

带新型可更换墙脚部件剪力墙的抗震性能分析

王浩祚^{1,2}, 蒋欢军^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 提出了一种具备自复位能力的可更换墙脚部件, 介绍了该部件的构造和受力机理. 建立了带有该新型可更换墙脚部件的钢筋混凝土剪力墙的非线性数值计算模型, 进行了剪力墙在低周反复加载下的受力性能分析, 研究了墙脚部件中碟簧组的刚度和预压力对剪力墙抗震性能的影响. 结果表明, 带新型可更换墙脚部件的剪力墙具有良好的抗震性能, 结构残余变形小, 主体结构损伤低, 可实现震后使用功能的快速恢复.

关键词: 可恢复功能剪力墙; 更换墙脚部件; 抗震性能; 自复位

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0159-07

Seismic performance analysis of earthquake resilient shear wall with new replaceable corner components

WANG Haozuo^{1,2}, JIANG Huanjun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new type of replaceable corner component with self-centering capability was proposed, and the details and the loading mechanism of the new component were introduced. Furthermore, the numerical model of RC shear wall with the new replaceable corner components was established, and the seismic performance of shear walls was analyzed and the effect of stiffness and preload of disc springs in components on the shear walls was studied. The results show that the shear wall with the new replaceable corner components has good seismic performance and the characteristics of low residual deformation and low damage, and the function of the shear wall structure can be quickly restored by replacing the replaceable components after earthquake.

Key words: earthquake resilient shear wall; replaceable corner component; seismic performance; self-centering

带可更换部件的剪力墙属于可恢复功能剪力墙的一种, 该类剪力墙将结构在地震作用下易损伤的部位设计为可拆卸更换的耗能部件, 使结构损伤集中于可更换部件, 保护主体结构不受或只受轻微损伤, 并可通过震后可更换部件的替换实现结构功能的快速恢复^[1].

已有震害表明, 传统剪力墙在地震作用下墙脚部位受损较为严重^[2], 因此, 可将该部位设计为可更换部件. 目前, 国内外对于可更换墙脚的研究起步较晚且成果有限. Ozaki 等^[3]提出了一种带有可更换阻尼器的钢板剪力墙, 阻尼器由蝶形钢板和 U 型槽钢组成. 毛苑君等^[4]提出在剪力墙的底部两侧墙脚部位设置可更换的拉压组合减震支座. 刘其舟等^[5]在考虑更换与非更换部位刚度匹配

的基础上对墙脚支座进行了改进, 提出了一种类似屈曲约束支撑构造的拉压耗能部件. 王威等^[6]和汪梦甫等^[7]在研究中采用波形钢板制作的金属阻尼器作为可更换墙脚部件. 上述研究均表明, 相比于传统剪力墙, 带可更换墙脚部件的剪力墙可将结构的损伤集中于可更换部件上并具备良好的变形能力和耗能能力.

然而, 剪力墙在地震作用下会产生一定的残余变形, 这可能造成连接件与可更换部件之间孔位不对齐, 导致用于更换的部件无法正常安装. 已有研究中通过设置垫块和 U 型螺栓孔以适应结构在产生残余变形后的安装要求, 难以保证在强震作用下结构的残余变形在可调节偏差范围内. 本文提出了一种具备自复位能力的新型可更换墙

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978526); 国家自然科学基金地震联合基金项目(U2239253)

第一作者: 王浩祚(1994—), 男, 博士生, 主要从事可更换结构研究. E-mail: wanghz93@tongji.edu.cn

通信作者: 蒋欢军(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事建筑抗震防灾研究. E-mail: jhj73@tongji.edu.cn

脚部件,并通过数值模拟的方法研究了带新型可更换墙脚部件剪力墙的抗震性能。

1 新型可更换墙脚部件设计

可更换部件按其功能可划分为耗能部分和自复位部分,耗能部分由钢管、灌浆料、耗能钢棒、圆钢板和连接钢管组成,自复位部分由钢套筒、碟簧组、垫片、导杆和连接杆组成,两部分采用并联模式,并通过端板连接形成整体,如图1(a)所示。对于耗能部分,钢管和耗能钢材分别焊接于底部端板上,灌浆料填充于钢管内,钢管内壁和耗能钢材上涂覆有聚四氟乙烯材料用于消除与灌浆料之间的黏结力,钢管仅对灌浆料起约束作用。对于自复位部分,连接杆与端板铰接,钢套筒内设置有碟簧组和垫片,碟簧组由若干单片碟簧通过叠合和对合的方式组合而成。

