

文章编号: 1002-0268 (2003) 06-0053-06

桥梁老化要因推测系统的开发

王桂萱¹, 中村秀明², 晏班夫², 宫本文穗²

(1 大连大学, 辽宁 大连 116622; 2 山口大学, 日本山口县)

摘要: 将桥梁各构件的损伤和老化要因间的关系表现为“如果则”的规则, 规则的可信度用概率表示, 由概率的大小确定各规则间的联合强度。利用这种因果网络, 结合桥梁的环境条件、表现检测结果等创建桥梁老化要因推测系统, 建立桥梁构件优化评价模型。该系统可以推测桥梁检查中发现的损伤及潜在损伤的老化要因, 在维修管理对策方面除给出修复损伤的方法外, 还可从抑制老化要因进行速度方面考虑相应对策, 并用遗传算法对维修对策进行优化。

关键词: 老化要因; 推测系统; 损伤; 环境条件; 因果网络

中图分类号: U445.7 **文献标识码:** A

Development of Estimation System for Bridge Deterioration Causes

WANG Gui-xuan¹, Hideaki Nakamura², YAN Ban-fu², Ayaho Miyamoto²

(1 Dalian University of Technology, Liaoniag Dalian 116622 China;
2 Yamaguchi University, Yamaguehi prefecture, Japan)

Abstract: This paper describes the relationship between the damages in bridge members and the deterioration causes as the if-then rules. The reliability of the rules is expressed as a probability proportional to the connecting strength. By using this kind of cause-effect network and by combining with visual inspection, ambient condition, and Non Destructive Testing, an estimation system for bridge deterioration causes and an optimum assessment model for bridge member are established, which is capable of estimating the deterioration causes of the existing and potential damages. Moreover, it is not only possible to select available maintenance strategies according to the damage level and control the deterioration speed, but also apply Genetic Algorithms (GAs) to optimize the maintenance plan for advanced bridge management.

Key words: Dterioration cause; Estimation system; Damage; Ambient condition; Cause-effect network

0 前言

桥梁的老化有很多表现形式, 各种表现形式相互关联, 损伤和老化要因间关系复杂, 而且除表现出的损伤现象外, 还存在很多潜在的损伤及正在起作用的老化要因, 因而桥梁管理单位需要有一个根据表观检测数据直接推测出桥梁损伤的原因, 进而选择维修管理对策的系统。本研究建立了一般环境条件下桥梁损伤和老化要因的因果网络。结合桥梁的环境条件、工作状况、无破损试验结果等修正因果网络规则, 建立

了在各多的损伤和老化要因事象(现象)中找出桥梁损伤机理的方法; 再根据损伤程度和老化要因作用情况, 在评价构件维修必要性的基础上, 给出能抑制老化要因发展的维修对策。

1 桥梁损伤和老化要因推测系统

1.1 损伤和老化要因的定义和分类

老化要因指的是桥梁构件上能够引起损伤的现象; 损伤指的是使得桥梁构件性能降低的现象。老化要因与损伤互为因果关系。本研究把主梁及桥面板的

收稿日期: 2002-11-11
资助项目: 日本文部科学省科学研究费资助项目 (10450169)
作者简介: 王桂萱 (1960-), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授.

损伤归纳为表 1，老化要因归纳为表 2。

桥梁损伤一览表 表 1

编号	损伤名 (构件)	编号	损伤名 (构件)
1	低质量混凝土 (主梁, 桥面板)	12	钢筋锈蚀 (主梁 桥面板)
2	配筋杂乱或不等距配置钢筋 (桥面板)	13	漏水、滞水 (主梁, 桥面板)
3	胀裂 (主梁, 桥面板)	14	脱落 (桥面板)
4	苔类植物 (主梁, 桥面板)	15	剥离 钢筋外露 (主梁, 桥面板)
5	裂缝 (主梁)	16	异常弯曲 (主梁 桥面板)
6	桥面板裂缝 (桥面板)	17	游离石灰 (主梁 桥面板)
7	变色、老化 (主梁, 桥面板)	18	异常振动 (主梁 桥面板)
8	破损 (主梁, 桥面板)	19	钢板连接部损伤 (主梁, 桥面板)
9	排水管堵塞或机能不足	20	锈汁 (主梁, 桥面板)
10	路面裂缝	21	凝胶状流出物 (主梁, 桥面板)
11	蜂窝、空洞 (主梁, 桥面板)		

