

直立锁缝屋面体系固定支座的有效静力风荷载

景晓昆, 李元齐

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对强风作用下直立锁缝屋面体系多发生固定支座脱扣破坏现象, 综合考虑固定支座受力的实际影响范围和屋面脉动风力的空间相关性, 提出了固定支座有效受风承载面积的计算方法. 基于刚性模型同步测压风洞试验测得的双坡屋面表面风荷载时程数据, 建立了考虑风荷载传递路径的直立锁缝屋面体系有限元模型. 基于理论分析和动力时程分析, 通过相对传统风荷载从属面积的放大系数合理取值, 将有效受风承载面积的概念引入到固定支座的有效静力风荷载估计中. 计算结果表明, 采用建议的修正方法得到的固定支座所受风荷载值可以包络实际风致动力响应的极值, 且表达形式简洁, 方便工程设计使用.

关键词: 直立锁缝屋面体系固定支座; 有效受风承载面积; 风荷载传递路径; 动力时程分析; 有效静力风荷载

中图分类号: TU392.5

文献标志码: A

Effective Static Wind Load for Clips of Standing Seam Roof System

JING Xiaokun, LI Yuanqi

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Detachment failure of clips from roof panels of standing seam roof system is a typical and often-happened phenomenon in practice. A calculation method of effective wind loaded area for the clips under wind load is proposed considering the actual wind loaded area and the spatial correlation of fluctuating wind pressure on the roof surface. Based on wind load time series obtained from the synchronous multi-pressure measurement on a rigid gable roof model, the finite element model for standing seam roof system considering wind load path in the roof system is established. By using a magnification coefficient in comparison with the widely-used tributary area, the concept of effective wind loaded area is introduced to estimate the effective static wind load for the clips. It is shown that the wind-induced forces for

clips obtained from the proposed calculation method using the magnification coefficient can envelope the extreme values from dynamic time history analysis, and the expression of the method is very simple, which will be convenient in practical use.

Key words: clips of standing seam roof system; effective wind loaded area; wind load path; time history analysis; effective static wind load

直立锁缝屋面体系作为一种新型的屋面体系在国内市场迅速崛起, 由于其卓越的防水密闭性能并具有有效释放屋面板温度变形的能力, 在实际工程中已经得到越来越广泛的应用. 典型的直立锁缝屋面体系结构形式是: 首先将固定支座用自攻螺钉固定在主结构的檩条上, 再将金属屋面板通过不同角度扣在固定支座上, 最后用电动锁边机将屋面板的自然搭接扣边咬合在一起. 风灾调查表明^[1-2], 直立锁缝屋面体系的破坏形式多为固定支座与屋面板在锁缝处的脱离, 即发生脱扣破坏, 而自攻螺钉仍将固定支座紧密固定在檩条上, 如图 1 所示. 脱扣破坏将导致屋面板局部被掀起, 进而发生大面积脱落. 因此, 如何合理估计固定支座所受风力已成为直立锁缝屋面体系抗风设计的重要问题.



图 1 直立锁缝屋面体系风致破坏

Fig. 1 Wind-induced damage of standing seam roof system

收稿日期: 2013-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(50978192); 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE09-B-01)

第一作者: 景晓昆(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为轻型钢结构抗风设计理论. E-mail: jingxk@126.com

通讯作者: 李元齐(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为冷弯型钢结构及结构抗风. E-mail: liyq@tongji.edu.cn

本文综合考虑强风作用下直立锁缝屋面体系固定支座受力的实际影响范围和屋面脉动风力的空间相关性,提出了固定支座有效受风承载面积的计算方法,并通过相对传统风荷载从属面积的放大系数将有效受风承载面积的概念引入到固定支座的有效静力风荷载的估计中.在此基础上,与实际风致动力响应分析下固定支座受力的极值进行对比,验证了本文方法的有效性和适用性,可方便用于实际工程设计中.

1 理论分析方法

1.1 风荷载的相关长度

在风荷载作用下,结构物表面上任一点的脉动风力并不与其他点的脉动风力完全相关,这种相关一般可用相关长度表示.两点 y_1 和 y_2 之间的相关长度 L 估测可以通过关于两点距离 $y = |y_1 - y_2|$ 的相关系数 $\rho(y)$ 积分求得^[3],即

$$L = \int \rho(y) dy \quad (1)$$

1.2 固定支座的有效受风承载面积

依据一维相关长度的概念,可以得到二维相关面积 A_{cor} 的定义,即

$$A_{cor} = \iint \rho(x, y) dx dy \quad (2)$$

式中: $\rho(x, y)$ 为脉动风力的空间相关函数.

