

基于数值模拟的地下洞室施工安全预警指标

王建敏¹, 任青文¹, 杨 印²

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 事先确定地下洞室开挖的安全预警指标以便及时采取工程措施, 是确保围岩稳定的关键. 根据洞室所在区域的工程地质资料建立地下洞室开挖的有限元模型, 通过非线性分析, 获得不同地质地段洞室断面的位移发展曲线, 结合相关规范对围岩变形容许值的规定, 以容易量测的洞室周边位移为对象, 确定了地下洞室开挖的安全预警指标. 最后, 建立了一个圆形地下洞室数值模型, 求解了4组围岩状态下地下洞室的安全预警指标, 并与围岩塑性区发展情况对比, 说明了利用数值模拟方法结合相关规范确定地下洞室施工安全预警指标可以用于判断洞室安全程度, 也验证了地下洞室施工安全预警指标确定方法的可行性.

关 键 词: 地下洞室; 安全预警指标; 数值模拟

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)02-0020-05

地下洞室赋存的地质环境是一个内部信息部分已知、部分未知的灰色系统^[1], 它在建设过程中不可预见的因素较多, 是一个极其复杂的系统工程. 研究^[2-5]表明, 许多地下洞室在施工过程中发生塌方、大变形等安全事故, 其重要原因是缺少合理的洞室施工安全预警指标, 并且不能及时采取工程加固措施所致. 武世婷等^[3]认为大型水电工程建设中的地下洞室设计和支护复杂而无规范可循, 现有大部分工程仍然遵循“经验设计, 经验施工”的原则, 这也说明地下洞室预警系统及预警指标仍是需要研究的重要课题.

国内外对地下洞室施工安全预警指标的确定方法主要有: 工程类比法^[2]、规范法、数值计算法和数据统计法^[2]等. 工程类比法和规范法不能针对具体工程情况分析围岩稳定性, 确定的预警指标和实际情况偏差较大. 数值计算法虽然对参数的选取依赖性大, 但可以事先给出施工安全预警指标, 供施工初期使用^[2]. 数据统计法需要对长时间的海量监测数据进行统计分析, 工作量大且无法提前给出.

基于施工过程中的地质勘测数据建立有限元模型对围岩的稳定性进行评价的方法已得到广泛应用, 但对预警指标的定量研究较少^[5]. 因此, 本文基于有限元数值模拟^[6]和相关规范综合确定洞室开挖的安全预警指标, 在地下洞室施工过程中, 根据实时监测的数据, 对提前给出的安全预警指标予以调整, 从而更好地指导施工.

1 地下洞室施工安全预警指标的确定

预警指标通常包括结构的位移、应力应变以及渗流等^[7], 由于位移容易量测, 且有限元分析的位移精度较高, 因此以位移为对象进行预警指标研究. 根据洞室所在区域的工程地质资料建立地下洞室开挖的有限元模型, 通过非线性分析获得不同地质段的不同洞室断面的位移随开挖长度的变化, 分析各断面的相对位移收敛情况^[8-9], 并结合相关规范关于位移容许值的规定, 最终确定洞室开挖的安全预警指标.

收稿日期: 2012-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079045);《特大地下洞室群施工安全环保关键技术研究与应用》重大专项;江苏省2011年度普通高校研究生科研创新计划资助项目(1044-B11054)

作者简介: 王建敏(1985-), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事地下洞室安全预警研究. E-mail: haimi85@163.com
通信作者: 任青文(E-mail: renqw@hhu.edu.cn)

1.1 地下洞室开挖的数值模拟

一般而言,地下洞室的破坏是由于施工开挖引起的应力重分布超过围岩强度或引起围岩变形过大所致.从力学角度看,围岩失稳是因围岩应力达到或超过岩体强度的范围较大,最后形成一片连续贯通的塑性破坏区,岩体产生过大的变形^[10].有限元法具有良好的适应性、通用性和灵活性,可以解决各种复杂的力学问题^[11],利用有限元软件模拟开挖过程,可以清楚地显示洞室围岩的应力变形状态和塑性区的变化情况,具有传统的稳定性评价难以企及的优点.

