

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.020

# 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏数值模拟

申政<sup>1,2</sup>, 闵凡路<sup>1,2</sup>, 柏煜新<sup>1,2</sup>, 方忠强<sup>3</sup>, 张雷<sup>4</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点试验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;

4. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100102)

**摘要:** 基于 Mohr-Coulomb 强度准则和不相关联的流动法则, 采用 Abaqus 模拟砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏, 分析埋深比  $C/D$ 、地层上覆水位高度  $H$ 、砂土内摩擦角  $\varphi$  对地表位移的影响, 并探讨开挖面前方土体破坏模式。结果表明: 标准开挖面支护压力与  $C/D$ 、 $H$  和砂土  $\varphi$  均呈正相关关系; 地表位移受  $C/D$  变化影响较大,  $C/D$  由 0.8 增大到 1.5, 最大纵向和横向位移值分别减小 80% 和 86%; 静水压力仅会限制横向地表位移的发展, 对纵向地表位移的影响较小;  $C/D$  较小时, 被动破坏模式呈现延伸至地表的倒棱台形, 属于整体破坏;  $C/D$  增大至 4.3 时, 土拱无法达到地表, 属于局部破坏。

**关键词:** 水下隧道; 砂土地层; 开挖面; 被动破坏; 数值模拟; 地表位移; 破坏模式

**中图分类号:** U452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)01-0158-09

## Numerical simulation of passive failure of underwater shield tunnel excavation face in sandy soil layer

SHEN Zheng<sup>1,2</sup>, MIN Fanlu<sup>1,2</sup>, BAI Yuxin<sup>1,2</sup>, FANG Zhongqiang<sup>3</sup>, ZHANG Lei<sup>4</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 4. CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China)

**Abstract:** Based on the Mohr-Coulomb strength criterion and uncorrelated flow rule, Abaqus is used to simulate the passive failure of the excavation surface of underwater shield tunnel in sandy soil layer, and influences of the buried depth ratio  $C/D$ , height of overlying water level  $H$  and friction angle  $\varphi$  in sandy soil on the surface displacement are analyzed. The failure mode of the soil in front of the excavation face is also discussed. The results show that the support pressure of standard excavation face is related to  $C/D$ , sand  $\varphi$ , and there is a positive correlation between them; the surface displacement is greatly affected by the change of  $C/D$ , and when  $C/D$  increases from 0.8 to 1.5, the maximum longitudinal and transverse displacement decrease by 80% and 86% respectively; hydrostatic pressure will only limit the development of lateral surface displacement and has little effect on longitudinal surface displacement; when  $C/D$  is small, the passive failure mode presents an inverted pyramid shape extending to the surface, which belongs to overall failure; when  $C/D$  increases to 4.3, the soil arch cannot reach the ground surface, which belongs to local damage.

**Key words:** underwater tunnel; sandy stratum; excavation face; passive failure; numerical simulation; surface displacement; failure mode

盾构法以其对周围环境影响小、安全、高效等优势, 在城市地铁、水下隧道建设中得到了广泛应用。盾构隧道施工的前提是保证开挖面稳定, 设定合理的开挖面支护压力是保障开挖面稳定、控制地层变形的关键。开挖面支护压力设定过小, 易导致开挖面发生坍塌等主动破坏事故; 而开挖面支护压力设定过大, 则易引发开挖面地层隆起等被动破坏险情, 造成工程停工、威胁施工人员安全等危害<sup>[1-3]</sup>。目前盾构隧道开挖面主动

**基金项目:** 国家自然科学基金(520030611, 517034911); 2020 年江苏省省级战略性新兴产业发展专项资金(苏发改高技[2020]645)

**作者简介:** 申政(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事盾构隧道研究。E-mail: shenzheng0047@126.com

**通信作者:** 闵凡路(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事盾构隧道研究。E-mail: minfanlu@126.com

**引用本文:** 申政, 闵凡路, 柏煜新, 等. 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 158-166.

SHEN Zheng, MIN Fanlu, BAI Yuxin, et al. Numerical simulation of passive failure of underwater shield tunnel excavation face in sandy soil layer[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 158-166.

破坏的研究较为完善,国内外众多学者主要运用模型试验<sup>[4-5]</sup>、数值模拟<sup>[6-7]</sup>和极限平衡分析<sup>[8-9]</sup>等方法研究开挖面主动破坏极限支护压力的设定和地表位移的预测,而盾构隧道施工引起的开挖面被动破坏问题也逐渐引起工程界的关注。如荷兰的 Heinenroord 第二隧道<sup>[10]</sup>因支护压力设定过大导致开挖面发生被动破坏,工程延期半年;广州市地铁1号线烈士陵园—公园站区间<sup>[11]</sup>采用土压盾构进行施工,因支护压力设定过大而导致地表隆起,路面最大隆起值达 152 mm,超过警戒值范围达 200 m<sup>2</sup>。这些事故表明,开挖面的被动破坏对盾构隧道安全施工有较大的威胁。

