

非线性破坏准则下法向受力条形浅锚抗拔力上限计算方法

赵炼恒, 李亮, 杨小礼, 但汉成, 邹金锋

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 在上限定理、相关联流动法则基础上, 根据非线性破坏准则对法向受力条形浅锚极限抗拔力上限进行计算, 其方法是: 通过“切线法”引进变量, 把锚板上填土的非线性抗剪强度指标 c_t 和 φ_t 作为变量参数, 对锚板上部填土建立含有变量的速度场, 根据外力功率与内部耗能相等原理获得极限抗拔力的目标函数与约束条件; 基于 MATLAB 软件平台, 利用“序列二次规划算法”对该问题进行优化求解。计算结果表明: 当非线性破坏准则变为线性破坏准则时, 计算结果与实际结果相符; 非线性参数对锚板的极限抗拔力有重要影响, 对非线性岩土体进行线性简化不利于正确评价抗拔基础的承载性能, 恰当引入岩土体破坏准则的非线性更加符合工程实际; 提高岩土抗剪强度, 加大锚板埋深, 提高锚板板面粗糙度和锚板倾斜埋置均有利于提高法向受力浅埋条锚基础抗拔承载力。
关键词: 法向受力条形锚板; 极限抗拔力; 上限定理; 非线性 M-C 强度准则; 关联流动法则; 序列二次规划法
中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7207(2009)05-1444-07

Calculating method of upper bound for ultimate pullout capacity of vertically loaded strip plate anchors based on nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion

ZHAO Lian-heng, LI Liang, YANG Xiao-li, DANG Han-cheng, ZOU Jin-feng

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the upper bound limit analysis theorem, the associated flow rule and the nonlinear M-C failure criterion, the ultimate pull-out capacity (UPC) of vertically loaded strip plate anchors were studied by means of the kinematical approach of limit analysis theory. The procedures were as follows: the nonlinear shear strength parameters, i.e., internal friction angle φ_t and cohesive force c_t , were treated as variable parameters for the calculation schemes. The objective function of UPC was obtained by equating the work rate of external force to internal dissipation along the velocity discontinuities, and the upper bound solutions were presented by applying a nonlinear sequential quadratic programming (SQP) algorithm. The results show that the nonlinear failure parameter exerts a significant effect on UPC, and if the nonlinear M-C yield criterion turns into a linear M-C yield criterion, the results presented here agree well with the real ones. The density of soil mass, the embedment ratio, the interface properties, the inclined angle and the geometric properties have significant effects on UPC and the region of failure modes.

Key words: vertically loaded strip plate anchors; ultimate pull-out capacity; upper bound theorem; nonlinear M-C failure criterion; associated flow rule; sequential quadratic programming

收稿日期: 2009-01-10; 修回日期: 2009-03-20

基金项目: 西部交通建设科技项目(2006318802111); 中南大学优秀博士学位论文扶植项目(2008yb004); 铁道部科技研究开发计划重点项目(2008G032-3); 湖南省交通厅科技项目(2007-29)

通信作者: 赵炼恒(1980-), 男, 湖南益阳人, 博士研究生, 从事道路与铁道工程、地基处理等研究; 电话: 13755139425; E-mail: zlh8076@163.com

