

維持管理効果を考慮した信頼性解析

RELIABILITY ANALYSIS CONSIDERING MAINTENANCE EFFECTS

* ** ***

白石 成人 古田 均 尾崎 美伸

By Naruhito SHIRAIISHI, Hitoshi FURUTA and Yoshinobu OZAKI

In general, maintenance of bridges consists of inspection and repair. To establish a rational repair and maintenance program, it is necessary to estimate the effects of maintenance operations on the structural reliability. However, it is not easy because of the variety and complexity of the maintenance operations.

In this paper, an attempt is made to develop a reliability analysis method which can take the maintenance effects into account. Instead of the failure probability being used so far, a reliability measure called "probability of losing serviceability" is proposed. Coupling this measure with the concept of fuzzy sets, it is possible to deal with various kinds of uncertainties such as variation of applied load and structural resistance, gross error, inappropriateness of model, political or financial pressure, etc., in a comprehensive manner. A problem of determining the target reliability level is discussed from the standpoint of multi-objective optimization.

1. まえがき

橋梁構造物の維持管理業務は、大きく分類して点検と補修・補強の2つに分かれる。点検とは、日常点検、定期点検、臨時点検等からなり、橋梁の供用状態を監視、診断するためのものである。この点検結果を基に、補修・補強工事の必要性が判定され、必要と認められれば何らかの措置がとられる。点検、補修・補強工法としては、橋梁の各要素および各個所に応じて様々なものが挙げられる。これらの方法が構造物の信頼性評価にどのような影響を与えるかを調べることは、合理的あるいは経済的な維持管理計画を策定する上で重要であろう。

本論文では、この維持管理システムの複雑な相互関係をグラフで表現し、各項目に対して重み付けを行い総合評価を得ることで、点検、補修効果の構造物の信頼性解析への導入を試みる。特に以下に示す2つの方針に基づいて、定式化を行い検討を加える。

1) 橋梁構造物の特徴および役割を考えると、各部材が破壊に達する以前、すなわち使用限界を限界状態として考えるべきであろう。本論文ではこのことを考慮して、従来の破壊確率の定義を拡張して使用限界状態に適用し、「機能損失確率」とも言うべき尺度を設定する。

2) 構造物を取巻く不確定性には、確率変数として表現できる荷重や抵抗だけではなく、設計・施工・管理等の各段階において生じる人間の過誤や不慮の出来事などに起因する不確定性や、社会的・経済的制約等

* 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工博 京都大学講師 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 京都大学大学院生 工学研究科修士課程 (〒606 京都市左京区吉田本町)

に関わる不確定性が存在する。¹⁾²⁾ このような性質の異なる不確定性を総合的に取扱うために、ファジィ性の概念³⁾⁴⁾を「機能損失確率」の定義に導入して、より柔軟な形で定量的な評価を行う。

また、本論文では経済性の点を考慮して、多目的最適化手法を利用した目標信頼性の決定法についても論じる。

2. 言語変数による評価

点検、補修業務は経済的あるいは時間的な制約を受け、それによって業務の良悪は様々に変化し、確定的な形で評価することは難しい。そこでここでは、各項目における点検・補修業務内容の評価を言語変数によって表現する。この言語変数はZadeh⁵⁾によって提案されたもので、言葉によってしか表現し得なかった曖昧な事象を定量化するのに有効な手段である。ファジィ集合とは、境界の曖昧な集合をいい、その集合への帰属度をメンバーシップ値として μ ($0 \leq \mu \leq 1$) で表す。例えば、身長 h (cm) の、「背が高い」という集合 $\tilde{H}$ に対するメンバーシップ関数 $\mu_{\tilde{H}}(h)$ は図1のように表される。

各業務の実行程度を「良好」とい $\tilde{H}$ うような曖昧な表現で規定し、この「良好」という言葉を $[0, 1]$ の台集合で定義する。すなわち、台集合を x で表わし、「業務内容無し」を0、「完璧」を1として、言語変数は $0 \leq x \leq 1$ の値を取るものと規定する。次に、各業務の実施程度を「非常に綿密」、「綿密」、「普通」、「粗雑」、「非常に粗雑」の5段階に分類し各々を $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}, \tilde{E}$ のファジィ集合で規定し、 x のその集合に属する度合い（グレード）を設定する。例えば x が集合 $\tilde{A}$ に属する程度を $\mu_A(x)$ とおくと、この値を $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ の範囲で定義する。（図2）

