



沿海高层建筑玻璃幕墙风致应力现场实测研究

李正农^{①*}, 罗叠峰^①, 史文海^{①②}, 梁笑寒^①

① 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 长沙 410082;

② 温州大学建筑与土木工程学院, 温州 325035

* E-mail: zhn88@263.net

收稿日期: 2011-04-16; 接受日期: 2011-06-28

国家自然科学基金(批准号: 90815030, 50778072, 51008237)资助项目

摘要 沿海地区受台风的影响, 高层建筑玻璃幕墙容易发生破坏. 目前关于玻璃幕墙抗风性能的各种研究方法都具有一定的局限性. 在台风登陆时, 受大气压变化、温度变化和暴雨的冲击作用的影响幕墙整体会发生振动和变形, 使得幕墙玻璃实际的应变和应力分布情况与模型试验和风洞试验的情况大不相同. 本文对厦门沿海某高层建筑的玻璃幕墙进行了现场实测研究, 获得了台风登陆过程中幕墙玻璃表面的风压情况及大量风致应力数据, 并分析了幕墙玻璃上的风压与应力或应变的关系, 总结了应力分布情况.

关键词
高层建筑
玻璃幕墙
风致应力
现场实测
台风

玻璃幕墙已经逐渐成为高层建筑最主要的外围护结构, 直接承受风荷载作用. 沿海地区高层建筑受强/台风的影响, 玻璃幕墙发生破坏的情况时有发生. 例如: 1999年9月16日, 9915号台风约克损坏了香港湾仔数幢办公楼玻璃幕墙, 其中政府税务大楼和入境事务大楼及湾仔政府大楼共有 400 多块幕墙玻璃被吹落(见图 1), 造成室内大量文件被风吸走. 因此, 玻璃幕墙设计中应考虑足够的抗风能力. 但在幕墙设计中, 如果风荷载取值过大, 又会使得幕墙设计强度过强或受风面积小的地方材料过分富余而造成不必要的浪费. 因此, 有必要对高层建筑玻璃幕墙抗风性能进行系统的研究.

实验室模型试验研究主要研究幕墙的各种支承结构体系的承载性能和动力性能, 以及玻璃面板的承载性能. 这种方法不能模拟玻璃幕墙在风致振动情况, 只能通过模态测试的方法得到其自振频率, 通常会将试验结果与有限元分析结果进行对比^[1, 2]. 王元清等人^[3, 4]进行了 1:100 比例点支式玻璃幕墙单



图 1 台风约克造成的香港湾仔玻璃幕墙损坏情况

层索网模型的承载性能及动力特性试验. 段永炜等人^[5, 6]进行了点支式中空玻璃幕墙的承载性能试验. So 等人^[7]研究了玻璃面板在强风荷载下的非线性特性, 并做了大量有关这方面的全尺寸实体模型试验.

抗风性能检测试验研究是利用玻璃幕墙物理性

能检测设备对具有代表性的幕墙试件进行抗风性能试验研究, 包括玻璃面板的挠度变形、风致应力等. 这种方法最大的优点是选取的幕墙试件具有代表性, 且为与施工要求完全一致的 1:1 实体模型. 幕墙检测设备可以方便的对试件进行分级加载, 但这种风荷载属于静风压, 且通常风压较大. 目前, 这种研究方法通常与工程设计紧密联系^[8-10]. 湖南大学的宫博^[11]对中空玻璃幕墙进行了抗风性能检测试验, 研究了中空玻璃幕墙的挠度变形和风致响应.

针对复杂体型的高层建筑或超高层建筑等结构的幕墙结构属于非常规玻璃幕墙, 设计时其风荷载的取值难以确定. 我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2001)和《玻璃幕墙工程技术规范》(JG102-2003)中均明确建议进行风洞试验研究以确定幕墙设计的风荷载. 对非常规幕墙的抗风设计, 风洞试验逐渐在工程实践中得到应用, 除了用来确定幕墙的设计风荷载外, 还可以研究其风振响应^[12-14].

有研究表明台风登陆前后各风荷载特性不断变化, 与目前的风洞试验模拟的水平流场情况大不相同^[15,16]. 此外, 在台风登陆时, 受气压变化、温度变化、以及暴雨的影响, 使得幕墙的挠度变形和风致应力情况与模型试验和风洞试验的情况大不相同, 尤其是中空玻璃幕墙的风致应力情况更为复杂. 虽然对中空玻璃的内外片玻璃的荷载分配问题研究比较成熟^[17-20], 对其风致应力的研究却几乎没有. 因此, 本文对中空玻璃幕墙进行了现场实测研究.

本文对厦门沿海某高层建筑玻璃幕墙进行了现场实测研究, 获得了台风在台风作用下幕墙玻璃表面的风压情况及大量风致应力数据, 并分析了幕墙玻璃上的风压与应力或应变的关系, 总结了应力分布情况.

1 现场实测概况

试验地点: 以厦门市东海岸某高层建筑玻璃幕墙为测量对象, 该建筑离海边仅约 400 m 的距离, 建筑东面为海滩. 附近高层建筑较少, 视野开阔, 无任何遮挡, 平常风速比较大. 所选实验楼为该海岸附近最高建筑, 共 37 层, 高约 150 m. 图 2 为实验楼及其周边环境.

试验设备: 风速仪 (RM Young 05103L 螺旋桨式风速仪)、风压传感器 (CY2000FA1P)、DH5920 动态信

号测试分析系统、应变片 (BX120-5CA, BHF120-5AA).

试验条件: 幕墙玻璃为中空玻璃, 其规格为 8 mm LOW-E 钢化+12A+8 mm 白玻钢化, 测量玻璃块尺寸为 1400 mm×1700 mm. 试验幕墙在 33 楼层处, 离地面高度约 135 m. 由于厦门地区夏季主导风向为东南风, 故在建筑的东南向选取两块典型的玻璃面板进行测量.

