曲哲　中泽俊幸

建筑隔震技术在日本的发展与应用

曲哲，中国地震局工程力学研究所副研究员。2001年至2010年就读于清华大学土木工程系并先后取得工学学士、硕士和博士学位。曾先后赴英国爱丁堡大学、日本东京工业大学、美国加州大学洛杉矶分校从事交流合作和博士后研究。研究领域主要涉及建筑结构地震损伤控制和建筑物地震恢复力等方面。曾获中国地震局防震减灾科技成果一等奖、国际桥梁与结构工程师协会（IABSE）青年工程师贡献奖等。近年来在相关专业领域发表论文90余篇，著有专著《结构札记》一部，译著《建筑结构损伤控制设计》一部。

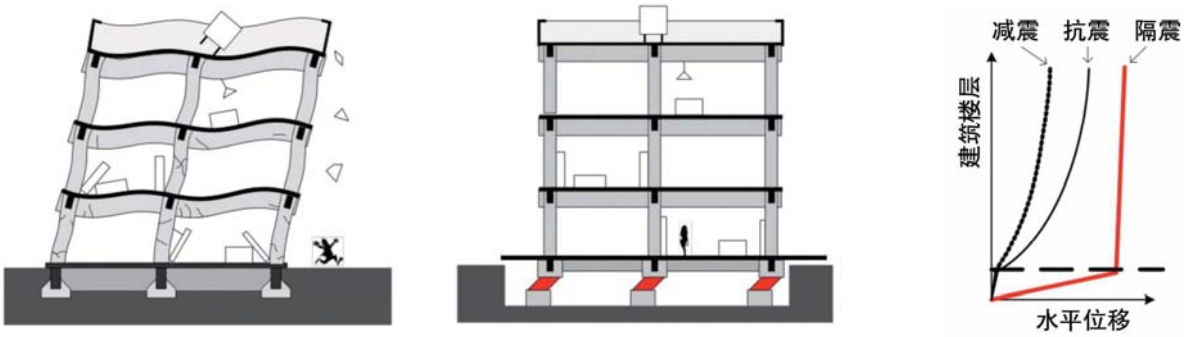
中泽俊幸，日本东京建筑研究所董事。1980年至1986年就读于日本早稻田大学并先后取得学士和硕士学位，2013年于东京工业大学取得工学博士学位。长年从事隔震建筑的设计与研究工作，曾参与编写《隔震结构入门》《隔震结构设计指南》《JSSI隔震结构施工标准》等规范，并发表多篇学术论文。主持或参与设计隔震建筑30余栋，其主持设计的日本稻城市立医院隔震结构荣获第2届日本隔震结构协会优秀作品奖。

隔震的原理

隔震的基本思路非常简单，就是在建筑物与基础之间设置一个柔软的隔震层，减小地震动对隔震层以上结构的影响。当建筑受到地震袭击时，地面运动会从基础开始向上传播并被逐渐放大。这样一来，不但结构本身很容易被损坏，建筑设备和室内家具等也都很容易被损坏（见图1a）。在隔震建筑中，由于隔震层在水平方向比较柔软，变形主要集中这里（见图1b），于是产生三方面效果：（1）柔软的隔震层延长了结构的自振周期，往往可以有效减小结构的加速度反应；（2）安装在隔震层中专门用于耗散地震能量的消能器可以通过集中在隔震层的变形，有效地耗散地震能量，从而减小建筑的加速度和位移反应；（3）结构周期延长了，总变形通常会增大，但在隔震建筑中，变形集中在隔震层，这有效地减小了隔震层以上的上部结构的变形（见图1c）。

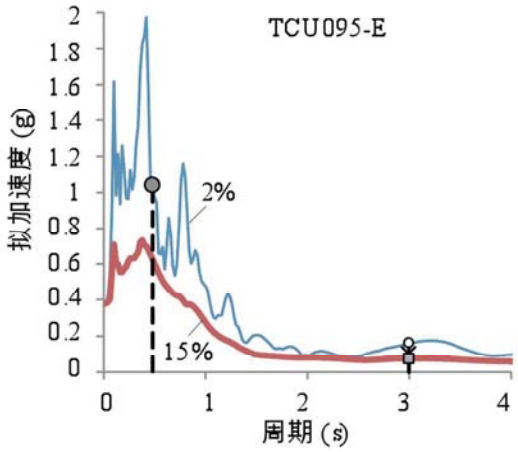
前两方面的隔震效果可以通过反应谱直观地解说。对于一般的地震动，短周期的加速度成分往往多于长周期成分。图2（a）所示的TCU095–E记录便是典型的例子。这条地震动记录是在1999年台湾集集7.6级地震中得到的。比如一座普通多层建筑的基本周期是0.5s，通过隔震将其周期延长至3s。那么其最大拟加速度反应将从如图2（a）所示的实心圆圈处大幅下降至空心圆圈处。如果在隔震层合理设置一些耗能装置，比如使整体结构的阻尼比从2%提高到15%，则可以进一步降低至如图2（a）所示的实心方块处。

