

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.037

裂纹对直墙拱形隧道围岩损伤破坏模式的影响规律研究

周 磊, 朱哲明, 刘 邦

(四川大学 建筑与环境学院 能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 运用不同的有限元分析软件 (RFPA^{2D}、ABAQUS) 模拟研究隧道周边裂纹对直墙拱形隧道围岩稳定性的影响。裂纹分布在隧道拱底、边墙、拱肩、拱顶等部位, 将两种数值模拟方法进行对比分析, 研究隧道周边裂纹的起裂、扩展机制及隧道围岩在围压载荷作用下的破坏形式。为了验证数值模拟结果, 采用水泥砂浆制作隧道模型进行模型试验并与数值模拟结果进行对比分析, 其数值分析与模型试验结果较为一致。结果表明, 隧道墙脚处的裂纹是隧道围岩破坏的较弱位置; 隧道拱顶圆弧位置处的裂纹与隧道拱顶圆弧圆心成 45° 夹角时, 隧道模型的抗压强度最低, 稳定性最差; 隧道在围压作用下, 破坏形式主要是拱底、拱顶的拉伸破坏和边墙、裂纹尖端的压剪破坏。

关 键 词: 裂纹; 数值模拟; 岩石破裂过程分析; 隧道

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 12-3688-10

Influence of cracks on surrounding rock damage-failure mode of straight wall arch tunnel

ZHOU Lei, ZHU Zhe-ming, LIU Bang

(Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Disaster Mechanics of Ministry of Education, School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The effect of cracks on the stability of surrounding rock of the straight wall arched tunnel was simulated by using different types of finite element analysis software (RFPA^{2D} and ABAQUS). Cracks were normally distributed in the arch bottom, sidewall, arch shoulder, roof and other parts of the tunnel. This study investigated the mechanisms of crack initiation and propagation and the damage-failure patterns of surrounding rock under the confining pressure. The detailed comparisons and discussions of these two finite element methods (FEM) were presented. The model tests using cement mortar were conducted to validate the results obtained by numerical simulations. There was a good agreement between experimental results and numerical simulations. The results showed that cracks at the corner were the weak position of surrounding rock in the tunnel. When the crack at the arc of the tunnel roof formed 45° angle with the arc centre of the tunnel roof, the compressive strength of the tunnel was the lowest and the stability was the worst. Under the confining pressure, tensile failure mainly occurred at the arch bottom and the roof, and shear failure was observed at the sidewall and the crack tip.

Keywords: crack; numerical simulation; rock failure process analysis; tunnel

1 引 言

隧道围岩作为一种脆性岩石介质, 内部分布着大量的天然节理、裂隙或爆破开挖诱发的裂纹缺陷。

这些缺陷在自重和构造应力场作用下, 会促使裂纹孕育、萌生、繁衍、扩展和贯通, 最终可能导致隧道的坍塌及岩爆等特大工程地质灾害。因此, 研究隧道中裂纹在压缩载荷作用下裂纹的起裂、扩展及

收稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.11672194, No.11702181); 四川省安全监管局安全生产科技项目 (No.aj20170515161307)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11672194, 11702181) and the Foundation of Sichuan Administration of Work Safety (aj20170515161307).

第一作者简介: 周磊, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事岩石断裂力学方面的研究工作。E-mail: zhouleittkx@126.com

通讯作者: 朱哲明, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与采矿工程方面的研究工作。E-mail: zhemingzhu@hotmail.com

隧道的破坏机制具有重要的实际意义。

隧道围岩中岩石裂纹的扩展与演化是岩石断裂力学研究的重要研究方向,已经有众多的国内外学者做了相关的研究与探索。Brace 等^[1]等多次试验证明,脆性材料中的裂缝将在裂纹尖端应力集中区域扩展,并逐渐进入稳定状态,需要进一步加载后脆性材料才会进一步破坏。随后 Dyskin^[2], Ashby^[3]等在此基础上进一步证明脆性材料中裂缝的扩展机制。Bobet 等^[4-6]研究了压缩载荷条件下翼形和次生裂纹的起裂和扩展机制,并提出了最大切应力准则。Tang 等^[7]基于 RFPA^{2D} 软件,用非线性变形分析方法研究了岩石中裂纹的起裂和贯通机制。Zhu 等^[8-14]采用边界配位法和复变函数研究了不同边界条件下有限体裂纹尖端应力强度因子的求解,并提出一种双轴压缩断裂准则。

隧道岩体中的裂隙起裂、扩展及贯通机制也具有上述相似的破坏准则。在隧道爆破掘进施工过程中,隧道周边会产生大量的径向裂隙,这些裂隙的存在严重影响着隧道工程的稳定性和使用寿命。国内外众多学者^[15-19]指出,节理裂隙的存在改变了隧道岩体中应力的传导方式,层状节理面的倾角对隧道围岩的失稳破坏有很大的影响。康勇等^[20]采用数值试验研究了深埋隧道围岩开挖过程中的破坏机制,首先是从隧道拱顶开裂,然后拱肩、边墙破坏,最后围岩深部裂纹开裂导致隧道失稳破坏。李占海等^[21]采用 RFPA 系统研究了侧压力系数 λ 对马蹄形隧道破坏模式的影响, λ 较小时以裂纹纵向开裂为主, λ 较大时以横向开裂为主。于海龙等^[22]对大断面公路隧道研究后认为,三心圆拱断面形式的圆拱部分会承受较大的压应力,隧道墙脚处应力集中较大,在拱脚处加设仰拱,可使隧道结构承载力提高 10% 左右。WANG 等^[23]采用光弹性试验研究了隧道周边裂纹尖端应力强度因子对隧道破坏强度的影响。Zhu 等^[24]采用有限元法模拟了隧道拱肩裂纹方向对隧道围岩稳定性的影响,得出裂纹倾角为 135° 时,隧道的稳定性最差。郑颖人等^[25-26]采用有限元强度折减法研究了隧洞裂纹的破坏机制。也有一些学者^[27-28]研究了裂纹对隧道衬砌的影响,指出了隧道衬砌中裂纹位置及深度对隧道稳定性的影响。

