

引用本文:谷 倩,任 靖,张延宾,等. 双面叠合剪力墙平面外受力性能[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):32-41.

GU Qian,REN Jing,ZHANG Yan-bin,et al. Out-of-plane Mechanical Behavior of Double-face Superposed Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2020,37(4):32-41.

DOI:10.19815/j.jace.2019.11004

双面叠合剪力墙平面外受力性能

谷 倩¹,任 靖¹,张延宾¹,赵端锋¹,谭 园²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070; 2. 美好建筑装配科技有限公司,湖北 武汉 430050)

摘要:为研究带水平接缝的装配整体式双面叠合剪力墙的平面外受力性能,完成了1片双面叠合剪力墙和1片现浇剪力墙足尺试件的平面外静力加载试验和有限元参数分析,对比分析了各试件的破坏形态、荷载-位移曲线、刚度退化特征和水平接缝处竖向连接钢筋的传力性能,提出了双面叠合剪力墙平面外受弯承载力和水平接缝截面受剪承载力的计算方法。结果表明:双面叠合剪力墙与现浇剪力墙试件的破坏形态基本相同,均为平面外弯曲破坏,与现浇剪力墙相比,双面叠合剪力墙试件的初始裂缝出现在底部水平接缝处,随后在墙面出现并逐级向上发展,表现出良好的延性破坏特征;双面叠合剪力墙试件具有较高的平面外受弯承载力和变形能力,其初始刚度、极限承载力、平面外位移延性系数均大于现浇剪力墙试件;双面叠合剪力墙试件的有限元计算结果与试验结果吻合良好;随着轴压比增加,叠合剪力墙平面外承载力明显增加,但延性明显降低;高厚比越小,叠合剪力墙平面外承载力越高,而对延性则影响不大;提出的受弯承载力计算结果与试验结果吻合较好,可用于指导工程实践。

关键词:双面叠合剪力墙;水平接缝;平面外受力性能;承载力计算

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)04-0032-10

Out-of-plane Mechanical Behavior of Double-face Superposed Shear Wall

GU Qian¹, REN Jing¹, ZHANG Yan-bin¹, ZHAO Duan-feng¹, TAN Yuan²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. Myhome Prefabricated Building and Technological Co., Ltd., Wuhan 430050, Hubei, China)

Abstract: In order to study the out-of-plane mechanical behavior of assembly double-face superposed shear wall with horizontal joint, the out-of-plane static loading test and finite element parameter analysis of one full-scale specimen of double-face superposed shear wall and one cast-in-place shear wall were completed. The failure mode, load-displacement curve, stiffness degradation characteristics and the force transfer performance of the vertical connection reinforcement at the horizontal joint were compared and analyzed. The out-of-plane bending capacity and the shear bearing capacity of the horizontal joint section of the double-face superposed shear wall were proposed. The results show that the failure modes of the double-face shear wall and cast-in-situ shear wall are basically the same, both of them are out-of-plane bending failure. Compared with the cast-in-situ shear wall, the initial crack of the double-face

收稿日期:2019-11-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0305101);武汉市城建局科技计划项目(201922)

作者简介:谷 倩(1972-),女,山东巨野人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:guqian@whut.edu.cn。

superposed shear wall specimen appears at the bottom horizontal joint, and then the crack appears on the wall surface and develops progressively upward, showing good ductile failure characteristics. The double-face superposed shear wall specimen has higher out-of-plane bending capacity and deformation capacity, and their initial stiffness, ultimate bearing capacity and out-of-plane displacement ductility coefficient are all larger than those of cast-in-situ shear wall specimen. The simulation results of finite element calculation of double-face superposed shear wall specimen are in good agreement with the experimental results. With the increase of axial compression ratio, the out-of-plane bearing capacity of the double-face superposed shear wall increases significantly, but the ductility decreases obviously. The smaller the height to thickness ratio, the higher the out-of-plane bearing capacity of the double-face superposed shear wall, but it has little effect on ductility. The calculated results of flexural bearing capacity formula proposed are in good agreement with the test results, which can be used to guide engineering practice.

Key words: double-face superposed shear wall; horizontal joint; out-of-plane mechanical behavior; calculation of bearing capacity

0 引 言

预制装配式混凝土结构作为一种适应工业化生产模式的建筑结构形式,在中国受到越来越多的关注和重视^[1-2]。本文研究的半预制半后浇式双面叠合剪力墙是由内、外叶预制钢筋混凝土板通过构造三角钢筋桁架连接成带中间空腔的墙板构件,在现场装配施工时通过后浇混凝土填充芯层空腔而形成的一种新型叠层式混凝土剪力墙(图 1),可用于装配式混凝土多层、高层住宅建筑。

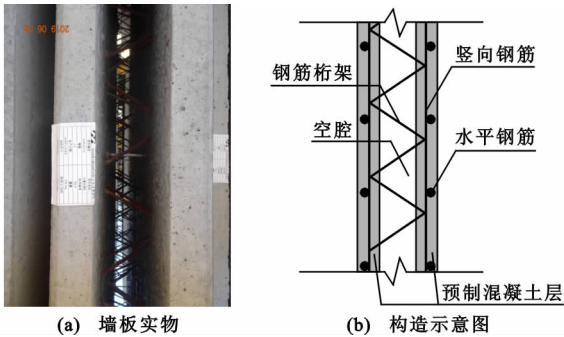


图 1 双面叠合剪力墙

Fig. 1 Double-face Superposed Shear Wall

与现浇剪力墙相比,双面叠合剪力墙结构工业化程度高、施工速度快、使用模板少,与实心剪力墙相比,其整体性能好、安装精度和难度低,是一种适合中国国情的半装配式结构体系。近年来,国内外学者对叠合剪力墙的研究主要集中在采用不同的水平接缝连接构造^[3-4]、竖向拼缝连接构造^[5-6]和不同边缘构件形式^[7-8]的单片墙体抗震性能等,如蒋庆等^[3]完成了双排竖向插筋连接的双面叠合剪力墙拟

