

DOI: 10.11779/CJGE2021S1006

基于不同平面应变强度理论的土压力问题及适用性研究

刘 琪¹, 张 玉^{*1,2}, 邵生俊², 赵 阳¹, 孟天一¹, 余芳涛²

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对于实际工程中大量存在的挡土墙、基坑等平面应变问题, 依据 Mohr-Coulomb、SMP、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面、Lade-Duncan、AC-SMP 和广义 Mises 强度准则所建立的平面应变条件下的中主应力公式, 推导出了基于各强度准则的主、被动土压力计算公式, 将其推广至黏性土, 对平面应变条件下的主、被动土压力进行了计算与分析, 并与实测土压力数据进行了对比分析。研究结果表明, 土破坏时中主应力的发挥程度对土压力的大小影响显著; Mohr-Coulomb 强度准则未考虑中主应力效应, 计算的主动土压力偏大, 被动土压力偏小, 在设计上趋于保守; SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则、AC-SMP 强度准则的计算结果更接近实测土压力, 其中 AC-SMP 强度准则的计算结果最为准确; 广义 Mises 强度准则的土压力计算结果不再适宜于描述挡墙上土压力的大小。在进行平面应变问题的挡土结构工程设计时, 可选择相适应的土压力计算公式, 考虑平面应变条件下中主应力对土强度的贡献, 充分发挥土的强度潜能, 在工程建设中提高经济效益。

关键词: 平面应变; 强度准则; 中主应力; 土压力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0030-06

作者简介: 刘 琪(1987—), 女, 讲师, 博士, 主要从事黄土环境与黄土力学方面的研究。E-mail: 358198000@qq.com。

Earth pressure problems under different plane strain strength theories and their application

LIU Jin¹, ZHANG Yu^{1,2}, SHAO Sheng-jun², ZHAO Yang¹, MENG Tian-yi¹, SHE Fang-tao²

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A great number of problems in practical projects like retaining walls and foundation pits are under plane strain state. According to the formulas for the intermediate principal stress under the plane strain established by Mohr-Coulomb, SMP, $\sqrt[3]{\sigma}$ spatially mobilized plane, Lade-Duncan, AC-SMP strength criterion and generalized Mises criterion, the formulas for the active earth pressure and passive earth pressure are derived in these strength criterions and extended to clay, the calculated active and passive earth pressures are compared with the measured data. The results indicate that the development degree of the intermediate principal stress has a significant impact on the earth pressure in the process of soil break. The calculated active earth pressure in the Mohr-Coulomb strength criterion is larger and the passive earth pressure is smaller than the practical one because the effect of the intermediate principal stress is not considered, and the design tends to be conservative. The calculated results by the criteria of SMP, $\sqrt[3]{\sigma}$ spatially mobilized plane, Lade-Duncan and the AC-SMP strength are close to the measured data, among which the results by the AC-SMP strength criterion is much closer. The earth pressure calculated by the generalized Mises criterion is no longer appropriate to describe that on the retaining wall. When design the retaining structures under the plane strain state, appropriate formula should be chosen to consider the contribution of the intermediate principal stress so as to give full play of the potential strength of soil and to improve the economic benefits in project construction.

Key words: plain strain; strength criterion; intermediate principal stress; earth pressure

0 引言

实际工程中的挡土墙、基坑直立开挖等问题, 均可类似归结为平面应变问题。平面应变条件下, 由于平面应变方向上的应变为零, 增强了约束, 提升了土的强度。经典的 Rankine 土压力理论是基于 Mohr-Coulomb 强度准则提出的, 未考虑中主应力对强度影响, 导致了计算结果偏于保守, 且与实测结果差别较大, 这已被众

多试验结果所证实。针对土在一般应力状态条件下的土压力问题, 众多学者开展了研究, 并取得了一定的成

果。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802218); 陕西省科技计划项目(2019JQ-432, 2019JQ-835); 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(LEM201801); 陕西省教育厅自然专项科研计划项目(20JK0670)

