

重庆兴隆隧道在流固耦合作用下围岩 稳定性研究

王 锋¹, 张雨浓², 朱宝强², 侯云乾¹, 李志军¹, 刘春树¹, 王述红²

(1. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100020;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 兴隆隧道位于重庆市渝北区, 由于位于重庆的特殊地理位置, 无论水库是否处于丰水期, 隧道下穿水库区段, 存水量始终保持稳定。根据流固耦合原理, 利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对隧道不同位置所承载的压力进行数值模拟计算。在现场实际测量结合公式计算得到隧道下穿水库段涌水量, 根据涌水量及水头高度得到隧道不同位置的受力情况, 模拟结果表明在拱底位置围岩受力最大, 其次是拱腰处, 受力最小为拱顶处。随着时间步的增加, 不同位置的应力变化速率相同。并且对于水头高度进行参数分析, 发现随着水头高度的增加, 隧道的应力增大。

关键词: 下穿水库隧道; 流固耦合; 稳定性分析

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0184—06

Surrounding Rock Stability Analysis of Chongqing Xinglong Tunnel Under Fluid-solid Coupling Condition

WANG Feng¹, ZHANG Yunong², ZHU Baoqiang², HOU Yunqian¹, LI Zhijun¹,
LIU Chunshu¹, WANG Shuhong²

(1. Chinese Northeast Architectural Design Institute Co., Ltd., Beijing 100020, China;

2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Xinglong tunnel is located in Chongqing Yubei District. Due to its special geographical location, whether the reservoir is in the period of abundant water or not, the tunnel passes through the reservoir section and the amount of water stored always remains stable. In this paper, based on the fluid-solid coupling principle, the finite element numerical simulation software of COMSOL Multiphysics was adopted to simulate the pressure bearing in different positions of the tunnel. According to the actual working conditions, the actual measurement in the field combined with the formula calculated the water inflow of the tunnel through the reservoir section. According to the water inflow and water head height, the stress of the tunnel at different positions was obtained. The simulation results showed that the stress of the surrounding rock was the largest at the arch bottom, followed by the arch waist, and the stress was the lowest at the arch top. With the increase of time step, the pressure change rate of different positions is the same. It is found that the stress of the tunnel increases with the increase of the head height.

Keywords: tunnel which runs through reservoir; fluid-structure interaction; stability analysis

随着我国社会经济发展进入的一个新的历史性的阶段, 我国的交通运输业也将进入一个新的发展

时期。在我国除西北地区, 每年的年降水量为 400 mm ~ 1 600 mm 之间, 地下水水位较高且地下水极

为丰富,隧道的软岩通常是处于富水状态,在“山城”重庆极为明显。在隧道的修建及运营过程中,因为其地质的复杂性及不确定性,施工过程中的涌水以及运营过程中水的渗流造成的围岩损伤,是隧道需要解决的安全问题。富水地层隧道承受的主要是地层压力和水荷载^[1]。尽管隧道设置排水沟,但是在排水装置下,由于应力场-渗流场耦合作用的影响以及对于围岩及支护结构的共同承载作用,在任何一种排水方式下,支护结构上的荷载确定是很困难的,对需要考虑水压力的隧道,除了考虑作用在结构上的围岩压力外,还需要考虑静水压力 and 围岩传导过来的渗透体积力^[2]。对于渗透体积力可分为水势梯度成比例的渗透动压力和与体积成比例的浮力^[3-5]。郭鸿雁等^[6]以某富水隧道为依托,借助FLAC^{3D}软件通过流固耦合数值分析了围岩无注浆条件下隧道外水压力随排水量的变化规律,进而提出了基于结构安全的隧道外水压力取值和地下水排放标准;李明等^[7]根据室内土工试验数据,建立三维有限元模型,基于流固耦合和不耦合效应,分析对比了富水大断面黄土隧道采用CRD法和双侧壁导坑法施工时的初期支护受力和变形特征、地表沉降及孔隙水压力场分布特征;徐建国等^[8]研究了不同围岩等级、埋深条件下,考虑流固耦合效应时,隧道开挖后围岩渗流场、应力场、位移场及塑性区的分布特征,探讨了流固耦合效应对围岩稳定性的影响。与非耦合条件下计算结果的对比分析表明,流固耦合效应对开挖后的围岩稳定性具有较显著的影响。陈明奎^[9]以某下穿库区铁路隧道为依托工程,对比分析有无渗流场作用和不同水深条件下,隧道结构应力变化规律以及围岩变形、塑性区和渗流场的变化特性,同时还考虑隧道加固圈厚度和渗透系数对围岩稳定性的影响。本文以重庆兴隆隧道为例,对围岩的稳定性进行流固耦合研究。

