

基于均匀设计的海峡两岸高层建筑顺风向风荷载多因素分析

董锐^{1,5}, 梁斯宇^{1,2}, 邱凌煜¹, 罗元隆³, 刘国买⁴

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 3. 台北科技大学, 台湾 台北 106344; 4. 福建工程学院管理学院, 福建 福州 350118; 5. 福建省土木建筑学会, 福建 福州 350001)

摘要: 为明确海峡两岸高层建筑顺风向风荷载的异同, 对两岸建筑风荷载标准进行了对标分析, 并采用均匀设计方法进行了高层建筑顺风向风荷载多因素分析。研究表明: 两岸风荷载标准中基本风速取样方法和极值分布参数取值方法存在明显区别, 风压高度变化系数分布和不同重现期的设计风速转换系数大致相同, 台湾标准给出的湍流强度建议值明显大于大陆标准; 台湾标准分类计算建筑物主体和围护结构的设计风压, 大陆标准采用统一表达式, 两者给出的设计风荷载组合方式区别明显; 以基底剪力和基底弯矩作为评价指标, H/\sqrt{BL} (高宽比)、 α (地面粗糙度指数)、 C_g (脉动效应系数)、 C_p (风荷载体型系数) 和 I_z (湍流强度), 对高层建筑顺风向风荷载的影响程度依次减小, H/\sqrt{BL} 和 α 为主要影响因素; 随 H/\sqrt{BL} 的增大, C_g 对顺风向风荷载的影响逐渐增强, 当 H/\sqrt{BL} 增大到一定程度时, C_g 成为主导因素。

关键词: 风荷载; 顺风向; 规范; 均匀设计; 高层建筑; 台湾海峡

中图分类号: TU973⁺. 213

文献标志码: A

Multi-Factor Analysis of Along-wind Loads of High-Rise Buildings Between Chinese Taiwan and Mainland Areas Based on Uniform Design

DONG Rui^{1,5}, LIANG Siyu^{1,2}, QIU Lingyu¹, LUO Yuanlong³, LIU Guomai⁴

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. National Taipei University of Technology, Taipei 106344, China; 4. School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 5. Fujian Civil Engineering and Architectural Society, Fuzhou 350001, China)

Abstract: In order to determine the difference and similarity of along-wind loads of high-rise buildings between Chinese Taiwan and Chinese mainland areas, benchmarking analysis was used to compare the wind load code for buildings on both sides of the Taiwan strait, and multi-factor analysis of along-wind loads of high-rise buildings was conducted using the uniform design method. The results show that there are significant differences in the basic wind speed sample method and extreme distribution parameter estimation methods. The wind pressure height coefficient distribution and conversion coefficient of design wind speed in different return periods for the two standards are roughly the same; The turbulence intensity values of the Taiwan code is significantly larger than that of the mainland code; For the wind pressure calculation of main wind-force resisting system and cladding, Taiwan wind load code adopts classification method, while the Mainland wind load code adopts a unified expression. There are significant differences between the two standards in the combination of design wind loads of along-wind, cross-wind, and torsional directions. Taking the base shear and base bending moment as evaluation indexes, the influence of aspect ratio H/\sqrt{BL} , exposure factor α , gust effect factor C_g , wind load shape coefficient C_p , and turbulence intensity I_z on the along-wind loads of high-rise buildings gradually decreases, and the aspect ratio and exposure factor are the main influencing factors. The influence of gust effect factor on along-wind load increases with the increase of the aspect ratio of the structure, and when the aspect ratio increases to a certain value, it becomes the main factor that dominates the along-wind loads of the both sides.

Key words: wind load; along-wind; code; uniform design; high-rise building; Taiwan strait

收稿日期: 2022-02-28

基金项目: 福建省科技创新战略研究联合项目[2022R0154]

第一作者: 董锐(1982—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为桥梁与结构风工程。

E-mail: dongruifu@126.com



论文
拓展
介绍

台湾海峡两岸的台湾和福建在气候条件和地形地貌方面高度相似,且均受西北太平洋热带气旋和亚热带季风气候的影响,是世界上风致灾害最严重的区域之一^[1]。随着闽台两岸经济的发展,大量高层建筑在此兴建。风荷载标准作为工程师进行高层建筑抗风设计的重要依据,其取值大小直接影响结构的安全性及经济性。由于多种原因,闽台两岸现行建筑风荷载标准存在诸多不同,福建主要依据《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)^[2](以下简称大陆标准)进行建筑结构抗风设计,而台湾则主要依据2015版《建筑物耐风设计规范与解说》^[3](以下简称台湾标准)。尽管两岸经济文化和技术交流在不断发展,但是,关于海峡两岸建筑风荷载标准系统、完整的比较研究还很不完善。Ge等^[4-5]和金新阳^[6]在对亚太地区风荷载标准的比较中,对台湾标准有提及,但内容仅限于部分设计参数和计算结果的对标。董锐等^[1]对海峡两岸建筑基本风速的合理取值进行了系统研究,但没有涉及风荷载。此外,国内外学者采用单因素分析法对世界主要风荷载标准进行了大量的比较研究^[7-12],但均未涉及台湾标准,也没有将各因素对风荷载系统的贡献进行量化,无法准确评估单个因素对系统的影响程度。鉴于此,本文以海

峡两岸高层建筑顺风向风荷载比较为研究对象,在两岸建筑风荷载标准对标分析的基础上,将高层建筑顺风向风荷载视为一个系统,采用均匀设计方法对各因素的影响程度进行量化评估,相关结论对于两岸高层建筑顺风向风荷载合理取值的确定和福建探索实施风荷载“行业标准共通”建设的区域发展战略都具有重要意义。

1 海峡两岸建筑风荷载标准对标分析

海峡两岸建筑风荷载标准对标分析包括设计风参数、建筑物主体结构和维护结构三部分。

1.1 设计风参数

基本风速、风压高度变化系数、湍流强度、湍流积分尺度、不同重现期基本风速转换系数等参数是确定建筑结构风荷载的关键参数。下面将对上述海峡两岸设计风参数进行对标分析。

1.1.1 基本风速

台湾标准将地面粗糙度类别分为A、B、C三类,大陆标准分为A、B、C、D四类。两者在梯度风高度 z_G 、平均风剖面指数 α 、计算设计风速截断高度的对应情况见表1。

表1 地面粗糙度类别
Tab. 1 Types of ground roughness

地面粗糙度 类型描述	台湾标准				大陆标准			
	类型	z_G/m	α	截断 高度/m	类型	z_G/m	α	截断 高度/m
近海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	C	300	0.15	5	A	300	0.12	5
田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇	C	300	0.15	5	B	350	0.15	10
有密集建筑群的城市市区	B	400	0.25	5	C	450	0.22	15
有密集建筑群且房屋较高的城市市区	A	500	0.32	5	D	550	0.30	30

基本风速的确定与标准地貌类别、平均风速时距、标准高度、重现期、风速样本取样方法和风速分布概率模型等6个因素有关。两岸标准对于基本风速的规定基本相同,均为平坦开阔地貌、10 m高度、10 min时距、采用极值I型概率模型获得的50年重现期统计值。但风速样本取样方法存在差异,大陆标准取样采用年最大值法,台湾标准采用台风风速法^[3]。台湾标准的原始统计资料为台湾岛24个测站1947—1991年间发生的128个侵台台风最大10 min平均风速资料,大陆标准的原始统计资料为大陆地区672个气象站1949—2008年的年最大10 min平均风速资料。台湾标准的基本风速将台湾岛划分为47.5、42.5、37.5、32.5、27.5和22.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 六个区,周围外岛地区单独给出,大陆标准按照全国行政区

