

风成砂的室内静力试验研究

王 健 任宝珍

骆筱菊

(冶金部秦皇岛冶金设计研究院 060001) (河北农业大学 保定 071001)

【摘要】 本文对风成砂进行了室内常规试验, 分别对饱和和干燥状态的砂进行了静力三轴试验。采用回归分析的方法对三轴试验数据进行了处理。结果表明: 风成砂的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon\%$ 曲线完全符合邓肯——张非线性变形模式。

【Abstract】 Routine laboratory tests are done for blown sand, static—triaxial test is done for dry and saturated sand. The triaxial test data have been treated using regressive analysis method. It is stated clearly that the $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon\%$ curve of blown sand fits closely with the Duncan-chang non-linear model.

0 前言

我国风成砂分布面积很大, 据最新资料介绍已超过 100 万 km^2 , 约占我国国土面积的十分之一。面积近 33.4 万 km^2 的塔克拉玛干沙漠, 属于世界第二大沙漠。随着我国石油天然气资源的开发, 对塔克拉玛干沙漠腹地风成砂的工程地质特性研究已势在必行。

从所进行的勘察成果来看, 沙漠腹地地表以下 0 ~ 20m 深度范围内全部由风积粉细砂构成, 颗粒均匀, 不含粘粒及粗砂, 从地表向下砂土的密实度逐渐增大 (除个别情况外) 由松散、稍密、中密过渡到密实。

本文对风成砂进行了室内常规试验, 并对干燥及饱和状态的砂分别做了静力三轴试验, 采用非线性拟合方法进行数据处理, 找到了符合风成砂应力—应变关系的最佳模式。

1 物性试验

在地层内不同埋深处取试样做筛分试验, 试验结果见图 1, 根据《建筑地基基础设计规范》GBJ7—89 关于砂土的分类标准, 应定名为细砂。从图 1 可见基本上不含粘粒和粗砂, 粒度非常均匀。

另外, 对满参*试验场地的表层砂测定了比重、天然重度、天然含水量、天然孔隙

比、相对密实度及压缩模量。其结果比重为 2.65; 天然重度为 $1.50 \sim 1.54 \text{g/cm}^3$, 平均 1.51g/cm^3 ; 天然含水量 (风干) 为 $2.0\% \sim 2.5\%$, 平均 2.2% ; 天然孔隙比为 $0.802 \sim 0.764$, 平均为 0.794 ; 相对密实度 D_r 为 $0.62 \sim 0.71$, 平均 0.65 ; 压缩模量 E_c 为 $9.8 \sim 10.6 \text{MPa}$, 平均为 10.1MPa , E_s 在 $5.0 \sim 15.0 \text{MPa}$ 之间属于中等压缩性土。

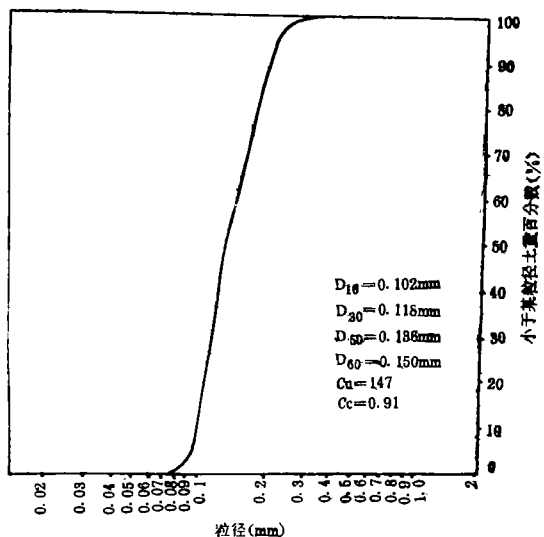


图 1 颗粒组成曲线图

2 干砂静三轴试验数据分析

对于干砂制样相对密实度为 0.65, 采用

*——为沙漠中的名

固结快剪试验方法, 施加的围压分别为: 100、200、400、600、800、950、1000kPa。

通过做出的三轴试验应力圆及抗剪强度曲线可以得到强度指标: $c_{ca} = 0$, $\varphi_{ca} = 37.8^\circ$ 。

由试验数据绘制的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon\%$ 曲线来看: 当 ε 到达5%~7%时, 土样基本上破坏; 当 ε 小于3%时, $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon\%$ 曲线近似为一条直线。从曲线的形状来看近似符

