

带暗支撑预制叠合剪力墙抗震性能试验研究^{*}

汪梦甫[†], 邹同球

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了从构造上进一步优化预制叠合剪力墙的连接,分别设计了1片普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙和1片带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙,进行了拟静力试验研究,分析了试件在水平低周往复荷载作用下的承载能力、滞回曲线、骨架曲线、位移延性、刚度退化以及耗能性能,对比研究了试件的裂缝发展情况以及破坏形态.研究表明:塑性铰区采用局部高阻尼混凝土和内置钢板暗支撑的预制叠合剪力墙均能表现出较好的抗震性能,连接构造合理,且钢板暗支撑的引入在提高预制叠合剪力墙承载能力的同时也提高其延性.

关键词:叠合剪力墙;局部高阻尼混凝土;暗支撑;连接构造;拟静力试验;抗震性能

中图分类号:TU375; P315.9

文献标志码:A

Experimental Study on Seismic Behavior of Precast Composite Shear Wall with Concealed Bracing

WANG Mengfu[†], ZOU Tongqiu

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to optimize the connection of precast composite shear wall, two local high damping concrete precast composite shear walls with or without concealed steel plate bracing were designed. Quasi-static tests of two specimens were carried out, and the bearing capacity, hysteretic curves, skeleton curves, displacement ductility, stiffness degradation, energy-dissipation performance, crack development and failure pattern were obtained, and compared with each other. The test results indicate that the test specimens exhibit great seismic structural behaviors, and the use of concealed steel plate bracing can improve the bearing capacity, deformation ability as well as its ductility of precast composite shear wall.

Key words: precast composite shear wall; local high damping concrete; concealed bracing; connectors; quasi-static test; seismic behavior

预制叠合剪力墙结构体系是一种集构件标准化设计、工厂化制作以及装配化施工于一体的新型建筑结构体系. 预制叠合剪力墙兴起于德国,并在欧洲

得到了广泛的应用,但在欧洲国家的使用中并不考虑抗震要求,而我国的地震活动频度高、强度大,且活动范围较广,大部分地区需要考虑抗震设防. 因

^{*} 收稿日期:2016-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978091,51278181,51578225), National Natural Science Foundation of China(50978091,51278181,51578225)

作者简介:汪梦甫(1965-),男,湖北通城人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: wangmengfu@126.com

此,在我国的大部分地区推广预制叠合剪力墙结构体系之前,必须对这种预制结构的抗震性能进行系统完善的研究。

近年来,我国的一些研究人员直接应用德国西伟德公司生产的预制墙板制作的叠合剪力墙试件^[1-2]或仿照德国技术自行制作的叠合剪力墙试件^[3],进行了拟静力试验。通过与现浇剪力墙试件的对比,以探讨不同边缘构造(暗柱、端柱)的叠合剪力墙及不同竖向拼缝连接方式(暗柱、水平钢筋、现浇)的叠合剪力墙^[2-3]的抗震性能,检验该类构件能否满足我国建筑结构抗震设计的要求。同时,一些研究人员应用 ANSYS 软件^[4-5]或 DIANA 软件^[6]对预制叠合剪力墙进行有限元数值模拟以优化其构造,或基于实验结果建立预制叠合剪力墙正截面、斜截面强度计算公式和正截面开裂荷载、墙板水平接缝受剪承载力计算公式^[7],以满足预制叠合剪力墙设计的需要。为了使预制叠合剪力墙能更广泛地应用于我国各地震区,国内的一些研究人员试图从构造上改进该种结构体系,以提高其抗震性能。肖全东和郭正兴^[8]主要对剪力墙边缘构造进行了改进,即:剪力墙边缘的竖向钢筋采用墙两侧预制板之间的现浇混凝土布置 U 形筋搭接连接,在边缘构件竖向钢筋搭接高度范围加设一连续(复合)螺旋箍筋。肖全东和郭正兴进行了 6 个该种叠合剪力墙的足尺试验。结果表明:改进后的叠合剪力墙的抗震性能指标与现浇剪力墙接近,极限变形能力与耗能能力略低于现浇剪力墙。针对叠合剪力墙在对空腔内现浇混凝土进行振捣作业时,预制墙片会出现裂纹、桁架钢筋从混凝土中拉脱甚至出现墙体偏位的不利情况,叶燕华等^[9]提出了预制墙板内空腔现浇自密实混凝土叠合剪力墙,并完成了 5 片预制普通混凝土墙板内现浇自密实混凝土叠合剪力墙试件的拟静力试验。结果表明:与预制墙板内现浇普通混凝土叠合剪力墙相比,预制墙板内现浇自密实混凝土叠合剪力墙破坏形态及裂缝分布基本相同,承载力、滞回曲线、耗能能力、刚度退化等指标接近,而延性则更好。为了加强预制叠合剪力墙的上下连接,王滋军、刘伟庆等^[10]发明了一种预制墙板下部左右角带缺口的新型预制叠合剪力墙,并进行了 4 片新型预制叠合剪力墙的试验研究。结果表明:与全现浇剪力墙相比,新型预制叠合剪力墙破坏模式与承载能力基本相同,但极限变形能力与耗能指标略低。这种新型预制叠合剪力墙的主要特点是克服了传统预制叠合剪力墙对截面削弱的缺点,而且方便施工,便于检查节点

钢筋的连接情况,同时还可方便地检查混凝土的浇筑质量,保证叠合墙体连接的可靠性。此外,在我国目前的工程应用中^[11],预制叠合剪力墙主要采用现浇密排边柱-预制叠合剪力墙。该种剪力墙体系应用于高层建筑时内填混凝土过厚导致剪力墙结构自重过大而受到限制,且剪力墙厚度超过 400 mm 后,若用双排配筋,将会在剪力墙中间形成大面积的素混凝土使截面的应力分布不均匀,若用多排配筋,则预制叠合剪力墙尚无满意的组成方案。

