

文章编号:1673-9469(2022)01-0015-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.003

双钢板-再生混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析

陈道申, 韦芳芳*, 朱有华, 徐庆鹏

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究双钢板-再生混凝土组合剪力墙的抗震性能,在已有试验的基础上,使用有限元软件 ABAQUS 进行模型验证和分析,研究内容包括再生粗骨料取代率、距厚比、轴压比以及连接件形式。结果表明:(1)随再生粗骨料取代率的增加,试件抗弯承载力、抗剪承载力、初始抗侧刚度均出现不同程度的劣化;(2)当轴压比为 0~0.5 时,试件承载力随轴压比增大而减小,初始刚度随轴压比增大而增大;(3)剪跨比为 1.5 的再生混凝土(再生粗骨料取代率为 100%)剪力墙试件,抗剪承载力随距厚比的增大而下降;(4)连接件形式对试件的早期承载力和刚度影响较小,但对加载后期的抗剪承载力和抗弯承载力影响较大。

关键词: 双钢板-再生混凝土组合剪力墙;参数分析;再生粗骨料取代率;抗震性能;有限元分析

中图分类号: TU398.2

文献标识码: A

Finite Element Analysis of the Seismic Performance of Recycled Aggregate Concrete-filled Double Steel Plate Composite Shear Walls

CHEN Daoshen, WEI Fangfang*, ZHU Youhua, XU Qingpeng

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of recycled aggregate concrete-filled double steel plate composite shear walls, the finite element software ABAQUS was used for model verification and analysis on the basis of existing tests. The research contents include replacement rate of recycled coarse aggregate, distance -thickness ratio, axial compression ratio and connector form. The results show that: (1) With the increase of recycled coarse aggregate replacement rate, the flexural capacity, shear capacity and initial lateral stiffness of the specimens have different degrees of deterioration; (2) when the axial compression ratio is 0~0.5, the bearing capacity decreases and the initial stiffness increases with the increase of it; (3) for the recycled concrete shear wall specimens with shear span ratio of 1.5 (replacement ratio of recycled coarse aggregate is 100%), the shear bearing capacity decreases with the increase of distance -thickness ratio; (4) the forms of connectors have little effect on the early bearing capacity and stiffness, but have a great influence on the shear and bending bearing capacity of the later loading period.

Key words: concrete-filled double steel plate composite shear wall; parameter analysis; the replacement rate of recycled coarse aggregate; seismic performance; finite element analysis

双钢板-混凝土组合剪力墙(Concrete-Filled Double Steel Plate Composite Shear Walls, CFDSPC-SW)作为新型抗侧力构件,能够充分发挥钢板和混凝土二者的性能,并以较小的墙厚来实现高性

能^[1]。近年来,国内外学者对 CFDSPCSW 抗震性能和再生混凝土结构或构件的抗震性能分别进行了大量研究。Eom 等^[2]发现加固墙体底部可有效提高试件延性,且 T 型截面的 CFDSPCSW 较矩形

收稿日期:2021-08-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608168)

作者简介:陈道申(1996-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事钢-混凝土组合结构抗震研究。

* 通讯作者:韦芳芳(1978-),女,浙江东阳人,博士,副教授,主要从事钢-混凝土组合结构抗震研究。

截面有更好的承载性能和延性。聂建国等^[3-4]通过试验发现,随着剪跨比的增加,试件破坏形态从弯剪破坏变为压弯破坏,且对试件的耗能能力影响较大,缀板可有效约束墙体外包钢板发生局部屈曲,同时有助于充分发挥高强混凝土的性能,并给出了CFDSPCSW的轴心受压承载力的计算方法、压弯承载力的计算公式以及栓钉最大间距的限制。Chen等^[5]采用内填高强混凝土的CFDSPCSW拟静力加载试验,距厚比不是影响试件初始刚度和承载力的主要因素,但随着距厚比的降低,CFDSPCSW的变形能力显著提高。Epackachi等^[6]通过ABAQUS研究CFDSPCSW构件在不同加载制度下的差异性,在循环往复荷载的作用下,墙体内部会产生塑性损伤积累,从而降低了CFDSPCSW的刚度和强度。杨梦^[7]通过试验证实了外包波纹钢板能够弥补再生混凝土对组合剪力墙抗震性能造成的不利影响。与此同时,随着我国城市化建设的日新月异,建筑垃圾通常只进行简单填埋,不仅占用大量用地,还造成了严重的污染^[8-9]。回收处理建筑垃圾中的混凝土,作为骨料加以利用,可制备出节能环保的再生骨料混凝土^[10],对保护资源和环境意义重大。

当前,对CFDSPCSW抗震性能已展开了较为深入的研究,但针对双钢板-再生混凝土组合剪力墙(Recycled Aggregate Concrete-filled Double Steel Plate Composite Shear Walls, RCFDSPCSW)抗震性能的研究相对较少。本文基于已有的RCFDSPCSW低周反复加载试验的基础上,结合数值模拟对RCFDSPCSW抗震性能进行了分析。

