

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.012

# 不同抗剪模型下高强混凝土剪力墙数值模拟分析

张艺欣, 郑山锁, 甘传磊, 关永莹, 秦 卿

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

**摘要:**基于修正斜压场理论和扰动应力场模型分别对不同剪跨比的高强混凝土剪力墙拟静力试验进行数值模拟,得到相应的滞回曲线和骨架曲线。与试验数据对比,结果表明:较之于修正斜压场理论模型,基于扰动应力场模型计算的  $P-\Delta$  滞回曲线与试验  $P-\Delta$  滞回曲线吻合更好,得到的破坏形态及裂缝分布图与试验基本相同。充分说明了基于扰动应力场模型的有限元数值模型能够较好地模拟循环荷载作用下的高强混凝土剪力墙构件的滞回特性。

**关键词:**修正斜压场理论; 扰动应力场模型; 高强混凝土剪力墙; 剪跨比; 数值模拟

**中图分类号:** TU375      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0064-07

## Numerical simulation analysis for high-strength concrete shear walls based on different shear model

Zhang Yixin, Zheng Shansuo, Gan Chuanlei, Guan Yongying, Qin Qing

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** The simulations of the nonlinear response of quasi-static tests of HSC shear wall specimens with different shear span ratios under reversed cyclic type loading was carried out. The finite element model based on Modified Compression Field Theory (MCFT) and Disturbed Stress Field Model (DSFM), respectively, is used for HSC shear wall specimens. The hysteretic curves and skeleton curves are compared with the experimental results. The results shows that the simulative hysteretic curves, failure modes and cracking patterns of the finite element models, based on DSFM, is more consistent with the experiment results compared with MCFT. This fully shows that the finite element models, based on DSFM, could simulate the hysteretic Characteristics of HSC shear wall specimens well.

**Key words:** modified compression field theory; disturbed stress field model; HSC shear wall; shear span ratio; numerical simulation

钢筋混凝土剪力墙是高层以及超高层建筑的主要抗侧力构件,而高强混凝土作为一种新的建筑材料,具有抗压强度高、抗变形能力强、密度大、孔隙率低等优点,在高层建筑结构中得到广泛的应用。因此,高强混凝土剪力墙近年来逐渐成为研究热点,对其进行非线性有限元分析亦是相关研究中的难点。杜静<sup>[1]</sup>以修正斜压场为理论基础,对带翼缘普通混

凝土剪力墙进行了模拟,得到的试件极限承载力和位移延性系数与试验值相比,吻合较好;李佳<sup>[2]</sup>利用修正斜压场理论对高强混凝土梁进行了数值模拟,说明采用基于修正斜压场理论能够很好地模拟高强混凝土梁的受弯性能。张川<sup>[3]</sup>、Mostafaei<sup>[4]</sup>利用有限元分析程序 VecTor2 分别对普通混凝土梁、柱进行分析,结果表明扰动应力场模型可以很好的模拟

收稿日期:2015-11-10

基金项目:国家科技支撑计划(2013BAJ08B03);国家自然科学基金(50978218,51108376);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20136120110003);陕西省科研项目(2012K12-03-01,2011KTCQ03-05,2013JC16)

作者简介:张艺欣(1991-),女,硕士生,主要从事钢筋混凝土结构工程研究,(E-mail)zyx19910619@126.com。

钢筋混凝土构件在低周往复循环荷载下的滞回性能,能够有效预测混凝土构件的破坏形态。

文中将基于修正斜压场理论和扰动应力场模型,分别对高( $\lambda = 2.1$ )、中高( $\lambda = 1.5$ )及低矮( $\lambda = 1.0$ )高强混凝土剪力墙试件进行数值模拟,结合试验结果,对数值模拟结果的准确性进行验证,探讨修正斜压场理论和扰动应力场模型对这三类不同剪跨比的高强混凝土剪力墙进行数值模拟的可靠性和适用性。

