

文章编号:1005-0523(2013)05-0018-06

提高室内击实试验精确度的方法研究

王旭¹,赵秀绍¹,艾成刚¹,莫林利²

(华东交通大学1. 土木建筑学院;2. 软件学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对室内标准击实试验,介绍了压实度的确定方法和室内击实试验方法的选用,对影响试验结果的因素进行了说明和分析研究。首先对试验用土提出了要求,其次提出了击实土余土高度控制在6 mm内的“精确边击边测”的控制方法,控制每层土样击实后厚度约为三分之一筒高,当超过或缺时,应适当的减小或增加下层土的加入量,实践表明“精确边击边测”的控制方法可以有效的控制余土高度在6 mm以内。实验数据的处理借助Excel和Matlab软件,分别采用三点二次和更高次的Lagrange插值对最大干密度与最佳含水率进行求解。计算结果表明,并非选取的插值点越多、拟合曲线次数越高,就能达到更高的准确性,采用合理的三点二次的Lagrange插值法就可得到准确的计算结果。

关键词:击实试验;最大干密度;“精确边击边测”;余土高度;数据处理

中图分类号:TP311+TU411

文献标志码:A

随着我国经济的快速发展,交通运输业也得到了很快的发展,运行速度慢、运量小的旧式运输方式已适应不了经济发展的需求,而且现有的一些公路和铁路在快速、重载交通运输条件下,路况遭到了不同程度的变形和损坏,究其破坏的原因,主要是路基的压实度不够,承载能力低导致其破坏。因此对路基质量的要求必须有足够的强度和稳定性。为了保证路基有足够的抗变形的能力,目前国内规范主要采用路基压实度指标来进行评价,其定义^[1]:

$$K = \rho_d / \rho_{dmax} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为压实度; ρ_d 为现场测定的压实干密度; ρ_{dmax} 为室内测定相同土样的室内击标准击实试验最大干密度。

根据式(1)知,影响压实度 K 的一个重要参数是最大干密度 ρ_{dmax} ,所以准确测出最大干密度 ρ_{dmax} 是控制压实度的关键。目前,最大干密度主要是通过室内击试验得到,但是没有准确的解析式求解 ρ_{dmax} ,而是根据估读击实曲线峰值确定。为了减小误差,得到比较精确的最大干密度,就需要规范试验操作和对数据进行合理的处理分析。

1 最大干密度实验方案的选择

确定最大干密度的目的是为路基施工碾压提供土的压实资料,现行我国测定最大干密度的主要方法是室内标准击实试验。《铁路工程土工试验规程》^[2]中的击实试验采用的是普氏击实仪,有轻型和重型两种,规格和主要部件如表1所示。我国采用轻型试验较多,水库、堤防、铁路路基填土均采用轻型击实试验,轻型击实试验要求分三层击实,每层25击,适用于粒径小于5 mm的粘性土。文中所述实验的目的是测定既有铁路过渡段路基土最大干密度,样本采用的是宁启既有铁路冯官圩中桥的粉质粘土试样,由于路基填筑时采用的是轻型1击实方法,故本次试验也采用轻型1击实方法。

收稿日期:2013-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51208198);江西省教育厅项目(GJJ11441);华东交通大学博士科研启动基金项目

作者简介:王旭(1987—),男,硕士研究生,研究方向为道路与铁道工程、岩土工程。

表1 击实仪规格和主要部件尺寸

Tab.1 Compaction equipments standards and the dimensions of the components

试验类型	编号	击锤			击实筒			护筒	试验条件		
		质量/kg	锤底直径/mm	落距/mm	内径/mm	筒高/mm	容积/mm	高度/mm	层数	每层击数	最大粒径/mm
轻型 (Q)	Q1	2.5	51	305	102	116	947.4	50	3	25	5
	Q2	2.5	51	305	152	116	2 103.9	50	3	56	20
	Z1	4.5	51	457	102	116	947.4	50	5	25	5
重型 (Z)	Z2	4.5	51	457	152	116	2 103.9	50	5	56	20
	Z3	4.5	51	457	152	116	2 103.9	50	3	94	40

