

挡土结构上水-土压力分算的进一步探讨

李兴高, 刘维宁

(北京交通大学 土建学院, 北京 100044)

摘要: 挡墙上作用的水-土压力计算方法与土压力计算方法有着密切的关系。在水-土压力分算的前提下, 研究了土压力计算方法对水-土压力计算方法的影响。研究表明, 挡墙背后土体存在着沿平面滑动和绕对数螺旋柱面转动两类临界状态, 对应有两种不同类型的水-土压力分算方法。与测试结果的对比表明, 得到的两类水-土压力计算结果可以作为挡墙上水-土压力的一个区间估计。

关键词: 水-土压力分算方法; 变分极限平衡方法; 区间估计

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Discussion on computing water and earth pressures on retaining wall separately

LI Xing-gao, LIU Wei-ning

(School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The computation method of water and earth pressures on retaining wall is closely related with that of earth pressure. Under the precondition of computing water and earth pressures separately, the effect of the computation method of earth pressure on that of water and earth pressures is studied. Results show there exist two kinds of critical states of sliding on a plane and rotation around a log-spiral cylinder surface; and there are two kinds of methods to compute the water and earth pressures. Comparisons with measured data show that the two kinds of attained results can be regarded as an interval estimation of the water and earth pressures on retaining wall.

Key words: computing water and earth pressures separately; variational limit equilibrium method; interval estimation

1 引言

从岩土工程学的发展来看, 地下水的问题是早已存在的。自从 Terzaghi 提出饱和土体的有效应力原理以来, 孔隙水压力已经成为土力学中的一个十分重要的参数。近年来, 随着大规模地下空间的开发利用, 深入研究地下水问题的重要性日益显现。我国沿海许多城市的地下水位很高, 建造的许多挡土结构物处于饱和地层。然而, 对于地下水问题带来的若干新的课题, 工程师们或者是采用传统的保守方法进行评价和设计, 或者还没有意识到问题的重要性, 使设计存在隐患。其中, 如何计算作用在挡土结构上的水-土压力就是一个亟待解决的关键技术课题。

在确定饱和土体中的挡土结构的荷载时, 应同

时考虑土压力和水压力的作用。目前, 在工程实践中计算挡土结构的侧向水土压力时, 讨论更多的是水-土分算和水-土合算的原则问题^[1]。所谓水-土分算的原则, 即分别计算土压力和水压力, 以两者之和为总的侧压力。所谓水-土合算的原则, 以土粒与孔隙水共同组成的一个整体, 直接用土的饱和重度计算侧压力。然而, 还必须看到, 无论是水-土合算还是水-土分算, 都与土压力的计算方法有着密切关系, 不同的土压力计算方法将产生不同的水-土分算和水土合算方法。限于篇幅, 本文仅讨论土压力计算方法不同对于水-土压力分算计算方法的影响。

2 饱和地层水-土压力分算模型

2.1 基本假定

本文建模计算分析的基本假定如下:

(1) 研究的问题为平面应变问题, 挡墙垂直, 地面水平, 地下水位与地表齐平。

(2) 墙后土体为 Coulomb 材料, 可用物性参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 表征。

(3) 墙后土体产生主动或被动土压力时, 土体形成滑动楔体, 其滑裂面通过墙踵。

(4) 挡土结构刚性且其运动不受限制, 运动位移与墙高相比可忽略不计。

(5) 墙-土之间的摩擦可用摩擦角 δ 表示。

(6) 孔隙水压力为静水压力, 不考虑黏性土体的遇水膨胀和湿陷。

2.2 潜在破坏土体的极限平衡方程

图 1 和图 2 分别表示墙后饱和土体处于主动和被动极限状态的情况。AC 表示挡土结构, AB 为土层的水平面, BC 为土层的破坏面; W 为 ABC 部分土体的重量, P_a 、 P_p 分别表示作用在墙背上的主动和被动土压力, δ 为墙土间的摩擦角, 并且假定其小于土体的内摩擦角 φ , d 为力的作用点距墙底的垂直距离, h 为墙高, σ_c 为作用在破裂面上的法向有效应力, τ 为作用在滑动面上的切向应力, u_w 为作用在滑动面上的孔隙水压力。取 ABC 部分的土体为隔离体 (包括其中的地下水), 可以建立其处于平衡状态时的 3 个力的平衡方程。由 $\sum X = 0$ 可得