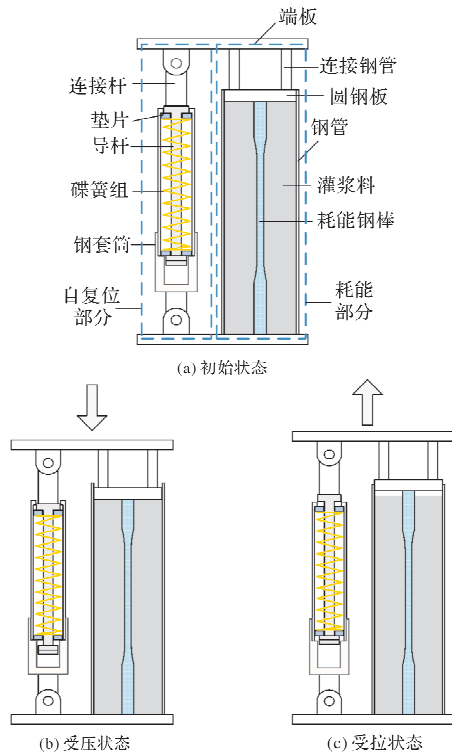


图1 新型可更换部件的构造与受力机理示意

Fig. 1 Details and loading mechanism of new replaceable component

部件的受力机理如图1(b)、(c)所示。部件受压力时,耗能部分和自复位部分共同承担压力,其中耗能部分的压力由内填灌浆料和耗能钢材承受。部件受拉力时,耗能部分和自复位部分共同承担拉力,其中耗能部分的拉力仅由耗能钢材承受。自复位部分在地震作用下将能量储存为碟簧的弹性形变能,并在震后转化为恢复力,为墙体提供自复位能力。图2为新型部件的滞回性能。

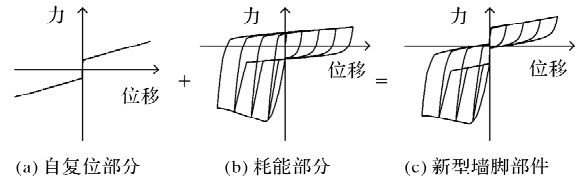


图2 新型可更换部件的滞回性能

Fig. 2 Theoretical hysteretic response of new replaceable component

2 有限元模型建立

2.1 单元选取与网格划分

本研究的数值模拟工作基于有限元软件OpenSees开展。带可更换墙脚部件剪力墙模型见图3。

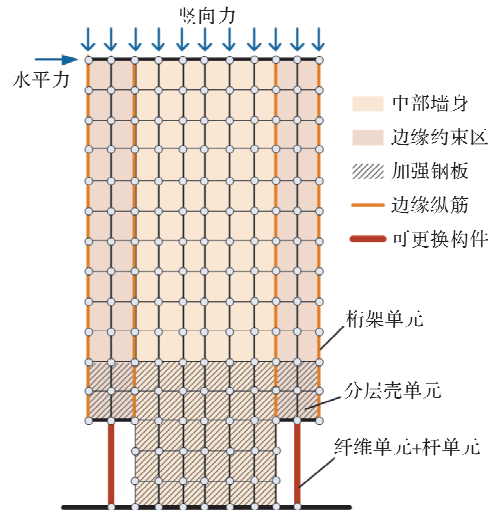


图3 剪力墙模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of shear wall model

采用清华大学陆新征团队开发的一种基于广义协调元理论的分层壳单元(NLDKGQ)来模拟墙肢^[8-9]。对于墙片部分,边缘约束区和中部墙身各使用一个分层壳截面定义。中部墙身的箍筋和纵筋以及边缘约束区的箍筋均离散为正交异性的钢筋层,与混凝土层共同构成壳单元。边缘约束区内的纵筋采用桁架单元模拟并与相应壳单元共结点以保证变形协调。布置于墙脚的可更换部件主要受拉压作用,基本不发生剪切破坏,因此可通过纤维单元和杆单元进行模拟。与端板焊接的耗能部分采用纤维单元模拟,与端板铰接的自复位部分采用杆单元模拟,通过 rigidLink 命令连接二者端部。对于带可更换部件的剪力墙,删除可更换部件设置区域内的壳单元,并将部件上方处的分层壳单元底部的水平自由度约束,模拟实际情况中支座连接处对于墙体变形的限制。此外,可在墙底设置加强钢板,弥补结构因底部墙身区域