1 有限元模型建立与验证

1.1 验证试验简介

表1给出了2个剪力墙试件^[11]的基本参数。2个试件的连接件间距都是100 mm,距厚比(连接件间距与钢板厚度之比)为33。试件N4D100RL墙体采用自配的C40再生混凝土,再生粗骨料取

代率为100%。试件N4D100试件墙体采用自配C40普通混凝土;加载梁及基础梁采用C40商品混凝土。

1.2 模型建立

本文采用ABAQUS对RCFDSPCSW的低周反复试验进行数值模拟,建立与试件尺寸一致的有限元模型。考虑到计算成本,混凝土采用C3D8R实体单元;钢管和钢板采用S4R壳单元,以避免剪力自锁现象;钢筋和连接件采用B31梁单元。

墙体钢板与内填混凝土、钢管与内填混凝土均采用面与面接触单元形式,其中钢板表面为主接触面,混凝土接触面为从面;法向采用“硬”接触,允许主从表面相互脱离;切向选取“罚”接触,允许钢板与混凝土之间发生小滑移,摩擦系数取0.3^[12]。

钢板(伸入混凝土梁部分)与混凝土梁、钢管(伸入混凝土梁部分)与混凝土梁、连接件(栓钉/约束拉杆)与钢板皆采用共节点连接;钢筋与内填混凝土、连接件与内填混凝土均采用内置区域约束。

除底面外,混凝土加载梁其他表面均固定3个自由度(U_2, UR_1, UR_3),以限制其在加载过程中可能出现的平面外平动和转动;混凝土基础梁底面固定6个自由度($U_1, U_2, U_3, UR_1, UR_2, UR_3$);对加载梁一端侧面中心点施加位移约束(U_1),以模拟位移加载过程,各方向与有限元模型坐标一致。

试验数据表明,加载梁在加载过程中发生平面内转动(UR_2 方向),故固定加载梁 UR_2 方向的自由度不符合实际边界条件。此外,试验中竖向荷载由液压千斤顶施加,在加载位移较大时,由于加载梁发生平面内转动,上部千斤顶可能会对加载梁施加附加弯矩从而影响加载梁的平面内转动以及试件的承载力(图1),故在有限元模型中根据试验数据对加载梁施加 UR_2 方向的位移约束。

表1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of specimens

试件编号	墙体尺寸 $W_w \times T \times t_w$ /mm×mm×mm	端柱尺寸 $W_c \times B_c \times t_c$ /mm×mm×mm	试件高度 H /mm	距厚比 J /mm	试验轴压比 n	再生粗骨料 取代率/%	混凝土立方体 抗压强度 f_{cu} /MPa
N4D100	600×90×3	120×100×3.5	1 050	33	0.4	0	45.0
N4D100RL	600×90×3	120×100×3.5	1 050	33	0.4	100	35.4

注: W_w 、 B_c 、 W_c 、 t_w 和 t_c 分别为剪力墙截面宽度(不含端柱)、两侧端柱截面宽度、端柱沿厚度方向的长度、墙体钢板厚度和端柱钢板厚度。

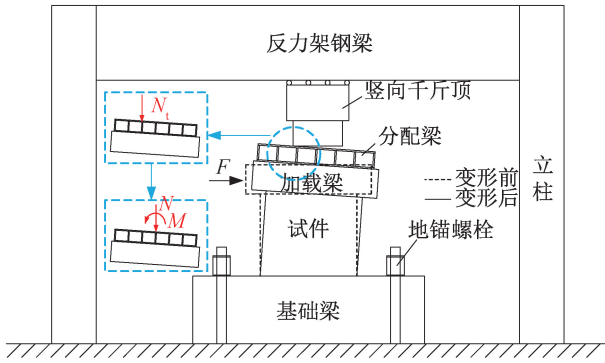


图 1 附加弯矩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of additional bending moment

以上各边界约束皆通过参考点施加,参考点与对应边界通过刚体约束连接。

1.3 模型验证

图 2 展示了 2 个剪力墙试件与有限元模型的滞回曲线对比,可以看出:加载位移较小时,试验

和模拟结果吻合较好;随着加载位移的增大,试验的荷载值略大于模拟结果,这是因为:(1)进入加载后期,受压侧内填混凝土压碎,但外包钢板能够约束内填混凝土,使其仍能维持一定强度,本文有限元模型所用非约束再生混凝土本构模型难以模拟此现象;(2)钢板和混凝土之间的粘结滑移关系难以模拟,本文采用的方式可能不能很好地模拟其力学行为^[13]。

此外,与试验数据相比,有限元模型未有明显的下降段,这是由于薄钢板焊接产生残余应力,引起加载后期试件出现钢板被约束拉杆拉裂以及栓钉断裂的情况,导致承载力明显下降;由于薄钢板焊接形成的残余应力难以进行定量研究,本文有限元模型未考虑残余应力的影响。

