

砖砌体建筑体外预应力抗震加固技术研究

刘 航

(北京市建筑工程研究院有限责任公司 北京 100039)

摘 要:针对城镇既有砖砌体建筑抗震性能较差的问题,提出了一种适合多层砖砌体房屋的抗震加固新技术,即采用竖向无粘结预应力筋对砌体墙体进行加固,从而改善墙体的抗震性能,提高房屋的整体抗震能力。为了解该技术的加固效果,完成了两批共17片墙体构件的拟静力试验研究和一栋2层足尺房屋模型的拟动力试验研究。墙体构件的试验研究结果表明,该项加固技术可以大幅度提高砖砌体墙体的抗裂能力、受剪承载力和延性。房屋模型的拟动力试验研究则进一步表明,采用该项技术加固后,抗震设防烈度不足8度的房屋,在模拟9度罕遇地震的拟动力作用下基本保持弹性,抗震能力显著提高。在试验研究的基础上,提出了预应力加固砌体墙体的受剪承载力的计算方法。该技术在北京市怀柔区某多层办公建筑的实际应用情况表明,其具有施工工艺简单、工期短、成本低等优势。

关键词:多层建筑 砖砌体结构 预应力 抗震加固 受剪承载力

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.04.001

引言

据不完全统计,我国城镇既有建筑总量超过500亿 m^2 ,而其中以砖砌体墙体为主要承重和抗震墙体的砖砌体建筑所占比例很大,且许多未达到抗震设防标准。一般而言,砖砌体结构整体性相对较差,砌体材料抗压强度较高而抗拉、抗剪强度较低,且具有自重大、呈脆性等特点,导致其抗震性能较差,在强烈地震作用下一旦发生倒塌,将造成大量的人员伤亡。汶川地震、玉树地震和雅安地震中,大量砖混、砖木结构房屋倒塌,人员伤亡惨重。因此,对现存的大量不满足抗震设防要求的砌体房屋进行加固改造,提高其抗震安全性,是当前工程建设领域亟待解决的问题。

考虑到当前需加固的砌体建筑数量过于庞大,且大量分布在经济相对落后的村镇地区,工程造价将成为最为突出的问题之一,同时,绿色低碳、节材环保等也是当前既有建筑改造工作的重要发展方向,因此,迫切需要研发成本相对较低,同时又绿色环保、施工相对简便、质量易于控制、加固效果好的新型抗震加固技术。

近十几年来,国际上一些研究者提出了采用预应力技术对砌体墙进行抗震加固的方法,并开展了相关研究^[1-4]。文献[5]提出了按构造柱位置

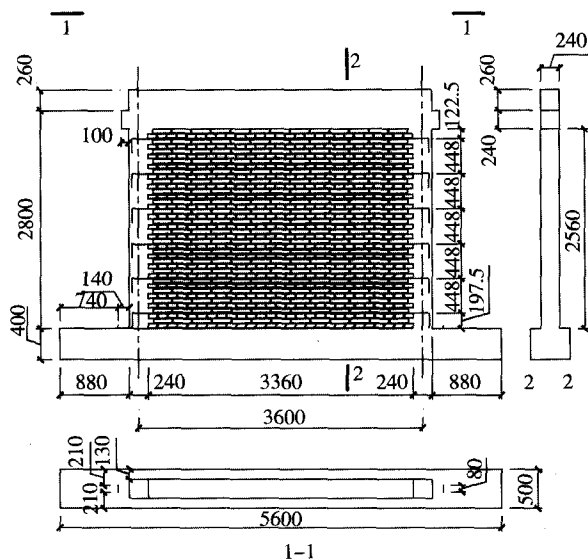
设置预应力筋加固的方案,并进行了振动台试验研究。本文在上述研究工作的基础上,提出一种采用竖向无粘结预应力筋对砌体墙体进行加固的新技术,可适用于多层砖砌体房屋的抗震加固。并介绍该技术的相关抗震试验研究成果和计算方法,结合该技术在北京市怀柔区某办公建筑的实际应用情况,分析其特点与优势。

1 预应力加固砖砌体墙体抗震试验研究成果介绍

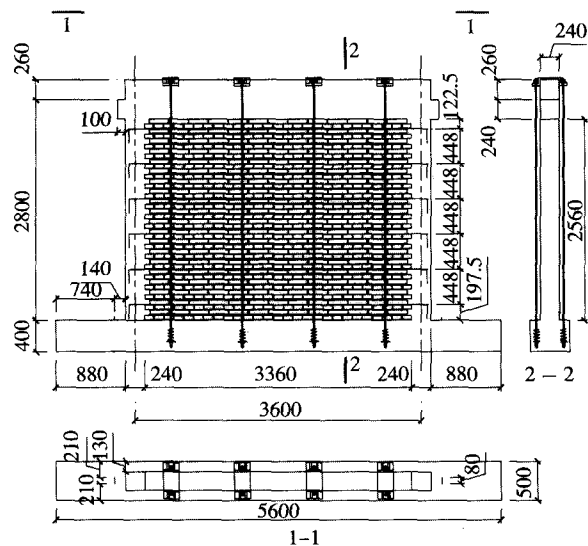
1.1 带构造柱墙体拟静力试验研究

文献[6], [7]对带构造柱砖砌体墙体开展了采用预应力技术进行加固的抗震试验研究。试验墙体一共8片,外形尺寸均相同,其中一片为未加固的对比墙体(编号为W1),另外7片为采用无粘结预应力筋加固的墙体(编号为W2~W8),该试验主要研究不同预应力筋间距和不同墙体轴压比对加固效果的影响。具体包括3种预应力筋间距(720mm, 900mm, 1200mm)、5种轴压比(0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5)。试验墙体宽3.84m、高2.8m、厚0.24m(图1)。砌筑用砖为黏土砖,尺寸为240mm×115mm×53mm,砖强度等级为MU10,混合砂浆砌筑,砂浆强度等级为M7.5。预应力筋采用体外布置方式,即沿被加固墙体两侧对称均匀布置(图1(b)),预

