

DOI:10.11918/202011117

混凝土厚板和转换梁静态破碎试验

姜智盛^{1,2}, 郑文忠^{1,2}, 侯晓萌^{1,2}, 李瑞森^{1,2}, 郭常顺^{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: 混凝土厚板和转换梁是建筑结构中的重要水平构件。为探究如何绿色、高效地完成二者的拆除, 本文开展了3个混凝土厚板试件和7个混凝土转换梁试件的静态破碎试验, 并在破碎前切断或剔除配筋。试验结果表明: 垂直于厚板顶面钻孔进行混凝土厚板破碎时, 试件内的水平纵筋影响静态破碎过程中的开裂程度, 沿孔连线及其延长线切断或剔除厚板上部纵筋可提高破碎效果, 破碎后形成块体的短边尺寸为孔间距或孔边距; 倾斜向下斜交于转换梁侧面钻孔进行混凝土转换梁破碎时, 试件内的箍筋和纵筋均影响静态破碎过程中的开裂程度, 沿孔口的连线及延长线切断孔口所在侧面的箍筋或纵筋, 同时切断钻孔延长线与另一侧面交点的连线及延长线所交纵筋或箍筋可提高破碎效果, 破碎后形成块体的短边尺寸为孔间距或孔排距; 垂直于转换梁顶面钻孔进行混凝土转换梁破碎时, 沿孔连线及其延长线切断梁顶箍筋后, 梁内拉结筋影响静态破碎过程中的开裂程度, 可继续缩小孔间距以提高破碎效果。

关键词: 静态破碎; 混凝土厚板; 混凝土转换梁; 切断配筋; 剔除配筋; 开裂程度; 破碎效果

中图分类号: TU37

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)10-0012-11

Static crushing experiment of thick concrete slab and concrete transfer beam

JIANG Zhisheng^{1,2}, ZHENG Wenzhong^{1,2}, HOU Xiaomeng^{1,2}, LI Ruisen^{1,2}, GUO Changshun^{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: Thick concrete slab and concrete transfer beam are important horizontal components in building structures. To explore how to complete the demolition of the two components environmental-friendly and efficiently, static crushing experiments of three thick concrete slab specimens and seven concrete transfer beam specimens were carried out, and reinforcements were cut or removed before crushing. Experimental results showed that when the thick concrete slabs were broken by drilling holes perpendicular to the top surface of the slab, the cracking degree was affected by the horizontal longitudinal reinforcements of the specimens in the static crushing process; the crushing effect could be improved by cutting off along the hole connecting line and its extension line or removing the upper longitudinal reinforcements; the size of the short side of the blocks after crushing was hole spacing or hole edge distance. When the concrete transfer beams were broken by drilling holes inclined downward at the side surface of the beam, the cracking degree was affected by the stirrups and longitudinal reinforcements of the specimens in the static crushing process; the crushing effect could be improved by cutting off the stirrups or longitudinal reinforcements along the orifice connecting line and extension line, and cutting off the stirrups or longitudinal reinforcements along the connecting line and extension line of the intersection of the borehole extension line on the other side surface; the size of the short side of the blocks after crushing was hole spacing or hole row spacing. When the concrete transfer beams were broken by drilling holes perpendicular to the top surface of the beam, after the stirrups at the top of the beam were cut off along the hole connecting line and its extension line, the cracking degree was affected by the tie reinforcements of the specimens in the static crushing process, which could continue to reduce the hole spacing to improve the crushing effect.

Keywords: static crushing; thick concrete slab; concrete transfer beam; cut reinforcements; remove reinforcements; cracking degree; crushing effect

静态破碎技术是将按一定水剂比搅拌好的静态破碎剂(static crushing agent, 简称SCA)浆体灌入岩石或混凝土的钻孔中, 其水化反应引起的体积膨胀

会使孔壁受到环向膨胀压力, 从而导致岩石与混凝土这类抗拉强度相对较低的脆性材料产生明显的裂缝扩展以实现破碎的技术。与传统的拆除方法(人工拆除、机械拆除、爆破拆除等)相比, 静态破碎技术具有安全、施工简单、无振动、无噪音、无有害气体等优点^[1-2], 近年来已引起学者们的广泛关注。

岳中文等^[3]进行了单孔圆柱体砂浆试件的静态破碎试验, 研究发现圆柱体单孔下的破坏形态与

收稿日期: 2020-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806100)

作者简介: 姜智盛(1998—), 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, hitwzzheng@163.com

方形块体单孔下的破坏形态不同,圆柱体试件的破坏形态为在某条直径方向形成两条主裂缝。郑志涛等^[4]、Laefer 等^[5]、谢益盛等^[6]基于电阻应变法探究了孔径对膨胀压应力的影响,研究发现孔径越大所产生的膨胀压应力越大。Shang 等^[7]基于弹性理论和厚壁钢管理论探究了孔径和孔间距对孔间拉应力的影响,研究发现孔间距增大、孔径减小均会使孔间拉应力减小。唐烈先等^[8]基于 RFPA^{2D} 软件进行了双孔下素混凝土的静态破碎数值试验,研究发现孔间距增大会导致裂缝发展缓慢,当孔间距达到 60 cm 时两孔间已无法形成连通裂缝。Cho 等^[9]基于有限元软件模拟了素混凝土静态破碎时裂缝的发展过程,研究发现混凝土强度越高、孔间距越大裂缝连通所需的膨胀压应力越大。薛志翔等^[10]进行了配筋混凝土试块和素混凝土试块的静态破碎试验,研究发现钢筋的约束会延长开裂时间并减小裂缝的宽度。李瑞森^[11]进行了钢筋混凝土柱墩的静态破碎试验,研究发现构件中钢筋的约束不会阻止混凝土开裂,而是使混凝土无法酥碎,从而导致破碎效果不理想。

混凝土厚板和转换梁是建筑结构中重要的水平构件,因较大的截面尺寸、较多的配筋导致拆除困难。以往的研究中尚缺少对钢筋约束导致破碎效果较差这一问题的解决方法,因此,本文基于静态破碎技术,针对拆除过程中较多配筋会限制裂缝发展、延长开裂时间等问题,提出在破碎前采用机械手段切断或剔除配筋的方法,并系统性地分析了不同方法的优缺点,以期静态破碎技术的工程应用提供参考。

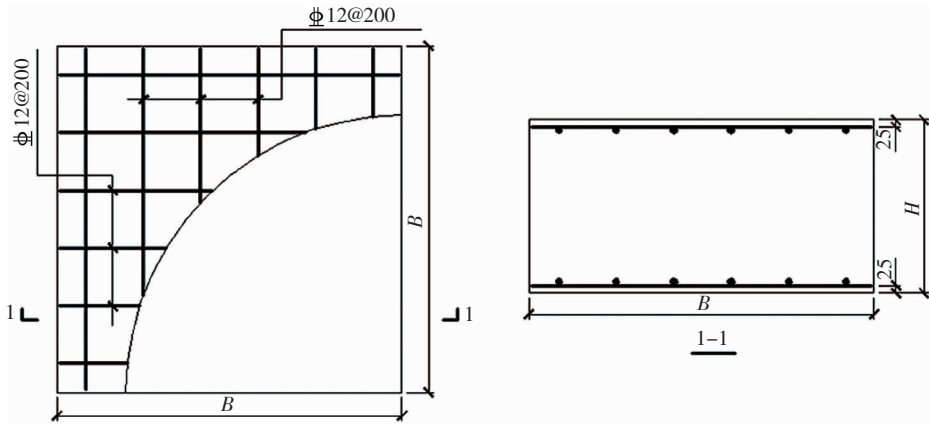


图 1 混凝土厚板配筋
Fig. 1 Reinforcement drawing of thick concrete slab

7 个混凝土转换梁的试件设计见表 2,混凝土转换梁的配筋形式为:配置钢筋牌号为 HRB400、间距为 200 mm、直径为 8 mm 的箍筋,钢筋牌号为 HRB400、间距为 200 mm、直径为 12 mm 的纵筋,钢筋牌号为 HRB400、间距为 200 mm、直径为 8 mm 的拉结筋,配筋见图 4。同样使用凿岩机钻孔,孔径、

