

# 渗水条件下裂缝对隧道衬砌稳定性的影响分析

王平让<sup>1</sup>, 陈波<sup>2</sup>, 李柄成<sup>2</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 基于砼断裂准则建立渗水条件下隧道衬砌裂缝的稳定系数, 采用扩展有限元分析渗水条件下裂缝对隧道衬砌稳定性的影响。结果表明, 渗水会导致衬砌裂缝尖端的应力强度因子增大, 降低裂缝稳定系数, 对衬砌裂缝的稳定性有较大影响, 考虑渗水时的裂缝稳定系数均小于不考虑渗水时的裂缝稳定系数; 随裂缝深度增大, 裂缝尖端的应力强度因子增大, 稳定系数减小, 衬砌裂缝的稳定性降低; 随裂缝位置从拱顶变化至边墙, 裂缝尖端的应力强度因子增大, 稳定系数减小, 衬砌裂缝的稳定性降低。

**关键词:** 隧道; 渗水; 衬砌; 裂缝; 稳定性

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0152-06

裂缝是隧道衬砌的常见病害之一, 而且大多数情况下与渗水同时存在。渗水的存在不但影响裂缝的扩展, 还会影响衬砌结构的损伤。目前带裂缝隧道衬砌结构的安全评价主要根据相关规范通过调查裂缝的各项指标来判定裂缝对隧道衬砌结构安全的影响, 主要方法有两类, 一是基于层次分析法和模糊综合评判法评估带裂缝隧道衬砌结构的安全性, 另一类是通过力学计算定量分析裂缝对衬砌结构受力和变形的影响。刘学增等通过荷载试验建立裂缝深度与衬砌刚度的关系, 研究了纵向裂缝对隧道衬砌承载力的影响; 张玉军、李治国等采用断裂力学理论分析了衬砌开裂后裂缝深度、宽度和数目对隧道衬砌承载能力的影响; 王亚琼等建立基于断裂力学的公路隧道素砼衬砌裂缝稳定性分析方法, 采用有限元计算衬砌裂缝尖端的应力强度因子, 据此判定衬砌裂缝的稳定性; 黄宏伟等采用扩展有限元法研究了衬砌裂缝的分布规律、裂缝扩展过程、裂缝外观表现形式及发生机制; 李洪建等利用扩展有限元对纵向裂缝以不同深度单独出现在不同衬砌部位时的各工况进行数值模拟, 分析了不同工况对衬砌结构承载力和安全性的影响; 张芳等采用有限元-离散元法分析了浅埋隧道衬砌在荷载作用下裂缝的分布位置、扩展规律、外观表现及产生机制。这类研究在评价带裂缝隧道衬砌结构安全方面取得了较好的效果, 但未考虑渗水对衬砌裂缝稳定性的影响。

在考虑孔隙水对裂缝影响的研究方面, 王海龙

等采用断裂力学方法对孔隙水对湿态砼抗压强度和裂缝的影响进行了研究; 邓华锋等从断裂力学角度分析了岩体裂隙水压力对裂纹应力强度因子的影响, 对考虑裂隙水压力作用的拉-剪(I-II型)复合裂纹扩展规律进行了研究; 李夕兵等研究了渗透水压下类岩石材料张开型裂纹的启裂特性; 汤连生等分别研究了无水和有水作用下岩体复合型裂缝的扩展规律, 探讨了水对岩体断裂强度的影响。这类研究利用断裂力学理论分析孔隙水对裂缝的影响, 但由于隧道衬砌裂缝一般处于复杂的应力状态, 要准确分析渗水条件下裂缝对隧道衬砌结构稳定性的影响, 单纯采用理论解析方法难以凑效, 还需借助数值分析方法。该文采用非线性有限元 ABAQUS 对隧道渗水条件下带裂缝衬砌结构进行数值模拟, 研究渗水条件下带裂缝隧道衬砌结构的稳定性。

## 1 稳定性分析方法

### 1.1 裂缝应力强度因子

汤连生等针对承受双向压应力作用下含裂缝的砼材料, 针对 I、II 型裂缝, 推导了空隙水压力下裂缝尖端的应力强度因子计算公式, 指出考虑孔隙水压力时裂缝尖端的应力强度因子会增大。

