

文章编号: 1671-0118(2004)01-0043-06

# 基于类三棱柱的连续型地质体三维构模方法

徐能雄<sup>1,2</sup>, 何满潮<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083; 2. 黑龙江科技学院, 黑龙江 哈尔滨 150027;

3. 中国矿业大学, 北京 100083)

**摘要:** 空间数据模型是地质体三维构模的关键。根据地质体的几何特征, 建立了适用于连续型地质体的数据模型, 构造了三棱柱类, 提出了相应的数据概化方法, 开发了柱体构模技术和地质体三维可视化构模系统。利用该系统, 建立了某人工围湖工程的三维可视化模型, 验证了构模技术的适用性。

**关键词:** 地质体; 三维; 可视化; 类三棱柱; 空间数据模型; 构模技术

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

## 3D visual model technology of continuous geological body based on prism class

XU Nengxiong<sup>1,2</sup>, HE Manchao<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Engineering &amp; Technology, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

2. Heilongjiang Institute of Science &amp; Technology, Harbin 150027, China;

3. China University of Mining &amp; Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Spatial data model is the key to building 3D model of geological body. According to the geometry characteristics of geological body, a suitable spatial data model is put forward, and pillar modeling technique is developed. And the modeling system of continuous geological body is also developed. As an example, the 3D visual model of the embankment engineering of one artificial lake is built by the visual modeling system.

**Key words:** geological body; 3D; visualization; prism class; spatial data model; modeling technique

作为二维 GIS 数据模型的扩展, 栅格数据模型、矢量数据模型及混合数据模型<sup>[1~4]</sup>成为目前三维 GIS 的几种主要的空间数据模型。然而, 在岩土工程领域中(如边坡工程、隧道工程、基坑工程等)涉及到的地质体的几何结构是非常复杂的, 很难用某一种数据模型来刻画整个地质体。这就需要深入分析地质体的几何特征, 将复杂的地质体划分成具有简单结构的地质体, 然后设计出适应性很强的数据模型, 描述这些简单结构地质体。

收稿日期: 2003-10-13

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助(59852114)

## 1 连续型地质体的几何特征

为叙述方便, 将所研究的地质体称为总地质体, 其内部是按照一定的划分标准(如地质性、地质年代、构造等)划分成的一系列不同类型的子地质体。连续型地质体在第四系中随处可见, 所涉及的工程也极为广泛, 如基坑工程、市政工程、水文地质工程、港航工程等。图 1 为香港替换机场海底典型地层剖面, 图 2 为北京市密怀顺平原某地质剖面图。

从图中可以看出, 连续型地质体具有以下特征:

(1) 各子地质体在区域内是层状分布的。地层是

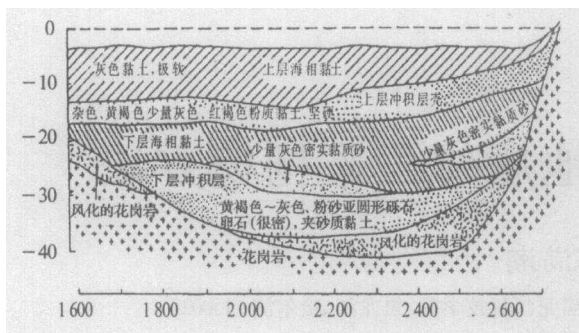


图1 香港替换机场海底典型地层剖面

Fig. 1 Typical strata cross-section in sea bed of airport, Hongkong

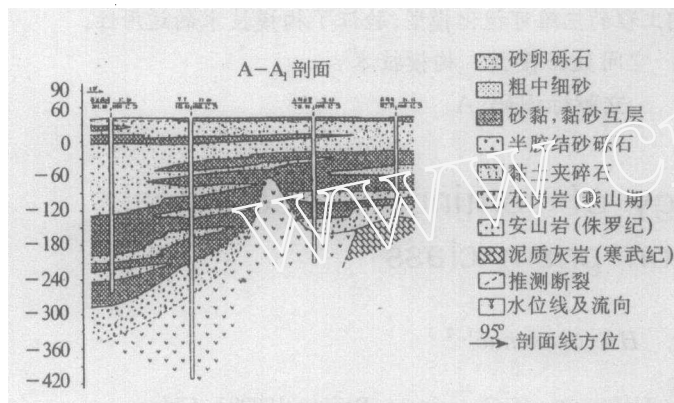


图2 北京市密怀顺平原某地质剖面

Fig. 2 Typical geological section of Beijing Mihuaishun plain, China

在一定地质时期内所形成的层状岩石(含沉积物), 泛称为岩层。地层形成时是水平的或近于水平的<sup>[9]</sup>。层状构造决定了数据将用层状子地质体进行组织。

