

强震区隧洞工程服役期抗震性能研究

宋万鹏^{1, 2}, 陈卫忠^{1, 3}, 赵武胜^{1, 2}, 杨典森^{1, 2}, 赵 坤^{1, 2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 为了研究我国西部强震区重大岩石地下工程服役期的抗震性能, 基于时变可靠度理论, 提出一种地下工程衬砌服役期抗震性能的基于 Matlab-Abaqus 平台的 BP 联合计算方法。该方法基于拉丁超立方抽样技术和神经网络, 因此具有精度高、计算量小等优点。以滇中引水香炉山隧洞为例, 计算结果表明, 结构抗力和荷载响应的均值在服役期内均呈现缓慢下降趋势, 但结构抗力的标准差增长的更快, 表现为结构抗力的样本离散程度更大, 导致服役后期结构可靠度指标的迅速下降。该方法能快速有效地给出衬砌结构在整个服役期内的抗震性能及结构可靠度的变化趋势, 为合理选择结构加固时间提供了理论依据, 该方法为强震区地下工程服役期抗震性能研究提供参考和借鉴。

关键词: 地下工程; 服役期; 抗震性能; 时变可靠度

中图分类号: TU 49

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)增 1 - 3533 - 09

Study on seismic behavior of tunnel project during whole life for strong earthquakes

SONG Wanpeng^{1, 2}, CHEN Weizhong^{1, 3}, ZHAO Wusheng^{1, 2}, YANG Diansen^{1, 2}, ZHAO Kun^{1, 2}

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*)

Abstract: In order to study the seismic performance of rock underground engineering during whole life in western China, a calculation method with Matlab-Abaqus-BP based on the time-dependent reliability theory is proposed for researching the seismic performance of underground structures in strong earthquake areas. The method has the advantages of high precision and small computational amount based on Latin hypercube sampling and neural network. Taking the Xianglushan Tunnel of Water diversion project in central Yunnan as an example, the calculated results show that both the mean values of structural resistance and load response show a slowly decreasing trend during the service period. However, the standard deviation of structural resistance increases more rapidly, indicating the samples of structural resistance are more discrete, which lead to the rapid decline of the reliability index in the late stage of service. The method can quickly and effectively study the seismic performance of the lining structure during the whole service period, and provide a theoretical basis for the reasonable selection of the structural reinforcement time. The method can be used to provide reference for the seismic performance of

收稿日期: 2017 - 09 - 26; **修回日期:** 2017 - 12 - 03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 项目)(2015CB057906); 国家自然科学基金青年基金项目(51409245)

Supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(Grant No. 2015CB057906) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51409245)

作者简介: 宋万鹏(1988 -), 男, 2010 年毕业于中国地质大学(武汉)土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: songwanpeng555@163.com。通讯作者: 陈卫忠(1968 -), 男, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1246

underground engineering to analyze the seismic performance of the tunnel during whole life.

Key words: underground engineering; service period; seismic performance; time-dependent reliability

1 引言

地下工程一直被认为具有良好的抗震性能,在1995年阪神地震发生以前的强震中均没有关于地下工程遭到严重破坏的相关记录,直到阪神地震中地铁车站大开和上泽等站点遭到严重损毁,才让各国学者意识到地下工程抗震研究的迫切性^[1]。地下工程的地震动力响应与地面建筑存在较大差异,地震作用下地面建筑的破坏主要是由地震惯性力导致结构的共振引起,这与地下工程主要受周围地层变形影响存在本质的不同^[2],因此,地下工程的抗震性能研究和性能评价与地上建筑存在较大差异。

近年来,随着可靠度理论的不断发展和完善,将可靠度引入到工程全寿命服役期抗震性能研究中的需求日益增加。谢楠等^[3]结合施工记录和监测数据,基于二衬抗力衰减模型,联合采用连续介质模型和响应面法计算了隧洞运营期的时变可靠度;姚贝贝和孙钧^[4]利用响应面法和重要抽样法计算了隧洞衬砌结构的可靠度,通过回归分析证实可靠度指标随时间增长呈指数降低;李志华^[5]在改变几个随机变量求得隧洞结构内力统计特征后,基于Matlab优化工具箱计算了隧洞使用期的平均可靠度。P. Chen和K. R. Collins^[6]基于性能的设计和可靠度理论,结合静力Pushover分析,给出了非对称结构的抗震设计方法和步骤;J. Zhang和R. O. Foschi^[7]基于可靠度理论,提出了一种通过设计计算机模拟实验和神经网络来评价结构的抗震性能并优化结构设计的方法,通过2个实例验证了方法的有效性和适用性。总体来说,目前已有研究大多集中在静力时变可靠度和地震作用下的动态可靠度方面^[8],同时考虑结构衰减特性和地震动随机特性的时变可靠度在强震区岩石地下工程服役期抗震性能评价方面的应用还存在诸多困难和问题,比如地下工程结构荷载和抗力的时变特性模拟,结构破坏准则的评定,地震作用下结构的非线性动力响应,可靠度计算结果的精度和效率问题等,这些都制约着时变可靠度理论在地下工程抗震性能研究中的应用。

本文考虑到地震的随机过程性和结构材料、几何尺寸及力学参数的不确定性,开展了强震区岩石地下工程全寿命服役期抗震性能的研究,提出了一

种计算地下结构时变可靠度的基于Matlab-Abaqus平台的BP联合计算方法。与传统的拟静力法和随机有限元等在结构时变可靠度中的应用相比,该方法基于动力时程分析、Monte Carlo思想和BP神经网络^[9],因此具有精度高、计算量小、节约时间等优点,可以为强震区岩石地下工程服役期抗震性能研究提供参考和借鉴。