1.1.1 有限元模型的建立 根据地下洞室所在区域的地质剖面图,建立其有限元计算模型.由于地下洞室一般埋藏在岩体深部,为了保证有限元计算的精度,需要较大的计算范围,通常应不小于岩体工程轮廓尺寸的3~4倍^[6].根据洞室沿线围岩的不同地质条件对模型分段,每一段的岩体物理力学参数相同,每段至少取1个断面作为位移的计算断面.根据经济条件和计算工作量来确定网格的疏密程度,计算断面位置必须设置网格节点,距离开挖体较远的位置单元可以稍大,接近开挖体需要对单元加密.

模型需要的岩体和结构面物理力学参数,应通过现场和室内试验取得.当无实测数据时,各级围岩物理力学参数和岩体结构面的黏结力及内摩擦角,可采用表1中的数值^[12].

表1 岩体物理力学参数
Tab.1 Parameters of the rock

围岩级别	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗剪断峰值强度		变形模量/ GPa	泊松比
		内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa		
I	26.50	>60	>2.1	>33.0	>0.20
II		60~50	2.1~1.5	33.0~20.0	0.20~0.25
III	26.54~24.50	50~39	1.5~0.7	20.0~6.0	0.25~0.30
IV	24.50~22.50	39~27	0.7~0.2	6.0~1.3	0.30~0.35
V	<22.50	<27	<0.2	<1.3	<0.35

1.1.2 初始地应力场的确定 洞室开挖过程中,导致围岩变形的主要原因是初始地应力引起的开挖荷载,因此首先要确定洞室所在区域的初始地应力场.如果该区域有实测地应力点,则可通过反演确定地应力场;如无,则可近似采用自重应力场.值得注意的是,围岩在地应力作用下初始的位移须归零,故需要对围岩做初始地应力平衡.

1.1.3 有限元计算及结果分析 依据建立的有限元模型,模拟洞室开挖的过程,提取每个计算断面的竖向和水平相对位移,即把开挖到 L 处与开挖到该断面时的位移相减得到值 u ,随着开挖掌子面的向前推进,绘制 $u-L$ 曲线.在洞室开挖过程中,根据 $u-L$ 曲线的变化情况,若计算断面的相对位移逐渐收敛,则将该断面定为收敛断面确定预警指标;若计算断面的相对位移不收敛,则将该断面定为不收敛断面确定预警指标.

1.2 关于围岩位移容许值的相关规定

目前相关规范对无支护的地下洞室周边允许相对位移容许值没有具体规定,故借用了《锚杆喷射混凝土技术规范》^[12]关于有支护隧洞的位移相对值的规定.根据实际地质资料建立有限元计算模型,计算使围岩保持稳定的位移容许值,参考规范^[12]规定综合确定围岩的安全预警指标.

《锚杆喷射混凝土技术规范》^[12]指出,根据勘测地质资料确定围岩级别,对于高跨比为0.8~1.2的一些地下工程(Ⅲ级围岩跨度不大于20 m,Ⅳ级围岩跨度不大于15 m,Ⅴ级围岩跨度不大于10 m的地下洞室),隧洞周边的实测位移相对值或用回归分析推算的最终位移相对值均应小于表2所列数据.表2中的允许位移相对值是指洞室周边径向位移之和 Δu 与洞室尺寸之比,由此可确定容许位移 $[\Delta u]$.

表 2 隧洞周边允许位移相对值

Tab. 2 Allowable relative displacement of the tunnel rock

围岩级别	埋深<50 m	埋深=50~300 m	埋深>300 m
Ⅲ	0.10~0.30	0.20~0.50	0.40~1.20
Ⅳ	0.15~0.50	0.40~1.20	0.80~2.00
Ⅴ	0.20~0.80	0.60~1.60	1.00~3.00

1.3 预警指标的确定方法

位移是岩体结构在开挖或变形过程中反馈出的一个重要信息,通过对岩体结构位移的实时监测可以及时了解结构稳定状态的变化,既可以按照需要对其进行稳定性控制,又可以利用位移反分析预测岩体结构和荷载的未来变化^[13].下面将根据计算断面位移与开挖长度关系即 $u-L$ 曲线的形状以及规范的容许相对位移值确定洞室开挖的安全预警指标.

