

DOI:10.11918/202102071

对混凝土剪力墙静态破碎效果的试验研究

李瑞森^{1,2}, 郑文忠^{1,2}, 姜智盛^{1,2}, 郭常顺^{1,2}, 王 英^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 为考察成孔方式、剪力墙厚度等对混凝土剪力墙静态破碎效果的影响,开展了9片混凝土剪力墙试件的静态破碎试验。采用倾斜向下斜交于墙片侧面打孔、注入静态破碎剂进行破碎和垂直向下垂直于墙片顶面打孔、注入静态破碎剂进行破碎这两种破碎方案。为提高破碎效果,在墙片侧面打孔后用锯片切断钻孔侧的竖向分布钢筋,在墙片顶面打孔后用锯片切断两侧的水平分布钢筋。试验结果表明:采用这两种破碎方案,破碎后产生的块体短边尺寸为孔间距或者孔边距;倾斜向下斜交于墙片侧面打孔并注入静态破碎剂后,试件的割缝平均宽度随墙片厚度的增加逐渐增大;垂直向下垂直于墙片顶面打孔并注入静态破碎剂后,试件的割缝平均宽度与墙厚无关;破碎效果的先后顺序为:垂直向下垂直于墙片顶面打孔并切断两侧水平分布钢筋 > 垂直向下垂直于墙片顶面打孔不切断钢筋 > 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔并切断钻孔侧竖向分布钢筋。

关键词: 静态破碎;混凝土剪力墙;墙厚;切断钢筋;破碎效果

中图分类号: TU746

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)10-0023-08

Experimental study on static crushing effect of concrete shear walls

LI Ruisen^{1,2}, ZHENG Wenzhong^{1,2}, JIANG Zhisheng^{1,2}, GUO Changshun^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To investigate the influence of hole forming methods and the thickness of shear wall on the static crushing effect of concrete shear walls, static crushing tests of nine concrete shear wall specimens were carried out. Two crushing methods were adopted: one is drilling holes on the side of the wall obliquely downwards and injecting static crushing agent for crushing, and the other is drilling holes perpendicular to the top surface of the wall and injecting static crushing agent for crushing. In order to improve the crushing effect, the vertically distributed steel bars on the side of the wall were cut off with a saw blade after drilling on the side of the wall, and the horizontally distributed steel bars on both sides of the wall were cut off with the saw blade after drilling on the top of the wall. Test results show that with these two crushing schemes, the short side size of the block produced after crushing was the hole spacing or hole edge spacing. After injecting static crushing agent, with the increment of the wall thickness, the average width of the slits of the specimens drilled obliquely on the side increased, while for the specimens drilled vertically on the top surface, the average width of the slits had no obvious correlation with the wall thickness. The order of the crushing effect was: drilling holes on the top of the wall vertically and cutting off the horizontally distributed steel bars > drilling holes on the top of the wall without cutting the steel bars > drilling holes on the side of the wall obliquely downwards and cutting off the vertically distributed steel bars.

Keywords: static crushing; concrete shear wall; wall thickness; cutting steel bars; crushing effect

静态破碎剂是一种粉状或粒状的化学材料,通常呈浅灰或黑色,具有非易燃、非易爆、吸湿等特性,静态破碎剂与水混合形成浆体、发生放热反应并产生显著的体积膨胀^[1]。将静态破碎剂浆体注入钻孔后,伴随着破碎剂浆体的膨胀结硬,沿孔环向会产生逐渐增大的拉应力,当拉应力高于材料的抗拉强

度时,膨胀裂缝出现并发展,实现破碎^[2]。与爆破拆除的瞬时破坏相比,从灌入静态破碎剂浆体到实现破碎通常会经过1~2 d的时间,类似于一个准静态过程,几乎不产生振动、飞石、烟尘及噪音,也无高温、高压及明火产生,因此更为适用于城镇建筑密集区建筑的拆除。

廖静^[3]制作了200 mm × 200 mm × 200 mm的钢筋混凝土试块和素混凝土试块,钢筋混凝土试块采用直径3.5 mm的钢丝代替钢筋,钢丝通过焊接连接,配置8φ3.5的纵筋和φ3.5@140的箍筋,两

收稿日期: 2021-02-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806100)

作者简介: 李瑞森(1995—),男,博士研究生;

郑文忠(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 郑文忠, hitzzheng@163.com

种试块中央预留孔径为 25 mm 的单孔,通过静态破碎试验发现钢筋混凝土膨胀裂缝的宽度小于素混凝土。崔年生等^[4]制作了 150 mm × 150 mm × 150 mm 的素混凝土试块并在试块中部预留孔径为 30 mm、孔深为 110 mm 的圆孔,试块的混凝土强度等级分别为 C20、C25 和 C30,通过静态破碎试验发现:当混凝土强度相同、静态破碎剂浆体水剂比在 0.25 ~ 0.35 之间变化时,水剂比越低,试件开裂越早,裂缝扩展越快。何翔^[5]制作了 200 mm × 200 mm × 200 mm 和 600 mm × 200 mm × 200 mm 的素混凝土试件,并分别采用在试件中部仅预留竖直孔、竖直孔与水平孔结合形成交叉孔两种布孔方式,采用交叉孔的试件开裂仅用 1 h,比采用竖直孔的试件开裂时间提前 4 h。姜智盛等^[6]制作了标准立方体抗压强度实测值为 47.7 MPa 的 13 个素混凝土单孔试件并进行了静态破碎试验,将试件内切圆内混凝土的面积与注入破碎剂的钻孔面积之比定义为约束比,发现孔径和约束比对混凝土开裂时间影响很大,开裂时间随着孔径的增大而缩短,随着约束比的增大而延长。

