

文章编号:1001-4810(2009)03-0275-06

ANSYS 在土洞演化预警中的应用

章秀玲^{1,2}, 严明¹, 蒋小珍²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要:以桂林某高速公路为工程依托点,在全面分析现有高速公路覆盖地区的岩溶土洞的监测预警技术的基础上,选取TDR监测技术作为主要研究手段,并用ANSYS模拟了TDR监测全过程。模拟结果表明,在基岩面以上厚5.0 m左右的土层中发育有土洞且直径3.0 m以上时,可能对地面造成破坏,当土层厚度不变(5.0 m),梁的截面尺寸一定(8 cm×6.5 cm),土洞沿基岩面慢慢往上发育时,随着土洞发育直径的不断增大,地面变形也就越明显,且变形趋势呈缓慢的直线型;当土洞直径为2.0 m,埋深为4.0 m,或土洞直径为4.0 m,埋深为3.0 m时,梁埋深从2.0 m开始,其变形趋于平缓;当土洞直径为3.0 m时,埋深为3.5 m,梁埋深从1.0 m到3.0 m,其变形量基本相当;当土洞直径为5.0 m,土洞顶板埋深为2.5 m,梁埋深分别为1.0 m、2.0 m,其基本保持一致,分别为 6.74×10^{-2} m、 6.75×10^{-2} m,即达到极限平衡状态,说明监测梁布设在距离土洞顶板2 m范围内时,可比较有效地监测到土洞变形破坏的演化趋势。

关键词:岩溶路基;ANSYS;土洞演化预警

中图分类号:P642.26

文献标识码:A

0 引言

岩溶土洞(塌陷)在我国西南覆盖型岩溶区极其普遍,是线性工程建设面临的、难以解决的岩溶路基病害问题,严重影响工程的建设 and 安全运营。岩溶土洞的发育具有隐蔽性、累积性,由其引起的塌陷具有突发性,给防治工作带来了很大的困难。由此,对岩溶土洞(塌陷)的预报、预警十分重要。目前在岩溶土洞预警预报中使用最多的、最有效的是分布式TDR及BOTDR技术,这两种技术可有效确定塌陷的空间位置^[1]。

TDR技术监测岩溶土洞(塌陷)主要是利用同轴电缆的破坏机制监测原理,即断点测量。其方法是通过同轴电缆与水泥砂浆胶结,按照土洞发育规模的统计,在可能发现土洞(塌陷)地段按一定间隔水平布置同轴电缆,在上覆土层荷载的作用下,当土洞发育到一定规模时,被水泥砂浆胶结的同轴电缆将断裂,通

过检测TDR电缆的特征信号,就可以判断出土洞的确切发生位置^[2~4]。

但是如果测线电缆埋藏过浅,当监测到土洞时,已经造成了对地面的破坏,失去了监测的意义;如果埋藏过深,加大了开挖的难度,增加了成本。本文拟通过ANSYS模型计算出一定土层厚度条件下最佳测线电缆的尺寸和埋设深度。

1 基础理论

本文采用的是理想弹塑性模型。有限元分析软件ANSYS采用德洛克(Druker)和普拉格(Prager)提出的广义米塞斯准则,即Druker-Prager准则^[5]:

$$\beta I_1 + \sqrt{J_2} = k_f \quad (1)$$

式中: β 、 k_f 为材料常数; I_1 为第一应力不变量, J_2 为第二应力偏量不变量。

基金项目:国土资源部百人计划项目“线性工程岩溶土洞(塌陷)监测预警技术研究”、岩溶所所控项目“岩溶塌陷灾害防治开放实验室建设”

第一作者简介:章秀玲(1984-),女,成都理工大学在读硕士研究生,研究方向:地质工程。E-mail:ninixiu@qq.com。

收稿日期:2009-02-27

在忽略硬化规则的影响条件下, β, k_f 分别为:

$$\beta = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (2)$$

$$k_f = \frac{6c \cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (3)$$

式中: c 为材料的粘聚力, φ 为材料的内摩擦角。屈服函数为:

