

基于四种曲线不同当量半径算法的对比研究*

茅靳丰, 廖露, 陈尚沅, 李超峰, 邓忠凯

(解放军理工大学 国防工程学院, 南京 210007)

摘要:为探讨不同曲线代替拱形断面地下工程顶部曲线对当量半径及围护结构传热的影响趋势,利用圆弧、椭圆、抛物线和双曲线分别代替求得当量半径值的计算公式。基于MATLAB和COMSOL软件针对宽度参数 L 、起拱高度 H 和拱高 h 进行模拟,分析结果发现,在不考虑明显偏离情况下,3个参数对当量半径值的影响趋势总体上分别保持一致, $R_{\text{dif-s}}$ 与 $R_{\text{dif-p}}$ 的差值在对应 L 、 H 和 h 的变化条件下最大分别可达0.43 m、0.45 m和0.65 m。对比发现,湿周法所得当量半径值均大于截面积法,两者差值在对应参数变化条件下最大分别可达1.03 m、0.91 m和0.94 m。且从工程最高温度的角度分析,采用截面积法计算模拟宜选择椭圆,采用湿周法则宜选择抛物线。若给定相同热流密度,则湿周法计算所得的温升大于截面积法。

关键词:曲线;当量半径;拱形;地下工程;影响趋势

中图分类号:TU928

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)04-0920-08

Comparative Study on Different Equivalent Radius Algorithms Based on Four Curves

Mao Jinfeng, Liao Lu, Chen Shangyuan, Li Chaofeng, Deng Zhongkai

(College of National Defense Engineer, PLA Univ. of Sci. Tech., Nanjing 210007, P.R. China)

Abstract: In order to study the effect of different curves in place of the top curve of arch section in underground engineering on the equivalent radius and the heat-transfer of envelope, theoretical formulas of equivalent radius are obtained by using circular arc, ellipse, parabola and hyperbolic respectively. According to the simulation to the width parameter L , the springing height H and the height h of arch based on MATLAB and COMSOL, the results show that the overall impact of each parameter on the equivalent radius is consistent without considering the obvious deviation and that the biggest difference between $R_{\text{dif-s}}$ and $R_{\text{dif-p}}$ in the corresponding L , H and h changes can respectively reach up to 0.45 m, 0.43 m and 0.65 m. It is found by comparison that the equivalent radius of the wetted perimeter method is larger than that of the cross section method and that the biggest difference between the two methods in the corresponding L , H and h changes can respectively reach up to 1.03 m, 0.91 m and 0.94 m. And from the view of the maximum temperature of engineering, ellipse and parabola should be respectively selected when using the cross section method and wetted perimeter method to simulate. Given the same heat flux, the temperature rise of the wetted perimeter method is larger than that of the cross section method.

Keywords: curve; equivalent radius; arch; underground engineering; impact trend

* 收稿日期:2017-12-29(修改稿)

作者简介:茅靳丰(1962-),男,江苏盐城人,博士,教授,主要从事地下工程热湿理论研究工作。

E-mail:maojinfeng628@sina.com

0 引言

近年来,开发地下空间已经成为我国城市建设发展的一个重点方向,加之我国经济水平的持续快速提高,越来越多的学者不断研究地下工程的热湿环境保障技术,以期不断提升地下工程的保障品质和提高应对不同环境下的保障能力^[1-6]。传热是地下工程负荷的重要组成部分,其计算结果直接影响到工程负荷设计的准确性和运行时期的可靠性^[7-9]。

文献[10~12]中为更精确计算地下工程岩土环境下的传热问题,对地下工程围护结构传热过程中的影响因素进行了详细地分析,建立了地下工程传热模型。文献[13~14]中将无限长拱形地下工程换算成当量圆柱体,介绍了地下工程的热湿负荷算法并进行了模拟和实例计算。文献[15~16]中以拱形截面地下工程为基础,在不换算成当量圆柱体的情况下,对不同气象参数条件下地下工程围护结构及其周边岩土传热过程进行了数值模拟,建立了相应的传热数学模型。文献[17]中提出将无限长拱形断面浅埋工程的断面等周长地简化成矩形,可用来近似计算工程的热湿负荷。

相关文献分析了地下工程围护结构传热过程中的诸多影响因素,对无限长拱形断面地下工程的断面进行了不同处理,建立了相应的计算模型,但并未讨论不同的处理方式会对当量半径造成何种影响。基于探讨不同曲线代替拱形断面地下工程顶部曲线对当量半径值的影响趋势,本文利用圆弧、椭圆、抛物线和双曲线4种曲线代替工程截面的顶部曲线,求得相应的截面积和湿周长,进而求得4种情况下当量半径值的理论公式,并将理论公式代入MATLAB软件中进行绘图分析,比较4种情况下所得结果,分析各个情况下变量参数对当量半径值的影响趋势。为进一步研究当量半径值算法对围护结构的热影响,将已得半径值代入COMSOL软件中模拟,分析找出最宜采用的替代曲线。

1 理论分析

1.1 工程概况

对于无限长的拱形断面地下工程,为得到其热、湿负荷,通常将其当作无限长当量圆柱体进行计算。图1所示为某无限长拱形断面地下工程截面图,为讨论其尺寸参数变化对所求当量半径值的