静力试验,研究表明双面叠合剪力墙的破坏过程、刚度和耗能能力与现浇剪力墙相似,承载力略低于现浇剪力墙;Aldemir 等^[5]的研究表明预制叠合墙板采用正确的竖向拼缝连接构造可以安全应用于抗震设防地区;王滋军等^[7]通过不同边缘构件的叠合剪力墙拟静力抗震试验,得出了现浇约束边缘构件优于部分预约束边缘构件的结论。然而,目前国内关于双面叠合剪力墙平面外受力性能的研究尚不多见,Amran 等^[9]对采用钢筋桁架连接的预制混凝土泡沫夹芯墙板进行了抗弯性能试验和有限元模拟,研究表明钢筋桁架能够保持墙板进入塑性阶段后的整体性能。种迅等^[10]进行了嵌入式基础的双面叠合墙平面外静力加载试验,研究表明双面叠合剪力墙在平面外受力时预制墙板和芯层后浇混凝土整体工作性能好,未发生明显滑移。薛伟辰等^[11]对边缘构件区的双面叠合剪力墙进行平面外低周反复荷载试验,研究表明双面叠合剪力墙平面外极限承载力比现浇剪力墙低 10.7%,平面外延性系数大于现浇剪力墙。鉴于目前有关双面叠合剪力墙平面外受力性能的研究尚不够充分,本文依据《装配式混凝土建筑技术标准》^[12]设计了 1 片带水平接缝的装配整体式双面叠合剪力墙足尺试件和 1 片现浇剪力墙足尺试件,进行了平面外极限承载力试验研究和有限元分析,并提出其受弯和受剪承载力计算方法,为双面叠合剪力墙设计及工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了 1 片现浇剪力墙试件 RCW 和 1 片

双面叠合剪力墙试件 DPCW,各试件由墙板、地梁和加载梁三部分组成,其尺寸及配筋见图 2。各试件墙板高度、宽度、厚度分别为 2 700,1 800,200 mm,试件两端为 400 mm×400 mm 的边缘构件,其中试件 DPCW 两侧预制层厚度为 50 mm,芯层后浇混凝土层厚度为 100 mm,DPCW 的竖向钢筋搭接长度为 $1.2l_{aE}$ (l_{aE} 为抗震设计时纵向受拉钢筋的最小锚固长度),钢筋桁架的间距为 400 mm。

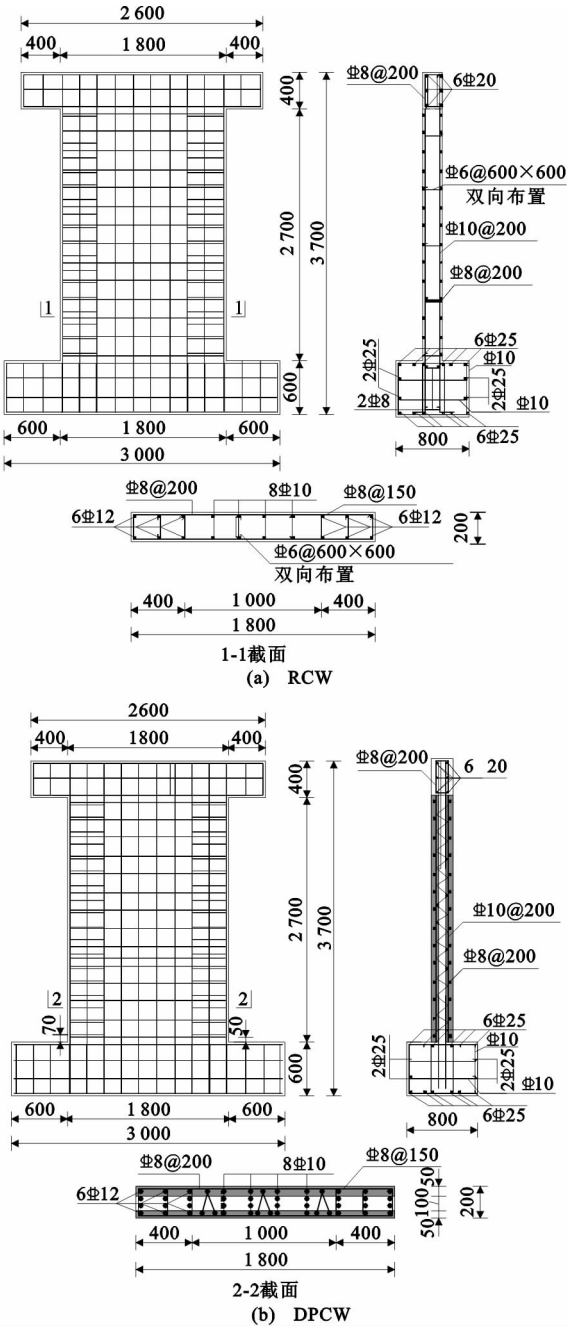


图 2 剪力墙试件设计图(单位:mm)

Fig. 2 Design Drawing of Shear Wall Specimen (Unit:mm)

实测现浇剪力墙、叠合剪力墙预制层、叠合剪力墙后浇层的混凝土标准立方体^[13]抗压强度平均值

分别为 60.1,60.7,57.4 MPa。钢筋采用 HRB400 级钢筋,实测力学性能^[14]见表 1。

表 1 钢筋力学性能

Tab. 1 Mechanical Performance of Reinforcement			
钢筋直径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ 10 ⁵ MPa
6	407	602	2.02
8	436	614	2.03
10	453	635	2.01
12	429	596	2.07

1.2 加载装置和加载制度

试验采用 1 000 kN 水平作动器和分配梁实现墙顶水平均布荷载加载,其加载装置见图 3。考虑加载过程中若施加竖向轴压,当墙体顶部平面外发生较大位移时存在一定的试验安全隐患,且轴压比为 0、墙体顶部为自由端时是叠合剪力墙试件底部水平接缝截面平面外受力最不利状态,鉴于此,本次试验暂未在墙体顶部施加竖向压力。

