

# 地下水位下降对运营盾构隧道衬砌力学性能的影响

吴锋, 翟天立

(大连交通大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:** 为了分析单双侧降水模式下运营期盾构隧道衬砌结构的应变以及裂缝扩展情况, 应用有限元软件 Abaqus 建立道床-隧道-土层有限元模型, 通过扩展有限元功能实现初始裂缝扩展, 得到衬砌应变以及裂缝扩展规律。结果表明: 单侧水位下降导致衬砌纵向应变以及裂缝扩展出现非对称性变化, 排水侧纵向应变约为未排水侧对称点位置的 2.6~7 倍; 未排水侧纵向裂缝扩展长度是排水侧的 0.015 倍。与拱腰位置相比, 拱顶及拱脚裂缝开展更明显, 且拱脚裂缝扩展长度最长, 约为其他位置裂缝扩展长度的 2 倍; 裂缝位于拱顶及拱底时损伤破坏发展较快, 管片结构出现突发性破坏。相同工况下, 双裂缝扩展比单裂缝扩展更加迅速。

**关键词:** 盾构式隧道; 地下水位变化; 裂缝扩展; 力学性能; 有限元

**文献标识码:** A **DOI:** 10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.011

调查研究表明, 衬砌开裂是影响隧道结构性能的主要原因。隧道投入运营以后, 地下水水位的变化影响隧道衬砌裂缝的产生与发展。滨海地区地层构成多为复合地层, 结构受力复杂, 因此运营期复合地层地下水位变化条件下的衬砌裂缝扩展研究尤为重要。针对层状复合地层, 何川等<sup>[1]</sup>在不同水土压力场作用下对层状复合地层和单一地层两种不同地层的管片衬砌结构力学特征进行相似模型试验, 分析复合地层对管片衬砌结构的影响。曹鹏飞等<sup>[2]</sup>建立有限元模型, 分析富水砂层地下水位升降速率对区间盾构隧道衬砌内力的影响。针对地下水影响, 张明飞<sup>[3]</sup>研究地下水位变动诱发地铁隧道变形以及地铁对地下水渗透阻挡作用。田俊丰等<sup>[4]</sup>考虑不同含水量土层对黄土隧道围岩变形规律的影响。宋文杰<sup>[5]</sup>研究运营期间地下水位变化与列车荷载共同作用对车站结构力学性能的影响。李建民<sup>[6]</sup>通过有限元三维数值模拟, 分析地下水位下降对隧道的影响。张夏冉等<sup>[7]</sup>以三峡库区万州区下坪滑坡为模型, 分析在 4 种不同数量级的渗透系数条件下的渗流场特征, 研究在不同渗透系数下的滑坡稳定性变化规律。刘德华<sup>[8]</sup>应用 Flac3D 对地下水作用下隧道结构的受力和变形进

行数值模拟和分析。黄宏伟等<sup>[9]</sup>设置不同渗流程度及水位边界条件, 分析长期渗流条件下隧道周围土体的孔压分布规律、地表沉降规律和管片内力变化规律。Arjoi 等<sup>[10]</sup>采用密封、零水压、恒定总水头完全排水、仅排水等边界条件探讨排水条件对隧道孔隙水压力分布和衬砌应力的影响。针对隧道衬砌裂缝扩展研究, 黄宏伟等<sup>[11]</sup>研究了衬砌在主要影响因素作用下的裂缝分布规律、裂缝扩展过程、裂缝外观表现形式及发生机制。余天堂<sup>[12]</sup>通过理论推导模拟了单一裂纹扩展和多裂纹扩展。Xu 等<sup>[13]</sup>针对沙土和花岗岩复合地层隧道开裂进行数值与试验结合的模拟方法, 研究影响管片裂缝开裂原因以及开裂过程。

综上所述, 近年来国内对于盾构隧道的力学性能研究主要集中在地下水、衬砌裂缝、车辆荷载等单一因素上, 而有关水位下降的模式及地下水、衬砌裂缝、车辆荷载等多因素耦合的研究相对较少。基于此, 本文以大连地铁 4 号线营城子站—银杏大道站区间为研究背景, 采用 Abaqus 软件建立道床-隧道-土层有限元模型, 通过设置排水边界实现水位变化, 模拟运营隧道在地下水位下降时不同降水模式及衬砌裂缝等参数对盾构隧道性能的影响。

