

砌体结构新型加固技术研究进展 及实用建议¹

王 贇

(陕西理工学院土木工程与建筑学院, 汉中 723000)

摘要 发展适用于砌体结构尤其是村镇砌体结构的低成本加固技术紧迫且必要。本文对嵌筋加固、钢带加固、玻璃纤维复合材料加固和打包带加固进行了总结分析, 认为这些新型低成本加固技术可有效提高砌体结构的承载力、变形性能和耗能能力等, 并给出上述四种加固技术的实用建议, 认为钢带加固和打包带加固在砌体结构加固中更有发展潜力。

关键词: 砌体结构 加固技术 实用建议

引言

目前砌体结构是我国主要的建筑结构形式之一, 而砌体结构刚度大, 产生的地震作用较大, 震害严重。许多既有砌体结构建筑已经进入中老年期, 抗震性能下降, 加之我国结构设计和抗震标准不断提高, 已有结构的安全性能已不能满足要求。村镇砌体结构的建设缺乏监管力度, 其建筑质量偏低, 抗震能力更差, 在历次大地震中震害触目惊心(周中一, 2012; 孟凡龙, 2011), 砌体结构尤其是村镇砌体房屋的加固迫在眉睫。

砌体结构有许多传统的加固方法(孟凡龙, 2011; 别宇飞, 2013), 如钢筋网片面层、混凝土板墙、粘钢加固和 X 形钢支撑加固等方法。这些传统加固方法在实际中均有应用并各有优缺点, 有的湿作业时间长, 有的对已有建筑空间影响较大, 有的造价偏高施工复杂等, 这些都限制了砌体结构尤其是村镇砌体结构房屋的加固进程。寻求施工方便、造价低廉和性能良好的新型砌体结构加固技术已经很紧迫。本文对嵌筋加固、钢带加固、玻璃纤维复合材料加固和打包带加固四种新型砌体加固方法进行总结分析, 期望为砌体结构尤其是村镇砌体结构房屋的加固提供参考。

1 新型加固技术研究进展

1.1 嵌筋加固技术

嵌筋加固利用配筋砌体的原理, 在水平灰缝内嵌入钢筋, 提高砌体承载力、变形和耗能

1 基金项目 陕西省科学技术厅社会发展科技攻关项目(2016SF-420)

[收稿日期] 2015-09-10

[作者简介] 王贇, 女, 生于 1977 年。副教授。主要从事工程结构抗震及新型胶凝材料研究。E-mail: wangyun411@126.com

性能等, 该加固技术构造简单、施工方便, 据估算所增加的钢筋约为 $2\text{kg}/\text{m}^2$, 故总的加固成本较低。

孟凡龙 (2011) 将钢筋通过嵌缝胶泥嵌固于墙体内部, 并对 21 片砖墙进行拟静力试验。嵌筋加固提高了墙体的整体性, 高宽比分别为 0.5 和 1.8 时, 墙体侧向承载力分别提高了 24.78% 和 53.16%, 素墙体嵌筋加固后其性能高于砌墙时直接放入钢筋的配筋墙体, 墙体的变形能力由原来的 2.15 提高到 3.19 以上。别宇飞 (2013) 对不同高宽比的水平嵌筋砖砌体墙体进行了低周反复试验, 高宽比为 0.7 的墙体, 开裂荷载、极限荷载、破坏荷载和破坏位移分别提高 4%、9%、18.2% 和 29.4%; 高宽比为 1.75 时, 极限荷载、破坏荷载和破坏位移分别提高 6.7%、5.7% 和 15%。后植筋墙体的等效粘滞阻尼比 ξ 较无筋墙体高, 说明带钢筋的墙体其吸收能量的比重增大, ABAQUS (通用有限元分析软件) 模拟分析与试验结果相当。王秀英 (2014) 对嵌筋加固前后墙体进行了水平低周反复荷载试验, 发现高宽比为 0.7 的嵌筋墙体的极限荷载、破坏荷载和破坏位移分别提高了 13.6%、13.6% 和 17.5%; 高宽比为 1.75 的嵌筋墙体的极限荷载、破坏荷载和破坏位移分别提高了 22.7%、25.5% 和 27.4%。加筋试件的能量耗散系数和等效粘滞阻尼比系数均大于未处理试件, 表明耗能能力和变形能力提高。Antonio (2014) 用预紧不锈钢绞线沿柱全高嵌筋加固砖柱, 为防止应力集中在柱四角预埋钢板, 并加强约束效果, 在柱中预钻孔埋钢管穿筋 (图 1), 发现未加固试件表现为脆性破坏, 抗压强度按八边型、方形和矩形截面依次减小, 单肢箍加固的抗压强度提高 123—143%, 重叠加固的抗压强度提高 196%, 轴向应变增加 1.8 倍。



