

DOI: 10.11779/CJGE201806009

类岩石材料内置不规则裂纹形状因子分析

代 风, 朱万成, 李少华, 于永军

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 脆性岩体中内置裂纹的萌生、扩展和贯通将导致岩体失稳破裂。为研究脆性岩体中内置裂纹的断裂特性, 首先, 利用室内相似材料模拟试验, 验证了 1/4 节点奇异单元建立的含圆形水平内置裂纹的圆柱体有限元数值模型的正确性与可靠性。其次, 为了分析裂纹尖端弯曲程度和裂纹相对试件尺寸对内置裂纹断裂特性的影响作用, 定义了相对曲率半径比 t 和相对尺寸比 n , 用于描述不规则水平内置裂纹的几何形态。然后, 利用圆型和椭圆型内置裂纹数值模型, 分别研究了 t 值与 n 值对裂纹形状因子的影响规律。在此基础上, 综合考虑二者的影响作用, 得出了一种适用于计算任意凸曲线型水平内置裂纹形状因子的简易表达式。同时, 对该表达式可靠性进行了验证, 结果表明, 对于圆型、椭圆型、不规则型裂纹, 该式计算结果与数值计算结果的误差均小于 2%。同时得出, 在与极轴夹角约为 60° 和 300° 处, 文中所述不规则裂纹尖端的应力强度因子值最大, 裂纹将率先由此处扩展。研究结果可以为工程或实验中估算内置裂纹岩体的应力强度因子提供参考。

关键词: 类岩石脆性材料; 直接拉伸试验; 内置不规则裂纹; 裂纹形状因子; 有限元分析

中图分类号: TD313

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)06-1039-09

作者简介: 代 风(1992-), 男, 博士研究生, 从事岩石断裂与破碎方面研究。E-mail: typhoondf@163.com。

Shape factor of irregular internal cracks in rock-like materials

DAI Feng, ZHU Wan-cheng, LI Shao-hua, YU Yong-jun

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The initiation, propagation and coalescence of internal cracks will lead to the failure of rock mass. To study the fracture characteristics of the internal cracks in brittle rock mass, the validity and reliability of a cylinder FEM numerical model containing a horizontal circular crack with 1/4-point singular elements are verified by the similar material simulation tests. Then, to analyze the effects of the size and curvature on the fracture characteristics of internal cracks, the relative-size-ratio (n) and relative-curvature-radius-ratio (t) of crack are defined to describe the geometrical feature of the internal cracks. Furthermore, the influences of n and t on the shape factors of crack (Y) are examined by the numerical model with circular and elliptical internal horizontal cracks. In addition, based on the above research results, a simple formula is proposed to calculate the shape factor of arbitrary convex-curve-type internal horizontal crack. Moreover, the comparisons of the calculated results and the numerical simulations of circular, elliptical and irregular crack show that all the deviations are within 2%. Meanwhile, SIF of the irregular crack in this research approaches its maximum at positions of 60° and 300° from X-axis positive direction approximately, where the crack will develop firstly. The results can be applied to the estimation of SIF value of internal cracks in laboratory tests or practical engineering.

Key words: brittle rock-like material; direct tensile test; irregular internal crack; shape factor; finite element analysis

0 引 言

在工程岩体中, 贯穿裂纹、表面裂纹和角裂纹都容易观察, 而内置裂纹难以捕捉其真实形态, 进行量化研究。岩体中普遍存在着各种形式的内置裂纹, 这种隐藏的危险更容易导致的工程的破坏。所以, 关于岩体中内置裂纹的研究工作对工程实际有着重要的意义^[1]。

目前, 国内外对于内置裂纹的研究工作相对较少。

在物理试验方面, 由于天然内置裂纹不易表征, 同时天然岩石内部人造完全封闭的裂纹也相对困难。迄今, 只有少部分学者利用水泥砂浆或透明树脂等相似材料进行过探索性试验研究: 李廷春等^[2]利用混凝土砂浆

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51525402, 51374049, 51534003); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0801607); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (N160103005, N160104008)

收稿日期: 2017-03-14

材料预制内置三维裂纹,应用 CT 扫描技术研究了单轴压缩和三轴压缩下单裂纹和双裂纹扩展规律。李术才等^[3]采用试验手段研究了单轴拉伸条件下内置三维裂隙倾角对类岩石砂浆材料力学特性及断裂特征的影响作用。林恒星等^[4-5]、朱珍德等^[6]通过对内部布置有不同长度和角度裂隙的透明类岩石材料进行单轴压缩力学试验,观察研究了内部三维单裂隙和双裂隙的扩展贯通机理。总之,这些探索性研究工作大部分集中于裂纹压缩破坏情况,而裂纹在受拉伸情况下对岩石承载能力的影响作用更大,相应的研究工作却开展较少。

在数值分析方面,戴峰等^[7]采用细观损伤数值方法对单轴压缩下内置裂隙的破坏进行了模拟研究。于培师等^[8-9]应用有限元方法分析了表面和内置裂纹网格划分问题,建立了网格划分模块。张敦福等^[10]基于无网格数值模拟方法,研究了单轴压缩条件下内置椭圆三维裂纹的扩展问题,揭示了裂纹的断裂过程。此外,由于裂纹尖端应力存在奇异性,目前在有限元分析过程中,裂纹尖端通常采用的是 1/4 节点奇异单元^[11-13]。

本文依据岩石的基本物理力学参数范围,选择了适当的相似模拟材料制作圆柱体内置圆形水平裂纹试样进行拉伸断裂试验研究。同时,在验证有限元数值模拟手段可靠性的基础上,对不同的裂纹试样受拉伸情况进行模拟分析,并针对影响内置不规则水平裂纹断裂特性的各因素进行了参数分析,得出了一种简便的计算裂纹形状因子的表达式。

1 物理实验与数值模型验证

1.1 直接拉伸试验

常规力学参数测试。为进行含裂纹材料断裂性能试验研究,选用建筑石膏作为相似材料,采用加压成型的方式制作试样,膏水比为 5:1,成型压力为 11 MPa。

进行了单轴压缩试验和巴西劈裂试验,得到单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、抗拉强度等参数,并与谢仁海等^[14]介绍的天然砂岩基本力学参数范围进行了对比,见表 1。

