



Views & Comments

先进城市与社会的高性能抗震结构

Jiro Takagi^{a,*}, Akira Wada^b^a Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-0397, Japan^b Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 226-8503, Japan

1. 引言

东京是日本的首都，是世界上最大的城市之一，也是一个地震多发的地区。日本人口及其大部分城市功能都高度集中在此。据估计，未来日本7级以上的大地震对东京造成的破坏将是极其严重的。地震本身和震后的火灾，致使伤亡人数可能超过 2×10^4 人。由于长途通勤线路故障而无法回家的被困工人、学生和其他人员将高达 8×10^6 人。有可能倒塌或被烧毁的建筑物约为610 000栋。地震造成的经济损失，包括生产力和服务业水平下降所带来的影响，可能高达 9.5×10^{13} 日元，这几乎相当于日本的年度财政总预算[1,2]。

像东京一样，世界上还有许多其他大城市也很容易受到大地震造成的灾难性破坏。先进的现代城市和社会必须具有更强的可持续性和更强的抗灾能力，才能抵抗地震所造成的破坏。为了实现这一目标，建筑结构必须更加可靠。

建筑结构在大地震期间可能会遭受强烈的震动，尽管这样的地震非常罕见。这种震动会使结构构件之间彼此分离，从而导致整体结构的分离。因此，建筑结构可能会失去竖向承载能力，然后倒塌。严重解体的结构构件倒塌后会导致居民及其周围邻居的死亡。在过去发生的大地震中，在几种建筑结构中观察到了这样的现象——尤其是在2016年日本熊本地震、2010年海地地震、2015年尼泊尔廓尔喀地震、2008年中国四川地震、

2009年意大利拉奎拉地震、2016年意大利阿玛特里切地震以及2017年墨西哥普埃布拉地震中坍塌的以古木、钢筋混凝土（RC）和砖石建造的建筑物。这些脆性结构的倒塌直接造成了许多人员的伤亡。自北岭大地震（1994年）以来，尽管美国还未再经历过一次大的地震，但仍有大量脆性结构建筑物，其倒塌风险依然存在。在地震风险相对较低且对地震风险认识不足的地区，即使是中度地震也可能具有极大的破坏性。因此，这种脆性建筑结构的结构性能仍需要继续改进。

科学家和工程师已经开发了抗震设计技术以减少建筑结构的倒塌。首先，建筑结构的设计是为了在大地震中保持其完整性。这些技术包括：木结构房屋的连接件、砌体结构建筑中的木框架、RC柱中的箍筋、强柱弱梁设计理论以及钢结构连接破坏的预防等。其次，采用延性结构设计方法。大地震中建筑结构的塑性变形可以吸收地震能量，防止结构倒塌。这种抗震设计思想的应用，极大地整合了结构构件，防止了结构倒塌，挽救了人类的生命。实际上，在执行评估结构延性的抗震设计法规要求后，日本在大地震中倒塌的建筑物数量大幅减少。然而，许多设计精良的建筑物在大地震中经历了过度的塑性变形，不得不被拆除，因为这些建筑物的主要（抗重力荷载）结构构件，如柱子、梁和节点都受到了破坏。居民通常意识不到地震后建筑物的结构设计会受到破坏，但也不想继续住在受损的建筑物中。因此，有必要采用一种新的结构设计方法，即通过将主体结构

与承载地震侧向载荷并吸收地震能量的结构进行分离，从而避免主体结构的损坏。被动控制结构和隔震结构是实现这一目的的有效方法，应该得到更广泛的应用。

2. 脆性结构

大多数地震的临界损伤和结构倒塌都发生在脆性结构中，其抗侧力的延性变形能力有限。由于没有可感知的韧性变形能力，某一个元件或连接件的脆性破坏可能会引发其他元件或连接件的破坏。这种脆性断裂链可能导致整体结构破坏或倒塌。

由于缺乏对地震风险的认识或受预算限制，建筑结构的建造往往非常脆弱。图1展示了2015年在尼泊尔廓尔喀地震中坍塌的未加固砌体结构建筑。在这场大地震中，由于强烈震动，砖块从不同方向上脱落，导致建筑物倒塌。在其他许多地震中也观察到了类似的破坏，包