作为一种提供抗拔力的基础形式, 锚板在实际工程中被广泛应用^[1-14], 如输电线路杆塔基础、电视通讯塔基础、高耸构筑物基础、桩板码头和桩板墙的锚定板等承受抗拔荷载的土工结构均使用锚板。按锚板在土中埋设及受力方向来分, 有水平埋设垂直受力的水平锚板, 垂直埋设水平受力的竖向锚板和倾斜埋设倾斜受力的锚板(一般上拔力垂直于锚板平面)^[12, 14]。按锚板的几何特征, 一般可将长宽比 $L/B \geq 5$ 的锚板视作条形锚板^[10, 14]。多数设计理论均从条形锚板入手, 再引进形状系数推广到其他锚板。按锚板在极限上拔荷载的作用下土体的破坏形态分类, 可以分为浅埋锚板、深埋锚板^[3, 7-8, 12, 14]。以临界深度为界, 松散岩土中临界埋深率 $H/B \geq 5$ 时的锚板为浅埋锚板(其中, H 为埋置深度, B 为锚板宽度)。而在密实岩土体中, 当 $H/B \geq 8$ 时的锚板为浅埋锚板, 锚板上部岩土体出现整体剪切破坏, 浅锚的极限抗拔力一般根据破坏形态得出。锚板的承载力特性尤其是极限抗拔力(Ultimate pull-out capacity, UPC)一直是抗拔基础的研究重点。从理论研究到实验测试, 国内外许多研究者采用不同的方法如现场实测和模型试验法^[3, 7-9, 12]、极限平衡法^[3]、极限分析法^[1-2, 10, 14]、数值分析方法^[4-8, 13-14]以及经验公式法^[12]等对此进行研究。既有研究多数针对水平^[1-8]或竖直^[9]埋设锚板的抗拔力计算, 在很多情况下往往需要根据工程实际把锚板倾斜^[10-14]埋置。目前, 人们对法向受力斜置浅埋锚板的承载性能研究较少, 对其极限抗拔力及破坏机理也有待深入^[10-13]。同时, 在以上众多研究中^[1-14], 其研究手段和方法大多建立在岩土体的线性 Mohr-Coulomb 破坏准则(即 M-C 准则)基础上。但研究表明, 岩土体破坏准则具有非线性, 且线性 M-C 破坏准则是其的特例^[15-16], 目前, 人们对基于这一强度准则下的法向受力浅埋锚板极限抗拔力的探讨较少。因此, 有必要在上限定理的基础上, 寻求合适的方法求解非线性破坏准则下法向受力倾斜条形锚板的极限抗拔力。为此, 本文作者在前人的研究成果的基础上, 根据关联流动法则和非线性破坏准则^[15-16], 运用上限法^[17]求解浅埋倾斜条形锚板极限抗拔力的上限解。基本方法是: 首先通过“切线法”引进变量, 把锚板上填土的非线性抗剪强度指标 c_t 和 φ_t 作为变量参数, 对锚板上部填土建立含有变量的机动容许速度场, 然后, 根据外力功率与内部耗能相等原理求出极限抗拔力的目标函数与约束条件, 再应用“序列二次规划算法”(SQP)对该问题进行优化^[15-16, 18]。最后, 对影响参数进行分析, 并给出相应的工程建议。

1 基本原理和假设

1.1 极限上限法及非线性破坏准则

在虚功率原理的基础上可推导出上限定理, 即: 在所有与运动许可的位移速度场和应变率场相对应的荷载中, 极限荷载最小, 或者说, 按运动许可的速度场与应变率场求得的极限荷载都大于真正的极限荷载^[17]。对结构物承载上限进行分析时, 提高材料的屈服强度不会降低结构的极限载荷, 因而, 采用上限分析时, 对非线性破坏准则下的上限分析可采用“切线法”, 以提高岩土材料强度为手段来分析结构物的上限解。外切线直线破坏准则下的上限解为真实极限载荷(非线性破坏准则对应的极限载荷)的上限^[15-16]。

设非线性破坏准则^[15-16]为:

$$\tau = c_0 \cdot (1 + \sigma_n / \sigma_t)^{1/m} \tag{1}$$

将式(1)绘制成如图 1 所示的曲线。式(1)中, c_0 , σ_t 和 m 均为岩土材料参数; c_0 为曲线与纵轴的截距; σ_t 为曲线与横轴的截距, 曲线恒定通过(0, c_0)和($-\sigma_t$, 0) 2 个点, m 决定了曲线的弯曲程度。当 $m=1$ 时, 式(1)变为线性 Mohr-Coulomb 强度准则。

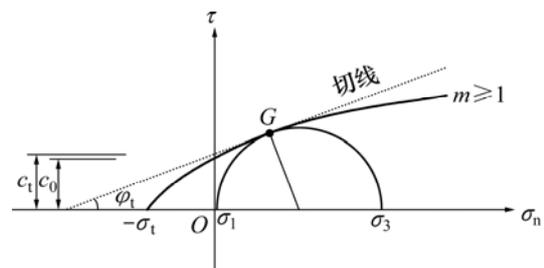


图 1 非线性破坏准则的切线

Fig.1 Tangential line for a nonlinear failure criterion

式(1)的切线方程为:

$$\tau = c_t + \tan \varphi_t \cdot \sigma_n \tag{2}$$

式中: c_t 和 $\tan \varphi_t$ 分别为切线的斜率和截距, 如图 1 所示。 c_t 和 $\tan \varphi_t$ 的表达式为:

$$c_t = \frac{m-1}{m} \cdot c_0 \cdot \left(\frac{m \cdot \sigma_t \cdot \tan \varphi_t}{c_0} \right)^{\frac{1}{1-m}} + \sigma_t \cdot \tan \varphi_t; \tag{3}$$

$$\tan \varphi_t = \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \frac{c_0}{m \sigma_t} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right)^{\frac{1-m}{m}} \tag{4}$$