$$F = \beta I_1 + \sqrt{J_2} - k_f \quad (4)$$

其屈服面是摩尔-库仑屈服准则外角点的外接圆, 见图 1。

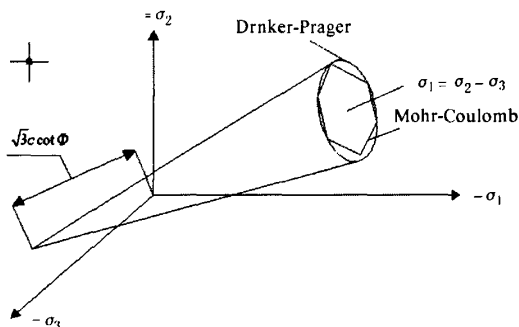


图 1 摩尔-库仑和 Drucker-Prager 准则

Fig. 1 Moore-Coulomb criteria and the Drucker-Prager criteria

建立在强度缩小有限元分析基础上的土体稳定分析的基本原理是将土体强度参数粘聚力 c 和摩擦系数 $\tan\varphi$ 同时除以一个折减系数 F_s , 得到一组新的 c' 和 φ' 值。然后作为一组新的材料参数输入, 再进行有限元计算。当计算不收敛时, 对应的 F_s 就为土体的最小安全系数, 此时土体达到极限状态, 发生剪切破坏, 同时可得到临界破裂面。

ANSYS 提供了岩土的非线性弹塑性模型, 模型遵循 Drucker-Prager 准则, 适应于相关联流动法则或不相关联流动法则(根据剪胀角 Ψ' 值确定)。采用八节点四边形单元(每个单元有四个高斯点), 在重力荷载作用下刚度矩阵的生成和应力重分配的算法都采用这种单元。假定土体开始为弹性的, 模型在网格内所有高斯点生成正应力和剪应力。然后将这些应力与 Drucker-Prager 准则相比。如果特定高斯点上的应力在 D-P 破坏圆锥内, 则该点仍然是弹性的。如果位于圆锥上或者圆锥外, 则该点处于屈服状态。利用弹塑性算法, 屈服应力在网格中被充分分配。当足够数目的高斯点发生屈服使机制发生变化时, 即认为发生了整体剪切破坏。

本研究采用的土体物理力学参数包括 6 个参数,

即摩擦角 φ 、粘聚力 c' 、剪胀角 Ψ' 、杨氏模量 E' 、泊松比 μ' 、容重 γ' 。

土体的安全系数是这样定义的: 为了使土体达到破坏, 给原始的剪切强度除以一个数, 这个数就是安全系数 F_s 。则经过折减后的剪切强度参数 c'_f 和 φ'_f 变为:

$$c'_f = c'/F_s \quad (5)$$

$$\varphi'_f = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right) \quad (6)$$

土体的稳定极限平衡法采用摩尔-库仑屈服准则, 安全系数定义为沿破裂面的抗剪强度与破裂面上的实际剪力的比值, 用公式表示如下:

$$F_s = \frac{\int (c' + \sigma'_n \tan\varphi) d\Gamma}{\int \tau d\Gamma} \quad (7)$$

将上式两边同时除以 F_s , 则式(7)变为:

$$1 = \frac{\int \left(\frac{c'}{F_s} + \sigma'_n \frac{\tan\varphi}{F_s}\right) d\Gamma}{\int \tau d\Gamma} = \frac{\int (c'_f + \sigma'_n \tan\varphi'_f) d\Gamma}{\int \tau d\Gamma} \quad (8)$$

上式左端等于 1, 表明当材料强度折减 F_s 以后, 土体达到极限状态。

在指定的最大迭代次数内, 如果算法不能收敛, 就意味着没有出现既能满足 D-P 破坏准则又能满足整体平衡的应力分布状态。如果算法不能满足这些准则, 则说明破坏已经发生。如果土体破坏和数值上的不收敛同时发生, 网格中节点位移将显著增加。因此, 可用位移的网格图和向量图来显示安全系数和破坏机制的特性。

2 模型的建立

2.1 地质模型

研究区位于桂林某高速公路路段内, 属峰林平原地貌类型, 地形较平缓, 略有起伏, 海拔高程 151~155 m, 区内原为水田、菜地。属中亚热带湿润季风气候, 气候温和, 雨量充沛, 年均降雨量 1 926 mm。区内覆盖土层为第四系的坡、残积的红粘土层, 呈棕红~棕黄色, 土质均匀性差, 状态以可塑~硬塑为主, 在溶槽处的土层往往呈软塑状。覆盖土层厚度为 3~5 m, 但在溶槽处厚度可达 10 m 以上^[1]。