应力筋为直径15.2mm的高强低松弛钢绞线， $f_{pk}=1860\text{MPa}$ 。



(a) 未加固墙体



(b) 加固墙体

图1 带构造柱墙体外形尺寸图

1.1.1 试件破坏形态对比

试验结果表明，加固墙体的破坏形态与未加固墙体明显不同。未加固墙体两端虽然有构造柱约束，但仍呈明显的脆性破坏，由开始出现裂缝到整个墙体沿斜裂缝剪断而破坏，整个过程迅速而突然，一旦墙体被剪断，水平荷载快速下降。而相比之下，采用预应力筋加固后，墙体破坏形态有了明显的改善，表现在如下几个方面：1) 墙体抗裂能力得到明显提高，开裂荷载提高幅度为30%~60%；2) 破坏时，墙体上裂缝分布多而

均匀，裂缝宽度较小，摩擦耗能机制得到较好的发展；3) 水平荷载达到峰值点后下降较为缓慢，墙体的延性和变形能力得到显著增强。

1.1.2 荷载-位移滞回曲线和骨架曲线对比

图2为未加固墙体W1与加固墙体W6（预应力间距900mm，轴压比0.2）的荷载-位移（ $P-\Delta$ ）滞回曲线对比。

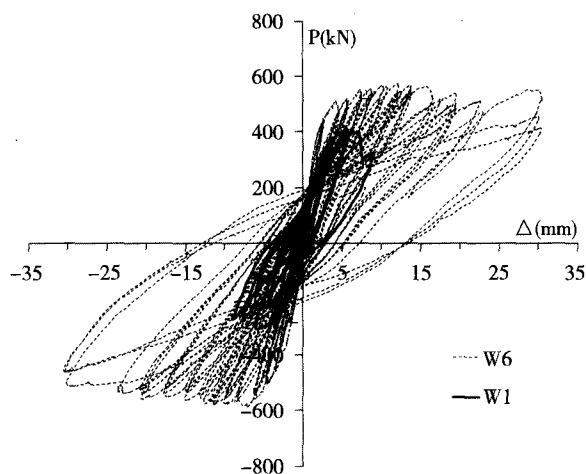


图2 荷载-位移（ $P-\Delta$ ）滞回曲线对比

由图2可以看出，加固墙体与未加固墙体对比，其滞回环呈饱满的梭形，耗能能力得到大幅度提高。

图3为试验墙体的荷载-位移（ $P-\Delta$ ）骨架曲线对比，为说明墙体在不同预应力作用下试验墙体受力性能的变化规律，图中绘出了不同轴压比墙体的荷载-位移骨架曲线。由图3可以看出，墙体受剪承载力随其轴压比的提高而提高。且5片加固墙体的承载力和变形能力均较未加固墙体有不同程度的提高。

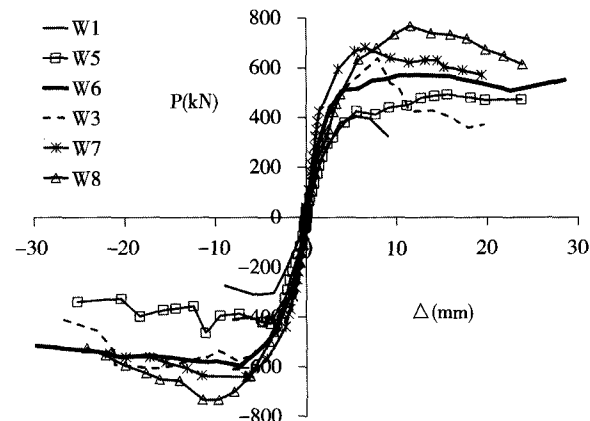


图3 荷载-位移（ $P-\Delta$ ）骨架曲线对比

总体上,对于带构造柱的砖混墙体,采用竖向无粘结预应力筋的加固方法可以更进一步地改善墙体的破坏形态和耗能机制,同时也能显著提高墙体的受剪承载力和延性,大幅度提高墙体的抗震性能。

1.2 无筋墙体拟静力试验研究

在带构造柱墙体试验研究的基础上,文献[8]进一步开展了无筋砌体墙体的拟静力试验研究。试验墙体的外形尺寸如图4所示,每片墙体的宽度为3.84m、高度为2.8m、厚度为0.24m。

