

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.021

钢筋混凝土构件的大孔径静态破碎技术研究*

娄荣¹,陈威文¹,周方均²,邢黎明²,商圣波²,倪晓静^{1,3}

(1. 华汇工程设计集团股份有限公司, 绍兴 312000; 2. 华汇建设集团有限公司, 嵊州 312400;
3. 浙江大学, 杭州 310027)

摘要: 对于钢筋混凝土临时构件的拆除,提出一种沿着轴线设置大直径预埋孔进行静态破碎的方法。基于扩展有限元方法,对某截面尺寸为500 mm×500 mm钢筋混凝土梁的静态破碎过程进行了数值模拟。模拟结果表明:裂缝沿着截面对角线方向扩展。应变能释放率结果显示静态破碎过程可分为弹性变形、裂缝稳定扩展与裂缝失稳扩展三个阶段,且拉应力为裂缝扩展的主导因素。针对大孔径静态破碎的冲孔问题,提出了一种可用于钢筋混凝土构件的防冲孔构造,进而采用足尺模型试验验证了大孔径静态破碎技术的可行性。

关键词: 大孔径静态破碎; 扩展有限元法; 钢筋混凝土; 防冲孔; 模型试验

中图分类号: TU371.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0127-05

Soundless Cracking Technology of Reinforced Concrete Structure with Large Embedded Hole

LOU Rong¹, CHEN Wei-wen¹, ZHOU Fang-jun², XIN Li-ming², SHAN Shen-bo², NI Xiao-jin^{1,3}

(1. Huahui Engineering Design Group Co Ltd, Shaoxing 312000, China;
2. Huahui Construction Group Co Ltd, Shengzhou 312400, China;
3. Zhejiang University, Hanzhou 310027, China)

Abstract: A demolition scheme of temporary reinforced concrete structure based on soundless cracking agent is proposed with large diameter hole embedded along its axis. Based on extended finite element method, the soundless cracking process of a reinforced concrete beam with a section size of 500 mm×500 mm is simulated. The simulation results show that the main cracking propagation route is along the diagonal of the section. The results of strain energy release rate indicate that the tensile stress accounts for the main motivation of cracking propagation. And the static fracture process can be divided into three stages: elastic deformation, stable crack propagation and unstable crack propagation. Aiming at the punching problem of static cracking with a large hole, a method of preventing the phenomenon of hole punching suitable for reinforced concrete structures is proposed. Furthermore, full-scale model tests have proved the feasibility of soundless cracking with large embedded hole along the axis of a reinforced concrete structure.

Key words: soundless cracking with large embedded hole; extended finite element method; reinforced concrete; hole punching prevention; full-scale model test

大面积开挖的深基坑施工过程中,一般需设置

若干道钢筋混凝土梁作为支撑。施工完毕后,支撑梁的拆除成为影响施工进度的重要因素。目前常用的拆除方法有爆破拆除、机械拆除和人工拆除等,这些方法均会产生大量飞石、粉尘和噪音。除此之外,爆破拆除伴随着巨大的冲击力,并对周围的建筑物

收稿日期:2020-07-31

作者简介:娄荣(1981-),男,高级工程师、博士,从事静态破碎技术研究,(E-mail)lourong@zju.edu.cn。

基金项目:绍兴市科技计划项目(2018A21010)

以及管线设施产生不利影响;机械拆除一般采用镐头机,施工过程中不仅振动和噪声大,工期也较长;而人工拆除法劳动强度大,效率低。特别是在城市CBD区域,如何安全、快速、经济、环保地拆除钢筋混凝土支撑梁,是一个具有现实意义的课题。

静态破碎技术又称“无声破碎技术”,其原理为利用静态破碎剂水化反应产生的体积膨胀,使被破碎体开裂、破碎^[1,2]。目前该技术在矿山开采、水利工程等领域已经得到了广泛应用^[3],在钢筋混凝土结构拆除中应用尚不多见。事实上对于钢筋混凝土构件的拆除,只需在预埋孔中灌注静态破碎剂,1 h左右便可产生较大膨胀压力,12 h内完成破碎作业^[1,2],整个过程可视为准静态过程。与目前常用的拆除方法相比,静态破碎技术可有效减少拆除过程中的振动、粉尘以及噪声,具有良好的社会效益。

