

# 基于结构解释模式的服役混凝土结构损伤识别

袁春燕<sup>1</sup>, 卢俊龙<sup>2</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:**混凝土损伤的影响因素较多,采用结构解释模式(interpretative structural model, ISM)的系统分析方法进行服役混凝土结构损伤识别研究,科学判定既有混凝土结构的损伤程度及基本影响因素。根据引起混凝土损伤的因素,确定各因素间的二元关系,并以此为基础,由要素间的关系传递性,建立基于结构解释模式(ISM)的混凝土结构损伤识别的构思模型,并提取骨架矩阵,形成递阶结构模型,经过比较反馈、修正学习,分析给出混凝土结构损伤识别的基本影响因素。研究结果表明:结构损伤多因素的二元关系是进行损伤识别的基础,综合考虑系统中引起损伤的各因素之间的关系,利用图论中关联矩阵原理分析混凝土结构损伤,给出的结构损伤影响因素更为直接有效;由损伤识别模型归结出的基本影响因素与现行结构检测规范的基本项目基本一致。

**关键词:**土木工程;服役结构;损伤识别;结构解释模型;识别模式

**中图分类号:**TU311.3

**文献标志码:**A

## Damage identification in concrete structure based on interpretative structural model

YUAN Chun-yan<sup>1</sup>, LU Jun-long<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

**Abstract:** Because many factors account for concrete damage, the interpretative structural model (ISM) was used for concrete damage identification. It could determine the degree of the concrete damage and the basic factors of concrete damage scientifically. ISM of damage determination was formed based on two elements' relationship. According to the transmission relationship of the elements', the skeleton matrix system with hierarchical structure was got. By comparing and feedback, adjusting and learning, the main reasons of the structural damage were analyzed. The results show that the relation between two elements is the basis in damage identification for concrete structure. With the integral consideration of all the damage factors and the principle of association matrix in graph theory, the analysis results are direct and effective. The main concrete damage factors from the ISM agree with the basic items from structure inspection rules. 3 tabs, 3 figs, 10 refs.

**Key words:** civil engineering; existing structure; damage identification; interpretative structural model; identification model

0 引言

混凝土结构经过长期的使用后,因材料老化或受到地震、环境等因素的影响,结构会受到不同程度的损伤,对结构损伤进行识别是科学分析结构力学性能的基础工作之一。结构损伤识别可分为 4 个层次,即损伤存在判定、损伤位置判定、损伤程度判定、损伤效应评定。因结构内部损伤会引起结构动力特性改变,故动力特性的变化亦可作为结构进行损伤评估的直接依据。目前基于试验数据的损伤识别参数有模态频率、模态振型、应变能、传递函数、柔度矩阵、残余模态力和频响函数等,损伤识别方法有确定性的损伤识别方法和不确定性的损伤识别方法。

在结构损伤识别的相关研究中,杨栋等将环境激励的结构响应信号进行多变量融合,扩展到高维相空间中,依据信号在高维空间中临近点的分布规律和运动特点,采用递归图理论,结合奇异熵理论提出递归矩阵的奇异熵,将其作为敏感特征指标进行结构的损伤识别<sup>[1]</sup>;周绮凤等引入随机森林法,采用小波包对结构在不同损伤程度和位置上的振动加速度信号进行分解,得到各个频带上的总能量,利用各频带上能量值存在着差异性作为输入到分类器的特征向量,并对建筑结构的损伤位置和损伤程度进行识别<sup>[2]</sup>。然而,以结构振动特性的变化作为损伤识别的直接依据,其识别结果不能反映损伤的位置、结构因损伤导致的质量变化<sup>[3-6]</sup>。基于模态域数据方法,由测试的振动响应数据识别结构的模态参数,而后通过灵敏度分析、模式识别、比较结构损伤前后的模态参数、神经网络或模型修正等方法来识别、定位和定量损伤<sup>[7-8]</sup>。基于时间域数据的方法,通过结构振动响应在局部时间域上的特性或统计特性来识别结构的损伤,但部分与损伤有关的信号特征可能被幅值较大的无关信号特征所掩盖,且当激励源发生变化时,利用该法识别损伤则更困难<sup>[9]</sup>。可见,上述结构损伤识别及判定方法中,均假设振动的幅值很小,结构处于线性范围内;而对非线性特性较强的结构材料,如混凝土及地基土,结构中的损伤大多数也是非线性的,因而非线性结构的损伤判定是结构损伤分析的重要基础之一<sup>[10]</sup>。

