

路基压实密度气囊检测方法研究

Study on balloon testing method for compacted density of roadbed

李小勇¹, 富志根²

(1. 北方工业大学 建筑学院, 北京 100041; 2. 铁道建筑研究设计院, 北京 102600)

摘要: 在路基压实质量检测和控制在, 压实密度是重要指标之一。目前国内路基施工现场密度试验主要用灌砂法和灌水法两种方法, 然而由于灌砂法具有测试效率低的缺点, 灌水法具有测试精度低的缺点, 工程上迫切要求一种快速方便、精度较高的密度试验方法, 气囊式容积测定仪的研制成功正好能够满足这一要求。文中介绍了气囊式容积测定仪的构成和灵敏度及其检测方法, 通过室内和现场气囊法、灌砂法和灌水法 3 种方法对比试验, 利用随机因子分析方法, 研究了气囊法测试精度。试验结果表明, 气囊式容积测定仪仪器轻便, 操作简单, 测试精度较高。

关键词: 路基; 密度; 气囊式容积测定仪; 气囊法; 灌砂法; 灌水法; 随机因子

中图分类号: TU 415; U416

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0619-05

作者简介: 李小勇(1970-), 男, 山西翼城人, 在站博士后, 副研究员, 主要从事建筑工程施工管理、岩土工程可靠性以及路基压实质量检测方法研究。

LI Xiaoyong¹, FU Zhigen²

(1. North China University of Technology, Beijing 100041, China; 2. Research and Design Institute of Railway Construction, Beijing 102600, China)

Abstract: Density is one of key indexes for detecting and controlling the quality of compacted soil. Sand replacement method and water replacement method are used to test the density of compacted soil in the field of roadbed construction in our country at present. However, because of the shortcomings of inefficient detection for sand replacement method and low precision for water replacement method, it is necessary to develop a method with faster detection speed and higher precision, and then rubber balloon volumeter has been developed to meet the demand. The structure, principle, sensitivity and test method of rubber balloon volumeter are introduced. Detection precision of the instrument is assessed by comparisons between the tests with balloon method, sand replacement method and water replacement method in lab and in-situ, and with analytical method of random factor. The instrument is light, simple, and convenient to be operated with high precision.

Key words: roadbed; density; rubber balloon volumeter; sand replacement method; water replacement method; balloon method; random factor

0 引言*

密度是路基填方压实质量检测和控制的一个重要指标。密度测试中目前国内主要采用灌砂法、灌水法和核子密度法^[1], 国外还有灌石膏法、水袋法^[2,3]。灌砂、灌水和灌石膏法系传统方法, 已沿用多年。由于它们存在共同缺点——慢, 后又出现了核子密度仪法和核子密度法解决了传统方法中慢的问题, 但却相应地伴生了成本、精度、安全和污染问题, 不易普及。水袋法系美国首创, 1963 年正式列入标准。德国于 1975 年正式应用水袋法, 现在这两种方法两国仍在应用。我国交通、水电行业 20 世纪 80 年代曾引进水袋法, 后因技术、加工工艺等原因而废止。

我国路基工程密度试验一般采用灌砂法或灌水法^[1]。灌砂法的主要缺点是测试速度慢, 不计挖试坑时间, 一次试验也需要大约 15 min, 而且试验前必须作烦琐的标准砂标定工作。灌水法虽然比灌砂法方便, 但是人为及客观环境影响因素多, 测试精度低。因此迫切需要一种试验方法, 能够克服上述两种方法的不

足, 具有仪器轻便、操作简单、测试速度快、精度高的优点。

近年来, (在汲取国内外经验教训的基础上, 笔者进行了气囊法的试验研究。室内和现场测试证明, 这种方法比现有传统方法快, 比现有快速方法精确, 仪器轻便, 操作简单, 易于推广应用。

1 气囊式容积测定仪介绍

1.1 基本结构

气囊式容积测定仪是在水囊式容积测定仪基础上改进的, 基本结构见图 1, 与前者相比, 主要变化有以下几方面: ①传递压力的介质由水改为空气, 增加了 1 个水位管和 1 个球囊; ②测尺由刻度读数改为数显式; ③手柄与活塞杆连接由十字形改为丁字形; ④护坑钢环改为铝环, 增加了踏板。

* 基金项目: 铁道部建设司工程建设规范科研项目(铁建技字 2001 第 6 号)

