

基于块体集上限法的砂土中条形锚板抗拔承载力分析

黄茂松^{1, 2}, 余生兵^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 运用块体集上限法详细分析了砂土中条形锚板的抗拔承载特性。首先分析了砂土中水平条形锚板的抗拔承载力, 并与已有文献中的极限分析上限解、极限平衡解和模型试验结果等进行了详细对比, 验证了本文分析的有效性。对比结果表明本文块体集上限分析的求解精度要高于多块体上限法和极限分析有限元法, 具有较大的优越性。运用块体集上限法分析了条形锚板的破坏面特性, 对不同土体内摩擦角和不同锚板埋深比(H/B)条件下砂土中条形锚板的破坏模式及其变化规律进行了详细的分析研究。

关键词: 极限分析; 块体集; 条形锚板; 抗拔承载力; 砂土

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)02-0201-07

作者简介: 黄茂松(1965-), 男, 浙江玉环人, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的科研和教学工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn。

Pull-out capacity of strip anchor plate in sand based on block set mechanism

HUANG Mao-song^{1, 2}, YU Sheng-bing^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The block set mechanism is employed to analyze the pull-out characteristics of strip anchor plates in sand. An application to upper bound analyses of vertically loaded strip anchor plates is given first to illustrate the utility and effectiveness of the proposed method. Detailed comparisons with results obtained from other upper-bound limit analysis methods, limit equilibrium methods and model tests are included. It is shown that the accuracy of solutions obtained from the proposed mechanism is higher than that from the multi-rigid-block mechanism and finite element limit analysis methods. Then the analyses are extended into the characteristics of failure surface for strip anchor plates in sand. The shapes of failure surface under different soil friction angles and embedment ratios (H/B) are studied.

Key words: limit analysis; block set mechanism; strip anchor plate; pull-out capacity; sand

0 引言

随着经济发展对能源需求的日益增加, 海洋油气资源的开发逐渐从浅海走向深海, 而锚板作为锚泊体系中一种提供抗拔承载力的重要基础形式, 越来越多的成为大型浮式结构海洋平台必不可少的结构形式。此外, 锚板还广泛应用于输电线塔、高耸构筑物、边坡挡土墙等工程中。对于在实际工程中广泛应用的螺旋锚、埋置管线和抗拔基础等的抗拔承载力问题, 也可以间接地简化为条形锚板的力学模型进行求解。因此, 研究条形锚板的抗拔承载力有着重要的工程意义。

对于砂土中埋置的条形锚板, 很多学者^[1-7]均采用基于模型试验的经验拟合法研究其抗拔承载力。模型试验结果往往与试验所选取的土质有很大关系, 因此, 依据模型试验结果所作出的拟合公式往往是地域性的或仅适用于某种特定的土, 这一明显的缺陷限制了该

方法的广泛应用。此外, 经验拟合法的理论基础也明显不足, 为了能够适应各种实际工程的设计需要, 对锚板抗拔承载力的理论分析就显得尤为重要。因此, 一些学者^[8-11]采用假设破坏面的极限平衡法来研究锚板的抗拔承载力。极限平衡法需要首先假设一个破坏面, 然后根据破坏面上力的平衡关系来求解锚板抗拔承载力。由于不同学者对于锚板破坏面的假设相差很大, 并且在具体求解过程中采用的简化方式也各有不同, 因此不同学者得到的锚板抗拔承载力极限平衡解往往差距较大, 这就给工程设计人员带来了许多困扰。

空腔膨胀理论^[12]是求解锚板抗拔承载力的一个非常独特的方法。该方法认为当由空腔膨胀理论计算

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50825803); 上海市优秀学科带头人计划项目(09XD1403900)

收稿日期: 2012-04-09

所得塑性区扩展到土体表面时，就认为锚板已经到达极限破坏状态了。弹塑性有限元法^[2]在研究砂土中条形锚板抗拔承载力时具有很多优点，但是该数值方法计算参数较多，并且不同的参数选取方法得到的结果往往差别较大，因此理论上需要有一种独立的解答方法对其进行验证。

现有极限分析上限求解方法中，多块体上限法具有求解简便、优化所得的破坏面较为直观的优点，但是多块体上限法的速度场推导依赖于具体问题，通用性较差。极限分析有限元法^[17-18]是将极限分析法和有限元方法相结合的方法，既有极限分析法理论上的严格性又有有限元适用性强的特点，但是该数值方法不易实现。Kumar 等^[13-16]根据多块体上限法分析了浅埋锚板的抗拔承载力。Merifield 等^[19-21]利用极限分析有限元法对条形锚板抗拔承载力进行了有益的分析。

