

DOI: 10.11779/CJGE201511023

砂土中锚板拉拔模型试验及其抗拔力计算

郝冬雪¹, 符胜男¹, 陈榕^{*1}, 张永建², 侯立群¹

(1. 东北电力大学建筑工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 海南省电力设计研究院, 海南 海口 570203)

摘要: 锚板基础因其具有良好的抗拔特性而广泛应用于各类岩土工程问题中。在不同密实程度砂土中采用不同几何形状的锚板进行小比尺拉拔模型试验, 分析锚板型式及尺寸对上拔承载特性的影响。试验结果表明, 相同直径和埋深比的螺旋锚与平板锚上拔承载特性无明显差别; 相同埋深比时, 直径为 50 mm 的锚板上拔承载力系数略小于直径为 20 mm 锚板的上拔承载力系数, 而其上拔破坏位移比明显高于小直径锚板。进一步根据破坏位移比与埋深比关系曲线确定中密及密砂中浅、深破坏模式的临界埋深比, 同时结合已有试验结果假设两种破坏模式的滑裂面, 利用极限平衡分析推导并给出两种破坏模式下上拔承载力公式; 通过与 41 个拉拔试验数据进行比较, 验证了所提理论公式的适用性及准确性。

关键词: 锚板型式; 上拔承载特性; 浅及深破坏模式; 极限平衡分析; 理论公式

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2015)11 - 2101 - 06

作者简介: 郝冬雪(1981 -), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事输电线路基础承载特性及原位测试机理研究工作。E-mail: haodongxue2005@126.com。

Experimental investigation of uplift behavior of anchors and estimation of uplift capacity in sands

HAO Dong-xue¹, FU Sheng-nan¹, CHEN Rong¹, ZHANG Yong-jian², HOU Li-qun¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Hainan Electric Power Design and Research Institute, Haikou 570203, China)

Abstract: Anchor plates have been widely used in geotechnical engineering due to their good uplift resistance. Small-scale pullout model tests on anchors with various geometries in dry sands are carried out to investigate the influences of type and dimension of anchors on the uplift behavior. The experimental results show that there is no distinct difference of uplift capacity between helical anchor and circular plate anchor with the same diameter and embedment depth. The breakout factors of anchors with a diameter of 50 mm are slightly lower than those with a diameter of 20 mm, and their dimensionless failure displacements are obviously higher than those of anchors with a smaller diameter. The critical embedment ratios of anchors in medium and dense sand are determined based on the relationships of dimensionless failure displacement and embedment ratio, which is used to postulate failure surfaces of shallow and deep modes considering previous experimental results. Accordingly, theoretical formulas for uplift capacity are deduced by means of limit equilibrium analysis. The comparisons between theoretical values and experimental results demonstrate the accuracy of theoretical formulae.

Key words: anchor type; uplift behavior; shallow and deep failure mode; limit equilibrium analysis; theoretical formula

0 引言

锚板基础因具有较大的抗拔承载能力而广泛应用于输电线路、挡土墙、边坡防护、海洋工程等各类岩土工程问题中。对锚板上拔承载力的研究常采用小比尺模型试验^[1-7]、离心机试验^[8]、极限平衡分析及有限元等数值分析方法^[9-12]。Ghaly等^[5]对5种不同螺纹数和螺纹间距的单螺旋锚(screw anchors)在砂土中进行模型试验,研究了螺旋锚锚片型式对上拔行为的影响,并采用极限平衡法确定上拔承载力。研究表明,

螺旋锚型式对上拔承载力的影响很小可忽略。Nazir等^[13]对干砂中单片螺旋锚进行了一系列上拔模型试验,分别研究了埋深比、杆径比和砂土相对密度对螺旋锚上拔承载力的影响。Murry等^[4,7]对砂土中平板锚进行了室内模型试验,研究了锚板上拔破坏模式及极限承载力。图1为已有文献中密砂、中密及松砂中锚板

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308095, 51409045, 51308094);
吉林省科技厅青年科研基金项目(20130522068JH)

收稿日期: 2015 - 03 - 13

*通讯作者

上拔承载力系数 N_γ 与埋深比 H/D 的关系比较, 其中 $N_\gamma = Q/\gamma AH$, Q 为上拔承载力, γ 为土的重度, A 为锚板面积, H 为锚板埋深, D 为锚板直径。图中实心和空心符号分别表示螺旋锚和圆形平板锚上拔承载力系数。由图可见, 螺旋锚上拔承载力普遍比平板锚高; 密砂中深埋螺旋锚比平板锚上拔承载力增加更多。Hanna 等^[11]注意到这样的关系, 根据 Ghaly 等^[5]和 Ilamparuthi 等^[7]试验结果分别估计螺旋锚和平板锚上拔破坏滑裂面, 并以此为基础分别给出两种锚板的上拔承载力公式。需要注意的是, 上述试验并非在同一土中同时进行, 两种锚板承载力是否存在上述关系需要专门研究。