さらに、この定義にDubois, Prade⁶⁾によるL-R関数の考え方をういてファジィ集合を3つの代表値で表わし、計算の簡略化を図る。このL-R関数の3つの代表値とは、中央値（ m ）、左側（ α ）あるいは右側（ β ）の広がりである。この m は確率密度関数ではモードに対応するもので、L関数およびR関数の広がり α 、 β の大きさを表わすパラメータ α 、 β と組み合わせることにより、メンバーシップ関数 $\mu(x)$ を次式のように定義する。

$$\mu(x) = \begin{cases} L((m-x)/\alpha) & \text{for } x \leq m, \alpha > 0 \\ R((x-m)/\beta) & \text{for } x \geq m, \beta > 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここでL, Rは各々左右の形を表す関数であり、対象とする問題に応じて選定されるべきものである。 α , β の値が大きくなるほど、メンバーシップ関数は大きな広がりを持つ。L, R関数を用いると、ファジィ集合 $\tilde{A}$ は3つの代表値により次式のように表される。

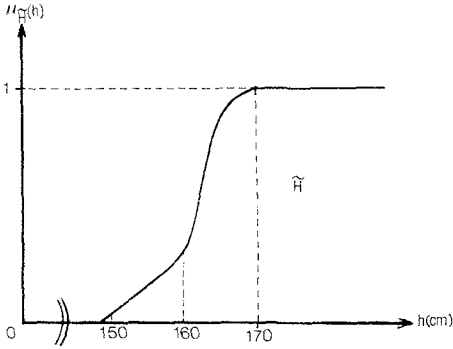


図1 「背が高い」というファジィ集合のメンバーシップ関数

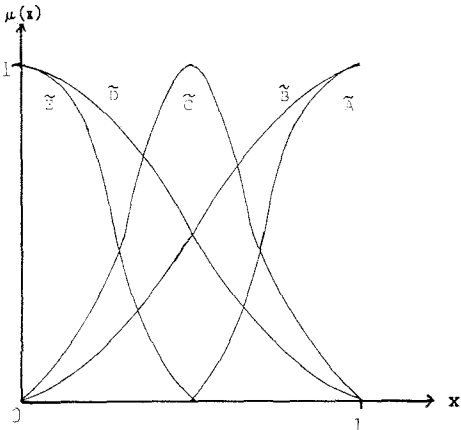


図2 $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}, \tilde{E}$ のメンバーシップ関数

$$\tilde{A}; (m, \alpha, \beta)$$

(2)

3. 維持管理項目の関連のグラフ化および重み付け

次に、維持・補修効果を評価するために、これらの作業内容を関連グラフで表現する。点検・補修関連グラフの、それぞれの頂上事象は、道路橋全体の点検・補修業務の総合的な評価を示す。最下位に位置するのが各項目を表わす基本事象で、この基本事象に業務の実施程度、すなわち2節で述べた $\tilde{A}$ から $\tilde{E}$ までのメンバーシップ関数をデータ $\tilde{P}_m$ として入力する。頂上事象と基本事象の間に存在する中間事象は、基本事象間の関係を表わしている。ある事象に複数の下位事象が関係している場合には、それらに重みを与えて、下位事象の影響をより正確に評価することを考える。この重みにより評価項目の重要性が、頂上事象に的確に反映されることになる。ここでは、Wagenknecht, Hartmann⁷⁾によるFuzzy Weightの考え方を採用し、重みそのものもファジィ数で定義する。このメンバーシップ関数の形は、専門技術者が決定すべきものであろう。図3に関連グラフの簡単な例を、図4、図5および表1、表2に橋梁全体の評価関連グラフの一例を示す。

