

石膏围岩隧道衬砌结构腐蚀模型研究

任松¹, 李振元¹, 陈钊², 姜德义¹
(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为研究石膏岩对隧道衬砌结构的腐蚀性,对硫酸盐侵蚀混凝土的机理及影响因素进行了深入分析. 设计正交试验,研究硫酸盐对混凝土腐蚀系数的变化规律,结果表明:抗渗等级、C₃A 质量分数与腐蚀系数呈二次函数关系,硫酸根质量浓度和时间与腐蚀系数呈对数函数关系,溶液压力与腐蚀系数近似呈线性关系;采用极差与层次分析法对各个因素的影响权重进行解算,各因素按权重大小依次为:C₃A 质量分数、硫酸根质量浓度、时间、抗渗等级、溶液压力;综合考虑各个因素,基于 BP 神经网络建立了混凝土腐蚀后强度变化量的预测模型,并将该模型成功应用在礼让隧道的衬砌设计中.

关 键 词: 石膏岩腐蚀性;正交试验;极差分析;层次分析法;BP 神经网络

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)07-1049-06

Study on the Corrosion Model of Tunnel Lining Structure in Gypsum Rock

REN Song¹, LI Zhen-yuan¹, CHEN Fan², JIANG De-yi¹
(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: LI Zhen-yuan, E-mail: 1554562609@qq.com)

Abstract: In order to study the corrosion of gypsum rock to tunnel lining structure, the mechanism and influence factors of sulfate attacking on concrete were analyzed. The orthogonal test was designed to study the sulfate's influence on the changing rule of the concrete corrosion coefficient. The results show that there is a quadratic function between the anti-permeability level and the C₃A content and a logarithmic function between the corrosion coefficient, sulfate concentration and time; however, there is a linear relation between the pressure and the corrosion coefficient. The influence weight of each factor was calculated by using the range and AHP. According to the weight of each factor, it can be listed as C₃A content, sulfate concentration, time, anti-permeability level, pressure in order. Considering all the factors, a prediction model on the strength of concrete after concrosion was established based on the BP neural network. This model was applied in the design of Lirang tunnel lining.

Key words: corrosion of gypsum rock; orthogonal test; range analysis; AHP(analytic hierarchy process); BP neural network

石膏岩是一种具有膨胀性、软化性、腐蚀性的软岩,其在围岩中的存在对隧道衬砌结构具有十分不利的影响,严重影响地下工程的使用寿命. 近年来,石膏岩层对地下工程建设的危害逐渐引起学术界及工程界的广泛重视^[1-2].

混凝土受硫酸盐侵蚀是一个复杂的物理化学过程,包括了很多次生反应,一般认为外界的SO₄²⁻在进入混凝土后通过溶解结晶生成石膏晶体,它进一步和水泥水化物反应产生硫铝酸盐,如钙矾石,使得腐蚀进一步加深,出现微开裂^[3]. 同时其侵蚀作用还会受到环境条件的影响^[4]. 对混凝土的抗腐蚀性能进行评估可以基于硫酸钠加速

侵蚀试验^[5],有关文献显示,受硫酸盐侵蚀的混凝土其强度变化可以高达 19.4%^[6].硫酸盐侵蚀造成的强度损失不仅与其内部损伤有关,水化硅酸钙的脱钙作用对其也有一定影响^[7].通过对工业钢筋水泥大厦样品的观察与分析,发现了水泥脱钙和二次硫酸盐矿物的形成^[8].研究表明,添加适量矿渣作为水泥替代物可以提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力^[9],添加粉碎石灰石粉达 40% 时对自密实混凝土有改善作用^[10].

国内外学者关于硫酸盐对混凝土的腐蚀机理及混凝土结构腐蚀后的力学性质变化进行了大量研究,然而并没有文献总结出各因素对硫酸盐侵蚀后的混凝土腐蚀系数的影响规律,也没有确切的多因素作用下混凝土腐蚀后强度变化模型,在隧道衬砌的设计方面多凭经验进行.本文通过正交试验,得到了混凝土抗渗等级、C₃A 质量分数、溶液压力、硫酸根质量浓度、时间对硫酸盐侵蚀混凝土腐蚀系数的影响规律及权重,基于 BP 神经网络模型,综合考虑所有因素建立了混凝土腐蚀后强度变化量的预测模型,并将该模型应用在礼让隧道的衬砌设计中,对同类工程具有指导意义.