图 1 角钢及钢管穿筋

Fig. 1 Angle steel and steel bar through the steel tube

1.2 钢带加固技术

国内外用钢带加固混凝土构件和节点以及砌体结构等, 钢带以条状或网状铺设在构件上, 钢带可以预紧, 钢带之间用卡扣连接, 该加固技术施工方便、操作简单、成本低廉。

Farooq 等 (2012) 对比了碳纤维和钢带加固烧结砖砌体的抗震性能, 发现加固后抗剪承载力分别提高 2.14 和 1.57 倍, 破坏时横向位移分别提高 4.28 和 3.40 倍, 位移延性分别提高 1.97 和 2.67 倍, 与碳纤维加固相比, 钢带加固抗侧能力提高不多, 但其他的抗震加固效果较好, 关键是价格较低。Farooq 等 (2014) 通过试验研究了单双面加固、不同的配筋率及井字型和斜交两种设置方向等不同加固方案对高宽比为 0.7 烧结砖墙体的抗震性能的影响, 发现双面加固的抗侧刚度比单面加固的抗侧刚度高, 但与横向配筋率不成正比; 加固构件的侧向位移均有提高, 双面加固侧移和屈服点位移比单面加固的大; 所有构件都表现出对称稳定的滞回特性, 未加固墙体的滞回曲线狭窄, 表现为明显的脆性破坏, 单面加固的墙体滞回曲线饱满, 表现为延性的剪切破坏, 有较好的能量耗散和延性特性, 双面加固的墙体滞回曲线在

中心捏拢,有较少的残余横向位移,加固墙体剪切强度提高 1.6—2.44 倍,累积的能量耗散提高 10.45—22.58 倍,延性系数提高 2.14—2.83 倍;单面配筋有较高的延性,双面配筋抗侧刚度较高但延性较单面加固差,0.27%配筋率有较好的性能。Farooq 等(2014)还研究了墙体在 3 种不同轴向压力和不同方向设置钢带加固墙体的抗震性能,发现轴向压力越大,墙体抗压强度越大,破坏模式由无裂缝的滑移破坏到压碎-滑移剪切的复合破坏模式,表现出较大的延性,滞回曲线变得丰满,加固后的试件抗剪强度提高 1.17 到 2.05 倍,耗能能力提高,延性提高 2.6 到 2.8 倍,矩形网格的加固效果大于 45 度对角加固。Darbhanzi 等(2014)在墙体的两边分别用两条竖向布置成钢轨式的钢带加固砌体墙体,对于高宽比为 0.5 的试样,屈服强度减小了 70%,最大强度增加了 160%;对于高宽比为 0.7 的试样,屈服强度和最大强度分别增加了 210%和 280%,最大位移和屈服位移分别增加了 300%和 30%,延性系数平均提高 270%,初始和有效弹性模量分别降低 70%和 50%。

1.3 玻璃纤维复合材料(GFRP)加固技术

碳纤维增强复合材料(CFRP)加固结构性能优良,但价格昂贵,玻璃纤维每平方米的价格最多是碳纤维的 1/5,极大地降低了加固成本。近年国内外将 GFRP 布满贴、条状或网状粘贴在砌体构件表面进行加固,并对加固后的力学性能、抗震性能和粘结性能等方面做了多方面的研究(张波,2014)。