本文将采用作者在文献[22, 23]提出的块体集上限法来分析砂土中条形锚板抗拔承载力上限解。块体集上限法以旋转块体集为基本组成单元，运用旋转块体集的不同组合来构造所求问题的运动许可速度场，然后通过优化算法找到最小上限解。块体集上限分析方法的整个求解过程比多块体上限法更为简单、快捷，求解精度也要高于多块体上限法。同时，块体集上限法的优化结果可以给出明确的破坏面，因此可以从破坏面的角度对其他方法的假设破坏面提出明确的改进意见。尽管从极限分析有限元优化得到的速度场中，也可以近似确定破坏面，但极限分析有限元法给出的破坏面与本文方法相比不够明确。

1 块体集上限分析方法

块体集上限分析方法的基本思想是：集成和组合，即将最基本的三角形楔块集成为两个旋转方向各异的旋转块体集（见图 1），然后运用这两个旋转块体集的不同组合来构造所求问题的运动许可速度场，并通过 GAPS 算法（遗传-模式搜索算法）的优化得到最小上限解。作者在文献[22, 23]中已经介绍了旋转块体集的推导过程及块体集上限法求解过程。本文所采用的锚板运动许可速度场构造方式如图 2 所示，即采用两个组合块体集上下累加构成。图 2 中①、②、③、④均为旋转块体集。图 2 所示运动许可速度场的内能耗散和重力做功的计算详见文献[23]。

2 砂土中条形锚板问题描述

对于砂土中埋置的水平条形锚板，此处锚板埋深 H 定义为锚板中点到土体表面的垂直距离； B 为条形锚板的宽度； Q_u 为条形锚板的极限抗拔承载力； φ ，

γ 分别为砂土的内摩擦角和土体重度。仿照 Terzaghi 地基承载力公式，砂土中埋置的条形锚板抗拔承载力可以表示为

$$q_u = \frac{Q_u}{A} = \gamma H N_\gamma , \quad (1)$$

式中， N_γ 为砂土中锚板的抗拔承载力系数。

由极限分析上限定理，可得

$$Q_u v_0 + W' \leq E' , \quad (2)$$

式中， E' 和 W' 分别为砂土中条形锚板运动许可速度场总的内能耗散和重力做功； v_0 为运动许可速度场中锚板的速度大小。

将式（1）代入式（2）即可以得到砂土中法向受力的条形锚板抗拔承载力系数 N_γ 为

$$N_\gamma \leq \frac{E' - W'}{B v_0 \gamma H} . \quad (3)$$

式（3）即为本文块体集上限分析针对砂土中条形锚板抗拔承载力的优化目标函数。通过 GAPS 算法（遗传-模式搜索算法）的优化，就可以由式（3）得到砂土中条形锚板抗拔承载力的最小上限解及相应的破坏面。

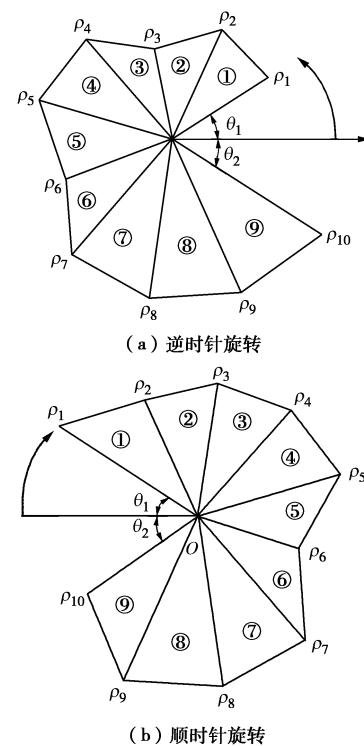


图 1 旋转块体集示意图

Fig. 1 Schematic of rotational block set

3 砂土中锚板抗拔承载力分析

对于砂土中埋置的条形锚板，本节将详细分析在不同土体内摩擦角 φ 和不同锚板埋深比 (H/B) 条件下，条形锚板抗拔承载力的特性，并与文献中已有理

论解和模型试验结果进行充分的对比, 验证本文块体集上限分析的有效性。

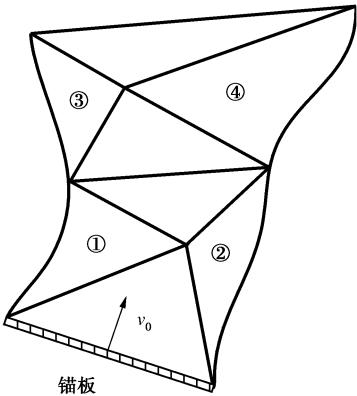


图 2 浅埋条形锚板速度场构造示意图

Fig. 2 Construction schematics of admissible velocity fields for shallow strip anchor plates

