

DOI: 10.11779/CJGE201712015

水泥固化的风积沙地基扩展基础抗拔试验研究

盛明强¹, 乾增珍², 鲁先龙³

(1. 南昌大学, 江西 南昌 330031; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 沙漠风积沙地基结构松散、稳定性差、承载力低, 利用水泥作为固化剂固化稳定风积沙, 形成水泥固化风积沙地基是改善其不良工程特性的有效手段。将取自内蒙古库布齐沙漠的现场风积沙重塑为 3% 含水率的试验用风积沙, 向其中掺入 6% 普通硅酸盐水泥经充分拌和形成水泥固化风积沙填料, 完成了水泥固化风积沙地基中 9 个扩展基础模型抗拔试验。结果表明, 风积沙水泥固化方法可显著提高风积沙抗拔承载性能。上拔荷载作用下, 当水泥固化风积沙扩展基础抗拔深度与底板边长比值小于 3.5 时, 其荷载-位移曲线呈 2 阶段变化: 初始弹性段-峰值荷载、峰值荷载后破坏段, 极限抗拔承载力对应的位移与底板边长比值变化范围为 0.04%~1.05%, 平均 0.54%。按“土重法”确定的水泥固化风积沙“上拔角”远大于天然风积沙。

关键词: 沙漠; 风积沙; 水泥固化风积沙; 抗拔试验

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)12-2261-07

作者简介: 盛明强(1975-), 男, 江西安义人, 博士, 讲师, 主要从事地基基础方面教学和科研工作。mqsheng@sina.com.

Uplift load tests on model spread foundations in cement-stabilized aeolian sand

SHENG Ming-qiang¹, QIAN Zeng-zhen², LU Xian-long³

(1. Nanchang University, Nanchang, 330031; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Electric Power

Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Aeolian sands are inherently very low in strength and very high in compressibility because they are loose, cohesionless and easily movable. The cement-stabilization of aeolian sand may be an alternative method to improve the mechanical characteristics of aeolian sand in the desert areas. In this study, the aeolian sand samples collected from the Hobq Desert are remoulded with a moisture content of 3%, and a relatively small amount of cement of 6% by weight of dry aeolian sand is added to the aeolian sand backfill. A total of 9 uplift load tests are carried out to investigate the uplift performance of model spread foundations embedded in cement-stabilized aeolian sand. The experimental results demonstrate that the cement-stabilized aeolian sand has a typical brittle nature, and two-phase pre-peak and post-peak behaviours of load-displacement responses are observed in all the tests on the model spread foundations embedded in the cement-stabilized aeolian sand. Under uplift loading, when the normalized embedment ratio of depth to basement width for spread foundations is less than 3.5, the displacement corresponding to the ultimate uplift resistance ranges from 0.04%~1.05% of the basement width, with an average of 0.54%. Based on the uplift capacity of shallow spread corresponding to the peak failure resistances, the magnitudes of the slope angle α of the dead weight method are calculated for each of the spread foundations. Compared to the natural aeolian sand, the significant increases in uplift resistance and slope angle α of the dead weight method can be obtained for model spread foundations subjected to uplift in the cement-stabilized aeolian sand, irrespective of embedment ratios of H/D .

Key words: desert; aeolian sand; cement-stabilized aeolian sand; uplift load test

0 引言

中国沙漠地区石油、天然气资源丰富, 迫切需要建设输电线路、完善电网结构, 满足资源开发需求^[1]。地基基础的抗拔承载性能是影响输电线路运行安全的重要因素^[2]。但沙漠风积沙结构松散、黏粒含量少而无黏聚强度、稳定性差、承载力低, 且受常年频繁的

风力搬运和风蚀, 流动性大。因此沙漠地区工程电网工程建设难度大、成本高^[3-5]。为提高风积沙地基抗拔承载力, 在天然风积沙中掺入一定质量的水泥, 充分拌和后作为输电线路杆塔基础工程的回填料, 经回填

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208480)

收稿日期: 2016-09-30

压实后, 回填料中水泥矿物、风积沙中的水、风积沙中的矿物成分之间将发生一系列的物理化学反应和作用, 所生成胶凝物质填充风积沙孔隙, 产生固化效应强化风积沙颗粒间接触面性能与胶结连接作用, 大大改善天然风积沙强度和变形特征, 形成具有稳定强度的水泥固化风积沙地基^[6-8]。沙漠风积沙水泥固化是土体固化/稳定技术的一种形式, 也是“因地制宜、就地取材”提高地基承载性能的一种有效手段^[9]。