1 钢筋混凝土构件的静态破碎

如图1所示,目前钢筋混凝土结构在静态破碎时,一般是在构件高度方向布置直径不超过50 mm的预埋孔^[4,5],孔间距在150~300 mm之间,为达到破碎效果,需要先将箍筋切断。基坑支撑梁的受力以轴向偏心受压为主,密密麻麻的预埋孔引起的应力集中对其承载力有较大的影响,也不便于灌注静态破碎剂。



图1 常规的静态破碎孔布置

Fig. 1 Conventional arrangement of soundless crack hole

文献[5]的研究表明,40 mm孔径静态破碎的最大膨胀压力约为30 MPa,而100 mm孔径的静态破碎最大膨胀力可达200 MPa以上。此外,大孔径静态破碎发挥药效所需时间也更短^[4,5]。由于冲孔问题^[4],目前大孔径静态破碎在实际工程中的应用尚不多见。国内有学者提出了堵孔器来解决冲孔问题^[4],然而构造较为复杂,不便于在实际工程中推广应用。针对钢筋混凝土构件的拆除,提出一种沿着构件轴线布置大直径预埋孔进行静态破碎的方案,其主要优点在于:1)采用了对支撑梁承载力影响较小的预埋孔布置方式;2)大直径预埋孔两端均

采用软管与注浆口和排气口相连,通过软管的弯折防止静态破碎剂冲孔;3)在构件破碎拆除时,采用灌浆机集中灌注静态破碎剂浆液,施工快速便捷。在此基础上,通过扩展有限元方法研究了该静态破碎方案的裂缝扩展过程,进而采用足尺模型试验进行验证。

2 基于扩展有限元法的裂缝扩展研究

2.1 扩展有限元法

扩展有限元方法由美国西北大学的Belytschko和Black于1999年提出。其基本原理为:单元内部的不连续面采用法向水平集 $\varphi(X)$ 和切向水平集 $\psi(X)$ 描述,独立于计算网格,从而避免了网格的频繁重剖分^[6]。在常规有限元法基础之上,其位移模式增加了反映内部裂缝面的加强函数^[6,7],如式(1)~(4)所示

$$u^h(x) = \sum_{i \in N} N_i(x) \left[u_i + \underbrace{H(x) a_i}_{i \in N_r} + \underbrace{\sum_{\alpha=1}^4 F_\alpha(x) b_i^\alpha}_{i \in N_A} \right] \quad (1)$$

$$H(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} [F_\alpha(x), \alpha = 1, \dots, 4] = & \\ & \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta \right. \\ & \left. \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta \right] \quad (3) \end{aligned}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\psi}{\varphi}\right) \quad (4)$$

式(2)中: N 为所有区域的集合; N_r 为开裂区域; $H(x)$ 为跳跃函数; a_i 为开裂区域单元的加强自由度,用于考虑单元内部裂缝两边位移场的不连续性; N_A 为裂缝尖端区域; $F_\alpha(x)$ 为裂缝尖端的渐进函数; b_i^α 为裂缝尖端单元的加强自由度,用于考虑裂缝尖端的奇异性。式(3)中: x^* 为高斯点 x 在裂缝面上的垂直投影; n 为裂缝上 x^* 处的单位外法向量; $r = \sqrt{\psi^2 + \varphi^2}$ 。

2.2 算例研究

某钢筋混凝土支撑梁长度为6 m,截面如图2所示。配置的钢筋为:直径8 mm间距为100 mm的四肢箍;上下各4C20纵向受力钢筋;左右各配置2C18腰筋。所有钢筋均采用HRB400,混凝土强度等级为C30。预埋孔沿着支撑梁的轴向布置,直径为90 mm。

分析时采用了Abaqus软件的扩展有限元模

块^[7]。支撑梁的长度超过截面尺寸的十倍,中部截面近似处于平面应变受力状态,因而将模型简化为轴向长度为300 mm,内含两道箍筋的三维模型。混凝土的极限拉应变 $\epsilon_{tu} \approx 1.0 \times 10^{-4}$,而静态破碎剂的体积膨胀可达固相体积的3倍以上^[1]。因此裂缝稳定扩展阶段的体积变形对静态破碎剂膨胀压力的影响较小,分析时静态破碎剂的膨胀力通过在预埋孔壁施加压力来模拟。

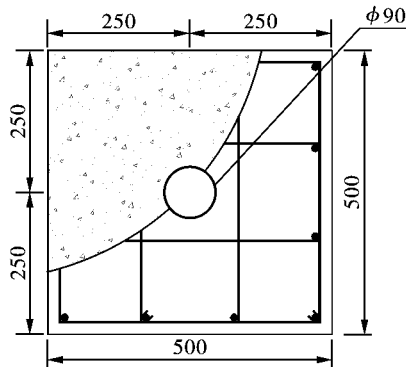


图2 内支撑梁截面示意图(单位:mm)
Fig. 2 Cross section of strut (unit:mm)

