

# 考虑土石混填地基不均匀性影响的坑测法 合理试坑尺寸研究

赖余斌

(南方电网能源发展研究院有限责任公司 广州 510530)

**摘要:**建于山区的电网工程受到环境的制约,往往采用削山获得的混合材料作为山谷填料,但混合材料填方后地基密度具有一定的不均匀性,采用坑测法检测时受此影响会对结果的准确性产生一定影响。针对这一问题,开展考虑土石混填方地基密度不均匀性对坑测法合理试坑尺寸影响的研究。具体过程如下,首先基于三维随机场理论对一定区域范围内的密度不均匀性进行模拟,其次采用蒙特卡洛模拟的方式对不同粒径、不同试坑尺寸和不同不均匀程度的工况计算其试验有效率,最后总结上述规律,基于BP神经网络原理建立试验有效率与试坑尺寸、不均匀程度和颗粒粒径的映射关系,藉此实现在不同工况下计算合理坑测法尺寸的目标。

**关键词:**电网工程;土石混料;不均匀性;灌砂法;坑测法合理试坑尺寸;BP神经网络

**中图分类号:**TU463 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4563(2020)10-080-04

## Study on the Reasonable Pit Size by Pit Measurement Method Considering the Influence of Soil and Stone Foundation Inhomogeneity

Lai Yubin

(China Southern Power Grid Energy Development Research Institute Co.,Ltd. Guangzhou 510530,China)

**Abstract:** Restricted by the environment, the power engineering built in mountainous areas often use the mixed materials obtained from mountain cutting as the filling material of valleys. However, the density of the foundation after the filling of the mixed materials is inhomogeneity to a certain extent, which will affect the accuracy of the results when using the irrigation method. In order to solve this problem, a study was carried out to consider the influence of the uneven density of soil and stone mixture filling foundation on the size of pit measurement method. Firstly, based on 3D random field theory, the density inhomogeneity in a certain area is simulated. Secondly, monte carlo simulation is used to calculate the test efficiency under different particle size, different pit size and different degree of inhomogeneity. Finally, based on the principle of BP neural network, the mapping relationship between the test efficiency and the size of the pit, the degree of inhomogeneity and the particle size was established. Thus, the objective of calculating the reasonable size of the pit method under different working conditions is realized.

**Key words:** power engineering; soil-rock mixture; inhomogeneity; sand filling method; reasonable size of the pit measuring method; BP neural network

## 0 引言

随着电网工程的快速发展,越来越多的工程修筑于山区之中。受环境制约影响,往往采用削山获得的混合材料作为山谷的填料,这些填方材料因具有较好的压实特性、抗剪强度和承载能力,是一种良好的填方材料,但同时作为2种或多种材料的混合体,土石混料填方地基密度值往往具有极强的不均匀性<sup>[1,2]</sup>。采用灌水(灌砂)法进行压实质量检测时,受土石混料变异性影响,试坑尺寸太小时检测结果同样具有较强的不确定性,代表性不强,无法真实准确反映测点的压实情况;而试坑尺寸太大时,虽然可以在一定程度上消除土石混料密度值空间变异性对检测结果的影响,但耗时耗力,极大地影响检测效率<sup>[3,4]</sup>。

针对这一问题,开展了考虑土石混料填方地基密度不均匀性对坑测法尺寸影响的研究。具体过程

为:①基于三维随机场理论对一定区域范围内的密度情况进行模拟;②采用蒙特卡洛模拟的方式,对不同粒径、不同试坑尺寸和不同不均匀程度的工况进行试验有效率检测;③总结上述规律,得到适用于不同工况土石混料坑测法的合理试坑尺寸。

## 1 密度随机场模型

对于土石混料填方地基而言,由于土颗粒和岩石比重存在一定差异,因此不同区域位置处的密度值也会有所不同,即密度值具有一定的随机性。然而不同位置处的比重又不是完全随机的,考虑到岩石粒径的影响,对于岩石来说,石块粒径范围内的比重值应大致相等,即相邻位置处的比重值又具备一定的相关性。对于此类特征,在岩土工程领域通常描述为岩土体参数的空间变异性,可以采用随机场理论进行模拟。目前各种随机场理论已经相对成熟,较为常用的方法有局部平均法<sup>[5,6]</sup>、中心点法<sup>[7]</sup>、谱分解法<sup>[8]</sup>、Karhunen-Loeve (K-L)级数展开法<sup>[9-12]</sup>等。其中K-L级