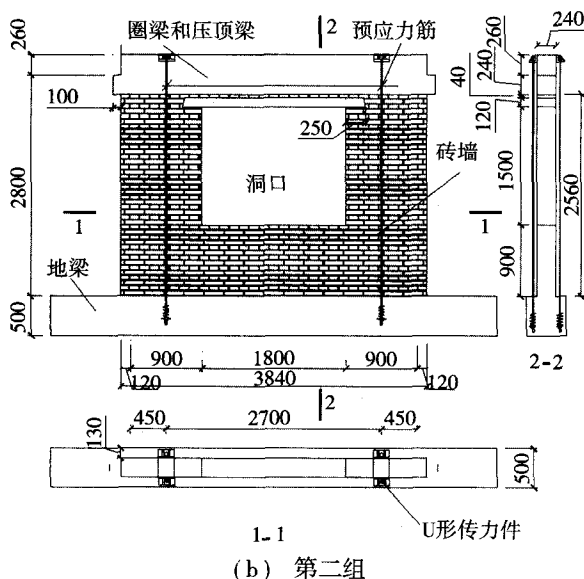
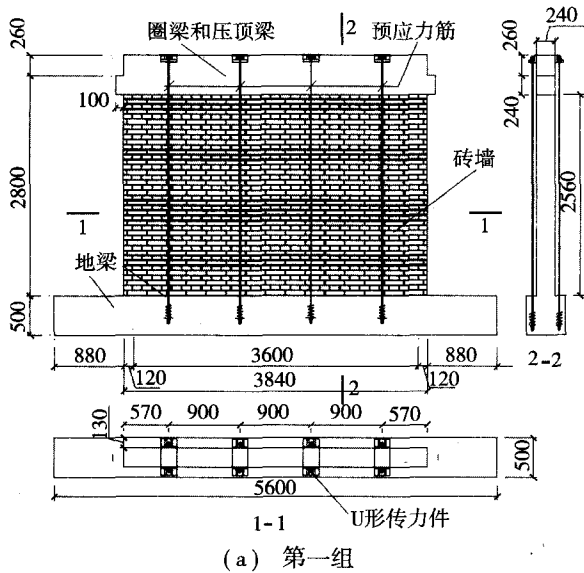


图4 无筋墙体外形尺寸图

试验墙体共9片,分为两组,其中第一组试件W1~W5用于模拟整截面无洞口墙体,第二组

试件W6~W9用于模拟开洞墙体。试验主要变化参数为墙体在预应力作用下的轴压比。

墙体所用砖块尺寸为240mm×115mm×53mm,砖强度等级为MU10,砂浆强度等级为M5。加固用的无粘结预应力筋也采用体外布置方式,即沿被加固墙体两侧对称均匀布置,对于整截面墙体,沿墙轴线均匀布置了4对预应力筋(图4(a));对于开洞墙体,沿洞口两侧各布置1对预应力筋(图4(b)),预应力筋为直径15.2mm的高强低松弛钢绞线, $f_{pk}=1860\text{MPa}$ 。

1.2.1 试验破坏形态对比

试验结果表明,对于整截面墙体,采用预应力加固可以延缓墙体的破坏,使墙体达到更高的承载能力和变形能力,并在墙体发生错动后维持其水平承载能力不下降。当水平荷载卸除后,预应力筋可以使墙体的裂缝闭合、水平变形在较大程度上得到恢复。对于开洞墙体,采用预应力加固也可以使墙体达到更高的承载能力和变形能力,并在墙体破坏相对于未加固墙体更为严重的情况(水平墙肢剪断、裂缝宽度很大)下,维持其水平承载能力不下降。而当水平荷载卸除后,由于预应力筋的约束作用,墙体的各部分仍可连接为整体。

1.2.2 荷载-位移滞回曲线和骨架曲线对比

图5为未加固墙体W1与加固墙体W3(预应力间距900mm,轴压比0.3)的荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线对比。由图5可以看出,对于无筋砌体墙,采用竖向无粘结预应力筋加固后,滞回曲线虽然仍呈现捏拢性较强的“S”形,但较未加固墙体有明显改善,同时由于其极限承载力和变形得到大幅度提高,墙体的耗能能力也有明显的增强。

图6为第一组整截面墙体的荷载-位移骨架曲线对比。可以看出,采用预应力筋加固后,墙体的受剪承载力和变形能力均有显著的提高。

总体上,对于无筋砌体墙,采用竖向无粘结预应力筋加固后可以显著提高墙体的抗裂能力,这对砖砌体结构在小震和中震下的抗震性能有很大的改善,若设计得当的话,可以实现“中震不

坏”的抗震性能目标；加固墙体虽然仍然发生剪切脆性破坏，但却可以延缓墙体的破坏，在墙体发生错动后维持其水平承载能力不下降。而当水平荷载卸除后，无粘结预应力筋可以使墙体的裂缝闭合、水平变形在较大程度上得到恢复，对实现砌体建筑的“大震不倒”可以发挥重要的作用。