这些研究对于隧道的破坏机制以及裂纹对隧道围岩稳定性的影响认识有很大的提高,促进了国内外学者对于隧道失稳机制的研究。隧道周边不同位置处的裂纹对于隧道围岩稳定性的影响有很大不

同,如果能通过数值分析与模型试验对比找到隧道周边裂纹破坏的最弱位置及裂纹位置对隧道围岩破坏模式的影响规律,即可根据裂纹形成的不同位置对隧道的支护、养护等提供一定的施工依据。因此,本文选择直墙拱形隧道作为研究对象,在压缩载荷作用下研究隧道周边裂纹的起裂、扩展及对隧道破坏形式的影响。采用数值模拟和模型试验对比分析研究,模型试验采用水泥砂浆作为试验材料,数值模拟分析采用 RFPA 系统软件和 ABAQUS 软件分别计算隧道围岩数值损伤演化过程及应力云图,通过数值模拟和模型试验结果进行对比分析,得出一些较有意义的结论,为以后隧道工程的设计、爆破施工等提供一定的理论依据。

2 直墙拱形隧道损伤破坏的数值模拟研究

本文研究对象直墙拱形隧道的裂纹分布在拱底、墙脚、边墙、拱肩、拱顶等部位。隧道内部裂纹都采用单一裂纹进行研究,由于隧道内的多裂纹设置具有一定的复杂性和奇异性,这也将留作下一课题进行进一步研究。裂纹设置分 2 种情况进行,一种是裂纹分布在隧道的拱顶半圆弧位置,与隧道拱顶圆弧圆心成夹角 α , 裂纹以每 15° 为梯度增量从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 逆时针方向转动设置,共 7 组试验模型;如图 1(a)所示。由于国内外众多学者^[23-24,29]已经提出在隧洞边墙周边的裂纹,当裂纹倾角为 45° 时,隧道的稳定性最差,因此,第 2 种裂纹分布在隧道的拱底、墙脚、边墙部位,与隧道周边成 45° 夹角,裂纹以逆时针方向转动从拱底至边墙设置 6 组试验模型,如图 1(b)所示,进而通过这两组试验结果找到隧道周边裂纹的薄弱破坏位置和隧道围岩破坏形式的规律。

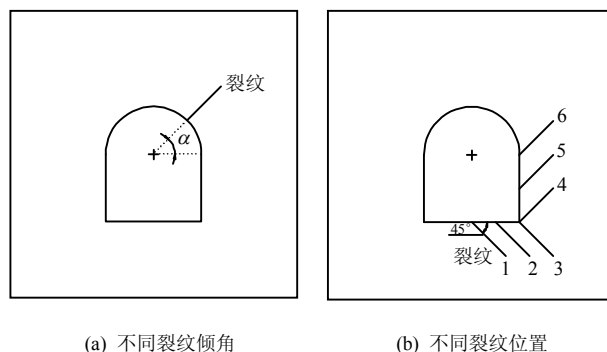


图 1 含有单一裂纹的两种隧道模型

Fig.1 Two types of tunnel models with a single crack

2.1 数值损伤模型的建立

考虑到实际工程中隧道周边会受到构造应力场作用,在隧道模型的侧面加载一定的围压值,使隧道模型为双轴受压状态。按线弹性理论可以得知,构造应力场水平方向侧压力 σ_3 与主应力 σ_1 的关系为

$$\sigma_3 = \nu \sigma_1 \quad (1)$$

式中: ν 为泊松比,即为无侧向变形下的侧压力系数 λ ; σ_1 为隧道模型达到破坏状态下的破坏应力峰值大小。

隧道模型的尺寸设为 350 mm×350 mm,断面按直墙拱形隧道实际比例缩小设置,隧道断面尺寸取如图 2 所示,隧道高度为 60 mm,宽度为 50 mm,圆拱半径为 25 mm,隧道周边裂纹长度为 50 mm。

网格采用正方形单元网格离散,网格划分为 500×500 等参单元,划分较密的单元网格有利于隧道的裂纹空隙形成较小值,数值分析的裂纹尖端的起裂、扩展和隧道破坏形式结果更为精确。网格单元服从 Weibull 分布赋值,均质度系数为 5.0,弹性模量的平均值为 2.95 GPa,泊松比的平均值为 0.25,参数设置如表 1 所示。

表 1 数值模拟参数

Table 1 Parameters of model tests in numerical simulation

弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	密度 ρ / (g/cm ³)	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / (°)	均质度系数 m	垂直应力 σ_v / MPa	水平侧压力 σ_h / MPa
2.95	0.25	2.32	1.5	15	5.0	10	2.5

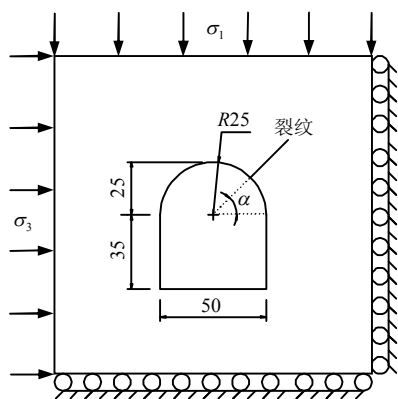


图 2 数值模拟隧道模型 (单位: mm)

Fig.2 Model of numerical simulation tunnel (unit: mm)

该 Weibull 分布函数可以按照如下分布密度函数表示为

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left[-\left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中: u 为岩石介质基元体力学性质参数 (弹性模量、强度、泊松比、自重等); u_0 为岩石介质基元体力学性质参数的平均值; m 定义了 Weibull 分布函数的性质参数,其物理意义反映了岩石材料介质的均匀度,定义为岩石材料介质的均匀性系数,反映材料的均匀程度, m 值越大,材料细观单元越趋于均匀;式 (2) 反映了岩石材料非均匀分布性的情况, m 和 u_0 为 Weibull 分布参数。

