

文章编号: 1000-7598-(2006)04-0673-04

塔克拉玛干沙漠砂静力触探试验研究

杜学玲¹, 杨广庆¹, 陈明长¹, 张喜发²

(1. 石家庄铁道学院, 石家庄 050043; 2. 吉林大学, 长春 130026)

摘 要: 在控制相对密度和含水量的条件下进行了系列室内大型槽和中型槽原位测试模拟试验及相关土工试验, 取得了塔克拉玛干沙漠砂静力触探指标锥尖阻力 q_c 与容许承载力 p_a 、内摩擦角 φ 、相对密度 D_r 和变形模量 $E_{0.01}$ 的一系列有效数对, 建立了 q_c-p_a , $q_c-\varphi$, q_c-D_r , $q_c-E_{0.01}$ 等相关关系, 并给出了适合在沙漠地区应用的数字化表格, 为在沙漠地基勘察中推广应用静力触探技术积累了经验。

关 键 词: 沙漠砂; 静力触探试验; 锥尖阻力; 沙漠地基勘察

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Testing research of cone penetration test on Taklamaka desert sand

DU Xue-ling¹, YANG Guang-qing¹, CHEN Ming-zhang¹, ZHANG Xi-fa²

(1. Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China; 2. Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: A series of in-situ simulated tests and geotechnical tests are completed in big trough and medium trough under the condition of controlling the relative density and moisture of the Taklamaka desert sand in laboratory. Then some data and indexes such as static point resistance q_c of cone penetration test, allowable bearing capacity p_a , angle of internal friction φ , relative density D_r , modulus of deformation $E_{0.01}$ etc. are got. On the basis of these data, some correlations including q_c vs. p_a , q_c vs. φ , q_c vs. D_r , q_c vs. $E_{0.01}$ and digital forms applied for desert are given. All these are accumulated experience for application of cone penetration test on desert foundation investigation.

Key words: desert sand; cone penetration test; static point resistance; desert foundation investigation

1 前 言

原位测试是岩土工程勘察的一个重要组成部分, 而静力触探技术作为一种原位测试手段, 在工程勘察中具有快速、连续、经济、操作简便、适用范围广等优越性。为满足塔克拉玛干沙漠地区石油工业建设的需要, 深入了解该地区的工程地质条件以正确评价地基土的工程力学性质, 本文通过系列室内原位测试模拟试验及相关土工试验的对比研究, 积累出成套的原位测试指标与土力学指标间的经验关系, 为在沙漠地基勘察中推广应用静力触探技术奠定了基础, 有助提高沙漠地基勘察技术水平。

试验砂样采自新疆塔中四号油田, 经测定颗粒级配非常均匀, 颗粒分析曲线上 $0.070 \sim 0.15$ mm 范围内曲线陡直, 有效粒径 $d_{10}=0.070$ mm, 限定粒径 $d_{60}=0.086$ mm, 不均匀系数 $C_u=1.23$, 定名为粉

砂。其它物理性质指标见文[1]。用标准击实仪进行了重型击实和轻型击实试验, 当含水量为零时得到最大干密度 $\rho_{dmax}=1.589$ g/cm³, 随着含水量的增加, 干密度逐渐减小, 至含水量 18% 后, 干密度又随含水量的增加而增大, 曲线呈现双峰值。试验砂样主要矿物成分为石英和长石, 主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 。

2 静力触探模拟试验

本次模拟试验是在控制相对密度和含水量的条件下, 在大型试验槽和中型试验槽中分别模拟现场情况进行系列原位测试试验(包括静力触探试验、标准贯入试验和载荷试验), 以与现场原位试验和其它土工试验进行对比。

2.1 现场原位试验

现场载荷试验土层为非饱和土, 深度为 $0.7 \sim$

0.8 m, 深度过大时坑壁不稳。载荷板面积为 0.5 m², 圆形压板, 由地锚提供反力。试坑直径为 1.8 m, 大于 3 倍压板直径。

现场静力触探试验采用 15 t 静力触探机, 在每个载荷试验点旁边触 2 个孔, 以求平均值。整理资料时, 取压板沉降量与圆形压板直径之比, 即 $S/d=0.01$ 对应的荷载作为容许承载力。静力触探试验锥尖阻力 q_c 与容许承载力 P_a 试验结果见表 1。

表 1 现场原位试验锥尖阻力与容许承载力
Table1 Static point resistance and allowable bearing capacity of in situ test

编号	q_c/MPa	P_a/kPa	编号	q_c/MPa	P_a/kPa
TZ1	8.63	272	TZ6	6.40	160
TZ2	4.46	160	TZ7	7.70	280
TZ3	8.20	200	TZ8	5.66	175
TZ4	2.40	90	TZ9	12.50	275
TZ5	4.60	160	TZ10	4.89	200