试验安排: 在玻璃外侧贴一风压传感器以采集实时风压. 由于在幕墙外表面贴应变片操作困难, 故测点均布置在幕墙内侧. 在玻璃四角和中心处布置三向应变片, 四边中点处布置单向应变片, 同时采集在强风作用下玻璃的实时应变. 同时, 用安装在楼顶的风速仪采集风速风向数据, 并根据情况调整试验方案. 图 3~5 分别显示了实测现场的条件、设备以及测点布置方案.

应变数据处理: 对于三片直角形应变片 (见图 6), 在平面应力状态下, 根据各向同性材料的广义胡克定律可以从应变圆上求得主应变 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, 并由此计算得到主应力 σ_1, σ_2 ,

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + (2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1 - \mu} \pm \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + (2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2} \right]. \quad (2)$$



图 2 实验楼及其周边环境

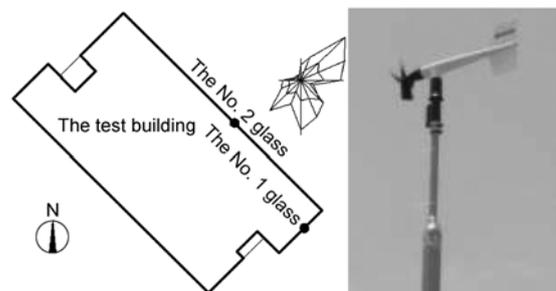


图 3 测点玻璃块在建筑平面上的位置及风速仪

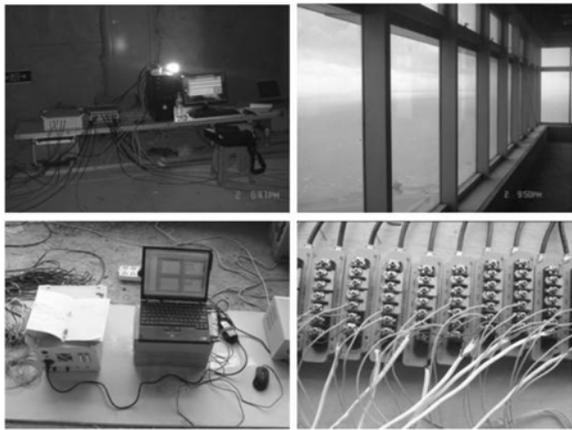


图4 实测现场及仪器设备

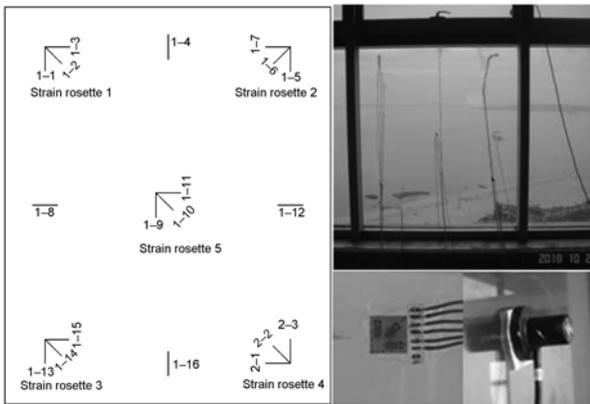


图5 幕墙玻璃应变测点布置及风压传感器布置

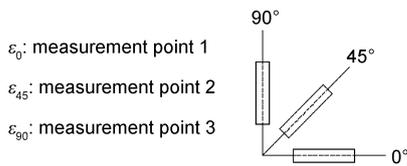


图6 三向应变片

台风概况: 于2010年9月至10月, 先后3次对该高层建筑中空玻璃幕墙在台风作用下的风效应进行了同步实测, 如表1所示. 由于之前台风预报狮子山会在广东登陆, 考虑对厦门影响会很小. 当台风转向并将在福建漳浦县附近登陆时, 才匆忙赶往试验地点, 但台风已经减弱, 测得的玻璃表面风压比较小.

2 现场实测结果分析

测点动态应变数据的采样频率为20 Hz, 采样时

表1 现场实测的台风概况

Typhoon	Data	Wind direction	Peak wind speed (m/s)	Distance from worksite (km)
Lionrock	2010.09.02	Southeast	33.4	82
Meranti	2010.09.10	Southeast	22.2	65
Megi	2010.10.23	East	30.1	80

间从台风预计登陆前几个小时一直持续到台风过境后风速减弱到5级以下的时候, 记录了整个强风过程中玻璃的应变. 由于从实测开始一直到实测结束, 室外风荷载一直存在, 幕墙玻璃的应变一直存在并处于持续变化过程中. 如果提前在基本无风的日子测得的玻璃的应变作为初始应变, 一方面幕墙玻璃的应变受到各种因素的影响, 时间长了会产生无法预测的变化; 另一方面实验条件有限, 操作起来困难. 因此, 只能以风压状态下产生的应变作为基准点, 并在此基础上随风压变化而产生的应变来分析幕墙玻璃的应变或应力规律.

2.1 风压时程与应变时程

2010年第13号强台风鲇鱼于10月23日12时55分在福建漳浦沿海登陆, 登陆地点距试验地点约80 km. 登陆时中心附近最大风力有13级(38 m/s), 中心最低气压为970百帕. 风速记录数据显示, 从10月23日04时至12时这段时间内风力最强. 台风一直往北偏西方向移动, 距离试验地点从约165 km减少至80 km. 此段时间内, 试验所在地最大瞬时风速为30.1 m/s, 以东南风为主.

在这几次台风中, 鲇鱼对2号幕墙玻璃表面的风压最大, 故本节主要分析鲇鱼对2号幕墙玻璃的影响. 图7所示为9时20分至10时55分这段时间内2号玻璃表面的风压时程和玻璃板长边中点的应变时程.

从实测数据发现, 台风作用下玻璃表面风压也并不很大(不超过400 Pa), 比实际中空玻璃所能承受的破坏荷载(大于5000 Pa)要小一个数量级以上.

由于玻璃的动态应变与风压的变化是同步的, 同平均风速的取值类似, 平均风压与平均应变的数值与时距的取值很有关系, 时距的取值既要把较大风压和较大应变体现出来, 又要反映出较小风压下的小应变. 由于一般阵风的周期约为1 min, 我们发现当取1 min为时距时能较好地反映应变随风压的变化过程. 如图8, 9所示.

