

高层剪力墙抗震理论发展—— 从高强高刚到震后可恢复设计

王 威, 任英子, 苏三庆, 侯铭岳, 王 鑫

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 剪力墙是重要的抗侧力构件, 主要承受风荷载或地震作用引起的水平荷载和竖向荷载, 防止结构剪切破坏, 对高层及超高层建筑的抗震具有重要的意义。传统的剪力墙墙身较厚, 自重较大, 在大震作用下容易表现出不良的性能, 破坏后难以修复或修复费用很高。近些年来, 抗震设计已从最开始的追求高强高刚, 向刚柔并济转化, 剪力墙的设计也随之向抗耗相协调发展。本文综述了不同剪力墙的设计理念, 特点及研究进展, 并对新型抗震剪力墙的设计提出了展望。

关键词: 剪力墙; 抗震设计; 可更换; 自复位; 摇摆结构

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0493-10

Seismic theory development of shear walls in tall buildings—— from high strength and high rigidity to resilient design after earthquake

WANG Wei, REN Yingzi, SU Sanqing, HOU Mingyue, WANG Xin

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Shear wall is an important component to resist lateral forces. It mainly bears the horizontal and vertical loads caused by wind load or earthquake, and prevents shear failure of the structure. It is of great significance to the seismic resistance of high-rise buildings and super-high-rise buildings. The traditional shear wall is thicker and heavier, so it is easy to show poor performance under the action of large earthquake, and it is difficult to repair or expensive to repair after damage. In recent years, seismic design has been transformed from the initial pursuit of high strength and high rigidity to the combination of rigidness and flexibility, and the design of shear wall has also been transformed. In this paper, the design concepts, characteristics and research progress of different shear walls are summarized, and the prospects of the design of new seismic shear walls are put forward.

Key words: shear wall; seismic design; replaceable; self-centering; rocking structure

随着城市化和经济的快速发展, 高层建筑越来越普遍, 建筑高度逐年增高, 对结构设计的要求也随之提高。剪力墙是世界各国高层建筑中广泛使用的主要抗侧力构件之一, 对高层建筑的耗能和抗震起着至关重要的作用。钢筋混凝土剪力墙具有较高的水平和竖向承载力, 应用最为广泛。但其墙体自重大, 易开裂, 且破坏呈脆性。根据以往的地震经验和研究表明, 高层建筑底部的钢筋混凝土剪力墙在大震作用下极易损坏^[1], 最典型的破坏形式是剪力墙墙趾处混凝土的压溃剥落和联肢剪力墙连梁中钢筋的屈曲或断裂, 如图 1 所示, 这些破坏通常难以修复, 或者修复代价极高。因此, 亟需研发一种新型剪力墙来代替传统钢筋混凝土剪力墙以提高剪力墙墙体的抗震性能。



图 1 剪力墙的典型破坏

Fig. 1 Typical failure of the shear wall

建筑结构抗震技术已从最初的追求高强高刚, 向刚柔并济的形式转变。其理念可划分为“抗”、“消”、“隔”三种形式^[2]。“抗”即从改善结构自身抗震性能着手, 开发高性能结构材料, 结构构件, 结构体系等; “消”即利用结构抗震控制思想, 在结构中加入耗能元件帮助结构消耗地震能量; “隔”即将地震动作用与建筑物通过隔震层部分隔

收稿日期: 2018-04-08

修改稿日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578449; 51878548), 陕西省自然科学基金重点项目(2018JZ5013)

第一作者: 王 威(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事组合结构及高层建筑结构抗震等方面的研究, E-mail: wangwgh1972@163.com.

离开来,从而减小输入建筑物的地震动加速度,减小建筑物的破坏.这些理念逐渐发展成为剪力墙的抗震设计依据.

1 钢板剪力墙

钢板剪力墙(SPSW)是将钢板连接到梁和柱组成的框架内形成的一种剪力墙^[3].由于具有轻质、延性好、强度和刚度高等优点,钢板剪力墙引起了国内外工程界的广泛关注^[4].

2011 年 Berman 设计了一系列不同尺寸的平钢板剪力墙,并利用非线性分析对其在不同等级地震动下的性能进行了评价,研究发现:腹板相对于整体剪力墙的层间抗剪率在 60%~80%之间,层间剪力的分布与剪力墙的高宽比无关,但受各层板厚过渡的影响^[5];2017 年 Pavi 等比较了不同截面尺寸和长度的连梁的耦合平钢板剪力墙的性能特点,并发现:剪力墙的抗剪性能和耗能能力随连梁长度的增加而增大^[6].

根据钢板剪力墙技术规程(JGJT 380-2015),平钢板剪力墙的抗剪承载力公式^[7]如下式所示:

$$V = 0.42ft_wL_e \quad (1)$$

其中 f 为钢板的抗拉强度, t_w 为钢板剪力墙的厚度, L_e 为钢板剪力墙的净跨度.

由于平钢板剪力墙在受力过程中变形较大,且承受竖向荷载的能力较差,容易平面外失稳,而波形钢板剪力墙能较好的克服这一缺点,近些年对波形钢板剪力墙的研究越来越多.2017 年赵秋红等人对平钢板剪力墙和不同类型的波形钢板剪力墙进行了非线性分析,结果表明:深波纹的波形钢板剪力墙具有较高的侧向刚度、侧向强度和耗能能力,浅波纹的波形钢板剪力墙具有较高的侧向刚度和延展性,但其侧向强度低于平钢板剪力墙^[8];Hosseinzadeh 等^[9]研究了梯形波形钢板波角的变化对波形钢板剪力墙的影响,研究发现:波形钢板剪力墙耗能良好,其极限强度、弹性刚度和耗能能力随着波角增大而减小.

2 钢-混凝土组合剪力墙

钢-混凝土组合剪力墙可分为型钢混凝土剪力墙、钢板混凝土剪力墙和带钢斜撑混凝土剪力墙三种,其截面分别如图 2、图 3 和图 4 所示,一般,组合剪力墙比钢筋混凝土剪力墙更薄,而且由于其简单的构造,可以快速施工,其中以钢板混凝土剪力墙研究最多.