收稿日期: 2020-12-15

* 通信作者(E-mail: 153673438@qq.com)

果^[1-2], 但大多是基于假定或经验得到的中主应力, 将其代入描述一般应力状态的某个强度准则中, 得到主、被动土压力系数, 最终实现土压力计算。显然, 这与实际工程中平面应变条件下土的应力状态不相符合, 不能贴切地反映出平面应变条件下的土压力问题。平面应变条件下的土压力研究, 有针对于动荷载^[3-4]和静荷载的, 大体上可以分为两类: ①依据平面应变条件、塑性理论, 得到中主应力条件^[5-6], 引入土压力计算中; ②依据广义虎克定律和平面应变方向的应变条件^[7], 得到基于弹性理论, 引入中主应力的土压力。目前针对于平面应变条件下的土压力研究还处于基于某个特定的一般应力状态强度准则, 引入特定中主应力条件, 从而得到相应的土压力阶段, 针对描述土一般应力状态的众多强度准则条件下土压力理论的全面、系统研究还有待进一步深入, 基于平面应变条件下这些强度准则所计算出的土压力演化规律还需进一步揭示, 其适用性也有待研究。

基于以上分析和已有研究成果^[8], 本文首先以土的几种强度准则为基础, 依据平面应变条件和塑性理论建立中主应力公式。其次, 将各中主应力公式代入相应的强度准则中, 求解大、小主应力关系, 即可得到基于各平面应变强度准则的主、被动土压力系数。最后, 将其推广至黏性土, 提出了无黏性土和黏性土的主、被动土压力计算公式, 并将计算结果与砂土、黏性土的土压力实测数据进行对比分析与验证。

1 土的几种常用强度准则及平面应变条件下的主应力关系

目前, 针对土建立的强度准则包括 Mohr-Coulomb 准则、SMP 准则、Lade-Duncan 准则、广义 Mises 准则、轴对称压缩空间滑动面(AC-SMP)准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面准则, 各强度准则的主应力表达式见文献[9]。

将土视为弹塑性介质时, 平面应变方向的正应变($d\varepsilon_2 = 0$)始终等于零, 即弹性正应变($d\varepsilon_2^e$)和塑性正应变($d\varepsilon_2^p$)增量均为零。依据塑性理论 $d\varepsilon_2^p = d\lambda (\partial f / \partial \sigma_2) = 0$, 根据相关联的流动法则, 将上述土的各强度准则 f 作为屈服函数, 即可根据不同的强度准则推导得到相应的中主应力和大、小主应力的关系^[8]。

2 平面应变条件下基于各强度准则的无黏性土主动与被动土压力

平面应变条件下, 如果建立了土体破坏时的大、小主应力关系, 那么依据经典的朗肯土压力理论, 即可得到平面应变条件下的土压力表达式。将各中主应力表达式代入相应的强度准则中, 即可得到平面应变条件

下土破坏时的大、小主应力关系表达式。在计算主动土压力时, 将 $\sigma_1 = \gamma z$ (式中 γ 为土的重度, z 为水平地面到单元的深度) 带入各平面应变的大、小主应力关系式, 求解出 $P_a = \sigma_3$; 在计算被动土压力时, 令 $\sigma_3 = \gamma z$, 求得 $P_p = \sigma_1$, 这样就可得到平面应变条件下基于不同强度准则的被动土压力和主动土压力表达式。

2.1 基于 Mohr-Coulomb 强度准则的平面应变土压力主动土压力:

$$P_a = \sigma_3 = \sigma_1 / K_p = \gamma z / K_p \quad ; \quad (1)$$

被动土压力:

$$P_p = \sigma_1 = K_p \sigma_3 = K_p \gamma z \quad . \quad (2)$$

2.2 基于 SMP 强度准则的平面应变土压力

将中主应力条件 $\sigma_2 = \sqrt{\sigma_1 \sigma_3}$ 代入其强度准则可得:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1}{4} \left(\sqrt{K_{\text{SMP}}} + \sqrt{K_{\text{SMP}} - 3 - 2 \sqrt{K_{\text{SMP}}} - 1} \right)^2, \quad (3)$$

