



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104992013 A

(43) 申请公布日 2015. 10. 21

(21) 申请号 201510364671. 0

(22) 申请日 2015. 06. 26

(71) 申请人 陇东学院

地址 745000 甘肃省庆阳市兰州路 45 号

(72) 发明人 张斌伟 董正方 严松宏

(74) 专利代理机构 四川君士达律师事务所

51216

代理人 苟忠义

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

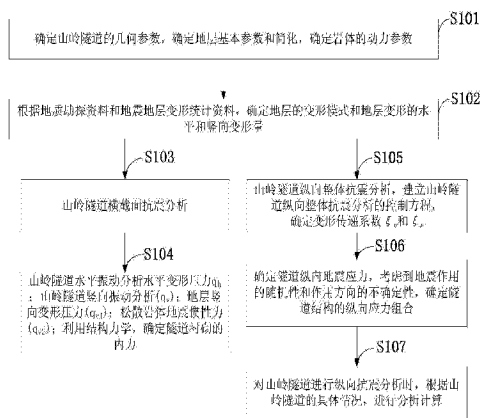
权利要求书3页 说明书15页 附图2页

(54) 发明名称

一种山岭隧道抗震分析的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种山岭隧道抗震分析的方法,对于隧道横截面抗震分析方面,以地层弹性剪切变形理论为基础,首次同时考虑地层水平变形、地层竖向变形、隧道顶部破碎岩体的地震自重惯性力,研究隧道横截面抗震的相关问题;对于隧道纵向整体抗震分析方面,以弹性地基梁为模型,考虑隧道和围岩的相互作用,利用连续介质力学、依据抗震动力学理论、变形传递理论,建立隧道结构动力平衡方程,经典反应变位法是该方法的特例。本发明首次将山岭隧道横截面抗震分析和纵向整体抗震分析采用统一的思想进行分析,思路新颖,方法可行,通过实例验证,对于强震作用下的山岭隧道初步设计,具有较好的适用性。



1. 一种山岭隧道抗震分析的方法,其特征在于,该山岭隧道抗震分析的方法包括:

步骤一,确定山岭隧道的几何参数,确定和简化地层基本参数,确定岩体的动力参数;

步骤二,根据地质勘探资料和地震地层变形统计资料,确定地层的变形模式和地层变形的水平和竖向变形量;

步骤三,山岭隧道横截面抗震分析;

步骤四,山岭隧道水平振动分析;山岭隧道竖向振动分析;利用结构力学,确定隧道衬砌的内力;

步骤五,山岭隧道纵向整体抗震分析,建立山岭隧道纵向整体抗震分析的控制方程确定变形传递系数  $\xi_w$  和  $\xi_a$ ;

步骤六,确定隧道纵向地震应力,考虑到地震作用的随机性和作用方向的不确定性,进而确定隧道结构的纵向应力组合;

步骤七,对山岭隧道进行纵向抗震分析时,根据山岭隧道的具体情况,进行分析计算。

2. 如权利要求 1 所述的山岭隧道抗震分析的方法,其特征在于,在步骤一中,确定山岭隧道的几何参数包括: $h_1$ -隧道埋深(m), $h_2$ -隧道衬砌总高度(m), $B$ -隧道的总跨度(m), $\delta$ -隧道衬砌的平均厚度(m), $R_0$ -隧道的等效半径(m), $E_s$ -隧道衬砌的弹性模量(Gpa), $\mu_s$ -隧道衬砌的泊松比;

确定和简化地层基本参数包括: $\gamma = \sum \gamma_i h_i / H$ ,  $\mu_d = 0.45$ ,  $v_s = H / \sum (h_i / v_{si})$ ,  $G_d = \gamma v_s^2 / g$ ,  $E_d = 2(1 - \mu_d) G_d$ ,  $H$ -表层地基的厚度(m), $E$ -土介质弹性模量; $\mu$ -土的泊松比;

确定岩体的动力参数包括: $K_H$ -表层地基设计水平地震系数, $K_V$ -表层地基设计竖向地震系数; $a_v$ -地层最大竖向加速度( $m/s^2$ ), $T$ -地层固有周期, $V_s$ -弹性剪切波速, $S_v$ -震动基准面的速度反应谱, $K_a$ -水平弹性地基系数, $K_w$ -竖向平弹性地基系数。

3. 如权利要求 1 所述的山岭隧道抗震分析的方法,其特征在于,在步骤二中,确定地层的变形模式和地层变形的水平和竖向变形量的公式为:

$$\begin{bmatrix} u_{hmax} \\ u_{vmax} \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi^2} S_v T K_H \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \circ$$

4. 如权利要求 1 所述的山岭隧道抗震分析的方法,其特征在于,在步骤四中,确定隧道衬砌的内力据材料力学,隧道横截面地震应力为:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{S} = \frac{6M}{\delta^2} + \frac{N}{\delta} \quad \tau_{max} = \frac{3Q}{2\delta} \quad \circ$$

5. 如权利要求 1 所述的山岭隧道抗震分析的方法,其特征在于,在步骤六中,确定隧道结构的纵向应力组合公式为:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{amax}^2 + \sigma_{wmax}^2} \quad \circ$$

6. 如权利要求 1 所述的山岭隧道抗震分析的方法,其特征在于,在步骤七中,根据山岭隧道的具体情况,进行的分析计算包括:

①结构-围岩相互作用对衬砌纵向应力的分析;

②隧道埋深对衬砌纵向应力的分析;

③基岩剪切波输入方向对衬砌纵向应力分析;

- ④上覆地层特征周期对衬砌纵向应力分析；  
 ⑤隧道地基基床系数  $K_a = K_w = \beta G$ ,  $\beta$  改变时对衬砌应力的分析；  
 ⑥围岩弹性模量变化时对衬砌应力的分析。

7. 如权利要求 1 所述的山岭隧道抗震分析的方法, 其特征在于, 该山岭隧道抗震分析的方法对于隧道横截面抗震分析具体的实现方法为:

第一步, 根据地质勘探资料和地震地层变形统计资料, 确定地层的变形模式和地层变形水平和竖向变形量:

$$\begin{bmatrix} u_{h\max} \\ u_{v\max} \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi^2} S_v T K_H \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix};$$

式中:  $S_v$ —单位地震系数时的速度反应谱 (m/s);

$T$ —表层地基的基本固有周期 (s);

$K_H$ —表层地基上的设计水平地震系数 (震度);

第二步, 山岭隧道水平振动分析:

$$q_h = \frac{E}{(1+\mu)} \frac{S_v T K_H}{\pi^2 h_2} \left\{ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left[\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right] \right\};$$

第三步, 山岭隧道竖向振动分析:

a. 地层竖向形变压力:

$$\begin{aligned} q_{v1} &= \delta_v \xi_w \\ &= \frac{\xi_w}{\pi^2} S_v T K_H \left[ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left(\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right) \right]; \end{aligned}$$

b. 利用现有公路或铁路设计规范, 洞顶松散岩体压力为:

$$q_{v2} = m_0 a_v = \frac{a_v}{g} q_0;$$

式中:  $a_v$  为地层最大竖向加速度:

$$\begin{aligned} q_v &= q_{v1} + q_{v2} \\ &= \frac{\xi_w}{\pi^2} S_v T K_H \left[ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left(\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right) \right] + \frac{a_v}{g} q_0 \end{aligned};$$