1.2 基本假设

对于法向受力的倾斜浅埋条形锚板，在构建平动破坏机构时，应用如下假设：

a. 锚板上填土为理想刚塑性体，破坏时服从非线性 M-C 破坏准则，破坏面上某一点对应的抗剪强度指标为 c_t 和 φ_t (c_t 和 φ_t 的具体含义如图 1 所示)；

b. 锚板上填土服从相关联流动法则；

c. 倾斜浅埋条形锚板为刚性结构，锚板与板上填土出现相对滑动且滑动摩擦角 δ 为常数，锚板与土体之间的粘附力为 $P_u \cdot \tan \delta$ (其中 P_u 为锚板极限抗拔荷载， δ 为板摩擦角)；

d. 以临界深度为界，临界埋深率 $H/B \geq 8$ 的锚板假设为浅埋锚板，锚板上部岩土体出现整体破坏。

2 刚性块平动破坏机制

Murray 等^[10]针对浅埋法向受力倾斜锚板，结合模型试验结果建立了 2 种上限计算模式。包含对数螺旋线受剪区 bcf 的破坏模式对倾斜浅埋锚板极限抗拔力计算具有更好的适用性，所构建的破坏机构和速度场如图 2 和图 3 所示。

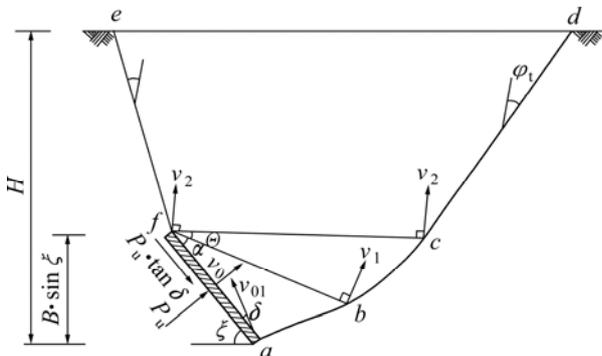


图 2 法向受力倾斜条锚平动破坏机制

Fig.2 Failure mechanism of inclined strip anchor

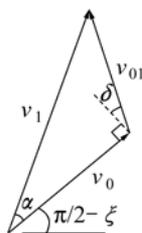


图 3 速度相容三角形

Fig.3 Hodograph for velocity displacement

需要指出的是：尽管 Murray 等^[10]构建了合适的机动破坏模式，但在极限抗拔力计算时仅仅考虑了砂性土的单一抗剪强度指标 φ (砂土内摩擦角)，因而，其抗拔力计算式相对简单，且只适用于砂土。现有研究也表明^[1-14]，岩土体密实度、岩土体抗剪强度、锚板表面粗糙、锚板埋深率和锚板几何形状均对锚板承载能力和锚板抗拔破坏区域有较大影响。因而，本文考虑以上几个影响因素(其中，岩土体抗剪强度指标采用“切线法”引进的非线性变量 c_t 和 φ_t)，对非线性破坏准则条件下倾斜锚板极限抗拔力计算式进行重新推导。

2.1 破坏机制

根据图 2 以及简单的几何关系，可分别求得各刚性块边长 l_{ab} ， l_{bc} ， l_{cd} ， l_{de} ， l_{ef} ， l_{bf} 和 l_{cf} 以及面积 S_{abf} ， S_{bcf} 和 S_{cdef}