图 3 展示了有限元模型和试件 N4D100RL 破坏形态的对比,二者破坏形态接近,表现为墙体钢板底部屈曲变形,两侧端柱侧面鼓曲,说明有限元模型可以较好地预测试件的破坏形态。

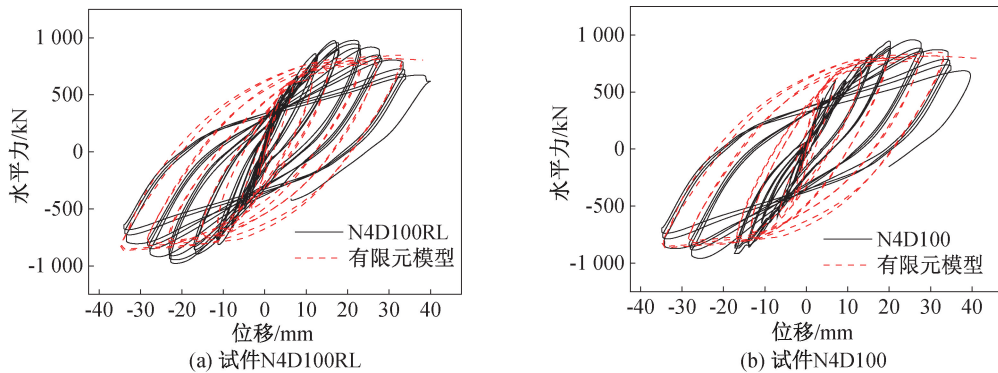


图 2 试验结果和数值模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of experimental results and numerical simulation results

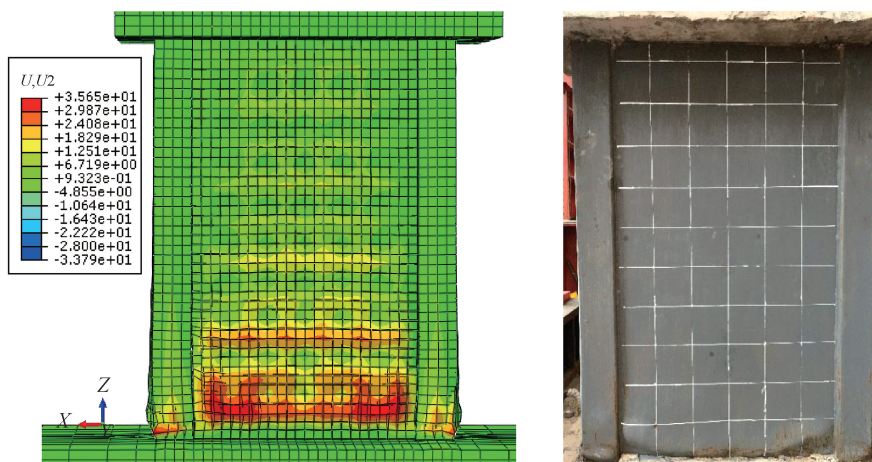


图 3 有限元模型和试验破坏形态的对比(试件 N4D100RL)

Fig. 3 Comparison of failure modes between finite element model and test (specimen N4D100RL)

1.4 加载制度的影响

图4展示了试件N4D100在单调加载和循环加载制度下的荷载-位移曲线,可以看出:

(1)二者在加载前期基本一致,骨架曲线整体上相似。但随着加载位移的增大,循环加载墙体承载力小幅下降,单调加载墙体则未出现此现象。这是由于在循环往复荷载作用下,墙体内填混凝土损伤积累,钢材塑性应变过大而导致承载力下降。

(2)本文所用有限元模型考虑钢材的混合硬化特性,墙体进入屈服阶段后,循环加载墙体的承载力略高于单调加载墙体。

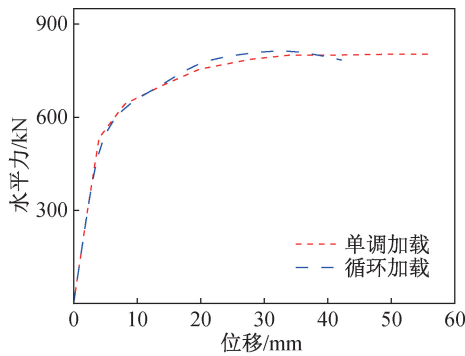
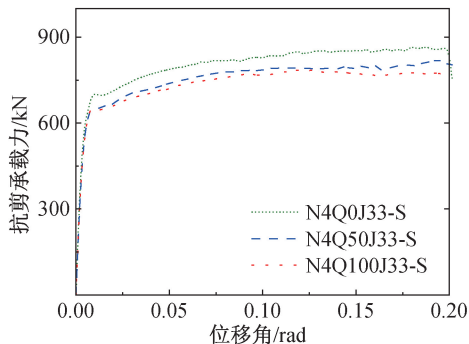