$$P_n \cos \delta = \int_0^{x_B} [(\sigma_c + u_w) \dot{y} - n\tau] dx - P_w = \int_0^{x_B} (\sigma_c \dot{y} - n\tau) dx + \int_0^h u_w dy - P_w \quad (1)$$

式中: P_n 为作用在挡土结构上的土压力。当 $n=1$ 时, P_n 为主动土压力 P_a ; 当 $n=-1$ 时, P_n 为被动土压力 P_p 。 P_w 为作用在挡土结构上的水压力, $\dot{y} = dy/dx$ 。由 $\sum Y = 0$ 可得

$$P_n \sin \delta = \int_0^{x_B} [n(h-y)\gamma_{sa} - n(\sigma_w + u_w) - \tau \dot{y}] dx = \int_0^{x_B} [n(h-y)\gamma_{sb} - n\sigma_c - \tau \dot{y}] dx + n \int_0^{x_B} [(h-y)\gamma_w - u_w] dx \quad (2)$$

式中: γ_{sa} 为土体的饱和重度; γ_{sb} 为土体的浮重度; γ_w 为水的重度。由 $\sum M_c = 0$ 可得

$$P_n \cos \delta d_s = \int_0^{x_B} \sigma_c (y \dot{y} + x) dx - n \int_0^{x_B} \tau (y - x \dot{y}) dx - \int_0^{x_B} (h-y)\gamma_{sb} x dx + \int_0^{x_B} u_w (y \dot{y} + x) dx - \int_0^{x_B} (h-y)\gamma_w x dx - P_w d_w \quad (3)$$

式中: d_s 为作用在挡土结构上的土压力的作用点距墙底的距离; d_w 为作用在挡土结构上的水压力的作

用点距墙底的距离; x_B 为滑动面终点 B 的 X 坐标。

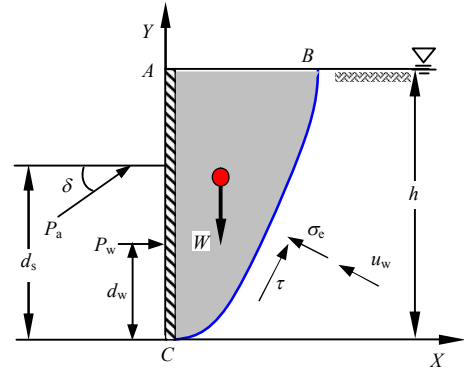


图 1 主动极限状态
Fig.1 Limit active state

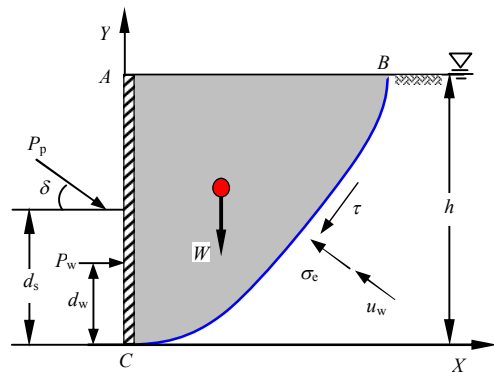


图 2 被动极限状态
Fig.2 Limit passive state

对于孔隙水压力为静水压力的情形, 有:

$$P_w = \gamma_w h^2 / 2 \quad (4)$$

$$u_w = \gamma_w (h - y) \quad (5)$$

$$d_w = h/3 \quad (6)$$

$$\int_0^h u_w dy = \int_0^h \gamma_w (h - y) dy = \gamma_w h^2 / 2 = P_w \quad (7)$$

$$\int_0^{x_B} \gamma_w (h - y) dx = \int_0^{x_B} u_w dx \quad (8)$$

$$\int_0^{x_B} u_w x dx = \int_0^{x_B} \gamma_w (h - y) x dx \quad (9)$$

$$\int_0^{x_B} u_w y \dot{y} dx = \int_0^{x_B} \gamma_w (h - y) y dy = \gamma_w h^3 / 6 = P_w d_w \quad (10)$$