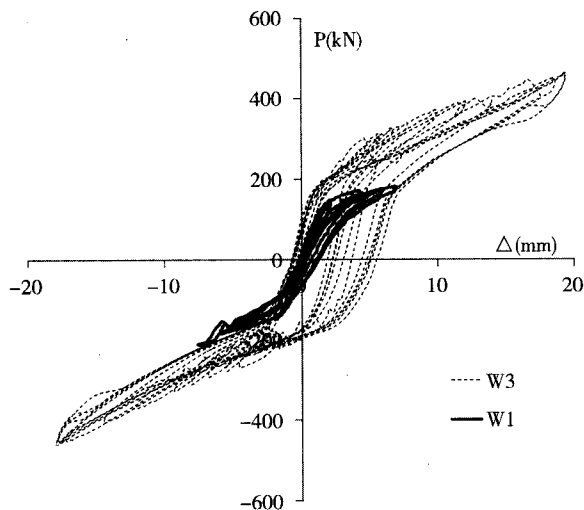


图5 荷载-位移 (P-Δ) 滞回曲线对比

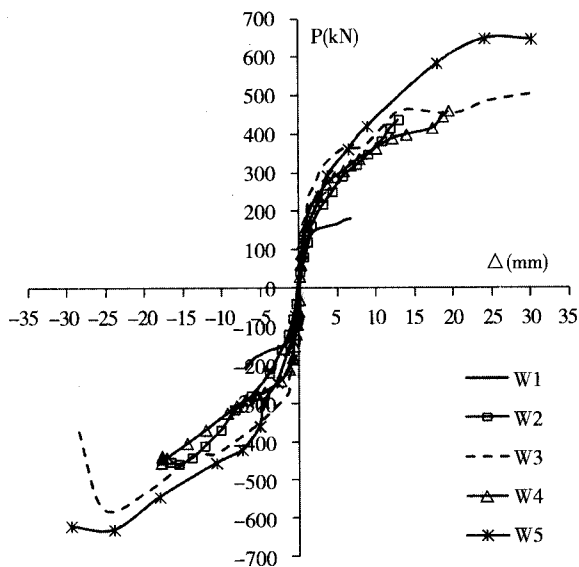
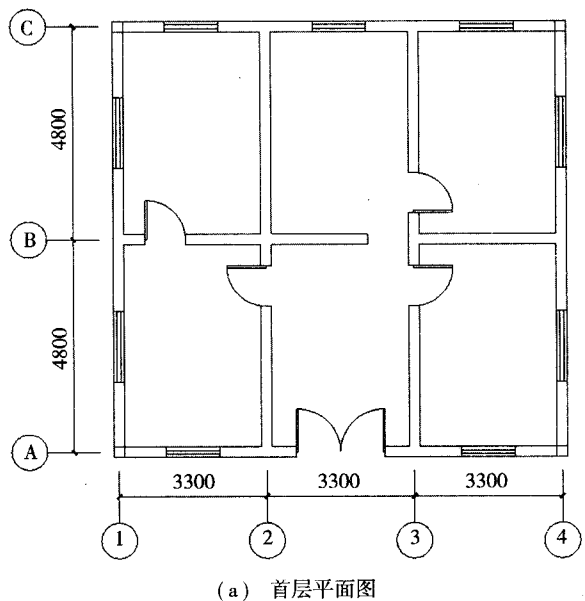


图6 荷载-位移 (P-Δ) 骨架曲线对比

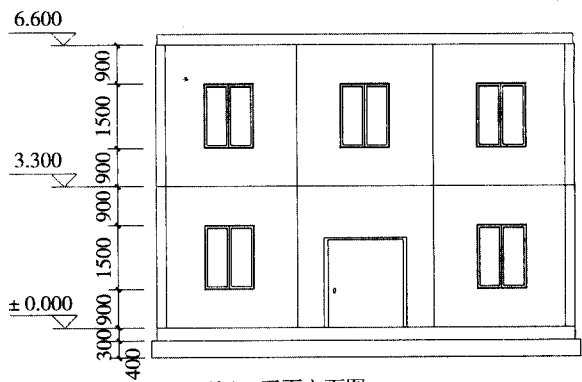
1.3 两层足尺砖砌体房屋模型拟动力试验研究

为验证整体房屋的抗震加固效果，在上述墙体构件试验的基础上，设计并建造了一栋2层足尺砖砌体房屋模型，并进行了拟动力和拟静力全过程加载试验研究。本文限于篇幅，只简要介绍拟动力试验研究结果。

图7 (a)，(b) 分别为试验房屋模型的首层平面图、正面立面图。房屋平面纵向轴线长为9.9m，横向轴线长9.6m，层高3.3m，共2层，总建筑面积为199.56m²。



(a) 首层平面图



(b) 正面立面图

图7 足尺试验模型平面及立面图

房屋模型墙体采用240mm×115mm×53mm的标准黏土砖，砖强度等级为MU10，砌筑砂浆强度等级为M2.5。该房屋模型按不足8度的抗震设防等级设计，采用PKPM软件对该结构进行计算分析，地震作用取为8度(0.2g)，计算结果表明，房屋首层墙体不满足抗震鉴定要求，需要进行加固处理。

房屋模型纵、横向全部承重砖墙均设置无粘结预应力筋进行加固，房屋模型加固后的现场照片见图8。

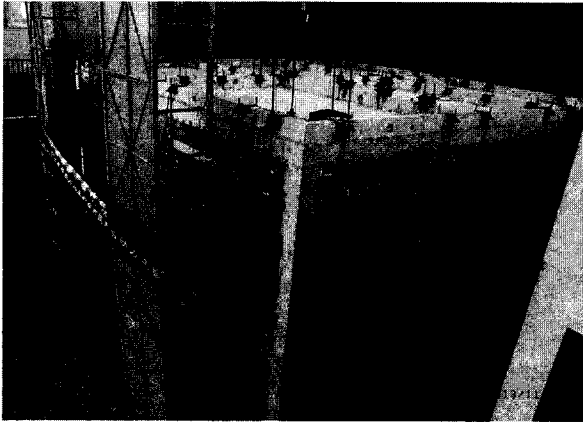


图8 试验模型加固后照片

1.3.1 拟动力试验加载制度

图9为拟动力试验加载装置示意图,分别进行强轴(X向)和弱轴(Y向)两个方向的拟动力试验。

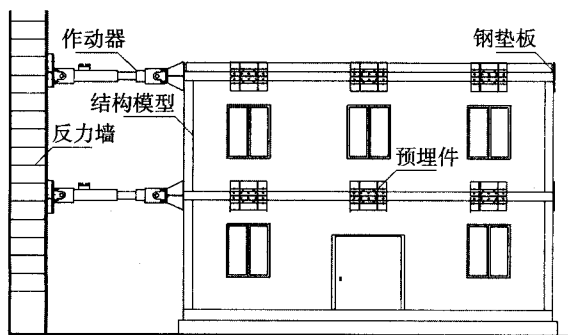


图9 拟动力试验加载装置示意图

试验输入地震波采用汶川地震中卧龙岗地震采集站获得的地震波。从地震波中截取主震峰值出现较多的一段作为本次试验的模拟地震输入波,时长10s,时间间隔0.005s。选取地震波加速度时程曲线如图10所示。沿强轴和弱轴两个方向分别进行了8度小震、中震、大震及9度大震的拟动力加载试验。

