

DOI: 10.11779/CJGE202006013

水平地震作用下浅埋隧道围岩压力的计算方法研究

卢钦武, 邓 涛, 关振长*

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 以现行规范中浅埋隧道围岩压力计算的力学模型为基础, 引入水平条分原理和水平地震系数, 建立一套地震工况下浅埋隧道围岩压力计算方法。与规范方法及杨小礼方法相比, 将静力工况与地震工况结合到统一力学模型中, 且将岩土体的两个强度参数作为独立因素考虑, 且能考虑岩土体分层的实际情形。通过简单算例的对比分析, 认为将黏聚力和内摩擦角作为独立因素考虑, 能更为准确地计算隧道围岩压力; 通过多层算例的对比分析, 认为隧道自身所穿越地层的围岩条件, 对其围岩压力分布特性起主要作用; 进一步利用方法, 探讨岩土体强度参数和水平地震系数, 对破裂角和竖向围岩压力的影响。研究成果可为浅埋隧道的抗震计算或设计提供更为准确可靠的理论依据或技术参考。

关键词: 浅埋隧道; 水平地震系数; 条分法; 破裂角; 围岩压力

中图分类号: U451; TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)06-1093-08

作者简介: 卢钦武(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道工程方面研究工作。E-mail: lqw5467@163.com。

Ground loading of shallow tunnels under seismic scenario

LU Qin-wu, DENG Tao, GUAN Zhen-chang

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Based on the calculation diagram specified by the current codes, the horizontal slice principle and the horizontal seismic coefficient are introduced to establish a general method for calculating the ground loading of shallow tunnels under seismic scenario. Compared with the traditional methods, it can unify the static and seismic scenarios into one single calculation diagram, separate two strength parameters apart as independent factors, and consider the multiple-layered ground condition. The case study of simple ground shows that the separation of cohesion and friction angle can describe the ground loading in a more accurate way. The case study of multi-layered ground shows that the ground condition within the range of tunnel itself plays a key role for the distribution of ground loading. Moreover, the influences of two strength parameters and horizontal seismic coefficient on the rupture angle and vertical ground loading are further analyzed through a series of case studies. The proposed method provides a reliable theoretical basis and technical reference for the anti-seismic analysis of shallow tunnels.

Key word: shallow tunnel; horizontal seismic coefficient; slice method; rupture angle; ground loading

0 引言

从近年来数次大地震的震后调查结果来看, 有相当数量的山岭隧道遭受不同程度破坏^[1-2]。尤其是埋深较浅、围岩条件较差的洞口段, 衬砌结构容易出现大量开裂甚至掉块等严重破坏^[3]。因此, 对山岭隧道抗震计算方法展开深入研究, 具有重要的科学价值与工程实践意义。

目前隧道工程中常用的抗震计算方法主要有地震系数法、反应位移法和动力时程法等。其中地震系数法因其计算难度低, 力学机理清晰的特点, 而广泛应用于隧道抗震计算与设计中。对于埋深介于 1.0 倍~2.5 倍等效荷载高度之间的浅埋隧道, 现行规范基于库仑破裂面假定, 考虑两侧楔形块与拱顶矩形块的力系平衡, 给出了其竖向围岩压力和侧向围岩压力的计算

方法^[4]。若进一步考虑地震工况, 现行规范基于地震系数法, 给出了衬砌自重惯性力、上覆土柱惯性力、侧向围岩压力增量的计算方法, 并将上述附加荷载叠加到原静力工况上^[5]。

在上述规范方法基础上, Liu 等^[6]通过数值模拟和理论推导, 研究了地震作用下偏压隧道破裂角度、破坏模式和围岩松弛压力分布, 并推导出围岩松弛压力解析解。杨小礼等^[7]基于地震系数法推导了考虑地震作用下的隧道围岩压力计算公式, 并对其进行参数敏感性分析。李鹏飞等^[8]考虑连拱隧道双塌落拱的几何与结构不对称, 根据普氏理论推导了深埋情况的围岩

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678155)

收稿日期: 2019-07-22

*通信作者 (E-mail: gaussto@hotmail.com)

压力计算公式。张露晨等^[9]将地震荷载转化为等效静力, 利用关键块体理论矢量分析方法求解隧道围岩压力。张治国等^[10-11]基于地震系数法, 提出地震作用下考虑黏聚力的隧道围岩压力计算方法。

上述规范或文献中, 均假定地层是单一均质的, 未能考虑多层岩土体的情况。而另一方面, 基于微单元体极限平衡的水平或竖向条分法, 已在边坡及挡墙工程的设计计算中得到广泛应用^[12], 能够较精确地给出静力工况或地震工况下土压力的强度分布, 进而评价边坡或挡墙的整体稳定性^[13-16]。因此本文将水平条分原理引入基于附加地震系数的隧道抗震计算中, 能更全面且更精确地给出地震工况下浅埋隧道围岩压力的解析解, 进而为其抗震设计提供可靠依据。