基于国内对预制叠合剪力墙研究与改进的现状,结合本文作者多年来应用高阻尼混凝土及暗支撑于剪力墙结构的研究结果^[12-13],为了提高预制叠合剪力墙承载力、减薄预制叠合剪力墙厚度、进一步改善预制叠合剪力墙竖向连接、提高预制叠合剪力墙延性,我们提出了一种新的带暗支撑叠合剪力墙^[14],即:采用下方左、右角设置缺口的混凝土墙肢,内置带抗剪钢筋条的 X 型钢斜撑,墙板内现浇自密实混凝土,在底部塑性铰区增加高阻尼材料。为了验证这种预制叠合剪力墙的合理性,特别设计了 2 片预制叠合剪力墙:1 片普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙,1 片内置焊接有抗剪钢筋条的钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙,进行了拟静力试验。试验研究了在水平低周往复荷载作用下的承载能力、滞回曲线、骨架曲线、位移延性、刚度退化以及耗能性能,为高阻尼混凝土和暗支撑在预制叠合剪力墙技术中的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

依据 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[15]以及 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[16],本试验设计了 2 片预制叠合剪力墙试件,墙体尺寸均为 1 450 mm×1 000 mm×160 mm,在墙片的两端设置 160 mm×200 mm 的暗柱,高宽比均为 1.45,且均在剪力墙底部的两端设置左右缺口,缺口尺寸 300 mm×300 mm,缺口处竖向和水平钢筋预留,待预制构件吊装就位并必要支模后在缺口高度范围内现浇 C30 等级高阻尼混凝土,其余预制和现浇混凝土均采用 C30 等级自流密实混凝土。

剪力墙构件的破坏一般集中在剪力墙底部的一定高度范围内,这个高度习惯上称作塑性铰区。因此,本次试验设计的试件缺口高度取塑性铰区长度。塑性铰区长度的确定方法有沈聚敏公式、钱稼茹公

式以及新西兰规范公式,本文根据沈聚敏公式 $L_p = (0.2 \sim 0.5) h_0 = (0.2 \sim 0.5) \times 1450 = 290 \sim 725$ mm,同时考虑节约高阻尼材料,取为 300 mm.普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙编号 HDCW1,

带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙编号 HDCBW1.试件的基本尺寸及配筋情况见表 1 和图 1.

表 1 试件基本参数
Tab.1 Parameters of specimens

试件编号	墙宽 L /mm	墙高 H /mm	墙厚 h /mm	高宽比	轴压比	备注
HDCW1	1 000	1 450	160	1.40	0.1	普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙
HDCBW1	1 000	1 450	160	1.40	0.1	带钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙

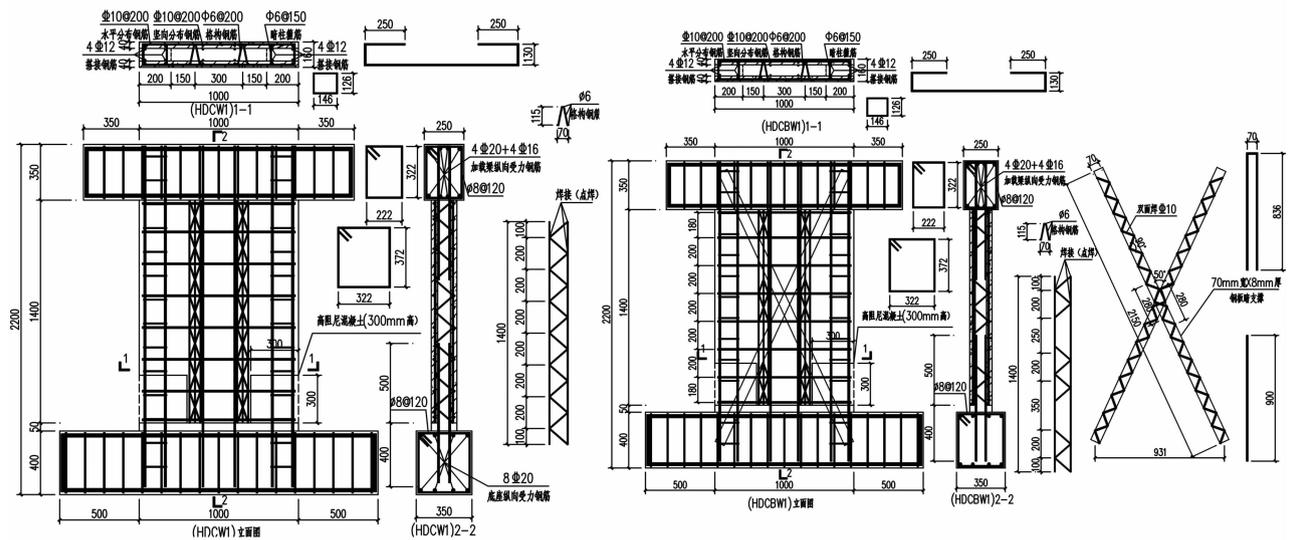


图 1 试件几何尺寸及配筋

Fig.1 Reinforcement details of specimens

试件制作时,绑扎好钢筋并支模定位后,先浇筑一侧 40 mm 厚钢筋混凝土预制墙片,7 d 后拆模翻转再浇筑另一侧 40 mm 厚预制墙片.两侧预制墙片均用 C30 自流密实混凝土浇筑,为了加强新浇混凝土与预制混凝土墙片的黏结,预制过程中,在预制墙片的内侧、墙片上下两端以及底座上与墙片对应的位置进行适当的拉毛处理.待两侧预制墙片均达到设计强度后方可吊装,吊装就位时,在墙体和底座间垫放 50 mm 高的小垫块,同时用斜向支撑临时固定墙体,预留 50 mm 的空隙作为座浆层,完成必要支模后与空腔一起浇筑高阻尼混凝土到超过缺口高度 50 mm,再用 C30 自流密实混凝土浇筑剩余墙体空腔.对于带钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙,绑扎格构钢筋时按照设计在钢板暗支撑通过处打断格构钢筋预留出通道,在预制墙片吊装好并固定后现场插入钢板暗支撑.为了保证钢板暗支

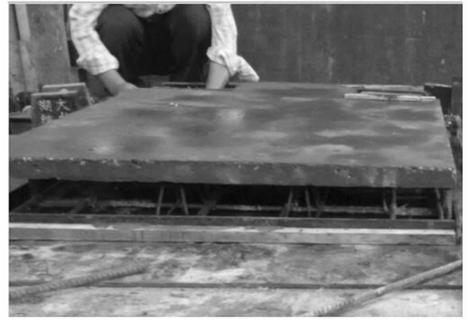
撑能够顺利插入并能与后浇混凝土共同工作,在钢板暗支撑的两侧焊接有抗剪钢筋条.试件制作现场如图 2 所示.