### 1.2 砼断裂准则

断裂准则是指裂纹尖端开展或破坏的临界条件, 分为理论断裂准则和工程断裂准则。由于隧道工程实际情况复杂多变, 同时砼衬砌的不均匀性和

离散性很大,加上衬砌裂缝一般处于复杂的应力状态,采用理论断裂准则的计算结果与实际情况之间会存在误差,采用工程断裂准则更符合工程实际,而且其形式简单,便于实际工程应用。

针对Ⅰ—Ⅱ复合型裂缝,于晓中在室内试验及现场试验的基础上提出如下工程断裂准则:

$$K_{I}^2 + 4.2K_{II}^2 = K_{IC}^2 \quad (1)$$

式中: $K_{I}$ 、 $K_{II}$ 分别为Ⅰ、Ⅱ型裂缝的应力强度因子; $K_{IC}$ 为Ⅰ型裂缝的断裂韧度,一般情况下根据实际工程经验可取 $K_{IC} = 0.3 \sim 1.3 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。

### 1.3 裂缝稳定系数

采用稳定系数 $f$ 表示渗水条件下隧道出现裂缝后衬砌结构的稳定性,表达式见式(2)。 $f$ 值越大,裂缝越稳定,衬砌结构的稳定性越高; $f$ 值越小,裂缝越扩展,衬砌结构的稳定性越低; $f = 1$ 是裂缝和衬砌结构处于稳定的一种临界状态。可根据裂缝稳定系数 $f$ 值的变化,从力学角度定量分析渗水条件下裂缝对隧道衬砌结构稳定性的影响。

$$f = \frac{K_{IC}^2}{K_{I}^2 + 4.2K_{II}^2} \quad (2)$$

实际工程中,隧道衬砌结构受力较复杂,主要承受弯矩、剪力和轴力作用,属于偏心受压构件。衬砌裂缝一般属于Ⅰ—Ⅱ复合型裂缝,考虑孔隙水压力时,会导致Ⅰ型或Ⅱ型应力强度因子增大,增大裂缝扩展失稳的可能性。采用ABAQUS对隧道渗水条件下带裂缝衬砌结构进行数值模拟,该软件具有专门的扩展有限元分析模块,可模拟裂缝等不连续问题,对岩土中水的渗流和岩土体变形进行耦合分析。

## 2 数值模型和材料参数

结合某高速公路隧道工程实例进行分析。该隧道采用复合式衬砌,按新奥法原理设计,表1为复合

式衬砌构造设计参数。隧道防排水采用1.2 mm厚EVA防水卷材和 $350 \text{ g/m}^3$ 土工布、环向排水管、纵向排水管、横向引水管与隧道路面下纵向盲沟相连。

表1 隧道复合式衬砌的构造参数

支护类型	支护项目	支护参数
初期支护	锚杆类型	$\phi 22$ 砂浆锚杆
	锚杆间距/cm	100×120
	锚杆长度/m	4.0
	喷射砼厚度/cm	22
	钢拱架类型	I20a
二次衬砌	钢拱架间距/cm	100
	二次衬砌砼类型	C30 素砼
	二次衬砌厚度/cm	50

进行有限元分析时,地下水位深度取20 m,隧道围岩级别为Ⅳ级。取隧道中心左右5倍洞径为左右边界,隧道中心上下4倍洞径为上下边界,模型顶部为自由面,底部约束竖向位移,四周约束水平位移,侧压力系数取0.47。隧道围岩采用实体单元模拟,二次衬砌采用板单元模拟,共划分为286 900个网格单元(见图1)。计算时在模型上边界施加均布荷载 $q = \gamma h$ 模拟隧道上覆岩层的作用。

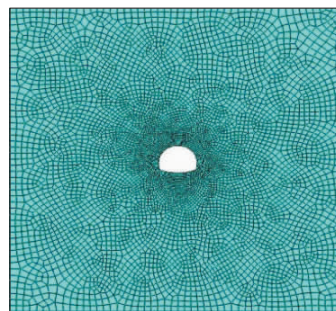


图1 隧道数值分析模型

采用摩尔—库伦模型,围岩和支护结构的材料参数见表2。

表2 围岩和支护结构的材料参数

材料类型	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	空隙比
围岩	2	0.32	0.6	30	19	$1 \times 10^{-13}$	0.025
锚杆	180	0.30	—	—	4	—	—
喷射砼	22	0.20	1.0	50	22	$1 \times 10^{-12}$	0.018
钢架	200	0.30	—	—	78	—	—
二次衬砌	30	0.20	1.0	60	24	$1 \times 10^{-11}$	0.015

