

DOI: 10.11779/CJGE202108004

# 盾构隧道泥水劈裂三维数值模拟

陈铁林, 周墨臻\*

(北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 泥水盾构法是一种重要的隧道施工方法, 在复杂工程条件下易发生泥水劈裂破坏, 目前国内外对泥水劈裂机理的研究还没有十分有效的方法。发展了基于弥散裂缝模型和流体体积法的泥水劈裂三维数值算法, 自主研发了相应的有限元计算程序, 开展了盾构隧道泥水劈裂的三维数值模拟, 研究了盾构隧道泥水劈裂形态、劈裂过程及其引起的地层位移变化, 对比分析了土体黏聚力、内摩擦角、弹性模量和隧道尺寸对泥水劈裂形态及劈裂压力的影响。结果表明, 劈裂面扩展至地表后, 将在盾构机顶部土层内形成下窄上阔的梯形状块体, 地层隆起变形主要发生在该块体内。相较于中小直径隧道, 大直径隧道的劈裂路径更短, 且启裂之后更容易扩展, 劈裂风险更高。

**关键词:** 盾构隧道; 泥水劈裂; 有限元; 劈裂扩展; 劈裂压力

中图分类号: TU461; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)08-1399-09

**作者简介:** 陈铁林(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事隧道及岩土工程研究工作。E-mail: tlchen1@bjtu.edu.cn。

## Three-dimensional numerical simulation of slurry fracturing during shield tunnelling

CHEN Tie-lin, ZHOU Mo-zhen

(Key Laboratory for Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The slurry shield tunnelling is an important construction method which is widely applied in tunnel engineering. This method can lead to slurry fracturing failure to the stratum under complex conditions. However, there is no readily available method which can be used to study the mechanism of slurry fracturing during shield tunnelling. To provide a convenient tool for this issue, a three-dimensional numerical method is developed based on the smeared crack model and the volume of fluid method. It is implemented numerically in our in-house finite element code and then used to simulate a three-dimensional shield tunnel, wherein the morphology and process of the slurry fracturing are simulated. The fracture-induced displacement is investigated. The effects of the soil cohesion, internal friction, modulus and tunnel size on the fracturing are studied. The numerical results indicate that when the fracture propagates till the stratum surface, a trapezoidal block with wide top and narrow bottom can occur in the stratum above the shield machine. This block is found to produce the most part of the upward deformation for the stratum. As compared with the tunnel with relatively small diameter, the large-diameter tunnel has shorter fracturing path toward the stratum surface and provides easier propagation condition for the fracture after occurrence. It is therefore concluded that the safety risk of fracturing is higher in the large-diameter tunnel.

**Key words:** shield tunnelling; slurry fracturing; finite element method; fracturing propagation; fracturing pressure

## 0 引言

泥水盾构工法因具有泥水压力控制精度高、施工扰动小、刀具磨损轻微等优势, 被广泛应用于不同地质条件的隧道工程, 尤其是软土中的水下隧道和大直径、长距离的盾构隧道<sup>[1-2]</sup>。盾构的发明和发展历史也是开挖面稳定性控制技术的发展史<sup>[2]</sup>。开挖面的稳定性控制一直以来都是盾构施工的核心问题。随着中国越江跨海通道、城市地下隧道等大型工程的增多, 经常会遇到大直径、高水压、浅覆土和复杂地质等工程条件, 导致开挖面稳定性的控制难度大, 施工风险高。

主要的挑战在于开挖面支护压力不易设定, 压力过小会导致开挖面出现主动失稳破坏<sup>[3-7]</sup>, 压力过大则会导致开挖面出现被动失稳破坏<sup>[8-14]</sup>。对泥水盾构, 被动失稳通常还伴随一种独特的破坏现象, 即泥浆冲破泥膜, 并劈裂地层, 也称为泥水劈裂<sup>[10-14]</sup>。

例如, 在江河湖海的中段, 盾构覆土厚度一般较

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0805400); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808034)

**收稿日期:** 2021-02-19

**\*通信作者** (E-mail: mzzhou@bjtu.edu.cn)

小且水压较大,泥水压力控制困难,稍有不慎就会导致泥浆压力过高,引发开挖面前方地层的泥浆突出,造成涌水事故<sup>[10]</sup>。再比如,盾构掘进过程经常遇到覆土厚度急剧减小的情况,若先前支护压力未及时降低,则容易发生开挖面的被动失稳破坏,并对地表建筑造成危害<sup>[9]</sup>。可见,如何避免泥水劈裂,是设定泥水盾构隧道最小覆土厚度时需要考虑的决定性因素<sup>[2]</sup>。

关于盾构泥水劈裂的研究,最早开始于日本东京湾海底隧道。Kurihara等<sup>[15]</sup>通过盾构模型试验研究了发生泥水劈裂的可能性,不足之处是加压液体采用的是水,与泥浆的黏度等特性还具有一定差别。为此,Mori等<sup>[16]</sup>通过室内试验研究了盾构尾端注浆的破裂现象,Yuan<sup>[17]</sup>完成了大量的泥水劈裂三轴试验。在上述试验中,由于试样尺寸和边界条件的限制,尚未观察劈裂的扩展过程。王滕等<sup>[14]</sup>通过采用盲孔试样开展了三轴劈裂试验,在试样强度较大时,可观察到劈裂面,但试样强度较小时,由于破坏严重而难以捕捉劈裂面。通过开展盾构模型试验,袁大军等<sup>[10]</sup>和刘晶晶等<sup>[18]</sup>分别针对黏土和砂土地层研究了泥浆扩散过程以及劈裂扩展过程。为了进一步克服室内模型试验尺寸较小导致难以完全捕捉劈裂的发生及扩展过程,袁大军等<sup>[11-12]</sup>开展了现场泥水劈裂试验,在试验结束后采用人工台阶法开挖揭露劈裂面的形态,但开挖过程本身可能也会对劈裂面产生一定扰动。可见,由于泥水劈裂现象发生在地层中,具有很强的隐蔽性,通过试验手段直接观察具体的劈裂过程仍具有较大的难度。

