

建筑结构 震害机理与概念设计

邱明兵 编著

中国建筑工业出版社

建筑结构震害机理与概念设计

邱明兵 编著

中国建筑工业出版社

本书收集了国内外数十次建筑震害图片资料，时间跨度最早可追溯到 20 世纪初，最晚则到 2011 年盈江地震；并择其重点分门别类作了详细阐述；除此之外还对震害机理进行简明扼要的分析，以达到“知其然，更知其所以然”的效果；其间还结合现行规范梳理相关条文，帮助读者深入理解这些重要的文字。

面对纷繁复杂的震害，如何总结成功的抗震经验甚为重要。当调查者伫立在废墟中，面对着一栋屹立未倒的建筑时，常常不自觉将此栋建筑定义为“成功的抗震建筑”；由此再推论出“此栋结构的抗震设计是成功的设计”。这样的逻辑推理还不够严密。本书作者在总结震害时摒弃了“大震不塌即代表着抗震设计成功”的习惯经验，而是从“震害形成了有利屈服机制才代表抗震成功”的角度来总结震害。所谓“有利屈服机制”是指：结构遭遇设防地震或罕遇地震时产生的屈服机制不至于引发连续坍塌，即是说具有良好的延性。工程师首先要意识到，震害是不可避免的；其次，结构屈服机制可以通过“能力保护设计”进行控制。只有当震后实际屈服机制符合设计预期的“有利屈服机制”时，才可以说抗震设计成功。

本书首先探讨了延性体系、能力保护、有利屈服机制、消能耗震等基本原则，此外还阐述了刚强比、结构整体性、层侧向刚度等重要概念，并针对嵌固部位选取、结构与地基基础共同作用、楼板在抗侧力体系中的作用等实际工程问题作了说明。本书还对地裂缝、边坡失稳、软土震陷、场地液化等岩土地震工程问题作了简要阐述并提出设计对策。最后本书阐述了隔震结构、框架结构及楼梯、框架-填充墙结构、剪力墙结构、多层砌体结构、底框砌体结构的震害特征和破坏机理，并总结了相应的设计概念。

本书可供结构工程师、岩土工程师及大专院校相关专业师生参考使用。

* * *

责任编辑：何玮珂

责任设计：赵明霞

责任校对：姜小莲

前言

众所周知，作为人们生产生活的建筑物应能在地震中成为保护生命财产的庇护所。为达到这个庄严而神圣的目标，受过专业训练的工程师有不可避免的责任和义务，这就要求工程师有精巧的结构分析能力和清晰的结构抗震设防概念。

图1简单表示结构设计流程。第1步：工程师在满足建筑功能前提下，结合经验建立结构模型；第2步：输入地震动参数，如加速度、场地卓越周期，甚至是地震加速度时程；第3步：设置软件计算参数并分析得到结构效应 S ，如变形、内力等；第4步：将结构的变形限值和截面承载力 R 与结构效应 S 比较，如果 $S < R$ 则认为设计合适，反之则需要调整结构模型，重新分析。

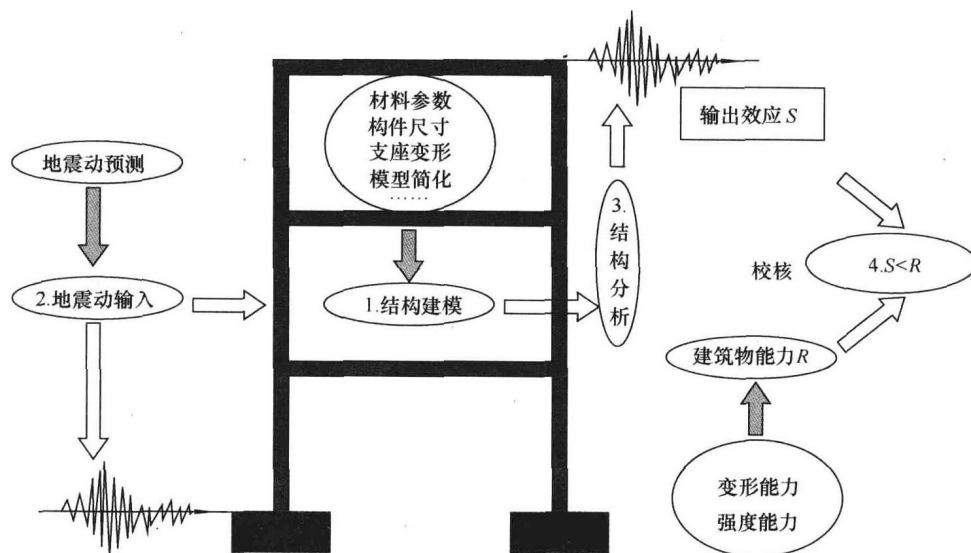


图1 结构设计流程

上述流程相当严密，步步均有“相关规范”作出规定，而且软件功能也越来越强大，以至于多数工程师认为“工程设计就是熟练使用软件”，有时甚至被错误的软件分析结果所误导，而忽略了以下重要事实：