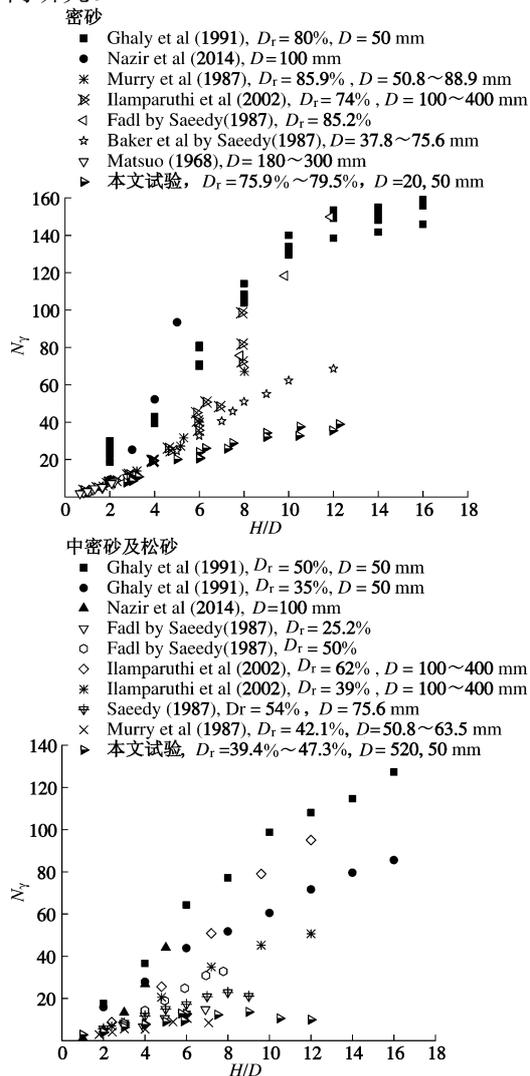


图1 已有文献中锚板上拔承载力系数比较

Fig. 1 Comparison of breakout factors of anchors in existing literatures

锚板极限上拔承载力计算多采用极限平衡分析法, 不同研究者对破坏滑裂面的假定不同。Meryerhof 等^[11]假设破坏面与竖直方向夹角在 $\varphi/4 \sim \varphi/2$ 之间, 提出条形、圆形和矩形锚板上拔承载力半经验公式; Saeedy^[3]假设破坏面为与锚板边缘相切且与地面夹角为 $45^\circ \sim \varphi/2$ 的对数螺旋线, 滑裂面上法向应力为土

体自重应力, 剪应力服从 Mohr-Coulomb 屈服条件及 Kottter 偏微分方程, 通过极限平衡分析计算出破坏滑裂面及极限上拔力, 并引入经验系数来反映土体密实程度的影响。Ghaly 等^[6]在 Saeedy^[3]基础上给定对数螺旋线表达式, 通过求解 Kottter 偏微分方程确定滑裂上剪应力, 从而确定上拔极限承载力。张昕等^[12]假设破坏滑裂面与竖直方向夹角近似为土体剪胀角, 通过假设极限状态下滑裂面上小主应力与自重应力相等来确定破坏面上的法向应力, 给出浅埋时锚板上拔承载力的计算公式, 并建议通过 Bolton 关系确定土体的内摩擦角和剪胀角, 以考虑它们对土体密实度和应力水平的依赖; 通过理论结果与已有文献试验结果对比来验证理论公式的准确性。但可能由于已有文献中砂土临界内摩擦角未知, 从而无法利用引入 Bolton 关系的上拔承载力公式。因此, 其文中对上拔承载力理论公式的验证实际上仍采用预先估计的内摩擦角, 未考虑应力水平影响。另外, 多数文献仅限于对浅埋锚板上拔承载力进行分析, 对深埋锚板上拔承载力研究较少。

因此, 本文针对上述问题, 在相同密实度砂土中进行平板锚及螺旋锚拉拔试验, 比较两者的上拔承载特性。同时采用极限平衡分析法对锚板上拔承载力进行分析, 分别提出适用于浅埋及深埋条件下的极限上拔力公式。通过与试验结果进行比较, 进一步验证该理论公式的适用性及准确性。

