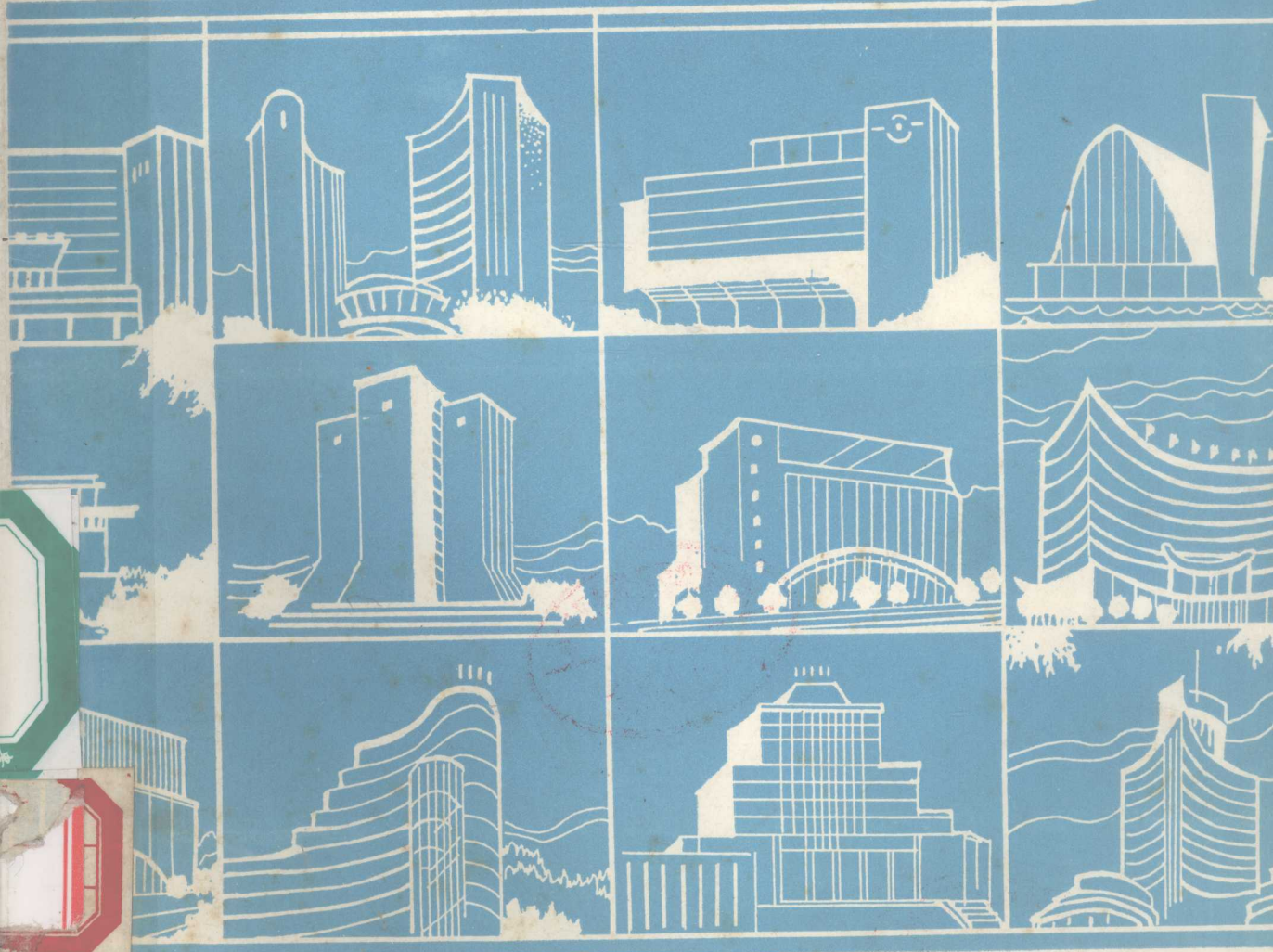


柔性底层房屋的 抗震性能

〔苏〕M·图尔苏穆拉托夫

刘世富 译 杜荣幸 校



自贡市建筑学会

自贡市建筑工程设计院

自贡市建筑设计研究所

柔性底层房屋的抗震性能

[苏]M·图尔苏穆拉托夫

刘世富 译

杜荣幸 校

江苏工业学院图书馆
藏书章

自贡市建筑学会

自贡市建筑工程设计院

自贡市科技情报研究所

一九八七年九月

译校者的话

近二十年来,在国外对地震区采用底层(或者第一、第二层)为钢筋混凝土框架、上部为砖墙或钢筋混凝土墙体的多层及高层房屋,即所谓“柔性底层房屋”日益受到人们的重视。因为,作为抗震结构方案之一的柔性底层房屋结构能够大幅度地降低设计地震荷载(20~30%),因而有很高的经济效益。但是目前这种结构类型用于地震区的工程还不多,其主要原因是柔性底层房屋在地震时的动力性能研究不够,认识不足。本书系统地论述了地震时柔性底层房屋的动力特性理论和试验分析方法,详细地叙述了作者在苏联阿拉木图地区对该类房屋的动力特性所作的实地试验研究和所作的大量分析计算,对柔性底层房屋在地震时的动力特性作出了结论性的评价,并提出了柔性底层房屋的设计及其计算方法的若干实用的建议。

本书对于研究抗震建筑结构具有一定参考价值,可供地震科学工作者、在地震区从事建筑设计和施工的工程技术人员、建筑结构科研部门、抗震工作部门、高等建筑工程院校的科研人员、教学人员阅读。