1.2 材料力学性能

根据文献[9],设计 C30 自流密实混凝土,配合比(质量比)为水:泥水:石子:砂:粉煤灰:减水剂=1:0.60:2.81:2.70:0.53:0.018.依据文献[17],本试验中 C30 的高阻尼混凝土,取配合比(质量比)为水泥:砂:碎石:水=1:1.77:2.61:0.49,且在混凝土中加入苯丙乳液和羟甲基苯乳液的共混液,其质量为水泥质量的 12%,同时加入体积分数 0.2%的聚丙烯纤维.钢筋除箍筋和格构钢筋采用 HPB300 外,其余均采用 HRB400;此外, HDCBW1 试件中的暗支撑钢板采用 Q235 钢.2 片预制叠合剪力墙中所用墙体钢筋、暗柱钢筋、格构钢筋以及箍筋的材料力学性能列于表 2.



(a) 浇筑一侧预制墙片



(b) 准备浇筑另一侧预制墙片

图 2 试件制作现场

Fig. 2 The specimen manufacturing site

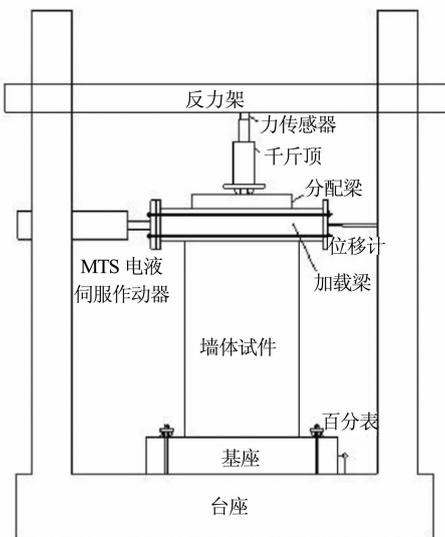
表 2 钢材的材料力学性能
Tab. 2 Material properties of steel

钢筋类别	钢筋位置	直径 d /mm	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /MPa	屈服应变 $\epsilon_y/\mu\epsilon$
HPB300	格构钢筋及暗柱箍筋	6	434.0	483.5	2.0×10^5	2170
HPB300	支座及加载梁箍筋	8	429.8	485.5	2.0×10^5	2149
HRB400	墙体分布钢筋	10	479.4	587.1	2.0×10^5	2397
HRB400	暗柱钢筋	12	467.7	589.4	2.0×10^5	2339

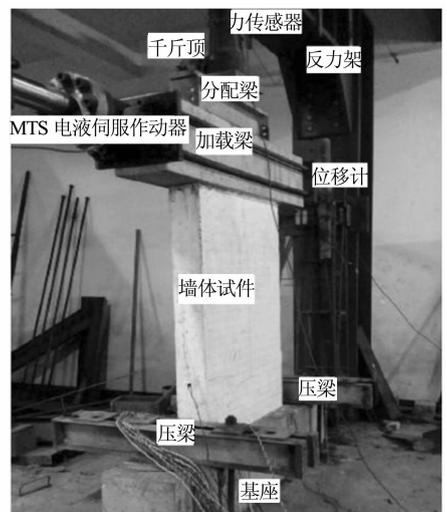
1.3 试验装置及加载制度

本次试验的加载装置示意和现场如图 3 所示。首先由分配梁上 1 个千斤顶施加竖向荷载 230 kN, 控制轴压比为 0.10, 并在试验过程中, 保持轴向压力恒定。然后, 在水平方向通过 MTS 电液伺服作动器逐级施加低周往复荷载。在试件开裂以前, 每级荷载增幅控制为 20 kN, 在接近预估开裂荷载时, 每级

荷载增幅降为 10 kN, 墙体屈服前, 每级荷载循环 1 次, 待墙体屈服后, 改为位移控制, 位移取为墙体屈服位移的整数倍, 且每级位移循环 3 次, 至荷载下降到峰值荷载的 85% 以下或试件发生其他破坏后恢复到零位移并停止试验^[18]。本文约定 MTS 电液伺服作动器推时为正, 拉时为负。



(a) 试验装置示意图



(b) 实验装置现场

图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup

1.4 量测内容与测点布置

由 MTS 电液伺服作动器端部的荷载及位移传

感器量测墙体的水平荷载和位移, 绘制墙体的荷载-位移曲线。同时在加载梁的另一端正中部布置位移

计量测端部位移对 MTS 电液伺服作动器端部传感器量测的试件位移进行校核. 在基座端部布置位移计以监测基座是否发生了滑移. 在混凝土与钢筋的适当位置粘贴应变片, 测量试验过程中的应变变化, 详细应变测点布置如图 4 所示. 其中带括号的编号表示在墙体另侧的相同位置. 应变数据采用 DH3816 静态应变测试系统采集.