1 拉拔模型试验

1.1 锚板模型

制作平板锚和螺旋锚两种型式锚板进行拉拔试验。锚板直径为 20 mm 和 50 mm 两种; 螺旋片采用 1 mm 厚的不锈钢板制作, 并与锚杆焊接, 锚片螺距与直径之比为 0.25; 平板锚由铝制成, 锚片厚度与直径之比为 0.1; 50 mm 直径锚的锚杆与锚片直径之比为 0.2, 20 mm 直径锚的比值为 0.235。螺旋锚和平板锚埋深分别为砂面至螺距中间或锚片一半厚度处的距离。锚板模型如图 2 所示。

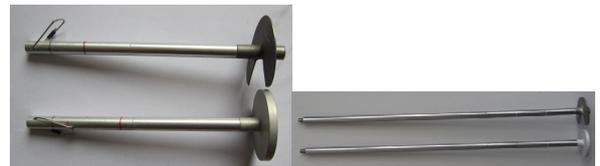


图2 平板锚和螺旋锚模型 ($D = 50, 20$ mm)

Fig. 2 Models of plate and helical anchors ($D = 50, 20$ mm)

1.2 试样制备及加载方式

试验所用砂土为超细石英砂, 砂土相对密度为 2.65, 最大干密度为 1.774 g/cm^3 , 最小干密度为 1.461 g/cm^3 。粒径在 $0.15 \sim 0.425$ mm 范围的土体占总质量 84%, 平均粒径为 0.17 mm, 不均匀系数为 1.63。临

界状态内摩擦角为 29° 。模型槽为 38 mm 厚不锈钢板制作, 内部长宽高为 650 mm×390 mm×325 mm。采用砂雨法制备土样, 每铺 100 mm 砂层调节一次砂漏器高度。螺旋锚和平板锚均采用预埋方式, 当铺砂至埋置深度时, 轻轻将锚板放置在砂层表面, 并采用拉线定位以保证锚杆垂直度, 之后继续洒砂至地面高度以上, 最后由吸尘装置将砂面刮平。通过量测锚杆露高, 计算锚板实际埋深。土样密度由制样后砂样重量和体积计算, 从而确定砂样相对密度。中密砂的相对密实度在 39.4%~47.3%之间, 密砂的相对密实度在 75.9%~79.5%之间。采用电动作动器进行位移加载, 位移加载率为 0.3 mm/s。作动器上固定的连接杆与荷载传感器由螺丝相连, 传感器与大直径锚板采用锚线连接, 与小直径锚板采用挂钩连接。通过数据采集软件实现作动器控制和数据传输。

2 锚板上拔承载特性

2.1 平板锚与螺旋锚承载特性对比

为比较锚板型式对上拔承载力的影响, 对直径 50 mm 的平板锚和螺旋锚同时进行拉拔试验, 埋深相同的两种型式锚板置于同一模型槽中, 以确保砂样密实程度相同。在中密及密砂中分别进行了 4 组和 2 组埋深比的对比试验, 所得荷载 - 位移关系曲线如图 3 所示。由图可见, 相同埋深比的平板锚和螺旋锚的荷载 - 位移关系曲线基本相同, 即极限承载力和对应破坏位移没有明显差别。当锚板埋深比不超过 3 时, 荷载 - 位移曲线在峰值附近比较平滑, 可以很容易确定极限上拔承载力 Q_u 和对应的破坏位移 δ ; 当埋深比超过 3 时, 荷载位移曲线在趋近水平时开始出现波动, 这种现象已由一些模型试验发现并解释^[4, 7, 14]。因在曲线拐点后平稳段上每个震荡的荷载最大值相差很小, 这里统一取荷载 - 位移曲线上最大值作为极限上拔力, 而以曲线上水平趋势出现的起点对应的位移作为破坏位移 δ , 其值列于表 1, 2。由图 3 可见, 相同密实度土中直径和埋深相同的两种锚板极限上拔承载力接近, 相差不超过 5%, 未见螺旋锚上拔承载力高于平板锚的现象。

