

考虑中主应力影响倾斜填土面朗肯土压力参数的敏感性分析

张健^{1,2}, 胡瑞林¹, 余文龙¹, 李丽慧¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 南阳师范学院土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061)

摘要: 挡土墙后填土面为倾斜时, 朗肯土压力理论应用很少。经典的各种土压力理论是基于 Mohr-Coulomb 强度准则得出的, 没有考虑中主应力的影响。首先推导了填土面倾斜时的朗肯主动和被动土压力的计算公式; 根据平面应变假设确定了中主应力 $s_2 = n(s_1 + s_3)$, 在此基础上推导了统一强度理论下的材料强度指标计算公式, 利用该公式可将 Mohr-Coulomb 强度准则下的材料强度指标转化为考虑中主应力效应的统一强度理论下的材料强度指标; 最后通过一算例采用正交试验设计对反映中主应力影响的中间主剪应力系数、泊松比、填土面倾角、黏聚力、内摩擦角、重度 6 种因素进行了敏感性分析。结果表明: 影响朗肯主动土压力强度的 6 种因素从大到小分别为: 重度、中间主剪应力系数、黏聚力、内摩擦角、倾角、泊松比; 影响朗肯被动土压力强度的 6 种因素从大到小分别为: 内摩擦角、中间主剪应力系数、泊松比、黏聚力、倾角、重度; 中主应力对朗肯土压力计算结果的影响是一个不可忽视的重要因素。

关键词: 朗肯土压力; 倾斜填土面; 中主应力; 正交试验设计; 敏感性分析

中图分类号: TU431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)10-1566-07

作者简介: 张健(1980-), 男, 河南新乡人, 中国科学院地质与地球物理研究所博士研究生, 主要从事岩土力学及地质灾害等方面的研究。E-mail: zhangjian9945016@126.com。

Sensitivity analysis of parameters of Rankine's earth pressure with inclined surface considering intermediate principal stress

ZHANG Jian^{1,2}, HU Rui-lin¹, YU Wen-long¹, LI Li-hui¹

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China; 2. Department of Civil Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract: Up to now the Rankine's earth pressure theory has not been widely used under the condition of inclined surface. Generally, the classical earth pressure theories are based on the Mohr-Coulomb criterion and the intermediate principal stress is not taken into account. First, a formula for Rankine's active and passive earth pressures with inclined surface as well as that for the intermediate principal stress in the plane strain assumption is derived. Then, the formula for shear strength parameters in the unified strength theory is derived based on the formula for the intermediate principal stress, so the shear strength parameters under the Mohr-Coulomb criterion can be transformed into the shear strength parameters under the unified strength theory. Finally, an example is given to carry out sensitivity analysis of six factors in terms of the design theory of orthogonal tests. The six influential factors are considered including the cohesion, internal friction angle, intermediate principal shear stress parameter, Poisson's ratio, angle of inclined surface and unit weight. It is shown that among the influential factors of Rankine's active earth pressure, the unit weight is the most important one, followed by the intermediate principal shear stress parameter, the cohesion, the internal friction angle, the angle of inclined surface and the Poisson's ratio; among those of Rankine's passive earth pressure, the internal friction angle is the most important one, followed by the intermediate principal shear stress parameter, the Poisson's ratio, the cohesion, the angle of inclined surface and the unit weight. So the effect of the intermediate principal stress on the calculated results of the Rankine's earth pressure is a critical factor.

Key words: Rankine's earth pressure; inclined surface; intermediate principal stress; orthogonal experimental design; sensitivity analysis

基金项目: 中科院知识创新重要方向性项目(KZCXZ-YW-113); 中国地质调查局地调项目(1212010814005); 国家自然科学基金项目(41072226)

收稿日期: 2009-05-21

0 引言

经典的各种土压力理论是基于Mohr-Coulomb强度准则得出的,没有考虑中主应力对强度的影响。俞茂宏双剪统一强度理论提出后,一些学者把双剪统一强度理论引入土压力计算中,考虑了中主应力对土压力计算结果影响作用,扩展了其应用范围。高江平^[1-2]在双剪统一强度理论的基础上通过计算平衡拱面积和滑裂体体积推导了主动土压力公式,还导出了按能量理论计算挡土墙主、被动土压力的公式。范文^[3]根据土压力上限理论和多三角形破坏机构的计算原理推导了基于统一强度理论的土压力计算公式。谢群丹^[1]、路德春^[2]、陈秋南^[3]分别把中主应力假设为 $s_2=Ks_1$ 、 $s_2=\sqrt{s_1s_3}$ 、 $s_2=\frac{m}{2}(s_1+s_3)$,利用双剪统一强度理论主应力型表达式也提出了新的土压力计算公式。3位学者在主应力分析中对中主应力的假设缺乏合理依据和说明。虽然上述5位学者都考虑了中主应力的作用,但是并不清楚中主应力对土压力计算结果的具体影响程度。

