

附加子结构抗震加固方法及其在日本的应用*

曲 哲, 叶列平

(清华大学土木工程系, 教育部结构工程与振动重点实验室, 北京 100084)

【摘要】 结合汶川地震灾后房屋建筑结构抗震加固的需要, 介绍了在日本应用较多的附加子结构抗震加固方法, 并结合一些典型案例介绍了不同类型附加子结构的抗震加固方法和技术在日本的实际应用和加固前后抗震性能的分析对比。最后, 根据我国抗震规范的要求, 提出采用附加子结构抗震加固的设计原则和方法。

【关键词】 建筑结构, 抗震加固, 附加子结构, 消能减震, 变形模式

Seismic retrofit with attached substructures and its applications in Japan

Qu Zhe, Ye Lieping

(Key Lab. of Stru. Eng. and Vibration of China Education Ministry, Dep. of Civil Eng., Tsinghua Uni., Beijing 100084, China)

Abstract: As an effort to meet the demands of retrofitting building structures after the Wenchuan earthquake, the seismic retrofit with attached substructures which has been widely used in Japan is introduced. Various types of attached substructures and their applications and effectiveness are demonstrated through typical retrofit projects. Design principles of structures retrofitted with attached substructures are proposed according to the requirement of the Chinese seismic design code.

Keywords: Building structure, seismic retrofit, attached substructure, energy dissipating, deformation pattern.

0 引言

在 1995 年日本阪神地震中, 按 1981 版《建筑基准法实施令》设计建造的结构经受了考验, 而此前的建筑则遭受了不同程度的震害^[1]。阪神地震后, 日本对建筑结构抗震加固方法和技术开展了大量的研究, 并在实际工程中积极推广应用。大量采用附加整体子结构的抗震加固方法是其中一个显著的特色。这种加固方法不但能够有效地提高结构的整体刚度和抗震能力, 而且能够最大限度地减少加固施工对建筑物内部正常使用的影响, 设计得当时还可取得特有的建筑效果。介绍了附加整体子结构抗震加固的基本概念及其在日本应用的一些实例, 并根据我国抗震规范^[2]的要求, 提出了采用附加子结构抗震加固的设计原则和方法。

1 附加整体子结构抗震加固的基本概念

《建筑抗震加固技术规程》(JGJ116-98)^[3] (简称《加固规程》) 强调应从提高结构整体抗震性能的角度对结构进行加固, 明确指出“加固的总体布局, 应优先采用增强结构整体抗震性能的方案, 应有利于消除不利抗震因素, 改善构件的受力状态”。以多层钢筋混凝土房屋为例, 《加固规程》指出“可根据房屋的实际情况, 分别采用主要提高框架抗震承载力、主要增强框架变形能力或改变结构体系而不加固框架的方案。”这是以提高结构整体抗震性能为出发点来进行加固的思路。

但在操作层面上, 《加固规程》给出的各种加固方法却大多局限于在构件上对原结构进行加固。如对多层钢筋混凝土房屋, 加强楼、屋盖整体性, 增设抗侧力构件, 采用钢构套、现浇钢筋混凝土套或粘钢等方式加固框架梁、柱, 采用细石混凝土修

复构件损伤等, 而缺乏整体加固的设计原则和具体方法。无形中对结构抗震加固实践产生一种误导, 使工程师更倾向于对原结构中抗震能力不足的构件进行加固, 而不是从结构整体抗震性能出发来设计加固方案。

事实上, 结构是作为一个整体来抵御地震作用的, 保证整体结构的抗震能力才是实现抗震设防目标的根本。为此, 首先要在充分理解结构“整体抗震性能”的基础上, 认识到结构体系层次加固与构件层次加固相比的优越性。附加整体子结构加固就是利用附加整体子结构与原有结构的协同工作, 增强原结构的整体抗震能力, 或改变原结构的结构体系, 进而改善原结构的受力状态和变形模式, 从而提高结构的整体抗震性能, 是一种结构体系的加固方法。基于构件的加固方法和基于结构体系的加固方法各有所长, 在实践中应结合工程具体情况, 取长补短, 综合制订加固方案。但总的来说, 应以提高整体结构抗震能力的加固为主, 以提高构件抗震能力的加固为辅。