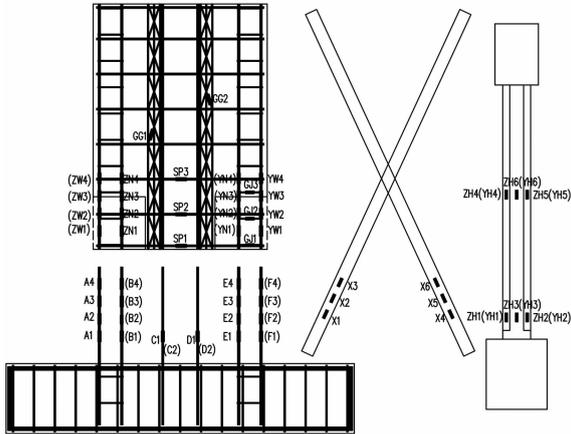


图 4 应变测点布置

Fig. 4 Monitoring point arrangement

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

表 3 列出了试件在试验各主要阶段的荷载、位移数据. 其中 F_y 和 Δ_y 分别表示屈服荷载和屈服位移, 而 F_{max} 和 Δ_{max} 则分别表示峰值荷载和相对应的峰值位移, F_u 和 Δ_u 分别为破坏荷载和相对应的极限位移. 试验过程中 2 片预制叠合剪力墙表现出大致相同的破坏特征. HDCW1 试件在加载初期, 荷载-位移曲线呈线性变化, 卸载后几乎无残余变形, 处于弹性阶段, 试件表面没有发现裂缝; 水平荷载增至 80 kN 时, 在 HDCW1 底部高阻尼混凝土和预制墙片的结合面处出现水平裂缝, 同时在 HDCW1 的表面发现了多条零星分散的水平裂缝, 底部居多, 卸载后这些裂缝均能自动闭合, 随着荷载的继续增加, 剪力墙的表面陆续有新的裂缝出现, 原有的裂缝不断延伸开展, 延伸开展的速度较平缓; 在水平位移增至屈服位移 ($\Delta_y = 7.3$ mm) 后, 水平裂缝开始沿斜向开展, 角度约在 35° 到 55° 之间, 高阻尼混凝土与预制墙片结合面处的水平裂缝则穿过结合面层进入预制墙片斜向下开展, 且裂缝开展的速度有逐渐加快的趋势, 待水平位移增至峰值位移 ($\Delta_{max} = 15.6$ mm) 时, 水平荷载达到峰值 ($F_{max} = 280.5$ kN), 斜

裂缝向下延伸并已发展成交叉主裂缝, 试件的底部两端混凝土逐渐被压酥并有轻微的脱落现象; 水平位移继续增加到极限位移 ($\Delta_u = 24.9$ mm) 的过程中, 试件底部两端的混凝土压碎脱落现象逐渐加剧, 而裂缝基本不再增加和开展, 仅有个别裂缝稍稍延伸, 达到极限位移时, 承载力显示为 228.3 kN, 已下降至峰值荷载的 85% 以下, 纵筋被拉断, 试件底部两端的混凝土被压溃, 加载结束. 试件 HDCW1 最终的裂缝形态和局部破坏情况如图 5 所示, 其中粗实线表示高阻尼混凝土与预制墙片的结合面. HDCBW1 试件在加载初期的荷载-位移曲线和 HDCW1 试件接近, 刚度稍高一点, 在水平荷载增至 100 kN 以前, HDCBW1 试件表面没有发现可见裂缝, 水平荷载增至 100 kN 时, 同样在试件底部高阻尼混凝土和预制墙片的结合面处找到水平裂缝, 同时伴随有多条零星的水平裂缝分散在塑性铰区高阻尼混凝土表面, 卸载后裂缝均能闭合, 荷载继续增加, HDCBW1 试件表面的水平裂缝继续向墙板中部开展, 速度缓慢, 同时伴随有少量新裂缝产生; 待水平位移增至屈服位移 ($\Delta_y = 6.7$ mm) 后, 水平裂缝开始沿斜向开展, 发展成斜裂缝, 角度约在 35° 到 55° 之间, 高阻尼混凝土与预制墙片结合面处的水平裂缝则继续沿结合面水平开展一段距离遇竖向结合面后穿过结合面进入预制墙片沿斜向开展, 及至水平位移增至峰值位移 ($\Delta_{max} = 17.8$ mm) 时, 水平荷载达到峰值 ($F_{max} = 322.2$ kN), 斜裂缝向下延伸并已发展成交叉主裂缝, 试件的底部两端混凝土逐渐被压酥并有轻微的脱落现象; 当水平位移加至约 $4.0 \Delta_y$ 后, 纵筋被拉断, 试件底部两端混凝土被压溃, 水平荷载降至峰值荷载的 85% 以下, 加载结束. 试件 HDCBW1 最终的裂缝形态和局部破坏情况如图 5 所示, 其中粗实线表示高阻尼混凝土与预制墙片的结合面.

试验结果表明, HDCW1 和 HDCBW1 预制叠合剪力墙从开始加载到破坏的全过程均可以分为 3 个阶段: 弹性工作阶段、带裂缝工作阶段以及破坏阶段. 整个试验过程中未出现加载梁和剪力墙试件间连接部位的开裂或者滑移现象, 两者始终保持协同工作. 2 片预制叠合剪力墙的最终裂缝都发展较充分, 且现浇自流密实混凝土和两侧预制墙板间始终保持整体, 没有结合面层间的开裂现象, 表明格构钢筋能够有效拉结两侧预制面层和中间现浇混凝土形成整体, 而 HDCBW1 试件的这一现象则表明钢板暗支撑的设置虽然打断了部分格构钢筋的整体连续

性,但是剩余的格构钢筋足以约束两侧的预制墙板,仍然能够保证预制叠合墙体叠合面层的整体性.塑性铰区的现浇高阻尼混凝土和预制面层在试验过程中出现了沿结合面的裂缝,裂缝能够穿过结合面延伸进入预制墙片,且始终没有出现错动滑移脱落等现象,表明塑性铰区现浇高阻尼混凝土能有效改善结合面的性能.

试验过程中钢材的应变数据见表 4. 从表 4 可以看出,HDCW1 试件的纵筋最先屈服,随后其箍筋

屈服,而 HDCBW1 试件则是暗支撑钢板先屈服,紧接着暗柱纵筋屈服,然后箍筋屈服,整个试验过程中未见格构钢筋和水平钢筋屈服现象.从受拉侧纵筋和钢板暗支撑屈服,受拉侧纵筋最终被拉断,及受压区混凝土被压碎可见,两个试件均表现出弯曲破坏特征.单从破坏时的裂缝形态来看,两个试件也呈现出一定的弯剪型裂缝走势.同时,暗支撑钢板的屈服表明钢板暗支撑能够有效引导和约束斜裂缝的开展.

