

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.04.010

CATIA-FLAC^{3D}耦合建模方法及其应用

乔世范¹, 谢济仁¹, 郭麒麟², 许文龙¹

(1. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075;

2. 长江委岩石工程总公司(武汉), 武汉 430010)

摘要:针对FLAC^{3D}面向复杂的地质模型建模存在的技术困难和不足,提出CATIA-FLAC^{3D}耦合建模新方法。先利用CATIA强大的三维地质体建模功能进行三维地质建模,再利用其有限元模块对地质体进行网格划分;基于对两类软件中单元、节点数据关系的差异分析,应用Visual Basic语言编写CATIA-FLAC^{3D}接口程序,实现了将CATIA环境下建模生成的单元、节点信息导入FLAC^{3D}。以某已建成偏压隧道工程为例,验证了CATIA-FLAC^{3D}耦合建模方法的可行性和有效性,为FLAC^{3D}构建三维复杂工程模型提供了新的思路。

关键词:复杂地质体;有限元;建模;接口程序

中图分类号:TU17;TP391.9 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)04-0063-06

Analysis of the Coupling Modeling Method with CATIA-FLAC^{3D} and Its Application

Qiao Shifan¹, Xie Jiren¹, Guo Qilin², Xu Wenlong¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China;

2. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430010, P. R. China)

Abstract: Numerical models based on FLAC^{3D} are difficult to build. A new kind of method modeling and meshing in the CATIA software, named the CATIA-FLAC^{3D} coupled modeling method, was proposed. This method utilizes the powerful geological modeling capabilities of CATIA for three-dimensional geological body modeling and meshing. And then, the interface program of CATIA-FLAC^{3D} is adopted to export the information into FLAC^{3D}, which is coded by visual basic language based on the variance of nodes and elements between the two software. The new proposed method was used in a bias tunnel through a mountain, and the results verified the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: complex geological body; finite element methods; modeling; interface program

FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 是以拉格朗日法为基础编写的有限差分程序,三维快速拉格朗日法是基于三维显式的一种有限差分法的数值分析方法,它可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为。自20世纪90年代以来,已经在土建、交通、采矿、地质、水利等工业部门广泛应用,逐渐成为岩土工程界的重要工具之一。

然而FLAC^{3D}软件在模型前处理上存在很大缺陷,主要表现为:建模过程不直观、检查不方便、工作量大耗时长。为了解决这些问题,一些学者做了一些工作:王树仁等^[1]基于MIDAS/GTS软件,采用MATLAB语言编写MIDAS/GTS-FLAC^{3D}接口程序。廖秋林等^[2]基于ANSYS软件,采用ANSYS语言编写了FLAC^{3D}-ANSYS接口程序,借

收稿日期:2013-12-03

基金项目:湖南省科技厅支撑计划(2013SK3075);国家973计划(2011CB710601)

作者简介:乔世范(1975-),男,博士(后),教授,主要从事环境岩土工程研究,(E-mail)qiaosf@mail.csu.edu.cn。

助有限元软件 ANSYS 相对便捷的前处理功能,实现了层状地质体 FLAC^{3D}模型的建立。胡斌等^[3]采用 FORTRAN 语言编写了 FLAC^{3D}的前处理程序,对于简单地质体实现了快速、便捷的建模; Aringoli 等利用 Surfer 和 GID 处理,建立地质体模型,通过 Fish 编程将建好的网格读入到 FLAC^{3D}中^[4-7]。ANSYS、MIDAS/GTS 等有限元计算软件,针对规则的地质体能够快速建立地质体的几何模型和有限元模型,然而对于复杂的地质体,其建模过程复杂、工作量大、花费时间长^[8-11]。法国 Dassault 公司开发的 CATIA 软件是集 CAD/CAM/CAE 于一体的优秀三维设计软件,在机械、电子、航空、航天和汽车等行业获得很广泛应用。它从 V5R19 版本开始,增加了地形地质建模功能,用于土木工程的规划与设计以及基础工程等。一些单位在相关课题中已应用 CATIA 进行三维地质建模,开发了相应的地质插件,实现了地质点的转换、钻孔数据的导入、钻孔信息的分层、平面图的导入以及剖面图的导入等操作,从而简化了建模过程,具有比较好的实用性。然而, CATIA 虽然有比较强的建模能力,但其有限元分析模块比较薄弱,所以需要开发与岩土工程专业软件 FLAC^{3D}的接口程序。