到目前为止,素混凝土块体的静态破碎试验研究依旧占较大比重,对于钢筋影响及混凝土构件的静态破碎研究较少。高层和超高层建筑大量应用混凝土剪力墙,高层建筑绝大部分处于建筑密集区,开展静态破碎混凝土剪力墙的研究具有重要的理论意义和实用价值。

1 试验概况

本文试验的 9 个剪力墙试件的编号及相关参数见表 1,配筋见图 1,保护层厚度 20 mm。剪力墙试件所用混凝土边长 100 mm 的立方体的抗压强度为 35.95 MPa。表中 W-n-H 表示墙片编号为 W-n,倾斜向下斜交于墙片侧面打孔;W-n-V 表示墙片编号为 W-n,竖直向下垂直于墙片顶面打孔。结合目前实际工程的经验及 Huynh 等^[7]的建议,钻孔深度取为拟破碎深度的 80% (计划破碎的深度为 Δh_0 时,钻孔深度取为 80% (Δh_0)),孔径取手持钻头的最大直径 42 mm。根据刘纪峰等^[8]总结的钻孔参数,将两孔之间的间距取为 300 mm,孔边距取为保护层厚度和一半孔间距之和,孔位布置见图 2。本试验所使用的静态破碎剂为施必达(大连)公司生产的 S-611-1 石灰型无声爆破剂,应用气温范围为 20 ~ 40 °C,使用时用自来水搅拌后灌入孔中,利用徐笠博^[9]提供的方法发现:当水剂比(质量比)为 0.3 时,静态破碎剂体积的自由膨胀率达到最大值 310%。采用改进后的“电阻应变片法”^[10-11]测量静态破碎剂的径向膨胀压应力,所用无缝钢管的

内径为 40 mm、外径为 50.7 mm、高度为 500 mm,钢管底部焊接 6 mm 厚钢板封堵,管口不做封堵,测量得到水剂比为 0.3 的静态破碎剂在 48 h 时的最大径向膨胀压应力为 23.82 MPa。

表 1 混凝土剪力墙设计参数

Tab. 1 Design parameters of concrete shear walls

编号	墙竖向高度 H/mm	墙横截面 高度 h/mm	墙厚 b/mm	孔深 Δh /mm	孔径 d/mm	孔间距 s/mm													
W-1-H	950	950	160	150	42	300													
W-2-H	950	950	180	170	42	300													
W-3-H	950	950	200	190	42	300													
W-4-H	950	950	220	210	42	300													
W-5-H	950	950	240	230	42	300													
W-6-V	950	950	200	800	42	300													
W-7-V	950	950	220	800	42 </tr <tr> <td>W-8-V</td> <td>950</td> <td>950</td> <td>240</td> <td>800</td> <td>42</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>W-9-V</td> <td>950</td> <td>950</td> <td>240</td> <td>800</td> <td>42</td> <td>300</td> </tr>	W-8-V	950	950	240	800	42	300	W-9-V	950	950	240	800	42	300
W-8-V	950	950	240	800	42	300													
W-9-V	950	950	240	800	42	300													

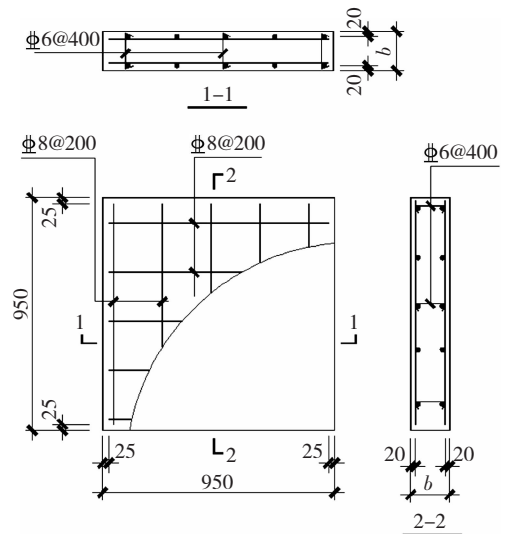
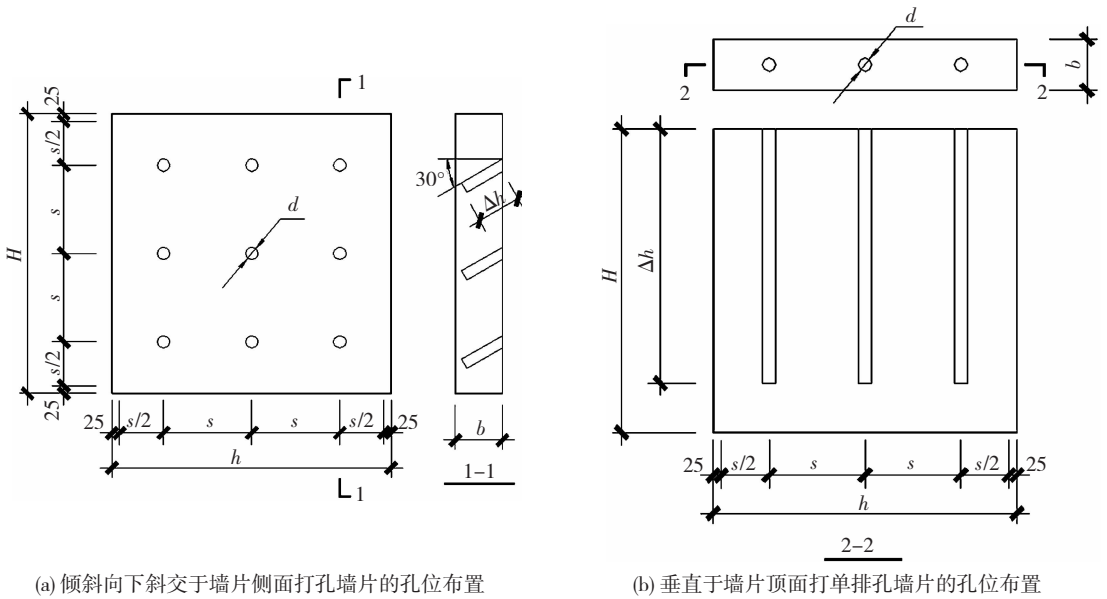


