

抗滑桩与滑体之间土拱效应的理论分析¹⁾

魏作安^{*,**,2)} 周永昆^{**} 万玲^{*,**} 赵颖[†] 代高飞^{**}

^{*}(重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

[†](中国科学院力学研究所, 北京 100190)

^{**}(重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘要 从力平衡的角度, 分析了抗滑桩的抗滑阻力与滑体的下滑力之间的依存关系以及传递过程. 利用弹性力学理论, 推导出桩后土体应力场的分布函数. 通过绘制应力等值线图, 发现抗滑桩与土体之间产生土拱现象的机制是滑体内的应力状态由不平衡逐渐到达平衡的结果, 属于应力拱的表现形式.

关键词 抗滑桩, 应力分布, 解析解, 岩土力学

中图分类号: O319.56 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)03-057-05

THEORETICAL ANALYSIS OF THE SOIL-ARC MECHANISM BETWEEN SOILS AND REINFORCING PILES¹⁾

WEI Zuoran^{*,**,2)} ZHOU Yongkun^{**} WAN Ling^{*,**} ZHOU Ying[†] DAI Gaofei^{**}

^{*}(The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[†](Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^{**}(College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Anti-slide pile is a major landslide prevention measure. This paper analyzes the transition process of force between soil and anti-slide pile based on force equilibrium. According to the relationship of acting force and reacting force between soil and anti-slide pile, the stress distribution in the soil behind anti-slide pile is obtained. From the stress isograms, it is shown that the mechanism of soil arc between anti-slide pile and soil is the result of the stress state from imbalance to balance in soil.

Key words reinforcing piles, stress distributing, analytical solution, soil and rock mechanics

引 言

据有关资料显示, 在近年来的滑坡整治中, 因抗滑桩具有设桩位置灵活、施工简便、施工期短等诸多优点, 已成为一种主要的工程措施被广泛采用, 并取得了良好的效果^[1-4]. 同时, 在滑坡与抗滑桩作用机理等方面的研究也取得了许多成果^[5-8]. 抗滑桩的主要工作原理是通过桩与周围岩土体的共同作用,

将滑体的剩余下滑力传递到滑床的稳固地层中, 利用稳定地层的锚固作用和被动抗力来平衡滑体的剩余下滑力. 如图 1. 一般认为桩与周围岩土体是由于土拱效应起作用的, 而且利用不同的方法分析了桩与桩后土体共同作用的土拱效应^[9-12]. 笔者认为土拱只是一种表象, 是在不平衡力作用下产生位移压缩时, 由于土体不均匀位移造成的, 其实质是土体内的应力状态由不平衡到达平衡的结果.

2009-04-14 收到第 1 稿, 2010-03-11 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10772205), 高等学校博士学科点专项科研基金 (200806110012), 中国博士后科学基金 (20070420123) 和湖南省煤矿安全开采技术重点实验室开放基金 (200806) 资助项目.

2) 魏作安, 男, 1965 年生, 教授, 主要从事采矿工程、滑坡灾害防治、尾矿库等方面的科研与教学工作. E-mail: weiza@cqu.edu.cn

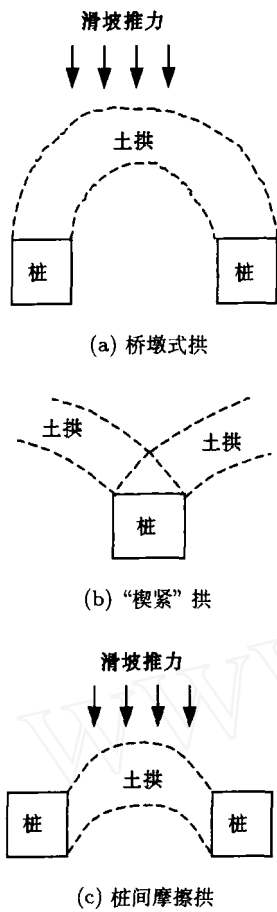


图1 桩与桩之间的水平土拱

1 抗滑桩与桩后土体的相互协同作用分析

工程实践中, 在施工条件许可的情况下, 抗滑桩通常是布置在滑体阻滑段的末端, 如图2, 即让滑体的下滑力尽可能由滑体的阻滑段来承担, 这样作用在桩上的力就比较小, 桩的断面尺寸也就比较小, 节省工程投资. 根据作用力与反作用力原理, 抗滑桩与桩后土体之间相互作用力的传递关系如图3. 滑体中的阻滑段除了自身提供一个阻止滑体滑动的阻力外, 还起到一个传递力的作用: 将下滑段的滑坡推力传给抗滑桩, 把抗滑桩的反作用力传递给下滑段, 阻止滑体滑动.

