

# 基于能量理论的土钉支护结构地震主动土压力 计算方法研究

王永胜, 朱彦鹏, 周 勇

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 地震作用下柔性支挡结构土压力的计算是个比较复杂的问题, 其方法还不成熟且比较保守, 为了能够比较准确地合理地计算地震作用下土钉支护结构的主动土压力, 以能量法和极限平衡法为基础, 考虑土钉支护结构对地震土压力的影响, 建立了滑动面为平面的地震主动土压力模型, 推导了地震主动土压力的计算公式。结合工程实例, 把公式与现有规范和方法的计算结果作比较, 并进行参数分析, 得到一些具有参考价值的结果。分析表明, 公式计算的土压力值均比其它方法小, 土钉的存在能够有效地减小地震作用下土体对支护结构的侧向压力, 并使滑动面慢慢向墙后移动。通过算例验证, 说明这种考虑土钉支护作用的计算方法更加合理, 比较符合工程实际, 为以后土钉支护结构的施工、优化和抗震设计提供参考。

**关键词:** 边坡工程; 能量理论; 极限平衡法; 土钉支护结构; 地震主动土压力

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0040-05

**作者简介:** 王永胜(1985-), 男, 甘肃甘谷人, 博士生, 主要从事支挡结构和工程事故分析与处理方面的科研工作。

E-mail: wys591888@163.com。

## Method for calculating seismic active earth pressure of soil-nailing retaining structures based on energy theory

WANG Yong-sheng, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong

(College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The calculation of earth pressure of flexible retaining wall under earthquake ground motion is a complex problem, and the relevant method for calculating the earth pressure is still not mature and conservative. In order to calculate the active earth pressure of soil-nailing retaining structure under earthquake ground motion accurately and reasonably based on the energy method and the limit equilibrium method, a model for the seismic active earth pressure is established, in which the sliding surface is considered as a plane, and the formula is obtained considering the influence of the role of soil-nailing retaining structure on the earth pressure. Based on an engineering example, the results obtained from the above formula are compared with those obtained from the existing norms and methods, and parametric analysis is carried out, and then some practical results are obtained. The results show that the calculated earth pressures are smaller than those from other methods. The existence of soil nails can effectively reduce the lateral pressure of supporting structures under earthquake ground motions and make the sliding surface slowly move to the wall back. The proposed method considering the role of soil nailing is more reasonable and agrees with the actual engineering. It may provide some valuable references for the construction, optimization and anti-seismic design of soil-nailing retaining structures.

**Key words:** slope engineering; energy theory; limit equilibrium method; soil-nailing retaining structure; seismic active earth pressure

## 0 引 言

挡土墙是防止路基填土或山坡滑坡坍塌的常用支挡构筑物。而土钉墙支护作为一种新型的柔性主动支护模式, 因其经济可靠且施工快速简便, 已在土体开挖和边坡稳定等工程领域得到迅速的推广和应用。尤

其是“5.12”地震以后, 诱发了大量的边坡灾害, 而边坡灾害所引发崩塌、滑坡等成为了阻断交通的主要

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978129)

收稿日期: 2012-08-21



作用在滑动土体上的外力有滑动土体的重力  $G$ ，土钉墙面板对滑动土体的反力  $P_a$ ，土钉的极限抗拔力  $T_{wi}$ ，水平地震作用  $F_h$ 。当土体处于塑性流动状态时，滑动土体  $ABC$  在  $BC$  面上的应变速率为  $V$ ，其矢量与滑动面  $BC$  成  $\varphi$  角，其方向与土体滑动方向基本相同，如图 1 所示。

(1) 重力  $G$  在竖直方向所作的功

$$\begin{aligned} W_G &= GV \sin(\theta - \varphi) \\ &= \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta \sin\theta} V \sin(\theta - \varphi) \\ &= \frac{1}{2} \gamma H^2 V \frac{\cos(\beta + \theta) \sin(\theta - \varphi)}{\cos\beta \sin\theta} \quad (11) \end{aligned}$$