代入式 (7) ~ (10), 式 (1) ~ (3) 可以简化为

$$P_n \cos \delta = \int_0^{x_B} (\sigma_c \dot{y} - n\tau) dx \quad (11)$$

$$P_n \sin \delta = \int_0^{x_B} [n(h-y)\gamma_{sb} - n\sigma_c - \tau \dot{y}] dx \quad (12)$$

$$P_n \cos \delta d_s = \int_0^{x_B} \sigma_c (\dot{y} + x) dx - n \int_0^{x_B} \tau (y - x \dot{y}) dx - \int_0^{x_B} (h-y)\gamma_{sb} x dx \quad (13)$$

设滑裂面上应力满足饱和土体 Mohr-Coulomb 准则, 即

$$\tau = \sigma_e \tan \varphi + c \quad (14)$$

式中: c 、 φ 为土体的有效应力强度指标, 分别为土体的黏聚力和内摩擦角。

由式 (11) ~ (14), 可以建立起表述饱和地层土体极限荷载 (主动土压力和被动土压力) 的泛函问题。

目标函数为

$$P_n = \int_0^{x_B} [\sigma_e \dot{y} - n(\sigma_e \tan \varphi + c)] dx / \cos \delta \quad (15)$$

约束条件为

$$\begin{aligned} & \tan \delta \int_0^{x_B} [\sigma_e \dot{y} - n(\sigma_e \tan \varphi + c)] dx + n \int_0^{x_B} \sigma_e dx + \\ & \int_0^{x_B} [(\sigma_e \tan \varphi + c) \dot{y}] dx - n \int_0^{x_B} (h - y) \gamma_{sb} dx = 0 \quad (16) \\ & n \int_0^{x_B} (\sigma_e \tan \varphi + c)(y - x \dot{y}) dx + \int_0^{x_B} h \gamma_{sb} x dx - \\ & \int_0^{x_B} y \gamma_{sb} x dx + d_s \int_0^{x_B} [\sigma_e \dot{y} - n(\sigma_e \tan \varphi + c)] dx - \\ & \int_0^{x_B} \sigma_e (y \dot{y} + x) dx = 0 \quad (17) \end{aligned}$$

2.3 土压力泛函驻值解的边值方程

式 (15) ~ (17) 表示土压力 P_n 为含有 2 个自变量函数 $y(x)$ 、 $\sigma_e(x)$ 的泛函, 且为边界待定的条件变分极值问题。滑裂面曲线的起始点为 (墙踵处) C 点, 坐标为 $x_C = 0$, $y_C = 0$, 终点为土体表面上的 B 点, 坐标为 $x = x_B$, x_B 待定, $y_B = h$ 。依据泛函在约束条件下的变分法, 用 Lagrange 乘子法构造如下的泛函 J^* , 从而使上述条件极值问题转化为无约束的极值问题:

$$J^* = \int_0^{x_B} F dx \quad (18)$$

$$F = F_0 + \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 \quad (19)$$

$$F_0 = \sigma_e \dot{y} - n(\sigma_e \tan \varphi + c) \quad (20)$$

$$F_1 = -n\sigma_e - (\sigma_e \tan \varphi + c) \dot{y} + n(h - y) \gamma_{sb} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} F_2 = & -x(h - y) \gamma_{sb} + \sigma_e (x + y \dot{y}) - n\sigma_e \tan \varphi y - \\ & n[cy - (\sigma_e \tan \varphi + c)x \dot{y}] \quad (22) \end{aligned}$$

