

## 一つのシステムとした橋桁端部の損傷に着目した信頼度評価に関する基礎的研究

Fundamental study on reliability evaluation against damage to bridge girder ends as a system

北楯 大\*, 北田 俊行\*\*, 加賀山 泰一\*\*\*

Dai Kitadate, Toshiyuki Kitada, Taiichi Kagayama

\* 大阪市立大学院, 工学研究科後期博士課程 土木工学専攻 2年生 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3丁目 3-138)

\*\* 工博 大阪市立大学大学院教授, 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3丁目 3-138)

\*\*\* 阪神高速道路公団 工務部 工務第一課 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

In 2002, the Japanese Specifications for Highway Bridges has been revised and the bridge design life in Japan is redefined as 100 years. However, the actual life-cycle of shoes, expansions joints, asphalt pavement etc. are much shorter. It is, therefore, necessary to develop a maintenance strategy for these structural members. To find out the tendency of the damage to these members, a number of reliability field data with comparatively short life on the damage were collected. The first target of this paper is to generate the probability density function on occurrence of the damage. In this study, some indexes will be proposed and the reliability indexes are calculated considering the members as a series and parallel systems. Maintenance strategy for each system is discussed together with its maintenance procedure. Thus, the value of 'availability' is calculated adopting the Monte Carlo simulation.

Key Words: steel bridge, system, reliability index, availability, damage

キーワード: 鋼橋, システム, 信頼度, アベイラビリティ, 損傷

## 1. はじめに

これまで、多くの橋梁構造物が設計、施工されているが、この後、数十年にわたってこれらが寿命に達し、機能を失っていくものと考えられる。平成14年3月に道路橋示方書が改訂され<sup>1)</sup>、新たに橋梁の寿命が100年と定義された。しかし、これまで、寿命の長さそのものについては、「減価償却資産の耐用年数等に関する大蔵省令」において、鉄道橋の耐用年数がコンクリート橋で50年、鉄骨造で40年となっていることにひきずられて、我が国では50年程度と考えることが多かった<sup>2)</sup>。したがって今後、維持管理に関しては2種類の橋梁が存在していくことが考えられる。一つは、新道路橋示方書で設計されていない50年の寿命を目標に設計された橋梁に対する維持管理、他の一つは、新道路橋示方書で規定された100年間の寿命を保証する設計法により設計された橋梁である。しかし、橋梁全体で考えてみると、50年や100年という寿命は、伸縮装置、支承、舗装など付属物等の寿命が短いために、絶えずメンテナンスを繰り返して機能を保持していかなければならない。また、平成5年4月1日現在、全長が15m以上の橋梁は124,604橋にのぼり<sup>2)</sup>、仮に橋梁の寿命を50年とすると、年間約2,500橋を更新しなければならず、新設橋梁が年間2,000~2,500橋であることを考慮すれば、相当な建設費用が必要となる。したがって、50年という

寿命が到来しても機能を保持できるようにメンテナンスを行っていく必要がある。そこで、航空機および海洋構造物等のように規模が巨大で複雑な機能を持つシステムを考えてみる。このようなシステムでは指定された機能を実現することは容易でなく、また、故障が生じるとその社会的、経済的影響がきわめて大きくなると考えられる。したがって、システムが正常に機能する性質を評価したり、あるいはその逆に、ある機能を喪失させる故障を定量的に評価し、信頼性の高いシステムを設計するための手法が必要となってくる。そこで、信頼性工学という学問分野を考える。

本研究では、一般的に経年劣化が激しいと考えられる桁端についてそのシステムの信頼性を評価し、100年よりも寿命が短いと考えられる付属物についてその寿命を算出し、ライフサイクルコストの算出に対して適当な値を提案するとともに、それぞれについて信頼度を算出する。ここで、信頼度とは、JIS Z 8115において、「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たす確率」とされている。また、アベイラビリティとは、「システムまたは装置がある規定の条件下で使用されたとき、任意の時点において満足に動作する確率」と定義されている。これまで、信頼度を主として考え、劣化が規定の基準を超えた場合、即座に機能の回復が図られ、そしてまた新たに補修部品の信頼度の低下の繰り返しが考えられて

きた。しかしながら、図-1に示すように、航空工学、また宇宙工学においては、劣化が規定の基準を超えた場合、修理系の場合は機能が失われる期間、すなわちダウンタイムが存在し、ダウンタイム中に機能の回復が行われる確率密度関数が存在し、これに伴って任意の時点において満足に動作する確率を求める方法が確立されている。橋梁では、これまで任意の時点における機能の有効性を定量的に評価する方法が存在しなかった。そこで、本研究では、このアベイラビリティを算出することを目的とし、これにより、橋梁構造物のアベイラビリティを評価しようとするものである。

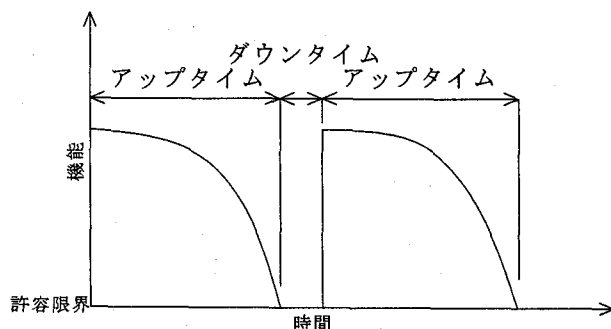


図-1 劣化曲線の概念図

これは、一般的には信頼性試験を行って、得られたデータより解析を行って算出されるものである。しかしながら、土木構造物は一般に供用期間が長く、試験室信頼性試験を行っている余裕はない。そこで、阪神高速道路公団より損傷データを入手し、これをフィールド信頼性試験のデータとして解析を行い、信頼度を算出した。機械工学、航空工学においては、詳細なフィールドデータを採取し、これに信頼性解析を行うことによってメンテナンス戦略を特定し、これにより機能の維持を図るべく対処できるような体制を整えてある。しかしながら、ご存じの通り、土木構造物においてはフィールド信頼性試験のデータしか存在しないばかりか、これについても不備が多く、今後のデータの蓄積が待たれるばかりである。そこで、本研究では、不備の多い信頼性データから、機械工学および航空工学で用いられているような手法を用い、なんとか納得できるような信頼度、およびアベイラビリティを算出しようとするのが目的である。

