

[54] コンクリート橋損傷要因の階層化と耐用性判定

正会員 西村 昭 (神戸大学工学部)
 正会員 藤井 学 (神戸大学工学部)
 正会員 ○宮本 文徳 (神戸大学大学院自然科学研究科)
 富田 隆弘 (神戸大学大学院)

1. まえがき

近年、道路網の発達と共に自動車交通量、重量車両が増加し、橋梁に様々な損傷が発生している。橋梁に発生する損傷とその原因、また、損傷発生とそれによる橋梁諸機能への影響は、いずれも複雑な関連性を有しており、一つのシステムを形成していると考えられる。しかしながら、このシステムを定量的に把握することは非常に困難なことであるが、経験豊富な技術者は、この関連性を基にした損傷評価システムを概念的に構築し、損傷の発生している橋梁の診断を行っているのが現状と考えられる。

本研究では、コンクリート橋の損傷要因をシステム工学的に階層化し、下位の定性的情報から上位の耐荷性、耐久性が推定可能なモデルを作成した。この階層モデルを用いて、実橋に発生している損傷の種類、発生箇所の推定を行うと共に耐用性判定を行うシステムを開発し、実橋へ適用した。

2. 橋梁の損傷要因の階層化

橋梁全般を網羅する損傷要因間の複雑な関連性を求めるために、あいまい階層構造モデル¹⁾を導入する。あいまい階層構造モデル(以下、階層モデルと略記)は、損傷要因間の相関関係に対して人間の主観や経験を反映させることの出来るモデルである。

2.1 あいまい階層構造モデル

階層モデル作成の概念図を図1に示す。図1に示すように、階層モデル作成の第一段階として階層モデルにおいて頂点となる損傷要因 S_i を決定する。次に、階層モデルで線で表される要因間の関係をあいまい2項関係に関する帰属度関数 $f_r(S_i, S_j)$ で表現する。このとき、 $f_r(S_i, S_j)$ は主観によって値域 $[0, 1]$ で与えられる。

要因間のマトリックスモデルとは、各要因間の関連性を行列で表したもので、その要素 $a(i, j)$ は $f_r(S_i, S_j)$ を用いて次のように与えられる。

$$a(i, j) = f_r(S_i, S_j) \quad (1)$$

$$(0 \leq a(i, j) \leq 1)$$

$a(i, j)$ は、要因 S_i が要因 S_j に与える影響の強さを示しており、階層モデルは有向グラフとなる。階層モデル作成前に行列は次の条件を満足していなければならない。

- a) あいまい非反射律が成立する。すなわち、 $\forall (S_i, S_j) \in S \times S$ に対して $f_r(S_i, S_j) < P$ 、これは自己ループを持たないための条件である。
- b) あいまい非対称律が成立する。すなわち、 $\forall (S_i, S_j) \in S \times S, (i \neq j)$ に対して $f_r(S_i, S_j) < P$ もしくは、 $f_r(S_j, S_i) < P$ 、これは、 S_i から S_j へのパスと S_j から S_i へのパスが同時に存在する(サイクリックパス)のを防ぐための条件である。
- c) あいまい半推移律が成立する。すなわち、 $\forall (S_i, S_j), (S_j, S_k), (S_k, S_i) \in S \times S, (i \neq j, j \neq k, k \neq i)$ に対して $M = \bigvee_{d=1}^N (f_r(S_i, S_j) \wedge f_r(S_j, S_k) \geq P)$ の時、 $f_r(S_i, S_k) \geq M$ 、これは S_i と S_j, S_j と S_k に関連性が存在するとき、 S_i と S_k にも関連性が存在するという条件である。