第四步, 剪切波作用下衬砌横截面内力计算:

强震区的公路和铁路隧道多采用曲线墙式衬砌, 根据等代圆思想, 并利用结构力学和材料力学知识得到隧道衬砌结构的内力和横截面应力:

$$M = \frac{1}{4} q_v R^2 \cos 2\theta - \frac{1}{2} q_h R^2 \sin 2\theta$$

$$N = q_v R \sin^2 \theta + q_h R \sin 2\theta \quad \sigma_{\max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{S} = \frac{6M}{\delta^2} + \frac{N}{\delta};$$

$$Q = -q_v R \sin \theta \cos \theta - q_h R \cos 2\theta \quad \tau_{\max} = \frac{3Q}{2\delta}$$

式中:  $\delta$  为隧道衬砌的平均厚度 (m);

第五步, 利用钢筋混凝土基本理论, 进行隧道衬砌截面的配筋。

8. 如权利要求 1 所述的山岭隧道抗震分析的方法,其特征在于,该山岭隧道抗震分析的方法对于隧道纵向整体抗震分析具体的实现方法为:

第一步,确定山岭隧道的纵向整体振动的二维方程:

$$\begin{cases} \rho A \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + K_w[v(x,t) - g_w(x,t)] + EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} = 0 \\ \rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + K_a[u(x,t) - g_a(x,t)] - EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0 \end{cases}, \text{相关参数含义如下:}$$

E 为梁的弹性模量, I 为梁截面惯性矩, A 为梁截面面积,  $K_w$  为地基梁横向变形系数,  $K_a$  为地基梁轴向变形系数,  $v(x, t)$  为隧道的横向位移,  $u(x, t)$  为隧道的轴向位移,  $g_w(x, t)$  为地基土的横向位移,  $g_a(x, t)$  为地基土的轴向位移;

第二步,引入变形传递系数,隧道地震惯性力的位移传递系数  $\xi_w$  和  $\xi_a$  为:

$$\begin{cases} \xi_w = \frac{1}{1 + \frac{EI}{K_w} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{\lambda} \right)^4 - \beta(K_w)} \\ \xi_a = \frac{1}{1 + \frac{EA}{K_a} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{\lambda} \right)^2 - \beta(K_a)} \end{cases} \quad \beta(K) = \frac{\rho A \omega^2}{K}$$

$\Phi$  - 入射方向与隧道的轴线的夹角;

第三步,山岭隧道纵向地震应力分析:

$$\begin{cases} \sigma_{amax} = \frac{ES_v T \{ \cos(\frac{\pi h_1}{2H}) + \cos[\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}] \} \sin 2\phi}{\pi v_s T + \frac{4\pi^4 E(R_0^2 - R_1^2) \cos^2 \phi}{K_a v_s T} - \alpha(K_a) v_s \eta} \\ \sigma_{wmax} = \frac{4ES_v \{ \cos(\frac{\pi h_1}{2H}) + \cos[\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}] \} \cos^3 \phi R_0}{v_s^2 T + \frac{4\pi^5 E(R_0^4 - R_1^4) \cos^4 \phi}{K_w v_s^2 T^3} - \alpha(K_w) v_s^2 \eta} \\ \alpha(K) = \frac{4\pi^3 \gamma_c (R_0^2 - R_1^2)}{KgT_1} \quad \eta = \frac{T}{T_1}; \end{cases}$$

$v_s$  为剪切波速 (m/s), T 为场地的卓越周期 (s); 基岩上覆层的厚度为 H,  $h_1$  为隧道埋深 (m);  $h_2$  为隧道衬砌总高度 (m);

第四步,剪切波作用下衬砌纵向内力计算:

此时隧道结构的纵向应力组合为:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{amax}^2 + \sigma_{wmax}^2};$$

第五步,隧道纵向地震反应分析:

对山岭隧道进行纵向抗震分析时,根据山岭隧道的具体情况,进行如下的分析计算:①结构-围岩相互作用对衬砌纵向应力的分析;②隧道埋深对衬砌纵向应力的分析;③基岩剪切波输入方向对衬砌纵向应力分析;④上覆地层特征周期对衬砌纵向应力分析;⑤隧道地基基床系数  $K_a = K_w = \beta G$ ,  $\beta$  改变时对衬砌应力的分析;⑥围岩弹性模量变化时对衬砌应力的分析。

## 一种山岭隧道抗震分析的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于隧道抗震分析技术领域,尤其涉及一种山岭隧道抗震分析的方法。

### 背景技术

[0002] 随着西部大开发战略的深入推进,我国西部地区基础设施建设将得到大力的发展,尤其是公路和铁路交通建设得到跨越式发展,这样势必要修建许多隧道,这些地区大都处于高烈度的地区,保证隧道工程在地震时的功能正常,深具战略意义。尤其是日本“阪神”地震中地铁震害和中国“5.12 汶川”地震中 109 隧道的严重震害,使得人们对地下工程的震害有了更加清楚的认识。

[0003] 山岭隧道抗震分析方法大都采用 ANSYS 等有限元数值分析技术来进行,但是先进的数值模拟技术对工程设计人员来说比较复杂,而且时间和费用都比较高,而寻找一种简单、高效和适用的近似分析方法,对于山岭隧道工程的初步设计是必要的。

[0004] 目前,山岭隧道实用设计方法比较多,诸如前苏联的福季耶娃法、美国 ST. John 法等,但这些方法均没有考虑到上覆岩体和隧道结构自重的影响,实际上,山岭隧道由于目前施工技术的局限,在隧道拱顶势必产生山体松散压力,这些荷载在地震时将产生比较大的地震惯性力,忽略这些荷载对山岭隧道是不安全的。而且,目前的方法在分析山岭隧道横截面抗震分析和纵向抗震分析时采用了不同的思想和方法,在体系上不完整。

### 发明内容

[0005] 本发明实施例的目的在于提供一种山岭隧道抗震分析的方法,旨在解决山岭隧道在强震作用下,利用比较简单的方法和程序进行山岭隧道的初步设计,为工程设计人员提供必要的设计参数和资料的问题。

[0006] 本发明实施例是这样实现的,一种山岭隧道抗震分析的方法,该山岭隧道抗震分析的方法包括:

[0007] 步骤一,确定山岭隧道的几何参数,确定和简化地层基本参数,确定岩体的动力参数;

[0008] 步骤二,根据地质勘探资料和地震地层变形统计资料,确定地层的变形模式和地层变形的水平和竖向变形量;

[0009] 步骤三,山岭隧道横截面抗震分析;