根据前面的分析,孔隙水会对砼材料产生一定损伤作用,导致裂缝尖端的Ⅰ型或Ⅱ型应力强度因子增大,同时导致材料的断裂韧度降低。因此,根据

式(2)计算渗水条件下带裂缝隧道衬砌结构的稳定系数时,从偏安全考虑,二次衬砌材料的断裂韧度取较小值,可取 $K_{IC} = 0.35 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。

### 3 数值分析结果

#### 3.1 拱顶裂缝影响分析

图2~4为裂缝深度为5、15和25 cm时隧道拱顶裂缝区域的孔隙水压力云图。由图2~4可知:裂缝深度为5、15、25 cm时,隧道拱顶裂缝区域的最大孔隙水压力分别为87.81、89.86、85.43 kPa;在裂缝尖端区域,孔隙水压力分布出现不同程度改变,裂缝深度越大,孔隙水压力分布的变化程度越明显。

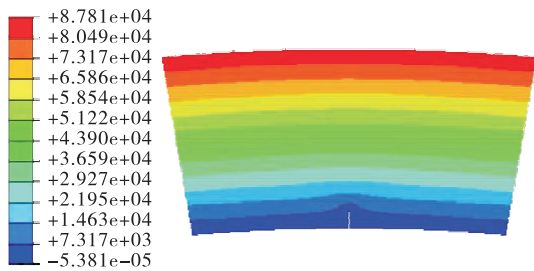


图2 裂缝深度为5 cm时拱顶区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

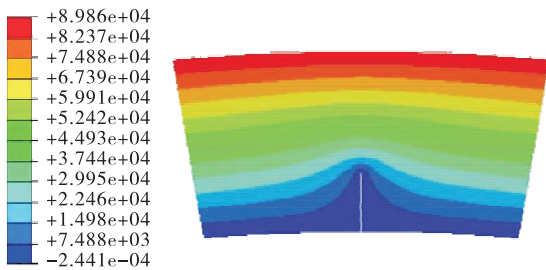


图3 裂缝深度为15 cm时拱顶区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

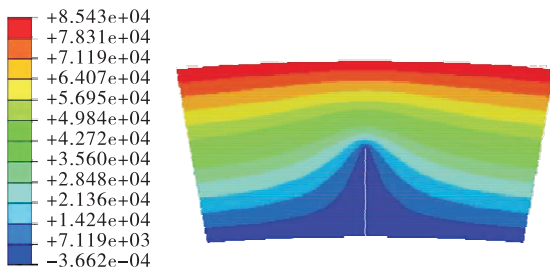


图4 裂缝深度为25 cm时拱顶区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

经有限元数值计算,考虑渗水后裂缝尖端的I型应力强度因子出现不同程度增大但仍小于零,说明裂缝仍然属于压剪型裂缝,根据式(2)计算裂缝稳定系数时可不考虑I型应力强度因子的影响。表3为拱顶裂缝在不同裂缝深度条件下不考虑渗水和考虑渗水时的II型应力强度因子和裂缝稳定系数。

图5为不考虑渗水和考虑渗水情况下拱顶裂

表3 拱顶裂缝应力强度因子和裂缝稳定系数

裂缝深度/cm	应力强度因子/(MN·m <sup>-3/2</sup> )		裂缝稳定系数	
	不考虑渗水	考虑渗水	不考虑渗水	考虑渗水
5	0.020 46	0.028 46	91.00	36.01
15	0.036 83	0.043 86	28.08	15.16
25	0.103 28	0.112 92	3.57	2.29

的稳定系数随裂缝深度的变化。由图5可知:不同裂缝深度下,考虑渗水时拱顶裂缝稳定系数均小于不考虑渗水时的裂缝稳定系数。裂缝深度为25 cm时,考虑渗水时裂缝稳定系数更可能小于1,裂缝更易失稳扩展,导致隧道衬砌结构处于不稳定状态。可见,渗水对不同裂缝深度情况下拱顶裂缝的稳定性有较大影响。

