

(165) 複数の劣化因子から構成されるコンクリート構造物の経時変化予測手法の提案

富士技研センター株式会社 正会員 ○村坂 宗信  
 同 上 非会員 古屋 美伸  
 同 上 非会員 西山 文男

1. まえがき

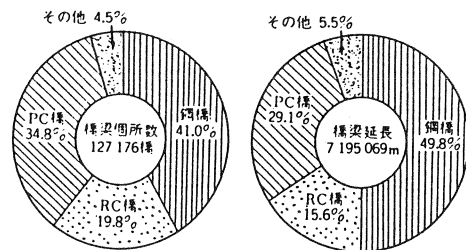
我が国の国道を始めとする主要道路に架かる橋梁は、全長 15 m 以上の主要なものだけでも約 13 万橋（平成 6 年 4 月現在）ある。図-1 は建設年次ごとの橋梁数を示したものであるが 1970 ~ 1980 年代に建設時期が集中しており、2020 年代以降にはこの 13 万橋のうち橋齢 50 年以上の橋梁数が約 5 割を占めると考えられ、今後、橋梁の老朽化が重要な社会問題となることは明白である<sup>1)</sup>。また上述の既設橋梁の現状は、厳しい自然環境、近年の交通量増加及び車両の大型化に伴い、当初設計よりも過酷な供用条件のもとで使用されており、定期的な橋梁点検調査等から著しい損傷等が確認されている。

コンクリート橋梁においては従来より高い耐久性を有しメンテナンスフリーとする考え方が支配的であったが、塩害や中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学腐食等を原因とする耐久・耐荷性の低下が確認されており、早急な維持管理対策を要する橋梁が年々増加している状況である。

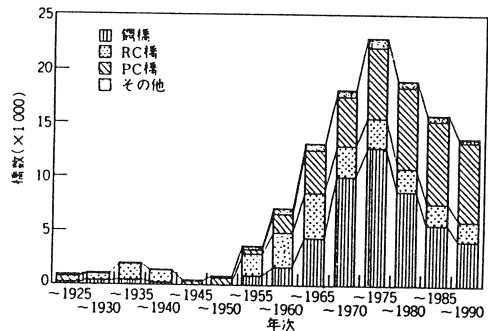
このような状況から近い将来、これらの橋梁に対する維持管理業務が増大し、補修・補強（維持管理）対策費が新設橋梁の建設費を圧迫する事態になることが考えられるため、既設橋梁の正確な劣化診断及び診断結果に基づく補修・補強工法の選定のみならず、限られた建設コスト内で最大の効果を得るための最適な補修・補強計画の提案が合理的かつ効率的に判断できる総合診断システムが必要とされてきている。

このような背景のもと、著者らは従来より「橋梁健全度診断システム：The Sound Estimation of Bridge System (SEBS)」(以下、SEBS と略す) の開発に取り組んでおり、各管理機関での多大な努力によって収集された数多くの橋梁台帳等の基礎データを基に、各因子に対する重み付けを数量化理論を用いて定量的な判断を行い、補修・補強の対象になる重要橋梁をピックアップする手法<sup>2-3)</sup>を提案してきた。この手法を用いることにより、数多い橋梁の中で『どれが一番劣化している橋梁か』という一種のランク付けを行うことが可能となるため、限られた建設コストを有効活用する手段として適している手法と考えられた。

本論文では、このランク付けされた橋梁のより詳細な診断を行う過程において、塩害や中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学腐食等の劣化要因を単一的に考慮するのではなく、システム・ダイナミクス理論<sup>5)</sup>によりシステム的にとらえることにより構造物の余寿命を判定し、同時にライフサイクルコスト<sup>5)</sup>を考慮した補修・補強対策が提案できる総合的余寿命予測手法について考察した。



(a)形式別橋梁数及び橋梁延長



(b)建設年次別橋梁数

図-1 建設橋梁数・延長及び年次別橋梁数

## 2. 既設コンクリート橋梁の余寿命予測の考え方

### 2.1 SEBSの現状<sup>6)</sup>

既設橋梁の安全性はSEBSの結果として得られる耐用性(耐荷力、余寿命)に荷重効果を考慮して評価される。橋梁に作用する荷重効果は、各管理機関で収集されたデータに基づき、ほぼ確率・統計手法で処理が可能なところまでできている<sup>7)</sup>。一方、SEBSの現状は、橋梁が多分野の製品と比較し大規模で単産品となること、その耐用期間が非常に長いこと等のため、実証試験・再現試験が困難であることより、現在のところ診断によって直接「現有耐荷力」或いは「余寿命」を求めることはできず、目視調査、各種載荷試験等により得られた検査結果(ひび割れ状況或いは卓越振動数等)から、損傷度の指標(鉄筋の腐食程度または剛性低下率等)を通して最終的に橋梁の状態(耐用性:耐荷力、余寿命)を推定するという流れに従っている状況にあり、この変換過程に検査技術者の主観が入る余地を残しており、或いは技術者の主観的判断に頼らざるを得ない部分が存在し、診断に相当のバラツキを生じる結果となっている。

