

ファジィ理論に基づいた海岸施設の劣化診断

松島 学*・関 博**・松井邦人***
・梅原健生****

本研究では、杭式栈橋を対象として、目視調査データからその劣化レベルを判断するためにファジィ理論を利用する方法を提案している。既往の調査報告では、鉄筋腐食、ひびわれ、剥離、のそれぞれの項目について劣化レベルを判断し、最も悪い指標をその構造物の劣化レベルであるとしている。本研究では、それぞれの項目の重要度を考慮して総合的に構造物の劣化を判断している。そして既往の調査結果と比較し本手法の妥当性を検証した。

Keywords : damage evaluation, fuzzy set theory, landing piers, visual inspection

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化診断は、目視などの外観調査などから行われるのが普通である。しかし、目視調査結果から構造物の劣化レベルを定量的に求めることは、技術的に困難である。さらに、栈橋のような構造物では、それ以上の詳細な検査を常時実施することは困難である。これらの目視調査の評価方法について、現時点で信頼できる方法は確立されているとはいえない。調査の評価項目とその判定基準や劣化レベルの等級の境界が明確でないこと、その評価が個人により相違することなどから、劣化レベルの評価は技術者の主観的な感覚や経験に大きく依存している。このように、たとえ定量的な表現であっても、それらの区分の判断は、各技術者の経験に基づいた主観的な判断に負うところが大きい。そのため、劣化レベルの評価を行うとき、従来の分類のように、客観的な立場で判断する手法の開発を目指すのではなく、必要とあらば、主観的な立場で判断することがよいと考えられる。主観的不確実性を数学的に取り扱う一手法としては、ファジィ集合の概念が1965年にL. A. Zadeh¹⁾によって提案されている。このような概念に基づき、白石・古田ら^{2)~4)}は、コンクリート橋の床板の劣化レベルの判断にファジィ理論を応用し、損傷モードおよび劣化レベルを推定するエキスパートシステムを提案している。西村・藤井ら^{5)~7)}もコンクリート橋を対象にして健全度診断を行うために、ファジィ理論を適用している。また、著者らも^{8),9)}、コンクリート構造物の劣化診断にファジィ理論の適用を試みてきた。本研究では、定期点

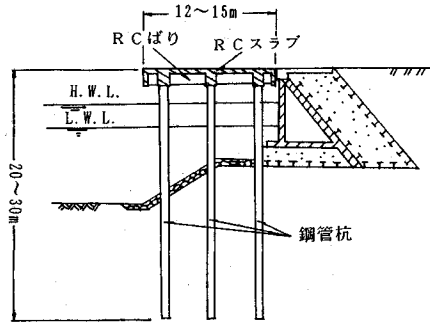


図-1 対象構造物の外観

検など目視等の簡便な調査から構造物の劣化レベルを判断することを目的としており、主観的な立場からコンクリート構造物の劣化診断にファジィ理論を利用する方法を提案している。具体的には、対象構造物を杭式栈橋として、その目視調査結果に、ファジィ理論を適用して、劣化評価を行う方法を示した。さらに、既往の調査結果と比較して、本報で提案したファジィ理論に基づいた劣化診断の妥当性も検証した。

2. 対象構造物

対象とした構造物は、図-1に示すように上部工をRC構造とし下部工を鋼管杭で構成する杭式栈橋であり、今回は劣化の顕著な上部工のRCのスラブおよびRCはりに関して検討した。図にみられるように、RC部材はH.W.L.より上に位置しており、環境としては飛沫帯に位置している。

3. ファジィ理論による劣化レベルの評価

(1) 評価手順

コンクリート構造物の劣化評価は、鉄筋の腐食、ひびわれの大きさ・密度、部分的な剥離などから評価される

*正会員 工修 東電設計(株)技術開発本部研究開発部課長(〒101 千代田区内幸町1-3-1)

**正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

***正会員 Ph.D. 東京電機大学教授 理工学部建設工学科

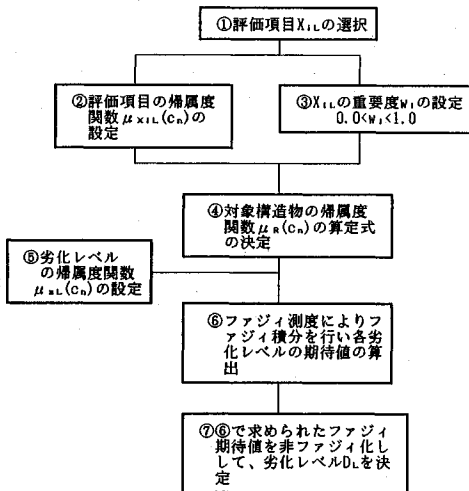
****正会員 工修 (株)長大 長大橋部
(元・東京電機大学大学院生)

