

文章编号:1000-7598-(2002)03-0368-04

钙质砂中锚定物锚固性能的试验研究

初晓锋¹, 李志刚², 汪 稔¹, 朱长歧¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 厦门海沧土地有限公司, 福建 厦门 361026)

摘 要: 钙质砂具有特殊力学性质与工程特性。利用模型试验,研究了锚定物在钙质砂中的坑拔特性以及变形破坏机理。给出了试验结果,并得出了锚定物抗拔力的各种影响因素之间的联系,以及破坏面的基本形状。

关 键 词: 锚定物; 抗拔力; 钙质砂

中图分类号: TU 41, TU 44a **文献标识码:** A

The test research of anchor's uplift behavior in calcareous sand

CHU Xiao-feng¹, LI Zhi-gang², WANG Ren¹, ZHU Chang-qi¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. Haicang Soil Company Ltd., Xiamen 361026, China)

Abstract: The calcareous sand has typical mechanical and engineering-oriented properties. In this paper the uplift behavior of anchor in calcareous sand and deformation and failure mechanism are investigated by model tests. The results of model tests are presented, together with the factors in relation to the anchor's uplift capacity, and the typical shape of failure surface.

Key words: anchor; uplift; calcareous sand

1 前 言

锚定物具有方便、实用的特点,被广泛应用于诸如转换塔、海洋工程等结构中以提高抗拔力及抗倾覆力矩,增加稳定性。对于质量非常大的结构物或结构物承受较大冲击荷载情况下,锚定物对于整个结构物的设计、实施将产生决定性的影响。

本文所用介质——钙质砂是生物成因的含 CaCO_3 超过 50% 以上的粒状、片状材料。许多文献^[1-3]都对其特殊的力学性质和工程特性有过报导。钙质砂的特性必将对锚定物的抗拔性能产生很大的影响。

关于锚板抗拔特性的研究,50 年代开始迄今已发展了很多模型,这些模型都是在假定存在不同破坏模式下提出的。Balla(1961 年)^[4]采用平面应力假定,得到破坏面在锚板边缘处与垂向夹角为 $\frac{\pi}{2}$ 的结论。

Meyerhof 和 Adams(1968 年)^[5]引用浅层空腔理论,研究了抗拔力系数的变化规律。Rowe 和 Davis(1982 年)^[6]综合考虑了锚板埋深、内摩擦角、土的膨胀性、预应力状态以及锚板刚度种种因素,提出了连续水平锚

板计算模型。Sutherland 等^[7]基于平面破坏面的假定,提出了不同埋深下的计算模型。Ghaly 等^[8]研究了不同螺旋锚的抗拔力性状。K. Iamparuthi 等^[9]提出了临界埋深比的概念。这些研究主要是针对陆源砂等无粘性土提出的,而对海相的生物碳酸盐松散沉积物中锚板抗拔性状的研究开展较少。在前人的基础上笔者对钙质砂锚板抗拔特性进行了试验研究,并取得了一些成果。

2 试验设备、试样制备与方法

试验设备由模型箱、锚板、加力系统及测量系统组成,如图 1。模型箱尺寸足够大,以防止边界摩擦效应,且有一个立面为有机玻璃板,作为观察窗。试样制备过程如下:首先取南沙永暑礁松散钙质砂,筛去大于 60 mm 粗颗粒,进行筛分试验,其结果见颗粒级配曲线(图 2),不均匀系数 C_u 为 2.0 左右,级配不良。

试验采用三种不同相对密度的砂样,物理力学性质指标见表 1。装土样时,控制干重度,以 10 cm 为间隔,采用木板静压法捣实。

收稿日期:2001-09-05

重点项目:中科院“九五”基础性研究重点项目(编号:KJ952-J1-203)