1 试验概况

3 个混凝土厚板的试件设计见表 1,混凝土厚板的配筋形式为:在混凝土厚板顶部和底部各配置一排钢筋牌号为 HRB400、间距为 200 mm、直径为 12 mm 的水平钢筋网,配筋见图 1。使用凿岩机垂直于厚板顶面钻孔,选用“4×4”的布孔形式,依据工程经验将孔径取为 40 mm (孔径较小时无法获得足够的膨胀力,孔径较大时易发生冲孔),依据课题组前期的研究结果^[12]将孔间距取为 250、300 mm,孔深取为板厚的 80%,为便于试验现象的描述以及后续的分析,将厚板上的钻孔分为角部孔、边部孔和中部孔三类,布孔示意见图 2。试件 S-2 采用风镐剔除厚板上部混凝土保护层和纵筋再钻孔的方法,上表面保护层剔除的厚度为 80 mm。试件 S-3 采用先钻孔再使用墙锯沿孔连线及其延长线双向切断厚板上部纵筋的方法,切割深度为 80 mm,切缝宽度为 4 mm,试件 S-2 和 S-3 处理后的实物见图 3。试件 S-1 未作处理。

表 1 混凝土厚板试件设计
Tab. 1 Design of thick concrete slab

试件 编号	板边长 B/mm	板厚 H/mm	孔径 D/mm	孔间距 S/mm	孔深 h/mm	立方体抗压 强度(边长为 150 mm)/MPa
S-1	1 000	600	40	250	480	34.9
S-2	1 200	1 000	40	300	800	51.5
S-3	1 200	1 000	40	300	800	51.5

注:所有试件的孔边距为 1/2 的孔间距。

孔间距和孔排距等参数的选取依据与破碎混凝土厚板时的选取依据相同。倾斜向下斜交于转换梁侧面钻孔进行混凝土转换梁破碎时,采用“5×3”的布孔形式,钻孔与梁高度方向的夹角为 60°,孔底部与梁侧面的水平距离为 100 mm。垂直于转换梁顶面钻孔进行混凝土转换梁破碎时,采用“一”字形单排孔

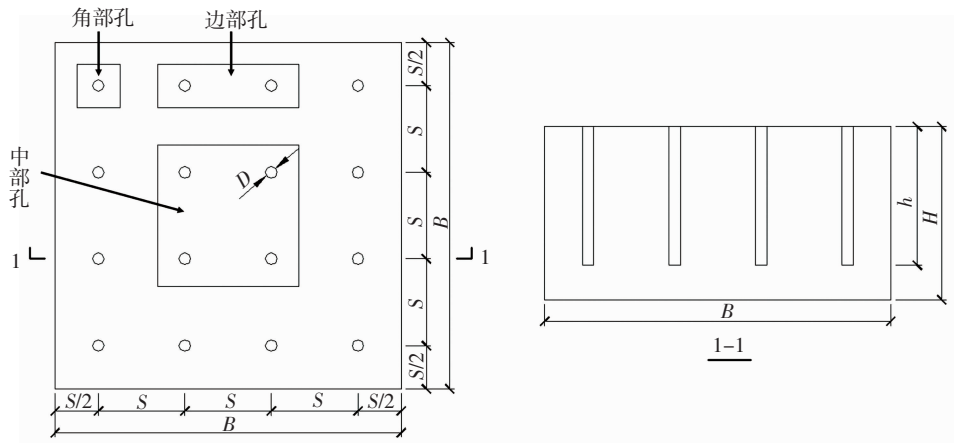


图 2 混凝土厚板布孔示意

Fig. 2 Hole layout of thick concrete slab



图 3 混凝土厚板处理后实物

Fig. 3 Picture of thick concrete slab after treatment

表 2 混凝土转换梁试件设计

Tab. 2 Design of concrete transfer beam

试件编号	梁长	梁宽	梁高	孔径	孔间距	孔排距	孔深	立方体抗压强度 (边长为 150 mm)/MPa
	L/mm	B/mm	H/mm	D/mm	S/mm	d/mm	h/mm	
B-1	900	400	1 200	40	200	200	350	34.9
B-2	900	600	1 800	40	300	300	580	51.5
B-3	900	600	1 800	40	300	300	580	51.5
B-4	900	600	1 800	40	300		450	51.5
B-5	900	600	1 800	40	300		800	51.5
B-6	900	600	1 800	40	300		1 440	51.5
B-7	900	400	900	40	150		810	34.9

注:试件 B-1 左右两侧的孔边距为 3/4 的孔间距,上侧的孔边距为 1/2 的孔排距;试件 B-2 和 B-3 左右两侧的孔边距为 1/2 的孔间距,上侧的孔边距为 1/2 的孔排距;试件 B-4 至 B-7 的孔边距为 1/2 的孔间距。

的布孔形式,为分析孔深对破碎效果的影响,孔深分别取为梁高的 25%、45%、80% 和 90%,转换梁试件的布孔示意图见图 5。试件 B-2 在梁侧面使用墙锯沿孔口的连线及延长线切断孔口所在侧面的箍筋和纵筋,同时切断钻孔延长线与另一侧面交点的连线及延长线所交纵筋和箍筋。试件 B-3 仅在梁侧面使用墙锯沿孔口的连线及延长线切断孔口所在侧面箍筋,同时切断钻孔延长线与另一侧面交点的连线及延长线所交箍筋。试件 B-4、B-5、B-6 和 B-7 在梁顶面使用墙锯沿孔连线及延长线切断顶部箍筋。各试件处理后的实物见图 6,上述试件的切割深度均为 50 mm,切缝宽度为 4 mm。试件 B-1 未作处理。