合指数曲线及双曲线模式。为了找到最佳模式, 先消除量纲的影响, 将 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 分别除以 σ_3 及 σ_0 ($\sigma_0 = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$) 得到 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3 - \varepsilon\%$ 曲线及 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0 - \varepsilon\%$ 曲线绘成图, 结果发现: $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0 - \varepsilon\%$ 曲线离散范围小, 规律性较强。于是将 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0 - \varepsilon\%$ 实测数据分别按指数曲线及双曲线两种模式进行拟合分析。干砂静力三轴试验数据见表1。

表1 干砂静力三轴试验数据一览表

σ_3 (kPa)	参 数	序 号															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
100	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	77.1	135.0	170.4	196	213	224	232	239	244	247	249	250	253	254	255	
	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0$	0.61	0.93	1.09	1.19	1.25	1.28	1.31	1.33	1.35	1.35	1.36	1.36	1.37	1.38	1.38	
	ε	0.25	0.75	1.50	2.51	3.51	4.31	5.52	6.52	7.50	8.53	9.53	10.03	11.03	12.04	13.55	
200	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	183	276	359	482	569	624	661	675	683	691	698	706	699	698		
	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0$	0.70	0.96	1.12	1.34	1.46	1.53	1.57	1.59	1.60	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	
	ε	0.51	1.02	1.52	2.54	3.56	4.57	5.59	6.10	6.61	7.12	7.62	8.26	8.64	9.15		
400	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	377	563	720	924	1039	1111	1163	1182	1188	1194	1195	1190				
	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0$	0.72	0.96	1.13	1.31	1.39	1.44	1.48	1.49	1.49	1.50	1.50	1.49				
	ε	0.52	1.03	1.55	2.58	3.61	4.63	5.68	6.19	6.71	7.23	7.74	8.26				
600	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	594	913	1162	1342	1577	1743	1840	1868	1896	1911	1925	1927	1929	1925		
	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0$	0.74	1.01	1.18	1.28	1.40	1.48	1.52	1.53	1.53	1.54	1.55	1.55	1.55	1.55		
	ε	0.52	1.03	1.55	2.07	3.10	4.13	5.16	5.68	6.20	6.71	7.23	7.75	8.26	8.78		
800	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	629	1044	1216	1721	2023	2213	2344	2434	2492	2536	2556					
	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0$	0.62	0.91	1.01	1.25	1.37	1.44	1.48	1.51	1.53	1.54	1.55					
	ε	0.51	1.03	1.29	2.31	3.34	4.37	5.40	6.43	7.46	8.49	9.52					
1000	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	706	1092	1397	1647	1999	2230	2414	2553	2655	2727	2781	2820	2842	2860	2873	2862
	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0$	0.57	0.80	0.95	1.06	1.20	1.28	1.34	1.38	1.41	1.43	1.44	1.45	1.46	1.46	1.47	1.46
	ε	0.51	1.02	1.52	2.03	3.05	4.07	5.08	6.10	7.12	8.26	9.15	10.17	11.18	12.20	13.21	14.23

2.1 指数曲线拟合

指数曲线公式形式为:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_0} = \mu [1 - \exp(-\beta \cdot \varepsilon)]$$

拟合结果见表2、图2、图3。

表2 干砂指数曲线拟合参数

应力 σ_3 (kPa)	μ	β	r	Q
100	1.326	1.689	0.940	7.65×10^{-2}
200	1.589	0.874	0.985	3.24×10^{-2}
400	1.473	1.037	0.984	2.28×10^{-2}
600	1.527	1.029	0.985	2.46×10^{-2}
800	1.507	0.871	0.991	1.78×10^{-2}
1000	1.426	0.729	0.982	4.09×10^{-2}
200,400,600,800	1.529	0.940	0.976	1.748×10^{-1}
100,200,400,600,800,1000	1.464	0.981	0.927	8.07×10^{-1}

