

DOI:10.11918/202103039

混凝土厚板静态破碎试验研究

姜智盛^{1,2}, 郑文忠^{1,2}, 李瑞森^{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: 为考察孔深和外围孔与内孔灌入破碎剂浆体的间隔时间对混凝土厚板静态破碎效果的影响, 开展了7个混凝土厚板试件的静态破碎试验。垂直于厚板顶面钻孔, 并在破碎前沿孔连线及其延长线方向双向切断厚板上部纵筋。试验结果表明: 孔深小于板厚的70%时, 破碎剂浆体结硬膨胀引起的裂缝已无法向下延伸至厚板底部; 孔深由板厚的70%增至90%时, 破碎效果逐渐提高, 但破碎后形成块体的最小短边尺寸和最大长边尺寸相近, 孔深为板厚的80%时, 破碎后形成块体的数量最多; 先外围孔灌入破碎剂浆体, 经历一段时间浆体结硬膨胀后再向内孔灌入破碎剂浆体, 与所有钻孔同时灌入破碎剂浆体相比, 破碎效果提高, 其中对外围区域的提高比对内部区域的提高明显, 此外, 破碎后形成块体的数量、最小短边尺寸和最大长边尺寸相近。基于试验结果, 给出如下建议: 破碎混凝土厚板时, 孔深应取为板厚的80%; 宜采用先外围孔灌入破碎剂浆体, 待外围孔内浆体结硬膨胀后再向内孔灌入破碎剂浆体的方法。

关键词: 静态破碎; 混凝土厚板; 孔深; 间隔灌浆; 破碎效果

中图分类号: TU37

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)04-0025-07

Experimental study on static crushing of thick concrete slab

JIANG Zhisheng^{1,2}, ZHENG Wenzhong^{1,2}, LI Ruisen^{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 effects of hole depths as well as the intervals of slurry grouting into outer holes and inner holes on the static crushing effect of thick concrete slabs, static crushing tests of seven thick concrete slab specimens were carried out. Boreholes were drilled perpendicular to the top surface of the thick concrete slab, and the longitudinal reinforcements on the upper part of the thick slab were cut off in two directions along the hole connecting line and its extension before crushing. Results showed that when the hole depth was less than 70% of the slab thickness, the cracks caused by the hardening and expansion of the slurry could not extend down to the bottom of the slab. When the hole depth increased from 70% to 90% of the slab thickness, the crushing effect was gradually improved, but the size of the minimum short edge and the size of the maximum long edge of the blocks after crushing were similar. When the hole depth was 80% of the slab thickness, the number of the blocks generated after crushing was the most. The slurry was first grouted into the outer holes and then into the inner holes after a certain time of hardening and expansion. Compared with the method of grouting all the boreholes at the same time, the crushing effect was improved, and the improvement in the external area was more obvious than that in the internal area. Besides, the number, the size of the minimum short edge, and the size of the maximum long edge of the blocks after crushing were similar. Based on the test results, the following suggestions are given: when crushing thick concrete slabs, the hole depth should be 80% of the slab thickness; it is better to first grout the slurry into the outer holes, and then the inner holes after the hardening and expansion of the slurry.

Keywords: static crushing; thick concrete slab; hole depth; interval grouting; 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, 其结硬过程中的体积膨胀会

使孔壁受到环向膨胀压力, 进而导致岩石或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, 从而实现破碎的技术。与其他拆除方法相比, 静态破碎技术具有安全、施工简单、无噪音、无振动、无粉尘、无有害气体等优势^[1-3]。

为促进静态破碎技术的应用, 学者们进行了相应的研究。谢益盛等^[4]基于电阻应变法探究了水

收稿日期: 2021-03-12

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, hitwzheng@163.com

剂比对膨胀压应力的影响,研究指出水剂比越小(0.25~0.43),破碎剂产生的膨胀压应力越大。谢益盛等^[4]、李瑞森等^[5]、Laefer 等^[6]、郑志涛等^[7]基于电阻应变法(文献[4]中钢管的高度为 500 mm,内径分别为 30、40、50、60 mm;文献[5]中钢管的高度为 500 mm,内径分别为 30、40、50 mm;文献[6]中钢管的高度为 500 mm,内径分别为 50.8、76.2、101.6 mm;文献[7]中钢管的高度为 1 000 mm,内径分别为 32、38、48、58、72 mm)探究了孔径对膨胀压应力的影响,研究指出孔径越大,膨胀压应力的发展越快,膨胀压应力的峰值越大。Natanzi 等^[8]基于电阻应变法探究了环境温度(2~19 ℃)对破碎剂水化反应进程的影响,研究指出环境温度越高,水化反应越剧烈,水化热峰值和膨胀压应力峰值均随之增大。崔年生等^[9]通过素混凝土块体的静态破碎试验探究了水剂比和混凝土强度对裂缝扩展的影响,研究指出水剂比越小(0.25~0.35)、待破碎混凝土强度越低,裂缝产生的越早并且扩展速度越快。李岩^[10]通过素混凝土块体的静态破碎试验探究了混凝土强度对破碎效果的影响,研究指出随着混凝土强度提高,开裂时间延后,并且产生裂缝的条数减少。郝大宽等^[11]基于 RFPA^{2D}软件模拟了双孔下素混凝土静态破碎的裂缝发展过程,研究指出孔径一定的条件下,孔间距越小越容易形成连通裂缝。