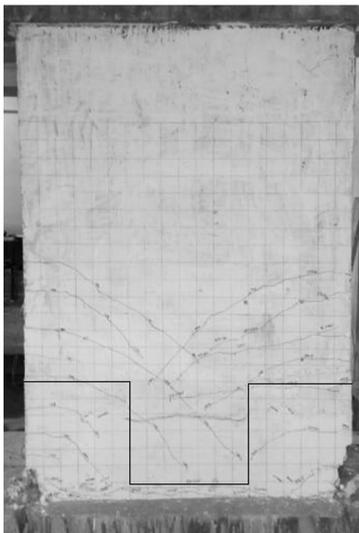
表 3 主要特征点试验结果
Tab. 3 Experimental results at main stages

试件编号	F_y /kN	Δ_y /mm	F_{max} /kN	Δ_{max} /mm	F_u /kN	Δ_u /mm	试验日期
HDCW1	238	7.3	280.5	15.6	228.3	24.9	2015-12-1
HDCBW1	277	6.7	322.2	17.8	280.7	26.8	2015-12-6

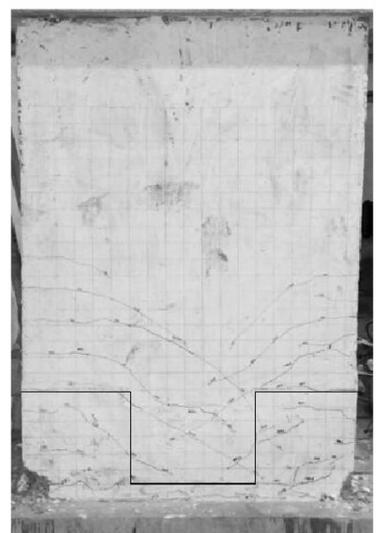
表 4 钢材应变数据
Tab. 4 The steel strain data

试件编号	测点位置	钢材应变/ $\mu\epsilon$											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HDCW1	A1	1 942	<u>2 366</u>	3 529	5 704	8 137	—	—	—	—	—	—	—
	GJ1	238	588	898	1 210	1 444	2 006	<u>3 420</u>	4 128	4 615	5 620	5 771	—
	GG1	332	513	768	874	1 011	1 132	1 203	1 234	1 265	1 306	1 430	—
	SP1	224	495	837	1 002	1 097	1 202	1 325	1 468	1 587	1 682	1 903	—
HDCBW1	A1	1 857	<u>2 341</u>	<u>3 217</u>	5 037	7 235	9 982	—	—	—	—	—	—
	GJ1	259	583	750	1 213	1 611	2 022	2 167	<u>2 182</u>	3 020	3 570	3 970	4 370
	GG1	360	485	621	720	834	906	958	1 087	1 268	1 270	1 453	1 638
	SP1	239	491	654	831	924	1 078	1 163	1 287	1 432	1 561	1 697	1 975
	X1	859	<u>1 143</u>	1 891	2 735	4 041	5 946	8 893	—	—	—	—	—

注:A1 在暗柱纵筋上,GJ1 在暗柱箍筋上,GG1 在格构钢筋上,SP1 在水平钢筋上,X1 在暗支撑钢板上.加粗带下划线表示已屈服.—表示溢出无记录或试验已结束.



(a) 试件 HDCW1 裂缝形态



(b) 试件 HDCBW1 裂缝形态



(c) 试件 HDCW1 局部压溃



(d) 试件 HDCBW1 局部压溃

图 5 剪力墙试件裂缝形态和局部压溃图

Fig. 5 Shear wall specimen fracture morphology and local crushing figure

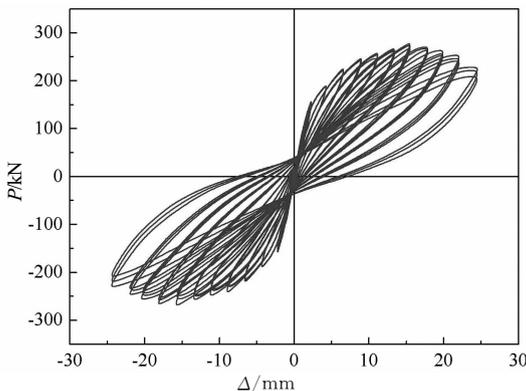
2.2 荷载-位移滞回曲线

试件荷载-位移滞回曲线见图 6. 由于预制叠合剪力墙底部塑性铰区现浇高阻尼混凝土, 保证了预制叠合剪力墙面层中的钢筋在节点处与现浇混凝土直接接触, 增加了钢筋节点处墙体有效截面, 消除了传统预制叠合剪力墙在节点连接处的薄弱环节, 从而保证了预制叠合剪力墙的整体性. 从图 6 中可以看出, 局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙和带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙滞回曲

