

文章编号: 1005—0523(2007)01—0040—04

砖混房屋整体式外套框架加层结构分析

高剑平

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对砖混房屋整体式外套框架加层中新旧结构之间作用不明确, 计算模型不清晰的问题, 在分析大量相关试验研究和理论分析资料的基础上, 提出外套框架结构对原砌体结构抗震加固作用应按体外构造柱考虑, 并分析了外套框架结构和既有砖混结构各自最不利内力阶段, 以此作为控制结构设计的依据. 本文提出, 采用外套框架和抗震墙各自弹性抗侧刚度, 计算结构总地震作用和层间剪力, 并按其各自弹性抗侧刚度比分配地震剪力, 作为既有砖混结构抗震加固验算的依据; 按框架弹性刚度和抗震墙经刚度折减后的刚度比分配楼层地震剪力作为外套结构的抗震设计依据.

关键词: 砖混房屋, 加层, 抗震, 外套框架, 结构分析

中图分类号: TU317+.1 **文献标识码:** A

1 引言

砖混结构的加层方式基本可以归结为二类: 直接加层法和外套框架加层法. 直接加层法适用于原砖混结构的墙体和基础的承载力有一定富裕的情况, 且开间较小, 而加层改建也无大开间要求的情况, 这时其经济性较好, 工期较短, 应予以优先考虑. 但是, 直接加层往往因原承重结构或地基基础难以承受过大的加层荷载, 而大规模地加固原结构不仅费时费力而且很不经济. 外套框架加层法是直接加层方法不可行情况下唯一的选择. 外套框架加层法又可分为“分离式”或“整体式”两种, 其中分离式是指新增结构同原结构彻底分开, 无任何连接, 新旧结构体系之间留有足够宽的抗震缝, 各自独立地承担竖向荷载和抵抗侧力. 分离式加层具有传力路径明确, 计算简图明晰, 对原结构影响较小, 而且增加的结构平面布置灵活, 不受原结构的限制等优点, 因而应用较广. 然而, 分离式外套框架作为典型的底层柔性结构, 在地震区使用存在一系列问题, 最大的缺陷是易形成“高鸡腿”结构, “头重脚轻”、“上刚下柔”, 高腿柱、竖向刚度突变、底层大跨度结构对抗震很不利. 整体式外套结构, 即将新旧结构通过某种连接构

造连接起来形成整体来共同抵抗侧力. 但在地震区采用, 往往存在新旧结构之间相互作用不明确, 新旧结构交织在一起, 竖向和水平传力路径复杂, 难以形成清晰明确的计算简图等问题.

针对这些问题, 在文献^[1]中作者结合一座教学楼的加层改造提出“竖向分离, 水平一体、兼顾既有砖混结构抗震加固”这一设计思想, 即通过特别设计的连接构造使外套结构和既有砖混结构各自承担竖向荷载, 而水平方向共同抵抗地震作用. 一般而言, 建于70年代以前的房屋多未考虑抗震设计, 因此加层改造的同时多伴以既有砖混结构的抗震加固. 试验研究^[2,3]表明: 采用钢筋网水泥砂浆面层加固砖砌体是提高其抗震能力的有效措施, 可较大幅度提高砖砌体的抗侧刚度、抗剪强度和延性. 一般结构方案中为避免新旧结构楼层刚度突变, 应采取措施加强上部外套框架部分的刚度. 对于既有砖混房屋的横墙间距较大, 不满足现行抗震规范要求的情况, 结合加层改造可在局部增设钢筋混凝土剪力墙.

根据统计资料^[4], 拟加层的既有房屋多为四层以内的砖混结构, 五层以上的极少. 而采用外套结构加层在既有结构四、五层的基础上增加二~三层比较经济合理. 在实际工程中, 大部分砖混结构的加层

改造不会超出这个范围. 对于个别有特殊要求的加层工程, 可考虑采用其它形式的结构体系, 这里不拟讨论. 因此以下对结构的分析和计算模型的讨论以多层砖混结构(四层以内)的加层为主.

2 外套框架梁柱对原砌体结构抗震加固作用分析

根据对相关试验资料的分析研究, 本文认为, 外套框架梁柱对原砌体结构抗震加固作用类似体外构造柱. 基于的理由如下:

2.1 马牙槎和拉结筋的作用

对于构造柱与砖砌体的结合面, 是用无槎接缝好还是大马牙槎好尚未有定论. 清华大学^[5]等单位采用体外构造柱加固多层墙片模型试验表明, 尽管后浇混凝土柱与砖墙之间的结合面没有槎口, 也没有拉结筋, 砖墙变形达到 0.14 弧度, 墙面龟裂, 墙柱结合面也未出现裂缝. 从内力分析的角度看, 除了砖墙外甩力之外, 层间剪力和倾覆力矩都不可能使构造柱与砌体结合面产生拉力, 倾覆力矩在结合面引起的剪力也不大. 即使是无槎平接, 后浇混凝土与砖砌体的粘结强度也足以应付变形过程中的各种应力. 从北京建筑设计院^[2]所作的带构造柱砖房模型的试验过程可以看出, 墙端构造柱与砖墙之间联系钢筋之所以必要, 并非因为构造柱与砖墙接触面的结合力不够强, 在侧力作用下接触面因为出现张力而拉开或发生剪切破坏, 而是在砖墙碎裂的破坏后期阶段, 构造柱象框架柱一样发生弯曲, 用拉结筋拉住一部分未开裂的砌体共同工作, 可提高构造柱的抗弯强度及其在竖向荷载作用下的稳定, 对于提高砖墙的抗震能力和防止砖墙的坍塌将起到一定作用. 因此, 可以得出结论: 构造柱与砖砌体结合面之间拉结筋的作用要比是否有槎接缝重要; 从另一方面看, 若采用文献^[1]中的构造措施, 即使构造柱与砖砌体的结合面无槎平接, 通过框架梁与墙体间的剪力键仍能起到传递剪力的作用. 换句话说, 可以不采用马牙槎, 但设置拉结筋是必要的.

2.2 外套框架与砌体墙片共同工作能力

外套框架柱与砖砌体之间的柔性拉结筋允许新旧结构在竖向一定程度的自由变形, 两者在结合面上变形不协调, 墙片与框架柱之间只能传递压力不能传递剪力和弯矩. 而带边框的砌体剪力墙在施工过程中预留的马牙槎和砌体间以及与边框柱相连的水平钢筋使墙体具有良好的整体性, 可把带边框砌

块剪力墙看作一个整体, 在边框柱和砌体在两者的接触面上, 位移协调, 满足连续性条件. 因此外套框架柱与砖砌体共同工作能力以及外套框架对砌体的约束作用都不如带边框的砌体剪力墙, 若按砌体剪力墙分析显然过高地估计了其抗剪能力和变形能力, 它们共同工作性能更接近体外构造柱和砖砌体. 此外, 外套框架柱承受新加楼层的竖向荷载, 且与穿过原砖混结构内部的梁在纵横向形成明确的框架结构体系, 无视这一点也有失偏颇. 基于上述原因, 并且考虑到墙体的受力性能不易确定, 因此将外套框架对砖混砌体的抗震加固作用视为“体外构造柱”是合理的并偏于安全.

2.3 外套框架梁柱对原砌体结构抗震加固作用

工程力学研究所进行的框架填充墙试验结果表明, 带边框的砖墙体, 当构造柱和圈梁强大到框架的程度, 砖墙体的抗剪能力也只提高 13% 左右^[6]. 外套框架梁柱对原砖混房屋抗震加固的作用在弹性阶段是有限的, 它的作用主要在后期的弹塑性变形阶段才能发挥出来. 构造柱和圈梁(或外加构造柱和圈梁)之所以能提高砌体结构的抗倒塌能力, 主要不在于其对砌体抗剪强度的提高. 其真正作用在于构造柱与圈梁一起形成砖墙的边框, 箍住开裂的墙体, 阻止裂缝的进一步开展, 限制开裂后块体的错位, 使砖墙的竖向承载力不致大幅度下降, 从而防止砖墙的倒塌, 即增强了原结构整体性能, 从而也达到抗震加固的目的. 一般当构造柱间距较密时, 对抗剪承载力提高的幅度较大, 但间距较大时, 只能对砌体结构起到一定的约束作用, 增加延性、改善变形能力. 因此, 外套框架对原砌体结构的抗剪承载力的提高不可过高地估计. 一般在既有房屋年久失修, 承载力多有降低的情况下, 将外套框架梁柱对抗震墙抗震能力的提高作用作为储备是偏于安全的.

3 外套框架和砌体结构最不利内力阶段分析

大量研究表明^[6~9], 当抗震墙与框架并存时, 在发挥抗震能力方面步调并不一致. 框架和抗震墙(砖墙和钢筋混凝土夹板墙)是受力和变形性能不同的构件, 它们的弹性变形极限和破坏过程不同, 因此, 对各构件的地震剪力的分配和强度验算, 应考虑不同变形阶段各自相对抗侧刚度的变化引起的塑性内力重分布的影响, 以确定各自的最不利内力阶段作为控制设计的依据.