土体固化/稳定技术已有 50 多年历史^[10], 国内外学者已针对滩涂淤泥及滨海软土^[11-12]、盐渍土^[13]、膨胀土^[14-15]以及粉土^[16]等不同类型土体, 在固化剂选取与配置、固化机理、固化土性质与工程应用等方面开展了有益的探索和研究工作。但风积沙固化稳定方面, 目前国内外研究工作主要是集中在改善风积沙地基的路用性能方面^[6-9, 17-18], 还尚未见对固化风积沙的抗拔性能研究的相关文献报道。

本文采用内蒙古达拉特旗库布齐沙漠的风积沙试样, 将其重塑为 3% 含水率的试验用风积沙, 并向其中掺入 6% 的普通硅酸盐水泥以形成水泥固化风积沙, 测试了风积沙、水泥固化风积沙强度与变形性质, 完成了水泥固化风积沙地基中 3 种底板尺寸、3 种基础埋深的 9 个扩展基础模型抗拔承载性能试验。随着中国“一带一路”国家战略实施, 越来越多的具有战略意义和关系国计民生的基础设施将建设在沙漠腹地或穿越沙漠, 基础抗拔工程日益增多, 水泥固化风积沙地基扩展基础抗拔试验成果可为相关工程提供参考。

1 试验方案

1.1 风积沙取样及其性质

试验风积沙取自内蒙古达拉特旗库布齐沙漠, 由现场取样运回实验室。通过室内试验得到试验风积沙粒径级配累积曲线如图 1 所示^[19]。图 1 表明, 试验风积沙级配曲线较陡, 粒径分布集中, 属于细砂, 其中 $D_{10} = 0.09 \text{ mm}$, $D_{30} = 0.12 \text{ mm}$, $D_{50} = 0.15 \text{ mm}$, $D_{60} = 0.17 \text{ mm}$ 。

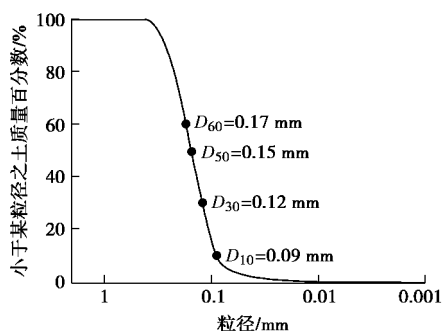


图 1 试验风积沙颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curve of aeolian sand

试验及统计资料表明^[9, 20-23], 沙漠风积沙天然含水率的变化范围为 0~4%, 一般多在 3% 左右。本研究旨在仅利用风积沙中的天然含水率, 而无需现场添加水分, 实现风积沙的水泥固化。为此, 将现场取回的风积沙沙样重塑成 3% 含水率的试验风积沙, 实测其重度为 14.5 kN/m^3 。

图 2 为 100, 200, 300, 400 kPa 4 种正应力作用下, 3% 含水率的重塑风积沙剪切应力 - 剪切位移和剪切位移 - 竖向位移关系曲线。根据莫尔-库仑强度准则进行抗剪强度拟合结果^[19], 试验用重塑风积沙黏聚强度近似等于 0, 内摩擦角为 36.1° 。

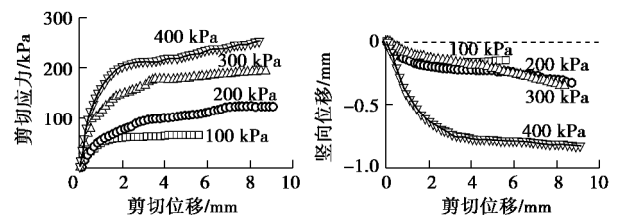


图 2 含水率 3% 试验风积沙直剪试验结果

Fig. 2 Shearing test results of aeolian sand with moisture content of 3%

1.2 风积沙水泥固化方案及其性质

风积沙是经过风力自然搬运分级的一种硅质材料, 其矿物成分相对稳定, 含有大量的活性成分无定型 SiO_2 , 一般在 65% 以上, 其次为 Al_2O_3 , 约占 10% 左右, CaO 约占 8% 左右, 其他化学成分还有 Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O 等^[5, 24-26]。

风积沙矿物成分与水分为其固化提供了物质基础。当水泥与风积沙拌和后, 水泥矿物与风积沙中的水分发生水解和水化反应, 同时从溶液中分解出氢氧化钙并形成其它水化物。水泥、水及风积沙颗粒间的一系列物理化学反应形成了水泥固化风积沙强度的主要来源, 成为风积沙的固化提供了物质基础^[27-28]。

