

混凝土强度差异对带拼缝单面叠合板式剪力墙的影响

马 巍¹, 赵 超¹, 王 锋², 徐 凯¹, 倪良昆¹

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 安徽苏亚建设安装有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 叠合板式混凝土剪力墙结构由叠合墙板和预制混凝土构件通过可靠方式进行连接, 与现场后浇混凝土形成装配整体式混凝土剪力墙结构。利用有限元软件 ABAQUS 对带拼缝的单面叠合板式剪力墙进行内叶板与后浇混凝土强度等级差异条件下抗震性能研究。结果表明: 内叶板和后浇混凝土强度差异对墙体抗震性能影响较小。当混凝土强度等级值和考虑厚度加权混凝土强度等级值相同时, 两者墙体抗震性能基本相同, 与现浇剪力墙相比差别不大。分析结果可为单面叠合板式剪力墙的进一步试验研究以及工程应用提供科学依据。

关键词: 混凝土强度; 叠合板式剪力墙; 有限元; 抗震性能

中图分类号: TU398.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2022) 03-025-09

Influences of Different Concrete Strengths on Single-sided Composite Slab Shear Wall With Joints

MA Wei¹, ZHAO Chao¹, WANG Feng², XU Kai¹, NI Liangkun¹

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Suya Construction And Installation Co.LTD., Hefei 230601, China)

Abstract: The composite slab concrete shear wall structure combines composite wall panels and other precast concrete components with post-cast concrete in situ to form an assembled monolithic concrete shear wall structure. Using the finite element software ABAQUS, the seismic performance of single-sided composite slab shear walls with joints was studied under different inner plates and post-cast concrete. The results show that different strengths of inner plates and post-cast concrete have little effects on the seismic performance of the wall. When the concrete strength grade and the thickness-weighted concrete strength grade are the same, the seismic performance of both walls is basically the same, and the difference is not significant compared with that of cast-in-situ shear wall. The results provide scientific basis for further experimental research and engineering application of single-sided composite slab shear walls.

Keywords: concrete strength; composite shear wall; finite element; seismic performance

近年来,预制混凝土夹心保温外挂墙板技术在国内逐渐发展起来,并在实际工程中实施。将保温板集成在预制墙板中,可减少现场湿作业,并提高施工效率。单面叠合式剪力墙是内侧预制墙板(内叶板)与后浇混凝土叠合而形成整体受力的叠合

式剪力墙,外侧预制墙板(外叶板)仅作为施工时的模板及保温层的外保护板(见图1),这种组合墙板实现了外墙保温一体化,从构件设计、制作到现场装配,实现了工业化生产,从而节约资源,保护环境,推动我国绿色建筑的可持续发展^[1-4]。马

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 安徽省教育厅高校自然科学研究重点项目(KJ2020A0454); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2021-YF20)

作者简介: 马巍(1972-), 男, 教授, 主要研究方向: 装配式建筑。

巍等^[5-7]提出利用暗柱水平拼接两片墙板形成整体剪力墙,通过拟静力试验研究发现,带暗柱拼缝的单面叠合板式剪力墙抗震性能与整体单面叠合板式剪力墙基本一致。Ricci 等^[8]对叠合板式剪力墙进行了抗震性能试验研究,试验结果表明此类结构抗震性能与整体现浇剪力墙相似。崔瑶等^[9]对双面叠合板式剪力墙进行数值模拟分析,结果发现随着轴压比、混凝土强度、边缘构件形式、插筋面积等参数的增大,墙肢承载力增大,箍筋加密可以提升墙肢的变形能力。连星等^[10]对带有边缘约束构件的叠合板式剪力墙进行实验,发现叠合板与现浇混凝土粘结良好,提出在设计时可采用暗柱形式。除此之外,还有国内外专家学者对叠合板式剪力墙抗震方向进行了研究^[11-16],推广了叠合板式剪力墙结构的应用。

目前,国内外关于单面叠合板式剪力墙的理论及应用研究主要集中在接缝连接、钢筋搭接、结构形式等方面,但对新旧混凝土强度等级差异的影响,相关研究还较少。在实际工程中有可能出现混凝土强度等级不同的情况,因此对单面叠合板式剪力墙受力性能的影响还需要进一步研究。

本文利用有限元数值分析软件 ABAQUS^[17]研究内叶板和后浇混凝土强度等级差异对单面叠合

板式剪力墙抗震性能的影响。对比分析试件的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化能力等,为单面叠合板式剪力墙结构的设计及工程应用提供设计依据。

1 有限元模拟

1.1 模型概况

本文参照文献[18]的试件规格,共设计 9 个试件(见表 3),其中叠合板式剪力墙试件编号分别为 DHB1~DHB6,现浇剪力墙试件编号分别为 DW1~DW3(见图 2)。剪力墙试件尺寸均为高 2 800 mm、宽 2 000 mm、厚 200 mm,试件高宽比为 1.4。其中叠合试件保温板厚度为 30 mm,外叶板厚度为 50 mm,内叶板厚度为 50 mm,现浇部分厚度为 150 mm。试件中部设置 320 mm×100 mm 暗柱,其中拼缝宽度 20 mm。试件受力钢筋等级均为 HRB400。文献[18]的试件尺寸以及配筋详见图 1,钢筋和混凝土材料力学性能参数具体见表 1 和表 2。