因此,为了分析多因素影响下混凝土结构损伤的判别及识别方法,本文引入结构解释模式(ISM),以某地下车库柱混凝土的损伤识别为例,判别引起混凝土损伤各因素间的二元关系,建立混凝土结构损伤识别的 ISM 模型,为混凝土结构损伤识别提供参考。

1 工程概况

某地下车库位于西安市,包含 3 个分区,其中地下室柱混凝土设计强度等级均为 C40。已基本竣工,尚未投入使用。后因发现中间跨内 2 根混凝土柱柱头部位出现混凝土压酥、钢筋外弯曲现象,为保证车库后期安全使用性能,需对这 2 个问题柱进行检测后评定其损伤。

为了较为精确地判定混凝土柱的损伤状况,依据混凝土结构检测的相关标准要求,分别对 2 根问题柱的节点混凝土密实度、混凝土现龄期抗压强度、柱截面尺寸和钢筋配置状况、区域梁柱变形进行检测,具体结果如表 1、表 2、下页表 3 所示。

表 1 混凝土密实度缺陷超声检测结果

Tab. 1 Ultrasonic testing results of defect density of concrete

构件名称	测点	实测声速/(km·s <sup>-1</sup> )	有无异常值
柱 1	1	4.01	无
	2	3.95	无
	3	3.92	无
	4	0	有
	5	0	有
	6	2.60	有
柱 2	1	3.00	有
	2	3.56	有
	3	3.57	有
	4	0	有
	5	3.41	有
	6	3.52	有
	7	2.22	有
	8	3.12	有
	9	2.81	有
	10	4.00	无

进行混凝土密实度现场检测,发现所测柱 1 柱头约 25 cm 高混凝土不密实,所测柱 2 混凝土不密实范围在梁底下约 150 cm 高。

表 2 回弹法测定混凝土强度推定值

Tab. 2 Estimated strength of concrete with rebound method

构件名称	现龄期混凝土抗压强度值/MPa	
柱 1	测点 1	50.6
	测点 2	59.1
	测点 3	58.6
柱 2	测点 1	41.6
	测点 2	47.4
	测点 3	47.4

由下页表 3 可见,地下车库混凝土问题柱配筋箍筋平均间距不满足《混凝土结构工程施工质量验

收规范》(GB 50204—2002)(2011 年版)的要求。

表 3 混凝土构件钢筋布置检测结果

Tab.3 Test results of layout of reinforcement

构件名称	设计配筋	实测筋间距/mm
柱 1	16 Φ 18 Φ10@100/200	单侧 5 根,总 16 根,50,90,200,210,230,230,160,250 (顶部 1 430 mm 范围内)
柱 2	16 Φ 18 Φ10@100/200	单侧 5 根,总 16 根,90,120,110,110,110,110,230,210,200,210,200,210,200,250,300,170,90,100,90,110,120,100

## 2 混凝土损伤的 ISM 判别模式

ISM 模型通过提取问题的构成要素,利用有向图、矩阵等工具和计算机技术,对要素及相互关系等信息进行处理,最后以文字进行解释说明,明确问题的层次和整体结构,其工作原理如图 1 所示。

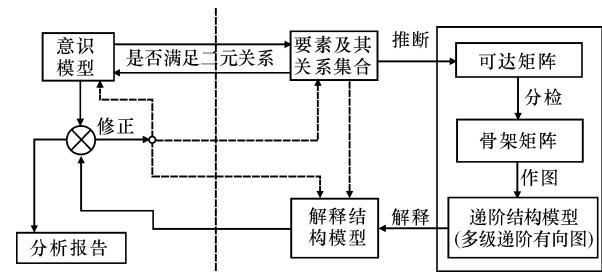


图 1 ISM 工作原理  
Fig.1 ISM working principle

该方法是用来分析和揭示复杂的、内部层级结构不明确的系统的有效方法,以二元关系为基础,通过各种矩阵模型分析可将组成系统的各要素间的零乱、无规律、复杂的关系经过区域化、级位化后分解成清晰的多级递阶结构模型。

