(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 115114709 B
(45)授权公告日 2024.04.19

(21)申请号 202210659999.5
(22)申请日 2022.06.13
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115114709 A
(43)申请公布日 2022.09.27
(73)专利权人 安徽理工大学
地址 232001 安徽省淮南市泰丰大街168号
(72)发明人 蔡海兵 洪荣宝 李孟凯 姚方兴 胡时 杨哲 庞昌强 黄献文
(74)专利代理机构 南京合砺专利商标代理事务所(普通合伙) 32518
专利代理师 许云花
(51)Int.Cl.
G06F 30/13(2020.01)
G06F 30/20(2020.01)
G06F 119/02(2020.01)

(56)对比文件
CN 109268068 A,2019.01.25
CN 111999471 A,2020.11.27
CN 113515880 A,2021.10.19
JP 2016121487 A,2016.07.07
RU 2157882 C2,2000.10.20
WO 2009088995 A1,2009.07.16
洪荣宝等.地铁隧道冻结法施工地层融沉研究进展及展望.《建井技术》.2020,第41卷(第03期),全文.
翟全礼;胡利琼.冻结法施工引起的地表沉降及变形预测.岩土工程界.2009,(09),全文.
史向阳;张泽;李东庆;周攀峰;冯文杰.冻融循环作用下锥柱式桩基础水热及变形动态变化规律研究.岩石力学与工程学报.2019,(S1),全文.
王效宾;杨平;胡俊.人工冻土融沉对地层位移场影响的三维有限元分析.煤田地质与勘探.2011,(06),全文.
秦军.地铁区间隧道旁通道施工融沉注浆技术.中国市政工程.2009,(05),全文.
刘波;李东阳;廖建军.土体压力对地铁旁通道解冻后地表沉降的影响.煤炭学报.2011,(04),全文.

审查员 张裕

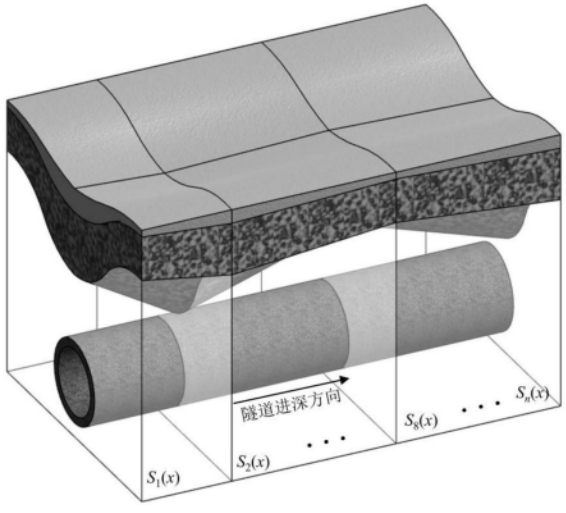
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法

(57)摘要

本发明公开了一种地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,该预测方法将冻土融化产生的地层沉降$S_{I}(x)$和融土固结产生的地层沉降$S_{II}(x)$进行叠加,确定隧道进深方向某二维切面上地层各点的最终融沉位移$S_1(x)$,再融合隧道进深方向全部二维切面上地层各点的最终融沉位移,最终形成了地铁隧道冻结法施工引起的地层三维融沉位移$S(x)=(S_1(x),S_2(x),\cdots,S_n(x))$,从而完成了对地铁隧道冻结法施工引起的地层三维融沉变形的预测。该方法简便,能够为地铁隧道冻结法施工现场解冻期的地层注浆位置、注浆时间、注浆体量等问题提供理论的判断依据。



CN 115114709 B

1.一种地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,其特征在于包括如下步骤:

(1)获取冻结法施工地层的土体参数并求得力学性能参数,选取隧道进深方向某一二维切面,求解冻融区移动相变边界方程X(t),进而求解冻结壁内解冻锋面半径$R_1(t)$,外解冻锋面半径$R_2(t)$,冻结壁内缘融缩区$\Delta_a(t)$的内、外半径R_0和$R_a(t)$,外缘融缩区$\Delta_c(t)$的内、外半径$R_c(t)$和R_1,冻结壁内缘固结区$\Delta_b(t)$的内、外半径$R_{a1}(t)$和$R_b(t)$,外缘固结区$\Delta_d(t)$的内、外半径$R_d(t)$和$R_{c1}(t)$,其中,$R_a(t)=R_{a1}(t)$,$R_c(t)=R_{c1}(t)$;

