

日本建筑物的有效抗震设计思路与进展

卢振恒

(中国地震局中国地震台网中心, 北京 100045)

总结国内外大量地震灾害的经验教训得知两条重要事实, 一是地震对建筑的破坏是造成人类生命财产损失的重要原因; 二是地震作为一种突发性灾难, 它可以在几十秒钟内将一座城市夷为平地, 导致数万人甚至数十万人死亡, 并使城市及周围地区的经济活动处于瘫痪状态。但是, 地震灾害并不是不可逾越的劫难。目前, 国内外各界都在为减少地震灾害的损失, 在建筑物的抗震能力和安全性等方面深入地研究、开发与应用。此文仅就日本建筑抗震技术研究与应用方面的进展作一介绍。

1 建筑物的结构设计

举例说明, 如设计建造一座医院, 就要考虑场地, 规模, 诊房、手术、床位和业务量等等, 将详细列出作为保障医院的机能的种种必要条件和满足这些条件的建筑物的方案称为建筑设计。其中也特别注意柱和梁的粗细及可承载其自重、地板厚度以及注意地板振动等建筑物的安全和性能, 其将由柱、梁、壁等组成的骨架部分能抗住外力的系统即建筑的结构体和构造物等因素的组装行为称为“结构设计”。结构构造设计就是适当地配置柱、梁等结构部件, 然后确定其尺寸和强度的“选择”过程。选择后的结果是否具有结构物所设计的机能, 即是否符合安全要求和确保性能要求, 对此要做“验证”, 由以上过程要反复“选择”和“验证”, 最后形成合理适当的结构物、构造物设计模型。

2 建筑物的抗震设计

在结构设计中, 为确保建筑物(构造物)相对于地震外力作用时的安全和确保性能而反复进行的“选择”和“验证”等一系列行为, 称为抗震设计。构造物上常常有自重、荷载的垂直向下的力作用, 而柱和梁不言而喻必须能抗得住这样的力作用, 不仅如此, 有时还得更能抗得住台风和积雪的袭击。这些外力, 一般地说作为“设计荷载”的标准值而确定下来。对于地震, 给出设计地震荷载, 而给出设定设计地震荷载时的基本信息是“反应谱”。

图 1a 就是其中一例, 描绘出相对于若干个记录地震波的(拟似)加速度反应谱。在一般性建筑物上, 由于地震荷载设计比其它荷载设计要大得多、重要得多, 因此, 对于地震荷载, 若要进行“选择”、“验证”时, 就要考量能抗得住比其它荷载更大的荷载因素, 这就是所谓的抗震设计控制构造设计的原理。

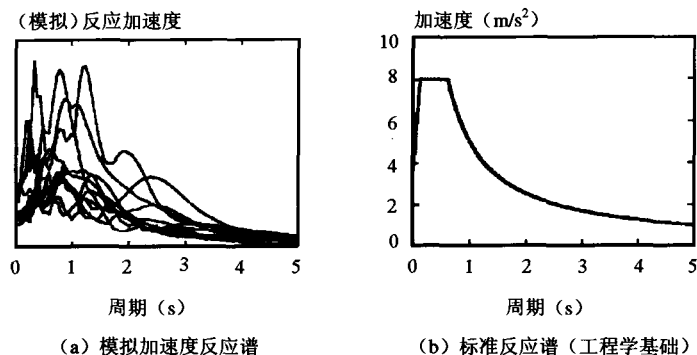


图1 为设定地震荷载给出的反应谱

3 建筑物抗震设计的难度

在构造设计中特别是抗震设计中有几个难点。出人意料地突发大地震的可能性虽然存在,但其频率极其低,而且,由于烈度7度、7度以上地震晃动程度是由地基控制或决定的,地震晃动因地基特性不同而有很大差别。对于构造物来说,作为外力源的强震动具有很高的不确定性。另外,即使对于同一地面的晃动,若构造物特性不同,构造物本身晃动也有很大变化,说明晃动和构造物特性密切相关。若构造物的固有周期不同,作用于其上的力也有很大不同,这一点从图1a所示的反应谱上也能有所了解。即使具有相同的(弹性)固有周期,层的强度分布均匀的场合和某层弱的场合,到达破坏的程度也有很大差别,如图2b(1层与其它层相比,相对弱些,图2b那样的破坏范例,在日本兵库县南部地震时也常见)。这些都说明了不确定性,由于构造特性不同,相对于荷载值发生变化不大的情况下,与其它荷载的设计相比,抗震设计是容易些,但也不可大意。