模型中混凝土部分采用 C3D8R 单元,采用指数法则计算等效应变能释放率^[8-11],且指数均取 1.0;抗压和抗拉强度分别取 20.1 MPa 和 2.01 MPa;弹性模量为 $E_c = 29.5$ GPa,泊松比取 0.2,混凝土的临界应变能释放率取 120 N/m。钢筋部分采用理想弹塑性本构模型,屈服强度取 360 MPa,泊松比取为 0.3,弹性模量 $E_s = 200$ GPa。钢筋与混凝土之间粘结采用嵌入约束关系模拟,模型两端均施加轴线方向的位移约束。数值模拟结果显示,静态破碎过程可分为三个阶段:

1) 第一阶段为弹性变形阶段,在膨胀压力不大于 2.04 MPa 时,支撑梁处于弹性受力状态。截面各方向的刚度不同,其中对角线方向的刚度最大,各边中部方向刚度最小,因而对角线方向变形最小,各边中部变形最大,截面内的变形模式如图 3 所示。在此位移模式下,最大主拉应力垂直于 4 条对角线。当膨胀压力 $P = 2.04$ MPa 时,预埋孔附近混凝土的最大主拉应力达到混凝土抗拉强度,初始裂缝产生。

2) 第二阶段为裂缝稳定扩展阶段,裂缝扩展过程中的应变能释放率如图 4 所示。应变能释放率是判断裂缝扩展的宏观指标,根据受力和开裂模式的不同,应变能释放率可分为 I 型(张开型)、II 型(滑移型)、和 III 型(撕裂型)三种基本类型^[6]。其中, I 型应变能释放率对应于拉应力作用下裂缝面的垂直分离模式。分析结果显示,裂缝扩展过程中, II 型和

III 型应变能释放率计算结果可忽略不计,这表明拉应力为裂缝扩展的主导因素。

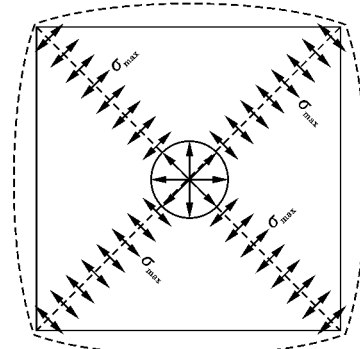


图3 截面上的变形和最大主拉应力
Fig. 3 Deformation and maximum principal tensile stress in cross section

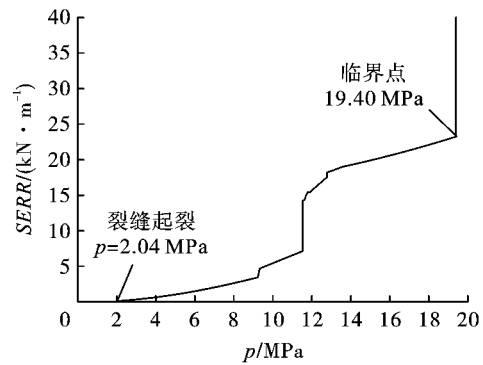


图4 裂缝扩展过程中的应变能释放率
Fig. 4 Strain energy release rate during crack propagation

随着膨胀压力的增大,应变能释放率开始增大,裂缝逐步由截面内部向外扩展。当膨胀压力 $P = 19.4$ MPa 时,应变能释放率开始急剧增大,裂缝快速扩展,这就是稳定扩展与失稳扩展之间的临界点;

3) 第三阶段为裂缝失稳扩展,此阶段膨胀压力的微小增大即可引起裂缝快速扩展,最终裂缝在对角线方向贯通,如图 5 所示。分析结果表明,当膨胀压力达到 19.4 MPa 时,裂缝扩展到钢筋混凝土梁的表面,而现有的静态破碎剂产品在 12 h 内可达到 30 MPa 以上的膨胀压力^[4,5],这表明该静态破碎方案是可行的。在裂缝扩展过程中,纵向钢筋一直处于低应力水平,表明其影响可忽略;而箍筋的应力在裂缝扩展过程中不断增加。