分析学者们已有的研究成果发现,尚缺少对孔深和外围孔与内孔灌入破碎剂浆体的间隔时间对破碎效果影响的研究。因此,本文将孔深和外围孔与内孔灌入破碎剂浆体的间隔时间作为研究对象,考察二者在破碎混凝土厚板时对破碎效果的影响规律。

1 试验概况

静态破碎试验用 7 个混凝土厚板的试件设计见表 1。各试件配筋形式均为:在混凝土厚板顶部和

底部各配置一层钢筋牌号为 HRB400、直径为 12 mm、间距为 200 mm 的水平钢筋网,水平钢筋网的混凝土保护层厚度为 25 mm,见图 1。参考工程经验与课题组前期的研究结果^[12],将孔径取为 40 mm,孔间距取为 300 mm。使用凿岩机垂直于厚板顶面钻孔,采用“4×4”的布孔形式。因钢筋会限制裂缝的发展,导致混凝土无法酥碎^[13-14],本次试验采用课题组前期研究得到的去除钢筋约束的方法,即使用墙锯沿孔连线及其延长线双向切断厚板上部的水平纵筋^[14],厚板试件的布孔示意图 2,切断钢筋后的实物见图 3。为探究孔深对破碎效果的影响,试件 S-1、S-2、S-3 和 S-4 的孔深分别取为板厚的 90%、80%、70% 和 60%。为探究外围孔和内孔灌入破碎剂浆体的间隔时间对破碎效果的影响规律,试件 S-5、S-6 和 S-7 的孔深均为板厚的 80%,外围孔先灌入破碎剂浆体,分别间隔 1 h、2 h 和 3 h 后再向内孔灌入破碎剂浆体。试件 S-1~S-7 对应的混凝土标准立方体抗压强度均为 41.6 MPa。

表 1 混凝土厚板试件设计

Tab. 1 Design of thick concrete slabs mm					
试件编号	板边长 <i>B</i>	板厚 <i>H</i>	孔径 <i>D</i>	孔间距 <i>S</i>	孔深 <i>h</i>
S-1	1 200	600	40	300	540
S-2	1 200	700	40	300	560
S-3	1 200	800	40	300	560
S-4	1 200	900	40	300	540
S-5	1 200	700	40	300	560
S-6	1 200	700	40	300	560
S-7	1 200	700	40	300	560

