

高延性混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究 及抗剪承载力计算

邓明科¹, 李琦琦¹, 刘海勃², 景武斌³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西, 西安 710043;

3. 西安五和土木工程新材料有限公司, 陕西, 西安 710055)

摘 要: 该文提出采用高延性混凝土(HDC)提高低矮剪力墙的抗震性能, 设计并制作了 5 片剪跨比均为 1.0 的剪力墙, 并通过拟静力试验, 分析轴压比、水平分布钢筋及内置钢板对低矮剪力墙的破坏形态、延性和耗能能力的影响。试验结果表明: 与高强混凝土剪力墙相比, HDC 剪力墙的变形能力明显提高; HDC 低矮剪力墙的耗能能力、变形能力随着轴压比的增大而减小, 随水平分布钢筋数量的减小而减小; HDC 与钢板协同工作提高了低矮剪力墙的承载能力和耗能能力。基于软化拉-压杆模型, 并考虑 HDC 材料的受压软化特性, 该文提出了高延性混凝土低矮剪力墙抗剪承载力的计算公式, 计算结果与试验结果吻合较好。

关键词: 高延性混凝土; 低矮剪力墙; 抗震性能; 抗剪承载力; 软化拉-压杆模型

中图分类号: TU398.2; TU352.11 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.0290

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR AND SHEAR STRENGTH CALCULATION OF HIGH DUCTILE CONCRETE LOW-RISE SHEAR WALL

DENG Ming-ke¹, LI Qi-qi¹, LIU Hai-bo², JING Wu-bin³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. Power China Northwest Engineering Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710043, China;

3. Xi'an Wuhe Civil Engineering New Materials Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: The usage of high ductile concrete (HDC) in low-rise shear walls was proposed to improve their seismic behavior. The effects of axial load ratio, the amount of horizontal reinforcement and steel plate on failure patterns, ductility and energy dissipation capacity of shear walls were studied by quasi-static tests of five shear walls with the shear span ratio of 1.0. The results showed that the deformability of the HDC low-rise shear walls is significantly improved compared with the high-strength concrete low-rise shear walls. The energy dissipation capacity and deformability of shear walls are improved with the increase of the axial load ratio and the decrease of the spacing of horizontal reinforcement. The collaborative work between HDC and steel plate improves the shear capacity and energy dissipation capacity of the low-rise shear walls. A formula for calculating the shear capacity of the HDC low-rise shear walls is proposed based on the softened strut-and-tie model, and the calculation values agree well with the test data.

Key words: high ductile concrete; low rise-shear wall; seismic behavior; shear capacity; softened strut-and-tie model

收稿日期: 2018-05-29; 修改日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578445)

通讯作者: 邓明科(1979—), 四川南充人, 教授, 工学博士, 博导, 主要从事新材料与新型结构体系研究(E-mail: dengmingke@126.com).

作者简介: 李琦琦(1993—), 陕西咸阳人, 硕士生, 主要从事建筑结构抗震及抗剪研究(E-mail: liqiqi4028@126.com);

刘海勃(1991—), 陕西咸阳人, 硕士, 主要从事建筑结构抗震及抗剪研究(E-mail: 1069638083@qq.com);

景武斌(1989—), 陕西宝鸡人, 硕士, 主要从事建筑结构抗震及抗剪研究(E-mail: 346025123@qq.com).

高层及超高层建筑中，常出现低矮剪力墙。由于混凝土材料的脆性特征，在强地震作用下低矮剪力墙容易发生剪切破坏，其延性和耗能能力较低，破坏后危及整个结构的安全。采用钢板和混凝土组合的形式，可充分发挥两种材料的各自优势，有效提高剪力墙的延性和耗能能力。研究表明^[1-3]，双钢板-混凝土组合剪力墙和内置单钢板-混凝土组合剪力墙均有较高的延性和耗能能力，当钢板-混凝土组合应用于剪跨比较低(小于等于 1)的剪力墙时，墙体虽能承受较高的剪应力，但其变形能力仍然较差，其根本原因是混凝土的脆性和开裂软化特性。

高延性混凝土(high ductile concrete, HDC)^[4-7]是一种具有高韧性、高抗裂性能和耐损伤能力较好的新型结构材料，在拉伸和剪切荷载作用下具有多裂缝开展和应变硬化特征，能显著改善混凝土材料的韧性和抗裂能力，在土木工程领域具有广阔的应用前景。研究表明，在短柱^[8]、梁^[9-10]、钢框架组合剪力墙^[11]及低矮剪力墙^[12]等承受较高剪应力的构件中采用 HDC 替换混凝土，显著改善构件的变形能力，实现具有延性的剪切破坏。

基于以上研究，为提高低矮剪力墙的抗震性能和剪切变形能力，本文设计并制作了 5 片 HDC 低矮剪力墙试件，考虑轴压比、水平分布筋数量和配置钢板对剪力墙试件破坏形态、延性和耗能的影响，为 HDC 低矮剪力墙的工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验设计并制作了 5 片尺寸相同的剪力墙，其中 3 片 HDC 剪力墙(试件 HDCW-01、HDCW-02 和 HDCW-03)和 2 片内置钢板 HDC 组合剪力墙(试件 SHDCW-03 和 SHDCW-04)，试件参数见表 1。试件尺寸及配筋情况见图 1。

所有试件由加载梁、墙身和底梁三部分组成。剪力墙截面尺寸均为 100 mm×1000 mm，剪跨比 $\lambda=1.0$ ，采用高延性混凝土浇筑，HDC 强度等级按 C50 混凝土设计。顶部加载梁高度为 200 mm，采用 C50 普通混凝土浇筑。由于低矮剪力墙试件对底梁承载力和刚度要求较高，本文采用可替换式钢底梁装置，并在底梁与墙板试验区之间设置高度为 200 mm 的外包钢板 HDC 刚性过渡区域，并采用栓钉进行有效连接。

