

文章编号: 1000-7598-(2003)02-0183-05

开采沉陷三维损伤有限元分析

李云鹏^{1, 2}, 王芝银^{1, 2}

(1. 石油大学, 北京 102200; 2. 西安科技学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 针对上覆岩体结构的复杂性, 将节理、裂隙及正交各向异性岩体视为损伤岩体, 建立了裂隙损伤岩体三维动态有限元分析模型, 给出了较详细的三维仿真模拟有限元实施格式, 完成了可考虑多种工程因素且能在 WINDOWS 下运行的三维模拟软件。分析模拟结果显示, 对岩体结构复杂性的处理方式是可行的, 所研制软件是有效的。

关 键 词: 开采沉陷; 三维损伤; 裂隙岩体

中图分类号: TD 82; TB 115 **文献标识码:** A

Three-dimensional damage finite element analysis of mining settlement

LI Yun-peng^{1, 2} WANG Zhi-yin^{1, 2}

(1. University of Petroleum, Beijing 102200, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In light of the complexity of rock mass structure in mining area, joints, cracks and anisotropic rock masses are regarded as damage rock mass in the paper. And a three dimensional (3D) damage model of finite element analysis is set up for joint-crack rock masses. Concrete formulas of 3D finite element imitation are given in greater detail. The 3D simulating software is completed, which can be carried out in WINDOWS. All kinds of engineering factors can be considered in the software. Case analysis results show that the given way is feasible to deal with complex structure rock masses and the developed software is effective.

Key words: mining settlement; three-dimensional damage; crack rock mass

1 引 言

地下矿层的大面积开采, 会引起采空区上覆岩层下沉, 在地面形成陷坑、陷槽、台阶, 甚至形成垂向沉陷和水平位移达若干米的下沉盆地。为了充分利用有限资源, 确保矿区持续性发展, 同时又能保证地面构筑物的安全稳定, 开采过程中地表沉陷动态分析、监控与预测, 已成为煤矿生产中的重要技术课题。

由于岩体具有地质体和结构体的双重性, 其变形特性受到地质构造的控制, 尤其是赋存于地壳中的构造应力场及由此而导致的褶皱、断层、节理、裂隙等致使岩体具有明显的各向异性。应该正确地认识这些复杂岩体的力学特性, 为这些充满裂隙及节理的岩体建立合理的力学模型, 并且考虑空间与时间因素, 判断和分析相关工程的稳定性, 进而采用科学的防护方案和加固方法, 有效地抑制岩层移

动和沉陷。

本文就地下开采引起的地表沉陷问题, 讨论了岩体节理及裂隙对地表移动变形的影响效应, 考虑了岩体微观损伤对岩体特性的影响, 引入了三维岩体损伤概念, 改进了以往连续介质力学的研究方法, 从岩层的非线性本质入手, 建立以岩石细观损伤力学为基础的数值模型, 给出了一套三维地表沉陷动态仿真模拟软件, 并通过算例证明了其有效性和实用性。

2 裂隙岩体损伤三维有限元模型

地表移动实测研究结果表明, 岩体内的裂隙与节理对岩层及地表移动有较大影响, 使下沉盆地出现水平移动, 并显现出非对称性。为此, 本文对裂隙与节理的影响引入损伤力学模型来进行考虑。

对于单组节理, 其损伤变量可以用对称张量来表征, 但实际存在于岩体中的往往不是 1 组节理系

收稿日期: 2002-02-25

基金项目: 陕西省自然科学基金(No. 2001SL11)和陕西省重点项目(No. 01ZC19)资助部分内容。

作者简介: 李云鹏, 男, 1956 年生, 教授, 主要从事计算固体力学与工程应用的教学与研究工作。

统,而是 2,3 组甚至更多,于是,对应于多组节理裂隙系统可得多个对称张量。根据勒迈特(J.Lemaitre)对含有 N 组裂隙与节理的研究,则该损伤体的等效总体损伤张量为^[1]

$$[\boldsymbol{\omega}] = [\boldsymbol{I}] - \left\{ \sum_{n=1}^N ([\boldsymbol{I}] - [\boldsymbol{\omega}_n])^{-1} - (N-1)[\boldsymbol{I}] \right\}^{-1} \quad (1)$$