削弱而减小的刚度与强度,但会在一定程度上增大结构的残余变形。加强钢板的模拟选用壳单元,与墙体单元共节点。

2.2 材料本构关系

壳单元中的混凝土采用 NLDKGQ 中自带的基于损伤力学和弥散裂缝模型的多维混凝土材料 (PlaneStressUserMaterial)^[10],考虑边缘约束区与中部墙身的不同情况,采用 Mander 材料模型^[11]来计算不同区域混凝土的强度与特征应变点。可更换部件中的灌浆料采用 Concrete02 材料模型,同样考虑钢管的约束作用。剪力墙中的钢筋和可更换部件中的耗能钢棒均采用 Steel02 材料模型。加强钢板采用 J2 材料模型。碟簧组采用 ElasticMultiLinear 材料模型,忽略碟簧片间的摩擦耗能,通过设置对应的力-位移点来模拟碟簧组的刚度和预压力。

2.3 模型验证

采用上述墙体模型对文献^[5]中的两片剪力墙的滞回受力和变形情况进行模拟,所选取的墙体编号为 CT 和 NEW2,分别对应传统剪力墙和带可更换墙脚部件剪力墙,如图 4。

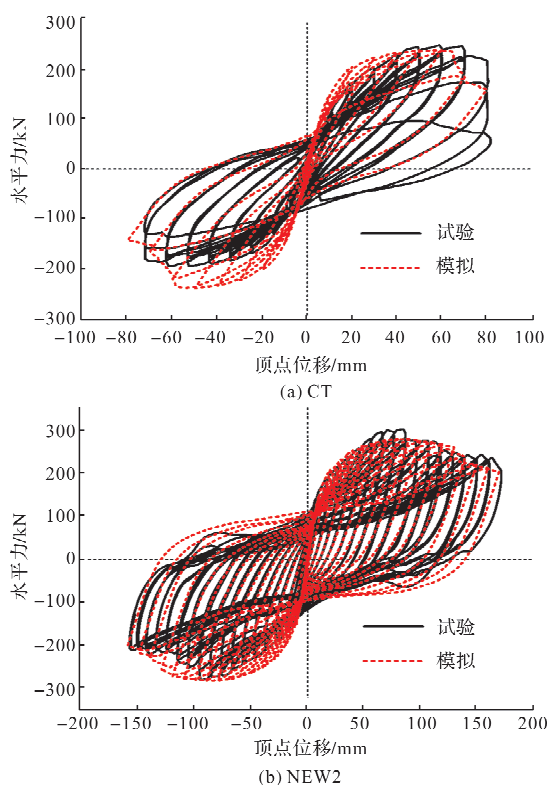


图4 剪力墙滞回曲线模拟与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of simulation and experimental results of hysteretic curves of shear walls

两片墙体的高度×宽度×厚度均为 3 600 mm×1 200 mm×140 mm,配筋构造相同,详细信息

见文献^[5]。墙体 NEW2 中的可更换墙脚部件不具备自复位能力,因此模型中的可更换部件仅采用纤维单元模拟耗能钢板和内填灌浆料。模型中的材料属性取值如下:约束区和非约束区的混凝土抗压强度分别为 33.4 MPa 和 27.9 MPa;边缘约束区纵筋和墙身纵筋及箍筋的屈服强度分别为 481 MPa、464 MPa 和 350 MPa;钢板屈服强度为 359 MPa;灌浆料的抗压强度为 56 MPa;耗能钢棒的屈服强度为 183 MPa。

数值模拟结果和试验结果的对比从图 4 可以看出,模拟结果和试验结果吻合良好,较好地反映了墙体的刚度、承载力和变形能力,表明本文建立的模型具有可靠性。

3 有限元计算结果和分析

3.1 滞回曲线

共设计了 8 个带可更换墙脚部件的剪力墙,包括 1 个带无自复位能力墙脚部件剪力墙 RCC 和 7 个带新型可更换墙脚部件剪力墙。模型 RCC 以试件 NEW2 的分析模型为基础,除未设置加强钢板外,其余设计参数均保持一致。各新型剪力墙模型的区别在于新型可更换墙脚部件的参数设置,部件的主要设计参数包括:碟簧组刚度和预压力大小。各剪力墙的参数如表 1 所示。需要说明的是,为避免可更换部件承载力过大而导致结构损伤向非更换区转移,模拟中各墙脚部件的设计拉压承载力保持一致。因此,新型可更换部件的耗能钢芯面积会随碟簧组刚度和预压力的变化而改变,而灌浆料面积不变。

