

# 不确定性大坝地基几何尺寸智能识别初探

黄耀英<sup>1,2a,2b</sup>, 郑宏<sup>2a,2b</sup>, 向衍<sup>3</sup>, 付学奎<sup>1</sup>

(1. 三峡大学 水利与环境学院 湖北 宜昌 443002; 2. 中国科学院 a. 武汉岩土力学研究所;  
b. 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071; 3. 南京水利科学研究院 南京 210024)

摘要: 大坝地基实际几何尺寸存在不确定性, 将监测点相对位移作为输入, 坝体混凝土、岩基材料参数和地基几何尺寸作为输出, 建立了不确定性地基几何尺寸识别神经网络模型。该模型采用均匀设计原理进行材料参数组合, 根据不同地基几何尺寸建立的大坝-地基有限元模型的稳定渗流体荷载分布, 获得样本进行学习, 以此训练好的网络来描述大坝混凝土、岩基材料参数及地基几何尺寸和坝体变形的非线性关系。将大坝实测位移分离出的水压分量输入训练好的网络, 可自动识别出大坝混凝土和岩基的材料参数以及地基几何尺寸。算例分析表明, 建立的不确定性大坝地基几何尺寸识别神经网络模型是可行的。

关键词: 地基几何尺寸; 不确定性; 智能识别; 混凝土坝

中图分类号: TV314, TV642.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-5485(2013)06-0076-04

## 1 研究背景

当采用数值方法分析混凝土坝变形时, 计算域除坝体外还包含地基。张有天<sup>[1]</sup>结合典型工程实例分析表明, 对于库盘面积大的水库, 水库蓄水后, 由于作用在库盘上的增量水荷载大, 导致两岸山体及大坝变形沉降较大。那么地基几何尺寸取多大范围时, 可以较合理反映库盘变形对坝体位移的影响, 目前对这个问题报道的文献存在较大差异。徐芝纶<sup>[2]</sup>认为在地基比较均匀时, 上下游所取区域以及地基深度在1~2倍底宽时, 地基边界条件对结构物的影响较小; 敖麟<sup>[3]</sup>认为上下游所取区域以及地基深度应放大至2~5倍坝高, 此时地基边界条件对坝体应力影响较小; Bettess等<sup>[4]</sup>提出可采用无限单元来较好地解决在无限域和半无限域中进行应力分析的实际工程; 吴中如等<sup>[5]</sup>为了弄清上游库水荷载引起的库盘变形对坝体位移的影响, 对龙羊峡重力拱坝进行了大范围有限元计算, 地基向上游取120 km、向下游取10 km、宽度根据正常高水位时的水面宽度向外延伸5 km、地基深度取8 km; 黄耀英等<sup>[6]</sup>采用理论研究和数值分析方法对重力坝地基截取范围进行了探讨, 建议地基向上游取5~10倍坝高, 下游取5倍坝高, 地基深取5倍坝高。显然, 地基几何尺寸截取范围, 对坝体位移影

响较大。张有天指出<sup>[1]</sup>: 用有限元方法作渗流和应力分析时, 计算域应取多大, 边界条件如何确定, 这些看似简单的问题, 却是常被忽略的重要问题。分析可知, 当考虑上游库水荷载时, 地基截取范围对坝体位移的影响要大于对坝体应力的影响。由此可见, 大坝地基几何尺寸的截取范围本质上是一个不确定的问题, 应结合实测位移反馈获得, 但基于实测坝体位移反馈地基几何尺寸至今尚未见有关文献报道, 为此, 本文假设地基为等效连续介质模型, 基于均匀设计神经网络模型对大坝地基几何尺寸及材料参数进行识别。

## 2 智能识别基本原理

### 2.1 基于均匀设计的神经网络模型识别地基几何尺寸

关于均匀设计和神经网络模型的基本原理在文献[7]和文献[8-9]等中有较详细的阐述, 本文不再赘述。以下介绍基于均匀设计的神经网络模型识别不确定性地基几何尺寸的思路。其主要步骤分为以下4步:

(1) 建立不同地基几何尺寸  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_j\}$  的大坝-地基联合模型, 假设地基为等效连续介质模型, 采用数值方法进行地基稳定渗流场分析, 获

收稿日期: 2012-06-04; 修回日期: 2012-08-21

基金项目: 国家杰出青年基金(50925933); 湖北省教育厅科学技术项目(D20101207)

作者简介: 黄耀英(1977-), 男, 湖南郴州人, 副教授, 博士, 主要从事大坝安全监控及数值计算方面的研究。(电话) 13997662901(电子邮箱) huangyaoying@sohu.com。

