

文章编号:1671-8879(2007)06-0034-05

## 地震作用下黄土暗穴的稳定性

陈立伟<sup>1,2</sup>, 彭建兵<sup>1</sup>, 范 文<sup>1</sup>, 孙 萍<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国核电工程公司 北京第二设计研究院, 北京 100840)

**摘 要:**黄土高原地区发育的黄土暗穴是一种特殊的不良地质现象,已经成为西部黄土地区公路损坏的主要原因。黄土具有很高的地震易损性,对于暗穴较高发育区的西安—兰州一带,受地震影响比较大。在深入研究黄土暗穴发育特点的基础上,采用有限元法对其在地震力作用下的致塌机理进行了数值模拟,得出了不同洞径及埋深的暗穴在地震荷载作用下的动力响应规律。研究结果表明:地震发生时,往往会引起暗穴顶板的塌落,这种现象并非洞壁土体材料的屈服渐次发展所致,而是由突发性的暗穴结构稳定性丧失引起的。

**关键词:**道路工程;黄土暗穴;有限元;地震;稳定性

**中图分类号:**U419.4; P642.26 **文献标志码:**A

## Stability of loess-hidden hole under earthquake

CHEN Li-wei<sup>1,2</sup>, PENG Jian-bing<sup>1</sup>, FAN Wen<sup>1</sup>, SUN Ping<sup>1</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Beijing Second Design Institute of Nuclear Engineering, China Nuclear Corporation, Beijing 100840, China)

**Abstract:** Loess-hidden hole developed in the loess plateau is a kind of unfavorable geological phenomenon, and it has become the main reason causing damage to the highway in western loess region. The loess has the seismic vulnerability. At the loess regions from Xi'an to Lanzhou, the hidden-holes are more developed, the earthquake influence is strong. Through the study on the developmental features of loess-hidden hole, this paper analyzes the slumping mechanics by dynamic finite element method. According to the dynamic response results of loess-hidden hole with different diameter and embedded depth, when the earthquake happens, the reason causing the hidden holes' roof collapsed is not that the soils become yield gradually, but the structure loses its stability. 3 tabs, 8 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; loess-hidden hole; finite element; earthquake; stability

## 0 引 言

中国西北地区是黄土分布的主要地区,也是世界上黄土最为发育的地区。黄土具有特殊的工程地

质特性(疏松、大孔隙、垂直节理发育和湿陷性等),再加上对它的开发利用不合理,造成了原本平整的黄土高原地区水土流失、沟壑纵横,不良地质现象频繁发生<sup>[1-3]</sup>。黄土洞穴是一类特殊的地质灾害<sup>[4]</sup>,造

收稿日期:2006-05-27

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131881213)

作者简介:陈立伟(1978-),男,河南扶沟人,中国核电工程公司北京第二设计研究院工程师,长安大学博士研究生,E-mail:clw5070@163.com。

成田地沉陷、隧道塌方、路基坍塌和路堤滑坡等,对人类生命财产安全构成了极大威胁。近年来,随着国家西部大开发和基础设施建设的加强,需要大力发展公路交通事业,但广泛发育于黄土中的洞穴对公路的建设和安全运营带来了一系列的严重后果。

黄土微结构具有独特的动力性质,表现出很高的地震易损性<sup>[5-6]</sup>。黄土高原地区历史上发生过多次大地震,在每次强震的过程中发生滑坡、震陷和液化的事例都多有记载,甚至一些小的地震有时也会在震中区和丘陵地带引起许多房屋和黄土窑洞变形和倒塌(例如 1986 年山西运城 3.1~3.7 级地震群)。从中国地震动参数区划图(2001)上来看,西安—兰州一带大部分地区的地震峰值加速度 $\geq 0.15g$ ,这里受地震影响较大。因此,地震作用也是引起黄土暗穴坍塌的一个重要因素。目前,对于黄土暗穴抗震性能的研究,国外很少有这方面的资料,中国的研究工作多探讨的是黄土窑洞<sup>[7-8]</sup>。为此,本文从动力学角度分析了地震作用下黄土暗穴的稳定性,以期在实际工程提供科学依据。

1 黄土暗穴的形成及发育特点

在黄土地区,黄土洞穴是造成公路损坏的主要原因<sup>[9]</sup>,如图 1、图 2 所示。



图 1 阶地上发育的串珠状陷穴(定西郭沟)



图 2 黄土洞穴引起的路面塌陷(环县)