在这个例子中，延长周期带来的减振效果远远好于提高耗能的减振效果。然而，结构的周期易于控制，未来地震动的频谱特性却难以掌握。如果遇到的不是TCU095–E记录那样的地震动，而是同样在集集地震中另一个台站记录到的TCU052–E记录那样的地震动，情况就大不一样了。

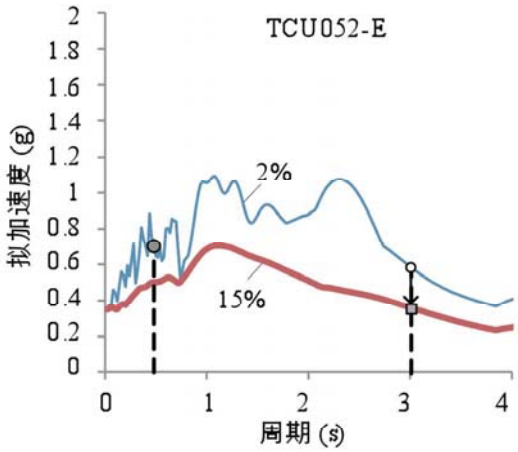


（a）一般建筑　　（b）隔震建筑　　（c）侧向位移的比较

图 1　建筑物的地震反应示意图



（a）一般地震动



（b）近断层脉冲型地震动

图 2　隔震建筑的地震反应

集集地震的 TCU052–E 记录是典型的近断层脉冲型地震动。其特点是在地面运动时程中有明显的长周期大振幅脉冲。这从图 2 所示的 TCU095–E 记录和 TCU052–E 记录的加速度时程的对比上可以看出来。这种长周期大振幅脉冲往往蕴含巨大的能量，表现在反应谱上就是在长周期段（比如周期大于 1s 的区段）会有明显的反应谱峰值。通过隔震手段延长结构的周期，有可能正中长周期地震动的下怀。尽管如此，通过在隔震层设置耗能装置，提高结构的耗能能力仍可以有效地减小上部结构的地震反应见图 2（b）。

从地震损伤控制的角度讲，无论隔震结构能否有效避开未来地震动中蕴含较大能量的频率成分，其变形与损伤机制都被根本改变了。柔软的隔震层吸收了结构的大部分变形与损伤，像保险丝一样给上部结构可能受到的地震作用封了顶，使本来充满不确定性的地震作用更加易于估算，从而使上部结构的设计更加简便与可靠，同时也为建筑设计提供了高度的结构自由性。

日本建筑隔震技术略史

如果以 1881 年日本地震学会的成立为日本地震工程学研究开端的话，那么日本建筑隔震的历史几乎与日本地震工程学研究的历史一样久远。1891 年 8.0 级浓尾地震造成了巨大的灾难。同年，河合浩藏提出在混凝土基础下设置数层纵横排列的圆木隔震结构（见图 3）。这恐怕是日本最早的现代隔震结构的设想了。

1923 年 7.9 级关东大地震之后，再次出现了一些关于隔震建筑的构想。如 1924 年鬼头健三郎在名为“建筑

物抗震装置”的专利中提出的在柱脚处采用滚珠隔震的方法（见图 4），以及岡隆一在 1928 年提出的由两端采用不同半径的球面的铰支短柱形成的“隔震基础”（见图 5）。值得一提的是，1934 年建成的不动贮金银行姬路支行采用了岡隆一提出的短柱隔震的专利技术。虽然短柱隔震技术随后并没有在日本得到很好的推广，但这恐怕是日本第一座实际建成的现代隔震建筑。

20 世纪 30 年代席卷全日本的“刚柔之争”在客观上为日后隔震建筑的大发展奠定了思想基础。当时，东京帝国大学（“二战”后更名为东京大学）的佐野利器、武藤清等学术权威主张刚性结构。与之针锋相对的是以海军技师真岛健三郎为代表的柔性派。以当时人们对地震动特性和结构动力反应的理解，没能争出个结论来，尽管如此，否定隔震结构的刚性派（权威派）仍然占了上风。在这样的条件下，真岛健三郎于 1934 年提出了如图 6 所示的柔性底层结构。

1960 年，小堀铎二针对核电站核反应堆的抗震问题提出了如图 7 所示的解决方案，并首次提出了赋予结构能够控制地震动的特性的“制震”的概念（我国常称之为减震）。

1964 年，日本发生了因大规模砂土液化而著名的新潟地震。翌年，松下清夫、和泉正哲提出一种具有自复位特性的滚珠隔震（见图 8）。而此后不久，后来统治日本隔震界的叠层橡胶支座登上了历史的舞台。