图 1 混凝土剪力墙片配筋 (mm)

Fig. 1 Reinforcement of concrete shear wall (mm)

分析钢筋混凝土柱墩和素混凝土试件的静态破碎试验结果可以发现:钢筋虽然无法避免混凝土在静态破碎过程中的开裂,但钢筋骨架却可以延缓混凝土的松散酥碎,同时钢筋混凝土柱墩膨胀裂缝的宽度远小于素混凝土块体^[6,9]。因此,为提高静态破碎的效果,本试验在进行静态破碎前对剪力墙试件内的钢筋进行了“松绑”处理,即利用墙锯将阻碍膨胀裂缝发展的钢筋割断:倾斜向下斜交于墙片侧面打孔的试件仅切断钻孔侧的竖向分布钢筋,竖直向下垂直于墙片顶面打孔的试件在竖孔两侧切断墙片的水平分布钢筋,割缝深度均为 35 mm,具体处理方案见图 3。其中墙片 W-9-V 仅割裂混凝土,不割断钢筋,割缝深度为 15 mm,与墙片 W-8-V 形成对照。

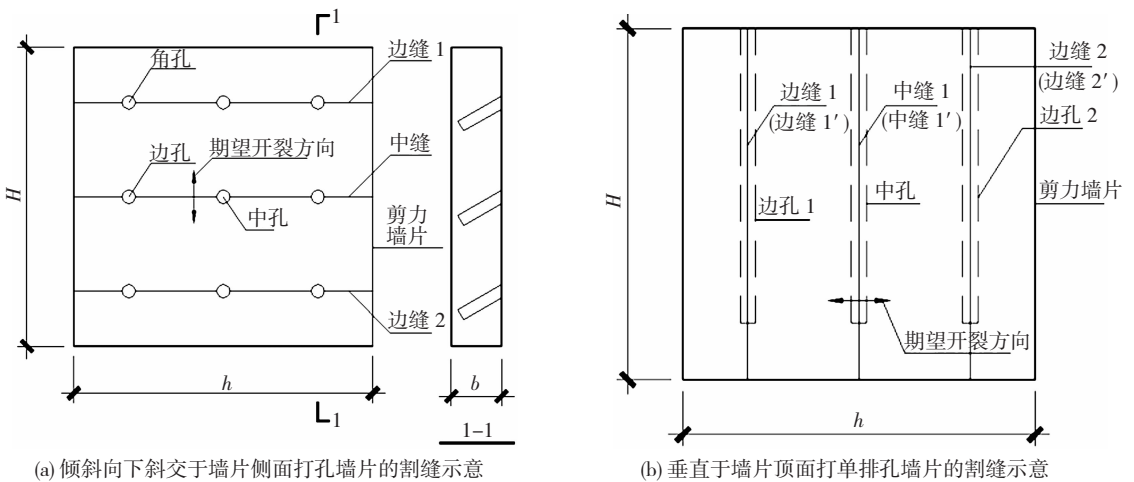


(a) 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔墙片的孔位布置

(b) 垂直于墙片顶面打单排孔墙片的孔位布置

图 2 孔位布置

Fig. 2 Borehole arrangement



(a) 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔墙片的割缝示意

(b) 垂直于墙片顶面打单排孔墙片的割缝示意

图 3 待破碎试件割缝示意

Fig. 3 Schematic of slits of specimens

考虑到实际应用和工程经验,将破碎剂浆体注入孔内后不采取封堵措施,并在 52 h 内记录 6 次混凝土剪力墙片上裂缝宽度的变化。试件 W-1-H、W-2-H、W-3-H、W-4-H、W-5-H 灌入静态破碎剂的时间为 2020 年 8 月 30 日 8:15 至 8:35,日间平均温度 21 ℃,夜间平均温度 18 ℃。试件 W-6-V、W-7-V、W-8-V、W-9-V 灌入静态破碎剂的时间为 2020 年 9 月 11 日 9:15 至 9:30,日间平均温度 19 ℃,夜间平均温度 13 ℃。

2 试验结果与分析

2.1 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔时静态破碎的试验现象与分析

倾斜向下斜交于墙片侧面打孔的试件在静态破

碎过程中平放在地面,即墙厚方向与地面垂直,破碎过程中有代表性的照片见图 4。为方便描述,将钻孔分为边孔、角孔和中孔三类,割缝分为中缝和边缝两类,具体见图 3(a)。分析时所用割缝宽度均为表面宽度,割缝平均宽度为每条割缝取 10 个测点的平均值。所有试件注入静态破碎剂顺序为先注入周围、再注入中心,同一个试件灌药最大时间间隔 1 min,由于静态破碎剂反应较慢,因此可以认定为同时注入。

分析上述 5 片剪力墙在静态破碎过程中的试验现象可以发现:

1) 0 ~ 6.3 h,试件割缝宽度无明显变化。

2) 8.4 ~ 9.2 h,试件边缝 2 宽度增大,中缝和边缝 1 的宽度变化不大。试件 W-5-H 的割缝宽度明显大于其他试件。

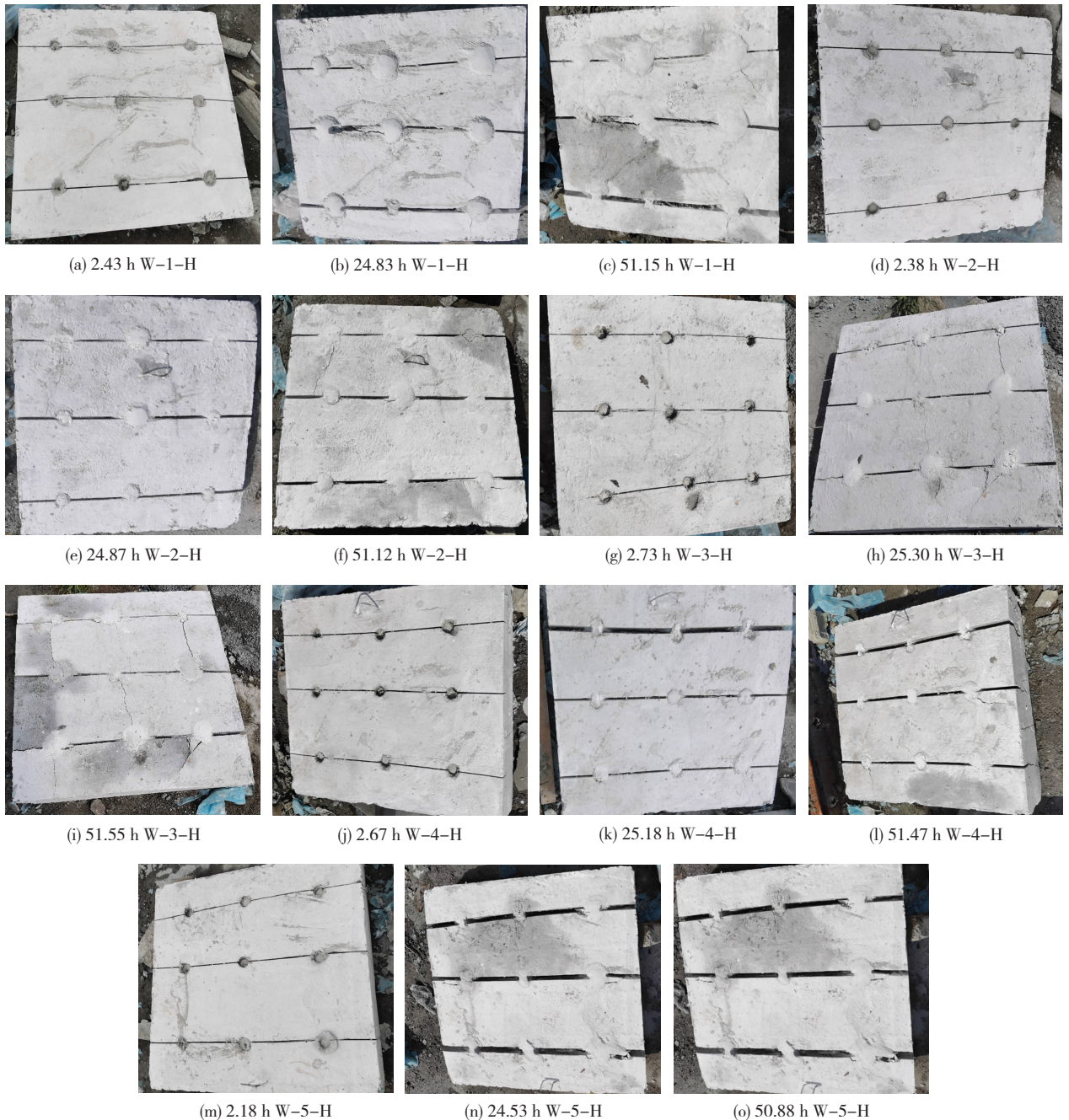


图 4 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔墙片的破碎过程

Fig. 4 Crushing process of shear walls drilled on the side obliquely downwards

3) 24.5 ~ 25.3 h, 试件的割缝宽度明显增大, 边缝 2 宽度大于中缝和边缝 1。试件 W-3-H 右侧边孔与角孔之间及中孔与下侧边孔之间的裂缝连通, 见图 4(h)。

4) 30.1 ~ 30.9 h, 所有试件的割缝宽度继续增大。试件 W-2-H 左侧角孔与边孔之间的裂缝连通, 试件 W-3-H 左下和右下角孔处裂缝延伸至试件边缘, 试件 W-4-H 右侧边孔和左下角孔处裂缝延伸至试件边缘。

5) 50.8 ~ 51.5 h, 所有试件的割缝宽度无明显变化。试件 W-1-H 右上角孔处裂缝延伸至试件边缘, 试件 W-2-H 右下角孔处出现裂缝但并未

延伸至试件边缘。

W-1-H、W-2-H、W-3-H、W-4-H、W-5-H 在静态破碎剂作用下破碎过程见图 5。

以注入静态破碎剂浆体后时间为横轴, 割缝平均宽度为纵轴, 建立各试件割缝平均宽度时程曲线见图 6。

由试件的割缝平均宽度时程曲线可以看出: 0~7 h 时割缝的平均宽度增长较为缓慢; 7~35 h 时割缝的平均宽度增长迅速; 35~52 h 时割缝的平均宽度增长减缓、发展趋于停滞。

