

岩土参数空间分布特征及其制约机理研究

李红中^{1,2,3}, 马占武⁴, 张修杰^{1,2}, 李水清^{1,2}, 何志军¹,

郑梦天¹, 张亚妮¹, 徐燕君², 胡晓¹

(1.广东省公路勘察设计技术咨询服务工程技术研究开发中心, 广东 广州 510507; 2.广东省交通规划设计研究院股份有限公司;
3.中山大学 地球环境与地球资源研究中心; 4.北方民族大学 土木工程学院)

摘要:岩土参数兼具“随机性”与“结构性”双重空间变异性特征,它制约着工程建设的安全性与经济合理性。研究表明:岩土参数的随机性来源于岩土体组成、结构和构造以及赋存环境的差异及取样、试验和统计过程中普遍存在的失真与量测误差,结构性则来源于岩土体形成和后期改造过程中多种宏观规律的控制或受某些确定性控制因素带来的失真与量测误差。基于岩土参数变异性这一特点,该文提出提升岩土参数获取准确性的重要解决途径:岩土体的地层划分需要综合利用多种类型的地质参数,原始岩土参数获取的准确性应兼顾“成果来源”、“勘察阶段”和“施工工法”,数据选取要充分重视“经验值”与“实际值”之间的平衡和修正,建设基于GIS的岩土参数数据库及预测专家系统。

关键词:岩土参数;随机性;结构性;工程勘察;变异性

1 前言

岩土参数具有空间变异性并引起了学术界和工程实践的广泛关注。岩土体是地壳表层岩石和土壤的统称,它是漫长地质历史中形成的复杂介质。岩土参数指标包括岩土物理特性指标、力学指标、水文地质参数、特殊试验指标和推算参数指标,这些指标复杂多变并主要归因于岩土材料形成过程中自然因素和人为因素的综合作用。研究表明:自然界中大多数岩土体均具有非均质性和各向异性,这些岩土体的参数指标常常表现出显著的空间变异性,即同时兼具空间上的“结构性”和“随机性”两个重要属性。在以长线状为特征的公路工程建设中,准确掌握岩土参数的空间分布特征及变异性可提升工程与环境的和谐性。因此,诸如经典统计学、地质统计学、马尔可夫预测模型、集合卡尔曼滤波估值法、分形理论、改进灰自助法、空间状态模拟等方法被引入到了岩土工程的研究中,这些新的理论及方法主要涉及岩土参数空间分布特征、变异性及影响因素等内容。

岩土参数的变异性制约着工程建设的安全性与经济合理性。在公路工程建设中,以物理力学性质为代

表的岩土体参数与工程的设计、施工和管理关系密切,同时也直接影响着建筑物的安全、经济和正常的使用。研究表明,科学合理的岩土参数能确保工程项目的安全性和经济性,否则就可能会导致工程投资加大或存在工程隐患。工程实践表明,准确合理的物理力学指标是工程设计方案经济且可行的根本保障,其中参数的准确合理性通常需要考虑其所处的地质环境并且有助于准确开展工程安全性与经济合理性的评价和预测。岩土体形成过程中所经历的复杂地质作用造就了岩土体的空间地质“随机性”和“结构性”并表现为客观存在的空间变异性,严重地制约了自然岩土体岩土参数的合理选择及未知点的预测。基于对工程质量和耐久性的需求,人们探索了岩土参数指标空间变异性与区域空间尺度和生态系统差异的联系,研究成果的应用极大地提升了建设工程管理的精细化并提升了工程建设效益。公路工程以长线状为特征并通常跨越多种复杂地形地貌区域,其岩土参数的原始值经常变化很大并给最终的取值工作带来了巨大的麻烦。鉴于此,分析岩土参数的特征及其形成机理,以得到岩土参数变异性的处理方法及获取岩土参数提升的重要解决途径,以期对岩土工程勘察及岩土参数指标选择提供借鉴。

收稿日期:2019-06-28(修改稿)

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(编号:科技-2016-02-042, 2014-02-009, 2015-02-002)

