

目 录

通海地震的烈度分布与场地影响	通海地震影响场调查组(1)
通海地震区穿斗木构架房屋调查报告	高云学、刘锡荟(15)
通海土墙承重房屋的震害调查与试验研究	第二研究室通海工作小组(21)
通海地震区石拱桥灾害调查	黄龙生、王前信、陆干文、王良琛、孙述臣(53)
抗震建筑的设计反应谱	陈达生、卢荣俭、谢礼立(73)
在水平荷载作用下砖填充墙对框架承载力影响的试验研究	框架填充墙试验小组(95)
单层工业厂房地震荷载分布	卢书辉、沈乃杰、陈昶(102)
单层混凝土厂房、单层砖厂房、砖筒水塔模型破坏试验	结构延伸系数试验小组(119)
工业与民用建筑地基基础的抗震经验	抗震规范编制组地基小组(128)
RDZ1-12-66 型强震加速度仪及其野外标定方法	黄振平、黄树棠、于双久、白桂泉、王友琴(136)
一座典型砖结构及邻近地表的地震观测和分析	谢礼立、杨章和(147)
阳江地震中多层砖房的震害及其地震荷载系数的反算	民用建筑抗震组(159)
砖结构动力及静力性质的实验研究	尹之潜、王志勇、张大名、邵英景(186)
带抗震板墙的多层框架电厂模型破坏试验	抗震板墙试验小组(198)
电厂主厂房装配式接头抗震性能的试验研究	装配式接头试验小组(217)
双曲拱桥地震力的简化计算	何度心、王倩梅、高金英、黄万春、孙述臣(228)
拱坝自振特性的试验研究	罗学海、张雪亮、朱葳、黄万春、高光伊(244)
原状饱和粘土动力性能的试验研究	谢君斐、石兆吉(256)
单桩的侧力试验和抗震性能	地基组(271)
地面运动相位差对单层长建筑抗震分析的影响	王前信(283)

通海地震的烈度分布与场地影响

通海地震影响场调查组

提 要

本文根据 1390 个自然村中全部房屋的震害情况,提出了房屋震害指数法,作为对比各自然村烈度的指标。根据同类地基上自然村的震害指数,绘制了以几类地基为背景的等震害线图和烈度衰减曲线,确定了不同地基条件对烈度的影响。对这次地震而言,基岩与松软地基上的烈度差别,在八、九度区内,最大将近二度;在七度地区内,减小到约一度;在极震区内,除基岩上的烈度约低一度外,其它地基上的烈度无显著差异。局部孤立突出的地形,明显地使烈度增高;远离极震区的断层对震害无明显影响。

一、前 言

在进行烈度区划或鉴定某地烈度时,需要知道烈度的衰减规律;在选择建筑场地时,需要知道不同的局部地质条件对烈度的影响。为了寻找这两方面的规律,以适应我国生产建设发展的需要,由科研和生产部门共同组成了调查组,在当地人民群众的帮助下,对 1970 年通海地震进行了调查。共调查了全部位于八度和八度以上地区以及部分外围地区的 1390 个村庄的震害情况与村庄附近的地质条件,并对若干重点地区的村庄进行了浅层钻探和物探工作。技术人员和当地居民一起对各村内全部房屋逐栋逐间进行现场调查,了解震前状况和主震震害。根据调查结果,以大量房屋的震害统计分析为基础,确定了以震害指数作为烈度对比的指标;根据地质资料和震害指数,研究了通海地震的烈度分布规律以及场地条件对烈度的影响。这里提出一些初步结果。

二、地 震 概 况

1970年1月5日在我国云南省的通海、建水、峨山三县交界的山区发生了强烈地震。极震区大体沿曲江河谷延展;震中烈度达十度以上。根据仪器资料,震级 $M=7.7$,震中位置为 $24^{\circ}12'N, 102^{\circ}41'E$,震源深度 $h=13$ 公里,断层面走向 111° ,倾向 NE ,倾角 80° 。

地震发生时,沿老的曲江断裂或其附近产生了极为强烈的新断裂带,东起建水县的庙碑山附近,经过通海县的高大到峨山县的牛白甸。牛白甸以西,从展布于沿河地带近代冲积层中的间断出露的地裂缝来看,新断裂带有可能延伸至峨山县城,其总体走向约 $120^{\circ}-130^{\circ}$,长约60公里,见图1。沿新断裂带地表出露一系列平直光滑的新断面、地裂缝带及其它多种地表形变,显示新断裂以顺时针水平错动为主,其错距在高大附近最大,水平错距达2.2米,垂直错距近1米。另外,有些迹象表明,回龙断层东段牛白甸至金鸭上村,这次主震时可能也有活动。我们认为,这次强震是由曲江断裂的新活动引起的。

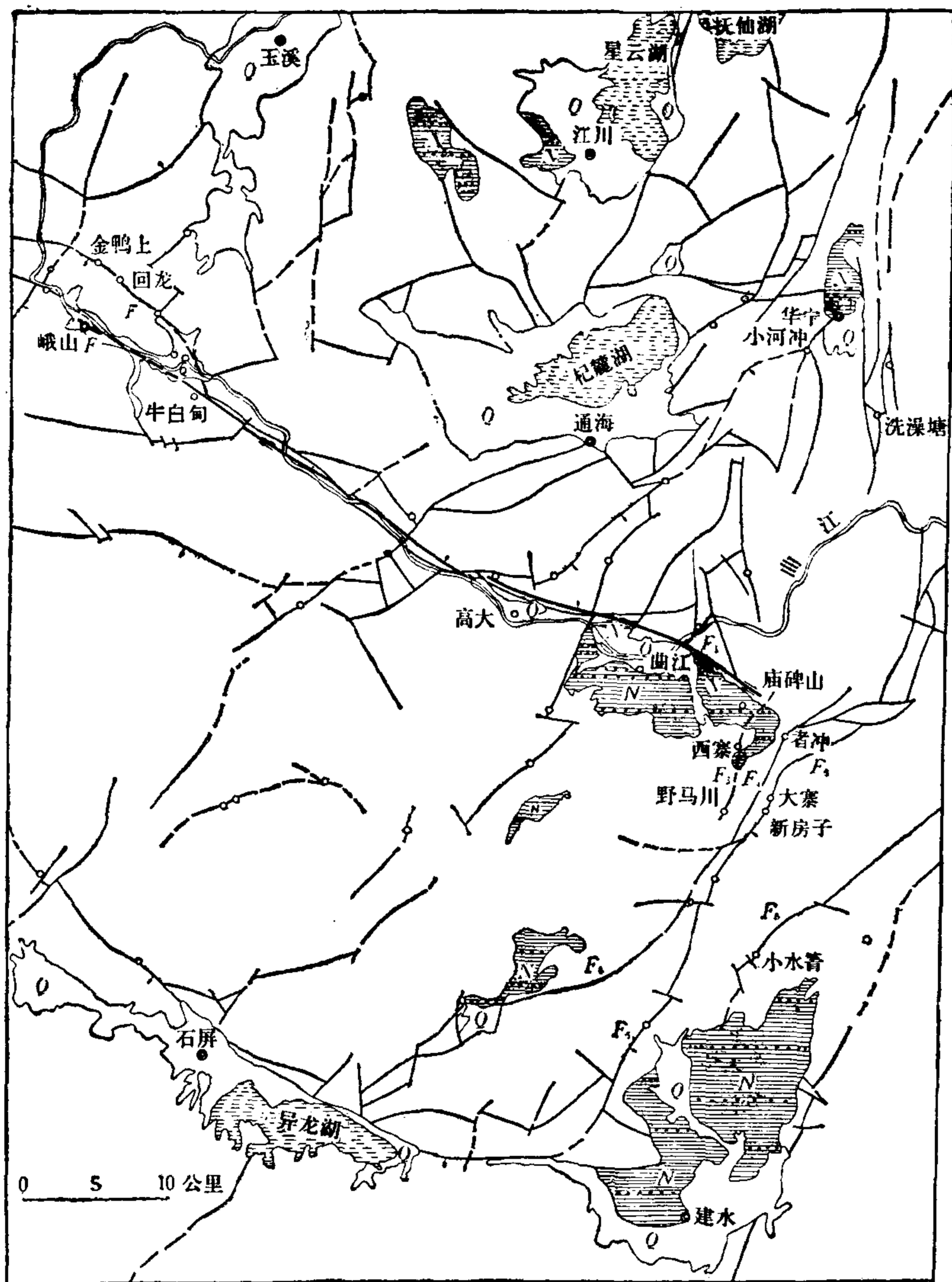


图 1 通海地震区主要断层

震区地形地质条件复杂，山区、河谷、盆地相间，地基土各处不一，断裂构造也很发育。由于各村场地条件变化很大，因而实际等震害线形状复杂(见图 9)。

三、衡量震害程度的震害指数

在应用现行烈度表评定一个村庄的烈度时，要保证精度在 1 度以内，是不容易的。这样的精度不能满足研究场地条件对烈度影响的要求。为此，我们提出了下述震害指数的方法。

对于以宏观地震现象评定烈度，我们有两点看法：(1)最有工程意义的烈度范围是六至十度，在此范围，房屋的破坏是最好的烈度宏观标志，因为从房屋震害程度(从轻微到全

毁)易于辨别不同的烈度;(2)烈度的评定要以大量事实的统计分析为根据,才能够比较准确。农村房屋在震区大量存在,并在构造上具有典型性,因而是统计分析的最好对象。所以在通海地震调查中,采用了以农村典型民房的破坏程度为根据的震害指数。作为对比六度以上地区各地点震害程度的方法。在分析中,只取典型房屋超过50间的村庄进行比较;对于房屋数量不足的村庄,则仅作参考。

通海地震区常见民房有四种,我们称之为瓦顶楼房(W_2)、土顶楼房(T_2)、瓦顶平房(W_1)和土顶平房(T_1),均为木构架承重、土墙围护的一或二层房屋,其平面以三开间为最常见,如图2。屋顶为两面坡或一面坡,瓦屋顶的坡度约为1/3,土屋顶的坡度约为1/10;土墙厚度约为50厘米,多嵌于柱间。木构架为中国古式的穿斗形式,即梁与柱的接头为榫接。