如果相关系数是在固定支座受力的影响范围内积分,那么得到的相关面积在本文中被称为固定支座在风吸力下的有效受风承载面积 A_e ,即

$$A_e = \iint \rho(x, y) dA \quad (3)$$

式中: A 为固定支座受力的影响范围,其确定方法是撤消固定支座处的竖向约束,并且在该固定支座所在节点上施加单位荷载,此时产生的变形区域就是固定支座受力的影响范围^[4].

1.3 固定支座的有效静力风荷载的估计

依据上述分析,固定支座受到的有效静力风荷载 F_u 可以表示为

$$F_u = P_w A_e \quad (4)$$

式中: P_w 为固定支座的风压标准值 ($kN \cdot m^{-2}$),可以按《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》^[5](以下简称“《门规》”)取值,计算参数包括基本风压、风压高度变化系数和体型系数(含阵风系数).

考虑到从属面积在工程中广泛应用,可以引入相对传统风荷载从属面积的调整系数来考虑有效受

风承载面积的概念,则式(4)可表示为

$$F_u = \eta P_w A_e \quad (5)$$

式中: A_e 为固定支座计算风荷载时的从属面积; $\eta = A_e / A_c$, 定义为计算固定支座风荷载的放大系数.

因此,对强风作用下直立锁缝屋面体系固定支座的有效静力风荷载的研究可以视作是固定支座风荷载的放大系数的合理取值问题,可通过式(3)直接分析,或基于式(4)通过屋面模型的动力时程分析得到的固定支座风荷载极值进行分析.

2 刚性模型风洞试验

为得到分析模型表面的同步风压时程分布,在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 风洞进行了双坡屋面刚性模型测压试验.采用尖塔-粗糙元的方法,成功地模拟出《建筑结构荷载规范》^[6](以下简称“《荷规》”)定义的 B 类地貌.屋面坡角为 10° ,模型缩尺比为 $1:40$,试验风速比为 $1:3$.模型屋面半坡高度被视为参考高度,该处的风速被视为参考风速.图 2 为双坡屋面测点布置图,共 110 个测点且关于屋脊线对称布置.试验时将模型放置在转盘中心,通过旋转转盘模拟不同风向角.以气流垂直吹向房屋纵向为 0° 风向角,风向角间隔 45° .各点同步采样频率为 312.5 Hz .

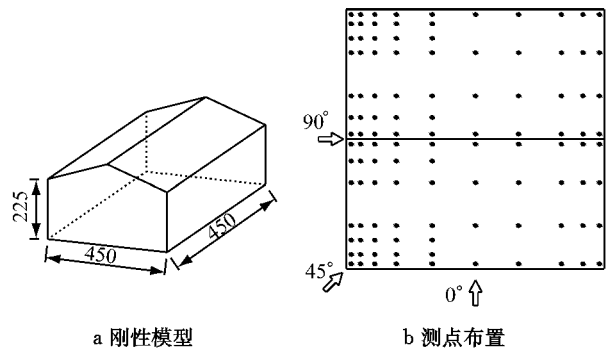


图 2 双坡屋面刚性模型和测点布置(单位:mm)
Fig.2 Rigid model and layout of pressure taps on gable roof (unit:mm)

图 3 和 4 分别给出模型在 0° , 45° 和 90° 风向时的平均和脉动风压系数分布,与相近模型的风压分布规律较为一致^[7],在屋面角部、边缘处和屋脊处存在较高的负压.因此本次试验数据可以用于本文的动力时程分析.

