

DOI: 10.11779/CJGE201808016

RT 模式下考虑主应力偏转的刚性挡墙地震主动土压力

张雯萍¹, 周亦涛², 俞 璟^{1, 3}, 刘士雨¹, 蔡燕燕^{1, 3}, 余 闯⁴

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 河北水利电力学院交通工程系, 河北 沧州 061001;
3. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 4. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 依据拟静力学理论, 考虑主应力偏转的影响, 推导了绕墙顶转动模式 (RT 模式) 下的地震主动土压力的计算公式。通过旋转挡土墙的解析模型, 将地震问题转化为静力问题, 并根据库仑土压力理论得到地震主动破裂角。在此基础上改进圆弧形小主应力偏转迹线, 利用摩尔应力圆得到了 RT 模式下地震主动侧压力系数和水平微元土层间摩擦系数公式, 提出基于微分薄层法的地震主动土压力解析式。分析了主要参数对地震主动破裂角、地震主动侧压力系数、水平微元土层间摩擦系数、地震主动土压力分布和侧向土压力作用位置的影响。将解析结果与其他土压力理论及试验数据进行对比, 结果表明本文方法更为可靠。

关键词: 主应力偏转; 刚性挡墙; 绕墙顶转动; 地震主动土压力; 地震主动破裂角; 拟静力法

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)08-1498-09

作者简介: 张雯萍(1992-), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学与地基处理等方面的研究工作。E-mail: zhangwxwz@163.com。

Seismic active earth pressures on rigid retaining walls under RT mode considering rotation of principal stresses

ZHANG Wen-ping¹, ZHOU Yi-tao², YU Jin^{1,3}, LIU Shi-yu¹, CAI Yan-yan^{1,3}, YU Chuang⁴

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Xiamen 361021, China; 2. Department of
Transportation Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China; 3. Department of
Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 4. School of Civil
Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Considering the rotation of the principal stresses, new formulae for seismic active pressures on rigid retaining walls under rotation about top (RT mode) are derived by the pseudo-static method. Through the rotation model, the calculation of seismic active earth pressures by the pseudo-static method is transforming into that of static active earth pressures, and the seismic active rupture angle is obtained by means of the Coulomb earth pressure theory. According to the Mohr stress circle and the improved circular arc trajectory of the minor principal stresses being a circular arch, the coefficients of the lateral seismic active earth pressures and the horizontal interfacial frictions are proposed under RT mode. Then based on the force equilibrium of the differential sliding backfill element, the formula for the seismic active earth pressures on the rigid retaining wall under rotation about top is obtained. Moreover, the effects of influence parameters on the seismic active rupture angle, lateral seismic active earth pressure and its coefficient, horizontal interfacial friction coefficient, resultant of the seismic active earth pressure and height of its application are discussed. And comparisons of the predicted values by the proposed method and other methods are carried out as well as model tests, and it is shown that the proposed method is more reasonable and effective than other methods.

Key words: principal stress rotation; rigid retaining wall; rotation about wall top; seismic active earth pressure; seismic active rupture angle; pseudo-static method

0 引言

挡土墙是岩土工程中最常见的支挡性结构之一, 土压力强度和分布是挡土墙设计的关键, 地震作用下挡土墙的受力分析是难点问题。地震状况下的土压力

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774147, 51679093); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUEK1701); 2015 年度福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目; 福建省自然科学基金项目(2017J01094, 2015J01210)

收稿日期: 2017-07-17

*通讯作者(E-mail: bugyu0717@163.com)

算法中属拟静力法的使用最为广泛。拟静力法由 Okabe 等^[1]、Mononobe 等^[2]最早提出, 建立在库仑理论的基础上, 是一种用惯性力来等效地震作用的近似算法。然而, 该方法得到的地震土压力计算结果沿墙高线性分布, 与试验中体现的非线性分布特性不符^[3-5], 引起了众多学者的重视。

Choudhury 等^[6]、Caltabiano 等^[7]、Iskander 等^[8]、Ghosh 等^[9]、林宇亮等^[10]、孙勇^[11]、张国祥^[12]应用拟静力学的方法对挡墙 T 模式(平移模式)下的地震土压力计算法做了进一步的研究, 但他们均忽视了主应力偏转对地震土压力的作用。事实上, 土体与结构之间必然存在摩擦力, 这就使得土中主应力的方向必然不会是一成不变的。卢坤林等^[14]及侯键等^[15]基于主应力偏转原理提出了 T 模式下地震土压力算法, 但卢坤林等^[14]在理论公式推导中所选取的地震主动破裂角未能满足平衡条件。侯键等^[15]依据水平微元土层的主应力偏转原理和平衡条件所得到的地震主动破裂角可能不正确。黄睿等^[16]改进微分薄层法, 依照其应力状态和静力平衡条件求解土压力, 但求解中需要进行迭代, 加大了计算的繁琐性。更重要的是, 在现实工程中, 由于支挡方式以及荷载状况的差异, 挡土墙的实际位移模式会有很多种。主要分为 T 模式、RT 模式(绕墙顶转动模式)及 RB 模式(绕墙趾转动模式), 而且土压力分布与挡土墙位移模式密切相关^[4]。前述成果大多是对 T 模式下的动土压力的探究, 对挡土墙的抗震性能非常不利。Ishibashi 等^[4]对 RT 模式下的墙后填土为干砂的挡墙进行了模型试验, 并与其它模式的试验结果进行对照, 结果显示: 位移模式不同, 地震土压力也呈现出相当不同的分布状态。RT 模式是挡土墙破坏的形式之一, 为完善挡墙的动土压力算法体系, 有必要对 RT 模式下的动土压力进行研究。