1 规范中围岩压力计算方法

1.1 静力工况下的计算简图

对埋深大于 2.5 倍等效荷载高度的深埋隧道, 其竖向围岩压力直接按照等效荷载高度 h_q 计算; 对埋深小于 1.0 倍等效荷载高度的超浅埋隧道, 其竖向围岩压力直接按照埋深 H 计算。对埋深介于二者之间的浅埋隧道 ($h_q < H < 2.5h_q$), 现行规范中给出其围岩压力的计算方法如图 1 所示^[4]。

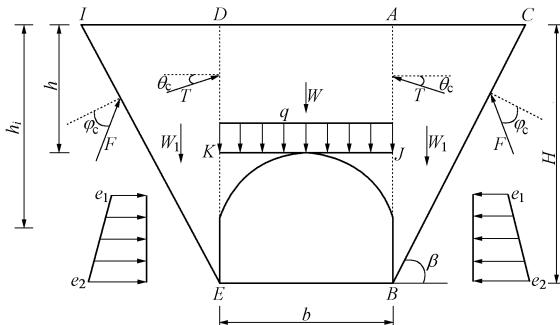


图 1 浅埋隧道围岩压力的计算简图

Fig. 1 Calculation diagram for ground loading of shallow tunnel

假定隧道顶部地层 $AJKD$ 下沉时, 带动两侧三角形地层 ABC 与 DEI 分别沿破裂面 BC 与 EI 滑移, 并与水平面间成锐角 β 。其抗滑移能力取决于岩土体强度参数, 用计算内摩擦角 φ_c 表示。 AJ 与 DK 为潜在滑移面, 其力学参数稍弱于破裂面, 一般将破裂面参数乘以折减系数 δ , 得到潜在滑移面上的摩擦角 θ_c 。相关规范中给出了各级围岩计算内摩擦角及折减系数的建议取值范围^[4]。

1.2 静力工况下的围岩压力

对两侧楔形块进行受力分析, 楔形块自重 W_1 、破裂面上的支撑力与摩擦力的合力 F 、潜在滑移面上的支撑力与摩擦力的合力 T , 三者在极限状态是达到平衡, 由此可求得

$$T = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\lambda}{\cos \theta_c} \quad , \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \varphi_c}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta_c) + \tan \varphi_c \tan \theta_c]} \quad , \quad (2)$$

式中, γ 为地层重度, λ 为侧压力系数^[4]。

上述潜在滑移面上的作用合力 T , 实际上是破裂角 β 的函数, 对其求导等零, 得到最大作用合力所对应的破裂角^[4]:

$$\tan \beta = \tan \varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1) \tan \varphi_c}{\tan \varphi_c - \tan \theta}} \quad . \quad (3)$$

进一步考虑拱顶矩形块体 $AJKD$, 根据竖向受力平衡, 得上覆竖向总合力 Q 为

$$Q = \gamma h b - 2T \sin \theta_c \quad , \quad (4)$$

式中, b 为隧道宽度, h 为隧道顶部埋深。

假定总合力均布于隧道顶部, 得竖向围岩压力 q 为^[4]

$$q = Q/b = \gamma h - 2T \sin \theta_c / b \quad . \quad (5)$$

同时各深度处的水平向围岩压力等于其上覆竖向压力乘以侧压力系数,

$$e_i = \gamma h_i \lambda \quad , \quad (6)$$

式中, h_i 为侧压力计算各点的埋深^[4]。

1.3 地震工况下的附加围岩压力

若进一步考虑水平向或竖向地震作用, 采用修正地震系数法计算时, 认为衬砌结构承受的附加围岩压力主要包括上覆土柱惯性力、侧向土压力增量。现行规范中给出了上述附加围岩压力的计算方法(其中上覆土柱高度需根据围岩级别和隧道跨度进行修正), 并将其叠加到静力工况的计算图示中^[5]。

2 基于水平条分的围岩压力计算方法

上述规范方法只能考虑均质地层, 且用计算内摩擦角代替黏聚力与内摩擦角, 同时将静力工况与地震工况分开考虑。为克服上述不足, 本文将水平条分原理引入基于附加地震系数的隧道抗震计算中, 推导地震工况下浅埋隧道围岩压力的解析解。

2.1 计算简图

采用地震系数法考虑水平向地震作用, 即对所有地层施加附加惯性力(假定方向指向左侧), 其量值等于地震系数 k_h 乘以其重力 W 。同时不采用计算摩擦角, 而是将地层的黏聚力和内摩擦角分开考虑。根据以上假定建立地震工况下浅埋隧道围岩压力的计算简图如图 2 所示。

图 2 中除地震系数 k_h 外, 所有符号的物理意义均与图 1 相同。但需要注意的是, 由于左右两侧不对称, 故大部分符号都冠以上标 r 或 l 来表示右侧或左侧;

另外由于将黏聚力和内摩擦角分开考虑, 故破裂面 BC 和 EI 上(同理, 潜在滑移面 AJ 与 DK 上), 除支持力和摩擦力的合力外, 还存在沿破裂面(或潜在滑移面)的黏聚阻力。