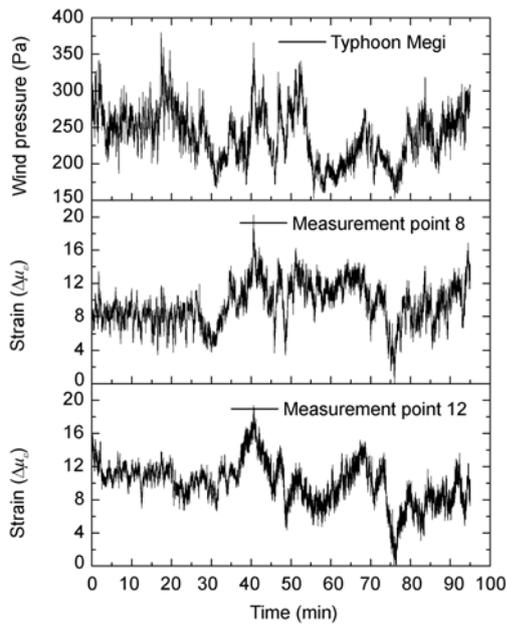


图7 鲇鱼作用下2号玻璃表面的风压时程及其长边中点的应变时程

由图7可以看出, 应变时程与风压时程的变化过程整体上是相符的. 对于中空玻璃来说, 一方面, 玻璃框架对玻璃板的约束对玻璃的变形有制约作用, 尤其是在玻璃板的四角的影响会更明显; 另一方面, 温度变化和大气压变化会对中空玻璃的空气层产生影响, 从而使玻璃板变形具有很大的非线性. 此外, 风荷载具有阵风效应, 同样玻璃表面的风压也具有相同的特点. 从风压时程也可以看出, 风压值突变很快, 玻璃的应变会比风压的变化相对滞后.

分析图8. 1) 四边中点的应变时程均呈现出同风压时程基本相符的变形过程, 即随着玻璃表面风压的变化, 测点处玻璃会发生相应的应变变化. 2) 四边中点的平均应变时程曲线基本相似, 其应变的变化幅度基本相等. 3) 在15至20min这段时间内, 玻璃表面风压有一个较大的峰值, 但玻璃板各边中点的应变并未随风压而产生一个应变峰值; 同样, 在55至65min的时段内, 玻璃表面风压有一个较大的谷值, 但玻璃板各边中点的应变并未随风压而产生一

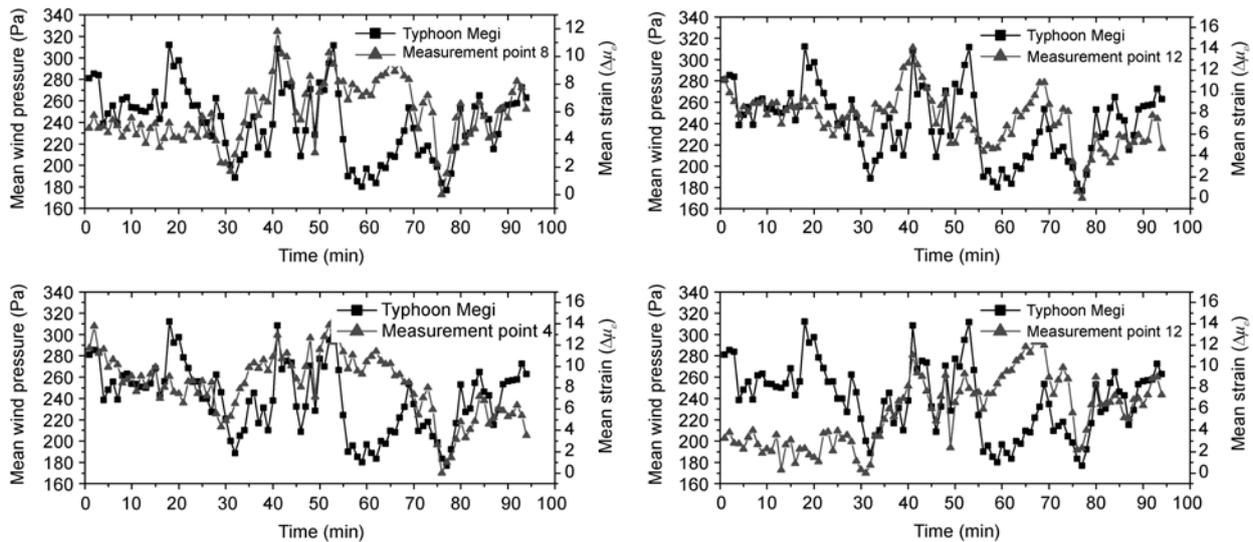


图8 鲇鱼作用下2号玻璃四边中点的平均应变与平均风压时程

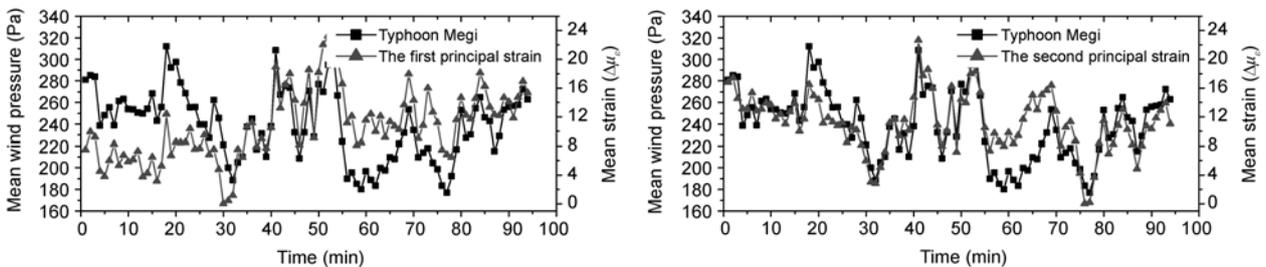


图9 鲇鱼作用下2号玻璃板心处的平均主应变与平均风压时程

个应变谷值. 观察图 7 所示的风压时程, 在产生峰值或谷值时, 风压突变明显, 可能是由于玻璃板应变相对滞后以及受框架约束变形的影响所致. 4) 风荷载的作用方向与玻璃平面并不垂直, 故玻璃面板对称位置处(测点 8 和测点 12 相对称, 测点 4 和测点 16 相对称)的应变并不对称.