本文采用 RFPA 系统进行数值模拟,此模拟软件经过 Tang^[30]和 ZHU^[31-32]等研究开发,在岩石脆性材料裂纹的起裂和扩展过程方面中已经取得了一系列重大研究成果,RFPA 系统基于有限单元法计

算模型的破坏准则,主要计算细观单元的应力状态来判断隧道模型的受力状态。判断细观单元失稳的 2 个准则分别是最大拉应变准则和 Mohr-Coulomb 准则,当单元达到其中之一破坏准则,就发生失稳破坏:

$$\left. \begin{aligned} -\varepsilon_1 &= \frac{k f_{co}}{E_0} \\ \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\sigma_3 \geq f_{co}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ε_1 为最大主应变; f_{co} 为单元的单轴抗压强度; E_0 为初始弹性模量; k 为单元的单轴抗压强度与抗拉强度的比值; φ 为单元的内摩擦角。

式 (3) 中的第 1 式为最大拉应变准则,第 2 式为 Mohr-Coulomb 准则;隧道模型中的细观单元可能发生拉伸或剪切破坏,最后隧道模型的弹性模量将会产生如下式所示的衰减:

$$E = (1 - \omega) E_0 \quad (4)$$

式中: ω 为损伤模量; E 为损伤后的弹性模量; E_0 为初始弹性模量;

2.2 数值损伤模拟试验结果分析

本文取隧道模型细观单元发生初始损伤的破坏阶段至隧道即将失稳的破坏阶段作对比分析,得出隧道中裂纹的起裂、扩展机制以及隧道围岩的破坏形式规律。由于本文试验组数较多,不能一一列举,仅取裂纹倾角 $\alpha = 45^\circ$ 的隧道模型的数值损伤演化过程做分析,如图 3 所示,图中白色单元表示

发生剪切损伤区域, 黑色单元表示已经发生了剪切损伤区域; 剪切应力分布图中, 白色单元的亮度高

低代表着最大剪切应力的大小, 颜色越亮的区域表示剪切应力越大。

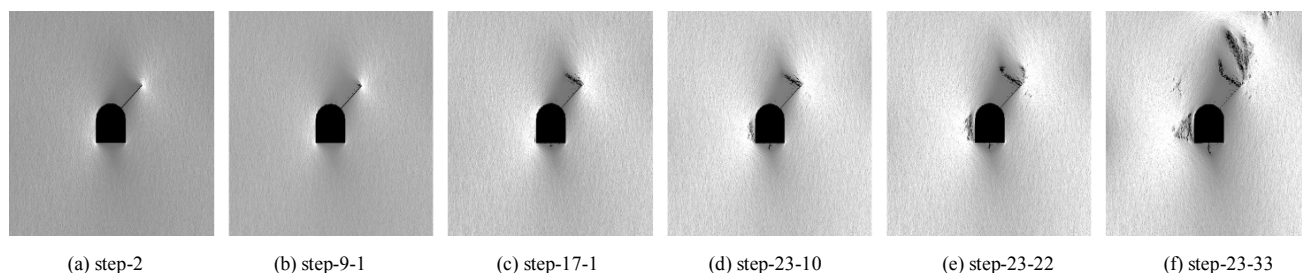


图 3 裂纹倾角 $\alpha=45^\circ$ 隧道的数值损伤演化过程

Fig.3 The numerical damage evolution process of tunnel with the crack inclination angle $\alpha=45^\circ$

从图 3 数值损伤演化过程可以看出, 隧道围岩剪切应力较大的区域为隧道的左侧墙脚、边墙、拱肩和裂尖区域。当加载到一定步时, 裂尖区域开始形成初始损伤, 损伤单元聚集形成裂纹; 然后裂纹开始起裂、扩展, 隧道的拱底和墙脚位置处也开始出现细观单元的损伤; 紧接着隧道的左侧边墙开始形成压剪破坏, 从墙脚位置向拱肩处延伸破坏, 而拱底开始形成拉伸破坏面聚集成裂纹; 最后隧道拱肩深处形成远场裂纹, 从而导致隧道的失稳和物理破坏。从隧道的剪切应力分布图可知, 随着加载步的增加, 整个隧道模型的剪切应力逐渐增大。

图 4 为裂纹在隧道的墙脚 3 位置处时隧道模型损伤演化的整个过程, 从图中可以看出, 隧道剪切应力较大的区域为隧道左侧的墙脚、边墙、拱肩和裂纹尖端区域。隧道首先从裂纹尖端形成细观单元损伤聚集形成较小裂纹, 然后裂纹尖端开始起裂、扩展, 左侧边墙、拱肩部位开始单元损伤, 紧接着左侧边墙形成压缩剪切破坏直至发展到墙脚区域, 拱顶开始形成拉伸破坏裂纹, 隧道围岩深处形成远场裂纹, 隧道最后达到失稳和物理破坏。随着加载步的增加, 整个隧道模型的剪切应力也呈逐渐增大的趋势。