震害指数*i*表示房屋震害程度:*i*=0表示完好;*i*=1表示全部倒毁;部分损坏时 $0 < i < 1$ (见表1)。一个自然村的震害指数是同类房屋的震害指数按间数的加权平均值:

$$\bar{i}_j = \sum_k i_{jK} n_K / N_j$$

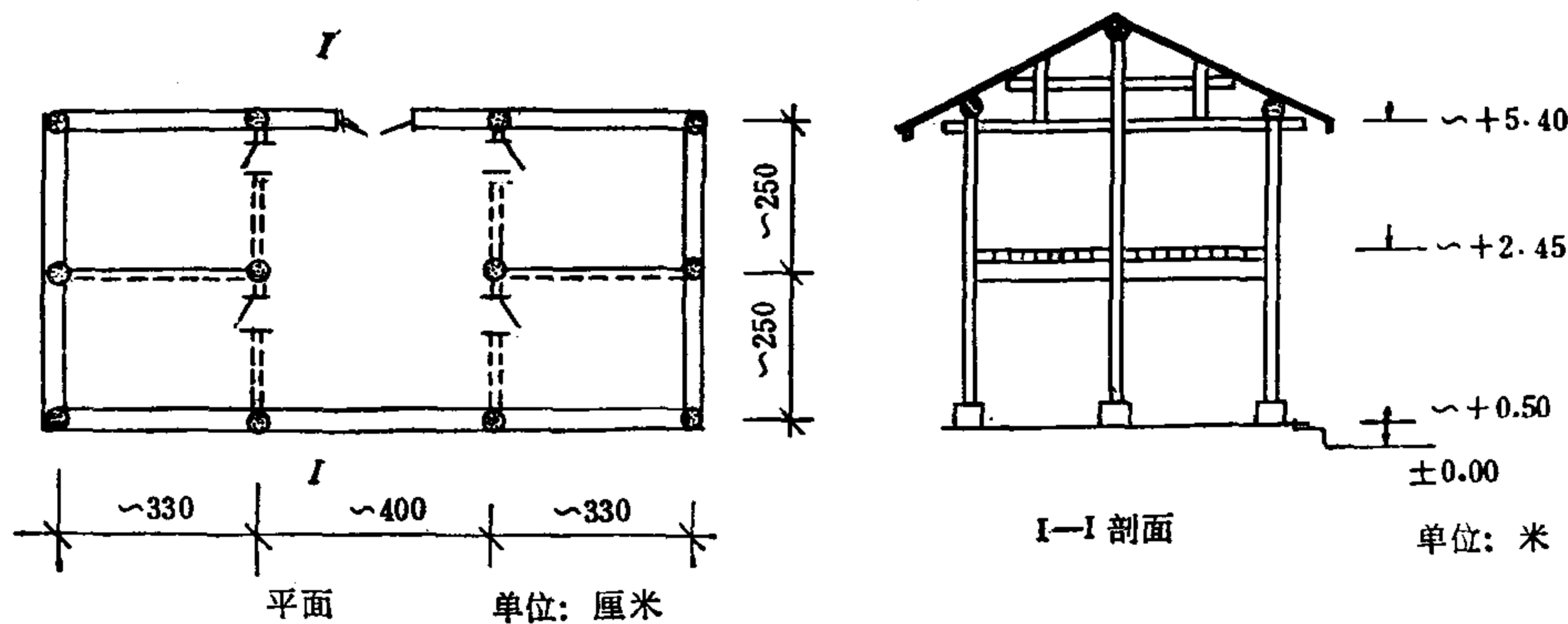


图2 W_2 型民用构造示意图

式中角标*j*代表房屋类型, n_K 为与震害指数 i_{jK} 相应的房屋间数, $N_j = \sum_K n_K$ 为一个自然村内*j*型房屋的总间数。

表1

震害类别		震害描述	<i>i</i>	
I	倒平	房屋全部倒塌	1.0	
II	墙倒架歪	墙体全部倒塌,房架倾斜显著	0.8	
III	墙倒架正	墙体大部倒塌,房架基本未倾斜	0.6	
IV	局部墙倒	主要墙体局部倒塌	0.4	
V	裂	严重裂缝	0.27	0.2
	缝	轻微裂缝	0.13	
VI	完好	基本无损或完好	0	

当一个自然村内有两种房屋均达 50 间以上时，就可以对比它们之间抗震性能的差别，求得它们的震害指数的换算关系。作为一个例子，图 3 给出了 W_2 与 T_1 两种房屋震害指数的对比关系。图中每一个点表示一个自然村中这两种房屋的震害指数，所有这些点的平均曲线即为这两种房屋震害指数的换算关系。图 3 的附图中，又给出了其它两种房屋与 W_2 型房屋的这种关系。这些曲线反映这四种房屋抗震性能的差别，这种差别是随烈度而不同的，在高烈度区差别最大。

一个自然村的震害指数的计算步骤如下：首先由调查者在现场按房屋逐间评定其震害程度，从表 1 中确定其相应的震害指数 i 。然后对每个自然村按上式分别统计上述四种房屋的平均震害指数 \bar{i}_j ，各种房屋的 \bar{i}_j 均按图 3 中曲线换算为 W_2 型房屋的震害指数 $(\bar{i}_j)_w$ 。最后按各种房屋间数计算震害指数的加权平均值，则得该自然村的震害指数，即

$$(i)_w = \sum (\bar{i}_j)_w \cdot N_j / \sum N_j$$

为了检验震害指数的稳定性，曾由不同调查者在两年后对一些自然村进行了重复的调查，结果发现，震害指数的误差一般在 0.05（相当于烈度 1/4 度）以内，只有在低烈度区 ($i < 0.2$) 内，才偶然有超过 0.1 的。

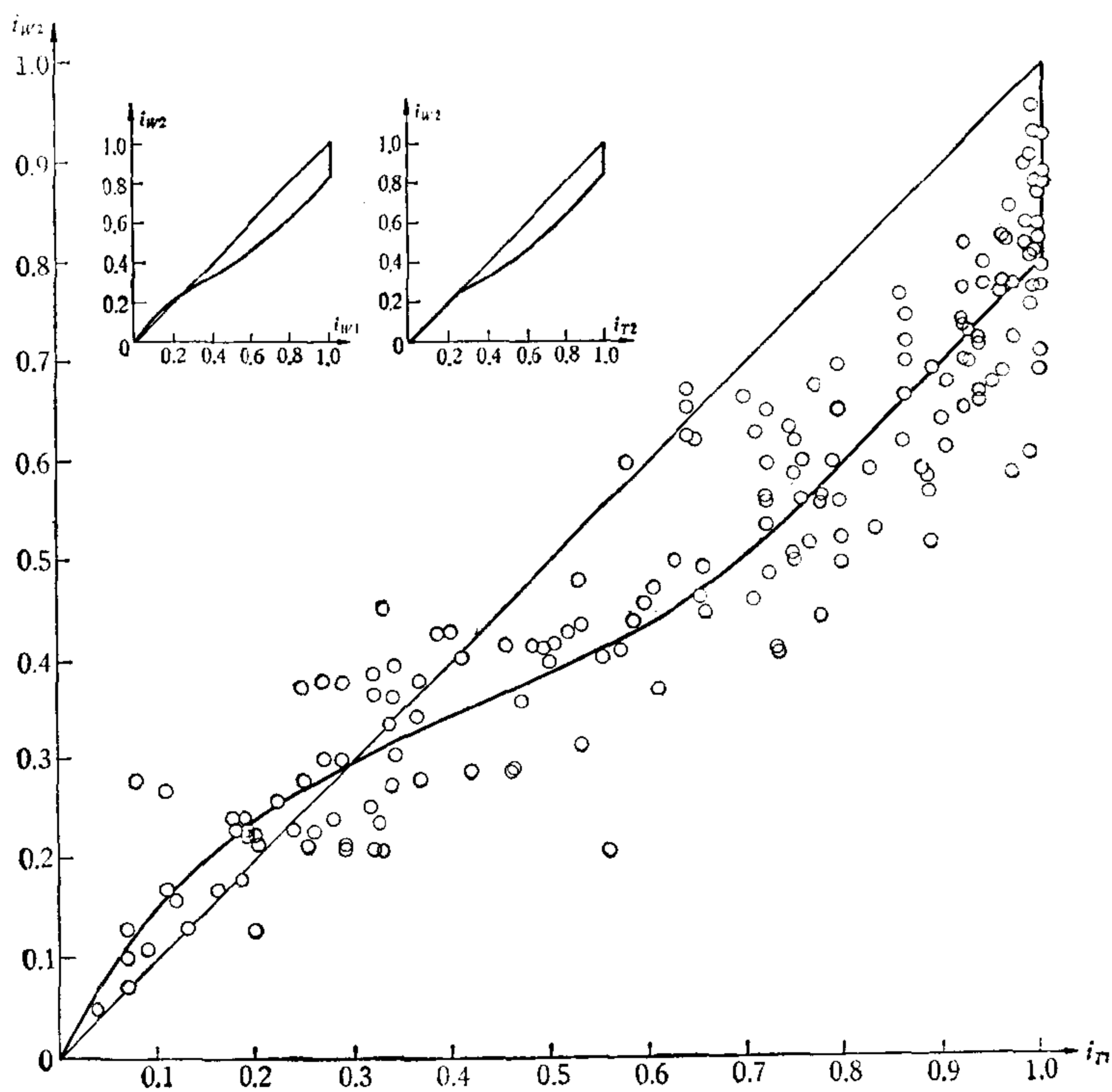


图 3 各类房屋震害指数换算关系

不言而喻，震害指数与烈度表所规定的烈度应该存在着对应关系。我们通过两个不同的途径来寻求这一关系。一是直接从烈度表中对房屋震害的描述寻找相应的震害指数，其方法是：从抗震强度来看， W_2 型房屋属于烈度表中 II 与 III 类之间的房屋；对烈度表中描述的各种震害程度按表 1 给以适当的震害指数值；对烈度表中关于受害房屋的数量描述

给以适当的百分数；最后按烈度表的规定计算出不同烈度所对应的震害指数。二是按通海地震等震线图计算各烈度区内震害指数的平均值。综合这两种结果，我们取得了表2中的对应关系。

表 2

烈 度	7	8	9	10	>10
震 害 指 数	0.1—0.3	0.3—0.5	0.5—0.7	0.7—0.9	>0.9

四、各类地基上的烈度分布

1. 同类地基等震害线图

和其它强震时一样，在这次地震中，自然村的地质条件对震害的影响是明显的。为此，我们根据不同地基上的震害表现，把它们粗略地分为表3中的四种类别，然后按同一

表 3

地 基 类 别	宏 观 描 述
I、基 岩	基岩上覆坡残积物不超过 2 米
II、硬 土	基岩上覆坡残积物厚 2—10 米；大块碎石类土
III、一般土	较厚的新第三系胶结不良的粘土岩和砂砾岩，不包括在其它类别中的第四系土层
IV、松软土	饱和松散的粉细砂，软粘土，淤泥，松散的人工填土

类地基土上的村庄(断层通过的或位于孤立突出的小山包、小山梁上的村庄除外)绘制以该类地基为背景的等震害线，亦称为“同类地基等震害线”¹⁾。作为例子，图4和图5分别绘出I类和II+III类地基(II+III指II类加III类)等震害线图。因为居民点大多建在II+III类地基上，故图5大体上接近于不区分地基的实际等震害线。图6是基岩等震害线图中各区内位于基岩上的自然村的实际震害指数分布情况。可以看出，在相邻两条等震害线之间，各村庄震害指数的平均值与这两条等震害线数值的平均值基本相同，但离散较大。

2. 烈度衰减规律

通过同类地基等震害线图，可以研究不同地质背景的烈度衰减规律。从图4或图5可见，长短轴两个方向的衰减规律有所不同。因此，图7中绘出了不同地基上沿这两个方

1) 在绘制同类地基等震害线图时，除了撇开断层通过的或位于孤立突出地形上的村庄外，震害表现偏离绝大多数村庄的总趋势较远的村庄(在各类地基总数中仅占4—8%)和房屋不足50间的村庄未予考虑，并把余下的村庄(称为标准点)分别按各类地基标在图上。在考虑标准点震害指数实际分布的基础上，要求等震害线内密外疏，同时要求两条等震害线之间标准点震害指数的平均值接近于这两条线指数的平均值，这样作出同类地基等震害线图。为了适应这些要求，有时忽视了一部分标准点对等震害线的控制作用。在作图过程中，对于标准点震害指数呈犬牙交错分布的情况，我们就求出其平均值，并置于标准点村子位置中心处，来估计附近等震害线的位置。这些同类地基等震害线的形状，与不区分地基的实际等震害线相比，要简单得多。其主要的原因之一是在作图方法上，从前述目的出发，基于震害分布的平均趋势和衰减规律，对等震害线作了圆滑化处理。