橡胶与钢板交错布置而成的叠层橡胶支座最早是 1970 年在欧洲开发的。20 世纪 70 年代末 80 年代初曾在法国应用于学校和核电站的隔震。1980 年，福冈大学的多田英之等人最早在日本开始了叠层橡胶支座的研究。这一系列研究以小

图 3　河合浩藏提出的滚木隔震（1891）

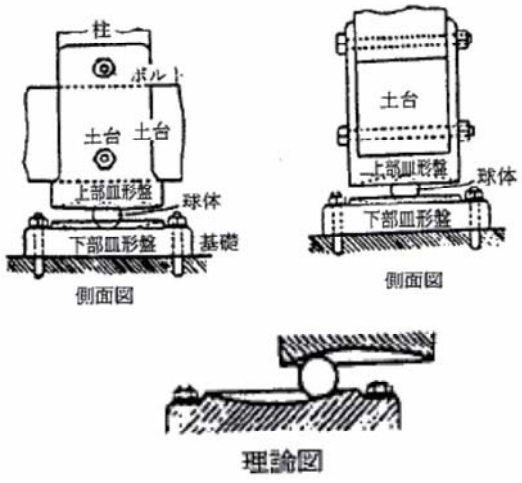


图 4　鬼头健三郎提出的滚珠隔震（1924）

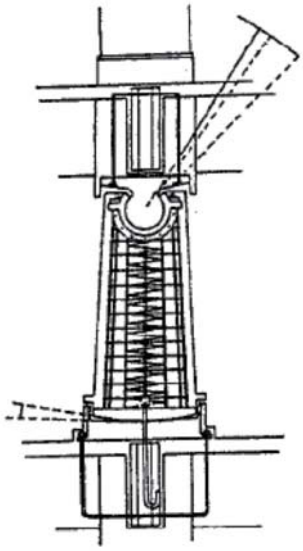


图 5　岡隆一提出的短柱隔震（1928）

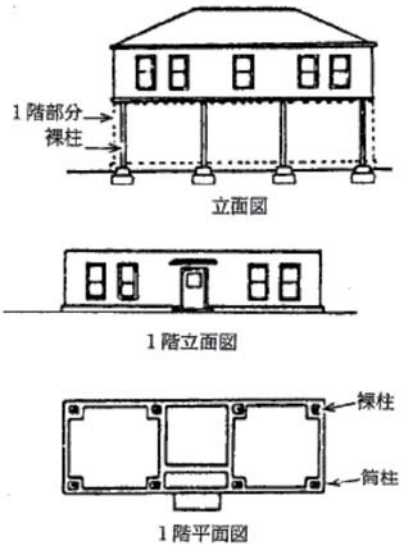


图 6　真岛健三郎的柔性底层结构（1934）

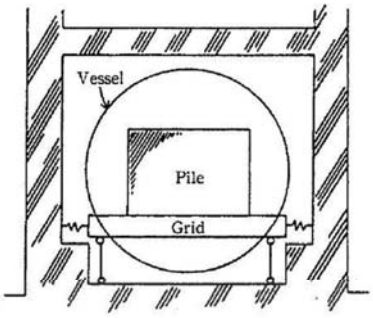


图 7　小堀铎二提出的核反应堆制震结构（1928）

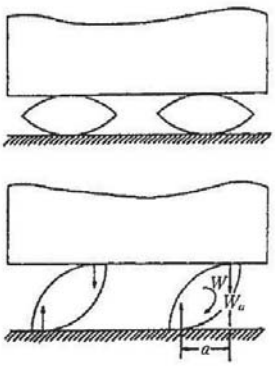


图 8　松下清夫、和泉正哲提出的摇摆滚珠隔震（1965）

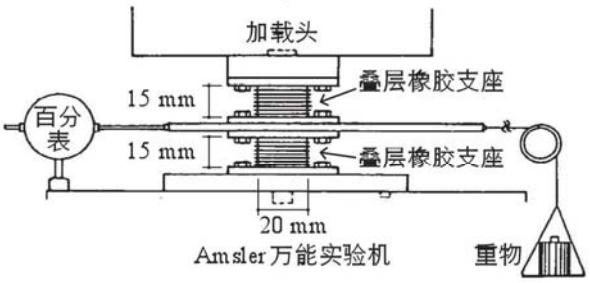


图 9　日本最早的叠层橡胶支座压剪试验

比例尺的试件为对象，系统地研究了叠层橡胶支座的压缩和压剪刚度（见图 9），并以此为基础进行了小比例尺钢框架隔震模型的振动台试验。