式中, $K_{\text{SMP}} = (2K_p + 1)(K_p + 2)/K_p$ 。

主动土压力:

$$P_a = \sigma_3 = \sigma_1 / K_{\text{p-SMP}} = \gamma z / K_{\text{p-SMP}} \quad , \quad (4)$$

式中, $K_{\text{p-SMP}} = (\sqrt{K_{\text{SMP}}} + \sqrt{K_{\text{SMP}} - 3 - 2 \sqrt{K_{\text{SMP}}} - 1})/4$ 。

被动土压力:

$$P_p = \sigma_1 = K_{\text{p-SMP}} \sigma_3 = K_{\text{p-SMP}} \gamma z \quad . \quad (5)$$

2.3 基于 Lade-Duncan 强度准则的平面应变土压力

将中主应力条件 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 代入其强度准则可得:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2}{27} K_{\text{LD}} + \frac{2}{27} \sqrt{K_{\text{LD}}^2 - 27 K_{\text{LD}}} - 1 \quad , \quad (6)$$

式中, $K_{\text{LD}} = (K_p + 2)^3 / K_p$ 。

主动土压力:

$$P_a = \sigma_3 = \sigma_1 / K_{\text{p-LD}} = \gamma z / K_{\text{p-LD}} \quad , \quad (7)$$

式中, $K_{\text{p-LD}} = \frac{2}{27} K_{\text{LD}} + \frac{2}{27} \sqrt{K_{\text{LD}}^2 - 27 K_{\text{LD}}} - 1$ 。

被动土压力:

$$P_p = \sigma_1 = K_{\text{p-LD}} \sigma_3 = K_{\text{p-LD}} \gamma z \quad . \quad (8)$$

2.4 基于广义 Mises 强度准则的平面应变土压力

将依据广义 Mises 强度准则得到的中主应力条件 $\sigma_2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2 / (\sigma_1 + \sigma_3)$ 代入其强度准则可得

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + K_{\text{MIS}} + \sqrt{6K_{\text{MIS}} - 3K_{\text{MIS}}^2}}{1 - 2K_{\text{MIS}}} \quad , \quad (9)$$

式中, $K_{\text{MIS}} = 2(K_p - 1)^2 / (K_p + 2)^2$ 。

主动土压力:

$$P_a = \sigma_3 = \sigma_1 / K_{\text{p-MIS}} = \gamma z / K_{\text{p-MIS}} \quad , \quad (10)$$

式中, $K_{\text{p-MIS}} = \frac{1 + K_{\text{MIS}} + \sqrt{6K_{\text{MIS}} - 3K_{\text{MIS}}^2}}{1 - 2K_{\text{MIS}}}$ 。

被动土压力:

$$P_p = \sigma_1 = K_{p-MIS} \sigma_3 = K_{p-MIS} \gamma z \quad (11)$$

2.5 基于 AC-SMP 强度准则的平面应变土压力

将依据 AC-SMP 强度准则得到的中主应力条件 $\sigma_2 = \sigma_1^2 + K_p \sigma_3^2 / (\sigma_1 + K_p \sigma_3)$ 代入其强度准则可得

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = (1 + K_{AC} K_p + \sqrt{3K_{AC} K_p - K_{AC}^2 K_p^2 + 2K_{AC} K_p^2 + K_{AC} - 2K_{AC}^2 K_p^3}) / (1 - K_{AC} K_p - K_{AC}) \quad (12)$$

式中, $K_{AC} = 2(K_p - 1)^2 / (9K_p^2)$ 。

主动土压力:

$$P_a = \sigma_3 = \sigma_1 / K_{p-AC} = \gamma z / K_{p-AC} \quad (13)$$

式中, $K_{p-AC} = (1 + K_{AC} K_p + \sqrt{3K_{AC} K_p - K_{AC}^2 K_p^2 + 2K_{AC} K_p^2 + K_{AC} - 2K_{AC}^2 K_p^3}) / (1 - K_{AC} K_p - K_{AC})$ 。

