

地层数字制图中纵、横分界线控制搜索新算法

朱凤贤^{1,2}, 周翠英^{1,2}

(1. 中山大学 岩土工程与信息技术研究中心, 广州 510275; 2. 中山大学 工学院, 广州 510275)

摘 要: 针对目前地层数字连线中处理地层缺失和倒转困难的问题, 考虑 6 种地层缺失和倒转情形, 提出了纵、横向结合地层分界线控制点搜索算法。将剖面图绘制视为一个多层地层区域组合叠加的过程, 在保持地层连续性的前提下兼顾各地层相互之间的影响, 有效处理了地层倒转、缺失问题, 在此基础上提出一种增加虚拟点、微调已有点的新算法。结合 3 次样条插值函数, 对绘制出的剖面图进行修正, 实现了地层光滑连线, 达到了地层无缝、无重叠组合的效果。将提出的复杂地层连线新方法应用于广东梅河高速公路工程数字制图中, 构造出的地层分布图像准确性好, 比较符合实际, 可以为工程的勘察、设计和施工提供参考。

关 键 词: 地层连线; 地层缺失和倒转; 控制点搜索; 三次样条插值; 光滑处理

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

A new algorithm for digital mapping of stratum based on control and searching method of vertical and horizontal dividing line

ZHU Feng-xian^{1,2}, ZHOU Cui-ying^{1,2}

(1. Research Center for Geotechnical Engineering and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Aiming at the difficulty to treat the stratum-absence and stratum-reversion situation, some researches on the method for complex stratum-line based on drill hole database are carried out. On the consideration of the single stratum continuity and the mutual influence of strata, a new algorithm is proposed to search the reference points of stratum boundary, which can deal with six special situations of stratum-absence and stratum-reversion. Meanwhile combined with cubic spline interpolation function, the second arithmetic modifying the point position is used to smooth the Stratum-line. The results of applying this aforementioned method to the digital profile mapping of Guangdong Meihe Expressway Project, indicate that the mapping precision is consistent with the maps from the investigation reports, and could provide some reference and guidance for the engineering design and construction.

Key words: stratum-line; stratum absence and reversion; reference point searching; cubic spline interpolation; smoothing process

1 引 言

在工程的设计、施工过程中, 计算机数字制图越来越受到设计人员的重视^[1], 用计算机绘制钻孔柱状图已日趋成熟, 但是, 由于工程地质剖面图其信息量大, 需要反映的实体多, 随机性强且不规则, 给绘制工作带来了一定的难度^[2]。地层连线问题是剖面图绘制的重点和难点内容, 对已知一系列钻孔的位置信息和地层信息, 要求用图形的形式把这些钻孔的地层用线连起来, 以展现钻孔分布的区域地

层情况。

目前国内主要采用以下两种方法进行剖面图地层连线^[3]: 一种是纵向搜索连接法, 将每个钻孔的地层编号, 地层界限沿每个钻孔顺序排出, 第 1 个钻孔、第 2 个钻孔、……, 钻孔连线首尾相接, 这种方法比较简单, 效果也比较好, 国内出现的一些专业地质剖面图软件正是基于此方法进行开发的, 如新型工程地质剖面图软件——PM^[4]、理正工程地质勘察 CAD^[5-6]等, 但这种方法无法考虑地层自身的连续性, 很难真实地反映地层分布情况。另

收稿日期: 2007-12-19

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2007AA11Z112); 国家自然科学基金 (No. 40672194); 高等学校博士学科点基金 (No. 20060558060); 广东省自然科学基金重点项目 (No. 06104932); 广东省科技计划项目 (No. 2004B10101002) 资助。

第一作者简介: 朱凤贤, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程与信息技术的学习与研究工作。

通讯作者: 周翠英, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与环境地质方面的教学与研究工作。E-mail: ueit@mail.sysu.edu.cn