**作者简介:**赖余斌(1973-),男,硕士研究生,高级工程师,主要从事电网工程建设管理研究和质量监督工作。

**E-mail:**hongqz@csg.cn

数展开法计算精度及效率较高、应用最为广泛,本文选择该方法生成相应的密度随机场,具体生成过程可参看文献[9-12]。

生成土石混合料密度随机场的过程,需要知晓以下几个关键参数,包括土石混合料密度均值、变异系数、相关距离和概率分布形式。均值、变异系数和概率分布形式作为常用的统计学参量其表达意义在此不做赘述,需要特殊说明的是相关距离这一概念。随机场不仅表征参数的随机性特征,同时还可以模拟其相关性特征,相关距离就是描述这一特征的主要参量。其物理概念为参数值在一定距离范围内有较强的相关性,针对本文研究问题可以将相关距离理解为石块粒径。通过文献调研和总结既有工程经验,对于电网工程的土石混合料填方地基而言,石块粒径约为10~50 cm,变异系数为6%~14%,密度概率分布形式通常可以采用正态分布表征。本文仅针对一个密度检测点位空间进行探究,因此构建一个空间尺度为1 m×1 m×1 m=1 m<sup>3</sup>的立方体,立方体中按照0.05 m间距设置8 000个节点,每个节点设置不同的密度值,用以模拟土与石的不同密度。假设采用同一堆土石混合料堆填这1 m<sup>3</sup>空间,即对于这1 m<sup>3</sup>空间内的土石混合料其密度均值是一个确定量,本章按照2 g/cm<sup>3</sup>设定。图1所示为石料最大粒径为30 cm、变异系数为0.01密度随机场的一次典型实现,不同颜色深度表示不同的密度值,可以看出不同区域的密度会有所不同,同时石块粒径(30 cm)范围内的密度值比较接近,可以较好地描述该区域内的密度变异性情况。每次随机场的实现都相当于将同批次土料以不同的排列方式堆填在这1 m<sup>3</sup>空间内,基于此探究土石混合料不均匀性及随机性对检测结果带来的影响。现设计表1工况,进行石料粒径、变异系数和试坑尺寸对检测结果准确性的影响分析,每个工况生成500组密度随机场。

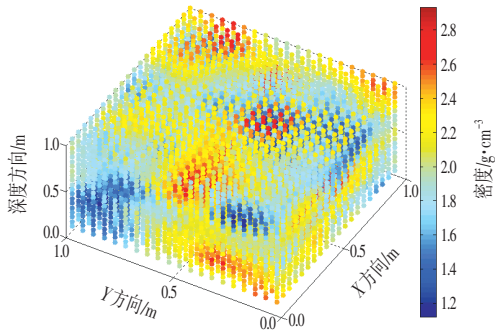


图1 石料最大粒径30cm变异系数0.01情况下一次典型密度随机场

Fig.1 A Typical Density Random Field of Material Particle Size 30 cm and Coefficient of Variation Equaling to 0.01

2 考虑土石混合料密度不均匀性影响的坑测法合理试坑尺寸研究

试坑尺寸大小会对检测结果的准确性及检测效率产生重大影响,为了探究不同试坑尺寸条件下检测结

表1 密度随机场设计工况

Tab.1 Density with Field Design Conditions

工况	均值 /g·cm <sup>-3</sup>	变异 系数	相关距离 /m	模拟 次数
工况1	2.0	0.10	0.1	500
工况2	2.0		0.2	500
工况3	2.0		0.3	500
工况4	2.0		0.4	500
工况5	2.0		0.5	500
工况6	2.0	0.06	0.3	500
工况7	2.0	0.08		500
工况8	2.0	0.12		500
工况9	2.0	0.14		500

果的准确性,设计如下模拟过程。在1 m<sup>3</sup>的三维密度随机场空间内,选取立方体上表面中心点作为检测基准点,以该点为中心分别模拟不同试坑尺寸的坑测法试验,根据该体积范围内所有随机场点位的密度数值加权计算得到检测密度值。试坑尺寸按照直径40 cm、60 cm、80 cm和100 cm,深度取40 cm、60 cm和80 cm的圆柱体两两组合,共计12种试坑尺寸组合。