1 工程概况

兴隆隧道进洞位于重庆市渝北区木耳镇良桥村,出洞位于重庆市渝北区木耳镇金岗村农业开发园区内。进洞口无公路经过,距离西侧最近的国道G210支线距离大约850 m,交通极不便利;出洞口有连接国道G210的水泥(村道)公路从上方经过,交通较便利。隧址区属构造侵蚀丘陵地貌区,隧道大体沿垂直构造线方向布设,与岩层走向呈大角度相交。隧道进洞口段位于后河深切的斜坡地带,后河走向与线路近于垂直相交,左线、右线进洞口均位

于斜坡地带,连接宋家湾大桥,斜坡坡向240°~260°,进洞口上部地形陡峭,坡角一般为70°~80°,局部陡崖坡角可达90°,隧道进洞口下地形较洞口上方地形平缓,地形坡角一般为30°~40°。隧道出洞口位于缓坡地带,斜坡向350°,沿隧道轴线地形较平缓,地形坡角一般为6°~12°,横坡较陡,地形坡角一般为30°~40°。隧址区分布地层主要为第四系全新统残坡积粉质黏土、素填土、崩坡积块石土,分布不均匀,部分地段基岩出露,出露地层岩性为侏罗系中统上沙溪庙组泥岩、砂岩。其中砂岩层为隧道的含水层。水质分析结果表明:区内地表水类型为 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^{-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na} \cdot \text{K}$ 型。据《公路工程地质勘察规范》^[10](JTG C20—2011)附录K判定,区内地下水对混凝土结构有微腐蚀性;对钢筋混凝土结构中钢筋有微腐蚀。位于隧道洞身120 m~400 m,有河水湾水库,属小II型水库,总库容量 $40.44 \times 10^4 \text{ m}^3$,河湾水库大坝为均质土坝,最大坝高21.2 m,坝顶宽2 m,坝长77 m。坝顶高程525 m,库底高程503 m,勘察期间水位508 m。隧道开挖ZK37+090.5—ZK37+170.5段砂岩层与河湾水库在同一含水层。按建筑限界宽10.25 m,高5.00 m拟定,上半断面半径为545 cm的三心圆曲墙结构,隧道内轮廓拱顶净高7.05 m,净宽10.66 m,内净空面积64.28 m²,周长31.17 m。隧道设计尺寸如图1所示。

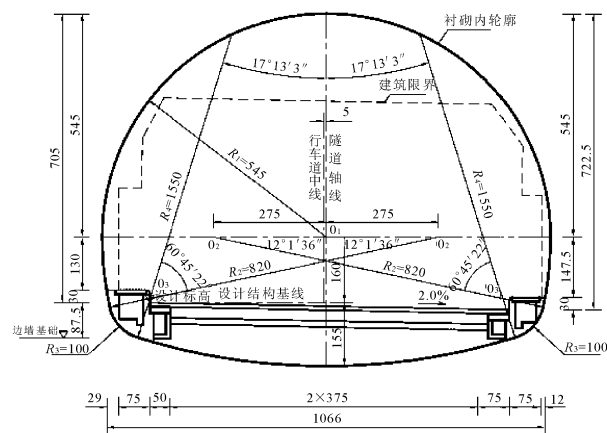


图1 兴隆隧道模型设计图(单位:cm)

2 基于流固耦合模型的隧道围岩稳定性研究

2.1 隧道流固耦合模型计算的基本假定

渗流场模型假定:

(1) 将隧道的围岩假设为各向同性、均质的等

效连续渗透介质。

(2) 在隧道为开挖前,隧道内的孔隙水处于静止的状态,在水库以下的岩体处于饱和状态,在隧道完成开挖后,隧道的围岩处于稳定渗流状态。

(3) 隧道围岩地下水服从 Darcy 渗流定律。

应力场基本假定:

(1) 计算中围岩采用 Mohr - Coulomb 弹塑性本构模型。

(2) 隧道的围岩初始应力场部考虑其应力场,仅考虑其自身重力。

2.2 隧道涌水量预测方法比较及计算

兴隆隧道的富水段围岩稳定性与隧道围岩上方的水库含水率及水库距离隧道拱顶位置有关,常规的隧道涌水量计算方法共有 4 种方法^[11-14]。

(1) 经验公式法:

$$Q_s = L \times K \times H(0.676 - 0.06K) \quad (1)$$

其中主要采用实际工程抽水、压水等实验资料来确定经验公式中水文地质的参数。

式中: K 为隧道围岩渗透系数, m/d ; L 为隧道涌水段的计算长度, m ; H 为水头至隧道横断面等价圆中心的距离, m 。

(2) 地下水动力学法:

① 经验公式:

$$Q_0 = L(0.0255 + 1.9224 \times H \times K) \quad (2)$$

② 古德曼公式:

$$Q_0 = L \frac{2\pi KH}{\ln \frac{4H}{d}} \quad (3)$$

式中: d 为隧道横断面等价圆的直径, m ; Q_0 为隧道通过涌水地段的最大涌水量, m^3/d 。

K 、 L 、 H 的含义与公式(1) 的含义相同。

(3) 简易水均衡法:

在确定研究范围内的大气降水量和计算范围内的地表补给面积,简易水均衡法计算的是平均涌水量,是考虑大气降水的全部或部分涌入隧道,其计算公式为:

$$Q_{cp} = (1000 \cdot F \cdot \alpha \cdot R) / 365 \quad (4)$$

式中: Q_{cp} 为隧道的平均涌水量, m^3/d ; F 为计算范围内的地表补给面积, km^2 ; R 为在一定范围内的大气降水量, mm ; 可以通过当地的气象局确定; α 为大气降水入渗系数。

(4) 裘布依理论公式:

$$Q_s = L \cdot K \frac{H^2 - h^2}{R - r} \quad (5)$$

式中: Q_s 为隧道的正常涌水量, m^3/d ; R 为隧道涌水地段的引用补给半径, m ; h 为隧道内排水沟假设水深, m ; r 为隧道洞身横断面等价圆的半径, m 。

K 、 L 、 H 的含义与公式(1) 的含义相同。

结合以上公式计算求解及现场实际测量,得到重庆兴隆隧道涌水量为 $1\,940 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.3 隧道围岩流固耦合模型建立

2.3.1 岩土体的渗流应力耦合方程

岩土体的初始孔隙率为:

$$n_0 = 1 - \frac{v_s}{v_0} \quad (6)$$

式中: v_0 为岩土体初始总体积; v_s 为岩土体初变形后总体积。

对岩土体进行不能压缩的假设,则岩土层被扰动后的土体孔隙率为:

$$n = 1 - \frac{v_s}{v} \quad (7)$$

对于小变形问题:

$$\varepsilon_v = \frac{v - v_0}{v_0} \quad (8)$$

联立式(6)、式(7)、式(8) 可得到:

$$n = \frac{n_0 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v} \quad (9)$$

在平面应变中, $\varepsilon_z = 0$, 所以单位体积应变:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (10)$$

根据本构方程:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E'_c} (\sigma_r - v'_c \varepsilon_\theta) \quad (11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E'_c} (\sigma_y - v'_c \varepsilon_x)$$

式中: $E'_c = \frac{E_c}{1 - v_c^2}$; $v'_c = \frac{v_c}{1 - v_c}$ 。

根据渗流力学中的 Kozeny - Carman 方程:

$$k = \frac{R^2}{L} n^3 \quad (12)$$

式中: L 为常量; R 为水力半径; K 为渗透系数; n 为孔隙率, 将式(9) 代入式(12) 可以得到:

$$k = \frac{k_0}{(1 - \varepsilon_v)^3} \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0} \right)^3 \quad (13)$$

式中: $k_0 = \frac{R^2}{L}$

2.3.2 渗流场的控制方程

渗流场在计算时利用 Darcy 渗流法则,在单位面积下的渗流量公式为^[15-16]:

$$q = k \cdot i \tag{14}$$

式中: q 为单位面积的渗透力; k 为 Darcy 定律的渗透系数; i 为水力坡度。

渗流场在计算时采用的基本方程式如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \tag{15}$$

式中: H 表示总水头; k_x 、 k_y 、 k_z 分别表示 x 、 y 、 z 方向上的渗透系数; Q 表示渗流场的流量; Θ 表示渗流场的体积含水率; t 表示时间。

