



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102704947 B

(45) 授权公告日 2014. 04. 30

(21) 申请号 201210176528. 5

(22) 申请日 2012. 05. 31

(73) 专利权人 中南大学

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号

(72) 发明人 施成华 彭立敏 雷明锋 杨伟超 曹成勇

(74) 专利代理机构 长沙市融智专利事务所 43114

代理人 黄美成

(51) Int. Cl.

E21D 11/10(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101566063 A, 2009. 10. 28,

JP 4250050 B2, 2009. 01. 23,

陈俊儒. 基于流固耦合的海底隧道注浆圈合理参数研究. 《中国优秀硕士学位论文全文数据库

库 工程科技 II 辑》. 2010, (第 4 期), C034-111.

吉小明等. 浅埋暗挖隧道围岩预加固机理及稳定性分析. 《现代隧道技术》. 2008, (第 S1 期),

杜朝伟等. 水下隧道渗流场解析解及其应用. 《岩石力学与工程学报》. 2011, 第 30 卷 (第 S2 期),

审查员 刘坤

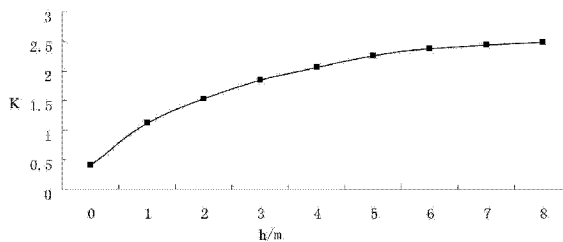
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法, 其特征在于, 包括以下步骤: 步骤 1: 选取一组加固圈厚度参数, 计算不同加固圈厚度条件下隧道施工工作面的稳定系数; 步骤 2: 基于不同加固圈厚度以及对应的稳定系数, 根据最小二乘法, 获得加固圈厚度 - 稳定系数回归曲线; 步骤 3: 根据该加固圈厚度 - 稳定系数回归曲线, 即可得到某一设计的稳定系数条件下隧道所需的加固圈厚度。采用该水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法得到的加固圈厚度更能满足现场工程施工要求, 从而一方面可保证隧道的施工安全, 另一方面也可降低工程造价。



1. 一种水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤 1:选取一组加固圈厚度参数,计算不同加固圈厚度条件下隧道施工工作面的稳定系数;

步骤 2:基于不同加固圈厚度以及对应的稳定系数,根据最小二乘法,获得加固圈厚度-稳定系数回归曲线;

步骤 3:根据该加固圈厚度-稳定系数回归曲线,即可得到某一设计的稳定系数条件下隧道所需的加固圈厚度;

在步骤 1,某一加固圈厚度对应的稳定系数采用以下方法计算:

(1) 计算围岩压力  $q$ ;

①  $H \leq$  等效荷载高度  $h_q$  时,

$$q = \gamma \cdot H;$$

式中: $\gamma$  为隧道上覆围岩重度; $H$  为隧道埋深,指隧道拱顶至地面的距离;

② 等效荷载高度  $h_q < H <$  深、浅埋隧道分界深度  $H_p$  时,

$$q = \gamma H \left( 1 - \frac{H}{2B} \lambda \operatorname{tg} \theta \right),$$

$$\lambda = \frac{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \beta [1 + \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \theta) + \operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \theta]};$$

式中: $\lambda$  为侧压力系数; $B$  为隧道开挖宽度, $\beta$  为破裂面与水平面的夹角; $\phi$  为似摩擦角, $\theta$  为摩擦角;

③  $H \geq$  深、浅埋隧道分界深度  $H_p$  时,

$$q = \gamma \cdot h_q;$$

(2) 采用以下公式计算作用于注浆加固圈外的静水压力:

$$u = \gamma_w \frac{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2}}{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2} + k_1 \ln \frac{D/2+H}{D/2+h}} h_0;$$

式中: $u$  为注浆加固圈外表面上的静水压力; $h_0$  为水的深度; $k_0$  为周围岩土原有的渗透系数; $k_1$  为注浆圈的渗透系数; $H$  为隧道埋深; $h$  为注浆加固圈厚度; $D$  为隧道跨度; $\gamma_w$  为水的容重;

(3) 计算作用于注浆加固圈上的总荷载,总荷载  $q_0$  为围岩压力  $q$  与静水压力  $u$  之和;

(4) 获得加固圈的挠度方程  $\omega(x)$ ;

将总荷载  $q_0$  代入  $EI \frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} - G_p b^* \frac{d^2 \omega(x)}{dx^2} + kb^* \omega(x) = bq_0$  并代入边界条件对上式求解,

得到加固圈的挠度方程  $\omega(x)$ ;

式中: $G_p$  为地基剪切模量, $k$  为基床系数, $b^*$  为考虑双参数地基连续性有限宽度梁等效

宽度,有  $b^* = b \left[ 1 + \frac{(G_p/k)^{1/2}}{b} \right]$ ;  $E$ 、 $I$  为注浆圈的弹性模量和惯性矩,其中  $I = \frac{bh^3}{12}$ ,  $b$  为梁的宽

度,此处即为隧道的跨度 ;h 为注浆加固圈的厚度 ;

(5)基于加固圈的挠度方程  $\omega(x)$ , 计算作用于楔形破裂体顶面的总作用力 P ; $P=\sigma \cdot S$ , 其中,  $\sigma$  为作用在楔块上部的平均应力,  $\sigma=\frac{1}{L} \int p(x) dx$ , 积分区间  $(0, D \cot \alpha)$ ,  $L=D \cot \alpha$  ;

$$p(x)=k \omega(x)-G_p \frac{d \omega^2(x)}{d x^2}, \quad S \text{ 为楔形破裂体顶面面积 ;}$$

(6) 计算楔形破裂体内部形心处水平方向的水头值  $h(y)$  和竖直方向的水头值  $h(z)$  ;

(7) 作用于楔形体上渗透力的水平分量  $F_y$ , 竖直分量  $F_z$  ;

$$F_y=2 \gamma_w D^2 h(y) ;$$

$$F_z=2 \gamma_w D^2 \cos \alpha h(z) ;$$

其中, D 为隧道跨度 ; $\alpha$  为楔形破裂体破裂面与水平面的夹角,  $h(y)$  为楔形体内 部形心处沿水平方向的水头,  $h(z)$  为楔形体内部形心处沿竖直方向的水头 ;