2 击实试验中应该注意的问题与采取的措施

任本杰^[3],郭凯玥等^[4]分析了通过做平行试验提高干密度计算的精确性。罗小芳^[5]研究了击实功对击实试验的影响。曾凡稳^[6]研究了击实筒内涂抹润滑剂对击实试验最大干密度的影响。在击实试验中,最大干密度 ρ_{dmax} 由含水率(ω)-干密度(ρ_d)曲线的峰值确定。根据击实后土样干密度的计算公式: $\rho_d = \rho / (1 + 0.01\omega)$,要提高实验结果的准确性,就需要准确测出击实后土样的湿密度 ρ 和击实后的含水率 ω (%)。针对提高试验结果的准确性,文中从试实验用土,余土高度的控制,数据处理方法几个方面,分析提高室内击实试验准确性应注意的几个问题并提出相应的改进措施。

2.1 击实试验用土的要求与试样的配制

选取做试验的土要干净均匀,不能含有腐殖质、碎石等,否则对土的最有含水率和最大干密度都有不同程度的影响。轻型击实试验要求土颗粒粒径不大于5 mm,因此试验用土必须过5 mm筛。击实试验的土样制备有干法和湿法两种,两种方法所得的实验结果也不同。《土工试验技术手册》^[7]指出:最大干密度以烘干土最大,风干土次之,天然土最小;两种方法所对应的最优含水率也有差异,以烘干土最低,此现象粘土表现最突出,由于黏粒含量高,烘干对最大干密度影响也越大,原因是烘干影响了胶粒的性质,故粘土不宜用烘干土制备试样。在配置不同含水率土样时,依据文献^[8]提出的方法,准确测出土的塑限 ω_p ,由塑限值确定所配土样含水率的范围。所配土样的含水率应相差1%~2%,不能相差过大或过小,当配制土样的含水率相差过大,则在作图求解时由于数值点比较分散,峰值点不确定性较大;当土样含水率相差过小时,数值点分布很密集,作图拟合计算时会漏掉某些关键点,对实验结果都会造成不同程度的影响。在试验用土的塑限值附近配制至少5个土样,以减小试验误差。在采用有干到湿的方法制备土样时,喷水后要注意保湿防止水分蒸发,在室温下浸润不少于12 h再进行试验,保证水分均匀的浸润到土样中,击实后土颗粒在水的作用下均匀的粘结在一起,击实后土柱不应出现类似“断桩”现象,确保试样均匀击实。

2.2 击实试验余土高度对试验结果的影响分析与控制措施

2.2.1 实验余土高度控制标准

试样击实后总会有部分土超出击实筒的高度,这部分高出的土柱称为余土。由于在击实时不可能很精确的控制到标准击实后余土高度为零,为了减小人们试验操作带来的误差,达到试验精度,《土工试验技术手册》^[7]规定,余土高度不超过6 mm时,干密度的误差(以余土高度为零时的干密度为准)才能控制在允许误差范围内。对于每一次击实试验,由于落锤的质量、每次落下的高度和击实的次数都是一定的,因此击实功是一定的,当余土高度过大(超过6 mm)时,就会使土柱单位体积的击实功减小,导致土样不能够充分压密,干密度显著减小;当余土高度为负(击实后土柱的高度低于击实筒的高度)时,导致土样单位体积的击实功增大,与标准击实密实度相比,此时土样密实度大大提高,干密度显著增大。因此余土高度过大或为负两种情况对击实试验的精确性都有很大的影响,不能准确的指导工程实践,而余土高度控制在

