

[文章编号] 1002-8528(2001)03-0001-03

# 抗震加固原理与方法

韦承基, 程绍革

(中国建筑科学研究院 工程抗震研究所, 北京 100013)

[摘 要] 从运动微分方程入手, 阐述了抗震加固的原理和新方法, 以及砌体结构和框架结构抗震加固中常用加固方法的技术细节, 供设计人员参考。

[关键词] 抗震加固; 结构构件加固

[中图分类号] TU352.1; TU370.2 [文献标识码] A

## The Principle and Methods of Seismic Strengthening

WEI Cheng-ji, CHENG Shao-ge

(Institute of Earthquake Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

[Abstract] This paper elaborates on the principle and new methods of seismic strengthening based on dynamic differential equation. Some technical details, which are common adopted in structural strengthening, are also put forward.

[Key words] seismic strengthening; strengthening of structural element

### 1 前 言

抗震加固与一般有缺陷房屋的加固不同, 后者是根据缺陷性质, 往往是针对性地加固, 可谓“头痛医头, 脚痛医脚”, 某构件强度不足, 则加强某构件的强度, 刚度不足的, 则设法增加刚度, 或用预应力, 使其挠度减小。抗震加固则除了构件由于强度不足或延性不足作针对性对构件进行加固外, 尚可对房屋进行整体性加固, 例如框架结构可增设剪力墙, 使地震作用下的柱子内力与变形减小, 从而达到抗震加固的目的。

抗震加固使用的方法很多, 可根据实际情况, 采用不同的手段达到同一个目的, 因此可以说抗震加固是一种“艺术”, 设计者可根据甲方的要求, 采用灵活的手段, 以使抗震加固做得更合理。

本文除介绍常规的构件强度(包括延性)加固外(本文称此为构件加固), 根据地震作用下结构的运动微分方程, 指出各种整体性加固在微分方程中所

处位置及作用, 从而从原理上阐述各种整体性加固方法的物理意义, 以便设计者更透彻地了解抗震加固的真谛, 使设计做得更完美。

### 2 抗震整体加固原理及方法

地震作用下, 结构的运动微分方程(为叙述方便, 下面以单自由度体系来表示)为:

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_0) + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

式中  $m$ ——结构质量;

$c$ ——结构阻尼系数;

$k$ ——结构刚度系数;

$x, \dot{x}, \ddot{x}$ ——分别为结构对地面的相对位移、速度及加速度;

$\ddot{x}_0$ ——地面加速度时程。

#### 2.1 房屋隔震技术

在式(1)中, 其第 1 项为惯性力, 亦即抗震规范中的地震作用, 如果地震作用能减小, 结构反应必然减小。假设某一结构在 8 度地震时, 只有抵抗 7 度地震作用的能力, 如果采用某种方法, 能使地震作用减小到 7 度, 甚至更低地震作用的水平, 结构便能达

[收稿日期] 2001-03-01

[作者简介] 韦承基, (1939—), 男(汉), 研究员, 硕士

到与采用其它抗震加固方法相同的加固效果。

在我国规范中,地震作用与地震影响系数  $\alpha$  成正比。地震影响系数  $\alpha$  在我国新编抗震规范中按图 1 确定。

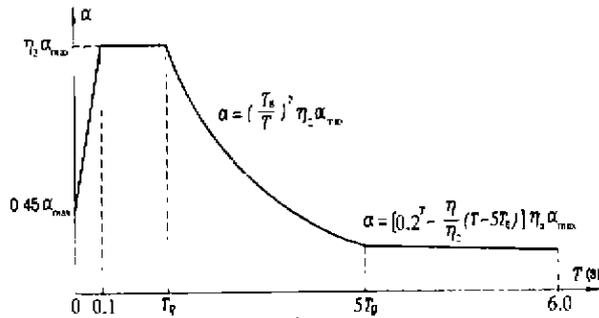


图 1 地震影响系数曲线

图中  $\eta_1 = 0.02 + (0.05 - \zeta)/8$  (2)

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.06 + 1.4\zeta} \quad (3)$$

$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \zeta}{0.5 + \zeta} \quad (4)$$