注:孔边距为 1/2 的孔间距。

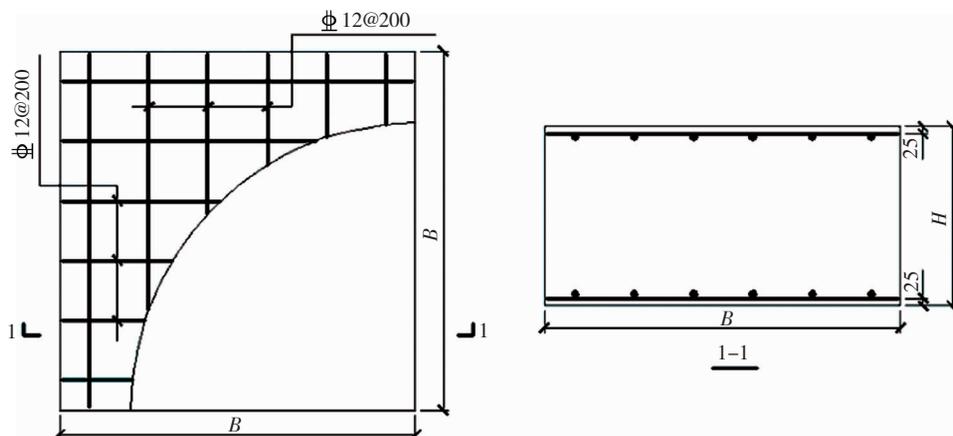


图 1 混凝土厚板配筋

Fig. 1 Reinforcement drawing of thick concrete slab

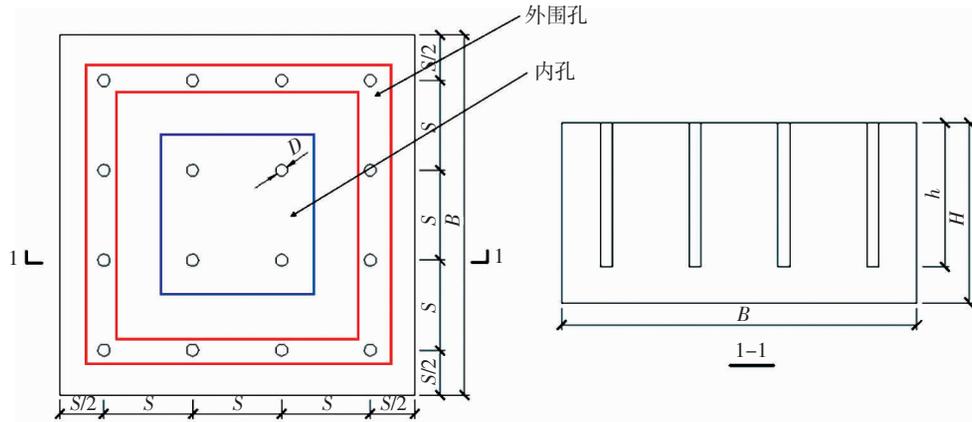


图 2 混凝土厚板布孔示意

Fig. 2 Hole layout of thick concrete slab

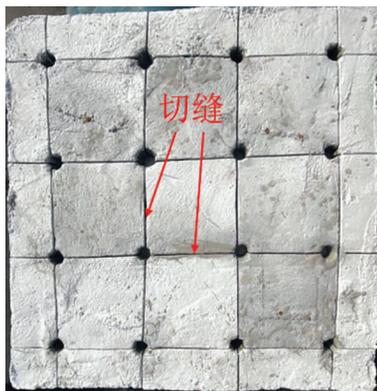


图 3 混凝土厚板切断钢筋后实物

Fig. 3 Picture of thick concrete slab after cutting reinforcements

试验用静态破碎剂为施必达(大连)公司生产的 S-611 石灰型无声破碎剂,参考破碎剂的使用说明,并为保障搅拌后浆体的流动性和破碎剂结硬产生所需的膨胀压力,将水剂比取为 0.3。采用 JC 506—2008《无声破碎剂》中的电阻应变测量法(将破碎剂浆体灌入直径为 40 mm、高度为 500 mm、壁厚为 5.35 mm 且封底的钢管(直立放置)中,测定钢管外表面的拉伸应变,基于弹性理论(均匀内外载荷作用下厚壁钢管的切向和径向应变与所受的压力呈一定的函数关系)^[6]推导出的计算公式便可得到钢管内壁受到的环向膨胀压应力)获得了距钢管顶部 100、250 和 400 mm 处径向膨胀压应力的时程曲线,见图 4(分析图中曲线下降的原因为:钢管试验在水箱中进行,水箱中水的温度低于室温,将钢管放入水箱时破碎剂浆体还未凝结,钢管受冷收缩,应变在前期为负值,曲线下降,破碎剂浆体凝结结硬后,对钢管内壁的膨胀压应力逐渐增大,曲线上升)。此外,水剂比为 0.3 时,S-611 型无声破碎剂的自由体积膨胀率为 310%。本次试验的灌药时间为 2020 年 9 月 13 日 7:30,钻孔灌入破碎剂浆体后未采取封孔措施,每间隔一定时间测量并记录裂缝的发展。试验期间白天的平均温度为 20 ℃,夜间的平均温度为 13 ℃。

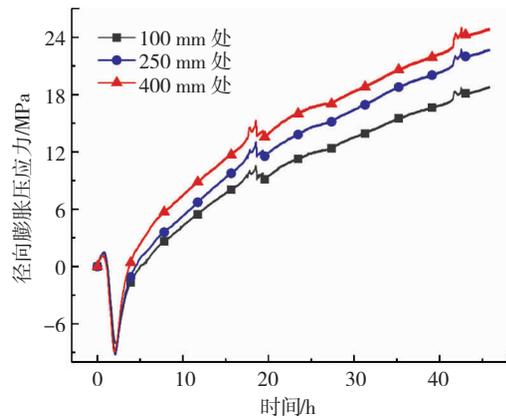


图 4 膨胀压应力时程曲线

Fig. 4 Time history curves of expansive pressure

2 试验现象及分析

试件 S-1、S-2、S-3: 钻孔灌入静态破碎剂浆体 5 h 时试件顶面切缝的宽度开始增大。随着时间的推移,切缝的宽度继续增大,同时裂缝逐渐向下延伸至试件底部。试件的整体裂缝发展趋势主要沿切缝发展,但会存在两孔之间切缝宽度增长不明显的情况。试件 S-1、S-2 和 S-3 顶面的裂缝发展过程见图 5~7。