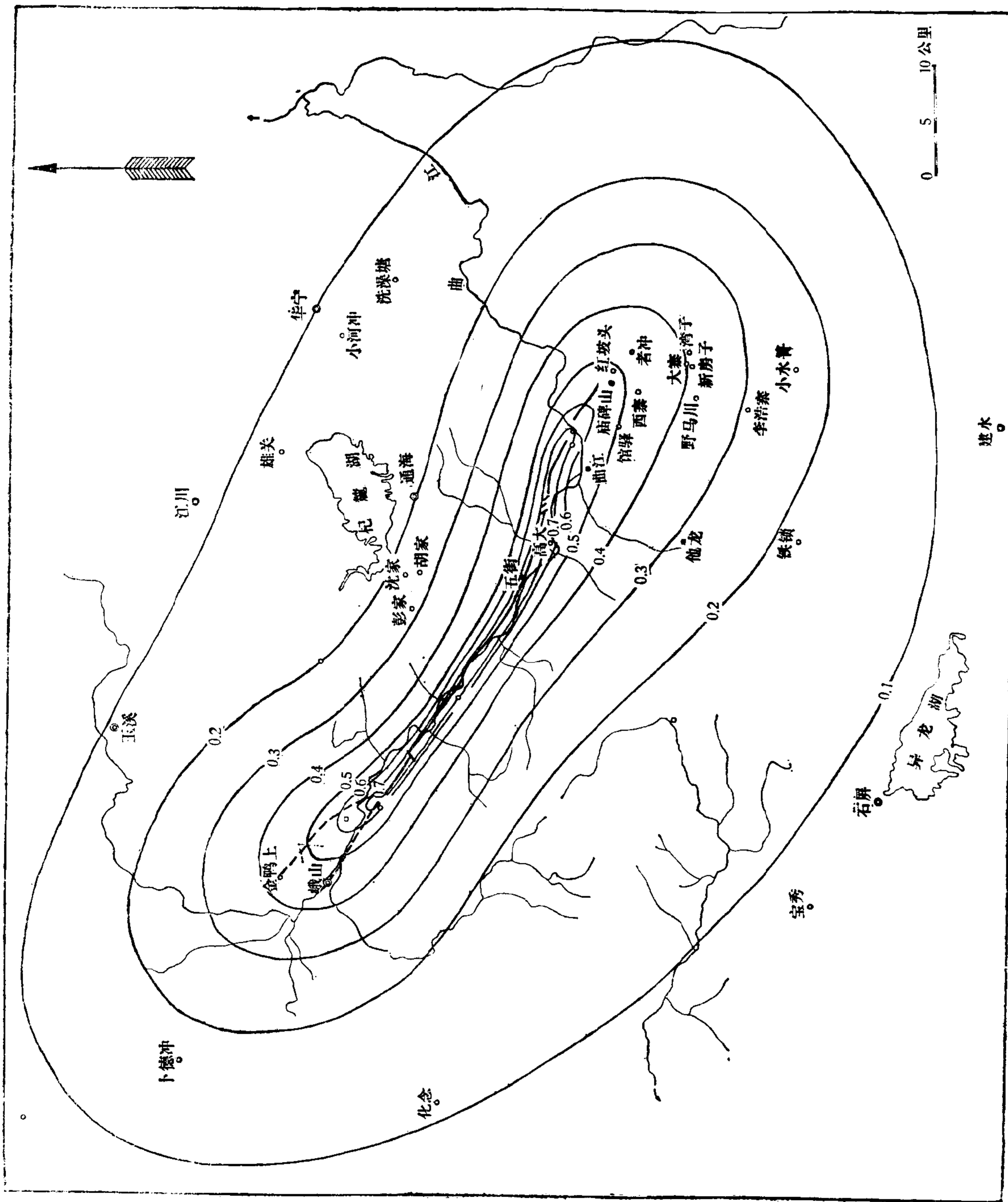


图 4 I 类地基等震害线图

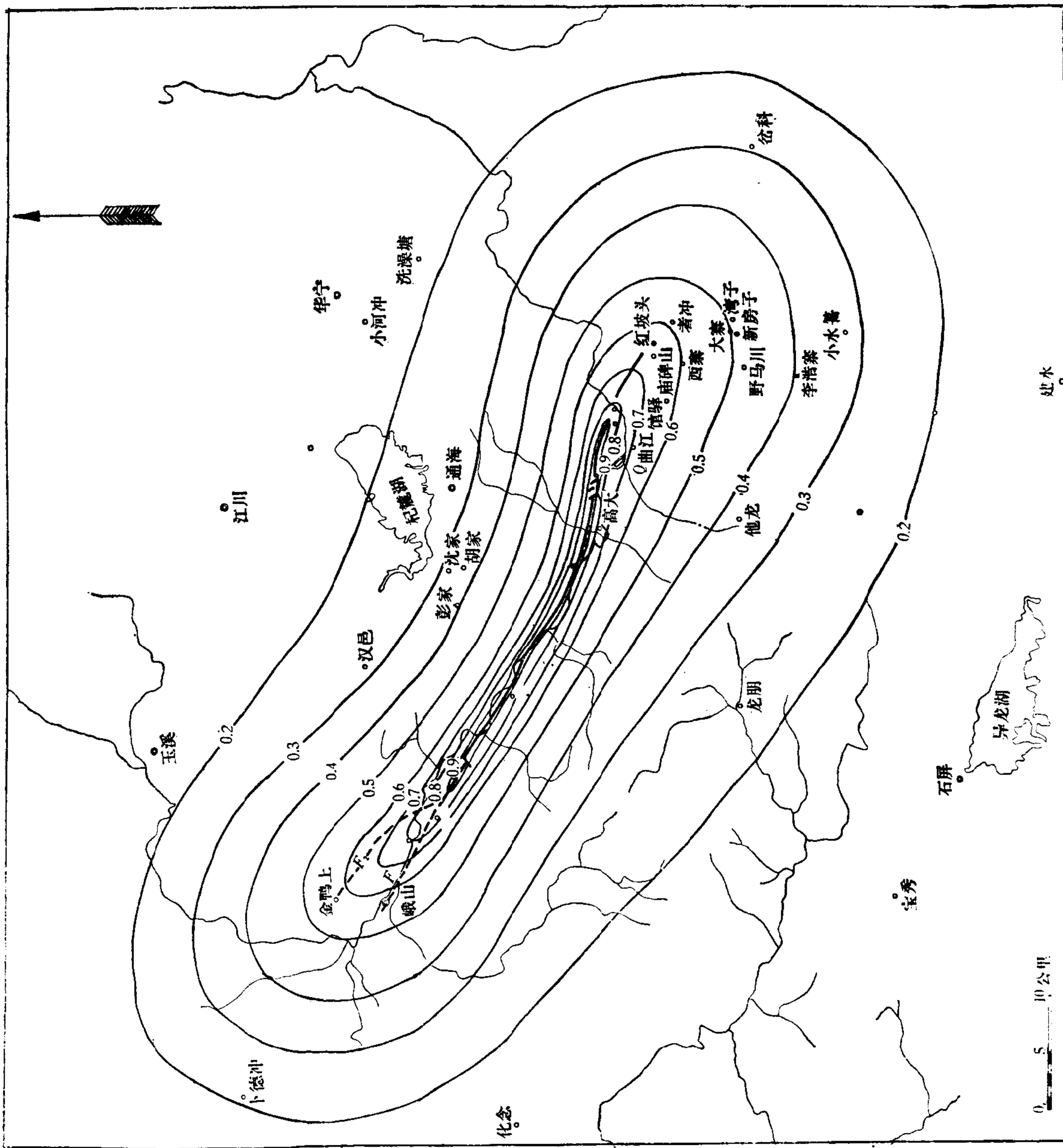


图 6 II + III 类地基等震曲线图

向的烈度衰减平均曲线。短轴方向指垂直发震断层的方向，长轴方向指顺着发震断层的方向。

不少人曾以地震动最大加速度为指标研究过烈度的衰减规律。我们按烈度每减一度加速度减小一半的习惯方法，把通海地震的烈度衰减转换为加速度衰减，并和许多作者的结果作比较(图8)。结果表明，通海地震的烈度衰减在短轴方向是格外迅速的。对于象

