

地层信息系统中的地质实体与数据类型

饶杨安, 贺怀建

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 结合地质实体概念厘清数据类型及其特征对地层信息系统的发展有重要意义。地层信息系统数据可以归类为属性数据、几何数据、关系数据、元数据4类, 地层信息中的地质实体可分为基础地质实体和地质实体要素, 进一步把地质实体要素分为关联要素和非关联要素。文中分析了矿体、风化分界面、断层、褶皱、不整合面、滑坡体的几何属性。区分观测者位置、数据采集点和数据本身空间属性, 数据获取方法可分为地表调查、钻入调查、岩层透视调查、岩层非透视调查, 并分析了原始数据与地质实体的对应关系。

关键词: 地层信息系统; 基础地质实体; 地质实体要素; 空间属性; 岩层透视调查; 岩层非透视调查

中图分类号: P 535

文献标识码: A

On geological entities and data types of strata information system

RAO Yang-an, HE Huai-jian

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: It is necessary to clarify the data types of strata information system and their features based on the concept of the geological entity. The data of strata information system are summed to 4 categories, namely the attribute data, geometric data, relation data, metadata. Geological entities are divided to basic geological entities and geological entity elements; and the latter are further divided to connection elements and non-connection elements. The geometric properties of ore bodies, weathering interfaces, faults, folds, unconformity planes and sliding bodies are analyzed. With the difference between locations of the observer, data gathering and data corresponding to considered, the concepts of surface survey, driving-in survey, stratum perspective survey and stratum non-perspective survey are proposed as a classification of geological investigation methods; and the corresponding relationships between raw data and geological entities are analyzed.

Key words: strata information system; basic geological entity; geological entity element; spatial property; stratum perspective survey; stratum non-perspective survey

1 引言

地层信息系统研究正处于接近成熟的阶段, 此时厘清地层信息系统的基本数据类型及其特征有着重要的意义。目前对地理信息系统的基本数据类型及其特征有许多研究、归纳^[1], 关于地层信息系统具体理论和应用的研究比较多^[2-3], 总结其总体规律的少, 所以没有见到地层信息系统的基本数据类型的研究。而相对于一般二维的地理信息系统, 地层信息系统是三维的, 涉及到的数据和空间运算更复杂。

地理信息系统建模过程中的难点和关键步骤可

以总结为由原始数据生成地层数据、把地层数据表达出来。由原始数据生成地层数据的方法很多^[4-6], 表达地层的数据模型也很多^[7-9], 但成熟的数据模型还在发展中。总结分析地层数据基本类型, 有助于改进地层数据生成方法和数据模型。

地理信息系统建设过程中, 获取数据成本高、工作量大, 一般来说, 获取数据的成本是总成本的60%~80%^[10]。地层信息系统除了有这个特点外, 还因为目标是地表下面的地层, 而不是一般地理信息系统中的地表, 获取数据手段更少、更困难、数据更不完备, 因此, 充分利用已有方法获取的数据来弥补这些不足是十分必要的。此时, 分析、归纳

地层信息系统数据基本类型和特征,有助于指导数据采集,在地层数据生成、数据模型研究中考虑充分利用地学规律和已有数据,使从野外数据采集到系统开发、建设更一体化。

地质实体是地层信息系统中数据表达的对象,本文将结合地质实体讨论地层信息系统数据的基本类型及其特点。

2 地层信息系统数据类型

文献[1]提出地理实体有属性、空间、时间3个方面的特征,地理实体数据可以归纳为属性数据、几何数据、(空间)关系数据3类,又指出描述地理实体的数据项一般包括编码、位置、类型、行为、属性、说明(数据来源等)、关系。文献[11]把岩石圈数据分为4类:探测数据、空间数据、专业概念(对研究方法、专业术语的描述)、管理信息(工程信息、项目信息等)。文献[12]把地理信息系统数据分为3大类:属性数据、图形图像数据、空间拓扑数据。因为目前专门考虑时间特征的应用实例很少,另外可以把时间特征考虑为随时间变化的属性特征,所以参考、总结上述分类,可以把地层信息系统数据分为4类:属性数据、几何数据、关系数据、关于数据的数据(元数据)。根据这个分类,可以发现上述的编码、类型、行为、属性属于属性数据,专业概念、管理信息属于元数据,其他数据属于几何数据或关系数据。几何数据和空间数据结合起来就描述了地质实体的空间特征,其中几何数据是地层数据的主导因素,其他数据的类型、形式往往由它决定^[10]。本文将围绕实体的概念,讨论相关的几何数据、关系数据、属性数据,不涉及元数据。