划以基本风压的形式分别给出。此外,两岸标准采用极值I型概率分布时分布参数的取值方法存在区别,大陆标准中分布参数取值与样本容量 n 有关,而台湾标准不受样本容量的影响^[1]。上述因素使得台湾标准给出的基本风速大部分情况下要高于大陆标准的对应值。关于两岸基本风速比较的详细内容,参见文献^[1]。

1.1.2 风压高度变化系数

两岸标准均采用指数律表示平均风速随高度的变化规律,进而得到风压随高度的变化规律。对于不同地面粗糙度类别,风压高度变化系数 μ_z (台湾标准称风速压地况系数 K_z)随高度 z 的变化曲线汇总于图1。

图1中TW表示台湾标准,GB表示大陆标准。

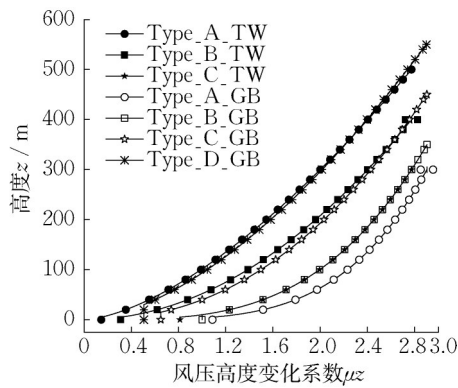


图 1 不同地面粗糙度类型时的 μ_z - z 曲线

Fig. 1 μ_z - z curves for different types of ground roughness

观察图 1 可以发现,台湾标准中 C 类地貌的风压高度变化系数与大陆标准中 B 类时的分布完全相同,台湾标准中的 A、B 类地貌分别与大陆标准中的 D、C 类地貌大致相当。与大陆标准不同,2015 版台湾标准将湖岸与海岸地区统一采用 C 类地貌描述,使得该类地貌下的设计风压计算值要明显小于大陆标准 A 类地貌的对应值。

1.1.3 湍流强度和湍流积分尺度

两岸风荷载标准给出的高度 z 处湍流强度 $I(z)$ 和湍流积分尺度 $L(z)$ 计算公式汇总于表 2。表中, c 为与地面粗糙度类别有关的系数,对于台湾标准 A、B、C 类地面粗糙度类别分别取 0.45、0.30、0.20; I_{10} 为 10 m 高度处的名义湍流度,对于大陆标准 A、B、C、D 类地面粗糙度类别分别取 0.12、0.14、0.23、0.39; α 为地面粗糙度指数。 c' 和 $\bar{\epsilon}$ 为计算湍流积分尺度的参数,对于台湾标准 A、B、C 类地面粗糙度类别, c' 分别取 55、98、152 m, $\bar{\epsilon}$ 分别取 0.5、0.33、0.20。台湾标准中,湍流强度和湍流积分尺度的截断高度在 A、B、C 类地面粗糙度时分别为 18、9、4.5 m。

表 2 湍流强度和湍流积分尺度

Tab. 2 Turbulence intensity and turbulence integral

类型	台湾标准	大陆标准
湍流强度 $I(z)$	$I(z)=c(10/z)^{1/6}$	$I(z)=I_{10}(10/z)^{\alpha}$
湍流积分尺度 $L(z)$	$L(z)=c'(10/z)^{\bar{\epsilon}}$	无规定

图 2 为湍流度随高度的变化规律。由图 2 可知,两岸标准给出的顺风向湍流度表达式形式相同,但对于相同的地貌类别,台湾标准给出的同高度处的湍流度明显大于大陆标准。台湾标准 C 类地面粗糙度(平坦开阔地面)的湍流度与大陆标准 C 类地况(密集建筑群的城市市区)的对应值大致相当。台湾

标准在计算阵风反应因子时考虑了湍流积分尺度,不同地面粗糙度类别时湍流积分尺度随高度的变化规律如图 3 所示,大陆标准暂未考虑湍流积分尺度的影响。

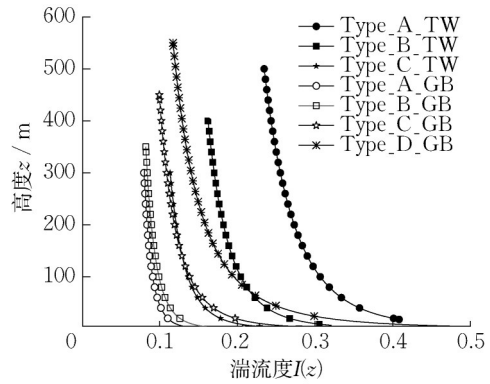


图 2 不同地面粗糙度类型时的 $I(z)$ - z 曲线

Fig. 2 $I(z)$ - z curves for different types of ground roughness

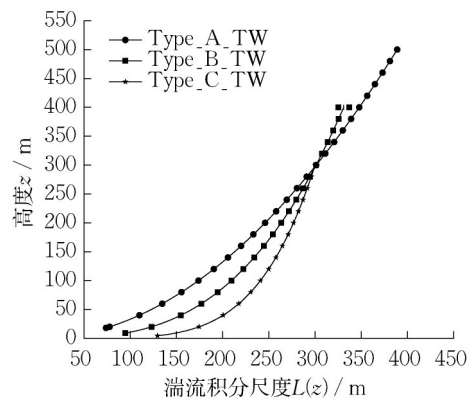


图 3 不同地面粗糙度类型时的 $L(z)$ - z 曲线

Fig. 3 $L(z)$ - z curves for different types of ground roughness

1.1.4 不同重现期设计风速转换系数

设计风速与统计时采用的重现期有很大关系,对于重要程度不同的建筑物,可以采用不同重现期的设计风速。台湾标准中重现期为 R 的设计风速 U_R 与基本风速 $U_{10}(C)$ 之间的关系为

$$U_R = \gamma_R U_{10}(C) = U_{10}(C) \cdot [0.36 - 0.131 \ln(-\ln(1 + 4.22 \ln(\frac{12R-1}{12R})))]) \quad (1)$$

式中: γ_R 为不同重现期设计风速的换算系数。台湾标准对于固定的重现期 R , 系数 γ_R 是固定值,不随地理位置而改变。

大陆标准给出了重现期为 R 的设计风压 w_R 计算公式,如式(2)所示。式中 w_{10} 和 w_{100} 分别表示重现期为 10 年与 100 年的设计风压,该公式实际上主

要推算 $R \in [10, 100]$ 时的设计风压, 对于 $R > 100$ 年和 $R < 10$ 年的设计风压, 推算结果可能存在误差。

$$w_R = w_{10} + (w_{100} - w_{10})(\ln R / \ln 10 - 1) \quad (2)$$

根据伯努利方程, 风压之比等于风速平方之比, 可得不同重现期设计风速的比值。由于大陆标准给出的各地 50 年重现期基本设计风压和 100 年重现期设计风压间不存在固定的比例关系, 故设计风速转换系数 γ_R 不存在固定值, 与地理位置有关。表 3 和图 3 给出了两岸标准重现期分别为 5、10、25、50、100 年时的转换系数 γ_R 的分布。其中大陆标准中的转换系数是根据大陆标准中台湾 11 个城市的设计风压换算得出。由表 3 和图 4 可知, 大陆标准给出的台湾 11 个城市不同重现期风速转换系数均值与台湾标准值基本相当, 标准偏差均小于 7.1 %。对于台北市, 大陆标准在 5、10 年重现期时给出的转换系数小于台湾标准。

表 3 不同重现设计风速的转换系数

Tab. 3 Conversion coefficient of design wind speed for different return periods

重现期 R /年	TW 规范	GB 均值	GB 标准差	GB 台北市
0.5	0.30			
1	0.46			
5	0.70	0.70	0.05	0.61
10	0.79	0.80	0.03	0.76
25	0.90	0.93	0.01	0.91
50	1.00	1.00	0.00	1.00
100	1.10	1.09	0.01	1.10