3 模型试验研究

试验件的截面、配筋与材料等信息与前述数值分析模型相同。详细构造如图 6 所示,长度为 1.8 m,沿着试验件的轴线布置预埋孔,两端分别设置注浆口和排气口。

预埋管件的组装如图7所示。中部管件采用PE管,直径为90 mm。两端均采用PVC材质的偏心异径接头,其中在注浆口一端的小头偏向预埋管的底部,而排气口一端的小头偏向预埋管的顶部,以保证静态破碎剂浆液灌注饱满。两端偏心异径接头均采用直径为30 mm的金属压力软管与注浆口和排气口连接。

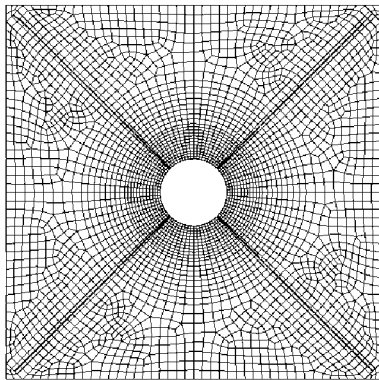


图5 裂缝扩展分析结果

Fig. 5 Result of crack propagation simulation

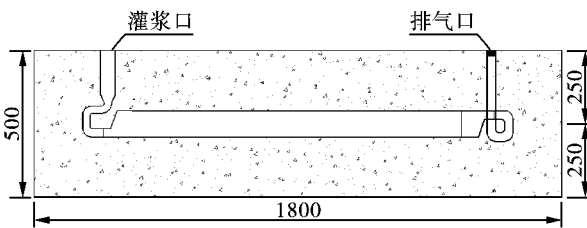


图6 试验件构造图(单位:mm)

Fig. 6 Structure of test model(unit:mm)

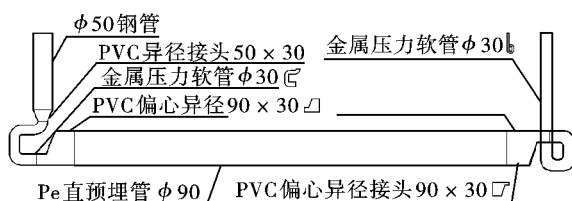


图7 预埋管组装图

Fig. 7 Assembling of embedded pipe

防冲孔构造如图8所示,通过金属压力软管的弯折减小注浆口和排气口的压力。破碎剂浆液采用灌浆机灌注,为便于与灌浆机的出料口连接,在金属压力软管口部与直径为50 mm的钢管相连接。试验表明,弯折一次即可有效防止冲孔,且不影响灌注静态破碎剂浆液。上述所有配件均选用国标规格,所有预埋管件均固定在箍筋上。

静态破碎剂浆液按照3:10水灰比配置,如图9所示为灌浆完成1 h后的裂缝扩展结果。可见,裂缝已经扩展到试验件表面,主要裂缝均出现在试验

件的角部,与前述数值模拟结果相符。

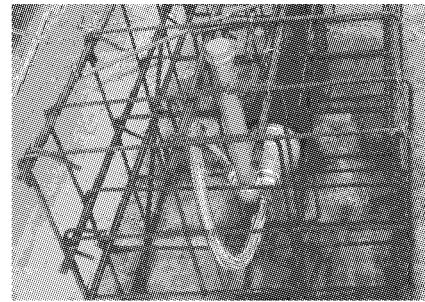
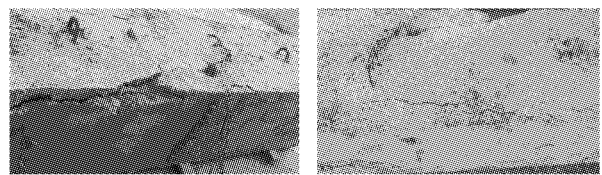


图8 防冲孔设计

Fig. 8 Blasting-prevention design



(a) 试验件左侧裂缝

(b) 试验件右侧裂缝

(a) Crack on the left of test model (b) Crack on the right of test model

图9 模型试验结果

Fig. 9 Result of model test

4 结论

1) 针对钢筋混凝土临时构件的拆除,提出了一种沿着构件轴向布置大直径预埋孔进行静态破碎的方法,数值计算与足尺模型试验均表明该方案的可行性。

2) 数值模拟与模型试验均表明,该静态破碎方案中裂缝沿着截面对角线方向扩展,拉应力为裂缝扩展的主导因素。

3) 足尺试验研究表明,通过金属压力软管的弯折可有效防止大孔径静态破碎发生冲孔。

参考文献 (References)

- [1] 马芹永,薛志翔,宫志颖,等. 钢筋混凝土梁静态破裂试验与应变分析[J]. 爆破,2017,34(3):14-19.
- [1] MA Q Y, XUE Z X, GONG Z Y, et al. Experimental study on failure mode and strain analysis of reinforced concrete beams by using static cracking agent[J]. Blasting, 2017, 34(3):14-19. (in Chinese)
- [2] 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):14-19.
- [2] CUI N S, ZHANG D N, GUO L J, et al. Experimental study on static cracking effect of concrete[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(3):14-19. (in Chinese)
- [3] 王玉杰. 静态破裂技术及机理研究. [D]. 武汉:武汉理工大学,2009.