6 mm 内时,实测干密度与标准干密度的误差在试验精度之内。

2.2.2 余土高度“精确边击边测”的控制方法

在试验过程中,由于不同含水率的土在松散状态下的密实度不同,导致击实后体积的减少量也不同。在传统的击实试验中,分三层击实时每次装入的土样量只是通过粗略的估计来控制的,相邻两层装入的试样土量差别较大,在击实试验完成后余土高度很难控制在 6 mm 内,从而会显著影响求解最大干密度的精确性。为了能够有效地控制余土高度,提高实验的精确度,可采用“精确边击边测”的方法:①在制备每个含水率的土样前,采用标准击实法,先做一个参照样品,测出余土高度在控制范围内的土柱高度 h_0 和总质量 m_0 ,估算每层应装入土的质量。②依据上述的估算结果,装入参照样品总质量的 $1/3$ 的土样,平铺、击实。由于轻型击实标准筒高度为 116 mm,在每次装入土样击实后的高度控制在 40 ± 1 mm,每层土的击实要均匀,开始几击要沿击实筒周围击实,然后在中心处加击一次,保证击实面平整。③每层土击实完成后,用尺子测量击实筒剩余空间的高度,如图 1 所示,装入质量为 $m_1 = m_0/3$ 的第一层土样后击实,算出筒内击实后土样的高度 h_1 。分别由式(2)和式(3)计算 h_1 与 $h_0/3$ 的偏差 Δh_2 和装入第二层土的质量 m_2 。由式(2)和式(4)可计算出第三次击实应该装入试样土量的合理值 m_3 。按试验要求把上一次的击实面刨毛后,装入下一层土样并击实,这样可以精确地控制余土高度且保证击实土柱的完整性。试验中发现,在击实后拥有同样高度的土柱时,含水率低的土样每次装入的量少,含水率高的土样装入的量多,这是由于含水率高的土在自然状态下比较松散,空隙率大,击实沉降量更大些。④完成击实后,在取下护筒时,开始时反复轻轻转动,使余土柱与护筒处于脱离状态,防止余土柱与筒内土产生裂缝而造成筒内土样的不完整性,特别是含水率较低的土样,土颗粒之间的粘聚力很小,容易产生裂缝出现土结块现象,造成试样不完整。若出现土柱有损坏现象,要重新击实制作土样。对于余土的去,用切土刀轻轻用力将土一层一层削去,不能在试样中出现土的凹陷区,直到试样与筒边缘位于同一平面上,试样才满足要求。

$$\Delta h_{i+1} = h_i - \frac{h_0}{3} \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

$$m_2 = \frac{m_0}{3} - \frac{m_0}{3h_1} \times \Delta h_2 \quad (3)$$

$$m_3 = \frac{m_0}{3} - \frac{m_2}{h_2} \times \Delta h_3 \quad (4)$$



图1 精确控制测量图

Fig. 1 Controlling with compaction by accurate measuring

式中: h_i 为第 i 次装入土样击实后的该层土的高度; Δh_{i+1} 为第 i 次装入土样击实后的该层土的高度 h_i 与 $h_0/3$ 的偏差。

3 试验数据处理与分析

击实试验的数据处理方法规范中提供的方法是图解法,根据试验测出的含水率和干密度数据,绘成二者之间的关系曲线图,曲线的峰值即为该土的最大干密度,峰值对应的含水率为最佳含水率。这种方法的缺陷是,估读带有人为主观性,不能得出一个科学准确的最大干密度和最佳含水率,误差较大,给路基压实度评价也带来不确定性。冯忠居等^[9]直接提出 Lagrange 用三点二次差值的方法建立干密度和含水率之间的关系,从而求得最大干密度和相应的最佳含水率,而没有采用高次多项式拟合作为计算结果对比。韩峰^[10]在 Excel 表格中应用非线性最小二乘法进行曲线拟合,计算最大干密度与最佳含水率。龚新法^[11]利用最小二乘法为理论基础,对击实试验数据进行了定量分析。本文对 Lagrange 三点二次插值和更高次的 Lagrange 插值拟合方法进行计算,同时对比分析其求解的准确性。

3.1 Lagrange 插值求解最大干密度与最佳含水率

3.1.1 算法基本原理

Lagrange 插值法^[12]数据分析的插值函数:

$$\rho(\omega) = \sum_{i=1}^n \left(\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{(\omega - \omega_j)}{(\omega_i - \omega_j)} \right) \rho_i \quad (5)$$