图4 加载制度对骨架曲线的影响(试件 N4D100)
Fig. 4 Influence of loading regime on skeleton curve
(specimen N4D100)

由于后续参数分析中涉及连接件间距和形式,模型较精细复杂,计算下降段时易出现加载位移难以控制的情况,故在后续分析中,采用单调加载替代循环反复加载以研究再生粗骨料取代率、轴压比等因素对试件承载力、刚度等指标的影响。

2 参数分析

基于上述有限元模型,本节研究了再生粗骨



(a) 再生粗骨料取代率对抗剪承载力的影响

料取代率、轴压比、距厚比以及连接件形式对组合剪力墙抗震性能的影响。具体模型参数见表2,编号规则如下:例如,试件N4Q100J33-SL,即表示轴压比为0.4、再生粗骨料取代率为100%、距厚比为33、连接件形式采用栓钉和约束拉杆等间距布置。

表2 有限元模型工况

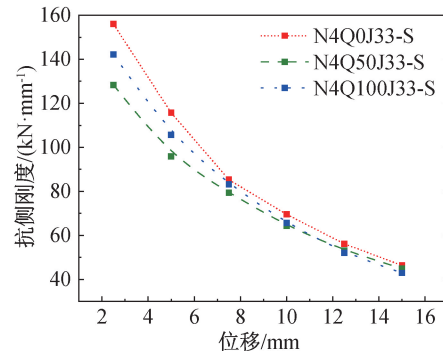
Tab. 2 Working conditions of finite element model

试件编号	轴压比	再生粗骨料 取代率/%	距厚比	连接件形式
N4Q0J33-S	0.4	0	33	栓钉
N4Q50J33-S	0.4	50	33	栓钉
N4Q100J33-S	0.4	100	33	栓钉
N4Q100J25-S	0.4	100	25	栓钉
N4Q100J50-S	0.4	100	50	栓钉
N4Q0J50-S	0.4	0	50	栓钉
N0Q100J33-S	0.0	100	33	栓钉
N2Q100J33-S	0.2	100	33	栓钉
N5Q100J33-S	0.5	100	33	栓钉
N4Q100J33-SL	0.4	100	33	栓钉/拉杆
N4Q100J33-L	0.4	100	33	拉杆

2.1 再生粗骨料取代率的影响

普通混凝土取立方体抗压强度为30 MPa,各不同再生粗骨料取代率的混凝土抗压强度基于文献[14]换算,保持轴压比为0.4。

再生粗骨料取代率对墙体构件抗剪承载力和抗侧刚度的影响如图5所示。可以看出,随着再生粗骨料取代率的提高,试件的抗剪承载力有所下降。试件N4Q50J33-S和试件N4Q100J33-S的抗剪承载力分别是试件N4Q0J33-S的93%、90%,试件N4Q50J33-S和试件N4Q100J33-S的荷载-位移角曲线几乎一致,表明:当 r 为50%~100%时,再生粗骨料取代率对试件的承载力影响不大,当 r 低于50%时,其影响相对显著。各试件抗侧刚度-位移曲线如图5(b)所示,可以看到试件N4Q50J33-S



(b) 再生粗骨料取代率对抗侧刚度的影响

图5 再生粗骨料取代率对抗剪性能的影响

Fig. 5 Influence of the replacement rate of recycled coarse aggregate on shear performance

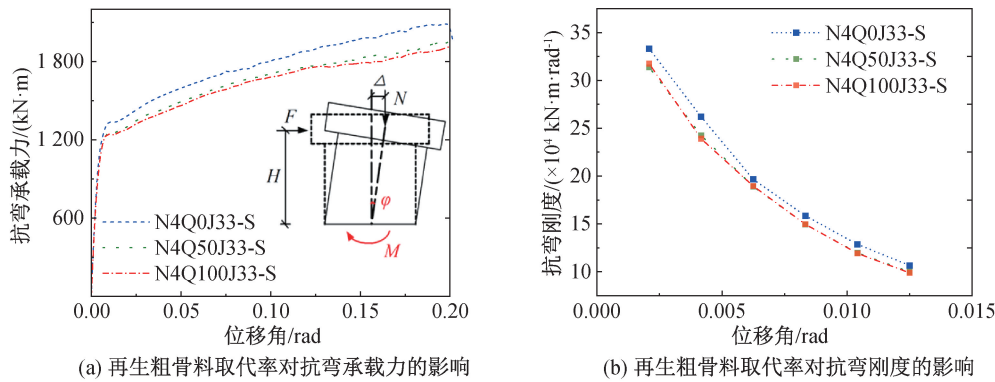


图 6 再生粗骨料取代率对抗弯性能影响

Fig. 6 Influence of the replacement rate of recycled coarse aggregate on bending resistance

和试件 N4Q100J33-S 的初始抗侧刚度(取 2.5 mm 处的割线刚度)分别是试件 N4Q0J33-S 的 89%、91%,试件 N4Q50J33-S 的初始刚度小于试件 N4Q100J33-S。

