

土工击实试验的关键影响因素及对策分析

陈浩凤, 刘军*, 杜峥, 钟盼, 单位摇

(河南省岩石矿物测试中心, 郑州 450012)

摘要: 土工击实试验是测定土体在一定击实功下最佳干密度与最优含水率的关系的重要手段, 可借以了解土的压实性能, 对保证工程基础建设的质量有着重要的意义。本文在综合分析影响土工击实试验影响因素的基础上, 结合笔者的工程实践经验, 提出了强化对土工击实试验结果真实性和有效性把控的策略, 旨在提升土工试验的质量和工作效率, 保证土工试验的可靠性和功能性。

关键词: 土工击实; 土样; 最大干密度; 最优含水率

Analysis of key influencing factors and counterplan in geotechnical compaction testing

CHEN Hao-Feng, LIU Jun*, DU Zheng, ZHONG Pan, SHAN Wei-Yao

(Henan Provincial Testing Center for Rocks and Minerals, Zhengzhou 450012, China)

ABSTRACT: Geotechnical compaction test is an important means to determine the relationship between the optimal dry density and the optimal water content of soil under a certain compaction work, which can be used to understand the compaction performance of soil, and has important significance to ensure the quality of engineering foundation construction. On the basis of comprehensive analysis of influencing factors of geotechnical compaction test, combined with the author's engineering practice experience, this paper puts forward strategies to strengthen the control of the authenticity and effectiveness of geotechnical compaction test results, aiming at improving the quality and efficiency of geotechnical tests and ensuring the reliability and functionality of geotechnical tests.

KEY WORDS: geotechnical compaction; soil samples; maximum dry density; optimum moisture content

0 引言

土作为最基础的填筑材料, 被广泛应用于水利、土木、交通等工程建设中, 但由于填土过程中土的原状结构受人为扰动, 普遍存在土质不均匀、渗透性大、强度低等突出问题, 对工程现场施工质量及稳定性造成较大影响。目前常采用机械碾压、机械夯实、振动压实等方法将土体进行压实, 其中土工击实试验便是评价土体压实程度的重要手段^[1]。该试验作为评估土壤密实度和工程性质的一项标准试验, 通过模拟现场压实原理, 基于室内试验确定回填料的最大干密度和最优含水率, 可帮助工作人员更好评估土壤的力学性质, 研判土壤是否能够承受预期应力荷载并保持长期稳定, 从而确保工程的安全和可靠性^[2]。目前《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[3]中对土工击实试验已经进行了明确的规定, 详细阐述了其操作流程、计算、

制图及记录要求。但在实际操作过程中, 土工击实试验的开展极易被土样、制备方法、含水率、击实功、余土高度等因素^[4-9]所干扰, 难以保证试验结果的真实性, 严重制约了土工击实试验在工程应用中的发挥。鉴于此, 笔者在借鉴前人研究成果的基础上, 对影响土工击实试验的几种关键性影响因素进行探讨分析, 并结合个人工程实践经验, 进一步提出相应的解决对策, 以期工程建设提供助益。

1 土工击实试验理论及试验方法

1.1 土体压实机理分析

土是由固相(土粒)、液相(水)和气相(气)组成的三相分散体系(见图1), 其中固相作为土的主体部分, 其粒径颗粒的含量比例等条件会导致单粒、蜂窝及絮状等孔隙结构的形成, 进而影响土体的密实度^[10]。液相包括土体孔隙中的结合水、自

* 通信作者: 刘军, 高级工程师, 研究方向为地质测试、环境损害。E-mail: changshou20200310@163.com

* Corresponding author: LIU Jun, Senior Engineer, Henan Provincial Testing Center for Rocks and Minerals, Zhengzhou 450012, China. E-mail: changshou20200310@163.com