3 直立锁缝屋面有限元分析模型

直立锁缝屋面体系的风荷载传递路径是:风荷

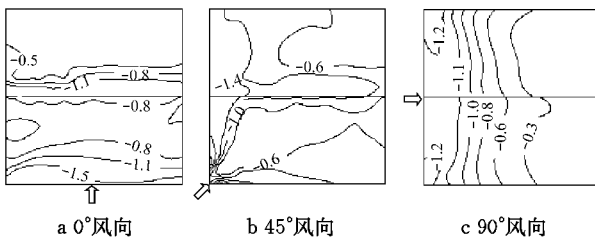


图 3 双坡屋面平均风压系数分布

Fig. 3 Mean wind pressure coefficient distribution on gable roof

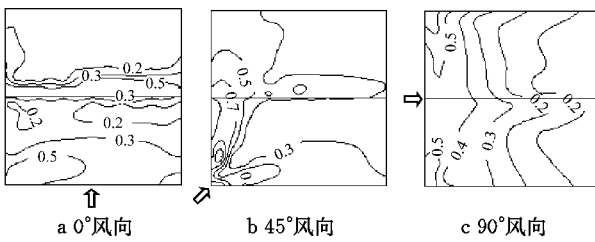


图 4 双坡屋面脉动风压系数分布

Fig. 4 Fluctuating wind pressure coefficient distribution on gable roof

载—屋面板—屋面板锁缝边缘—固定支座—自攻螺钉—檩条。以此为基础,本文建立了直立锁缝屋面代表性部分的有限元分析模型。模型尺寸为 18 m×9 m(仅考虑迎风屋面),屋面坡角为 10°。屋面板采用 SHELL63 模拟,板宽为 400 mm,厚度为 0.8 mm。固定支座只起到传力作用,可以用 BEAM4 模拟。檩条采用 BEAM44 模拟,间距为 1.5 m,跨度为 6 m,截面形式^[8]选取带卷边的 Z 型钢 160 mm×70 mm×20 mm×2.5 mm。本构模型均采用理想弹性模型。锁缝传力可以通过耦合相邻屋面板和固定支座相应节点的位移来实现。由于强风作用下,自攻螺钉仍将固定支座紧密固定在檩条上,所以在有限元模型中直接将固定支座与檩条对应的节点处的位移耦合。工程中实腹式檩条一般按简支梁设计,故每跨檩条两端采用铰接约束,这样既可以保证风荷载能在屋面体系各构件中传递,也可以保证檩条能将所受风力传递到刚架梁上。不考虑构件自身的破坏,只保证风荷载能够传递到下一级构件。ANSYS 建立的基于风荷载传递路径的直立锁缝屋面体系有限元模型如图 5 所示。

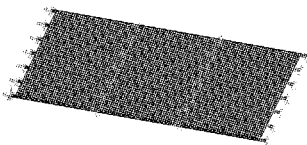


图 5 基于风荷载传递路径的直立锁缝屋面体系有限元模型
Fig. 5 FE model for standing seam roof system considering actual wind load path

用时域方法计算屋面体系风致响应的参数取值如下:①基本风压,0.55 kPa(重现期 50 年,按上海地区考虑);②时间步长,0.034 7 s(考虑风洞试验的采样频率);③结构阻尼比,0.02;④体系为经典阻尼体系,阻尼矩阵 C 、质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 的关系为 $C=\alpha M+\beta K$,本文中 $\alpha=0.520 8,\beta=4.801 6\times 10^{-3}$ 。

本征正交分解是一种有效的分析和重建建筑结构表面随机风场的方法^[9-10],根据已有的风压时程数据获得模型表面风场的本征模态,结合与时间相关的主坐标获得重构的各点风压时程,并保持各点的风压脉动性和空间相关性,可以作为风致响应有限元计算中相应表面节点的输入风荷载^[11]。本文根据风洞试验中屋面已有测点的风压时程,通过本征正交分解获得有限元模型表面各节点的风压时程。风力垂直作用于屋面表面,且规定背离屋面表面为正。

4 固定支座风荷载放大系数的合理取值

4.1 基于理论分析的有效受风承载面积

图 6 给出了固定支座的编号以及参考《门规》关于固定支座风荷载体型系数的分区示意。编号为 1, 23, 139 和 161 固定支座的受力影响范围如图 7 所示。由于屋面坡角较小,可以用竖向位移云图近似代替垂直屋面板方向的位移观察固定支座的受力影响范围,可以看出固定支座的受力影响范围是周边相邻的固定支座所包围的区域,该区域以外的影响非常小,可以忽略不计。

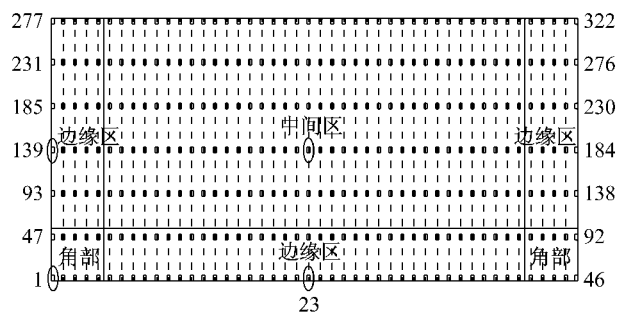


图 6 固定支座编号及风荷载体型系数分区示意
Fig. 6 The number and zone of shape coefficients for the clips