式中 $\boldsymbol{\omega}$ 为总体等效损伤张量; $\boldsymbol{I}$ 为单位张量; $\boldsymbol{\omega}_n$ 为第 n 组节理对应的损伤张量^[2~4], 其计算式为

$$\boldsymbol{\omega}_n = \frac{l}{V} \bar{m} \bar{a} (\bar{n} \otimes \bar{n}) \quad (2)$$

式中 $\bar{m}$ 为包含在体积 V 中的节理数; $\bar{a}$ 为该组节理的平均面积; l 为该组节理的平均间距; $\bar{n}$ 为该组节理的单位法向矢量。

由于岩体内的节理裂隙往往有充填物,因此,节理面不仅能传递压应力,还能传递剪应力。于是,有效应力可表为

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}_t (\boldsymbol{I} - C_t \boldsymbol{\omega})^{-1} + \boldsymbol{\sigma}_n [H \langle \boldsymbol{\sigma}_n \rangle (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{\omega})^{-1} + H \langle -\boldsymbol{\sigma}_n \rangle (\boldsymbol{I} - C_n \boldsymbol{\omega})^{-1}] \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{\sigma}_t$ 为偏应力张量; $\boldsymbol{\sigma}_n$ 为体积应力张量;

$$H \langle x \rangle = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

系数 C_t 、 C_n 在 0~1 之间变化,取决于节理的闭合程度和粗糙程度, $C_t = 1$ 为节理不能传递偏应力; $C_t = 0$ 为节理能完全传递偏应力。同样,当 $C_n = 1$ 时为节理不能传递体积应力; $C_n = 0$ 时,能全部传递体积应力。一般情况,对受压闭合节理,可设 $C_n = 0$, $0 < C_t < 1$ 。

将式(3)中的有效应力经对称化处理,并根据勒迈特的等效应变假说,可将节理损伤岩体的本构关系表为

$$[\boldsymbol{\varepsilon}] = [\boldsymbol{C}]^{-1} [\tilde{\boldsymbol{\sigma}}] \text{ 或 } [\tilde{\boldsymbol{\sigma}}] = [\boldsymbol{C}] [\boldsymbol{\varepsilon}] \quad (4)$$

式中 $[\tilde{\boldsymbol{\sigma}}]$ 为节理损伤岩体的损伤等效应力,可由式(3)并经对称化后求出; $[\boldsymbol{C}]$ 为常数元素的弹性模量矩阵。

根据上述节理岩体的损伤本构关系,可推导出三维有限元分析格式为^[5,6]

$$\{k\} \{\bar{\boldsymbol{u}}\} = \{F_1\} + \{F_2\} + \{F_3\} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \{k\} &= \int_V [B]^T [D] [B] dV; \{F_1\} = \int_V [N]^T [\bar{\boldsymbol{F}}] dV \\ \{F_2\} &= \int_V [N]^T [\bar{\boldsymbol{P}}] dV; \{F_3\} = \int_V [B]^T [\boldsymbol{\omega}] dV \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $\{\bar{\boldsymbol{P}}\}$ 为面力; $[\bar{\boldsymbol{F}}]$ 为体力; $\{\boldsymbol{\omega}\} = \{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}\} - \{\boldsymbol{\sigma}\}$; $\{F_3\}$ 为由损伤引起的附加荷载。式(5)的解可分为两步。

$$\text{令 } \{\bar{\boldsymbol{u}}\} = \{\bar{\boldsymbol{u}}'\} + \{\bar{\boldsymbol{u}}''\}$$

$$\{k\} \{\bar{\boldsymbol{u}}'\} = \{F_1\} + \{F_2\} \quad (7)$$

$$\{k\} \{\bar{\boldsymbol{u}}''\} = \{F_3\} \quad (8)$$

由式(7)得宏观应力对应的位移 $\{\bar{\boldsymbol{u}}'\}$, 并求得柯西应力 $\{\boldsymbol{\sigma}\}$, 代入式(3)及式(4), 求得有效应力 $\{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}\}$ 及 $\{\boldsymbol{\omega}\}$, 并进而由式(6)求得 $\{F_3\}$ 。代入式(8)求出 $\{\bar{\boldsymbol{u}}''\}$, 同时, 得到损伤岩体的位移场。