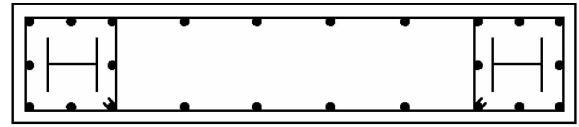


图 2 型钢混凝土剪力墙

Fig. 2 Shape steel concrete shear wall

组合结构设计规范(JGJ138-2016)提出了典型的型钢混凝土组合剪力墙、钢板混凝土组合剪力墙和带钢斜撑混凝土剪力墙的抗剪承载力计算公式^[10],分别为公式(2)、(3)、(4).

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.5f_t b_w h_{w0} + 0.13N \frac{A_w}{A}) + \quad (2)$$

$$f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} + \frac{0.4}{\lambda} f_a A_{a1}$$

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.5f_t b_w h_{w0} + 0.13N \frac{A_w}{A}) + \quad (3)$$

$$f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} + \frac{0.3}{\lambda} f_a A_{a1} + \frac{0.6}{\lambda - 0.5} f_p A_p$$

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.5f_t b_w h_{w0} + 0.13N \frac{A_w}{A}) + \quad (4)$$

$$f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} + \frac{0.3}{\lambda} f_a A_{a1} + 0.8(f_g A_g +$$

$$\varphi f'_g A'_g) \cos \alpha$$

其中, λ 为剪跨比 ($1.5 \leq \lambda \leq 2.2$); f_t 为混凝土的抗拉强度; b_w 为墙的厚度; h_{w0} 为型钢受拉翼缘和纵向受拉钢筋合力点至混凝土截面受压边缘的距离;当剪力墙截面为矩形时, A_w 等于 A , 即剪力墙的截面面积; f_{yh} 为水平分布钢筋屈服强度; A_{sh} 为水平分布钢筋的面积; s 为水平分布钢筋的间距; f_a 和 f_p 分别为型钢和钢板的屈服强度; f_g 和 f'_g 及 A_g 和 A'_g 为剪力墙受拉、受压钢斜撑的强度设计值和截面面积; A_{a1} 和 A_p 分别为一侧型钢柱(较小端)的截面面积和钢板的截面面积; N 为轴向荷载; φ 为受压斜撑面外稳定系数; α 为斜撑与水平方向的倾斜角度.

钢板混凝土组合剪力墙是将钢板内嵌或外包在混凝土墙体中形成的一种组合结构,可分为内嵌钢板混凝土剪力墙(见图 3(a))和外包钢板混凝土剪力墙(见图 3(b))两种.它充分发挥了钢与混凝土两种材料的各自优势^[11-16],在地震作用下具有较高的承载力、刚度及良好的延性和耗能能力.

内嵌钢板混凝土组合剪力墙中,混凝土和钢板共同抵抗水平和竖向荷载.混凝土可以为钢板提供支撑,从而抑制了钢板的面外变形,防止钢板早期屈曲和剪力墙整体屈曲,提高了屈曲荷载.2015 年董红英等研究了一种由钢管混凝土边柱、钢筋混凝土中柱、钢板深梁、钢筋混凝土混凝土

墙和消能带组成的钢-混凝土多级耗能组合剪力墙,如图5所示.研究发现钢筋混凝土柱、钢板深梁、混凝土墙和消能带协同耗能性良好^[17];2018年王威等对16个约束边缘构件为槽钢的内嵌钢板混凝土组合剪力墙(见图6)和3个传统的钢筋混凝土剪力墙进行循环加载试验,研究了不同变宽比、墙厚、钢板厚度、结构细节等对钢板混凝土组合剪力墙抗震性能的影响,结合大量试验数据,并根据现行设计规范提出了约束边缘构件柱为角钢的内嵌钢板混凝土组合剪力墙的抗剪承载力计算公式^[18],即:

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.05 f_c b h_0 + 0.13 N \frac{A_w}{A}) + f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_0 + \frac{0.4}{\lambda} f_a A_a + \frac{0.22}{\lambda} f_p A_p \quad (5)$$

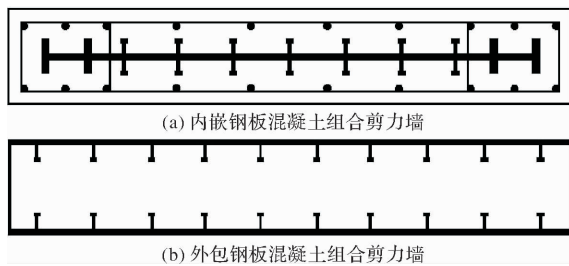


图3 钢板混凝土组合剪力墙

Fig. 3 Steel plate concrete composite shear walls

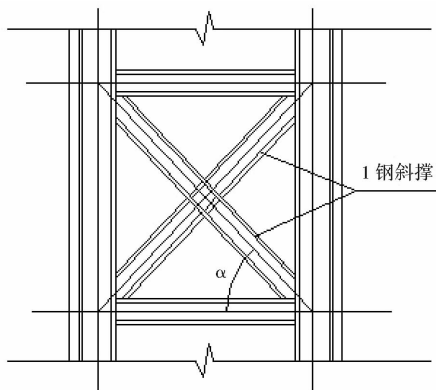


图4 带钢斜撑混凝土剪力墙

Fig. 4 Steel concealed bracing concrete composite shear walls

外包钢板混凝土组合剪力墙中,钢板在施工过程中可以作为混凝土填料的模板,可以延缓混凝土裂缝的出现;混凝土墙芯通过连接件和钢板相连,可以防止钢板的屈曲.通常这种组合剪力墙安装在钢框架结构中,用来抵抗横向荷载.聂建国等对双钢板混凝土组合剪力墙的有效刚度进行了分析研究,提出了一种平面组合桁架模型,并基于此推导出了组合剪力墙有效剪力刚度的计算公式^[2];Hossain^[19-20]和Rafieiet等^[21-22]研究了双波纹钢板复合剪力墙的抗震性能.研究发现:

对该复合剪力墙来说,相比提高混凝土的抗压强度,提高钢板的屈服强度更能提高复合剪力墙的抗剪承载力.