英国学者朗肯(Rankine W J M)于1857年提出的朗肯土压力理论成为经典的土压力分析计算理论之一。经典的朗肯土压力理论要求挡土墙后填土面一般为水平,当挡土墙后填土面倾斜时,朗肯土压力理论应用很少。因此,本文基于对填土面倾斜时土微元体应力状态分析推导了填土面倾斜时的朗肯主动和被动土压力的计算公式。然后根据平面应变假设确定了中主应力 $s_2=n(s_1+s_3)$,在此基础上推导了统一强度理论下的材料强度指标计算公式,利用该公式可将Mohr-Coulomb强度准则下的材料强度指标 c_0 、 j_0 转化为考虑中主应力效应的统一强度理论下的材料强度指标 c_t 、 j_t ,最后采用多个因素敏感性分析方法正交试验设计对黏聚力 c_0 、内摩擦角 j_0 、反映中主应力影响的中间主剪应力系数 b 、泊松比 n 、填土面倾角 b 、重度 g 等6个参数进行了敏感性分析,得出了朗肯主动和被动土压力的主导影响因素,为挡土墙的优化设计提供了依据。

1 主、被动土压力强度 p_a 和 p_p 的确定

1.1 理论分析模型

假设墙背垂直、光滑、半无限土体具有与水平面成 b 角的倾斜表面,如图1所示。现分析紧靠挡土墙面土中任意 Z 深度处一菱形土微元体的应力状态。该土微元体由两个与地表平行的斜面所组成,两组平面

夹角为 $90-b$ 。由于是半无限土体,在自重作用下,地表下相同深度 Z 处,这种土单元的应力状态都是一样的;即在其斜面上作用有相等的竖直应力 s_z ,其数值等于单位斜面积上土柱的重量 $gz \cos b$;在土微元体的竖直面上则作用有大小相等的应力 s 。

根据单元体的静力平衡条件,作用于单元体上的竖向应力大小相等,方向相反,相互平衡,因而作用于单元两个侧面的应力 s 的方向必定平行于坡面。当墙向外离开填土方向移动时, s 不断减小,直至土单元达到主动极限平衡状态,这时的 s 即为主动土压力 p_a 强度。同样地,当墙向里填土方向移动时, s 不断增大,直至达到被动极限平衡状态,这时的 s 即为被动土压力 p_p 强度。

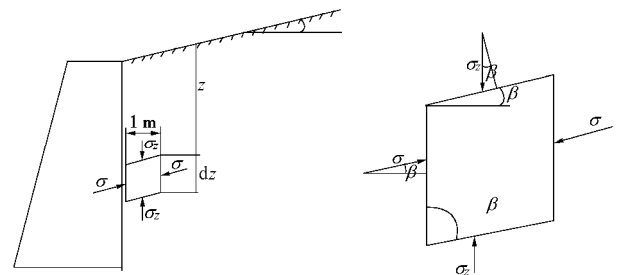


图1 倾斜填土面时土体中某点的应力状态

Fig. 1 Stress state of a point with inclined surface

1.2 主动土压力强度 p_a 确定

首先在水平 s 轴的上下两侧分别画出与水平轴成 $\pm b$ 的直线 OH 与 OH' ;然后在 OH' 线上取线段 $OB=s_z=gz \cos b$,则 B 点代表土微元体单位斜面上的应力,包括法向应力与剪应力。因此 B 点必定在代表该单元应力状态的应力圆I上。其次在 s 轴上找圆心 E ,作应力圆,令其通过 B 点,又与抗剪强度包线相切,这个应力圆就是该单元处于极限平衡状态的应力圆。最后应力圆交 OH' 线于 A' 点, A' 点代表单元竖直面上的应力 s ,也即主动土压力强度 p_a ,其值等于 $\overline{OA'}$ 线段长度见图2。