3 三维有限元实施过程

由前述有限元分析格式,在三维弹塑性分析程序 NCAP-3D^[7]的基础上增加了计算有效应力模块和形成损伤张量模块,并补充了相关的计算功能,使之能够计算含初始损伤的节理岩体。具体程序分析步骤如下:

(1) 对于每一级载荷增量及附加荷载,首先按线弹性分析求得单元应力增量 $\{\Delta \boldsymbol{\sigma}_i\}_j$ 及应变增量 $\{\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_i\}_j$, 其中, i 表示荷载增量次数, j 表示迭代次数。

(2) 计算各单元当前应力值

$$\{\boldsymbol{\sigma}_i\}_j = \{\boldsymbol{\sigma}_i\}_{j-1} + \{\Delta \boldsymbol{\sigma}_i\}_j \quad (9)$$

由式(3)可得各单元的净应力 $\{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}_i\}_j$, 对于屈服单元,修正其应力增量,并由下式计算出初应力 $\{\Delta \boldsymbol{\sigma}_0\}_j$, 即

$$\{\Delta \boldsymbol{\sigma}_0\}_j = \{\Delta \boldsymbol{\sigma}_i\}_j - \{\Delta \boldsymbol{\sigma}'_i\}_j \quad (10)$$

$$\text{式中 } \{\Delta \boldsymbol{\sigma}'_i\}_j = [D_{ep}] \{\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_i\}_j \quad (11)$$

(3) 在本次增量及本次迭代后屈服单元的实际应力按下式进行调整:

$$\{\boldsymbol{\sigma}'_i\}_j = \{\boldsymbol{\sigma}_i\}_{j-1} + \{\Delta \boldsymbol{\sigma}'_i\}_j = \{\boldsymbol{\sigma}_i\}_j - \{\Delta \boldsymbol{\sigma}_0\}_j \quad (12)$$

(4) 由 $\{\Delta \boldsymbol{\sigma}_0\}_j$ 计算单元的等效附加荷载:

$$\{\Delta f_0\} = \int_V [B]^T \{\Delta \boldsymbol{\sigma}_0\}_j dV \quad (13)$$

并迭加得总体附加荷载 $\{\Delta F_0\}$ 。

(5) 计算各节点当前位移值:

$$\{u_i\}_j = \{u_i\}_{j-1} + \{\Delta u_i\}_j \quad (14)$$

(6) 在 $\{\Delta F_0\}$ 作用下重复(1)~(5)步骤,直到所有单元都收敛至要求精度。

(7) 令 $\{\Delta\omega\}_i = \{\Delta\tilde{\sigma}\}_i - \{\Delta\sigma\}_i$, 由下式计算损伤附加荷载 $\{\Delta F_3\}$

$$\{\Delta F_3\} = \sum \int_V [B]^T \{\Delta\omega\}_i dV \quad (15)$$

(8) 在 $\{\Delta F_3\}$ 作用下, 重复步骤 (1) ~ (6), 直到所有单元均收敛至规定精度为止。

(9) 施加下一级荷载增量并重复步骤 (1) ~ (8), 至全部荷载增量计算完成为止。

在程序中, 非线性弹塑性分析采用了增量-初应力法。该方法在整个计算过程中无须改变系统的刚度矩阵, 计算效率较高。

4 工程算例

(1) 概况

某矿井采区计算模型如图 1 所示, 煤层平均厚度约 10 m, 埋深 127 m。顶底板岩石主要以泥岩、砂岩及页岩等为主。采用分层长壁开采法, 工作面总长度约为 300 m, 主要力学参数示于表 1 中。对于损伤参数的确定, 通过现场观察分析, 考虑对岩体性能影响较大的节理, 给出了煤层及采区顶板岩层各组节理的特征参数, 并列于表 2 中。