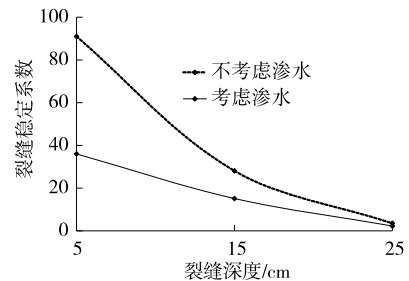


图5 不同深度时拱顶裂缝稳定系数的变化

#### 3.2 拱腰裂缝影响分析

图6~8为裂缝深度为5、15和25 cm时隧道拱腰裂缝区域的孔隙水压力云图。由图6~8可知:裂缝深度为5、15、25 cm时,隧道拱腰裂缝区域的最大孔隙水压力分别为109.4、106.2、106.4 kPa,在裂缝尖端区域,孔隙水压力分布出现不同程度改变。

表4为拱腰裂缝在不同裂缝深度条件下不考虑渗水和考虑渗水时的II型应力强度因子和裂缝稳定系数。图9为不考虑渗水和考虑渗水情况下拱腰裂

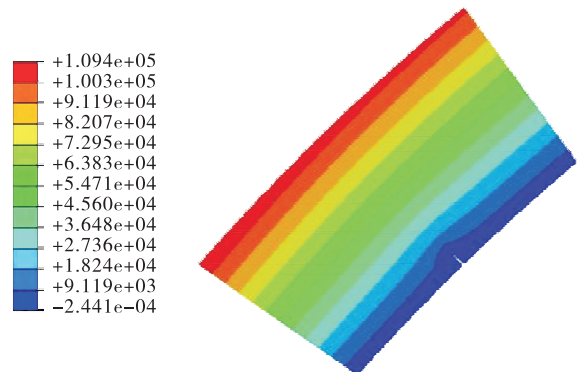


图6 裂缝深度为5 cm时拱腰区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

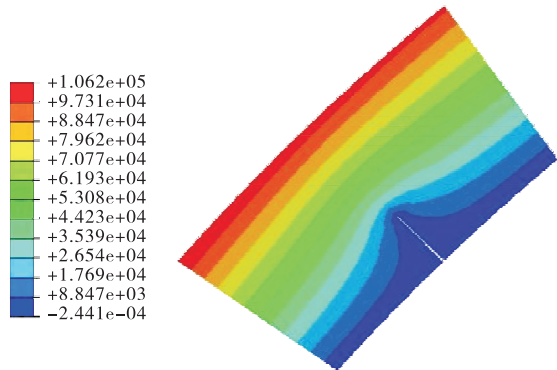


图7 裂缝深度为15 cm时拱腰区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

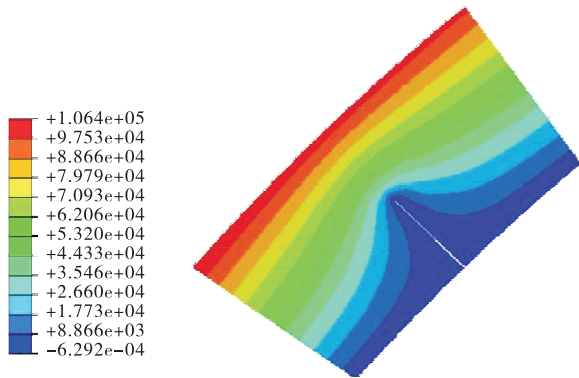


图8 裂缝深度为25 cm时拱腰区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

缝稳定系数随裂缝深度的变化。由图9可知:不同裂缝深度下,考虑渗水时拱腰裂缝稳定系数均小于不考虑渗水时的裂缝稳定系数。裂缝深度为20~25 cm时,考虑渗水时裂缝稳定系数更可能小于1,裂缝更易失稳扩展,导致隧道衬砌结构处于不稳定状态。可见,渗水对不同裂缝深度情况下拱腰裂缝的稳定性有较大影响。

表4 拱腰裂缝应力强度因子和裂缝稳定系数

裂缝深度/cm	应力强度因子/(MN·m <sup>-3/2</sup> )		裂缝稳定系数	
	不考虑渗水	考虑渗水	不考虑渗水	考虑渗水
5	0.026 52	0.031 57	54.17	29.26
15	0.052 14	0.062 59	14.01	7.45
25	0.131 25	0.140 49	2.21	1.48