收稿日期: 2022-12-17

第一作者: 吴锋 (1982—), 男, 副教授。E-mail: Wff888@sina.com

通信作者: 翟天立 (1997—), 男, 硕士研究生。E-mail: 15222217017@163.com

## 1 有限元模型建立

### 1.1 模型参数

本文使用有限元模拟软件 Abaqus 建立二维道床-隧道-土层耦合有限元模型,土层模型建立尺寸为 50 m(垂直深度)×100 m(水平宽度),土

层分为 5 层,土层参数见表 1。根据所提供的管片系列构造设计图可得,隧道外径为 3.6 m,内径为 3.4 m,混凝土型号为 C50。道床为 C30 混凝土,厚度取 0.5 m。道床与衬砌间的约束采取绑定(Tie)约束。

表 1 土层参数

层数 (由上到下)	土体类型	厚度/ m	泊松比	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ (kN/m <sup>2</sup> )	内摩擦角/ (°)	孔隙率/ %	渗透系数/ (m/s)	压缩模量/ MPa
1	杂填土	3	0.35	1.9	9	17.9	0.41	$1.3 \times 10^{-4}$	5.3
2	细沙	3	0.30	2.1	5	28.0	0.45	$2.9 \times 10^{-4}$	26.0
3	卵石	4	0.25	2.3	2	45.0	0.49	$3.2 \times 10^{-4}$	50.0
4	黏土	10	0.25	2.0	9	25.0	0.42	$9.7 \times 10^{-5}$	20.0
5	板岩	30	0.25	2.3	25	35.0	0.47	$6.7 \times 10^{-7}$	90.0

### 1.2 网格划分

采用有限元软件 Abaqus 对孔隙压力作用下的盾构隧道衬砌进行模拟分析。为减少计算分析时间,假设土体以及衬砌为理想弹塑性体。盾构隧道土体采用 Drucker-Prager 模型的本构关系,假定为各向同性材料。

#### 1.2.1 隧道衬砌网格

考虑渗透的影响,衬砌模型网格采用 CPE4P 网格类型;采用扩展有限元方式计算裂缝,网格形状为四边形,网格数量为 450 个。为减小计算量,对于没有裂缝衬砌结构网格大小划分为 0.1,带裂缝衬砌结构位置网格大小为 0.05。

#### 1.2.2 隧道土层网格

土层采用二维实体单元(CPE4P),衬砌模型同样采取 CPE4P,网格形状为四边形,数量为 4 316 个。为精确计算结果,对隧道周围土体进行网格加密划分,最终土层与衬砌二维有限元模型网格划分效果见图 1。

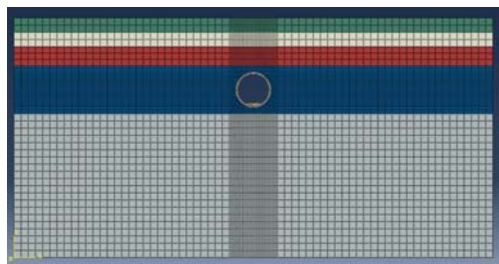


图 1 隧道衬砌有限元模型

### 1.3 工况设置

本文分别在隧道结构拱顶、拱腰、拱脚位置设置 8 个监测点,记为 A~G(图 2),隧道埋深为 20 m。

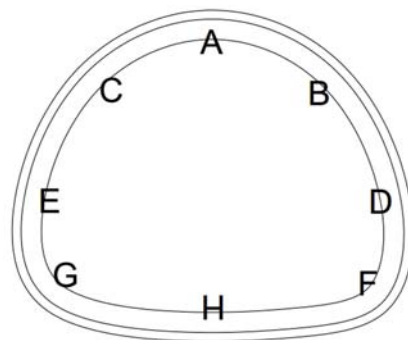


图 2 隧道衬砌监测点位置

采用 Abaqus 建立道床-隧道-土层有限元模型,通过设置排水边界实现水位变化,模拟运营隧道在地下水位下降时不同降水模式对盾构隧道力学性能的影响。

二维模型共设置 3 个分析步,顺序如下:

(1)初始分析步:模型初始边界条件、预应力场和自重应力在该步设置。

(2)静力通用分析步:在该步得出应力,以 ODB 导入方法平衡地应力。

(3)soil 分析步:利用关键字方法设置排水边界,以设置边界条件的方法设置透水面。

#### 1.3.1 水位下降模式设置

大连地区地层分布复杂,软弱夹层分布不规律,岩层会对地下水流动起到阻碍作用,影响地下水位下降后的补给以及渗流,从而形成单侧水位下降模式。

为了探究双侧水位下降与单侧水位下降 2 种不同水位下降模式对滨海复合地层隧道衬砌的影响,本文利用 Abaqus 仿真软件对单双侧下降模式进行

仿真模拟分析,不同工况下单双侧降水分布见表 2。

表 2 单双侧降水分布

工况	单双侧降水情况
1	A 点以上 1.4 m 下降到 A 点
2	A 点以上 1.4 m 下降到 C 点
3	A 点以上 1.4 m 下降到 E 点
4	A 点以上 1.4 m 下降到 G 点
5	A 点以上 1.4 m 下降到 H 点
6	A 点以上 1.4 m 下降到 H 点以下 1.4 m

1.3.2 列车荷载设置

本文工况为运营地铁隧道衬砌,应考虑列车荷载影响,将列车速度设置为 60 km/h,列车车身质量为 44 524 kg,转向架质量为 2 418 kg,轮对质量为 2 418 kg,车身长度为 19.8 m。

由轨道不平顺理论可知,竖向轮轨荷载主要在低频(0.5~10 Hz)、中频(30~60 Hz)和 高频(100~400 Hz)3 个频率范围内,具体可以表示为一个静荷载和 3 个随时间变化的正弦动荷载函数相加:

$$F(t) = Q_0 + Q_1 \sin \omega_1 t + Q_2 \sin \omega_2 t + Q_3 \sin \omega_3 t \tag{1}$$

式中:  $Q_0$  是单边车轮静载;  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  分别为低、中、高频中某一典型值振动荷载幅值。

令列车簧下质量为  $M_0$ ,则其相应幅值为:

$$Q_i = M_0 B_i \omega_i^2 \tag{2}$$

式中:  $B_i$  为低、中、高频 3 种情况下的某一典型矢高;  $\omega_i$  为某一车速下低、中、高频 3 种情况下的不平顺振动波长下的圆频率,计算公式为:

$$\omega_i = 2\pi v / \lambda_i \tag{3}$$

式中:  $v$  为列车的运行速度;  $\lambda_i$  为对应低、中、高频 3 种情况下的典型波长。

根据规范,本文依照最不利情况下取轨道不平顺值  $\lambda_1 = 10$  m、 $B_1 = 3.5$  mm、 $\lambda_2 = 2$  m、 $B_2 = 0.4$  mm、 $\lambda_3 = 0.5$  m、 $B_3 = 0.08$  mm,得到 60 km/h 时列车动荷载函数:

$$F(t) = 60 + 0.288 \sin 10.47t + 0.822 \sin 52.33t + 2.629 \sin 209.33t \tag{4}$$

1.3.3 隧道衬砌裂缝设置

在隧道衬砌管片上不同位置处设置长度为 5 cm 的初始裂缝,建立单裂缝衬砌结构模型、双裂缝衬砌结构模型。单裂缝模型初始裂缝分别设置在 A、C、G 位置;双裂缝模型初始裂缝设置在