收稿日期: 2002-06-05

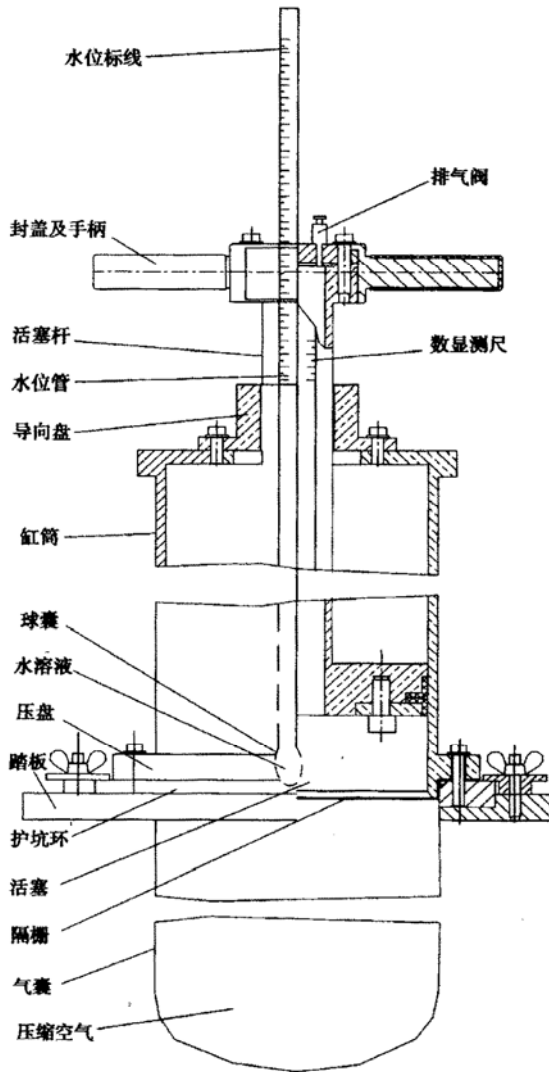


图1 气囊式容积测定仪结构示意图

Fig. 1 Structure of rubber balloon volumeter

1.2 工作原理

图2为容积测定仪工作原理示意图。操作时,用活塞加压。试坑开挖前,仪器置于试坑位置,推动活塞,缸筒中的空气逐渐升压,在超压作用下,缸筒内球囊中水进入水位管并逐渐上升;活塞继续下推,超压继续增大,水位管中的水柱继续上升,直到升至水位标线;活塞停止推压,待水柱稳定后读取数显尺初始读数 L_1 ,可通过置零按钮置零。移走仪器,待试坑挖好后,将仪器重新置于护坑环上并固定,向下推动活塞,直到水柱升至原水位标线高度,待水柱稳定后,读取数显测尺终止读数 L_2 。仪器两次显示读数之间的时间是试坑挖凿时间,一般不超过10 min。在现场大气压下,10 min的温差可以忽略不计。活塞推动时,由于推动缓慢,活塞与缸筒摩擦产生的热量很小,对缸筒内温度的影响也可忽略不计。同时,两次显示读数时的压力 P 是相等的。根据物理学 Boyle 定律,在一定温度下,密闭容器内气体体积 V 与压力 P 乘积为一常数。因此读

取 L_2 读数时,试坑内压缩空气的体积 V_1 与缸筒内同样压力压缩空气减少的体积 V_3 是相等的,即

$$V_1 = V_3 = A(L_2 - L_1), \quad (1)$$

式中 A 为容积仪常数,由厂家标定给出。

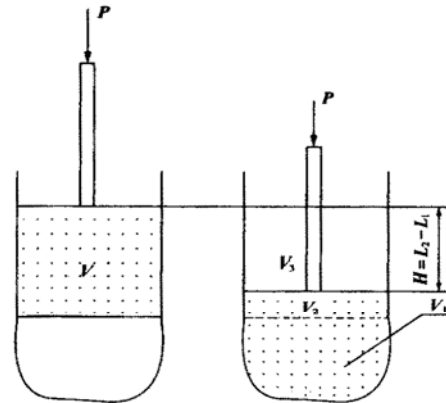


图2 气囊式容积测定仪工作原理示意图

Fig. 2 Principle of operation for rubber balloon volumeter

1.3 灵敏度分析

(1) 压力响应

气囊式容积仪压缩气体体积随压力变化而变化,水柱变化对测试体积有影响,仪器活塞所加压力大小仍以水柱表示,定为800 mm。水柱升至水位标线时,活塞定位瞬间,水位上下波动一般不超过 ± 1 mm,即压力波动不超过 $1/800$,相应地,压缩空气因压力波动引起的体积变化不超过 $1/800$ 。

