

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.008



不同地层比功阈值优化的统计方法及其应用

刘先珊,张同乐,牛万保

(重庆大学 土木工程学院;山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要:采用在线监测系统监测进行随钻参数的采样与分析,建立了派生参数与直测参数的理论表达式,提出了多因素组合的地层比功模型,实现了地层地质条件与随钻参数的有机结合。以重庆市某高压变电站施工场地为依托,建立了不同地层如素填土层、粉质粘土层、砂岩层及泥岩层的地层比功演化曲线,对比地勘信息可知,不同地层的比功值存在显著差异。可见,合理的地层比功阈值是辨识地层类型的重要参量。运用统计学原理对勘测孔附近不同地层的比功值阈值进行保值优化,通过地勘获得的地层信息来验证阈值区间的可靠性。进一步采用如上地层比功阈值对该区域的其他桩位所在地层进行分析验证,说明了地层比功阈值优化的统计方法可行,其阈值区间合理,可用于其他赋存环境的地层比功阈值确定及地层识别。

关键词:旋挖钻机;随钻参数;比功模型;统计分析;阈值优化

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0058-07

Statistical analysis of work ratio threshold of different formations and its application

Liu Xianshan, Zhang Tongle, Niu Wanbao

(School of Civil Engineering, Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The drilling parameters in the rotary drilling process were sampled and analyzed using online monitoring system. The theoretical expressions between the derived parameters and direct sampling parameters were constructed, and the model of formation work ratio considering multi-factor combinations was also proposed to realize the perfect integration of geological conditions and drilling parameters. With the case study of a construction field of the high voltage substation in Chongqing, the curves of different formations such as backfilled soil, silty clay sandstone and mudstone formations were described and compared with the geological survey, the comparison presented obvious difference of different formations. The above results indicated that rational work ratio thresholds were significant to identify the strata

收稿日期:2016-06-20

基金项目:中央高校基本科研业务费(106112014CDJZR200014、106112014CDJZR200015);国家自然科学基金(51478065);国家山区公路工程技术研究中心(GSGZJ-2015-09)

作者简介:刘先珊(1978-),女,博士,副教授,主要从事建筑基础与地下工程研究,(E-mail)liuxianshan@163.com。

Received:2016-06-20

Foundation item: Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 106112014CDJZR200014, 106112014CDJZR200015); National Natural Science Foundation of China (No. 51478065); National Highway Engineering Technology Research Center (No. GSGZJ-2015-09)

Author brief: Liu Xianshan(1978-), PhD, associate professor, main research interest: building foundation and underground engineering, (E-mail) liuxianshan@163.com.

characteristics. And then, the work ratio threshold of different formations was optimized near the surveying piles based on the statistical analysis theory to prove the reliability of the threshold range of different formations according to the geological information. In addition, the threshold value were used to verify the formations far away from the surveying piles, the results deeply calibrated the proposed method and verified the rationality of the threshold values. Therefore, the proposed method to determine the threshold range based on formation work ratio model can be used to another different formations and strata identification.

Keywords: rotary drilling rig; drilling parameters; work ratio model; statistical analysis; threshold optimization

旋挖钻机作为嵌岩桩成孔的一种重要施工方式,其钻进过程中的随钻参数与地层物性特征关联性研究不仅可以作为施工操作时的依据,还可为嵌岩持力层的判定提供基础数据。将旋挖钻机工作过程中的随钻参数进行采样分析,并建立基于相关直测参数与派生参数的理论表达式,提出多因素组合控制的地层比功数学模型,以实现随钻参数判定地层物性特征的目的^[1-3]。因此,比功法是将地层地质赋存条件与随钻参数如钻进压力、回转速度、钻矩、钻进率、接触面积等因素综合考虑,是一种针对时时钻进过程中多因素综合指标的地层辨识方法。比功值作为体现岩土参数指标的重要参量,根据曲线的时空演化规律初步判定地层物性特征的变化。因此,以旋挖施工过程中的地层比功曲线的变化趋势即可识别不同地层且进行持力层辨识,使得施工过程具有可控性,提高了施工效率并终孔深度确定的可靠性。

近年来,比功法作为工程师与科学家认为较为合理的方法,实际应用成果不多。刘宝林等^[4]根据钻孔深度的不同,将钻柱-孔壁环节作为主要的影响因素并从能量传递角度,提出了钻机钻进过程中的优化原理。赵大军等^[5]就钻机优化钻进在施工过程中的钻进特点进行了大量的研究,提出了在钻进过程中的比功法的原理以及比功值范围,并取得了丰硕的成果。

