

DOI: 10.11779/CJGE201612014

平动模式下考虑剪应力作用的刚性挡土墙 主动土压力计算

刘忠玉¹, 陈捷²

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南财经政法大学工程管理与房地产学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 以墙后为无黏性填土的刚性挡土墙为研究对象, 假定破裂面为通过墙踵的平面, 且墙后土体中形成圆弧形土拱, 考虑滑动土楔内水平土层间的平均剪应力, 修正水平层分析法, 得到平动模式下主动土压力的表达式。通过与文献中模型试验结果和现有理论成果的对比分析证明了修正方法的合理性。参数分析表明, 水平土层间的平均剪应力和主动土压力一样, 沿墙高为非线性分布, 主要受墙背倾角、墙土摩擦角、填土内摩擦角等因素的影响。对于墙背竖直或墙背较陡且比较粗糙的挡土墙, 考虑水平土层间平均剪应力作用算得的主动土压力合力作用点位置高于库仑解且低于不考虑剪应力作用的理论解答, 而对墙背较缓且比较光滑的挡土墙, 情况则正好相反。而且, 不论是否考虑水平土层间的平均剪应力, 主动土压力合力作用点位置都会随墙背变缓而降低。

关键词: 挡土墙; 土拱效应; 剪应力; 主动土压力; 水平层分析法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)12 - 2254 - 08

作者简介: 刘忠玉(1968 -), 男, 教授, 主要从事岩土力学等方面的教学和科研。E-mail: zhyliu@zzu.edu.cn。

Active earth pressure against rigid retaining wall considering shear stress under translation mode

LIU Zhong-yu¹, CHEN Jie²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Construction Management and Real Estate, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Taking a rigid retaining wall with granular backfill for example, it is assumed that the failure surface is a plane through the wall heel and the soil arch in the backfill takes the form of a circle, the differential level layer method is modified considering the mean shear stress between level soil layers in the failure wedge, and then a new formulation is proposed for calculating the active earth pressure on the retaining wall undergoing horizontal translation. In order to verify the accuracy of the proposed formulation, the predictions from the equation are compared with both the existing full-scale test results and the values from the existing equations. The calculated results show that the mean shear stress between level soil layers is related to the inclination of wall back face, the angle of wall friction and the internal friction angle of backfill, and its distribution along the wall height is nonlinear like that of active earth pressure. For the wall with a vertical back face or a steep and rough one, the point of application of the resultant active earth pressure by the proposed formulation considering the mean shear stress between level soil layers is higher than that by the Coulomb's theory, and lower than that by the existing theories which the mean shear stress between level soil layers is negligible. But the conclusion will be just the opposite for the wall with a relatively gentle and smooth back face. In addition, whether the mean shear stress between level soil layers is taken into consideration or not, the height of the resultant active earth pressure will decrease with the increase of the inclination of the back face.

Key words: retaining wall; soil-arching effect; shear stress; active earth pressure; differential level layer method

0 引言

目前, 对墙背倾斜或不光滑的重力式挡土墙进行土压力计算时, 应用最为广泛的当属库仑土压力理论。根据该理论得到的土压力沿墙高为线性分布, 但现场观测和室内模型试验经常与之有较大的偏差^[1~7]。卡岗

在 1960 年提出了水平层分析法, 并得到了沿墙高呈非线性分布的土压力^[7]。为使后者更加符合实际, 先后有学者在考虑墙体位移模式^[8~9]、多层填土^[10]、地震荷

载^[11-13]等方面对其进行了改进。当墙体平动时, 从有关文献的分析过程看, 一般认为水平土层间不存在剪切力, 但都没有对这种处理的合理性进行必要的探讨。以墙背竖直为例, 如果墙背不光滑, 则墙背和填土之间存在着摩擦力, 那么根据剪应力互等定理, 水平土层间则必然存在着剪应力 τ (图 1)。李兴高等^[14]认为水平层间的剪切力应该是墙高的函数, 它将会使主动土压力合力作用点的位置下移。所以, 要得到更为合理的土压力分布曲线和合力作用点位置就需要合理考虑水平层间的剪切力。

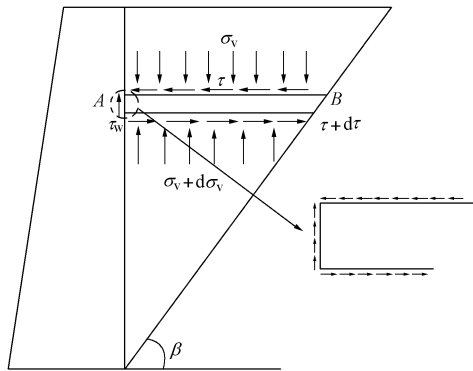


图 1 水平层间的剪应力

Fig. 1 Shear stress between level layers

既然有相当多的试验^[2-6]和理论分析^[15]证明, 土拱效应是影响墙后土压力非线性分布的主要原因, 所以, 许多学者考虑土拱效应后改进了水平层分析法^[16-33]。尽管挡土墙后填土中土拱的理论曲线为悬链线的一部分^[16-17], 但其表达式较为复杂, 所以多将其简化为圆弧^[18-27]和抛物线^[28-31]。分析表明, 对于特定的挡土墙和滑裂面, 土拱形状对计算结果的影响并不大^[27]。同时, 为简化计算, 一般引入库仑假定, 即滑裂面为通过墙踵的平面, 但其倾角 β 的确定一般有两种: ①推广朗肯主动土压力理论的结论, 取 $\beta = \pi/4 + \varphi/2$ ^[16, 18, 21-22, 28, 26, 31]