目前关于盾构隧道开挖面被动破坏问题的研究大多依据极限分析法<sup>[12-14]</sup>和极限平衡法<sup>[15-16]</sup>,从极限支护压力解析解<sup>[17]</sup>和被动破坏三维楔形体模型<sup>[18]</sup>等理论进行,也有一些学者通过数值模拟和离心机试验的方法对开挖面被动破坏支护压力、地表位移和破坏模式开展研究。齐立志<sup>[19]</sup>利用 Abaqus 对饱和砂土的开挖面被动破坏进行模拟,发现盾构隧道被动破坏会造成开挖面前方地表大范围隆起,隆起区域呈现上宽下窄的倒锥形,开挖面被动破坏的支护压力随埋深比  $C/D$  ( $C$  为隧道埋深,  $D$  为隧道直径) 的增大而增大; Wong 等<sup>[20]</sup>通过离心机试验研究开挖面被动破坏情况,发现  $C/D$  会影响最大隆起值的纵向位置,  $C/D$  越大地表隆起值越小,最大隆起值出现的纵向位置距离开挖面越远,当  $C/D=2.2$  时,开挖面破坏区域与地表相连,而  $C/D=4.3$  时,开挖面呈局部破坏;陈仁朋等<sup>[21]</sup>采用 Abaqus 对砂土中盾构隧道开挖面被动破坏进行模拟,结果表明,随着支护压力的增大,开挖面位移先缓慢线性增加,至出现近似线性的急剧增加时,开挖面前方土体已经达到整体被动破坏阶段。现有的研究几乎未考虑盾构隧道建设中存在地层上覆水的情况。

本文针对砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏引发地表位移的问题,采用 Abaqus 模拟砂土中水下盾构隧道开挖面被动破坏情况,研究埋深比  $C/D$ 、地层上覆水位高度  $H$ 、砂土内摩擦角  $\varphi$  3 种影响因素下盾构隧道开挖面被动破坏过程中的地表位移,并分析相应的破坏模式,为开挖面支护压力的设定、沉降预测提供参考。

## 1 数值计算

### 1.1 模型建立及模拟方案

采用有限元分析软件 Abaqus 模拟砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏情况。为方便结果的验证和比较,参考 Wong 等<sup>[20]</sup>的离心机试验结果,假定隧道的直径  $D=5$  m,模型长 70 m、宽 40 m、高 40 m,考虑隧道具有对称性,建立 1/2 隧道模型(见图 1)进行模拟。模型的边界条件为:四周为法向约束,上表面为自由边界,下表面为固定约束,单元采用 8 节点的线性单元(C3D8R),渗流边界为不透水边界(Abaqus 默认)。地层采用丰浦砂模拟,其基本性质参数<sup>[22]</sup>为:内摩擦角  $37^\circ$ ,饱和容重  $19 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量  $20 \text{ MPa}$ ,泊松比  $0.35$ ,静止侧压力系数  $0.4$ 。计算中本构关系遵循 Mohr-Coulomb 强度准则,流动法则遵循不相关联的剪切屈服流动法则。

分别考虑  $H(0$  和  $5 \text{ m})$ 、 $C/D(0.8、1.5、2.2、3、4.3)$  和  $\varphi(35^\circ、37^\circ、40^\circ)$ ,共 30 种方案,见表 1。由于砂土的渗透系数较大,因此在模拟过程中不考虑超静孔隙水压力的影响<sup>[23]</sup>。为了消除由于土体容重及隧道直径的改变对极限支护压力产生的影响,引入标准开挖面支护压力<sup>[24]</sup>(式 1)。同时将盾构隧道开挖面中点处的水平位移( $S_x$ )进行无量纲处理,定义标准开挖面位移  $S_x/D$ 。

$$N_{\gamma m} = \frac{\sigma}{D\gamma'} \quad (1)$$

式中: $N_{\gamma m}$  为标准开挖面支护压力,1; $\sigma$  为盾构开挖面中心点处极限支护压力, kPa;  $\gamma'$  为土体有效容重,  $\text{kN/m}^3$ 。

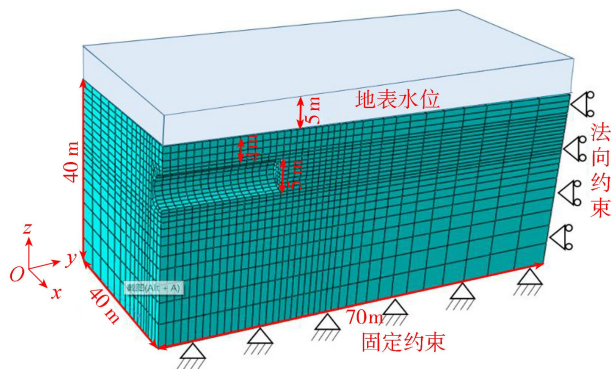


图1 有限元模型网格划分(以  $C/D=0.8$  为例)

Fig. 1 Mesh generation of finite element model (taking  $C/D=0.8$  as an example)

表 1 数值模拟方案

Table 1 Numerical simulation scheme

编号	H/m	C/D	$\varphi/(\circ)$	编号	H/m	C/D	$\varphi/(\circ)$
1~5	0	0.8、1.5、2.2、3.0、4.3	35	16~20	5	0.8、1.5、2.2、3.0、4.3	35
6~10	0	0.8、1.5、2.2、3.0、4.3	37	21~25	5	0.8、1.5、2.2、3.0、4.3	37
11~15	0	0.8、1.5、2.2、3.0、4.3	40	26~30	5	0.8、1.5、2.2、3.0、4.3	40

1.2 数值计算及模型可靠性验证

数值计算具体过程如下:①建立地层模型,施加初始应力状态,进行地应力平衡,并获取隧道开挖面处的地应力值;②开挖隧道,同时对隧道侧面进行径向约束,并在隧道开挖面处施加与地应力相等的梯形支护压力;③逐级施加支护压力,记录开挖面土体的位移和应力状态;④当支护压力增加很小,而土体出现大变形时,可认为开挖面发生失稳,即终止计算。

提取 30 组模拟工况下隧道开挖面中心点处的位移和支护压力数据,作荷载位移曲线,图 2 为编号 6、7 的位移-荷载曲线。从图 2 可以发现,荷载位移曲线都较为光滑,没有明显的破坏阶段,其他编号组计算结果与之类似。采用“双切线法”确定标准开挖面被动破坏极限支护压力<sup>[25]</sup>,其结果见表 2。由表 2 可知,标准开挖面被动破坏极限支护压力与 C/D、H、 $\varphi$  的变化均呈正相关关系,随着地表位移 C/D 的增大,极限支护压力增长最为明显。