图 6 展示了再生粗骨料取代率对于试件抗弯承载力和初始抗弯刚度的影响,可以看出:普通混凝土在抗弯承载力和初始抗弯刚度上都略优于再生混凝土;此外,试件 N4Q50J33-S 和试件 N4Q100J33-S 的抗弯性能基本一致。

根据以上数据,再生混凝土相比普通混凝土在抗剪和抗弯性能上都有一定程度的劣化,但幅度不大。

2.2 距厚比的影响

图 7 展示了不同距厚比对再生混凝土(再生粗骨料取代率为 100%)墙体试件抗剪承载力的影响,结果表明:当距厚比在 25~50 的范围内,随着距厚比的增大,试件抗剪承载力下降。试件 N4Q100J25-S 和试件 N4Q100J50-S 的抗剪承载力分别是试件 N4Q100J33-S 的 94%、107%。此外,距厚比的变化对试件的初始抗侧刚度影响不大,因为在加载早期,试件处于弹性工作阶段,试件的刚度主要由内填混凝土贡献。

由图 8 可以看到,当再生粗骨料取代率为 100%,栓钉间距为 150 mm 时,试件 N4Q100J50-S 在进入屈服阶段后,承载力下降后又有所提升。对应加载位移下的混凝土损伤分布云图和钢板变形云图如图 9 所示,可以看出:受压侧靠近端柱的混凝土强度下降,同时钢板发生明显的屈曲变形。但是,当再生粗骨料取代率为 0%(即普通混凝土),其荷载-位移角曲线在对应位移角未见明显的承载力下降,因为相比普通混凝土,再生混凝土的破坏具有更显著的脆性^[15]。在加载早期,混凝土对试件承载力的贡献较大,再生混凝土过早地

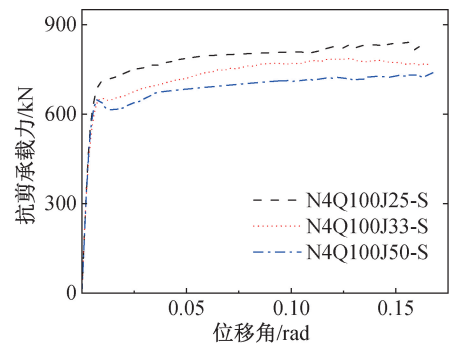


图 7 距厚比对抗剪承载力的影响

Fig. 7 Influence of distance-thickness ratio on shear capacity

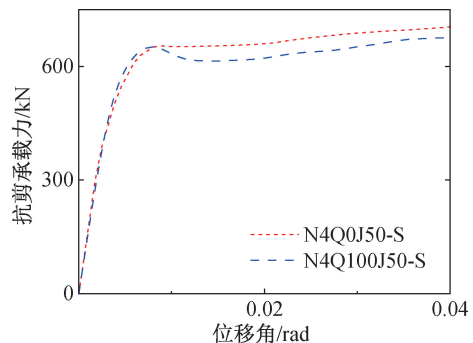


图 8 再生混凝土和普通混凝土的差异性(距厚比 50)

Fig. 8 Difference between recycled concrete and ordinary concrete (Distance-thickness ratio is 50)

发生强度下降,同时钢板由于栓钉间距过大而发生屈曲变形,二者结合引起承载力有一段小幅下降,随后受压侧混凝土压碎,对试件承载力贡献比下降,钢板发生应力重分布,抗剪承载力继而有所上升。但前期的屈曲变形限制了后续抗剪承载力的提升,故抗剪承载力最小。

图 10 展示了试件 N4Q100J25-S 和试件 N4Q100J50-S 在相同位移下的 U2 位移云图,可以看出:当距厚比为 25 时,试件受压侧墙面钢板和端柱侧面钢板屈曲变形,呈现水平压曲波形,屈曲范围较小(靠近端柱);当距厚比为 50 时,除了端柱