2 时变可靠度联合计算方法

2.1 混凝土经时模型

混凝土由于具有较好的整体性和耐火性及易于就地取材等特点,自问世以来就被广泛应用于各类土木建筑结构中。但是,在外部环境和内在材料因素的共同影响下,混凝土力学性能将随时间的增长逐渐退化,表现为混凝土强度的衰减,即混凝土结构抗力的衰减。

影响混凝土强度衰减的因素很多,目前国内大部分研究的重点主要集中在混凝土碳化和氯离子腐蚀等方面,而国外的研究则集中在材料方面,比如水泥品种对混凝土强度衰减的影响。牛荻涛等^[10-13]通过对已有结构混凝土的强度进行实测统计分析,分别提出了适用于不同环境下的混凝土强度经时变化模型,并给出了强度方差随时间变化的关系。国外学者J. Sim等^[14-18]则针对水泥品种和水化热的影响提出了不同的混凝土强度时变模型。在分析已有混凝土强度时变模型的基础上,考虑到西部地区结构主要受混凝土碳化影响及模型的适用范围,综合分析后确定采用得到广泛应用的牛荻涛一般大气环境下混凝土强度的经时模型,其强度的平均值和标准差的数学计算公式分别为

$$\mu_{fc}(t) = \mu_{fc0} 1.4529 \exp[-0.0246(\ln t - 1.7154)^2] \quad (1)$$

$$\sigma_{fc}(t) = \sigma_{fc0} (0.0305t + 1.2368) \quad (2)$$

式中: μ_{fc0} , σ_{fc0} 分别为混凝土28d强度的平均值和标准差; $\mu_{fc}(t)$, $\sigma_{fc}(t)$ 分别为混凝土的时变强度和标准差。当 $t > 0$ 时,混凝土的时变强度取式(1),当 $t = 0$ 时,混凝土的时变强度取28d强度的平均值。

2.2 极限状态方程的建立

地下工程进行可靠度分析时,由于地下结构及

其所处围岩的不确定性因素较多，传统的基于解析表达式的极限状态方程不再适用，采用广义的抗力和荷载效应模式即 R-S 模式则显得十分有效。考虑到抗力和荷载效应的时间过程性，分别用 $R(t)$ 和 $S(t)$ 表示地下结构的时变抗力和时变荷载效应，则地下工程在服役期的抗震性能极限状态方程可以表示为

$$Z(t) = g[R(t), S(t)] = R(t) - S(t) \quad (3)$$

目前已有地下工程在地震荷载作用下的失效准则较多，主要有强度破坏准则、变形破坏准则、能量破坏准则和变形与能量的双重破坏准则等。鉴于应用破坏准则的可操作性及方便性等特点，隧道结构的破坏一般采用锚杆的锚固力、衬砌结构的拉应力和压应力及变形特征来衡量。在收集和整理历史上几次大的强震导致隧道结构破坏的震害资料基础上，认为隧道衬砌结构的破坏大多以拉破坏为主^[19]，即地震产生的结构拉应力超过混凝土材料的极限拉应力后造成结构产生裂缝，在地震动持续作用下，裂缝逐渐扩展直至贯通，从而导致结构的整体破坏。

考虑到服役期隧洞结构材料性能的退化，采用强度破坏为失效准则，以衬砌结构内力为对象，建立地震作用下隧洞衬砌结构的非平稳随机过程的极限状态方程为

$$Z(t) = [\sigma_{\max}(t)] - \sigma_{\max}(t) \quad (4)$$

式中： $[\sigma_{\max}(t)]$ 为服役 t 年时隧洞衬砌结构容许应力最大值， $\sigma_{\max}(t)$ 为服役 t 年时衬砌结构在地震作用下的最大响应值。

2.3 BP 神经网络

BP 神经网络(back-propagation neural network)是目前应用最为广泛的人工神经网络之一，是一种多层前馈神经网络，通过信号前向传递、误差反向传播来控制样本的学习和训练精度^[20]。它具有较强的非线性处理能力，通过隐含层的“黑箱”式操作可实现高度非线性问题的映射。

一个简单的含单个隐含层的 BP 神经网络拓扑结构如图 1 所示。 X_1, X_2, \dots, X_m 为神经网络的输入变量； Y_1, Y_2, \dots, Y_n 为输出变量； W_i, W_o 为神经网络的权值矩阵。一个 BP 神经网络可以看成是一个非线性函数，输入变量从输入层经隐含层逐层处理到达输出层，完成一个神经信号的输入、处理和输出。如果输出的结果达不到期望值，则误差反向传播，根据误差值调整神经网络的权值和阈值，从而确保神经网络输出值不断逼近期望输出值，即完成从多个输入变量到多个输出变量的非线性映射。

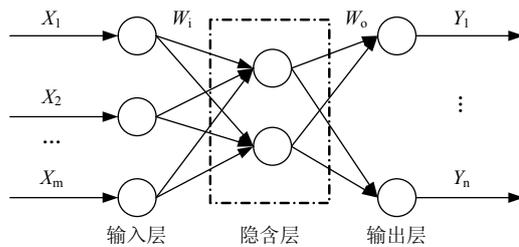


图 1 含单隐层的 BP 神经网络拓扑结构图

Fig.1 Topological structure of BP neural network with single implicit layer

目前，BP 神经网络在岩土工程中的应用已渐趋成熟，基于 Matlab 的 BP 神经网络工具箱也日趋完善，用户可以方便地调用 Matlab 工具箱或者编制子程序来完成 BP 神经网络的高度非线性映射功能。