令 $v_0=1$ ，由图 2 和图 3，根据速度三角形关系和对数螺旋线受剪区速度场性质^[17]，可求得各速度间断线上的间断速度 v_{01} ， v_1 和 v_2 。

$$v_{01} = [v_0 / \sin(\pi/2 - \alpha - \delta)] \cdot \sin \alpha ; \quad (5)$$

$$v_1 = [v_0 / \sin(\pi/2 - \alpha - \delta)] \cdot \sin \alpha (\pi/2 + \delta) ; \quad (6)$$

$$v_2 = v_1 \cdot \exp[\theta \cdot \tan \varphi_t] . \quad (7)$$

式中： α 和 θ 为图 2 中所示的几何角度。

当锚板倾角 $\xi=0^\circ$ 即锚板水平埋设时，该破坏机制可退化为如图 4 所示的对称破坏形式，此时，锚板上填土不与锚板出现相对滑动^[10]。

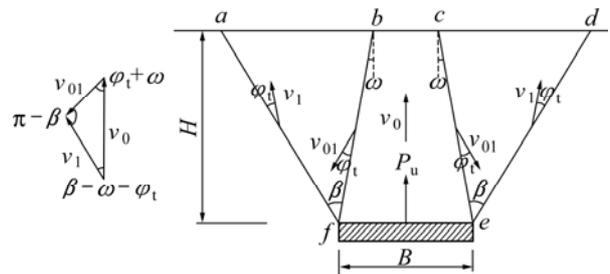


图 4 水平浅埋条形锚板平动破坏机制

Fig.4 Failure mechanism of horizontal strip anchors

图 4 中的破坏模式由 Murray 等^[1]提出，极限抗拔力计算过程与图 2 所示的破坏模式的极限抗拔力计算过程类似。

2.2 能耗计算

能耗计算包括外力做功计算和内部耗能计算 2 个方面。

2.2.1 外力做功

由图 2 可知, 在假定的破坏模式中, 外力的功率包括: 极限抗拔荷载 P_u 的功率 W_{P_u} , 地基表面超载 q 的功率 W_q , 破坏区域 $abcdef$ 土重力做功 W_{soil}

$$W_{P_u} = B \cdot P_u \cdot v_0 ; \quad (8)$$

$$W_q = q \cdot v_2 \cdot l_{de} \cdot \cos(\pi - \xi + \alpha + \Theta) . \quad (9)$$

重力做功 W_{soil} 包括 3 个部分: 楔形体 abf 土重力做功 W_{abf} , 多边形 $cdef$ 土重力做功 W_{cdef} , 对数螺旋线受剪区 bcf 处土重力做功 W_{bcf} 。

$$W_{abf} = S_{abf} \cdot \gamma \cdot v_1 \cdot \cos(\pi - \xi + \alpha) ; \quad (10)$$

$$W_{cdef} = S_{cdef} \cdot \gamma \cdot v_2 \cdot \cos(\pi - \xi + \alpha + \Theta) . \quad (11)$$

式中: γ 为土体容重; $(\pi - \xi + \alpha)$ 和 $(\pi - \xi + \alpha + \Theta)$ 分别表示 abf 和 $cdef$ 刚性块重力方向与其运动方向的夹角。

对数螺旋线受剪区 W_{bcf} 计算如下。

该区土重作的外功率为沿整个区域 θ 不同微元的垂直速度分量与其重力的乘积之和。

由图 5 所示的辐射受剪区 fbc 的功率计算示意图, 作用在不同微元上的重力是 dF , 因而微元的外功率为:

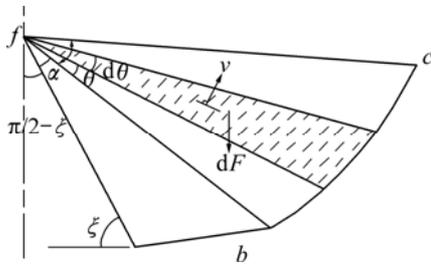


图 5 辐射受剪区 fbc 的功率计算示意图

Fig.5 Energy dissipation calculation of shear area fbc

$$[v \cdot \cos(\pi - \xi + \theta + \alpha)] \cdot dF = [v \cdot \cos(\pi - \xi + \theta + \alpha)] \cdot [1/2 \cdot \gamma \cdot r^2 \cdot d\theta] . \quad (12)$$

又由于

$$v = v_1 \cdot \exp(\theta \tan \varphi_t) ; \quad (13)$$

$$r = l_{bf} \cdot \exp(\theta \tan \varphi_t) . \quad (14)$$

则 bcf 区域土重作的外功率为:

$$W_{bcf} = \frac{\gamma \cdot l_{bf}^2 \cdot v_1}{2} \int_0^\Theta \exp[(3 \cdot \theta) \tan \varphi_t] \cdot \cos(\pi - \xi + \theta + \alpha) \cdot d\theta =$$

$$\frac{\gamma \cdot l_{bf}^2 \cdot v_1}{2 \cdot (1 + 9 \cdot \tan^2 \varphi_t)} \cdot h(\alpha, \Theta, \xi, \varphi_t) . \quad (15)$$