1.2 模型参数

表 1 混凝土性能参数

混凝土等级	立方体抗压强度 (Mpa)
C30 (预制)	33.5
C30 (现浇)	33.3

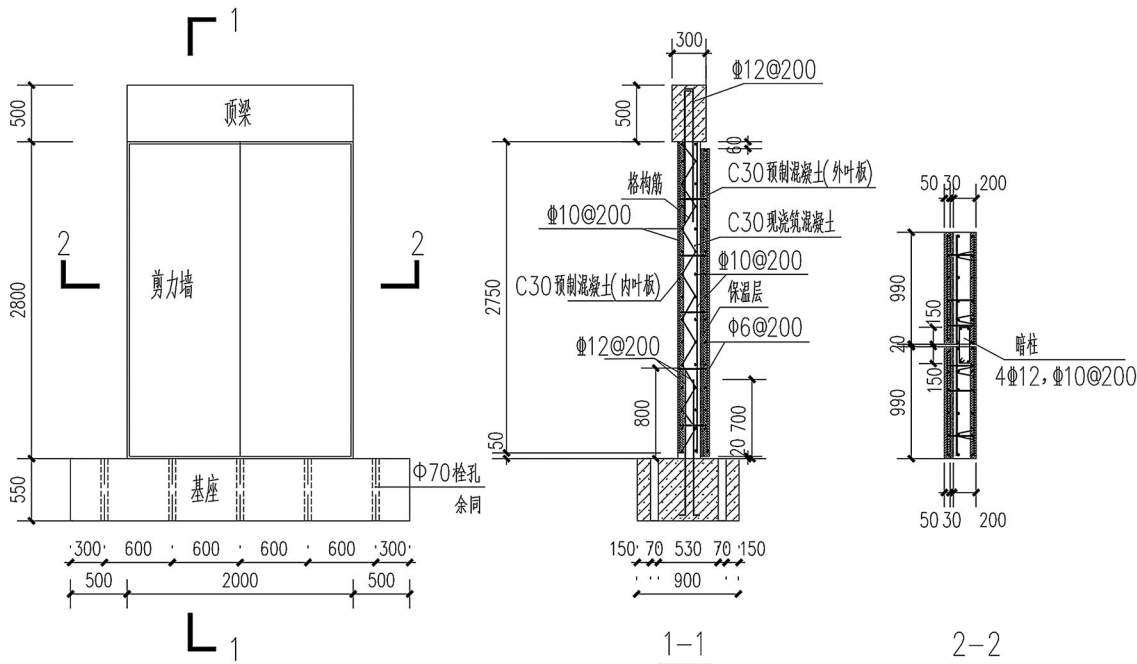


图 1 DHB1-DHB6 剪力墙板试件图

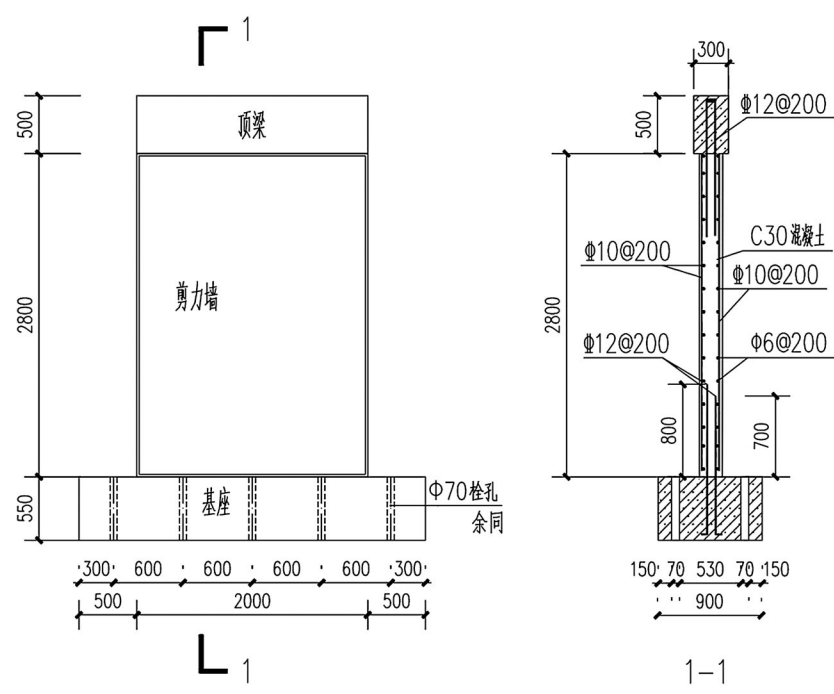


图 2 DW1-DW3 剪力墙板试件图

表 2 钢筋性能参数

类别	钢筋直径 /mm	屈服强度 /(N/mm ²)	极限强度 /(N/mm ²)	伸长率
HRB400	6	542.5	626.8	13.2%
HRB400	10	492.2	525.1	11.9%
HRB400	12	544.2	668.2	12.5%