针对 FLAC^{3D}前处理建模存在的不足^[12],笔者借助 CATIA 进行复杂地质体及工程结构的几何建模和网格划分,通过编写 CATIA-FLAC^{3D}数据转换接口程序,将建好的模型导入到 FLAC^{3D}中,从而降低 FLAC^{3D}前处理建模的难度,实现复杂工程的 FLAC^{3D}三维模型快速、准确构建,弥补了 CATIA 在有限元计算方面的不足。

1 复杂地质体的建立和网格划分

1.1 CATIA 软件简介

CATIA 软件包括多个功能模块,用于三维地质建模的模块主要包括有数字曲面编辑(DSE)、创成式外形设计(GSD)、快速曲面重建(QSR)和雕刻(Shape Sculptor)模块等。采用 CATIA 建立地质模型,建模方便,模型准确。

1.2 CATIA 中建立地质模型

1.2.1 点云和地表 Mesh 面的形成 根据测绘部门所提供的工程地形图,通过转化软件,生成地形图等高线所有点的 .asc 文件。通过 CATIA 中 DSE 模块导入,形成点云图,见图 1。

将点云进行过滤、删除明显错误的的数据点,通过 mesh creation 命令形成 3D 三角小网格面片组,采用 DSE 平台中的网格面修改功能对三角网格面片

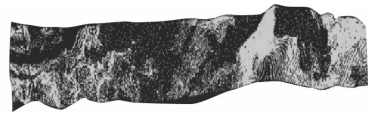


图 1 导入的点云

组进行补点、删点、修改网格形状等操作,生成合理网格面,见图 2。

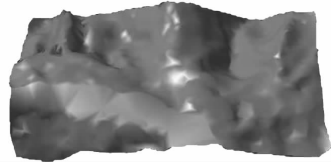


图 2 形成网格面

1.2.2 形成地表曲面 进入 QSR 模块,点击 Power Fit 命令,将网格面强制实体化,调整界面参数,生成接近真实情况的实体面。如图 3。

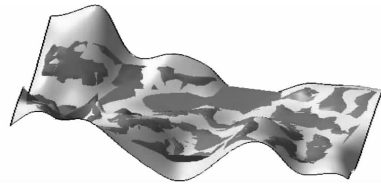


图 3 形成地表曲面

1.2.3 生成地质体模型 在地表面范围内建立凸台,进入零件设计模块,点击分割命令(插入/基于曲面的特征/分割),其中,分割元素为上步生成的地表面,生成的地质实体模型如图 4 所示。

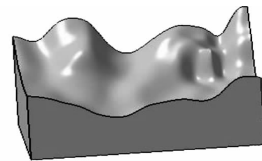


图 4 地质体模型

1.2.4 生成网格体模型 进入分析与模拟模块的高级网格划分工具(Advanced Meshing Tools)模块,点击 Meshing Methods 工具栏下的网格划分工具(OCTREE Tetrahedron Mesh)命令,设定单元体大小,最后生成地质体有限元网格模型^[13-14],如图 5 所示。

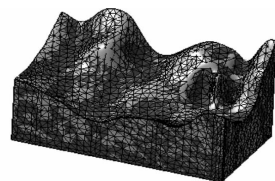


图 5 网格体模型

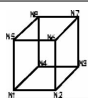
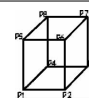

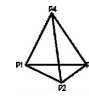
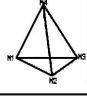
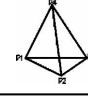
2 CATIA-FLAC^{3D}接口程序

