

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.06.008

考虑桩前土体抗力的抗滑桩内力计算

宋政群¹, 刘晓燕², 周志军²

(1. 云南省公路开发投资有限责任公司, 云南 昆明 650200; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为得到切合实际的抗滑桩内力计算公式, 考虑桩前土体抗力的作用, 基于对不同岩性滑坡推力的分布形式的总结, 将二次函数作为滑坡推力的分布函数, 推导出考虑桩前土体抗力的抗滑桩内力计算公式。结果表明, 推导的考虑桩前土体抗力的抗滑桩内力计算方法, 可根据工程实际选择滑坡推力的分布形式, 使计算结果更加符合实际情况。通过实例验算对比分析, 相比于传统滑坡推力分布形式, 考虑桩前土体抗力后推导的公式能有效提高抗滑桩内力计算精度。

关键词: 边坡工程; 抗滑桩; 滑坡推力; 桩前土体抗力; 内力计算

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)06-0037-05

Internal Dorce Calculation of Anti-slide Pile Considering the Soil Resistance before Pile

SONG Zhengqun¹, LIU Xiaoyan², ZHOU Zhijun²

(1. Yunnan Province Highway Development and Investment Limited Liability Company, Kunming, Yunnan 650200, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to get practical anti-slide pile internal force calculation formula which can achieve its optimal design, the anti-slide pile internal force need to be considered. First, the distribution form of different rock landslide thrust is summarized. Then the two quadratic function is used as the distribution function of landslide thrust and the resistance of soil before pile, and the calculation formula that considers the resistance of soil before pile is deduced. The results show that according to practical engineering, the distribution form of resistance of soil before pile can be chosen. Thus calculation result by the calculation method deduced conforms to the actual situation. Through the contrastive analysis of example, the calculation method deduced in this paper can improve the calculation accuracy and efficiently of internal force of anti-slide pile comparing to traditional calculation formula based on triangular distribution of resistance of soil before pile.

Keywords: slope engineering; anti-slide pile; landslide thrust; pile front soil resistance; internal force calculation

抗滑桩是一种重要的滑坡治理形式, 近年来被大量使用, 其设计计算方法也得到了进一步发展, 但仍然存在诸多问题。例如在工程中对抗滑桩进行设计时, 仅把滑坡推力作为外荷载, 忽略了桩前土体抗力的作用, 依此设计出的抗滑桩过于保守, 其抗滑效果没有完全发挥出来, 使很多原本只需要简单加固就能维持稳定的边坡花费过高, 直接影响工程的经济合理性。

桩前土体抗力的大小主要由桩与土的相互作用决定^[1-5]。在实际工程中, 为确保工程安全可靠, 桩

前土体抗力的值取桩前土体剩余抗滑力、被动土压力中较小者^[6-8]。目前, 各学者对桩前土体抗力的分布图式及合力作用点的选取并没有达成一致, 仍然存在很大的分歧, 而在抗滑桩设计计算中桩前土体抗力的分布图式及合力作用点选择的是否准确合理, 直接影响了滑动面以上抗滑桩桩身内力计算的准确性, 进而影响抗滑桩设计的合理性^[9-11]。本文依据前人总结的桩前土体抗力分布规律, 推导出新的考虑桩前土体抗力的抗滑桩内力计算公式, 进而对抗滑桩进行设计计算或对已经设计好的抗滑桩进

行优化,既节约工程成本又能达到支护边坡的效果。

1 考虑桩前土体抗力的抗滑桩内力计算公式推导

1.1 滑坡推力分布函数

根据模型试验、实测试桩的试验结果以及前人

对桩前土体抗力分布函数的推导,戴自航^[12-13]针对不同岩土类型,对桩前土体抗力和滑坡推力的分布函数总结如表 1 所示。其中 P 指土体抗力沿桩高的分布集度; h_1 指滑动面以上桩长; E 表示设桩位置处的滑坡推力;滑坡推力的合力作用点位于桩顶以下 $z_0 = kh_1$ 处。