(2)根据太沙基单向渗透固结方程,求解固结压密函数G(t),由下式(1)获得:

$$\begin{cases} G(t)=\dfrac{\alpha_v U_t \gamma_w(\eta_1-H_0)}{1+e_0} \\ U_t=1-\dfrac{32}{\pi^3}\exp\left(-\dfrac{\pi^2}{4}\cdot\dfrac{C_v t}{h_0^{\,2}}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中:α_v为土层的压缩系数,U_t为融土的平均固结度,γ_w为孔隙水的容重,η_1为固结锋面微单元体中心距地表的深度,H_0为初始水位深度,e_0为融土的初始孔隙比,h_0为降水深度,C_v为土层的固结系数,t为解冻时间;

(3)计算冻土融化产生的地层沉降$S_I(x)$,并根据下式(2)计算融土固结产生的地层沉降$S_{II}(x)$:

$$\begin{aligned} S_{II}(x)&=\iint_{\Delta_b(t)+\Delta_d(t)}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}[x-r\cos\theta]^2\right\}G(t)rdrd\theta \\ &=\int_{R_b(t)}^{R_a(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}[x-r\cos\theta]^2\right\}G(h-R_b(t)\sin\theta,t)rdrd\theta \\ &+\int_{R_d(t)}^{R_c(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}[x-r\cos\theta]^2\right\}G(h-R_d(t)\sin\theta,t)rdrd\theta \end{aligned} \tag{2}$$

式中:h为隧道中心距地表的距离,β为土层的主要影响角,r、θ分别为$ro_1\theta$极坐标系下的极径、极角,x为横坐标,θ_1、θ_2分别为冻结壁的起始和结束角;

(4)根据冻土融化产生的地层沉降$S_I(x)$和融土固结产生的地层沉降$S_{II}(x)$,计算地层各点的最终融沉位移$S_1(x)$,由下式(3)所示:

$$S_1(x)=S_I(x)+S_{II}(x) \tag{3}$$;

(5)依次计算不同隧道进深方向二维切面上的地层融沉位移$S_n(x)$,融合隧道进深方向不同位置处的地层融沉位移($S_1(x)$,$S_2(x)$,・・・,$S_n(x)$),计算隧道冻结壁解冻期地层三维融沉变形S(x),由下式(4)获得:

$$S(x)=(S_1(x),S_2(x)\cdots S_n(x)) \tag{4}$$;

其中,所述冻土融化产生的地层沉降$S_I(x)$由下式(11)获得:

$$S_1(x)=\iint_{\Delta_a(t)+\Delta_c(t)}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}rdrd\theta$$
$$=\int_{R_a(t)}^{R_1(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}rdrd\theta$$
$$+\int_{R_c(t)}^{R_1}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}rdrd\theta \quad (11)。$$

2.根据权利要求1所述隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,其特征在于:步骤(1)中,所述冻融区移动相变边界方程X(t)由下式(5)获得:

$$\left(k_f\frac{\partial T_f}{\partial x}-k_u\frac{\partial T_u}{\partial x}\right)_{x=X(t)}=L\frac{dX(t)}{dt} \quad (5)$$

式中:k_f为冻土的导热系数,T_f为冻结区的温度,x为横坐标,k_u为融土的导热系数,T_u为解冻区的温度,L为单位容积土的相变潜热。

3.根据权利要求1所述地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,其特征在于:步骤(1)中,所述冻结壁内解冻锋面半径$R_1(t)$、外解冻锋面半径$R_2(t)$由下式(6)和(7)获得:

$$\begin{cases}R_1(t)=R_0+B\sqrt{t}\\R_2(t)=R_1-B\sqrt{t}\end{cases} \quad (6)$$

$$X(t)=B\sqrt{t} \quad (7)$$

式中:B为系数。

4.根据权利要求1所述地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,其特征在于:步骤(1)中,所述冻结壁内缘融缩区$\Delta_a(t)$的外半径$R_a(t)$、外缘融缩区$\Delta_c(t)$的内半径$R_c(t)$由下式(8)获得:

$$\begin{cases}R_a(t)=R_1(t)-\int_{R_0}^{R_1(t)}\varepsilon_{th}dr\\R_c(t)=R_1-\int_{R_2(t)}^{R_1}\varepsilon_{th}dr\end{cases} \quad (8)$$