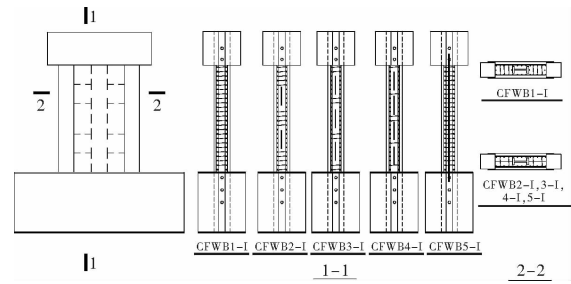


图5 钢-混凝土多级耗能组合剪力墙^[17]

Fig. 5 Steel-concrete multienergy dissipation composite shear walls

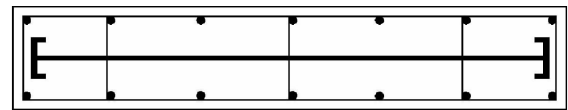


图6 约束边缘构件柱为槽钢的内嵌钢板混凝土组合剪力墙^[18]

Fig. 6 Steel plate reinforced concrete shear wall with channel steels restrained edge member columns

3 震后可恢复功能剪力墙

上述剪力墙都是从“抗”的角度出发,即提高自身强度,刚度等.按现行规范设计的建筑,虽然在地震期间从对人员安全的角度来看表现良好,但其造成的经济损失和社会影响仍然很大.所以,如何使剪力墙在地震中损伤较小,震后快速恢复功能,已成为目前最为热门且值得继续探索的方向.2009年,美国和日本学者在NEES/E-Defense美日地震工程第二阶段合作研究计划会议上,首次提出了“可恢复功能城市”(Resilient City)的概念,将其作为地震工程合作的大方向^[2].可恢复功能抗震结构(Earthquake Resilient Structure)是指地震后不需修复或者稍加修复就可恢复使用功能的结构^[23],目前主要有带可更换构件的结构、自复位结构、摇摆结构3种形式.将结构某部位强度削弱,或在该部位设置延性耗能构件,将削弱部位或耗能构件设置为可更换构件,并与主体结构通过方便拆卸的装置连接,即为带有可更换构件的结构体系^[24].放松结构与基础或构件间约束,使结构与基础或构件间接触面处仅有受压能力而无受拉能力,则结构在地震作用下发生摇摆,通过自重或预应力使结构复位,即形成摇摆及自复位结构^[2].可恢复功能抗震结构的研究受到了世界各国工程界的广泛关注,目前已成为地震工程领域新的研究方向,剪力墙也相应的向带可更换构

件的剪力墙、自复位剪力墙、摇摆剪力墙发展。

3.1 可更换剪力墙

对可更换剪力墙的研究主要集中在连梁和墙趾处设置可更换的耗能构件上。2007年Fortney等人提出了一种创新的带“保险丝”的钢连梁^[25], 钢连梁由三部分组成: 中间的部分削弱腹板的厚度作为保险丝, 两边部分通过端板与中间部分用高强螺栓相连, 如图7所示。这为钢连梁在损伤后快速修复和减少造价提供了新思路。可更换连梁的设计思想是: 通过削弱跨中截面构件形成保险丝, 将非弹性破坏集中在可更换的保险丝上, 使墙肢和连梁与墙肢连接部分保持无损。

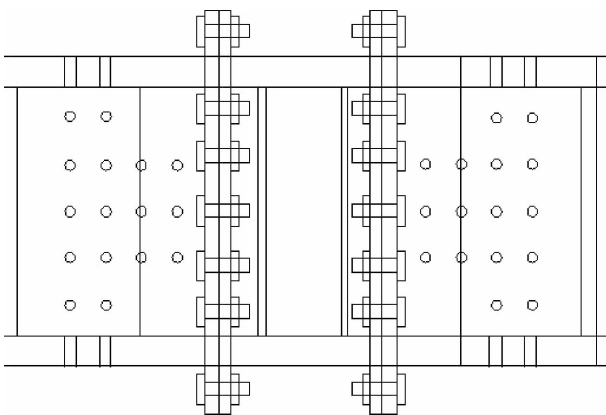


图7 带“保险丝”的钢连梁^[26]

Fig. 7 Replaceable “fuse” steel coupling beam

目前, 不少学者研究了各种可更换构件对连梁的影响, 2013年吕西林等设计了三种不同类型的可更换连梁“保险丝”耗能构件(见图8), 对可更换连梁进行了性能试验^[26]。研究表明: (a)型“保险丝”可适用于剪切变形较小的连梁, 能够充分发挥其剪切变形较小, 耗能能力较强的特点; (b)型“保险丝”的综合性能最优, 因此适用范围较广; (c)型“保险丝”可应用于跨高比较大的可更换连梁, 并可以设计成弯曲屈服型可更换连梁。实际应用中可根据不同的结构型式、不同的连梁跨度进行优选, 以充分发挥各自的优势。除此之外, 2014年, 吕西林等对带可更换连梁的双肢剪力墙抗震性能进行了试验研究^[27]; 2015年, 纪晓东^[28]等对可更换钢连梁抗震性能进行了试验研究; 陈云等^[29-30]对带可更换连梁的超高层结构的抗震性能进行了模拟分析; 2016年, 邵铁峰等^[31]对采用耗能角钢连接的连梁进行了试验研究, 如图9所示; 2017年, 吕西林等^[32]对设置可更换连梁的双筒混凝土结构中的可更换连梁的抗震性能进行了试验研究, 研究均发现可更换连梁能够将破坏集中于可更换构件上, 通过可更换构件耗能并集