由水等,其性质主要由含水率决定,可定量反映土体的饱和状态。气相包括自由气体和封闭气体两种,其中自由气体受压后排出可显著提高土体密实度,封闭气体则会使土体具有“弹性”,难以被压缩^[11]。通常情况下认为固相和液相是不可被压缩的,土的压实性也可以被定义为土体在不规则荷载作用下自由气体和部分自由水被排出,固相颗粒间接触增多,其密度相应提高的性状^[12]。诸多国内外学者也对土的压实机理进行了系统的分析,主要包括毛管润滑^[13]、黏滞水^[14]、颗粒定向^[15]、孔隙水压力^[16]和结构理论^[17]等。Proctor认为土体压实就是克服固相颗粒表面水膜毛细压力的过程,但随着含水量的增加,自由水也会起到颗粒移动润滑的作用,提高压实度。Hogentogler进一步提出土颗粒水合物的黏滞力同样会随着含水量增加而降低,并不断提高其润滑效果,但由于水的不可压缩性,过量的水则会降低其压实性能。Lambe认为含水量的提升将显著增强孔隙中液相电解质浓度引起的电层排斥作用强度,使土体易于压实。Hilf和Barden从孔隙结构出发,认为土体偏干时外力作用可使孔隙中的水、气有效排出,土体压实效果显著提升,但大孔隙消失后,含水量继续增加,受孔隙压力和水层作用土体会更难压实。总体来看,虽然各学者研究的方向及表征判识方法不同,但对于土体压实的认识基本一致,土体压实性能随土样含水量的增加呈现出先提升后下降的变化趋势,根据其演变规律即可获取土体压实的最大干密度和最优含水量。

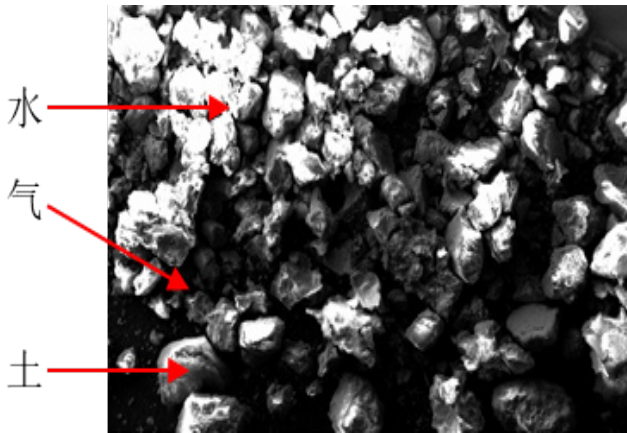


图1 土的三相微观图

Fig.1 The micro three-phase diagram of soil

1.2 土工击实试验方法

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)要求,土工击实试验选用的仪器主要有击实仪、天平、台秤和标准筛等。其中,击实仪由击实筒、击锤和护筒组成(见图2)。同时可采用干法和湿法两种方法制备土试样,试样制备后即可进行土工击实试验,其步骤主要如下:

- (1) 将击实仪放置平稳,并在击实筒内壁与底座涂润滑油,并检查仪器及配套设备是否性能正常;
- (2) 称取定量土试样分3层~5层倒入击实筒并将土面平整,分层击实,分层击实时应在两层交接土面刨毛处理;
- (3) 击实完成后借助修土刀沿内壁削挖土试样,取下护筒后测量超高,并称量土试样重量;
- (4) 在土试样中心部位取定量土料测量其含水率;

(5) 重复称取定量土试样进行上述操作,避免土样重复使用,记录并绘制土样干密度与含水率曲线。



图2 多功能电动击实仪

Fig.2 Multi-functional electric compaction tester

2 土工击实试验的影响因素分析

一般而言,室内土工击实试验结果可直接为工程现场填土过程及其质量控制提供技术支撑,如若试验所测数据不够精准,将会严重影响工程进度和安全性。该试验的影响因素可分为主观人为干扰和客观外部影响两方面,试验人员依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)操作流程开展试验可最大程度避免人为干扰,然而外部影响几乎无法回避。诸多学者经试验研究和工程应用验证发现,其外部影响又可分为土样级配、制备方法、含水率、击实功和余土高度等关键因素。

2.1 土样级配

在同一土类中,级配不良的土(土粒较均匀)压实后其干密度要低于级配良好的土(土粒不均匀),其主要原因是级配不良的土粒的不均匀性,导致细土粒无法有效填充级配不良土形成的孔隙;级配良好的土与之相反,即细土粒可有效填充结构孔隙,因此相较于级配不良的土样干密度,级配良好的土样干密度较高^[18]。周立新等人^[19]采用超粒径处理方法,得出了高填方工程中不同填料的击实指标,认为粗料含量是影响填料最大干密度的主要因素。王恩辉^[20]针对极细、级配不良,粉细砂难以压实的特点,通过调整铺层厚度、对砂料增湿、优化碾压遍数,成功地将砂料压实指标达到 $Dr \geq 0.75$,实现了级配不良粉细砂应用于工程填筑的可行性。赵然杭等人^[21]通过对黄河泥沙进行级配分析及优化并测试土工压实性,为其应用于高速公路路基填筑提供了参考依据。由此可见,级配良好的土样有助于提高土工击实试验数据准确度和可靠性,故笔者认为在土工击实试验中可结合实际情况采取剔除法、等量替代法和相似级配法等对土样级配进行优化调整并指导工程实践。