图1. 2015年廓尔喀地震中损坏的未加固砌体结构建筑[3]。



图2. 2009年拉奎拉地震中倒塌的砌体结构建筑[4]。

括拉奎拉地震（图2）、海地地震、四川地震、阿玛特里切地震（图3）和普埃布拉地震。砌体结构在许多地区被广泛采用，其优点是便于施工，不用大型建筑机械来铺砖。然而，砖块之间连接的强度通常不足以抵抗大地震期间的强烈震动。可采取的对策包括安装木框架或钢筋（图4）和加固砂浆水泥。在这些建筑结构中，有许多都是非工程建筑，而且是在没有结构工程师适当参与的情况下建造的。尽管这种砌体结构建筑的抗震强度差异很大，并且难以评估，但结构工程师仍需要更多的参与。

图5是1923年日本关东大地震中被破坏的砌体结构建筑。自19世纪末以来，日本从西方国家引进了许多科学和工程领域的技术。日本利用这种引进技术建造了新的砌体结构建筑。然而，由于这种技术最初是在地震较少的国家发展起来的，所以这些砌体结构在关东大地震中暴露了其抗震方面的弱点。



图3. 2016年阿玛特里切地震中倒塌的砌体结构建筑。



图4. 阿玛特里切地震中幸存的交叉加固砌体结构建筑。

由于砌体结构房屋在地震中遭到了严重的破坏，无填充墙的RC结构越来越受欢迎。在经历了东京大范围震后火灾后，无填充墙的RC结构的高耐火性受到了欢迎。尽管RC结构脆性较小，但在1995年阪神大地震中，人们发现RC结构仍然会以极脆弱的方式倒塌。如图6所示，由于箍筋间距和端钩长度的不足，RC柱在核心混凝土约束失效后失去了垂直承载力。在阪神大地震之前，关于箍筋间距的设计规定被修改为100 mm或更少；然而，在修订前建造的建筑物却以图6所示的方式遭到破坏。



图5. 1923年关东大地震中损坏的砌体结构建筑[5]。

钢是一种韧性结构材料，其结构具有延展性；但是，由于细节设计或施工不当，可能会导致此类结构在大地震中发生脆性破坏。图7显示了阪神大地震中发生的钢结构的脆性破坏，梁柱连接处的焊接失效，锚栓断裂。这次地震后，人们对连接处的细节要求进行了重新修订。

日本的大多数房屋都是木制的，而其中许多旧木屋都是非工程建筑。图8显示了柱与梁之间连接处的断裂。在阪神大地震中，木屋倒塌造成90%以上的人员伤亡。20多年后，2016年发生了熊本地震。图9(a)显示了木柱与基座之间连接的破坏。如图8、图9(a)所示，在过去的20年间，结构工程领域的某些方面并没有得到改善。连接破坏仍然会导致房屋倒塌[图9(b)]。

脆性破坏会直接造成伤害和死亡，为了避免这种情况发生，结构的设计确保了其在大地震期间的完整性。在脆性破坏模式中，结构构件出现物理上的分离，这与地震中连接强度立即丧失有关。因此，必须使构件具有延性，或者允许其他延性构件失效。人们对木结构房屋的连接件、砌体结构建筑中的木框架、RC柱的箍筋、强柱弱梁设计理论、钢结构连接破坏的预防等方面进行