作者简介:李红中,男,博士,高级工程师.E-mail:lihongzhong01@126.com

2 岩土参数特征

自然岩土体是地球内外动力在漫长地质年代中共同作用的产物。岩石形成后暴露于地壳表层,它们经风化及剥蚀等作用形成大小悬殊的颗粒。岩石颗粒经风和流水等的搬运并沉积于某既定部位,亦或是直接在原地经历复杂的成土作用形成土壤。人类活动涉及的土是指由原岩风化产物经“剥蚀、搬运、沉积”形成且尚未胶结硬化的松散沉积物,它们通常属于第四纪(258万年)以来的产物。自然界中绝大多数岩土体具有非均质各向异性的特点,这些岩土体的参数多且复杂并大致可划分为:岩土物理特性指标(如含水率、孔隙比、饱和度、土粒重度、液限、塑限、渗透系数、塑性指数、液性指数等)、力学指标(细分为强度指标、变形指标,如压缩系数、抗剪强度、侧压力系数、泊松比、无侧限抗压强度、岩石单轴抗压强度等)、水文地质参数、特殊试验指标和推算参数指标(如地基承载力特征值、修正后的地基承载力、压缩模量、桩的极限侧阻力、桩的极限端阻力等)。工程实践表明:岩土体的参数复杂并在空间上呈现出如下两个显著特点:

(1) 随机性,即岩土体在形成或后期改造过程中受各类因素影响导致相关参数在空间上表现出随机性的特点。岩土参数在空间上具有的随机性表现为岩土参数值存在强烈的空间变化和离散,就连同一地块甚至同一土体相邻位置也存在岩土参数差异,这种岩土参数随着三维空间位置变化而呈现出典型的地质特性。岩土体中微观成分或结构的差异广泛存在,导致岩土参数的值发生明显变化。即使岩土体的成分和结构相同,复杂的地质作用和演化历史也能造就岩土参数的差异。另外,人为因素也常常导致岩土参数的差异,如采样运输、试验方法、统计估计及参数计算模型等带来的误差。

(2) 结构性,即岩土力学参数因受到多种宏观规律的控制而在整体上表现出统计平均规律性或具有某种相关性。在天然形成的岩土体中,不同空间位置上的岩土参数表现出较强的统计规律性(即岩土参数间存在相互联系,也称岩土参数间的相关性),这主要归因于其形成过程和后期改造中的控制作用存在多种宏观规律性。这种空间分布上存在的统计平均规律性,亦或是空间不同位置点岩土参数具备的相关性,它们被统一称为岩土参数的空间结构性。尽管非均质各向异性是自然界中绝大多数岩土体广泛具有的特点,但

岩土体形成和后期改造过程中多种宏观规律性的制约造就了岩土参数空间分布上的结构性。

综上所述,“随机性”和“结构性”构成了岩土参数特有的双重特征,该双重特征被称为空间变异性(Spatial Variability),这种特性在坡面土壤力学指标、岩体强度指标、隧道上覆岩土及其他工程岩土参数中得到了广泛证实。事实上,以鲍克洛夫斯基(Pokrovsky)为代表的研究人员在20世纪30年代就已经关注到了岩土参数的变异性,其中关于岩土参数变异性深入研究的报道则始于20世纪60年代,岩土参数的空间变异性这一概念则由Lumb于1975年首次提出。天然的岩土体经历了复杂的地质演化历史,其参数的随机性主要归因于组成、结构和构造及赋存环境等因素,而参数空间分布上的结构性则归因于岩土体形成和后期改造过程中多种宏观规律制约的贡献,这就是岩土参数空间变异性具有“随机性”与“结构性”双重特征的根源所在。

3 空间变异机理

岩土参数变异性来源非常广泛并被概括为下式:

$$\delta_R = \sqrt{\delta_D^2 + \delta_S^2 + \delta_K^2 + \delta_F^2 + \delta_G^2} \quad (1)$$

式中: δ_D 为同一地层中的各向异性; δ_S 为地质分层边界的随机性; δ_K 为勘探和取样数量不足的误差; δ_F 为计算模型缺陷导致的偏差; δ_G 为测试方法、试样尺寸及扰动情况、仪器精度及量测误差。岩土参数的空间变异性最初源于岩土体本身因素,但最终的变异性结果是叠加了取样、测试、量测、统计和模型造成的误差变异的最终结果。岩土参数空间变异性受到学术界广泛关注,研究历程及趋势主要包括“定性分类描述→定量的模型表达和预测”和“从简化的空间突变→具有空间依赖关系的渐变→结合突变性和渐变性的各种混合模型”两个方面。综合已有研究和工程实践,岩土参数的变异性主要包括“岩土体固有变异性”和“量测系统变异性”两大类,其中:空间岩土体自身的固有变异性属于岩土体真正意义上的“空间变异性”;而量测及人为因素导致的误差和失真本质上归属于“量测系统变异性”,后面这类不确定性将会随着人们认识水平的提高和模拟、测试条件及手段的改善而得以减弱。