式中: λ_1 、 λ_2 为 Lagrange 乘子。

由变分学的知识可知, 临界滑动面的方程 $y(x)$ 及沿滑动面的 $y(x)$ 的法向有效应力分布 $\sigma_e(x)$ 必须满足以下条件^[2]:

(1) 辅助函数 F 的 Euler 微分方程

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_e} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{\sigma}_e} \right) = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right) = 0 \quad (24)$$

(2) 积分约束方程: 式 (16)、(17)。

(3) 两类边界条件

① 可动边界点处的变分边界条件——横截条件

$$\left(F - \dot{y} \frac{\partial F}{\partial \dot{y}} - \dot{\sigma}_e \frac{\partial F}{\partial \dot{\sigma}_e} \right) \bigg|_{x=x_B} \delta x_B + \frac{\partial F}{\partial \dot{\sigma}_e} \bigg|_{x=x_B} \delta \sigma_{eB} = 0 \quad (25)$$

式中: δ 为变分算子; x_B 为滑动体上 B 点的 X 坐标; σ_{eB} 为 B 点的法向有效应力; 其余符号的意义同上。

② 固定边界点条件

$$x_C = 0, \quad y_C = 0 \quad (26)$$

2.4 土体中的滑动面、滑动面上的应力

求解 Euler 方程, 可以得出:

(1) 当 $\lambda_2 = 0$ 时, 土体沿平面滑动破坏, 滑动面方程为

$$y = \frac{n \tan \varphi + n \lambda_1}{1 - \lambda_1 \tan \varphi} x \quad (27)$$

沿滑动面的法向有效应力为

$$\sigma_e = \frac{-n \lambda_1 \gamma_{sb}}{1 - \lambda_1 \tan \varphi} x + Z_1 \quad (28)$$

式中: Z_1 为积分常数, 可利用 B 点的横截条件式 (25) 和应力连续性条件求出。从而有:

$$Z_1 = \frac{-c}{\lambda_1 + \tan \varphi} + \frac{n \lambda_1 \gamma_{sb}}{1 - \lambda_1 \tan \varphi} x_B \quad (29)$$

(2) 当 $\lambda_2 \neq 0$ 时, 土体绕对数螺旋柱面转动破坏, 引入坐标变换:

$$r \cos \theta = x - n \lambda_1 / \lambda_2 = x^0 \quad (30)$$

$$r \sin \theta = y + 1 / \lambda_2 = y^0 \quad (31)$$

可以求出滑动面的方程为

$$r = r_C \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta)] \quad (32)$$

式中: (r_C, θ_C) 为 C 点的极坐标。

沿滑动面的法向有效应力为

$$\begin{aligned} \sigma_e = & -\frac{c}{\tan \varphi} - \frac{\gamma_{sb} r_C (\sin \theta - 3n \tan \varphi \cos \theta)}{(1 + 9 \tan^2 \varphi) \exp[n \tan \varphi (\theta - \theta_C)]} + \\ & Z_2 \exp(2n \theta \tan \varphi) \quad (33) \end{aligned}$$

式中: Z_2 为积分常数, 同样可利用 B 点的横截条件式 (25) 和应力连续性条件求出。

$$Z_2 = \left\{ \frac{\gamma_{sb} r_C (\sin \theta_B - 3n \tan \varphi \cos \theta_B)}{(1 + 9 \tan^2 \varphi) \exp[n \tan \varphi (\theta_B - \theta_C)]} \right\} \exp\left(\frac{\theta_B \tan \varphi}{-0.5n}\right) + \left(\frac{nc \tan \theta_B}{1 - n \tan \varphi \tan \theta_B} + \frac{c}{\tan \varphi} \right) \exp\left(\frac{\theta_B \tan \varphi}{-0.5n}\right) \quad (34)$$