表一 劣化の評価基準¹⁰⁾

判定区分	スラブの劣化の評価項目 X_{iL}		
	鉄筋の腐食 X_{1L}	ひびわれ X_{2L}	剝離 X_{3L}
0	なし (A0)	なし (B0)	
1	コンクリート表面に点錆が見られる。(A1)	一部にはひびわれがある。(B1)	なし (C1)
2	一部に錆汁が見られる。(A2)	ひびわれが広がる。(B2)	一部に浮きが見られる。(C2)
3	錆が広がる。(A3)	ひびわれが広がる。(B3)	一部に剝離が見られる。(C3)
4	浮き・剝離多し。(A4)	ひびわれが広がる。(B4)	浮き・剝離多し。(C4)
5	浮き・剝離多し。(A5)	ひびわれが広がる。(B5)	浮き・剝離多し。(C5)

表二 各劣化レベルと補修の要否判定

劣化レベル	0	I	II	III	IV	V
補修の要否判定	補修の要なし	補修の要なし	補修の要なし	補修の要なし	補修の要なし	補修の要なし



図二 対象構造物の劣化レベルの決定の流れ

のが通例である。このため、各評価項目の判定は、一般に定性的な表現によるものが多い。たとえ定量的な表現であってもその境界を明確に区分することは難しく、調査を行う技術者の判断に負うところが大きい。本研究では、各評価項目に対する劣化レベル判定が、技術者の主観に依存しているという“あいまいさ”，すなわち技術者間の判定のばらつきを考慮して劣化レベルの評価手法を開発するものである。

本研究のフローを図二に示す。研究の流れは、①では既往の調査項目から劣化に及ぼす評価項目 X_{iL} を選択した。②では、この評価項目の帰属度関数を設定する。

さらに、③では各評価項目 X_{iL} の重み w_{iL} を設定し、②での各帰属度関数と合わせて④で対象構造物の劣化に対する帰属度関数 $\mu_R(C_n)$ を求める。次に、⑤では設定した劣化レベルの帰属度関数 $\mu_{iL}(C_n)$ を設定し、この関数を被積分関数として、⑥で $\mu_R(C_n)$ によりファジィ積分して、各劣化レベルの期待値を求める。⑥で求めたファジィ期待値を⑦で、非ファジィ化することにより劣化レベルを決定している。

(2) 劣化の判定基準の評価項目

一般に、劣化調査には一次調査（概略調査）、二次調査（詳細調査）の2つがあり、本報は前者を対象としている。構造物の劣化を評価する場合に現段階では種々の方法があり、数多くの調査項目を取り上げることが適切と考えられる。しかし、目視などの簡易な方法で現場の技術者が容易に確認できるのは、鉄筋の腐食、ひびわれ、剝離の3項目程度であり、現実に港湾施設で実施している方法⁹⁾である。既施設で上記3項目で劣化を判断している背景には、一般に調査が容易でない施設が多いこと、本研究での対象構造物の棧橋等の下面の詳しい調査を実施するには多大な労力を要すること、劣化した施設が多く初期段階で詳しい調査まで実施することができないこと、他の項目と劣化に密接な関係を見出すことは困難であること、などが考えられる。このようなことから、現状の既調査項目を踏まえて上記の3項目に限定することとした。これらの目視調査に基づく劣化の判断基準は、『劣化防止・補修マニュアル(案)』¹⁰⁾によると、表一のように設定されている。また、表二に各劣化レベル