表 4 建筑物主体结构风荷载计算公式

Tab. 4 Wind load calculation formula for main wind-force resisting system of buildings

类型	台湾标准			大陆标准
	普通	柔性	女儿墙	
封闭式或部分封闭式	$p = qGC_p - q_i(GC_{pi})$	$p = qG_rC_p - q_i(GC_{pi})$	$P_p = q_p(GC_{pn})$	$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$
开放式	$F = q(Z_{AC})GC_iA_c$			

表 4 中, P 为主体结构的设计风压, 台湾标准中采用的单位为 $\text{kgf} \cdot \text{m}^{-2}$, 取 $g = 9.81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$, 则有: $1 \text{ kgf} \cdot \text{m}^{-2} = 9.81 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$; q 为外风速压, 对于迎风面墙 $q = q(z)$, $q(z)$ 为离地面 z 米高度处的风速压; 对于背风面墙、侧墙与屋顶, $q = q(h)$, h 为建筑物的平均屋顶高度; G 为普通建筑物的阵风反应因子; C_p 为外风压系数; (GC_{pi}) 为内风压系数; q_i 为内风速压, 取负值时取为 $q(h)$, 取正值时取为 $q(h)$ 或 $q(Z_{h_0})$, Z_{h_0} 为影响正值内风压之最高开口高度。 w_k 为风荷载标准值, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$, β_z 为高度 z 处的风振系数, μ_s 为风荷载体形系数, μ_z 为风压高度变化系数, w_0 为基本风压, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

对于建筑物主体结构的风压计算, 两岸标准的

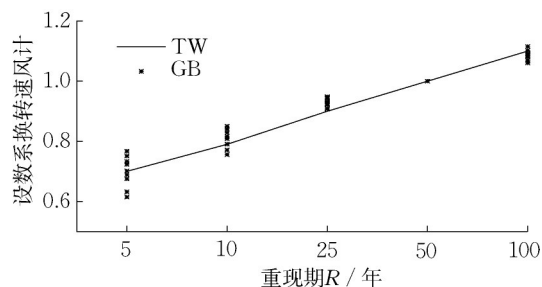


图 4 不同重现期的设计风速换算系数比较

Fig. 4 Comparison of design wind speed conversion coefficient for different return periods

1.2 建筑物主体结构

两岸标准均将建筑物抗风设计分为主体结构和围护结构两部分, 并采用不同的公式分别进行计算。两岸标准同时适用于建筑物和地上独立结构物, 以下讨论中除特殊说明外不再区分, 统称建筑物。台湾标准根据建筑物的封闭程度分为封闭式、部分封闭式与开放式三类; 根据建筑物基频大小分为普通和柔性两类, 其中基频大于 1 Hz 的为普通建筑物, 小于等于 1 Hz 的为柔性建筑物, 建筑物女儿墙风荷载的规定单独给出。大陆标准对主体结构风荷载的计算采用统一表达式, 不区分建筑物的类型。两岸标准对建筑物主体结构风荷载的计算规定见表 4。表中, C_{pn} 为净风压系数, C_i 为开放建筑的风力系数, G_r 为柔性建筑的阵风反应因子, Z_{AC} 为风荷载作用面积 AC 的形心高度。

主要区别如表 5 所示。需要注意的是, 台湾标准中内风压系数 (GC_{pi}) 以极值的形式给出, 并且在不同方向墙面的取值相同, 即同时取正值或负值。因此, 对于建筑物整体而言, 内风压产生的风力是相互抵消的, 即内风压对建筑物的整体风荷载为零。但对于每一面单独的墙体而言, 考虑内风压会显著改变该墙体所承受的风荷载。

1.2.1 顺风向风荷载

由于建筑结构风振响应计算的复杂性, 几乎所有国家/地区的风荷载标准均采用等效风荷载进行等代计算。大陆标准计算顺风向等效静力风荷载采

表 5 建筑物主体结构风荷载计算规定比较

Tab. 5 Comparison of wind load calculation rules for main wind-force resisting system of buildings

项目	台湾标准	大陆标准
风压单位	$\text{kgf}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$
是否考虑内压	考虑	不考虑
建筑物类型	分类计算	统一表达式
地形对设计风速的影响	通过地形影响系数 K_z 考虑	通过修正系数 η 考虑
建筑物的重要程度	通过用途系数 I 考虑	根据各结构设计规范的规定调整基本设计风压或重现期
背风面墙和侧墙风压	采用建筑物平均屋顶高度 h 处的风压,为定值	采用实际高度 z 处的风压,为随高度变化的值
背风面风压系数(矩形)	取值小于大陆标准	取值大于台湾标准
最小基本设计风压规定	无规定	不小于 $0.3\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$

用惯性风荷载法(IWL法)^[13],以平均风荷载与风振系数 β_z 乘积的形式体现;台湾标准则采用阵风荷载因子法(GLF法),通过平均风荷载与阵风反应因子

G 的乘积得到顺风向等效静力风荷载。表6给出了两岸标准顺风向风荷载计算的主要区别。

表 6 建筑物主体结构顺风向风荷载计算规定比较

Tab. 6 Comparison of calculation rules for along wind load of main wind-force system of buildings

项目	台湾标准	大陆标准
单位	$\text{kgf}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$
动态风压的放大系数	阵风反应因子 G ,不随高度变化	风振系数 β_z ,数值随高度变化
考虑振型的数量	仅考虑第1阶振型	仅考虑第1阶振型
普通建筑物	只考虑背景响应	同时考虑共振响应和背景响应
柔性建筑物	同时考虑共振响应和背景响应	
脉动风荷载空间相关性	无体现	考虑水平和竖向
适用范围	普通和柔性建筑物	一般竖向悬臂结构

从表6中可知,台湾标准中没有体现脉动风荷载的空间相关性,主要是由其等效静风荷载的获得方式决定的。台湾标准中,通过高频天平测力试验获得高层建筑的整体风荷载,然后假设风荷载的分布模式与高层建筑的一阶振型相同,进而获得规范中的等效静风荷载分布。因此,台湾标准中的风荷载分布实际上已经间接考虑了脉动风的空间相关性。

大陆标准对于普通和柔性建筑物均同时考虑共振响应和背景响应。此外,两岸风荷载标准对于结构阻尼比的取值也存在较大区别,台湾标准的结构阻尼比建议取值整体低于大陆标准。对于钢结构建筑物,台湾标准建议取0.01,大陆标准取0.01和0.02;对于混凝土结构建筑物,台湾标准0.02的建议值远小于大陆标准0.05的建议值。

由于建筑物横风向和扭转向风荷载的机理比较复杂,与建筑物的外形、流经建筑物的涡脱频率、结构的质量分布等因素有关,两岸标准均根据建筑物的几何形状分类给出几种简单的情况,此处不做详细比较。此外,对于高度小于18 m并满足一定条件的低矮建筑物,台湾标准给出了简化的顺风向、横风向和扭转向等效静力风荷载表达式。

1.2.2 风荷载组合

由于建筑物所受的最大顺风向、横风向和扭转向风荷载不会同时发生在相同的风向上,台湾标准给出了两种设计用风荷载组合模式:①考虑 x 风向(与建筑物长边平行的风向)时的顺风向、横风向和扭转向设计风荷载;②考虑 y 风向(与建筑物短边平行的风向)时的顺风向、横风向和扭转向设计风荷载。此处的设计风荷载相当于大陆标准中的风荷载标准值。工程设计时,风荷载取上述两种组合模式中的最不利值。大陆标准给出了三种荷载组合模式:①仅考虑最不利风向的顺风向风荷载标准值;②考虑横风向风荷载标准值和0.6倍的顺风向风荷载标准值;③仅考虑扭转向的风荷载标准值。