1.3 被动土压力强度 p_p 确定

首先在水平 s 轴的上下两侧分别画出与水平轴成 $\pm b$ 的直线 OH 与 OH' ;然后在 OH 线上取线段 $OC=s_z'=gz \cos b$,则 C 点代表土微元体面上的应力,包括法向应力与剪应力。因此 C 点必定在代表该单元应力状态的应力圆II上;其次在 s 轴上找圆心 F ,作应力圆,令其通过 C 点,又与抗剪强度包线相切,这个应力圆就是该单元处于极限平衡状态的应力圆;最后应力圆交 OH' 线于 D' ,因此 D' 代表单元竖直面上的应力 s ,也即被动土压力强度 p_p ,其值等于 $\overline{OD'}$ 线段长度见图2。

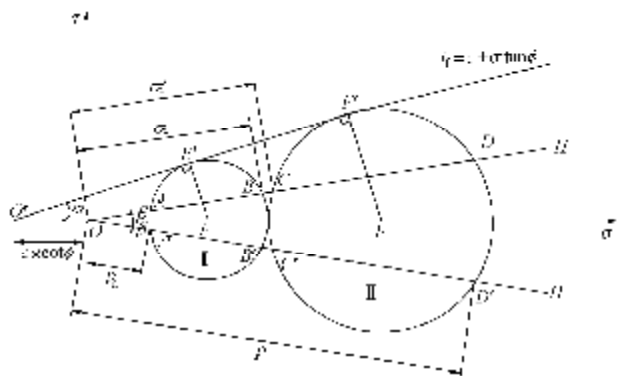


图2 倾斜填土面时土体中某点的应力圆

Fig. 2 Stress circle of a point with inclined surface

2 计算公式推导

由于 s 和 s_z 并不垂直于其作用面, 故它们都不是主应力。 s 即可以代表主动土压力又可以代表被动土压力, 下面我们通过几何解析的方法确定 p_a , p_p 。建立如图 2 的 $s-t$ 直角坐标系, 莫尔圆 I 是代表主动土压力时的状态, 莫尔圆 II 是代表被动土压力时的状态。

2.1 主动土压力强度 p_a 推导

根据莫尔圆 I 和直线 OH 建立其方程式:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(s - \frac{s_1 + s_3}{2} \right)^2 + (t - 0)^2 &= \left(\frac{s_1 - s_3}{2} \right)^2 \\ t &= s \tan b \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式 (1) 是关于 s 的一元二次方程, 联立求解可得方程的两个根为

$$s_A = \frac{(s_1 + s_3) - \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}}{2(1 + \tan^2 b)} \quad (2)$$

$$s_B = \frac{(s_1 + s_3) + \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}}{2(1 + \tan^2 b)} \quad (3)$$

上述两个根即为莫尔圆 I 和直线 OH 交点 A、B 两点的横坐标值。

由以上分析可知: OA' 代表朗肯主动土压力强度 p_a ; 直线 OH 与 OH' 对称, 所以 $OA' = OA$ 。

$$\frac{p_a}{s_z} = \frac{OA'}{OB} = \frac{OA}{OB} = \frac{s_A}{s_B} = \frac{(s_1 + s_3) - \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}}{(s_1 + s_3) + \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}} \quad (4)$$

由上述理论分析可知: $OB = gz \cos b$,

$$OB \cos b = s_B \quad (5)$$

在三角形 $O'EE'$ 中:

$$EE' = O'E \sin j_0, \quad EE' = R = \frac{s_1 - s_3}{2},$$

$$O'E = O'O + OE = c_0 \cdot \cot j_0 + \frac{s_1 + s_3}{2},$$

$$\text{所以 } R = \frac{s_1 - s_3}{2} = (c_0 \cdot \cot j_0 + \frac{s_1 + s_3}{2}) \sin j_0 \quad (6)$$

联立式 (2) ~ (6) 可得

$$p_a = \frac{\cos b}{\cos^2 j_0} \{ c_0 \sin 2j_0 + 2gz \cos^2 b - 2[g^2 z^2 \cos^2 b (\cos^2 b - \cos^2 j_0) + c_0^2 \cos^2 j_0 + c_0 gz \cos^2 b \sin 2j_0]^{\frac{1}{2}} \} - gz \cos b \quad (7)$$

p_a 的作用方向垂直于墙背, 沿墙高呈三角形分布。

若挡土墙后填土为无黏性土, 即 $c_0 = 0$, 由式 (7)