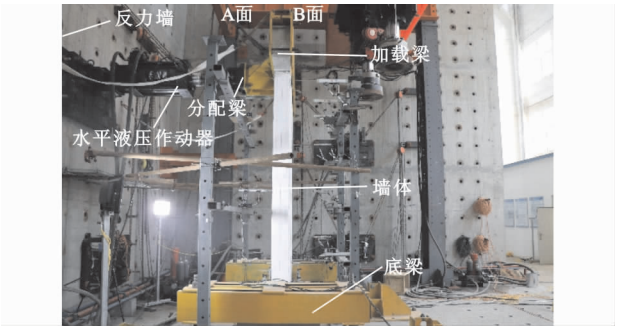


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test Loading Setup

加载制度根据《混凝土结构试验方法标准》^[15]确定,在钢筋测点达到屈服应变之前采用荷载控制,荷载等级步长为 3 kN,钢筋屈服后采取位移控制加载,位移步长取屈服位移的一半,加载直至承载力下降到最大承载力的 85%或弯曲挠度达到试件墙体高度的 1/25 时,停止试验。

1.3 测点布置

试件的位移测点布置如图 4(a)所示,各试件分别布置了 7 个位移计,编号为 H1~H7,H1 距墙底 2 900 mm,用于测量墙顶水平位移,H2~H5 测量试件不同高度处的水平位移,H6 和 H7 分别测量墙体与地梁、地梁与地面的相对滑移。试件钢筋应变测点 1a~8a,1b~8b 如图 4(b)~4(d)所示,双面叠合剪力墙在墙板竖向钢筋和地梁预埋插筋上布置应变片,位置分别在搭接区外 20 mm 和地梁上方 30 mm,试件 RCW 在同等高度处竖向钢筋上布置应变片。

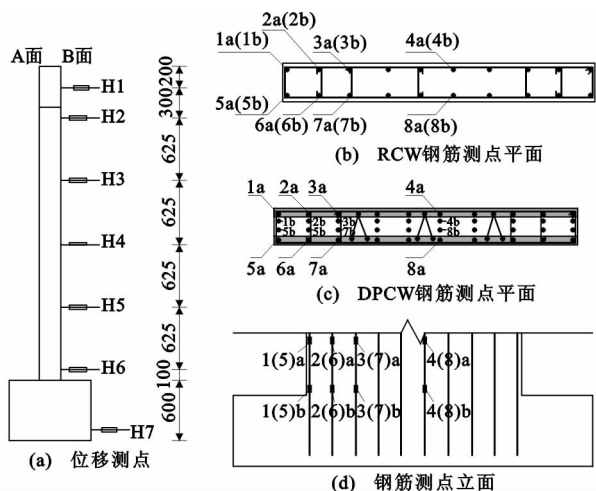


图 4 测点布置 (单位: mm)

Fig. 4 Measuring Point Layout (Unit: mm)

2 试验现象

对于试件 RCW,当加载荷载较小时,试件处于弹性阶段,表面无可见裂缝出现。当加载至 18 kN 时,试件受拉侧 250,450 mm 墙高处出现 2 条水平贯通弯曲初始裂缝,裂缝由试件正面延伸至侧面,此后开始进入弹塑性工作阶段。随着荷载增大,墙体 A 面有新裂缝不断出现,新裂缝大致分布在墙高 250,450,650,850 mm 处,同时原有裂缝宽度持续增大,并向墙体中部和两侧发展。当加载至 26 kN、水平位移为 52.5 mm 时,边缘构件出现竖向钢筋屈服,判断试件已屈服。随着位移增大,墙体新裂缝出现较少,主要以已有裂缝发展为主。当水平位移增加至 155.0 mm 时,墙体侧面一些水平裂缝斜向发展成弯剪斜裂缝,斜裂缝基本上为 45°走向。当水平位移增加至 228.0 mm 时,墙片与地梁连接处受压边缘混凝土被压碎,试件承载力也有所下降,试验结束。

对于试件 DPCW,当加载至 9 kN 时,在墙片与地梁水平接缝处出现长度约 20 mm 的微小初始裂缝。随着荷载的增加,初始裂缝逐渐向中和轴方向延伸。加载至 26 kN、水平位移为 21.8 mm 时,水平接缝处形成水平通缝,裂缝最大宽度约为 0.4 mm,同时,边缘构件后浇层受拉侧竖向连接钢筋屈服,判断试件已屈服。当水平位移为 32.0 mm 时,试件在受拉侧预制墙板 250 mm 高处出现第 1 条墙面开裂的水平贯通弯曲裂缝。随着位移继续增大,墙面 400,580,850 mm 高处陆续出现新裂缝并向墙体两侧发展。当水平位移为 240.0 mm 时,受拉区预制墙板与地梁顶面脱离,出现明显缝隙,墙体底部

受压区混凝土被压溃剥落,试件承载力下降,试验结束。试验结束后,在靠近地梁的墙体侧边新旧混凝土叠合面处发现宽度很小且不连续贯通的竖向裂缝,从外观上看新旧混凝土未发生明显相对滑移,表明预制墙板和芯层后浇混凝土层能够很好地协同工作。

图 5 为极限破坏时各试件裂缝分布形态。由图 5 可知,各试件破坏形态基本相同,均表现为典型的弯曲破坏特征。试件 DPCW 的初始裂缝比试件 RCW 出现更早,分析认为:双面叠合剪力墙的水平接缝处浇筑成形后具有 2 个新旧混凝土结合面,且结合面之间无钢筋连接,其抗裂能力远低于现浇剪力墙相同部位。试件 DPCW 屈服后墙面裂缝开始逐渐发展,而试件 RCW 屈服后几乎无新裂缝产生,分析认为:双面叠合剪力墙抵抗外力作用的竖向连接钢筋在芯层后浇混凝土中,钢筋传力到预制板竖向钢筋后,才能观察到墙面的试验现象。试验后期试件 DPCW 受拉侧预制墙板与地梁顶面出现明显缝隙,而试件 RCW 没有出现这种现象,分析认为:双面叠合剪力墙受拉侧竖向连接钢筋距受拉侧预制墙板外表面距离比现浇剪力墙竖向钢筋距受拉侧外表面距离大,两者竖向受力钢筋屈服后相同竖向应变增长,双面叠合剪力墙受拉侧墙板外表面观测到的变形大。