本文拟结合“虚拟转动”挡土墙解析模型方法和库伦土压力理论, 来简化地震条件下破裂角的求解过程。通过取两段圆弧作为小主应力偏转迹线, 改进墙后无粘性滑移土体的小主应力偏转迹线, 利用主应力偏转原理以及微分薄层法以获得 RT 模式下地震主动侧压力系数和微元土层间摩擦系数, 进而获得地震主动土压力分布、土压力合力和侧土压力作用位置的解析式。

1 地震条件下的拟静力分析

用拟静力法对地震发生时的挡墙土压力进行分析。地震状况下滑移土体中产生水平向惯性力 F_h 及竖直向惯性力 F_v , 有

$$F_h = k_h \rho g, \quad (1)$$

$$F_v = (1 - k_v) \rho g. \quad (2)$$

式中 k_h 为水平地震系数; k_v 为竖直地震系数; ρ 为破坏土楔体的密度; g 为重力加速度。

见图 1, 地震状况下滑移土体中的惯性力合力方向与重力方向间有一夹角 η (地震角), 有

$$\eta = \arctan \frac{F_h}{F_v} = \arctan \frac{k_h \rho g}{(1 - k_v) \rho g} = \arctan \frac{k_h}{1 - k_v}. \quad (3)$$

地震状况下, 滑移土体中惯性力合力为

$$F = \frac{(1 - k_v) \rho g}{\cos \eta}. \quad (4)$$

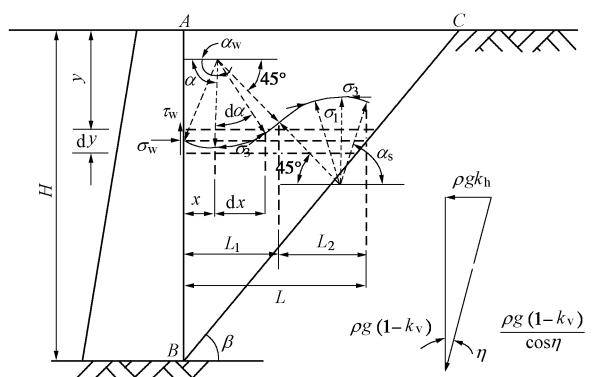


图 1 地震条件下滑移体内的主应力偏转

Fig. 1 Principal stresses of sliding backfill under seismic load

2 地震主动土压力分析

2.1 受力模型

设墙后土体为砂性土且表面为水平面, 刚性挡土墙背面与地面垂直。在地震动力条件下, 墙体绕墙顶远离土体转动到一定程度时, 墙后土体沿着图 1 所示的与水平面夹角为 β 的 BC 面进行滑移, 并认为是滑移土体 ABC 在墙背上施加了土压力。设墙后砂性土重度为 γ , 内摩擦角为 φ , 墙土之间摩擦角为 δ 。

图 1 为地震条件下的主动土压力理论模型, 与非动力状况下的模型不同的是: 此模型中, 土体中的惯性力合力 $\rho g(1 - k_v)/\cos \eta$ 方向与重力方向并不重合, 两者间的夹角为 η 。

文献[12, 13]成功地建立了旋转挡土墙模型, 来简化地震土压力的理论计算过程, 并且证明了旋转挡土墙模型不会引起挡墙和墙后土体的应力状态的改变。需要特别指出的是, 这里的“旋转”是指一种计算地震土压力的方法, 是根据水平和竖直地震系数的关系, 利用对挡土墙的虚拟“旋转”来实现对动力问题的拟静力分析, 其含义并非挡土墙位移模式中提到的实际“转动”。根据该方法, 绕挡墙的墙趾逆时针旋转图 1 的计算模型 η 角度, 即如图 2 所示: 挡土墙的墙背不再竖直, 墙背倾角为 η , 土中的合力

$\rho g(1-k_v)/\cos\eta$ 方向与重力方向重合。而后, 可按照静土压力解析式进行解析, 其中, 墙高 $H' = H \cos\eta$, 土的重度 $\gamma' = \gamma(1-k_v)/\cos\eta$ 。

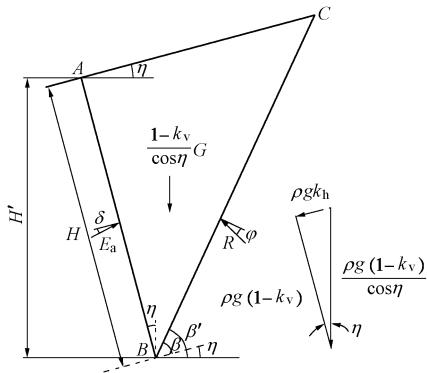


图 2 地震主动破裂角的计算模型

Fig. 2 Computational model for seismic active rupture angle

2.2 地震主动破裂角

利用以上参数间的转化关系, 并依照库伦土压力理论得到地震主动破裂角 β' , 即

$$E = \frac{(1-k_v)\gamma H^2 \cos(\beta' - \eta) \sin(\beta' - \varphi)}{2 \cos\eta \sin(\beta' - \eta) \cos(\beta' - \varphi - \delta - \eta)}, \quad (5)$$

$$\beta' = \beta + \eta. \quad (6)$$

式中, β' 为挡土墙旋转后的地震主动破裂角。

由式 (5)、(6) 可得原本的地震主动破裂角为 $\beta = \beta' - \eta$

$$= \arctan \left\{ \tan(\varphi - \eta) \left[1 + \sqrt{1 + \cot(\varphi + \delta) \cot(\varphi - \eta)} \right] \right\}. \quad (7)$$