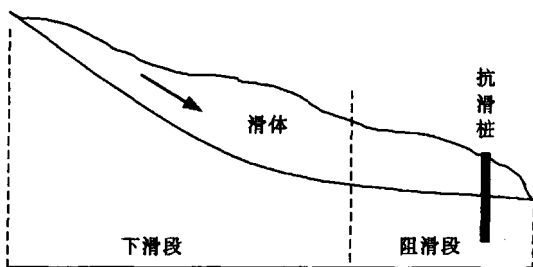


图2 抗滑桩的布置图

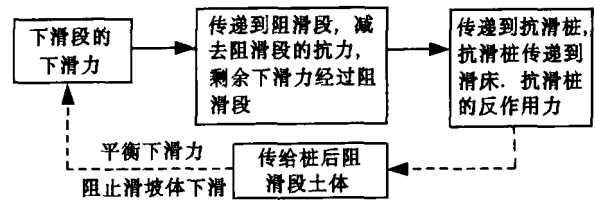


图3 桩土之间力的传递关系

如图4, 现取 A, B 两根抗滑桩和桩后一段土体进行分析. 施工抗滑桩后, 滑体达到稳定状态, 则抗滑桩作用在桩后面阻滑段上的力与剩余下滑力大小相等, 方向相反, 整个系统处于平衡稳定状态. 图4中, Q 为滑体剩余下滑力 (kn/m); q 为抗滑桩所承受的力 (kPa), 也是桩作用在滑体上的反作用力; $2L$ 为桩的间距, $2b$ 为桩的宽度.

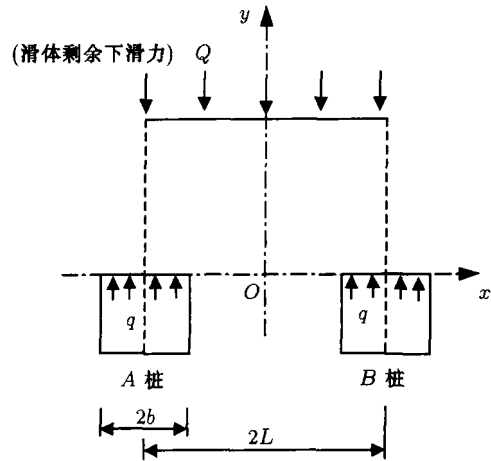


图4 桩与土之间的作用力及临界面

下面对抗滑桩的受力进行分析. 滑坡推力按三角形分布考虑, 单根抗滑桩所承受的均布荷载为 q , 如图5.

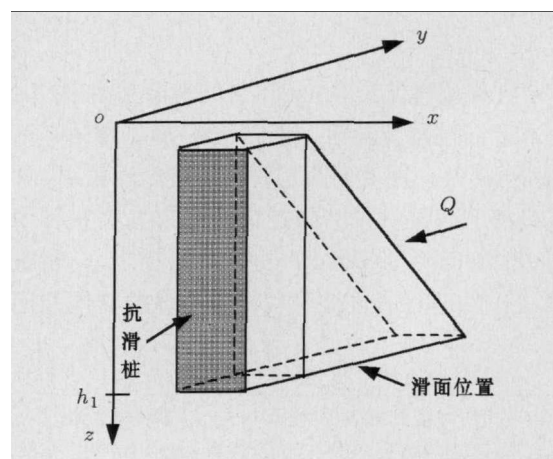


图5 抗滑桩的受力分析

令 $q = f(z)$, 按照三角形分布方式, 设 $q = kz$, k 为待定常数.

$$2LQ = \int_0^{h_1} kz \cdot dz \cdot 2b$$

$$k = \frac{2LQ}{bh_1^2} \quad (\text{kn/m}^3)$$

$$q = \frac{2L \cdot Q}{bh_1^2} \cdot z \quad (1)$$

令 $L = nb$, 则式 (1) 变为

$$q = \frac{2n \cdot Q}{h_1^2} \cdot z \quad (2)$$

其中 n 为桩间距与桩宽度之比值.

