

【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

考虑中主应力的有限土体非极限地震土压力解

周彤¹, 董雅丞¹, 陕耀¹, 赵昱^{2,3}, 肖逸¹

1) 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 2) 深圳大学极端环境绿色长寿道路工程国家重点实验室, 广东深圳 518060; 3) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060

摘要: 为探明刚性挡墙平移模式(T模式)下有限土体非极限状态地震被动土压力分布规律, 解决既有地震土压力计算中无法综合考虑挡墙位移效应、土拱效应、中主应力以及地震时间影响的难题, 基于水平微分单元法和拟动力法, 建立了微分土条水平与竖向应力平衡方程, 得到考虑中主应力的有限土体非极限地震被动土压力解析解. 分析表明: 考虑土拱效应和挡墙位移后, 有限土体地震被动土压力沿深度方向非线性分布; 同一深度位置地震被动土压力随土体内摩擦角、黏聚力、位移比以及中主应力系数的增大而增大, 忽略中主应力影响的地震被动土压力计算结果偏于不安全; 地震效应存在时将导致有限土体地震被动土压力合力增大, 墙底位移比及土体黏聚力较大时, 地震土压力合力随内摩擦角的增大幅度更为明显, 以归一化深度为0.8为例, 其他因素相同条件下, 内摩擦角分别增加33.33%、66.67%及100%时, 将导致归一化侧土压力分别增加42.96%、44.79%及44.67%. 研究成果可为地下工程中挡土结构抗震性能评估提供理论参考.

关键词: 岩土工程; 统一强度理论; 地震被动土压力; 非极限状态; 微分单元法; 拟动力法

中图分类号: TU43

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.06688

Non-limit state seismic earth pressure solution for finite soil mass considering intermediate principal stress

ZHOU Tong¹, DONG Yacheng¹, SHAN Yao¹, ZHAO Yu^{2,3}, and XIAO Yi¹

1) Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China

2) National Key Laboratory of Green and Long-Life Road Engineering in Extreme Environment, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: To investigate the distribution law of non-limit state seismic passive earth pressure in a finite soil mass under the translational (T-mode) pattern of a rigid retaining wall, and to overcome the limitations of existing seismic earth pressure models that cannot simultaneously account for wall displacement, soil arching effect, intermediate principal stress, and seismic temporal effects, this study establishes horizontal and vertical stress equilibrium equations for differential soil strips by combining the differential element method with the pseudo-dynamic method. An analytical solution for non-limit state seismic passive earth pressure considering intermediate principal stress is derived. Parametric analysis indicates that when soil arching effect and wall displacement are considered, the seismic passive earth pressure exhibits a nonlinear distribution along depth. At the same depth, the seismic passive

Received: 2025-04-25; **Accepted:** 2025-09-16; **Online (CNKI):** 2025-10-21

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52378458, 52408378); Shenzhen Science and Technology Research Foundation (JCYJ20240813143512016)

Corresponding author: Researcher SHAN Yao (shanyao@tongji.edu.cn)

Citation: ZHOU Tong, DONG Yacheng, SHAN Yao, et al. Non-limit state seismic earth pressure solution for finite soil mass considering intermediate principal stress [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(6): 688-695. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



earth pressure increases with larger internal friction angle, cohesion, displacement ratio, and intermediate principal stress coefficient, whereas neglecting the intermediate principal stress results in unconservative estimates. Under seismic loading, the resultant seismic passive earth pressure is amplified, and this amplification becomes more pronounced with increasing internal friction angle, especially when the base displacement ratio and soil cohesion are relatively high. For instance, at a normalized depth of 0.8, with all other factors held constant, increasing the internal friction angle by 33.33%, 66.67%, and 100% leads to normalized lateral pressure increases of 42.96%, 44.79%, and 44.67%, respectively. The proposed method provides a valuable theoretical reference for evaluating the seismic performance of retaining structures in underground engineering.

Key words: geotechnical engineering; unified strength theory; seismic passive earth pressure; non-limit state; differential unit method; pseudo-dynamic method

挡土墙地震土压力计算是岩土工程的核心课题之一, 其理论发展始终围绕工程实践需求展开. 城市地下空间开发过程中, 临近既有建筑或基岩的挡土结构物时常面临有限土体工况^[1-4], 由于墙-土相对位移在施工及服役期间会发生改变, 有限土体土压力将处于静止状态到被动极限状态之间的任意非极限状态, 基于半无限空间假定以及极限状态假设的经典地震土压力理论所得计算结果无法同时满足具体工程的安全性及经济性要求. 除此之外, 现行规范下, 针对地震土压力的计算均采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 忽略了中主应力的影响, 易导致计算结果偏于不安全^[5]. 因此, 明确中主应力影响下挡墙后地震被动土压力分布规律是保障地下工程韧性的关键之一^[6].