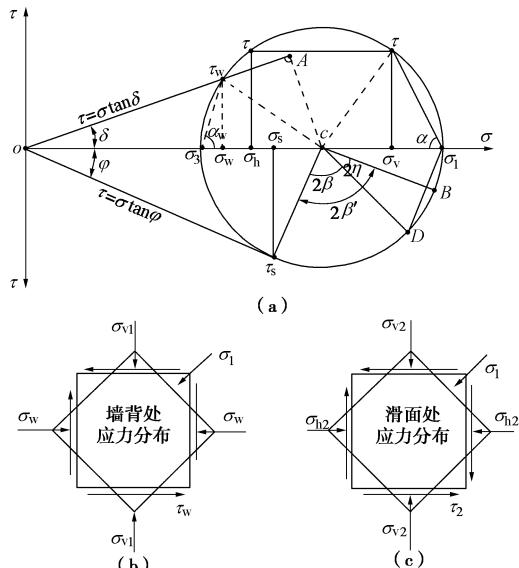


图 3 滑移体内土体的应力

Fig. 3 Stresses of sliding backfill

2.3 滑移微分层内的应力分析

滑移微分层内任意点的力和主应力的关系可在摩尔圆中表示出来, 如图 3 (a) 所示, 滑移微分层墙背

处以及滑移面处的受力情况分别如图 3 (b)、(c) 所示。

滑移微分层垂直面上的水平应力为

$$\sigma_h = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha. \quad (8)$$

滑移微分层水平面上的竖向应力为

$$\sigma_v = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha. \quad (9)$$

式中, α 为滑移土体内任意点的主应力偏转角, σ_1 , σ_3 分别为最大、最小主应力。

水平面或垂直面上的剪应力为

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha. \quad (10)$$

同理, 可得滑移微分层墙背处的水平应力为

$$\sigma_w = \sigma_1 \cos^2 \alpha_w + \sigma_3 \sin^2 \alpha_w; \quad (11)$$

滑移微分层墙背处和滑移面处的剪应力分别为

$$\tau_w = \sigma_w \tan \delta; \quad (12)$$

$$\tau_s = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi}{2}; \quad (13)$$

滑移微分层滑移面处的垂直应力为

$$\sigma_s = \frac{\tau_s}{\tan \varphi} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 \varphi}{2 \sin \varphi}; \quad (14)$$

滑移微分层墙背处和滑移面处的主应力偏转角分别为

$$\alpha_w = \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2} + \frac{1}{2} \arccos \frac{\sin \delta}{\sin \varphi}, \quad (15)$$

$$\alpha_\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}. \quad (16)$$

由图 1 中的几何关系, 可得滑移微分层在破裂面处的大主应力与水平面间夹角, 有

$$\alpha_s = \frac{\pi}{2} + \beta - \alpha_\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} + \beta. \quad (17)$$

主应力偏转迹线的形式主要有 3 种: 悬链线形 (Handy^[17]、蒋波等^[18])、圆弧形 (Cai 等^[19]、俞缙等^[20]) 和抛物线形 (Zhou 等^[21]、Goel 等^[22])。挡土墙绕其顶部发生转动, 并至即将破坏还未破坏时, 墙土间以及微元土层间形成相对运动趋势, 微元土层间形成摩擦角, 致使各土层的主应力发生偏转。计算式 (17) 可以得到 $\alpha_s < 90^\circ$, 若假定小主应力偏转迹线为一段圆弧, 此时微分体上表面剪应力之和方向向左 (即挡土墙绕其底部发生转动时的受力情况) 与 RT 模式下微元体上表面剪应力之和方向向右不符。为满足等式要求以及 RT 模式的模型受力特征, 假定小主应力偏转迹线为两段圆弧线, 其半径均为 R , 那么根据图 1, 可得

$$dx = R \sin \alpha d\alpha, \quad (18)$$

$$\alpha = \arccos \left(\cos \alpha_w - \frac{x}{R} \right). \quad (19)$$

高度为 dy 的土层的宽度和自重分别为

$$L = R(\sqrt{2} + \cos \alpha_w + \cos \alpha_s) \quad (20)$$

$$dG = \gamma(H - y) \cot \beta dy \quad (21)$$

2.4 地震主动土压力系数

作用在滑移微分土层上的平均垂向应力为

$$\sigma_{av} = \frac{\int_0^L \sigma_v dx}{L} = \sigma_1 \left[1 - \frac{(1 - k_a) \left(\cos^3 \alpha_w + \cos^3 \alpha_s + \frac{\sqrt{2}}{2} \right)}{3 \left(\cos \alpha_w + \cos \alpha_s + \sqrt{2} \right)} \right], \quad (22)$$

式中,

$$k_a = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (23)$$

微分薄层法分析 RT 状况下的土压力时需计算滑移微元土层间的水平剪力, 即

$$\tau_a = \frac{\int_0^L \tau dx}{L} = \frac{\sigma_1 (1 - k_a) \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \sin^3 \alpha_s - \sin^3 \alpha_w \right)}{3 \left(\sqrt{2} + \cos \alpha_w + \cos \alpha_s \right)} \quad (24)$$

地震主动侧压力系数为 σ_w 和 σ_{av} 的比值, 即

$$k_{aw} = \frac{\sigma_w}{\sigma_{av}} = \frac{(\cos^2 \alpha_w + k_a \sin^2 \alpha_w)}{(1 - k_a) \left(\cos^3 \alpha_w + \cos^3 \alpha_s + \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} \quad (25)$$

$$1 - \frac{3(\cos \alpha_w + \cos \alpha_s + \sqrt{2})}{3(\cos \alpha_w + \cos \alpha_s + \sqrt{2})}$$

水平微元土层间摩擦系数 $\tan \varphi'$ 为 τ_a 和 σ_{av} 的比值, 即

$$\tan \varphi' = \frac{\tau_a}{\sigma_{av}}$$

$$= \frac{(1 - k_a) \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \sin^3 \alpha_s - \sin^3 \alpha_w \right)}{3(\sqrt{2} + \cos \alpha_w + \cos \alpha_s) - (1 - k_a) \left(\cos^3 \alpha_w + \cos^3 \alpha_s + \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} \quad (26)$$