翁大根等(2003)用试验证明粘贴 GFRP 布能有效增强砌体抗震整体性,具有等效于提高砂浆强度的效果,GFRP 的厚度满足其抗拉能力大于砌体的抗剪能力时,能增强砌体的抗裂和水平极限抗剪承载力,墙端设有钢筋混凝土构造柱时将会提高墙片的水平抗剪承载力。王全凤等(2006)用 GFRP 加固带壁柱砖墙,通过低周往复试验发现,加固后试件的抗震性能、极限变形能力明显增强,提高幅度 66—256%,墙体刚度退化减缓,混合加固方式在极限位移状态下比斜向加固的墙体耗能性能好,加固量增加、采用“对拉”锚固措施可有效地提高墙体的变形和耗能性能。王欣等(2006)研究了玻璃纤维双面“XX”形加固粉煤灰砌块墙片的抗震性能,加固旧粉煤灰砌块墙体的承载力基本和未破坏前接近,直接用玻璃纤维加固的墙片极限荷载、破坏位移分别提高了 19.2%和 26.3%,延性系数提高了 1.23 倍,滞回曲线丰满,刚度退化性能得到了改善,承载力降低系数曲线相对平缓,降低程度较小,改善了墙片的累积损伤。由世岐(2007)通过试验研究了 GFRP 布加固砌体抗压、抗剪、抗弯和抗震性能及效果,发现 GFRP 布加固砌体的抗压强度提高,抗剪强度提高率在 73—88%之间,极限弯矩是未加固砖梁的 2.04—5.13 倍,跨中挠度是未加固砖梁的 1.22—8.11 倍,抗剪和抗弯加固效果明显;在低周反复荷载作用下,GFRP 布加固砌体墙片的抗震能力提高,耗能能力明显增加,耗能系数提高幅度在 45—485%之间,加固砌体墙片的骨架曲线下降段比较平缓,延性系数提高了 1.0—3.1 倍。Júnia 等(2015)用 GFRP 沿全高加固了受损砌体墙体,试验发现发生剥离破坏后杨氏模量值和应力应变曲线同加固墙相似,说明刚度和最初的承载力基本回复,试验还发现抗压强度增加 49%。Arsalan 等(2012)用垂直相交、沿墙片对角布置和满布的 GFRP 加固试件,并进行了对角的压缩试验,垂直相交加固的试件抗剪强度是未加固试件的 2.45—4.32 倍,对角加固的效果更好,加固后的位移、延性系数和破坏能量都有提高。王全凤等(2007)发现 GFRP 可以有效地提高砖墙的平面外抗弯能力和延性,当 GFRP 加固量达到一定程度,其平面外抗弯承载能力得到较大的提高,而平面外方向的抗剪承载能力提高有限,试件的平面外受荷能力由其抗剪承载能力控制。除了 GFRP 布以外,张智等

(2010) 用喷射 GFRP 整喷加固砖墙, 加固墙体承载能力、开裂位移、极限位移和延性系数有了明显的提高。Jorge 等 (2012) 将玻璃纤维条用粘结和锚固的方法加固砌体结构, 并用新的试验方法进行 29 个试件的不同锚固个数和间距的粘结试验; 发现锚固明显提高了试件的强度和变形性能, 多种锚固结合比单一锚固的加固效果好, 增大锚固间距导致剥离破坏, 锚固间距适中效果较好。

1.4 打包带加固技术

打包带取材方便、抗拉强度大、耐久性好, 将条状或加工成网格的打包带围箍在墙体上, 内外打包带可拉结, 该加固技术湿作业少, 施工简单, Navaratnarajah 等 (2012, 2013a, 2013b, 2014) 分析得到打包带加固成本约在 0.85—3.4 美元/m², 加固成本低廉, 同时对打包带加固砌体房屋的抗震性能也进行了研究和应用。

曾银枝 (2011) 用角钢和塑钢打包带加固砖墙, 沿墙高间隔 20cm 用打包带围箍, 打包带张紧后接头处各用 3 个卡扣紧固 (图 2)。通过低周往复荷载试验发现, 加固后墙体的抗剪承载力由加固前的 62kN 提高到 80kN, 承载力的提高幅度为 29%; 极限位移较开裂位移增加了 11.33mm, 提高幅度为 300% 以上, 墙体的延性明显提高, 滞回环面积增大, 变形能力得到加强, 延性增加, 骨架曲线下降段平缓, 从而改善了整体结构的抗震性能。姚新强 (2011) 等在西藏自治区农牧民安居工程中, 将打包带