文献[4]试验研究了含水率 3% 的风积沙在掺入 3%, 6% 和 9% 三种掺量的普通硅酸盐水泥 (P.O42.5) 后所形成的固化风积沙的抗剪强度。结果表明, 当水泥掺量小于 6% 时, 固化风积沙黏聚强度随水泥掺量的增加而呈显著的增长趋势。而当水泥掺量超过 6% 时, 黏聚强度反而下降。据此, 本次扩展基础抗拔试验的水泥固化风积沙也选择含水率 3% 试验风积沙中掺入 6% 的普通硅酸盐水泥 (P.O42.5) 而形成, 实测其重度为 14.8 kN/m^3 。

图 3 为含水率 3% 风积沙中掺入 6% 水泥固化风积沙试样 28 d 养护期后直剪试验结果, 得到其内摩擦角、黏聚强度分别为 30.2° 和 43.6 kPa 。与 3% 含水率重塑风积沙相比, 水泥固化风积沙的黏聚强度显著提高, 而

内摩擦角反而有所降低。

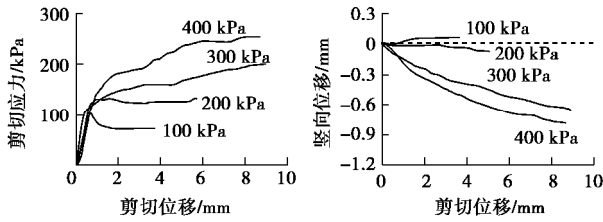


图 3 含水率 3%，6%水泥掺量的固化风积沙直剪试验结果

Fig. 3 Shearing test results of cement-stabilized aeolian sand with moisture content of 3% and cement content of 6%

1.3 模型槽及试验基础尺寸

考虑到风积沙自稳特性及现场施工条件，沙漠地区输电线路杆塔的基础一般选用钢筋混凝土扩展基础，并采用开挖回填方法施工^[4]。本次水泥固化风积沙扩展基础试验模型槽及上拔试验装置如图 4 所示。

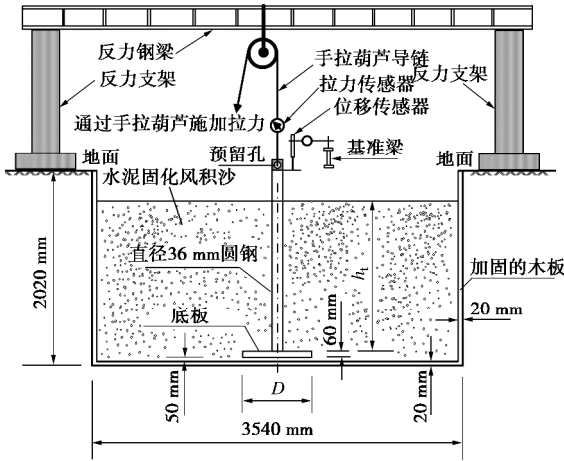


图 4 模型槽及上拔试验装置

Fig. 4 Schematic diagram of uplift model tests

模型试验槽长、宽、高的净尺寸分别为 3.5, 3.5, 2.0 m。模型基础底板采用钢筋混凝土制作，厚度相同，均为 0.06 m，底板边长 D 分 0.1, 0.2, 0.3 m 3 种规格，立柱采用直径 36 mm 预埋圆钢模拟。

试验过程中通过回填不同厚度 h_t 的水泥固化风积沙，研究 3 种底板尺寸、3 种埋置深度下的 9 个扩展基础抗拔性能。各模型试验基础参数如表 1 所示。

1.4 水泥固化风积沙的回填

如图 4 所示，所有试验中回填的水泥固化风积沙均采用相同方法制作完成。首先将现场取回的风积沙重塑成 3% 含水率的试验风积沙，再向其中掺入 6% 的普通硅酸盐水泥 (PO42.5)，最后采用人工方法多次充分拌合均匀，形成试验用水泥固化风积沙回填料。