1.3.1 预警指标的分级 根据统计资料,地下洞室群从开挖到失效,通常经历 3 种状态:(1)正常状态,指地下洞室能达到设计要求,不存在影响正常使用的缺陷,且各主要监测量的变化处于正常情况下的状态;(2)不正常状态,指地下洞室的某项功能已不能完全满足设计要求,或主要监测量出现异常,因而影响正常使用的状态;(3)失效状态,指地下洞室出现危及安全的严重缺陷,或环境中某些危及安全的因素正在加剧,或主要监测量出现较大异常,若按设计条件继续运行将出现重大事故的状态.破坏是失效状态的一种特例.因而,将地下洞室施工安全预警指标分为二级:地下洞室由正常状态进入不正常状态的临界位移值作为二级预警指标,由不正常状态进入失效状态的临界位移值作为一级预警指标.

1.3.2 位移收敛断面预警指标 对于位移收敛($\partial u/\partial L \leq 0$)的断面,根据位移 Δu 和规范规定的位移容许值 $[\Delta u]$ 的大小关系可以分为以下两种情况:

(1)如果模拟开挖过程直到结束时均有 $\Delta u \leq [\Delta u]$,则以开挖结束时的变形量 Δu 作为二级预警指标,当实测位移超过该值,发出二级预警,此时施工单位应该加强位移的观测.以规范规定的该围岩变形量容许值 $[\Delta u]$ 作为一级预警指标,当实测位移接近或达到该值,就要发出一级预警,此时应该加强支护,启动应急预案,避免发生安全事故.

(2)如果模拟开挖过程直到结束时均有 $\Delta u > [\Delta u]$,则以规范规定的该围岩变形量容许值 $[\Delta u]$ 的 70%^[2] 作为二级预警指标,一级指标和其余应对措施同情况(1).

1.3.3 位移不收敛断面预警指标 对于位移不收敛($\partial u/\partial L > 0$)的断面,根据位移 Δu 和规范规定的位移容许值 $[\Delta u]$ 的大小关系可以分为以下两种情况:

(1)如果模拟开挖过程直到结束时均有 $\Delta u \leq [\Delta u]$,则需考虑围岩的流变效应,在洞室开挖结束后的一段时间内,加强该断面位移变化情况的监测.以规范规定的该围岩变形量容许值 $[\Delta u]$ 作为该断面的一级预警指标,当实测位移接近或达到该值,发出一级预警,此时应该加强支护,启动应急预案,避免发生安全事故.

(2)如果模拟开挖过程直到结束时均有 $\Delta u > [\Delta u]$,则应事先施加支护,建立新的有限元模型,进一步通过有限元分析,直到出现以上 3 种情况时确定预警指标.

2 算例分析

洞室埋深 50 m,洞径 10 m,上下左右各取 5 倍洞径,沿洞室轴线方向取 360 m.建立模型如图 1 所示,模型共剖分了 38 800 个单元,42 925 个节点.围岩为Ⅳ类岩体,取表 3 所示的几组参数进行计算,采用 D-P 屈服准则,其中的参数根据内摩擦角 φ 和黏聚力 c 换算^[14].

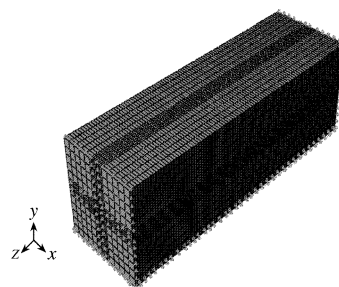


图 1 地下洞室模型

Fig. 1 A model for underground grotto

表 3 围岩参数
Tab. 3 The parameters of surrounding rock

围岩分组	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	变形模量/ GPa	泊松比 μ
1	2.1	30	0.50	3	0.35
2	2.1	27.69	0.45	3	0.35
3	2.1	25.69	0.42	3	0.35
4	2.1	24.79	0.40	3	0.35

2.1 预警指标的确定

将模型沿 Z 向分为 1~2, 2~3 和 3~4 三段, 选取 1~2 段的 $A-A$ 断面作为位移的计算断面(图 2). 分析不同围岩参数模型 $A-A$ 断面的竖向收敛位移和水平收敛位移与洞径之比, 根据《锚杆喷射混凝土技术规范》位移容许值比较, 确定预警指标.