图6. 1995年阪神大地震中RC柱的损坏[6]。

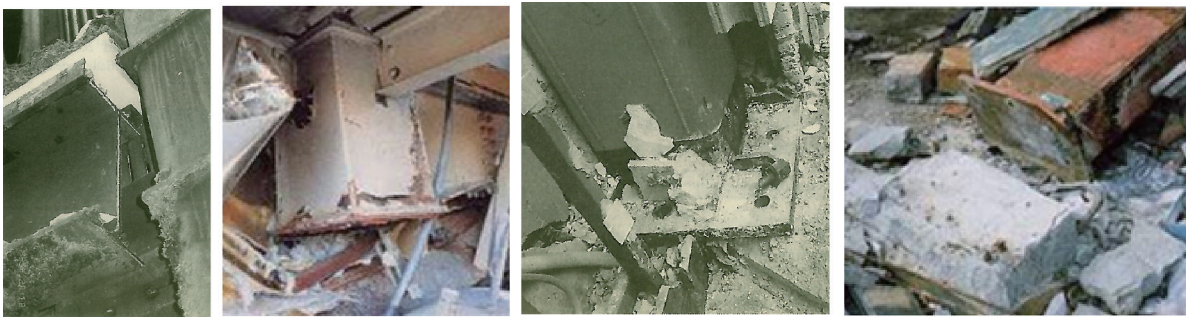


图7. 阪神大地震中钢结构的损坏[7]。

了改进。重型结构构件的碎裂和坠落会直接造成人员伤亡。因此，建筑结构必须能够抵抗重力荷载，即使在大地震期间经历强烈震动之后也应如此。

日本著名空间结构工程学家Yoshikatsu Tsuboi教授(1907–1990年)，在一次关于1978年日本伊豆大岛附近地震的结构破坏的会议上发表了自己的感想：

地震工程研究在世界范围内得到了广泛的发展，其主要集中在对地震作用下建筑结构的侧向力和位移大小的研究。然而，由于建筑物倒塌或结构构件随重力坠落，可能会直接造成人员受伤或死亡，重力对建筑结构具有



图8. 1995年阪神大地震中一座木屋的连接处断裂[8]。



(a)



(b)

图9. 2016年熊本地震中的木屋。(a) 连接处断裂；(b) 倒塌的房屋。

永久作用力。所以，柱、梁、板和墙等结构构件的设计必须避免在地震后发生坠落。如果在一个重力可忽略不计的空间站发生了大地震，此时空间站可能只会倾斜，但不会坠落，也不会伤害到居民。

3. 延性结构

日本在1981年修订了抗震设计标准。这次修订引入了一种针对大型建筑结构的两步设计方法。按照这种方法，建筑物应该在中强地震中保持弹性，在大地震中应该允许非弹性变形而不倒塌；应评估结构的破坏机制和极限侧向强度；根据建筑物的延性变形能力，确定所需的极限侧向强度。此次修订的目的是允许与破坏相关的侧向位移，但应防止倒塌，保护人类生命不受地震的影响。因此，建筑物的破坏被认为是为了挽救生命而作出的牺牲。“延性就是破坏。”这是Vitelmo V. Bertero教授20多年前提出的，简明地表达了这个事实。

这种抗震设计理念的应用显著提高了居民的安全性。事实上，在执行修订的抗震设计标准后，日本大地震中严重受损或倒塌的建筑物数量急剧减少。图10显示了在阪神大地震震中附近调查的受损RC建筑物所占的百分比[6]。值得注意的是，在1981年标准修订后建造的建筑物中，有5.8%遭受中度至大规模破坏或倒塌，而在标准修订前建造的建筑物中，遭受中度至大规模破坏或倒塌的数量是标准修订后的两倍多，占比12.5%。

然而，许多设计精良的建筑物经塑性变形后必须被拆除。图11(a)显示了按1981年修订的标准设计及建造的一座RC住宅楼。这座建筑物在阪神大地震中遭到严重破坏。如图所示，在柱与柱连接处的许多梁中都发现了较大的弯曲裂纹。这种损坏在设计中是可以预料