其中:

$$h(\alpha, \Theta, \xi, \varphi_t) = [3 \cdot \cos(\xi - \alpha) \cdot \tan \varphi - \sin(\xi - \alpha)] + \{\sin(\xi - \alpha - \Theta) - 3 \tan \varphi \cos(\xi - \alpha - \Theta)\} \cdot \exp(3 \cdot \Theta \cdot \tan \varphi_t) . \quad (16)$$

累加上述重力做功, 得 $abcdef$ 重力功率 W_{soil} :

$$W_{soil} = W_{abf} + W_{bcf} + W_{cdef} \quad (17)$$

2.2.2 内部耗能

根据假设, 条形锚板为刚性基础, 锚板上滑动土体为理想刚体, 无塑性变形, 内部耗能仅发生在破坏区域的速度间断线 ab, bc, cd 和 ef , 板土接触面 fa 上以及对数螺旋线受剪区域 bcf 中, 各部分耗能计算式为:

$$G_{ab} = c \cdot (v_1 \cdot \cos \varphi_t) \cdot l_{ab} ; \quad (18)$$

$$G_{cd} = c \cdot (v_2 \cdot \cos \varphi_t) \cdot l_{cd} ; \quad (19)$$

$$G_{ef} = c \cdot (v_2 \cdot \cos \varphi_t) \cdot l_{ef} ; \quad (20)$$

$$G_{af} = P_u \cdot \tan \delta \cdot (v_{01} \cdot \cos \delta) \cdot l_{af} . \quad (21)$$

根据文献[17], 对数螺旋线受剪区 bcf 中的能量耗散计算式为:

$$G_{bcf} = \int_0^\Theta c \cdot r \cdot v \cdot d\omega = \int_0^\Theta c \cdot (l_{bf}) \cdot \exp[(\omega) \cdot \tan \varphi_t] \cdot v_1 \cdot \exp[(\omega) \cdot \tan \varphi_t] \cdot d\omega = \frac{1}{2} \cdot c \cdot v_1 \cdot (l_{bf}) \cdot [(\exp(2 \cdot \Theta \cdot \tan \varphi_t) - 1) / \tan \varphi_t] . \quad (22)$$

同时, 根据文献[17], 速度间断线 bc 上消耗的能量与受剪区 bcf 消耗的能量相同, 见式(22)。则除锚板表面(fa)能量耗散外的内部耗能为:

$$G = G_{ab} + G_{bcf} + G_{bc} + G_{cd} + G_{ef} . \quad (23)$$

2.3 极限抗拔荷载计算

根据破坏模式中外力做功与内部耗能的能量相等原理, 将以上相关各式代入并整理, 得浅埋法向承力倾斜条形锚板极限抗拔荷载 P_u 表达式:

$$P_u \cdot v_0 + W_{soil} + W_q = G + P_u \cdot \tan \delta \cdot (v_{01} \cdot \cos \delta) \cdot l_{af} \Rightarrow P_u = \frac{G - W_{soil} - W_q}{v_0 - l_{af} \cdot \tan \delta \cdot (v_{01} \cdot \cos \delta)} . \quad (24)$$

3 SQP 优化方法与实现

式(24)中,除 B, H, γ, q, δ 和 ζ 为已知量外, c_t 是非线性破坏准则上某一点切线对应的抗剪强度指标,极限抗拔荷载 P_u 还与参数变量 φ_t, α 和 θ 有关。显然,这些变量应满足平动机制刚体运动协调速度场约束条件和物理意义要求的几何约束条件。当其他条件一定时,破坏范围和形状可由参数 φ_t, α 和 θ 完全确定,对应该破坏模式即可得到 1 个上限解 P_u 的目标函数,即 $P_u = f(\alpha, \theta, \varphi_t)$ 。按照上限定理,满足运动许可条件的最小 P_u 才是对应于此破坏模式的最优解。于是,问题转化为:在满足物理意义的约束条件下,寻求目标函数 $P_u = f(\alpha, \theta, \varphi_t)$ 的最小值 $P_{u, \min}$ 。