(2)各子地质体在区域内是连续分布的。其分布范围可以是整个区域,也可以是其中的某些小区域。子地质体的边界只能是总模型的边界或尖灭处。因此,可以认为各子地质体在全区内连续分布。在有某子地质体分布的子区域,该子地质体具有一定厚度,而在没有该子地质体分布的子区域厚度为零。

(3)各子地质体均由上、下两地层界面封闭而成,上、下层在水平面上的投影完全重合。子地质体的边界只能是垂直于水平面的,或其厚度为零。因此,上层界面上的任意点和任意多边形(如三角形)均可在下层界面上找到相应的点和相应的多边形。

(4)在研究范围内,任一平面点  $P(x,y)$ , 在上层界面或下层界面上对应的  $Z$  值是惟一的,即单值性。这一条件保证上下层界面可以通过插值获得。对于包含其他子地质体的子地质体可以划分成多个子地质体,从而满足这一条件。

(5)相同性质的子地质体可能重复出现。例如,按照岩性进行地质体划分时,相同岩性的子地质体可能在不同深度出现,相同岩性的子地质体之间又有一层或多层具有其他岩性的子地质体。

## 2 连续型地质体三维可视化构模方法

### 2.1 基本方法

连续型地质体的构模可以采用柱体构模技术。柱体构模就是根据一定的划分标准(如岩性、地层等),将模型体分成不同的层,然后将各层细分成微柱体元,通过微柱体元来组织存储数据。每个柱体由位于上、下层界面上的多边形面与几个垂直于水平面的侧面组成。文中微柱体元是三棱柱。

### 2.2 数据概化

由于地质体结构的复杂性,几何特征也千变万化,不可能完全符合上节中提出的几何特征。为此,提出了适合于连续体构模的数据概化方法。

#### 2.2.1 概化方法

三维构模是为工程应用服务的,因此,概化应该满足工程要求。采用的概化方法主要有尺度判别法、关键层法两种。

##### (1)尺度判别法

所谓尺度判别法就是根据模型体的规模,给出一定的尺度标准  $D_m$  (如模型体高度的  $1/10$ )。当某层的最大层厚  $D$  小于  $D_m$  时,不考虑该层,并将该层合并到它的上层或下层;当某层的最大层厚  $D$  大于  $D_m$  时,考虑该层。

##### (2)关键层法

在工程岩体中,有些层(如软弱夹层)对于模型体的规模来说可能是很小的,是可以忽略的层,但对工程来说具有显著的影响,必须考虑该层的存在。关键层法就是抽象出一系列对工程有显著影响的层,尽量合并对工程影响很小的层,从而减少数据存储量,加快计算处理速度。

#### 2.2.2 几种特殊情况的处理

##### (1)包含关系的处理

所谓包含关系就是某层完全包含在另一层之内,从而导致包含层出现内部边界,不符合柱体构模的数据特征。

图3中  $A$  层包含  $B$  层,应将  $A$  层沿  $B$  层顶界或底界划分成两部分(如图4),即  $A_1$  层与  $A_2$  层,使模型符合柱体构模的基本假设。

