

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0034-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.007

横观各向同性在抗滑桩加固边坡中的应用

胡聪^{1,2}, 张永攀^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 讨论了土体强度横观各向同性和非均质性, 分析了考虑强度横观各向同性与非均质性边坡的计算方法。采用极限平衡法推导出考虑强度横观各向同性与非均质性边坡稳定计算公式, 对安全系数计算方法中土体抗滑力矩与抗滑桩抗滑力矩计算公式进行了修正, 得到了同时考虑土体强度横观各向同性与非均质性抗滑桩加固边坡的计算方法。通过实例验证, 得到当假定水平粘聚力不变, 在考虑土体强度横观各向同性时计算安全系数相对误差小于不考虑土体强度横观各向同性边坡。在实际抗滑桩加固边坡工程中考虑土体强度横观各向同性是必要的。

关键词: 抗滑桩; 横观各向同性; 边坡稳定; 计算方法

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Application of the transverse isotropy in the piled slope

HU Cong^{1,2}, ZHANG Yongpan^{1,2}

(1.Key Laboratory of Ministry of Education of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2.Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: This paper discussed the transversely isotropy and heterogeneity of the slope and analyzed the calculation method considering transverse isotropy and heterogeneity. The anti-skid moment calculation formula of the soil and the anti-slide pile was developed by the limit equilibrium method. Calculation method of slope reinforced by anti-slide piles considering soil strength transversely isotropic and heterogeneous was developed by modifying the safety factor calculation for the anti-skid moment calculation formula of the soil and the anti-slide pile. The situ case showed that when the horizontal cohesion was assumed to be a constant, the relative error of the safety factor of the transversely isotropic slope was less than that without considering the transversely isotropic nature of the soil strength, which meant that it is necessary to consider the transversely isotropic nature of the soil strength in the anti-slide pile reinforced slope engineering.

Key words: anti-slide pile; transversely isotropic; slope stability; calculating method.

目前, 抗滑桩被广泛应用于边坡加固工程中^[1-7], 因此, 大量针对抗滑桩加固边坡作用机理的研究应运而生。Broms 等^[8]通过对单桩被动区水平荷载的实验分析, 假定在极限状态下桩体沿深度方向单位长度所承担的水平应力为 3 倍的被动土压力。Fleming 等^[9]通过离心机实验得到桩体所承担的水平荷载, 对实验数据对比分析后假定在极限状态下

桩体沿深度方向单位长度承担的水平承载力与朗肯被动土压力系数的平方成正比。目前的研究中, 通常采用上边界极限分析方法研究强度各向异性非均质边坡的稳定性^[10-16]。然而该方法存在以下几点不足: 第一, 上限分析中, 要求构造运动许可速度场, 根据外功率与内能耗散率相等原理求得问题的上限解, 此时并不考虑静力平衡要求。第二, 该方法滑

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478166)

作者简介: 胡聪(1994-), 男, 四川广安人, 硕士, 研究方向为软土地基加固。

动面为对数螺旋曲线，求解过程复杂结果表达式繁琐，在编写程序过程中存在一定误差。第三，该方法计算得到的“稳定系数”与常用的边坡安全系数不同，因此计算结果无法直接与常用结果对比分析，难以直接评价边坡稳定性。第四，在计算抗滑桩加固强度各向异性边坡过程中，以平面二维模型进行计算，并未考虑桩间距对抗滑桩水平承载力带来的影响。因此，本文在抗滑桩加固边坡稳定计算公式中考虑了边坡土体强度横观各向同性，采用极限平衡法推导出考虑强度横观各向同性与非均质性边坡稳定计算公式，对安全系数计算方法中土体抗滑力矩与抗滑桩抗滑力矩计算公式进行了修正，得到了同时考虑土体强度横观各向同性与非均质性抗滑桩加固边坡计算方法。

1 强度横观各向同性和非均质性

1.1 强度横观各向同性分析

根据产生原因和表现的不同，土体各向异性可分为原生各向异性和次生各向异性，或者称为原有各向异性和应力诱导各向异性^[17]。原生各向异性是天然土在沉积过程中或人工土在填筑工程中，因各种原因导致土颗粒在不同方向上的排列不同，从而产生不同的力学性状和参数，这与土体颗粒的扁平取向和大主应力方向所成角度有关。次生各向异性是指复杂加荷状态下，应力状态的改变导致不同方向上的力学性状和参数的改变。二者的共同点在于宏观上的表现都是在不同方向上有不同力学性状，微观上都是由于土体所具有的颗粒结构性：区别在于引起这种差异的原因及内容。在边坡稳定性分析中，由于固结应力、历史应力以及沉积物类型的不同存在着明显的各向异性现象，如图 1、图 2 所示。