一种是横向搜索连接,即层 1 的地层界限从第 1 个钻孔开始,一直连接到最后一个钻孔,然后再连接层 2、3,以此类推。王德筑^[3]针对岩基地层和软基地层的特点,采用地层横向搜索排比法实现地层界限的连接。陈建宏等^[7]提出了处理层状矿体、单一连通区域等简单类型的矿岩体的地质界线连接法。李锋等^[8]开发了 JHSCAD 软件,实现了剖面图中分层区域自动生成。魏敏、唐云等^[9-10]应用扫描线的区域充填算法,实现较复杂的地质充填剖面图的绘制等。研究发现,横向连接法可以将剖面中地层界限的数据连续地记录下来,但它通常只可以处理地层分布规则的钻孔数据,对于地层倒转等复杂地层情况仍然难以解决,举例进行说明见图 1。图中左边的钻孔出现了地层倒转,层序大的层 3 出现在层 2 上面,连线时就出现了交叉的线,层 3 的部分区域被后连线的层 2 覆盖了一部分,而钻孔中的一部分区域却没有归属哪个地层区,出现了空白。此外,这两种算法中地层的连线都是采用直线,整个地层在钻孔处有一个尖锐的折角,不符合实际情况。

本文提出一种基于钻孔数据的复杂地层连线新算法,即纵、横向结合钻孔搜索方法,将剖面图绘制视为一个多层地层区域组合叠加的过程,在保持地层连续性的前提下,兼顾各地层相互之间的影响,并有效处理了地层倒转、缺失问题,构造出具有相当准确性的地层分布图形,能够较好地地为工程勘察、设计、施工和管理服务。

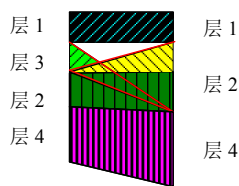


图 1 地层连线传统算法示例
Fig.1 Traditional method for stratum-line

2 纵、横向分界线控制搜索新算法

纵、横向结合钻孔新算法中所涉及的关键问题有两个:各地层上下分界线中控制点的确定问题和地层无缝、无重叠组合的问题。

2.1 地层分界线中控制点的确定

2.1.1 6 种地层倒转情形

为能较真实模拟地层倒转情况,对 1 400 多条钻孔基本数据和约 10 000 条的钻孔地层信息数据进行了考查,其中约有近 100 多处的地层倒转现象,经过详细分析和归纳后,将其分为 6 类(类型

A~F),如图 2 所示:类型 A:层 3、2 倒转,下层 2 层在相邻钻孔中有同层;类型 B:层 3、2 倒转,但在相邻钻孔中都没有同层;类型 C:层 3、2 倒转,但在相邻的钻孔中倒转的情况是相同的;类型 D:层 2、1 倒转,且与下层的层 1 构成夹层之势,但在相邻的钻孔中还有层 2 与左孔中的层 2 相同;类型 E:层 3、2 倒转,但在相邻的钻孔中层 2、3 又按正常顺序出现;类型 F:层 3、2 倒转,且在这个倒转上还有一个层 2,且在右边钻孔中没有层 3。

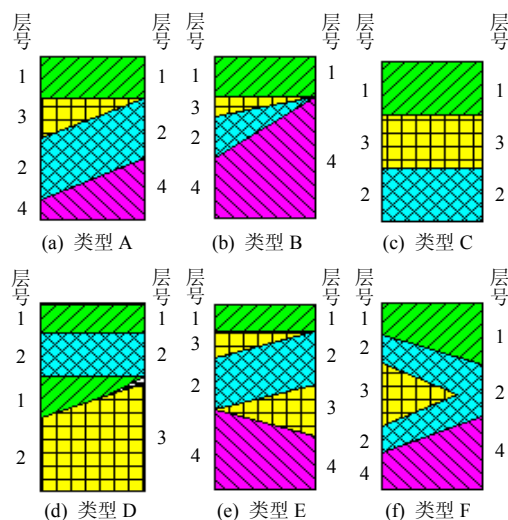


图 2 6 种地层缺失倒转情形
Fig.2 Six cases of Stratum absence and reversion

图 2 中 F 类型地层值得一提,该处地质夹层并未延伸到另外一个钻孔就已经尖灭。笔者采用的处理方法是,根据要尖灭的地层在钻孔中的相对厚度确定尖灭点,如图 3 所示,图中 A~H 为地层剖面的端点, $\frac{OM}{GH} = \frac{BC}{AD}$, $OM = GH \frac{BC}{AD}$, O 点即为尖灭点。这种方法考虑了地质夹层厚度在整个地层中所占比例对地层尖灭的影响,可以较为真实模拟地层尖灭的情况。