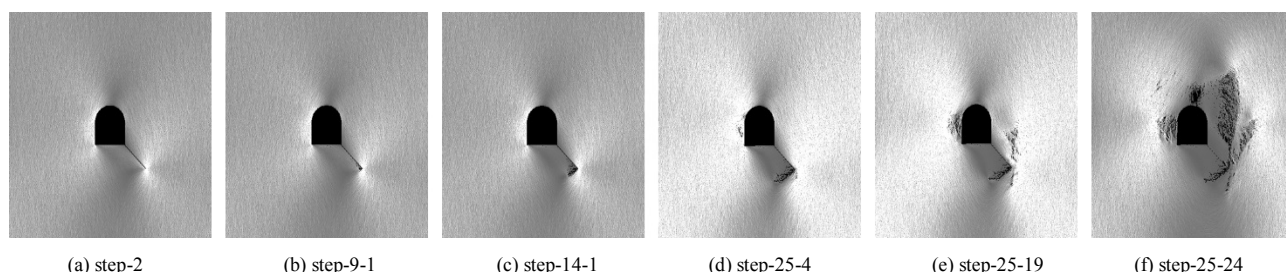


图 4 裂纹在 3 位置处的隧道数值损伤演化过程

Fig.4 Numerical damage evolution process of tunnel with crack at the position 3

3 模型试验

3.1 模型试验设计与制作

为了验证数值模拟结果的准确性, 本文采用水泥砂浆作为试验材料制作隧道模型, 模型试验将隧道模型理想化为连续介质模型。试验之前, 经过多次调配确定水泥砂浆比例, 水泥:砂:石膏:水为 1:2.5:0.6:0.45, 物理性质参数见表 1。试验模型尺寸为 350 mm×350 mm×100 mm, 隧道尺寸与数值损伤模拟试验尺寸相同。隧道模型采用 0.25 mm 厚的薄塑料片作为预制裂纹贯穿于整个模型厚度, 裂纹长度为 50 mm。



图 5 隧道模型试件

Fig.5 Model specimen of tunnel

首先制作 1 组无裂纹的隧道模型, 然后按试验

设计方案分别制作 7 组裂纹在隧道拱顶半圆弧部位和 6 组裂纹在隧道拱底、边墙部位的隧道模型试件。每组试验试件制作 3 个, 总共 14 组试验试件。如图 5 所示。

3.2 模型试验的加载与结果

隧道模型的 σ_1 加载采用电液伺服压力机 (5 000 kN) 对隧道模型施加轴向竖直压力, 加载速率为 10 kN/s; σ_3 加载采用液压千斤顶, 固定值设置为 2.5 MPa。加载前, 为了减少端部效应对水泥砂浆试件的影响, 采用多功能角磨机对隧道模型四周进行打磨抛光处理; 然后在其表面涂抹一层机油, 防止试件与加载模具之间的摩擦, 这些处理措施能够较好地保证试验的精准性。

将隧道模型放入加载设备中间加载, 首先加载一定值的 σ_3 , 使其固定在 2.5 MPa, 然后再缓慢加载 σ_1 , 直至试件破坏。在试验的全过程中, 电脑会自动记录整个模型的加载时间、应力、位移等曲线, 根据电脑记录的各种包络线提取重要的试验数据。

根据应力-位移曲线将每 3 组的隧道模型的抗压强度求其平均值, 隧道周边无裂纹标准模型试件的抗压强度均值为 16.07 MPa。当裂纹位于隧道拱顶半圆弧位置处时, 得到如图 6 所示隧道模型的抗压强度随裂纹倾角变化的趋势线。从图可以看出, 裂纹倾角 α 变化时, 隧道模型的抗压强度有较大的变化。当裂纹倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时, 隧道模型的抗压强度最低, 仅为 8.03 MPa; 当裂纹倾角为 0° 和 90° 时, 隧道模型的抗压强度较大。

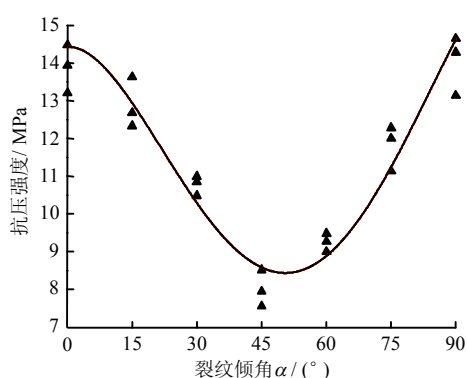


图 6 不同裂纹倾角 α 时隧道模型的抗压强度
Fig.6 Compressive strength of tunnel models with different crack inclination angles α

当裂纹位于隧道拱底、边墙位置处时, 同样根据应力-位移曲线将每 3 组的隧道模型试验的抗压强度求其平均值, 得到如图 7 的隧道模型的抗压强度随裂纹位置变化的趋势线。从图可知, 裂纹在隧道墙脚位置处的隧道模型的抗压强度最低, 为

7.13 MPa; 裂纹在拱肩处的隧道模型的抗压强度也较低, 仅为 7.74 MPa; 说明墙脚和拱肩处的裂纹对隧道围岩的稳定性影响都较大。

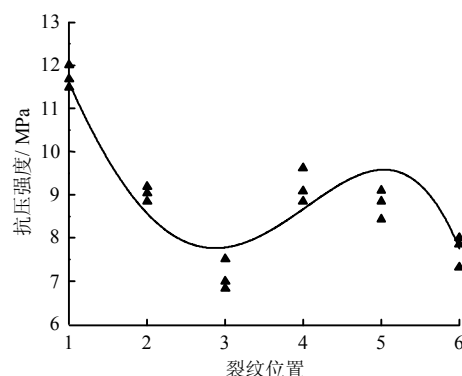


图 7 不同裂纹位置处时隧道模型的抗压强度
Fig.7 Compressive strength of tunnel models with different crack positions

4 模型试验与数值分析结果对比分析

为了验证 RFPA 系统软件计算结果的准确性, 本文采用 ABAQUS 软件进行数值模拟计算裂纹隧道模型的 Tresca 应力云图, 模型中裂纹采用 Contour integral 方法建立, 为了更好地模拟裂纹表面在隧道围岩中的实际工程情况, 设置裂纹表面的摩擦系数为 $f=0.2$ 。一般有限元处理裂纹问题时, 需将裂纹尖端区域设置为 CPS6 节点单元, 其余区域采用 CPS8 节点单元。这样的网格划分更优于常规有限元计算问题, 因为常规有限元在处理裂纹问题时, 须将裂纹面设置为单元的边界, 裂尖设为单元的一个节点。计算的剪切应力云图与数值损伤演化过程中的剪切损伤区域进行比较, 最后与隧道模型的试验结果进行对比分析, 得出不同位置处的裂纹对隧道模型的破坏形式的影响。

