

夹板式单层玻璃板压弯组合承载性能试验研究^{*}

石永久¹, 邓晓蔚¹, 王元清¹, 罗 忆², 徐 悦²

(1. 清华大学建筑玻璃与金属结构研究所 // 结构工程与震动教育部重点实验室, 北京 100084
2. 珠海市晶艺玻璃工程有限公司, 广东 珠海 519015)

摘 要: 为了研究不同的夹板约束对玻璃板在压弯组合作用 (面外受弯和面内承压) 的加载全过程中应力和位移的发展, 以及压弯组合的作用机理, 以试验为基础, 结合有限元方法, 给出了荷载位移和最大主应力荷载的全过程曲线以及面外极限荷载和面内极限剪力; 通过试验数据验证了有限元方法的有效性; 求得了各类荷载下应力的控制点。研究表明, 夹板约束玻璃板在加载的全过程中, 小变形条件下其位移和应力都随着荷载的增长而线性增长, 表现出明显的脆性破坏的特征; 在压弯组合作用下, 两者的作用效应是独立的, 它的破坏状态可以用极限面外荷载和极限面内剪力关系图中围成的矩形区域来判断。

关键词: 夹板式玻璃板; 试验研究; 有限元方法; 破坏准则

中图分类号: TU 382 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 04-0021-06

夹板式节点最大的特点就是无需开孔, 依靠安装在玻璃板胶缝中的前后两夹板夹持住玻璃板, 并在玻璃板和夹板中设置橡胶垫片, 以防止两者直接接触产生过大的局部应力, 连接前后两夹板的金属支框 (或金属垫块) 支承玻璃板提供面内约束, 夹板式连接件的安装图如图 1 所示。

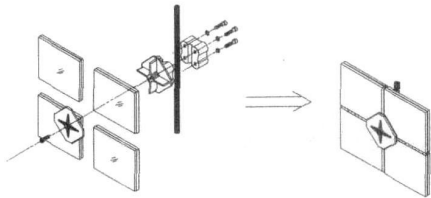


图 1 夹板式连接件的安装图

Fig 1 installation diagram for overlapped glass panel

夹板式玻璃幕墙在国外已经得到了广泛的应用, 国内也开始尝试^[1]。目前玻璃板的抗弯承载性能的研究较多, 而考虑面内剪力作用和弯剪联合作用的玻璃板的承载性能的研究不足^[2-5]。而且对于板式结构来说, 在面外荷载和面内剪力组合下的应力计算不能得像梁柱结构线弹性分析一样进行简单的线性叠加, 它们的联合作用机理还不清楚, 本文对两种不同夹板约束的玻璃板在面外荷载作用下受弯, 在面内荷载作用下受剪以及在弯剪联合作用

下的承载性能的试验研究, 对受力性能的比较分析了受力机理, 并通过有限元进行了对比验证。

1 压弯共同作用承载性能试验

1.1 试验试件

试件为 1 260 mm×890 mm 矩形玻璃板, 厚度均为 12 mm。由于不同的夹板式连接件对玻璃板的受力状况有显著的影响, 采用两种典型的连接件: 空心轮辐形和实心方形连接件, 如图 2 所示。为了与纯弯和纯剪试验有所比较^[5], 采用与上述几何尺寸相同的玻璃板进行抗弯试验和抗剪试验, 试件参数见下表 1, 测点布置如图 3 所示 (板上边缘为面内剪力施力边)。根据有限元的计算结果, 受垂直于玻璃板面均布荷载作用时最大位移发生在板中心处, 在此试验的玻璃板的 1 号测点设位移计测竖向位移; 在可能出现应力最大值的节点区、板中心以及板边缘中心布置三向应变花测量其的应力水平。

表 1 试件参数
Tab 1 parameters of specimens

试件 编号	连接件 类型	试验 类型	玻璃板几何 尺寸 /mm	数量
LF	轮辐形	弯剪联合	1260×890×12	1
FX	方形	弯剪联合	1260×890×12	1

^{*} 收稿日期: 2006-07-24

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (8053021), KGE 科学研究基金资助项目 (200501)

