

延安地区黄土高填方工程室内标准击实试验研究

张伦超^{1,2}, 郝明月³

(1. 滁州职业技术学院土木工程系, 安徽 滁州 239000; 2. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098;
3. 日照港集团有限公司, 山东 日照 276800)

摘要:随着西北地区城镇化建设的发展,黄土高填方成为一个重要的研究课题。针对黄土高填方项目做了大量室内标准击实试验,对理论问题、影响因素、数值解法进行了研究。研究表明:(1)依据能量守恒原理,通过计算发现我国各行业土工规程中给出的单位体积击实功标准值较延安地区黄土略微偏小;(2)引入含气量概念,发现 Q_3 黄土击实样比 Q_2 黄土击实样含气量高;(3)引入可达到的压实系数概念,通过构造可达到的压实系数与饱和度的关系曲线,发现在特定的干密度条件下,选择最优含水率左侧的含水率数值更为适宜;(4)可以结合几个主要影响构造含水率的最优区间,将含水率控制在最优区间而不是最佳含水率数值,即可以减少水的使用,也能保证施工质量要求。

关键词:击实试验;黄土高填方;含气量;理论分析;可达到的压实系数;最优区间

中图分类号:TU411.3;TU444 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2018)02-0021-06

Laboratory Study of Indoor Standard Compaction Test on High Loess-filled Project in Yan'an Area

ZHANG Lun-chao^{1,2}, HAO Ming-yue³

(1. Department of Civil Engineering, Chuzhou Vocational and Technical College, Chuzhou, Anhui 239000, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Rizhao Port Group Co., Ltd., Rizhao, Shandong 276800, China)

Abstract: With the development of urbanization in northwest region, the high loess-filled project has become an important research topic. In this paper, indoor standard compaction tests are carried out to research theoretical problems, influencing factors, and numerical solutions. The results show that: (1) According to the energy conservation theory, it finds that the calculated unit volume compaction standard values given by different industry geotechnical testing rules are a little smaller than loess in Yan'an region. (2) By introducing the concept of air content, this paper finds that the compacted Q_3 loess sample is higher in air content than the compacted Q_2 loess sample. (3) By defining the concept of obtainable compaction coefficient and structuring relation curve of obtainable compaction coefficient and saturation level curve, this paper finds out that in specific conditions of the dry density, select the value of the left side of optimum water content is more appropriate. (4) Combining with several main factors can structure the optimal range of water content, and controlling water content in the optimal range rather than the optimum water content value, the use of water can be reduced and the construction quality requirement can be also ensured.

Keywords: standard compaction test; high loess-filled project; air content; theoretical analysis; obtainable compaction coefficient; optimum range

0 引言

任何一个工程结构都会通过基础与土体或岩石直接接触,而与之接触的土体,或者是天然土壤,或者是人工填土。土在本质上是一个三相系统

的存在:(1)土体颗粒:固相;(2)水:液相;(3)空气和水蒸气:气相。土层在高强度的外加荷载作用下,其中的结合水和气体一方面会溶解在自由水中,另一方面则会随着孔隙体积的变化而被排出,从而产生一定的压缩固结变形^[1]。黄土是具有湿陷

收稿日期:2018-01-29

基金项目:安徽省教育厅2017年高校自然科学研究项目重点项目资助(KJ2017A725)。

作者简介:张伦超(1980—),男,安徽定远人,讲师,博士,研究方向:土木工程施工及混凝土结构耐久性。

性的特殊土壤,当水环境变化时遇水湿陷,迅速丧失结构稳定性和承载力,并且在我国西北地区分布广泛。许多类型的工程结构,例如水坝、挡土墙、公路、机场、运河堤岸等需要人工填土,随着西北黄土地区城市新区建设的发展,黄土高填方项目越来越多,填方高度和深度的数值在逐年增大,压缩固结与湿陷性变形很可能会损害到结构的稳定性,地基的变形可能会引发一系列严重的工程事故。同时,最近几年西北地区地震灾害频发,干密度数值对黄土的震陷性有着显著的影响^[2],总体上震陷系数随着干密度的增大而逐渐减小。人工填方不同于天然固结土壤,因此在土方施工过程中要严格控制压实系数以提升施工质量,压实系数的概念与最大干密度有关系,只有在最优含水率条件下压实,才能达到最佳的压实效果。