下伏基岩为泥盆系上统桂林组白云质灰岩。受区域构造的影响, 岩体节理、裂隙非常发育, 岩溶土洞发育强烈。

通过取样试验, 选择模型材料的物理力学参数平

均值如表1所示。

表1 计算模型材料参数
Tab.1 Calculation of model material parameters

材料 介质	弹性 模量	波松比 μ	内聚力 /kPa	内摩擦角 /°	容重 /g/cm ³
土层	20	0.4	100	19	1.810
梁	22000	0.2	—	—	2.100
基岩	40	0.33	80	28	1.950

在土洞发育区地下不同深度水平铺设混凝土梁如图(2),通过定期测量梁的变形,以了解梁下土体中土洞的发育情况。

2.2 ANSYS 模型实验

梁用静力状态下beam 2rode 188 模拟,土层用平面二维应力平面模拟,在模型的两个竖直边上施加水平方向的约束;底边和梁的两端施加全约束;以使构件在自重应力下发生变形(图3)。

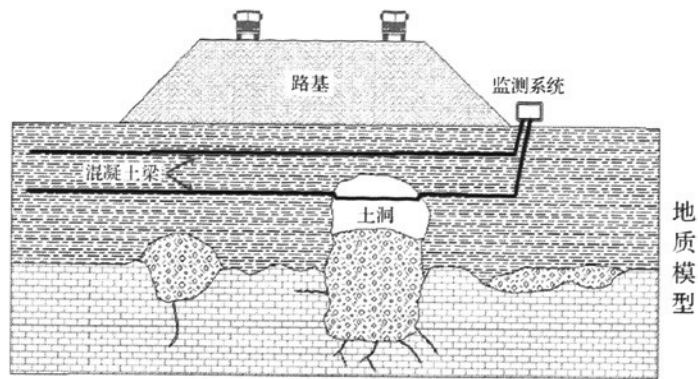


图2 监测原理

Fig.2 The principle of monitoring

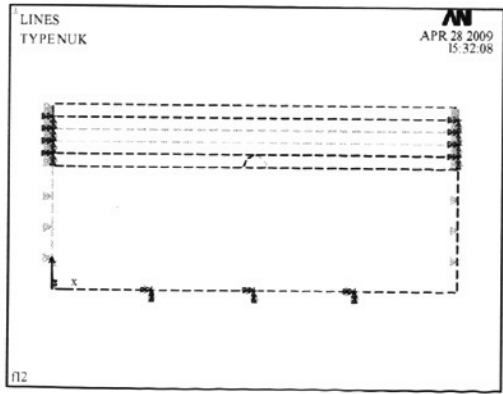


图3 模型受力分析图

Fig.3 Stress distribution in the model

构建模型总厚度15.0 m,其中基岩层厚10.0 m,土层厚度5.0 m,土洞沿基岩面开始发育,发育大小从直径2.0 m、3.0 m、4.0 m、5.0 m 递增;布置梁监测从地表面往下逐米布设,即地面以下1 m、2 m、3 m、4 m 分别布设监测梁,直到碰到土洞发育为止。共建立了4个工况下的模型(表2)。

表2 工况参数
Tab.2 Condition parameters

工况	土层厚度 /m	土洞直径 /m	梁的截面尺寸 /cm ²	梁的埋深 /m
工况一	4.000	2.000	8×6.5	1.000
				2.000
				3.000
				4.000
工况二	3.500	3.000	8×6.5	1.000
				2.000
				3.000
工况三	3.000	4.000	8×6.5	1.000
				2.000
				3.000
工况四	2.500	5.000	8×6.5	1.000
				2.000

3 结果分析

本次 ANSYS 计算共计算了四种工况条件下监测梁的变形,结果如下表3 所示。模型变形云图如图4 所示。该图反映了在自重条件下土体的垂直变形(uy)特征,且在土洞正上方,垂直变形最明显,往两边逐渐减弱。

表 3 四种工况下梁变形的计算结果

Tab. 3 Results of the beam deformation on four different conditions

工况	土洞埋深 /m	土洞直径 /m	梁的截面 尺寸/cm ²	梁的埋深 /m	梁的最大 变形/m	地面垂直方向 上的总变形/m
工况一	4.000	2.000	8×6.5	1.000	0.047	0.053
				2.000	0.051	
				3.000	0.052	
				4.000	0.053	
工况二	3.500	3.000	8×6.5	1.000	0.056	0.057
				2.000	0.056	
				3.000	0.057	
工况三	3.000	4.000	8×6.5	1.000	0.058	0.061
				2.000	0.061	
				3.000	0.061	
工况四	2.500	5.000	8×6.5	1.000	0.067	0.067
				2.000	0.068	