表 3 各试件混凝土强度等级

试件编号	单面叠合板式剪力墙板 (内叶板 + 现浇部分 / 加权值) 或现浇墙板	单位: MPa
DHB1	30+50/45	
DHB2	45+45	
DHB3	35+55/50	
DHB4	50+50	
DHB5	50+30/35	
DHB6	35+35	
DW1	45	
DW2	50	
DW3	35	

本文采用文献 [6、18] 中有限元软件建模方式对 9 块剪力墙试件进行数值模拟分析。钢筋采用双折线应力 - 应变曲线,泊松比取 0.3;混凝土采用

CDP 模型(混凝土损伤塑性模型),应力 - 应变关系参照《混凝土结构设计规范》^[19] 中单轴压拉应力 - 应变曲线。

模型采用分离式建模,钢筋采用 T3D2 桁架单元模拟,混凝土采用 C3D8R 实体单元模拟。采用“Embedded”命令将钢筋嵌入混凝土,设置为内置区域。为了防止应力集中,在加载梁顶面和地梁底面分别设置参考点耦合点 RP1 和 RP2,用点来代替整个区域的运动,并约束模型以避免发生平面外失稳。考虑实际试验中保温板外侧混凝土板和剪力墙预制部分与空腔现浇混凝土粘结较好,故使用“Tie”命令模拟接触界面的粘结性能。模型网格划分如图 3 所示。

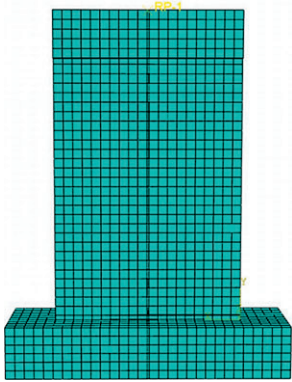


图 3 模型网格划分

为模拟实验加载条件,将地梁的自由度进行限制,设置成完全固接。计算时设置 2 个加载步骤,竖向方向为剪力墙顶施加的 60T 的轴压力;水平方向忽略力加载的分析步,为位移加载。

1.3 滑移本构

由于有限元软件自身原因,CDP 模型并不能直接模拟钢筋与混凝土的滑移,故应用弹簧单元 SPRING2 相对位移定义为弹簧单元两个节点位移之差。建立非线性弹簧单元模拟钢筋与混凝土的粘结滑移,根据《混凝土结构设计规范》^[19] 中滑移本构模型计算如图 4。已知剪力墙 τ - S 曲线,可确定任意一点弹簧位置处的粘结力与滑移相对关系,即 F - D 曲线,如图 5。

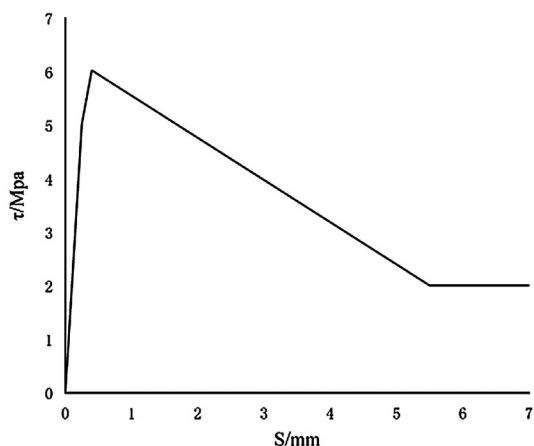


图 4 τ - S 曲线

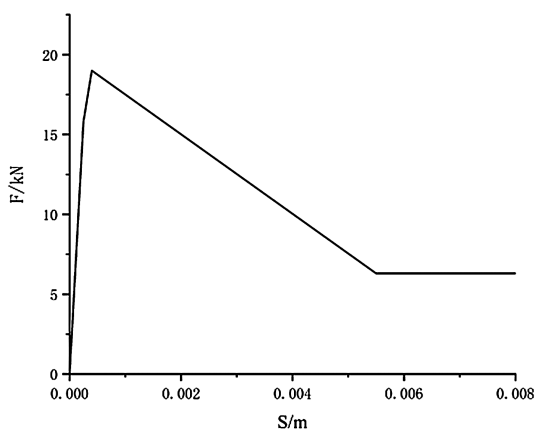
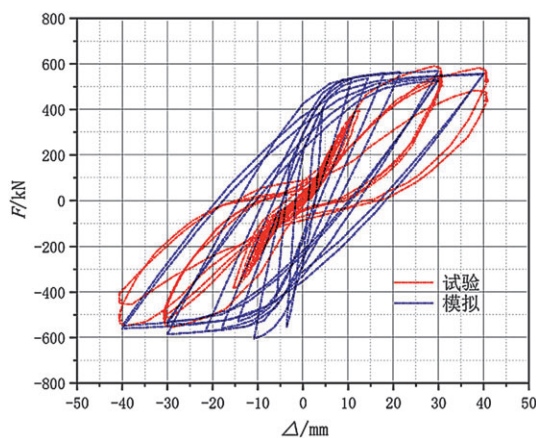