2.2 上拔承载力系数及临界埋深比

表 1, 2 分别为中密砂及密砂的试验结果, 其中 D_r 为模型槽内土体相对密度。将埋深比 H/D 与上拔承载力系数 N_y 关系绘制在半对数坐标系中, 如图 4 所示。图中空心和实心圆分别表示直径为 50 mm 和 20 mm 锚板的结果, 曲线为上拔承载力系数发展趋势。对比埋深比为 3 和 6 左右的两种直径锚板上拔承载力系数, 直径为 50 mm 的锚板上拔承载力系数比直径为 20 mm 的锚板低约 5%~25%。对于中密砂, 在埋深较浅时, 上

拔承载力系数随着埋深比增加而增大, 当埋深比超过 6 后, 上拔承载力系数稳定并开始减小; 对于密砂, 在试验埋深比范围内 ($H/D \leq 12$), 上拔承载力系数随埋深比增加, 并未出现中密砂的情况, 但随埋深比增加, 上拔承载力系数增加速率逐渐放缓。

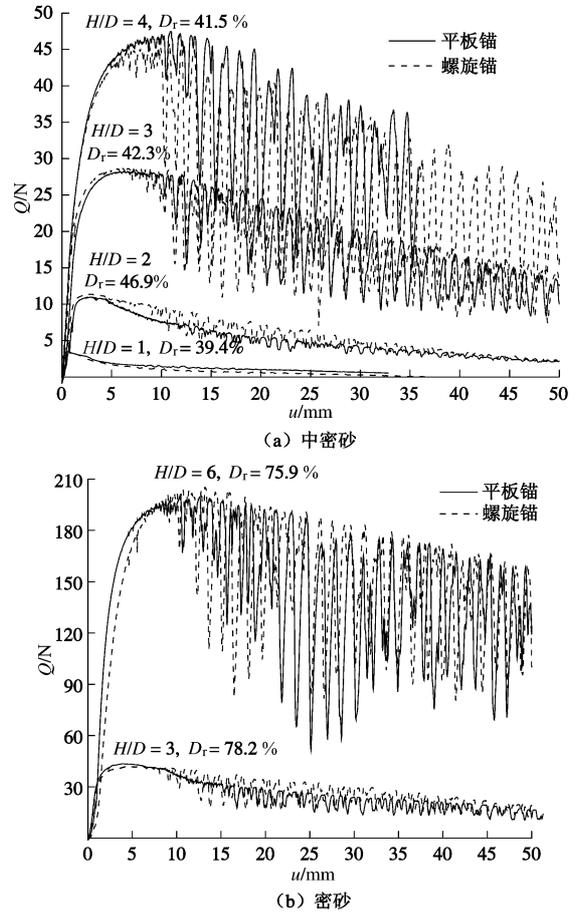


图 3 两种锚板的上拔力 - 位移关系曲线对比($D=50$ mm)

Fig. 3 Comparison of curves of uplift load and displacement between plate and helical anchors

表 1 中密砂中锚板试验结果

Table 1 Experimental results of anchors in medium sand

类型	D /mm	H/D	D_r /%	δ /mm	Q_u /N	Q_{uc} /N	误差 /%
螺旋锚	50	1.00	39.4	0.91	4.16	3.13	-24.79
		2.00	46.9	2.70	12.25	11.27	-8.00
		3.00	42.3	5.85	29.44	22.11	-24.90
		4.00	41.5	7.10	46.45	38.34	-17.47
		5.00	46.2	8.60	68.88	68.48	-0.59
		5.88	39.6	9.80	81.70	81.30	-0.50
		5.88	41.0	7.92	84.50	84.40	-0.12
		3.00	42.5	1.76	2.48	1.54	-37.93
	20	6.00	42.5	3.34	7.40	6.58	-11.06
		7.50	43.1	3.22	9.14	8.64	-3.78
		9.00	42.5	3.89	11.86	8.97	-24.56
		10.50	45.7	3.47	10.84	9.93	-8.39
		12.00	42.5	3.72	11.53	9.80	-15.02
		1.00	39.4	0.50	4.24	3.13	-26.20
平板锚	50	2.00	46.9	2.76	11.75	11.27	-4.09
		3.00	47.3	5.01	34.53	24.57	-28.84
		3.00	42.3	5.71	28.99	22.11	-23.73
		4.00	41.5	8.01	48.03	38.34	-20.18
		5.00	43.1	9.96	68.55	63.27	-7.71
		5.75	47.3	10.05	112.73	95.29	-15.47