比功值作为识别地层的重要岩土参数,其不同地层的比功阈值区间的确定至关重要。根据《岩土工程勘察规范》可知,采用数理统计方法对工程勘察试验的岩土力学试验数据进行分析修正,可以将大样本岩土参数结果直观准确简单有效的体现,且实际应用中的可靠性高^[6-8]。吴长富等^[9]归纳总结了现行规范岩土参数估计理论在勘察中的应用,并指出岩土参数点估计与区间估计两种数理统计方法在

实际勘察中存在的缺陷。黄一峰等^[10]通过 K-S 检验法与经典的概率分布函数做对比,为大样本岩土参数概率分布推断提供了新的途径。卞世俊^[11]提出采用不同方法降低标准差及变异系数提高数理统计的精度,可以得到可靠度较高的岩土参数。张润明等^[12]根据岩土体本身的特性认为按照传统的理论计算岩土参数的概率分布特征是不科学的,提出采取相关型参数区间估计方法。

鉴于岩土材料是地质构造的产物,具有很强的空间变异性,但彼此间也有一定的相关性,因此,选取正确的数学模型,将复杂的岩土对象(即多个参数的相互关系)联系起来,然后转化为直观的数学描述十分关键^[13-15]。根据规范^[6]可知,用数理统计方法对比功值数据进行处理是可行的,其方法不仅仅可考虑岩土体及比功值的变异性与相关性,且能对变化的数据曲线给出合理的优化区间^[16]。在已有的研究基础上,以重庆市江津某输变电工程旋挖桩位随钻参数数据库为基础,用比功模型计算不同地层的比功值,用统计方法优化上述比功值得到不同地层的比功阈值,与实际地勘信息对比,表明本文确定的地层特征是符合实际的,说明阈值区间值是可靠的。并将该阈值用于非勘测孔桩位在旋挖钻进过程中的地层辨识,进一步验证了确定方法的可行性及阈值的合理性。

1 工程简介

1.1 工程概况

江津某输变电工程场地原始地形属剥蚀浅丘地貌及河流侵蚀沟谷地貌。场地类别属中等复杂场地,岩土种类较多,较不均匀。平整场地后,在场地东南角及西北为填方地段,采用人工机械抛填并进行强夯处理,填土厚度 0~21.3 m,局部基岩出露,平场标高约为 303.0~305.0 m。

场地地层为内陆河湖相沉积,岩土层划分为:上覆第四系全新统素填土(Q4ml)、粉质粘土(Q4dl+el),下伏侏罗系中统沙溪庙组(J2S)泥岩与砂岩互层分布。基岩状态分为强风化及中等风化,强风化层岩体破碎~较破碎,质较软,结构构造欠清晰,中等风化基岩岩体较完整,结构构造清晰,岩体为层状结构。

场地内的所有旋挖桩采用中联重科 ZR220A 施工,该钻机参数配置合理,生产效率高,且有多种钻杆选择,匹配不同钻具即可进行不同类型岩土层如素填土层、粘土层、砂层、冻土层、卵石层和中风化岩层等的旋挖作业,以满足日益复杂的施工要求,具有广泛的用途和很强的适应性^[17]。主要技术参数如表 1 所示。

表 1 中联重科 ZR220A 主要技术参数

Table 1 Zoomlion ZR220A main technical parameters

发动 机功率/ kW	钻进 扭矩/ (kN·m)	最大成 孔直径/ mm	最大成 孔深度/ m	主卷扬 提升力/ kN	主卷扬 提升速度/ (m·min ⁻¹)
252	220	2 000	60	196	62.5

1.2 比功模型

为了进行钻进过程中的地层识别,基于在线监测系统获得钻进直测参数(图 1),并推导派生参数(图 1)表达式,针对各参数的时空演化曲线分析钻进参数与地层物性特征的关联性,通过控制钻进压力、回转速度等参数以实现最优钻进速度。因此,综合考虑各参数之间的关联性,结合旋挖施工场地的地层条件与钻进方法,建立考虑转速、转矩、钻进率、给进力、钻孔直径等多因素综合影响的数学模型,即为地层比功模型,如式(1)所示,可根据地层比功与钻进深度的变化趋势来鉴别地层的变化特征。

$$e = \frac{F}{A} + \frac{2\pi n\omega}{A u} \quad (1)$$

式中: e 为比功; F 为给进力; A 为钻孔面积; n 为转速; ω 为转矩; u 为机械钻速。比功法综合考虑了给进力、转速、转矩、钻进率、钻孔直径等钻进主要参数,可较好地识别地层。