(8) 计算作用于楔形体上的抗滑力和下滑力 ;

$$\text{抗滑力 } F_{\text{抗滑力}}=T_g+T,$$

$$\text{下滑力 } F_{\text{下滑力}}=(P+G+F_z) \sin \alpha+F_y \cos \alpha ;$$

$$\text{式中 : } T_g \text{ 为楔块两侧侧向摩阻力, } T_g=D^2 \cot \alpha \left( c+K_0 \tan \phi \frac{2 \sigma+D \gamma}{3} \right) ;$$

$$T \text{ 为倾斜滑动面上的摩阻力, } T=N \tan \phi+c \frac{D^2}{\sin \alpha} ; N \text{ 为作用于破裂体的法向力,}$$

$$N=(P+G+F_z) \cos \alpha-F_y \sin \alpha ; P \text{ 为作用于楔形破裂体顶面的总作用力(具体计算由步骤}$$

(5) 算得), G 为楔块自重,  $G=\frac{1}{2} \gamma D^3 \cot \alpha$  ;

$\alpha$  为楔形破裂体的破裂角, 即楔形破裂体破裂面与水平面的夹角,  $\alpha=45^\circ+\phi / 2$  ;

$\phi$  为工作面围岩的内摩擦角 ; $\gamma$  为围岩容重 ;c 为围岩的粘聚力 ;

$K_0$  为侧压力系数,  $K_0=\frac{\mu}{1-\mu}$ ,  $\mu$  为围岩的泊松比 ;

(9) 计算得到隧道掌子面的稳定系数 K :

$$K=\frac{D^2 \cot \alpha \left( c+K_0 \tan \phi \frac{2 \sigma+D \gamma}{3} \right)+\left[ (P+G+F_z) \cos \alpha-F_y \sin \alpha \right] \tan \phi+c \frac{D^2}{\sin \alpha}}{(P+G+F_z) \sin \alpha+F_y \cos \alpha} .$$

2. 根据权利要求 1 所述的水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法, 其特征在于, 加固圈厚度参数为至少五个, 从大到小或从小到大排列, 相邻的加固圈厚度参数值的差值为 1m。

## 一种水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法。

### 背景技术

[0002] 水下隧道采用矿山法进行施工时,为防止开挖面出现突水坍塌等工程事故,施工中通常采用超前注浆进行预加固,而后在注浆加固圈的保护下进行隧道开挖,以保证水下隧道的施工安全。然而,目前国内外对于水下隧道超前注浆加固参数的设计主要还是在经验的基础上按工程类比法进行,相关的公路和铁路隧道设计规范对水下隧道注浆加固圈厚度如何确定完全没有涉及。实际水下隧道工程设计中,注浆加固参数的确定往往根据设计工程师的个人经验进行判定,对于采用的注浆设计参数是否完全能够保证隧道安全施工的需要,或者确定的注浆参数是否过于保守,其安全系数有多大,包括设计工程师自己都无法确定。因此,一方面设计中为保证安全,设计工程师往往一味的加大注浆加固圈的厚度,以保证隧道的施工安全,从而增加了隧道的工程造价;另一方面,由于缺乏有效的分析和设计方法,无法根据隧道的地质条件进行针对性的设计,整座隧道往往采用完全相同的注浆加固设计参数,使得水下隧道在断层破碎带等地质薄弱位置又存在一定的施工风险。

[0003] 总体来说,水下隧道注浆加固圈厚度的设计目前还停留在经验的基础上,无法满足我国水下隧道建设快速发展的需要。

[0004] 因此,研制一种新型的定量化的水下隧道注浆加固圈厚度的设计方法已为急需。

### 发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是提供一种水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法,采用该水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法得到的加固圈厚度更能满足现场工程施工要求,从而一方面可保证隧道的施工安全,另一方面也可降低工程造价。

[0006] 发明的技术解决方案如下:

[0007] 一种水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1:选取一组加固圈厚度参数,计算不同加固圈厚度条件下隧道施工工作面的稳定系数;

[0009] 步骤2:基于不同加固圈厚度以及对应的稳定系数,根据最小二乘法,获得加固圈厚度-稳定系数回归曲线;

[0010] 步骤3:根据该加固圈厚度-稳定系数回归曲线,即可得到某一设计的稳定系数条件下隧道所需的加固圈厚度。

[0011] 在步骤1,某一加固圈厚度对应的稳定系数采用以下方法计算:

[0012] (1) 计算围岩压力  $q$ ;

[0013] ①  $H \leq$  等效荷载高度  $h_q$  时,

[0014]  $q = \gamma \cdot H$ ;

[0015] 式中: $\gamma$  为隧道上覆围岩重度; $H$  为隧道埋深,指隧道拱顶至地面的距离;

[0016] ②等效荷载高度  $h_q < H <$  深、浅埋隧道分界深度  $H_p$  时,

$$[0017] \quad q = \gamma H \left( 1 - \frac{H}{2B} \lambda \operatorname{tg} \theta \right),$$

$$[0018] \quad \lambda = \frac{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \beta [1 + \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \theta) + \operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \theta]};$$

[0019] 式中:  $\lambda$  为侧压力系数;  $\beta$  为破裂面与水平面的夹角;  $\phi$  为似摩擦角,  $\theta$  为摩阻角。

[0020] ③  $H \geq$  深、浅埋隧道分界深度  $H_p$  时,

$$[0021] \quad q = \gamma \cdot h_q;$$

[0022] (2) 采用以下公式计算作用于注浆加固圈外的静水压力:

$$[0023] \quad u = \gamma_w \frac{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2}}{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2} + k_1 \ln \frac{D/2+H}{D/2+h}} h_0;$$

[0024] 式中:  $u$  为注浆加固圈外表面上的静水压力;  $h_0$  为水的深度;  $k_0$  为周围岩土原有的渗透系数;  $k_1$  为注浆圈的渗透系数;  $H$  为隧道埋深;  $h$  为注浆加固圈厚度;  $D$  为隧道跨度;  $\gamma_w$  为水的容重。

[0025] (3) 计算作用于注浆加固圈上的总荷载, 总荷载  $q_0$  为围岩压力  $q$  与静水压力  $u$  之和;

[0026] (4) 获得加固圈的挠度方程  $\omega(x)$ ;

[0027] 将总荷载  $q_0$  代入  $EI \frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} - G_p b^* \frac{d^2 \omega(x)}{dx^2} + kb^* \omega(x) = bq_0$  并代入边界条件对上式求解, 得到加固圈的挠度方程  $\omega(x)$ ;

[0028] 式中:  $G_p$  为地基剪切模量,  $k$  为基床系数, ( $G_p$ 、 $k$  均能根据地质勘探资料得到),  $b^*$  为考虑双参数地基连续性有限宽度梁等效宽度, 有  $b^* = b \left[ 1 + \frac{(G_p/k)^{1/2}}{b} \right]$ ;  $E$ 、 $I$  为注浆圈的弹性

