

文章编号: 0451-0712(2005)12-0128-05

中图分类号: U414.110.3

文献标识码: A

浸水+环刀法测定干燥风积沙密度

金昌宁^{1,2}, 李志农³, 陈杰², 祝解²

(1. 兰州大学地理科学系 兰州市 730000; 2. 新疆交通科学研究院 乌鲁木齐市 830000;

3. 新疆高等级公路管理局 乌鲁木齐市 830001)

摘 要: 干燥的风积沙对扰动很敏感, 现行有关规程中的密度测定方法对其均不太适合。本文介绍的方法是通过浸水润湿风积沙, 再用环刀法测定密度。试验分析表明, 当风积沙的压实度达 90% 以上时, 干沙浸水所导致的体积变化量很小; 将此变化量忽略而以环刀法测定的湿沙干密度来表征浸水前干沙的干密度, 则在精度及准确性方面是可以满足公路工程需要的。

关键词: 道路工程; 密度; 环刀法; 风积沙; 压实度

依据现行《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 059-95)、《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057-94) 和《公路土工试验规程》(JTJ 051-93), 土的压实度(密度)测定方法有: 灌砂法、环刀法、蜡封法、灌水法、核子仪测定法和钻芯法。

但对干燥的风积沙来说, 上述方法均不太适合。原因在于干燥的风积沙基本上无内聚力, 呈散粒状, 因而对外部扰动很敏感。如在进行灌砂法、灌水法试验时, 无法挖出具有垂直剖面的试坑; 进行环刀法试验时, 在环刀两端修削试样的过程中, 常常会扰动沙体; 自身为散粒状, 不能保持形状, 故也无法进行蜡封法及钻芯法试验; 而核子仪测定法本身精度就不高, 因而在《公路路基路面现场测试规程》中规定其不宜做仲裁试验及验收试验。

正因为如此, 1992 年修筑塔克拉玛干沙漠公路时, 未对干燥的风积沙路基进行压实度检测, 压实质量控制主要是通过选定压实机械及保证碾压遍数等方式实现。2001 年修筑塔中一井~且末沙漠公路时, 曾用环刀法进行压实度测定, 但对此测定结果, 不同人有不同看法。有人认为在一定条件下, 如选用体积较大的环刀, 操作时特别小心时, 则测定结果可满足工程要求。有人则认为扰动现象在所难免, 故测定结果的准确性是不能保证的。

由此可见, 如何测定干燥的风积沙密度, 到目前

为止, 还没有一个能够得到公认的方法; 与之相应的研究, 也将在保证沙漠公路施工质量等方面发挥重要作用。

1 试验研究思路

干燥的风积沙对外部扰动很敏感, 但湿润的风积沙则因毛细管力作用, 可挖出具有垂直剖面的试坑或砂土柱, 因而可用灌砂法、灌水法、环刀法进行压实度测定。有鉴于此, 再考虑到风积沙矿物成分以憎水性的石英、长石等为主, 遇水后体积变化很小, 故在选择试验方法上的思路为: 首先研究干燥的风积沙在浸水后密度变化规律; 再用环刀法进行密度检测; 通过试验数据分析, 确定试验方法的可行性, 并给出适用范围及注意事项。这种方法的优点为: 无需复杂仪器设备, 基本上仍为现行规程中的常用方法, 简单而又快捷, 可较好地满足公路工程对此项试验的要求。

2 试验方法简述

2.1 试样成型

试验用风积沙分别取自塔克拉玛干沙漠(A)及古尔班通古特沙漠(B)。试验的难点之一是能预先得知干燥风积沙密度, 只有这样, 试验数据才有对比标准。《公路土工试验规程》中的击实试验就能预先得知密度。这是因为试样质量可通过称重获得, 试样

体积由试筒体积控制。受此启发,我们用振动夯在直径 45 cm、高 30 cm 的大试筒(只有这样,才能在试筒内进行环刀法试验)中振动压实沙样,沙样质量可称重获得,沙样厚度可由水准测量获得。

2.2 试样浸水

(1)选一肉眼看不出孔洞且又能均匀透水的布,裁成圆形,圆面直径应比试验用环刀直径大 3 倍以上。之所以如此,一是用透水布防止在浸水时,滴水的水流冲蚀沙样表面;二是较大的透水布能够保证取样处的风积沙全都能较为均匀地浸水。

(2)将透水布在清水中浸湿,然后取出,展开。等透水布基本上不再滴水时,将其小心地放在已成型的风积沙表面需试验处。再用木抹子轻压透水布,做到既要保证整个透水布与沙面能较为紧密地接触,又不能力量太大而改变风积沙密度。