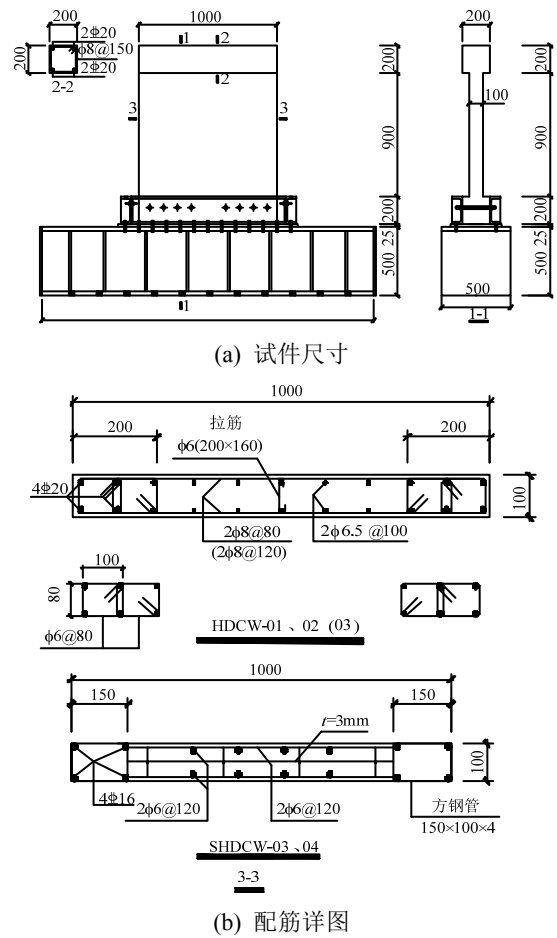


图 1 试件尺寸及配筋

Fig.1 Dimension and reinforcement details of the specimens

表 1 试件参数

Table 1 Parameter of the specimens

试件编号	边缘约束构件			水平 分布筋	竖向 分布筋	钢板厚度/mm	剪跨比	试验轴压比	竖向荷载/kN
	纵筋	箍筋	方钢管厚度/mm						
HDCW-01	4Φ20	2Φ6@80	—	2Φ8@80	2Φ6.5@100	—	1.0	0.34	1110
HDCW-02	4Φ20	2Φ6@80	—	2Φ8@80	2Φ6.5@100	—	1.0	0.28	924
HDCW-03	4Φ20	2Φ6@80	—	2Φ8@120	2Φ6.5@100	—	1.0	0.28	924
SHDCW-03	4Φ16	—	4	2Φ6.5@120	2Φ6.5@120	3	1.0	0.40	1294
SHDCW-04	4Φ16	—	4	2Φ6.5@120	2Φ6.5@120	3	1.0	0.28	924

1.2 材料力学性能

本试验所采用的 HDC 主要成分由水泥、粉煤

灰、精细河砂、矿物掺合料、水、高效减水剂和 PVA 纤维组成。其中水泥采用 P.O42.5R 的普通硅酸盐水

泥, 粉煤灰为某电厂一级灰, 砂为灞河河砂, 最大粒径为 1.18 mm。PVA 纤维力学性能指标见表 2。

表 2 PVA 纤维各项性能指标

Table 2 Performance indicators of PVA

长度/ mm	直径/ μm	长径比/ (×10 ³)	抗拉强度/弹性模量/ MPa	伸长率/ (%)	密度/ (g/cm ³)
12	39	0.31	1600	40	7
					1.3

对试验同条件 HDC 材料预留立方体试块, 试块尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm, 对其进行力学性能试验, 得到抗压和抗拉强度试验结果如表 3 所示。试件制作时采用的钢筋、方钢管和钢板型号和强度指标如表 4 所示。

表 3 HDC 的强度试验结果

Table 3 The test results of the strength of HDC

材料	f_t /MPa	极限拉应变 ε_{t0}	f_{du} /MPa	f_c /MPa	峰值压应变 ε_{c0}
HDC	5.08	0.008	52.12	45.19	0.0039

表 4 钢材的材料性能

Table 4 Material properties of steel

钢筋型号	f_y /MPa	f_u /MPa	弹性模量 $E/(\times 10^5 \text{ MPa})$
Φ6	392	581	2.1
Φ8	355	508	2.1
Φ16	418	588	2.0
Φ20	423	585	2.0
钢板	255	364	2.1
方钢管	239	322	2.0

本试验采用哑铃型试件, 测试了 HDC 的单轴拉伸应力-应变曲线如图 2 所示, 可见, HDC 的极限拉应变可达到 0.8%, 具有明显的拉伸应变硬化效应。其裂缝开展如图 3 所示。

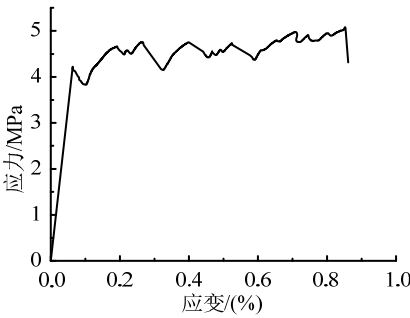


图 2 HDC 单轴拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Tensile stress-strain curves of HDC

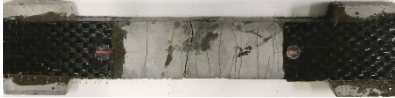


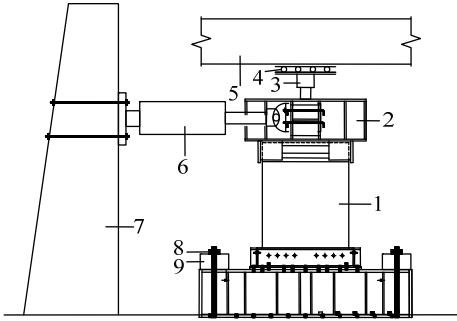
图 3 HDC 试件多裂缝开展

Fig.3 Multi crack development of HDC specimen

1.3 加载方案

本试验采用低周反复水平加载, 加载装置如图 4

和图 5 所示。首先施加预定的竖向荷载, 通过刚性垫梁均匀施加在试件加载梁顶部, 并在试验过程中保持不变。为防止试件发生平面外失稳, 试验采用 2 个 1000 kN 的液压伺服作动器并行施加水平荷载。