2.4 拉丁超立方抽样(LHS)

传统的 Monte Carlo 随机抽样方法原理简单、应用广泛，几乎不受任何条件的限制，且由于回避了可靠度计算时概率方面处理的困难，在可靠度计算中被认为是一种相对精确的方法，常常用作其他计算方法的校正和检验。但是 Monte Carlo 随机抽样法需要用数量巨大的样本空间来模拟实际发生的概率，有研究表明，Monte Carlo 方法所需的样本数量近似满足如下关系：

$$N \geq \frac{100}{P_f} \quad (5)$$

式中： P_f 为结构失效概率。这对实际工程结构的破坏一般为小概率事件来说需要的样本数量是极为庞大的，在一定程度上限制了 Monte Carlo 方法在时变可靠度研究方面的应用。

为了降低抽样次数，人们研究了许多改善抽样效率的方法，其中一个显著的方法就是拉丁超立方抽样(LHS)。它是一种多维分层抽样技术，和传统 Monte Carlo 抽样方法相比，它只需通过较少迭代次数的抽样，准确地重建输入样本的分布^[21]。其最核心的思想是将输入概率分层后的累积曲线分成相等的区间，然后从每个区间中均匀随机抽取样本，与传统抽样方法相比，拉丁超立方抽样的样本能更加准确地反映输入概率分布情况，且能大大减少样本空间。根据伍国军研究，传统 Monte Carlo 抽样和拉丁超立方抽样的标准差分别为

$$E[(\bar{y} - \mu_y)^2] = \frac{1}{N} \sigma_y^2 (\text{MC}) \quad (6)$$

$$E[(\bar{y} - \mu_y)^2] = \frac{1}{N^3} \sigma_y^2 (\text{LHS}) \quad (7)$$

式中： μ_y 为抽样均值， σ_y 为标准差， \bar{y} 为估计均

值。

由此可知，拉丁超立方抽样的标准差/Monte Carlo 抽样的标准差= $1/N^2$ ，样本空间越大，其误差以二次指数形式减少。因此，拉丁超立方抽样在保证抽样精度的前提下能大大减少样本数量，特别适合于大样本空间的动力随机有限元计算。在后续的计算程序中，在保证精度的前提下采用了该抽样技术来降低传统 Monte Carlo 思想的抽样次数。

2.5 联合计算程序的开发

针对传统 Monte-Carlo 抽样方法计算结构可靠度时的计算量巨大，难以广泛应用于工程实际的问题，采用拉丁超立方抽样技术以减少抽样量，结合 Matlab 优秀的矩阵运算能力和读写数据能力、有限元软件 Abaqus 强大的动力计算能力以及 BP 神经网络良好的预测能力，编制了有限元时变可靠度程序。在 Matlab 中利用拉丁超立方抽样技术生成满足变量分布类型的样本空间，通过调用 Abaqus 程序计算地震作用下隧洞结构的动力响应值，建立荷载和抗力的极限状态方程后，计算隧洞服役期某年内结构可靠度，然后通过 BP 神经网络训练已有样本来预测其他年份内的隧洞响应值以计算其结构可靠度，从而计算整个隧洞服役期内结构时变可靠度。

联合计算的有限元时变可靠度程序步骤主要包括以下几个方面：(1) 确定各随机变量的统计特征，利用数学方法将非正态分布的随机变量正态化，采用拉丁超立方抽样生成满足分布特征的样本空间；(2) 编制 Matlab 子函数，修改 inp 文件中的随机变量特征值，实现随机变量的不断更新；(3) 调用

Abaqus 软件计算隧洞地震作用下的动力响应，利用 Matlab 子函数读取有限元程序计算的 dat 结果文件；(4) 编制 BP 神经网络子函数，利用已有结果训练神经网络，待训练误差满足要求后，扩展动力响应的样本空间；(5) 建立荷载和抗力的极限状态方程，利用 Monte-Carlo 方法统计极限状态方程的失效次数，计算该年的结构失效概率及可靠度；(6) 利用训练好的 BP 神经网络预测其他年份的隧洞动力响应值；(7) 利用预测的响应样本空间计算隧洞全寿命服役期内的时变可靠度。具体程序框图见图 2。

以 Matlab 和 Abaqus 计算动力响应的程序为例，在计算某年份的隧洞地震动力响应中采用 lhnorm 函数生成一定数量的满足分布特征的样本空间，通过循环结构采用 fopen 和 fprintf 函数打开和修改 inp 文件中的相关参数，调用 system 函数实现 abaqus 中的地震动力计算，待计算完成后利用 fopen 函数打开 dat 文件，通过 fgetl、strfind 和 textscan 等函数找到和读取 dat 文件中的应力结果并存储，待该年份的所有样本计算完成以后再通过 Monte Carlo 方法计算结构的失效概率和可靠度。