2.2 制备方法

不同的土样制备方法得到的压实度结果各不相同,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)要求,土样制备可分为干法制备和湿法制备两种方法。通过有关试验得知,干法制备的土样含水率要低于湿法制备土样,但密度要大于湿法制备土样(见图3~图4)^[22]。原因在于天然土内部胶凝物质中($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, $SiO_2 \cdot nH_2O$)包含结合水,而结合水作为物质颗

粒的组成部分可能会受到高温环境影响, 使其与颗粒间的结合力和分子结构受到破坏, 失水后其胶凝作用无法恢复。而湿法制备的土样则是在自然状况下风干形成, 对土体结构无明显破坏, 故干法制备的土样含水率要低于湿法土样。冯冠庆等人^[23]通过击实试验发现不同土样压实度性状不尽相同, 广西红黏土宜采用较高干密度, 而无锡黏土则不宜要求高压实度。肖硕^[24]则利用干法和湿法两种制备方法分别对南方湿热地区一般黏土、高液限土和砂性土等典型土样进行了土工击实试验, 明确了其最佳含水率与 CBR 强度的变化规律, 提出了工程允许下的含水率范围。一般而言, 干法击实更适用于土料含量较低情况, 而湿法击实则适用于含水率较高的土样。在工程实践中, 干法、湿法两种制备方法也需因地制宜, 结合土质情况、施工质量要求等酌情选择。

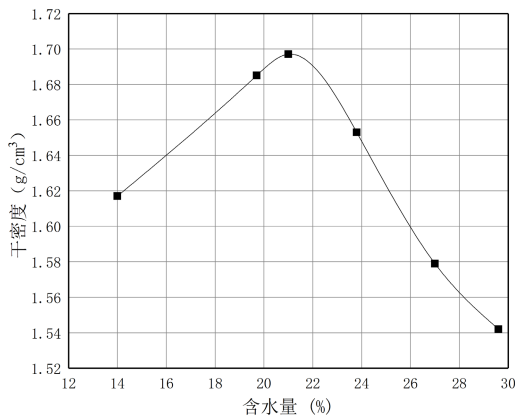


图 3 干法制备土样击实曲线图

Fig.3 Compaction diagram of soil sample by dry method

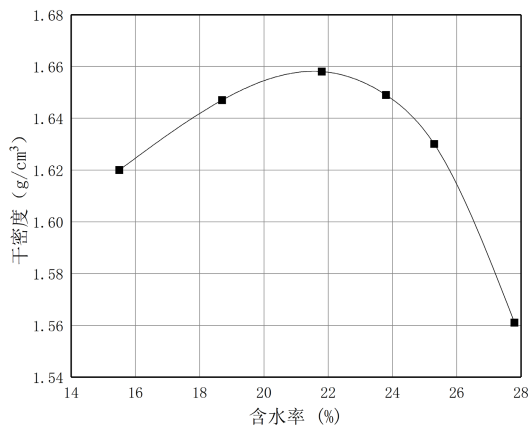


图 4 湿法制备土样击实曲线图

Fig.4 Compaction diagram of soil sample by wet method

2.3 含水率

土样含水率的控制主要发生在土样的制备过程中, 土样制备时加入适量的水会相应提高击实功的效率, 但当土样的含水量超过某一临界值时, 水的作用反而会降低功的效率。原因在于当土中含水量较少时, 土中空气占据着主导地位, 由于空气之间是连通的, 且较少的水无法有效地润滑土颗粒, 土颗粒之间相互移动需要克服很大的阻力, 消耗很大的击实能量, 故而土体很难被压实。随着含水率的增加, 土中空气开始被向外排出, 水分的润滑作用使颗粒间阻力减小, 土颗粒相对移动较为容