以这些研究成果为基础，1983 年，日本第一座采用叠层橡胶支座的现代隔震建筑——位于东京的八千代台住宅——诞生了（见图 10）。它的结构设计正是东京建筑研究所的前任所长山田昭一与福冈大学多田英之教授的团队合作完成的。在日本工程界，八千代台住宅又常被称为“日本第 1 号”。这是 1 栋纵向 2 跨横向 1 跨地上两层总高约 7.6 米的独栋住宅。采用 6 个天然叠层橡胶支座进行隔震，每个支座的橡胶层总厚度为 60mm，设计时考虑的橡胶支座极限侧向变形为 250mm。上部结构与周边挡土墙壁之间的隔震缝宽度为 350mm，即保证在橡胶支座断裂破坏之前上部结构不会与挡墙壁发生碰撞。此处，在隔震层设置了“破坏－安全”支墩，以保证在隔震支座被破坏的极端情况下上部结构的安全。

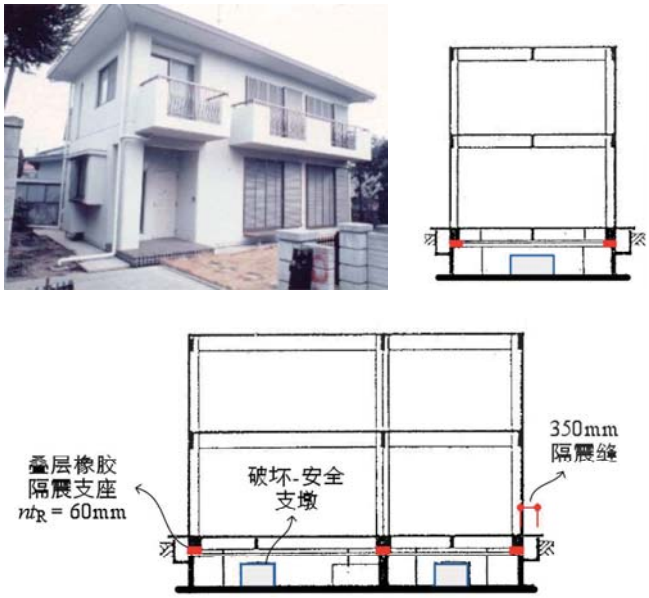
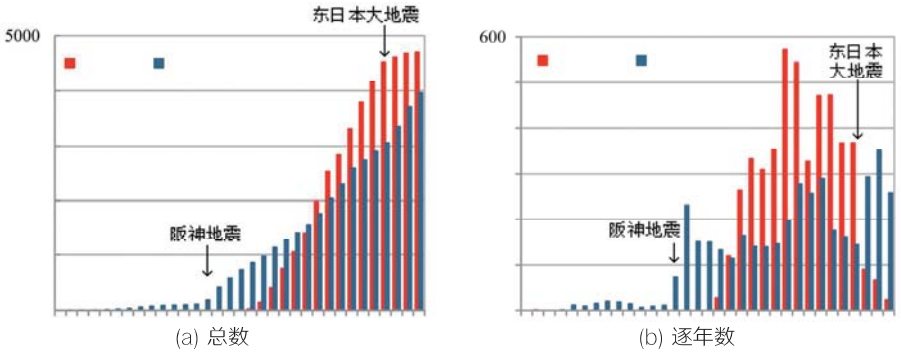


图 10　“日本第 1 号”八千代台住宅

然而，叠层橡胶隔震支座在八千代台住宅的应用并没有立即带来隔震技术应用的大发展。直到十几年后的 1995 年，阪神地震才再次使日本民众警醒。在这次 7.3 级地震中，大量采用抗震结构的房屋倒塌或严重受损，而建成于 1994 年的采用隔震技术的“WEST 大楼”则充分发挥了隔震的效果。以此为契机，以往不被世人所知的隔震技术走进了公众的视野，隔震建筑也在日本迎来了高速发展的阶段。

图 11 总结了 1982 至 2014 年间日本隔震建筑数量的变化。从图中可以明显地看出，在 1995 年阪神地震之后，隔震技术在日本真正地起飞了。

截止 2014 年，日本全国共有各类型隔震建筑约 8600 栋，其中约 4700 栋为规模较小的独栋住宅，约 3900 栋为其他建筑，主要是集合住宅。不论从数量还是质量上看，日本都是名副其实的世界第一隔震大国。