式中: (r_B, θ_B) 为 B 点的极坐标。

2.5 土压力的大小

(1) 当 $\lambda_2 = 0$ 时, 土体沿平面滑动破坏

当土体的内摩擦角 φ 为常数时, 式 (27) 是一条直线方程, 此时可利用 EF 方向力的平衡求解土压力 P_n 的大小 (见图 3)。 EF 垂直于 σ_{ed} 的作用方

向, σ_{ed} 为滑动面上任一点的法向有效应力 σ_e 与切向力 τ 中的 $\sigma_e \tan \varphi$ 部分的合力。详细求解过程可参阅文献[4]。土压力 P_n 大小的表达式为

$$\frac{P_n}{\gamma_{sb} h^2} = \frac{\sin(\alpha - n\varphi)}{2 \tan \alpha} - \frac{nc \cos \varphi}{\gamma_{sb} h \sin \alpha} \quad (35)$$

式中: α 为破裂面与水平方向的夹角。

(2) 当 $\lambda_2 \neq 0$, 土体绕对数螺旋柱面转动破坏

此时, 滑动面为数螺旋线柱面, 在坐标系 $X^0 O Y^0$ 中 (见图 4), 代入式 (32)、(33), 关于土压力 P_n 的表达式——式 (1)、(2) 可以改写为

$$\begin{aligned} \frac{P_n \cos \delta}{\gamma_{sb} h^2} = & \frac{(\sin \theta_B - 3n \tan \varphi \cos \theta_B) \left\{ \frac{\sin(\theta_B + n\varphi)}{\exp[2n \tan \varphi (\theta_B - \theta_C)]} - \frac{\sin(\theta_C + n\varphi)}{\exp[3n \tan \varphi (\theta_B - \theta_C)]} \right\}}{\cos \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi) \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} - \\ & \frac{3n \cos(2\theta_C - n\varphi)}{4 \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi)} - \frac{nc \cos \theta_C - \cos \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)]}{\gamma_{sb} h \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)]} + \\ & \frac{3 \{ 1 - \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \} / \cos \varphi + 3n \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \sin \varphi \cos(2\theta_B - n\varphi)}{4 \cos \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi) \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} + \\ & \frac{c \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \sin(\theta_C + n\varphi) - \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \sin(\theta_B + n\varphi)}{\gamma_{sb} h \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \} \sin \varphi (1 - n \tan \varphi \tan \theta_B)} + \\ & \frac{3n \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \sin \varphi \sin(2\theta_B - n\varphi) - \sin(2\theta_C - n\varphi) \sin \varphi}{4 \cos^2 \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi) \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} + \\ & \frac{c \sin(\theta_B - n\varphi) \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] - \sin(\theta_C - n\varphi)}{\gamma_{sb} h \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)]} \frac{1}{\sin \varphi} \quad (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{P_n \sin \delta}{\gamma_{sb} h^2} = & n \frac{\exp[3n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \cos(\theta_C + n\varphi)}{\{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} \frac{(\sin \theta_B - 3n \tan \varphi \cos \theta_B)}{\cos \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi)} - \\ & \frac{\exp[2n \tan \varphi (\theta_B - \theta_C)] \cos(\theta_B + n\varphi) (\sin \theta_B - 3n \tan \varphi \cos \theta_B) + n \{ 1 - \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \} / 4 \sin \varphi}{n \cos \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi) \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} + \\ & n \frac{c \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \cos(\theta_B + n\varphi) / \sin \varphi - \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \cos(\theta_C + n\varphi) / \cos \varphi}{\gamma_{sb} h \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \} (1 - n \tan \varphi \tan \theta_B)} - \\ & \frac{1}{4 \tan \varphi} \frac{\exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] - 1}{\{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} - \frac{n \sin 2\theta_B \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] - \sin 2\theta_C}{4 \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} + \\ & n \frac{c \cos(\theta_C - n\varphi) - \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \cos(\theta_B - n\varphi)}{\gamma_{sb} h \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)]} \frac{1}{\sin \varphi} - \frac{c}{\gamma_{sb} h} + \\ & n \frac{\cos \theta_B \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] - \cos \theta_C \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \sin \theta_B}{\{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} \frac{\sin \theta_B}{\cos \varphi} + \\ & \frac{3 \tan \varphi \cos(2\theta_C - n\varphi) \{ 1 - \exp[2n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \cos(2\theta_B - n\varphi) \}}{4 \cos \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi) \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} + \\ & n \frac{\exp[2n \tan \varphi (\theta_B - \theta_C)] \sin(2\theta_B - n\varphi) - \sin(2\theta_C - n\varphi)}{4 \cos \varphi (1 + 9 \tan^2 \varphi) \{ \sin \theta_C - \sin \theta_B \exp[n \tan \varphi (\theta_C - \theta_B)] \}^2} \quad (37) \end{aligned}$$