隧道围岩渗流场中,稳定的渗流状态中流入和流出的量不随时间发生变化,即围岩的体积含水率不随时间变化,得到公式为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = 0 \tag{16}$$

岩土体特性的变化及隧道围岩应力状态的变化将影响着隧道围岩体积含水率的变化。体积含水率的变化与孔隙水压力的变化关系如下:

$$\partial \Theta = m_w \partial \mu_w \tag{17}$$

式中: m_w 为阻流系数。

另外总水头可视为压力水头和位置水头之和,即:

$$H = \frac{\mu_w}{\gamma_w} + z \tag{18}$$

式中: H_w 为总水头; μ_w 为孔隙水压; γ 为水的重度; z 为标高。

联立式(14)一式(18) 可得:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H - z)}{\partial t} \tag{19}$$

当标高一定时,对时间求导后函数为零,即变为下式:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \tag{20}$$

隧道围岩为二维模型,其渗流只有 x 、 y 两个方向,则根据式(20) 可得到二维的渗流方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \tag{21}$$

2.3.3 应力场的控制方程

对应力场控制方程进行方程整理,依据弹塑性力学相关理论,可求得岩土体应变场的控制方程。求解有效应力影响下的土体的平衡方程为:

$$\sigma_{ij,j} + F_i - (\alpha \delta_{ij} p)_{,j} = 0 \tag{22}$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为应力张量; α 为 Biot 系数; p 为孔隙水压力; F_i 为土体的体积力分量。

岩土体变形的几何方程为:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{23}$$

式中: ε_{ij} 为应变张量; u 为位移。

岩土体应变场的本构方程采用弹塑性本构方程,本构方程的增量表达式为:

$$\{d\sigma'_{ij}\} = [D_{ep}] \{d\varepsilon_{ij}\} \tag{24}$$

式中: $\{d\sigma'_{ij}\}$ 为有效应力增量; $[D_{ep}]$ 为弹塑性矩阵; $\{d\varepsilon_{ij}\}$ 为应变增量。

假设岩体只发生孔隙变形,则孔隙度与体积应变的关系为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1 - \phi_0}{(1 + \varepsilon_v)^2} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \tag{25}$$

式中:体积应变 $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$; ϕ_0 为初始孔隙度。

通过对有效应力方程和弹塑性本构方程的联立得出应力与应变的关系方程,该方程表示出应力场是通过应力的改变影响岩体的应变而作用于渗流场的。

2.4 隧道围岩流固耦合模型有限元分析

2.4.1 兴隆隧道耦合模型建立

兴隆隧道下穿水库段,水库位于隧道顶部 30 m 处。本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元数值模拟软件对隧道施工完成后,隧道流固耦合隧道围岩稳定性分析。隧道假设为半径为 5 m 的圆形隧道,即 $r_0 = 5$ m,隧道水头高为 30 m,即 $h_a = 30$ m,其模拟比例及网格划分如图 2 所示。

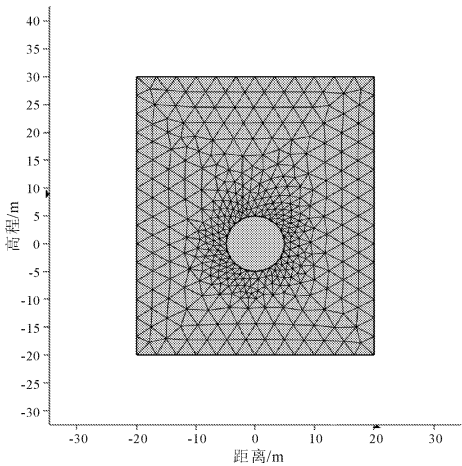


图 2 兴隆隧道有限元模拟示意图

兴隆隧道围岩主要分为强风化泥岩、中风化泥岩、强风化砂岩及中风化砂岩,具体的物理性质参数如表 1 所示。

表 1 兴隆隧道围岩物理性质参数

材料类型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙率	渗透率/ 10^{-11}m^2	内摩擦角/($^{\circ}$)
强风化泥岩	20.80	0.25	2480	0.1146	17.0	33.70
中风化泥岩	22.13	0.19	2520	0.2052	38.0	34.55
强风化砂岩	25.70	0.16	2510	0.0781	1.8	33.71
中风化砂岩	28.90	0.19	2540	0.067	1.9	32.44
水	—	—	1000	—	—	—