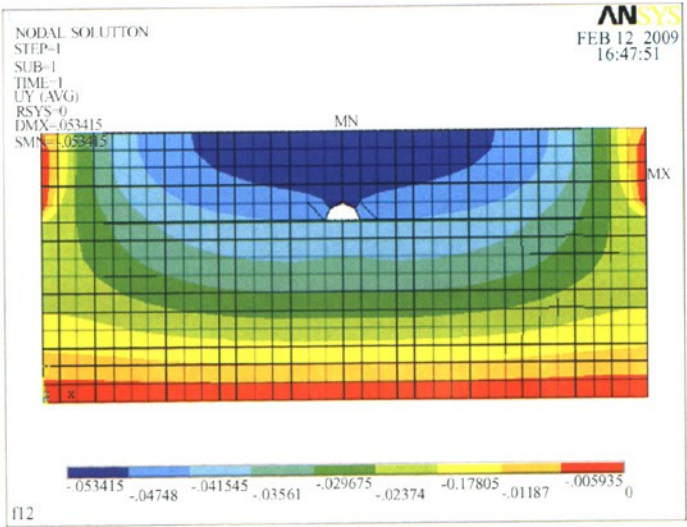


图 4 自重条件下 ANSYS 土体垂直变形云图

Fig. 4 Vertical deformation nephogram of ANSYS soil under the dead weight conditions

(1)四种工况下土层的总变形如下图(图5)所示,即当土层厚度不变(5.0 m),梁的截面尺寸一定(8 cm×6.5 cm),土洞沿基岩面慢慢往上发育时,随着土洞发育直径的不断增大,地面变形也就越明显,且变形趋势呈缓慢的直线型,斜率大约为0.004。

(2)当土层厚度一定(5.0 m),土洞发育大小保持不变时,梁截面的尺寸一定(8 cm×6.5 cm),不同埋设深度下的梁变形如图6所示。从该图可以看出:

在工况一中,即土洞直径为2.0 m,埋深为4.0 m,梁的埋深从1.0 m到4.0 m,变形量由 4.7×10^{-2} m到 5.33×10^{-2} m。其中从2.0 m深开始,梁的变形趋于平缓,即图中直线斜率趋于0。

在工况二中,即土洞直径为3.0 m时,土洞埋深为3.5 m,梁的埋深从1.0 m到3.0 m,变形量分别为 5.62×10^{-2} m、 5.62×10^{-2} m、 5.7×10^{-2} m,工况二中三根梁的变形基本一样,变形直线呈水平状。

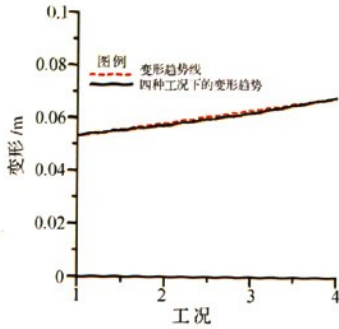


图5 四种工况下土层的总变形趋势

Fig. 5 Total deformation trend of soil layer on four conditions

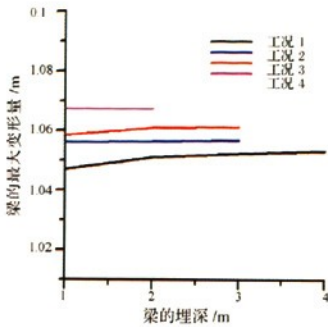


图6 土洞直径不变时,不同埋深条件下梁的变形特征图

Fig. 6 Map of deformation characteristics of the beam at different depths under the conditions of soil cave in constant diameter

在工况三中,即土洞直径为4.0 m,土洞埋深为3.0 m,梁的埋深从1.0 m到3.0 m,变形量分别为 5.86×10^{-2} m、 6.14×10^{-2} m、 6.14×10^{-2} m,梁的埋深从2.0 m开始变形趋于平缓,直线变形斜率向0趋近。

工况四中,即土洞直径为5.0 m,土洞顶板埋深为2.5 m,埋深分别为1.0 m、2.0 m,变形分别为 6.74×10^{-2} m、 6.75×10^{-2} m,即梁的变形达到极限平衡状态,所以两根梁的变形量基本保持一致。