图 5 F - D 曲线

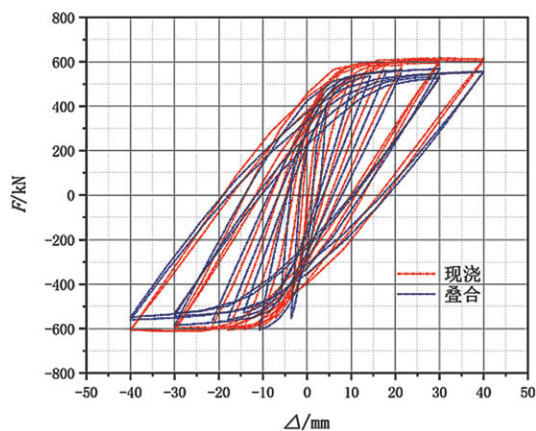
1.4 模拟结果

根据文献 [18] 的实验滞回曲线与数值模拟滞回曲线进行对比 (见图 6)。模拟曲线的位移、极限荷载、峰值荷载等与试验结果基本一致,曲线总

体变化趋势一致,差值在 8% 以内。其中滞回曲线基本吻合,但滞回曲线的“捏拢”效果尚有一些区别,模拟结果偏于饱满,效果不如试验曲线明显。原因是单面叠合板式剪力墙结构的破坏形态既包括下部剪力墙的弯曲破坏,又包括上下部位连接部位的局部剪切破坏。同时剪力墙在浇筑过程中的施工误差、骨料的不均匀以及试验环境与理想化模拟间的存在偏差。但总体曲线拟合度较准确,可以利用有限元建模参数对试件进行数值分析。



(a) 单面叠合板式剪力墙试件试验与数值模拟对比



(b) 现浇与单面叠合板式剪力墙试件数值模拟对比

图 6 实验与数值模拟滞回曲线对比

2 混凝土强度差异分析

在数学领域中加权平均值是根据不同权数而进行计算的平均数,定义为 n 个数的集合 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的权分别是集合 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 则 $\bar{x} = x_1\omega_1 + x_2\omega_2 + \dots + x_n\omega_n / (\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n)$ 为这 n 个数的加权平均值。

在工程领域中集合 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 定义为混凝土强度等级,集合 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 定义为剪力墙厚度。当内叶板混凝土强度等级为 C30,现浇混凝土强度等级为 C50 (混凝土强度组合 30+50) 时,剪力墙考虑厚度加权平均后混凝土强度等级 (以后简称加权值)

$$\bar{x} = \frac{30 \times 50 + 50 \times 150}{200} = 45 \text{MPa}, \text{其他混凝土强度等级组合加权方法同上。}$$

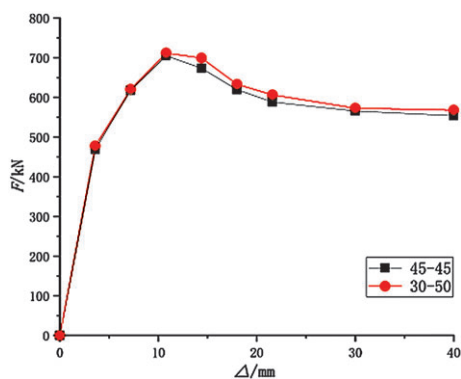
分别改变内叶板与后浇部分混凝土强度等级与轴压比大小,模拟实际工程中混凝土强度等级不同对带拼缝单面叠合板式剪力墙受力性能的影响,并与现浇剪力墙进行对比。取轴压比 $n_d=0.1$ 和轴压比 $n_d=0.3$ 进行分析。各试件参数如表 3 所示,其中混凝土力学性能参照《混凝土结构设计规范》^[19],详见表 4。

表 4 混凝土材料力学性能

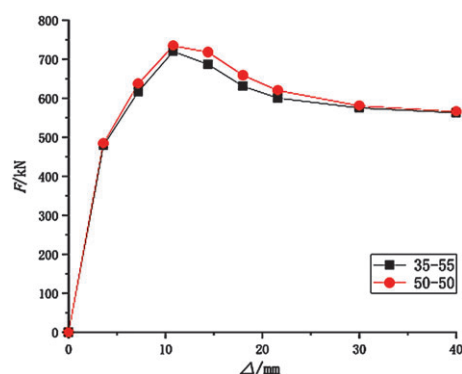
混凝土等级	轴心抗压强度标准值 (单位: N/mm ²)	轴心抗拉强度标准值 (单位: N/mm ²)	弹性模量 (单位: N/mm ²)
C35	23.4	2.20	31 500
C45	26.8	2.51	33 500
C50	32.4	2.64	34 500
C55	35.5	2.74	35 500