桥梁老化要因一览表 表 2

编号	老化要因名 (构件)	编号	老化要因名 (构件)
22	荷载等力学要因 (桥面板)	25	搅拌至养生阶段问题 (主梁, 桥面板)
23	弯曲应力 (主梁)	28	钢筋不足导致刚度不足 (主梁, 桥面板)
24	剪切应力 (主梁)	33	低质量骨料 (主梁, 桥面板)
26	配筋误差 (桥面板)	34	干燥收缩 (主梁 桥面板)
27	保护层不足 (主梁, 桥面板)	35	排水功能不良 (主梁, 桥面板)
29	碱骨料反应 (主梁, 桥面板)	36	意外荷载 (交通事故, 地震等)
30	盐害 (主梁, 桥面板)	37	型模、支护不良 (主梁, 桥面板)
31	中性化 (主梁, 桥面板)	38	基础条件变化 (主梁, 桥面板)
32	冻害 (主梁, 桥面板)		

1.2 设定损伤和老化要因的规则

本文在参考既有成果的基础上^[2~4]，建立了表示桥梁损伤和老化要因关系的详细因果规则。表 3 为主梁的因果规则例子。表中前件部表示条件，后件部表

示结果。表中各规则的意思为：如果前件部事象发生（或作用），则后件部事象发生（或作用）的概率为多少。

主梁因果规则例 表 3

规则编号	前件部	后件部	规则发生概率
83	苔类植物	混凝土变色, 老化	0.9
84	裂缝	漏水, 滞水	0.4
85	裂缝	剥离, 钢筋外露	0.6
86	排水堵塞或不足	排水功能不足	0.9
87	路面裂缝	漏水, 滞水	0.6
88	蜂窝, 空洞	剥离, 钢筋外露	0.4
89	钢筋锈蚀	裂缝	0.4
:			
157	中性化	施工不良	0.4
158	冻害	材料不良	0.4
159	干燥收缩	施工不良	0.4
160	干燥收缩	材料不良	0.4
161	排水功能不足	排水堵塞或不足	0.6
162	基础条件变化 意外荷载 (交通事故, 地震)		0.4

利用这些因果规则，对检测结果的事象逐一比较各规则发生的概率，可以求出桥梁整体的损伤和老化要因间的关系。但由于要搜索很多事实上不存在的组合，因而计算效率较差。为提高效率，本文将所有桥梁损伤和老化要因间的因果规则整理出几个因果网络，然后用此网络，从规则的后件部（结果）开始按网络的联接顺序进行老化要因的推测，降低了搜寻时间，提高了效率。图 1 所示为主梁的因果网络关系例子，图中箭头方向表示影响关系，反方向表示要因关系，连接线表示因果规则成立，事象间连接强度就是表 3 所示的概率。这里的规则主要以表 1 和表 2 定义的损伤和老化要因为基础，参考既有结果和桥梁专家的意见而建立，各规则可能发生的概率设定见表 3。

1.3 环境条件和周边状况规则

1.2 节建立起来的规则是考虑一般的老化机理进行老化原因推测时的规则。因而只要损伤相同，就得出了老化要因相同的结论。但是实际的桥梁受环境条件和周边状况的影响，即使是发生相同程度的损伤，其老化要因也可能完全不同。因此系统在开发过程中，参考桥梁专家的意见，建立了环境条件和周边状况对桥梁损伤和老化要因的影响规则。表 4 表示了其中的一部分规则。具体判断时系统根据环境条件和周边状况的影响程度，变更相应由因果规则确定的事象发生概率。