作者简介: 石永久 (1962 年生) 男, 教授; E-mail: shiyj@mails.tsinghua.edu.cn

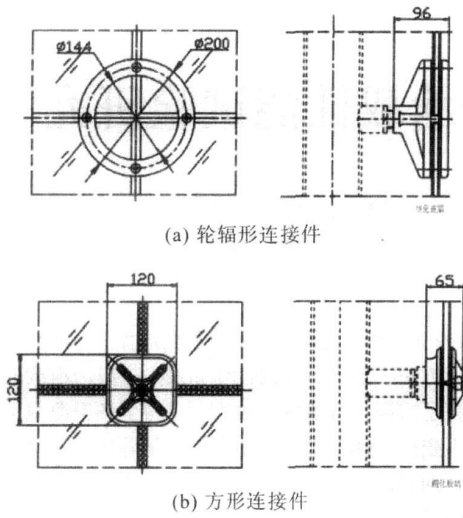


图 2 不同连接件的几何构造

Fig 2 Configuration for different overlapped connectors

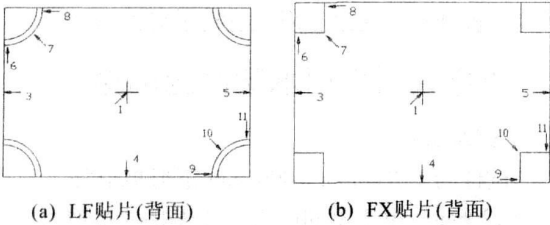
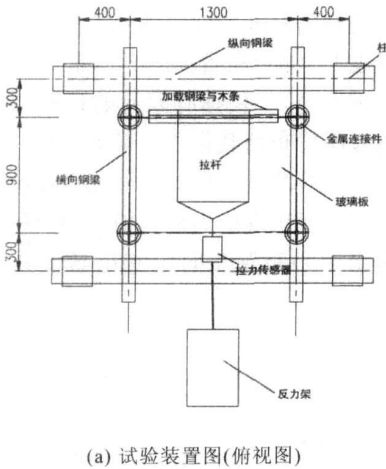
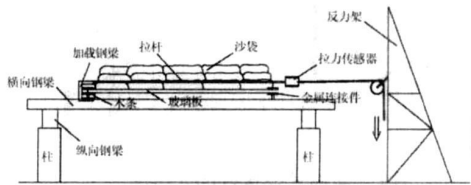


图 3 测点布置及编号图

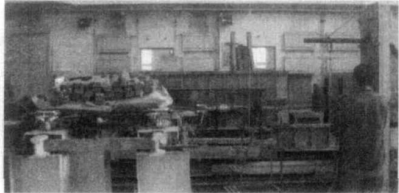
Fig 3 Survey points



(a) 试验装置图(俯视图)



(b) 试验装置图(侧视图)



(c) 试验现场加载图

图 4 弯剪组合试验装置及加载图

Fig 4 Experimental equipments and on site loading

需要指出的是，对于夹板约束玻璃板，有限元计算表明其最大应力可能出现在夹板与玻璃板表面或板边缘接触的区域，该区域是难以直接布置测量传感器，因此试验玻璃板的最大应力难以测量。

1.2 试验装置以及加载过程

在面外受弯和面内承压联合破坏试验过程中，采用均布沙袋以及铅块加载来模拟面外均布荷载，并将玻璃板的一长边作为受力边，在受力边安装加载钢梁将由拉杆传递来的集中的拉力转化为沿受力边的均布线荷载，钢梁与玻璃板间加木条缓冲，通过拉力传感器可以测出实际面内总剪力的大小，千斤顶可以持续加载。由实际的常遇工况确定面外荷载和面内荷载的比例是 1 0.6 采用沙袋铅块与水平千斤顶交替加载的方式。LF试件按上述比例交替加载至面外荷载达到极限面外荷载后连续施加面内剪力直至破坏；FX试件按上述比例交替加载直至破坏。以上试验均采用计算机进行监测和数据采集，将连接件和玻璃板作为一个整体共同承受荷载以模拟真实的受力情况，见图 4

2 试验结果分析

2.1 试验现象

在加载全过程中，小变形条件下各测点的应变

以及位移随着荷载的增加而线性增加。达到极限荷载时，玻璃板瞬间破坏，呈现显著的脆性破坏特征，整块单层板碎裂成小块的玻璃渣。在玻璃板节点区，玻璃板沿着与夹板相接的边缘被“掰断”，如图 5（a）和 5（b）所示。

试件 FX由于在破坏前承受的面外剪力较小，直至玻璃板破坏，没有观察到连接件发生显著的变形，节点区的转动很小。试件 LF在玻璃板边缘在与连接件的支承处发生受剪破坏，且由于破坏时的面内剪力达到了极限荷载，因而受剪侧的转接件发