附加整体子结构加固方法, 将附加子结构与原结构通过有效措施结合起来, 形成一个新的整体结构, 实现整体结构抗震能力的提升。附加整体子结构不但以其自身的抗震承载能力和耗能能力贡献于加固后的整体结构的抗震能力, 还可改善原结构的受力状态和变形模式, 使结构形成更合理的损伤屈服机制, 从而使原结构的抗震能力得到更充分的

*国家科技支撑计划项目 (2009BAJ28B01); 国家自然科学基金重大研究计划重点项目资助 (90815025)。

作者简介: 曲哲, 博士研究生; 叶列平, 教授, 博士生导师, Email: qz@mails.tsinghua.edu.cn。

利用。同时, 附加整体子结构的加固施工主要在原结构外部完成, 可最大限度地减少对建筑正常使用的干扰, 在加固施工期间可以不中断建筑的使用。在设计附加子结构时, 应特别注意附加子结构与原结构变形能力的协调, 从结构整体受力角度出发, 明确加固后结构的变形与破坏模式。

根据原结构的情况, 附加整体子结构加固方法可以从抗震承载力、变形能力和耗能能力的某一个方面提升原结构的抗震能力, 也可以从几个方面同时提升原结构的抗震能力, 通常为后一种情况。

2 附加整体钢支撑子结构加固

附加整体钢支撑子结构通常分布于原结构全高, 其本身具有较大的刚度, 且在为结构提供额外抗震承载力的同时, 还从整体上改善了原结构的受力状态和变形模式, 有助于使原结构的侧向变形沿高度分布更加均匀。加固后获得的抗震性能的提升, 不仅来自于附加整体钢支撑子结构自身的刚度和承载力, 还来自于合理的变形模式对原结构构件抗震能力的充分利用。

图 1 所示为一幢采用附加 V 形钢支撑框架加固的 3 层钢筋混凝土教学楼^[4]。结构纵向 3 跨, 横向 2 跨, 并在横向设置有结构墙。在纵向外侧的两榀框架上各附加一个贯通结构全高的 V 形钢支撑框架子结构进行加固, 附加 V 形钢支撑框架子结构与原混凝土结构在各楼层位置处相连。



图 1 3 层钢筋混凝土教学楼的附加 V 型钢支撑加固^[4]

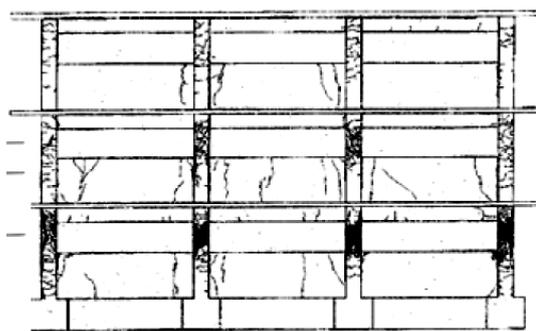
对加固前后教学楼分别进行的足尺模型振动台试验的试验现象如图 2 所示。未加固的教学楼在 100% 的 JMA Kobe 地震记录 (PGA=818gal) 作用下已发生严重破坏, 主要表现为首层窗间柱的短柱剪切破坏 (见图 2 (a))。而结构在加固后, 在 130% 的 JMA Kobe 地震记录作用下也未造成明显破坏, 最终采用与结构基本周期相同的正弦波进行加载, 才使结构破坏, 图 2(b) 为加固后结构最终破坏时的状态。

图 3 为未加固结构和加固结构的损伤分布对比, 可以看出, 附加 V 形钢支撑框架子结构加固后, 不但提高了结构的抗震承载力、减轻了结构的损伤, 而且抑制了结构层屈服机制的出现, 使结构损伤分布更加均匀。