2 桩后土体中应力解析解

如图 6, 由弹性力学可知, 在半平面体边界上施加分布力 q , 则半平面体内任一点 M 的应力为

$$\sigma_x = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{y+b}{x} - \arctan \frac{y-a}{x} + \frac{x(y+b)}{x^2+(y+b)^2} - \frac{x(y-a)}{x^2+(y-a)^2} \right] \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{y+b}{x} - \arctan \frac{y-a}{x} - \frac{x(y+b)}{x^2+(y+b)^2} + \frac{x(y-a)}{x^2+(y-a)^2} \right] \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{q}{\pi} \left[\frac{x^2}{x^2+(y+b)^2} - \frac{x^2}{x^2+(y-a)^2} \right] \quad (5)$$

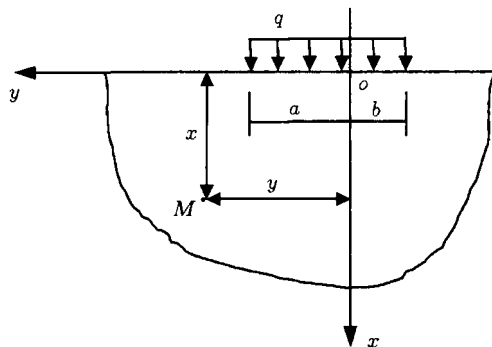


图 6 半平面体边界上受分布力作用计算模型

沿抗滑桩的轴向方向 z 处截取任一个水平面, 如图 7, 按平面应变问题来考虑, 同时, 有两点假

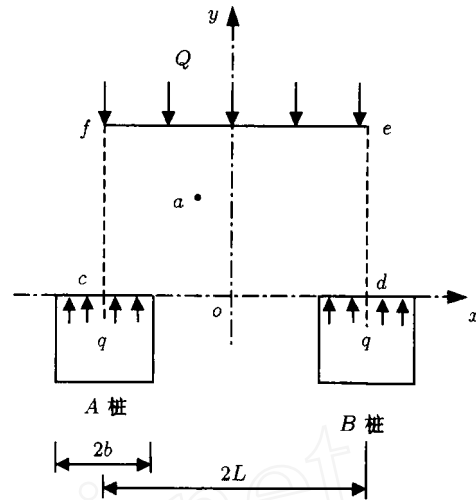


图 7 抗滑桩与桩后土的受力分析

设: (1) 假定 A, B 桩的反作用力分别作用在半无限体上; (2) 假定桩后土 ($cdef$ 区域内) 任一点的附加应力仅与相邻两桩的作用有关. 那么可以求出抗滑桩的反作用力作用在桩后土 ($cdef$ 区域内) 任一点 a 的附加应力.

如图 5, 通过坐标变换, 计算出 A 桩作用在 a 点的附加应力为

$$\sigma_y^A = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x+L+b}{y} - \arctan \frac{x+L-b}{y} + \frac{y(x+L+b)}{y^2+(x+L+b)^2} - \frac{y(x+L-b)}{y^2+(x+L-b)^2} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_x^A = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x+L+b}{y} - \arctan \frac{x+L-b}{y} - \frac{y(x+L+b)}{y^2+(x+L+b)^2} + \frac{y(x+L-b)}{y^2+(x+L-b)^2} \right] \quad (7)$$

$$\tau_{xy}^A = \frac{q}{\pi} \left[\frac{y^2}{y^2+(x+L+b)^2} - \frac{y^2}{y^2+(x+L-b)^2} \right] \quad (8)$$

B 桩作用在 a 点的附加应力为

$$\sigma_y^B = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x-L+b}{y} - \arctan \frac{x-L-b}{y} + \frac{y(x-L+b)}{y^2+(x-L+b)^2} - \frac{y(x-L-b)}{y^2+(x-L-b)^2} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_x^B = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x-L+b}{y} - \arctan \frac{x-L-b}{y} - \frac{y(x-L+b)}{y^2+(x-L+b)^2} + \frac{y(x-L-b)}{y^2+(x-L-b)^2} \right] \quad (10)$$

$$\tau_{xy}^B = \frac{q}{\pi} \left[\frac{y^2}{y^2+(x-L+b)^2} - \frac{y^2}{y^2+(x-L-b)^2} \right] \quad (11)$$

利用应力叠加原理, 将 A, B 两桩作用在 a 点的应力叠加, 得到抗滑桩作用在 a 点处的合力, 即把式 (6) 与式 (9)、式 (7) 与式 (10)、式 (8) 与式 (11)

分别相加,同时,令 $m_1 = n + 1$, $m_2 = n - 1$. 整理后得

$$\sigma_y^{AB} = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x + m_1 b}{y} - \arctan \frac{x - m_1 b}{y} + \arctan \frac{x - m_2 b}{y} - \arctan \frac{x + m_2 b}{y} + A \right] \quad (12)$$

$$\sigma_x^{AB} = \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x + m_1 b}{y} - \arctan \frac{x - m_1 b}{y} + \arctan \frac{x - m_2 b}{y} - \arctan \frac{x + m_2 b}{y} - B \right] \quad (13)$$

$$\tau_{xy}^{AB} = \frac{q \cdot y^2}{\pi} \left[\frac{1}{y^2 + (x + m_1 b)^2} - \frac{1}{y^2 + (x - m_1 b)^2} + \frac{1}{y^2 + (x - m_2 b)^2} - \frac{1}{y^2 + (x + m_2 b)^2} \right] \quad (14)$$

