

# 围岩变形的时效特征与预测的研究

杨林德<sup>1</sup>, 颜建平<sup>1,2</sup>, 王悦照<sup>3</sup>, 王启耀<sup>1</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究院, 上海 200011;  
3. 宜兴抽水蓄能电站电力公司, 江苏 宜兴 214206)

**摘要:** 在假设围岩地层的性态服从三元件粘弹性模型的基础上, 结合对宜兴抽水蓄能电站地下厂房试验洞位移量测数据的分析, 提出一种确定地层时效特征参数和预报地层变形的办法。内容包括在考虑试验洞开挖面空间效应影响的前提下对现埋孔的位移量进行修正。根据位移-时间关系曲线的回归方程建立任意时刻围岩地层等效弹性模量间的关系式, 给出确定三元件粘弹性模型参数值及对洞周地层的变形进行预报的方法。研究表明: 位移量的预报值与回归值可较好吻合, 表明这一方法可供同类工程采用。

**关键词:** 岩石力学; 流变特性; 粘弹性模型; 围岩变形预报; 反分析方法

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)02-0212-05

## STUDY ON TIME-DEPENDENT PROPERTIES AND DEFORMATION PREDICTION OF SURROUNDING ROCK

YANG Lin-de<sup>1</sup>, YAN Jian-ping<sup>1,2</sup>, WANG Yue-zhao<sup>3</sup>, WANG Qi-yao<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Institute of Construction Design and Research, Shanghai 200011, China;  
3. Yixing Hydro-power Corporation, Yixing 214206, China)

**Abstract:** Based on the assumption that the behavior of surrounding rocks conforms to that of Kelvin-Voigt model, a method to determine the parameters related to the time-dependent properties of surrounding rocks is established and the ground displacement of a test tunnel of an underground hydro-power station cavern is predicted by using the measured data. The measured data is revised to consider the space effect of excavation face. The total displacement values are treated by regression to derive the displacement-time curves. The formula to describe the relation between equivalent elastic modulus of the surrounding rock and the displacement values at different moments is also established. The case study shows that the predicted displacements by the method agree well with the measured values, so the proposed method can be adopted in practice.

**Key words:** rock mechanics; rock rheology; visco-elastic model; surrounding rock deformation prediction; back analysis

## 1 引言

水电站地下厂房洞室群通常规模巨大, 总体地

质条件较为复杂, 故在设计阶段通常都在主厂房拟选位置上, 沿纵轴线设置与主厂房地下洞室成一定比例的试验洞, 用以量测洞周围岩由开挖引起的位移。与此同时, 量测数据也常用于确定试验洞所在

**收稿日期:** 2003-06-30; **修回日期:** 2003-08-07

**基金项目:** 上海市重点学科建设项目资助

**作者简介:** 杨林德(1940-), 男, 1963年毕业于同济大学路桥系隧道工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事隧道与地下工程结构设计与施工技术方面的研究工作。E-mail: Yangldn1@mail.tongji.edu.cn.

位置的初始地应力及围岩力学特性参数，并由此预测洞室围岩的变形，以供设计研究参考。

在节理岩体中建造地下洞室时，围岩地层的变形常随时间而增长，故在对地下洞室围岩的变形及其稳定性作预测时，有必要考虑时间因素的影响。

工程实践中，采用数值方法模拟地下洞室的施工过程中，采用位移反分析方法根据现场量测信息确定地层性态模型的参数值常可取得较好的效果。在这一领域，确定性反分析方法的研究已取得系列成果<sup>[1-5]</sup>，建立非确定性反分析方法的研究近几年来已有许多成果<sup>[6-9]</sup>，本文则拟主要借助宜兴抽水蓄能电站地下厂房试验洞的观测数据，提出一种确定地层时效特征参数的方法，对围岩地层的变形随时间而增长的性质得出规律性认识，并确定围岩长期变形效应的影响。计算结果表明，这一方法可以满足工程实践的需要。