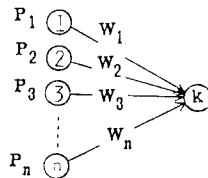


図3 関連グラフの一例

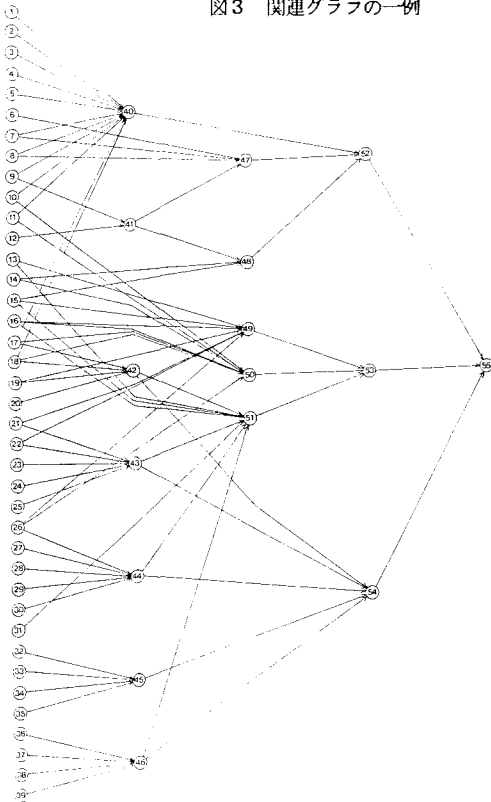


図4 点検項目の関連グラフ

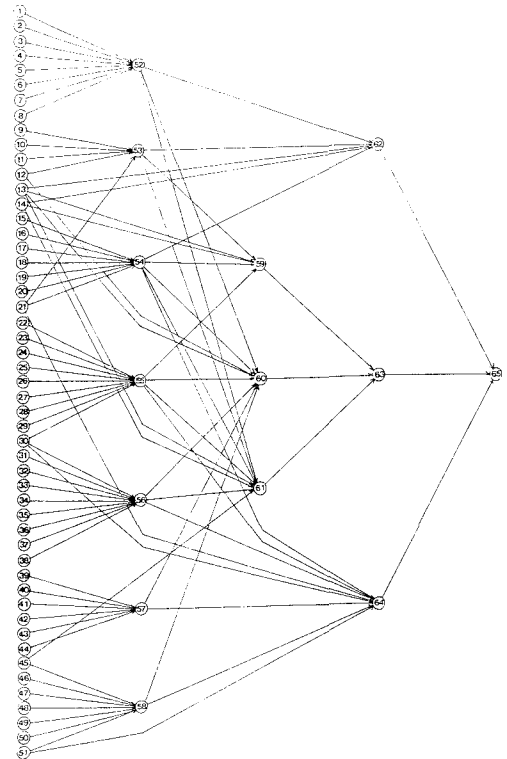


図5 補修項目の関連グラフ

表1 点検項目

RANK 1 【舗装】 1. 凹陥 2. ひび割れ、ひらき 3. ポットホール、スケーリング 4. ふくれ 5. さす 6. ポリッシング 7. ブリージング 8. 路面の油こぼれ 9. わだち割れ 10. 段差 11. フレッティング、ラベリング 【付属品】 12. 排水施設の詰り 13. 排水管の損傷 14. 排水口の蓋 15. 高欄の変形、錆 16. 防音壁の損傷 【伸縮装置】 17. 本体の損傷、腐食 18. 周辺舗装部、後打ち材、アンカー部の損傷 19. 漏水 20. 異音・伸縮 【床版】 21. 空洞、豆板 22. 剥離 23. 雨水、劣化、道障石灰 24. 鉄筋露出 25. ひび割れ 【本体】 26. 継手のゆるみ（ポルトレット） 27. 変位 28. 損傷 29. 漏水、漏水 30. 腐食 31. 劣化の悪化	【支承】 32. 変位 33. 部材、各部の損傷 34. 取り付け部のゆるみ（アンカーボルト） 35. 腐食 【下部工】 36. 変位 37. 部材の損傷 38. コンクリート部のひび割れ、腐食、および 鋼製橋脚の腐食 39. 漏水、漏水 RANK 2 40. 乗心地の低下 41. 路上のたまり 42. 伸縮装置の破壊、機能損失 43. 床版の破壊 44. 本体の破壊 45. 支承の破壊、機能損失 46. 下部工の破壊 RANK 3 47. 舗装表面のすべり抵抗の低下 48. 路上環境の悪化 49. 地上への落下物 50. 振動、騒音 51. 外観の悪化 RANK 4 52. 快適安全走行性の低下 53. 周囲への影響 54. 構造物自体の局部的、全体的破壊 RANK 5 55. TOP
---	--

表2 補修方法

RANK 1 【舗装】 1. バッチング工 2. シーリング工 3. 切削工 4. オーバーレイ 5. 安全舗工法 6. 表面処理工 7. 打換え工 8. 路上の清掃 【付属品】 9. 排水管の現場溶接 10. 排水管の支持間隔の減少 11. 排水管の荷重 12. 排水施設（蓋を含む）の取換え 13. 防音壁の補修、改良 14. 高欄の補修、改良 【伸縮装置】 15. 同種の装置に取換え 16. 別種の装置に取換え 17. 本体の補修 18. 本体に兼装等注入 19. 後打ち材取換え 20. 後打ち材補修 21. 増設 【床版】 22. 覆工板工法 23. バッチング工法 24. 支保工工法 25. 打込工法 26. パテ工法 27. 鋼板接合工法 28. コンクリート打換え工法 29. 他形式床版への取換え 【本体】 30. 補強、増設 31. 劣装の完全修繕 32. 劣装の部分的修繕 33. 応急処理、収受け 34. 部材の矯正 35. ジャッキアップ 36. 部分的取換え、架換え 37. 全体の取換え、架換え 38. ポルトレットの締めつけ、交換、補充	【支承】 39. 応急処理、収受け 40. ジャッキアップ 41. 据直し、骨の補修 42. 取換え 43. 清掃 44. 劣装の取換え 【下部工】 45. コンクリート部の補修、鋼製橋脚の劣装 46. 応急処理、収受け 47. 増く、基礎拡大 48. 根固め工 49. 周辺地盤の改良 50. 支持条件の改善 51. 中間補間の増設 RANK 2 52. 舗装の機能性向上 53. 排水施設の機能性向上、強化 54. 伸縮装置の機能性向上、強化 55. 床版の強化 56. 床版の強化 57. 支承の機能性向上、強化 58. 下部工の安定性向上、強化 RANK 3 59. 橋下への落下物減少 60. 騒音、振動の減少 61. 外観の美化 RANK 4 62. 路上の安全性向上 63. 周囲への影響良好 64. 構造物自体の安全性、機能性向上 RANK 5 65. TOP
---	--