表2 密砂中锚板试验结果

Table 2 Experimental results of anchors in dense sand

类型	D/mm	H/D	Dr/%	δ /mm	Q_u /N	Q_{uc} /N	误差/%
螺旋锚	50	3.00	78.2	4.20	42.5	45.76	7.70
		6.00	75.9	9.72	205.4	209.54	2.00
		2.75	77.3	0.89	2.23	2.71	21.90
		6.00	77.3	2.10	14.93	16.33	9.40
		9.00	77.3	3.91	32.15	31.95	-0.62
		12.25	77.3	4.14	49.71	34.88	-31.60
	20	3.15	78.2	1.11	3.75	3.732	-0.55
		7.25	78.2	3.13	19.54	26.41	35.20
		2.90	78.7	0.40	3.01	3.138	4.23
		7.50	78.7	2.96	22.55	29.05	28.80
		10.45	79.8	3.99	35.80	34.72	-3.02
		3.28	79.5	0.94	3.71	4.19	13.10
平板锚	50	3.00	78.2	4.55	41.80	45.76	9.47
		3.00	77.0	3.43	44.05	44.70	1.48
	20	6.00	75.9	9.21	200.16	209.54	4.69
		3.00	78.2	4.55	41.80	45.76	9.47
		3.00	77.0	3.43	44.05	44.70	1.48
		6.00	75.9	9.21	200.16	209.54	4.69
		3.00	78.2	4.55	41.80	45.76	9.47
		3.00	77.0	3.43	44.05	44.70	1.48
		6.00	75.9	9.21	200.16	209.54	4.69
		3.00	78.2	4.55	41.80	45.76	9.47
3.00	77.0	3.43	44.05	44.70	1.48		
6.00	75.9	9.21	200.16	209.54	4.69		

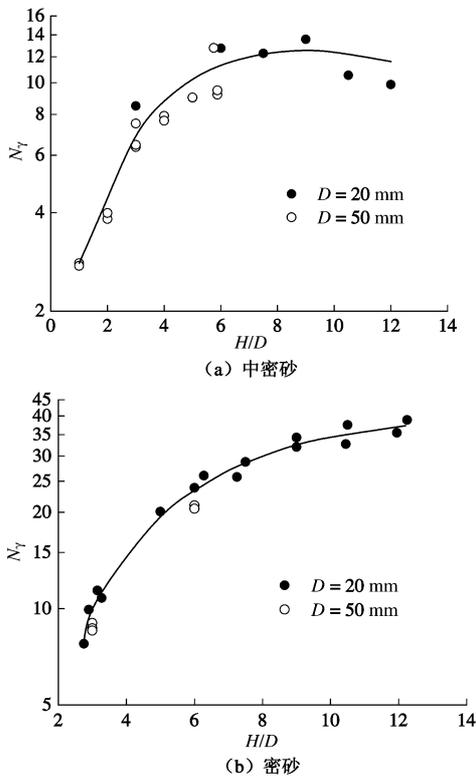
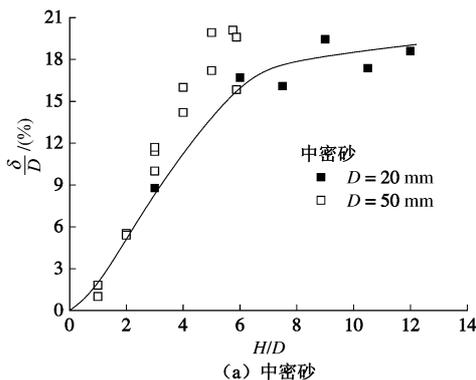
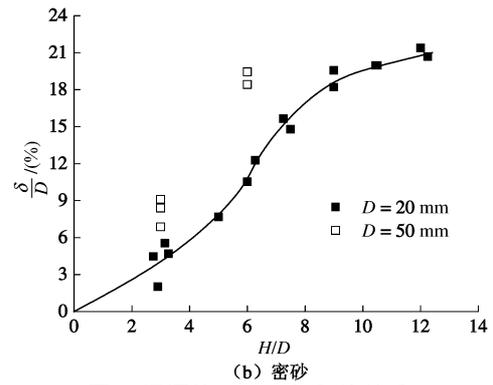