针对地震条件下挡土墙侧土压力分布问题, 国内外学者进行了广泛研究. 俞茂宏等^[7]提出统一强度理论, 通过引入中主应力影响系数量化其对土体抗剪强度的影响. 同时, 土拱效应是影响土体应力重分布的重要影响因素^[8-9], 在分析“土体-结构”相互作用时若忽略土拱效应, 将导致理论计算结果偏离工程实际^[10]. 在地震土压力的计算中, 拟静力法^[11]应用较为广泛, 但未考虑地震时间效应以及地震相位差的影响^[12], 针对这一缺点, ZENG 等^[13]提出了拟动力法, 更合理地反映了地震荷载影响. 通过拟动力分析方法, GHOSH 等^[14-15]分别研究了非垂直挡土墙和垂直挡土墙在地震作用下的被动土压力. 在非极限状态土压力计算^[16]方面, 陈奕柏等^[17]提出了考虑挡墙变位的非极限土压力计算方法, 揭示了挡墙位移与土压力之间的关系. 徐日庆等^[18]考虑剪应力影响, 提出了有限土体被动土压力计算方法. ZHAO 等^[19]通过活动门试验, 探讨了地下结构上下移动时上覆土体的渐进破坏机制. 应宏伟等^[20]通过试验揭示了有限土体刚性挡墙在平动模式下被

动土压力的非线性分布规律. CHEN 等^[21]研究了有限宽度砂土在刚性挡墙平动模式下的被动土压力特性. NI 等^[22]建立了与位移相关的侧向土压力计算模型. 黄睿等^[23]基于拟动力法, 提出半无限空间中地震非极限主动土压力的计算框架.

综上所述, 在中主应力影响方面, 现有的基于拟动力法的地震被动土压力计算理论仍需进一步完善. 鉴于此, 本研究基于水平微分单元法和拟动力法框架, 构建了考虑中主应力影响的有限土体地震被动土压力解析计算方法, 以期为实际工程中挡土结构的抗震设计提供思路与建议.

1 基本假定

地震土压力分布受诸多因素影响, 主要包括土体物理力学性质(如重度、内摩擦角和黏聚力)、地震动参数(如峰值加速度和地震作用方向)、挡土结构形式与刚度, 以及土体与结构间的相互作用, 还需考虑土拱效应与墙体位移发展. 为简化计算, 作出如下假定:

1) 研究对象为两刚性挡墙间的有限黏性土体, 左右刚性挡墙墙背竖直; 墙间有限黏土为均质且各向同性土体, 土体抗剪强度满足平面应变统一强度理论.

2) 考虑墙体位移的影响, 刚性挡墙平行移动(T 模式). 假定在有限土体内部形成倾斜角为 β 的平面滑裂面^[24]; 有限土体以滑裂面与竖直面交点为界分为上下两部分, 上方为矩形区(I 区), 下方为三角形区(II 区), 高度分别为 h 和 $H-h$, 满足:

$$h = H - B \tan \beta \quad (1)$$

其中, B 为两墙间有限土体宽度; H 为挡墙总高度.

3) 左右刚性挡墙墙背粗糙, 界面摩擦角不同.

左侧墙土间界面摩擦角为 δ ，墙土之间黏聚力为 c_w ；右侧墙土间界面摩擦角为 α ，墙土之间黏聚力为 c_d 。墙-土界面遵循 Mohr-Coulomb 强度准则。

4) 有限土体采用水平微分单元法建模，同一水平微分土条上的土体单元处于同一应力 Mohr 圆。大主应力 σ_1 偏转导致土拱效应产生，并将大主应力迹线假定为圆弧拱迹线。采用拟动力法计算地震惯性力，水平与竖直方向地震惯性力呈正弦式分布变化，为时间与深度相关的函数，且其峰值沿墙高呈线性增加。

5) 假设土体黏聚力发挥值(c_m)、左侧挡墙与有限土体间黏聚力发挥值(c_{wm})、右侧挡墙与有限土体间黏聚力发挥值(c_{dm})随深度和位移的变化遵循相同规律。

基于上述假设建立的理论模型如图 1。

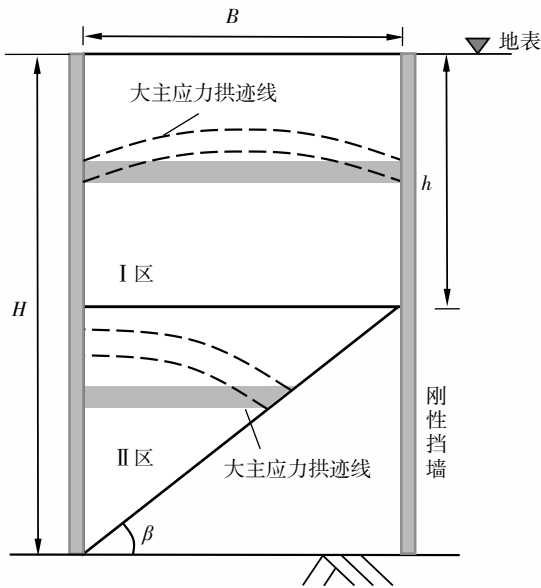


图 1 地震土物理模型示意

Fig. 1 Schematic physical model of seismic earth. The dashed line represents the principal stress trace, flanked by rigid retaining walls with the ground surface above.