$\zeta$ —阻尼比。

从地震影响系数曲线可看出,当结构周期增大时,地震作用减小。最有效使结构周期增大的方法是隔震技术,使房屋上部结构与基础完全分开,在分开处放置隔震材料。最常用的隔震材料为叠合橡胶隔震垫,其作用是使地面水平地震加速度在隔震层处中断,或使向上传递的地震加速度大大减小。在设计计算中,其表现形式是上部结构周期加长,因而地震作用减小,结构反应亦减小,从而达到抗震加固的目的。该方法的原理很简单,然而用于加固时的技术难度却很大。首先必须将上部结构与基础完全切开,并要放入有一定阻尼的叠合橡胶垫。其必要条件是上部结构整体性好,因此并非所有结构都能用此方法进行加固。目前国外已有采用此方法加固的建筑,如美国盐湖城市政大楼(100年前建成的12层砖石结构)。

## 2.2 消能减震技术

式(1)中的第2项为阻尼力。如果结构反应在相对变形较大的部位,适当布置阻尼器,使结构阻尼加大,则地震作用必将会大幅度减小,从而使结构反应较小,达到抗震加固目的。例如原结构阻尼比为

0.05,当增加至0.2(阻尼比增加0.15)时,如果该结构周期是2s,场地特征周期为0.4s,则

$$\text{原结构 } \alpha = \left(\frac{0.4}{2}\right)^{0.9} \alpha_{\max} = 0.235 \alpha_{\max}$$

如果阻尼器增加阻尼比为0.15,使结构阻尼比增加至  $\zeta = 0.2$  时,

$$\gamma = \frac{0.9 + 0.05 - 0.2}{0.5 + 5 \times 0.2} = 0.9 - \frac{0.15}{1.5} = 0.8$$

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - 0.2}{0.06 + 1.4 \times 0.2} = 1 - \frac{0.15}{0.34} = 0.559$$

$$\alpha = \left(\frac{0.4}{2.0}\right)^{0.8} 0.559 \alpha_{\max} = 0.154 \alpha_{\max}$$

$$\text{地震反应减小值为: } \frac{0.235 - 0.154}{0.235} = 0.345$$

可见,增设阻尼器后,结构反应减小,使结构满足抗震要求,亦可达到抗震加固的目的。

如果降低后的结构处于弹性工作状态,结构将不会破坏;如果结构不在弹性阶段工作,可用时程分析法求得结构反应。实践证明,其反应值也大大减小。

中国建筑科学研究院工程抗震研究所采用粘滞阻尼器加固了北京火车站中央大厅、北京饭店、北京展览馆、中国革命历史博物馆等大型公共建筑,有些工程加固后在大震作用下,层间位移值达1/390,处于接近弹性阶段工作,收到非常好的加固效果。

## 2.3 增设剪力墙加固技术

式(1)的第3项,是结构弹性反力,是反应结构刚度的量。结构刚度增大,有两个可能:一是刚度增大,结构周期缩短,根据反应谱方法,地震作用相应增大;二是刚度增大,结构变形减小,从而使内力减小。两者所起作用相反。因此,只要刚度取得合理,地震作用虽然增加,但结构变形仍然减小。实践证明,大多数结构增设剪力墙后,将使结构变形减小,这时,地震作用主要由剪力墙抵御,框架结构中的内力与变形大大减小,从而达到抗震加固的目的。

增设剪力墙加固技术,是常用抗震加固手段,中国建筑科学研究院工程抗震研究所采用此方法加固了全国政协礼堂、北京火车站、中国革命历史博物馆、农展馆等数十个大型公共建筑。

## 3 结构构件加固方法的改进

抗震加固需兼顾结构的安全、美观和实用,近年

来随着抗震加固新技术(消能、减震)、新材料(结构胶、碳纤维)以及新工艺(钻孔、挤碎)的出现,加固手段已发展成为多种方法并举的局面,给结构工程师以充分发挥的余地。不仅如此,常规加固手段的具体细部构造也较以往更为灵活和实用。下面仅就抗震加固中常用的几种构件加固新技术,作一简要介绍。

### 3.1 砖砌体的混凝土板墙加固

砌体结构的抗震加固主要是加强结构的整体性,提高墙体的抗震承载能力和变形能力。唐山地震以后,人们发现采用钢筋混凝土外加柱连同圈梁和钢拉杆一起加固砌体房屋是一种简便易行的方法,并很快在全国推广。但近年来人们也意识到这一加固方法对建筑外观和城市风貌带来的负面影响,因此逐渐采用混凝土板墙加固法取代传统的加固方法。