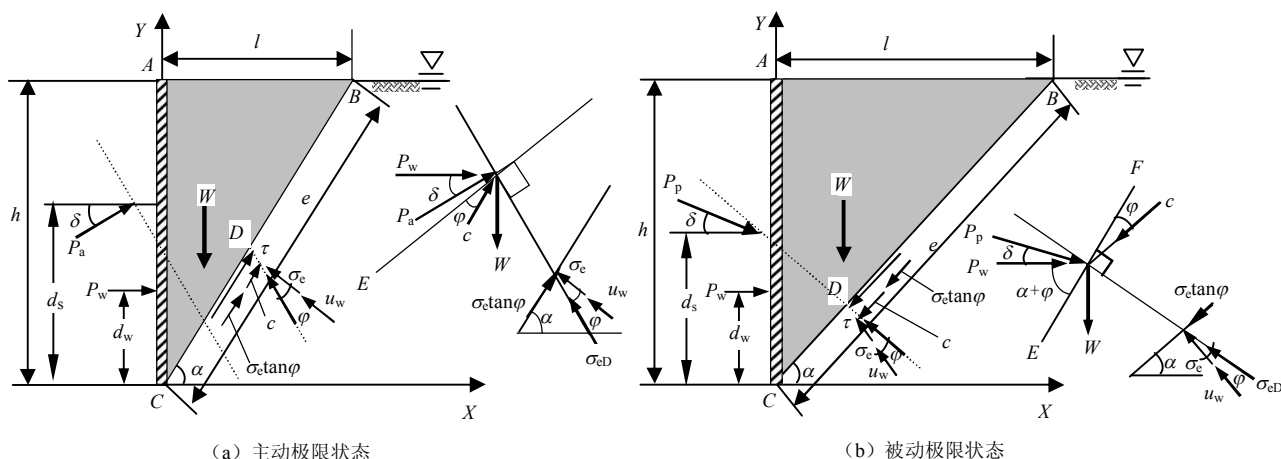


图3 沿平面滑动破坏情况下水土压力计算简图

Fig.3 Computation diagram of water and earth pressure in case of sliding along a plane