另一方面,对盾构支护压力范围,除采用开挖面失稳试验进行测定外,通常还采用极限分析进行计算,在涉及渗流场时,通常采用数值模拟得到孔压,再导入极限分析<sup>[5-6,9]</sup>。对支护压力的下限,无论是土压平衡式盾构还是泥水盾构,一般均采用主动失稳土压力<sup>[2,5-6,9]</sup>。对支护压力的上限,土压平衡式盾构一般采用被动失稳土压力<sup>[5-6,9]</sup>,但泥水盾构由于可能发生泥水劈裂而通常采用劈裂压力<sup>[13]</sup>。在计算泥水劈裂压力时,孔压是关键变量之一<sup>[13]</sup>。而如何计算孔压,本身又涉及到一系列强耦合的复杂物理过程。目前,对泥水劈裂力学行为的细节了解还十分有限,导致泥水盾构的开挖面稳定性控制难度较大,尤其对浅埋高水压的情况,发生泥水劈裂的安全风险高,迫切需要对地层泥水劈裂机制进行深入研究,但还没有十分有效的研究手段。

为此,本文开发了泥水劈裂三维数值模拟程序,进行了盾构隧道泥水劈裂三维动态过程的模拟,研究了泥水劈裂形态和发展过程,分析了土体黏聚力、内摩擦角和模量变化条件下中小直径和大直径隧道的泥

水劈裂形态和劈裂压力的变化规律。

## 1 计算方法简介

专门针对泥水劈裂的数值计算方法十分缺乏,因此从计算力学方面调研了一些相关的算法,以作为借鉴。从物理机制和力学行为上来看,泥水劈裂与水力压裂具有高度相似性。水力压裂是一项应用广泛的油气井增产措施,并随美国“页岩气革命”而迅速成为了计算力学的热点。虽然水力压裂模拟是一个非常棘手的问题,但由于受关注度高,目前已经形成了一系列的算法体系,文献众多,此处仅作简单介绍。

与水力压裂、劈裂或裂缝扩展相关的算法主要分为以下几类:有限元法<sup>[19]</sup>、扩展有限元法(XFEM)<sup>[20]</sup>、相场法<sup>[21]</sup>、无网格法<sup>[22]</sup>、粒子类方法<sup>[23]</sup>、连续-非连续耦合方法<sup>[24]</sup>等。每种方法都各有其优缺点,如何选择合适的算法,主要取决于应用场景,这是计算力学的一个典型特点。例如,有限元法一般基于弥散裂缝模型,数值实现方便。采用离散裂缝模型的有限元法目前已逐步被XFEM取代,XFEM具有求解精度高且允许裂缝在单元内任意扩展等优点,但精确捕捉裂缝面的几何关系则较为复杂,尤其是对三维的情形。

另一方面,泥水劈裂涉及的物理现象较为复杂。正如文献[20]所指出的,水力压裂面中的流体行为将对裂缝扩展具有至关重要的影响。同理,对泥水劈裂而言,泥浆从劈裂面向地层中的扩散效应也将会影响劈裂的扩展,数值模拟至少需考虑如下5个方面:①劈裂表面上流体压力引起的变形;②裂缝内流体流动;③裂缝扩展;④裂隙周围计算域的渗流与应力耦合;⑤岩土本构关系。有限元法虽然求解精度不如XFEM,但可以更方便地模拟上述复杂物理过程,关于精度方面的不足,则可在一定程度上通过使用较密计算网格来进行弥补。Chen等<sup>[19]</sup>发展了基于弥散裂缝模型和流体体积法的二维有限元计算程序,并分别用于劈裂注浆<sup>[19,25]</sup>和盾构隧道泥水劈裂的模拟<sup>[18,26]</sup>。基于类似的算法思路,朱旻等<sup>[27]</sup>在商业软件ABAQUS中通过二次开发实现了二维劈裂注浆模拟。

本文主要是在文献[19]的基础上,将二维算法推广至三维情况,并开展三维泥水劈裂过程的数值模拟。算法的主要原理是:通过应力场、流体场和劈裂破坏的耦合计算,实现泥浆压力作用下土体中劈裂发生和扩展的模拟。采用比奥理论计算土体和孔隙流体的相互作用,得出渗流固结过程中土体中任一点的孔隙流体压力和位移;裂缝的启裂和扩展考虑土体的拉、剪破坏,其中,拉破坏准则为最大拉应力准则,抗剪强度准则采用莫尔-库仑准则;裂缝单元的渗透性采用立

方定律; 采用流体体积法追踪注入泥浆的前锋。更多的算法细节可参考文献[19], 此处限于篇幅不作展开。

2 计算模型设置

三维计算模型的示意图见图 1 示。模拟区域尺寸为  $L \times L \times L$ , 盾构机直径为  $D$ , 覆土厚度为  $C$ , 坐标轴原点  $o$  位于盾构机刀盘圆心处,  $zoy$  平面为盾构机的纵对称面。计算中取  $L = 18\text{ m}$ ,  $C = D = 6\text{ m}$ 。模型地表为自由边界, 其他表面均约束法向位移为零, 超静泥水压力  $p_s$  作用点位于盾构机刀盘表面节点上。在模拟过程中, 超静泥浆压力作用于掘削面, 每级加压  $10\text{ kPa}$ , 加压至预设压力之后保持稳压。泥浆压力还包括泥浆自身重力, 该部分在计算中作为体力施加, 因而总的泥浆压力沿竖向为梯度分布。

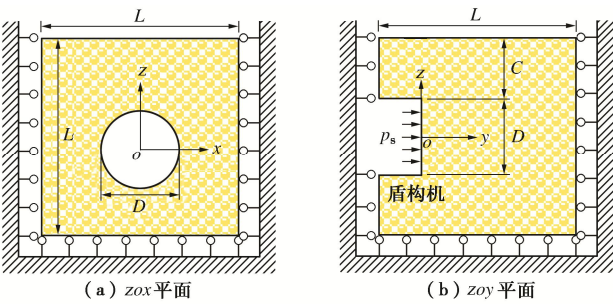


图 1 三维计算模型示意图

Fig. 1 Schematic of three-dimensional computational model

在数值模拟中, 土体应力应变本构关系采用邓肯-张  $E-B$  模型, 材料参数如表 1 所示。此外, 土体的密度取为  $1800\text{ kg/m}^3$ , 渗透系数取为  $1 \times 10^{-7}\text{ m/s}$ , 拉伸强度取为  $0.6\text{ kPa}$ 。

表 1 土体的邓肯张  $E-B$  模型参数

Table 1 Parameters of  $E-B$  model for soil

$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^\circ)$	$K$	$K_{ur}$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$
60	30	50	100	0.6	0.95	20	0.5