## 2 基本原理

研究表明，对节理岩体中的地下洞室，采用三元件粘弹性模型(见图 1)揭示的关系表述洞周地层的变形随时间而增长的规律时，工程问题分析中常可取得较好的拟合效果，因而本文拟采用这一模型近似模拟洞周围岩变形的依时性特征。

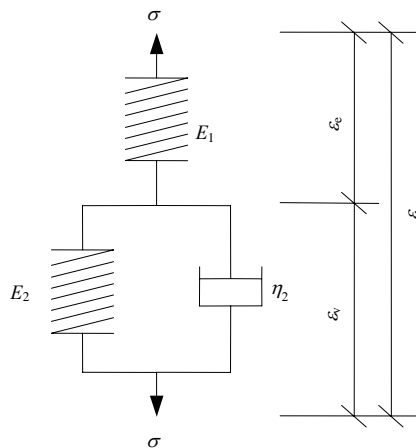


图 1 三元件粘弹性模型  
Fig.1 Kelvin - Voigt model

有限元分析中，假设围岩地层的变形随时间而变化的规律与三元件粘弹性模型揭示的规律相符，则对均一地层中的二维平面应变问题，在应力边界

条件和排水条件保持不变，且泊松比不随时间而变化的前提下，任意时刻的计算均可简化为弹性问题的分析，区别仅需以等效弹性模量  $(E_t)_i$  取代杨氏模量。 $(E_t)_i$  的表达式<sup>[1, 10]</sup>为

$$\frac{1}{(E_t)_i} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{E_2 t_i}{\eta_2}} \right) \quad (1)$$

式中： $E_1, E_2$  为三元件粘弹性模型中弹性元件的弹性模量； $\eta_2$  为粘性元件的粘滞系数。

以下讨论根据试验洞观测断面的监测数据建立确定三元件粘弹性模型参数值的方法。

由有限元分析的原理，可知对弹性问题的分析有

$$[K][u] = [F] \quad (2)$$

令  $[K] = E[K']$ ，则式(2)可改写为

$$E[K'] [u] = [F] \quad (3)$$

式中： $E$  为弹性模量。令式(3)中的  $E = (E_t)_i$ ，则上式可用于  $t = t_i$  时刻的粘弹性问题的分析。

地层材料的性态符合三元件粘弹性模型揭示的规律，且应力边界条件和排水条件保持不变时，式中  $[K']$  和  $[F]$  均为常数矩阵，故对  $t = t_i$  与  $t = t_{i+1}$  时刻的计算，可有

$$(E_t)_i [K'] [u]_i = (E_t)_{i+1} [K'] [u]_{i+1} = [F]$$

由此可得

$$(E_t)_i [u]_i = (E_t)_{i+1} [u]_{i+1} \quad (4)$$

当  $t = 0$  时，由式(1)可知有  $(E_t)_0 = E_1$ 。因在洞室开挖初期岩体发生的变形主要是弹性变形，故如假设  $(E_t)_0$  近似等于岩体的弹性模量  $E_0$ ，即可得

$$(E_t)_0 = E_1 = E_0 \quad (5)$$

建立上述关系式后，即可由式(4)得出 3 个不同时刻的  $(E_t)_i$  值，并可将其代入式(1)建立 3 个以  $E_1, E_2, \eta_2$  为未知数的方程式，用以组成方程组。可以证明方程组有唯一解<sup>[1, 10]</sup>。然而由于式中存在超越函数，该方程组需以数值法求解。此外需指出，由于开挖初期的岩体变形并非完全由弹性变形引起，采用以上方法确定  $E_1$  值通常将仅与  $E_0$  接近。