A+G、A+C 位置。在上述模型中施加车辆荷载,设置水位下降工况进行仿真分析,分析不同水位变化模式下隧道结构应变以及裂缝扩展的影响。

2 计算结果分析

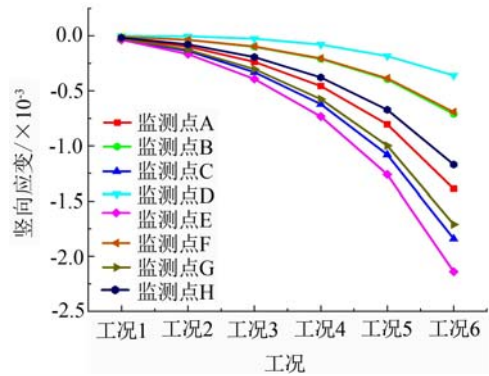
本文采用渗流模拟的方法,按照表 2 的不同工况,建立二维隧道模型,监测隧道结构的应力和应变,从而分析不同水位变化对隧道结构的影响。

2.1 应变分析

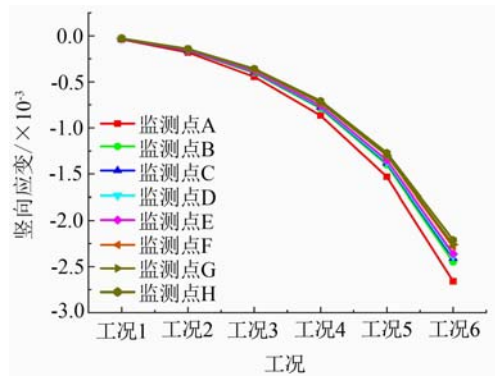
2.1.1 竖向应变分析

分析地下水水位变化对隧道衬砌产生的影响时,衬砌竖向应变是观测的重要指标,过大的竖向应变能够导致隧道结构产生裂缝,最终影响隧道结构的使用寿命。

根据图 3 衬砌结构竖向应变结果可知,随着地下水位的下降,结构各监测点竖向应变增大。工况 4~6 衬砌结构监测点的竖向应变最大增加幅度为 0.001 8,工况 1~3 衬砌结构监测点的竖向应变最大增加幅度为 0.000 41。工况 4~6 地下水对衬砌结构上浮作用明显大于工况 1~3,并且随着地下水位下降,相比于双侧排水,单侧排水



(a) 单侧降水衬砌



(b) 双侧降水衬砌

图 3 单双侧降水衬砌竖向应变

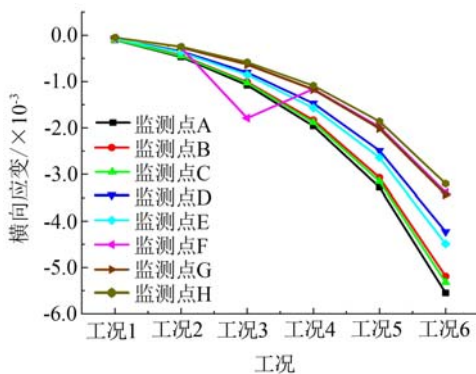
各工况下衬砌结构各个监测点竖向应变相对较小,说明此时未排水一侧地下水对衬砌结构浮力作用仍然不可忽略。

衬砌结构监测点 C、E、G(靠近排水侧监测点)单侧排水各工况情况下的竖向应变分别为 0.18、0.21、0.17;衬砌结构监测点 B、D、F(靠近排水侧监测点)单侧降水各工况情况下的竖向应变分别为 0.07、0.03、0.06。C、E、G 单侧降水各工况情况下的竖向应变约为对称点 B、D、F 竖向应变的 2.6~7 倍。随着水位下降,土体孔隙水压变小,进而导致土体有效应力增大,衬砌的竖向应力增大,单侧降水情况下,排水侧相对未排水侧的竖向应变变化较大。