压实是一种通过外力作用,减少空气体积而使土体变得更加密实的方法,增大了土的干密度值,即提高了密实程度。在填方、路基、堤坝等建设过程中,每层填土都会通过一个特定的压实方式进行压实,比如压路机、表层振动器、重锤夯实或者强夯法等。

室内标准击实试验是一种室内测量最大干密度和最优含水率的方法,通过对土体的振动压实使土体压密,在不同的含水率下找到最大干密度与最优含水率数值。由室内标准击实试验所确定的最大干密度与最优含水率数值,在土方压实施工中起着非常重要的作用,一些学者^[3]对室内标准击实试验的影响因素进行了研究,同时用数值分析的方法,给出最大干密度与最优含水率的数值解。由于受试验设备、试验程序及试验者差异等因素,试验结果往往存在一定的误差;以往的研究成果没有系统总结国内外规范,对实验步骤的选择不明确;击实试验属于土的常规力学性质试验,因此对击实试验的理论研究较少,为了解决相关问题本文针对延安地区黄土高填方工程,做了大量室内标准击实试验。

1 试验概况

现在国内外有很多种击实试验办法,我国规范中采用五点法,就是根据至少五个击实点做一条曲线,然后根据曲线的峰值点找到所对应的最优含水率与最大干密度,五点法需要大量用土,对土样的浪费非常严重,像现在新兴的高庙子膨润土研究,采用此类方法特别浪费资金,但是此类方法所获得的试验数据最为充分,所得到的试验结果最准确;

一些学者提出用三点法^[4,5],三点法的出现是采用数值计算的办法,核心观点是根据三个击实点构造插值函数等办法求解,并且在插值函数中,插值点越多试验结果越精确;一些学者对击实试验曲线进行回归分析,即曲线的数据拟合,通常认为击实试验曲线属于抛物线形,罗孝荣等^[6]将击实试验曲线做二次回归分析,但是本文的试验结果证实延安Q₂黄土满足三次回归分析。国外学者对击实试验方式进行了革新,采用单点击实试验,单点法的最大优点是对土样的浪费较少,工程量较少,国内最早关于单点法的介绍见于朱崇辉等^[7]发表的论文,在黄土上没有实例。

国家标准中规定击实试验有轻型击实试验与重型击实试验两种类型,适用范围上两者有很大不同,重型击实试验适用于高等级公路、大型水坝,机场建设以及城市新区建设等大型填土工程。试验土样取自延安宝塔区,为扰动土样,黄土填料主要为Q₂、Q₃黄土,根据液塑限联合测定的试验结果,Q₂、Q₃黄土塑限分别为17.9%和17.3%。本次试验依托于延安新区建设,其填土最深处为112 m,选择采用标准重型击实试验,击实筒采用大筒,根据国家试验仪器标准规定选用DJD-1型标准电动击实仪。

现场试验场地属于沟谷型有侧限情况,黄土高填方变形主要是压缩固结变形与浸水变形,而浸水变形又包含浸水软化变形、湿化变形、湿陷变形、溶滤变形等。黄土高填方填土工程完成之后,施工场地需要空置一定时间,使场地压缩固结变形可以较充分进行,因而获得良好的建筑地基条件。但是,突然的水环境变化对黄土高填方项目浸水变形特性影响严重,由于水环境变化的突发性和影响程度的不确定性,使黄土地基的稳定性和沉降变形问题变得非常复杂。室内击实试验为后续试验和现场质量控制提供重要的基础数据,因此试验结果准确度问题不容忽视。

2 试验研究

2.1 规范标准

击实试验属于土的常规力学性质试验,因其为基本试验,试验理论与准确性问题往往不受重视。基础数据的不准确性通常是一些工程事故出现的根本原因。本文依据《土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)》《湿陷性黄土地区建筑规范(GB 50025—2004)》《公路土工试验规程(JTG E40—2007)》《岩土工程勘察规范(GB 50021—2001(2009修订版))》《土工试验规程(SL 237—1999)》等^[7-11]国

内相关规范与技术标准,同时参考了ASTM D1557^[12]以及BS 1377^[13]等欧美规范中关于击实试验的内容,对标准击实试验从总体上进行了对比分析与相关问题探讨。

击实试验要按照设计用途,遵照相关行业标准执行。经过对国家标准、水利部标准、公路规程对比分析发现:公路土工试验标准相较于国标及水利部标准锤底直径、落高略小,试筒尺寸、每层击数略大,击实功略小,对比总击实功后发现,公路标准击实功更大。本次试验主要用于侧限条件下填方区黄土调料压实变形特性与水环境变化产生的湿陷变形研究,击实试验按照国家标准执行,试验结果在水利、公路上也有一定的参考价值。