试件 S-4: 钻孔灌入静态破碎剂浆体 5 h 时试件顶面切缝的宽度开始增大。随着时间的推移,切缝宽度继续增大,角部区域的混凝土先在距试件底部 10~20 cm 处脱落。随后,边孔连线以外其他区域的混凝土也在距试件底部 10~20 cm 处脱落,裂缝未能向下延伸到试件底部。试件的整体裂缝发展趋势主要沿切缝发展。试件 S-4 顶面的裂缝发展过程见图 8。

试件 S-5、S-6、S-7: 钻孔灌入静态破碎剂浆体 5 h 时试件顶面外围切缝的宽度先开始增大。随着时间的推移,外围切缝的宽度继续增大,内部切缝宽度也开始增大。破碎剂水化反应继续进行,切缝宽度继续增大,同时裂缝逐渐向下延伸至试件底部。

试件的整体裂缝发展趋势主要沿切缝发展,但会存在两孔之间切缝宽度增长不明显的情况。试件 S-5、

S-6和 S-7 顶面的裂缝发展过程见图 9~11。

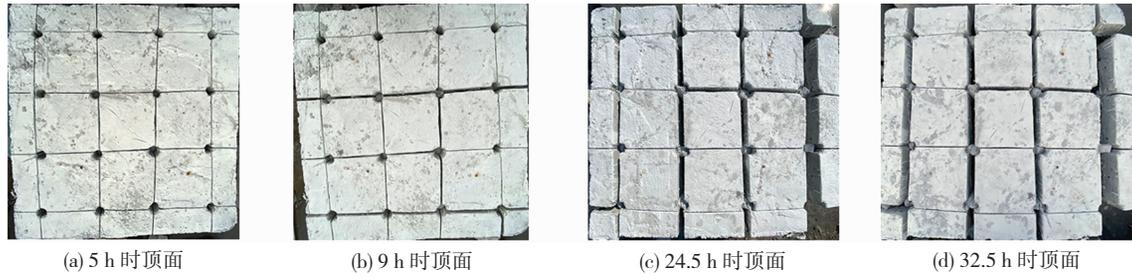


图 5 S-1 裂缝发展过程

Fig. 5 Crack development process of S-1

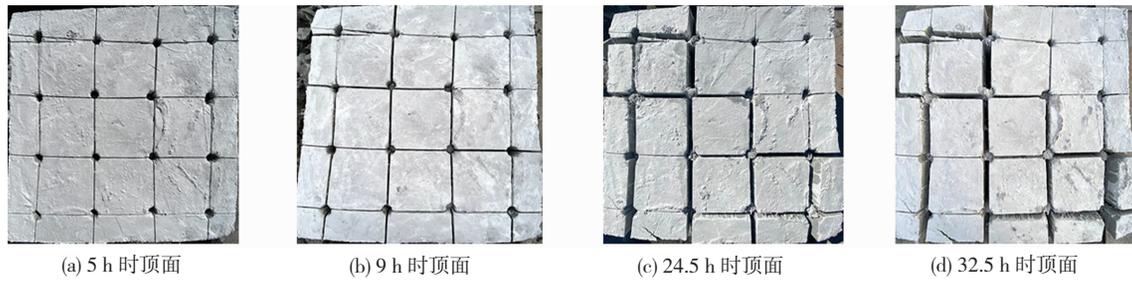


图 6 S-2 裂缝发展过程

Fig. 6 Crack development process of S-2

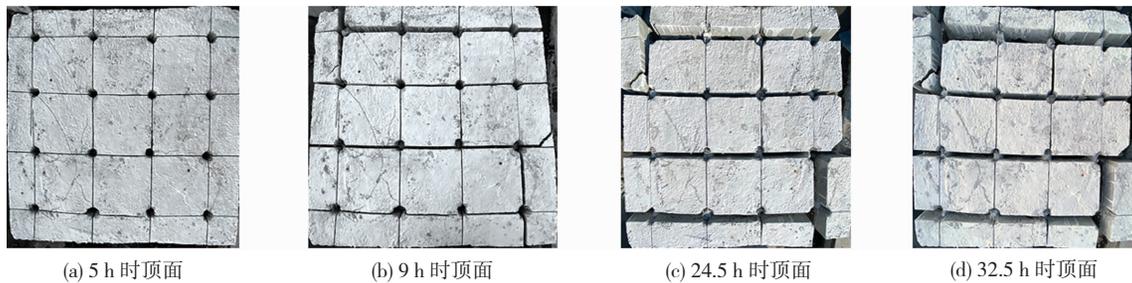


图 7 S-3 裂缝发展过程

Fig. 7 Crack development process of S-3

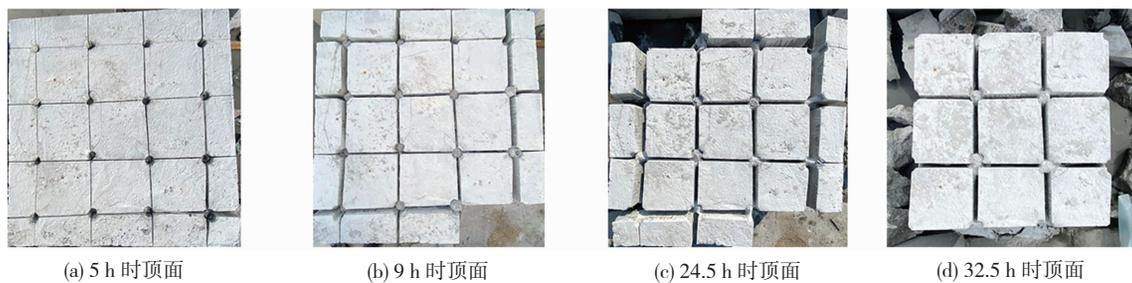


图 8 S-4 裂缝发展过程

Fig. 8 Crack development process of S-4