[0010] 步骤四,山岭隧道水平振动分析(水平形变压力  $q_{h1}$ );山岭隧道竖向振动分析(包括地层竖向变形压力  $q_{v1}$ 和松散岩体地震惯性力  $q_{v2}$ );利用结构力学,确定隧道衬砌的内力;

[0011] 步骤五,山岭隧道纵向整体抗震分析,建立山岭隧道纵向整体抗震分析的控制方程确定变形传递系数  $\xi_w$ 和  $\xi_a$ ;

[0012] 步骤六,确定隧道纵向地震应力,考虑到地震作用的随机性和作用方向的不确定性,确定隧道结构的纵向应力组合;

[0013] 步骤七,对山岭隧道进行纵向抗震分析时,根据山岭隧道的具体情况,进行分析计算。

[0014] 进一步,在步骤一中,确定山岭隧道的几何参数包括: $h_1$ -隧道埋深(m), $h_2$ -隧道衬砌总高度(m), $B$ -隧道的总跨度(m), $\delta$ -隧道衬砌的平均厚度(m), $R_0$ -隧道的等效半径(m), $E_s$ -隧道衬砌的弹性模量(Gpa), $\mu_s$ -隧道衬砌的泊松比;

[0015] 确定地层基本参数和简化包括: $\gamma = \sum \gamma_i h_i / H$ ,  $\mu_d = 0.45$ ,  $v_s = H / \sum (h_i / v_{si})$ ,  $G_d = \gamma v_s^2 / g$ ,  $E_d = 2(1 - \mu_d)G_d$ ,  $H$ -表层地基的厚度(m), $E$ -土介质弹性模量; $\mu$ -土的泊松比;

[0016] 确定岩体的动力参数包括: $K_H$ -表层地基设计水平地震系数, $K_V$ -表层地基设计竖向地震系数; $a_v$ -地层最大竖向加速度(m/s), $T$ -地层固有周期, $V_s$ -弹性剪切波速, $S_v$ -震动基准面的速度反应谱, $K_a$ -水平弹性地基系数, $K_w$ -竖向平弹性地基系数。

[0017] 进一步,在步骤二中,确定地层的变形模式和地层变形的水平和竖向变形量的公式为:

[0018]

$$\begin{bmatrix} u_{hmax} \\ u_{vmax} \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi^2} S_v T K_H \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}^{\circ}$$

[0019] 进一步,在步骤四中,确定隧道衬砌的内力据材料力学,隧道横截面地震应力为:

$$[0020] \quad \sigma_{max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{S} = \frac{6M}{\delta^2} + \frac{N}{\delta} \quad \tau_{max} = \frac{3Q}{2\delta}$$

[0021] 进一步,在步骤六中,确定隧道结构的纵向应力组合公式为:

$$[0022] \quad \sigma_p = \sqrt{\sigma_{amax}^2 + \sigma_{vmax}^2}$$

[0023] 进一步,在步骤七中,根据山岭隧道的具体情况,进行的分析计算包括:

[0024] ①结构-围岩相互作用对衬砌纵向应力的分析;②隧道埋深对衬砌纵向应力的分析;③基岩剪切波输入方向对衬砌纵向应力分析;④上覆地层特征周期对衬砌纵向应力分析;⑤隧道地基基床系数 $K_a = K_w = \beta G$ , $\beta$ 改变时对衬砌应力的分析;⑥围岩弹性模量变化时对衬砌应力的分析。

[0025] 进一步,该山岭隧道抗震分析的方法对于隧道横截面抗震分析具体的实现方法为:

[0026] 第一步,根据地质勘探资料和地震地层变形统计资料,确定地层的变形模式和地层变形水平和竖向变形量:

$$[0027] \quad \begin{bmatrix} u_{hmax} \\ u_{vmax} \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi^2} S_v T K_H \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

[0028] 式中: $S_v$ -单位地震系数时的速度反应谱(m/s);

[0029]  $T$ -表层地基的基本固有周期(s);

[0030]  $K_H$ -表层地基上的设计水平地震系数(震度);

[0031] 第二步,山岭隧道水平振动分析:

$$[0032] \quad q_h = \frac{E}{(1+\mu)} \frac{S_vTK_H}{\pi^2 h_2} \left\{ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left[\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right] \right\}$$

[0033] 第三步,山岭隧道竖向振动分析:

[0034] a. 地层竖向形变压力:

$$[0035] \quad \begin{aligned} q_{v1} &= \delta_v \xi_w \\ &= \frac{\xi_w}{\pi^2} S_vTK_H \left[ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left(\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right) \right] \end{aligned}$$

[0036] b. 利用现有公路或铁路设计规范,洞顶松散岩体压力为:

$$[0037] \quad q_{v2} = m_0 a_v = \frac{a_v}{g} q_0$$

[0038] 式中: $a_v$ 为地层最大竖向加速度:

$$[0039] \quad \begin{aligned} q_v &= q_{v1} + q_{v2} \\ &= \frac{\xi_w}{\pi^2} S_vTK_H \left[ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left(\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right) \right] + \frac{a_v}{g} q_0 \end{aligned}$$

[0040] 第四步,剪切波作用下衬砌横截面内力计算:

[0041] 强震区的公路和铁路隧道多采用曲线墙式衬砌,利用结构力学和材料力学知识得到隧道衬砌结构的内力和横截面应力:

$$[0042] \quad M = \frac{1}{4} q_v R^2 \cos 2\theta - \frac{1}{2} q_h R^2 \sin 2\theta$$

$$[0043] \quad N = q_v R \sin^2 \theta + q_h R \sin 2\theta \quad \sigma_{\max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{S} = \frac{6M}{\delta^2} + \frac{N}{\delta}$$

$$[0044] \quad Q = -q_v R \sin \theta \cos \theta - q_h R \cos 2\theta \quad \tau_{\max} = \frac{3Q}{2\delta}$$

[0045] 式中: $\delta$ 为隧道衬砌的平均厚度(m);

[0046] 第五步,利用钢筋混凝土基本理论,进行隧道衬砌截面的配筋。

[0047] 进一步,该山岭隧道抗震分析的方法对于隧道纵向整体抗震分析具体的实现方法为:

[0048] 第一步,确定相关参数,建立地震波作用下隧道二维运动方程:

$$[0049] \quad \begin{cases} \rho A \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + K_w [v(x,t) - g_w(x,t)] + EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} = 0 \\ \rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + K_a [u(x,t) - g_a(x,t)] - EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0 \end{cases}$$

[0050] E为梁的弹性模量,I为梁截面惯性矩,A为梁截面面积, $K_w$ 为地基梁横向变形系数, $K_a$ 为地基梁轴向变形系数, $v(x,t)$ 为隧道的横向位移, $u(x,t)$ 为隧道的轴向位移, $g_w(x,t)$ 为地基土的横向位移, $g_a(x,t)$ 为地基土的轴向位移;

[0051] 第二步,引入变形传递系数,隧道地震惯性力的位移传递系数 $\xi_w$ 和 $\xi_a$ 为:

$$[0052] \quad \begin{cases} \xi_w = \frac{1}{1 + \frac{EI}{K_w} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{\lambda} \right)^4 - \beta(K_w)} \\ \xi_a = \frac{1}{1 + \frac{EA}{K_a} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{\lambda} \right)^2 - \beta(K_a)} \end{cases} \quad \beta(K) = \frac{\rho A \omega^2}{K}$$