##### (2)相同物理性质透镜体的连接

采用尺度判别或关键层判别方法,透镜体不能

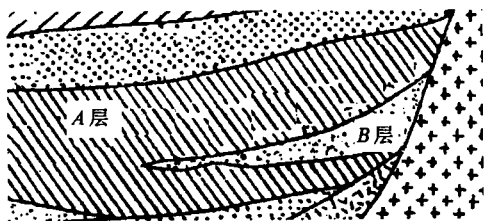


图 3 包含关系示例

Fig. 3 Example of enclosed relationship

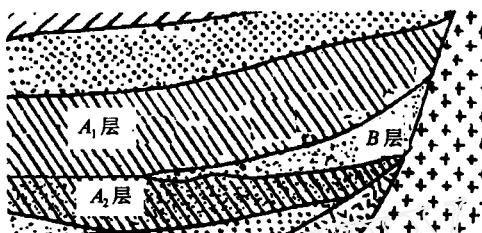


图 4 包含关系的处理

Fig. 4 Treatment of enclosed relationship

被忽略时, 应将透镜体作为层来构模。当相同性质的多个透镜体同时出现时, 如何选择连接成同一层, 必须有一定的连接标准。文中采用两个准则:

① 当两个透镜体连接成一层时, 该层的上、下界只能是单值的。也就是说, 透镜体之间在深度方向上不能重叠, 如图 5a 中 A 不能与 C 相连, B 与 C 相连是合理的。

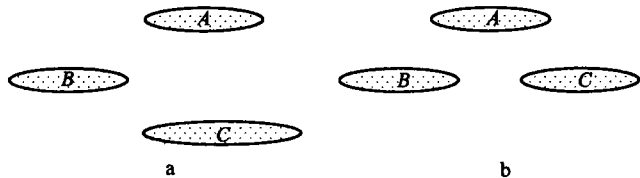


图 5 透镜体的连接

Fig. 5 Connection of lens

② 透镜体的形心标高最接近。如图 5b 中 B 应与 C 相连, 而不应与 A 相连。

(3) 不同物理性质的透镜体交错分布的处理

如图 6 所示, 透镜体 A 与 C 具有相同物理性质, B 具有另一种物理性质, 而 A、B、C 均不可忽略, 此时, 不应将 A 与 B 连接起来, 而应设为独立层。层与层之间按形心的标高排列上、下层关系。

### 2.3 数据结构

连续型地质体模型中的各内部实体可以当做由上、下两个曲面所围成的封闭区域, 这两个曲面具有三个特点: (1) 在空间上是连续的; (2) 在各界



图 6 透镜体交错分布

Fig. 6 Crossed distribution of lens

面上, 对应一个平面上的点  $(x, y)$  有且只有一个  $z$  值与之对应; (3) 上、下界面在水平面上的投影完全重合。

根据这三个特点, 就可以将上、下界面划分成许多三角形面, 然后将处于上、下层面的相互对应的三角形的角点相连就形成了柱体。图 7 为连续型地质体的形成过程。图中平面网格是将模型体在  $XOY$  平面上的投影区域进行剖分, 形成的微面; 网格角点坐标是平面网格角点的平面坐标; 上、下界面是各地质层面对应网格角点处的埋深值; 由平面网格数据、角点坐标数据与上、下界数据的结合, 就可以形成上、下界面, 再由上、下界面组成体, 多个体的组合就形成整体模型。

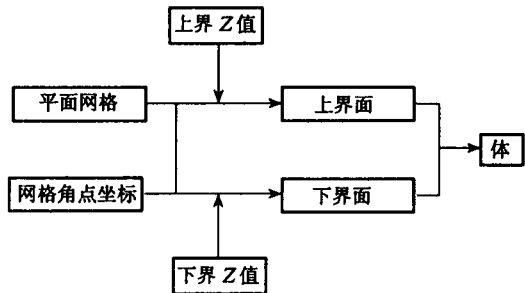


图 7 连续型地质体的数据形成过程

Fig. 7 Process of data formation of continuous geologies

根据以上分析, 可以形成连续型地质体的数据结构, 如图 8 所示。每个三棱柱由顶面、底面与侧面围成, 顶面与底面分别位于岩层的上、下界面上, 侧面与水平面垂直。在这种模型中, 只需要记录平面网格数据、各岩层界面上对应各网格结点的埋深值, 就可以刻画整个地质体模型了。