3 地层信息系统的实体

在地理信息系统经典概念中,地理实体是一种在现实世界中不能再划分为同类现象的现象,而地理目标是地理实体在数据库中的表现^[1],这里是从现实世界与数据表达的关系的角度定义的,实体包含了抽象的现象。而实体和现象是不同的,比如岩层、岩层面等等是实在存在的,是确定的、有边界的,而褶皱是多个岩层面表现出来的一种起伏现象,是一种抽象的概念,在现实世界中不是确定的,边界是人为指定的。在地层信息系统中需要区分这一点,才能明确实体、数据的层次关系,因此,下面将地层信息系统中的实体和现象分别称之为地质实体(包括人工的实体)、地质现象。

3.1 基础地质实体

地层信息系统的基础地质实体包括体、面、线、点。体基础地质实体包括广义的岩层体、人工构建建筑物。面基础地质实体包括断层面、节理面、滑坡面等,面基础地质实体有时穿越多个体。

体、面基础地质实体是现实世界中确定存在的,而线、点基础地质实体是数据采集或数据表达中产生的,本文将在3.2节讨论后两者。

3.1.1 广义的岩层体

基础地质实体中的体是构成地层信息系统的框架,广义的岩层体应该包括地下溶洞等液体、气态的空间,地面上的大气也可以看作是材质为气体的广义的岩层体,只是地面是地层信息系统的边界,地层信息系统不考虑大气。

连续变化量的边界:实际上所有地质实体的几何边界都是以某个或者某些属性量为标准划分的。地层信息系统中的属性量,有的是离散的,这种情况下很容易确定对应的面和体的地质实体;有的是连续变化的,如各种场(各种气态、液态流场)和量(浓度、压力)。有时属性量是地层信息系统中的求解目标,或者作为建模时具体岩层体的随空间位置变化的属性,比如求解连续变化的海水入侵时地下水的矿化度,可以不划分成不同的岩层体;在建模时需要表达边界时,或者在表达求解量的结果时,比如地下水发生污染,污染物浓度是连续变化的,当需要在地层信息系统中表达出污染体范围时,通常人工指定某一浓度的边界,由边界的面包围构成基础地质实体——广义的岩层体。这个时界线只存在于信息表达中,不存在于现实世界中。

在这种离散模型中,即使是针对离散的量,也有不确定性,很难定义清晰的区分标准,理论上可以用模糊集合理论来解决这个问题,但目前没有应用的实例,所以边界常常是基于个人的判断来划分的^[1]。

岩层体的分界:现实世界中的岩层之间的划分实质和上面情形是一样的,即根据属性——岩石的外观、物理力学性质、化学性质进行划分。这些属性的变化有时不是离散的,是连续的,比如渐变的风化、变质程度等。同样的,在不需要划分为不同岩层体的时候,只把声波速度、力学强度等参数作为具体岩层体的随空间位置变化的属性;在需要划分时,通常是约定俗成的方法人为确定岩层之间的界线,比如人为认定某处岩体某个界线下为岩浆岩岩层、上面为变质岩岩层,人为区分原岩岩层、微风化岩层、弱风化岩层。

矿体与岩层关系：现实世界的矿体是多种多样的，矿体的范围可能小于、等于、大于某个具体的岩层，矿体还有可能是充填于具体岩层间的空间，不论是哪种情形，在需要把矿体作为地层信息系统的框架考虑时，它们都是基础地质实体，即广义的岩层体，此时，相应的原有的岩层被分割或者合并；在矿体不作为框架时，矿体是岩层体或者岩层体部分基于某种共同属性的联合。

3.1.2 面与体基础地质实体的转换

断层面、节理、滑坡面等有厚度或者张开度等几何要素，一般情况下这些要素不重要或者差别不大而不考虑它们，只在必要时把它们作为面的统一的属性，在需要考虑这些要素不同空间位置的变化时，就把它作为面的随着空间变化的属性。这两种情况下，这些面还是作为面处理。在某些力学计算中，节理等作为特殊的体——无厚度单元考虑，从地层信息系统表达的角度考虑应该算作面。在断层面、节理、滑坡面等的厚度、张开度比较可观，或者形成了新的由类似材料构成的体时（比如断层碎裂带、滑坡泥层），可以把它们作为地层信息系统的框架——广义的岩层体考虑，此时，这些面就是体。