2 平面应变统一强度公式

2.1 基于统一强度理论的 Mohr-Coulomb 准则

在双剪强度理论的基础上，俞茂宏等^[7]提出了

统一强度理论。本研究根据文献[7]修改了屈服面模型，请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S1。以压应力为正时，主应力形式的统一强度理论可表示为

$$\begin{aligned} & \text{当 } \sigma_2 < \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{\sin \varphi}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \text{ 时,} \\ & F' = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = \\ & \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{(1 + b)(1 - \sin \varphi)}(b\sigma_2 + \sigma_3) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{当 } \sigma_2 \geq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{\sin \varphi}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \text{ 时,} \\ & F' = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = \\ & \frac{1}{1 + b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}\sigma_3 \quad (3) \end{aligned}$$

其中， φ 为土体内摩擦角； b 为中主应力系数。基于平面应变假设，令 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ ， σ_1 为中主应力值， σ_3 为小主应力值； F' 和 C 为中间系数。联立式(2)和式(3)，根据 Mohr-Coulomb 准则，可得土体基于统一强度理论的内摩擦角(φ_t)和黏聚力(c_t)分别为

$$\varphi_t = \arcsin \frac{2(1 + b)\sin \varphi}{b + b\sin \varphi + 2} \quad (4)$$

$$c_t = \frac{2(1 + b)c \cos \varphi}{(b + b\sin \varphi + 2)\cos \varphi_t} \quad (5)$$

基于统一强度理论的 Mohr-Coulomb 准则，剪应力 τ 为

$$\tau = \sigma \tan \varphi_t + c_t \quad (6)$$

其中， σ 为正应力值； c 为土体黏聚力。

2.2 填土的内摩擦角与黏聚力发挥值

当墙土位移发展导致墙间土体处于中间非极限状态时， φ_t 与 c_t 无法完全发挥其极限作用，二者的实际发挥值介于土体初始工作状态下的对应值与极限状态下的极限值之间，且会随墙土位移的持续发展而动态变化。对于墙体平动模式(T模式)来说，墙后有限土体内摩擦角发挥值 φ_m 与墙体位移比 Ψ (定义为中间非极限状态下挡墙位移与被动极限状态下挡墙位移之比，取值范围为0~1， $\Psi=0$ 代表静止状态， $\Psi=1$ 代表被动极限状态)的关系为^[16]

$$\varphi_m = \frac{180}{\pi} \arcsin \left\{ \frac{(1 - K_0)(1 + \sin \varphi_t)[1 - (1 - \Psi)R_f] + \Psi[K_0 - 1 + (K_0 + 1)\sin \varphi_t]}{(1 + K_0)(1 + \sin \varphi_t)[1 - (1 - \Psi)R_f] - \Psi[K_0 - 1 + (K_0 + 1)\sin \varphi_t]} \right\} \quad (7)$$

其中, K_0 为静止侧土压力系数; R_f 为破坏比, 本研究取 $R_f = 0.85$.

对于左侧挡墙与有限土体之间的界面摩擦角发挥值 δ_m , 可采用经验公式^[25]进行计算:

$$\delta_m = \frac{180}{\pi} \arctan \left[\tan \delta_0 + \frac{4}{\pi} (\tan \delta - \tan \delta_0) \arctan \Psi \right] \quad (8)$$

其中, $\delta_0 = \varphi_t/2$, 为左侧墙土间初始界面摩擦角. 对于右侧挡墙与有限土体之间的界面摩擦角 α_m 也有相同的结论.

c_m 、 c_{wm} 和 c_{dm} 分别为

$$c_m = c_t \tan \varphi_m / \tan \varphi_t \quad (9)$$

$$c_{wm} = c_w \tan \varphi_m / \tan \varphi_t \quad (10)$$

$$c_{dm} = c_d \tan \varphi_m / \tan \varphi_t \quad (11)$$

其中, c_w 为实测左侧挡墙墙土黏聚力极值; c_d 为实测右侧挡墙墙土黏聚力极值.