本研究では、桁端部の舗装、伸縮装置、および支承を代表的なアイテムとして取り上げ、これらについてシステム評価することを考えた。しかしながら、桁端部には他にも桁自体の腐食、塗装の劣化、および支承周辺の疲労クラックといった問題がある。支承については、今後、新たに追加して損傷データを解析することによって、どこにどれだけの問題があるかが判明するものと考えられる。また、桁自体の劣化についても、フィールドデータを収集することで、腐食の現状が判明し、これより原因が特定され、機能の維持を図るための方策が見えてくるものと考えられる。これらを桁端部のシステムの一部として考えていくことは、今後の課題である。

本研究のような類の論文は過去になく、損傷データを集めた論文もあり見受けられない。この理由として、今までは橋梁構造物が長大な寿命を有することから、維持管理に対する関心が薄く、ほぼメンテナンスフリーとして、使い捨ての構造物という考え方が強かったものと考えられる。また、昨今の建設費削減という考え方がなく、潤沢な資金に支えられ、損傷が起きたときに補修を行う事後保全を行っておけば、橋梁としての機能が維持できると考えられていた側面もある。また、鉄道などは異なり、一時的な機能の停止は、交通事故等によってたびたび引き起こされ、国民感情が一時的な機能停止に対して寛容であることも、本研究の類を遅らせている原因の一つと考えられる。また、橋梁構造物は多種多様な部材からなっており、技術開発に伴い、常に新しい部材が導入されることから、個別の耐久性を評価しようとしても、その評価が行われる時点では、また新しい技術が導入されるというフィールド信頼性試験のデータとして扱いにくいという問題点も存在する。しかしながら、ここ数年の建設費削減により、維持管理の必要性が増大し、多様な方法を用いて構造物を評価する指標が必要になってきたことも事実である。一部では、遺伝的アルゴリズムを利用して補修箇所を優先度を決定しようとする論文も見受けられるようになってきた<sup>3)</sup>。そこで、本研究では、限られたデータではあるが、その中から維持管理に関する指標を見いだそうとしたものである。

## 2. 損傷の判定

表-1 定期点検の判定例<sup>4)</sup>

| 判定区分 | 状 況                                                                                                           |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ④    | 損傷・腐食・劣化が著しく、構造物の機能低下を招き、交通安全確保上、または第三者への影響が大であり、支障をきたす恐れがあると考えられ、緊急補修の必要がある場合（固有の限界状態が設計基準等で定める目標限界状態を下回る場合） |
| A    | 損傷・腐食・劣化が著しく、補修の必要がある場合（近い将来に固有の限界状態が設計基準等で定める目標限界状態を下回る可能性がある場合）                                             |
| B    | 損傷・腐食・劣化があり、必要に応じて補修する場合（将来に固有の限界状態が設計基準等で定める目標限界状態を下回る可能性がある場合）                                              |
| C    | 損傷・腐食・劣化が軽微であり、必要に応じて補修する場合（遠い将来に固有の限界状態が設計基準等で定める目標限界状態を下回る可能性がある場合）                                         |
| OK   | 上記以外の場合（補修・補強が不要な場合）                                                                                          |

伸縮装置および支承といった付属物の寿命は橋梁の寿命より短く、定期的に点検、および補修を繰り返していく必要がある。そこで、阪神高速道路公団の過去の損傷データを使用し、これまでの付属物がどれだけの寿命を持っているのかを明確にする必要がある。なお、阪神高速道路公団では、表-1のような判定基準をもっており、これにしたがって補修、補強が必要と判定された場合、損傷したとみなすものとする。具体的には、Aランク以上と判定されたものを損傷とみなしている。

### 3. 個々の平均寿命

個々の平均寿命を算出するにあたっては、損傷データに確率密度関数をあてはめ、最尤推定法を用いて確率密度関数の母数を推定するのが一般的である。しかし、データの性質上、完全データでない場合もあり、これについてはノンパラメトリック法により解析する方法もあるが、理論分布にあてはめて、母数を使用して議論の方が便利でもある。そこで、完全データの場合は、最尤推定法を用い、不完全データの場合は、Herdの方法<sup>5)</sup>を用いて直接信頼度曲線を算出した後、ハザードプロット法を用いて母数の推定を行った。なお、完全データの場合には、 $\chi^2$ 乗検定を行って、最もよい適合性を示した分布をあてはめることとした。平均寿命に関しては、本研究で考慮した付属物が修理系であることを考慮し、平均故障時間間隔 (MTBF: Mean Time Between Failure) をそれぞれの平均寿命とした。なお、検定の対象とした分布形は、完全データの場合、正規分布、対数正規分布、およびワイブル分布の3つを考えた。ワイブル分布はガンマ分布と同様の指数分布を拡張したものであり、また極値分布の一つでもある。したがって、ワイブル分布を考慮することで、他の広範な分布形状も包含できると判断し、これについて検討を加えることで他の分布形状の性質も判断できるものとした。

#### 3. 1 伸縮装置

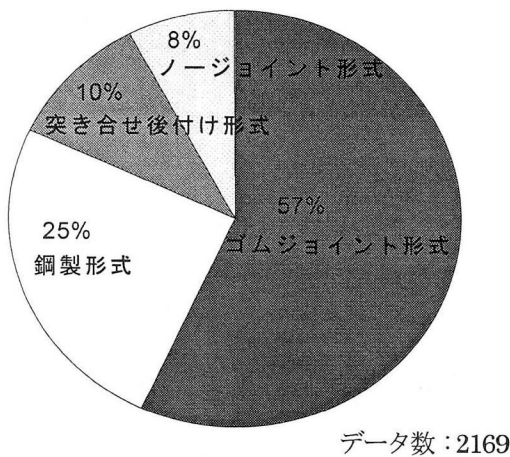


図-2 伸縮装置の内訳

伸縮装置について、収集したデータの内訳を図-2に示す。内訳は、ゴムジョイント形式が半数以上と多く、また、鋼製形式も次に多くなっている。したがって、本章では、主に荷重支持型の伸縮装置について考察を行うこととなる。伸縮装置のデータは、阪神高速堺線のデータであり、これについてはほぼ全数のデータがそろっていることから、完全データとして扱い、最尤推定法により母数を推定した。この結果、表-2に示すとおり、MTBF が最も適切な分布であるワイブル分布で9.8年となった。また、対数正規分布および正規分布についても、MTBF が約10年