2.1 骨架曲线

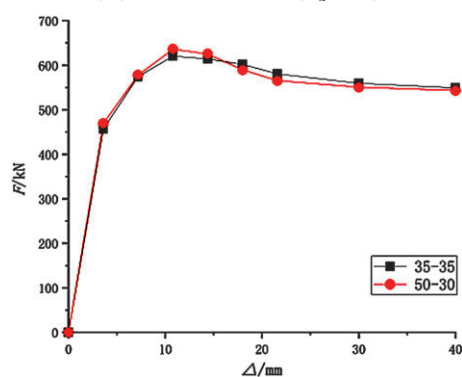
图 7 为不同混凝土强度等级下的 F- Δ 曲线,可以看出各试件在竖向恒定荷载和水平低周反复荷载作用下,经历了弹性、弹塑性和破坏三个阶段,9 个试件的骨架曲线发展规律接近。



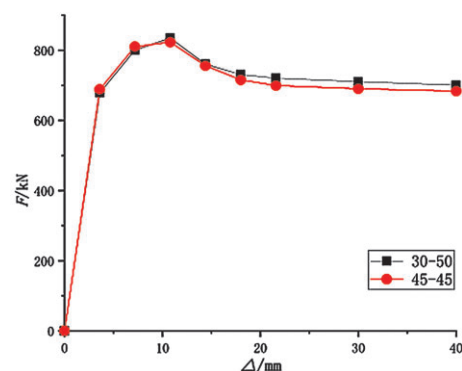
(a) DHB1 和 DHB2 ($n_d=0.1$)



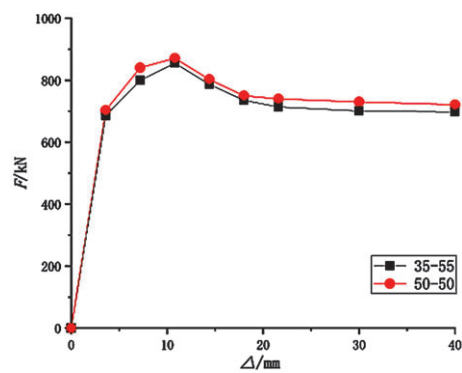
(b) DHB3 和 DHB4 ($n_d=0.1$)



(c) DHB5 和 DHB6 ($n_d=0.1$)



(d) DHB1 和 DHB2 ($n_d=0.3$)



(e) DHB3 和 DHB4 ($n_d=0.3$)

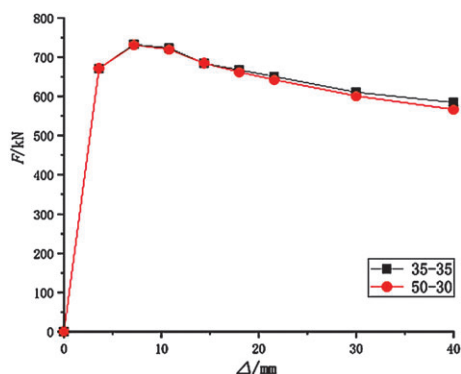
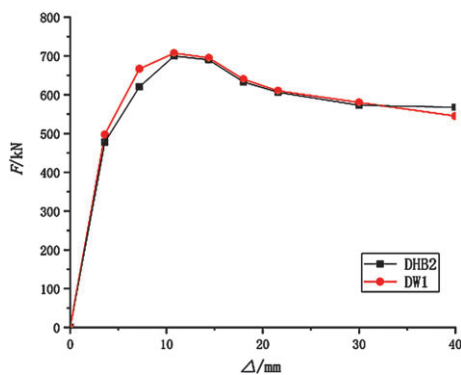
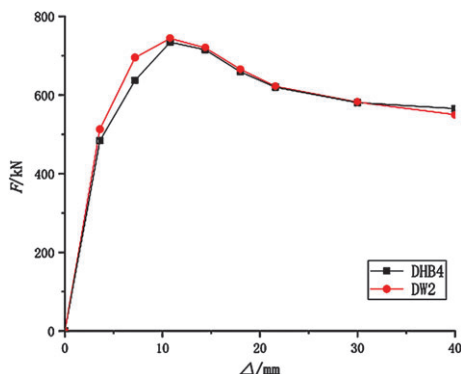
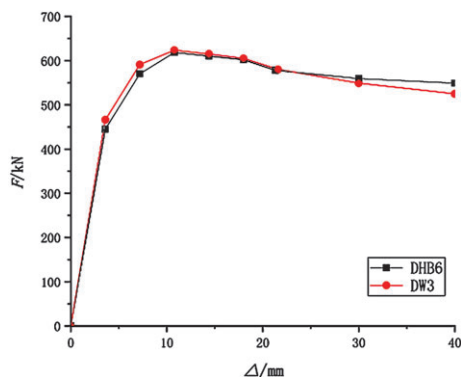
(f) DHB5 和 DHB6 ($n_d=0.3$)(g) DHB2 和 DW1 ($n_d=0.1$)(h) DHB4 和 DW2 ($n_d=0.1$)(i) DHB6 和 DW3 ($n_d=0.1$)

图 7 不同混凝土强度等级下的 F-Δ 曲线对比

图 7(a)、(b)、(c) 可以看出混凝土强度等级组合试件和加权试件骨架曲线均呈 S 形, 且走势基本一致, 墙体峰值承载力接近, 但加权试件骨架曲线下降段略平缓, 最大承载力和延性段均比较接近。同时随着轴压比的增加, 骨架曲线的下降段变陡, 承载能力衰减加剧。此时剪力墙的受力性能受混凝土强度等级影响更显著, 随着混凝土强度等级从 C35 提高到 C45 和 C50, 试件极限承载力分别提高 14%、17%、19%, 但混凝土强度等级组合试件与加权试件承载力差异不大。

