

塔克拉玛干沙漠砂归一化性状研究及工程应用

水伟厚¹ 高广运¹ 韩晓雷² 姚仰平²

(1 同济大学地下建筑与工程系,上海,20092;2 西安建筑科技大学,西安,710055)

摘要 该文在对不同初始干密度的塔克拉玛干沙漠砂压缩试验结果进行分析的基础上,引入了一条归一化压缩曲线并定义了与之相对应的归一化因子。利用该归一化压缩曲线可计算不同初始干密度、不同应力范围下沙漠砂的压缩模量,并将其结果应用于沙漠地基的沉降计算。

关键词 沙漠砂 压缩试验 归一化压缩曲线 归一化因子 沉降分析

1 前言

塔克拉玛干沙漠位于塔里木盆地的中央,面积约 $33.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国最大的沙漠,世界上第二大流动性沙漠。自然条件极其恶劣,干旱少雨,多沙尘暴。然而该地区却蕴藏着极为丰富的石油天然气资源和矿产资源。正成为我国石油工业发展的重要战略接替区和重点勘探开发区,并且已在沙漠腹地建成了年产 250 万吨的大型整装油田——塔中四号油田^{[1][2][7]}。

在塔克拉玛干沙漠内进行油气田勘探和开采中,要为钻井井架修建基础,同时还要为油气田的开发利用修建永久性的建(构)筑物。例如,控制中心、职工公寓、火炬塔、压缩机(注水泵)等。如何在沙漠性场地中进行地基基础的设计计算是一个具有现实意义的问题。而在地基的沉降计算中则须用到沙漠砂的压缩曲线及压缩模量。沙漠砂在颗粒级配上的均匀性为压缩曲线的归一化提供了可能。根据归一化压缩曲线,再结合归一化因子可以较方便的计算不同初始干密度的沙漠砂在不同应力作用下的孔隙比,进而计算各种条件下沙漠砂的压缩模量,使设计中的沙漠地基沉降分析变得简单易行^{[2][7]}。

2 沙漠砂压缩试验概况

本文试验所用砂样取自塔克拉玛干沙漠塔中 404 井、塔中 16 排 10 井、塔中 4-7-H22 井、且北-1* 井。多项试验结果表明,沙漠砂比较均匀,不同点位的沙漠砂物理力学指标相差较小,故本试验结

果也具有一定的代表性。试验内容包括砂的压缩试验及相关的室内常规试验。压缩试验按中华人民共和国水利电力部颁发的《土工试验规程 SD-128-84》中关于压缩试验的有关规定进行。压缩试验仪器为南京土壤仪器厂生产的三联固结仪。试验统计结果表明:塔克拉玛干沙漠砂颗粒细小(粒径主要在 0.05~0.25 之间,最大粒径 $\leq 1 \text{ mm}$),多为粉砂,颗粒均匀,其不均匀系数在 3.0 左右,级配不好。沙漠砂比重变化范围很小,不同场地,不同深度的砂试样比重基本保持在 2.678 左右,常见的范围为 2.675~2.690。本次对塔克拉玛干沙漠腹地四个场地的沙漠砂分别进行了压缩试验,每个场地砂制备了较松、中密、较密三种试样,共制备试样十二组。荷载等级分为 $p = 50, 100, 200, 300 \text{ kPa}$,以求得在侧限条件下变形与压力或孔隙比与压力的关系。

砂样的初始孔隙比 e_0 按下式计算^[5]:

$$e_0 = \frac{d_s \cdot p_w}{p_d} - 1 \quad (1)$$

各级荷载下压缩稳定后的孔隙比 e 为:

$$e = \frac{H_p}{H_s} - 1 \quad (2)$$

式中: d_s ——砂粒比重,取 2.678;

p_d ——砂样初始干密度, g/cm^3 ;

p_w ——水的密度, g/cm^3 ;

收稿日期:2002.4.19

第一作者简介:水伟厚,男,1976年生,同济大学地下建筑与工程系博士生

H_0 ——砂样起始高度(等于环刀高度),mm;
 H_p ——每级荷载作用下砂样稳定后的高度,mm;
 H_s ——砂样中固体颗粒的理论累积高度,

$$H_s = \frac{H_0}{1 + e_0}, \text{mm};$$

另外,为满足某些特殊建(构)筑物地基沉降计算的要求,本文又进行了另外四组试验,荷载等级分别取为 $p = 50、100、200、300、400、500、600、700、800\text{kPa}$,以求得沙漠砂在高压作用下的变形与压力的关系。

