

第3章 既設橋の健全度評価

3.1 損傷度と健全度評価

構造物の維持管理を合理的な形で行うには、構造各部での損傷度を的確に評価し、それらをもとに部材や橋梁全体の健全度を総合的に評価することが必要である。しかし、これまでの多くの健全度評価は構造各部に現れた個々の変状そのものに重点を置いたものであり、必ずしも部材全体あるいは構造物全体に対する健全度の評価に結びついていない面があった。本来、部材あるいは構造物全体の健全度評価においては、構造各部における種々の損傷が全体に及ぼす影響のほかに、耐荷性や耐久性に関する安全性の度合い、走行性・機能性といった使用性に関する評価も含め総合的に判断することが必要である。

ここで、以下に示すような構造物の各レベルにおける損傷度あるいは健全度評価を考えると、

- 1) 構造部位の損傷度評価
- 2) 構造部材・要素の損傷度あるいは健全度評価
- 3) 構造物全体の損傷度あるいは健全度評価

疲労や腐食などといった個々の劣化現象に対する 1), 2) レベルでの損傷度の評価については、種々の研究・検討が進められており、定量的な解析・分析を通じて有用な情報が得られるようになってきた。しかしながら、各構造部位・部材における種々の損傷要因の集合体としての構造物全体の損傷度評価あるいは使用性や耐荷性・耐久性をも考慮した形での健全度評価に関しては、前述したようにまだ十分な評価手法が確立しているとは言いかたい。現在、橋梁構造物全体の損傷度評価は、各部材・要素単位ごとに損傷度を点数で評価し、それぞれに重み（各部材・要素の重要度、各損傷の重要性）をつけ総合化して全体としての評価を行っている。今後はさらに 1), 2) レベルでの損傷度評価の精度を上げる必要があることは言うまでもないが、3) についてもう少し種々の条件（補修・補強にかかる経済性、施工性、景観性など）を考慮に入れ、1) と 2) の評価レベルとの整合性をとることが必要である。特に、1), 2) レベルでの評価における人間の主觀に起因する曖昧さの問題や従来、経験的に設定してきた重み係数の理論的根拠に関する問題などについては、今後十分な検討が必要と考えられ、それには総合評価手法の改良さらにはエキスパートシステムやニューラルネットワークなどの新技術を評価手法に活用していく必要があろう。

本章では、まず種々の損傷度尺度を紹介し、その特徴について説明する。次に、構造部位あるいは部材レベルでの損傷度評価に関しては、代表的な劣化現象として疲労および腐食を取り上げ、第4章および第5章においてそれぞれその評価手法について述べることとし、ここでは、構造物全体の損傷度あるいは健全度評価手法および新しい方法として注目されるファジィ理論、エキスパートシステム、ニューラルネットワークを活用した評価手法について述べる。

3.2 損傷度の評価尺度

一般的な損傷の評価尺度として今までに提案されたものについて、その理論的根拠と特徴を以下に示す。Yao¹⁾によると、損傷は以下のように定義されている。

“any deficiency and/or deterioration of strength as caused by external loading and environmental conditions as well as human errors in design and construction”

この定義はヒューマンエラーを除けば、外力および環境による耐力・強度の低下を意味している。さて、この損傷

を評価するための尺度としては、もちろんどのような構造物に対しても適用でき、その定義ならびに物理的意味が明確なものが望ましい。

損傷評価尺度は、その評価目的により概念的に以下のような3つのものに分類される。

- 1) 数値的尺度
- 2) 経済的尺度
- 3) 言語表現による尺度

2)の経済的尺度としては、damage quotient²⁾が、3)の言語表現による尺度としてはファジィ集合³⁾やファジィ確率⁴⁾などを用いたものが提案されているが、ここでは1)の数値的尺度に着目して、現在までに提案された代表的なものを紹介する⁵⁾。

損傷指標は基本的には、線形被害則に基づいている。作用する荷重の大きさにより、応力をパラメータとする高サイクル疲労と塑性ひずみをパラメータとする低サイクル疲労に分けられる。低サイクル疲労では、繰返し荷重を受けた場合の応力-ひずみ関係、ヒステリシスに注目して、対象となる構造物の材料特性を考慮する必要がある。以下に、鋼部材に関する数値的指標を紹介する。

鋼構造部材の損傷指標としては、3つのものが考えられている。

(1) Yao と Munse の指標

Yao と Munse によって1962年に強地震下での鋼構造物の低サイクル疲労に対して提案されたものである。

i サイクル中の損傷

$$D_i = (\Delta i / \Delta u_i)^{\alpha_i} \quad (3.1)$$

Δi ：サイクル中の塑性ひずみ増分

Δu_i ： i サイクル中の破壊を生じさせる引張塑性ひずみ

$$\alpha_i = 1 - 0.86(\Delta i' / \Delta i)$$

$\Delta i' / \Delta i$ ：相対ひずみ比

n 回繰返し載荷後の損傷

$$D_e = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n (\Delta i / \Delta u_i)^{\alpha_i} \quad (3.2)$$

この方法では鉄筋コンクリート構造物で重要な荷重の載荷順序の影響を考慮するのが困難である。また、鉄筋コンクリート構造で Δu_i と α_i を実験的に求めるのは容易ではない。

(2) Oliveira の指標

Oliveira は1975年に以下の指標を提案している。

$$D_e = (\Delta / \Delta u)^{\alpha} \quad (3.3)$$

Δ ：最大塑性ひずみ

Δu ：部材の極限塑性ひずみ

α ：材料に依存する正のパラメータ

この指標は散逸エネルギーと荷重履歴を考慮していない。

(3) Krawinkler と Zohrei の指標(1983)

$$D_e = C \sum_{i=1}^n (\Delta \delta_{pi})^{\alpha_i} \quad (3.4)$$

C, α_i ：損傷パラメータ

$\Delta \delta_{pi}$ ： i サイクル中の塑性変形

この指標は引張、圧縮で同じ挙動をする材料に適している。

これらの損傷尺度は、荷重の繰返し効果は考えているものの、主としてかなり大きな外力が繰り返し作用していることを考えている。いわゆる低サイクル疲労に近いものを対象としており、外力としては地震を想定している。これに対し、橋梁構造物では耐用期間が長いため、より小さな荷重の繰返しによる高サイクル疲労が重要となる。前述したように、低サイクル疲労、高サイクル疲労のいずれにしても、基本的には線形被害則に基づいてその損傷度を評価しているが、これに対し、圧力容器などでは熱疲労に対して、材料特性の変化、例えば、硬度の変化によって疲労損傷度を評価しようとする試みもなされている。

ここで、損傷度と余寿命の関係について考えてみる。例えば地震に対する余寿命は地震（特に大地震）の再現期間で決定されるが、交通荷重による疲労は時間に依存し、その損傷の進行は時間の関数となる。具体的には、疲労き裂の発生進行過程を評価し、それから余寿命評価を行うことになる。環境による電気化学作用である腐食もその評価尺度は同様に時間の関数となる。よって、腐食速度が余寿命評価にとって非常に重要であり、実際の構造物の維持管理にとってはその許容値（例えば、許容腐食量、疲労であれば許容き裂長など）をどう設定するかが重要となる。

概念的には、損傷度を $[0,1]$ で定義し、0 を損傷が全くない、1 が完全に損傷していると考えると、損傷度は 1 のとき余寿命は 0 となる。しかしながら、最も重要かつ困難なことがこの損傷度の 0,1 の定義であり、そのためにはいくつかの限界状態を設定する必要がある。もちろん、限界状態の設定には、構造材料の韌性（ductility）や構造物の冗長性（redundancy）を考慮する必要がある。

3.3 構造物全体の健全度評価

橋梁構造物全体の健全度評価については先にも述べたように、各部材・要素単位ごとに損傷度を点数で評価し、それぞれについて各部材・要素の重要度、各損傷の重要度などに応じて重みをつけ総合化して全体としての評価を行っているものが多い。

3.3.1 鋼鉄道橋の健全度評価^{①)}

鋼鉄道橋では、健全度の評価をより定量的なものとするために、評価の内容を以下に示す項目に分けて考えている。

- ① 損傷度（変状の悪影響の度合い）
- ② 健全性（耐力・耐久性等強度上の安全性の度合い）
- ③ 使用性（走行性・機能性）

従来における主に現れた変状そのものに重点を置いた評価では、その変状の評価結果は損傷評価としては正しくても、それが部材や構造物全体の健全度にどの程度影響するのかについては明確ではなかった。また、疲労損傷のように徐々に進行し、ある時点から急速に進展して、それが構造物全体の健全度を著しく低下させるものであっても、その時点で兆候程度しか現れていなければ、実態より危険側に判定されることもあった。さらに、後追い的対応で維持管理を進めた場合、計画的予算措置の実施や投資の平準化を図るために予防・保全的な対策を講じるのに不便な面もあった。このようなことから、健全度の要因を前述した3項目に分け、部材に関係なく損傷として現れたものを「損傷度」で表し、主に強度面からみた構造全体の安全性の度合いを「健全性」とし、要求される使用性能に対する性能を「使用性」として分離して評価することとしている。また、構造物の評価では常に構造物が維持すべき「性能」を意識しておくことの重要性から、図-3.1に示すような構造物の劣化曲線図を用いて、性能の時系列的変化と損傷およびとるべき措置の説明がなされている。なお、ここでは、上記3項目のうちの「損傷度」に関する健全度の評価について紹介するが、「健全性」に関する評価や疲労損傷に対する評価については、疲労損傷および腐食に関して記述した第4章および第5章において一部記載したので参照するのがよい。