式中, φ' 为水平微元土层间摩擦角。

由上述公式可得: 当 $\delta = 0$ 且 $\eta = 0$, 即采纳朗肯理论所提出的假设 (墙背面竖直且光滑, 填土表面水平) 时, $\tan \varphi' = 0$, $k_{aw} = k_a$ 。

2.5 地震主动土压力

在深度 y 处的滑移土体内, 取一高为 dy 的水平微分薄层, 如图 4 所示, 为求解 RT 模式下地震主动土压力的微分薄层法解析模型。

建立该薄层水平方向的静力平衡, 得

$$\sigma_w + \tau_s \cot \beta + \tau_a \cot \beta - k_h \gamma(H - y) \cot \beta -$$

$$(H - y) \frac{d\tau_a}{dy} \cot \beta - \sigma_s = 0 \quad (27)$$

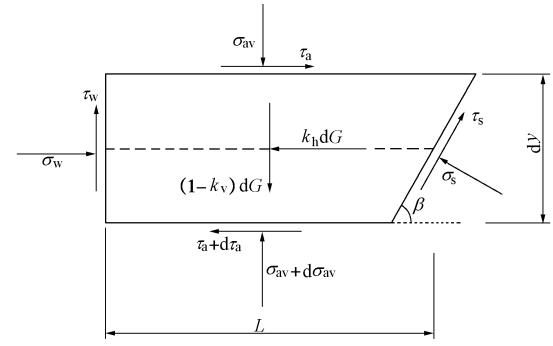


图 4 微元滑移土层上的应力

Fig. 4 Stresses on differential sliding backfill element

建立该薄层垂向方向的静力平衡, 得

$$\tau_w + (H - y) \frac{d\sigma_{av}}{dy} \cot \beta + \tau_s + \sigma_s \cot \beta -$$

$$(1 - k_v) \gamma(H - y) \cot \beta - \sigma_{av} \cot \beta = 0 \quad (28)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \tau_w &= \sigma_w \tan \delta, \\ \tau_s &= \sigma_s \tan \varphi, \\ \sigma_w &= k_{aw} \sigma_{av}, \\ \tau_a &= \sigma_{av} \tan \varphi' \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

由式 (27) ~ (29), 整理得到

$$\frac{d\sigma_{av}}{dy} = \frac{1 - A}{H - y} \sigma_{av} + B \gamma, \quad (30)$$

式中,

$$A = k_{aw} \tan \beta \frac{\cos \varphi' \cos(\beta - \varphi - \delta)}{\cos \delta \sin(\beta - \varphi - \varphi')} \quad (31)$$

$$B = \frac{\cos \varphi'}{\sin(\beta - \varphi - \varphi')} [(1 - k_v) \sin(\beta - \varphi) + k_h \cos(\beta - \varphi)]. \quad (32)$$

对式 (30) 积分, 解得

$$\sigma_{av} = \frac{\gamma B (H - y)}{A - 2} + C (H - y)^{(A-1)} \quad (33)$$

式中, C 为积分常数。

把边界条件 $y = 0$, $\sigma_{av} = 0$ 代入式 (33) 得

$$C = \frac{B \gamma}{2 - A} H^{(2-A)} \quad (34)$$

把式 (34) 代入式 (33) 得到

$$\sigma_{av} = \frac{\gamma H B}{A - 2} \left[\frac{H - y}{H} - \left(\frac{H - y}{H} \right)^{(A-1)} \right] \quad (35)$$

由式 (29)、(35) 可以得到水平动土压力分布

$$\sigma_w = k_{aw} \sigma_{av}$$

$$= k_{aw} \frac{\gamma H B}{A - 2} \left[\frac{H - y}{H} - \left(\frac{H - y}{H} \right)^{(A-1)} \right] \quad (36)$$

对式 (36) 积分, 即得到水平动土压力合力

$$E_h = \int_0^H \sigma_w dy = k_{aw} \frac{\gamma H^2 B}{2 - A} \quad (37)$$

由式(37)可得动土压力合力为

$$E_a = \frac{E_h}{\cos \delta} = \frac{k_{aw}}{\cos \delta} \frac{\gamma H^2 B}{2 A} \quad (38)$$

将式(31)、(32)代入式(38)可得

$$E_a = \frac{(1-k_v)\gamma H^2 \sin(\beta + \eta - \varphi)}{2 \cos \eta \tan \beta \cos(\beta - \varphi - \delta)} \quad (39)$$

把式(6)代入式(5)同样可得式(39), 由此也检验了本文理论推导的正确性。

由式(36)可求出水平动土压力对墙底部的总弯矩为

$$M = \int_0^H \sigma_w (H-y) dy = k_{aw} \frac{\gamma H^3 B}{3(A+1)} \quad (40)$$

式(40)除以式(37)可得合力作用点位置距墙末的距离为

$$h = \frac{M}{E_h} = \frac{H}{3} \frac{2A}{A+1} \quad (41)$$

当 $\delta = 0$ 且 $\eta = 0$ 时, 解出 $A = 1$, 则

$$h = \frac{H}{3} \quad (42)$$

可知: 在非动力状况下, 且墙背面竖直、光滑, 填土表面水平, 侧向土压力合力作用在距离墙底部的 $1/3$ 墙高处, 这与朗肯土压力的结论是相同的。

3 合理性验证

为检验本算法的适用性, 图 5 给出了式(36)计算得到的 RT 模式下地震主动土压力分布, 并和张永兴等^[23]、彭述权等^[24]解的近似算法解与 Sherif 等^[3]的 RT 模式下的振动台实测数据进行对比。所用参数为 $\varphi = 36.3^\circ$, $\delta = \varphi/3$, $k_h = 0.26$, $k_v = 0$ 。