3.1 与极限分析有限元解对比

如图 3 所示为本文块体集上限解与 Merifield 等^[20]的极限分析有限元上限解的对比, 图中给出了土体内摩擦角 φ 分别为 20° , 30° , 40° 时, 不同锚板埋深比 (H/B) 条件下水平条形锚板抗拔承载力上限解。如图所示, 本文块体集上限解在所有锚板埋深比 (H/B) 和土体内摩擦角 φ 条件下均比 Merifield 和 Sloan 所得极限分析有限元解要小, 尤其是在土体内摩擦角 φ 比较大的情况下, 本文块体集上限解更具优势, 这表明本文块体集上限法求解精度要高于极限分析有限元法, 具有较大的优越性。

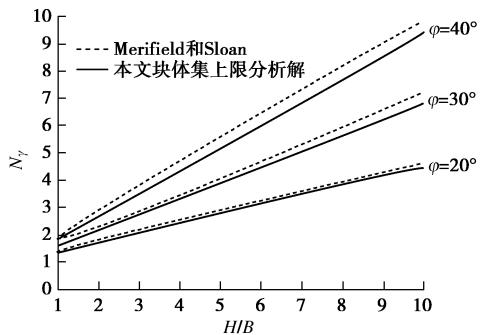


图 3 本文块体集上限解与 Merifield 和 Sloan 对比^[20]

Fig. 3 Comparison between pullout capacity and numerical solution of Merifield & Sloan^[20]

3.2 与现有极限平衡法对比

对于砂土中条形锚板抗拔承载力, 很多学者采用假设破坏面的极限平衡法进行求解。图 4 所示为本文块体集上限解与 Majer^[11]基于极限平衡法所提出的水平锚板抗拔承载力计算公式的对比。为方便对比, 此处土压力系数 K 近似取为 $K=1-\sin\varphi$ 。由图 4 可以看出, 在土体内摩擦角 $\varphi=10^\circ$ 时, Majer 所得解与本文

上限解较为接近, 但是对于内摩擦角 φ 比较大的情况, Majer 所得砂土中水平条形锚板抗拔承载力远远小于本文块体集上限解。

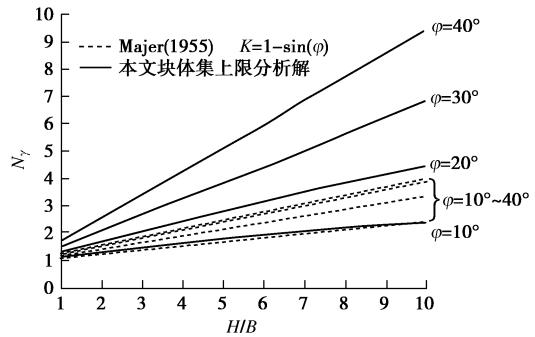


图 4 本文块体集上限解与 Majer 对比^[11]

Fig. 4 Comparison between pullout capacity and limit equilibrium solution of Majer^[11]

Murray 等^[3]在模型试验结果的基础上, 基于极限平衡法也提出了一个计算砂土中水平条形锚板抗拔承载力的计算公式。图 5 所示为 Murray 和 Geddes 的公式计算结果与本文块体集上限解的对比。由图中可以看出, Murray 和 Geddes 的计算公式所得锚板抗拔承载力解均大于本文块体集上限解。

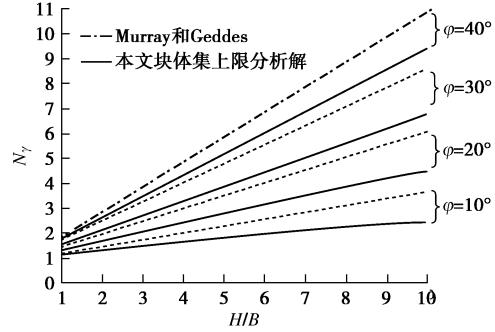


图 5 本文块体集上限解与 Murray 和 Geddes 对比^[3]