### 2.4 三棱柱类

根据上述数据模型, 可以形成三棱柱类。

#### 2.4.1 类的功能

每一个三棱柱就是柱体模型类的一个对象。该类记录了柱体模型的内部属性 (如内部实体数、实体名等)、工程属性 (如地质性、比重等) 和几何特征 (如结点坐标、地层埋深等)。另外, 该类还提供了一系列方法, 用来操作对象, 如制作剖面、计算体积、绘制模型等。

#### 2.4.2 类的主要属性

模型 ID: 记录模型的 ID 号;

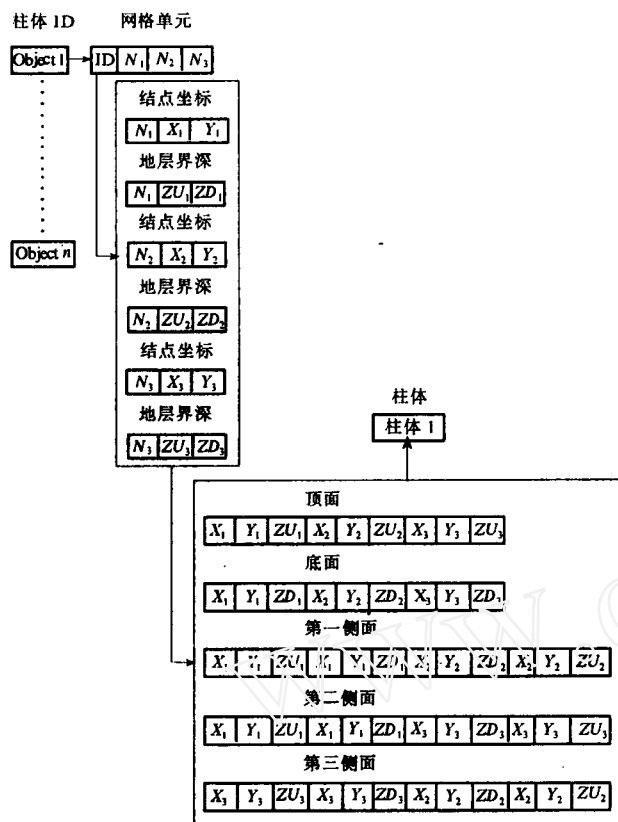


图8 连续型地质体的数据结构

Fig. 8 Data structure of continuous geologies

内部实体数: 记录模型所包含的地层子体数;

内部实体名: 记录模型所包含的地层子体名称;

工程属性集: 按工程分析需要, 记录地层子体的工程参数, 如岩性等;

实体符号集: 记录表示地层子体的符号, 格式为 BMP;

平面三角形微元集: 记录模型网格组成信息, 即单元的结点号;

结点集: 记录模型网格结点坐标;

地层上、下界数据集: 记录网格结点处地层上、下界埋深值。

#### 2.4.3 类的主要方法

CreateObject(Parameter)——创建对象。该方法的参数包括该类的所有属性值。通过创建对象, 可以记录对象的几何与属性特征。

EditElement(Parameter)——该方法主要用于创建剖面时修改网格单元, 根据剖面与网格单元的相交情况, 将网格单元划分成新的单元, 从而形成临时网格微元集与结点集。

Scale(Parameter)——进行坐标的比率变换, 使得图形的绘制具有通用性。

Volume(Parameter)——该方法用于计算实体体积。

Visual(Parameter)——该方法用于绘制对象, 它按照对象的几何属性进行三维图形的绘制。

#### 2.5 可视化构模实现过程

三维构模实际上就是进行数据处理、数据组织与数据显示。因此, 数据流程显得非常重要。图9为柱体构模的数据流程。

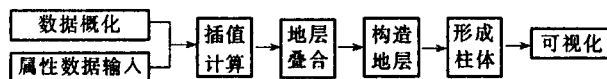


图9 柱体构模的数据流程

Fig. 9 Flow of data in pillar model

在柱体构模开始时, 必须进行数据概化, 抽象出一系列地层子体, 并赋予这些子体一定的工程特性。一般情况下, 在进行构模时所用的数据为钻孔数据或通过其他勘探手段获得的剖面数据。依靠这些数据进行插值计算就可以获取各个地层面上的数据, 但这些数据可能是不真实的。这是因为插值计算时没有考虑到其他地层面的相互影响。因此, 在插值后还要进行地层面叠合处理, 适当修改插值结果。在得到修改后的地层面数据后就可以形成柱体, 并进行可视化显示了。

