地震工程与工程振动, 33(4), 2013: 106-119
Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 33(4), 2013: 106-119

日本钢筋混凝土结构抗震加固技术现状与发展趋势

曲哲，张令心
（中国地震局工程力学研究所，中国地震局地震工程与工程振动重点实验室，哈尔滨，150080）

摘要：既有钢筋混凝土结构的丰富而可靠的抗震加固技术是提升我国建筑物抗震性能，实现社会可持续发展的重要保障。在长期工程实践的积累中，日本建筑界逐渐发展出一套行之有效的抗震性能评估、加固设计体系和多种多样的抗震加固技术，值得我国借鉴。本文在简要回顾日本抗震加固设计方法之后，介绍了日本钢筋混凝土结构抗震加固的传统方法，总结了近年来在传统加固方法基础上所做的改良，并在此基础上，从外附子结构、消能减震化和自复位技术等三个方面归纳了日本新一代钢筋混凝土结构抗震加固技术的发展趋势。

关键字：钢筋混凝土结构，抗震加固，外附子结构，消能减震，自复位
中图分类号：TU375.4　**文献标志码**：A

State of the art and development tendency of seismic retrofit for reinforced concrete structures in Japan

QU Zhe, ZHANG Lingxin
(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration，Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin, 150080)

Abstract: Reliable techniques for seismic retrofit of existing reinforced concrete structures are of essential importance for increasing the preparedness of built environment and the sustainable development of the society. Effective seismic performance evaluation and retrofitting methods for existing reinforced concrete structures have been developed in Japan through the many decades of engineering practice and are helpful for improving the seismic retrofitting practice in China. Following a brief introduction of the retrofit design methods of Japan, the conventional retrofitting methods of reinforced concrete structures in Japan and their recent refinement are summarized in detail and the undergoing development for next-generation retrofitting methods is described with focuses on innovative techniques featuring attached external substructures, damage control and self-centering techniques.

Keywords: Reinforced concrete structure, seismic retrofit, attached external substructure, passive control, self-centering

引言

以 1977 年日本建设省推出的“新抗震设计法”为蓝本，日本于 1981 年全面修订了《建筑基准法》中有关抗震设计的条文，正式确立了“新抗震设计法”在全日本建筑结构抗震设计中的地位。与 1981 年之前采用的传统抗震设计方法相比，该设计法的一个显著特点是明

项目资助：中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项（编号 2013B13）
作者简介：曲哲，1983 年出生，男，副研究员，博士，主要从事建筑结构抗震与减隔震技术研究。
E-mail: quz@iem.ac.cn

确采用“两阶段设计”，即在水准 1 地震作用下通过线弹性分析验算结构构件是否满足容许应力的要求，检验结构的侧向层间位移角是否满足规范限值（通常是 1/200），是对“使用极限状态”的检查；在水准 2 地震作用下考虑结构延性等非线性因素的影响，进行“保有水平耐力”计算，并考虑结构的动力特性以及竖向和平面刚度分布不均匀的影响，是对“安全极限状态”的检查。1995 年 6.9 级的日本阪神地震全面检验了 81 版“新抗震设计法”的效果。虽然阪神地震造成了惨重的伤亡，但 1981 年以后设计建造的房屋基本经受住了考验。这无疑巩固了“新抗震设计法”的地位。但另一方面也暴露出老旧建筑物抗震性能不足的问题。为此，日本于阪神地震当年，即 1995 年颁布了《抗震加固促进法》，以国家立法的形式使老旧建筑的抗震性能评估和加固改造义务化，使抗震加固业向健康、规范化的方向发展，有力促进了抗震加固业务的发展以及相关专业技术人才的培养。2011 年东日本大地震中建筑结构因地震地面运动受到的震害相对较轻，一方面与此次地震地面运动特征有关，但另一方面，十几年来日本建筑业在建筑结构抗震加固方面付出的努力也功不可没。

多年的抗震加固实践使日本建筑业逐渐形成了具有自身特色的包括抗震性能评估、加固设计和施工方法在内的抗震加固技术体系。结合近年来基于性能的抗震设计和功能可恢复抗震社区概念的发展，日本抗震加固技术也表现出一些新的发展趋势。本文拟通过全面总结日本现有抗震技术和近年来一些有代表性的新型抗震技术，归纳其发展趋势，为我国建筑物抗震加固事业的发展提供借鉴。

1 抗震加固设计概要

在介绍具体抗震加固技术之前，有必要对日本抗震加固设计方法作以简要介绍。日本的抗震加固设计方法与其抗震性能评估方法密不可分。根据所掌握数据的详细程度、性能评估的紧急程度和精细程度不同，该评估方法包括一次评估、二次评估和三次评估等三种方法。三种方法的目标都是计算出表征建筑结构抗震性能的“结构抗震指标”I_s，并通过将结构抗震指标 I_s 与某一判定指标 I_{so} 相比较，判断结构是否具有足够的抗震性能，即要求

$$I_s \geq I_{so} \tag{1}$$

其中 I_{so} 与建筑物用途及其所在场地的地震危险性、场地土特征有关，三种评估方法通用。对于一般建筑，I_{so} 通常取 0.6，即如果 I_s 小于 0.6 则应对建筑物进行抗震加固。但对于公立学校建筑物，考虑到其功能的特殊性，将 I_{so} 适当地提高至 0.7[1]，也有提高至 0.75 的情况。结构抗震指标 I_s 的计算在三种评估方法之间差异较大。一次评估往往用于缺乏设计资料的情况，仅根据建筑外观、主体结构基本尺寸等粗略信息计算经验性的 I_s 指标。当资料比较齐全时，建筑物抗震加固阶段往往需要进行相对比较详细的二次评估。这时需要有关于建筑物的更加详细的信息，包括材料强度、结构构件尺寸、配筋信息、建筑物使用过程中经历的改造与结构变动、结构构件的老化等，以更加准确的评价建筑的结构抗震指标 I_s。

不论是一次还是二次评估，计算 I_s 的基本公式是通用的，即

$$I_s = E_0 \cdot S_D \cdot T \tag{1}$$

式中 E_0 是抗震性能基本指标，由结构各个构件的承载力指标 C 和延性指标 F 共同决定；S_D 是形状指标，反映结构布置的不规则性对其抗震性能的影响；T 是时间指标，反映建筑结构随时间的劣化对其抗震性能的影响。

抗震加固设计的过程实际上是对既有结构进行抗震性能评估（通常是二次评估）得到其

I_s，再通过加固使既有结构的 I_s 提高至 ${}_RI_s$，以保证 ${}_RI_s$ 不小于一定的抗震性能判定指标 I_{so} 的过程。日本建筑防灾协会出版的《既有钢筋混凝土建筑抗震加固设计指南》[2]（以下简称《抗震加固指南》）给出的抗震加固设计流程如图 1 所示。