表 1 滑坡推力分布函数

滑坡岩土类别	滑坡推力分布形式	z_0	滑坡推力分布函数 $q(z) = \xi z^2 + \eta z + \psi$
岩石	矩形或平行四边形	$\frac{1}{2} h_1$	$q(z) = \frac{E}{h_1}$
砂土、散体	三角形—抛物线形	$\frac{3}{5} h_1 \sim \frac{2}{3} h_1$	$q(z) = \frac{(36k-24)E}{h_1^3} z^2 + \frac{(18-24k)E}{h_1^2} z$
黏土	抛物线—三角形	$\frac{2}{3} h_1 \sim \frac{3}{4} h_1$	$q(z) = \frac{(36k-24)E}{h_1^3} z^2 + \frac{(18-24k)E}{h_1^2} z$
介于砂土及黏土之间	梯形	$\frac{13}{20} h_1$	$q(z) = \frac{1.8E}{h_1^2} z + \frac{1}{10h_1} E$

1.2 抗滑桩计算模型

抗滑桩的计算模型如图 1 所示,弯矩和剪力的正负规定如图 2 所示。

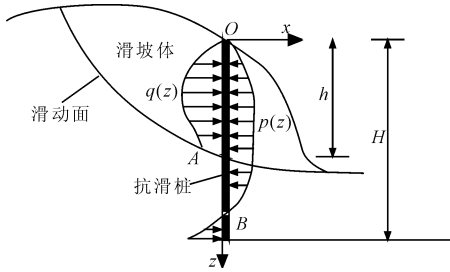


图 1 抗滑桩计算模型

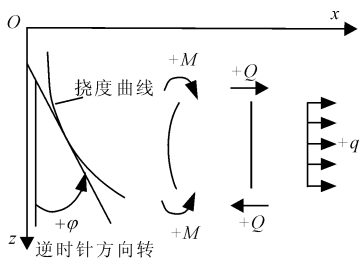


图 2 内力正负号规定

抗滑桩受荷段的荷载有桩后的滑坡推力 $q(z) = \xi z^2 + \eta z + \psi$, 桩前的土体抗力 $p(z) = \xi' z^2 + \eta' z + \psi'$, 全桩发生挠曲变形。其中 ξ, η, ψ 及 ξ', η', ψ' 是根据不同滑体的岩土类别, 滑坡推力具有不同的分布形式和合力作用点条件下的分布函数的系数, 见表 1。假定地层为弹性介质, 抗滑桩为弹性结构, 抗滑桩上任意一点 x 处弹性抗力可表示为:

$$\sigma_z = P = CB_p x_z$$

式中: C 为地基系数(或弹性抗力系数), kN/m^3 ; B_p

为抗滑桩的截面计算宽度, m ; x_z 为距地面深度 z 处的水平位移, m 。

1.3 地基系数法抗滑桩内力计算公式推导

(1) 抗滑桩 OA 段内力计算公式推导^[2]:

$$EI \frac{d^4 x_z}{dz^4} = \xi z^2 + \eta z + \psi - CB_p x_z \quad (1)$$

$$\frac{d^4 x_z}{dz^4} = \frac{\xi}{EI} z^2 + \frac{\eta}{EI} z + \frac{\psi}{EI} - \alpha^5 z \cdot x_z \quad (2)$$

其中, $C = mz, \alpha = \sqrt[5]{\frac{mB_p}{EI}} \Rightarrow \frac{mB_p}{EI} = \alpha^5$

式中: E 为抗滑桩的弹性模量, kN/m^2 ; I 为抗滑桩的截面惯性矩, m^4 。

设:

$$x_z = \sum_{i=0}^{\infty} a_i z^i = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + L + a_n z^n + L + a_i z^i \quad (3)$$

其中 a_i 为待定系数。

对式(3)分别求一阶导数、二阶导数、三阶导数、四阶导数可得:

$$\frac{dx_z}{dz} = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot i \cdot z^{i-1} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 x_z}{dz^2} = \sum_{i=2}^{\infty} a_i \cdot i \cdot (i-1) \cdot z^{i-2} \quad (5)$$

$$\frac{d^3 x_z}{dz^3} = \sum_{i=3}^{\infty} a_i \cdot i \cdot (i-1) \cdot (i-2) z^{i-3} \quad (6)$$

$$\frac{d^4 x_z}{dz^4} = \sum_{i=4}^{\infty} a_i \cdot i \cdot (i-1) \cdot (i-2) \cdot (i-3) z^{i-4} \quad (7)$$