影响,设工程宽度为 $2L$,起拱高度为 H ,拱高为 h 。为便于后续模拟,假定该地下工程处于预热期,时间为720 h,内边界恒热流密度为 10 W/m^2 ,岩石物性参数恒定,分别取导热系数为 $2.5 \text{ W/(m} \cdot \text{℃)}$ 、热扩散系数为 $0.018 \text{ m}^2/\text{h}$,且设岩石自然温度为 12 ℃ 。

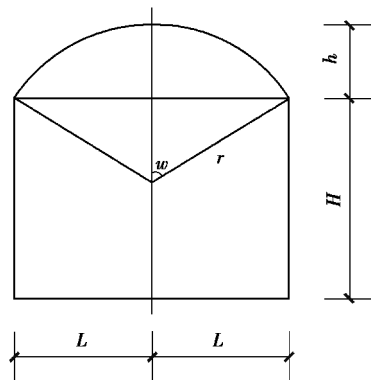


图1 工程示意图1

Fig. 1 Engineering sketch 1

若设其截面积为 S ,湿周长为 P ,则对应的当量半径为

$$\text{截面积法: } R_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1)$$

$$\text{湿周法: } R_p = \frac{P}{2\pi} \quad (2)$$

根据由截面积和湿周长求当量半径的方法,只要测得某个指定工程的宽度、高度和拱高,就可求得当量半径。但用何种曲线代替顶部曲线求得截面积和湿周长,仍需讨论。

将无限长拱形断面地下工程简化为无限长空气圆柱体,在 τ 时刻沿径向 r 处的传热满足方程:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = 0.018 \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right)$$

边界条件:

$$-2.5 \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} = 10$$

$$t(\infty, \tau) = t_o = 12$$

初始条件:

$$t(r, 0) = t_o = 12 (r \geq R)$$

1.2 代替方法

1.2.1 圆弧代替拱形曲线

若该工程截面顶部拱形曲线是一段圆弧,且圆心位于其对称轴上某一点,半径设为 r ,对应的圆心角设为 $2w$,如图1所示。

由图可列出:

$$L^2 + (r - h)^2 = r^2$$

解得此时该工程截面积 S_{cir} 为:

$$S_{\text{cir}} = 2HL + \frac{(L^2 + h^2)^2}{4h^2} \arcsin \frac{2hL}{L^2 + h^2} - \frac{L^2 - h^2}{2h} L$$

湿周长 P_{cir} 为:

$$P_{\text{cir}} = 2(L + H) + \frac{L^2 + h^2}{h} \arcsin \frac{2hL}{L^2 + h^2}$$

则根据式(1)、式(2)进而求得对应的当量半径 $R_{\text{s,cir}}$ 与 $R_{\text{p,cir}}$ 分别为:

$$R_{\text{s,cir}} =$$

$$\sqrt{\frac{2HL}{\pi} + \frac{(L^2 + h^2)^2 \arcsin \frac{2hL}{L^2 + h^2}}{4\pi h^2} - \frac{L(L^2 - h^2)}{2\pi h}} \quad (3)$$

$$R_{\text{p,cir}} = \frac{L + H}{\pi} + \frac{(L^2 + h^2) \arcsin \frac{2hL}{L^2 + h^2}}{2\pi h} \quad (4)$$

1.2.2 椭圆代替拱形曲线

若该工程截面顶部拱形曲线是椭圆的一半,且椭圆中心位于该工程截面矩形上边的中点处,上边长的一半 L 为长半轴长,拱高 h 为短半轴长。此时,该工程截面积 S_{ell} 为:

$$S_{\text{ell}} = 2HL + \frac{\pi hL}{2}$$

湿周长 P_{ell} 为:

$$P_{\text{ell}} = 2L + 2H + \pi h + 2(L - h) = (\pi - 2)h + 2(2L + H)$$

考虑到 $L \leq h$ 时,即椭圆的长半轴长与短半轴长互换的情况,得到更普遍适用的湿周长结果为:

$$P_{\text{ell}} = \begin{cases} (\pi - 2)h + 2(2L + H) & (L \geq h) \\ \pi L + 2(2L + H) & (L < h) \end{cases}$$

同理,根据式(1)、式(2)可求得对应的当量半径 $R_{\text{s,ell}}$ 与 $R_{\text{p,ell}}$ 分别为:

$$R_{\text{s,ell}} = \sqrt{\frac{2HL + \frac{\pi hL}{2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{2HL}{\pi} + \frac{hL}{2}} \quad (5)$$

$$R_{\text{p,ell}} = \begin{cases} \frac{(\pi - 2)h}{2\pi} + \frac{2L + H}{\pi} & (L \geq h) \\ \frac{L}{2} + \frac{h + H}{\pi} & (L < h) \end{cases} \quad (6)$$