(2)  $P_a$  所做的功

由于  $P_a$  的作用线与面板的法线成  $\delta$  角，作用方向指向填土，故可分解为两部分：水平分量  $P_a \cos(\delta - \beta)$  和竖直分量  $P_a \sin(\delta - \beta)$ ，其各自做功为：

$$W_{ph} = -P_a \cos(\delta - \beta) V \cos(\theta - \varphi) \quad ; \quad (12)$$

$$W_{pv} = -P_a \sin(\delta - \beta) V \sin(\theta - \varphi) \quad (13)$$

(3) 土钉极限抗拉承载力  $T_{wi}$  所作的功  
 $T_{wi}$  水平和竖直分量各自做的功分别为：

$$W_{Th} = -\cos\alpha \sum_{i=1}^n T_{wi} V \cos(\theta - \varphi) \quad ; \quad (14)$$

$$W_{Tv} = \sin\alpha \sum_{i=1}^n T_{wi} V \sin(\theta - \varphi) \quad (15)$$

式中  $T_{wi} = \frac{1}{\gamma_s} \pi d_{ni} q_{sk} L_e$ ， $\gamma_s$  为土钉抗拉承载力分项系数，取 1.3； $d_{ni}$  为第  $i$  根土钉锚固体直径； $q_{sk}$  为土体与锚固体极限摩阻力标准值； $L_e$  为土钉在直线破裂面外稳定土体内的长度； $n$  为土钉排数<sup>[13]</sup>。

(4) 水平地震作用  $F_h$  所做的功

$$W_{Fh} = F_h V \cos(\theta - \varphi) \quad , \quad (16)$$

而  $F_h = \alpha_h (G/g) = K_h G$

$$= K_h \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta \sin\theta} \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (16) 得：

$$\begin{aligned} W_{Fh} &= K_h \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta \sin\theta} V \cos(\theta - \varphi) \\ &= \frac{1}{2} \gamma H^2 K_h \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta \sin\theta} V \cos(\theta - \varphi) \quad (18) \end{aligned}$$

式中，正号表示该力的方向与  $V$  的方向相同，负号表示与  $V$  的方向相反。其中  $K_h$  水平地震系数，地震烈度分别为 7、8 和 9 度时对应的水平地震系数分别为 0.1、0.2 和 0.4。

综上所述，外力所做的总功为

$$\begin{aligned} W_{\text{外}} &= W_G + W_{ph} + W_{pv} + W_{Th} + W_{Tv} + W_{Fh} \\ &= \frac{1}{2} \gamma H^2 V \frac{\cos(\beta + \theta) \sin(\theta - \varphi)}{\cos\beta \sin\theta} - \\ &\quad P_a \cos(\delta - \beta) V \cos(\theta - \varphi) - \\ &\quad P_a \sin(\delta - \beta) V \sin(\theta - \varphi) - \\ &\quad V \cos(\theta - \varphi) \cos\alpha \sum_{i=1}^n T_{wi} + \\ &\quad V \sin(\theta - \varphi) \sin\alpha \sum_{i=1}^n T_{wi} + \\ &\quad \frac{1}{2} \gamma H^2 K_h \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta \sin\theta} V \cos(\theta - \varphi) \quad (19) \end{aligned}$$

而滑动面  $BC$  上任一点处消耗的能量（吸收的功，也称为内功）为

$$W_{\text{内}} = c V \cos\varphi \overline{BC} = c V \cos\varphi (H / \sin\theta) \quad (20)$$

根据外力所做的功与内部消耗的能量相等原则，有  $W_{\text{外}} = W_{\text{内}}$ ，代入相关式子，将应变速率  $V$  消去，经整理可得地震主动土压力

$$E_D = P_a = \frac{A + B - C + D - F}{F} \quad , \quad (21)$$

式中， $A = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos(\beta + \theta) \sin(\theta - \varphi)}{\cos\beta \sin\theta}$ ， $B = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_h \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta \sin\theta} \cos(\theta - \varphi)$ ， $C = \cos(\theta - \varphi) \cos\alpha \sum_{i=1}^n T_{wi}$ ， $D = \sin(\theta - \varphi) \sin\alpha \sum_{i=1}^n T_{wi}$ ， $E = c \cos\varphi (H / \sin\theta)$ ， $F = \cos(\delta + \varphi - \beta - \theta)$ 。