可得

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{2 \cos b}{gz \cos^2 j_0} \left[gz \cos^2 b - gz \cos b (\cos^2 b - \cos^2 j_0)^{\frac{1}{2}} \right] - gz \cos b \\ &= \frac{2gz \cos b}{\cos^2 j_0} \left[\cos b - (\cos^2 b - \cos^2 j_0)^{\frac{1}{2}} \right] - gz \cos b \\ &= gz \cos b \frac{\cos b - \sqrt{\cos^2 b - \cos^2 j_0}}{\cos b + \sqrt{\cos^2 b - \cos^2 j_0}} \quad (8) \end{aligned}$$

即为 Mohr-Coulomb 准则条件下倾斜填土面无黏性土的朗肯主动土压力强度计算公式。

若挡土墙填土面水平, 即 $b = 0$, 由式 (7) 可得

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{1}{\cos^2 j_0} \{ c_0 \sin 2j_0 + 2gz - 2[c_0^2 \cos^2 j_0 + 2gz c_0 \sin j_0 \cos j_0 + g^2 z^2 \sin^2 j_0]^{\frac{1}{2}} \} - gz \\ &= \frac{2}{\cos^2 j_0} \{ c_0 \sin j_0 \cos j_0 + gz - (c_0 \cos j_0 + gz \sin j_0) \} - gz \\ &= \frac{gz(1 - \sin j_0)}{1 + \sin j_0} - \frac{2c_0 \cos j_0}{1 + \sin j_0} = gz \tan^2 \left(45^\circ - \frac{j_0}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{j_0}{2} \right) \quad (9) \end{aligned}$$

即为经典的朗肯主动土压力强度公式。

在式 (7) 中, 令 $p_a = 0$, 则可求得张拉裂缝的深度 z_0 , 即

$$0 = \frac{\cos b}{\cos^2 j_0} \{ c_0 \sin 2j_0 + 2gz \cos^2 b - 2[g^2 z^2 \cos^2 b (\cos^2 b - \cos^2 j_0) + c_0^2 \cos^2 j_0 + c_0 gz \cos^2 b \sin 2j_0]^{\frac{1}{2}} \} - gz \cos b \quad (10)$$

将上式两端平方、整理得

$$z_0^2 g^2 \cos j_0 - 4z_0 c_0 g \sin j_0 + 4c_0^2 \cos j_0 = 0 \quad (11)$$

z_0 一元二次方程两个根为

$$z_0 = \frac{2c_0(\sin j_0 \pm 1)}{g \cos j_0} \quad (12)$$

在实际工程中张拉裂缝的深度 $z_0 > 0$, 所以

$$z_0 = \frac{2c_0(\sin j_0 + 1)}{g \cos j_0}, \quad (13)$$

上式化简可得

$$z_0 = \frac{2c_0}{g} \tan \left(45^\circ + \frac{j_0}{2} \right). \quad (14)$$

式 (14) 与经典的朗肯主动土压力中的张拉裂缝深度计算公式相同, 表明张拉裂缝深度与填土面倾角无关。

若墙高为 H , 则作用于单位墙长度上的总土压力 E_a 为

$$E_a = \frac{1}{2} P_{\max} (H - z_0), \quad (15)$$

P_{\max} 为墙底处主动土压力强度, E_a 的作用方向垂直于墙背, 其作用点在距墙底 $\frac{H - z_0}{3}$ 处。

2.2 被动土压力强度 p_p 推导

根据莫尔圆 II 和直线 OH 建立其方程式:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(s - \frac{s_1 + s_3}{2} \right)^2 + (t - 0)^2 &= \left(\frac{s_1 - s_3}{2} \right)^2, \\ t &= s \tan b. \end{aligned} \right. \quad (16)$$

式 (16) 是关于 s 的一元二次方程, 联立求解可得方程的两个根为

$$s_c = \frac{(s_1 + s_3) - \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}}{2(1 + \tan^2 b)}, \quad (17)$$

$$s_D = \frac{(s_1 + s_3) + \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}}{2(1 + \tan^2 b)}. \quad (18)$$

上述两个根即为莫尔圆 II 和直线 OH 交点 C 、 D 两点横坐标值。

由以上分析可知: OD' 代表朗肯主动土压力强度 p_a , 直线 OH 与 OH' 对称, 所以 $OD = OD' = s_D$ 。

$$\frac{p_p}{s'_z} = \frac{OD'}{OC} = \frac{OD}{OC} = \frac{s_D}{s_c} = \frac{(s_1 + s_3) + \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}}{(s_1 + s_3) - \sqrt{(s_1 + s_3)^2 - 4s_1s_3(1 + \tan^2 b)}}. \quad (19)$$