在计算中, 假定泥浆在劈裂缝中的流动满足<sup>[25]</sup>

$$q = -\frac{\gamma b^3}{12\mu} J \quad (1)$$

式中  $q$  为泥浆流量;  $\gamma$  为水的重度;  $b$  为裂缝的总宽度, 由单元劈裂前后的宽度变化值确定, 在计算过程中进行实时更新;  $J$  为水力梯度;  $\mu$  为动力黏度系数, 本文取为  $0.15\text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 对应文献[18]中制备的稳定浆液。

3 泥水劈裂机制分析

3.1 泥水劈裂过程

图 2 为裂缝贯通至地表时的各劈裂面示意图, 图 3 进一步给出了这些劈裂面的逐步发展过程。

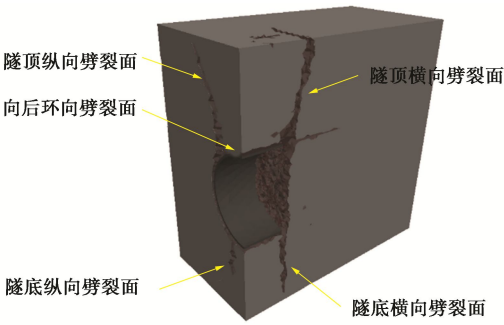
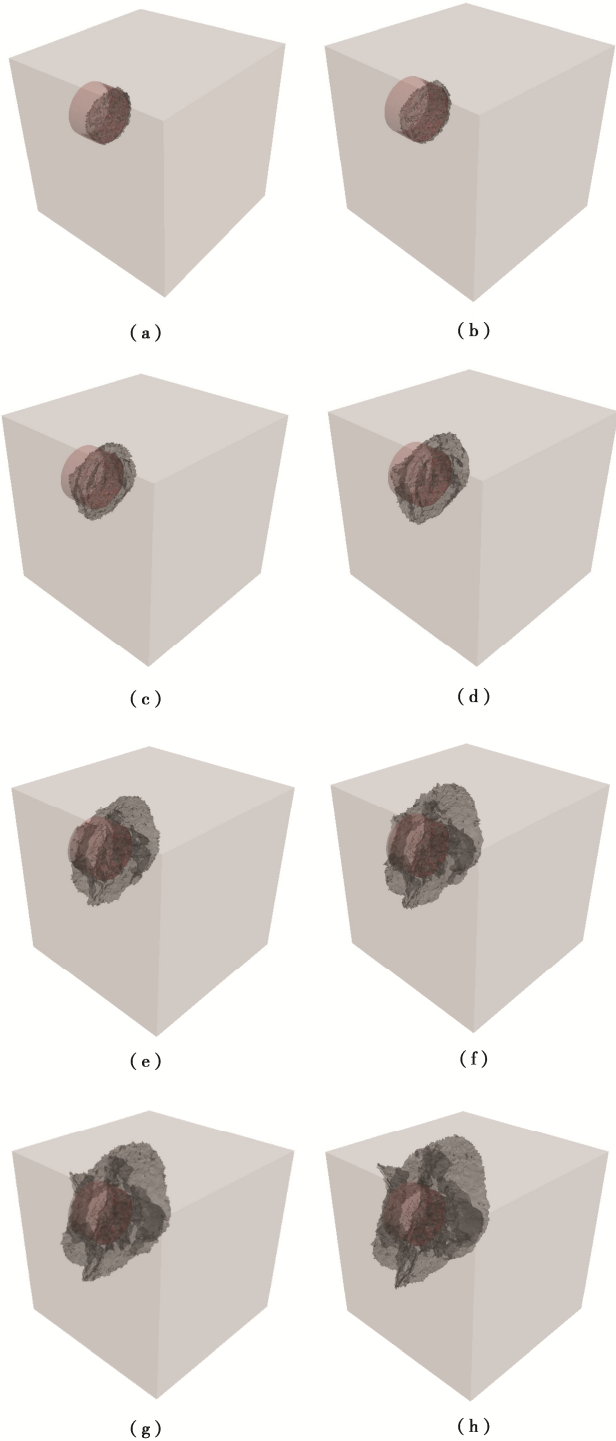


图 2 泥水劈裂各劈裂面示意图

Fig. 2 Schematic of slurry fracturing surfaces



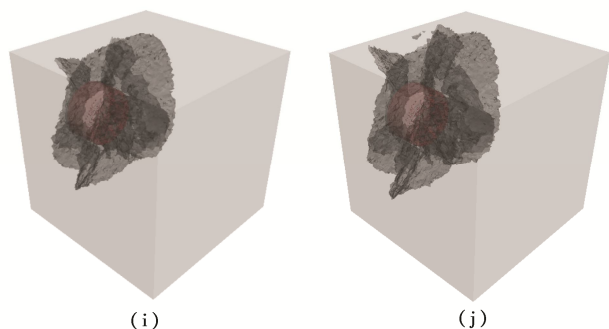


图3 泥水劈裂过程图

Fig. 3 Process of slurry fracturing

结合图2, 3, 按七个阶段分析如下: ①加压泥浆作用于掘削面, 对应图3(a)。②在高压泥浆作用下, 沿掘削面形成“横向劈裂面”, 并沿掘削面向周围地层扩展, 对应图3(b)。③在掘削面及其前方地层形成“向前环向劈裂面”, 并向掘进方向扩展。同时, 沿盾构机壁面(盾构机外壳与土体的接触面), 开始形成向后方扩展的“向后环向劈裂面”, 对应图3(c)。④“横向劈裂面”、“向前环向劈裂面”和“向后环向劈裂面”进一步发展, 对应图3(d)。⑤向后环向劈裂面挤压并推动周围地层, 在盾构机顶部和底部初步形成“纵向劈裂面”, 对应图3(e)。⑥各劈裂面进一步扩展, 其中, “横向劈裂面”向周围扩展并向地表延伸, “隧顶纵向劈裂面”和“环向劈裂面”向掘进方向扩展, “隧底纵向劈裂面”向下扩展, 对应图3(f)~(i)。⑦“隧顶横向劈裂面”和“隧顶纵向劈裂面”扩展至地表, 形成盾构机顶部土层的“突出”块体。同时, 其他劈裂面停止扩展, 对应图3(j)。