2.2 室内大型槽和中型槽试验

室内试验是在大型试验槽和中型试验槽中进行。大型槽深 3.83 m, 内径为 3.0 m, 由于该槽尺寸足够大, 其应力分布与现场基本一致, 模拟效果较好。在大型槽内依次进行的原位模拟试验有载荷试验、静力触探试验和标准贯入试验。试验砂样由人工控制含水量和相对密度, 含水量为风干、5%, 11%及饱和, 相对密度从松散至密实, 资料整理同现场原位试验, 试验设计可参见文[1], 结果见表 2。

表 2 大型试验槽锥尖阻力与容许承载力
Table 2 Static point resistance and allowable bearing capacity of big trough

编号	q_c/MPa	P_a/kPa	编号	q_c/MPa	P_a/kPa
D1	0.65	60	D12	22.00	430
D2	1.20	75	D14	10.50	250
D4	13.5	283	D15	12.00	300
D6	5.20	200	D16	14.00	320
D7	8.80	250	D17	19.00	380
D8	12.30	300	SZ1	6.60	220
D9	5.50	167	SZ2	10.00	270
D10	9.00	280	SZ3	4.20	167
D11	17.60	400	SZ4	11.20	300

3 土工试验

3.1 直剪试验

非饱和砂样试验设计与中型槽相同, 含水量分别为 2%, 5%, 8%, 11%和 14%, 相对密度分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 和 0.8, 按黏聚力 $c=0$ 统计得内摩擦角 φ 变化范围为 $28.1^\circ \sim 37.6^\circ$ [2]; 饱和砂样的相对密度为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 按 $c=0$

统计得内摩擦角 φ 变化范围为 $30.4^\circ \sim 33.9^\circ$ [1]; 当不区分含水量时, 仍按 $c=0$ 统计得内摩擦角 φ 变化范围为 $31.4^\circ \sim 35.0^\circ$ [1]。

3.2 压缩试验

压缩试验也分为饱和砂和非饱和砂两种情况。非饱和砂与直剪试验相同, 砂料均取自中型槽, 试验配制 26 组砂体。饱和砂样采用含水量为 20% 的砂料装样, 浸水饱和后进行固结试验, 结果见表 3。所有试验均为 2 个样, 用特制的钢模压样, 以消除试验误差。

表 3 沙漠砂压缩模量 E_{s1-2}
Table 3 Modulus of compressibility on desert sand

相对密度 D_r	不同含水量 ω (%) 时压缩模量 / MPa					饱和
	2	5	8	11	14	
0.3		20.27	22.53	20.27	22.27	
0.4		21.86	23.15	20.71	21.86	
0.5	21.7	23.57	23.87	21.22	22.46	21.22
0.6	22.04	24.36	24.68	22.57	23.14	23.14
0.7	23.11	24.88	25.59	23.57		25.59
0.8	24.93	25.86	26.66	24.76		26.66

由表 3 可见, 砂样具有以下特点: (1) 压缩性总体上的变化较小, 在相对密度 $D_r=0.3 \sim 0.8$, 含水量在 2%至饱和的范围内, E_{s1-2} 变化范围在 20.27~26.66 MPa 之间; (2) 对非饱和砂, 在含水量相同的条件下, 随初始密度的增加, 压缩模量增大, 而同一初始密度、不同含水量时压缩特征较复杂; (3) 对饱和砂, 试验时较小密度的砂样不能装满, 因此饱和砂样的压缩模量可看作仅随相对密度增加而增大; (4) 不考虑含水量时按线性回归 $D_r - E_{s1-2}$ 关系, 其相关系数达 0.85, 这对压缩性指标而言是较高的。

3.3 三轴变形试验

为了解三轴强度与直剪强度的差别, 并获得沙漠砂应力-应变关系参数, 进行了 6 组固结排水试验。试样直径为 3.98 cm, 高径比为 2。待试样饱和后, 分别施加 100, 200, 300, 400 kPa 围压使试样固结, 然后在充分排水条件下对试样分级施加偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$, 并测记量力环读数和排水量。将非饱和砂的三轴强度与直剪试验所得值相比较, 发现三轴固结排水剪强度比直剪强度平均高 $3^\circ \sim 4^\circ$ 。