表 2 标准开挖面被动破坏极限支护压力

Table 2 Limit support force table of passive failure at standard excavation face

编号	$N_{ym}$	编号	$N_{ym}$	编号	$N_{ym}$	编号	$N_{ym}$	编号	$N_{ym}$
1	12.5	7	32	13	66	19	86	25	145
2	23	8	58	14	100	20	140	26	25
3	50	9	83	15	120	21	22	27	55
4	77	10	115	16	20	22	43	28	72
5	105	11	15.5	17	36	23	63	29	110
6	14	12	27	18	54	24	90	30	155

选取盾构隧道 C/D 分别为 0.8、1.5、2.2、4.3 ( $H=0$ 、 $\varphi=37^\circ$ ) 进行数值模拟,得到标准被动破坏极限支护压力,见图 3,并与 Leca 等<sup>[26]</sup> 极限分析法及 Wong 等<sup>[20]</sup> 离心机试验的结果进行对比。由图 3 可知,数值模拟得到的支护压力与离心机试验得到支护压力都处于 Leca 等<sup>[26]</sup> 的极限分析法的上下限之内,总体发展趋势为开挖面极限支护压力随 C/D 的增加而增大;数值模拟结果与 Wong 等<sup>[20]</sup> 离心机试验的结果更为相近,尤其在 C/D 较小时(0.8、1.5),表明本文模型的建立、参数的选取以及计算结果是可靠的,可以进行砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏地表位移分析。

2 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏地表位移分析

为了揭示不同影响因素下开挖面被动破坏引起的地表位移变化规律,以及破坏过程中开挖面前方土体的破坏模式,根据模拟结果作不同条件下地表位移曲线以分析地表位移变化规律,并通过破坏应力和位移矢量图分析开挖面前方土体的破坏模式。

2.1 开挖面被动破坏纵向地表位移规律

图 4 为纵向地表位移随 C/D 变化的规律。从图 4 可以看出,当 C/D=0.8 时,纵向地表位移呈现明显的

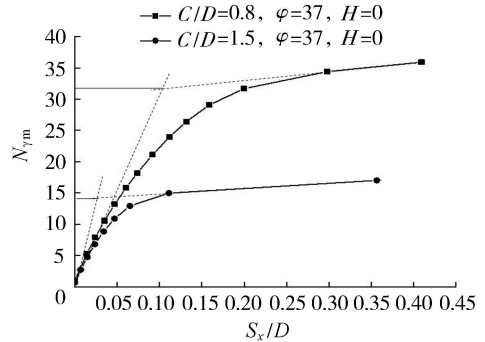


图 2 位移-荷载曲线

Fig. 2 Load-displacement curve

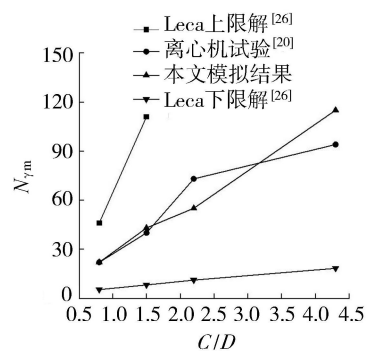


图 3 标准开挖面支护压力可靠性对比  
Fig. 3 Reliability comparison of support force of standard excavation face

倒 U 形,最大隆起可达 18.58% D;当  $C/D=1.5$  时,纵向地表位移略有隆起,最大隆起值约为 3.75% D;当  $C/D$  超过 1.5 时,纵向地表位移曲线几乎没有隆起。由此可知, $C/D$  对纵向地表位移的影响较大,随着  $C/D$  的增大,开挖引起的纵向地表位移逐渐减小, $C/D$  仅由 0.8 增大到 1.5,最大位移即减小 80%。

图 5 为  $H=5\text{ m}$ ,  $\varphi=37^\circ$ ,  $C/D=0.8$  和 1.5,  $S_x/D=0.1$ 、0.2、0.3 情况下,地表轴线处的地表位移。从图 5 可以看出,在  $C/D$  较小时,标准开挖面位移对纵向地表位移的影响较大。随着标准开挖面位移的增大,纵向地表位移曲线的倒 U 形愈加明显,最大隆起值增大约 11 倍;随着  $C/D$  的增大,标准开挖面位移对纵向地表位移的影响降低,在  $C/D$  为 1.5 时,随着标准开挖面位移的增大,最大隆起值增大约 8 倍,并且最大隆起值发生的位置向远离开挖面的方向发展。由此可知,随着标准开挖面位移的不断增大,地表隆起值也随之变大,且最大隆起位置也逐渐远离开挖面,这种影响在  $C/D$  较小时尤为明显。

为探究纵向地表位移随  $\varphi$  和  $H$  的变化规律,并考虑到  $C/D$  较大时纵向地表位移值较小,选取  $C/D=0.8$ 、 $S_x/D=0.3$  时的纵向地表位移作为参考值。图 6 为纵向地表位移随  $\varphi$  和  $H$  的变化规律。由图 6 可知, $H$  的变化对纵向地表位移的影响不大, $H$  从 0 增长到 5 m,最大地表隆起值减小 5%~7%; $\varphi$  的变化对纵向地表位移的影响也不大,随着  $\varphi$  的增大,地表位移随之减小, $\varphi$  每增大  $2^\circ$ ,最大地表隆起约下降 6%,最大地表位移发生位置略微远离开挖面。这是由于随着砂土  $\varphi$  的增大,破坏区受到的摩擦力增大,从而阻碍了土体位移的发展<sup>[27]</sup>。摩擦力的增大也致使隧道开挖面需要更大的支护压力而避免发生破坏,即随着隧道  $C/D$  的增大,支护压力的增大使得地表位移最大位置更加远离开挖面。