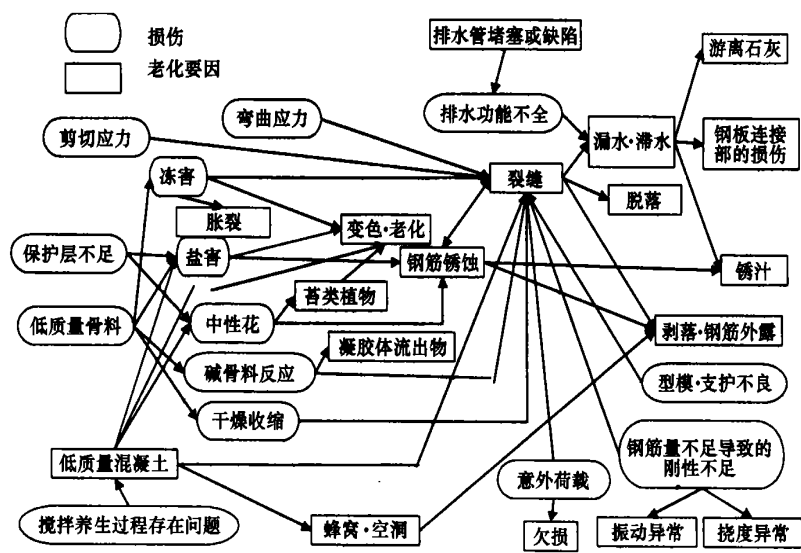


图 1 主梁的因果关系网络
部分环境条件和周边状况规则

表 4

设问	构件	影响规则			根据对设问的回答变更的可信度（概率）			
		前件部时象	后件部事象	确信度				
单车道大型 车交通量为	桥面板	桥面板裂缝	荷载等力学原因	0.6	每天昼夜通行量 1000 台以上	提高等级	每天昼夜通行量	
	桥面板	路面裂缝	荷载等力学原因	0.6		提高等级	1000 台以上	
	主梁	裂缝	弯曲应力	0.4		提高等级		
	主梁	裂缝	剪切应力	0.4		提高等级		
桥龄为	桥面板	桥面板裂缝	荷载等力学原因	0.6	50 年以上	提高等级	50 年以下	10 年以上
	桥面板	路面裂缝	荷载等力学原因	0.6		提高等级	10 年以上	
	主梁	钢筋锈蚀	盐害	0.4		提高等级		降低等级
	主梁	钢筋锈蚀	中性化	0.4		提高等级		降低等级
	主梁	裂缝	弯曲应力	0.4		提高等级		
	主梁	钢筋锈蚀	盐害	0.4		提高等级		降低等级
	主梁	钢筋锈蚀	中性化	0.4		提高等级		降低等级
设计标准 年代	桥面板	桥面板裂缝	钢筋量不足	0.4	83 年前	提高等级	83 年前	不明
	主梁	裂缝	钢筋量不足	0.4		提高等级		

1.4 老化原因推测步骤

按照 1.2、1.3 节建立起来的规则开发了老化要因推测系统。系统进行老化要因推测的步骤如下（参见图 2）。

(1) 因果网络的初期化

建立由因果关系构成的初期因果网络，并对初始事象的发生概率进行初始化。

(2) 确定环境条件

输入桥梁（构件）的环境条件，周边状况，变更因果网络规则对应事象发生的概率。

(3) 输入桥梁检测数据

根据检测结果确定桥梁损伤的有无和各损伤等级，桥梁检测时检查出的损伤的发生概率为 1（确定事件）。

(4) 判断损伤类型

对检测中确认的损伤，变更对应规则因果网络的

发生概率。

(5) 输入详细试验数据

如果对桥梁进行了无破损检测试验，则输入这些

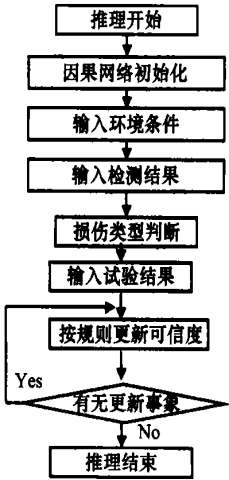


图 2 老化要因推定步骤

试验结果，再根据试验结果更改相应事象的发生权
率。

(6) 更新各规则的概率

使用因果网络，更新各事象发生的概率。

(7) 是否还有可信度需要更新

对整个因果网络检查是否还有未更新的可信度，
如果有返回步骤 6 进行更新。当事象间的可信度全部
被更新时，推理结束，系统给出结果。

2 选择最佳维修管理对策

2.1 维修管理对策必要性评价（事象等级的确定）

桥梁维修管理的必要性一般按桥梁构件的重要程
度和桥梁构件的损伤程度来进行。用公式表示为

事象 j 的维修管理对策的必要性 = $CF \times RK$
式中， RK 为事象 j 的等级权重（见表 5）^[4]； CF 为事
象 j 的发生概率（可信度）。