被动土压力:

$$P_p = \sigma_1 = K_{p-AC} \sigma_3 = K_{p-AC} \gamma z \quad (14)$$

2.6 基于 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则的平面应变土压力

将中主应力条件 $\sigma_2 = 0.472\sigma_1 + 0.528\sigma_3$ 代入其强度准则可得:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 0.119K_p^2 + 0.976K_p - 0.121 \quad (15)$$

主动土压力:

$$P_a = \sigma_3 = \sigma_1 / K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} = \gamma z / K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} \quad (16)$$

式中, $K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} = 0.119K_p^2 + 0.976K_p - 0.121$ 。

被动土压力:

$$P_p = \sigma_1 = K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} \sigma_3 = K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} \gamma z \quad (17)$$

2.7 平面应变条件下基于各强度准则的土压力系数分析

(1) 主动土压力系数分析

依据平面应变条件下, 整理基于各强度准则得到的主动土压力系数 K_a 随内摩擦角 ϕ 的变化规律, 如图 1 所示。

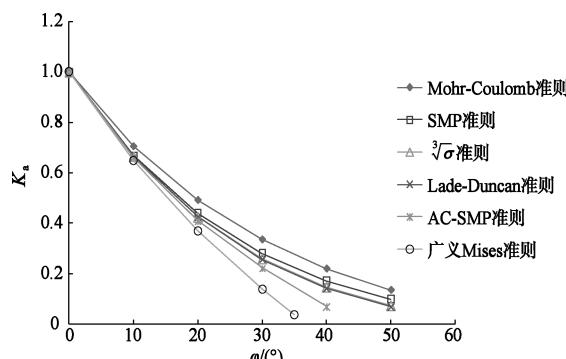


图 1 主动土压力系数与内摩擦角的关系

Fig. 1 Relationship between coefficient of active earth pressure and internal friction angle

从图 1 可以看出, 依据平面应变条件下各强度准则得到的主动土压力系数随着内摩擦角的增大呈非线性减小, 各基于各强度准则得到的主动土压力系数均小于 Mohr-Coulomb 强度准则计算的主动土压力系数, 主动土压力系数从大到小依次为 Mohr-Coulomb 强度准则、SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则、AC-SMP 强度准则、广义 Mises 强度准则。当 $\phi \leq 20^\circ$ 时, 基于各强度准则得到的主动土压力系数均能较好地反映主动土压力大小; $\phi > 20^\circ$ 后, 广义 Mises 强度准则的计算结果不适用于描述土的主动土压力, AC-SMP 强度准则的计算结果则误差较大。平面应变条件下, 除 Mohr-Coulomb 强度准则, 其余强度准则均考虑了中主应力对强度的贡献, 得到的主动土压力系数均小于 Mohr-Coulomb 强度准则计算的主动土压力系数, 表明土体在主动卸荷条件下可以承受更大的变形而保持稳定。

(2) 被动土压力系数分析

基于各平面应变强度准则计算的被动土压力系数随内摩擦角的变化规律, 如图 2 所示。

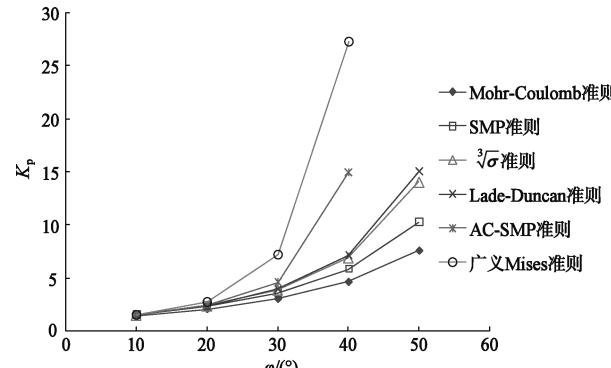


图 2 被动土压力系数与内摩擦角的关系

Fig. 2 Relationship between coefficient of passive earth pressure and internal friction angle