1.3 建筑物围护结构

与建筑物主体结构的计算类似,台湾标准根据建筑的类型分别计算围护结构的风荷载,大陆标准仍然是采用统一表达式。对于围护结构的计算,两者均考虑建筑物内压。与主体结构的计算不同,大陆标准在围护结构风荷载计算时采用的是阵风系数 β_{gz} (高度 z 处)。该系数没有考虑结构动力效应中的共振分量,仅考虑脉动风的瞬时增大作用对基本设计风压的影响。台湾标准直接给出了外风压系数

(GC_p) 和内风压系数 (GC_{pi}) 的整体取值,此处的风压系数均为极值,即该系数综合考虑了结构动力效应

中的共振分量和背景分量。两岸标准对于建筑物围护结构风荷载的比较如表7所示。

表7 建筑物围护结构风荷载计算公式

Tab. 7 Wind load calculation formula for components and cladding of buildings

台湾标准				大陆标准
类型	普通		柔性	
	高度≤18	高度>18		
封闭或部分封闭式	$p=q(h)[(GC_p)-(GC_{pi})]$	$p=q(GC_p)-q_i(GC_{pi})$		$w_k=\beta_{gz}\mu_{sl}\mu_zw_0$
开放式	$p=q(h)(GC_{pn})$			
女儿墙	$p=q_p[(GC_p)-(GC_{pi})]$			

2 高层建筑顺风向风荷载多因素分析

由第1节可知,高层建筑顺风向等效风荷载计算时,两岸标准均采用多参数表达式,且参数之间存在较大差异。为探究两岸高层建筑顺风向风荷载的主要影响因素,本节将顺风向风荷载视为一个系统,首先对其计算公式做标准化处理,并分别以基底剪力和基底弯矩作为评价指标,采用均匀设计法对各影响因素的显著性进行分析。

2.1 均匀设计方法

本文选用均匀设计对海峡两岸高层建筑顺风向风荷载展开多因素分析。均匀设计法的基本思想是以回归分析为统计模型,利用均匀性选出具有代表性的水平组合,在减少试验次数和计算量的同时,也能通过分析得出可靠结论。均匀设计主要包括均匀设计表设计和回归分析两大步骤。

2.1.1 均匀设计表

均匀设计是通过均匀设计表 $U_n(q_m)$ 进行试验设计,其中, U 表示均匀设计, n 表示试验次数, m 表示因素的个数, q 表示每个因素的水平数。通常 n 远小于 q_m ,试验工作量会得到极大改善。均匀设计表需要满足“任意一个因素的各水平均进行相同数目的试验,任意两个因素的所有可能的水平组合有相同的重复数”,使各因素水平搭配均匀,在减少试验次数的同时,可以准确判定每个因素对响应的影响是否显著。

2.1.2 回归分析

通过均匀设计表获得试验数据样本后,需采用回归分析法对其进行统计分析。回归分析包括5步。

第一步,确定回归模型。本文采用多元线性回归分析法,其模型可表示为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m + \epsilon \quad (3)$$

式中: y 为因变量(响应值); x_1, \dots, x_m 为自变量(因素); β_0, \dots, β_m 为回归系数; ϵ 为随机误差, $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。

第二步,获取回归系数。本文采用最小二乘法获取回归系数。

第三步,回归方程显著性检验。获得回归系数后,需要考察因素 x_1, x_2, \dots, x_m 对响应 y_i 是否有显著性影响。首先给出检验假设如下:

$H_0: \beta_1 = \dots = \beta_m = 0, H_1: \beta_1, \dots, \beta_m$ 不全等于0。

其中 H_0 为零假设,表示所有因素对响应 y_i 无显著性影响,否则拒绝 H_0 假设,表明至少有一个因素对响应 y_i 存在显著性影响。实际操作中采用 F 检验对上述假设做出判断,统计量 F 的计算公式为

$$F = \frac{M_{SR}}{M_{SE}} = F(m, n - m - 1) \quad (4)$$

$$M_{ST} = \frac{S_{ST}}{n - 1}, M_{SR} = \frac{S_{SR}}{m}, M_{SE} = \frac{S_{SE}}{n - m - 1} \quad (5)$$

式中: S_{ST} 为总离差平方和(sum of squares total, SST), S_{SR} 为回归平方和(sum of squares regression, SSR), S_{SE} 残差平方和(sum of squares error, SSE); M_{ST}, M_{SR}, M_{SE} 分别为总离差平方和、回归平方和、残差平方和的均方。给定显著性水平 α ,查 F 分布表得到 $F_\alpha(m, n - m - 1)$ 。若 $F > F_\alpha(m, n - m - 1)$,则拒绝假设 H_0 ,认为 x_1, \dots, x_m 中至少有一个对 y 有显著影响,回归方程显著;若 $F < F_\alpha(m, n - m - 1)$,则接受假设 H_0 ,回归方程不显著。

第四步,拟合优度检验。拟合优度检验的目标是对回归方程的拟合效果进行检验。本文采用的指标为决定系数 R^2 ,其计算公式为

$$R^2 = \frac{S_{SR}}{S_{ST}} = 1 - \frac{S_{SE}}{S_{ST}} \quad (6)$$

R^2 的取值在 $[0, 1]$ 之间,越接近1,表明回归方程拟合的效果越好;越接近0,表明回归方程拟合的

效果越差。

第五步,检验因素 $x_j(j=1, \dots, m)$ 对响应 y 是否有显著性影响,即检验假设: $H_0: \beta_j=0$, $H_1: \beta_j \neq 0, j=1, \dots, m$ 。检验方法为 t 检验,检验的统计量为

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{c_{jj}MS_E}} \sim t(n-m-1) \quad (7)$$

式中: c_{jj} 为矩阵 $(X^T X)^{-1}$ 对角线上第 j 个元素。给定显著性水平 α ,查 t 分布表找出双侧检验的临界值 $t_{\alpha/2}(m, n-m-1)$ 。若 $|t_j| > t_{\alpha/2}(m, n-m-1)$,则拒绝假设 H_0 ,表明因素 x_j 对响应 y 影响显著;若 $|t_j| < t_{\alpha/2}(m, n-m-1)$,则接受假设 H_0 ,表明因素 x_j 对响应 y 影响不显著。

2.2 顺风向风荷载计算公式标准化

两岸风荷载标准均采用平均风荷载与动力放大系数乘积的形式表达等效风荷载。为了便于对高层建筑顺风向风荷进行多因素分析,本文首先对两岸风荷载标准中顺风向风荷载表达式做标准化处理,如式(8)所示:

$$W = q_0 C_e C_p C_g \quad (8)$$

式中: W 为顺风向等效风荷载, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$; q_0 为基本风压, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$; C_e 为风压高度变化系数; C_p 为风荷载体型系数; C_g 为脉动效应系数,分别对应大陆标准中的风振系数 β_z 和台湾标准中的阵风反应因子 G 。

2.3 基于均匀设计的顺风向风荷载多因素分析

本文算例中的建筑物位于台北,为无女儿墙封闭式平屋顶钢筋混凝土结构,长 $L=30 \text{ m}$,宽 $B=30 \text{ m}$,层高 3.0 m ,通过改变层数改变其高宽比。由于阻尼比对高层建筑风荷载的计算具有重要影响,且两岸标准对阻尼比均无强制性规定,为消除阻尼比的影响,本文分析中统一采用台湾标准给出的建议值 $\xi=0.02$ 。

2.3.1 均匀试验设计

由式(8)可知,基本风压 q_0 、风压高度变化系数 C_e 、风荷载体型系数 C_p 和脉动效应系数 C_g 是影响高层建筑顺风向风荷载 W 的4个因素。基本风压由基本风速确定,本文暂不考虑该因素的影响,计算中统一按照台湾标准给出的台北市50年重现期基本风速 $42.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 取值。由于风压高度变化系数主要受地面粗糙度类型的影响,风荷载体型系数主要受高层建筑外形的影响,脉动效应系数主要受等效风荷载计算方法和湍流强度的影响,故本文在进行均匀设计时,主要考虑高宽比 H/\sqrt{BL} 、地面粗糙度系数