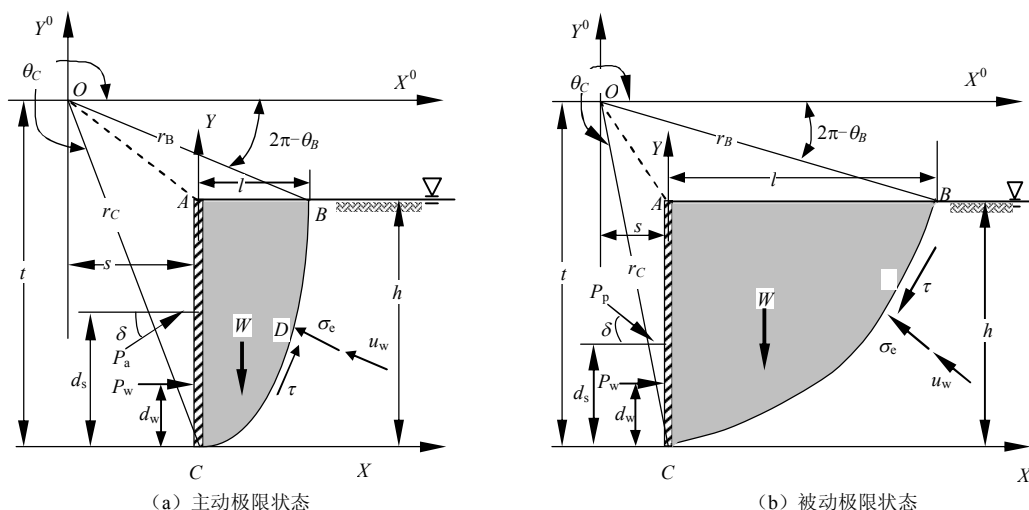


图4 沿对数螺旋柱面转动破坏情况下水土压力计算简图

Fig.4 Computation diagram of water and earth pressure in case of rotation around a log-spiral cylinder surface

式中： θ_B 、 θ_C 分别为滑动楔体上B点、C点在坐标系 X^0OY^0 中的极角。

3 优化方法

前文已经推导出了墙后土体沿平面滑动破坏时土压力 P_n 关于 α （ α 为滑动破裂面与水平方向的夹角）一元函数的解析表达式和墙后土体转动破坏时土压力 P_n 关于角度 θ_B 、 θ_C 二元函数的解析表达式（式（35）～（37））。需借助于某种优化方法确定 P_n 的极值，经过分析，选取了Matlab6.1优化工具箱提供的fminbnd和fmincon函数^[3]土压力 P_n 的极值 P_{ne} 。

（1）fminbnd函数

功能：求取固定区间内单变量函数的最小值。对于主动土压力，需要转化为求解 $-P_a$ 的极小值。本文求解土体沿平面滑动破坏时的土压力，角度 α

限定的区间为 $[0, \pi/2]$ 。

（2）fmincon函数

功能：求多变量有约束非线性函数的最小值。对于主动土压力，需要转化为求解 $-P_a$ 的极小值。目标函数为式（36）或式（37）。本文求解土体沿对数螺旋柱面转动破坏时的土压力的约束如下：

- ①角度 θ_C 、 θ_B 限定的区间为 $[3\pi/2, 2\pi]$ ，且角度 θ_C 小于角度 θ_B 。
- ②滑动破裂面上的切向应力 τ 大于0。
- ③式（36）乘以 $\sin \delta$ 减去式（37）乘以 $\cos \delta$ 等于0。

利用fmincon函数和fminbnd函数，编制了各种情况下的土体极限荷载计算程序的m文件。

4 计算结果整理分析

当 $c=0$ 时的部分计算结果见表1、2。此时，

无量纲化的土压力 P_{ne} 为

$$P_{ne}/(\gamma_{sb}h^2) = K_\phi/2 \quad (38)$$

式中: K_ϕ 为与土体内摩擦角 ϕ 相关的土压力系数。当 $c \neq 0$ 时, 土压力大小 P_{ne} 在形式上可以表达为

$$P_{ne}/(\gamma_{sb}h^2) = K_\phi/2 + K_c c/(\gamma_s h) \quad (39)$$

式中: K_c 为与土体的黏聚力 c 相关的土压力系数, 具体求解过程详见文献[4]。

表 1 土压力系数 K_ϕ 的计算结果

Table 1 Calculated results of earth pressure coefficient K_ϕ

$\phi/(\circ)$	$\delta/(\circ)$	主动土压力系数 $K_{\phi a}$		被动土压力系数 $K_{\phi p}$	
		滑动破坏	转动破坏	滑动破坏	转动破坏
10	0	0.704	0.728	1.420	1.383
10	5	0.662	0.697	1.570	1.495
10	10	0.635	0.670	1.730	1.603
20	0	0.490	0.527	2.040	1.955
20	10	0.447	0.488	2.635	2.382
20	20	0.427	0.479	3.525	2.888
30	0	0.333	0.378	3.000	2.863
30	15	0.301	0.347	4.976	4.103
30	30	0.297	0.352	10.095	6.274