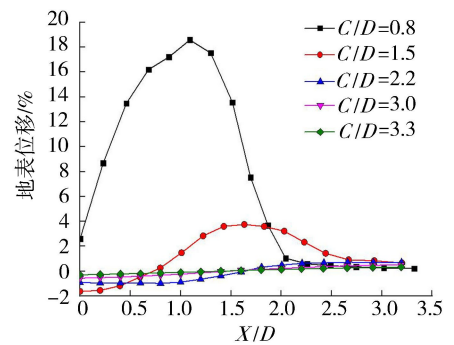


图 4 纵向地表位移随埋深比变化  
Fig. 4 Variation of longitudinal surface displacement with buried depth ratio

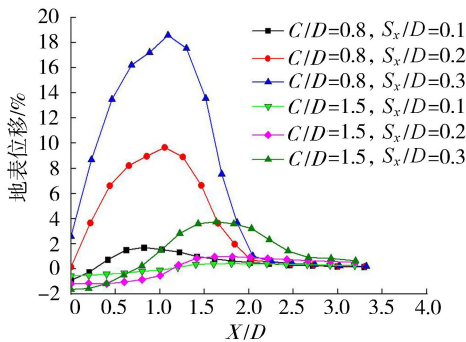


图 5 纵向地表位移随标准开挖面位移变化  
Fig. 5 Variation of longitudinal surface displacement with displacement of standard excavation surface

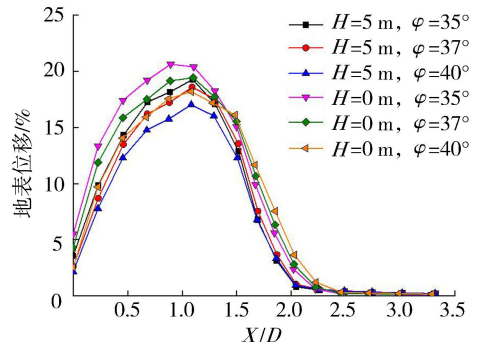


图 6 纵向地表位移随内摩擦角和地层上覆水位高度变化  
Fig. 6 Variation of longitudinal surface displacement with friction angle and overlying water level height

### 2.2 开挖面被动破坏横向地表位移规律

图 7 为  $H=5\text{ m}$ 、 $\varphi=37^\circ$  的情况下距开挖面  $2D$  处的横向地表位移随  $C/D$  的变化情况。由图 7 可知, $C/D$  为 0.8 和 1.5 时,横向地表位移显示出明显的倒 U 形; $C/D$  为 2.2 时,地表略有隆起; $C/D$  为 3.0 和 4.3 时,地表隆起值很小。横向地表隆起的范围为  $-3D \sim 3D$ 。横向地表位移值受  $C/D$  变化的影响较大,随着  $C/D$  的增大,最大横向地表位移值逐渐减小,减小幅度可达 86%。

由于  $C/D$  较大时横向地表位移值较小,且由于软件的原因,使得距轴线较近处的地表位移小于轴线远端地表,因此选择  $C/D$  分别为 0.8、1.5、2.2 情况下的横向地表位移曲线进行高斯拟合,拟合结果如图 8 所示。由图 8 可知,3 组曲线高斯拟合效果均较好, $C/D$  为 2.2 的位移曲线数据点基本全部位于拟合曲线上; $C/D$  为 0.8 和 1.5 的拟合曲线在距轴

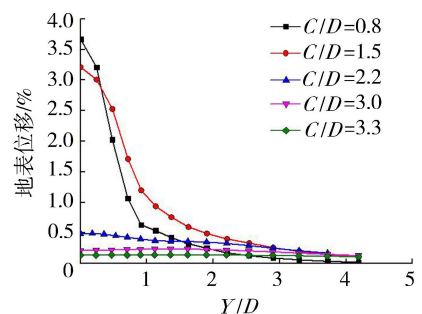


图 7 横向地表位移随埋深比变化  
Fig. 7 Variation of lateral surface displacement with buried depth ratio

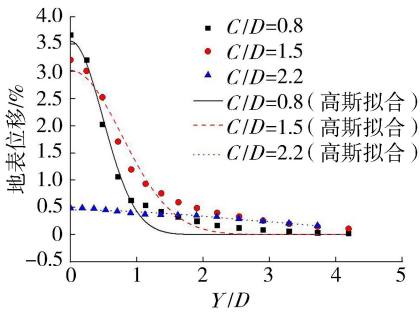


图8 横向地表位移高斯拟合曲线

Fig. 8 Gaussian fitting curve of lateral surface displacement

为探究横向地表位移随  $\varphi$  和  $H$  的变化规律,并考虑到  $C/D$  较大时横向地表位移值较小,选取  $C/D=0.8$  时的横向地表位移作为参考值,探索  $H=0, 5$  m 和  $\varphi=35^\circ, 37^\circ, 40^\circ$  时横向地表位移曲线的变化规律,如图9所示。由图9可知,地层上覆水位对横向地表位移的影响较大,地层上覆水位从0增长到5 m,最大地表隆起值减小约48.9%;  $\varphi$  变化对横向地表位移的影响相对较小,随着  $\varphi$  的增大,横向地表位移随之减小,  $\varphi$  每增大  $2^\circ$ ,最大地表隆起约下降9.8%。