物质的各向异性是指其性质在不同的空间方位具有差异性，横观各向同性是各向异性的一种简单

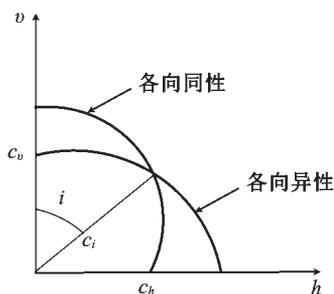


图 1 粘聚力各向异性

Fig.1 Illustration of cohesion anisotropy

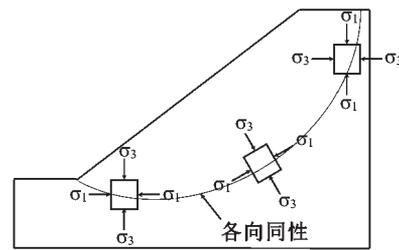


图 2 边坡滑动面不同位置处单元应力状态

Fig.2 The stress state of the element at different positions

的特殊形式^[18]。土体在沉积过程中由于扁平介质颗粒排列的取向性，土体竖向和水平向的性质存在着差异，往往会形成层状结构的粘土层相互交错的薄层矿物成分及物理力学性质各不相同横观各向同性^[19]。

如果采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型描述土的应力 - 应变关系，内摩擦角 φ 通常并不表现出显著的横观各向同性，因此本文假定只有粘聚力 c 是非均质和横观各向同性的，而土体内摩擦角是均质和各项同性的，在边坡稳定计算过程中内摩擦角是常数。粘性土体的粘聚力 c_i 表示为大主应力方向与竖向夹角为 i 时土体的粘聚力值，根据 Chen 等^[20]有：

$$c_i = c_h + (c_v - c_h) \cos^2 i$$

其中， c_h 表示水平方向上的粘聚力强度； c_v 为土体竖向粘聚力强度； i 为最大主应力与竖直方向的夹角。对于给定的土体，其任意位置处的各向异性系数可表示为：

$$k = \frac{c_h}{c_v}$$

本文假定在同一种土体材料中各点处各向异性系数相同。将各向异性系数引入该式可得：

$$c_i = c_h \left(1 + \frac{1-k}{k} \cos^2 i \right) = c_h k_i$$

1.2 强度非均质性分析

土体非均质性表现在随着深度增加土体粘聚力也会随之增大，从而增大了土体的抗剪强度。假定粘聚力的非均质性是随深度 z 的增加而增加，本文采用粘聚力非均质变化模式，土体粘聚力强度随深度 z 呈线性变化（图 3），在实际工程中经常利用原位十字板剪切试验测定土体的抗剪强度，其测量结果为水平强度指标，因此用水平向粘聚力来描述非均质性，其表达式为：

$$c_h = c_{h0} + \lambda h$$

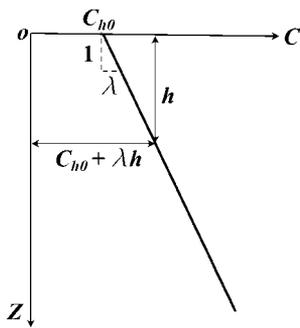


图3 粘聚力随深度的变化情况
Fig.3 Cohesion with depth

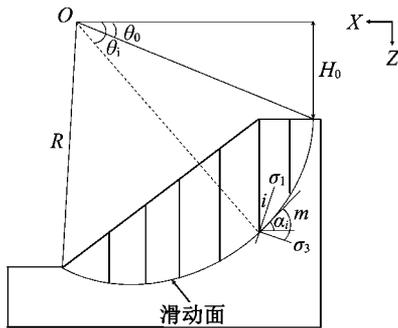


图4 圆形滑动面横观各向同性非均质边坡

Fig.4 Circular transversely isotropic heterogeneous slope

2 考虑强度横观各向同性的非均质边坡稳定性分析

本文应用极限平衡方法研究横观各向同性非均质边坡的稳定性，并应用修正英国规范 BS8006 安全系数计算公式求解。假定滑动面为圆形的横观各向同性非均质边坡如图 4 所示。

