

# 塔克拉玛干沙漠砂归一化压缩曲线 及其工程应用

姚仰平, 韩晓雷, 水伟厚

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 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

中图分类号: TU 444 文献标示码: A 文章编号: 1006-7930(2000)04-0317-04

## Normalization compression curve of Taklamakan Desert sand and its application

YAO Yang-ping, HAN Xiao-lei, SHUI Wei-hou

(School of Civil Eng., Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract** On the basis of analysis of the compression test results on Takla Makan desert sand with different initial dry density, the normalization compression curve is introduced and compressibility modulus of the desert sand from this Normalization compression curve can be calculated and applied to the settlement computation of desert foundation.

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

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。

### 1 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。西安建筑科技大学所进行的多项试验结果表明, 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水电部颁发的《土工试验规程 SD-128-84》中关于压缩试验的有关规定进

收稿日期: 2000-06-15

作者简介: 姚仰平(1961-), 男, 陕西蓝田人, 西安建筑科技大学教授, 博士后。

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

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 mm 之间, 最大粒径 $\leq 1$  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  $p=50, 100, 200, 300$  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:

$$e_0 = \frac{d_s \cdot d_w}{d_t} - 1 \quad (1)$$

各级荷载下压缩稳定后的孔隙比  $e$  为

$$e = \frac{H_0}{H_s} - 1 \quad (2)$$

式中:  $d_s$ ——砂粒比重, 取 2.678;

$d_t$ ——砂样初始干密度,  $g/cm^3$ ;

$d_w$ ——水的密度,  $g/cm^3$ ;

$H_0$ ——砂样起始高度(等于环刀高度), mm;

$H_s$ ——每级荷载作用下砂样稳定后的高度  $H_s = \frac{H_0}{1+e_0}$ , 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  $p=50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800$  kPa, 以求得沙漠砂在高压作用下的变形与压力的关系.

## 2 沙漠砂压缩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结果见表 1, 压缩试验压力范围: 50~300 kPa; 砂样密度范围: 1.356~1.647  $g/cm^3$ ; 孔隙比范围: 0.976~0.604.

表 1 四级加载条件下的沙漠砂压缩试验的孔隙比

$p$ / kPa	$d/(g \cdot cm^{-3})$											
	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	0.608
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 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: 50~800 kPa; 砂样密度分别取为: 1.356, 1.500, 1.647  $g/cm^3$ ; 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 0~300 kPa 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等. 以上规律为将不同初始干密度的沙漠砂压缩曲线归一

表 2 多级加载条件下的沙漠砂压缩试验的孔隙比

$p$ / kPa	$d/(g \cdot cm^{-3})$			
	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	0.6110
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

化提供了可能性. 图 2 中的相应于  $d_{10} = 1.500 \text{ g/cm}^3$  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  $e$ , 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:

$$e = U \cdot \bar{e} \tag{3}$$

式中:  $U$ ——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:

$$U = -1.50d_{10} + 3.25 \tag{4}$$

例如: 求  $d_{10} = 1.451 \text{ kN/m}^3$  的砂样在  $300 \text{ kPa}$  压力下的孔隙比  $e$ , 则:

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

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  $800 \text{ kPa}$  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.