模量和惯性矩, 其中  $I = \frac{bh^3}{12}$ ,  $b$  为梁的宽度, 此处即为隧道的跨度;  $h$  为注浆加固圈的厚度。

[0029] (5) 基于加固圈的挠度方程  $\omega(x)$ , 计算作用于楔形破裂体顶面的总作用力  $P$ ;

[0030]  $P = \sigma \cdot S$ , 其中,  $\sigma$  为作用在楔块上部的平均应力,  $\sigma = \frac{1}{L} \int p(x) dx$ , 积分区间  $(0,$

$D \cot \alpha)$ ,  $L = D \cot \alpha$ ;  $p(x) = k\omega(x) - G_p \frac{d\omega^2(x)}{dx^2}$ ,  $S$  为楔形破裂体顶面面积;

[0031] (6) 计算楔形破裂体内部形心处水平方向的水头值  $h(y)$  和垂直方向的水头值  $h(z)$ ;

[0032] (7) 作用于楔形体上渗透力的水平分量  $F_y$ , 竖直分量  $F_z$ ;

$$[0033] \quad F_y = 2 \gamma_w D^2 h(y);$$

$$[0034] \quad F_z = 2 \gamma_w D^2 \cos \alpha h(z);$$

[0035] 其中,  $D$  为隧道跨度;  $\alpha$  为楔形破裂体破裂面与水平面的夹角,  $h(y)$  为楔形体内部形心处沿水平方向的水头,  $h(z)$  为楔形体内部形心处沿垂直方向的水头;

[0036] (8) 计算作用于楔形体上的抗滑力和下滑力；

[0037] 抗滑力  $F_{\text{抗滑力}} = T_g + T$ ，

[0038] 下滑力  $F_{\text{下滑力}} = (P + G + F_z) \sin \alpha + F_y \cos \alpha$ ；

[0039] 式中： $T_g$  为楔块两侧侧向摩阻力， $T_g = D^2 \cot \alpha \left( c + K_0 \tan \phi \frac{2\sigma + D\gamma}{3} \right)$ ；

[0040]  $T$  为倾斜滑动面上的摩阻力， $T = N \tan \phi + c \frac{D^2}{\sin \alpha}$ ； $N$  为作用于破裂体的法向力，

[0041]  $N = (P + G + F_z) \cos \alpha - F_y \sin \alpha$ ； $P$  为作用于楔形破裂体顶面的总作用力（具体计算由步骤（5）算得）， $G$  为楔块自重， $G = \frac{1}{2} \gamma D^3 \cot \alpha$ ；

[0042]  $\alpha$  为楔形破裂体的破裂角，即楔形破裂体破裂面与水平面的夹角， $\alpha = 45^\circ + \phi / 2$ ；

[0043]  $\phi$  为工作面围岩的内摩擦角； $\gamma$  为围岩容重； $c$  为围岩的粘聚力；

[0044]  $K_0$  为侧压力系数， $K_0 = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ， $\mu$  为围岩的泊松比；【对于具体的隧道工程， $c$ 、 $\phi$ 、 $\gamma$ 、 $\mu$  可根据地质勘探报告选取，也可根据隧道具体的围岩级别根据隧道设计规范选取；】

[0045] (9) 计算得到隧道掌子面的稳定系数  $K$ ：

[0046]

$$K = \frac{D^2 \cot \alpha \left( c + K_0 \tan \phi \frac{2\sigma + D\gamma}{3} \right) + [(P + G + F_z) \cos \alpha - F_y \sin \alpha] \tan \phi + c \frac{D^2}{\sin \alpha}}{(P + G + F_z) \sin \alpha + F_y \cos \alpha}$$

[0047] 加固圈厚度参数为至少五个，从大到小或从小到大排列，相邻的加固圈厚度参数值的差值为 1m。

[0048] 本发明提供的水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法，认为水下隧道施工工作面在围岩压力、静水压力和渗透力共同作用下会产生如图 2 所示的潜在楔形破裂体，从而按保证潜在楔形破裂体的稳定性进行注浆加固圈厚度的设计。

[0049] 本发明还在于所述的作用于注浆加固圈上的围岩压力根据隧道埋深的不同按相关隧道设计规范进行计算。

[0050] ①埋深 ( $H$ )  $\leq$  等效荷载高度 ( $h_q$ ) 时，荷载视为均布垂直压力：

[0051]  $q = \gamma \cdot H$  (1)

[0052] 式中： $q$  为垂直均布压力 ( $\text{kN/m}^2$ )； $\gamma$  为隧道上覆围岩重度 ( $\text{kN/m}^3$ )； $H$  为隧道埋深，指隧道拱顶至地面的距离 (m)。其中  $h_q$  为等效荷载高度 (m)， $h_q = 0.45 \times 2^{S-1} \cdot \omega$ ， $S$  为围岩级别； $\omega$  为宽度影响系数，即  $\omega = 1 + i(B-5)$ ，其中  $B$  为隧道宽度 (m)， $i$  为隧道宽度  $B$  每增减 1m 时的围岩压力增减率，以  $B=5\text{m}$  的围岩垂直均布压力为准，当  $B < 5\text{m}$  时，取  $i = 0.2$ ； $B=5 \sim 15\text{m}$  时，取  $i = 0.1$ 。

[0053] ②等效荷载高度 ( $h_q$ )  $<$  埋深 ( $H$ )  $<$  深、浅埋隧道分界深度 ( $H_p$ )，作用在注浆加固圈上的均布荷载为：

[0054]  $q = \gamma H \left( 1 - \frac{H}{2B} \lambda \tan \theta \right)$  (2)

[0055]  $\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \phi}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \phi - \tan \theta)] + \tan \phi \tan \theta}$  (3)

[0056] 以上式中 :B 为隧道开挖宽度,  $\beta$  为破裂面与水平面的夹角 ( $^{\circ}$ );  $\phi$  为似摩擦角,  $\theta$  为摩阻角, 根据围岩级不同按《公路隧道涉及规范》选取。  $H_p$  为隧道深、浅埋隧道分界深度,  $H_p = (2 \sim 2.5)h_q$ , 当围岩为 I ~ III 级时取 2, IV ~ VI 级时取 2.5,  $\lambda$  为侧压力系数, 按下式计算。