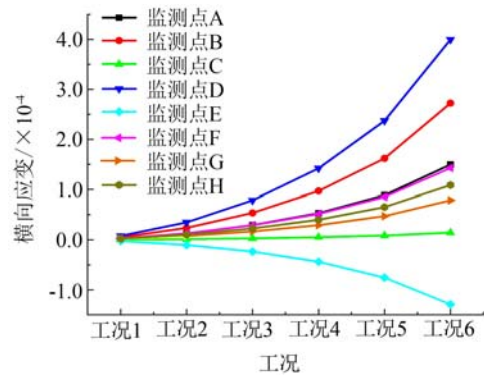
### 2.1.2 横向应变分析

单双侧降水衬砌横向应变见图 4。从图中对比结果可知,随着地下水位下降,隧道衬砌结构各个监测点横向应变均有所增加,排水造成失水围岩孔隙压力减小,在上覆土层及结构自重条件下,横向应变增加。在双侧降水模式工况下,衬砌结构各监测点横向应变最大值为 0.03,竖向应变最大值为 0.26,横向应变远小于竖向应变,说明结构承受的竖向应力远大于横向应力。因此在施工以及运营期间,衬砌结构竖向应变为关键因素,但是由于本文考虑到单双侧降水工况,单侧降水会导致结构偏压,从而影响衬砌结构各个位置横向应力分布,因此本文以研究隧道衬砌结构横向应变为主。

双侧降水模式下,工况 1~3 衬砌结构各监测点横向应变最大增加幅度为 0.000 36,工况 4~6 横向应变最大增加幅度为 0.001,工况 1~3 衬砌结构各监测点横向应变增加幅度远小于工况 4~6,主要原因是地下水下降时衬砌结构浮力作用减弱,从而导致土体竖向有效应力增加,土体对衬砌结构竖向应力增加,横向应变增加,并且工况 4~6



(a) 单侧降水衬砌



(b) 双侧降水衬砌

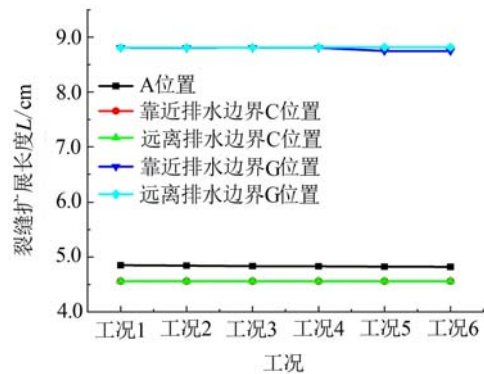
图 4 单双侧降水衬砌横向应变

地下水对结构上浮作用明显。衬砌结构监测点 D、E 分别为横向应变最大点,横向应变随着地下水位下降而迅速增加。

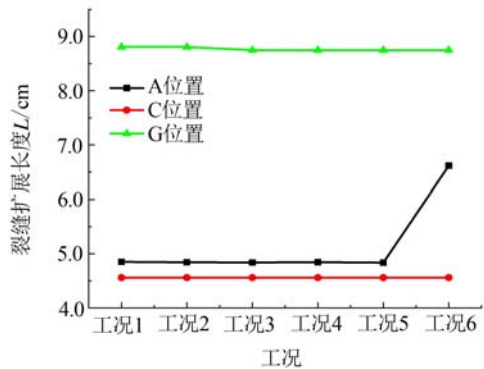
### 2.2 裂缝扩展分析

#### 2.2.1 单裂缝分析

为了模拟单裂缝在地下水下降过程中的裂缝扩展情况,在拱顶、上拱腰、下拱脚处分别布置一条初始裂缝。单双侧降水衬砌单裂缝扩展情况见图 5。可以看出衬砌拱腰处裂缝扩展平缓,裂缝



(a) 单侧降水单裂缝扩展



(b) 双侧降水单裂缝扩展

图 5 单双侧降水衬砌单裂缝扩展情况

位于拱顶及拱脚处时损伤破坏发展较快,即管片裂缝扩展呈现突发性、剧烈性的特征。由于双侧降水,衬砌结构受力分布沿竖向轴线呈对称分布,同时为了对比单双侧降水对监测点裂缝扩展的影响,因此对监测点 A、C、G 进行进一步深入研究。