1 试验方法及条件

1.1 试验方案

根据硫酸盐对混凝土结构腐蚀性的影响因素,并结合实验条件,选择混凝土抗渗等级、C₃A 质量分数、溶液压力、时间、硫酸根质量浓度 5 个因素,设计 5 因素 5 水平的正交试验,见表 1.其中混凝土抗渗等级采用内掺膨胀剂的方法来控制,C₃A 质量分数在保证两种水泥其他性质无相互干扰的情况下通过两种水泥的复掺来控制.选取混凝土的单轴抗压强度变化量与未腐蚀时间的比值定义腐蚀系数,代表试件被腐蚀的程度;对被侵蚀和未被侵蚀两种同配比试件分别进行单轴压缩试验,进而得到腐蚀系数.重复试验一次,进行两组试验.

表 1 试验方案正交表
Table 1 Orthogonal test scheme

水平	抗渗等级	C ₃ A 质量分数/%	溶液压力 MPa	硫酸根质量浓度 mg·L ⁻¹	时间 d
1	P2	2.5	0	500	20
2	P4	4.0	0.4	1 000	40
3	P6	5.5	0.8	1 500	60
4	P8	7.0	1.2	2 000	80
5	P10	8.5	1.6	2 500	100

1.2 试验试件

根据腐蚀性正交试验方案,制作并选取外观、颜色等差异性较小的 125 个强度为 C45 的混凝土试件,经过 28 天标准养护,加工成尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准岩石力学试件,经测试试件平均强度达到 40.82 MPa,如图 1 所示.



图 1 混凝土试件
Fig. 1 Concrete specimen

1.3 试验仪器

实验采用自行设计的多因素作用下石膏岩腐蚀试验装置,见图 2.该装置通过气瓶提供气压,采用减压阀来调节作用在水面上的气压,进而达到控制装置中作用在试件上溶液压力的目的;通过压紧环压紧密封圈来防止水从试件周围漏出;将支撑外壳做成水浴箱,控制装置内整体的温度.试件单轴压缩试验在自行研发设计的三轴试验机上进行,该试验机最大轴力为 400 kN,轴力误差精度小于示值的 $\pm 0.8\%$,位移误差精度 $\pm 0.8\%$,试验机主要结构如图 3 所示.试验过程中采用位移控制,加载速度为 0.01 mm/min.

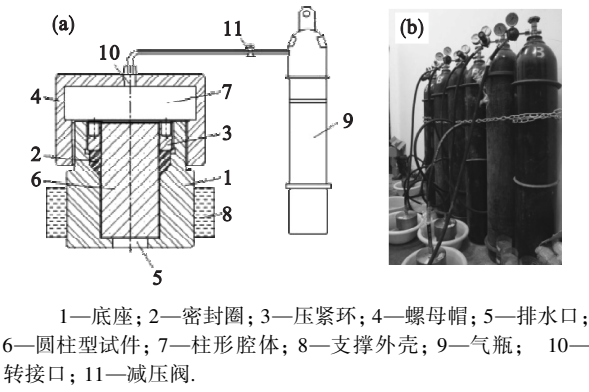


图 2 腐蚀实验装置
Fig. 2 Corrosive experimental apparatus
(a)—原理图;(b)—实物图.

2 结果与讨论

2.1 不同因素对混凝土腐蚀系数的影响

2.1.1 抗渗等级对混凝土腐蚀系数的影响

图 4 为混凝土腐蚀系数均值与抗渗等级的关系.由图可得随着抗渗等级的增大,混凝土腐蚀系

数先增大,后变小.造成这种情况的原因是在比较低的抗渗等级下,试件内存在连通的孔隙,石膏结晶并不会导致很大的结晶应力,当抗渗等级达到一定值以后,混凝土内部孔隙较少,石膏的结晶产生的结晶应力会导致试件内部的损伤,造成混凝土试件强度的下降量增大;当抗渗等级进一步增大,腐蚀性溶液很难进入试件内部,不会对试件内部造成损伤,强度下降量又将减小.对数据进行拟合,选择拟合度较高的二次函数,如式(1)所示:

$$C=0.0011p^2+0.0145p+0.035. \quad (1)$$

式中: C 为混凝土腐蚀系数; p 为混凝土抗渗等级.