根据设计确定的施工程序, 沿洞室轴线方向 $Z=0$ 向 $Z=360$ m 开挖, 共划分了 100 个开挖步, 每个开挖步 3.6 m. 分别绘出 4 组围岩下 $Z=18$ m 的 $A-A$ 计算断面的竖向收敛位移和水平收敛位移与开挖长度的关系曲线 $u \sim L$ (见图 3). 地下洞室埋深 50 m, 围岩为 IV 级, 根据规范隧洞周边允许位移相对值为 0.40%. 断面 $A-A$ 的预警指标见表 4.

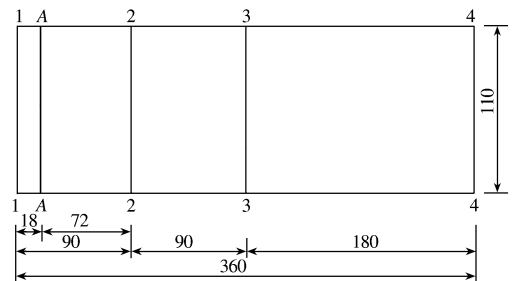


图 2 地下洞室分段示意图 (单位: m)
Fig. 2 Sections of the underground grotto (unit: m)

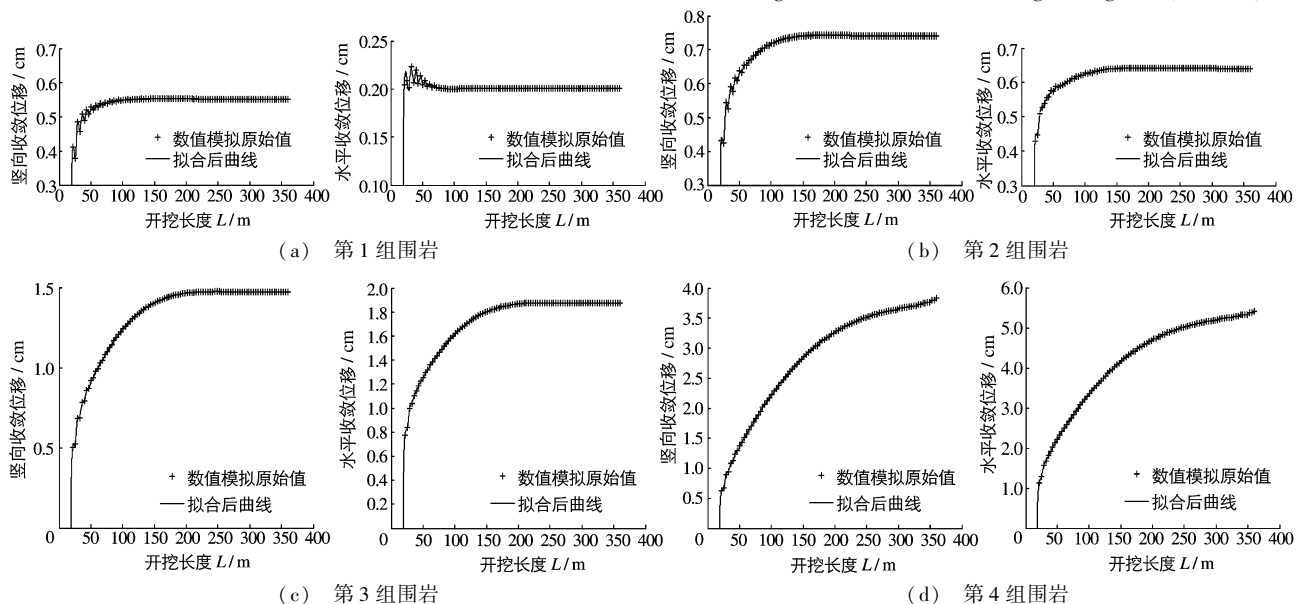


图 3 4 组围岩收敛位移与开挖长度的关系

Fig. 3 Relationships between relative displacement and excavation length of four groups

表 4 $A-A$ 断面的预警指标
Tab. 4 Early safety warning index of the section $A-A$

围岩 分组	竖直方向			水平方向			预警指标/ mm	
	位移/ mm	位移洞径之比/ %	$\frac{\partial u}{\partial L}$	位移/ mm	位移洞径之比/ %	$\frac{\partial u}{\partial L}$	二级	一级
1	5.5	0.055	≤ 0	2.0	0.020	≤ 0	5.5	40
2	7.4	0.074	≤ 0	6.4	0.064	≤ 0	7.4	40
3	14.7	0.147	≤ 0	18.8	0.188	≤ 0	18.8	40
4	38.2	0.382	> 0	54.2	0.542	> 0	—	—

注: 第 4 组围岩没有办法确定预警指标, 需要加强支护后, 重新计算和确定预警指标.