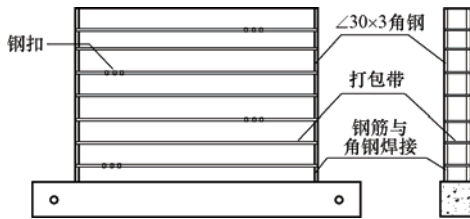


图 2 角钢打包带加固

Fig. 2 Strengthened with angle steel-packing belt

受到影响, 打包带加固有效提高了房屋整体性, 墙体变形恢复力增强, 控制了裂缝开展, 震害要明显轻于未加固模型, 并用 ABAQUS 软件进行了数值分析, 加固和原型结构的加速度、位移、应力应变和拉损伤等值和试验结果一致, 验证了用打包带进行抗震加固的可行性。周戟等 (2013) 应用有限元软件模拟分析打包带与碳纤维两种材料加固农村砌体结构房屋后的整体动力特性, 打包带与碳纤维加固模型的承载能力分别提高了 50% 和 133%, 加固结构的裂缝分布更加均匀, 宽度较小; 极限位移是未加固结构的 1.66 与 3.23 倍, 加固后地震加速度响应相对减小, 加固后的时程曲线相对平缓, 峰值区域宽度相对增加, 并且曲线的峰值点出现相对滞后。



图 3 墙体打包带加固

Fig. 3 Reinforcement with polypropylene band



图 4 打包带拉结

Fig. 4 Connecting of polypropylene band

Navaratnarajah 等 (2012, 2013a, 2013b, 2014) 通过工程造价比较认为 PP 打包带加固经济性最好, 并对 PP 打包带网格加固砌体结构性能进行了系列的研究, 认为该加固技术抗

震安全性较高。Navaratnarajah 等 (2012) 用 PP 打包带加固拱顶砖砌体房屋, 通过振动台试验发现加固后墙体抵抗横向侧移的水平是未加固的 45 倍, 能量耗散能力是未加固墙体的 25 倍。Navaratnarajah 等 (2013a) 用 PP 打包带加固木屋架石砌体结构, 通过沿阶梯型截面受剪试验, 发现打包带网格间距 40mm 加固效果最优, 加固的石砌体墙体开裂后有残余强度, 延性比未加固墙体提高至少 20 倍; 通过 1:4 模型振动台试验发现加固结构在严重破坏时和极限状态时的横向侧移分别是未加固结构的 5.5 和 6.2 倍, 开裂后加固模型的横向剪切力系数比未加固的高, 加固房屋模型严重破坏时和极限状态时的能量耗散能力分别是未加固结构的 3.1 和 3.3 倍, 表明 PP 打包带明显增强了砌体结构的抗侧能力; 通过耐久性试验, 发现打包带的抗拉强度与应用温度呈反比关系, 在阳光下暴露几个月, 抗拉强度退化, 并建议用灰泥等砂浆涂抹。Navaratnarajah 等 (2013b) 用 PP 打包带加固烧结砖和土坯砌体墙体, 沿阶梯型截面受剪试验发现原结构一裂就坏, 没有残余强度, 加固后砌体墙体开裂是个渐进的过程, 开裂后有残余强度, 砌块破坏整个墙体仍保持稳定; 打包带与灰缝呈 45 斜角的变形能力比平行于灰缝加固的高, 打包带的张紧和固定间距越小, 剩余强度与初始强度的比值越大, 加固后进行抹面处理至少 80% 的初始强度可以保留; 带孔钢板连接器固定比塑料绳固定的强度损失小, 但加固后进行抹面处理至少 84% 的初始强度可以保留; 平面外弯曲试验表明加固后的墙体竖向位移明显增大, 未加固的一裂就坏, 加固的烧结砖墙体剩余强度至少为初始强度的 45%。Navaratnarajah 等 (2014) 用 PP 打包带加固两层土坯房屋, 通过 1:4 模型振动台试验发现严重破坏时 1 层和 2 层横向侧移分别是未加固结构的 27 和 26 倍, 开裂后加固模型的横向剪切强度有很大提高, 在各个阶段加固房屋模型的能量耗散能力至少比未加固的提高 20 倍, 严重破坏时提高 42 倍。

2 实用建议

上述四种加固技术通过改变墙体在水平荷载作用下的破坏形式, 使得墙体从裂而即坏的脆性破坏转变为裂缝分散、裂缝的宽度小而密, 且不断增多的延性破坏, 从而明显改善了墙体的抗震性能, 具备显著的社会效益、经济效益和环境效益。为了加快新型加固技术的推广应用, 笔者给出实用建议。