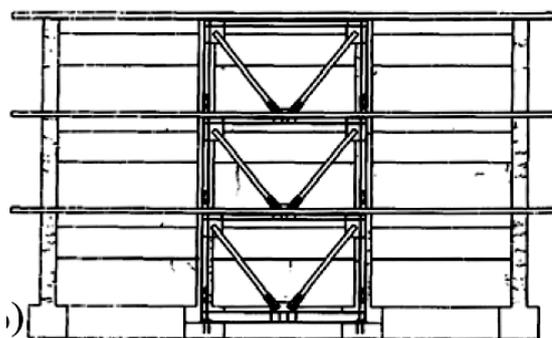


(a) 未加固教学楼的震害 (100% JMA Kobe) (b) 加固后教学楼在正弦波激励下的震害

图 2 附加 V 形钢支撑框架加固教学楼的足尺振动台试验



(a) 加固前



(b) 加固后

图 3 100% JMA Kobe 地震作用下加固前后教学楼的损伤情况 (Kabeyasawa^[4])

图 4 为东京工业大学建筑系系馆采用附加 X 形钢支撑加固^[5], 该加固方案的主体是附加在结构立面上的 X 形钢支撑面层, 底部几层采用 CFRP 缠绕对原有结构框架柱进行加固以提高其变形能力。对原结构变形能力的增强有助于保证原结构与附加子结构之间变形能力的协调。

设计加固方案时, 根据各个楼层的不同功能, 体现了尽量减少对建筑物正常使用的影响的加固原则。对于地下层 1 试验室和层 1, 2 教室, 利用暑期进行原框架结构的内部加固; 而对层 3~5 办公室, 为不中断正常使用, 不进行内部加固, 只通过在立面附加巨型 X 形钢支撑进行加固。作为建筑系系馆, 加固方案设计必须到考虑加固后的建筑效果, 斜撑面层与金属遮阳板面层的结合为原来比较规矩死板的建筑立面增添了现代感 (图 4 (c))。

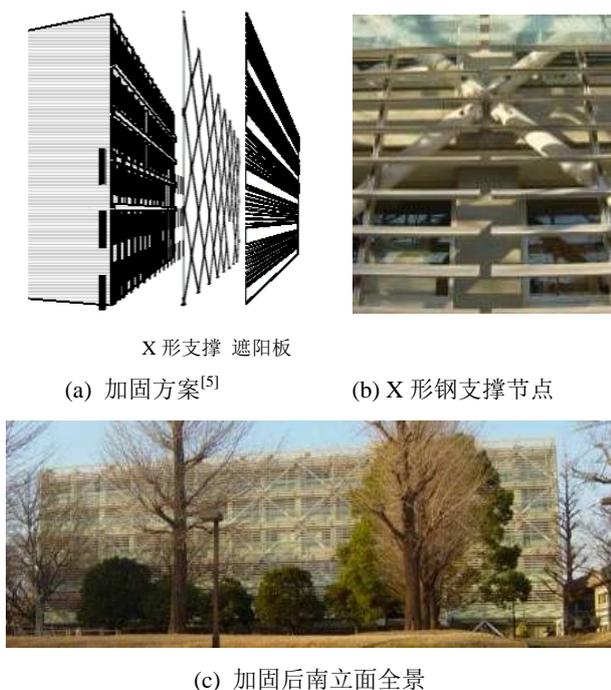


图4 东京工业大学建筑系系馆的加固

用弹塑性时程分析计算得到的加固前后结构在5条地震地面运动记录作用下的最大层间位移如图5所示^[5]。可以看出, 加固后不但结构变形均明显减小, 楼层变形的分布更加均匀, 而且结构响应的离散程度也大为减小。这是附加X形钢支撑加固方案对整体结构变形模式改善的结果, 不仅使结构地震响应的预测更准确, 也提高了结构抗震性能的可控性, 有利于避免遭遇不利地震时可能产生的震害。

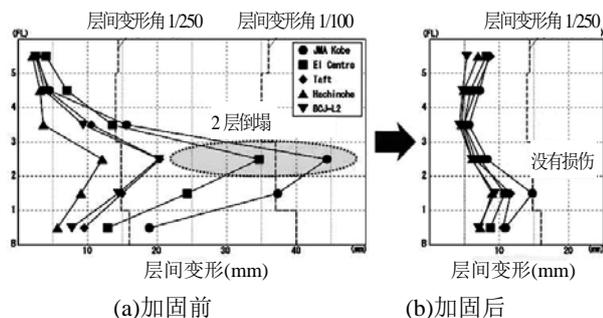


图5 加固前后结构在地震作用下的最大层间位移弹塑性时程分析结果^[5]