[0053]  $\Phi$  - 入射方向与隧道的轴线的夹角；

[0054] 第三步, 山岭隧道纵向地震应力分析：

$$[0055] \quad \begin{cases} \sigma_{amax} = \frac{ES_v T \{ \cos(\frac{\pi h_1}{2H}) + \cos[\frac{\pi(h_1 + h_2)}{2H}] \} \sin 2\phi}{\pi v_s T + \frac{4\pi^4 E(R_0^2 - R_1^2) \cos^2 \phi}{K_a v_s T} - \alpha(K_a) v_s \eta} \\ \sigma_{wmax} = \frac{4ES_v \{ \cos(\frac{\pi h_1}{2H}) + \cos[\frac{\pi(h_1 + h_2)}{2H}] \} \cos^3 \phi \cdot R_0}{v_s^2 T + \frac{4\pi^5 E(R_0^4 - R_1^4) \cos^4 \phi}{K_w v_s^2 T^3} - \alpha(K_w) v_s^2 \eta} \end{cases}$$

$$[0056] \quad \alpha(K) = \frac{4\pi^3 \gamma_c (R_0^2 - R_1^2)}{KgT_1} \quad \eta = \frac{T}{T_1}$$

[0057]  $v_s$  为剪切波速 (m/s),  $T$  为场地的卓越周期 (s); 基岩上覆层的厚度为  $H$ ,  $h_1$  为隧道埋深 (m);  $h_2$  为隧道衬砌总高度 (m);

[0058] 第四步, 剪切波作用下衬砌纵向内力计算：

[0059] 此时隧道结构的纵向应力组合为：

$$[0060] \quad \sigma_p = \sqrt{\sigma_{amax}^2 + \sigma_{wmax}^2}$$

[0061] 第五步, 隧道纵向地震反应分析：

[0062] 对山岭隧道进行纵向抗震分析时, 根据山岭隧道的具体情况, 进行如下的分析计算：①结构-围岩相互作用对衬砌纵向应力的分析；②隧道埋深对衬砌纵向应力的分析；③基岩剪切波输入方向对衬砌纵向应力分析；④上覆地层特征周期对衬砌纵向应力分析；⑤隧道地基基床系数  $K_a = K_w = \beta G$ ,  $\beta$  改变时对衬砌应力的分析；⑥围岩弹性模量变化时对衬砌应力的分析。

[0063] 本发明提供的山岭隧道抗震分析的方法, 首次将山岭隧道横截面抗震分析和纵向整体抗震分析采用统一的思想进行分析, 思路新颖, 方法可行, 通过实例验证, 对于强震作用下的山岭隧道初步设计, 具有较好的适用性。

[0064] 本发明无须通过复杂的数学建模或者数值分析技术, 只需要在岩土工程勘察阶段取得比较准确的地质勘察资料, 通过本发明即可进行山岭隧道在强震作用下的抗震实用分析, 对各种敏感性参数进行优化对比分析, 获得相应的分析资料和设计参数；得到相关设计单位的应用, 反响较好, 极大的解放了隧道工程设计人员的前期工作量, 为进行详细设计提供了必要的参数。

[0065] 本发明实施例, 比较了 ANSYS 建模数值方法与本发明自编程序的计算结果, 得到如下几点技术优点：

[0066] (1) 山岭隧道抗震分析利用 ANSYS 建模等数值分析方法, 建模复杂, 建模时间大概在 24h 左右, 而利用本发明自编计算程序, 只要岩土勘察资料已知, 极大的解放了隧道工程



设计人员的前期工作量,计算效率很快(1h左右);

[0067] (2) 横截面抗震分析角度来看,本发明方法的计算效率不但高,而且其计算结果与工程现状完全一致。应用本发明得到较大的衬砌弯矩,轴力次之;而用有限元方法得到较大的轴力,弯矩次之。而工程实践经验可知,山岭隧道在强震作用下,衬砌结构完全承受地层的剪切变形,衬砌结构发生较大的形状的变异,从而产生较大的弯矩和剪力,本发明的计算结论与山岭隧道的真实状态是一致的;根据本发明应用实例知,隧道拱顶45度范围内的弯矩和剪力都比较大,是洞顶出现拉裂缝和剪切破坏的主要区域,拱脚部位也是最大弯矩出现的地方,这些结论也与山岭隧道地震破坏的现状是一致的。说明本发明不但极大的节省了时间、解放人力资源,而且计算质量也比较高。

[0068] (3) 从山岭隧道纵向整体抗震分析来看,本发明提供的方法能在上述各个方面进行综合比较分析,进行隧道优化抗震分析,不但方便、计算效率高,而且其结果与工程实例一致。而ANSYS等数值方法不但纵向整体建模困难,而且很难进行上述分析,所以,目前大多数山岭隧道的ANSYS等数值分析均进行横截面分析,很少有纵向整体分析的应用实例。

### 附图说明

[0069] 图1是本发明实施例提供的建立隧道横截面震动分析的方法流程图;

[0070] 图2是本发明实施例提供的地层变形模式示意图;

[0071] 图3是本发明实施例提供的单位水平地震系数的速度反应谱示意图;

[0072] 图4是本发明实施例提供的水平震动应力分布示意图;

[0073] 图5是本发明实施例提供的隧道-围岩体系的变形示意图;

[0074] 图6是本发明实施例提供的隧道单元受力示意图。

### 具体实施方式

[0075] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0076] 下面结合附图及具体实施例对本发明的应用原理作进一步描述。

[0077] 本发明具体实施例为:某山岭隧道,地层比较单一,其地层参数、围岩参数和隧道支护参数见表1。

[0078] 表1 实施例计算参数

[0079]

地层参数	名称	特征周期 (s)	隧道埋深 (m)	水平地震系数	地层速度谱 (m/s)	地层剪切波速 (m/s)	基岩地震波输入角度
	数值	0.665	82	0.2	0.8	180	30
围岩参数	名称	弹性模量 (Mpa)	泊松比	容重 (KN/m <sup>3</sup> )	内聚力 (Mpa)	内摩擦角 (度)	弹性地基系数
	数值	500	0.25	18	0.179	31.4	$K_a = K_w = \beta G$
隧道参数	名称	隧道高度 (m)	隧道跨度 (m)	弹性模量 (Gpa)	泊松比	衬砌平均厚度 (m)	隧道等效半径(m)
	数值	8.86	10.54	28	0.25	0.5	5.16

