

底层为框架的多层混合结构房屋 抗震性能的试验研究

侯雪岩 董伟平

(建筑工程系)

摘要 本文通过对1/4缩尺比的二层二开间底层框架混合结构房屋的模型进行低周反复荷载作用下的试验研究,探讨了这种结构形式在地震作用下的裂缝开展过程、破坏机理、滞回特性、强度与刚度以及延性与耗能能力,并将相应阶段的试验结果与弹性有限元的计算结果进行了对比分析。

关键词 滞回特性,耗能能力,抗震性能

底层为框架的多层混合结构房屋是我国城乡基本建设中应用极为广泛的房屋结构形式之一。由于这种房屋上刚下柔,底层框架与上层混合结构交接部位刚度突变,应力集中,在近些年来发生的几次大地震中破坏严重。所以,至今为止,结构设计人员对这种房屋结构形式在地震区的采用仍抱十分小心谨慎的态度。为了探讨这种房屋结构形式在地震荷载作用下的受力全过程,我们以工程实际中常见的底层商店上层住宅、旅馆或办公楼的临街建筑结构形式为原型,专门加工了尺寸为 $60 \times 29 \times 15\text{mm}$ 的模型粘土小砖,进行了1/4缩尺比的结构模型的抗震性能试验研究。

1 结构模型及试验方法

结构模型为两个3.3m开间,底层层高4.2m,上层层高2.8m的两层两开间单元,由三片墙体和两片楼板所组成,其中A轴、C轴为二层高的落地砖墙,B轴为底层框架上抬一层墙高的框支砖墙。落地砖墙两端自基础顶至墙顶、框支砖墙自框架顶至墙顶均设置了构造柱。二层和三层楼面采用了两开间大的整块预制钢筋混凝土板,以模拟装配式预制楼板加整浇面层。

结构模型是按照框架上部有四层砖混住宅承受7度地震烈度进行设计的,实际试验时,取用的是简化了的两层结构模型。这是因为:

1) 根据对底层框架混合结构房屋震害的调查分析,破坏主要发生在薄弱的底层,以上各层震害较轻;

2) 框架上部各层住宅、旅馆或办公楼, 其平面布置一般相同, 其抗侧刚度大体相等。抗侧刚度突变主要在一、二层;

3) 根据建研院结构所所做的十二层底层大空间剪力墙的拟动力试验结果以及有限元计算, 框支墙应力集中主要在一、二层交接区, 也即在框架上方的二层墙体上, 三层及以上接近于普通墙;

4) A、C轴落地砖墙和B轴框支墙之间水平剪力分配大小的差别主要在一、二层, 三层及以上基本相等。

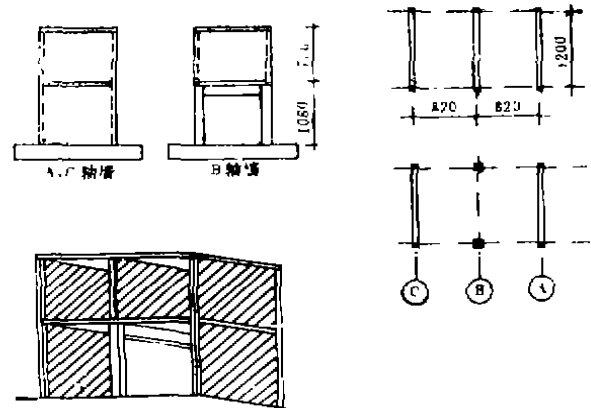


图 1

简化成两层的结构模型后, 上部还有三层楼的结构重量和活荷载组合值, 经比例换算后用铁法码作用于第二层顶面。

结构模型的平面、剖面如图 1 所示。

框架梁柱的几何尺寸和配筋情况见表 1。

表 1 框架梁柱的几何尺寸和配筋情况

项目	柱		梁			
	原 型	模 型	原 型		模 型	
断面尺寸	400×400	100×100	240×600		60×150	
配箍率	0.25%	0.25%	0.05%	0.1%	0.05%	0.1%
配箍	φ8每100	φ2.5每40	φ8每200	φ8每100	φ2.5每70	φ2.5每35
配筋率	1.42%	2.1%	1.26%	0.69%	1.86%	1.01%
配筋	4φ20、4φ18	4φ8	6φ20	2φ16 2φ20	6φ6	2φ8

模型底层框架及楼板用C25细石混凝土预制, 在三片墙体和两片楼板砌筑安装完毕后, 再在现场用C20细石混凝土浇注构造柱, 构造柱截面尺寸60×60, 配4φ4。墙体用M5砂浆, Mu10砖砌筑, 墙厚60。