3.1 自身因子

岩土体自身因子(也称本身因素)导致的岩土参数空间变异性属于固有变异性,这类变异性是岩土体本身固有的并一直是岩土参数变异性研究的重点内容。

工程实践和理论研究综合表明:岩土参数的固有变异性只有通过实际岩土体的性质参数进行全面系统的统计分析才能掌握,这势必需要足够多的样本参数作为基础。

(1) 随机性。非均质各向异性是自然界中大多数岩土体所具有的共同特征,这是因为岩土体(尤其是土壤)在形成过程中受控于自然因素(物源、气候、地形、地貌、构造应力、生物、时间等)和人为因素(如人类对岩土体的改造、保护和破坏等)综合作用的结果。现实中,自然因素和人为因素在时空分布上存在高度不均的特点,这些综合因素的差异在微观上通过矿物成分、颗粒形态、颗粒结构、颗粒排列方式等造就了岩土体这类天然材料复杂多变的性质。岩土体性质是内部矿物成分及颗粒结构的综合反映,内部颗粒的形态、结构和排列方式等复杂多变性造就了岩土体性质的复杂多变。即使存在完全均匀的同类岩体,这些岩土体形成后所处地质环境(地貌、地质构造、地下水、地应力等)也会对其各类参数造成影响和改造。岩土体组分、结构构造、内损伤等局部差异在各种改造因素的作用下势必产生随机不确定特征,如土体抗剪强度在沉积环境和含水量不同时可以相差甚远,天然重度 and 抗剪强度在围压增大后明显提升,天然含水率在围压增大后会降低,而岩体的力学参数受上部建筑物荷载作用和围岩压力作用等共同制约。因此,导致岩土体自身随机不确定性的因素非常多,岩土体自身成分(粒径、矿物、化学)、粒度组成、胶结物组分、结构类型、含水量和密度等属于内因,外部土层埋深、物理化学条件、应力历史、人类活动、环境等则属于外因。

(2) 结构性。岩土参数的空间结构性反映了岩土体的宏观整体规律(如某种相关性、统计平均规律性等),这种规律归属于岩土体形成过程中或/和后期改造作用过程中遭受了宏观规律性控制作用的产物。虽然地质作用的复杂性导致岩土体本身难以绝对均匀,但一定规模的整体性降雨、气温、地形、植被甚至构造作用等均能造成岩土体在三维空间上呈现结构性(即某种统计规律中系统性的变异)。对于已经形成的岩土体,宏观上统一且有规律性的改造作用也能造就某些岩土参数的空间结构性。这种结构性因素的作用通常涉及一定规模的空间范围,该范围内岩土参数空间分布在宏观上通常呈现出明显的结构性(也称统计平均规律性)。在岩土参数具有明显空间结构性的范围内,某任意两点间的距离越近通常相关性越大,距离越远则相关性越小。以沉积土为例,沉积时间和成土年

代越近,成因条件和物源相似度越高,这类土体的岩土参数通常会具有更高的相关性。随着研究的深入,岩土参数结构性的诸多规律得到了不断的挖掘和利用,具体表现在:①部分岩土参数具有显著的空间“连续性”,如相同地质背景(如沉积条件和沉积历史等)下的岩土层在统一均匀外部作用(如埋藏条件或改造作用等因素)下一般不存在空间位置变化导致的岩土物理特性指标、力学指标(包括强度指标和变形指标)及水文地质参数数值的显著变化;②部分岩土参数之间具有不同程度的“关联性”,如北京地区粉质黏土及黏质粉土的诸多参数在类型相同时存在显著的相关性,广州地区白垩系红层的岩石力学参数与样品室内超声波“纵波”波速之间存在明显的关联性。岩土参数的结构性为利用相关结构及波动距离等空间概念描述岩土参数的变化空间变异提供了条件,如以单纯形法、复合形法和模式搜索法等为代表的传统反演法实现了岩土参数的有效反演,后续的以遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)及量子遗传算法(QGA)等为代表的群智能算法有效提升了岩土参数反演的“全局寻优能力和收敛性”,这些方法为岩土参数的空间变异性描述和反演提供了条件。