其中: $\rho(\omega)$ 为插值拟合函数干密度,表示含水率的函数; ω 表示插值函数的变量含水率; ω_i 与 ω_j 为试验所测得的试样含水率值,式(3.1)中满足 $i \neq j$; ρ_i 为试验所得的相应于含水率 ω_i 的干密度值。

首先根据选用的插值点个数和要求结果的目标,用 Matlab 软件编程计算各次插值函数的求导程序,对(5)式求其导函数,再令(5)式导函数值为0。其次用牛顿迭代法对多项式进行求根,迭代方法:

$$x_{k+1} = x_k - f(x_k)/f'(x_k) \quad (6)$$

其中; $k=0,1,2,3 \dots$; x_0 为赋予方程 $f(x)=0$ 的初始近似根; x_k 为第 k 次迭代后的近似根值; x_{k+1} 为代入数值 $x=x_k$ 迭代后的近似根值; $f(x_k)$ 与 $f'(x_k)$ 分别为 $x=x_k$ 时 $f(x)$ 的函数值与导函数值。

根据(3.2)式用 Matlab 软件编制牛顿迭代法求根公式程序,赋予适当的初始含水率 ω (%) 的值和迭代次数,可求得准确最佳含水率 ω (%),再带入(3.1)式,即可求出最大干密度 ρ_{dmax} 。

3.1.2 计算方法中数据的选用

在用数学方法计算分析时,数据的选用也至关重要。由于最大干密度出现在曲线的峰值处,因此所选用的数据要在峰值左右对称取值,使峰值位于拟合的曲线段内。根据实验测定的数据与曲线的分布状态,可以用二次或更高次的多项式对峰值所在的区间进行曲线拟合,达到可以用数学理论精确求解的目的。

3.2 工程实例分析

现以宁启铁路工程为例,分别采用 Lagrange 三点二次插值和更高次的 Lagrange 插值方法。对该工程实例进行曲线拟合、计算分析,算出最佳含水率与最大干密度,并对结果进行比较,分析其准确性。工程实例的实验数据见表2。

表2 试验数据
Tab.2 Experimental data

参数	试验序号						
	1	2	3	4	5	6	7
含水率/%	18.670	20.198	22.834	23.656	24.373	26.298	29.469
干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	1.542	1.582	1.604	1.639	1.632	1.581	1.531

根据已测数据,在 Excel 中描点连成光滑的曲线图,图2为试验数据通过 Excel 的作图曲线。根据数据处理时选择接近曲线最大值位置的点的原则,图3为选择表2中序号为1~7对应的点,分别进行二次、三次、四次、五次多项式拟合曲线图,并且与实测数据绘制的曲线作比较,结果表明,选择7个点的曲线拟合所得的最大值与真实最大值差别很大,因此,此条件下的7点 Lagrange 插值法求最大值不可取。图4为选择表2中序号为2~6的点作为计算的插值点,经多项式拟合结果表明,在所测数据范围内,四次和五次多项式的峰值与试验曲线的峰值有很高的重合度。图5为选择表2中序号为3~5的点作为计算的插值点,拟合曲线为二次抛物线,与试验曲线较接近。现用 Lagrange 插值法分别对拟合度比较高的四次多项式和二次多项式求解最大值,并比较其准确性。

采用四次多项式拟合与二次多项式拟合的 Lagrange 插值法的插值点的选取如表3-2。用 Matlab 编写多项式求导程序与牛顿迭代法求根程序,分别求解两种方法的干密度的最大值。采用五点四次插值的计算结果为:最佳含水率 $\omega_{40} = 23.862$ (%),最大干密度 $(\rho_{dmax})_4 = 1.6405 g \cdot cm^{-3}$ 。采用三点二次插值的计算结果为: $\omega_{20} = 23.871$ (%), $(\rho_{dmax})_2 = 1.6406 g \cdot cm^{-3}$ 。比较两种方法计算结果:最佳含水率差值为 $|\Delta\omega| = |\omega_{40} - \omega_{20}| = 0.009$ (%),最大干密度差值为 $|\Delta\rho| = |(\rho_{dmax})_4 - (\rho_{dmax})_2| = 0.0001 g \cdot cm^{-3}$ 。