(3)按略小于最大持水量计算浸水时所需水量。浸湿厚度应比取样深度大 5 cm 以上。

(4)喷壶缓慢均匀地将水浇洒到透水布上。等水全部都渗入到沙中后,取走透水布。

2.3 形变观测

在干燥的风积沙表面铺透水布,透水布上放透水的多孔板,多孔板边缘有两个百分表支杆,架在支架上的百分表测头端顶在百分表支杆上。装置安好后,先读取百分表读数,然后一边浇水,一边计时,一边在规定时间内读取百分表,直至变形达到稳定(图1)。



图 1 浸水及形变量观测

2.4 密度测定

按照《公路路基路面现场测试规程》中的环刀法测定压实度试验方法,以及《公路土工试验规程》中密度试验的环刀法,进行密度测定。

3 试验结果与分析

3.1 形变观测

形变观测结果见表 1,由此可知以下几点。

表 1 风积沙浸水后的形变量

试样 编号	干密度 g/cm ³	压实 度/%	浸水(min)后的沉降量/0.01mm			
			1	10	60	1 080
A	1.421	87.3	37	218	247	257
A	1.435	88.1	20	195	226	238
A	1.471	90.3	30	105	165	180
A	1.491	91.6	25	85	97	109
A	1.522	93.5	27	65	75	82
A	1.548	95.1	18	39	47	55
A	1.568	96.3	15	36	46	50
A	1.583	97.2	6	16	30	44
A	1.599	98.2	8	16	28	39
B	1.686	86.9	209	635	687	696
B	1.734	89.4	140	359	425	444
B	1.771	91.3	79	169	195	221
B	1.797	92.7	40	123	160	183
B	1.826	94.2	35	80	90	99
B	1.871	96.5	23	39	61	72
B	1.873	96.6	20	38	47	58
B	1.918	98.9	15	31	41	50
B	1.932	99.6	8	25	37	44

注:试样成型厚度 20 cm 左右。

(1)干燥风积沙浸水后的形变表现为下沉(正因为如此,陕西等省才有对风积沙路基进行水坠法施工的经验)。

(2)风积沙浸水后的沉降开始比较快,随后就越来越慢(图1)。60 min 的沉降量与 1 080 min 的沉降量相比,压实度小于 95%时,前者可达后者 90%以上;压实度大于 95%的,除个别特殊外,一般都能达 80%以上。

(3)对同一风积沙来说,压实度越高,浸水后的沉降量越少;反之亦反。

(4)不同风积沙在浸水过程中的沉降量差异较大,尤其是压实度较低时(如在 88%时),甚至可达 1 倍以上。

(5)从开始浸水到用环刀取出沙样并完成试验的时间一般不超过 10 min。从表 1 可看出,当风积沙的压实度在 90%以上时,10 min 内的沉降率一般在 0.5%以下,很小,故可认为浸水措施对其密度影响不大。

3.2 密度测定

3.2.1 成型误差分析

为确定大击实筒中成型的沙样厚度,进行水准

测量如下：

(1)水准仪安置在距大击实筒约 4 m 处,如此近的距离内,在塔尺上的读数分辨率可达 0.5 mm；

(2)在多次水准测量过程中,不移动水准仪,这样可大幅度减少测量数据的系统误差；

(3)使用同一把具有 mm 刻划的塔尺,并在测量过程中反复多次读塔尺,以减少测量数据的系统误差及偶然误差。

这样的水准测量,其系统误差与偶然误差相比是很小的,因而可忽略不计；一次观测的偶然误差 $\Delta m = \pm 0.5\text{ mm}$ 。沙样厚度则是以 2 次观测数据相减而得到。根据误差传播理论,若偶然误差 $\Delta m = \pm 0.5\text{ mm}$,系统误差忽略不计,则在某一测点的一

次测量数据中,系统误差 $\Delta b = 0$,偶然误差 $\Delta m = \pm 0.5\text{ mm}$ ；以 2 次测量所得数据之差而得到的新数据,其误差同样为：(1)2 次系统误差 Δb 的累积为系统误差,等于 0；(2)2 次偶然误差 Δm 的累积为 $\pm 1\text{ mm}$,总误差为 $\pm 1\text{ mm}$ 。

在大击实筒中,沙样的成型厚度设计为 20 cm (虽然实际压实后会略多或略少一点),则成型沙样干密度的总误差为 $\pm 0.5\%$ 。如此一来,通过高程测量而得知的成型干密度并不一定是其准确值。准确值应在此量测值的 0.995~1.005 倍间。