理论上，由  $dE_D / d\theta = 0$  可求得最危险滑裂面与水平方向的夹角  $\theta$ ，但这会遇到非常复杂的超越方程，很难求解。为此，利用如图 2 所示做变换，将各变量代换成  $\overline{BN}$  的关系式（线段  $\overline{BN}$  随线段  $\overline{BC}$  的长度而变化，也就是随滑动面的倾角  $\theta$  而变化），然后求解。过  $B$  作  $\overline{BN}$  与水平面成  $\varphi$  角（ $\varphi$  为内摩擦角），并交地表面于  $D$ ；作  $\overline{BQ}$ ，使之与  $\overline{AB}$  成  $(\varphi + \delta)$  的夹角；过  $A$  作  $\overline{AM}$  平行于  $\overline{QB}$ ；过  $C$  作  $\overline{CN}$  平行于  $\overline{QB}$ ；过  $C$ 、 $N$  分别作铅垂线，交过  $B$  点的水平线于  $R$ 、 $S$ 。

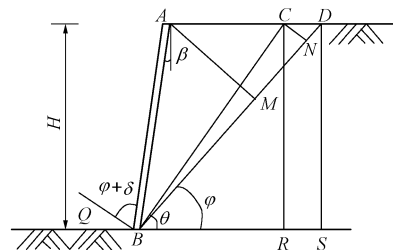


图 2 主动土压力计算图

Fig. 2 Calculation of active earth pressure

最终得到总土压力值  $E_D$  和滑裂面与水平方向的

夹角  $\theta$  的表达式如下:

$$E_D = -M_1 \overline{BN} + M_2 \frac{1}{BN} + M_3 \frac{1}{BN^2} + M_4, \quad (22)$$

$$\theta = \arctan \frac{e_1}{e_2 + e_3 \frac{BN}{H} - e_4}. \quad (23)$$

式中,  $M_1 = \frac{ca_1}{b}$ ,  $M_2 = \frac{\frac{1}{2}\gamma H^2(b_1 - b_2 K_h)}{a} + \frac{H(b_3 + b_4) \cdot \sum_{i=1}^n T_{wi} - cH^2 b_5}{b}$ ,  $M_3 = \frac{\frac{1}{2}\gamma H^3(c_1 K_h - c_2)}{a}$ ,  $M_4 = \frac{\frac{1}{2}\gamma H(d_1 K_h - d_2) + 2cHd_3}{a} - \frac{(d_4 + d_5) \sum_{i=1}^n T_{wi}}{b}$ 。其中,

$a = \cos \beta \cos(\beta - \delta) \cos^2(\varphi + \delta - \beta)$ ,  $b = \cos(\beta - \delta) \cdot \cos(\varphi + \delta - \beta)$ ,  $a_1 = \cos \varphi [\sin^2 \varphi + \cos^2(\varphi + \delta - \beta) + 2 \sin(\beta - \delta) - \sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \delta - \beta)]$ ,  $b_1 = \cos \beta \cos^2(\beta - \delta) + \sin \varphi \sin(\varphi + \delta) \cos(\beta - \delta)$ ,  $b_2 = \sin(\varphi + \delta) \cos(\varphi + \delta - \beta) + \sin \varphi \sin(\varphi + \delta) \sin(\beta - \delta) + \cos \beta \cos(\beta - \delta) \sin(\beta - \delta)$ ,  $b_3 = \cos \alpha \sin(\beta - \delta)$ ,  $b_4 = \sin \alpha \cos(\beta - \delta)$ ,  $b_5 = \cos \varphi$ ,  $c_1 = \sin(\varphi + \delta) \sin(\beta - \delta)$ ,  $c_2 = \sin(\varphi + \delta) \cos(\beta - \delta)$ ,  $d_1 = \cos \beta \cos(\beta - \delta) \cos(\varphi + \delta - \beta) + \cos \beta \cos(\beta - \delta) \cdot \sin \varphi \sin(\beta - \delta)$ ,  $d_2 = \sin \varphi \cos \beta \cos^2(\beta - \delta)$ ,  $d_3 = \cos \beta \cos \varphi [\sin \varphi - \sin(\beta - \delta) \cos(\varphi + \delta - \beta)]$ ,  $d_4 = \sin \varphi \cos(\beta - \delta) \sin \alpha$ ,  $d_5 = \cos \alpha [\cos(\varphi + \delta - \beta) + \sin \varphi \sin(\beta - \theta)]$ ,  $e_1 = \cos \beta \cos(\varphi + \delta - \beta)$ ,  $e_2 = \sin \beta \cos(\varphi + \delta - \beta)$ ,  $e_3 = \cos \beta \cdot \cos(\beta - \delta)$ ,  $e_4 = \sin(\varphi + \delta)$ 。