3 隧洞服役期衬砌结构抗震性能研究算例

3.1 工程概况

滇中引水工程是云南省可持续发展的战略性基础工程，由金沙江上游石鼓河段取水，途经丽江、大理、楚雄、昆明、玉溪、红河等六个州(市)的 35

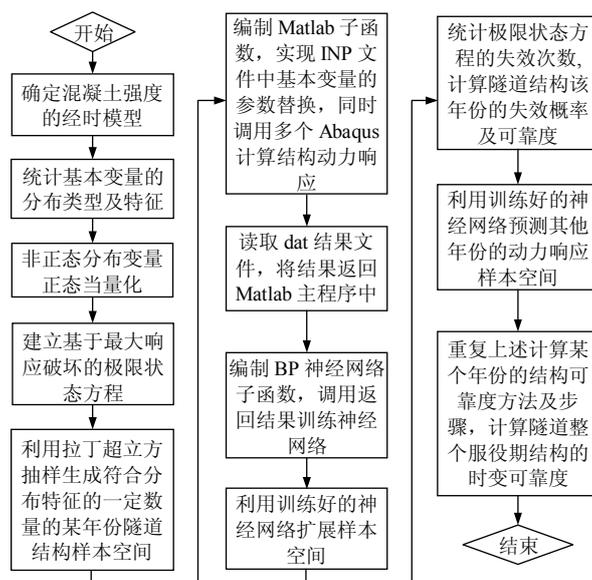


图 2 时变可靠度计算程序框图

Fig.2 The calculation program block diagram of time-dependent reliability

个县(市、区)等,以解决滇中地区水资源短缺问题(见图 3)。香炉山隧洞是滇中引水工程的控制性工程,处于大理 I 段线路,穿越金沙江与澜沧江的分水岭—马耳山脉,全长 63.426 km,属于超长隧洞,具有地质条件复杂、埋深大、高地应力、软岩大变形、地震活动频繁等特点。香炉山隧洞初步设计方案采用直径为 8.40 m 的圆形断面形式,初衬采用挂网+C25 锚喷混凝土,二衬采用 C30 强度等级钢筋混凝土结构形式,钻爆法和 TBM 法分段掘进施工。

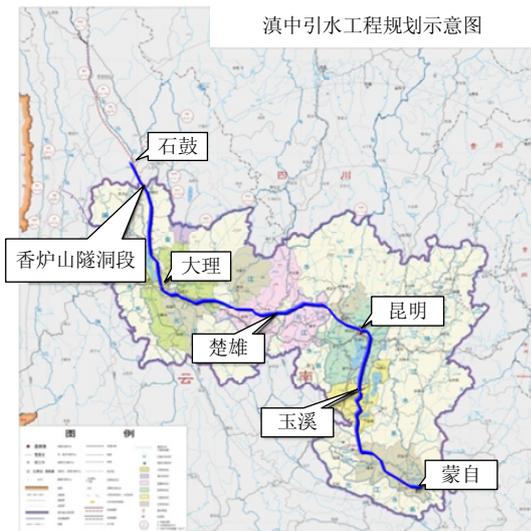


图 3 滇中引水工程线路示意图

Fig.3 Schematic diagram of water diversion project in central Yunnan

香炉山隧洞位于鲜水河—滇东地震带内的“川滇菱形块体”内,跨川西北块体和滇中块体(以丽江—剑川断裂为界),主要位于中甸—丽江—大理地震活动带上,处于丽江 7.5 级潜在震源区内。带内活动断裂发育、地震构造复杂、地壳比较破碎、强震频度较高,距香炉山隧洞不远的中甸、剑川、丽江均有多次历史强震发生。活动断裂对引水隧洞的影响主要体现在 2 个方面:一是当活动断裂因黏滑运动引发 7 级左右强震时,断裂沿线产生位错进而带来的隧洞抗剪断问题及震中区隧洞衬砌遭受高地震烈度的破坏问题;二是全新世活动断裂蠕滑产生的累积位移对隧洞结构的破坏作用。因此,重点研究香炉山隧洞服役期内结构的抗震性能变化是非常有必要的。香炉山隧洞地震加速度分区如图 4 所示。

3.2 计算模型及参数

以滇中引水工程香炉山隧洞为背景,采用连续介质模型方法建立了强震区隧洞全寿命服役期抗震性能时变可靠度二维平面计算模型。

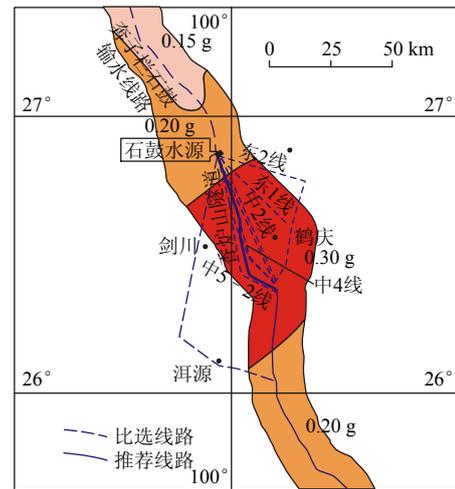


图 4 香炉山隧洞地震加速度分区

Fig.4 Seismic Acceleration Division of Xianglushan Tunnel

根据初步设计文件,不考虑初衬的影响,二衬采用混凝土材料进行模拟。隧洞直径为 8.40 m,衬砌厚度 60 cm,拱顶埋深 15 m。为减小计算范围和边界条件对有限元计算的影响,隧洞整体尺寸取为 120 m×84.6 m,模型左右对称,左右两侧和底部均采用无限元边界以模拟地震波的传播作用,顶部为地表自由边界。隧洞衬砌及围岩按均质弹塑性材料设置,采用 Drucker-Prager 屈服准则模拟其非线性变形特性。模型见图 5。