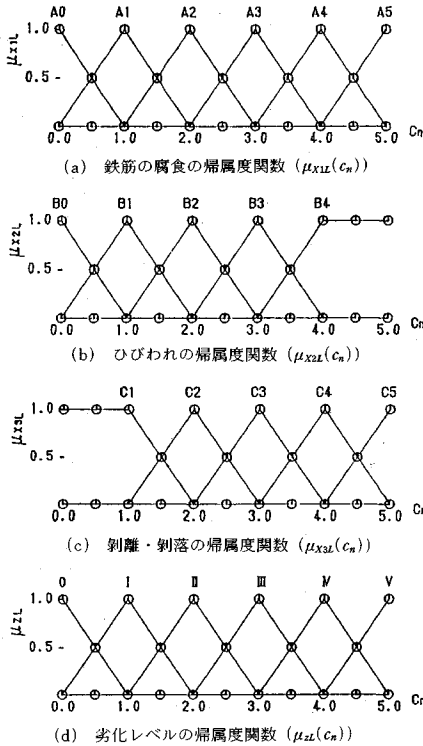


図-3 設定された帰属度関数

表-3 重要度係数

X_{iL}	X_{1L}	X_{2L}	X_{3L}
W_{iL}	0.8	0.5	1.0

—1の $L=0\sim 5$ の各言語表現に対して、次のようなファジィ集合として定義することができる。

$$\begin{aligned}
 X_{10} &= 1.0/0.0 + 0.5/0.5 \\
 X_{11} &= 0.5/0.5 + 1.0/1.0 + 0.5/1.5 \\
 X_{12} &= 0.5/1.5 + 1.0/2.0 + 0.5/2.5 \\
 X_{13} &= 0.5/2.5 + 1.0/3.0 + 0.5/3.5 \\
 X_{14} &= 0.5/3.5 + 1.0/4.0 + 0.5/4.5 \\
 X_{15} &= 0.5/4.5 + 1.0/5.0
 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

このようにファジィ集合を用いれば判定区分の選択にかかわるあいまいさを定量的に表現できる。帰属度関数は、技術者が主観的に定めるべきもので、この関数の設定方法により判定区分に反映することができる。各評価項目 $X_{iL}(i=1\sim 3)$ の帰属度関数 $\mu_{xiL}(c_n)$ を図-3 (a)~(c) に示す。また、劣化レベルの帰属度関数 $\mu_{zL}(c_n)$ も各評価項目の判定区分と同じように定めた。図-3 (d) にその帰属度関数を示す。実際の現象では劣化レベルが低いときその区分はあいまいであるが、劣化レベルが高くなるとその区分は明確になると推定される。しかし、本研究では、その違いを明確に評価をできないため、同等として取り扱っている。

(3) 評価項目の重要度の設定

コンクリート構造物の劣化に及ぼす各評価項目の影響度合は各項目ごとに異なることが考えられる。そこで、評価項目ごとに $[0, 1]$ の間の値で重みを与え、その重みをここでは重要度係数 w_{iL} と定義することとした。これらの値は、劣化レベルが小さいときは同じような値を設定できるが、大きくなると値に違いがでてくるであろうというものを経験的な感覚として持ち合わせている。しかし、このような感覚的な値を定量的に表現するに至っていないことから、各項目ごとに一定値として与えられるものとした。これらの値は技術者の主観的判断により設定されるもので、著者らの経験的判断から表-3 のように設定した。

(4) 劣化レベルのファジィ期待値の評価

各評価項目の判定結果から劣化レベルの期待値を求める手法を説明する。一般に、この決定は技術者の主観により設定されるもので、最終の劣化レベルの判定に対する思考過程を説明することは難しい。本研究では過程を明確に表現するため、ファジィ理論を用いて劣化レベルのファジィ期待値を求める。

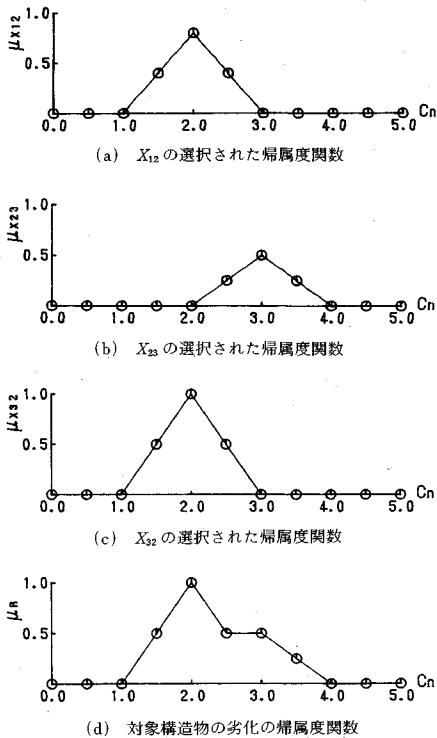
a) 劣化レベルのファジィ集合

評価項目の判定結果と重要度係数を用いて対象構造物の劣化レベルのファジィ集合を求める。つまり、劣化レベルに属している程度を表す帰属度関数 $\mu_{zL}(c_n)$ を目標