式(1)可以代表抗渗等级与混凝土腐蚀系数之间的基本关系,该式的极值点处 $p=6.6$,在隧道设计施工中,综合考虑衬砌结构的防水能力及防腐能力,要避开此抗渗等级,取抗渗等级 P8 及其以上.



图 3 三轴试验机
Fig. 3 Tri-axial test machine

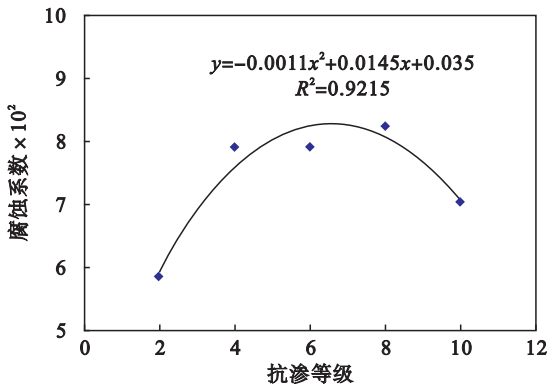


图 4 混凝土腐蚀系数与抗渗等级关系
Fig. 4 Relationship between the corrosion coefficient and the anti-permeability grade of concrete

2. 1. 2 C₃A 含量对混凝土腐蚀系数的影响

图 5 为混凝土腐蚀系数与 C₃A 含量的关系.

由图可得,随着 C₃A 质量分数的增加,混凝土腐蚀系数迅速上升,尤其是当 C₃A 质量分数达到 7.5% 以后,升高速率加快.对数据进行拟合,采用拟合度相对较高的二次函数,如式(2)所示:

$$C=0.0021[w(C_3A)]^2-0.0161w(C_3A)+0.0905. \quad (2)$$

式(2)仅能代表 C₃A 质量分数与混凝土腐蚀系数之间的基本趋势.由图 5 可得,在石膏围岩隧道施工过程中控制 C₃A 质量分数在 4% 以下可以保证隧道衬砌受腐蚀程度相对较小.

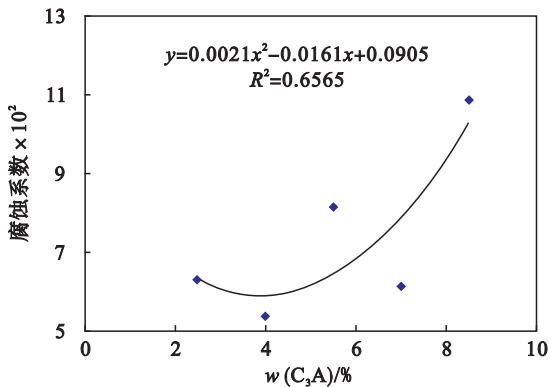


图 5 混凝土腐蚀系数与 C₃A 质量分数关系
Fig. 5 Relationship between the corrosion coefficient and the C₃A content

2. 1. 3 溶液压力对混凝土腐蚀系数的影响

图 6 为混凝土腐蚀系数与溶液压力的关系.由图可得,在溶液压力变化的情况下,混凝土腐蚀系数变化很小,因此认为此实验条件下溶液压力对混凝土腐蚀系数影响较小.