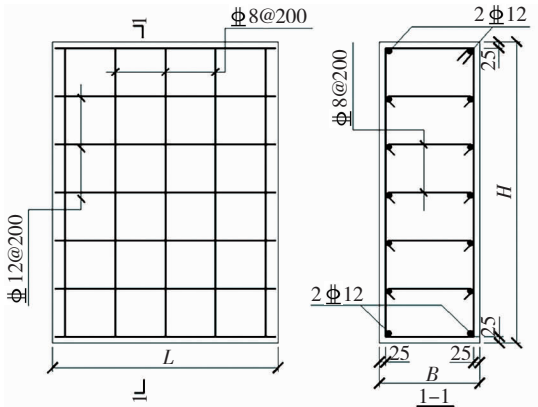


图 4 混凝土转换梁配筋

Fig. 4 Reinforcement drawing of concrete transfer beam

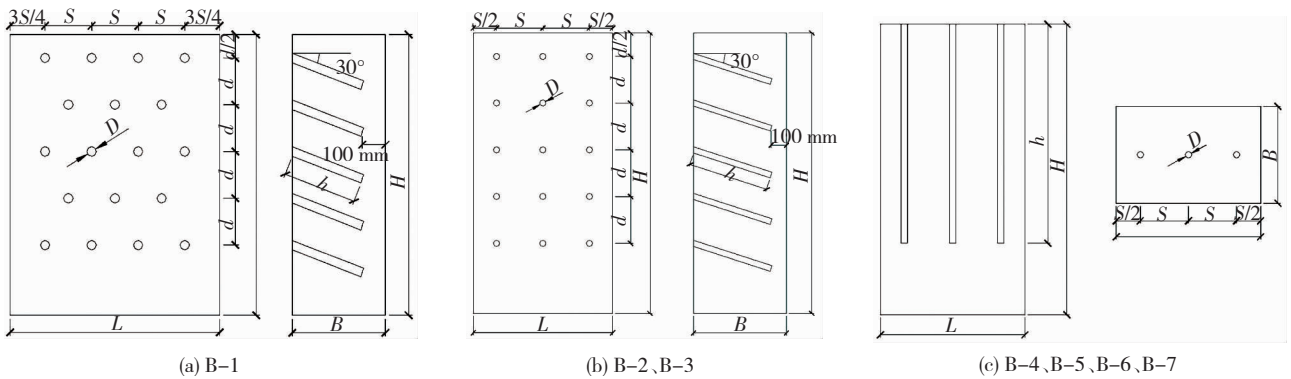


图 5 混凝土转换梁布孔示意

Fig. 5 Hole layout of concrete transfer beam

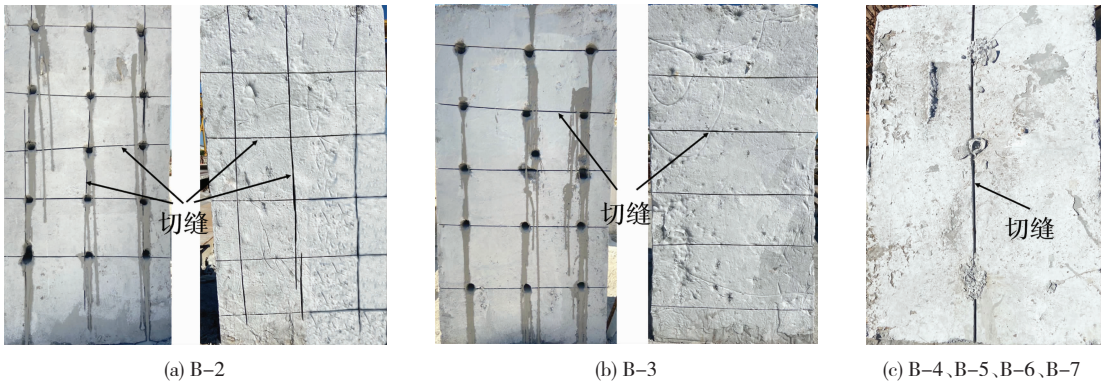


图 6 混凝土转换梁处理后实物

Fig. 6 Picture of concrete transfer beam after treatment

试验用静态破碎剂为施必达(大连)公司生产的 S-611 石灰型无声爆破剂,根据其使用说明以及搅拌后浆体的流动性,将水剂比取为 0.3,钻孔灌入破碎剂浆体后未采取封孔措施。此外,基于电阻应变法(将按一定水剂比搅拌好的破碎剂浆体倒入直径 40 mm、壁厚 5.35 mm、高 500 mm 且封底的钢管中,测定钢管外表面的拉伸应变,基于弹性理论计算得破碎剂产生的膨胀应力)获得了破碎剂径向膨胀压应力的时程曲线,见图 7。此外,水剂比为 0.3 时, S-611 型无声爆破剂的自由体积膨胀率为 310%。

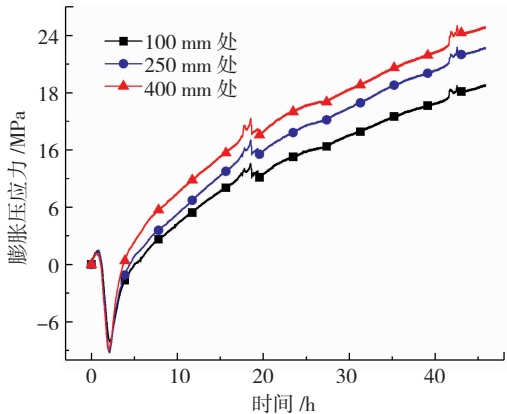


图 7 膨胀压应力时程曲线

Fig. 7 Time history curves of expansion pressure

2 试验现象及分析

2.1 混凝土厚板试验现象及分析

试件 S-1:钻孔灌入破碎剂浆体后 1 h 左右外围 3 个孔喷孔(分析喷孔的原因为:试件 S-1 外围 3 个孔为本次试验最后灌入破碎剂浆体的钻孔,此时环境温度较高,从而导致喷孔),7 h 时试件顶面角部孔周围出现裂缝。随着时间推移,角部孔周围的裂缝继续发展与边部孔连通,中部孔周围相继形成微裂缝,同时试件侧表面的中间位置出现水平裂缝。随着破碎剂水化反应继续进行,已形成的裂缝继续扩展,除喷孔的钻孔外,试件顶面各孔之间均形成连通裂缝。试件的整体裂缝主要沿侧面的水平裂缝发展,侧面水平裂缝的宽度远大于顶面裂缝的宽度。试件 S-1 顶面和某一侧面的裂缝发展过程见图 8。

试件 S-2:钻孔灌入破碎剂浆体 2.5 h 时发现试件顶面角部孔周围首先出现裂缝。随着时间推移,角部孔与边部孔之间和各边部孔之间形成连通裂缝,试件角部处的混凝土脱落。随着破碎剂水化反应继续进行,已连通的裂缝继续扩展,中部孔与边部孔之间和各中部孔之间的裂缝也相继连通,并随着时间的推移裂缝宽度逐渐增大,同时竖向裂缝逐渐延伸至试件底部。裂缝发展稳定后,试件 S-2 破

碎后形成 15 块块体,外围区域 9 块,其中形成块体的短边尺寸均为 150 mm,最大长边尺寸为 900 mm,内部区域 6 块,其中形成块体的短边尺寸均为 300 mm,最大长边尺寸为 750 mm。试件 S-2 顶面的裂缝发展过程见图 9。

试件 S-3: 钻孔灌入破碎剂浆体 5 h 时试件顶面切缝的宽度开始增大。随着时间推移,切缝宽度继续增大,角部处和边部处切缝的宽度大于中部区域切缝的宽度。随着破碎剂水化反应继续进行,切

缝宽度继续增大,角部处和边部处的混凝土脱落,同时竖向裂缝逐渐延伸至试件底部。试件的整体裂缝主要沿切缝发展,但会存在少数两孔之间切缝宽度增长不明显的情况。裂缝发展稳定后,试件 S-3 破碎后形成 15 块块体,外围区域 8 块,其中形成块体的短边尺寸均为 150 mm,最大长边尺寸为 750 mm,内部区域 7 块,其中形成块体的短边尺寸均为 300 mm,最大长边尺寸为 600 mm。试件 S-3 顶面的裂缝发展过程见图 10。

