

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.075



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



有限土体地震主动土压力的拟动力分析

夏琼^{a,b}, 冯晓慧^b, 刘德仁^b

(兰州交通大学 a. 土木工程国家级实验教学示范中心; b. 土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 地震主动土压力为震区支挡结构抗震设计的主要荷载, 现有地震土压力计算理论主要针对半无限填土, 不适用于有限土体。结合拟动力法与水平微分单元法, 考虑土拱效应建立微分方程, 采用有限元法进行数值求解, 重点分析主要参数对有限土体地震主动土压力分布的影响规律。结果表明: 计算有限土体地震主动土压力时, 最不利地震惯性力组合为竖向地震惯性力向下、水平地震惯性力指向挡土墙; 水平地震系数、有限土体宽度对土体地震主动土压力系数影响均较小; 水平地震系数、有限土体宽度、填土黏聚力、内摩擦角及墙土间外摩擦角对有限土体 II 区地震主动土压力分布影响显著; 地震波速仅影响有限土体地震主动土压力达到幅值的时间。

关键词: 有限土体; 地震土压力; 拟动力方法; 水平微分单元法

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)05-0081-09

Pseudo-dynamic analysis of seismic active earth pressure of limited soil

XIA Qiong^{a,b}, FENG Xiaohui^b, LIU Deren^b

(a. National Demonstration Center for Experimental Civil Engineering Education; b. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: The seismic active earth pressure is the primary load for the seismic design of retaining structures in seismic zones. The prevailing calculation theories of seismic earth pressure focus on semi-infinite backfill, which makes them unsuitable for calculating the seismic earth pressure of limited soil. Combining the pseudo-dynamic method with the horizontal differential element method, this paper establishes differential equations considering the soil arching effect, solves them numerically with the finite element method, and analyzes in detail the influence laws of main parameters on the distribution of seismic active earth pressure in limited soil. The results show that when calculating the seismic active earth pressure of limited soil, the most unfavorable combination of seismic inertial forces is downward vertical seismic inertial force and horizontal seismic inertial force pointing towards the retaining wall. The influences of the horizontal seismic coefficient and the width of limited soil on the seismic active earth pressure coefficient are relatively small. The effects of the horizontal seismic coefficient, the width of limited soil, the cohesion of backfill, the internal friction angle and the external friction angle

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(42362033); 中铁科学研究院科技项目(2023-KC-02)

作者简介: 夏琼(1977-)女, 博士, 主要从事岩土工程研究, E-mail: xemily@163.com。

刘德仁(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: liuderen@mail.lzjtu.cn。

Received: 2025-01-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42362033); Scientific and Technological Research Program of China Railway Academy (No. 2023-KC-02)

Author brief: XIA Qiong (1977-), PhD, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: xemily@163.com.

LIU Deren (corresponding author), PhD, professor, E-mail: liuderen@mail.lzjtu.cn.

between the wall and soil on the seismic active earth pressure in Zone II of limited soil are significant. The seismic wave velocity only affects the time when the seismic active earth pressure of limited soil reaches its amplitude.

Keywords: limited soil; seismic earth pressure; pseudo-dynamic method; horizontal differential element method

当新建基坑临近既有地下室,或道路路基修筑于基岩地段时,支挡结构后方填土范围受限,会承受有限土体土压力。与半无限填土相比,有限填土对支挡结构的主动土压力会明显偏小^[1-2],基于半无限填土的经典土压力理论不再适用于有限填土。地震作用属于随机荷载,随时间、空间发生变化,使得有限土体地震土压力计算更加复杂^[3]。现行规范普遍采用拟静力法计算地震惯性力,将地震作用等效为静力作用,无法反映其动力特性;同时,该方法假定支挡结构后方填土剪切模量足够大,与实际情况不符^[4]。拟动力方法以拟静力法为基础^[5],假设地震加速度随时间、空间(沿挡墙深度方向)均呈正弦函数变化,能更加合理地考虑地震作用的动力特性。

众多学者针对支挡结构后方有限土体主动土压力的计算进行研究。高印立^[6]假定建筑物附近地下室的外墙与土体完全脱离,基于土的塑性上限理论得出有限土体土压力计算公式。应宏伟等^[7]利用有限元法对有限土体土压力开展研究后发现,极限状态下破裂土楔体与地下室外墙并未完全脱离,填土内部存在多条滑裂面;据此提出有限土体主动土压力计算公式,但未考虑土拱效应的影响。赵琦等^[8]考虑了土拱效应,采用水平微分层析法推导出有限土体主动土压力解,但其假定填土滑裂面与水平面夹角为常数。徐日庆等^[9]采用水平薄层分析法,考虑非极限状态下的土拱效应,得到有限土体主动土压力解。赖丰文等^[10]对上部未滑裂区采用弯曲微分单元法,下部滑裂区采用滑裂体极限平衡法,综合考虑土拱效应与水平剪切力,提出有限土体主动土压力的普适解法。张恒志等^[11]采用离散元法对不同变位模式下挡墙的有限土体主动土压力开展数值模拟。可见,有限土体土压力的静力研究成果较多,研究方法较完善。