野外调查发现,黄土高原的一些阶地看似地表平坦,实则其下发育了一些规模较大、分布较广的黄

土洞穴,它们在整个阶地内构成了地下通道,有的甚至坍塌至地表。一般经验认为,“水”是这些洞穴形成和发展的关键性因素。一次大的降雨,不仅能够形成众多微型黄土洞穴,而且也会造成已有洞穴洞径的扩大甚至洞顶的坍塌。因此黄土洞穴从形成到扩大再到坍塌是一个长期而渐进的过程。

黄土高原地区发育的黄土暗穴形状多变,以圆形、狭缝状、三角形和圆拱形为主,兼有其他一些不规则形状,平坦的阶地上黄土暗穴多以圆形或自然平衡拱形式出现。一般情况下,暗穴多发育在质地疏松、孔隙发育、有各种结构面存在及欠固结的土中。从不同地质年代的黄土地层的岩性上看,存在于具有这些性质的马兰黄土  $Q_3$  和新近堆积的黄土层  $Q_4$  中。黄土暗穴主要发育在湿陷性黄土中,其发育深度受湿陷性黄土的厚度限制。湿陷性黄土厚度一般为 8~15 m,因此深度大于 20 m 的暗穴很少见到。野外调查表明,公路下伏暗穴洞径多集中在 1~2 m 以内,分布深度在 6 m 以内;有些远离公路路基河流阶地上的黄土暗穴直径可达 4~6 m,分布位置较深,但大都在 15 m 以内,暗穴发育位置如图 3 所示。

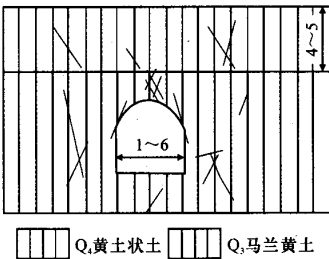


图 3 暗穴发育位置 单位:m

2 有限元计算

2.1 计算模型

依据暗穴发育特点及存在形式,建立了如图 4 所示的平面几何模型。可以认为模型是从半无限空间中“切”出的一小块体,其底部认为是假想基岩面,并假定基岩面是水平的。当地震波从底面边界输入并传至其他边界时则会产生波的反射,从而造成波的叠加。而实际上土体是向两侧和向下无限延伸的,地震波不会因遇到人为截取的边界产生反射。为消除这一影响,将模型边界宽度设置在距暗穴尺寸 10 倍以外的地方。

暗穴横断面的形状采用固定宽高比为 1:1 的拱形,模型大小为 60 m×60 m。为考察不同直径和埋深两种情况下暗穴在地震荷载作用下的动力响应,

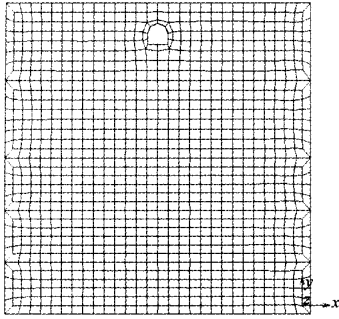


图4 有限元模型

模型分下列几种情况考虑:①洞径 2 m 时,埋深取 2、4、6 m;②洞径 3 m 时,埋深取 4、6 m;③洞径 4 m 时,埋深取 4、6 m。几何模型的网格划分采用等参四边形单元,如图 4 所示。

## 2.2 计算方法

求解动力问题的有限元矩阵微分方程为

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + K\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

式中: $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{u}}(t)$  和  $\mathbf{u}(t)$  分别是系统的节点加速度向量、速度向量和位移向量; $M$ 、 $C$ 、 $K$  和  $\mathbf{f}(t)$  分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和外力向量,取  $M$  为集中质量矩阵。

地震作用下,外力向量  $\mathbf{f}(t)$  表示为  $-M\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ ,其中  $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$  为输入地震加速度时程。 $\mathbf{f}(t)$  可以认为是由加速度  $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$  引起的力或输入荷载。

系统采用瑞利阻尼矩阵

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为质量阻尼系数; $\beta$  为刚度阻尼系数。

$\alpha$  和  $\beta$  可根据下面公式求出

$$\alpha = \frac{2(\xi_i\omega_i - \xi_j\omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)}\omega_i\omega_j$$

$$\beta = \frac{2(\xi_i\omega_i - \xi_j\omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)}$$

若  $\xi_i = \xi_j = \xi$ , 则

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}\xi \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2}{\omega_i + \omega_j}\xi \quad (4)$$