赵大军等^[3]对此方法进行了详细的研究,将地层分为了 3 大类:土层、破碎松散层、岩层。由于上述 3 种地层的物性特征不同,钻进过程中的随钻参

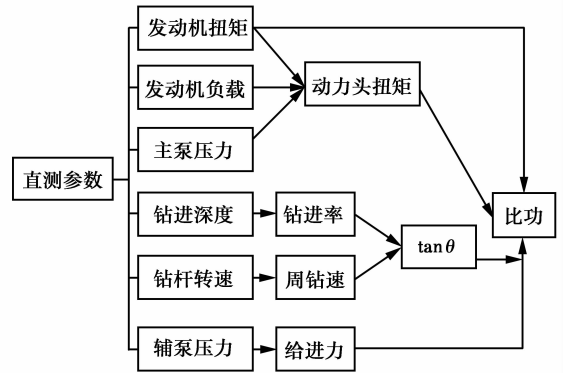


图 1 旋挖钻机直测参数及其派生关系

Fig. 1 Direct measurement parameters of drilling machine and its derived relationship

数及派生参数差异较大,计算表明其不同地层的比功值差异显著,且范围变化很大,地层区分较为模糊,比功阈值区间有待进一步优化。鉴于岩土体赋存环境的各向异性及力学参数的随机性,不同地层的比功值阈值确定也需考虑如上影响因素,因此,本文提出基于统计学原理的地层比功值阈值优化,能对不同地层分界进行准确确定。

根据本依托工程地质勘查情况,将施工场地旋挖桩所在地层划分为素填土层,粉质粘土层,砂岩层以及泥岩层。由于不同地层的比功值差异大,因此,基于挖钻钻进监测系统实时监测的直测参数以及多个派生参数推导而来的比功值(图 1)也将产生显著变化,即上述 4 种地层的比功值随着钻进过程不断变化。对所有勘测孔附近的旋挖钻进过程进行监测分析并计算每个桩位钻进过程中的比功值,由于实际施工过程的不精准性,对地勘信息完备的勘测孔附近桩位地层比功值进行统计分析,得到保值率更高的地层比功阈值区间,更准确进行地层识别。

2 比功值的统计分析方法及实施步骤

在现有的岩土参数的计算方法中,是在概率的分布和对数值进行估算的情况下进行的。对于某些未知参数如岩土力学参数,若想估计出一个满足工程需要的参数范围,并期望确定这个范围包含未知参数真值的可信程度,这个范围通常是以区间的形式给出,这种形式的估计称为区间估计。区间估计是通过参数置信区间的置信度来衡量的。

根据岩土工程的实际情况和数理统计理论,认

为岩土参数试验数据样本量 $n < 30$ 属于小样本容量情况,反之,为大样本容量情况。本文数据统计结果均为大样本情况,其分析方法如下。

确定样本容量 n 后,需要确定分位点,即对于给出的置信水平 $1 - \alpha$,来确定分位点。最后利用不等式变形得到未知参数的置信区间: $(\bar{x} \pm u_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}})$ 。

相关统计分析指标如下:

$$\text{样本均值: } \bar{x} = \sum_{i=0}^n x_i$$

$$\text{样本标准差: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\text{平均误差: } \mu_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{置信上限: } \lambda_1 = \bar{x} - u_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{置信下限: } \lambda_2 = \bar{x} + u_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

计算完区间估计,将采取类似“3 σ 法则”来检验此区间优化方法的合理性,即另采集若干同类岩土层的不同比功值参数数据,计算该数据落在优化后的区间的比例。

3 勘测孔附近桩位的地层比功值统计

3.1 数据统计

收集整理了该场地全部桩位旋挖钻进的随钻参数及计算的比功值。其中,勘测孔附近桩位共有 10 根;包括素填土层比功值数据 182 组,粉质粘土层比功值数据 46 组,砂岩层比功值数据 34 组,泥岩层比功值数据 49 组。

3.2 数据分析

由于不同桩位中等风化基岩的天然、饱和状态下抗压强度具有变异性,相同岩土层的比功值分布概率考虑符合正态分布。获得勘测孔附近样本桩孔的地层结构和相应比功值后,对不同地层的比功值进行分析,以确定保值率在 95% 时的比功置信区间。如下将对素填土层、粉质粘土层、砂岩层以及泥岩层四类岩土层的比功值分别进行统计分析。