1.2.3 抛物线代替拱形曲线

若该工程截面顶部拱形曲线是抛物线的一部分,且抛物线的对称轴与该工程截面的对称轴重合,建立如图2所示直角坐标系。

由图可设抛物线方程为 $y = ax^2 + h$, 将点 $(L, 0)$

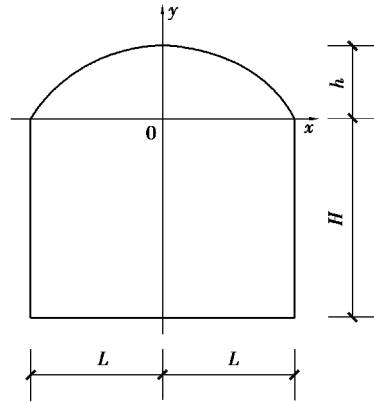


图2 工程示意图2

Fig. 2 Engineering sketch 2

代入方程求得,此时该工程截面积 S_{par} 为:

$$S_{\text{par}} = 2HL + \frac{4}{3}hL$$

湿周长 P_{par} 为:

$$P_{\text{par}} = 2(L + H) + \sqrt{L^2 + 4h^2} + \frac{L^2}{2h} \ln \frac{2h + \sqrt{L^2 + 4h^2}}{L}$$

同理,根据式(1)、式(2)可求得对应的当量半径 $R_{\text{s,par}}$ 与 $R_{\text{p,par}}$ 分别为:

$$R_{\text{s,par}} = \sqrt{\frac{2HL + \frac{4}{3}hL}{\pi}} = \sqrt{\frac{2HL}{\pi} + \frac{4hL}{3\pi}} \quad (7)$$

$$R_{\text{p,par}} = \frac{2(L + H) + \sqrt{L^2 + 4h^2} + \frac{L^2}{2h} \ln \frac{2h + \sqrt{L^2 + 4h^2}}{L}}{2\pi} = \frac{(L + H)}{\pi} + \frac{\sqrt{L^2 + 4h^2}}{2\pi} + \frac{L^2}{4\pi h} \ln \frac{2h + \sqrt{L^2 + 4h^2}}{L} \quad (8)$$

1.2.4 双曲线代替拱形曲线

若该工程截面顶部拱形曲线是一支双曲线的一部分,且这支双曲线的对称轴与该工程截面的对称轴重合,建立如图3所示直角坐标系,并设该工程截面矩形上边中点为这支双曲线的焦点。

由图可设这支双曲线的方程为:

$$\frac{x^2}{a} - \frac{y^2}{b} = 1$$

将焦点 C 处条件代入方程得到,此时该工程截面积 S_{hyp} 为:

$$S_{\text{hyp}} = 2HL + \frac{hL(L - h)}{L - 2h} - \frac{h^3 \sqrt{L}}{(L - 2h) \sqrt{L - 2h}} \cdot \ln \frac{\sqrt{L(L - 2h)} + L - h}{h}$$

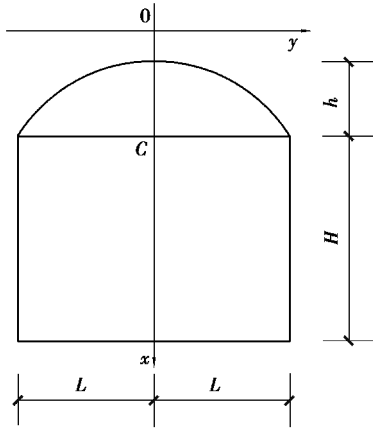


图3 工程示意图3

Fig. 3 Engineering sketch 3

湿周长 P_{hyp} 为:

$$P_{hyp} = 2L + 2H + 2 \int_a^{\sqrt{a^2+b^2}} \sqrt{1 + \left(\frac{bx}{a\sqrt{x^2-a^2}} \right)^2} dx$$

同理,根据式(1)、式(2)可求得对应的当量半径 $R_{s,hyp}$ 与 $R_{p,hyp}$ 分别为:

$$R_{s,hyp} = \sqrt{\frac{2HL}{\pi} + \frac{hL(L-h)}{\pi(L-2h)} - \frac{h^3 \sqrt{L} \ln \frac{\sqrt{L(L-2h)} + L - h}{h}}{\pi(L-2h)\sqrt{L-2h}}} \quad (9)$$

$$R_{p,hyp} = \frac{L+H}{\pi} + \frac{\int_a^{\sqrt{a^2+b^2}} \sqrt{1 + \left(\frac{bx}{a\sqrt{x^2-a^2}} \right)^2} dx}{\pi} \quad (10)$$

由于式(10)中积分难以得到解析解,故采用矩形划分求解方法利用软件求出其数值解^[18]。

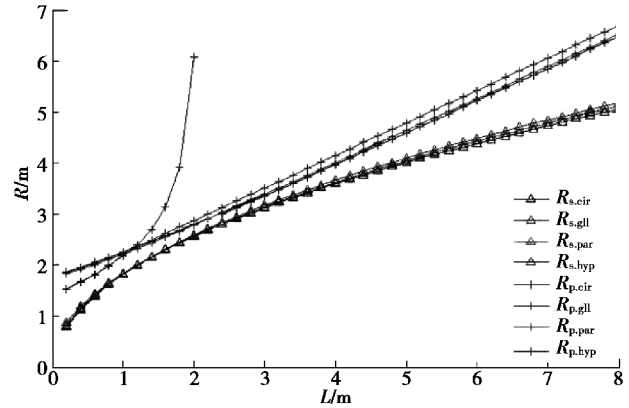
2 绘图分析

为研究地下工程截面的宽度、起拱高度和拱高对当量半径的影响趋势,利用 MATLAB 软件将式(3)~(10)绘成当量半径随 L 、 H 和 h 的变化曲线。采用控制变量法对这3个参数分别绘制,即在绘制当量半径随其中某个参数变化的曲线时,其余2个参数设为定值。为方便运算且前后统一,规定当 L 、 H 和 h 取定值时的数值分别为4、4.4和1.1,单位均为 m。