式中:ε_{th}为冻土的融沉系数。

5.根据权利要求1所述地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,其特征在于:步骤(1)中,所述冻结壁内缘固结区$\Delta_b(t)$的外半径$R_b(t)$,外缘固结区$\Delta_d(t)$的内半径$R_d(t)$由下式(9)获得:

$$\begin{cases}R_b(t)=R_a(t)-\int_{R_0}^{R_a(t)}\varepsilon_a\gamma hdr\\R_d(t)=R_c(t)-\int_{R_2(t)}^{R_c(t)}\varepsilon_a\gamma hdr\end{cases} \quad (9)$$

式中:ε_a为融土的压密系数,γ为隧道上覆各土层重度的加权平均值。

6.根据权利要求1所述地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,其特征在于:步骤(2)中,所述太沙基单向渗透固结方程由下式(10)获得:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} = C_v \dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ C_v = \dfrac{k}{\gamma_w} \dfrac{1+e}{\alpha_v} \\ \alpha_v = \dfrac{\Delta e}{\Delta p} \end{cases} \tag{10}$$

式中:C_v为土层的固结系数,u为土的孔隙压力,z为土的深度,k为土层的渗透系数,e为土的孔隙比,Δe为土体孔隙比的改变量,Δp为土体应力的改变量。

一种地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法

技术领域

[0001] 本发明属于地铁隧道施工技术领域,尤其涉及一种地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法。

背景技术

[0002] 21世纪以来,城市地下空间的开发和利用正逐步展开,富水、软土等复杂地层的神秘面纱也正被巧妙揭开。目前在集约型交通和韧性城市的建设浪潮中,由于人工地层冻结技术具有“强封水、低扰动、易还原”等优势,其在地铁隧道建设工程中的应用越来越广泛。然而,在地铁隧道人工冻结法施工的解冻期,随着冻结壁的解冻,人工冻土会经历融化和固结两个阶段,且围绕隧道管壁周围的土必然会产生非均匀性收敛,扩散到地层,即会引起地层的不均匀沉降,简称“融沉”。地层融沉现象会对已建隧道和上部地表产生不良影响,由此带来的隧道破坏和地表病害无形中将增加市政工程的建设成本,甚至存在安全隐患。

[0003] 而现有的地铁隧道冻结法施工期地层融沉变形的预测方法仅限于地表沉降的预测,且融沉变形的预测同样仅限于融化阶段,对于固结阶段却并未研究。

发明内容

[0004] 发明目的:本发明的目的是提供一种充分考虑地铁隧道解冻期内的融化和固结两个阶段地层的三维融沉变形预测方法。

[0005] 技术方案:本发明地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法,其特征在于包括如下步骤:

[0006] (1)获取冻结法施工地层的土体参数并求得力学性能参数,选取隧道进深方向某一二维切面,求解冻融区移动相变边界方程$X(t)$,进而求解冻结壁内解冻锋面半径$R_1(t)$,外解冻锋面半径$R_2(t)$,冻结壁内缘融缩区$\Delta_a(t)$的内、外半径R_0和$R_a(t)$,外缘融缩区$\Delta_c(t)$的内、外半径$R_c(t)$和R_1,冻结壁内缘固结区$\Delta_b(t)$的内、外半径$R_{a1}(t)$和$R_b(t)$,外缘固结区$\Delta_d(t)$的内、外半径$R_d(t)$和$R_{c1}(t)$,其中,$R_a(t)=R_{a1}(t)$,$R_c(t)=R_{c1}(t)$;

[0007] (2)根据太沙基单向渗透固结方程,求解固结压密函数$G(t)$,由下式(1)获得:

[0008]
$$\begin{cases} G(t)=\dfrac{\alpha_v U_t \gamma_w(\eta_1-H_0)}{1+e_0} \\ U_t=1-\dfrac{32}{\pi^3}\exp\left(-\dfrac{\pi^2}{4}\cdot\dfrac{C_v t}{h_0^{\,2}}\right) \end{cases} \qquad (1)$$

[0009] 式中:α_v为土层的压缩系数,U_t为融土的平均固结度,γ_w为孔隙水的容重,η_1为固结锋面微单元体中心距地表的深度,H_0为初始水位深度,e_0为融土的初始孔隙比,h_0为降水深度,C_v为土层的固结系数,t为解冻时间;

[0010] (3)计算冻土融化产生的地层沉降$S_{\mathrm{I}}(x)$,并根据下式(2)计算融土固结产生的地层沉降$S_{\mathrm{II}}(x)$:

[0011]
$$S_{II}(x)=\iint_{\Delta_b(t)+\Delta_d(t)}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}G(t)rdrd\theta$$
$$=\int_{R_b(t)}^{R_a(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}G(h-R_b(t)\sin\theta,t)rdrd\theta$$
$$+\int_{R_d(t)}^{R_c(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}G(h-R_d(t)\sin\theta,t)rdrd\theta \quad (2)$$