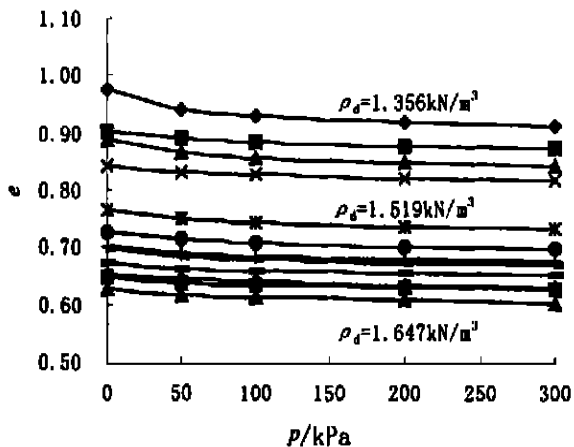


图 1 沙漠砂压缩曲线

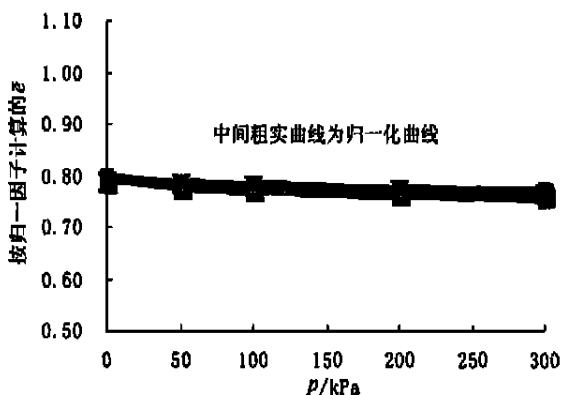


图 2 不同初始干密度下的误差分析图 (孔隙比最大误差 0.0152)

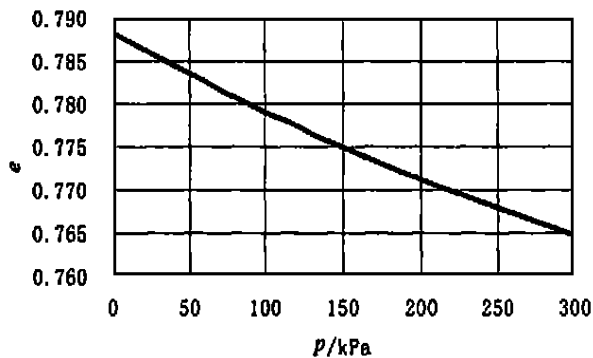


图 3 沙漠砂归一化压缩曲线

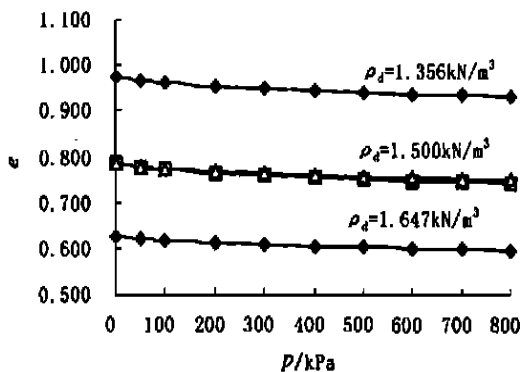


图 4 沙漠砂压缩曲线

图 5 中的相应于  $d_{10} = 1.500 \text{ g/cm}^3$  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.

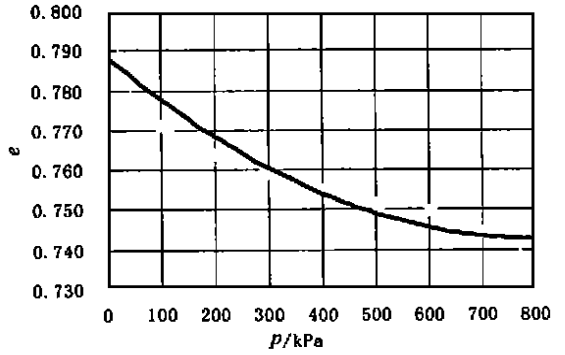
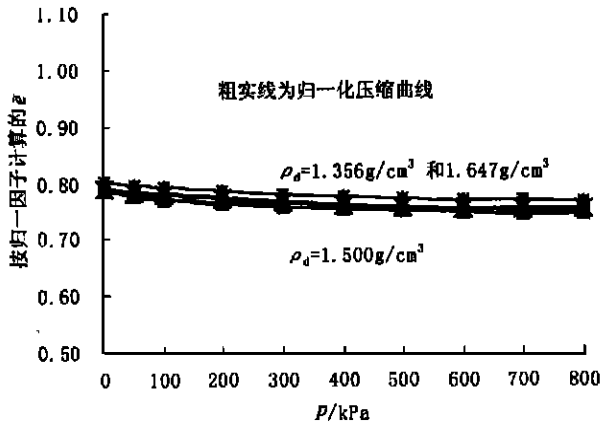