### 2.1 混凝土损伤判别模型系统二元关系及表达

混凝土结构中,使结构产生损伤的因素很多,各因素间的二元关系复杂。以下结合结构检测工作项目,重点就节点混凝土密实度、混凝土现龄期抗压强度、柱截面尺寸和钢筋配置状况、区域梁柱变形几个要素间的二元关系进行分析。

根据混凝土结构损伤的各影响因素间存在的二元关系,设该混凝土结构系统  $S_1$  为混凝土密实度;  $S_2$  为混凝土强度值;  $S_3$  为钢筋配筋量;  $S_4$  为钢筋设置位置,即

$$S=\{S_1,S_2,S_3,S_4\} \quad (1)$$

基于混凝土结构损伤特性和损伤识别所约定的 2 个要素( $S_i,S_j$ )之间的关系记为  $R_{ij}$ (简记为  $R$ ),表

明要素间的比较关系。为此,以 2 个要素间的二元关系为基础,建立起直接(邻接)关系矩阵为

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

因二元关系具有传递性,反应两要素之间的间接联系,可记作  $R^t$ ( $t$  为传递次数)。在系统要素集合  $S$  及二元关系的基础上,将系统构成要素中满足某种二元关系  $R$  的要素对( $S_i,S_j$ )的集合,称作  $S$  上的二元关系集合,记作  $R_b$ ,即

$$R_b=\{(S_i,S_j)|S_i,S_j\in S,S_iRS_j, i,j=1,2,\cdots,n\} \quad n\geq 2 \quad (3)$$

由于直接关系矩阵只能反映系统要素之间的直接关系,不反映要素间的间接关系,若要反映混凝土结构损伤影响因素系统内要素间的间接关系,则必须对该关系矩阵进行计算,求出可达矩阵,得到混凝土损伤影响因素的解释结构模型,反映各因素对混凝土质量的影响程度,确定各影响因素间的主次包含关系,实现逻辑问题的矩阵化分析。

### 2.2 判别模型邻接矩阵

以邻接矩阵表达的系统要素间基本二元关系将影响混凝土结构损伤诸因素间的关系数量化,以方阵的形式来表示其两两间的相互关系。若两因素间有直接联系则赋值为 1;若两因素间无明显二元关系或无关系则赋值为 0;各因素自身对自身的影响假设为 0,可采用以下公式定义为

$$A=(a_{ij})_{n\times n} \quad (4)$$

$$a_{ij}=\begin{cases} 1,S_iRS_j \text{ 或 } (S_i,S_j)\in R_b(S_i \text{ 对 } S_j \text{ 有某种二元关系}) \\ 0,S_i\bar{R}S_j \text{ 或 } (S_i,S_j)\notin R_b(S_i \text{ 对 } S_j \text{ 没有某种二元关系}) \end{cases}$$

邻接矩阵中的输出因素(汇元素)和输入因素(源元素)反映了结构损伤的影响因素和损伤判别的总目标。

### 2.3 可达矩阵

研究表明,ISM 结构解释模型定义因素间的二元关系具有传递性。可达矩阵反映了因素之间任意次传递性的二元关系,在有向图中表示两节点通过任意路长可以到达的关系方阵,其定义为

$$T=(T_{ij})=\begin{cases} 1,S_iR^tS_j(i \text{ 至 } j, \text{ 存在长为 } t \text{ 的通路}) \\ 0,S_i\bar{R}^tS_j(i \text{ 至 } j \text{ 的通路不存在}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $t$  为有向图中无回路条件下的最大路长或传递次数,且  $0\leq t\leq r$ 。

此时,若传递次数  $t=1$ ,表示两因素满足基本二元关系,可达矩阵与邻接矩阵相同;当  $t \geq 2$  时,表示因素间传递二元关系; $t=0$  反映了因素变量的反身性,即因素的影响对象为本身。

## 2.4 缩减矩阵

矩阵求解时,以邻接矩阵为基础,将可达矩阵中具有强连接关系的影响因素当作同一类因素进行矩阵简化处理,即只保留其中 1 个作为代表因素,删除其余被替换因素在可达矩阵  $T$  中所在行和列的元素,得到的新矩阵为缩减矩阵  $T'$ 。

## 2.5 递阶结构模型分析

将混凝土结构损伤影响因素集合  $S$  分割成给定二元关系的互相独立区域,其中受因素  $S_i$  影响的相关其他诸因素构成的集合  $R(S_i)$  为可达集,影响因素有向图中表现为从  $S_i$  可到达的其他因素,在可达矩阵中表现为  $S_i$  所在第  $i$  行的“1”元素所对应第  $j$  列元素构成的集合。