Fig. 5 Comparison between pullout capacity and limit equilibrium solution of Murray and Geddes^[3]

Meyerhof 等^[8]同样也基于极限平衡法提出了一个计算砂土中条形锚板抗拔承载力的计算公式。为了使得公式更好的符合模型试验的结果, Meyerhof 和 Adams 将水平锚板的破坏模式分为埋深较浅和埋深较深两种情况, 如图 6 所示为本文块体集上限解与 Meyerhof 和 Adams 的极限平衡解对比。为便于对比, 对于 Meyerhof 和 Adams 埋深比较浅的破坏模式, 根据文献介绍系数 K 近似取 0.95。由图 6 可以看出, 当不考虑 Meyerhof 和 Adams 的深埋模式时, 本文块体集上限解与 Meyerhof 和 Adams 的极限平衡解是非常吻合的。但是当考虑 Meyerhof 和 Adams 的深埋模式时, 该极限平衡解在锚板埋深比 (H/B) 比较大时小于本文块体集上限解, 并且土体内摩擦角越小, 本文

块体集上限解与 Meyerhof 和 Adams 的极限平衡解差距就越大。

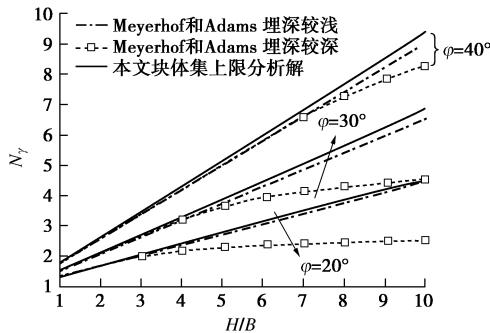


图 6 本文块体集上限解与 Meyerhof 和 Adams^[8]对比

Fig. 6 Comparison between pullout capacity and limit equilibrium solution of Meyerhof and Adams^[8]

由以上本文块体集上限解与不同学者所得极限平衡解^[3, 8, 11]的对比可以看出, 各种极限平衡解由于不同学者所采用的破坏面假设和简化计算方法的不同, 其计算结果有的远远小于本文块体集上限解, 有的又比本文块体集上限解大。因此, 不同学者所得到的砂土中条形锚板抗拔承载力极限平衡解之间相差非常大, 这就给工程设计人员带来了许多困扰。

3.3 与空腔膨胀理论解对比

除了基于各种假设破坏面的极限平衡解外, Yu 采用空腔膨胀理论也得到了一个计算水平锚板抗拔承载力的计算公式。考虑破坏面一直延伸到土体表面, 本文块体集上限解与空腔膨胀理论解的对比如图 7 所示。由图可以看出, 空腔膨胀理论解要大于本文块体集上限解, 并且在土体内摩擦角 φ 比较大时, 空腔膨胀理论解过高地估计了锚板的抗拔承载力。

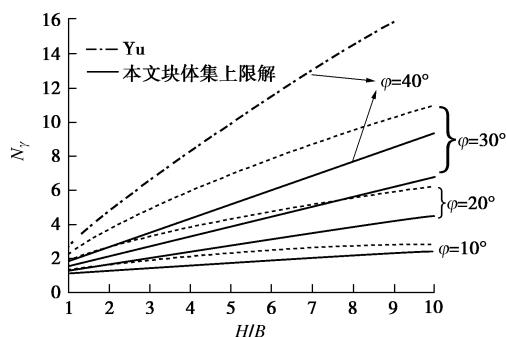


图 7 本文块体集上限解与空腔膨胀理论解对比^[12]

Fig. 7 Comparison between pullout capacity and cavity expansion solution of Yu^[12]

3.4 与弹塑性有限元解对比

Dickin 等^[2]采用 PLAXIS 软件针对 Dickin^[1]的离心机试验进行了数值模拟, 如图 8 所示为本文块体集上限解与弹塑性有限元解^[2]的对比。由图可以看出, 对于密砂的数值模拟, 弹塑性有限元解与本文块体集上