Steedman等^[12]假定挡墙后方填土为弹性体,且地震加速度呈正弦函数变化,提出了土压力的拟动力分析法。Zeng等^[13]采用离心模型试验,进一步验证了拟动力法能更真实地反映地震作用的动力特性和挡墙后土压力的分布规律。何思明等^[14]结合薄层单元法与极限平衡理论,利用拟动力法得出地震作用下挡墙后方土压力随时程变化的计算公式。王浩等^[15]基于均匀土层剪切梁理论,提出改进的挡

土墙地震土压力拟动力分析方法。Gupta等^[16]采用拟动力法研究土体放大效应对地震土压力的影响,提出墙背倾斜挡土墙地震主动土压力分布的通用计算公式。苗晓燕等^[17]基于塑性理论上限法与拟静力法,综合考虑墙背倾斜粗糙、填土后岩层面和墙后填土面倾斜,得出有限土体地震主动土压力的上限解。以上研究多采用拟动力法求解半无限填土的地震土压力问题,或采用拟静力法分析有限填土的地震土压力问题,针对有限填土地震土压力的拟动力法研究仍较为匮乏。

黄睿等^[18]结合拟动力法与水平层分析法,推导了RT(绕墙顶转动)变位模式下非极限地震主动土压力的计算公式。彭晓钢等^[19]针对非均质各向异性填土,基于离散法与极限分析上限定理,引入拟动力法考虑地震作用对主动土压力的影响。Nandi等^[20]结合竖向条分法与极限平衡法,提出新的地震被动土压力计算模型,对比所得数值解与已有试验结果,验证了该方法的合理性。杨宇哲等^[21]基于水平层分析法与拟动力法,提出了RB(绕墙底转动)位移模式下非极限地震被动土压力的拟动力计算方法。Xiao等^[22]基于刚性墙后土体的极限平衡状态与拟静力法,采用变分法,提出了考虑挡墙后土体剪切与张拉破坏的地震主动土压力计算方法。现有研究多结合地震分析方法与水平微分单元法计算特殊情况下的地震土压力。但关于最不利竖向地震惯性力方向的选取仍存在争议,王志凯^[23]从最危险滑动面倾角与最不利动土压力系数角度出发,确定该惯性力方向向上,亦有研究者认为其方向向下^[24]。

笔者在已有研究基础上采用拟动力法与水平微分单元法建立有限土体地震主动土压力的微分方程,同时考虑土拱效应,结合不同地震惯性力方向组合的分析结果,确定其最不利方向;采用数值方法求解,并将试验结果与其他理论解进行对比,验证该方法的合理性。通过主要参数分析,揭示有限土地震主动土压力的分布规律,可为震区有限土体刚性挡墙的设计与加固提供理论参考。

1 有限土体地震主动土压力分析

1.1 地震加速度

采用拟动力法分析地震作用下有限土体的主

动土压力时,为简化计算,作如下假设:1)地震加速度随深度与时间均发生变化,加速度峰值沿墙高呈线性增大;2)挡墙为刚性结构,仅呈平动变位模式;3)滑裂面内填土为均质各向同性,填土剪切模量为常数。

基于上述假设,水平微单元土体受到的水平地震加速度 a_h 与竖向地震加速度 a_v 均为时间 t 和深度 z 的函数,其表达式分别为式(1)、式(2)。

$$a_h(z, t) = \left[1 + \frac{H-z}{H} (f_a - 1) \right] k_h g \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H-z}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

$$a_v(z, t) = \left[1 + \frac{H-z}{H} (f_a - 1) \right] k_v g \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H-z}{\eta} \right) \right] \quad (2)$$

式中: H 为挡墙高度; f_a 为地震加速度放大系数; k_h 为水平地震加速度系数; k_v 为竖向地震加速度系数; g 为重力加速度; T 为周期; λ 为填土剪切波长, $\lambda = TV_s$,其中 V_s 为土体剪切波波速; η 为填土压缩波波速, $\eta = TV_p$,其中 V_p 为土体压缩波波速。

1.2 土楔体受力模型

考虑土拱效应,采用水平微分单元法计算有限土体的地震土压力。为简化理论推导,作以下假设:1)挡墙位移模式为平动,地下室外墙无位移,挡墙与土体、土体与地下室外墙的外摩擦角均为 δ ,取 $\delta = \frac{1}{2}\varphi$,其中 φ 为填土内摩擦角;2)挡墙与土体、地下室外墙与土体的黏聚力均为 c_w ,取 $c_w = \frac{c \tan \delta}{\tan \varphi}$,其中 c 为填土黏聚力;3)墙后填土面与墙顶齐平;4)墙后填土内形成小主应力拱,拱型取圆弧形;5)不考虑水平微分层间的剪应力。

当墙后填土宽度有限,且挡墙位移使土体达到主动极限平衡状态时,填土内滑裂面无法延伸至填土表面,将滑裂土楔体划分为I区、II区,如图1所示。在任意深度 z 处取水平微分单元土层进行分析,厚度为 dz ;I区、II区的水平微分单元土层分别