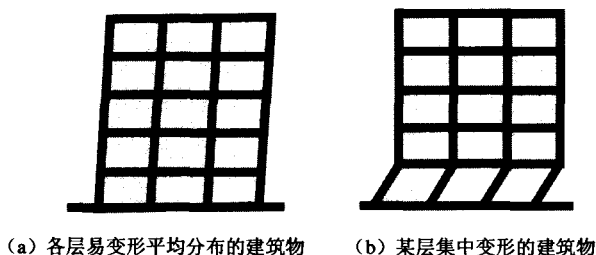


图2 因构造特性不同产生的破坏不同

4 各种抗震设计法

对于预测强震动,日本的翠川三郎先生提出理论方法(运动车预测)和经验手法(自动轿车预测)两种方法。前者性能虽然高,但难以应用。构造设计(抗震设计)在“验证”过程是完全相同的。应用最新的理论方法预测强震动,考虑到表层地基特性和支持上部构造物的桩柱和地下部分对其特性的影响,通过弹塑性地震反应分析检验构造物的柱、梁超过弹性限度时是怎样发生变形的,进而通过分析预测得到变形中柱和梁是否合理的顺应变形,对此应用精确构造分析予以验证,这属于理论性抗震设计。另外,将地震动置换为等价的(静态)地震荷载设计,并考虑适当的安全度,通过简便的弹性分析来检验构造物安全性等,这属于

经验性抗震设计。图 1b 是根据 1999 年修改后的建筑基准法确定的加速度反应谱, 这成为确定设计地震荷载(静态)的基本标准。在住宅密度较高的中小规模建筑群, 多使用经验性抗震设计。理论性抗震设计多适用于使用最新技术的超高层建筑物和减振建筑物等建筑上。

5 日本兵库县南部地震后的建筑物抗震设计

以兵库县南部地震出现的前所未有的建筑物破坏为契机, 通过震后 7 年的研究和开发, 大大改变了建筑构造物的抗震设计思路与实践。

(1) 对构造物的地震输入

理论性抗震设计时, 是通过理论方法进行强震动预测。具体地说, 考虑建设场地地震活性等设定模拟地震动作为对构造物的输入力, 并通过反应解析进行“验证”等程序后才确定下来。当然, 这里还应充分考虑表层地基地震动的增减幅特性。在 1999 年修改后的建筑基准法中, 也是充分考虑了表层地基特性对强震动的影响, 不是用过去对地表定义的设计地震力。规定了地表层地基下的刚性工程学基础的标准加速度反应谱(图 1b), 正式采用考虑表层地基晃动变化的方法。

(2) 建筑物的安全性和性能

日本抗震设计已有 20 年以上历史, 其设计理念定位在: 中小地震时能保证财产安全和继续使用的无损伤程度, 大地震时防止倒塌以确保人的生命安全(允许建筑物有损伤)。但是, 在兵库县南部地震时, 即使建筑物免遭破坏、保住人的生命, 但建筑物的损伤也难免造成社会活动停滞、资产减少等现象发生。作为教训, 必须提高认识, 仔细关注因地震大小、强度、频率和由此遭受损伤程度等因素和考查各类建筑物在大地震时应具有的功能后再作设计这一概念。作为这些思路的最突出最先进的就是“性能设计”。

在“性能设计”中, 有必要用量来表示损伤程度, 但对于一般建筑物, 是取最大层间位移(某层地板位置的水平位移和与其上层地板位置的水平位移之差的最大值)造成损伤程度为基本指标。由最大层间位移可推断柱和梁会不会或可能产生多大的应力、形变、损伤, 而且对于墙间壁、外装饰和构造物的构成要素, 不管哪一种损伤都将造成财产丧失和活动停滞等重大物质损失。该位移亦成为评价造成损伤的诸部件损伤程度的指标。对于理论性抗震设计, 通过弹塑性地震反应分析可以预测最大层间位移相对多次地震动将发生怎样程度的变化。在 1999 年修改后的建筑基准法, 虽然实施弹塑性地震反应分析比较合理, 但仍要参考规定的设计地震荷载的加速度反应谱, 引进“等价线性化法”这一思路, 提出包括所设计的构造物出现多大程度的最大层间位移的预测方法, 称此为“临界弹性极限应力法”。所有这些都是使性能设计具体化的基础程序思路。为使构造物赋有高安全性而进行改进设计、施工方法和以高精度预测构造物安全性临界而研究开发分析等, 均纳入并作为性能设计高度化的一环。