1—剪力墙试件; 2—刚性分配梁; 3—油压千斤顶; 4—滑动支座; 5—反力梁; 6—电液压伺服作动器; 7—反力墙; 8—地锚螺栓; 9—压梁;

图 4 试验加载装置

Fig.4 Test setup



图 5 试验加载现场

Fig.5 Photo of test

试件水平加载采用荷载-位移混合控制方法, 试件屈服前采用荷载控制加载, 屈服后改为位移控制, 以 4 mm 为级差进行逐级往复加载, 每级位移循环三次, 直至荷载下降到峰值荷载的 85%以下停止加载。

1.4 试件破坏形态

本文 5 个试件的破坏过程都经历了弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段, 最终破坏形态如图 6 所示, 对试件破坏过程与破坏形态的描述见表 5。



(a) HDCW-01

(b) HDCW-02

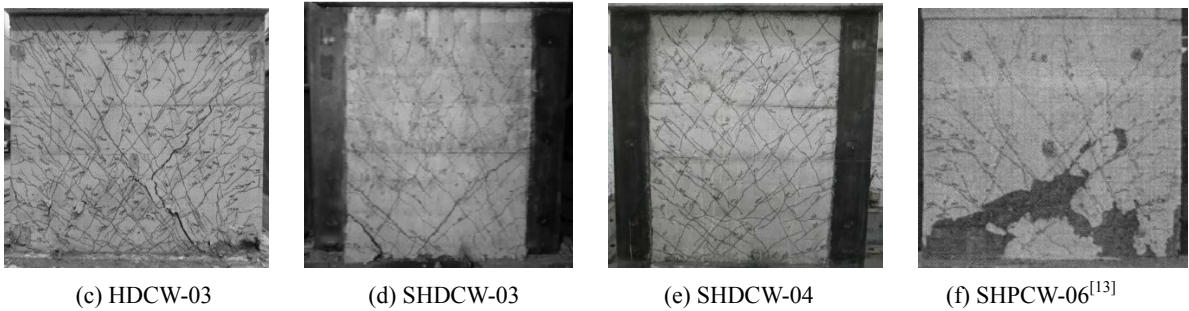


图 6 试件破坏形态
Fig.6 Failure modes of the specimens

表 5 试件破坏过程与破坏形态

试件 编号		破坏过程			破坏形态
		弹性阶段	带裂缝工作阶段	破坏阶段	
HDCW-01		HDC 和钢筋很好的协同工作，承受水平力，墙体底部出现细微斜裂缝和水平裂缝；荷载-位移滞回曲线基本呈线性变化	墙体腹部及底部出现多条斜向裂缝，随着荷载的增加，墙面出现大量细密剪切斜裂缝；纵筋、水平分布筋及箍筋发生屈服	破坏过程中，墙体斜裂缝增多，与原有斜裂缝形成交叉裂缝，裂缝细而密，且墙体伴有“滋滋”的响声；墙体底部水平裂缝延伸、变宽、贯通形成水平剪切滑移裂缝；脚部 HDC 保护层受压外鼓	弯曲屈服后的剪切滑移破坏
HDCW-02		HDC 和钢筋很好的协同工作，承受水平力，墙体底部出现细微斜裂缝；荷载-位移滞回曲线基本呈线性变化	墙体腹部及底部出现较多的斜向裂缝，西侧墙脚出现新的水平裂缝；随着荷载的增加，墙面继续出现较多细长的斜裂缝，原有的斜裂缝分叉延伸较明显；水平分布筋、箍筋及纵筋发生屈服	破坏过程中，少量原有斜裂缝继续延伸；墙板底部斜裂缝快速发展、贯通形成剪切滑移裂缝，且墙体伴有“滋滋”的响声。墙体底部 HDC 保护层出现轻微压碎、剥落现象	弯曲屈服后的剪切滑移破坏
HDCW-03		HDC 和钢筋很好的协同工作，承受水平力，墙体底部出现细微的水平裂缝；荷载-位移滞回曲线基本呈线性变化	墙体底部裂缝密集发展，部分逐渐贯穿至墙底；加载至 500 kN 时，箍筋和水平分布筋被拉断；继续加载，纵筋基本发生屈服	随着位移幅值的不断增大，墙体中部出现交叉斜裂缝，斜裂缝逐渐发展、变宽形成主裂缝；底部 HDC 压碎外鼓，荷载迅速下降，试件破坏以后具有较好的完整性	弯曲屈服后的剪切破坏
SHDCW-03		HDC、钢板和钢筋很好的协同工作，承受水平力，墙体基本没有裂缝出现；荷载-位移滞回曲线基本呈线性变化	墙体底部出现细密的水平裂缝，东侧墙角出现斜裂缝，且逐渐延伸分叉，部分裂缝继续下延与原有裂缝贯通；钢管、钢板及钢筋发生屈服；加载位移至 21.5 mm 时，钢管发生屈服	墙体腹部剪切斜裂缝变宽，墙体下部 HDC 保护层压酥并轻微外鼓；墙体底部钢管受压屈曲外鼓，斜裂缝贯通发展；试件破坏时底部水平裂缝贯通，底部钢板两侧 HDC 受压外鼓	弯剪破坏
SHDCW-04		HDC、钢板和钢筋很好的协同工作，承受水平力，墙体底部出现细微的水平裂缝；荷载-位移滞回曲线基本呈线性变化	墙体腹部出现较多细长斜向裂缝，且原有裂缝变宽延伸；钢管、钢板及钢筋发生屈服；加载位移至 17 mm 时，钢管发生屈曲	墙体中部多条斜裂缝变宽，墙体底部钢管受压屈曲外鼓，同时墙体底部 HDC 保护层有轻微压酥现象；试件破坏时，墙体底部钢板两侧 HDC 受压外鼓	弯剪破坏

1.5 破坏形态分析

5 个 HDC 低矮剪力墙试件的裂缝分布及破坏形态进行比较，具有以下特点。

1) 试件 HDCW-01 和 HDCW-02 的裂缝出现破坏过程相似，墙内钢筋均发生屈服以后，剪力墙底部塑性区弯曲裂缝贯通形成一条水平通缝，从而使剪力墙强度降低，发生弯曲屈服后的剪切滑移破坏。不同之处在于，试件屈服以后，随轴压比增大，