3.2 地理信息系统中体的简化

在地理信息系统中，如果区分目标与手段，就可以发现岩层体、隧道、断层面等基础地质实体是地理信息系统研究的目标，是预先存在的，这些都是体、面，不可能出现线和点，而在采集数据和表达数据时，可以出现线、点基础地质实体。在采集数据时，会形成一些点、线、面、体，这些需要作为基础地质实体在地质信息系统中表现出来，比如地质调查的采样点和调查线路，一些物探方法反演得到剖面。采用钻孔得到柱状图的过程也是数据采集，钻孔实际上是体，但通常不需要考虑钻孔的直径，所以钻孔数据在地层信息系统中表达出来是线。一些人工构筑物，某些情况下必须考虑三维参数，有时可以简化为线，截面的信息不考虑或者是作为非几何属性，比如一些隧道和管线在尺度很大的模型里就可以这样处理。水文观测井是一种体人工构筑物，在大多数数值模拟中简化为线，如果进行同位素试验，试验井就简化为线源或者点源。

3.3 地质实体层次关系

地理实体的定义规定它不可再分割为同类，体地质实体是体，所以体地质实体之间的关联——相交的部分就不可能是体。一般情况下，现实世界中

的体地质实体之间的关联是面（比如岩层面、地层面），很少可能是线、点，面地质实体之间的关联是线，很少可能是点。不过，在地层信息系统模型中，由于地层信息系统数据常常不完备和要保证算法健壮性，需要考虑现实世界中少见的情形。基础地质实体之间的关联和这些关联之间的关联，也是地质实体，位置是确定的。地质实体有许多要素，有的是地质实体之间的关联，这些要素的几何要素是确定的，比如节理的迹线，是节理面和地面或者开挖面的交线；有的不是地质实体之间的关联，人们表达和应用这些概念时常常保留一些模糊性，不追求准确地确定它们的几何量，即使现实中可以做到这一点也不追求，比如滑坡面的主轴线和地面的山谷线、山脊线，人们在数据采集的过程中，容许它们的几何要素有较大的误差，在由地质调查人员人为指定这些要素时，则更缺乏确定性了。这些非关联要素，如果要在地质信息系统表达出来，也是地质实体。

所以，地质实体可以分为如表1所列。

表1 地质实体分类
Table 1 Classification of geological entities

地质实体	体	面	线	点
基础地质实体	广义的岩层体 (包括人为划分的), 人工构筑物	滑坡面、断层 面、节理面	数据采集线、 简化表达线	数据采 集点
地质实体要素	关联要素 非关联要素	广义的岩层面 滑坡轴线、 山脊线等等	前面各种 面的交线 高程点等等	

4 地质结构的要素和几何属性

岩层：定义岩层的空间位置是它的边界——岩层面，地层面和地层不整合面属于岩层面。

赋存体：各种矿体、地下水水体赋存于岩体中，它们的控制几何属性也是它们的边界，一些规则的矿体可以有产状几何参数，比如走向、倾向、倾角、侧伏角、倾伏角。

滑坡体：滑坡体的边界是滑面，滑面与地面交线是滑坡周界。

断层：是一种构造，不是具体的地质实体，断层面或者断层破碎带才是具体的地质实体。断层两盘相对位移的方式和大小是针对两盘岩层而言的，是两盘岩层的关系，可以不作为断层面或者断层带的参数。

面的产状与层状地层：较规则、平整的面，或者大的不规则面的较规则局部，可以记录面的产状

(走向、倾向、倾角), 不规则的情形下记录这些几何参数就没有实际意义。地层面、滑坡面、断层面、节理面常常可以记录这些产状参数。如果岩层的上、下表面平行或者夹角比较小, 就构成层状地层, 几何参数就可以记录岩层厚度。沉积岩的明显特征就是具有层状构造, 大部分火山岩和一部分变质岩可显示层状构造, 所以地层信息系统利用广泛存在的层状地层的规律、特性是十分必要的。