由上述分析可知

$$\left\{ \begin{aligned} OC &= g z \cos b, \\ OC \cos b &= s'_c. \end{aligned} \right. \quad (20)$$

由三角形 $O'FF'$ 可得

$$\begin{aligned} FF' &= O'F \sin j_0 \quad FF' = R = \frac{s_1 - s_3}{2}, \\ O'F &= O'O + OF = c_0 \cot j + \frac{s_1 + s_3}{2}, \end{aligned}$$

$$\text{所以 } R = \frac{s_1 - s_3}{2} = (c_0 \cot j_0 + \frac{s_1 + s_3}{2}) \sin j_0. \quad (21)$$

联立式 (17)、(18)、(19)、(20)、(21) 可得

$$\begin{aligned} p_p &= \frac{\cos b}{\cos^2 j_0} \{ c_0 \sin 2j_0 + 2c_0 g z \cos^2 b + 2[g^2 z^2 \cos^2 b \\ &(\cos^2 b - \cos^2 j_0) + c_0^2 \cos^2 j_0 + c_0 g z \cos^2 b \sin 2j_0]^{\frac{1}{2}} \} \\ &- g z \cos b. \end{aligned} \quad (22)$$

若墙后填土为无黏性土, 即 $c_0 = 0$, 则由式 (22) 可得

$$\begin{aligned} p_p &= \frac{2 \cos b}{g z \cos^2 j_0} \left[g z \cos^2 b + g z \cos b (\cos^2 b - \cos^2 j_0)^{\frac{1}{2}} \right] - g z \cos b \\ &= \frac{2 g z \cos b}{\cos^2 j_0} \left[\cos b + (\cos^2 b - \cos^2 j_0)^{\frac{1}{2}} \right] - g z \cos b \\ &= g z \cos b \frac{\cos b + \sqrt{\cos^2 b - \cos^2 j_0}}{\cos b - \sqrt{\cos^2 b - \cos^2 j_0}}, \end{aligned} \quad (23)$$

即为 Mohr-Coulomb 准则条件下倾斜填土面无黏性土的朗肯被动土压力强度计算公式。

若填土面水平, 即 $b = 0$, 则

$$\begin{aligned} p_p &= \frac{1}{\cos^2 j_0} \{ c_0 \sin 2j_0 + 2g z + \\ &2[c_0^2 \cos^2 j + 2g z c_0 \sin j_0 \cos j_0 + g^2 z^2 \sin^2 j_0]^{\frac{1}{2}} \} - g z \\ &= g z \tan^2 \left(45^\circ + \frac{j_0}{2} \right) + 2c_0 \tan \left(45^\circ + \frac{j_0}{2} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

即为经典的朗肯被动土压力强度公式。

若墙高为 H , 则作用于单位墙长度上的总土压力为

$$E_p = \frac{1}{2} P_{p \max} H. \quad (25)$$

$P_{p \max}$ 为墙底处被动土压力强度, E_p 的作用方向垂直于墙背, 其作用点在距墙底 $\frac{H}{3}$ 处。

3 平面应变假设下的统一强度理论材料强度指标

由于 Mohr-Coulomb 强度准则等普遍运用于岩土工程的相关强度理论均无法描述中间主应力对岩土力学性态的影响, 俞茂宏于 1991 年发表了双剪统一强度理论, 充分考虑了中间主应力 s_2 在不同应力条件下对材料屈服或破坏的影响。统一强度准则具有多种数学表达式, 在岩土力学和工程中, 压应力为正、拉应力为负, 则其主应力型的表达式为

当 $s_2 \leq \frac{s_3 + as_1}{1+a}$ 时, $F = as_1 - \frac{bs_2 + s_3}{1+b} = s_t$, (26)

当 $s_2 \geq \frac{s_3 + as_1}{1+a}$ 时, $F' = \frac{a}{1+b}(s_1 + bs_2) - s_3 = s_t$ 。(27)

式中 s_t 为拉伸强度极限; s_c 为压缩强度极限; a 为材料拉压强度比, b 为反映中主应力影响的中间主剪应力系数。

$$a = \frac{s_t}{s_c} = \frac{1 - \sin j_0}{1 + \sin j_0} \quad , \quad (28)$$

$$s_t = \frac{2c_0 \cos j_0}{1 + \sin j_0} \quad , \quad (29)$$

c_0 , j_0 为岩土体的黏聚力和内摩擦角。

将式 (28)、(29) 代入式 (26)、(27), 可得出用 c_0 和 j_0 表示的双剪统一强度理论:

当 $s_2 \leq \frac{s_1 + s_3}{2} - \frac{s_1 - s_3}{2} \sin j_0$ 时,

$$s_1(1 - \sin j_0) - \frac{bs_2 + s_3}{1+b}(1 + \sin j_0) = 2c_0 \cos j_0 \quad ; \quad (30)$$

当 $s_2 \geq \frac{s_1 + s_3}{2} - \frac{s_1 - s_3}{2} \sin j_0$ 时,

$$\frac{s_1 + bs_2}{1+b}(1 - \sin j_0) - s_3(1 + \sin j_0) = 2c_0 \cos j_0 \quad 。 \quad (31)$$

平面应变状态是岩土工程中广泛存在的一种应力状态, 如边坡、条形地基、挡土墙等。当采用非线性方法对岩土体进行强度和变形分析时, 中主应力可以通过广义虎克定律来确定。该模型可视为平面应变问题进行研究, 假设挡土墙横截面为 xz 平面, 那么垂直于挡土墙横截面的方向为 y 方向, 由平面应变问题的弹性解答可知: $e_y = 0$; 由广义胡克定律知: $e_y =$

$\frac{1}{E}[s_y - n(s_z + s_x)]$, 其中 v 为填土材料的泊松比, $0 < n < 0.5$, 可得 $s_y = n(s_z + s_x)$; 在 xz 平面上一点应力状态: $s_z + s_x = s_1 + s_3$, 所以假设中间主应力为

$$s_2 = n(s_1 + s_3) \quad , \quad (32)$$

根据文献[5], 令主应力 s_1 为

$$s_1 = \frac{1 + \sin j_t}{1 - \sin j_t} s_3 + \frac{2c_t \cos j_t}{1 - \sin j_t} \quad , \quad (33)$$

可解得

$$j_t = \arcsin \left[\frac{b(1 - 2n) + (2 + b + 2nb) \sin j_0}{2 + b(1 + \sin j_0)} \right] \quad , \quad (34)$$

$$c_t = \frac{2(1+b)c_0 \cos j_0}{2 + b(1 + \sin j_0) \cos j_t} \quad 。 \quad (35)$$

上述两个公式可以将 Mohr-Coulomb 强度准则抗剪强度参数 c_0 , j_0 转化为统一强度理论下的抗剪强度参数数 c_t , j_t 。其中 c_t , j_t 公式中含有中间主剪应力系数 b , 以此来考虑了中主应力的影响作用。

4 多因素正交分析算例

算例: 挡土墙墙高 $H=5$ m, 分析黏聚力 c_0 、内摩擦角 j_0 、泊松比 n 、反映中主应力影响的中间主剪应力系数 b 、重度 g 、倾角 b 等 6 种因素对朗肯主、被动土压力强度 p_a 和 p_p 的影响。各参数取值范围及水平见表 1。

计算朗肯主、被动土压力强度 p_a 和 p_p 时采用公式 (7) 和 (22), 为了考虑中主应力的作用, 需要利用 (34)、(35) 两个公式可以将 Mohr-Coulomb 强度准则抗剪强度参数 c_0 , j_0 转化为统一强度理论下的抗剪强度参数数 c_t , j_t , 见表 2。然后采用正交试验进行了分析见表 3、表 4 和表 5。

表 1 正交试验的因素及水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal tests

水平	黏聚力 c_0 /kPa	内摩擦角 $j_0/(^\circ)$	中间主 剪应力 系数 b	泊松 比 n	倾角 b /(kN·m)	重度 g /(kN·m ⁻³)
1	0	20	0.00	0.000	0	16
2	5	25	0.25	0.125	5	17
3	10	30	0.50	0.250	10	18
4	15	35	0.75	0.375	15	19
5	20	40	1.00	0.500	18	20

表 2 在不同 b 值和 n 值下的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters under different values of b and n