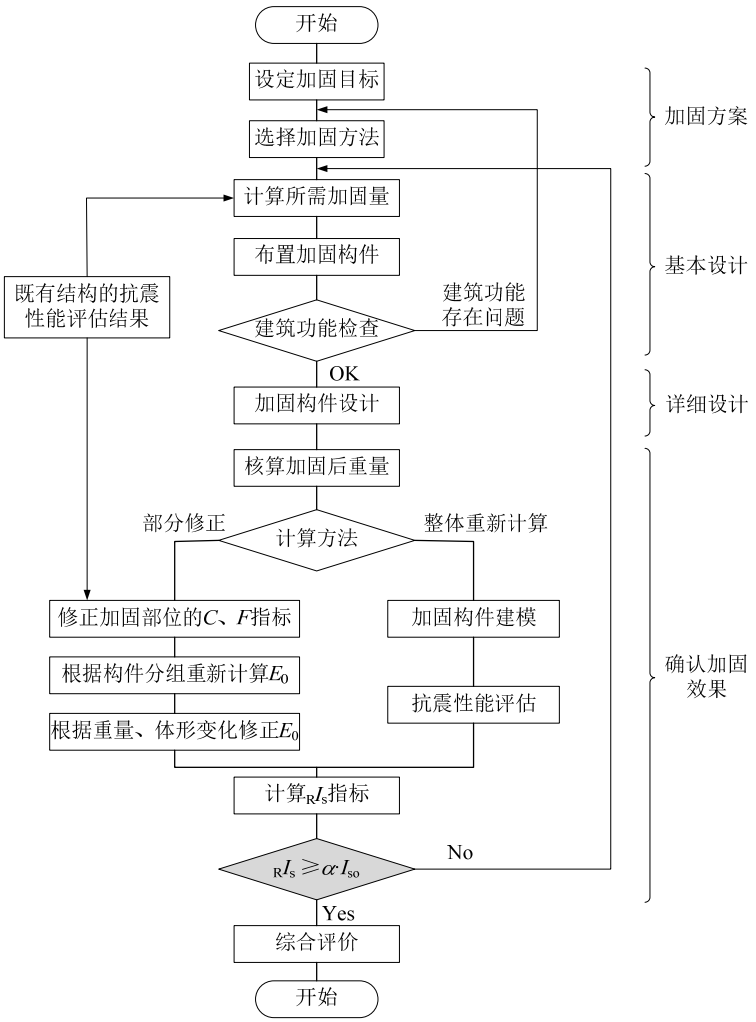


图 1 抗震加固设计流程[2]

Figure 1. Flow chart of seismic retrofit design

图 1 流程中最终确认加固效果时引入的系数α称为设计施工系数，在 1.0 至 1.2 之间取值，反映抗震性能评估方法以及施工质量等方面不确定性的影响。由于结构抗震指标 ${}_RI_s$ 主要受加固后结构构件的承载力指标 C 和延性指标 F 的影响，基于上述评价与设计体系的抗震加固方法往往有三种选择：（1）提高结构承载力；（2）提高结构延性；（3）同时适当提高结构的承载力和延性。此外，通过加固改造减小既有结构的不规则性，避免地震损伤集中；通过减轻结构重量、隔震与消能减震技术降低结构受到的地震作用；对结构的基础进行加固，也是抗震加固中经常采用的方法。

2 传统抗震加固技术

提高承载力和提高延性是传统抗震加固的两个主要目标。其中，以提高延性为目标的抗震加固方法主要集中于对框架柱的加固。典型的做法包括（1）钢板包裹钢筋混凝土柱，如富岡大岳等（2009）[3]；（2）FRP 包裹钢筋混凝土柱，如菊田貴恒等（2006）[4]；（3）针

对震后应急加固的采用预应力螺栓约束混凝土柱，如山川哲雄等（1999）[5]。典型的加固做法如图 2 所示。相关实验表明上述加固方法均能有效提高钢筋混凝土柱的塑性变形能力。但从建筑结构整体抗震性能的角度出发，基于延性的抗震加固方法延续了基于延性抗震设计的思想，希望通过提高既有结构的塑性变形能力，使其在地震作用下耗散地震输入能量，减小结构的地震反应。与延性设计一样，这种基于延性的加固往往使结构构件本身承受较大的地震损伤，从而带来较大的直接和间接经济损失，还可能造成建筑结构在震后难以修复而不得不拆除重建。这些问题使得基于延性的抗震加固难以适应当前基于性能地震工程发展的需求。

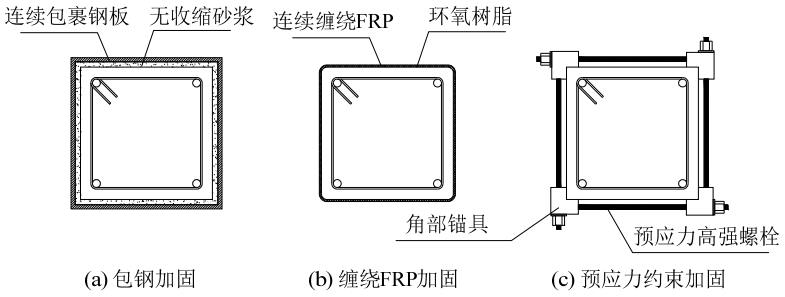


图 2 基于延性的钢筋混凝土柱加固技术柱截面示意图

Figure 2. Column cross sections in ductility based seismic retrofit methods for RC columns

与之相比，以提高承载力为目标的加固方法对于提高结构的抗震性能、减小地震损伤和损失具有更加直观的效果。更加重要的是，在这类方法的基础上派生出许多适应基于性能地震工程和功能可恢复性要求的新型抗震加固技术。在这类方法中，增设抗震墙和增设钢支撑框架的应用最为广泛。

2.1 增设抗震墙

与框架柱相比，抗震墙具有很大的抗侧刚度和承载力，是非常有效的抗侧力构件。早在 1958 年，中川恭次等（1958）便通过总结 1923 年日本关东地震和 1948 年日本福井地震中钢筋混凝土结构的震害，建立了钢筋混凝土结构震损程度与墙率（某楼层抗震墙截面积之和与该楼层面积之比）的相关关系[6]。志贺敏男（1978）通过总结 1968 年 7.9 级日本十胜冲地震中钢筋混凝土建筑的震害，进一步建立了抗震墙平均剪应力与墙率之间的关系，从而奠定了日本直接以墙率进行低层钢筋混凝土结构抗震设计的基础[7]。Fintel（1995）在总结三十年间的历次地震震害时指出，在这些地震中没有一栋带有混凝土结构墙体的建筑物发生了倒塌[8]。直到 2011 年 8.8 级的智利地震，人们才首次观察到一幢钢筋混凝土剪力墙结构的高层住宅因地震地面运动而发生整体倒塌。抗震墙在地震作用下的优异表现也使增大既有结构抗震墙的截面，或者直接增设抗震墙，以提高结构的墙率的方法成为抗震加固中最常采用的加固方法之一。

在既有建筑中增设抗震墙的关键技术问题是新建墙体与既有框架的连接。目前日本应用最为广泛，也是《抗震加固指南》中建议的连接方法是在既有框架梁、柱构件内植入钢筋，与新建的现浇钢筋混凝土墙体实现连接。植筋主要有机械式和胶结式两种。根据建筑功能和开设门窗洞口的需要，可以在框架柱两侧增设翼墙（图 3(a)），（如太田勤等（2009）[9]，苔前圭介等（2011）[10]）；也可以增设整片抗震墙（图 3(b)）。为防止连接界面局部开裂，还通常在连接界面附近设置螺旋箍筋（图 3(c)）。

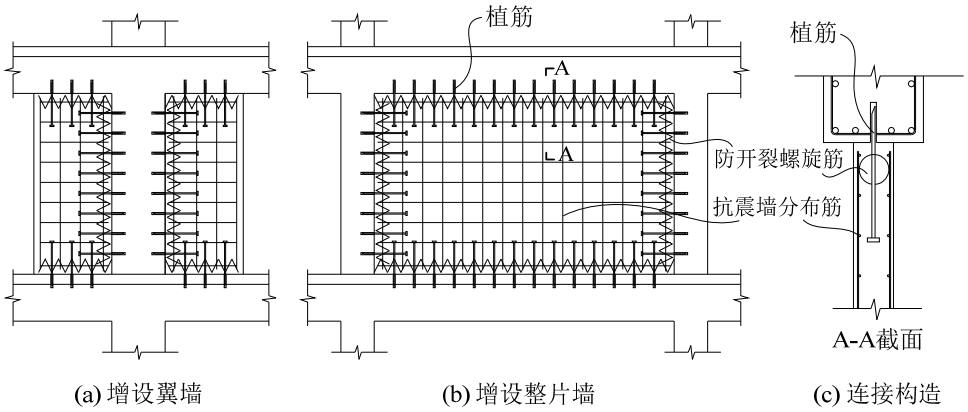


图 3 增设抗震墙加固示意图

Figure 3. Attaching shear walls for seismic retrofit

2.2 增设钢支撑框架

与抗震墙类似，结构中的斜撑也往往具有较大的抗侧刚度和承载力，并且与抗震墙相比，斜撑主要承受轴力作用，受力状态更加明确。但在应用于既有钢筋混凝土结构的抗震加固时，斜撑轴力会对周边混凝土构件产生较大的集中力作用，特别是集中拉力作用，容易引起周边构件的局部损伤。较大的集中拉力也使钢支撑难以直接与混凝土构件相连。为此，在采用钢支撑对钢筋混凝土结构进行加固时，往往不是将钢支撑本身，而是将钢支撑框架与周边混凝土构件进行连接，以保证连接界面的传力性能。目前日本应用最为广泛的钢支撑框架与既有混凝土框架的连接方法是如图 4 所示的“间接连接法”，即首先在既有混凝土框架梁、柱内表面植筋，将梁、柱外表面焊有栓钉的钢支撑框架安装就位后，采用无收缩砂浆灌注二者之间的空隙。为防止灌注砂浆开裂，可在其中配置螺旋箍筋。