α 、风荷载体型系数 C_p 、脉动效应系数 C_g 、湍流强度 I_z 五个因素。各因素及对应水平取值如表8所示。

表8 顺风向风荷载均匀试验设计因素和水平汇总

Tab. 8 Summary of factors and levels of uniform design experimentation of along-wind loads

水平	H/\sqrt{BL}	α	C_p	C_g	I_z
1	3	0.12	1.3	G	I_{z-TW}
2	4	0.15	1.4	β_z	I_{z-GB}
3	5	0.22			
4	6	0.25			
5	7	0.30			
6	8	0.32			

本文利用拟水平法,以等水平均匀设计表为基础,实现混合水平的均匀设计。选取中国数学会均匀设计分会提供的等水平均匀设计表 $U_{18}(6_5)^{[14-15]}$,并将该表中任意三列的水平进行合并: $\{1, 2, 3\} \Rightarrow 1$, $\{4, 5, 6\} \Rightarrow 2$ 。采用中心化 L_2 -偏差 CD_2 度量其均匀性,比较发现,当 $U_{18}(6_5)$ 的第二、三、五列的6个水平合并成二个水平时,偏差最小,均匀性最好,此时, CD_2 为0.322。

2.3.2 顺风向基底剪力均匀设计回归分析

回归分析中,高宽比、地面粗糙度指数和风荷载体型系数为数值变量,直接代入模型(3)即可;脉动效应系数和湍流强度为定性变量,需要采取0-1化方法将其转换成虚拟变量后才能进行回归分析,即:

$$C_g = \begin{cases} 1, & C_g = G \\ 0, & C_g = \beta \end{cases} \quad (9)$$

$$I_z = \begin{cases} 1, & I_z = I_{z-TW} \\ 0, & I_z = I_{z-GB} \end{cases} \quad (10)$$

分别采用向前筛选法、向后筛选法和逐步回归法进行回归分析,结果表明三种筛选变量方法的分析结果相同。表9给出了高层建筑顺风向基底剪力回归方程在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时的显著性检验结果。经过自变量筛选后最终有三个自变量进入方程, $m=3, n=18$,临界值 $F_{0.05}(3, 14)=3.34 < 44.852$,且 p 值远小于0.05,检验结果高度显著,回归方程有统计学意义。对回归方程进行拟合优度检验,决定系数 $R^2 = S_{SR}/S_{ST} = 0.906$,接近1,表明回归方程拟合效果良好。

进一步对回归系数做 t 值统计量检验,检验每个因素对顺风向基底剪力计算影响的显著性。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,回归系数的检验结果如表10所示。由表10可知,高宽比 H/\sqrt{BL} 、地面粗糙度系数 α 和脉动效应系数 C_g 是影响海峡两岸高层建筑顺风向基底剪力的主要因素。这三个因素的检验 p 值均

表 9 顺风向基底剪力回归方程显著性检验结果

Tab. 9 Result of significance test of regression equation of base shear force of along-wind

来源	平方和(SS)	自由度 f	均方(MS)	F 值	p 值
回归	2.799×10^9	3	9.330×10^8	44.852	<0.001
残差	2.912×10^8	14	2.080×10^{13}		
总和	3.090×10^9	17			

远小于 0.05,说明对顺风向基底剪力的计算有显著性影响。风荷载体型系数 C_p 和湍流强度 I_z 在回归分析中检验 p 值大于 0.05,检验不显著,说明这两个因素的水平变化对顺风向基底剪力影响较小,不是顺风向基底剪力的主要影响因素。将高层建筑顺风向基底剪力视为一个系统,比较每个因素的标准化回归系数绝对值,可以获得各因素对系统影响程度的大小依次为: $H/\sqrt{BL} > \alpha > C_g > C_p > I_z$ 。

表 10 顺风向基底剪力回归系数显著性检验

Tab. 10 Result of significance test of regression coefficient of base shear force of along-wind

因素	回归系数	标准化回归系数	t 值	$t_{\alpha/2}(n-m-1)$	p 值	显著性
常量	2 206.246		0.431	2.145	0.673	
H/\sqrt{BL}	6 274.869	0.818	9.961	2.145	<0.001	显著
α	-74 619.247	-0.415	-5.062	2.145	<0.001	显著
C_g	6 538.347	0.249	3.039	2.145	0.009	显著
C_p		0.094	1.145	2.160	0.273	不显著
I_z		0.026	0.307	2.160	0.764	不显著

2.3.3 顺风向基底弯矩均匀设计回归分析

以高层建筑顺风向基底弯矩为评价指标,分别采用向前筛选法、向后筛选法和逐步回归法进行均匀设计回归分析,结果表明三种筛选变量方法的分析结果一致。表 11 给出了顺风向基底弯矩回归方程在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时的显著性检验结果。经过自变量筛选后最终有两个自变量进入方程, $m=2$, $n=18$, 临界值 $F_{0.05}(2, 15) = 3.68 < 80.602$, $F_{0.05}(2, 15) = 3.68 < 80.602$, p 值也远小于 0.05,回归方程高度显著,有统计学意义。对回归方程做拟合优度检验,决定系数 $R^2 = S_{SR}/S_{ST} = 0.915$,接近 1,表明回归方程拟合效果良好。

进一步对回归系数做 t 值统计量检验,获得显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时各因素的检验结果如表 12 所示。由表 12 可知,高宽比 H/\sqrt{BL} 和地面粗糙度指数 α 的检验 p 值均远小于 0.05,表明对顺风向基底弯矩有显著影响,是海峡两岸高层建筑顺风向基底弯矩的主要影响因素。脉动效应系数 C_g 、风荷载体型系

表 11 顺风向基底弯矩回归方程显著性检验

Tab. 11 Result of significance test of regression equation of base moment of along-wind

来源	平方和(SS)	自由度 f	均方(MS)	F 值	p 值
回归	5.554×10^{13}	2	2.777×10^{13}	80.602	<0.001
残差	5.168×10^{12}	15	3.446×10^{11}		
总和	6.071×10^{13}	17			

数 C_p 和湍流强度 I_z 在回归分析中检验 p 值大于 0.05,检验不显著,因此没有包含在最终的回归方程中。将高层建筑顺风向基底弯矩视为一个系统,比较每个因素的标准化回归系数绝对值可以获得各因素对系统影响程度的大小排序依次为:高宽比 $H/\sqrt{BL} >$ 地面粗糙度指数 $\alpha >$ 脉动效应系数 $C_g >$ 风荷载体型系数 $C_p >$ 湍流强度 I_z 。

表 12 顺风向基底弯矩回归系数显著性检验

Tab. 12 Result of the significance test of regression coefficient of base moment of along-wind

因素	回归系数	标准化回归系数	t 值	$t_{\alpha/2}(n-m-1)$	p 值	显著性
常量	-1.370×10^6		-2.142	2.131	0.049	
H/\sqrt{BL}	9.820×10^5	0.913	12.119	2.131	<0.001	显著
α	-6.769×10^6	-0.269	-3.569	2.131	0.003	显著
C_g		0.125	1.777	2.145	0.097	不显著
C_p		0.058	0.754	2.145	0.463	不显著
I_z		0.017	0.217	2.145	0.831	不显著

2.4 不同高宽比的顺风向风荷载多因素分析

高宽比是衡量结构刚度大小的主要指标。由 2.3 节可以发现,高宽比是两岸高层建筑顺风向风荷载的最重要影响因素。为进一步研究各因素对高层建筑顺风向风荷载影响随高宽比的变化规律,本节将在 2.3 节的基础上,开展不同高宽比的高层建筑顺风向风荷载多因素分析,着重考察地面粗糙度系数 α 、风荷载体型系数 C_p 、脉动效应系数 C_g 、湍流强度 I_z 对两岸高层建筑顺风向风荷载的影响。

