

Mechanical Parameter Inversion of Slope Rock Mass Based on Artificial Neural Network

Lijun Zhou¹, Wenbin Dong², Zhenyun Zhao³

¹China Petroleum & Chemical Corporation Yunnan Petroleum Branch, Kunming Yunnan

²Kunming Coal Design and Research Institute, Kunming Yunnan

³Fuyuan County Xiaobaozi Coal Industry, Qujing Yunnan

Email: zhoulijuncqu@126.com

Received: May 25th, 2019; accepted: Jun. 13th, 2019; published: Jun. 20th, 2019

Abstract

Based on FLAC numerical simulation experiment and *in-situ* deformation monitoring, simulation experiment scheme was designed according to uniform test. The artificial neural network algorithm was used for rock slope displacement back analysis, and four important mechanical parameters of the rock slope were obtained. Further, by analyzing the mechanic parameters inversion, the slope rock mass stability could be better predicted. The obtained mechanical parameters by back analysis were more accurate and consistent with the calculated results of FLAC because the effects of time and various excavations were taken into account. The mechanical parameters inversion of slope rock mass by artificial neural network has important reference value for slope support and parameter selection, and also has an important effect on engineering economy.

Keywords

Numerical Simulation, Artificial Neural Network, Rock Mass Mechanical Parameters, Uniform Test

基于人工神经网络的边坡岩体力学参数反演

周丽君¹, 董文斌², 赵振云³

¹中国石化销售股份有限公司云南石油分公司, 云南 昆明

²昆明煤炭设计研究院, 云南 昆明

³富源县小凹子煤业有限公司, 云南 曲靖

Email: zhoulijuncqu@126.com

收稿日期: 2019年5月25日; 录用日期: 2019年6月13日; 发布日期: 2019年6月20日

摘要

本文基于FLAC数值模拟实验和现场变形监测实验,依据均匀试验进行模拟实验方案的设计,采用人工神经网络算法进行了岩质边坡位移反分析,得出了岩质边坡四个重要的力学参数,通过对反演的力学参数做分析可较好预测边坡岩体稳定性。通过位移反分析得到的力学参数,因其考虑了时间与各种开挖等效应,结果更具有准确性,同时与FLAC计算结果具有较好的一致性。人工神经网络的边坡岩体力学参数反演对边坡支护和参数的选取有重要的参考价值,同时对于工程经济也具有重要的意义。

关键词

数值模拟, 人工神经网络, 岩体力学参数, 均匀试验

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国基础建设的蓬勃发展,在高速公路的建设与建筑基坑的开挖过程中,常常面临着边坡的稳定性分析与处理[1] [2] [3],因此如何准确获得边坡的力学参数,在边坡处理问题中,显得尤为关键。在实际勘察工作中获取的边坡力学参数,往往存在“尺寸效应”、“时间滞后”、“代表性不强”等问题,而如果是现场的大剪实验又存在费用较大,投入高的问题。随着监测技术的发展,利用现有边坡的时间位移观测值的位移反分析方法所取得参数可以弥补以上缺陷。本文以重庆一高速公路边坡为工程背景,运用均匀试验设计方法,采用有限差分法和人工神经网络,结合现场监测数据,利用均匀实验,对该岩质边坡的力学参数进行了反演,同时与地勘值进行了对比,其结果对采用监测数据获得动态力学参数,在边坡的支护方法选用和设计方案有着重要的参考价值。

2. 神经网络模型

BP算法不仅有输入层节点、输出层节点,还可有1个或多个隐含层节点。对于输入信号,要先向前传播到隐含层节点,经作用函数后,再把隐节点的输出信号传播到输出节点,最后给出输出结果。节点的作用的激励函数通常选取S型函数,如

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x/Q}}$$

式中 Q 为调整激励函数形式的Sigmoid参数。该算法的学习过程由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中,输入信息从输入层经隐含层逐层处理,并传向输出层。每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果输出层得不到期望的输出,则转入反向传播,将误差信号沿原来的连接通道返回,通过修改各层神经元的权值,使得误差信号最小。