5 个墙片注入静态破碎剂浆体 52 h 时割缝表面平均宽度-墙厚关系曲线见图 7。

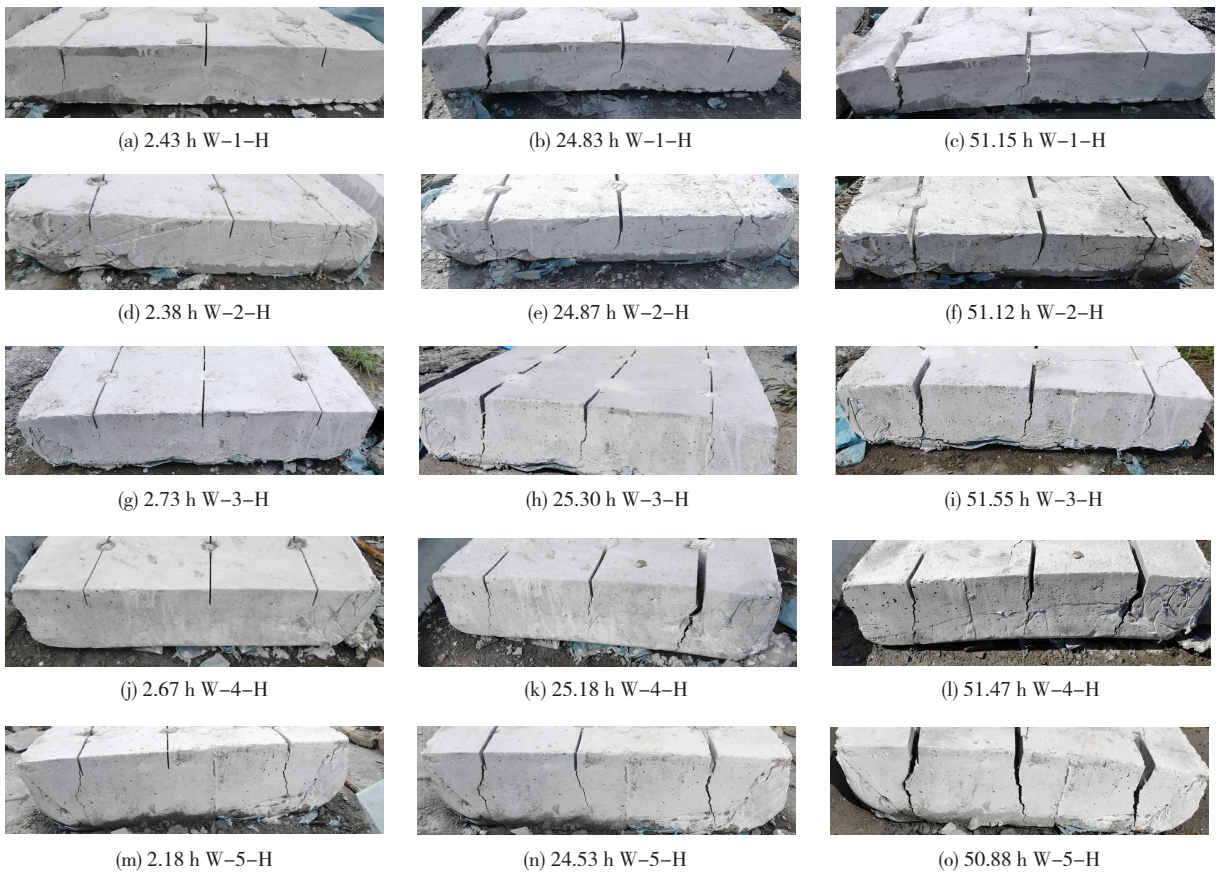


图 5 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔墙片的侧面破碎过程

Fig. 5 Crushing process of the side of shear walls drilled on the side obliquely downwards