2.4.2 流固耦合计算结果分析

隧道在施工完成后由于上部水库作用发生隧道围岩的流固耦合,计算隧道流固耦合围岩所承受的压力,其中图 3 表示隧道施工完成后发生渗流时,隧道围岩的受力情况。

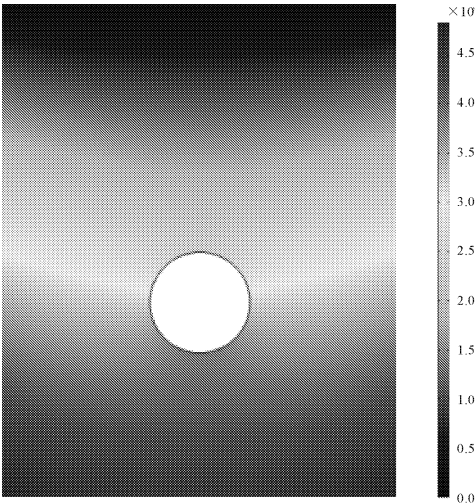


图 3 隧道围岩受力示意图(MPa)

选取隧道中三个点进行围岩受力分析,其坐标点如 4 图所示,得到如图 5 所示的曲线示意图。

图 5 中横坐标表示运算的时间步,纵坐标表示的是测试位置所承载的压力变化。可以得到,三个位置的压力变化速率大致相同,但承载的压力不同,在流固耦合发生一段时间后,所承载的压力不再发生变化保持稳定。

图 5 中可以得到,在以圆形隧道为模型的隧道底部受到的压力最大,其次为隧道的拱腰处受到的压力,隧道在拱顶处所受到的压力最小。其中拱底

受到的压力为 3.87 MPa,拱腰处受到的压力为 3.19 MPa,拱顶处受到的压力为 2.34 MPa。

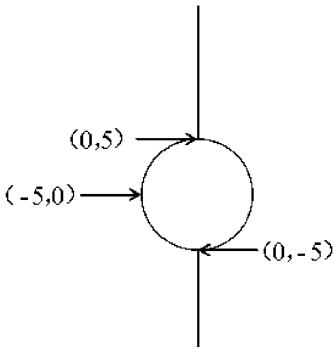


图 4 隧道围岩受力测试点示意图

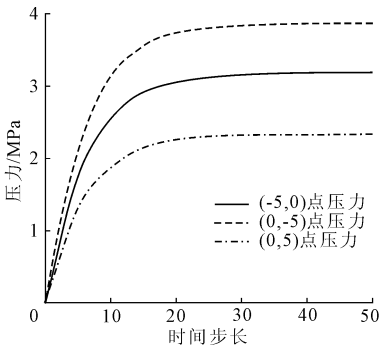


图 5 隧道围岩受力测试点曲线示意图

改变水库距隧道顶部的距离,判断水头的高度变化对隧道各个位置所受的压力大小的影响,分别将水头高度设置为 30 m、20 m 及 10 m,求在不同的水头高度下所承载的压力。

从图 6 中可以得到,对于 (-5,0) 测试点即位于隧道拱腰处的测试点,水头高度的变化对于此位置所受的压力产生变化,但变化不大。 L_1 、 L_2 及 L_3 分别表示隧道在顶部距离水库底部 30 m、20 m 及 10 m 水头高度下所受的压力,其数值分别为 3.19 MPa、3.09 MPa 及 2.99 MPa。

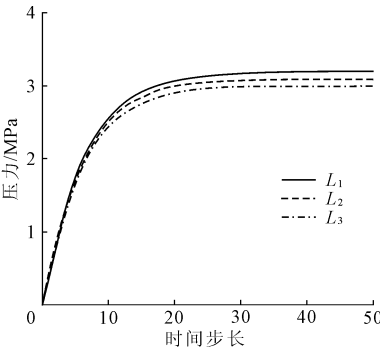


图 6 隧道 (-5,0) 测试点在不同水头高度作用下受力变化示意图

从图7中可以得到,对于(0,5)测试点即位于隧道拱顶处的测试点,水头高度的变化对于此位置所受的压力产生变化,变化同样不大。在 L_1 、 L_2 及 L_3 分别表示隧道在顶部距离水库底部30 m、20 m及10 m水头高度下所受的压力,其数值分别为2.34 MPa、2.24 MPa及2.14 MPa。