本书作者M·图尔苏穆拉托夫是苏联技术科学博士、著名抗震建筑专家,多年从事抗震结构研究,造诣很深,卓有见地。曾在苏联国内外发表过许多抗震结构方面的论著。本书于1981年由苏联哈萨克斯坦出版社出版,国内外发行。

由于我们水平有限、知识不足,译文中错误难免,敬请读者批评指教,深表谢忱。

一九八七年七月于自贡

目 录

前言	1
第一章 低刚度底层房屋的抗震性能(根据震害观测和理论试验研究得出)	3
在抗震建筑中采用柔性底层房屋的基本前提	3
在地震时低刚度底层房屋的性能	4
对从理论试验研究得出的低刚度底层房屋动力计算简图的分析	12
参考文献 I	18
第二章 低刚度底层房屋的实物动力特性	21
研究对象	21
研究的目的、任务和方法	27
被研究房屋的实际动力特性与分析	33
参考文献 II	54
第三章 柔性底层房屋动力简图的计算理论分析	56
柔性底层房屋动力计算简图	56
扭转振动对自由振动振型和频率的影响	78
柔性底层房屋对实际地震作用反应的研究	83
关于房屋在振动时的能量耗散计算问题	96
根据调整水平力大小,进行柔性底层房屋的设计和计算方法	106
参考文献 III	119
结 束 语	123

前言

近10~15年世界上发生了许多次强烈的、破坏性严重的地震。其中包括洲际性的地震。例如发生在智利、秘鲁、中美洲和小亚细亚的地震等。因此,人们研究抗震建筑的兴趣逐年高涨,这一点可以从许多国际性会议、欧洲的专业会议,如1956年在旧金山、1960年在东京、1965年在惠灵顿、1969年在智利的圣地雅哥、1972年在伦敦、1973年在罗马、1975年在斯坦布尔等地举行的会议所提出的大量材料得到证明。

在苏联6~9度区(按本国现行震级划分)占全国领土面积的五分之一,居住人口四千多万,在十一个加盟共和国都分布着地震设防区。

在地球上平均每年发生5级地震700多次,6级或6级以上的地震90次左右、7级以上的地震12次。从3级开始,到8.5级的地震就能造成巨大的破坏了。

我国基本建设投资很大,因此建筑物抗震对国民经济具有特别重要的意义。

大家知道,提高房屋和构筑物的抗震能力,会增加建筑安装工程的造价:7度设防增加造价4~5%;8度设防增加造价8%;9度设防增加造价12~15%。因此,摆在抗震建筑设计人员、建筑师、建筑科研人员面前的重要任务之一就是:采取切实可行的抗震措施办法,在保证房屋和构筑物达到要求的强度与稳定性的前提下,努力降低建筑造价。

在地震区房屋设计中,比较与选择建筑平面布置方案以及相应的结构方案时,必须考虑抗震要求,因为建筑结构决定了房屋的地震荷载的特征及荷载量,以及为提高房屋的抗震能力而采取的各种专门措施的工作量。

根据对实际震害的分析和仪器测出的地震记录,我们知道地震时,建筑物的加速度值总是随其柔性程度的增加而降低。这一点正是柔性房屋的优越性。在选择结构时,应当注意到,柔性结构对于土质密实和地震烈度高的地区的建筑物特别适用。一般说,高烈度地区,抗震措施的工作量大,为了降低地震荷载,采用最新的柔性结构就起着决定性的作用了。

在结构上可以体现出用于承受地震作用力的柔性构筑物形式之一就是所谓柔性底层房屋。

这种结构形式的核心在于：在房屋的底层设置一种连接钢筋混凝土板的柔性柱，在混凝土板上再设置房屋的刚性盒体。

目前，柔性底层房屋在我国地震危险区尚未大量采用，原因是多方面的。首先是对这种房屋在地震情况下的各种性能缺乏认识。

根据实测和震害分析，常常发现柔性底层房屋的动力特性曲线不符合设计提出的结构计算图。往往没有选择好房屋的上层部份与柔性层部份的刚度比，然而正是刚度比决定整个房屋的性能，首先是底层的防震作用。

柔性底层房屋设计中，象楼梯、隔墙、承重墙等未计算的结构件，设计时往往没有用缝把柱与该层断开，这就阻止了柱的自由位移。

目前，在建造柔性底层房屋中上述某些存在的缺陷已经在很大程度上克服了。尽管需要进一步研究解决的问题还很多，但是完全能够把它列入在抗震建筑中人们强调采用的传统的房屋与构筑物的结构方案。

本书第一章综述地震时低刚度底层房屋的状态以及根据理论试验研究的经验，对低刚度底层房屋所作的计算分析。

第二章叙述在阿拉木图实地考察研究柔性底层房屋的动力特性曲线的情况。

第三章说明确定柔性底层房屋地震荷载的实际方法和建议采用的新的计算方法以及根据调整水平力大小进行抗震房屋的设计方法。

结束语总结了柔性底层房屋的抗震性能，提出了柔性底层房屋的设计与计算方法的实际建议。

本书在编写过程中承蒙科学顾问，技术科学博士 Т. Ж. 鲁科夫、С. В. 鲍利亚科夫、审校者、技术科学博士 Я. М. 阿捷别尔古等提出许多宝贵意见和建议，在此一并致谢。