基于 SPSS 数据分析软件对素填土层、粉质粘土层、砂岩层以及泥岩层 4 类岩土层的比功值分别进行分析,根据可用的有效数据的概率分布,相当于找到一个合适的数组范围来估算特定某场地岩土属

性^[18]。其数据分布直方图见图 2~5,分析结果见表 2。结果表明,4 种岩土层的比功值分布规律不尽相同,素填土层、粉质粘土层及砂岩层的比功值分布规律均符合正态分布规律,而泥岩层比功值的分布规律符合偏正态分布规律,在大样本数据分析过程中,正态分布规律可以充分利用样本自身所提供的信息。根据随钻参数如给进力、转矩、转速、钻进速度及钻孔直径等参数的时空演化曲线可知地层比功值与与岩土体的固有属性关系密切。也即地层比功值是地层的固有属性,是同一施工场地岩土层承载能力评价的特征值,可用来判定地层类型。通过以上统计分析,并结合实际地看资料,得到 4 种地层——素填土层、粉质粘土层、砂岩层以及泥岩层,各层所对应的比功值阈值区间,对应于保值率为 95% 时的保值优化区间分别为 4.83 ~ 29.17、31.86 ~ 49.78、51.57 ~ 70.73、72.79 ~ 152.46 MPa。

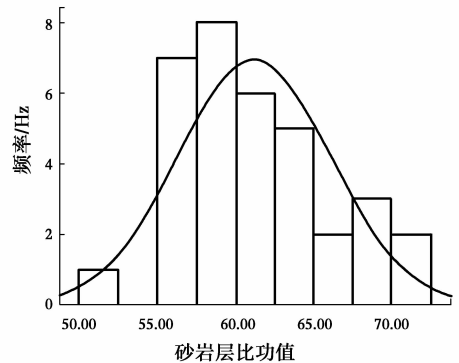


图 2 素填土层比功值直方图
Fig. 2 Histogram of the specific work value of the plain fill layer

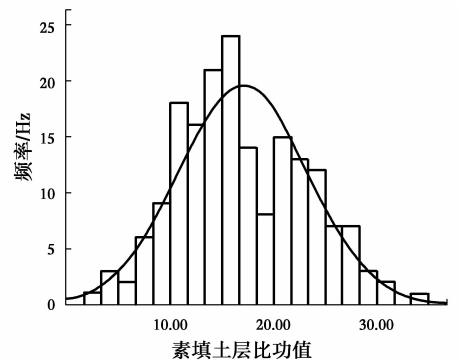


图 3 粉质粘土层比功值直方图
Fig. 3 Histogram of the specific work value of the silty clay layer

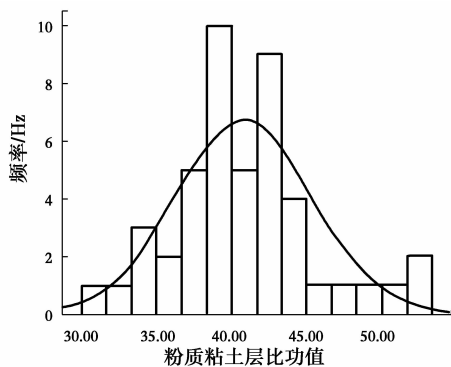


图 4 砂岩层比功值直方图

Fig. 4 Histogram of the specific work value of the sandstone layer

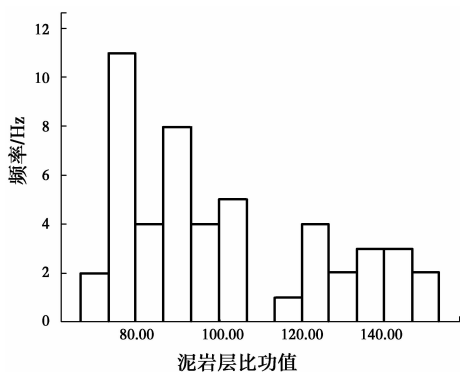


图 5 泥岩层比功值直方图

Fig. 5 Histogram of the specific work value of the mudstone layer

表 2 勘测孔附近各土层数据统计分析表

Table 2 Statistical analysis table of soil data of known survey data

岩土层	范围值	样本容量	平均值	标准差	保值率 95% 的区间
素填土层	2.15~33.76	182	17.00	6.21	4.83~29.17
粉质粘土层	31.23~51.72	46	40.82	4.57	31.86~49.78
砂岩层	51.80~71.46	34	61.65	4.89	51.57~70.73
泥岩层	72.69~152.46	49	100.77	24.85	72.79~152.46

