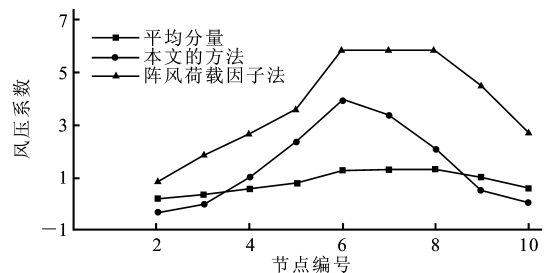


图 7 等效静风荷载计算结果 2

Fig. 7 Calculation result 2 of ESWL

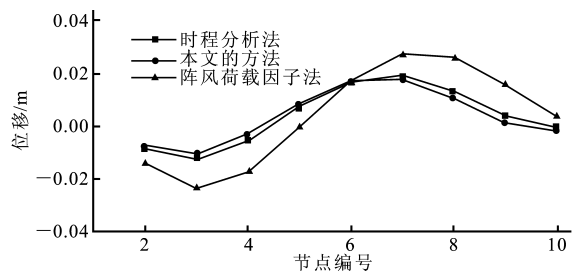


图 8 等效静风响应计算结果

Fig. 8 Calculation result of equivalent static wind response

致的。不仅如此,通过与时程分析法(可认为是精确方法)的比较表明:本文的方法在保证控制点等效的同时,还保证了结构其他部位的响应最接近于实际可能发生的最不利响应,而阵风荷载因子法却无法做到这一点。

## 4 结 语

(1)笔者系统地讨论了大跨度屋盖结构等效静风荷载研究所面临的主要问题,即关键是解决好多激振模态、多响应振型和多等效目标问题;为此必须要采用一些能够更加反映风荷载作用机理的精细化方法来描述大跨度屋盖结构的风荷载和风效应。

(下转第 39 页)

果相对较少;同时因设备所限,无法得到更为详尽、实时的参数。

目前进行西部山地风场特性及其对公路桥梁影响的研究项目刚刚起步。长安大学的研究人员结合山西禹门口黄河大桥项目,开展了对陕西韩城、山西河津地区黄河出山口风环境的观测研究,并正进行地形数值模拟。湖北省交通厅结合沪蓉高速公路建设,对该线上一个典型河谷进行了风场观测。这些研究因直接从桥梁抗风安全出发,因此研究更有针对性,数据可用性更强。但靠现有少数的观测点进行西部地区复杂的地形风场特性研究是很困难的。

自 20 世纪 90 年代以来,短短十几年间,中国的桥梁建设已迈入世界桥梁建设大国行列;21 世纪以来,中国西部桥梁建设也达到了空前未有的水平。但中国地域辽阔,地形地貌复杂多变,社会经济发展水平在各地也有相当大的差异,桥梁建设还存在许多问题有待解决。近年来,随着西部地区经济的发展,公路及高等级公路建设也随之蓬勃发展。出于地形等考虑,这里修建的多是一些高墩大跨桥梁,风

工程问题也日渐突出,因此研究西部山地风环境特点及其对公路桥梁的影响迫在眉睫。笔者仅结合长安大学风洞实验室建成一年来的工作,就西部地区桥梁的风工程问题谈了一些粗浅的看法,难免有缺失之处。笔者建议在西部公路建设中,以高等级公路、大跨桥梁建设为依托,开展更多地点的风环境特点和桥梁风工程研究。

参考文献:

[1] JTJ/T D60-01-2004,公路桥梁抗风设计规范[S].  
[2] 长安大学风洞实验室.禹门口黄河大桥风特性观测与风环境数值模拟分析计算[R].西安:长安大学风洞实验室,2005.  
[3] 川田忠树.现代吊桥[M].东京:理工图书株式会社,1987.  
[4] 长安大学风洞实验室.南昌生米大桥主拱架设抗风性能风洞试验研究报告[R].西安:长安大学风洞实验室,2005.  
[5] 长安大学风洞实验室.洛河大桥抗风性能试验研究[R].西安:长安大学风洞实验室,2005.

(上接第 31 页)

(2)初步提出了关于大跨度屋盖结构等效静风荷载问题的研究思路,并给出了各等效分量的确定方法,即等效背景分量可以表示为脉动风荷载本征模态的组合;共振分量可表示为各主导振型惯性力的组合。

(3)本文的部分工作还处于探索阶段,所得结论亦有待于进一步验证。

参考文献:

[1] DAVENPORT A G. Gust loading factor[J]. J. Struct. Div.,1967,93(3):11—34.  
[2] SIMIU E. Equivalent static wind loads for tall buildings design[J]. J. Struct. Div.,1976,102(4):719—737.  
[3] SOLARI G. Alongwind response estimation: closed from solution[J]. J. Struct. Div.,1982,108(1):225—244.

[4] ZHOU Y,KAREEM A. Gust loading factor;new model [J]. J. Struct. Eng.,2001,127(2):168—175.  
[5] 张相庭.结构顺风向风振的规范表达式及有关问题的分析[J].建筑结构,2004,34(7):33—35.  
[6] KASPERSKI M. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design[J]. J. Eng. Struct.,1992,14(1):27—34.  
[7] HOLMES J D. Effective static load distributions in wind engineering[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.,2002,90(2):91—109.  
[8] TAMURA Y, SUGANUMA S, KIKUCHI H, HIBI K. Proper orthogonal decomposition of random wind pressure field[J]. J. Fluids and Structures,1999,13(7):1 069—1 095.  
[9] WILSON E L, YUAN M W, DICKENS J M. Dynamic analysis by direct superposition of RITZ vectors[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1982,10(6):813—821.