中塑性变形, 而两端非屈服段连接梁保持弹性。同时, 可更换连梁的设置减小了墙根部的应变反应。

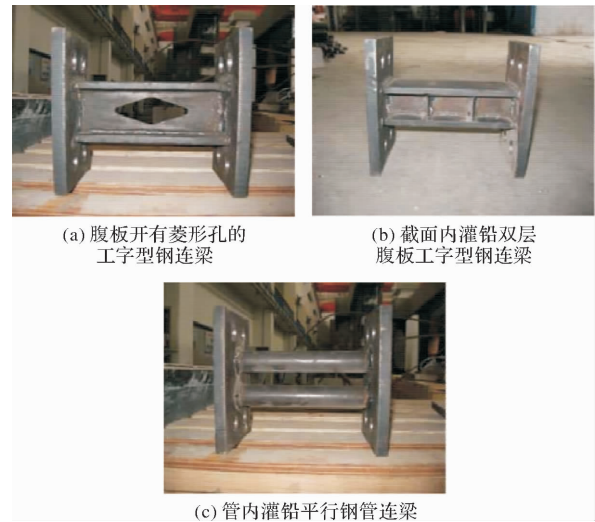


图8 “保险丝”耗能构件^[27]

Fig. 8 Fuse installed at the mid-span of replaceable coupling beam

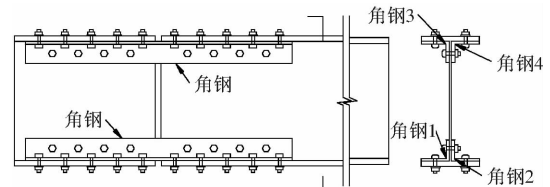


图9 采用耗能角钢连接的连梁^[32]

Fig. 9 Steel H-beams with replaceable energy dissipation angle

目前, 对于剪力墙的可更换研究主要集中在在墙趾处设置可更换构件, 通过将剪力墙墙脚易破坏的钢筋混凝土区域替换以耗能构件, 保护剪力墙其余部位不受破坏。2010年, Ozaki等提出了一种用于低层住宅单元的可更换耗能钢阻尼器的摇摆钢剪力墙体系, 如图10所示, 该体系将阻尼器置于连接地脚螺栓和钢板墙的折叠钢板墙中, 使大部分地震能量可以通过阻尼器塑性变形来消散。通过试验, 验证了所研制的阻尼器具有较高的耗能能力和抗震性能, 强震后可更换受损阻尼器以快速恢复其使用功能, 提高了建筑体系的可持续性^[33-34]; 2011年, 吕西林和毛苑君^[1,35-36]提出了一种带有可更换墙脚构件的钢筋混凝土剪力墙, 构造如图11所示, 脚部支座采用叠层橡胶附加两侧软钢板组合而成, 叠层橡胶承担压力, 软钢板承受倾覆力矩下的拉力, 通过连接板与上部混凝土墙和下部基础连接。研究表明: 带可更换脚部构件的剪力墙的水平承载能力比普通剪力墙略低,

变形能力是普通剪力墙的2倍,耗能能力在屈服点时明显比普通墙的高,后期耗能能力没有明显提高的原因主要与结构本身的塑形变形和可更换耗能构件的变形能力不够有关;2016年,刘其周、蒋欢军提出了一种新型的可更换墙脚构件^[37],如图12所示。上下连接端板中间是可更换墙脚部件主体部分,包括防屈曲软钢内芯、钢管混凝土及预紧自填充单元,并在剪力墙的下部设置钢板加强区。通过有限元软件分析发现:新型剪力墙耗能良好,附加的钢板有利于结构保持足够的刚度及承载力;2017年,蒋欢军等又提出了一种新型的可更换耗能构件^[38],如图13所示,试验结果表明,带有可更换墙角的新型剪力墙的承载力、延性和耗能能力均明显优于传统剪力墙,且其破坏主要集中在可更换构件上。

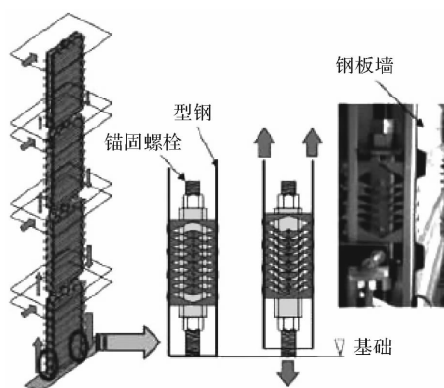


图10 可更换耗能钢阻尼器的钢板剪力墙^[33]

Fig. 10 Damage-control systems using replaceable energy-dissipating steel fuses for cold-formed steel structures

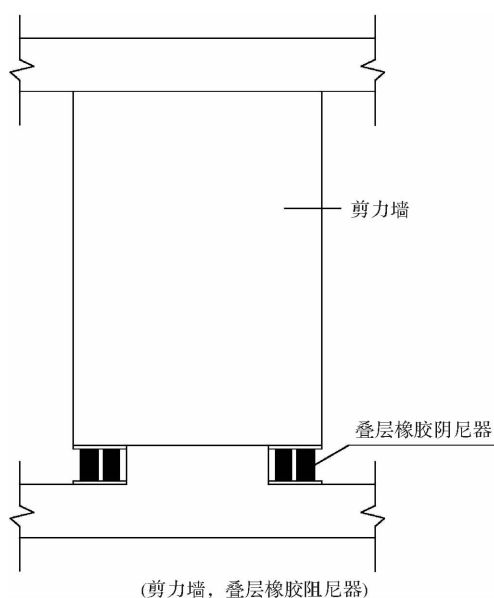


图11 带可更换叠层橡胶阻尼器的钢筋混凝土剪力墙^[1,35-36]

Fig. 11 Shear wall with replaceable rubber foot member

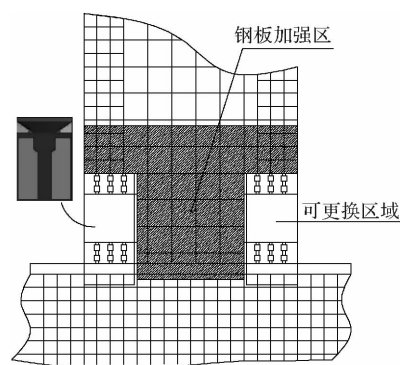


图12 带可更换墙脚构件的剪力墙^[37]

Fig. 12 Reinforced concrete shear wall with replaceable corner components



图13 可更换墙脚耗能构件^[38]