- [0080] 如图 1 所示,本发明实施例的山岭隧道抗震分析的方法包括以下步骤:
- [0081] S101: 确定山岭隧道的几何参数,确定地层基本参数和简化,确定岩体的动力参数;
- [0082] S102: 根据地质勘探资料和地震地层变形统计资料,确定地层的变形模式和地层变形的水平和竖向变形量;
- [0083] S103: 山岭隧道横截面抗震分析;
- [0084] S104: 山岭隧道水平振动分析(水平形变压力  $q_h$ );山岭隧道竖向振动分析(包括地层竖向变形压力  $q_{v1}$ 和松散岩体地震惯性力  $q_{v2}$ );利用结构力学,确定隧道衬砌的内力;
- [0085] S105: 山岭隧道纵向整体抗震分析,建立山岭隧道纵向整体抗震分析的控制方程确定变形传递系数  $\xi_w$ 和  $\xi_a$ ;
- [0086] S106: 确定隧道纵向地震应力,考虑到地震作用的随机性和作用方向的不确定性,确定隧道结构的纵向应力组合;
- [0087] S107: 对山岭隧道进行纵向抗震分析时,根据山岭隧道的具体情况,进行分析计算。

[0088] 在步骤 S101 中,确定山岭隧道的几何参数包括: $h_1$ -隧道埋深(m), $h_2$ -隧道衬砌总高度(m), $B$ -隧道的总跨度(m), $\delta$ -隧道衬砌的平均厚度(m), $R_0$ -隧道的等效半径(m), $E_s$ -隧道衬砌的弹性模量(Gpa), $\mu_s$ -隧道衬砌的泊松比;

[0089] 确定地层基本参数和简化包括: $\gamma = \sum \gamma_i h_i / H$ ,  $\mu_d = 0.45$ ,  $v_s = H / \sum (h_i / v_{si})$ ,  $G_d = \gamma v_s^2 / g$ ,  $E_d = 2(1 - \mu_d)G_d$ ,  $H$ -表层地基的厚度(m), $E$ -土介质弹性模量; $\mu$ -土的泊松比;

[0090] 确定岩体的动力参数包括: $K_h$ -表层地基设计水平地震系数, $K_v$ -表层地基设计竖向地震系数; $a_v$ -地层最大竖向加速度(m/s), $T$ -地层固有周期, $v_s$ -弹性剪切波速, $S_v$ -震动基准面的速度反应谱, $K_a$ -水平弹性地基系数, $K_w$ -竖向平弹性地基系数。

[0091] 在步骤 S102 中,确定地层的变形模式和地层变形的水平和竖向变形量的公式为:

$$[0092] \begin{bmatrix} u_{\max} \\ u_{v\max} \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi^2} S_v T K_H \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

[0093] 在步骤 S104 中,确定隧道衬砌的内力据材料力学,隧道横截面地震应力为:

$$[0094] \sigma_{\max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{S} = \frac{6M}{\delta^2} + \frac{N}{\delta} \quad \tau_{\max} = \frac{3Q}{2\delta}$$

[0095] 在步骤 S106 中,确定隧道结构的纵向应力组合公式为:

$$[0096] \quad \sigma_p = \sqrt{\sigma_{amax}^2 + \sigma_{wmax}^2}$$

[0097] 在步骤 S107 中,根据山岭隧道的具体情况,进行的分析计算包括:

[0098] ①结构-围岩相互作用对衬砌纵向应力的分析;

[0099] ②隧道埋深对衬砌纵向应力的分析;

[0100] ③基岩剪切波输入方向对衬砌纵向应力分析;

[0101] ④上覆地层特征周期对衬砌纵向应力分析;

[0102] ⑤隧道地基基床系数  $K_a = K_w = \beta G$ ,  $\beta$  改变时对衬砌应力的分析;

[0103] ⑥围岩弹性模量变化时对衬砌应力的分析。

[0104] 本发明实施例的山岭隧道抗震分析的方法主要包含了以下两个方面:

[0105] 1、对于隧道横截面抗震分析方面,以地层弹性剪切变形理论为基础,首次同时考虑地层水平变形、地层竖向变形、隧道顶部破碎岩体的地震自重惯性力,研究隧道横截面抗震的相关问题;

[0106] 具体的实现方法:

[0107] 为了建立隧道横截面震动分析的数学模型和便于得到近似计算方法,特提出以下几点假定:

[0108] ①土体为各向同性的线弹性连续介质;

[0109] ②隧道埋深一般为隧道半径的 5 倍以上,可以认为隧道为深埋隧道,符合图 4 简化条件;

[0110] ③地层变形从上到下按线性变化考虑,隧道剪切变形可近似用隧道中心地层变形来代替。

[0111] ④洞室形状的不同造成的影响多局限在棱角等局部地方,对总体地层空间应力场的演变变化规律影响不大。因此,对断面形状非圆形的其他形状地下结构,采用“当量半径”的折算形式,不但有利于问题的理论分析,而且易于工程现场实际应用。

[0112] 第一步,根据地质勘探资料和地震地层变形统计资料,确定地层的变形模式(如图 2 所示)和地层变形(水平和竖向变形)量,如图 3 所示:

$$[0113] \quad \begin{bmatrix} u_{hmax} \\ u_{vmax} \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi^2} S_v T K_H \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

[0114] 式中:  $S_v$ - 单位地震系数时的速度反应谱 (m/s);

[0115]  $T$ - 表层地基的基本固有周期 (s);

[0116]  $K_H$ - 表层地基上的设计水平地震系数 (震度);

[0117] 第二步,如图 4 所示,水平震动应力分布,山岭隧道水平振动分析:

$$[0118] \quad q_h = \frac{E}{(1+\mu)} \frac{S_v T K_H}{\pi^2 h_2} \left\{ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left[\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right] \right\}$$

[0119] 第三步,山岭隧道竖向振动分析:

[0120] a. 地层竖向形变压力:

[0121] 
$$q_{v1} = \delta_v \xi_w$$

$$= \frac{\xi_w}{\pi^2} S_v TK_H \left[ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left(\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right) \right]$$

[0122] b. 利用现有公路或铁路设计规范,洞顶松散岩体压力为:

[0123] 
$$q_{v2} = m_0 a_v = \frac{a_v}{g} q_0$$

[0124] 式中 : $a_v$ 为地层最大竖向加速度 :

[0125] 
$$q_v = q_{v1} + q_{v2}$$

$$= \frac{\xi_w}{\pi^2} S_v TK_H \left[ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) - \cos\left(\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right) \right] + \frac{a_v}{g} q_0$$

[0126] 第四步,剪切波作用下衬砌横截面内力计算 :

[0127] 强震区的公路和铁路隧道多采用曲线墙式衬砌,根据假设条件知,这种衬砌的结构形式可以应用“当量半径”的思想转化为一个等效圆形衬砌来进行隧道的拟静力地震反应分析,利用结构力学和材料力学知识得到隧道衬砌结构的内力和横截面应力 :

[0128] 
$$M = \frac{1}{4} q_v R^2 \cos 2\theta - \frac{1}{2} q_h R^2 \sin 2\theta$$

[0129] 
$$N = q_v R \sin^2 \theta + q_h R \sin 2\theta \quad \sigma_{\max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{S} = \frac{6M}{\delta^2} + \frac{N}{\delta}$$