損傷度の評価は、①進行性、②冗長性（Redundancy）、③変状が与える影響（変状の重要度）の各項目について

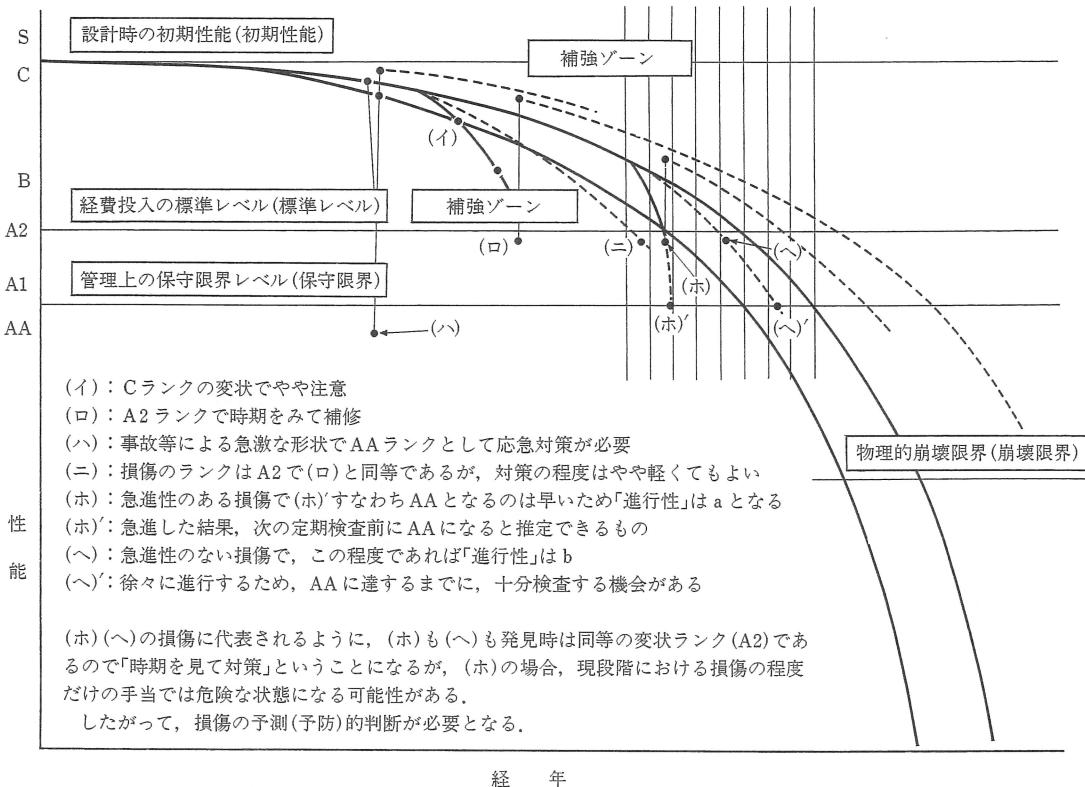


図-3.1 構造物の性能の劣化曲線概念図

表-3.1 損傷に対する評価表の一例

進行性および冗長性の評価表（1）「進行性」

評価ランク	状況
a	変状を発見してから4～5年以内（全般検査で1回見落としを考慮）に機能の限界もしくはその部材（品）の破断等に達する可能性のあるもの。
b	変状を発見してから10年（塗装期間）以内に機能の限界もしくはその部材（継手）の破断等に達する可能性のあるもの。
c	変状が認められるものの進行は遅く、計算上設計想定寿命程度は満足できると思われるもの。
s	変状が発生しても通常はほとんど進展しないか、進展しても破断に至らないもの。

進行性および冗長性の評価表（2）「冗長性」

評価ランク	状況
a	直接部材や構造物の安全を脅かす著しい機能低下や崩壊につながるもの。
b	連鎖的もしくはある特定の使用条件になったときに構造物の著しい機能低下や崩壊に結びつくもの。
c	耐久性の低下として長期的には機能低下や崩壊に結びつくもの。
s	その継手や部材が崩壊しても構造物全体の強度や機能にあまり影響を与えないもの。

評価がされる。表-3.1に各項目に対する評価表を示す。

損傷の進行性においては、発見された損傷によって、いつその部材の機能が失われるか、また、それが通常の検査で発見し、適切な処置をとっていく余裕のある早さで進行するか否かを評価する。主要部材に限らず二次部材であっても同様の評価を行う。変状の種類や発生した位置、量、交通量などを加味したものである。

構造物の冗長性は、発見された損傷が進展して破断状態に達したとき、構造物全体としての崩壊など、構造物としての機能を失う状態になるかどうかを評価するものである。従来における「部材の重要度」、「部材の強度に与える影響」や「列車の走行安全性」などを反映したものとなっている。

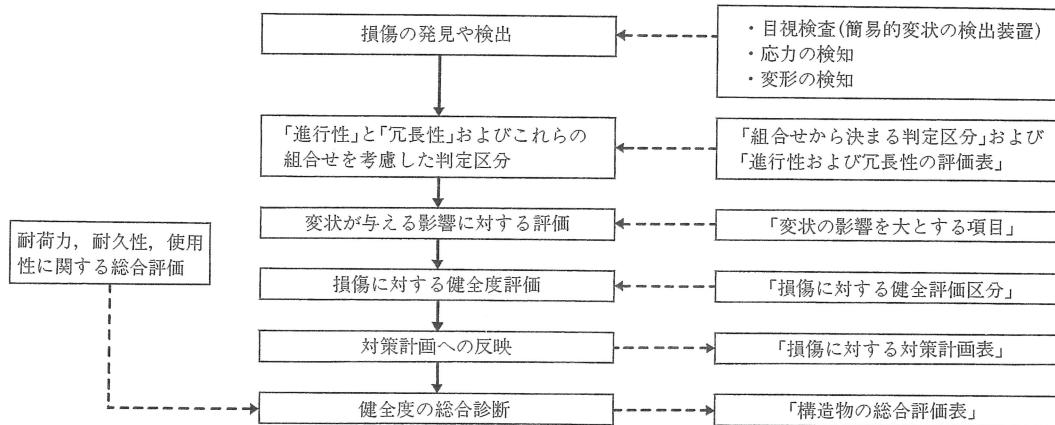
変状の影響に関しては、進行性や冗長性の評価以外についての影響について評価を行う。変状の発生が他に多大な

表-3.2 各要因の組合せから決定される判定区分

冗長性 進行性	a	b	c	s
a	A ₁	A ₁	A ₂	A ₂
b	A ₂	A ₂	B	C
c	B	B	C	C
s	C	C	C	S

表-3.3 損傷に対する健全度判定区分

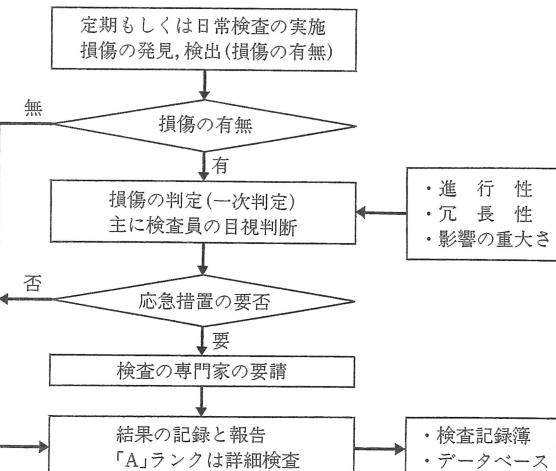
判 定 区 分	運転保安等に対する 影 韶	変状の程度	措 置
AA	・安全を脅かす	重 大	直ちに措置
A	・早晩脅かす ・異常外力の作用時危険	変状が進行し, 機能低下も進行	早急の措置
	将来脅かす	変状が進行し, 機能低下の恐れ	必要な時期に 措置
B	進行すれば Aランクになる	進行すれば Aランクになる	監視(必要に応 じて措置)
C	現状では影響なし	軽 微	重点的に検査
S	影響なし	健 全	



影響を及ぼす場合や多発する可能性がある場合などについては進行性や冗長性の評価に重みをつけ、総合評価の際に判定ランクを1ランクアップさせている。

これら各項目に対する評価の組合せにより表-3.2、表-3.3に示す判定区分により健全度判定を行う。なお、直ちに何らかの措置が必要となる「AA」ランクの損傷については、その内容と損傷程度(定量化された量として)が具体的に示されているが、示された値については、その妥当性についてさらに調査・研究すべきとしている。

発見された損傷に対する評価の流れと定期・日常検査における損傷評価の流れをそれぞれ図-3.2、図-3.3に示す。損傷に対する定期もしくは日常検査は主に目視検査で行われ、変状、異常の発見と発見された損傷に対する一次判定が主な役割であり、損傷の評価は図-3.2に示した流れに従ってなされる。定量的な検査が必要な場合には詳細検査として専門家による検査が実施されるが、その場合の評価の流れについても同様である。