作者简介:初晓锋,男,1976 年生,硕士研究生,主要从事土力学和岩土工程方面的工作。

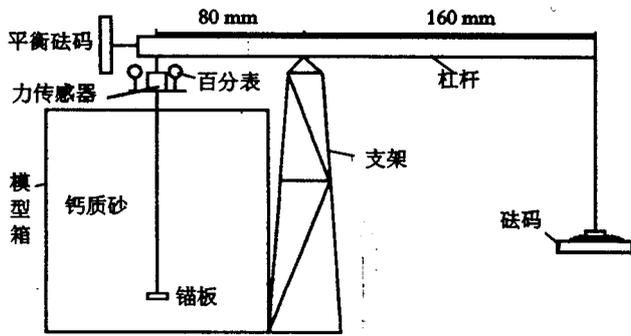


图 1 试验设备简图
Fig.1 Test setup

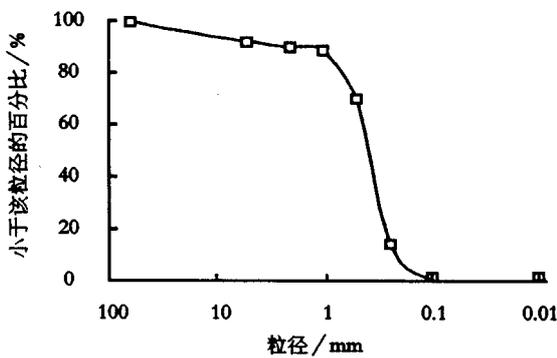


图 2 试验中钙质砂筛分曲线
Fig.2 Grading curve of calcareous sand used in the test

表 1 试样的物理力学性质

Table 1 The physical properties of the tested samples

参数	松散钙质砂	中密钙质砂	密实钙质砂
$D_r / \%$	20	46	95
$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	12.46	12.95	13.98
$\varphi / (^\circ)$	44	46	48

注: D_r 为相对密度, γ 表示干重度, φ 为内摩擦角。

中密砂在纯水中的比重取为 2.8。

试验选用钢制锚板, 锚杆与拉杆为刚性联接。试样分三种密度状态, 分别为松散 ($D_r = 20\%$), 中密 ($D_r = 46\%$) 和密实 ($D_r = 95\%$), 锚板的埋置深度分别为 200, 450, 650 和 850 mm, 加载一般按 10 级控制, 拉力及位移的读数间隔开始为 6 s, 10 s, 20 s, 1 min, 以后每分钟读一次, 直到稳定再加下一级荷载。

3 试验结果及分析

3.1 抗拔力特性

极限抗拔力与埋置深度, 锚板大小, 介质密度等因素有关。

图 3 为松散钙质砂中锚板在不同埋深比条件下的抗拔力 Q -位移 δ 曲线。可见, 极限抗拔力 Q_u 随埋

置深度的增加而增加, 在达到极限值之前, 曲线存在明显的拐点 (如图中 A 点), 拐点前后斜率变化较大, 极限抗拔力与拐点对应的抗拔力值相差不大。拐点前, 抗拔力与位移的关系近似为线性, 拐点 A 和极限抗拔力对应的位移量也随埋深的增加而增加。中密及密实砂中的锚板抗拔力-位移曲线特征与松散钙质砂的基本相同, 对比后发现, 抗拔力随相对密度或内摩擦角而增加, 埋置深度相同时, 极限抗拔力对应的位移随相对密度或内摩擦角增大而减小。为验证以上结论, 对半模试验结果也进行了整理, 发现曲线特征基本上符合上述规律, 但当埋深达到一定值后, 极限抗拔力不再增加。这里引入无量纲因子 N_{qu} 为极限抗拔力系数

$$N_{qu} = \frac{Q_u}{\gamma H B^2} \quad (1)$$

式中 γ 为钙质砂重度; H 为埋深; B 为锚板宽度; Q_u 为极限抗拔力。

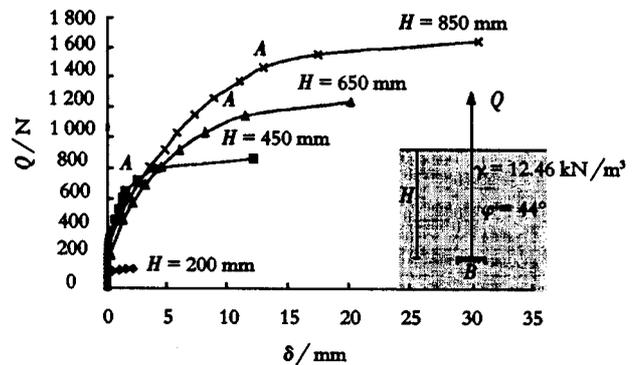


图 3 松散钙质砂中抗拔力-位移曲线
Fig.3 Uplift capacity-displacement curves in loose calcareous sand