[0130] 
$$Q = -q_v R \sin \theta \cos \theta - q_h R \cos 2\theta \quad \tau_{\max} = \frac{3Q}{2\delta}$$

[0131] 式中 : $\delta$  为隧道衬砌的平均厚度 (m) ;

[0132] 第五步,利用钢筋混凝土基本理论,进行隧道衬砌截面的配筋。

[0133] 对于山岭隧道横截面抗震分析设计的上述过程,关键是计算隧道水平和竖向形变压力以及竖向地震惯性力,应用 MATLAB 编程技术,上述思想可按如下程序实现 :

[0134] %%%%%%%%%隧道横截面地震荷载分析子程序

[0135]

```

function [qh,qv]=Qhv(R0,R1_2,H,Hs,gama,Bs,a,seta,av,T,...
                    ksw,ksa,Sv,KH,HDC,s,g,Ed,Mud);

if Bs<5
    i=0.2;
else Bs>5
    i=0.1;
end
w=1+i*(Bs-5);
clear i;
hq=0.45*w*2^(s-1);          %%%山岭隧道的深浅埋的界限深度;
clear w;
if H<hq
    q0=gama*H;
elseif hq<H&H<2.5*hq
    TB=tan(a)+sqrt((1+tan(a)^2)*tan(a)/(tan(a)-tan(seta)));
    Lamada=(TB-tan(a))/(TB*(1+TB*(tan(a)-tan(seta))+tan(a)*tan(seta)));
    q0=gama*H*(1-H*Lamada*tan(seta)/Bs);
else H>=2.5*hq
    q0=hq*gama;
end
clear TB; clear Lamada; clear hq;
qv2=av*g*q0/g;            %%%拱顶松散岩体的地震惯性力;
clear q0;

```

[0136]

```

e=(1/pi^2)*Sv*T*KH*(cos(pi*H/(2*HDC))-cos(pi*(H+Hs)/(2*HDC)));
qv1=ksw*e;
qv=qv2;
e1=((Sv*T*KH)/(pi^2*Hs))...
    *(cos(pi*H/(2*HDC))-cos(pi*(H+Hs)/(2*HDC)));
qh=(Ed/(1+Mud))*e1;
end
return

```

[0137] 2、对于隧道纵向整体抗震分析方面，以弹性地基梁为模型，考虑隧道和围岩的相互作用，利用连续介质力学、依据抗震动力学理论、变形传递理论，建立隧道结构动力平衡方程，该方程从理论上考虑隧道的自重惯性力。从该方程可以看出，经典反应变位法是该方法的特例。对比分析隧道在基岩地震波的输入方向、地震剪切波速的大小、上覆地层的厚度、地层的特征周期（软硬程度）、地层的弹性刚度系数影响下的隧道纵向应力和应变的变化规律，对比各个因素的变化对隧道纵向应力的影响，找到合理的参数取值范围。

[0138] 具体的实现方法：

[0139] 为了建立隧道横截面震动分析的数学模型和便于得到近似计算方法，特提出以下几点假定：

[0140] ①土体为各向同性的线弹性连续介质；

[0141] ②隧道视为弹性地基梁，即隧道与围岩之间为弹簧连接；

[0142] ③隧道与围岩之间存在相互作用，考虑隧道与围岩之间的相对位移。隧道在地震作用下产生变形，其变形包括轴向变形和横向变形。

[0143] ④不考虑地震波的随机性、时频特性及在土层中的反射和散射，将地震波看成是单一频率的简谐波。

[0144] 第一步，如图 5 和图 6，设  $E$  为梁的弹性模量， $I$  为梁截面惯性矩， $A$  为梁截面面积， $K_w$  为地基梁横向变形系数， $K_a$  为地基梁轴向变形系数， $v(x, t)$  为隧道的横向位移， $u(x, t)$  为隧道的轴向位移， $g_w(x, t)$  为地基土的横向位移， $g_a(x, t)$  为地基土的轴向位移；得地震波作用下隧道二维运动方程：

$$[0145] \begin{cases} \rho A \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + K_w [v(x, t) - g_w(x, t)] + EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} = 0 \\ \rho A \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + K_a [u(x, t) - g_a(x, t)] - EA \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = 0 \end{cases}$$

[0146] 第二步，引入变形传递系数，考虑隧道地震惯性力的位移传递系数  $\xi_w$  和  $\xi_a$  为：

$$[0147] \begin{cases} \xi_w = \frac{1}{1 + \frac{EI}{K_w} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{\lambda} \right)^4 - \beta(K_w)} \\ \xi_a = \frac{1}{1 + \frac{EA}{K_a} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{\lambda} \right)^2 - \beta(K_a)} \end{cases} \quad \beta(K) = \frac{\rho A \omega^2}{K}$$

[0148]  $\Phi$  - 入射方向与隧道的轴线的夹角；

[0149] 第三步,山岭隧道纵向地震应力分析：

$$[0150] \begin{cases} \sigma_{amax} = \frac{ES_v T \left\{ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) + \cos\left[\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right] \right\} \sin 2\phi}{\pi v_s T + \frac{4\pi^4 E(R_0^2 - R_1^2) \cos^2 \phi}{K_a v_s T} - \alpha(K_a) v_s \eta} \\ \sigma_{wmax} = \frac{4ES_v \left\{ \cos\left(\frac{\pi h_1}{2H}\right) + \cos\left[\frac{\pi(h_1+h_2)}{2H}\right] \right\} \cos^3 \phi \cdot R_0}{v_s^2 T + \frac{4\pi^5 E(R_0^4 - R_1^4) \cos^4 \phi}{K_w v_s^2 T^3} - \alpha(K_w) v_s^2 \eta} \end{cases}$$

$$[0151] \alpha(K) = \frac{4\pi^3 \gamma_c (R_0^2 - R_1^2)}{KgT_1} \quad \eta = \frac{T}{T_1}$$

[0152]  $v_s$  为剪切波速 (m/s),  $T$  为场地的卓越周期 (s); 基岩上覆层的厚度为  $H$ ,  $h_1$  为隧道埋深 (m);  $h_2$  为隧道衬砌总高度 (m);

[0153] 第四步,剪切波作用下衬砌纵向内力计算：

[0154] 考虑到地震作用的随机性和作用方向的不确定性,则此时隧道结构的纵向应力组合为：

$$[0155] \sigma_p = \sqrt{\sigma_{amax}^2 + \sigma_{wmax}^2}$$

[0156] 第五步,隧道纵向地震反应分析：

[0157] 对山岭隧道进行纵向抗震分析时,根据山岭隧道的具体情况,可以进行如下的分析计算：

[0158] ①结构 - 围岩相互作用对衬砌纵向应力的分析；

[0159] ②隧道埋深对衬砌纵向应力的分析；

[0160] ③基岩剪切波输入方向对衬砌纵向应力分析；

[0161] ④上覆地层特征周期对衬砌纵向应力分析；

[0162] ⑤隧道地基基床系数  $K_a = K_w = \beta G$ ,  $\beta$  改变时对衬砌应力的分析；

[0163] ⑥围岩弹性模量变化时对衬砌应力的分析。

[0164] 对于山岭隧道纵向地震分析的上述过程,应用 MATLAB 编程实现了上述算法,程序设计如下：

[0165]

function zxdz

%% E围岩的弹性模量; Mu为围岩的泊松比; gama为围岩的平均容重;