### 3.2 泥水劈裂形态

为了更直观地观察泥水劈裂形态, 对图3(j)沿3个坐标方向逐层取样, 如图4~6所示。

(1) 劈裂形态水平剖面图(由下到上)。如图4所示, 横向劈裂面在切削面附近现多分支形态, 而远离切削面时分支减少。在掘削面左右两侧产生2~3个劈裂面, 横向劈裂面在隧道左、右侧的扩展范围各约为 $1.0D$ ; 纵向劈裂面向掘进方向扩展范围约为 $1.0D$ , 如图4(d)~(h)所示。在隧道顶部及上方土层中, 劈裂面主要为横向劈裂面、纵向劈裂面和环向劈裂面, 如图4(b)~(e)所示。隧顶纵向劈裂面与隧道轴线平行, 由隧道顶部地层呈“斜直线”型扩展至地表。横向劈裂面向地表扩展并倾向掘进方向, 从图4(g)可以看出, 泥浆作用于掘削面, 产生掘削面劈裂面并向上和向下均发生扩展, 其中隧道底部土层内的扩展长度较短, 而在隧道顶部土层内劈裂可贯通至地表。这与深部土体处于侧限应力状态, 而浅部土层可产生

向上的自由位移有关。

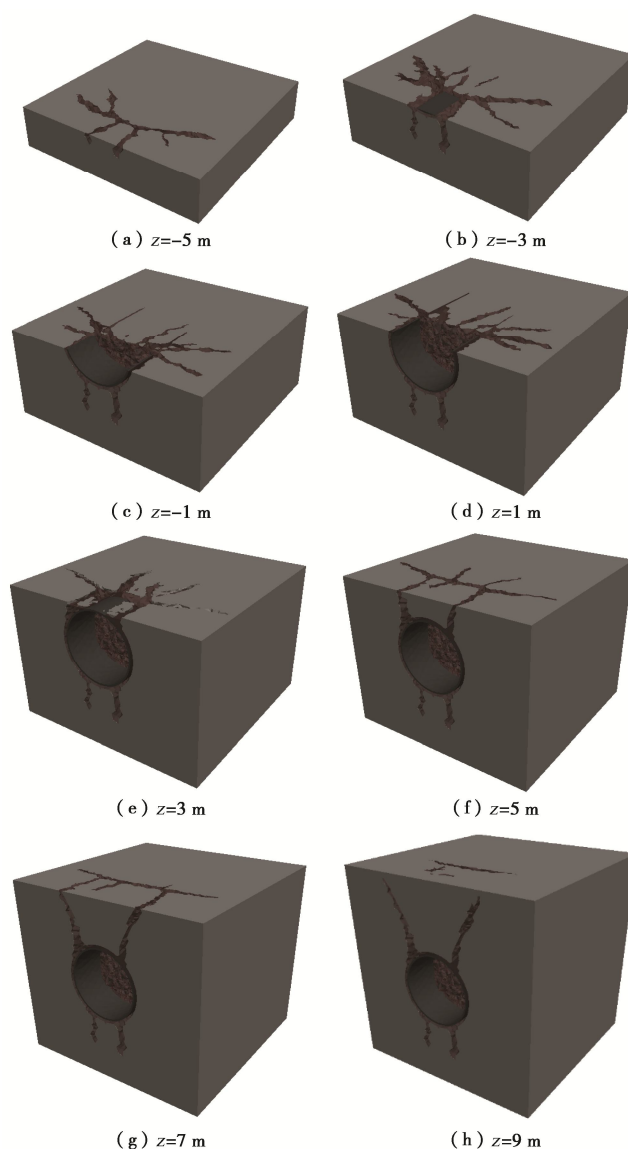


图4 泥水劈裂形态水平剖面

Fig. 4 Horizontal sections of morphology of slurry fracturing

(2) 劈裂形态纵切剖面图(由左到右)。如图5所示, 在掘削面两侧的土层中存在多个劈裂面。横向劈裂面沿掘削面形成, 并且由掘削面顶部呈“斜直线”型向上贯通至地表, 在隧道底部产生竖直向下约 $0.5D$ 的劈裂扩展, 如图5(c)和图5(d)所示。盾构隧道施工过程中的泥水劈裂, 贯通至地表的劈裂面主要由隧顶横向劈裂面和隧顶纵向劈裂面组成, 形成以劈裂面为边界的“突出”块体, 且呈“下窄上阔”的梯形形状。在 $C = 1.0D$ 条件下, 横向劈裂面从掘削面顶部呈“斜直线”型向上扩展直至贯通地表。

(3) 劈裂形态纵切剖面图(由后到前)。从图6(b)可知, 泥水劈裂沿掘削面的边缘向外大范围扩展。这是由于高压泥浆作用于掘削面, 在掘削面与隧道的交界面处产生应力集中, 在高压泥浆冲剪作用下, 产



生沿掘削面边缘向外扩展的泥水劈裂。由图 6 (c) ~ (h) 可知, 近掘削面地层中的劈裂面数目较多, 向前环向劈裂面向掘进方向的扩展长度约为  $1.0 D$ 。