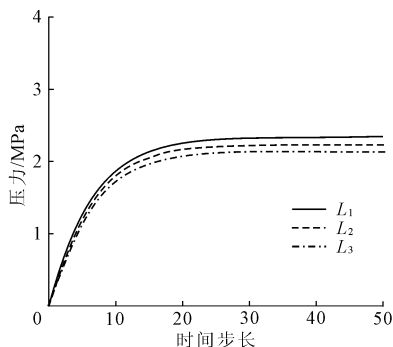


图7 隧道(0,5)测试点在不同水头高度作用下受力变化示意图

从图8中可以得到,对于(-5,0)测试点即位于隧道拱底处的测试点,水头高度的变化对于此位置所受的压力产生变化。 L_1 、 L_2 及 L_3 分别表示隧道在顶部距离水库底部30 m、20 m及10 m水头高度下所受的压力,其数值分别为3.84 MPa、3.77 MPa及3.67 MPa。

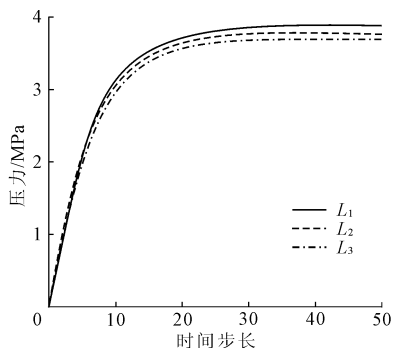


图8 隧道(-5,0)测试点在不同水头高度作用下受力变化示意图

3 结 论

(1) 针对重庆兴隆隧道,因其下穿的水库存储量大,造成隧道围岩的涌水量巨大,根据计算及实际测量,得到涌水量平均数值为 $1\,940\text{ m}^3/\text{d}$ 。在实际工程中,应将测量所得涌水量与计算值相比较得到隧道涌水量的最优解。

(2) 按照隧道的实际工况,对隧道的不同位置所承载的压力利用有限元软件进行计算,得到结论,隧道的拱底承载的压力大于拱腰及拱顶位置的压

力,数值分别为3.87 MPa、3.19 MPa及2.34 MPa。可以得到在实际工程中,不同位置的围岩损伤程度不同,拱底位置应进行保护。

(3) 根据不同水头高度进行参数分析,发现隧道的各个位置都随水头的高度升高承载的压力变大,其变化速率大致相同。

参考文献:

- [1] 周 祥. 秀宁隧道下穿龙潭水库施工技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [2] 侯云乾,张 泽,朱宝强,等. 富水岩质隧道开挖稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):19-24.
- [3] 李宝东,任艺鹏,张立新,等. 一种小波-模糊控制 Elman 网络的隧道位移预测模型[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):176-180.
- [4] 齐 龙,李志华,王述红. 考虑黏性成分时的渗流固结理论及其在工程中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):42-46,175.
- [5] 郑立夫,高永涛,周 喻,等. 基于流固耦合理论水下隧道冻结壁厚度优化研究[J]. 岩土力学,2020,41(3):1029-1038.
- [6] 郭鸿雁,纪亚英,方 林,等. 基于流固耦合分析的富水隧道外水压力与限量排放标准研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(S1):165-168.
- [7] 李 明,严松宏,潘春阳,等. 富水大断面黄土隧道开挖流固耦合效应分析[J]. 现代隧道技术,2019,56(4):81-88.
- [8] 徐建国,于松聆,王 刚,等. 基于流固耦合理论的隧道围岩稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):62-67.
- [9] 陈明奎. 基于流固耦合理论下穿库区隧道围岩稳定性分析[J]. 铁道标准设计,2016,60(4):72-77.
- [10] 公路工程地质勘察规范:JTG C20—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [11] 高虎军. 青坪隧道流固耦合分析及涌水量预测研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [12] 赵亚龙,任 刚,孔 君,等. 小净距隧道合理滞后距离的确定[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):215-220.
- [13] 黄 震,李晓昭,李仕杰,等. 隧道突水模型试验流固耦合相似材料的研制及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(12):3029-3039.
- [14] 周国栋. 考虑流固动力耦合的饱和土体内隧道结构地震反应分析[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [15] 郭晓杰. 富水节理岩体中隧道开挖流固耦合效应研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [16] 刘 健. 富水地层大断面隧道开挖流固耦合效应分析[D]. 成都:西南交通大学,2017.