生小角度的弯曲变形，导致在节点域玻璃板随着连接件发生刚体转动，如图 5（b）所示。

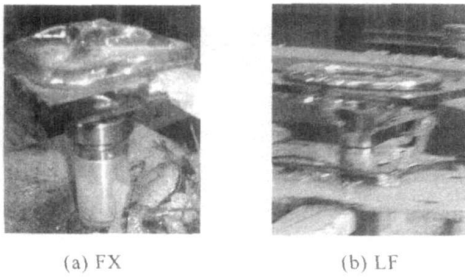


图 5 节点区玻璃板弯剪联合破坏模式
Fig 5 Failure in joint region

2.2 承载能力分析

2.2.1 试验结果及对比分析 玻璃属于典型的脆性材料，其破坏通常是在拉应力处发生的，采用 Rankine 准则来判断玻璃材料的破坏。对于面外受弯的玻璃板，会发生玻璃板下表面中心和板边中心以及玻璃板上表面节点区的受拉破坏；而玻璃板面内受剪的情况则比较特殊：在支承边缘处玻璃板的最大压应力远大于最大拉应力，玻璃板往往是由于

受到局部很大的压应力而破坏，拉应力不起控制作用，尤其是玻璃的侧面经过切割、打磨加工，强度有所降低；在压弯组合作用下，既有可能发生受拉破坏，也有可能发生受压破坏。由于荷载分布以及贴片的偏差，对称的测点的应力值略有差别。各试件的双向最大主应力如表 2 所示。将表 2 结果与抗弯和抗剪试验比较得^[5]：

（1）对于面外受弯试验，在玻璃板的背面，板大面中心和板边缘中心的应力主要是拉应力，而节点域附近以压应力为主。

（2）在面内承压试验中，应力分布主要集中在节点域，且以压应力起控制作用，其它位置（如板边中心点 4）的应力可以忽略。

（3）在压弯联合作用试验中，连接件支承的玻璃板边缘应力（如点 9）主要由面内受剪控制，大面的应力主要由面外受弯控制。它与面外受弯和面内受剪相对应的点在应力值大小上虽然有一定的差距，但是应力分布趋势是一致的。需要指出的是，由于难以在夹板式连接件和玻璃板的接触区域布点，因此该试验没有量测到节点区的最大应力值，应力的大小主要依赖于数值计算结果的推断。

表 2 试验试件的最大主应力
Tab 2 Maximal stress for experimental specimens

测点位置		测点编号	弯剪组合试验			
			IF		FX	
			第一主应力	第二主应力	第一主应力	第二主应力
破坏应力 /MPa	板中心	1	48.8	29.0	42.9	26.8
	板边缘	3	47.7	-2.45	40.3	-0.65
		4	53.32	-0.04	45.51	-1.03
	中心	5	51.3	-2.30	41.5	-0.78
	节点区	6	17.8	-10.3	14.0	-17.6
		7	17.8	-20.7	20.1	-30.6
		8	30.4	-19.3	14.3	-20.2
		9	-57.4	-69.0	0.54	-30.2
		10	-10.7	-53.0	-0.57	-34.9
		11	2.45	-11.9	3.79	-24.5
破坏荷载 /kN	面外荷载		13.9		11.7	
	面内剪力		17.91		7.01	
板中心最大位移 /mm			21.92		23.51	

2.2.2 破坏模式分析 图 6 表示了夹板式玻璃板极限面外荷载和极限面内剪力关系。每个图的三个点分别代表了面外受弯、面内受压以及压弯组合三种极限状态，粗线表示了压弯组合下玻璃板的加载路径。由于玻璃板材性的离散性，不同试件的极限承载力会有一定的差别。从图中可以看出：

（1）两坐标轴和两条细实线围成的矩形可作为玻璃板的安全区域，细实线是临界破坏分界线。

（2）在图 6（a）中，轮辐形夹板试件压弯组合的破坏模式以剪压破坏为主；在图 6（b）中，方形夹板试件弯剪组合的破坏模式以弯拉破坏为主。

(3) 压弯组合的破坏模式可描述为: 在面外荷载和面内剪力组合作用下, 两者的作用独立, 即两者只要有一个超过极限承载力, 试件就发生破坏, 将在以下的有限元模型中会进一步加以分析。