图 7 中加权试件 DHB2 的正向承载力水平与现浇试件 DW1 相比差别不大, 峰值后的下降速率较快, 表现良好。其余两组现浇试件和叠合试件也展现出相同的结论。

现浇试件、不同混凝土强度等级试件以及加权试件的峰值承载力 F_p 相对值如表 5、表 6、表 7 所示。综合以上分析结果, 混凝土强度等级组合值和加权值相同时, 试件承载力基本相同, 且叠合试件和现浇试件力学性能较接近。同时, 考虑后浇部分现场施工误差以及钢筋的搭接影响, 后浇混凝土强度等级应不低于预设混凝土强度等级。

表 5 混凝土强度等级 C45 试件承载力

n_d	现浇墙板或叠合板式剪力墙板	F_p/kN	F_p 相对值
0.1	DW1	717.1	1
	DHB1	711.7	0.99
	DHB2	705.0	0.98
0.3	DW1	845.7	1
	DHB1	835.1	0.99
	DHB2	823.2	0.97

表 6 混凝土强度等级 C50 试件承载力

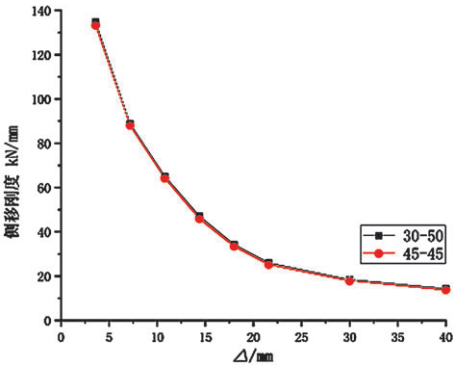
n_d	现浇墙板或叠合板式剪力墙板	F_p/kN	F_p 相对值
0.1	DW2	744.0	1
	DHB3	720.1	0.97
	DHB4	734.5	0.99
0.3	DW2	887.3	1
	DHB3	855.5	0.96
	DHB4	871.0	0.98

表 7 混凝土强度等级 C35 试件承载力			
n_d	现浇墙板或叠合板式剪力墙板	F_p/kN	F_p 相对值
0.1	DW3	635.9	1
	DHB5	620.4	0.98
	DHB6	632.2	0.99
0.3	DW3	742.6	1
	DHB5	723.0	0.97
	DHB6	720.1	0.97

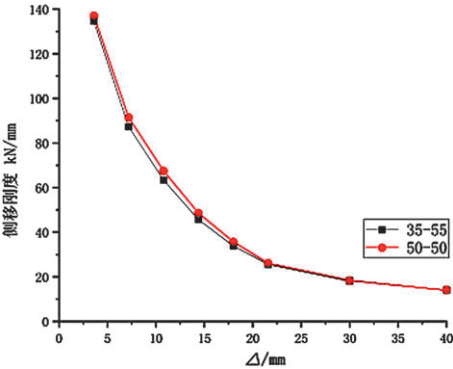
2.2 刚度退化曲线

图 8 为 9 组试件的刚度退化曲线。由图可见，随着加载的进行，各试件的刚度退化趋势相似。在加载初期，曲线平缓，刚度退化并不明显，随着加载的进行，呈现出迅速退化趋势，最后刚度退化逐渐趋于平缓，曲线基本重合。

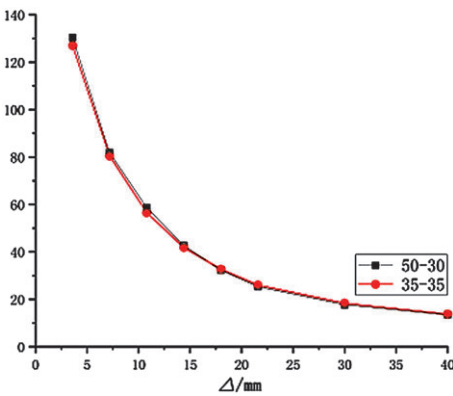
图 8 中混凝土强度等级组合试件与加权试件曲线整体退化趋势相同，加载初期刚度差别不大。随着不断低周往复加载，试件的非线性变形及累积损伤不断增大，试件的刚度不断衰减，两条刚度退化曲线逐渐缩小差距。而加权试件与现浇试件相比，刚度稍小，随着位移的增加逐步发生退化，未出现明显突变，说明结构的变形能力较接近，叠合试件和现浇试件同样具有良好整体性。



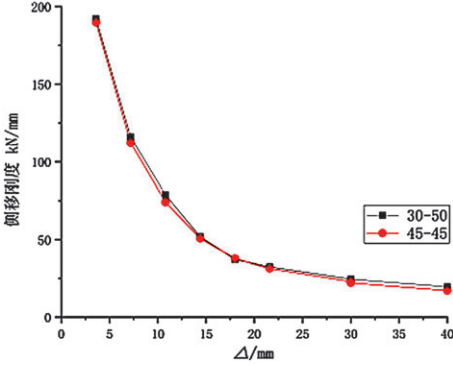
(a) DHB1 和 DHB2 ($n_d=0.1$)