4 工程实例应用

为验证如上地层比功阈值区间的合理性。现选取依托项目中一根靠近已知勘测线的桩构架 19# 桩,该桩位于场地 1-1 勘测线上、ZY3 勘测孔下方 1.381 m 处。根据已知勘测线的情况,推断出 19# 桩在钻深 0~17.6 m 时处于素填土层,17.6~18.8 m 时

处于粉质粘土层,18.8~19.4 m 时处于砂岩层,19.4 m 以下时处于泥岩层。

统计该根桩比功值数据共有 42 组,比功值随钻进深度的变化曲线如图 6 所示。由图可得,随钻深的变化,比功值呈现阶梯形变化,即可得到桩身钻深 0~17.76、17.76~18.84、18.84~19.2、19.2~20.1 m 时的比功值范围变化较大,与地勘资料中地层的变化是一致的。该根桩 42 组数据中,处于 4 种土层的优化区间内的百分比分别为 100%、95%、100%、100%。因此,以比功值的变化来识别地层是可行的,并且,比功值区间的划分也是合理符合实际的。

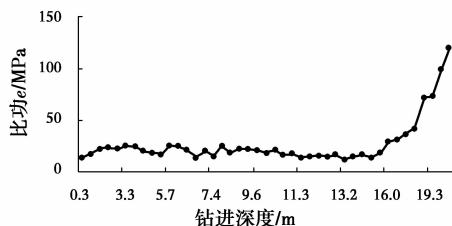


图 6 19# 桩比功值与深度变化

Fig. 6 Relationship between specific work and depth

另外,对全部非勘测孔附近的 68 根桩位的比功值进行统计:包括素填土层比功值 796 组,粉质粘土层比功值 208 组,砂岩层比功值 130 组,泥岩层比功值 138 组。基于已有的地层比功阈值区间,对 68 根桩位比功值进行再次统计分析,反馈分析该区间对未知区域地层识别的保值率,如表 2 所示,非勘测孔附近各土层比功值的保值率均在 90% 以上,表明统计方法优化确定的阈值区间可靠性较高,对勘测孔较少的场地进行其他桩位地层辨识是可行的。

表 3 未知勘测资料各土层比功值的保值率

Table 3 The preserving rate of the specific work value of each soil layer in the unknown survey data

试验项目	保值率/%
素填土层	93
粉质粘土层	90
砂岩层	99
泥岩层	91.3

5 结论

通过对重庆某地区旋挖桩施工的全程监测工况参数后处理得到的各土层比功值的统计分析,给出

了素填土层、粉质粘土层、砂岩层以及泥岩层 4 种土层的比功保值率为 95% 的优化区间,并结合工程中非勘测孔附近桩地层的反馈分析,说明本文提出的地层比功阈值优化统计方法是可行的。结论如下:

1) 统计结果源于重庆市地区实际工程实测试验数据,相对于赵大军等^[5]的推荐值来说,其结果在地层识别的工作中更具有区域代表性和区域适用性。

2) 地层比功值是对钻进过程中的地层特征进行实时辨识的重要参量,但不同地层的比功阈值区间确定是关键。基于提出的统计方法实现了地层比功阈值区间的确定,并对非勘测孔附近地层比功保值率进行了反馈分析,其保值率均能保持在 90% 以上,说明该方法用于复杂赋存环境中的地层辨识是可行的。

3) 数据采集过程中,主要针对本项目的四种地层进行统计分析,鉴于其他赋存环境中的地层比功值随机性及变异性,需对基于多种环境中多因素协同控制比功值进行统计分析,获得更多符合实际的比功值分布模型,随着资料的丰富和试验数据的积累,阈值优化的统计分析还需进一步完善。

4) 虽然,主要采集的是重庆市具有代表性的岩土层,但对其他区域的不同岩层而言,采用比功模型及统计方法进行阈值区间优化并进行地层识别仍是可行的。可见,对于重庆地区而言本文的统计结果具有一定的代表性和适用性,尤其是针对地层分布类似的土层,本文的结果可供参考使用。

参考文献:

[1] 褚志伟,王超,徐林,等. 基于全液压动力头钻机的扭矩实时监测[J]. 煤矿机械,2015,36(4):315-317.
CHU Z W, WANG C, XU L, et al. Torque real time monitoring based on fully hydraulic power head drill rig [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(4): 315-317. (in Chinese)

[2] LUO J, LI L G, YI W, et al. Working performance analysis and optimization design of rotary drilling rig under on hard formation conditions [J]. Procedia Engineering, 2014, 73: 23-28.