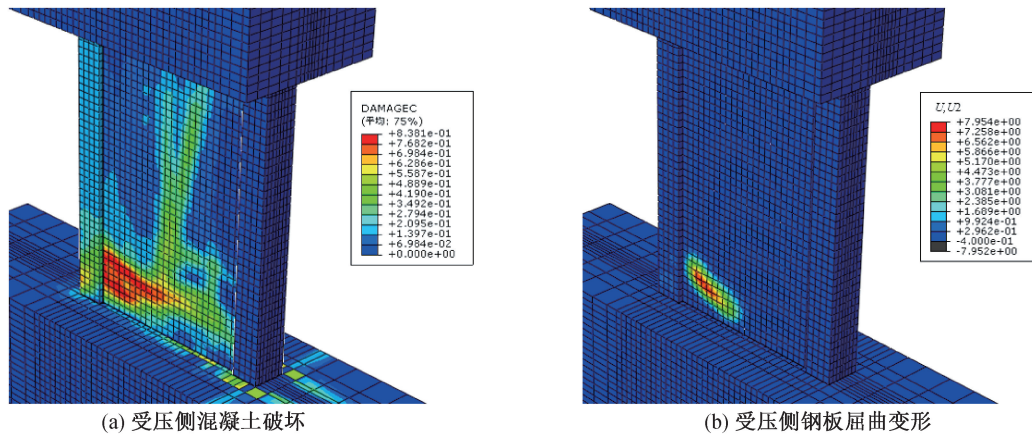


图9 试件 N4Q100J50-S 云图

Fig. 9 Cloud of specimen N4Q100J50-S

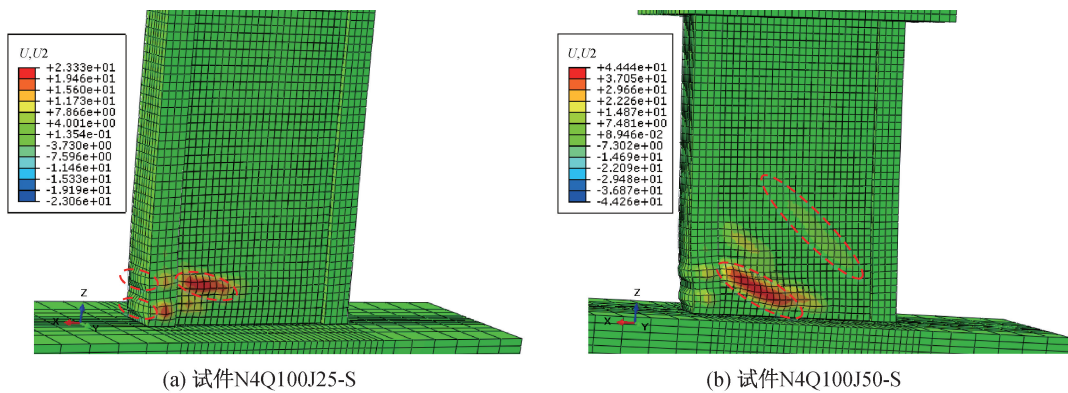


图10 距厚比对钢板屈曲形态的影响

Fig. 10 Influence of distance-thickness ratio on buckling shape of steel plate

侧面出现水平屈曲外,墙面钢板还出现多条斜向剪切波形,波形之间基本平行,分布范围比较大,延伸至试件高度 1/2 处,这说明当栓钉间距过大时,会影响试件屈曲的形态和位置以及破坏形态。

根据上述分析可知,对于剪跨比为 1.5,轴压比为 0.4,再生粗骨料取代率为 100%的组合剪力墙试件,距厚比不宜过大,否则将明显削弱试件的抗剪承载力,改变试件的破坏形态,不利于其抗震性能。

2.3 轴压比的影响

图 11(a)展示了轴压比对 RCFDSPCSW 抗剪承载力的影响,对比了各轴压比(0.0、0.2、0.5)试件。结果表明:

(1)剪力墙抗剪承载力随轴压比的增大而减小,试件 N2Q100J33-S 和试件 N5Q100J33-S 的抗剪承载力分别是试件 N0Q100J33-S 的 98%、89%,说明:当轴压比为 0~0.2 时,轴压比对抗剪承载力影响较小,但是当轴压比增大到 0.5 时,试件的承载力显著下降。

(2)试件 N5Q100J33-S 在刚进入屈服阶段时,

荷载-位移角曲线斜率急剧下降,说明当轴压比为 0.5 时,试件钢板进入屈服阶段后会提前屈曲并影响承载力,具体分析过程见 2.2 节。

图 11(b)展示了各试件在各位移下的抗侧割线模量,可以看出:墙体的初始刚度(取位移 2.5 mm 处的割线模量)随轴压比的增大而增大。

图 12 展示了相同位移下,试件 N0Q100J33-S 和试件 N5Q100J33-S 的 U_2 位移云图,可以看到:相比试件 N0Q100J33-S,试件 N5Q100J33-S 的墙体钢板屈曲范围要更大,屈曲角度更小,趋于水平,同时在端柱侧面出现两条相互平行的压曲波形,说明:轴压比影响墙体钢板的屈曲状态和位置。

2.4 连接件形式的影响

本文有限元模型栓钉采用 B31 梁单元,通过内置区域与内填混凝土实现约束,难以考虑内填混凝土压碎后锚固作用的弱化,故本有限元模型是在假定栓钉锚固良好的基础研究连接件形式的影响。

图 13 展示了连接件形式对墙体构件抗剪承载

力和抗侧刚度的影响。由图 13(a)可以看出,试件 N4Q100J33-S 的后期承载力明显小于其他两个试件,较早地出现承载力下降,因为相比栓钉,约束拉杆能更好地抑制外包钢板的屈曲变形从而维持承载力。试件 N4Q100J33-S 和试件 N4Q100J33-SL 的抗剪承载力分别是试件 N4Q100J33-L 的 89%、96%,说明连接件形式影响墙体的抗剪承载力,尤其是后期承载力。此外,图 13(b)展示了早期抗侧刚度退化,表明连接件形式对试件的抗侧刚度几