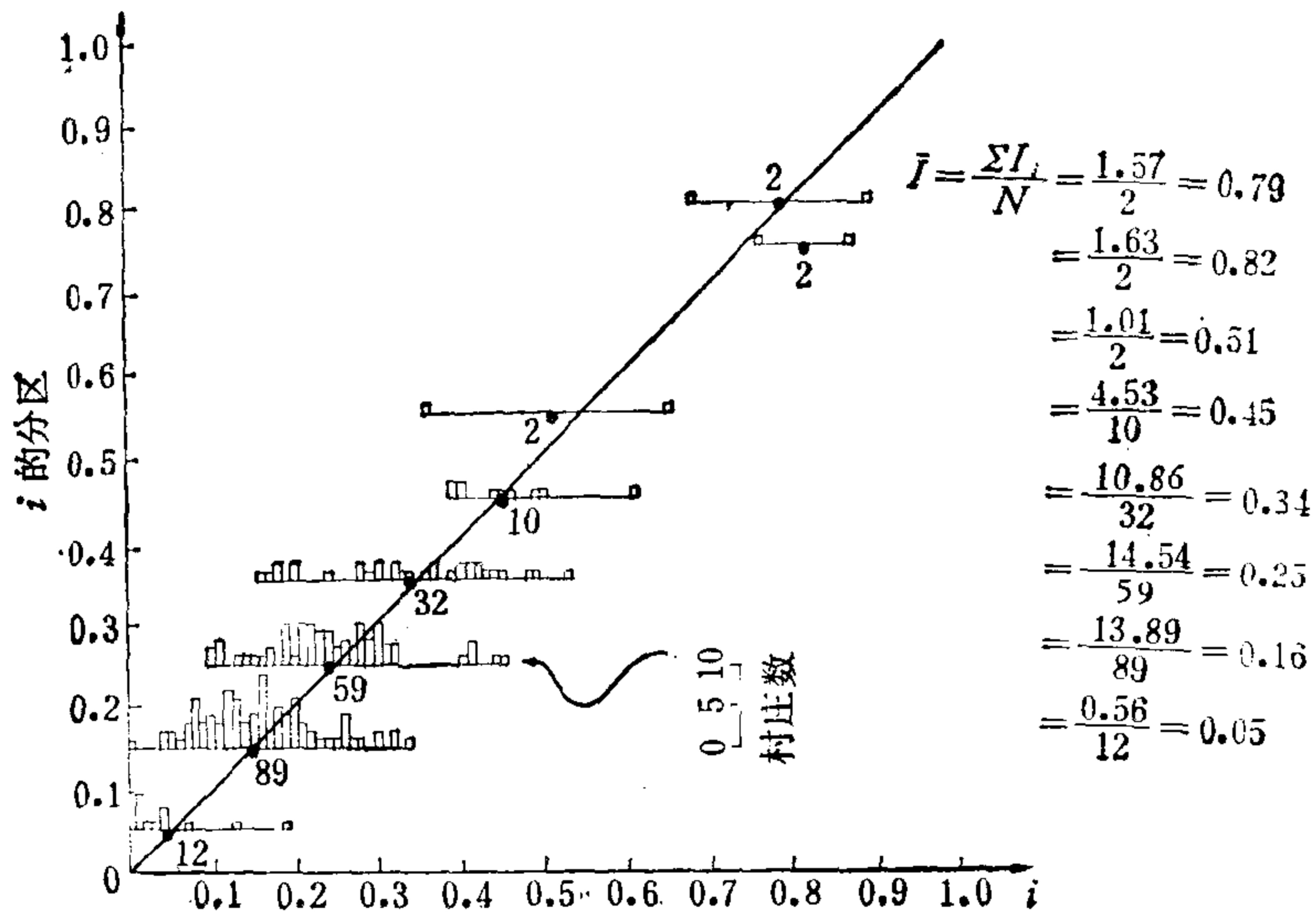
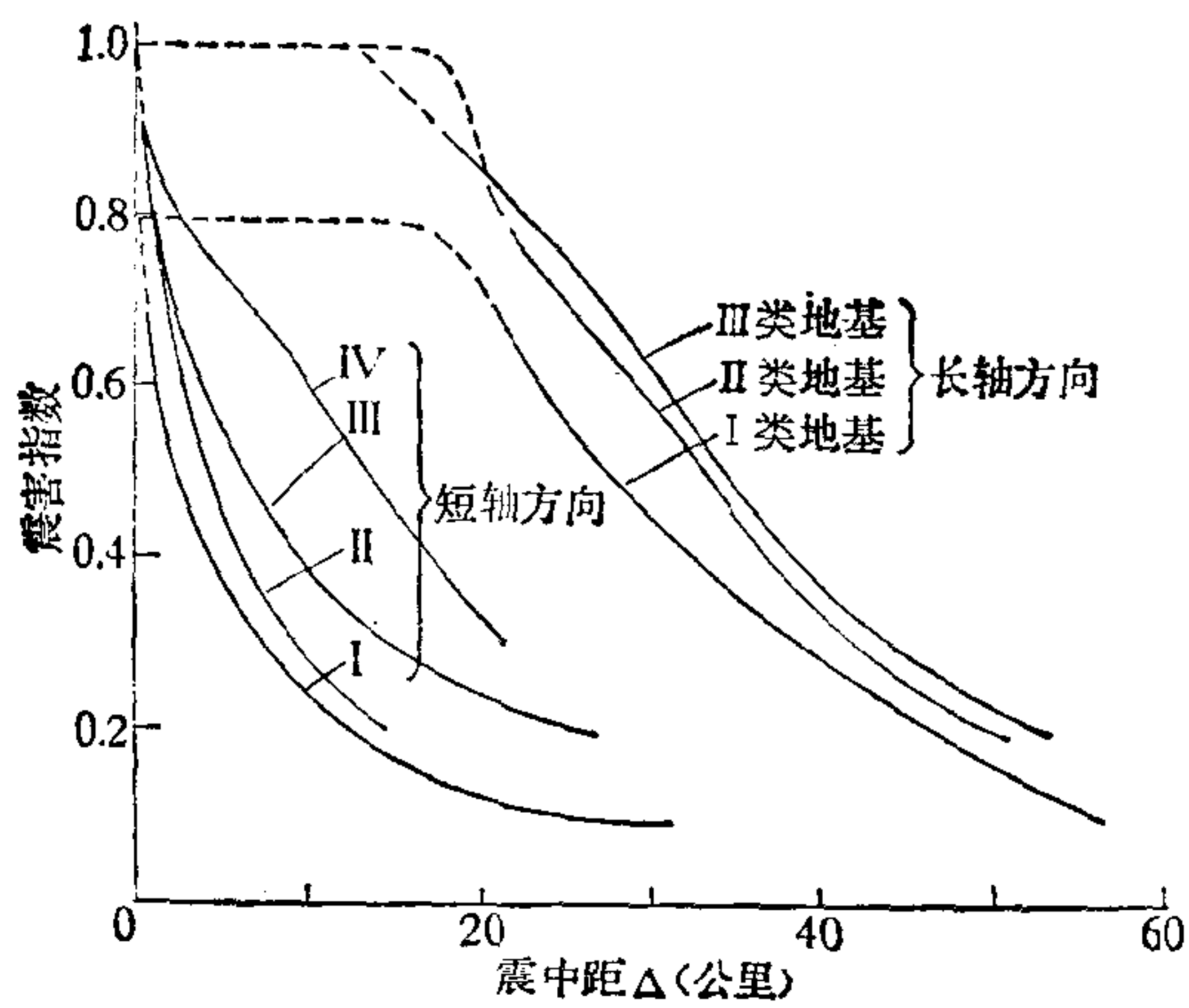


图6 I类地基实际震害分布



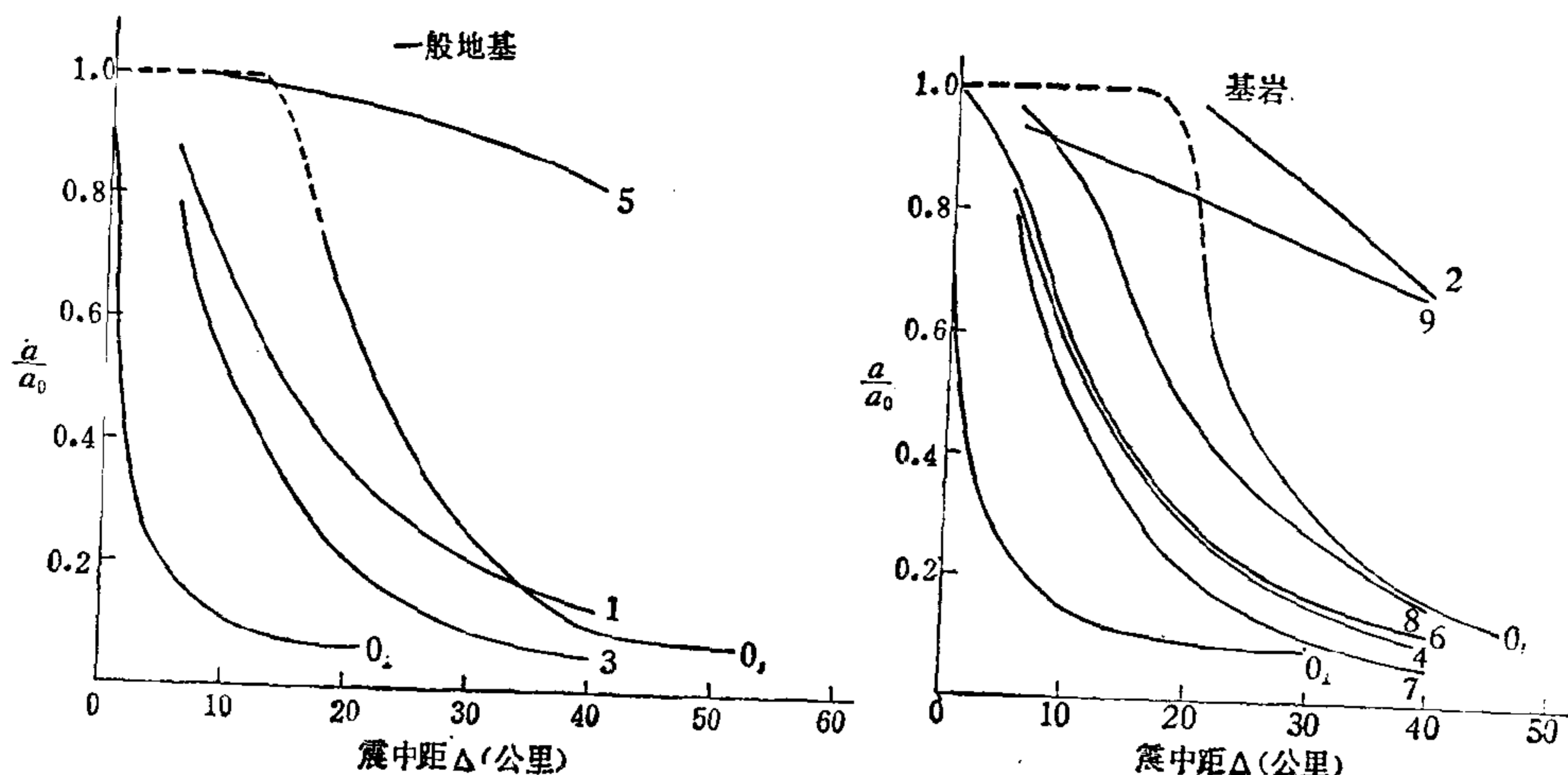
Δ 在短轴方向为断层距

图7 通海地震的烈度衰减曲线

通海地震这样的震级大、震源浅、新断裂长且以水平错动为主的地震，这种烈度衰减规律有一定的代表意义。

3. 主震释能区的空间分布

我们得到的同类地基等震害线图是狭长条形的，两端向北东微弯，以新断裂为内核，



- a : 加速度 a_0 : 震中加速度
 o : 本文 o_{\perp} : 短轴方向 (Δ 为断层距) o_{\parallel} : 长轴方向
 1: 河角广
 2: Gutenberg and Richter-Benioff ($M=8$)
 3: Esteva and Rosenblueth
 4: Esteva-Rosenblueth-Seed
 5: Housner ($M=8$)
 6: 金井清
 7: Blume
 8: Gutenberg-Richter
 9: 岡本舜山等 ($M=8$)

图 8 各种烈度衰减曲线的比较

一圈圈地向外扩展。从断层两侧来看，等震害线的分布大体上是对称的。等震害线在中部狭窄，而两端较宽，尤以东南端为甚。这些特点看来主要是由地震能量释放的空间分布所决定的。

首先，同类地基等震害线图的总体形状与新断裂的走向一致。新断裂中段走向约为 130° ，等震害线与之平行；新断裂的高大至曲溪段走向为 105° 左右，等震害线也作相应的弯转，并保持与之平行。

其次，在断裂的西北端，等震害线的主轴向东北弯转。在与曲江断裂相连的回龙断层 F_2 上，发现在基岩中有两处地裂缝；在这条断层所通过的村庄里，震害普遍加重。这些迹象表明，回龙断层在此次地震中可能有所活动。这样，等震害线的弯转，便是可以理解的了。

在东南端老断层 F_4 在者冲村附近的破碎带中有新地裂缝；在野马川老断层 F_3 上也出现新的地裂缝； F_3 与 F_5 一带又是余震集中的一个地区，一次震级 $M=5$ 的余震使 F_5 附近的弯子村受到比附近村庄更重的震害。另外，从位于 F_3, F_4, F_5 以及东边的 F_6 断层上的野马川、者冲、大寨、新房子、大小水箐等村庄的震害来看，它们和各自附近村庄的震害相比，都比较高。震害指数差值以野马川为最高，达 $\Delta i=0.43$ ，向东逐步降低为 $\Delta i=0.28, 0.16$ 和 0.11 。根据这些迹象， F_3 与 F_4 这两组老断层在这次主震时可能也有所活动，这可能是这一带等震线向南加宽的原因。