Fig. 13 Replaceable corner component

3.2 摇摆剪力墙

1963年,美国加利福尼亚工业大学的 Housner^[39]发现并报道了一处基础弱化的高位水槽,由于在地震作用中发生摇摆而在1960年智利地震中未遭受破坏。随后他用摇摆质量块模型(见图14),通过验算抗倾覆力证明:摇摆结构在地震作用下的稳定性要好于传统结构。由此,将该物理模型引入结构设计理念中:将基础对上部结构的约束放松,使基础只抗压而不约束上部结构抬升,由于结构抗倾覆力矩的作用,结构抬升后回位,在保证上部结构刚性的前提下,通过反复抬升与回位耗散地震输入的能量。

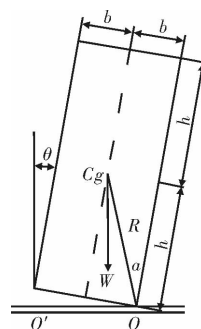


图14 摇摆力学模型^[39]

Fig. 14 Rocking mechanics model

2001 年摇摆剪力墙第一次应用于实际工程, 应用于美国伯克利市一栋 14 层建筑的改造项目中; 2009 年, Wada 等^[40]在对东京工业大学津田校区一栋建筑的修复加固项目中也采用了摇摆墙与阻尼器联合的方案. 结果表明, 该加固方案可明显降低地震作用下的结构响应. 近些年, 摇摆剪力墙研究的主要是损伤控制与更换领域.

在中国大陆, 对摇摆墙的研究始于几年前, 主要集中在计算模拟上. 2011 年, 曲哲和叶列平^[41]研究了摇摆墙-框架体系损伤机制的控制原理和效果, 提出了一种实用的摇摆墙刚度估算方法, 并发现该结构整体抗震性能提高; 2011 年曹万林等^[42]人用 ABAQUS 软件和 Puserover 分析对摇摆墙框架结构的抗震性能进行了研究. 推覆分析结果表明, 加摇摆墙后, 整个结构的承载能力和延性都有了明显的提高, 层间位移分布更加均匀; 2012 年曹海韵^[43]等人提出了一种新的摇摆墙墙底连接构造, 如图 15 所示, 通过一系列准静态试验研究了新型连接构造的性能. 试验结果表明, 新的连接方式能让层间位移分布更均匀; 2013 年裴星洙等^[44]采用静力和动力弹塑性分析方法, 对 10 层摇摆墙框架结构、框架结构和框架剪力墙的抗震性能进行了对比分析. 计算结果表明, 摇壁式框架结构的层间位移比较均匀, 在摇摆墙框架结构中更容易实现强柱弱梁结构; 2015 年, 张富文^[45]等对摇摆墙体与框架及摇摆墙与基础间节点进行了可更换设计, 试验表明, 设计的框架-摇摆墙承载性能和耗能能力提高, 各层的层间位移趋向均匀, 且能够将失效部位设定在预期构件上, 有助于实现强震后的可恢复性.

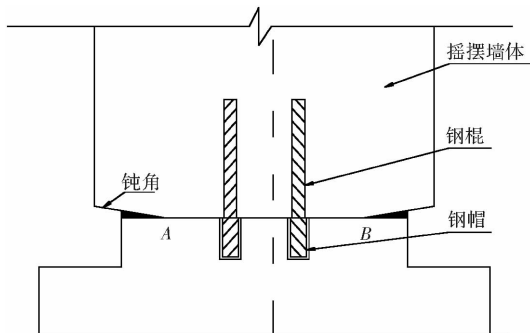


图 15 摇摆墙墙底连接构造^[43]

Fig. 15 Construction details of the bottom of rocking wall

3.3 自复位剪力墙

1999 年, Kurama^[46]提出了一种自复位剪力墙, 如图 16 所示, 它由钢筋混凝土剪力墙与内置竖向无粘结后张拉预应力钢绞线组成, 墙体与基础的约束被放松, 为防止剪力墙墙趾处塑性集中

区域破坏, 在墙趾处对混凝土用螺旋筋约束, 由墙体自重及预应力钢绞线提供恢复力, 这种自复位剪力墙在较大侧向变形时几乎没有破坏, 具有很好的变形能力. Kurama^[47]和 Restrepo^[48]在上述实验的基础上, 分别加装了粘滞阻尼器(见图 17)和软钢阻尼器(见图 18), 墙体变形时, 阻尼器可以增强墙体的耗能能力.

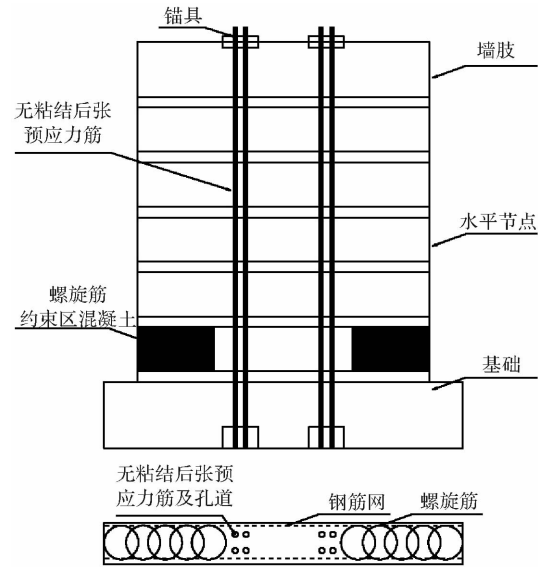


图 16 自复位剪力墙^[46]

Fig. 16 Self-centering shear wall

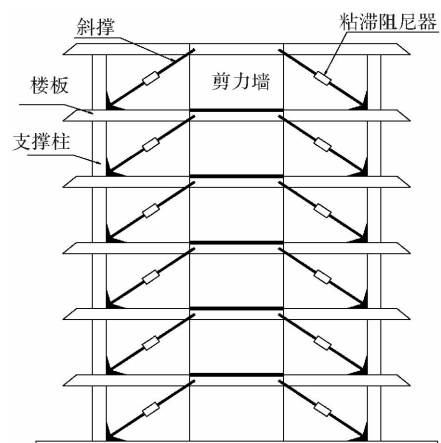


图 17 带粘滞阻尼器的自复位剪力墙^[47]