3.3.2 道路橋の健全度評価手法例⁷⁾

東京都では、表-3.4に示すように、損傷の判定標準を日常点検、定期点検、異常時点検の3つに分けて定めている。日常点検とは、全橋梁を対象として、損傷の早期発見を図るためにもので、原則として目視点検である。これに対し、定期点検は全橋梁を対象として、橋梁の保全を図るために定期的に実施されるもので、主に目視および簡易な点検機器・器具により行う点検である。また、異常時点検とは、地震、台風、集中豪雨等の災害が発生した場合や日常点検で異常が発見されたときに特定の橋梁を対象に主として橋梁の安全性を確認するためのものである。ここでは、一般的である定期点検時の橋梁の総合健全度判定法を紹介する。

総合健全度は各部材・要素の点検結果をもとに判定されるため、まず、部材別の点検項目を定める必要がある。東京都では表-3.5に示すように、上部工、下部工、支承、高欄、防護柵、地覆、舗装、伸縮装置、排水設備、落橋防止装置、点検設備、防音設備、照明設備、添加物ごとに損傷・異常の内容を具体的に示した点検項目を決めている。これらの点検結果をもとに、表-3.6の判定基準により各部材の損傷度の判定をする。橋梁全体の損傷度は総合健全度として求められる。東京都では、鋼橋とコンクリート橋に分けて総合健全度判定式を定めている。

鋼 橋

$$\begin{aligned} \text{耐久性 } (\alpha) &= a_1^{b1} \cdot a_2^{b2} \cdot a_3^{b3} \cdot a_4^{b4} \cdot a_5^{b5} \cdot a_6^{b6} \cdot \\ &\quad a_7^{b7} \cdot a_8^{b8} \\ &= a_1^{30} \cdot a_2^5 \cdot a_3^5 \cdot a_4^1 \cdot a_5^{30} \cdot a_6^1 \cdot a_7^4 \cdot \\ &\quad a_8^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{耐荷力 } (\beta) &= a_9^{b9} \cdot a_{10}^{b10} \cdot a_{11}^{b11} \\ &= a_9^2 \cdot a_{10}^1 \cdot a_{11}^1 \end{aligned}$$

コンクリート橋

$$\begin{aligned} \text{耐久性 } (\alpha) &= a_1^{b1} \cdot a_2^{b2} \cdot a_3^{b3} \cdot a_4^{b4} \cdot a_5^{b5} \cdot a_6^{b6} \cdot \\ &\quad a_7^{b7} \cdot a_8^{b8} \\ &= a_1^{30} \cdot a_2^3 \cdot a_3^3 \cdot a_4^{10} \cdot a_5^{30} \cdot a_6^1 \cdot \\ &\quad a_7^3 \cdot a_8^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{耐荷力 } (\beta) &= a_9^{b9} \cdot a_{10}^{b10} \cdot a_{11}^{b11} \\ &= a_9^2 \cdot a_{10}^1 \cdot a_{11}^1 \end{aligned}$$

表-3.7と表-3.8に鋼橋とコンクリート橋の重み係数および評価因子別の評点を示す。このとき、総合評価は図-3.4の総合評価判定図を用いて行われる。

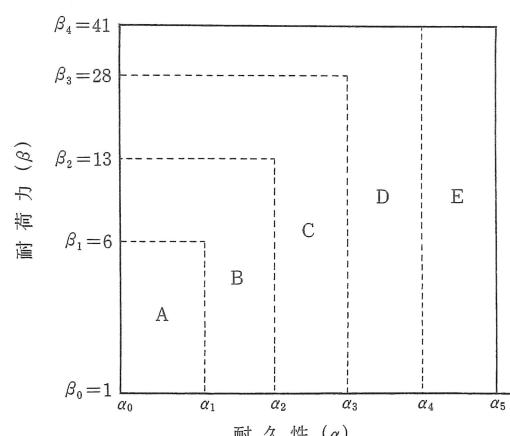


図-3.4 総合評価判定図

表-3.4 損傷の判定標準事例

(1) 日常点検

日常点検の結果は、下表の判定標準により判定する。

表1 日常点検の判定標準

判定区分	状況	措置
I 健全	損傷が特に認められない。	-
II やや注意	損傷がある。	記録
III 危険	損傷が著しい。	緊急補修

(2) 定期点検

定期点検の結果は、下表の判定標準により判定する。

表2 定期点検の判定標準

判定区分	状況	措置
A 健全	損傷が特に認められない。	-
B やや健全	損傷が小さい。	記録
C やや注意	損傷がある。	動態観測
D 注意	損傷が大きい。	詳細調査
E 危険	損傷が著しい。または、第三者へ影響を与える可能性がある。	緊急補修

(3) 異常時点検

異常時点検の結果は、下表の判定標準により判定する。

表3 異常時点検の判定標準

判定区分	状況	措置
I 健全	損傷なしあるいは軽微。	-
II やや注意	損傷がある。	動態観測
III 危険	損傷が著しい。	緊急措置

表-3.5 点検項目事例

部材区分		点検項目		部材区分		点検項目		部材区分		点検項目	
上部工	主桁	本体	鋼	伸縮装置		排	水	設備	備	鋼	①腐食 ②亀裂 ③ゆるみ ④脱落 ⑤破断 ⑥塗装劣化 ⑦遊離・漏水 ⑧鉄筋露出 ⑨豆板・空洞 ⑩豆板・漏水 ⑪豆板・空洞 ⑫豆板・漏水 ⑬鋼板接着部の損傷 ⑭床版ひびわれ ⑮変色・劣化 ⑯漏水・滲水 ⑰漏水・滲水 ⑱漏水・滲水 ⑲漏水・滲水 ⑳異常振動 ㉑異常たわみ ㉒変形
				伸	縮						
中間部	支承	支承体	ゴム	モルタル	アーサーボルト	鋼	コングリート	点検	備	鋼	①腐食 ②亀裂 ③ゆるみ ④脱落 ⑤破断 ⑥塗装劣化 ⑦遊離・漏水 ⑧鉄筋露出 ⑨豆板・空洞 ⑩豆板・漏水 ⑪豆板・空洞 ⑫豆板・漏水 ⑬鋼板接着部の損傷 ⑭床版ひびわれ ⑮変色・劣化 ⑯漏水・滲水 ⑰漏水・滲水 ⑱漏水・滲水 ⑲漏水・滲水 ⑳異常振動 ㉑異常たわみ ㉒変形
下部工	床版	高欄	鋼	コングリート	鋼	コングリート	落橋防止装置	点検	備	鋼	①腐食 ②亀裂 ③ゆるみ ④脱落 ⑤破断 ⑥塗装劣化 ⑦遊離・漏水 ⑧鉄筋露出 ⑨豆板・空洞 ⑩豆板・漏水 ⑪豆板・空洞 ⑫豆板・漏水 ⑬鋼板接着部の損傷 ⑭床版ひびわれ ⑮変色・劣化 ⑯漏水・滲水 ⑰漏水・滲水 ⑱漏水・滲水 ⑲漏水・滲水 ⑳異常振動 ㉑異常たわみ ㉒変形
下部工	橋脚躯体	覆地	鋼	コングリート	鋼	コングリート	防音	点検	備	鋼	①腐食 ②亀裂 ③ゆるみ ④脱落 ⑤破断 ⑥塗装劣化 ⑦遊離・漏水 ⑧鉄筋露出 ⑨豆板・空洞 ⑩豆板・漏水 ⑪豆板・空洞 ⑫豆板・漏水 ⑬鋼板接着部の損傷 ⑭床版ひびわれ ⑮変色・劣化 ⑯漏水・滲水 ⑰漏水・滲水 ⑱漏水・滲水 ⑲漏水・滲水 ⑳異常振動 ㉑異常たわみ ㉒変形
下部工	橋脚躯体	基礎	アスファルト	コンクリート	コングリート	コングリート	照 明	備	鋼	①腐食 ②亀裂 ③ゆるみ ④脱落 ⑤破断 ⑥塗装劣化 ⑦遊離・漏水 ⑧鉄筋露出 ⑨豆板・空洞 ⑩豆板・漏水 ⑪豆板・空洞 ⑫豆板・漏水 ⑬鋼板接着部の損傷 ⑭床版ひびわれ ⑮変色・劣化 ⑯漏水・滲水 ⑰漏水・滲水 ⑱漏水・滲水 ⑲漏水・滲水 ⑳異常振動 ㉑異常たわみ ㉒変形	