从而可得桩的挠曲微分方程为:

$$x_z = x_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} E_1 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} F_1 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} G_1 \quad (8)$$

对式(8)求一阶导数:

$$\frac{dx_z}{dz} = \varphi_z = x_0 \alpha A_2 + \frac{\varphi_0 \alpha}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_2 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} E_2 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} F_2 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} G_2 \quad (9)$$

对式(9)求一阶导数:

$$\begin{cases} x_z = x_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} E_1 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} F_1 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} G_1 \\ \frac{\varphi_z}{\alpha} = x_0 A_2 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_2 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} E_2 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} F_2 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} G_2 \\ \frac{M_z}{\alpha^2 EI} = x_0 A_3 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_3 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} E_3 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} F_3 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} G_3 \\ \frac{Q_z}{\alpha^3 EI} = x_0 A_4 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_4 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} E_4 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} F_4 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} G_4 \end{cases} \quad (12)$$

(2) 桩 AB 段内力计算公式

$$\begin{cases} x_B = x_A \varphi_1 + \frac{\varphi_A}{\beta} \varphi_2 + \frac{M_A}{\beta^2 EI} \varphi_3 + \frac{Q_A}{\beta^3 EI} \varphi_4 \\ \frac{\varphi_B}{\beta} = -x_A \cdot 4\varphi_4 + \frac{\varphi_A}{\beta} \varphi_1 + \frac{M_A}{\beta^2 EI} \varphi_2 + \frac{Q_A}{\beta^3 EI} \varphi_3 \\ \frac{M_B}{\beta^2 EI} = -x_A \cdot 4\varphi_3 - \frac{\varphi_A}{\beta} \cdot 4\varphi_4 + \frac{M_A}{\beta^2 EI} \varphi_1 + \frac{Q_A}{\beta^3 EI} \varphi_2 \\ \frac{Q_B}{\beta^3 EI} = -x_A \cdot 4\varphi_2 - \frac{\varphi_A}{\beta} \cdot 4\varphi_3 + \frac{M_A}{\beta^2 EI} \cdot 4\varphi_4 + \frac{Q_A}{\beta^3 EI} \varphi_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, α 是桩的变形系数, $\alpha = \sqrt[5]{\frac{mB_p}{EI}}$; 其中 A_i 、

B_i 、 C_i 、 D_i 、 E_i 、 F_i 、 G_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 是随桩的换算深度 αh_1 而变化的“ m ”法的影响函数值, 具体取值可参见文献[3]中的附表四。 φ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 随着抗滑桩的换算深度 βh_2 而变化的“ K ”法的影响函数值, 取值可查阅文献[3]中附表五。

2 实例计算

结合某工程实例中抗滑桩的设计与计算, 对本文 2.3 节推导出的内力计算公式重新对抗滑桩进行设计。

工程实例资料: 滑体主要为强风化泥岩、泥质粉砂质岩以及全风化的玄武岩, 根据经验值并考虑降雨渗入坡体等因素, 滑体部分的重力密度取 $\gamma = 20$

$$\frac{d^2 x_z}{dz^2} = \frac{M_z}{EI} = x_0 \alpha^2 A_3 + \frac{\varphi_0}{\alpha} \alpha^2 B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \alpha^2 C_3 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \alpha^2 D_3 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} \alpha^2 E_3 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} \alpha^2 F_3 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} \alpha^2 G_3 \quad (10)$$

对式(10)求一阶导数:

$$\frac{d^3 x_z}{dz^3} = \frac{Q_z}{EI} = x_0 \alpha^3 A_4 + \frac{\varphi_0}{\alpha} \alpha^3 B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \alpha^3 C_4 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \alpha^3 D_4 + \frac{\psi}{\alpha^4 EI} \alpha^3 E_4 + \frac{\eta}{\alpha^5 EI} \alpha^3 F_4 + \frac{\xi}{\alpha^6 EI} \alpha^3 G_4 \quad (11)$$