CATIA 有限元模型可采用采用四面体、六面体进行划分,其单元形状与 FLAC^{3D}所采用的四面体形网格和矩形网格形状相似,但其每一单元节点编制的规则和节点坐标(单元数据)有差异。通过深入分析两个软件数据文件的内在联系,在 VS2010 的平台下,使用 Visual Basic 语言编写了 CATIA-FLAC^{3D}接口程序,实现了在 CATIA 中建模和网格划分,在 FLAC^{3D}中计算,使两个软件的优势得到发挥。

2.1 FLAC^{3D}与 CATIA 单元数据关系

CATIA 主要提供四面体(I)、四面体(II)和六面体 3 种实体单元,可分别对应于 FLAC^{3D}中的 Tetrahedron 和 Brick 单元^[15],其单元节点编号对应关系见表 1(以四面体(I)为例)。

表 1 CATIA 与 FLAC^{3D}单元数据关系对照

单元类型	CASTIA 单元类型	FLAC 单元类型	备注
六面体			brick 单元
四面体(II)			退化 为 Tefrahedron 单元
四面体(I)			Tefrahedron 单元

CATIA 导出的节点、单元数据格式与 FLAC^{3D}可识别的节点、单元数据格式对照分别见表 2(以四面体(I)为例)和表 3(以四面体(I)为例)所列内容。

表 2 CATIA 与 FLAC^{3D}节点数据格式对照表

数据格式	节点关键字	节点号	坐标系	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
CATIA 导出的节点数据格式		2	整体直角	100	100	100
FLAC ^{3D} 可识别的节点数据格式	GR	2		100	100	100

表 3 CATIA 与 FLAC^{3D}单元数据格式对照表

数据格式	节点关键字	单元号	单元类型	网格类型	节点号 1	节点号 2	节点号 3	节点号 4
CATIA 导出单元的数据格式		1	四面体(I)	2	21	12	5	1
FLAC ^{3D} 可识别的数据格式	CA	1	四面体		21	12	5	1

2.2 CATIA 与 FLAC^{3D}数据转换思路

基于 CATIA 与 FLAC^{3D}单元数据关系,应用 Visual Basic 编写了 CATIA-FLAC^{3D}接口程序。将 CATIA 导出的节点、单元数据通过编程存储到几个动态数组中,再利用 CATIA-FLAC^{3D}数据转换接口程序转换成 FLAC^{3D}可识别的数据文件,并存入一个.txt 文件中,通过调用这个文件,在 FLAC^{3D}中生成有限元模型;依次施加边界条件和初始条件、对材料参数赋值等,进行计算^[13-15]。

2.3 CATIA 与 FLAC^{3D}数据转换实现过程

CATIA 与 FLAC^{3D}数据转换接口程序实现过程如下:

2.3.1 节点数据转换 将 CATIA 的节点数据转换为 FLAC^{3D}数据文件,需删掉非数据列(即“GRID *”列)以及多余的节点号列,当遇到关键字“GR”,开始存储节点数据,将节点号和节点坐标分别存储到动态数组 node number()和 axis()数组中。部分关键代码如下:

```

Do While sr.Peek <> -1
    If name.Substring(0, 2) = "GR" Then
        ReDim Preserve nodenur(i)
        ReDim Preserve axis(3 * i + 2)
        nodenur(i) = CDBl(name.Substring(15, 9)) + countnumber2
        axis(3 * i) = CDBl(name.Substring(36, 20))
        .....
    End If
Loop
    
```

2.3.2 单元数据转换 将 CATIA 的单元数据转换为 FLAC^{3D}数据文件。主要流程如下:

- 1)读取单元编号,将单元编号存储到动态数组 element number()。
 - 2)读取单元的所有节点,将这些节点存入动态数组 element contact()。
 - 3)将网格组存入动态数组 element group()。
- 部分关键代码如下:

```

Do While sr.Peek <> -1
    If name.Substring(0, 2) = "CT" Then
        ReDim Preserve elementcontact(4 * j + 3)
        ReDim Preserve producegroup(j)
        elementnumber(j) = CDBl(name.Substring(6, 10)) + countnumber1
        elementmaterial(j) = CDBl(name.Substring(16, 8))
        elementcontact(4 * j) = CDBl(name.Sub-
    
```

string(24, 8)) + countnumber - k

.....