各基础试验的水泥固化风积沙地基均采用人工分层夯实方法回填，分层厚度 300 mm，按照重度 14.8 kN/m^3 计算和控制每一层的回填沙量，分层回填直至

相应试验固化风积沙回填标高，夯实过程中的人员和工具基本相同，以减小不同基础试验风积沙回填质量的差异。

表 1 抗拔基础设计参数及其试验结果

Table 1 Design parameters and load test results of all foundations

底板边长 D /m	埋深 h_t /m	深宽比 h_t/D	抗拔极限承载力 T_u /kN	极限荷载对应位移 s_u /mm	s_u/D /%	上拔角 α /($^\circ$)
0.10	0.15	1.5	8.44	1.58	1.05	84.8
0.10	0.25	2.5	10.86	2.13	0.85	80.0
0.10	0.35	3.5	12.10	0.14	0.04	74.4
0.20	0.30	1.5	22.18	1.44	0.48	80.5
0.20	0.50	2.5	25.60	1.10	0.22	71.1
0.20	0.70	3.5	27.64	6.53	0.93	61.0
0.30	0.45	1.5	32.24	4.04	0.90	75.1
0.30	0.75	2.5	39.47	1.64	0.22	61.8
0.30	1.05	3.5	44.60	1.67	0.16	49.5

所有试验基础的回填水泥固化风积沙养护时间为 28 d，达到养护时间后即开展相关基础上拔试验。图 5 为经 28 d 养护并完成试验后所开挖出的固化风积沙地基土体。实测得其重度为 14.8 kN/m^3 ，表明水泥固化风积沙的回填控制标准取得了较好的效果。



图 5 开挖后的水泥固化风积沙地基

Fig. 5 Excavated cement-stabilized aeolian sand sample

1.5 试验加载方法

如图 4 所示，试验上拔力采用手拉葫芦加载，由拉力传感器显示荷载值，并采用人工方法加载、补载，并实现荷载维持。试验采用慢速维持荷载法加载^[29]，即试验前将基础预估抗拔极限承载力分为 10 等分，由此确定每一级试验工况所对应的荷载增量及其荷载值。试验中第 1 次加载量为荷载分级增量的 2 倍，以后按荷载分级的增量逐级等量加载。所有试验基础均做到极限破坏，然后停止试验，无卸载段。

2 试验结果与分析

2.1 荷载位移特性

图 6 是所有试验基础的抗拔荷载 - 位移曲线。分析 9 个试验基础的荷载 - 位移曲线，可得到水泥固化风积沙地基扩展基础的抗拔承载特性：

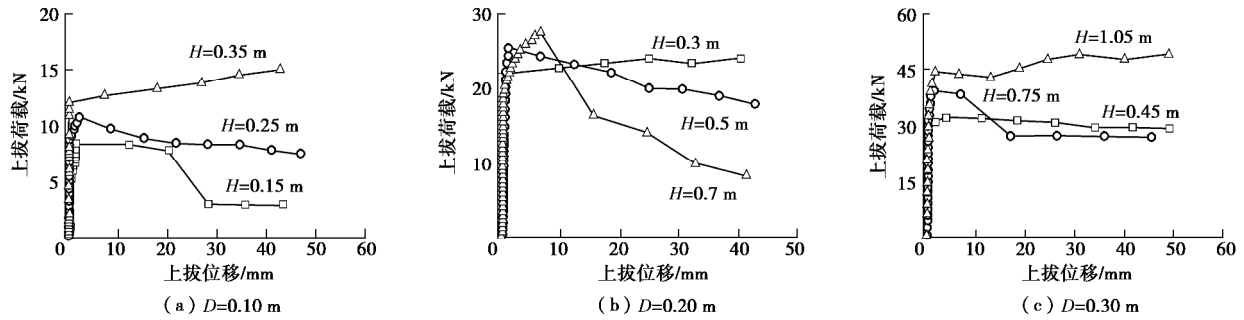


图6 各抗拔试验基础荷载-位移曲线

Fig. 6 Measured uplift load-displacement curves of all tests

(1)水泥固化风积沙扩展基础抗拔荷载-位移曲线均呈2阶段变化规律:初始弹性段至峰值荷载以及峰值荷载后的破坏阶段。在初始弹性段,基础位移随上拔荷载的增加,荷载-位移曲线近似为直线,基础上拔位移变化较小。而当试验基础达到其抗拔极限承载力 T_u 后,其荷载-位移曲线又呈现出2种变化趋势:①基础保持残余强度而位移急剧增大,②基础承载力随位移增加而迅速下降。表1给出了各试验基础的抗拔极限承载力 T_u 及其对应的位移 s_u 。