## 1 试验概况

梁兴文等<sup>[5-6]</sup>为了研究高强混凝土剪力墙在循

环荷载作用下的破坏机理,设计了1组高强混凝土剪力墙拟静力试验,对其抗剪承载力、变形能力以及耗能能力等进行了系统研究。三榀高强混凝土剪力墙构件编号为HPCW-2<sup>[5]</sup>、HPCW-6<sup>[6]</sup>及HPCW-9<sup>[6]</sup>,墙高分别为2.0、1.4、0.9 m,对应的剪跨比分别为2.1、1.5和1.0。剪力墙试件截面尺寸及配筋如图1所示。试验时,构件HPCW-2、HPCW-6及HPCW-9施加的分别为753、1 400、1 000 kN,竖向荷载由液压千斤顶进行施加,水平荷载和位移均通过MTS电液伺服作动器进行施加。钢筋和混凝土材料力学性能值详见表1。

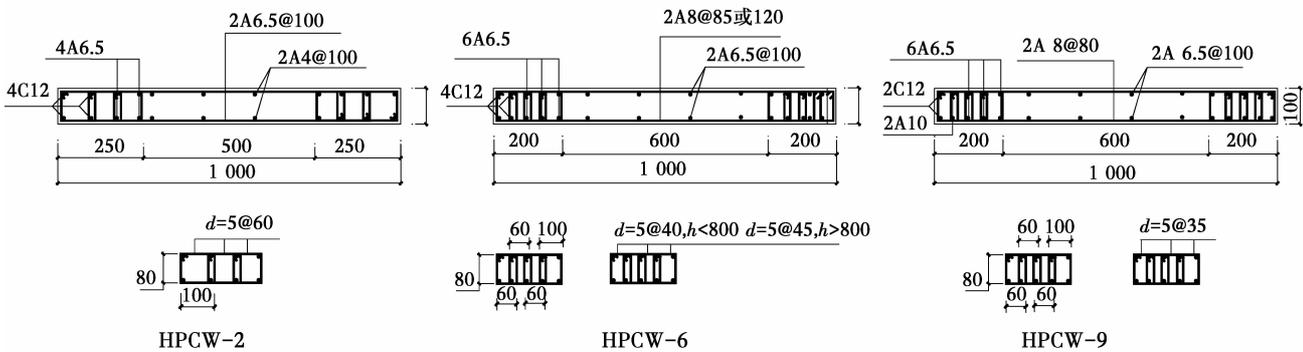


图1 剪力墙试件的截面配筋图(单位:mm)

表1 钢筋和混凝土试块的强度

MPa

钢筋种类	钢筋型号	屈服强度		极限强度		混凝土试块编号	立方体抗压强度	
		HPCW-2	HPCW-6、HPCW-9	HPCW-2	HPCW-6、HPCW-9		HPCW-2	HPCW-6、HPCW-9
HRB400	C 25	460.4	485.1	639.7	485.1	1	61.43	67.9
	C12	433.3	447.9	636.6	447.9	2	73.56	80.1
高强钢丝	d=5			708.2	713.0	3	75.32	88.5
	A 10		445.9		445.9	4	86.02	89.3
HPB235	A 8		428.0		428.0	5	64.17	81.6
	A 6.5	316.6	361.6	506.3	361.6	6	77.33	77.3

## 2 高强混凝土剪力墙拟静力试验的数值模拟

### 2.1 修正斜压场理论和扰动应力场模型简介

2.1.1 修正斜压场理论<sup>[7]</sup> 修正斜压场理论将已开裂的混凝土模拟为裂缝均布于单元体内的连续体,在加载过程中分布在混凝土单元体中的裂缝方向与混凝土中主压应力场方向相一致进行自由转动。该理论以平均应力和平均应变的概念表示平衡条件、变形协调关系以及应力—应变本构关系。并且考虑了拉应力在开裂混凝土中的作用以及裂缝处局部的应力情况。

修正斜压场理论作了如下基本假设:

- 1)假设单元内剪应力和正应力均匀分布;
- 2)假设钢筋弥散在整个单元之中;
- 3)假设裂缝均匀分布在单元中并且可以转动;
- 4)以平均应力和平均应变表示本构关系;
- 5)假设单元主应力场方向与主应变场方向相同;
- 6)假设钢筋和混凝土本构关系彼此独立;
- 7)不考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移;
- 8)忽略钢筋的销栓作用
- 9)不考虑加载历史的影响;

虽然修正斜压场理论的可靠性和准确性已经得

到验证,但是在某些特殊条件下,修正斜压场理论依然存在不足之处<sup>[7-8]</sup>,原因是假设了混凝土单元中主应力场方向与主应变场方向相同。

2.1.2 扰动应力场模型<sup>[9]</sup> Vecchio 在修正斜压场理论研究的基础上提出了扰动应力场模型。在修正斜压场理论原有变形协调关系中考虑了裂缝剪切滑移变形,同时去掉了修正斜压场理论中的裂缝间剪力传递机构的验算,直接评估裂缝间的剪切滑移变形。将混凝土单元体因应力产生的平均应变与由裂缝剪切滑移变形引起的平均应变区分开来。考虑了主应力场方向与主应变场方向之间的滞后现象,摒弃了修正斜压场理论中主应力场方向与主应变场方向相同的假设,提出了“弥散滞后的转动裂缝模型(smearred delayed rotating crack model),改进了钢筋和混凝土的本构关系。

### 2.2 模拟分析平台

采用非线性有限元分析程序 VecTor2 作为数值模拟工具。VecTor2 由多伦多大学的学者们在对钢筋混凝土结构的研究和对有限元法的应用基础上开发而成。它采用修正斜压场理论(MCFT)和扰动应力场模型(DSFM)作为理论基础,对二维钢筋混凝土膜结构进行有限元分析。VecTor2 中包含多种有关钢筋和混凝土的模型,辅以有限元法的强大分析能力,它可以比线弹性方法得到更准确的结构性能评价<sup>[10]</sup>。VecTor2 中包含多种单元类型,其中混凝土单元有:常应变三角形单元、平面应力矩形单元和四节点四边形单元;钢筋单元有:桁架杆单元;粘结滑移单元有:两节点粘结单元和四节点接触单元。

### 2.3 材料本构模型

高强混凝土材料本构模型的特点为:试件开始受力后,应力应变接近按线性增大,应力超过峰值点后迅速下降,而变形增加较少,形成陡峭的下降段。混凝土强度越高,峰值点后的强度衰减越快。文中高强混凝土受压本构模型采用 Popovics (High-Strength)模型<sup>[11]</sup>,如图 2 所示,应力-应变关系表达式见式(1)~式(3)。受拉本构模型采用 VecTor2 程序中默认的 Modified Bentz 2003<sup>[12]</sup>本构模型。钢筋材料的本构模型采用考虑强度退化的非线性模型,如图 3 所示。其中,  $P$  是应变强化参数。

$$f_{ci} = - \left( \frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_p} \right) f_p \frac{n}{n - 1 + \left( \frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_p} \right)^{nk}} \quad (\epsilon_{ci} < 0) \quad (1)$$

$$n = 0.80 + \frac{f_p}{1.7} \quad (2)$$

$$k = \begin{cases} 1.0 & \epsilon_p < \epsilon_{ci} < 0 \\ 0.67 + \frac{f'_p}{6.2} & > 1.0 \quad \epsilon_{ci} < \epsilon_p < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_{ci}$  为混凝土主压应力;  $n$  为考虑不同混凝土强度的线性拟合参数;  $k$  为混凝土应变影响参数。