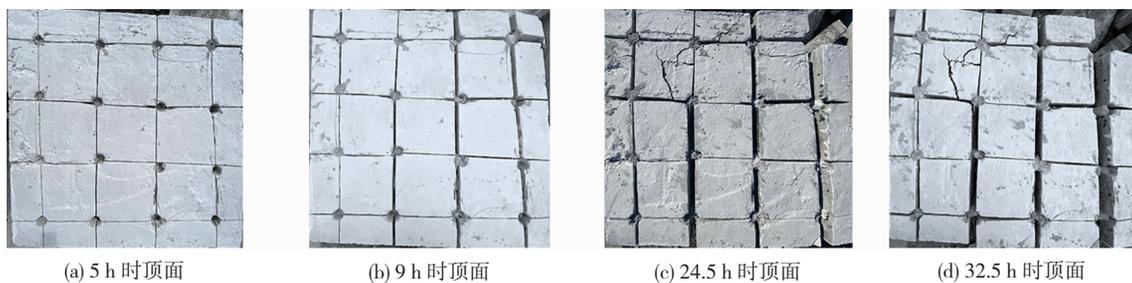


图 9 S-5 裂缝发展过程

Fig. 9 Crack development process of S-5

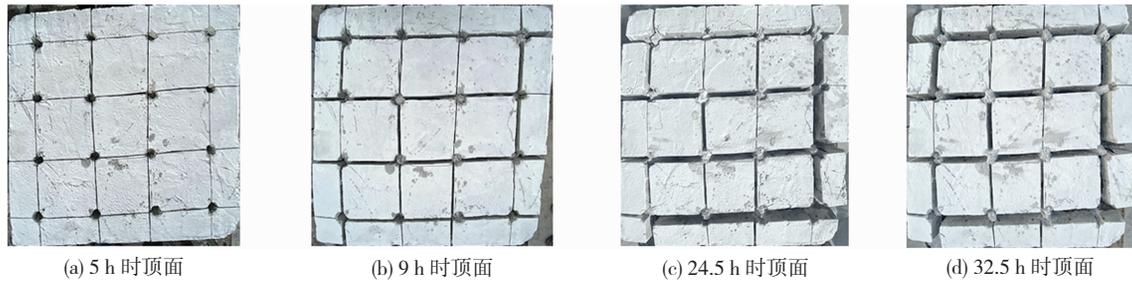


图 10 S-6 裂缝发展过程

Fig. 10 Crack development process of S-6

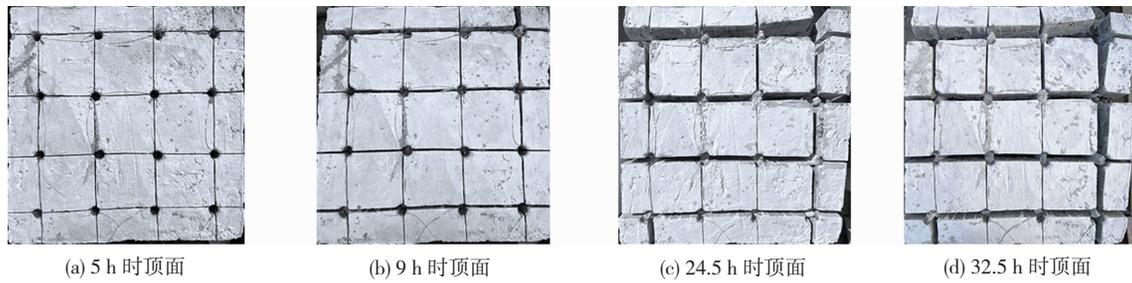


图 11 S-7 裂缝发展过程

Fig. 11 Crack development process of S-7

综合分析上述混凝土厚板试件的试验现象发现:因切割钢筋会对试件造成缺陷,上述厚板试件的裂缝均在切缝处发展;孔深为板厚的 60% 时,裂缝已无法向下延伸到试件底部;孔深为板厚的 70%、80% 和 90% 时,破碎后形成块体的最小短边尺寸和最大长边尺寸相近;孔深为板厚的 80% 时,破碎后形成块体的数量最多;外围孔与内孔间隔灌入破碎剂浆体时,试件外围切缝先开始发展,随后内部切缝发展;外围孔与内孔间隔灌入破碎剂浆体与所有钻孔同时灌入破碎剂浆体相比,破碎后形成块体的数量、最小短边尺寸和最大长边尺寸相近。

3 孔深和灌浆间隔时间对破碎效果的影响

3.1 孔深对破碎效果的影响

因试验过程中试件 S-4 外围区域的混凝土脱落,本部分使用厚板顶面内部区域裂缝面积比(β)来表示厚板试件的破碎效果, β 为厚板顶面内部区域(扣除边孔连线以外的区域)切缝面积(切缝长度×切缝宽度)之和与厚板顶面内部区域面积之比。基于试件 S-1、S-2、S-3 和 S-4 的试验结果,建立以 β 为纵坐标、钻孔灌入破碎剂浆体后经历的时间(t)为横坐标的时程曲线,见图 12。同时,为分析孔深对破碎效果的影响,建立以 β 为纵坐标、孔深(h/H)为横坐标的影响曲线,见图 13。