但し、 P は境界値であり、 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_N\}$ 。

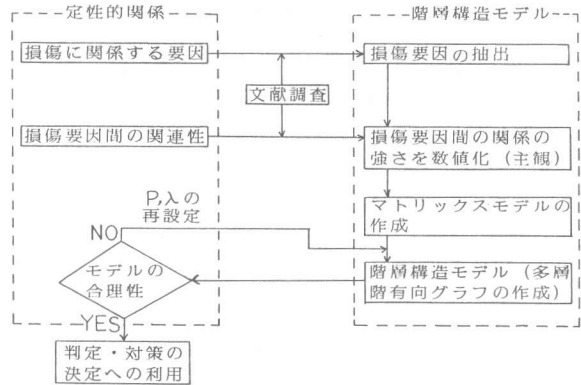


図1 あいまい階層モデルの作成概念図

次に、階層モデルの作成であるが、ここで1つのマトリックスモデルから複数個の有向グラフが得られるため、階層モデルの合理性判定を行い、対象システムを最も忠実に反映する有向グラフを階層モデルとして採用する。階層モデルが合理的で無い場合は、境界値Pとあいまい構造パラメータλを再設定し有向グラフを再び作成する。ここで、Pは関係の有無の境界となる値であり、λはファジー補集合 \bar{r} への帰属度 $f\bar{r}(Si, Sj)$ を制御する変数である。

$$f\bar{r}(Si, Sj) = \frac{1 - f_r(Si, Sj)}{1 + \lambda \cdot f_r(Si, Sj)} \quad (2)$$

(但し、 $-1 < \lambda < \infty$)

で、決定される。

2.2 損傷要因の階層モデル

まず、橋梁の諸機能を表す用語の定義を行う。本研究では、橋梁の諸機能を構造的な面と社会的な面の二つに分類し、諸機能がそれぞれ図2に示すツリーに従うものとし、その意味を表1に示すものとした。但し、各用語には幅員狭小とか線形不良のような設計時の問題として扱われるものは含んでいない。また、ツリーの最下層の用語のみを、

損傷により直接影響を受けるものとし階層モデルの要因の中にも含める。表2に階層モデルのために選定した要因名とその対応番号を示す。損傷要因は橋梁の上部工・下部工を網羅するように選んだが、付属施設は省略したが、要因は大きく分類すると三種類になる。第一類は、損傷発生により影響を受ける橋梁の諸機能で、番号1から8である。第二

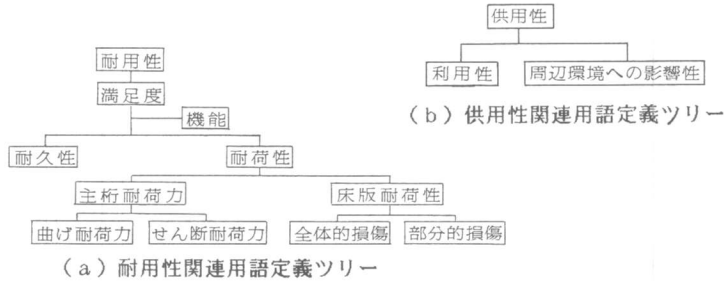


図2 各用語関連ツリー

表1 橋梁の諸機能を表す用語の定義及び、その意味

耐用性	: 満足度を指標とする対象構造物に対する現時点での評価
満足度	: 耐用性及び耐久性より対象構造物が、その機能を構造的に安全に果たすか否かの尺度
機能	: 設計時に構造物に与えられた構造的な能力
耐荷性	: 構造物の作用荷重に対する抵抗性
耐荷力	: 現時点において、構造物あるいは部材が、ある限界状態に達するまでに抵抗する荷重
耐久性	: 劣化速度からみた、現時点における構造物の劣化に対する抵抗性
劣化	: 構造材料が物理的・化学的作用等により経年的に材料本来の性能を低下させること
全体的損傷	: 床版において、曲げ剛性低下の結果、使用限界として現れる損傷
部分的損傷	: 床版において、ひびわれ面でのせん断伝達能の低下として現れるコンクリート塊の抜け落ち
供用性	: 橋梁、すなわち道路構造物としての社会的影響度
利用性	: 走行時の安全性より見た路面状況の社会的影響度
周辺環境へ の影響性	: 構造物が存在することによる騒音・美観等構造物周辺への影響