3.2 外部因子

导致岩土参数结构性变异的外部因子(也称外部系统因素)非常多,主要涉及采样运输和试验量测过程中的方法、设备、人员、试样等,具体表现为:

(1) 随机性。外部系统因素导致的岩土参数随机性包括试验变异性、模型变异性和统计变异性。研究表明:岩石试件尺寸的增加导致力学参数值迅速降低(如 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准试件与 $1\ 000\text{ mm}$ 尺度现场试验的岩土参数测试结果相差有时可高达一个量级),钻孔取土时的振动压密使土样结构破坏、密实度增大导致同一场地探井土样的天然重度小于钻孔土样,而同一土样在不同试验方法(如总应力法或有效应力法)中获得的强度指标也存在显著偏差。外部系统因素导致的岩土参数随机性的常见类型包括采样运输、试验条件、试样尺寸、设备和人员,其中室内试验的样品尺寸效应是合理选择反映岩土客观力学特性的关键因素。模型变异性主要归因于理论模型的不足,即实操中计算模型选择过于简化、理想化或机理不清导致与真实值发生偏差,如与深度 h 有密切关联的场地黏聚力指标有时会被简化为均值。统计变异性主要来源于采样统计的误差,其中试样数量的不充分是引起统计不确定性的主要原因。

(2) 结构性。岩土参数获取的试验条件、仪器设备和 workflow 及流程等外部因素通常具有一定的共性,这是导致岩土参数出现结构性(如某种相关性、统计平均规律性等)的根源所在。外部因素导致的岩土参数结构性变异类型非常多,可细分为人为操作不规范导致的偏差(如钻探开孔时大量注水影响岩土体性质识别,单个回次进尺过大导致土层划分和取土深度失真,采样、试验和原位测试不规范导致结果失真)和仪器设备或方法的差异导致的偏差。在外部因素导致的结构性变异中,同一类行为、同一类方法和导致的岩土参数取值偏差在总体上应该具有统计规律。现实中,不规范人为操作导致的结构性变异可以通过规范各个过程的管理来予以降低甚至避免。仪器设备或方法等导致的结构性变异基本难以避免,但可以通过系统分析相应变异的客观规律并探索对应的修正方式。因此,外部系统因素导致的结构性变异可以通过改进取样方法(如在探井中进行人工取样等)、认识水平的提高、模拟测试条件及手段的改善、增加试验数量和提高试验技术水平等途径予以限制,而取样和测试过程中难以避免的随机量测试误差可以通过规范操作予以尽可能降低。

4 工程实践与讨论

4.1 珠三角地区工程实践

基于“随机性”与“结构性”导致的岩土参数变异,岩土参数在工程应用时势必需要优化处理才能符合工程安全性与经济合理性的需求。以珠三角地区多条公路和道路工程的近 850 份软土样品为例,开展了系统的参数统计、概率分布模型和相关性分析。研究表明:单个工程的岩土参数因数量小且影响因素多而呈现出极高的离散性和空间变异性,而部分岩土参数随着区域内样品数量呈现出明显的规律性(图 1~4)。表 1 为图 1~4 的 559 件淤泥样品相关关系。由表 1 可知:含水率 w 与孔隙比 e 的相关系数为 $R^2=0.898$,孔隙比 e 与密度 ρ 的相关系数为 $R^2=0.745$ 、 w_L 与 w_p 的相关系数为 $R^2=0.779$, w_L 与 I_p 的相关系数为 $R^2=0.639$ 等。珠三角地区多个工程实践结果表明:该文提供的岩土参数较好地实现了“经验值”与“实际值”之间的平衡和相互修正,尤其是在剔除异常指标时具有重要的指导作用,为工程的“质量、工期和造价”三个关键指标提供了有力支撑。