混凝土板墙加固类似于钢筋网水泥面层加固,具有较大的灵活性。首先,可根据结构综合抗震能力指数提高程度的不等增设不同数量的混凝土板墙。板墙可设置为单面或双面,甚至可在楼梯间部位设置封闭的板墙,形成混凝土筒。其次,采用混凝土板墙加固时,可根据业主的意图采用“内加固”或“外加固”方案。当希望保持原有建筑风貌时,可采用“内加固”方案;当需结合抗震加固进行外立面装修时,则可采用以“外加固”为主的方案。

采用混凝土板墙加固可更好地提高砖墙的承载能力,控制墙体裂缝的开展。此外,在板墙四周采用集中配筋形式取代外加柱、圈梁和钢拉杆,以提高墙体的延性性能和变形能力。这种处理方法对建筑外观和内部使用的影响很小。图 2 给出了采用板墙加固时常用的几种节点构造。

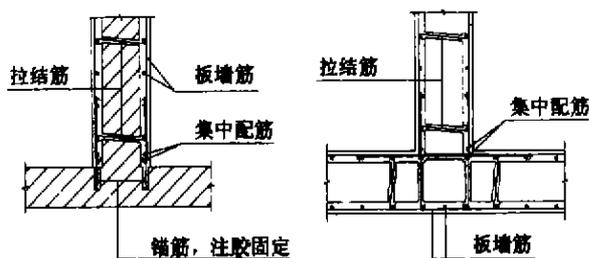


图 2 板墙加固节点构造

### 3.2 框架结构的剪力墙加固

框架结构的加固方法很多,但其中增设钢筋混凝土剪力墙仍是一种主流方法。利用新增的剪力墙承担主要的地震力,减小结构的变形,降低框架柱的配筋构造要求,从而使加固工作量大大减少。采用增设剪力墙加固时,需处理好新增墙体与原有结构构件的连接,如墙柱连接、墙梁连接。既要保证连接的可靠性,又要避免对原结构构件造成过多的损伤。

新设剪力墙需有暗柱和暗梁,设计时有两种处理方法。第 1 种方法是利用原结构梁柱做其暗梁暗柱,这种方法不会对原有构件造成损伤,但外包部分的混凝土会影响室内观感和使用。近年来随着钻孔、植筋技术在结构加固领域中的应用,这一矛盾逐步得到解决。第 2 种方法是新增墙体采用相对独立的暗梁暗柱体系,其配筋构造见图 3。

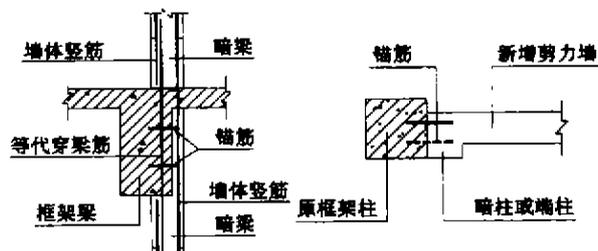


图 3 新增剪力墙连接构造

这种方法的特点是在新增剪力墙的两端设新暗柱(或称端柱),暗柱配筋按计算和现行规范构造要求配置,暗柱与原框架柱间用锚筋相连,即似连非连的构造措施。抗震墙竖向分布筋穿原框架梁时,其中一排筋从梁边穿楼板直接伸入上一层楼,另一排竖向筋则在原框架梁位置按等强度原则等代,以减少穿筋数量,从而减少对原框架梁的损伤。此外在原框架梁上下各做一道暗梁,与原框架梁连接为一体,既加强了新增抗震墙的稳定性和上下连续性。

### 3.3 框架梁柱的加固

有时,由于受建筑使用功能的限制,无法采用剪力墙加固,消能减震技术也无法使用,在这种情况下,分别对原结构梁柱进行加固会是最好的加固方

(下转第 7 页)

遭遇强震作用时,消能装置率先进入弹塑性状态耗散掉大量的地震能量,从而使主体结构免遭破坏。

“八五”期间,我国的一些科研院校在引进国外先进技术的基础上进行了大量卓有成效的研究,研制出加劲阻尼(ADAS)装置、摩擦阻尼器、粘弹性阻尼器和粘性流体阻尼器等,这些耗能装置正被愈来愈多地应用于抗震加固工程中。如沈阳市政府大楼采用了摩擦阻尼进行了加固,粘性阻尼器则已用在北京饭店、北京火车站、中国革命历史博物馆和北京展览馆等工程的抗震加固上。