Fuzzy Weight $\tilde{W}_i$ を用いることにより事象 m に関する評価値 $\tilde{P}_m$ は n 個の下位事象が存在する場合次式で計算される。

$$\tilde{P}_m = \tilde{P}_1 \odot \tilde{W}_1 \oplus \tilde{P}_2 \odot \tilde{W}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{P}_n \odot \tilde{W}_n \quad (3)$$

ただし、 $\oplus$ 、 $\odot$ は拡張原理にもとづく和、積を表わしている。この操作を頂上事象まで繰り返すことにより最終的な総合的評価値がファジィ数として得られることになる。

4. 維持管理効果の信頼性解析への導入

いま、点検、補修に関する総合的評価を

$$\text{点検}; \tilde{Y}(m, \alpha, \beta) \quad (4)$$

$$\text{補修}; \tilde{R}(n, \gamma, \delta) \quad (5)$$

と表わすと、これは橋梁全体における点検・補修各々の業務遂行による効果を代表している。まず、点検・補修効果の判定基準として初期入力データ全てを先の5段階評価の $\tilde{E}$ とした場合、すなわち全ての項目に対して非常に粗雑な点検・補修が実施された場合と全てが $\tilde{A}$ すなわち非常に綿密な作業が行われた場合を考え

る。全てが $\tilde{E}$ の場合のメンバーシップ関数を各々 $\tilde{I}_E, \tilde{R}_E$ で表わし、全てが $\tilde{A}$ の場合のメンバーシップ関数を各々 $\tilde{I}_A, \tilde{R}_A$ とする。この両者は点検・補修作業の極端な場合の限界水準を表わしていると考えられる。

いま、ある点検作業データから得られた頂上事象のメンバーシップ関数を $\tilde{I}$ とすると、 $\tilde{I}$ のL関数と $\tilde{I}_E$ のR関数との交点のメンバーシップ値を f 、 $\tilde{I}$ のR関数と $\tilde{I}_A$ のL関数との交点を g で表わす。ここで、メンバーシップ関数がnormalかつconvexであるとする、 f の値が大きくなるにつれて $\tilde{I}$ は $\tilde{I}_E$ に近くなる。同様に g に関しても $\tilde{I}_A$ に対して同じことが言える。この f, g の2つのパラメータと $\tilde{I}$ の中央値 m を用いて、集合 $\tilde{I}$ の評価、すなわち点検の内容を指標 X で定義することを試みる。(図6)

ここで、

$$\begin{cases} 0 \leq f \leq 1 \\ 0 \leq g \leq 1 \\ 0 \leq m \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

である。これらのことより、 $(g - f)$ という新たなパラメータを考えると、この値の正負、およびその絶対値によって、 $\tilde{I}_E$ あるいは $\tilde{I}_A$ に $\tilde{I}$ がどの程度近いかを判断することができる。すなわち、この値は $\tilde{I}$ の形状のうち広がり、総合的評価に影響するパラメータであると考えられる。式(6)より、

$$-1 \leq (g - f) \leq 1 \quad (7)$$

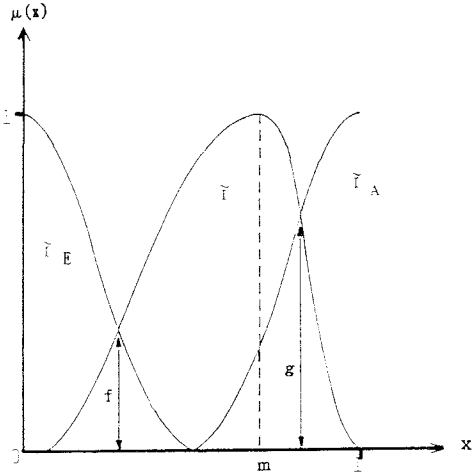


図6 f 値, g 値, m 値の定義

である。

次に、 m はメンバーシップ関数の中央値であるので、当然評価値に大きく影響するものである。そこで $(g - f)$ と m を加えたものを X として表す。まず、 $(g - f)$ と m のスケールを同じにするために、式(7)を変形し