[0057] ③埋深 (H)  $\geq$  深、浅埋隧道分界深度 ( $H_p$ )

$$[0058] \quad q = \gamma \cdot h_q \quad (4)$$

[0059] (3) 本发明还在于所述的作用于注浆圈外的静水压力根据注浆加固圈厚度及渗透系数, 按照地下水渗流的相关理论进行求解。

$$[0060] \quad u = \gamma_w \frac{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2}}{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2} + k_1 \ln \frac{D/2+H}{D/2+h}} h_0 \quad (5)$$

[0061] 式中 :u 为注浆加固圈外表面上的静水压力 ;  $h_0$  为水的深度 ;  $k_0$  为周围岩土原有的渗透系数 ;  $k_1$  为注浆圈的渗透系数 ; H 为隧道埋深 ; h 为注浆加固圈厚度 ; D 为隧道跨度 ;  $\gamma_w$  为水的容重。

[0062] (4) 本发明还在于所述的注浆加固圈按照有限长度弹性地基梁进行计算分析, 进而计算得到作用于潜在楔形破裂体上的作用力为 :

$$[0063] \quad p(x) = k\omega(x) - G_p \frac{d\omega^2(x)}{dx^2} \quad (6)$$

[0064] 式中,  $G_p$  为地基剪切模量, k 为基床系数。  $\omega(x)$  为注浆圈的挠度方程, 其控制方程为  $EI \frac{d^4\omega(x)}{dx^4} - G_p b^* \frac{d^2\omega(x)}{dx^2} + kb^*\omega(x) = bq_0$ , 代入边界条件即可进行求解。其中  $q(x)$  为作用于注浆加固圈上的荷载 (包括围岩压力、静水压力),  $p(x)$  为弹性抗力, 也即作用于楔形破裂体上的作用力。E、I 为注浆圈的弹性模量和惯性矩。其中  $I = \frac{bh^3}{12}$ , b 为梁的宽度, 此处即为隧道的跨度 ; h 为注浆加固圈的厚度。

[0065] (5) 本发明还在于所述的作用于楔形破裂体的渗透力采用数值模拟方法求出各点的水头, 而后根据渗流理论进行求解。应用高斯理论, 如图 2 所示, 得到作用在楔形体上的渗透力的水平分量和垂直分量的表达式 :

$$[0066] \quad F_y(\alpha) = \gamma_w (-\sin \alpha \int_{ABEF} h^* dA + \int_{BCJh}^* dA) \quad (7)$$

$$[0067] \quad F_z(\alpha) = \gamma_w (\cos \alpha \int_{ABEF} h^* dA - \int_{CJEFh}^* dA) \quad (8)$$

[0068] 式中 :  $\alpha$  为楔形破裂体的破裂角,  $\gamma_w$  为水的容重,  $h^*$  为楔形体内部沿 x 方向的平均水头, 有

$$[0069] \quad h^* = h^*(y, z) = \frac{1}{D} \int_{-D/2}^{D/2} h(x, y, z) dx \quad (9)$$

[0070] 式中 : D 为隧道跨度 ;  $h(x, y, z)$  为数值模拟得到的各点的水头值。

[0071] (6) 本发明还在于所述的作用于潜在楔形破裂体上的下滑力和抗滑力分别为 :

$$[0072] \quad F_{\text{抗滑力}} = T_g + T \quad (10)$$

$$[0073] \quad F_{\text{下滑力}} = (P + G + F_z) \sin \alpha + F_y \cos \alpha \quad (11)$$

[0074] 式中： $T_g$  为楔块两侧侧向摩阻力， $T_g = D^2 \cot \alpha \left( c + K_0 \tan \phi \frac{2\sigma + D\gamma}{3} \right)$ ； $T$  为倾斜滑动面上的摩阻力， $T = N \tan \varphi + c \frac{D^2}{\sin \alpha}$ ； $N$  为作用于破裂体的法向力， $N = (P + G + F_z) \cos \alpha - F_y \sin \alpha$ ； $P$  为楔形破裂体顶面的总作用力， $G$  为楔块自重， $G = \frac{1}{2} \gamma D^3 \cot \alpha$ ； $F_y$ 、 $F_z$  为作用在楔形体上的渗透力的水平分量和垂直分量，按(11)和(12)式进行计算； $\alpha$  为楔形破裂体的破裂角， $\alpha = 45^\circ + \varphi / 2$ ； $\varphi$  为工作面围岩的内摩擦角； $\gamma$  为围岩容重； $c$  为围岩的粘聚力； $K_0$  为侧压力系数， $K_0 = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ， $\mu$  为围岩的泊松比；对于具体的隧道工程， $c$ 、 $\varphi$ 、 $\gamma$ 、 $\mu$  可根据地质勘探报告选取，也可根据隧道具体的围岩级别根据隧道设计规范选取；其余符号意义同前。

[0075] (7) 本发明还在于所述的隧道施工掌子面的稳定系数，分别计算作用于潜在楔形破裂体上的下滑力和抗滑力，即可得到水下隧道施工掌子面的稳定系数，具体按下式求解。

[0076]

$$K = \frac{D^2 \cot \alpha \left( c + K_0 \tan \phi \frac{2\sigma + D\gamma}{3} \right) + [(P + G + F_z) \cos \alpha - F_y \sin \alpha] \tan \varphi + c \frac{D^2}{\sin \alpha}}{(P + G + F_z) \sin \alpha + F_y \cos \alpha} \quad (12)$$

[0077] 式中：各符号意义同前。

[0078] (7) 本发明还在于所述的最佳的注浆加固圈厚度，对不同注浆加固圈厚度条件下隧道施工掌子面的稳定系数进行求解，绘制加固圈厚度与掌子面稳定系数的关系曲线，即可求得满足工作面稳定系数要求的最佳的注浆加固圈厚度。

[0079] 有益效果：

[0080] 本发明的水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法，与现有水下暗挖施工隧道注浆加固设计方法相比，其优点在于：传统的基于规范和经验的水下隧道注浆加固圈厚度的设计方法，其设计厚度选择的合理性完全依赖于设计人员本身的设计经验和现场经验，而本发明提出的水下隧道注浆加固圈厚度的定量化设计方法，其加固厚度的确定完全通过理论计算得到，和设计人员的设计经验关系不大，使得得到的加固圈厚度更能满足现场工程施工要求，从而一方面可保证水下隧道的施工安全，另一方面也可降低工程造价。