2.1 当量半径比较分析

(1)如图4所示,在宽度参数 L 的整个变化区间(0,8]内,根据截面积求得的4个当量半径值随

其变化的趋势一致,但 $R_{s,cir}$ 与 $R_{s,par}$ 的值一直近似相等,而当 L 在(0,3]内递增时, $R_{s,ell}$ 、 $R_{s,hyp}$ 的值与 $R_{s,cir}$ 、 $R_{s,par}$ 的值近似相等,之后则分别逐渐变大与变小。

图4 R - L 曲线图Fig. 4 R - L curves

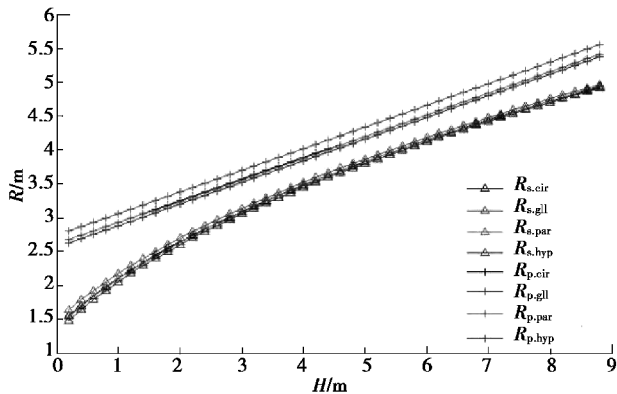
(2)在 L 的变化区间(0,1.2]内, $R_{p,ell}$ 、 $R_{p,par}$ 与 $R_{p,hyp}$ 的值基本相等,而 $R_{p,cir}$ 的值出现了明显向下偏离;当 L 在[2,8]内变化时, $R_{p,ell}$ 的值一直最大, $R_{p,cir}$ 与 $R_{p,par}$ 的值基本一致;当 L 处于[1.4,2.2]范围内时, $R_{p,hyp}$ 的值出现很大的向上偏差,且产生断点并在该处趋于无穷,这是由于 $R_{p,hyp}$ 的计算公式中的分母项含有 L 与 h ,若分母趋近于0,则 $R_{p,hyp}$ 的值会趋近于无穷; $R_{p,hyp}$ 的值在 L 大于2.4后,与 $R_{p,cir}$ 和 $R_{p,par}$ 的变化趋势一致,但一直比其余三者的值小。

(3)根据湿周长求得的当量半径值总体上都要大于根据截面积求得的当量半径,且 L 在[2,3]之间变化时,这个差距最小,当 L 向两端变化时,这个差距明显随之增大。

2.1.1 当量半径-起拱高度曲线

(1)如图5所示,在起拱高度 H 的整个变化区间(0,8.8]内,根据截面积求得的四个当量半径值随其变化的趋势一致,但 $R_{s,cir}$ 与 $R_{s,par}$ 的值一直近似相等,而 $R_{s,ell}$ 与 $R_{s,hyp}$ 的值分别一直最大与最小,且随着 H 的增大逐渐与 $R_{s,cir}$ 、 $R_{s,par}$ 的值接近。

(2)在 H 的整个变化区间(0,8.8]内,根据截面积求得的四个当量半径值随其变化的趋势完全一致,但 $R_{p,cir}$ 与 $R_{p,par}$ 的值一直近似相等,而 $R_{p,ell}$ 与 $R_{p,hyp}$ 的值分别一直最大与最小,且随着 H 的变化与 $R_{p,cir}$ 、 $R_{p,par}$ 的差值并无明显变化,这是因为其理

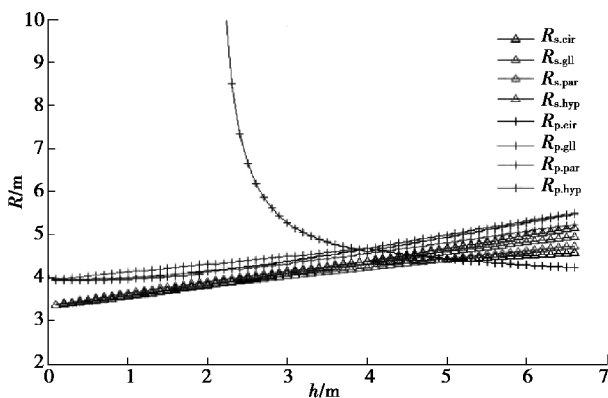
图 5 R - H 曲线图Fig. 5 R - H curves

论解中 H 项是一定的。

(3) 根据湿周长求得的当量半径值总体上都要大于根据截面积求得的当量半径值,且 H 在 $[5, 6]$ 之间变化时,这个差距最小,当 H 向两端变化时,这个差距明显随之增大。