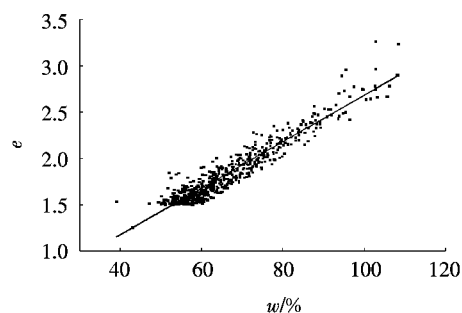


图 1 含水率 w 和孔隙比 e 相关图

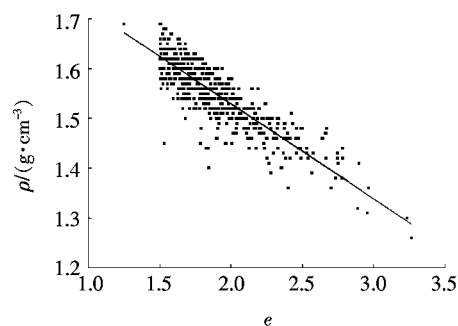


图 2 孔隙比 e 和密度 ρ 相关图

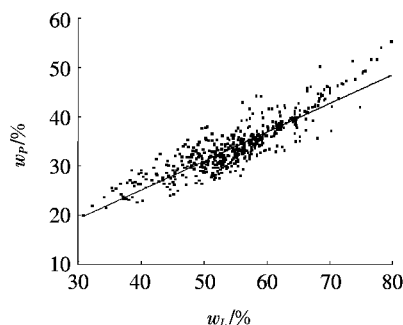


图 3 液限 w_L 和塑限 w_p 相关图

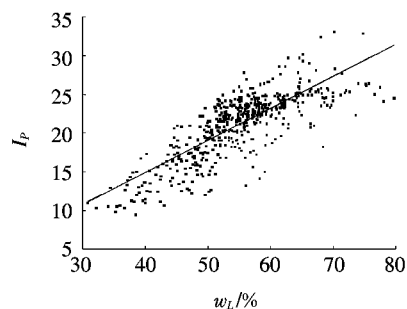


图 4 液限 w_L 和塑性指数 I_p 相关图

4.2 讨论

4.2.1 岩土参数与工程

岩土参数获取和确定的准确性是岩土体工程建设的重要组成部分,它影响着建筑物的安全性、经济性和适用性。据公开报道,岩土性质和参数的不准确引发

表 1 珠三角地区淤泥的物理力学指标相关关系

序号	回归方程	相关系数	相关性检验
1	$e = 0.17 + 0.03w$	$R^2 = 0.898$	极显著相关
2	$e = 1.91 - 0.19\rho$	$R^2 = 0.745$	显著相关
3	$w_p = 1.68 + 0.59w_L$	$R^2 = 0.779$	显著相关
4	$I_p = -1.68 + 0.41w_L$	$R^2 = 0.639$	显著相关

了流砂、隧道坍塌、突(涌)水、基坑塌方、地表塌陷、开挖面失稳、周围建筑开裂(或倒塌)等多种类型的工程问题,其中仅有限范围内的填海淤泥性质及参数的认识偏差就导致了某沿海城市地铁及房建等工程多次发生围护结构失稳和位移等问题。为了降低岩土工程中参数不准导致的风险,人们围绕岩土参数确认开展了涉及“岩土力学特性参数的测试和选用”、“模型识别和本构方程”及“分析方法的选择”三个关键问题的大量研究,而以直接参数反演和智能优化反演为代表的岩土参数反演方法倍受学术界关注。工程实践表明:不当的岩土参数取值和本构模型选择均会影响分析结果的准确性,因此岩土参数的确定在工程建设中存在着两难的处境:一方面,岩土工程参数的选取过于冒进可能造成工程隐患影响工程安全;另一方面,岩土工程参数的选取过于保守势必会造成工程投资的加大而影响经济性。因此,科学、合理、准确的岩土参数才能同时兼顾工程项目的安全性和经济性,它同时也可以有效地确保工程设计方案经济和可行。在实际操作中,岩土参数的准确合理性还需要考虑其所处的地质环境,这也是评价和预测工程安全性与经济合理性的基础。综上所述,岩土参数与工程建设的关系可归结为“岩土工程参数选取尺度的把握”,亦或是参数选择中“保守”和“冒进”倾向的综合权衡,这势必需要综合考虑实际工程的岩土体性质和多种勘察测试结果来实现最优岩土工程参数的准确选取。