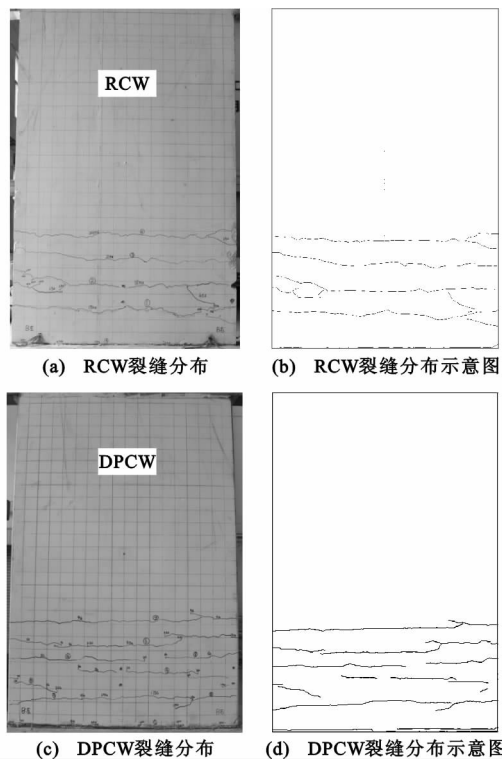


图 5 极限破坏时各试件裂缝分布形态

Fig. 5 Crack Distribution of Specimens at Ultimate Failure

3 试验结果及分析

3.1 荷载-位移曲线

图 6 为各试件的荷载-位移曲线。两试件曲线形态比较接近,均经历了线弹性、弹塑性、塑性和破坏 4 个阶段。与试件 RCW 相比,试件 DPCW 初始刚度大,承载力高,达到峰值荷载时位移大,分析认为:首先,试件 DPCW 中钢筋桁架的存在增大了其初始刚度,其次,试件 DPCW 的竖向连接钢筋均在后浇层中,随着平面外位移增大,试件沿墙厚方向受压区高度逐渐减小,试件 DPCW 受压侧竖向连接钢筋较试件 RCW 受压侧竖向钢筋更早进入受拉状态,增强了试件 DPCW 的平面外刚度和承载力。

表 2 为各试件主要阶段的荷载和位移。由于本次试验中未做到承载力下降至峰值荷载的 85%,极限点位移取弯曲挠度达到墙体高度 1/25 时的位移,并在受压侧混凝土被压溃时停止试验。由表 2 可知,试件 DPCW 水平接缝开裂荷载比试件 RCW 低

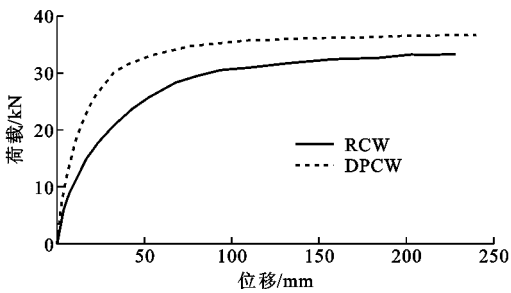


图 6 试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement Curves of Specimens

57%,这是由于水平接缝处新旧混凝土间抗拉强度低,在荷载较小时即发生开裂。与试件 RCW 相比,试件 DPCW 墙面开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载分别提高 72%,1%,10%,钢筋桁架提高了双面叠合剪力墙平面外抗弯承载力。试件 DPCW 的屈服位移小于试件 RCW,平面外位移延性系数为试件 RCW 的 2.4 倍,表明双面叠合剪力墙在平面外荷载作用下具有更好的延性。

表 2 试件特征荷载和位移

Tab. 2 Characteristic Loads and Displacements of Specimens

试件类型	水平接缝开裂		墙面开裂		屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_p/kN	峰值位移 Δ_p/mm	极限点位移 Δ_u/mm	极限点位移角 θ_u/rad	延性系数
	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm							
RCW	21.0	23.7	17.6	23.7	25.7	52.5	33.4	228.2	116.0	1/25	2.2
DPCW	9.1	3.7	30.3	32.7	26.0	21.8	36.7	239.8	116.0	1/25	5.3

3.2 刚度退化特征

图 7 为各试件的刚度退化曲线。由图 7 可知,加载初期,试件 DPCW 的初始刚度大于试件 RCW,刚度退化速率略大于试件 RCW。墙顶位移超过 50 mm 后,两试件的刚度退化曲线基本重合。分析认为:由于钢筋桁架的存在,使得双面叠合剪力墙的初始刚度大于现浇剪力墙,而双面叠合剪力墙是分层浇筑,整体性不如现浇剪力墙;随着位移的增加,双面叠合剪力墙后浇层与预制层混凝土结合面发生局部破坏,墙底与地梁交接面出现水平通缝,因而双面叠合剪力墙的刚度与现浇剪力墙的刚度相差不大。

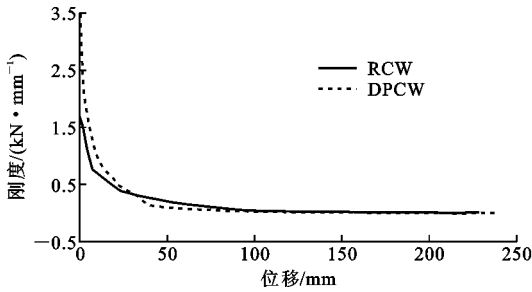


图 7 试件刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness Degradation Curves of Specimens

应变逐渐减小,随后逐渐由受压状态转变为受拉状态,至位移约为 50 mm 时,大部分竖向受力钢筋处于受拉状态。

3.3 钢筋应变

图 8 为各试件钢筋的应变-位移曲线。对于试件 RCW,随着平面外荷载的不断增大,受拉侧竖向钢筋拉应变增大,受压侧竖向钢筋压应变增大,到达极值后又逐渐减小,至位移为 160 mm 时,大部分竖向受力钢筋处于受拉状态。对于试件 DPCW,加载初期,受拉(压)侧竖向连接钢筋和预制墙板竖向受力钢筋拉(压)应变增大,试件屈服后,受压侧钢筋压