第1步，结构建模过程中需要输入材料参数、构件尺寸等，其中重点是“模型简化”，这是实际结构转化为结构模型的必要步骤。工程中常有这样的描述，“为简化计算，忽略……”，常在不经意间把主要因素忽略了，这是思维懒惰的表现。在“忽略”之前，首先应明确忽略的内容是不是影响结果的主要因素，主要因素决然不能忽略；其次，如果是次要因素，也应明确其对分析结果影响的程度和方向，并采取相应措施削弱影响。如果置之不理，那就不是“忽略”而是“忽视”了。如：填充墙对框架结构的影响是引发框架结构震害的主要因素，不能“忽略”。凡此种种“简化”，均会带来各种误差，应引起工程师

注意。

第2步,输入地震动参数,其内涵有两个假定:一是已有地震动参数统计规律符合某种概率分布函数 $f(x)$;二是预测该地区未来发生的地震符合该概率分布函数 $f(x)$ 。历史地震动参数统计的可靠度严重依赖于历史地震动记录的精度和数量;而概率分布函数则是一种数理统计的假定,各个地区应当有所不同;至于基于过去地震动参数统计来对未来地震动参数进行预测,则超越理性范畴,其可靠度还在探讨中。

第3步,结构分析的精度与软件模拟程度、数值算法精度等因素有关。精确模拟结构所有细节代价高昂,所以专业软件的算法都存在一些基本假定,工程师需要对不同软件的精度和内涵仔细研究后才能使用。最后必须判断计算结果的合理性,这一点是软件所不能完成的。

第4步,结构变形和构件承载力与材料强度及钢筋在截面中的布置有关。当前设计方法重心是验算截面在结构物处于弹性阶段的强度,即“小震不坏”。问题在于,在分析结构内力和位移时假定结构仅产生弹性变形,而在验算截面强度时则是假定截面受拉钢筋屈服而受压混凝土压碎,二者之间存在误差。此外在验算“大震不塌”时,应采用材料极限强度而不是设计强度,否则仍存在误差。例如:钢筋硬化会使得截面强度超强,即实际强度比设计强度高;塑性铰区域的混凝土破碎后,实际抗剪强度降低。

由此可见上述每一步均存在假定和误差。

对于软件而言,输入确定的初始条件,就能得到确定的结果。遗憾的是,地震动参数、材料属性、结构边界条件等初始条件常常难以“确定”。工程师的任务就要以“不确定”的初始条件为基点,设计出“安全、经济、合理”的结构物。如果没有明确而清晰的结构概念,单靠使用结构分析软件,难以达到目标。

工程师在积累一定经验后,都知晓“抗震概念设计”的现实意义。概念设计,是指根据震害分析经验和试验研究成果而形成的工程判断,是与“结构分析”相对应而言的。依靠强大的数值计算技术,建筑结构的弹性分析可以做到相当精确,然而对于结构抗震设计还远远不够:一方面,结构在地震下破坏瞬间进入塑性;另一方面,地震波作用到结构上的地震动参数还存在随机性。因此在实践中,工程师不得不面临着分析不准甚至无法分析的困境。这时候,工程师清晰的设计概念成为解决鲜题的重要手段。如果将“结构分析”称为一项技术,那么“概念设计”则无疑属于艺术范畴。

我国工程界历来重视抗震概念设计,每次强震后都总结出大量有效的抗震概念。需要指出的是,这些抗震概念是随震害资料的累积、震害机理分析而不断修正、改进的;并非一成不变。

比如对于剪力墙的认识,20世纪80年代前普遍认为钢筋混凝土剪力墙结构水平变形能力差,属于脆性结构,长期以来在地震区受到限制。那时一些国家编制的规范对剪力墙结构的应用采取谨慎态度。如加拿大1970年建筑设计规范规定,建于2~3区的剪力墙结构高度不得超过60m。美国1978年的ATC-3-06暂行规定提出不得高于73m。日本1982年的《高层建筑抗震计算指南》规定,高度不得超过75m。1988年美国加利福尼亚州要求,建于3~4区的抗震剪力墙结构不得超过50m。同一时期,国内外开始对高层剪力墙结构进行抗震性能的研究。自20世纪70年代起,新西兰坎特伯雷大学、美国波特兰水泥协会研究所、加州大学地震工程研究中心,分别进行了剪力墙静力和动力方面的试验研

究。我国自 1974 年以来在中国建筑科学研究院主持下开展了高层剪力墙结构设计计算方法的研究；而后，又对双肢剪力墙及框支剪力墙进行试验研究。随着试验研究工作进展和近年来一些震害的调查分析，人们逐渐认识到：剪力墙上开设洞口形成连肢剪力墙结构，在抗震耗能方面比延性框架约大十数倍，且由于破坏易发生在连梁位置，便于震后修复，因此连肢剪力墙结构在抗震设防区逐渐得到推广。目前高层住宅采用剪力墙结构已是普遍的选择了。

又比如对于多层建筑，人们从隔震减振的角度出发，曾认为首层为柔性结构可以减轻地震作用，并据此设计大量的建筑物，而在多次地震中此类房屋大量倒塌，从而证明了这个概念的错误性；这个事实说明：人们根据某些知识在头脑中形成的概念，可能经不起实践检验。后来人们把这样的柔性结构设计为柔性支座，并设置在基础底部，形成良好的隔震层，这样的建筑物则在历次地震中得到检验。