4 静力触探指标的应用

在沙漠地基勘察中推广应用静力触探技术, 须以一定的经验为基础, 为此本文通过大型槽和中型槽试验, 获得了可靠的静力触探数据。下面将建立一些相关关系。

4.1 静力触探指标与承载力相关关系

根据大型槽试验资料, 整理得 $q_c - P_a$ 最佳回归方程为

$$P_a = 72.554 q_c^{0.5679}, R = 0.9856 \quad (1)$$

指标统计范围: 含水量从风干至饱和。相对密度 $D_r = 0.23 \sim 0.73$, 从松散到密实。锥尖阻力 $q_c = 0.65 \sim 22.0$ MPa, 容许承载力 $P_a = 60 \sim 430$ kPa。式(1)中复相关系数 R 值较高, 在于静力触探和载荷试验均是在同一砂体上进行, 二者关系属于直接对比, 不受制样条件差异的影响。国际上确定砂土承载力通常取 $p_a = q_c / (30 \sim 40)^{[3]}$, 国内《港口工程地质勘察规范》^[4]提出用表格确定砂土承载力。利用以下公式^[5]:

$$p_s = 1.093 q_c + 0.358 \quad (2)$$

将规范^[4]转化成 $q_c - P_a$ 关系, 如图1所示。可以看出, 前半段与本文建立的式(1)比较接近, 但后半段明显偏离, 因此国内提出的确定砂土承载力的表格不适合在沙漠地区应用。为方便应用, 将式(1)表格化, 见表4^[6]。

表4 用锥尖阻力确定沙漠砂容许承载力
Table 4 Determination of desert sand allowable bearing capacity by the static point resistance

q_c /MPa	P_a /kPa	q_c /MPa	P_a /kPa	q_c /MPa	P_a /kPa
1	70	9	250	17	360
2	100	10	265	18	370
3	125	11	280	19	380
4	150	12	295	20	390
5	175	13	310	21	400
6	200	14	325	22	410
7	295	15	340		
8	310	16	350		

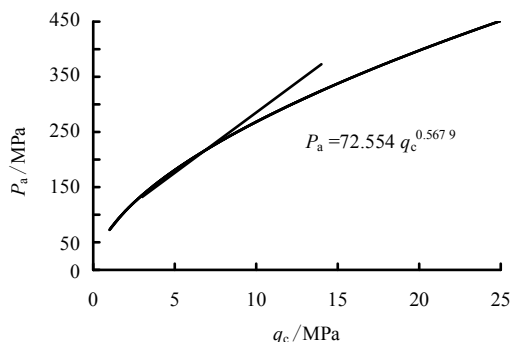


图1 $q_c - P_a$ 关系线比较
Fig.1 Comparison of q_c vs. P_a curves

4.2 静探指标与抗剪强度指标间的关系

静力触探的重要应用之一是确定砂土的相对密度和内摩擦角。通过对比大中槽试验和直剪试验发

现, 锥尖阻力 q_c 和内摩擦角 φ 之间的关系受试样含水状态的影响很小, 直接建立 $q_c - \varphi$ 最佳回归方程^[1]:

$$\varphi = 0.2317 q_c + 29.439, r = 0.9336 \quad (3)$$

指标统计范围: 锥尖阻力 $q_c = 1.1 \sim 26.2$ MPa, 含水状态从风干到饱和。将式(3)表格化, 见表5^[2]。

表5 用锥尖阻力确定沙漠砂内摩擦角
Table 5 Determination of desert sand angle of internal friction by the static point resistance

q_c /MPa	$\varphi / (^\circ)$	q_c /MPa	$\varphi / (^\circ)$
1	29.7	10	31.8
2	29.9	15	32.9
3	30.1	20	34.1
4	30.6	25	35.2

4.3 静探指标与相对密度的关系

通过综合大型槽和中型槽试验, 共获得可供对比的 $q_c - D_r$ 数据 45 个, 回归方程为

$$D_r = 0.274 q_c^{0.3047}, R = 0.899 \quad (4)$$

绘制 $q_c - D_r$ 散点图(略)发现, 饱和砂样和风干砂样的数据点均集中在散点图的上方, 而非饱和砂的数据点都集中在散点下方。综合考虑 $q_c - D_r$, $N - D_r$ (略)及 $q_c - N$ (略)等关系, 提出按表6估计沙漠砂密实程度。需要说明的是, 在进行沙漠砂压缩和三轴等土工试验时发现, 在制作小密度($D_r = 0.3$, 0.4)饱和样时都装不满, 无法制作小密度饱和砂样。为此表6中没有提出对应于 $D_r = 0.35$ 或 $D_r = 0.33$ 饱和砂样 q_c 值。

表6 用锥尖阻力估计沙漠密实度
Table 6 Estimation of desert sand compactness by the static point resistance

参数	状态及量值		
密实度描述	松散	中密	密实
相对密度 D_r	<0.35(0.33)	0.50	>0.65(0.67)
饱和砂锥尖阻力 q_c /MPa		6	>13(14)
非饱和砂锥尖阻力 q_c /MPa	<3(3)	8	>20(22)