式中: $\xi$  为振型对应的阻尼比; $\omega_i$ 、 $\omega_j$  为两个不同的自振圆频率。

通常取  $i = 1$ ,  $j$  取大于或等于 2 的某个正整数。在计算时,可选取两种“贡献”较大的与振型相应的自振圆频率(本文取  $i = 1$ ,  $j = 6$ ),来确定模型的阻尼系数<sup>[10]</sup>,以综合考虑各振型的影响。

方程求解采用隐式算法 Newmark 积分法。Newmark 法采用下列假设

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_t + \left(\frac{1}{2} - \delta\right)\Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_t + \delta\Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + (1 - \gamma)\Delta t \ddot{\mathbf{u}}_t + \gamma\Delta t \ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \quad (6)$$

在  $t + \Delta t$  时刻的运动微分方程为

$$M\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + C\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + K\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{f}_{t+\Delta t} \quad (7)$$

式中: $\gamma$ 、 $\delta$  均为常数。

取  $\gamma = 1/2$  和  $\delta = 1/4$ , 此时 Newmark 隐式积分法为无条件稳定,在积分步长满足  $\Delta t \leq T_{\max}/100$  时( $T_{\max}$  为体系的最大自振周期),能使结果达到满意的精度。将式(5)、式(6)代入式(7),得

$$\left(M + \frac{\Delta t}{2}C\right)\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + C\left(\dot{\mathbf{u}}_t + \frac{\Delta t}{2}\ddot{\mathbf{u}}_t\right) + K\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{f}_{t+\Delta t} \quad (8)$$

由式(6)可得

$$\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \frac{4}{\Delta t^2}(\mathbf{u}_{t+\Delta t} - \mathbf{u}_t) - \frac{4}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_t - \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),经整理得

$$\left(K + \frac{2}{\Delta t}C + \frac{4}{\Delta t^2}M\right)\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{f}_{t+\Delta t} + C\left(\frac{2}{\Delta t}\mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t\right) + M\left(\frac{4}{\Delta t^2}\mathbf{u}_t + \frac{4}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_t + \ddot{\mathbf{u}}_t\right) \quad (10)$$

由式(10)解出  $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$  后,代入式(9)可解出  $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ ,然后可由式(6)解出  $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ 。

## 2.3 材料参数

将黄土视为弹塑性材料,采用 Drucker-Prager 屈服准则(简称 D-P 准则)。黄土的材料参数取值见表 1。

表1 黄土材料特性参数

弹性模量 / MPa	密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	阻尼比	泊松比	粘聚力 / kPa	摩擦角 / ( $^\circ$ )
60	1 650	0.1	0.35	30	25

## 3 地震波的选择和施加方法

在利用地震波对结构进行非线性反应分析时,应充分考虑结构所在场地的特征和近震及远震情况,合理选用与其相适应的地震波。由于记录到的地震波的幅值并不一定与进行地震动力反应分析所需的地震动幅值相一致,因此在进行分析前,需对地震记录进行适当的幅值调整,使其满足分析所需的数值大小。

图 5 是最具有代表性的 1940 年 5 月 18 日测得的美国帝国谷南北分量强震记录,地震持续时间为 53.73 s,采样间隔 0.02 s,最大峰值为 341.7  $\text{cm/s}^2$ ,发生在 2.12 s 处。该地震波的频谱很广,高频部分频带较宽。

一般认为,地震动是从底部边界传递到模型体系中的,也就是说,模型的震动是由底部边界的运

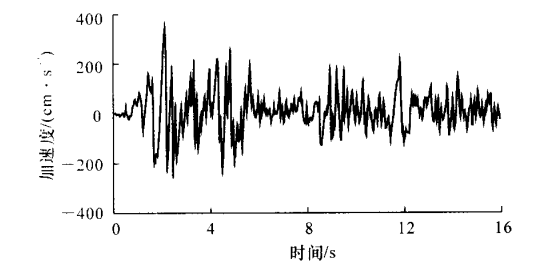


图5 EL-Centro地震波(1940年5月18日,南北分量)

动激起的。实际情况下,地基地部固定,地震波从基岩面输入引起上部土层的振动。为模拟地震荷载下暗穴的动力响应,将地震波从底部沿水平向输入,只考虑模型的水平向振动,侧面及底面施加竖向约束,顶面为自由表面。