总之，根据上述等震害线的总体形状，我们初步认为这次地震的能量主要是在从新断

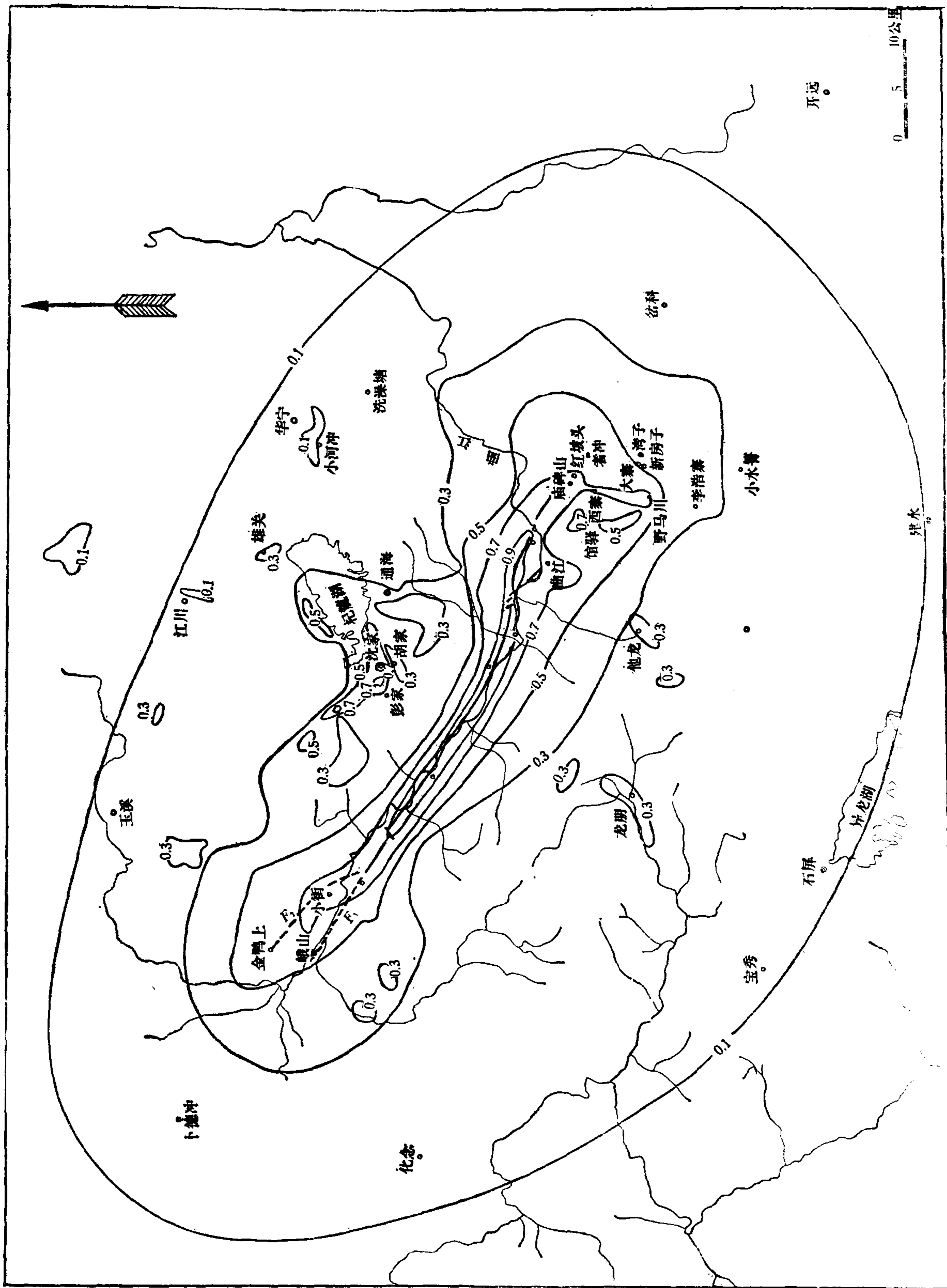


图9 实际等高线图

裂几乎竖直向下的一个近地表的狭长区域内释放出来的。

文献上有些地震的烈度分布看来规律性远不如通海地震明确。究其原因,可能有两方面:首先,通海地震的能量释放可能比较集中于一个较浅的狭长区内;其次,本文考虑了场地条件和建筑物结构类型对烈度的影响。

五、场地条件对烈度的影响

1. 地 基 土

图9中的等震害线是按照全部1390个自然村的震害指数绘制的,没有区分自然村的地质背景。由于调查的村庄为数较多,故能绘出图中那样复杂形状的等震害线。由图可见,有一些地区实际震害分布与烈度衰减的总趋势明显不符。我们称这样的地区为“烈度异常区”。它们大都是由于局部地质条件的差异而引起的。

由于地基的差异造成的异常区,有通海杞麓湖畔、曲江的他龙等烈度偏高的异常区,石屏与峨山交界处的波罗山区、通海西部的老尖山与木成山区等烈度偏低的异常区。高异常区地基较差,例如杞麓湖畔,除少数近山麓的村庄外,地下水位一般在1—2米以内,地下几十米内大多为较密实的细砂和软塑状态的淤泥质粘性土的互层,所以震害偏高,形成大片高异常区。特别是有些村庄,由于地表以下几米内就有属于IV类地基的软淤泥层,震害就更重,形成更高的异常区(图9)。与此相反,上述低异常区则是由于I类地基造成的。

地基土的影响还可以从大量数据的平均趋势来分析。考虑到通海的等震害线图呈狭长条形,我们采用了图10的方式来研究不同烈度区内地基土对震害的影响。图中的横座标 D_i 表示村庄在同类地基等震害线图上的位置,用震害指数表示;当村庄处于两条等震害线之间时,可用内插法决定 D_i 的数值。纵座标为各村的实际震害指数。把各类地基的村庄的资料分别标入上述坐标系中,并分别地基绘出平均趋势,即得图中的几条曲线。

图中的曲线是根据I类地基等震害线决定的 D_i 绘出的。假若用其它地基上的等震害线,如II+III类来决定 D_i ,也可以得到另一组曲线。但是,由于各类地基上的等震害线图的形状差别不大,因而可用下述简单方法,从图中直接得到这样的结果。在图10中先给出另一条横座标 D_i 线来表示II+III类地基等震害线的震害指数,其座标的数值由下述条件确定:使图10中II+III类地基的平均曲线(图中的虚线)上的任一点具有相同的纵横座标值。结果如图所示。

由图10可见,各类地基上震害的差异是明显的,而且它们的差值又随烈度区而异。图10中的结果又表示于表4中。

值得注意的是IV类地基在高烈度区内的表现。和其他强震时一样,在高烈度区内,特别是在高达十度的地区内,IV类地基上常见砂土液化、不均匀沉陷、滑坡等地基失效现象,这些现象无疑地会加剧上部结构的震害。但由表4可知,在极震区内,IV类地基与其他地基上震害的差别反而不如在中等烈度区内明显。这说明地基土对烈度的影响是复杂的,可能有非线性的影响,还需要从地震动强度和地基与房屋振动特性等方面进行深入的研究。