事象等级和权重		表 5
事象等级	判断标准	权重
I	损伤显著，有损交通安全	2.0
II	损伤较大，需要详细检测	1.0
III	有损伤，需要追踪调查	0.5
IV	有损伤，需要记录	0.2
OK	无损伤	0.0

也就是说按上式评价法，对桥梁损伤有重大影响
的事象将为优先采取措施的对象。

2.2 维修管理对策的效果

由于事象间互相关联，当桥梁实施某种对策工法
时，往往同时修复了多种损伤和抑制了多种老化要
因。而且有时还会产生某些次生效果。考虑到这些区
别，本文假定某维修管理对策具有主从两种效果。主
效果指针对某损伤或老化要因采取措施的直接效果，
从属效果为采取某措施后对其它损伤或老化要因引起
的间接效果。系统汇总了桥梁维修的常用对策和各对
策的主从效果及费用情况，表 6 给出了主梁常见的维
修管理对策和主从效果及对策的费用表例子。制订维
修管理对策时，从属效果的效果权重设为主效果权重
的一半。

2.3 维修对策工法的施工条件限制

当对象桥梁的维修对策工法有施工条件限制时，
系统将除去和施工条件不相符合的工法。例如，当不
能进行交通封闭的管制时，替换桥面板的对策就不能
使用，系统在制订维修管理对策时必须除去该项目。

主梁常见的维修管理对策表			表 6
对策名	主效果	从效果	费用 (U)
环氧注入	裂缝		23.8
断面修复	损伤，路面裂缝，漏水，滞水， 盐害，中性化	胀裂	14
表面保护	盐害，中性化		25.2
钢板粘结	钢板连接部的损伤，钢筋 量不足引起的刚性不足	弯曲异常 振动异常 弯曲应力 剪切应力	75
加入预应力	弯曲应力，剪切应力		150
电解电位法	盐害		30
表面清扫	苔类植物，排水堵塞或排水不 足，游离石灰，锈汁，凝胶状 流出物		5
排水管设置	排水堵塞或排水不足		30

表中，费用单位 U (Unit)，1U $\approx$ 100/m²

2.4 维修管理计划的模型化

(1) 维修管理对策主效果的模型化

当施加多种维修对策时，桥梁总的主效果采用下
式评价

$$Y_{11} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^S f(l_j) \times A_i \times E_{ij} \times CF_j \times RK_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=S+1}^N \frac{1}{2^j} \times A_i \times E_{ij} \times CF_j \times RK_j \quad (1)$$

式中， RK_j 为事象 j 的等级权重； CF_j 为事象 j 的确信
度； M 为对策数； N 为事象数； S 为损伤数； A_i 为
是否包含维修管理对策 i ， $A_i = 1$ 为包含维修管理对
策 i 时， $A_i = 0$ 为不包含维修管理对策 i 时； E_{ij} 为对
策 i 对事象 j 的主效果有无， $E_{ij} = 1$ 时为有效果时， E_{ij}
 $= 0$ 时为无效果时； l_j 为施加对策对事象 j 的效果重复
回数，当无重复效果时 $f(l_j)$ 值取 1，否则取 0。

(2) 维修管理对策从属效果的模型化

类似于主效果的考虑，桥梁维修对策的从属效果
用下式表示

$$Y_{12} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^S f(l_j) \times A_i \times E'_{ij} \times CF_j \times RK_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=S+1}^N \frac{1}{2^j} \times A_i \times E'_{ij} \times CF_j \times RK_j \quad (2)$$

式中， E'_{ij} 为对策 i 对事象 j 的从效果有无，有效果时
 $E'_{ij} = 1$ ，无效果时 $E'_{ij} = 0$ 。

(3) 维修计划对策费用的计算

$$C = \sum_{i=1}^M A_i \times C_i \quad (3)$$

式中， C 为维修管理对策需要的费用； C_i 为对策 i

需要的费用。

(4) 维修计划的优化模型

设定维修对象构件效果最大（最大发挥对构件的损伤和老化要因的抑制程度）和效率最大化（维修效果对费用的比）为目标函数，约束条件为可能的维修预算费用。用公式（模型）表示如下