再比如 1975 年我国海城地震时，震中区许多乡村土坯房屋中的土坯墙都倒塌，但是墙内细弱、没有水平撑杆的木构架所支撑的瓦屋顶却安然无恙。工程师将此土坯墙称为第一道防线，其倒塌耗散了强震相当巨大的能量，而木构架作为第二道防线仍然经受住了余震。“多道防线”的概念是这次震害调查的结晶。基于这个概念，工程师认为带砌体填充墙的钢筋混凝土框架是一个好的抗倒塌设计。遗憾的是自 20 世纪 70 年代以来，在设计中仅仅用周期折减的粗略方法计入填充墙对框架刚度的增大作用，而忽略了砌体填充墙在结构布置中的随意性而导致的结构刚度不平衡问题。一方面在平面上导致较大的扭转，另一方面竖向刚度突变产生应力集中，对主体框架结构造成不利影响；汶川地震中大量框架结构（实则为框架-填充墙结构）的破坏证明了这一点。这说明：一种“好的结构形式”经过“不恰当的设计”，仍然不能担当抗震重任。

宏观上看，震害随机性极强。1976 年唐山地震后总结多层砌体建筑的震害规律，倒塌形态有：全部倒塌、上部倒塌、局部倒塌；破坏特点有：X 裂缝、多种竖向裂缝、多种水平裂缝、外墙中部外鼓、防震缝两侧墙体酥碎、预制楼板中部横向断裂、主筋成灯笼状、楼梯板出现水平裂缝。一个重要原因是：历史上大量建筑按“等安全度原则”设计，理论上地震效应与强度一一匹配，但构造措施、施工质量等因素造成相对薄弱截面，而薄弱截面是随机出现的，破坏总是在相对薄弱处率先出现。可见薄弱截面随机出现是震害随机性的主要原因，这类震害称为“随机震害”。

既然“破坏总是在相对薄弱处率先出现”，工程师可以根据需要“加强或削弱”某些关键截面，使震害在指定位置率先出现，其他重要截面或构件得到保护，这就是“能力保护”。根据“能力保护原则”设计的建筑物的震害位置具有特定指向，如 1995 年日本阪神地震中，某些框架结构在梁端出现塑性铰，与设计预期一致，这类震害称为“可控震害”。“可控震害”是结构抗震设计目标。

面对纷繁复杂的震害，如何归纳成功的抗震经验甚为重要。当调查者伫立在废墟中，面对着一栋屹立未倒的建筑时，常常不自觉将此栋建筑定义为“成功的抗震建筑”；由此再推论出“此栋结构的抗震设计是成功的设计”，这样的逻辑推理还不够严密。首先，建筑物“屹立不倒”只是一个结果，与结构延性并无关联，专业工程师不应将二者混为一谈。1976 年唐山地震调查发现，内框架砌体结构有大量未倒，实现了“裂而不倒”的设防目标，因此建议保留这种结构形式；但此后的震害表明，这种结构遭遇强震极易破坏，

如今人们再也不会说这是一种好结构了。再者，建筑物在强震中未倒塌，与“抗震设计成功”也不存在一一对应的关系。历次震害都有不少建筑屹立不倒，但是抗震设计的理念和方法仍在不断更新。如果经历某一次地震发现存在不倒的建筑，就推论抗震设计成功，那么中国历史上某些经历了多次地震的古塔，可以作为抗震设计的标本了，也就是说，我们早就“成功”了。

本书作者在总结震害时摒弃了“大震不倒即代表着抗震设计成功”的习惯经验，而是从“震害形成有利屈服机制才代表抗震成功”的角度来总结震害。所谓“有利屈服机制”是指：结构遭遇设防地震或罕遇地震时产生的屈服机制，能将总位移分配到每个楼层而不是集中于单个楼层，能产生大变形但不至于引发坍塌。为了在震害中总结出有用的概念和原则，应理解震害具有必然性和有利性。所谓“震害必然性”是指：任何结构在遭遇强震时均可能破坏，震害是不可避免的。所谓“震害有利性”是指：某些特征的震害（“震害”也可称为“破坏”或“屈服”）具有“良好的耗能机制和延性”，这种震害正是应鼓励的。结构屈服机制可以通过“能力保护设计”进行控制。只有当震后实际屈服机制符合设计预期的“有利屈服机制”时，才可以说抗震设计成功。

以工程抗震学理论或震害调查经验的某一项为依据形成的抗震概念，具有片面性。笔者力图将二者融合起来，以“概念为先，机理为本”的思想为主线，根据建筑结构（构件）破坏特征将收集到的各国和地区、不同时期（跨度达100年）的震害图片资料——分类，使读者看到不同场地、不同震级的地震下，结构形式相似、设计方法不同的建筑物破坏特征具有的相通性，首先形成直观的感觉；同时采用一些简单结构力学模型，分析其破坏机理，以此表明这些混乱破坏的合理性，唯有如此，才能形成明确的抗震设计概念；然后，将这些设计概念提炼为设计原则，并结合当前各本规范中涉及这些概念的条文，加以分析和解释，以便工程技术人员能充分理解并灵活运用，从而由设计的必然王国走向自由王国。这就是“震害特征——破坏机理——设计概念和原则”三部曲。