と補修の要否判定区分を示す¹⁰⁾。これらの各評価項目の判定区分は、定性的に表現されるもので、区分の境界は明確ではない。たとえば、表-1 にみられるように『鉄筋の腐食』の項目で、4:『浮き錆多し』と5:『浮き錆著しい』の境界の判断は、各技術者の主観に依存することになる。このようなことから、本研究では評価した各境界はあいまいなものとして判断して、ファジィ集合として表現することとした。判定区分は区間 $[0.0, 5.0]$ を10等分して、式(1)のように全体集合を定義した。

$$C_N = \{0.0, 0.5, 1.0, \dots, 4.5, 5.0\} \quad (N=0\sim 10) \quad \dots\dots\dots (1)$$

全体集合 C_N の要素は劣化を表す指標であり、この値が大きくなるほど劣化レベルが高く、逆に小さいほど劣化が少なく、0.0のとき無被害であることを意味している。次に、評価項目の判定区分をファジィ集合として定義する。本研究では表-1の区分をそのままファジィ集合として置換できるものと仮定した。本来各項目には相関があり、その組合せにより劣化レベルの判断がされるものと考えられるが、このように仮定したことで、各項目は独立として取り扱ったことになる。したがって、各評価項目 $X_{iL}(i=1\sim 3)$ について、6段階の評価区分を設定して、これらをファジィ集合 $X_{iL}(L=0, 1, 2, 3, 4, 5)$ とする。ここで、 X_{iL} の帰属度関数を $\mu_{xiL}(c_n)$ ($c_n \in C_N$) と表す。例として、評価項目 X_{1L} 『鉄筋の腐食』は、表



図—4 帰属度関数の例

調査から判断した区分 L の帰属度関数 $\mu_{X_{iL}}(C_n)$ とその重要度係数 w_{iL} を用いて求める。本研究では $\mu_R(C_n)$ を求めるにあたり、次の算定式を定義した。

$$\mu_R(C_n) = \sum_{i=1}^3 w_{iL} \cdot \mu_{X_{iL}}(C_n) \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) は、帰属度関数 $\mu_R(C_n)$ に与える影響は最も大きな因子で説明できることを意味している。このように、 $\mu_R(C_n)$ を定める算定式は技術者の感覚や経験により主観的に定められる。例題として、 X_{1L} ：鉄筋の腐食→2、 X_{2L} ：ひびわれ→3、 X_{3L} ：剝離→2 と判断された場合の X_{iL} の各帰属度関数 $\mu_{X_{iL}}(C_n)$ と、その結果から求めた $\mu_R(C_n)$ を図—4 (d) に示す。

b) ファジィ測度^{10)~12)}

ファジィ集合は、その対象の意味のあいまいさを表現しているのに対して、ファジィ測度は判定結果のあいまいさを表現するものである。本研究では、この評価尺度として λ ファジィ測度を用いる。 λ ファジィ測度は λ をパラメーターとして式 (4) で構成される。

$$\begin{cases} g_i(F_i) = g_i & i=0 \\ g_i(F_i) = g_i + g_i(F_{i-1}) + \lambda \cdot g_i \cdot g_i(F_{i-1}) & i > 0 \quad (-1 < \lambda < \infty, i=0 \sim 10) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $F_i = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_i\}$ であり、 C_n の部分集

合である。また、 g_i はファジィ密度 ($0.0 < g_i < 1.0$) であり、式 (5) で表される。

$$g_i = \alpha \cdot \mu_R(c_i) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 α は g_i を正規化するための定数で、パラメーター λ を与えた後に、式 (6) で求められるものである。

$$1 = \begin{cases} \sum_{i=0}^{10} g_i & \lambda = 0.0 \\ \lambda^{-1} \left[\prod_{i=0}^{10} (1 + \lambda \cdot g_i) - 1 \right] & \lambda \neq 0.0 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) は λ と g_i の制約式であり、 λ をパラメーターとして F_i の重複する度合を表す尺度である。 $\lambda > 0.0$ のとき $g_\lambda(F_i) > g_i + g_i(F_{i-1})$ となり優加法的となり、大きな劣化レベルを重視する結果を与える。 $\lambda < 0.0$ のとき $g_\lambda(F_i) < g_i + g_i(F_{i-1})$ となり劣加法的となり、逆に、小さな劣化レベルを重視する結果を与える。 $\lambda = 0.0$ のとき $g_\lambda(F_i) = g_i + g_i(F_{i-1})$ となり、加法的となり、 λ ファジィ測度と確率測度は一致する。