第一章 低刚度底层房屋的抗震性能

(根据震害观测和理论试验研究得出)

在抗震建筑中采用柔性底层房屋的基本前提

通常把首层框架看成是房屋的基础与房屋的上部结构之间的一种减振连接,因此在框架以上的那部份房屋应当看成是不变形的,只是由于自身的质量影响才产生地震荷载。

在上述前提下,改变底层的刚度与房屋质量的比值可使自振频率的计算值降低,从而相应地降低地震荷载,也就降低了建筑造价。

苏联现行抗震建筑规范(СНП II-A, 12—69[24])中提出的基本计算公式的构成和标准光谱曲线的特征客观上促进了低刚度底层房屋应用于抗震建筑的实践。

目前,在我国各地震区,其中包括阿拉木图市,兴建了大量这类房屋。这些房屋的底层通常采用装配式钢筋混凝土、装配整体式钢筋混凝土或者整体式钢筋混凝土结构。通常,房屋的刚性部份有4~11层高,有各种不同结构形式。为此,最常采用各种加钢筋的砖砌体或者钢筋混凝土类板墙加固的砖砌体以及用装配式大板。虽然这类房屋在建筑实践中已经相当大量的采用了,但仍然不能认为,对它可能达到的抗震作用程度就完全弄清楚了。对于这个问题自始至终还存在很多自相矛盾的数据。显然,这就可以说明问题的复杂性,也说明对这一复杂性还缺乏研究。1967年在阿拉木图和1971年在伏龙芝召开的全苏抗震建筑会议对低刚度底层房屋的研究特别重视。这种房屋就是参考文献[5、10、26、28]提出的报告中所论证的。参考文献[11、26]就把柔性底层房屋作为理想抗震结构的例子提出来。按照作者的意见,基本要求之一就是柔性层柱能够自由位移。在框架柱与墙之间设置抗震缝,缝内填塞最新弹性隔离材料来达到其自由位移的目的。或者把墙体与隔墙设置在框架柱平面之外。

采取增加房屋的柔性适应低刚度底层房屋使之综合成柔性底层,同时把其余的上部楼层的刚度设计到足够大的程度,使其由于楼板的水平位移而产生的楼层错动

比底层框架上楼板的错动小到无可比拟的程度,从而降低地震荷载的计算值。也就是说,这种类型的房屋就是由两个基本结构方案的组合体,即柔性方案和刚性方案构成的组合体。现代化城市的社会商贸企业需要有较大的活动面积,这就必不可免的要安排在低层,因此就要用框架结构来解决,这是建造这类房屋的原因之一。作为住宅的高层部份则采用普通的承重与非承重墙或者隔板墙处理。对房屋底层用“柔性”这个术语是有条件的,技术上是不够确切的,因为要保证房屋的强度、稳定和空间几何不变性,柔性层也应当具有一定的刚度——既要有弯曲刚度,也要有剪切刚度。所以,我们把底层刚度小于其余层刚度的房屋视为低刚度底层房屋,也就是通常随高度不同而变换刚度的房屋,这个认识是更加确切的。同样“弹性层”这个术语的思想内容也是有条件的。弹性这个概念作为材料工作的一个阶段,对于地震作用下底层的钢筋混凝土柱远远不是弹性的。抗震建筑结构要考虑到材料应力可能达到设计计算强度(这个强度大大超过材料的弹性极限)。所以,柱在弹塑性阶段工作是不可避免的。此外,在注意地震荷载计算值的条件性与其复杂性的同时,还必须考虑产生多个超荷载的可能性,这种超荷载能够导致材料产生塑性和出现塑性铰。无论如何在地震时不能保证底层结构仅在弹性阶段工作。

从结构的观点来看,用“底层框架房屋”这一个术语更加准确,正如对刚度特征来说,用“低刚度底层房屋”这一术语更为确切一样。

现在,这类房屋在国外,如美国、墨西哥、意大利、南斯拉夫等大量采用,广泛发展。

在地震时低刚度底层房屋的性能

“柔性底层房屋”,作为一种抗震结构类型的概念,在二十年代美国太平洋海岸的加利福尼亚州肯塔巴尔巴拉市(СанТа-Барбара)(1925年)地震后就提出来了。当时发现,底层刚度低于高层刚度的房屋更能经受地震破坏。M·A·比沃特举出若干房屋为例,说明柔性底层房屋具有更大的抗震性能[30]。从分析这类房屋在地震时的状态来看,柔性底层房屋并不是任何时候都能够成功地经受地震破坏。例如,1933年美国的隆格比奇市(Лонг-Бич)发生地震,该市的底层框架房屋就受到了

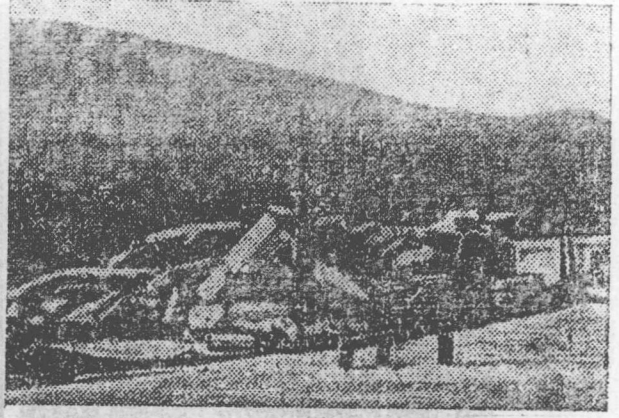
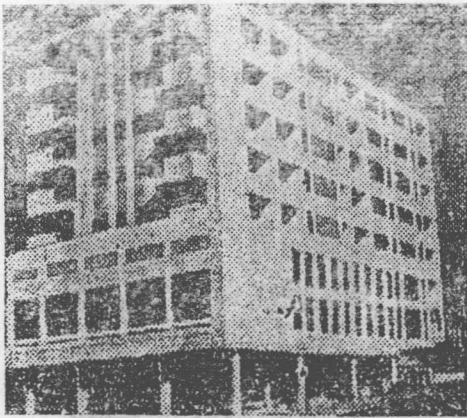