限解非常吻合; 而对于松砂, 虽然在锚板埋深比 (H/B) 比较大时本文块体集上限解与弹塑性有限元解相比略有差距, 但是两者在整体上还是比较吻合的。

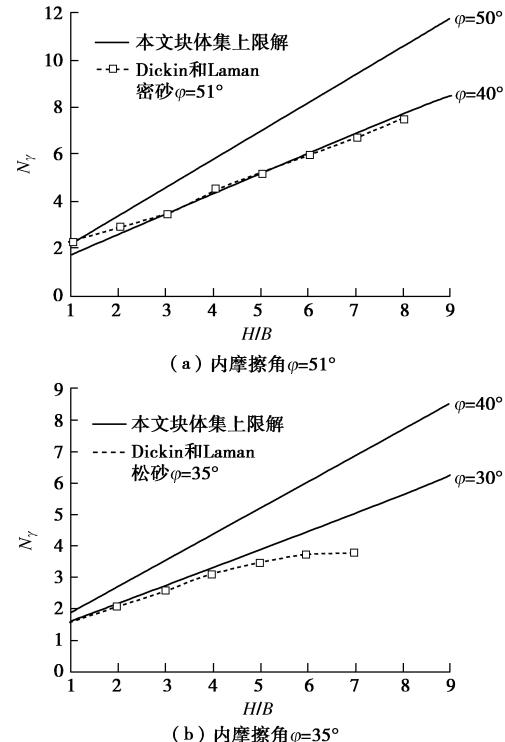


图 8 本文块体集上限解与 Dickin 和 Laman^[2]对比

Fig. 8 Comparison between pullout capacity and elastic-plastic finite element solution of Dickin & Laman^[2]

3.5 与模型试验结果对比

与黏土中条形锚板的模型试验相比, 砂土中的模型试验更容易实现, 因此, 不同学者^[1, 3, 5]进行了较多砂土中条形锚板抗拔承载力模型试验, 此处将选取其中非常有代表性的几个模型试验与本文理论预测进行对比。

图 9 所示为本文块体集上限解与 Rowe^[5]模型试验结果的对比。Rowe 的模型试验所采用的砂土的平均重度为 $\gamma = 14.9 \text{ kN/m}^3$, 土体内摩擦角 $\varphi = 32^\circ$ 。为增加试验结果的可靠性, Rowe 进行了较多的平行试验, 如图 9 所示, 每一个锚板埋深比 (H/B) 条件下均有多个试验数据点。由图中的对比可以看出, 本文块体集上限分析的理论预测与 Rowe 的模型试验是非常吻合的。

图 10 所示为本文块体集上限解与 Murray 等^[3]的中密砂模型试验结果的对比, 由图可以看出, 本文上限解与 Murray 和 Geddes 的模型试验结果是比较吻合的^[1]。

Dickin^[1]采用离心机模型试验研究了 Erith 砂中水平条形锚板的抗拔承载力。该离心机模型试验分别研究了密砂和松砂条件下水平条形锚板的抗拔承载

力, 其中密砂的孔隙率为45.2%, 土体重度 $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, 松砂的孔隙率为38.5%, 土体重度 $\gamma=14.24 \text{ kN/m}^3$ 。在平面应变条件下, 密砂的土体内摩擦角为 $48^\circ \sim 51^\circ$, 松砂的土体内摩擦角为 $38^\circ \sim 41^\circ$ 。图11所示为本文块体集上限解与Dickin的离心机模型试验结果的对比, 由图可以看出, 本文理论预测与密砂和松砂的试验结果整体上均比较吻合。相比较而言, 松砂的试验结果与本文的计算结果差距略大一些。如图11(b)所示, 在锚板埋深比(H/B)比较小时, 松砂的试验结果略大于本文块体集上限解, 而在锚板埋深比(H/B)较大时, 试验结果出现了随锚板埋深比(H/B)不增反降的情况。

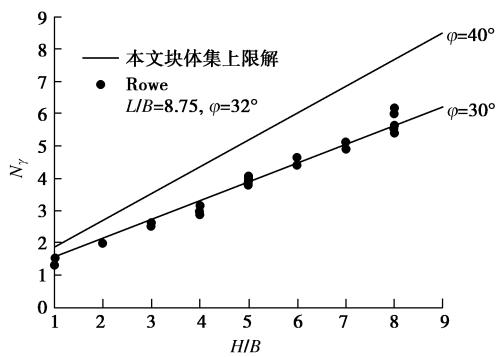


图9 本文块体集上限解与Rowe^[5]的模型试验结果对比

Fig. 9 Comparison between pullout capacity and model test of Rowe^[5]