增设钢支撑框架中支撑的布置有图 5 所示的几种常见形式，包括（1）单斜撑（如松金佑典等，2011 [11]）；（2）V 字形或倒 V 字形支撑（V 字形如毛井崇博（2001）[12]，小谷野正浩（2010）[13]；倒 V 字形如河本孝纪等（2010）[14]，岩川浩二等（2010）[15]）；（3）加腋支撑（如石村光由等（2009，2011）[16][17]，横山刚等（2010）[18]）。

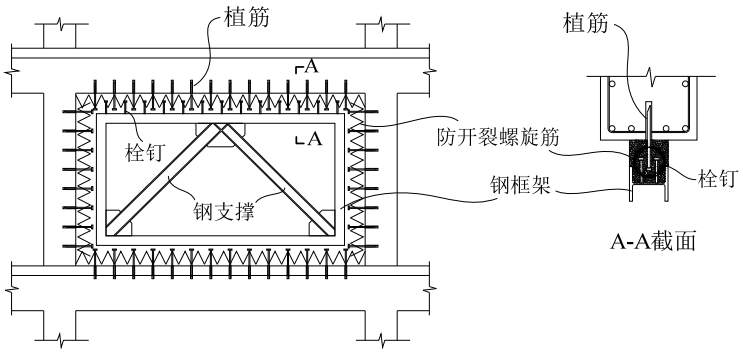


图 4 增设钢支撑框架加固示意图

Figure 4. Attaching braced steel frames for seismic retrofit

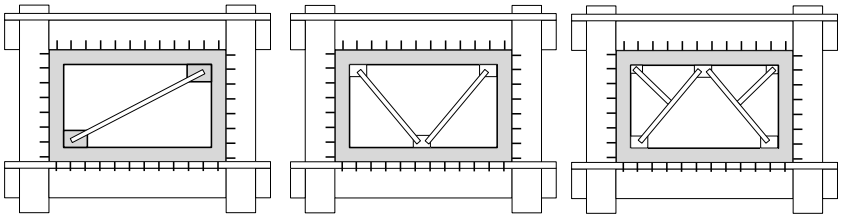


图 5 增设钢支撑框架的常见支撑形式

Figure 5. Common configurations for braces in attached braced frame

2.3 连接构造的改良

无论是增设抗震墙还是增设钢支撑框架，上述抗震加固方法都需要在既有钢筋混凝土结构中大量植筋以保证连接性能。植筋施工费时费力，对施工质量管理和工人素质要求较高，大量的植筋施工还会造成严重的振动、噪音和粉尘污染，对周边环境影响较大，且因为工期较长，经济性不佳。这些抗震加固方法虽然对于提高建筑结构的抗震性能很有帮助，但已难以有效应对当代经济社会在可持续性发展方面的要求。为此，日本研究与工业界提出了多种多样的实用技术以减小加固施工的工作量和对建筑功能的影响。

上文所述的新增钢支撑框架与既有混凝土框架之间的“间接连接法”在设计连接界面时仅考虑植筋的受剪承载力，而不考虑灌注砂浆与既有混凝土构件之间的粘结锚固作用。横浜国立大学的增田安彦等（2011）通过单层单跨带内置钢支撑框架的 RC 框架模型实验考察了混凝土表面高压水枪喷毛对连接界面性能的贡献，以期减少植筋数量，减小加固施工工作量[19]。另一方面，传统的“间接连接法”要求沿钢框架四周的既有混凝土梁、柱均需要植筋。河本孝纪等（2010）则通过实验考察了将植筋和栓钉集中布置以减少植筋数量的可能性，如图 6 所示[14]。为增强集中布置后锚固部分的承载力，该方法不是在钢框架外表面布置栓钉，而是将锚固部钢框架外侧翼缘切窄并与植筋相互咬合，形成连续的剪力传递机制。此外，在切削翼缘的锚固部设置加劲肋并在肋间灌注砂浆，利用加劲肋与砂浆之间的承压作用形成剪力键，进一步增强剪力传递作用（如图 6 中的 A-A 截面所示）。

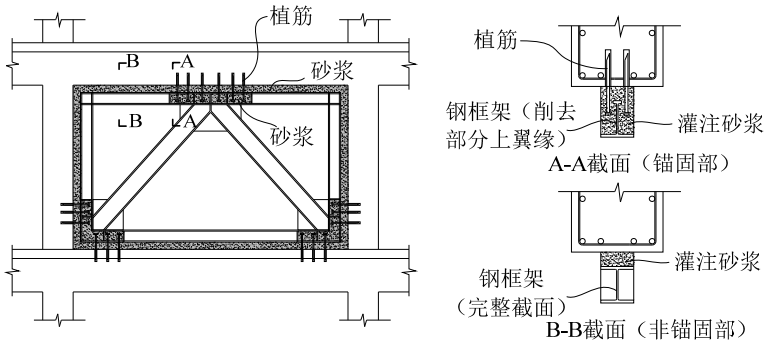
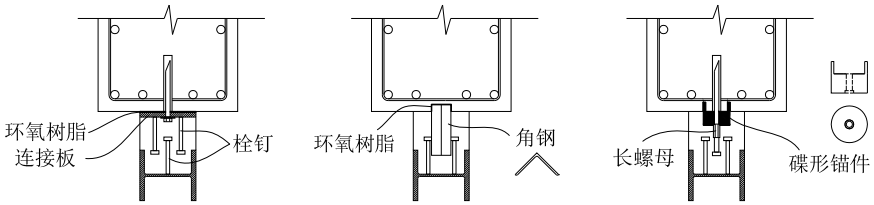


图 6 集中布置剪力键的增设钢支撑框架连接方法[14]

Figure 6. Connections with concentrated shear keys for attached steel braced frame

石村光由等（2011）针对既有低强度混凝土结构提出了一种混合式的间接连接方法。所谓“混合”，是指在连接界面上同时利用植筋和胶结两种受剪抵抗机制[17]。具体做法是首先通过植筋和环氧树脂将连接板紧固在既有混凝土构件表面，连接板外表面布置栓钉，与增设

钢框架的栓钉相互咬合，二者之间灌注无收缩砂浆以实现连接，如图 7(a)所示。这种连接方法一方面有助于减小既有混凝土构件中植筋的局部应力，适用于既有结构混凝土强度很低（如轴心受压强底低于 13.5 MPa）的情况；另一方面对于正常强度混凝土的既有结构，有助于减少植筋数量，减小施工量。岩川浩二等（2010）提出用粘结角钢代替植筋[15]。由于角钢截面积和截面惯性矩远大于螺栓，仅需埋入混凝土 20 mm 左右即可具有足够的锚固承载力（图 7(b)）。较浅的埋置深度有助于减轻既有混凝土切削作业的难度和工作量，减小施工过程中的振动、噪声和粉尘污染。为减少传统间接连接法中的植筋数量，飞岛建设等公司研制了一种新型的具有更高的受剪承载力的碟形螺栓连接，如图 7(c)所示（板谷秀彦等（2010）[20]；池田明隆等（2011）[21]）。其特点在于在传统植筋的基础上增设一个如图 7(c)所示碟形锚件，锚件一侧的圆环通过胶结嵌固在既有混凝土构件内，从而有效增大了植筋的受剪面积和周边混凝土的承压面积。一个碟形螺栓可以代替多个传统植筋，可极大减少植筋数量，简化施工。虽然上述针对间接连接法的改进主要针对增设钢支撑框架的应用，但同样可以用于增设抗震墙的情况。