图 8 为裂纹位于隧道拱顶半圆弧位置处时, 裂纹不同倾角 α 数值模拟的分析结果与试验模型的破坏照片。在 Tresca 应力云图中, 红色表示该围岩区域剪切应力较大, 说明应力集中较大, 蓝色表示该围岩区域剪切应力较小, 说明应力集中较小。剪应力大小从红色→黄色→绿色→蓝色依次减小。首先, 当隧道周边无裂纹时, 从数值损伤分布结果可以看出, 隧道模型破坏主要是两侧边墙的剪切破坏和拱底、拱顶的拉伸破坏。从试验照片可知, 试验模型的破坏主要是左、右侧壁和拱顶、拱底模型试验与数值模拟结果基本一致。从 Tresca 应力云图可知, 剪切应力集中区域为隧道两侧墙脚、边墙、拱肩部位, 隧道模型的 Tresca 应力云图与数值模拟的剪切损伤区域较为一致。

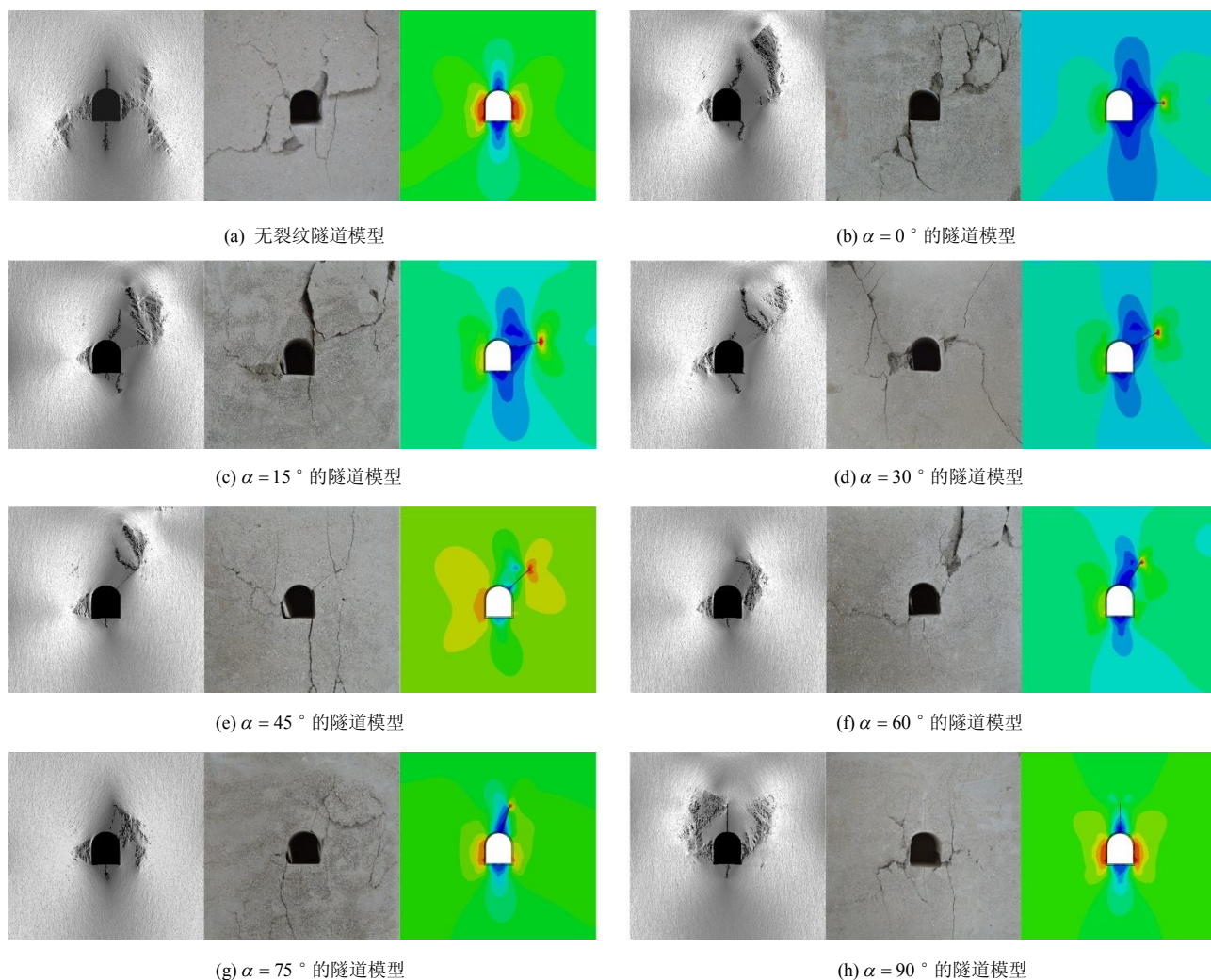


图 8 不同裂纹倾角隧道模型的数值模拟损伤分布及试验照片和 Tresca 应力云图

Fig.8 Damage distributions of numerical simulation and experimental photos and Tresca stress nephogram of tunnel models with different crack inclination angles α

当裂纹位于隧道拱顶半圆弧部位，从数值损伤的试验结果可知，裂纹倾角 α 较小时，隧道的破坏形式主要是拱底、拱顶的拉伸破坏及左侧边墙和裂纹尖端的压剪破坏；当裂纹倾角 α 较大时，隧道的破坏形式主要是左侧侧壁和裂纹尖端的压剪破坏，右侧拱肩部位也出现一定程度的压剪破坏，拱底受到拉伸破坏形成拉伸裂纹。

从试验照片可知，当裂纹倾角 α 较小时，隧道的破坏主要是左侧边墙和裂纹尖端的翼形起裂、扩展，拱底和拱顶受到挤压形成拉伸裂隙；当裂纹倾角 α 较大时，隧道破坏主要是左侧边墙、裂纹尖端和右侧的拱肩、边墙，裂纹尖端的起裂、扩展存在一定的离散性和奇异性，拱底形成底鼓结构使得底部受到拉伸破坏，形成较小的拉伸裂隙。模型试验与数值损伤结果基本吻合，但裂纹倾角 α 为 0° 时的试验模型左侧边墙的破坏情况与数值分析结果有差异。