表 1 常规力学试验测试结果

Table 1 Results of conventional tests

| 项目 | σ_c /MPa | σ_t /MPa | E /MPa | ν | σ_c / σ_t |
|------|--------------------|--------------------|----------------|---------|-----------------------|
| 相似材料 | 19.21 | 1.89 | 5961 | 0.19 | 10.16 |
| 砂岩 | 11~252 | 1~3 | 5000 ~80000 | 0.2~0.3 | 4~25 |

由表 1 可以看出,石膏材料的各项基本力学参数与天然砂岩均较为接近。同时,相似材料单轴压缩试验的应力应变曲线,如图 1 所示。由于试验机刚度有

限,材料脆性破坏剧烈,采用应变片测试方法无法测得峰后应力应变曲线。但根据王宇等^[15]对脆性材料定义的总结论述,在工程上和实验技术上也可以采用抗压拉强度比值来定义材料的脆性程度,比值越大,脆性越大。

该相似材料破坏时的极限应变在 5‰以内,试验中观察到应力达峰值后试样迅速破坏,且材料抗压拉强度比值较高。综上,可判断材料基本满足脆性特征,可用于脆性岩石模拟研究。

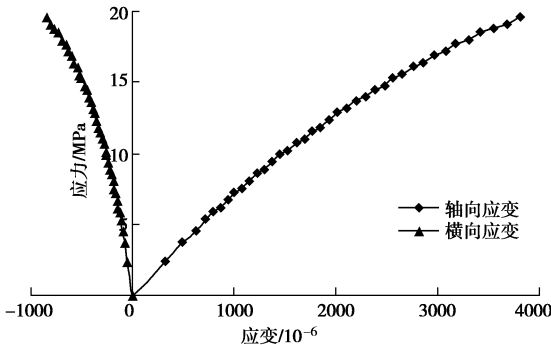


图 1 相似材料单轴压缩应力应变曲线

Fig. 1 Uniaxial compressive stress-strain curves of similar materials

直接拉伸试验。裂纹试样为圆柱体试样,直径为 39.1 mm,高度为 150 mm,试样中心预制内置圆形水平裂纹,如图 2 所示。其中, a 为圆片裂纹半径(最大半长), b 为试样半径, p 为端部均布荷载。

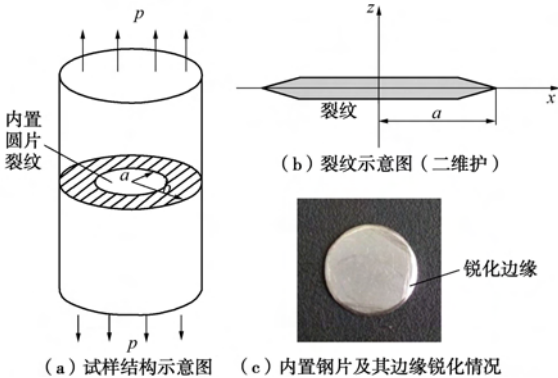


图 2 内置圆形裂纹及预置裂纹所用的钢片

Fig. 2 Internal circular crack and steel sheet

采用相似材料制作内置圆形水平裂纹试样时,当填充料填充至试样整体高度的一半时,内置预制钢片,模拟内置圆片裂纹,钢片边缘磨薄,锐化处理,如图 2 (b)、图 2 (c)。为防止石膏黏结在钢片表面,钢片上下表面涂抹了防黏结的试剂。该内置钢片在整个试验过程中不取出,钢片周边的物料需要先充分捣毛,再填料,使非裂纹部分物料结合充分。加压成型,脱模,干燥固化。

试验采用匀速的拉伸荷载加载, 加载速率为 20 N/s (已知材料的弹性模量和试样尺寸的情况下, 理论上可粗略估计出, 当加载速率保持在 95.14 N/s 之内时, 可保证位移加载速率在 0.002 mm/s 之内, 基本实现静态加载条件^[3])。所用试样的裂纹半长为 5 mm 与 6 mm。每组 3 个试样, 试验数据见表 2。试样编号“T-5-1”中, “5”代表裂纹半径为 5 mm, “1”代表试样标号。

表 2 直拉试验结果

| Table 2 Results of tensile tests | | | | |
|----------------------------------|-------|-----------|------------|------------|
| 裂纹半径/mm | 试样编号 | 拉伸峰值荷载/kN | 拉伸峰值应力/MPa | 平均峰值应力/MPa |
| 5 | T-5-1 | 1.50 | 1.34 | 1.36 |
| 5 | T-5-2 | 1.69 | 1.51 | 1.36 |
| 5 | T-5-3 | 1.38 | 1.23 | 1.36 |
| 6 | T-6-1 | 1.40 | 1.25 | 1.22 |
| 6 | T-6-2 | 1.35 | 1.24 | 1.22 |
| 6 | T-6-3 | 1.27 | 1.17 | 1.22 |

直接拉伸试验过程中, 内置圆形水平裂纹始终受垂直于裂纹面的轴向拉应力作用。裂纹尖端附近不存在 K_{II} 和 K_{III} , 只有 K_I 发挥作用^[3]。当外荷载达到起裂应力后, 在裂纹尖端发生裂纹扩展, 扩展方向仍沿水平方向, 最终贯通整个横截面, 导致试件拉断。试验结果表明: 试样断裂过程发生迅速, 破坏前无明显征兆; 破坏时伴有较大声响与少量砂砾溅出; 断裂位置基本位于预置钢片高度水平, 试样断口较为平整, 断面无明显剪切擦痕, 可认定为拉伸破坏; 断裂后, 内置钢片表面光滑、无黏结物料, 说明内置钢片与材料无明显黏结作用, 在裂纹受拉伸荷载张开时, 钢片便与材料脱离, 不影响裂纹的自由扩展。试样的破坏情况如图 3 所示。



图 3 直接拉伸装置与破坏后试样端口形貌

图 4 中给出了不含裂纹试样、内置圆形水平裂纹半径分别 5, 6 mm 试样直接拉伸试验的应力 - 应变曲线。由图 4 可以看出, 试样破坏前基本处于弹性状态, 达到峰值拉应力后迅速破坏, 呈现出明显的弹脆性特征。并且, 可以明显看出, 裂纹尺寸越大其裂纹试样