### 2.3 开挖面被动破坏地表位移理论验证

图10为盾构隧道开挖断面示意图,由图10可知,隧道中心点处极限支护压力为

$$\sigma = \gamma_w \left( H + C + \frac{D}{2} \right) + \gamma' \left( C + \frac{D}{2} \right) K_p \quad (2)$$

$$N_{\gamma m} = \frac{\sigma}{D\gamma'} = \frac{H + C + D/2}{D} \frac{\gamma_w}{\gamma'} + \left( \frac{C + D/2}{D} \right) K_p = \frac{H}{D} \frac{\gamma_w}{\gamma'} + \frac{C}{D} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma'} + K_p \right) + \left( \frac{\gamma_w}{2\gamma'} + \frac{K_p}{2} \right) \quad (3)$$

其中

$$K_p = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

由式(3)中第一部分  $N_{\gamma m1} = \frac{H}{D} \frac{\gamma_w}{\gamma'}$  可知,当  $D$  固定时,地表覆水高度

$h_1$  越大,  $N_{\gamma m1}$  越大;由第二部分  $N_{\gamma m2} = \frac{C}{D} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma'} + K_p \right)$  可知,  $C/D$  越大,  $N_{\gamma m2}$  越大;由第三部分  $N_{\gamma m3} = \left( \frac{\gamma_w}{2\gamma'} + \frac{K_p}{2} \right)$  可知,砂土  $\varphi$  越大,  $N_{\gamma m3}$  越大。

由此可验证标准开挖面被动破坏极限支护压力与  $C/D$ 、 $H$  和  $\varphi$  的变化均呈正相关关系,随着地表位移  $C/D$  增大,极限支护压力增长最为明显的结论。

## 3 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏土体位移模式分析

### 3.1 开挖面被动破坏土体位移模式

由于  $H$  和砂土  $\varphi$  对开挖面被动破坏地表位移的影响较小,而  $C/D$  的影响较明显,因此讨论不同  $C/D$  下的开挖面土体被动破坏模式。在开挖面前方的土体变形最大,使得距离开挖面前方  $0 \sim 3D$  处的土体产生较大的隆起。在开挖面上方至地表会出现一块向下位移区域,这是由有限元模拟中开挖面前方土体单体拉伸引起的,不予考虑。

线较近时拟合效果较好,而离轴线较远处的数据点与拟合曲线略有差距。利用高斯正态分布函数对拟合曲线进行计算,得到的  $K$  值见表3。通过对  $K$  值的对比分析,含地层上覆水位高度计算得到的  $K$  值比较符合 Mair 等<sup>[27]</sup>的经验值。

表3 数值模拟地表位移  $K$  值Table 3 Surface displacement  $K$  value from numerical simulation

$C/D$	$K$	
	不含水深	含水深
0.8	0.57	0.25
1.5	0.53	0.32
2.2	0.61	0.42

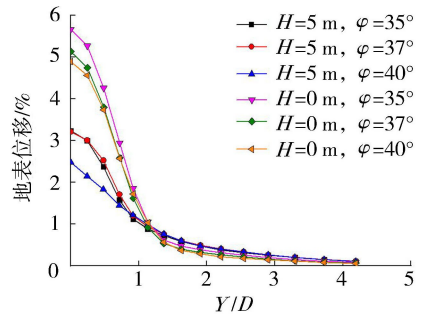
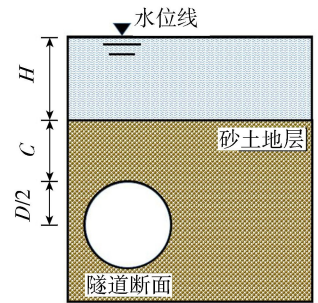
图9 横向地表位移随地层上覆水位和内摩擦角变化  
Fig. 9 Variation of lateral surface displacement with surface water level and friction angle

图10 盾构隧道开挖断面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of shield tunnel excavation section

图 11 为  $H=0, \varphi=37^\circ, C/D=0.8$  和  $4.3$  的情况下开挖面被动破坏时的应力和位移矢量图。由图 11(a)(c) 可知,隧道在开挖面处应力达到最大,且随着  $C/D$  的增大,应力值随之增大。这是由于隧道埋深加大,开挖面受到的水土应力所产生的地应力增大,导致大埋深下开挖面被动破坏需要更大的破坏应力。通过对比发现,隧道底部的应力大于隧道顶部的应力,这与 Li 等<sup>[28]</sup> 的模拟结果一致。随着  $C/D$  的增大,底部的高应力不断向顶部扩展。由图 11(b)(d) 可见,开挖面处土体发生巨大的向前位移,从而导致开挖面土体不断向上和向前位移。结合图 4 和图 7,当  $C/D$  为  $0.8, 1.5$  和  $2.2$  时,开挖面被动破坏模式呈现延伸至地表的倒棱台形,发生了整体破坏;随着  $C/D$  增大至  $4.3$ ,其破坏范围不断向外扩展,但是地表隆起高度却随之减少,最终地表隆起不随  $C/D$  变化,此时开挖面发生局部破坏,这与 Wong 等<sup>[20]</sup> 离心机试验结果一致。