最终可得:

kN/m^3 、饱和重度取 $\gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3$ 。滑动面在自然状态下的 $c = 12 \text{ kPa}$, $\varphi = 15^\circ$, 工程状态下取滑面饱水时的 $c = 7 \text{ kPa}$, $\varphi = 12^\circ$ 。滑坡体的总滑坡推力为 634.95 kN 。抗滑桩桩长 21 m , 受荷段桩长 $h_1 = 12 \text{ m}$, 锚固段桩长 $h_2 = 9 \text{ m}$, 桩间距(中心距) $L = 6 \text{ m}$, 桩截面尺寸 $2.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 。

2.1 考虑桩前土体抗力的传统方法计算桩内力

根据已有地勘资料以及边坡抗滑桩设计计算资料可知, 滑坡推力按矩形分布计算, 桩前土体抗力按三角形分布, 计算得到抗滑桩的最大弯矩 $M_{\text{max}} = 52942.16 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 最大剪力是 $Q_{\text{max}} = 6225.71 \text{ kN}$ 。

2.2 本文考虑桩前土体抗力抗滑桩内力计算

本文将滑坡推力按照二次函数分布, 桩前土体抗力按照线性分布, 进行了抗滑桩内力计算公式的推导, 见式(13)和式(14)。

桩的变形系数: 受荷段 $\alpha = \sqrt[5]{\frac{mB_p}{EI}} = 0.292/\text{m}$, $\alpha h_1 = 3.5 > 2.5$ 属弹性桩

锚固段 $\beta = \sqrt[4]{\frac{KB_p}{4EI}} = 0.167/\text{m}$, $\beta h_2 = 0.167 \times 9 = 1.5$, 属弹性桩

桩受荷段内力及位移计算结果见表 2, 桩锚固段桩身内力及位移计算结果见表 3。

2.3 考虑桩前土体抗力的抗滑桩结构设计计算

(1) 正截面承载能力极限验算。单筋矩形截面

计算简图如图 3 所示,图中的 x 为混凝土高度, z 为内力臂。

① 正截面强度验算。

根据力的平衡条件可得:

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s \quad (14)$$

根据力矩平衡条件可得:

$$\begin{cases} M_u = f_y A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \\ \gamma_0 M \leq M_u = \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \end{cases} \quad (15)$$

其中 $x \leq \xi_b h_0$, 为防止超筋破坏

因此正截面所承受的弯矩应满足:

$$\begin{cases} \gamma_0 M \leq M_u = f_y A_s h_0 (1 - 0.5 \xi) \\ \gamma_0 M \leq M_u = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi (1 - 0.5 \xi) \end{cases} \quad (16)$$

表 3 桩锚固段桩身内力及位移值

z	β_z	x_z /(10^{-3} m)	σ_z /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	M_z /($\text{kN}\cdot\text{m}$)	Q_z /kN
0.00	0.00	1.58	151.68	33093.70	5111.19
0.60	0.10	1.32	528.00	36363.51	4687.13
1.20	0.20	0.96	384.00	38806.08	3425.28
1.80	0.30	0.72	288.00	41316.49	1023.67
2.40	0.40	0.51	204.00	43827.43	34.79
3.00	0.50	0.23	92.00	30457.16	-215.21
3.60	0.60	0.01	4.00	23395.10	-501.89
4.20	0.70	-0.47	-188.00	18723.86	-934.86

z	β_z	x_z /(10^{-3} m)	σ_z /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	M_z /($\text{kN}\cdot\text{m}$)	Q_z /kN
4.80	0.80	-0.94	-376.00	12935.88	-1173.13
5.40	0.90	-1.39	-556.00	10996.13	-2015.29
6.00	1.00	-1.74	-696.00	8645.21	-3652.13
6.60	1.10	-1.81	-724.00	5332.41	-2413.12
7.20	1.20	-2.07	-828.00	2153.89	-1099.65
7.80	1.30	-2.52	-1008.00	846.73	-632.17
8.40	1.40	-2.86	-1144.00	316.32	-298.54
9.00	1.50	-2.97	-1188.00	0.00	0.00