另外,从地下一、二十米内来看,这种松软土层愈厚或愈近地表,则震害愈重。通海杞

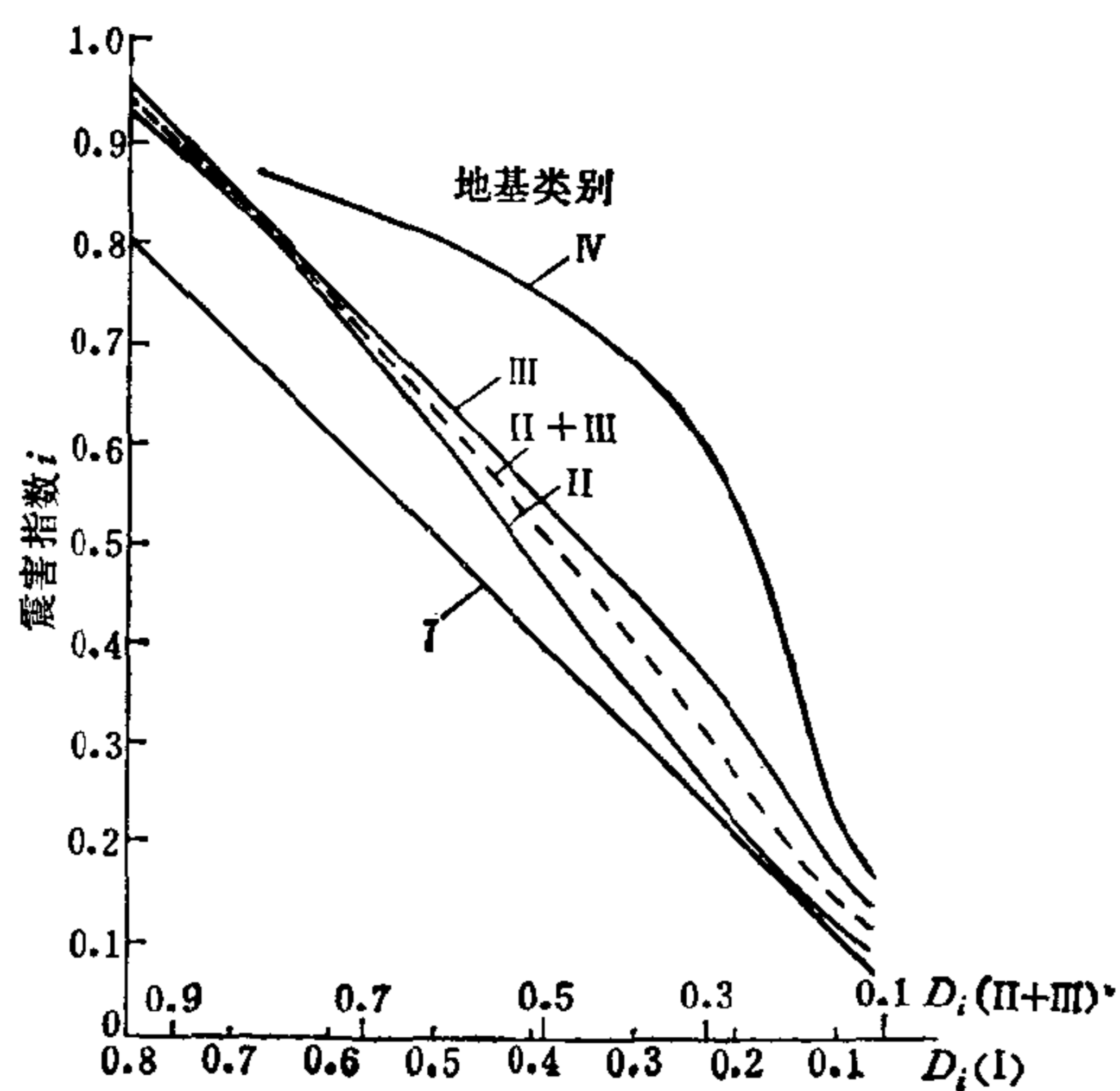


图 10 震害与地基类别的关系

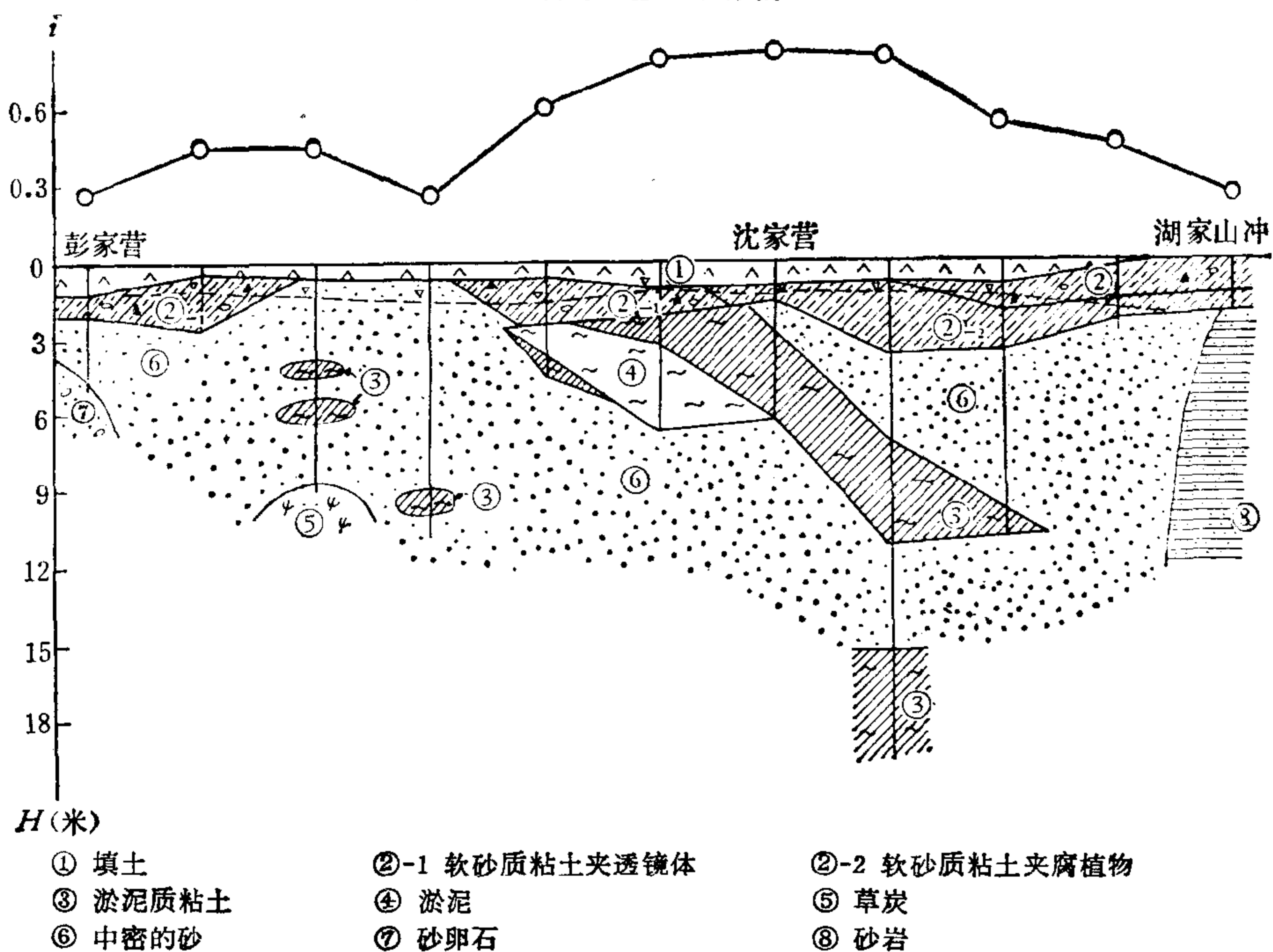


图 11 通海杞麓湖畔震害与地基的关系

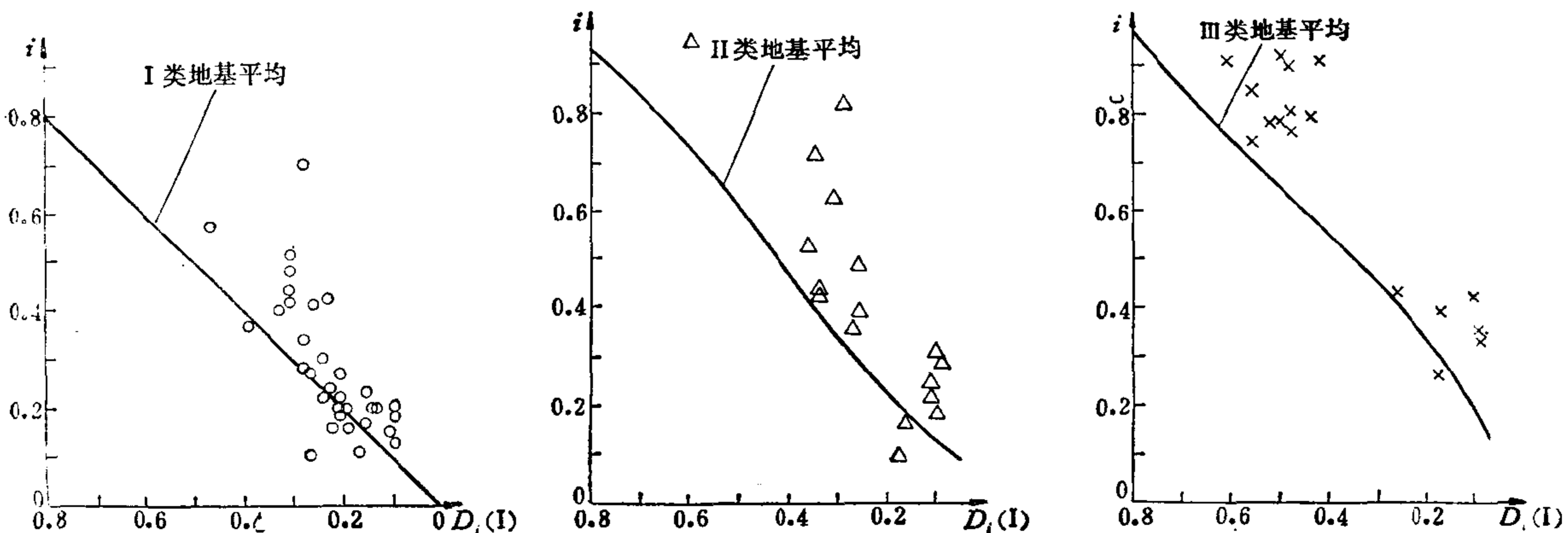


图 12 局部孤突地形对震害的影响

表 4

D_i (II+III)	相应烈度	各类地基与 I 类地基的震害指数差		
		II 类	III 类	IV 类
0.2	七	0.02	0.09	0.23
0.4	八	0.05	0.14	0.37
0.6	九	0.09	0.14	0.31
0.8	十	0.14	0.15	0.20

麓湖畔一个剖面上的震害变化 (图 11) 表明了这一点。

2. 局部地形

通海地震发生于山区, 有不少村庄位于局部孤立突出的地形上, 即在孤立的小山包或山梁 (高度一般在 100 米以下) 顶部。它们的震害和在平地上同类地基上的村庄相比, 一般均较重, 见图 12。根据 67 个村庄的统计, 震害指数差 Δi 多在 0.07—0.25 范围内。这些孤立突出的山包和山梁, 有些由新第三系岩层构成, 有些由基岩构成, 前者对震害加剧的影响较显著, 后者在高度不超过 30 米时影响一般不明显。

3. 非发震断层

工程实践中常常需要考虑断层的影响。以前一般认为断层对抗震是很不利的, 应当避开它。但是在山区建设中, 断层有时是难以避开的。发震断层的影响已如前述。这里对非发震断层的影响作一分析。

我们所调查的村庄中有三十多个正好位于非发震断层上, 将它们的震害与同类地基的震害平均曲线相比, 可分别得出震害指数的差值, 见图 13。由于确定地基类别时根据的是基岩或破碎带上的表土覆盖, 因此, 这里的分析结果中包含了基岩破碎的影响。

分析结果表明: 在离极震区较远的地区, 断层上震害无加重的趋势, 即使是在几条断层交会处也是如此, 如华宁的小河冲与洗澡塘; 在离极震区较近的地区, 那些与发震断层

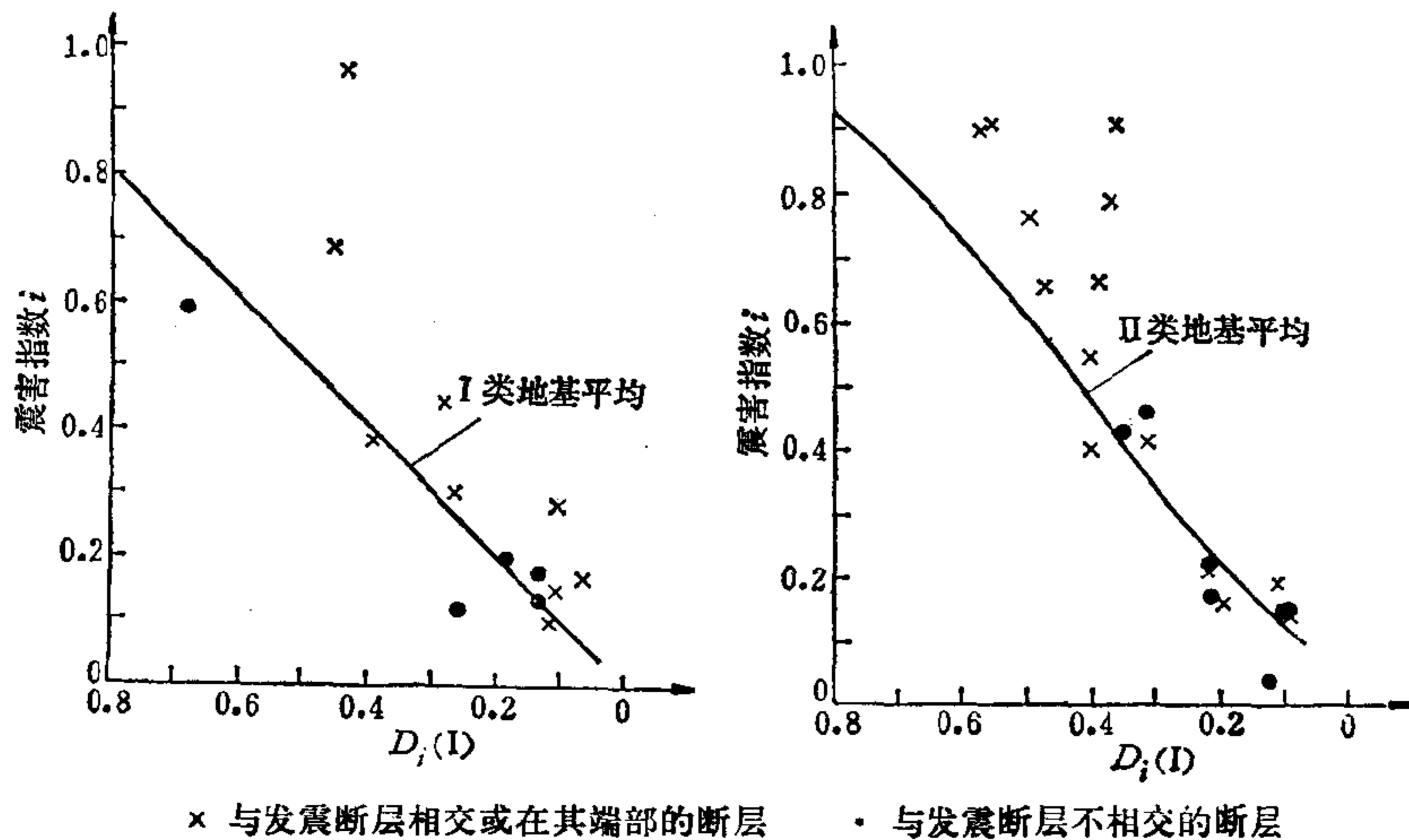


图 13 断层对震害的影响

相交或在其端部附近的规模较大的或破碎严重的非发震断层,使震害有不同程度的加重,发震断层东南端的几条断层表现得更为明显。

六、结 论

以典型房屋的震害指数为指标,根据大量数据的统计来评定一个自然村的震害程度是一个可行的方法,当房屋数量较多且其构造具有典型性时,即可采用。这个方法可以较详细地对比各个地点的震害差异,也可以与烈度表建立对应关系。