[0012] 式中:h为隧道中心距地表的距离,β为土层的主要影响角,r、θ分别为ro$_1$θ极坐标系下的极径、极角,x为横坐标,θ_1、θ_2分别为冻结壁的起始和结束角;

[0013] (4)根据冻土融化产生的地层沉降$S_I(x)$和融土固结产生的地层沉降$S_{II}(x)$计算地层各点的最终融沉位移$S_1(x)$,由下式(3)获得:

[0014] $S_1(x)=S_I(x)+S_{II}(x)$ (3);

[0015] (5)依次计算不同隧道进深方向二维切面上的地层融沉位移$S_n(x)$,融合隧道进深方向不同位置处的地层融沉位移($S_1(x)$,$S_2(x)$,・・・,$S_n(x)$),计算隧道冻结壁解冻期地层三维融沉变形S(x),由下式(4)获得:

[0016] $S(x)=(S_1(x),S_2(x)\cdots S_n(x))$ (4)。

[0017] 进一步说,该预测方法的步骤(1)中,所述冻融区移动相变边界方程X(t)由下式(5)获得:

[0018]
$$\left(k_f\frac{\partial T_f}{\partial x}-k_u\frac{\partial T_u}{\partial x}\right)_{x=X(t)}=L\frac{dX(t)}{dt} \quad (5)$$

[0019] 式中:k_f为冻土的导热系数,T_f为冻结区的温度,x为横坐标,k_u为融土的导热系数,T_u为解冻区的温度,L为单位容积土的相变潜热。

[0020] 进一步说,该预测方法的步骤(1)中,所述冻结壁内解冻锋面半径$R_1(t)$、外解冻锋面半径$R_2(t)$由下式(6)和(7)获得:

[0021]
$$\begin{cases}R_1(t)=R_0+B\sqrt{t}\\R_2(t)=R_1-B\sqrt{t}\end{cases} \quad (6)$$

[0022]
$$X(t)=B\sqrt{t} \quad (7)$$

[0023] 式中:B为系数。

[0024] 进一步说,该预测方法的步骤(1)中,所述冻结壁内缘融缩区$\Delta_a(t)$的外半径$R_a(t)$、外缘融缩区$\Delta_c(t)$的内半径$R_c(t)$由下式(8)获得:

[0025]
$$\begin{cases}R_a(t)=R_1(t)-\int_{R_0}^{R_1(t)}\varepsilon_{th}dr\\R_c(t)=R_1-\int_{R_2(t)}^{R_1}\varepsilon_{th}dr\end{cases} \quad (8)$$

[0026] 式中:ε_{th}为冻土的融沉系数。

[0027] 进一步说,该预测方法的步骤(1)中,所述冻结壁内缘固结区$\Delta_b(t)$的外半径$R_b(t)$,外缘固结区$\Delta_d(t)$的内半径$R_d(t)$由下式(9)获得:

[0028] $$\begin{cases} R_b(t) = R_a(t) - \int_{R_0}^{R_a(t)} \varepsilon_a \gamma h dr \\ R_d(t) = R_c(t) - \int_{R_2(t)}^{R_c(t)} \varepsilon_a \gamma h dr \end{cases} \quad (9)$$

[0029] 式中：ε_a为融土的压密系数，γ为隧道上覆各土层重度的加权平均值。

[0030] 进一步说，该预测方法的步骤(2)中，所述太沙基单向渗透固结方程由下式(10)获得：

[0031] $$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ C_v = \frac{k}{\gamma_w} \frac{1+e}{\alpha_v} \\ \alpha_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \end{cases} \quad (10)$$

[0032] 式中：C_v为土层的固结系数，u为土的孔隙压力，z为土的深度，k为土层的渗透系数，e为土的孔隙比，Δe为土体孔隙比的改变量，Δp为土体应力的改变量。

[0033] 进一步说，该预测方法的步骤(3)中，所述冻土融化产生的地层沉降$S_I(x)$由下式(11)获得：

[0034] $$\begin{aligned} S_1(x) &= \iint_{\Delta_a(t)+\Delta_c(t)} \frac{\tan\beta}{h - r\sin\theta} \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}[x - r\cos\theta]^2\right\} r dr d\theta \\ &= \int_{R_a(t)}^{R_1(t)} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\tan\beta}{h - r\sin\theta} \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}[x - r\cos\theta]^2\right\} r dr d\theta \\ &+ \int_{R_c(t)}^{R_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\tan\beta}{h - r\sin\theta} \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}[x - r\cos\theta]^2\right\} r dr d\theta \end{aligned} \quad (11)。$$