序列二次规划算法(简称 SQP 法)适用于非线性较严重的问题,特别是对于大多数中小规模问题,采用 SQP 法效率较高。近年来, SQP 法已成为国际上过程系统优化商品化软件中的标准算法^[19]。已有研究表明^[15-16, 18],对这类极限承载力目标函数 P_u 和约束条件包含自变量 c_t, φ_t, α 和 θ 的非线性函数,采用序列二次规划法(SQP)最优化理论能够获得较好的效果。本文利用数学计算软件 MATLAB 编写相应的计算程序,并调用 MATLAB 优化工具箱中的序列二次规划(SQP)优化方法,对该问题进行优化求解,该算法具体内容见文献^[19]。

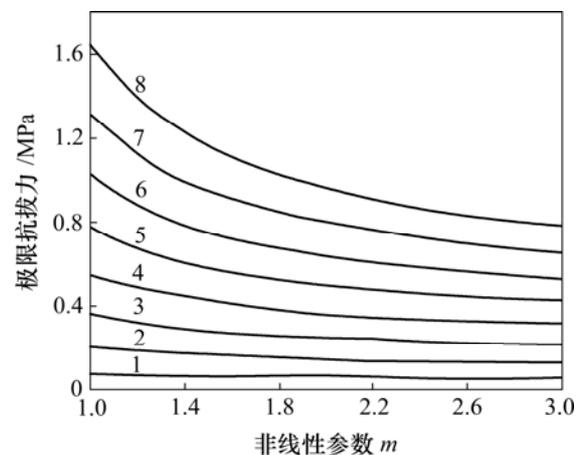
4 参数敏感性分析

已有研究大多针对性质单一的砂土^[1, 5, 7-8, 9-12]或纯黏土^[2, 4, 6, 13-14]进行研究,发现岩土体密实度 γ 、岩土体的非线性抗剪强度指标 c_t 和 φ_t 、埋设方式、锚板表面粗糙程度、埋深率 H/B 和锚板几何形状对锚板承载能力和锚板抗拔破坏区域均有较大的影响^[1-14]。因此,本文基于上述非线性 M-C 破坏准则^[15-16],主要分析 c_t, φ_t (以非线性参数 m 表征), $\delta, H/B$ 和 ζ 等不同参数的组合对倾斜浅埋条锚极限抗拔力(P_u/B)的影响。其他参数固定,即:锚板宽 $B=1.0$ m,填土容重 $\gamma=18.0$ kN/m³, $c_0=20$ kPa, $\sigma_t=32$ kPa。

当锚板倾斜角 $\zeta=45^\circ$,板土摩擦角 $\delta=15^\circ$,相对埋深率 $H/B=1\sim 8$ 时非线性参数 m 对极限抗拔力 P_u/B 的

影响如图 6 所示。由图 6 可看出,在其他条件一定的情况下,锚板埋深率(H/B) 和非线性强度参数 m 均对极限抗拔力 P_u/B 有较大影响,随着 m 的增加,岩土体抗剪强度指标 c_t 和 φ_t 降低,极限抗拔力迅速减小;而埋深率增加, P_u/B 呈非线性增加,加大埋深,可提高基础承载性能。

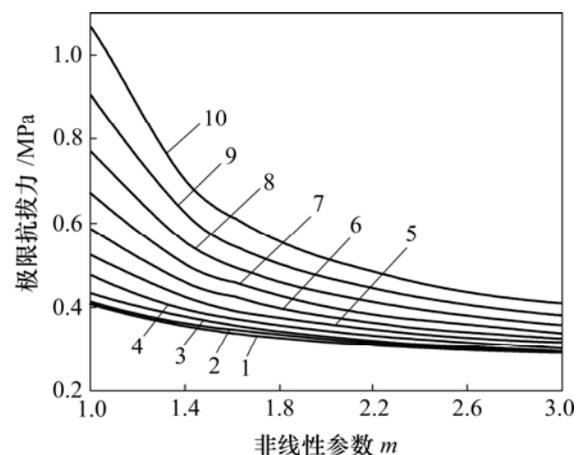
当相对埋深率 $H/B=4$,板土摩擦角 $\delta=15^\circ$,锚板倾斜角 $\zeta=0^\circ\sim 90^\circ$ 时,非线性参数 m 对极限抗拔力 P_u/B 的影响如图 7 所示。由图 7 可看出,当其他条件一定时,锚板倾斜角 ζ 和非线性强度参数 m 均对极限抗拔力 P_u 有较大影响,随着 m 增加,岩土体抗剪强度指