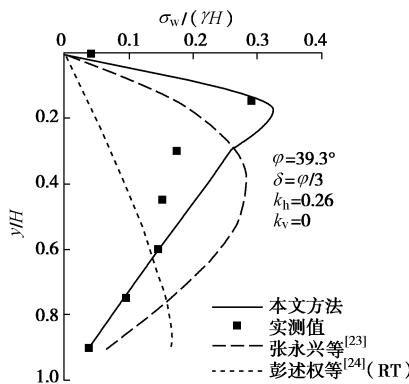


图 5 地震主动侧土压力分布理论与试验对比

Fig. 5 Comparison of lateral seismic active earth pressures by theoretical formulae and test results

由图 5 可以看出, 本文及其他理论成果与振动台试验模拟地震状况得到的 RT 模式下的主动土压力分布均是非线性的。张永兴等^[23]在土压力分析中考虑了

地震的作用, 由滑移土体内的力矩平衡条件求解地震主动土压力, 但其未考虑主应力偏转以及位移模式的影响, 其主动土压力主要发生在挡土墙中部。彭述权等^[24]考虑主应力偏转的影响推导了非动力条件下 RT 模式的主、被动土压力公式, 但其主动土压力大小沿挡土墙从上到下是递增的, 土压力值在挡土墙下部达到最大。这两种算法的解均与试验数据存在较大差异。而本文结果与试验数据吻合更好, 主动土压力的分布均主要集中在挡土墙上部, 进一步证明了本文方法的合理性。

4 影响参数分析

4.1 地震主动破裂角分析

图 6, 7 给出了根据式(7)得到的地震主动破裂角随内摩擦角 φ , 墙土间摩擦角 δ , 水平地震系数 k_h 和竖直地震系数 k_v 的变化曲线。

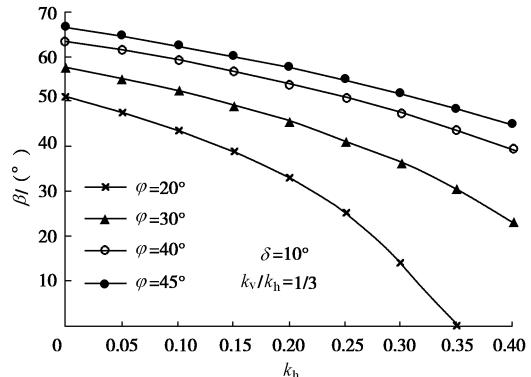


图 6 β 随 k_h 和 φ 的变化

Fig. 6 Effects of horizontal seismic coefficient on β under different φ

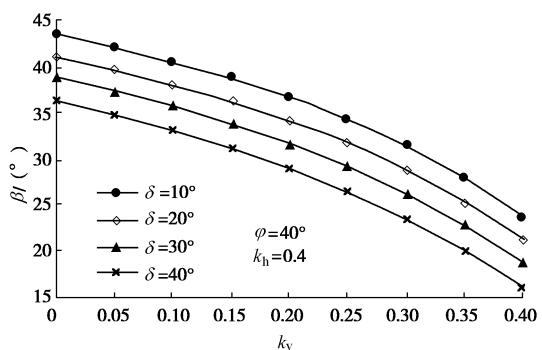


图 7 β 随 k_v 和 δ 的变化

Fig. 7 Effects of vertical seismic coefficient on β under different δ

由图 6, 7 可以看出, 地震主动破裂角始终小于 $\pi/4 + \varphi/2$ 。破裂角随着 φ 的增大而增大, 而随着 δ 的增大近似线性减小, 破裂角随 φ 的变化幅度大于随 δ

的变化幅度, 但是随着 φ 的不断变大, 地震破裂角的增大幅度显著减小。还可以看到, 地震主动破裂角分别随着 k_h 和 k_v 的增大而减小。

4.2 地震主动侧压力系数分析

图 8~11 给出了根据式 (25) 得到的地震主动侧压力系数随内摩擦角 φ , 墙土间摩擦角 δ , 水平地震系数 k_h 和竖直地震系数 k_v 的变化曲线。