欧美地区击实试验标准对试验步骤的适用范围与设备精度的描述非常详细,标准中针对不同的粒径范围,有合适的步骤,且规范中对试验设备精度表述非常详细。

室内击实试验过程中,击实功是利用能量的转化与守恒原理,即将落锤的重力势能转化为压实功。因此,单位体积击实功的计算公式如公式(1)所示:

$$\text{单位体积击实功} = \frac{\text{层数} \times \text{每层击数} \times \text{锤质量} \times \text{落高}}{\text{击实样体积}} \quad (1)$$

我国国家标准单位体积击实功为2 684.9 kJ/m³,但是经过计算,5层56击结果是2 736.9 kJ/m³;3层94击结果是2 756.5 kJ/m³。公路土工规程重型-I单位体积击实功是2 687 kJ/m³,重型-II单位体积击实功2 677.2 kJ/m³,但是计算结果分别是2 741.9 kJ/m³,2 734.7 kJ/m³。计算结果表明,各类规范中给出的单位体积击实功标准值都略微偏小,虽然误差范围不超过70 kJ/m³,由于考虑到规范的标准性,作者提出了本观点。

2.2 击实试验

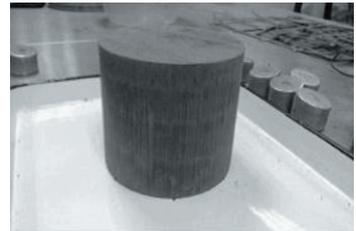
很多学者的研究成果,证明了试验过程中土样制备方法若不相同,试验结果也不相同,本次试验按照规范与经验,采用湿法制备的方式,取试验代表性土样约60 kg,人工碾碎后,过20 mm筛,土样拌和匀后分别测量Q₂、Q₃土样天然含水率。

重型击实试验需要大量配土,工程量比较大,为减少试验过程中含水率的影响,实时监测配制土样的含水率变化。湿密度是通过称量击实筒与精心修平的筒和击实样质量,根据击实筒体积求得,试验数据表明采用标准方式测得土样密度偏小。因为击实试验过程中,当某些土样含水率大于15%时,击实样底部与底座往往会发生黏结现象,影响

试验结果准确性,经验证兰州黄土在击实试验过程中高含水率情况下击实样会有水从底部流出的现象。对击实后试样切环刀测密度,较准确值应为击实样中部土,底层土样在其他每层击实时都会受到力的作用而过于致密。本文建议采用组合法测量湿密度,即击实样湿密度取值宜采用低于环刀测量密度而略高于标准测量方法取值。击实试验中环刀样与击实样如图1所示。



(a) 环刀样



(b) 击实样

图1 环刀样与击实样示意图

土是三相系统的存在,土中气体所占的体积与土的总体积的比值,称为气体含量,简称含气量。可由公式(2)表示:

$$A = \frac{V_g}{V} \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_g 指土中气体所占的体积(cm³); V 指土的总体积(cm³); A 指含气量(%)。

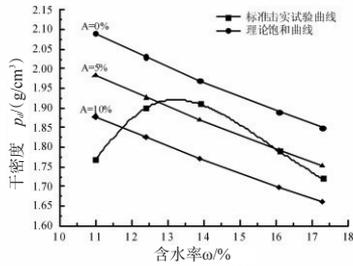
在处理击实试验数据时,需要绘出理论饱和含水率曲线,理论饱和含水率曲线作为一条辅助线,指含气量为零时的情况,孔隙体积完全被水占满,这种情况实际是不可能达到的。一般情况下,经过压实作用,土壤从含水率为 ω 到含气量为 A 时所对应的干密度数值,可由公式(3)计算出来:

$$\rho_d = \frac{G_s(1-A)}{1+\omega G_s} \rho_w \quad (3)$$

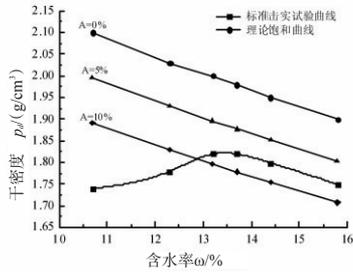
式中: ω 指含水率(%); ρ_w 指温度4℃时水的密度(g/cm³); ρ_d 指试样的干密度(g/cm³); G_s 指土颗粒比重; A 指含气量(%)。