2.1.2 当量半径-拱高曲线

(1) 如图 6 所示,在拱高 h 的整个变化区间 $(0, 6.6]$ 内, $R_{s,ell}$ 的值在 h 取 4 之前一直最大,之后仅次于 $R_{s,hyp}$; $R_{s,hyp}$ 的值在 h 取 2 之前一直最小,当 h 在 $[2, 4]$ 的范围内时则与 $R_{s,cir}$ 的值近似相等,之后一直最大; $R_{s,par}$ 的值在 h 取 2 之前与 $R_{s,cir}$ 的值近似相等,之后则明显向下偏离; $R_{s,cir}$ 的值在 h 取 4 之前一直处于中间水平,在 h 取 4 处出现拐点,这是由于 $R_{s,cir}$ 在此处开始取得复数值,而利用 MATLAB 作图时所取值是其实部大小。

图 6 R - h 曲线图Fig. 6 R - h curves

(2) 在 h 的变化区间 $(0, 1.8]$ 内, $R_{p,cir}$ 、 $R_{p,par}$ 与 $R_{p,hyp}$ 的值基本相等,而 $R_{p,ell}$ 的值略偏大;当 h 在 $[2.2, 4]$ 内变化时, $R_{p,ell}$ 的值相对 $R_{p,cir}$ 与 $R_{p,par}$ 一直偏大, $R_{p,hyp}$ 的值出现了图 4 类似的断点情况,产生

原因相同;当 h 在 4 之后变化时, $R_{p,cir}$ 的值出现明显的向下偏差, $R_{p,ell}$ 、 $R_{p,par}$ 与 $R_{p,hyp}$ 的变化趋势一致,但 $R_{p,ell}$ 与 $R_{p,hyp}$ 的值基本相等并大于 $R_{p,par}$ 。

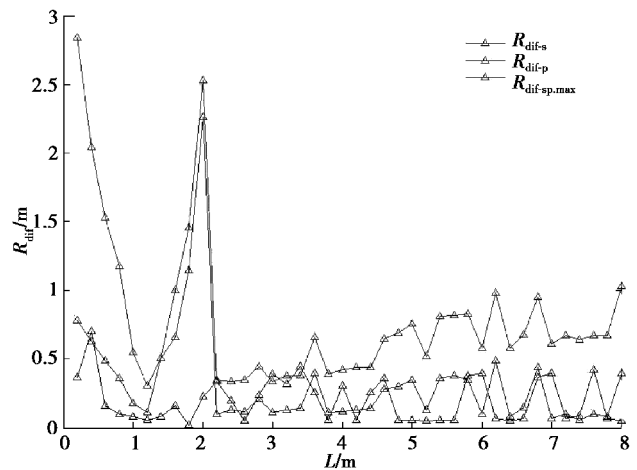
(3) 在不考虑以上两个结果中出现的明显偏离情况下,根据湿周长求得的当量半径值总体上都要大于根据截面积求得的当量半径值,且 h 在 $[2, 3]$ 之间变化时,这个差距最小,当 H 向两端变化时,这个差距随之增大,但增大的程度没有 3.2 和 3.3 中明显。

2.2 差值比较分析

为进一步研究单参数变化时不同当量半径值之间的差异大小,考察 R_{dif-s} 、 R_{dif-p} 和 $R_{dif-sp,max}$ 在各个参数变化下的取值并绘图分析。其中, R_{dif-s} 为截面积法中最大与最小当量半径值之差, R_{dif-p} 为湿周法中最大与最小当量半径值之差, $R_{dif-sp,max}$ 为截面积法中最大当量半径值与湿周法中最小当量半径值之差。

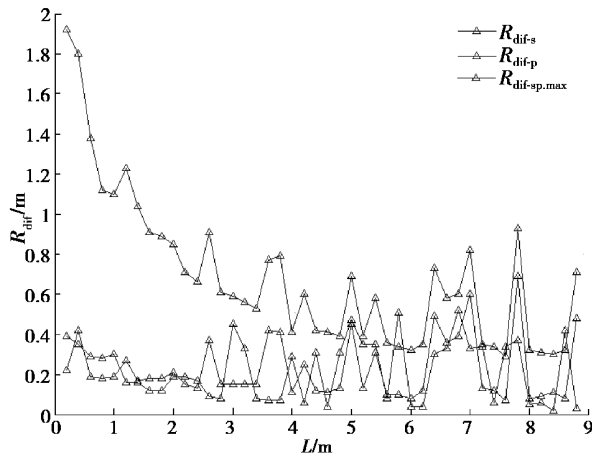
2.2.1 当量半径差值-宽度曲线

如图 7 所示,在宽度参数 L 的整个变化区间 $(0, 8]$ 内、不考虑明显偏离情况下, R_{dif-s} 的值总体上比 R_{dif-p} 小,且两者的差值最大可到 0.43 m,而根据截面积法和湿周法所得的当量半径值之间的差值最大可达 1.03 m。