表2 階層モデル要因名と対応番号

番号	要因名	番号	要因名
1	利用性	39	主桁コンクリートの疲労
2	周辺環境への影響性	40	主桁コンクリートの劣化
3	走行安全性	41	引張鉄筋量、PC鋼材量の減少と付着性状の変化
4	耐久性	42	スラスト鉄筋量の減少と付着性状の変化
5	主桁 曲げ耐荷力	43	鉄筋、PC鋼材の疲労
6	主桁 せん断耐荷力	44	支承機能の劣化
7	床版 全体的損傷	45	桁のひびわれ
8	床版 部分的損傷	46	鉄筋、PC鋼材の腐食
9	床版、ひびわれ面でのせん断伝達能の低下	47	同一方向のひびわれ
10	主筋方向ひびわれ	48	支承付近のひびわれ
11	配筋方向ひびわれ	49	上部、下部構造の変位
12	格子状ひびわれ	50	橋台、橋脚の変状
13	ハンチ沿いのひびわれ	51	基礎の変状
14	一部に集中したひびわれ	52	応力集中箇所の疲労
15	貫通ひびわれ	53	鋼ボックス、鋼橋脚内への水の侵入
16	ひびわれ幅	54	鋼材のひびわれ
17	床版コンクリートの疲労	55	結露、滲水
18	床版コンクリートの劣化	56	塗装の劣化
19	床版コンクリートの剝離	57	部材位置
20	角落ち、すりへり	58	鋼材の腐食
21	遊離石灰	59	美観
22	床版での漏水	60	排水施設の破壊
23	輪荷重の通行軌跡	61	泥づまり
24	配筋筋量	62	清掃不足
25	床版厚	63	排水不良
26	主桁の剛性	64	路面滲水
27	主桁のねじれ、不等沈下	65	輪荷重の増大と繰返し頻度
28	主桁作用	66	大型車交通量
29	舗装の凹凸	67	示方書
30	舗装のひびわれ	68	橋令
31	道路線形	69	塩害
32	主桁の振動、たわみ	70	凍結融解作用
33	舗装面での漏水	71	道路条件
34	アスファルトの老化	72	橋脚条件
35	伸縮装置の破壊とその付近の凹凸	73	構造条件
36	騒音	74	施工不良
37	床版目地とその付近の凹凸	75	設計
38	主桁コンクリート部のせん断力分担能の低下	76	災害

類は、損傷名で番号9 から60である。第三類は、番号24,25,57及び、61から76の要因名で示される損傷の直接的・間接的原因である。

実際の階層モデルの作成に際しては、境界値Pとあいまい構造パラメータλを試行錯誤的に変化させ、幾つもの有向グラフを作成し、その合理性を判定した。その結果、 $P=0.4, \lambda=2.8$ として作成した有向グラフが、文献等の記述との一致性、パスの簡潔さより階層モデルとして最適と判断した。作成した階層モデルを図3に示す。ここで図中の番号1から76は要因番号を表し、aからxはパスの接続を示している。また、最上層の2重丸が図2の定義ツリーの最下層となっている。このモデルは、損傷要因の関連性を総合的に表現しているが階層モデル内には、コンクリート桁、鋼桁、RC床版それぞれに生ずる特有の損傷を同時に表現し、また耐用性、供用性という性質の異なるものを含んでいる。そこで、各機能別の損傷構造を明らかにするためにこのモデルを分割する。分割したモデルの一覧表を表3に示す。分割は、図3の最上層要因ごとに行ったが、コンクリート桁、鋼桁については要因の持つ意味に従って分割した。

3. 橋梁診断システム

本システムは、対話形式を採用しており、目的に応じて幾つかの使用方法が可能であるが、ここでは本診断システムを実橋（桜橋）²⁾耐用性診断に適用した例について述べる。

桜橋の概要を表4に示す。表4よりわかるように、桜橋は橋齢50年を越え、一般的に考えられる寿命を過ぎている。また、元来は幅員5mであったが、拡幅され現在は6.75mとなっている。周辺の道路条件としては、橋の両側ともほぼ直線であるが、左岸側に信号があり、橋上で車両が停止する。