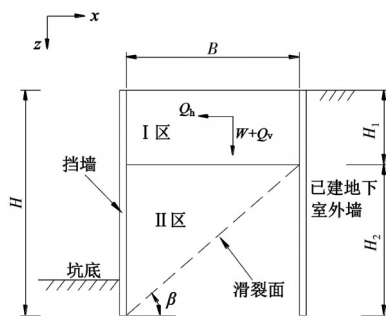


图1 有限土体计算模型

Fig. 1 Calculation model of finite soil

为矩形、梯形,力学模型如图2所示。图中 W 为土体重力, Q_h 为水平地震惯性力, Q_v 为竖向地震惯性力, $\bar{\sigma}_v$ 为竖向平均应力, σ_h 为挡墙侧水平应力, σ'_h 为地下室外墙侧水平应力, τ_{w1} 为挡墙与填土间的剪应力, τ_{w2} 为地下室外墙与填土间的剪应力, τ 为滑裂面上的剪应力, σ_F 为滑裂面上的法向应力。

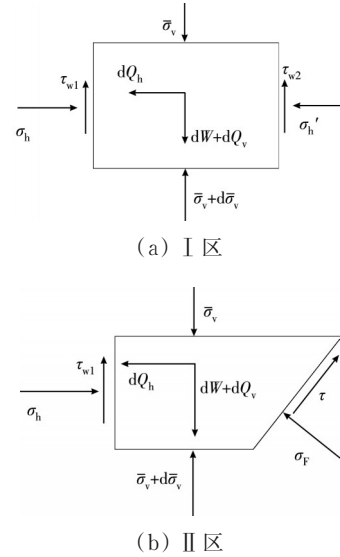


图2 水平微分单元土层的力学模型

Fig. 2 Mechanical model of horizontal differential soil element

地震惯性力作用方向呈动态变化,为保障挡墙稳定,分析时应选取其最不利受力方向。对于主动土压力,最不利水平地震惯性力 Q_h 的方向指向挡墙,而目前关于最不利竖向地震惯性力 Q_v 的方向仍存在不同观点,本文通过分析发现其最不利方向为向下。

1.3 侧向主动土压力系数

挡墙墙背与填土间存在的摩擦导致填土内产生土拱效应。在主动土压力状态下,作用于墙背的水平向应力不再为小主应力,大、小主应力方向均发生偏离,采用圆弧形的小主应力拱迹线进行分析,如图3所示。

定义侧向主动土压力系数 K_{aw} 为水平应力 σ_h 与平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 之比;根据小主应力拱迹线,可得 K_{aw} 的表达式,见式(3)。

$$K_{aw} = \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}_v} = \frac{(\cos^2 \theta_A + K_a \sin^2 \theta_A) - \frac{c}{\gamma z \tan \varphi + c}}{\frac{\gamma z \tan \varphi}{\gamma z \tan \varphi + c} - \frac{(\cos^2 \theta_A + \cos \theta_A \cos \theta_B + \cos^2 \theta_B)}{3} (1 - K_a)} \quad (3)$$

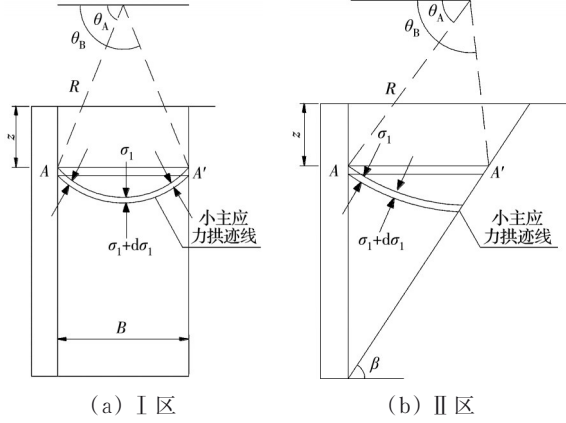


图 3 小主应力拱迹线

Fig. 3 Trace line of minor principal stress arch

式中: γ 为填土重度; K_a 为朗肯主动土压力系数; θ_A 、 θ_B 为有限土体两侧的主应力偏转角, 其中 θ_A 见式(4), θ_B 在 I、II 区不相等, 因挡墙、地下室外墙与土体间的外摩擦角均为 δ , 故 I 区 $\theta_B = (\pi - \theta_A)$, II 区 θ_B 见式(5)。

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

$$\theta_B = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} + \beta \quad (5)$$

式中: β 为土体破裂面与水平面夹角。

1.4 地震主动土压力

根据图 2 的水平微分单元土层受力模型建立力平衡方程, 可得平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 的微分方程, 结合边界条件求解该方程。

图 2(a) 为 I 区矩形单元层, 建立竖向力平衡方程并整理, 可得式(6)。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{\sigma}_v}{dz} &= A\bar{\sigma}_v + C\gamma \\ A &= -\frac{2K_{aw}\tan\delta}{B} \\ C &= 1 - \frac{a_v(z,t)}{g} - \frac{2c\tan\delta}{B\gamma\tan\varphi} + \frac{\tan\delta}{g} a_h(z,t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: B 为有限土体宽度。