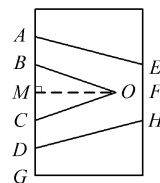


图 3 尖灭点确定方法示意图
Fig.3 Determination method for points of depositional termination

2.1.2 纵、横向结合搜索方法

纵、横向结合搜索方法是用来确定各地层上下分界线中的控制点,其基本思想是:在纵向(地层

从浅到深方向)搜索属于各层的控制点,在横向(钻孔从左至右排列方向)进行各层控制点的存储,也是通过多个同类型数据结构来管理每一层地层的信息(图4),其中上、下分界线上的控制点采用链表进行存储。不论是纵向,还是横向,都只需处理一次即可,其实现方法(图4)如下:

①对所有钻孔进行预处理。为便于比较,把主层号和次层号结合作为地层的层序:层序=主层号 $\times 10$ +次层号;

②对第1个钻孔进行分别处理。由于大多数地层是从这里开始的,需要借助钻孔2中地层分界点,进行钻孔1、2虚拟地层连线划分地层(考虑2.1.1中6种倒转情形),同时对所虚拟划分的地层,按照从上至下的顺序分别新建相应的数据结构进行管理,并将第1个钻孔上的各个分界点作为所在层上或下分界线控制点链表的起始点;

③处理第2个钻孔,同样考虑2.1.1中6种倒转情形,处理该孔最上面的点,判断该点是否属于已建分界线的延续点,是则将其存储至所对应的上或下分界线控制点链表中,否则,新建一个地层数据结构,并将该点作为该层上或下分界线控制点链表的起始点。用这种方法从上至下搜索该钻孔各地层分界点,并加以存储。

④后面钻孔的处理同步骤③,直到最后一个钻孔搜索完毕。

以上对钻孔所在区域内地层进行了划分,得到各层地层上下分界线控制点的链表,接下来要解决的是如何利用这些控制点,进行地层连线,也就是地层无缝、无重叠组合问题。

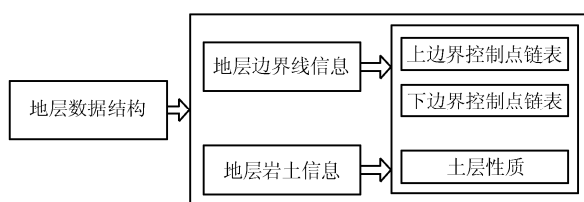


图4 地层数据结构

Fig.4 Data-structure of Stratum information

2.2 地层无缝、无重叠组合

地层无缝、无重叠组合即地层光滑连线问题。根据前面的搜索方法,已经得到了构成同一地层上、下分界线的控制点,这时问题变成已知一个点的坐标序列,如何用光滑曲线把它们连起来,即已知 $(X_0, Y_0), (X_1, Y_1), \dots, (X_k, Y_k)$, 求曲线方程 $S(X)$, 使得 $S(X_i) = Y_i (0 \leq i \leq k+1)$, 且 $S(X)$ 在 X_i 处有连

续的1阶和2阶导数。已知若干函数点的函数值,求函数表达式使目标函数过这些点是一个插值问题^[1]。本文采用三次样条(Spline)插值方法:设在区间 $[a, b]$ 上取 $k+1$ 个节点, $a = X_0 < X_1 < \dots < X_{k-1} < X_k < X_{k+1} = b$, 给定这些点上的函数值 $S(X_i) = Y_i (i = 0, 1, \dots, k)$ 。现在要求构造一个三次分段插值函数 $S(X)$, 使得满足下列条件: $S(X_i) = Y_i (i = 0, 1, \dots, k)$, 且在每个小区间 $[X_i, X_{i+1}]$ 上是一个三次多项式。

由于构成各地层分界线控制点个数的不同,在上下相邻地层往往很难实现无缝组合(图5),图中地层I的下分界线是由A~D 4个控制点组成,而相邻地层II的上分界线却只有A、B两个控制点,曲线拟合后地层I的下分界线与地层II的上分界线之间必然出现了一个空白区域。