注： μ 为 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_0$ 的极值， β 为衰减指数， r 为相关系数， Q 为误差平方和。

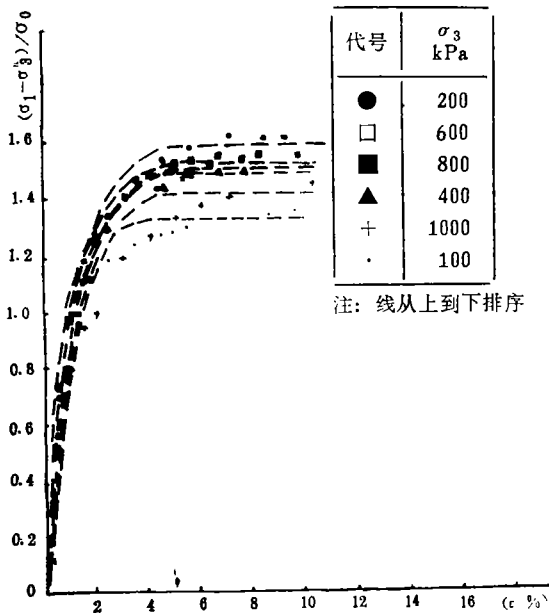


图2 干砂静三轴试验数据指数曲线拟合

2.2 双曲线拟合

双曲线公式形式为：

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_c} = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1}$$

拟合结果见表3、图3、图4。

对相关系数 r 进行检验，对各应力水平下的 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c - \epsilon\%$ 试验数据都满足双曲线拟合方程，回归效果高度显著。