公式(3)可以绘出含气量为0%、5%、10%等情况的理论曲线,并不是仅可描述理论饱和含水率曲线。

标准击实试验曲线如图2所示。



(a) Q₂黄土



(b) Q₃黄土

图2 延安Q₂、Q₃黄土标准击实试验曲线

图2表明:

(1)延安地区Q₂黄土的最佳含水率是13.4%,最大干密度是1.92 g/cm³;Q₃黄土的最佳含水率是13.5%,最大干密度是1.82 g/cm³。试验数值是根据曲线的趋势按照刻度预估得到的。

(2)从图2可以看到,击实试验曲线左侧陡、右侧缓,大量的试验结果表明击实试验曲线右侧大致与饱和含水率曲线相平行,说明了当土样含水率低于最优含水率时,含水率对干密度的影响更为显著一些,这一点可以从压实机理中看出来。因为压实功的存在,使土体颗粒发生变形和调整,致使土体变得致密。当土体处于偏干燥状态时,外加功无法克服粒间引力,强结合水水膜较薄而润滑作用不明显,因此压实效果比较差;如含水率逐渐加大,土粒移动和水膜的润滑作用明显,而压实效果逐渐变好;在最佳含水率附近时,压实效果最优。当含水率继续增加,土体处于偏湿状态时,由于孔隙中出现了自由水,而击实无法把多余的水和空气压出,击实效果反而变得更差。

(3)理论的饱和含水率曲线,位于实际击实试验曲线的右侧,因为饱和曲线假定土中气体全部被排走,孔隙完全被水占据,而实际不可能达到这样的效果,因为当含水率大于最优含水率之后,土中气体越来越处于与大气不连通状态,击实作用已经不能将其排出体外。如果做出的试验结果达到了理论饱和含水率曲线,说明肯定出现了一些测量、计算、试验步骤、绘图或者比重测试的错误。

(4)通过对比Q₂、Q₃击实试验曲线与各自饱和含水率曲线的间距,发现Q₃黄土比Q₂黄土含气量高。渗透系数表征了水气运移的状态与能力,目前渗气试验大多忽略试样本身的含气量,然而它却直接或间接影响了黄土填料的强度和变形特性^[14]。

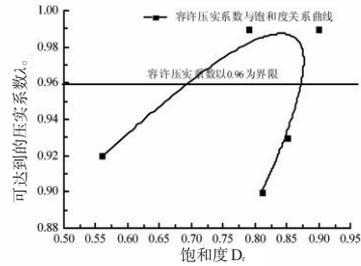
(5)在最优含水率与最大干密度条件下,Q₂黄土的含气量比Q₃黄土小5%,同样Q₂黄土的最大干密度数值比Q₃黄土大5%,因此认为含气量与最大干密度数值呈现反比例关系。

为了进一步加深对试验成果的理解,本文对击实试验做进一步探讨。击实试验曲线近似抛物线型,在抛物线两侧存在着2个相等的干密度数值,但是其对应不同的含水率大小。在现场实际施工过程中,使全部回填土达到最优含水率数值是比较困难的,因此本文探求压实效果与含水率的关系,得出相等干密度条件下的最佳含水率数值。饱和含水率可由公式(4)求得:

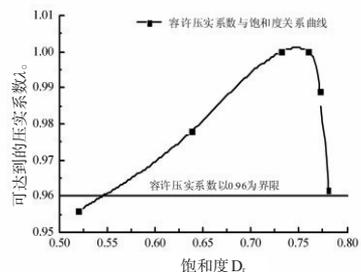
$$\omega_{sat} = \left(\frac{\rho_w G_s - \rho_d}{\rho_d G_s} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中: ω_{sat} 指饱和含水率(%); p_w 指温度4℃时水的密度(g/cm³); p_d 指试样的干密度(g/cm³); G_s 指土颗粒体积质量。

饱和度 $D_r = \omega / \omega_{sat}$, 定义可达到的压实系数 $\lambda = p_d / p_{dmax}$, 即不同含水率对应的干密度数值与最大干密度值之比,认为在特定含水率条件下,当可达到的压实系数 λ_0 大于某一界限值时压实程度满足技术要求。构造 $\lambda_0 - D_r$ 关系曲线如图3所示。