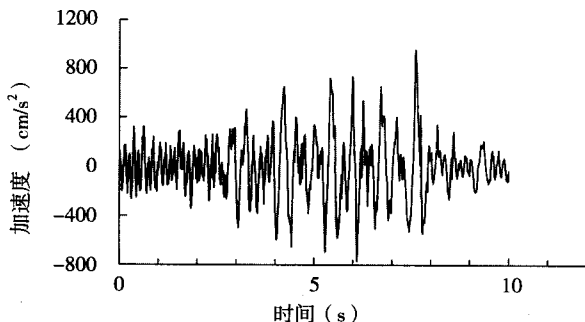
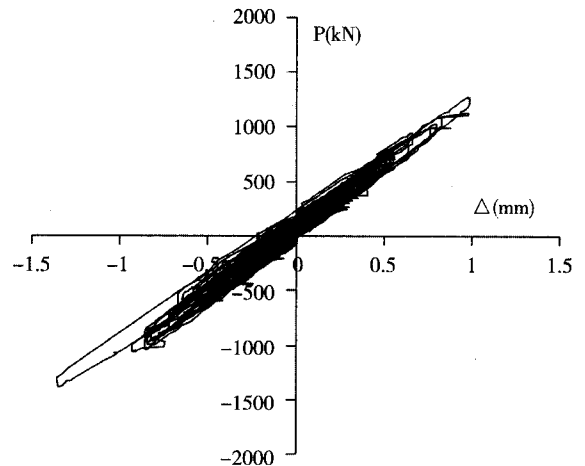


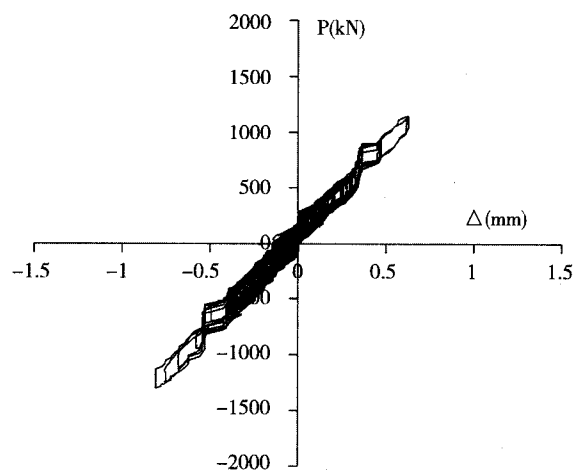
图10 试验选取地震波加速度时程曲线

1.3.2 拟动力试验结果

在9度大震(地震波加速度幅值为620gal)下,结构在强轴和弱轴两个方向的基底剪力-顶点位移滞回曲线如图11所示。由图可以看出,试验房屋模型在相当于9度大震(地震波加速度幅值为620gal)的拟动力作用下,弱轴方向的最大顶点位移为1.36mm(总位移角1/4853),对应的基底剪力达到了1389kN,而强轴方向的最大顶点位移为0.81mm(总位移角1/8148),对应的基底剪力达到了1302kN。房屋模型基本处于弹性阶段。现场实际观测结果表明,砌体墙体未出现裂缝,只是在房屋四角构造柱底部有细微的裂缝。



(a) 弱轴方向



(b) 强轴方向

图11 9度大震下基底剪力-位移滞回曲线

图12为各工况地震作用下试验房屋模型强轴和弱轴两个方向的层间最大位移比分布。可以看出,当地震波加速度幅值不超过400gal时,试验

房屋1、2层的层间位移基本呈线性均匀分布,表明结构处于弹性状态。当地震波加速度幅值达到620gal时,弱轴方向的底层层间位移略有增加;而强轴方向的1、2层的层间位移仍保持线性均匀分布。这表明,弱轴方向的结构出现轻微损伤,而强轴方向的结构几乎为零损伤,这与现场观察到的房屋模型只在四角构造柱上出现轻微裂缝的现象相一致。

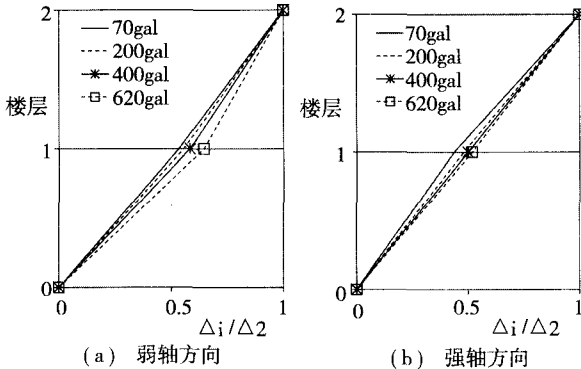


图12 楼层层间位移比分布图

从上述拟动力试验结果初步可以看出,加固前不满足8度抗震设防的结构采用竖向无粘结预应力筋加固后,在9度罕遇地震的作用下基本保持弹性,抗震能力得到大幅度提高。对该房屋进一步进行的拟静力试验结果也验证了这一结论。