对比图 8 和 9. 1) 玻璃板心处(应变花 5)的平均主应变也呈现出同风压时程基本相符的变化过程, 且在相应的风压波峰和波谷处, 板心处的应变也能很好与风压相吻合, 说明玻璃板心处的变形趋势与风压时程更一致. 2) 玻璃四边中点处的应变变化幅度比板心处的应变变化范围要小约 10 个微应变. 分析原因: 玻璃板心处受幕墙玻璃框架的约束影响较玻璃面板各边中点略小, 故相应的应变时程与风压时程吻合得更好, 变形范围也更大些.

2.2 应力与风压的关系

在各台风作用下 1 号玻璃表面的风压时程见图 10. 狮子山作用下, 玻璃表面风压为正, 但风压较小; 莫兰蒂作用下, 玻璃表面风压较小, 但风压值在零上下波动; 鲑鱼作用下, 玻璃表面风压较大.

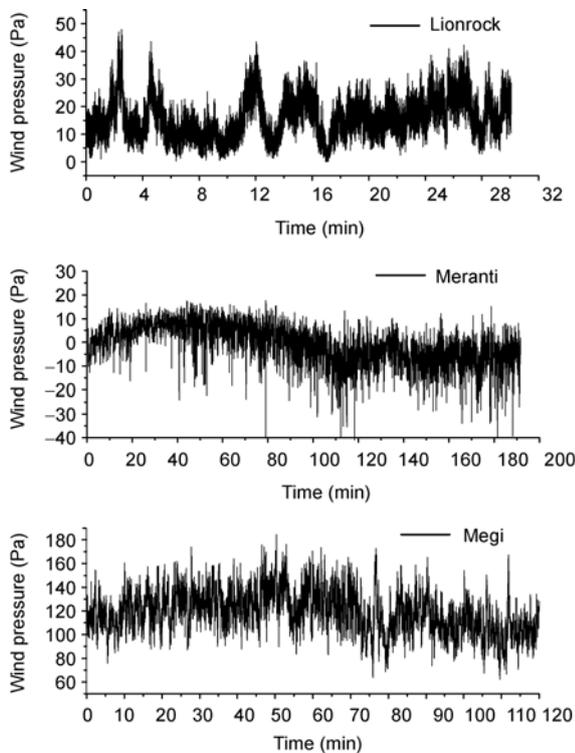


图 10 1 号玻璃面板表面的风压时程

要考察应力随风压的变化关系, 一般实验室模型试验时可以采取分级加压的形式, 但实测得到的玻璃表面的风压时程是一个变化的随机过程. 为了便于分析应力与风压的关系, 首先对风压时程进行统计分析, 将在不同风压变化范围内的应力数据进行平均, 并按风压值递增的顺序进行排序. 这种作法相当于得到了随玻璃表面风压递增的应力变化数据. 分别以风压和应力为变量, 做出各测点处的 $Pa-\Delta\sigma$ 关系图, 并进行了线性拟合, 如图 11~13 所示.

另外, 台风鲑鱼作用时, 由于时间充足, 分别获得了 1 号玻璃和 2 号玻璃表面的风压时程和应力数据. 分析结果发现两块玻璃的 $Pa-\Delta\sigma$ 关系基本相近, 没必要将其全部列出来, 考虑到 2 号玻璃表面测得的风压值要大一些, 故只列出了 2 号玻璃在鲑鱼作用下的 $Pa-\Delta\sigma$ 关系图.

分析图 11. 从整体来看, 玻璃面板上的应力是随风压的增大而增大的, 但不是随风压大而线性增大的. 有的时候风压增大, 应力反而会减小, 其变化趋势更接近于一条三次曲线. 玻璃各角点处(应变花 1~4)的应力比玻璃板心及各边中点处(应变花 5 和应变片 4, 8, 12)的应力约大一倍, 说明在台风狮子山作用下玻璃板角上的应力较大. 但其中玻璃板下边中点处(应变片 16)应力也比较大. 分析原因: 1) 实际的风荷载对玻璃幕墙的作用是个随机动力过程, 使得玻璃本身乃至幕墙整体都会发生随机振动, 加上中空玻璃本身的非线性特征以及玻璃板受框架约束等的影响, 其风荷载与应力的变化关系必然是非线性的; 2) 风荷载的作用方向与玻璃平面不垂直, 从而玻璃面板应力分布不具有对称性.

分析图 12. 1) 玻璃面板上的应力随风压基本呈线性增大的趋势, 除应变花 1 和应变花 3 的第二主应力以及应变片 4 的应力随风压变化的拟合曲线是下降的直线以外, 但是这三处的应力很小, 可以忽略. 2) 当风压为负时, 应力也为负值. 说明台风莫兰蒂作用下, 玻璃表面受正负风压的交替作用, 应力也呈正负交替变化. 3) 实测的风向数据表明, 当时风荷载的方向基本与面板垂直, 故各处应力分布比较均匀.

分析图 13. 同前面的图 12 类似, 玻璃面板上的应力随风压基本呈线性增大的趋势. 但在角上的应力分布较复杂, 各角点处的第二主应力随风压的增大反而线性减小, 而应变花 4 则刚好相反.