(2)在达到极限承载力前,各基础塑性变形很小,甚至没有塑性变形。而当基础达到极限抗拔承载力时,水泥固化风积沙的粒间接触与胶结连接作用迅速破坏,承载力达到峰值。总体上看,水泥固化风积沙地基扩展基础抗拔性能呈明显脆性破坏特征。表1结果表明,水泥固化风积沙扩展基础抗拔极限承载力对应位移 s_u 与底板边长 D 的比值 s_u/D 变化范围为0.04%~1.05%,平均值为0.54%。而Berardi等^[30]、Consoli等^[31]研究表明,水泥固化粗砂土浅基础下压极限承载力对应地基位移的平均值约为底板边长的1.0%左右。相比较而言,水泥固化风积沙中扩展基础抗拔极限承载力对应位移则小得多。

(3)根据表1试验结果,可得到抗拔极限承载力随基础深宽比 h_t/D 和底板尺寸 D 的变化规律如图7所示。抗拔极限承载力随基础深宽比、底板尺寸的增加而增加。总体上看,增大底板尺寸可较好地提高基础极限抗拔承载力。

2.2 地表裂缝开展及其分布特征

图6表明,水泥固化风积沙扩展基础抗拔荷载-位移曲线呈2阶段变化规律的脆性破坏特征。在加荷初期,荷载-位移曲线近似成直线,位移增加速率非常缓慢,地表无明显位移变化。随着荷载持续增加,基础达到其抗拔极限承载力,水泥固化风积沙的固化效应被迅速破坏,基础上拔位移迅速增大,破裂面随即发展到地表,固化风积沙地基产生剪切破坏而丧失承载能力,地表裂缝分布范围不断扩大。图8以底板边长 $D=0.2$ m为例,基础破坏时典型地表裂缝分布情

况,其他底板边长的基础破坏裂缝分布规律也类似。图8表明,当基础底板尺寸相同时,地表裂缝分布特点随基础深宽比 h_t/D 而呈现出规律性变化。当 $h_t/D=1.5$ 时,地表裂缝分布范围较大,且以基础为中心,由里及外分为3个区域:靠近基础立柱周边地表的径向裂缝区域;环向和径向裂缝共有区域;径向裂缝区域。而当 h_t/D 从2.5增加到3.5时,地表裂缝以径向为主,且分布范围不断变小。

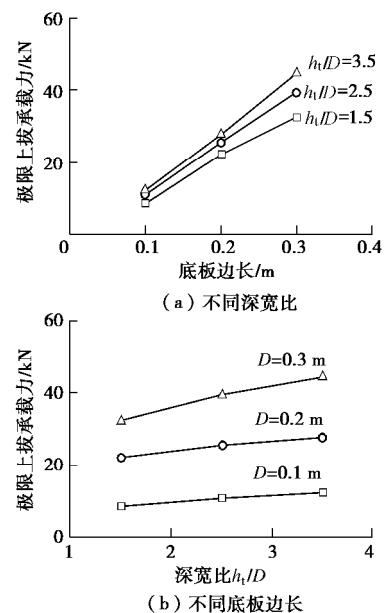


图7 极限抗拔承载力随基础深宽比和底板尺寸变化规律

Fig. 7 Relationship among ultimate uplift resistances and normalized embedment ratio and basement width for all tests

3 水泥固化风积沙抗拔性能计算

国内外对扩展基础的抗拔稳定性计算,多采用经验性的“土重法”^[29, 32-33],其假设上拔荷载作用下的抗拔土体破裂面为倒锥体,计算模型如图9所示。图中: H 为基础埋深(m); h_t 为基础抗拔计算深度(m), $h_t=H-t$; t 为下台阶高度(m); D 为底板边长(m); α 为抗拔倒锥体表面与垂直面的夹角,称为“上拔角”,反映地基基础抗拔承载性能的经验参数($^\circ$)。