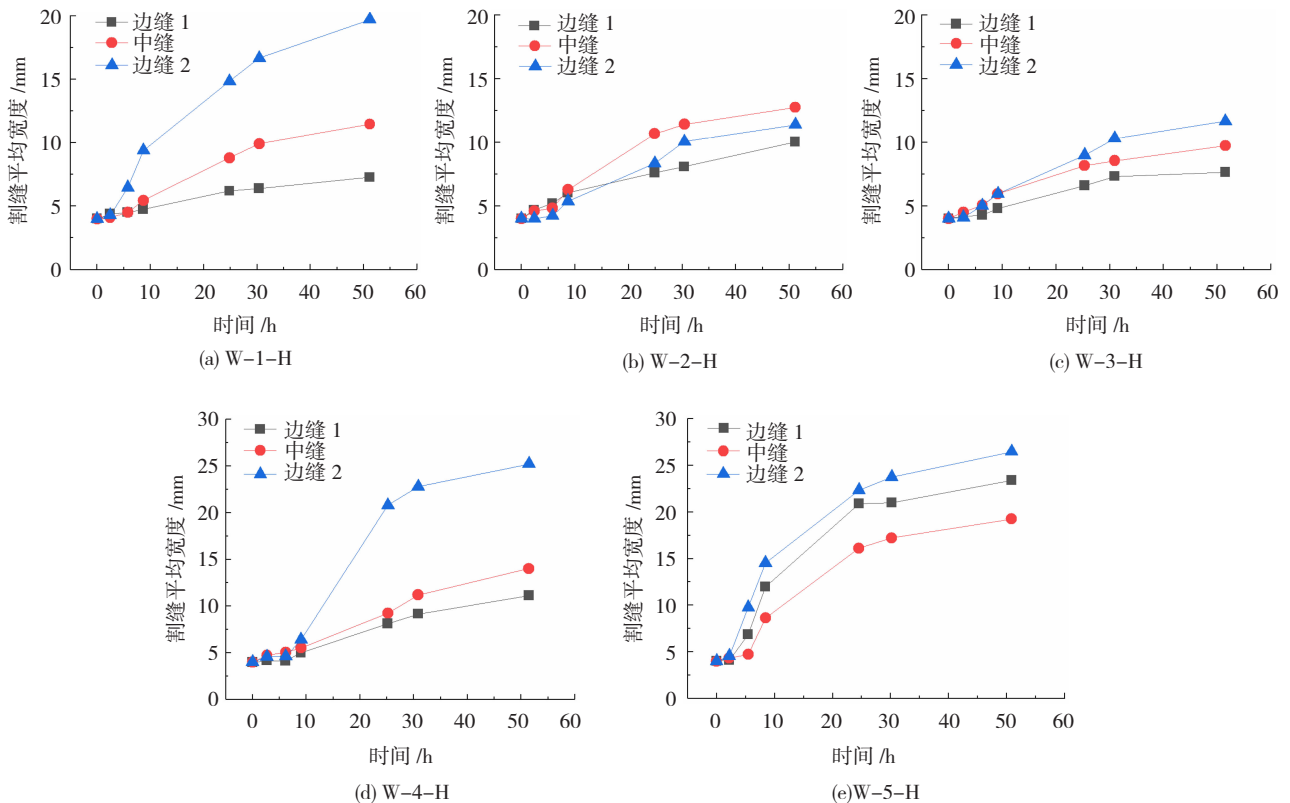


图 6 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔墙片的割缝平均宽度历程曲线

Fig. 6 Time-history curves of average slit width of shear walls drilled on the side obliquely downwards

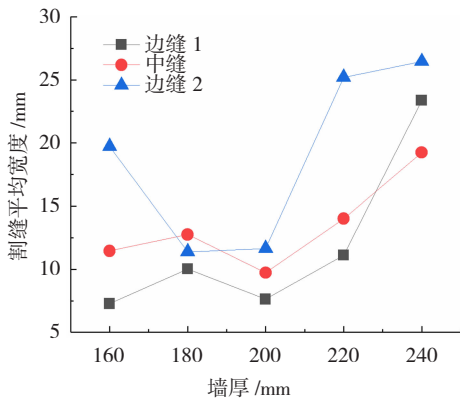


图 7 注入静态破碎剂浆体 52 h 时倾斜向下斜交于墙片侧面打孔墙片的割缝平均宽度与墙厚关系曲线

Fig. 7 Relation between average slit width and wall thickness of shear walls after drilling on the side obliquely downwards and injecting static crushing agent for 52 h

由于试件 W-3-H 的中缝和边缝 1 处存在未割断的钢筋,因此割缝平均宽度较小。由图 7 可知,

除试件 W-1-H 的边缝 2、试件 W-3-H 的边缝 1 及中缝之外,割缝平均宽度随着墙厚的增加呈增大的趋势。这是因为本试验仅切断了墙片钻孔侧的竖向分布筋,而墙片另一侧完好的钢筋网片会对整个墙片产生一定的约束作用,但完好钢筋网片对有割缝侧面的约束作用随墙片厚度的增加而降低,因此墙片割缝的平均宽度越来越大。

2.2 竖直向下垂直于墙片顶面打孔时静态破碎的试验现象与分析

W-6-V、W-7-V、W-8-V、W-9-V 四个试件垂直于墙片顶面竖直向下打孔静态破碎。静态破碎过程中有代表性的照片见图 8,试件顶面的破碎情况见图 9。为方便描述,将钻孔分为边孔和中孔两类,割缝分为中缝和边缝两类,其中与边缝 1 相对的另一面的边缝命名为边缝 1',与边缝 2 相对的另一面的边缝命名为边缝 2',与中缝 1 相对的另一面的中缝命名为中缝 1',具体见图 3(b)。



图 8 垂直于墙片顶面竖向打孔并注入静态破碎剂后墙片的侧面破碎过程

Fig. 8 Crushing process of the side of shear walls drilled perpendicular to the top surface of the wall

由图 8、9 可以发现:除试件 W-9-V 之外,所有试件的割缝宽度均有明显发展,但孔与孔之间未出现连通的裂缝。虽然试件 W-9-V 割缝宽度变化不大,但其顶面每两个钻孔之间的裂缝均连通。此外,试件 W-6-V 和 W-8-V 在两侧面对称分

布的每两条割缝中仅有一条割缝宽度增大,另一条割缝变化不大,而试件 W-7-V 每组对称分布的两条割缝的宽度均在增加,产生这种现象的原因可能是:1) 钻孔中心偏移(位),致使距离钻孔中心较近一侧的割缝宽度率先发展;2) 在给钢筋“松绑”时,

某一侧割缝未将钢筋全部切断,未被切断的钢筋起到了“铰”的作用,使试件在静态破碎过程中绕“铰”