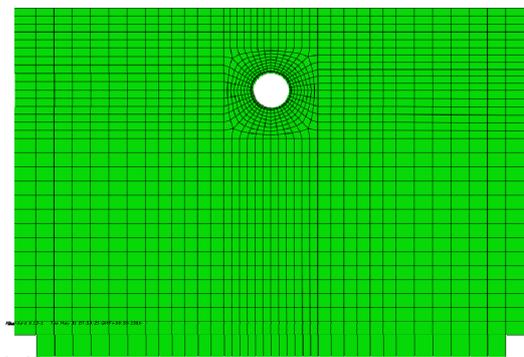


图 5 香炉山隧洞计算模型图

Fig.5 The model diagram of Xianglushan Tunnel

根据设计文件,围岩为 V 类泥岩,基本物理力学参数如表 1 所示。混凝土衬砌力学参数如表 2^[8]所示。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanics parameters of surrounding rock				
围岩类型	密度/(g·cm ⁻³)	变形模量/GPa	泊松比	c/MPa
泥岩	2.2	0.5	0.35	0.2

表 2 C30 混凝土力学参数统计^[8]

Table 2 Statistical table of mechanical parameters for C30 concrete^[8]

均值		方差		变异系数		分布类型	
弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa ²	抗拉强度/MPa ²	弹性模量	抗拉强度	弹性模量	抗拉强度
31	1.43	6.992 3	0.024 7	0.085 3	0.11	正态分布	正态分布

3.3 地震动输入

针对有限元模拟过程中固定边界条件下易导致地震动传播受到扰动的情形，模型截断边界采用在动力计算方面得到广泛应用的无限元边界条件，该边界能较为真实的模拟地震波在岩土介质中传播的折射、反射等特性。根据《滇中引水工程水源及总干渠线路重点工程场地地震安全性评价报告》，香炉山隧洞不同部位场地 50 a 超越概率 10% 水平向地震动峰值加速度值为 246 gal~315 gal。针对背景工程中的实际场地条件，选用具有完整记录的 El-Centro 波作为地震动输入的波形，并采取底部基岩输入以模拟实际地震作用下的地下结构的变形。输入的 El-Centro 波加速度时程曲线如图 6 所示。

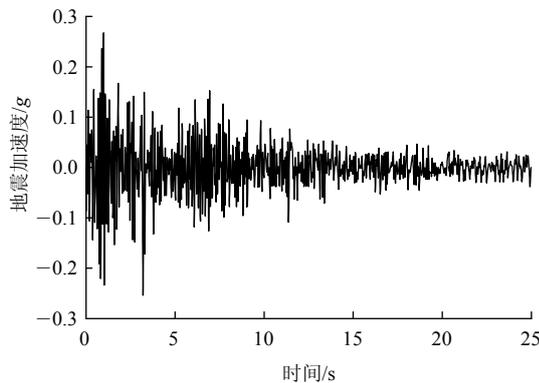


图 6 El-Centro 波加速度时程曲线

Fig.6 The acceleration time-history curve of El-Centro wave

3.4 隧洞服役期抗震时变可靠度计算

以隧洞服役某年为第一个计算点开始计算该年份地震作用下的动力可靠度，通过 BP 神经网络预测其他年份内的动力响应，其中 BP 神经网络的输入参数主要是混凝土材料的力学统计参数，包括弹性模量、抗拉强度及其变异系数等，输出则为地震荷载作用下衬砌结构响应，根据经检验满足精度要求的神经网络即可得到其他年份的结构响应样本空间，从而可以计算隧洞整个服役期的时变可靠度，为隧洞满足服役期内抗震加固要求提供理论依据。

采用编制的联合计算程序通过试算后确定，样

本空间为 150 次即可满足可靠度计算的需求。通过联合计算程序计算隧洞服役 50 a 时 150 次样本的动力响应，利用响应样本训练 BP 神经网络，训练误差如图 7 所示，回归系数 $R^2 = 0.999 94$ ，表明误差满足设定要求，BP 神经网络训练效果很好，能满足计算精度要求。

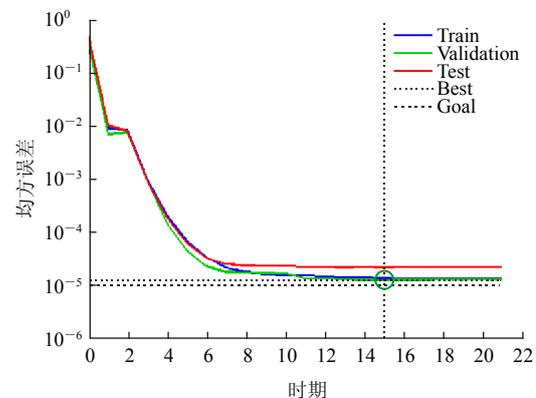
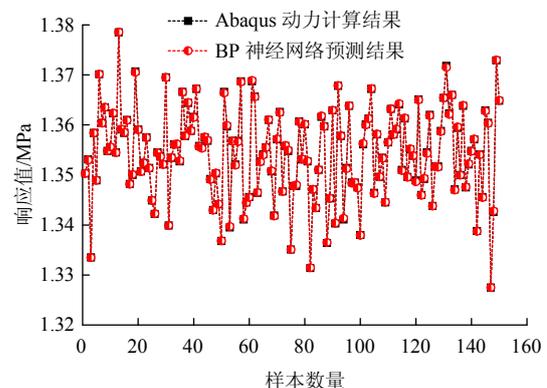