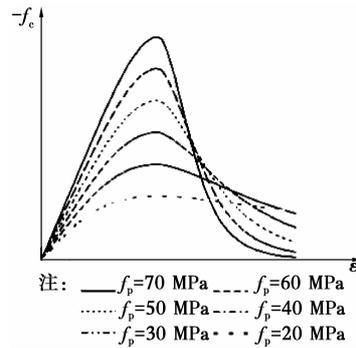


图 2 混凝土材料受压本构模型

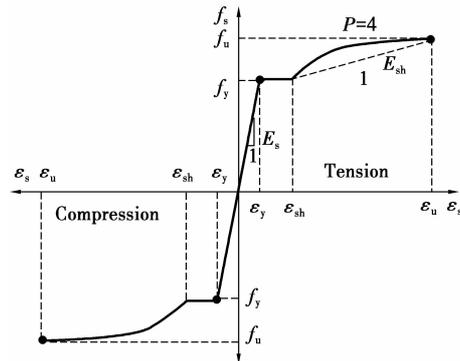


图 3 钢筋材料本构模型

### 2.4 有限元分析模型的建立

采用平面应力矩形单元对剪力墙试件建立有限元模型。考虑到剪力墙边缘约束区域内箍筋对高强混凝土的约束作用,将剪力墙边缘约束区域和墙身的混凝土分别定义为两种强度不同的混凝土材料。对钢筋进行模拟时,将纵向受力钢筋、纵向分布钢筋、横向分布钢筋以及箍筋定义为弥散钢筋(smearred reinforcement),包含在混凝土材料的属性中,模型中配筋率与试验相同。由于修正斜压场理论缺少对裂缝剪切滑移变形的计算,因此仅在扰动应力场模型中考虑钢筋的销栓作用。钢筋的屈曲行为的模拟在 VecTor2 程序中无法实现,在分析时不考虑钢筋的屈曲行为。其余模型参数参 VecTor2 程序的用户手册<sup>[13]</sup>选取。

根据试验加载条件,剪力墙基座有固定于地面的水平装置限制其水平位移,因此有限元模型中的

边界条件亦约束剪力墙基座各结点的水平位移。按照试验所采用的加载制度对剪力墙模型进行加载, 直至构件破坏。

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 $P-\Delta$ 滞回曲线

基于修正斜压场理论和扰动应力场模型分别对高强混凝土剪力墙试件 HPCW-2、HPCW-6 和 HPCW-9 进行数值模拟, 得到的  $P-\Delta$  滞回曲线, 如图 4 所示。可以看出:

1) 对于剪跨比分别为 2.1、1.5 和 1.0 的高强混凝土剪力墙试件, 基于修正斜压场理论和扰动应力场模型得到的  $P-\Delta$  滞回曲线, 均未能反映实际构件的强度和刚度退化。

2) 修正斜压场理论和扰动应力场模型均高估了剪力墙  $P-\Delta$  滞回曲线的“捏拢效应”, 扰动应力场模

型考虑了裂缝剪切滑移变形, 因此随着循环次数的增加, 试件的残余变形不断增大, 与试验  $P-\Delta$  滞回曲线吻合较好。

3) 采用修正斜压场理论对各剪力墙试件进行模拟, 试件 HPCW-2 在达到目标位移后仍有一定的变形能力, 试件 HPCW-6 和试件 HPCW-9 均未达到目标位移便提前破坏; 基于扰动应力场模型对各剪力墙试件进行模拟, 试件 HPCW-2 在达到目标位移的第一次循环时破坏, 试件 HPCW-6 和试件 HPCW-9 均达到目标位移, 与试验基本一致。产生上述差异的主要原因是: 构件产生剪切变形时, 除裂缝表面的骨料咬合作作用和箍筋的拉力之外, 纵向主筋的销栓作用在很大程度上延缓了混凝土沿斜拉裂缝的滑动<sup>[14]</sup>, 而修正斜压场理论没有考虑纵向受力钢筋的销栓作用。