地震作用是按结构构件之间相对刚度比例分担的.在罕遇地震作用的初期(一瞬时),由于砖混结构的初始刚度一般远大于框架的抗侧刚度,砖混结构将首先“吸引”大部分地震作用.由于抗震墙的弹性变形很小,墙片将很快首先开裂,越过其弹性极限,率先进入弹塑性阶段,刚度大幅退化,而框架则在层间位移角达到 $1/500$ 以前,基本处于线弹性变形阶段,刚度基本不降低^[9].因抗震墙是主要的抗侧力构件,其刚度的大幅度降低将导致结构总抗侧刚度的降低,从而使结构自振周期加长,所受总地震作用减小.其次,由于层间位移角达到 $1/500$ 时,抗震墙刚度已大幅降低,而此时框架处于弹性工作阶段,换言之,框架和抗震墙之间的刚度比已经发生了变化,那么地震作用将在二者之间重新分配.这意味着应根据地震过程中结构不同变形阶段抗震墙和框架的实际刚度的比值,进行总地震作用的计算及其在抗震墙和框架之间的分配,以求得框架的最不利地震内力,从而保证抗震墙在刚度退化并吸收了一定的地震能量后,外套框架能够承担一定的地震作用.

西安冶金建筑学院、抗震所、工程力学研究所等单位对砖填充墙框架的试验结果表明,当底层采用砖抗震墙时,当楼层变形角为 $1/500$,嵌砌于框架间的砖抗震墙,因出现较多细裂缝,抗侧刚度降低为初始弹性刚度的 20% 左右^[8].中国科学院工程力学研究所,北京市建筑设计院等单位模型试验的一些早期研究结果表明,砖墙的初裂角变形大致在 $1/3\ 000$,当角变形达到 $1/2\ 000$ 时开始出现对角裂缝,角变形达到 $1/1\ 000$ 时对角裂缝贯通,角变形达到 $1/200$ 时,墙面普遍开裂^[6].从以上资料可看出,当砖墙的层间角变形达到其弹性极限,即开始出现裂缝时,钢筋混凝土框架柱的层间角变形离它的弹性极限还很远,大致相当于其弹性极限的 $1/8$ 左右,也就是说此时框架柱处于低应力状态.国内外所做的钢筋混凝土框架模型试验表明,当层间位移角达到 $1/500$ 时,框架结构基本还处于弹性或轻微弹塑性阶段,刚度并无明显降低;而此时混凝土抗震墙和砌体抗震墙的刚度分别降为弹性刚度的 30% 和 20% 左右^[6~7].当层间位移角超过 $1/500$ 后,框架进入弹塑性阶段,其抗侧移刚度开始退化,当层间位移角 θ 约为 $1/250 \sim 1/230$ 时出现初裂,当 θ 达到 $1/120$ 左右时进入屈服阶段.对高宽比小于 1 的整体钢筋混凝土抗震墙,当层间位移角在 $1/200$ 左右已达到极限承载力,而后承载力迅速降低.此后随着层间侧移的增加,框架和抗震墙的刚度都在进一步下降,但二

者下降的比例基本维持在 $1:0.3$ 左右^[8].

当层间位移角达到 $1/500$ 之前,框架基本处于弹性变形阶段,而此时剪力墙已越过其弹性层间位移角极限 $1/3\ 000$,且刚度以较快的速度退化.因此,当层间位移角达到 $1/500$ 时,框架刚度与剪力墙刚度比 η 将达到最大值 $\eta_{\max}$,因为当层间位移角超过 $1/500$ 后,框架也进入弹塑性阶段,其刚度也在退化,且其退化速率与剪力墙在 $\theta \geq 1/500$ 后的退化速率基本相同^[9].这意味着当层间位移角 $\theta \geq 1/500$ 一直到 $\theta = 1/120$ (框架屈服)这个阶段中,框架刚度与剪力墙刚度之比 η 基本维持在 $\eta_{\max}$ 附近,按 $\eta_{\max}$ 进行框架和剪力墙之间地震作用的分配,框架分配到的地震剪力是最大的.那么回到另一个关键问题上来,即当层间位移角 $\theta = 1/500$ 时,抗震墙刚度的退化将使整个结构的刚度降低、周期加长,总地震作用也同时在减小.那么此时($\theta = 1/500$)的总地震作用是否是其后的阶段($\theta \geq 1/500$)中的最大值呢?由前述的分析可知,当 $\theta \geq 1/500$ 以后,随变形的加大和裂缝的出现、开展,框架和抗震墙的刚度基本以相同的速率连续减小,结构的总刚度也将连续减小,结构的总地震作用也在持续减小.因此可以断定:当层间位移角 $\theta = 1/500$ 时按结构实际刚度计算的总地震作用是结构所受地震作用的最大值.

综上所述,抗震墙所承担的最大地震剪力发生在抗震墙具有最大抗侧刚度时分配得到的剪力.此时,抗震墙与外套框架刚度比最大,分配到的地震剪力也最大,因此成为检验抗震墙承载力的关键阶段.当整个结构的层间位移角达到 $\theta = 1/500$ 时,框架所受的地震作用是最大的,为框架的最不利内力状态.