图 5 为带可更换部件剪力墙的荷载-位移滞回曲线。可以看出,带有新型可更换墙脚部件剪力墙的滞回曲线较为饱满,形态上与对比件 RCC 相似。随着部件碟簧组刚度的提高和预压力的增大,滞回曲线出现不同程度的捏缩,说明新型可更换部件可有效减小墙体的残余变形。此外,对于碟簧组含预压力的墙体,滞回曲线在坐标原点处附近呈现明显的陡增或陡降,这是由于部件由压转拉(或由拉转压)时克服碟簧组内预压力引起的,该现象随预压力的增大而越发显著(如模型 DISC6 所示)。

新型墙体的滞回环面积均小于对比件 RCC,这是由于新型部件中采用碟簧组代替了部分耗能钢棒,耗能钢棒面积的减小导致剪力墙耗能能力降低。表 1 中的总耗能为模型滞回环面积的总和,反映出结构耗能能力与部件钢棒面积的关系。

表 1 剪力墙模型设计参数与分析结果

Tab. 1 Design parameters and analysis results of shear wall models

| 试件 编号 | 钢芯面积 /mm ² | 碟簧组刚度 /kN·mm ⁻¹ | 碟簧组 预压力 /kN | 屈服荷载 /kN | 屈服位移 /mm | 峰值荷载 /kN | 极限位移 /mm | 延性 系数 | 总耗能/ kN·m |
|----------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-------------------|----------------|--------------|
| RCC | 1 017.36 | — | — | 201.05 (-191.92) | 31.0 (-27.3) | 227.85 (-215.12) | 141.1 (-140.0) | 4.55 (5.13) | 287.7 |
| DISC1 | 863.50 | 2 | 0 | 195.89 (-187.65) | 32.7 (-29.1) | 224.02 (-215.20) | 134.3 (-138.8) | 4.10 (4.77) | 256.5 |
| DISC2 | 637.42 | 5 | 0 | 184.93 (-175.12) | 34.7 (-30.6) | 212.12 (-210.20) | 145.8 (-140.1) | 4.20 (4.59) | 209.4 |
| DISC3 | 357.18 | 8 | 0 | 191.92 (-186.28) | 43.4 (-41.3) | 215.30 (-214.94) | 136.2 (-130.2) | 3.14 (3.15) | 163.2 |
| DISC4 | 486.70 | 5 | 20 | 194.58 (-183.31) | 38.4 (-33.7) | 221.19 (-212.89) | 136.5 (-140.1) | 3.55 (4.15) | 185.1 |
| DISC5 | 401.92 | 5 | 40 | 194.06 (-184.35) | 39.0 (-34.8) | 220.16 (-208.31) | 135.2 (-139.8) | 3.46 (4.01) | 167.5 |
| DISC6 | 502.90 | 2 | 70 | 200.29 (-190.76) | 36.6 (-33.0) | 226.99 (-215.05) | 134.5 (-136.3) | 3.67 (4.14) | 185.9 |
| DISC7 | 310.86 | 8 | 10 | 190.29 (-196.86) | 42.6 (-40.1) | 213.58 (-217.48) | 146.3 (-137.8) | 3.43 (3.44) | 149.9 |