由图 12、13 可知:开裂后,裂缝面积比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;孔深由板厚的 70% 增长至 90% 时,裂缝

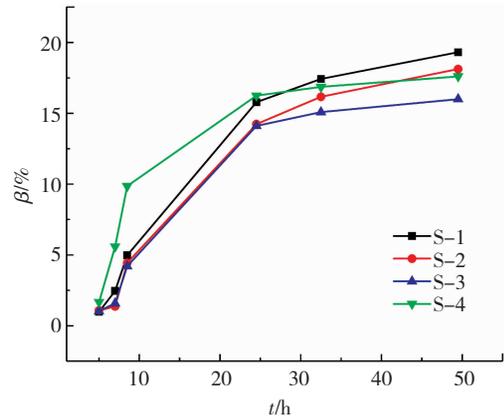


图 12 裂缝面积比时程曲线(S-1~S-4)

Fig. 12 Time history curves of crack area ratio(S-1-S-4)

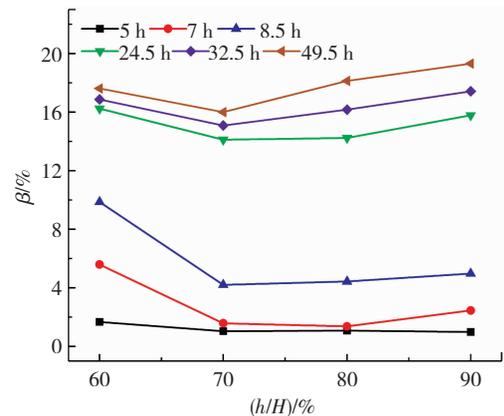


图 13 孔深对裂缝面积比的影响

Fig. 13 Effect of hole depth on crack area ratio

面积比呈上升趋势;破碎剂浆体灌入钻孔 50 h 后,裂缝面积比已近乎不再增长,可认为此时裂缝发展已稳定,孔深由板厚的 70% 增长至 80% 时,裂缝面积比提高 10.9%,孔深由板厚的 80% 增至 90% 时,

裂缝面积比提高 5.5% ;孔深由板厚的 60% 增长至 70% 时,裂缝面积比呈下降趋势,分析原因为:孔深为板厚 70% 时,板厚为 800 mm,裂缝可以延伸至试件底部,试件底部的水平钢筋网仍然连通限制裂缝开展,而孔深为板厚的 60% 时,板厚为 900 mm,裂缝已无法向下延伸至试件底部,裂缝从根部向上呈三角形,导致最终的裂缝面积比优于孔深为板厚 70% 时的裂缝面积比,但因厚板底部的约束作用,其最终的裂缝面积比差于孔深为板厚 80% 和 90% 时的裂缝面积比。根据试验结果,建议破碎混凝土厚板时,孔深取为板厚的 80% 。