如果将上述三部曲缩减为“震害特征——设计概念和原则”二部曲，则可能导致一些不完善的设计概念。如：砖混结构楼梯出屋面顶层震害严重，由此得出“加强顶层的暗柱和圈梁”可以减轻震害。实际上不管如何加强，顶层砌体总是易破坏；加强的结果最多是防止顶层散架而已；虽然震害可以减轻，但可能仍然难以达到“中震可修”的设防目标。诸如此类“哪里震害就在哪里加强”的设计概念值得反思。工程师应理解：假定震害在结构相对薄弱的A位置产生；设计加强了A处，那么另一位置B则相对薄弱，震害将在B位置产生；如果B位置震害后结构仍然不具有良好的延性，那么加强A位置有何意义呢？因此应从“结构整体性和延性”这一高度理解破坏机理，才能寻求到经得起地震检验的“抗震概念”。

对于那些工作不久的结构工程师，比较关心概念设计的具体原则，因为这部分内容具有较强的操作性，可以指导工程设计；对于那些已取得注册结构工程师执业资格的人，可能会比较关心机理分析，因为这部分内容具有一定的理论性，能解释那些原则背后存在的工程力学原理；而那些试图深刻理解规范的工程师，则会对书中丰富的震害图片感兴趣，因为这些图片可以协助工程师更好的理解结构方案概念设计的重要性。如果读者能通过阅读此书，让“概念设计”成为“自觉行为”；并从这些震害资料和机理分析中，发掘出新的设计原则和概念，那真是善莫大焉。

本书主要分六章。第一章阐述了“地面加速度和场地特征周期”这两个重要强震动参数的来龙去脉。由于地震动参数随机性极强，结构计算分析的结果也就有局限性，因此抗震概念设计具有必然性。

第二章阐述了抗震设防若干基本原则和概念。建筑物应有抗震设防目标；工程师应提供必要的设计原则和设计方法。这些原则包括：延性体系、能力保护原则、屈服机制、消能耗震等。此外还阐述了刚强比、结构整体性等重要概念。随后就几个实际工程问题作了阐述：嵌固部位选取，结构与地基基础共同作用，楼板在结构中的作用。

第三章简单阐述了岩土工程中的几个问题：地裂缝，边坡失稳、软土震陷、场地液化，以及对建筑的影响和设计对策。由于地基大变形难以控制，因此在选址中也回避；对于局部抗震不利场地应有针对性措施。

第四章阐述了隔震结构的发展历史，比较了隔震结构和抗震结构的震害特征。隔震结构减小了上部结构承受的地震动，也改变了结构的振动模式，极大降低了结构物承受的加速度，是一种能有效减轻震害的结构。

第五章阐述了框架结构、框架-填充墙结构、剪力墙结构的震害特征和破坏机理，并分析层抗侧刚度等重要概念；尤其是框架-填充墙结构，在经过适当改进后可以成为良好的抗震结构。本章还对楼梯设计作了详细阐述。

第六章阐述了多层砌体结构、底框砌体结构的震害特征和破坏机理。提出砌体结构难以达到“中震可修”的设防目标；对于底框结构也应加以改进，否则宜坍塌。

本书的编写参考了有关文献资料，在此对这些文献作者表示衷心感谢！并对文献作者的卓越工作表示由衷敬意！关于建筑抗震设计的原则、概念、方法等，现阶段还“在路上”，远远没有达到终点。限于作者专业水平和知识面的局限性，书中疏误之处在所难免，不当之处敬请读者和专家不吝指正（意见请寄 qiumb@sina.com）。

本书引用的图片来源于几个方面：一是历年公开出版物，二是公布在网络上，三是朋友提供。本书作者对能查到的图片所有者均在书中的“参考文献”注明，但还有很多图片未能查到所有者，在此首先对图片所有者表示衷心感谢和敬意。如有读者对引用图片有意见或者觉得侵权冒犯的话，请来邮件说明，本书作者将考虑给予一定的稿酬。

邱明兵

2011.4.15

目 录

第 1 章 强震动参数	1
1.1 地震动与地震仪	1
1.2 强震动与强震仪	3
1.2.1 倾倒的墓碑	4
1.2.2 强震仪的发展	6
1.2.3 强震仪的作用	8
1.3 地震烈度与震级	9
1.3.1 地震烈度	9
1.3.2 中国地震烈度表	11
1.3.3 地震基本烈度与中国地震烈度区划图	14
1.3.4 震级	17
1.4 设计地震加速度与场地周期	17
1.4.1 设计基本地震加速度	18
1.4.2 场地类别与场地卓越周期的关系	19
1.4.3 场地类别与反应谱特征周期的关系	22
1.5 地震动输入	25
1.5.1 单点一致输入	25
1.5.2 多向输入	26
1.5.3 多点激振	29
1.6 本章小结	31
第 2 章 抗震设防基本概念	32
2.1 “抗震”的语义学分析	32
2.2 抗震设防目标	33
2.2.1 抗震设防目标的社会意义	33
2.2.2 抗震设防目标变迁	34
2.3 地震作用计算方法	38
2.3.1 震度法	38
2.3.2 弹性反应谱	39
2.3.3 弹塑性反应谱法	42
2.3.4 静力非线性分析	45
2.3.5 动态时程分析简述	49
2.4 抗震设计原则	50
2.4.1 结构体系延性	50