3.2.2 试验误差分析

用环刀法对已完成浸水试验的风积沙进行密度测定试验,结果见表 2。由表 2 可知以下几点。

表 2 风积沙长时间浸水试验完成后的密度测定试验

试样 编号	浸水后 干密度 g/cm ³	浸水结束 后的压实 度/%	干密度准确值范围		环刀试验法测定的干密度/(g/cm ³)								平均值 g/cm ³	
			g/cm ³		1	2	3	4	5	6	7	8	未修正	修正
A	1.452	89.2	1.445	1.459	1.431	1.456	1.489	1.444	1.467	1.525	1.472	1.463	1.468	1.460
A	1.528	93.9	1.521	1.536	1.532	1.506	1.551	1.543	1.517	1.527	1.499	1.551	1.528	1.528
A	1.602	98.4	1.594	1.610	1.589	1.614	1.608	1.577	1.583	1.594	1.623	1.564	1.594	1.594
B	1.768	91.2	1.759	1.777	1.787	1.796	1.751	1.758	1.777	1.764	1.797	1.808	1.780	1.780
B	1.835	94.6	1.826	1.844	1.857	1.809	1.766	1.823	1.847	1.866	1.815	1.832	1.827	1.836
B	1.936	99.9	1.927	1.946	1.920	1.948	1.903	1.939	1.943	1.917	1.911	1.895	1.922	1.922

注：(1)由于本试验主要是以数据对比的方式来反映环刀法测定密度试验的准确性,故而只选了几组较为典型者进行试验。
(2)试验所用环刀体积为 200 cm³。

(1)用环刀法对同一密度的风积沙进行多次试验后,发现测得的密度差值最大可达 0.1 g/cm³,但一般多在 0.06 g/cm³ 以内。比《公路土工试验规程》密度试验环刀法中的要求(本试验须进行二次平行测定,取其算术平均值,其平行差值不得大于 0.03 g/cm³)要大些。主要原因：一是湿润的风积沙虽有一定的内聚力,但内聚力并不大,因而外力扰动对其还是有一定影响的；二是与粉土或粘土相比,风积沙颗粒还是比较大的,“粗糙”的表面会在一定程度上影响其体积的真实性。因此,对风积沙来说,为降低试验误差,可要求平行测定试验不应低于 3 次。若 3 次平行测定所得到数值的中间值与高值、低值之差均小于 0.03 g/cm³ 的话,则可将这 3 次平行测定的数值进行算术平均,并以算术平均值为代表；反之,则应再进行平行测定,至到数次平行试验中有 3 次测定的数值满足上述要求。这样做,即可满足规程要求,同时出错(即 3 次平行测定结果的平均值与真值之差大于 0.03/2=0.015 g/cm³)的概率也是比较

低的(数理分析约在 3.02%左右)。
(2)浸水试验完成后,用环刀法测定的风积沙的密度平均值基本上都落在了由高程量测加上误差分析而得知的准确值范围之内。这一方面说明通过高程量测及其误差分析来控制或预知干燥风积沙的成型密度是一种可行的手段；另一方面也表明,由于环刀法测定风积沙密度时误差较大,超过了有关规程规定,故多次的平行试验是很有必要的。
(3)浸水试验完成后,用环刀法测定的风积沙的密度平均值,在风积沙在密度较小时略偏大,反之亦反。究其原因,一方面与修土过程中沙被压入环刀中有关(密度较小时易被压入)；另一方面也与试验过程中沙样受到了扰动有关(已有经验表明,砂受扰动后,其密度发生变化的规律是：松散的变密,密实的变松)。
(4)风积沙压实度在 90% 以上时,浸水导致的密度变化多在 0.5% 以内；而用环刀法进行的不低于 3 次的平行测定时,误差基本上可控制在 0.02 g/cm³

以内。若风积沙的密度为 $1.5 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$, 则由 0.02 g/cm^3 导致的误差为 $1.0\% \sim 1.3\%$ 。前者仅为后者 50% 左右。这种情况下, 可认为风积沙浸水所导致的密度变化是用环刀法无法测出的, 故可忽略不计, 也用不着校正。