图 7 R_{dif} - L 曲线图Fig. 7 R_{dif} - L curves

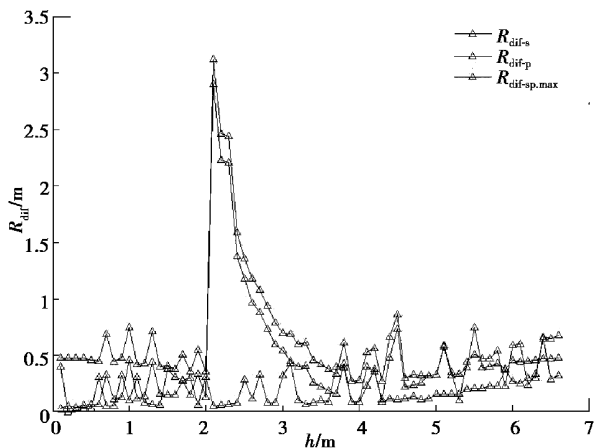
2.2.2 当量半径差值-起拱高度曲线

如图 8 所示,在宽度参数 H 的整个变化区间 $(0, 8.8]$ 内、不考虑明显偏离情况下, R_{dif-s} 与 R_{dif-p} 的值相互交错、差别不明显,且两者的差值最大可达 0.45 m,而根据截面积法和湿周法所得的当量半径值之间的差值最大可达 0.91 m。

图8 $R_{\text{dif}}-H$ 曲线图Fig. 8 $R_{\text{dif}}-H$ curves

2.2.3 当量半径差值-拱高曲线

如图9所示,在宽度参数 h 的整个变化区间 $(0, 6.6]$ 内,不考虑明显偏离情况下, $R_{\text{dif-s}}$ 与 $R_{\text{dif-p}}$ 的变化趋势相近,且两者波动的最大值相比的差值约为 0.65 m,而根据截面法和湿周法所得的当量半径值之间的差值最大可达 0.94 m。

图9 $R_{\text{dif}}-h$ 曲线图Fig. 9 $R_{\text{dif}}-h$ curves

3 模拟分析

基于 COMSOL 软件模拟分析不同当量半径算法对以当量圆柱体代替拱形断面地下工程进行计算过程中温升的影响。以围护结构表面温度即最高温度值为研究对象,分别作出与上文三种情况对应的最高温度 T_{max} 的变化曲线图并分析。图10为模拟示意图。图11为最高湿度-宽度曲线图,图12为最高湿度起拱曲线图,图13为最高湿度-拱高曲线图。

3.1 最高温度-宽度曲线图

(1)在宽度参数 L 的整个变化区间 $(0, 8]$ 内,基于截面法所得的最高温度值随其变化的趋势一

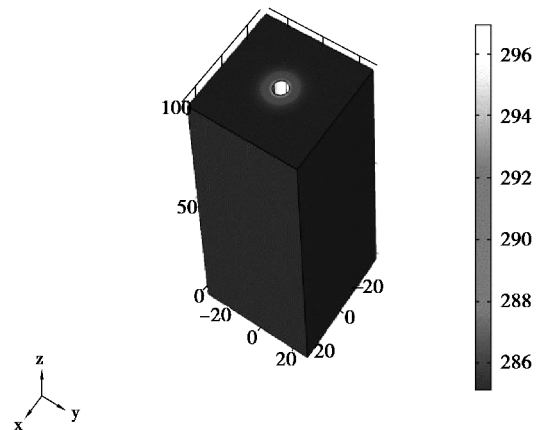
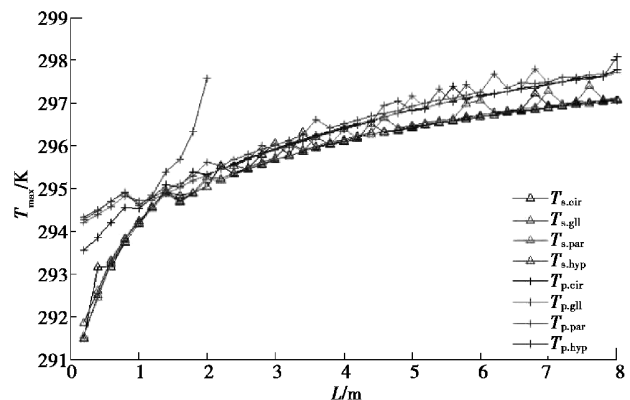


图10 模拟示意图

Fig. 10 Simulation sketch

图11 $T_{\text{max}}-L$ 曲线图Fig. 11 $T_{\text{max}}-L$ curves

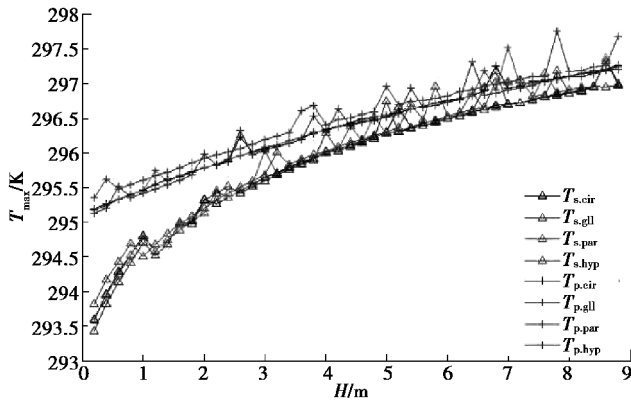
致,都有一定的微小波动,但 $T_{\text{s.cir}}$ 和 $T_{\text{s.gll}}$ 的波动程度相对较大,而 $T_{\text{s.par}}$ 和 $T_{\text{s.hyp}}$ 则相对较小,且 $T_{\text{s.hyp}}$ 在 $L=2.2$ 处出现断裂,此时采用椭圆和双曲线代替拱形曲线所得模拟结果较好,其中要注意采用双曲线求解时出现的断点。