3 沙漠砂试验结果及归一化压缩曲线

不同初始干密度沙漠砂在四级加载条件下的压缩试验如果见表 1,压缩试验压力范围:50~300kPa;砂样密度范围:1.356~1.647g/cm³;孔隙比范围:0.976~0.604。表 2 为沙漠砂在多级加载条件下 4 组不同初始干密度砂样的试验结果,压缩试验压力范围为:50~800kPa;砂样密度分别取为:1.356,1.500,1.647g/cm³;孔隙比范围为:0.975~0.597。

根据表 1 的试验数据作出的不同初始干密度砂

表 1 四级加载条件下的沙漠砂压缩试验结果

Table 1 Desert sand compression test result under 4 level pressure

p/kPa	$\rho_d/\text{g/cm}^3$											
	1.356	1.408	1.418	1.451	1.519	1.552	1.575	1.579	1.599	1.621	1.625	1.647
0	0.976	0.902	0.902	0.844	0.763	0.726	0.701	0.696	0.674	0.652	0.648	0.626
50	0.942	0.891	0.891	0.833	0.750	0.714	0.690	0.685	0.664	0.644	0.639	0.617
100	0.932	0.886	0.886	0.828	0.744	0.709	0.685	0.680	0.660	0.640	0.635	0.613
200	0.921	0.878	0.878	0.822	0.737	0.702	0.680	0.672	0.634	0.634	0.630	0.680
300	0.914	0.873	0.873	0.818	0.732	0.698	0.676	0.668	0.652	0.631	0.627	0.604

表 2 多级加载条件下的沙漠砂压缩试验的孔隙比

Table 2 e of desert sand compression test under multi-level pressure

p/kPa	$\rho_d/\text{g/cm}^3$			
	1.356	1.500	1.500	1.647
0	0.9750	0.7850	0.7850	0.6260
50	0.9670	0.7760	0.7780	0.6210
100	0.9620	0.7700	0.7730	0.6170
200	0.9540	0.7620	0.7660	0.6610
300	0.9490	0.7570	0.7620	0.6080
400	0.9440	0.7530	0.7580	0.6050
500	0.9400	0.7490	0.7550	0.6020
600	0.9370	0.7470	0.7530	0.6000
700	0.9340	0.7440	0.7510	0.5990
800	0.9320	0.7420	0.7590	0.5970

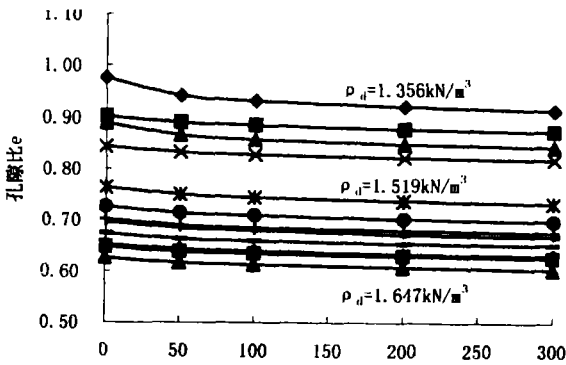


图 1 沙漠砂试验压缩曲线

Fig 1 Compression curves of desert sand test

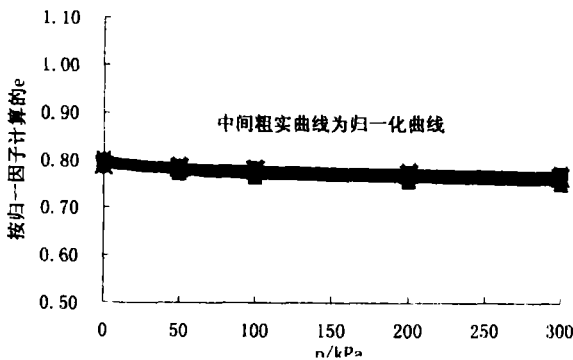


图 2 不同初始干密度下的误差分析图
(孔隙比最大误差 0.0152)

Fig 2 Error analysis curve under different initialize rd
(Maximal error of e is 0.0152)

