

# 快速贯入法测定细粒土密度的试验方法与应用

常伟良 王正峡

(中国水电十一局有限公司中心试验室,河南 郑州 450001)

**【摘要】** 本文以郑州市贾鲁河综合治理工程为例,在大量土方回填作业检测的基础上,深入研究了细粒土密度、含水率与现场贯入阻力的关系。通过试验数据分析,建立了细粒土贯入阻力与土密度的回归公式。通过现场贯入试验,快速、便捷地推算出回填土密度,并将其应用于现场压实质量检测。该试验方法可供类似的土方回填质量检测项目参考。

**【关键词】** 细粒土;贯入阻力;填土密度;相关性分析

中图分类号: TV41

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2018)06-037-04

## Test method and application of rapid penetration method in determination of fine grained soil density

CHANG Weiliang, WANG Zhengxia

(China Hydroelectricity No. 11 Bureau Central Laboratory, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Zhengzhou Jialuhe Comprehensive Treatment Engineering Project Is adopted as an example in the paper. The rule relationship among fine grained soil density, moisture content and field penetration resistance is deeply studied on the basis of massive earthwork backfill operation test. The regression formula of fine grained soil penetration resistance and soil density is established through experimental data analysis. The backfill soil density is calculated quickly and conveniently through field penetration test, and it is used in field compaction quality test. The test method can provide reference for similar soil backfill quality test projects.

**Key words:** fine grained soil; penetration resistance; filling density; correlation analysis

在郑州市贾鲁河综合治理工程中进行了大量的细粒土回填施工作业,依照规范要求,采取环刀法或灌砂法检测密实度对土方回填质量进行控制。现场进行了大量的压实土密度检测,现场试验发现,压实土的密实度越大,土的贯入阻力也越大。在搜集大量的试验成果数据的基础上,根据土的密实度与贯入阻力假定关系,试对细粒土的贯入阻力与密度的相关性进行分析研究。

土是由固体矿物质、液体水和气体组成的三相体系,固相物质构成土的骨架,骨架之间的孔隙中充填着液相的水和空气。由于土的三相组成比例不是固定的,它随外界环境的变化而变化,这对土的力学性质有着很大影响,含水率是其中重要的影响因素之一,在研究土的密度与贯入阻力相关性时,必须考虑到含水率的影响。

## 1 工程概况

贾鲁河是淮河支流沙颍河的主要支流,也是郑州市的主要排水河道,发源于新密、荥阳两市交界处,在周口市汇入沙颍河,全长 256km,流域面积 5896km<sup>2</sup>。贾鲁河综合治理工程位于河南省郑州市,治理河段自尖岗水库至中牟县大王庄弯道,治理长度 62.77km,其中河道综合治理长 49.67km,河道疏浚长度 13.1km。共修建各类配套建筑物 71 座,开挖湖泊湿地 3 处,其中综合治理工程中包含土方回填量约 352 万 m<sup>3</sup>。

## 2 试验室室内土工试验

在施工现场取有代表性的土样,分组封存后送至试验室检测。按照室内土工击实试验程序,对不同含水率的土样进行击实后,检测击实土样的密度和含水率,并测试贯入阻力。将室内六种不同含水率土样进行击实试验的 35 组检测数据予以整理计算,结果见表 1。

表 1 细粒土室内击实试验检测数据统计

试验组号	实测含水率 w/%	实测湿密度 ρ/(g/cm <sup>3</sup> )	计算干密度 ρ <sub>d</sub> /(g/cm <sup>3</sup> )	贯入阻力代表值 f <sub>n</sub> /N
1	9.2	1.893	1.733	184.2
2	11.3	2.008	1.804	325.0
3	13.2	2.059	1.817	304.7
4	14.8	2.082	1.814	205.0
5	17.4	2.074	1.767	28.7
6	19.1	2.052	1.723	12.4

通过对表 1 数据分析,发现贯入阻力、密度随含水率增大规律性的变化,深入对数据变化规律进行相关性分析发现其相关关系。以含水率为 x 轴,贯入阻力和干密度为 y 轴作图,三者的相关关系如图 1 所示:

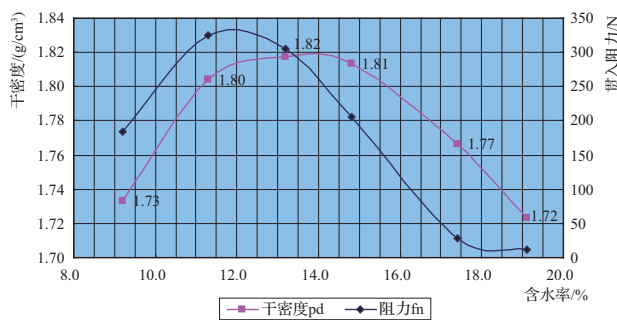


图 1 土样干密度、贯入阻力与含水关系

由室内击实试验检测数据统计分析及“细粒土干密度、贯入阻力与含水关系图”可知,在最佳含水率 ±4% 范围内,贯入阻力和干密度随含水率变化趋势基本一致。

## 3 基础试验数据回归分析

为深入研究干密度、贯入阻力与含水率相关性,进一步确定三者关系,对原室内击实试验得到的 35 组基础数据采取不同方法进行数理统计处理和回归分析。

### 3.1 对数回归分析法

当土样含水率在最佳含水率 ±4% 以内时,相关性较好,对该范围数据进行整理后统计分析,得出干密度推算值与贯入阻力实测值的相关对数方程如下:

$$\rho_{d1} = 0.1198 \times \ln(f) + 1.1375 \quad (1)$$

式中  $\rho_{d1}$ ——干密度推算值, g/cm<sup>3</sup>;