(a) 混合连接　(b) 角钢连接　(c) 碟形螺栓连接

图 7 改进的间接连接法示意图

Figure 7. Improved details for indirect connections

为进一步简化施工，也有学者提出了完全避免使用锚固连接件的做法。竹中工务店的毛井崇博等（2001）通过单层单跨框架模型的拟静力实验，对比了传统的间接连接法和仅使用环氧树脂将钢支撑框架粘结于既有混凝土框架内部的直接连接法的性能，验证了后者的可能性并指出了可能存在的问题[12]。粘结界面虽然具有较高的受剪承载力，但由于受拉承载力较低，粘结面较小时会因钢支撑局部集中轴力的作用出现剥离。佐藤工业研制的 E-BRACE 加固法放弃了钢支撑框架与既有混凝土框架之间的受拉连接，而仅依靠二者之间的压力与剪力作用实现二者的共同工作。为增大二者之间的剪切传力作用，E-BRACE 加固法在增设钢支撑框架的四角采用了如图 8 所示的纤维袋摩擦节点。一方面将既有混凝土框架内表面凿毛后放置内嵌钢丝网的砂浆板，另一方面在增设钢框架外表面焊接一系列方钢棒剪力键，砂浆板和剪力键之间插入纤维袋并压入砂浆，使纤维袋充填在二者之间。为进一步提高剪切传力作用，还可将方钢棒剪力键与灌浆纤维袋之间的空隙以无收缩砂浆或环氧树脂填充。实验结果表明，这种摩擦节点可以获得高达 0.8 的摩擦系数（小谷野正浩，2010）[13]。

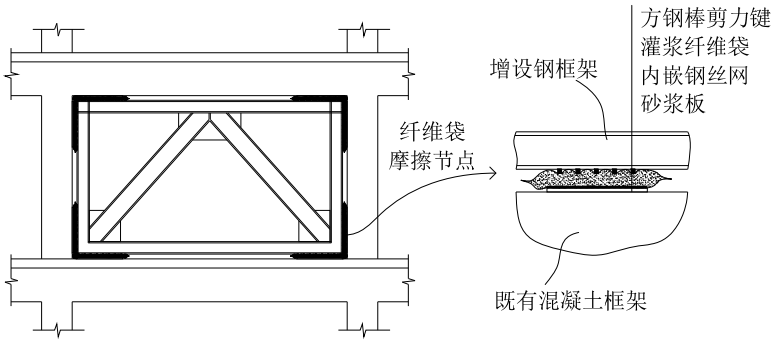


图 8 E-BRACE 加固法和纤维袋摩擦节点示意图[13]

Figure 8. E-BRACE techniques and frictional joints using fiber bags

基于类似的思想，神奈川大学的大竹诚宽等人（2012）提出在采用防屈曲支撑加固混凝土框架时，让防屈曲支撑只受压而不受拉，从而消除支撑对周边混凝土框架的集中拉力作用，以完全避免在混凝土构件中进行锚固[22]。九州大学的北岛幸一郎等人（2007，2008，2009）也提出一种使斜撑只受压不受拉的用于钢筋混凝土框架抗震加固的连接方法[23][24][25]。该方法采用具有稳定的受压性能的钢管混凝土构件作为斜撑。由于钢支撑框架或者钢支撑直接与混凝土框架相连，与传统的“间接连接法”相比，这些方法均属于“直接连接法”。它们能够有效避免斜撑集中拉力对周边混凝土构件的不利影响，极大地简化钢支撑与混凝土框架的连接构造。但其代价是牺牲了钢支撑优异的受拉性能，且为保证结构在正反两个方向的地震作用下表现出对称的行为，总需要在两跨中成对布置防屈曲支撑，效率不高。

另一类更加有效的“直接连接法”是采用预应力螺栓将钢支撑节点板直接紧固在混凝土构件表面。萨川惠一等人（2005）提出如图 9 所示的防屈曲支撑与混凝土梁摩擦连接节点[26]。预应力高强螺栓穿过混凝土梁腹，将防屈曲支撑节点板底板与梁腹另一侧的背板紧固于梁腹两侧，节点板底板下设置砂浆垫层，以提高界面的摩擦力。与传统的间接连接法相比，这一连接方法只需在梁腹开凿少量孔洞，且不需要设置钢框架，省工省料。此外，利用摩擦作用进行连接，可以获得很高的连接刚度，减少连接界面变形损失对钢支撑工作性能的影响。但实验结果也显示出梁端的损伤对连接节点的性能会有不利的影响。横内基等人（2005）在利用支撑型摩撑阻尼器加固一座实际的三层教学楼并进行拟静力实验时采用了类似的摩擦型连接节点[27]。

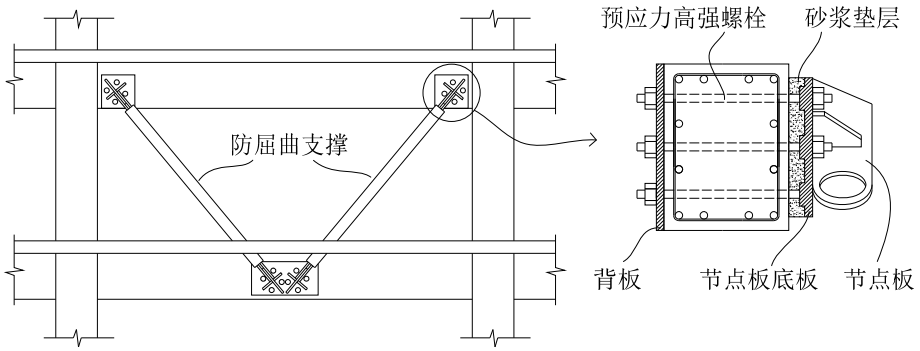


图 9 钢支撑-混凝土梁腹摩擦连接示意图[26]

Figure 9. Frictional connections for steel braces on RC beam webs

3 抗震加固技术的发展趋势

3.1 “边使用边加固”的有机更新模式

有机更新理论原是吴良镛先生提出的城市规划理论，其核心思想是城市改造应顺应城市原有的肌理，实现有机秩序。此处援引这一概念来描述日本抗震加固技术发展的最重要趋势，即**建筑结构抗震加固的理想模式是尽量减小甚至消除加固施工对建筑功能的中断和影响**，像有机体的新陈代谢那样在发挥正常功能的同时完成有机体的更新。传统抗震加固方法往往需要在加固施工过程中暂停建筑物的正常使用，即建筑物使用性能降为零，如图 10 中的路径(1)所示。采用改良的连接构造有助于减小加固施工期间建筑物使用性能的降低，如缩短工期，减小噪音和粉尘污染，尽量只在夜间或假期施工等，如图 10 中的路径(2)所示。然而，更高的目标是在不降低使用性能的条件下实现抗震性能的提升，如图 10 中的路径(3)所示。这是当代高度发达的经济社会对建筑界提出的要求，也是日本建筑结构抗震加固技术发展的最主要趋势。“不入户加固”技术是这一趋势的集中代表。