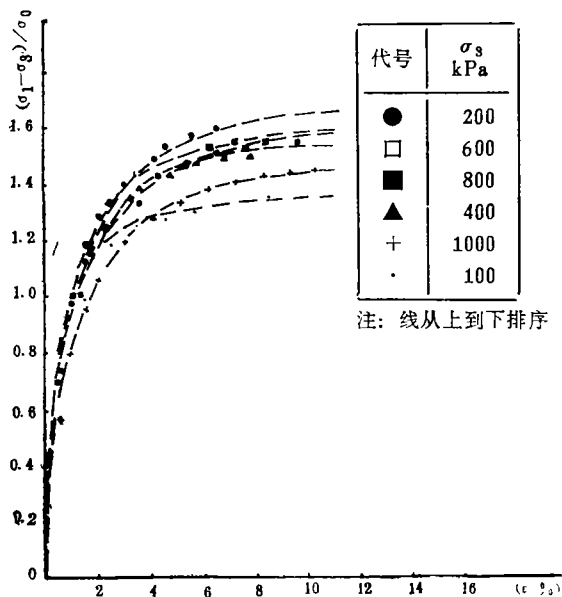


图3 干砂静三轴试验数据双曲线拟合

对相关系数 r 进行检验， r 均大于0.92，采用检验水平 $a = 0.01$ ，经检验对各应力水平下的试验数据都满足指数曲线模式，回归效果高度显著。

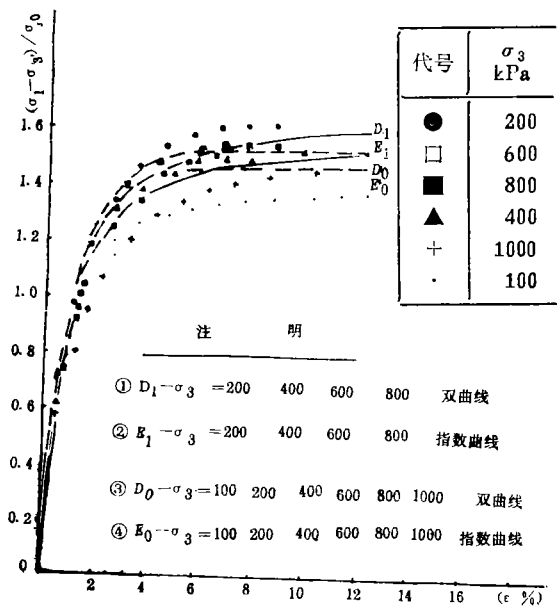


图4 干砂静三轴试验综合数据指数曲线双曲线拟合

表 3 干砂双曲线拟合参数

σ_3 (kPa)	a	b	r	Q
100	0.2662	0.7118	0.9952	6.21×10^{-3}
200	0.4723	0.5588	0.9978	4.78×10^{-3}
400	0.4198	0.6083	0.9984	2.32×10^{-3}
600	0.3966	0.5901	0.9985	2.41×10^{-3}
800	0.5178	0.5831	0.9993	1.33×10^{-3}
1000	0.6140	0.6307	0.9989	2.53×10^{-3}
200, 400, 600, 800	0.4132	0.5939	0.9766	2.04×10^{-1}
100, 200, 400, 600, 800, 1000	0.4207	0.6223	0.9368	7.06×10^{-1}

注: r 为相关系数, Q 为误差平方和, a 及 b 为双曲线公式参数。

2.3 评价

这两种模式相关系数 r 都很高。在单独数据(σ_3 分别为100, 200, 400, 600, 800, 1000kPa)分析时, 指数曲线模式相关系数为0.927~0.982, 平均为0.971; 而双曲线模式相应值为0.995~0.999, 平均0.998; 从误差平方和 Q 来看: 双曲线模式所计算的 Q 值约为指数曲线相应值的十分之一。综合数据分析时, 两种模式的相关系数及误差平方和比较接近。

从图1中也可看出: 双曲线模式的计算与实测值在试样破坏前是非常吻合的; 而指数曲线上曲率最大的地方, 计算值与实测值偏离很大。

由此说明, 对于风成干砂非常适合双曲线非线性变形模式, 即邓肯-张模式。

2.4 邓肯-张模式的几个参数

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (4-1)$$

式(4-1)可改写成:

$$\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) = a + b\varepsilon_1 \quad (4-2)$$

不难得出

$$E_t = \frac{a}{(a + b\varepsilon_1)^2}$$

$$E_t = 1/a$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{1}{b}$$

E_t 为切线模量; E_{it} 为初始切线模量; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为 ε_1 趋于无限时的渐近线, 由于三轴试验轴向应变总是有限的, 故应力一应变曲线总是位于该渐近线之下, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 总是略高于土样破坏时的强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 令二者之比为 R_f , 即

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (4-3)$$

R_f 称为破坏比, 对不同的土约在0.75~1.0之间, 根据莫尔-库伦破坏准则, 可得

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4-4)$$

$$E_t = k Pa \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^n \quad (4-5)$$

式中: Pa 为大气压力, 依次与 σ_3 相同; k 、 n 为试验常数, 其值与土的种类、密度和应力条件有关。

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_t \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]} \quad (4-6)$$

对于砂土只需确定六个参数 a 、 b 、 k 、 n 、 c 、 φ 、 R_f 可由 c 、 φ 、 σ_3 、 b 四个参数来确定。对于风成砂邓肯-张模式有关参数列于表4。