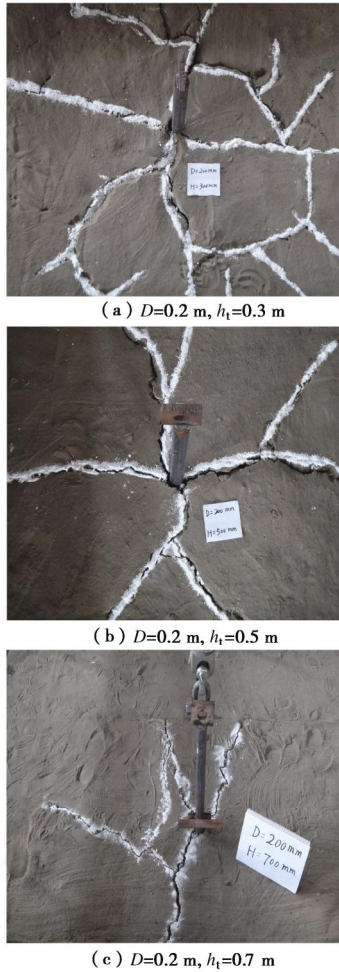


图 8 基础破坏时典型地表裂缝分布

Fig. 8 Rupture surface distribution of cement-stabilized aeolian sand at failure

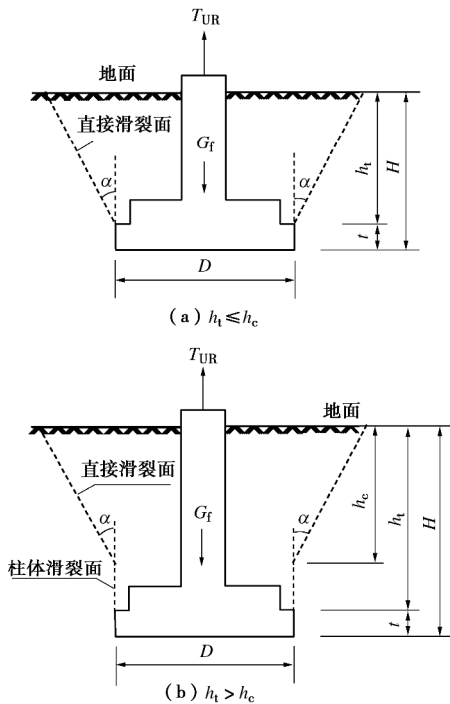


图 9 扩展基础抗拔“土重法”计算模型

Fig. 9 Diagram of dead weight method for uplift bearing capacity for spread-type foundations

随基础埋置深度的不同, 抗拔扩展基础一般呈现浅基础和深基础 2 种破坏模式^[32], 分别如图 9 (a) 和图 9 (b) 所示。当 $h_t \leq h_c$ 时, 抗拔土体滑动破裂面仅为倒锥面。而当 $h_t > h_c$ 时, 抗拔土体滑动破裂面由临界埋深以下的柱状面和临界埋深以上倒锥面组成。通常称 h_c 基础临界埋深。

“土重法”认为基础抗拔极限承载力由基础自重及抗拔倒锥体内的土体重量 2 部分组成。对图 9 中的 2 种破坏模式, 抗拔承载力均可为

$$T = g_s(V_t - V_0) + G_f \quad (1)$$

式中, T 为基础抗拔极限承载力 (kN), G_f 为基础自重 (kN), g_s 为回填的水泥固化风积沙地基计算重度 (kN/m³), V_0 为基础体积 (m³), V_t 为抗拔倒锥体范围内的地基土体的体积。

当 $h_t \leq h_c$ 时

$$V_t = h_t \left(D^2 + 2Dh_t \tan a + \frac{4}{3} h_t^2 \tan^2 a \right) \quad (2)$$

当 $h_t > h_c$ 时

$$V_t = h_c \left(D^2 + 2Dh_c \tan a + \frac{4}{3} h_c^2 \tan^2 a \right) + D^2(h_t - h_c) \quad (3)$$

国外相关研究成果均表明, 抗拔基础临界埋深 h_c 一般取 3~4 倍基础底板尺寸, 即 $h_c/D = 3 \sim 4$ ^[29, 32-33]。本文试验基础 h_c/D 变化范围为 1.5~3.5, 各基础可按浅基础破坏模式进行计算。由此, 根据表 1 各试验基础抗拔极限承载力, 按式 (1)、(2) 可计算得到各试验基础水泥固化风积沙“上拔角”, 结果列于表 1。图 10 为“上拔角” a 随基础深宽比变化规律。

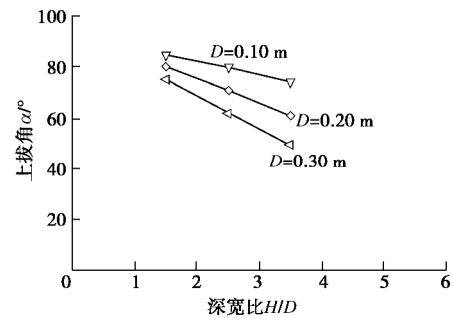


图 10 上拔角 a 随基础深宽比变化规律

Fig. 10 Relationship between angle a and embedment ratio H/D for all model tests

如表 1 和图 10 所示, 水泥固化风积沙地基“上拔角”与基础底板尺寸、基础抗拔埋深及基础深宽比等因素有关。当基础底板边长相同时, “上拔角”随深宽比 (h_t/D) 的增大而减小, 即埋深越大, “上拔角”越小。当深宽比 (h_t/D) 相同时, “上拔角”随基础底板边长的增加而减小。因此, 实际工程中, 需要合理确定基础结构尺寸及其埋置深度。