试件 DPCW 和试件 RCW 的应变-位移曲线总体趋势比较接近,但由于双面叠合剪力墙水平接缝处竖向连接钢筋搭接连接的传力机制与现浇剪力墙的单根钢筋传力机制有所差别,两试件局部区域钢筋的应变规律略有不同。首先,在加载初期,试件 DPCW 的受拉区竖向连接钢筋同试件 RCW 的受拉

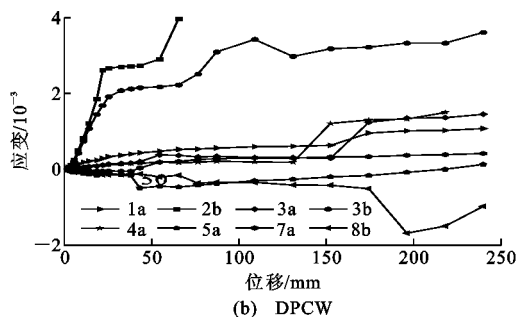
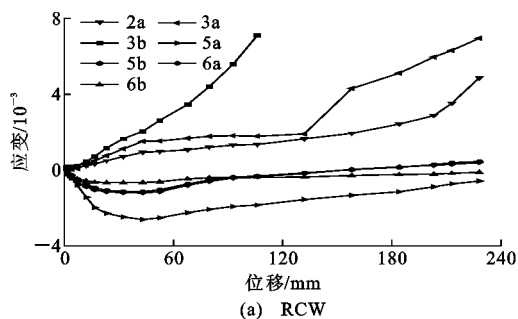


图 8 试件钢筋应变-位移曲线

Fig. 8 Reinforcement Strain-displacement Curves of Specimens

区竖向钢筋相比,拉应变增速更大。分析认为:在双面叠合剪力墙平面外受力时,受拉一侧预制墙板不参与结构受力,即计算高度比现浇剪力墙小 50 mm,混凝土受压区高度更小,相同加载速率下,试件 DPCW 受拉区竖向连接钢筋应力增长更快。其次,试件 DPCW 的受压区竖向连接钢筋同试件 RCW 的受压区竖向钢筋相比,更早从受压状态转变为受拉状态,峰值拉应变更大。分析认为:两试件的受压钢筋位置不同,随着受压区高度不断减小,双面叠合剪力墙受压区竖向连接钢筋位于离受压区中心较远的后浇层,其应变的变化较快。

3.4 平面外变形特征

图 9 为各试件屈服和试验终止时不同高度平面外变形曲线。由图 9 可知,试件屈服时,各试件的平面外位移曲线均有一定的弯曲线型变形曲线特征,表明墙板底部已开始形成塑性铰区。试验终止时,各试件侧向位移曲线均接近直线,表明试件底部塑性铰区已完全失效,各试件近似转动。

4 数值模拟

本文采用 ABAQUS 软件对双面叠合剪力墙试件的受力过程进行了数值模拟分析^[16]。混凝土和钢筋采用分离式建模,忽略钢筋与混凝土的黏结滑移,将钢筋用 Embedded 的方式嵌入混凝土中。图 10(a)为整体网格划分,图 10(b)为模型钢筋单元划

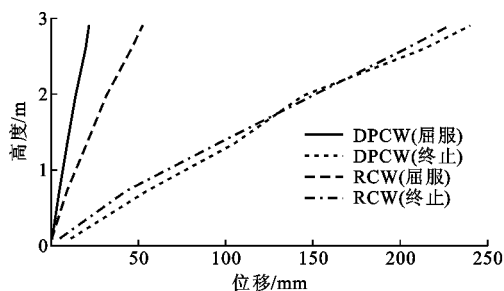


图 9 试件平面外变形曲线

Fig. 9 Out-of-plane Deformation Curves of Specimens

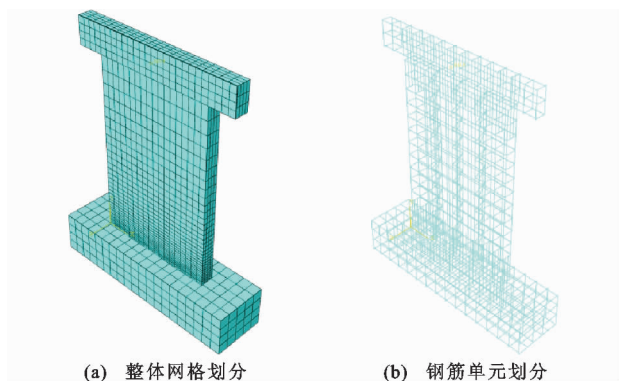


图 10 有限元模型单元划分

Fig. 10 Finite Element Model Division

分。模型在加载点加设刚垫板,以防止模拟中出现应力集中产生过大变形。剪力墙的地梁地面设置为固定端约束,加载方式为在加载点处进行位移加载。

4.1 单元选取和材料模型

有限元建模时,混凝土和刚垫板选用 C3D8R 实体单元,钢筋采用 T3D2 桁架单元。钢筋采用双折线弹塑性模型,其斜率取 $0.01E_s$ (E_s 为钢筋弹性模量),钢筋屈服强度、抗拉强度及弹性模量采用实测值,屈服准则为 Von Mises 准则,泊松比取 0.3。混凝土选取 ABAQUS 中的损伤塑性模型^[17],其力学性能取实测值。

4.2 接触单元设置

在地梁与双面叠合剪力墙的水平接缝接触部位,选用面-面接触模拟,其中法向设为“硬”接触^[18],切向设为“罚”摩擦接触,摩擦因数取 0.6^[19]。对于预制墙板与后浇层叠合面、墙体与加载梁接触面,均设置为绑定(tie)接触。

4.3 模拟结果分析

4.3.1 破坏形态

ABAQUS 中通常使用 SDEG 值(量纲为 1)来表征裂缝单元的损伤程度,当 SDEG 值等于 1 时表示单元完全破坏。图 11(a)为有限元分析得到的双面叠合剪力墙损伤分布云图。对于试件 DPCW,除