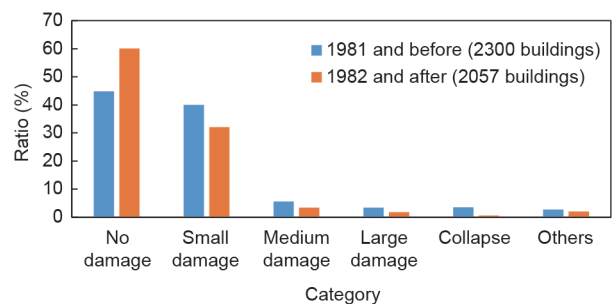


图10. 阪神大地震中受损建筑物的百分比[6]。

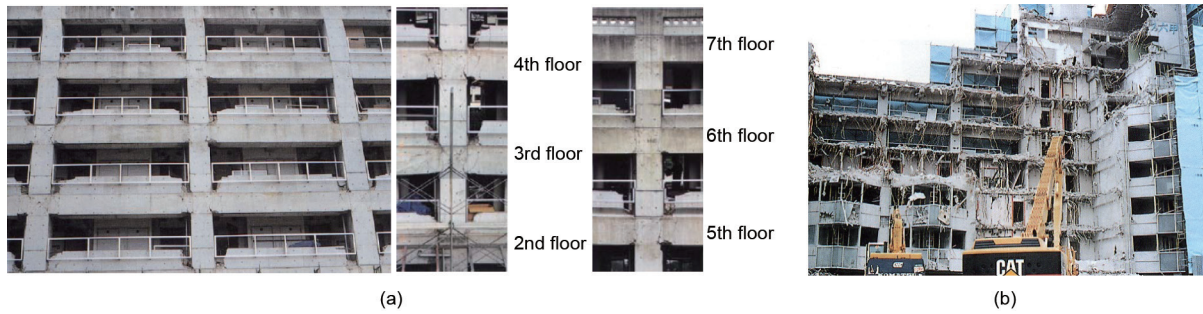


图11. 阪神大地震中被毁坏和拆毁的住宅。(a) 梁的弯曲裂缝；(b) 被拆毁的建筑物。

的，按照设计，塑性形变消耗了地震能量，但是挽救了人的生命。

从这个意义上说，这座建筑的设计是成功的；然而，该建筑最终会被拆除，而不会被修复[图11 (b)]，因为居民一旦看到了建筑物受损就不再愿意住在里面。专家说，居民们会认为这是严重损坏的迹象。图12显示了一座在阿玛特里切地震（2016）中没有倒塌的受损建筑。结构工程师已经预料到了这种损坏，认为其设计是成功的；但是，这座大楼没有被再次使用，地震后一直空着。

尽管2011年在新西兰的克赖斯特彻奇地震中只有两幢建筑物完全倒塌，但由于开裂或倾斜，2400栋建筑物中大约有1700栋被拆除。图13标出了被修复和拆除的建筑物的位置。值得注意的是，被拆除的建筑物多于被修复的建筑物。

延性设计方法已被世界各国的结构工程师所广泛接受，但是这两个对建筑物非关键结构损坏作出回应的例子对延性设计方法的充分性提出了挑战。

4. 更加牢固的结构

日本的两步弹性和非弹性设计方法是在35年前提出来的。在过去35年中，技术有了显著的进步，社会也发生了巨大的变化。社会对于抵抗自然灾害的需求也发生了变化。生命安全曾经是主要目标；现在，在发达的现代社会中，建筑物和房屋的可持续使用也是必要的。

大地震后的业务连续性计划是重要的，不仅对大公司，对中小型公司也是如此。业务运行的中断使得地震破坏后的恢复变得困难。商业网络已经变得非常复杂，小公司的业务中断会影响整个网络。此外，房屋的继续使用可能尤为重要。房屋对人类活动至关重要，在发生灾害时，房屋可作为居民的避难所。如果房屋遭到损坏，



图12. 在2016年阿玛特里切地震后没有倒塌但再未被使用的受损建筑物。

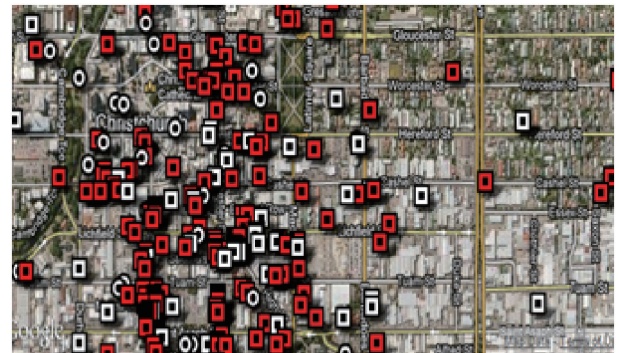


图13. 2011年克赖斯特彻奇地震中受损的建筑物；白色和红色方块分别表示被修复和拆除的建筑物。

无法使用，居民必须搬迁到临时疏散住所并在那里长期居住。在大地震后，医院、消防设施和其他重要建筑物保持运转也至关重要。同样，桥梁、隧道和其他重要的结构也必须继续运作。