3 附加摇摆墙加固

在结构中加入具有足够刚度和承载力的整体型关键构件, 可以有效改变结构的变形模式, 避免出现层屈服机制等局部型破坏模式。东京工业大学G3教学楼的加固改造设计^[6], 巧妙地利用既有结构在建筑平面两端和中部的6个凹槽, 附建6片预应力钢筋混凝土摇摆墙体(图6), 墙体根部通过特殊设计的铰支座与基础相连, 摇摆墙体与原钢筋混凝土框架之间通过一系列钢阻尼器相连(图7)。在地

震作用下, 当结构发生水平变形时, 摇摆墙体可以绕其根部的铰支座在墙体平面内自由摇摆而不出现损伤, 同时摇摆墙与原框架结构之间的相对变形使布置于其间的钢阻尼器充分发挥其耗能能力, 减小整个结构的地震响应。

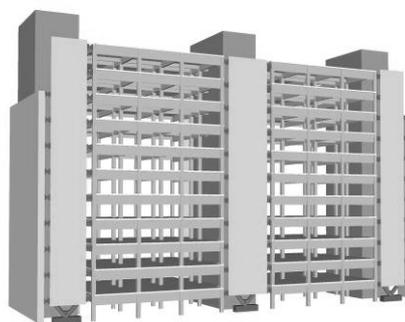
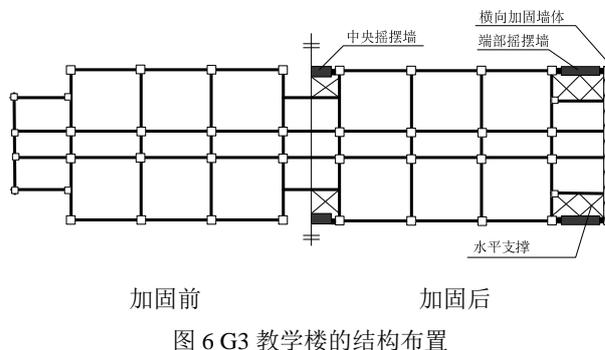


图7 G3 教学楼在加固后的结构示意图

表1 弹塑性动力响应分析采用的地震波

震级	时间	名称	V _{s,30} /m/s	断层 距 /km	原数据库中 文件名称	PGA /g	PGV /cm/s	T _d /s
1	6.50	Friuli, Italy	424.8	14.97	A-TMZ270	0.31	30.78	4.9
2	6.53	Imperial Valley, US	274.5	22.03	H-DLT352	0.35	32.99	50.3
3	6.54	Supert. Hills, US	207.5	23.85	B-IVW360	0.21	34.51	28.7
4	6.93	Loma Prieta, US	370.8	27.67	HSP000	0.37	62.30	16.4
5	7.28	Landers, US	353.6	23.62	YER270	0.24	51.40	17.6
6	6.69	Northridge, US	450.3	20.10	ORR090	0.57	52.54	9.1
7	6.90	Kobe, Japan	256.0	19.14	SHI000	0.24	37.84	10.3
8	7.14	Duzce, Turkey	326.0	12.02	BOL090	0.82	62.07	9.4
9	7.62	集集地震	446.6	45.15	TCU095-E	0.38	62.02	13.2
10	8.00	汶川地震	300.0*	18.76	UA0097	0.48	35.87	72.0

注: V_{s,30} 为场地 30m 土层平均剪切波速; 带*数值为估计值, 代表 II 类场地。

采用表1所列的10条地震地面运动记录, 对加固前后的结构进行弹塑性时程分析, 得到结构最大层间位移角的平均值如图8所示。同时给出只增设摇摆墙而不安装钢阻尼器情况下的减震效果。可以清楚的看出, 因原结构的侧移变形受到摇摆墙的