可达集  $R(S_i)$  与先行集  $A(S_i)$  的交集为共同集  $C(S_i)$ ,反映因素间的相互影响关系。系统要素  $S_i$  的可达集  $R(S_i)$ 、先行集  $A(S_i)$ 、共同集  $C(S_i)$  之间的关系如图 2 所示。

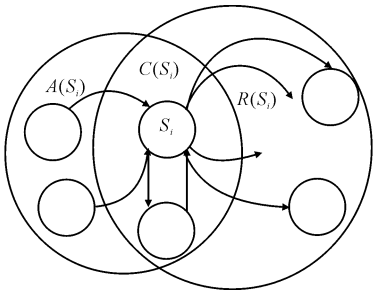


图 2 可达集、先行集、共同集关系

Fig. 2 Relationship of reachable set, first set and common set

混凝土损伤影响因素中只影响其他因素而不受其他因素影响的因素构成的集合为起始集,有向图中表现为只有箭线流出,在可达矩阵中表现为  $S_i$  所在的列元素除表示“反身性”的“1”元素外,其余元素均为“0”。

反之,只受其他因素影响而不影响其他因素的所有因素构成的集合为终止集,在有向图中表现为只有箭线流入而无箭线流出;在可达矩阵中表现为  $S_i$  所在列元素在某区域块中全为“1”,这些因素即为影响结构损伤因素的汇要素。

## 2.6 骨架矩阵的提取

保留可达矩阵  $T(L)$  中表示强连接关系的 2 个影响因素之一,删除另一个影响因素,提取骨架矩

阵,可得到缩减矩阵,再进行检出处理即可建立起  $T(L)$  的最小实现矩阵(也称为骨架矩阵  $A'$ )。

## 3 地下结构服役混凝土柱损伤的结构解释模型分析

结合地下结构混凝土结构损伤特点,以二元关系为基础,通过建立混凝土结构损伤判定的结构解释模型,就服役混凝土结构的损伤判定分析如下。

(1)确定混凝土结构损伤影响因素,通过分析逐步求出关系方格图。

(2)通过分析结构损伤影响因素方格图所表示的关系,并结合诸因素的反身性,求得因素变量可达矩阵。

(3)计算缩减矩阵  $T'$  每行中“1”元素的数量;然后按照由少到多的顺序进行排列,重新调整  $T'$  行和列的位置,得到 1 个新的缩减矩阵  $T'(L)$ ;再在矩阵  $T'(L)$  中从左上角到右下角,依次分解出最大阶数的单位矩阵,并加注方框,各方框即表示影响因素的层级关系。

(4)首先把所有要素按已有层次排列,其次按照矩阵  $T'(L)$  中两方框(单位矩阵)交会处的“1”元素,画出表征不同层次要素间直接联系的有向弧,形成多级递阶有向图。

(5)根据要素的实际意义绘制解释结构模型。

### 3.1 结构解释模型的 MATLAB 实现

分析结构解释模型需做大量的矩阵运算,基于 MATLAB 平台,进行  $25 \times 25$  矩阵的布尔运算,具体如下:

$A$  为邻接矩阵,  $L = A + I$ ,  $I$  为与邻接矩阵同阶次的单位矩阵,反应要素自身到达。通过将上次循环得出来的  $L$  赋为  $B$ ,并判断新一轮循环得出的  $C$  是否与  $B$  相等,决定是否终止循环。由布尔运算求出  $(A+I)^2, (A+I)^3, \dots$ , 直至  $(A+I)^n = A^{n-1}$ , 停止运算,此时的  $(A+I)^n$  便是要求的可达矩阵。

如下页图 3 所示,将可达矩阵相应的强连接元素所在行和所在列去掉,形成缩减矩阵  $T'$ 。找出缩减矩阵中“1”元素最少的行,则该行为第一级,将该行元素全部变为“0”;继续找出矩阵中“1”元素最少的行,为第二级,本例为  $S_4$ ,将该行元素全部变为 0,以此类推,完成所有行元素的缩减。完成后,添加先前去掉的强连接元素,绘制出递阶有向图。