序号	黏聚力 c_0 /kPa	内摩擦角 $j_0/(^\circ)$	中间主剪 应力系数 b	泊松 比 n	黏聚力 c_t /kPa	内摩擦角 $j_t/(^\circ)$
1	0	20	0.00	0.000	0.0	20.0
2	0	25	0.25	0.125	0.0	29.6
3	0	30	0.50	0.250	0.0	36.2
4	0	35	0.75	0.375	0.0	41.0
5	0	40	1.00	0.500	0.0	44.9
6	5	20	0.25	0.000	6.6	23.7
7	5	25	0.5	0.125	8.4	29.6
8	5	30	0.75	0.250	14.7	34.1
9	5	35	1.00	0.375	11.5	49.6
10	5	40	0.00	0.500	3.8	40.0
11	10	20	0.50	0.000	12.7	22.6
12	10	25	0.75	0.125	10.5	38.6
13	10	30	1.00	0.250	67.4	42.7
14	10	35	0.00	0.375	8.2	35.0
15	10	40	0.25	0.500	7.9	42.5
16	15	20	0.75	0.000	18.4	31.4
17	15	25	1.00	0.125	34.6	35.3
18	15	30	0.00	0.250	13.0	30.0
19	15	35	0.25	0.375	13.9	36.8
20	15	40	0.50	0.500	29.2	48.3
21	20	20	1.00	0.000	31.6	27.3
22	20	25	0.00	0.125	18.1	25.0
23	20	30	0.25	0.250	20.2	35.4
24	20	35	0.50	0.375	40.3	42.4
25	20	40	0.75	0.500	17.6	47.5

表 3 试验方案及分析计算表

Table 3 Experimental schemes and analysis of calculation							
序号	黏聚力 c_0 /kPa	内摩 擦角 j_0 /($^{\circ}$)	中间 主剪 应力 系数 b	泊松 比 n	倾角 b /(kN·m)	重度 g /(kN·m $^{-3}$)	主动 被动 p_a p_p / kPa
1	1	1	1	1	1	1	119.2 243.2
2	1	2	2	2	2	2	113.8 331.1
3	1	3	3	3	3	3	112.7 415.6
4	1	4	4	4	4	4	113.0 488.7
5	1	5	5	5	5	5	114.1 571.6
6	2	1	2	3	4	5	135.2 305.7
7	2	2	3	4	5	1	95.8 286.7
8	2	3	4	5	1	2	93.4 441.6
9	2	4	5	1	2	3	93.3 807.0
10	2	5	1	2	3	4	111.2 520.0
11	3	1	3	5	2	4	120.3 341.4
12	3	2	4	1	3	5	112.0 545.9
13	3	3	5	2	4	1	32.8 742.4
14	3	4	1	3	5	2	97.0 360.7
15	3	5	2	4	1	3	100.4 591.4
16	4	1	4	2	5	3	94.1 373.8
17	4	2	5	3	1	4	84.6 584.5
18	4	3	1	4	2	5	118.1 439.0
19	4	4	2	5	3	1	85.1 432.5
20	4	5	3	1	4	2	71.8 747.8
21	5	1	5	4	3	2	76.6 398.8
22	5	2	1	5	4	3	101.5 326.1
23	5	3	2	1	5	4	95.2 450.9
24	5	4	3	2	1	5	83.9 798.0
25	5	5	4	3	2	1	78.1 692.0

表 4 正交试验结果分析表

Table 4 Analysis of orthogonal test result for Rankine's active earth pressure						
差数	黏聚力 c_0 /kPa	内摩 擦角 j_0 /($^{\circ}$)	中间主 剪应力 系数 b	泊松比 n	倾角 b /(kN·m)	重度 g /(kN·m $^{-3}$)
K_{1j}	572.8	545.4	547	491.5	481.5	411
K_{2j}	528.9	507.7	529.7	435.8	541.5	452.6
K_{3j}	462.5	452.2	484.5	507.6	479.7	502
K_{4j}	453.7	472.3	490.6	503.9	454.3	524.3
K_{5j}	435.3	475.6	401.4	514.4	496.2	563.3
极差	137.5	93.2	145.6	71.8	87.2	152.3
结果	$g > b > c_0 > j_0 > b > n$					

表 4、5 中极差是度量数据波动大小的一个重要指标, 极差值大的因素对指标的影响大, 是影响指标的主要因素; 反之, 极差值小的因素对指标的影响就小, 是影响指标的次要因素。据此分析可知: 朗肯主动土压力强度 p_a 参数敏感性从大到小分别为: 重度 g 、中间主剪应力系数 b 、黏聚力 c_0 、内摩擦角 j_0 、倾角 b 、

泊松比 n ; 朗肯被动土压力强度 p_p 的参数敏感性从大到小分别为: 内摩擦角 j_0 、中间主剪应力系数 b 、泊松比 n 、黏聚力 c_0 、倾角 b 、重度 g 。