(a) Q₂黄土



(b) Q₃黄土

图3 Q₂、Q₃黄土λ₀-D_r曲线

图3表明:

(1) λ_0-D_r 曲线左侧缓、右侧陡,说明了当土样含水率高于最优含水率时,饱和度对干密度的影响更为显著一些,并且 Q_2 黄土的饱和度数值逐渐减少, Q_3 黄土的饱和度数值逐渐增大。

(2) 取可达到的压实系数 λ_0 为某一特定值,如 0.96,可知在同样的压实条件下, Q_3 黄土超过界限值的范围大于 Q_2 黄土,即 Q_3 比 Q_2 黄土更容易压实。

(3) 水的润滑作用是土颗粒之间更容易相互靠近,在压实过程中达到更加压实的效果。由图3可以看出在最大干密度两侧存在着两个相等却对应不同含水率大小的干密度数值,由于土样含水率高于最优含水率时干密度数值减少加快,同时饱和度数值对于干密度数值影响更为显著,由此本文提出在特定的干密度条件下,选择最优含水率左侧的含水率数值更为适宜。

2.3 函数求解

为了更进一步求得最优含水率与最大干密度,根据试验结果,本文采用函数求解的办法。许多试验过程的问题都可以用函数来表示其某种内在的联系或变化规律,然而不少函数只能通过室内或者现场试验和实际观测来了解。如果对试验中的某个物理量(自变量与因变量)的变化进行观测,在若干个不同的试验段得到相应的观测值,运用插值函数的方法可以求取一个多项式,这个多项式可以恰好在各个观测点取得观测到的数值^[15]。

2.3.1 插值函数

拉格朗日插值法的公式结构整齐、样式紧凑,在理论分析中使用非常方便。 P_d 随 ω 而变化,函数关系在本文可以表示为: $P_d = g(\omega) \approx L(\omega)$, 即构造拉格朗日插值函数形式, $g(\omega)$ 是被插值函数, $L(\omega)$ 是插值函数。

定义重心权就可以得到插值函数的表达式为:

$$L_n(\omega) = \sum_{i=0}^n \rho_{di} \frac{l(\omega)w_i}{(\omega - \omega_i)} \quad i=0,1,2,\dots,n \quad (5)$$

公式(5)的优点是每当插值函数增加一个点时,本文可以将重心权除以 $(\omega_i - \omega_{n+1})$ 就可以得到一个新的重心权,简化了计算步骤。同时,罗孝荣等^[7]提出牛顿插值的办法,计算步骤亦较为简洁。

将试验结果代入公式,得出 Q_2 黄土的最佳含水率是 13.4%,最大干密度是 1.92 g/cm³; Q_3 黄土的最佳含水率是 13.5%,最大干密度是 1.82 g/cm³,拉格朗日插值与牛顿插值结果相同,并且与击实试验曲线得出的结果一样,由此可知,简单的插值函数方法,可以快捷、准确的得出数值解。

2.3.2 数据拟合

研究发现曲线接近于抛物线型,使用回归分析原理,取 y 的回归模型如公式(6):

$$Y = N_0 + N_1x^1 + N_2x^2 + \dots + N_px^p \quad (6)$$

为了使误差最小化,取方差 $D = \sum_{i=1}^n E(Y_i - y_i)^2$ 为最小值,既是求取合理的 N_0, N_1, \dots, N_p 。

将 Q_2 黄土试验数据带入公式后,可知三次回归分析可以较准确的拟合试验结果,实际曲线与拟合曲线关系如图4所示。

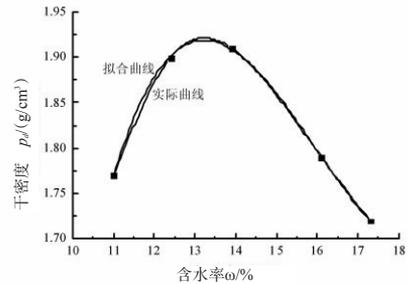


图4 Q_2 黄土数据拟合曲线

公式中 $N_0 = -8.923\ 57, N_1 = 2.145\ 82, N_2 = -0.138\ 53, N_3 = 0.002\ 89$ 。图4表明 Q_2 黄土的最佳含水率为 13.2%,比差值函数与图解法略小;最大干密度为 1.92 g/cm³,结果一致。将 13.4% 带入拟合公式满足误差要求,由此给出最优含水率区间是 13.2%~13.4%。 Q_3 黄土试验数据,不能构造最优的拟合曲线,即说明了回归分析的方法不具备普适性,但仍然可以认为击实试验曲线符合抛物线型模型。