挡墙后填土为黏性土时, 土体自填土表面向下产生裂缝, 裂缝区域内 $\sigma_h = 0$, 裂缝深度 z_c 可按式(7)计算。求解 I 区 $\bar{\sigma}_v$ 的微分方程式(6)时, 边界条件为: 在 $z = z_c$ 处, $\bar{\sigma}_v = \gamma z_c$ 。

$$z_c = \frac{c}{\gamma \tan \varphi} \cdot \frac{(1 - K_a) \sin^2 \theta_A}{\cos^2 \theta_A + K_a \sin^2 \theta_A} \quad (7)$$

图 2(b) 为 II 区梯形单元层, 建立水平、竖向力平衡方程, 经简化整理得式(8)。求解 II 区 $\bar{\sigma}_v$ 的微分方程式(8)时, 边界条件为: 在 $z = H_1$ 处, $\bar{\sigma}_v$ 按 I 区的式(6)计算。

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\sigma}_v}{dz} &= E\bar{\sigma}_v + F\gamma \\ E &= \frac{1}{H-z} - \frac{K_{aw}\tan\beta}{H-z} \left(\tan\delta + \frac{1 + \tan\beta\tan\varphi}{\tan\beta - \tan\varphi} \right) \\ F &= 1 - \frac{a_v(z,t)}{g} + \frac{(1 + \tan\beta\tan\varphi)}{(\tan\beta - \tan\varphi)} \frac{a_h(z,t)}{g} - \\ &\quad \frac{c}{\gamma(H-z)} \left(\frac{1}{\tan(\beta - \varphi)} + \tan\beta + \frac{\tan\delta}{\tan\varphi} \tan\beta \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式(6)、式(8)采用数值方法求解, 求得 $\bar{\sigma}_v$ 后再由式(3)计算 σ_h 。

对 σ_h 积分求和, 可得水平地震主动土压力合力 E_{ax} , 见式(9); 地震主动土压力合力 E_a 按式(10)计算; 地震主动土压力合力作用点距墙底的高度 h_c 按式(11)计算。

$$E_{ax} = \int_{z_c}^H \sigma_h dz \quad (9)$$

$$E_a = \frac{E_{ax}}{\cos\delta} \quad (10)$$

$$h_c = \frac{\int_{z_c}^H \sigma_h (H-z) dz}{E_{ax}} \quad (11)$$

2 合理性验证

若取 $k_h = 0$ 、 $k_v = 0$, 该方法可简化为不考虑地震作用下有限土体主动土压力的计算; 当填土面足够宽, 即 $B \geq H/\tan\beta$ 时, 该方法可简化为半无限空间地震主动土压力的计算; 当上述两项条件同时成立时, 该方法可简化为不考虑地震作用下半无限空间主动土压力的计算。Fang 等^[25]采用模型试验测得平动模式下半无限空间主动土压力, 张雯萍等^[26]采用拟静力法推导出地震作用下半无限空间主动土压力的计算公式, 二者主动土压力均可采用该方法计算。文献[25]模型试验的参数 $\gamma = 15.54 \text{ kN/m}^3$, $c = 0$, $\varphi = 34^\circ$, $H = 1.015 \text{ m}$, $\delta = 17^\circ$, $k_h = 0$, $k_v = 0$; 将该方法得到的计算结果与模型试验结果进行对比, 结果如图 4(a) 所示。

从图 4(a) 可知, 在 $0 \sim 0.6H$ 范围内, 该方法所得主动土压力与实测结果的分布趋势相似, 二者均沿深度呈增大趋势, 且数值差异较小; 在 $0.6H \sim 1.0H$ 范围内, 二者数值差异显著, 这是由于模型试验条件和理论计算假定并非完全一致; 不考虑地震作用时, 该方法与张雯萍等^[26]计算所得的半无限空间主动土压力结果基本一致, 这是因为两种方法的主要区别仅限于考虑地震惯性力时采用的计算方法不同。取地震参数 $k_h = 0.2$, $k_v = k_h/2$, $T = 0.167 \text{ s}$,

$f_a=1.0$; 土体参数 $V_s=200$ m/s, $V_p=375$ m/s, 墙高 $H=3$ m; 其余参数同文献[25], 计算地震作用下半无限空间主动土压力。采用拟动力法分析时, 地震主动土压力随时间呈周期性波动, 为与拟静力法计算结果对比, 该方法的计算结果均取一个周期内 σ_h 极大值对应的工况, 如图4(b)所示。从图4(b)可知, 当 Q_v 方向相同(即向上), 且 $f_a=1.0$ 时, 该拟动力法计算所得的 σ_h 与张雯萍等^[26]采用拟静力法的计算结果吻合, 间接验证了该方法的准确性; 拟静力法计算的 σ_h 为不考虑地震加速度沿墙高放大效应下一个周期内的 σ_h 极大值; 当 Q_v 向下时, 该拟动力法计算所得的 σ_h 更大, 可见 Q_v 作用方向的合理选取仍有待进一步研究。