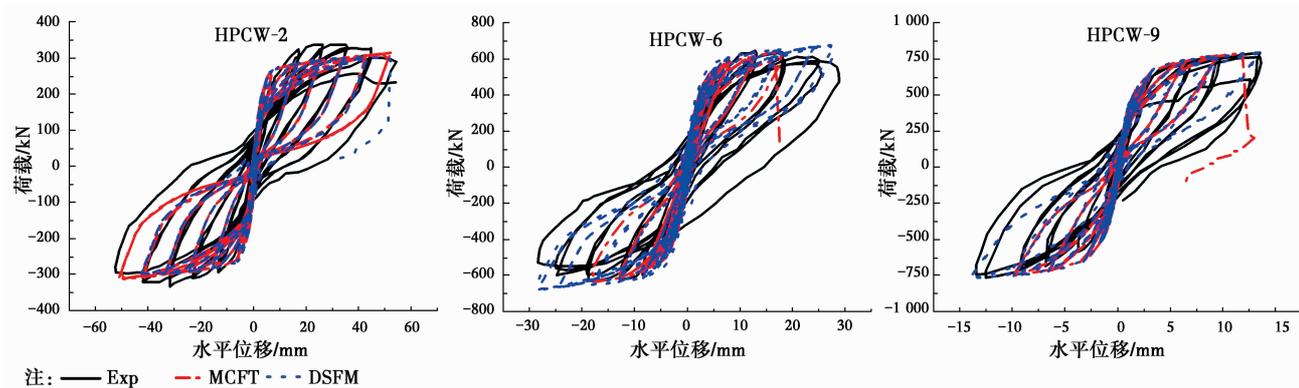


图 4  $P-\Delta$  滞回曲线数值分析结果与试验结果对比

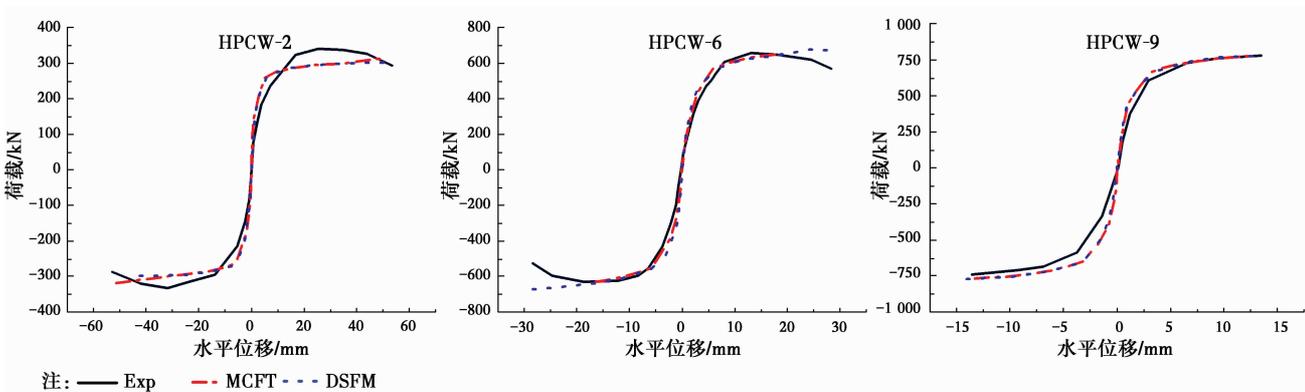


图 5 骨架曲线数值分析结果与试验结果对比

#### 3.2 骨架曲线

根据数值模拟结果和试验数据, 分别绘制 3 根高强混凝土剪力墙试件的骨架曲线, 如图 5 所示。

可以看出:

1) 正向加载骨架曲线与反向加载骨架曲线对称, 与试验骨架曲线基本一致。

2)达到屈服荷载前,基于修正斜压场理论和扰动应力场模型模拟分析得到的试件刚度值和强度值均大于试验值。

3)对于发生弯曲破坏的试件(HPCW-2和HPCW-6,HPCW-6的破坏形态基本为弯曲破坏<sup>[5]</sup>),修正斜压场理论和扰动应力场模型均未能模拟出骨架曲线的下降段。对于发生剪切破坏的试件(HPCW-9),2种模型模拟得到的骨架曲线与试验基本一致。