2 预应力加固砖砌体墙体受剪承载力计算方法

试验研究和有限元仿真分析^[9]表明,砌体墙体采用无粘结预应力筋加固后,墙体受剪承载力的提高来源于两方面:一方面是由于加固后墙体正应力得到提高,另一方面是由于预应力筋作为砌体配筋所起的作用。其中由于墙体正应力的提高对受剪承载力的贡献可以参考现行《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)有关砌体抗震抗剪强度的规定。对于预应力加固的砖砌体墙体,在确定其抗震抗剪强度时,应考虑竖向荷载与预应力的共同作用在砌体中产生的截面平均压应力对抗震抗剪强度的提高作用。预应力加固砌体沿阶梯形截面破坏的抗震抗剪强度设计值 f_{vE} 按下式计算:

$$f_{vE} = \zeta_{NP} f_v \quad (1)$$

式中: f_v 为非抗震设计的砌体抗震抗剪强度设计

值; ζ_{NP} 为砖砌体抗震抗剪强度由于竖向荷载和预应力筋的共同作用而产生的正应力影响系数,应按现行《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)表10.2.1采用。

在确定截面受剪承载力时,可在《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)相关计算公式的基础上,增加预应力筋对受剪承载力的提高作用项。对于无筋墙体,其受剪承载力可按式计算:

$$V_R = (f_{vE} A + \beta_p \sigma_{pe} A_p) / \gamma_{Rs} \quad (2)$$

式中: V_R 为墙体加固后的受剪承载力设计值; A 为墙体横截面面积; A_p 为预应力筋横截面面积; σ_{pe} 为预应力筋的有效预应力; β_p 为预应力筋参与工作系数; γ_{Rs} 为抗震加固的受剪承载力调整系数,按《建筑抗震加固技术规程》(JGJ 116—2009)采用。

式(2)中,关键是要确定预应力筋参与工作系数 β_p 的取值。试验研究和仿真分析^[9]表明,预应力筋参与工作系数对于整截面墙可以达到0.3~0.35,对于开洞墙可以达到0.2~0.25,考虑到工程现场实施与试验研究存在差异性,应用式(2)计算加固墙体的受剪承载力时,应当降低预应力筋参与工作系数 β_p 的取值。

同理,对于采用预应力筋加固带构造柱墙体的受剪承载力计算,也可在《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)相关计算公式的基础上通过增加预应力筋对受剪承载力的提高作用项而实现,此处不再赘述。

当砌体房屋经抗震鉴定,墙体受剪承载力不满足要求时,可以考虑采用竖向无粘结预应力筋进行加固。而在具体应用时,如果房屋自身缺少圈梁、构造柱等基本构造措施,应考虑将该项技术与补充构造措施的加固方法配套采用。

3 工程应用

3.1 工程概况

某办公楼建于1985年前后,位于北京市怀柔区青春路,抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.15g。主体结构地上5层、南北两侧裙房为地上2层。总建筑面积约为3208m²,外观照片如图13所示。

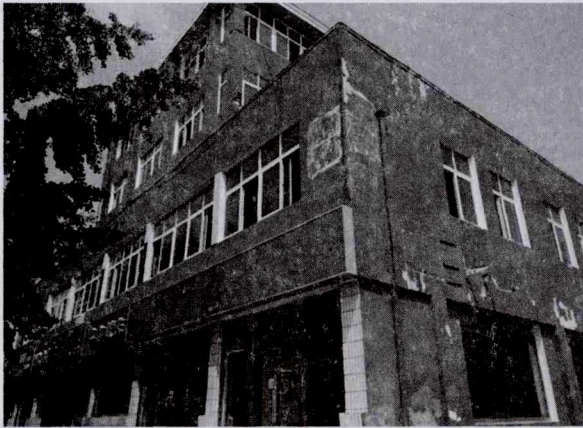


图13 房屋外观照片

加固前对该房屋进行了检测鉴定,混凝土抗压强度经回弹法(钻芯修正)检测,推定值为18.0MPa~26.3MPa;砌筑砂浆抗压强度平均值为3.6MPa~8.9MPa,抗压强度推定值为4.7MPa。墙体砖的抗压强度推定等级为MU10。经安全性鉴定和抗震鉴定,主要结果为:1)安全性评定为D_u级,极不符合《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB50292—1999)对A_u级的要求,严重影响结构整体承载能力;2)结构部分抗震措施不满足第一级鉴定要求,1~4层部分墙体不满足第二级抗震鉴定要求。

建议对该建筑的上部主体结构及时采取加固或其他有效处理措施。

3.2 预应力加固方案

根据抗震鉴定验算结果,1~4层均存在大量砖墙受剪承载力不足,但1层砌体墙体同时存在受压承载力不足的情况,而2层及以上墙体受压承载力有较大的安全储备。基于上述验算结果,对1层承载力不足的墙体,采用双面钢筋混凝土板墙的方法进行加固,每侧加固钢筋混凝土板墙厚度为60mm,混凝土强度等级为C20,采用喷射混凝土施工工艺。对于2~4层受剪承载力不足的墙体,采用无粘结预应力筋进行加固。图14为结构2层预应力筋平面布置示意图。考虑到各层加固墙体位置不尽相同,预应力筋采用分层法布置,预应力筋加固墙体的构造做法如图15所示。