注: 括号内的数字为规范确定砂土密实程度的界限值。

4.4 静探指标与压缩指标的关系

通过大型槽试验, 对比 q_c 与 E_s (压缩模量), E_0 (变形模量), $E_{0.01}$ (取 $S/d = 0.01$ 时对应 $P_{0.01}$ 所确定的模量) 关系发现, $q_c - E_{0.01}$ 相关系数较高, 其回归方程为

$$E_{0.01} = 1.4417 q_c + 8.741; r = 0.864 \quad (5)$$

指标统计范围: 含水量从风干至饱和, $q_c = 0.65 \sim 22.0$ MPa, $E_{0.01} = 6.6 \sim 43.6$ MPa。

根据铁道部第一设计院提出的用比贯入阻力 p_s 确定粉细砂变形模量公式^[7]:

$$E_0 = 3.5 p_s^{0.683 \ 6} \quad (6)$$

将式(2)转化成 $q_c - E_0$ 关系, 与式(5)比较发现: (1) 饱和砂 $E_{0.01}$ 在约 $q_c > 8.0$ MPa 以后相当大范围内均与铁一院公式基本吻合, 但在约 $q_c < 8.0$ MPa 时, 本文回归线比铁一院的公式偏大; (2) 非饱和砂 $E_{0.01}$ 比铁一院的公式高得多, 并且差值随 q_c 增加而增大; (3) 非饱和砂 $E_{0.01}$ 值按幂函数统计时, 约在 $q_c > 8.0$ MPa 以后, 比直线方程大; 在 $q_c < 8.0$ MPa 时, 比直线方程小。为此提出用锥尖阻力确定沙漠砂变形模量, 见表 7。

表 7 用锥尖阻力确定变形模量 $E_{0.01}$

Table 7 Determination of modulus of deformation $E_{0.01}$ by static point resistance

q_c /MPa	$E_{0.01}$ /MPa		q_c /MPa	$E_{0.01}$ /MPa	
	饱和砂	非饱和砂		饱和砂	非饱和砂
1	6.6		8	16.4	22.6
2	8.1		10	18.6	26
3	9.6		12	20.9	29.4
4	11.0	13.8	15	24.3	34.6
5	12.4	16.2	18	27.7	39.8
6	13.8	18.4	20	30	43.2
7	15.1	20.6	22		46.6

5 结 论

通过室内大型槽和中型槽静力触探模拟试验及相关土工试验的研究, 对塔克拉玛干沙漠砂的工程性质取得了规律性认识, 为在沙漠地区推广应用静力触探技术奠定了基础, 结论如下:

(1) 在大量试验资料基础上建立了沙漠砂静力触探指标与沙漠砂承载力的相关关系, 指出了国内现有规范用静探指标确定沙漠砂承载力的不足, 给出了可直接用于指导工程实践的表格。

(2) 通过分析大中槽试验和直剪试验, 建立了静探指标 q_c 与内摩擦角 φ 之间的回归方程, 为方便应用, 给出了锥尖阻力确定沙漠砂内摩擦角的数字化表格。

(3) 提出了用静探指标划分砂土密实程度的标准, 对比后指出国内现有的标准不适合沙漠砂。

(4) 通过探讨静探指标和压缩性指标相关关系, 提出了用 q_c 确定沙漠砂变形模量 $E_{0.01}$ 的表格。

本文建立的公式和数字化表格, 还有待于进一步在沙漠地基勘察实践中检验。

参 考 文 献

- [1] 杜学玲, 杨俊彪, 张喜发. 沙漠砂抗剪强度指标与原位测试指标关系研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 838—840.
DU Xue-ling, YANG Jun-biao, ZHANG Xi-fa. Research on relationships between shear strength index and in-situ indexes of desert sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(5): 838—840.
- [2] 杜学玲, 苏明, 张喜发. 沙漠砂抗剪强度指标及其与静力触探指标间的关系[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(5): 12—13.
DU Xue-ling, SU Ming, ZHANG Xi-fa. The relationship between shear strength of desert sand and index of cone penetration test[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2000, 27(5): 12—13.
- [3] 张喜发. 岩土工程勘察与评价[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 159—168.
- [4] JTJ240—97, 港口工程地质勘察规范[S].
- [5] 陈继成, 龚启昌. 静力触探单、双桥探头测 p_s , q_c 值的相关分析[J]. 工程勘察, 1985, 3(2): 44—45.
CHEN Ji-cheng, GONG Qi-chang. Correlation analysis for actual measurement values about single-probe p_s and double-probe q_c of cone penetration test[J]. **Geotechnical Investigation and Surveying**, 1985, 3(2): 44—45.
- [6] 刘辉, 张喜发, 张文殊. 沙漠砂承载力室内综合性原位测试模拟试验研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(2): 169—170.
LIU Hui, ZHANG Xi-fa, ZHANG Wen-shu. A comprehensive laboratory simulated testing of in-situ measuring on desert sand bearing capacity[J]. **Journal of Changchun University of Science and Technology**, 2001, 31(2): 169—170.
- [7] 唐贤强, 谢瑛, 文载奎. 地基工程原位测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993. 112—120.