图4 埋深比与上拔承载力系数关系

Fig. 4 Relationship between embedment ratio and breakout factor



(a) 中密砂



(b) 密砂

图5 埋深比与破坏位移比关系

Fig. 5 Relationship between embedment ratio and failure displacement ratio

图5为埋深比 H/D 和破坏位移比 δ/D 的关系曲线，图中空心和实心方块分别表示直径为50 mm和20 mm锚板的结果。由图可见，锚板直径越大，破坏时所需相对位移越大。将直径为20 mm锚板的破坏位移比发展趋势用曲线表示，对于中密砂，当锚板埋深比小于6时，随着埋深比增加，破坏位移比快速增加，而后随着埋深比增加，破坏位移比增加速率明显变缓；对于密砂，当埋深比小于7.5时，随着埋深比增加，破坏位移比快速增加，当埋深比大于7.5时，破坏位移比增加速率开始放缓。根据Ilamparuthi^[7]确定临界埋深比的方法，可将这种破坏位移比增长速率变化明显的点作为浅深破坏模式的分界，即临界埋深比。因此，对于试验所用砂，中密砂中锚板临界埋深比 H_{cr}/D 可确定为6，密砂中约在7.5左右。

3 上拔承载力极限平衡分析

3.1 破坏模式假设

当锚板埋深较浅时，破坏滑裂面从板四周边缘开始向两侧发展至地表，根据Ilamparuthi等^[7, 12, 13, 15]对浅埋锚板周围砂土位移及剪应变的观测结果，滑裂面开展角度 β 与土体密实程度密切相关，即与土体剪胀程度有关；当锚板埋深较深时，滑裂面以封闭气泡型式形成于土体内部^[7, 15]，锚板边缘滑裂面开展角度 β 较浅埋时大。为简化起见，无论浅或深破坏模式均假设滑裂面为倒锥台，当埋深小于临界埋深时($H \leq H_{cr}$)，圆台高度为锚板埋深 H ，滑裂面开展角 β 等于砂土剪胀角 ψ ^[10, 12]，上拔承载力为滑裂面上土体强度竖向分量及内部土体自重之和；当 $H > H_{cr}$ 时，滑裂面开展高度为 H_1 ，如图6。对于本文试验用砂，中密砂的临界埋深 H_{cr} 为 $6D$ ，密砂为 $7.5D$ ；根据双层螺旋锚拉拔试验所确定的使两锚片承载力独立发挥的间距^[14]，假设深埋锚板滑裂面开展高度 H_1 为：中密砂中 $H_1 = 4.5D$ ，密砂中 $H_1 = 6D$ 。另外，基于文献[7]中锚板上拔试验砂土变形的观测结果，假设深破坏模式滑裂面开展角度

$\beta = 0.8\varphi$ 。

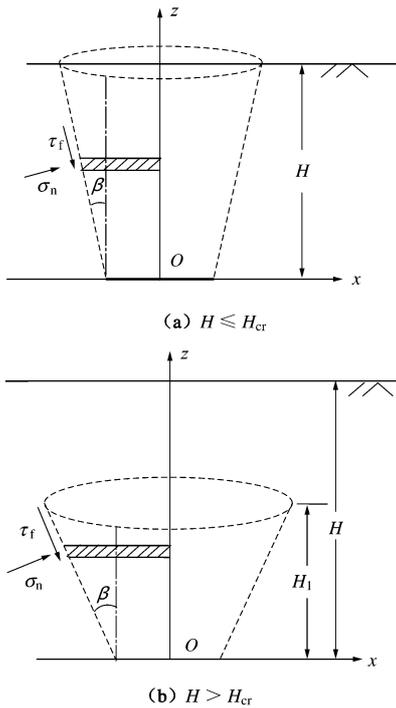


图 6 圆形锚板上拔破坏模式

Fig. 6 Failure modes of circular anchor under uplift loading

3.2 上拔极限承载力理论公式

基于上述破坏模式, 并假设极限状态下滑裂面上土体满足 Mohr-Coulomb 抗剪强度理论, $\tau_f = \sigma_n \tan \varphi$, 极限上拔承载力 Q_u 为滑裂面上土体强度竖向分量在滑裂面上积分与滑裂面内土体自重之和。

当 $H \leq H_{cr}$ 时, $\beta = \psi$,

$$\begin{aligned}
 Q_u &= \int_A (\tau_f \cos \beta - \sigma_n \sin \beta) \cdot dA + W \\
 &= \int_0^H K_n \gamma (H - z) \cdot (\tan \varphi \cos \beta - \sin \beta) \cdot \pi(D + 2z \tan \beta) dz + W \\
 &= \pi K_n \gamma (\tan \varphi \cos \beta - \sin \beta) \left(\frac{DH^2}{2} + \frac{H^3 \tan \beta}{3} \right) + \\
 &\quad \pi \gamma \left(\frac{D^2 H}{4} + \frac{DH^2}{2} \tan \beta + \frac{H^3 \tan^2 \beta}{3} \right), \tag{1}
 \end{aligned}$$