(3)从图7中可以看出,在梁埋深都一致的情况下,随着土洞的不断发育及变形不断加大,土洞直径发育到3.0 m时与梁埋深在2.0 m的范围内变形重合。由此说明在基岩面以上5.0 m左右的土层中发育

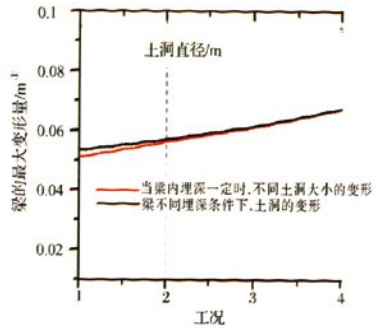


图7 两种变形(土洞直径发育到3.0 m 时与梁埋深在2.0 m 的范围内变形)计算结果图

Fig. 7 Figure showing the calculating results for soil cave deformation under the conditions of soil cave diameter 3.0 m and beam depth 2.0 m

有土洞,当土洞直径达3.0 m 以上时,对地面可能造成破坏,而监测梁布设在距离土洞顶板2 m 范围内时,可有效地监测到土洞变形破坏的演化趋势。

4 结论及建议

(1) 有限单元法不需要做任何假定,计算模型不仅满足力的平衡方程,而且满足土体的应力应变关系,计算结果可靠。有限元法能分析各种复杂形状、多种土体性质下产生的土洞。

(2) 建立在强度缩小有限元分析基础上的土洞演化预警,梁的变形破坏本身就是应力变形破坏的结果,通过位移变形量可以转化为监测系统的抗折强度,从而达到监测预警的效果。利用ANSYS的后处理功能可以直观地显示出模型前后的变形破坏结果。

(3) 计算模型的建立,如计算范围、边界条件、网格划分的粗细应满足有限元计算的精度,如果网格划分太粗,将会影响到计算的精度,造成较大的误差。

(4) 应采用建立在强度缩小有限元分析基础上的土洞演化预警的基本原理,通过ANSYS提供的非线性弹塑性模型进行土洞演化预警计算是可行的。

参考文献

- [1] 李瑜,雷明堂,蒋小珍.广西黎塘岩溶塌陷监测[J].中国岩溶,2006,25(4):309-346.

①因监测梁埋设于土洞上方的土层中,土洞发展将引起土体变形和监测梁变形,所以图中的监测梁变形量就是同等位置上土层的变形量。

- [2] 蒋小珍, 雷明堂, 李瑜. 岩溶水作用下填石路基稳定性模型试验[J]. 中国岩溶, 2005, 24(2):96—102.
- [3] 彭建国. 填石路堤变形观测方案设计与实施[J]. 中国岩溶, 2005, 24(2):135—139.
- [4] 刘雄. 光纤传感技术在岩土力学与工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5):102—116.
- [5] 郝文化. ANSYS 土木工程中应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005(4):54—58.

Application of ANSYS to early warning of soil cave evolution

QIN Xiu-ling^{1,2}, YAN Ming¹, JIANG Xiao-zhen²

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: This paper took a highway in Guilin as a study case, chose TDR monitoring technology as a major research tools and used ANSYS to simulate the TDR to monitor the entire process, based on the comprehensive analysis on the existing early warning technology of the karst soil cave along highway covered area. The simulation results show that it may cause damage to ground surface if there is soil cave with a diameter of more than 3.0 m in the earth layer, which is 5.0 m or so away from the bed rock surface. If the layer thickness (5.0 m) and beam cross-section size (8 cm × 6.5 cm) remains unchanged, ground deformation will be more obvious, and the deformation will presents as a slow linear trend, as the soil cave is growing upward slowly along the bed rock surface and its diameter keep on increasing. If the soil cave is 2.0 m long and 4.0 m deep, or it is 4.0 m long and 3.0 m deep, beam deformation tend to stability when it is buried at 2.0 m to 4.0 m depth. If the soil cave is 3.0 m long and 3.5 m deep, beam deformation are almost the same when it is buried at a depth of 1.0~3.0 m. If the soil cave is 5.0 m long and it's roof is 2.5 m deep, beam deformation, which is 6.74×10^{-2} m and 6.75×10^{-2} m respectively, are basically the same when beam buried at 1.0 m and 2.0 m depth, which is also mean that it has reach the limiting equilibration. So it can more effectively monitor the soil deformation and the hole evolution trend that monitoring beams are laid within a depth of 2 m from the roof of soil cave.

Key words: karst subgrade; ANSYS; early warning of soil cave evolution