该边坡滑动面半径为 R ，坡顶滑动面与水平向圆心夹角为 θ_0 ，坡顶处与圆心高差为 H_0 。圆心夹角为 θ_i ，滑动面处大主应力与竖向夹角为 i ，滑动面与大主应力面夹角为 m ，滑动面与水平向夹角为 α_i 。由图 4 中几何关系可以得到：

$$H_0 = R \sin \theta_0$$

$$i = \theta_i - \frac{\pi}{2} + m$$

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \alpha_i$$

由莫尔—库伦破坏准则可以得到剪破面与大主应力面的夹角：

$$m = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$$

从而可以得到该点水平粘聚力为：

$$c_h = c_{h0} + \lambda R (\sin \theta_i - \sin \theta_0)$$

结合以上公式可以得到强度横观各向同性非均质边坡在该点处大主应力与竖向夹角为 i 时粘聚力 c_i ：

$$c_i = k_i c_{h0} + \lambda R k_i (\sin \theta_i - \sin \theta_0)$$

依据 BS8006 土体抗滑力矩 M_{RS} 公式在横观各向同性非均质边坡中就求解抗滑力矩时需对公式中粘聚力分项进行修正。将第 i 块土条粘聚力分项定义为 Z_i ，则在三维边坡内有：

$$Z_i = c_i \times b_i \times D_1$$

式中， b_i 为第 i 块土条宽度， D_1 为桩间距。为了方便将土条宽度近似为土条所在滑动面弧长。在条块内将 Z_i 沿滑动面积分则有：

$$Z_i = \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} c_i R D_1 \sin \theta d\theta$$

$$= R D_1 \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} (A \sin \theta + B \cos^2 \theta + C \sin^3 \theta) d\theta$$

最终得到应用英国规范在横观各向同性非均质边坡中抗滑力矩公式为：

$$M_{RS} = \sum_{i=1}^n \frac{\left[\frac{Z_i}{f_{ms}} + (f_{js} W_i + f_q b_i W_{si})(1 - r_u) \frac{\tan \varphi}{f_{ms}} \right] \sec \alpha_i R_d}{1 + \frac{\tan \varphi \tan \alpha_i}{f_{ms}}}$$

3 实例验证

如图 5 所示，Lin 等^[21]论文中边坡分为上下两种土层，地下水位与下土层表面等高，离坡脚 6.71 m 处设置一排抗滑桩加固边坡，桩径为 0.9 m，桩间距与桩径比值 $S/D = 2$ ，将土体进行等效置换可以得到其土体参数如表 1 所示。

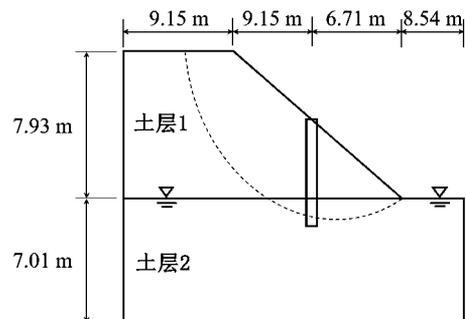


图5 抗滑桩加固边坡断面图

Fig.5 Slope section with anti-slide pile

表 1 土体参数

Tab.1 Soil parameters

重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 /kPa	摩擦角 / $^\circ$	弹性模量 /MPa	泊松比
18	10	13	4.8	0.3

首先，考虑强度横观各向同性和非均质性验证计算，取各向异性系数 $k = 0.9$ 的均质抗滑桩加固边坡，桩间距与桩径的比值 $S/D = 2$ 。其初始值：

$$c_{h0} = 0$$

$$\lambda = \frac{c_v}{h} = \frac{11.11}{7.93} = 1.401$$

$$m = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} = 51.5^\circ$$

在极限状态下当 k 取 0.9 时，土体参数计算值见表 1，土体抗滑力矩与下滑力矩计算过程见表 2、表 3。抗滑桩承担抗滑力矩不随各向异性系数变化，因此依据各向同性均质抗滑桩加固边坡安全系数计算方法进行计算。当只考虑强度横观各向同性时的验证计算：取各向异性系数 $k = 0.9$ 的均质抗滑桩加固边坡，桩间距与桩径的比值 $S/D = 2.0$ 。其中：

同理，根据以上计算步骤得到不同各向异性系数条件下的均质土体边坡安全系数如表 4。

4 结论

1) 确定了各向异性系数和非均质性分布规律，对抗滑桩加固边坡安全系数计算方法中土体抗滑力矩与抗滑桩抗滑力矩计算公式做了两次修正，得到同时考虑水平土拱效应、土体强度横观各向同性与非均质性抗滑桩加固边坡计算方法。

2) 通过实例验证得到：当假定水平粘聚力不变且考虑土体强度横观各向同性时，计算安全系数相对误差小于不考虑土体强度横观各向同性边坡，在考虑强度横观各向同性条件下计算得最小相对误差远小于 10%。

参考文献：

[1] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册. 路基 [M]. 第 2 版. 北京: 人民交通出版社, 1996.

[2] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.

[3] 贺建清, 张家生, 梅松华. 弹性抗滑桩设计中几个问题的探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 600-600.