$$0 \leq \frac{1 + (g - f)}{2} \leq 1 \quad (8)$$

とする。この値と m との間のWeight を k ($k > 0$)として考慮し、さらにそれを加えたものを、0から1の間の値をとるように、次式で定義する。

$$X \text{ or } Y = \frac{k \frac{1 + (g - f)}{2} + m}{1 + k} = \frac{2m + k(g - f) + k}{2(1 + k)} \quad (9)$$

$$(0 \leq X, Y \leq 1)$$

この X, Y をそれぞれ $\tilde{I}, \tilde{R}$ の評価順位の判定基準とする。

いま、ある構造物が点検も補修も非常に粗雑な場合の機能損失確率 $\tilde{P}_f; (m_p, \alpha_p, \beta_p)$ が図7の破線部で示された関数M1で与えられているとする。すなわち、関数M1においては $X=0$ かつ $Y=0$ である。ここで、この構造物にある程度の点検を行う。点検を行なうということは、構造物に構造的・力学的変化をもたらさないため、 $\tilde{P}_f$ の値自体には減少あるいは増加という変化は生じないが、 $\tilde{P}_f$ の推定の精度は上がると考えられる。すなわち、その帰属度は中央値の近傍で相対的に大きくなり、結果として帰属度関数の広がり狭くなると考えられる。よって、 $X=0$ から X の値が大きくなるにつれて、 $\tilde{P}_f$ は関数M2のようになる。一方、点検作業に対して補修作業は構造系を物理的に変化させるわけであるから、補修業務のみを実行する、すなわち Y の値が大きくなると、 $\tilde{P}_f$ は明らかに減少し、関数M3のようになる。

ここで、 X 、 Y と P_f には表3に示す関係がある。すなわち、 X が0から1に変化すると m_p の変化はなく、 α_p と β_p が負の相関をもった変化をする。逆に Y の値は α_p 、 β_p には関係がないが、 m_p とは逆の相関がある。

5. 重要度を考慮した目標信頼性の決定法

一般に維持補修業務の実行に必要な経費はその作業内容が綿密になるほど大きくなり、全費用に占める割合もかなりのものになる。ここでは、この維持管理費用を目標信頼性の決定過程に反映させ、同時に機能損失確率をその指標とすることで、社会的・経済的重要性を考慮する。

一般に構造物を建設する際の総期待損失費用⁸⁾は、

$$C_T = C_I + C_F \cdot P_f \tag{10}$$

と表わせ、 C_T を最小にする P_f から、目標信頼性を決定することができる。ただし C_I は初期建設費、 C_F は構造物が破壊した場合の損失、 P_f は破壊確率である。ここでは、都市高速道路の特徴から機能損失確率を考え P_f の代わりにファジイ数で定義した $\tilde{P}_f$ を用い、次式のように総期待損失費用を定式化する。

$$\tilde{C}_T = \tilde{C}_I \oplus \tilde{C}_F \odot \tilde{P}_f \tag{11}$$

ただし、上式では初期建設費用 $\tilde{C}_I$ 、機能損失時の損失 $\tilde{C}_F$ もファジイ数で定義している。記号 $\sim$ はファジイ数を表わしている。

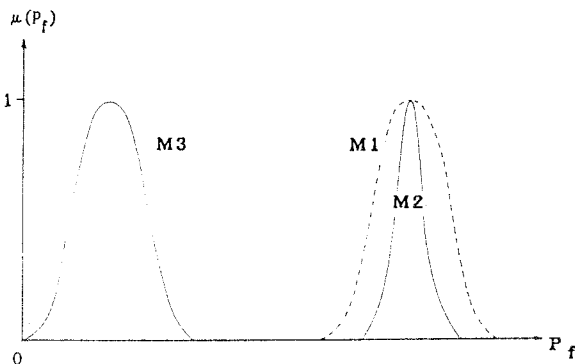


図7 点検・補修業務の帰属度関数への影響

表3 X, Yと $\tilde{P}_f$ の関係

X	0 ——— 1	Y	0 ——— 1
m_p	変化なし	m_p	最大 ——— 最小
α_p	最大 ——— 最小	α_p	変化なし
β_p	最大 ——— 最小	β_p	変化なし

$\tilde{C}_I$ は、例えば $\tilde{P}_f$ が小さいときには多くの費用が必要であるというような関係があるので、 $\tilde{P}_f$ の関数として表現される。また、 $\tilde{C}_F$ は機能損失時の損失であり、その確定的な評価は困難であるが定数と考えられる。このとき、総期待損失費用 $\tilde{C}_T$ もファジィ数で定義され、ファジィ変数 $\tilde{P}_f$ の関数となる。この $\tilde{P}_f$ は前述の X, Y の関数であるので、 $\tilde{C}_T$ は結局 X, Y で規定されることになる。