となった。

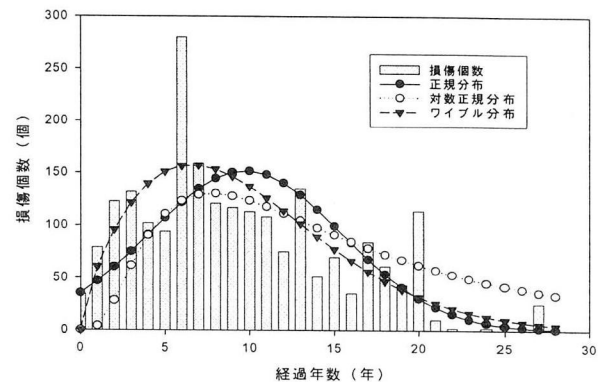


図-3 伸縮装置の経過年数に伴う損傷個数と損傷発生確率密度曲線

表-2 伸縮装置の損傷の確率密度分布とその平均値

|      | 確率密度分布 |        |        |
|------|--------|--------|--------|
| 適合   | 1.ワイブル | 2.対数正規 | 3.正規分布 |
| 平均寿命 | 9.8年   | 10.5年  | 9.8年   |

これは、荷重支持型の伸縮装置が多く、これらが平均寿命を長くしている要因と考えられる。また、補修後、ノージョイント形式に変更しているものは、ほぼメンテナンスフリーと考えてよく、伸縮装置の今後の耐久性を向上させる大きな要因と考えられる。結果として、阪神高速道路公団が、補修を加えたことによって高耐久性でメンテナンスフリーな伸縮装置に切り替えたことがわかる。また、これらのデータより確率密度関数のあてはめを行ったものが図-3に示されている。6年目に補修のピークが来て、その後徐々に減少していく傾向にある。本研究では、正規分布が最も一般的な分布であることから、これについても母数の推定を行ったが、正規分布の性質上、確率密度分布が時間のマイナス領域にまで分布することから、実務上は不適切であると考えられており、 $\chi^2$ 乗検定では、3番目に位置し、不適切なものとなっている。これは、あらかじめ想定されたことである。

#### 3. 2 支承

支承のデータは、4分の3を支承板支承が占め、残りをローラー支承、線支承などが占めている。支承板支承は標準図集等が整備されており、この点からも一般的な支承であると考えられることから、図-4に示すとおりになった。支承についても確率密度関数のあてはめを行った。支承の場合、全数35,001個中、損傷したのは2,699個であり、明らかに第1型センサード標本 (定時打ち切りデータ) である。したがって、この損傷データを最尤推定法により母数を推定するのは、現在稼働中の支承の寿命を無視し、これまでに損傷した支承のデータのみで母数を推定することとなる。したがって、今後、損傷データが増えるにしたがって母数が変化することからこの方法は不適切である。そ

ここで、累積ハザード関数を用いたNelsonの方法<sup>5)</sup>を考えた。ただし、計算が簡便な Herd の方法と結果に大差ないことから、本研究では Herd の方法を用い、直接信頼度を求めた後、ハザードプロット法<sup>5)</sup>により最小自乗法を用いて母数を推定することとした。なお、伸縮装置では、ワイブル分布が最も適当なことが判明したことから、支承についてもワイブル分布を仮定し、この母数を推定することとした。これは、伸縮装置の分布形状を仮定した場合にも述べたように、ワイブル分布が他の分布形状の性質も示すものであると考えられるためであるのと、形状母数 $m$ の取り方によって、DFR(Decreasing Failure Rate)期から IFR(Increasing Failure Rate)期までを表現できる多様な分布形状を持つと考えたためである。また、ワイブル分布は指数分布を拡張して得られた分布形状であることも考慮し、指数分布に酷似した支承の損傷度数分布を表す分布形状としては最適であるものと判断した。この計算により、形状母数 $m$ と尺度母数 $\eta$ を算出し、経時変化をプロットしたものを図-5に示す。

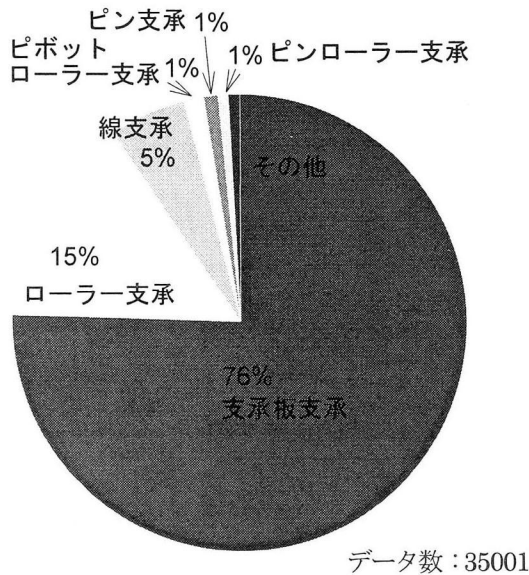


図-4 支承の内訳

表-3 ワイブル分布の形状母数と尺度母数  
(支承の損傷)

|      | 形状母数 $m$ | 尺度母数 $\eta$ |
|------|----------|-------------|
| 推定母数 | 0.9926   | 446.3       |

表-3に示したように、ハザードプロット法により求めた形状母数は1以下であり、ワイブル分布の特徴として指数分布に酷似することとなった。図-5に示す分布形状では、指数型の分布形状に当てはまっていないようにも思えるが、前述したように、全支承数35001個中、約32300個が計測時点で稼働中であり、この稼働中の32300個を無視して損傷した支承のみから分布形状を特定することは、数学的にも非常に無理がある。本章の結果は、不完全データとして処理した結果、素直に導き出されたものであることから、このデータ解析を尊重し、これに対して考察を加え