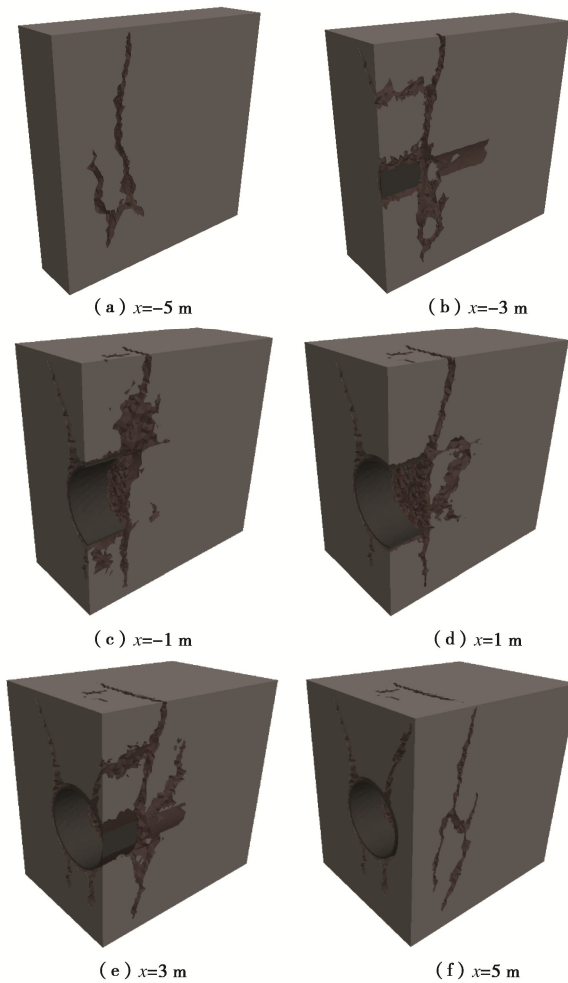


图 5 泥水劈裂形态纵切剖面

Fig. 5 Longitudinal sections of morphology of slurry fracturing

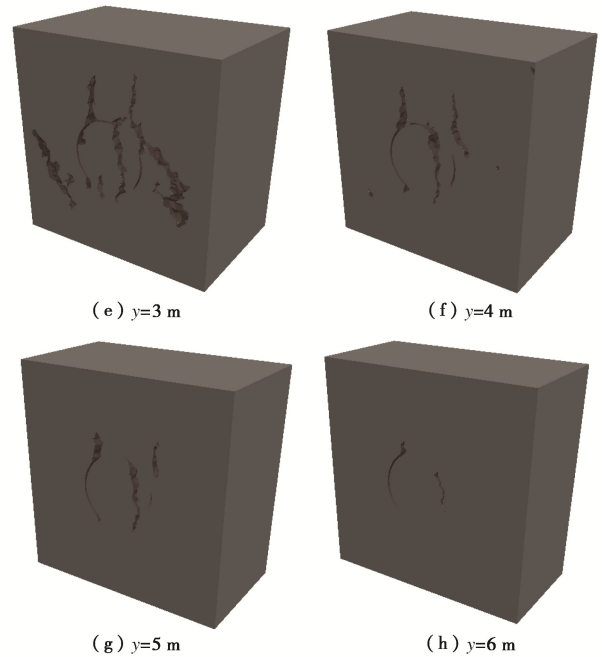
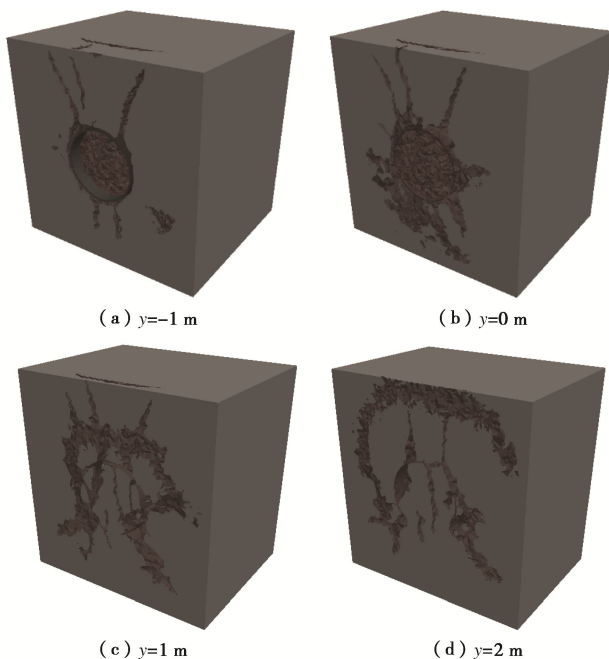


图 6 泥水劈裂形态横切剖面

Fig. 6 Transverse sections of morphology of slurry fracturing

## 4 参数影响性分析

在第 2 节所给出的计算参数基础上, 对隧道尺寸和土体参数的影响进行了计算分析。在研究某个参数的影响时, 其余计算参数保持与第 2 节一致。以下分析中涉及的土体弹性模量  $E = 5, 50, 100, 200 \text{ MPa}$ , 对应围压为一个大气压时邓肯张模型参数  $K = 50, 500, 1000, 2000$ 。

### 4.1 隧道尺寸对地层位移的影响

保持覆跨比  $C/D = 1$  不变, 另外模拟了盾构直径  $D = 15 \text{ m}$  的情形, 为此, 整体模型尺寸也进行了相应地扩大, 取  $L = 45 \text{ m}$ 。对泥水劈裂已经贯通至地表的最终时刻, 图 7 给出了土体竖向位移的计算结果。

由图 7 可知, 泥水劈裂引起的土体竖直向上的位移主要分布在隧道顶部形成的“突出”块体内; 而土体竖直向下的位移主要分布在隧道底部土层中。土体竖向位移的分布与泥水劈裂机制有关, 由前述的泥水劈裂过程可知, 向后环向劈裂面沿盾构机壁面扩展成环后, 劈裂面内的泥浆挤压、推动周围地层, 在盾构机顶部和底部地层中初步形成破坏面。破坏面像“断层”一样破坏了土层的连续变形, 使隧道上方土层的突出块体的竖直向上位移量值和隧道下方土层竖直向下的位移值明显地高于周围土层。对浅覆土隧道 ( $C = D = 6 \text{ m}$ ), 最大地层位移位于地表; 对深覆土隧道 ( $C = D = 15 \text{ m}$ ), 最大地层位移位于隧道顶部地层。