2.4.2 能力保护设计原则	58
2.4.3 有利屈服机制控制	66
2.4.4 能量原理和消能耗震	70
2.4.5 阻尼器	72
2.4.6 本节小结	78
2.5 几个重要概念	79
2.5.1 刚强比	79
2.5.2 结构高宽比	81
2.5.3 内力分布特征	82
2.5.4 结构整体性与抗连续倒塌	83
2.5.5 预期震害与实际震害的契合度	87
2.6 结构嵌固部位	88
2.7 结构与地基基础共同作用	91
2.7.1 结构与基础分割模式	91
2.7.2 刚性地基假定对结构分析的影响和修正	92
2.7.3 桩基础体系的预期塑性铰位置	95
2.8 楼板在抗侧力体系中的作用	96
第3章 地基土的地震变形与对策	101
3.1 地裂缝与对策	101
3.1.1 断裂带	101
3.1.2 构造地裂缝	103
3.1.3 重力地裂缝	106
3.2 边坡失稳与对策	107
3.2.1 边坡建筑抗震设计的必要性	107
3.2.2 坡底建筑与边坡的合理距离	108
3.2.3 坡顶建筑与边坡的合理距离	110
3.3 软土震陷与对策	111
3.3.1 震害特征	111
3.3.2 震陷机理与判别	115
3.3.3 工程处理对策	116
3.4 地基土液化与对策	117
3.4.1 液化震害	117
3.4.2 液化机理与判别	119
3.4.3 液化地基的处理措施	124
3.5 独立埋置结构物抗震设计	125
3.5.1 震害特征	125
3.5.2 地下结构分析方法简述	129
3.5.3 地下结构设防目标与构造措施	131

第4章 隔震层结构	132
4.1 厘清几个基本概念	132
4.1.1 隔震层	132
4.1.2 隔震结构提高设计自由度	133
4.1.3 几个关键指标	134
4.1.4 隔震结构适用范围	136
4.2 隔震结构振动特征	137
4.2.1 历史的轮回	137
4.2.2 隔震结构的地震反应	140
4.2.3 隔震机理	145
4.2.4 隔震结构的优势	146
4.3 隔震设计要点	149
4.3.1 隔震支座的剪切性能	149
4.3.2 动线与建筑空间预留	151
4.3.3 与维护管理有关的设计	151
第5章 钢筋混凝土结构抗震设计	153
5.1 框架结构	153
5.1.1 框架结构的层抗侧刚度	153
5.1.2 “强柱弱梁”及构造	155
5.1.3 填充墙自稳定性	160
5.1.4 单跨框架结构设计	161
5.1.5 框架节点震害	164
5.1.6 板式楼梯设计	166
5.1.7 本节小结	170
5.2 框架-填充墙结构	171
5.2.1 概述	171
5.2.2 刚性连接对结构的整体影响	173
5.2.3 填充墙与主体框架相互影响	174
5.2.4 填充墙的耗能作用	178
5.2.5 框架-填充墙结构设计要点	179
5.3 剪力墙结构	181
5.3.1 剪力墙位移分析	181
5.3.2 结构层抗侧刚度	184
5.3.3 层扭转	186
5.3.4 剪力墙开洞对层抗侧刚度的影响	190
5.3.5 连梁刚度折减系数	192
5.3.6 剪力墙震害与设计要点	194
5.3.7 本节小结	198

第 6 章 砌体结构抗震设计	199
6.1 多层砌体结构	199
6.1.1 砌体结构的抗震设防目标	199
6.1.2 砌体结构的整体性	199
6.1.3 砌体结构楼梯设计	204
6.2 底框-抗震墙砌体结构	206
6.2.1 消失的结构形式	206
6.2.2 底框-抗震墙砌体建筑设计要点	209
6.3 本章小结	213
参考文献	214

第1章 强震动参数

1.1 地震动与地震仪

地震在瞬间摧毁各类建筑物，伴以海啸、暴雨等极端气候，引起火灾、水灾、泥石流等，给人类生产生活带来极大灾难。

长久以来人类没有停止过对地震活动的观察。在没有仪器监测地震活动之前，人们靠文字记录地震，其详细程度使得现在的地震学者可通过当时对地震破坏的描述，推测出地震烈度。

我国有文字可考的最早地震，记载于宋太宗期间《太平御鉴》，该书转引《墨子》：“墨子曰：三苗欲灭时，地震泉涌。”在明本《墨子·非攻下第十九》（卷5）中记载：“昔者三苗大乱，天命殛之，日妖宵出，雨血三朝，龙生于庙，犬哭乎市，夏有冰，地坼及泉，五谷变化，民乃大振。”东汉许慎《说文解字》释为：坼，裂也。而“三苗大乱”事件在战国时魏国史官所作的《竹书纪年》中提到，“三十五年帝命夏后征有苗”，夏后即大禹。据此粗略推算，有记录的最早地震距今已有四千多年历史。