るものである。また、限界状態による損傷だけではなく、人為的に損傷と判断された部分もあるのではないかと考えられるが、信頼性工学はヒューマンエラーをも含めた広義の損傷にも対応することから、マクロ的に考え、「損傷」と判断されたもの全てを対象とみなして解析を行った。この場合の故障率の経時変化を図-6に示す。この結果、MTBFは478年と算出されたが、図-6を見ても明らかにように、指数分布の場合、CFR(Constant Failure Rate)期を示すことから、平均寿命という考え方自体が不適切である。それより

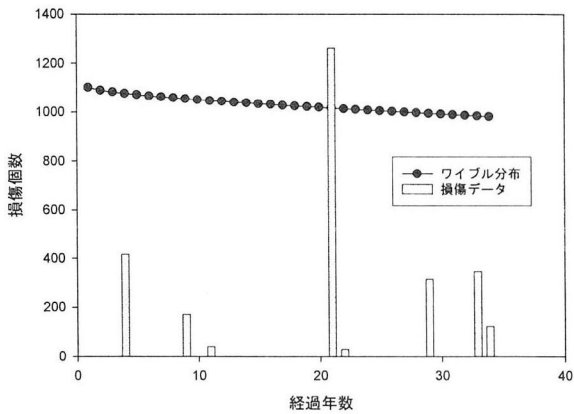


図-5 支承の経過年数に伴う損傷個数と確率密度曲線

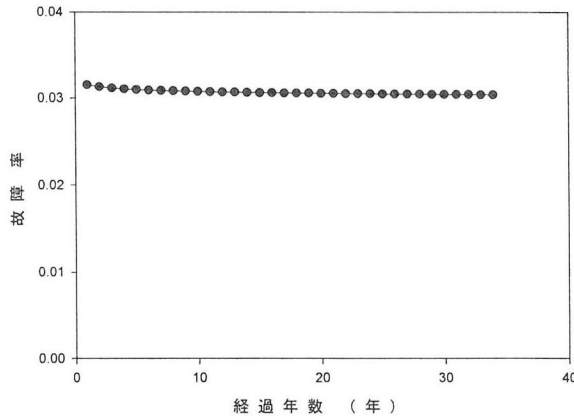


図-6 支承の故障率の遷移図

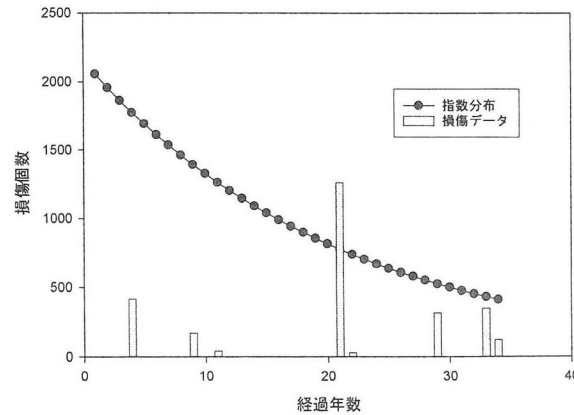


図-7 支承の経過年数に伴う損傷個数と確率密度曲線

も、解析結果より、支承の場合は故障率が時間に関して一定の偶発故障期にあると考えるのが適当である。一般的なシステムでは、bath-tub-curveのようにDFR期があってもおかしくはないが、土木構造物の場合、スクリーニングが徹底されているので、CFRを示すのみとなった。この場合、PM(Preventive Maintenance)の時期を予測するのは困難であり、CM(Corrective Maintenance)が主要な問題になると考えられる。ただし、土木構造物、特に支承の場合は、地震などの災害による突発的なストレスを除けば、一般的に劣化故障型のシステムであり、支承の機能が劣化したことにより、橋梁全体の機能が失われるとは考えにくい。今後、支承の劣化が進めば、IFR期に入り、PMが有効となる時期が来るものと考えられる。図-5には、ワイブル分布を示したが、図-7には指数分布による確率密度関数のあてはめも載せた。MTBFは20.5年と算出されたが、前述の通り指数分布のMTBFにはあまり意味がない。

### 3. 3 舗装

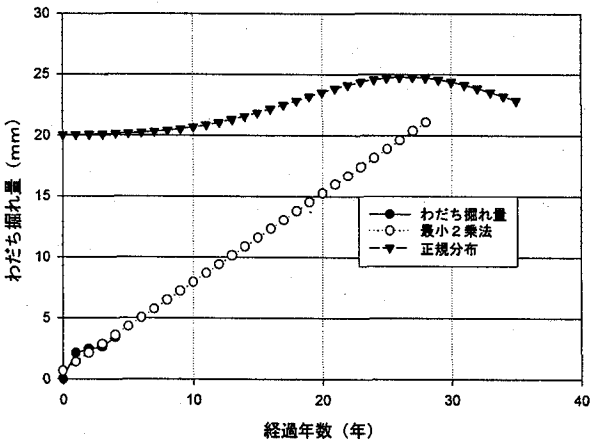


図-8 舗装の経過年数に伴うわだち掘れ量と確率密度関数

表-4 最も適合する確率分布とその平均値  
(舗装の損傷)

|      | 確率密度関数 |
|------|--------|
| 適合   | 1.正規分布 |
| 平均寿命 | 26.5年  |

舗装についても同様な確率密度関数のあてはめを行った。しかしながら、現実には、舗装については目標限界状態のわだち掘れ量20mmに達する以前に、通行止めが行われ、そのときに随時補修が行われていることから、わだち掘れ量20mmに達することが非常に少ない。しかしながら、入手したデータより、推定しうる最大限の情報を算出するという本研究の目的を考えると、これまでの4年分の観測データより最小自乗法を用いてわだち掘れの劣化曲線を近似し、これが20mmと交差する点を目標限界状態として確率密度関数の母数を推定することも、適当な方法である

と考える。また、舗装のわだち掘れが車両の累積台数に比例して大きくなっていること、また毎年の年間交通量がそれほど変化していないことを考えると、直線の最小二乗法による近似で現実の状態をよく近似しているものと考えた。この場合、 $\chi^2$ 乗検定ができないことから、最も代表的な正規分布に従うとして、その母数を推定した。本来であれば、舗装の損傷特性を考慮して分布形状を仮定すべきであるが、これまで本研究のような統計的な処理が舗装に対して行われていないこと、またデータにも乏しいことを考えると、最も基本的な正規分布を仮定した。これを図-8、および表-4に示す。