表 2 为模型与原型的相似指标, 试验所得的实测值乘以表中系数, 即视为原型的相应值。

表 2 模 型 相 似 指 标

型别	长度	面积	荷载	位移	应力	剪力	弯矩	轴力
原型	4	16	16	4	1	16	64	16
模型	1	1	1	1	1	1	1	1

试验时, 首先在二、三层楼面上放置铁法码模拟结构自重与楼面均布活荷载。然后, 依次在两个相反水平方向上进行低周反复加卸载。低周反复水平荷载是利用 MTS 电液伺服系

统250mm冲程的250kN作动器施加的，作用点在B轴框支砖墙二层墙顶处楼板厚度的正中。加载装置及测试仪表布置详见图2、图3。我们担心结构模型在水平加载过程中发生突然的脆性破坏，采用了较为小心谨慎的加载制度。开始时荷载取值很低，缓慢地逐级上升，在达到最大荷载之前，采用荷载控制。之后，转为采用位移控制。加载程序如图4所示。

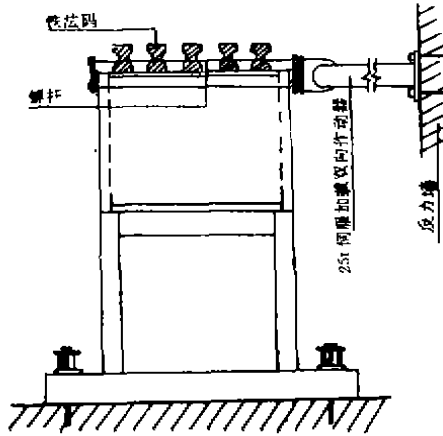


图 2

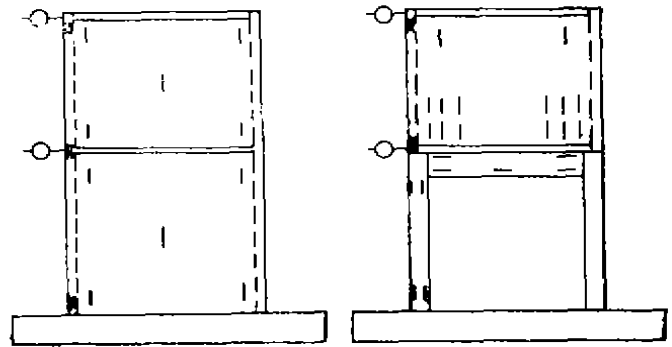


图 3

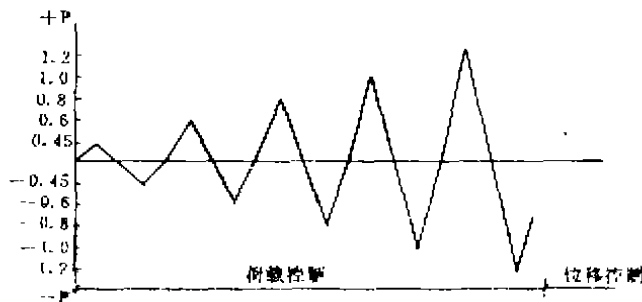


图 4

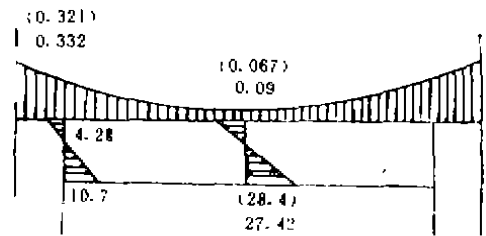


图 5

2 试验结果及分析

2.1 受力特点与破坏形态

2.1.1 竖向荷载作用下的结构受力特点

在竖向荷载作用下，B轴框支砖墙墙体内有明显的应力集中现象。图5是 3kN/m^2 竖向荷载作用下原型框支砖墙有限元计算应力值与结构模型试验实测应力值的比较。计算的平均压应力为 0.165N/mm^2 ，而试验测得的柱上方墙体压应力为 0.321N/mm^2 ，有限元计算压应力为 0.332N/mm^2 ，比平均压应力高出两倍左右，而梁跨中上方墙体压应力却很低，实测的、计算的都远小于平均压应力值。同时，梁内纵筋的应力，无论在跨中下部或端部上方，均很小。