3.2 灌浆间隔时间对破碎效果的影响

为便于分析,将厚板试件分为角部区域、边部区域和中部区域 3 个区域,见图 14。本部分使用厚板顶面裂缝面积比(β_1)、厚板顶面角部区域裂缝面积比(β_2)、厚板顶面边部区域裂缝面积比(β_3)、厚板顶面中部区域裂缝面积比(β_4)来表示厚板试件的破碎效果,其中 β_1 为厚板顶面切缝面积(切缝长度 \times 切缝宽度)之和与厚板顶面面积之比, β_2 为厚板顶面角部区域切缝面积(切缝长度 \times 切缝宽度)之和与厚板顶面角部区域面积之比, β_3 为厚板顶面边部区域切缝面积(切缝长度 \times 切缝宽度)之和与厚板顶面边部区域面积之比, β_4 为厚板顶面中部区域切缝面积(切缝长度 \times 切缝宽度)之和与厚板顶面中部区域面积之比。基于试件 S-2、S-5、S-6 和 S-7 的试验结果,建立以 β_1 为纵坐标、外围孔灌入破碎剂浆体后经历的时间(t)为横坐标的时程曲线,见图 15。同时,为分析外围孔与内孔灌入破碎剂浆体的间隔时间对破碎效果的影响,建立以 β_2 、 β_3 和 β_4 为纵坐标、外围孔与内孔灌入破碎剂浆体的间隔时间(T)为横坐标的影响曲线,见图 16~18。

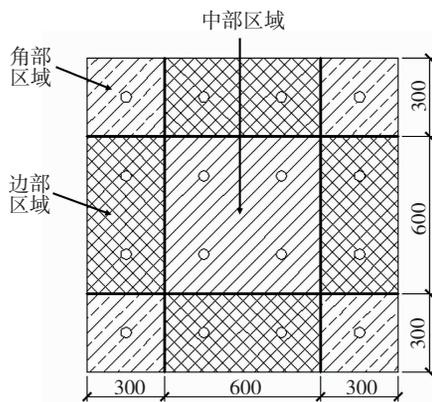


图 14 各区域示意

Fig. 14 Schematic of each area

由图 15~18 可知:开裂后,裂缝面积比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;外围孔与内孔灌入破碎剂浆体间隔时

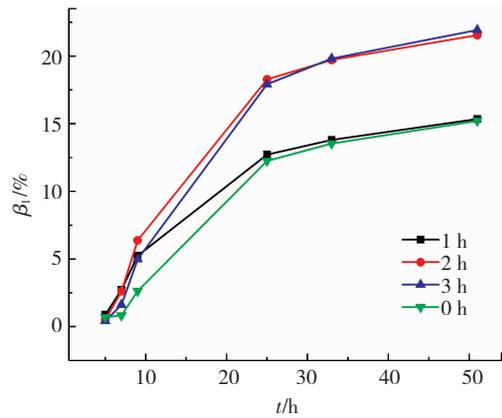


图 15 裂缝面积比时程曲线(S-2、S-5~S-7)

Fig. 15 Time history curves of crack area ratio(S-2, S-5~S-7)

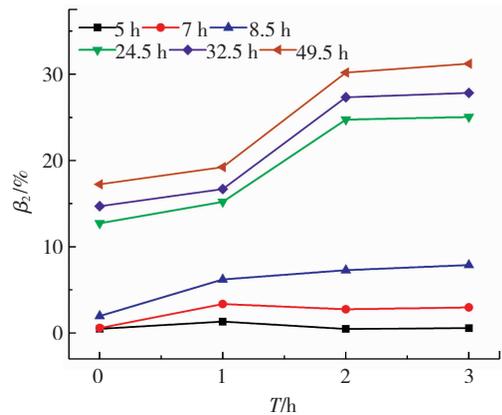


图 16 灌浆间隔时间对角部区域裂缝面积比的影响

Fig. 16 Effect of grouting interval on corner crack area ratio

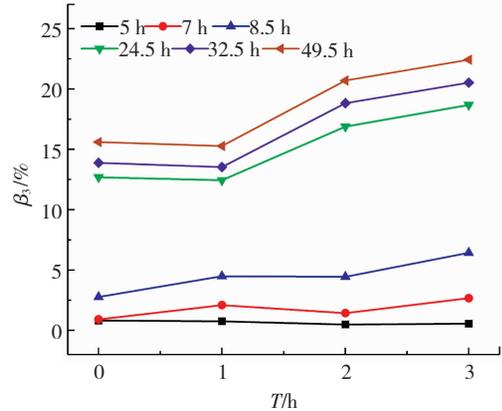


图 17 灌浆间隔时间对边部区域裂缝面积比的影响

Fig. 17 Effect of grouting interval on edge crack area ratio

间为 1 h 和所有钻孔同时灌入破碎剂浆体相比,裂缝面积比的时程曲线相近;外围孔与内孔灌入破碎剂浆体间隔时间为 2 h 和 3 h 与所有钻孔同时灌入破碎剂浆体相比,裂缝面积比增大;钻孔灌入破碎剂浆体 50 h 后,裂缝面积比已近乎不再增长,可认为此时裂缝发展已稳定,与所有钻孔同时灌入破碎剂浆体相比,外围孔与内孔灌入破碎剂浆体间隔时间为 2 h 时,角部区域裂缝面积比提高 75.2%,边部区域裂缝面积比提高 32.7%,中部区域裂缝面积比提