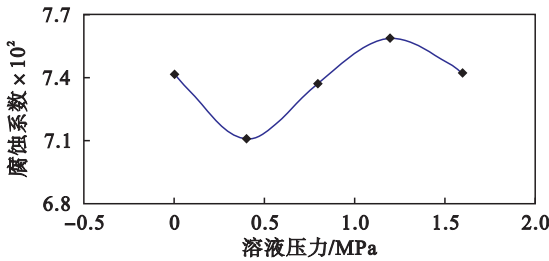


图 6 混凝土腐蚀系数与溶液压力关系
Fig. 6 Relationship between the corrosion coefficient and the solution pressure

2. 1. 4 SO₄²⁻ 质量浓度对混凝土腐蚀系数的影响

图 7 为混凝土腐蚀系数与 SO₄²⁻ 质量浓度的关系.由图可得,随着 SO₄²⁻ 质量浓度的增加,混凝土腐蚀系数增大的速率变小.对实验数据进行拟合,采用拟合度较高的对数函数,如式(3)所示.

$$C=0.0227\ln\rho-0.089. \quad (3)$$

式中, ρ 为 SO₄²⁻ 质量浓度.

式(3)可以代表硫酸根质量浓度与混凝土腐蚀后腐蚀系数的基本关系,在隧道的设计中要尽量避免 SO_4^{2-} 质量浓度高的区域.

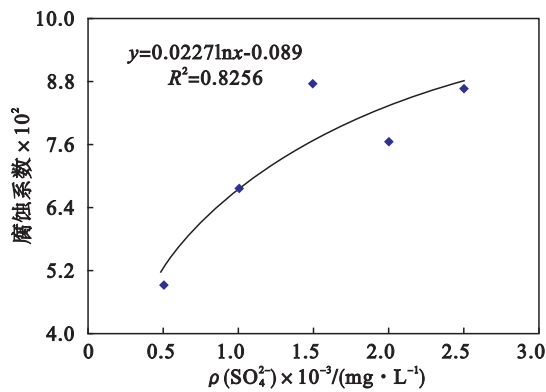


图 7 混凝土腐蚀系数与 SO_4^{2-} 质量浓度的关系
Fig. 7 Relationship between the corrosion coefficient and the concentration of SO_4^{2-}

2.1.5 时间对混凝土腐蚀系数的影响

图 8 为混凝土腐蚀系数与时间的关系. 由图可见:与硫酸根质量浓度影响因素相似,混凝土腐蚀系数随着时间的增加逐渐增大且增大速率越来越小. 对试验数据进行拟合,选择拟合度较高的对数函数,如式(4)所示.

$$C = 0.0126\ln t + 0.0238. \tag{4}$$

式中, t 为腐蚀时间.

式(4)可以代表腐蚀时间与混凝土腐蚀系数之间的基本关系,可见使用年限长的隧道尤其需要有效的防护措施.

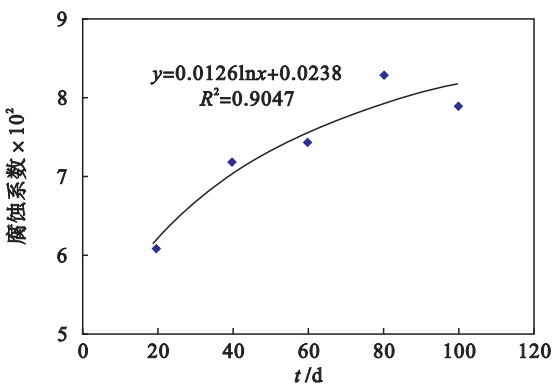


图 8 混凝土腐蚀系数与时间的关系
Fig. 8 Relationship between the corrosion coefficient and time

2.2 各因素对混凝土腐蚀系数影响权重分析

2.2.1 极差分析

按照极差分析法的步骤,得到极差分析表 2,可以看出, $R_B > R_D > R_A > R_E > R_C$,各因素对混凝土腐蚀系数影响大小排序为: C_3A 质量分数 > 硫酸根质量浓度 > 抗渗等级 > 时间 > 溶液压力. 本

实验条件下造成混凝土腐蚀系数最大的因素水平组合为 $A_4B_5C_4D_3E_4$.