根据风洞试验中屋面已有测点的风压时程,可以通过本征正交分解获得有限元模型中屋面各节点处的风压时程^[11],并可以求出各节点间的相关系数。依据式(3),在各个固定支座受力的影响范围内可按

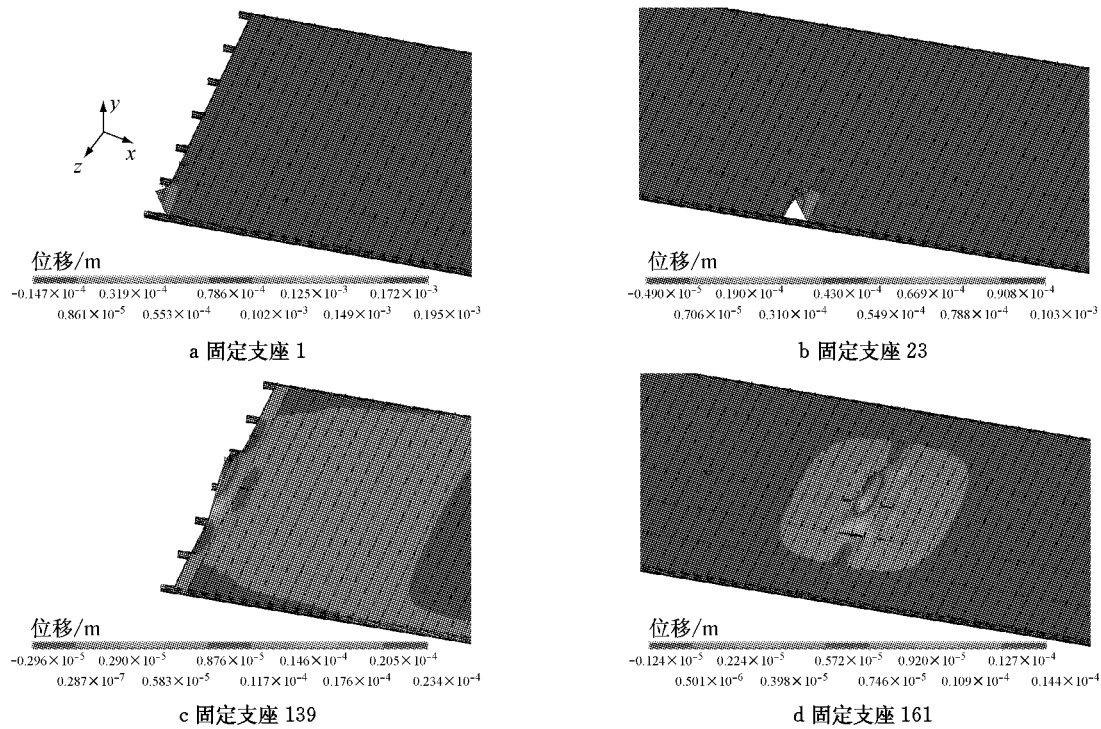


图 7 固定支座的受力影响范围

Fig.7 The influence surface for the clips

$\sum \rho_i A_i$ 求得有效受风承载面积,其中 ρ_i 为所关心的固定支座和其受力影响范围内节点 i 的相关系数, A_i 为节点 i 的代表面积. 本文计算了所有固定支座的有效受风承载面积 A_e 、从属面积 A_c 及其比值 A_e/A_c

A_c ,限于篇幅,表 1 只给出了基于理论分析的典型固定支座的有效受风承载面积、从属面积及其比值. 可以看出,由于表面风压的空间相关性,使得固定支座的有效受风承载面积 A_e 要大于从属面积 A_c . 对所

表 1 基于理论分析的典型固定支座有效受风承载面积及从属面积

Tab.1 Effective wind loaded area based on theoretical analysis and tributary area for typical clips