[0035] 有益效果：与现有技术相比，本发明的显著优点为：该预测方法将冻土融化产生的地层沉降$S_I(x)$和融土固结产生的地层沉降$S_{II}(x)$进行叠加，确定隧道进深方向某二维切面上地层各点的最终融沉位移$S_1(x)$，再融合隧道进深方向全部二维切面上地层各点的最终融沉位移，最终形成了地铁隧道冻结法施工引起的地层三维融沉位移$S(x) = (S_1(x), S_2(x), \cdots, S_n(x))$，从而完成了对地铁隧道冻结法施工引起的地层三维融沉变形的预测。该方法简便，能够为地铁隧道冻结法施工现场解冻期的地层注浆位置、注浆时间、注浆体量等问题提供理论的判断依据。

附图说明

[0036] 图1为冻结壁内缘解冻示意图；

[0037] 图2为冻结壁外缘解冻示意图；

[0038] 图3为隧道进深方向某二维切面地层融沉示意图；

[0039] 图4为地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形示意图；

[0040] 图5为实施例1地铁隧道固结区融土收缩示意图。

具体实施方式

[0041] 下面结合附图和实施例对本发明的技术方案做进一步详细说明。

[0042] 本发明冻结壁内缘解冻示意图、冻结壁外缘解冻示意图分别如图1和图2所示，隧道进深方向某二维切面地层融沉示意图如图3所示。

[0043] 本发明地铁隧道冻结法施工地层三维融沉变形的预测方法包括如下步骤：

[0044] (1)获取地铁隧道建设区域有效范围内的土层信息，包括土层属性、厚度、含水率以及密度等；钻孔取样对其进行热物理力学性能试验，包括导热系数试验和比热试验，获得所需力学性能参数。

[0045] (2)选取隧道进深方向某一二维切面，由下式(5)求解冻融区移动相变边界方程X(t)：

[0046] $$\left(k_f\frac{\partial T_f}{\partial x}-k_u\frac{\partial T_u}{\partial x}\right)_{x=X(t)}=L\frac{dX(t)}{dt} \qquad (5)$$

[0047] 式中：k_f为冻土的导热系数，T_f为冻结区的温度，x为横坐标，k_u为融土的导热系数，T_u为解冻区的温度，L为单位容积土的相变潜热，t为解冻时间。

[0048] (3)由下式(6)、式(7)、式(8)和式(9)求解冻结壁内、外解冻锋面半径$R_1(t)$和$R_2(t)$，融缩区半径和固结区半径；

[0049] 其中，融缩区包括冻结壁内缘融缩区$\Delta_a(t)$和外缘融缩区$\Delta_c(t)$，内缘融缩区$\Delta_a(t)$的内、外半径分别为R_0(亦为隧道衬砌外半径)和$R_a(t)$，外缘融缩区$\Delta_c(t)$的内、外半径分别为$R_c(t)$和R_1(亦为冻结壁外半径)；固结区包括冻结壁内缘固结区$\Delta_b(t)$和外缘固结区$\Delta_d(t)$，内缘固结区$\Delta_b(t)$的内、外半径分别为$R_{a1}(t)$和$R_b(t)$，外缘固结区$\Delta_d(t)$的内、外半径分别为$R_d(t)$和$R_{c1}(t)$，而$R_a(t)=R_{a1}(t)$，$R_c(t)=R_{c1}(t)$：

[0050] $$\begin{cases}R_1(t)=R_0+B\sqrt{t}\\R_2(t)=R_1-B\sqrt{t}\end{cases} \qquad (6)$$

[0051] $$X(t)=B\sqrt{t} \qquad (7)$$

[0052] $$\begin{cases}R_a(t)=R_1(t)-\int_{R_0}^{R_1(t)}\varepsilon_{th}dr\\R_c(t)=R_1-\int_{R_2(t)}^{R_1}\varepsilon_{th}dr\end{cases} \qquad (8)$$

[0053] $$\begin{cases}R_b(t)=R_a(t)-\int_{R_0}^{R_a(t)}\varepsilon_a\gamma hdr\\R_d(t)=R_c(t)-\int_{R_2(t)}^{R_c(t)}\varepsilon_a\gamma hdr\end{cases} \qquad (9)$$