褶皱:是岩层体受力发生弯曲变形的构造现象, 体现为多个面状构造平行着弯曲, 在地层信息系统中是多个地质实体——岩层面体系的几何属性的规律。

地层信息系统难点有两方面: 一是从不完备的数据生成面地质实体; 二是建立合理的数据结构来高效、健壮地表达地质实体。当然, 这两个问题是相互联系、部分重合的。地层信息系统的数据结构可以划分为3类^[13-16], 即基于表面表示的数据结构(面表示法)、基于体表示的数据结构(体表示法)和混合数据结构(混合法), 即使是体表示法, 也需要确定岩层体的边界——面地质实体。在一般地层信息系统中, 与不整合面(许多对岩层的界面——岩层面的联合)、褶皱和断层相关的面地质实体就是上述难点的主要对象, 也是建模研究的主要对象。一方面, 地层信息系统原始数据本来就非常稀疏, 而这些地质现象又使得情况更加复杂, 所以插值、判断具体空间位置归属于哪个地质实体是非常困难的, 而且某些表示法还有处理某些褶皱地层面的造成的多值面的问题。另外一方面, 在地下数据采集困难的数据稀少的同时, 目前各种手段得到的数据没有得到很好的整合, 断层、褶皱、层状地层是某些岩层体很强的整体规律性的体现, 所以有必要标准化各种数据以使它们能整合于同一地理信息系统, 发展能考虑这些规律的插值和判断方法。比如对于比较规则层状岩层组, 如果某处有的岩层有数据, 而其上、其下岩层数据缺乏, 可以根据有数据的岩层的变化趋势来推测附近岩层的数据(厚度、岩层面位置等)。所以, 在地层信息系统研究中处理和利用面地质实体是非常重要的。

5 原始数据及其来源

5.1 数据空间属性分类

获取地质数据的方法根据数据本身的空间属性和它与数据采集点的关系可以分为4类: 地表调查、钻入调查、岩层透视调查、岩层非透视调查。所有在地面或者空中进行只获得地表数据的方法,

如工程地质地表调查、航空摄影都属于地表调查。所有深入地下获取地下暴露点的数据的调查方法, 如钻孔、挖井、开挖调查隧道, 都属于钻入调查。所有用各种物理场测量数据反演得到剖面、立体形式的采集点“以下”、“以里”岩层属性的地球物理勘探方法, 都属于岩层透视调查, 这些电的、电磁波的或者振动波的场多是人工主动产生的, 针对地下某一点, 往往有多个场发射源和测点的数据。所有测量数据反映的是岩层区域性特征、不能反演为三维坐标下采集点“以下”、“以里”某点物理参数的地球物理勘探方法都属于岩层非透视调查。

这里需要区分观测者位置、数据采集点和数据本身空间属性(数据对应的空间位置), 观测者是指观测人员或者设备所在的空间位置, 数据采集点是指观测者与地质实体发生干涉、接触的初始空间位置, 数据本身空间属性是指数据反映的是地质实体的哪些空间位置的属性。上述三者有时重合, 或者在数据记录时不区分, 但很多时是不同的, 比如原位岩石力学试验, 观测者位置、数据采集点、数据对应的空间位置是重合的; 而摄影测量中观测者位置和数据采集点(此时是地面的某些点)不同, 数据采集点和数据对应的空间位置是重合的; 在所有地表调查、钻入调查中, 数据采集点、数据对应的空间位置是重合或者可以不区分的, 而在所有岩层透视调查、岩层非透视调查中, 数据采集点、数据对应的空间位置是不同的。

在地层信息系统中, 观测者位置只有在某些数据求解过程中是必要的, 在数据再现的过程中可以不考虑。由于数据要参与空间运算, 数据本身的空间属性比数据采集点的位置更重要、更本质, 所以本文根据数据本身的空间属性和它与数据采集点的关系, 把在空中、地面采集的方法都归类于地表调查, 某些地球物理勘探可以在空中、地面、井下进行, 却归类于透视的、非透视的。另外, 一些地球物理勘探方法获取的是采集点的特性数据, 这些数据与采集点“以下”、“以里”的岩层无关, 比如地温测量反映的是测量点的温度, 属于地表调查或者钻入调查。

5.2 数据与对应目标的空间关系

原始数据比对应的地质实体维数低或者一样高, 比如滑动面或者岩体的一个点的试验数据对应于整个滑动面或者岩体。一般来说, 原始数据和目标是一一对应的, 不过统计数据是特殊的情形, 数据来源于不同的点, 反映的是相关区域整体的属性, 而不是数据采集点——统计点的属性, 比如在地面