表 1 采区围岩力学性能参数

Table 1 The mechanical parameters of surrounding rock in mining area

材料名称	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	内摩 擦角 ϕ / (°)	粘聚力 C / MPa	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	抗拉强度 R_t / MPa
砂岩	12 500.0	0.26	36.5	1.28	24.8	1.09
粉砂岩	9 200.0	0.23	37.1	1.13	26.8	0.82
细砂岩	10 500.0	0.26	36.5	1.28	24.6	0.96
泥岩	2 600.0	0.23	28.0	0.86	24.8	0.56
煤	2 500.0	0.32	30.5	0.30	26.1	0.51
砂质泥岩	5 800.0	0.31	32.1	1.06	25.4	0.80
炭泥岩	3 510.0	0.30	31.2	0.96	25.7	0.45

表 2 煤层及采区顶板岩层各组节理的特征参数

Table 2 Joints' characteristic parameters in the coal seam and the rock strata

材料	节理	节理分 布密度 $\bar{m} / \text{V} \cdot \text{m}^{-3}$	平均 面积 $\bar{a} / \text{m}^2$	平均 间距 $\bar{l} / \text{m}$	单位法向矢量 $\bar{n}$		
煤层	第 1 组	13.40	0.123	0.12	0.976	0.216	0.175
	第 2 组	14.95	0.175	0.08	0.268	0.805	0.101
	第 3 组	9.24	0.150	0.03	0.407	-0.452	0.201
顶板 岩层	第 1 组	6.30	0.223	0.13	0.856	0.276	0.165
	第 2 组	8.05	0.105	0.09	0.168	0.825	0.111
	第 3 组	7.14	0.215	0.04	0.510	-0.552	0.241

由式 (2), 利用表 1 中的参数计算单组节理初始损伤张量为

$$\omega_{\text{煤层}} = \begin{bmatrix} 0.210 & 0.079 & 0.042 \\ 0.079 & 0.153 & 0.207 \\ 0.042 & 0.207 & 0.009 \end{bmatrix}$$

$$\omega_{\text{岩层}} = \begin{bmatrix} 0.151 & 0.036 & 0.034 \\ 0.036 & 0.084 & 0.007 \\ 0.034 & 0.007 & 0.009 \end{bmatrix}$$

其它岩层初始损伤张量计算方法类同, 不再赘述。计算模型约束条件为前后、左右水平约束, 垂直方向自由, 底面垂直方向约束, 水平方向自由, 四角固定, 顶面自由。有限元网格剖分节点 11 466 个, 单元 10 000 个。

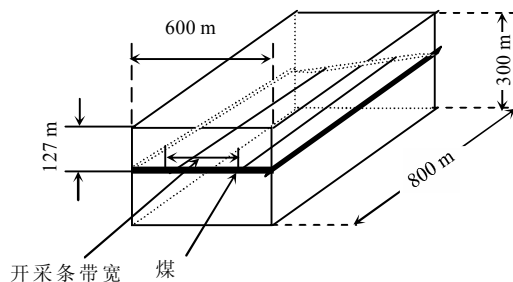


图 1 分析区域示意图

Fig.1 Sketch of analysis region

(2) 结果分析

采用本文所研究开发的三维有限元仿真软件, 对前述工程问题进行了仿真模拟。现给出不同开采时步时的采区地表沉陷变形计算结果, 并利用仿真图形显示采区地表沉陷规律, 如图 2~图 3 所示。

图 2 给出了随开采工作面的不断推进, 采区地表沉陷变形规律三维侧视图。由图可见, 随着采空区的不断扩大, 开采对地表变形的影响效应也不断递增。图 3 给出了地表沉陷变形规律的俯视图, 由图可明显看出, 随着采区不断扩大, 地表沉陷的发展规律, 以及沉陷盆区最大沉陷点的位置。

图 4 分别给出了地表下沉盆地走向主断面上下沉曲线的变化规律及地表倾斜角变化规律。由图可见, 地表沉陷曲线的峰值点位于工作面的后方, 其最大沉降量随采空区增大而增大, 且位置随工作面的推进而不断向工作面推进方向移动。地面最大倾角在工作面上方区域及工作面后方两个位置处, 两点距离随工作面的推进而不断增大, 即沉陷盆地区域不断扩大, 地表倾角为零或较小值区域也不断扩