(这里 φ 为填土的内摩擦角); ②类似于库仑土压力理论, 通过对土压力合力求极值来得到 β ^[17, 19, 23, 25, 29-30]。实际上, 仅当所有条件都符合朗肯理论假定时, $\beta = \pi/4 + \varphi/2$ 才是精确成立的。当墙背不光滑时, 该面并非最危险的潜在滑裂面, 也不满足小主应力拱拱顶面的要求^[20]。同时, 章瑞文等^[20]还指出, 由于不计水平层间的剪力, 所以对任意水平层微元来说并不满足水平力平衡的要求。应该说, 当主应力偏转后, 水平面上的剪应力是客观存在的, 因此陈林等^[30]、章瑞文^[32]和黄睿等^[33]认为应该考虑该力的影响, 但陈林等^[30]的推导过程隐含着同一水平面上应力均布的假定, 而章瑞文^[32]和黄睿等^[33]用某一水平面墙背处和滑裂面处的竖向应力和剪应力的算术平均值来计算该面上的平均竖向应力和平均剪应力, 这等于假定同一水平面上应力为线性分布。实际上有关水平面上应力的

不同假定不会影响水平层微元水平向和竖向力的平衡条件, 但是却会对其力偶矩平衡条件产生影响。所以, 如果推导过程中不涉及力偶矩平衡条件, 那么就不用关心水平面上应力的具体分布。因此这里假设墙后填土中形成的滑裂面为库仑滑裂面, 且土拱为圆弧型, 考虑主应力偏转来计算水平层间的平均竖向应力和平均剪应力; 基于水平层分析法, 对竖直或俯斜式刚性挡土墙, 仅利用水平向和竖向力的平衡条件来求得主动土压力强度、合力作用点位置的表达式, 并与有关文献中的模型试验以及其他理论结果进行比较。

1 主动土压力理论分析

1.1 侧向主动土压力系数和平均剪应力系数

如图 2 所示, 某刚性挡土墙墙高为 H , 墙背与竖直面夹角为 α , 填土表面水平, 墙后为无黏性填土, 重度为 γ , 内摩擦角为 φ , 墙土间摩擦角为 δ ($0 \leq \delta \leq \varphi$), 暂不考虑填土表面超载。类似库仑土压力理论, 可得通过墙踵的潜在滑裂面倾角 β ^[34], 即

$$\beta = \arctan \left\{ \cos(\alpha + \varphi + \delta) \cdot \left[\sqrt{\cos(\alpha + \delta) \sin(\varphi + \delta) / (\cos \alpha \sin \varphi)} - \sin(\alpha + \varphi + \delta) \right]^{-1} \right\}. \quad (1)$$

取图 2 所示潜在滑裂土楔中墙顶以下深度 z 处的水平微元进行分析。考虑到土拱效应, 当滑裂体内的主应力 σ_1 方向发生偏转后, 同一水平面上的竖向应力 σ_v 是不相等的, 因此 Handy^[16]和 Paik 等^[18]对墙背竖直的挡土墙将侧向主动土压力系数 K_{awn} 定义为墙土接触面上水平向土压力 σ_h 与同一深度水平面上平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 的比值。当墙背倾斜时, 陈国舟等^[23]、朱建明等^[25]仍沿用该定义。为便于分析, 这里将该定义修改为

$$K_{awn} = \frac{\sigma_{awn}}{\bar{\sigma}_v}, \quad (2)$$

式中, σ_{awn} 为墙土接触面上的法向土压力。很明显, 当 $\alpha=0$, 即墙背竖直时, 式(2)即等同于 Handy^[16]和 Paik^[18]的定义。

分析图 2 土拱中的任意点 D , σ_1 为该点的大主应力, 它与水平面的夹角为 θ , 则该点的竖向应力 σ_{vd} 、水平应力 σ_{hd} 以及剪应力 τ_d 分别为^[19, 25]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{vd} &= \frac{\sigma_1}{1 + \sin \varphi} (1 - \sin \varphi \cos 2\theta), \\ \sigma_{hd} &= \frac{\sigma_1}{1 + \sin \varphi} (1 + \sin \varphi \cos 2\theta), \\ \tau_d &= \frac{\sigma_1 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

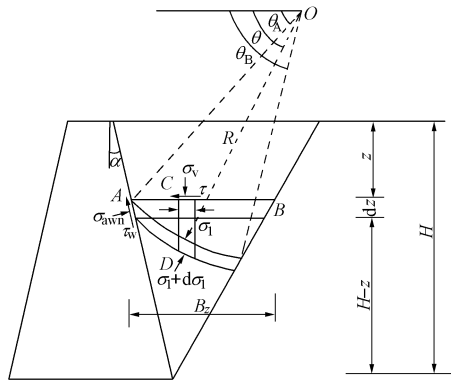


图2 理论分析模型

Fig. 2 Analytical model

这里，深度为 z 墙土接触处(A 点)和滑裂面处(B 点)大主应力 σ_1 与水平面的夹角分别为^[25]

$$\theta_A = \frac{1}{2} \left[\pi - \arcsin \left(\frac{\sin \delta}{\sin \varphi} \right) + \delta \right] + \alpha, \quad (4)$$

$$\theta_B = \pi/4 - \varphi/2 + \beta. \quad (5)$$

这样滑楔内深度为 z 的平面上平均竖向应力为

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\int_{\theta_A}^{\theta_B} \sigma_{vD} R \sin \theta d\theta}{B_z} = \sigma_1 - \frac{2 \sin \varphi (\cos^3 \theta_A - \cos^3 \theta_B)}{3(1 + \sin \varphi)(\cos \theta_A - \cos \theta_B)} \sigma_1, \quad (6)$$