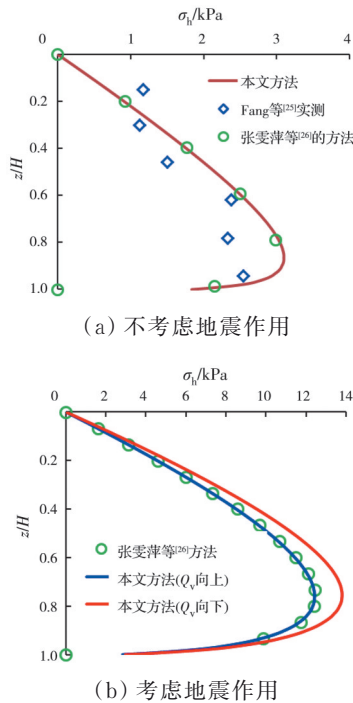


图4 半无限空间主动土压力分布对比

Fig. 4 Comparison of active earth pressure distribution of semi-infinite space

3 地震惯性力方向

a_h 、 a_v 均按周期相等的正弦函数变化; 在同一深度处, 一个周期内 a_h 、 a_v 在不同时刻各变换一次方向, 变换时刻分别与 λ 、 η 有关, 进而形成不同的地震惯性力方向组合。为分析最不利地震惯性力方向组合, 取水平地震惯性力 Q_h 向左, 竖向地震惯性力 Q_v 分别向上、向下, 由此可在一个周期内实现 Q_h 、 Q_v 的所有方向组合(4种); 计算得到一个振动周期内 σ_h 随时间的波动规律, 依据 σ_h 最大值原则确定最不利地震惯性力方向组合。取地震参数 $k_h=0.2$, $k_v=k_h/2$, $f_a=1.2$, $T=0.167$ s; 土体参数 $\gamma=20$ kN/m³,

$c=20$ kPa, $\varphi=20^\circ$, $\delta=\varphi/2$, $V_s=200$ m/s, $V_p=375$ m/s, $B=3$ m, 墙高 $H=10$ m, 计算结果如图5所示。

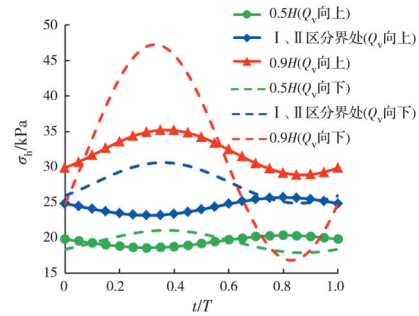


图5 不同 Q_v 方向下的 σ_h

Fig. 5 σ_h under different directions of Q_v

由图5可知, 当 Q_v 向下时, 不同深度处 σ_h 均在 $0.35T$ 时刻达到峰值; σ_h 峰值均高于 Q_v 向上工况对应的结果, 且深度越大, 两种工况下 σ_h 峰值差值越显著。结合 a_h 、 a_v 时程函数分析, $0.35T$ 时刻满足 $a_v>0$ 、 $a_h>0$, 此时 Q_v 、 Q_h 作用方向均与假设方向一致。因为取 Q_v 向下、 Q_h 向左计算时, 此时 Q_v 真正的方向向下, Q_h 真正的方向向左, 这就是 Q_v 、 Q_h 所有方向组合中 σ_h 峰值最大的组合。因此, 在地震加速度变化模式下计算地震主动土压力时, 最不利地震惯性力组合取 Q_v 向下、 Q_h 向左。

4 影响参数分析

在分析某个参数时, 均取 $t=0.35T$ 时 σ_h 达到极大值对应的结果。

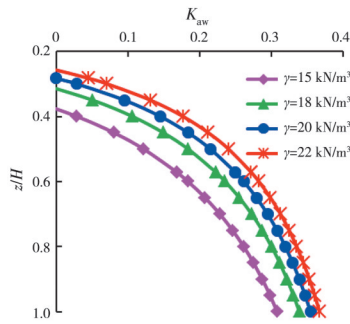
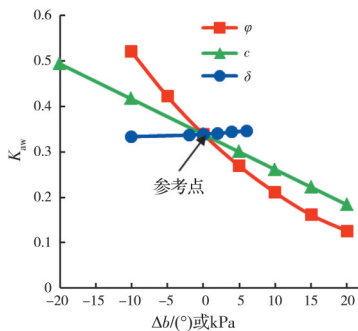
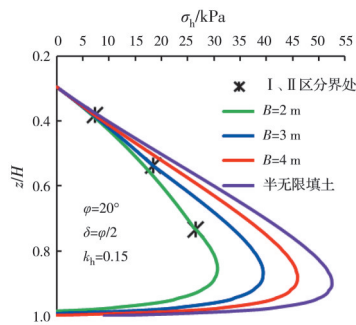
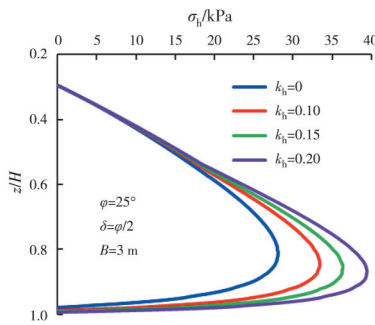
4.1 有限土体地震主动土压力系数