承载能力明显下降, 试样整体弹性模量减小。

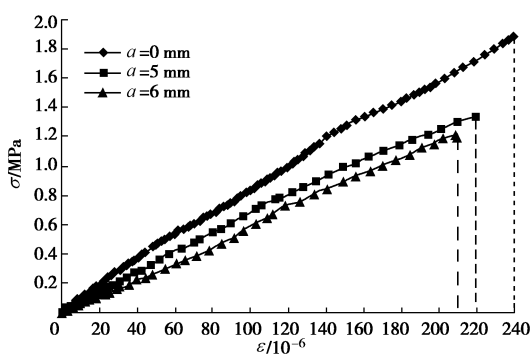


图 4 不同裂纹尺寸试样直接拉伸试验应力 - 应变曲线

Fig. 4 Uniaxial tensile stress-strain curves of specimens with different-size cracks

1.2 数值模型验证

应用有限元数值计算方法研究裂纹体问题时, 本文采用 1/4 节点奇异单元网格划分方法对裂纹尖端进行网格划分^[8], 如图 5 所示。

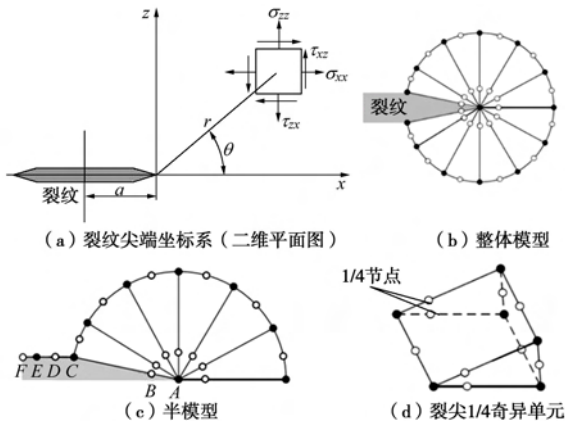


图 5 裂尖坐标系与奇异单元划分结果示意图^[8]

Fig. 5 Coordinate system at crack tip and singular element of FEM model

已知 I 型裂纹尖端附近的位移公式^[8]:

$$u_z(r, \theta) = \frac{2(1 + \nu)K_I}{4E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right]. \quad (1)$$

本文为平面应变状态, 则

$$k = 3 - 4\nu. \quad (2)$$

裂纹尖端应力强度因子解法多样, 有位移法和位移外推法、J-积分间接求解法、M 积分方法等^[8, 13, 16]。经过前人研究, 位移外推法计算三维裂纹应力强度因子是可靠的^[17], 本文也采用位移外推法计算裂纹尖端形状因子、应力强度因子等断裂参数。

采用位移外推法计算断裂参数时, 首先用数值分析方法得到裂纹面上包括 1/4 节点在内的多个节点的张开位移 $u_z(r_i, \theta)$, 代入式 (1), 反求出各点的应力强度因子 K_I , 如式 (3), 然后通过插值拟合得出裂纹尖端处的应力强度因子。

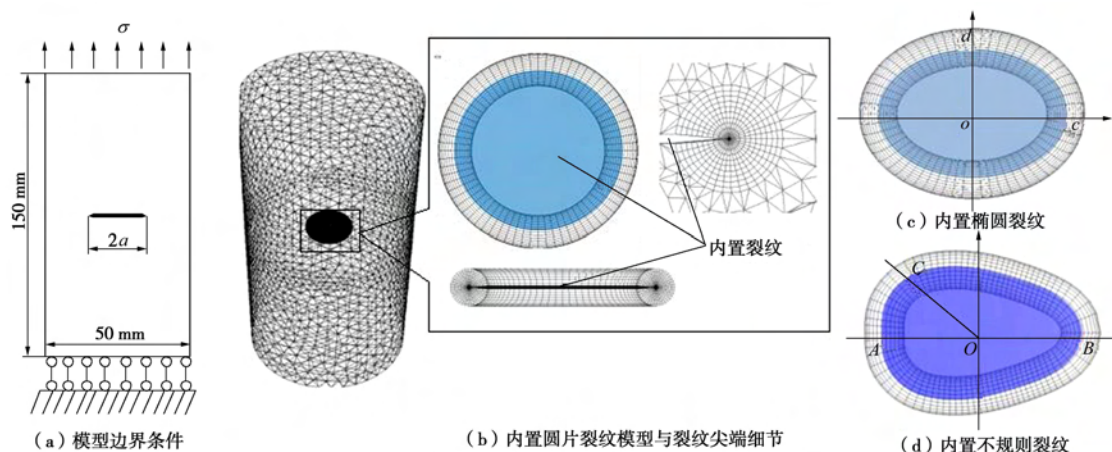


图6 三维内置裂纹数值模型

Fig. 6 3D numerical simulation model for specimen with internal crack

$$K_I(r, \theta) = \frac{E}{(1+\nu)(k+1)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \cdot \Delta u_z(r, \pi) \quad (3)$$

提取节点的方法,如图5(c),提取BCDEF等裂纹面上的节点,其中B点为1/4节点,A点为裂纹尖端点。

本文选择采用裂纹的形状因子Y参量来表征裂纹结构自身的断裂特性,以消除荷载等其他因素的影响。裂纹构件形状因子Y为^[18]

$$Y = \frac{K_I}{\sigma_0 \sqrt{2\pi a}} \quad (4)$$

$$\sigma_0 = \frac{p}{\pi b^2} \quad (5)$$

式中,p为荷载,a为裂纹半径,b为试样半径, σ_0 为无裂纹状态的名义应力。

按位移外推法计算时,将式(3)代入式(4)可得

$$Y = \frac{\sqrt{2}E}{(1+\nu)(k+1)} \Delta u_z(r_i, \pi) \quad (6)$$

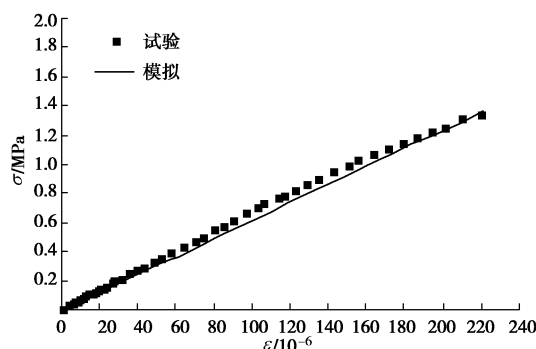
式中, r_i 为节点与裂纹尖端的距离,一般应满足 $r_i/a \leq 0.005$ 的条件^[19], $\Delta u_z(r_i, \pi)$ 为该节点处的裂纹张开位移。