式中， B_z 为滑楔内深度 z 处 AB 的长度， R 为土拱圆弧半径，且 $R = B_z / (\cos \theta_A - \cos \theta_B)$ 。

墙土接触面上(A 点)的法向土压力 σ_{awn} 为

$$\sigma_{awn} = \frac{\sigma_1}{1 + \sin \varphi} (1 + \sin \varphi \cos 2\theta_{A0}), \quad (7)$$

式中， $\theta_{A0} = \theta_A - \alpha$ 。

式(6)、(7)代入式(2)可得侧向主动土压力系数为

$$K_{awn} = \frac{\sigma_{awn}}{\bar{\sigma}_v} = \frac{3(1 + \sin \varphi \cos 2\theta_{A0})}{3(1 + \sin \varphi) - 2 \sin \varphi (\cos^2 \theta_A + \cos^2 \theta_B + \cos \theta_A \cos \theta_B)}. \quad (8)$$

当 $\alpha = \delta = 0$ 时，式(8)简化为 $K_{awn} = \tan^2(\pi/4 - \varphi/2)$ ，即退化为朗肯主动土压力系数。另外，当 $\alpha = 0$ 时，如果取 $\theta_B = \pi/2$ ，式(2)则退化为Paik等^[18]解。

同理可求得滑楔内深度 z 的平均剪应力为

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{\theta_A}^{\theta_B} \tau_D R \sin \theta d\theta}{B_z} = \frac{2 \sin \varphi (\sin^3 \theta_A - \sin^3 \theta_B)}{3(1 + \sin \varphi)(\cos \theta_A - \cos \theta_B)} \sigma_1. \quad (9)$$

称水平土层上平均剪应力与平均竖向应力之比为平均剪应力系数 k ，即

$$k = \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}_v}$$

$$= \frac{2 \sin \varphi (\sin^3 \theta_A - \sin^3 \theta_B)}{3(1 + \sin \varphi)(\cos \theta_A - \cos \theta_B) - 2 \sin \varphi (\cos^3 \theta_A - \cos^3 \theta_B)}. \quad (10)$$

这里，剪应力系数 k 应小于等于 $\tan \varphi$ 。

1.2 主动土压力

对图3所示的任一水平微元进行受力分析，其竖向和水平向的受力平衡条件为

$$\sigma_{awn} dz - \tau_w dz \tan \alpha - \bar{\tau} dz \cot \beta + d\bar{\tau} (H - z) \cot \beta - rdz \sin(\beta - \varphi) / \sin \beta = 0, \quad (11)$$

$$\sigma_{awn} dz \tan \alpha + \tau_w dz + \bar{\sigma}_v dz \cot \beta - d\bar{\sigma}_v (H - z) \cot \beta + dW - rdz \cos(\beta - \varphi) / \sin \beta = 0. \quad (12)$$

式中 dW 为水平微元的重量， $dW = \gamma(H - z)dz \cot \beta$ ； τ_w 为和墙面接触处的摩擦力， $\tau_w = \sigma_{awn} \tan \delta$ ； r 为水平微元与滑床之间的相互作用力。

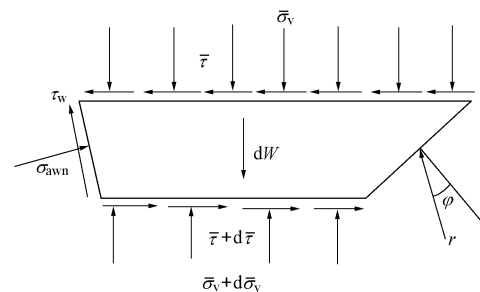


图3 水平微元受力分析

Fig. 3 Forces acting on horizontal differential element

由式(11)、(12)化简可得

$$a \frac{d\bar{\sigma}_v}{dz} + b \frac{\bar{\sigma}_v}{H - z} - e\gamma = 0, \quad (13)$$

考虑到 $z = 0$ 时， $\bar{\sigma}_v = 0$ ，求解式(13)得

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma HC}{a - b} \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right)^{b/a} - \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right], \quad (14)$$

式中， $a = (\cot \beta + \tan \alpha)[k \cos(\beta - \varphi) + \sin(\beta - \varphi)]$ ， $b = [K_{awn} - k(\tan \alpha + \cot \beta)] \cos(\beta - \varphi) + (K_{awn} \tan \delta - \tan \alpha - \cot \beta) \sin(\beta - \varphi) + K_{awn} \tan \alpha [\sin(\beta - \varphi) - \tan \delta \cdot \cos(\beta - \varphi)]$ ， $e = (\cot \beta + \tan \alpha) \sin(\beta - \varphi)$ 。

从而得到主动土压力垂直于墙背的分量为

$$\sigma_{awn} = K_{awn} \bar{\sigma}_v = \frac{K_{awn} \gamma HC}{a - b} \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right)^{b/a} - \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right], \quad (15)$$

则作用在挡土墙上的主动土压力合力为

$$E_a = \int_0^H \frac{\sigma_{awn}}{\cos \delta \cos \alpha} dz = \frac{K_{awn} e \gamma H^2}{2(a + b) \cos \delta \cos \alpha} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a, \quad (16)$$

式中， K_a 为主动土压力系数，即

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos \delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos(\alpha + \delta) \cos \alpha}} \right]^2}. \quad (17)$$