图 7 BP 神经网络训练误差

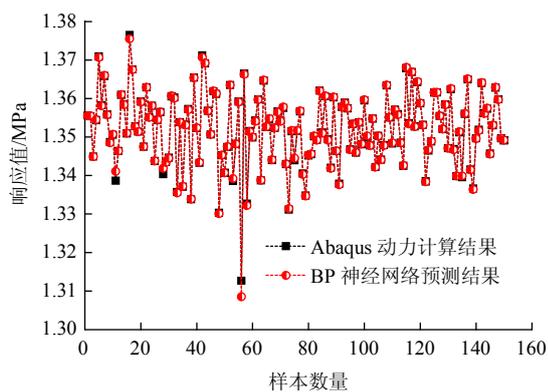
Fig.7 The training error of BP neural network

利用训练好的 BP 神经网络预测其他年份的动力响应，与采用 Abaqus 进行动力随机有限元计算的响应值进行了对比，对比结果如图 8, 9 所示。

上述结果表明，利用 BP 神经网络预测其他年份的隧洞结构动力响应是完全合理可行的。因此根据采用上述方法训练的 BP 神经网络预测其他年份的隧洞动力响应，依据建立的极限状态方程计算隧洞服役期的时变可靠度。联合计算程序得到的隧洞



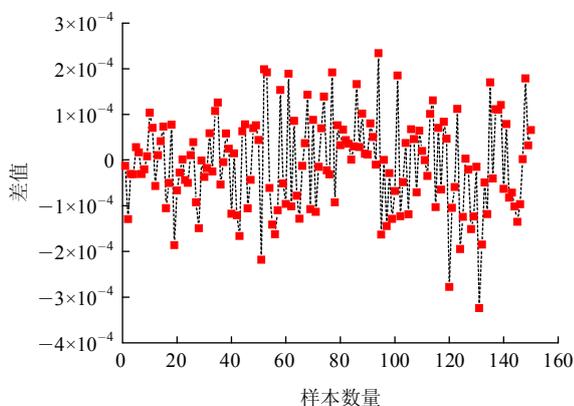
(a) 预测服役 50 a



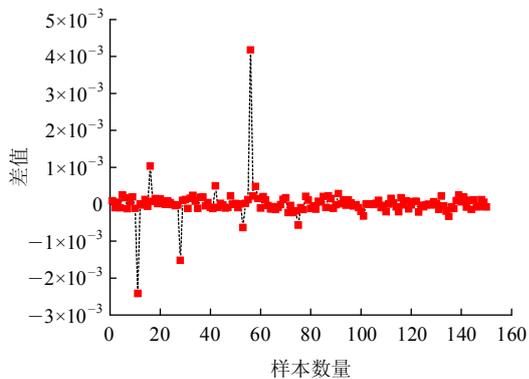
(b) 预测服役 80 a

图 8 BP 神经网络结构响应值与计算值对比

Fig.8 The difference between structural response value in BP neural network and calculated value



(a) 预测服役 50 a



(b) 预测服役 80 a

图 9 BP 神经网络结构响应值与计算值之间的差值

Fig.9 The difference between structural response value in BP neural network and calculated value

结构抗力和荷载响应随服役年限的变化规律如图 10, 11 所示, 根据预测的样本空间得到香炉山隧洞服役期的时变可靠度如图 12 所示。

3.5 结果分析

(1) 结构抗力和荷载响应均值在服役初期均有一定程度的上升, 随着服役年限的增加, 均呈现下

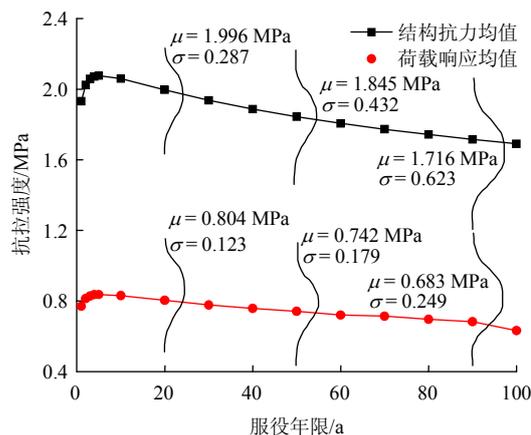


图 10 结构抗力与荷载响应均值的时变特性

Fig.10 Time-dependent characteristics of the mean values of structural resistance and load response

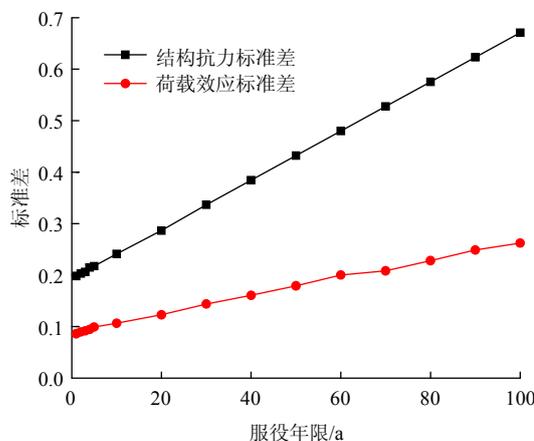


图 11 结构抗力与荷载响应标准差的时变特性

Fig.11 Time-dependent characteristics of standard deviation of structural resistance and load response