同类地基等震害线使烈度分布和衰减规律有一个明确的场地背景。应用这种等震害线确定的基本烈度才便于实用,因为这样才有一个明确的场地背景作为基础来考虑不同场地条件的影响。文中给出的烈度衰减规律对于地质条件与发震条件相似的地震有一定的参考意义。

通海地震烈度分布的复杂情况说明,在大地震的山区进行建设,场地选择是十分重要的。因为局部的地质条件对烈度的影响是很大的。其中地基土壤条件对烈度的影响随烈度高低有所不同,但基岩地基震害一般较轻,Ⅳ类地基一般较重;局部孤立突出的地形使震害加重;远离极震区的断层或虽在震中附近,但与发震断层不相交的断层,对震害无明显影响;在离新断裂较近处,与发震断层相交或在其端部附近的规模较大的或破碎严重的断层,使震害加重。这些结果可供烈度鉴定和场地选择时参考使用。

最后,我们认为,烈度只是用地震后果来表示地震动强度总趋势的指标,而上述关于局部地质条件对烈度影响的结果,是从通海地震区这种房屋得来的,对于性能迥异的其它结构,结果可能有所不同。在抗震设计中,应当针对地震动的特征、地基和结构物的动力特性作具体分析,不能仅凭烈度的差异判定地震对结构的破坏作用的大小。

通海地震区穿斗木构架房屋调查报告

高云学 刘锡苍

提 要

本文扼要地总结了通海地震中穿斗木构架房屋的主要破坏现象和抗震经验。

1970年云南通海地震发生后，我们遵照伟大领袖毛主席“要认真总结经验”的教导，对该地城乡民用建筑进行了调查。该地建筑物以两层居多，大多为穿斗木构架。这类房屋以木构架承重、土墙围护，其典型平、立面和构架，如图1,2所示。现将主要破坏现象和抗震经验总结如下。

一、破坏现象

穿斗木构架房屋的破坏，从构架和墙两部分来看，后者比前者要重得多。

1. 构 架

穿斗木构架房屋的木构架，其典型如图1和2所示。由图可见，正间系四椽三间，每椽三根立柱。耳房为单坡水，大多数系三椽两间，有带廊柱和不带廊柱的两种。正间与耳房之间为楼梯。柱顶搁檩，檩上钉椽，盖以筒板瓦。柱下垫柱脚石，柱脚石一般高20—30厘米。

木构架的破坏现象，轻的为构架歪斜，柱脚错位或榫接松动；较重的则构架严重倾斜（图3）或部分梁柱折损；严重的，则部分或全部倒塌。

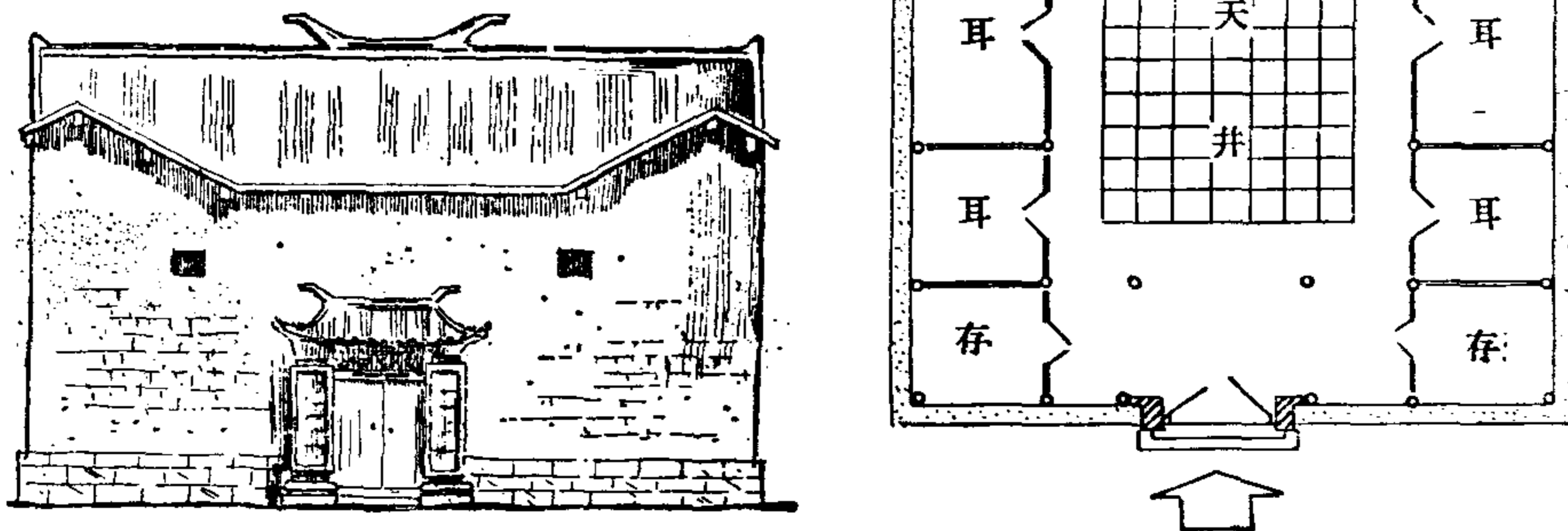


图1 典型穿斗木构架房屋的平、立面图

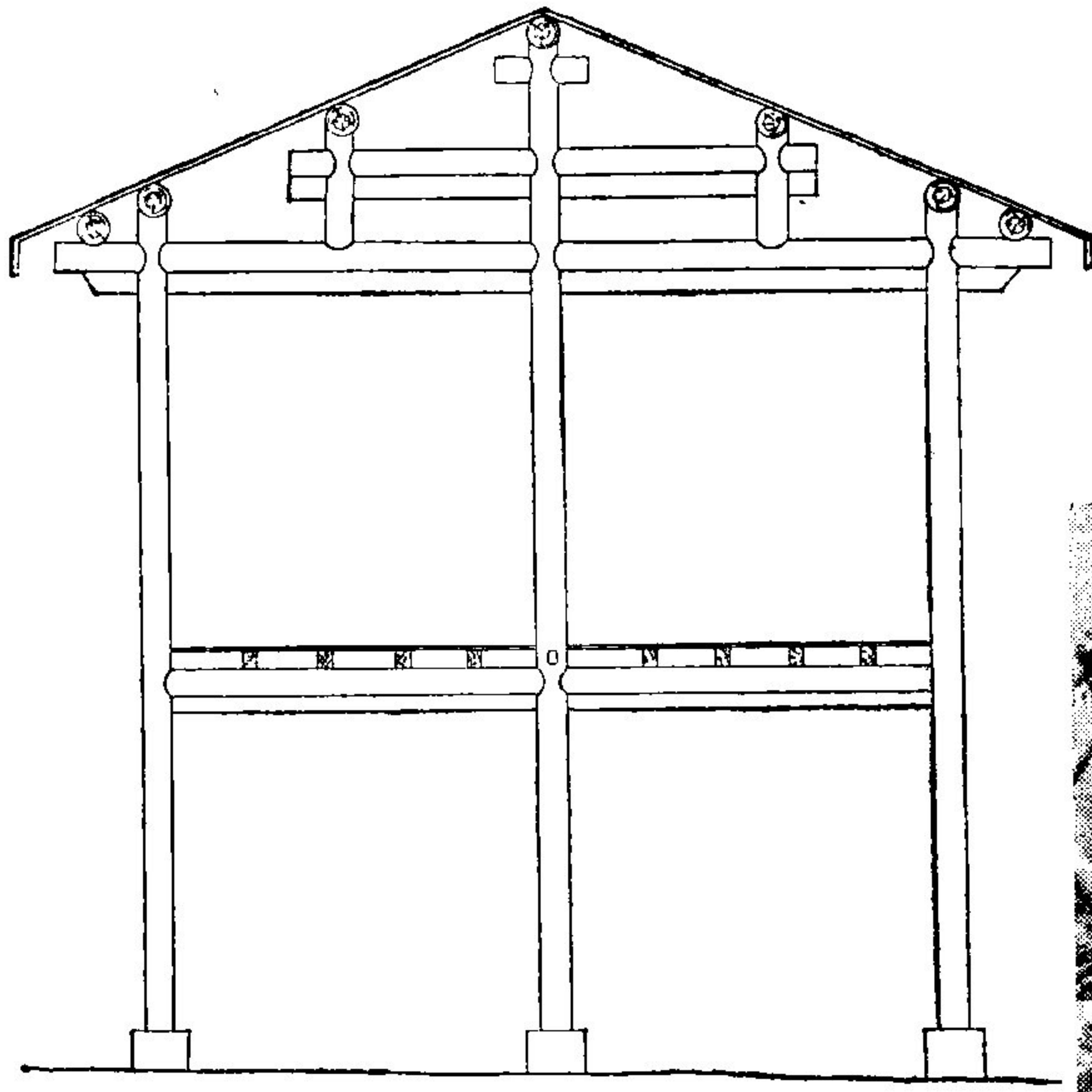


图 2 穿斗木构架房屋的构架图



图 3 穿斗木构架房屋围护墙倒塌, 构架严重倾斜

木构架的破坏现象有以下两个特点:

(1) 立柱在楼层处是抗震的一个薄弱环节。图 4 上的四楹屋架的 12 根木柱, 在楼层处折断 7 根。更有严重的, 如图 5 所示, 楼层以上全部倒塌, 但底层仍完好。这种现象, 除