### 4. 信頼度

損傷個数に関する確率密度曲線が求められ、この確率分布関数として不信頼度が求められ、次いで不信頼度の補事象として信頼度も求まる。伸縮装置の信頼度 $R_E(t)$ 、および支承の信頼度 $R_S(t)$ についてはワイブル分布が適合すると判断されたので、これに従う信頼度は以下ようになる。

$$R_E(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{10.94} \right)^{1.721} \right] \quad (1)$$

$$R_S(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{446.3} \right)^{0.9926} \right] \quad (2)$$

また、舗装の信頼度 $R_A(t)$ は正規分布を仮定したので、以下の通りとなる。

$$R_A(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 70} \int_0^t \exp \left[ - \frac{(t - 26.52)^2}{2 \times 70^2} \right] dt \quad (3)$$

### 5. 安全性

これまでは、主に非修理系の信頼度について述べてきた。言葉の上ではMTBFと表現していても、実際には、初めての故障までの時間MTTFF(Mean Time To First Failure)までを問題にしている、保全を伴うシステムの安全性は問題にしていなかった。しかしながら、多くのシステムにおいては、修理が可能である。そこで、保全度という製品が故障状態から正常状態に回復する保全時間の分布や、MTBFに対応するMTTR(Mean Time To Repair)を考えてみる。そこで問題となってくるのは、信頼性の他に安全性を考慮したアベイラビリティであり、これは、信頼度と保全度とを総合したシステムの広義の信頼性を表す尺度である。これを求めるため、本章では、故障状態にあるシステムが正常に戻る時間の分布について考えてみた。これを図-9に示す。保全度についてはこれまでも研究がなされており、その多くが対数正規分布で表されることがわかっている。橋梁構造物の場合、保全に関する時間の分布は、2001年

冬に阪神高速東大阪線および同大阪港線の通行止めが行われたときに9日間を要したこと、また、2001年秋に1号環状線南行きが通行止めになったときも9日間を要したことを考えれば、有意水準5%を考慮して対数正規分布で9日目に保全度が95%になっていればよい。これらを考え、対数正規分布により9日目で保全度95%を目指して、平均値および分散を仮定してみたが、どのように仮定してみても40%程度までしか上がらず、また、確率密度曲線が指数分布と酷似してきたことから、指数分布で近似し、指数分布のMTTRを変数として極力保全度を95%に近づけるよう努力してみた。その結果、MTTR=3.105のとき最も保全度M(t)が高く、80%を示した。95%には届かなかったが、指数分布とMTTRを上記のように仮定する方法が実用的であると考えた。このときの保全度M(t)の式を下記に示す。

$$M(t) = \exp\left(-\frac{t}{3.105}\right) \quad (4)$$

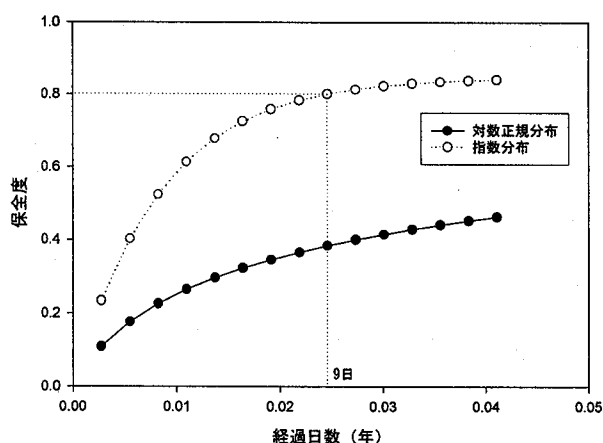


図-9 経過年数に伴う保全度 (桁端部)

## 6. システム

本章では、桁端全体を複雑な機能を持つ一つのシステムと考え、桁端全体についてどの程度の信頼度とアベイラビリティがあるかを算出することを目標とする。

### 6.1 直列システム

橋梁に関していえば、付属物についても、補修していない限りは使用限界状態に達していないと判断できる。また、支承、伸縮装置、および舗装それぞれのアイテムは、独立で損傷するものと考えられる。したがって、図-10に示すように、桁端全体をそれぞれ独立したアイテムで構成された直列システムと考え、この全体の信頼度とアベイラビリティを算出することとする。これは、現実的には、車線全体を通行止めし、機能を停止させた状態でメンテナンスを行った場合に相当する。

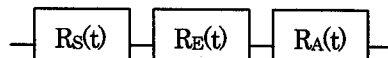


図-10 桁端の諸構造を直列システムと考えたモデル化の例

### 6.2 一部並列システム

構造的に一旦破損すると2車線の通行車線に影響する支承は直列システムとした。また、阪神高速道路は、主要幹線道路については片側2車線以上であることが多い。そこで、完全な通行止めを行わず、少なくとも1車線を機能させ、車線毎に修復するものとした場合を考え、伸縮装置と舗装とを並列システムとした。このときのシステムを図-11に示す。ただし、この場合、信頼性設計された機械等で見受けられる待機冗長システムとするのは不適當であり、道路では、2車線が常に機能していることから通常の並列システムと考え、並列のシステムが常に機能していると考えた。システムの組み方については、参考文献に乏しいことから、計算上、ある程度理想化する必要があった。したがって、各アイテムが独立であると仮定した。アイテム間の相関については、相関があるアイテムを分解し、独立したものとする事で適当な組み方が考えられる。ただし、相関がはっきりしていないこと等を考慮すれば、本研究のような理想化したモデルで解を得るのも一研究になるものと判断した。