由图 2 可知, 被动土压力系数随着内摩擦角的增长呈非线性增大; 内摩擦角越大, 依据各强度准则计算的被动土压力系数的差异也越大。当 $\phi > 20^\circ$ 后, 广义 Mises 强度准则的被动土压力系数计算结果快速增大, 不适宜于计算被动土压力; $\phi > 30^\circ$ 后, AC-SMP 强度准则的计算结果迅速增大, 其余各强度准则的被动土压力计算结果未出现明显偏差, 能较好地反映被动土压力。

综合分析图 1, 图 2 土压力系数可知, 依据 Mohr-Coulomb 强度准则得到的主动土压力系数偏大, 被动土压力系数偏小, 未充分考虑到中主应力对于强度的贡献, 即未充分发挥土自身强度。平面应变条件下, 基于 SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则、AC-SMP 强度准则、广义 Mises 强度准

则得到的土压力系数均可用于主、被动土压力的计算, 但各自的适用范围不同: SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则的计算结果针对不同大小的内摩擦角均具有普遍的适用性; AC-SMP 强度准则的计算结果适用于 $\varphi < 30^\circ$ 时的土压力计算; 广义 Mises 强度准则适用于 $\varphi < 20^\circ$ 时的土压力计算。因此, 针对不同的土性和工程问题, 选择合理的强度准则计算结果, 可充分发挥土自身的强度, 降低支护强度, 提高工程经济性。

3 平面应变条件下基于各强度准则的黏性土主动与被动土压力

通过式(18)的坐标变换, 即用 $\hat{\sigma}_i$ 代替无黏性土平面应变土压力表达式中的 σ_i , 就可以得到考虑黏聚力的土压力表达式。

$$\hat{\sigma}_i = \sigma_i + ccot\varphi \quad i = 1, 2, 3 \quad (18)$$

式中, c 、 φ 分别为黏聚力和摩擦角。

3.1 基于 Mohr-Coulomb 强度准则的黏性土平面应变土压力

主动土压力:

$$\begin{aligned} P_a &= \sigma_3 = [\sigma_1 - ccot\varphi(K_p - 1)]/K_p \\ &= [\gamma z - ccot\varphi(K_p - 1)]/K_p \end{aligned} \quad (19)$$

被动土压力:

$$\begin{aligned} P_p &= \sigma_1 = K_p \sigma_3 + ccot\varphi(K_p - 1) \\ &= K_p \gamma z + ccot\varphi(K_p - 1) \end{aligned} \quad (20)$$

3.2 基于 SMP 强度准则的黏性土平面应变土压力

主动土压力:

$$\begin{aligned} P_a &= \sigma_3 = [\sigma_1 - ccot\varphi(K_{p-SMP} - 1)]/K_{p-SMP} \\ &= [\gamma z - ccot\varphi(K_{p-SMP} - 1)]/K_{p-SMP} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, $K_{p-SMP} = \frac{1}{4}(\sqrt{K_{SMP}} + \sqrt{K_{SMP} - 3} - 2\sqrt{K_{SMP}} - 1)^2$ 。

被动土压力:

$$\begin{aligned} P_p &= \sigma_1 = K_{p-SMP} \sigma_3 + ccot\varphi(K_{p-SMP} - 1) \\ &= K_{p-SMP} \gamma z + ccot\varphi(K_{p-SMP} - 1) \end{aligned} \quad (22)$$

3.3 基于 Lade-Duncan 强度准则的黏性土平面应变土压力

主动土压力:

$$\begin{aligned} P_a &= \sigma_3 = [\sigma_1 - ccot\varphi(K_{p-LD} - 1)]/K_{p-LD} \\ &= [\gamma z - ccot\varphi(K_{p-LD} - 1)]/K_{p-LD} \end{aligned} \quad (23)$$