从 Tresca 应力云图可知，当裂纹倾角 α 较小时，主要是隧道左侧边墙和裂纹尖端部位剪切应力较大，当裂纹倾角 α 较大时，主要是隧道左侧边墙、裂纹尖端和右侧拱肩、边墙部分区域剪切应力较大。Tresca 应力云图中应力较大的区域与数值损伤应力云图的剪切损伤区域基本一致。

当裂纹倾角 $\alpha = 90^\circ$ 时，裂纹尖端几乎不扩张。由于受到侧压力的作用，导致裂纹尖端闭合，裂尖的应力集中较小，损伤破坏主要发生在隧道的两侧边墙部位，损伤裂纹沿拱肩方向发展，最后在拱肩围岩深部产生剪切破坏，且较为对称；拱底由于受到竖直压力作用挤压形成底鼓，在拱底中间、边脚部位不同程度上受到拉伸破坏，且形成较小的微观裂隙，与数值损伤模拟分析结果相吻合。

图 9 为裂纹在隧道拱底、边墙不同位置处时，数值模拟分析结果和隧道模型的试验照片，通过对

比分析可知,隧道周边裂纹处于不同位置处,隧道

围岩的破坏形式有所不同。



(a) 1 位置处裂纹隧道模型



(b) 2 位置处裂纹隧道模型



(c) 3 位置处裂纹隧道模型



(d) 4 位置处裂纹隧道模型



(e) 5 位置处裂纹隧道模型



(f) 6 位置处裂纹隧道模型

图 9 不同裂纹位置处隧道模型的数值模拟损伤分布及试验照片和 Tresca 应力云图

Fig.9 Damage distribution of numerical simulation and experimental photos and Tresca stress nephogram of tunnel models with different crack locations

当裂纹位于隧道拱底时,从数值损伤应力云图可知,隧道的破坏形式主要是左侧侧壁和裂纹尖端的压剪破坏,右侧拱肩、边墙部位有一定程度的压剪破坏,拱顶受到拉伸应力形成拉伸裂纹。当裂纹位于隧道右侧边墙时,主要是隧道左侧侧壁和裂纹尖端的剪切破坏,拱底、拱顶受到拉伸应力破坏形成裂纹。

从试验照片可知,当裂纹位于隧道拱底时,隧道模型的破坏主要是左侧的墙脚、边墙、拱肩及裂纹尖端的翼形起裂、扩展,裂纹尖端扩展延伸至同侧的拱肩剪切破坏,隧道右侧的边墙、拱肩部位也有一定程度的剪切破坏,拱顶受到拉伸应力作用形成较小的裂隙扩展。当裂纹位于隧道右侧边墙时,隧道模型破坏主要是左侧侧壁及裂纹尖端,隧道拱底、拱顶受到挤压拉伸破坏,由于破坏形成的是微观较小裂隙,试验照片中不易看出。数值损伤结果与模型试验结果较为一致。但裂纹在 3 位置处的隧道模型右侧拱肩和拱顶的破坏情况与数值分析结果有差异。

从 Tresca 应力云图可知,当裂纹位于隧道拱底

时,隧道剪切应力较大的区域为左侧侧壁和裂纹尖端及右侧拱肩部位。当裂纹位于隧道右侧边墙时,隧道剪切应力较大的区域为左侧边墙和裂纹尖端区域。隧道剪切应力较大的区域与数值损伤应力云图的剪切损伤区域较为一致,表明 RFPA 系统软件与 ABAQUS 软件模拟计算的结果较为吻合,说明采用 RFPA 系统的数值损伤模拟隧道的破坏行为具有较好的可行性。

5 裂纹尖端应力强度因子对隧道稳定性的影响

隧道裂纹在压缩荷载作用下,裂纹尖端发生起裂、扩展,隧道拱底、墙脚、边墙、拱肩发生不同形式破坏。裂纹尖端无量纲值应力强度因子(I型裂纹) K_I 、(II型裂纹) K_{II} 对隧道周边裂纹的起裂、扩展及隧道的抗压强度有很大的影响。因为隧道在围压荷载作用下,裂纹尖端主要破坏形式为压剪破坏形式,所以可以认为, K_{II} 达到裂纹尖端断裂韧度 K_{IIC} 时裂纹便会开始起裂、扩展。

本文采用 ABAQUS 软件进行数值计算裂纹尖

端的应力强度因子, 裂纹位于隧道拱顶半圆弧位置时, 当裂纹倾角 α 不同时, 裂纹尖端的应力强度因子 K 值有所不同, 其变化趋势线如图 10 所示。从图可以看出, K 值基本全为负值, 这是由于在围压状态下, 隧道裂纹尖端闭合, 而致使裂纹尖端主要是压剪破坏。负的 K_I 值会在裂纹尖端造成压应力, 进而影响裂纹尖端的应力场重分布, 对裂纹尖端的扩展有一定的影响, 但具体的影响规律, 还需要进一步研究。无量纲值 K_{II} 对隧道围岩的稳定性有极大的影响, 随着角度的增加, 其值先增大后减小。当裂纹倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时, 应力强度因子 K_{II} 值达到最大值, 说明此位置处的裂纹尖端应力集中最明显, 对隧道围岩的稳定性影响较大。此时应力强度因子 K_{II} 值趋势线与试验隧道模型的抗压强度趋势线走势基本一致。

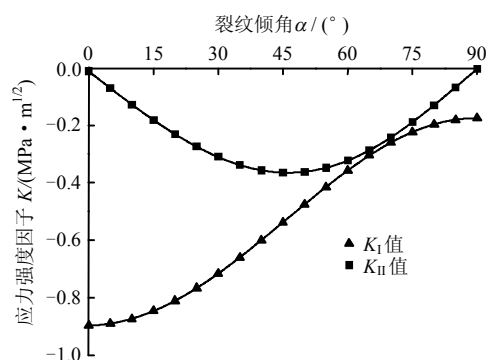


图 10 不同裂纹倾角隧道的无量纲应力强度因子 K_I 、 K_{II} 值

Fig.10 Values of dimensionless stress intensity factor K_I and K_{II} of different crack inclination angles α in the tunnel