在A、C轴落地砖墙上，无论从同一水平位置上的两张应变片所实测的，或是从有限元

计算的，同一水平上墙体压应力基本相等。

2.1.2 水平荷载作用下的结构受力特点

2.1.2.1 结构的侧向位移

由于结构模型的实际刚度中心和加载中心不可能完全重合，在逐级施加水平荷载的过程中，三片墙体的侧移逐步出现偏差，产生扭转效应。在水平荷载加到1.4t后，扭转效应越趋明显。此外，三片墙体的实测侧移曲线还表现出底层变形大，二层变形小的特点，属剪切型的变形曲线。从三片墙体的布置来看，结构模型属刚性方案范围，其一、二层抗侧移刚度比为2.15，刚度突变不大。而且，构造柱的设置也大大加强了墙体的刚度和结构的整体性。加荷初期，水平力主要由落地砖墙承担，框支砖墙承担很少，这就减少了它的应力，变形很小。只是在水平荷载超过1.4t墙体开裂后，刚度有所退化，变形才较快增大。图6是三片墙的侧移曲线。

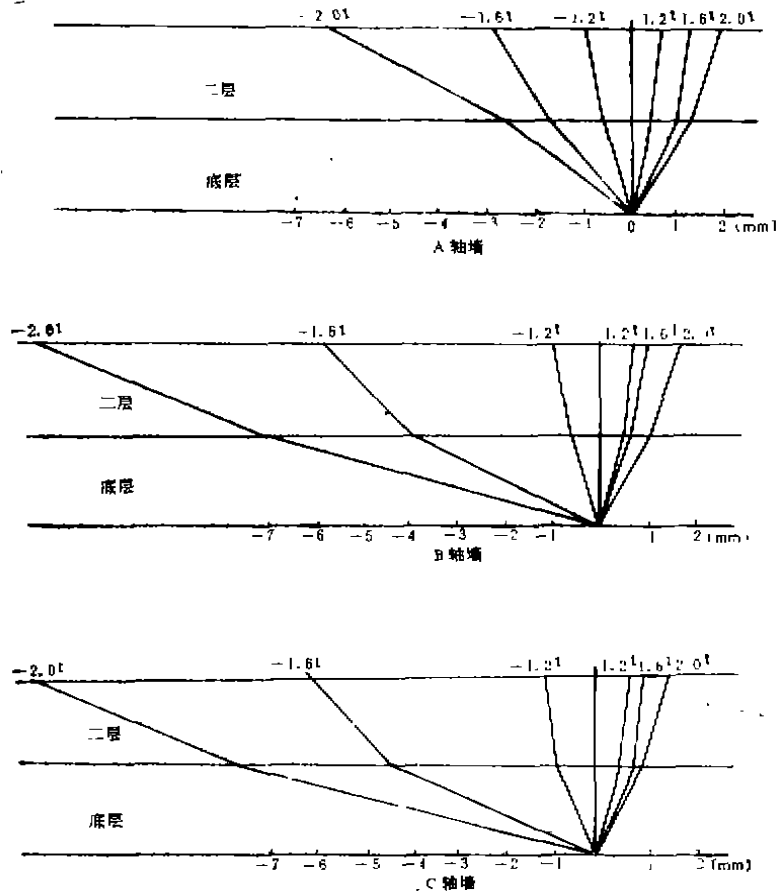


图 6

2.1.2.2 框支砖墙的应力

在水平荷载 $p = 1.8t$ 时的框支砖墙计算应力和实测应力如图7所示，表明在水平荷载和竖向荷载共同作用下仍然存在着墙梁作用，只是一边压应力减小，另一边增大，中间部位仍然较小。随着墙体开裂，计算和实测差异增大，但即使在转入位移控制后，经实测，框支砖

墙的受力仍符合两边压应力大中间压应力小的墙梁工作机理。随着水平位移的加大, 框架上部与墙体交接部位水平裂缝逐渐向里发展, 砖墙上的应力变化仍主要发生在两端。

2.1.2.3 框架梁柱钢筋的应力

在荷载控制期间, 框架梁钢筋应力变化幅度不大, 只是在水平荷载达到 $-1.8t$ 和 $-2.0t$ 时才有较大增多, 但仍未达到屈服。转为位移控制后, 应力变化仍然不大。在框架水平位移过程中, 梁主要是平移, 而柱变形较大。柱开裂后, 梁、柱刚度比发生变化, 梁受力更小。

在荷载控制期间, 框架柱钢筋应力变化幅度较大, 在结构模型达到最大承载力时, 柱根部纵筋达到了屈服。转为位移控制后, 虽然水平位移在不断增大, 但柱筋应力在屈服台阶附近波动, 增长甚为缓慢。