4.2.2 岩土参数的选取

岩土参数的确定方法一直属于岩土工程研究的焦点。岩土参数空间变异性涉及结构性和随机性双重属性,其“土体本身变异、统计误差、试验误差、理论模型变异”4种来源在样本数量足够大并舍弃明显不合理试验值后可以忽略统计误差和模型变异。已有研究结果显示:以地质统计学为基础的方法在岩土参数空间结构信息获取时兼顾了空间随机性和结构性两大特点,概率论相对于经典统计方法中岩土参数的变异性(指标:变异系数=均方差/均值)呈现出更高的合理性。鉴于经典统计方法容易忽略岩土参数的“结构性”

变异,人们尝试采用区域化变量理论中的变异函数来描述岩土参数空间变异性并成功提供了空间任意距离间土壤性质的相互依赖关系和空间插值估算依据(如克里格插值法)。随着研究的深入,目前已经形成的岩土参数数值的确定方法类型比较多,如试验法(基于室内试验和现场原位试验数据的概率统计分析法)、经验类比法(根据类似地区或条件采用经验数据确定)、公式估算法(采用经验公式确定)、岩体质量分类法(根据岩体质量分级的方法确定)、反演法(根据参数反演的方法确定)和综合确定法(根据岩土参数优化确定的综合方法)。实际工程中,岩土参数可靠度的评价及决策优化水平的提升可以通过加大测试数据采集数量和加强理论研究提升工程性状判断的宏观精度,同时利用概率统计理论样品采集和试验量测并建立概率模型也是提升参数可靠性的基本方式。尽管受到了研究与工程实践的广泛关注,岩土参数取值的确定仍旧是岩土工程勘察中面临的难点和亟待突破的焦点。

5 结论

通过对岩土参数特征和空间变异机理研究,得到如下主要结论:

(1) 岩土参数的变异性具有“随机性”与“结构性”的双重特征。岩土参数随机性变异源于岩土体组成、结构和构造以及赋存环境的差异和后期取样、试验、模拟、统计计算过程中导致的失真与量测误差的叠加。岩土体的结构性变异源于形成及改造过程的宏观规律控制和规律性失真及量测误差的贡献。

(2) 岩土参数的随机性和离散性在工程勘察中很难避免。岩土参数的随机性和离散性普遍存在,原位测试、室内试验或原型监测等在这种天然具有的非均质各向异性面前均难以避免偏差。

(3) 提升工程岩土参数获取的准确性具有多种途径。岩土体地层划分可综合岩土体多种类型的地质参数,兼顾工程勘察“成果来源”、“勘察阶段”和“施工工法”可提升原始岩土参数的准确性,数据选取要充分重视“经验值”与“实际值”之间的平衡和修正,建设基于GIS的岩土参数数据库及预测专家系统。

参考文献:

- [1] 王家华,巩建敏.如何在实验中有效对岩土参数进行预算之浅析[J].价值工程,2010(1).
- [2] 刘春.岩土力学参数数据库的开发与取值研究[D].中国