斜裂缝与墙体中和轴的夹角变小。

2) 试件 HDCW-03 由于配置的水平分布筋较少，水平分布筋和箍筋较早被拉断，而发生弯曲屈服后的剪切破坏。与试件 HDCW-02 相比，水平分布筋间距增大，剪切斜裂缝越明显。

3) 钢板-HDC 组合剪力墙 SHDCW-03 和 SHDCW-04 均由于角部 HDC 受压外鼓发生弯剪破坏。不同之处在于，随轴压比增大，墙体脚部 HDC

压酥现象严重, 钢管较晚发生屈曲。

4) 与 HDCW 试件相比, 钢板-HDC 组合试件发生延性较好的弯剪破坏, 承载力显著增加。

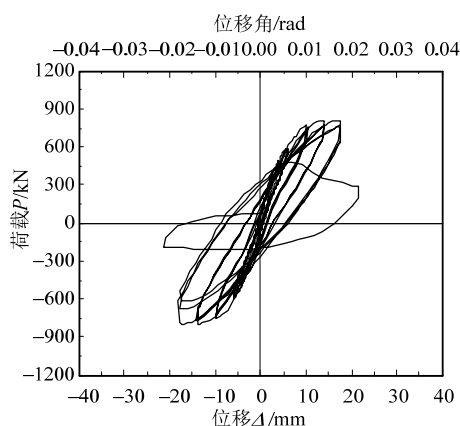
5) 文献[13]中试件 SHPCW-06 发生剪切破坏时, 斜裂缝数量较少, 承载力下降突然, 塑性铰区混凝土压碎剥落严重, 带有明显的脆性(见图 6)。本文 HDC 低矮剪力墙试件破坏时均保持较好的完整性, 斜裂缝沿整个墙面细密开展, 未出现明显的脆性破坏, 表明 HDC 良好的受拉应变硬化特征能显著提高低矮剪力墙的耐损伤能力, 改善其脆性剪切破坏模式。

2 试验结果分析

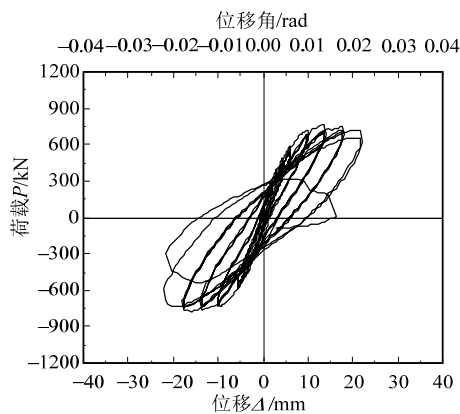
2.1 荷载-位移滞回曲线

试件的顶点水平荷载-位移滞回曲线见图 7。由图 7 可以看出:

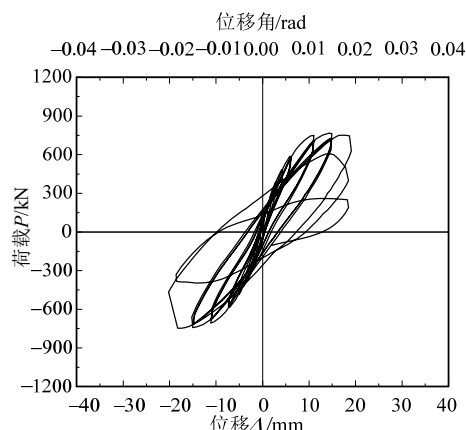
1) 5 个 HDC 低矮剪力墙试件的滞回曲线均比较饱满, 无明显捏缩现象。加载初期, 各试件滞回曲线呈线性变化, 基本无残余变形, 处于弹性工作状态; 屈服后随着加载位移的增加, 试件刚度下降, 卸载后残余变形逐渐增大。



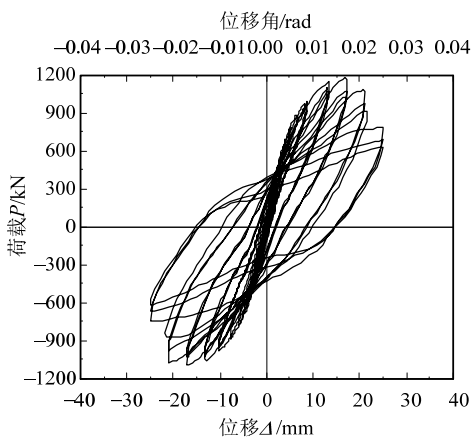
(a) HDCW-01



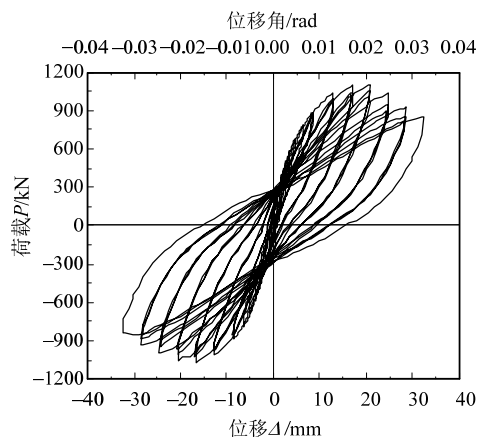
(b) HDCW-02



(c) HDCW-03



(d) SHDCW-03



(e) SHDCW-04

图 7 荷载-位移滞回曲线

Fig.7 Load-displacement hysteretic loops

2) 对 HDC 剪力墙试件, 随轴压比增大, 滞回环面积减小, 峰值荷载之后承载力下降突然; 随水平分布钢筋间距增大, 滞回环面积减小, 耗能能力降低。

3) 与 HDC 试件相比, 2 个钢板-HDC 组合剪力墙试件的滞回性能明显提高, 滞回环更饱满, 峰值荷载后承载力降低和刚度退化缓慢, 表现出较好的抗震性能。