3 饱和砂静三轴试验分析

对于饱和砂, 制样固结后相对密度达

表 4 邓肯-张模式参数一览表

风成细砂, 试样相对密实度为0.65								K (kPa)	n	c _{co} (kPa)	φ _{co} (°)
干 砂	σ ₃ (kPa)	100	200	400	600	800	950	272	0.926	0	37.8
	a(10 ⁻⁶ kPa ⁻¹)	32.34	23.33	10.28	6.39	6.16	4.04				
	b(10 ⁻⁴ kPa ⁻¹)	36.96	11.19	6.89	4.30	3.21	2.96				
	E _i (10 ⁻³ kPa)	30.92	42.87	97.25	156.5	162.3	247.3				
	R _f		0.73	0.87	0.84	0.84	0.92				
饱 和 砂	σ ₃ (kPa)	100	200	400	600	800	1000	434	0.591	78 (假)	38.3
	a(10 ⁻⁶ kPa ⁻¹)	25.14	12.72	11.40	7.89	3.95	5.90				
	b(10 ⁻⁴ kPa ⁻¹)	12.85	7.35	4.70	3.64	3.02	2.17				
	E _i (10 ⁻³ kPa)	39.8	78.6	87.7	127.0	253.1	169.4				
	R _f	0.83	0.72	0.76	0.83	0.88	0.78				

注: “假”为假粘聚力

表 5 饱和砂静力三轴试验数据

q(kPa)	参 数	序 号																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	(σ ₁ -σ ₃)	143	169	207	245	283	319	371	422	471	504	531	553	570	587	588	597	594	
	(σ ₁ -σ ₃)/σ ₀	0.97	1.08	1.23	1.35	1.46	1.55	1.66	1.75	1.83	1.88	1.92	1.95	1.97	1.99	1.99	2.00	1.99	
	e	0.25	0.51	0.76	1.01	1.27	1.52	2.03	2.53	3.04	3.55	4.05	4.56	5.07	5.57	6.08	6.59	7.09	
200	(σ ₁ -σ ₃)	217	323	413	502	557	608	710	785	859	919	996	999	1032	1052	1059	1058		
	(σ ₁ -σ ₃)/σ ₀	0.80	1.05	1.22	1.37	1.44	1.51	1.63	1.70	1.77	1.82	1.87	1.87	1.90	1.91	1.92	1.92		
	e	0.26	0.51	0.77	1.02	1.28	1.54	2.06	2.57	3.08	3.60	4.11	4.63	5.14	5.65	6.17	6.68		
400	(σ ₁ -σ ₃)	237	374	603	733	809	934	1072	1169	1252	1337	1416	1459	1525	1550	1584	1587	1590	
	(σ ₁ -σ ₃)/σ ₀	0.50	0.71	1.00	1.14	1.21	1.31	1.42	1.48	1.53	1.58	1.62	1.65	1.68	1.69	1.71	1.71	1.71	
	e	0.26	0.51	1.02	1.28	1.53	2.04	2.55	3.06	3.57	4.08	4.59	5.11	5.62	6.13	6.64	7.15	7.66	
600	(σ ₁ -σ ₃)	382	544	705	866	971	1130	1298	1449	1589	1713	1808	1877	1944	1998	2051	2078	2092	2098
	(σ ₁ -σ ₃)/σ ₀	0.53	0.70	0.84	0.97	1.05	1.16	1.26	1.34	1.41	1.46	1.50	1.53	1.56	1.58	1.60	1.61	1.61	1.62
	e	0.26	0.52	0.78	1.04	1.30	1.56	2.07	2.59	3.11	3.63	4.15	4.67	5.19	5.70	6.22	6.74	7.26	7.78
800	(σ ₁ -σ ₃)	521	883	1166	1434	1649	1928	2058	2239	2354	2467	2529	2611	2676	2686	2701	2731	2716	2699
	(σ ₁ -σ ₃)/σ ₀	0.54	0.81	0.98	1.12	1.22	1.34	1.39	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.58	1.59	1.60	1.59	1.59
	e	0.25	0.51	0.76	1.01	1.27	1.52	2.03	2.53	3.04	3.55	4.05	4.56	5.07	5.57	6.08	6.59	7.09	7.10
1000	(σ ₁ -σ ₃)	479	717	967	1197	1423	1604	1941	2224	2438	2677	2817	2967	3065	3150	3220	3265	3297	3328
	(σ ₁ -σ ₃)/σ ₀	0.41	0.58	0.73	0.86	0.97	1.05	1.18	1.28	1.35	1.42	1.45	1.49	1.52	1.54	1.55	1.56	1.57	1.58
	e	0.26	0.51	0.77	1.03	1.28	1.54	2.05	2.56	3.07	3.59	4.10	4.61	5.12	5.64	6.15	6.66	7.17	7.69