人类遭遇地震，一方面感到巨大的恐惧，另一方面也表现出极大的兴趣并试图对地震现象加以研究、量化。东汉阳嘉元年（公元132年），我国古代杰出的科学家张衡发明了候风地动仪，其功能是确定地震发生的时间和方位。汉顺帝阳嘉三年十一月壬寅（公元134年12月13日），地动仪的一个龙机突然发动，吐出铜球，掉进蟾蜍的嘴里。当时在京师洛阳的人们却丝毫没有感觉到地震的迹象，几天后，一千多里外的陇西（今甘肃省天水地区）飞马来报，证实那里前几天确实发生了地震，这个事件显示了地震仪的灵敏度。

图1.1-1为当代地震学家冯锐于2004年根据《后汉书·张衡传》记载，并按“悬垂摆原理”复原的地震仪的外观和内部结构。

按照现代观点，候风地动仪仅仅能监测地震发生的大致方位和时间，不能测出震源位置及地震强度，还不能与现代意义上的“地震仪”相比。但是这一发明伟大之处在于，人类第一次尝试用机械器具来感知地震，并且获得了成功；在此之前和候风地动仪失踪之后的近1700年里，人类对于地震仍然局限于“感知”范围内，而地震学的知识也因为这些限制迟迟未能发展。

到了17世纪，伟大的英国科学家伊萨克·牛顿（Isaac Newton，1643~1727年）在《自然哲学的数学原理》一书中总结并发表了“牛顿运动定律”。牛顿第二运动定律为：物体的加速度跟物体所受的合外力成正比，跟物体的质量成反比，加速度的方向跟合外力的方向相同。即： $\Sigma F=ma$ 或 $F=ma$ ，这为计算地震作用提供了坚实的力学基础。

公元1876年，英国学者米尔恩（J. Milne、采矿工程师）、格雷（T. Gray，电报工程师）和美国的物理学家尤因（J. A. Ewing）受聘来到日本东京帝国工程学院任教，刚刚登陆日本就体验了一次地震，惊恐之余，他们对于传说中“鲛鱼作怪”而引发的“地震”发