易^[25]。当击实土样的含水率超过最佳含水率时, 土中水开始在土体中占据主导地位, 并且占据部分土颗粒的位置, 土中空气仅以微小气泡的形式分散在土体中, 击实过程中自由水的迁移造成击实功的消耗。朱崇辉等人^[26]采用土体饱和度计算分析法提出了含水率对黏性土击实干密度具有限制作用的观点, 即黏性土的最大干密度不会超过土体被击实达到饱和状态的干密度。陈文涛^[27]针对土的塑限预估最优含水率与实际最优含水率存在差距的问题, 通过轻型击实试验提出了调整塑限预估含水率的方法。由此可见, 土样含水率的控制击实试验中极为关键, 含水率太高或者太低都不利于土的压实性^[28], 所以在试验过程中要精准控制土样的含水率, 配置土样时掺水量应随存放时间和室内温度变化动态调整, 同时土样可在密闭容器内放置 24 h 确保水分散布均匀, 但也不能放置过久避免水分蒸发或土样变质。

2.4 击实功

室内击实试验主要分为轻型和重型两大类, 轻型击实试验适用于粒径小于 5 mm 的黏性土, 重型击实试验适用于粒径小于 20 mm 的粗粒土, 轻型击实试验的单位体积击实功约为 592.2 kJ/m³, 重型击实试验的单位体积击实功约为 2684.9 kJ/m³。王鹏等人^[29]认为增大击实功可显著提高路基土的最大干密度和抗压强度, 延长路基使用寿命。李治平等人^[30]发现击实试验得出的最优含水量与最大干密度不是恒定值, 而是随击实功变化而变化。击实功与最优含水率呈反比, 而与最大干密度呈正比。韦美富等人^[31]则发现击实功的改变击实曲线的整体形状不会发生太大变化, 整体位置会随着击实功的增大逐渐向左上方平移(见图 5)。因此, 在进行土工击实试验时, 应严格按照土样粒径大小及土壤性质来选择匹配的击实仪器, 宜通过击实拟合模型等方法进一步优化击锤数量等参数来降低击实功对试验结果的影响, 从而为工程提供更加准确的指导。

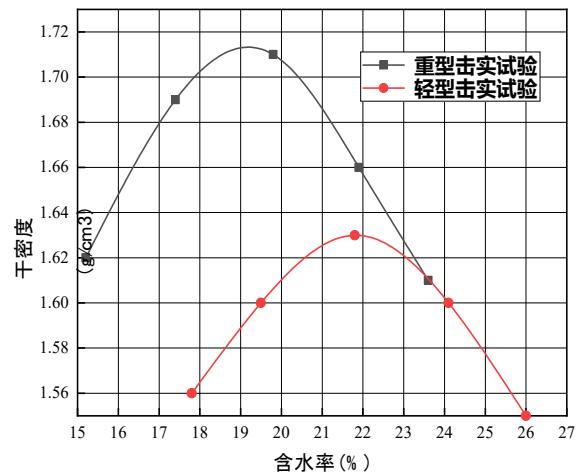


图 5 同一土样轻、重击实曲线

Fig.5 Light and heavy compaction curves of the same soil sample

2.5 余土高度

击实筒是实现土工击实试验的重要组成部分, 在实际的试验过程中, 余土是切实存在的, 而且余土高度对试验具有一定的影响^[32]。理论上的击实曲线指的是指余土高度为零时干密度与含水率之间的关系曲线, 而在实际试验过程中难以做到余土

高度为零。当余土高度过大时,土样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(击实后土样低于击实筒的高度)时,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^[33]。由于余土高度不一,各点所受的击实功不同,使得击实曲线上各点不是在等击实功下得到的干密度,导致其离散性增加^[34]。张志权等人^[35]也发现余土高度差在3 mm以内时土样最大干密度变化趋势不明显,且随着高度差增加干密度变化速率显著提升。因此,为进一步提升试验精度,可提前对单层装土量及最佳装土量进行估算并结合实际测量情况进行优化调整来控制余土高度变量,降低试验误差。

3 结束语

土工击实试验是模拟现场施工条件确定最大干密度及最优含水率的一种有效试验方法,对于指导现场填土工程的开展具有关键性作用。由本文分析可知,该试验受客观影响因素干扰较多,且涉及试验的全过程,因此有必要做好有效的防范和应对措施。由于尚未形成统一的修正评估方法,文中所述均为笔者将工程实践经验与土工试验方法相结合提出的一些优化建议,仍需开展进一步的研究分析,以期为工程建设提供助力。