[0054] 式中：B为系数，ε_{th}为冻土的融沉系数。

[0055] (4)由下式(10)的太沙基单向渗透固结方程，结合下式(1)求解固结压密函数G(t)：

[0056] $$\begin{cases}\dfrac{\partial u}{\partial t}=C_v\dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2}\\ C_v=\dfrac{k}{\gamma_w}\dfrac{1+e}{\alpha_v}\\ \alpha_v=\dfrac{\Delta e}{\Delta p}\end{cases}\qquad(10)$$

[0057] $$\begin{cases}G(t)=\dfrac{\alpha_v U_t\gamma_w(\eta_1-H_0)}{1+e_0}\\ U_t=1-\dfrac{32}{\pi^3}\exp\left(-\dfrac{\pi^2}{4}\cdot\dfrac{C_v t}{h_0^{\,2}}\right)\end{cases}\qquad(1)$$

[0058] 式中:C_v为土层的固结系数,u为土的孔隙压力,z为土的深度,k为土层的渗透系数,e为融土的孔隙比,Δe为土体孔隙比的改变量,Δp为土体应力的改变量,α_v为土层的压缩系数,U_t为融土的平均固结度,γ_w为孔隙水的容重,η_1为固结锋面微单元体中心距地表的深度,H_0为初始水位深度,e_0为融土的初始孔隙比,h_0为降水深度,t为解冻时间。

[0059] (5)由下式(11)计算冻土融化产生的地层沉降$S_{\mathrm{I}}(x)$,由下式(2)计算融土固结产生的地层沉降$S_{\mathrm{II}}(x)$:

[0060] $$\begin{aligned}S_{\mathrm{I}}(x)&=\iint_{\Delta_a(t)+\Delta_c(t)}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}rdrd\theta\\&=\int_{R_a(t)}^{R_1(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}rdrd\theta\\&\quad+\int_{R_c(t)}^{R_1}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}rdrd\theta\end{aligned}\qquad(11)$$

[0061] $$\begin{aligned}S_{\mathrm{II}}(x)&=\iint_{\Delta_b(t)+\Delta_d(t)}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}G(t)rdrd\theta\\&=\int_{R_b(t)}^{R_a(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}G(h-R_b(t)\sin\theta,t)rdrd\theta\\&\quad+\int_{R_d(t)}^{R_c(t)}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\tan\beta}{h-r\sin\theta}\exp\left\{-\frac{\pi\tan^2\beta}{(h-r\sin\theta)^2}\left[x-r\cos\theta\right]^2\right\}G(h-R_d(t)\sin\theta,t)rdrd\theta\end{aligned}\qquad(2)$$

[0062] 式中:h为隧道中心距地表的距离,β为土层的主要影响角,r、θ分别为$ro_1\theta$极坐标系下的极径、极角,x为横坐标,θ_1、θ_2分别为冻结壁的起始和结束角。

[0063] (6)利用冻土融化产生的地层沉降$S_{\mathrm{I}}(x)$和融土固结产生的地层沉降$S_{\mathrm{II}}(x)$,由下式(3)计算地层各点的最终融沉位移$S_1(x)$:

[0064] $S_1(x)=S_{\mathrm{I}}(x)+S_{\mathrm{II}}(x)$ (3)。

[0065] (7)依次计算不同隧道进深方向二维切面上的地层融沉位移$S_n(x)$,融合隧道进深方向不同位置处的地层融沉位移($S_1(x)$,$S_2(x)$,···,$S_n(x)$),由下式(4)计算隧道冻结壁解冻期地层三维融沉变形S(x),示意图如图4所示:

[0066] $S(x)=(S_1(x),S_2(x)\cdots S_n(x))$ (4)。

[0067] 实施例1

[0068] 本实施选取北京地铁复八线某隧道冻结修建工程,隧道上覆地层中纵横交错多条地下管线,隧道埋深为10m,隧道拱部有2m厚的饱和细砂层。由于地下管线年久失修,其产生的渗漏水直接影响到隧道的施工。受施工工期和质量的限制,迁移管线和施工降水均不能满足施工要求。因此,基于技术、经济和安全的考虑,最终采用避开地下管线所在地层的水平冻结加固措施,即在沿隧道拱顶周围进行水平钻孔,对流砂层进行冻结加固,使之与下部粘土层闭合。隧道构筑完成后,冻结形成的1.2m厚的冻结壁开始自然解冻,采用本发明构建的地铁隧道冻结法施工地层三维融沉预测方法对本实施例进行融沉预测,分别模拟获得了解冻10-85天的地层融沉曲线,如图5所示,其中所涉及的参数如下表1所示。