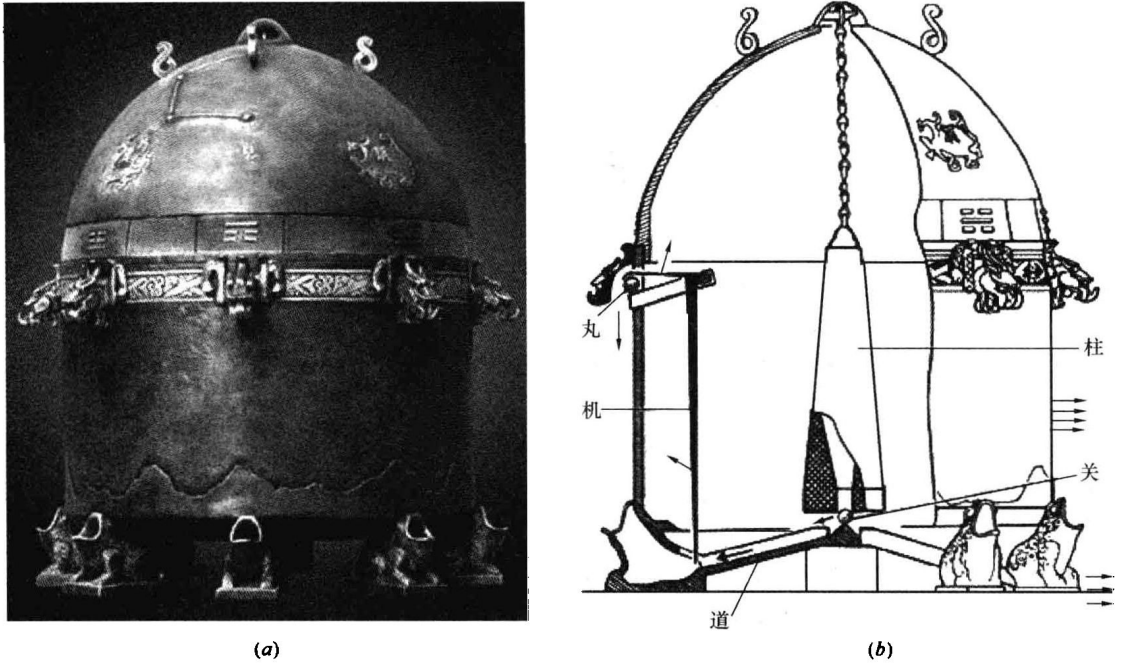


图 1.1-1 张衡的地震仪
(a) 复原模型; (b) 内部结构

生兴趣。为了记录下“地震”，他们和日本同事一起发起成立了日本地震学会，并且开始着手研制使用地震仪。

不久，Ewing 根据悬摆理论设计出第一台地震仪，由于测定地震动水平方向周期，称为“摆式地震仪”，如图 1.1-2 所示，其原理简述如下。

质量为 m 的重锤，悬挂于长 l （无质量）的绳子上，则摆在铅锤平面内的运动方程为：

$$m \frac{d^2(l\theta)}{dt^2} = -mg \sin\theta$$

式中， θ 为重锤的偏转角， t 为时间， g 为重力加速度。

若 θ 足够小，则上式简化为：

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l}\theta = 0$$

其固有周期即为 $T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}$ 。

“摆式地震仪”恰巧记录了 1880 年 11 月 3 日发生在日本横浜的灾害地震，取得了宝贵的“地震图”，这是早期反映“地震波真面目”的地震图。直到一百多年以后的今天，地震图依然是科学家研究地震的重要手段之一。

1881 年，Gray 设计出了垂直摆，用于测定地震动水平方向周期，如图 1.1-3 所示，其振动周期为：

$$T_0 = 2\pi\sqrt{a\Delta h/bh} \quad (1.1-1)$$

式中， Δh 为弹簧承重时长度的增量。

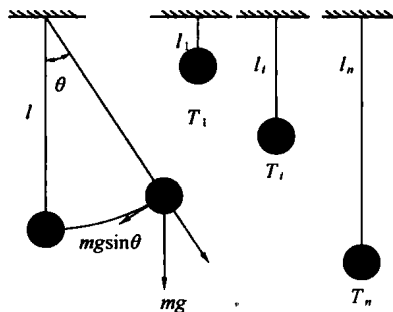


图 1.1-2 水平摆原理示意图

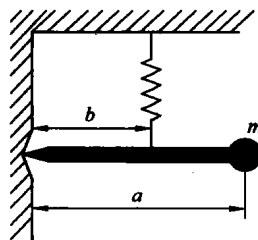


图 1.1-3 垂直摆原理示意图

根据动力学基本原理制造振动装置，再辅以信号放大装置、记录装置等，就可制造出可供应用的地震仪，客观而及时地将监测地面某个地点的振动记录下来。由地震仪记录下来的振动是一条具有不同起伏幅度的曲线，称为地震谱。曲线起伏幅度与地震波引起地面振动的振幅相应，它标志着地震的强烈程度。从地震谱可以清楚地辨别出各类地震波的效应。纵波与横波到达同一地震台的时间差，即时差与震中离地震台的距离成正比，离震中越远，时差越大。由此规律即可求出震中离地震台（即监测点）的距离，即震中距。

图 1.1-4 为 1919 年台湾地震时，在日本东京记录的水平震动的地震图。

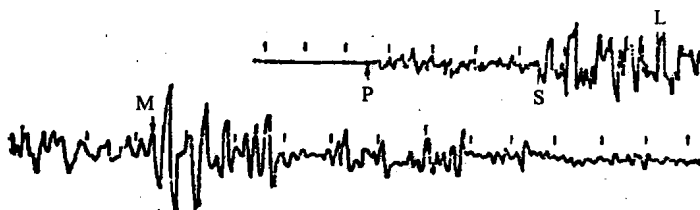


图 1.1-4 东京记录的 1919 年台湾地震图

1930 年，李善邦在北平开始创建鹫峰地震台，负责组装、调试德国进口的维歇尔式机械地震仪，并于当年 9 月 20 日 13 时 02 分 02 秒记录到第一次地震。

现代地震仪最重要的发展是应用地震检波器组合。这种组合中，有些由几百个地震仪组成，都连接到一个单独的中心记录器上。通过对不同地点产生的地震波图进行比较，研究者可以确定震中位置。地震仪主要量测弱震动，提供发震时间与大小、震源地点和力学特性等，从而使地震学者了解震源机制、地震波所经路线的介质、地震波特性及传播规律。

1.2 强震动与强震仪

早期地震仪仅能记录较小强度地震；当地震强度过大时地震仪常被破坏，不能记录到有用的强震动参数，因此有必要研发新型仪器，以便记录大地震的强度、周期等参数，这就是强震仪。

20 世纪 50 年代后期开始以地震工程为目的进行地震动观测，初期观测重点在结构物，且以房屋为主。随着人们对地震工程问题尤其是土-结相互影响理解的加深，逐渐认

识到地表附近的地震动是一个重要内容，所以现在更加重视全面的观测，包括结构物振动、室内外地表运动和地震动，这就要依靠强震仪。现代的强震仪可记录的物理量有位移、速度、加速度，分别称为强震位移仪、强震速度仪和强震加速度仪。