3.3 预应力加固墙体施工

预应力加固砖砌体墙体的主要施工工序包括:1)清理原结构;2)在加固墙体上定位放

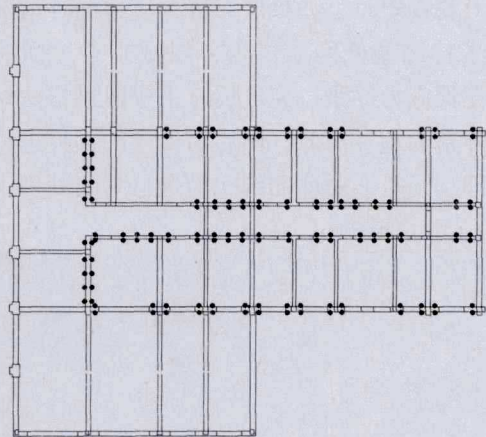


图14 结构2层预应力筋平面布置示意图

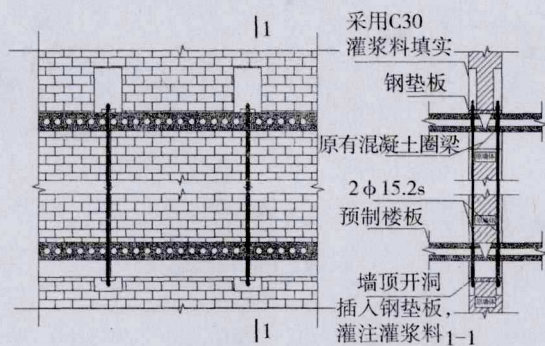


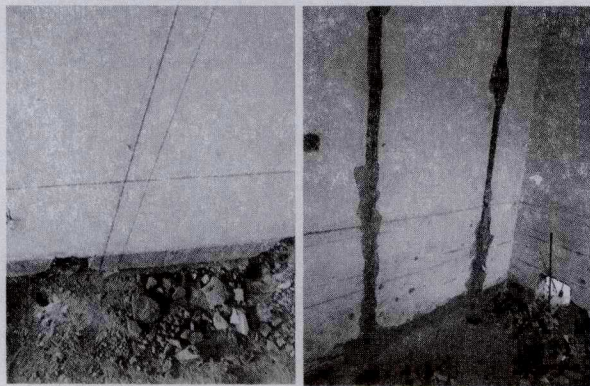
图15 预应力加固墙体的构造做法

线,标注张拉端和锚固端的位置、预应力筋的位置;3)在预应力筋安装部位墙体两侧剔凿出凹槽,在张拉端和锚固端墙体上开洞,并在其对应位置的楼板上开洞;4)安装并固定预应力筋及其锚固装置、支承垫板等零部件;5)张拉并锚固预应力筋;6)进行施工质量检验;7)对墙、地面进行表面封闭施工及其防护面层的施工。

对预应力筋张拉端和锚固端设置部位的墙体采用静力切割的方法开洞,对洞口部位楼板表面进行清理。墙体表面开槽前,先复核墙内水电管线位置,避免开槽损坏水电管线。采用云石切割机进行开槽施工,开槽定位准确,确保槽沟为直线,开槽的深度与宽度保证预应力筋可以完全被封闭于墙体内。将预应力筋穿入开好的槽内,在穿筋过程中注意防止无粘结预应力筋的高密度聚乙烯(HDPE)护套受到机械损伤,预应力筋就位后,安装张拉端的承压板、锚具等节点组件。

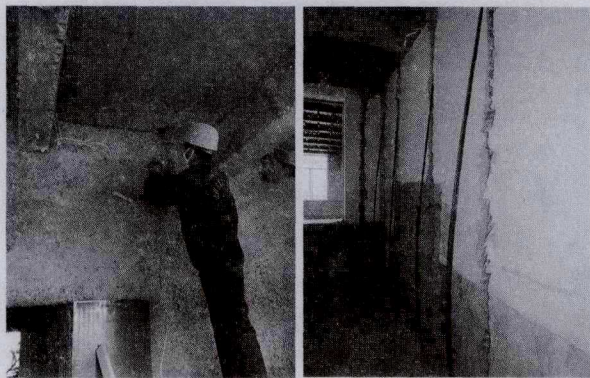
预应力筋的张拉按照顺序对称的原则进行,墙体两侧成对布置的预应力筋同时同步张拉。当

预应力筋较短时,如单层布置预应力筋等情况,采用了特制的低回缩锚具,以减小夹片回缩损失。在预应力筋张拉完成后,采用机械方法切割锚具外露的超长部分,然后对外露的锚具进行防护处理。同时,对墙面的凹槽进行封闭处理。施工过程照片如图16所示。



(a) 墙体定位放线

(b) 墙体开槽



(c) 楼板钻孔

(d) 预应力筋安装



(e) 预应力筋的张拉施工

(f) 墙面封闭施工

图16 施工现场照片

上述工程实践表明,砌体结构的预应力加固技术在具有良好实用性的同时,还具有以下特点:1)相比传统加固方式,该加固技术成本较低,具有良好的经济性;2)湿作业少,施工过

程中产生的噪声少,粉尘少,对外部环境影响也较少;3)加固后不影响建筑的使用面积,不破坏房屋的美观性;4)施工简单,工期较短;5)加固材料(预应力筋)质轻高强,几乎不增加墙体自重,不改变结构的刚度分配。

4 结论

本文提出了一种适合多层砌体房屋的采用竖向无粘结预应力筋的抗震加固新技术,介绍了相关试验研究成果和加固计算方法,对比分析了该抗震加固新技术的特点与优势,并介绍了该技术在北京市怀柔区某办公楼的实际应用情况。可以得到如下结论:

(1)对于带构造柱的砖混墙体,采用竖向无粘结预应力筋加固后,可以更进一步改善墙体的破坏形态和耗能机制,同时显著提高墙体的受剪承载力和延性,大幅度提高墙体的抗震性能。

(2)对于无筋砌体墙,采用竖向无粘结预应力筋加固后,可以显著提高墙体的抗裂能力,这对提高砖砌体结构在小震和中震下的抗震性能有很大作用,加固墙体虽然仍然发生剪切脆性破坏,但受剪承载力和延性得到显著提高,且在荷载卸除后,预应力筋可以使墙体的裂缝闭合、水平变形在较大程度上得到恢复。