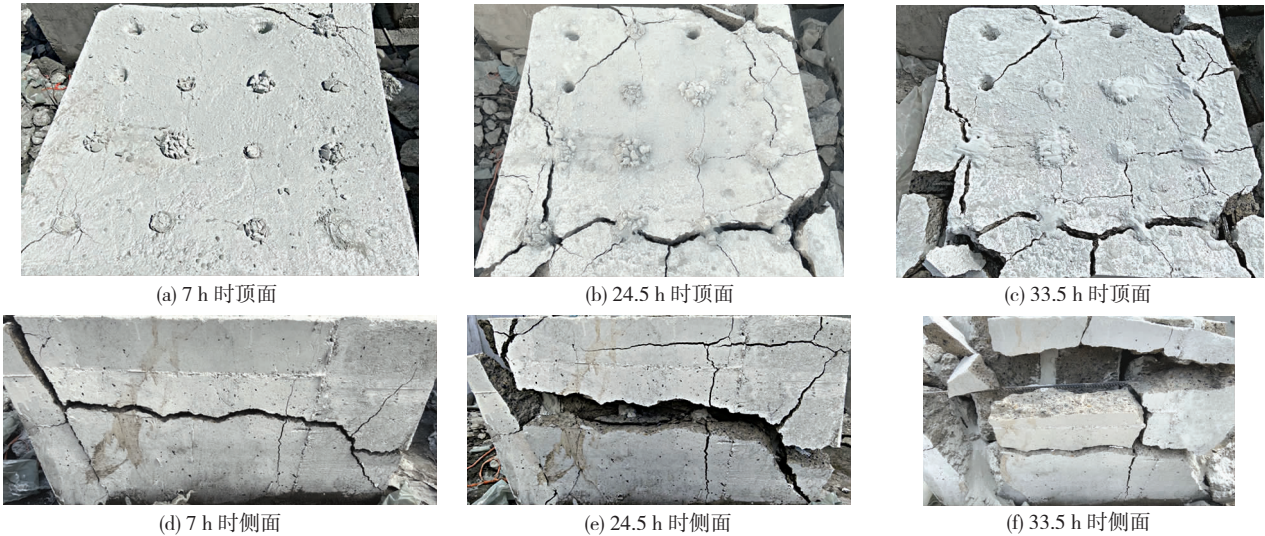


图 8 S-1 裂缝发展过程

Fig. 8 Crack development process of S-1

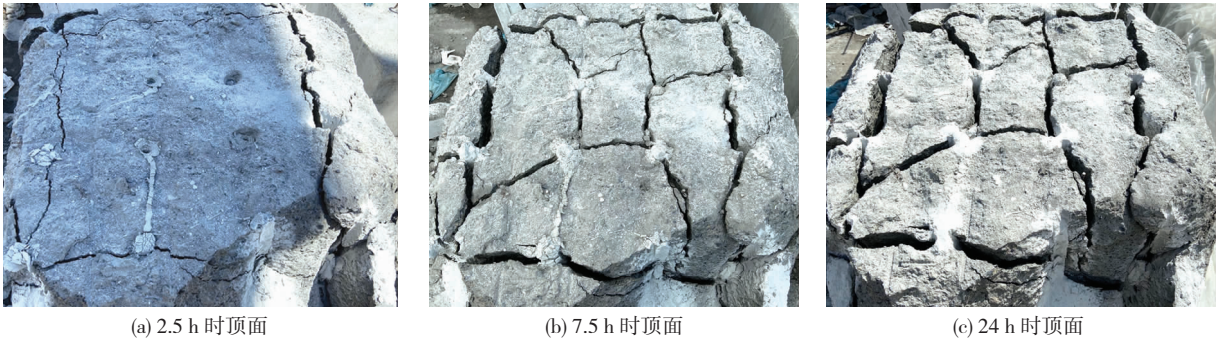


图 9 S-2 裂缝发展过程

Fig. 9 Crack development process of S-2

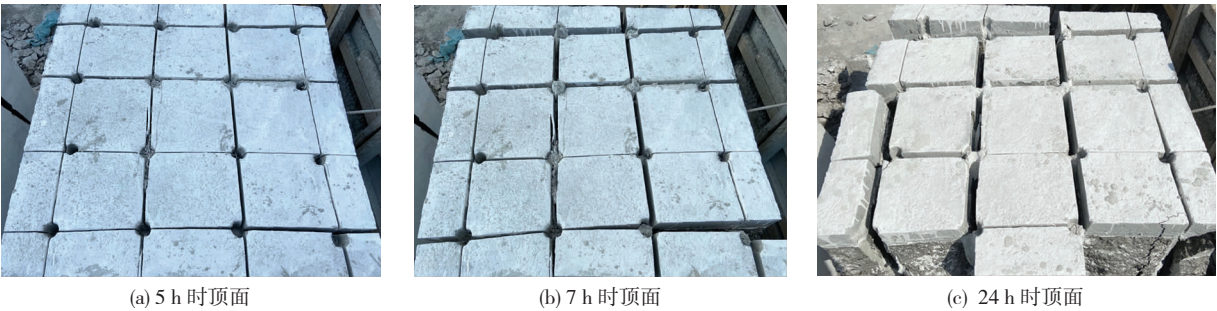


图 10 S-3 裂缝发展过程

Fig. 10 Crack development process of S-3

综合分析 3 个厚板试件的试验现象发现: 板内纵筋的约束会限制裂缝发展, 未去除钢筋约束时, 各孔之间可以形成连通裂缝但宽度相对较小; 切断或

剔除纵筋后, 试件顶面各孔之间裂缝发展明显; 两种方法破碎后形成块体的数量相同, 破碎后形成块体的尺寸相近, 其短边尺寸均为孔间距或孔边距, 便于

继续沿长边方向打碎使其分成更小的块体。

2.2 混凝土转换梁试验现象及分析

为便于试验现象的描述,将转换梁试件的钻孔面定义为正面,钻孔面的对应面定义为背面,此外,将转换梁试件的两个端面按方位定义为左侧面和右侧面。

试件 B-1:钻孔灌入破碎剂浆体 7 h 时试件外

围孔周开始形成裂缝。随着时间推移,外围孔间的裂缝逐渐连通,内部孔周围也开始形成微裂缝,外围孔周围裂缝的宽度大于内部孔周围裂缝的宽度。随着破碎剂水化反应继续进行,已连通的裂缝继续扩展,内部孔之间裂缝也相继连通,并随着时间的推移裂缝宽度逐渐增大。试件 B-1 正面和背面的裂缝发展过程见图 11。

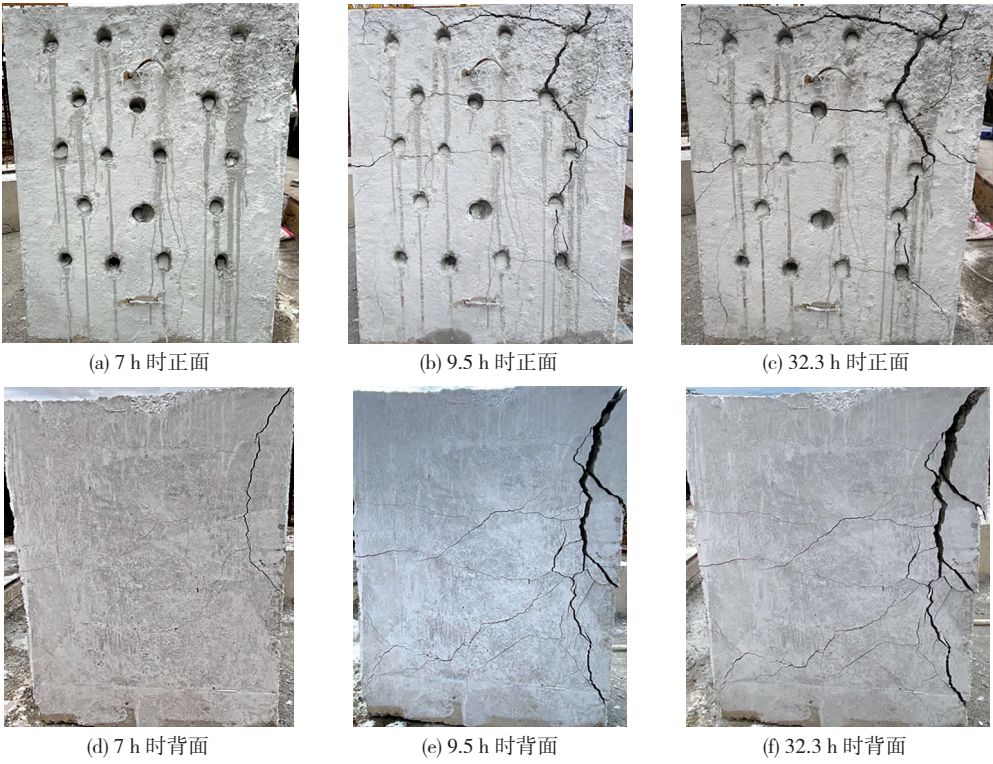


图 11 B-1 裂缝发展过程

Fig. 11 Crack development process of B-1

试件 B-2:钻孔灌入破碎剂浆体 1.5 h 时试件中部竖向切缝的宽度开始增大。随着时间推移,试件中部竖向切缝的宽度继续增大,两侧竖向切缝的宽度也逐渐增大。随着破碎剂水化反应继续进行,3 条竖向切缝的宽度继续增大,试件的整体裂缝主要沿 3 条竖向切缝发展。其破坏形式为沿 3 列孔被破碎为 4 块,其中边部两块的短边尺寸为 150 mm,中部两块的短边尺寸为 300 mm,长边尺寸均为梁高。试件 B-2 正面和背面的裂缝发展过程见图 12。