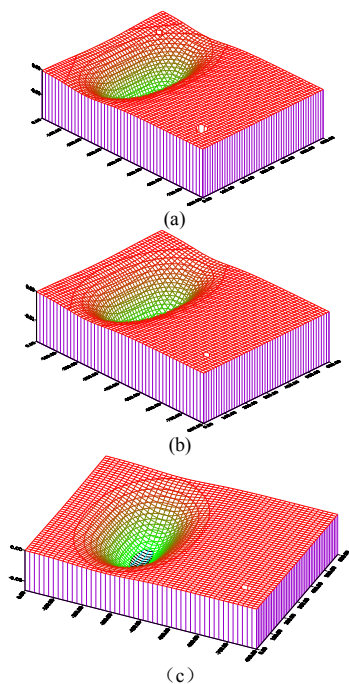


图2 随开采推进地表沉陷规律侧视图
Fig.2 The settlement laws of ground surface with mining coal

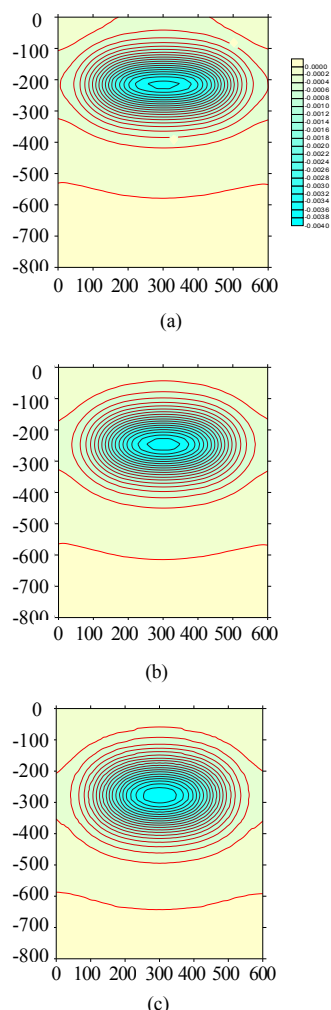


图3 随开采推进地表下沉附视等值线图 (单位: m)
Fig.3 The settlement contours of ground surface with mining coal (unit: m)

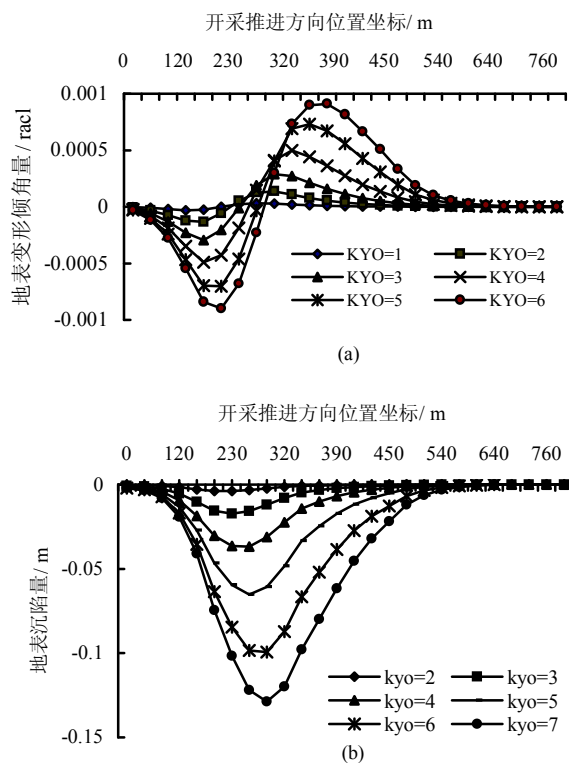


图4 开采引起地表变形规律曲线
Fig.4 The settlement curves of ground surface caused by mining coal

大。最大倾角位置距开采面为采高的 6~10 倍和 20~25 倍处。由图 4 中两图又知,地表沉陷量及地面倾斜度并非以沉陷盆谷为对称中心。

由上分析表明,本文给出的开采沉陷三维仿真软件,能够较好地对开采引起采区地表沉陷变形规律进行描述。所得结果对矿区“三下”开采方案制定和地表构筑物稳定性分析判别及安全维护都有一定的积极作用。