但在没有强震加速度仪之前，人们需要依靠一些基本的力学知识获取地面加速度，这些早期数据成为今天科研的宝贵基础数据。

1.2.1 倾倒的墓碑

1891年10月28日发生了日本浓尾（Mino-Owari）大地震，极震区位于伊势湾以北的广大平原地区，从福井市的东南延伸到名古屋市。地震引起山崩1万处以上，震塌房屋14万余户；造成7000余人死亡，1.7万余人受伤。地震形成了7条大断裂，主断层可能长达80km左右。一条通往岐阜城的大路被断层崖切断，断层东侧的地面升高约6m，并向北滑动约4m。按照后来估算的震级，最低为7.9，最高为8.4。这次震害使人们认识到地震研究和抗震防灾对策的重要性。1892年，日本成立了帝国地震研究委员会，研究地震预报方法和制定减轻震害的方法。

为铭记这次大地震给人类带来的灾害，日本对地震遗迹进行了保护，图1.2-1为保存完好的根尾谷地区的断层。

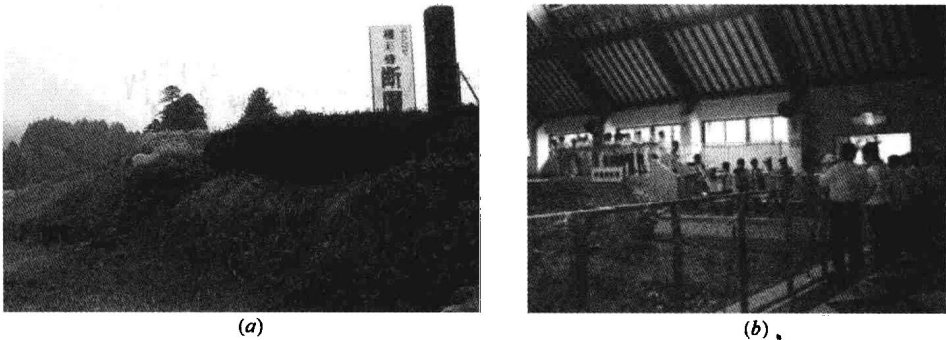


图 1.2-1 根尾谷地区断层
(a) 野外断层标识；(b) 断层室内保护

1891年，整个世界还没有能获得地面强震动加速度的强震仪，为了从建筑物的震害推算出地震强度（即：地面运动最大加速度除以重力加速度所得到的系数 k ），作为此后结构物抗震设计的基础，日本工程师认为有必要通过其他途径获得地震强度，有趣的是，工程师想到了墓碑。

日本的墓碑分布较为广泛，形状简单且大小差异不大，典型的日式墓碑由一方石柱置于平顶石座上。从理论力学角度分析，刚度极大可假定为刚体。假设墓碑重量为 W ，高度为 H ，宽度为 B ， g 为重力加速度（以伽为单位），水平强度 k_h 和垂直强度 k_v 分别定义为：

$k_h = \alpha_h / g$ ， α_h 为地面震动的水平加速度。

$k_v = \alpha_v / g$ ， α_v 为地面震动的垂直加速度。

如图1.2-2所示，对支点 O 取矩，当顺时针力矩大于逆时针力矩时，物体就会倾倒。墓碑倾倒的条件为：

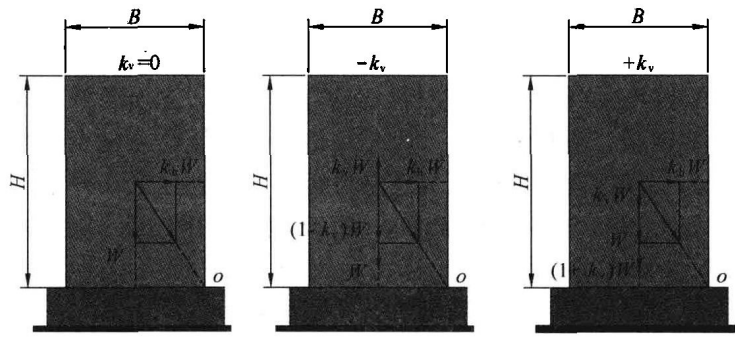


图 1.2-2 墓碑倾倒模型

$k_h W \cdot H/2 \geq (1 \pm k_v) W \cdot B/2$

即: $\frac{B}{H} \leq \frac{k_h}{1 \pm k_v}$

令 $k_v = \alpha k_h$, 那么 $k_h = \frac{B/H}{1 \pm \alpha}$

在 1891 年，地震学家收集的地震动资料极少，基于这个现实，假定垂直加速度远小于水平加速度 ($\alpha \ll 1.0$)，那么上式简化为 $B/H \leq k_h$ ，其物理含义为：水平强度可用墓碑的底宽 B 和高度 H 之比确定。表 1.2-1 即为用上述方法获得的一些大地震的地震强度。

墓碑法推算的地震强度 表 1.2-1

地震	年份	位置	水平强度 k_h
浓尾	1891	岐阜大垣	0.3
东京	1894	东京市区	0.1
		东京近郊区	0.04
旧金山	1906	旧金山市区	0.25
		旧金山近郊区	0.1
斐川	1909	尊胜寺	0.4
		长滨	0.2
关东	1923	镰仓	0.5
		东京市区	0.2
		横滨市区	0.3
田岛	1925	城崎	0.3
丹后	1927	乡村	0.4
北伊豆	1930	大场	0.4
		元箱根	0.3
南海	1946	高知	0.4
		和歌山	0.2
福井	1948	森田	0.5