为了使建筑物能进一步抵抗大地震，需要另一种延性设计方法。在这种替代设计方法中，主体结构不允许被损坏；相反，安装了可更换的部件以用于吸收地震能量。为了实现这一目标，地震隔离结构和被动控制结构

是有效的。主体结构承载了重力荷载，设计时应确保其在大地震中能保持完整性。此外，应该适当地向建筑物所有者和社会解释这些结构的抗震性能和其他性能。使用这种方法设计的建筑结构应该能够在大地震后继续使用，决策者不应该轻易拆除它们。

图14展示了具有抗震构件和主体结构的结构体系的概念。屈曲约束支撑（BRBs）是与主体结构相分离的抗震构件。图15展示了隔震系统[9]。

图16显示了1999年以后在日本建造的地震隔离和被动控制建筑物的累计数量。地震隔离结构已被广泛用于医院、大型仓库和高层住宅等大型建筑物中。截至2016年，建造的地震隔离结构数量已超过4000个。在许多高层建筑中以及最近新建的大多数建筑物中都安装了被动控制系统。这一趋势表明，人们越来越认识到这些建筑物对抗地震的性能和有效性：世界上最容易发生地震的国家之一，在最近发生的大地震中受损的建筑物越来越少。

图16中的数据仅包括大型建筑物；地震隔离和被动控制建筑物的实际数量远比统计数据要多。尤其是被动

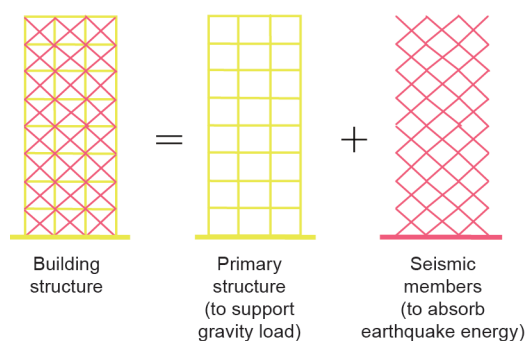


图14. 另一种延性设计方法中主体构件和抗震构件的分离。

控制建筑物，如果建筑物不是很大，现在可以在常规的建筑物批准程序中直接批准被动控制结构的设计而无需专家的同行评审。作为示例，图17展示了一所大学六层建筑物的内部视图，其中使用了BRBs，并将其暴露在社区空间中。日本有许多相对较小的地震隔离和被动控制的建筑物；这些都没有被包括在图16的统计中。

5. 结论

延性结构设计在挽救生命方面是有效的；然而，许多设计精良的建筑物，由于在大地震中经历了较严重的塑性变形，其主要的结构元件受到损害，所以不得不被拆除。这意味着有必要采用一种新的结构设计方法，通过将主体结构与承受地震横向荷载的地震结构分开去避免损坏。对此，被动控制结构和隔震结构是有效的，应该被更广泛采用。

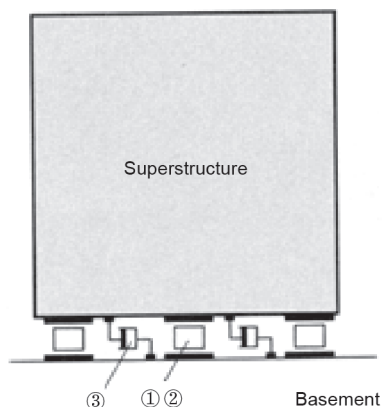


图15. 地震作用下隔震结构示意图。上部结构通过机构①、②、③灵活地连接，其中机构①在垂直方向上支撑上部结构；机构②沿水平方向表现出恢复力；机构③在上部结构与地基之间的相对位移处吸收能量[10]。