很明显，式(17)与库仑主动土压力系数完全一

致, 即主动土压力合力的大小与库仑解相等。

另外, 主动土压力对墙踵的力矩和合力作用点到墙踵的竖向距离分别为

$$M = \int_0^H \sigma_{awn} (H - z) dz = \frac{k_{awn} e \gamma H^3}{3(2a + b)}, \quad (18)$$

$$h = \frac{2(a + b)}{3(2a + b)} H. \quad (19)$$

2 实例验证

2.1 Tsagareli^[1]的模型试验

在 Tsagareli^[1]的模型试验中, 墙背竖直($\alpha=0$), 墙高 H 在 2~4 m 之间, 墙后无黏性填土重度 $\gamma=18.0$ kN/m³, 填土表面无荷载, 归一化后的侧向主动土压力实测结果见图 4。Tsagareli 曾估算内摩擦角和墙土摩擦角为 $\varphi=\delta=37^\circ$, Paik 等^[18]也曾依此数据进行分析。但 Handy^[16]认为取 $\varphi=\delta=32^\circ$ 更为合适, 所以这里取 $\varphi=\delta=32^\circ$, 计算结果见图 4。为便于比较, 图 4 中也分别给出了库仑解以及基于圆弧土拱的 Paik 等^[18]、应宏伟等^[19](或朱建明等^[25]) 等学者的解答。很明显, Paik 等^[18]、应宏伟等^[19]和本文的解答都是非线性的, 其分布曲线的形状也是类似的, 但 Paik 等解^[18]明显偏大。实测值多处于本文和应宏伟等解^[19]之间, 并且在墙高的上半部分处, 应宏伟等解^[19]要大于本文解, 而在墙高的下半部分, 则正好相反, 这是因为应宏伟等^[19]没有考虑水平土层间平均剪切力的缘故。

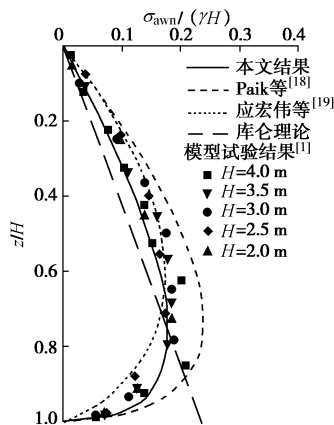


图 4 理论分析与 Tsagareli^[1]的模型试验的对比

Fig. 4 Comparison between experimental results of Tsagareli^[1] and theoretical predictions

2.2 Fang 等^[3]的模型试验

Fang 等^[3]的模型试验选用的也是墙背竖直的挡土墙, 墙高 1.015 m。在 #342 试验中, 墙体移动模式为平动, 墙后砂土重度 $\gamma=15.4$ kN/m³, 内摩擦角 $\varphi=34.0^\circ$, 填土表面无超载, 试验结果如图 5 所示。Fang 等^[3]没有给出墙体平动模式下墙土之间的摩擦角, 但给出当墙体位移模式为绕墙顶和墙底转动时墙土之间

的摩擦系数 $\tan \delta$ 分别为 0.46 和 0.42, 所以这里合理由取二者之平均值为平动模式下墙土之间的摩擦系数, 即摩擦角 $\delta=23.75^\circ$ 。图 5 给出了考虑水平土层间剪切力影响的本文解答和不考虑水平土层间剪切力影响的应宏伟等^[19]解答。从图 5 中可以看出, 本文解答更接近实测值。

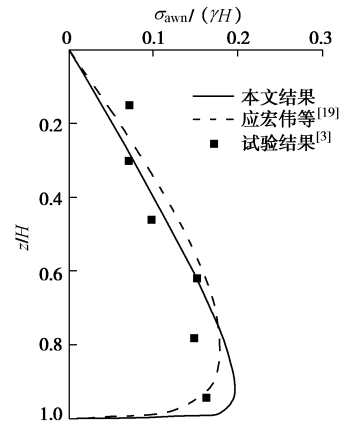


图 5 理论分析与 Fang 等^[3]的模型试验的对比

Fig. 5 Comparison between experimental results of Fang et al^[3] and theoretical predictions

3 参数分析

3.1 平均竖向应力

由式 (8)、(10) 可以看出, 作用于墙背上的主动土压力强度 σ_a 、水平土层间的平均剪应力 $\bar{\tau}$ 与滑动楔体内该深度处的平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 成正比, 所以前两者沿深度的分布形态取决于后者沿深度的分布形态。图 6 给出了 3 个不同墙背倾角的挡土墙在填土内摩擦角 $\varphi=32^\circ$ 时平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 沿深度的分布曲线。图 6 表明, 无论是否考虑水平土层间剪应力的影响, 墙土之间摩擦角 δ 越小, 同一深度处的平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 就越大, 并且 $\bar{\sigma}_v$ 沿深度基本上都是非线性分布, 但其分布形态明显受到 α 、 δ 的影响。当墙背竖直 ($\alpha=0$) 时, 只要墙土之间摩擦角 $\delta>0$, 平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 曲线就都是右凸的, 即呈现中间大两头小的形态, 仅仅是其最大值随着 δ 值的减小而下移。但当墙背倾斜 ($\alpha>0$) 且 δ 值较小时, 其形态却可能发生变化, 比如图 6 (c) 中, 当 $\alpha=20^\circ$ 时 $\delta/\varphi=1/3$ 和 $2/3$ 的两条曲线却是左凸的, 并且深度越大, $\bar{\sigma}_v$ 值就越大, 甚至在墙底处明显超过填土自重产生的竖向应力。

另外, 图 6 表明, 是否考虑水平土层间的剪应力对平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 的数值也有影响。当墙背竖直或墙背倾斜且比较粗糙 (即 δ 较大) 时, 如图 6 (a) 的 3 条曲线, 图 6 (b) 中 $\alpha=5^\circ$ 且 $\delta/\varphi=2/3$ 和 1 的两条曲线以及图 6 (c) 中 $\alpha=20^\circ$ 且 $\delta/\varphi=1$ 的曲线所示, 考虑水平土层间的平均剪应力作用使得从填土面向下