- 科学院研究生院(武汉岩土力学研究所)博士学位论文, 2003.
- [3] 周文海,李永东.基于岩土参数统计分析的地层划分研究[J].土工基础,2017(4).
- [4] 南亚林.黄土地区土性参数的统计分析及其在公路边坡中的应用[D].长安大学硕士学位论文,2006.
- [5] 张征,刘淑春,邹正盛,等.岩土参数的变异性及其评价方法[J].土木工程学报,1995(6).
- [6] 王长虹,朱合华,徐子川,等.考虑岩土参数空间变异性的盾构隧道地表沉降分析[J].岩土工程学报,2018(2).
- [7] 张征,刘淑春,鞠硕华.岩土参数空间变异性分析原理与最优估计模型[J].岩土工程学报,1996(4).
- [8] 赵红亮,冯夏庭,张东晓,等.岩土力学参数空间变异性的集合卡尔曼滤波估值[J].岩土力学,2007(10).
- [9] 李红中,马占武,张修杰,等.广东省软土分布特征及其对高速公路路基影响的预测研究[J].广东公路交通,2016(6).
- [10] 陈蓓.岩土参数试验方法不确定性的概率评定方法[J].建材与装饰,2015(49).
- [11] 蒋敏.岩土参数估计的研究[D].武汉大学硕士学位论文, 2005.
- [12] Diodato N, Ceccarelli M. Geographical Information Systems and Geostatistics for Modelling Radioactively Contaminated Land Areas[J]. Natural Hazards, 2005, 35(2):229-242.
- [13] Amro E, Michel D. A Markov Chain Model for Subsurface Characterization: Theory and Applications[J]. Mathematical Geology, 2001, 33:569-589.
- [14] 赵红亮.基于集合卡尔曼滤波数据同化方法的岩土力学参数时空变异性研究[D].中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所)博士学位论文, 2006.
- [15] 李化云,范洪海,胡端.岩土小样本参数区间估计方法探讨[J].水力发电,2017(8).
- [16] 李黎,王永刚.地质统计学应用综述[J].勘探地球物理进展,2006(3).
- [17] 陈洪松.坡面尺度土壤特性的空间变异性[J].水土保持通报,2004(6).
- [18] 辜明清.岩土力学参数与地质环境[J].四川水力发电, 2002(1).
- [19] 缪林昌,周贻鑫,李植淮,等.中美欧规范桩基承载力计算设计对比[J].中外公路,2016(1).
- [20] 李建宇,耿文林,潘家奇,等.路堑高边坡稳定性分析与支护参数优化设计研究[J].中外公路,2018(5).
- [21] 刘新喜,侯勇,戴毅,等.软弱夹层岩质边坡长期稳定性研究[J].中外公路,2017(4).
- [22] 田小甫,孙进忠,张彬.北京地区粘性土物理力学指标统计分析[J].资源与产业,2007(4).
- [23] 徐泽友,李亚.岩土工程参数取值小议[J].江苏建筑, 2016(S1).
- [24] 李红中,张修杰,马占武,等.地质灾害对高速公路隧道工程长度及埋深激增的响应研究[J].建筑技术开发, 2018(12).
- [25] 蒋敏,王钊.地质统计学在土性指标的空间变异特性研究中的应用[J].四川水利,2005(1).
- [26] 宋亚新,张发旺,荆恩春,等.农田大尺度土壤水空间变异试验研究[J].水文地质工程地质,2008(2).
- [27] 杜志勇,刘苑秋,郑诗樟,等.退化红壤区不同模式重建森林土壤水分空间变异性[J].水土保持学报,2007(5).
- [28] 蔡浩.地质统计学在地层岩土参数分布规律研究中的应用[D].苏州科技学院硕士学位论文, 2015.
- [29] 赵玉.岩土力学参数影响因素的分析[J].科技与创新, 2015(16).
- [30] 徐鹏道.基于BP神经网络的岩土参数预测专家系统的研究[D].河北工业大学硕士学位论文,2005.
- [31] 张润明,郑文棠.相关型岩土参数分析和选用[J].岩土力学,2013(7).
- [32] 吴振君.土体参数空间变异性模拟和土坡可靠度分析方法应用研究[D].中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所)博士学位论文,2009.
- [33] 谭文辉,王家臣,周汝弟.岩体强度参数空间变异性分析[J].岩石力学与工程学报,1999(5).
- [34] Chen M, Ma L, Hoogeweg C, et al. Arsenic Background Concentrations in Florida, U. S. A. Surface Soils: Determination and Interpretation[J]. Environmental Forensics, 2001, 2(2):117-126.
- [35] Lumb P. The Variability of Natural Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1966, 3(2):74-97.
- [36] Li K S, Lumb P. Probabilistic Design of Slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4):520-535.
- [37] 赵玉杰,师荣光,刘凤枝,等.江苏北部农业区土壤砷含量空间变异性研究[C].全国耕地土壤污染监测与评价技术研讨会论文集,2006.
- [38] 赵宇飞.岩土强度参数选取方法研究及工程应用[D].中国水利水电科学研究院硕士学位论文,2005.
- [39] 卢远富,包腾飞,李润鸣,等.基于IDE-OSVR-ABAQUS的岩土力学参数反演方法[J].长江科学院院报,2017(6).
- [40] 关文章.湿陷性黄土工程性能新篇[M].西安:西安交通大学出版社,1992.
- [41] 胡群芳.基于地层变异的盾构隧道工程风险分析及其应用研究[D].同济大学博士学位论文,2006.
- [42] 陈浩冲.填海区淤泥的岩土参数反演及基坑变形预测研究[D].广州大学硕士学位论文,2017.
- [43] 吴冰冰.岩土工程参数确定方法研究[J].世界有色金属,