なお、取付隔壁や取付階段等を含む橋梁については各自を径間データとして点検し、記録するものとする。

表-3.6 損傷ランクの一覧

部材	損傷の種類	写真の有・無	損傷ランク				
			I	II		III	
			A	B	C	D	E
鋼部材	①腐食	○なし	表面積小	表面積大	断面欠損小	断面欠損大	
	②亀裂	○なし	—	—	規模小	規模大	
	③ゆるみ		なし	—	—	規模小	規模大
	④脱落	○なし	—	—	規模小	規模大	
	⑤破断	○なし	—	—	—	あり	
	⑥塗膜劣化	○なし	変色小	変色大	ハガレ小	ハガレ大	
コンクリート部材	⑦ひびわれ	○なし	—	規模小	規模中	規模大	
	⑧剥離・鉄筋露出	○なし	鉄筋露出せず	鉄筋露出小	鉄筋露出大	鉄筋断面欠損	
	⑨遊離石灰	○なし	あり	—	—	—	
	⑩豆板・空洞	○なし	規模小	規模大	—	—	
	⑪すりへり・浸食		なし	規模小	規模大	—	—
	⑫抜け落ち	○なし	—	—	—	あり	
	⑬鋼板接着部の損傷		なし	—	規模小	—	規模大
	⑭床版ひびわれ	○なし	一方向ひびわれ (50 cm以上)	二方向ひびわれ (50 cm未満)	二方向ひびわれ (50 cm未満)	二方向で鉄筋の 錆汁あり	
舗装	⑮段差・コルゲーション	○なし	20 mm未満	20 mm~40 mm	40 mm以上	—	
	⑯ポットホール	○なし	10 mm未満	10 mm~30 mm	30 mm以上	—	
	⑰舗装ひびわれ	○なし	5 mm未満	5 mm~10 mm	10 mm以上	—	
	⑱わだち掘れ	○なし	20 mm未満	20 mm~40 mm	40 mm以上	—	
その他	⑲遊間の異常	○なし	—	—	あり	—	
	⑳変色・劣化		なし	規模小	規模大	—	—
	㉑漏水・滯水	○なし	あり	—	—	—	
	㉒異常音		なし	—	—	あり	—
	㉓異常振動		なし	—	—	あり	—
	㉔異常たわみ		なし	—	—	あり	—
	㉕変形	○なし	—	規模小	—	規模大	
	㉖土砂詰り・土砂滯り	○なし	—	—	あり	—	
	㉗沈下	○なし	—	規模小	—	規模大	
	㉘移動・ずれ	○なし	—	規模小	—	規模大	
	㉙傾斜	○なし	—	規模小	—	規模大	
	㉚洗掘	○なし	—	規模小	—	規模大	
	㉛欠損	○なし	—	規模小	—	規模大	

表-3.7 重み係数と評点 (鋼橋)

		評価項目	<i>i</i>	評価因子別の評点 [a_i]					重み係数 [b_i]	
耐久性	上部工	桁	主桁	1	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5	30
			縦桁	2	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5	5
			横桁	3	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5	5
		横構・対傾構	4	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		1
	下部工	床版	5	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		30
		支承	6	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		1
	下部工	橋台	7	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		4
		橋脚	8	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		4
耐荷力性	活荷重	設計活荷重	9	$\geq S31$		1.0			2	
				$S31 > \sim \geq S14$		1.5				
				$S14 >$		1.6				
	交通量	大型車交通量 (台/日)	10	$4000 \geq$		1			1	
				$4000 < \sim \leq 8000$		2				
				$8000 < \sim \leq 12000$		3				
				$12000 <$		4				
	供用年数	供用年数	11	$\geq S40$		1			1	
				$S40 > \sim \geq S20$		2				
				$S20 > \sim \geq S1$		3				
				$S1 >$		4				

表-3.8 重み係数と評点 (コンクリート橋)

		評価項目	<i>i</i>	評価因子別の評点 [a_i]					重み係数 [b_i]	
耐久性	上部工	桁	主桁	1	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5	30
			縦桁	2	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5	3
			横桁	3	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5	3
		床版	5	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		10
	下部工	支承	6	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		1
		橋台	7	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		3
	下部工	橋脚	8	A-1	B-2	C-3	D-4	E-5		3
耐荷力性	活荷重	設計活荷重	9	$\geq S31$		1.0			2	
				$S31 > \sim \geq S14$		1.5				
				$S14 >$		1.6				
	交通量	大型車交通量 (台/日)	10	$4000 \geq$		1			1	
				$4000 < \sim \leq 8000$		2				
				$8000 < \sim \leq 12000$		3				
				$12000 <$		4				
	供用年数	供用年数	11	$\geq S40$		1			1	
				$S40 > \sim \geq S20$		2				
				$S20 > \sim \geq S1$		3				
				$S1 >$		4				

3.3.3 FHWA の判定法⁸⁾

FHWA (Department of Transportation, Federal Highway Administration) では、中小橋梁に対して点検の標準シートが用いられる⁸⁾。これは、AASHTO の橋梁点検マニュアルのものを参考にしている。評価点としては、以下のものが考えられる。このうち、評価点の 0~6 は主部材のみに用いられる。

- 9：新しい
- 8：良好—補修は不要
- 7：軽微な補修が必要
- 6：少し大きい補修が必要
- 5：大きな補修が必要
- 4：通行に注意—緊急に補修が必要
- 3：重量車通行不可
- 2：通行不可
- 1：補修が絶対必要
- 0：崩壊に至る可能性

図-3.5 に構造物の健全度判定法を要約したものを示す。

表-3.9 に示す各項目の評価点を用いて計算するようになっており、図中の $S_1 \sim S_4$ については、その詳細な計算法が示されている¹⁰⁾。

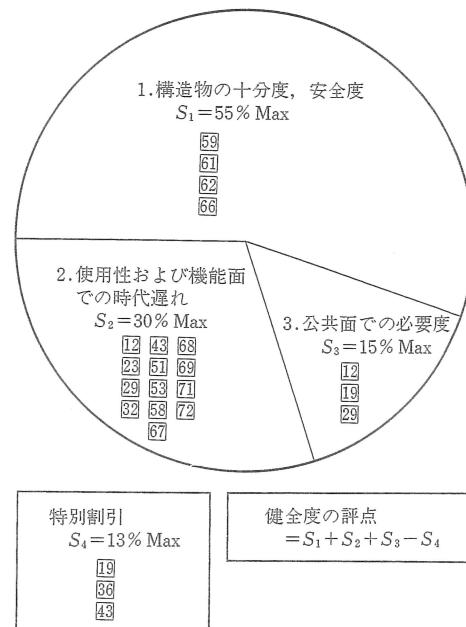


図-3.5 構造物の健全度評価 (FHWA)

表-3.9 構造物台帳および評価シート (FHWA)

状態	材料	状態の分析	評点
58 床版 床版表面の状況、収縮継手等			
59 上部構造 すべての部材、支点、排水設備を含む			
60 下部構造 橋台、橋脚、パイル、フェンダー、フーティング等			
61 水路と水路の防護工 流れの安定性、護岸工事、堤防等			
62 暗渠および擁壁 線形や沈下問題、擁壁の安定			
63 残存寿命の評価 大幅な改修なしでの寿命、材料、交通量等より評価		ここで[63]および[64]を除く[58]から[65]までの評点は次の11段階で示される N : Not applicable, 9 : New Condition, 8 : Good Condition, 7 : Generally good Condition, 6 : Fair Condition, 5 : Generally fair Condition, 4 : Marginal Condition, 3 : Poor Condition, 2 : Critical Condition, 修理するまで使用不可, 1 : Critical Condition, 修理するかどうか検討する, 0 : Critical Condition, 修理不可能	
64 運用上の評点 許しうる最大荷重（最大軸重、総重量）			
65 アプローチ道路の線形 橋の使用効果に関する			
66 記録上の評点 現在のままで安全に使用できる荷重レベル			
査定	欠陥		評点
67 構造物の状態 構造物の全体的な評価、構造的欠陥+機能的欠陥		ここで[62]から[72]までの評点は次の11段階で示される N : Not applicable, 9 : 現行基準より上, 8 : 現行基準と同等, 7 : 現行の最低基準より上, 6 : 現行最低基準と同等, 5 : 耐えられる最低のレベルより若干上, 4 : 耐えられる最低レベル, 3 : 耐えられないレベル, 修理が必要, 2 : 耐えられないレベル, 架替えが必要, 1 : 使用をやめてすぐ修理, 0 : 使用をやめてすぐ架替え	
68 床版の幾何学的形状 床版の幅、高欄、地覆等			
69 橋下のクリアランス、高さ及び横方向 下を通過する道路から上部構造まで			
70 安全載荷能力 荷重制限			
71 水路の妥当性 洗掘、斜面の防護、流れの容量			
72 アプローチ道路の線形 アプローチ道路の線形と橋の安全性、機能性			

3.4 新しい評価手法

損傷度評価における人間の主観的判断による曖昧さの除去や各損傷要因の総合化に対しては、新しい手法であるファジィ理論、エキスパートシステム、ニューラルネットワーク手法などの適用が有効である。ここでは、これらの新しい手法を用いた評価事例について述べる。

3.4.1 ファジィ理論の損傷度評価法への利用

(1) ファジィ協和分析法による総合健全度評価法

構造物の損傷度を評価するには、多数の要因を取り上げる必要がある。しかし、多数の要因が必ずしも独立して損傷度評価に寄与するとは限らず、要因の定量的寄与度を確定的に決定することは困難である。このような問題に対処するために数量化理論第2類を適用することが考えられる¹¹⁾。

数量化理論は質的データの判別・予測分析のために考えられた手法であり、外的基準（この場合、構造物の損傷度）が分類（グループ）で示されているようなとき、数量化された評価項目（要因）が同じグループに属する場合と異なるグループに属する場合とをより明確にするような判別得点（カテゴリーウェイト）を求めようとするものである。