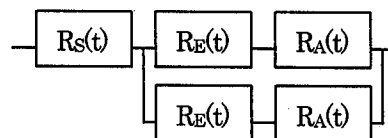


図-11 支承を並列とした場合のシステムの例

## 7. システム全体の信頼度

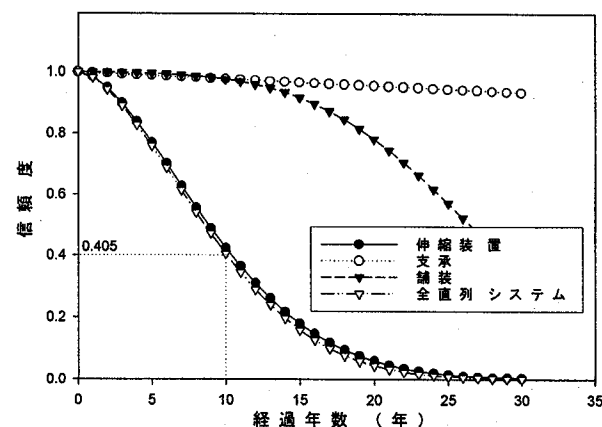


図-12 直列システム全体の信頼度 (桁端部)

直列システムとした場合、信頼度は各アイテムの信頼度を乗じたものになることから、これを図-12に示す。図よ

り、10年でシステム全体の信頼度が0.405にまで低下していることがわかる。これは、図を見ても明らかなように、伸縮装置の信頼度が大きく影響しており、この信頼度が上がればシステム全体の信頼度も高くなると考えられる。

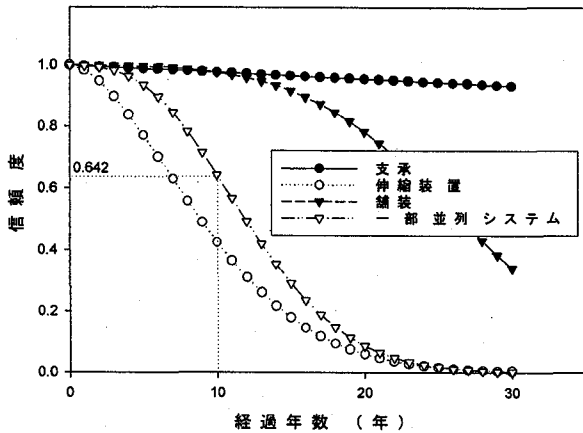


図-1 3 一部並列システム全体の信頼度 (桁端部)

一部並列システムとした場合の信頼度は図-1 3に示すとおりである。この場合、10年経過した後、システム全体の信頼度は0.642であり、直列システムとした場合の信頼度と比較するとかなりよくなっていることがわかる。したがって、片側2車線の道路を補修する場合は、少なくとも1車線は機能を確保して補修を行う方が信頼度が高くなると考えられる。

## 8. アベイラビリティの算出

アベイラビリティの算出については、種々の研究が行われており、シャノン線図<sup>9)</sup>に基づき、マルコフ過程を用いた確率行列の $n$ 乗を計算することによって定常解を求める方法<sup>9)</sup>。または、detailed balance 方程式<sup>7)</sup>をたてることにより、この微分方程式を解くことによって、定常解だけではなく、過渡解となる瞬時アベイラビリティの算出も可能となる。ただし、どちらの場合も信頼度が指数分布に従う場合にのみ有効な方法であり、本研究のようなワイブル分布等に従う信頼度をもつシステムの解法としては、適当ではない。また、土木構造物の場合は、修理の回数が少ないことから、定常解のみを求める方法には適せず、数回修理を行った場合の過渡解が重要な意味を持つ。したがって、目標としては、いかにして過渡解を算出するかに重点がおかれる。そこで、システムが一般の信頼度関数を有する場合のアベイラビリティの解法として、積分方程式をたて、これをラプラス変換して一般解を求める方法がある。この場合、それぞれのシステムについて積分方程式をたて、この数値解法によって解を得る方法であるが、一般的にはシミュレーションにより解を得るのが有効である。そこで、本研究では、6章のようなシステムのアベイラビリティの過渡解を求める手段としてモンテカルロシミュレーション

を用いることとし、これにより、瞬時アベイラビリティの経年変化を求めることとする。

### 8. 1 モンテカルロシミュレーション

モンテカルロシミュレーションにも種々の方法があるが、本研究では、信頼度として各システムが0から1までの変数をとることから、0から1までの一様乱数を用いた原始的モンテカルロ法によりシミュレーションを行うのが適当と考え、この方法を用いた。これにより、システムが破損の状態に達しているかを判断する限界状態関数として信頼度の関数を使用することができる。さらに、状態指標関数をプログラム上に設定することによって、状態関数の期待値を信頼度のシミュレーション値として使用できることから、これをシステムの信頼度の経年変化としてプロットした。また、安全性については、信頼度関数を上回って損傷したと見なされた場合、即時に補修が行われるとしてシミュレーションを行った。一般的には、付属物の破損は劣化故障型と推定できるが、一斉補修を行うまでは機能していると考えられる。では、一斉補修をどのように考えるかが問題となるが、これは、5年、6年という短期間で補修が行われていることを考慮すれば、本研究の方法で現実の問題と対応がとれていると考えて良いと思われる。

### 8. 2 シミュレーション結果

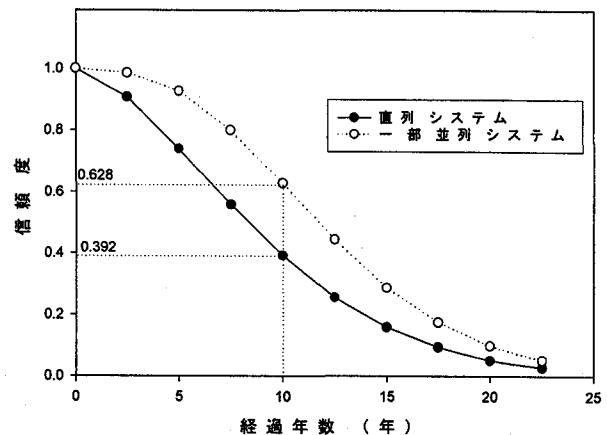


図-1 4 各システム全体の信頼度 (桁端部)

6章に示すそれぞれのシステムについてシミュレーションを行った結果を図-1 4に示す。これは、保全を伴わない場合の信頼度についての結果であるが、10年を過ぎた時点で、直列システムの方が0.392、一部並列システムが0.628となっている。これを7章のシステム全体の信頼度と比較すると、10年で直列システムの方が0.405、一部並列システムの方が0.642とシミュレーション結果と非常によく合っていることがわかる。若干、計算値とシミュレーション値が異なるのは、モンテカルロシミュレーション