(3) 减振、控振建筑物

极端地讲, 免震是使建筑物浮在空间里, 这样, 不管地面怎样摇晃, 其晃动完全传不到建筑物上。当然, 这是不现实的。

通过将水平向运动相反的柔性反应装置配置在地面(基础)和建筑物之间, 呈即使说不上浮于空中状态也与此相似的状态。这样的装置就叫减振装置。组合构造这种减振装置的建筑物叫减振建筑物。

减振建筑物的固有周期相当长(3—5s), 从图 1a 加速度反应谱可以知道, 作用于建筑物

的加速度（图 1b）急剧变小，这是减振建筑物的长处。但是，由于柔软部分在水平方向有很大的弯曲度，所以，有必要设计如同上部构造物本身触不到围壁那样的充分大的净空间。

6 建筑抗震控制技术的应用

日本减振构造的历史久远，日本减振建筑物第 1 例是 1983 年设计的。在兵库县南部地震前，每年建设 10 栋。与此相反，地震后由于强化抗震意识，其建筑数量猛增，每年有 100—200 例。采用减振构造的理由是它具有更高的安全性。作用于建筑物上的加速度（力）急剧减小，极大提高建筑物功能的维持能力。由于有这个优势，在灾害紧急时必须保持 100% 功能的建筑，如：医院、消防厅等防灾设施都给予广泛应用，数据增加迅速。在发生兵库县南部地震这样大的灾害的多地震地区，应考虑大规模应用这种减振技术。

有很多方法可以避免建筑物移动过度，最简单的可能是在人造橡胶垫中混合具有特殊目的的填充物，增加垫子的内磨擦，借此减少建筑物随着大地前后摇动。用来减缓建筑物晃动的另一种装置，是在每一个人造橡胶垫中心塞入铅栓，凭借铅的可塑性，增加垫子任意剪切扭曲时能量的消散（图 3）。

所有的隔振系统最后的问题就是如何使建筑物回到原来位置，解决方法通常是依靠弹簧的弹性，或是以水平钢筋作为弹簧的拉力，另外就是通过中心有垂直钢管作为垂直悬臂弹簧的人造橡胶垫（图 4）。

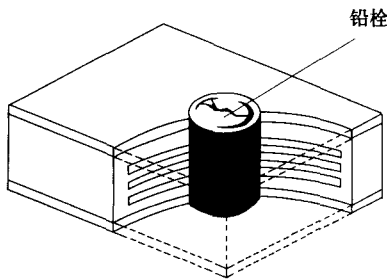


图 3 装有铅栓的人造橡胶垫

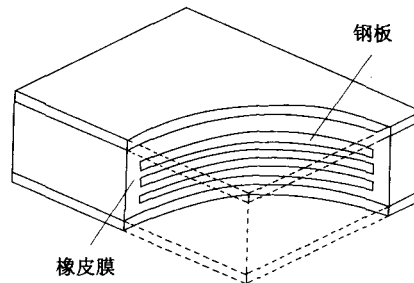


图 4 合成橡胶垫

台湾在 1999 年集集地震时遭到严重破坏，但并没有积极引进减振技术。他们也充分肯定减振构造的安全性能，但认为说起来容易做起来不易，并不是在图上计算和设计即可，实际制造起来必须有减振构造的技术、能提供减振装置的制造商、购销减振装置的流通体制。能与制造商协调、具有设计减振建筑物的技术和经验的设计者，有实际施工能力的技术人员和技术工人目前实在太少。这样的人力、物力资源不是一日即蹴的，日本从兵库县南部地震以来经历长时间反复多次试行才培养出具有这种能力的技术与组织，以这次地震为契机不可能很快推广。这样，从研究开发到减振技术广泛普及使用，需要长期的埋头苦干才会有现在的发展。