嵌筋加固技术中配筋率为嵌筋墙体开裂性能的主要影响因素, 配筋率越大, 所承受的开裂荷载值越大, 采用同样直径的钢筋时, 随着嵌筋间距的减小, 开裂荷载值的提高程度越大。实际工程中建议采用合适的配筋率, 选择较粗的钢筋, 较大的嵌筋距离; 在用钢量和配筋率相同的条件下, 单面嵌筋比双面嵌筋能更好地提高荷载值; 墙体开槽位置和深度对墙体的极限承载能力和变形能力影响较大, 故施工过程中应该严格控制开槽位置和深度, 建议采用深度 $\geq 50\text{mm}$, 宽为 15mm, 在槽内每隔 500mm 钻孔, 穿入拉结筋, 槽中的灰尘要清除干净。

钢带加固可有效提高墙体平面内剪力, 墙体的抗震性能的提高归因于在钢带的约束下墙体的整体性增强, 墙体的破裂和滑移性能的改变, 墙体由脆性破坏过渡为延性破坏模式, 故在实际加固中, 保持合理的配筋率来改变砌体的破坏模式, 配筋率建议采用 0.27%, 在配筋率相同的情况下, 建议采用加固效果较好、施工方便的矩形网格形式, 其次优先采用单面加固方式。

GFRP 加固能提高墙体的强度, 增强墙体的抗震能力, 但随着位移的增加, 易出现空鼓和剥离, GFRP 布加固砌体不能很好地约束砌体侧面变形, 故建议工程加固中在墙体中增加

锚固以延缓空鼓和剥离的出现, 墙体端部两侧增加夹具以有效抑制侧面变形, GFRP 布的层数及布的种类对试件抗压、抗剪强度影响不明显, 加固层数也不是越多越好, 实际工程中砌体抗压、抗剪最大加固量不超过满粘一层 GFRP 布或加固层数不宜超过两层, 加固时采用 45°斜向粘贴加固效果较好。

打包带加固方法以其突出的价格优势, 易于施工操作、对房间使用影响较小的优势, 在经济相对落后、施工环境较差的广大农村地区有较大的应用前景, 在实地的工程应用中应注意将打包带拉紧紧贴墙面, 打包带进行横向拉结, 打包带上增加砂浆保护层, 使打包带的作用充分发挥。

3 结语

嵌筋加固、钢带加固、玻璃纤维复合材料加固和打包带加固, 其构造简单、施工方便、造价低廉, 加固后墙体的承载力、变形性能和抗震性能等都得到了提高, 是新型且具有广阔应用前景的砌体结构加固技术。其中, 钢带加固和打包带加固无论在施工、成本还是加固效果上, 更具优势, 尤其对经济水平相对较低的广大村镇砌体结构有广阔的研究推广前景。虽然这些新型加固技术取得较大的进展, 但仍有很多问题有待进一步研究确定, 如加固墙体抗剪强度的计算、加固因素与连续倒塌的关系等, 以及实际工程应用中加固材料的合理配筋率范围, 具体的加固间隔和形式等。

参考文献

- 别宇飞, 2013. 水平嵌筋加固墙体试验及有限元分析. 乌鲁木齐: 新疆大学.
- 孟凡龙, 2011. 砌体结构嵌筋加固墙体抗震性能试验研究及理论分析. 兰州: 兰州交通大学.
- 王秀英, 2014. 嵌筋加固技术对砌体抗震性能的影响. 内蒙古农业大学学报, **35** (2): 112—120.
- 王全凤, 柴振岭, 黄奕辉等, 2006. GFRP 复合材料加固带壁柱砖墙抗震性能试验研究. 土木工程学报, **39** (8): 65—72.
- 王全凤, 陈凡, 黄奕辉等, 2007. GFRP 加固带壁柱砖墙平面外受荷性能试验. 华侨大学学报(自然科学版), **28** (2): 182—187.
- 王欣, 绳钦柱, 李明等, 2006. 粉煤灰砌块墙片用玻璃纤维加固的抗震试验研究. 四川建筑科学研究, **32** (1): 126—130.
- 翁大根, 吕西林, 任晓崧等, 2003. 砖砌体墙片抗震修复与加固伪静力试验. 世界地震工程, **19** (1): 1—8.
- 由世岐, 2007. FRP 加固砌体结构受力性能及计算方法研究. 沈阳: 东北大学.
- 姚新强, 2011. 规则平面西藏单层砌体打包带加固抗震试验研究与有限元模拟分析. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 周中一, 2012. 村镇砌体结构新型抗震与隔震技术研究. 北京: 北京工业大学.
- 周戟, 白晓霞, 窦远明等, 2013. 不同材料加固农村砌体房屋动力性能分析. 混凝土与水泥制, (5): 57—60.
- 张波, 2014. FRP 加固砌体结构的应用研究进展. 玻璃钢/复合材料, (5): 82—86.
- 张智, 2010. 喷射 GFRP 加固砌体结构抗震性能试验研究与理论分析. 武汉: 武汉理工大学.
- 曾银枝, 李保华, 徐福泉等, 2011. 角钢和打包带加固低强度砖墙的抗震性能试验研究. 工程抗震与加固改造, **33** (6): 58—62.