H/B : 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5; 6—6; 7—7; 8—8

图 6 极限抗拔力 P_u/B 与非线性参数 m 的关系

Fig.6 Relationships between ultimate pull-out capacity P_u/B and nonlinear parameter m



$\zeta/(^\circ)$: 1—0; 2—10; 3—20; 4—30; 5—30; 5—40; 6—50;

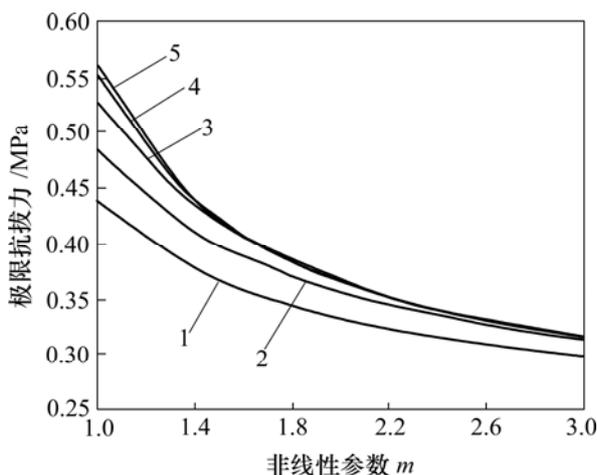
7—60; 8—70; 9—80; 10—90

图 7 极限抗拔力 P_u/B 与非线性参数 m 的关系

Fig.7 Relationships between ultimate pull-out capacity P_u/B and nonlinear parameter m

标 c_t 和 φ_t 降低, 极限抗拔力迅速减小; 而倾斜角增加对 P_u 的影响与之相反, 说明锚板倾斜放置有利于锚板的抗拔稳定。

当相对埋深率 $H/B=4$, 锚板倾斜角 $\zeta=45^\circ$, 板土摩擦角 $\delta=0^\circ\sim 20^\circ$ 时, 非线性参数 m 对极限抗拔力 P_u/B 的影响如图 8 所示。



$\delta/(^\circ)$: 1—0; 2—5; 3—10; 4—15; 5—20

图 8 极限抗拔力 P_u/B 与非线性参数 m 的关系

Fig.8 Relationships between ultimate pull-out capacity P_u/B and nonlinear parameter m

从图 8 可看出, 当其他条件一定时, 锚板板土摩擦角 δ 和非线性强度参数 m 均对极限抗拔力 P_u/B 有较大影响, 随着 m 的增加, P_u/B 迅速减小, 而板土摩擦角增加将引起 P_u/B 增加, 但其增加幅度逐渐减小。因而, 在实际工程中, 采用粗糙的锚板板面将有利于锚板的稳定。

对比图 6~8 均可看出: 在一定条件下, 非线性参数 m 对极限抗拔力 P_u/B 有较大影响; 随着 m 的增加, P_u/B 均呈非线性减小, 因而, 非线性岩土体的线性简化对正确评价抗拔基础的承载性能不利, 恰当引入岩土体的非线性将更加符合工程实际; 当非线性参数 $m=1$, 非线性破坏准则变为线性破坏准则时, 在相同计算参数下, 本文所得结果与文献结果一致, 可以认为, Murray 等^[1, 10]的研究成果是本文的简化特例。

由图 6~8 还可看出, 在一定岩土体密实度和锚板几何特性条件下, 岩土体抗剪强度指标 c_t 和 φ_t 提高, 埋深率 H/B 加大, 板土摩擦角 δ 提高, 锚板倾斜角 ζ 增加, 均对提高法向受力浅埋倾斜条锚基础抗拔承载力有利。因而, 在实际工程应用中, 可通过改良地基

土物理学特性, 加大基础埋深率, 采用粗糙锚板板面, 增加锚板倾斜角来提高抗拔基础的稳定性。

5 结 论

a. 当非线性参数 $m=1$ 时, 非线性破坏准则变为线性破坏准则, 此时, 采用本文法向受力条形浅锚抗拔力上限计算方法所得结果与文献结果一致。

b. 岩土体破坏准则的非线性对锚板基础的承载能力和稳定性有较大影响。在其他参数不变时, 随着岩土体非线性参数 m 的增加, 极限抗拔力 P_u/B 减小。因而, 非线性岩土体的线性简化对正确评价抗拔基础的承载性能不利, 恰当引入岩土体的非线性将更加符合工程实际。

c. 在一定工程条件下, 提高岩土抗剪强度指标, 加大锚板埋深率, 提高锚板板面粗糙度和锚板倾斜埋置, 均有利于提高法向受力浅埋倾斜条锚基础抗拔承载力。因而, 在实际工程应用中, 可通过改良地基土物理学特性, 加大基础埋深, 采用粗糙锚板, 增加锚板倾斜角来提高抗拔基础的稳定性。