变异系数在一定程度上可以反映检测结果的稳定性,图2为工况1中500次密度随机场不同试坑尺寸检测结果的变异系数。可以看出试坑尺寸对变异系数的影响较大,直径越大、深度越大,相应的检测密度变异系数也就越小,说明检测密度值越稳定,在实际检测过程中结果代表性也就越强,反之检测结果受土石混合料不均匀性影响偶然误差越大。

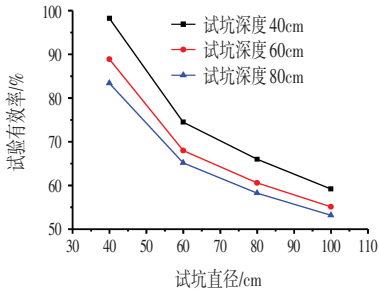


图2 不同试坑尺寸密度检测值变异系数曲线

Fig.2 Variation Coefficient Curve of Density Detection Value of Different Pit Sizes

变异系数越小,表示检测结果受偶然因素的影响越小,代表性越强,但究竟达到怎样的变异系数等级检测结果才具有足够的代表性,现有研究对此问题并无定论。检测结果变异系数的大小其实反映了检测结果的偶然误差情况,可从这一角度入手。《公路土工试验规程:JTG E40-2007》中对于灌砂法检测的平行试验误差有过明确说明,即2次试验的相对误差应小于0.03 g/cm<sup>3</sup>,此时的密度检测结果才具有足够的代表性。按照这一控制标准,从500组随机场中,随机抽取两2组随机场的计算结果进行误差计算,若2次抽取结果差值小于0.03 g/cm<sup>3</sup>,则认为该组密度值具有代表性,反之则不满足误差要求。将上述过程通过编程实现,并

重复模拟 100 000 次,统计结果中差值小于  $0.03 \text{ g/cm}^3$  的次数,认定这些结果为合格结果,据此计算其合格率,并将该合格率参数定义为“试验有效率”,即该参数在一定程度上可以反映检测结果的稳定性和准确性,试验有效率越高,检测结果越稳定、代表性越强。

图3为工况1即石料最大粒径 10 cm、变异系数 0.1 情况下,不同试坑尺寸的试验有效率曲线。由图3可以看出,试坑直径越大、深度越深,相应的有效率越高,也就是说排除偶然因素检测结果具有代表性的比例越高。当试坑直径达到 60 cm 时,无论试坑深度为多少,其有效率均在 80% 以上,即按照这一尺寸检测填方地基密度,有超过 80% 的概率认定该次检测结果对该区域的密度情况具有代表性。这与各类地基压实系数检测规范中,采用灌砂法检测密度时,试坑直径应不小于最大粒径的 5 倍的结果相吻合。表示采用该方法探究不同变异性、不同最大粒径土石混合料坑测法合理试坑尺寸的方法是正确有效的。

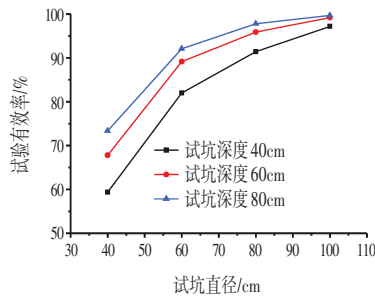


图3 不同试坑尺寸密度检测试验有效率曲线  
Fig.3 Efficiency Curve of Density Detection Test of Different Pit Sizes

图4为不同试坑体积的试验合格率统计曲线,尽管整体来说随着试坑体积的增大,试验有效率同样增大。但可以看出二者之间并不存在唯一的相关关系。如体积为  $0.10 \text{ m}^3$  与  $0.11 \text{ m}^3$  这2个点,体积基本相同但试验有效率分别为 73% 和 82%,相差近 10%。这说明即使体积大致相等,不同直径深度组合也会影响最终的试验有效率。

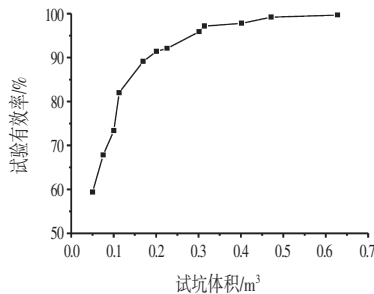


图4 试验有效率随试坑体积变化曲线  
Fig.4 The Curve of Test Efficiency Varies With Pit Volume

图5为试验有效率随试坑深度变化曲线,可以看出在试坑直径 40 cm 时,随深度变化最明显,变化率为  $0.35\%/cm$ ;同理,由图3可知,试坑深度 40 cm 时,试验有效率随试坑直径变化最明显,变化率为  $0.61\%/cm$ 。因此,可以认为试坑直径相较于试坑深度对检测有效率的