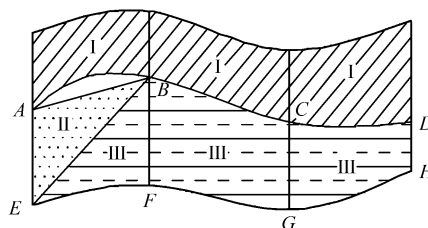


图5 地层有缝组合示意图

Fig.5 Stratum combination with the generation of blank areas

针对这一问题,本文提出增加虚拟点、微调已有点的新算法,是将C、D点作为地层II的上分界线的延长线上两个虚拟点,从而保证该线与地层I的下分界线重合,但由此出现新的问题是:原地层II区域是由AB、EB两条线所夹,现在上分界延长成了ABCD,而下分界线仍然是EB没有变,这样就无法形成一个合理区域来进行区域图形填充,因此,需要对下分界线作相应调整。同样增加两个虚拟点B'、C' (与B、C点重合),如图6所示,为保证区域的合理性,需要将B'、C'向下微调一点距离,从而使其形成一个合理区域,即ABCD C'B'E A。由于微调距离很小,所以绘制的图

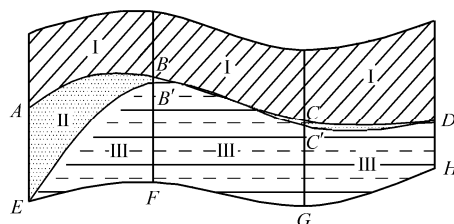


图6 地层无缝、无重叠组合示意图

Fig.6 Stratum combination with no blank or overlapping

形中并不失合理性,且达到了地层无缝、无重叠组合的效果。

3 工程应用

广(东)梅(河)高速公路是广东省境内具有代表性的山区高速公路之一,它东起梅州,西止河源,主干线全长 125 km,其沿线所经地质复杂,不良地质地段颇多,尤其是复杂地质环境地区(山区和沿海软土分布区)的线路长、跨越的地质单元多且具有隐蔽性和复杂性等特点。针对这种复杂的地下隐蔽环境,笔者采用上述的复杂地层连线新方法,开发了高速公路剖面图数字制图技术,绘制出的剖面图(图 7(a)),并与工程中已有的剖面图(图 7(b))进行比较,表明新算法可以处理地层正常、地层缺失和地层倒转情况,并且样条曲线型的地层线与手工绘制的是很接近的,达到了比较满意的效果。

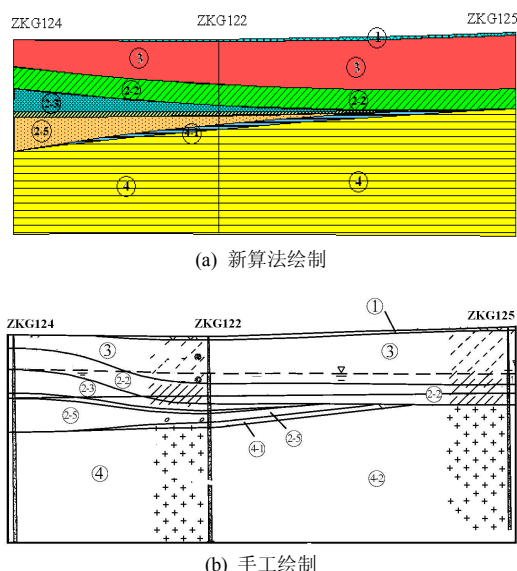


图 7 新算法与手工绘制地层线的比较

Fig.7 Comparison of stratum-lines by new algorithm and traditional manual method

4 结 论

(1) 针对目前地层数字连线中存在的问题,考虑 6 种地层倒转情形,提出纵、横向结合钻孔数据搜索算法,将剖面图绘制视为一个多层地层区域组合叠加的过程,在保持地层连续性前提下,兼顾各地层相互之间的影响,有效地处理了地层倒转、缺失问题;

(2) 采用三次样条插值函数进行地层连线,同时提出一种增加虚拟点、微调已有有点的新算法,对绘制出的剖面图进行修正,实现了地层光滑连线,达到了地层无缝、无重叠组合的效果;