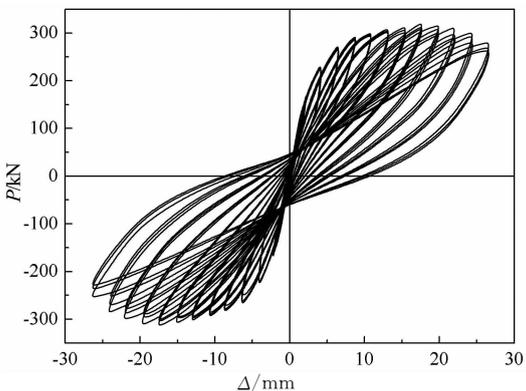
线均较为饱满. 图 6 的荷载-位移滞回曲线还表明: 普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙 HDCW1 和带钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙 HDCBW1 的滞回曲线大体一致; 出现初始水平裂缝以前, 滞回曲线保持直线, 该阶段滞回环所包含的面积非常小, 可以认为各滞回环基本重合, 整个阶段处于弹性工作状态, 刚度基本没有发生变化; 墙体出现水平裂缝后, 随着水平荷载的逐渐增大, 墙体开始进入非弹性工作阶段, 滞回曲线开始渐渐向位移轴倾斜, 此时, 滞回环所包含的面积逐渐增大, 而水平荷载卸载后的残余变形也逐渐增大, 滞回曲线不再重合. 在滞回曲线的后期没有出现明显的反“S”形, 可以认为剪力墙在屈服之后没有出现较大的剪切滑移, 局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙和带钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙的节点连接良好, 构造合理. 试件 HDCBW1 的滞回曲线饱满程度高于试件 HDCW1, 中部捏拢现象较轻, 因为钢板暗支撑的存在较大提高了剪力墙的抗震性能和稳定性, 暗支撑在墙中对斜裂缝的开展起到了有效的约束作用, 形成的裂缝更多, 整体耗能能力更强.

2.3 骨架曲线

依据《建筑抗震试验规程》^[18], 把荷载-位移滞回曲线的各级加载第一次循环的峰值点连线, 得到的 2 片预制叠合剪力墙试件骨架曲线如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 2 片预制叠合剪力墙的骨架曲线比较相似, 开裂前, 骨架曲线基本为直线, 开裂后, 进入非弹性工作阶段, 骨架曲线逐渐向位移轴倾斜, 墙片的刚度逐渐降低, 荷载保持低速增长, 直到峰值荷载后开始下降, 开始荷载下降较为缓慢, 随着位移的进一步增长, 承载力下降速度越来越快, 直到承载力下降至峰值荷载的 85% 以下, 2 片预制叠合剪力墙都表现出良好的延性和耗能能力, 均为延性破坏, 而



(a) 试件 HDCW1



(b) 试件 HDCBW1

图 6 荷载位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement hysteretic loop

带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙性能更为优越.在加载初期,2片预制叠合剪力墙的刚度基本一致,而带钢板暗支撑的预制叠合剪力墙刚度略高,随着水平荷载的进一步加大,普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙 HDCW1 相较于带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙 HDCBW1 先进入非线性工作阶段,刚度下降,2片预制叠合剪力墙的骨架曲线开始分离,表现出差异性,到达峰值荷载后,随着位移的进一步增加,试件 HDCBW1 的承载力下降相对于试件 HDCW1 而言平缓一些,表明试件 HDCBW1 的延性较好.试件 HDCBW1 的峰值荷载较试件 HDCW1 提高了约 15%,表明钢板暗支撑的存在,能够提高预制叠合剪力墙的承载能力.

2.4 位移延性

剪力墙试件的延性通过位移延性系数 μ 来表示,表达式为

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: Δ_u 为试体的极限位移, Δ_y 为试体的屈服位移.对于初始屈服点(Y)和极限点(U)至今尚无统一认可的确定方法.现有确定初始屈服点的方法有能量等值法和几何作图法等.现有确定极限点的方法有取荷载下降至峰值荷载的 85% 时的相应点和取混凝土达到极限(压)应变值的相应点.此外,还有目估定值和计算变形增量的增长率定值等方法^[18].本文分别采用能量等值法和荷载下降至峰值荷载的 85% 确定初始屈服点(Y)和极限点(U).2片剪力墙的延性系数见表 5,从表中可以看出,两片局部高阻尼预制叠合剪力墙的延性系数均较好,而内含带抗剪钢筋条钢板暗支撑的预制叠合剪力墙其延性系数高于无暗支撑的局部高阻尼预制叠合剪力墙,高出约 18%,表明带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙,延性优于普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙.这是由于内含钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙屈服位移略低于普通局部高阻尼预制叠合剪力墙,而极限位移高于普通局部高阻尼预制叠合剪力墙.此外,由表 5 可以看出普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙和带钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙的弹性层间位移角和弹塑性层间位移角均分别远远大于规范限值 1/1000 和 1/120^[16],说明在预制叠合剪力墙塑性较区采用局部高阻尼混凝土和加钢板暗支撑能够使预制叠合剪力墙实现与普通现浇剪力墙“等同”的

效果.

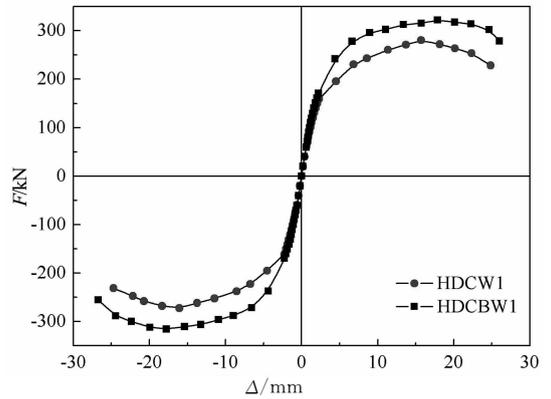


图 7 骨架曲线
Fig. 7 Skeleton curves

2.5 刚度退化

刚度 P_i 的表达式为

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: P_i 为第 i 次峰值荷载点对应的水平荷载值; Δ_i 为第 i 次峰值荷载点对应的水平位移.