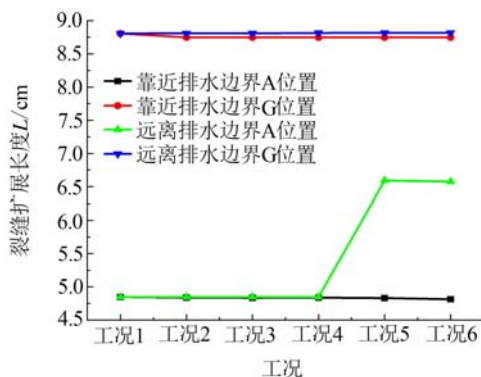
单裂缝双侧降水情况下,A、C 位置裂缝扩展分别为 6.4 cm,G 位置裂缝扩展程度相对更大,是 C 位置的 2 倍,结构破坏更加严重。根据 A 位置裂缝发展趋势,可知裂缝扩展具有突变性。拱底以及拱顶受力形式主要为外部受压,内部受拉;拱腰为外部受拉,内部受压。衬砌裂缝形式主要为张拉裂缝,因此在受拉部分容易出现开裂。地下水水位下降导致土体有效应力增大,土体对衬砌结构应力增大,拱顶以及拱底内部受拉,因此拱顶以及拱底内部位置裂缝扩展比拱腰位置裂缝扩展更大。

同理,单裂缝单侧降水情况下,G 位置裂缝扩展最大,裂缝扩展长度为 8 cm,A 略小,为 4.8 cm,C 最小,为 4.5 cm,因此选择 G 位置进行裂缝扩展研究。由于单侧降水衬砌结构应力分布不对称,排水侧出现较大竖向应变,从而衬砌结构拉力增加,导致排水侧衬砌裂缝扩展长度为 8.748 cm,比未排水侧裂缝扩展长度 8.817 cm 略小。

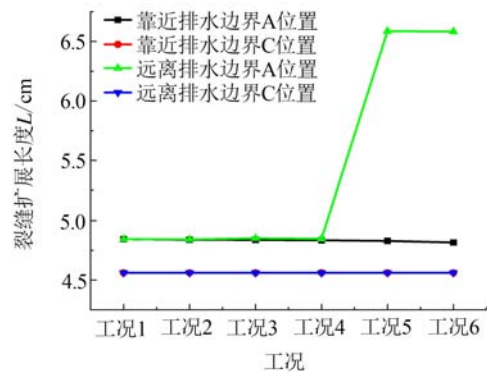
### 2.2.2 双裂缝分析

由于单侧降水情况对结构影响较大,因此在单侧降水情况下,考虑双裂缝扩展情况。双裂缝布置在监测点 A、G(拱腰以及拱脚)和 A、C(拱顶以及拱腰)处裂缝扩展情况见图 6。

单侧降水情况下,拱脚裂缝扩展较大,裂缝位置远离排水侧时,裂缝扩展较大。由土力学可知,在施加荷载过程中,饱水的土体所承受的附加压力由水和颗粒骨架共同承担,地下水水位下降变化引起岩体内空隙水压力的变化,造成大范围的地面沉降,从而衬砌结构拉力增大,导致未排水



(a) A、G 裂缝扩展



(b) A、C 裂缝扩展

图 6 单侧降水衬砌双裂缝扩展情况

侧衬砌裂缝扩展相对于排水侧裂缝扩展较大,相差最大约为 2 cm。

将 A、G 双裂缝与 A 单裂缝情况进行对比,研究 G 位置裂缝对 A 位置裂缝的影响,可以得到 G 位置裂缝会导致 A 位置裂缝提前发生裂缝突变扩展,达到 6.6 cm,从而得出拱脚位置裂缝会加剧拱顶裂缝扩展。将 AC、AG 两种双裂缝情况进行对比,研究 C 和 G 位置裂缝对 A 位置裂缝的影响,C 和 G 位置裂缝会导致 A 位置裂缝迅速扩展到 6.6 cm,其他位置裂缝对拱顶裂缝影响较大。因此在实际工程中,应对拱顶位置裂缝进行及时、有效地处理。

## 3 结论

(1) 地下水水位下降、孔隙压力下降及土体有效应力增大,使得隧道衬砌各个监测点的应变均有所增大。

(2) 工况 1~3 竖向应变最大增加幅度为 0.000 41,工况 4~6 竖向应变最大增加幅度为 0.001 8;工况 1~3 衬砌结构各监测点横向应变最大增加幅度为 0.000 36,工况 4~6 横向应变最大增加幅度为 0.001,工况 4~6 最大横竖向应变增幅明显,说明水位在拱腰以下变化时对衬砌结构上浮作用明显。