其中

$$A = \frac{y(x + m_1 b)}{y^2 + (x + m_1 b)^2} - \frac{y(x - m_1 b)}{y^2 + (x - m_1 b)^2} + \frac{y(x - m_2 b)}{y^2 + (x - m_2 b)^2} - \frac{y(x + m_2 b)}{y^2 + (x + m_2 b)^2}$$

$$B = \frac{y(x - m_1 b)}{y^2 + (x - m_1 b)^2} - \frac{y(x + m_1 b)}{y^2 + (x + m_1 b)^2} + \frac{y(x + m_2 b)}{y^2 + (x + m_2 b)^2} - \frac{y(x - m_2 b)}{y^2 + (x - m_2 b)^2}$$

如图 8, 抗滑桩后面土体在重力作用下任一点 a 的应力为

$$\sigma_z = \gamma \cdot z \quad (15)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = K_0 \gamma \cdot z \quad (16)$$

式中, γ 为土的重度 (kn/m^3), K_0 为土的侧压力系数.

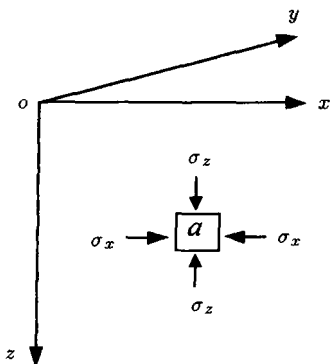


图 8 土体在自重作用下任一点的应力

假定抗滑桩的反作用力对自重的作用没有影响, 所以, 抗滑桩后面土体任一点 a 的应力为重力 and 附加应力两者叠加之和, 即

$$\sigma_z^a = \gamma \cdot z \quad (17)$$

$$\sigma_y^a = \frac{q}{\pi} \left(\arctan \frac{x + m_1 b}{y} - \arctan \frac{x - m_1 b}{y} + \arctan \frac{x - m_2 b}{y} - \arctan \frac{x + m_2 b}{y} + A \right) + K_0 \gamma \cdot z \quad (18)$$

$$\sigma_x^a = \frac{q}{\pi} \left(\arctan \frac{x + m_1 b}{y} - \arctan \frac{x - m_1 b}{y} + \arctan \frac{x - m_2 b}{y} - \arctan \frac{x + m_2 b}{y} - B \right) + K_0 \gamma \cdot z \quad (19)$$

$$\tau_{xy}^a = \frac{q \cdot y^2}{\pi} \left[\frac{1}{y^2 + (x + m_1 b)^2} - \frac{1}{y^2 + (x - m_1 b)^2} + \frac{1}{y^2 + (x - m_2 b)^2} - \frac{1}{y^2 + (x + m_2 b)^2} \right] \quad (20)$$

$$\tau_{yz}^a = \tau_{zx}^a = 0 \quad (21)$$

将式 (2) 中的 q 代入式 (17)~式 (21), 则为

$$\sigma_z^a = \gamma \cdot z \quad (22)$$

$$\sigma_y^a = \frac{2nQ}{h_1^2} \cdot z \cdot \frac{1}{\pi} \left(\arctan \frac{x + m_1 b}{y} - \arctan \frac{x - m_1 b}{y} + \arctan \frac{x - m_2 b}{y} - \arctan \frac{x + m_2 b}{y} + A \right) + K_0 \gamma \cdot z \quad (23)$$

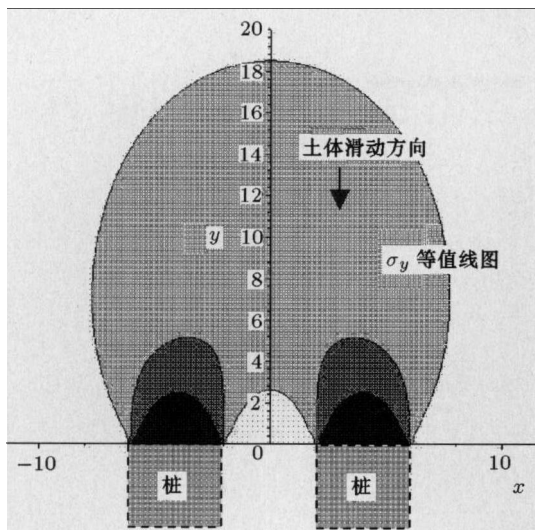
$$\sigma_x^a = \frac{2nQ}{h_1^2} \cdot z \cdot \frac{1}{\pi} \left(\arctan \frac{x + m_1 b}{y} - \arctan \frac{x - m_1 b}{y} + \arctan \frac{x - m_2 b}{y} - \arctan \frac{x + m_2 b}{y} - B \right) + K_0 \gamma \cdot z \quad (24)$$