3 非极限状态地震土压力解析计算

3.1 基于拟动力法的地震惯性力计算

本研究采用拟动力法分析地震对土压力分布的影响, 将地震波分别沿水平和竖直方向分解为剪切波与压缩波. 水平方向剪切波速 $v_s = (G/\rho)^{1/2}$, 其中, G 和 ρ 分别为有限土体的剪切模量与密度. 竖直方向压缩波速 $v_p = [2G(1-\mu)/\rho(1-2\mu)]^{1/2}$, 其中, μ 为土体泊松比. 深度 y 处地震加速度可被分解为水平加速度 a_h 与竖向加速度 a_v , 均为深度 y 和时间 t 的函数:

$$a_h(y, t) = k_h g \left[1 + \frac{H-y}{H} (f_a - 1) \right] \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{H-y}{v_s} \right) \quad (12)$$

$$a_v(y, t) = k_v g \left[1 + \frac{H-y}{H} (f_a - 1) \right] \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{H-y}{v_p} \right) \quad (13)$$

其中, k_h 和 k_v 分别为水平与竖向地震系数; g 为重力加速度; f_a 为放大因子; $T = 2\pi/\omega$ 为地震周期, ω 为角频率.

3.2 有限土体应力分析

3.2.1 矩形区静力平衡方程

将矩形区有限非饱和土体沿深度方向水平划分为若干层, 薄层土体所受平均竖向应力值为 σ_v , 基坑墙面处的法向作用力值 $\sigma_{wm} = K_{am1} \sigma_v$ (K_{am1} 为法向作用力系数), 基坑墙面处的切向作用力值 $\tau_w =$

$\sigma_{wm} \tan \delta_m + c_{wm}$, 地下室墙面处的法向作用力值为 σ_{dm} , 地下室墙面处的切向作用力值 $\tau_d = \sigma_{dm} \tan \alpha_m + c_{dm}$, 微分土条水平层间剪应力值 $\tau_h = K_{hm1} \sigma_v$ (K_{hm1} 为水平剪应力系数), 薄层水平微分土体重量为 γ , 薄层水平微分土体单元受到的水平与竖直方向地震惯性力分别为 dQ_h 和 dQ_v , 如图2所示.

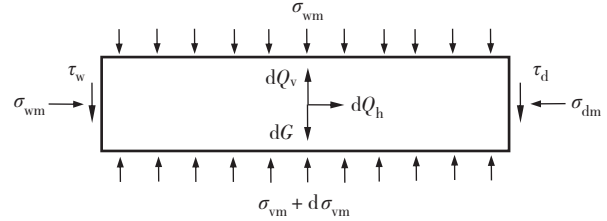


图2 矩形区土体受力示意

Fig. 2 Schematic of soil forces in rectangular area.

$$dQ_h(t) = \frac{\gamma B a_h(y, t)}{g} dy \quad (14)$$

$$dQ_v(t) = \frac{\gamma B a_v(y, t)}{g} dy \quad (15)$$

根据图2, 分别建立水平方向和竖直方向受力平衡方程,

$$\sigma_{wm} dy - \sigma_{dm} dy + dQ_h = 0 \quad (16)$$

$$-\tau_w dy - \tau_d dy + dQ_v - \gamma B dy + B d\sigma_v = 0 \quad (17)$$

因此可建立平衡微分方程,

$$\frac{d\sigma_v}{dy} - D\sigma_v - F = 0 \quad (18)$$

其中, F 和 D 为中间系数.

$$D = \frac{K_{pm1} (\tan \delta_m + \tan \alpha_m)}{B} \quad (19)$$

$$F = \frac{c_{wm} + c_{dm}}{B} + \gamma \left(1 - \frac{a_v}{g} - \frac{a_h}{g} \tan \delta_m \right) \quad (20)$$

边界条件为 $y=0$ 时,

$$\sigma_v^1(y=0) = q_0 \quad (21)$$

其中, σ_v^1 为矩形区竖向土压力; q_0 为地面所受荷载.

因此, 矩形区深度 $y(0 \leq y \leq H)$ 处竖向应力为

$$\sigma_v^1(y) = -\frac{F}{D} + \left(q_0 + \frac{F}{D} \right) e^{Dy} \quad (22)$$

3.2.2 三角区静力平衡方程

将三角区有限土体沿深度方向水平划分为若干层, 薄层水平微分土体所受平均竖向应力为 σ_v , 基坑墙面处的法向作用力 $\sigma_{wm} = K_{am2} \sigma_v$, 基坑墙面处的切向作用力 $\tau_w = \sigma_{wm} \tan \delta_m + c_{wm}$, 作用于滑动面上的法向作用力为 σ_{sm} , 作用于滑动面上的切向作用力为 τ_s , 薄层水平微分土体重量为 γ , 薄层水平