裂纹在隧道的拱底、边墙不同位置处时, 隧道周边裂纹尖端的应力强度因子 K 值变化趋势线如图 11 所示。当裂纹位于隧道模型的不同位置处时, 裂尖的应力强度因子 K 值变化比较明显, 表明裂纹

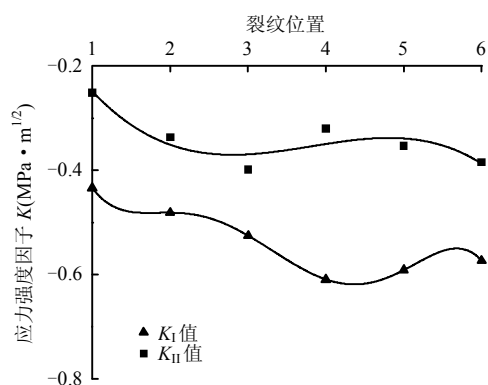


图 11 不同裂纹位置隧道的无量纲应力强度因子 K_I 、 K_{II} 值

Fig.11 The dimensionless stress intensity factor K_I and K_{II} values of different crack locations in tunnel

位于不同位置处时对隧道裂纹尖端的起裂、扩展及隧道模型的抗压强度有很大影响。当裂纹处于隧道的墙脚、拱肩位置处时, 裂纹尖端 K_{II} 值都较大, 说明墙脚、拱肩位置处的裂纹尖端应力集中较为严重, 对隧道围岩的稳定性影响最大。当裂纹从位置 1 处移至位置 3 处的过程中, K_I 值先递减, 后增大, 变化幅度值比 K_{II} 值大。

结果表明, 由于试验隧道模型主要为压剪破坏以及局部的拉伸破坏, 从 K_{II} 值变化趋势线可以看出, 与模型试验结果的抗压强度趋势线走势相似, 表明应力强度因子 K_{II} 值对隧道抗压强度的影响较大; 当裂纹倾角 $\alpha = 45^\circ$, 隧道模型的抗压强度较低, 为隧道拱顶圆弧裂纹位置处的较易破坏位置; 当裂纹位于隧道的墙脚、拱肩位置处时, 裂纹尖端应力强度因子较大, 隧道模型的抗压强度最低, 因此, 墙脚和拱肩处的裂纹为隧道周边的最薄弱部位。

6 结 论

(1) 从围岩初始损伤特征看, 围岩初始损伤与最终破坏失稳竖直方向承受的载荷随着裂纹位置的变化具有一定的规律; 当裂纹位于隧道拱顶半圆弧位置处, 裂纹倾角 α 较小时, 主要以隧道的边墙压剪破坏以及裂纹尖端的起裂、扩展, 而隧道的拱底和拱顶也有一定程度的拉伸破坏; 当裂纹倾角 α 较大时, 主要以隧道两侧边墙的压剪破坏, 裂纹尖端有一定的扩展, 但裂尖破坏程度较小, 隧道拱底产生较小裂隙扩展, 最后裂尖压剪破坏向下延伸至同侧的边墙破坏。

(2) 当裂纹处于隧道的拱底位置时, 隧道主要是裂纹尖端及边墙的压剪破坏, 裂纹尖端形成较小的损伤裂纹延伸至同侧的边墙破坏。当裂纹位于隧道的边墙位置时, 隧道主要以裂纹尖端的起裂、扩展及隧道边墙的剪切破坏, 导致隧道结构的失稳, 拱底、拱顶也会有微观较小的拉伸裂隙的存在。

(3) 从隧道的破坏强度来看, 当裂纹位于隧道的墙脚、拱肩位置时, 隧道模型的抗压强度较小, 应力强度因子较大; 表明墙脚、拱肩位置处为隧道裂纹形成的薄弱部位, 在隧道的设计、施工等环节应当加强这些部位的加固和维护, 或者在墙脚部位设置仰拱提高隧道的承载力。

(4) 裂纹在隧道拱顶半圆弧部位, 裂纹倾角 α 为 45° 时, 隧道的抗压强度最低, 应力强度因子也较大, 表明隧道拱顶部位的衬砌设计与维护也应该注意裂纹倾角 α 为 45° 时对隧道稳定性的影响。