图 4 及图 5 为极限抗拔力与埋置深度的关系曲线, 可以看出, 极限抗拔力随相对密度及埋深的增加而增加, 且埋深越大, 相对密度对极限抗拔力的影响

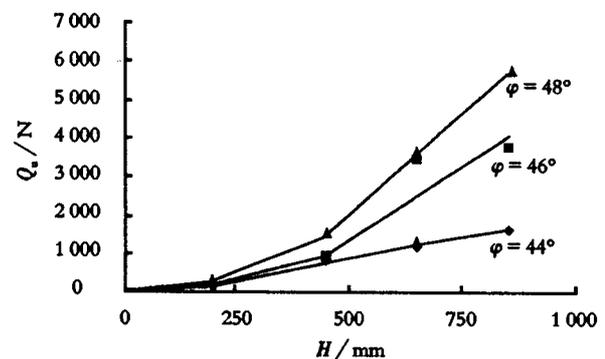


图 4 极限抗拔力与埋深的关系
Fig.4 The relation of ultimate uplift capacity and embedment depth

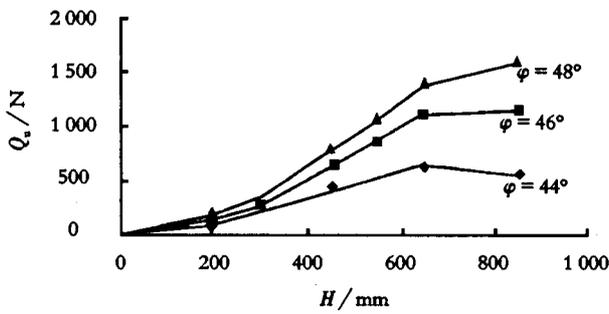


图5 极限抗拔力与埋深的关系(半模试验)

Fig.5 The relation of ultimate uplift capacity and embedment depth in half-model test

越显著。当 $H \leq 200$ mm 时,相对密度对极限抗拔力影响不大。半模试验结果中,埋深 $H > 650$ mm 时曲线斜率变缓,应为侧壁影响的结果。

图6~7分别为全模及半模试验的极限抗拔力系数 N_{qu} 与埋深比 H/B 的关系,可以明显地发现, N_{qu} 随 H/B 的增加而增加,当 H/B 达到某一值后, N_{qu} 维持为定值,我们定义该值为临界埋深比 $(H/B)_c$,本次试验 $(H/B)_c$ 值随相对密度的增加而增加。对应于相对密度为 20%, 46% 及 95% 的钙质砂,得到的 $(H/B)_c$ 值分别为 4.5, 7.0, > 7.0 。临界深度 $(H/B)_c$ 和概念对锚板抗拔力的设计十分重要,否则会造成投资的严重浪费。

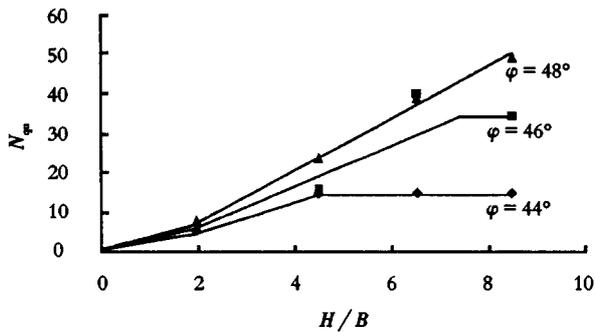


图6 极限抗拔力系数与埋深比的关系

Fig.6 The relation of breakout factor and embedment ratio

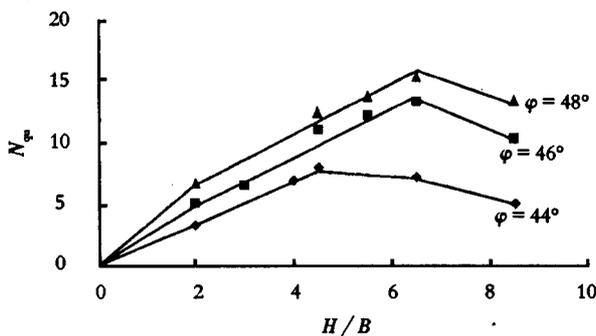


图7 极限抗拔力系数与埋深比的关系(半模试验)

Fig.7 The relation of breakout factor and embedment ratio in half-model test

3.2 变形破坏机理

图8为锚板在松散钙质砂中的变形破坏特征,破坏时的剪切面为曲面。在任何水平面上,颗粒的垂向位移呈现出中间大,向周围减小直至破坏面处为零的特征。除了中轴线以外,在破坏面范围内砂粒也存在水平向的位移,垂向位移自锚板向上,呈减小趋势。