(2) 测尺读数响应

由式(1)可知,测试精度与容积仪常数 A 及测尺读数精度有直接关系。仪器分大小两种型号,大型号 A 约为 $270 \text{ cm}^3/\text{cm}$,小型号 A 约为 $160 \text{ cm}^3/\text{cm}$;测尺读数精度为0.01 mm,由此可得仪器灵敏度大型号为 $0.27 \text{ cm}^3/\text{cm}$,小型号为 $0.16 \text{ cm}^3/\text{cm}$ 。综合分析,仪器的灵敏度能够满足测试精度要求。

2 室内对比试验

2.1 模拟试验标准罐制作

(1) 主要参数。模拟填料最大粒径:20 cm;模拟试坑标准罐尺寸:直径约15 cm,深度约20 cm。

(2) 制作方法。①将模拟填料装入预制木箱内,分层夯实;②按TBJ 102—96标准开挖试坑;③在开挖好的试坑内灌入熔融石蜡,等石蜡冷凝后,拆掉木箱,取出蜡芯;④用蜡心做内模,塑料桶做外模,浇注混凝土,等混凝土达到一定强度后,取出蜡芯,将罐顶四周用石膏抹平。

(3) 标定。标定前,先在罐内灌满水,存放24 h后,将水舀干,用纯净自来水进行标定。当3次标定相

差不大于罐体积的 0.1% 时,取 3 次标定的平均值。标定时,水温 12 ℃,每克水的体积为 1.00048 cm³,考虑了温度影响的标定结果,第 1 次为 3254.16 cm³,第 2 次为 3255.34 cm³,第 3 次为 3255.80 cm³。3 次标定的均值为 3255.10 cm³、最大极差 1.64 cm³ 为均值的 0.05%。因此标准罐体积真值为 3255.10 cm³。

2.2 对比试验

对已知体积标准罐用灌砂法、灌水法和气囊法各进行 30 次试验,误差分析、随机因子列于表 1^[4-7]。表中相对误差为绝对误差与标准罐体积真值的百分数,绝对误差为实测值减去标准罐体积真值,随机因子为标准罐体积真值与实测值的比值。室内试验测定值和随机因子的特征值见表 2。

表 1 室内试验结果分析

Table 1 Analytical result of laboratory test

灌砂法		灌水法		气囊法	
相对误差 /%	随机 因子	相对误差 /%	随机 因子	相对误差 /%	随机 因子
-1.25	1.01	-2.61	1.03	-1.14	1.01
-0.98	1.01	-2.40	1.02	-1.11	1.01
-1.04	1.01	-2.18	1.02	-1.17	1.01
-0.92	1.01	-1.38	1.01	-1.26	1.01
-0.89	1.01	-2.46	1.03	-1.26	1.01
-1.47	1.01	-2.43	1.02	-0.77	1.01
-1.40	1.01	-2.03	1.02	-0.99	1.01
-1.38	1.01	-2.00	1.02	-0.96	1.01
-1.17	1.01	-2.15	1.02	-1.10	1.01
-1.36	1.01	-2.09	1.02	-0.88	1.01
-1.42	1.01	-2.00	1.02	-0.89	1.01
-1.44	1.01	-1.08	1.01	-1.23	1.01
-0.71	1.01	-1.81	1.02	-1.18	1.01
-0.62	1.01	-1.63	1.02	-1.11	1.01
-1.15	1.01	-2.18	1.02	-1.61	1.02
-0.65	1.01	-1.69	1.02	-0.65	1.01
-1.34	1.01	-2.06	1.02	-0.91	1.01
-1.28	1.01	-2.15	1.02	-1.42	1.01
-1.06	1.01	-2.15	1.02	-1.28	1.01
-0.89	1.01	-2.30	1.02	-0.86	1.01
-1.02	1.01	-2.30	1.02	-1.28	1.01
-1.32	1.01	-2.61	1.03	-1.14	1.01
-1.21	1.01	-2.43	1.02	-1.02	1.01
-0.87	1.01	-2.43	1.02	-1.31	1.01
-1.32	1.01	-2.46	1.03	-1.47	1.01
-1.40	1.01	-2.30	1.02	-1.08	1.01
-1.49	1.02	-2.30	1.02	-1.08	1.01
-0.98	1.01	-2.40	1.02	-1.20	1.01
-1.06	1.01	-2.46	1.03	-1.11	1.01
-1.06	1.01	-2.18	1.02	-0.46	1.00