对式 (22) 求导得到  $\overline{BN}$  的值, 然后再反代到式 (22) 和式 (23) 中分别求得主动土压力的极值  $E_D$  和最危险滑裂面与水平方向的夹角  $\theta_0$ 。

3 实例分析

3.1 工程概况

甘肃某二级公路新建工程边坡采用土钉墙支护 (见图 3), 墙高 9 m, 墙面与竖直线的夹角为  $10^\circ$ , 墙背地面水平, 边坡重要系数 1.0, 土钉与水平面夹角  $10^\circ$ , 安全系数取 1.3, 本工程抗震设防烈度为  $8^\circ$ , 地震加速度峰值取  $0.20g$ , 边坡土体参数见表 1。

表 1 边坡土体参数

Table 1 Parameters of slope soil

黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	天然重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	极限摩阻力 /kPa
16	27	16.5	48

3.2 参数分析

(1) 水平地震系数  $K_h$  对地震主动土压力的影响

设计参数除  $K_h$  外, 其余都同本例。采用本文推导的公式与一般挡墙地震土压力计算方法罗米谢法、俄罗斯规范和我国道路规范等<sup>[14]</sup>未考虑土钉支护结构作用的计算方法进行对比分析, 最终结果如表 2 所示。

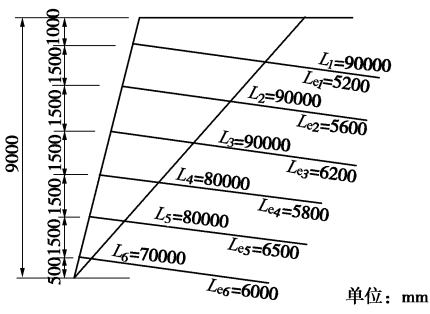


图 3 土钉设计剖面

Fig. 3 Design profile of soil nailing

表 2 水平地震系数  $K_h$  对主动土压力的影响

Table 2 Influence of horizontal earthquake coefficient  $K_h$  on active

earth pressure		(kN/m)			
地震烈度	水平地震系数	罗米谢法	俄罗斯规范	我国道路规范	本文公式
7	0.1	737.34	405.42	394.81	310.89
8	0.2	749.58	433.51	412.62	328.13
9	0.4	—	490.17	548.16	346.82

由表 2 可知, 罗米谢法的计算结果最大, 其它两种方法的结果比较接近, 而本文的结果最小。由此可见, 土钉的作用是不可忽略的, 它能够有效地减少地震作用下土体对支挡结构的侧压力, 使支挡结构和土体共同工作, 承受外荷载。

(2) 水平地震系数  $K_h$  对最危险滑移面的影响

设计参数  $K_h$  变化, 其余同本例。通过  $K_h$  的变化来分析地震作用下考虑土钉作用时最危险滑移面的变化情况。最终结果如表 3 和图 4 所示。

表 3 水平地震系数  $K_h$  对最危险滑移面的影响

Table 3 Influence of horizontal earthquake coefficient  $K_h$  on most

dangerous sliding surface			
水平地震系数 $K_h$	0.1	0.2	0.4
最危险滑移面夹角 $\theta_0/(^\circ)$	43.8	41.5	34.8

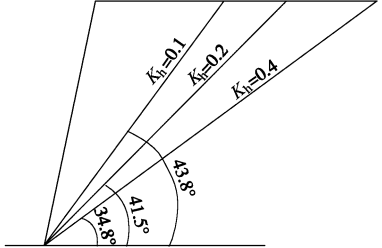


图 4 水平地震系数  $K_h$  对最危险滑移面夹角的影响

Fig. 4 Influence of horizontal earthquake coefficient  $K_h$  on angle of most dangerous sliding surface