(3) 将提出的复杂地层连线新方法应用于广东梅河高速公路工程数字制图中,构造出的地层分布图像比较切合实际,有相当的准确性,为相关的施工或研究提供了比较好的模型。

参 考 文 献

- [1] 周翠英, 陈恒, 温少荣, 等. 地下空间 GIS 二次开发中的数字制图方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 833—837. ZHOU Cui-ying, CHEN Heng, WEN Shao-rong, et al. Research on digital mapping methods for secondary development of GIS of underground space[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 833—837.
- [2] GIBBS B L. Computer software for mine design, an overviews[J]. **Journal of Mines, Metals & Fuels**, 1996, 96(7): 317—322.
- [3] 王德筑. 地层界限的处理方法[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(2): 49—50. WANG De-zhu. Method of dealing with stratum boundary[J]. **Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering**, 2002, 21(2): 49—50.
- [4] 王德筑. 新型工程地质剖面图软件——PM[J]. 水利水电工程, 1994, (2): 30—32. WANG De-zhu. A new software PM for drawing engineering geology profile map[J]. **Water Resources & Hydroelectric Engineering**, 1994, (2): 30—32.
- [5] 北京理正软件设计研究院有限公司. 工程地质勘察 CAD[J]. 计算机辅助设计与制造, 2001, (1): 74—75.
- [6] 黄超华. 理正工程地质 CAD5.0 使用介绍[J]. 江西煤炭科技, 2001, (2): 24—26. HUANG Chao-hua. Introduction of Lizheng geology CAD 5.0[J]. **Jiangxi Coal Science & Technology**, 2001, (2): 24—26.
- [7] 陈建宏, 周智勇, 陈纲, 等. 基于钻孔数据的勘探线剖面图自动生成方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(3): 486—490. CHEN Jian-hong, ZHOU Zhi-yong, CHEN Gang, et al. Automatic formation method of prospecting line profile map based on drill hole database[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2005, 36(3): 486—490.
- [8] 李锋, 胡维平. 剖面图中分层区域自动生成的计算机实现[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 117—120. LI Feng, HU Wei-ping. The computer realization of generating the layered regions in sectional graphs[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(1): 117—120.
- [9] 魏敏, 黄地龙, 邓飞. 基于扫描法在复杂地层剖面图绘制中的应用[J]. 新疆地质, 2004, 22(1): 104—106. WEI Min, HUANG Di-long, DENG Fei. A scanning-based method of the profile plotting applied to the complex stratum structure[J]. **Xinjiang Geology**, 2004, 22(1): 104—106.
- [10] 唐云, 黄地龙. 复杂地层结构的 2D、3D 剖面显示技术研究[J]. 物探化探计算技术, 2004, 26(4): 368—373.

TANG Yun, HUANG Di-long. A research on 2D and 3D display technique of baropue layers[J]. **Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exp-**

loration, 2004, 26(4): 368—373.

[11] 张家广, 杨长贵. 计算机图形学(新版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

《岩土力学》2009 年第 3 期被 EI 收录论文 (52 篇, 收录率 100 %)