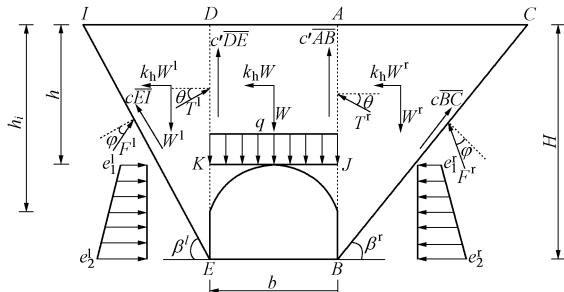


图 2 地震工况下浅埋隧道围岩压力的计算简图

Fig. 2 Calculation diagram for ground loading of shallow tunnel under seismic scenario

2.2 条分法计算楔形块侧向作用合力(右侧)

取右侧楔形块体 ABC 进行分析, 其受力简图如图 3 所示。作用力包括楔形块自重 W^r ; 水平地震作用力 $k_h W^r$; 破裂面上的支撑力与摩擦力的合力 F^r , 其与破裂面法线方向夹角 φ ; 潜在滑移面上的支撑力与摩擦力的合力 T^r , 其与潜在滑移面法线方向夹角 θ ; 破裂面上黏聚阻力 $c'BC$; 潜在滑移面上黏聚阻力 $c'AB$ 。

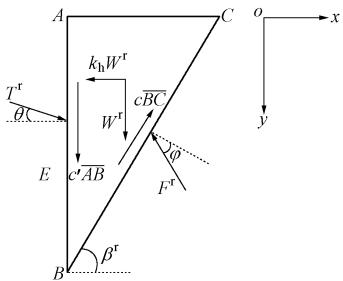


图 3 右侧楔形块的受力简图

Fig. 3 Force diagram of wedge block at right side

对上述楔形块沿水平方向截取厚度为 dy 的微元条 $abcd$, 其受力简图如图 4 所示。各作用力的物理意义与图 3 完全一致, 但微元条还额外受到条间力 G 作用, 其方向与竖直线成 η 角 (η 为地震角, $\tan\eta=k_h$)。另需说明的是, 为简化符号, 以下针对微元条的公式推导过程中均不带上标 r 。

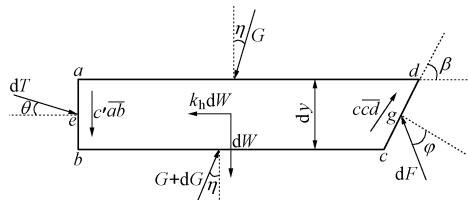


图 4 右侧楔形微元条的受力简图

Fig. 4 Force diagram of wedge slice at right side

微元条上的几何关系和自重如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \overline{AB} &= H, \\ \overline{AC} &= H \tan(90^\circ - \beta), \\ \overline{ab} &= dy, \\ \overline{cd} &= dy / \sin \beta, \\ \overline{ad} &= (H - y) \tan(90^\circ - \beta), \\ \overline{bc} &= (H - y - dy) \tan(90^\circ - \beta), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$dW = \frac{1}{2} \gamma dy (\overline{ad} + \overline{bc}) \quad (8)$$

根据图 4 所示微元条受力简图, 建立 x 向与 y 向的力平衡方程:

$$\begin{aligned} dT \cos \theta + c'cd \cos \beta + (G + dG) \sin \eta \\ = dF \cos(90^\circ - \beta + \varphi) + k_h dW + G \sin \eta, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} dW + G \cos \eta + c'ab + dT \sin \theta \\ = (G + dG) \cos \eta + c'cd \sin \beta + dF \sin(90^\circ - \beta + \varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

以 cd 边中点为矩心, 建立力矩平衡方程:

$$\begin{aligned} dT \sin \theta \overline{eg} + c'ab \overline{eg} + dW \frac{\overline{eg}}{2} + G \sin \eta \frac{1}{2} dy + \\ G \cos \eta \left(\frac{\overline{ad}}{2} - \frac{dy}{2 \tan \beta} \right) + (G + dG) \sin \eta \frac{1}{2} dy \\ = (G + dG) \cos \eta \left(\frac{\overline{bc}}{2} + \frac{dy}{2 \tan \beta} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

联立式 (9) ~ (11), 令 dy 趋于 0 并忽略高阶无穷小, 则作用在微元条上的 3 个未知力 dF , dT 和 dG :

$$dF = \frac{dT \cos \theta + c'cd \cos \beta + dG \sin \eta - k_h dW}{\sin(\beta - \varphi)}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} dT = \frac{dG(\cos \eta \tan(\beta - \varphi) + \sin \eta) - dW(k_h + \tan(\beta - \varphi))}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta} + \\ \frac{c'dy(\tan(\beta - \varphi) + \cot \beta) - c'cd \tan(\beta - \varphi)}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{dG}{dy} + \frac{G}{H - y} \frac{z_2}{z_1} = (H - y) \frac{z_3}{z_1} + \frac{z_4}{z_1}. \quad (14)$$

需要注意的是, 上述 dG 是以微分形式表达的, 且涉及符号较多, 故引入中间变量 $z_1 \sim z_4$ 以简化表达:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{(\cos \eta \tan(\beta - \varphi) + \sin \eta) \cot \beta}{\tan(\beta - \varphi) - \cot \theta} - \frac{\cos \eta \cot \beta}{2}, \\ z_2 &= \sin \eta - \frac{\cos \eta \cot \beta}{2}, \\ z_3 &= \gamma (\cot \beta)^2 \left(\frac{\tan(\beta - \varphi) + \cot \theta + 2k_h}{2(\tan(\beta - \varphi) - \cot \theta)} \right), \\ z_4 &= -\cot \beta \left(\frac{c(\tan(\beta - \varphi) + \cot \beta) - c' \cot \theta}{\tan(\beta - \varphi) - \cot \theta} \right). \end{aligned} \right\}$$