含有 n 个节点的任意网络,各节点之特性为Sigmoid型。为简便起见,指定网络只有一个输出 y ,任一节点 i 的输出为 O_i ,并设有 N 个样本 $(x_k, y_k) (k=1,2,3,\dots,N)$,对某一输入 x_k ,网络输出为 y_k 节点 i 的输出为 O_{ik} ,节点 j 的输入为

$$\text{net}_{jk} = \sum_i W_{ij} O_{ik}$$

并将误差函数定义为 $E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2$

其中 \hat{y}_k 为网络实际输出, 定义 $E_k = (y_k - \hat{y}_k)^2$, $\delta_{jk} = \frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{jk}}$, 且 $O_{jk} = f(\text{net}_{jk})$, 于是

$$\frac{\partial E_k}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{jk}} \frac{\partial \text{net}_{jk}}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{jk}} O_{ik} = \delta_{jk} O_{ik}$$

当 j 为输出节点时, $O_{jk} = \hat{y}_k$

$$\delta_{jk} = \frac{\partial E_k}{\partial \hat{y}_k} \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \text{net}_{jk}} = -(y_k - \hat{y}_k) f'(\text{net}_{jk}) \quad (\text{式 1})$$

若 j 不是输出节点, 则有

$$\begin{aligned} \delta_{jk} &= \frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{jk}} = \frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}} \frac{\partial O_{jk}}{\partial \text{net}_{jk}} = \frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}} f'(\text{net}_{jk}) \\ \frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}} &= \sum_m \frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{mk}} \frac{\partial \text{net}_{mk}}{\partial O_{jk}} \\ &= \sum_m \frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{mk}} \frac{\partial}{\partial O_{jk}} \sum_i W_{mj} O_{ik} \\ &= \sum_m \frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{mk}} \sum_i W_{mj} = \sum_m \delta_{mk} W_{mj} \end{aligned}$$

因此

$$\begin{cases} \delta_{jk} = f'(\text{net}_{jk}) \sum_m \delta_{mk} W_{mj} \\ \frac{\partial E_k}{\partial W_{ij}} = \delta_{mk} O_{ik} \end{cases} \quad (\text{式 2})$$

如果有 M 层, 而第 M 层仅含输出节点, 第一层为输入节点, 则 BP 算法为:

第一步, 选取初始权值 W 。第二步, 重复计算过程直至收敛:

- 1) 对于 $k=1$ 到 N
 - a) 计算 O_{ik} , net_{jk} 和 \hat{y}_k 的值(正向过程);
 - b) 对各层从 M 到 2 反向计算(反向过程);
- 2) 对同一节点 $j \in M$, 由(式 1)和(式 2)计算 δ_{jk} ;

第三步, 修正权值, $W_{ij} = W_{ij} - \mu \frac{\partial E}{\partial W_{ij}}$, $\mu > 0$, 其中 $\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = \sum_k \frac{\partial E_k}{\partial W_{ij}}$ 。

根据上述算法, 本文使用 FORTRAN 语言编制了微机 BP 神经网络训练与仿真程序 BPANN。

3. 边坡岩体力学参数的反演

用 BP 神经网络进行高速公路边坡岩体力学参数的反演分析, 其基本过程为:

- 1) 进行正演问题的求解, 得到反映公路边坡工程结构系统输入和输出关系的样本;
- 2) 采用 BP 神经网络对上述样本进行学习训练, 在一定收敛条件下得到相应的权值矩阵和阈值向量;

3) 采用训练后的 BP 神经网络, 对实测位移、应力、应变等进行网络仿真, 得到公路边坡岩体力学参数。

在实际问题的正演分析中, 结构分析采用的有限差分法, 这一方面是因为有限差分法对于分析实际工程问题具有较好的适应性和计算精度, 另一方面是计算效率较高, 可以满足边坡施工监控量测的需要。

4. 工程算例

4.1. 工程概况

重庆市长寿区某高速公路第 C2 合同段中 K2 + 916~K3 + 000 与第 C3 合同段中 K7 + 276~K7 + 733.5 共计 3 个里程段均为高填深挖段路基, 对于路基填方边坡大于 16 米的路堤作特殊处理路基设计, 并在路堤下部设置土工格栅层以增强基础承载力和路基稳定避免基础不均匀沉降。

监测边坡位处于低缓丘陵地带, 地貌格局为缓丘沟谷及凹地组成, 地形总体为北高南低。工区地形最高点 519 m, 最低位 465 m, 相对高差近 54 m。自然坡度约为 46.02°, 基岩少部分裸露, 上覆薄层土, 岩体节理裂隙不发育, 植被较发育。沿线属于亚热带气候, 多年平均温度为 17.5°C~18.5°C, 极端最高气温 42.2°C, 极端最低气温 -3°C; 区内年平均雾日 30~40 天。多年平均相对湿度 80%, 绝对湿度 17.6 毫巴。区内多年平均降水量 1094.6 毫米, 最大降水量 1378.3 毫米, 最小降水量 783.2 毫米。降水量分配不均, 一般集中在 5~9 月份。