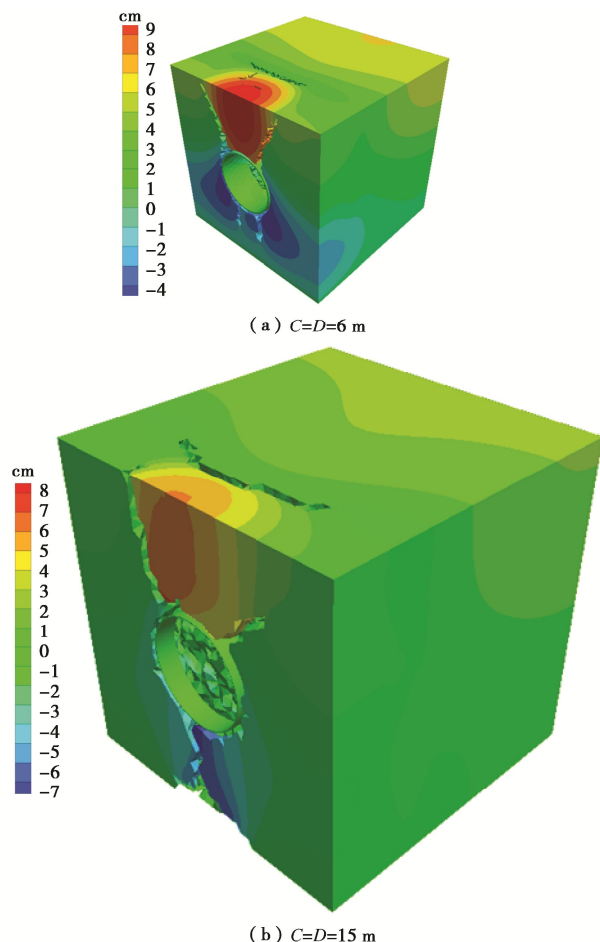


图7 最终时刻的竖向位移分布

Fig. 7 Vertical displacements at final instant

#### 4.2 土体参数变化对劈裂形态的影响

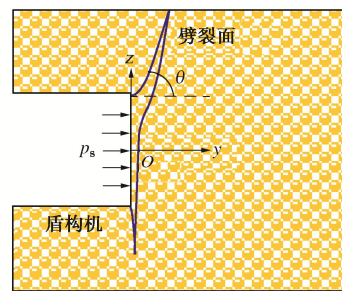
首先,在表1所示参数的基础上,研究了土体黏聚力 $c$ 的取值变化对劈裂形态的影响。此处劈裂形态使用劈裂扩展角 $\theta$ 来进行描述,即隧顶横向劈裂面与掘进方向的夹角,如图8(a)所示。

图8(b)给出了劈裂扩展角随黏聚力的变化过程。对中小直径隧道( $C=D=6\text{ m}$ ),劈裂扩展角 $\theta$ 随黏聚力 $c$ 增大而明显降低,降幅达到 $50^\circ$ 。当 $c$ 较小时, $\theta > 90^\circ$ ;当 $c$ 较大时, $\theta < 90^\circ$ 。对大直径隧道( $C=D=15\text{ m}$ ), $\theta$ 随 $c$ 增大而有略微降低,降幅约为 $10^\circ$ ,但 $\theta$ 始终大于 $90^\circ$ 。可见,对不同的黏聚力取值,大直径隧道的劈裂形态都更加直立,说明劈裂路径更短,劈裂风险更高。

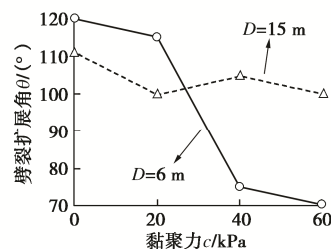
然后,研究了内摩擦角和弹性模量对劈裂形态的影响,如图9所示。由图9(a)可见,对中小直径隧道,劈裂扩展角 $\theta$ 随内摩擦角 $\varphi$ 增大而明显降低,降幅为 $45^\circ$ 。当 $\varphi$ 较小时, $\theta > 90^\circ$ ;当 $\varphi$ 较大时, $\theta < 90^\circ$ 。对大直径隧道, $\theta$ 随 $\varphi$ 增大而有略微降低, $\theta$ 由 $122^\circ$ 降至 $110^\circ$ ,降幅约 $10^\circ$ ,但 $\theta$ 始终大于 $90^\circ$ 。可见,当 $\varphi = 5^\circ$ 和 $10^\circ$ 时,大直径隧道的劈裂形态更加直立;而当 $\varphi = 20^\circ$ 和 $30^\circ$ 时,中小直径隧道的

劈裂形态较为直立。

由图9(b)可见,对大直径隧道,劈裂扩展角 $\theta$ 随弹性模量 $E$ 增大而由 $100^\circ$ 降至 $55^\circ$ ,降幅为 $45^\circ$ 。当 $E = 5\text{ MPa}$ 时, $\theta > 90^\circ$ ;当 $E \geq 50\text{ MPa}$ 时, $\theta < 90^\circ$ 。对中小直径隧道, $\theta$ 随 $E$ 增大而由 $75^\circ$ 降至 $28^\circ$ ,降幅为 $47^\circ$ ,并且始终保持 $\theta < 90^\circ$ 。可见,对中小直径和大直径隧道,随着 $E$ 由 $5\text{ MPa}$ 增大至 $200\text{ MPa}$ , $\theta$ 均出现约 $45^\circ$ 的大幅下降,大直径隧道的劈裂面更加直立。



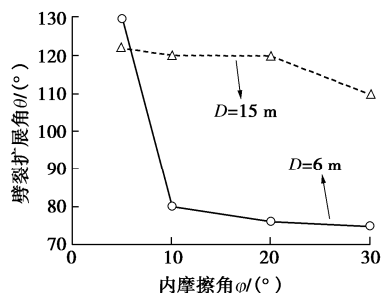
(a) 劈裂扩展角示意图



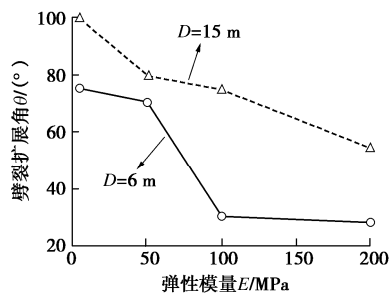
(b) 扩展角随黏聚力的变化

图8 黏聚力对劈裂形态的影响

Fig. 8 Effects of cohesion on morphology of slurry fracturing



(a) 内摩擦角的影响



(b) 弹性模量的影响

图9 内摩擦角和弹性模量对劈裂形态的影响

Fig. 9 Effects of internal friction angle and modulus on morphology of slurry fracturing