### 3.3 特征点参数

根据骨架曲线,得到高强混凝土剪力墙试件各特征点参数,见表2~表4。可以看出:

1)试件HPCW-2( $\lambda = 2.1$ )峰值位移的预测值与试验值偏差较大,但屈服位移的预测值与试验值吻合较好。对于试件HPCW-6( $\lambda = 1.5$ )和试件HPCW-9( $\lambda = 1.0$ ),2种模型都能较好的预测其峰值位移和屈服位移。

2)基于修正斜压场理论对各剪力墙试件进行模拟,试件HPCW-6( $\lambda = 1.5$ )提前破坏导致其峰值荷载较小。除上述情况外,2种模型都能较好的预测不同剪跨比的高强混凝土剪力墙试件的屈服荷载和峰值荷载,并且误差均在10%以内。

表2 试件HPCW-2特征点试验结果与数值分析结果对比

	Exp	MCFT	MCFT	DSFM	DSFM
			Exp		Exp
屈服荷载/kN	255.50	277.48	1.09	272.22	1.07
屈服位移/mm	9.00	10.64	1.18	7.45	0.83
峰值荷载/kN	332.69	313.20	0.94	299.55	0.90
峰值位移/mm	28.22	51.32	1.82	39.97	1.42

表3 试件HPCW-6特征点试验结果与数值分析结果对比

	Exp	MCFT	MCFT	DSFM	DSFM
			Exp		Exp
屈服荷载/kN	547.20	571.39	1.04	574.93	1.05
屈服位移/mm	6.82	6.25	0.92	7.31	1.07
峰值荷载/kN	637.30	553.00	0.87	676.45	1.06
峰值位移/mm	23.64	17.55	0.74	28.35	1.20

表4 试件HPCW-9特征点试验结果与数值分析结果对比

	Exp	MCFT	MCFT	DSFM	DSFM
			Exp		Exp
屈服荷载/kN	675.00	662.29	0.98	672.52	1.00
屈服位移/mm	4.48	3.26	0.73	3.50	0.78
峰值荷载/kN	772.56	764.65	0.99	776.70	1.01
峰值位移/mm	12.66	10.85	0.86	13.77	1.09

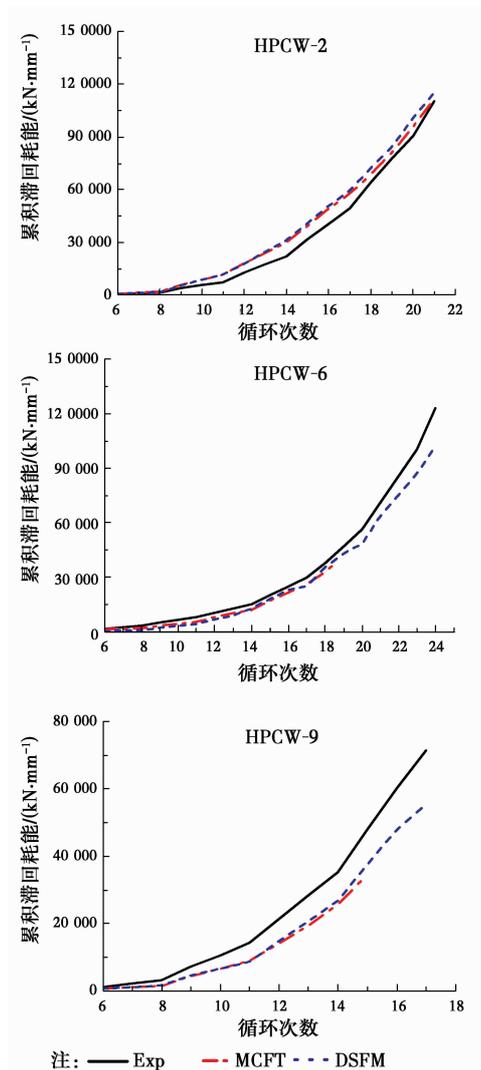


图6 累积滞回耗能及与循环次数关系曲线

### 3.4 耗能能力

根据数值模拟结果和试验数据,分别计算绘制出3榀高强混凝土剪力墙试件的累积滞回耗能及与循环次数关系曲线,如图6所示。可以看出:

1)扰动应力场模型可以较好的模拟出剪力墙的“捏拢效应”,因此每次循环得到的累积滞回耗能略

高于基于修正斜压场理论模拟得到的累积滞回耗能。

2) 对于试件 HPCW-2 ( $\lambda = 2.1$ ), 基于修正斜压场理论和扰动应力场模型模拟得到的每次循环下的累积滞回耗能均略高于试验值。对于试件 HPCW-6 ( $\lambda = 1.5$ ) 和试件 HPCW-9 ( $\lambda = 1.0$ ), 2 种模型模拟得到的每次循环下的累积滞回耗能均略低于试验值。

各剪力墙试件总滞回耗能的试验结果与数值分析结果对比见表 5。基于扰动应力场模型模拟得到的总滞回耗能与试验值吻合较好, 可以较好的反映不同剪跨比的高强混凝土剪力墙试件在循环荷载作用下的耗能能力。

表 5 试件总滞回耗能的试验结果与数值分析结果对比

	Exp/ (kN · mm)	MCFT/ (kN · mm)	MCFT Exp	DSFM/ (kN · mm)	DSFM Exp
HPCW-2	110 213.5	111 651.4	1.01	115 020.1	1.04
HPCW-6	122 985.3	40 928.1	0.33	101 924.2	0.83
HPCW-9	71 378.2	29 622.5	0.42	55 255.7	0.77

### 3.5 试件破坏形态及裂缝分布

图 7 为各高强混凝土剪力墙试件的破坏形态及裂缝分布, 为了便于观察, 模拟得到的破坏形态及裂缝分布图均为变形放大 10 倍后的单侧变形图。由图可见:

1) 对于试件 HPCW-2 ( $\lambda = 2.1$ ), 2 种模型模拟得到的破坏形态与试验相同, 均发生弯曲破坏, 且裂缝分布情况与试验裂缝分布基本一致。

2) 对于试件 HPCW-6 ( $\lambda = 1.5$ ), 基于扰动应力场模型模拟得到的破坏形态及裂缝分布图与试验破坏形态及裂缝分布一致, 均发生弯曲破坏。而基于修正斜压场理论模拟得到剪力墙的破坏形态为剪切滑移破坏。

3) 对于试件 HPCW-9 ( $\lambda = 1.0$ ), 基于扰动应力场模型模拟得到的破坏形态及裂缝分布图与试验破坏形态及裂缝分布一致, 均发生斜压破坏。而基于修正斜压场理论模拟得到剪力墙破坏形态为剪切滑移破坏。

基于扰动应力场模型模拟得到的各试件的破坏形态及裂缝分布图与试验基本相同, 较之于修正斜压场理论, 扰动应力场模型能够更好地模拟不同剪跨比的高强混凝土试件的破坏形态及裂缝分布。