Fig. 17 Self-centering shear wall with viscous damper

自复位剪力墙的墙体底部与基础间无竖向钢筋贯通, 而采用无黏结预应力筋将墙体与基础相连接^[49], 自复位剪力墙与摇摆剪力墙的区别在于: 摇摆剪力墙由重力的抗倾覆力矩提供恢复力, 而自复位剪力墙通过预应力钢绞线提供恢复力. 我国国内学者在 2010 年以后, 开始了自复位剪力墙的研究, 主要集中在数值分析上; 2010 年, 陈适才^[50]等通过有限元软件分析了底部开缝自复位剪力墙的力学性能; 2014 年, 党像梁^[49,51-53]等通过

试验和有限元软件分析了自复位预应力剪力墙抗震性能;2016年吴浩等^[54]在自复位剪力墙根部中间位置布置若干普通钢筋以增加墙体耗能性,如图19所示。这些对自复位剪力墙的研究发现:此种剪力墙变形能力较强,非线性变形集中在墙根部接缝处,墙体损伤和残余变形很小,且具有一定的耗能能力。

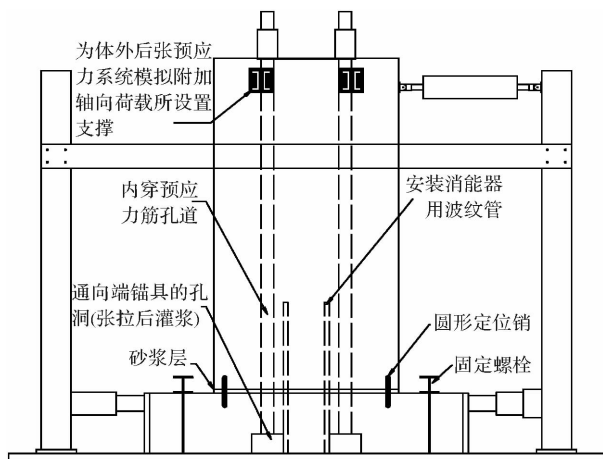


图 18 带软钢阻尼器的自复位剪力墙^[48]

Fig. 18 Self-centering shear wall with mild steel damper

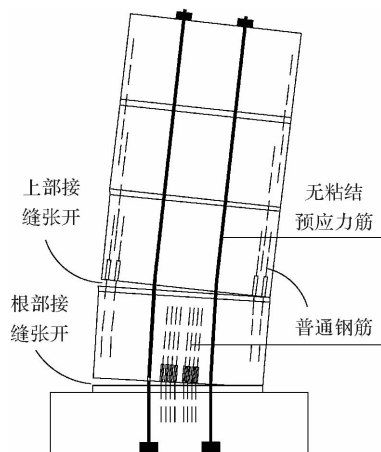


图 19 自复位剪力墙的变形模式^[54]

Fig. 19 Deformation mode of self-centering shear wall

近几年,自复位功能的实现方式正朝向多种耗能原理同时应用的趋势发展。2015年,Khan-mohammadi等^[55]研究了一种综合耗能减震装置和恢复力系统(见图20)来限制地震力对结构影响的自复位墙的抗震性能;2017年,Twigden等^[56]对带耗能系统的自复位墙进行了循环加载试验研究,结果表明墙壁底部损伤微弱,加入耗能装置后自复位剪力墙的性能更好。

4 结论

剪力墙是高层建筑结构的主要抗侧力构件,随着高层、超高层建筑高度的增加以及建筑功能

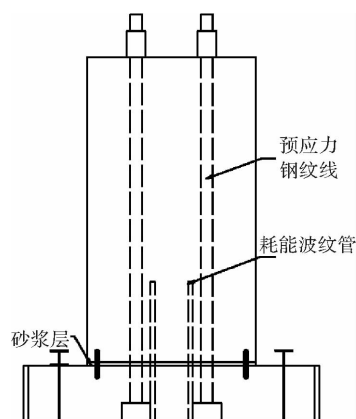


图 20 带耗能波纹管的自复位剪力墙^[55]

Fig. 20 Reinforced concrete shear wall using multiple rocking systems

需求的不断提高,对剪力墙性能的要求也随之提高。剪力墙的抗震设计目前在追求“抗耗相协”的综合抗震,“抗”即在弱风振和小地震作用下抗震结构能为建筑主体提供额外的附加刚度来抵抗外部荷载的作用,保持主体结构的完整性,避免结构主体出现大的内部损伤;“耗”即在强风振和大地震的作用下,抗震结构能通过局部耗能,使结构主体在强风振和大地震中不至于被严重破坏甚至倒塌。提高剪力墙的抗震和可恢复功能的能力,除了传统的提高剪力墙的强度和刚度,减少地震破坏外,还可利用消能减震技术,设计出更加耗能,可快速恢复使用的新型抗震剪力墙。剪力墙的抗震设计理念还在不断进步,今后还可在以下方面开展进一步的研究工作:

(1)为了使剪力墙具有更好的抗震性能,可以研究更高性能的材料,也可将可更换,自复位、摇摆剪力墙技术综合使用,即提出更有利于结构抗震的新型多级耗能剪力墙。

(2)采用可更换、自复位和摇摆剪力墙时,剪力墙墙趾部位的强度和刚度突变及摇摆幅值的控制需要进一步考虑。

(3)新型抗震剪力墙的形式各异,对新型抗震剪力墙的精确的数值模拟计算有待统一。

(4)为了便于新型抗震剪力墙的结构设计和推广使用,需要对各类新型抗震剪力墙的施工方法、构造设计和承载力计算等研究出成文的规范。

参考文献 References

- [1] WANG Bin, JIANG Huanjun, LÜ Xilin. Seismic performance of steel plate reinforced concrete shear wall and its application in China mainland[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 131: 132-143.