由图 4 可知, 随着地震烈度的增大, 考虑土钉作用时的最危险滑移面逐渐减小, 即滑移面慢慢向后移动, 其角度值比静力计算时的角度 ( $45^\circ + \frac{\varphi}{2} = 58.5^\circ$ ) 小。由此可见, 地震作用下土钉的作用使得滑移面的出现与静力作用时有所不同, 整体上有向后移动的趋势。

## 4 结 论

(1) 传统的土钉柔性支挡结构地震作用下土压力的计算都采用经验公式, 没有考虑土钉的贡献, 而实际工程中土钉的影响是确实存在的。从能量法和极限平衡法入手, 考虑支挡结构的作用, 建立了滑动面为平面时的地震主动土压力的计算模型, 并利用计算机编程进行求解。

(2) 通过计算分析得到, 土钉的存在能够有效地减少地震作用下土体对支挡结构的侧向压力, 使滑移面慢慢向后移动。

(3) 通过算例结果对比和参数分析得到, 本文提出的计算方法更加合理, 能够很好地应用于工程实践, 为今后土钉支挡结构的抗震设计提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] 王 建, 姚令侃, 陈 强. 汶川地震路堤成灾模式及土工格栅加筋变形控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1): 3387 - 3394. (WANG Jian, YAO Ling-kan, CHEN Qiang. Research on failure mode of road embankment in Wenchuan great earthquake and deformation control of geogrid reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(1): 3387 - 3394. (in Chinese))
- [2] 邱燕玲, 姚令侃, 秦 伟. 汶川地震路基挡墙震害特征分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, **29**(4): 576 - 581. (QIU Yan-ling, YAO Ling-kan, QIN Wei. Characteristic analysis of the damaged retaining wall in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, **29**(4): 576 - 581. (in Chinese))
- [3] 许 强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(6): 818 - 826. (XU Qiang, LI Wei-le. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 818 - 826. (in Chinese))
- [4] 王元战, 李新国, 陈楠楠. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005, **26**(7): 1019 - 1022. (WANG Yuan-zhan, LI Xin-guo, CHEN Nan-nan. Active earth pressure on a retaining wall and lateral coefficient of earth pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(7): 1019 - 1022. (in Chinese))
- [5] 王立峰. 土钉墙面层土压力的计算分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1615 - 1626. (WANG Li-feng. Analysis of facing earth pressure in soil nailing walls[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1615 - 1626. (in Chinese))
- [6] 曹振民. 挡土墙填土曲线破裂面主动土压力分析[J]. 中国公路学报, 1995, **8**(2): 7 - 14. (CAO Zhen-min. Analysis of active earth pressure of back fill on retaining wall with curved rupture surface[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, **8**(2): 7 - 14. (in Chinese))
- [7] 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1): 83 - 85. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Earth pressure calculating method considering displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1): 83 - 85. (in Chinese))
- [8] BROWZIN B S. Anchored bulkheads horizontal and sloping anchors[J]. J Geotech Engng Div Am Soc Civ Engrs, 1981, **107**(GT5): 629 - 645.
- [9] HASHASH M A, WHITTLE A J. Mechanisms of load transfer and arching for braced excavations in clay[J]. 2002, **128**(3): 187 - 197.
- [10] DESAI C S. A fundamental study of braced excavation construction[J]. Comput Geotech, 1977, **8**: 39 - 64.
- [11] 徐日庆. 考虑位移和时间的土压力计算方法 [J]. 浙江大学学报, 2000, **34**(4): 370 - 375. (XU Ri-qing. Methods of earth pressure calculation for excavation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2000, **34**(4): 370 - 375. (in Chinese))
- [12] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2001. (CHEN Ye-kai. Model test and numerical analysis of earth pressures on retaining wall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese))
- [13] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周 勇. 支挡结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (ZHU Yan-peng, LUO Xiao-hui, ZHU Yong. Retaining structure design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [14] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000. (GU Wei-ci. Calculating instructions of retaining wall[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2000. (in Chinese))

(本文责编 明经平)