[0069] 表1土体参数

[0070]

参数	数值
密度 ρ	2100kg/m^3
孔隙比 e	0.56
渗透系数 k	25.92mm/d
冻土的融沉系数 ε_{th}	1.0%
融土的压密系数 ε_a	0.10MPa^{-1}
固结系数 C_v	4.56e6
冻土导热系数 k_f	31.5kcal/(m d °C)
融土导热系数 k_u	25.7 kcal/(m d °C)
待定常数 B	72.7

[0071]

隧道主影响角的正切值 tanβ	0.42
-30m≤x≤30m	
地表距离该层土的高度 h	10.0m
冻结壁的起始角 θ_1	48°
冻结壁的结束角 θ_2	142°
冻结壁内解冻锋面半径 $R_1(t)$	4322mm
冻结壁外解冻锋面半径 $R_2(t)$	3640mm
内缘融缩区域的内半径 $R_a(t)$	3850mm
内缘固结区域的内半径 $R_b(t)$	4324.64mm
外缘融缩区域的内半径 $R_c(t)$	2650mm
外缘固结区域的内半径 $R_d(t)$	2666mm
冻结时间 t	10-85 天

[0072] 通过上述实施例可知,本发明的预测方法将冻土融化产生的地层沉降$S_{I}(x)$和融土固结产生的地层沉降$S_{II}(x)$进行叠加,确定隧道进深方向某二维切面上地层各点的最终融沉位移$S_{1}(x)$,再融合隧道进深方向全部二维切面上地层各点的最终融沉位移,最终形成了地铁隧道冻结法施工引起的地层三维融沉位移$S(x)=(S_{1}(x),S_{2}(x),\cdots,S_{n}(x))$,从而完成了对地铁隧道冻结法施工引起的地层三维融沉变形的预测,方法简便,能够为地铁隧道冻结法施工现场解冻期的地层注浆位置、注浆时间、注浆体量等问题提供理论的判断依据。