$$\tau_{xy}^a = \frac{2nQ}{h_1^2} \cdot \frac{y^2}{\pi} \left[\frac{1}{y^2 + (x + m_1 b)^2} - \frac{1}{y^2 + (x - m_1 b)^2} + \frac{1}{y^2 + (x - m_2 b)^2} - \frac{1}{y^2 + (x + m_2 b)^2} \right] \quad (25)$$

$$\tau_{yz}^a = \tau_{zx}^a = 0 \quad (26)$$

式 (22)~式 (26) 即为抗滑桩桩后岩土体应力的解析解.

将抗滑桩和滑坡体的有关参数代到上式中, 利用 Matlab 软件, 则桩后土 σ_y 的应力分布规律如图 9. 从图中可以明显看出桩之间的 σ_y 分布成拱形, 而且越靠近抗滑桩, 应力拱越明显.

图 9 桩后土中 σ_y 的应力分布规律

3 结 论

(1) 根据滑坡推力的传递过程及作用力与反作用力原理，利用弹性力学理论，获得了桩后土体中应力分布的解析解。

(2) 通过绘制 σ_y 应力等值线图，发现抗滑桩与土体之间的应力拱，说明土拱现象的机理是土体内的应力状态由不平衡到达平衡时形成的应力拱。

参 考 文 献

- 1 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析. 北京: 水利出版社, 1980 (Pan Jiazheng. Buildings Stabilizing and Landslide Analysis. Beijing: Water Press House, 1980 (in Chinese))
- 2 Wei Zuoan, Li Shihai, Wang JG, et al. A dynamic comprehensive method for landslides control. *Engineering Geology*, 2006, 84: 1-11
- 3 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算. 北京: 中国铁道出版社, 1983 (Second Railways Survey & Design Institute. Design and Calculation of Anti-slide Pile. Beijing: China Railway Publishing House, 1983 (in Chinese))
- 4 Hassiotis S, Chameau JL, Gunaratne M. Design method for

stabilization of slopes with piles. *Journal of Geotechnical and Geonivronment Engineering*, 1997, 123(4): 314-323

- 5 刘曰武, 官欣, 张大为等. 库水浸泡后滑坡体中水分分布的实验研究. *力学与实践*, 2004, 26(4): 21-24 (Liu Yuwu, Gong Xin, Zhang Dawei, et al. Experimental study on water distribution in landslide with reservoir table changed. *Mechanics in Engineering*, 2004, 26(4): 21-24 (in Chinese))
- 6 张友良, 冯夏庭, 范建海等. 抗滑桩与滑坡体相互作用的研究. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(6): 839-842 (Zhang Youliang, Feng Xiating, Fan Jianhai, et al. Study on the interaction between landslide and passive piles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 839-842 (in Chinese))
- 7 魏作安, 李世海, 赵颖. 底端嵌固桩与滑体相互作用的物理模型试验研究. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2259-2263 (Wei Zuoan, Li Shihai, Zhao Ying. Model study of interaction mechanism between anti-sliding piles and landslide. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2259-2263 (in Chinese))
- 8 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 517-521 (Dai zihang. Study on distribution laws of landslide- thrust and resistance of sliding mass acting on antisliding piles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 517-521 (in Chinese))
- 9 贾海莉, 王成华, 李江洪. 基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析. *工程地质学报*, 2004, 12(1): 98-103 (Jia Haili, Wang Chenghua, Li Hongjiang. Analysis of pile spacing between anti-sliding piles and retaining piles in accordance with soil arching effect. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(1): 98-103 (in Chinese))
- 10 王成华, 陈永波, 林立相. 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析. *山地学报*, 2001, 19(6): 556-559 (Wang Chenghua, Chen Yongbo, Lin Lixiang. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 556-559 (in Chinese))
- 11 Chien Yuan Chen. Numerical analysis of slope stabilization concepts piles. [PhD Thesis]. University of Southern California, 2001. 1
- 12 Vermeer PA, Punlor A, Ruse N. Arching effects behind a soldier pile wall. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28(6): 379-396

(责任编辑: 何漫丽)