$f$ ——实测贯入阻力值, N。

上述回归方程相关系数 (Correlation coefficient):  $r = 0.9101$ , 判定为高度相关。计算检验绝对误差最大值 0.083, 相对误差最大值 4.59%。

### 3.2 线性回归分析法

综合分析室内击实试验数据及对数回归分析法的结果可知,含水率是对数回归公式精度的关键影响因素。含水率在最佳含水率 ±4% 范围内,土样干密度主要受贯入阻力影响;当含水率超出最佳含水率 ±4% 范围后,由于土体对贯入阻力的异常变化致使含水率成为显著因素。为了提高干密度、贯入阻力的拟合度,将含水率影响因素考虑在内,通过多元线性回归的方式分析数据,推算干密度公式如下:

$$\rho_{d1} = (43.7 \times f + 324.5 \times w) \times 10^{-5} + 1.583 \quad (2)$$

式中  $\rho_{d1}$ ——干密度推算值, g/cm<sup>3</sup>;

$f$ ——实测贯入阻力值, N;

$w$ ——含水率, %。

上述回归方程相关系数 (Correlation coefficient):  $r = 0.9176$ , 可判定为高度相关。经计算检验,绝对误差最大值 0.105, 相对误差最大值 5.82%。

## 4 现场试验对比验证和应用误差分析

### 4.1 以灌砂法为基准对比验证

根据以上室内试验数据回归分析结果,在选定试

验场地进行随机对比检测,并验证相关关系的适用性和准确性。按照《土工试验规程》分别进行灌砂法试验、环刀法试验和快速贯入法试验进行对比检测。三种方法检测结果对比见表2。

表2 现场某段填方压实质量检测对比试验结果

(单位:  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

编号	现场测定/(推定)密度值						以灌砂法为基准计算误差					
	灌砂法	快速法		环刀法			快速法		环刀法			
		1	2	1	2	3	1	2	1	2	3	
1	1.629	1.661	1.663	1.625	1.631	1.609	-0.032	-0.034	0.004	-0.002	0.020	
2	1.671	1.701	1.668	1.602	1.644	1.607	-0.030	0.003	0.069	0.027	0.064	
3	1.667	1.665	1.659	1.630	1.620	1.635	0.0020	0.008	0.037	0.047	0.032	
4	1.659	1.697	1.674	1.595	1.670	1.671	-0.038	-0.015	0.064	-0.011	-0.012	
5	1.665	1.701	1.668	1.612	1.625	1.635	-0.036	-0.003	0.053	0.040	0.030	
最大误差							-0.034	-0.038	0.069	0.047	0.064	
最小误差							0.0030	0.0200	0.004	-0.002	-0.012	

- 注 1. 快速法1是指利用公式1推算出的结果;  
2. 快速法2是指利用公式2推算出的结果;  
3. 两个误差是以灌砂法为基准,计算快速法和环刀法的差值。

根据上表数据,可初步推断采用灌砂法、环刀法、快速贯入法测定土密度结果基本一致,且快速贯入法检测结果与灌砂法更接近,采用快速贯入法能满足现场土工压实质量检测要求。

### 4.2 以环刀法为基准对比验证

以贾鲁河综合治理工程三标土方回填质量检测为

例,在现场选定验证点后,首先按标准规范要求,采用环刀法检测压实土密度;同时在检测点附近进行快速贯入法测试,推算干密度。将标准方法(环刀法)和快速贯入法检测数据统计整理进行对比验证,两者结果见表3。

表3 现场对比试验结果数据

序号	施工部位	阻力/N	环刀法实测密度/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$	推算密度/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$		误差(快速贯入法)			
				公式1	公式2	绝对/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$		相对/%	
						公式1	公式2	公式1	公式2
1	三标回填	269.5	1.75	1.78	1.73	-0.03	0.02	-1.60	1.29
2	三标回填	248.5	1.72	1.77	1.72	-0.05	0.00	-2.77	0.14
3	三标回填	371.4	1.82	1.82	1.77	0.00	0.05	0.06	2.64
4	三标回填	310.7	1.82	1.80	1.75	0.02	0.07	1.31	4.05
5	三标回填	296.9	1.72	1.79	1.76	-0.07	-0.04	-4.09	-2.37
6	三标回填	216.0	1.72	1.75	1.73	-0.03	-0.01	-1.73	-0.31
7	三标回填	76.4	1.66	1.62	1.66	0.04	0.00	2.57	0.14
8	三标回填	55.5	1.65	1.58	1.66	0.07	-0.01	4.46	-0.57
9	三标回填	70.8	1.68	1.61	1.64	0.07	0.04	4.32	2.54
10	三标回填	86.0	1.64	1.63	1.63	0.01	0.01	0.46	0.37
11	三标回填	90.0	1.6	1.64	1.67	-0.04	-0.07	-2.38	-4.60
12	三标回填	102.1	1.62	1.65	1.68	-0.03	-0.06	-2.12	-3.64
13	三标回填	111.3	1.63	1.67	1.67	-0.04	-0.04	-2.17	-2.73