表 2 室内测定体积和随机因子特征值

Table 2 Characteristic value of volume measured by laboratory test and random factor

试验方法	测定值		随机因子	
	均值	标准差	均值	标准差
灌砂法	3218	8.1579	1.0115	0.0026
灌水法	3185	11.4281	1.0220	0.0036
气囊法	3219	7.7356	1.0111	0.0024

由表 1 可以看出,灌砂法测定体积的相对误差为 -0.62% ~ -1.49%,灌水法相对误差为 -1.08% ~ -2.61%,气囊法的相对误差为 -0.46% ~ -1.61%。

由表 2 特征值可知,气囊法测定值均值最接近标准罐体积的真值,而且其标准差最小;3 种试验方法的随机因子的均值都大于 1,可认为是对标准罐体积真值的负偏估计;随机因子的标准差中,气囊法最小,灌砂法次之,灌水法最大,但气囊法的标准差与灌砂法比较接近。

2.3 三种试验方法比较

灌砂法已沿用多年,技术比较成熟,测试精度较高,工作原理、操作方法都比较简单,所用设备也比较便宜,主要缺点是工效低。灌水法主要优点是设备简单,操作简便;主要缺点是测试精度低。气囊法兼有灌砂法和灌水法的主要优点,并克服了灌砂法和灌水法的缺点。

3 现场对比试验

经多方调查,选定 3 个路基工程进行现场试验。工程 1 稳定基层集料为石灰、粉煤灰和砂砾混合料,其设计配合比为 6:12:82。工程 2 路堤填料全部为隧道掘进机滚动盘刀切割的碎石,碎石粒径较均匀,多在 20~25 mm。工程 3 填料为砂砾土。

在 3 个施工现场分别进行灌砂法、灌水法和气囊法 3 种对比试验,试验和分析结果分别列于表 3、表 4 和表 5。随机因子特征值列于表 6。工程实践和室内试验表明,灌砂法测试精度较高,因此用灌砂法作为指标的真值。

根据试验得出体积相对误差 Δ_v 与干密度相对误差 Δ_m 关系式为

$$\Delta_m = \frac{1}{\Delta_v + 1} - 1. \quad (2)$$

当相对误差绝对值小于 3% 时,体积相对误差与干密度相对误差符号相反,绝对值相差很小,因此,为分析方便,工程 1 以干密度进行分析,工程 2 和工程 3 以体积进行分析。

表 3 工程 1 干密度结果分析

Table 3 Analytical result of dry density for project No. 1

灌砂法干密度 $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	相对误差/%		随机因子	
	灌水法	气囊法	灌水法	气囊法
2.2500	-0.2701	-0.3778	1.0027	1.0038
2.2200	-1.2001	-1.2252	1.0121	1.0124
2.1600	2.3314	1.0046	0.9772	0.9901
2.2500	-1.2311	-1.4444	1.0125	1.0147
2.2300	0.6188	0.1435	0.9939	0.9986
2.1300	1.2555	1.1737	0.9876	0.9884
2.2300	-1.2786	-1.3049	1.0130	1.0132
2.3200	-2.1569	-2.2974	1.0220	1.0235
2.1900	0.9745	0.7717	0.9903	0.9923
2.2100	2.3950	1.5747	0.9766	0.9845
2.2100	-1.4217	-1.7783	1.0144	1.0181
2.2200	1.0364	0.3559	0.9897	0.9965
2.2200	-0.9559	-1.4234	1.0097	1.0144
2.2400	-0.4672	-0.6161	1.0047	1.0062
2.2000	1.2572	0.5091	0.9876	0.9949
2.1900	0.5804	0.4840	0.9942	0.9952
2.1300	1.1306	0.9249	0.9888	0.9908
2.1800	0.6260	0.2752	0.9938	0.9973
2.1800	-1.0648	-1.3303	1.0108	1.0135
2.2300	1.7006	1.2377	0.9833	0.9878
2.1600	0.5451	0.3889	0.9946	0.9961
2.1900	-0.4617	-0.7123	1.0046	1.0072
2.1500	-0.6637	-0.9767	1.0067	1.0099
2.2000	1.3291	1.0000	0.9869	0.9901
2.1700	1.6020	1.9770	0.9842	0.9806
2.1900	1.0074	0.6347	0.9900	0.9937
2.2100	1.1142	0.8643	0.9890	0.9914
2.1500	1.2003	0.9488	0.9881	0.9906
2.1700	-0.6710	-1.2028	1.0068	1.0122
2.1600	0.9178	1.0139	0.9909	0.9900
2.2100	0.6592	0.1719	0.9935	0.9983
2.2300	1.0345	1.0538	0.9898	0.9896
2.1900	-1.0621	-1.1096	1.0107	1.0112
2.1700	-0.5819	-1.1290	1.0059	1.0114
2.1500	0.5986	0.1674	0.9941	0.9983
2.2500	-0.6906	-0.9556	1.0070	1.0096
2.2300	1.4971	1.2063	0.9852	0.9881
2.2200	-1.1748	-1.2883	1.0119	1.0131
2.1900	1.0809	0.9041	0.9893	0.9910
2.1700	1.2674	0.8479	0.9875	0.9916