得结点水头值,并计算对应的地基水荷载。

(2) 利用数值方法产生神经网络的学习样本,即首先设置待反演坝体和地基参数的取值水平,利用均匀设计方法在待反演参数  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  的可能取值空间中构造参数取值组合,形成待反演参数若干个取值集合。然后,基于大坝-地基联合模型,在坝体上、下游面施加水压力(面荷载),在地基内施加地基水荷载,以及在坝基面施加相对应的扬压力(面荷载),把每一个待反演参数的取值集合输入大坝-地基联合模型,进行数值计算,获得坝体关键监测点的计算位移值。最后,将坝体关键监测点的计算位移作为输入,待反演参数  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  的取值组合,以及地基几何尺寸  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_l\}$  作为输出,组成学习样本。

(3) 利用该样本集对神经网络进行训练,获得较为合理的神经网络模型。

(4) 对大坝关键监测点的实测位移建立变形统计模型<sup>[5]</sup>,分离出水压分量、温度分量和时效分量,然后,将大坝关键监测点分离出的实测位移水压分量输入训练好的神经网络模型,即能自动反演出坝体和岩基的材料参数,以及识别出地基几何尺寸。

## 2.2 智能识别说明

在基于均匀设计的神经网络模型识别大坝地基几何尺寸时,有如下几个问题需要注意:

(1) 由于大坝实测位移为相对值(观测日相对位移起测日的值),为此在准备学习样本时,关键监测点的计算位移应采用相对位移。设起测日对应的水位为  $h_a$ ,观测日对应的水位为  $h_b$ ,考虑到大坝位移起测日一般尚未蓄水或处于蓄水初期,此时处于渗流初期,作用在地基上的水荷载可作为面荷载考虑,此时计算得到关键监测点的位移为  $\delta_{ia}$ ;而在大坝位移观测日,地基已经形成渗流场,作用在地基上的水荷载按渗流体荷载施加,此时计算得到关键监测点的位移为  $\delta_{ib}$ ,则关键监测点计算相对位移为  $\delta_i = \delta_{ib} - \delta_{ia}$ 。为保证智能识别精度,选取离坝基面 2/3 倍坝高以上的监测点顺河向位移参与反馈分析。

(2) 由于地基约束条件对大坝计算位移有一定影响<sup>[5]</sup>,参考文献[6],对于重力坝而言,建立大坝-地基有限元模型时,地基地部施加完全位移约束,在上下游地基施加顺河向连杆约束。

(3) 一般混凝土大坝在竣工后才安装正倒垂线<sup>[10]</sup>,因此,坝体自重所引起的变形,一般在正倒垂线变形测值中不能反映。为此,在计算坝体变形时,不考虑自重荷载。

## 3 算例分析

以某混凝土重力坝典型坝段为例,该坝段高 100 m,不考虑坝踵帷幕和排水。

### 3.1 有限元模型

为分析问题方便,地基几何尺寸中向上游截取范围、向下游截取范围以及向地基深处截取范围取同一个几何尺寸,均取  $n$  倍坝高, $n$  分别取 1, 2, 5, 10, 20。如  $n=2$  时,是指向上游、向下游和向地基深处均截取 2 倍坝高。为了较好地反应坝基扬压力,在坝基面设置了厚度为 0.1 m 的夹层单元。

### 3.2 稳定渗流场分析

假设地基为等效连续介质模型,通过进行地基稳定渗流场分析来获得地基的节点水头及渗流体荷载分布。

### 3.3 材料参数取值范围

通过分析大坝原有的地质资料和混凝土试验资料,选定坝基综合变形模量  $E_R$  取值范围为 12 ~ 21 GPa,混凝土综合弹性模量  $E_c$  取值范围为 17 ~ 26 GPa,混凝土和基岩泊松比分别为 0.2 和 0.25;采用均匀设计方法对坝基变形模量和混凝土弹性模量进行组合,材料参数水平数均取 4,即坝基变形模量  $E_R$  分别取 12, 15, 18, 21 GPa,混凝土弹性模量  $E_c$  分别取 17, 20, 23, 26 GPa;依据均匀设计原理,给出了 12 组不同组合。