End If

Loop

2.3.3 单元分组 FLAC^{3D}可识别的单元分组信息格式为 GROUP 组名。由表 3 可见,CATIA 导出的单元数据中包括单元所属的网格组信息。每个单元都会与网格组类型对应,此信息存储于数组 element group()内,由此,可以通过网格组信息对单元进行分组,这样就可实现单元分组信息的识别。笔者利用 Visual Basic 编写的转换程序,对每个单元进行分组,知道所有单元分组完成,程序终止。部分关键代码如下:

```

Do While sr.Peek <> -1
    ReDim Preserve elementnumber(j)
    ReDim Preserve elementmaterial(j)
    If (countnumber - k) <> countnumber2 Then
        .....
        producegroup(j) = "group" + " " +
            elementma(j)
    End If
    .....
Loop
    
```

2.3.4 转换接口的流程图及界面 执行完以上操作后,将转换完毕的节点、单元数据及单元分组信息输出到一个.txt 文件中,在 FLAC^{3D}调用^[16-18]。流程见图 6。CATIA-FLAC^{3D}的接口程序界面如图 7 所示。

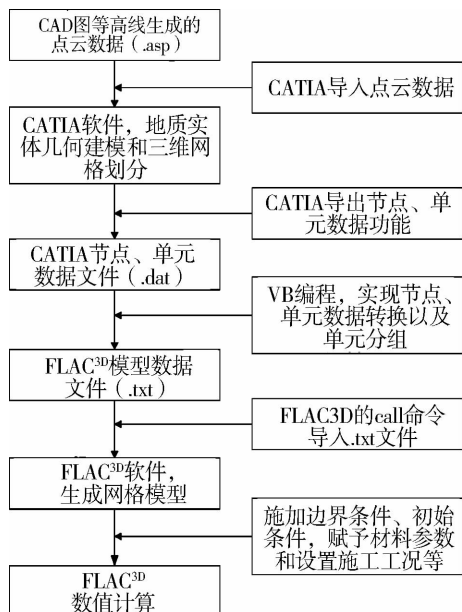


图 6 算法流程图



图 7 CATIA-FLAC^{3D}接口程序界面

3 应用实例

3.1 工程背景

以某已建成的偏压隧道为依托,验证该方法的可行性和有效性。该地区的特点是地表形态比较复杂,岩层主要以石灰岩为主,其力学参数见表 4。

表 4 岩石参数

岩石类型	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	粘聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	容重/(kg·m ⁻³)
石灰岩	7.31	5.63	3.79	5.1	40.9	2 480

使用 ANASYS, MIDAS 等软件建模,工程量较大,建模繁琐,而直接使用 FLAC^{3D}建模,建模周期长,费时费力^[16,19]。采用该方法,能够方便快速的建立几何模型和有限元模型,利用 CATIA-FLAC^{3D}接口程序很方便的将模型导入 FLAC^{3D}中进行分析。

3.2 有限元计算模型及计算结果

根据以上流程,在 CATIA 中生成的有限元模型如图 8。导入到 FLAC^{3D}中的有限元模型如图 9。该模型上表面为自由面,不需要施加约束,其他 5 个面都施加法向约束,施加重力场,材料参数如表 4 所示,本构模型采用摩尔库伦,见图 10。