被动土压力:

$$\begin{aligned} P_p &= \sigma_1 = K_{p-LD} \sigma_3 + ccot\varphi(K_{p-LD} - 1) \\ &= K_{p-LD} \gamma z + ccot\varphi(K_{p-LD} - 1) \end{aligned} \quad (24)$$

3.4 基于广义 Mises 强度准则的黏性土平面应变土压力

主动土压力:

$$\begin{aligned} P_a &= \sigma_3 = [\sigma_1 - ccot\varphi(K_{p-MIS} - 1)]/K_{p-MIS} \\ &= [\gamma z - ccot\varphi(K_{p-MIS} - 1)]/K_{p-MIS} \end{aligned} \quad (25)$$

被动土压力:

$$\begin{aligned} P_p &= \sigma_1 = K_{p-MIS} \sigma_3 + ccot\varphi(K_{p-MIS} - 1) \\ &= K_{p-MIS} \gamma z + ccot\varphi(K_{p-MIS} - 1) \end{aligned} \quad (26)$$

3.5 基于 AC-SMP 强度准则的黏性土平面应变土压力

主动土压力:

$$\begin{aligned} P_a &= \sigma_3 = [\sigma_1 - ccot\varphi(K_{p-AC} - 1)]/K_{p-AC} \\ &= [\gamma z - ccot\varphi(K_{p-AC} - 1)]/K_{p-AC} \end{aligned} \quad (27)$$

被动土压力:

$$\begin{aligned} P_p &= \sigma_1 = K_{p-AC} \sigma_3 + ccot\varphi(K_{p-AC} - 1) \\ &= K_{p-AC} \gamma z + ccot\varphi(K_{p-AC} - 1) \end{aligned} \quad (28)$$

3.6 基于 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则的黏性土平面应变土压力

主动土压力:

$$\begin{aligned} P_a &= \sigma_3 = [\sigma_1 - ccot\varphi(K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} - 1)]/K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} \\ &= [\gamma z - ccot\varphi(K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} - 1)]/K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} \end{aligned} \quad (29)$$

被动土压力:

$$\begin{aligned} P_p &= \sigma_1 = K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} \sigma_3 + ccot\varphi(K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} - 1) \\ &= K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} \gamma z + ccot\varphi(K_{p-\sqrt[3]{\sigma}} - 1) \end{aligned} \quad (30)$$

4 平面应变土压力理论算例与实测值对比分析

4.1 无黏性土土压力验证

试验采用无黏性的松散砂土^[10], 内摩擦角 $\varphi = 34^\circ$, 重度 $\gamma = 19.56 \text{ kN/m}^3$ 。挡墙由杂木板制成, 厚度 5 cm, 高 1 m, 宽 1 m, 并用两肋加强, 以满足刚度要求, 其中, h 为墙高, P_a 为墙体水平土压力。依据各个强度准则得到的挡墙不同深度处的主动土压力值与实测土压力曲线的比较, 如图 3 所示。

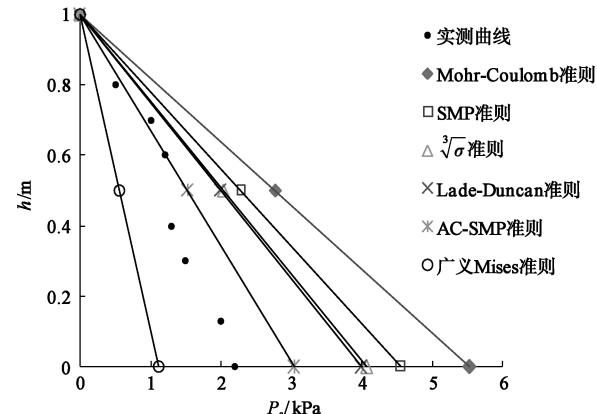


图 3 砂土的主动土压力

Fig. 3 Active earth pressures of sand

从图3可以看出,依据平面应变条件下各强度准则计算的主动土压力计算结果从大到小依次为 Mohr-Coulomb 强度准则、SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则、AC-SMP 强度准则、广义 Mises 强度准则,规律明显。平面应变条件下,土破坏时中主应力的大小,直接决定了土压力的大小, Mohr-Coulomb 强度准则未考虑中主应力对强度的影响,因此其计算的主动土压力值最大。