或者开挖面上进行的节理统计，反映的是岩体的这个区域节理分布特征，即使要在数据模型中再现这些节理，也通常不要求再现的节理的位置和真实节理的位置一致，而只要求它们在统计上符合相同的分布规律。

地层信息系统是三维的，一般来说，原始数据对应的都是三维空间的点、线、面、体，比如航空照片上的某一点对应的是三维空间的地面上的某一点，上面说到统计数据反映的也是三维空间中岩体区域的特性。而岩层非透视调查得到的数据比较特殊，一般的物探数据通过反演计算，得到的是三维

空间中地下各点的属性，而岩层非透视调查数据（比如重力数据、地磁数据）无法反演或者反演限制很多，无法反演为三维空间中地下各点的属性^[17-18]，虽然地磁、重力数据可以蒙在数据模型的地面上，但它们不是反映地面的点的属性，而是反映点上下左右的整体的属性，重力异常、磁力异常只能说明附近可能存在某种构造，而且不能精确确定构造三维坐标，把重力数据、地磁数据和其他数据结合起来进行运算时，尤其要考虑这一点。

根据上面的标准，可以归纳得到一个不完全的数据来源与地质实体关系，见表2。

表2 不完全的数据来源与地质实体关系表
Table 2 Relation of data sources and geological entities (incomplete)

数据	采样点形式	数据形式	地质实体	地质实体形式	数据采集方法
外观描述	点	点	各种面、体	面、体	原地面、揭露面地质调查，钻孔
产状	点	面	各种规则面，包括岩层面、断层面、节理面、滑坡面	面	原地面、揭露面地质调查，钻孔
厚度	线	两个面的距离	广义的岩层体	体	原地面、揭露面地质调查，钻孔
迹长统计	面	线长度统计数据	一个或者多个岩层体	体	原地面、揭露面地质调查
节理统计	面	面统计数据	一个或者多个岩层体	体	原地面、揭露面地质调查
岩体物理力学参数	点	点的力学参数	岩层体	体	原地面、揭露面、钻孔采集样本室内试验，或者原位试验
活动面物理力学参数	点	面的力学参数	滑坡面、断层面、断层体	面、体	原地面、揭露面、钻孔采集样本室内试验，或者原位试验
地下水文、水化学参数	点	点的水文、水化学参数	地下水体	体	钻孔、钻井
影像数据	面	面的影像	地面、开挖面	面	卫星、飞机、原地面、揭露面、钻孔摄影照片
岩层反演数据	点、线	反演得到剖面、立体数据、属性分界面上点或线	广义的岩层体、人工构建筑物、面	面、体	卫星、飞机、原地面、揭露面、钻孔物探
岩层非反演数据	点、面	岩层体区域性物理参数	广义的岩层体、人工构建筑物、面	面、体	卫星、飞机、原地面、揭露面、钻孔物探

6 结 论

通过对地层信息中实体和数据的分析可以得出以下结论：

(1) 地层信息系统数据可以分4类：属性数据、几何数据、关系数据、元数据，其中几何数据是主导因素。

(2) 根据对地理实体的经典概念分析，可以提出地层信息系统中地质实体的概念：在地层信息系统中，地质实体是现实世界中不能再划分为同类的实体，地质实体可以分为基础地质实体和地质实体要素，地质实体要素可以进一步分为关联要素和非关联要素，关联要素——基础地质实体的关联和这些关联的关联是确定性的，而非关联要素有很大的人为随意性。

(3) 与不整合面、褶皱和断层相关的面地质实体的生成和再现是地层信息系统的难点和重点。

(4) 获取地质数据的方法根据数据本身的空间属性和它与数据采集点的关系可以分为4类：地表调查、钻入调查、岩层透视调查、岩层非透视调查。观测者位置、数据采集点和数据对应的空间位置有时重合，有时不同，其中数据本身的空间属性是最重要的。

(5) 分析原始数据与地质实体的对应关系，可以发现，统计数据反映的是三维空间下相关区域整体的属性，而不是统计点的属性，岩层非透视调查数据反映的不是三维空间下某点的属性，而是反映点上下左右的整体的属性。

参 考 文 献

- [1] 胡鹏, 黄杏元, 华一新. 地理信息系统教程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [2] 史秋晶, 胡伍生. 工程地质钻孔信息模型及数据库研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 758—762.