0.65。采用固结不排水剪试验方法。施加围压分别为100, 200, 400, 600, 800, 1000 kPa。通过做出的三轴试验应力圆可以得到强度指标 $c_{\text{su}} = 78 \text{ kPa}$, $\varphi_{\text{su}} = 38.3^\circ$ 由试验数据点绘制的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon\%$ 曲线来看, 也基本上符合指数曲线及双曲线两种模式, 最后对 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3 - \varepsilon\%$ 实测数据分别采用指数曲线及双曲线两种模式进行拟合分析。试验数据见表 5。

3.1 指数曲线拟合

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} = \mu [1 - \exp(-\beta \varepsilon)]$$

拟合后参数见表 6。按表 7 参数计算出 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3 - \varepsilon\%$ 相应值绘于图中并与实测值进行对比, 见图 6、图 7。

3.2 双曲线拟合

拟合结果见表 7 及图 6, 图 7。

3.3 评价

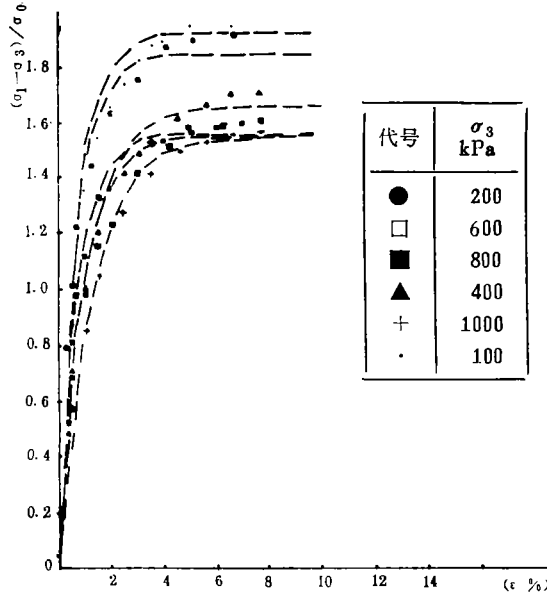


图 5 饱和砂静三轴试验数据指数曲线拟合

对相关系数 r 进行检验, 对各应力水平下的 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3 - \varepsilon\%$ 试验数据都满足指数

表 6 饱和砂指数曲线拟合参数

应力 σ_3 (kPa)	μ	β	r	Q
100	1.915	1.368	0.923	2.833×10^{-1}
200	1.842	1.405	0.961	1.366×10^{-1}
400	1.661	0.887	0.984	6.698×10^{-2}
600	1.547	1.103	0.947	2.069×10^{-1}
800	1.560	1.297	0.991	3.01×10^{-2}
1000	1.548	0.766	0.992	4.076×10^{-2}
200, 400, 600, 800	1.638	1.154	0.906	1.535
100, 200, 400, 600, 800, 1000	1.660	1.127	0.858	3.883

表 7 饱和砂双曲线拟合参数

σ_3 (kPa)	a	b	r	Q
100	0.2301	0.4716	0.976	9.049×10^{-2}
200	0.2437	0.4852	0.995	1.703×10^{-2}
400	0.4605	0.5204	0.999	6.382×10^{-3}
600	0.4711	0.5556	0.996	1.438×10^{-3}
800	0.3176	0.5732	0.998	7.742×10^{-3}
1000	0.6044	0.5486	0.998	8.64×10^{-3}
200, 400, 600, 800	0.3420	0.5414	0.920	1.302
100, 200, 400, 600, 800, 1000	0.3447	0.5340	0.874	3.472