参考文献:

- [1] Murray E J, Geddes J D. Uplift of anchor plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113(3): 202-215.
- [2] Merifield R S, Sloan S W, Yu H S. Stability of plate anchors in undrained clay[J]. Géotechnique, 2001, 51(2): 141-153.
- [3] 何思明. 抗拔锚板基础承载力研究[J]. 地下空间, 2002, 22(2): 145-148.
HE Si-ming. Study on bearing capacity of uplift anchor foundation[J]. Underground Space, 2002, 22(2): 145-148.
- [4] Merifield R S, Lyamin A V, Sloan S W et al. Three-dimensional lower bound solutions for stability of plate anchors in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(3): 243-253.
- [5] Merifield R S, Lyamin A V, Sloan S W. Three-dimensional lower bound solutions for the stability of plate anchors in sand[J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 123-132.
- [6] 刘 君, 吴利玲, 胡玉霞. 正常固结黏土中圆形锚板抗拔承载力[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(5): 712-719.
LIU Jun, WU Li-ling, HU Yu-xia. Pullout capacity of circular plate anchors in NC clay[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(5): 712-719.

- [7] Dickin E A, Laman M. Uplift response of strip anchors in cohesionless soil[J]. *Advances in Engineering Software*, 2007, 38(9): 618–625.
- [8] 刘文白. 抗拔基础的承载性能与计算[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
LIU Wen-bai. The bearing behavior and calculation of the anti-uplift foundation[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.
- [9] Sawwaf M El, Nazir A. The effect of soil reinforcement on pullout resistance of an existing vertical anchor plate in sand[J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33(3): 167–176.
- [10] Murray E J, Geddes J D. Resistance of passive inclined anchors in cohesionless medium[J]. *Géotechnique*, 1989, 39(3): 417–431.
- [11] 茜平一, 刘祖德. 浅埋斜拔锚板周土体的变形破坏特征[J]. *岩土工程学报*, 1992, 14(1): 62–66.
QIAN Ping-yi, LIU Zu-de. Distortion and failure character of shallow buried inclined anchors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 14(1): 62–66.
- [12] 丁佩民, 肖志斌, 张其林, 等. 砂土中锚板抗拔承载力研究[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(5): 82–91.
DING Pei-min, XIAO Zhi-bin, ZHANG Qi-lin, et al. Uplift capacity of anchor plates in sand[J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(5): 82–91.
- [13] Merifield R S, Lyamin A V, Sloan S W. Stability of inclined strip anchors in purely cohesive soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(6): 792–799.
- [14] 刘海笑, 杨晓亮. 法向承力锚极限抗拔力特性[J]. *海洋工程*, 2006, 24(4): 8–14.
LIU Hai-xiao, YANG Xiao-liang. Characteristics of ultimate pull-out capacity for vertically loaded anchors[J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(4): 8–14.
- [15] 杨小礼. 线性与非线性破坏准则下岩土极限分析方法及其应用[D]. 长沙: 中南大学土木建筑学院, 2002.
YANG Xiao-li. Limit analysis method and its application to geotechnical engineering with linear and nonlinear failure criteria[D]. Changsha: School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, 2002.
- [16] 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 等. 基于非线性 Mohr-Coulomb 强度准则下的锚索极限抗拔力研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 107–111.
ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li, et al. Study on the ultimate pullout force of pre-stressed cable based on nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 107–111.
- [17] Chen W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Press, 1975.
- [18] YANG Xiao-li, GUO Nai-zheng, ZHAO Lian-heng et al. Influences of nonassociated flow rules on seismic bearing capacity factors of strip footing on soil slope by energy dissipation method[J]. *Journal of Central South University and Technology*, 2007, 14(6): 842–847.
- [19] 飞思科技产品研发中心. MATLAB6.5 辅助优化计算与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Fei Si Technological Products Research and Development Center. MATLAB6.5 aided optimization design and calculation[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.