## 附图说明

[0081] 图 1 为本发明水下隧道暗挖施工注浆加固示意图

[0082] 图 2 为本发明掌子面楔形破裂体示意图

[0083] 图 3 为本发明静水压力计算模型示意图

[0084] 图 4 为本发明隧道开挖过程中注浆圈受力计算模型示意图

[0085] 图 5 为本发明掌子面楔形破裂体作用力示意图

[0086] 图 6 为本发明注浆加固圈厚度与隧道掌子面稳定系数关系曲线示意图

[0087] 图中：1—初期支护，2—钢拱架，3—掌子面，4—破裂面，5—围岩，6—注浆加固圈，7—江底位置，8—江水位，9—隧道，10—楔形破裂体， $H$ —隧道埋深， $D$ —隧道高度， $P$  注浆圈传递到楔形破裂体上的合力， $G$  楔块自重， $T_g$  为楔块两侧侧向摩阻力， $F_y$ —作用在楔形体上的



渗透力的水平分量,  $F_z$ —作用在楔形体上的渗透力的垂直分量,  $T$ —倾斜滑动面上的摩阻力,  $N$ —作用于破裂体的法向力,  $h_0$ —隧道拱顶的水位深度,  $h$ —注浆圈的厚度,  $K$ —隧道工作面的稳定系数,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $J$ —楔形破裂体各顶点的位置。

### 具体实施方式

[0088] 以下将结合附图和具体实施例对本发明做进一步详细说明：

[0089] 一种水下隧道暗挖施工注浆加固参数的设计方法, 参见图 1, 隧道开挖后, 水下隧道施工工作面在围岩压力、静水压力和渗透力共同作用下会产生潜在的楔形破裂体(图 2), 通过工作面稳定性分析, 按保证潜在楔形破裂体的稳定性进行注浆加固设计, 注浆加固的具体设计参数包括注浆圈厚度、注浆后的渗透系数和力学参数。围岩压力根据隧道埋深的不同按相关隧道设计规范进行计算, 注浆加固圈按照有限长度弹性地基梁进行计算分析, 作用于注浆圈外的静水压力根据注浆加固圈厚度及渗透系数, 按照地下水的渗流的相关理论进行求解, 作用于楔形破裂体的渗透力采用数值模拟方法求出各点的水头, 而后根据渗流理论进行求解, 分别计算作用于潜在楔形破裂体上的下滑力和抗滑力, 基于极限平衡理论, 最终确定保证潜在楔形破裂体稳定性的注浆加固圈厚度。

[0090] (1) 作用于注浆加固圈上的围岩压力的计算

[0091] 根据我国公路或铁路隧道设计规范, 可得隧道围岩等效荷载高度  $h_q$  为：

$$[0092] \quad h_q = 0.45 \times 2^{S-1} \cdot \omega \quad (1)$$

[0093] 式中： $h_q$  为等效荷载高度(m);  $S$  为围岩级别； $\omega$  为宽度影响系数, 即  $\omega = 1 + i(B-5)$ , 其中  $B$  为隧道宽度(m),  $i$  为隧道宽度  $B$  每增减 1m 时的围岩压力增减率, 以  $B=5m$  的围岩垂直均布压力为准, 当  $B < 5m$  时, 取  $i=0.2$ ;  $B=5 \sim 15m$  时, 取  $i=0.1$ 。

[0094] ①埋深 ( $H$ )  $\leq$  等效荷载高度 ( $h_q$ ) 时, 荷载视为均布垂直压力：

$$[0095] \quad q = \gamma \cdot H \quad (2)$$

[0096] 式中： $q$  为垂直均布压力 ( $kN/m^2$ )； $\gamma$  为隧道上覆围岩重度 ( $kN/m^3$ )； $H$  为隧道埋深, 指隧道拱顶至地面的距离 (m)。

[0097] ②等效荷载高度 ( $h_q$ )  $<$  埋深 ( $H$ )  $<$  深、浅埋隧道分界深度 ( $H_p$ ), 作用在注浆加固圈上的均布荷载为：

$$[0098] \quad q = \gamma H \left( 1 - \frac{H}{2B} \lambda \operatorname{tg} \theta \right) \quad (3)$$

$$[0099] \quad \lambda = \frac{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \beta [1 + \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \theta)] + \operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \theta} \quad (4)$$

[0100] 式中： $\lambda$  为侧压力系数； $\phi$  为似摩擦角， $\theta$  为摩阻角， $\beta$  为破裂面与水平面的夹角 ( $^\circ$ )，其中  $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \phi + \sqrt{\frac{(\operatorname{tg}^2 \phi + 1) \cdot \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \theta}}$ ； $\phi$ ,  $\theta$  根据围岩级别不同按隧道设计规范选取, 其余符号意义同前。

[0101] ③埋深 ( $H$ )  $\geq$  深、浅埋隧道分界深度 ( $H_p$ )

$$[0102] \quad q = \gamma \cdot h_q \quad (5)$$

[0103] (2) 作用于注浆圈外的静水压力的计算。

[0104] 参见图 3, 可得：

$$[0105] \quad u = \gamma_w \frac{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2}}{k_0 \ln \frac{D/2+h}{D/2} + k_1 \ln \frac{D/2+H}{D/2+h}} h_0 \quad (6)$$

[0106] 式中： $u$  为注浆加固圈外表面上的静水压力； $h_0$  为水的深度； $k_0$  为周围岩土原有的渗透系数；（可由地质勘探资料得到） $k_1$  为注浆圈的渗透系数（可通过取样试验得到）； $H$  为隧道埋深； $h$  为注浆加固圈厚度； $D$  为隧道跨度； $\gamma_w$  为水的容重，为  $10\text{kN/m}^3$ （ $H, D$  根据隧道设计图纸确定， $h$  为本方法需要确定的设计参数。）

[0107] （3）通过注浆加固圈作用于潜在楔形破裂体上的作用力的计算。

[0108] 注浆加固圈的弹性地基梁力学模型参见图 4，可将已支护段看作具有一定初始位移  $\omega_0$  和初始转角  $\theta_0$  的弹性固定端，注浆圈的初始位移  $\omega_0$  为初期支护的既有位移；将注浆圈视为有限长度的弹性地基梁，可得梁的挠度微分方程  $\omega(x)$  为：

$$[0109] \quad EI \frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} = b[q(x) - p(x)] \quad (7)$$

[0110] 式中： $q(x)$  为作用于注浆加固圈上的荷载（包括围岩压力、静水压力、动水压力）， $p(x)$  为弹性抗力，也即作用于楔形破裂体上的作用力。 $E, I$  为注浆圈的弹性模量和惯性矩。

[0111] 其中  $I = \frac{bh^3}{12}$ ， $b$  为梁的宽度，此处即为隧道的跨度； $h$  为注浆加固圈的厚度。

[0112] 地基反力采用双参数模型的 Pasternak 模型进行求解，可得

$$[0113] \quad EI \frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} - G_p b^* \frac{d^2 \omega(x)}{dx^2} + kb^* \omega(x) = bq_0 \quad (8)$$