表 4 工程 2 体积结果分析

Table 4 Analytical result of volume for project No. 2

灌砂法体积 $/\text{cm}^3$	相对误差/%		随机因子	
	灌水法	气囊法	灌水法	气囊法
3240	-1.0116	-0.3516	1.0102	1.0035
3280	-1.5211	-0.8311	1.0154	1.0084
3233	-0.1217	-0.0827	1.0012	1.0008
3263	-2.4120	-1.6420	1.0247	1.0167
3367	-1.7713	-0.8413	1.0180	1.0085
3367	-0.8712	-0.2512	1.0088	1.0025
3352	-2.9000	-2.0700	1.0299	1.0211
3394	-0.7721	-0.6599	1.0078	1.0066
3336	-1.8922	-1.0422	1.0193	1.0105
3385	-0.1655	-0.1599	1.0017	1.0016
3209	-2.1136	-1.4236	1.0216	1.0144
3384	-1.7721	-0.8621	1.0180	1.0087
3343	-0.2678	-0.2411	1.0027	1.0024
3396	-1.5571	-0.8371	1.0158	1.0084
3292	-0.7643	-0.4343	1.0077	1.0044
3315	-0.5211	-0.5027	1.0052	1.0051
3358	-2.5516	-1.7316	1.0262	1.0176
3363	-0.9235	-0.2535	1.0093	1.0025
3391	-1.7721	-1.1621	1.0180	1.0118
3273	-2.7160	-1.8060	1.0279	1.0184
3392	-0.7652	-0.1552	1.0077	1.0016
3234	-1.7691	-1.0491	1.0180	1.0106
3343	-2.8722	-2.1322	1.0296	1.0218
3277	-1.9812	-1.1612	1.0202	1.0117
3278	-0.5611	-0.3111	1.0056	1.0031
3286	-1.3611	-0.4311	1.0138	1.0043
3372	-0.8219	-0.5019	1.0083	1.0050
3364	-1.0924	-0.3424	1.0110	1.0034
3219	-2.7166	-2.0366	1.0279	1.0208
3395	-0.2786	-0.1086	1.0028	1.0011
3361	-1.6311	-0.9611	1.0166	1.0097
3365	-0.7233	-0.3533	1.0073	1.0035
3286	-1.8722	-1.1522	1.0191	1.0117
3361	-0.2455	-0.0955	1.0025	1.0010
3348	-0.7689	-0.3589	1.0077	1.0036
3241	-2.0721	-1.2521	1.0212	1.0127
3254	-0.6722	-0.4522	1.0068	1.0045
3332	-1.8721	-0.9621	1.0191	1.0097
3332	-0.3677	-0.1777	1.0037	1.0018
3200	-0.4926	-0.3226	1.0050	1.0032