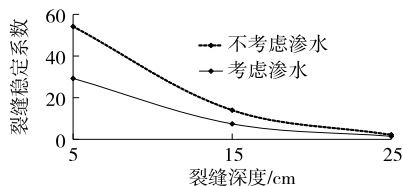


图9 不同裂缝深度时拱腰裂缝稳定系数的变化

### 3.3 边墙裂缝影响分析

图10~12为裂缝深度为5、15和25 cm时隧道边墙裂缝区域的孔隙水压力云图。由图10~12可知:裂缝深度为5、15、25 cm时,隧道边墙裂缝区域的最大孔隙水压力分别为148.3、148.7、160.9 kPa;在裂缝尖端区域,孔隙水压力分布出现不同程度改变,裂

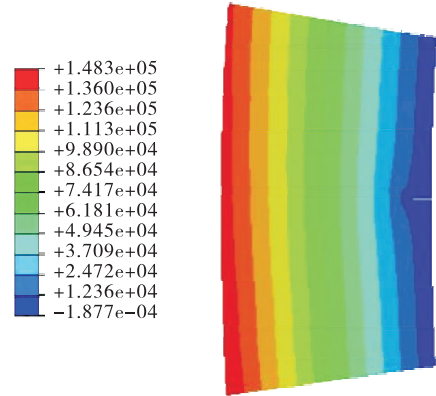


图10 裂缝深度为5 cm时边墙区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

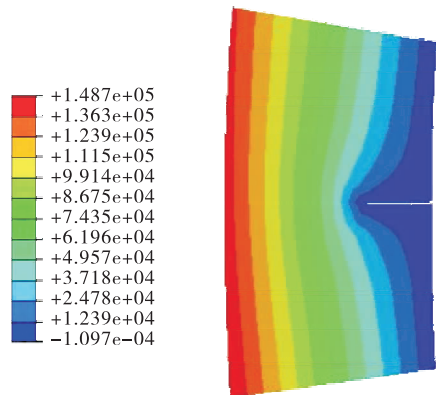


图11 裂缝深度为15 cm时边墙区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

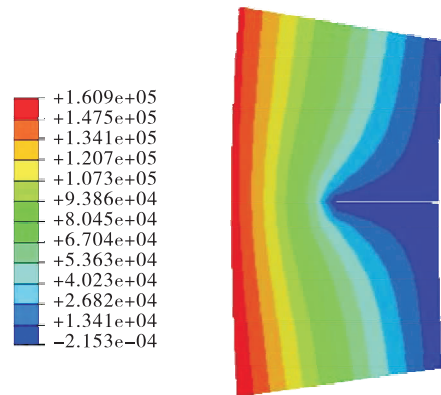


图12 裂缝深度为25 cm时边墙区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

缝深度越大,孔隙水压力分布的变化程度越明显。

表5为边墙裂缝在不同裂缝深度条件不考虑渗水和考虑渗水时的Ⅱ型应力强度因子和裂缝稳定系数。图13为不考虑渗水和考虑渗水情况下边墙裂缝稳定系数随不同裂缝深度的变化。由图13可知:不同裂缝深度情况下,考虑渗水时边墙裂缝稳定系数均小于不考虑渗水时的裂缝稳定系数。尽管裂缝深度为25 cm时2种情况下的裂缝稳定系数均小于1,但裂缝深度为20~25 cm时,考虑渗水时裂缝稳定系数更可能小于1,裂缝更易失稳扩展,导致隧道衬砌结构处于不稳定状态。可见,渗水对不同裂缝深度情况下边墙裂缝的稳定性有较大影响。

表5 边墙裂缝应力强度因子和裂缝稳定系数

裂缝深度/cm	应力强度因子/(MN·m <sup>-3/2</sup> )		裂缝稳定系数	
	不考虑渗水	考虑渗水	不考虑渗水	考虑渗水
5	0.032 26	0.037 54	36.61	20.70
15	0.073 68	0.082 59	7.02	4.28
25	0.215 94	0.223 58	0.82	0.58