由以上计算分析可得,采用从四次多项式和二次多项式的 Lagrange 插值求解结果相差很小,可认为计

算结果相同,而且与曲线的拟合结果一致,因此两种拟合方法都是可取的。在通常的计算中,可以选择计算量小的抛物线型的二次插值就可得到准确的最大干密度。在此数据处理过程中,目的是找到最大干密度 ρ_{dmax} ,即曲线的峰值。采用 Lagrange 插值法求解时,并非插值点越多、多项式次数越高结果越准确。选择合适的插值点是关键,距离峰值较远的试验数据在计算时可以略去,在峰值点附近对称取点,作为插值计算点,就可以通过数学理论推导求得准确的结果,从而减小估读带来的误差。

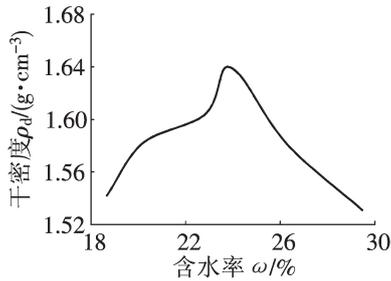


图2 试验数据Excel作图曲线

Fig.2 Plotted curve in Excel for experimental data

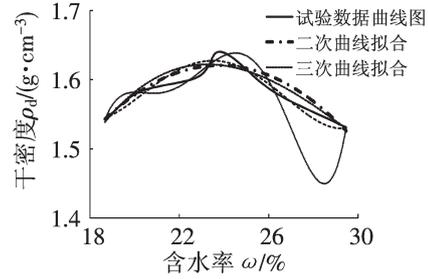


图3 Excel作图曲线与多项式拟合曲线比较(7点)

Fig.3 Plotted curve in Excel and polynomial fitting curves (7 points)

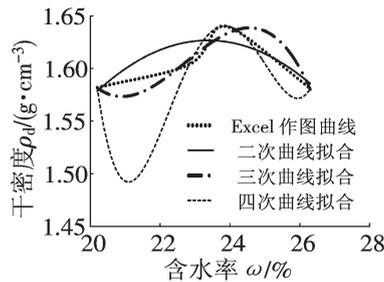


图4 Excel作图曲线与多项式拟合曲线比较(5个点)

Fig.4 Plotted curve in Excel and polynomial fitting curves (5 points)

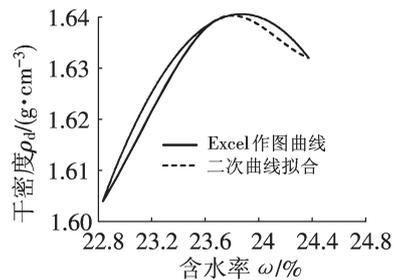


图5 Excel作图曲线与多项式拟合曲线比较(3个点)

Fig.5 Plotted curve in Excel and polynomial fitting curves (3 points)

表3 多项式拟合插值点

Tab.3 Polynomial interpolation points

参数	四次多项式拟合插值点					二次多项式拟合插值点		
	试验序号					试验序号		
	2	3	4	5	6	3	4	5
含水率 $\omega / \%$	20.198	22.834	23.656	24.373	26.298	22.834	23.656	24.373
干密度 $\rho / g \cdot cm^{-3}$	1.582	1.604	1.639	1.632	1.581	1.604	1.639	1.632

4 结论

1) 阐述了击实方法、干湿法击样、余土高度、数据处理对击实试验精确度的影响因素,重点对击实操作过程中余土高度对实验精确度的影响进行了分析,提出了“精确边击边测”的方法。由于本次试验条件所限,对于各因素对试验精确度的综合影响需要进一步的系统研究。