代入边界条件 $G|_{y=0}=0$, 求解微分方程式 (14), 可得条间力 G :

$$G = (H - y)^{\frac{z_2}{z_1}} \left(z_5 - \frac{z_3}{2z_1 - z_2} (H - y)^{\frac{2-z_2}{z_1}} - \frac{z_4}{z_1 - z_2} (H - y)^{\frac{1-z_2}{z_1}} \right) .$$

$$z_5 = \frac{z_3}{2z_1 - z_2} H^{\frac{2-z_2}{z_1}} + \frac{z_4}{z_1 - z_2} H^{\frac{1-z_2}{z_1}} , \quad (15)$$

式中, z_5 为中间变量。

对条间力 G 求微分, 得到 dG 的显示表达, 并代入式 (13), 经整理简化后, 得到微元条潜在滑移面上作用力 dT :

$$dT = \frac{dG(\cos \eta \tan(\beta - \varphi) + \sin \eta)}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta} -$$

$$\frac{\gamma(H - y) \cot \beta (k_h + \tan(\beta - \varphi))}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta} dy +$$

$$\frac{c(\tan(\beta - \varphi) + \cot \beta) - c' \tan(\beta - \varphi)}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta} dy . \quad (16)$$

若地层由上至下可分为 n 层, 对式 (16) 沿埋深进行分段积分, 即可得到潜在滑移面上侧向作用合力 T^r :

$$T^r = \sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_{i+1}} dT , \quad (17)$$

式中, h_i , h_{i+1} 为第 i 层顶面与底面深度。

2.3 条分法计算楔形块侧向作用合力 (左侧)

同理, 取左侧楔形块体 DEI 进行分析, 其受力简图如图 5 所示, 各符号物理意义与图 3 一致, 但冠以上标 1 表示左侧。

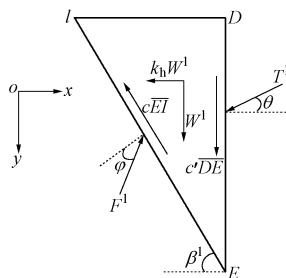


图 5 左侧楔形块的受力简图

Fig. 5 Force diagram of wedge block at left side

对左侧楔形块 DEI 截取厚度为 dy 的微元条分析如图 6 所示 (为简化推导过程, 针对微元条的公式推导过程中均不带上标 1)。

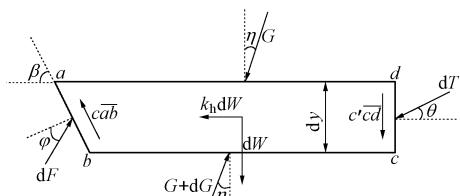


图 6 左侧楔形微元条的受力简图

Fig. 6 Force diagram of wedge slice at left side

受力分析与公式推导过程与右侧类似, 最终可得

微元条潜在滑移面上作用力 dT :

$$dT = \frac{dG(\cos \eta \tan(\beta - \varphi) + \sin \eta)}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta} -$$

$$\frac{\gamma(H - y) \cot \beta (\tan(\beta - \varphi) - k_h)}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta} dy +$$

$$\frac{c(\tan(\beta - \varphi) + \cot \beta) - c' \tan(\beta - \varphi)}{\sin \theta \tan(\beta - \varphi) - \cos \theta} dy . \quad (18)$$

若地层由上至下可分为 n 层, 对其沿深度方向进行分段积分, 可得潜在滑移面上侧向作用合力 T^r :

$$T^r = \sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_{i+1}} dT . \quad (19)$$

2.4 竖向围岩压力的解析解

取隧道拱顶矩形块体 $AJKD$ 进行分析, 如图 7 所示, 符号意义同前。根据竖向受力平衡, 可得作用于隧道拱顶的竖向总合力 Q' :

$$Q' = \gamma h b - (T^r + T^l) \sin \theta - 2c'h . \quad (20)$$

假定总合力沿隧道拱顶均布, 得竖向围岩压力 q' :

$$q' = Q'/b = \gamma h - (T^r + T^l) \sin \theta / b - 2c'h / b . \quad (21)$$

另外根据水平受力平衡, 可得作用于隧道拱顶的水平向总合力 P' 为

$$P' = k_h \gamma h b - (T^r - T^l) \cos \theta . \quad (22)$$

假定总合力沿隧道拱顶均布, 得隧道拱顶的水平向摩擦力 p' 为

$$p' = k_h \gamma h - (T^r - T^l) \cos \theta / b . \quad (23)$$

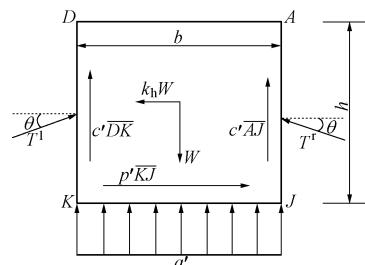


图 7 隧道拱顶矩形块体的受力简图

Fig. 7 Force diagram of rectangular block above tunnel crown

2.5 水平向围岩压力的解析解

对左右楔形块而言, 分层求其自重:

$$\left. \begin{aligned} W^r &= \sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_{i+1}} dW , \\ W^l &= \sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_{i+1}} dW . \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