转动,一侧割缝宽度不断增加,另一侧割缝宽度反而不断减小。

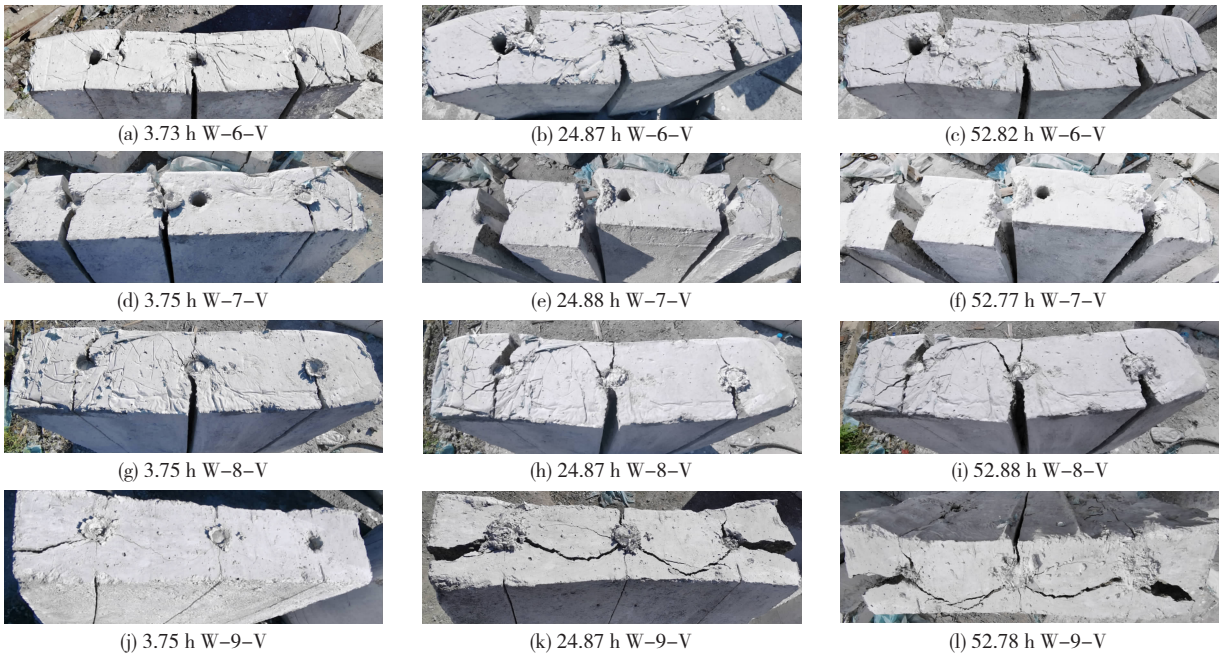


图 9 垂直于墙片顶面竖向打孔并注入静态破碎剂后墙片的顶面破碎过程

Fig. 9 Crushing process of the top of shear walls drilled perpendicular to the top surface of the wall

裂缝趋向于在试件 W-9-V 的两孔之间产生并连通,说明在钢筋网片的影响下,墙截面高度方向的约束远大于墙厚方向。同时,由于拉筋的存在,试件 W-9-V 边孔和中孔之间的裂缝宽度发展较慢。

均宽度为纵轴,建立各试件割缝平均宽度时程曲线见图 10,割缝 1 定义为边缝 1 和边缝 1'宽度的平均值,割缝 2 定义为中缝 1 和中缝 1'宽度的平均值,割缝 3 定义为边缝 2 和边缝 2'宽度的平均值,裂缝 1 和裂缝 2 分别为试件 W-9-V 横截面上的裂缝开展情况。

以灌入静态破碎剂浆体后的时间为横轴,割缝平

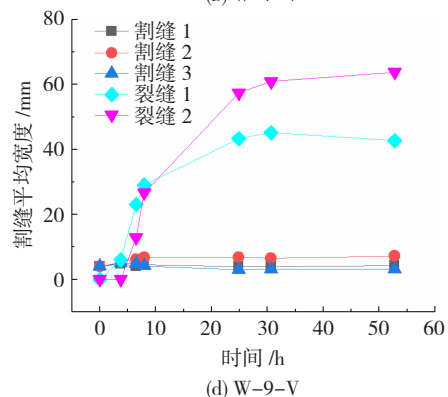
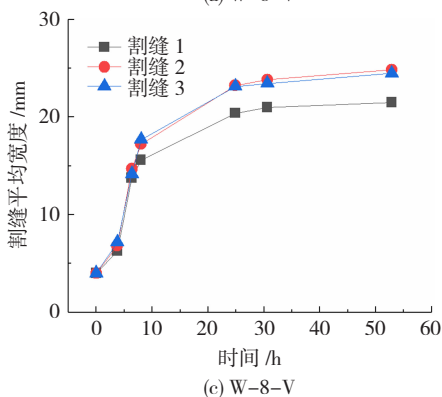
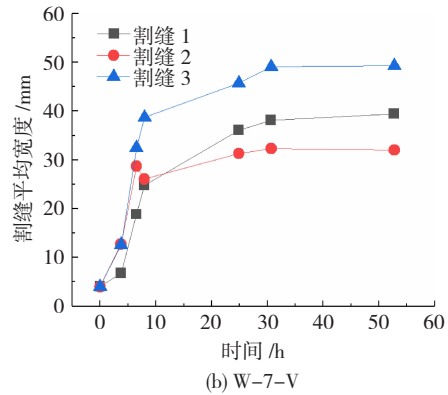
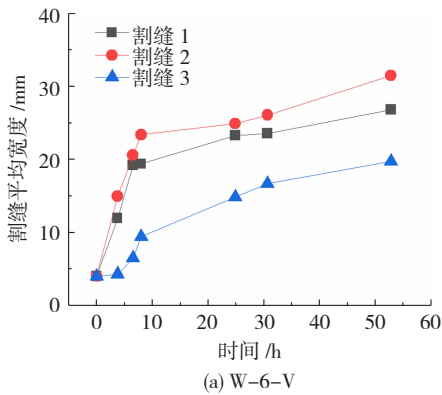


图 10 垂直于墙片顶面竖向打孔并注入静态破碎剂后墙片的割缝平均宽度时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of average slit width of shear walls after drilling perpendicular to the top surface of the wall and injecting static crushing agent