图1.1. 这是具有低刚度底层框架的商业中心八层大楼在地震前和地震后所拍的照片(1960年, 阿卡吉尔市)。

严重破坏,这就和地震作用的特征分不开[38]。1960年阿卡吉尔地震时“商业”大楼(图1.1)受到破坏,这栋大楼的结构总体平面布置方案与本书后面分析的建于阿拉木图的九层试验房屋[图11.3]相同。正如 C·B·鲍利科夫在文章[17]中指出的那样,阿卡吉尔市建造的房屋没有计算地震荷载,大多数的房屋在设计时也没有计算风荷载。显然,上述情况就在房屋的动态状态中充分反映出来且成为遭受严重破坏的原因。再进一步分析,造成破坏的原因还有未设置隔板墙或者隔板墙太少以及底层的其他低强的非结构构件。因为那些非结构构件起到了结构连接的作用[1—3, 19],这样就能够降低施加给底层结构的地震荷载了。

1963年斯科别尔(Сконе)地震[8]也像阿卡吉尔地震一样,大量反映出了低刚度底层房屋的状态特征。必须指出,1963年以前在斯科别尔没有发生过破坏性地震,在实践上也缺乏抗震建筑经验。通常对房屋只作了风荷载计算。但是,根据斯科别尔大学城市建设和抗震建筑研究所对震害所作的分析,一些著名的抗震建筑方面的专家在地震前曾建议与推广过类似柔性底层房屋这种结构。图1、2所示是一栋由于地震低层框架遭受破坏的六层柔性底层房屋。从图中可以看出,房屋的低层柱倾斜 $10\sim 15^\circ$ 和嵌固位置出现巨大的剩余变形(大约0.5米),即变形出现在地震荷载而引起的最大力矩处。显然是由于柱受累积变形而大大增加了偏心矩和柱的上下节点应力集中、导致下部节点的混凝土碎裂、柱内钢筋受压鼓出。值得注意的是,房屋的刚性部份的墙体未受多大破坏,由此便可以看出,底层起到一定的减震作用。

图1、2中所表明的斯科别尔市这类房屋的破坏特征在专门的文献中[8、17、28]已经充分说明了。但是,虽然这种房屋的抗震性能有不足之处,而在目前的抗震建筑中

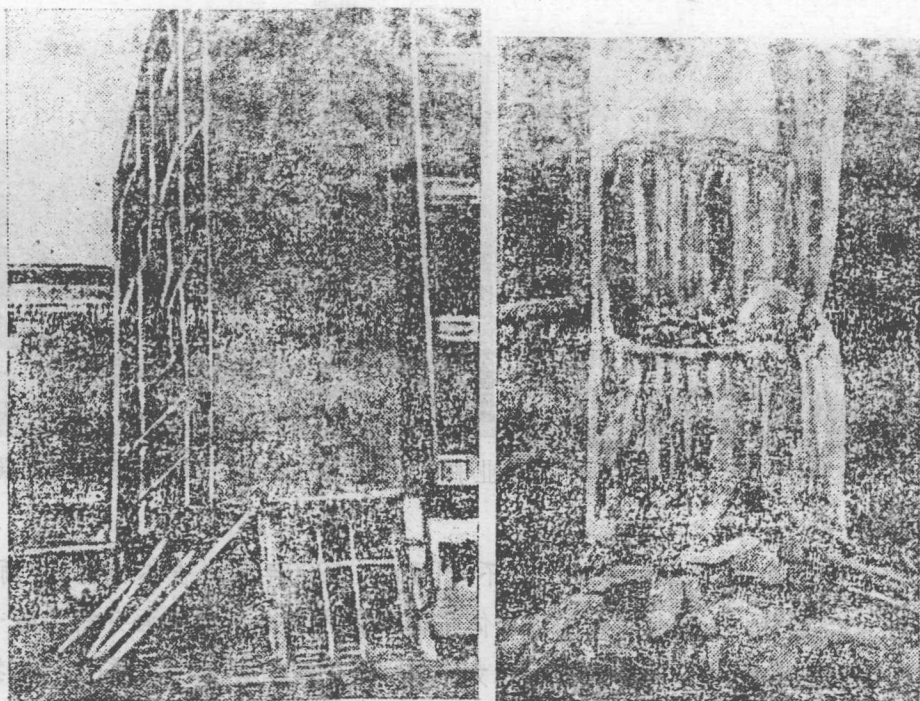


图1.2. 1963年斯科普列地震时一幢六层房屋的框架底层一部份柱下端发生倾斜和受到破坏的情况。

还在继续大量采用。仅管四年后的加拉加斯(Каракас)地震,八年后的圣费尔南达地震(Сан-Фернандо)再次确认了柔性底层的作用是房屋遭受破坏的原因之一。