### 3 构模系统的开发

该系统以 Microsoft Visual C++ 6.0 为开发平台, 建立了面向对象的构模方法, 充分利用组件技术, 开发了一系列组件, 并利用 OpenGL 技术实现三维图形的可视化。系统的主要功能是进行连续型地质体的三维建模与三维图形的可视化, 围绕主要功能开发了一系列辅助功能。图10为系统的主菜单。下面将按系统主菜单进行简要描述。

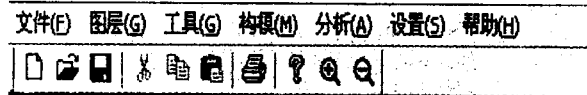


图10 面向对象的工程岩体三维可视化构模系统的主菜单

Fig. 10 Main menu of 3D visual modeling system of rock-mass

#### 3.1 图层

如图11a所示, 图层操作用于添加图层、删除图层与选择图层。添加图层功能, 可以从数据库中读取数据, 并在窗口中显示图形, 同时, 还可以删

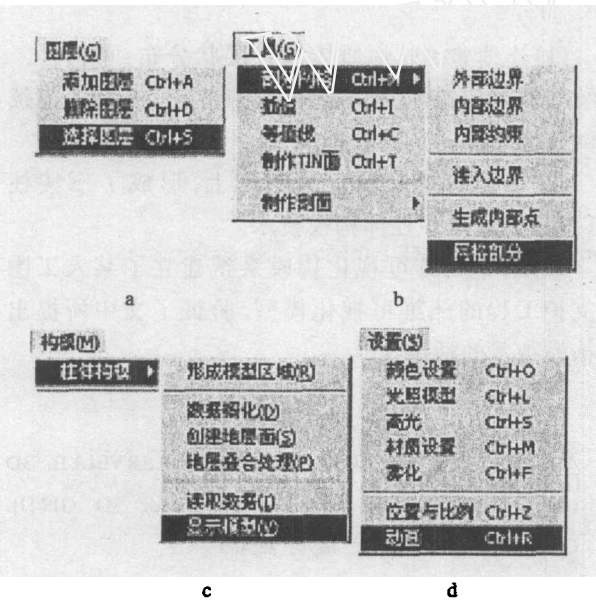
除图层与选择图层。该菜单项对于左右两窗口均可用。当点击左窗口时, 可以操作二维图形数据; 当点击右窗口时, 可以操作三维图形数据。

3.2 工具

系统提供了网格剖分、插值、等值线制作、TIN 面制作与剖面制作等通用工具, 如图 11b 所示。其中, 网格剖分支持交互式人机对话, 用户可以用鼠标画模型边界与内部约束, 也可以读入边界, 还可以修改内部结点。插值方法有多种, 该系统中提供了 Kriging 与 IDW 两种, 针对不同情况可以选择不同的插值方法。等值线工具是为求取曲面之间交线设置的。

3.3 构模

连续型地质体构模通过柱体构模方法来实现。构模过程包括: 形成模型区域、数据概化、创建地面、地层叠合处理、可视化等 (图 11c)。



a-图层操作菜单; b-工具菜单; c-构模菜单; d-图形设置菜单

图 11 系统菜单

Fig. 11 Menu of system

3.4 设置

该菜单项主要提供针对 OpenGL 的图形参数的设置, 如图 11d 所示。利用该菜单可以进行图形的移动与缩放, 颜色、光照、材质、高光、雾化设置, 还可以进行动画显示。三维图形的效果如何, 很大程度上由这些参数的设置决定, 良好的参数设置可以使三维图形变得非常逼真。

4 可视化模型实例

文中在 Microsoft Visual C++ 6.0 环境下, 利用

OpenGL 技术开发了地质体三维可视化构模系统。作为连续非倒转地质体的实例, 建立了天津市某人工围湖工程的三维可视化模型, 模型的建立为湖底隔水层的确定提供了依据。