一定深度处的平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 减小,且使得其下直到墙底处的平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 增大;当墙背倾斜且相对光滑(即 δ 较小)时,如图6(b)中 $\alpha=5^\circ$ 且 $\delta/\varphi=1/3$ 的曲线以及图6(c)中 $\alpha=20^\circ$ 且 $\delta/\varphi=1/3$ 和 $2/3$ 的两条曲线所示,情况则正好相反。

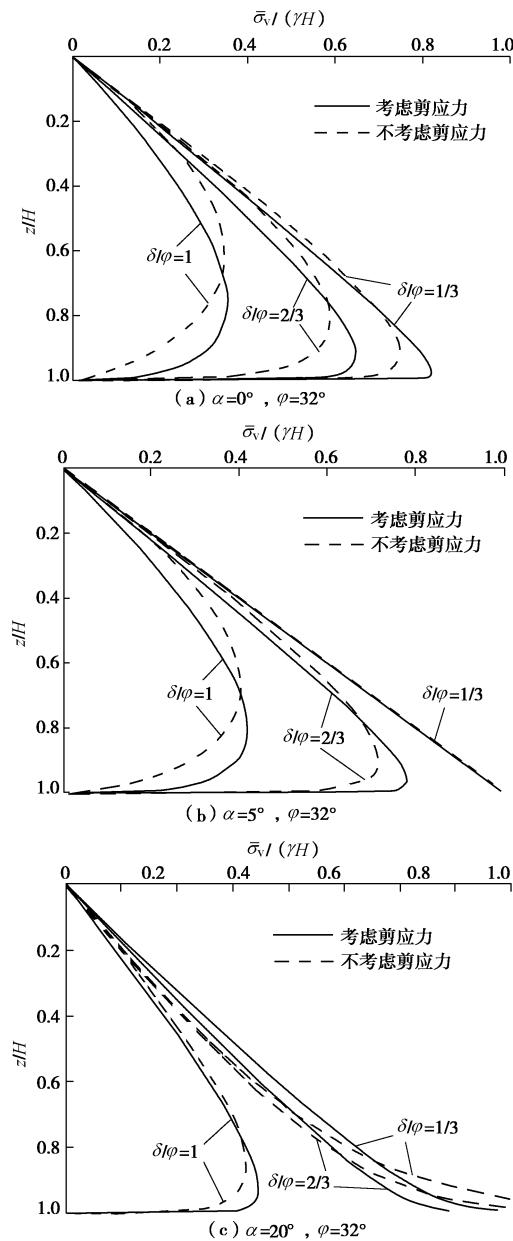


图6 平均竖向应力沿深度的分布曲线

Fig. 6 Curves of mean vertical stress

3.2 平均剪应力系数

图7(a)给出了平均剪应力系数 k 与填土内摩擦角 φ 之间的关系曲线。从图7(a)可以看出,墙背较陡($\alpha=5^\circ$)的曲线都是上凸的,且存在峰值,即当 φ 较小时, k 值随 φ 的增大而显著增大,然后曲线变得比较平缓,达到峰值后, k 值随 φ 的增大而减小。当墙背较缓($\alpha=20^\circ$)时,除 $\delta/\varphi=1$ 的曲线具有上述特征外,对应 $\delta/\varphi=1/3$ 和 $2/3$ 的 k 值则几乎都小于

0,且其绝对值随 φ 的增大而增大。对于此时 k 为负值可从如下角度理解:在滑动楔体同一深度处,由于主应力偏转而引起的剪应力大小是不等的,且在靠近墙边和滑裂面处剪应力的方向也是不同的,因而会影响到平均剪应力的方向。当墙背较陡且比较粗糙时,靠近墙边处的剪应力较大,因而平均剪应力的方向与之一致,而在墙背较缓且相对光滑时,靠近墙边处的剪应力较小,因而平均剪应力的方向与靠近滑裂面处的剪应力一致。

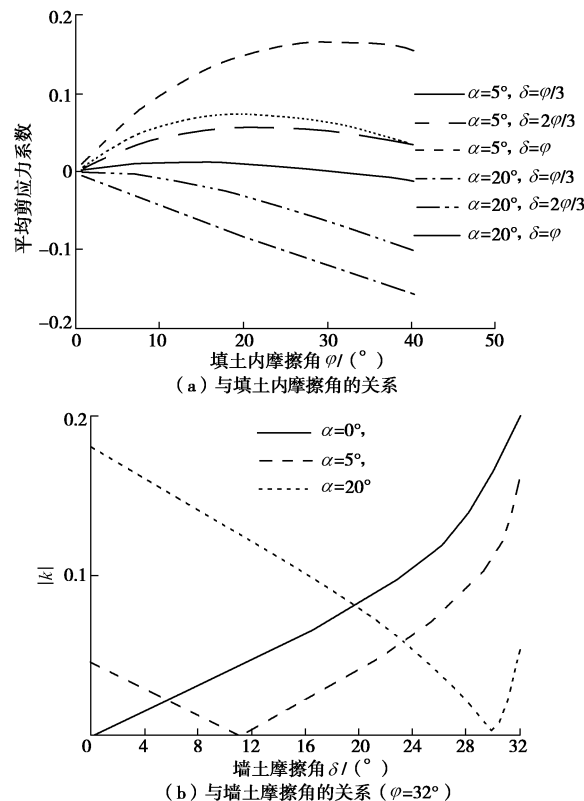


图7 平均剪应力系数与填土内摩擦角、墙土摩擦角的关系

Fig. 7 Relationship among mean shear stress coefficient, internal frictional angle of fill and wall-soil frictional angle