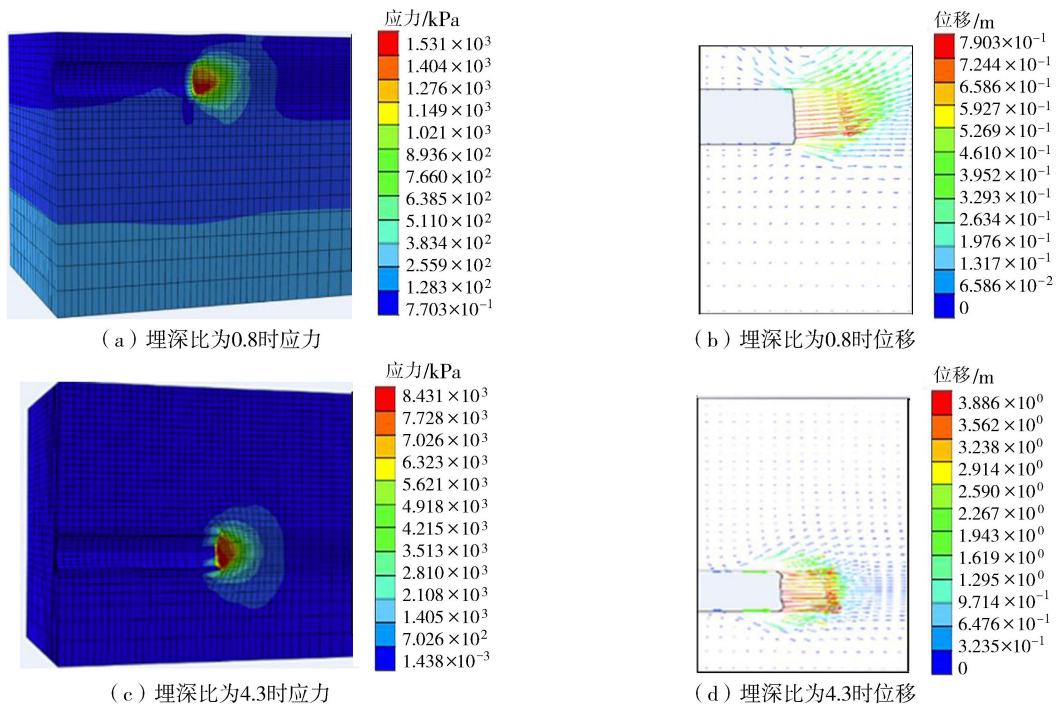


图 11 开挖面被动破坏应力和位移矢量

Fig. 11 Stress diagram and displacement vector diagram of passive failure of excavation face

### 3.2 开挖面被动破坏模式的形成机理

随着盾构机的不断掘进,开挖面处的砂颗粒不断被挤密,继而形成土拱。由于开挖面顶部和底部与盾构位移为相同的量,因此前方形成的土拱大小基本相同,从而解释了开挖面正前方破坏土体区域不是理想的三角形,而是倒棱台型的原因。如图 12 所示,砂颗粒随着土拱的向上发展而不断产生向上位移,开挖面顶部的应力最先得到释放。若隧道埋深较浅,土拱将达到地表,地表产生大位移,继而开挖面顶部的应力得到大量释放,形成开挖面底部应力大于顶部应力的情况。此时,地表砂土颗粒位移较大,产生明显的隆起,造成开挖面整体的破坏。

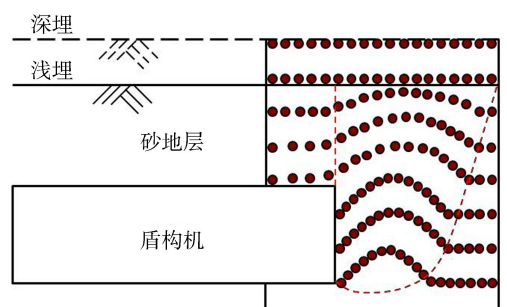


图 12 开挖面被动破坏颗粒位移示意图

Fig. 12 Schematic diagram of passive failure particle displacement of excavation face

目前工程界关于软土盾构隧道深埋和浅埋的划分<sup>[29-34]</sup>,一般以  $C/D=1$  为界限,认为  $C/D>1$  为深埋隧道,  $C/D<1$  为浅埋隧道;在开挖面发生破坏时,深埋隧道往往发生局部破坏,浅埋隧道往往发生整体破坏;黏土地层开挖面一般发生局部破坏,砂土地层多发生整体破坏。根据本文模拟结果与 Wong 等<sup>[20]</sup> 离心机试验结果,发现在砂土地层中,当  $C/D=1.5, 2.2$  时,按照经验应该属于深埋隧道范围,开挖面发生了整体破坏,但是如果设定的  $S_x/D$  较小,如图 5 所示,此时应属于局部破坏的情况。当  $C/D=4.3$  时,开挖面发生局部破坏,但是如果设定  $S_x/D$  继续发展,也可能出现整体破坏的情况。因此,盾构隧道开挖面被动破坏模式会随着标准开挖面  $S_x/D$  的变化而变化,当标准开挖面  $S_x/D$  较小时,即使埋深较小,开挖面也有可能发生局部破坏;

当  $S_x/D$  足够大时,即使埋深较大,开挖面也可能发生整体破坏,但此时可能超出了实际的范畴,即达到该标准开挖面  $S_x/D$  时开挖面已经发生了破坏。对于同一埋深的隧道,开挖面的破坏模式并不是固定的,而是过程性的、随着设定  $S_x/D$  变化的结果,在讨论盾构隧道开挖面被动破坏模式时,需要给出地层条件、埋深情况、推进位移等限定条件。