カテゴリーウェイトは外的基準のどの分類を対象とするかによって異なる値を与える。ある場合は大きな値を取り、ある場合は小さな値を取ることになるが、一般に、その最大値と最小値の差、すなわち変動幅が大きいほど損傷度の判別に大きな影響を与えており、この変動幅をもって重要度係数と考える。このような数量化理論を用いることにより、従来は経験的に決められていた重み係数に理論的根拠を与えることができる。

総合的な損傷度評価を得るために、ここでは Nijkamp による concordance analysis（協和分析）を用いる¹²⁾。この手法は評価モデルの構成の際に設ける仮定や作業量が少なく、しかも一定の信頼度のある評価が行えるという利点を持つ。concordance analysis を実行するには、次式で示すインパクト行列 P と重要度係数 W が必要である。

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1J} \\ P_{I1} & \cdots & P_{IJ} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_J] \quad (3.6)$$

ただし、 P_{ij} は構造物 i の評価項目 j に関する損傷度ランクであり、 W_j は評価項目 j に関する重要度係数である。

この P と W を用いて、各構造物の損傷度の大小を表す指標として以下に concordance index $d_{ii'}$ を考える。

$$d_{ii'} = \sum_{j \in D_{ii'}} W_j \frac{|P_{ij} - P_{i'j}|}{\max_{1 \leq i, i' \leq I} |P_{ij} - P_{i'j}|} \quad (3.7)$$

ただし、 $D_{ii'} = \{j | P_{ij} > P_{i'j}\}$ を表す。 $D_{ii'}$ は P_{ij} より $P_{i'j}$ が大きい、すなわち i' 構造物より i 構造物の損傷が大きい項目の集合を表している。この $d_{ii'}$ より、次式で示す concordance matrix を作成する。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1i} \\ d_{I1} & \cdots & d_{Ii} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

最後にこの D を用いて次の concordance dominance index D_i を各構造物について求める。

$$D_i = \sum_{i'} d_{ii'} - \sum_{i'} d_{i'i} \quad (3.9)$$

この concordance dominance index D_i を用いて構造物の損傷度を評価することができるが、実際に各評価項目に対する損傷状態を判定することはそれほど容易ではない。例えば、やや異常がある、あるいは大きな異常があるという状態は点検者によって微妙な差があると考えられる。すなわち、このような言語による評価は本質的に曖昧さを含

表-3.10 ファジィインパクト行列

		評価要因 j								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
橋梁 i		L	S	L	Vs	S	S	S	S	S
1		L	S	L	Vs	S	S	S	S	S
2		Vl	M	L	Vs	M	M	M	M	M
3		Vs	M	Vs	L	M	S	M	S	M
4		M	L	L	S	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs
5		Vs	Vs	Vl	S	S	Vs	S	Vs	S
6		Vl	L	Vs	M	Vl	Vl	Vl	Vl	Vl
7		S	L	Vs	Vs	M	S	Vs	S	Vl
8		Vl	S	M	Vs	L	Vl	L	M	L
9		L	Vl	L	Vs	S	S	S	S	S
10		M	Vs	Vl	Vs	S	M	M	S	Vs

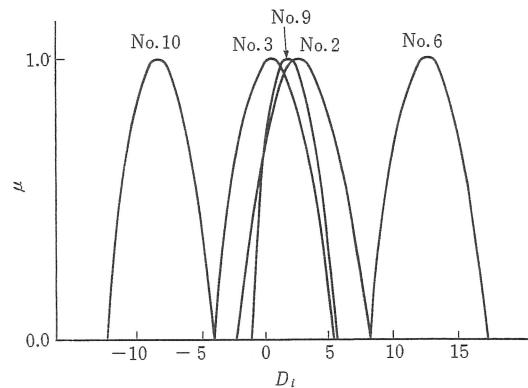


図-3.6 ファジィ化した評価項目を利用した損傷評価

んでおり、その解釈にはある程度の幅を持たした方がよいと思われる。

ここでは、人間の主観に起因する曖昧さを取り扱うために考案されたファジィ理論^{12),13)}を用いて、このような言葉による評価をより実際的な形で扱う方法を紹介する。

この方法では、各評価項目に対する評価を0, 1, 2, ……のようにカテゴリー化するのではなく、ファジィ集合で規定された言語変数を用いて表現する。この場合、インパクト行列は表-3.10 のようになる。ただし、ここでは話を簡単にするために評価項目としては9項目のみを用いている。表-3.10 の中の記号は、それぞれ Vl : (損傷が) Very large, L : Large, M : Medium, S : Small, Vs : Very small を表す。このようにファジィ化した評価項目を利用して、特に5つの橋梁 (No.2, No.3, No.6, No.9, No.10) について損傷評価したものが図-3.6 である。縦軸はメンバシップ関数の値であり、横軸は損傷度を表す指標で前述の concordance dominance index D_i を表している。この D_i の計算は式(3.9)を用いて行われるが、インパクト行列がファジィ量で与えられているので、この計算では拡張原理（ファジィ数の一つの計算法）が用いられている¹³⁾。半順序関係 (semi-ordering; 明確な順序関係がつかないこと)を考えれば、5橋のうち最も健全度の高いのは橋梁 No.10 で、次が No.3, No.2, No.9 であり、最も健全度の低いのが No.6 となる。ここで注意しなければならないのは、橋梁 No.3, No.2, No.9 の間には明確な差がないことである。すなわち、元々の評価項目に対する評価が言語変数という幅のある形でなされているため、それらを総合した結果も必然的に幅のある形で与えられることになる。このように評価にかかる曖昧さがそのまま生かされているため、これらの橋梁の損傷状態には明確な差がないという結果が導かれることになる。この評価結果は、一見大雑把で信頼性が低く感じられるかもしれないが、元々それほど正確でない情報から精密な結果が得られること自体が矛盾しているとも考えられる。このような言語変数を用い、半順序関係という考え方を用いることにより、本当は酷い損傷を受けている橋梁を健全なものとして誤って評価する可能性を減らすことが可能になる。このことは、損傷度解析の結果を維持管理計画策定に利用する場合の大きなメリットとなると思われる。

(2) ファジィ真理値を用いた損傷の影響度評価法

橋梁全体の損傷度評価を合理的に行うためには、点検によって発見された損傷が構造物全体の健全度に対してどの程度影響するかについてエキスパートの知識をアンケートにより獲得し、それぞれの損傷の影響度に関するファジィ真理値を求め、それによって構造物全体の損傷度を評価する試みもなされている¹⁵⁾。

アンケートは橋の管理期間、鋼橋の製作、工事会社およびコンサルタントに所属する15人の技術者を対象とし、プレートガーダー橋の62箇所の着目位置について、表-3.11 に示す損傷ごとに、表-3.12 に示す3つの調査項目に関する見解を3段階で評価するものである。アンケートの集計結果によれば、これら3段階の評価は回答者によってかなりばらつく。これには回答者の主観的判断による曖昧さが含まれていると考えられる。この曖昧さを処理するため

表-3.11 鋼桁の損傷の種類

記号	損傷の種類	損傷の概要
イ	腐食	塗膜が劣化し、鏽汁、孔食、欠食等がみられる。
ロ	き裂	鋼材に疲労き裂が生じている。
ハ	破断	疲労き裂や異常な力で断面が破断している。
ニ	変形	曲がりや座屈などの変形がみられる。
ホ	緩み	H.T.B. やリベットが緩み、正常な機能を失っている。
ヘ	脱落	H.T.B. やリベットが抜け落ちている。
ト	接合不良	床版とフランジの接合面が離れている、ボルトやリベット連結部に肌すきがある。
チ	漏水・滯水	部材の欠損部から雨水が浸透している、漏水が箱断面内部にたまっている。
リ	異常音	部材のきしみ音や、接合面のたたき音、きしみ音が発生している。
ヌ	異常振動	通常振動が発生しない部位に振動が生じている。

表-3.12 アンケート調査の回答

現在の損傷状況		将来の損傷発生予想		損傷の影響度	
記号	項目	記号	項目	記号	項目
A	現在、損傷が多く発生している	1	将来、損傷が多く発生すると思われる	イ	重大な損傷である
B	現在、損傷の発生は少ない	2	将来、損傷の発生は少ないと思われる	ロ	重大な損傷につながるおそれがある
C	現在、損傷の発生が極めて少ないか、または全くない	3	将来、損傷の発生は全くないか、または全くないと思われる	ハ	軽微な損傷である
X	無回答	4	無回答	ニ	無回答

にファジィ真理値を利用し、アンケートから得られた回答者数から特定の部材・部位における各種の損傷の発生に関する知識の真理値を求めることができる。

ファジィ真理値は真理値空間 $[0,1]$ におけるファジィ集合として定義され、ファジィ真理値に対してメンバシップ関数を定義することができる。ここでは、4つのカテゴリー A,B,C,X (あるいは 1,2,3,4 またはイ,ロ,ハ,ニ) に対するファジィ真理値をそれぞれ very true, more or less true, very false, unknown であると考えている。