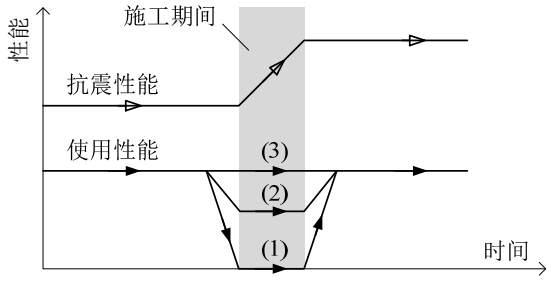
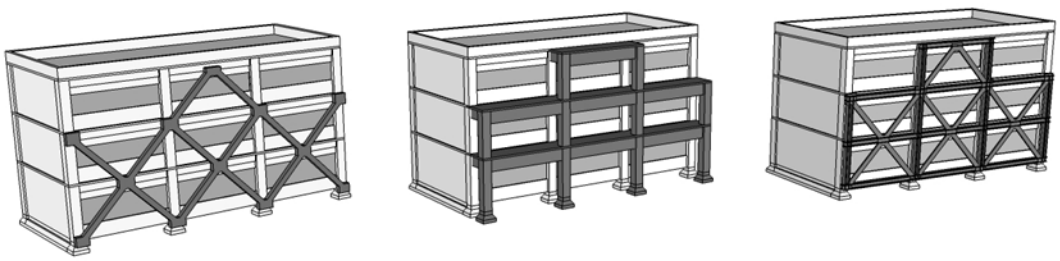


图 10 建筑结构抗震加固过程中抗震性能与使用性能的变化示意图

Figure 10. Variation of seismic capacity and building occupancy during seismic retrofit of building structures

所谓“不入户加固”，即所有加固施工作业只在建筑物外部进行，而不进入建筑物内部。外附子结构是不入户加固的最主要形式。这种加固方法因为不需要转移房间内的仪器、设备等物品，也不会对房间内部装修、环境等造成过多影响，具有显著的经济效益而日益受到建筑主的青睐。这一趋势促使建筑业提出了形式多样的外附子结构，外附子结构较多地布置于结构纵向，即开窗方向。常见的有外附钢支撑、外附钢或混凝土框架、外附钢或混凝土支撑框架等三类，如图 11 所示。



(a) 外附钢支撑　(b) 外附混凝土框架　(c) 外附钢支撑框架

图 11 抗震加固中常见的外附子结构示意图

Figure 11. Attached external substructures commonly used in seismic retrofit

外附子结构与原结构的连接和上文所述的增设抗震墙或增设钢支撑框架的连接构件具有共通性，可以互相借鉴。与增设抗震墙或增设钢支撑框架一样，最常见的连接方式是在既有混凝土框架中植筋，再现浇外附混凝土框架，或者通过上文所述的“间接连接法”将外附钢结构与既有结构进行连接。但外附子结构可能存在一种特殊的连接情况，即外附子结构与阳台或外走廊悬挑板相连的情况。这时往往先对悬挑板进行加固，将加固后的悬挑板与外附子结构相连，利用加固后悬挑板的受剪性能保证新建与既有结构的协同工作（如法向良二等（1999）[28]）。必要时还会在悬挑板下设置托梁。典型的连接构造如图 12 所示。

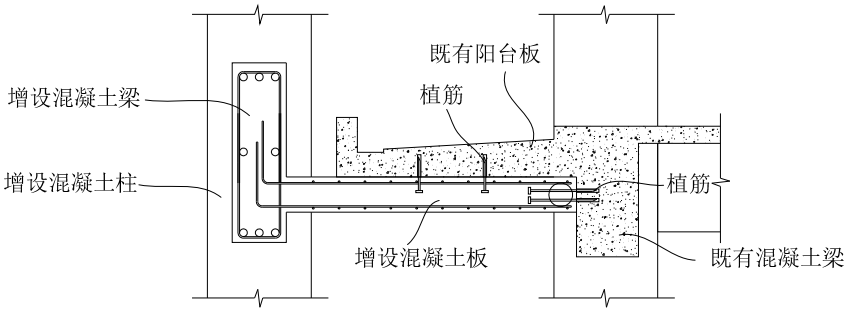


图 12 悬挑阳台侧外附混凝土框架时的典型连接构造示意图

Figure 12. Typical connection details for attaching external RC frames outside cantilever balconies

在上述三种常见的外附子结构中，外附钢支撑往往可以创造出独特的建筑效果。早在 1979 年，日本东北工业大学的川股重也等人（1979）便采用外附钢支撑对一座在 1978 年宫城冲地震中受损的地上 5 层地下 3 层的钢筋混凝土框架结构进行了抗震加固[29]。钢支撑节点板通过预应力高强螺栓固定在既有框架结构的梁柱节点外侧，与上文图 10 所示的连接方式类似。该建筑北立面的外附钢支撑的布置如图 13 所示。与之类似，东京工业大学的安田幸一和竹内徹在东京工业大学绿之丘 1 号馆的抗震加固中利用外附防屈曲支撑形成所谓的耗能立面，并结合遮阳系统创造出令人满意的建筑效果（图 14）。

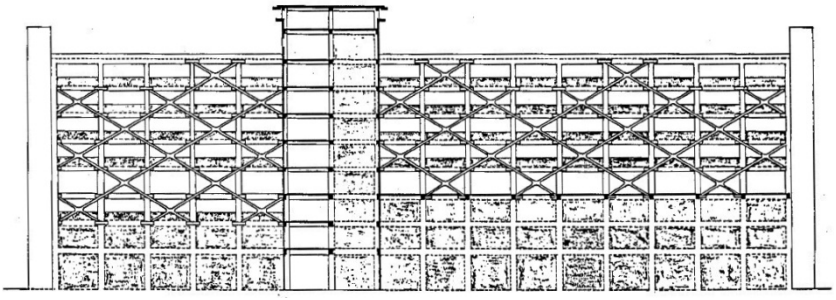


图 13 东北工业大学 5 号馆北立面的外附钢支撑[29]

Figure 13. Attached external steel braces of Building No.5, Tohoku University



图 14 东京工业大学绿之丘 1 号馆的耗能立面

Figure 14. Energy dissipation façade of Building No.1, Midorigaoka Campus, Tokyo Tech

与外附钢支撑或支撑框架结构相比，外附纯框架可以避免斜撑对窗户视野与采光的影响，具有建筑功能意义上的吸引力，但其提供的抗震承载力往往低于钢支撑或支撑框架。当采用普通的现浇钢筋混凝土或钢骨混凝土外附框架时，可以让外附框架直接付着在既有混凝土框架的梁、柱外侧，相当于增大既有结构最外侧框架的梁、柱构件截面（如谷口俊恭等（2010）[30]，小平涉 等（2010）[31]），这时不存在新设基础或对原有基础进行加固的问题。与之类似，也可以从外部增大抗震墙截面或为框架柱增设翼墙，以实现抗震加固的目的（如近藤龙哉等（2010）[32]）。但当外附子结构自重较大或者与原结构距离较远（如图 12 所示的在阳台侧增设外附结构）时，有必要为外附子结构单独设置基础，或者对原结构基础进行加固扩充。这会增大加固施工的难度和成本。

常见的外附纯框架有现浇钢筋混凝土框架（如法量良二等（1999）[28]）和钢框架（如阪口暁洋等（2004）[33]）等。此外，预制预应力混凝土（**PreCa**st **P**restressed **C**oncrete, PCaPC）外附框架是一个重要的发展方向。预应力混凝土梁、柱构件在工厂预制后搬运到加固施工现场，通过预应力技术接合成一个整体，新建预应力框架与既有结构之间则通过类似图 12 所示的现浇混凝土板相连。这在下文 4.3 节还会进一步介绍。

将外附纯框架与外附支撑相组合可以得到多种形式的外附支撑框架的加固方法，包括钢支撑框架（如永山宪二等（2010）[34]）、钢支撑混凝土框架（如本村一成等（2002）[35]、增田安彦等（2011）[19]）、钢骨混凝土支撑框架（如神谷隆等（2010）[36]、野中洋志等（2011）[37]）等。虽然外附支撑框架的形式不同，但加固原理相似，新建结构与既有结构之间的连接构造也大同小异，上文已有充分的介绍。值得注意的是，不论是单设斜撑还是增设支撑框架，都可以方便地使用各种支撑型阻尼器实现消能减震结构，这在下文会有进一步介绍。

除了上述三种比较常见的外附子结构，即外附支撑、外附框架和外附支撑框架之外，也有一些新颖的外附子结构付诸实践。一个典型的例子是东京工业大学 G3 教学楼的抗震加固工程。在结构纵向从建筑物外部增设了六片贯通结构全高的预应力混凝土墙体，墙体底部支撑在铸铁铰支座上，使墙体可以绕底部发生一定程度的转动而不会发生损伤，如图 15 所示（Qu et al, 2012）[38]。