注：括号中的数值为模型负向加载时的数据；极限位移定义为荷载下降到 85% 的峰值荷载时对应的位移。

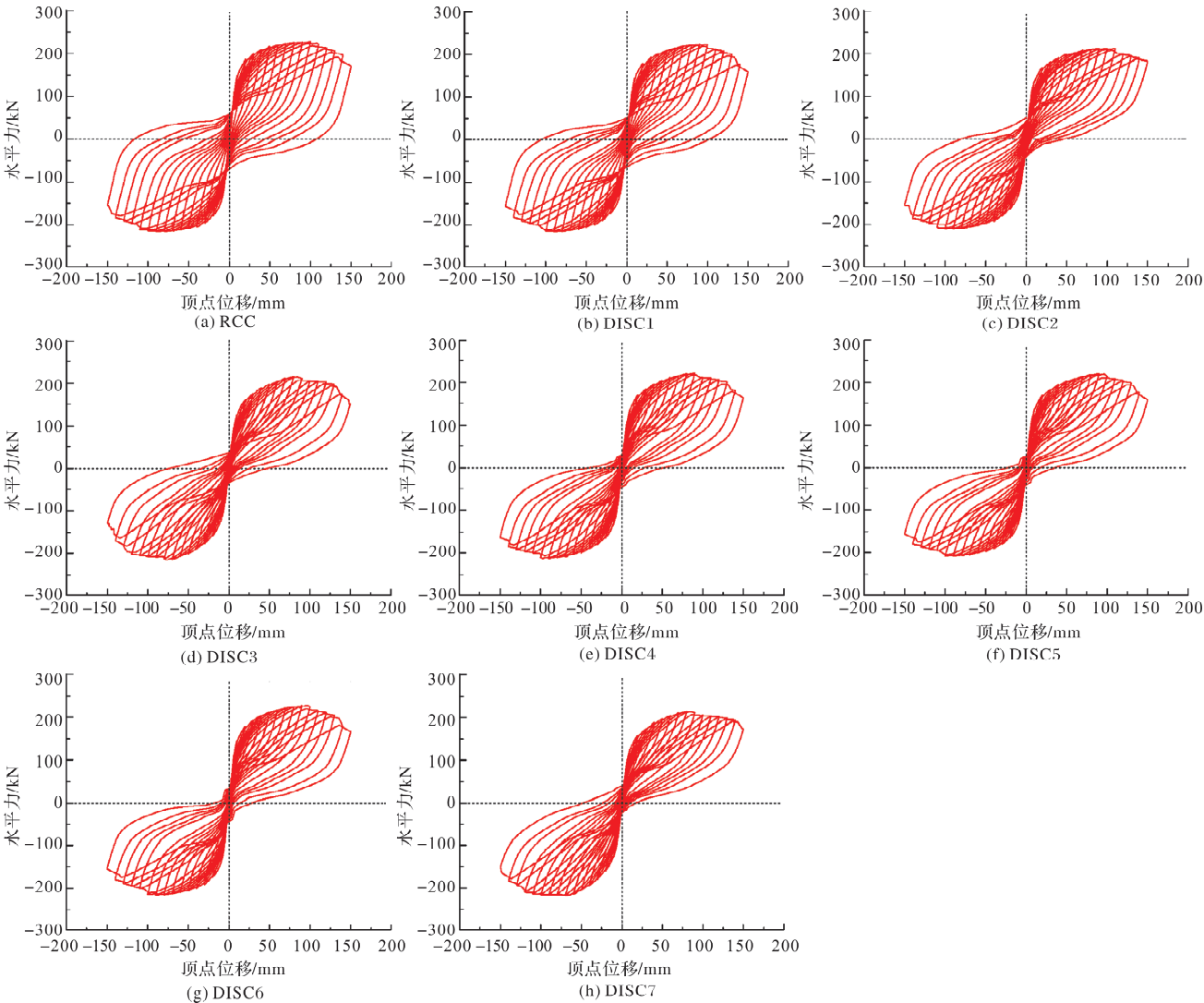


图 5 带可更换部件剪力墙的滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of shear walls with replaceable components

3.2 骨架曲线

各模型的骨架曲线如图6所示。各骨架曲线的形态相似,初始刚度基本一致,表明设置自复位能力的可更换墙脚部件不会显著改变墙体的抗侧刚度。但各模型的承载力有所差异,表明新型可更换部件对墙体的承载力有一定的影响,墙体的峰值荷载见表1。由表可知,在新型墙脚部件无碟簧组预压力的情况下,设置过大的碟簧组刚度会导致剪力墙的峰值荷载降低;在碟簧组的刚度相同但设置不同预压力的情况,提高预压力值可使得剪力墙的峰值荷载提高。