试件 B-3:钻孔灌入破碎剂浆体 5 h 时试件最上排切缝的宽度开始增大,并在侧面观察到斜裂缝。随着时间推移,从上向下每排切缝宽度依次增大,侧面的斜裂缝也依次形成并逐渐扩展。随着破碎剂水化反应继续进行,每排水平切缝与侧面斜裂缝的宽度继续增大,试件的整体裂缝主要沿每排水平切缝与侧面斜裂缝发展。其破坏形式为沿 5 排孔被破碎为 6 块,其中破碎后形成块体的短边尺寸均为 300 mm,长边尺寸均为梁长。试件 B-3 正面、背面以及两侧面的裂缝发展过程见图 13。

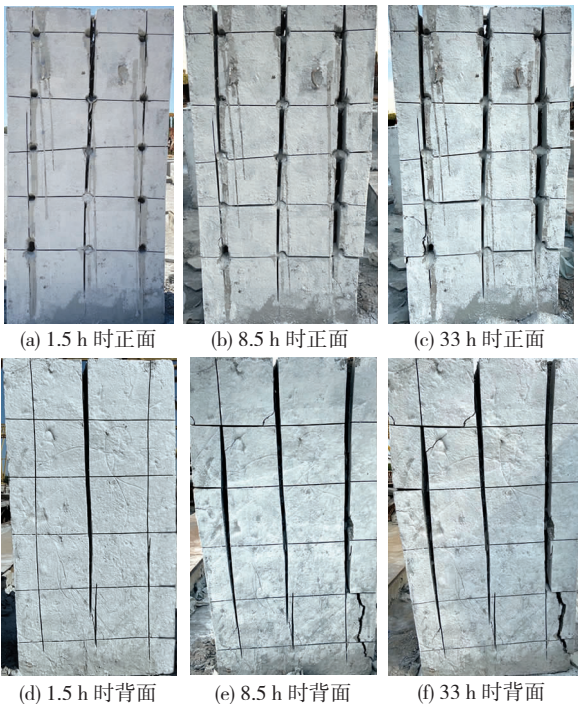


图 12 B-2 裂缝发展过程

Fig. 12 Crack development process of B-2

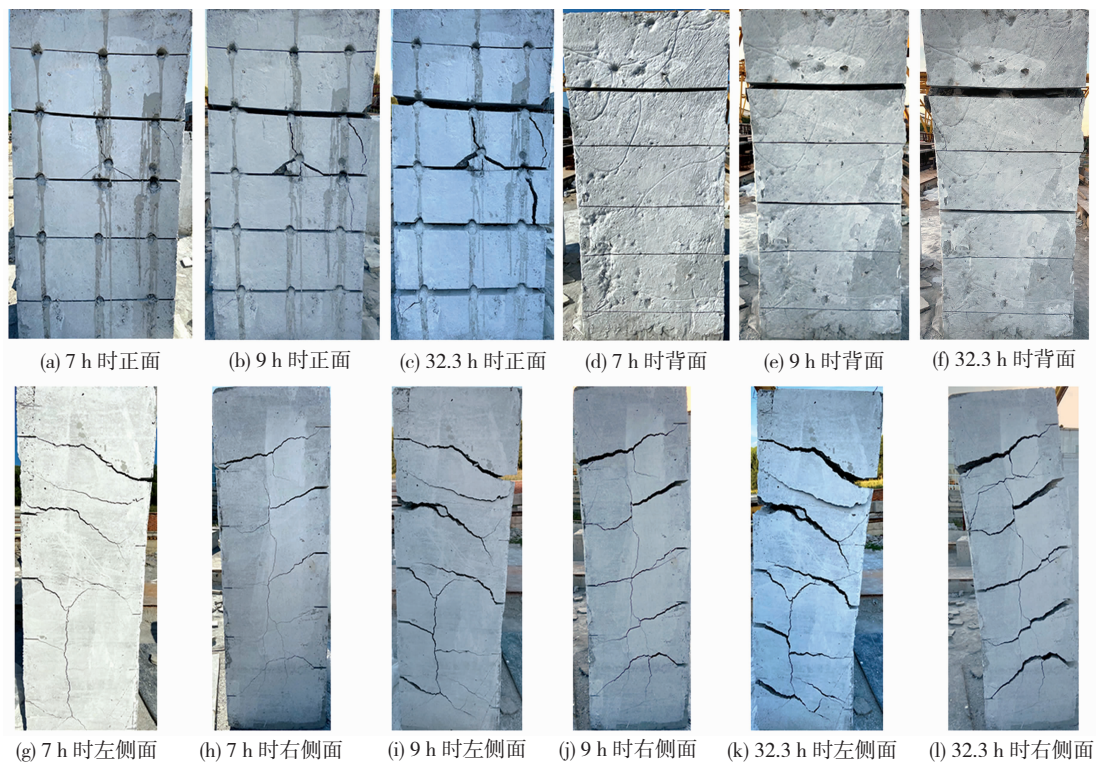


图 13 B-3 裂缝发展过程

Fig. 13 Crack development process of B-3

试件 B-4、B-5、B-6 和 B-7: 试件 B-4、B-5、B-6 和 B-7 裂缝的发展过程相同。钻孔灌入破碎剂浆体 5 h 时试件顶面切缝的宽度开始增大, 侧面出现从切缝处向下延伸的竖向裂缝。随着时间推移, 顶面切缝的宽度不断增大, 切缝处的竖向裂缝不断发展, 并在侧面观察到新的竖向裂缝。随着破

碎剂水化反应继续进行, 顶面切缝与侧面竖向裂缝继续发展。试件的整体裂缝主要沿顶面切缝与侧面竖向裂缝发展, 其破坏形式为沿孔被破碎为两块, 短边尺寸为梁宽的一半, 长边尺寸为梁长。试件 B-4、B-5、B-6 和 B-7 顶面和两侧面的裂缝发展过程见图 14~17。