[4] 熊朝辉. 深汕高速公路 101 滑坡整治新技术——园安抗滑桩明洞 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 532-537.

[5] 张友良, 冯夏庭, 范建海, 等. 抗滑桩与滑坡体相互作用的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 839-842.

[6] 戴自航, 沈蒲生, 彭振斌. 预应力锚固抗滑桩内力计算有限差分法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 407-413.

[7] 沈强, 陈从新, 汪稔, 等. 边坡抗滑桩加固效果监测分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 934-938.

表 2 边坡抗滑桩极限侧向压力的计算

Tab.2 Calculation of ultimate lateral pressure of anti-slide pile on slope

k	γ	c	φ	D_2	N_ϕ	g_1	g_2	A	$p_{\text{表层}}$	$p_{\text{滑动面层}}$
2	18.5	10	13	0.9	1.58	3.77	0.87	3.29	48.79	160.88

表 3 边坡抗滑桩加固边坡安全系数计算

Tab.3 Calculation of safety factor of side slope reinforced with anti-slide piles

k	$P_{\text{表层}}$	$P_{\text{滑动面}}$	F_P	l	M_{RP}	M_{RS}	M_D	F_S
2	48.79	160.88	331.91	17.03	5 652.79	10 794.76	15 263.92	1.07

表 4 抗滑桩加固非均质土体边坡安全系数汇总

Tab.4 Summary of the safety factor of non-homogeneous soil slope

各向异性系数	安全系数	设计安全系数	相对误差
横观各向同性	1.798 4	1.834	1.9%
非均质各向同性 ($k=1$)	1.067 7	1.834	41.8%
非均质横观各向异性 ($k=0.9$)	1.077 5	1.834	41.2%
非均质横观各向异性 ($k=0.7$)	1.146 1	1.834	37.51%
非均质横观各向异性 ($k=0.5$)	1.298 3	1.834	29.21%

- [8]BROMS B. Lateral resistance of piles in cohesionless soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1964, 40(1): 73-84.
- [9]FLEMIN W G K, WELTMAN A I, RANDOLPH M F, et al. Piling engineering[J]. Geotechnical Engineering, 2013.
- [10]方薇, 杨果林, 刘晓红, 等. 非均质边坡稳定性极限分析上限法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6): 14-20.
- [11]杜佐龙, 黄茂松. 非均质与各向异性黏土基坑抗隆起稳定分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 455-461.
- [12]栾茂田, 年廷凯, 杨庆. 考虑非均质各向异性效应的阻滑桩加固土坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 530-536.
- [13]年廷凯, 栾茂田, 杨庆. 考虑各向异性效应的阻滑桩加固土坡稳定性分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(6): 858-864.
- [14]廖海, 龙林焕. 基于极限平衡方法的堆积体斜坡稳定性分析与抗滑桩加固措施敏感性讨论[J]. 交通建设与管理, 2013(7): 54-55.
- [15]古浩. 边坡稳定及抗滑桩加固研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [16]郑轶轶. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [17]张连卫. 各向异性对土质边坡稳定性的影响[J]. 中国矿业, 2011, 20(12): 108-110.
- [18]曹威, 王睿, 张建民. 横观各向同性砂土的强度准则[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2026-2032.
- [19]高洪波. 轴对称横观各向同性饱和土中单桩竖向振动的简化模型求解[J]. 振动工程学报, 2014, 27(3): 451-456.
- [20]CHEN W F, SNITBHAN N, FANG H Y. Stability of Slopes in Anisotropic, Nonhomogeneous Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 12(1): 146-152.
- [21]LI L, LIANG R Y, LIU H. Reliability Based Design for Slope Stabilization Using Both Anchors and Drilled Shafts[C]// Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. 2014.

(责任编辑 王利君)

(上接第33页)

- [2]尚嘉兰, 沈乐天, 赵坚. 粗粒花岗岩中应力波的传播衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 212-215.
- [3]刘晓辉, 张茹, 刘建峰. 不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1528-1534.
- [4]KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society, 1994, 62(11): 676-700.
- [5]郭连军, 杨跃辉, 华悦含, 等. 冲击荷载作用下花岗岩动力特性试验分析[J]. 工程爆破, 2014, 20(1): 1-5.
- [6]翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩和混凝土在单轴冲击压缩荷载下的动态性能比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 762-768.
- [7]许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3225-3229.
- [8]International Society for Rock Mechanics(ISRM). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(1): 99-103.
- [9]胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. 兵器材料科学与工程, 1991, 11(11): 40-47.
- [10]王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 17-25.
- [11]单仁亮, 陈石林, 李宝强. 花岗岩单轴冲击全程本构特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 32-38.

(责任编辑 王利君)