No.	论文题名	作者	页码
1	煤与瓦斯突出的激发和发生条件	鲜学福, 辜 敏, 李晓红, 等	577—581
2	CO ₂ 注入岩体的热-气-应力耦合二维弹塑性有限元分析	张玉军	582—586
3	循环荷载下路基红黏土临界应力水平分析	廖化荣, 汤连生, 刘增贤, 等	587—594
4	煤与瓦斯突出中单个煤壳解体突出的突变理论分析	潘 岳, 张 勇, 王志强	595—602
5	基于设计安全系数及破坏模式的边坡开挖过程动态变形监测预警方法研究	张振华, 冯夏庭, 周 辉, 等	603—612
6	水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究	刘新荣, 傅 晏, 王永新, 等	613—616
7	平面应变状态下土体的软化特性与本构模拟	钱建固, 吕玺琳, 黄茂松	617—621
8	滚石冲击碰撞恢复系数研究	何思明, 吴 永, 李新坡	623—627
9	土工环剪仪的开发及其应用研究现状	洪 勇, 孙 涛, 栾茂田, 等	628—634
10	土石坝沥青混凝土心墙力学参数反演分析	朱 晟, 张美英, 戴会超	635—639
11	小浪底水库 1 [#] 滑坡体非饱和土强度特性试验研究	黄志全, 陈贤挺, 姜 彤, 等	640—644
12	长寿沥青路面结构的层厚设计与分析	邹维列, 王 钊, 彭远新	645—649
13	复杂层状岩层隧道塌方原因分析与加固后信息化施工技术	陈秋南, 赵明华, 周国华, 等	650—653
14	采矿巷道围岩变形机制数值模拟研究	周传波, 郭廖武, 姚颖康, 等	654—658
15	声波速度-频移衰减联合层析成像检测技术	于师建, 刘家琦	659—663
16	桩顶荷载对负摩阻力性状影响的现场试验	夏力农, 雷 鸣, 聂重军	664—668
17	三维弹塑性模型在路堤软基固结分析中应用	孙德安, 甄文战, 黄文雄	669—674
18	高斯过程机器学习在边坡稳定性评价中的应用	苏国韶, 宋咏春, 燕柳斌	675—679
19	成层土中倾斜荷载作用下桩承载力有限元分析	郑 刚, 王 丽	680—687
20	土体耦合蠕变模型在基坑数值模拟开挖中的应用	郭海柱, 张庆贺, 朱继文, 等	688—692
21	虚拟场地上杭州地铁隧洞开挖数值模拟	丁伯阳, 陶海冰	693—698
22	利用旁压试验确定抗滑桩地基系数的研究	孙 勇	699—702
23	加筋路基处治不均匀沉降模型试验研究	羊 晔, 刘松玉, 邓永锋	703—706
24	GIS 数据用于复杂边坡三维极限平衡稳定分析	赵春宏, 崔大勇, 刘振波, 等	707—711
25	层状岩质边坡遍布节理模型的三维稳定性分析	蒋青青, 胡毅夫, 赖伟明	712—716
26	水泥土搅拌桩施工扰动评价的一种方法	邓永锋, 刘松玉, 洪振舜	717—720
27	溪洛渡地下洞室群地震响应的二维及三维数值模型比较分析研究	吕 涛, 李海波, 杨建宏, 等	721—728
28	节理面透射模型及其隔振性能研究	石 崇, 徐卫亚, 周家文, 等	729—734
29	正常固结黏土中平板锚基础的吸力和抗拉力	刘 嘉, 王 栋	735—740
30	坝体填筑料压缩特性及影响因素分析	张 兵, 高玉峰, 刘 伟, 等	741—745
31	考虑蠕变性状的港区软土地基参数反演和长期沉降预测	史旦达, 周 健, 贾敏才, 等	746—750
32	重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究	汪东林, 栾茂田, 杨 庆	751—756
33	基于 PCA-GEP 算法的边坡稳定性预测	谷 琼, 蔡之华, 朱 莉, 等	757—761
34	刚性承压板下深部岩体压缩蠕变参数反演	杨文东, 张强勇, 张建国, 等	762—768
35	正常固结软土渗透系数与固结应力关系研究	吕卫清, 董志良, 陈平山, 等	769—773
36	三维黏弹性人工边界地震波动输入方法研究	张 波, 李术才, 杨学英, 等	774—778
37	软黏土强度非均质对复合加载模式下桶形基础破坏包络面的作用分析	武 科, 栾茂田, 杨 庆, 等	779—784
38	刚性桩复合地基地震反应机理分析	武思宇, 宋二祥	785—792
39	基于 AHP 和模糊综合评判的 TBM 施工风险评估	赵延喜, 徐卫亚	793—798
40	桩-土间剪切应力的传递探讨	聂如松, 冷伍明, 杨 奇, 等	799—804
41	深埋隧道开挖围岩失稳突变模型研究	祝云华, 刘新荣, 黄 明, 等	805—809
42	土质边坡非饱和渗流场与应力场耦合数值分析	田东方, 刘德富, 王世梅, 等	810—814
43	杭州地铁储气砂土的渗气性试验研究	王 勇, 孔令伟, 郭爱国, 等	815—819
44	小应变条件下应力路径旋转对剪切模量影响	张培森	820—824
45	顶管施工对邻近地下管线的影响预测分析	魏 纲, 朱 奎	825—831
46	遂渝线无碴轨道桩板结构路基动力响应现场试验研究	詹永祥, 蒋关鲁, 胡安华, 等	832—835
47	青藏铁路冻区盐渍土热特性及力学性能分析	王春雷, 谢 强, 姜崇喜, 等	836—839
48	基于浸润线矩阵的尾矿坝稳定性分析	王飞跃, 杨铠腾, 徐志胜, 等	840—844
49	基于 PSO 和 LSSVM 的边坡稳定性评价方法	马文涛	845—848
50	饱和土中刚性排桩对平面 SV 波的隔离分析	丁光亚, 蔡袁强, 徐长节	849—854
51	土石混合体渗透性现场试坑试验研究	徐 扬, 高 谦, 李 欣, 等	855—858
52	爆夯动力固结法加固软基试验研究	连 峰, 龚晓南, 徐 杰, 等	859—864