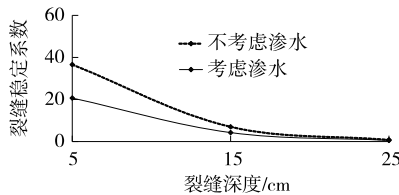


图13 不同裂缝深度时边墙裂缝稳定系数的变化

### 3.4 不同位置裂缝影响分析

沿隧道拱顶至边墙区域选取9个裂缝位置进行有限元计算,分析渗水条件下隧道不同位置裂缝的稳定性。如图14所示,1#、5#和9#分别对应隧道拱顶、拱腰和边墙部位。

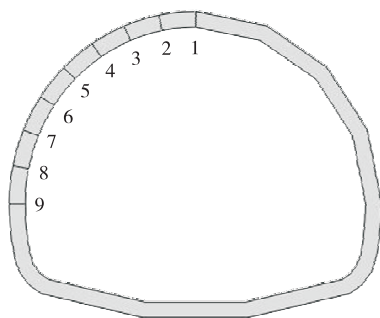


图14 隧道衬砌不同位置裂缝编号

图15、图16分别为裂缝深度为15 cm时3#、7#裂缝附近区域的孔隙水压力云图。由图15~16可知:3#和7#裂缝附近区域的最大孔隙水压力分

别为91.61、126.6 kPa,在裂缝尖端区域,孔隙水压力分布出现一定程度改变。

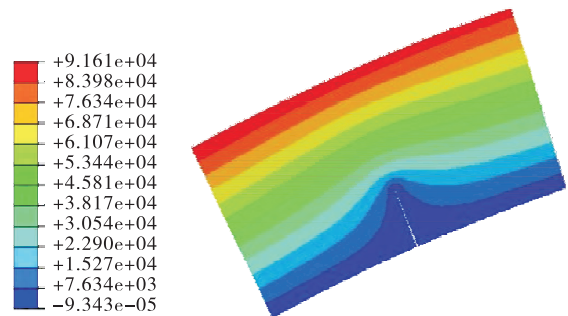


图15 深度为15 cm时3#裂缝区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

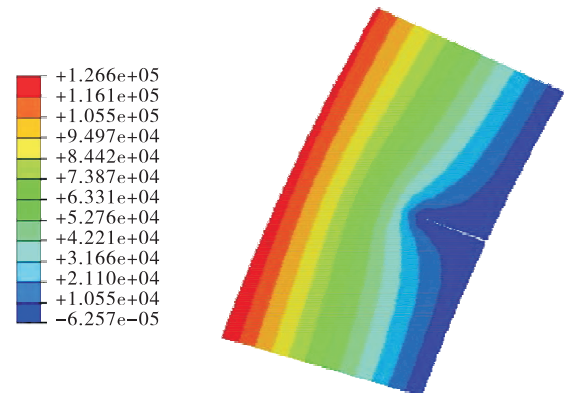


图16 深度为15 cm时7#裂缝区域孔隙水压力云图(单位:Pa)

表6、表7分别为不同裂缝深度条件下不考虑渗水和考虑渗水时3#、7#裂缝的Ⅱ型应力强度因子和裂缝稳定系数。

表6 3#裂缝应力强度因子和裂缝稳定系数

裂缝深度/cm	应力强度因子/(MN·m <sup>-3/2</sup> )		裂缝稳定系数	
	不考虑渗水	考虑渗水	不考虑渗水	考虑渗水
5	0.022 36	0.028 62	76.20	35.61
15	0.043 95	0.051 47	19.72	11.01
25	0.116 34	0.119 47	2.81	2.04

表7 7#裂缝应力强度因子和裂缝稳定系数

裂缝深度/cm	应力强度因子/(MN·m <sup>-3/2</sup> )		裂缝稳定系数	
	不考虑渗水	考虑渗水	不考虑渗水	考虑渗水
5	0.029 37	0.035 28	44.16	23.43
15	0.058 42	0.065 46	11.16	6.81
25	0.183 54	0.192 56	1.13	0.79

图17~19为裂缝深度为5、15和25 cm时裂缝稳定系数随衬砌裂缝位置的变化。由图17~19可

知:不考虑渗水和考虑渗水情况下,裂缝稳定系数沿隧道拱顶至边墙呈逐渐减小趋势;随裂缝深度增大,隧道不同位置裂缝稳定系数均呈减小趋势;裂缝深度增大至 25 cm 时,7#、8# 和 9#(边墙位置)裂缝在考虑渗水时的稳定系数均小于 1,裂缝将出现失稳扩展,而 7# 裂缝在不考虑渗水时的稳定系数大于 1,裂缝处于稳定状态;不同裂缝深度情况下,考虑渗水时的裂缝稳定系数均小于不考虑渗水时的裂缝稳定系数。可见,渗水对不同裂缝深度情况下不同位置裂缝的稳定性均有较大影响。