已知其潜在滑移面上的侧向作用合力, 根据侧压力系数的定义 (式 (1)), 解得左右侧的侧压力系数分别为

$$\left. \begin{aligned} \lambda^r &= \frac{T^r \cos \theta}{W^r} , \\ \lambda^l &= \frac{T^l \cos \theta}{W^l} . \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

进而根据侧压力系数, 可求得各深度处水平向围岩压力的表达式:

$$\left. \begin{aligned} e_i^r &= \lambda^r \sum_{i=1}^n \gamma_i (h_{i+1} - h_i), \\ e_i^l &= \lambda^l \sum_{i=1}^n \gamma_i (h_{i+1} - h_i). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

3 破裂角 β 的图解法

上述考虑地震工况的浅埋隧道围岩压力计算方法中, 关键是求得两侧潜在滑移面上的作用合力 T^r 和 T^l 。如式(17) (或式(19)) 所示, 侧向作用合力实际上是破裂角 β^r (或 β^l) 的函数, 使侧向作用合力取极大值时的破裂角即为真实破裂角, 一般可通过试算法求解。对于单一均质地层情形, 可采用图解法的思路, 即将关于角度的函数转化为关于长度的函数, 进而求解该函数的极大值问题。

以右侧楔形块为例 (如图 8 所示), 过 B 点作直线 BL 与水平线夹角为 φ , 与 AC 延长线交于 L 点, 分别过 A, C 点作垂线 AM, CN 交 BL 于 M, N 点。根据三角函数关系得

$$\left. \begin{aligned} \cot \beta^r &= \frac{1}{\tan \varphi} - \frac{1}{\sin \varphi \cos \varphi} + \frac{\overline{BN}}{H \cos \varphi}, \\ \tan(\beta^r - \varphi) &= \frac{H}{\overline{BN} \cos \varphi} - \tan \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

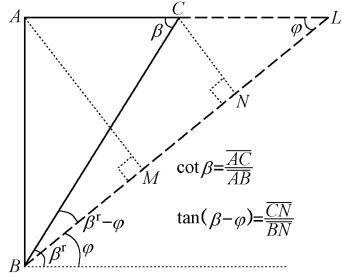


图 8 临界破裂角的图解法

Fig. 8 Graphic method for critical rupture angle

将其代入式(17) 并对 \overline{BN} 求导令其等零, 求得关于 \overline{BN} 的解为

$$\overline{BN} = \frac{-I_2 + \sqrt{I_2^2 - 4I_1I_3}}{2I_1}, \quad (28)$$

式中, I_1, I_2, I_3 为中间变量, $I_1 = 0.5\gamma H \cos(\varphi - \theta)(k_h - \tan \varphi) - c \cos(\varphi - \theta)$, $I_2 = 2cH \cdot \sin \theta - \gamma H^2 \sin \theta (k_h - \tan \varphi)$, $I_3 = H^2 \sin \theta \sin \varphi (c' - 2c) + (cH^2 - c'H^2) \cdot \cos(\varphi - \theta) - \frac{1}{2}\gamma H^3 \cdot \left[\sin \theta \left(\frac{1 + (\sin \varphi)^2}{\cos \varphi} - k_h \sin \varphi \right) - \tan \varphi \cos(\varphi - \theta) \right]$ 。

将式(28) 代入式(27) 求得临界破裂角为

$$\beta^r = \arccot \left(\frac{1}{\tan \varphi} - \frac{1}{\sin \varphi \cos \varphi} + \frac{\overline{BN}}{H \cos \varphi} \right). \quad (29)$$

4 简单算例与多层算例

4.1 与规范方法对比

单一均质地层情况下, 若不考虑地震作用 (令 $k_h=0$), 不考虑地层的黏聚力 (令 $c=0, c'=0$), 且用计算摩擦角代替摩擦角 (令 $\varphi=\varphi_c, \theta=\theta_c$), 则本文所述侧向作用合力 T^r (或 T^l) 的式(17) (或式(19)), 即退化成规范方法的式(1); 竖向围岩压力的式(21) 即退化成规范方法的式(4)。因此, 规范方法实际上是本文方法的一个特例。

以下通过简单算例, 比较两种计算方法的异同。选取隧道的几何参数 $b=10.5 \text{ m}$, $H=20 \text{ m}$, $h=12 \text{ m}$; 参考相关规范选取IV级、V级和VI级围岩的物理力学参数, 如表 1 所示。需要说明的是, 规范方法中采用岩土体的计算内摩擦角及潜在面折减系数; 而本文方法中则采用岩土体的黏聚力、内摩擦角及潜在面折减系数。