さて、最適な維持管理方法は、この $\tilde{C}_T$ を最小化することにより得られる。しかし、 $\tilde{C}_T$ はファジィ数で定義されているために明確な大小関係が規定できない場合があり、通常の”最小”という概念では $\tilde{C}_T$ の最小化を実行することができない。そこで、ここでは $\tilde{C}_T$ の最小化として以下の $\tilde{\text{Min}}$ 演算を定義する。

$$\tilde{C}_T = \tilde{C}_I \oplus \tilde{C}_F \odot \tilde{P}_f \rightarrow \tilde{\text{Min}} \quad (12)$$

この $\tilde{\text{Min}}$ はファジィ集合論的な最小化を表わし、ファジィ数の中央値とその左右の広がりと同時に最小にすることを意味している。いま $\tilde{C}_T ; (m, \alpha, \beta)$ と表わすと、 $\tilde{\text{Min}}$ は、

$$\tilde{\text{Min}} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} m \rightarrow \text{Min} \\ \alpha, \beta \rightarrow \text{Min} \end{cases} \quad (13)$$

で定義される。 $\tilde{C}_T$ を $\tilde{\text{Min}}$ することにより最適な $\tilde{P}_f$ が求まり、この $\tilde{P}_f$ の中央値から最適な補修方法が、広がり α, β から最適な点検方法が規定できることになる。

ところが、実際には $\tilde{C}_T$ の中央値 m_{CT} および広がり α_{CT} を両者ともに最小化することは困難であり、何らかの新たな方法を考えることが必要である。いま、 m_{CT}, α_{CT} の考えられる範囲の最大値で各々を割って正規化したものを $\hat{m}_{CT}, \hat{\alpha}_{CT}$ とすると、 X, Y と $\hat{m}_{CT}, \hat{\alpha}_{CT}$ は式 (12) と表 3 の結果から推定できるように負の相関があるので、 X, Y がともに 1 のとき $\tilde{C}_T$ は最小となり最も望ましい値といえる。しかし、両者を同時に 1 にすることは困難であるので、ここでは両者の”満足度”に当たるものを定義して、それを最大にすることにより解を得ることを試みる。この満足度最大の考え方にもとづくと、 $\tilde{C}_T$ の最小化問題は以下のよう に定式化される。

$$\text{満足度 } Sa = \text{Min}(\hat{m}_{CT}, \hat{\alpha}_{CT}) \rightarrow \text{Max} \quad (14)$$

この $\hat{m}_{CT}$ と $\hat{\alpha}_{CT}$ の最小値にもとづく満足度の定義は最も悲観的な場合に相当する。すなわち、目的関数の最悪の状態を想定したもて自己の決定変数に関して最適化した解を求める方法で、例えば図 8 に示すように 2 つの関数 F と G からなる簡単な場合では、Min-Max 点を求め最適な $\tilde{P}_f$ を計算することは、両者の交点を求めることになる。

次に、 $\tilde{C}_T$ と $\tilde{P}_f$ の関係について考える。まず、 $\hat{m}_{CT}$ と $\tilde{P}_f$ の中央値 m_p 、広がり α_p について考える。いま、 m_p がある値に固定されているとすると、 $\hat{m}_{CT}$ と α_p の関係は図 9 のようになる。これは精密な点検 (α_p が小さいほど精密な点検となる) を行うと経費が上がることを表わしている。また、 α_p が固定されている場合、 $\hat{m}_{CT}$ は m_p によって、例えば図 10 のようなグラフで表現される。すなわち、補修をしないと機能損失確率が大きくなり、総期待損失費用が大きくなるが、一方必要以上に補修作業を行うと、この場合も経費の浪費につながることを意味している。このことは、通常の総期待損失費用と破壊確率の関係に対応している。この両者を組み合わせると、 $\hat{m}_{CT}$ と m_p, α_p の関係は図 11 のようになる。

一方、 $\hat{\alpha}_{CT}$ と m_p 、 α_p との関係は、図12、図13のようになる。図12は、 m_p が大きくなるとファジイ数の積の定義から $\hat{C}_T$ の広がり α_{CT} も大きくなることを表わしている。また図13は、点検が粗雑 (α_p が大)であれば α_{CT} も大きくなることを表わしている。図12と図13とを空間座標で表現すると図14のようになる。

さらに、 $\hat{m}_{CT}$ と $\hat{\alpha}_{CT}$ は正規化してあるので、図11と図14のグラフを図15のようにそのまま重ねることができ、曲面F 1と平面F 2の交線が、満足度を表わす目的関数となる。ここで、満足度を最大にする点、というのは損失を最大にする点であるから、交線の最小点をとればよい。