桜橋の耐久性の診断を本システムを適用して行う。診断システムへ入力した初期条件は、表4に示した概要と、属地条件としての農村部及び一般道路への架設、である。この初期条件を基に診断システムが行った質問に対する解答の一部を、表5と表6に示す。表5は発生する損傷の予測のための入力情報であり、表6は、損傷による耐久性への影響を調べるための入力である。この解答を基に、耐久性階層モデルのパスを辿った様子を図4に示す。但し、図4は耐久性階層モデルの上部階層構造のみである。図中の番号は表2の要因番号であり、また実線が辿ったパスを、破線が止まったパスを表しているが、桜橋がRC T桁橋であることより床版関係のパスは全て止まれと指示している。

図4より、耐久性は46:腐食により41:

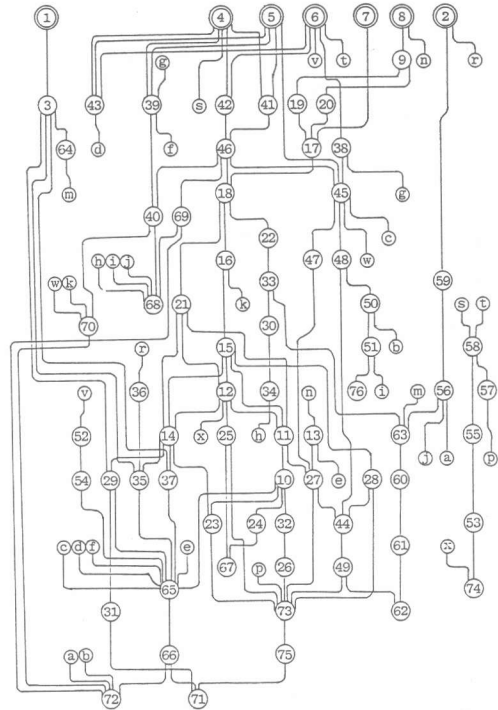


図3 橋梁の損傷要因間の関連性に基づく階層モデル（全体図）

表3 分割階層モデル名一覧表

① 利用性
② 周辺環境への影響性
③ 耐久性
④ RC桁曲げ耐力
⑤ RC桁せん断耐力
⑥ 鋼桁耐久性
⑦ 鋼桁耐力
⑧ 床版 全体的損傷
⑨ 床版 部分的損傷

表5 損傷予測用入力（質問への解答）の一部

・橋梁の前後に交差点がある
・床版厚（15cm）
・支承部に対する点検は行われていない
・床版スパン（1.06m）
・主桁部に部分的補強工事を行ったことがある

表6 耐久性の状態推測用入力（質問への解答）の一部

・支承部に損傷がある
・桁端部での支圧ひびわれは無い
・桁に同一方向の斜めひびわれがある
・鉄筋に発錆が見られる
・桁に0.2mm以上のひびわれ幅のひびわれがある

表4 桜橋の概要

所在地	兵庫県佐用郡三日月町
架設路線	国道179号線
橋長	2 @ 10.9 m = 21.8 m
形式	RC単軸T桁斜橋
幅員	6.75 m
架設年次	昭和8年
適用示方書	大正15年版
設計荷重	TL-8（2等橋）
拡幅年次	昭和43年

引張鉄筋、及び42:スターラップ鉄筋の断面積減少と付着性状の変化による影響を受けていることが明らかとなる。この原因は1.4mmを越える過大な45:ひびわれからの水分の侵入と、68:橋齢が50年を越えていることによる40:コンクリートの中酸化による劣化の進行である。更に、39:コンクリートの疲労による影響があるが、これは材質の不均一さにより疲労が発生しやすいことを施工不良として架設年代、つまり、橋齢で考えている。これより、診断システムは耐久性の診断を行うために、次の三つの要因に対し目視点検結果を入力するよう求めた。