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12} \rightarrow \max(\text{效果最大化}) \tag{4}$$

$$Y_2 = Y_1 / C \rightarrow \max(\text{效率最大化}) \tag{5}$$

$$C \leq Bu \tag{6}$$

式中，*Bu* 为可用于维修管理对策的预算。

2 5 用遗传算法进行维修对策的优化

可以采用很多方法求解满足约束条件式（6），目标函数（4）、（5）式表示的组合优化问题。本文采用了跟其它优化方法相比，可以快速求解的遗传算法。按照遗传算法的基本流程，本文首先对桥梁可能采用的维修对策加以整理，并使每个对策（遗传因子）与一个二进制串（基因串）相对应，然后用式（4）、（5）计算个体的适应度。并按适应度排序进行个体选择。通过对个体的选择、杂交及突然变异等操作，给出维修管理对策的优化解。经过试算后本研究的遗传算法计算参数取表 7 所示的数值。计算的详细步骤请参见文献 [5] 。

遗传算法参数		表 7
项目	参数取值，手法	
个体数	100	
世代数	100	
突然变异率	5%	
选择手法	联赛方式+ 最佳个体保存方式	
交叉手法	1 点交叉	
交叉率	100%	
结束条件	世代换代数= 世代数	

3 实际应用

为验证本系统的可靠性，本文以表 8 所示的桥梁为例，进行了检证。检证方法为首先对对象桥梁进行表观检查，各桥梁检测结果概况如下：Tu 桥由于大型工程车辆通行较多，检测时发现主梁存在有弯曲裂缝、剪切裂缝、钢筋锈蚀裂缝等问题，断面已经过多次修复，修复处由裂缝引起的再老化现象突出。桥面板在发现游离石灰的同时，部分地方存在有和桥轴方向垂直的裂缝，而且桥梁的伸缩装置和排水管被土堵塞；Ha 桥的交通量较大，主梁中央有裂缝在一处发生钢筋外露，桥面板发现游离石灰，桥面板悬臂部发

现由漏水引起的损伤；Ko 桥的交通量较小，但在主梁下方桥轴方向上发现裂缝，主梁和桥面板结合部发现有游离石灰，桥面板的游离石灰现象多方向发生，部分已连接成片，另外铺装结合部发现了裂缝。

对象桥梁概要			表 8
桥梁名	Tu 桥	Ha 桥	Ko 桥
桥梁等级	一级	一级	一级
桥梁形式	RC 简支 T 型梁桥 (1, 2, 3 跨) PC 简支 T 型梁桥 (4, 5 跨)	RC 简支 T 型梁桥	RC 简支 T 型梁桥
桥长 (m)	81. 20	28. 90	63. 00
有效宽度 (m)	5. 50	7. 80	4. 40
跨数	5	2	8
桥龄 (年)	36	32	82
交通量 (台 /2h)	2800	1800	300
构造概要	主梁根数	3 本 (RC 部)	4 本
	主梁间隔	2 @1. 80m (RC 部)	3 @1. 60m
	横梁有无	有 (RC 部)	有
	栏杆材料	混凝土 (RC 部)	混凝土

之后聘请数位有经验桥梁专家对桥梁进行鉴定，专家的评价方法按表 9 所示的标准进行。尽管系统的可信度评价（概率）和表 9 的专家评价方法不完全一致，但将系统利用因果网络进行老化要因推测的可信度（概率）和专家评价结果进行比较，可大致判断系统的可靠性。

专家老化要因评定方法		表 9
评价值	标准	
1	完全无影响	
2	基本上无影响	
3	判断不出	
4	轻微影响	
5	严重影响	

表 10 给出了专家和系统的桥梁诊断评价结果。表中专家评价点数在 4 以上的项目大致与系统 0. 5 以上的输出概率相当。Ha 桥、Ko 桥及 Tu 桥中的排水功能不足项，专家的评价点数是 4 或 5，而系统输出的可信度分别为 0. 90、0. 54、0. 90，系统和专家的判断结果一致，Ko 桥的荷载等的力学要因项专家评价为 4，系统输出的确信度分别为 0. 60，系统和专家的判断结果十分相近。专家评价为 3 以下的项目，系统输出的事象可信度也较低，可以认为系统的输出基本跟专家的意见一致，从而间接验证了系统的可靠性。