控制, 结构的楼层变形沿高度分布趋于均匀, 使原结构的抗震能力有所改善, 但提高不多, 表现为最大变形的降低并不明显。而阻尼器的加入则大大增强了结构的承载力和耗能能力, 结构的最大侧向变形显著减小。可见摇摆墙的贡献在于创造出相对均匀的变形模式, 使阻尼器的耗能能力得到最大限度的利用。另一方面, 加设摇摆墙后结构在不同地震激励下的变形响应的离散性也大为减小。这种通过改善原结构的受力状态与变形模式来实现建筑结构抗震性能的提升, 是基于构件的加固方法难以实现的。

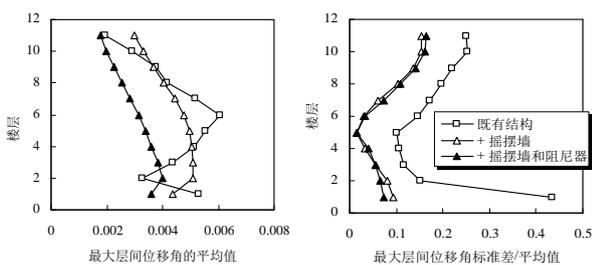


图 8 加固前后结构的地震响应及其离散性

4 其他子结构形式

附加整体子结构的加固方法还可以采用多种多样的形式, 如图 9 是在既有结构之外再建造新的钢筋混凝土框架并与原结构相连以进行抗震加固, 图 10 是采用贯通结构全高的附加斜拉柱进行加固的方式。这两种加固方法都是通过既有结构上附加一个相对独立的整体子结构, 在增加既有结构抗侧能力的同时, 也改变了既有结构的变形模式, 使整个结构在抗震承载力、变形能力和耗能能力等多方面得到提高。



图 9 神户大学某教学楼利用附加钢筋混凝土框架加固实例



图 10 某教学楼采用附加斜拉立柱的加固方案

5 附加子结构抗震加固的设计原则和方法

如前所述, 与基于构件的加固方法相比, 基于结构体系的附加子结构抗震加固着眼于改善原结构的受力状态与变形模式, 提高结构的抗震承载力、变形能力和耗能能力。在设计附加子结构抗震加固时可按以下原则进行: 1)附加子结构应具有足够的刚度和承载力, 能够起到控制原结构变形模式的作用; 2)在平面布置上, 附加子结构的布置应均匀对称, 避免因局部加强造成刚度突变; 3)应按新的整体结构进行地震作用分析, 分别获得原结构和附加子结构的内力进行构件抗震承载力设计; 4)当附加子结构分散布置在原结构的不同区段时, 原结构中竖向承载力不足的构件也应进行加固, 以避免原结构局部倒塌; 5)附加子结构本身应具有可靠的基础; 6)附加子结构与原结构之间应有可靠的连接, 原结构在连接部位应具有足够的承载力, 否则应进行局部补强。

6 结语

附加整体子结构的抗震加固方法不但可以有效改善结构的整体受力状态, 提高结构的抗震性能, 而且在加固施工期间可以尽量不中断建筑结构的正常使用, 还可以结合建筑的具体情况创造出丰富的建筑效果, 是一种经济、合理、高效的加固方法, 值得在我国推广应用。

参考文献

- [1] BSL 2004. The Building Standard Law of Japan[S]. Translated by Sansei International Inc. 4th ed. Tokyo: The Building Center of Japan, 2004.
- [2] GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 2001.
- [3] JGJ116-98. 建筑抗震加固技术规程[S].1998.
- [4] KABEYASAWA, TOSHIKAZU, KABEYASAWA, TOSHIMI, MATSUMORI, TAIZO, et al. Shake table test on a full-scale three-story reinforced concrete building structure. Journal of structural and construction engineering. Transactions of AIJ [J]. 73(632), 2008: 1833-1840.
- [5] TAKEUCHI TORU, YASUDA KOICHI, IWATA MAMORU. Seismic retrofitting using energy dissipation facades[C]//Proc. ATC&SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Building and Other Structures, San Francisco, 2009.
- [6] WADA AKIRA, QU ZHE, ITO HIROSHI, et al. Seismic retrofitting using rocking walls and steel dampers[C]//Proc. ATC&SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Building and Other Structures, San Francisco, 2009.
- [7] GB50023-95 建筑抗震鉴定标准[S]. 1995.