- [2] 周颖,吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011,32(9): 1-10.
ZHOU Ying, LÜ Xilin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures[J]. Journal of Building Structures, 2011,32(9): 1-10.
- [3] LI Chao-Hsien, TSAI Keh-Chyuan, HUANG Hsuan-Yu, et. al. Cyclic tests of steel plate shear walls using box-shape vertical boundary elements with or without infill concrete[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(14):2537-64.
- [4] CHEN Shengjin, JHANG Chyuan. Experimental study of low-yield-point steel plate shear wall under in-plane load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011,67: 977-985.
- [5] BERMAN Jeffrey. Seismic behavior of code designed steel plate shear walls[J]. Engineering Structures, 2011, 33:230-244.
- [6] PAVIR Aydin, SHEKASTEBAND Behzad. Hysteretic behavior of coupled steel plate shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 19-35.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢板剪力墙技术规程:JGJ/T380-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Technical specification for steel plate shear walls; JGJ/T380-2015[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.
- [8] ZHAO Qihong, SUN Junhao, LI Yanan, et al. Cyclic analyses of corrugated steel plate shear walls[J]. The Structural of Tall and Special Buildings, 2017,26(16): 1319-1335.
- [9] HOSSEINZADEH Leila, EMAMI Fereshteh, MOFID Masood. Experimental investigation on the behavior of corrugated steel shear wall subjected to the different angle of trapezoidal plate[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017, 26(17):1390-1396.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范:JGJ138-2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Code for design of composite structures; JGJ138-2016 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [11] NIE Jianguo, MA Xiaowei, TAO Muxuan, et al. Effective stiffness of composite shear wall with double plates and filled concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research,2014,99:140-148.
- [12] EMORI Katsuhiko. Compressive and shear strength of concrete filled steel box wall[J]. Steel Structures, 2002,68(2):29-40.
- [13] ZHOU Ying, LÜ Xilin, DONG Yuguang. Seismic behaviour of composite shear walls with multiembedded steel sections. Part I: Experiment [J]. The Struct Design of Tall and Special Buildings, 2010,19(6):618-36.
- [14] DAN Daniel, FABIAN Alexandru, STOIAN Valeriu Augustin. Nonlinear behavior of composite shear walls with vertical steel encased profiles[J]. Engineering Structures, 2011, 33(10): 2794-804.
- [15] WU Yuntian, KANG Daoyang, YANG Yeongbin. Seismic performance of steel and concrete composite shear walls with embedded steel truss for use in high-rise buildings[J]. Engineering Structures,2016, 125:39-53.
- [16] JI Xiaodong, LEONG Tongheng, QIAN Jiaru, et. al. Cyclic shear behavior of composite walls with encased steel braces[J]. Engineering Structures, 2016, 127:117-128.
- [17] DONG Hongying, CAO Wanlin, WU Haipeng, et al. Experimental and analytical study on seismic behavior of steel-concrete multienergy dissipation composite shear walls[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14:125-39.
- [18] WANG Wei, WANG Yan, LU Zheng. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete composite shear wall [J]. Engineering Structures, 2018,160: 281-292.
- [19] HOSSAIN K handaker, RAFIEI Shahryar, LACHEMI Mohamed, et al. Finite element modeling of impact shear resistance of double skin composite wall [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 107:101-18.
- [20] HOSSAIN K handaker, RAFIEI Shahryar, LACHEMI Mohamed, et al. Structural performance of profiled composite wall under in-plane cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2016, 110:88-104.
- [21] RAFIEI S hahryar, HOSSAIN Khandaker, LACHEMI Mohamed, et al. Finite element modeling of double skin profiled composite shear wall system under in-plane loadings[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 46-57.
- [22] RAFIEI S hahryar, HOSSAIN Khandaker, LACHEMI Mohamed, et al. Impact shear resistance of double skin profiled composite wall [J]. Engineering Structures, 2017, 140: 267-85.
- [23] 吕西林,陈云,毛苑君. 结构抗震设计的新概念:可恢复功能结构[J]. 同济大学学报: 自然科学版,2011,39(7): 94-948.
LÜ Xilin, CHEN Yun, MAO Wanjun. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2011,39(7):94-948.
- [24] 吕西林,陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程震动, 2014,34(1): 27-36.