表 1 各等级围岩参数取值

Table 1 Properties of rock/soil mass

围岩级别	重度 $\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	计算内摩擦角 $\varphi_c/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	折减系数 δ
IV	23	50	50	31	0.8
V	20	45	30	30	0.6
VI	16	30	15	17	0.4

采用本文方法与规范方法, 计算得到破裂角和竖向围岩压力, 如表 2 所示。可知本文方法计算所得破裂角比规范方法略小 $4^\circ \sim 8^\circ$; 对于竖向围岩压力, 在围岩等级较低时, 二者计算结果较为接近; 随着围岩等级提高, 本文方法计算结果显著小于规范方法。究其原因认为, 本文方法将黏聚力和内摩擦角作为独立因素考虑, 式(17) (或式(19)) 相对于式(1), 式(21) 相对于式(5), 考虑了黏聚力的有利影响, 体现了高等级围岩的自稳定性, 能更为准确地计算隧道围岩压力。

表 2 与规范方法的计算结果对比

Table 2 Calculated results compared with code's method

围岩级别	破裂角 $\beta/(\text{°})$		竖向压力 q'/kPa	
	规范方法	本文方法	规范方法	本文方法
IV	76.2	71.8	124.8	74.3
V	71.7	66.7	153.3	133.3
VI	63.8	58.7	142.0	143.8

4.2 与杨小礼方法的验证对比

若考虑地震作用, 不考虑地层的黏聚力 (令 $c=0, c'=0$), 且用计算摩擦角代替摩擦角 (令 $\varphi=\varphi_c, \theta=\theta_c$),

则本节所述侧向作用合力 T^r (或 T^l) 的式 (17) (或式(19)), 即退化成杨小礼方法的相应公式^[7]。当 $k_h=0.1$ 时, 计算得到破裂角和竖向围岩压力如表 3 所示。

表 3 与杨小礼方法的计算结果对比

Table 3 Calculated results compared with Yang's method

围岩 级别	破裂角 $\beta^r/\beta^l/(\circ)$		竖向压力 q'/kPa	
	杨小礼法	本文方法	杨小礼法	本文方法
IV	74.2/78.0	69.8/73.4	123.3	73.6
V	69.0/74.1	64.0/69.1	152.2	132.9
VI	59.8/67.2	59.8/67.2	141.7	143.0

需要指出的是, 当考虑地震力作用时, 两侧楔形体的破裂角是不同的。本文假定水平地震力指向左侧, 故右侧楔形体的破裂角小于左侧, 即右侧楔形体体积大于左侧。由表 3 可知, 本文方法计算所得破裂角比杨小礼方法略小 $4^\circ \sim 7^\circ$; 对于竖向围岩压力, 在围岩等级较低时, 二者计算结果较为接近; 随着围岩等级提高, 本文方法计算结果显著小于杨小礼法。究其原因也与前述类似, 将黏聚力和内摩擦角作为独立因素考虑, 能更为准确地计算隧道围岩压力。

4.3 多层算例

在上述简单算例的基础上, 进一步考虑多层岩土体的情形, 假定计算工况如表 4 所示。将总高度 20 m 的地层分为上下两层, 隧道自身所穿越地层为较高等级围岩, 较低等级围岩处于隧道上方, 各级围岩参数取值与前述相同。

表 4 多层算例的计算工况

Table 4 Calculation cases for multilayer condition

围岩	工况 1 (分 2 层)	工况 2 (分 2 层)	工况 3 (分 2 层)
VI 级	—	10	10
V 级	10	—	10
IV 级	10	10	—

采用本文方法计算上述工况下的破裂角及竖向围岩压力, 如表 5 所示。随着围岩条件逐渐减弱 (从工况 1 到工况 3), 两侧破裂角逐渐减小, 即滑动体积增加; 自稳能力下降, 即竖向围岩压力逐渐增加。尤其是工况 3, 相对于工况 1 和工况 2, 其破裂角大幅减小而竖向围岩压力陡增, 可见隧道自身所穿越地层的围岩条件, 对其围岩压力分布特性起主要作用。

表 5 多层算例的计算结果

Table 5 Calculated results of multilayer condition

工况	破裂角 $\beta^r/\beta^l/(\circ)$	竖向压力 q'/kPa
工况 1	69.9	90.0
工况 2	67.5	90.2
工况 3	61.5	122.8

5 参数敏感性分析

进一步地, 利用本文方法探讨岩土体强度参数及水平地震系数, 对破裂角和竖向围岩压力的影响。需

要说明的是, 本节仅考虑单一均质地层情形, 且假定地震作用方向是从右到左, 重点讨论右侧楔形体的情形。

5.1 黏聚力的敏感性分析

以 V 级围岩条件为例, 在前文算例中令 k_h 为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 (分别对应地震烈度Ⅶ、烈度Ⅷ、烈度Ⅷ强、烈度Ⅸ), 计算并绘制右侧破裂角 β^r 及竖向围岩压力 q' , 随岩土体黏聚力变化的影响曲线, 如图 9 所示。