5 结 语

(1) 考虑采区岩体节理、裂隙的时空影响效应,并将节理裂隙岩体视为损伤岩体,这不仅改进了以往连续介质力学的研究方法,而且,为开采沉陷的预测预报的有效性奠定了基础。文中方法与传统的地表沉陷理论相比较,其考虑工程因素全面,预测结果较接近实际。

(2) 利用作者研制的三维损伤有限元分析软件,模拟了水平煤层开采过程中的地表沉陷发展规律。结果表明,开采引起地表沉陷量的峰值点一般位于工作面后方,随采空区的增大,最大沉降量不断增加,且位置随工作面的推进而不断向工作面推进方向移动。地面最大倾斜角有两处位置,即在工

作面后方距开采面距离为采高 6~10 倍和 20~25 倍位置处。地表沉陷量及地面倾斜度并非以沉陷盆谷为对称中心。此结果对采区地表变形规律预测及地面建筑物维修与保护都有一定参考和指导意义。

(3) 通过应用计算分析表明, 本文完成的三维开采沉陷分析软件, 可视化程度高, 应用方便, 并能有效地模拟采区工程因素对采区地表沉陷的影响, 具有较广泛的工程应用前景。

参考文献

- [1] 勒迈特 J. 损伤力学教程[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 75—79. 187
- [2] 邓喀中. 开采沉陷中的岩体节理效应[J]. 岩石力学与工

程学报, 1996, 15(4): 345—317.

- [3] 谢和平. 岩石的连续损伤力学模型探讨[J]. 煤炭学报, 1988, 12(1): 33—40.
- [4] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991. 15—45.
- [5] 李云鹏, 王芝银. 开采沉陷粘弹塑性损伤模拟分析[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 9(Sup): 34—38.
- [6] 李云鹏, 王芝银. 固体力学有限元法及其程序设计[M]. 西安地图出版社, 1994. 223—244.
- [7] 李云鹏, 王芝银. 岩土工程三维非线性有限元分析 NCAP-3D 程序使用说明(Version 3.20)[Z]. 西安科技学院, 1997.

上接第 177 页

足抗浮、抗震以及抗风等方面的要求, 在工程中最好能将轻质材料填筑技术与预压固结及其它处理措施结合使用。在将预压固结法与换填技术结合使用时, 需充分考虑工后沉降量的控制标准, 据此标准来控制预压荷载、预压时间、加载速率及换填高度, 将这几方面有机结合, 在工程中作好监控量测, 判断软土的受力变形性状, 把握好换填的时机, 确保在换填完以后总荷载下软土的总固结度满足工后沉降的要求。

(3) 要彻底解决桥头软基的沉降问题, 不仅要考虑消除主固结沉降, 而且要设法使土体处于超固结状态, 从而消除土体的次固结沉降。按照传统的软基处治方法, 很难做到让软土在运营过程中处于超固结状态, 而使用轻质材料的换填技术可以比较方便的达到这种要求, 保证路基的沉降稳定性。

参考文献

- [1] Murakami Y. Secondary compression in the stage of primary consolidation[J]. *Soils and Foundations*, 1988, 28(3), 169—174.

- [2] Duncan J M, Chang C Y. Non-Linear analysis of stresses and strain in soils[J]. *Proc. ASCE, JSMFD*, 1970, 96 (5).
- [3] 谢洪涛, 杨春和. 软基侧向变形对邻近桥台及桩基的影响和防治[J]. 岩土力学, 2002, 23 (6): 742—749, 753.
- [4] 赵维炳, 施健勇. 软土流变理论及其在排水预压加固分析中的应用[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(3): 12—17.
- [5] 三木博史(日). 轻型路堤施工的种类与特征[J]. 孙全韵译, 路基工程, 1996, 68: 84—88.
- [6] 钟俊杰, 张庆贺, 段瑞明. 一种软土的新型设计施工方法-EPS[J]. 中国市政工程, 1996, 1: 1—6.
- [7] Duncan J M, Byrne P, Wong K, Mabry P. Strength, Stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses[R]. *UCB/GT/ 80-01*, univ. of california, Berkeley, 1980.
- [8] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1996, 44—106.
- [9] 张小平, 包承纲, 李进军. 泡沫轻质材料在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2000, 1: 58—62.