(2)在 L 的整个变化区间 $(0, 8]$ 内,基于湿周长所得的最高温度值随其变化的趋势总体上一致,但 $T_{\text{p.hyp}}$ 在断点附近出现了较大偏差, $T_{\text{p.cir}}$ 在起始段明显向下偏移, $T_{\text{p.gll}}$ 和 $T_{\text{p.par}}$ 则相对较稳定,此时采用椭圆和抛物线代替拱形曲线所得模拟结果较好。

(3)基于湿周长所得的最高温度值总体上都要大于基于截面法所得的最高温度值,且在 $L=3$ 处附近,这个差距最小,当 L 向两端变化时,这个差距明显随之增大。

3.2 最高温度-起拱高度曲线图

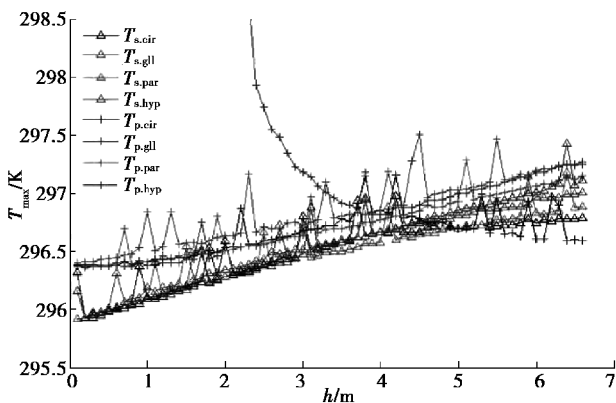
(1)在起拱高度 H 的整个变化区间 $(0, 8.8]$ 内,基于截面法所得的最高温度值随其变化的趋势一致,都有一定的微小波动,但4条曲线相互间的波动差异并不明显,此时采用4条曲线代替拱形曲

图 12 T_{\max} - H 曲线图Fig. 12 T_{\max} - H curves

线均可,即起拱高度的变化对利用截面法所得结果的误差没有明显的影响。

(2)在 H 的整个变化区间 $(0, 8.8]$ 内,基于湿周长所得的最高温度值随其变化的趋势保持一致,都有一定的波动,但 $T_{p,ell}$ 的波都幅度较其余 3 种明显较大,且其值一直大于其余 3 种, $T_{p,cir}$ 、 $T_{p,par}$ 和 $T_{p,hyp}$ 则相对较稳定,此时采用圆弧、抛物线和双曲线代替拱形曲线所得模拟结果较好。

(3)基于湿周长所得的最高温度值总体上都大于基于截面法所得的最高温度值,且随 H 的逐渐增大,这个差距缩小。

图 13 T_{\max} - h 曲线图Fig. 13 T_{\max} - h curves

3.3 最高温度-拱高曲线图

(1)在拱高 h 的整个变化区间 $(0, 6.6]$ 内,基于截面法所得的四个最高温度值的波动均比较大。在 $h=0.2$ 之前与 $h=4$ 之后时相互差距比较明显,这是因为此时拱形断面已经发生严重变形,不符合实际形状,但在 h 从 0.2 到 4 的过程中差距较小,且 $T_{s,ell}$ 相对其余三种的波动幅度较小,此时宜采用椭圆代替拱形曲线进行模拟计算。

(2)在 h 的整个变化区间 $(0, 8]$ 内,基于湿周

长所得的最高温度值随其变化的趋势总体上一致,但 $T_{p,hyp}$ 在 $h=2$ 处产生断点,出现了较大偏差, $T_{p,cir}$ 在末端明显向下偏移,但在符合实际形状的区域 $[0.2, 4]$ 内, $T_{p,cir}$ 、 $T_{p,ell}$ 和 $T_{p,par}$ 比较接近,而 $T_{p,ell}$ 相对波动较大, $T_{p,cir}$ 和 $T_{p,par}$ 则相对较稳定,此时采用圆弧和抛物线代替拱形曲线所得模拟结果较好。

(3) h 在区间 $[0.2, 4]$ 内变化时,基于湿周长所得的最高温度值总体上都大于基于截面法所得的最高温度值,且随 h 的逐渐增大,这个差距缩小。

4 结语

基于 MATLAB 软件绘图比较分析,得到了拱形断面地下工程宽度参数 L 、起拱高度 H 和拱高 h 在给定条件下发生变化时,单因素对当量半径值的影响趋势,发现在不考虑明显偏离情况下,各个参数对当量半径值的影响趋势总体上分别保持一致, R_{dif-s} 与 R_{dif-p} 的差值在对应 L 、 H 和 h 的变化条件下最大分别可达 0.43 m、0.45 m 和 0.65 m。并且对比截面法和湿周法两种方法所得结果发现,湿周法所得当量半径值均大于截面法,两者的差值在对应 L 、 H 和 h 的变化条件下最大分别可到 1.03 m、0.91 m 和 0.94 m。