(3) 水位在拱腰以下变化时,地下水上浮对隧道衬砌结构作用明显。随着地下水水位下降,单双侧排水情况下,结构所受横竖向应力均有所增大,横竖向应变增大,单侧降水导致衬砌结构偏压,出现不对称变形,且单侧排水情况下排水侧横竖向应变均大于未排水侧。因此,在盾构隧道的运营与维护阶段中应注重水位下降的模式以及结构的薄弱区域。单侧排水对盾构隧道衬砌结构的

影响明显,值得关注。

(4)在单双侧排水情况下,拱脚裂缝扩展最为剧烈,拱腰位置裂缝几乎不扩展;单侧排水会导致未排水侧裂缝扩展加剧。在双裂缝情况下,裂缝相互作用,导致裂缝扩展相对于单裂缝扩展提前且长度更长,为6.6 cm。双裂缝情况下,其他位置裂缝会导致拱顶裂缝在工况4~5时发生剧烈扩展。

#### 参考文献:

- [1]何川,张建刚,杨征.层状复合地层条件下管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J].岩土工程学报,2008(10):1537-1543.
- [2]曹鹏飞,袁宗义,陈昭阳,等.富水砂层地下水位变化对盾构隧道衬砌结构的影响分析[J].城市轨道交通研究,2022,25(1):134-140.
- [3]张明飞.地下水位变动诱发地铁隧道变形机理及其与地铁隧道相互影响研究[D].南京:东南大学,2018.
- [4]田俊峰,叶万军,杨更社.含水量及冻融循环对黄土隧道围岩变形规律影响研究[J].公路,2015,60(4):271-276.
- [5]宋文杰.地下水位变化与列车动载共同作用对地铁车站结构力学性能影响研究[D].北京:北京建筑大学,2014.
- [6]李建民.地下水位下降导致的隧道衬砌位移变化规律研究[J].北方建筑,2017,2(5):17-20.
- [7]张夏冉,殷坤龙,夏辉,等.渗透系数与库水位升降对下坪滑坡稳定性的影响研究[J].工程地质学报,2017,25(2):488-495.
- [8]刘德华.不同地下水位环境下地铁隧道结构的劣化机制研究[D].北京:北京建筑大学,2015.
- [9]黄宏伟,刘印,张冬梅.盾构隧道长期渗水对地表沉降及管片内力的影响[J].中国铁道科学,2012,33(6):36-43.
- [10]ARJNOI P, JEONG J H, KIM C Y, et al. Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4):376-389.
- [11]黄宏伟,刘德军,薛亚东,等.基于扩展有限元的隧道衬砌裂缝开裂数值分析[J].岩土工程学报,2013,35(2):266-275.
- [12]余天堂.裂纹扩展仿真分析[J].系统仿真学报,2009,21(6):1756-1759.
- [13]XU G W, HE C, LU D Y, et al. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144:106282.

## Influence of Groundwater Level Decline on Mechanical Performance of Subway Shield Tunnel Lining during Operation

WU Feng, ZHAI Tianli

(School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** In order to analyze the strain and crack expansion of the shield tunnel lining structure during the operation period under the single and double side waterfall modes, the finite element software Abawus was applied to establish a bed-tunnel-soil finite element model, and the initial crack expansion was achieved by extending the finite element function to derive the lining strain and crack expansion law. The results show that the lining strain and crack extension are vary asymmetrical due to the drop in water level on one side, with the vertical strain on the drained side being about 2.6-7 times longer than the symmetrical point on the undrained side. The vertical crack extension on the undrained side is 0.015 times longer than that on the drained one. Compared with the waist of the arch, the cracks in the top and foot of the arch are more obvious, and the crack extension in the foot of the arch is the longest, about twice as long as the crack extension in other locations.

**Keywords:** shield tunnel; groundwater level change; fracture propagation; mechanical performance; finite element