影响更大,因此在控制试坑体积相同的情况下,增大直径较增加深度对提高试验有效率的作用更为明显。

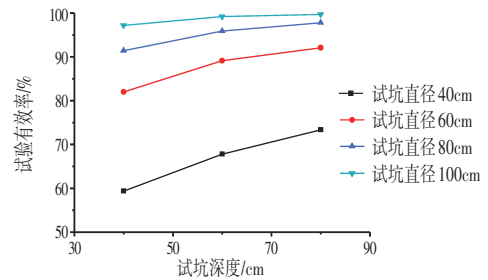


图5 试验有效率随试坑深度变化曲线  
Fig.5 The Curve of Test Efficiency Varies with Pit Depth

图6为工况1~工况5下不同试坑尺寸试验有效率随石块粒径的变化曲线,可以看出在相同试坑尺寸条件下,石块粒径越大,试验有效率越低,且石块粒径越小变化率越大。对于相同粒径的土石混合料,试坑直径从 40 cm 增长到 100 cm,试验有效率平均提高幅度为 20% 左右,而石块粒径从 30 cm 减小到 10 cm,试验有效率平均提高幅度为 40%。因此对同一工程来说,若在保证相同试验有效率,减小填料粒径较增大试坑尺寸更为有效。

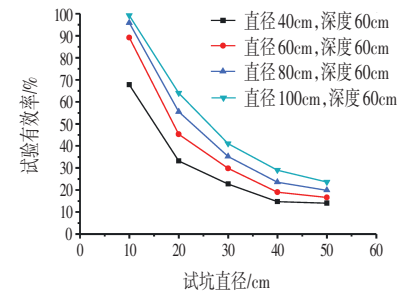


图6 试验有效率随石块粒径变化曲线  
Fig.6 The Curve of Test Efficiency Varies with the Particle Size of Rock

图7为工况3、工况6~工况9中,石块粒径为 30 cm 时4种试坑尺寸条件下,试验有效率随变异系数的变化曲线,趋势为随着变异系数的增大,试验有效率逐渐减小。变异系数从 6% 增长到 14% 的过程中,试验有效率平均降低幅度为 25%,这一降低幅度也说明了土石混合料拌和均匀程度对最终检测结果的准确性起到了至关重要的影响。

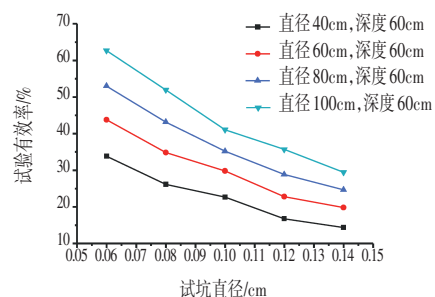


图7 检测有效率随变异系数块粒径变化曲线  
Fig.7 The Detection Efficiency Curve Varies with the Variation Coefficient of the Block Size

根据之前分析可知,颗粒尺寸越小、试坑尺寸越



大、变异系数越小,相应的试验有效率越高,检测结果也就越具有代表性,但具体需要满足怎样的标准并无直接结论。考虑到实际工程的复杂性,本文探究的9种工况无法全面覆盖,因此需要建立一个完整的试验有效率关于颗粒粒径、试坑尺寸和变异系数的相互关系式,其中试坑尺寸又包含试坑直径和试坑深度2个参数。

由于4个影响参数并非是相互独立的,因此无法通过建立简单的线性关系描述这一映射关系。考虑到直接拟合函数的复杂性,可以采用人工智能方法建立这一关系。其中最为简单、高效的方式就是BP神经网络模型。BP神经网络具有任意复杂的模式分类能力和优良的多维函数映射能力,无需事先确定输入输出之间映射关系的数学方程,仅需要基于既有数据的学习训练就可以得到完整的映射关系,时下对于该算法的研究已经相对成熟,在此不做赘述。