(a) 总数　　(b) 逐年数

图 11　日本隔震建筑数量的增长（数据来源：日本免震协会 JSSI 主页及刊物 MENSHIN）

日本隔震建筑的实际地震反应

前面提到，位于兵库县的 WEST 大楼在 1995 年阪神地震中展示的隔震效果真正地让隔震技术走向了社会公众。WEST 大楼地上 6 层，局部 8 层，高 28.85m，建筑面积 46823m^2，是当时世界上规模最大的隔震建筑（见图 12）。采用 54 个直径 1.2m 的铅芯橡胶支座和 66 个直径 1m 或 0.8m 的叠层橡胶支座进行隔震。隔震层中同时设置了 44 个环形钢阻尼器。

在阪神地震中，WEST 大楼距离震中仅 35km。建筑基础上记到的峰值加速度为南北方向 300cm/s^2，东西方向 263cm/s^2，竖直方向 213cm/m^2；经过隔震层过滤后，首层楼面处的峰值加速度减小到南北方向 57cm/s^2，东西方向 106cm/s^2，竖直方向 193cm/m^2；与之对应的顶层峰值加速度为南北方向 75cm/s^2，东西方向 103cm/s^2，竖直方向 377cm/m^2。水平方向的隔震效果非常明显。与此同时，隔震层最大位移出现在东西方向，为 12cm，东西双向合计总位移约为 20cm（见图 13）。在这样的位移下，隔震层的损伤仅限于环状钢阻尼器漆皮剥落，且没有残余位移。

除了著名的 WEST 大楼之外，日本还有不少经历了实际地震考验并且表现出优异抗震性能的隔震建筑的实例。比如早在 1986 年，清水建设和日本东北大学合作，在东北大学的校园里建造了两座几乎一模一样的试验性的建筑。这两座紧临的建筑都只有 3 层高，建筑面积都是 209m^2，布置也基本一样。二者主要的区别在于，一栋采用传统的抗震结构；而另一栋采用 6 个高阻尼橡胶支座进行了隔震。建成翌年的 1987 年，福岛县近海发生 6.7 级地震，震中距离该建筑 168km。上述非隔震建筑的顶点峰值加速度达到 205cm/s^2，而隔震建筑的顶点峰值加速度却只有 36cm/s^2，隔震效果非常明显。在 1998 年的宫城县南部地震中，二者的基础位置都记录到了约 380cm/s^2 的水平峰值加速度，非隔震建筑屋面的最大水平加速度为 672cm/s^2，而隔震建筑的屋面最大水平加速度只有 137cm/s^2，再次展现了隔震的效果。

在 2011 年 9.0 级东日本大地震中，位于震灾中心区的石卷红十字医院的成功案例再次向公众展示了隔震技术的优异性能。该医院建成于 2006 年，为地下 1 层，地上 7 层（局部 8 层）的隔震结构。地上部分主体结构采用钢结构，建筑面积 32486m^2。由于场地条件较差，场地卓越周期长达 1.4s，因此在设计隔震层时，采用了天然叠层橡胶支座、滑板支座和钢阻尼器混用的方案（见图 14），使结构在罕遇地震时（隔震层变形 49cm 时）的等效隔震周期达到 3.73s，仅考虑隔震支座而不考虑钢阻尼器时的隔震周期则长达 5.39s。