水平接缝附近混凝土竖向拉应变较大,墙板与地梁间接触面出现轻微脱离外,相同墙高不同墙宽位置处混凝土损伤大致相同,局部有斜向发展趋势,且大部分混凝土较大拉伸损伤分布在墙高 1/3 以下区域。这与试验结果得到的墙板与地梁间水平接缝处裂缝开展宽度最大,墙体裂缝多数为水平向弯曲裂缝和少数为斜向弯剪裂缝,最后一条发展裂缝出现在墙高 850 mm 左右处的结果完全吻合。图 11(b)为双面叠合剪力墙试件极限状态时的竖向钢筋应力分布云图,后浇层受拉侧和受压侧竖向连接钢筋均达到受拉屈服,与试验结果吻合良好。

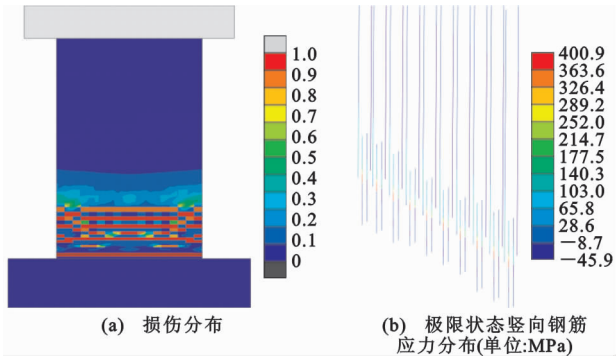


图 11 试件 DPCW 模拟云图

Fig. 11 Simulated Cloud Chart of DPCW

4.3.2 荷载-位移曲线

试件有限元荷载-位移曲线与试验曲线对比如图 12 所示。由图 12 可以看出,有限元模拟曲线与试验曲线在弹性阶段基本重合,模拟的初始刚度略大于试验结果。分析认为:试验初期加载时地梁发生了微小转动,降低了试件刚度。达到屈服位移之后,有限元模拟得到的平面外承载力与试验结果略有差异,达到峰值荷载时,模拟值 41.45 kN 比试验值 36.65 kN 高 13.1%,数值分析结果与试验数据吻合较好,表明建立的模型能够较好地模拟试件平面外的受力过程。

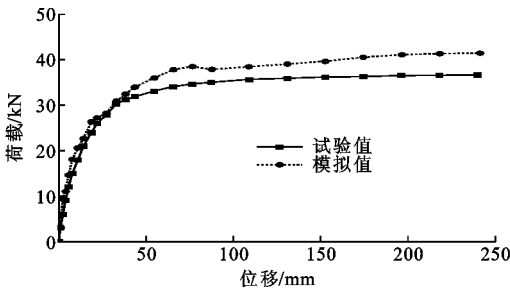


图 12 试件 DPCW 荷载-位移曲线模拟值与试验值对比

Fig. 12 Comparison Between Simulation Values and Test Values of Load-displacement Curve of DPCW

4.4 参数分析

4.4.1 轴压比

本次试验的双面叠合剪力墙试件边缘构件采用叠合暗柱,参照文献[20]规定的二、三级剪力墙可不设约束边缘构件的轴压比限值为 0.3,本文建立了轴压比分别为 0.1,0.2,0.3 的有限元模型 DPCW-0.1,DPCW-0.2,DPCW-0.3,以轴压比为 0 的试件 DPCW 为对比分析模型。图 13 为不同轴压比双面叠合剪力墙模型的平面外荷载-位移曲线。由图 13

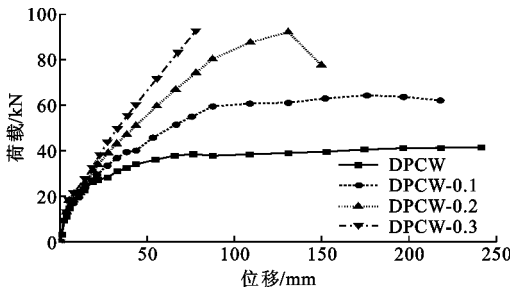


图 13 不同轴压比双面叠合剪力墙荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement Curves of Double-face Superposed Shear Wall with Different Axial Compression Ratios

可以看出,随着轴压比增加,双面叠合剪力墙试件的抗弯承载力明显提高,但延性降低。

4.4.2 高厚比

本次试验中,水平荷载作用点距墙底高 2 900 mm,墙厚 200 mm,剪力墙试件的设计高厚比均为 14.5。通常预制墙板高度由建筑层高决定,本文按文献[21]有关剪力墙截面厚度的设计规定,建立了墙厚分别为 160,250,300 mm 的叠合剪力墙有限元模型 DPCW18.1,DPCW11.6,DPCW9.7,即各模型高厚比分别为 18.1,11.6,9.7,试件 DPCW 为对比分析模型。图 14 为不同高厚比双面叠合剪力墙模型的平面外荷载-位移曲线。由图 14 可以看出,高厚比对双面叠合剪力墙的延性影响不大,对承载力影响较大。高厚比越小,剪力墙模型的屈服荷载和峰值荷载越大,而对应的屈服位移则大致相同。

5 双面叠合剪力墙极限承载力分析

双面叠合剪力墙试件的平面内抗震试验结果[21]表明,其抗震性能和破坏形态与全现浇剪力墙试件较为接近,且极限破坏时其内、外叶预制板与芯层后浇混凝土界面亦未发生剪切滑移破坏现象,从而说明这种叠层式墙板的层间整体工作性能良好。从本文的试验结果也可以看出,在平面外受力状态

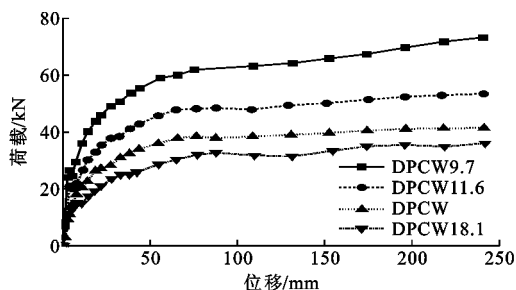


图14 不同高厚比双面叠合剪力墙荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement Curves of Double-face Superposed Shear Walls with Different High-thickness Ratios

下,双面叠合剪力墙试件同样表现出良好的预制-后浇混凝土层间整体工作性能,因此,基于此前提,本文提出了双面叠合剪力墙平面外受弯承载力和水平接缝截面平面外受剪承载力的计算方法。