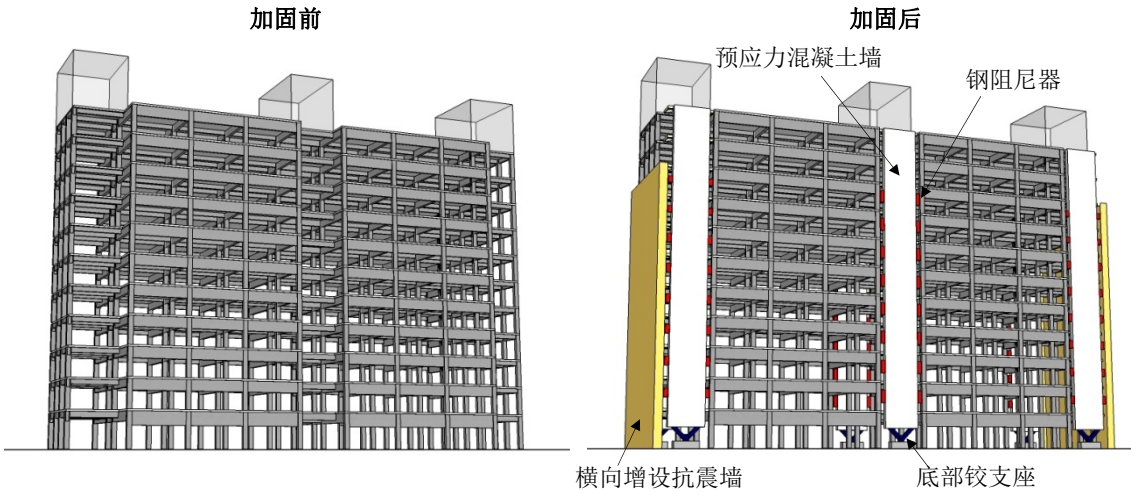


图 15 东京工业大学 G3 教学楼的外附摇摆墙抗震加固示意图

Figure 15. Attached external rocking walls for seismic retrofit of G3 Buildng, Tokyo Tech

3.2 混凝土结构的消能减震化

伴随着各种类型的消能减震装置在日本新建建筑中的大量应用，通过抗震加固实现既有结构的消能减震化也成为日本抗震加固技术的一个发展趋势。在既有结构中增设消能减震装置的常见形式如图 16 所示。图中灰色为增设部分，红色为耗能部分。常见的消能减震装置（阻尼器）根据变形模式可以分为支撑型和剪切型两类，支撑型阻尼器利用构件本身的轴向变形耗散能量，剪切型阻尼器则利用剪切变形耗散能量。按耗能机制的不同可以分为滞回型阻尼器（如防屈曲支撑、摩擦阻尼器等）、粘性阻尼器和粘弹性阻尼器等几种。

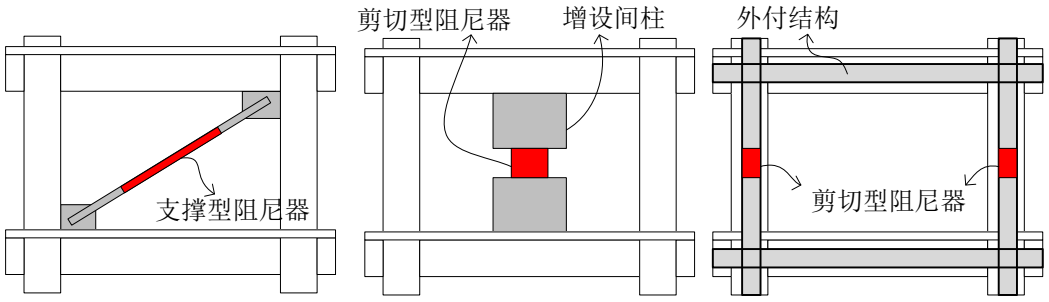


图 16 抗震加固中消能减震装置在既有结构中的常见布置形式

Figure 17. Common configurations of energy dissipating devices for seismic retrofit

由于其布置形式与各类传统的支撑框架非常相似，支撑型阻尼器在抗震加固中的应用最为广泛，其中又以各种类型的防屈曲支撑的应用最为广泛。如上文介绍的东京工业大学绿之丘 1 号馆的加固工程中即大量采用了两端铰接的防屈曲支撑（图 14）。为便于与外附混凝土框架进行连接，也有利用内藏钢板的钢筋混凝土斜撑进行抗震加固的应用。内藏钢板中段作无粘结处理后即形成以钢筋混凝土为屈曲约束机制的防屈曲支撑（如野中洋志等（2011）[37]）。另外也有关于将油阻尼器（如河野孝幸等（2002）[39]）、摩擦阻尼器（如横内基等（2005）[27]、本村一成等（2010）[35]）用于抗震加固的研究。

在跨中位置设置“间柱”作为集中耗能部位是剪切型阻尼器的常见布置方法。饭塚信一等（1999）介绍了采用不同形式的间柱加固的一个单层单跨钢筋混凝土模型的振动台实验[40]。实验中采用了软钢阻尼器和两种不同材料的粘弹性阻尼器。实验结果充分证明了这种消能减震方式的有效性。森浩二 等（2011）介绍了一种在外附钢框架中采用钢制间柱的加固方式。关于间柱型阻尼器在新建建筑或抗震加固中的应用已有大量的研究[41]。

上述支撑型和间柱型消能减震方案并非抗震加固所特有，同样可用于新建建筑。图 16(c)所示的外附柱型消能减震方案则是抗震加固所独有的。其特点是将外附框架柱（钢框架或混凝土框架）在层中位置打断，中间设置剪切型阻尼器，利用层间位移耗散地震能量。野中康友等（2008）介绍了一个在外附钢框架的钢柱中段设置钢阻尼器的抗震加固设计，如图 17 所示[42]。除了将钢柱打断设置钢阻尼器之外，该设计的另一个独特之处在于其外附钢框架与既有混凝土框架结构通过特殊设计的机械铰相连，一方面保证二者之间剪力和侧向位移的传递，另一方面避免混凝土框架自身的局部变形对外附钢框架造成不利影响，简化外附钢框架的受力状态。同样基于图 16(c)中的阻尼器布置形式，田中和宏等（2010）针对外附钢筋混凝土框架的情况，提出一种安装在框架柱中段的可以传递轴力的粘弹性阻尼器[43]。

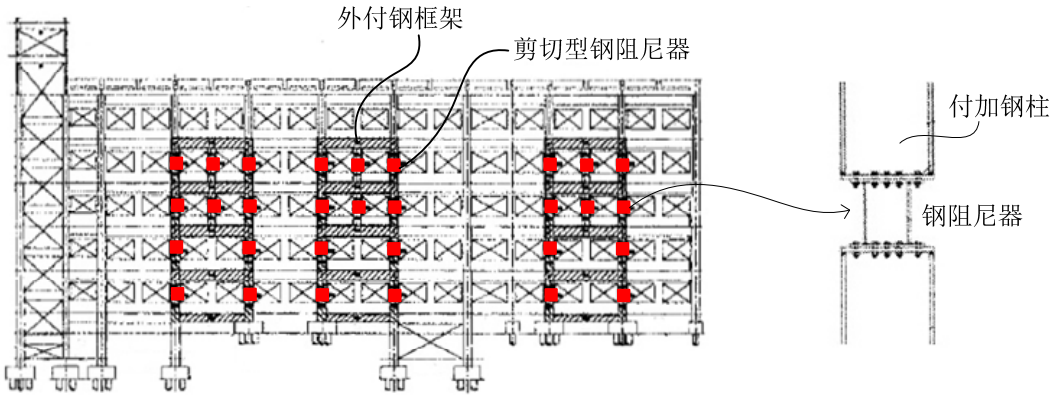


图 17 琦玉县某中学男生宿舍楼的消能减震加固设计示意图[42]