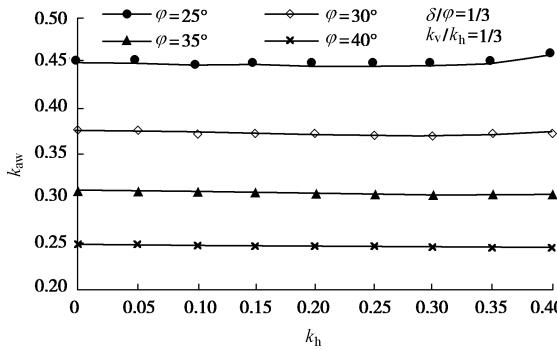


图 8 k_{aw} 随 k_h 和 φ 的变化

Fig. 8 Effects of horizontal seismic coefficient on k_{aw} under different φ

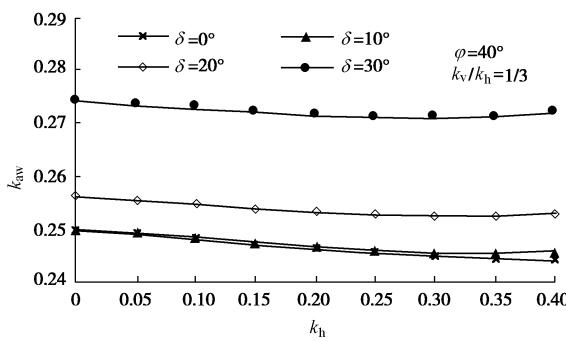


图 9 k_{aw} 随 k_h 和 δ 的变化

Fig. 9 Effects of horizontal seismic coefficient on k_{aw} under different δ

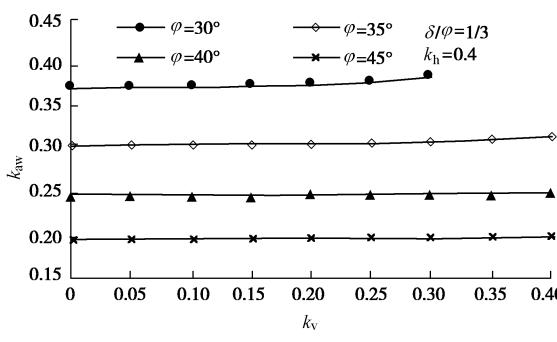


图 10 k_{aw} 随 k_v 和 φ 的变化

Fig. 10 Effects of vertical seismic coefficient on k_{aw} under different φ

由图 8~11 可以发现, RT 模式下地震主动侧压力系数 k_{aw} 的值始终在朗肯主动土压力系数 k_a 和静止土压力系数 k_0 两者之间。并且 k_{aw} 随着 φ 的增大而减小, 分别随着 δ 以及 k_v 的增大而增大, 而随着 k_h 的增大,

k_{aw} 先减小后增大。当 φ 接近 45° 时, 无论 k_h 和 k_v 如何变化, k_{aw} 的值几乎保持稳定不变。随着 δ 的增大, k_{aw} 的增大幅度也显著增加。

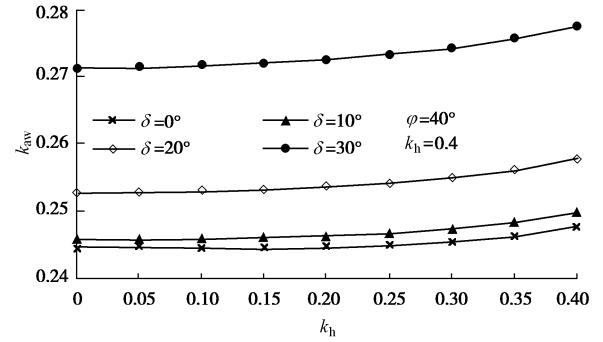


图 11 k_{aw} 随 k_v 和 δ 的变化

Fig. 11 Effects of vertical seismic coefficient on k_{aw} under different δ

4.3 水平微元土层间摩擦系数分析

根据式 (26) 可以得到水平微元土层间摩擦系数 $\tan \varphi'$ 。 φ , δ , k_h 以及 k_v 对 $\tan \varphi'$ 的影响见图 12, 图 13。

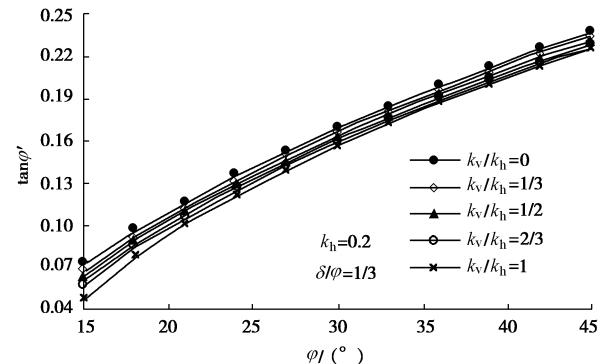


图 12 $\tan \varphi'$ 随 φ 和 k_v/k_h 的变化

Fig. 12 Effects of internal friction angle on $\tan \varphi'$ under different k_v/k_h

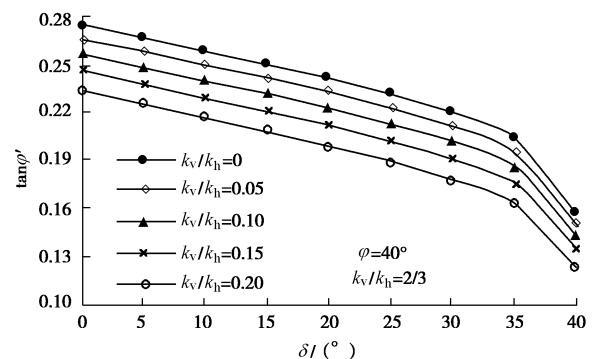


图 13 $\tan \varphi'$ 随 δ 和 k_h 的变化

Fig. 13 Effects of wall-soil friction angle on $\tan \varphi'$ under different k_h

从图 12 可以看到, 随着内摩擦角 φ 从 15° 增加至 45° , 竖直地震系数 k_v 从 k_h 减小至 0, 水平微元土层间摩擦系数 $\tan \varphi'$ 的值从 0.05 增加至 0.24。从图 13

可以看到, 随着墙土摩擦角 δ 从 0 增加至 φ , 水平地震系数 k_h 从 0 增加至 0.2, 水平微元土层间摩擦系数 $\tan \varphi'$ 的值从 0.275 减小至 0.12, 其值远远小于 $\tan \varphi = \tan 40^\circ = 0.84$ 。比较图 12, 13 也可以明显看出, 相较于 k_v , 显然 k_h 对 $\tan \varphi'$ 的变化幅度影响较大。