表 2 极差分析
Table 2 Range analysis

指标均值	因素				
	A	B	C	D	E
K_1	0.059	0.063	0.074	0.049	0.061
K_2	0.079	0.054	0.071	0.068	0.072
K_3	0.079	0.082	0.074	0.088	0.074
K_4	0.082	0.061	0.076	0.077	0.083
K_5	0.070	0.109	0.074	0.087	0.079
R	0.024	0.055	0.005	0.038	0.022

注: A 为抗渗等级; B 为 C_3A 质量分数; C 为溶液压力; D 为 SO_4^{2-} 质量浓度; E 为时间.

2.2.2 层次分析法定量计算权重

运用层次分析法计算各影响因素的权值,层次结构模型分为三层:目标层、指标层和对象层^[11]. 目标层为各影响因素的权值,指标层为混凝土腐蚀系数的变化,对象层为各个影响因素.

运用回归分析的方法,对各个因素与混凝土腐蚀系数之间的关系进行线性回归分析,计算得到标准回归系数,见表 3. 对任意两个影响因素标准回归系数进行比较分析,可以计算出两个影响因素对混凝土腐蚀系数的相对重要性比值,利用相对重要性比值来构建判断矩阵. 例如抗渗等级的标准回归系数为 -0.125 , C_3A 质量分数的标准回归系数为 -0.470 ,则两个因素对混凝土腐蚀系数的影响相对重要性比值为 $a = |(-0.125)/(-0.470)| = 0.266$,根据此方法可以依次计算出任意两个影响因素对混凝土腐蚀后相对重要性比值,从而构建判断矩阵 A.

表 3 标准回归系数
Table 3 Standard regression coefficient

模型参数	回归系数	显著水平
常量	—	0.758
抗渗等级	-0.125	0.271
C_3A 质量分数	-0.470	0.000
溶液压力	-0.023	0.840
SO_4^{2-} 质量浓度	-0.395	0.001
时间	-0.225	0.052

模型判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.266 & 5.435 & 0.316 & 0.556 \\ 3.760 & 1.000 & 20.435 & 1.190 & 2.089 \\ 0.184 & 0.049 & 1.000 & 0.058 & 0.102 \\ 3.160 & 0.840 & 17.174 & 1.000 & 1.756 \\ 1.800 & 0.479 & 9.783 & 0.570 & 1.000 \end{bmatrix}.$$

采用 Matlab 中求解最大特征值和特征向量的命令 (eig) 求解可得矩阵 A 的最大特征值为 5.000, 其最大特征值对应的向量为 (0.101 0.380 0.019 0.319 0.182), 即其影响因素权向量 $\omega = [0.101, 0.380, 0.019, 0.319, 0.182]$.

对判断矩阵进行一致性检验以后, 以上所求得特征向量才能成为各因素的权重分配. 一致性检验的方法: 通过式 (5) 计算判断矩阵 A 随机一致性比率 CR, 当 $CR < 0.1$ 时, 判定矩阵 A 具有满意的一致性. 当 n 为 3 ~ 10 时, 随机一致性比率 RI 取值分别为 0.58, 0.90, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49.

$$CR = \frac{[\lambda_{\max}(A) - n/n - 1]}{RI}.$$

(5)

按上述方法计算可得 $CR(A) = 0$. 判断矩阵 A 的 CR 值小于 0.1, 具有满意的一致性. 因此, 抗渗等级、 C_3A 质量分数、溶液压力、硫酸根质量浓度、时间对应的权重依次为 0.101, 0.380, 0.019, 0.319, 0.182.

3 混凝土腐蚀后强度预测模型及应用

3.1 混凝土腐蚀后强度变化量预测模型

从 2.1 节的分析中可以看出, 各因素对混凝土腐蚀系数及混凝土腐蚀后的强度变化量的影响是非线性的, 在多因素作用下腐蚀后强度变化模型更为复杂, 要对它进行预测就必须利用一种能模拟非线性的模型. 神经网络是一种智能算法, 在不需要知道数据间分布形式和关系的情况下, 理论上可以逼近任意一个非线性函数, 本文选择 BP 神经网络作为建立混凝土腐蚀后的强度变化预测模型.