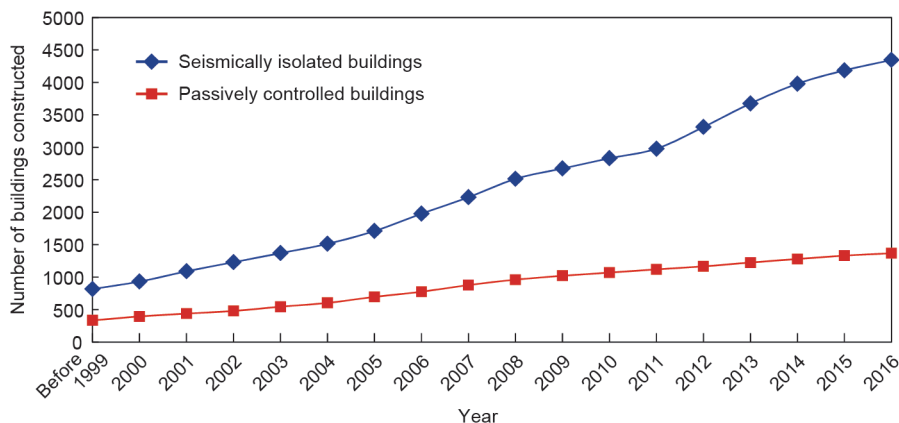


图16. 日本地震隔离和被动控制建筑物的统计数据。



图17. 使用BRBs的被动控制建筑（日本京都外国语大学）。

致谢

The essence of this paper comes from 30 years of discussion with Professor Stephen Mahin at the University of California, Berkeley and Professor Jerome J. Connor at the Massachusetts Institute of Technology, who are greatly acknowledged. Professor Vitelmo V. Bertero at the University of California, Berkeley, Professor Yoshikatsu Tsuboi at the University of Tokyo, and Professor Emeritus Tsuneyoshi

Nakamura at Kyoto University are also acknowledged. The authors would like to thank Nagahide Kani, executive advisor of the Japan Society of Seismic Isolation, and Won K. Lee for their support.

References

- [1] Working Group on Countermeasures for Tokyo Metropolitan Inland Earthquake. Damage estimation and countermeasures for Tokyo metropolitan inland earthquake. Final report. Tokyo: Working Group on Countermeasures for Tokyo Metropolitan Inland Earthquake; 2013 Dec. Japanese.
- [2] Cabinet Office, Government of Japan. Disaster management in Japan. Tokyo: Cabinet Office, Government of Japan; 2015.
- [3] Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Earthquake reconnaissance team report: M7.8 Gorkha, Nepal earthquake on April 25, 2015 and its aftershocks. Oakland, CA: EERI; 2016.
- [4] Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Special earthquake report: the Mw6.3 Abruzzo, Italy, earthquake of April 6, 2009. Oakland, CA: EERI; 2009.
- [5] Yokohama Red Brick Warehouse. History of the Red Brick [Internet]. Yokohama: Yokohama Akarenga [cited 2018 Nov 5]. Available from: <http://www.yokohama-akarenga.jp/about/history/>
- [6] Architectural Institute of Japan. Report on the Hanshin-Awaji earthquake disaster—building series 1: structural damage to reinforced concrete building. Tokyo: Architectural Institute of Japan; 1997. Japanese.
- [7] Architectural Institute of Japan. Report on the Hanshin-Awaji earthquake disaster—building series 3: structural damage to steel buildings, structural damage to shell and spatial structures, structural damage to storage tanks and their supports. Tokyo: Architectural Institute of Japan; 1997. Japanese.
- [8] Architectural Institute of Japan. Report on the Hanshin-Awaji earthquake disaster—building series 4: wooden structure, damage to building foundations. Tokyo: Architectural Institute of Japan; 1998. Japanese.
- [9] Architectural Institute of Japan. Design recommendations for seismically isolated buildings. Tokyo: Architectural Institute of Japan; 2015. Japanese.