在东日本大地震中，该医院隔震层最大变形达到 26cm（单侧），大约为设计时罕遇地震下变形的一半。几乎所有的钢阻尼器的表面涂装都有剥落（见图 15）。上

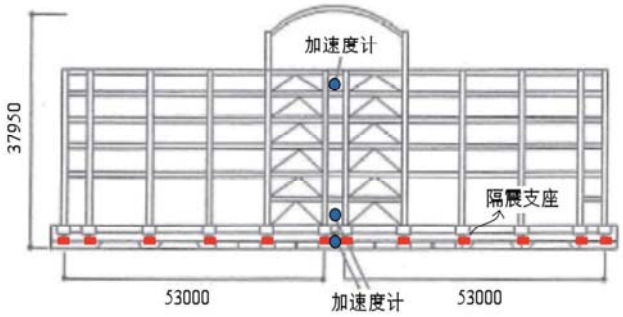


图 12　兵库县 WEST 大楼剖面（单位：mm）

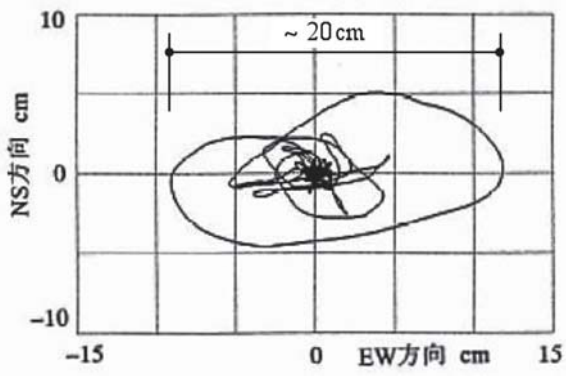


图 13　WEST 大楼隔震层位移

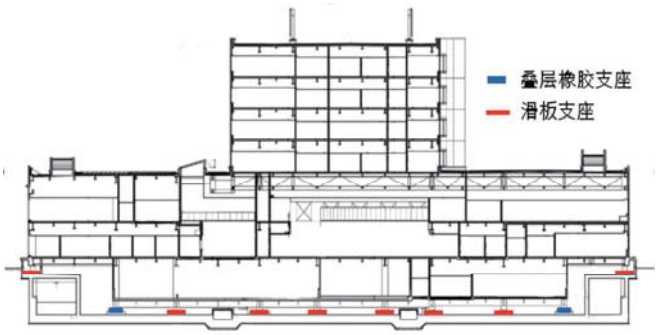


图 14　石卷红十字医院的隔震结构

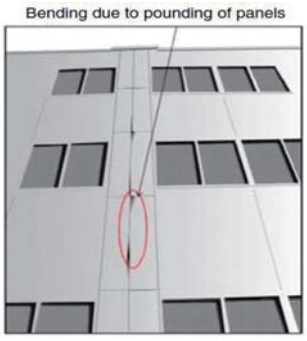
图 15　钢阻尼器涂装层剥落

图 16　震后的室内

部建筑的室内虽然有电脑显示器跌落、书本散落等现象（见图 16），但没有人员受伤。震后，该医院成为救灾中心，不但收治了大量伤员，还成为其他救援队伍和组织的临时聚点，充分发挥了应急救灾的作用。

2011 年东日本大地震后，日本东京工业大学的笠井和彦教授调查、搜集并整理了 327 栋隔震建筑的地震反应情况。全部隔震建筑的上部结构均完好无损。约有 15% 的隔震建筑的隔震层中的阻尼器出现了不同程度的损坏，但并没有影响隔震建筑在地震中的表现。最常见的震害则是各种接缝处的非结构构件的破坏，如室外地面处隔震沟盖板［见图 17（a）］和外墙饰面的变形［见图 17（b）］。

（a）隔震沟盖板弯折



（b）外墙饰面变形

图 17　隔震建筑接缝处的非结构构件破坏

前面在介绍隔震原理时曾提到，长周期成分比较显著的近断层脉冲型地震动对柔性的隔震结构非常不利。在 2011 年东日本地震之前，便有学者开始关注近断层脉冲型地震动可能对隔震建筑造成的不利影响。在 2016 年的熊本地震中，位于断层破裂方向的阿苏医疗中心经受了近断层脉冲型地震动的考验。该隔震建筑虽然距离震中比较远，但正好位于布田川断裂带的破裂方向上（见图 18）。由于向前方向性效应，其所在区域容易形成大振幅速度脉冲的近断层地震动。位于阿苏医疗中心附近的 K–NET 一之宫台站的地震记录证明了这一点。该地震记录的拟速度谱在 3s 左右出现显著的峰值。在该建筑的隔震周期处，两个水平方向的拟速度谱值均高于日本第二水准的设计谱，南北方向甚至达到设计谱的 2 倍（见图 19）。

图 18　熊本地震中的阿苏医疗中心的地理位置

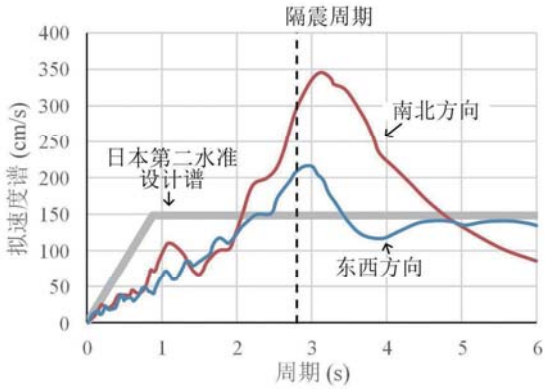


图 19　K-NET“一之宫”台站记录拟速度反应谱（阻尼比 5%）

在熊本地震中，在该建筑的隔震层中记录到了 ±45 cm 的变形，两方向合计 90 cm 的最大变形，是日本隔震建筑出现以来记录到的最大的隔震层位移。该建筑的隔震沟宽度为 62 cm，足以避免隔震层碰撞的发生。地震后，该医疗中心的功能基本没有受到影响，仅发生个别接缝处非结构构件的破损、储物柜倾倒、自动玻璃门无法正常开启等非结构破坏。这一案例再一次体现了隔震技术在提升建筑震后恢复能力方面的优越性。