高3.5%,外围孔与内孔灌入破碎剂浆体间隔时间为3 h时,角部区域裂缝面积比提高81.1%,边部区域裂缝面积比提高43.8%,中部区域裂缝面积比提高11.2%。根据试验结果,建议采用先外围孔灌入破碎剂浆体,待外围孔内浆体结硬膨胀后再向内孔灌入破碎剂浆体的方法,或待外围混凝土破碎并清理完成后,再进行内部区域的破碎。

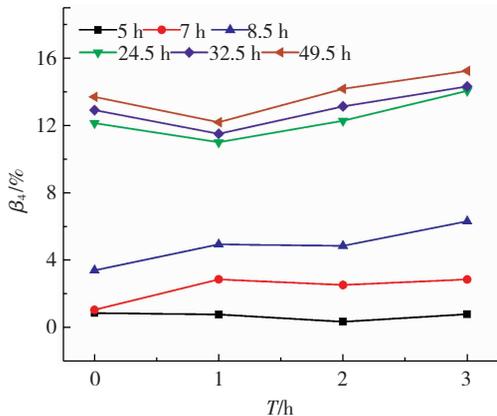


图18 灌浆间隔时间对中部区域裂缝面积比的影响

Fig. 18 Effect of grouting interval on central crack area ratio

4 结 论

1) 孔深小于板厚的70%时,裂缝已无法延伸至试件底部,孔深由板厚的70%增至板厚的90%时,裂缝面积比增大,破碎后形成块体的最小短边尺寸与最大长边尺寸相近,孔深为板厚的80%时,破碎后形成块体的数量最多。

2) 先外围孔灌入破碎剂浆体,经历一段时间浆体结硬膨胀后再向内孔灌入破碎剂浆体,与所有钻孔同时灌入破碎剂浆体相比,破碎后形成块体的数量、最小短边尺寸与最大长边尺寸相近,裂缝面积比增大,其中对外围区域的提高比对内部区域的提高明显。

3) 基于试验结果,建议破碎混凝土厚板时:孔深取为板厚的80%;宜采用先外围孔灌入破碎剂浆体,待外围孔内浆体结硬膨胀后再向内孔灌入破碎剂浆体的方法,或可待外围区域混凝土破碎完成后,再进行内部区域的破碎。

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] LAEFER D F, AMBROZEVITCH-COOPER N, HUYNH M P, et al. Expansive fracture agent behaviour for concrete cracking[J]. Magazine of Concrete Research, 2010,62(6):451

[3] NATANZI A S, LAEFER D F, ZOLANVARI S M I. Selective demolition of masonry unit walls with a soundless chemical

demolition agent[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248:118635

[4] 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):11
XIE Yisheng, YANG Guanghui, HUANG Xiaopeng. Experimental research on mechanical properties of static breaking agents[J]. Safety in Coal Mines, 2019,50(3):11

[5] 李瑞森,郑文忠,徐笠博,等. 静态破碎剂对钢管径向膨胀压应力试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(10):27
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):27

[6] 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

[7] 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

[8] NATANZI A S, LAEFER D F, CONNOLLY L, et al. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents [J]. Construction and Building Materials, 2016,110:126

[9] 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):19
CUI Niansheng, ZHANG Daning, GUO Lianjun, et al. Experimental study on static cracking effect of concrete [J]. Engineering Blasting, 2018,24(3):19

[10] 李岩. 不同强度混凝土静态破碎试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2014,34(3):24
LI Yan. Test research on static cracking of different strength concrete[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2014,34(3):24

[11] 郝大宽,包春燕,唐春安. 钻孔间距对岩石静态破碎效果影响的数值模拟研究[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学),2018,38(2):62
HAO Dakuan, BAO Chunyan, TANG Chunan. Numerical simulation of rock static breakage with different drill hole spacings[J]. Journal of Shaoxing University (Natural Science), 2018,38(2):62

[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

[13] 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

[14] 姜智盛,郑文忠,侯晓萌,等. 混凝土厚板和转换梁静态破碎试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(10):21
JIANG Zhisheng, ZHENG Wenzhong, HOU Xiaomeng, et al. Static crushing experiment of thick concrete slab and concrete transfer beam[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(10):21