表-3.13 にプレートガーダー主桁各部について「現在の状況」、「将来予想」および「影響度」に関する真理値の一部を示す。き裂については、特に支間部の下フランジあるいはそれに隣接した部位で真理値が極めて高い値となっている。これは作用応力の大きさ、構造的なレダンダシィの低さ、専門家の橋梁構造に関する知識が反映された結果とみることができる。これらに対応する「現在の損傷状況」の真理値は、例えば下フランジの板継ぎ溶接部の 0.237 のごとく非常に小さい。損傷事例の調査によれば、下フランジの板継ぎ溶接部の疲労破壊は融合不良や溶接割れなどのかなり劣悪な品質の継手のみで発生している。このような、現在はほとんど発生しない、将来はある程度発生する可能性がある、しかし、もしも発生したならばその影響度は極めて高い部位の点検計画については、設計計算や製作時の非破壊検査記録を参考にする、応力測定を併用する、抜き取り検査の考え方を導入するなどの配慮が必要である。

点検結果に基づいて橋の全体としての損傷度を評価し、以降の処置を決めなければならない。影響度に関する真理

表-3.13 ファジィ真理値

着目位置	部 位 ・ 部 材	損 傷 形 態					
		き 裂			腐 食		
		現状	将来	影響度	現状	将来	影響度
支間部	① 下フランジ	0.14	0.33	1.00	0.71	0.71	0.56
	② 下フランジ板縫接部	0.24	0.49	1.00	0.67	0.69	0.53
	③ ウエブ	0.24	0.49	0.95	0.55	0.65	0.40
	④ ウエブ板縫接部	0.23	0.51	0.89	0.52	0.62	0.35
	⑤ 上フランジ	0.14	0.24	0.73	0.53	0.55	0.35
	⑥ 上フランジ板縫接部	0.14	0.34	0.67	0.56	0.57	0.41
	⑦ 下フランジ～ウェブ溶接部	0.24	0.43	0.84	0.52	0.62	0.35
	⑧ 上フランジ～ウェブ溶接部	0.35	0.56	0.63	0.60	0.62	0.29
	⑨ 垂直補剛材下端部	0.30	0.55	0.58	0.52	0.71	0.24
	⑩ カバーブレート端部・側面溶接部	0.24	0.49	0.78	0.59	0.62	0.35
	⑪ 添加物等取付プラケット付け根の溶接部	0.38	0.53	0.54	0.65	0.65	0.35
	⑫ 下フランジ	0.38	0.36	0.77	0.82	0.82	0.45
	⑬ 下フランジ～ウェブ溶接部	0.40	0.48	0.73	0.74	0.74	0.47
端支点 または 中間支点	⑭ ウエブ	0.24	0.34	0.72	0.71	0.78	0.45
	⑮ 下フランジ～ソールプレート溶接部(横断方向)	0.53	0.58	0.61	0.81	0.81	0.31
	⑯ 下フランジ～ソールプレート溶接部(長手方向)	0.43	0.48	0.61	0.81	0.81	0.31
	⑰ ソールプレート	0.29	0.29	0.58	0.85	0.79	0.30
	⑱ 垂直補剛材	0.33	0.34	0.55	0.71	0.74	0.41
	⑲ 垂直補剛材～下フランジ溶接部	0.35	0.44	0.67	0.65	0.74	0.41
	⑳ 垂直補剛材～下フランジ溶接部	0.40	0.38	0.53	0.82	0.82	0.41
	㉑ 横桁・対傾構取付ガセット	0.43	0.45	0.56	0.74	0.78	0.36
	㉒ 横構ガセット	0.45	0.49	0.45	0.67	0.70	0.26
	㉓ 横構ガセット～ウェブ溶接部	0.48	0.58	0.51	0.65	0.67	0.26
	㉔ 横構ガセット部の垂直補剛材溶接部	0.48	0.53	0.50	0.65	0.67	0.26
対傾構 取付部	㉕ 垂直補剛材上端溶接部	0.63	0.69	0.46	0.63	0.59	0.35
	㉖ 垂直補剛材上端スカーラップ部	0.63	0.70	0.46	0.50	0.59	0.35
	㉗ 上フランジとウェブの溶接部	0.49	0.62	0.60	0.53	0.59	0.39
	㉘ ガセット	0.47	0.50	0.41	0.50	0.59	0.29
	㉙ 垂直補剛材の高力ボルト、リベット孔	0.43	0.49	0.39	0.54	0.62	0.29
	㉚ 高力ボルトまたはリベット	0.51	0.49	0.33	0.54	0.59	0.29
横 桁 取付部	㉛ 垂直補剛材上端溶接部	0.66	0.69	0.57	0.53	0.59	0.36
	㉜ 垂直補剛材上端スカーラップ部	0.63	0.67	0.53	0.50	0.59	0.36
	㉝ 上フランジとウェブの溶接部	0.51	0.62	0.66	0.53	0.59	0.36
	㉞ ガセット	0.35	0.47	0.47	0.53	0.56	0.29
	㉟ 垂直補剛材の高力ボルト、リベット孔	0.51	0.54	0.47	0.54	0.62	0.29
	㉟ 高力ボルトまたはリベット	0.48	0.52	0.41	0.54	0.63	0.31
横 構 取付部	㉞ 横構ガセット	0.33	0.47	0.46	0.56	0.62	0.26
	㉟ 横構ガセット～ウェブ溶接部	0.57	0.62	0.43	0.53	0.62	0.31
	㉟ 横構ガセット部の垂直補剛材溶接部	0.41	0.51	0.46	0.53	0.62	0.26
	㉟ 高力ボルトまたはリベット	0.60	0.55	0.23	0.56	0.62	0.24

表-3.14 損傷度評価

評価ランク	A	B	C
影響度の真理値	0.70 以上	0.70~0.30	0.30 以下

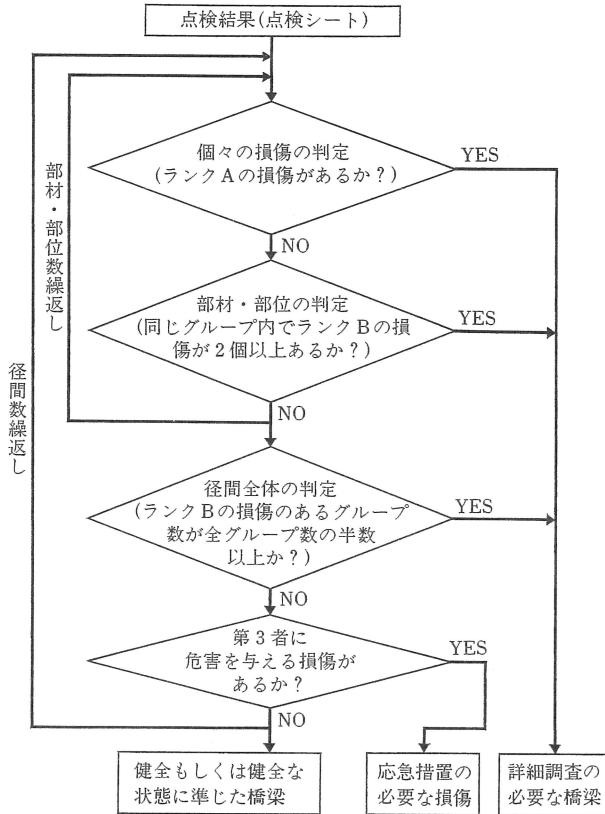


図-3.7 橋梁全体の損傷度の判定フロー

値を用い、それぞれの損傷の程度に対する評価のランクを表-3.14に示すように決定している。図-3.7に橋梁全体の損傷度の判定フローを示す。損傷の程度を表すAの有無、部材・部位の同一グループ内のBの数、橋全体でのBの分布に従って、橋は応急処置が必要、詳細調査が必要、および健全の3つに分類されている。

以上のような方法を実際に適用するには、ここで用いているメンバシップ関数、真理値の解釈の方法、損傷の判定フローなどについて今後さらに検討を加えていく必要があろう。また、設計計算や橋の置かれている地域の交通荷重や自然環境、さらには応力測定などと組み合わせる方法も今後の課題と考える。

3.4.2 損傷度評価エキスパートシステム

橋梁の個別的な損傷度評価には、各損傷要因の評価のみならず、総合的評価にもどうしても人間の判断に頼らざるを得ない部分がある。つまり、人間の持つ対象が不明確で漠然としていてもその本質を把握し、特性の判別ができる総合的評価能力で、情報不足やモデルの不備などを補うわけである。ここでは、鉄筋コンクリート床版の損傷度評価のためのエキスパートシステムを紹介する¹⁶⁾。ここで紹介するシステムは、専門家の持つ知識をプロダクションシステム（IF…THEN…型のルールを用いたシステム）という形で表現し、コンピュータに蓄積することにより実用的な損傷度評価を行うことを目的としている。このシステムの特徴として以下の点をあげることができる。

- 1) 実際に維持管理業務に携わっている専門家との対話を通じて専門的、経験的な知識の獲得を試みている。

- 2) コンピュータ言語として LISP (記号処理型のコンピュータ言語) を用いて、ルールの変更や追加に対する柔軟性を確保している。
- 3) 確信度 (certainty factor) を導入することにより、入力データの不確定性およびルール自体に含まれる不確定性を考慮できるようにしている。
- 4) ルールベースおよびデータベースを複数個に分割し、必要に応じてそれらを切り替えて使えるようにすることにより、実行速度の短縮を図っている。
- 5) 損傷度を評価するための指標として、損傷程度のほかに、損傷原因および損傷進行度を考え、これらの指標を組み合わせることにより、より多面的な評価を可能にしている。