2.2 骨架曲线

5 个 HDC 低矮剪力墙试件的骨架曲线如图 8 所示，由图 8 可以看出：

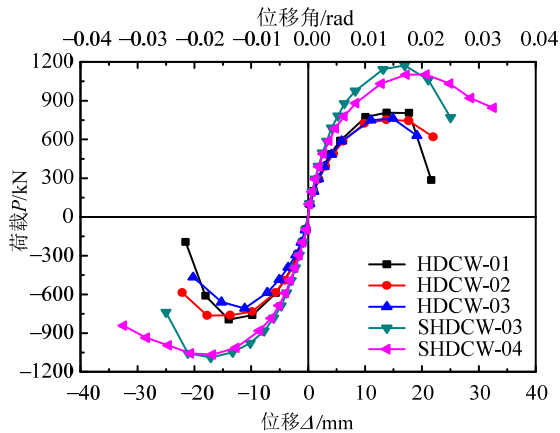


图 8 试件骨架曲线
Fig.8 Skeleton curves of the specimen

1) 3 个 HDC 剪力墙试件的骨架曲线在试件开裂前基本重合。试件达到峰值荷载后，随轴压比增大，承载力下降突然；随水平分布钢筋间距增大，

试件极限位移减小。

2) 与 HDC 剪力墙试件相比，2 个钢板-HDC 组合剪力墙试件的骨架曲线弹性段明显变长，峰值荷载显著提高，主要原因是 HDC 开裂后，钢板承受更多剪力。其中，试件 SHDCW-04 和 SHDCW-03 相比，轴压比降低，达到峰值点以后，承载力下降更为平缓，表现出较好的延性。

2.3 变形能力及延性分析

本文采用极限位移角 θ (构件的极限位移与试件高度的比值)作为其延性指标来分析低矮剪力墙的延性；采用“能量等值法”来确定试件的屈服点。根据《建筑抗震试验方法规程》^[14]规定，取荷载下降至峰值荷载的 85%所对应的点为极限位移点^[14]， H 取值为加载点到剪力墙底部截面的高度。各试件的特征点和位移延性的计算结果如表 6 所示。表 6 给出了文献[13]中 2 个型钢高性能混凝土低矮剪力墙试件以及文献[15]中的 2 个高强混凝土剪力墙的特征点取值，由表 6 可以看出：

表 6 试件的特征点比较

Table 6 Comparison of characteristic point

数据来源	试件编号	剪切开裂荷载 P_{cr}/kN	开裂位移 Δ_{cr}/mm	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_u/kN	极限荷载 $0.85P_u/\text{kN}$	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$	极限位移角 $\theta=\Delta_u/H$
本文 试件	HDCW-01	400	2.65	671	7.62	802	682	17.62	2.31	1/57
	HDCW-02	400	3.05	635	7.27	758	644	20.94	2.88	1/48
	HDCW-03	300	1.85	618	7.52	736	626	17.59	2.34	1/57
	SHDCW-03	500	2.53	960	8.84	1 130	961	22.36	2.53	1/45
	SHDCW-04	500	2.66	910	9.33	1 085	937	28.86	3.09	1/35
文献[13]	SHPCW-05	500	1.7	598	2.46	780	663	4.66	1.89	1/215
	SHPCW-06	450	1.6	572	2.48	829	705	9.87	3.98	1/101
文献[15]	HPCW-08	400	1.50	686	4.35	797	677	18.25	4.20	1/55
	HPCW-09	400	1.62	638	4.48	765	650	12.75	2.84	1/78

1) 试件 HDCW-02 的极限位移为试件 HDCW-01 的 1.19 倍，试件 SHDCW-04 的极限位移为试件 SHDCW-03 的 1.29 倍，说明随着轴压比减小，试件的极限变形能力明显提高；当水平分布筋数量变小，试件 HDCW-03 的变形能力比试件 HDCW-02 有所降低。

2) 与 HDC 试件相比，钢板-HDC 组合剪力墙试件的屈服荷载平均增加了 46%，峰值荷载平均增加了 45%，说明内置钢板有效的提高了 HDC 低矮剪力墙的抗剪承载力；屈服位移平均增加了 22%，极限位移角平均增加了 35%，说明在 HDC 剪力墙内置钢板后，有效提高了变形能力。

3) 与文献[13]和文献[15]中剪跨比为 1.0 的剪力墙相比，本文试件的屈服位移和极限位移显著提高，

说明 HDC 良好的拉伸性能和纤维桥联作用，显著提高了 HDC 低矮剪力墙试件的变形能力。

2.4 耗能分析

各试件在低周反复荷载作用下各特征点的累积耗能如表 7 所示。由表 7 可得：

表 7 累积耗能

Table 7 Energy dissipation of the specimens

试件编号	累积耗能 $E/(\text{kN} \cdot \text{mm})$		
	屈服荷载	峰值荷载	极限位移
HDCW-01	10 462	26 003	100 440
HDCW-02	11 050	54 025	118 649
HDCW-03	12 035	28 828	75 987
SHDCW-03	11 270	59 308	238 452
SHDCW-04	24 372	95 248	314 356

1) 与 HDCW-01 相比，HDCW-02 峰值荷载对

应的累积耗能增加了 1.08 倍, 可见 HDC 低矮剪力墙试件的耗能能力随着轴压比的降低而增加; 与试件 HDCW-03 相比, 试件 HDCW-02 峰值荷载和极限位移时对应的累积耗能分别增加了 87% 和 56%, 可以得到 HDC 低矮剪力墙试件的耗能能力随着水平分布钢筋间距的减小而增大。

2) 与 HDC 剪力墙试件相比, 钢板-HDC 组合剪力墙试件达到峰值荷载时对应的累积耗能平均提高了 1.88 倍, 达到极限位移时对应的累积耗能平均提高了 2.07 倍, 表明在 HDC 低矮剪力墙内置钢板后, 试件的耗能能力大幅度提升。

2.5 刚度与损伤分析

本文采用刚度退化曲线来描述试件的刚度退化现象。等效刚度 K 值计算如式(1), 根据试验结果所得低矮剪力墙的刚度退化曲线如图 9 所示:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+A_i| + |-A_i|} \quad (1)$$

式中: F_i 、 A_i 分别为第 i 次循环的最大荷载及其对应的位移。图 9 为 5 个试件的刚度退化曲线, 由图 9 可以看出:

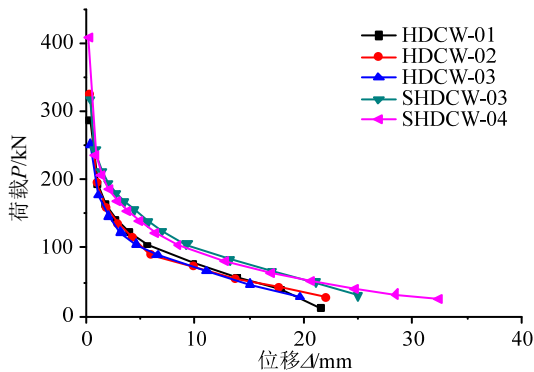


图 9 刚度退化曲线

Fig.9 Curves of stiffness degradation

1) 五个 HDC 剪力墙的初始刚度退化较快, 试件屈服后, 刚度退化曲线逐渐平缓, 说明试件在破坏阶段的损伤程度基本趋于稳定。

2) 两个组合剪力墙的刚度退化曲线均高于其余三个试件, 说明 HDC 与钢板的组合作用, 可以提高 HDC 低矮剪力墙的耐损伤能力。

3 抗剪承载力分析

3.1 基于软化拉-压杆模型的抗剪承载力计算

3.1.1 软化拉-压杆模型

软化拉-压杆模型是 Hwang 等^[16-17]在拉-压杆模型的基础上考虑混凝土的受压软化特性发展起

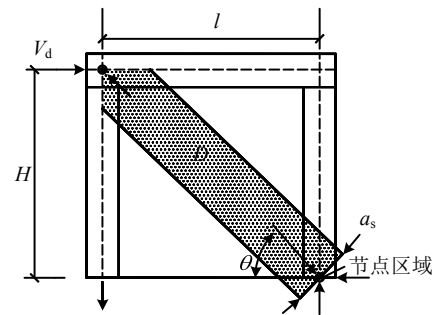
来, 该模型满足平衡条件、变形协调条件和物理方程, 用于计算钢筋混凝土受剪构件承载力有较好的效果。下面以剪力墙为例, 简述采用软化拉-压杆模型分析受剪构件承载力的原理。

当剪力墙出现斜裂缝后, 钢筋承受拉力, 裂缝间的混凝土承受压力, 形成拉-压杆作用。软化拉压杆模型通过 3 个传力机构传递荷载, 分别为斜向机构、水平机构和竖向机构, 如图 10 所示。

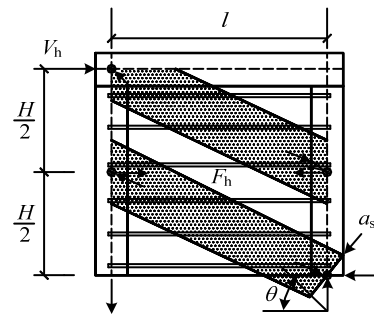
斜向机构为一对角混凝土斜压杆(图 10(a)), 斜向压杆与水平轴向夹角 θ 为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{H}{l}\right) \quad (2)$$

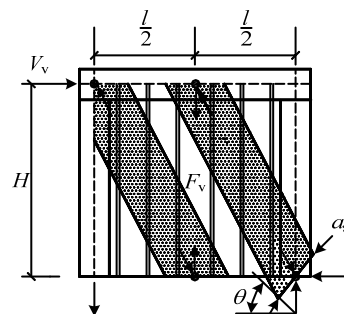
式中: H 为加载点到剪力墙底部截面的高度; l 为剪力墙受压、受拉合力作用点之间的距离。



(a) 斜向机构



(b) 水平机构



(c) 竖向机构

图 10 剪力墙软化拉-压杆模型

Fig.10 Softened strut-and-tie model of shear wall

其有效面积 A_{str} 为:

$$A_{\text{str}} = a_s \times b_s \quad (3)$$

式中, a_s 为剪力墙斜向压杆高度, $a_s \approx a_w$, $a_w = \left(0.25 + 0.85 \frac{N}{A_w f'_c} \right) h^{[18]}$, N 为剪力墙承受的竖向荷载, A_w 为墙体截面面积, f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, h 为剪力墙高度; b_s 为剪力墙斜向压杆宽度, 本文取剪力墙厚度。

水平机构包含一个水平拉杆和两个平缓压杆(图 10(b)), 由墙体内水平分布钢筋组成。

竖向机构包含一个竖向拉杆和两个陡峭压杆(图 10(c)), 由墙体内竖向分布钢筋组成。

在软化拉-压杆模型中, RC 剪力墙的抗剪强度取决于节点区域混凝土的受压承载力, 其承载力由斜向机构、竖向机构和水平机构三者承担的剪力叠加所得。

3.1.2 软化拉-压杆模型方法的简化算法

由于采用软化拉-压杆模型计算构件的抗剪承载力需编程后反复迭代获得, 不易于推广应用。因此, Hwang 将软化拉压杆模型进一步简化^[16], 得到该模型的简化计算方法。下面以 RC 剪力墙为例给出简化算法的公式。

剪力墙的承载力 V 为^[16]:

$$V = K \zeta f'_c A_{\text{str}} \cos \theta \quad (4)$$

式中: K 为拉杆贡献系数^[16]; ζ 为混凝土抗压强度软化系数。

3.1.3 HDC 低矮剪力墙的软化拉压-杆模型

采用软化拉-压杆模型计算 HDC 低矮剪力墙抗剪承载力时, 本文对 HDC 受压软化系数、斜向压杆的有效面积及水平机构、竖向机构承担的拉力进行了修正。

1) HDC 受压软化系数

Suwada 和 Fukuyama^[19]基于试验数据提出了混凝土中掺入 PVA 纤维的软化系数计算公式如下:

$$\zeta = 1 - \frac{200 \varepsilon_r}{1 + 500 \varepsilon_r} \quad (5)$$

由式(5)可得: HDC 材料的软化系数在 0.6 和 1 之间, 软化性能明显高于混凝土。但该公式认为 HDC 材料的软化性能只与垂直于主压应变方向的主拉应变有关, 并未考虑材料强度对软化性能的影响。故本文在式(5)基础上, 参考 Zhang 和 Hsu^[20]提出的混凝土软化系数计算式的强度因素, 提出考虑材料强度的 HDC 的受压软化系数, 计算如下:

$$\zeta = \frac{5.8}{\sqrt{f'_c}} \left(1 - \frac{200 \varepsilon_r}{1 + 500 \varepsilon_r} \right) \quad (6)$$