c) ファジィ積分^{11)~13)} による劣化レベルの評価

劣化評価は、各評価区分の帰属度関数を被積分関数とするファジィ積分によって行う。 $g_\lambda(F_i)$ は式 (4) を用いて $\mu_R(C_n)$ より求められる。ファジィ期待値 $FI(L)$ は劣化レベルの帰属度関数 $\mu_{zL}(C_n)$ を $g_\lambda(F_i)$ で積分することで得られる。したがって、各劣化レベル L のファジィ期待値 $FI(L)$ は式 (7) で表される。

$$\begin{aligned} FI(L) &= \int \mu_{zL} \cdot g_\lambda \\ &= \bigvee_{i=0}^{10} \left[\left(\bigwedge_{n=0}^i \mu_{zL}(C_n) \right) \wedge g_\lambda(F_i) \right] \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで、 $\mu_{zL}(C_n)$ の順番を $\mu_{zL}(c_0) > \mu_{zL}(c_1) > \mu_{zL}(c_2) > \dots > \mu_{zL}(c_{10})$ となるように並びかえて、 $C_n^{(L)} = \{c_0^{(L)}, c_1^{(L)}, c_2^{(L)}, \dots, c_{11}^{(L)}\}$ とすると、式 (7) は式 (8) のように書き換えられる。

$$FI(L) = \bigvee_{i=0}^{10} [\mu_{zL}(c_i^{(L)}) \wedge g_\lambda(F_i^{(L)})] \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $F_i^{(L)} = \{c_0^{(L)}, c_1^{(L)}, c_2^{(L)}, \dots, c_i^{(L)}\}$ も、 $\mu_{zL}(C_n)$ の大きい順番に合わせて各劣化レベル L ごとに並びかえたものである。前に示した例題について、 $\lambda = 0.0$ の場合の劣化レベル $L = \text{I} \sim \text{IV}$ についてファジィ積分の計算過程を図—5 (a)~(d) に示す。図中で、 Δ 印は劣化レベルの帰属度関数であり、 \circ 印は b) で求められた λ ファジィ測度である。さらに、同図にはファジィ積分値も示してある。その結果、図—6 (b) のように各劣化レベルのファジィ期待値を求めることができる。この図より、劣化レベル II および III に属するファジィ期待値がほぼ同程度であることが示されている。しかし、劣化レベル I および IV の可能性も全くないわけではないことを意味している。図—6 (a), (c) に $\lambda = -0.5$ および $\lambda =$