为将数值计算与物理试验进行对比,用以验证数值模型及计算方法的正确性。采用有限元软件ANSYS建立数值模型,数值模型与物理试验所用试样尺寸保持一致,取为 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。裂纹半径为5 mm与6 mm,裂纹最大开度为1 mm,如图6所示。裂纹尖端附近划分10层厚度为1 mm的单元,组成裂纹尖端单元组。最内层楔形单元按1/4节点奇异单元划分,单元类型为SOLID95。其余部分用四面体单元自由划分,单元类型为SOLID45。

为使数值试验结果客观,所有单元的材料参数均采用室内试验所测基本力学参数,见表1。由于室内

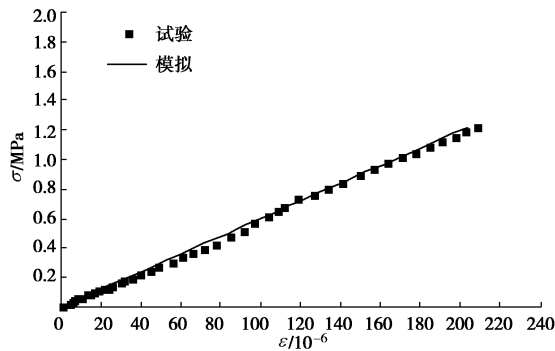
试验结果可以看出,材料拉伸断裂过程基本保持线弹性特征,于是数值模拟试验均采用线弹性本构模型。边界条件:模型下端面约束竖向位移,其他边界条件自由。加载方式:试样上端面施加均布应力荷载,加载量与室内试验峰值应力保持一致,裂纹半径 $a=5 \text{ mm}$ 的模型加载量为1.36 MPa,裂纹半径 $a=6 \text{ mm}$ 的模型加载量为1.22 MPa。

通过数值模拟计算,得出数值模拟与室内试验的应力应变曲线对比如图7,8。可以看出,两条曲线发展趋势几乎相同,认为该数值模型能较好的符合试验真实情况,验证了数值模拟的可靠性。

图7 $a=5 \text{ mm}$ 时数值模拟与试验应力-应变曲线对比Fig. 7 Comparison of stress-strain curves between numerical modeling and experiment ($a=5 \text{ mm}$)

2 不规则裂纹的形状因子

由于工程实际中的裂纹形态绝大部分为不规则形态。而不规则水平内置裂纹根据裂纹尖端迹线的形状,可分为凸曲线型(尖端迹线为光滑凸曲线)和凹凸不平型(即尖端迹线呈凹凸不平、曲折的复杂形态)。由于凹凸不平型不规则裂纹过于复杂,探清其断裂特性过于困难,本文仅针对尖端迹线为凸曲线的不规则内置水平裂纹进行研究。

图8 $a=6$ mm 时数值模拟与试验应力 - 应变曲线对比Fig. 8 Comparison of stress-strain curves between numerical modeling and experiment ($a=6$ mm)

圆柱体内置水平凸曲线型不规则裂纹受端部均布荷载作用时, 由于名义应力相同, 裂纹尖端点的形状因子, 只与临近裂纹段的形态有关, 与远处裂纹状态无关, 可以用临近裂纹段的弯曲程度来描述。而对于有限体情况, 还应考虑边界效应的影响, 这种影响可用裂纹尖端点与边界点的距离来描述。

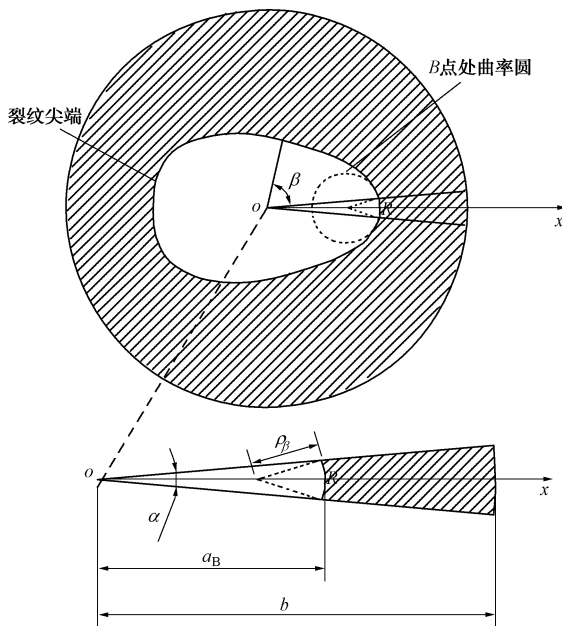


图9 凸曲线型不规则裂纹划分为类扇形微块

Fig. 9 Mesh of irregular internal crack as sector-like block

将几何中心位于圆柱体圆心的水平不规则凸曲线型裂纹划分为无数个微小的类似扇形块体, 如图9, 裂纹尖端点B处的形状因子只与其所在微裂纹段的弯曲程度、尖端距几何中心的远近两个因素有关。所以, 本文从这两方面因素考虑, 研究其分别对裂纹形状因子的影响作用, 得出计算该类裂纹尖端上任意点形状因子的表达式。

2.1 裂纹尺寸对形状因子影响

为了研究裂纹尺寸对圆柱体裂纹材料断裂特性的

影响, 本文采用裂纹相对尺寸比 n 值来表征裂纹试样的构造形态以及裂纹尖端距构件几何中心的远近程度, 其中 $n=a/b$, a 为裂纹半长, b 为圆柱体试样半径^[20]。

以试样半径 b 为 25 mm, 试样高度为 150 mm, 裂纹相对尺寸比 n 值取为 0.2, 0.24, 0.3, 0.36, 0.4, 力学参数、本构关系及边界条件与 1.2 节数值模拟试验一致。加载方式采用应力加载方式, 在模型上表面施加 1 MPa 均布拉应力。采用 1.2 节中式 (6) 的计算方法, 研究三维内置 I 型圆形裂纹的形状因子 Y 与裂纹相对尺寸比 n 存在的关系, 得出结果如图 10 所示。