从式(3)可知, K_{aw} 与 c 、 φ 、 δ 、 β 、 γ 、 z 均相关。其中, β 决定 II 区的高度, 同时影响 II 区内 K_{aw} 取值。分析 K_{aw} 随 β 的变化规律可知, β 的变化对 II 区内 K_{aw} 影响微弱, 可忽略。由于 k_h 、 k_v 、 B 均通过改变 β 间接影响 K_{aw} , 故三者对 K_{aw} 的影响同样较小。不同 γ 对应的 K_{aw} 沿深度变化曲线如图6所示。从图6可知, K_{aw} 随深度单调递增, 曲线整体呈外凸形态; 同一深度处, K_{aw} 随 γ 的增大而增大。分析 c 、 φ 、 δ 对 K_{aw} 的影响规律时, 取 $z=0.9H$ 开展计算, 参考点参数为 $c=20$ kPa、 $\varphi=20^\circ$ 、 $\delta=10^\circ$; 定义相对差 Δb 为计算点参数与参考点对应参数的差值, 结果如图7所示。从图7可知, K_{aw} 随 c 、 φ 的增大而减小, 随 δ 的增大而增大; 相较 δ , φ 对 K_{aw} 的影响更为显著。

4.2 有限土体地震主动土压力分布

有限土体地震主动土压力 σ_h 沿深度分布随 B 、 k_h 的变化曲线分别如图8、图9所示。

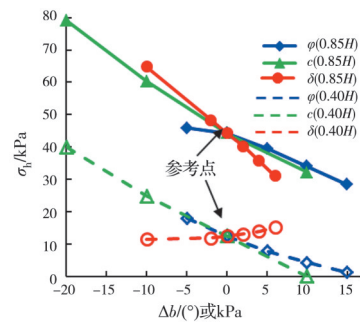
从图8可知, 有限土体地震主动土压力 σ_h 沿深

图 6 不同 γ 对应 K_{aw} 沿深度的分布曲线Fig. 6 Distribution curves of K_{aw} under different γ 图 7 K_{aw} 随不同参数的变化曲线Fig. 7 Variation curves of K_{aw} with different parameters图 8 不同 B 对应的 σ_h 分布Fig. 8 Distribution of σ_h under different B 图 9 不同 k_h 对应的 σ_h 分布Fig. 9 Distribution of σ_h under different k_h

度呈外凸形非线性分布,数值先增大后减小, σ_h 最大值出现在靠近挡墙底部的位置。随着有限土体宽度 B 的增加, I 区范围缩小, σ_h 最大值增大;当墙后填土达到半无限状态时, I 区消失,土体全部为 II 区, σ_h 不再受 B 影响。从图 9 可知,地震作用并未改变 σ_h 的分布形状;随着 k_h 的增大, σ_h 整体呈增大趋

势。墙身不同高度处, k_h 对 σ_h 的影响效果存在差异;不同 k_h 下 I、II 区分界处均在 $0.5H$ 附近, I 区内 σ_h 基本不受 k_h 影响, II 区内 k_h 影响效果显著。

明确 σ_h 沿深度分布的形状后,为分析 c 、 φ 、 δ 对 σ_h 分布规律的影响,取参考点 $c=20$ kPa、 $\varphi=20^\circ$ 、 $\delta=10^\circ$,分别取 $z=0.4H$ (I 区)、 $0.85H$ (II 区) 时的计算结果,如图 10 所示。从图 10 可知,在 $z=0.85H$ 处, σ_h 均随 c 、 φ 、 δ 的增加呈减小趋势,且相较 φ 、 δ 对 σ_h 的影响更为显著;在 $z=0.4H$ 处, σ_h 随 δ 的增加呈增大趋势,但增加斜率较小,显著小于 $z=0.85H$ 处 σ_h 随 δ 减小的斜率, $z=0.4H$ 处 σ_h 随 c 、 φ 的变化趋势与 $z=0.85H$ 处一致,变化斜率基本相等。墙-土接触面存在摩擦作用,致使墙后填土内部的主应力方向发生偏转,进而形成土拱效应; δ 越大,墙-土界面摩擦作用越强,土拱效应越显著,且土拱效应有利于墙体稳定^[27]。

图 10 σ_h 随不同参数的变化曲线Fig. 10 Variation curves of σ_h with different parameters

随着 B 、 k_h 的增加, σ_h 分布图形重心均呈下移趋势,即有限土体地震主动土压力合力作用点高度 h_c 随之降低;水平主动土压力合力同步增加,二者综合作用使总倾覆力矩呈增大趋势。随着 c 、 φ 的增加,有限土体地震主动土压力合力作用点高度 h_c 均呈下移趋势;水平主动土压力合力同步减小,总倾覆力矩随之减小。随着 δ 的增大, h_c 向上移动,水平主动土压力合力呈减小趋势,总倾覆力矩仍呈减小趋势。