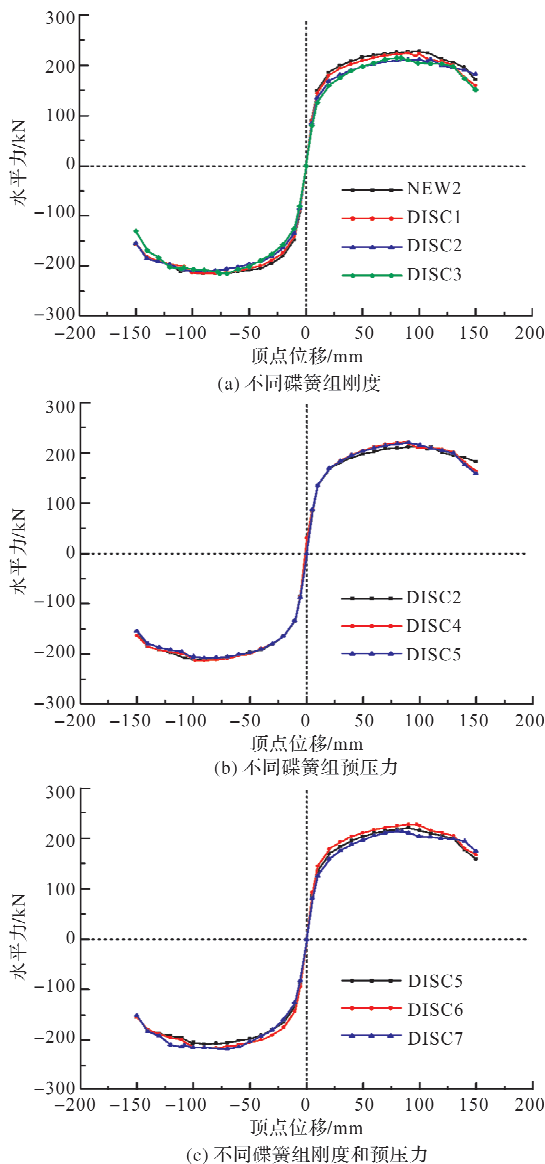


图6 带可更换部件剪力墙的骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of shear walls with replaceable components

采用Park法^[12]来计算各骨架曲线的延性系数,通过延性系数来评价剪力墙的变形能力,各模型正负向加载下的延性系数见表1。以模型RCC作为参照,延性系数总体上随碟簧组刚度和预压

力的增大而降低,说明设置新型可更换部件会削弱可更换部件剪力墙的变形能力,但各新型墙体的延性系数均大于3,表明带新型可更换部件的墙体依然具备良好的变形能力。

3.3 残余变形

图7给出了各剪力墙在目标顶点位移下的残余变形。由图7(a)可知,随着碟簧组刚度的增大,剪力墙的残余变形呈现减小的趋势,这一部分是由于碟簧组可在震后为墙体提供自复位能力,另一部分是因为耗能钢棒面积减小所导致的。碟簧组刚度相同但设置不同预压力的情况如图7(b)所示,结构残余变形随预压力的增大而减小,原因同样是由于设置预压力和减小钢棒面积引起。