## 4 结 论

a. 基于 Mohr-Coulomb 强度准则、不相关联剪切屈服流动法则建立的模型,能够较好地模拟砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏情况,标准开挖面被动破坏极限支护压力与  $C/D$ 、 $H$  和砂土  $\varphi$  的变化均呈正相关关系。

b. 开挖面前方土体在轴线处的纵向地表位移曲线呈明显的倒 U 形,纵向地表位移值与  $C/D$ 、 $H$  和砂土  $\varphi$  均呈正相关关系,受  $C/D$  变化的影响较大, $C/D$  由 0.8 增大到 1.5 时,最大纵向地表位移值减小 80%,受  $H$  和砂土  $\varphi$  变化的影响相对较小。

c. 开挖面前方土体横向地表位移呈明显的倒 U 形,隆起的范围约为  $-3D \sim 3D$ ,位移曲线符合正态分布的特性;横向地表位移值与  $C/D$ 、 $H$  和砂土  $\varphi$  均呈正相关关系,受  $C/D$  变化及  $H$  的影响较大, $C/D$  由 0.8 增大到 1.5 时,最大横向位移值减小 86%,静水压力会限制横向地表位移的发展。

d. 盾构隧道开挖面被动破坏模式是一个过程性的结果,讨论时需要限定地层类别、隧道埋深、标准开挖面位移  $S_x/D$  等条件。对于确定的标准开挖面位移  $S_x/D$ ,发生整体破坏时,开挖面前方土体呈现延伸至地表的倒棱台形,随着  $C/D$  的增大,开挖面前方土拱逐渐无法到达地表,当  $C/D$  增大至 4.3 时,破坏模式逐渐转变为局部破坏;对于同一埋深的隧道,随着标准开挖面  $S_x/D$  的增大,开挖面的破坏模式由局部破坏逐渐转变为整体破坏。

### 参考文献:

- [1] 闵凡路,宋航标,柏煜新,等. 泥水盾构隧道开挖面被动破坏研究进展[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(4):575-581. (MIN Fanlu, SONG Hangbiao, BAI Yuxin, et al. Research progress on passive failure of excavation face of slurry shield tunnel [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(4): 575-581. (in Chinese))
- [2] 沈培良,张海波,殷宗泽. 上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,30(5):556-559. (SHEN Peiliang, ZHANG Haibo, YIN Zongze. Analysis of ground settlement of metro tunnel shield construction in Shanghai [J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2003, 30(5): 556-559. (in Chinese))
- [3] 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 Dajun, HUANG Qingfei, KOIZUM I, et al. Study on mud water eruption in underwater shield tunneling [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2296-2301. (in Chinese))
- [4] 汤旅军,陈仁朋,尹鑫晟,等. 密实砂土地层盾构隧道开挖面失稳离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(10):1830-1838. (TANG Lyujun, CHEN Renpeng, YIN Xinsheng, et al. Centrifugal model test study on excavation face instability of shield tunnel in dense sandy soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1830-1838. (in Chinese))
- [5] 周小文,濮家骝. 砂土中隧洞开挖引起的地面沉降试验研究[J]. 岩土力学,2002(5):559-563. (ZHOU Xiaowen, PU Jialiu. Experimental study on ground settlement caused by tunnel excavation in sandy soil [J]. Geotechnical Mechanics, 2002(5): 559-563. (in Chinese))
- [6] 朱伟,秦建设,卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):897-902. (ZHU Wei, QIN Jianshe, LU Tinghao. Numerical simulation of deformation and failure of shield excavation face in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 897-902. (in Chinese))
- [7] VERMEER P A, RUSE N M, MARCHE R. Tunnel heading stability in drained ground [J]. Felsbau, 2002, 20(6): 8-18.
- [8] KIM S H, TONON E. Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane-drained case [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25: 526-542.
- [9] 刘奕晖,黄茂松,王浩然,等. 考虑渗流影响的软土管幕箱涵开挖面稳定分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊2):15-18. (LIU Yihui, HUANG Maosong, WANG Haoran, et al. Stability analysis of excavation surface of soft soil pipe curtain box culvert considering the influence of seepage [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(Sup2): 15-18. (in Chinese))
- [10] BEZUIJEN A, BRASSING A, BLOW-OUTH M. Pressures measured in a centrifuge model and in the field [C]//Tunnelling: a

Decade of Progress-GeoDelft 1995—2005. London:Taylor & Francis,2005:143-148.