3.2.3 环刀类型影响

试验结果见表3。将某一类型的环刀所测定的密

度试验结果看成为一个总体; 3 种环刀类型, 就会有 3 个总体, 它们可分别由随机变量 ξ, η, λ 来表征。假设 $D\xi = D\eta, D\xi = D\lambda, D\eta = D\lambda$ ($D\xi, D\eta, D\lambda$ 分别表示为随机变量 ξ, η, λ 的数学期望)。记 $D\xi = \mu_1, D\eta = \mu_2, D\lambda = \mu_3$, 那么, 判断“3 种环刀类型的测定结果的平均水平有无显著差异”也就是要检验“假设 $\mu_1 = \mu_2, \mu_1 = \mu_3, \mu_2 = \mu_3$ ”是否成立。

表3 不同环刀类型的密度测定

试样编号	A		成型干密度/(g/cm³)				1.536		准确值范围/(g/cm³)			1.528 ~ 1.544	
环刀容积 cm³	测定干密度值(g/cm³)										均值	标准差	变异系数 %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
100	1.526	1.493	1.544	1.574	1.513	1.511	1.585	1.597	1.535	1.560	1.544	0.034 5	2.23
200	1.504	1.574	1.536	1.515	1.553	1.581	1.563	1.522	1.513	1.541	1.540	0.026 9	1.75
500	1.534	1.541	1.563	1.557	1.536	1.527	1.572	1.536	1.511	1.543	1.542	0.017 9	1.16

注: 风积沙成型时的含水量为 9.53% 。

基本假设 $H: \mu_1 = \mu_2, \mu_1 = \mu_3, \mu_2 = \mu_3, 0 < \sigma < \infty$
显著性水平: 选 $\alpha = 0.05; t_{0.05, 18} = 2.10$

数理分析表明, 3 种环刀类型对风积沙密度进行测定的结果, 其平均水平并无显著差异。因而在实际工作中, 可选取容积较小的环刀进行试验, 以取得最大功效。

但从表3 还可看出, 随着环刀容积由小至大, 测量数据的绝对误差及其变异系数均在变小, 说明在测定精度方面, 环刀容积大的明显地要比环刀容积小的高。有鉴于此, 在测定次数较少、准确性要求又较高的试验中, 宜选用容积较大的环刀。

3.2.4 风积沙密度测定

在上述研究基础上, 在大击实筒中成型风积沙, 然后加水浸湿; 水渗完后即开始用环刀进行密度测定。试验结果见表4, 由此可看出以下2 点。

(1) 用浸水+环刀法测定的风积沙干密度的平均值, 包括修正与未修正的, 与风积沙成型干密度相差不大, 最大达 0.045 g/cm^3 , 一般在 0.02 g/cm^3 以下。相差较大者, 为压实度较低的(一般在 90% 以下); 随着压实度增大, 两者间差值也越来越小; 当压实度达 90% 以上时, 差值一般都低于 0.02 g/cm^3 ; 而当压实度达 95% 以上时, 差值一般在 0.01 g/cm^3 以内。

(2) 用浸水+环刀法测定的风积沙干密度的平均值, 包括修正与未修正的, 与风积沙成型干密度所在的准确值范围相比, 其大致规律是: 当压实度在 90% 以下时, 前者(显得较大) 超出了后者的范围; 当

压实度在 90% 以上时, 前者一般都在后者的范围之内。

(3) 综上所述, 再考虑到风积沙试样成型时水准测量的误差, 以及环刀法测定风积沙密度的误差等, 则可认为当风积沙的密度(压实度) 达 90% 及以上时, 浸水所造成的风积沙的密度改变是很小的, 小于环刀法测定风积沙密度的误差。因此, 只要在试验时注意消除含水量分布不匀等因素影响, 并适当地增加试验测定次数, 则浸水+环刀法的试验结果是可以精度及准确度上满足公路工程需要的。

4 结论

(1) 干燥的风积沙在浸水后体积变化表现为下沉, 并且开始时较快, 随后越来越慢。对同一风积沙来说, 压实度(密度) 越高, 浸水后的沉降量越少; 反之, 压实度(密度) 越低, 浸水后的沉降量也就越大。浸水+环刀法试验一般可在 10 min 内完成。在这段时间内, 风积沙的沉降量, 除最松散的可达 3.06% 外, 较为密实及密实的(密实度达 90% 以上时) 一般在 0.5% 以下。

(2) 对风积沙来说, 环刀法密度测定试验的平行误差, 一般多在 0.06 g/cm^3 以内。比有关规程要求要大些。在此情况下, 为达到有关规程要求, 应适当地增加平行试验的次数, 如不低于 3 次等。