4 计算结果与分析

首先采用 Lanczos(兰索斯)算法对体系进行模态(振型)分析,求出前十阶振型的特征周期。计算选取两种“贡献”较大的与振型相应的自振圆频率来确定模型的阻尼系数。例如,对洞径3 m、4 m的暗穴模型进行模态分析,得出第一振型圆频率 $\omega_3 = 3.793$ ,第六振型圆频率 $\omega_6 = 16.502$ ,则最大自振周期为 $T_{\max} = 1.67$  s,由式(3)、式(4)可知,瑞利阻尼参数 $\alpha = 0.616$  9, $\beta = 0.009$  9。计算时,截取EL-Centro地震波的前16 s,并根据陇西地区地震动特点和地震区划分布特点,将其幅值调整到0.09g作为基底入射波。计算的时间步长 $\Delta t$ 取为0.01 s ( $\leq T_{\max}/100 = 0.016$  7 s),共计算1 600 步时。

表2给出了暗穴在输入EL-Centro地震波后在地表处出现的应力峰值。由表2可知,相同洞径的暗穴,埋深越浅,在地面处引起的应力幅值越大;对于埋深相同的暗穴,则洞径越大,在地面处引起的应力幅值越大。这说明暗穴直径大、埋深浅时,在遭受地震作用时最不易于稳定。

表3给出了暗穴洞顶处的水平加速度峰值,可

表2 地表处的应力峰值				
洞径/ m	埋深/ m	地震荷载引起的 最大水平主应力/ kPa	地震荷载引起的 最大垂直主应力/ kPa	地震荷载引起的 最大剪应力/kPa
2	2	0.003 2	-0.006 6	-2.246
	4	-0.003 0	-0.002 0	-1.582
	6	-0.005 1	0	-1.187
3	4	-0.015 2	0.017 5	-3.449
	6	-0.001 2	-0.001 5	-2.799
4	4	0.042 0	-0.023 0	-5.205
	6	-0.006 5	-0.005 1	-4.433

见暗穴的存在对水平加速度峰值有一定的放大效应。如果以洞径2 m、埋深2 m和4 m的暗穴洞底(距地表同一高度)处的水平加速度峰值 $1.34$   $\text{m/s}^2$ 和 $1.23$   $\text{m/s}^2$ 为基准,则暗穴洞顶处的水平加速度峰值放大率可用图6表示。由此可见,相同洞径的暗穴,埋深越浅,洞顶处加速度峰值的放大效果越明显;若埋深相同,则洞径越大,放大效果越明显。图7为洞径3 m、埋深4 m的暗穴洞底、洞顶和地面点的水平加速度时程。

埋深/m	不同洞径(m)时的加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )		
	2 m	3 m	4 m
4	1.516	1.563	1.599
6	1.299	1.399	1.434

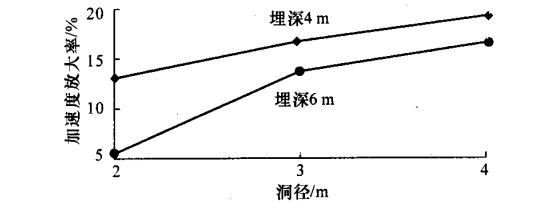


图6 加速度放大率与暗穴洞径的关系

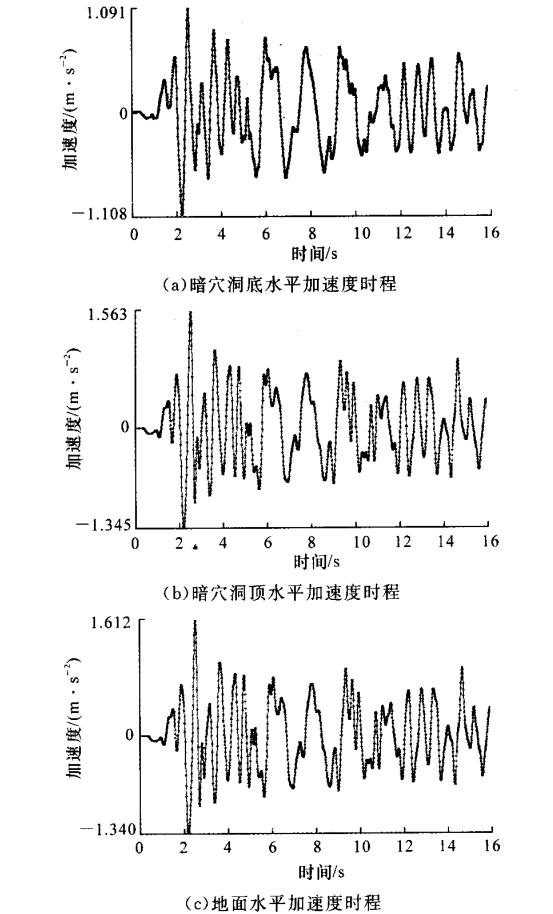


图7 暗穴洞底、洞顶和地面水平加速度时程

图 8 是从 1 600 时步中选出的等效应力与屈服应力比值最大的云图。由图 8 可以看出,由于暗穴的存在,在地震作用下洞壁周围出现应力集中状态,洞室底部角点及侧壁与上部圆拱的拐角处尤其明显,顶部有向上延伸的趋势,这将给岩土体稳定性造成不利影响。