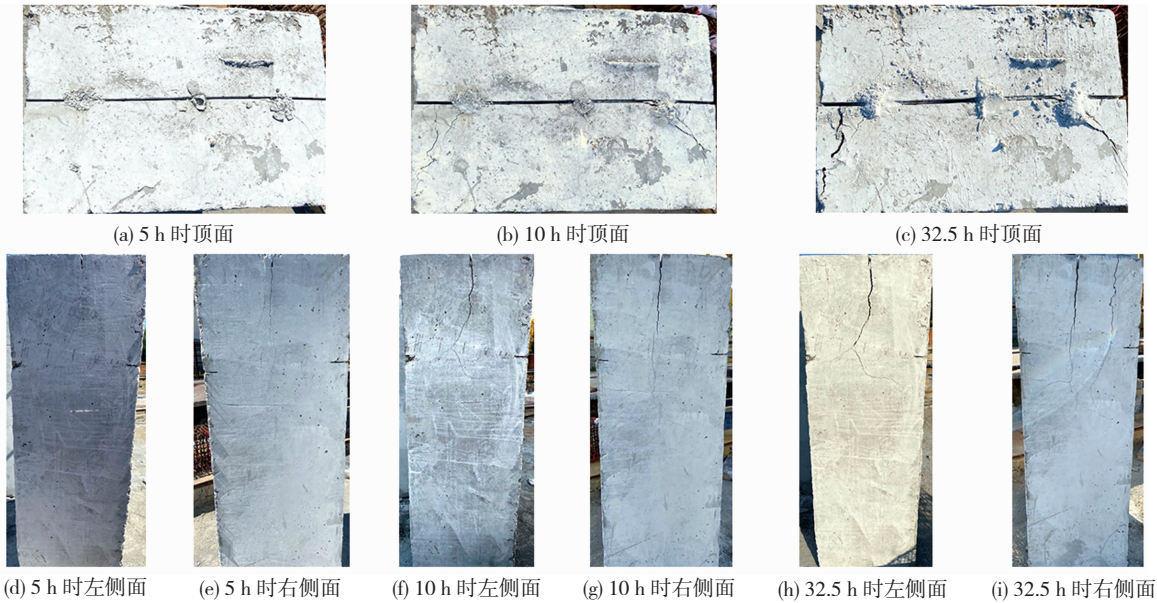


图 14 B-4 裂缝发展过程

Fig. 14 Crack development process of B-4

综合分析 7 个转换梁试件的试验现象发现: 倾斜向下斜交于转换梁侧面钻孔进行混凝土转换梁破碎时, 梁内的箍筋和纵筋会限制裂缝的发展, 未去除

钢筋约束时, 各孔之间会形成连通裂缝, 但裂缝宽度相对较小; 切断箍筋和纵筋后, 裂缝会在竖向切缝处发展, 破碎后形成块体的短边尺寸为孔间距, 可继续

沿梁高度方向打碎使其分成更小的块体;仅切断箍筋后,裂缝会在水平切缝处发展,并在侧面形成斜裂缝,破碎后形成块体的短边尺寸为孔排距,可继续沿梁长度方向打碎使其分成更小的块体;垂直于转换梁顶面钻孔进行混凝土转换梁破碎时,切断顶部箍

筋后,裂缝会在梁顶面切缝处发展,并在侧面形成两到三条竖向裂缝,其破坏形式为沿顶面切缝被破碎为两块,短边尺寸为梁宽的一半,可继续沿梁长度方向打碎使其分成更小的块体。

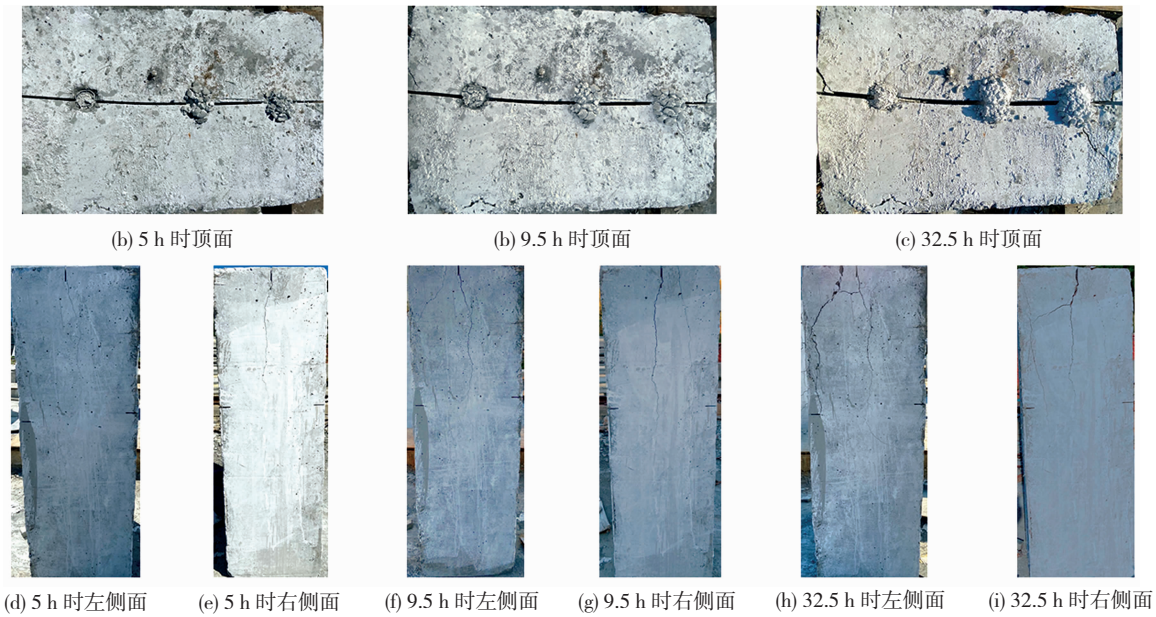


图 15 B-5 裂缝发展过程

Fig. 15 Crack development process of B-5

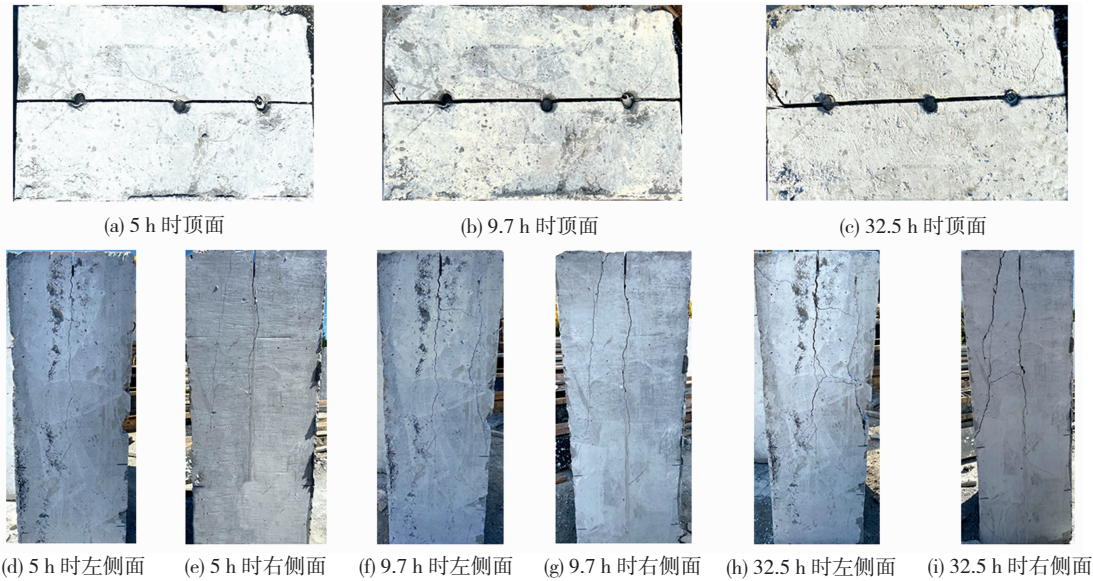


图 16 B-6 裂缝发展过程

Fig. 16 Crack development process of B-6

3 静态破碎效果分析

3.1 混凝土厚板静态破碎效果分析

课题组前期研究中使用破碎剂体积膨胀率表示破碎效果,即假设混凝土块体破碎后孔的形状仍近似为圆形,便可计算得破碎剂的体积膨胀率^[12]。破碎混凝土厚板时,孔周裂缝的发展与单孔下混凝土

块体孔周裂缝的发展相近,在平面内可假设破碎后孔的形状为圆形,在空间中可假设破碎后孔的形状为圆台。因此,本部分仍使用破碎剂体积膨胀率来表示破碎效果,破碎剂体积膨胀率可根据式(1)计算。同时使用裂缝面积比表示混凝土厚板的破碎效果,其为厚板顶面裂缝面积之和与厚板顶面面积之比,裂缝面积比可根据式(2)计算。