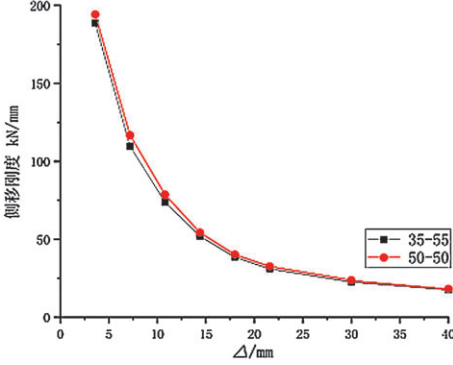
(b) DHB3 和 DHB4 ($n_d=0.1$)



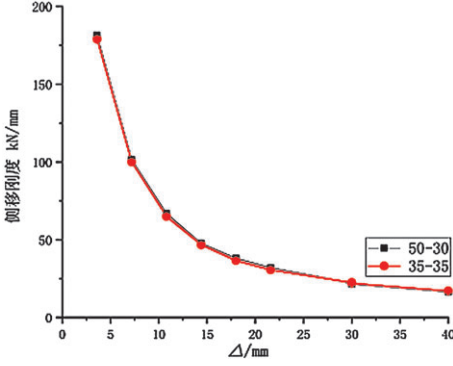
(c) DHB5 和 DHB6 ($n_d=0.1$)



(d) DHB1 和 DHB2 ($n_d=0.3$)



(e) DHB3 和 DHB4 ($n_d=0.3$)



(f) DHB5 和 DHB6 ($n_d=0.3$)

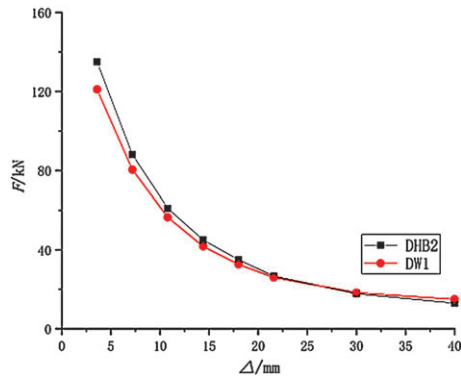
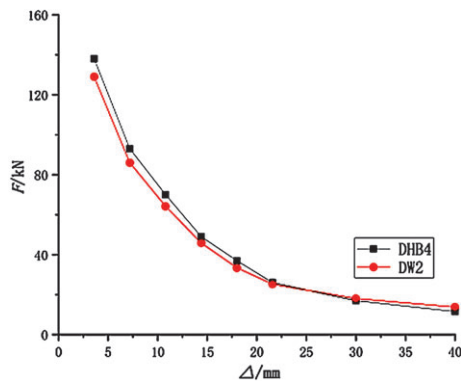
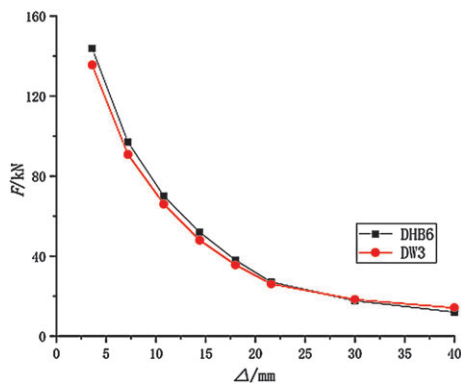
(g) DHB2 和 DW1 ($n_d=0.1$)(h) DHB4 和 DW2 ($n_d=0.1$)(i) DHB6 和 DW3 ($n_d=0.1$)

图 8 不同混凝土强度等级下的刚度退化曲线

从图 8(a)、(d) 可知随着轴压比的增大, 两组试件初始刚度略高, 后期刚度退化程度也大, 但曲线总体较为接近。

2.3 延性性能

参考《土木工程结构试验》^[20], 采用修改过的“通用屈服弯矩法”确定屈服点, 取最大承载力下降 15% 的相应点为极限点。 U_d 和 U_y 分别为极限和屈服位移, 位移延性系数 $\mu=U_d/U_y$ 。

9 组剪力墙延性系数如表 8 和表 9 所示, 由

表中结果可知各试件均具有良好的抗震变形能力。混凝土强度等级对试件延性的影响较显著, 随着混凝土强度等级的增大, 延性系数降低。相比于 DHB6, DHB2 与 DHB4 延性急剧下降, 分别降低 31% 和 35%, 原因是构件的整体刚度增强, 脆性变大, 导致构件屈服变缓, 最终延性系数降低。当轴压比从 $n_d=0.1$ 提高到 $n_d=0.3$ 后, 9 组试件延性系数均减小。

对于加权值相同的构件, 如试件 DHB1 和 DHB2, 延性系数接近, 前者的延性系数为 4.2, 后者为 4.1, 具有较好的后期变形能力。其余两组试件呈现相同的结论, 其中叠合试件结构延性系数低于现浇试件, 变形能力有所下降。