2.4.1 均匀试验设计

本节分析采用均匀试验设计方法,不同高宽比的顺风向风荷载均匀设计影响因素和对应水平的取值如表 13 所示。风荷载体型系数 C_p 、脉动效应系数 C_g 、湍流强度 I_z 的取值水平与 2.2 节完全相同。地面粗糙度指数 α 的取值水平仅考虑对应地貌,对于海岸地貌, α_{TW} 和 α_{GB} 分别为 0.15 和 0.12;对于平坦开阔地貌, α_{TW} 和 α_{GB} 均为 0.15;对于城市地貌, α_{TW} 和

α_{GB} 分别为 0.25 和 0.22;对于大城市中心地貌, α_{TW} 和 α_{GB} 分别为 0.32 和 0.30。表 13 中水平 1 对应该因素在台湾风荷载标准中的取值,水平 2 对应该因素在大陆风荷载标准中的取值。

表 13 不同高宽比顺风向风荷载均匀设计因素和水平
Tab. 13 Summary of factors and levels of uniform design experimentation of along-wind loads with different aspect ratios

水平	α	C_p	C_g	I_z
1	α_{TW}	1.3	G	I_{z-TW}
2	α_{GB}	1.4	β_z	I_{z-GB}

由表 13 可知,本节分析为 4 因素 2 水平的均匀试验设计,此处选用文献《正交与均匀试验设计》^[16] 给出的均匀设计表 $U_8(2_4)$ 进行分析。表 $U_8(2_4)$ 同时也是正交表,具有“均匀分散”和“整齐可比”的特点,其中心化 L_2 -偏差 CD_2 为 0.342 3。根据 $U_8(2_4)$ 进行均匀设计,将地面粗糙度系数 α 、风荷载体型系数 C_p 、脉动效应系数 C_g 、湍流强度 I_z 依次安排在 1~4 列中。本节分别对 6 种高宽比的矩形高层建筑在 4 种地貌下的顺风向响应进行均匀试验设计,共完成了 24 次均匀设计,计算结果详见文献[15]附录 1。为保证每个因素都能同时进入回归方程进行筛选并计算出标准化回归系数,本节采用向后筛选法进行回归分析。

2.4.2 不同高宽比的顺风向基底剪力均匀设计回归分析

当显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,不同高宽比的矩形高层建筑在不同地貌下的顺风向基底剪力均匀设计回归系数检验 p 值如图 5 所示。

由图 5 可以发现矩形高层建筑高宽比在 3~8 的常用范围内,无论对于何种地貌类型,地面粗糙度指数、风荷载体型系数和湍流强度的回归系数检验 p 值均大于 0.05,表明这 3 个因素对顺风向基底剪力的影响均不显著,不是引起两岸标准中顺风向基底剪力计算差异性的主要影响因素。

当高宽比较小时,结构刚度相对较大,两岸标准给出的顺风向基底剪力计算值相近,同时所有 4 个因素的回归系数检验 p 值均大于 0.05,检验不显著。随着高宽比的增大,脉动效应系数对顺风向基底剪力的影响逐渐显著,成为主导两岸标准顺风向基底剪力计算差异的主要影响因素。

为直观比较各因素对顺风向基底剪力的影响程度,图 6 给出地面粗糙度指数、风荷载体型系数、脉动效应系数和湍流强度的标准化回归系数的绝对值

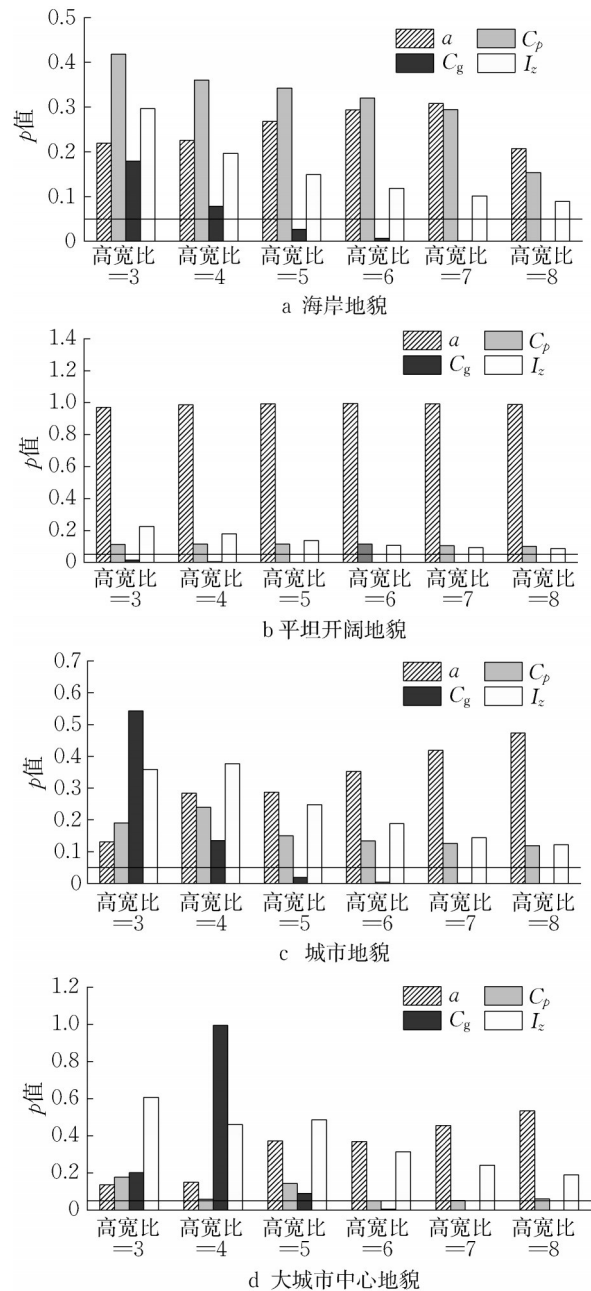


图 5 不同高宽比顺风向基底剪力均匀设计回归系数检验 p 值

Fig. 5 Value p of regression coefficient for uniform design of base shear force of along-wind with different aspect ratios

$|\beta^*|$ 。当 β^* 为正值时,表明该参数按照台湾标准取值获得的顺风向基底剪力要大于按照大陆标准时的对应值,为负值则正好相反,且 $|\beta^*|$ 越大,其影响程度越大。