控振构造多用于高层建筑物，且数量不断增加，这就是将称之为阻尼装置的能量消耗机制配置在建筑物中，用它来减轻地震时的晃动。根据能量消耗形式的不同，研究开发出类似于“过程阻尼”、“粘性阻尼”等多种装置。近年来，几乎所有高层建筑物的设计都在考虑使用“阻尼”技术。控振和减振二者虽然都从 1980 年开始开发各种“阻尼装置”，但对如何配置“阻尼”、最有效的抑制摇晃等问题却还需要进一步的研究，不断积累实践经验。

无论是对反映表层地基特性的地震动评价, 还是对量化建筑物损伤所要进行的最大层间位移预测, 其评价和预测精度等都有很大的改善空间, 而且还存在强震动的不确定性高这一难题。目前, 兵库县南部地震才过几年, 有关建筑物安全与减轻地震灾害问题, 还需继续实践、总结和提高。尽管如此, 兵库县南部地震时暴露出的建筑物抗震问题和震后实践解决这个问题, 至少可以自信地说, 已经向解决建筑物安全问题的正确方向迈进了一大步。

兵库县南部地震的最大教训和问题是抗震性能并非是万全的, 并且需要对大量现有建筑物进行抗震改造。基于这些问题的重要性和紧迫性, 1995 年 10 月日本建设省公布了“促进建筑物抗震改造法律”。为促进文教设施的抗震改造, 制定了改造和改造前确定抗震设防标准所需部分经费由国家补助的制度, 由此促进中小学校的抗震改造。这一做法, 正在其它方面推广和实施。这些思路和实践, 值得大家借鉴。

20 世纪初, 早在人造橡胶垫发明之前, 美国各大城市就出现三四层楼的连栋建筑物意外成为极佳的基础隔振法典范。这些连栋建筑物的底层只作车库使用, 在地震发生之际, 底层的柱子无墙壁支持, 底层因重压而弯曲, 甚至危险倾斜, 但其上的楼层却安然无恙。虽然有时这样的建筑物不可能恢复原先的状态, 甚至造成建筑物的毁损, 但这也显示了另一种建筑物隔振的方法: 就是把底层支柱的中端铰接起来, 凭借弹簧限制底层的运动, 或是在管翼中打上直径较大的桩, 铰接上下两端, 并把它们连接在铸于混凝土块的底层钢筋顶端。在后面这种做法中, 管翼会限制建筑物的移位, 而连接在沉重混凝土块中的钢筋则有弹簧的作用, 可以让建筑物回到原先的位置(图 5)。

建筑大师赖特说, 帝国饭店就是因为其有弹性的长基桩, 才能在 1923 年东京大地震时逃过一劫, 这种基桩就像地下“薄弱楼”的柱子一样, 能够让沉重的钢筋混凝土建筑在其中水平摇摆而毫无损害(见图 6)。

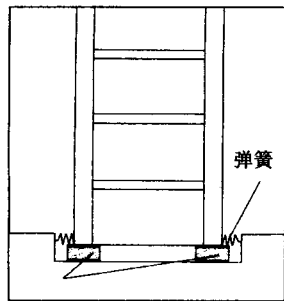


图 5 弹簧铰接的基底隔震建筑

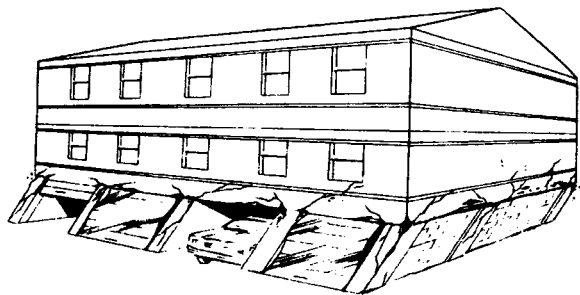


图 6 底层薄弱建筑物的扭曲

21 世纪是创新时代, 是高新技术高度发展和应用时代, 也是人类社会生活充满活力、幸福的时代。虽然目前这些高新技术的应用还不普遍, 还处于萌芽发展阶段, 但这是一项非常有希望的有吸引力的事业。在 21 世纪的国际科技和经济全球化大发展环境下, 地震的预测预防 and 救灾事业借高新技术的武装必将得以发展和发挥减灾作用, 为人类的生存安全和健康、为经济发展和社会安宁做出贡献。