2.2 预警指标的验证

根据塑性区图 4 可以证明第 1~3 组围岩在 A-A 断面塑性区没有贯通,围岩状态较稳定,第 4 组围岩在 A-A 断面处已经出现连续的滑移面,如果不加强支护,地下洞室的稳定性很难保证,因此必须先施加支护,然后方可确定安全预警指标。

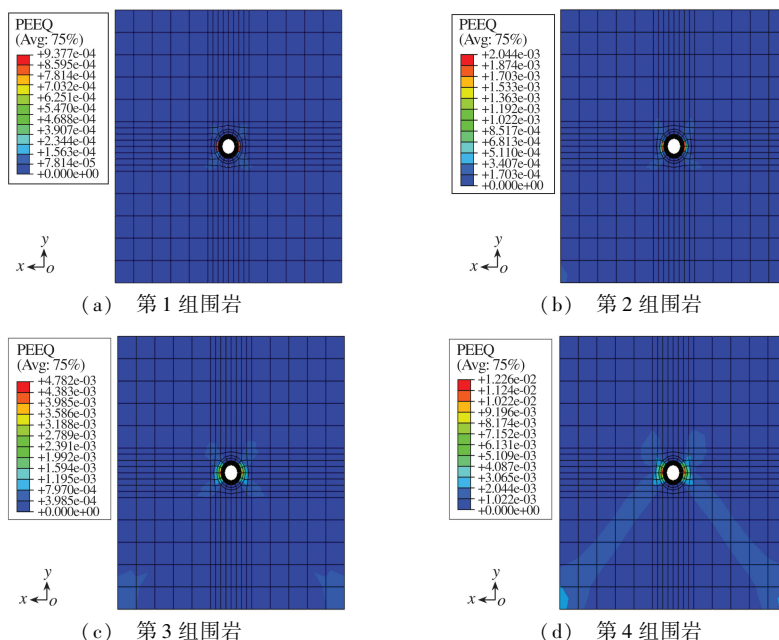


图 4 4 组围岩塑性区

Fig.4 Plastic zones of four groups

3 结 语

本文提出的基于数值计算结果、结合相关规范对地下洞室收敛位移的要求,进而确定地下洞室施工安全预警指标的方法,能够综合考虑洞室所赋存的地质环境和洞室的空间结构对围岩稳定性的影响,为地下洞室的施工提供了安全预警标准,便于施工单位及时采取工程措施确保围岩稳定。但是,有限元数值计算对岩体力学参数依赖性大,如果模拟的地质结构和取用的计算参数与岩体实际情况不同,那么所得到的安全预警指标就会存在偏差。为此,可将本文方法确定的预警指标作为初值,在施工过程中结合实测数据统计的方法,不断修正预警指标,以便达到更好的预警效果。

参 考 文 献:

- [1] 叶英. 隧道施工信息化预警[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 1-10. (YE Ying. Tunnel construction information precaution and guarantee[M]. Beijing: China Communications Press, 2012: 1-10. (in Chinese))
- [2] 刘学增, 俞文生. 隧道稳定性评价与塌方预警[M]. 上海: 同济大学出版社, 2010: 21-29. (LIU Xue-zeng, YU Wen-sheng. Stability evaluation and landslide early warning of tunnel[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2010: 21-29. (in Chinese))
- [3] 武世婷, 周广峰, 张建海, 等. 西部三大水电工程地下厂房研究比较[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 61-65. (WU Shi-ting, ZHOU Guang-feng, ZHANG Jian-hai, et al. Comparative study of three large underground powerhouses in the west of China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1): 61-65. (in Chinese))
- [4] 许传华, 任青文, 郑治, 等. 索风营水电站地下洞室岩体力学参数的位移反分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1981-1985. (XU Chuan-hua, REN Qing-wen, ZHENG Zhi, et al. Displacement back analysis of rock mechanic parameters of Suofengying Hydraulic Power Plant[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1981-1985. (in Chinese))