2片预制叠合剪力墙的刚度退化曲线见图 8.从图 8 可以看出,2片预制叠合剪力墙的刚度退化曲线较为相似.从开始开裂到试件屈服阶段的刚度退化较为强烈.从试件屈服到峰值荷载阶段刚度退化速度逐渐减缓.2片预制叠合剪力墙的初始刚度相近,带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙其初始刚度略高.开裂后,2片预制叠合剪力墙的刚度走势开始出现较大差异,带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙刚度高于普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙的刚度,直到 2片剪力墙试件均屈服后这种刚度差异才渐渐又趋于接近.图 8 还表明,2片预制叠合剪力墙的刚度退化速度均较均匀,没有出现突变现象,说明这 2片预制叠

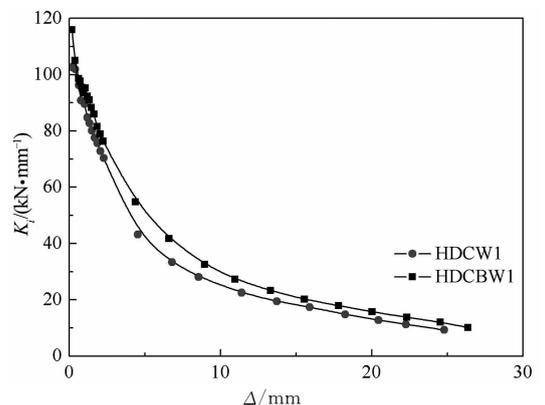


图 8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curves

合剪力墙在局部高阻尼混凝土以及钢板暗支撑的构造措施下,表现出良好的整体性,没有出现叠合面的破坏情况,预制部分与现浇部分二者协同工作较好。

2.6 耗能性能

试体的能量耗散能力,通常用能量耗散系数 E 或者等效黏滞阻尼系数 ζ_{eq} 来判断,以荷载-位移滞回曲线所包围的面积进行衡量,本文采用能量耗散系数 E 的方法评价 2 片预制叠合剪力墙的耗能性能,依据图 9 按公式(3)计算^[18]。

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(\Delta OBE+\Delta ODF)}} \quad (3)$$

由试件的荷载-位移滞回曲线包围图,计算得到各试件的能力耗散系数 E 见表 5。由表 5 可以看出,普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙试件 HD-CW1 和带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠

合剪力墙试件 HDCBW1 的能量耗散系数均较大,表明两者的耗能能力较好,相比较而言,带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙其能量耗散系数大约 9%。

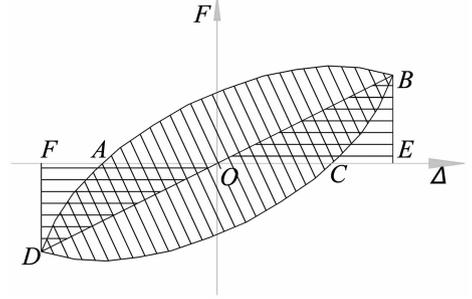


图 9 能量耗散系数 E 的计算

Fig. 9 Calculation of energy dissipation coefficient

表 5 试件的延性系数、能量耗散系数及层间位移角

Tab. 5 Ductility coefficient, energy dissipation coefficient and story drift of specimens

试件编号	屈服位移 Δ_y / mm	极限位移 Δ_u / mm	延性系数 μ	能量耗散 系数 E	弹性层间 位移角 θ_e	弹塑性层间 位移角 θ_p
HDCW1	7.3	24.9	3.41	1.56	1/199	1/58
HDCBW1	6.7	26.8	4.02	1.70	1/216	1/54

3 与相关试验结果的比较

文献[9]中的试件 W2, W4-A, W4-B 以及文献[10]中的试件 W-3A 和 W-3B 与本文设计的 2 片预制叠合剪力墙在高宽比、配筋及混凝土强度上较接近,仅几何尺寸和轴压比不同。为了进一步探讨本文 2 种构造措施的抗震效果,将文献[9]和[10]和本文 2 片预制叠合剪力墙试验结果作必要比较。由于压弯构件的承载能力,延性、变形能力及耗能能力与轴压比紧密相关,因此仅选取文献[9]中 W4-A 试件(轴压比 0.10)与本文试件进行相关参量的对比。

3.1 开裂模式与破坏形态

文献[10]中的试件 W-3 与本文 2 片预制叠合剪力墙有相似的破坏形态,其裂缝开展和走势基本相同,都是在试件底部两端出现细微的水平初始裂缝,然后由水平裂缝向板中延伸一段距离后斜向下发展,最终形成 X 形交叉主裂缝。不同之处是本文 2 片预制叠合剪力墙底部高阻尼混凝土与预制墙片的结合面和底部高阻尼混凝土表面几乎同时发现水平裂缝,而文献[10]中的 W-3 试件则是在试件屈服后

在结合面处发现水平裂缝,可能原因是 W-3 试件的缺口高度为 650 mm 而本文 2 片预制叠合剪力墙的缺口高度为 300 mm。此外,本文 2 片预制叠合剪力墙最终的裂缝数量较文献[9]和文献[10]中对比试件多而均匀,这是由于本文 2 片预制叠合剪力墙在底部塑性铰区设左右缺口且采用的高阻尼混凝土改善了节点连接和开裂性能,同时,钢板暗支撑的引入则对斜裂缝的开展起到了进一步的约束和引导作用。

3.2 极限变形能力与延性

文献[9]中试件 W4-A 的弹塑性层间位移角为 1/66,而延性系数为 3.50。本文试件 HDCW1 和 HDCBW1 的弹塑性层间位移角分别高出 13.8% 和 22.2%。本文试件 HDCW1 的延性系数和对比试件 W4-A 基本一致,低 2.6%,而试件 HDCBW1 的延性系数则高出对比试件 W4-A 达 14.9%,表明本文试件 HDCW1 和 HDCBW1 有较好的延性及变形能力。

3.3 承载能力与耗能性能指标

与文献[9]中试件 W4-A 比较,本文普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙试件 HDCW1 的峰

值承载力低 6.8%,可能原因是试件 HDCW1 的高宽比高于 W4-A 且预制墙片和现浇部分均用自密实混凝土,弹性模量相对较低,而带钢板暗支撑的试件 HDCBW1 的峰值承载力则高 7.0%,表明钢板暗支撑的引入能够较大提高预制叠合剪力墙结构的承载能力.试件 W4-A 的能量耗散系数为 1.55,本文试件 HDCW1 的能量耗散系数略高,而试件 HDCBW1 的能量耗散系数则高出 9.7%,表明本文试件 HDCW1 和 HDCBW1 的耗能性能较好.

4 结 论

本文分别设计了 1 片普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙试件和 1 片带暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙试件,对其进行了拟静力试验研究,得到了以下结论:

1)普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙和带钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙破坏形态及裂缝分布比较相似;而带钢板暗支撑的局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙的裂缝开展更为充分,耗能能力更强.