2.1.2.4 构造柱纵筋的应力

在荷载控制期间, 由于构造柱与墙体的整体组合作用, 初期纵筋应力很小。随着逐级加载, 墙体开裂, 构造柱根部纵筋应力增大很多, 但远未达到屈服。在水平荷载加到 $-2.0t$ 时, 由于扭转影响, 位移最大的C轴墙一边构造柱的混凝土被压碎, 另一边构造柱纵筋由于未锚入基础而与基础伸出筋在搭接长度上滑移拉脱, 使得由应变片测到的应变值减小。实际上这一边构造柱根部裂缝宽达 5mm 之多。转为位移控制后, 构造柱在拉、压应力反复作用下, 根部逐渐被压碎, 且压碎区不断增大, 构造柱与砖墙的连接逐渐破坏, 出现了构造柱与砖墙之间的竖向裂缝。

2.1.2.5 裂缝开展与破坏形态

当水平荷载在极限剪力 60% 以内时, 水平力 p 与模型顶点位移 Δ 基本呈直线关系, 之后逐渐由直变曲, 底层层间位移大于二层层间位移。

在 $-1.4t$ 时, 二层楼面与二层墙体交接处出现长约 8cm 的水平微裂缝;

在 $1.6t$ 时, 另一边相同部位也出现了长度不等的水平微裂缝; 在 $-1.6t$ 时, 底层墙体根部出现了轻微的水平裂缝;

在 $-1.8t$ 时, 底层墙体根部裂缝延长达墙宽 $1/2$ 左右; 二层楼面墙体交接处裂缝有所发展;

在 $2t$ 时, 底层墙体根部形成贯通墙全宽的水平通缝; 在 $-2.0t$ 时, 通缝一端的裂缝宽度达 5mm 左右。

在墙面上没有出现较为明显的斜裂缝。

框架柱在水平荷载为 $-1.8t$ 时, 上下柱端出现了弯曲水平裂缝; 在达到模型最大承载能力时, 柱根纵筋屈服。

在水平荷载为 $-2.0t$ 时, 底层构造柱和砖墙交接处出现竖向通缝从根部一直发展到二层墙体高度的一半。一端构造柱下部混凝土被压碎, 另一端构造柱下部钢筋被拉脱。在位移控制经过几次循环后, 二端构造柱下部混凝土均被压碎, 压碎区还扩展到根部砖墙内。此时, 竖向通缝进一步发展, 构造柱和砖墙进一步脱开, 在底层根部和二层楼面附近墙面上, 出现

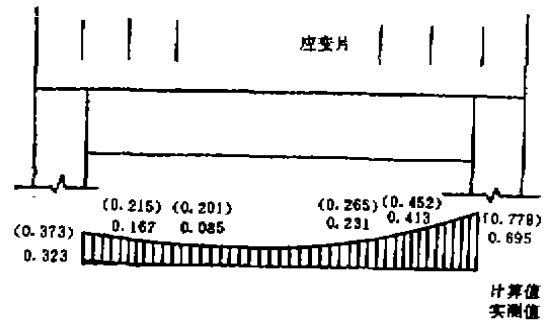


图 7

了一些轻微斜裂缝。

模型的破坏过程是：首先由于墙体和楼面、墙体和基础顶面粘结强度较弱，在弯曲和剪切下，在这些部位引起初始水平微裂缝。之后，由于弯曲和剪切的共同作用，水平微裂缝有所伸长并在靠近构造柱处墙两端的水平微裂缝有所加宽，随之出现了构造柱和砖墙交接处的竖向裂缝并逐步往上发展。在达到最大荷载，构造柱纵筋被拉脱之前，总变形中剪切滑移所占比重要大些，在转为位移控制后，模型主要由于弯曲变形，墙两端处水平裂缝开闭很大，直至破坏。