3 黄土击实试验影响因素

(1) 击实土样选取:选取的击实试验土样不同,击实试验结果也会不同。将 Q_3 击实试验土样碾碎烘干后,配至含水率 15%,实测含水率为 14.7%,发现干密度与击数不存在线性关系,如表1所示。

表1 Q_3 烘干土样干密度与击数关系

击数	干密度/(g·cm ⁻³)
14	1.76
21	1.77
28	1.78
35	1.82

将 Q_2 黄土击实样碾碎烘干后配土,发现在含水率为 12.5%时,干密度达到 1.94 g/cm³,证实烘干土样的干密度值要比天然土样的大,并且最优含水率对应点要小,因此土样不可以重复使用。

将烘干 Q_2 黄土配制到含水率 12.5%时,击数和干密度存在近似线性关系,斜率为 0.004 3,如图

5 所示:

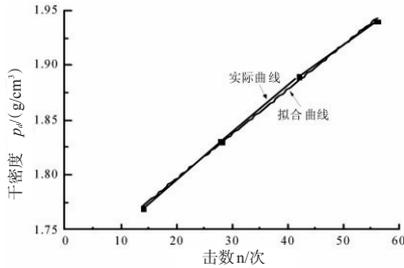


图 5 Q₂黄土击数与干密度线性关系

图 5 表明土样被烘干后,破坏了土颗粒间的黏结,在土的压实过程中外力做功需要抵消粘滞阻力作用。烘干土样中,土颗粒之间的摩擦作用力与压实功的大小也存在线性关系,并且是线性增大。

(2)黏粒含量:黄土的物化性质、粒度成分与颗粒的自身结构决定了黄土在压实作用下的性状。土中黏粒含量越高,孔隙就会越小,从而保水性会增强。兰州黄土与延安黄土试验结果如图 6 所示。



(a) 兰州黄土



(b) 延安黄土

图 6 兰州黄土与延安黄土试验结果对比

图 6 表明即使在底座上抹了凡士林,兰州黄土在含水率为 17.9% 时,有水从击实筒底部流出,更高的含水率也发现此类现象,影响了湿密度、含水率测定。然而延安黄土含水率 18.7% 时底部并没有水流出,含水率到达 21.8%,同样没有水从底部流出现象。粒度分析证实延安黄土黏粒含量比兰州黄土高,说明黏粒含量越高,保水性越好,击实试验过程中湿密度、含水率测量误差越小。

(3)击实筒尺寸效应:选用小筒做击实试验,设

备规格为:击实筒直径 102 mm;高度 116 mm。运用构造插值函数的方法,处理 3 点试验数据,得出 Q₂ 黄土的最佳含水率是 12.4%,最大干密度是 1.92 g/cm³; Q₃ 黄土的最佳含水率是 12.5%,最大干密度是 1.82 g/cm³。结果表明击实筒尺寸不影响最大干密度数值,仅影响最优含水率,且小筒所对应的最优含水率比大筒小约 1%。由此可知,在现场试验过程中,将 Q₂、Q₃ 黄土分别含水率控制在 12.4%~13.4% 与 12.5%~13.5% 的最优区间是可行的,西北地区水资源比较匮乏,将含水率控制在最优区间而不是最佳含水率数值,可以减少水的使用,也能保证施工质量要求。由于给定的最优区间在最优含水率左侧,也说明了在特定的干密度条件下,选择最优含水率左侧的含水率数值较为适宜。

4 结语

(1) 国家标准单位体积击实功,5 层 56 击: 2 736.9 kJ/m³; 3 层 94 击: 2 756.5 kJ/m³。公路土工规程中单位体积击实功,重型-I: 2 741.9 kJ/m³; 重型-II: 2 734.7 kJ/m³。计算结果表明,各类规范中给出的单位体积击实功标准值较延安地区黄土略微偏小,建议进一步研究。

(2) 引入含气量的概念,通过对比含气量为 0%、5%、10% 等情况下 Q₂、Q₃ 击实试验曲线与各自饱和含水率曲线的间距,发现 Q₃ 黄土比 Q₂ 黄土含气量高,由于目前渗气试验大多忽略试样本身的含气量,然而水气运移却直接或间接的影响了黄土填料的强度和变形特性。