表 5 正交试验结果分析表

Table 5 Analysis of orthogonal test result for Rankine's passive earth pressure						
差数	黏聚力 c_0 /kPa	内摩 擦角 j_0 /($^{\circ}$)	中间主 剪应力 系数 b	泊松比 n	倾角 b /(kN·m)	重度 g /(kN·m $^{-3}$)
K_{1j}	2050.2	1662.9	1889.0	2794.8	2658.7	2396.8
K_{2j}	2361.0	2074.3	2111.6	2765.3	2323.5	2280.0
K_{3j}	2581.8	2489.5	2589.5	2358.5	2599.8	2513.9
K_{4j}	2577.6	2886.9	2542.0	2204.6	2610.7	2385.5
K_{5j}	2665.8	3122.8	3104.3	2113.2	2043.7	2660.2
极差	615.6	1459.9	1215.3	681.6	615.0	380.2
结果	$j_0 > b > n > c_0 > b > g$					

5 结 论

(1) 本文推导了填土面倾斜时的朗肯主动和被土压力强度计算公式, 经典朗肯土压力理论可看作是填土面倾角 $b = 0$ 的一个特例。计算表明: 填土面倾斜时朗肯主动土压力张拉裂缝深度 z_0 与填土面倾角 b 无关。

(2) b 值的不同直接反映了中主应力作用的发挥程度, 将 Mohr-Coulomb 强度准则抗剪强度参数 c_0, j_0 转化为统一强度理论下的抗剪强度参数数 c_1, j_1 时, 其数值都有所增加, 其原因是考虑了中主应力的影响。

(3) 在朗肯主动土压力计算中, 中主应力影响作用超过了黏聚力 c_0 、内摩擦角 j_0 , 接近重度 g 的影响, 同样在朗肯被动土压力计算中, 中主应力仅次于摩擦角 j_0 对计算结果的影响。所以中主应力的作用对朗肯土压力计算是一个不可忽视的重要影响因素。关于中主应力对朗肯土压力的具体影响需要我们进一步探讨。

(4) 正交分析法是一种较实用的分析方法, 工作量大、易于完成, 不但可以找出主导因素, 而且对挡土墙的优化设计都具有一定意义。

参考文献:

[1] 谢群丹, 刘 杰, 何 杰. 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, LIU Jie, HE Jie. The application of the double-shear unified strength theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 343 - 345. (in Chinese))

- [2] 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**(A02): 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**(A02): 3354 - 3359. (in Chinese))
- [3] 陈秋南, 张永兴, 周小平. 三向应力作用下的朗金被动土压力公式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(5): 880 - 882. (CHEN Qiu-nan, ZHANG Yong-xing, ZHOU Xiao-ping. Formula of rankine passive earth pressure under triaxial compressive loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(5): 880 - 882. (in Chinese))
- [4] 范 文, 沈珠江, 俞茂宏. 基于统一强度理论的土压力极限上限分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1147 - 1153. (FAN Wen, SHENG Zhu-jiang, YU Mao-hong. Upper-bound limit analysis of earth pressure based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1147 - 1153. (in Chinese))
- [5] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998. (YU Mao-hong. Twin shear theory and application[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese))
- [6] 俞茂宏, 咎月稳, 范 文, 等. 20 世纪岩石强度理论的发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(5): 545 - 550. (YU Mao-hong, ZAN Yue-wen, FAN Wen, et al. Advances in strength theory of rock in the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(5): 545 - 550. (in Chinese))
- [7] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(2): 1 - 9. (YU Mao-hong. Unified strength theory for geo materials and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(2): 1 - 9. (in Chinese))
- [8] 姜 袁, 柏 巍, 戚永乐, 等. 基于 CT 扫描数据的混凝土细观结构的三维重建[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, **30**(3): 74 - 76. (JIANG Yuan, BAI Wei, QI Yong-le, et al. Reconstruction of 3D model of concrete mesastucture with CT original data[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2007, **30**(3): 74 - 76. (in Chinese))
- [9] YU M H. Advances in strength theory of material under complex stress in the 20th Century[J]. Applied Mechanics Reviews, 2002, **55**(3): 169 - 218.
- [10] 陈灯红, 彭 刚, 陈高峰, 等. 龙滩重力坝 21 坝段及引水道三维结构分析研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, **30**(2): 16 - 19. (CHEN Deng-hong, PENG Gang, CHEN Gao-feng, et al. 3-D structural analysis and research on diversion waterway of 21st monolith of Longtan Gravity Dam[J]. Journal Of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2007, **30**(2): 16 - 19. (in Chinese))