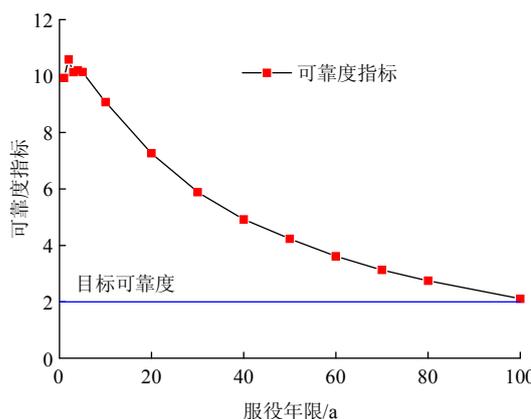


图 12 香炉山隧洞服役期抗震性能时变可靠度

Fig.12 Time-dependent reliability of seismic performance of Xianglushan tunnel during service

降趋势, 这与采用的预测模型有一定关系。两者的标准差随服役年的增加而增大, 但是结构抗力的标准差增长得更快, 表现为结构抗力样本的离散程度

变化更大,即随着服役年限的增加,结构抗力均值下降的同时,其样本离散性更大。如图10所示,以服役20,50,90 a为例,结构抗力值由1.996 MPa降为1.716 MPa,标准差由0.287增大到0.623,而荷载响应值由0.804 MPa降为0.683 MPa,标准差由0.123增大到0.249,两者均值的降低幅度类似,但前者标准差的增长幅度却明显大于后者(见图11),因此从统计的角度来看,结构抗力样本值会出现更多的两极化,而荷载响应值仍能保持较好的分布于均值附近,这也是服役后期结构可靠度下降的原因。

(2) 如图12所示,隧洞服役期内,衬砌结构抗震性能可靠度指标总体呈现下降趋势,这与结构服役期内性能逐渐降低的普遍认识是一致的。前期结构局部可靠度指标会升高,这与前期混凝土材料随着时间的变化强度逐渐增大有关,服役一定年限后,混凝土由于碳化等原因造成强度降低,影响衬砌结构的安全可靠,表现为可靠度指标的降低,服役年限达100年时,可靠度指标仅有2.1左右。

(3) 根据标准^[22],I级结构第二类破坏形式(脆性破坏)的承载能力极限状态的目标可靠度指标应当取为4.2,正常使用极限状态的目标可靠度指标需根据不同结构的特点和工程经验确定。规范中还提到北美加拿大公路桥梁设计规范中给出的正常使用极限状态可靠度指标为1.0。对于隧道衬砌截面抗裂(正常使用)极限状态,牛泽林^[23]研究认为,黄土隧道衬砌结构抗裂极限状态的目标可靠度指标取为2.5较为合适。景诗庭等^[24]则针对地面建筑结构建议目标可靠度指标取为1.0~2.0更为合适。考虑文章研究服役期结构抗裂极限状态的时变可靠度,水工隧洞较公路隧道和铁路隧道的抗裂性要求低,综合考虑后认为水工隧洞衬砌结构的抗裂极限状态可靠度指标取为2.0较为合适。

(4) 根据计算的时变可靠度指标结果,通过与目标可靠度指标进行比较,可以方便地确定隧洞服役期内需要进行结构抗震加固的年份。本算例结果表明在整个隧洞服役期内发生地震动峰值加速度为0.4 g的大震时,隧洞衬砌结构可靠度指标满足要求,能保证结构在发生地震动时的安全可靠,不需要对结构进行抗震性能加固处理。

(5) 本算例研究表明,隧洞衬砌结构的抗震时变可靠度与选取的混凝土经时模型存在较大关系。在结构服役初期,混凝土强度均值变化不大,标准差也较小,此时计算的结构可靠度指标较大,待服

役一定年限后,结构强度的均值有一定降低,而强度标准差呈线性增大,从而导致样本空间的强度值离散性变大,计算的结构可靠度指标迅速减小,这是导致隧洞服役前期与后期某个阶段混凝土强度差别不大而可靠度指标却相差甚远的原因。因此,建立合理的能准确反映实际工程中隧洞结构混凝土强度变化的经时模型显得尤为重要。

4 结 论

(1) 基于动力有限元计算、Monte Carlo思想、拉丁超立方抽样技术和BP神经网络,编制了基于Matlab-Abaqus平台的BP联合计算程序并计算了隧洞服役期的抗震时变可靠度,该方法只需要计算一定数量的样本空间(大概几百次,研究算例仅需150次),然后利用训练好的神经网络预测服役年限的动力响应,即可计算隧洞整个服役期的抗震性能时变可靠度。该方法既能大量减少Monte Carlo方法的抽样次数,又能保证其计算精度,不失为一种高效、高精的计算时变可靠度的方法。

(2) 基于该方法计算了滇中引水香炉山隧洞服役期抗震性能时变可靠度,结果表明,结构抗力和荷载响应的均值在服役期内均呈现缓慢下降趋势,但结构抗力比荷载响应的标准差增长的更快,结构抗力样本空间离散程度更大,计算的结构可靠度指标迅速变小。通过与目标可靠度进行比较,可以方便地确定隧洞服役期间需要进行抗震加固的年限,为合理选择加固时间提供了理论依据。根据计算结果可知,香炉山隧洞在整个服役期内结构抗震性能能够满足工程要求,初步设计确定的支护形式是安全合理的。

(3) 地下工程时变可靠度计算与混凝土经时模型存在较大关系,开展大规模现有地下工程混凝土结构服役期强度普查工作以至提出合理的混凝土经时模型是一项重大而繁杂的基础工作,这将为地下工程服役期抗震性能研究提供有力帮助,今后将考虑混凝土徐变影响的结构可靠度方面的工作需要开展进一步的研究。