一九六七年七月二十九日在委内瑞拉的人口稠密区发生地震,其损坏与破坏波及到古阿林纳斯(Гуаренас)、古阿吉尔(Гуатир)、劳斯杰克内斯(Лос Теквес)、安基摩纳(Антимоно)、马依克维特卡(Майкветка)和纳古阿依拉(Ла Гуайра)等靠近委内瑞拉首都加拉加斯的几个美式高层建筑林立的城市。研究这次地震造成的震害,为我们提供了分析总结的丰富材料。

在第四次国际抗震建筑会议上(1969年、智利)就这次地震提出了好几份报告[31、32、33、39、40],其中包括官方当局的正式报告[7]。根据加速谱成份分析,这次地震的特征是低频率、低衰减。震动周期约1秒时加速度最大值超过 $0.3g$ 。卓越周期长的地基对层数多的房屋和低柔性底层房屋地震影响不利,因为这类房屋的基本周期与地基周期相近似。从图1、3可看到这栋低刚度底层房屋的第十层的楼梯间连接处被破坏(房屋的刚度按高度均分的)有可能这是由于共振现象带来的结果。

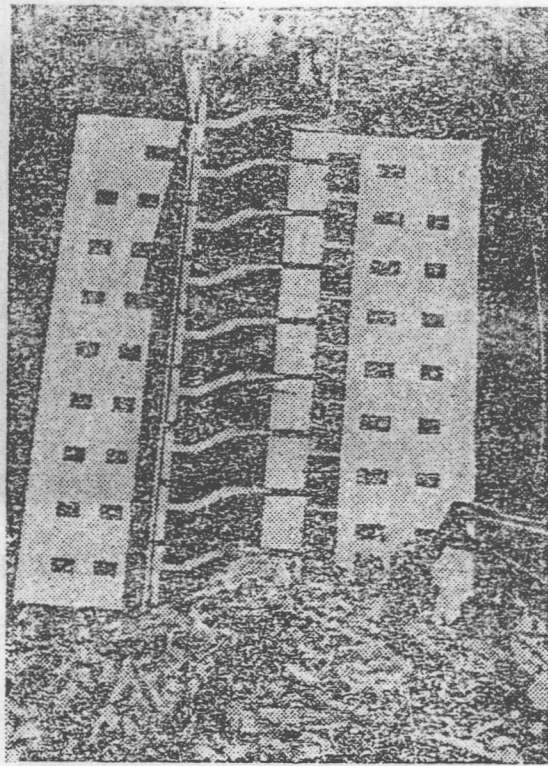


图1.3. 1967年在委内瑞拉一幢低刚度底层房屋的第十层部份塌落情况。

土质条件对地震震害大小有明显的影晌。加拉加斯平原软弱的冲积层土上建造的高层房屋就受到了很大的破坏。可是,我们发现在同样条件下,与高层房屋相邻的低层房屋却安然无恙,十分完好,尽管这些私人的低层房屋通常未考虑过抗震要求。我们还可以指出,第四次国际抗震建筑会议的材料中提到的那些遭受破坏的房屋或者是由于进行动力特性计算方面存在若干问题,或者是由于设计与施工质量太差*。显然,地震时这些缺陷就起了决定性的坏作用。

图1.4--1.7是一些经受了1967年委内瑞拉地震的8--17层房屋,很好地表现出了柔性底层房屋在地震后的性能。所有房屋的高层部份没有出现重大破坏,但柔性层柱的上下节点区受到破坏严重。这些节点区的混凝土产生部份碎裂,柱内钢筋鼓出。这是由于应力大量集中和在往复振动过程中柱结构产生剩余变形造成的。

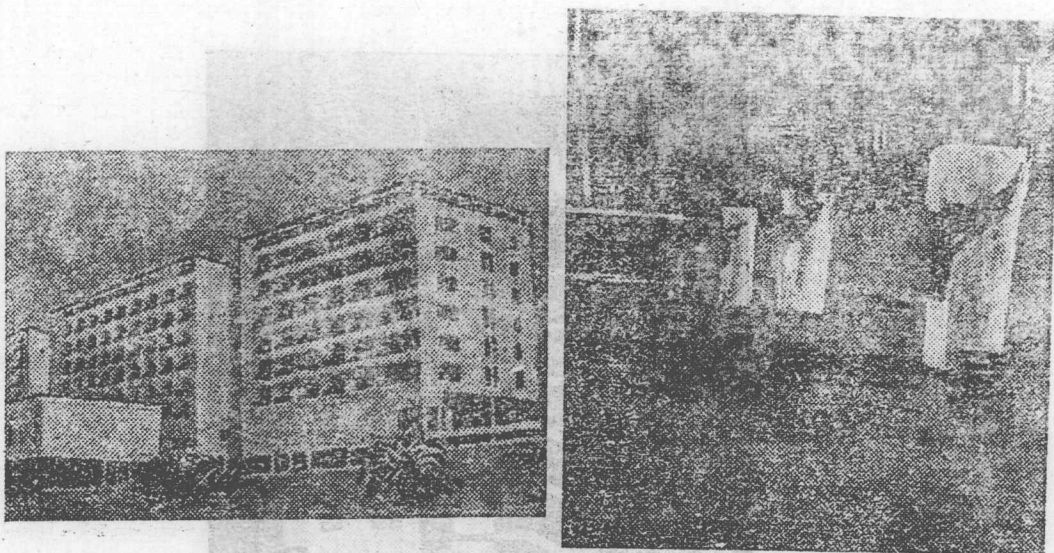


图1.4. 1967年在委内瑞拉一幢低刚度底层框架式的八层饭店大楼遭受地震, 其震害表现在底层柱局部区段被破坏。

* 官方委员会根据震害分析以及检查图纸和计算资料, 在向会议提出的报告中, 对多层框架房屋的破坏和损坏原因得出以下结论:

- 1) 在与框架的一个方向上使用肋形板代替横梁。
- 2) 扭矩与倾覆力矩作用。
- 3) 承重框架横梁与柱之间的连接强度不足。
- 4) 底层与高层相比其隔墙数量不够, 使柔性底层土的水平剪力增加。
- 5) 有时层间的肋型楼板在支承隔墙的地方有裂缝。显然这是由隔墙来的集中荷载传递给楼板, 在肋型板上产生应力, 而这些应力没有计算到。
- 6) 施工质量不良。
- 7) 很厚的冲积层土是多数房屋受到破坏的原因。那些厚的冲积层大大增加了传递到结构上的振动强度。研究表明, 房屋自振周期与地基振动周期很接近。

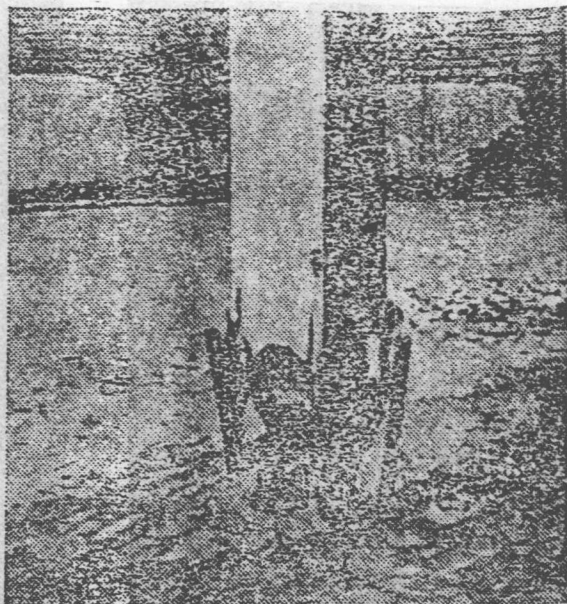


图1.5. 一幢十三层的低刚度底层框架式房屋遭受到1967年委内瑞拉地震, 被破坏的部位也在柱的下端。

正如С. В鲍利亚科夫在文章[17]中指出的那样, 柔性柱上下节点区混凝土碎裂就是由于用柔性钢筋配钢筋混凝土结构底层柱造成的。这种情况应当视为完全不恰当的作法。图1.7就是一栋在地震时16层低刚度底层框架角柱受到破坏的情况。显然, 这种破坏的特点是与房屋水平扭转变形分不开的。柔性底层的角柱在这种情况下承受到了很大的附加荷载。振动时房屋底层发生扭转是由于在平面上房屋质量分布不均匀所致。

一九七一年二月九日在加利福尼亚发生了一次里氏(Рихтер)震级为6.6级的地震(根据加利福尼亚工学院抗震试验室材料)造成了大量的物质损失与人身伤亡[36]。

震中离西尔摩尔市(Сильмор)不远, 沿索列达特断层区。这次地震使64人丧生, 1000多人受伤。北部盆地受破坏最大。初步统计有二百多所学校遭到破坏(损失达300万美元)。

从拉斯维加斯(ЛасВегас)向西到卡塔林岛(Каталин)的广大地区都有震感, 尤其是西尔摩尔和圣费尔南达两市破坏最为严重, 仅洛杉矶列斯市(Лос-Анджелес)地震带来的损失就达二亿三千三百五十万美元。有两所医院破坏极大。其

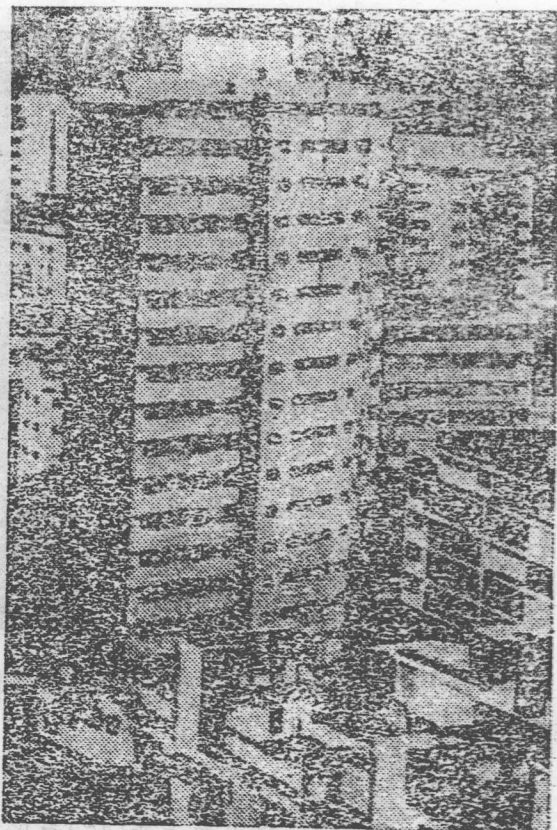
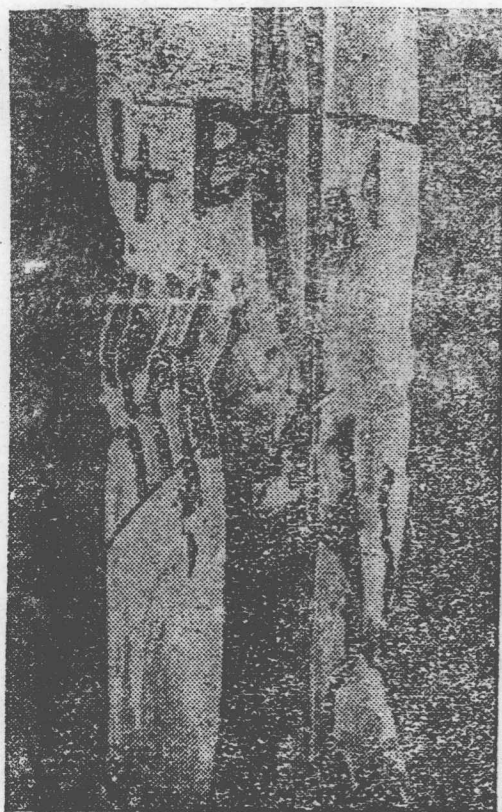