BP 网络由输入节点层、隐含节点层、输出节点层和层间节点组成. 本文采用如图 9 所示的神经网络模型建立混凝土腐蚀后强度变化量预测模型, 将实验条件作为神经网络输入项, 混凝土腐蚀后强度变化量作为神经网络输出项. 利用 Matlab 的神经网络工具箱实现 BP 神经网络模型的创建和训练. 本次试验共得到 50 组数据, 随机选择 45 组数据, 作为神经网络的训练学习数据; 将剩下的 5 组试验条件利用训练好的神经网络输出预测混凝土腐蚀后的强度变化量, 并与实际值进行对比, 如表 4 所示, 可见该模型可以较为准确地预测混凝土腐蚀后强度变化量.

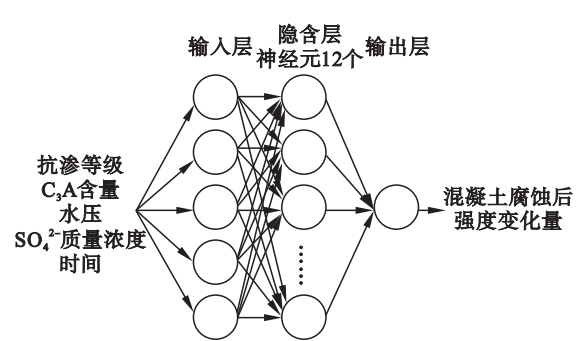


图 9 混凝土腐蚀后强度变化 BP 神经网络模型结构
Fig. 9 BP neural network model of concrete strength change after corrosion

3.2 预测模型在礼让隧道的应用

礼让隧道位于梁平县七星镇、礼让镇境内, 是梁忠高速的控制性工程. 石膏主要分布于背斜轴部分布的三叠系下统嘉陵江组四段的地层中, 具体分布范围: 左线 ZK14 + 666 ~ ZK14 + 961, 右线 K14 + 682 ~ K14 + 983. 石膏为弱透水层, 在隧道中不存在干湿和冻融交替作用, 判定为 II 类环境, 根据《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTG/T B07 - 01—2006), 礼让隧道膏岩段对衬砌具有强腐蚀性 (对应腐蚀作用等级为 D 级).

表 4 模型预测值与实际值对比
Table 4 Comparison between the predicted value and the actual value

样本编号	1	2	3	4	5
实际值	-2.21	-2.64	-2.73	-4.50	-4.74
预测值	-2.39	-2.78	-2.82	-3.17	-4.22
相对误差	-0.082	-0.054	-0.032	-0.295	-0.109

根据地勘资料, 将礼让隧道衬砌段所处腐蚀环境的参数及衬砌混凝土参数代入神经网络模型, 预测混凝土腐蚀后强度变化量随时间的关系, 如图 10 所示. 当隧道使用年限为 30 年时, 衬砌腐蚀后强度变化将达到 -12.638 MPa, 因此必须采取防腐蚀措施; 对影响权重最大的 C_3A 质量分数必须优先考虑, 礼让隧道设计中水泥要求采用抗硫酸盐水泥, C_3A 质量分数 $< 3\%$; 对硫酸根质量浓度而言, 权重较大, 为迫使其穿越石膏层, 综合考虑地下水因素, 需做好隧道的防排水工作, 避免地下水集聚现象发生, 确保衬砌后无水压力; 综合考虑衬砌防排水性能及抗腐蚀性能, 礼让隧道衬砌结构的抗渗等级不得低于 P8; 采用调整后的参数进行二次预测, 衬砌使用 30 年时, 强度变化量为 8.365 MPa, 改善量达到 33.81%.

为进一步降低礼让隧道衬砌腐蚀后的强度变化, 应考虑在礼让隧道设计施工中采取进一步的

综合防腐措施。水灰质量比大小是混凝土耐久性的重要指标,最大水胶质量比为 0.4,每立方混凝土水泥最小用量 340 kg 且不宜大于 450 kg,水泥细度不超过 350 m²/kg,游离氧化钙不超过 1.5%,混凝土中碱的质量浓度不超过 3.0 kg/m³;在混凝土中掺入粉煤灰、硅灰等掺合料,能有效提高混凝土抗硫酸盐侵蚀性能,因此在混凝土中掺加质量分数 6%~8% 抗腐剂(内掺法,等量代替水泥)作为防护层,喷射混凝土采用 C30 高性能喷射砼;采用全包防水板,防水板全周封闭;在混凝土表面涂憎水涂料;设防段落向非腐蚀性围岩延伸不小于 15 m 的距离等。