%% c,a为围岩的粘聚力和内摩擦角; cr,ar为围岩的残余粘聚力和内摩擦角;

%% a1为围岩的剪胀角; sigmac为围岩的单轴抗压强度;

global Hs Bs houdu1 houdu2 E1 Mu1

%% Hs 、 Bs 对应于衬砌的外缘高度, 外缘宽度;

%% houdu1 为隧道初衬的平均厚度; houdu2 为隧道二衬的平均厚度;

%% E1 、 Mu1为衬砌的弹性模量和泊松比;

global H P0 R0 R1 Gv

%% H为结构的埋深; P0为按双向等压计算的静水压力;

%% R0为等待圆的外径; R1为等代圆的内径; A B为中间参数;

%%%

E=500000000;

Mu=0.25;

gama=22000;

c=179000;

a=31.4\*pi/180;

Hs=8.86;

Bs=10.54;

houdu1=0.15;

houdu2=0.5;

[0166]



```

E1=280000000000;
Mu1=0.167;
H=82;
%%地震计算参数;
av=0.1;
ah=0.2;
T=0.665;
ksw=3*E/(2*(1+Mu));
ksa=3*E/(2*(1+Mu));
Sv=0.16;
KH=0.2;
HDC=H+Hs+3*Hs;
s=5;
g=9.8;
vs=180;
Gd=gama*vs^2/g;
Mud=0.45;
Ed=2*(1-Mud)*Gd;           %%地层的动弹性模量 单位pa;
a3=30*pi/180;             %%基岩地震波输入角度;
w1=sin(a);
w2=cos(a);
P=gama*H;
sigmac=(2*c*w2)/(1-w1);
Lamada=Mu/(1-Mu);         %%侧压力系数
P0=(1+Lamada)*P/2;
clear Lamada; clear P;
R0=sqrt(4*Hs^2+Bs^2)/(4*cos(atan(Bs/2*Hs)*pi/180)); %%等代圆半径;
R1_1=R0-houdu1;
R1_2=R0-houdu2;

```

[0167]

%%%%%%%%%%基岩剪切波输入方向对应力的影响分析!

x=input('1: 输入角度; 2: 隧道埋深;3:围岩弹性模量4:地层特征周期及地基  
刚度系数 5: 剪切波速');

```

if x==1
    a3=0;
    global zxforce
    st=0.5:90;
    N=length(st);           %循环的次数
    zxforce=zeros(4,N);
    zxforce(1,:)=st;
    for i=1:N
        w1=cos(pi*H/(2*HDC))+cos(pi*(H+Hs)/(2*HDC));
        w2=cos(a3*pi/180);
        w3=((R0^2-R1_2^2)*w2^2*4*pi^4*E1)/(ksa*vs*T);
        w4=((R0^4-R1_2^4)*w2^4*4*pi^5*E1)/(ksw*vs^2*T^3);
        sigma_am=(E1*Sv*T*w1*sin(2*a3*pi/180))/(pi*vs*T+w3);
        sigma_wm=4*E1*Sv*w1*w2^3*R0/(vs^2*T+w4);
        zxforce(2,i)=sigma_am;           %轴向应力
        zxforce(3,i)=sigma_wm;         %弯曲应力
        sigma_p=sqrt(sigma_am.^2+sigma_wm.^2); %总应力
        zxforce(4,i)=sigma_p;
        i=i+1;
        a3=a3+5;
    end
    %%轴向应力与输入方向的关系!
    plot(st,zxforce(2,:),'-');hold on;
    %%弯曲应力与输入方向的关系!
    plot(st,zxforce(3,:),'-s'); holdon;

```

[0168]

```
plot(st,zxforce(4,:), '-*'); hold on;
title('衬砌应力随地震波输入方向的变化图');
xlabel('基岩剪切波输入方向/度');
ylabel('衬砌应力/pa');
legend('轴向应力','弯曲应力','总应力');

elseif x==2
    .....(略)
end

end

return
```

[0169] 本发明首次将横截面抗震分析方法和纵向整体抗震分析方法采用统一的思想进行分析,思想新颖,方案合理。

[0170] 对于隧道横截面抗震分析方面,以地层弹性剪切变形理论为基础,首次同时考虑地层水平变形、地层竖向变形、隧道顶部破碎岩体的地震自重惯性力,研究隧道横截面抗震的相关问题;

[0171] 对于隧道纵向整体抗震分析方面,以弹性地基梁为模型,考虑隧道和围岩的相互作用,利用连续介质力学、依据抗震动力学理论、变形传递理论,建立隧道结构动力平衡方程,该方程从理论上考虑隧道的自重惯性力。经典反应变位法是该方法的特例。该方法可分析在基岩地震波的输入方向、地震剪切波速的大小、上覆地层的厚度、地层的特征周期(软硬程度)、地层的弹性刚度系数影响下的隧道纵向应力和应变的变化规律,对比各个因素的变化对隧道纵向应力的影响,找到合理的参数取值范围。