### 3.2 损伤识别结果

由最终缩减矩阵计算结果表明,地下车库问题柱损伤的主要因素可判定为混凝土密实度、钢筋配

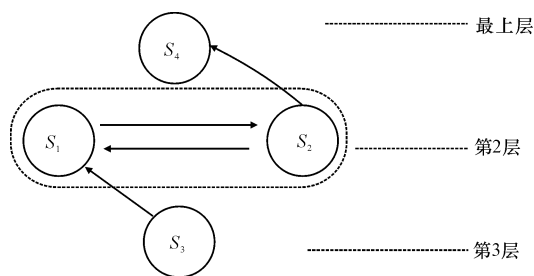


图3 递阶有向图

Fig.3 Hierarchical directed graph

置。与实际检测结果对比可见,抽检混凝土梁下挠变形较大,为混凝土结构损伤的一种表现形式,其影响因素可归结为:①混凝土密实性:混凝土柱头变形对周侧混凝土框架梁变形有一定程度的影响,所测问题柱柱头存在混凝土浇筑或者振捣不密实现象;②钢筋配置:所测混凝土构件箍筋配置状况不满足《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2002)(2011年版)的要求。

## 4 结 语

(1)引起结构损伤的因素是多方面的,进行损伤识别应从结构材料与结构设计的相关影响因素归结基本要素。

(2)结构损伤多因素的二元关系分析是进行损伤识别的基础。

(3)通过邻接矩阵建立可达矩阵可确定系统各要素之间的逻辑关系,而通过解释结构模型分析结构损伤影响因素更为直接有效。

(4)结构解释模型损伤识别的影响因素与现行结构检测规范中的检测项目基本一致。其优点在于利用图论中的关联矩阵原理分析混凝土结构损伤,综合考虑了系统中引起损伤的各影响因素之间的关系。

(5)运用结构解释模型系统分析混凝土结构损伤是一种新的尝试,但由于各类混凝土结构有其自身的特点,用系统理论方法并结合其他交叉学科技术进行混凝土结构损伤识别需要进一步深入研究。

## 参考文献:

## References:

[1] 杨 栋,任伟新.基于递归矩阵奇异熵的损伤识别方法[J].振动与冲击,2012,31(3):60-63.  
YANG Dong, REN Wei-xin. Structure damage detecting using singular entropy of recurrence matrix[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 60-63. (in Chinese)

[2] 周绮凤,杨小青,周青青,等.基于随机森林的建筑结构损伤识别方法[J].振动、测试与诊断,2012,32(2):197-202.  
ZHOU Qi-feng, YANG Xiao-qing, ZHOU Qing-qing, et al. Damage identification technique for building structure based on random forest[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2012, 32(2): 197-201. (in Chinese)

[3] Wang H N, Huang Z H, Li L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.

[4] 赵启林,李志刚,陈浩森.混凝土桥梁损伤识别的理论与试验研究[J].工程力学,2006,23(3):128-133.  
ZHAO Qi-lin, LI Zhi-gang, CHEN Hao-sen. Theoretical and experimental investigation on damage identification of concrete bridges[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(3): 128-133. (in Chinese)

[5] 汪应洛.系统工程理论、方法与运用[M].北京:高等教育出版社,1998.  
WANG Ying-luo. Engineering theories, methods and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.

[6] Koh B H, Ray L R. Localization of damage in smart structures through sensitivity enhancing feedback control [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2003, 17(4): 837-855.

[7] 瞿伟廉,陈 伟,李秋胜.基于神经网络技术的复杂框架结构节点损伤的两步诊断法[J].土木工程学报,2003,36(5):37-45.  
QU Wei-lian, CHEN Wei, LI Qiu-sheng. Two-step approach for joints damage diagnosis of framed structures by artificial neural networks [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 37-45. (in Chinese)

[8] 王柏生,倪一清,高赞明.用概率神经网络进行结构损伤位置识别[J].振动工程学报,2001,14(1):60-64.  
WANG Bai-sheng, NI Yi-qing, GAO Zan-ming. Structure damage localization using probabilistic neural network[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(1): 60-64. (in Chinese)

[9] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Damage localization by directly using incomplete mode shapes [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 656-660.

[10] 瞿伟廉,黄东梅.大型复杂结构的两阶段损伤诊断方法[J].世界地震工程,2003,19(2):72-78.  
QU Wei-lian, HUANG Dong-mei. Two-step damage diagnosis methods of large and complex structures [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 72-78. (in Chinese)