4.1 工程地质条件

该人工围湖位于天津市河西区友谊南路东侧, 珠江路与梅江路之间, 总用地面积 20.81 hm<sup>2</sup>, 其中约 28.5 % 规划为人工湖水域面积。拟建人工湖面积为 59 219 m<sup>2</sup>, 西侧紧邻友谊路, 东侧部分环绕区内高层建筑。其功能不仅可长期稳定美化环境, 而且可作为洁净蓄水池协同地热实现区内多元供水。本次三维建模的目的是再现工程区的地质信息, 寻找合适的隔水层, 确定支护桩的大致长度, 为设计提供依据。

该场地原为化学工业仓库及鱼塘分布区, 勘探施工时原有建筑物已拆除, 鱼塘已垫填平整。场地地势平坦, 地貌单元属海积冲积平原, 后经人工改造垫填, 浅部人工填土成分复杂, 分布不均。勘察揭示了第四系全新统 (Q4<sup>1</sup>-4) 及上更新统 (Q3<sup>a</sup>-e) 的河流相、滨海潮汐相及浅海相交互沉积的一套砂类土与黏性土的沉积地层。工程地质层划分为 7 大层 14 个亚层。与该次研究有关的地层见表 1。

表 1 地层状况一览

Table 1 List of strata

地质年代	序号	土层名称	层厚/m	顶板标高/m	物理力学指标					
					R	I <sub>p</sub>	C	φ	E <sub>s1-2</sub>	
Qm1	I	杂填土	0.2~0.4	1.99~3.21						
		素填土	0.4~0.8	1.16~2.68						
Q43al	III1	黏土	0.6~3.2	-2.06~-0.47	19.1	19.4	29.0	9.9	4.0	
	II2	粉质黏土	0.3~4.9	-2.45~-2.20	19.3	13.2	19.2	14.1	4.5	
	III1	粉质黏土	0.7~9.5	-3.96~-1.89	19.0	11.0	13.1	13.3	4.6	
Q42m	III2	粉土/粉砂	0.5~7.4	-8.67~-2.45	19.4	7.4	12.1	23.8	9.7	
	III3	粉质黏土	0.5~3.1	-10.91~-8.24	19.2	12.4	13.5	11.0	4.2	

4.2 可视化模型

根据工程设计需要, 需给出地质体三维图形。图 12a、图 12b 分别为地质体的不同侧面图, 图 13 为十字剖面图, 图 14 为组合剖面图, 图 15 为 I、III<sub>1</sub>、III<sub>3</sub> 三层组合图。

该工程是拟建一个人工湖, 因此, 保证湖堤的安全与避免水的渗漏是本次设计的关键。由表 1 可知, II<sub>1</sub> 为黏土, 其塑性指数为 19.4, 是最好的隔水层。但从图中可以看出, 该层 (第二层) 是一个薄层, 它的埋深较浅, 在 -2.06~-0.47, 不能作为湖底隔水层。II<sub>2</sub> 层为粉质黏土, 塑性指数为 13.2, 隔水性能较好, 埋深在 -2.45~-2.20, 但作为湖底隔水

