

# 由多层砖房墙体震害估计1988年灵武5.5级地震的峰值加速度和烈度

丁伯阳

(国家地震局兰州地震研究所)

徐善华

(甘肃工业大学)

## 摘 要

本文根据中国抗震规范(TJ11—78)和多次地震的多层砖房震害统计资料,用建筑力学方法推导出估计地震动峰值的公式。结合1988年灵武5.5级地震的多层砖房震害,根据计算的墙体抗震强度系数估算了这次地震的地面峰值加速度为0.158(g),相当于烈度7度半。

## 一、1988年灵武5.5级地震时灵武县城建筑的破坏概况

1988年1月4日灵武5.5级地震震中位于灵武县城近郊东塔乡。县城内共有两层以上砖混结构建筑161栋,总面积154856m<sup>2</sup>。1978年以前建造的占8.07%,1979年以后建造的占91.93%,震后经宁夏回族自治区建设厅震害调查组调查<sup>1)</sup>,房屋基本完好的占32.30%,轻微损坏的占42.86%,中等破坏的占20.49%,严重的占4.34%,无倒塌现象。具体情况见表1。房屋震害程度划分的标准为\*:

表1 灵武县城楼房震害调查表

等级	完 好		轻 微		中 等		严 重		合 计
	栋数	%	栋数	%	栋数	%	栋数	%	
二	41	50.00	31	37.80	8	9.76	2	2.44	82
三	7	14.89	21	44.68	16	34.04	3	6.39	47
四	4	12.90	16	51.61	9	29.03	2	6.45	31
五			1						1
合计	52	32.30	69	42.86	33	20.49	7	4.34	161

\*由于震害标准不同,因此本文引用宁夏回族自治区震害调查标准稍有改动。

1)宁夏回族自治区建设厅震害调查组,灵武县城范围楼房地震震害调查报告,1988。

**基本完好：**主体结构及填充墙、隔墙、屋顶小烟囱等基本完好。个别门窗洞口、墙角、砖垛及突出部分等偶有轻微裂缝，抹灰层局部开裂或小块掉落。

**轻微损坏：**主体结构基本完好，墙、板只有局部轻微的裂纹或构造裂缝，非主体结构局部可能有明显的破坏，不影响房屋的正常使用，只需稍加修理即可。

**中等破坏：**房屋的主体结构或其连接部位多处发生明显的裂缝，或填充墙、附属建筑等破坏严重，甚至倒塌。这些房屋经局部修复、补强或加固处理后仍可使用。

**严重破坏：**房屋主体结构破坏严重，墙体开裂，并有明显的滑移、错位或酥碎，甚至局部掉角和个别墙板塌落，这类房屋须经大修方可使用，或已无修复价值。

**倒塌：**房屋倒塌部分约占全楼的 $\frac{1}{4}$ 以上。

初步判定，这次地震的烈度为七度<sup>2)</sup>(图1)，但似有争议。本文由多层砖房抗震强度系数对该次地震烈度和峰值加速度作一估算。

## 二、多层砖房抗震强度计算

刚性结构的多层砖房，在振动时以剪切变形为主。因而多层砖房抗御地震的能力，主要取决于砖墙体的抗剪强度。历次地震震害也表明，墙体上的裂缝形式大都为“斜向缝”或“X”缝，即主拉应力的剪切破坏。由于地震的随机性和结构的非同一性，砖墙体抗震强度与震害之间并不存在对应的确定函数关系。但是，大量经受过地震的房子在统计特性上、震害和抗震强度方面具有很好的相关性。这些早已在乌鲁木齐、通海、海城等十多次地震震害统计中所证实。

多层砖房是呈脆性破坏的刚性结构，其固有周期在0.2—0.1秒左右。虽然多层砖房因层数和构造形式有变化，但在我国抗震规范设计反应谱中，它的动力放大倍数都在平台部分。规范所给的适用于多层砖房的地震影响系数是一个不变化的常数。如果地震荷载系数用常数K表示，则按设计烈度给出的总地震荷载为：