由图 10 可以看出,除试件 W-9-V 的割缝平均宽度无明显变化之外,其余试件割缝平均宽度发展情况为:0~3 h 时割缝的平均宽度增长缓慢;3~10 h 时割缝的平均宽度增长迅速;10~52 h 时割缝的平均宽度增长速率减缓、发展趋于停滞。与倾斜向下斜交于墙片侧面打孔并静态破碎相比,垂直向下垂直于墙片顶面打孔试件的割缝平均宽度较大、发展速率较快。

注入静态破碎剂浆体 52 h 后试件 W-6-V、W-7-V 和 W-8-V 的割缝平均宽度-墙厚关系曲线见图 11。

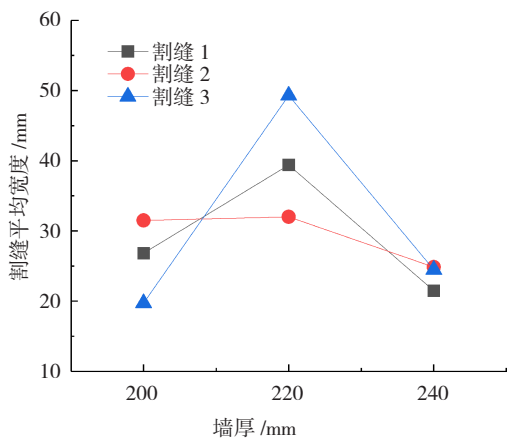


图 11 注入静态破碎剂浆体 52 h 后垂直向下垂直于墙片顶面打孔墙片的割缝平均宽度与墙厚关系曲线

Fig. 11 Relation between average slit width and wall thickness of shear walls after drilling perpendicular to the top surface of the wall and injecting static crushing agent for 52 h

由图 9、12 结合可知,试件 W-6-V 和 W-8-V 均是仅有一侧割缝的宽度在发展,试件 W-7-V 两侧割缝的宽度均在发展,因此试件 W-7-V 的割缝平均宽度明显大于试件 W-6-V 和 W-8-V。试件 W-6-V 和 W-8-V 的割缝平均宽度相差不大,说明在墙片顶面打孔进行破碎时墙厚与割缝的平均宽度无明显关联。

3 结 论

1) 倾斜向下斜交于墙片侧面打孔、沿孔水平连线切断墙片一侧的竖向分布钢筋后,向孔内注入静态破碎剂浆体,随着时间的推移可将剪力墙片水平分割成若干条带;垂直于墙片顶面竖向打孔并注入静态破碎剂,随着时间的推移可将剪力墙片竖向分割成若干条带。将剪力墙片分割成水平或竖向若干条带,为进一步破碎提供了方便。

2) 垂直于墙片顶面竖向打孔并注入静态破碎剂,破碎效果的先后顺序为:双侧割缝宽度发展 > 仅切割混凝土、不切断钢筋 > 单侧割缝宽度发展。

3) 不论从破碎施工难易程度,还是破碎效果,

垂直于墙片顶面竖向打孔并注入静态破碎剂进行破碎,好于斜交于墙片侧面倾斜向下打孔并注入静态破碎剂。

参考文献

- [1] ETKIN M B, AZARKOVICH A E. Effect of non-explosive splitting compounds and rational work parameters[J]. Power Technology & Engineering, 2006,40(5):287
- [2] NATANZI A S, LAEFER D F, CONNOLLY L. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents[J]. Construction & Building Materials, 2016,110:117
- [3] 廖静. 钢筋混凝土试块静态破裂试验研究[J]. 中国勘察设计, 2020(2):101
LIAO Jing. Experimental study on static fracture of reinforced concrete specimens[J]. China Engineering & Consulting, 2020(2):101
- [4] 崔年生, 张大宁, 郭连军, 等. 混凝土静态破碎效果实验研究[J]. 工程爆破, 2018,24(3):14
CUI Niansheng, ZHANG Daning, GUO Lianjun, et al. Experimental study on static cracking effect of concrete[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(3): 14
- [5] 何翔. 混凝土梁的交叉孔静态破裂试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019
HE Xiang. Static fracture test of cross holes in concrete beams[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019
- [6] 姜智盛, 郑文忠, 李瑞森, 等. 混凝土块体静态破碎试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020,52(6):191
JIANG Zhisheng, ZHENG Wenzhong, LI Ruisen, et al. Experimental study on static crushing of concrete block[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020,52(6):191. DOI:10.11918/202002076
- [7] HUYNH M P, LAEFER D. Expansive cement and soundless chemical demolition agents: state of technology review[C]//11th Conference on Science and Technology. Ho Chi Minh City:[s. n.], 2009
- [8] 刘纪峰, 陈阵, 卢长海, 等. 静态破碎剂在北京北护城河挡墙拆除中的应用[J]. 建筑技术, 2006(6):460
LIU Jifeng, CHEN Zhen, LU Changhai, et al. Soundless cracking agent used in dismantling of retaining wall of Beijing north moat[J]. Architecture Technology, 2006(6):460
- [9] 徐笠博. 静态破碎剂比选及混凝土构件静态破碎试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019
XU Libo. Comparison and selection of static crushing agents and static crushing test of concrete components[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019
- [10] 无声破碎剂: JC 506—2008[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008
Soundless cracking agent: JC 506—2008[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2008
- [11] 李瑞森, 郑文忠, 徐笠博, 等. 静态破碎剂对钢管径向膨胀应力试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020,52(10):19
LI Ruisen, ZHENG Wenzhong, XU Libo, et al. Experimental study on radial expansion compressive stress of steel tube with static crushing agent[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(10):19. DOI:10.11918/202002077

(编辑 赵丽莹)