4.4 地震主动土压力的分布

地震主动侧土压力在挡墙上的分布随内摩擦角 φ , 墙土摩擦角 δ , 水平地震系数 k_h 和竖直地震系数 k_v 的变化曲线见图 14~17。

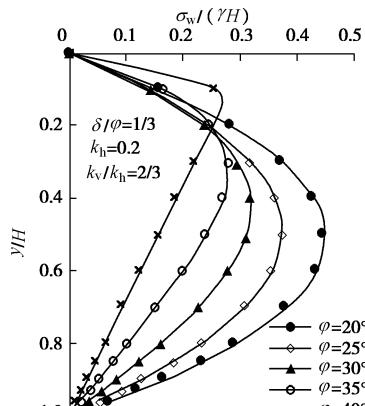


图 14 地震主动土压力随 φ 的分布

Fig. 14 Distribution of seismic active earth pressure with φ

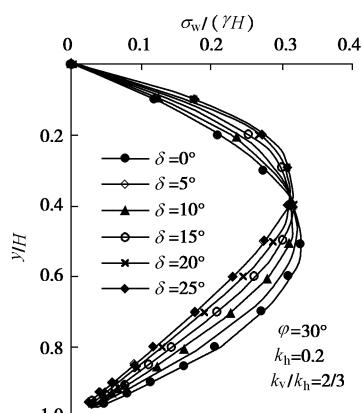


图 15 地震主动土压力随 δ 的分布

Fig. 15 Distribution of seismic active earth pressure with δ

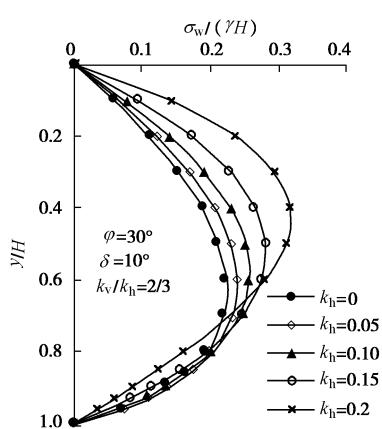


图 16 地震主动土压力随 k_h 的分布

Fig. 16 Distribution of seismic active earth pressure with k_h

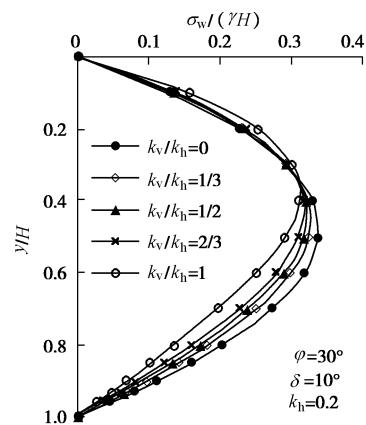


图 17 地震主动土压力随 k_v/k_h 的分布

Fig. 17 Distribution of seismic active earth pressure with k_v/k_h

从图 14~17 可以发现, 地震侧土压力大部分集中在挡土墙中上部, 侧土压力强度最大值也发生在挡土墙中上部, 这与 Sherif 等^[3]以及 Ishibashi 等^[4]的 RT 模式下的模拟地震状况的振动台试验结论一致。从图 14, 15 可看出, 地震主动侧土压力分别随 φ 和 δ 的增大呈减小趋势, $\sigma_w / (\gamma H)$ 变化曲线和纵坐标轴所组成的图形形心逐渐升高, 但是可以看出 φ 对其分布的影响更加显著。由图 16, 17 可知, k_h 越大, 地震侧土压力表现出变大的趋向, 而且越接近挡墙中上部, 增大的幅度越显著, $\sigma_w / (\gamma H)$ 变化曲线和纵坐标轴所形成的图形形心不断升高。地震侧土压力随着 k_v 的增大显示出略微的减小, 在挡土墙中上部, 减小幅度相对比较明显。相对于 k_v , k_h 对土压力的影响更大。从图 14~17 还可以看出, 地震侧土压力的最大值在挡墙上的作用高度分别随着 φ , δ , k_h 和 k_v 的增大而升高。

4.5 地震主动侧压力合力作用点高度分析

根据式 (41) 可以求得地震主动侧压力合力作用点高度。不同的 φ , δ , k_h 以及 k_v 下 h/H 的变化如图 18, 19 所示。

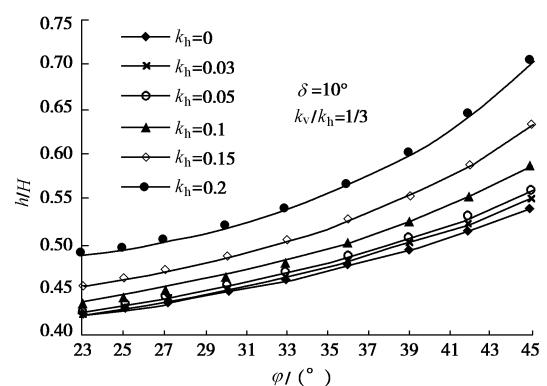


图 18 地震主动侧压力作用点高度随 φ 和 k_h 的变化

Fig. 18 Change of height of application of lateral seismic active earth pressure with φ under different k_h

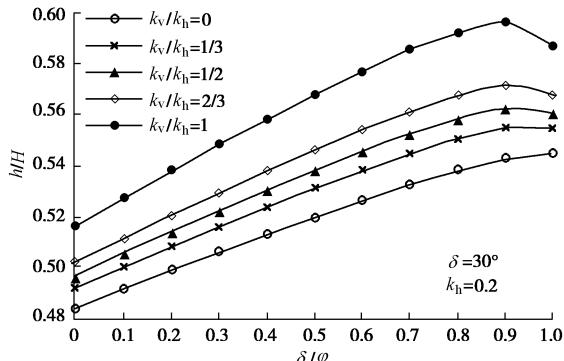


图 19 地震主动侧压力作用点高度随 δ/φ 和 k_v/k_h

Fig. 19 Change of height of application of lateral seismic active earth pressure with δ/φ under different k_v/k_h

从图 18, 19 可以看出, RT 模式下的总地震主动侧压力作用点高度始终大于 $1/3$ 墙高, 这与大量理论成果以及模型试验的结果都是相吻合的。由图 18 可知, 合力作用点高度分别随着 φ 和 k_h 的增大显示出增大的趋势, 且随着 k_h 的增大 h/H 越近似线性增加。由图 19 可知, 随着 k_v 的变大, 合力作用点高度也不断提高; 在 $\delta/\varphi > 0.9$ 时, 合力作用点高度随着 δ 的增大而逐渐升高, 当 $\delta/\varphi < 0.9$ 时, 曲线迅速下弯, 这说明本文的地震主动土压力受力模型不适合 $\delta/\varphi > 0.9$ 的情况, 因为本文认为墙土界面是一个滑移面, 而在这种情况下墙土界面不可能发生滑移。