求得  $E_1, E_2$  和  $\eta_2$  后，式(4)即可用于预测任意时刻洞周围岩的位移量。

应指出，用作反分析计算依据的位移量应根据位移量观测值的回归曲线取值。

### 3 模型洞的布置与变形观测结果

#### 3.1 量测断面与多点位移计的布置

宜兴抽水蓄能电站地下厂房试验洞断面尺寸为 4 m × 5 m (宽 × 长)，形状为城门洞型，沿洞深分别设置了量测断面 I 和 II，每个断面有 6 个多点位移计观测孔，其中 2 个为预埋孔，4 个为现埋孔。每个观测孔 4 个锚头的埋设位置离洞壁距离均分别为 1, 3, 7 和 14 m (13.5 m)。为防止继续开挖时损坏观测仪器，传感器埋入孔内约 50 cm 深处。多点位移计观测孔布置如图 2 所示。

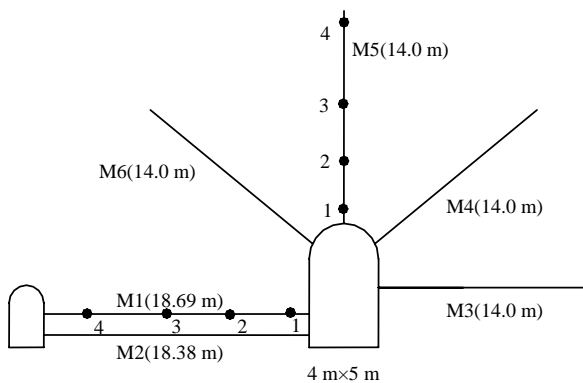


图 2 多点位移计测孔布置图(括号内为测孔长度)  
Fig.2 The layout sketch of multi-extensometers

#### 3.2 多点位移计的量测结果

预埋孔用于观测试验洞开挖过程中围岩变形的全过程，测孔 M2 的变形量随时间而变化的关系曲线示于图 3。现埋孔在开挖面到达预定位置后设置，测孔 M3 的变形量随时间而变化的关系曲线示于图 4。其余测孔量测结果的规律分别与 M2, M3 相仿。

#### 3.3 量测成果的修正与回归

对于现埋孔，开挖面尚未到达监测断面时，各

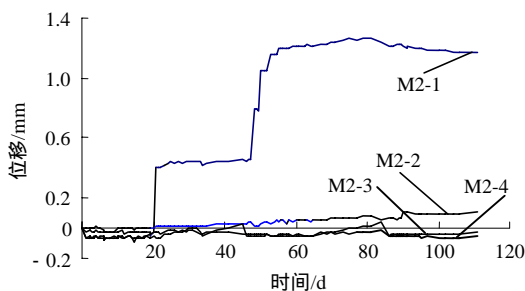


图 3 测孔 M2 位移-时间关系曲线  
Fig.3 The displacement-time curve of multi-extensometer M2

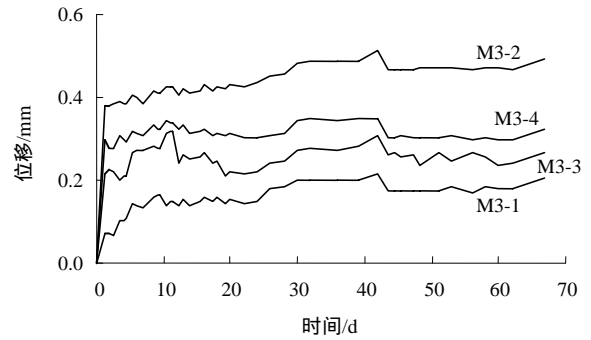


图 4 测孔 M3 位移-时间关系曲线  
Fig.4 The displacement-time curve of multi-extensometer M3

测点均已发生位移，因而须对由这类测孔得到的观测数据进行修正。鉴于预埋多点位移计的量测成果可真实地反映围岩位移的全过程，故拟以预埋多点位移计的量测数据为依据，对现埋孔的位移量观测值建立考虑开挖面空间效应影响的计算式。