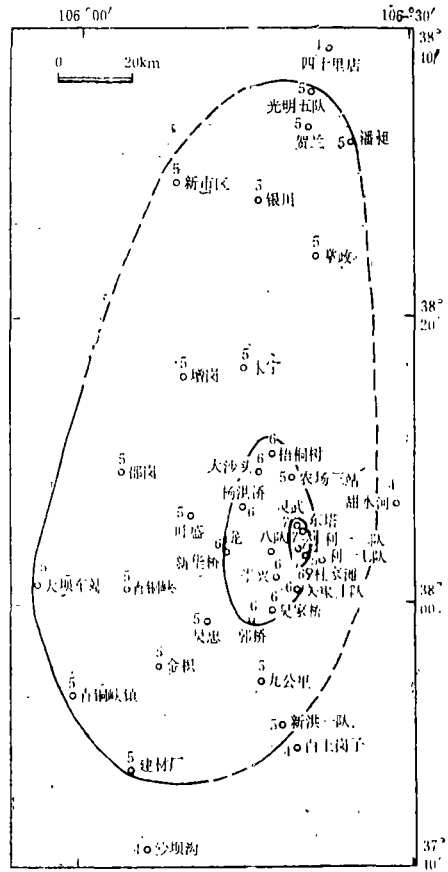


图1 1988年1月4日灵武5.5级地震等震线图

Fig. 1 Isoseismal map of the Lingwu earthquake (M=5.5) on Jan. 4, 1988

2) 宁夏地震局, 1988年元月4日灵武5.5级地震烈度考察报告, 1988.

$$Q_0 = C\alpha_{max} \sum_{i=1}^n W_i = K \sum_{i=1}^n W_i \quad .$$

作用于第*i*楼层的水平地震荷载 $P_i$ 按倒三角分布，即：

$$P_i = \frac{W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i} \quad .$$

这里 $M_i$ 和 $H_i$ 分别是由规范定义的第*i*层集中重量和结构标高。因此，第*i*层的地震剪力为

$$Q_i = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i} Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i} Q_0 \quad .$$

由于砖混结构的多层砖房在水平地震力作用下，平面弯曲比水平位移小得多，因此层间各墙段承受的地震荷载，可按其侧移刚度 $k_{ij}$ 分配，即

$$Q_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sum_{i=1}^n k_{ij}} Q_i \quad .$$

这样，第*i*层第*j*道墙的地震剪力

$$Q_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sum_{i=1}^n k_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i} \cdot K \sum_{i=1}^n W_i \quad .$$

若第*i*层第*j*道墙的截面积为 $A_{ij}$ ，那末剪应力

$$\tau_{ij} = \frac{Q_{ij} \xi_{ij}}{A_{ij}} = \frac{\xi_{ij} k_{ij}}{\sum_{i=1}^n k_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i} \cdot K \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{A_{ij}} \quad .$$

这里 $\xi_{ij}$ 为第*i*层第*j*道墙的截面剪应力不均匀系数。由材料力学可知，对矩形截面， $\xi_{ij} = \frac{3}{2}$ 。

砖墙体在水平地震力和竖向压力共同作用下的抗震抗剪强度，可采用主拉应力公式计算：

$$(R_v)_{ij} = (R_f)_{ij} \sqrt{1 + \frac{(\sigma_0)_{ij}}{(R_f)_{ij}}} \quad .$$

其中 $(R_f)_{ij}$ 为墙段的通缝抗剪强度， $(\sigma_0)_{ij}$ 是墙段的正压应力。要使墙体在地震中不受破坏，必须要求墙体的抗剪强度大于或等于墙体中的地震剪应力，也就是

$$(R_v)_{ij} \geq \frac{2 \xi_{ij} k_{ij}}{\sum_{i=1}^n k_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i} \cdot K \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{A_{ij}} \quad .$$

其中  $2$  是我国规范规定的安全系数, 上式又可写为

$$\frac{(R_r)_{ij}}{2\xi_{ij}} \cdot \frac{A_{ij}}{k_{ij}} \cdot \frac{\sum_{l=1}^m k_{lj}}{\sum_{l=1}^n W_l} \cdot \frac{\sum_{l=1}^n W_l H_l}{\sum_{l=1}^n W_l H_l} \geq K$$

若令

$$K_{ij} = \frac{(R_r)_{ij}}{2\xi_{ij}} \cdot \frac{A_{ij}}{k_{ij}} \cdot \frac{\sum_{l=1}^m k_{lj}}{\sum_{l=1}^n W_l} \cdot \frac{\sum_{l=1}^n W_l H_l}{\sum_{l=1}^n W_l H_l}$$