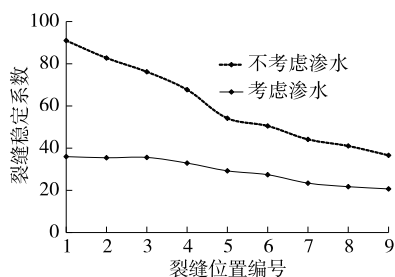


图 17 深度为 5 cm 时不同位置裂缝稳定系数的变化

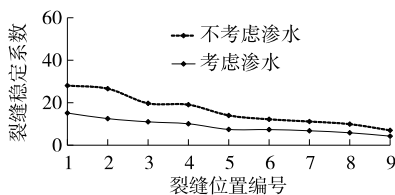


图 18 深度为 15 cm 时不同位置裂缝稳定系数的变化

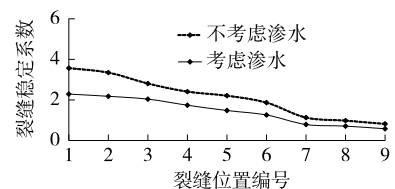


图 19 深度为 25 cm 时不同位置裂缝稳定系数的变化

## 4 结论

基于砼工程断裂准则建立渗水条件下隧道衬砌裂缝稳定系数,采用 ABAQUS 分析渗水条件下裂缝对隧道衬砌稳定性的影响,得出如下结论:1) 渗水对不同裂缝深度情况下隧道衬砌结构的稳定性有较大影响,随裂缝深度增大,裂缝尖端的应力强度因子增大,稳定系数减小,衬砌结构的稳定性降低。2) 不同裂缝深度情况下,考虑渗水时的稳定系数均小于不考虑渗水时的稳定系数,说明隧道渗水会降低带裂缝衬砌结构的稳定性。3) 边墙纵向裂缝深度为 20~25 cm 时,考虑渗水时稳定系数更可能小于

1,裂缝更易失稳扩展,导致衬砌结构处于不稳定状态。4) 隧道渗水对不同位置裂缝情况下衬砌结构的稳定性有较大影响,随裂缝位置从拱顶变化至边墙,裂缝尖端的应力强度因子增大,稳定系数减小,衬砌结构的稳定性降低。

该文基于实际隧道工程特定工况进行分析,由于计算工况的复杂性,未考虑隧道的其他工况,需作进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 重庆市交通委员会.公路隧道养护技术规范:JTG H12—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [2] 罗鑫.公路隧道健康状态诊断及系统的研究[D].上海:同济大学,2007.
- [3] 来弘鹏,杨晓华,林永贵.黄土公路隧道衬砌开裂分析[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(1):45—49.
- [4] 许文峰.某隧道衬砌开裂的安全性分析及治理[J].公路,2008(5):211—214.
- [5] 吴江滨,张顶立,王梦恕.铁路运营隧道病害现状及检测评估[J].中国安全科学学报,2003,13(6):49—52.
- [6] 伍振志,杨林德,时蓓玲,等.裂缝对隧道管片结构耐久性影响及其模糊评价[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):224—228.
- [7] 韩常领,夏才初,卞跃威,等.六甲洞隧道健康状态的模糊综合评价[J].公路,2008(7):250—254.
- [8] 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,2012,31(10):2096—2102.
- [9] 张玉军,李治国.带裂纹隧道二次衬砌承载能力的平面有限元计算分析[J].岩土力学,2005,26(8):1201—1206.
- [10] 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—31.
- [11] 王亚琼,刘占良,张素磊,等.在役公路隧道素混凝土衬砌裂缝稳定性分析[J].中国公路学报,2015,28(7):77—85.
- [12] 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.
- [13] 李洪建,林志,满银.裂缝对衬砌结构承载力影响与评价方法研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):27—32.
- [14] 张芳,王淑鹏,张国锋,等.基于 FDEM 的隧道衬砌裂缝开裂过程数值分析[J].岩土工程学报,2016,38

584.32,743.60,907.79)