曲线及双曲线拟合方程, 回归效果都高度显著。

单一 σ_3 试验数据分析时, 对饱和砂进行指数曲线拟合, 相关系数为0.923~0.992, 平均为0.966; 双曲线拟合相关系数 r 为0.995~0.999, 平均为0.997; 双曲线拟合的误差平方和 Q 为 $6.382 \times 10^{-3} \sim 9.049 \times 10^{-2}$, 平均为 2.41×10^{-2} ; 指数曲线拟合 Q 为 $3.01 \times 10^{-2} \sim 2.833 \times 10^{-1}$, 平均为 1.27×10^{-1} , 约为双曲线拟合 Q 值的5倍。通过(图5,图6)比较可以发现双曲线计算点与

实测点比较吻合。说明双曲线模型优于指数曲线模型。

综合试验数据分析时, 由于 $\sigma_3 = 100, 200\text{kPa}$ 两条曲线偏离其它4条曲线, 对于两种拟合方法回归系数都不是太高, 但双曲线拟合也略优于指数曲线拟合。

从饱和砂非线性变形特征看, 完全符合邓肯-张模式, 其参数列于表4。

总之, 对于风成砂, 无论是干的还是饱和状态的都很好满足邓肯-张非线性变形模式。

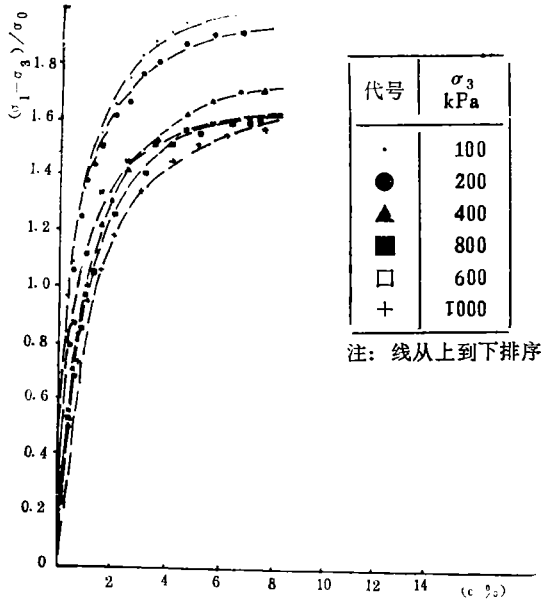


图6 饱和砂静三轴试验数据双曲线拟合

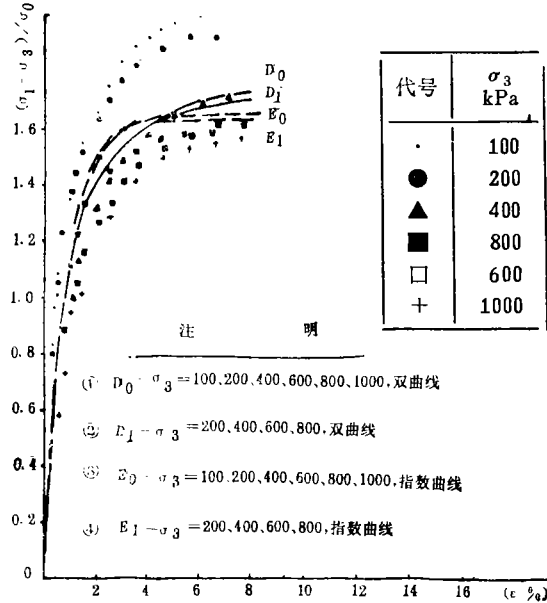


图7 饱和砂静三轴试验综合数据指数曲线双曲线拟合

4 结论

(1) 塔克拉玛干沙漠地区风成砂为细砂, 颗粒均匀, 不含粘粒及粗砂。

(2) 经室内静力三轴试验非线性拟合分析: $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon\%$ 曲线非常符合邓肯-张非线性变形模式。

参 考 文 献

- 1 王健. 浅叙风成砂地基的工程地质特性及加固方法. 西部探矿工程, 1993年第3期
- 2 奚进泉. 桩的荷载-变形非线性分析. 硕士学位论文, 1992, 5
- 3 武汉水利学院主编. 土力学及岩石力学. 水利出版社, 1982, 11