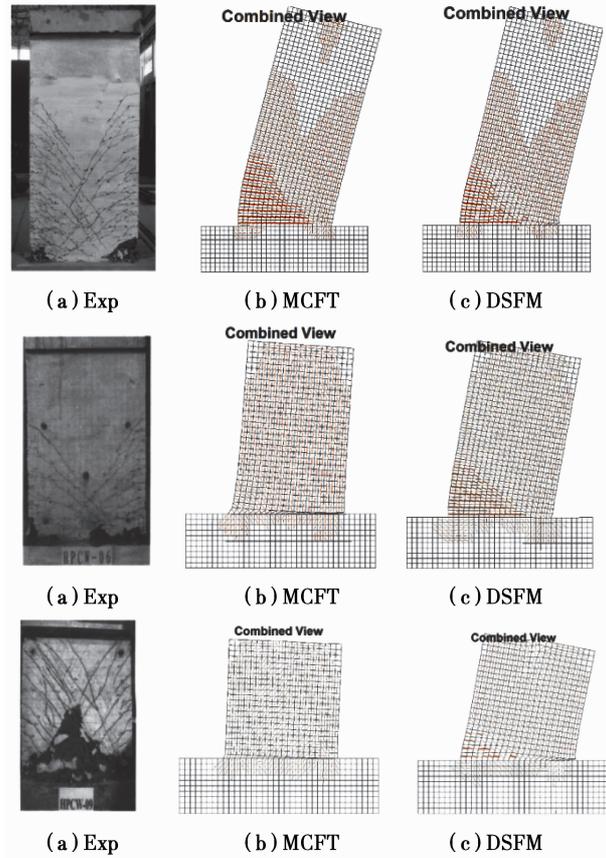


图 7 各试件破坏形态及裂缝分布

## 4 结 论

1) 采用 Popovics (high strength) 本构模型, 对比基于修正斜压场理论和扰动应力场模型模拟得到的各试件的  $P-\Delta$  滞回曲线、骨架曲线、累积滞回耗能、试件破坏形态及裂缝分布等分析结果, 表明基于扰动应力场模型的有限元数值模型能够较好地模拟高强混凝土剪力墙构件在循环荷载作用下的滞回特性。

2) 基于修正斜压场理论和扰动应力场模型模拟循环荷载作用下高强混凝土剪力墙的滞回特性时, 均存在初始刚度和强度值偏大现象。

3) 扰动应力场模型较适用于模拟发生明显剪切变形的剪跨比较小的高强混凝土剪力墙试件。

课题组后继研究, 将基于扰动应力场模型, 以裂缝宽度和钢筋是否屈服作为损伤极限状态, 建立 RC 剪力墙构件的试验易损性曲线。

### 参考文献:

[1] 杜静. 钢筋混凝土剪力墙的抗震抗剪性能研究及有限

- 元模拟[D]. 重庆:重庆大学, 2004.
- [ 2 ] 李佳. 高强钢筋混凝土梁受弯性能数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [ 3 ] 张川, 蒋宁. 用扰动应力场模型模拟深受弯简支梁的受力性能[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(1): 47-50.
- [ 4 ] Mostafaei H, Vecchio F J, Kabeyasawa T. Nonlinear displacement-based response prediction of reinforced concrete columns [ J ]. Journal of Engineering Structures, 2008, 30 (9): 2436-2447.
- [ 5 ] 梁兴文, 邓明科, 张兴虎, 等. 高性能混凝土剪力墙性能设计理论的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (5): 80-87.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Vecchio F J , Collins M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete element subjected to shear [J]. ACI Structural Journal, 1986: 219-231.
- [ 8 ] Bhide S B , Collins M P. Influence of axial tension on the shear capacity of reinforced concrete members [J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(5): 570-581.
- [ 9 ] Vecchio F J. Disturbed stress field model for reinforced concrete; formulation [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2000, 126(9): 1070-1077.
- [10] 陈玺. 有限元法在钢筋混凝土框架节点中的应用[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
- [11] Collins M P, Porasz A. Shear design for high strength concrete [ J ]. Comité Euro-International du Béton, Bulletin d' Information 1989, 193: 77-83.
- [12] Bentz E C. Explaining the riddle of tension stiffening models for shear panel experiments [J]. Struct. Eng. 2005, 131(9): 1422-1425.
- [13] Wong P S , Vecchio F J. VecTor2&FormWorks Users ' Manual [Z]. August, 2013.
- [14] 贺小岗, 美国雄. 钢筋销栓模型及其在深梁分析中的应用[J]. 工程力学, 2001, 18(1): 96-102.

(编辑 陈移峰)