文献[4]已经论证了, 当 $c=0$ 时由表 1 中的求解结果得到的土压力可以作为挡墙不同变位模式情况下作用在其上的土压力的一个区间估计。所不同的只是将式 (38) 中的土体浮重度 γ_{sb} 换成土体的天然重度 γ_s 。因而, 在水土分算的原则下, 对于不同的土压力计算方法, 应该有不同水-土压力分算方法。

在文献[5]中, 测试了主动极限状态时不同墙体运动形式下, 挡墙上作用的土压力强度、水-土压力强度分布, 进而计算和分析出作用在挡墙上的水-土压力的大小, 结果见表 2。依据前文计算方法, 可得到第 1 组试验土体平动破坏时的土压力系数 K_ϕ 为 0.296 2, 土体转动破坏时的土压力系数 K_ϕ 为 0.338 8; 第 2 组试验土体平动破坏时的土压力系数 K_ϕ 为 0.261 6, 土体转动破坏时的土压力系数 K_ϕ 为 0.305 8。根据水土压力分算的方法可以得到第 1 组试验土体平动破坏时的水土压力理论计算值为 1 785.7 Pa, 土体转动破坏时的水-土压力理论计算值为 1 844.6 Pa; 第 2 组试验土体平动破坏时的水-土压力理论计算值为 1 784.3 Pa, 土体转动破坏时的水-土压力理论计算值为 1 853.2 Pa。具体结果见表 2。

由表 2 的结果可以初步得出结论, 当考虑刚性

墙体不同的变位模式时, 文中水-土压力分算方法得到的结果可以作为挡墙上作用的水土压力的一个区间估计。

表 2 挡墙上作用的水土压力

Table 2 Water and earth pressures on retaining wall

N	$\phi/(\circ)$	PT_{tt} /Pa	PT_{rt} /Pa	PT_{tm} /Pa	PT_{rbm} /Pa	PT_{rtm} /Pa
1	32.89	1 785.7	1 844.6	1 735.5	1 788.8	1 814.6
2	35.83	1 784.3	1 853.2	1 742.2	1 790.1	1 819.4

注: N 为试验组数; PT_{tt} 为土体平动破坏水土压力理论值; PT_{rt} 为土体转动破坏水土压力理论值; PT_{tm} 为墙体平动水土压力测试值; PT_{rbm} 为绕墙底转动水土压力测试值; PT_{rtm} 为绕墙顶转动水土压力测试值。

5 结 论

(1) 挡墙上作用的水-土压力计算方法与土压力计算方法有着密切的关系。

(2) 挡墙背后土体存在着沿平面滑动和绕对数螺旋柱面转动两类临界状态, 对应两种不同类型的水-土压力分算方法。

(3) 与测试结果的对比表明, 本文得到的两类水-土压力计算方法可以作为挡墙上水-土压力的一个区间估计。

参 考 文 献

- [1] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 348—352.
LI Guang-xin. Estimating the water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit separately and together[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 348—352.
- [2] 蔡蓓蓓, 许履珊, 梁在中, 等. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 450—452.
- [3] 苏金明, 阮沈勇. MATLAB 6.1 实用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [4] 李兴高. 土压力和水土压力作用的极限平衡变分法研究及应用探讨[博士学位论文 D]. 北京: 北京交通大学, 2003.
- [5] 李兴高, 刘维宁. 挡墙上作用土压力和水土压力的测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2149—2154.
LI Xing-gao, LIU Wei-ning. Study on measurements of earth pressure and water-soil pressure acting on retaining walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2149—2154.