将开挖面到达观测断面前测点发生的位移量记为  $\delta$ ，测点的最大位移值记为  $A$ ，并将由开挖面空间效应导致的位移量释放系数记为  $\xi$ ，则有

$$\xi = \delta / A \tag{6}$$

对现埋孔的量测成果进行修正时，将修正系数记为  $\eta$ ，则有

$$\eta = 1 / (1 - \xi) \tag{7}$$

本研究通过引入上述系数对现埋多点位移计的量测数据进行了修正，并对经修正后的测点的位移量  $Y$  (mm) 随时间  $T$  (d) 而变化的曲线分别进行了回归，由此得到的部分测点的回归方程如下：

$$Y = 0.1234 \ln T + 0.6596 \text{ (测点 M2-1)} \tag{8}$$

$$Y = 0.0562 \ln T + 0.5912 \text{ (测点 M3-3)} \tag{9}$$

$$Y = 0.0327 \ln T + 0.5256 \text{ (测点 M4-3)} \tag{10}$$

$$Y = 0.0142 \ln T + 0.5793 \text{ (测点 M6-4)} \tag{11}$$

### 4 时效特征参数的计算结果及其合理性分析

根据地质勘察资料，将断面 I 所在位置围岩地层的弹性模量值取为  $E_0 = E_1 = 5.5 \text{ GPa}$ 。

对断面 I 的测点，根据前文所述的方法得出的不同时刻的等效弹模值的计算结果如表 1 所示。

表 1 同时列有等效弹模值的平均值。如按平均

表 1 断面 I 各测点不同时刻的等效弹模值表

Table 1 The equivalent elastic modulus of some measuring points of section I at typical moments

时间/d	断面 I 不同测线不同测点等效弹模/GPa					弹模平均值/GPa
	M2-1	M3-3	M4-3	M5-4	M6-4	
5	5.425	5.443	5.460	5.475	5.482	5.451
10	5.355	5.390	5.422	5.451	5.466	5.405
15	5.290	5.341	5.387	5.429	5.450	5.362
20	5.229	5.295	5.354	5.408	5.436	5.321
30	5.118	5.212	5.294	5.370	5.409	5.249
45	4.976	5.107	5.216	5.321	5.373	5.155
65	4.823	4.996	5.133	5.267	5.335	5.055
90	4.675	4.890	5.054	5.215	5.298	4.958
120	4.544	4.799	4.984	5.169	5.264	4.874
170	4.397	4.702	4.909	5.119	5.228	4.782

值计算, 则对断面 I 三元件粘弹性模型的参数值分别为:  $E_1 = 5.49 \text{ GPa}$ ,  $E_2 = 32.32 \text{ GPa}$ ,  $\eta_2 = 3\ 067.47 \text{ GPa} \cdot \text{d}$ 。

与之相应的长期等效弹模的收敛值为

$$(E_t)_\infty = 4.69 \text{ GPa} \quad 0.855E_1 \quad (12)$$

对本工程围岩长期变形的估计, 拟将长期弹模取为

$$(E_t)_\infty = 0.855E_0 \quad (13)$$

由前文所述的方法可计算出位移量的预报值, 结果表明位移量预报值与回归值可较好吻合。以断

面 I 测点 M4-3 为例, 不同时刻的等效弹模值、位移量的回归值及预测位移量如表 2 所示, 由表 2 可见二者吻合较好。

对实测位移回归值与预测位移之间的误差作了 F 检验, 结果表明当显著性水平为 0.05 时, 二者可显著接近, 表明上述计算方法对本工程适用。

同济大学对宜兴抽水蓄能电站地下厂房试验洞的监测数据曾进行过反分析研究, 所得结果与本文计算结果非常接近<sup>[11]</sup>, 由此可证实上述计算方法的适用性。

表 2 测点 M4-3 不同时刻的等效弹模、实测位移回归值及预测位移值比较表

Table 2 Comparison between predicted and measured displacement of M4-3

时间/d	实测位移回归值/mm	等效弹模/GPa	预测位移/mm	相对误差/%
5	0.58	5.46	0.61	- 5.17
10	0.60	5.42	0.61	- 1.67
15	0.61	5.39	0.62	- 1.64
20	0.62	5.35	0.62	0.00
30	0.64	5.29	0.63	1.56
45	0.65	5.22	0.64	1.54
65	0.66	5.13	0.65	1.52
90	0.67	5.05	0.66	1.49
120	0.68	4.98	0.67	1.47
170	0.69	4.91	0.68	1.45