实测主动土压力值远小于基于 Mohr-Coulomb 强度准则的计算值,说明 Mohr-Coulomb 强度准则的计算结果过于保守。当开挖深度小于 0.5 m 时, Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则、AC-SMP 强度准则的计算结果与实测值较为吻合;随着开挖深度继续增大,则 AC-SMP 强度准则的计算结果和实测值最为接近。基于广义 Mises 强度准则计算的主动土压力值比实测值还小,在工程设计中不安全,不能适用于计算土压力问题;基于 SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则、AC-SMP 强度准则得到的主动土压力均体现了平面应变条件下中主应力对土强度的贡献,能较好地反映挡墙上的应力状态,与实测土压力值更为接近。

4.2 黏性土土压力验证

某深基坑,深 7.1 m,采用桩径为 800 mm 的悬臂桩支护,桩长 12.70 m。坑深内土层共四层:第 1 层为杂填土,层厚 0.8 m, $c = 15$ kPa, $\varphi = 15^\circ$, $\gamma = 19.2$ kN/m³;第 2 层为新近化中粉质黏土,层厚 3 m, $c = 5$ kPa, $\varphi = 21^\circ$, $\gamma = 19$ kN/m³;第 3 层为第四纪中粉质黏土,层厚 2.5 m, $c = 14$ kPa, $\varphi = 24.8^\circ$, $\gamma = 19.6$ kN/m³;第 4 层为砂质粉土,层厚 0.8 m, $c = 6$ kPa, $\varphi = 28.5^\circ$, $\gamma = 20$ kN/m³。实测主动土压力值与各强度准则计算出的不同土层深度处的主动土压力值如图 4 所示。

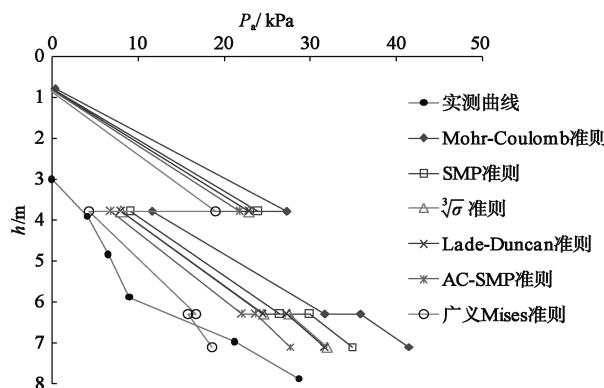


图 4 各强度准则条件下主动土压力分布图

Fig. 4 Distribution of active earth pressure under different strength criteria

由图 4 可知,基于各强度准则计算的成层土主动土压力的大小规律与无黏性土、均质黏性土一致。基

于广义 Mises 强度准则计算的基坑底部的主动土压力值已经小于实测主动土压力,在工程设计中不安全,也进一步表明,基于广义 Mises 强度准则的土压力理论不再适宜于描述挡墙上土压力的大小;其余各强度准则的计算结果均比 Mohr-Coulomb 强度准则的计算结果更接近实测值,其中 AC-SMP 强度准则的计算值与实测土压力最为接近。这也说明,在保证安全前提下,计算平面应变条件下的土压力时,充分考虑中主应力对土强度的贡献很有必要,可节约社会资源,提高工程经济性。

5 结 论

(1) 平面应变条件下,依据无黏性土常用的多种强度准则,应用相关流动法则和塑性理论,得到了基于不同强度准则的中主应力与大、小主应力之间的关系,推导出了各强度准则的主、被动土压力计算公式,并将其推广到黏性土。