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.05.005

基于B样条曲线逼近的边坡临界滑动面的 混合启发式搜索算法

苗晓燕, 陈昌富*

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:采用三次均匀B样条函数模拟边坡任意形状滑动面,探讨了B样条曲线的端点处理方法和有效滑动面生成策略。将万有引力算法(GSA)与粒子群算法(PSO)两种启发式算法相融合,同时引入雁阵效应、非线性惯性权重进行改进,提出一种新的混合启发式搜索算法(HHA)。该算法增加了粒子的记忆性与群体信息交流功能,协调了全局和局部寻优能力。数值试验表明:HHA能有效克服GSA易陷入局部最小的不足,具有更好的优化精度、效率与稳定性。结合Morgenstern-Price法,对生成的有效滑动面计算安全系数,并以安全系数为目标函数,采用HHA搜索临界滑动面。4道标准考题分析验证发现:三次均匀B样条曲线能合理逼近任意形状临界滑动面;HHA对临界滑动面的搜索优于GSA,对非均质、含软弱夹层及考虑地震效应的复杂边坡均具有适用性。

关键词:任意滑动面;B样条曲线;万有引力算法;粒子群算法;雁阵效应;惯性权重

1 引言

临界滑动面的合理确定是边坡稳定性分析的关键。传统滑动面形状常人为假设为直线形、圆弧形、对数螺旋形、二次抛物线形等,而工程实践中受边坡几何形状各异、材料特性多变的影响,滑动面形状并不完全规则。因此,采用任意形状滑动面更具客观性与广泛

适用性,且因滑动面形状所受约束较少,往往能搜索到更接近实际的临界滑动面和安全系数值。任意形状滑动面的构造一般采用若干点将滑动面曲线离散,点间通过直线或曲线相连,点的坐标作为优化变量。显然,离散点越多滑动面模拟精度越高,但相同模拟精度要求下,折线模式所需离散点个数要大于曲线模式,应用曲线模拟任意形状滑动面相比折线具有优化变量少、搜索效率高的优势。陈祖煜、李亮等,采用三次样条插

2016(19)。

- [44] 文辉辉,尹健民,秦志光,等.BP神经网络在隧道围岩力学参数反演中的应用[J].长江科学院院报,2013(2).
- [45] 胡合欢.岩移松散层移动角值参数确定方法研究[D].山东科技大学硕士学位论文,2014.
- [46] 程丽红.Duncan-Chang模型参数数据库及信息系统[D].天津大学硕士学位论文,2007.
- [47] 徐超,杨林德.岩土参数的空间变异性分析[J].上海地质,1996(4).
- [48] 张维秀,盛崇文.地基土抗剪强度指标统计的方差分离法[J].岩土工程学报,1992(2).
- [49] 刘俊杰,乔德清,克里格法在岩土工程勘察和地基处理

与基础设计中的应用[J].土木工程学报,2006(4).

- [50] 郭兵兵,孙光中,孙强,等.边坡岩土参数优化确定方法研究[J].煤炭工程,2011(2).
- [51] 邵龙潭,唐洪祥,韩国城.有限元边坡稳定分析方法及其应用[J].计算力学学报,2001(1).
- [52] 张雷,顾文红,文谦,等.岩堆体边坡稳定性的三维数值模拟分析[J].地下空间与工程学报,2007(6).
- [53] 何满潮,黄润秋,王金安,等.工程地质数值法[M].北京:科学出版社,2006.
- [54] 易朋莹,王凯,任佳,等.基于传递系数法的滑坡带土强度参数反分析研究[J].中国地质灾害与防治学报,2008(4).

收稿日期:2019-05-27(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41572298)

作者简介:苗晓燕,女,硕士.E-mail: mxiaoyan55@163.com

*通信作者:陈昌富,男,博士,教授.E-mail: cfchen@163.com