### 4.3 土体参数变化对劈裂压力的影响

图 10 给出了劈裂压力随土体参数的变化过程。图中, 启裂压力和扩展压力分别按照劈裂启裂和扩展时掘削面的平均泥水压力值统计得到。

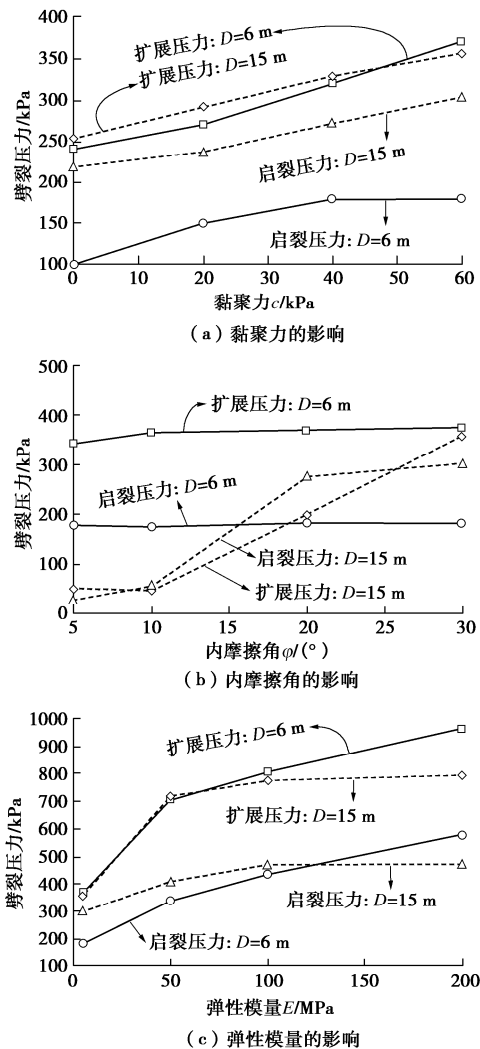


图 10 土体参数变化对劈裂压力的影响

Fig. 10 Effects of soil parameters on fracturing pressure

如图 10 (a) 所示, 对中小直径隧道和大直径隧道, 启裂压力和扩展压力均随  $c$  增大而稳步增长, 并且扩展压力始终高于启裂压力, 说明劈裂启裂后需进一步增大压力才能使劈裂扩展, 这与 Murdoch<sup>[28]</sup>在试验中观察到的现象一致。Murdoch<sup>[28]</sup>指出, 裂缝在启裂之后, 如果保持压力不变, 裂缝开口将保持张开但不扩展, 需增大压力裂缝才能进一步扩展, 即劈裂扩展压力高于启裂压力。对中小直径隧道, 扩展压力比启裂压力平均高出 147.5 kPa, 且二者差值随  $c$  增大而呈增大趋势。对大直径隧道, 扩展压力比启裂压力平均高出 49 kPa, 且二者差值基本保持稳定。

如图 10 (b) 所示, 对中小直径隧道, 随  $\varphi$  增加, 启裂压力基本保持不变, 扩展压力虽有一定增长, 但

增幅也不大, 且扩展压力始终高于启裂压力, 平均高出约 184 kPa。对大直径隧道: 随  $\varphi$  增加, 启裂压力和扩展压力均在整体上出现明显增大的趋势, 增幅分别为 274.6, 306.3 kPa; 在  $\varphi = 10^\circ, 20^\circ$  时, 出现启裂压力高于扩展压力的情况, 说明大直径隧道在该种条件下一旦启裂, 则扩展不可避免, 劈裂风险高。可见, 大直径隧道的启裂压力和扩展压力对参数  $\varphi$  具有强烈的敏感性, 当  $\varphi$  较小时, 很小的压力就可以引起劈裂破坏, 比传统预测的启裂压力和扩展压力都要小, 表明传统预测方法可能偏于不安全。

如图 10 (c) 所示, 当弹性模量  $E$  由 5 MPa 增至 50 MPa 时, 不管是中小直径隧道还是大直径隧道, 启裂压力和扩展压力均大幅增长。当  $E$  由 50 MPa 增至 200 MPa 时, 启裂压力和扩展压力在中小直径隧道中大幅增长而在大直径隧道中基本保持稳定。

综合图 10 中 3 种参数的影响还可以看出, 扩展压力与启裂压力的差值在中小直径隧道中较高, 而在大直径隧道中较低, 表明劈裂启裂后, 大直径隧道更容易发生劈裂的扩展现象。

## 5 结 论

本文探讨和分析了盾构隧道泥水劈裂的机制以及影响因素, 主要得到以下 4 点结论。

(1) 采用弥散裂缝模型和流体体积法, 发展了可用于模拟泥水劈裂的三维数值计算方法, 自主研发了相应的有限元数值模拟程序, 开展了盾构隧道泥水劈裂的三维数值模拟。

(2) 计算结果表明, 横向劈裂面沿掘削面向周围扩展, 在隧道左右两侧的扩展范围约为 1 倍盾构直径。横向劈裂面和纵向劈裂面均由掘削面顶部呈斜直线型扩展至地表, 形成盾构机顶部土层的“突出”块体, 并使得该块体呈下窄上阔的梯形状。泥水劈裂引起的地层隆起变形主要发生在这一“突出”块体内。

(3) 不同参数的结果表明, 大直径隧道的劈裂面一般更加直立, 劈裂路径更短, 风险更高。泥水劈裂的扩展压力一般要高于启裂压力, 即启裂之后需进一步增大压力才能使劈裂扩展。大直径隧道的扩展压力与启裂压力的差值更小, 即启裂之后更容易扩展。

(4) 泥水劈裂的启裂压力和扩展压力均随土体黏聚力和弹性模量的增加而增大。内摩擦角对中小直径隧道的劈裂压力影响不大, 但对大直径隧道的影响很显著。尤其对内摩擦角较小的情况, 大直径隧道的启裂压力和扩展压力均明显小于传统预测值, 表明传统预测方法偏不安全, 容易导致发生劈裂破坏。