参 考 文 献

- [1] BRACE W F, BOMBOLAKIS E G. A note on brittle crack growth in compression[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1963, 68(12): 3709—3713.
- [2] DYSKIN A, GERMANOVICH N. A model of crack growth in microcracked rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(7): 813—820.
- [3] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. **Acta Metall**, 1986, 34(3): 497—510.
- [4] BOBET A, EINSTEIN H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(7): 863—888.
- [5] BOBET A. The initiation of secondary cracks in compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2000, 66(2): 187—219.
- [6] BOBET A. Fracture coalescence in rock materials: experimental observations and numerical predictions[Ph.D Thesis D]. **Cambridge, England: Massachusetts Institute of Technology**, 1997.
- [7] TANG C A, KOU S Q. Crack propagation and coalescence in brittle materials under compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1998, 61(3-4): 311—324.
- [8] ZHU Z M. New biaxial failure criterion for brittle materials in compression[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 1999, 125(11): 1251—1258.
- [9] ZHU Z M, WANG L, MOHANTY B, et al. Stress intensity factor for a cracked specimen under compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2006, 73(4): 482—489.
- [10] ZHU Z M, XIE H P, MOHANTY B. Numerical investigation investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(2): 111—121.
- [11] ZHU Z M. An alternative form of propagation criterion for two collinear cracks under compression[J]. **Mathematics and Mechanics of Solids**, 2009, 14(8): 727—746.
- [12] ZHU Z M. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. **International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(6): 1088—1096.
- [13] ZHU Z M. Evaluation of the range of horizontal stresses in the earth's upper crust by using a collinear crack model[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2013, 88 (1): 114—121.
- [14] ZHENG T, ZHU Z M, WANG B, et al. Stress intensity factor for an infinite plane containing three collinear cracks under compression[J]. **Journal of Applied Mathematics and Mechanics**, 2014, 94(10): 853—861.
- [15] 任德惠, 张平. 不同倾角结构面对巷道稳定性的影响[J]. **煤炭学报**, 1988, 13(3): 13—19.
REN De-hui, ZHANG Ping. The influence of different dip angle structure on the stability of roadway[J]. **Journal of Coal**, 1988, 13(3): 13—19.
- [16] JIA P, TANG C A. Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(5): 500—507.
- [17] 郝宪杰, 李邵军, 江权, 等. 柱状节理玄武岩隧洞破坏模式及其力学机制模拟[J]. **岩土力学**, 2015, 36(3): 837—846.
HAO Xian-jie, LI Shao-jun, JIANG Quan, et al. Failure mode of columnar jointed basalt tunnel and its mechanism simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 837—846.
- [18] 璩世杰, 刘际飞. 节理角度对预裂爆破成缝效果的影响研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(1): 189—194.
QU Shi-jie, LIU Ji-fei. Numerical analysis of joint angle effect on cracking with presplit blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 189—194.
- [19] 周应麟, 邱喜华. 层状岩层围岩隧道稳定性的探讨[J]. **地下空间与工程学报**, 2006, 2(2): 345—348.
ZHOU Ying-lin, QIU Xi-hua. Study on stability of stratified rock tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(2): 345—348.
- [20] 康勇, 李晓红, 杨春和. 深埋隧道围岩损伤破坏模式的数值试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(增刊 1): 3578—3583.
KANG Yong, LI Xiao-hong, YANG Chun-he. Numerical tests of damage failure mode of surrounding rock damage in deep tunnels[J]. **Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 3578—3583.
- [21] 李占海, 朱万成, 冯夏庭, 等. 侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(增刊 2): 441—448, 468.
LI Zhan-hai, ZHU Wan-cheng, FENG Xia-ting, et al. Effect of lateral pressure coefficients on damage and failure process of horseshoe-shaped tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 441—448, 468.

- [22] 于海龙, 王瑞峰. 大断面公路隧道的断面形式研究[J]. 四川建筑, 2006, 26(3): 65—67.
YU Hai-long, WANG Rui-feng. Research on the section form of large section highway tunnel[J]. **Sichuan Building**, 2006, 26(3): 65—67.
- [23] WANG M, ZHU Z M, LIU J. The photoelastic analysis of stress intensity factor for cracks around a tunnel[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2012, 142: 197—200.
- [24] ZHU Z M, LI Y X, XIE J, et al. The effect of principal stress orientation on tunnel stability[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 49: 279—286.
- [25] 郑颖人. 隧洞破坏机制及设计计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增刊 2): 1522—1532
ZHENG Ying-ren. Failure mechanism and design and calculation method for the tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 6(Supp.2): 1522—1532.
- [26] 郑颖人, 王永甫, 王成, 等. 节理岩体隧道的稳定分析与破坏规律探讨_隧道稳定性分析讲座之一[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 649—656.
ZHENG Ying-ren, WANG Yong-fu, WANG Cheng, et al. Stability analysis and exploration of failure law of jointed rock tunnel-seminor on tunnel stability analysis[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(4): 649—656.
- [27] 李治国, 张玉军. 衬砌开裂隧道的稳定性分析及治理技术[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(1): 26—34, 43.
LI Zhi-guo, ZHANG Yu-jun. Stability analysis of tunnel lining cracking and treatment technology[J]. **Modern Tunneling Technology**, 2004, 41(1): 26—34, 43.
- [28] 刘学增, 张鹏, 周敏. 纵向裂缝对隧道衬砌承载力的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 31(10): 2096—2101.
LIU Xue-zeng, ZHANG Peng, ZHOU Min. Analysis of effect of longitudinal cracks on bearing capacity of tunnel lining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 31(10): 2096—2101.
- [29] 李元鑫, 朱哲明, 刘凯, 等. 裂纹方向对隧道稳定性影响规律的研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 189—194.
LI Yuan-Xin, ZHU Zhe-ming, LIU Kai, et al. Study of effect of cracking orientation on tunnel stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 189—194.
- [30] TANG C A, LIU H, LEE P K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—Part I: Effect of heterogeneity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(4): 555—569.
- [31] ZHU W C, TANG C A, HUANG Z P, et al. A numerical study of the effect of loading conditions on the dynamic failure of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(1): 348—353.
- [32] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(2): 236—252.

上接第 3687 页

- [21] 李锐铎, 乐金朝. 基于分数阶导数的软土非线性流变本构模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(5): 856—863.
LI Rui-duo, YUE Jin-chao. Nonlinear rheological constitute of soft soil based on fractional order derivative theory[J]. **Journal of Basis Science and Engineering**, 2014, 22(5): 856—863.
- [22] 尹检务, 旷杜敏, 王智超. 压实土固结蠕变特征及分数阶流变模型参数分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(3): 46—51.
YIN Jian-wu, KUANG Du-min, WANG Zhi-chao. Consolidation creep characteristics of compacted clay and its parameters analysis of rheological constitutive model based on fractional calculus[J]. **Journal of Hunan University of Science & Technology (Nature Science Edition)**, 2015, 30(3): 46—51.
- [23] DUBNER H, ABATE J. Numerical inversion of Laplace transforms by relating them to the finite Fourier cosine transform[J]. **Journal of Associating for Computing Machinery**, 1968, 15(1): 115—123.
- [24] DUBINE F. Numerical inversion of Laplace transforms: an efficient improvement to Dubner & Abate's method[J]. **Compute Journal**, 1974, 17(4): 371—376.
- [25] CRUMP K S. Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier series approximation[J]. **Journal of Association for Computing Machinery**, 1976, 23(1): 89—96.