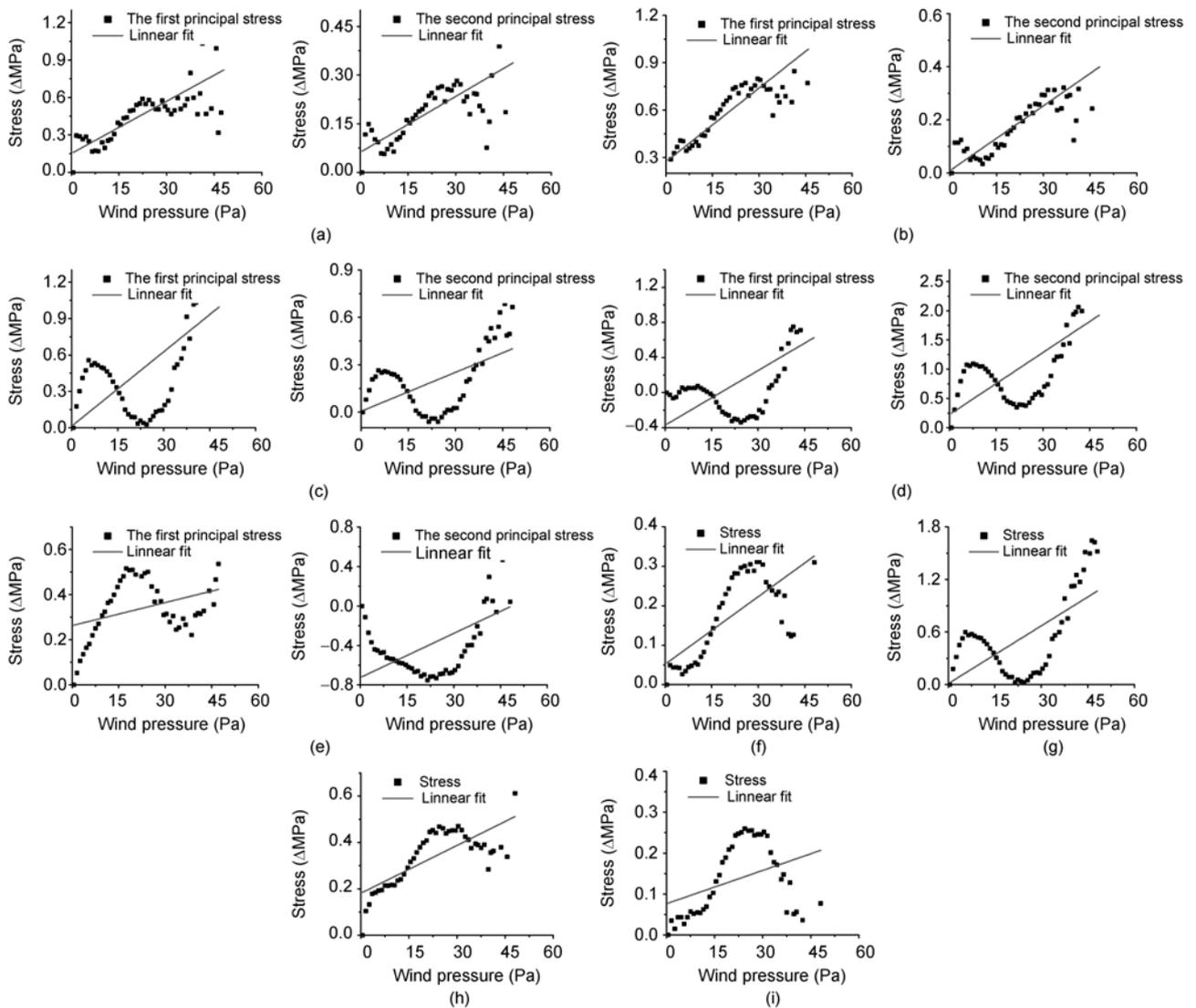


图 11 狮子山作用下 1 号玻璃各测点处风压与应力的关系

(a) 应变花 1; (b) 应变花 2; (c) 应变花 3; (d) 应变花 4; (e) 应变花 5; (f) 应变片 4; (g) 应变片 16; (h) 应变片 8; (i) 应变片 12

有些图显示, 随着平均风压的增大平均应力反而会减小, 通常发生在幕墙玻璃的角部位置. 这种现象可能是由于在幕墙玻璃局部位置初始应力较大, 而施工安装时由玻璃框架对玻璃的约束所引起的初始应力是难以预测的. 当玻璃表面所受的风压增大时, 其初始应力因被抵消而逐渐减小, 从而应力测量结果会出现随着平均风压的增大平均应力反而会减小的情况.

2.3 应力分布

根据风压时程得出在整个随机过程中玻璃表面

风压值的概率分布情况, 如图 14 所示. 对风压时程进行统计可得到对玻璃表面作用概率较大的风压区间, 并将该风压区间内的风压数据和应力数据平均, 得到玻璃面板在概率较大的风压作用下的应力分布图, 如图 15 所示. 此外, 同上一节对应, 对于台风鲇鱼, 也只列出了对风压值较大的 2 号玻璃的分析结果.

图 15 显示了在对该玻璃的应力进行实测的时间段内玻璃面板上最有可能的应力分布情况. 从图 15 中可以看出: 1) 狮子山作用下, 当风压较小时, 玻璃表面的应力分布主要呈“X”形, 在 2 个斜对角上应力较大; 而当风压较大时则主要表现为上部应力较