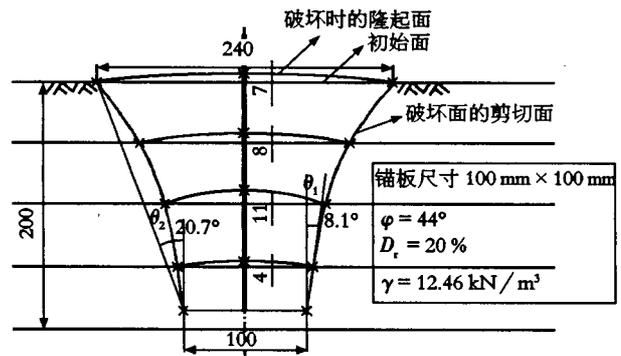


图8 松散钙质砂中的破坏面(单位:mm)
($B = 100$ mm, $H = 200$ mm)

Fig.8 Failure surface in loose sand
($B = 100$, $H = 200$) (unit: mm)

可以看到,破坏面自锚板开始贯穿整个土层,出露于砂体表面,形状呈对数螺旋状,其原因系由于锚板与砂粒间产生的摩擦所致。其切线与垂向的夹角 θ_1 为 8.1° , 连接起始点与顶点形成的平面与垂向的夹角 θ_2 为 20.7° , 而 θ_1 约为 $\frac{\varphi}{4} - 2$, θ_2 约为 $\frac{\varphi}{2} + 2$ 。当埋深为 450 mm 时,如图9所示,松散钙质砂中的破坏面被限制在某一高度范围内,形成一个气球状破坏面。土体表面颗粒未产生位移,颗粒位移被限定在一定的范围内。在锚板之上 1.5 倍板宽范围内,破坏面近似为平面,再向上破坏面为曲面且向外凸起直至 $H/B = 2.8$

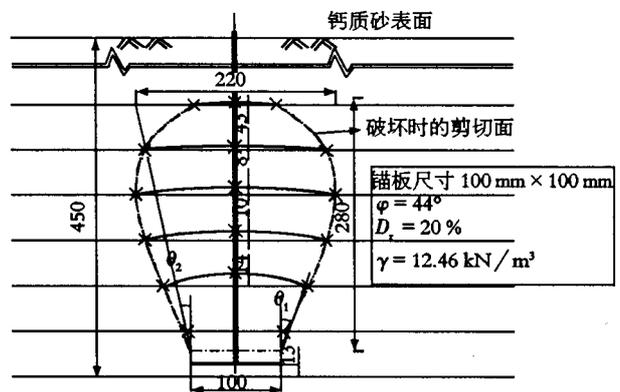


图9 松散钙质砂中的破坏面(单位:mm)
($B = 100$ mm, $H = 450$ mm)

Fig.9 Failure surface in loose sand ($B = 100$ mm, $H = 450$ mm)
(unit: mm)

的高度,最大直径 220 mm,为锚板宽度的 2.2 倍。 $\theta_1 = 19.8^\circ$ 约为 $\frac{\varphi}{2} - 2$, $\theta_2 = 12.4^\circ$ 约为 $\frac{\varphi}{4} + 2$ 。

当埋深为 650 mm 时 (如图 10 所示), 其 $\theta_1 = 30.1^\circ$, 约为 $\frac{2\varphi}{3}$, $\theta_2 = 11.4^\circ$, 约为 $\frac{\varphi}{4}$ 。最大直径处 $H/B = 2.2$, 最大直径为 $1.8B$ 。综合以上结果可以看到,随着埋深的增大,破坏面形状会发生变化,且破坏面高度呈减小趋势,最大直径也呈减小趋势。

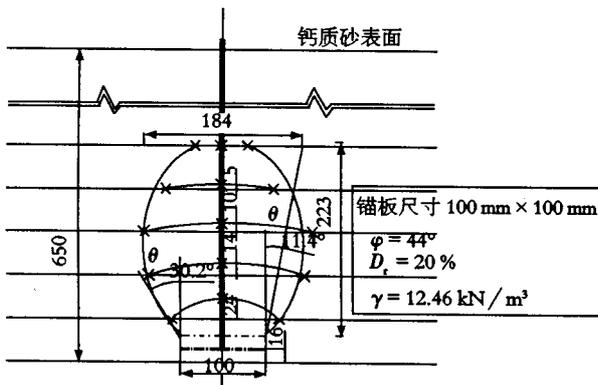


图 10 松散钙质砂中的破坏面(单位:mm)
($B = 100 \text{ mm}$, $H = 450 \text{ mm}$)