Figure 17. Seismic retrofit with energy dissipation devices for middle school dormitory in Saitama prefecture, Japan

如本文第 2 节所述，日本目前的抗震加固设计中往往只考虑加固后对结构承载力指标和延性指标的提高，而没有直接考虑阻尼器在降低地震作用方面的消能减震效果。为了验证加固效果，往往需要进行相对比较复杂的非线性结构分析。这对消能减震技术在抗震加固中的推广应用造成了一定的不便。

3.3 自复位技术

自复位能力是实现功能可恢复结构的一个重要途径。根据实际需要，通过抗震加固为既有结构赋予更高的自复位能力也是一个重要的发展方向。上文提到的外附 PCaPC 框架是实现这一目标的一种较为常见的途径。下面介绍外附 PCaPC 框架抗震加固方法中一种比较典型的“KTB 加固法”。

该加固法与上文图 11(b)所示的外附混凝土框架类似，外附框架与既有结构之间的连接也可参考图 12 给出的连接构造。不同之处在于，外附框架并非普通钢筋混凝土框架，而是将预制预应力混凝土梁、柱构件通过预应力连接节点相连而成的具有自复位性能的框架结构，如图 18 所示。该加固法继承了外附混凝土框架的全部优点，可以实现不入户施工，减少施工过程对建筑功能的干扰，且不设置斜撑，对住户视线不构成遮挡。

除此之外，该加固法还具有普通外附混凝土框架所不具备的优点。该加固法采用预制拼装的施工方法，现场湿法作业少，可显著缩短工期；与现浇混凝土构件相比，预制混凝土构件还具有节能环保、质量稳定、耐久性好等特点。从抗震性能的角度出发，该外附框架采用有粘结预应力高强钢绞线将预制梁、柱构件张紧成为一个整体，预应力连接节点可以张开、闭合，变形集中在梁、柱构件的接缝处，可有效避免梁、柱构件自身的损伤。这样的预应力连接节点还可以实现同时具有耗能和自复位能力的“旗形”滞回曲线，有助于提升既有结构的耗能能力和功能可恢复性（图 19）。

目前，KTB 加固法已在日本的集合住宅、医院、政府办公楼等多层钢筋混凝土建筑的抗震加固中得到较多的应用。图 20 是该加固法在横浜市某 7 层钢筋混凝土集合住宅的抗震加固中的应用实例。

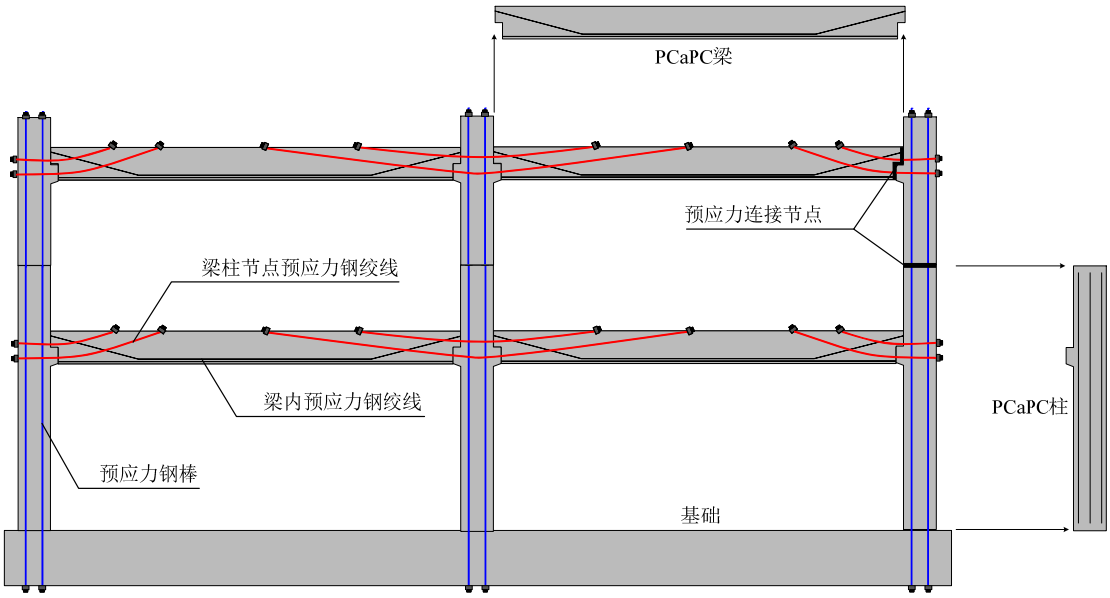


图 18 KTB 加固法中的外附预制预应力混凝土（PCaPC）框架构成[44]

Figure 18. Attached external precast prestressed concrete frames in KTB technique

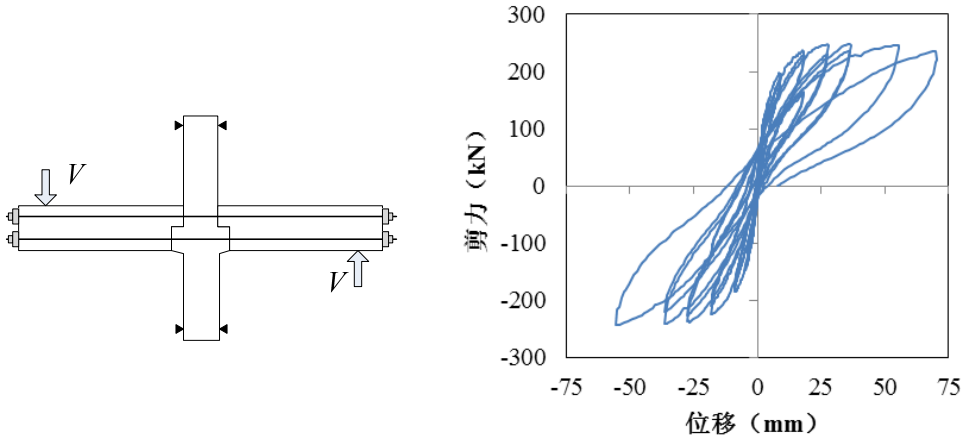


图 19 梁柱预应力节点拟静力实验示意图及滞回曲线[45]

Figure 19. Test setup and cyclic behavior of prestressed beam-column subassembly



图 20 KTB 加固法在某集合住宅中的应用[46]

Figure 20. Application of KTB techniques in residential apartment

值得注意的是，自复位技术和消能减震技术各自在不同的方面提高结构的抗震性能，将两者组合应用则有望获得更加优异的抗震性能。实际上，自复位体系成立的前提是结构在地震作用下不会发生过大的变形，因此通过消能减震技术降低结构的地震反应对于自复位技术的有效应用也是至关重要的。

4 结语

既有建筑的功能提升相关技术是经济社会可持续发展的重要保证。本文在总结日本钢筋混凝土建筑结构抗震加固技术现状的基础上，重要介绍了以“有机更新”、消能减震和自复位为主要特征的抗震加固技术发展趋势。其中消能减震和自复位技术是在新建建筑中同样存在的课题，而“有机更新”则是抗震加固技术所独有的，也是抗震加固技术发展的最主要趋势。所谓“有机更新”，是指应尽量减小甚至消除抗震加固施工对建筑功能的中断和影响，像有机体的新陈代谢那样在发挥正常功能的同时完成有机体的更新。日本建筑界在这方面已经发展出种类繁多的“不入户加固”技术，并积累了相当的经验，值得我国借鉴。

应该指出的是，除了技术层面的问题之外，还有必要在法律法规层面上加大鼓励建筑抗震加固的力度，特别是加大对新技术应用的支持力度，以充分发挥我国的后发优势，促进符合当代经济社会发展的新技术的广泛应用。

致谢

衷心感谢东京工业大学和田章教授、坂田弘安教授，大阪工业大学吉敷祥一博士和东京建筑研究所中泽俊幸博士在本文调研和写作过程中给予的帮助。

参考文献：

[1] 文部省. 学校施設の耐震補強マニュアル RC 造校舎編[S], 1998: 286-287.