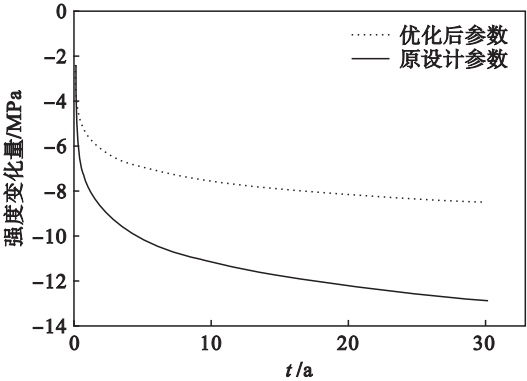


图 10 神经网络模型预测值

Fig. 10 Predicted value of neural network model

4 结 论

- 1) 通过对混凝土腐蚀系数与各因素之间的拟合,得出了各单因素条件对混凝土腐蚀系数的影响规律. 抗渗等级、C₃A 质量分数与混凝土腐蚀系数呈二次函数关系,硫酸根质量浓度和时间与混凝土腐蚀系数呈对数函数关系,溶液压力与混凝土腐蚀系数近似呈线性关系,且试件腐蚀后表面变化明显。
- 2) 通过极差分析及层次分析法得到抗渗等级、C₃A 质量分数、溶液压力、硫酸根质量浓度、时间对混凝土腐蚀系数影响的权重分别为 0.101,0.379 7,0.018 6,0.319,0.181 8,该权重代表了各因素对混凝土腐蚀系数影响大小,权重越大,影响越大。
- 3) 基于神经网络建立了混凝土腐蚀后强度变化量预测模型,将该模型应用到礼让隧道,指导

其衬砌结构设计,并给出了防腐设计参数,对其他石膏岩地层隧道防腐蚀设计具有参考价值。

参考文献:

[1] Azam S. Study on the geological and engineering aspects of anhydrite/gypsum transition in the Arabian Gulf coastal deposits [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2007, 66 (2) : 177 – 185.

[2] Oldecop L, Alonso E. Modelling the degradation and swelling of clayey rocks bearing calcium-sulphate [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 54: 90 – 102.

[3] 张磊,杨鼎宜. 混凝土硫酸盐侵蚀过程及主要产物研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2006, 12 (6) : 19 – 22.

(Zhang Lei, Yang Ding-yi. Research progress of concrete sulfate attack process and main products [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2006, 12 (6) : 19 – 22.)

[4] Fernandes I. Role of granitic aggregates in the deterioration of a concrete dam [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74 (1) : 195 – 206.

[5] Bassuoni M T, Rahman M M. Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 79: 395 – 408.

[6] Bondar D, Lynsdale C J, Milestone N B, et al. Sulfate resistance of alkali activated pozzolans [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2015, 9 (2) : 145 – 158.

[7] Tulliani J M, Montanaro L, Negro A, et al. Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32 (6) : 843 – 849.

[8] Secco M, Lampronti G I, Schlegel M C, et al. Degradation processes of reinforced concretes by combined sulfate – phosphate attack [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 68: 49 – 63.

[9] Al-Swaidan A M, Aliyan S D. Effect of adding scoria as cement replacement on durability-related properties [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2015, 9 (2) : 241 – 254.

[10] Salami B A, Maslehuddin M, Mohammed I. Mechanical properties and durability characteristics of SCC incorporating crushed limestone powder [J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2014, 4 (3/4) : 1 – 18.

[11] 姜德义,张军伟,陈结,等. 卤水浸泡环境下盐岩剪切特性影响因素分析[J]. 岩土力学, 2015, 36 (2) : 333 – 339.

(Jiang De-yi, Zhang Jun-wei, Chen Jie, et al. Analysis of influencing factors of salt rock’s shear characteristics in brine soak environment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (2) : 333 – 339.)