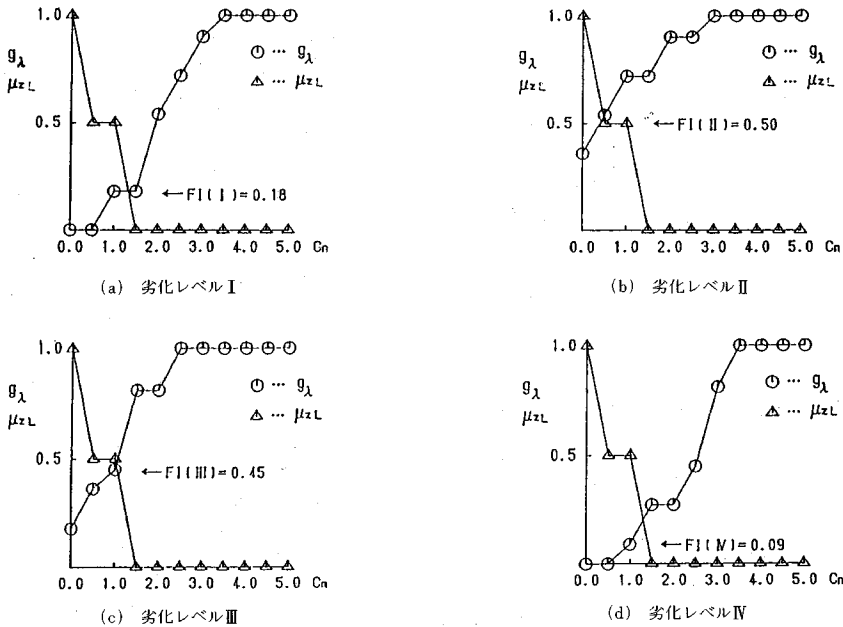


図-5 ファジィ積分

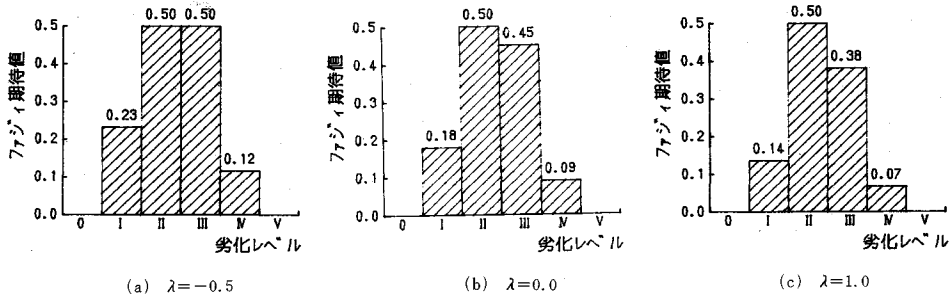


図-6 劣化レベルのファジィ期待値

1.0の場合のファジィ期待値を示す。図にみられるように、λが小さくなるにつれて、全体にファジィ期待値は大きくなる傾向にある。さらに、λ=0.0のときと比較してλが正の場合は、劣化レベルが小さい期待値をさらに小さくする傾向があり、λが負の場合は逆になる。つまり、λが大きくなると劣化レベルを明確にする方向に働き、λが小さくなると逆に働くことを意味する。このように、ファジィ理論による診断結果は各劣化レベルの期待値の分布として与えるために情報量の多い解となっている。

(5) 劣化レベルの決定

求められた各劣化レベルLのファジィ期待値FI(L)から劣化レベルD_Lを決定する。本研究では、この非ファジィ化の方法として、式(9)に示すように各期待値の分布の重心を求めることで決定した。ここでは、本来離散量である劣化レベルを連続量とすることで計算が可能となった。つまり、各劣化レベルを0.0~1.0のときに

劣化レベル0、同様に1.0~2.0で劣化レベルI、2.0~3.0で劣化レベルII、3.0~4.0で劣化レベルIII、4.0~5.0で劣化レベルIVおよび5.0~6.0で劣化レベルVと設定し、得られた各ファジィ期待値をその中央値に割り当てた。

$$D_L = \frac{\sum_{L=0}^5 FI(L) (L+0.5)}{\sum_{L=0}^5 FI(L)} \dots \dots \dots (9)$$

この方法で図-6(a)で得られたファジィ積分での各期待値を非ファジィ化すると、D_L=2.85となり、劣化レベルIIが選択される。

4. 既往の調査データへの適用

既往の杭式栈橋の劣化診断の調査データを用いて、3.で説明したファジィ理論に基づいた劣化診断手法を適用してみた。既往の調査データを表-4に示す。調査データ数は全26ケースである。この表にみられるように、既往の劣化調査では劣化レベルが最高でもレベルIIIで、

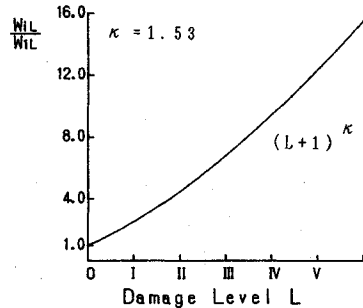
表—4 既往の調査データとファジ判定による判断

栈橋No.	判定項目			既往判定	Fuzzy判定	逆算 κ
	鉄筋腐食	ひびわれ	剝離			
No. 1	II	O	I	II	1.80 (I)	1.35
No. 2	O	O	I	I	1.25 (I)	-2.90
No. 3	III	I	I	III	2.42 (II)	2.33
No. 4	O	O	I	I	1.25 (I)	-2.90
No. 5	III	O	I	III	2.23 (II)	2.42
No. 6	O	O	I	I	1.25 (I)	-2.90
No. 7	III	I	I	III	2.42 (II)	2.33
No. 8	O	O	I	I	1.25 (I)	-2.90
No. 9	III	O	I	III	2.23 (II)	2.42
No. 10	II	O	I	II	1.80 (I)	1.35
No. 11	III	I	III	III	2.75 (II)	1.02
No. 12	O	O	I	I	1.80 (I)	-2.90
No. 13	III	I	III	III	2.75 (II)	1.02
No. 14	O	O	II	II	1.83 (I)	0.48
No. 15	III	O	I	III	2.23 (II)	2.42
No. 16	O	O	I	I	1.25 (I)	-2.90
No. 17	III	I	I	III	2.42 (II)	2.33
No. 18	I	O	I	I	1.32 (I)	-3.50
No. 19	III	O	III	III	2.69 (II)	0.53
No. 20	O	O	I	I	1.25 (I)	-2.90
No. 21	III	O	III	III	2.69 (II)	0.53
No. 22	II	O	I	II	1.80 (I)	1.35
No. 23	III	O	I	III	2.23 (II)	2.42
No. 24	II	O	I	II	1.80 (I)	1.35
No. 25	III	O	III	III	2.69 (II)	0.53
No. 26	II	O	I	II	1.80 (I)	1.35