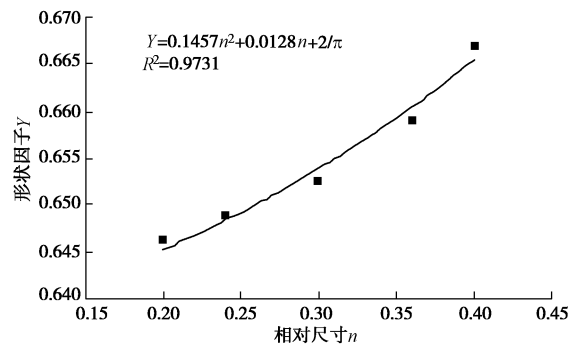
图10 裂纹相对尺寸比 n 与裂纹形状因子 Y 的关系

Fig. 10 Relationship between relative crack size-ratio and shape factor

由图 10 可看出, 在裂纹尺寸因素 (即 n 值) 的单独影响作用下, 随着 n 值的增大, 裂纹形状因子 Y 呈抛物线型增长趋势, 具体的关系表达式为

$$Y = 0.1457n^2 + 0.0128n + 2/\pi, \quad (7)$$

式中, Y 为内置裂纹 I 型无量纲形状因子, n 为裂纹相对尺寸比, 公式拟合方差 $R^2 = 0.9731$, 吻合度较高。

2.2 裂纹尖端迹线弯曲程度对形状因子的影响

为了研究裂纹尖端弯曲程度对圆柱体裂纹材料断裂特性的影响, 需对裂纹尖端弯曲程度进行精确地表征。由于不规则裂纹尖端迹线的曲率较难精确地得出, 一般采用画曲率圆的方法近似获得。而椭圆的曲率半径可以精确得出, 长半轴端点处的曲率半径为 $\rho_c = c^2/d$, 短半轴端点处的曲率半径为 $\rho_d = d^2/c$, 如图 6 (c) 所示。所以, 本文借助椭圆形裂纹研究曲率因素单独对内置裂纹断裂特性的影响规律, 以此推测曲率因素对不规则裂纹断裂特性的影响作用。

裂纹形状因子仅与裂纹、构件的相对尺寸有关 (即与构件形状、裂纹形状及各部分尺寸比例有关, 等比缩放裂纹与构件时, 形状因子不变)。在研究圆柱体内置椭圆形水平裂纹受 I 型拉伸状态下裂纹形状因子的影响因素时, 本文定义相对曲率半径比 t 值, 即裂纹尖端迹线曲率半径与裂纹半长 a 的比值, 来表征裂纹尖端迹线的弯曲程度,

$$t = \rho/a \quad (8)$$

这种表征方法，有效的避免了单一采用曲率或曲率半径参数描述弯曲影响作用时，等比例缩放裂纹体模型会造成弯曲特征参量发生变化的问题。

针对圆柱体内置椭圆裂纹问题，建立有限元模型进行线弹性计算分析。圆柱体试样半径 b 为 25 mm，分别对椭圆裂纹的长半轴 c 与短半轴 d 不同的情况进行分析，材料参数、本构关系、边界条件、加载方式均与 2.1 节保持一致。

计算了椭圆裂纹长半轴 c 为 10 mm，短半轴 d 分别为 5, 6, 7, 8, 9 mm 的情况，根据式 (6)，得出相对尺寸比（裂纹长半轴/试样半径） $n=0.4$ 时，5 种情况下椭圆长半轴处的形状因子值，见图 11。

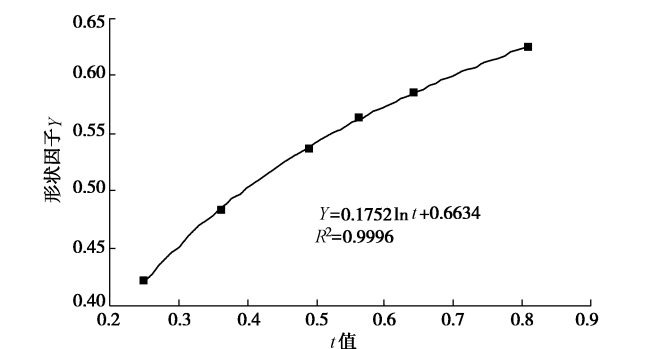


图 11 裂纹相对曲率半径比与裂纹形状因子的关系
Fig. 11 Relationship between crack relative-curvature and shape factor

由图 11 可看出，当 $n=0.4$ 时，由于 t 值不同，裂纹的形状因子值也不相同。通过对 $n=0.4$ 时的结果进行拟合，得出裂纹形状因子与 t 值关系：

$$Y = 0.1752\ln t + 0.6634 \quad (9)$$

式中 Y 为内置裂纹 I 型无量纲形状因子； t 为裂纹相对曲率半径比；公式拟合方差 $R^2 = 0.9996$ ，吻合度较高。从拟合结果可以得出，当 $n=0.4$ 时，在裂纹尖端迹线弯曲程度因素（即 t 值）的单独影响作用下，随着 t 值的增大，裂纹形状因子 Y 呈对数型增长趋势。

2.3 不规则内置裂纹的形状因子

综合上文对圆型与椭圆型水平内置裂纹的研究，结合 n 值的独立影响作用与 t 值的独立影响作用，得出适用于计算不规则凸曲线型水平内置裂纹形状因子的关系表达式：

$$Y = 0.1457n^2 + 0.0128n + 0.1752\ln t + 2/\pi \quad (10)$$

为了进一步验证该表达式的合理性，建立了不规则水平内置裂纹模型进行数值试验分析，如图 6 (d) 所示。利用式 (6) 得出裂纹尖端迹线上 A, B, C 点处的形状因子数值模拟计算值，与表达式 (10) 的计算结果进行对比，如表 3 所示。同时，将上文针对圆形和椭圆形裂纹的数值模拟计算结果与式 (10) 的计