超高层建筑的隔震

日本从 20 世纪 60 年代便开始探索在地震区建造超高层建筑的技术。随着 1995 年之后隔震技术的快速发展，1999 年，日本建成了第一座超高层隔震建筑——地上 18 层的仙台 MT 大楼。2002 年，采用隔震技术的地上 29 层的元麻布大楼在东京建成。与隔震技术在超高层建筑中的逐步应用相伴随的，是关于超高层隔震建筑的广泛争论。反对意见主要有两种：一是担心高宽比较大的超高层建筑若采用隔震建筑会面临严重的倾覆问题；二是认为超高层建筑自身周期已经比较长了，在此基础上再采用隔震技术，通过延长周期来减小结构地震反应的效果会大打折扣。

关于倾覆的问题，其实早在 1963 年，G.W.Housner 教授在研究细长结构在地面运动作用下的摇摆反应时已经做了回应。在论文中，Housner 教授给出了使细长结构发生倾覆的速度反应谱 Sv 的计算公式如下。

$$S_v = \frac{h}{b}\sqrt{gR}$$

式中，h/b 为建筑的高宽比，g 是重力加速度，R 是建筑物的重心到底边一角的距离。

根据这一公式，图 20 所示的 225 米高、高宽比 h/b=3.75 的超高层建筑的动力稳定性和 25 米高、高宽比 h/b=1.25 的多层建筑是相同的。换句话说，结构在地震中抗倾覆的稳定性具有尺寸效应。结构体量越大，动力稳定性越好，越不容易倾覆。

关于延长周期的隔震效率问题，上文介绍了隔震的三方面。当上部结构自身周期比较长（比如超高层建筑）时，隔震的第一条原理（延长周期的原理）确定会受到影响，但前面介绍的第二、三条原理仍然适用。一方面，即使隔震层比较硬，它仍然能够承受较大的变形（见图 21）；另一方面，隔震层同时是耗能集中的部位，在隔震层设置消能器可以有效地耗散地震输入能量，从而减小上部结构的地震反应。

进入 21 世纪，日本的超高层隔震技术在争论声中不断发展。到 2013 年为止，日本已建成高度超过 60m 的超高层隔震建筑 297 栋，其建设年份的分布如图 22 所示。此外，日本采用减震或隔震技术的超高层建筑在所有超高层建筑中所占的比例也在 1995 年之后有了快速的提高。从 2000 年开始，日本每年建设的超高层建筑中，大约有 40% 左右采用了减震技术，约 20% 左右采用了隔震技术。二者之和已经超过了采用传统抗震方案的数量（见图 23）。