图 8 是模型三片墙的破坏形态。

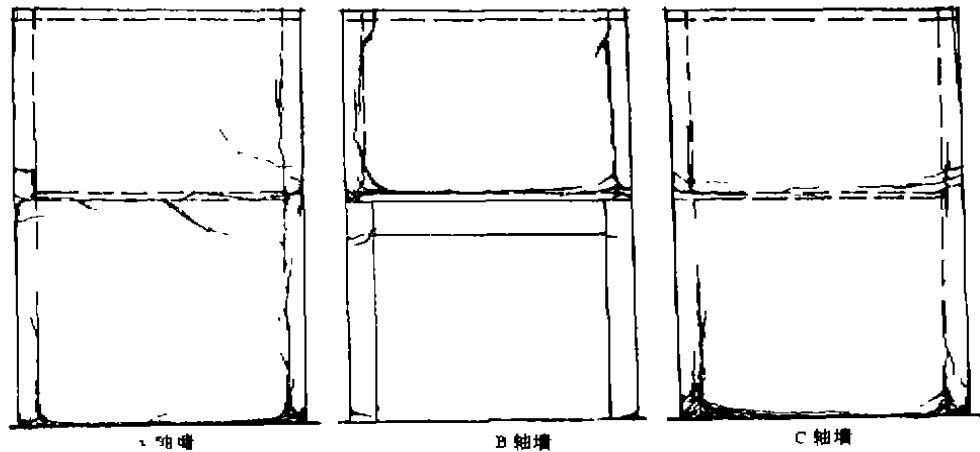


图 8

2.2 滞回性能

图 9 和图 10 分别为荷载控制和位移控制时的各片墙的荷载—位移滞回曲线。模型在达到最大荷载前，三片墙的荷载—位移曲线几乎呈直线变化，卸载后只有很小的残余变形。

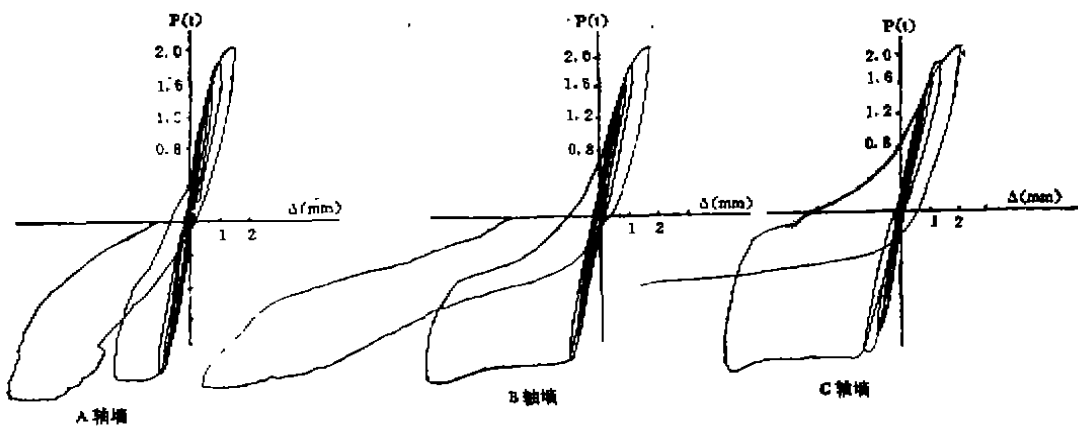


图 9

当荷载加到 $-1.8t$ 时，三片墙变形已显差别而产生扭转；加 $2.0t$ 时，变形增长加快；加 $-2.0t$ 时，模型出现较大的滑动，滞回曲线呈反 S 形。虽然滞回曲线仍表现出较为明显的脆