算结果进行对比，如表 4, 5 所示。

表 3 不规则裂纹形状因子对比

Table 3 Comparison between simulations and calculated results of shape factors of irregular crack

| 裂纹段 | 试样半长/mm | 裂纹半长/mm | n 值 | 曲率半径/mm | Y (FEM) | Y (本文公式) | 相对误差/% |
|-----|---------|---------|-------|---------|-----------|------------|---------|
| A 处 | 25 | 10.00 | 0.400 | 3.4 | 0.4742 | 0.4658 | 1.7799 |
| C 处 | 25 | 8.68 | 0.347 | 7.4 | 0.6199 | 0.6217 | -0.2920 |
| B 处 | 25 | 10.00 | 0.400 | 7.8 | 0.6017 | 0.6117 | -1.6597 |

表 4 椭圆形裂纹形状因子对比

Table 4 Comparison between simulations and calculated results of shape factors of elliptical crack

| 试样半长/mm | 裂纹半长/mm | 曲率半径/mm | n 值 | t 值 | Y (FEM) | Y (本文公式) | 相对误差/% |
|---------|---------|---------|-------|-------|-----------|------------|---------|
| 25 | 10.0 | 2.500 | 0.40 | 0.250 | 0.4219 | 0.4125 | 2.2394 |
| 25 | 5.0 | 20.000 | 0.20 | 4.000 | 0.8479 | 0.8830 | -4.1406 |
| 25 | 10.0 | 3.600 | 0.40 | 0.360 | 0.4832 | 0.4763 | 1.4278 |
| 25 | 6.0 | 16.700 | 0.24 | 2.783 | 0.8070 | 0.8212 | -1.7610 |
| 25 | 10.0 | 4.900 | 0.40 | 0.490 | 0.5360 | 0.5303 | 1.0663 |
| 25 | 7.0 | 14.300 | 0.28 | 2.041 | 0.7678 | 0.7697 | -0.2535 |
| 25 | 10.0 | 5.625 | 0.40 | 0.563 | 0.5636 | 0.5544 | 1.6242 |
| 25 | 7.5 | 13.300 | 0.30 | 1.773 | 0.7506 | 0.7470 | 0.4771 |
| 25 | 10.0 | 6.400 | 0.40 | 0.640 | 0.5866 | 0.5770 | 1.6285 |
| 25 | 8.0 | 12.500 | 0.32 | 1.563 | 0.7318 | 0.7259 | 0.7968 |
| 25 | 10.0 | 8.100 | 0.40 | 0.810 | 0.6218 | 0.6183 | 0.5595 |
| 25 | 9.0 | 11.100 | 0.36 | 1.235 | 0.6955 | 0.6882 | 1.0582 |

表 5 圆形裂纹形状因子对比

Table 5 Comparison between simulations and calculated results of shape factors of circular crack

| 试样半长/mm | 裂纹半长/mm | 曲率半径/mm | n 值 | t 值 | Y (FEM) | Y (本文公式) | 相对误差/% |
|---------|---------|---------|-------|-------|-----------|------------|--------|
| 25 | 5 | 5 | 0.20 | 1 | 0.6465 | 0.6403 | 0.9640 |
| 25 | 6 | 6 | 0.24 | 1 | 0.6489 | 0.6423 | 1.0139 |
| 25 | 7.5 | 7.5 | 0.30 | 1 | 0.6526 | 0.6463 | 0.9695 |
| 25 | 9 | 9 | 0.36 | 1 | 0.6591 | 0.6513 | 1.1873 |
| 25 | 10 | 10 | 0.40 | 1 | 0.6669 | 0.6552 | 1.7556 |

由表 3~5 可以看出，式 (10) 计算的结果与数值模拟计算结果非常接近，误差绝对值均小于 2%（其中只有一例误差为-4.14%），表明了该公式可以反映一般情况下的凸曲线型水平内置裂纹受拉伸荷载时的断裂特性，用于估算其裂纹尖端形状因子和应力强度因子是可靠的。

同时，当圆柱体内置圆形水平裂纹的裂纹半径 a 趋近于 0 时，该公式的计算结果与已有的计算结果也

保持一致^[20], 其中, 裂纹形状因子 $Y = 2/\pi$ 。验证了表达式 (10) 具有较强的普适性。

在实际应用中, 可以结合 CT 透射扫描工具, 获取岩石内部裂纹形态。在已知名义应力的情况下, 利用式 (10) 即可快速地求出裂纹尖端应力强度因子。由于岩石断裂韧性是材料的固定属性, 对于不规则裂纹必定会于应力强度因子值高的区段先发生断裂, 一旦裂纹局部起裂, 裂纹扩展就难以控制。所以, 对于不规则裂纹, 准确判断出裂纹尖端哪个区段应力强度因子值最高是至关重要的, 这也体现出表达式 (10) 的工程应用价值。

将本文所研究的不规则裂纹的尖端迹线进行描点, 粗略计算迹线上各点的曲率半径, 计算结果如图 12 所示。并依据所估算的曲率半径值, 代入式 (10) 和式 (4) 中分别计算迹线上各点的形状因子和应力强度因子, 如图 13, 14 所示。其中, 角度 β 为裂纹尖端迹线点与极轴 (X 轴) 的夹角, 如图 9 所示。