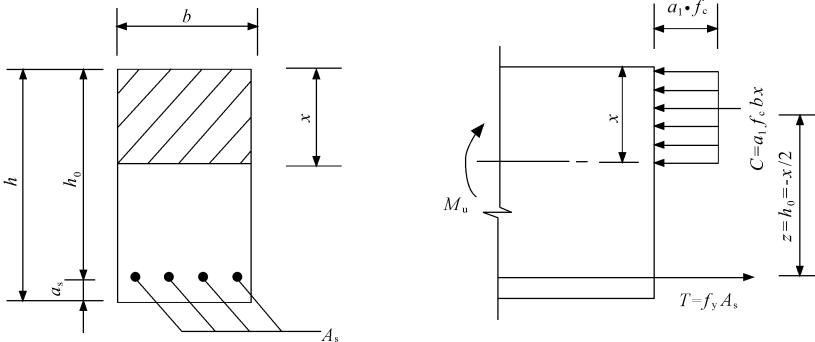


图 3 单筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算简图

② 纵筋最小配筋。

$$\rho \geq \rho_{\min} \frac{h}{h_0} \quad (17)$$

其中, $\rho = \frac{A_s}{bh_0}$, $\rho_{\min} = \max \left[0.2, \frac{45f_t}{f_y} \right] \%$, $\xi = \rho \frac{f_y}{\alpha_1 f_c}$, 为配筋系数。

其中, α_1 表示受压区混凝土的应力值与其轴心抗压强度设计值之比; f_c 表示混凝土轴心抗压强度设计值; f_y 表示钢筋抗拉强度设计值; f_t 表示混凝土轴心

表 2 桩受荷段内力及位移值

z	α_z	x_z /(10^{-3} m)	σ_z /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	M_z /($\text{kN}\cdot\text{m}$)	Q_z /kN
0.00	0.00	7.48	0.00	0.00	0.00
1.20	0.35	6.17	59.23	458.36	495.89
2.40	0.70	5.87	112.70	1066.48	698.32
3.60	1.04	4.93	141.98	2001.33	808.32
4.80	1.40	4.05	155.52	3084.45	1013.03
6.00	1.74	3.59	172.32	4559.40	1404.77
7.20	2.09	3.07	176.83	6798.83	2254.78
8.40	2.44	2.75	184.80	10004.97	3299.39
9.60	2.78	2.16	165.89	24510.07	4547.56
10.80	3.13	1.93	166.75	20532.06	4925.14
12.00	3.50	1.58	151.68	33093.70	5111.19

抗拉强度; h_0 表示截面有效高度; ρ 表示纵筋配筋率; A_s 表示受拉钢筋截面面积; γ_0 表示结构的重要性系数。

(2) 斜截面承载能力极限验算。

① 斜截面强度验算

$$\begin{cases} V \leq V_u = 0.7f_t b h_0 + f_{yv} \frac{nA_{svl}}{s} \\ V \leq V_u = 0.7f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \end{cases} \quad (18)$$

② 最小配筋率要求

$$\begin{cases} \rho_{sv} \geq \rho_{sv \cdot \min} = 0.24 \frac{f_t}{f_{yv}} \\ \rho_{sv} = \frac{A_{sv}}{b_s} = \frac{n \cdot A_{sv1}}{b_s} \end{cases} \quad (19)$$

考虑桩前土体抗力作用后的抗滑桩的内力值对抗滑桩进行截面配筋计算。其中,桩的最大弯矩为 $M_{\max} = 43827.43 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,最大剪力为 $Q_{\max} = 5111.19 \text{ kN}$,抗滑桩选用矩形截面,其截面尺寸是 $2.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 。计算简图如图 3 所示。采用 C30 混凝土,其轴心抗压强度设计值为 $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$,轴心抗拉强度设计值 $f_t = 1.43 \text{ N/mm}^2$ 。 $b = 2000 \text{ mm}$, $h = 2500 \text{ mm}$, $a_s = 100 \text{ mm}$, $h_0 = h - a_s = 2400 \text{ mm}$ 。受拉钢筋选用二级钢筋 HRB335,钢筋的抗拉强度设计值 $f_y = 3000 \text{ N/mm}^2$,查文献可知 $\xi_b = 0.56$,结构的重要性系数 $\gamma_0 = 1$ 。