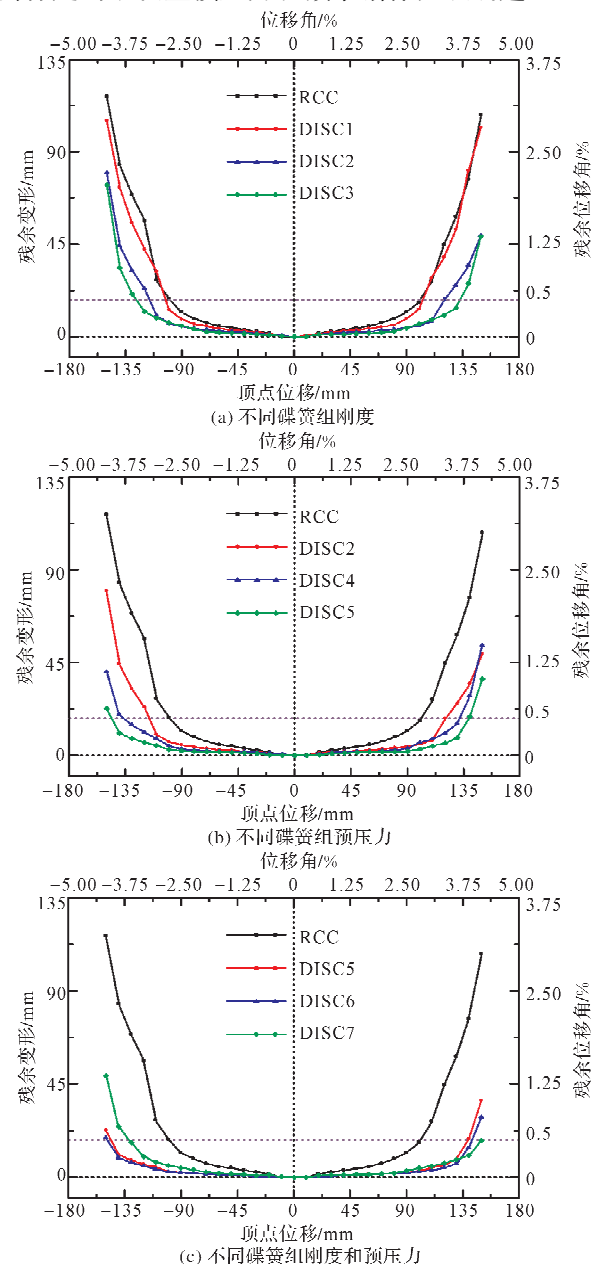


图7 带可更换部件剪力墙的残余变形

Fig. 7 Residual deformation of shear walls with replaceable components

图7(c)对比了不同刚度与预压力组合的情况,可以发现不同组合下各墙体的残余变形较为接近,3.5%位移角下对应的残余位移角均小于0.5%(结构可修复状况下的残余位移角建议限值^[13-14]),表现出良好的自复位能力。此外,通过对比可看出,设置了低刚度高预压力墙脚部件的墙体在保证良好自复位能力的情况下兼具较高的耗能能力,推荐在实际工程中采用低刚度高预压力的新型可更换墙脚部件。

3.4 结构损伤

以模型DISC5为例,采用墙体不同易损部位计算所得的应力应变数据来表征结构的损伤情况,并与模型CT进行比较,结果如图8所示。

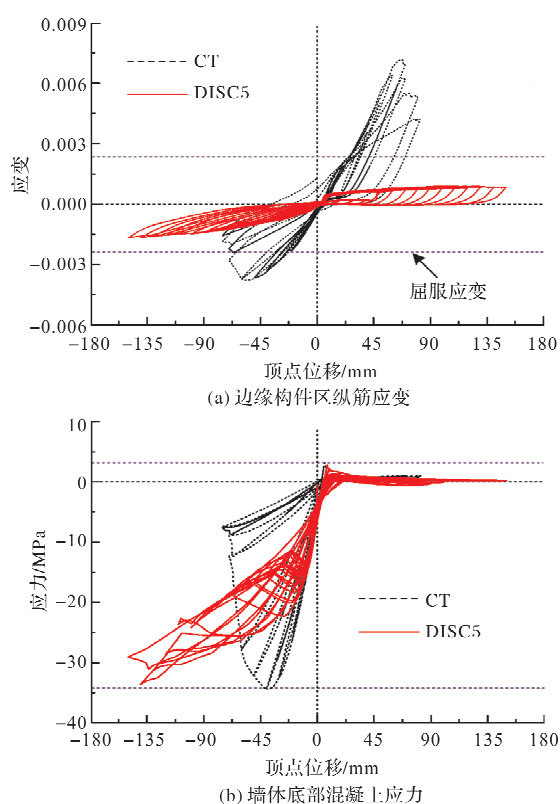


图8 剪力墙的损伤情况

Fig.8 Structural damage of shear walls

图8(a)为剪力墙左侧墙脚部件上方边缘约束区最外侧纵筋的应变曲线,两个模型选取的纵筋单元编号一致。可以看出,传统剪力墙模型CT的边缘构件纵筋在较小的侧向位移下就超出了屈服应变,纵筋的屈服表明墙体已进入损伤阶段。对于本文提出的带新型可更换墙脚部件的墙体模型DISC5,纵筋应变的最大绝对值仅为 $1\ 670\ \mu\epsilon$,远小于屈服应变,说明新型可更换墙脚部件能有效的保护主体结构。