- [11] 竺维彬,鞠世建.地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M].广州:暨南大学出版社,2009.
- [12] 李得建,赵炼恒,杨峰,等.非线性破坏准则下浅埋隧道掌子面三维被动破坏稳定性能耗分析改进方法[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):743-752. (LI Dejian, ZHAO Lianheng, YANG Feng, et al. Improved energy consumption analysis method for three-dimensional passive failure stability of shallow tunnel face under nonlinear failure criterion[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(4):743-752. (in Chinese))
- [13] ZHAO Lianheng, LI Dejian, LI Liang, et al. Three-dimensional stability analysis of a longitudinally inclined shallow tunnel face [J]. Computers and Geotechnics,2017,87:32-48.
- [14] 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应力研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3131-3139. (CAO Chengyong, SHI Chenghua, LEI Mingfeng, et al. Study on limit support stress of slurry shield excavation face in shallow permeable stratum[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2016,47(9):3131-3139. (in Chinese))
- [15] 章青,卓家寿,曾三平.南水北调穿黄隧道的非线性分析[J].河海大学学报(自然科学版),1998,25(4):36-40. (ZHANG Qing, ZHUO Jiashou, ZENG Sanping. Nonlinear analysis of Yellow River Crossing Tunnel of South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),1998,25(4):36-40. (in Chinese))
- [16] 乔金丽,张义同,高健,等.强度折减法在盾构隧道开挖面稳定分析中的应用[J].天津大学学报,2010,43(1):14-20. (QIAO Jinli, ZHANG Yitong, GAO Jian, et al. Application of strength reduction method in stability analysis of shield tunnel excavation surface[J]. Journal of Tianjin University,2010,43(1):14-20. (in Chinese))
- [17] 赵明华,毛韬,牛浩懿,等.上硬下软地层盾构隧道开挖面极限支护力分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):103-109. (ZHAO Minghua, MAO Tao, NIU Haoyi, et al. Analysis of ultimate support force of shield tunnel excavation face in upper hard and lower soft stratum[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition),2016,43(1):103-109. (in Chinese))
- [18] 赵红泽,郑群飞,朱建明,等.楔形体模型的简化计算方法[J].现代隧道技术,2017,54(1):83-88. (ZHAO Hongze, ZHENG Qunfei, ZHU Jianming, et al. Simplified calculation method of wedge model[J]. Modern Tunnel Technology,2017,54(1):83-88. (in Chinese))
- [19] 齐立志.砂层地基盾构隧道开挖面被动破坏支护力研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [20] WONGK S, NGC W, CHENY M, et al. Centrifuge and numerical investigation of passive failure of tunnel face in sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2012,28:297-303.
- [21] 陈仁朋,齐立志,汤旅军,等.砂土地层盾构隧道开挖面被动破坏极限支护力研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2877-2882. (CHEN Renpeng, QI Lizhi, TANG Lyujun, et al. Study on passive failure limit support force of shield tunnel excavation face in sandy soil[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(Sup1):2877-2882. (in Chinese))
- [22] MEADA K, MIURA K. Relative density dependency of mechanical properties of sands[J]. Soils and Foundations,1999,39(1):69-79.
- [23] KIM S H, TONON E. Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane-drained case [J]. Tunneling and Underground Space Technology,2010,25:526-542.
- [24] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material [J]. Geotechnique,1990,40(4):581-606.
- [25] LEE C J, WU B R, CHEN H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2006,21:119-132.
- [26] LECA E, PANET M. Application du Calcul a la Rupture a la stabilite du front de taille d'untunnel[J]. Revue Francaise de Geotechnique,1988,43:5-19.
- [27] MAIR R J, TAYLOR R N. Bored tunneling in the urban environment[C]//Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg: Balkema,1997,4:2353-2385.
- [28] LI Y, EMERIAULT F, KASTNER R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research,2009,24(4):472-481.
- [29] 叶治,付岸然,刘华北.盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287. (YE Zhi, FU Anran, LIU Huabei. Influence of seepage erosion on surface settlement and structural deformation of shield tunnel vault[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2021,49(3):279-287. (in Chinese))
- [30] 徐则民,黄润秋,王士天.隧道的埋深划分[J].中国地质灾害与防治学报,2000(4):8-13. (XU Zemin, HUANG Runqiu,



- WANG Shitian. Division of buried depth of tunnel[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2000(4):8-13. (in Chinese))
- [31] 陈林,葛坤龙,王涛. 基于盾构隧道环缝点云的中轴线提取方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1):73-78. (CHEN Lin, GE Kunlong, WANG Tao. Central axis extraction method of shield tunnel based on ring seam point cloud[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(1):73-78. (in Chinese))
- [32] 涂鹏,陈寿根. 基于统计和塑性区的隧道深浅埋划分方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2):387-394. (TU Peng, CHEN Shougen. Study on division method of tunnel depth and shallow burial based on statistics and plastic zone[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2):387-394. (in Chinese))
- [33] 高峰,谭绪凯,肖刚. 隧道深浅埋限界定量划分方法研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2):662-666. (GAO Feng, TAN Xukai, XIAO Gang. Study on quantitative division method of tunnel depth and shallow buried limit[J]. Modern Tunnel Technology, 2018, 55(Sup2):662-666. (in Chinese))
- [34] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1):85-90. (GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(1):85-90. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-03 编辑:胡新宇)

(上接第104页)

- [17] 王银梅,杨重存,谌文武,等. 新型高分子材料SH加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14):2554-2559. (WANG Yinmei, YANG Zhongcun, CHEN Wenwu, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14):2554-2559. (in Chinese))
- [18] DENG Y, LIU S, HUANG J, et al. Strength and permeability of cemented soil with PAM[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. Beijing: The Chinese Ceramic Society. 2012:1800-1807.
- [19] MIURA N, HORPIBULSUK S, NAGARAJ T S. Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content[J]. Soils & Foundations, 2008, 41(5):33-45.
- [20] HORPIBULSUK S, NAGARAJ T S, MIURA N. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. Géotechnique, 2003, 53(4):439-444.
- [21] HORPIBULSUK S, BERGADO D T, LORENZO G A. Compressibility of cement-admixed clays at high water content[J]. Geotechnique, 2004, LI(2):151-154.
- [22] JIANHUI L, NIMA F, CAIJUN S. Effects of superabsorbent polymer on interfacial transition zone and mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231:117142.
- [23] HAITAO Y, JUANHONG L, QIAN Z, et al. The re-swelling behavior of superabsorbent polymers(SAPs) in hardened cement paste with an artificial crack[J]. Materials and Structures, 2019, 52(5):1-13.
- [24] XIA B, YUPENG C, ZHIFENG W, et al. Effect of super-absorbent polymer on the undrained shear behavior of cemented dredged clay with high water content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(7):04017023.
- [25] 胡兴. 人工拌合盐酸和Zn~(2+)污染土的力学性能研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2017.
- [26] 何叶丽. 高吸水性聚合物性能指标与测试方法[J]. 化工新型材料, 1998(12):22-24. (HE Yeli. Performance index and test method of super absorbent polymer[J]. New Chemical Materials, 1998(12):22-24. (in Chinese))
- [27] TESSIER A, CAMPBELL P, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7):844-851.
- [28] 刘青云. PAM与水泥复合改性青海风积沙的路用性能与应用研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [29] 徐国中,陈吉森. 干湿循环作用下滞洪区路基填料改良土特性试验研究[J]. 小水电, 2014(2):16-18. (XU Guozhong, CHEN Jisen. Experimental study on characteristics of subgrade filler improved soil in flood detention area under dry wet cycle[J]. Small Hydro Power, 2014(2):16-18. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-11 编辑:刘晓艳)