損傷度の評価は、損傷パターン、損傷原因、損傷進行度という3つの指標を用いて行われる。損傷パターンは、パネルごとの点検により得られたデータから導かれる損傷程度 (A, B, C) の分布状況が、あらかじめ設定しておいた基準損傷パターンのどれに属するかで決定される。ここで、パネルとは、主桁と対傾構で区切られた部分を言う。損傷原因は、損傷状況、損傷パターン、床版の機能劣化の程度から推定され、床版の両端部、張り出し部、中央部について別個に求める。損傷進行度は、ひび割れ発生時期、ひび割れパターン、損傷原因、床版の機能性等から推定される。損傷進行度もパネルごとに A, B, C の3段階で評価し、パターン化を行う。損傷度評価は、上記の損傷パターン、損傷原因、損傷進行パターンを組み合わせて行う。これにより、床版のどの部分に損傷が集中し、将来それがどのように進展していくかを明らかにすることができます。

評価は、得られたデータにプロダクションルールの形で表現されている知識を順次適用していくことによりなされるが、この際データや知識に含まれる不確実性を考慮できるように、確信度 CF を導入する。CF は 0 から 1 までの

表-3.15 点検データ

点検項目	点検結果	CF	点検項目	点検結果	CF
ひび割れ幅	0.1 mm	0.8	ひび割れ形状	レンズ状	0.4
ひび割れ間隔	0.45 cm	0.7	ひび割れ状況	連続	0.4
ひび割れ方向	2方向	0.7	ひび割れ内の泥	多い	0.9
端横桁からの浮き	あり	0.5	鉄筋損傷程度	A	0.8
遊離石灰の流出	0.24 m ²	0.6	遊離石灰	多い	0.3

```

(損傷程度-1-2
IF
  (ひび割れ幅 = x = CF1)
  (* <= x 0.2) (* >= x 0.1)
THEN
  (* deposit (ひび割れ幅 中 = CF1)))

(損傷程度-1-5
IF
  (ひび割れ間隔 = x = CF1)
  (* <= x 60) (* >= x 40)
THEN
  (* deposit (ひび割れ間隔 中 = CF1)))

(損傷程度-2-8
IF
  (ひび割れ方向 2方向 = CF1)
  (ひび割れ幅 中 = CF2)
  (ひび割れ間隔 中 = CF3)
THEN
  (* deposit (損傷程度 B (* times 1.0 (* min = CF1)))))

(損傷程度-3-10
IF
  (流出 遊離石灰 = x = CF1)
  (* <= x 0.3)
THEN
  (* deposit (流出 遊離石灰 小 = CF1)))

(損傷程度-4-13
IF
  (流出 遊離石灰 小 = CF1)
THEN
  (* deposit (損傷程度 B (* times 1.0 (* min = CF1)))))

(損傷程度-4-20
IF
  (端横桁からの浮き = CF1)
THEN
  (* deposit (損傷程度 A (* times 1.0 (* min = CF1)))))


```

図-3.8 床版損傷程度適用ルール

表-3.16 損傷程度の推論結果

適用ルール	推論結果
〈損傷程度-2-8〉	損傷程度：B 0.7
〈損傷程度-4-13〉	損傷程度：B 0.6
〈損傷程度-4-20〉	損傷程度：A 0.5

A (0.50)	A (0.90)	B (0.70)	B (0.40)	B (0.60)	A (0.40)
B (0.80)	B (0.70)	A (0.80)	?	A (0.30)	A (0.50)
A (0.90)	C (0.80)	A (0.60)	?	B (0.80)	C (0.80)
C (0.20)	A (0.50)	B (0.50)	?	A (0.70)	A (0.60)
B (0.60)	B (0.80)	C (0.40)	A (0.60)	A (0.90)	A (0.30)

図-3.9 損傷程度の分布

表-3.17 床版の基準損傷パターン

損傷パターン	内 容
パターン1 (P 1)	損傷程度が「A」または「B」であるパネルがゾーン1, 2, 3においていずれも70%以上ある。
パターン2 (P 2)	損傷程度が「A」または「B」であるパネルがゾーン1, 2においてのみいずれも70%以上を占める。
パターン3 (P 3)	損傷程度が「A」または「B」であるパネルがゾーン1においてのみ70%以上を占める。
パターン4 (P 4)	損傷程度が「A」または「B」であるパネルがゾーン2においてのみ70%以上を占める。
パターン5 (P 5)	損傷程度が「A」または「B」であるパネルがゾーン3においてのみ70%以上を占める。
パターン6 (P 6)	損傷程度が「A」または「B」であるパネルがゾーン1, 2, 3においていずれも70%未満である。

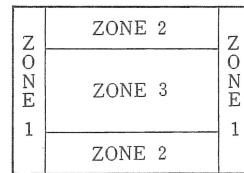


図-3.10 床版のゾーン分割

数値で表され、データおよびルールの結論部に設定される。ルールの条件部が複数の条件で構成される場合、各条件に与えられるCFのうち最小値を条件部全体のCFとし、それに結論部のCFを乗じることで全体のCFを求める。

次に適用例を示す。あるパネルに関する点検データを表-3.15に示す。これに図-3.8に示すルールを適用し、表-3.16の結果が得られる。1つのパネルについて複数の損傷程度が求まる場合は最もランクの高いものの中で最大のCFを有するものを選択する。したがって、このパネルの評価結果は、「損傷程度 A(CF=0.5)」となる。これを全パネルについてパネル位置とともに示したのが図-3.9である。図中、括弧内の数字は、損傷程度に対するCFを表し、“?”で示した箇所は、与えられたデータからは評価できなかったことを示す。次に、この結果を使って損傷パターンを求める方法を示す。まず、床版を図-3.10に示すような3つのゾーン（ゾーン1、ゾーン2、ゾーン3）に分割する。そして、表-3.17に示すような代表的な床版の基準損傷パターンに従って損傷パターンを求める。その結果、「損傷パターン P 2(CF=0.9)」が得られる。ほぼ同様にして、「損傷進行パターン P 2(CF=0.36)」が求まる。さらに、各ゾーンごとに最大のCFを有する損傷原因を選択し、それを各ゾーンの損傷に対する主要な原因であるとみなす。損傷原因として次のものが推論されている。

ゾーン1：「打継ぎ部の不良(CF=0.45)」

ゾーン2：「セメントの不良(CF=0.2)」

ゾーン3：「コンクリートの沈降(CF=0.35)」

以上の結果より、この床版は周辺部の損傷が進んでおり、しかも現在も比較的大きな速度を持って進行中であるため再点検および補修が、特に周辺部で必要だと思われる。さらに、これらの結果と損傷原因を合わせて評価することにより損傷の発生および進展メカニズムの解明のための有力な手掛かりが得られ、また補修が必要かどうか、あるいは必要な場合の補修工法選定のための有益な情報が得られる。

3.4.3 ニューラルネットワークを用いた補修工法選定システム

エキスパートシステムは橋梁の損傷度評価に有用であるが、実用的なシステムの構築においては、専門家からの知識の獲得、すなわちルールの作成が非常に困難である。もし十分な過去のデータがあれば、ニューラルネットワーク¹⁷⁾を用いることにより、この知識の獲得の問題を避けることができる。ここでは、ニューラルネットワークの学習機能を利用した補修工法自動選定システムを紹介する¹⁸⁾。

一般に橋梁の補修工法を選定するにあたっては、構造物の損傷度だけでなく、例えば橋梁工事を行う際の交通規制が及ぼす社会的影響など、より広い視野に立って検討しなければならない。このシステムでは、橋梁の補修工法を選定するための要因を「構造性」、「経済性」、「施工性」に大きく分類してシステムを構築している。「構造性」は橋梁構造物本体の損傷度を示しており、さらに「舗装」、「高欄・地覆」、「伸縮継手」、「床版」、「排水設備」、「支承」、「主桁」、「下部工」、「その他」の損傷度に分類されている。「経済性」は、「経済性を重視する」、「経済性をそれほど重視しない」に分類され、「施工性」は「交通規制ができるだけ避ける」と「交通規制を避ける必要がない」に分類されている。

補修工法選定のための以上の要因の分類に従って、実際に過去に実施した13橋の補修工事について、各要因と補修工法との関係が表-3.18のようにまとめられている。この表では、「構造性」の「舗装」～「その他」の各要因がさらに細分化されている。しかも、補修工法を選定する要因には、「舗装」の「ひび割れ」、「高欄・地覆」の「変形」、「床版」の「ひび割れ」などのようにa～cの評価で表されるものと、○または空白の2つの値で表されるものがある。このうち、a～cの評価で表される要因については、それぞれ評価aは「損傷が小さい」、評価bが「損傷がやや大」、評価cは「損傷が大きい」、空白は「損傷が見られない」を意味している。また、2つの値で表される要因については、それぞれ○は「その要因に該当する」、空白は「その要因に該当しない」を意味する。また、各要因においてデータが未知である場合は、「データがない」を選択する。また、入手した13橋の補修工法のデータはいずれも増桁工法、鋼板接着工法、打換工法の3つであり、表-3.18における補修工法の記号は、それぞれAが増桁工法、Bが鋼板接着工法、Cが打換工法を表している。