Fig.10 Failure surface in loose sand($B = 100 \text{ mm}$,
 $H = 450 \text{ mm}$)(unit: mm)

中密度及密实钙质砂的破坏面特征与松散钙质砂基本相同,随着埋深的增加,砂体表面的位移由大到小直至为零,破坏面形状由贯穿型向气球型转化。对贯穿型,埋深越大,砂体表面的隆起范围越大。对气球型,埋深越大,气球的高度比 h_0/H 减小,其中 h_0 为气球型破坏面的高度。综合统计后发现,对于贯穿型,破坏面与垂向的夹角 θ_2 约为 $\frac{\varphi}{2}$; 对于气球型, θ_2 约为 $\frac{\varphi}{4} \sim \frac{\varphi}{2} + 2$ 。

从三种相对密度的钙质砂的试验结果可以得到,随着埋深的增大,破坏面形状由贯穿型向气球型转化,同时,随着相对密度的增大,该转化的埋深比呈现增大的趋势。本项试验中得出了对应于相对密度为 20%, 46% 及 95%, 钙质砂的转化埋深比分别为 3.0, 5.0 及 5.0。

贯穿型破坏的锚板被称为浅埋型锚板,气球型破坏的锚板被称为深埋型锚板。对浅埋型, θ_2 值介于 $14.9^\circ \sim 22.2^\circ$ 间,平均值为 20.1° , 约为 0.43φ , 接近 $\frac{\varphi}{2}$; 对深埋型, θ_2 介于 $6.6^\circ \sim 14.2^\circ$ 间,平均为 11.3° , 接近于 $\frac{\varphi}{4}$, 且 θ_2 值与钙质砂的相对密度关系不大。

4 结 论

(1) 水平锚板的抗拔力是砂的密度,内摩擦角及锚板埋深比的函数。极限抗拔力随着相对密度,内摩擦角及埋深比的增大而增大,且埋深比越大,相对密度及内摩擦角对抗拔力的影响越大。

(2) 抗拔力设计中存在临界深度的问题,即当埋深比小于临界深度时,极限抗拔力系数随埋深比增加,当埋深比大于临界深度时,极限抗拔力系数维持不变,在半模试验中,出现了 N_{qu} 随 H/B 而减小的现象。

(3) 半模试验结果显示,达到极限抗拔力时存在两种不同的破坏模式。当 H/B 较小时,破坏面贯穿至砂体表面,呈近似的倒截锥体;当 H/B 大于某一数值后,破坏面呈气球状且被限制在砂体内的一定高度范围内。我们称前者为浅埋型,其破坏面与垂向的夹角为 0.43φ , 近似于 $\frac{\varphi}{2}$ 。后者为深埋型,其破坏面与垂向的夹角近似为 $\frac{\varphi}{4}$ 。该值基本不受钙质砂相对密度的影响。

参 考 文 献

- [1] 朱长歧,汪稔. 钙质土的工程特性及其有关的基础工程问题[A]. 岩土工程青年专家论坛文集[C]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998, 380-392.
- [2] Zhu C Q, Wang R, Liu C Q. The Geotechnical Engineering Properties of Calcareous Sands[A]. Yuan J X. Proc, 9th IACMAG[C]. Rotterdam: Balkema A A. 1997.
- [3] 刘崇权,汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1):33-37.
- [4] Balla A. The resistance to breaking out of mushroom foundations for pylons[A]. Proceedings of the 5th International Conference on SM and FE[C]. Paris: DUNOD(1), 1961. :569-576.
- [5] Meyerhof G G, Adams J I. The ultimate uplift capacity of foundation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4):225-244.
- [6] Rowe R K, Davis E H. The behaviour of anchor plates in sand. Geotechnique, 1982, 32(1):25-41.
- [7] Sutherland H B. Model studies for shaft raising through cohesionless soils[A]. Proceedings of the 5th International Conference on SM and FE(2) Paris: DUNOD, 1961.
- [8] Ghaly A, Hanna A, Hanna M. Uplift behavior of screw anchors in sand(I: dry sand)[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1991, 117(5):773-793.
- [9] Iamparuthi K, Muthukrishnaish K. Anchors in Sand bed: delineation of rupture surface[J]. Ocean Engineering, 1999, 26:1 249-1 273.