典型固定 支座区域	编号	A_c/m^2	0°风向		45°风向		90°风向		不同风向 A_e/A_c 最大值
			A_e/m^2	A_e/A_c	A_e/m^2	A_e/A_c	A_e/m^2	A_e/A_c	
角部	1	$0.15/\cos 10^\circ$	0.28	1.84	0.30	1.96	0.29	1.91	1.96
	2	$0.30/\cos 10^\circ$	0.53	1.73	0.58	1.91	0.56	1.85	1.91
	47	$0.30/\cos 10^\circ$	0.56	1.85	0.60	1.95	0.59	1.94	1.95
	48	$0.60/\cos 10^\circ$	1.15	1.89	1.13	1.86	1.17	1.93	1.93
边缘区	23	$0.30/\cos 10^\circ$	0.70	2.31	0.73	2.40	0.69	2.28	2.40
	69	$0.60/\cos 10^\circ$	1.19	1.96	1.44	2.36	1.35	2.21	2.36
	93	$0.30/\cos 10^\circ$	0.70	2.31	0.71	2.32	0.74	2.44	2.44
	94	$0.60/\cos 10^\circ$	1.35	2.22	1.31	2.15	1.39	2.28	2.28
	139	$0.30/\cos 10^\circ$	0.75	2.47	0.76	2.48	0.75	2.45	2.48
	140	$0.60/\cos 10^\circ$	1.45	2.37	1.35	2.22	1.44	2.36	2.37
	185	$0.30/\cos 10^\circ$	0.71	2.34	0.74	2.42	0.73	2.40	2.42
	186	$0.60/\cos 10^\circ$	1.38	2.27	1.45	2.39	1.41	2.32	2.39
	231	$0.30/\cos 10^\circ$	0.71	2.34	0.67	2.19	0.73	2.40	2.40
	232	$0.60/\cos 10^\circ$	1.39	2.28	1.30	2.13	1.43	2.35	2.35
中间区	277	$0.15/\cos 10^\circ$	0.31	2.03	0.31	2.04	0.37	2.44	2.44
	278	$0.30/\cos 10^\circ$	0.61	1.99	0.58	1.90	0.74	2.41	2.41
	115	$0.60/\cos 10^\circ$	1.81	2.97	1.76	2.88	1.73	2.84	2.97
	161	$0.60/\cos 10^\circ$	1.80	2.95	1.74	2.86	1.63	2.68	2.95
	207	$0.60/\cos 10^\circ$	1.75	2.87	1.61	2.65	1.64	2.69	2.87
	253	$0.60/\cos 10^\circ$	1.77	2.90	1.67	2.74	1.65	2.70	2.90
	299	$0.30/\cos 10^\circ$	0.86	2.82	0.75	2.46	0.64	2.12	2.82

有固定支座的计算结果表明,角部各个固定支座在不同风向下 A_e/A_c 的最大值在 1.6~2.0 之间,边缘区各个固定支座在不同风向下 A_e/A_c 的最大值在 1.8~2.5 之间,中间区各个固定支座在不同风向下 A_e/A_c 的最大值在 1.9~3.0 之间。

4.2 基于动力时程分析的有效受风承载面积

依据式(4),可以得到基于动力时程分析的有效受风承载面积 A_e ,即为动力时程分析得到的各个固定支座受到的风力极值与风压标准值的比值。限于

篇幅,表 2 只给出了基于动力时程分析的典型固定支座的有效受风承载面积 A_e 、从属面积 A_c 及其比值 A_e/A_c 。对所有固定支座的计算结果表明,角部各个固定支座在不同风向下 A_e/A_c 的最大值在 1.6~1.9 之间,边缘区各个固定支座在不同风向下 A_e/A_c 的最大值在 1.6~2.4 之间,中间区各个固定支座在不同风向下 A_e/A_c 的最大值在 1.9~2.8 之间。由表 1 和 2 比较可知,总体来看,基于动力时程分析的 A_e 值与基于理论分析的 A_e 值较为接近。

表 2 基于动力时程分析的典型固定支座有效受风承载面积及从属面积

Tab.2 Effective wind loaded area based on time history analysis and tributary area for typical clips