(4) 本方法中结构破坏的极限状态方程采用强度准则进行评价,不能完全体现地震持时效应对结构低周疲劳破坏的影响,因此,将能同时考虑首次超越破坏和累积损伤破坏的评价准则引入到本方法是下一步需要展开的研究重点。

参考文献(References):

- [1] HUO H, BOBET A, FERNANDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai station[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(12): 1 522 - 1 533.
- [2] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(4): 247 - 293.
- [3] 谢楠, 王大力, 张弥, 等. 隧道复合衬砌运营期可靠性评价方法[J]. *工程力学*, 2007, 24(增 1): 119 - 122.(XIE Nan, WANG Dali, ZHANG Mi, et al. Reliability analysis of tunnel secondary linings during service life[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(Supp.1): 119 - 122.(in Chinese))
- [4] 姚贝贝, 孙钧. 基于响应面和重要抽样法的隧道衬砌结构时变可靠度[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(10): 1 474 - 1 479.(YAO Beibei, SUN Jun. Response surface and importance sampling method-based tunnel lining structure time-dependent reliability research[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(10): 1 474 - 1 479.(in Chinese))
- [5] 李志华. 隧道结构生命全过程可靠度研究[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2007.(LI Zhihua. Research on Life-Cycle Reliability of Tunnel Structure[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [6] CHEN P, COLLINS K R. Some observations on performance-based and reliability-based seismic design of asymmetric building structures[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(8): 1 005 - 1 010.
- [7] ZHANG J, FOSCHI R O. Performance-based design and seismic reliability analysis using designed experiments and neural networks[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2004, 19(3): 259 - 267.
- [8] 郭小红. 厦门翔安海底隧道风化槽衬砌结构稳定性研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京交通大学, 2011.(GUO Xiaohong. Research on lining stability of Xiamen Xiang'an subsea tunnel in weathered trough[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.(in Chinese))
- [9] 周喻, 吴顺川, 焦建津, 等. 基于 BP 神经网络的岩土体细观力学参数研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(12): 3 821 - 3 826.(ZHOU Yu, WU Shunchuan, JIAO Jianjin, et al. Research on mesomechanical parameters of rock and soil mass based on BP neural network[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3 821 - 3 826.(in Chinese))
- [10] 牛荻涛, 王庆霖. 一般大气环境下混凝土强度经时变化模型[J]. *工业建筑*, 1995, 25(6): 36 - 38.(NIU Ditao, WANG Qinglin. Models of concrete strength changing with time in general air environment[J]. *Industrial Construction*, 1995, 25(6): 36 - 38.(in Chinese))
- [11] 张建仁. 现有混凝土桥梁结构基于时变可靠度的评估研究[博士学位论文][D]. 清华大学, 2002.(ZHANG Jian-ren. Research on evaluation for existing structure of concrete bridge based on time-dependent reliability[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.(in Chinese))
- [12] 高向玲, 颜迎迎, 李杰. 一般大气环境下混凝土经时抗压强度的变化规律[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(1): 19 - 26.(GAO Xiangling, YAN Yingying, LI Jie. Change law of time-dependent concrete compressive strength in the atmospheric environment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(1): 19 - 26.(in Chinese))
- [13] 颜迎迎. 大气环境下混凝土强度经时变化规律的研究[硕士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2012.(YAN Yingying. Time-dependent compressive strength of concrete in air condition[M. S. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2012.(in Chinese))
- [14] SIM J, PARK C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate[J]. *Waste management*, 2011, 31(11): 2 352 - 2 360.
- [15] LUPING T, GULIKERS J. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(4): 589 - 595.
- [16] NYKANEN A. Hardening of concrete at different temperatures, especially below the freezing point[C]// *Proceedings of the RILEM Symposium: Winter Concreting, Copenhagen*. 1956: 1 - 5.
- [17] NOKKEN M, BODDY A, HOOTON R D, et al. Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(1): 200 - 207.
- [18] LEW H S, REICHARD T W. Prediction of strength of concrete from maturity[J]. *Special Publication*, 1978, 56(14): 229 - 248.
- [19] 杨建国. 公路山岭隧道施工期衬砌及结构系统可靠性研究[博士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2011.(YANG Jianguo. Study on lining and system reliability during construction period of highway mountain tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.(in Chinese))
- [20] 易小明, 陈卫忠, 李术才, 等. BP 神经网络在分岔隧道位移反分析中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增 2): 3 927 - 3 932.(YI Xiaoming, CHEN Weizhong, LI Shucai, et al. Application of BP neural network to back analysis of forked tunnel displacement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3 927 - 3 932.(in Chinese))
- [21] 伍国军, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 基于拉丁超立方抽样的有限元可靠度程序开发及应用[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 550 - 554.(WU Guojun, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, et al. Program development of finite element reliability method and its application based on Latin hypercube sampling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 550 - 554.(in Chinese))
- [22] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50199—2013 水利水电工程结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50199—2013 Unified standard for reliability design of hydraulic engineering structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.(in Chinese))
- [23] 牛泽林. 基于可靠度理论的黄土隧道衬砌结构安全评价与分析方法[博士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2012.(NIU Zelin. Based on the reliability theory the safety assessment and analysis method of the loess tunnel lining's structure[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.(in Chinese))
- [24] 景诗庭, 朱永全, 宋玉香. 隧道结构可靠度[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002: 70 - 71.(JING Shiting, ZHU Yongquan, SONG Yuxiang. Tunnel structure reliability[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002: 70 - 71.(in Chinese))