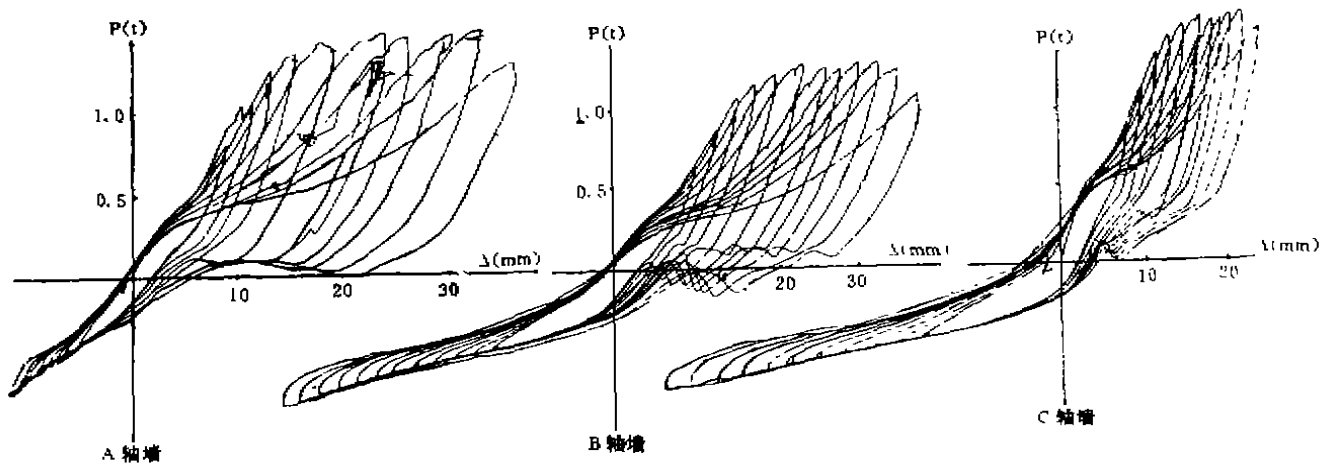


图 10

性特征，但比无构造柱的普通砖墙延性要好。虽然三片墙体下部均出现了水平通缝，但墙体仍能保持其完整性，没有出现完全破坏的现象。转为位移控制后，随着位移的增大和循环次数的增加，直到位移达到 $+3.2cm$ 时，荷载才出现下降趋势。相应的最大正向荷载达到 $1.5t$ ，最大反向荷载达到 $0.7t$ 。滞回曲线的骨架曲线下降较陡，滞回环出现较为严重的捏缩现象，强度退化快，延性及耗能能力差。

2.3 强度与刚度

结构模型是以 7 度抗震设防要求，按照混凝土结构设计规范 (GBJ10-89)、砌体结构设计规范 (GBJ7-89) 及建筑抗震设计规范 (GBJ11-89) 进行设计的，设计时未考虑构造柱的作用。在按抗震规范要求对底层框架砖房地震剪力设计值乘以 1.5 增大系数后，7 度设防时最大水平地震力为 $0.155Geg$ ，8 度设防时最大水平地震力为 $0.31Geg$ 。

将试验获得的荷载—位移曲线中每次循环的峰点连接起来即得到骨架曲线，如图 11 所示。它反映出结构的开裂强度和极限强度。现列表比较结构模型需承担的水平地震力和实测所具备的抗震能力：

表 3 设防地震力、开裂强度与极限强度

7 度设防地震力 $P_7(t)$	8 度设防地震力 $P_8(t)$	正向开裂强度 $P_f(t)$	正向极限强度 $P_u(t)$	负向开裂强度 $-P_f(t)$	负向极限强度 $-P_u(t)$	P_u/P_7	P_u/P_8
0.83	1.66	1.8	2.0	-1.7	-2.0	2.4	1.2

从模拟试验看，结构模型的抗震承载力大大超过了 7 度设防地震力的标准，达到了 8 度设防的要求。

从滞回曲线可以看出，结构模型的刚度随位移幅度的增大和循环次数的增加而逐渐降低。刚度的衰减可用环线刚度特征值 K 来表示：

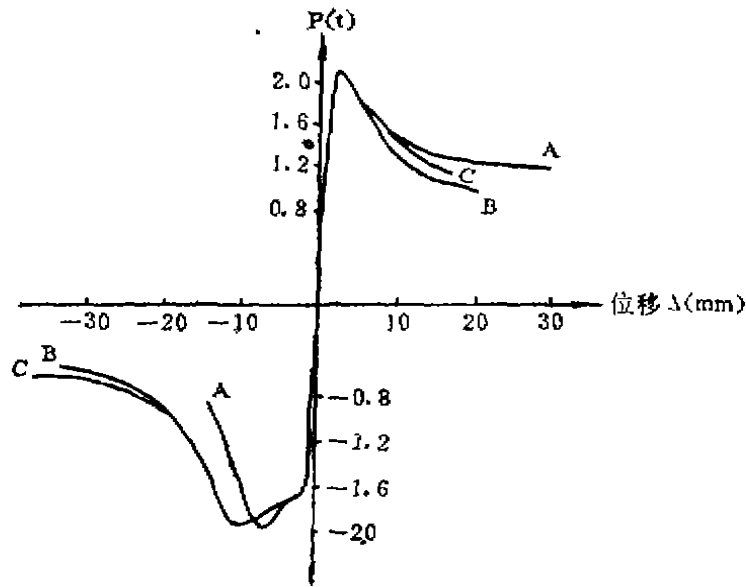


图 11

$$K = \frac{(+P_i) + (-P_i)}{(+\Delta_i) + (-\Delta_i)}$$

式中 $+P_i$, $-P_i$ 和 $+\Delta_i$, $-\Delta_i$ 为第 i 次正负向加载峰值和相对应的正负向位移值。

图12为三片墙体的环线刚度特征值 K 与相对位移 Δ_i/Δ_u 的关系曲线，虽然三片墙刚度退化不一致，但总的均下降较快，这也是符合砖石结构受力特点的。在转为位移控制后，环线刚度下降缓慢，并逐渐趋于稳定，但此时的环线刚度已经很小了。