典型固定 支座区域	编号	A_c/m^2	0°风向		45°风向		90°风向		不同风向 A_e/A_c 最大值
			A_e/m^2	A_e/A_c	A_e/m^2	A_e/A_c	A_e/m^2	A_e/A_c	
角部	1	$0.15/\cos 10^\circ$	0.27	1.76	0.27	1.77	0.28	1.84	1.84
	2	$0.30/\cos 10^\circ$	0.52	1.70	0.52	1.70	0.55	1.80	1.80
	47	$0.30/\cos 10^\circ$	0.55	1.80	0.55	1.80	0.53	1.73	1.80
	48	$0.60/\cos 10^\circ$	1.11	1.83	1.07	1.76	1.07	1.76	1.83
边缘区	23	$0.30/\cos 10^\circ$	0.68	2.22	0.61	2.02	0.60	1.97	2.22
	69	$0.60/\cos 10^\circ$	1.36	2.24	1.05	1.72	1.04	1.71	2.24
	93	$0.30/\cos 10^\circ$	0.65	2.15	0.70	2.29	0.63	2.08	2.29
	94	$0.60/\cos 10^\circ$	1.33	2.18	1.28	2.10	1.18	1.93	2.18
	139	$0.30/\cos 10^\circ$	0.56	1.84	0.64	2.10	0.57	1.88	2.10
	140	$0.60/\cos 10^\circ$	1.16	1.90	1.34	2.20	1.16	1.90	2.20
	185	$0.30/\cos 10^\circ$	0.60	1.96	0.65	2.13	0.61	2.02	2.13
	186	$0.60/\cos 10^\circ$	1.13	1.86	1.28	2.11	1.20	1.97	2.11
	231	$0.30/\cos 10^\circ$	0.53	1.75	0.64	2.10	0.69	2.25	2.25
	232	$0.60/\cos 10^\circ$	1.03	1.69	1.23	2.02	1.32	2.17	2.17
中间区	277	$0.15/\cos 10^\circ$	0.28	1.87	0.30	1.97	0.30	1.95	1.97
	278	$0.30/\cos 10^\circ$	0.63	2.05	0.57	1.87	0.61	2.00	2.05
	115	$0.60/\cos 10^\circ$	1.69	2.78	1.29	2.12	1.21	1.98	2.78
	161	$0.60/\cos 10^\circ$	1.52	2.49	1.17	1.93	1.24	2.03	2.49
	207	$0.60/\cos 10^\circ$	1.34	2.26	1.31	2.16	1.35	2.21	2.26
	253	$0.60/\cos 10^\circ$	1.43	2.35	1.27	2.09	1.41	2.31	2.35
	299	$0.30/\cos 10^\circ$	0.76	2.48	0.52	1.72	0.70	2.29	2.48

4.3 固定支座风荷载放大系数的取值建议

为了便于实用并能同时保证设计的安全性,可取各区域内 A_e/A_c 的最大值作为固定支座风荷载的放大系数 η 。基于表 1 和 2,本文对计算固定支座风荷载的放大系数取值建议如下:角部 $\eta=2.0$,边缘区 $\eta=2.5$,中间区 $\eta=3.0$,分区方式仍然采用《门规》关于固定支座风荷载体型系数分区的规定。

图 8 分别给出 0°,45°,90°风向下和不同风向下固定支座所受风荷载的动力时程极值与采用本文建议式(5)计算结果的对比,其中式(5)中 η 按建议值取值。可以看出,本文给出的建议公式能包络住实际动力响应极值,是偏于安全的。故称采用式(5)得到的固定支座所受风荷载可以作为有效静力风荷载,它综合考虑了固定支座受力的影响范围和脉动风力的空间相关性。

5 结语

本文综合考虑直立锁缝屋面体系固定支座受力的实际影响范围和屋面脉动风力的空间相关性,提出了固定支座有效受风承载面积的计算方法。基于理论分析和动力时程分析,通过相对传统风荷载从属面积的放大系数 η ,将有效受风承载面积的概念引入到固定支座的有效静力风荷载的估计中,其中对于角部 $\eta=2.0$,对于边缘区 $\eta=2.5$,对于中间区 $\eta=3.0$,分区方式仍然采用《门规》关于固定支座风荷载体型系数分区的规定。通过与实际风致动力响应极值的对比,验证了本文建议的修正方法的有效性,且表达形式简洁,适用于工程设计中。