微分土体单元受到的水平与竖直方向地震惯性力分别为 dQ_h 和 dQ_v ，三角区土体受力示意如图 3。

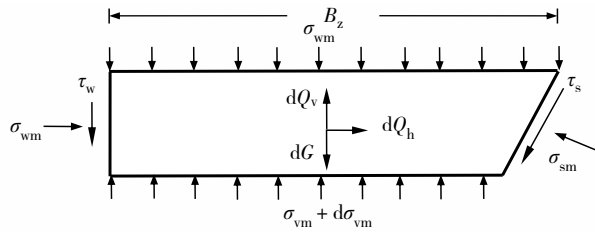


图3 三角区土体受力示意

Fig. 3 Schematic of soil forces in triangular area.

根据图 3，分别建立水平方向和竖直方向受力平衡方程，

$$\sigma_{wm} dy - \sigma_{sm} dy - (\sigma_{sm} \tan \varphi_m + c_m) \cot \beta dy + dQ_h = 0 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \tau_w dy + \tau_s dy + B_z \sigma_v - dQ_v - \sigma_{sm} \cot \beta dy - \\ (B_z - \cot \beta dy)(\sigma_v + d\sigma_v) + \\ \gamma(B_z - \cot \beta dy/2) dy = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

其中， B_z 为三角区土体宽度。

因此，可建立平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_v}{dy} - \frac{N}{H-y} \sigma_v - \frac{I}{H-y} - J = 0 \quad (25)$$

其中， N 、 I 、 J 和 T 为中间系数。

$$N = \frac{K_{pm2} \tan \delta_m + K_{pm2} T + \cot \beta}{\cot \beta} \quad (26)$$

$$I = \frac{c_{wm} + c_m - T c_m \cot \beta}{\cot \beta} \quad (27)$$

$$J = T \frac{\gamma a_h}{g} - \frac{\gamma a_v}{g} - \gamma \quad (28)$$

$$T = \frac{\tan \varphi_m - \cot \beta}{1 + \tan \varphi_m \cot \beta} \quad (29)$$

一阶非齐次线性微分方程的通解为

$$\sigma_v^{\text{II}}(y) = Q(H-y)^{-N} - \frac{J(H-h)}{1+N} + \frac{I}{N} \quad (30)$$

其中， σ_v^{II} 为三角区竖向土压力。

代入边界条件 $\sigma_h^{\text{I}}(y=h) = \sigma_h^{\text{II}}$ ，即可求出常数项 Q ，

$$Q = (H-h)^N \times \left[\frac{K_{pm1} F}{K_{pm2} D} (e^{Dh} - 1) + \frac{J(H-h)}{1+N} - \frac{I}{N} \right] \quad (31)$$

其中， K_{pm1} 和 K_{pm2} 为被动侧土压力系数，可按文献 [18] 建议进行取值。

3.3 非极限状态地震被动土压力计算

根据上述理论推导，挡土墙背离填土方向平动(T 模式)下非极限地震被动土压力 $\sigma_w(y)$ 分布可解析为

$$\sigma_w(y) = \begin{cases} K_{pm1} \left[-\frac{F}{D} + \left(q_0 + \frac{F}{D} \right) e^{Dy} \right], & 0 \leq y \leq H - B \tan \beta \\ K_{pm2} \left[Q(H-y)^{-N} - \frac{\gamma(H-y)}{1+N} + \frac{I}{N} \right], & H - B \tan \beta < y \leq H \end{cases} \quad (32)$$

4 模型验证及参数分析

4.1 模型计算结果对比验证

选取统一的模型参数，将本研究计算结果分别与文献 [5]、GHOSH 理论 [14]、CHOUDHURY 理论 [15] 计算值以及传统 Coulomb 解进行对比，结果请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S2。由图 S2 可见，本研究方法与 GHOSH 和 CHOUDHURY 理论计算值的结果吻合较好，土压力分布与理论解所得曲线趋势吻合良好。邵生俊等 [5] 利用双剪强度准则研究了地震作用下的挡土墙地震被动土压力分布，并考虑 b 的影响，但未考虑土拱效应影响，因此土压力分布曲线在浅层偏小、深层偏大。本研究由于考虑了土拱效应以及 b 的影响，因此，在深度较深位置处的地震土压力略大于 CHOUDHURY 及 GHOSH 解。此外，传统 Coulomb 理论基于滑楔整体平衡原理进行推导，将导致侧土压力计算结果偏大。