续表

序号	施工部位	阻力/N	环刀法实测密度/(g/cm <sup>3</sup> )	推算密度/(g/cm <sup>3</sup> )		误差(快速贯入法)			
						绝对/(g/cm <sup>3</sup> )		相对/%	
				公式 1	公式 2	公式 1	公式 2	公式 1	公式 2
14	三标回填	100.0	1.61	1.65	1.66	-0.04	-0.05	-2.58	-3.37
15	三标回填	113.9	1.64	1.67	1.66	-0.03	-0.02	-1.72	-1.38
16	三标回填	116.2	1.65	1.67	1.67	-0.02	-0.02	-1.26	-1.20
17	三标回填	107.4	1.62	1.66	1.67	-0.04	-0.05	-2.51	-3.18
18	三标回填	104.7	1.71	1.66	1.65	0.05	0.06	3.07	3.31
19	三标回填	111.1	1.73	1.67	1.68	0.06	0.05	3.75	3.05
20	三标回填	68.4	1.68	1.60	1.68	0.08	0.00	4.57	0.13

根据现场试验检测结果,将对试验数据统计整理,对两组数据分别进行分析,其中对数回归法公式的误差分析结果整理如图 2 和图 3。

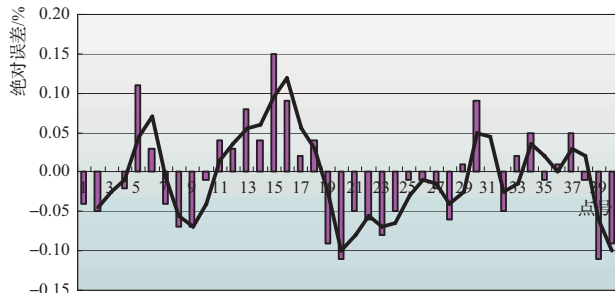


图 2 对数回归法绝对误差值分布

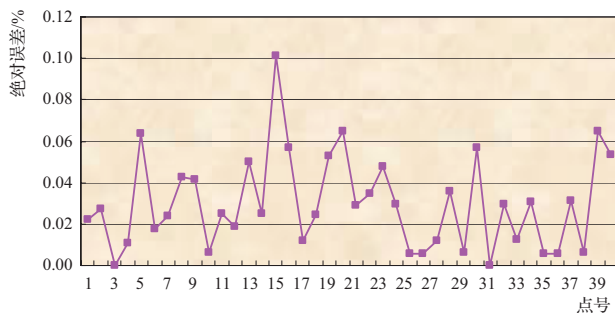


图 3 对数回归法相对误差值分布

若不考虑剔除异常值,线性回归公式计算绝对误差最大值 0.15,相对误差最大值 10.1%。

剔除异常值后,计算指数回归公式计算绝对误差最大值 0.08,相对误差最大值 5.0%。

根据贾鲁河综合治理工程三标现场实际检测有代表性的约 100 组试验数据中随机选取了 20 组数据,进行统计和误差分析后结果表明,采用标准方法(环刀法)检测土工压实质量所得出结果与快速贯入法结果相比差别较小,20 组检测数据统计的最大误差仅为

0.15,完全能满足现场土工回填施工质量控制要求。

## 5 结 语

根据现场应用检测的数据统计结果和上述误差分析,可以得出:

a. 匀质细粒土的密度与贯入阻力、含水率存在明确的相关关系,该规律性关系可以通过一系列的室内击实试验,经数据分析处理后推算得出。

b. 经过应用验证,快速贯入法可广泛应用于同类细粒土的现场密度测定,作为标准方法的补充。相对于标准方法,快速贯入法能快速得出现场压实度,提高工作效率,能达到随时检测、安全便捷地控制现场施工质量的目的。

贾鲁河综合治理工程土方回填施工质量控制按照水利行业标准规范要求,现场可采用环刀法检测土工回填压实度,每 100 ~ 150m<sup>2</sup> 取样检测 1 点,每次取样不少于 3 点。根据计算工程量应取样约 67000 点,采用标准方法检测耗时费工,将占用大量的人力、物力,为此回填土压实度检测采用快速贯入法也有较好的经济效益和实用意义。由于采用快速贯入法检测土工压实质量,在贾鲁河综合治理工程现场检测中验证效果较好,得到了监理单位的认可和支持,在土方回填检测中得以应用。

本文根据现有工程实例,仅对细粒土的密度测定方法进行了探索试验,还存在一定的局限性,对于其他类回填土的质量检测可参考应用。快速贯入法检测回填土压实质量有待更进一步的深入研究和分析,在今后的工作实践中有推广应用的价值。◆