时步: 255  
时间: 2.550 s

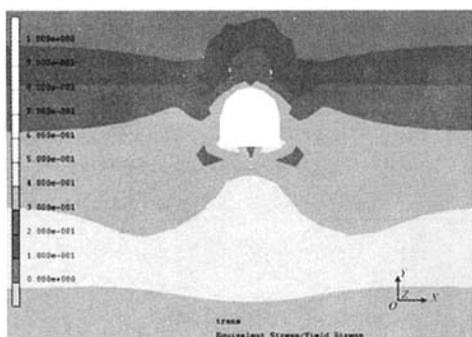


图 8 等效应力与屈服应力的比值云图(洞径 3 m、埋深 4 m)

## 5 结 语

(1)暗穴的存在对水平加速度峰值有一定的放大效应;洞径越大,在地面处引起的应力幅值越大,表明洞径越小、埋藏越深的暗穴在地震荷载作用下的稳定性相对越好。

(2)地震荷载作用下,暗穴的洞壁周围产生应力集中,这是造成暗穴顶板坍塌的因素之一。如果暗穴从公路底部穿过,当地震来临时,则会对公路路基的稳定性造成不利影响。

(3)几种工况在地震荷载作用下均未发生土体材料的屈服,说明地震发生时,暗穴顶板的塌落是由突发性的暗穴结构稳定性丧失引起的,而不是由土体材料的屈服渐次发展引起的。

### 参考文献:

### References:

- [1] 齐矗华. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究[M]. 西安:陕西人民教育出版社, 1991.
- [2] 王景明, 卜 臣. 黄土喀斯特与水土流失灾害[J]. 中国水土保持, 1990, (1): 18-22.  
WANG Jing-ming, BU Chen. Loess Karst and soil and water losses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1990, (1): 18-22.
- [3] 王景明, 卜 臣. 黄土喀斯特与水土流失灾害(续)[J]. 中国水土保持, 1990, (2): 32-33.  
WANG Jing-ming, BU Chen. Loess Karst and soil and water losses (continued) [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1990, (2): 32-33.
- [4] 彭建兵, 陈立伟, 邓亚虹, 等. 车辆荷载作用下黄土暗穴对路基稳定性影响的数值分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 17-22.  
PENG Jian-bing, CHEN Li-wei, DENG Ya-hong, et al. Numerical analysis of subgrade stability influenced by hidden holes in loess under dynamic load of vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 17-22.
- [5] 石玉成, 李 兰, 刘红梅. 黄土的震陷性与其微结构特征的关系研究[J]. 西北地震学报, 2002, 24(2): 130-134.  
SHI Yu-cheng, LI Lan, LIU Hong-mei. Study on the relation of loess seismic subsidence and its microstructure characters [J]. Northwestern Seismological Journal, 2002, 24(2): 130-134.
- [6] 孙 萍, 彭建兵, 范 文, 等. 黄土地区公路暗穴顶板临界厚度的确定方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 12-17.  
SUN Ping, PENG Jian-bing, FAN Wen, et al. Methods on defining critical thickness of hidden cave's roof of highway in loess area[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 12-17.
- [7] 陈国兴, 张克绪, 谢君斐. 黄土窑洞抗震性能分析[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995, 28(1): 15-22.  
CHEN Guo-xing, ZHANG Ke-xu, XIE Jun-pei. Seismic performance analysis of the cave dwelling on the loess precipice [J]. Journal of Harbin Construction Engineering Institute, 1995, 28(1): 15-22.
- [8] 高 峰, 任 侠. 黄土窑洞地震反应分析[J]. 兰州铁道学院学报: 自然科学版, 2001, 20(3): 12-18.  
GAO Feng, REN Xia. Seismic responses analysis of a loess cave [J]. Journal of Lanzhou Railway University: Natural Science Edition, 2001, 20(3): 12-18.
- [9] 石 刚, 王晋国, 支喜兰, 等. 黄土地区公路工程地基承载力分区计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(4): 48-52.  
SHI Gang, WANG Jing-guo, ZHI Xi-lan, et al. Calculation method of foundation bearing capacity based on division in loess area for highway engineering[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 48-52.
- [10] 潘昌实. 隧道力学数值方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.