5.1 平面外受弯承载力

试验破坏形态和钢筋应变结果表明,对于承受平面外水平荷载的双面叠合剪力墙,从开始加载到正截面完全破坏,水平接缝截面的受力分为3个阶段,如图15所示,其中 $\sigma_s, \sigma'_s, \sigma'_{s1}$ 分别为受拉一侧竖向连接钢筋、受压一侧竖向连接钢筋和受压一侧预制墙板竖向分布钢筋的应力, A_s, A'_s, A'_{s1} 分别为相应位置处的受力钢筋面积之和, h_2 为受拉侧竖向连接钢筋与受压侧竖向连接钢筋沿墙厚方向的间距, h_3 为受压侧预制板厚度, c' 为受压侧竖向连接钢筋距受压侧预制板内侧距离, f_y 为竖向连接钢筋的抗拉强度设计值, M 为截面受弯承载力。第一阶段为截面开裂前[图15(a)],荷载很小,全截面受力且截面的应力分布为直线,四排竖向钢筋的应力均较小;第二阶段为截面开裂到受拉区竖向连接钢筋屈服[图15(b)],随着受拉一侧预制板底座浆层开裂,受拉一侧竖向连接钢筋承担主要拉应力,随着荷载增加,逐渐达到屈服强度,而受压一侧竖向连接钢筋所受压应力逐渐降低,直至为0,即成为截面的中和轴位置;第三阶段为破坏阶段[图15(c)],受拉一侧竖向连接钢筋屈服后,塑性变形急速发展,受压区面积快速减小,中和轴位置继续向受压区移动,受压一侧竖向连接钢筋由第二阶段的压应力转变为拉应力,同时受压区混凝土压应力迅速增大,直到受压区边缘混凝土达到极限压应变而被压碎,即达到受弯承载力极限状态。本文在第三阶段的基础上推导了双面叠合剪力墙平面外受弯承载力的计算公式。

假定水平接缝截面受压区高度为 x ,按平截面假定和水平接缝截面的静力平衡条件,则有

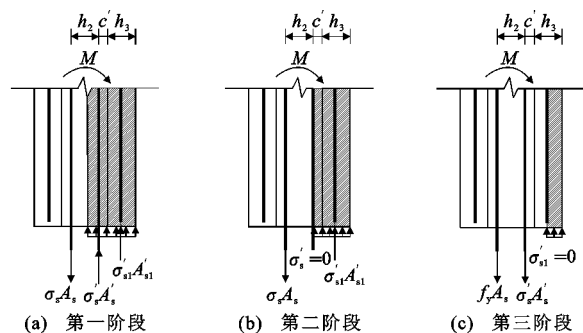


图15 不同阶段双面叠合剪力墙水平接缝截面应力分布

Fig. 15 Stress Distribution of Horizontal Joint of Double-face Superposed Concrete Shear Wall in Different Stages

$$\epsilon'_s = \frac{\epsilon_s(c' + h_3 - x)}{h_2 + c' + h_3 - x} \quad (1)$$

$$\sigma'_s = E'_s \epsilon'_s \quad (2)$$

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s + \sigma'_s A'_s \quad (3)$$

$$M \leq f_y (h_2 + c' + h_3 - \frac{x}{2}) + \sigma'_s (c' + h_3 - \frac{x}{2}) \quad (4)$$

式中: α_1 为受压区混凝土等效矩形应力图中应力与混凝土轴心抗压强度设计值的比值; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; b 为双面叠合剪力墙截面计算宽度; E'_s 为受压侧竖向连接钢筋的弹性模量; ϵ_s, ϵ'_s 分别为受拉侧、受压侧竖向连接钢筋应变。

计算可得 $M = 68.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$,则受弯屈服荷载 $F = 23.7 \text{ kN}$,比试验值 26.0 kN 低 8.8% ,计算结果与试验结果吻合较好,且有一定的安全储备,该计算公式可用于工程实践。

5.2 水平接缝截面平面外受剪承载力

双面叠合剪力墙试件根据剪切-摩擦理论计算的水平接缝抗剪承载力由界面黏结力、界面钢筋的销栓力和截面摩擦力组成,与加载方向无关,因此双面叠合剪力墙水平接缝截面的平面内受剪承载力计算原则同样适用于接缝截面的平面外受剪承载力计算,参照《装配整体式混凝土叠合剪力墙结构技术规程》^[22],双面叠合剪力墙水平接缝处的平面外受剪承载力应符合下列规定

$$V_{wj} \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.6 f_y A_s + 0.8 N) \quad (5)$$

式中: V_{wj} 为双面叠合剪力墙水平接缝处剪力设计值; N 为垂直于水平接缝的轴向力设计值,压力为正,拉力为负; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数,取 0.85 。

由式(5)可知,轴向压力对水平接缝截面抗剪承载力有利,随着轴压比增大,叠合剪力墙试件水平接缝截面抗剪承载力提高,与有限元模拟结果吻合。

6 结 语

(1) 双面叠合剪力墙试件在平面外荷载作用下的裂缝分布形态与现浇剪力墙试件基本相同, 均为受拉一侧墙面出现若干水平向弯曲裂缝, 极限破坏时受压一侧墙面底部出现局部压碎现象。

(2) 叠合剪力墙试件在水平接缝处的竖向连接钢筋达到屈服后墙身开始出现水平向弯曲裂缝, 随后受拉一侧预制墙板中的竖向钢筋应力逐渐增大, 表明叠合剪力墙水平接缝附近区域形成了转动能力良好的塑性铰, 位于芯层后浇混凝土中的竖向连接钢筋发挥了良好的传力作用。

(3) 双面叠合剪力墙在平面外荷载作用下具有较高的承载力和变形能力, 其屈服荷载与现浇剪力墙十分接近, 峰值荷载较现浇剪力墙提高约 10%, 平面外位移延性系数是现浇剪力墙的 2.4 倍。