(3) 随着环刀容积由小至大, 测量数据的绝对误差及其变异系数均在变小, 故在测定精度方面, 环刀容积大的明显地要比环刀容积小的高; 但其多次测

表 4 风积沙密度测定试验结果

试样 编号	成型 干密度	成型 压实度	准确值范围		环刀试验法测定的干密度/(g/cm ³)													平均值	
	g/cm ³	%	g/cm ³		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	未修正	修正
A	1.427	87.7	1.420	1.434	1.459	1.436	1.448	1.419	1.427	1.479*	1.452	1.433	1.461	1.452	1.466	1.422	1.445	1.446	1.443
A	1.468	90.2	1.461	1.475	1.478	1.511*	1.494	1.483	1.462	1.467	1.475	1.487	1.474	1.447				1.478	1.474
A	1.506	92.5	1.498	1.514	1.511	1.493	1.532	1.547*	1.518	1.526	1.506	1.520	1.482*	1.513				1.515	1.515
A	1.544	94.8	1.536	1.552	1.525	1.547	1.562	1.545	1.537	1.524	1.566	1.545	1.555	1.586*	1.574	1.548		1.551	1.548
A	1.583	97.2	1.575	1.591	1.542*	1.576	1.583	1.591	1.554	1.582	1.588	1.594	1.604	1.567				1.578	1.582
A	1.613	99.1	1.605	1.621	1.614	1.609	1.622	1.607	1.595	1.607	1.587	1.601	1.574*	1.623	1.615	1.613		1.606	1.608
B	1.691	87.2	1.683	1.699	1.705	1.734	1.728	1.769*	1.763	1.722	1.740	1.729	1.741	1.735	1.755	1.718		1.737	1.734
B	1.74	89.7	1.731	1.749	1.777	1.797*	1.765	1.752	1.785	1.762	1.747	1.765	1.773	1.739				1.766	1.763
B	1.796	92.6	1.787	1.805	1.804	1.780	1.819	1.791	1.813	1.833	1.806	1.823	1.815	1.810				1.809	
B	1.842	95.0	1.833	1.851	1.860	1.848	1.843	1.827	1.873	1.833	1.816*	1.855	1.861	1.839	1.840	1.841		1.845	1.847
B	1.895	97.7	1.886	1.904	1.887	1.903	1.863	1.873	1.917	1.894	1.887	1.890	1.878	1.898				1.889	
B	1.935	99.8	1.925	1.945	1.953	1.909	1.935	1.928	1.938	1.898*	1.914	1.937	1.951	1.934	1.936			1.930	1.934

注：(1)成型时干燥,试验前加水浸湿。

(2)干密度准确值一栏中的两行数字表明了成型试样干密度准确值的变化范围。

(3)平均值一栏中未修正者为所有数据的平均值,修正者为去掉异常试验数据后的平均值。

(4)带*号为异常试验数据,它与平均值之差大于0.03 g/cm³。

(5)每次试验均用3种环刀,后者体积分别为100 cm³、200 cm³、500 cm³,但在表列数据中并没有特别标明

定的平均值并无显著差异。

(4)试验表明,当风积沙的压实度达90%以上时,浸水作用所造成的风积沙的密度改变是很小的,小于环刀法测定风积沙密度的误差。因此,只要在试验时注意消除含水量分布不匀等因素影响,并适当地增加试验测定次数,则浸水+环刀法的试验结果是可以精度及准确度上满足公路工程需要的。

参考文献：

[1] JTJ 051—93,公路土工试验规程[S].

[2] JTJ 059—95,公路路基路面现场测试规程[S].

[3] JTJ 057—94,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[4] 陈忠明,张生辉,王新民,等. 沙漠地区公路路基压实标准及方法研究[R]. 西安公路研究所. 2003.

Density of Wind-Blown Sand Measured
by Immersional Wetting and Ring Sampler

JING Chang-nin^{1,2}, LI Zhi-nong³, CHEN Jie², ZHU Jie²

(1. Department of Geography on Lanzhou University,Lanzhou 730000,China;
2. Xinjiang Communication Scientific Research Institute,Urumqi 830000,China;
3. Xinjiang High Grade Highway Administration Bureau,Urumqi 830001,China)

Abstract: Because the dry wind-blown sand is sensitive to disturbance, the methods for measuring density in current regulations are not appropriate to it.The method which soaks the wind-blown sand before measuring the density by ring sampler is introduced. The results show that the change of volume is little by soaking the wind-blown sand when the degree of compaction of wind-blown sand reaches its 90%. In field test, the density of the soaking wind-blown sand is measared by using ring sampler to replace the density of dry wind-blown sand, which can meet the precision and veracity in highway engineering.

Key words: road engineering; density; ring sampler; wind-blown sand; degree of compaction