[0114] 式中： $G_p$  为地基剪切模量， $k$  为基床系数， $b^*$ ——考虑双参数地基连续性有限宽度梁等效宽度，即  $b^* = b \left[ 1 + \frac{(G_p/k)^{1/2}}{b} \right]$ 。

[0115] 代入边界条件（初始位移为  $\omega_0$ ，初始转角为  $\theta_0$ ， $\omega_0=2\text{mm}$ ， $\theta_0=1^\circ$ ）进行求解得到注浆圈的挠度方程  $\omega(x)$  后，即可求得作用于楔形破裂体顶面的作用力为：

$$[0116] \quad p(x) = k\omega(x) - G_p \frac{d\omega^2(x)}{dx^2} \quad (9)$$

[0117] 同时得到作用在楔块上部的平均应力  $\sigma$ ， $\sigma = \frac{1}{L} \int p(x) dx$ ，（积分区间  $(0, D \cot \alpha)$ ， $L=D \cot \alpha$ ）

[0118] 进一步求得作用于楔形破裂体顶面总的的作用力为：

$$[0119] \quad P = \sigma \cdot S \quad (10)$$

[0120] 式中： $S$  为楔形破裂体顶面面积。

[0121] （4）作用于楔形破裂体的渗透力的计算

[0122] 对楔形体上单位体积渗透力应用高斯理论，得到作用在楔形体上的渗透力的水平分量和垂直分量的表达式：

$$[0123] \quad F_y = 2 \gamma_w D^2 h(y) \quad (11)$$

$$[0124] \quad F_z = 2 \gamma_w D^2 \cos \alpha h(z) \quad (12)$$

[0125] 式中： $\gamma_w$  为水的容重； $D$  为隧道跨度； $\alpha$  为楔形破裂体破裂面与水平面的夹角，

$h(y)$  为楔形体内部形心处沿水平方向的水头,  $h(z)$  为楔形体内部形心处沿竖直方向的水头,  $h(y)$ 、 $h(z)$  可通过数值计算方法得到 (是现有技术, 根据实际工程, 实际参数, 利用数值模拟、建立模型分析, 得到  $h(y)$ 、 $h(z)$ )。

[0126] (5) 参见图 5, 作用于潜在楔形破裂体上的下滑力和抗滑力采用以下方法进行计算。

$$[0127] \quad F_{\text{抗滑力}} = T_g + T \quad (13)$$

[0128] 式中:  $T_g$  为楔块两侧侧向摩阻力,  $T_g = D^2 \cot \alpha \left( c + K_0 \tan \phi \frac{2\sigma + D\gamma}{3} \right)$ ;  $T$  为倾斜滑动面上的摩阻力,  $T = N \tan \phi + c \frac{D^2}{\sin \alpha}$ ;  $N$  为作用于破裂体的法向力,  $N = (P + G + F_z) \cos \alpha - F_y \sin \alpha$ ;  $P$  为楔形破裂体顶面的总作用力,  $G$  为楔块自重,  $G = \frac{1}{2} \gamma D^3 \cot \alpha$ ;  $F_y$ 、 $F_z$  为作用在楔形体上的渗透力的水平分量和垂直分量, 按(11)和(12)式进行计算;  $\alpha$  为楔形破裂体的破裂角,  $\alpha = 45^\circ + \phi/2$ ;  $\phi$  为工作面围岩的内摩擦角;  $\gamma$  为围岩容重;  $c$  为围岩的粘聚力; ( $\phi$ 、 $\gamma$ 、 $c$  可根据工程地质勘探报告测得的地质参数都能得到)  $K_0$  为侧压力系数,  $K_0 = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ,  $\mu$  为围岩的泊松比; 对于具体的隧道工程,  $c$ 、 $\phi$ 、 $\gamma$ 、 $\mu$  可根据地质勘探报告选取, 也可根据隧道具体的围岩级别根据隧道设计规范选取; 其余符号意义同前。

[0129]  $F_{\text{下滑力}} = (P + G + F_z) \sin \alpha + F_y \cos \alpha \quad (14)$

[0130] 式中:  $P$  为楔形破裂体顶面的总作用力,  $G$  为楔块自重,  $G = \frac{1}{2} \gamma D^3 \cot \alpha$ ;  $F_y$ 、 $F_z$  为作用在楔形体上的渗透力的水平分量和垂直分量, 按(11)和(12)式进行计算。

[0131] (6) 参见图 5, 根据式(13)和(14), 隧道施工掌子面的稳定系数可按下式求解

[0132]

$$K = \frac{D^2 \cot \alpha \left( c + K_0 \tan \phi \frac{2\sigma + D\gamma}{3} \right) + [(P + G + F_z) \cos \alpha - F_y \sin \alpha] \tan \phi + c \frac{D^2}{\sin \alpha}}{(P + G + F_z) \sin \alpha + F_y \cos \alpha}$$

(15)

[0133] 式中: 各符号意义同前。

[0134] (7) 根据具体的工程条件, 对不同注浆加固圈厚度条件下隧道施工掌子面的稳定系数进行求解, 即可得到如图 6 所示的曲线, 根据隧道设计规范, 取隧道施工掌子面的稳定系数为 2.0, 此时对应的注浆加固圈厚度即为最佳的注浆加固圈厚度。

[0135] 下面结合实例对本发明进行进一步说明。

[0136] 某水下隧道围岩破碎软弱, 特别是在断层破碎带段隧道和江水连通, 隧道施工过程中极易发生突泥、涌水、岩块崩落甚至坍塌等施工风险。该段隧道埋深为 24m, 河床顶部水深为 21m, 地层渗透系数为 0.89m/d, 为保证隧道的施工安全, 隧道设计中按照工程经验采用了 6.0 厚的注浆加固圈, 注浆后地层的渗透系数为  $10^{-6}$ m/d。

[0137] 采用本发明的水下隧道暗挖施工注浆加固圈厚度的设计方法, 对隧道穿越断层破碎带段的注浆加固圈厚度进行计算, 其具体设计计算过程如下:

[0138] (1) 首先计算不同注浆加固圈厚度条件下隧道施工工作面的稳定系数。以注浆加

固圈厚度 6m 为例,其计算过程如下:

[0139] 1) 根据隧道埋深情况的不同,按公式(2)、(3)或(5)计算作用于注浆加固圈上的围岩压力,对于本实例,按式(3)计算得到围岩压力为  $356.5\text{kN/m}^2$ 。