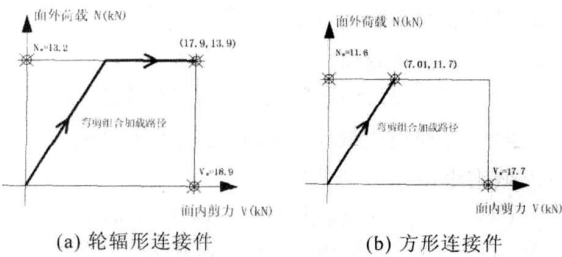


图 6 极限面外荷载和极限面内剪力关系图

Fig 6 The relation between ultimate out of plane load and ultimate in plane shear

2.2.3 与纯弯比较分析 图 7 表示了不同连接方式的试件在压弯作用下荷载和面外位移关系曲线, 为了比较, 同时列出纯弯 (面外受弯) 的试验结果^[5], 而面内受压试验中, 玻璃板自身位移很小, 未作分析。从图中看出, 面外荷载和面外位移基本上是线性关系; 1F 构件曲线中, 面内剪力的单独增大并未引起面外位移的变化, 进一步证明了面内受剪和面外受弯的作用效应独立; 面外荷载一定的情况下, 相同的连接方式玻璃板在纯弯和压弯联合作用下面外最大位移应该是相等的, 但试验结果出现一定的偏差主要是因为玻璃材料的离散性及压弯联合作用时玻璃板发生的面内平动导致固定的测点无法量测出最大的位移值。

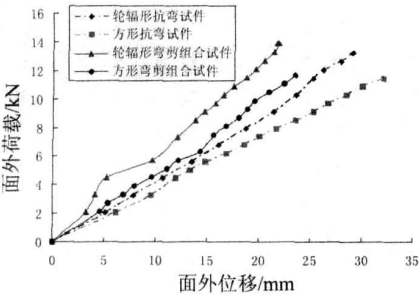


图 7 荷载位移关系曲线

Fig 7 Load and maximum displacement curve

图 8 比较了面外受弯和压弯组合下最大主应力与面外荷载关系曲线^[5]。从数值上来说, 在相同面外荷载情况下, 1 和 5 两测点在面外受弯和压弯组合作用下的差别不大, 可见在板大面和板边中心的应力主要是由面外受弯控制的。

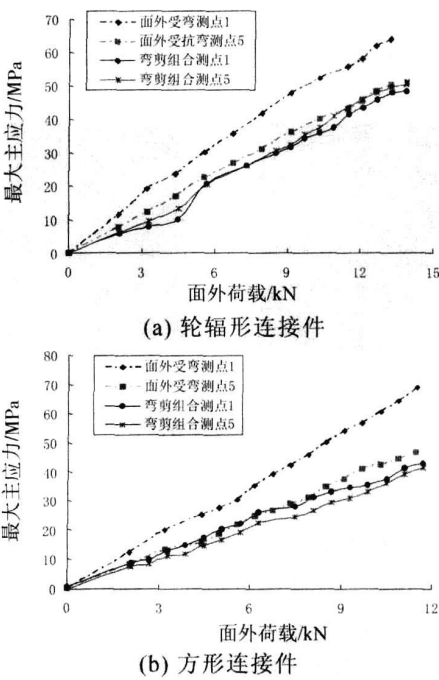


图 8 面外受弯和弯剪组合下最大主应力与面外荷载关系曲线比较

Fig 8 The comparison between bending out of plane and shear and moment action on maximal stress and load curve

2.2.4 与面内受压试验比较分析 图 9 比较了面内受压和压弯组合, 最大主应力与面内剪力的关系曲线^[5]。从图中可得出以下结论:

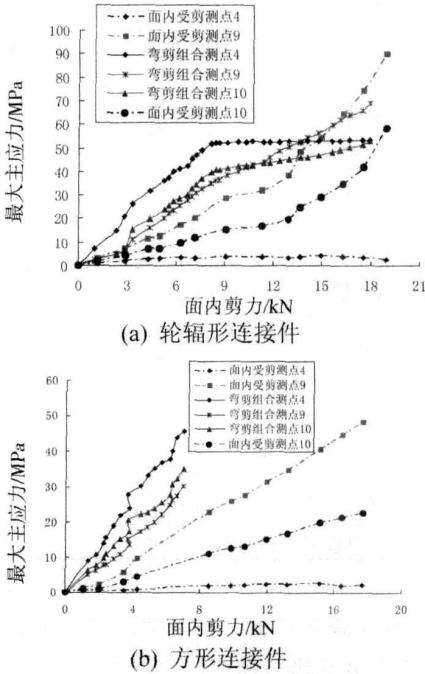


图 9 面内受剪和弯剪组合下最大主应力与面内剪力关系曲线比较

Fig 9 The comparison between shear in plane and shear and moment action on maximal stress and load curve