表—5 既往の判定とファジによる判定の比較

(n=26)	既往の調査での判定値						
	O	I	II	III	IV	V	計
ファジによる判定値	O	0	0	0	0	0	0
	I	0	9	5	0	0	14
	II	0	0	0	12	0	12
	III	0	0	0	0	0	0
	IV	0	0	0	0	0	0
	V	0	0	0	0	0	0
計		0	9	5	12	0	26

注) 欄の中は該当個数



図—7 重要度係数と劣化レベルの関係

それ以上のものはない。実際の現象を考えると、これ以上のものはその劣化レベルに達する前に補修がなされており、これ以上の劣化レベルのデータを望むことは難しく、本研究の手法の適用に十分満足でき得る資料であると判断される。また、既往の劣化レベルの判定は選択された各項目の劣化レベルの中の最大のものを採用しており、安全側の配慮をしている。同表には、本研究の手法で求めた劣化レベルも、 D_L の値とともに記載した。ただし、 $\lambda=0$ として計算してある。本研究の手法に基づく判定と既往の判定を比較すると、既往の判定結果は劣化レベルが大きめに判定されている。この結果を明確に表すため、表—4 を再整理したのが表—5 である。この表にみられるように、両判定がほぼ同様の劣化レベルを与える場合もあるが、現行手法の方が安全側の値を与えることも多い。この理由としては、既往の判定は3つの調査項目の最大を選択しているのに対し、本研究では各項目の重みを考慮しているからである。

ここまでの解析は表—3 の重要度係数を劣化レベルが変化しても一定としたため、対象構造物の劣化レベルの

重要度を考えていないことに相当している。次に、既往の判定手法はこれまで数多くの実績があり、十分満足できる妥当な安全性が考慮されていると考え、本手法を用いて既往の結果へすりつけを行う。表—5 にみられるように、既往の判定は、重要度係数を劣化レベルが変化しても一定とした3. までの判定結果と比較して、劣化レベルの大きさに比例して大きくなっている。このことから、すりつけを行う方法として劣化レベルが大きくなるにつれて指数的に重要度係数が増大するモデルを考えた。そのモデルを図—7 に示す。図にみられるように、各劣化レベル L の重要度係数は表—3 の値の $(L+1)^\kappa$ 倍と設定したことになる。このモデルを適用して、表—4 の既往判定と合致するように逆算 κ を求める。逆算値 κ の工学的意味は、次のとおりである。既往の判定方法による結果は、一つ一つをみると問題のあるものもあり、ばらつきがある。しかし、今までうまく機能してきた実績を考えると、その平均的な値は真値を満足することができるものと考えられる。また、結果のみをみると現行の結果と同じようにみえるが、本手法は判定の整合性が

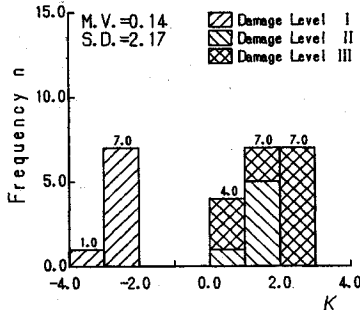


図-8 逆算κ値の分布

表-6 逆算重要度係数

劣化レベル	χ_{1L}	χ_{2L}	χ_{3L}
O	0.8	0.5	1.0
I	2.1	1.5	2.9
II	4.3	2.7	5.4
III	6.7	4.2	8.3
IV	9.4	5.9	11.7
V	12.4	7.8	15.5

表-7 既往の判定とファジィによる判定の比較

(n=26)		既往の調査での判定値						
		O	I	II	III	IV	V	計
ファジィによる判定値	O	0	0	0	0	0	0	0
	I	0	7	0	0	0	0	7
	II	0	0	7	7	0	0	14
	III	0	0	0	5	0	0	5
	IV	0	0	0	0	0	0	0
	V	0	0	0	0	0	0	0
計		0	7	7	12	0	0	26

注) 欄の中は該当個数

よく、真値に対して判定のばらつきが小さくなっているものと判断される。逆算の結果を表-4の最右列に示した。このκの頻度分布は図-8に示すとおりである。逆算κの値は大きくばらつき(標準偏差 $\sigma_{\kappa}=2.17$)、その平均値は $\kappa=0.14$ となった。しかしながら、表-4の逆算κ値でもみられるように、既往判定の劣化レベルは2つに区分され、劣化レベルIでは負の値を取り、II、IIIでは正の値を取る。安全性を考慮して、劣化レベルII、IIIで求められた逆算κの平均値 $\kappa=1.53$ を採用した。κの値より、重要度係数 w_{IL} は表-6のように求められる。この重要度係数を用いて、再度劣化レベルを計算すると表-7のようになり、現行の結果とほぼ同じような判定となっている。