由图 6 可知,随着高宽比的增大,脉动效应系数的标准化回归系数绝对值逐渐增大,其他 3 因素则逐渐减小;高宽比越大,脉动效应系数对顺风向基底剪力的

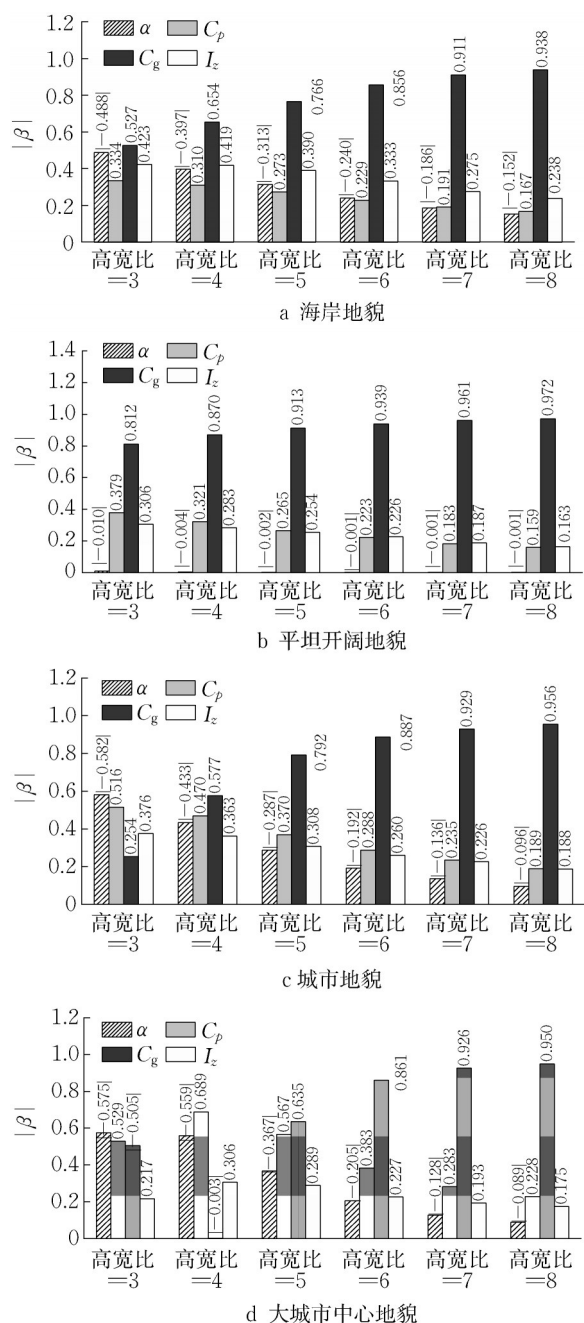


图6 不同高宽比顺风向基底剪力影响因素标准化回归系数绝对值 $|\beta^*|$

Fig. 6 $|\beta^*|$ of factors for base shear force of along-wind with different aspect ratios

影响程度越大;结合图5和图6可知,当高宽比较大时,脉动效应系数是导致两岸标准计算矩形高层建筑顺风向基底剪力差异性的主要因素,采用台湾标准阵风反应因子计算得到的顺风向基底剪力要显著大于采用大陆标准风振系数计算得到的对应值。

观察图6还可以发现,除平坦开阔地貌外(两岸标准的地面粗糙度指数均为0.15),地面粗糙度指数对高

宽比较小的矩形高层建筑顺风向基底剪力的影响要大于风荷载体型系数和湍流强度。随着高宽比的增大,地面粗糙度指数对顺风向基底剪力的影响逐渐下降,当高宽比增大到一定程度时,地面粗糙度指数的影响小于风荷载体型系数和湍流强度。风荷载体型系数对两岸高层建筑顺风向基底剪力的影响程度基本上随结构高宽比的增大而逐渐减小。

2.4.3 不同高宽比的顺风向基底弯矩均匀设计回归分析

当显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,不同高宽比的矩形高层建筑在不同地貌下的顺风向基底弯矩均匀设计回归系数检验 p 值如图7所示。

由图7可知,除大城市中心地貌高宽比为5的矩形高层建筑外,高宽比在3~8的常用范围内,无论对于何种地貌类型,地面粗糙度指数、风荷载体型系数和湍流强度的回归系数检验 p 值均大于0.05,表明这三个因素对顺风向基底弯矩的影响均不显著,对顺风向基底弯矩影响较小。对于海岸地貌,脉动效应系数对顺风向基底弯矩的影响随结构高宽比的增大而增大,当高宽比不小于6时脉动效应系数为主要影响因素。对于平坦开阔地貌,两岸地面粗糙度指数的取值相同,不引起高层建筑顺风向基底弯矩计算值的差异;脉动效应系数的影响同样随结构高宽比的增大而增大,当高宽比大于等于5时成为主要影响因素。对于城市和大城市中心地貌,脉动效应系数对顺风向基底弯矩的影响均表现出随结构高宽比的增大而先减小后增大的趋势。对于城市地貌,当高宽比大于等于6时,脉动效应系数是影响高层建筑顺风向基底弯矩的主要因素;对于大城市中心地貌,除高宽比为5、6的情况,脉动效应系数均为高层建筑顺风向基底弯矩的主要影响因素。

图8为不同高宽比顺风向基底弯矩影响因素标准化回归系数绝对值 $|\beta^*|$ 。由图8可知,对于海岸和平坦开阔地貌,脉动效应系数的标准化回归系数为正值,表明按照台湾标准取阵风反应因子 G 时,高层建筑顺风向基底弯矩的计算值要大于采用大陆标准取风振系数 β_z 时的对应值。对于城市和大城市中心地貌,脉动效应系数的标准化回归系数的数值受高宽比的影响明显。此外,除平坦开阔和大城市中心地貌外,随着高宽比的增大,地面粗糙度指数对顺风向基底弯矩的影响逐渐减小,当高宽比增大到一定程度时,地面粗糙度指数的影响小于风荷载体型系数和湍流强度。

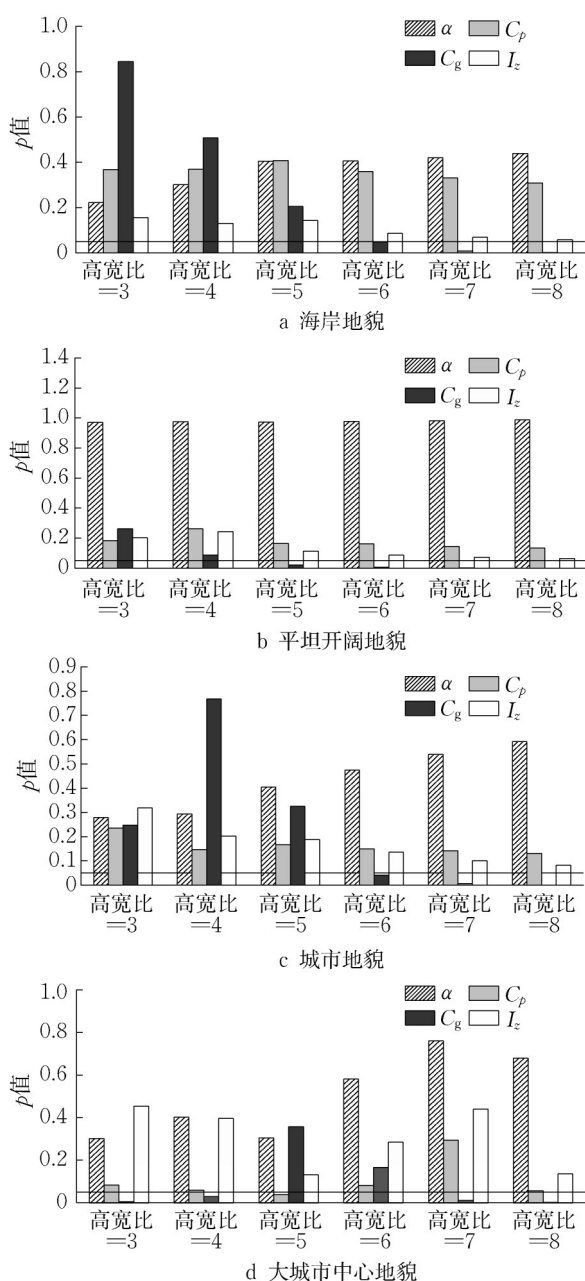


图7 不同高宽比顺风向基底弯矩均匀设计回归系数检验 p 值

Fig. 7 Value p of regression coefficient for uniform design of base moment of along-wind with different aspect ratios

3 结论

本文以海峡两岸高层建筑顺风向风荷载为研究对象,在两岸建筑风荷载标准对标分析的基础上,采用均匀设计方法对两岸高层建筑顺风向风荷载进行了多因素分析,主要结论为:(1) 两岸风荷载标准对基本风速的定义和计算方法基本相同,但风速样本取样方法和分布参数取值方法存在明显区别;对于