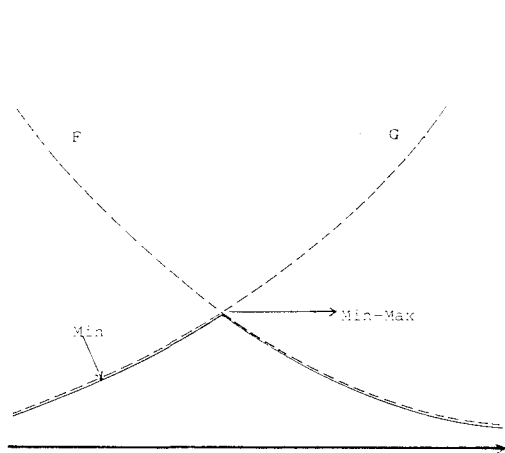


図8 Min-Max法の説明

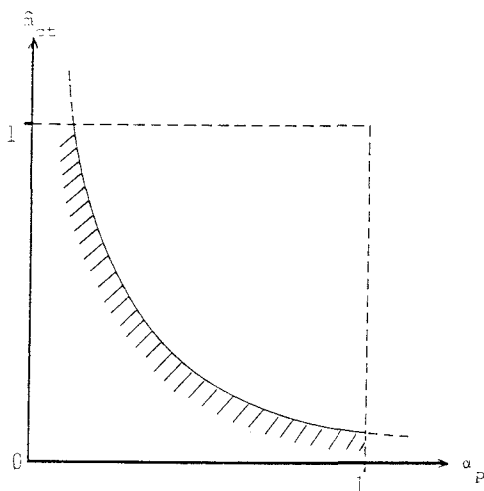


図9 α_p と $\hat{m}_{CT}$ の関係

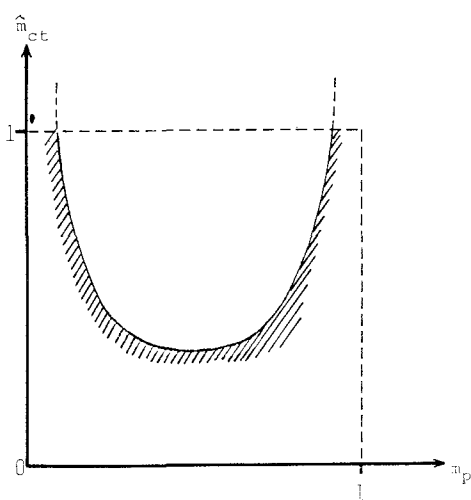


図10 m_p と $\hat{m}_{CT}$ の関係

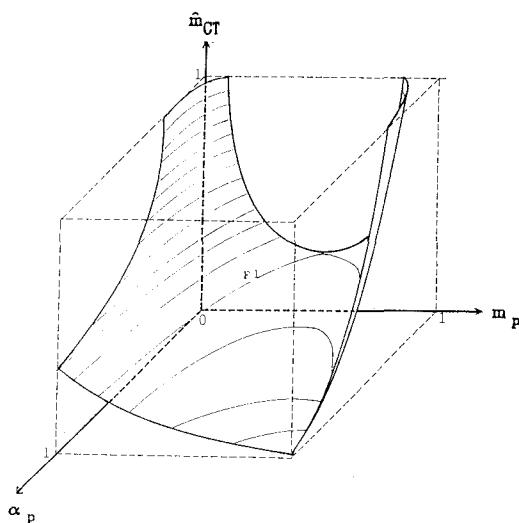


図11 空間座標における m_p 、 α_p と $\hat{m}_{CT}$ の関係

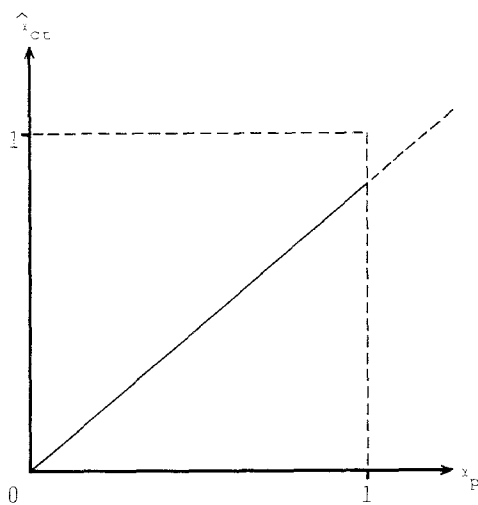


図12 α_p と $\hat{\alpha}_{CT}$ の関係

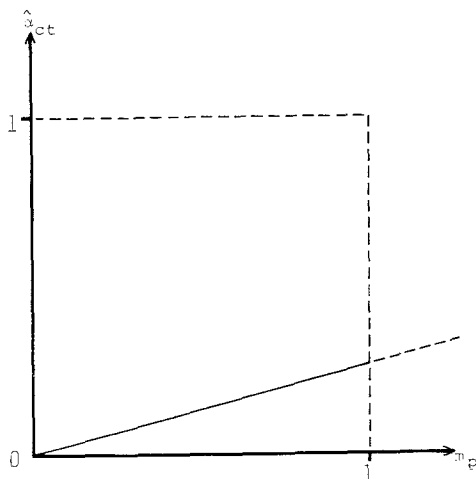


図13 m_p と $\hat{\alpha}_{CT}$ の関係

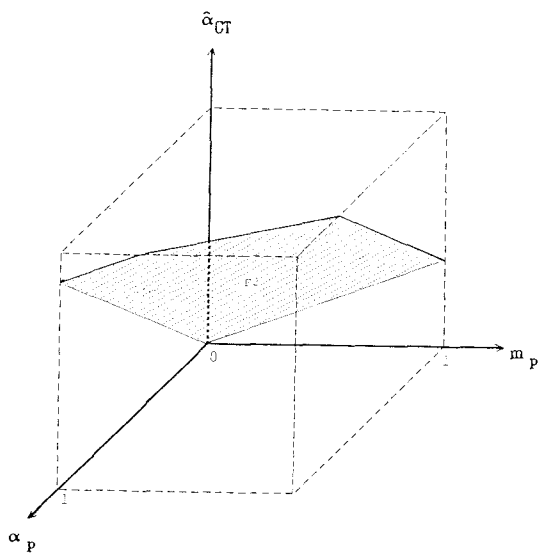


図14 空間座標における m_p , α_p と $\hat{\alpha}_{CT}$ の関係

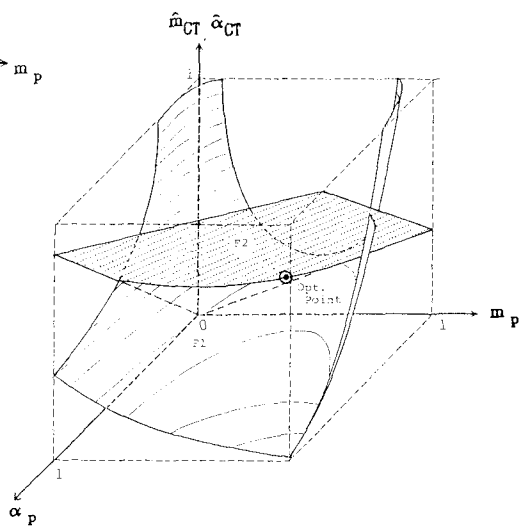


図15 空間座標における Opt. Point の位置

6. あとがき

本論文では、ファジイ理論を用いて維持管理効果の信頼性解析への導入を試みた。本論文で得られた結果は以下のとおりである。

(1) ファジイ集合の概念を導入することにより、維持管理効果の信頼性解析への導入が可能となった。本手法は、専門技術者にしかわからない直感や経験を定量的な形で取り入れることができる。機能損失確率の考え方をいえることにより、より実状に即した維持管理効果の評価ができる。特に、機能損失確率をファジイ集合として定義することにより、点検の効果と補修の効果を独立に表現することが可能である。

(2) 総期待損失費用をファジイ数として規定し、その最小化を中央値と広がり同時最小化という形で定義した。実際の計算においては多目的計画法のMin-Max法を用い、満足度最大化という形で定式化した。本研究では、目標信頼性の決定法の概念の呈示にとどまっているが、この考え方を基盤にしてより実用的な手法の開発が可能になると思われる。