表5 工程3体积结果分析

Table 5 Analytical result of volume for project No. 3

灌砂法体积 / cm ³	相对误差/%		随机因子	
	灌水法	气囊法	灌水法	气囊法
3381	- 2.1104	- 1.3004	1.0216	1.0132
3240	0.8066	1.5415	0.9920	0.9848
3277	- 2.0800	- 1.4100	1.0212	1.0143
3348	- 0.8921	- 0.3421	1.0090	1.0034
3320	1.1270	1.7506	0.9889	0.9828
3301	0.3383	1.2760	0.9966	0.9874
3250	- 1.8721	- 1.2021	1.0191	1.0122
3363	- 2.4731	- 1.5531	1.0254	1.0158
3364	- 1.7734	- 1.0634	1.0181	1.0107
3361	- 2.0972	- 1.2172	1.0214	1.0123
3110	1.4264	2.0926	0.9859	0.9795
3320	0.7758	1.0599	0.9923	0.9895
3215	0.7014	1.3386	0.9930	0.9868
3306	- 0.9920	- 0.3420	1.0100	1.0034
3393	- 1.8562	- 0.9362	1.0189	1.0095
3348	- 1.5324	- 0.8124	1.0156	1.0082
3397	- 0.5124	- 0.3524	1.0052	1.0035
3288	- 1.7211	- 0.9111	1.0175	1.0092
3301	0.3603	1.1116	0.9964	0.9890
3150	0.9490	1.5296	0.9906	0.9849
3289	- 1.6926	- 1.0426	1.0172	1.0105
3208	- 0.6321	- 0.4221	1.0064	1.0042
3395	- 1.8526	- 1.1226	1.0189	1.0114
3384	- 0.1366	- 0.1266	1.0014	1.0013
3203	- 0.1009	- 0.0509	1.0010	1.0005
3309	- 1.0732	- 0.4732	1.0108	1.0048
3321	0.8211	1.4321	0.9919	0.9859
3251	1.1028	1.7217	0.9891	0.9831
3228	0.6177	1.2270	0.9939	0.9879
3115	0.5321	1.1501	0.9947	0.9886
3299	- 0.6218	- 0.3218	1.0063	1.0032
3305	- 1.1425	- 0.5425	1.0116	1.0055
3367	- 0.4511	- 0.3511	1.0045	1.0035
3255	0.4502	1.0675	0.9955	0.9894
3241	0.4925	0.7960	0.9951	0.9921
3347	- 1.7811	- 1.1811	1.0181	1.0120
3223	0.7709	1.3809	0.9924	0.9864
3233	- 2.1189	- 1.5189	1.0216	1.0154
3241	- 1.0923	- 0.4923	1.0110	1.0049
3219	0.2373	0.8533	0.9976	0.9915

表6 随机因子特征值

Table 6 Characteristic value of random factor

工程名称	随机因子均值		随机因子标准值	
	灌水法	气囊法	灌水法	气囊法
工程 1	0.9970	1.0000	0.0115	0.0110
工程 2	1.0136	1.0080	0.0085	0.0061
工程 3	1.0054	0.9996	0.0119	0.0113

由表3可以看出,工程1灌水法干密度相对误差为- 2.16% ~ - 2.40%,气囊法干密度相对误差为- 2.30% ~ - 1.98%。由表4可知,工程2灌水法体积相对误差为- 0.12% ~ - 2.9%,气囊法体积相对误差为- 0.08% ~ - 2.13%。由表5知,工程3灌水法体积相对误差为- 2.47% ~ - 1.43%,气囊法干密度相对误差为- 1.55% ~ - 2.09%。由表6可知,对于每一工点,气囊法与灌水法相比其随机因子均值更接近于1,可认为是对灌砂法的无偏估计;气囊法标准差比灌水法小;因此气囊法的测试精度比灌水法高,这与室内试验规律一致。

4 结 语

灌水法、灌砂法和气囊法3种密度试验方法的测试结果是密度真值的负偏估计。测试精度由低到高依次为灌水法、灌砂法和气囊法,但灌砂法与气囊法测试精度较为接近。密度试验气囊法测试精度和气囊式容积测定仪的性能能够满足工程要求。气囊式容积测定仪结构简单、操作方便、性能稳定,用户易于接受。

参加此项研究工作的还有张贵珍、王安升等同志。

参考文献:

- [1] TBJ 102—96, 铁路工程土工试验规程[S].
- [2] DIN 18125, Determination of Soil Density[S].
- [3] ASTM D 2167—94, Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method[S].
- [4] Ronald K O, Bjerager P. Model uncertainty representation in geotechnical reliability analysis[J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1992, 118, (3): 394—405.
- [5] 李小勇, 贾新征, 谢康和. 地基土抗剪强度指标测定方法的不确定性研究[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(5): 581—584.
- [6] 李小勇, 谢康和, 虞 颜. 岩土参数试验方法不确定性的评定方法[J]. 科技通报, 2001, 17(5): 21—25.
- [7] 李小勇. 土工参数空间概率特性及软黏土地基固结概率特性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.