4.2 非极限状态地震土压力分布

4.2.1 内摩擦角和黏聚力对地震土压力分布的影响

取 $\Psi = 0.5$ ， $k_h = 0.1$ ， $B/H = 0.5$ ， $b = 0.5$ ， $\gamma = 15.5 \text{ kN/m}^3$ 。 c 和 φ 不同时， Ψ 对归一化侧土压力 $P/(\gamma H)$ 的影响请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S3。从图 S3 可见， $P/(\gamma H)$ 沿墙深方向呈非线性分布特征；在同一深度位置， $P/(\gamma H)$ 随着 φ 的增加而增大。以归一化深度为 0.8 为例， φ 分别增加 33.33%、66.67% 和 100% 时，将导致 $P/(\gamma H)$ 分别增加 42.96%、107.02% 和 199.48%。在 φ 相同时，随着 c 增加， $P/(\gamma H)$ 逐渐增大，表明土的抗剪强度逐渐提高。这主要是因为当土体的黏聚力增大时，土颗粒之间黏结能力增强，使得整体更加紧密和稳定。

4.2.2 中主应力系数 b 和位移比对地震土压力分布的影响

取 $c = 5 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 30^\circ$ ， $\Psi = 0.5$ ， $k_h = 0.1$ ，

$B/H = 0.5$. b 不同时, Ψ 和归一化深度 y/H 对 $P/(\gamma H)$ 的影响请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S4. 从图 S4 可见, 随着 Ψ 的增加, $P/(\gamma H)$ 随墙深增加的非线性特征增大. 以归一化深度 0.8 为例, Ψ 分别增加 50%、100% 和 150% 时, $P/(\gamma H)$ 分别增加了 28.02%、51.57% 和 71.12%. 随着 b 增加, 不同墙底位移比 η 下归一化侧土压力 $P/(\gamma H)$ 与归一化深度 y/H 的变化趋势相同, 且 $P/(\gamma H)$ 随 b 的增加而增大, 表明中主应力提高了土的抗剪强度. 在黏聚力和内摩擦角等特定参数工况确定时, 工程中应控制墙底位移比, 以减少侧土压力的非线性增长, 并可通过增强中主应力效应提高土体抗剪强度.

4.2.3 地震参数对地震土压力分布的影响

取 $c = 5 \text{ kPa}$, $\varphi = 30^\circ$, $\Psi = 0.5$, $B/H = 0.5$. 有无地震情况下不 b 时 $P/\gamma H$ 随 y/H 的变化见图 4. 从图 4 可见, 相比于无地震作用, 有地震作用时 $P/\gamma H$ 更大, 且归一化侧土压力分布均呈非线性特征. 中主应力提高了土的抗剪强度, 导致地震侧土压力增大, 不利于挡墙的稳定. 同时, 地震引起的惯性力也会使得土体对挡土墙的侧向压力增大, 导致被动土压力增加.

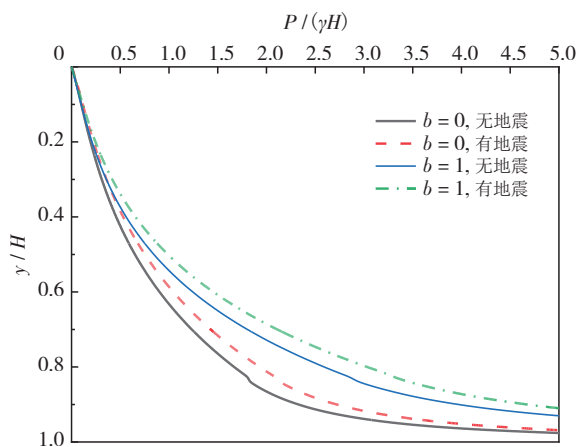


图4 有无地震和不同强度参数对土压力分布的影响

Fig. 4 Effects of different strength parameter conditions on soil pressure distribution. The solid lines represent conditions without seismic effects, while the dashed lines represent conditions with seismic effects.

4.3 非极限状态地震土压力合力

4.3.1 内摩擦角和黏聚力对地震土压力合力的影响

取 $\Psi = 0.5$, $k_h = 0.1$, $B/H = 0.5$. 地震土压力合力 $2E/(\gamma H^2)$ 随 φ 和 c 的变化见图 5. 由图 5 可见, 地震土压力合力随 φ 的增加非线性增大; φ 相

同时, c 分别增加 100% 和 200%, 将导致地震土压力合力分别增加 121.94% 和 313.20%.