在第 C1 合同段中 K1 + 118~K1 + 230 左侧设计为挖方岩质高边坡, 工区地质情况简单, 边坡岩性为侏罗系中统上沙溪庙组砂岩、泥岩。开挖后边坡形成的坡度为 63.56°, 坡脚设置 2.6 米宽平台, 自坡脚每 15 米高为一级开挖, 各级之间设置 2.0 米宽的平台, 向外倾斜 3%, 平台上设置平台截水沟。该段边坡共三级平台, 边坡采用四级锚杆框架防护。

4.2. 神经网络样本构建

4.2.1. 计算模型及物理力学参数

由工程实际概况和地勘报告可知现场为较软岩, 边坡岩土参数范围根据《重庆市工程地质规范》建议的物理力学性质指标参数值, 可取如下(表 1)。

Table 1. Standard value of slope rock mass property index
表 1. 边坡岩体性质指标标准值

岩石类别	重度(kN/m ³)	粘聚力(MPa)	内摩擦角(°)	抗拉强度(MPa)	变形模量 f _i (MPa)	泊松比 ν
坚硬岩	24.5~26.5	>1.80	>44	>0.75	>4500	<0.20
较硬岩	23.0~25.0	1.00~1.80	41~44	0.50~0.75	2500~4500	0.10~0.25
较软岩*	24.0~25.0	0.50~1.00	36~41	0.25~0.50	1500~3000	0.20~0.30
软岩	23.5~25.0	0.25~0.50	30~36	0.15~0.25	1000~2000	0.25~0.33
极软岩	23.5~24.5	<0.25	<30	<0.15	<1000	>0.33

注: 本表中强度未考虑时间效应因素。

4.2.2. 试验均匀设计

根据上述实验模量的确定, 因为边坡岩体材料、边坡高度及边坡角已知, 而且 γ 重度变化小, 在分析计算中取重度 $\gamma = 24.8 \text{ kN/m}^3$, 本文中, 主要考虑岩体强度(粘聚力 c 和内摩擦角 φ)和刚度参数(弹性模量 E 和泊松比 μ)的影响, 四个因素均分为 26 个水平, 则水平数为 26, 如下表 2。

Table 2. Arrangement of experiment factor
表 2. 实验水平表

水平	因素			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
	粘聚力 c (MPa)	内摩擦角 φ (°)	变形模量 f_1 (GPa)	泊松比 ν
1	0.50	36.8	2.46	0.296
2	0.52	37.8	1.86	0.288
3	0.54	38.8	2.88	0.280
4	0.56	39.8	2.28	0.272
5	0.58	40.8	1.68	0.264
6	0.60	36.4	2.70	0.256
7	0.62	37.4	2.10	0.248
8	0.64	38.4	1.50	0.240
9	0.66	39.4	2.52	0.232
10	0.68	40.4	1.92	0.224
11	0.70	36.0	2.94	0.216
12	0.72	37.0	2.34	0.208
13	0.74	38.0	1.74	0.200
14	0.76	39.0	2.76	0.300
15	0.78	40.0	2.16	0.292
16	0.80	41.0	1.56	0.284
17	0.82	36.6	2.58	0.276
18	0.84	37.6	1.98	0.268
19	0.86	38.6	3.00	0.260
20	0.88	39.6	2.40	0.252
21	0.90	40.6	1.80	0.244
22	0.92	36.2	2.82	0.236
23	0.94	37.2	2.22	0.228
24	0.96	38.2	1.62	0.220
25	0.98	39.2	2.64	0.212
26	1.00	40.2	2.04	0.204

试验设计就是如何在试验域内最有效地选择试验点, 通过试验得到响应的观测值, 然后进行数据分析求得达到最优响应值的试验条件。因此, 试验设计的目标, 就是要用最少的试验取得关于系统的尽可能充分的信息。均匀设计即可以较好地实现这一目标, 尤其对多因素、多水平的试验。每一个均匀设计表有一个代号 $U_n(q^s)$ 或 $U_n^*(q^s)$, 其中“U”表示均匀设计, “n”表示要做 n 次试验, “q”表示每个因素有 q 个水平, s 表示有 s 列。U 的右上角加“*”和不加“*”代表两种不同类型的均匀设计表。通常加“*”的均匀设计表有更好的均匀性, 应优先选用。本文有模型建立涉及 4 因素 26 水平, 因此选用 $U_{26}^*(26^{11})$ 表, 如下表 3。