考虑与不考虑桩前土体抗力抗滑桩钢筋计算结果见表 4。

表 4 考虑与不考虑桩前土体抗力抗滑桩
钢筋计算结果对比分析

计算类型	受力钢筋	箍筋	构造筋	架立筋
不考虑 桩前土 体抗力	二级钢筋 9Φ25、 9Φ32	三肢箍 一级钢筋 Φ16@150	一级钢筋 Φ12@100, 6根	一级钢筋 6Φ12
考虑桩 前土体 抗力	二级钢筋 8Φ25、 8Φ32	双肢箍 一级钢筋 Φ16@150	一级钢筋 Φ12@100, 6根	一级钢筋 6Φ12

由表 4 可以看出,考虑桩前土体抗力后桩的受力钢筋在 9Φ25、9Φ32 数量上分别减少 1 根,箍筋由三肢箍减少为双肢箍。由于抗滑桩的截面尺寸并未发生改变,为方便及安全起见,在这里对构造筋与架立筋不作计算,仍跟未考虑桩前土体抗力时的取值相同。

3 结 论

(1) 结合前人总结的滑坡推力及桩前土体抗力计算方法推导基于悬臂桩法的抗滑桩内力计算公式。推导过程中滑坡推力按 $q(z) = \xi z^2 + \eta z + \psi$ 进行计算,桩前土体抗力则按分布函数 $\sigma_z = P = CB_p x_z$ 进行计算,依此对抗滑桩内力及位移计算公式进行推导。

(2) 结合工程实例,基于本文新推导的考虑桩

前土体抗力的抗滑桩内力计算公式,计算抗滑桩的内力,验证边坡的稳定性(安全性),并依此计算抗滑桩的结构配筋量,与原设计中(考虑桩前土体抗力的传统计算方法)的抗滑桩配筋量对比,得出本文新推导方法计算出的抗滑桩所需的受力钢筋和箍筋的量都有所减少,进一步说明了本文推导公式的合理性,具有一定的工程价值,可节约材料用量,降低工程造价,尤其在大、中性滑坡工程上能起到可观的经济效果。

参考文献:

- [1] 张国辉,冯志秀,汤 华.顺层边坡松动岩层工程特性及工程处治措施[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):166-169.
- [2] 肖世国,程富强.再论悬臂式抗滑桩合理桩间距的计算方法[J].岩土力学,2015,36(1):111-116.
- [3] 杨雪强,吉小明,张新涛.抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J].中国公路学报,2014,27(1):30-37.
- [4] 于 洋,孙红月,尚岳全.基于桩周土体位移的双排抗滑桩计算模型[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):172-178.
- [5] 年廷凯,徐海洋,刘红帅.抗滑桩加固边坡三维数值分析中的几个问题[J].岩土力学,2012,33(8):2521-2526,2535.
- [6] 于 洋,孙红月,尚岳全.锚固深度对双排抗滑桩力学性能影响[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):1999-2007.
- [7] 刘永莉,孙红月.抗滑桩变形监测及位移确定研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):2147-2153.
- [8] 雷国平,唐辉明,李长冬,等.抗滑桩嵌固段设计修正方法研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(3):605-614.
- [9] 丁 慧,陈 杰,宋 力.不同种类边坡与锚索抗滑桩间接接触应力分布规律探讨[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):163-166,221.
- [10] 戴自航,徐 祥.边坡抗滑桩设计计算的三维有限元法[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2572-2578.
- [11] 陆业奇,梁慧琛.抗滑桩桩前滑体抗力分布规律及工程应用研究[J].人民长江,2011,42(22):38-41.
- [12] 年廷凯,李东晨,徐海洋,等.双排抗滑桩加固边坡稳定性与荷载传递机制分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):124-129.
- [13] 徐希强,李 宁,陈晓梅.基于 MIDAS/GTS 的预应力锚索最优锚固段长度优化设计[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):142-146.