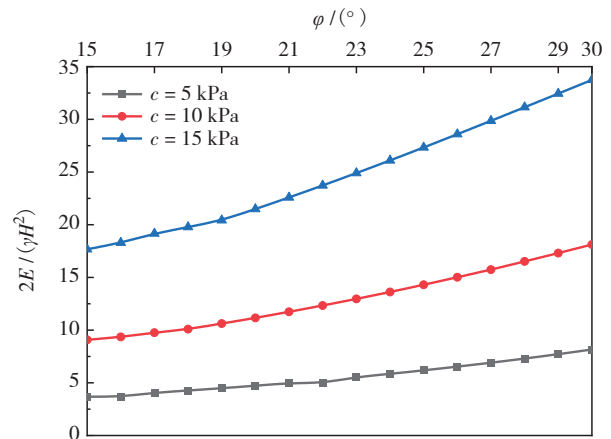


图5 不同内摩擦角和黏聚力下的地震土压力合力

Fig. 5 Seismic earth pressure ensemble for different internal friction angles and cohesive forces.

4.3.2 位移比对土压力合力的影响

取 $c = 5 \text{ kPa}$, $k_h = 0.1$, $B/H = 0.5$. 地震土压力合力 $2E/(\gamma H^2)$ 随 φ 和 Ψ 的变化见图 6. 由图 6 可见, 地震土压力合力随着 Ψ 的增加非线性增大. φ 相同时, Ψ 增加表明地震侧土压力越来越接近被动极限状态, Ψ 分别增加 100% 和 200% 时, 将导致地震土压力合力分别增大 59.73% 和 101.12%.

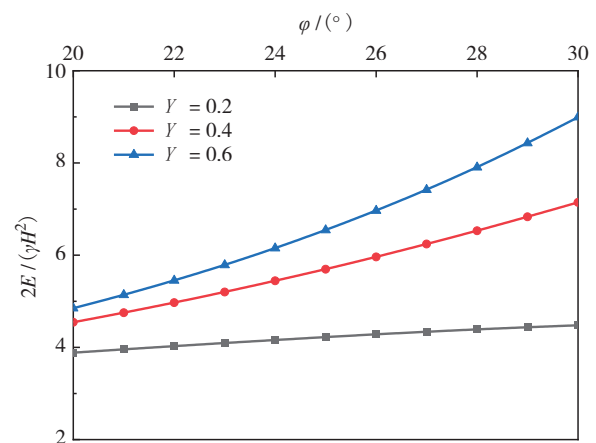


图6 不同内摩擦角和位移比下的地震土压力合力

Fig. 6 Seismic earth pressure ensemble for different internal friction angles and displacement ratios.

5 结 论

针对刚性挡墙平移模式(T模式)下的有限土体, 提出了综合考虑中主应力、土体强度参数、墙

体位移、土拱效应及地震作用影响的非极限状态地震被动土压力计算框架,可知:

1) 基于微分单元法框架建立了非极限状态地震土压力的解析解,实现了挡土结构物间有限土体的地震土压力分析,也为挡土结构的抗震设计提供了思路.

2) 考虑土拱效应和挡墙位移发展过程,有限土体地震被动土压力沿深度分布表现出非线性特征.地震侧土压力随内摩擦角、墙底位移比、黏聚力、中主应力系数的增大及地震作用而增加.

3) 考虑中主应力影响,地震被动土压力分布及合力均会增大,忽略中主应力影响的地震被动土压力计算结果偏于不安全,地震效应也会导致有限土体地震被动土压力合力增大.

值得说明的是,本研究方法仍存在一定的局限性,仅考虑中主应力系数,而未考虑构造指标和实际地震中剪切波与纵波周期不同的情况.因此,在实际应用中仍需考虑更多的地质和工程因素以保证结构的安全性.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378458, 52408378); 深圳市科技计划资助项目(JCYJ20240813143512016)

作者简介: 周彤(zhoutong9113@163.com), 同济大学博士研究生. 研究方向: 城市地下空间开发建设.

引文: 周彤, 董雅丞, 陕耀, 等. 考虑中主应力的有限土体非极限地震土压力解[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(6): 688-695.

参考文献 / References:

- [1] 陈湘生, 付艳斌, 陈曦, 等. 地下空间施工技术进展及数智化技术现状[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 1-12.
CHEN Xiangsheng, FU Yanbin, CHEN Xi, et al. Progress in underground space construction technology and technical challenges of digital intelligence [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 1-12. (in Chinese)
- [2] 陕耀, 董雅丞, 张旭辉, 等. 双层地下连续墙土压力的现场实测研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊1): 507-516.
SHAN Yao, DONG Yacheng, ZHANG Xuhui, et al. Field measurement study of earth pressure on a double-layered diaphragm wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(Suppl. 1): 507-516. (in Chinese)
- [3] 钱七虎. 能源地下结构与工程——助力“双碳”目标, 赋能绿色城市[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(1): 1-2.
QIAN Qihu. Energy geostructure engineering: promote carbon peak and neutrality, empower green cities [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(1): 1-2. (in Chinese)
- [4] 费建波, 肖俊, 周贤舜, 等. 地铁车站超大双基坑的施工工序[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(5): 541-549.
FEI Jianbo, XIAO Jun, ZHOU Xianshun, et al. Construction procedures for ultra-large twin foundation pits in metro stations [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(5): 541-549. (in Chinese)
- [5] 邵生俊, 陈菲, 邓国华. 基于平面应变统一强度公式的结构性黄土填料挡墙地震被动土压力研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1255-1262, 1290.
SHAO Shengjun, CHEN Fei, DENG Guohua. Seismic passive earth pressure against the retaining wall of structural loess based on plane strain unified strength formula [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1255-1262, 1290. (in Chinese)
- [6] 陕耀, 董雅丞, 吴遥杰, 等. 渗流条件下盾构隧道松动区非极限状态水土压力研究[J]. 天津大学学报自然科学与工程技术版, 2025, 58(8): 822-833.
SHAN Yao, DONG Yacheng, WU Yaojie, et al. Non-limit state water and soil pressure in loosening zone of shield tunnel under seepage conditions [J]. Journal of Tianjin University Science and Technology, 2025, 58(8): 822-833. (in Chinese)
- [7] 俞茂宏, 刘凤羽, 刘锋, 等. 一个新的普遍形式的强度理论[J]. 土木工程学报, 1990, 23(1): 34-40.
YU Maohong, LIU Fengyu, LIU Feng, et al. A new general strength theory [J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23(1): 34-40. (in Chinese)
- [8] LIU Chengyu, SHAN Yao, WANG Binglong, et al. Reinforcement load in geosynthetic-reinforced pile-supported model embankments [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50(6): 1135-1146.
- [9] HU Botao, SHAN Yao, ZHAO Yu, et al. Tunneling beneath the pile-raft foundations of high-speed railways: progressive arching deformation and pile settlement behavior [J/OL]. Underground Space. (2025-03-04) [2025-04-25]. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.12.004>.
- [10] 赖丰文, 陈福全, 万梁龙. 考虑不完全土拱效应的浅层地基竖向应力计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2546-2554.
LAI Fengwen, CHEN Fuquan, WAN Lianglong. Vertical stress calculation of shallow foundations based on partially

- developed soil arching effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2546-2554. (in Chinese)
- [11] STEEDMAN R S, ZENG Xiangwu. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(1): 103-112.
- [12] 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 Hao, DONG Jianhua, WANG Yongsheng, 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)
- [13] ZENG Xiangwu, STEEDMAN R S. On the behaviour of quay walls in earthquakes [J]. *Géotechnique*, 1993, 43(3): 417-431.
- [14] GHOSH P. Seismic passive earth pressure behind non-vertical retaining wall using pseudo-dynamic analysis [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, 25(6): 693-703.
- [15] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Seismic passive resistance by pseudo-dynamic method [J]. *Géotechnique*, 2005, 55(9): 699-702.
- [16] 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 Riqing, XU Yebin, CHENG Kang, 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)
- [17] 陈奕柏, 柯才桐, 高洪波, 等. 考虑变位影响的刚性挡墙非极限土压力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(5): 1060-1070. CHEN Yibai, KE Caitong, GAO Hongbo, et al. Non-limit state earth pressure against retaining wall considering influence of deformation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(5): 1060-1070. (in Chinese)
- [18] 徐日庆, 徐叶斌. 考虑剪应力作用的有限土体被动土压力分析[J]. *湖南大学学报自然科学版*, 2020, 47(9): 76-84. XU Riqing, XU Yebin. Analysis of passive earth pressure for limited soils considering action of shear stress [J]. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 2020, 47(9): 76-84. (in Chinese)
- [19] ZHAO Yu, GONG Quanmei, WU Yaojie, et al. Progressive failure mechanism in granular materials subjected to an alternant active and passive trapdoor [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28: 100529.
- [20] 应宏伟, 张金红, 王小刚, 等. 有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(6): 978-986. YING Hongwei, ZHANG Jinhong, WANG Xiaogang, et al. Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 978-986. (in Chinese)
- [21] CHEN Fuquan, LIN Yujian, YANG Juntao. Passive earth pressure of narrow cohesionless backfill against inclined rigid retaining walls under translation mode [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(5): 1226-1240.
- [22] NI Pengpeng, MANGALATHU S, SONG Linhui, et al. Displacement-dependent lateral earth pressure models [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2018, 144(6): 04018032.
- [23] 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 Rui, TANG Jinhuai. 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)
- [24] CHEN Fuquan, CHEN Chang, KANG Wuzhen, et al. Slip-line solution to seismic active earth pressure of narrow $c-\varphi$ soils on gravity walls rotating about the bottom [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 181: 108625.
- [25] 龚慈. 不同位移模式下刚性挡土墙土压力计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. GONG Ci. Earth pressure against rigid retaining wall of different movement modes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料