[3] JIANG T, YOU Y P, XUE G Y, et al. Research on the dynamic characteristics of mast mechanism of rotary drilling rig [J]. Procedia Engineering, 2011, 16:

763-771.

[4] 刘宝林,桂暖银. 自控钻进中的优化钻进原理[J]. 地质与勘探,1999,35(6):2-4.
LIU B L, GUI N Y. Optimizing drilling technology in computerized drilling [J]. Geology and Prospecting, 1999, 35(6): 2-4. (in Chinese)

[5] 赵大军,李文华,孙友宏,等. 工程地球物理勘探随钻测量钻机的研制[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(1):144-149.
ZHAO D J, LI W H, SUN Y H, et al. Research on engineering geophysical exploration MWD drilling rig [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(1):144-149. (in Chinese)

[6] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:300-302.
Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021-2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 300-302. (in Chinese)

[7] 廖建. 岩土工程勘察的场地和地基稳定性综合评价[J]. 吉首大学学报(自然科学版),2014,35(4):54-58.
LIAO J. Geotechnical engineering field and foundation stability evaluation [J]. Journal of Jishou University (Natural Science Edition), 2014, 35(4): 54-58. (in Chinese)

[8] WANG C H, ZHU H H. Combination of kriging methods and multi-fractal analysis for estimating spatial distribution of geotechnical parameters [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(1):413-423.

[9] 吴长富,朱向荣,刘雪梅. 基于现行规范岩土参数的统计方法分析及应用[J]. 工程勘察,2005(3):5-7.
WU C F, ZHU X R, LIU X M. Analysis and application of statistical methods based on the current specification of geotechnical parameters [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005(3): 5-7. (in Chinese)

[10] 黄一峰,李夕兵,朱唤珍. 基于正态信息扩散原理的大样本岩土参数概率分布推断[J]. 世界科技研究与发展,2016,38(2):249-253.
HUANG Y F, LI X B, ZHU H Z. Probability distribution of large samples of geotechnical parameters based on normal information spread method [J]. World Sci-Tech R & D, 2016, 38(2): 249-253. (in Chinese)

[11] 卞世俊. 岩土工程勘察中分层试验物理力学指标的数理统计及应用[J]. 江淮水利科技,2015(2):14-15.
BIAN S J. Mathematical statistics and application of physical and mechanical indexes of layered test in

- geotechnical engineering investigation [J]. *Jianghuai Water Resources Science and Technology*, 2015(2):14-15. (in Chinese)
- [12] 张润明,郑温棠. 相关型岩土参数分析和选用[J]. *岩土力学*, 2013, 34(7):1995-1999.
ZHANG R M, ZHENG W T. Analysis and selection of correlational geotechnical parameters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(7):1995-1999. (in Chinese)
- [13] BLISTAN P. Mathematical statistics in the geology [J]. *Acta Montanistica Slovaca*, 1999, 4(2):115.
- [14] LI D Q, TANG X S, ZHOU C B, et al. Uncertainty analysis of correlated non-normal geotechnical parameters using Gaussian copula [J]. *Science China Press*, 2012, 55 (11):3081-3089.
- [15] FAWAD S N, PAUL W M, WANG Y H. Statistical analysis of cone penetration tests and soil engineering parameters at the national geotechnical experimentation clay site [J]. *Geo-Frontiers*, 2011: 2998-3007.
- [16] 陈小平. 重庆沙溪庙组地层岩石单轴抗压强度研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10):2994-2999.
CHEN X P. Study of uniaxial compressive strength of Shaximiao formation rock in Chongqing urban area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35 (10):2994-2999. (in Chinese)
- [17] 马红月,郑现磊,张西坤,等. 旋挖钻头设计制造数据库系统设计[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(5): 63-66.
MA H Y, ZHENG X L, ZHANG X K, et al. Design of auger drill bit design database system [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(5): 63-66. (in Chinese)
- [18] WANG Y, ZHAO T Y, CAO Z J. Site-specific probability distribution of geotechnical properties [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015(10):159-168.

(编辑 王秀玲)