样的孔隙比(e)与压力(p)的关系曲线如图 1 所示。从图 1 可以直观看出沙漠砂压缩的一些规律:压缩曲线基本平行;密度至上而下逐渐增大;在 0~300kPa 的压力范围内同一初始干密度的沙漠砂其孔隙比变化范围不大。以上规律为将不同初始干密度的沙漠砂压缩曲线归一化提供了可能性。图 2 中的相应于 $\rho_d = 1.500\text{g/cm}^3$ 的粗实线即为沙漠砂归一化压缩曲线,该曲线是将不同密度沙漠砂的一簇压缩曲线经归一化后所得的一条压缩曲线。由图 2 可以看出,该归一化压缩曲线基本与各初始干密度沙漠砂的压缩曲线平行。为研究该归一化压缩曲线(见图 3),定义其孔隙比为 \bar{e} ,则对应于某一初始干

密度沙漠砂在一定压力下的孔隙比 e 可表示为:

$$e = \beta \cdot \bar{e} \quad (3)$$

式中: β ——给定初始干密度沙漠砂压缩曲线的归一化因子,由下式计算^[4]

$$\beta = -1.50\rho_d + 3.25 \quad (4)$$

例如:求 $\rho_d = 1.451 \text{ kN/m}^3$ 的砂样在 300kPa 压力下的孔隙比 e , 则:

$$e = \beta \cdot \bar{e} = (-1.50 \times 1.451 + 3.25) \cdot 0.7647 \approx 0.8209$$

式中: \bar{e} ——由归一化压缩曲线查得的所求压力作用下的归一化孔隙比。

对最终加载压力为 800kPa 的多级加载压缩试验,根据表 2 的试验数据,分别作出不同初始干密度砂样的孔隙比 e 与压力 p 的关系曲线如图 4 所示。从图 4 可以直观看出沙漠砂在高压 ($p = 300 \sim 800 \text{ kPa}$) 下的压缩规律与低压下的压缩规律基本上相同。

图 5 中的相应于 $\rho_d = 1.500 \text{ g/cm}^3$ 的粗实线即为沙漠砂在多级加载条件下的归一化压缩曲线。由图 5 可以看出,该归一化压缩曲线也基本与各不同初始干密度沙漠砂的压缩曲线平行。按与前相同的方

法定义归一化压缩曲线的孔隙比为 \bar{e} (见图 6), 该曲线将不同初始干密度沙漠砂的一簇压缩曲线也归一化为一条压缩曲线。则对应于某一初始干密度的沙漠砂在一定压力下的孔隙比 e 仍可用公式(3)计算。

4 用归一化压缩曲线进行地基沉降分析

沙漠中某 10000 m^3 金属油罐,罐底直径 30.02m, 罐高约 15m。根据工程地质勘探的结果,近似取 $\rho_d = 1.500 \text{ g/cm}^3$ 。现用分层总和法计算该油罐基础的沉降量,其中的压缩模量 E_s 由归一化压缩曲线得出。

计算结果如表 3 所示,若每层取 1m,在第 19 点处,(即 19m 处)

$$S_n = 2.67 \text{ mm} \leq 0.025 \sum_{i=1}^{19} \Delta S_i = 2.83 \text{ mm}$$

故确定计算深度为 19m。

由计算所得的 \bar{E}_s (\bar{E}_s 为沉降计算深度范围内压缩模量的当量值)确定沉降计算系数

$\Psi_s = 0.1$ (为根据沙漠砂特性提出的系数)。则可得地基最终沉降量^{[3][6]}:

表 3 用归一化压缩曲线计算油罐基础的沉降量

Table 3 Foundation settlement calculated by normalization compression curves

分层厚度 /m	计算深度 /m	自重应力 /kPa	附加应力 /kPa	自重+附加应力 /kPa	孔隙比 e_1	孔隙比 e_2	压缩模量 /MPa	平均附加应力系数	第 i 层土沉降量 /mm	沉降量 /mm
0	0	0	0.0	0.0				1.0000	0.0000	0.00
1	1	15	141.9	156.9	0.7885	0.7720	15.4	1.0000	9.2321	9.23
1	2	30	141.5	171.5	0.7860	0.7700	15.8	0.9993	8.9776	18.21
1	3	45	140.9	180.9	0.7830	0.7690	16.6	0.9980	7.8768	26.09
1	4	60	139.4	199.4	0.7825	0.7685	16.7	0.9947	7.8790	33.97
1	5	75	137.3	212.3	0.779	0.7675	17.8	0.9907	6.7979	40.76
1	6	90	134.8	224.8	0.7780	0.7660	18.2	0.9860	6.8430	47.61
1	7	105	131.2	236.2	0.7765	0.7645	19.4	0.9780	6.7991	54.41
1	8	120	127.2	247.2	0.7750	0.7630	19.8	0.9694	6.8619	61.27
1	9	135	122.7	257.7	0.7740	0.7625	19.9	0.9601	6.6447	67.91
1	10	150	117.7	267.7	0.7725	0.7615	20.0	0.9480	6.2825	74.19
1	11	165	112.6	277.6	0.7705	0.7605	20.9	0.9358	5.7966	79.99
1	12	180	107.4	287.4	0.7690	0.7595	21.0	0.9231	5.5624	85.55
1	13	195	102.2	297.2	0.7685	0.7590	22.0	0.9085	5.4732	91.03
1	14	210	97.0	307.0	0.7675	0.7592	23.7	0.8935	4.8018	95.83
1	15	225	91.8	316.8	0.7655	0.7590	24.9	0.8782	3.7815	99.61
1	16	240	87.0	327.0	0.7645	0.7580	25.6	0.8628	3.7998	103.41
1	17	255	82.3	337.3	0.7630	0.7570	26.3	0.8472	3.8026	107.21
1	18	270	77.7	347.7	0.7615	0.7560	27.9	0.8312	3.1909	110.40
1	19	285	73.5	358.5	0.7600	0.7555	28.7	0.8159	2.6699	113.07

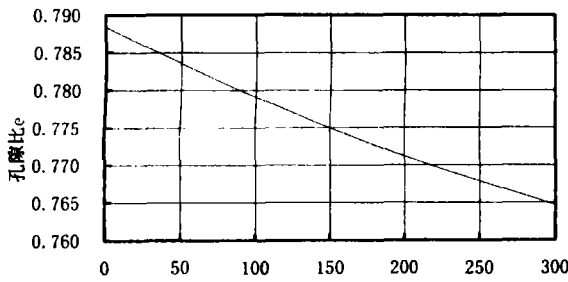


图 3 沙漠砂归一化压缩曲线

Fig 3 Normalization compression curves of desert sand

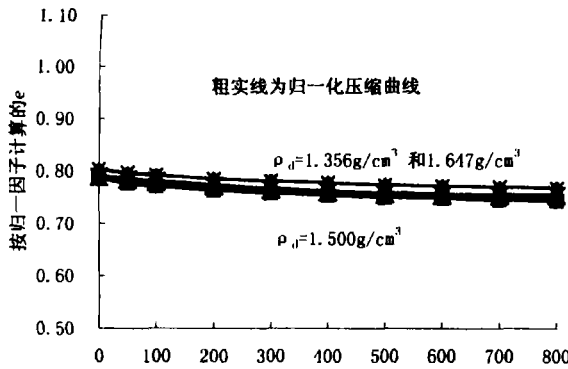


图 5 误差分析图(孔隙比最大误差 0.0161)

Fig 5 Error analysis curve (Maximal error of e is 0.0161)

$$s = \Psi_s \cdot s = \Psi_s \sum_{i=1}^{16} \frac{P_0}{E_{si}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1})$$

$$= 0.1 \times 113.07 \approx 11\text{mm}$$

由大庆油田设计研究院实测得 10000m³ 金属油罐各点平均累计沉降量为 6.13mm,最大沉降差为 3.00mm。从上述结果可以看出,计算值稍大于实测值。

5 结论

本文通过对塔中油田区域具有不同初始干密度沙漠砂的压缩试验结果进行分析,发现其在 c~p 空间,在应力范围为 50kPa~800kPa 下沙漠砂的压缩曲线具有大体平行的特点。基于此,本文建立了沙漠砂的归一化压缩曲线。从而可以根据现场标准贯入试验所得的标准贯入击数确定地基土不同深度所对应的初始干密度,再由归一化压缩曲线计算出相应初始干密度砂层的压缩曲线,进而进行沉降计算。所得结果可供在粒径、干重度相差不大的塔克拉玛