特有の精度の問題である。本研究では、有効数字3桁が変化しない範囲で、10万回の試行を行ったが、試行回数を増加させればこの問題も解消されるものと考えられる。ただし、現在の計算機の処理能力の問題もあることから、現時点では、本研究の範囲内で十分であると考えられる。ただし、モンテカルロシミュレーションが、システム全体の信頼度の計算、およびアベイラビリティの計算に有効な手段であることは、明らかになったと考えられる。

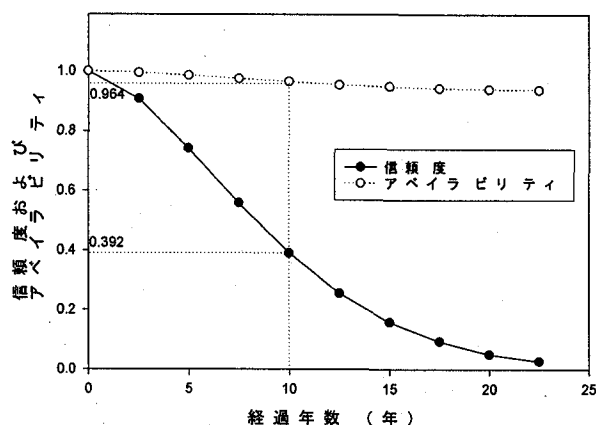


図-15 システム全体の信頼度とアベイラビリティ (桁端部)

次に、図-15には3つのシステムを直列とした場合のアベイラビリティと信頼度とを比較した曲線を示している。保全を伴った場合のアベイラビリティとの比較であるが、保全の場合、損傷が起きた時点ですぐに補修が行われるとしてシミュレーションを行った。前述したように、保全に伴う時間が阪神高速の場合には9日間と非常に短い。このため、横軸に経過年数をとった場合には、非常に短時間で機能が回復すると考えられる。したがって、アベイラビリティは10年を経過した後も0.964であり、96.4%の確率で機能を維持していることがわかる。信頼度と比較すると、信頼度はMTTFを問題としているのに対し、アベイラビリティは保全を考慮しているため、単なる信頼度の比較よりも、より現実的な指標であることがわかる。ただし、実際に補修は路線全体を通行止めにして一斉に行われるのに対し、本研究では即時に補修が行われるとしている。これは現実的でないため、その改良が今後の課題である。しかしながら、付属物については、5年または6年毎に補修されているという現実を考えると、補修間隔が短いことから本研究でも十分現実に対応できるものと考えられる。改良するとすれば、システムの復旧に対してアイテム相互に相関があることから、これを独立となるまで分解し、それぞれを適当に組み合わせてシステムを構築することで対応できるものと考えられる。

アベイラビリティには漸近性があり、時間を無限大にとった場合の定常アベイラビリティについても論じられることが多い。図-16には、直列システムとした場合のアベイラビリティの経年変化と一部並列システムとした場

合のアベイラビリティの経年変化をプロットしている。この結果、一部並列システムの方は、20年を経過した後もなだらかに低下傾向にあるが、直列システムの方は、0.92程度に漸近しているように見える。実際にシミュレーションを行った結果では、直列システムでも、1,000年経過した後もアベイラビリティは0.866を保っており、定常アベイラビリティは0.86に非常に近くなることがわかった。なお、一部並列システムの定常アベイラビリティは、0.94あたりと考えられる。

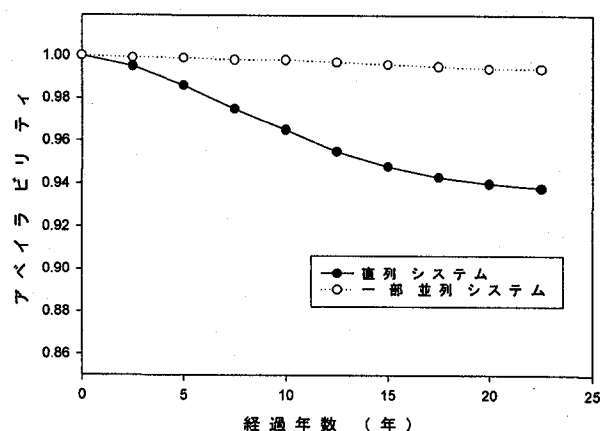


図-16 アベイラビリティの漸近性 (桁端部)

## 9. アベイラビリティの評価

本研究では、10年を経過した後、アベイラビリティA<sub>10</sub>は0.964となった。これは、10年を経たとき、1000個の桁端のうち、964個が機能していると言うことを示す。また、一部並列システムとした場合には、アベイラビリティが0.998となっているので、有意水準を5%としても、これまで、非常に優れたメンテナンス戦略をとってきたことが分かる。もし、仮に1車線毎の補修が許されるとするならば、本研究からすると、もっと信頼度の低いアイテムでも全体として十分機能が維持できていると判断することができる。直列システムで0.964、一部並列システムで0.998となっていることに関しては、直列システム、一部並列システムとしても十分機能が保持されていると判断できるので、特にメンテナンス戦略を変える必要がないと判断でき、これまで、非常に優れたメンテナンス戦略をとってきたことが分かる。

これを横軸に信頼度、縦軸に保全度をとった場合の3つの要素の関係を示したものを模式的に図-17に示す。本研究では、保全度を0.8と仮定したことから、図に示すAの場合のみについて計算を行ってきた。しかしながら、アベイラビリティを一定として保全度と信頼度との関係が図-17のように概念的に表されることから、メンテナンス戦略として保全を容易にする構造とした場合、Bに示すような保全度が高く、信頼度を低くとれる構造物を採用することができる。したがって、初期コストの低下が期待で