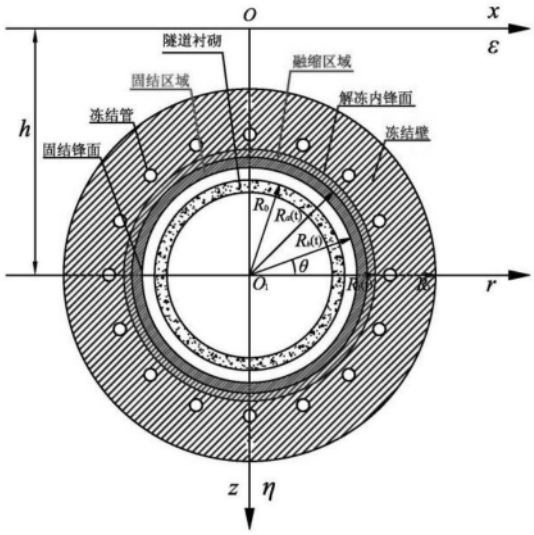

o
x
ε
隧道衬砌
融缩区域
固结区域
解冻内锋面
冻结管
冻结壁
h
固结锋面
θ
r
z
η

图1

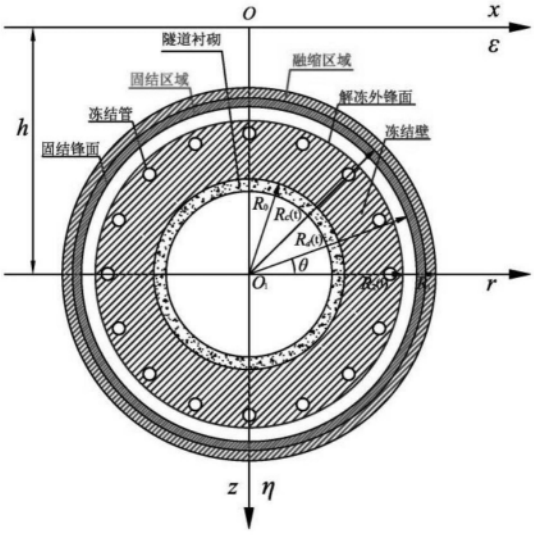

o
x
ε
隧道衬砌
融缩区域
固结区域
解冻外锋面
冻结管
冻结壁
h
固结锋面
θ
r
z
η

图2

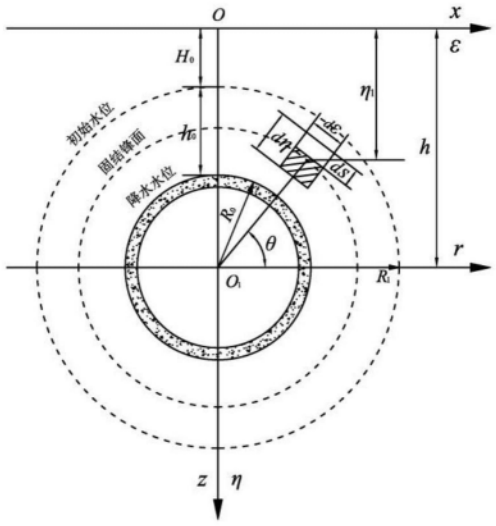

O
x
ε
H₀
η₁
初始水位
h₀
固结锋面
降水水位
dη
dξ
dS
h
R₂
θ
r
O₁
R₁
z
η

图3

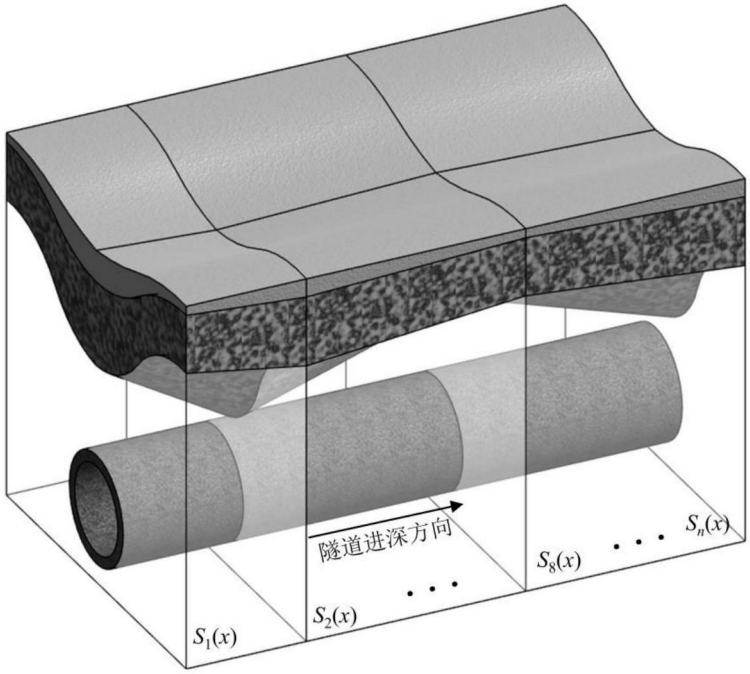

隧道进深方向
S₁(x)
S₂(x)
S₈(x)
Sₙ(x)

图4

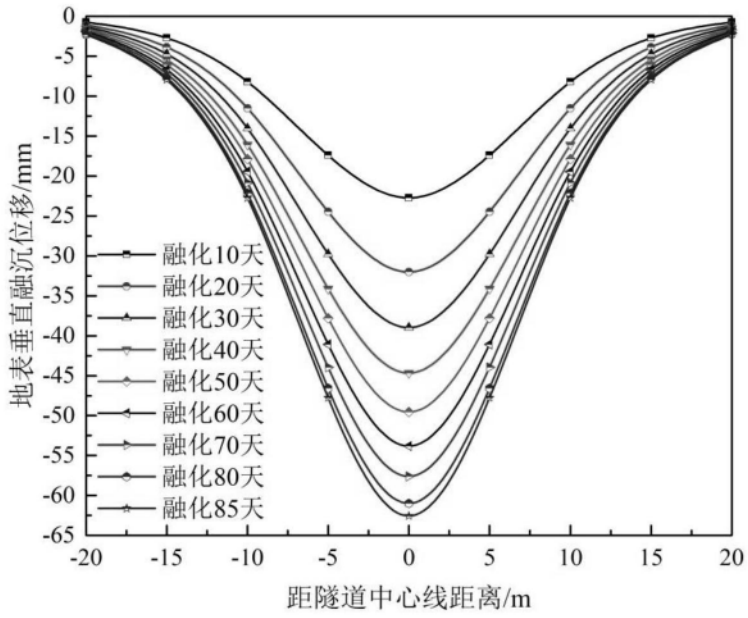

地表垂直融沉位移/mm
距隧道中心线距离/m
融化10天
融化20天
融化30天
融化40天
融化50天
融化60天
融化70天
融化80天
融化85天
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40
-45
-50
-55
-60
-65
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20

图5