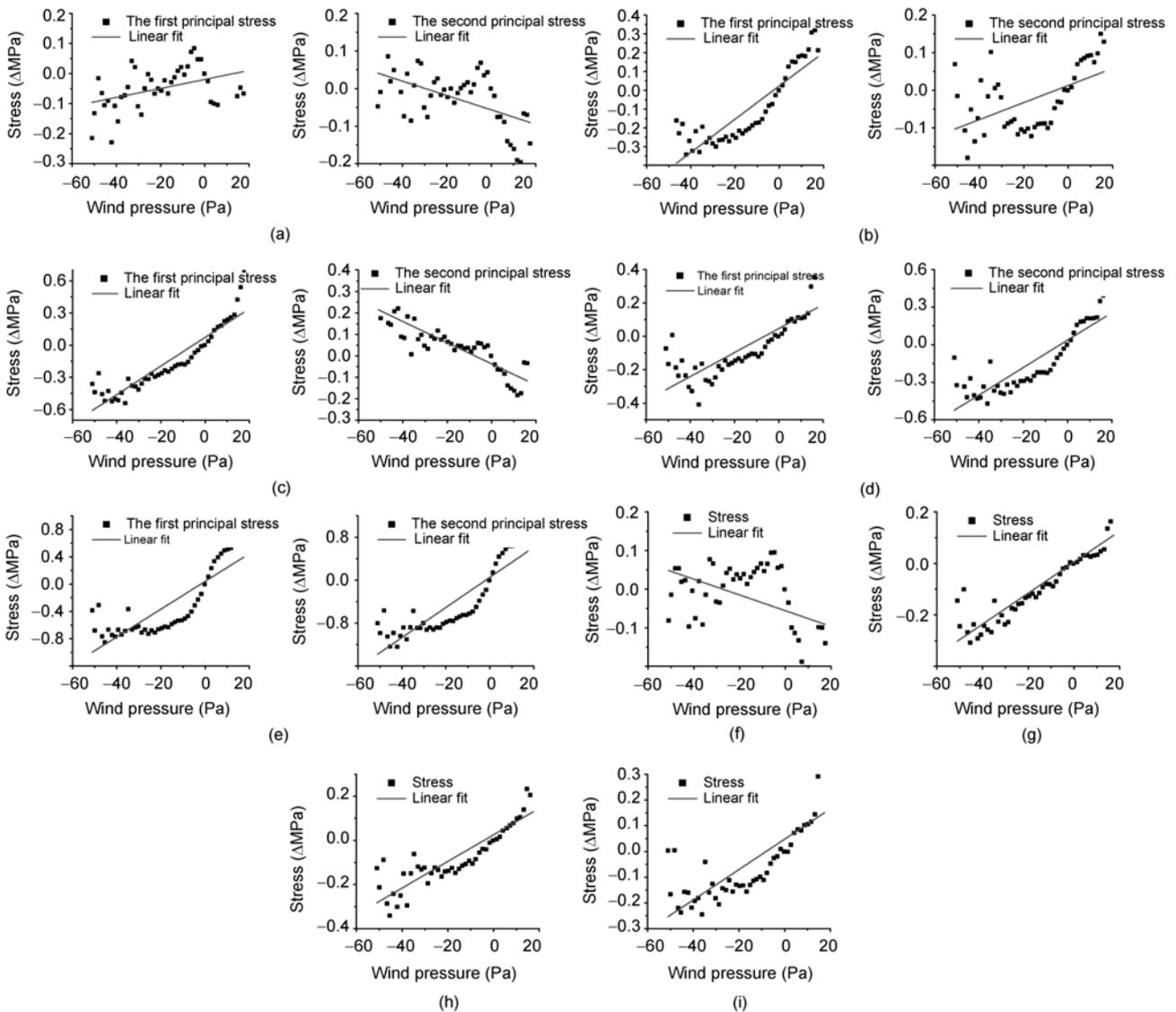


图 12 莫兰蒂作用下 1 号玻璃各测点处风压与应力的关系

(a) 应变花 1; (b) 应变花 2; (c) 应变花 3; (d) 应变花 4; (e) 应变花 5; (f) 应变片 4; (g) 应变片 16; (h) 应变片 8; (i) 应变片 12

表 2 玻璃表面作用概率较大的风压区间

Typhoon	Pressure interval (Pa)	Probability (%)	Mean wind pressure (Pa)
Lionrock	[4, 10]	19.67	7.08
	[10, 18]	41.87	13.99
	[18, 26]	26.57	21.99
Meranti	[-10, -4]	22.93	-6.99
	[-4, 6]	43.61	1.25
Megi	[6, 12]	19.96	9.42
	[180, 210]	20.06	196.96
	[210, 270]	56.53	241.98
	[270, 300]	15.22	286.94