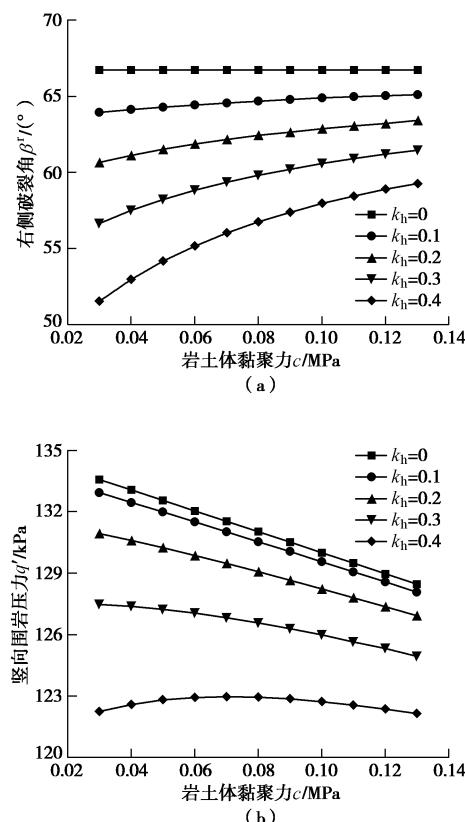


图 9 黏聚力敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis for cohesion

由图 9 (a) 可知, 破裂角随黏聚力增大而非线性增大 (即楔形滑动块体积减小), 低烈度工况时 ($k_h=0.1$) 其增幅约为 $1.2^\circ / 0.1 \text{ MPa}$, 高烈度工况时 ($k_h=0.4$) 其增幅扩大为 $7.7^\circ / 0.1 \text{ MPa}$ 。另一方面, 破裂角随地震烈度的增大而非线性减小 (即楔形滑动块体积增大), 小黏聚力情形时 ($c=30 \text{ kPa}$) 其降幅约为 $3.8^\circ / 0.1g$, 大黏聚力情形时 ($c=130 \text{ kPa}$) 其降幅约为 $1.9^\circ / 0.1g$ 。

由图 9 (b) 可知, 低烈度工况下, 竖向围岩压力随黏聚力增大呈近似线性减小, 其降幅比值约为 0.5, 而高烈度工况下, 竖向围岩压力随黏聚力增大呈先增后减的二次型变化。另一方面, 随地震烈度的增大, 两侧楔形块对拱顶矩形块提供的摩擦阻力增加, 因此竖向围岩压力呈非线性减小趋势。

5.2 内摩擦角敏感性分析

以V级围岩条件为例, 在前文算例中令 k_h 为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 计算并绘制右侧破裂角 β^r 及竖向围岩压力 q' , 随岩土体内摩擦角变化的影响曲线, 如图10所示。

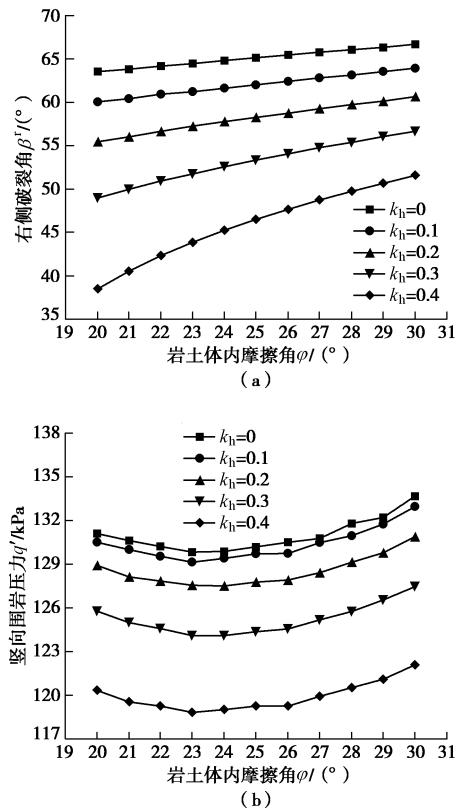


图10 摩擦角敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis for friction angle

由图10 (a) 可知, 破裂角随内摩擦角增大而近似线性增大(即楔形滑动块体积减小), 低烈度工况时($k_h=0.1$)其增幅比例约为0.3, 高烈度工况时($k_h=0.4$)其增幅比例约为1.3。另一方面, 破裂角随地震烈度的增大而非线性减小(即楔形滑动块体积增大), 小内摩擦角情形时($\phi=20^\circ$)其降幅约为 $6.2^\circ/0.1g$, 大内摩擦角情形时($\phi=30^\circ$)其降幅约为 $3.8^\circ/0.1g$ 。

由图10 (b) 可知, 竖向围岩压力随内摩擦角增大呈先减后增的二次型变化。同时随地震烈度的增大, 两侧楔形块对拱顶矩形块提供的摩擦阻力增加, 因此竖向围岩压力呈非线性减小趋势。

6 结语

以现行规范中浅埋隧道围岩压力计算的力学模型为基础, 引入水平条分原理, 建立一套考虑水平地震作用的浅埋隧道围岩压力计算方法。本文方法将静力工况与地震工况结合到统一力学模型中, 且将岩土体的两个强度参数作为独立因素考虑, 能考虑岩土体分