乎没有影响。

图 14 展示了连接件形式对 RCFDSPCSW 抗弯性能的影响,可以看到,通过采用约束拉杆替换栓钉,墙体的后期抗弯承载力明显提高,如图 14(a)所示。此外,连接件形式不是影响 RCFDSPCSW 的早期抗弯刚度的主要参数,如图 14(b)所示。

综上所述,连接件形式影响 RCFDSPCSW 的抗剪性能和抗弯性能,但主要体现在加载后期,对其早期承载力和刚度影响较小,由于在加载的早期,

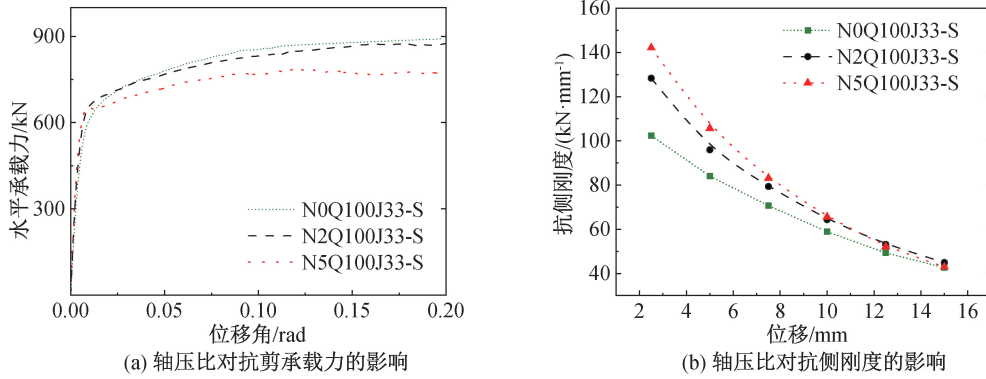


图 11 轴压比对抗剪性能的影响

Fig. 11 Influence of axial compression ratio on shear performance

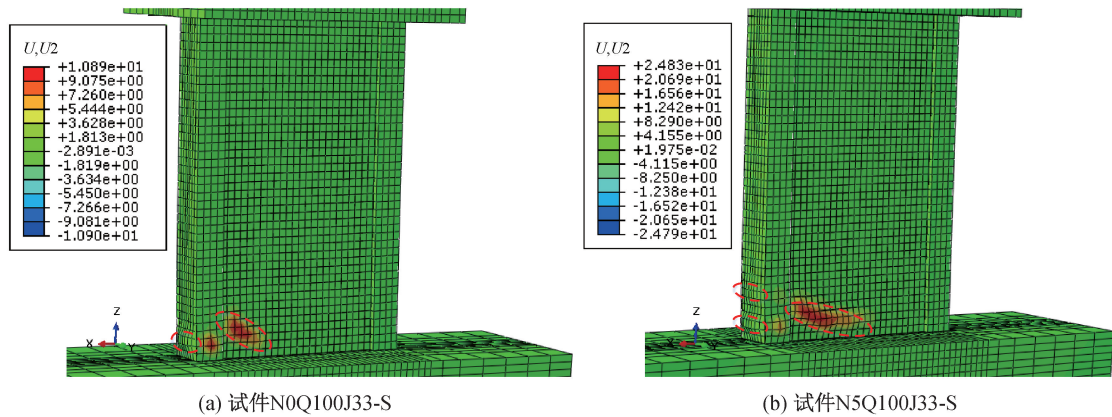


图 12 轴压比对钢板屈曲形态的影响

Fig. 12 Influence of axial compression ratio on buckling mode of steel plate

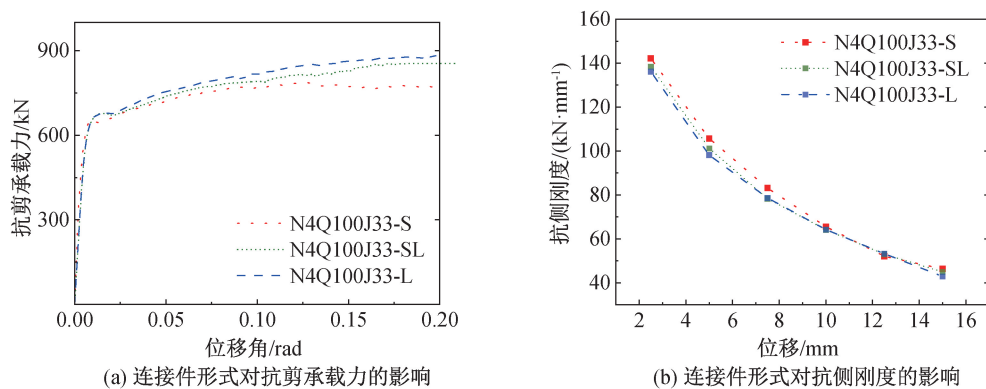


图 13 连接件形式对抗剪性能的影响

Fig. 13 Influence of connector form on shear performance

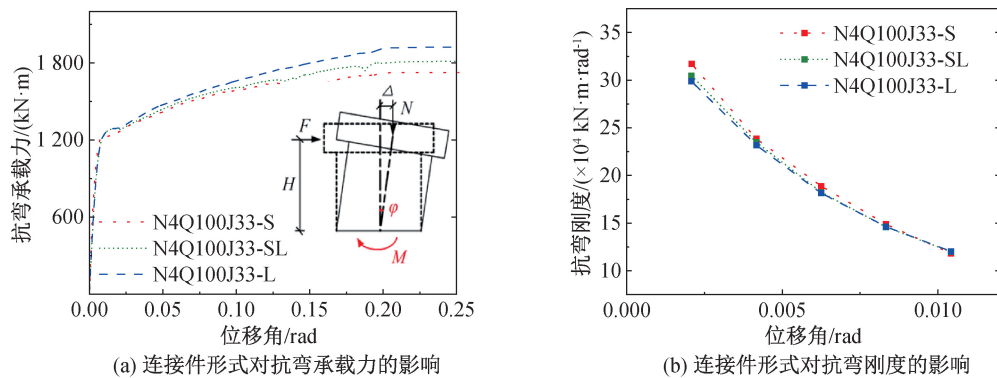


图 14 连接件形式对抗弯性能的影响

Fig. 14 Influence of connector form on bending resistance

RCFDSPCSW 的承载力和刚度主要由内填混凝土贡献,同时在栓钉和约束拉杆均锚固良好的情况下,各试件早期钢板和内填混凝土共同工作性能均较好,故连接件形式对其早期性能的影响较小。

3 结论

1) 初始抗侧刚度随再生粗骨料取代率增大而减小。当再生粗骨料取代率为 0%~50% 时,试件抗弯承载力、抗剪承载力随其增大而减小;再生粗骨料取代率为 50%~100% 时,对试件承载力几乎没有影响。

2) 对于剪跨比为 1.5 的再生混凝土(再生粗骨料取代率为 100%)剪力墙试件,抗剪承载力随距厚比的增大而下降。当距厚比过大(距厚比=50)时,试件墙面钢板屈曲形态由压曲波形转变为剪切波形,破坏形态由压弯破坏转变为弯剪破坏;此外,由于距厚比过大以及再生混凝土破坏具有更显著的脆性,试件在进入屈服阶段后,会出现抗剪承载力小幅下降的现象,故对于再生混凝土试件,距厚比不宜过大。

3) 当轴压比为 0~0.5 时,试件承载力随轴压比增大而减小,且当轴压比增大至 0.5 时,承载力显著下降;初始刚度随轴压比增大而增大;随着轴压比增大,试件钢板屈曲范围要更大,屈曲角度更小,趋于水平。

4) 连接件形式对试件的抗剪承载力和抗弯承载力影响主要体现在加载后期,在加载初期,钢板和内填混凝土共同工作性能均较好,连接件形式对试件的性能影响较小。

参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,樊健生,等. 双钢板-混凝土组合剪力墙研究新进展[J]. 建筑结构,2011,41(12):52-60.