2) 针对余土高度的控制问题,采用“精确边击边测”的方法,其核心就是量测并控制击实后剩余空筒高度,通过精确控制每层装入土样的质量,使第一次和第二次击完后分别应剩余 $2h_0/3$ 和 $h_0/3$ 高度,当超过或小于相应值时,在下一层加土样时应进行加土或减土。试验表明,该方法可以有效地控制了余土高度在 6 mm 内,提高试验的准确性。

3) 在最大干密度计算方法中,提出数据法代替图解估读法。采用 Lagrange 插值法对不同次数的多项式的拟合、求解结果进行了分析讨论,数据处理时选择插值点是关键。选取的插值点越多或拟合多项式次数越高,并不一定能提高计算的准确性。

4) 合理控制试样的含水率,使试验数据在峰值点左右合理分布,峰值点附近的对称点所在区间的试验曲线基本满足抛物线型,因此要选择峰值点附近的试验数据作为插值点,并且对这些点所在的区间的曲线进行拟合。分析表明,在峰值点附近区间段选用三点二次插值就能够对该区间段内的曲线进行准确的拟合,从而精确求解最大干密度,此方法大大降低了对曲线进行高次拟合时求解高次多项式的难度。

参考文献:

- [1] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 3版. 北京:人民交通出版社,2007:69.
- [2] 中华人民共和国国家标准铁路工程土工试验规程(TB 10102-2004) [S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 任本杰,郭兆清. 基于标准击实试验中几个值得注意问题的分析[J]. 工程与建设,2006,20(3):241-243.
- [4] 郭凯玥. 土工击实试验方法中几个常见问题分析[J]. 甘肃科技,2010,26(6):134-136.
- [5] 罗小芳. 浅析影响击实试验准确性的主要因素[J]. 土工基础,2009,23(1):72-74.
- [6] 曾凡. 稳土的室内击实试验结果影响因素及分析[J]. 中外公路,2009,29(6):250-253.
- [7] 南京水利科学研究院土工研究所土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2003:57.
- [8] 赵秀绍,莫林利. 回归分析在界限含水率试验数据处理中的应用[J]. 华东交通大学学报,2010,27(3):27-32.
- [9] 冯忠居,谢永利. 标准击实试验最佳含水量和最大干密度的理论计算[J]. 长安大学学报:自然科学版,2002,22(2):10-13.
- [10] 韩峰. 在 Excel 表格中计算最大干密度与最佳含水率[J]. 铁路计算机应用,2008,17(6):46-47.
- [11] 龚新法,方焘,袁民豪. 标准击实试验的一种数据处理方法研究[J]. 华东交通大学学报,2004,21(5):74-76.
- [12] 王金柱. 数值计算方法[M]. 西安:西北工业大学出版社,2011:14-18.

Study on Accuracy Improvement of Laboratory Compaction Experiment

Wang Xu¹, Zhao Xiushao¹, Ai Chenggang¹, Mo Linli²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Software, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper discusses how to determine compaction degrees and how to choose laboratory compaction experiments, then analyzes the factors that influence the experiment results. Firstly, the requirements for the experiment soil are set forth; Secondly, in order to control the excess height of soil column within 6mm, an experiment method called “controlling the excess height of soil column with compaction by accurate measuring” is proposed to control the thickness of each layer of soil sample reaching about one-third of the tube after compaction. When the height of each layer is higher or lower than one-third of the tube, the amount of added soil in the next step should be decreased or increased accordingly. The empirical study shows this method can effectively control the excess height of soil column within 6mm. In addition, with the aid of Excel and Matlab software, Lagrange interpolated with quadratic polynomial and high order polynomial is adopted to get the maximum dry density and optimum moisture content. Results suggest that the accuracy of the result is not related to the numbers of interpolation points and high-order curve-fitting. Instead, Lagrange interpolated with quadratic polynomial in which three number points are reasonably selected will lead to accurate calculation results.

Key words: compaction experiment; maximum dry density; compaction by accurate measuring; soil height; data processing