4.3 地震波波速的影响

墙后土体地震剪切波波速主要由土体密度、剪切模量决定,压缩波波速 V_p 与剪切波波速 V_s 的比值与土体泊松比 μ 相关^[28]。从式(1)、式(2)可知,剪切波波速、压缩波波速分别影响 a_h 、 a_v 的时空分布,进而影响地震土压力分布。根据文献[28]给出的土体 V_s 取值范围,取 $V_s=100$ 、 200 、 300 、 500 m/s,按 $\mu=0.3$ 确定 $V_p/V_s=1.87$,计算一个周期内地震土压力 σ_h 。 σ_h 最大值位于 $z=0.9H$ 处,取该处的 σ_h 进

行分析,结果如图11所示。由图11可知, V_s 对 σ_h 的幅值影响较小;对 σ_h 的峰值时刻影响显著。当 $V_s < 200$ m/s时, σ_h 峰值滞后时间随 V_s 的减小而增长;当 $V_s > 200$ m/s时, V_s 对 σ_h 峰值时刻基本无影响。综上,地震波波速对 σ_h 的幅值影响较小,主要改变 σ_h 达到幅值的时间。

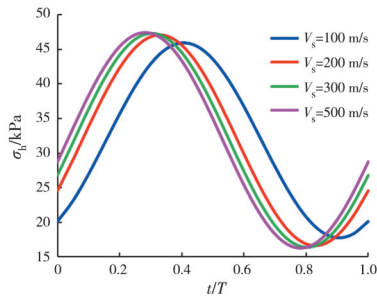


图11 $z=0.9H$ 处不同 V_s 对应的 σ_h 时程曲线

Fig. 11 σ_h under different V_s at $z=0.9H$

5 结论

针对有限填土,考虑刚性挡墙后填土的土拱效应,采用水平层微单元法推导有限土体地震主动土压力拟动力计算公式,并验证其合理性;通过分析主要影响参数,揭示有限土体地震主动土压力的分布规律。得到主要结论如下:

1)采用拟动力法计算有限土体地震主动土压力时,最不利地震惯性力方向组合为: Q_v 竖直向下, Q_h 指向挡土墙。

2)地震参数与有限土体宽度对地震主动土压力系数的影响均较小;填土重度、黏聚力、内摩擦角及墙-土间外摩擦角对该压力系数的影响显著,且相较填土内摩擦角,墙-土间外摩擦角的影响更为显著。

3)有限土体Ⅱ区地震主动土压力受上述参数影响显著,相较填土内摩擦角,墙-土间外摩擦角的影响更为显著;地震波波速影响 σ_h 达到幅值的时间。

4)建立了一种有限土体地震主动土压力计算方法,利用已有试验数据验证了该方法的合理性,可为填土受限刚性支挡结构的抗震计算提供理论参考。

参考文献

- [1] 梁发云, 华建, 李林, 等. 考虑土体有限宽度的邻近建筑基坑土压力计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(11): 1711-1719.
Liang F Y, Hua J, Li L, et al. Calculation method of earth pressure in adjacent building foundation excava-

tions considering finite soils[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(11): 1711-1719. (in Chinese)

- [2] 梁利生, 郭俊源, 王慧芳. 含柔性垫层的刚性挡土墙土压力计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 158-164.
Liang L S, Guo J Y, Wang H F. Calculation for lateral earth pressure on rigid retaining wall with flexible cushion [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 158-164. (in Chinese)
- [3] Siddalingeshwara D H, Chatterjee K. A critical review on static and seismic earth pressure of layered soil on retaining wall[C]//Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022 Volume 7. Singapore: Springer, 2024: 93-103.
- [4] 张常光, 关港辉, 李海祥, 等. 水位变化下含裂缝非饱和土挡墙的地震主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1575-1584.
Zhang C G, Guan G H, Li H X, et al. Seismic active earth pressure on a retaining wall in unsaturated soils with cracks for changing water table[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(6): 1575-1584. (in Chinese)
- [5] 王龙, 陈国兴, 冯健雪, 等. 地震作用下非饱和土主动土压力极限分析半解析法[J]. 地震工程学报, 2022, 44(6): 1309-1316, 1421.
Wang L, Chen G X, Feng J X, et al. Semi-analytical method for the limit analysis of active earth pressure of unsaturated soil under seismic action[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(6): 1309-1316, 1421. (in Chinese)
- [6] 高印立. 极限分析法计算有限范围土体土压力[J]. 建筑结构, 2001, 31(8): 66-68.
Gao Y L. Calculation of finite earth pressure with limit analysis method[J]. Building Structure, 2001, 31(8): 66-68. (in Chinese)
- [7] 应宏伟, 黄东, 谢新宇. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 2970-2978.
Ying H W, Huang D, Xie X Y. Study of active earth pressure on retaining wall subject to translation mode considering lateral pressure on adjacent existing basement exterior wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2970-2978. (in Chinese)
- [8] 赵琦, 朱建明. 临近地下室外墙影响下的考虑土拱效应的挡土墙主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 723-728.
Zhao Q, Zhu J M. Research on active earth pressure behind retaining wall adjacent to existing basements