[0140] 2) 按式(6)计算作用于注浆加固圈外的静水压力,其值为  $150.0\text{kN/m}^2$ 。

[0141] 隧道埋深  $H=21\text{m}$ ,注浆加固圈厚度  $h=6\text{m}$ ,跨度  $D$  为  $10\text{m}$ ,  $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ ,  $k_0$  周围岩土原有的渗透系数  $0.89\text{m/d}$ ,  $k_1$  为注浆加固以后渗透系数  $10^{-6}\text{m/d}$ ,  $h_0$  为  $15\text{m}$ ;

[0142] 3) 计算作用于注浆加固圈上的总荷载,将以上两项计算得到的压力进行叠加即可,其值为  $506.5\text{kN/m}^2$ 。

[0143] 4) 将计算得到的总荷载  $q_0$  代入式(8),并求解方程式(8),根据边界条件,如图 4 所示,在 B 端具有一定初始位移  $\omega_0$  和初始转角  $\theta_0$ ,在 C 点,注浆圈必定满足连续性条件,在 D 端为自由端,由此即可得到加固圈的挠度方程  $\omega(x)$ 。解微分方程的边界条件: $\omega_0=2\text{mm}$ ,  $\theta_0=1^\circ$ )

[0144] 式中:地基剪切模量  $G_p$  为  $1.8 \times 10^4\text{kN/m}$ ,  $k$  为,基床系数  $k$  为  $4.0 \times 10^4\text{kN/m}^3$ ,注浆加固圈截面刚度  $EI$  为  $8.4 \times 10^5\text{kN/m}^2$ ,梁的宽度  $b$  为  $10\text{m}$ 。

[0145] 5) 求得注浆圈的挠度方程后,进一步根据式(9)和(10),即可求得作用于楔形破裂体顶面作用力的平均值为  $320.56\text{kN/m}^2$ ,根据楔形体顶部的面积  $S$  为  $65.43\text{m}^2$ ,即可得到作用于楔形破裂体顶面的总作用力  $P$  为  $20974\text{kN}$ 。  $\sigma=320.56\text{kN/m}^2$ ,  $S=65.43\text{m}^2$ 。

[0146] 6) 采用数值计算方法,计算得到楔形破裂体内部形心处水平方向和竖直方向的水头值  $F_y$ 、 $F_z$  均为  $4.56\text{m}$ 。

[0147] 7) 采用式(11)和(12),求得作用于楔形体上渗透力的水平分量  $F_y$  为  $9120\text{kN}$ ,竖直分量  $F_z$  为  $5055.3\text{kN}$ 。其中,  $\alpha$  为  $56.3^\circ$ ,  $\gamma_w$  为  $10^4\text{kN/m}^3$ ,  $D$  为  $10\text{m}$ 。

[0148] 8) 根据式(13)和(14)分别计算作用于楔形体上的抗滑力和下滑力,分别为  $76791.7\text{kN}$  和  $32279\text{kN}$ 。

[0149] 9) 根据式(15)计算得到隧道掌子面的稳定系数  $K$  为  $2.379$ ,此即为注浆加固圈厚度为  $6\text{m}$  条件下隧道掌子面的稳定系数。

[0150] 10) 根据以上相同的计算方法和计算过程可以求得不同注浆加固条件下以及注浆加固圈厚度分别是  $1.0\text{m}$ ,  $2.0\text{m}$ ,  $3.0\text{m}$ ,  $4.0\text{m}$ ,  $5.0\text{m}$ ,  $6.0\text{m}$ ,  $7.0\text{m}$ ,  $8.0\text{m}$  时隧道掌子面的稳定系数分别为  $0.41$ ,  $1.126$ ,  $1.523$ ,  $1.853$ ,  $2.062$ ,  $2.251$ ,  $2.379$ ,  $2.445$ ,  $2.492$ 。

[0151] (2) 将不同注浆加固圈厚度条件下对应的掌子面安全系数根据最小二乘法绘制成图(为保证绘制图形的准确性,一般至少需取 5 个以上的加固圈厚度进行计算,计算步长可取  $1\text{m}$ ),即可得到如图 6 所示的回归曲线。

[0152] (3) 根据回归曲线图,即可得到某一设计掌子面安全系数条件下隧道所需的加固圈厚度;

[0153] 根据隧道设计规范,隧道安全系数一般取  $2.0$ ,此时保证该隧道施工掌子面稳定性的最小注浆圈厚度为  $3.8\text{m}$ ,较经验法确定的注浆加固圈厚度减小  $2.2\text{m}$ 。

[0154] 当隧道注浆加固圈厚度为  $6.0\text{m}$  时,其每延米的注浆费用约为  $1.5$  万元,当注浆加固圈的厚度减小为  $3.8\text{m}$  时,其每延米的注浆费用约为  $0.7$  万元,较  $6.0\text{m}$  注浆圈减少费用  $50\%$  以上,对于一般的水下隧道,其长度一般在  $2\text{km}$  以上,采用本发明降低的工程造价将在  $1600$  万元以上。

[0155] 此外,采用本发明的注浆加固圈厚度的确定方法,由于减小了注浆加固圈的厚度,降低了注浆施工的难度,加快了隧道的施工进度,可有效的缩短隧道的施工工期,其所产生的经济效益和社会效益也是非常显著。