(1) 在面内受压作用下, 当面内剪力不太大时, 都可以近似认为应力随荷载线性增大; 当剪力过大 (接近抗剪极限荷载) 时, 应力迅速增长, 即相同的荷载增量将引起更大的应力增量; 在压弯组合作用下, 可以认为应力随荷载线性增大;

(2) 对于板边中心的测点 4 在剪力作用下的应力很小, 基本可以忽略。从图 9 (a) 的轮辐形弯剪组合的测点 4 在加载的第二阶段为水平可得面内剪力对其没有影响, 该点的应力由面外荷载控制。

(3) 对于测点 10 经比较, 压弯组合的曲线的斜率远大于面内受压的曲线, 且轮辐形压弯组合的测点 10 在加载的第二阶段为接近为水平, 说明在压弯组合的情况下, 面内剪力对应力增长的贡献很小, 该测点的应力也由面外荷载控制。

(4) 连接件支承处附件布置的测点 9 在面内受压和压弯组合作用下的两条试验曲线比较接近, 且轮辐形弯剪组合的曲线在加载全程中均为一条直线, 未出现折现段, 这说明在压弯组合的情况下, 该测点的应力由面内剪力控制, 有无面外荷载对其没有影响。

3 试验与有限元模型比较

3.1 有限元模型

对夹板式玻璃板的承载力数值计算, 主要是通过大型通用有限元软件 ANSYS 完成的, 因此需要与试验结果进行比较, 以验证其的有效性。有限元方法采用三维实体建模, 在节点的处理上: 假设橡胶垫片与夹板是变形协调的, 直接将橡胶垫片与夹板粘结起来, 并且考虑垫片和玻璃板之间存在着摩擦滑移, 用接触对模拟两者之间的接触关系, 将垫层设为接触面, 接触单元为 $coneq73$, 玻璃板设为目标面, 目标单元为 $target70^{[5-11]}$ 。材料的物理参数按规范的规定选取^[12]。在计算压弯联合作用的模型中, 约束连接件上下表面的所有节点, 保证连接件自身不发生位移; 对于轮辐形连接件, 在金属垫片与板边缘交界处施加线约束; 对于方形连接件, 在十字形金属支框与板边缘交界面施加面约束^[3]。

3.2 试验和数值计算结果的比较

图 10 (a) 和 (b) 表示了在压弯联合下, 轮辐形和方形连接件约束玻璃板边缘应力的试验结果与有限元结果的比较。有限元与试验的结果偏差在允许范围之内, 说明有限元的结果基本合理。需要指出的是, 试验方法和有限元的偏差主要是由于有

限元结果对玻璃板实体划分方式尤其节点区的敏感性以及玻璃较大的离散性。

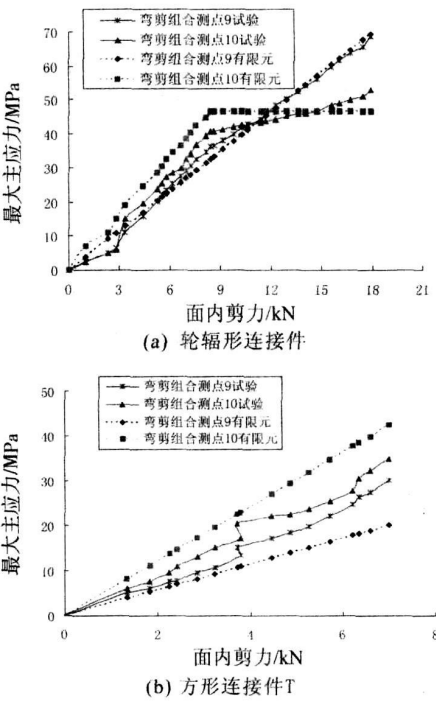


图 10 试验与有限元节点域应力比较
Fig 10 Comparison between experiment and FEM results

图 11 比较了轮辐式夹板式玻璃板在节点区面外受弯、面内受压以及压弯组合下, 节点区的应力分布。压弯组合可以看作面内受弯和面外受压的叠加, 但不是简单的线性叠加。从图中可以看出, 压弯组合在节点区可能出现两个峰值点, 分别在 1 区和 2 区, 它们分别是由面外受弯和面内受压控制。且有限元的计算结果表明, 1 区的峰值应力不随着面内剪力的增大而增大, 2 区的峰值应力也不随着面外荷载的增大而增大, 这进一步证明了压弯组合作用下, 两者的作用效应独立, 且各有其控制点。