補修工法の自動選定を実現するために、ニューラルネットワークを用い、表-3.18を学習データとして学習を行う。ニューラルネットワークのシステムとしては、RHINE¹⁹⁾を用い、ネットワークの構造としては4層（第1層49ユニット、第2層20ユニット、第3層20ユニット、第4層3ユニット）のものを用いる。学習データは、表-3.18における空白を0、○印を1、aを1、bを2、cを3に置き換えたものを用いる。また、ネットワークの出力値はA（増桁工法）、B（鋼板接着工法）、C（打換工法）の3つであり、例えば出力がBであることを、(A,B,C)=(0,1,0)で表現する。

学習データの入力を終え、学習を開始してから約15分程度でほぼ学習が終了した。表-3.19は橋梁番号1～橋梁番号13の「構造性」、「経済性」、「施工性」の各データを入力したときの出力値を表している。例えば、橋梁番号1の出力値は、「増桁工法」が0.998、「鋼板接着工法」が0.044、「打換工法」が0.001であり、各々の数値が認識の程度を表しているので、「増桁工法」が補修工法として選択されたことがわかる。実際の学習データと比較すると、橋梁番号1の補修工法は増桁工法で行われており、学習が高い精度で行われていることがわかる。

ニューラルネットワークの問題点としては、中身がブラックボックスである、学習データの収集法とその量と質の問題、用いるモデルの構造等があげられる。ブラックボックスの問題については、2層モデルで各重みを検討し、各損傷要因に対する重要度の検討を行うことが有用である。また、学習データの問題については、その質と量を十分なものとすることが望ましい。モデルの構造としては、中間層の影響、要因の削除、追加の影響を検討することなどが必要である。また、説明機能の充実を図る目的で、エキスパートシステムとの融合も考えることができる。

表-3.18 换工法選定の要因

橋梁番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
舗装	ひび割れ*	○		○	○	a	b	c	○				d	○
	段差									○			○	○
	その他	○												
	データがない													
高欄・地覆	破損						○	○	b				○	
	変形*	○	○	○		○	○						○	○
	腐食													
	その他												○	
	データがない													
伸縮継手	破損			○							○			
	変形													○
	その他	○								○				
	データがない													
構造性	床版	ひび割れ*	a	b	a	b	b	b	b	b	c	b	b	b
		剝離			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		鉄筋露出			○	○	○			○	○	○	○	○
		コンクリートの劣化												
		その他												
	データがない													
排水設備	腐食		○	○		○	○	○	○			○		○
	ゴミの堆積				○									
	その他													
	データがない													
承	支承	腐食	○		○									
		支承座モルタル破損		○		○								
		その他			○	○								
		データがない												
桁	主桁	塗装劣化		○	○		○			○	○	○	○	○
		腐食			○									
		変形			○									
		ボルトの緩み・抜落				○								
		欠損				○		○	○			○		○
	その他													
	データがない													
下部工	基礎	コンクリートの劣化	○	○					○		○	○		○
		ひび割れ							○		○		○	
		剝離												
		基礎部の洗掘			○		○		○		○		○	
		その他												
	データがない													
その他	橋の振動	○						○	○				○	
	落橋防止構造		○	○		○	○					○		○
	データがない													○
経済性	重視する									○			○	
	それほど重視しない		○	○	○	○		○	○		○	○		○
	データがない													
施工性	交通規制をできるだけ避ける	○		○	○	○				○		○	○	
	交通規制を避ける必要はない		○				○	○	○		○	○		○
	データがない													
	補修工法	A	A	C	A	A	B	C	C	A	C	C	B	A

表中の補修工法における記号はそれぞれ、A：増幅工法、B：鋼板接着工法、C：打換工法を表す。また、補修工法を決定する要因の中で、記号*が付されている要因は損傷度をa～cで評価（評価cが最も損傷が大きい）することを示し、それ以外の要因は二値で与えることを意味する。

表-3.19 学習後の出力結果

橋梁番号	増桁工法	鋼板接着工法	打換工法	橋梁番号	増桁工法	鋼板接着工法	打換工法
1	0.998	0.044	0.001	8	0.001	0.002	0.991
2	0.957	0.021	0.012	9	0.989	0.001	0.002
3	0.021	0.003	0.980	10	0.001	0.002	0.974
4	0.988	0.002	0.012	11	0.011	0.021	0.998
5	0.969	0.033	0.030	12	0.010	0.996	0.003
6	0.001	0.999	0.002	13	0.987	0.100	0.090
7	0.011	0.013	0.997				

3.4.4 総合損傷度評価法に関する課題

構造物の総合損傷度評価法について述べてきたが、最も大事なことは損傷度評価は非常に難しい問題であるという認識を持ち、考えられるすべての方法についてそれらの可能性を十分検討し、最も簡便でかつ理論性を持った実用的な方法を開発することである。現在は点数法による判定法が多く用いられているが、その重み係数の決定などにおいてまだ不明確な部分があり、本章で示した新しい手法の適用の可能性を考えてみる必要があるのではないだろうか。過去の信頼のおけるデータがあれば、数量化理論などの統計的手法やニューラルネットワークを用いることにより、専門家と同じような損傷度解析を行うことも可能となる²⁰⁾。

いまだ損傷度解析という言葉も定着されておらず、その実態も明確に定義されているわけではないが、現在の社会情勢を考えると、この問題の解決は急務であり、ここで示したような手順あるいは考え方を参考にしてより有効な損傷度解析の確立が望まれる。さらに、一橋梁としての全体の損傷度評価あるいは健全度評価だけでなく、将来はいくつかの橋梁群を橋梁ネットワークとしてとらえ、道路網との関連から災害時などの重要性を考慮した取り組みが必要となる。

また、損傷そのものの評価手法とともに耐荷性や耐久性に対する安全性の評価を統合した形での評価手法を検討していく必要がある。現在、既設橋の安全性評価として、個々の橋梁の荷重条件、耐荷力などを考慮した照査方法が検討されている。文献21)では安全性評価の現状についてまとめられており、耐荷力の照査方法として荷重係数法を取り上げ、安全性指標(β)を用いて抵抗係数と死荷重係数を検討している。また、既設橋梁とのキャリブレーションにより活荷重係数の検討を行っている。文献22)では実橋において材料試験、載荷試験および活荷重調査を行い、得られたデータをもとに安全性指標 β を用いて主桁の安全性の評価を行っている。しかし、これらの手法では腐食や疲労損傷などの劣化現象の影響を耐荷力の評価にどのように反映させていくかについて必ずしも明確にされていない。安全性の照査は、基本的には今までの使われ方、受けた劣化損傷の程度および今後予想される使われ方、期待される維持管理の水準など、その橋の外的条件や構造条件を考慮して行われるべきものであり、実用化にあたっては今後さらに内容を充実させていく必要がある。

参考文献（第3章）

- 1) J.T.P. Yao: Safety and Reliability of Existing Structures, Pitman Advanced Publishing, 1985
- 2) A.G. Davenport: The Role of Wind Engineering in Reducing the Risk of Windstorm Catastrophe, Proc. of Asia Pacific Symposium, 1986
- 3) 白石・古田・橋本：ファジイ多基準分析に基づく構造物の健全性評価，システムと制御，Vol.28, No.7, pp.474～482, 1984
- 4) 古田・白石・Yao：損傷構造物の信頼性解析，材料，Vol.36, No.408, pp.934～939, 1987
- 5) Y. Chung, C. Meyer and M. Shinozuka: Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Members, Tech. Rep. NCEER, 87-0022, 1987
- 6) (財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，平成4年
- 7) 東京都建設局：橋梁点検要領，昭和63年3月
- 8) 三木：米国における道路橋の破損と保守，道路，No.11, pp.26～30, 1982
- 9) U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Bridge Inspector's Training Manual, U.S. Government Printing Office, 1971
- 10) U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges, 1979
- 11) 白石・古田・杉本：数量化理論の構造物の健全度評価への応用，第29回構造工学シンポジウム，1983
- 12) 白石・古田：ファジイ集合論の構造工学への応用，土木学会誌，Vol.31, 63-67, 1984
- 13) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol.8, 338-353, 1965
- 14) 白石・古田・橋本：ファジイ多基準分析に基づく構造物の健全度評価，システムと制御，Vol.28, No.7, 474-482, 1984
- 15) 三木・三上・土田・風間：鋼橋のメンテナンス計画（アンケートの分析へのファジイ真理値の応用），日本機械学会実製品の信頼性創造技術シンポジウム講演論文集，pp.169～174, 1991
- 16) 白石・古田・馬場・川上：RC床版の耐用性評価システムに関する基礎的研究，土木学会論文集，第386号/I-8, pp.285～291, 1987
- 17) 麻生：ニューラルネットワーク情報処理，産業図書，1988
- 18) 古田・大谷・白石：ニューラルネットワークの補修工法選定への応用，構造工学における数値解析シンポジウム講演会論文集，第14集，pp.339～344, 1990
- 19) RHINE ユーザーズマニュアル，CRC社
- 20) 三上・田中・倉地：鋼橋疲労損傷の補修方法選定のための学習機能のあるニューラルネットワークシステム，構造工学論文集，Vol.37A, pp.655～668, 1991
- 21) 土木学会関西支部：既存橋梁の耐荷力と耐久性，昭和60年度講習会テキスト，昭和60年7月
- 22) 豊場：鋼道路橋の安全性照査に関する一手法，高田機工技報，No.2, 1986.1