参考文献

- [1] 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,2002,(02):10-13.
- [2] 李国文,杨文琦.洞庭湖区水泥改良软土的碾压特性研究[J].湖北水利水电,2020,(01):34-36.
- [3] 国家市场监督管理总局,中华人民共和国国家标准.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [4] 宫振剑.公路工程中土工试验的关键技术要点研究[J].交通世界,2021,(15):92-93.
- [5] 吕彩云.浅谈土工击实试验在工程中的应用[J].居舍,2020,(03):58.
- [6] 王新荣,王莹,李翠.土工击实试验过程中常见问题分析[J].山东水利,2017,(09):11-12.
- [7] 张守钊,寇畅.土工试验中常见问题及改善对策探讨[J].建筑技术开发,2020,47(13):67-68.
- [8] 王西峰.影响室内土工击实试验结果的几个问题[J].四川水泥,2018,(12):291.
- [9] 杨文婷.室内土工击实试验与现场回填土检测探讨[J].广东建材,2023,39(11):46-48.
- [10] 陈小平,何平.饱和土强度含水量有效应力唯一性关系的证明[J].地下空间与工程学报,2021,17(S2):609-615.
- [11] 黄艳.地基土三相组成分析在建筑工程中的作用[J].工程建设与设计,2016,(05):57-58,63.
- [12] 安鸿飞.不同击实条件下黄土状粉土土中应力传递规律的试验研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [13] PROCTOR R. Design and construction of rolled earth dams [J]. Eng News Rec, 1933, 111.
- [14] HOGENTGLER CA. Comaction of earth embankments in proceeding of highway research board [M]. Washington, 1938, 18(02): 155.
- [15] LAMBE TW. The structure of compacted clay [C]. Am Soc Civ Eng, 1958, 84(02): 1-34.
- [16] HILF J W. Compacting earth dams with heavy tamping rollers [J]. J Soil Mech Found Div, 1957, 83(02): 1205-1-1205-28.
- [17] BARDEN L, SIDES GR. Engineering behavior and structure of compacted clay [J]. J Soil Mech Found Div, 1970, 96(04): 1171-1200.
- [18] 吴平,凌华,石北啸,等.鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石料力学特性[J].河海大学学报,2024,52(02):69-76.
- [19] 周立新,黄晓波,周虎鑫,等.机场高填方工程中中填料试验研究[J].施工技术,2008,(10):81-83,94.
- [20] 王恩辉.极细、级配不良粉细砂填筑技术在BA干渠工程中的应用分析[J].水利技术监督,2021,(10):186-190.
- [21] 赵然杭,华丽丽,刘恒洋,等.黄河泥沙用于高速公路路基填筑的可行性研究[J].人民黄河,2021,43(02):122-126.
- [22] 汪敏芳.青塘尾水库除险加固工程中土体击实试验的参数优化研究[J].山西水利,2023,(09):48-51.
- [23] 冯冠庆,杨世基.高等级公路湿黏土路基压实性状[A]/中国土木工程学会.中国土木工程学会第七届土力学及基础工程学术会议论文集.交通部公路科学研究所[C].北京:中国建筑工业出版社,1994:5.
- [24] 肖硕.南方湿热地区典型路基土干法与湿法击实试验对比研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [25] 刘雄伟.土工击实曲线的确定方式[J].山东交通科技,2022,(02):74-76.
- [26] 朱崇辉,王增红.含水率对粘性土击实干密度的限制作用分析[J].水利与建筑工程学报,2010,8(04):101-103,110.
- [27] 陈文涛.轻型击实试验中土的塑限与含水率关系的探讨[J].广西水利水电,2009,(02):20-23,34.
- [28] 林向宇.影响土工击实试验的几个关键因素探讨[J].中国建筑金属结构,2022,(03):68-69.
- [29] 王鹏,郭成超,王海涛.增大击实功的路基压实试验研究[J].公路交通科技,2007,(02):1-4.
- [30] 李治平,王绍兵.击实功对黄土强度影响的试验研究[J].交通科技,2001,(06):19-20.
- [31] 韦美富,梁晓宁.室内土工击实试验影响因素分析[J].广西水利水电,2023,(04):1-2,22.
- [32] 杨小红.土工击实试验过程中常见问题分析[J].甘肃科技纵横,2016,45(09):67-68,50.
- [33] 韦颖.浅析影响土的击实试验的主要因素[J].土工基础,2019,33(03):389-392.
- [34] 王永和,胡萍,卿启湘.影响土样击实试验结果的试验分析[J].铁道科学与工程学报,2006,(06):31-34.
- [35] 张志权,王志勇.最大干密度和最优含水率的准确性探讨[J].长安大学学报(建筑与环境科学版),2004,(02):7-10.

作者简介

陈浩凤,高级工程师,研究方向为地质测试、贵金属分析检测。

刘军,高级工程师,研究方向为地质测试、环境损害。