为考察墙土之间摩擦角 δ 对平均剪应力系数 k 的影响,图7(b)给出了 $\varphi=32^\circ$ 时二者之间的关系曲线。考虑到 k 值的正负号仅表示平均剪应力的方向,所以这里讨论其绝对值。很明显,对墙背竖直的挡土墙($\alpha=0^\circ$), δ 值越大, k 值就越大,即墙背越粗糙,水平土层间的剪应力就越大;对墙背俯斜($\alpha=5^\circ$ 或 20°)的挡土墙,存在一个 δ 值,使得 $k=0$,即此时水平土层间的平均剪应力为0。当 δ 较小或较大时, $|k|$ 值都较大,特别地对于墙背较陡的挡土墙(如 $\alpha=5^\circ$), $\delta=\varphi$ 时 $|k|$ 值最大,对于墙背较缓的挡土墙(如 $\alpha=20^\circ$), $\delta=0^\circ$ 时 $|k|$ 值最大,也就是说,此时水平土层间存在着较大的平均剪应力。另外,从图7(b)可以看出,当 $0 \leq \delta \leq \varphi$ 时, $|k|$ 值总小于 $\tan \varphi$,即水平土层间不会发生剪切破坏。

3.3 主动土压力合力作用点位置

在进行挡土墙抗倾覆稳定性验算时, 合理确定主动土压力合力及其作用点位置是计算倾覆力矩的关键。由于本文和朱建明等^[25]取用的滑裂面倾角与库仑理论相同, 三者算得的主动土压力合力因而相等, 所以这里主要讨论水平土层间的剪应力对其作用点位置的影响。对于不计地面超载的工况, 按照库仑理论得出的主动土压力合力作用于墙高的下三分之一处, 但现有的试验观测^[1-6]一般不是这样。对于平动模式下墙背竖直的挡土墙, 实测的主动土压力合力作用点的位置均高于墙高的 $1/3$ ^[7], 即按库仑理论有可能高估墙背竖直挡土墙的抗倾覆稳定性。而按水平层分析法分析平动模式下墙背竖直的挡土墙时, 不论是否考虑土拱效应^[7-8, 10, 11, 15-33], 都会得到非线性分布的主动土压力, 且其合力作用点的位置都高于墙高的 $1/3$ 。这里对墙背竖直的挡土墙考虑水平土层间平均剪切力影响后的结果也是如此 (图 8 (a))。图 8 (a) 表明, 基于土拱理论算得的合力作用点到墙底的距离 h 均随填土内摩擦角 φ 和墙土内摩擦角 δ 的增大而增大, 且当 $\delta > 0$ 时, 都大于墙高的 $1/3$ 。不过, 本文方法算得的合力作用点位置却低于不考虑剪应力作用的朱建明等^[25]的解答。

但是, 上述结论对于俯斜式挡土墙却不成立。图 8 (b)、(c) 分别为 $\alpha = 5^\circ$, 20° 的计算结果。很明显, 当墙背较陡且比较粗糙时 (如图 8 (b) 中的 $\alpha = 5^\circ$ 且 $\delta/\varphi = 1$ 曲线), 主动土压力合力作用点高度与填土内摩擦角 φ 的关系类似于墙背竖直的挡土墙。当墙背较陡且相对光滑 (如图 8 (b) 中的 $\alpha = 5^\circ$ 且 $\delta/\varphi = 2/3$ 曲线) 或墙背较缓且比较粗糙 (如图 8 (c) 中的 $\alpha = 20^\circ$ 且 $\delta/\varphi = 1$ 曲线) 时, 主动土压力合力作用点尽管仍高于库仑理论值, 且本文考虑水平土层间剪应力作用算得的合力作用点位置仍低于不计该剪应力作用的朱建明等^[25]的解答, 但是其与填土内摩擦角 φ 的变化规律与竖直挡土墙不同, 即当 φ 较小时, 合力作用点高度 h 随着 φ 的增大而增大, 但当 φ 较大时, 则正好相反。当墙背倾斜但较为光滑 (如图 8 (b) 中的 $\alpha = 5^\circ$ 且 $\delta/\varphi = 1/3$ 曲线的局部, 图 8 (c) 中的 $\alpha = 20^\circ$ 且 $\delta/\varphi = 1/3$ 和 $2/3$ 的曲线) 时, 合力作用点的位置则会低于墙高的 $1/3$, 并且 φ 越大, 合力作用点就越低, 此时本文考虑水平土层间剪应力作用算得的结果则要高于不计该剪应力作用的朱建明等^[25]的解答。同时从图 9 可以看出, 主动土压力合力作用点高度随墙背变缓而降低, 且当其大于墙高的 $1/3$ 时, 考虑水平土层间剪应力作用算得的结果要低于不计其作用的朱建明等^[25]的解答, 当其小于墙高的 $1/3$ 时, 则正好相反。所以, 不论墙背竖直还是俯斜, 按本文方法得到的抗倾覆稳定性系数将会处于库仑和朱建明等^[25]理