5 结 论

(1) 选取旋转挡土墙解析模型的方法, 用非动力状况下主动土压力解析法来分析地震动力状况下主动土压力问题, 在很大程度上减小了地震土压力求解过程的复杂性。提出改进的 RT 模式下小主应力轨迹线, 并在计算中考虑滑移土层间的剪力作用, 使地震土压力算法更趋于准确和完善。

(2) 分析地震系数、土体内摩擦角、墙土间摩擦角对地震破裂角、地震侧压力系数、微元土层间摩擦系数、地震土压力分布、土压力合力和总侧土压力作用位置的影响, 结果表明这 4 种参数对挡墙动土压力都有着不可忽视的影响, 其中, 相对于竖直地震系数, 水平地震系数对挡墙动土压力的影响更为显著; 相对于墙土间摩擦角, 填土的内摩擦角对其影响更为显著。

(3) 本文建立了一种挡墙地震土压力的近似算法, 与其他理论算法相比, 本算法与实验数据吻合程度更高, 可供实际工程参考应用。

参考文献:

[1] OKABE S. General theory of earth pressure[J]. Journal of the

- Japanese society of Civil Engineers, 1926, **12**(1): 123 - 134.
- [2] MONONOBE N, MATSUO H. On the determination of earth pressure during earthquakes[C]// Proceedings of the World Engineering Conference. Tokyo, 1929: 179 - 187.
- [3] SHERIF M A, FANG Y S. Dynamic earth pressure on walls rotation about top[J]. Soils and Foundations, 1984, **24**(4): 109 - 117.
- [4] ISHIBASHI I, FANG Y S. Dynamic earth pressures with different wall movement modes[J]. Soils and Foundations, 1987, **27**(4): 11 - 22.
- [5] 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.
- [6] CHOUDHURY D, SINGH S. New approach for estimation of static and seismic active earth pressure[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, **24**: 117 - 127.
- [7] CALTABIANO S, CASCONE E, & MAUGERI M. Static and seismic limit equilibrium analysis of sliding retaining walls under different surcharge conditions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **37**(6): 38 - 55.
- [8] ISKANDER M, CHEN Z, OMIDVAR M, et al. Active static and seismic earth pressure for $c-\varphi$ soils[J]. Soils and Foundations, 2013, **53**: 639 - 652.
- [9] GHOSH S, DEBNATH C. Pseudo-static analysis of reinforced earth retaining wall considering non-linear failure surface[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, **34**(4): 981 - 990.
- [10] 林宇亮, 杨果林, 赵炼恒, 等. 地震动土压力水平层分析法[J]. 岩土力学, 2010, **29**(12): 2581 - 2591. (LIN Yu-liang, YANG Guo-lin, ZHAO Lian-heng, et al. Horizontal slices analysis method for seismic earthpressure calculation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **29**(12): 2581 - 2591. (in Chinese))
- [11] 孙 勇. 地震条件下挡土墙主动土压力及其分布的统一解[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 255 - 261. (SUN Yong. Unified solution of seismic active earth pressure and its distribution on a retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 255 - 261. (in Chinese))
- [12] 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))

- [13] 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))
- [14] 卢坤林, 杨 扬, 朱大勇, 等. 考虑土拱效应的挡土墙地震土压力及其分布[J]. 水电能源科学, 2010, **28**(5): 65 – 68. (LU Kun-lin, YANG Yang, ZHU Da-yong, et al. Seismic earth pressure on retaining wall considering soil arching effects and its distribution[J]. Water Resources and Power, 2010, **28**(5): 65 – 68. (in Chinese))
- [15] 侯 键, 夏唐代, 陈炜昀, 等. 考虑土拱效应的挡土墙地震主动土压力静力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 1): 2825 – 2832. (HOU Jian, XIA Tang-dai, CHEN Wei-yun, et al. Static study of seismic active earth pressure on retaining walls considering soil arching effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S1): 2825 – 2832. (in Chinese))
- [16] 黄 睿, 夏唐代. 无黏性土的地震主动土压力水平层法改[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, **46**(2): 85 – 91. (HUNG Rui, XIA Tang-dai. Improved horizontal slice method for seismic active earth pressure of cohesionless soil[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, **46**(2): 85 – 91. (in Chinese))
- [17] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 – 318.
- [18] 蒋 波, 应宏伟, 谢康和. 挡土墙后土体拱效应分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, **39**(1): 131 – 136. (JIANG Bo, YING Hong-wei, XIE Kang-he. Arching effect behind retaining wall[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, **39**(1): 131 – 136. (in Chinese))
- [19] CAI Y, CHEN Q, ZHOU Y, et al. Estimation of passive earth pressure against rigid retaining wall considering arching effect in cohesive-frictional backfill under translation mode[J]. International Journal of Geomechanics, 2016:04016093.
- [20] 俞 缙, 周亦涛, 蔡燕燕, 等. 基于土拱效应的刚性挡墙后主动土压力[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 for rigid retaining wall considering soil arching effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2306 – 2310. (in Chinese))
- [21] ZHOU Y, CHEN Q, CHEN F, et al. Active earth pressure on translating rigid retaining structures considering soil arching effect[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2016: 1 – 17.
- [22] GOEL S, PATRA N R. Effect of arching on active earth pressures for rigid retaining walls considering translation mode[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, **8**(2): 123 – 133.
- [23] 张永兴, 陈 林. 地震作用下挡土墙主动土压力分布[J]. 深圳大学学报(理工版), 2012, **29**(1): 31 – 37. (ZHANG Yong-xing, CHEN Lin. Seismic active earth pressure of retaining wall[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2012, **29**(1): 31 – 37. (in Chinese))
- [24] 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))