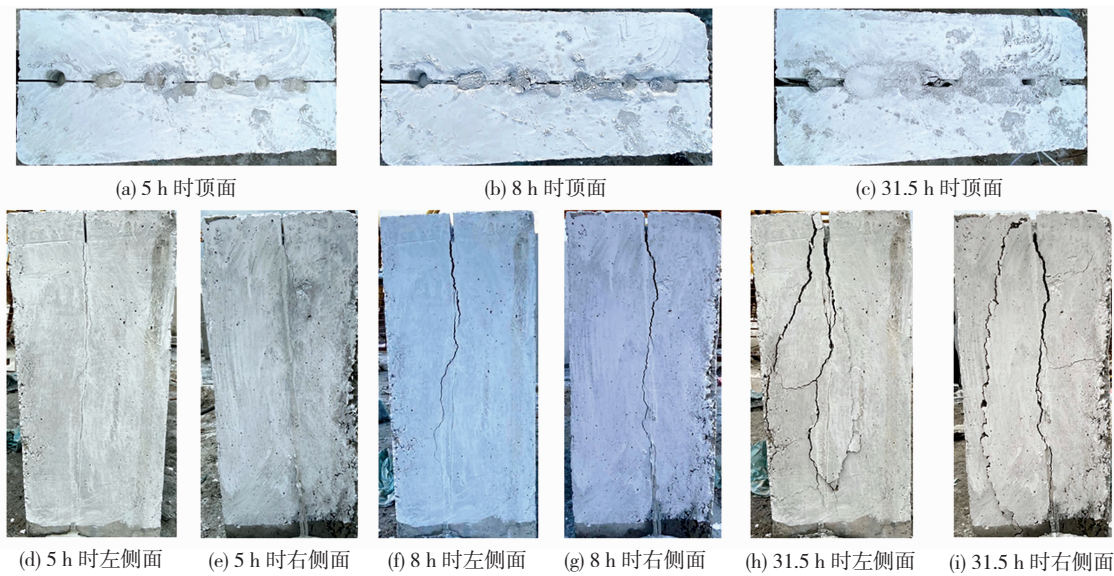


图 17 B-7 裂缝发展过程

Fig. 17 Crack development process of B-7

$$\alpha = \frac{\frac{1}{12}\pi h[\frac{\pi D + \omega}{\pi}D + D^2 + (\frac{\pi D + \omega}{\pi})^2] - \frac{1}{4}\pi D^2 h}{\frac{1}{4}\pi D^2 h} \times 100\%$$

(1)

$$\beta = \frac{l \times (\bar{d} - d')}{A} \times 100\%$$

(2)

式中: α 为破碎剂的体积膨胀率, ω 为孔周裂缝总宽度, β 为裂缝面积比, l 为试件顶面切缝总长度, $\bar{d}$ 为试件顶面切缝平均宽度, d' 为试件顶面切缝初始宽度(试件 B-2 为 0 mm, 试件 B-3 为 4 mm), A 为试件顶面面积。

基于试件 S-2 和 S-3 的试验结果, 建立以破碎剂体积膨胀率为纵坐标、钻孔灌入破碎剂浆体后的时间为横坐标的时程曲线, 见图 18、19。分析曲线发现: 开裂后, 破碎剂体积膨胀率随着时间推移而不断增大, 前期发展快, 后期发展缓慢并逐渐趋于稳定, 此外, 角部孔的体积膨胀率最大, 边部孔次之, 中部孔最小。

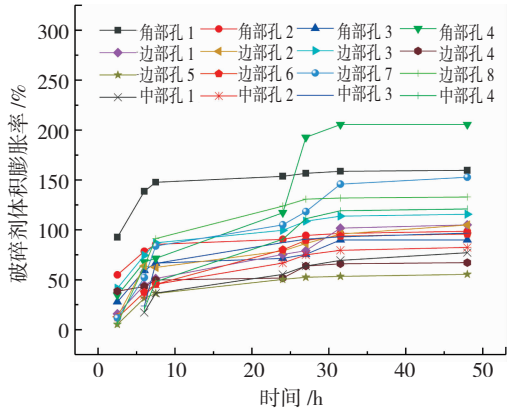


图 18 破碎剂体积膨胀率时程曲线(S-2)

Fig. 18 Time history curves of volume expansion rate of crushing agent(S-2)

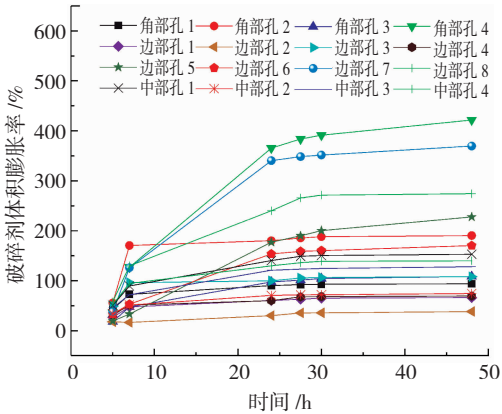


图 19 破碎剂体积膨胀率时程曲线(S-3)

Fig. 19 Time history curves of volume expansion rate of crushing agent(S-3)

为更直观对比切断和剔除纵筋两种方法, 分别建立以试件内所有钻孔体积膨胀率的平均值与裂缝面积比为纵坐标, 钻孔灌入破碎剂浆体后的时间为横坐标的时程曲线, 见图 20、21。分析曲线可以发现: 剔除纵筋后, 角部孔和边部孔在灌入破碎剂浆体 2.5 h 时孔周出现裂缝, 切断纵筋后, 在钻孔灌入破碎剂浆体 5 h 时切缝宽度增长, 前种方法的开裂时间早于后种方法; 钻孔灌入破碎剂浆体 48 h 时裂缝已近乎发展稳定, 剔除纵筋后, 破碎剂体积膨胀率和裂缝面积比分别为 110.1%、18.6%, 切断纵筋后, 破碎剂体积膨胀率和裂缝面积比分别为 164.8%、23.3%, 后种方法的破碎效果优于前种方法。

3.2 混凝土转换梁静态破碎效果分析

基于试件 B-2 的试验结果, 建立以正面和背面切缝宽度的平均值为纵坐标、钻孔灌入破碎剂浆体后的时间为横坐标的时程曲线, 见图 22。分析曲线可发现: 开裂后, 切缝宽度随着时间推移而不断增大, 前期发展快, 后期发展缓慢并逐渐趋于稳定; 切

断梁内箍筋和纵筋后,裂缝主要沿竖向切缝发展。钻孔灌入破碎剂浆体 48 h 时切缝宽度已近乎不再增长,此时各列切缝的平均宽度为 26.5、24.5、28.7 mm。

期发展缓慢并逐渐趋于稳定。钻孔灌入破碎剂浆体 48 h 时裂缝宽度已近乎不再增长,此时各层裂缝的平均宽度为 23.6、30.2、17.1、24.2、23.6 mm。

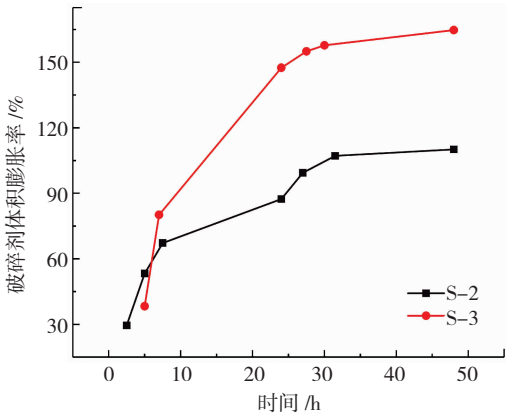


图 20 破碎剂体积膨胀率时程曲线

Fig. 20 Time history curves of volume expansion rate of crushing agent

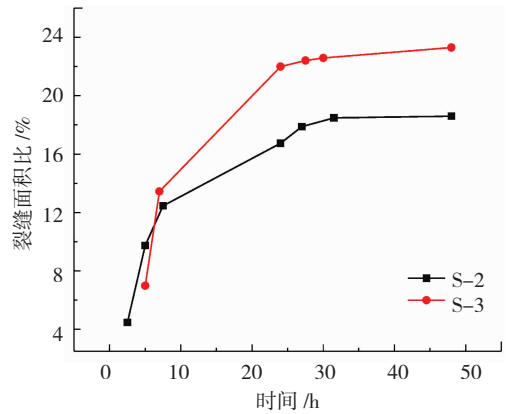


图 21 裂缝面积比时程曲线

Fig. 21 Time history curves of crack area ratio

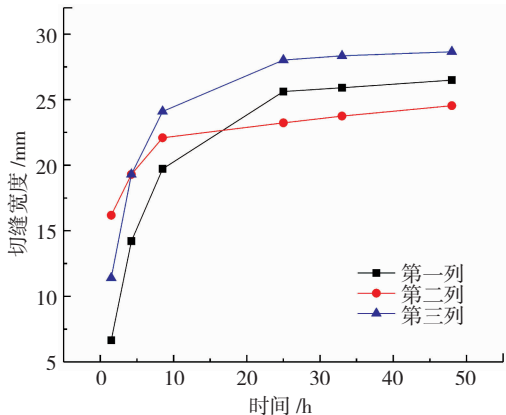


图 22 切缝宽度时程曲线 (B-2)