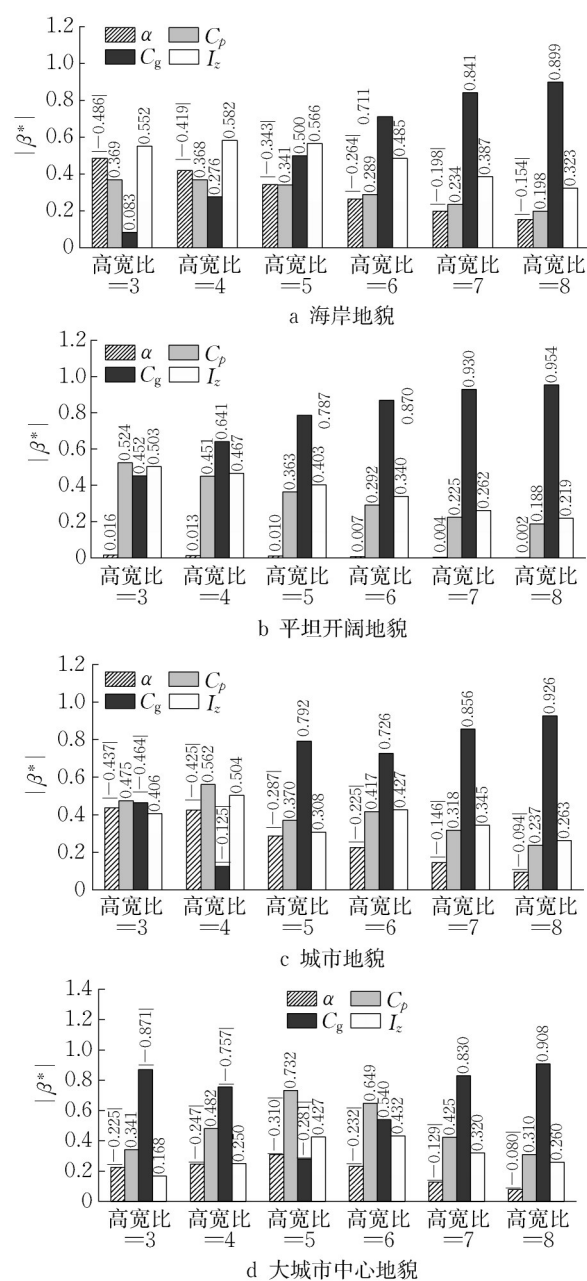


图8 不同高宽比顺风向基底弯矩影响因素标准化回归系数绝对值 $|\beta^*|$

Fig. 8 $|\beta^*|$ of factors for base moment of along-wind with different aspect ratios

大致相当的地面粗糙度类型,两岸风荷载标准给出的风压高度变化系数分布大致相同;对于相同高度处的湍流强度,台湾标准取值明显大于大陆标准;对于不同重现期设计风速转换系数,台湾标准取固定值,大陆标准随地理位置不同而异。(2) 建筑物主体结构设计风压的计算,台湾标准采用同时考虑外压和内压影响的分类计算方法,大陆标准采用不考虑内压影响且不区分建筑物类型的统一表达式;两岸风荷载标准对顺风向、横风向和扭转向设计风荷载

的组合方式存在明显不同;建筑物围护结构的设计风压计算,台湾标准采用分类计算方法,大陆标准采用统一表达式,两且均考虑内压和外压的影响。(3) 无论对于基底剪力还是基底弯矩, H/\sqrt{BL} 和 α 都是两岸高层建筑顺风向风荷载的主要影响因素。同时, H/\sqrt{BL} 、 α 、 C_g 、 C_p 和 I_z 等对顺风向风荷载的影响程度逐渐减小。(4) 不同高宽比的顺风向风荷载多因素分析表明, C_g 对高层建筑顺风向风荷载的影响基本上随结构高宽比的增大而增大;当高宽比增大到一定程度时,成为主导两岸标准顺风向风荷载的主要影响因素。当高宽比较大时,采用台湾标准阵风反应因子计算得到的顺风向基底响应要显著大于采用大陆标准风振系数计算得到的对应值。

作者贡献声明:

董锐:命题提出与构思、主要内容撰写与修订。

梁斯宇:数值计算、部分内容撰写。

邱凌煜:均匀设计多因素分析计算。

罗元隆:两岸风荷载标准对标分析。

刘国买:均匀设计方法实现与指导。

参考文献:

- [1] 董锐,李狄钦,罗元隆,等. 不同气候下海峡两岸建筑抗风标准之基本风速比较[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 119. DONG Rui, LI Diqin, LUO Yuanlong, *et al.* Comparative study of basic wind speed under different climatic conditions of both sides of the Taiwan Strait[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2021, 48(3): 119.
- [2] 中华人民共和国建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Construction People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [3] 詹氏书局编辑部. 建筑物耐风设计规范与解说[M]. 台北: 詹氏书局, 2017. Editorial Department of Jens Book Company. Code and commentary for wind resistant design of buildings [M]. Taipei: Jens Book Company, 2017.
- [4] GE Yaojun, JIN Xinyang, CAO Shuyang. Comparison of APEC wind loading codification and revision of Chinese national code[C/CD]//Proceedings of 6th Workshop on Regional Harmonization of Wind Loading and Wind Environmental Specifications in Asia-Pacific economies. Gangneung: [s.n.], 2010.
- [5] GE Yaojun, CAO Shuyang, JIN Xinyang. Comparison and harmonization of building wind loading codes among the Asia-Pacific economies [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2013, 7(4): 402.
- [6] 金新阳. 亚太地区各国风荷载规范的现状和发展趋势[C]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集. 三亚: 中国土木工程学会, 2004: 123-127. JIN Xinyang. Status quo and development trend of building wind loading codes among the Asia-Pacific economies[C]//Proceeding of the 11th National Conference on Structural Wind Engineering. Sanya: China Civil Engineering Society, 2004: 123-127.
- [7] KWON D K, KAREEM A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings[J]. Engineering Structures, 2013, 51(2): 23.
- [8] HOLMES J D. Along- and cross-wind response of a generic tall building: Comparison of wind-tunnel data with codes and standards [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 132: 136.
- [9] VERMA A, GOLIYA R K. Comparison of static wind load on high rise building according to different wind loading codes and standards[J]. International Journal of Engineering Research, 2016, 5(5): 885.
- [10] 赵杨, 段忠东, YUKIO Tamura, 等. 多国荷载规范中阵风荷载因子的比较研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(11): 1465. ZHAO Yang, DUAN Zhongdong, YUKIO Tamura, *et al.* Comparative study on the gust load factor in the load codes and standards of five countries [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(11): 1465.
- [11] 张军锋, 葛耀君, 柯世堂, 等. 中美日三国规范高层结构风荷载标准值对比[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(10): 18. ZHANG Junfeng, GE Yaojun, KE Shitang, *et al.* Comparative study on the nominal value of wind loads on tall buildings among the codes of China, America and Japan [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2011, 38(10): 18.
- [12] 陈余粮. 多国规范超高层建筑风荷载取值及与风洞实验的对比性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. CHEN Yuling. Comparative study on wind tunnel experiment and the wind load value of super high-rise building based on many national wind load standards [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [13] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990. ZHANG Xiangting. Manual of wind load theory and wind resistant on engineering structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.
- [14] The uniform design association of china. Uniform design table [EB/OL]. [2017-01-24]. <http://web.stat.nankai.edu.cn/cms-ud/UD/UD%20Tables.html>.
- [15] 邱凌煜. 海峡两岸高层建筑顺风向风荷载比较研究[D]. 福州: 福州大学, 2020. QIU Lingyu. Comparison of high-rise building's along-wind loads between Chinese Taiwan and mainland areas [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020.
- [16] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001. FANG Kaitai, MA Changxing. Orthogonal and uniform experimental design [M]. Beijing: Science Press, 2001.