- SHI Qiu-jing, HU Wu-sheng, LIU Dan-ping. Study on ground data model of drill hole information and database[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 758—762.
- [3] 王纯祥, 白世伟. 三维地层信息系统在岩土工程中应用研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 614—617.
WANG Chun-xiang, BAI Shi-wei. Study on application of 3D SIS to geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 614—617.
- [4] BRANDEL S, SCHNEIDER S, PERRIN M, et al. Automatic building of structured geological models[J]. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, ASME, 2005, 5(2): 138—148.
- [5] DE KEMP E A, SQRAGUE K B. Interpretive tools for 3D structure geological modeling, Part I: Bezier-based curves, ribbons and grip frames[J]. **GeoInformatica**, 2003, 7(1): 55—71.
- [6] MALLETT J L. Discrete modeling for nature objects[J]. **Mathematical Geology**, 1997, 29 (2): 199—218.
- [7] 李清泉, 李德仁. 三维地理信息系统中的数据结构[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21 (2): 128—133.
LI Qing-quan, Li Deren. Data structure in 3D geographic information systems[J]. **Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping**, 1996, 21(2): 128—133.
- [8] LI R. Data structures and application issues in 3-D geographic information systems[J]. **Geomatica**, 1994, 48(3): 209—224.
- [9] 李清泉. 基于混合结构的三维 GIS 数据模型与空间分析研究[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1998.
- [10] BERNHARDSEN T. Geographic Information Systems: An Introduction[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [11] 欧少佳, 许惠平, 陈华根, 等. 中国岩石圈数据模型总体设计[J]. 地球学报, 2005, 26(3): 265—270.
OU Shao-jia, XU Hui-ping, CHEN Hua-gen, et al. Framework design for Chinese lithosphere data model[J]. **Acta Geoscientia Sinica**, 2005, 26(3): 265—270.
- [12] 曾广鸿, 杨兴旺. GIS 软件和数据库的设计及发展[J]. 测绘信息与工程, 1999, 3: 16—19.
ZENG Guang-hong, YANG Xing-wang. On the design and development of GIS software and databases[J]. **WTUSM Bulletin of Science and Technology**, 1999, (3): 16—19.
- [13] 熊祖强. 工程地质三维建模及可视化技术研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- [14] 钟登华, 李明朝. 水利水电工程地质三维地质建模与分析理论与实践[M]. 北京: 水利水电出版社, 2006.
- [15] 曾钱帮, 刘大安, 张菊明, 等. 浅谈工程地质三维建模与可视化[J]. 西部探矿工程, 2005, 106(3): 72—74.
ZENG Qian-bang, LIU Da-an, ZHANG Ju-ming, et al. About 3D modeling and visualization in engineering geology[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2005, 106(3): 72—74.
- [16] 吴立新, 史文中, CHRISTOPHER Gold. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5—11.
WU Li-xin, SHI Wen-zhong, CHRISTOPHER Gold. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS[J]. **Geography and Territorial Research**, 2003, 19(1): 5—11.
- [17] TELFORD W M, GELDART L P, SHERIFF R E. Applied Geophysics[M]. London: Cambridge University Press, 1990.
- [18] 顾功叙. 地球物理勘探基础[M]. 北京: 地质出版社, 1990.

上接第 1620 页

- [4] 王立峰, 朱向荣. 土钉墙面层位移和内力的计算分析[J]. 岩土力学, 2008, 2(29): 437—441.
WANG Li-feng, ZHU Xiang-rong. Analysis of displacement and inner forces in soil-nailing walls[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 2(29): 437—441.
- [5] 杨茜, 张明聚, 孙铁成. 复合土钉支护面层设计分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 4(7): 1259—1266.
YANG Qian, ZHANG Ming-ju, SUN Tie-cheng. A method composite facing of composite soil nailing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 4(7): 1259—1266.
- [6] 段建立, 谭跃虎, 樊有维, 等. 复合土钉支护的现场测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2128—2132.
DUAN Jian-li, TAN Yue-hu, FAN You-wei, et al. Field testing study on composite soil nailing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 23(12): 2128—2132.
- [7] 黄义, 何芳社. 弹性地基上的梁、板、壳[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 26—48.
- [8] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981: 6—67.
- [9] 华东工业建筑设计院译. 弹性地基上结构物的计算[M]. 北京: 建筑工程出版社, 1957: 36—230.
- [10] 张季容, 朱向荣. 简明建筑基础计算与设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 41—51.