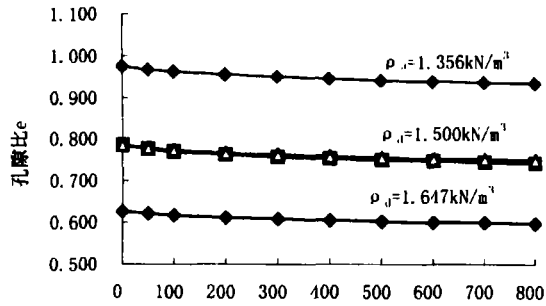


图 4 沙漠砂试验压缩曲线

Fig 4 Compression test curves of desert sand

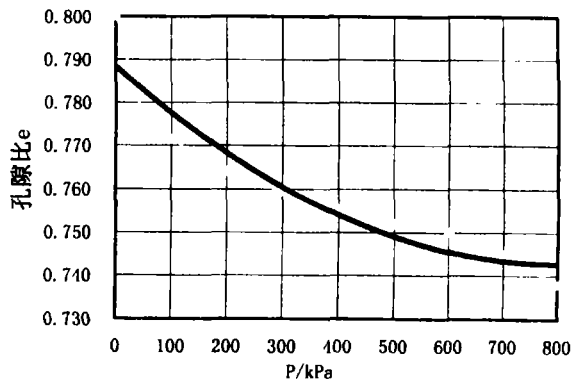


图 6 沙漠砂的归一化压缩曲线

Fig 6 Normalization compression curves of desert sand

干沙漠油田其它区域和其它沙漠上工程设计计算沉降时参考。

参考文献

- [1]朱腾明,张万昌等.塔中油田沙漠砂动力特性试验研究.[J].岩土工程学报,1998,Vo120(3):94-101.
- [2]邵生俊,林颂恩.塔克拉玛干沙漠腹地岩土工程性质的初步揭示与分析.[J].岩土工程学报,1997,Vo119(4):94-99.
- [3]建筑地基基础设计规范(GBJ7-89).[S].北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [4]Wang J Y. Data processing methodology in characterization of the mechanical properties of terrain.[J].Terramechanics, 1980, 17 (1).
- [5]土工试验规程(SDS-128-84).[S].北京:中国水利水电出版社,1984.
- [6]华南理工大学,东南大学,浙江大学,湖南大学等编.地基及基础.[M].第2版.北京:中国建筑工业出版社,1991.
- [7]姚正毅,徐广庭等.沙漠地区不良工程地质现象.[J].中国沙漠,Vo120(3),2000,269-272.

(下转 46 页)

- [2] 黄强, 桩基工程若干热占技术问题. 北京: 中国建材工业出版社, 1996
- [3] 上海岩土工程勘察设计研究院. 上海地区密集群桩沉降计算与承载力研究报告. 上海, 1999
- [4] 巴居兰·弗. 旁压仪和基础工程. 卢世深译. 北京: 人民出版社, 1984
- [5] 彭柏兴. 利用旁压试验确定软弱裂隙岩体的容许承载力. 勘察科学技术. 1997, 2: 32 ~ 36
- [6] J·Kruizinga. Bearing capacity of a test pile compared with predictions from pressuremeter rules. Proceedings of 12th International Conference on Soil and Foundation Engineering, Rio De Janeiro, 13 - 18, 1989, V. 2. 1155 - 1158
- [7] 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994
- [8] 地基基础设计规范, 上海, 1999

Determination of Bearing Capacity of Single Pile in Shanghai Soft Soil with Pressuremeter Test

Yang Shifei

(Department of Geotechnical Science and Engineering, Tongji University)

Gu Guorong

(Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute)

Dong Jianguo

(Department of Geotechnical Science and Engineering, Tongji University)

Abstract: More than 30 pressuremeter test (PMT) and 133 groups of pile load tests data from Shanghai is collected. After statistical analysis and comparison, a method to determine vertical bearing capacity of single pile is proposed, which is universally applicable and may be a good complement of statically loading test. In addition, bearing capacity of single pile by PMT and CPT method from 379 groups of test is compared to show that there is good coincidental relationship between these two methods.

Key Words: Pressuremeter Test (PMT), Bearing Capacity of Single Pile, Static Cone Penetration Test (CPT)

(上接第 40 页)

Normalization Compression Curves of Taklimakan Desert Sand and Its Application

SHUI Wei - hou¹ Gao guang - yun¹ HAN Xiao - lei² YAO Yang - ping²

(1 Dep. of Geotech. Eng. Tongji University, Shanghai, 200092;

2 Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055)

Abstract: On the basis of analysis of the compression test results on Taklimakan desert sand with different initial dry density, we introduced the Normalization compression curve. We can calculate compressibility modulus of the desert sand from this Normalization compression curve and apply it to the settlement computation of desert foundation.

Key words: desert sand; compression test; normalization compression curve; normalization factor; settlement analysis