层的实际情形, 规范方法与杨小礼方法均可视为本文方法的一个特例。

通过简单算例的对比分析, 认为将黏聚力和内摩擦角作为独立因素考虑, 体现了高等级围岩的自稳定性, 能更为准确地计算隧道围岩压力。进一步通过多层算例的对比分析, 隧道自身所穿越地层的围岩条件, 对其围岩压力分布特性起主要作用。

同时利用本文所述方法, 探讨岩土体强度参数和水平地震系数, 对破裂角和竖向围岩压力的影响。破裂角随黏聚力增大呈非线性增大, 随内摩擦角增大呈近似线性增大趋势, 随地震烈度的增大呈非线性减小变化。而竖向围岩压力随黏聚力增大呈近似线性减小, 随内摩擦角增大呈先减后增的二次型变化, 随地震烈度的增大呈非线性减小趋势。

参考文献:

- [1] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 742-750. (LI Tian-bin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 742-750. (in Chinese))
- [2] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 汶川地震公路隧道洞口结构震害分析及震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1084-1091. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Seismic damage and mechanism of portal structure of highway tunnels in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1084-1091. (in Chinese))
- [3] 王迎超, 尚岳全, 徐兴华, 等. 隧道出洞口松散围岩塌方时空预测研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1868-1874. (WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, XU Xing-hua, et al. Time and space prediction of collapse of loose wall rock at tunnel exit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1868-1874. (in Chinese))
- [4] 公路隧道设计细则: JTGT D70—2010[S]. 2010. (Guidelines for Design of Highway Tunnel: JTGT D70—2010[S]. 2010. (in Chinese))
- [5] 公路隧道抗震设计细则: JTGT B02—2019[S]. 2019. (Guidelines for Seismic Design of Highway Tunnel: JTGT B02—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [6] LIU X, LI D, WANG J, et al. Surrounding rock pressure of shallow-buried bilateral bias tunnels under earthquake[J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 9(4): 427-445.
- [7] 杨小礼, 黄波, 王作伟. 水平地震力作用下浅埋偏压隧

- 道松动围岩压力的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版). 2010, **41**(3): 1090 – 1095. (YANG Xiao-li, HUANG Bo, WANG Zuo-wei. Rock failure pressure of shallow tunnel subjected to horizontal seismic and unsymmetrical loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, **41**(3): 1090 – 1095. (in Chinese))
- [8] 李鹏飞, 王帆, 聂雄, 等. 深埋非对称连拱隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(9): 1625 – 1629. (LI Peng-fei, WANG Fan, NIE Xiong, et al. Methods for calculating rock pressure of symmetrical multi-arch deep tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(9): 1625 – 1629. (in Chinese))
- [9] 张露晨, 李育慧, 李树忱, 等. 动荷载作用下隧道围岩块体稳定性分析及其应用[J]. 岩土力学, 2016, **37**(11): 3275 – 3282. (ZHANG Lu-chen, LI Yu-hui, LI Shu-chen, et al. Stability analysis of surrounding rock mass of tunnel under dynamic load and its engineering application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(11): 3275 – 3282. (in Chinese))
- [10] 张治国, 姜蕴娟, 刘明, 等. 考虑黏聚力及地震力的浅埋偏压隧道围岩压力[J]. 中国矿业大学学报. 2018, **47**(4): 780 – 790. (ZHANG Zhi-guo, JIANG Yun-juan, LIU Ming, et al. Rock pressure of shallow unsymmetrical loading tunnels considering the cohesion and earthquake action[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, **47**(4): 780 – 790. (in Chinese))
- [11] 张治国, 徐晓洋, 赵其华. 水平地震力作用下浅埋偏压隧道围岩压力的简化理论分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊2): 16 – 24. (ZHANG Zhi-guo, XU Xiao-yang, ZHAO Qi-hua. Simple theoretical analysis of rock pressure for shallow unsymmetrical loading tunnels considering horizontal earthquake action[J]. Rock and Soil Mechanics. 2016, **37**(S2): 16 – 24. (in Chinese))
- [12] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (CHEN Zu-yu. Soil Slope Stability Analysis[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [13] 张国祥. 地震条件下挡土墙主动土压力及其分布的新分析法[J]. 岩土力学, 2014, **35**(2): 334 – 338. (ZHANG Guo-xiang. New analysis method of seismic active earth pressure and its distribution on a retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(2): 334 – 338. (in Chinese))
- [14] 张国祥, 王敏. 新建筑边坡规范地震主动土压力计算公式的推导及完善[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 1097 – 1102. (ZHANG Guo-xiang, WANG Min. Derivation and improvement of formula for calculating seismic active earth pressure in new Technical code for building slope engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 1097 – 1102. (in Chinese))
- [15] 林宇亮, 杨果林, 赵炼恒. 地震条件下挡墙后黏性土主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(8): 2479 – 2486. (LIN Yu-liang, YANG Guo-lin, ZHAO Lian-heng. Active earth pressure of cohesive soil behind retaining wall under seismic condition[J]. Rock and Soil Mechanics. 2011, **32**(8): 2479 – 2486. (in Chinese))
- [16] MEHDIPOUR I, GHAZAVI M, MOAYED Z. Stability analysis of geocell reinforced slopes using the limit equilibrium horizontal slice method[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(9): 1 – 15.