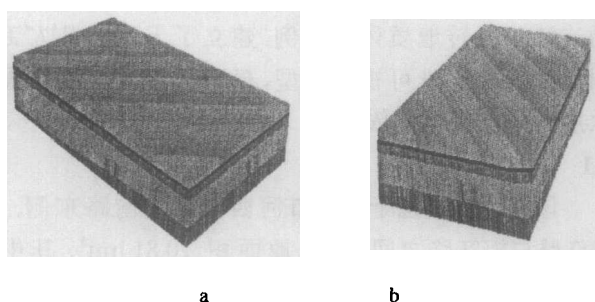


图12 地质体三维构造

Fig. 12 3D structure of geologies

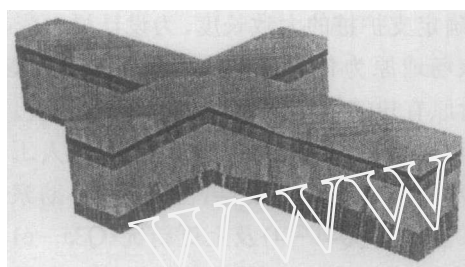


图13 十字剖面

Fig. 13 Cross-section with "十" shape

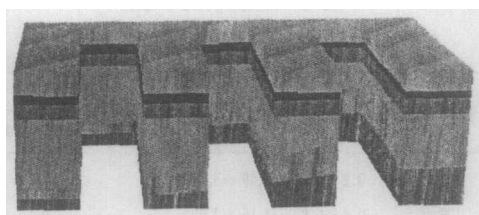
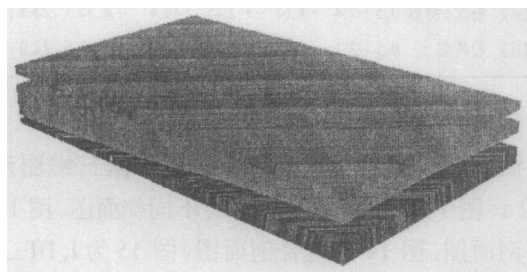


图14 组合剖面

Fig. 14 Combined cross-section

图15 I、III<sub>-1</sub>、III<sub>-3</sub>三层组合Fig. 15 Combination of I, III<sub>-1</sub> and III<sub>-3</sub>

层略浅。III<sub>-1</sub>层也为粉质黏土,塑性指数为11.0,埋深在-3.96~-1.89,可以作为湖底隔水层。但其下一层III<sub>-2</sub>层为粉土/粉砂层,塑性指数为7.4,隔水性能较差,因此,开挖人工湖时,应避免挖穿III<sub>-1</sub>层,不让III<sub>-2</sub>层出露。从图中可以看出,III<sub>-1</sub>层顶

界接近水平,南端厚度较小,北端厚度较大。开挖时,南端应尽量少挖,以防III<sub>-2</sub>层出露。III<sub>-2</sub>在南端埋深较浅,厚度较大,而在北端埋深较深,厚度较小。根据这种情况,可以将湖底设计为南浅北深,图16为开挖后湖底示意图。

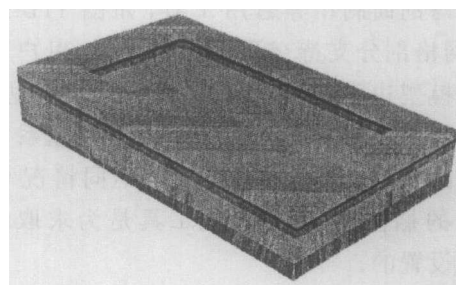


图16 开挖后湖底示意

Fig. 16 Lake bed after excavation

## 5 结束语

(1)连续非倒转地质体具有层状分布、单值性、连续性等几何特征。根据这些几何特征,提出了连续非倒转地质体的空间数据模型。

(2)在空间数据模型的基础上,形成了三棱柱类,提出并开发了柱体构模技术。

(3)利用三维可视化构模系统建立了某人工围湖支护工程的三维可视化模型,验证了文中所提出的构模技术的适用性。

## 参考文献

- [1] ARNAUD DE LA LOSA, BERNARD CERVELLE. 3D topological modeling and visualization for 3D GIS[J]. Computers & Graphics, 1999, 23:469-478.
- [2] POWER W L, KETELAAR P B, NICHOLS S, et al. Geology and orebody delineation using 3D computer modeling[A]. AusIMM Annual Conference-Technical Proceedings Mar, 1997, 12-15:175-180.
- [3] VOLKER COORS, UWE JASNOCH, VOLKER JUNG. Using the virtual table as an interaction platform for collaborative urban planning[J]. Computers & Graphics, 1999, 23:487-496.
- [4] 李清泉,李德仁.三维空间数据集成的概念框架研究[J].测绘学报, 1998, 27(4):325-329.
- [5] 徐能雄.工程岩体三维构模技术及其可视化系统研究[D].北京:中国矿业大学(北京校区), 2002.
- [6] 夏邦栋.普通地质学[M].北京:地质出版社, 1995.

作者简介:徐能雄(1971-),男,湖北省通山县人,博士,中国地质大学(北京)工程技术学院教师,现从事GIS开发与应用方面的研究工作。