## 5 结 论

本文在假设围岩地层的性态服从三元件粘弹性模型揭示的规律的基础上, 结合宜兴抽水蓄能电站地下厂房试验洞监测数据的分析, 提出了一种确定地层时效特征参数和预报地层变形的办法。文中对现埋孔的监测位移量, 提出了用于考虑试验洞开挖面空间效应影响的修正方法, 并以位移-时间关系曲线的回归方程为基础建立了任意时刻围岩地层等效弹性模量值间的关系式。此外, 本文还给出了根据不同时刻的等效弹模值确定三元件模型的参数和对位移量进行预报的方法。计算结果表明, 位移量的预报值与回归值可较好吻合, 表明这一方法可供工程实践采用。

### 参考文献(References):

- [1] Yang L, Zhang K, Wang Y. Back analysis of initial rock stresses and time-dependent parameters[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1996, 33(6): 641-645.
- [2] 杨林德, 荆 华, 李德宏. 二维粘弹性问题反分析计算的统一模型[J]. 地下空间, 1993, 13(4): 243-250.(Yang Linde, Jing Hua, Li Dehong. A common back analysis model of 2D viscoelasticity problem[J]. Underground Space, 1993, 13(4): 243-250.(in Chinese))
- [3] 杨林德, 仇圣华, 杨志锡等. 基坑围护位移量及其稳定性预测[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 267-270.(Yang Linde, Qiu Shenhua, Yang Zhixi, et al. Prediction on displacement and stability of frame bracing structure of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 267-270.(in Chinese))
- [4] 陈 斌, 刘 宁, 周家守等. 岩土工程反分析的最大熵原理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 52-55.(Chen Bin, Liu Ning, Zhuo Jiashou, et al. Principle of maximum entropy for back analysis in geotechnical engineering[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2002, 30(6): 52-55.(in Chinese))
- [5] 刘世君, 徐卫亚, 王红春等. 岩石力学参数的区间参数摄动反分析方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 760-763.(Liu Shijun, Xu Weiya, Wang Hongchun, et al. Interval parameter perturbation back analysis on mechanical parameter of surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 760-763.(in Chinese))
- [6] 高 玮, 郑颖人. 一种新的岩石工程进化反分析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 192-196.(Gao Wei, Zheng Yingren. New evolutionary back analysis algorithm in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 192-196.(in Chinese))
- [7] 高 玮, 郑颖人. 基于生态竞争模型的岩土本构模型辨识新算法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 93-97.(Gao Wei, Zheng Yingren. An new algorithm for identification of geomaterial model based on an ecological competition model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 93-97.(in Chinese))
- [8] 高 玮, 郑颖人. 采用快速遗传算法进行岩土工程反分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 120-122.(Gao Wei, Zheng Yingren. Back analysis in geotechnical engineering based on fast-convergent genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 120-122.(in Chinese))
- [9] 高 玮, 郑颖人. 岩土力学反分析及其集成智能研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 114-116.(Gao Wei, Zheng Yingren. Back analysis in geotechnical mechanics and its integrated intelligent study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 114-116.(in Chinese))
- [10] 杨林德, 丰志良, 朱合华等. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(Yang Linde, Feng Ziliang, Zhu Hehua, et al. Back Analysis Theory and Its Application in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [11] 杨林德, 丁文其. 江苏宜兴抽水蓄能电站地下厂房试验洞反分析研究[R]. 上海: 同济大学, 2001.(Yang Linde, Ding Wenqi. Back analysis of a test tunnel of pumped storage power station in Yixing of Jiangsu[R]. Shanghai: Tongji University, 2001.(in Chinese))