(3) 通过定义可达到的压实系数 $\lambda_0 = P_d / P_{dmax}$,构造 $\lambda_0 - D_r$ 关系曲线发现由于土样含水率高于最优含水率时干密度数值减少加快,同时饱和度数值对于干密度数值影响更为显著,由此本文提出在特定的干密度条件下,选择最优含水率左侧的含水率数值更为适宜。

(4) 击实土样的选取、黏粒含量、击实筒尺寸效应等是标准击实试验中的几个主要影响因素。烘干土样虽不能重复使用,但其干密度数值与击实功之间存在线性关系;黏粒含量越高,保水性越好;结合小筒重型击实试验,可以构造含水率的最优区间,将含水率控制在最优区间而不是最佳含水率数值,即可以减少水的使用,也能保证施工质量要求,同时由于给定的最优区间在最优含水率左侧,也说明了在特定的干密度条件下,选择最优含水率左侧的含水率数值较为适宜。

过仿真,电化学模块扩展了电化学系统设计、理解和优化的能力,为研究人员提供了很大的便利。叶片电化学加工在 COMSOL 中的仿真示例^[10]如图 3 所示。

3 结语

电化学加工是在阳极金属在通电电解液中产生电化学反应条件下去除材料,实现阳极工件的加工成型,其加工范围广、加工效率高、表面质量好。

发动机叶片的加工设计过程很复杂,要考虑包括流体动力学、传热学、强度等方面的问题。利用电化学加工方法对叶片进行电化学加工涉及多种物理场的耦合问题,包括电场、流场、热场等,其加工过程很难被准确预测,通常采用计算机仿真模拟的方式预先模拟叶片的加工过程,然后再做实验进行验证对比。电化学加工的高效率和无残余应力等优点,将使其在叶片加工方面发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 朱顺康.航空发动机叶片脉冲振动电解加工技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [2] 江伟.叶片高频窄脉冲电解加工过程多场耦合仿真[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [3] 穆莉.混流涡轮叶轮强度仿真研究[D].大连:大连交通大学,2013.
- [4] 秦艳芳.高频微秒级脉冲精密电化学加工中的多场耦合数值模拟[D].合肥:合肥工业大学,2014.
- [5] 何亚峰,卢文壮,干为民.基于电场分析的钛合金电解加工圆孔成形研究[J].中国机械工程,2016(11):1461-1466.
- [6] 裴迪.基于多场耦合仿真的脉冲电化学加工温度域的研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [7] 荆光涛.高频微秒级脉冲电解加工叶片的工艺研发[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [8] 赵龙. γ -TiAl 金属间化合物叶片电解加工试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [9] 何亚峰,卢文壮,干为民,等.基于电场和流场耦合的微坑电解加工数值研究[J].中国机械工程,2016(10):1365-1370.
- [10] 陈远龙,方明,裴迪,等.叶片电化学加工过程多场耦合仿真[J].中国机械工程,2016(22):3087-3092.

(责任编辑:曲继鹏)

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] HAMDANI. Optimum Moisture Content for Compacting Soils: One-Point Method [J]. J. Irrig. Drain Eng., 1983, 109(2):232-237.
- [2] 王兰民,袁中夏,王俊,等.干密度对击实黄土震陷性影响的试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(1):75-80.
- [3] 陈辉,雷胜友.土的击实试验影响因素[J].建筑科学与工程学报,2005,22(2):69-71.
- [4] 黄英,符必昌.确定土的最大干密度和最优含水率的数值解法[J].岩土工程学报,2002,24(4):538-540.
- [5] 冯忠居,谢永利.标准击实试验最佳含水率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.
- [6] 罗孝荣,陆学元,张素云.标准击实曲线的理论分析和应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2004,27(5):556-559.
- [7] 朱崇辉,王增红,希罗科夫 B.H.. 单点击实法击实试验研究[J].岩土力学,2012,33(1):60-64.
- [8] GBT 50123-1999,土工试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [9] JTG E40-2007,公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [10] SL 237-1999,土工试验规程[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [11] GB 50021-2001,岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [12] ASTM D1557-91, Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- [13] BS1377-1990, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes-part 4: Compaction-related Tests [S]. London: British Standards Institution, 2002.
- [14] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等.非饱和 Q_3 黄土渗气特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1264-1273.
- [15] 邓建中,刘之行.计算方法[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2001.

(责任编辑:曲继鹏)