对于本文研究问题来说,BP神经网络的输入层包括变异系数、石料最大粒径、试坑直径和试坑深度4个参数,输出参数为试验有效率。工况1~工况9每种工况包含12个不同试坑尺寸数据,共计 $9\times12=108$ 组数据,随机选择其中90组数据作为训练数据,18组数据作为验证数据,进行多次反复模拟训练,选择得到其中检测数据均方误差最小的神经网络作为最终的映射模型。为了验证这一模型的有效性,根据该网络分别计算变异系数为0.08、石块最大粒径20 cm、不同试坑尺寸条件下的检测有效率,并与实际的随机场计算结果进行对比,对比结果汇总于表2中。由表2可以看出,根据BP神经网络训练得到的神经网络模型,可以较为准确地计算某一石块粒径、某一变异系数不同试坑尺寸条件下的检测有效率结果,其准确度与生成随机场的计算结果误差均控制在3%以内。因此,基于上述模型,就可实现针对某一工况,在保证一定的试验有效率情况下,选择合理试坑尺寸进行坑测法试验的目标。

表2 BP神经网络模型与随机场方法试验有效率结果对比  
Tab.2 Comparison of Efficiency Results Between BP Neural Network Model and Random Field Method

试坑尺寸		试验有效率		相对 误差 /%
直径 /cm	深度 /cm	BP神经网络 结果/%	随机场计算 结果/%	
40	40	34.87	35.88	-2.82
60	40	47.02	47.66	-1.34
80	40	58.17	57.36	1.42
100	40	69.82	69.04	1.12
40	60	41.16	42.22	-2.52
60	60	56.23	55.43	1.45
80	60	64.87	65.22	-0.53
100	60	77.32	76.23	1.43
40	80	45.02	45.90	-1.92
60	80	61.89	61.00	1.45
80	80	71.23	70.39	1.19
100	80	82.65	81.72	1.14

3 结论

本文基于三维随机场理论对土石混合料密度不均匀性进行模拟,探究了不均匀程度、石料粒径和试坑尺寸对坑测法试验有效率的影响。根据模拟结果主要得到以下结论:

- (1) 试坑尺寸越大、粒径越小、不均匀性越低相应的试验有效率越高,检测结果代表性越强;
- (2) 相同试坑体积时,增大直径较增大深度对试验有效率的提升作用更为明显;
- (3) 基于神经网络模型,建立得到试验有效率与试坑尺寸、不均匀程度和石块粒径之间的映射关系,藉此指导不同工况下坑测法的合理试坑尺寸选择。

参 考 文 献

[1] 水电水利工程粗粒土试验规程:DL/T 5356-2006[S]. 北京:中国电力出版社,2007.

[2] 邹海味,熊越,陈学军. 土石混合料的压实与力学性能研究[J]. 公路,2019,64(6):32-38.

[3] 胡华昌. 缩尺方法对土石混合料力学性质的影响[J]. 水利规划与设计,2017(2):97-99.

[4] 程晓明,刘海涛. 新疆土石混合料最大干密度确定方法研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2014,32(1):81-84.

[5] 苏成,徐瑞,范学明. 二维随机场离散的曲边单元局部平均法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2008(3):104-107+120.

[6] Peng S T G, But T V M. Soil improvement works for the design and development of SP-PSA international port company Ltd project in Bariavung Tau, Vietnam[C]. In: Proceedings of International Symposium on Deep Mixing and Admixture Stabilization (Deep Mixing 2009),2009.

[7] 蒋水华,李典庆,周创兵,等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(3):508-518.

[8] Shinozuka M, Deodatis G. Simulation of multi-dimensional gaussian stochastic fields by spectral representation[J]. Applied Mechanics Reviews,1996,49(1):29-53.

[9] Phoon K K, Huang S P, Quek S T. Implementation of Karhunen - Loeve expansion for simulation using a wavelet-Galerkin scheme [J]. Probabilistic Engineering Mechanics,2002,17(3):293-303.

[10]李典庆,蒋水华,周创兵,等. 考虑参数空间变异性的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法[J]. 岩土工程学报,2013,35(8):1413-1422.

[11]蒋水华. 水电工程边坡可靠度非侵入式随机分析方法[D]. 武汉:武汉大学,2014.

[12] Melink T, Korelc J. Stability of Karhunen-Loève expansion for the simulation of Gaussian stochastic fields using Galerkin scheme[J]. Probabilistic Engineering Mechanics,2014(37):7-15.