论计算值之间。

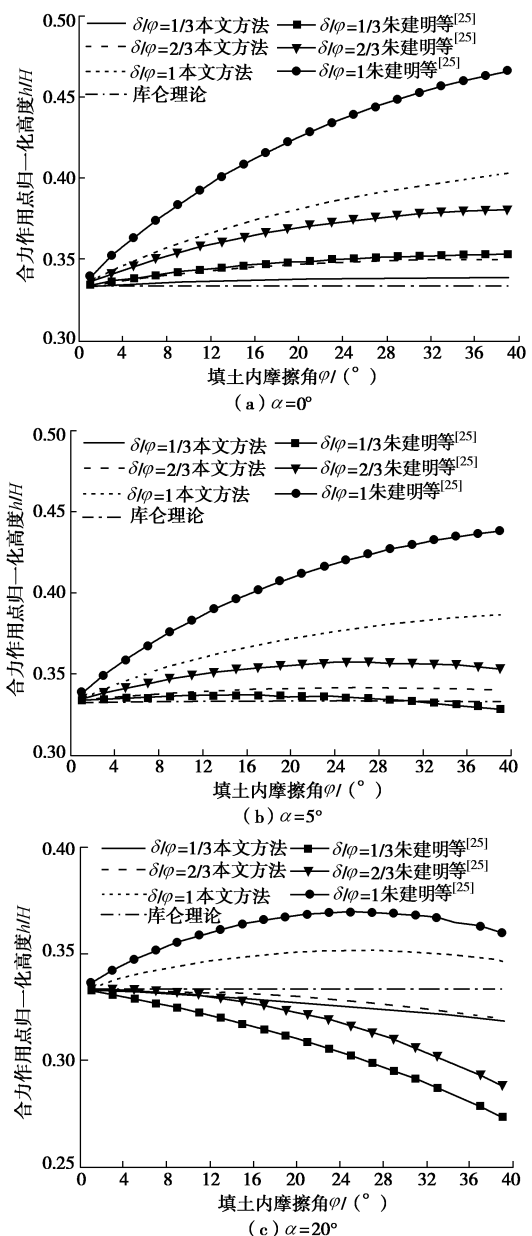


图 8 主动土压力合力作用点高度与填土内摩擦角的关系
Fig. 8 Relationship between height of point of application of total earth pressure and internal friction angle of fill

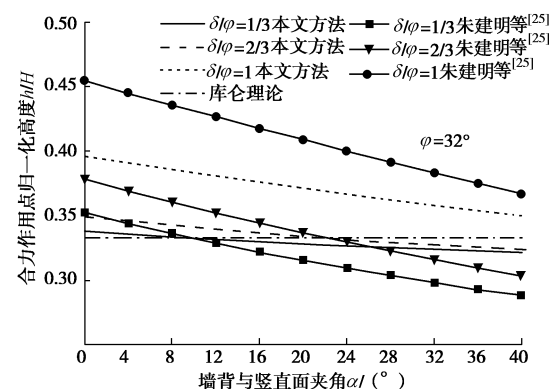


图 9 主动土压力合力作用点高度与墙背倾角的关系
Fig. 9 Relationship between height of point of application of total earth pressure and inclination angle of wall back

4 结 论

针对平动模式下的刚性挡土墙,考虑圆弧形土拱,通过分析主应力偏转,计算了滑动土楔内水平土层间的平均竖向应力和平均剪应力,修正了水平层分析方法。通过和 Tsagareli^[1]、Fang 等^[3]学者的模型试验结果以及 Paik 等^[18]、应宏伟等^[19]、朱建明等^[25]理论分析的对比,验证了修正方法的合理性。

(1)水平土层间的平均剪应力和主动土压力一样沿深度方向为非线性分布,其形态主要受填土内摩擦角、墙背倾角及墙背粗糙程度的影响。

(2)水平土层间剪应力会影响到合力作用点的位置。对于墙背竖直或墙背较陡且比较粗糙的挡土墙,考虑水平土层间平均剪应力得到的主动土压力合力作用点高于库仑理论值,但明显低于不考虑该剪应力的有关理论计算值;对于墙背较缓且比较光滑的挡土墙,考虑水平土层间剪应力得到的主动土压力合力作用点有可能低于库仑理论值,但高于不考虑该剪应力的有关理论计算值。另外,不论是否考虑水平土层间的平均剪应力,主动土压力合力作用点位置都随着墙背变缓而降低。

参考文献:

- [1] TSAGARELI Z V. Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and horizontal backfill surface[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965, **91**(4): 197 - 200.
- [2] MATSUO M, KENMOCHI S, YAGI H. Experimental study on earth pressure of retaining wall by field tests[J]. Soils and Foundations, 1978, **18**(3): 27 - 41.
- [3] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **112**(3): 317 - 333.
- [4] 周应英, 任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(2): 19 - 25. (ZHOU Ying-ying, REN Mei-long. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(2): 19 - 25. (in Chinese))
- [5] 肖衡林, 余天庆. 山区挡土墙土压力的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3771 - 3775. (XIAO Heng-lin, YU Tian-qing. Field experiment on earth pressure behind retaining wall in mountainous area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3771 - 3775. (in Chinese))
- [6] KHOSRAVI M H, PIPATPONGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode[J]. Géotechnique, 2013, **63**(12): 1020 - 1028.
- [7] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005: 235 - 262. (GU Hui-ci. Handbook for calculation of earth pressure on retaining wall[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2005: 235 - 262. (in Chinese))
- [8] WANG Y Z. Distribution of earth pressure on a retaining wall[J]. Géotechnique, 2000, **50**(1): 83 - 88.
- [9] 王元战, 唐照评, 郑 斌. 墙体绕墙顶转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 应用数学和力学, 2004, **25**(7): 695 - 700. (WANG Yuan-zhan, TANG Zhao-ping, ZHENG Bin. Distribution of active earth pressure of retaining wall with wall movement of rotation about top[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, **25**(7): 695 - 700. (in Chinese))
- [10] 刘忠玉, 马德遂, 何盛东. 层状填土的土压力计算[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, **25**(3): 56 - 59. (LIU Zhong-yu, MA De-sui, HE Sheng-dong. Active earth pressure acting on retaining walls with layered backfills[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2004, **25**(3): 56 - 59. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 刘忠玉, 闫富有. 有地下水时刚性挡土墙的动主动土压力[J]. 岩土力学, 2006, **27**(4): 566 - 570. (LIU Zhong-yu, YAN Fu-you. Dynamic active earth pressure on rigid retaining walls with submerged soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(4): 566 - 570. (in Chinese))
- [13] 林宇亮, 杨果林, 赵炼恒, 等. 地震动土压力水平层分析法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12): 2581 - 2591. (LIN Yu-liang, YANG Guo-lin, ZHAO Lian-heng, et al. Horizontal slices analysis method for seismic earth pressure calculation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(12): 2581 - 2591. (in Chinese))
- [14] 李兴高, 刘维宁. 关于水平层分析法的讨论[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 2): 79 - 82. (LI Xing-gao, LIU Wei-ning. Discussion on horizontal slice method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S2): 79 - 82. (in Chinese))
- [15] NADUKURU S S, MICHALOWSKI R L. Arching in distribution of active load on retaining walls[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2012, **138**: 575 - 584.
- [16] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 - 318.
- [17] 李永刚, 白鸿莉. 垂直墙背挡土墙土压力分布研究[J]. 水