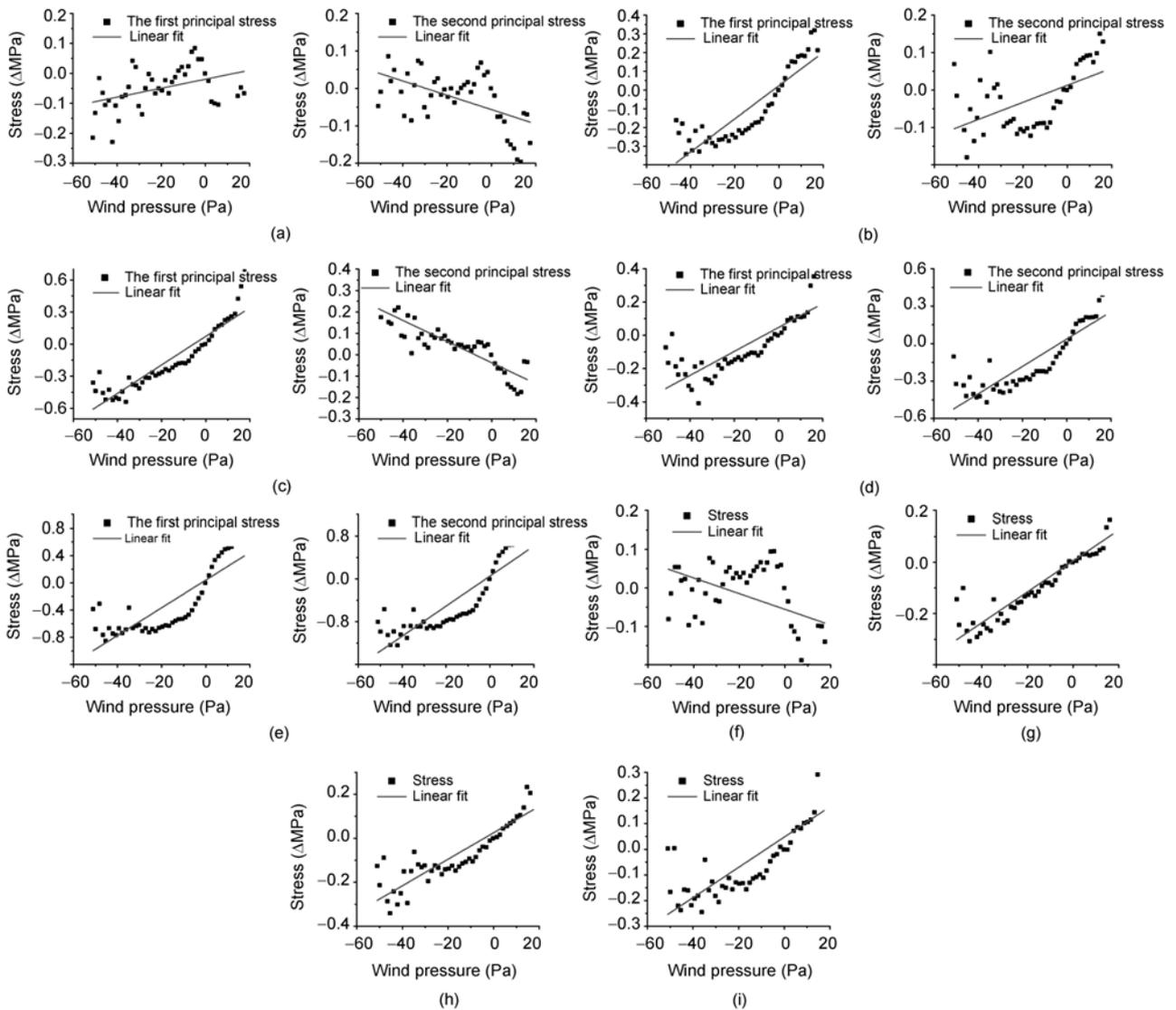


图 13 鲇鱼作用下 2 号玻璃各测点处风压与应力的关系

(a) 应变花 1; (b) 应变花 2; (c) 应变花 3; (d) 应变花 4; (e) 应变花 5; (f) 应变片 4; (g) 应变片 16; (h) 应变片 8; (i) 应变片 12

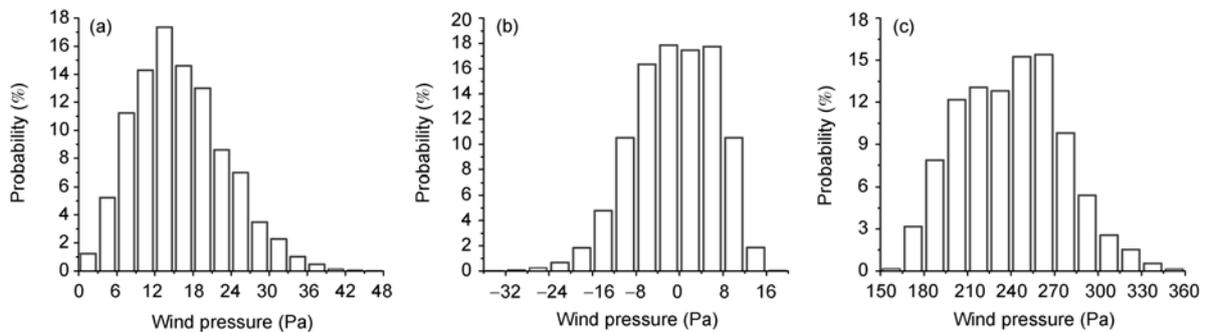


图 14 玻璃表面风压值概率分布

(a) 狮子山; (b) 莫兰蒂; (c) 鲇鱼(2号玻璃)