Table 3. Uniform design table $U_{26}^*(26^{11})$

表 3. 均匀设计表 $U_{26}^*(26^{11})$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	4	5	7	10	13	16	17	19	20	25
2	2	8	10	14	20	26	5	7	11	13	23
3	3	12	15	21	3	12	21	24	3	6	21
4	4	16	20	1	13	25	10	14	22	26	19
5	5	20	25	8	23	11	26	4	14	19	17
6	6	24	3	15	6	24	15	21	6	12	15
7	7	1	8	22	16	10	4	11	25	5	13
8	8	5	13	2	26	23	20	1	17	25	11
9	9	9	18	9	9	9	9	18	9	18	9
10	10	13	23	16	19	22	25	8	1	11	7
11	11	17	1	23	2	8	14	25	20	4	5
12	12	21	6	3	12	21	3	15	12	24	3
13	13	25	11	10	22	7	19	5	4	17	1
14	14	2	16	17	5	20	8	22	23	10	26
15	15	6	21	24	15	6	24	12	15	3	24
16	16	10	26	4	25	19	13	2	7	23	22
17	17	14	4	11	8	5	2	19	26	16	20
18	18	18	9	18	18	18	18	9	18	9	18
19	19	22	14	25	1	4	7	26	10	2	16
20	20	26	19	5	11	17	23	16	2	22	14
21	21	3	24	12	21	3	12	6	21	15	12
22	22	7	2	19	4	16	1	23	13	8	10
23	23	11	7	26	14	2	17	13	5	1	8
24	24	15	12	6	24	15	6	3	24	21	6
25	25	19	17	13	7	1	22	20	16	14	4
26	26	23	22	20	17	14	11	10	8	7	2

Table 4. $U_{26}^*(26^{11})$ table for use

表 4. $U_{26}^*(26^{11})$ 的使用表

	s	列号					D	
2	1	7					0.0588	
3	1	5	9				0.1126	
4	1	3	8	11			0.1311	
5	1	2	3	8	11		0.1683	
6	1	2	4	6	7	9	0.1828	
7	1	2	3	8	9	10	11	0.1967

表 3 为试验水平表。根据相关文献可选用表 3 所示的均匀设计表，使用表为表 4，该均匀设计表最多可安排的因素为 11。根据均匀设计表和使用表，按表 4 中的 1, 3, 8, 11 列来排列，根据此排列，将各因素的水平值代入即构成均匀设计表。

4.2.3. FIAC 建模

本例的计算模型，根据中国地质科学院建议的范围[4]，模型的长为 158 m，高位 106 m，根据实际开挖工况，取单元密度为 $0.5 \times 1 \text{ m}^2$ ，总计为 27,136 个单元。

本例中采用位移边界条件，上表以地表为界面，并与实际地表形状相同，模型水平方向采用滚支边约束条件即限制 X 方向位移，下边界采用限制 X、Y 方向约束，选用摩尔 - 库伦屈服准则。

在模拟开挖过程中，按照工程设计施工步骤，先进行边坡全体开挖后再进行支护，本文中，只考虑了边坡开挖后未进行支护的边坡深部位移情况进行了位移模拟。监测布置点结合现场实际监测进行布置，如图 1。