5. まとめ

本研究では、杭式栈橋を対象に技術者の経験や主観に基づく構造物の劣化診断を行う方法を提案した。本研究で得た知見を以下にまとめる。

(1) 構造物の劣化診断に対して、①評価項目の判断

区分、②評価項目の重要度係数、③構造物の劣化のファジィ積分、の各段階においてファジィ理論を用いることにより、構造物の劣化を求める思考過程を数値化でき、主観的な評価を定量的に表すことができる。

(2) ファジィ理論を用いた診断結果は、各劣化レベルのファジィ期待値の分布として与えるため、情報量の多い解となっている。劣化方法の非ファジィ化の方法として、各ファジィ期待値の分布の重心を求めることとした。

(3) 既往の調査結果から本研究の手法と既往の判断を比較すると、ほぼ同様の劣化レベルを与えるが既往の判断は安全側の値を与えることも多い。既往の劣化レベルから逆算κ値の分布を求めた。これから逆算κ値を $\kappa=1.53$ と設定した。その結果、表-6に示す重要度係数が得られた。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、奥村敏恵 東京大学名誉教授から常に適切な助言をいただいた。東電設計(株)第二土木本部地中線土木部主任 金子雄一氏にはこの論文を作成するにあたり、議論に加わってもらいました。また、東京電機大学理工学部建設工学科卒業生の山下雅彦氏には、計算に協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- Zadeh, L. A. : Fuzzy Sets Information and Control, Vol. 8, pp. 338~353, 1965.
- 白石成人・古田 均・橋本光行：プロダクションシステムを用いた構造物の健全度評価，第7回設計における信頼性工学シンポジウム，pp.164~169，日本材料学会，1985.12.
- 白石成人・古田 均・池島賢治：信頼性解析へのファジィ理論の適用に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第325号，pp.1~10，1982.9.
- 白石成人・古田 均・川村幸男：事故解析へのファジィ積分の応用，土木学会論文報告集，第339号，pp.33~40，1983.11.
- 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・富田隆弘：橋梁診断のシステム化に関する基礎研究，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.175~184，1987.2.
- 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・小笠 勝：構造物の健全度診断へのファジィ集合論の適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第380号/I-7，pp.365~374，1987.4.
- 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・富田隆弘：コンクリート橋損傷要因の階層化と耐用性判断，pp.213~216，日本コンクリート工学協会，1986.
- 関 博・松井邦人・松島 学・金子雄一・州鎌靖之：ファジィ理論に基づいた構造物の劣化診断の考え方，土木学会第45回年次学術講演会，平成2年10月.
- 関 博・松井邦人・松島 学・金子雄一・州鎌靖之：ファジィ理論に基づいた構造物の劣化診断の適用，土木学会第45回年次学術講演会，平成2年10月.

-
- 10) 港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査一劣化防止・補修マニュアル(案)一, (財)沿岸開発技術センター, 昭和62年9月.
- 11) 田中英夫: ファジィ理論と応用, ファジィ測度に基づくファジィモデルとその応用, 数理科学, pp.19~25, 1987.2.
- 12) 菅野道夫: Fuzzy 測度と Fuzzy 積分, 計測自動制御学会論文集, 第8巻, 第2号, pp.218~226, 1972.
- 13) 菅野道夫: Fuzzy 測度の構成と Fuzzy 積分によるパターンの類似度評価, 計測自動制御学会論文集, 第9巻, 第3号, pp.361~368, 1984.
- (1990.10.8 受付)
-

EVALUATION ON DETERIORATION OF LANDING PIERS BASED ON FUZZY SET THEORY

Manabu MATSUSHIMA, Hiroshi SEKI,
Kunihito MATSUI and Kenji UMEHARA

A damage evaluation for landing piers based on fuzzy set theory is presented. Three factors are considered as inspection items ; 1) corrosion of steel bars, 2) crack on surface and 3) delamination of cover concrete. Fuzzy expected value of each deterioration level is calculated by using λ -fuzzy measure and fuzzy integral. Deterioration level is assumed to be obtained from the center of gravity for fuzzy expected value of each level by using importance coefficients. The importance coefficients depend on an importance of damage level. The importance coefficients are obtained from an inverse analysis on 26 existing landing piers.