[2] 日本建築防災協会. 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針[S], 日本建築防災協会, 東京, 2001.

[3] 富岡大岳, 内海洋志, 佐藤立美. せん断破壊先行型の低強度 RC 柱の補強効果に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2009: 695-698.

[4] 菊田貴恒, 大沼正昭. RC 造校舎の耐震改修と耐震性能に関する研究[C]//日本建築学会東北支部研究報告集, 69, 2006: 79-82.

[5] 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義. プレストレスを導入した PC 鋼棒で外帯筋状に横補強した RC 柱の耐震補強法に関する実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文集, 526, 1999: 141-145.

[6] 中川恭次, 亀井勇, 黒正清治. 鉄筋コンクリート建物の壁率と震害の関係[J]. 日本建築学会論文報告集, 60(1), 1958: 309-311.

[7] 志賀敏男. 「鉄筋コンクリート造建物の壁率と震害」のマップについて[C]//日本建築学会東北支部研究報告集, 32, 1978: pp117-120.

[8] Fintel, M. Performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years [J]. PCI Journal, 40(3), 1995: 62-80.

[9] 太田勤, 中村聡宏, 勅使川原正臣 ほか. 袖壁補強柱の耐震性能評価に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2009: 683-688.

[10] 苔前圭介, 中村聡宏, 勅使川原正臣 ほか. 両側袖壁増打補強柱の補強効果に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2011: 315-316.

[11] 松金佑典, 稲井栄一, 原山賢 ほか. 枠付鉄骨ブレースの接合方法に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2011: 267-274.
[12] 毛井崇博, 宮内靖昌. 接着接合された鉄骨ブレース補強骨組の力学特性[J]. 日本建築学会構造系論文集, 539, 2001: 103-109.
[13] 小谷野正浩, 出水俊彦, 長縄裕行 ほか. 袋状繊維型枠を用いたアンカーレス耐震補強工法に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 475-480.
[14] 河本 孝紀, 稲井栄一, 渡辺 賢一, 原山 賢. あと施工アンカーを集中して配置する枠付鉄骨ブレース耐震補強工法[J]. 日本建築学会技術報告集, 32, 2010: 161-166.
[15] 岩川浩二, 稲井栄一, 松浦恒久, ほか. 在来型耐震補強工法の改良に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 585-588.
[16] 石村光由, 貞末和史, 藤井稔己, ほか. 鉄骨ブレース補強した低強度コンクリート学校校舎の耐震強度に関する実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文集, 644, 2009: 1813.
[17] 石村光由, 貞末和史, 藤井稔己, ほか. あと施工アンカーとエポキシ樹脂を併用して鉄骨ブレース補強した低強度コンクリート RC 建物の耐震強度に関する実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文集, 659, 2011: 141-148
[18] 横山剛, 貞末和史, 石村光由, ほか. 既存低強度コンクリート RC 建物に対するハイブリッド耐震補強工法の適用に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2011: 651-654.
[19] 増田安彦, 引寺隆世, 楠浩一, ほか. 外側耐震改修時に生じるコンクリート接合面へのウォータージェット工法の適用に関する実験的研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2011: 373-376.
[20] 板谷 秀彦, 佐藤 貴志, 高瀬 裕也, ほか. 高いせん断耐力を期待する新型ディスクアンカーの開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 163-168.
[21] 池田 隆明, 八木沢 康衛, 尾中 敦義, ほか. 鋼製ディスクとアンカーボルトを併用した耐震改修用接合部材の開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2011: 615-622.
[22] 大竹誠寛, 稲田達夫, 岩田衛. 座屈拘束ブレースを用いた既存 RC 造建築物の耐震補強における接合部のせん断耐力の実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文集, 682, 2012: 1925.
[23] 北島幸一郎, 下畠啓志, 中原浩之, ほか. 圧縮抵抗ブレースを用いた RC 骨組の耐震補強法に関する研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2007: 549-552.
[24] 北島幸一郎, 宮西紀彰, 下畠啓志, ほか. 圧縮抵抗ブレースによる既存 RC 造架構の耐震補強法の開発研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2008: 781-784.
[25] 北島幸一郎, 平紙裕文, 宮西紀彰, ほか. 圧縮抵抗ブレースによる既存 RC 造架構の耐震補強法の開発研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2009: 13-16.
[26] 薩川恵一, 井戸建介, 田中豊延, ほか. Experimental study on failure behavior and energy absorption effect of R/C building with brace type damper based on dynamic cyclic loading [J]. 日本建築学会構造系論文報告集, 591, 2005: 129-136.
[27] 横内基, 北嶋圭二, 中西三和, ほか. 制震補強された実在鉄筋コンクリート造校舎の補強効果に関する実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文報告集, 592, 2005: 145-152.
[28] 法量 良二, 上之薗 隆志, 小堀 隆治, ほか.中高層集合住宅を対象としたフレーム増設型耐震改修に関する研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 1999: 123-134.
[29] 川股重也, 鈴谷二郎, 大沼正昭. 東北工業大学 5 号館の震害と修復[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 54, 1979: 1693-1698.
[30] 谷口俊恭, 飯塚崇文, 小室努, ほか. 外付け RC 耐震補強工法の開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 529-532.
[31] 小平 渉, 高橋 之, 神谷 和輝, ほか. バットレスとブレースで外側耐震補強した骨組の 2 方向加力実験[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 507-510.

[32] 近藤 龍哉, 山本 泰稔, 加藤 三晴, ほか. 既存鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の補強工法の提案と検証[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 543-548.

[33] 阪口曉洋, 倉重 正義, 古川 忠稔, ほか. 外付け門形鉄骨による既存 RC 造建築物の耐震補強工法に関する実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文集, 578, 2004: 147-154.

[34] 永山 憲二, 早川 智美, 稲田 達夫, ほか. 座屈拘束ブレースを用いた既存 RC 造建築物の耐震補強における接合部の研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 471-474.

[35] 本村 一成, 田才 晃, 永山 憲二, ほか. 既存 RC 造建物の外付け制震フレームによる耐震補強に関する研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2002: 747-750.

[36] 神谷隆, 伴幸雄, 上田洋一, ほか. 鋼板内蔵型 RC 部材による外付け耐震補強工法に関する研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 533-536.

[37] 野中洋志, 渡邊信, 金東彦, ほか. 鋼板内蔵型 RC 外付耐震補強工法におけるボンドレスブレースの構造性能に関する研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2011: 353-356.

[38] Qu Z, Wada A, Motoyui S, et al. Pin-supported walls for enhancing the seismic performance of building structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41(14), 2012: 2075-2091.

[39] 河野孝幸, 黒木信浩. 制震装置を用いた郵便局の耐震改修[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 2002: 719-720.

[40] 飯塚信一, 和田章, 曽田五月也, ほか. エネルギー吸収部材を用いた既存建築物の耐震改修効果に関する研究[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 1999: 165-170.

[41] 森浩二, 佐藤尚隆, 中澤敏樹. 無収縮高流動コンクリートを用いた外付け耐震補強架構の開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2011: 367-370.

[42] 野中康友, 原博, 本多徹哉, ほか. ピン接合形式による外付け制震補強構法の開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2008: 77-84.

[43] 田中和宏, 服部学, 川端淳, ほか. 軸力伝達機構を有する粘弾性ダンパーシステムの開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2010: 635-638.

[44] 坂田 弘安, 中井 敏文, 杉山 智昭, ほか. PC 圧着関節工法を用いた士形架構の力学的挙動に関する研究 [J]. 日本建築学会構造系論文集, 73(624), 2008: 307-315.

[45] 加藤雅樹, 坂上肇, 坂田弘安, ほか. PC 圧着関節工法を用いた床スラブ付き十字形骨組の力学的挙動に関する実験研究 [J]. コンクリート工学年次論文集, 31(2), 2009: 505-510.

[46] KTB 協会: http://www.ktb-kyoukai.jp/pc/cases/10.html.