图1.6. 1967年委内瑞拉地震时一幢十七层的框架式房屋的部份柱受到破坏。

中一所为五层钢筋混凝土框架结构。由于底层柱被破坏，使许多单间的隔离病房倒塌。没有倒塌的病房的底层柱的倾斜度达到 20° 之多(图1.8)。底层上部水平面横向位移达到1米左右，底层柱混凝土碎裂，钢筋鼓出，一些平面位置相互垂直的病房因为首先互相冲击而完全倒塌。从阿卡吉尔和斯科别尔、加拉加斯地震可以看出，房屋底层遭受破坏的原因是底层比高层的变形性更高。在图1.8上清楚地看到有底层玻璃端墙、而同时高层保留着实心隔墙。

这次地震的教训使我们再一次注意到低刚度底层房屋的严重性。通过分析地震中这些结构的特征，必须清楚地看到，以上大多数类似结构的房屋遭受破坏。其原因基本上都可以归结为底层的柱受到了破坏。底层柱的完好程度决定房屋的完好程度。为此，一个考察了斯科别尔地震的美国专门委员会成员在讲话中告诉我们说：“虽然钢筋混凝土框架房屋的底层产生了变形，然而如果在设计上采取了抗震措施，

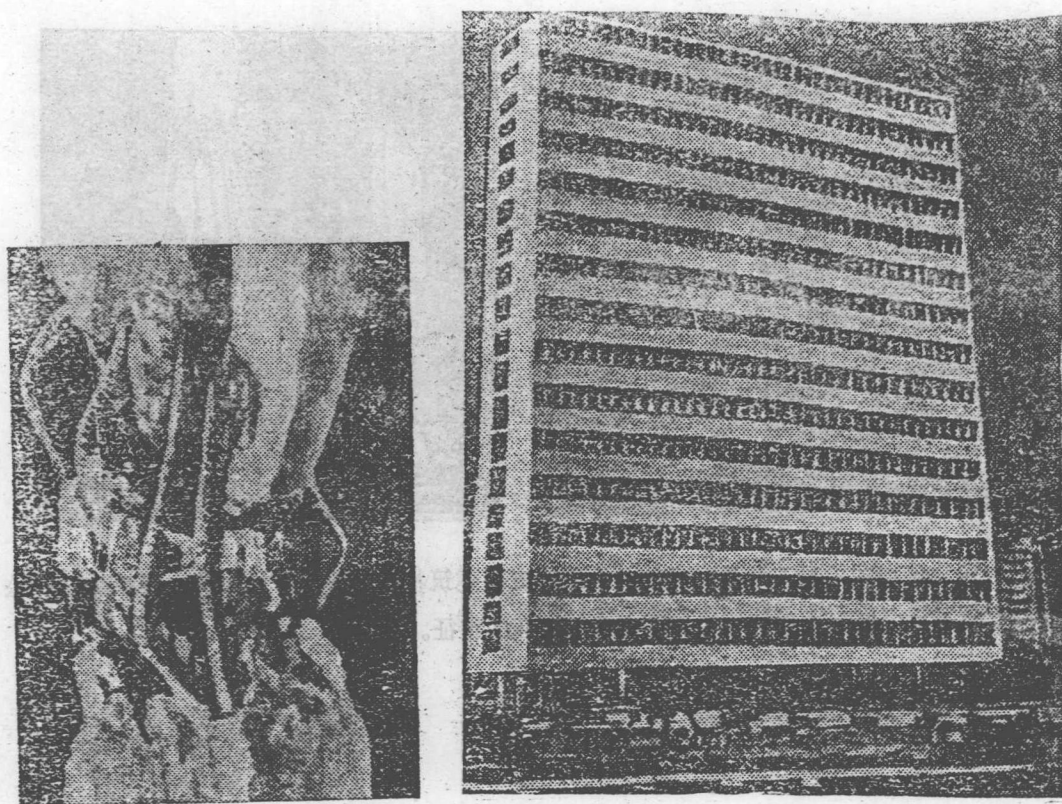


图1.7. 1967年委内瑞拉地震时一幢十六层的低刚底层框架式房屋的角柱遭到破坏。

就没有理由认为开敞底层房屋对地震区是不适合的。”