国内学者^[3, 34-35]结合中国西部电网建设, 先后在新疆塔克拉玛干沙漠和宁夏毛乌素沙漠开展了风积沙地基杆塔基础抗拔承载性能现场试验。试验表明, 天然风积沙抗拔性能较差, 其“上拔角”一般为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。表1试验结果表明, 水泥固化风积沙的“上拔角”远高于天然风积沙地基。水泥固化风积沙方法显著地提高了风积沙抗拔承载性能。

4 结 论

(1) 水泥固化风积沙扩展浅基础的抗拔荷载-位移曲线呈典型的2阶段变化规律: 初始弹性段-峰值荷载、峰值荷载后破坏段。极限抗拔承载力对应位移与底板边长比值的变化范围为 $0.04\% \sim 1.05\%$, 平均值为 0.54% 。

(2) 水泥固化的风积沙地基扩展基础抗拔承载性能较天然风积沙显著提高。按“土重法”计算得到水泥固化风积沙“上拔角”远大于天然风积沙。但水泥固化风积沙的计算“上拔角”与基础底板尺寸、基础抗拔埋深及基础深宽比等因素有关。工程设计时宜合理确定基础底板尺寸和埋深。

参考文献:

- [1] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 上拔与水平力组合作用下加筋风积沙斜柱扩展基础试验[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 373 - 379. (QIAN Zeng-zhen, LU Xian-long, DING Shi-jun. Experiments on pad and chimney foundation in reinforced aeolian sand under uplift combined with horizontal loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 373 - 379. (in Chinese))
- [2] KULHAWY F H, TRAUTMANN C H, BEECH J F, et al. Transmission line structure foundation for uplift-compression loading[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute USA, 1983.
- [3] 鲁先龙, 程永锋. 我国输电线路基础工程现状与展望[J]. 电力建设, 2005, **26**(11): 25 - 27. (LU Xian-long, CHENG Yong-feng. Current status and prospect of transmission tower foundation engineering in China[J]. Electric Power Construction, 2005, **26**(11): 25 - 27. (in Chinese))
- [4] 中国电力科学研究院. 复杂地质环境下输变电工程关键技术研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014. (China Electric Power Research Institute. Report on key technology of power transmission and transformation project under complicated geological environment[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [5] 高玉生, 陈汝恩, 李英海, 等. 中国沙漠风积沙工程性质研究及工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (GAO Yu-sheng, CHEN Ru-en, LI Ying-hai, et al. Research on the engineering property and application of aeolian sand in China[M]. Beijing: Chines Water Sources and Hydroelectric Power Press, 2013. (in Chinese))
- [6] AIBAN S A. A study of sand stabilization in eastern saudi arabia[J]. Engineering Geology, 1994, **38**(1/2): 65 - 79.
- [7] BAGHDADI Z A, RAHMAN M A. The potential of cement kiln dust for the stabilization of dune sand in highway construction[J]. Building and Environment, 1990, **25**(4): 285 - 289.
- [8] PANWAR P, AMETA N K. Stabilization of dune sand with bentonite and lime[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **18**: 2667 - 2674.
- [9] ELIPE M G M, LOPEZ-QUEROL S. Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction-The state-of-the-art[J]. Construction and Building Materials, 2014, **73**: 728 - 739.
- [10] 张涛, 刘松玉, 蔡国军. 固化粉土小应变剪切模量与强度增长相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 1955 - 1964. (ZHANG Tao, LIU Song-yu, CAI Guo-jun. Relationship between small-strain shear modulus and growth of strength for stabilized silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(11): 1955 - 1964. (in Chinese))
- [11] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (GUO Yin. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [12] 李雪刚. 杭州海相软土的固化及其理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (LI Xue-gang. Theoretical study on stabilization of marine soft clay in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [13] 杨西锋, 尤哲敏, 牛富俊, 等. 固化剂对盐渍土物理力学性质的固化效果研究进展[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(2): 376 - 385. (YANG Xi-feng, YOU Zhe-min, NIU Fu-jun, et al. Research progress in stabilizers and their effects in improving physical and mechanical properties of saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(2): 376 - 385.
- [14] 熊海帆. 膨胀土水泥改性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. (XIONG Hai-fan. Experimental study on expansive soil modified with cement[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [15] SARIDE S, PUPPALA A J, CHIKYALA S R. Swell-shrink