2.4 延性与耗能

延性是结构或构件抗震性能好坏的重要指标之一，通常用延性系数 μ 亦即结构的极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值来予以度量。

由于三片墙的滞回曲线的骨架曲线没有明显的屈服点，我们用如图13所示的“通用屈服

弯矩法”来确定它的假想屈服点 B ，得到相应的屈服位移 Δ_y 。同时，取达到极限荷载后下降10%时曲线下降段相应点的位移作为极限位移 Δ_u 。

在低周反复荷载作用下，模型两个方向上的 Δ_y 和 Δ_u 是不等的，本文取两个方向位移延性系数的平均值。三片墙的平均位移延性系数如表4所示。

在采用位移控制对模型加载时，最大位移加到 $\pm 32\text{mm}$ ，其极限位移 Δ_u 与墙高 H 的比值即相对位移为 $\Delta_u/H = 0.015 = 1/67$ 。这种可观的变形能力显然是构造柱起了很大的作用。

当结构进入弹塑性工作阶段时，其抗震能力很大部分取决于结构的耗能能力。滞回曲线中加、卸荷曲线所包围的面积反映了结构耗能能力的大小。表5列出了模型中各片墙体的耗能比。

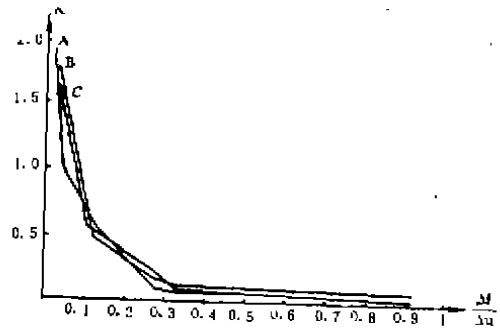


图 12

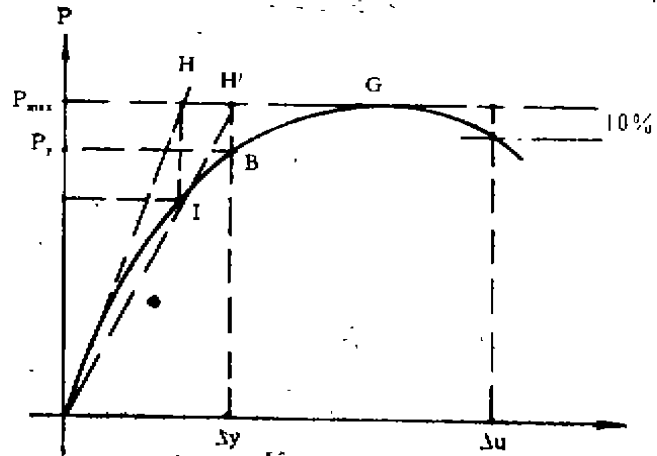


图 13

表 4 位移延性系数

墙体编号	正向加载			反向加载			$\mu + (-\mu)$ 2
	Δ_y	Δ_u	μ	$-\Delta_y$	$-\Delta_u$	$-\mu$	
A	0.95	1.52	1.6	0.88	2.5	2.84	2.22
B	0.98	1.67	1.71	0.97	5.4	5.56	3.63
C	1.02	2	1.96	1.05	5.9	5.62	3.79

表 5 墙体的耗能比 $\mu_E = E/P_y\Delta_y$

墙体编号	正向加载			反向加载			$P_y\Delta_y$	$E(1-\sigma)$	$\mu_E = \frac{E}{P_y\Delta_y}$
	P_y	Δ_y	$P_y\Delta_y$	$-P_y$	$-\Delta_y$	$-P_y\Delta_y$			
A	1.77	0.95	1.69	1.73	0.88	1.52	1.61	53.8	33.42
B	1.8	0.98	1.76	1.82	0.97	1.76	1.76	65.4	36.59
C	1.72	1.02	1.75	1.7	1.05	1.79	1.77	68.7	38.81

图14反映了各片墙体能量耗散的变化情况。可以看出，在加载过程中，能量耗散的比例是比较稳定的。C轴墙耗散能量多点，A轴墙少点。

3 几点看法

1) 底层为框架的多层混合结构房屋在7度、8度设防烈度区是适宜的。本结构模型是按建筑抗震设计规范 (AGJ11-89) 计算的7度地震作用乘以增大系数1.5后设计的，试验实测获得的结构抗剪承载力远超过7