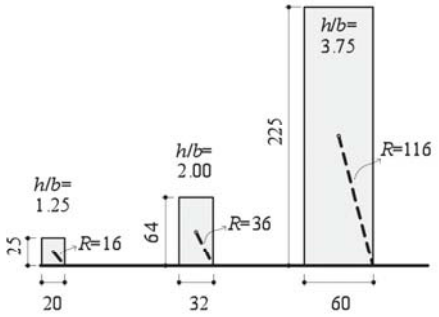


图 20　在地震中具有相同的稳定性的摇摆体
（长度单位：m）

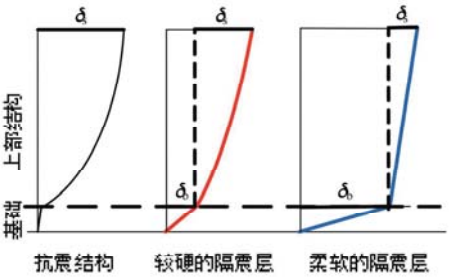


图 21　隔震结构变形的分配

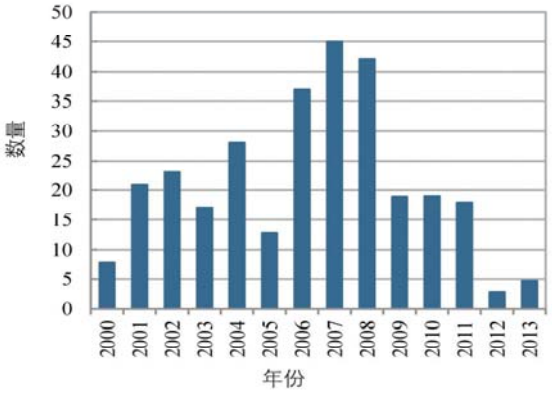


图 22　日本 2000 年以来超高层建筑的建设年份
（建筑高度超过 60m）

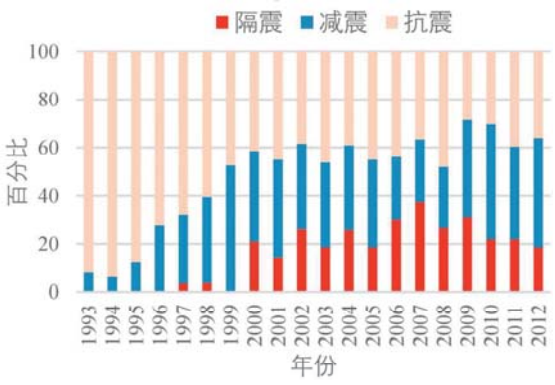


图 23　日本超高层建筑抗震方案的演变

基于隔震技术的抗震加固

隔震技术同样的对既有建筑进行抗震加固的有效手段。由于施工主要集中在地下，无论对建筑立面还是内部空间的影响都相对很小。这对于保护历史建筑和其他有纪念意义的建筑尤为重要。大阪市中央公会堂的隔震改造是一个典型的成功案例。该项目于 2006 年荣获日本建筑学会奖。

中央公会堂始建于 1918 年，地上 3 层、地下 1 层，具有日本近代建筑的典型特征（见图 24）。2002 年对其进行抗震加固时，采用了以隔震为主，同时辅以对上部结构进行局部加固的方案。隔震层施工工序如下：（1）在建筑四周浇筑钢筋混凝土地下连续墙，在建筑底部进行第一次挖掘，对原有基础进行加固；（2）利用第一挖掘在建筑底部形成的空间，进行第二次挖掘，设置钢管桩，将整个建筑临时托起，并通过设置在桩顶的油压千斤顶调整建筑的不均匀沉降；（3）浇筑新的厚 1.2m 的筏板基础，在既有基础和新设基础之间安装隔震支座；（4）对隔震支座进行预加载，将钢管桩承受的荷载转移到隔震支座上，并切除钢管桩（见图 25）。

图 24　大阪市中央公会堂主立面

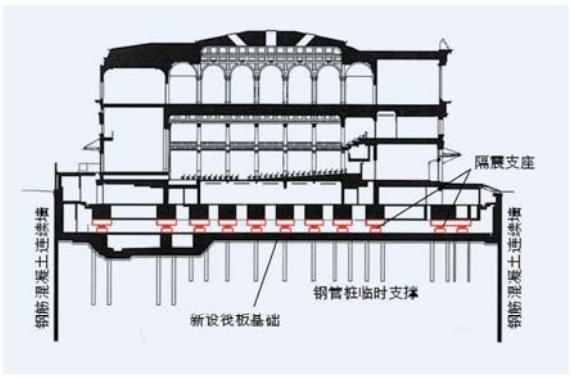


图 25　大阪市中央公会堂隔震改造示意图

结语

隔震技术是目前人类掌握的减轻建筑物地震损伤的效果最好、适用性最强的方法。日本的建筑隔震从早期的百花齐放，到 20 世纪 80 年代以后叠层橡胶支座一统江湖；从阪神地震之前十几年间不太受社会关注的试验性发展，到阪神地震之后的爆炸式应用，可以看到一项技术从概念，到争论、研发、定型、逐渐成熟，再到大规模应用的完整过程。其中凝结了几代结构工程师和学者的思考、智慧和心血。

相比之下，中国隔震技术的发展和应用具有后发优势，在很大程度上借鉴并引进了日本等的经验和技术，从而加快了发展的步伐。但由于缺乏长期的积累，相关的法律法规、行业管理和技术准备没有跟上，导致隔震技术在推广应用过程中难免出现各种各样的问题。这些问题并非科学问题，而是技术、甚至是非技术因素，但它们已经成为我国隔震技术健康发展的主要瓶颈。限于篇幅，本文未涉及日本隔震建筑相关的法律法规和设计、施工、产品管理方面的内容。

从隔震建筑的绝对数量上看，中国目前已成为仅次于日本的世界第二隔震大国，并且大有赶超之势。如何由大变强，是摆在我国隔震界面前的共同课题。

谨以此文纪念山口昭一先生

在本文介绍的诸多具有历史意义或代表性的隔震事例中，都有山口昭一先生的身影。被称为日本第 1 号的八千代台住宅和在阪神地震中以优异的表现引爆隔震技术快速发展的 WEST 大楼都出自山口先生之手。对历史建筑进行隔震改造的典范之作——大阪市中央公会堂——也是在山口先生的指导下完成的。与其说山口先生见证了日本隔震技术发展的历史，不如说是他参与缔造了这段历史。1993 年日本隔震结构协会成立时，山口先生是主要发起人，并就任该协会的第一任会长。那时协会的事务局就设在山口先生所在的东京建筑研究所。在山口先生的领导下，该协会为日本隔震技术的推广应用和健康发展发挥了重要的作用。2015 年 7 月 6 日，山口先生在东京溘然长逝，享年 88 岁。值此先生忌辰一周年之际，聊以此文纪念。