- and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays[J]. *Applied Clay Science*, 2013, **85**: 39 - 45.
- [16] 李迎春. 粉土固化稳定机理与措施研究[D]. 南京: 东南大学, 2003. (LI Ying-chun. Mechanism and countermeasures of silt stabilization[D]. Nanjing: Southeast University, 2003. (in Chinese))
- [17] 王树娟. 掺风积沙水泥复合土力学性能的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012. (WANG Shu-juan. The wind deposited sand mixed cement composite soil mechanics performance of research[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese))
- [18] SHIRVANI R A, SHOOSH PASHA I. Experimental study on load-settlement behaviour of cement stabilised footing with different dimensions on sandy soil[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, **40**: 397 - 406.
- [19] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [20] AL-ANSARY M, PÖPPELREITER M C, AL-JABRY A, et al. Geological and physiochemical characterization of construction sands in Qatar[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2012, **1**: 64 - 84.
- [21] AL-SANAD H A, ISMAEL N F, NAYFEH A J. Geotechnical properties of dune sands in Kuwait[J]. *Engineering Geology*, 1993, **34**(1-2): 45 - 52.
- [22] AL-TAIE A J, AL-SHAKARCHI Y J, MOHAMMED A A. Investigation of geotechnical specifications of sand dune: a case study around Baiji in Iraq[J]. *International Journal of Advanced Research*, 2013, **1**(6): 208 - 215.
- [23] KHAN I H. Soil studies for highway construction in arid zones [J]. *Engineering Geology*, 1982, **19**(1): 47 - 62.
- [24] 安建林. 新疆风积沙力学性质与动力性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2003. (AN Jian-lin. Research on the mechanical and dynamical property of aeolian sand in Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese))
- [25] 李万鹏. 风积沙的工程特性与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2003. (LI Wan-peng. Research on the engineering properties and corresponding application for aeolian sand[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese))
- [26] 鲁先龙, 程永锋, 丁士君. 风积沙地基工程性质及其输电线路基础抗拔设计[J]. *电力建设*, 2010, **31**(7): 46 - 50. (LU Xian-long, CHENG Yong-feng, DING Shi-jun. Property of aeolian sand design of the uplift bearing capacity for the sand foundation of transmission line structure[J]. *Electric Power Construction*, 2010, **31**(7): 46 - 50. (in Chinese))
- [27] 何静, 申向东, 董伟, 等. 风积沙掺量对水泥砂浆力学性能和微观结构的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2015, **34**(9): 2609 - 2613. (HE Jing, SHEN Xiang-dong, DONG Wei, et al. Influence of aeolian sand dosage on mechanical property and microstructure of cement mortar[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, **34**(9): 2609 - 2613. (in Chinese))
- [28] 董伟, 申向东. 不同风积沙掺量对水泥砂浆流动度和强度的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2013, **32**(9): 1900 - 1904. (DONG Wei, SHEN Xiang-dong. Study on cement mortar fluidity and compressive strength by different aeolian sand dosage[J]. *Bulletin of the Chinese ceramic Society*, 2013, **32**(9): 1900 - 1904. (in Chinese))
- [29] DL/T 5219—2014 架空输电线路基础设计技术规程[S]. 2014. (DL/T 5219—2014. Technical code for design of foundations of overhead transmission lines[S] 2014. (in Chinese))
- [30] BERADI R, LANCELLOTTA R. Stiffness of granular soil from field performance[J]. *Géotechnique*, 1991, **41**(1): 149 - 157.
- [31] CONSOLI N C, DALLA R F, FONINI A. Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(12): 1846 - 1856.
- [32] PACHECO M P, DANZIGER F A B, PEREIRA C P. Design of shallow foundations under tensile loading for transmission line towers: An overview[J]. *Engineering Geology*, 2008, **101**(3/4): 226 - 235.
- [33] IEEE Std 691-2001. IEEE guide for transmission structure foundation design and testing[S]. 2001.
- [34] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 塔克拉玛干沙漠输电线塔装配式基础试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(8): 2359 - 2364. (QIAN Zeng-zhen, LU Xian-long, DING Shi-jun. Experimental study of assembly foundation for transmission line tower in Taklimakan desert[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(8): 2359 - 2364. (in Chinese))
- [35] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 风积沙地基装配式偏心基础抗拔试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(4): 1097 - 1102, 1108. (QIAN Zeng-zhen, LU Xian-long, DING Shi-jun. Field tests on pullout behavior of eccentric grillage foundation in aeolian sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(4): 1097 - 1102, 1108. (in Chinese))