累减生成新序列:

$$\hat{F}^{(0)}(i) = (134.5, 145.41, 149.89, 154.52, 159.28, 164.19)$$

原本的序列为:

$$F^{(0)}(i) = (134.5, 143.0, 146.4, 150.0, 152.3, 155.1)$$

将上述数据代入公式,得到隧道变形预测结果(见表4),预测结果与实测值的对比见图1。

表4 隧道拱顶沉降监测数据与预测数据对比

监测时间/d	实测值/mm	预测值/mm	绝对残差/mm	预测值与实测值的误差/%
15	134.5	134.50	0.00	0.00
16	143.0	145.41	2.41	1.69
17	146.4	149.89	3.49	2.38
18	150.0	154.52	4.52	3.01
19	152.3	159.28	6.98	4.58
20	155.1	164.19	9.09	5.86

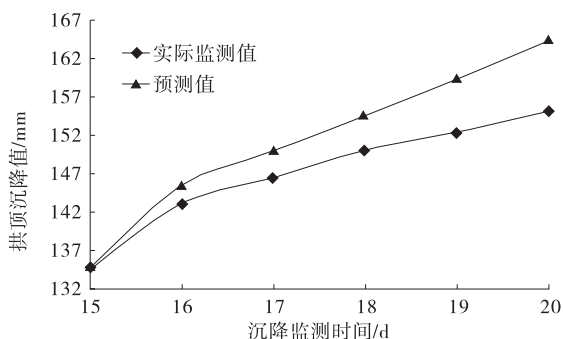


图1 隧道变形预测结果与实测值对比

由表4和图1可知:对15~20d隧道拱顶变形实测值和预测值的最大误差为5.86%,最小误差为零,模型精度符合要求;随着拱顶沉降监测时间的增加,拱顶沉降预测数据与实测数据间的相对误差虽然在可接受范围内,但误差越来越大。

### 3 结论

(1) 隧道拱顶变形随着时间的增加而增大。灰色预测模型的最大误差为5.86%,最小误差几乎为零,模型精度满足要求。

(2) 利用灰色理论构建预测模型,随着隧道拱顶沉降监测时间的增加,拱顶变形预测数据与实测数据的相对误差虽在允许范围内,但误差越来越大。

### 参考文献:

[1] 宋海萍.矿区地表沉降灰色系统理论预测模型对比研究[J].华北自然资源,2020(4):26-28.

[2] 兰泽全,傅本福,田冬梅,等.煤矿特别重大事故灰色预测与分析[J].煤炭技术,2020,39(7):81-83.

[3] 牛景太,梁彬彬,邓志平,等.施工期高心墙堆石坝沉降变形监控模型构建研究[J].南昌工程学院学报,2020,39(3):15-19.

[4] 秦拥军,孟建宇,谢良甫,等.基于灰色关联理论的Peck法隧道地表移动参数影响研究[J].城市轨道交通研究,2020,23(6):28-31.

[5] 刘鹏程,包太,蔡科,等.基于分数阶算子灰色理论隧道围岩变形预测[J].中国水运(下半月),2019,19(4):84-86.

[6] 杨洋.隧道紧急停车带施工工法计算机模拟分析及变形预测研究[D].西安:西安科技大学,2015.

[7] 何伟.灰色系统理论在隧洞工程中的应用研究[D].西安:西安理工大学,2010.

[8] 刘能铸.基于灰色理论的隧道围岩稳定性预测分析[D].重庆:重庆大学,2007.

[9] 姜帆.灰色理论在建筑工程质量综合评价中的应用研究[J].安徽建筑,2015,22(1):169-170.

[10] 黄凤娇,张跃刚,郑明君.基于灰色原理的最优测量方案选择[J].化学工程与装备,2011(10):34-36.

收稿日期:2021-03-18

(上接第157页)

(1):83-90.

[15] 王海龙,李庆斌.孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J].工程力学,2006,23(10):141-145.

[16] 邓华锋,李建林,刘杰,等.考虑裂隙水压力的岩体压剪裂纹扩展规律研究[J].岩土力学,2011,32(增刊1):297-302.

[17] 李夕兵,贺显群,陈红江.渗透水压作用下类岩石材料张开型裂纹启裂特性研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1317-1324.

[18] 汤连生,张鹏程,王洋.岩体复合型裂纹的扩展规律I:无水作用条件下[J].中山大学学报(自然科学版),2002,41(6):84-87.

[19] 汤连生,张鹏程,王洋.岩体复合型裂纹的扩展规律II:有水作用条件下[J].中山大学学报(自然科学版),2003,42(1):90-94.

[20] 汤连生,张鹏程,王洋.水作用下岩体断裂强度探讨[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3337-3341.

收稿日期:2021-01-17