专家和系统的诊断结果比较 表 10

变化要因	Tu 桥③		Ha 桥①		Ko 桥②	
	专家	系统	专家	系统	专家	系统
弯曲应力	4	0.6	3	0.6	4	0.6
剪切应力	3	0.6	3	0.6	3	0.6
钢筋量不足引起刚度不足	4	0.6	3	0.6	4	0.6
碱骨料反应	3	0.4	2	0.4	2	0.4
盐害	3	0.4	3	0.4	2	0.4
中性化	4	0.4	2	0.2	3	0.4
冻害	3	0.4	3	0.4	2	0.4
干燥收缩	3	0.5	3	0.4	3	0.4
排水功能不足	4	0.9	5	0.9	4	0.4
意外荷载（事故、地震）	2	0.4	3	0.4	2	0.4
基础条件	3	0.4	3	0.4	3	0.4

系统制订的维修管理对策见表 11。其中系统（1）表示可以进行交通封闭，系统（2）表示不能进行交通条件限制情况下的管理对策。“a”表示以效果最大化为目标函数的结果，“b”表示以效果效率最大化为目标函数的结果。专家栏中的效果、费用为专家

Ko 桥选定的维修对策例 表 11

方案制定者	维修管理对策	效果/效率	费用（U）
专家 A	桥面板：桥面板上面增厚，桥面板下面增厚，替换桥面板，桥面防水	7.55/0.06	137
	主梁：断面修复，重新架设		
专家 B	桥面板：桥面板上面增厚，表面保护，表面清扫，设置排水管	3.45/0.02	142.4
	主梁：断面修复，重新架设		
本系统（1）	a. 桥面板：断面修复，替换桥面板，表面清扫，重铺装	a 9.90/0.07	a 147
	主梁：断面修复，环氧注入，表面保护，表面清扫	b 6.00/0.13	b 45
	b. 桥面板：替换桥面板 主梁：无		
本系统（2）	a. 桥面板：桥面板下面增厚，断面修复，表面保护，表面清扫	a 4.76/0.03	a 147.2
	主梁：断面修复，环氧注入，表面保护，表面清扫	b 0.55/0.11	b 5
	b. 桥面板：表面清扫；注梁：无		

根据经验的设定值。由此可见系统和专家的选择方案比较相似。

4 结论

1. 本文在整理各式各样桥梁老化要因的基础上，建立了桥梁损伤和老化原因的因果网络，并设定了因果规则的可信度（概率）。利用因果网络，根据环境条件、使用状况、检测数据，找出混凝土构件的老化要因及其由此产生的桥梁损伤的因果关系。

2. 建立了桥梁是否需要维修的评价方法，并将维修对策用目标函数和约束函数表示。在此基础上引进遗传算法进行维修管理对策的优化，这里的维修管理对策主要是从桥梁的损伤和抑制老化要因方面考虑的。

3. 应用实例验证了本系统的可靠性。实例验证表明，系统的损伤和老化推测要因推测基本上与专家的判断相一致，用遗传算法得出的最优维修管理方案和专家的意见也基本一致。

参考文献：

[1] 例えば、川村満記. コンクリート構造物の耐久性上の問題とその対策、アルカリ骨材反（その1）、コンクリート工学 [C] . 1994 32（4）： 74—79

[2] 例えば コンクリート構造物の健全度診断技術の開 発に関する共同研究報告書—コンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）— [S] . 建设省土木研究所材料施工部 コンクリート研究室 . 日本構造物診断技術協会，共同研究報告書，整理番号第 195 号，1998—03

[3] 李田，刘西拉. 混凝土结构耐久性分析与设计 [M] . 科学出版社，1999.

[4] 土木研究所資料 桥梁点检要领（案）[R] . 建设省土木研究所，土木研究所資料 2

[5] Miyamoto A, Kawamura K, Nakamura H Bridge Management System and Maintenance Optimization for Existing Bridges [J] . Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2001, 15（1）： 45—55.