- exterior wall considering soil arching effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 723-728. (in Chinese)
- [9] 徐日庆, 徐叶斌, 程康, 等. 有限土体下考虑土拱效应的非极限主动土压力解[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(2): 362-371.
- Xu R Q, Xu Y B, Cheng K, et al. Method to calculate active earth pressure considering soil arching effect under nonlimit state of clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(2): 362-371. (in Chinese)
- [10] 赖丰文, 刘松玉, 杨大禹, 等. 有限宽度填土挡墙主动土压力的普适解法[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(3): 483-491.
- Lai F W, Liu S Y, Yang D Y, et al. Generalized solution to active earth pressure exerted onto retaining wall with narrow backfills[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(3): 483-491. (in Chinese)
- [11] 张恒志, 徐长节, 何寨兵, 等. 基于离散元方法的不同挡墙变位模式下有限土体主动土压力研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(1): 257-267.
- Zhang H Z, Xu C J, He Z B, et al. Study of active earth pressure of finite soils under different retaining wall movement modes based on discrete element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 257-267. (in Chinese)
- [12] Steedman R S, Zeng X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(1): 103-112.
- [13] Zeng X, Steedman R S. Discussion: on the behaviour of quay walls in earthquakes[J]. *Géotechnique*, 1994, 44(3): 557-558.
- [14] 何思明, 王忠福, 王娟. 考虑地震加速度时程影响的挡土墙动土压力分布[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(4): 31-37.
- He S M, Wang Z F, Wang J. Research on the earth pressure distribution behind the retaining wall under seismic acceleration influence[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(4): 31-37. (in Chinese)
- [15] 王浩, 董建华, 王永胜, 等. 挡土墙地震土压力的拟动力分析[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18): 128-133.
- Wang H, Dong J H, Wang Y S, et al. Pseudo-dynamic analysis on seismic earth pressure of retaining wall[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 128-133. (in Chinese)
- [16] Gupta A, Sawant V A. Effect of soil amplification on seismic earth pressure using pseudo-dynamic approach [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 15(1): 40-51.
- [17] 苗晓燕, 陈昌富, 王思逸. 有限填土地震主动土压力计算上限法[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(3): 38-44.
- Miao X Y, Chen C F, Wang S Y. Upper-bound method for calculating seismic active earth pressure with limited backfill[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(3): 38-44. (in Chinese)
- [18] 黄睿, 汤金焕. RT模式下地震非极限主动土压力的拟动力分析[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2564-2572, 2591.
- Huang R, Tang J H. Pseudo-dynamic analysis of seismic non-limit active earth pressure in RT mode[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2564-2572, 2591. (in Chinese)
- [19] 彭晓钢, 王寰宇, 李有志, 等. 考虑土体非均质各向异性特征及地震效应的挡墙主动土压力分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(1): 112-119.
- Peng X G, Wang H Y, Li Y Z, et al. Active earth pressure on retaining wall considering the heterogeneity and anisotropy of soil and seismic effect[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(1): 112-119. (in Chinese)
- [20] Nandi R, Choudhury D. An improved method of vertical slices to determine seismic passive earth pressure and its point of application[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(9): 06022025.
- [21] 杨宇哲, 吴文兵, 倪芃芃, 等. RB模式下挡土墙地震非极限被动土压力计算[J]. *工程力学*, 2025, 42(7): 129-136.
- Yang Y Z, Wu W B, Ni P P, et al. Pseudo-dynamic analysis of seismic non-limit passive earth pressure under the RB mode[J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(7): 129-136. (in Chinese)
- [22] Xiao S G, Qi Y, Xia P. General variational solution for seismic and static active earth pressure on rigid walls considering soil tensile strength cut-off[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2023, 24(5): 432-449.
- [23] 王志凯. 挡土墙后地震主动土压力的拟动力学分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- Wang Z K. Pseudo-dynamic analysis of seismic active earth pressure behind retaining walls[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [24] 张晓曦, 彭涛, 柯灵, 等. 考虑第二破裂面的折线墙背挡土墙的地震主动土压力[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(4): 562-568.
- Zhang X X, Peng T, Ke L, et al. Seismic active earth pressure on retaining walls with a broken-line back surface by considering the second failure surface of backfill[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2023, 59(4): 562-568. (in Chinese)
- [25] Fang Y S, Ishibashi I. Static earth pressures with vari-

- ous wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 317-333.
- [26] 张雯萍, 周亦涛, 俞缙, 等. 一种考虑主应力偏转的平移挡墙地震土压力算法[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1772-1779.
- Zhang W P, Zhou Y T, Yu J, et al. A method for seismic earth pressure of retaining walls under translation mode considering principal stress rotations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1772-1779. (in Chinese)
- [27] 汪丁建, 唐辉明, 吴琼, 等. 基于土拱效应的非饱和土主动土压力计算方法[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(8): 69-74.
- Wang D J, Tang H M, Wu Q, et al. Method for calculating active earth pressure of unsaturated soil considering arching effect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(8): 69-74. (in Chinese)
- [28] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Engineering Geology Handbook* Editorial Board. *Engineering Geology Handbook*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- (编辑 朱备)