[2] EOM T S, PARK H G, LEE C H, et al. Behavior of

Double Skin Composite Wall Subjected to In-Plane Cyclic Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10): 1239-1249.

- [3] 聂建国,卜凡民,樊健生. 低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(11):74-81.
[4] 聂建国,卜凡民,樊健生. 高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验研究[J]. 工程力学,2013,30(06):60-66+76.
[5] CHEN L, MAHMOUD H, TONG S M, et al. Seismic Behavior of Double Steel Plate-HSC Composite Walls[J]. Engineering Structures, 2015, 102: 1-12.
[6] EPACKACHI S, WHITTAKER A S, HUANG Y N. Analytical Modeling of Rectangular SC Wall Panels[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 105: 49-59.
[7] 杨梦. 双层钢板-内填再生混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[D]. 天津:天津大学,2018.
[8] 王一新,李会琴,蔡文娟,等. 无废城市背景下的建筑垃圾资源化再生产品使用意愿研究[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(12):86-90.
[9] 肖绪文,冯大阔,田伟. 我国建筑垃圾回收利用现状及建议[J]. 施工技术,2015,44(10):6-8.
[10] 刘清,韩风霞,于广明,等. 再生粗骨料自密实混凝土基本力学性能[J]. 建筑材料学报,2020,23(05):1053-1060.
[11] 朱有华. 双钢板-再生混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]. 南京:河海大学,2020.
[12] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学,2005.
[13] 郭小农,邱丽秋,罗永峰,等. 开洞双钢板组合剪力墙抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(06):69-76.
[14] 张向冈. 钢管再生混凝土构件及其框架的抗震性能研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
[15] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007(11):1445-1449.

(责任编辑 王利君)