表 8 位移及延性系数 ($n_d=0.1$)

试件	正向加载		负向加载		双向均值		延性系数 μ
	U_d	U_y	U_d	U_y	U_d	U_y	
DHB1	19.7	5.0	18.6	4.2	19.2	4.6	4.2
DHB2	19.2	5.1	18.3	4.1	18.8	4.6	4.1
DHB3	19.4	5.0	18.6	4.3	19.0	4.7	4.0
DHB4	19.1	5.2	18.4	4.5	18.8	4.9	3.8
DHB5	23.2	3.9	21.7	3.6	22.5	3.8	5.9
DHB6	23.2	3.8	21.2	3.6	22.2	3.7	6.0
DW1	28.3	4.9	26.9	5.1	27.6	5.1	5.4
DW2	25.9	5.0	26.7	5.4	26.3	5.2	5.1
DW3	30.1	4.6	30.5	4.2	30.3	4.4	6.9

表 9 位移及延性系数 ($n_d=0.3$)

试件	正向加载		负向加载		双向均值		延性系数 μ
	U_d	U_y	U_d	U_y	U_d	U_y	
DHB1	17.1	5.2	15.9	4.3	16.5	4.7	3.5
DHB2	16.8	5.2	15.5	4.4	16.2	4.8	3.4
DHB3	17.3	5.1	15.3	4.7	16.3	4.9	3.3
DHB4	16.5	5.4	15.8	4.8	16.2	5.1	3.2
DHB5	20.4	4.1	18.4	3.7	19.4	3.9	5.0
DHB6	20.6	3.9	18.8	3.7	19.7	3.8	5.2
DW1	24.9	5.3	19.7	5.3	22.3	5.3	4.2
DW2	23.1	5.4	20.9	5.6	22.0	5.5	4.0
DW3	25.2	4.9	24.4	4.3	24.8	4.6	5.4

3 结论

本文考虑实际工程中内叶板与后浇部分混凝土强度等级不同,采用 ABAQUS 有限元软件对带拼缝的单面叠合板式剪力墙进行数值模拟和力学分析,得到以下结论:

(1) 当混凝土强度等级组合值和加权值相同时,试件力学性能和抗震性能基本相同,且接近同等级的现浇剪力墙。

(2) 轴压比对此种带竖向拼缝的叠合剪力墙有着较为显著的影响,随着轴压比增大,试件水平承载力增加,但刚度退化加快、延性系数降低,混凝土强度等级加权值相同的叠合板式剪力墙抗震性能较为接近。

(3) 混凝土强度等级加权值相同的叠合板式剪力墙延性系数接近,变形能力基本相同,具有较好的延性,但低于同强度等级的现浇混凝土剪力墙。

可见,根据不同内叶板和现浇层厚度加权后的混凝土强度等级与同等级混凝土强度带拼缝单面叠合板式剪力墙叠合板的力学性能和抗震性能基本一致。实际工程中两者能否等同应用,还需要进一步试验研究和分析。

参考文献:

- [1] 安徽省市场监督管理局. 叠合板式混凝土剪力墙结构技术规程:DB34/T 810—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [2] 张锡治,李义龙,安海玉. 预制装配式混凝土剪力墙结构的研究与展望[J]. 建筑科学,2014,30(1):26-32.
- [3] 刘霞,叶燕华,王滋军,等. 新型钢筋混凝土叠合结构体系研究[J]. 混凝土,2010(7):124-126.
- [4] 徐培福,黄吉锋,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.
- [5] Ma W, Xu K, Cheng B Q, et al. Experimental study on the seismic behavior of a new single-faced superposed shear wall with the concealed column[J]. Structures, 2021, 33: 4446-4460.
- [6] 马巍,徐凯,黄旭辉,等. 带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(3):427-436.

- [7] 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.
- [8] Ricci I, Palermo M, Gasparini G, et al. Results of pseudo-static tests with cyclic horizontal load on cast in situ sandwich squat concrete walls[J]. Engineering Structures, 2013, 54: 131-149.
- [9] 崔瑶,王晶秋,郁银泉,等. 双面叠合剪力墙压弯性能的数值模拟分析[J]. 北京工业大学学报,2020,46(8):851-860.
- [10] 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.
- [11] Benayoune A, Samad A A A, Trikha D N, et al. Structural behaviour of eccentrically loaded precast sandwich panels[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(9):713-724.
- [12] 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.
- [13] 张伟林,沈小璞,吴志新,等. 叠合板式剪力墙T型、L型墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2012,29(6):196-201.
- [14] 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.
- [15] 杨联萍,余少乐,张其林,等. 不同轴压比下叠合板式剪力墙结构抗震性能分析[J]. 振动与冲击,2016,35(9):227-239.
- [16] 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.
- [17] 龙驭球. 有限元法概论[M]. 北京:人民教育出版社,1978.
- [18] 倪良昆. 基于暗柱拼缝单面叠合板式剪力墙试验研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2020.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [20] 姚谦峰. 土木工程结构试验[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.