- [3] WANG Yu-jie. Research on mechanism and technology of non-explosive demolition. [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [4] 温尊礼,徐全军,姜楠,等. 新型大孔径静态破碎技术的试验研究[J]. 探矿工程, 2013, 40(5): 72-74.
- [4] WENG Z L, XU Q J, JIANG N, et al. Experimental study on a new technology of static blasting in large diameter borehole [J]. Exploration Engineering, 2013, 2013, 40(5): 72-74. (in Chinese)
- [5] 姜楠,徐全军,龙源. 大孔径静态破碎膨胀压力特性及布孔参数分析[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(4): 467-472.
- [5] JIANG N, XU Q J, LONG Y, et al. Expansive pressure characteristic and borehole parameter analysis on large scale borehole soundless cracking [J]. Explosion and Shockwaves, 2015, 35(4): 467-472. (in Chinese)
- [6] 余天堂. 扩展有限单元法—理论、应用及程序[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 39-40.
- [7] FRANCISCO Cruza, DEANE Roehl, EURÍPEDES Jr. An XFEM implementation in Abaqus to model intersections between fractures in porous rocks [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112(8): 135-146.
- [8] A Boyano, J De Gracia, A Arrese, et al. Experimental assessment of an End Notched Flexure test configuration with an inserted roller for analyzing mixed-mode I/II fracture toughness [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 163(9): 462-475.
- [9] DE Xie, SHERRILL B, BIGGERS Jr. Strain energy release rate calculation for a moving delamination front of arbitrary shape based on the virtual crack closure technique. Part II: Sensitivity study on modeling details [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(6): 786-801.
- [10] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [11] S Muralidhara, B K Prasad, R K Singh. Size independent fracture energy from fracture energy release rate in plain concrete beams [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 98(1): 284-295.

英文编辑:柯波

科技论文写作小知识——摘要

摘要是以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记述文献重要内容的短文。摘要应具有独立性和自明性,并且拥有与文献同等量的主要信息,即不阅读全文,就能获得必要的信息。一篇完整的论文都要求写随文摘要,按摘要的不同功能来划分,大致有如下3种类型:

(1) 报道性摘要

报道性摘要是指明一次文献的主题范围及内容梗概的简明摘要,相当于简介。报道性摘要一般用来反映科技论文的目的、方法及主要结果与结论,在有限的字数内向读者提供尽可能多的定性或定量的信息,充分反映该研究的创新之处。科技论文如果没有创新内容,如果没有经得起检验的与众不同的方法或结论,是不会引起读者的阅读兴趣的,所以建议学术性期刊(或论文集)多选用报道性摘要,用比其他类摘要字数稍多的篇幅,向读者介绍论文的主要内容,以“摘录要点”的形式报道出作者的主要研究成果和比较完整的定量及定性的信息,篇幅以300字左右为宜。

(2) 指示性摘要

指示性摘要是指明一次文献的论题及取得的成果的性质和水平的摘要,其目的是使读者对该研究的主要内容(即作者做了什么工作)有一个轮廓性的了解。创新内容较少的论文,其摘要可写成指示性摘要,一般适用于学术性期刊的简报、问题讨论等栏目以及技术性期刊等只概括地介绍论文的论题,使读者对论文的主要内容有大致地了解,篇幅以100字左右为宜。

(3) 报道-指示性摘要

报道-指示性摘要是以报道性摘要的形式表述论文中价值最高的那部分内容,其余部分则以指示性摘要形式表达,篇幅以100~200字为宜。

论文发表的最终目的是要被人利用,如果摘要写得不好,在当今信息激增的时代论文进入文摘、杂志、检索数据库后,被人阅读、引用的机会就会少得多,甚至丧失,一篇论文价值很高,创新内容很多,若写成指示性摘要,也可能会失去较多的读者。所以一般地说,向学术性期刊投稿,应选用报道性摘要形式,只有创新内容较少的论文,其摘要可写成报道-指示性或指示性摘要。