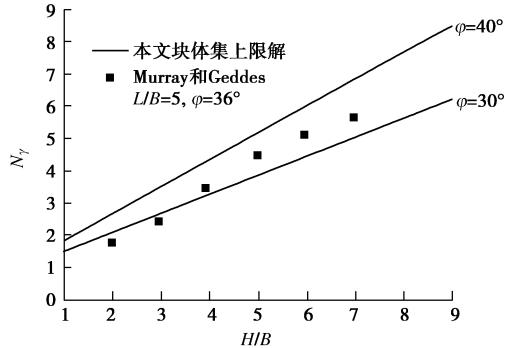


图10 本文块体集上限解与Murray和Geddes^[3]的模型试验结果对比

Fig. 10 Comparison between pullout capacity and model test of Murray & Geddes^[3]

由以上本文块体集上限法计算结果与极限分析有限元解、极限平衡解、空腔膨胀理论解、弹塑性有限元解及模型试验结果的对比可以看出, 本文块体集上限分析结果是非常合理的, 具有较大的优越性。同时, 对于密砂条件下, 本文理论预测与所有模型试验测试结果均非常吻合; 但是对于松砂条件下, 由于极限分析上限法仅考虑了砂土的剪胀性, 因此对于可能产生

剪缩现象的松砂, 极限分析上限解要高于模型试验结果, 这一现象在锚板埋深比(H/B)较大时比较明显。

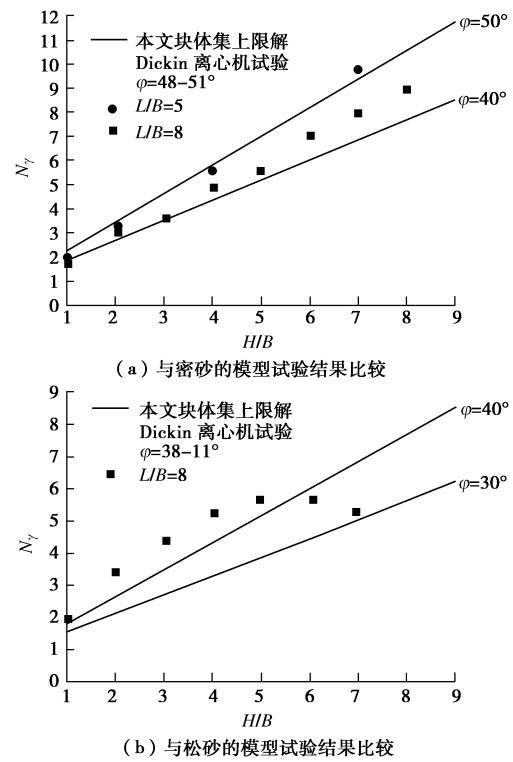


图11 本文块体集上限解与Dickin^[1]离心模型试验对比

Fig. 11 Comparison between pullout capacity and centrifugal model test of Dickin^[1]

4 砂土中条形锚板破坏面

本文块体集上限法相比于极限分析有限元法的一个重要优点就是, 块体集上限法可以得到明确的破坏面, 该破坏面不仅可以给工程师以锚板如何破坏的直观感受, 同时也可以作为改进其它基于假设破坏面的分析方法求解精度的依据。考虑不同土体内摩擦角 φ , 本文块体集上限法优化所得的砂土中水平条形锚板在不同锚板埋深比(H/B)条件下的破坏面如图12(a)、(b)、(c)所示。如图所示, 对于同一土体内摩擦角 φ , 随锚板埋深比(H/B)的增大, 破坏面所囊括的土体范围也越来越大。同时, 由图12(a)、(b)、(c)的对比可以看出, 砂土的内摩擦角 φ 对破坏面的形状影响是非常大的。当土体内摩擦角 φ 比较小时, 砂土中条形锚板破坏模式基本上呈两段直线的形式。随着土体内摩擦角 φ 的逐渐增大, 上部直线段向两侧倾斜的程度要比下部直线段快。因此, 当土体内摩擦角 φ 比较大时, 两条直线段的斜率趋于相同而成为一条直线, 这就导致了图12(c)所示由一条倾斜直线构成的破坏模式。

为说明不同土体内摩擦角 φ 时, 同一锚板埋深比 (H/B) 条件下破坏面的变化, 图 13 给出了锚板埋深比 (H/B) 分别为 2 和 10 时, 不同土体内摩擦角 φ 条件下所得破坏面的对比。由图 13 (a) 可以看出, 在锚板埋深比 (H/B) 比较小时, 不同土体内摩擦角 φ 条件下锚板破坏模式均呈一条倾斜的直线的形式, 并且随着土体内摩擦角 φ 的增大, 该倾斜直线向两侧倾斜的程度也越大。本文对图 13 (a) 所示破坏面进一步的研究表明, 该倾斜直线与垂直方向的夹角正好近似等于土体内摩擦角 φ 。