[0172] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

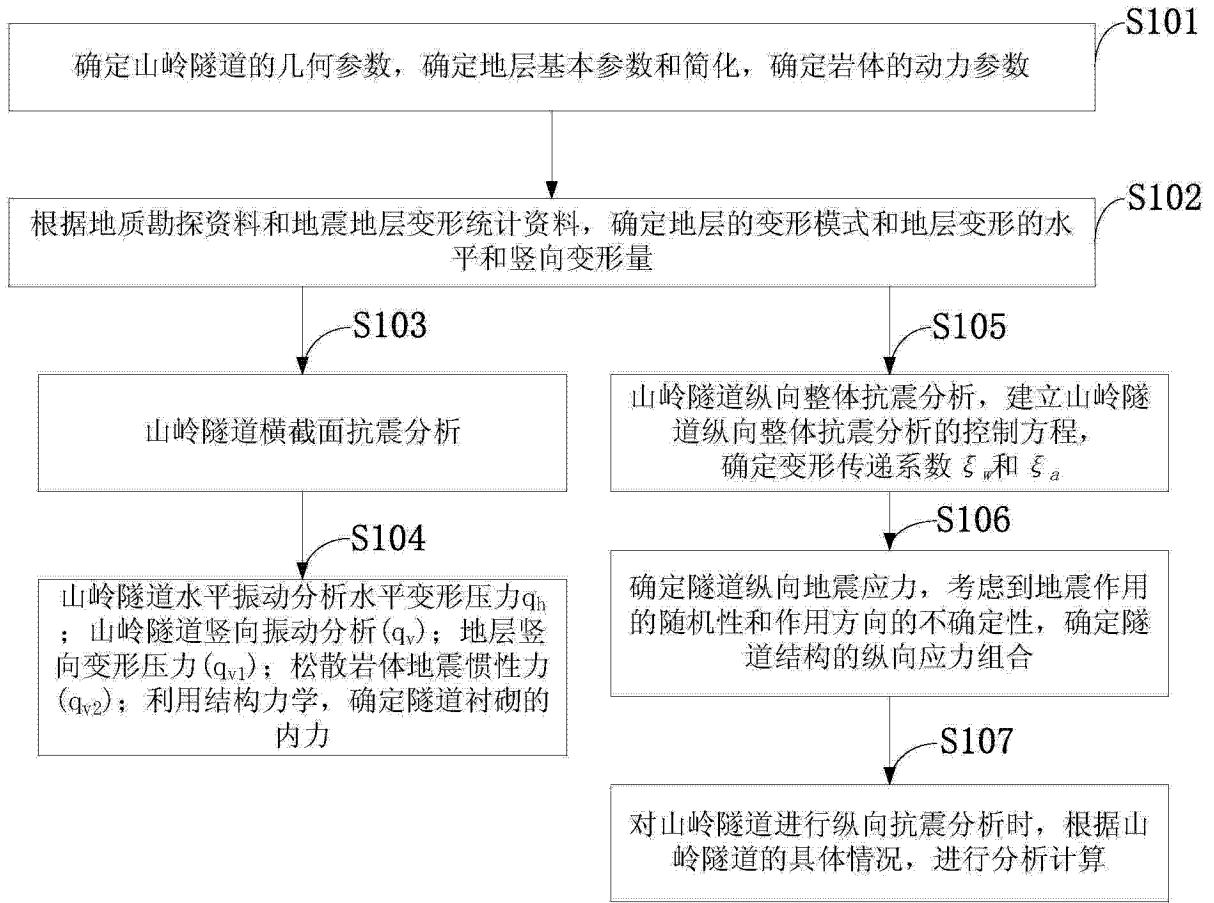


图 1

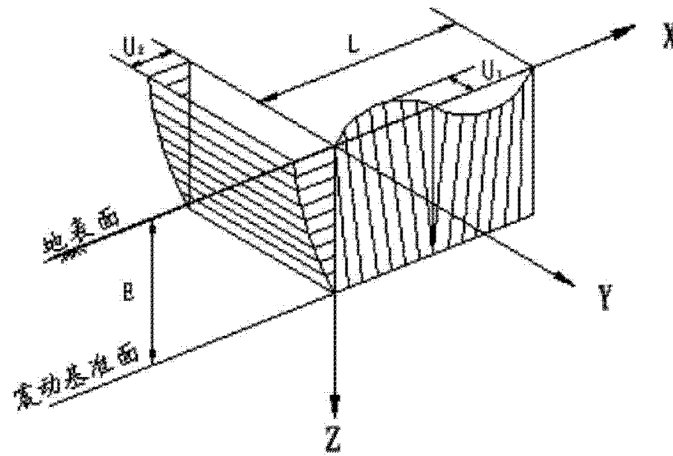


图 2

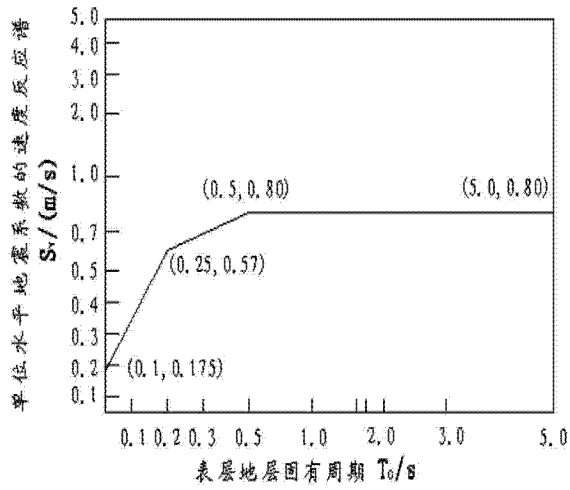


图 3

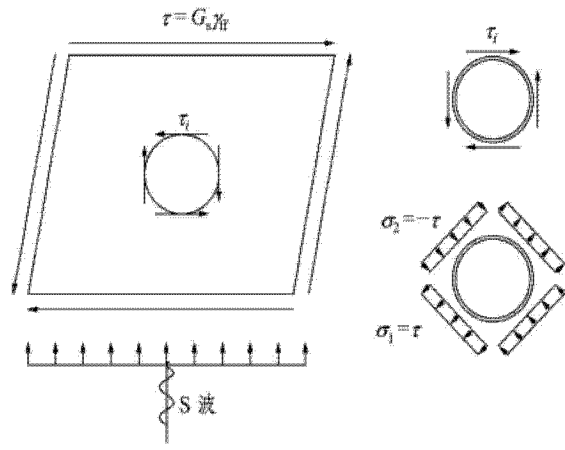


图 4

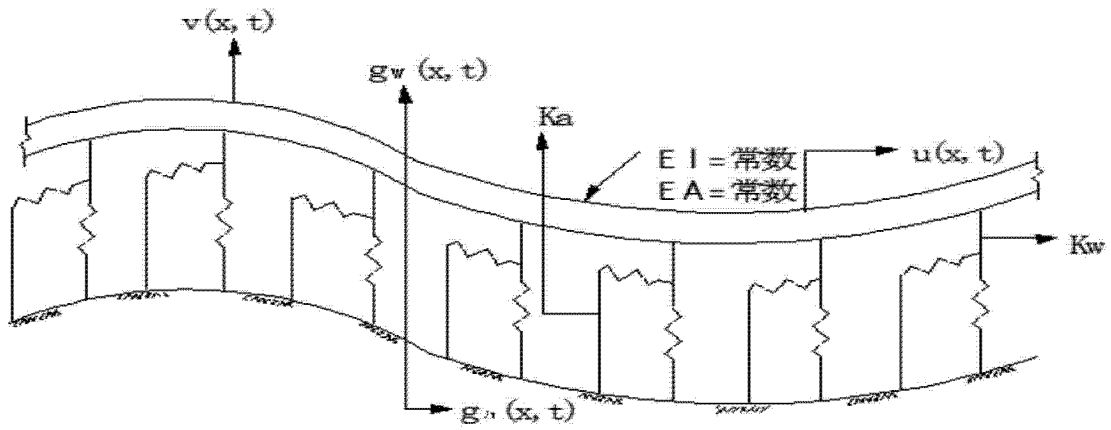


图 5

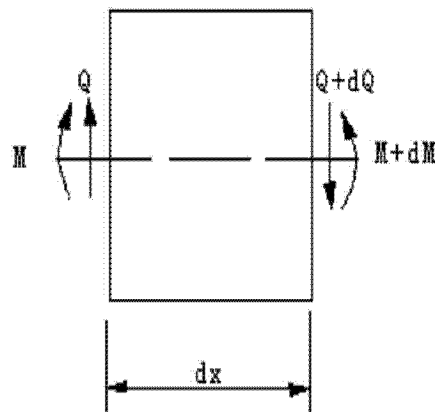


图 6