(4) 与现浇剪力墙相比, 双面叠合剪力墙的初始刚度较大, 钢筋桁架对其平面外刚度贡献明显; 加载初期, 双面叠合剪力墙的刚度退化速率较快, 顶点位移超过 50 mm 后, 其刚度退化曲线与现浇剪力墙基本重合。

(5) 双面叠合剪力墙试件有限元分析得到的荷载-位移曲线与试验曲线吻合较好, 破坏形态与试验结果基本一致, 墙肢轴压比、高厚比等参数分析结果有效补充了试验结果。

(6) 本文推导了双面叠合剪力墙平面外受弯承载力计算公式, 其计算值与试验值吻合良好, 并建议了水平接缝截面的受剪承载力计算方法, 可用于指导工程实践。

参考文献:

References:

- [1] 赵作周, 周 剑, 侯建群, 等. 装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述[J]. 建筑结构, 2015, 45(12): 40-47, 39.
ZHAO Zuo-zhou, ZHOU Jian, HOU Jian-qun, et al. Review of Studies on Shear Resisting Mechanisms and Calculating Formulas of Shear Resisting Capacity of Horizontal Joints in Fabricated Reinforced Concrete Shear Wall Structures[J]. Building Structure, 2015, 45(12): 40-47, 39.
- [2] 纪 强, 周苗苗. 浅谈装配式混凝土结构体系的发展方向[J]. 住宅产业, 2016(8): 22-24.
JI Qiang, ZHOU Miao-miao. Development of Fabricated Concrete Structure System[J]. Housing Industry,

- 2016(8): 22-24.
- [3] 蒋 庆, 叶献国, 种 迅. 叠合板式剪力墙的力学计算模型[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 8-12, 141.
JIANG Qing, YE Xian-guo, CHONG Xun. Calculation Model for Superimposed Slab Shear Walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 8-12, 141.
- [4] 张文莹, 杨联萍, 余少乐, 等. 双面叠合剪力墙关键问题研究: 水平连接节点抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 28-41.
ZHANG Wen-ying, YANG Lian-ping, YU Shao-le, et al. Research on Key Issues of the Double-superimposed Shear Wall: Experimental Study on Seismic Performance of Horizontal Connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 28-41.
- [5] ALDEMIR A, BINICI B, CANBAY E. Cyclic Testing of Reinforced Concrete Double Walls[J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(2): 395-406.
- [6] 沈小璞, 马 巍, 陈信堂, 等. 叠合混凝土墙板竖向拼缝连接抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(9): 1366-1371.
SHEN Xiao-pu, MA Wei, CHEN Xin-tang, et al. Experimental Study of the Seismic Performance of the Vertical Joint Seam of Superimposed Concrete Wall Panels[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2010, 33(9): 1366-1371.
- [7] 王滋军, 李向民, 王 宇, 等. 带有约束边缘构件的预制叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(8): 2759-2767.
WANG Zi-jun, LI Xiang-min, WANG Yu, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Composite Shear Wall with Confined Boundary Member[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(8): 2759-2767.
- [8] 侯和涛, 颜雪雪, 程积润, 等. 不同轴压比钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙的抗震性能[J]. 土木与环境工程学报: 中英文, 2019, 41(5): 73-81.
HOU He-tao, YAN Xue-xue, CHENG Ji-run, et al. Seismic Behavior of Shear Walls with Concrete Filled Tube Under Different Axial Compression Ratios[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(5): 73-81.
- [9] AMRAN Y H M, RASHZD R S M, HEJAZI F, et al. Response of Precast Foamed Concrete Sandwich Panels to Flexural Loading[J]. Journal of Building Engineering, 2016, 7: 143-158.
- [10] 种 迅, 黄俊旗, 蒋 庆, 等. 嵌入式基础叠合墙板平面外受弯性能试验研究与数值模拟分析[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 131-137.

- CHONG Xun, HUANG Jun-qi, JIANG Qing, et al. Experimental and Numerical Study on Out-of-plane Bending Behavior of a Superimposed Wall with Embedded Foundation[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(5):131-137.
- [11] 薛伟辰,李亚,蔡磊,等. 双面叠合混凝土剪力墙平面内和平面外抗震性能研究[J]. 工程力学, 2018, 35(5):47-53,142.
- XUE Wei-chen, LI Ya, CAI Lei, et al. In-plane and Out-of-plane Mechanical Behavior of Double faced Superposed Concrete Shear Walls[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5):47-53,142.
- [12] GB/T 51231—2016, 装配式混凝土建筑技术标准[S].
- GB/T 51231—2016, Technical Standard for Assembled Buildings with Concrete Structure[S].
- [13] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- GB/T 50081—2002, Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete[S].
- [14] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [15] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
- GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [16] 陈思宇,朱杰江. 装配式混凝土剪力墙平面外性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(9):76-78,83.
- CHEN Si-yu, ZHU Jie-jiang. Study on Out-of-plane Performance of Prefabricated Concrete Shear Wall [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(9): 76-78,83.
- [17] 聂建国,王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4):59-67,82.
- NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Comparison Study of Constitutive Model of Concrete in ABAQUS for Static Analysis of Structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4):59-67,82.
- [18] 赵作周,周剑,侯建群,等. 上下层插筋连接预制混凝土空心模剪力墙有限元分析[J]. 工程力学, 2017, 34(1):117-129.
- ZHAO Zuo-zhou, ZHOU Jian, HOU Jian-qun, et al. Finite Element Analysis of Shear Walls with Precast Concrete Hollow Moulds and Splice Rebar Connection Between the Upper and Lower floors[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1):117-129.
- [19] ACI 318-11, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S].
- [20] JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
- JGJ 3—2010, Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building[S].
- [21] GU Q, DONG G, KE Y, et al. Seismic Behavior of Precast Double-face Superposed Shear Walls with Horizontal Joints and Lap Spliced Vertical Reinforcement[J/OL]. Structural Concrete, 2020: 1-16 [2020-01-29]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/suco.201900019>. DOI:10.1002/suco.201900019.
- [22] DB42/T 1483—2018, 装配整体式混凝土叠合剪力墙结构技术规程[S].
- DB42/T 1483—2018, Technical Specification for Monolithic Precast Superposed Concrete Shear Wall Structures[S].