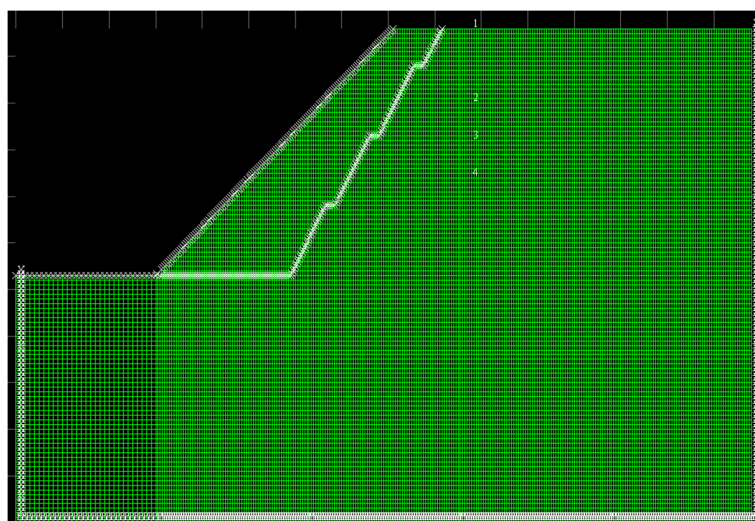


Figure 1. Geometry of calculating model

图 1. 计算模型几何形态

4.2.4. 样本的构建

根据现场沉降位移布置监测，对应在模型监测中在同样的监测位置布置同样的监测点，取同一 X 坐标的，不同的四个监测点的，得出不同强度及刚度条件下，监测点 X 向的位移的实验结果，如表 5 中所示。从图 2 中可以看出，在此 26 组均匀数值试验中，特征的位移整体在开挖后都向外移动，没有明显的趋势关系，但是四个特征点的平均位移值确集中在 $-0.10 \sim -0.17 \text{ m}$ 之间。

Table 5. Calculation displacements of the key points on the slope

表 5. 边坡特征点的计算位移值(期望值)

实验号	粘聚力 $c(\text{MPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	变形模量 $f_i(\text{Gpa})$	泊松比 ν	监测点 1(Xdis)m	监测点 2(Xdis)	监测点 3(Xdis)m	监测点 4(Xdis)m
1	0.50	36.8	2.46	0.296	-0.3265	-0.3584	-0.3661	-0.1486
2	0.52	37.8	1.86	0.288	-0.1187	-0.1372	-0.1360	-0.0600
3	0.54	38.8	2.88	0.280	-0.0981	-0.1024	-0.1110	-0.0474
4	0.56	39.8	2.28	0.272	-0.2913	-0.3201	-0.3270	-0.1344

Continued

5	0.58	40.8	1.68	0.264	-0.4282	-0.4695	-0.4814	-0.1972
6	0.60	36.4	2.70	0.256	-0.0962	-0.1108	-0.1150	-0.0685
7	0.62	37.4	2.10	0.248	-0.0962	-0.1185	-0.1255	-0.0734
8	0.64	38.4	1.50	0.240	-0.1506	-0.1687	-0.1768	-0.1019
9	0.66	39.4	2.52	0.232	-0.0884	-0.0993	-0.1040	-0.0586
10	0.68	40.4	1.92	0.224	-0.0857	-0.0967	-0.1015	-0.0574
11	0.70	36.0	2.94	0.216	-0.0673	-0.0746	-0.0811	-0.0554
12	0.72	37.0	2.34	0.208	-0.0865	-0.0985	-0.1047	-0.0745
13	0.74	38.0	1.74	0.200	-0.1552	-0.1747	-0.1850	-0.1234
14	0.76	39.0	2.76	0.300	-0.1390	-0.1556	-0.1650	-0.1086
15	0.78	40.0	2.16	0.292	-0.1234	-0.1392	-0.1473	-0.0965
16	0.80	41.0	1.56	0.284	-0.1641	-0.1861	-0.1974	-0.1258
17	0.82	36.6	2.58	0.276	-0.0932	-0.1070	-0.1146	-0.0860
18	0.84	37.6	1.98	0.268	-0.0071	-0.0041	-0.0027	-0.0031
19	0.86	38.6	3.00	0.260	-0.1097	-0.1251	-0.1332	-0.0980
20	0.88	39.6	2.40	0.252	-0.1195	-0.1363	-0.1452	-0.1060
21	0.90	40.6	1.80	0.244	-0.1005	-0.1165	-0.1250	-0.0897
22	0.92	36.2	2.82	0.236	-0.1664	-0.1864	-0.1971	-0.16006
23	0.94	37.2	2.22	0.228	-0.2511	-0.2800	-0.2952	-0.2358
24	0.96	38.2	1.62	0.220	-0.0754	-0.0901	-0.0989	-0.0783
25	0.98	39.2	2.64	0.212	-0.077	-0.0810	-0.0945	-0.0782
26	1.00	40.2	2.04	0.204	-0.0562	-0.066	-0.0717	-0.0594