并且定义  $K_{ij}$  为第  $i$  层第  $j$  道墙体的抗震强度系数, 这样用它就能衡量多层砖房该道墙的抗震能力。进一步根据抗震能力的大小, 结合实际震害就能估计出地震的作用。

根据上面推导可知, 当  $K_{ij} > K$  时, 表明墙体能经得住地震作用而不开裂, 并且差值越大, 安全储备也越大; 当  $K_{ij} < K$  时, 表明墙体在地震作用下开裂, 并且差值越大, 破坏越严重;  $K_{ij} = K$ , 说明墙体处于主拉应力剪切破坏的临界状态。

### 三、场地影响

震区位于银川地堑的南端。银川地堑是鄂尔多斯周边断陷带的一个组成部分, 是一个全新世以来仍具有活动性的断陷盆地, 总体走向为北北东。地堑东缘为黄河断裂, 这条断裂地表全被冲积层掩盖。灵武县城就位于这第四系冲积层上。因此, 灵武县城场地平展, 场地土组成简单。钻孔资料表明, 灵武县城场地土由素填土、轻亚粘土或亚粘土、粉细沙、卵石层所组成。素填土的埋深一般在  $1-1.5\text{m}$ , 轻亚粘土或亚粘土的埋深一般为  $1.5-5\text{m}$ , 粉细沙最深可达  $15\text{m}$  左右。另外, 灵武县城现距黄河  $12\text{km}$ , 其间地面由黄河西迁和层积所形成。因此, 浅层粉细沙和轻亚粘土都比较发育, 潜水埋深浅, 沙土均为全新世沉积, 是一个明显的沙土液化区。但是, 现在的灵武县城始建于明景泰三年, 由于年代久远, 城内填土较厚。这次地震除发现西边旧城外黄河遗留牛轭湖上回填区的建筑物以及东边旧城外原稻田上建筑的楼房, 由于沙土液化造成地基不均匀沉降而加重震害外, 城内尚未发现明显的砂土液化造成破坏的现象。因此, 我们可以认为, 地震时灵武县城里一般多层砖房的地震破坏主要取决于地震动峰值加速度幅值的大小。

### 四、灵武地震的峰值加速度和烈度

这次地震后, 我们共计算了 52 幢多层砖房的 2886 段墙体的抗震强度系数。选择其中有代表性的 8 幢建筑近 600 段墙体, 将其抗震强度系数及实际震害情况列于图 2 中。图 2 表明, 抗震强度系数与震害是极好地相关的。墙体的  $K_{ij}$  值越小, 破坏越重。同时, 也可以看出墙体受到破坏与未被破坏的抗震强度系数阈值(临界状态)  $K_0 = 0.16$ 。也就是说在  $K_{ij}$  大于  $0.16$  时, 大多数墙体是处于基本完好状态的;  $K_{ij}$  小于  $0.16$  时, 大多数墙体是处于损坏状态的。当然其中也有少量墙体在  $K_{ij} > 0.16$  时, 处于损坏状态; 而在  $K_{ij} < 0.16$  时处于基

武5.5级地震的峰值加速度和烈度

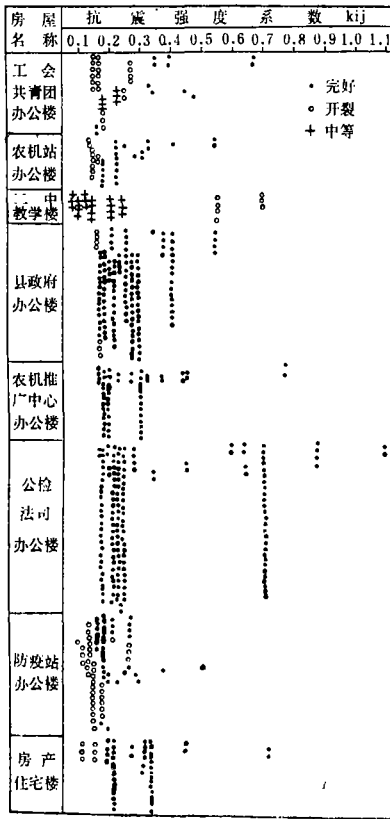


图 2 灵武县城多层砖房墙体抗震强度系数  
 Fig. 2 A seismic strength coefficient of multi-story brick building in Lingwu county town