- Antonio Borri, Giulio Castori and Marco Corradi, 2014. Strengthening of fair face masonry columns with steel hooping. *Materials and Structures*, **47** (12): 2117—2130.
- Arsalan Kalali, Mohammad Zaman Kabir, 2012. Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests. *Engineering Structures*, (39): 24—37.
- Darbhanzi A., Marefat M.S. and Khanmohammadi M., 2014. Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties. *Construction and Building Materials*, **52** (2): 122—129.
- Farooq S.H., Shahid I. and Ilyas M., 2014. Seismic performance of masonry strengthened with steel strips. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18** (7): 2170—2180.
- Farooq S.H., Mohamed A. ElGawady and Ilyas M., 2014. Seismic in-plane performance of retrofitted masonry walls. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18** (1): 226—237.
- Farooq S.H. Ilyas M. and Amir S., 2012. Response of masonry walls strengthened with CFRP and steel strips. *Arab. J. Sci. Eng.*, **37** (3): 545—559.
- Júnia Soares Nogueira Chagas, Gray Farias Moita, 2015. Influence of fibre reinforced polymers in the rehabilitation of damaged masonry wallettes. *Chagas and Moita Applied Adhesion Science*, **3**: 6.
- Jorge Proença, António Sousa Gago, Joaquim Cardoso, 2012. Development of an innovative seismic strengthening technique for traditional load-bearing masonry walls. *Bull. Earthquake Eng.*, (10): 113—133.
- Navaratnarajah Sathiparan, Kimiro Meguro, 2012. Seismic behavior of low earthquake-resistant arch-shaped roof masonry houses retrofitted by PP-Band meshes. *Practice Periodical on Structural Design and construction*, **17** (2): 54—64.
- Navaratnarajah Sathiparan, Kotaro Sakurai, Muneyoshi Numada et al., 2013a. Experimental investigation on the seismic performance of PP-band strengthening stone masonry houses. *Bull. Earthquake Eng.*, **11** (6): 2177—2196.
- Navaratnarajah Sathiparan, Kimiro Meguro, 2013b. Shear and flexural bending strength of masonry wall retrofitted using PP-band mesh. *Construction*, **14** (1): 3—12.
- Navaratnarajah Sathiparan, Kotaro Sakurai, Muneyoshi Numada et al., 2014. Seismic evaluation of earthquake resistance and retrofitting measures for two story masonry houses. *Bull. Earthquake Eng.*, **12** (4): 1805—1826.

Research Progress and Practical Suggestions on New Reinforcement Technology of Masonry Structure

Wang Yun

(School of Civil Engineering & Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract It's urgent and necessary to develop low-cost strengthening techniques applying to masonry structure, especially rural masonry structure, and four retrofitting techniques with embedded reinforcing bars, steel strips, glass fiber reinforced polymer and polypropylene band were analyzed and summarized, and the results revealed all can significant improve the bearing capacity, deformation property and energy dissipation property of the masonry structure, and practical suggestions of the four strengthening methods are given, in which steel strips and polypropylene band reinforcement methods have many advantages such as low cost and convenient construction, and they have a great potential in improving the shear capacity and ductility respectively.

Key words: Masonry structure; Strengthening techniques; Practical suggestions