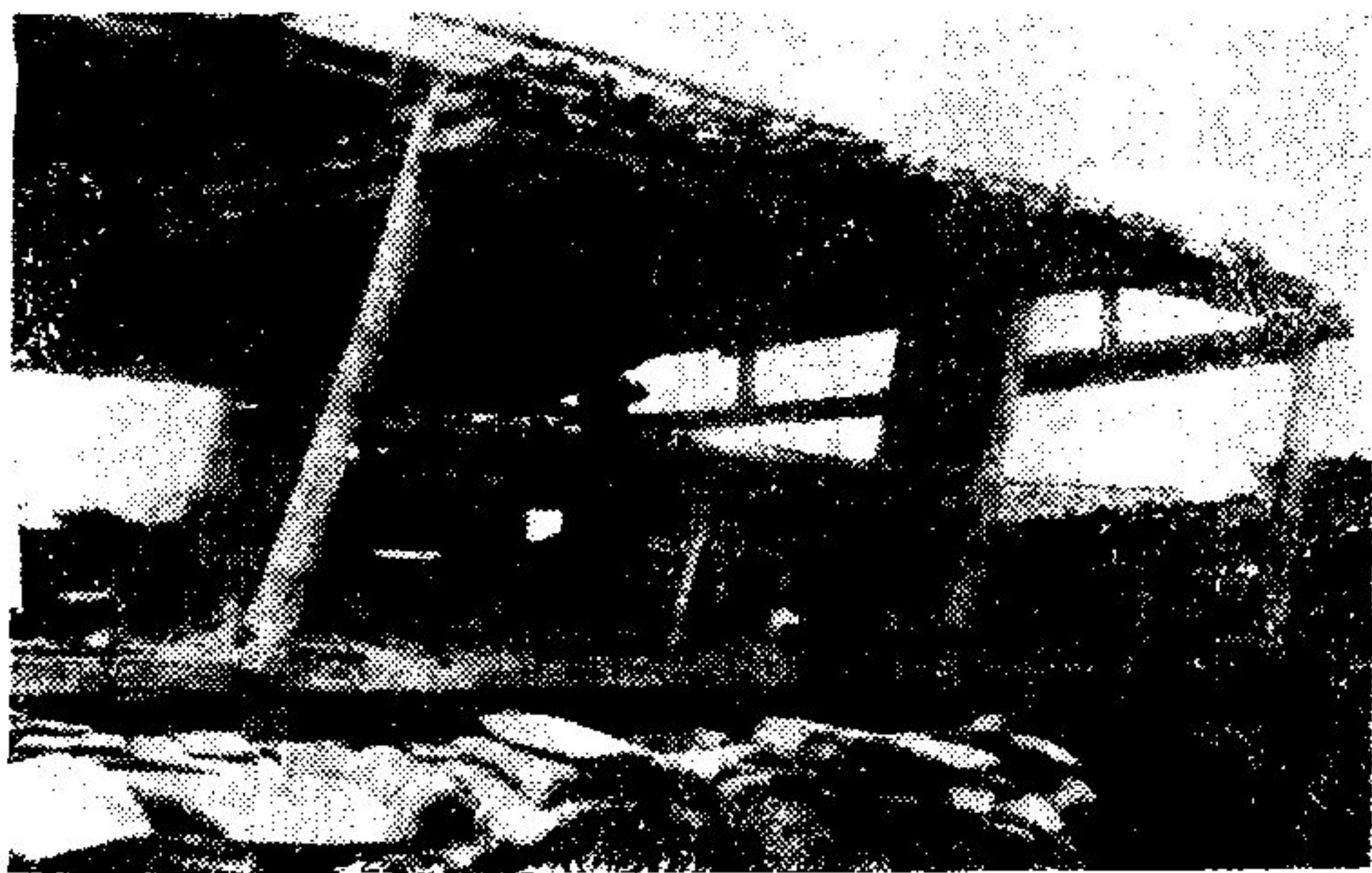


图 4 穿斗木构架的立柱, 其一部分在楼层处折损, 二楼歪斜

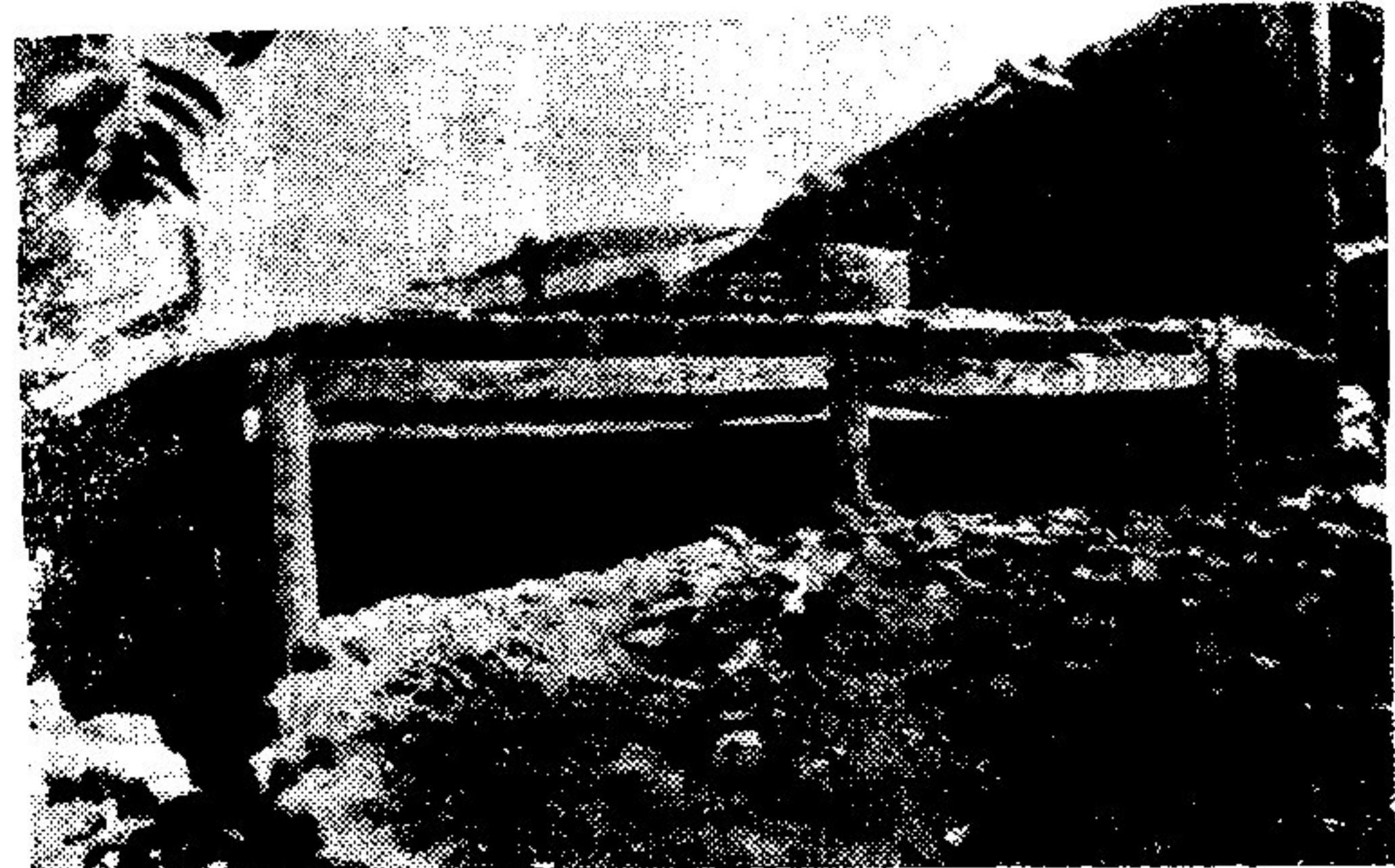


图 5 穿斗木构架的立柱在楼层处全部折断, 二楼倒平

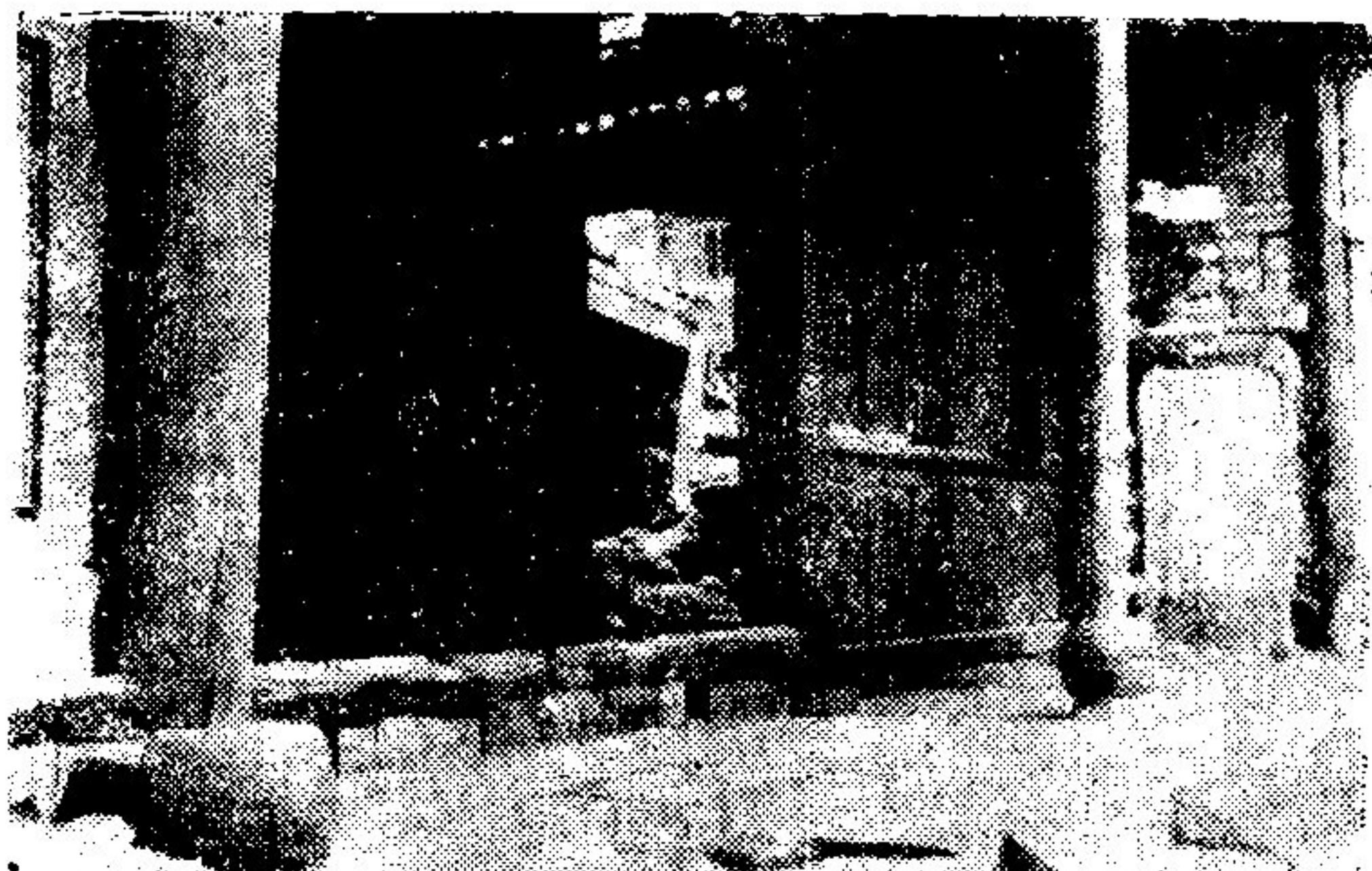


图 6 廊柱在柱脚石上错动

由于立柱在楼层处, 两个方向均与楼楞相接, 榫槽靠近, 使木柱断面削弱过大引起应力集中外, 楼层处弯矩较大也是一个重要原因。

在柱顶, 常有由于榫槽过多过密而造成的劈裂现象。

(2) 立柱在柱脚石上的错动比较普遍, 严重的滑脱失效, 导致构架倒塌。柱脚石太高时更是如此。图 6 所示的廊柱均向室内方向错动。