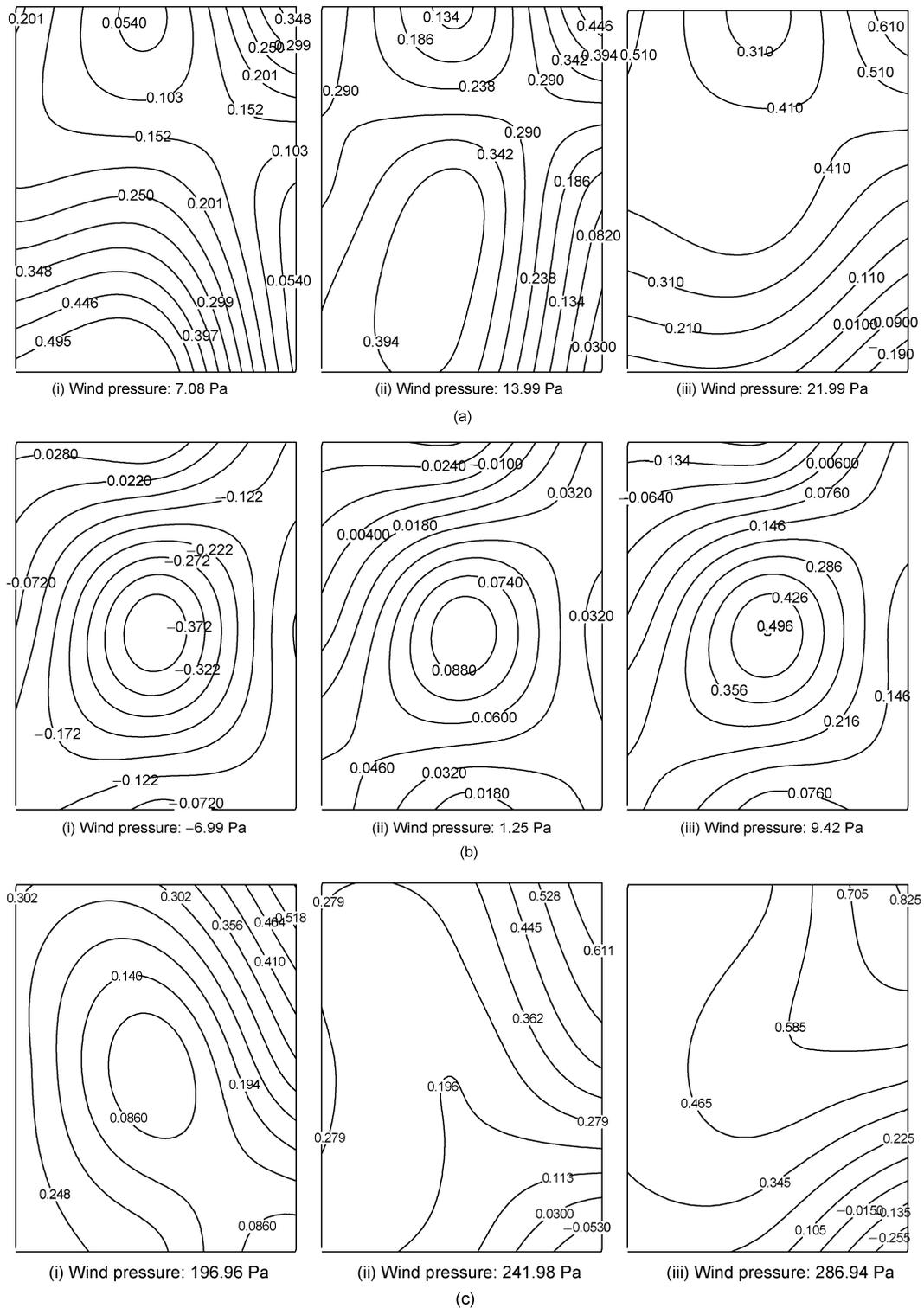


图 15 台风作用下幕墙玻璃上的应力分布
(a) 狮子山; (b) 莫兰蒂; (c) 鲇鱼(2号玻璃)

下部应力大; 2) 莫兰蒂作用下, 由于风压均较小, 最大应力发生在板的中部. 当玻璃面板承受负压时, 板心处为最大的负应力; 反之, 为最大的正应力; 3) 鲇鱼作用下的 2 号玻璃板, 右上角分布应力最大, 并沿对角方向应力呈梯度减小, 风压增大时, 趋势更明显. 可能是由于鲇鱼的风向以东风为主, 与玻璃平面大概呈 45° , 故使应力也呈现出沿 45° 的梯度变化.

3 结语

本文通过对沿海高层建筑中空玻璃幕墙的现场实测研究, 分析了台风作用下玻璃幕墙的风压与应变应力的关系, 以及幕墙玻璃板表面的应力分布的情况. 总结结论如下.

1) 取 1 min 为时距, 能较好地反映记录数据中的应变随风压的变化过程.

2) 实测得到的玻璃表面风压并不很大, 比实际玻璃幕墙所能承受的破坏荷载要小一个数量级以上.

3) 玻璃表面的应变时程与风压时程的变化过程整体上相符, 但当风压突变较大时, 玻璃的应变会比风压的变化相对滞后.

4) 可以认为玻璃面板上的应力随风压基本呈线性增大的趋势, 但实际上玻璃板的应力分布复杂.

5) 当风荷载较大时, 玻璃板的最大主应力一般在板的角部位置. 当玻璃面板表面的风压正负交替时, 应变和应力随之发生正负交替变化.

总之, 在台风作用下, 玻璃幕墙不仅受到风荷载的动力作用, 而且会受温度变化、暴雨冲击作用、以及幕墙整体的振动和变形的影响. 受实测条件和仪器设备的限制, 本文所测数据仍然有限, 像在动风压作用下玻璃应力应变关系等问题还需要进一步研究.

参考文献

- 1 武岳, 郭海山, 陈新礼, 等. 大跨度点支式幕墙支承结构风振性能分析. 建筑结构学报, 2002, 23: 49-55
- 2 冯若强, 武岳, 沈世钊. 单层平面索网幕墙结构的风激动力性能研究. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38: 153-155
- 3 王元清, 孙芬, 石永久, 等. 点支式玻璃幕墙单层索网体系承载性能试验研究. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35: 769-774
- 4 吴丽丽, 王元清, 石永久, 等. 点支式玻璃建筑单层索网体系的动力特性. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46: 318-321
- 5 殷永伟, 张其林. 点支式中空和夹层玻璃承载性能的试验研究. 建筑结构学报, 2004, 25: 93-98
- 6 殷永伟, 张其林, 王丹, 等. 点支式幕墙中空玻璃承载性能的理论 and 试验研究. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33: 1433-1437
- 7 So A K W, Chan S L. Nonlinear finite element analysis of glass panels. Eng Struct, 1996, 18: 645-652
- 8 曾国栋, 张士翔, 何瑄, 等. 全玻璃幕墙抗风压性能试验研究. 门窗, 2009, (12): 1-5
- 9 宋海罡, 张士翔, 何瑄. 钢-铝组合立柱抗风压性能试验研究. 门窗, 2010, (4): 7-10
- 10 赖燕德, 张士翔, 何瑄, 等. 吊挂肋点支式玻璃幕墙玻璃肋抗风压性能试验研究. 门窗, 2010, (7): 11-14
- 11 宫博. 定日镜和幕墙结构的抗风性能研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2011. 1
- 12 谭上飞. 风洞试验在建筑幕墙抗风设计中的应用. 建筑科学, 2010, 26: 39-42
- 13 莫英光. 超高层幕墙结构风振响应风洞试验研究. 见: 2008 年全国铝门窗幕墙行业年会论文, 广州, 2008. 67-72
- 14 侯军祥, 李龙春, 周霞, 等. 新保利大厦单层索网玻璃幕墙气动弹性风洞实验研究. 建筑结构, 2007, 37: 11-13
- 15 徐安, 傅继阳, 赵若红, 等. 土木工程相关的台风近地风场实测研究. 空气动力学学报, 2010, 28: 23-31
- 16 史文海, 李正农, 张传雄. 温州地区近地强风特性实测研究. 建筑结构学报, 2010, 31: 34-40
- 17 Feng R Q, Wu Y, Shen S Z. A simplified calculating method of nonlinear frequency of cable net under mean wind load. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 19: 248-254
- 18 Vallabhan C V G, Chou G D. Interactive nonlinear analysis of insulating glass units. J Struct Eng, 1986, 112: 1313-1326
- 19 Lynn Beason W, ASCE M. Structural analysis of sealed insulating glass. J Struct Eng, 1986, 112: 1133-1146
- 20 Dietrich J, Shen X F, Sagmeister B. Determination of load sharing in insulating glass units. J Eng Mech, 1993, 119: 386-392