## 参考文献:

- [1] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2161 - 2172. (WANG Meng-shu. Current developments and technical issues of underwater traffic tunnel—discussion on construction scheme of Taiwan Strait undersea railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2161 - 2172. (in Chinese))
- [2] 袁大军, 沈翔, 刘学彦, 等. 泥水盾构开挖面稳定性研究[J]. 中国公路学报, 2017, **30**(8): 24 - 37. (YUAN Da-jun, SHEN Xiang, LIU Xue-yan, et al. Research on excavation face stability of slurry shield tunneling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(8): 24 - 37. (in Chinese))
- [3] 陈孟乔, 刘建坤, 肖军华, 等. 高水压条件下泥水盾构隧道开挖面支护压力特性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊2): 163 - 169. (CHEN Meng-qiao, LIU Jian-kun, XIAO Jun-hua, et al. Face supporting pressure of slurry shield tunnel under high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 163 - 169. (in Chinese))
- [4] 金大龙, 袁大军, 郑浩田, 等. 高水压条件下泥水盾构开挖面稳定离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1653 - 1660. (JIN Da-long, YUAN Da-jun, ZHENG Hao-tian, et al. Centrifugal model tests on face stability of slurry shield tunnels under high water pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1653 - 1660. (in Chinese))
- [5] 陈仁朋, 尹鑫晟, 李育超, 等. 泥水盾构泥膜渗透性及其对开挖面稳定性影响[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(11): 2102 - 2108. (CHEN Ren-peng, YIN Xin-sheng, LI Yu-Chao, et al. Permeability of filter cake and its influence on face stability of slurry shield-driven tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 2102 - 2108. (in Chinese))
- [6] 曹成勇, 施成华, 雷明锋, 等. 浅埋透水地层泥水盾构开挖面极限支护压力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(9): 3131 - 3139. (CAO Cheng-yong, SHI Cheng-hua, LEI Ming-feng, et al. Limit support pressure for excavation face of shallow slurry shield-driven tunnel in water permeable strata[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(9): 3131 - 3139. (in Chinese))
- [7] 刘海宁, 张亚峰, 刘汉东, 等. 砂土地层中泥水盾构掌子面主动破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(3): 572 - 581. (LIU Hai-ning, ZHANG Ya-feng, LIU Han-dong, et al. Experimental study on active failure modes of slurry shield-driven tunnel faces in sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(3): 572 - 581. (in Chinese))
- [8] 李 昀, 张子新, 张冠军. 泥水平衡盾构开挖面稳定模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(7): 1074 - 1079. (LI Yun, ZHANG Zi-xin, ZHANG Guan-jun. Laboratory study on face stability mechanism of slurry shields[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 1074 - 1079. (in Chinese))
- [9] 李凤涛, 唐晓武, 刘 维, 等. 浅埋泥水盾构隧道开挖面被动失稳分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, **48**(7): 1809 - 1816. (LI Feng-tao, TANG Xiao-wu, LIU Wei, et al. Blow-out failure analysis of tunnel face in shallow slurry shield tunneling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, **48**(7): 1809 - 1816. (in Chinese))
- [10] 袁大军, 黄清飞, 小泉淳, 等. 水底盾构掘进泥水喷发现象研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(11): 2296 - 2301. (YUAN Da-jun, HUANG Qing-fei, KOIZUMI A, et al. Study on slurry-water gushing during underwater shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(11): 2296 - 2301. (in Chinese))
- [11] 袁大军, 黄清飞, 李兴高, 等. 盾构掘进黏土地层泥水劈裂伸展现象研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(5): 712 - 717. (YUAN Da-jun, HUANG Qing-fei, LI Xing-gao, et al. Hydraulic fracture extending during slurry shield tunneling in cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(5): 712 - 717. (in Chinese))
- [12] 刘学彦, 袁大军, 郭小红. 现场泥水劈裂试验及应用研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1901 - 1907. (LIU Xue-yan, YUAN Da-jun, GUO Xiao-hong. Test and application of in-situ slurry fracturing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1901 - 1907. (in Chinese))
- [13] 刘学彦, 王复明, 袁大军, 等. 泥水盾构支护压力设定范围及其影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 908 - 917. (LIU Xue-yan, WANG Fu-ming, YUAN Da-jun, et al. Range of support pressures for slurry shield and analysis of its influence factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(5): 908 - 917. (in Chinese))



- [14] 王 滕, 袁大军, 金大龙, 等. 泥水盾构中劈裂压力影响因素研究[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(增刊 1): 31 - 36. (WANG Teng, YUAN Da-jun, JIN Da-long, et al. Influence factors of fracturing pressure during slurry shield tunnelling[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(S1): 31 - 36. (in Chinese))
- [15] KURIHARA K, MORI A, TAMURA M. Experiment study on fracturing phenomenon by mud suspension in slurry type shield[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1988, **397**: 95 - 104.
- [16] MORI A, TAMURA M. Hydraulic fracturing phenomenon during shield tunneling in cohesive soil (No.2)- Hydraulic fracturing phenomenon by backfill grouting pressure[C]// The 24th Japanese Soil Engineering Presentation, 1990: 1773 - 1774. (in Japanese)
- [17] YUAN Da-jun. Experiment Study on Hydraulic Fracturing During Slurry Type Shield Tunneling in Cohesive Soil[D]. Tokyo: Waseda University, 2002. (in Japanese)
- [18] 刘晶晶, 陈铁林, 姚茂宏, 等. 砂层盾构隧道泥水劈裂试验与数值研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, **54**(9): 1715 - 1726. (LIU Jing-jing, CHEN Tie-lin, YAO Mao-hong, et al. Experimental and numerical study on slurry fracturing of shield tunnels in sandy stratum[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, **54**(9): 1715 - 1726. (in Chinese))
- [19] CHEN T L, ZHANG L Y, ZHANG D L. An FEM/VOF hybrid formulation for fracture grouting modelling[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **58**: 14 - 27.
- [20] JAFARI A, VAHAB M, KHALILI N. Fully coupled XFEM formulation for hydraulic fracturing simulation based on a generalized fluid leak-off model[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, **373**: 113447.
- [21] YI L P, WAISMAN H, YANG Z Z, et al. A consistent phase field model for hydraulic fracture propagation in poroelastic media[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, **372**: 113396.
- [22] GHAFFARIPOUR O, ESGANDANI G A, KHOSHGHALB A, et al. Fully coupled elastoplastic hydro-mechanical analysis of unsaturated porous media using a meshfree method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, **43**(11): 1919 - 1955.
- [23] 孙 锋, 张顶立, 陈铁林, 等. 土体劈裂注浆过程的细观模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 474 - 480. (SUN Feng, ZHANG Ding-li, CHEN Tie-lin, et al. Meso-mechanical simulation of fracture grouting in soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 474 - 480. (in Chinese))
- [24] 王理想, 唐德泓, 李世海, 等. 基于混合方法的二维水力压裂数值模拟[J]. 力学学报, 2015, **47**(6): 973 - 983. (WANG Li-xiang, TANG De-hong, LI Shi-hai, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing by a mixed method in two dimensions[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, **47**(6): 973 - 983. (in Chinese))
- [25] 程少振, 陈铁林, 郭玮卿, 等. 土体劈裂注浆过程的数值模拟及浆脉形态影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 484 - 491. (CHENG Shao-zhen, CHEN Tie-lin, GUO Wei-qing, et al. Numerical simulation of fracture grouting and influencing factors for morphology of grout veins[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 484 - 491. (in Chinese))
- [26] CHEN T L, PANG T Z, ZHAO Y, et al. Numerical simulation of slurry fracturing during shield tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **74**: 153 - 166.
- [27] 朱 旻, 龚晓南, 高 翔, 等. 基于流体体积法的劈裂注浆有限元分析[J]. 岩土力学, 2019, **40**(11): 4523 - 4532. (ZHU Min, GONG Xiao-nan, GAO Xiang, et al. Volume of fluid method based finite element analysis of fracture grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(11): 4523 - 4532. (in Chinese))
- [28] MURDOCH L C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments: Part 2 Propagation[J]. Géotechnique, 1993, **43**(2): 267 - 276.