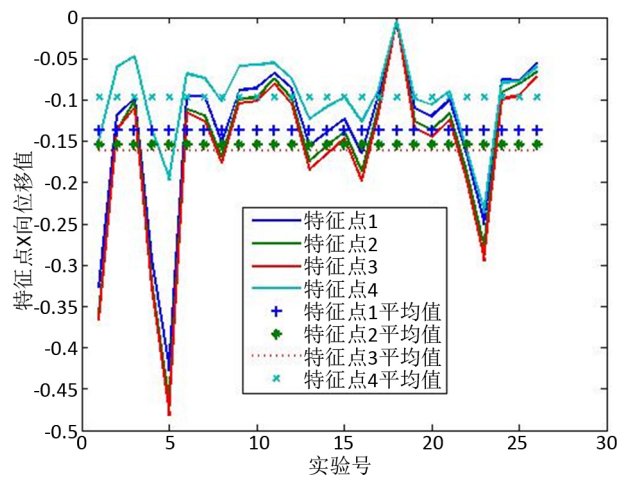


Figure 2. The X-displacement of feature points
图 2. 特征点 X 向位移值

4.3. 人工神经网络训练与验证

通过训练网络，选择一个训练后的最优网络，当网络训练到 1530 代时，输出的均方差已很小(MSE =

5.6836e-007)误差曲线如图 3 所示。因此,此时的网络输出已经非常比较精确。

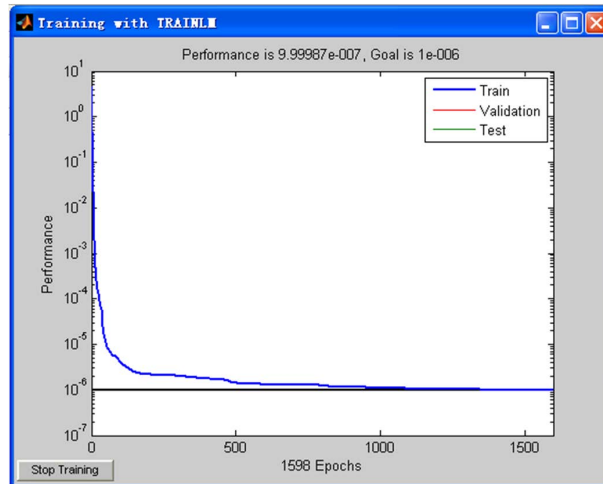


Figure 3. Training error curve

图 3. 训练误差曲线

当网络训练结束以后,利用测试两组样本对网络性能进行测试,用 sim 函数来仿真网络的输出,从而与目标输出进行比较,来检验网络的预报误差。如表 6,由此表中可知网络的预报误差在 7.35%~26.58% 之间,在通常允许范围之内,误差较小,性能满足实际应用的要求。

Table 6. The error between network prediction and true values

表 6. 网络预测与真值误差

力学参数	理论值	神经网络反演结果	绝对误差	相对误差(%)
c_6	0.60	0.505	0.095	15.83%
ϕ_6	36.4	32.68	3.72	10.21%
E_6	2.70	2.44	0.33	9.76%
μ_6	0.256	0.275	0.019	7.35%
c_{24}	0.96	0.837	0.123	12.85%
ϕ_{24}	38.20	32.94	5.26	13.76%
E_{24}	1.62	1.819	0.219	13.51%
μ_{24}	0.220	0.278	0.058	26.58%

5. 结论

本文通过对岩石边坡进行 FLAC 数值实验及神经网络位移预测研究得到如下结论:

1) 均匀试验设计可以利用最少的试验取得关于系统的尽可能充分的信息,尤其在多因素、多水平的试验中,可以发挥很大的作用,节约时间和人力成本。

2) 工程算例针对重庆市长寿区某高速公路第 C1 合同段中 K1+118~K1+230 左侧设计为挖方岩质高边坡,选取了具有代表性和工程实际意义的 4 个因素,分别为边坡岩体的粘聚力 c 、内摩擦角 ϕ 、弹性模量 E 、泊松比 ν ,并为 4 个因素设置 26 个水平。

3) 采用 BP 神经网络进行边坡特征点的位移预测是可行的,本文所训练的人工神经网络具有较高的

精度和较好的泛化性能，若要确定特征点处的位移，可以应用在智能反分析中，可用它替代有限元数值计算方法，能够节省大量的时间。并可依此建立其岩质边坡的位移反分析智能识别系统。

参考文献

- [1] 杜太亮. 岩质边坡智能化位移反分析及工程应用[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [2] 杨斌. 山区道路开挖边坡灾害与对策研究[J]. 四川建筑, 2009, 29(1), 82-83.
- [3] 蒋忠信. 中国山区道路灾害防治[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [4] 赵克烈. 岩质高边坡施工期监测及其稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org