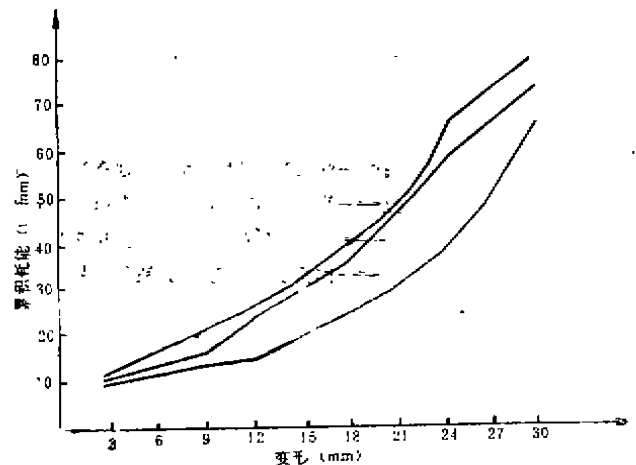


图 14

度设防地震力，相对于 8 度设防也是基本安全的。

2) 本结构模型之所以具有较大的抗剪承载力，很关键的取益于结构的合理布置和正确的构造措施：

模型中落地砖墙的间距使结构属刚性方案范围，一、二层刚度比为 2.15，刚度突变不大，为非柔性底层。实测表明，砖墙开裂前，框架承担的剪力仅占底层总剪力的 3% 左右；砖墙开裂后，当底层墙体环线刚度下降为 80% 时，框架承担的剪力占底层总剪力的 14%。这就避免了底层框架变形和应力的集中；

构造柱的设置对加强结构整体性、改善墙体脆性、增加结构延性以及提高墙体的抗剪承载力效果是很显著的。设置构造柱后，使墙体开裂荷载与极限荷载、开裂位移与极限位移之间拉开了距离。实测墙体开裂荷载为 1.6t，而极限荷载达到 2.0t；开裂位移约为 0.9mm，而极限位移约 2mm。在达到极限荷载后，虽然抗剪能力下降较快，但仍能继续承担一定的水平力和继续变形，最后位移值达 32mm，而模型仍不倒塌。

3) 在多层混合结构房屋中，除了斜裂缝或交叉裂缝这种常见的斜拉型的剪切破坏外，在构造柱加强了墙的整体性而自身没有足够锚固的情况下，沿墙体与楼面或基础面灰缝而发生的水平剪切和整体倾复弯曲共同作用的破坏形态，也应该予以注意。

4) 试验和有限元计算均表明，在水平荷载和竖向荷载共同作用下，框架梁和上部墙体仍能反映出墙梁效应。因此，可以建议底层框架按下列计算简图进行设计：

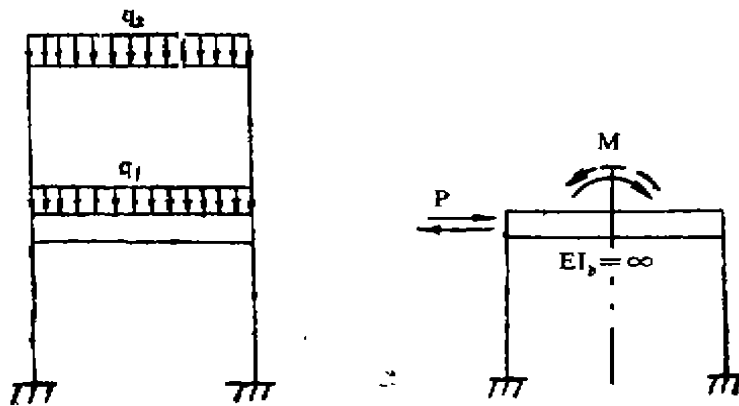


图 15

- q_1 ——作用在框架梁顶面的永久荷载和可变荷载设计值
- q_2 ——作用在墙梁顶面的永久荷载和可变荷载设计值
- P ——作用在框架顶点的水平地震力
- M ——作用在框架顶面的恢复力矩

(编辑：徐维森)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE ANTISEISMIC
BEHAVIOR OF THE BRICK BUILDING WITH FRAME
ON THE GROUND FLOOR

Hou Xueyan Dong Weipin

(Department of Civil Engineering)

ABSTRACT A two-story and two-space structure model (1/4 scale) is tested under low-cyclic loading for studying the antiseismic behavior of the brick building with frame on the ground floor. This paper presents mainly the development and pattern of cracks, failure mechanism, hysteresis behavior, strength and stiffness, ductility and energy dissipation. The calculated results by elastic finite element method are also compared with the results of test.

KEY WORDS hysteresis behavior, energy dissipation, antiseismic behavior