- 利学报, 2003, **34**(2): 102 - 106. (LI Yong-gang, BAI Hong-li. Study of earth pressure distribution on the retaining wall with vertical back[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **34**(2): 102 - 106. (in Chinese))
- [18] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 643 - 653.
- [19] 应宏伟, 蒋 波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 717 - 722. (YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 717 - 722. (in Chinese))
- [20] 章瑞文, 徐日庆. 土拱效应原理求解挡土墙土压力方法的改进[J]. 岩土力学, 2008, **29**(4): 1057 - 1060. (ZHANG Rui-wen, XU Ri-qing. Solution of problem of earth pressure on retaining wall calculated by method of soil arching effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(4): 1057 - 1060. (in Chinese))
- [21] 吴 明, 彭建兵, 徐 平, 等. 考虑土拱效应的挡墙后土压力研究[J]. 工程力学, 2011, **28**(11): 89 - 95. (WU Ming, PENG Jian-bing, XU Ping, et al. Study on earth pressure against rigid retaining wall[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(11): 89 - 95. (in Chinese))
- [22] 涂兵雄, 贾金青. 考虑土拱效应的黏性填土挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(5): 1064 - 1070. (TU Bing-xiong, JIA Jin-qing. Research on active earth pressure behind rigid retaining wall from calyey backfill considering soil arching effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(5): 1064 - 1070. (in Chinese))
- [23] 陈国舟, 周国庆. 考虑土拱效应的倾斜挡墙土压力研究[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(11): 1961 - 1966. (CHEN Guo-zhou, ZHOU Guo-qing. Research on earth pressure against inclined walls considering soil arching[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(11): 1961 - 1966. (in Chinese))
- [24] 俞 缙, 周亦涛, 蔡燕燕, 等. 基于土拱效应的刚性挡墙墙后主动土压力[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2306 - 2310. (YU Jin, ZHOU Yi-tao, CAI Yan-yan, et al. Active earth pressure against rigid retaining wall considering soil-arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2306 - 2310. (in Chinese))
- [25] 朱建明, 赵 琦. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力与被动土压力统一解[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2501 - 2505. (ZHU Jian-ming, ZHAO Qi. Unified solution to active earth pressure and passive earth pressure on retaining wall considering soil arching effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2501 - 2505. (in Chinese))
- [26] 武崇福, 张志军, 刘淑宏. 考虑土拱效应的黏性填土平行挡土墙侧向土压力计算方法[J]. 中国公路学报, 2014, **27**(4): 31 - 37. (WU Chong-fu, ZHANG Zhi-jun, LIU Shu-hong. Calculation method for lateral earth pressure on parallal retaining wall with clayey back fill considering soil arching effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, **27**(4): 31 - 37. (in Chinese))
- [27] 李东阳. 基于土拱效应和剪应力作用的挡土墙主动土压力分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2015. (LI Dong-yang. Study on active earth pressure on retaining wall based on soil arch effect and shear stress[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015. (in Chinese))
- [28] GOEL S, PATRA N R. Effect of arching on active earth pressure for rigid retaining walls considering translation mode[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, **8**(2): 123 - 133.
- [29] 彭述权, 周 健, 樊 玲, 等. 考虑土拱效应刚性挡墙土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(10): 2701 - 2707. (PENG Shu-quan, ZHOU Jian, FAN Ling, et al. Research on earth pressure of rigid retaining wall considering soil arching[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2701 - 2707. (in Chinese))
- [30] 陈 林, 张永兴, 冉可新. 考虑剪应力作用的挡土墙主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 2): 219 - 223. (CHEN Lin, ZHAN Yong-xing, RAN Ke-xin. method for calculating active earth pressure considering shear stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S2): 219 - 223. (in Chinese))
- [31] 王 杰, 夏唐代, 贺鹏飞, 等. 考虑土拱效应的刚性挡墙主动土压力分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 1914 - 1920. (WANG Jie, XIA Tang-dai, HE Peng-fei, et al. Analysis of active earth pressure on rigid retaining walls considering soil arching[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(7): 1914 - 1920. (in Chinese))
- [32] 章瑞文. 挡土墙主动土压力理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (ZHANG Rui-wen. Studies of active earth pressures on retaining wall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [33] 黄 睿, 夏唐代. 无黏性土的地震主动土压力水平层法改进[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, **46**(2): 85 - 91. (HUANG Rui, XIA Tang-dai. Improved horizontal slice method for seismic active earth pressure of cohesionless soil[J]. Journal of Haerbin Institute of Technology, 2014, **46**(2): 85 - 91. (in Chinese))
- [34] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 2 版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003. (ZHAO Ming-hua. Soil mechanics and foundation engineering[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003. (in Chinese))