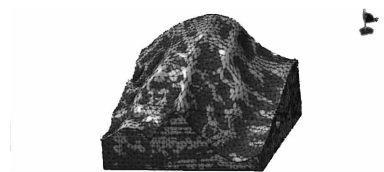


图 8 CATIA 有限元计算模型

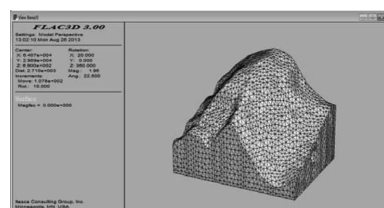


图 9 FLAC^{3D}有限元计算模型

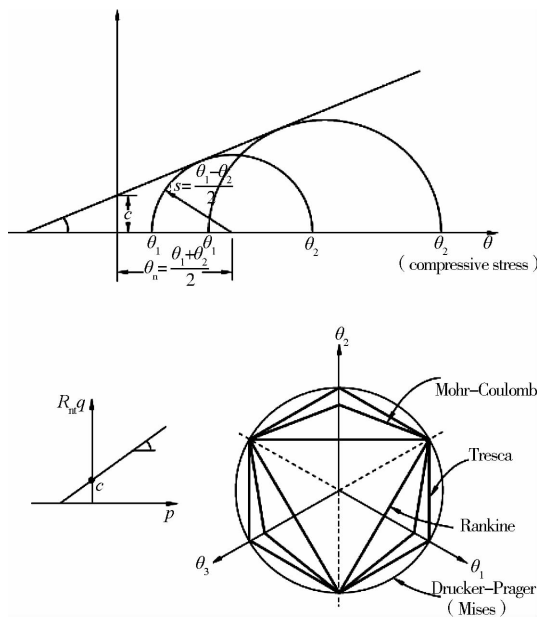


图10 Mohr-Coulomb 屈服面

$$s = c + \theta_f \tan \varphi \quad (1)$$

式中: c 为凝聚力; φ 为内摩擦角; s 和 θ_f 分别为破坏面上的剪切应力和法向应力。

如果用主应力表示,式(1)可以改写为:

$$\frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_3)_f = [c \cdot \tan \varphi + \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_3)_f] \sin \varphi \quad (2)$$

式中: θ_1 和 θ_3 分别为第一主应力和第三主应力; c 表示凝聚力; φ 为内摩擦角。计算结果如图11^[12,15]所示。

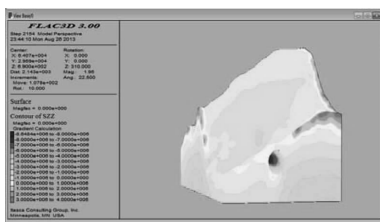


图11 Z方向应力云图

工程实例验证表明,CATIA-FLAC^{3D}耦合建模方法是有效、可行的。

4 结 论

1)基于CATIA平台进行三维建模,生成有限元模型,通过Visual Basic语言编写了CATIA-FLAC^{3D}的接口程序,实现了在CATIA中建模,在FLAC^{3D}中进行有限元计算的功能。

2)CATIA作为一款优秀的设计建模软件,但它的有限元分析计算模块并不强大;FLAC^{3D}是岩土方

向的专业有限元计算软件,它在前期处理上存在着一定的缺陷;通过CATIA-FLAC^{3D}接口程序,能够利用CATIA方便、快速、准确地建立地质模型,并利用FLAC^{3D}进行有限元计算,减少了建模所需要的时间和精力,提高了效率,缩短了计算周期。

参考文献:

- [1] 王树仁,张海清. MIDAS/GTS-FLAC^{3D}耦合建模新方法及其应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 12-17.
Wang S R, Zhang H Q. A coupling modeling method with MIDAS/GTS-FLAC^{3D} and its application [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(1): 12-17.
- [2] 廖秋林,曾钱帮. 基于ANSYS平台复杂地质体FLAC^{3D}模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010-1013.
Liao Q L, Zeng Q B. Automatic model Generation of complex geologic body with FLAC^{3D} based on ANSYS platform [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1010-1013.
- [3] 胡斌,张倬元,黄润秋,等. FLAC^{3D}前处理程序的开发及仿真效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1387-1391.
Hu B, Zhang Z Y, Huang R Q, et al. Development of pre-processing package for FLAC^{3D} and verification of its simulating effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1387-1391.
- [4] 罗周全,吴亚斌,刘晓明,等. 基于SURPAC的复杂地质体FLAC^{3D}模型生成技术[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1334-1338.
Luo Z Q, Wu Y B, Liu X M, et al. FLAC^{3D} modeling for complex geologic body based on SURPAC [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1334-1338.
- [5] Jenck O, Dias D, Kastner R. Three-dimensional numerical modeling of a piled Embankment [J]. International Journal of Geomechanics, 2009, 9(3): 102-112.
- [6] Chugh A K, Stark T D, Dejong K A. Reanalysis of a municipal landfill slope failure near Cincinnati, Ohio, USA [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(1): 33-53.
- [7] Aringoli D, Calista M, Gentili B, et al. Geomorphological features and 3D modelling of Montelparo mass movement (Central Italy) [J]. Engineering Geology, 2008, 99(1/2): 70-84.
- [8] 侯恩科,吴立新,李建民,等. 三维地学模拟与数值模拟

- 的耦合方法研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 388-392.
- Hou E K, Wu L X, Li J M, et al. Study on the coupling of 3D geoscience modeling with numerical simulation [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 388-392.
- [9] 王明华, 白云. 层状岩体三维可视化构模与数值模拟的集成研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1123-1126.
- Wang M H, Bai Y. Study on integration of three-dimensional modeling and numerical simulation for stratified rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1123-1126.
- [10] 李明超, 钟登华, 秦朝霞, 等. 基于三维地质模型的工程岩体结构精细数值建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1893-1898.
- Li M C, Zhong D H, Qin Z X, et al. Refined modeling for numerical simulation of engineering rock mass structures based on 3D geological model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1893-1898.
- [11] Papakonstantinou S, Schubert W. Para-metric study of displacements on sequential and full face tunnel excavation [C]//Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress-Underground Space-The 4th Dimension of Metropolises, 2007: 639-643.
- [12] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC^{3D}, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, version 2.0, User's Manual [R]. USA Itasca Consulting Group, Inc., 1997.
- [13] 刘晓明, 罗周全, 杨彪, 等. 复杂矿区三维地质可视化及数值模型构建[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 4006-4015.
- Liu X M, Luo Z Q, Yang B, et al. Numerical modeling and geological body visualization for complex mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 4006-4015.
- [14] 刘秀军. 基于 GOCAD 的复杂地质体 FLAC^{3D} 模型生成技术[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 41-45.
- Liu X J. FLAC^{3D} modeling for complex geologic body based on GOCAD [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4): 41-45.
- [15] 伍永平, 高永刚, 解盘石. 基于 AutoCAD 的 FLAC^{3D} 地下工程快速建模方法研究[J]. 煤炭工程, 2011(12): 61-64.
- Wu Y P, Gao Y G, Xie P S. Study on rapid modeling method of FLAC^{3D} underground project based on AutoCAD [J]. Coal Engineering, 2011(12): 61-64.
- [16] 王阳平, 崔颖辉. 基于 Midas/Gts 的 FLAC^{3D} 的建模方法[J]. 北方工业大学学报, 2010, 22(3): 78-81.
- Wang Y P, Cui Y H. Method of modeling the FLAC^{3D} based on midas/Gts [J]. Journal of North China University of Technology, 2010, 22(3): 78-81.
- [17] Lin H, Liu T Y, Li J T. A simple generation technique of complex geotechnical computational model [J]. The Scientific World Journal, 2013, 37(8): 1-8.
- [18] Zhang X D, Zhang B, Jiang L Z, et al. Research on modeling technology for three-dimension analysis of irregular slope stability in surface mines and its application [J]. Advanced Materials Research, 2013, 796: 838-841.
- [19] 卢志刚, 刘兴权, 唐义宏. 基于 GIS 和 FLAC^{3D} 矿山地表沉陷可视化[J]. 现代矿业, 2011(11): 44-46.

(编辑 胡英奎)