消能装置通常安装在钢支撑上形成消能支撑系统,结合建筑使用功能要求可设置多种类型的消能支撑,如在北京饭店采用的有交叉支撑、对角支撑和人字支撑等,在北京火车站中采用的是 K 型水平支撑,在中国革命历史博物馆中采用的门架型水平支撑。

(7)隔震加固法 该法是隔震技术在抗震加固领域中的应用,通过隔震层的设置将地震变形集中到隔震层上,从而起到减小原结构地震反应的目的。目前已研究出的隔震方法有:① 橡胶垫隔震;② 滑移隔震;③ 滚珠或滚轴隔震;④ 摆动隔震;⑤ 悬吊

隔震;⑥ 弹簧隔震等。目前较多的做法是将隔震层放在原结构基础上,即基础隔震。

隔震加固法用于现有建筑抗震加固在美国、日本等国已有成功的工程实例,如美国对盐湖城大厦、洛杉矶政府大楼等几十栋建筑就是采用此法进行了加固;日本对一些办公楼、机场等大型公共建筑也是采用此方法进行了加固,效果十分明显。在我国该项技术目前仅用于新建多层砌体结构中,还未用于现有结构的抗震加固。

抗震加固的内涵是结构加固而非构件加固,因此在确定结构抗震加固方案时首先应考虑整体性加固方案,以避免“头痛医头、脚痛医脚”的构件加固。

### [参考文献]

- [1]中华人民共和国国家标准,GB 50023-95,建筑抗震鉴定标准[S].
- [2]中华人民共和国行业标准,JGJ 116-98,建筑抗震加固技术规程[S].
- [3]戴国莹,李德虎.建筑结构抗震鉴定及加固的若干问题[B] 第五届全国地震工程会议论文集(I) [C].1998.10
- [4]李德虎.建筑抗震鉴定与加固在我国的发展[B].第二届全国建筑物鉴定与加固学术会议论文集[C].1993

(上接第 3 页)

案。通过加固可提高原构件的承载力,改善构件的延性性能,此外还可使“强梁弱柱”体系改变为“强柱弱梁”体系,从而达到抗震加固的目的。

目前梁柱加固的常用方法有加大截面法、外包钢法以及碳纤维加固法。这些方法并非抗震加固所特有的方法,普通的工程质量事故处理也常使用,其技术细节在许多文献中都能查到,本文不再赘述。需强调的是,五六十年代建造的框架结构,在梁柱节点区横向钢筋稀少甚至为素混凝土,历次地震震害表明节点区的破坏是普遍现象,且震后修复的难度大。因此,对于抗震加固而言,梁柱节点的加固远比梁柱构件本身的加固更重要。但在以往的加固工程中,由于受当时技术水平的限制,对于如何使梁高范围内的柱横向钢筋封闭问题,未能很好解决,从而影响了节点的加固补强效果。现今钻孔、植筋技术的出现,轻而易举地解决了这一难题。图 4 是采用加大截面法加固梁柱节点的构造图例。

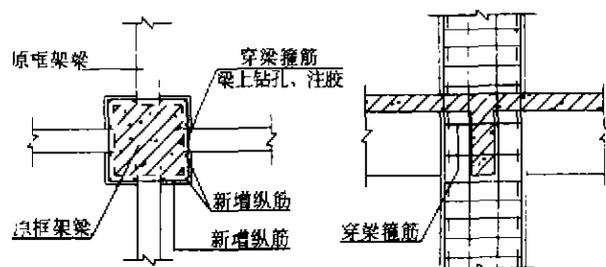


图 4 加大截面梁柱节点构造

加固方法随具体结构的实际情况会有变化,即使已完成了施工图设计,随着施工的进展,现场情况与旧图纸也可能有出入。但我们掌握了抗震加固原理后,在总的加固原则不变的前提下,可灵活处理。

### [参考文献]

- [1]国家标准 GBJ11-89,建筑抗震设计规范[S].
- [2]国家标准,建筑抗震设计规范(送审稿)[S].
- [3]行业标准 JGJ116-98,建筑抗震加固设计规程[S].