きる。これは、各部材の損傷原因別に確率密度曲線を求め、最も高い信頼度を示す要因の信頼度を下げる設計を行った構造物を採用すればよいことにつながる。逆に、メンテナンスを極力行わない戦略をとる場合、Cに示すように、信頼度の高い構造物を採用することによって、保全を極力減らすような構造物を採用することもできる。これを時系列で考えると、アベイラビリティは時間の経過とともに減少し、ある平面を示すことになる。この平面の中で、信頼度の高い構造物は保全が少なく、信頼度の低い構造物は保全の頻度が高くなる。この空間の中で、保全に関する費用を考慮すれば、最適な平面が導かれ、この平面に近い構造物を採用することによって、最適なメンテナンス戦略がとれると考えられる。しかしながらこれは、今後の課題である。

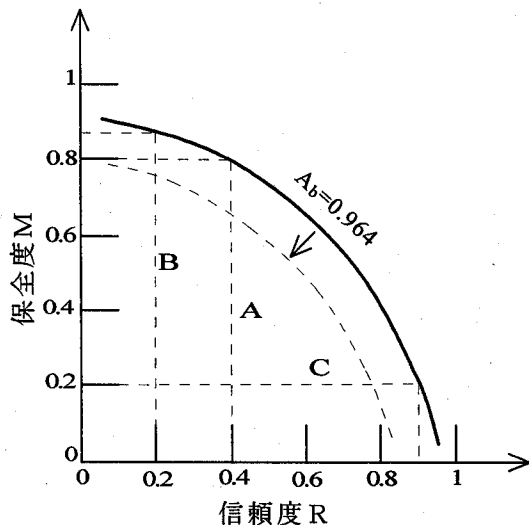


図-17 保全度、信頼度およびアベイラビリティの関係

## 10. 他のシステムとの比較

土木構造物は寿命が非常に長いため、これまで寿命を問題にされることが非常に少なかった。したがって、土木構造物自体の寿命を評価する指標も非常に乏しい。そこで、土木構造物をはなれた他のシステムの信頼性の指標を評価する判断材料が必要となる。文献5)には、それぞれのシステムのMTBFおよびMTTRについて表されたグラフが示されている。このグラフは、信頼性設計をするにあたって、新しく設計された装置がどの程度のMTBFおよびMTTRを有するかを予測するために一般的に使用されている図である。横軸にはシステムを構成する部品の数として能動部品数を示し、縦軸には全体系のMTBFおよびMTTRを示している。一般に、大規模なシステムになるほど信頼度は低下し、MTBFも低下することがわかっている。橋梁構造物の付属物は、溶接等が施されているが、おおむね構成されている部品数が少なく、能動部品数は限りなく1に近い。したがって、縦軸が1と交差する点の比較となる。伸縮装置について、9.8年というMTBFは船舶のMTBFである約10年近辺にあり、航空関係の部品のMTBFである2~3年と比較しても非常に耐用年数が長いことがわか

る。また、1部品とはいえないが、舗装のMTBFが26.5年であるということは、船舶以上の耐用年数があると考えてよい。これまで、橋梁構造物は、一般に航空関係および船舶の部品のように、定期的な点検を行ってメンテナンスを繰り返すシステムよりも、使い捨てのシステムとして扱われてきた傾向がある。これらをどのようにして系統的にメンテナンスを行うかについては、今後の課題である。

## 11. まとめ

本研究を行った結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 限定されたデータではあるが、データ解析を行った結果、伸縮装置および舗装の平均寿命は、それぞれ10年および26年となった。したがって、ライフサイクルコストを算出するにあたっては、これらの平均寿命を用いることで簡易的に対応できると考えられる。
- (2) 付属物すべてを直列システムと考えると桁端部全体のシステムを評価する場合、大規模構造物に特有のことではあるが、その信頼度が極端に低くなる場合がある。これは伸縮装置の信頼度が低いことが原因である。
- (3) 支承の損傷については、継続して機能している個数が非常に多く、解析上、指数分布と酷似した分布形状となった。したがって、bath-tub-curveの偶発故障期にあるシステムと考えてよく、定期的な補修計画がたてにくいシステムである可能性があることがわかった。
- (4) 信頼度だけでなく、保全性を考慮することで、システム全体のアベイラビリティを定量的に評価することができる。
- (5) 1車線の補修のように、直列システムで表される場合よりも、並列冗長システムとして少なくとも最小の機能を確保するような信頼性設計を行えば、全体のシステムの信頼度は向上すると考えられる。
- (6) 複雑なシステム全体のアベイラビリティを計算するにあたっては、モンテカルロシミュレーションを用いるのが一つの有効な手段であることがわかった。
- (7) 保全を考慮したアベイラビリティは、MTTFFを問題にした信頼度とは異なり、任意の時点の機能の有効性を判断する指標として非常にすぐれていることがわかった。
- (8) 直列システムとした場合でも、10年を経過した時点でのアベイラビリティは0.964であり、これまで、非常にすぐれたメンテナンス手法がとられてきたことが判明した。
- (9) 定常アベイラビリティは、直列システムでも0.86程度であり、これまでの保全計画でメンテナンスを行っていけば、少なくとも86%の確率で構造物の機能を維持できる可能性があることがわかる。
- (10) アベイラビリティ一定として信頼度と保全度のグラフを描くことにより、メンテナンス戦略に応じた構造物を選択することができる。
- (11) 航空機などの他のシステムと比較しても、阪神高速道路公団の付属物の信頼度は高く、船舶と同等かそれ以上

の信頼度があると考えられる。

謝辞：本研究のデータ収集については，阪神高速道路公団の杉岡弘一氏に多大なるご支援をいただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 共通編Ⅰ,丸善, 2002.3.
- 2) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理：土木学会論文集, No.501/I-29, pp.1～10, 1994.10.
- 3) 河村 圭：Bridge Management System(BMS)の開発および実用化に関する研究, 2000.3.
- 4) 福本 隼士, 北田俊行, 吉川 紀, 長沼敏彦, 溝渕修治, 岩崎雅紀：阪神高速道路における鋼構造物の維持管理の現状と展望：橋梁と基礎, vol.27, No.3, pp.27～33, 1993.3.
- 5) 塩見 弘：信頼性工学入門, 丸善, 1982.11.
- 6) 塩見 弘：信頼性の基礎, コロナ社, 1975.1.
- 7) 市田 嵩：保全性工学入門, 日科技連出版社, 1976.1.

(2002年9月13日受付)