(2) 在平面应变条件下,基于各强度准则得到的土压力系数均可用于主、被动土压力的计算,但各自的适用范围不同: Mohr-Coulomb 强度准则、SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则的计算结果针对不同大小的内摩擦角均具有普遍的适用性; AC-SMP 强度准则的计算结果适用于 $\varphi < 30^\circ$ 时的土压力计算; 广义 Mises 强度准则适用于 $\varphi < 20^\circ$ 时的土压力计算。

(3) 平面应变条件下,土体破坏时,中主应力的发挥程度直接决定了土压力的大小。中主应力发挥越高,土的强度越高,具体表现为计算出的主动土压力越小,被动土压力越大;反之,中主应力越小,对土强度的贡献也就越小,表现为所计算的主动土压力值越大,被动土压力越小。

(4) Mohr-Coulomb 强度准则由于未考虑中主应力效应,故而计算的主动土压力偏大,被动土压力偏小,未能充分发挥土的强度潜能,在设计上趋于保守。SMP 强度准则、Lade-Duncan 强度准则、 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则、AC-SMP 强度准则的计算结果更接近实测土压力,其中 AC-SMP 强度准则的计算结果最为准确。广义 Mises 强度准则的土压力计算结果不再适宜于描述挡墙上土压力的大小。

参 考 文 献:

- [1] 江强,朱建明,姚仰平. 基于 SMP 准则的土体三维应力状态土压力问题[J]. 岩土工程学报,2006, 28(S1): 1415–1417. (JIANG Qiang, ZHU Jian-ming, YAO Yang-ping. Earth pressures of three-dimensional soil stress states based on SMP failure criterion [J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2006, **28**(S1): 1415–1417. (in Chinese))
- [2] 谢群丹, 何 杰, 刘 杰, 等. 双剪统一强度理论在土压力计算中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 343–345. (XIE Qun-dan, HE Jie, LIU Jie, et al. The application of the double-shear unified strength theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 343–345. (in Chinese))
- [3] 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. (SHAO Sheng-jun, CHEN Fei, DENG Guo-hua. 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. (in Chinese))
- [4] ZHANG J M, SONG F, LI D J. Effects of strain localization on seismic active earth pressures [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(7): 999–1003.
- [5] 路德春, 张在明, 杜修力, 等. 平面应变条件下的极限土压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(S2): 3354–3359. (LU De-chun, ZHANG Zai-ming, DU Xiu-li, et al. Limit earth pressure under plane strain condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2): 3354–3359. (in Chinese))
- [6] MATSUOKA H, NAKAI T R. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses [J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1974(232): 59–70.
- [7] 庄心善, 李德贤, 何 怡. 基于 Lade-Duncan 屈服准则的土压力计算[J]. 土工基础, 2007, **21**(5): 40–42. (ZHUAGN Xing-shan, LI De-xian, HE Yi. Calculation of earth pressure based on the Lade-Duncan yield criterion [J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, **21**(5): 40–42. (in Chinese))
- [8] 张 玉, 邵生俊, 赵 敏, 等. 平面应变条件下土的强度准则在黄土工程问题中的应用研究[J]. 土木工程学报, 2018, **51**(8): 71–80. (ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun, ZHAO Min, et al. Application research of soil strength criterion in loess engineering problems under plane-strain condition for loess problems [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, **51**(8): 71–80. (in Chinese))
- [9] 邵生俊, 张 玉, 陈昌禄, 等. 土的 $\sqrt[3]{\sigma}$ 空间滑动面强度准则及其与传统准则的比较研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(4): 577–585. (SHAO Sheng-jun, ZHANG Yu, CHEN Chang-lun, et al. Strength criterion based on $\sqrt[3]{\sigma}$ spatially mobilized plane of soil and its comparison with conventional criteria [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(4): 577–585. (in Chinese))
- [10] 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): 19–26. (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): 19–26. (in Chinese))

(编校:明经平)