また今後の課題として、維持管理費と建設費用の関係の設定などをもう少し実際的にし、またメンバーシップ関数の設定、あるいはファジイ演算、さらには機能損失確率と維持管理効果の関係等に改善すべき点が多く残されている。

最後に、本研究の一部は科学研究費総合(A)60302059(代表 藤野陽三)と阪神高速道路公団HDLS委員会の援助を受けて行われたものである。ここに付記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Pugsley, A.: The Prediction of the Structural Accidents, Structural Engineer, Vol.51, No.3, pp.195~196, 1973.
- 2) 白石成人, 古田 均, 川村幸男: 事故解析へのファジイ積分の応用, 土木学会論文集, Vol.339, pp.33~40, 1983.
- 3) 白石成人, 古田 均: ファジイ集合論の構造工学への応用, 土木学会誌, Vol.69, No.6, pp.63~67, 1984.
- 4) 白石成人, 古田 均, 池島賢治: 信頼性解析法へのファジイ理論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, Vol.325, pp.1~10, 1973.
- 5) Zadeh, L.A.: The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning, I, Information Science, Vol.8, pp.199~249, 1975.
- 6) Dubois, D. and H. Prade: Fuzzy Real Algebra: Some Results, Fuzzy Sets and Systems, Vol.2, pp.327~348, 1979.
- 7) Wagenknecht, M. and K. Hartmann: On Fuzzy Rank-Ordering in Polyoptimization, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 11, pp.263~284, 1983.
- 8) 白石成人: 構造物の信頼性解析, 季刊カラム, No.95, pp.11~14, 1985

(1986年10月17日受付)