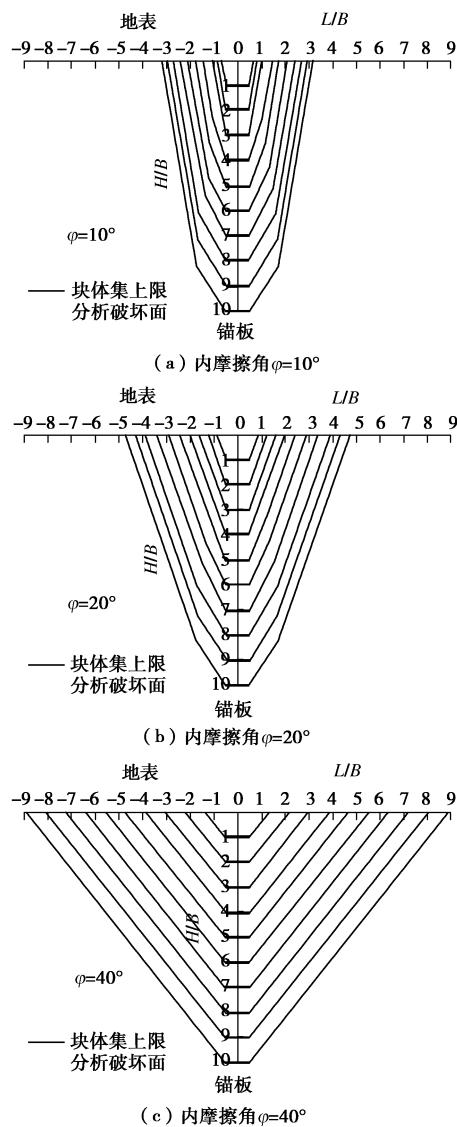


图 12 砂土中条形锚板破坏面

Fig. 12 Failure surfaces of horizontal strip anchor plates in sand

而由图 13(b) 可以清晰地看出随土体内摩擦角 φ 的增加, 砂土中锚板破坏面的变化过程。当锚板埋深比 (H/B) 比较大时, 随土体内摩擦角 φ 的增加, 破坏模式由两条直线段的形式逐渐过渡到一条倾斜直线形式。这一结论与图 12 (a)、(b)、(c) 的对比结论

是一致的。

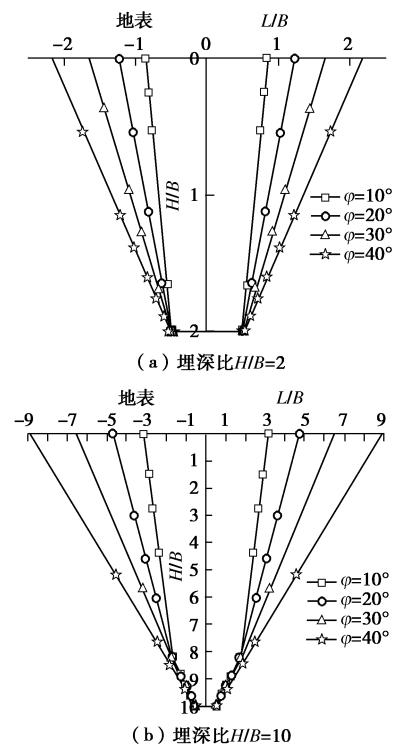


图 13 不同内摩擦角条件下破坏面比较

Fig. 13 Comparison among failure surfaces under different internal friction angles φ

5 结 论

本文运用块体集上限法详细分析了砂土中水平条形锚板的抗拔承载特性。首先分析了砂土中水平条形锚板的抗拔承载力, 并与已有文献中的上限解、极限平衡解和模型试验解等进行了详细的对比, 验证了本文块体集上限分析的有效性。然后研究了砂土中条形锚板的破坏面特性, 说明了在不同锚板埋深比 (H/B) 和土体内摩擦角 φ 条件下, 砂土中锚板破坏模式的转变。由本文分析可以得到以下结论:

(1) 对于砂土中条形锚板抗拔承载力, 本文块体集上限法求解精度要高于极限分析有限元法, 具有较大的优越性。

(2) 当锚板埋深比 (H/B) 比较大且土体内摩擦角 φ 比较小, 砂土中锚板破坏模式由两段倾斜的直线构成, 随着土体内摩擦角 φ 的增大, 上部直线段向两侧倾斜的程度比下部直线段快。因此, 当土体内摩擦角 φ 比较大时, 两条直线段的斜率趋于相同而成为一条直线, 这就导致了在土体内摩擦角 φ 较大时, 破坏模式由一条倾斜直线构成。

参 考 文 献:

- [1] DICKIN E A. Uplift behavior of horizontal anchor plates in

- sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1988, **114**(11): 1300 – 1317.
- [2] DICKIN E A, LAMAN M. Uplift response of strip anchors in cohesionless soil[J]. *Advances in Engineering Software*, 2007, **38**(8/9): 618 – 625.
- [3] MURRAY E, GEDDES J. Uplift of anchor plates in sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1987, **113**(3): 202 – 215.
- [4] MURRAY E, GEDDES J. Resistance of passive inclined anchors in cohesionless medium[J]. *Géotechnique*, 1989, **39**: 417 – 431.
- [5] ROWE R. Soil structure interaction analysis and its application to the prediction of anchor plate behaviour[D]. Sydney: University of Sydney, 1978.
- [6] ROWE R, DAVIS E. Behaviour of anchor plates in sand[J]. *Géotechnique*, 1982, **32**(1): 25 – 41.
- [7] DAS B M, SEELEY G R. Breakout resistance of shallow horizontal anchors[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1975, **101**(9): 999 – 1003.
- [8] MEYERHOF G, ADAMS J. The ultimate uplift capacity of foundations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1968, **5**(4): 225 – 244.
- [9] MEYERHOF G G. Uplift resistance of inclined anchors and piles[C]// Proc 8th Int Conf Soil Mech Found Engng. Moscow: Nova Scotia Technical Coll Halifax. 1973: 167 – 172.
- [10] BALL A. The resistance to breaking-out of mushroom foundations for pylons[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France, 1961.
- [11] MAJER J. Zur berechnung von zugfundamenten[J]. *Oesterreichische Bauzeitschrift*, 1955, **10**(5): 85 – 90. (MAJER J. On the design of railway foundations[J]. Austrian Contraction Magazine, 1955, **10**(5): 85 – 90. (in German))
- [12] YU H S. Cavity expansion methods in geomechanics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [13] RAO K, KUMAR J. Vertical uplift capacity of horizontal anchors[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1994, **120**(7): 1134 – 1147.
- [14] KUMAR J. Upper bound solution for pullout capacity of anchors on sandy slopes[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, **21**(7): 477 – 484.
- [15] KUMAR J. Uplift resistance of strip and circular anchors in a two layered sand[J]. *Journal of the Japanese Geotechnical Society of Soils and Foundations*, 2003, **43**(1): 101 – 107.
- [16] KUMAR J, KOZER K. Vertical uplift capacity of horizontal anchors using upper bound limit analysis and finite elements[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, **45**(5): 698 – 704.
- [17] SLOAN S W, KLEEMAN P W. Upper bound limit analysis using discontinuous velocity-fields[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, **127**(1/2/3/4): 293 – 314.
- [18] LYAMIN A V, SLOAN S W. Upper bound limit analysis using linear finite elements and non-linear programming[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, **26**(2): 181 – 216.
- [19] 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*, ASCE, 2005, **131**(6): 792 – 799.
- [20] MERIFIELD R S, SLOAN S W. The ultimate pullout capacity of anchors in frictional soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, **43**(8): 852 – 868.
- [21] MERIFIELD R S, SLOAN S W, YU H S. Stability of plate anchors in undrained clay[J]. *Géotechnique*, 2001, **51**(2): 141 – 153.
- [22] 黄茂松, 余生兵. 基于旋转块体集的深埋条形锚板上限分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(5): 685 – 692. (HUANG Mao-song, YU Sheng-bing. Upper bound analysis of deep strip anchor based on rotational block set[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(5): 685 – 692. (in Chinese))
- [23] 余生兵, 黄茂松. 基于组合块体集的浅埋条形锚板上限分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(5): 1049 – 1056. (YU Sheng-bing, HUANG Mao-song. Upper bound analysis of horizontally embedded anchors based on block set mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(5): 1049 – 1056. (in Chinese))