- (a) コンクリートの劣化状況 (要因番号40)
- (b) 引張鉄筋の腐食状況 (要因番号41)
- (c) スターラップ鉄筋の腐食状況 (要因番号42)

上記の要因について目視点検を行い各要因に主観的評価を与え診断を行う。その際の診断用入力を表7に示す。表7の影響度とは、要因の診断に対する影響の強さのことであり、確度とは、要因の評価に対する信頼の程度を意味する。コンクリートの劣化については、拡幅部以外で剝離、漏水、及びコンクリートの変色が見られることから、劣化はかなり進行していると考えられたため、3段階評価のうち最悪(33)とした。また、診断に対する影響度は大(3)とし、確度は全般に低い(5)とした。同様に、引張鉄筋とスターラップ鉄筋の腐食状況に対して評価を行った。

続いて、主桁のせん断耐力の診断を耐久性と同様に行った結果、せん断耐力にも影響が出ていることが判明した。そこで、その診断のために表8に示す目視点検結果に基づいた入力を行った。

最終的な診断はファジー集合論を用いて行う。具体的には、表7と表8内の判定ランクに対して帰属度関数を π 関数を用いて割り当てたのち、ベークネス関数と Dempster & Shafer理論を用いて結合する。結合後の帰属度関数の位置、形状に基づいて診断を行う。診断結果は、耐久性、せん断耐力共に悪く定量的診断を行うための載荷試験の実施を含む詳細調査の実施を促すものであった。事実、桜橋は現時点で架け換え工事が行われている。

4. あとがき

本研究での成果を以下に整理する：

- (a) 損傷要因間の相関関係を明らかにするために、要因間の関連性をファジー集合論的に数値化することによって、橋梁全般を網羅した階層構造モデルを作成した。更に、階層モデルを橋梁の機能別に分割する事により、各機能の損傷機構を明らかにした。
- (b) 橋梁診断システムを開発し、発生する損傷の予測、耐用性、供用性への影響推測と診断を一連の流れとして行う事を可能とした。

今後は、本システムをより多くの橋梁に適用し、その有効性を検証することと、エキスパートシステムのような柔軟なシステムへと移行するための研究が必要と思われる。

参考文献

- 1) 田崎 栄一郎: あいまい理論による社会システムの構造化, 数理科学, No.191, pp.54~66, 1975.5
- 2) 西村 昭, 藤井 学, 前田昌俊, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁診断ケーススタディ - R C 桁橋の場合 -, 橋梁と基礎, Vol.19, No.4, pp.18~24, 1985.4

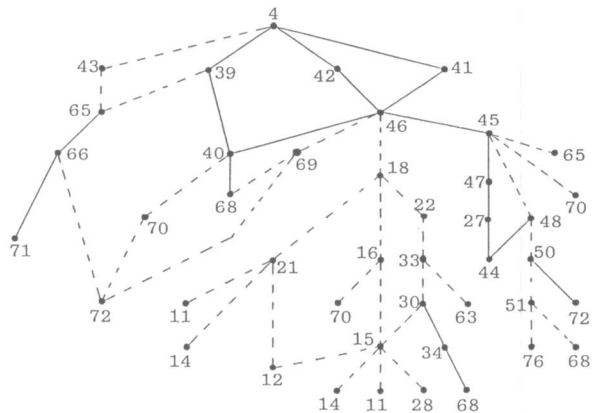


図4 耐久性階層モデル上部階層構造におけるパスの経路

表7 耐久性診断用目視点検結果 (入力情報)

評価項目	ランク*	影響度	確度
コンクリートの劣化	33	3	5
引張鉄筋の腐食	55	3	2
スターラップの腐食	54	3	2

* 3#: 3段階評価

5#: 5段階評価

表8 せん断耐力診断用目視点検結果 (入力情報)

評価項目	ランク*	影響度	確度
桁のひびわれ	55	2	3
スターラップの腐食	54	3	2

* 3 #: 3段階評価

5 #: 5段階評価