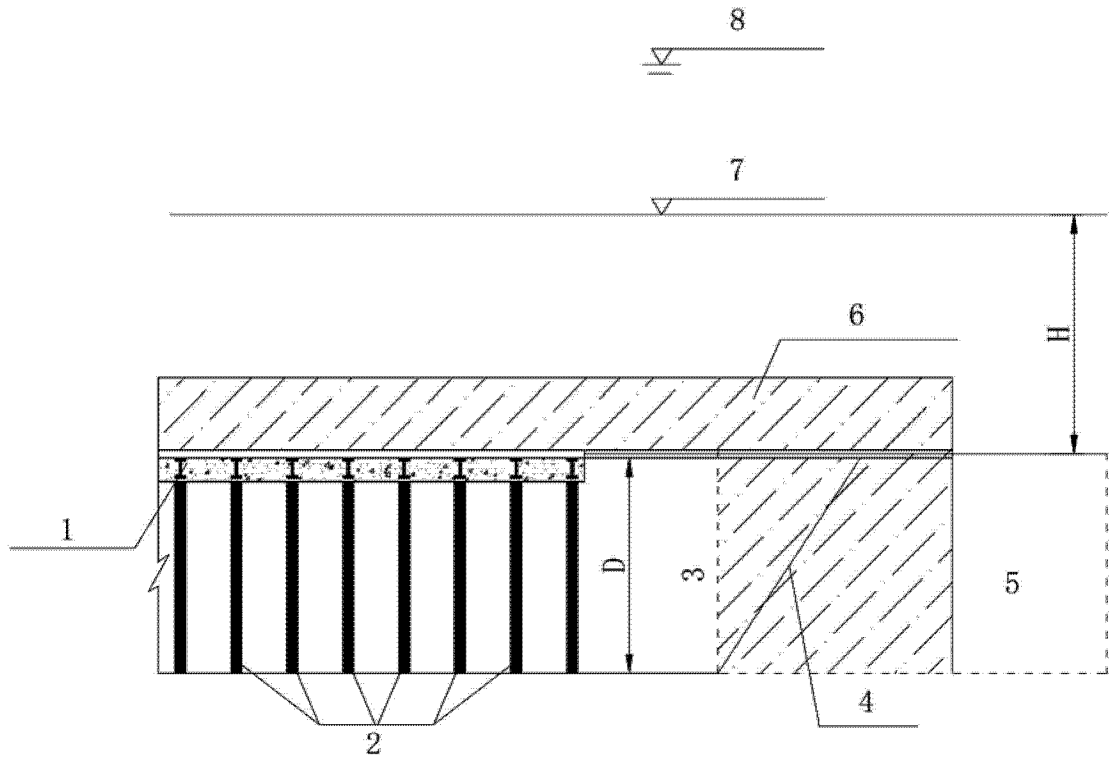


图 1

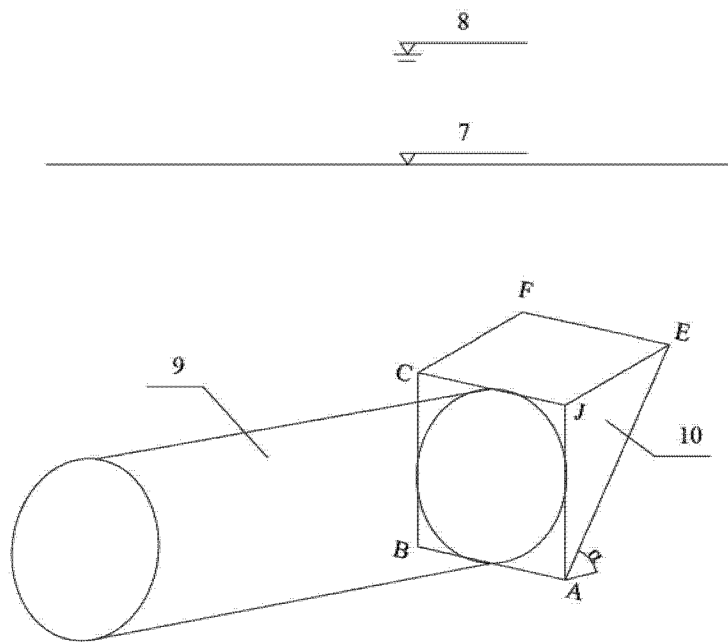


图 2

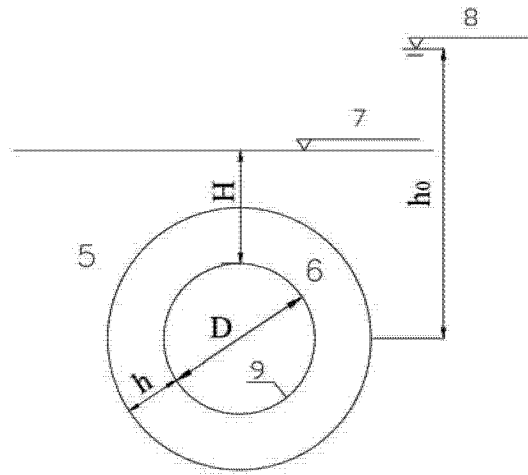


图 3

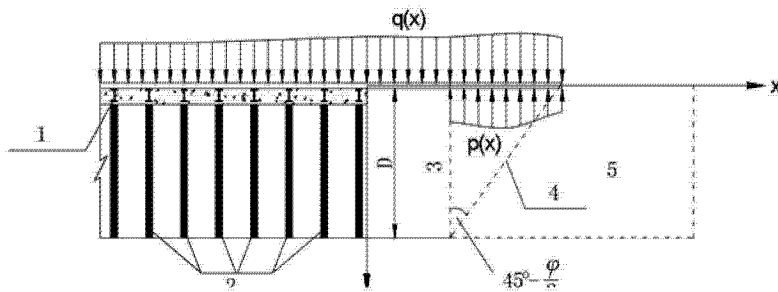


图 4

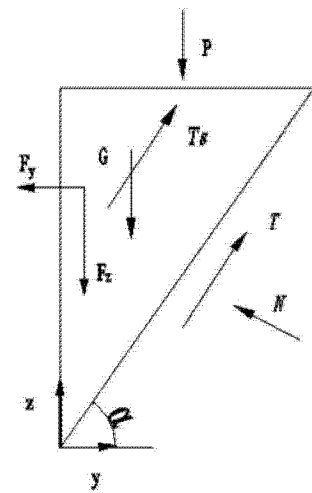


图 5

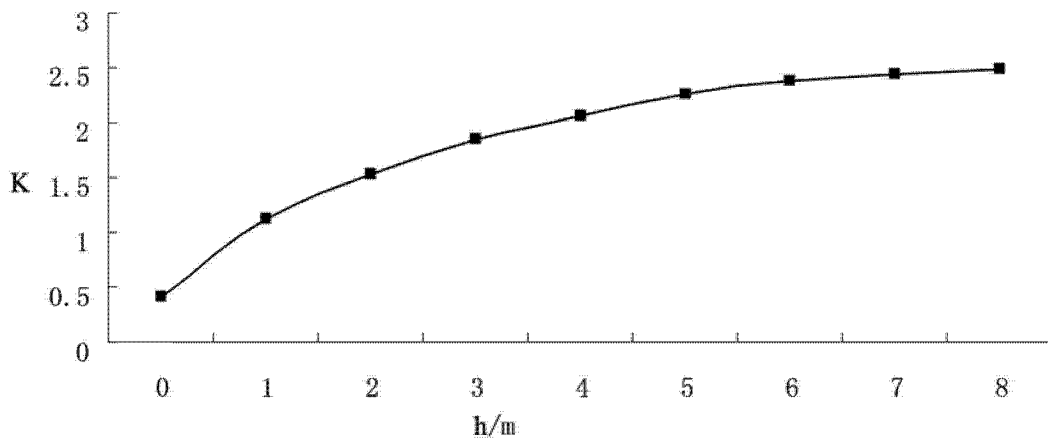


图 6