从式(16)可以看出, HDC 材料的软化系数存在一个下限值, 由于主拉应变的求解需要繁琐的迭代过程, 因此为方便计算, 本文取软化系数的下限值, 即:

$$\zeta = \frac{3.48}{\sqrt{f'_c}} \quad (7)$$

2) 钢板-HDC 组合剪力墙斜向压杆的有效面积

本文在计算钢板-HDC 组合剪力墙的抗剪承载力时, 将钢板简化为等强度的 HDC 墙板, 则内置钢板后 HDC 剪力墙斜向压杆的有效面积计算如下:

$$A_{\text{str}} = a_s \times (b_s + d \times \alpha_E) \quad (8)$$

式中: d 为钢板的厚度; α_E 为钢板和 HDC 的弹性模量比。

3) 水平、竖向机构承担的拉力 F_{yh} 、 F_{yv}

采用软化拉-压杆模型计算 HDC 低矮剪力墙抗剪承载力时, 水平拉杆由水平分布钢筋组成, 竖向拉杆由竖向分布钢筋、暗柱纵筋和方钢管组成, 则水平机构、竖向机构承担的拉力 F_{yh} 、 F_{yv} 计算如下:

$$F_{yh} = A_{sh} f'_{sh} \quad (9)$$

$$F_{yv} = A_s f'_y + A_{sv} f'_{sv} + A_{vf} f'_{vf} \quad (10)$$

式中: A_{sh} 、 f'_{sh} 分别为剪力墙水平分布钢筋作为水平拉杆的总截面面积、屈服强度; A_s 、 f'_y 分别为暗柱纵筋作为竖向拉杆的总截面面积、屈服强度; A_{sv} 、 f'_{sv} 分别为剪力墙竖向分布钢筋作为竖向拉杆的总截面面积、屈服强度; A_{vf} 、 f'_{vf} 分别为方钢管作为竖向拉杆的总截面面积、屈服强度。

4) 基于软化拉-压杆模型计算 HDC 低矮剪力墙抗剪承载力的过程

① 通过式(2)计算 θ ;

② 通过式(3)计算 HDC 剪力墙斜向压杆有效面积 A_{str} ; 通过式(8)计算钢板-HDC 组合剪力墙斜向压杆有效面积 A_{str} ;

③ 通过式(7)计算 HDC 的受压软化系数 ζ ;

④ 通过式(9)计算拉力 F_{yh} 、 F_{yv} ;

⑤ 参照文献[16]中关于计算节点拉杆贡献系数 K 的公式, 计算本文拉压杆系数 K ;

⑥ 通过式(4)计算 HDC 剪力墙抗剪承载力 V 。

3.2 基于规范的抗剪承载力计算

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》^[21]中关于计算混凝土剪力墙偏心受压时斜截面抗剪承载

力公式, 计算 HDC 剪力墙抗剪承载力, 计算公式如下:

$$V \leq \frac{1}{\lambda - 0.5} \left(0.5 f_t b_w h_{w0} + 0.13 N \frac{A_w}{A} \right) + f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \quad (11)$$

根据《组合结构设计规范》^[22]中关于计算内置钢板混凝土组合剪力墙偏心受压时斜截面抗剪承载力的公式, 计算钢板-HDC 组合剪力墙的抗剪承载力, 计算公式如下:

$$V \leq \frac{1}{\lambda - 0.5} \left(0.5 f_t b_w h_{w0} + 0.13 N \frac{A_w}{A} \right) + f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} + \frac{0.3}{\lambda} f_a A_a + \frac{0.6}{\lambda - 0.5} f_p A_p \quad (12)$$

3.3 理论计算值与试验结果对比分析

结合试件的各项参数以及本文的材性试验结果, 利用本文建议的基于软化拉-压杆模型及式(10)、式(11)分别对本文 HDC 低矮剪力墙试件的抗剪承载力进行计算, 结果如表 8 所示。

表 8 试件抗剪承载力对比
Table 8 Comparison of shear capacity

试件编号	P_{exp}	P_{thy}	P_{cal}	误差		误差	
	kN	kN	kN	P_{thy}/P_{exp}	百分比/ (%)	P_{cal}/P_{exp}	百分比/ (%)
HDCW-01	802	781.55	784.57	0.975	-2.55	0.978	-2.17
HDCW-02	758	711.03	784.57	0.938	-6.20	1.035	3.51
HDCW-03	736	706.89	642.65	0.960	-3.96	0.873	-12.68
SHDCW-03	1 130	1 134.19	952.58	1.004	0.37	0.843	-15.70
SHDCW-04	1 085	969.27	952.58	0.893	-10.67	0.878	-12.20

注: 表中 P_{exp} 表示试验值; P_{thy} 表示软化拉-压杆模型计算值; P_{cal} 表示规范计算值。

从表 8 对比分析结果可以看出: 基于软化拉-压杆模型的抗剪承载力计算结果与本文试验所得结果比较吻合, 误差在 10%以内。主要是由于在计算抗剪承载力时, 现行规范仅考虑各影响项的单纯叠加, 而本文基于软化拉-压杆模型将钢板作为斜压杆的一部分, 同时考虑了竖向分布钢筋和方钢管作为拉杆对抗剪承载力的贡献, 在计算理论中充分考虑了 HDC 材料的受压软化特性, 为 HDC 低矮剪力墙抗剪承载力的计算提供较为精确的理论。

4 结论

通过对 5 片 HDC 低矮剪力墙进行水平低周反复荷载试验, 对其各项抗震性能指标及抗剪承载力进行分析, 结论如下:

(1) 与相关文献相比, HDC 低矮剪力墙比普通混凝土低矮剪力墙的极限位移角、承载力均得到明

显提高。纤维的掺入能够有效抑制裂缝的开展, 推迟试件的破坏。

(2) 与 HDC 剪力墙试件相比, 钢板与 HDC 的组合效应能够有效提高低矮剪力墙的承载能力和变形能力。

(3) 试件随着轴压比增大, 累积耗能减小; 随着水平分布钢筋间距增大, 耗能能力下降。钢板与 HDC 的协同作用使 HDC 剪力墙的耗能能力大大提高。

(4) 基于软化拉-压杆模型, 将钢板简化为斜压杆的一部分, 同时考虑了水平分布钢筋、竖向分布钢筋和方钢管作为拉杆对抗剪承载力的贡献, 在计算理论中考虑了 HDC 材料的强度软化性能, 为 HDC 低矮剪力墙抗剪承载力计算提供较为精确的理论。

参考文献:

- [1] 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.
Nie Jianguo, Bu Fanmin, Fan Jiansheng. Experimental research on seismic behavior of low shear-span ratio composite shear wall with double steel plates and infill concrete [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 74—81. (in Chinese)
- [2] 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(6): 60—66, 76.
Nie Jianguo, Bu Fanmin, Fan Jiansheng. Quasi-static test on low shear-span ratio composite shear wall with double steel plates and infill concrete under high axial compression ratio [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 60—66, 76. (in Chinese)
- [3] 吕西林, 干淳洁, 王威. 内置钢板钢筋混凝土剪力墙抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 89—96.
Lü Xilin, Gan Chunjie, Wang Wei. Study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 89—96. (in Chinese)
- [4] 邓明科, 常云涛, 梁兴文, 等. 高延性水泥基复合材料抗压强度尺寸效应的正交试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(7): 80—85.
Deng Mingke, Chang Yuntao, Liang Xingwen, et al. Orthogonal test research on compressive strength size effect of engineered cementitious composites [J]. Industrial Construction, 2013, 43(7): 80—85. (in Chinese)
- [5] 邓明科, 孙宏哲, 梁兴文, 等. 延性纤维混凝土抗弯性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(5): 85—90.

- Deng Mingke, Sun Hongzhe, Liang Xingwen, et al. Experimental study of flexural behavior of ductile fiber reinforced concrete [J]. Industrial Construction, 2014, 44(5): 85—90. (in Chinese)
- [6] 邓明科, 刘海勃, 秦萌, 等. 高延性纤维混凝土抗压韧性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 660—665.
- Deng Mingke, Liu Haibo, Qin Meng, et al. Experimental research on compressive toughness of the high ductile fiber reinforced concrete [J]. Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 660—665. (in Chinese)
- [7] 李艳, 梁兴文, 邓明科. 高性能 PVA 纤维增强水泥基复合材料常规三轴受压本构模型[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 106—113.
- Li Yan, Liang Xingwen, Deng Mingke. A constitutive model for high performance PVA fiber reinforced cement composites under conventional triaxial compression [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 106—113. (in Chinese)
- [8] 邓明科, 张辉, 梁兴文, 等. 高延性纤维混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 62—69.
- Deng Mingke, Zhang Hui, Liang Xingwen, et al. Experimental study on seismic behavior of high ductile fiber reinforced concrete short column [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 62—69. (in Chinese)
- [9] 邓明科, 卢化松, 杨开屏, 等. 型钢高延性混凝土短梁抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 73—80.
- Deng Mingke, Lu Huasong, Yang Kaiping, et al. Experimental study on shear behavior of steel reinforced high ductile concrete short beams [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 73—80. (in Chinese)
- [10] 邓明科, 代洁, 梁兴文, 等. 高延性混凝土无腹筋梁受剪性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 208—217.
- Deng Mingke, Dai Jie, Liang Xingwen, et al. Experimental study on the shear behavior of high ductile fiber reinforced concrete beams without stirrups [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 208—217. (in Chinese)
- [11] 孙宏哲, 邓明科, 孙飞, 等. 半刚接钢框架内填高延性纤维混凝土剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 31(3): 42—51.
- Sun Hongzhe, Deng Mingke, Sun Fei, et al. Experimental study on seismic behavior of semi-rigid steel frames with ductile fiber reinforced concrete infill walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 31(3): 42—51. (in Chinese)
- [12] 邓明科, 方超, 代洁, 等. 高延性纤维混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(2): 57—63.
- Deng Mingke, Fang Chao, Dai Jie, et al. Experimental study on seismic behavior of high ductile fiber reinforced concrete low-rise shear walls [J]. Building Structure, 2017, 47(2): 57—63. (in Chinese)
- [13] 梁兴文, 白亮, 杨红楼, 等. 型钢高性能混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 131—138.
- Liang Xingwen, Bai Liang, Yang Honglou, et al. Experimental study on the seismic behavior of high performance steel-concrete shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10): 131—138. (in Chinese)
- [14] JGJ 101—96, 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- JGJ 101—96, Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [15] 梁兴文, 辛力, 邓明科, 等. 高强混凝土剪力墙抗震性能及其性能指标试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 37—45.
- Liang Xingwen, Xin Li, Deng Mingke, et al. Experimental study on the seismic behavior and performance indexes of high-strength concrete shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 37—45. (in Chinese)
- [16] Hwang Shyh-Jiann, Lee Hung-Jen. Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(12), 1519—1526.
- [17] Hwang Shyh-Jiann, Fang Wen-Hung, Lee Hung-Jen, et al. Analytical model for predicting shear strength of squat walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(1), 43—50.
- [18] Paulay T, Priestley M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992: 273—285.
- [19] Suwada H, Fukuyama H. Nonlinear finite element analysis on shear failure of structural elements using high performance fiber reinforced cement composite [J]. Journal of Advanced Concrete Technology 2006, 4(1): 45—57.
- [20] Zhang L X B, Hsu T T C. Behavior and analysis of 100 MPa concrete membrane elements [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(1): 24—34.
- [21] JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工程出版社, 2010.
- JGJ 3—2010, Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [22] JGJ 138—2012, 组合结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工程出版社, 2012.
- JGJ 138—2012, Code for design of composites structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012. (in Chinese)