图 5 误差分析图 (孔隙比最大误差 0.0161)

图 6 沙漠砂的归一化压缩曲线

### 3 用归一化压缩曲线进行地基沉降分析

沙漠中某 10 000 m<sup>3</sup> 金属油罐,罐底直径 30.02 m,罐高约 15 m.根据工程地质勘探的结果,近似取  $d_{10} = 1.500 \text{ g/cm}^3$ .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.

表 3 用归一化压缩曲线计算油罐基础的沉降量

分层厚度	计算深度	自重应力	附加应力	自重+附加应力	孔隙比 $e_1$	孔隙比 $e_2$	压缩模量	平均附加应力系数	第 $i$ 层土沉降量	沉降量
/m	/m	/kPa	/kPa	/kPa			/MPa		/mm	/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	185.9	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	0.7795	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

(下转第 370 页)

经典的边缘检测算法不仅不够精确,而计算量大,对噪声的敏感程度也远远高于小波变换的算法;

(2) 利用小波的多尺度空间信息,识别图像边缘特性的能力比高斯尺度空间强.由于小波变换有多尺度的特点,可以利用多尺度特性,通过细节和粗节的逼近,将图像的空间信息较好的描述,与传统的和经典的边缘检测算法相比,在识别边缘特征方面,强于它们.

(3) 在边缘和噪声的取舍中,由于二者均为高频信号,很难用频带划分.小波变换的方法,使得在大尺度下抑制噪声,小尺度下,得到边缘的真实位置;而传统的和经典的边缘检测算法则在此问题上不能提供有效的解决办法.

参考文献:

- [1] 美 崔锦泰. 小波分析导论 [M]. 程正兴译. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [2] 美 崔锦泰. 多元样条理论及应用 [M]. 程正兴译. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [3] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [4] JOY G, XIAN G Zhi-gang. Reducing false contours in quantized color images [J]. Computer & Graphics, 1996, 20 (2): 231-242.
- [5] HERBERT P. Color image quantization for buffer display [J]. Computer & Graphics, 1998, (16): 297-307.
- [6] DEMIRER M, GRIMSDALE R L. Approximation techniques for high performance texture mapping [J]. Computer & Graphics, 1996, (20): 483-490.
- [7] CASTILEMEN K R. Digital image processing [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [8] 高峻斌. Matlab 5.0 语言与程序设计 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1998.
- [9] 郑南宁. 计算机视觉 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.

(上接第 320 页)

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

$$S_n = 2.67 \text{ mm} \leq 0.02 \sum_{i=1}^{19} \Delta S_i = 2.83 \text{ mm}$$

故确定计算深度为 19 m.

由计算所得的  $E_s$  ( $E_s$  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  $J_s = 0.1$  (为根据沙漠砂特性提出的系数). 则可得

地基最终沉降量:

$$S = J_s \cdot S = J_s \sum_{i=1}^{16} \frac{P_0}{E_{si}} \left( Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1} \right) = 0.1 \times 113.07 \approx 11 \text{ mm}$$

由大庆油田设计研究院实测得  $10\ 000 \text{ m}^3$  金属油罐各点平均累计沉降量为  $6.13 \text{ mm}$ ,最大沉降差为  $3.00 \text{ mm}$ . 从上述结果可以看出,计算值稍大于实测值.

## 4 结论

本文通过对具有不同初始干密度塔克拉玛干沙漠砂的压缩试验结果进行分析,发现其在  $e-p$  空间,在应力范围为  $50 \sim 800 \text{ kPa}$  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.

参考文献:

- [1] 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, (4): 94-99.
- [2] GB 7-89,建筑地基基础设计规范 [S].
- [3] SDS-128-84,土工试验规程 [S].
- [4] 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.