那么这里涉及到是以外套框架和抗震墙均处于弹性阶段时计算的总地震作用,还是以整个结构的层间位移角达到 $\theta = 1/500$ 时计算的总地震作用作为设计总地震作用.本文认为,应以前者,即以外套框架和抗震墙均处于弹性阶段时计算的总地震作用作为设计总地震作用.原因在于:首先,我国现行抗震规范中地震作用的确定方法是采用与设防烈度对应的众值烈度下的地震动参数,用弹性反应谱法求得结构在弹性状态下的地震作用,并规定在众值烈度下结构处于弹性阶段.因此采用结构弹性地震作用作为确定框架最不利地震内力时整个房屋所受到地震作用是符合抗震规范的规定的.其次,根据前述的分析,当抗震墙在越过其弹性层间位移角开裂后,刚度急剧下降,此时房屋所受到的地震作用是在地震作用期间的最大值,随后结构总刚度降低,结构自

振周期加长,地震作用减小.所以,采用地震作用最大值作为框架最不利地震内力时房屋所受的地震作用是合理的.其三,各楼层的各片抗震墙出现裂缝后刚度衰减并不同步,刚度退化在 20%~30%之间只是一个平均的估计,若以抗震墙刚度退化 20%~30%时的总地震作用作为设计地震作用,有可能低估地震作用.最后,由于抗震设计中存在大量不确定因素,地震作用在时间、空间和强度上具有很强的不确定性,某一地区的设防烈度只存在概率上的意义,实际上总存在被超越的可能.结构构件的破坏机理同样非常复杂,各种计算模型也不可能与结构的实际情况完全相同.因此,考虑地震作用、材料强度和计算模式的随机性,结构的抗震设计不应完全依赖理论分析来解决,结构的抗震性能应从抗震概念设计、构造措施、计算分析等几方面来共同保证.基于上述几项原因,有理由认为,以外套框架和抗震墙均处于弹性阶段时计算的总地震作用作为设计总地震作用,至少不会将地震作用估计小了,这对于保证结构的抗震安全性是很重要的.

3 结论

- 1) 外套框架柱对既有砖混房屋的抗震加固作用应按体外构造柱来考虑,这样处理符合结构的实际受力情况,也偏于安全.
- 2) 采用本文提出的结合抗震加固的加层方法

可使脆性破坏的砖混结构体系改造成延性的框架—抗震墙结构,可较好地利用原结构的抗震潜力并改善结构的抗震性能.

3) 采用外套框架和抗震墙各自弹性抗侧刚度,计算结构自振周期、总地震作用和层剪力,按外套框架和抗震墙各自弹性抗侧刚度比分配地震剪力,作为既有砖混结构抗震加固验算的依据;按框架弹性刚度和抗震墙经刚度折减后的刚度比分配楼层地震剪力作为外套结构的抗震设计依据.

参考文献:

[1]高剑平,等.吉林工学院教学实验楼结构加层改造[J].低温建筑技术,2003(5):26~27.
[2]苏三庆,等.用夹板墙加固砖房的抗震性能[J].西安建筑科技大学学报,1998,9:233~235.
[3]苏三庆,等.用钢丝网水泥砂浆抹面加固砖墙的抗震性能试验研究[J].西安建筑科技大学报,1998,9:228~232.
[4]高剑平.砖混房屋整体式外套结构加层研究[D].哈尔滨工业大学博士学位论文,2003.12.
[5]刘大海,等.房屋抗震设计[M].西安:1985.
[6]钟锡根,等.底层框架砖房的抗震计算和构造[J].建筑结构学报,1982(5):32~35.
[7]刘大海,等.砖填充墙框架房屋的地震内力分析[J].建筑结构学报,1982(5):34~43.
[8]刘大海,等.底层框架与多层内框架砖房的抗震设计[J].建筑结构,1991(1):34~41.
[9]刘建新.高层框—剪结构中框架地震内力的确定[J].建筑结构学报,1997,20(3):15~22.

Structural Analysis for Story-adding of Existing Brick Masonry Buildings
by Incorporated Masonry-in-frame Systems

GAO Jian-ping

(School of Civil Engineering and Architecture, East Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The interaction of frames with brick masonry buildings in the story-adding structures of existing brick masonry buildings by incorporated masonry-in-frame system is ambiguous as well as the analytical model. It is proposed that the seismic strengthening effect of the new frame structure on the existing brick masonry may be considered to be similar to that of constructional columns and beams, based on a number of relevant test data from abroad and home. Furthermore, the most disadvantaged internal force stage of the frame and brick masonry structure is analyzed, respectively, which is expected to be served as the basis of governing structural design.

Key words: brick masonry buildings; story-adding; seismic; masonry-in-frame system; structural analysis