- LÜ Xilin, CHEN Cong. Research progress in structural systems with replaceable members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 27-36.
- [25] FORTNEY Patrick, SHAHROOZ Bahram, RASSATI Gian. The next generation of coupling beams[C] //International conference on composite construction in steel and concrete. Mpumalanga, South Africa, 2006: 619-630.
- [26] 吕西林,陈云,蒋欢军. 可更换连梁保险丝抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, (9): 1318-1325.
- LÜ Xilin, CHEN Yun, JIANG Huanjun. Experimental study on seismic behavior of "fuse" of replaceable coupling beam[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2013, (9): 1318-1325.
- [27] 吕西林,陈云,蒋欢军. 带可更换连梁的双肢剪力墙抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 175-182.
- LÜ Xilin, CHEN Yun, JIANG Huanjun. Experimental study of seismic performance of coupled shear wall structure with replaceable coupling beams[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(2): 175-182.
- [28] 纪晓东,王彦栋,马琦峰,等. 可更换钢连梁抗震性能试验研[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 1-10.
- JI Xiaodong, WANG Yandong, MA Qifeng, et al. Experimental study on seismic behavior of replaceable steel coupling beams[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 1-10.
- [29] 陈云,吕西林,蒋欢军. 带可更换连梁的超高层结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 1-8.
- CHEN Yun, LÜ Xilin, JIANG Huan-jun. Seismic performance of a super tall structure with replaceable coupling beams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(9): 1-8.
- [30] 陈云,吕西林,蒋欢军. 带可更换连梁的新型剪力墙仿真分析与试验验证[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(9): 49-53.
- CHEN Yun, LÜ Xilin, JIANG Huanjun. Detailed simulation analysis of shear wall structures with replaceable coupling beams and experimental verification [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(9): 49-53.
- [31] 邵铁峰,陈以一. 采用耗能角钢连接的部件可更换梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(7): 5-45.
- SHAO Tiefeng, CHEN Yiyi. Experimental study on steel H-beams with replaceable energy dissipation angle[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(7): 5-45.
- [32] 吕西林,陈聪. 设置可更换连梁的双筒体混凝土结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(8): 45-54.
- LÜ Xilin, CHEN Cong. Experimental study on steel H-beams with replaceable energy dissipation angle [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(8): 45-54.
- [33] OZAKI Fuminobu, KAWAI Yoshimichi, TANAKA Hiroshi, et al. Innovative damage control systems using replaceable energy dissipating steel fuses for cold-formed steel structures[C]//20th International specialty conference on cold-formed steel structures-recent research and developments in cold-formed steel design and construction. University of Missouri-Rolla, USA, 2010: 443-457.
- [34] OZAKI Fuminobu, KAWAI Yoshimichi, KANNO Ry-oichi, et al. Damage-control systems using replaceable energy-dissipating steel fuses for old-formed steel structures: seismic behavior by shake table tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(5): 787-796.
- [35] 吕西林,毛苑君. 带有可更换墙脚构件剪力墙的设计方法[J]. 结构工程师, 2012, 28(3): 12-17.
- LÜ Xilin, MAO Wanjun. Design method for RC shear walls with replaceable foot parts[J]. Structural Engineers, 2012, 28(3): 12-17.
- [36] 毛苑君,吕西林. 带可更换墙脚构件剪力墙的低周反复加载试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 2029-2040.
- MAO Wanjun, LÜ Xilin. Quasi-static cyclic tests of RC shear wall with replaceable foot parts[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 2029-2040.
- [37] 刘其舟,蒋欢军. 新型可更换墙脚部件剪力墙设计方法及分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 37-44.
- LIU Qizhou, JIANG Huanjun. Design Method of new type of reinforced concrete shear wall with replaceable corner components and its analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(1): 37-44.
- [38] LIU Qizhou, JIANG Huanjun. Experimental study on a new type of earthquake resilient shear wall [J]. Earthquake Engineering & Structure Dynamics, 2017, 46: 2479-2497.
- [39] HOUSNER George. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53 (2): 403-417.
- [40] WADA Akira, QU Zhe, ITO Hiroyasu, et al. Seismic retrofit using rocking walls and steel dampers [C]// Proceedings of ATC/SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and other Structures. San Francisco, CA, USA: Applied Technology Council, 2009. , 3(2): 38-48

- [41] 曲哲,叶列平. 摇摆墙-框架体系的抗震损伤机制控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 40-50.
QU Zhe, YE LiePing, Seismic damage mechanism control of rocking wall-frame system[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(4): 40-50.
- [42] 曹万林,张文江,张建伟,等. 钢管混凝土边框内藏钢板组合剪力墙抗震研究[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 219-253.
CAO Wanlin, ZHANG Wenjiang, ZHANG Jianwei, et al. Seismic research and application on embedded steel plate concrete shear wall with concrete filled steel tube columns[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 219-253.
- [43] 曹海韵,潘鹏,吴守君,等. 框架-摇摆墙结构体系中连接节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(12): 38-46.
CAO Haiyun, PAN Peng, WU Shoujun, et al. Experimental study of connections of frame-rocking wall system[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12): 38-46.
- [44] 裴星洙,王佩. 混凝土框架-摇摆墙体抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(2): 19-28.
PEI Xingzhu, WANG Pei, Study on seismic property of RC frame rocking wall[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(2): 19-28.
- [45] 张富文,李向民,许清风,等. 框架-摇摆墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8): 73-81.
ZHANG Fuwen, LI Xiangmin, XU Qingfeng, et al. Experimental study on seismic behavior of frame-rocking wall structure[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(8): 73-81.
- [46] KURAMAYahya, SAUSE Richard, PESSIKI Stephen, et al. Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 622-633.
- [47] KURAMA Yahya. Seismic design of unbounded post-tensioned precast concrete walls with supplemental viscous damping[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4): 648-658.
- [48] RESTREPO J I, RAHMAN A. Seismic performance of selfcentering structural walls incorporating energy dissipaters [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1560-1570.
- [49] 党像梁,吕西林,钱江,等. 自复位预应力剪力墙抗震性能实体和平面单元有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 17-24.
DANG Xiangliang, LÜ Xilin, QIAN Jiang, et al. Finite element analysis with solid and plane element of seismic performance of self-centering pre-stressed shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 17-24.
- [50] 陈适才,闰维明,李振宝,等. 底部开缝预应力剪力墙结构力学性能的有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(6): 631-636.
CHEN Shicai, RUN Weiming, LI Zhenbao, et al. Finite element study on mechanical behavior of the post-tensioned rocking shear walls with bottom slits[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(6): 631-636.
- [51] 党像梁,吕西林,周颖. 底部开水平缝预应力自复位剪力墙试验设计及结果分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(6): 103-112.
DANG Xiangliang, LÜ Xilin, ZHOU Ying. Experimental design and measured behavior analysis of self-centering shear walls with horizontal bottom slit[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(6): 103-112.
- [52] 党像梁,吕西林,周颖. 底部开水平缝预应力自复位剪力墙试验研究及数值模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 154-161.
DANG Xiangliang, LÜ Xilin, ZHOU Ying. Experimental study and numerical simulation of self-centering shear walls with horizontal bottom slit [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(4): 154-161.
- [53] 党像梁,吕西林,钱江,等. 底部开水平缝预应力自复位剪力墙有限元模拟[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 51-63.
DANG Xiangliang, LÜ Xilin, QIAN Jiang, et al. Finite element simulation of self-centering pre-stressed shear walls with horizontal bottom slits[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 51-63.
- [54] 吴浩,吕西林,蒋欢军,等. 预应力预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 208-217.
WU Hao, LÜ Xilin, JIANG Huanjun, et al. Experimental study on seismic performance of prestressed precast concrete shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 208-217.
- [55] KHANMOHAMMADI Mohammad, HEYDARI Sajad. Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 577-589.
- [56] TWIGDEN Kimberley, SRITHARAN Sri, HENRY Richard. Cyclic testing of unbonded post-tensioned concrete wall systems with and without supplemental damping [J]. Engineering Structures, 2017, 140: 406-420.

(编辑 桂智刚)