Fig. 22 Time history curves of cut seam width (B-2)

基于试件 B-3 的试验结果,建立以试件各排正面切缝宽度、背面切缝宽度和两侧面斜裂缝宽度的平均值为纵坐标、钻孔灌入破碎剂浆体后的时间为横坐标的时程曲线,见图 23。分析曲线可以发现:开裂后,裂缝宽度随着时间推移而不断增大,试验前期各排切缝由上到下依次开展,前期发展快,后

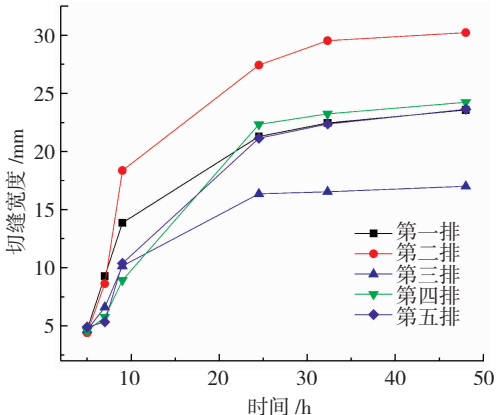


图 23 裂缝宽度时程曲线 (B-3)

Fig. 23 Time history curves of crack width (B-3)

基于试件 B-4、B-5、B-6 和 B-7 的试验结果,建立以梁顶面切缝宽度为纵坐标、钻孔灌入破碎剂浆体后的时间为横坐标的时程曲线,见图 24。分析曲线可以发现:开裂后,切缝宽度随着时间推移而不断增大,前期发展快,后期发展缓慢并逐渐趋于稳定;钻孔灌入破碎剂浆体 48 h 时切缝宽度已近乎不再增长,此时试件 B-4、B-5 和 B-6 顶面的切缝宽度分别为 13.79、13.98、14.14 mm,孔深由 25% 增大至 50% 再增大至 80%,切缝宽度依次增长 1.4%、1.1%;孔间距由 300 mm 缩短到 150 mm 时,切缝宽度增长 77.5%。

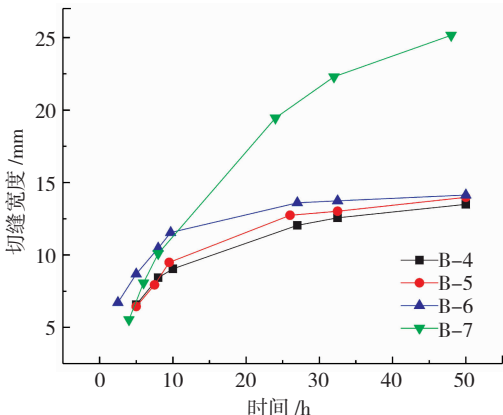


图 24 切缝宽度时程曲线 (B-4、B-5、B-6、B-7)

Fig. 24 Time history curves of cut seam width (B-4、B-5、B-6、B-7)

4 结 论

1)垂直于厚板顶面钻孔进行混凝土厚板破碎时,厚板内纵筋会影响静态破碎过程中的开裂程度,沿孔连线及其延长线切断厚板上部纵筋或剔除厚板上部纵筋均可有效去除钢筋约束,获得较好的破碎效果。破碎后形成块体的短边尺寸为孔间距或孔边

距,便于继续沿长边方向打碎使其分成更小的块体。二者方法相比,切断纵筋后的破碎效果优于剔除纵筋,剔除纵筋后的开裂时间早于切断纵筋。

2)倾斜向下斜交于转换梁侧面钻孔进行混凝土转换梁破碎时,转换梁内箍筋和纵筋会影响静态破碎过程中的开裂程度,沿孔口的连线及延长线切断孔口所在侧面的箍筋或纵筋,同时切断钻孔延长线与另一侧面交点的连线及延长线所交纵筋或箍筋可有效去除钢筋的约束,获得较好的破碎效果。破碎后形成块体的短边尺寸为孔间距、孔排距或孔边距,便于继续沿长边方向打碎使其分成更小的块体。

3)垂直于转换梁顶面钻孔进行混凝土转换梁破碎时,切断梁顶箍筋后,梁内拉结筋会影响静态破碎过程中的开裂程度。孔深增大、孔间距减小,均会导致顶面切缝的宽度增大。

参考文献

[1] 刘清荣,巴惠鹏,陈宝心,等. 静态破碎剂研究现状与展望——献给静态破碎剂问世十周年[J]. 爆破,1990(1):2
LIU Qingrong, BA Huipeng, CHEN Baoxin, et al. Status and prospect of static crushing agent research; dedicated to the 10th anniversary of static crushing agent[J]. Blasting, 1990(1):2

[2] DE SILVA V R S, RANJITH P G, PERERA M S A. An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review [J]. Energies, 2016,9(11):984

[3] 岳中文,杨仁树,郭义先,等. 静态破碎剂作用下裂纹扩展行为的动态分析[J]. 中国矿业,2010,19(7):74
YUE Zhongwen, YANG Renshu, GUO Yixian, et al. Dynamic analysis of crack propagation behavior under swelling of static cracking agent[J]. China Mining Magazine, 2010,19(7):74

[4] 郑志涛,徐颖,倪红娟. 钻孔直径对静态破碎剂致裂性能影响试验分析[J]. 科学技术与工程,2016,16(2):10
ZHENG Zhitao, XU Ying, NI Hongjuan. Test and analysis of hole

diameter effect on cracking performance of static cracking agent [J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(2):10

[5] LAEFER D F, NATANZI A S, ZOLANVARI S M I. Impact of thermal transfer on hydration heat of a soundless chemical demolition agent[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:358

[6] 谢益盛,杨光辉,黄小朋. 静态破碎剂膨胀力学性能试验研究 [J]. 煤矿安全,2019,50(3):12
XIE Yisheng, YANG Guanghui, HUANG Xiaopeng. Experimental research on mechanical properties of static breaking agents [J]. Safety in Coal Mines, 2019,50(3):12

[7] SHANG J, ZHAO Z, ALIYU M M. Stresses induced by a demolition agent in non-explosive rock fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018,107:179

[8] 唐烈先,唐春安,唐世斌. 混凝土静态破碎的物理试验与数值试验[J]. 混凝土,2005(8):5
TANG Liexian, TANG Chunan, TANG Shibin. Physical experiment and numerical tests of soundless cracking on concrete [J]. Concrete, 2005(8):5

[9] CHO H, NAM Y, KIM K, et al. Numerical simulations of crack path control using soundless chemical demolition agents and estimation of required pressure for plain concrete demolition [J]. Materials and Structures, 2018,51(6):181

[10] 薛志翔,马芹永. 钢筋混凝土试块静态破裂试验与分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2017,37(1):64
XUE Zhixiang, MA Qinyong. Experiment and analysis on reinforced concrete using static cracking agent[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science),2017,37(1):64

[11] 李瑞森. 混凝土结构静态破碎方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019

[12] 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):192
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):192

(编辑 赵丽莹)