### 3.4 相对位移及学习样本

位移采用相对值,大坝位移起测日对应的上游水深 50 m。考虑到在位移开始监测时(起测日),岩基渗流刚开始,因此假设起测日的地基水荷载为面力作用在地基表面,且此时尚没有坝基扬压力。由地基稳定渗流计算的节点水头获得渗流体积力和坝基扬压力,并结合均匀设计方法组合的材料参数,计算获得关键监测点的相对位移作为学习样本。选取 5 个不同地基几何尺寸,联合材料参数取值组合,共获得 60 个学习样本。部分学习样本如表 1。表中相对位移  $u_1, u_2, u_3$  为选取的 3 个关键监测点的计算相对位移。

### 3.5 神经网络模型训练

将表 1 中 3 个关键监测点的计算相对位移  $u_1, u_2, u_3$  作为输入,混凝土弹性模量、岩基变形模量和地基几何尺寸作为输出,建立神经网络模型。为了较好地防止计算过程出现“过拟合”等问题,在网络训练前,对数据进行了“归一化”处理。采用 3 层 BP 神经网络进行训练,其中隐含层神经元数目

采用 6 个 经过 1 000 次学习训练后 ,自动结束并获得网络模型。

表 1 部分学习样本

Table 1 Part of the learning samples

序号	$E_c /$ GPa	$E_R /$ GPa	地基几何尺 寸 $n$ 倍坝高	相对位移 $u_1 /$ cm	相对位移 $u_2 /$ cm	相对位移 $u_3 /$ cm
1	17	12	1	2.230	2.476	2.601
2	20	12	1	2.069	2.292	2.404
3	26	12	1	1.858	2.048	2.145
4	20	15	1	1.837	2.042	2.146
5	23	15	1	1.719	1.906	2.001
6	26	15	1	1.627	1.801	1.889
7	17	18	1	1.838	2.055	2.165
8	20	18	1	1.681	1.874	1.972
9	23	18	1	1.563	1.739	1.828
10	17	21	1	1.725	1.933	2.039
11	23	21	1	1.452	1.619	1.704
12	26	21	1	1.362	1.515	1.593
13	17	12	2	2.552	2.803	2.930
14	20	12	2	2.391	2.619	2.733
15	26	12	2	2.179	2.375	2.474
16	20	15	2	2.095	2.304	2.409
17	23	15	2	1.977	2.168	2.264
18	26	15	2	1.885	2.063	2.152
19	17	18	2	2.053	2.274	2.385
20	20	18	2	1.896	2.092	2.192
21	23	18	2	1.778	1.957	2.048
22	17	21	2	1.909	2.121	2.228
23	23	21	2	1.636	1.806	1.892
24	26	21	2	1.546	1.703	1.782
25	17	12	5	3.210	3.460	3.587
26	20	12	5	3.050	3.276	3.390
27	26	12	5	2.838	3.032	3.130
28	20	15	5	2.622	2.830	2.935
29	23	15	5	2.503	2.694	2.790
30	26	15	5	2.412	2.588	2.678
31	17	18	5	2.492	2.712	2.823
32	20	18	5	2.335	2.530	2.629
33	23	18	5	2.217	2.396	2.486
34	17	21	5	2.286	2.496	2.603
35	23	21	5	2.012	2.182	2.267
36	26	21	5	1.922	2.078	2.157
37	17	12	10	4.181	4.428	4.553
38	20	12	10	4.020	4.244	4.357
39	26	12	10	3.808	4.000	4.097
40	20	15	10	3.398	3.604	3.708
41	23	15	10	3.280	3.468	3.563
42	26	15	10	3.188	3.363	3.451
43	17	18	10	3.139	3.357	3.467
44	20	18	10	2.982	3.176	3.274
45	23	18	10	2.864	3.041	3.130
46	17	21	10	2.840	3.049	3.155
47	23	21	10	2.567	2.735	2.820
48	26	21	10	2.477	2.631	2.709

### 3.6 材料参数和地基几何尺寸智能识别

对大坝水平位移监测资料建立统计模型,采用逐步回归分析法<sup>[5]</sup>,分离出水压分量、温度分量和时效分量,选取上游水深 90 m 时的水压分量进行材料参数和地基几何尺寸识别。由上游水深 90 m 时 3 个关键监测点的实测位移分离出的水压分量分别为 2.481 2.667 2.762 cm,这 3 个关键监测点实测

位移分离出的水压分量为相对起测日的相对位移,将其代入训练好的网络模型,识别出的材料参数和地基几何尺寸“反归一化”处理后分别为 22.382, 17.491 6.786 GPa。即地基几何尺寸向上游、向下游、向地基深处截取 6.786 倍坝高。