1933年加利福尼亚州的隆格比奇(Лонг-Бич)和1967年委内瑞拉的加拉加斯的震害分析表明了,这类房屋的受到破坏直接与地震作用力的特征(震源深度、能量特性、震中位置等)和土质条件(软弱冲积层土)有关。考虑到,不可能对未来地震的特征进行预测,也不能指望保证低层结构在地震时完好无损——如果不在下面层设置类似减振器那样的体系,例如大变形减弱器或者能够承受部份倾复力矩的稳定墙等的话,按照相当多作者的意见[6、7、17、18],在地震区采用柔性底层这种结构应持慎重态度。

目前,对低刚度底层房屋的抗震性能问题还存在着不同的见解与争论,所以对这种结构在地震时的可靠度还没有充分依据来作出最后的结论,除此以外,也不能认为计算这类房屋的动力参数的理论方法是很有根据的,其中包括选用的动力计算简图。

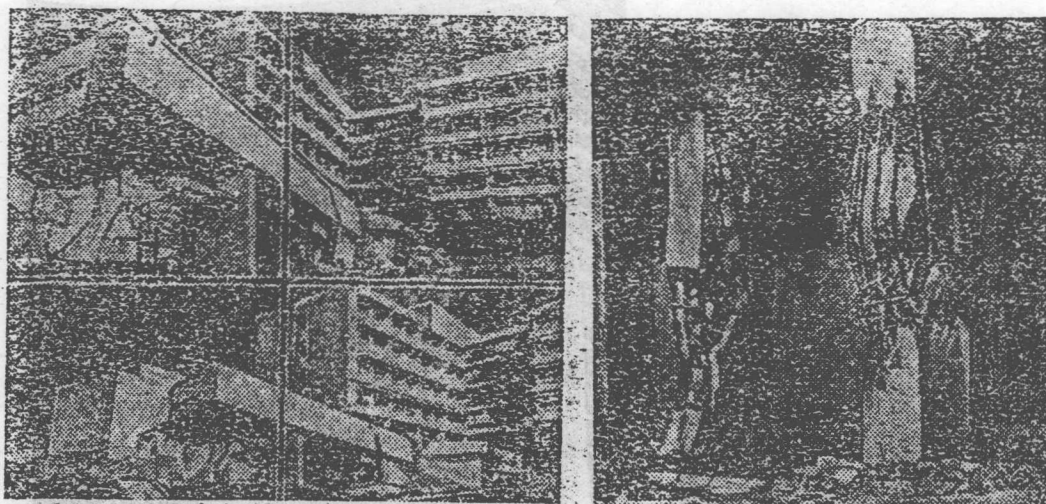


图1.8 1971年加利福尼亚地震时奥利夫医院的五层建筑物受到破坏，巨大的水箱被折断并坠落下来。从图中可以看到该建筑物的柔性底层被破坏的特征。

对从理论试验研究得出的低刚度

底层房屋动力计算简图的分析

M·A比沃特对低刚度底层房屋首先提出了分析[30]。他提出一种随时间而变化的最大水平位移包络线构成方法。这种方法的实质在于依据房屋的某些固定不变的特性来考察土地的实际位移曲线。

M·A比沃特用图示积分法得出了楼板的实际位移界限，对于其柔性底层房屋的包络方程式为：

$$x_0^2 = \left[\int y(t) \sin 2\pi\varphi_0 dt \right]^2 + \left[\int y(t) \cos 2\pi\varphi_0 dt \right]^2, \quad (1.1)$$

公式中： $y(t)$ ——土地位移曲线；

φ_0 ——房屋第一自振频率。

1934年 H. Б. 格林[31]指出，地震区的房屋采用这种结构计算公式是合理

的。他提出了一种弹性底层结构和动力计算的近似方法。H. Б. 格林经过研究得出了在房屋高层部份未产生变形的条件下, 弹性底层可以消耗(吸收)掉全部振动能量的结论。以压路机上的重锤来作计算动力公式的例子, 重锤的水平位移只能限于弹性范围之内。这种体系的振动方程式为:

$$\frac{md^2y}{dt^2} = ma\left(1 - \frac{t}{T}\right) - cy, \quad (I. 2)$$

公式中: m ——体系质量;

α ——土地初始加速度;

c ——体系刚度;

y ——静载挠度;

T ——加速度开始时间到加速度等于0;

t ——时间。

柱的一端嵌固、另一端简支在地基上, 建议采用以下公式计算柱的水平挠度:

$$d = \frac{p}{w} \left(\frac{\lg \alpha l}{a} - l \right), \quad (I. 3)$$

公式中: l ——柱的长度;

w ——竖向荷载;

P ——侧向荷载;

$$a = \sqrt{\frac{w}{EI}}.$$

振动周期计算与单自由度系统一样, 按以下公式进行:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}. \quad (I. 4)$$

关于H. Б. 格林在文章中论述的研究结论, 一些科学工作者提出了许多批评意见。例如, 褚松[32]建议在推导振动方程时, 认为底层柱上下两端的挠度与地基位移有关, 而与地基不动状态无关。按照H. Б. 格林的观点, 土地振动不传递到房屋的刚度部份上, 也就是说这种防震房屋就不必进行任何计算和增加抗震措施了。这种处理是把与土地连接刚度很小的构筑物对地震作用的反应用十分简化的方法来处理。流行着一种意见, 认为可以在刚度很低的底层框架房屋的刚性部份上设置一种最低限度的(结构上的)防震装置。

A. Л. 丘拉杨和И. А. 察布也提出了类似意见[29]。他们认为在七度地震