(3)足尺房屋模型的拟动力试验表明,加固前不满足8度抗震设防的房屋,在采用无粘结预应力筋加固后,在9度罕遇地震的作用下基本保持弹性,其抗震能力得到大幅度提高。

(4)预应力加固砖砌体墙体的受剪承载力的计算,一方面应考虑竖向荷载与预应力的共同作用在砌体中产生的截面平均压应力对抗震抗剪强度的提高作用,另一方面可在《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)相关计算公式的基础上通过增加预应力筋对受剪承载力的提高作用项而实现。

(5)工程应用表明,砌体结构的预应力加固技术在具有良好实用性的同时,还具有成本较低、施工质量易于控制、施工过程绿色环保等特点。

综上,砌体结构的预应力加固技术具有明显的优势,适合在城镇砌体房屋加固改造工程中推广。

(下转第40页)

通往云中的路

—亚洲最大钢箱梁悬索桥云南龙江特大桥正式通车

2016年5月1日,经过近5年的日夜施工建设,亚洲最大钢箱梁悬索桥——云南龙江特大桥正式通车。

建在腾冲火山地貌和高烈度地震带上的龙江特大桥直通缅甸,穿行在云雾中,一头连着高黎贡山,一头连着极边腾冲,犹如一道彩虹飞架龙川江,成为高黎贡山中一道奇观。作为中国面向南亚陆上大通道,龙江特大桥的通车,为积极参与“一带一路”建设、开展国际产能合作等战略举措,改善云南和滇西地区交通运输格局,完善云南省骨架路网体系,促进滇西地区旅游事业和社会、经济的发展具有重要的意义。

龙江特大桥是云南保腾高速公路上的重要控制性工程,峡谷跨径世界第一,海拔高度亚洲第一。桥型为主跨1196m双塔单跨钢箱梁悬索桥,是我国山区地貌中第一座跨径超过千米的钢箱加劲梁悬索桥。桥面宽33.5m,总长2470m,桥面距谷底高度280m,保山岸索塔高169.7m,腾冲岸索塔高129.7m,工程技术含量高,景观功能强,是保腾高速创造“历史文化之旅、自然景观之旅、国际通道之旅”的标志性建筑。

由于地处高烈度强震山区,两岸地质条件复杂,边坡稳定处治难、大桥抗震设计标准高、抗震体系设计复杂。大桥采用重力式锚碇构造,使用的OVM悬索桥锚碇体系无粘结式环氧钢绞线锚碇产品,为国内首次在全风化玄武岩地区采用的

该种锚碇类型。

悬索桥锚碇体系是一种运用于大型悬索桥、连接主缆索与锚碇砼台墩之间、将来自主缆索的荷载传递至锚碇砼台墩的结构。由于OVM悬索桥锚碇体系技术先进,体系完善,结构简单,受力明确,锚固可靠,安装方便而入选。OVM悬索桥锚碇体系根据孔道灌注材料不同,分为无粘结式锚碇锚固系统和粘结式锚碇锚固系统两种型式。无粘结式锚碇锚固系统在预埋孔道采用防腐油脂加环氧的方式对系统进行防护,粘结式锚碇锚固系统在预埋孔道内采用水泥浆加环氧的方式对系统进行防护。

无粘结式锚固系统具有“可监测”、“可更换”性能。可监测即对防腐油脂可随时取样检测,同时可通过力传感器对锚固系统受力状况进行监测。可更换是指可通过检测油脂的指标变化情况,必要时可更换管道内的油脂,或通过力传感器随时监测索力变化,又或是经过几十年后,对钢绞线进行抽样检查,如需更换,则可进行逐根更换预应力钢绞线,更换时不影响大桥的正常运营。

龙江特大桥是喜马拉雅山系横断山脉上的一个奇迹。美国专家为此专门来到云南腾冲考察调研,被中国的造桥技术和工艺水准所震惊!建成此桥总结出了20多项高科技创新技术,翻开了中国路桥建设史上崭新和光辉的一页!

(刘丹丹)

(上接第10页)

参考文献

- [1] MOJSILOVIC N, MARTIP. Load tests on post-tensioned masonry walls[J]. TMS Journal, 2000, 18(1): 65-70.
- [2] WIGHT G D, INGHAM J M, WILTON A R. Innovative seismic design of a post-tensioned concrete masonry house[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(11): 1393-1402.
- [3] ISMAIL N, INGHAM J M. Time-dependent prestress losses in historic clay brick masonry walls seismically strengthened using unbonded posttensioning [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25 (6): 718-725.
- [4] WIGHT G D, KOWALSKY M J, INGHAM J M. Shake table testing of posttensioned concrete masonry walls with openings[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1551-1559.
- [5] MA R, JIANG L, HE M, et al. Experimental investigations on masonry structures using external prestressing techniques for improving seismic performance[J]. Engineering Structures, 2012 (42): 297-307.
- [6] 刘航, 华少锋. 后张预应力加固砌体墙体抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(5):71-78.
- [7] 刘航, 华少锋. 后张预应力加固砖墙抗震性能研究及工程应用[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2013, 21(4):403-409.
- [8] 刘航, 班力壬, 兰春光等. 后张预应力加固无筋砖砌墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8):142-149.
- [9] 北京市建筑工程研究院有限责任公司. 既有砌体建筑新型后张预应力抗震加固技术开发与应用示范. 北京市科技计划研究报告, 2014, 12, 20