OpenSees中壳单元只能提取应力数据,因此采用应力变化情况来看近似反映墙体混凝土的损伤

情况。CT模型选取剪力墙底部最外侧墙体,DISC5模型选取可更换部件内侧的底部墙体,计算所得的应力曲线如图8(b)所示。传统剪力墙CT在较小的顶点位移下混凝土即达到极限抗压强度,后期的应力降低是由于混凝土压溃而导致的。新型剪力墙DISC5的混凝土在135 mm顶点位移(3.75%位移角)时达到极限抗压强度,说明该部分墙体混凝土在加载过程的前中期未出现压溃破坏情况,表明新型可更换墙脚部件能有效延缓主体结构损伤的出现,保护主体结构仅在较大层间位移角下出现轻微损伤。

4 结论

本文提出了一种带自复位能力的新型可更换墙脚部件,并通过有限元软件OpenSees对带该新型墙脚部件的可更换剪力墙开展了往复加载数值模拟,得到的主要结论如下:

(1)带新型墙脚部件的可更换剪力墙具有足够的承载力与刚度,良好的变形能力。

(2)增大碟簧组的刚度和预压力会在一定程度上降低剪力墙的承载力、延性和耗能能力,但能有效减小墙体的残余变形。经合理设计的新型可更换部件可对结构提供良好的复位能力,推荐在实际工程中采用低刚度高预压力的墙脚部件。

(3)主体结构的损伤情况表明,带新型可更换部件的剪力墙能够有效避免非更换区遭受严重破坏,能作为可恢复功能结构使用。

参考文献 References

- [1] 吕西林,武大洋,周颖.可恢复功能防震结构研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(2):1-15.
LÜ Xilin, WU Dayang, ZHOU Ying. State-of-the-art of earthquake resilient structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2):1-15.
- [2] 徐培福,黄吉峰,陈富盛.近50年剪力墙结构震害及其对抗震设计的启示[J].建筑结构学报,2017,38(3):1-13.
XU Peifu, HUANG Jifeng, CHEN Fusheng. Earthquake damages to shear wall structure in last fifty years and seismic design enlightenment [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3):1-13.
- [3] OZAKI F, KAWAI Y, KANNO R, et al. Damage-control systems using replaceable energy-dissipating steel fuses for cold-formed steel structures: Seismic behavior by shake table tests [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(5): 787-795.

- [4] 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 Yuanjun, LÜ Xilin. Quasi-static cyclic tests of RC shear wall with replaceable foot parts [J]. Journal of Central South University of Science and Technology, 2014, 45(6): 2029-2040.
- [5] LIU Q, JIANG H. Experimental study on a new type of earthquake resilient shear wall [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46 (14): 2479-2497.
- [6] 王威,侯铭岳,苏三庆,等.带可更换阻尼器的竖向波形钢板剪力墙及组合墙抗震性能试验对比研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(1):3846.
WANG Wei, HOU Mingyue, SU Sanqing, et al. Experimental study on seismic performance of vertical corrugated steel shear wall and composite wall with replaceable damper for contrast [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52 (1):3846.
- [7] 汪梦甫,陈遵胜.带可更换墙脚构件的叠合板混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2020,42(5):54-62.
WANG Mengfu, CHEN Zhunsheng. Experimental study on seismic performance of superimposed concrete shear wall with replaceable toes [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(5): 54-62.
- [8] 王丽莎,岑松,解琳琳,等.基于新型大变形平板壳单元的剪力墙模型及其在OpenSees中的应用[J].工程力学,2016,33(3):47-54.
WANG Lisha, CEN Song, XIE Linlin, et al. Development of a shear wall model based on a new flat shell element for large deformation simulation and application in opensees [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (3):47-54.
- [9] 肖人杰,吕西林.基于OpenSEES的带可更换构件的剪力墙结构的建模及参数分析[J].结构工程师,2019,35(1):101-111.
XIAO Renjie, LÜ Xilin. Modeling and parameter analysis of shear wall structures with replaceable members using OpenSEEs [J]. Structural Engineers, 2019, 35 (1):101-111.
- [10] LU X, XIE L, GUAN H, et al. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 98: 14-25.
- [11] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of structural engineering, 1988, 114 (8): 1804-1826.
- [12] PARK R. State-of-the art report: ductility evaluation from laboratory and analytical testing [C]//Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan; 1988, VIII605-616.
- [13] WANG B, ZHU S, ZHAO J, et al. Earthquake resilient RC walls using shape memory alloy bars and replaceable energy dissipating devices [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(6): 065021.
- [14] XIAO S, XU L, LI Z. Development and experimental verification of self-centering shear walls with disc spring devices [J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110622.

(编辑 桂智刚)