通过 COMSOL 软件对围护结构传热模拟,从工程最高温度的角度分析得出 L 、 H 和 h 在给定条件下发生变化时,采用截面法计算模拟宜选择椭圆,采用湿周法则宜选择抛物线。而对比两种方法所得结果发现,若给定相同热流密度,则利用湿周法计算所得的温升大于截面法。

但如果要讨论 3 个参数对当量半径及围护结构传热的综合影响、找到最佳的当量半径值,则需要补充新的条件使方程封闭才能求解。而在考虑工程的最佳受力情况下,即工程受到了上部的土压力并通过拱转化为两侧的推力,与拱受到的侧向压力平衡,此时可得到各个参数之间的力学关系,进而讨论影响情况。

参考文献 (References)

- [1] 《城市地下空间开发利用关键技术指南》编委会. 城市地下空间开发利用关键技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (Editorial board of 'The key technical guide for the development and utilization of urban underground space'. The key technical guide for the development and utilization of urban underground space [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))

- [2] Quan J, Xia T F, Tian B X, A parameter intelligent recognition method and numerical simulation large underground caverns [A] // Proceedings of the 2009 International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing [C]. 2009 : 484-487.
- [3] 袁红,戴志中,刘新荣,等. 重庆主城区地下空间利用发展阶段研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 1-5. (Yuan Hong, Dai Zhizhong, Liu Xinrong, et al. Development phase of underground space utilization in Chongqing urban district [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 1-5. (in Chinese))
- [4] 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 95-107. (Hong Kairong. State-of-art and prospect of tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 95-107. (in Chinese))
- [5] 夏才初,曹诗定,王伟. 能源地下工程的概念、应用与前景展望[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 420-424. (Xia Caichu, Cao Shiding, Wang Wei. An introduction to energy geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 420-424. (in Chinese))
- [6] 奚江琳,钱七虎. 地下空间作为城市空间结构的社会学内涵[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 651-654. (Xi Jianglin, Qian Qihu. The sociological connotation of underground space as urban space structure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 651-654. (in Chinese))
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. (Tao Wenquan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2001. (in Chinese))
- [8] 贾力,方肇洪. 高等传热学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (Jia Li, Fang Zhaohong. Advanced heat transfer (second edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 茅靳丰,韩旭. 地下工程热湿理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (Mao Jinfeng, Han Xu, Theory and application of heat and moisture in underground engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [10] 马喜斌,程宝义,刘文杰,等. 地下工程岩土环境初始温度场数字仿真[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 152-157. (Ma Xibin, Cheng Baoyi, Liu Wenjie, et al. Digital simulation of initial temperature profile in rock and soil for underground engineering [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(2): 152-157. (in Chinese))
- [11] Wang L J, Miao X P, Wang R H, et al. Numerical Simulation on Heat Transfer from Envelope of the Underground Engineering [J]. Advanced Materials Research, 2011, 320: 657-662.
- [12] Yuan Y P, Ji H H, Song B Y, et al. Influence factors of heat transfer of unattached rectangular underground engineering envelope [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2006, 11(4): 518-524.
- [13] 钟雪雪,舒明均. 地下工程内部热湿负荷的计算[J]. 洁净与空调技术, 2013, 6(2): 64-67. (Zhong Xuexue, Shu Mingjun. Underground engineering internal heat and moisture load calculation [J]. Contamination Control & Air-conditioning Technology, 2013, 6(2): 64-67. (in Chinese))
- [14] 缪小平,王利军,王瑞海,等. 地下工程围护结构动态热负荷仿真研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(9): 43-46. (Miao Xiaoping, Wang Lijun, Wang Ruihai, et al. Simulation of dynamic heat load for underground structure envelope [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(9): 43-46. (in Chinese))
- [15] 彭关中,缪小平,彭福胜,等. 有限单元法在地下工程围护结构传热中的应用[J]. 制冷与空调, 2010, 24(5): 51-56. (Peng Guanzhong, Miao Xiaoping, Peng Fusheng, et al. Applying of finite element method for heat transfer of the underground engineering [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2010, 24(5): 551-56. (in Chinese))
- [16] 马喜斌,程宝义,刘文杰,等. 室外气象数据对地下工程围护结构热过程影响分析[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(3): 14-19. (Ma Xibin, Cheng Baoyi, Liu Wenjie, et al. Numerical Analysis of the influence of outdoor meteorological parameters on the heat transfer in the underground envelope and the surrounding soils [J]. Building Energy & Environment, 2009, 28(3): 14-19. (in Chinese))
- [17] 袁艳平,程宝义,茅靳丰. ANSYS 在浅埋工程围护结构传热模拟中的运用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(2): 52-56. (Yuan Yanping, Cheng Baoyi, Mao Jinfeng, et al. Application of ANSYS in simulation of heat transfer of shallow buried underground engineering [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 5(2): 52-56. (in Chinese))
- [18] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析(第5版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (Li Qingchao, Wang Nengchao, Yi Dayi, Numerical analysis (fifth edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))