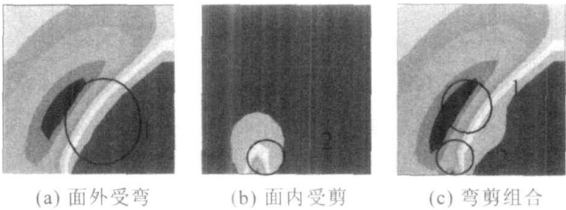


图 11 不同荷载类型轮辐式约束玻璃板节点区的应力分布图
Fig 11 Stress distribution in joint region for glass panels restrained by spoke overlapped connectors under different loads

4 结 论

(1) 夹板式玻璃板的加载试验的全过程中, 小变形条件下其位移和应力都随着荷载的增长而线性增长, 而且一旦达到破坏荷载立刻发生破坏, 表现出明显的脆性破坏的特征。

(2) 在弯剪组合作用下, 通过以下三方面的分析: 极限面外荷载和极限面内剪力关系; 面外受弯和面内受剪与弯剪组合的最大应力荷载关系曲线的比较; 三种荷载下节点域的应力分布图, 证明了两者的作用效应是独立的, 而且各有其控制点: 面外荷载控制的是大面以及节点域 1 的应力, 面内剪力控制了节点域 2 的应力。

(3) 弯剪组合的破坏状态可用极限面外荷载和极限面内剪力关系图中围成的矩形区域来判断。

参考文献:

- [1] 石永久, 邓晓蔚, 王元清, 等. 驳接式玻璃结构建筑及其玻璃板承载性能分析[J]. 工业建筑, 2005 35(2): 11—15
- [2] 王元清, 梁宇钊, 石永久, 等. 弯剪组合作用下点支承玻璃承载性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005 26(6): 122—128
- [3] 邓晓蔚, 石永久, 王元清. 驳接式玻璃板面内受剪承载性能有限元分析[J]. 河北建筑科技学院学报,

- 2005 22(4): 35—39
- [4] 马赢, 王元清, 石永久等. 三点支承中空玻璃抗弯性能试验与数值分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2005 22(2): 30—33
- [5] 邓晓蔚. 夹板约束玻璃板承载性能的理论分析与试验研究[D]. 清华大学, 2006
- [6] SMO J C, LAURSEN T A. An augmented lagrangian treatment of contact problems involving friction[J]. Computers & Structures, 1992 42(1): 97—116
- [7] VALLABHAN C V G, CHOU G D. Interactive nonlinear analysis of insulating glass units[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1986 112(6): 1313—1326
- [8] VALLABHAN C V G, MNOR J E, NAGALLA S R. Stress in layered glass units and monolithic glass plates[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1987 113(1): 36—43
- [9] TIMOSHENKO S W, KREGER S. Theory of plates and shells[M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1977
- [10] EDUARD Ventzel, THEODOR Krauthammer. Thin plates and shells: theory, analysis and applications[M]. New York: Marcel Dekker, 2001
- [11] GRAF H, ALBRECHT G, SACKMANN V et al. Structural behaviour of point supported and clamped laminated glass[J]. Structural Engineering International, 2004 (2): 129—133
- [12] JGJ102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S]. 2003

Experimental Test on Load ing Capability of Glass Panels with Overlapped Connectors

SHI Yong-jin¹, DENG Xiao-wei¹, WANG Yuan-qing¹, LUO Yi², XU Yue²

- (1) The Institute of Glass and Metal Structure for Architecture//Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
- 2 King Glass Engineering Ltd, Zhuhai 519015, China)

Abstract: Glass panels restrained by different types of overlapped connectors are investigated to understand the behavior of stress and displacement under the combination of shear and moment actions. Based on the experimental tests and FEM analysis, the load-displacement and maximal stress-load curves are suggested for ultimate out of plane load and ultimate in-plane shear. The validity of FEM by experiments is verified. It is concluded that the development of displacement and stress is linear with load and significant characteristic of brittle failure is exhibited. Furthermore, in-plane load and out of plane shear take independent effects when acting on glass panel together. The failure criterion can be judged by the rectangle region in the graph of the relation between ultimate out of plane load and ultimate in-plane shear.

Key words: overlap-connected glass panel; experiment test; FEM (finite element method); failure criterion