2)普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙和带钢板暗支撑局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙在低周往复荷载作用下,均表现出良好的延性,相比之下,暗支撑的引入进一步优化了预制叠合剪力墙节点构造,其延性系数高于普通局部高阻尼混凝土预制叠合剪力墙.

3)现浇混凝土与两侧预制墙板协同工作良好,在叠合面处没有出现任何裂缝和滑移痕迹,钢板暗支撑的引入打断了格构钢筋的整体连续性,但剩余的格构钢筋足以约束 2 侧预制墙板,仍然能够保证叠合面层的整体性能.

4)在预制叠合剪力墙底部塑性铰区设两端缺口,现浇高阻尼混凝土材料,能够改善连接节点的抗震性能,高阻尼混凝土在震作用下能够表现出良好的延性和耗能能力,推迟预制叠合剪力墙裂缝的出现,而钢板暗支撑的引入进一步限制了斜裂缝的开展,承载能力和耗能能力进一步提高.

参考文献

[1] 连星,叶献国,王德才,等.叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(8):1219—

1223.

LIAN Xing, YE Xianguo, WANG Decai, *et al.* Experimental analysis of seismic behavior of superimposed slab shear walls [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Sciences, 2009, 32(8): 1219—1223. (In Chinese)

[2] 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 Xiaopu, MA Wei, CHEN Xintang, *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 Sciences, 2010, 33(9): 1366—1371. (In Chinese)

[3] 王滋军,刘伟庆,魏威,等.钢筋混凝土水平拼接叠合剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(7):147—155.

WANG Zijun, LIU Weiqing, WEI Wei, *et al.* Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete composite shear wall with level splice [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 147—155. (In Chinese)

[4] 连星,叶献国,张丽军,等.叠合板式剪力墙的有限元分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(7):1064—1068.

LIAN Xing, YE Xianguo, ZHANG Lijun, *et al.* Finite element analysis of the superimposed slab shear walls [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Sciences, 2009, 32(7): 1064—1068. (In Chinese)

[5] 沈小璞,周宏庚.竖向拼缝叠合板式混凝土剪力墙有限元分析[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2010,26(5):905—912.

SHEN Xiaopu, ZHOU Honggeng. Finite element analysis of superimposed concrete wall panels with the vertical seam [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Sciences, 2010, 26(5): 905—912. (In Chinese)

[6] 徐芳,吕西林,章红梅,等.钢筋混凝土叠合墙体非线性仿真研究[J].结构工程师,2011,27(1):34—39.

XU Fang, LU Xilin, ZHANG Hongmei, *et al.* Computational simulation for nonlinearity of reinforced concrete composite walls [J]. Structural Engineers, 2011, 27(1): 34—39. (In Chinese)

[7] 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.

JIANG Qing, YE Xianguo, CHONG Xun. Calculation model for superimposed slab shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 8—12. (In Chinese)

[8] 肖全东,郭正兴.预制混凝土双板剪力墙的耗能能力[J].湖南大学学报:自然科学版,2014,41(9):35—41.

XIAO Quandong, GUO Zhengxing. Energy dissipation of double-wall precast concrete shear walls [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(9): 35—41. (In Chinese)

[9] 叶燕华,孙锐,薛洲海,等.预制墙板内现浇自密实混凝土叠合

- 剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 138-144.
- YE Yanhua, SUN Yue, XUE Zhouhai, *et al.* Experimental study on seismic behavior of SCC and precast NC composite shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 138-144. (In Chinese)
- [10] 王滋军, 刘伟庆, 翟文豪, 等. 新型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, 2015, 46(4): 1409-1419.
- WANG Zijun, LIU Weiqing, ZHAI Wenhao, *et al.* Experimental study on seismic behavior of new type reinforced concrete composite shear wall [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(4): 1409-1419. (In Chinese)
- [11] DB34 810-2008 叠合板混凝土剪力墙结构技术规程[S]. 合肥: 安徽省质量技术监督局, 2008: 5-17.
- DB34 810-2008 Technical specification for reinforced concrete composite shear wall [S]. Hefei: Anhui Bureau of Quality and Technical Supervision, 2008: 5-17. (In Chinese)
- [12] 汪梦甫, 宋兴禹, 汪帜辉. 高阻尼混凝土带暗支撑剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 153-161.
- WANG Mengfu, SONG Xingyu, WANG Zhihui. Experimental study on seismic performance of high damping concrete shear wall with concealed bracings [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 153-161. (In Chinese)
- [13] 王义俊, 汪梦甫. 高阻尼混凝土钢板暗支撑双肢剪力墙数值分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(5): 14-20.
- WANG Yijun, WANG Mengfu. Numerical simulation of high damping concrete coupled shear walls with steel plate concealed bracing [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(5): 14-20. (In Chinese)
- [14] 汪梦甫, 邹同球, 汪帜辉. 预制装配式带暗支撑叠合板式混凝土双联剪力墙: 中国, 201510006656. 9[P]. 2015-05-20.
- WANG Mengfu, ZOU Tongqiu, WANG Zhihui. Precast composite concrete double shear wall with concealed bracing: China, 201510006656. 9[P]. 2015-05-20. (In Chinese)
- [15] JGJ 3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 77-95.
- JGJ 3-2010 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2010: 77-95. (In Chinese)
- [16] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 66-69.
- GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2010: 66-69. (In Chinese)
- [17] 汪梦甫, 宋兴禹, 肖雨桐. 小跨高比连梁混合暗支撑高阻尼混凝土联肢剪力墙试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 125-132.
- WANG Mengfu, SONG Xingyu, XIAO Yutong. Experimental study on seismic performance of high damping concrete coupled shear wall with mixed concealed bracings and coupling beams with small span-depth ratios [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 125-132. (In Chinese)
- [18] JGJ 101/T 101-2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 10-18.
- JGJ 101/T 101-2015 Specification for seismic test of buildings [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2015: 10-18. (In Chinese)