裂缝，并且有明显的滑移、错位现象。也包括墙体的酥裂和局部掉角。

倒塌：墙体大块掉落直至整片墙体坍塌。

### 五、灵武地震的震害指数

胡聿贤先生曾经对同一个大区内，多层砖房的平均震害程度使用震害指数 $I_{(D)}$ 表示<sup>[2]</sup>，即

$$I_{(D)} = \sum_{i=1}^5 ini$$

这里 $i$ 为表示房屋震害类别的指数。对于多层砖房根据损坏程度分别定为：基本完好 $i = 0$ ，轻微破坏 $i = 0.2$ ，中等破坏 $i = 0.4$ ，严重破坏 $i = 0.9$ ，倒塌按其程度定 $i$ 为 $0.8$ 和 $1.0$ 。 $n_i$ 表示 $i$ 类损坏房屋的百分数。对于灵武地震

$$I_{(D)} = 0 \times 32.30\% + 0.2 \times 42.86\% + 0.4 \times 20.49\% + 0.6 \times 4.34\% \\ = 0.08572 + 0.08196 + 0.02604 = 0.194$$

本完好状态。造成这种离散的原因是复杂的，但施工砌筑砂浆标号影响最大，因此离散大小在一定程度上反映着砂浆质量。

前面我们已经定义 $K$ 为地震荷载系数，

$$K = C\alpha_{max}$$

对于灵武5.5级地震，其荷载系数 $K$ 和抗震强度系数阈值相等，为 $0.16$ 。理论和实际震害表明，多层砖房的整体延性系数应该是

$$0.45。所以 \alpha_{max} = \frac{K}{C} = 0.3556。而 \alpha_{max} =$$

$a\beta$ ，对短周期的多层砖房 $\beta = 2.25$ ，由此可求得灵武地震的地面峰值加速度

$$a = \frac{\alpha_{max}}{\beta} = \frac{0.3556}{2.25} = 0.158 (g)，$$

相当于烈度7度半。

应该指出的是，墙体的震害程度分类，不同于多层砖房的震害，所分五类的标准如下：

基本完好：基本无损的墙体。

轻微损坏：墙体表皮开裂或因局部应力集中而产生的短裂缝。

中等破坏：墙体出现贯通的交叉或斜向裂缝。

严重破坏：整个墙体出现了交叉或斜向

表 2

未采取抗震措施的多层砖房震害程度

烈度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X	Ⅺ
I(D)	<0.1	0.1—0.3	0.3—0.5	0.5—0.7	0.7—0.9	>0.9

表 2 给出的是在不同地震烈度区,按砖石结构规范<sup>3)</sup>施工但未采取抗震措施的多层砖房震害情况。对照表 2 可以看出,这次灵武地震时,若这些砖房未采取抗震措施,其震害指数应在 0.2 左右。这次地震实际震害指数为 0.194,约等于 0.2,而且十分之九的房屋是 1979 年以后建的,震害指数几乎没有下降。这除了说明灵武县城许多建筑未认真设防或者设防的考虑不周外,其施工质量差也是震害较重的一个原因。对此宁夏回族自治区建设厅震害调查组已有详细报告,另外也将有专题论及,本文不再赘述。

(本文 1988 年 12 月 6 日收到)

### 参 考 文 献

- [1] 杨玉成等,多层砖房的地震破坏和抗裂抗倒设计,地震出版社,1981.  
 [2] 胡聿贤,地震工程学,地震出版社,1988.

## THE INTENSITY AND PGA OF JAN. 4, 1988 LINGWU EARTHQUAKE ( $M_s=5.5$ ), NINGXIA ESTIMATED BY DAMAGE OF MULTI-STORY BRICK BUILDING

Ding Boyang

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China)

Xu Shanhua

(Polytechnic University of Gansu, Lanzhou, China)

### Abstract

In this paper, using Chinese aseismic code (TJ11-78) and statistical information about earthquake damage of multi-story brick building, according to the structure mechanics method, we get formula about assessment PGA. Having investigated the damage of multi-story brick building of Jan. 4, 1988 Lingwu earthquake, Ningxia, we give PGA and intensity of this earthquake by calculating the coefficient of wall aseismic strength.

3) 国家建委,工业与民用建筑抗震设计规范,1979.