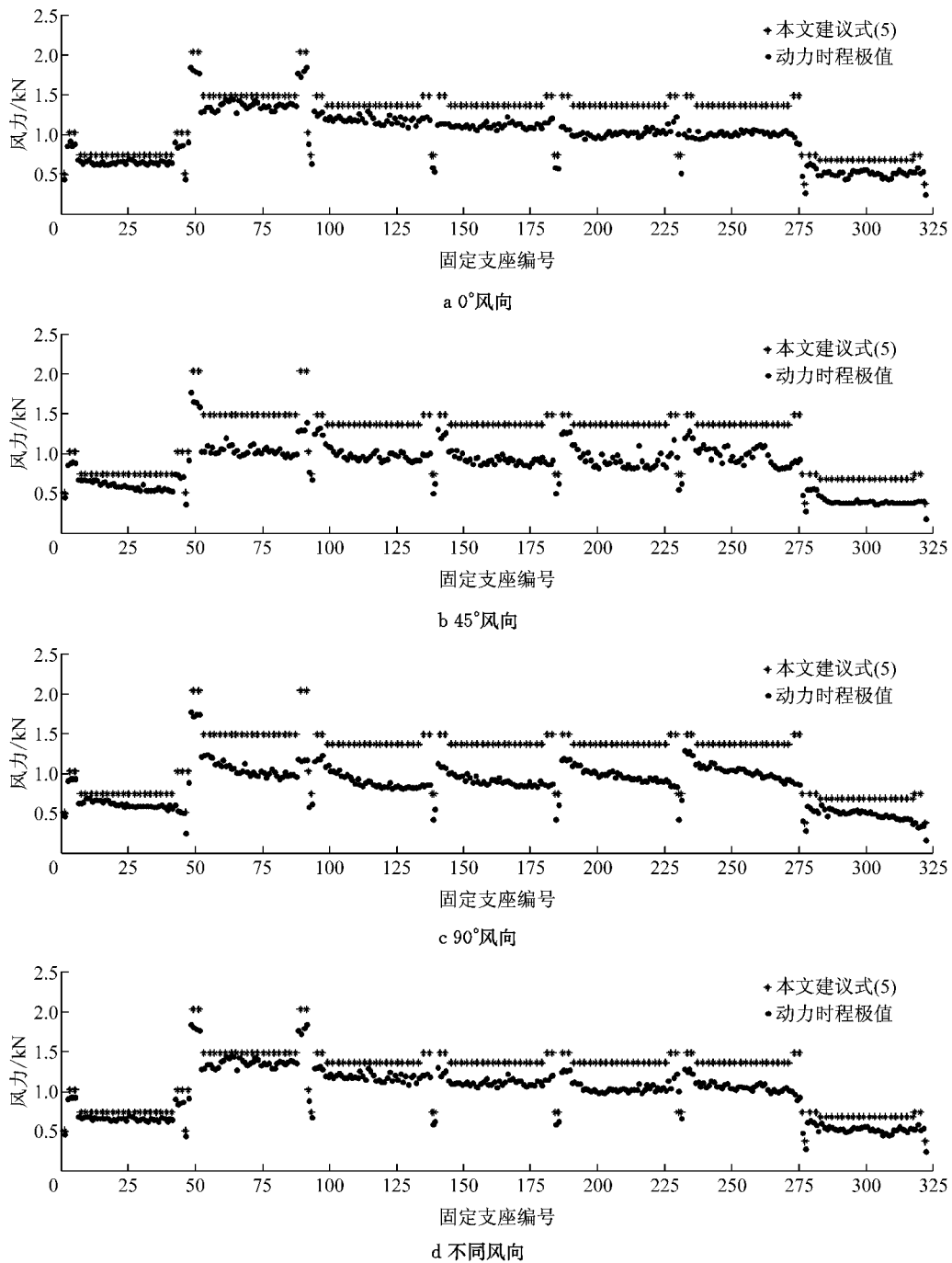


图 8 固定支座所受风荷载的对比
 Fig.8 Comparison of wind-induced force for the clips

参考文献:

[1] 郑卫基. 压型钢板屋面抗风设计有关问题的探讨[J]. 福建建筑, 2012, 163(1): 45.
 ZHENG Weiji. Profiled steel sheet roof discussion of wind-resistant design [J]. Fujian Architecture and Construction, 2012, 163(1): 45.

[2] 景晓昆, 李元齐. 轻型钢结构抗风研究现状[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(3): 30.
 JING Xiaokun, LI Yuanqi. State-of-the-art: research on wind-resistant design of light-weight steel structures [J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(3): 30.

[3] Holmes J D. Wind loading of structures [M]. London: Spon Press, 2001.

[4] Kassimali A. Structural analysis [M]. Boston: PWS Publishing Company, 1993.

[5] 中国工程建设标准化协会. CECS 102 : 2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
 China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 102 : 2002 Technical specification for steel structure of light-weight buildings with gabled frames [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.