当 $H > H_{cr}$ 时, $\beta = 0.8\varphi$,

$$\begin{aligned}
 Q_u &= \int_A (\tau_f \cos \beta - \sigma_n \sin \beta) \cdot dA + W \\
 &= \int_0^{H_1} K_n \gamma (H - z) \cdot (\tan \varphi \cos \beta - \sin \beta) \cdot \pi(D + 2z \tan \beta) dz + W \\
 &= \pi K_n \gamma (\tan \varphi \cos \beta - \sin \beta) \left[DHH_1 + H_1^2 \left(H \tan \beta - \frac{D}{2} \right) - \right. \\
 &\quad \left. \frac{2H_1^3 \tan \beta}{3} \right] + \pi \gamma H_1 \left(\frac{D^2}{4} + \frac{DH_1}{2} \tan \beta + \frac{H_1^2 \tan^2 \beta}{3} \right), \tag{2}
 \end{aligned}$$

式中, K_n 为滑裂面上法向应力系数, $K_n = \sigma_n / \sigma_{v0}$ 。根据 White 等^[10]对条形锚板的推导, 同样假设上拔过程中滑裂面上法向应力保持不变, 则滑裂面上剪应力可由应力 Mohr 圆确定, 初始和破坏时应力圆及破坏

滑裂面上的应力如图 7 所示。在初始地应力状态下, 滑裂面上水平应力, $\sigma_{h0} = K_0 \sigma_{v0}$, K_0 为初始侧压力系数, 可由 $K_0 = 1 - \sin \varphi_c$ 计算确定, 其中, φ_c 为临界状态内摩擦角。则由初始 Mohr 圆, 得

$$K_n = \left[\frac{1 + K_0}{2} - \frac{(1 - K_0) \cos 2\beta}{2} \right]. \tag{3}$$

Drescher 等^[16]采用折减内摩擦角 φ^* 描述由于非关联流动法则在某种应力条件下产生的材料软化, 给出的 φ^* 表达式为^[16-17]

$$\tan \varphi^* = \frac{\sin \varphi \cos \psi}{1 - \sin \varphi \sin \psi}. \tag{4}$$

本文采用式 (4) 确定的 φ^* 替代式 (1)、(2) 中的 φ 对上拔承载力进行估算, 其中对于深埋情况, β 取砂土原内摩擦角的 0.8 倍。因此, 无论哪种破坏模式, 计算极限上拔承载力的关键土性参数为内摩擦角 φ 和剪胀角 ψ 。Bolton^[18]通过试验数据拟合给出 $\varphi - \varphi_c$ 与其定义的剪胀指标 I_R 的关系:

$$\varphi - \varphi_c = 0.8\psi = 3I_R, \tag{5}$$

$$I_R = D_r (Q - \ln p') - 1, \tag{6}$$

即建立了内摩擦角和剪胀角与砂土相对密度 D_r 和平均有效应力 p' 的关系。式中, Q 为依赖于砂土特性的拟合参数, 对于石英砂, Q 可取 $10^{[10]}$ 。

至此, 砂土中锚板上拔承载力可由式 (1) 或 (2) 结合式 (3) ~ (6) 来确定。其中式 (6) 中的 p' 按锚板埋深处的初始平均有效应力计算。

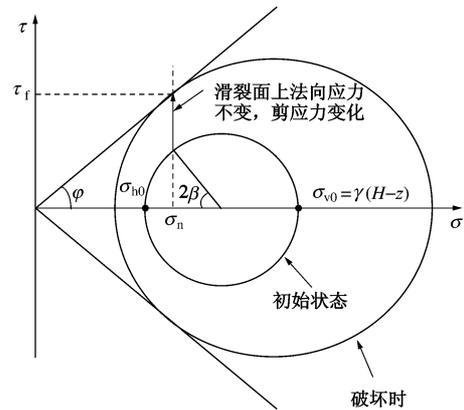


图 7 初始状态及破坏时的 Mohr 圆

Fig. 7 Mohr's circles in situ and at failure

3.3 理论与试验结果对比

按照上述分析的临界埋深比进行划分, 中密砂中 20 个试验有 4 个锚板为深埋锚; 密砂中 21 个试验有 6 个锚板为深埋锚。利用理论公式分别对中密及密砂中浅埋及深埋锚板上拔承载力进行估算, 将上拔承载力计算值 Q_{ue} 及其与试验结果误差列于表 1, 2。在 41 个拉拔试验的极限上拔力估算值中, 大多数误差绝对值小于 15%, 仅有 3 个试验的误差绝对值略高于 30%。