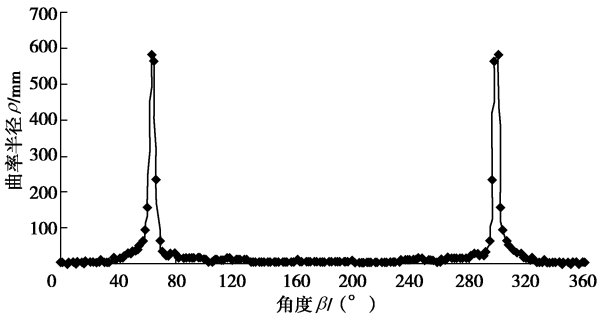


图 12 不规则裂纹尖端曲率半径

Fig. 12 Curvature radius of irregular crack

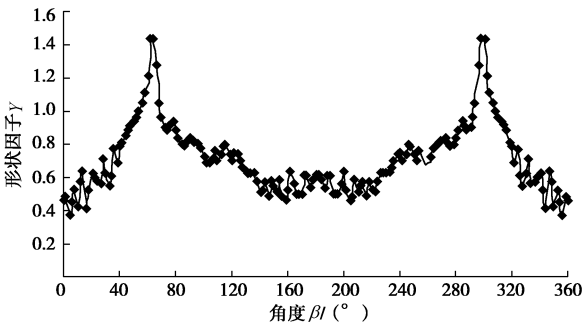


图 13 不规则裂纹尖端形状因子

Fig. 13 Shape factor of irregular crack

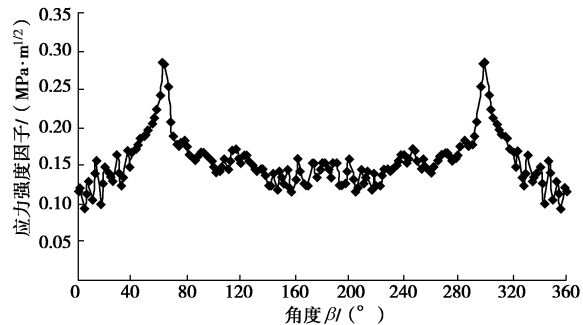


图 14 不规则裂纹尖端应力强度因子

Fig. 14 Intensive stress factor of irregular crack

由图 14 可以看出, 针对本文所研究的不规则裂纹情况, 与极轴夹角 β 为 60° 和 300° 左右时裂纹尖端处的应力强度因子值最大。与数值模拟结果基本一致, 见图 15。在材料属性 (断裂韧性) 一定的情况下, 裂纹首先从该处扩展。

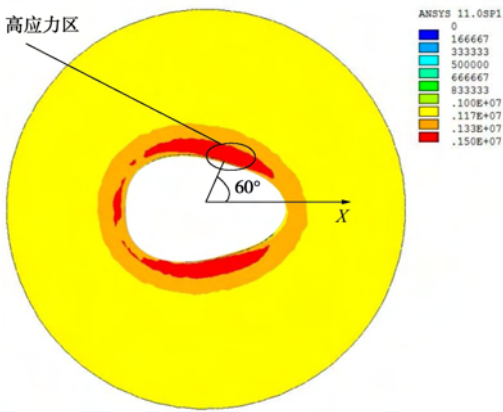


图 15 不规则裂纹尖端 Z 向应力分量分布图 (σ_z)

Fig. 15 Distribution of σ_z -stress at irregular crack tip

可见本文提供的形状因子与应力强度因子的估算方法, 可快速、简便地判断出含内置裂纹的岩体结构受拉伸荷载情况下的率先起裂点 (即应力强度因子最大处)。于是, 可针对这些率先起裂点进行一定的预防或防治措施, 阻止岩体的开裂或降低开裂破坏造成的损失, 对预防岩石张拉破坏导致的冒顶、边坡倾倒等灾害有着重大的意义。

3 结 论

(1) 本文采用脆性接近岩石的石膏相似材料, 进行圆柱体内置圆形水平裂纹直接拉伸试验。验证了 1/4 奇异单元法建立的数值模型的计算准确性, 证实了这种数值模拟方法适用于研究内置裂纹断裂问题。

(2) 通过对圆柱体内置圆形水平裂纹的数值分析, 得出裂纹形状因子 Y 与相对尺寸比 n 值相关, 随着 n 值的增大, 裂纹形状因子 Y 呈抛物线型增长。

(3) 通过对圆柱体内置椭圆形水平裂纹的数值分析, 得出椭圆形裂纹的裂纹形状因子 Y 不仅与裂纹相对尺寸比 n 有关, 还与相对曲率半径比 t 相关。当 n 值一定时, 随着 t 值的增大, 裂纹形状因子 Y 呈对数型增长。并得出了 $n=0.4$ 时圆柱体内置椭圆形水平裂纹的形状因子 Y 随 t 值的变化关系。

(4) 通过对圆柱体内置水平圆形与椭圆形裂纹数值模拟试验结果的分析总结, 考虑裂纹尺寸与裂纹尖端弯曲程度两方面因素, 得出一种适用于计算任意凸曲线型内置水平裂纹形状因子 Y 的简便表达式。并将圆形、椭圆形和不规则裂纹有限元数值分析结果与该式计算结果进行对比分析, 误差均在 2% 之内, 验

证了该式的正确性。

(5) 利用本文提出的裂纹形状因子简便计算表达式, 得出了文中内置不规则水平裂纹尖端各处的应力强度因子值, 并且于极轴夹角约为 60° 和 300° 处达到峰值。在材料断裂韧度一定时, 可判断出裂纹将率先由此处开裂、扩展。

参考文献:

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 李廷春, 吕海波. 三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的CT实时扫描试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 289 - 296. (LI Ting-chun, LÜ Hai-bo. CT real-time scanning tests on single crack propagation under tri-axial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 289 - 296. (in Chinese))
- [3] 李术才, 杨磊, 李明田, 等. 三维内置裂隙倾角对类岩石材料拉伸力学性能和断裂特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(2): 281 - 289. (LI Shu-cai, YANG Lei, LI Ming-tian, et al. Influences of 3D internal crack DIP angle on tensile mechanical properties and fracture features of rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(2): 281 - 289. (in Chinese))
- [4] 林恒星, 朱珍德, 王熙, 等. 透明类岩石内蕴裂纹扩展变形试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, **14**(29): 280 - 284. (LIN Heng-xing, ZHU Zhen-de, WANG Xi, et al. Experimental studies on crack propagation and coalescence in transparent rock[J]. Science Technology and Engineering, 2014, **14**(29): 280 - 284. (in Chinese))
- [5] 林恒星, 朱珍德, 孙亚霖, 等. 透明类岩石预制裂隙不同赋存方式起裂扩展研究[J]. 固体力学学报, 2015, **36**(增刊 1): 58 - 62. (LIN Heng-xing, ZHU Zhen-de, SUN Ya-lin, et al. Experimental studies on pre-existing crack in different ways propagation and coalescence in transparent rock[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015, **36**(S1): 58 - 62. (in Chinese))
- [6] 朱珍德, 林恒星, 孙亚霖. 透明类岩石内置三维裂纹扩展变形试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(4): 914 - 920. (ZHU Zhen-de, LIN Heng-xing, SUN Ya-lin. An experimental study of internal 3D crack propagation and coalescence in transparent rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(4): 914 - 920. (in Chinese))
- [7] 戴峰, 魏明东, 徐奴文, 等. 内置三维裂隙非均匀性岩石渐进破坏数值研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, **22**(6): 1178 - 1185. (DAI Feng, WEI Ming-dong, XU Nu-wen, et al. Numerical simulation on progressive failure of heterogeneous rock specimens with a pre-existing three-dimensional crack[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, **22**(6): 1178 - 1185. (in Chinese))
- [8] 于培师. 含曲线裂纹结构的三维断裂与疲劳裂纹扩展模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010. (YU Pei-shi. Studies on three-dimensional fracture and fatigue crack growth simulation of curve cracked structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese))
- [9] YU Pei-shi, GUO Wan-lin. An equivalent thickness conception for prediction of surface fatigue crack growth life and shape evolution[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, **93**: 65 - 74.
- [10] 张敦福, 张波, 王卫东, 等. 单向轴压条件下内置椭圆三维裂纹扩展无网格方法的研究[J]. 应用力学学报, 2016, **33**(3): 483 - 489. (ZHANG Dun-fu, ZHANG Bo, WANG Wei-dong, et al. Study on the built-in ellipse 3D crack propagation under uniaxial compression by meshless method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, **33**(3): 483 - 489. (in Chinese))
- [11] MORTEZA N, ADRIANA P, ROBERT W Z. On the use of quarter-point tetrahedral finite elements in linear elastic fracture mechanics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, **144**: 194 - 221.
- [12] ABDELAZIZ Y, BENKHEIRA S, RIKIOUI T, et al. A double degenerated finite element for modeling the crack tip singularity[J]. Applied Mathematical Modeling, 2010(34): 4031 - 4039.
- [13] 刘明尧, 柯孟龙, 周祖德, 等. 裂纹尖端应力强度因子的有限元计算方法分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, **33**(6): 116 - 121. (LIU Ming-yao, KE Meng-long, ZHOU Zu-de, et al. Analysis of finite element calculation methods for crack-tip stress intensity factor[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, **33**(6): 116 - 121. (in Chinese))
- [14] 谢仁海, 渠天祥, 钱光谟. 构造地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007. (XIE Ren-hai, QU Tian-xiang, QIAN Guang-mo. Structural geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 王宇, 李晓, 武艳芳, 等. 脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 264 - 275. (WANG Yu, LI Xiao, WU Yan-fang, et al.

- Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 264 - 275. (in Chinese))
- [16] 于永军, 梁卫国, 毕井龙, 等. 油页岩热物理特性试验与高温热破裂数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(6): 1106 - 1115. (YU Yong-jun, LIANG Wei-guo, BI Jing-long, et al. Thermo physical experiment and numerical simulation on thermal cracking of oil shale at high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(6): 1106 - 1115. (in Chinese))
- [17] 朱 锐, 邓乾金. 位移外推法在应力强度因子计算中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2013(2): 190 - 191. (ZHU Rui, DENG Qian-jin. Application of displacement extrapolation method in calculation of SIF[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2013(2): 190 - 191. (in Chinese))
- [18] 王 涛, 杨建国, 刘雪松, 等. 含中心裂纹低匹配对接接头形状参数对形状因子的影响[J]. 焊接学报, 2012, **33**(1): 101 - 104. (WANG Tao, YANG Jian-guo, LIU Xue-song, et al. Influence of joint geometric parameters on shape factor of under-matched butt joint with center crack[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2012, **33**(1): 101 - 104. (in Chinese))
- [19] 薛建阳, 董金爽, 尚 鹏. 裂纹尖端附近应力场和位移场精确解分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, **48**(2): 160 - 164. (XUE Jian-yang, DONG Jin-Shuang, SHANG Peng. Analysis of exact solution on stress and displacement near the crack tip[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2016, **48**(2): 160 - 164. (in Chinese))
- [20] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981. (China Research Institute of Aeronautics. Handbook of stress intensity factor[M]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese))

第十届全国土动力学学术会议二号通知 2018年11月2日~4日

主办单位: 中国振动工程学会土动力学专业委员会; 中国地震学会岩土工程防震减灾委员会; 恢先地震工程学基金会(中国)。

承办单位: 南京工业大学。

第十届全国土动力学学术会议将于2018年11月2日~4日在六朝古都南京召开。本次会议是继1980年12月6~12日在合肥召开“土的动力特性学术讨论会”后有着近四十年历史的第十次学术盛会, 在汶川特大地震10周年之际的2018年召开“第十届全国土动力学学术会议”, 将是一次具有历史意义的学术盛会。

会议主题与内容: 围绕“一带一路”倡议、“建设海洋强国”和“西部大开发”战略中的重大工程灾害灾前预防与综合防范, 本次会议重点研讨防灾减灾救灾工作“两个坚持、三个转变”新理念中遇到的前沿科学与关键技术问题, 具体征文专题如下: ①土的动力特性与本构关系; ②土与结构动力相互作用; ③土动力学数值与物理模拟研究; ④土动力学室内试验方法与技术; ⑤原位动力测试与表征技术; ⑥砂土液化评价与防治; ⑦强地震动与场地非线性效应; ⑧近海工程的特殊土动力

学问题; ⑧环境振动与测试技术; ⑨重大工程的土动力学问题; ⑩工程场地地震损失评估与灾害保险; ⑪桩基动力测试技术。

大会秘书处: 联系人: 庄海洋13584050564, 吴志坚13919182444, 陈炜昀13770620150, 赵凯13951863149, 王盛年15077865785, 通讯地址: 南京工业大学虹桥校区实验楼400-1室, 鼓楼区中山北路200号, 邮编: 210009, 论文提交邮箱: 王盛年myresort@126.com, 赵凯 zhaokai@njtech.edu.cn。

重要时间: 论文全文截止: 2018年5月30日, 修改稿截止: 2018年7月30日, 论文录用通知: 2018年8月30日。

会议论文征集: 会议论文应为未经正式发表过的最新成果, 学术委员会将组织专家对提交论文进行审查, 通过审查的论文将在《地震工程学报》专刊、《防灾减灾工程学报》和《地震工程与工程振动》正刊发表, 论文版面费自理。

会议、住所地点: 会议酒店: 南京国际青年会议酒店, 地址: 南京建邺区金沙江西街9号(南京保利大剧院旁), 电话: 025-86538888, 大会统一安排住宿, 费用自理。

会议费用: 正式代表1600元/人, 学生代表800元/人, 随从人员600元/人(自行安排食宿除外)。

(大会组委会 供稿)