## 4 结 语

(1) 由于实际大坝地基几何尺寸存在不确定性,将监测点相对位移作为输入,坝体混凝土、岩基材料参数和地基几何尺寸作为输出,建立了不确定性大坝地基几何尺寸识别神经网络模型,给出了基于均匀设计的神经网络模型识别地基几何尺寸的步骤和注意事项。

(2) 结合某混凝土重力坝工程,展示了本文建立的不确定性地基几何尺寸识别神经网络模型,将大坝实测位移分离出的水压分量输入训练好的网络,可自动识别出大坝混凝土和岩基的材料参数以及地基几何尺寸。

(3) 由于实际地基变形模量沿深度逐渐增大,本文采用综合地基变形模量,而为保证地基变形模量和几何尺寸的识别精度,应联合上游库盘典型测点沉降资料以及不同边界条件进行识别,该问题的研究还有待进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 张有天. 岩石水力学与工程 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (ZHANG You-tian. Rock Hydraulics and Engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 陈国荣. 有限元法原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. (CHEN Guo-rong. Principle and Application of Finite Element Method [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 敖 麟. 用有限单元法计算重力坝时关于地基边界条件的探讨 [J]. 水利学报, 1981, (4): 18 - 29. (AO Lin. Discussion on Boundary Condition of the Foundation in Applying Finite Element Method to Compute Stresses in Gravity Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981, (4): 18 - 29. (in Chinese))
- [4] BETTESS P. Infinite Element [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1977, 11(1): 53 - 64.
- [5] 吴中如. 大坝的安全监控理论和试验技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (WU Zhong-ru. Theory and Testing Technology of Dam Safety Monitoring [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese))

- [6] 黄耀英, 沈振中, 吴中如, 等. 混凝土坝及坝基分析截取边界的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2007, (4): 9 - 13. (HUANG Yao-ying, SHEN Zhen-zhong, WU Zhong-ru, *et al.* Intercepting Boundary Influence in Analysis Concrete Dam and Its Rock Foundation Size [J]. Hydro-Science and Engineering, 2007, (4): 9 - 13. (in Chinese))
- [7] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. (FANG Kai-tai, MA Chang-xing. Orthogonal and Uniform Test Design [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [8] 冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 岩石力学与工程综合集成智能反馈分析方法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1737 - 1744. (FENG Xia-ting, ZHOU Hui, LI Shao-jun, *et al.* Integrated Intelligent Feedback Analysis of Rock Mechanics and Engineering Programs and Its Applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1737 - 1744. (in Chinese))
- [9] 冯夏庭. 智能岩石力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. (FENG Xia-ting. Intelligent Rock Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [10] DL/T 5178—2003. 混凝土坝安全监测技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2003. (DL/T 5178—2003, Technical Specification for Concrete Dam Safety Monitoring [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. (in Chinese))

(编辑: 姜小兰)

## Preliminary Discussion on Intelligent Identification of Dam Foundation's Uncertain Geometry Size

HUANG Yao-ying<sup>1 2 3</sup>, ZHENG Hong<sup>2 3</sup>, XIANG Yan<sup>4</sup>, FU Xue-kui<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The actual geometric size of dam foundation is uncertain. In this research, a neural network model for the intelligent identification of the uncertain geometric size of dam foundation is established. The model takes the relative displacement of monitoring points as input, and the dam concrete, rock foundation material parameters and foundation's geometric size as output. The load distribution of steady seepage body is obtained, and on the basis of material parameters combined according to uniform design principle, the relative displacement of key monitoring points were calculated as the learning samples. The trained network describes the nonlinear relationship among the dam concrete, rock foundation material parameters and the foundation's geometric size and dam deformation. The water pressure component separated from the measured dam displacement is input into the trained network to automatically identify the dam concrete and rock foundation material parameters and the foundation's geometric size. Calculation example shows that this model is feasible.

**Key words:** foundation's geometric size; uncertainty; intelligent identification; concrete dam

(上接第 75 页)

Finite element regression analysis was carried out on the test results in consideration of the in-situ geological conditions. The initial rock mass stress distribution along the tunnel axis was obtained. Moreover, the design schemes for the lining of high-pressure tunnel were discussed in terms of in-situ stress. The results reveal that the stress of rock mass above the riverbed at the three positions are not high. The rock mass stress is mainly subjected to the topography. The minimum principal stress of the surrounding rock in the upper section of the headrace tunnels is 1.3 times greater than the internal water pressure, which meets the design requirement of crack prevention, thus the steel lining could be replaced by reinforced concrete lining.

**Key words:** in-situ geostress; hydraulic fracturing; power tunnel; lining