由此可见,本文提出的浅埋及深埋条件下的上拔承载力理论公式具有较好的适用性和准确性。

4 结 论

本文通过砂土中锚板拉拔模型试验,考察了锚板型式及尺寸对上拔承载特性的影响,同时采用极限平衡分析法对锚板上拔承载力进行分析,分别提出适用于浅破坏及深破坏模式下的极限上拔力公式。

(1)相同埋深比和直径的平板锚和螺旋锚的上拔荷载-位移曲线特征相同,极限上拔承载力并无明显差别;相同埋深比时,直径为50 mm的锚板上拔承载力系数略小于直径为20 mm锚板的上拔承载力系数,而其上拔破坏位移比明显高于小直径锚板。根据破坏位移比与埋深比关系曲线斜率变化确定锚板浅深破坏模式的临界埋深,中密砂中的临界埋深为 $6D$,密砂中为 $7.5D$ 。

(2)本文极限上拔力理论公式引入了Davis等的折减内摩擦角表达式和Bolton的内摩擦角与剪胀角关系式,以考虑砂土非关联流动特性在一定应力条件引起的材料强度降低及地基破坏模式和砂土强度对应力水平与密实程度的依赖。利用理论公式估算了41个试验锚板的上拔承载力,通过与试验结果进行对比,在一定程度上验证了本文理论计算公式的适用性及准确性。但由于试验数据仅限于小比尺模型试验,对于本模型更广泛的适用性需经过大比尺或离心机模型试验及现场试验进一步验证。

参考文献:

- [1] MEYERHOF G G, ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, **5**(4): 225 - 244.
- [2] MATSUO M. Study on the uplift resistance of footing (I) [J]. Soils and Foundations, 1968, **7**(4): 1 - 37.
- [3] SAEEDY H S. Stability of circular vertical anchors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, **24**(3): 452 - 456.
- [4] MURRY E J, GEDDES J D. Uplift of anchor plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(3): 202 - 215.
- [5] GHALY A, HANNA A, HANNA M. Uplift behaviour of screw anchors in sand. I: dry sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(5): 773 - 793.
- [6] GHALY A, HANNA A. Ultimate pullout resistance of single vertical anchors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(5): 661 - 672.
- [7] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRISNAIAH K. Experimental investigation on the uplift capacity of circular anchors in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(5): 648 - 664.
- [8] DICKIN E A. Uplift behavior of horizontal anchor plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(11): 1300 - 1317.
- [9] ROWE R K, DAVIS E H. The behaviour of anchor plates in sand[J]. Géotechnique, 1982, **32**(1): 25 - 41.
- [10] WHITE D J, CHEUK C Y, BOLTON M D. The uplift resistance of pipes and plate anchors buried in sand[J]. Géotechnique, 2008, **58**(10): 771 - 779.
- [11] HANNA A, AYADAT T, SABRY M. Pullout resistance of single vertical shallow helical and plate anchors in sand [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, **25**(7): 559 - 573.
- [12] 张 昕, 乐金朝, 刘明亮, 等. 砂土中锚板的抗拔机理与承载力计算模型研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1734 - 1739. (ZHANG Xin, YUE Jin-chao, LIU Ming-liang, et al. Uplifting behavior and bearing capacity of plate anchors in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1734 - 1739. (in Chinese))
- [13] NAZIR R, CHUAN H S, NIROUMAND H, et al. Performance of single vertical helical anchor embedded in dry sand[J]. Measurement, 2014, **49**: 42 - 51.
- [14] 郝冬雪, 陈 榕, 符胜男. 砂土中螺旋锚上拔承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 126 - 132. (HAO Dong-xue, CHEN Rong, FU Sheng-nan. Experimental study on uplift capacity of multi-helix anchors in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 126 - 132. (in Chinese))
- [15] LIU J Y, LIU M L, ZHU Z. Sand deformation around an uplift plate anchor[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2012, **138**(6): 728 - 737.
- [16] DRESCHER A, DETOURNAY E. Limit load in translational failure mechanisms for associative and non-associative materials[J]. Géotechnique, 1993, **43**(3): 443 - 456.
- [17] DAVIS E H. Theories of plasticity and the failure of soil masses[M]. London: Butterworth, 1968: 341 - 380.
- [18] BOLTON M D. Strength and dilatancy of sands[J]. Géotechnique, 1986, **36**(1): 65 - 78.