このような現状にあるSEBSの開発には大別して2つの流れが存在すると考えられる。すなわち、1つは橋梁の耐用性を支配する劣化要因(疲労、鉄筋腐食等)を明確に規定し、診断過程から経験則及び主観を排除することによって、あくまで客観的な診断結果を出力しようとするもの、他は診断過程における資料不足、知識・経験不足を認めた上で定性的・定量的情報の組み合わせによりあくまで大まかな総合的耐用性判定が可能となる診断結果を出力しようとするものである。後者のような経験豊富な専門家の判断によるある意味での工学的決定問題にはファジー集合論やエキスパートシステムの手法が有利に適用される<sup>8)</sup>。この場合、SEBSに存在する主観的曖昧さの取り扱いが重要となるのみならず、システムの実用化において最終的に最も重要な部分は、診断結果の実橋試験等による検証であると考えられる。

### 2.2 システム・ダイナミクス理論によるSEBSの考え方

本SEBS中での「システム・ダイナミクス理論による余寿命予測手法」の位置づけを示したフローを図-2に示す。作成された台帳データを基に数量化理論によるSEBSにより補修・補強の対象になる重要橋梁を選定する。選定後、当該橋梁のコア採取による劣化分析調査を行い、主要劣化原因を解明し、その結果をシステム・ダイナミクス理論によるSEBSに入力して現状評価及び余寿命予測を行う。この結果、橋梁の重要性を考慮して現状からの耐用年数を設定しライフサイクルコストを踏まえた補修・補強対策を提案し、対策後の劣化予測を行う流れとなっている。コンクリート橋梁の物理的耐用性は耐荷・耐久性の双方を考慮して評価されなければならないと考えるが、前述のようにSEBS及び余寿命予測の現状は、考慮すべき要因の多さのため満足なものとなっていない。本論文ではSEBSにおいて経過年数に対する鉄筋の腐食量を地域環境下の影響(塩害・中性化・凍害等)を系統的に考慮して定量的に求め、耐荷力を判定して余寿命評価の予測を可能とすることを考え方の基本とする。

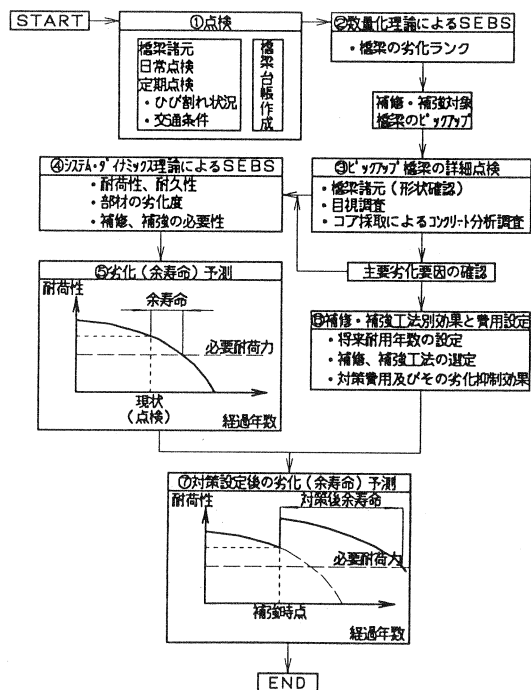


図-2 「システム・ダイナミクス理論」による SEBS の位置づけ

### 3. システム・ダイナミクス理論による余寿命モデル

#### 3.1 余寿命モデル概要

本論文はシステム・ダイナミクス理論を用いた鉄筋の腐食によるコンクリート構造物の耐荷力に着目した『余寿命モデル』により、現状把握と余寿命予測を評価すると共に、既設コンクリート構造物補修・補強設計のライフサイクルコストを考慮したフィードバックを検討することを主としている。図-3は構造物の耐荷力と鉄筋腐食量及び耐荷力低下による資本投資を結び付けたループを示している。これらのループの中では、ある環境下により決定される圧縮強度・中性化深さ・塩化物イオン濃度により増加する鉄筋腐食量が、構造物の耐荷力を低下させ、その低下の度合い及び構造物自体の重要度等により補強対策が設定される。これにより資本投資発生レイトが増大し、構造物の耐荷力を増加させることにより余寿命の延命を図るシステムとなっている。この余寿命モデルは大きく分けて①劣化要因によってコントロールされる鉄筋腐食ループ②鉄筋腐食によってコントロールされる耐荷力(余寿命)ループ③耐荷力(余寿命)によってコントロールされる資本投資ループの3つのループにより構成されている。

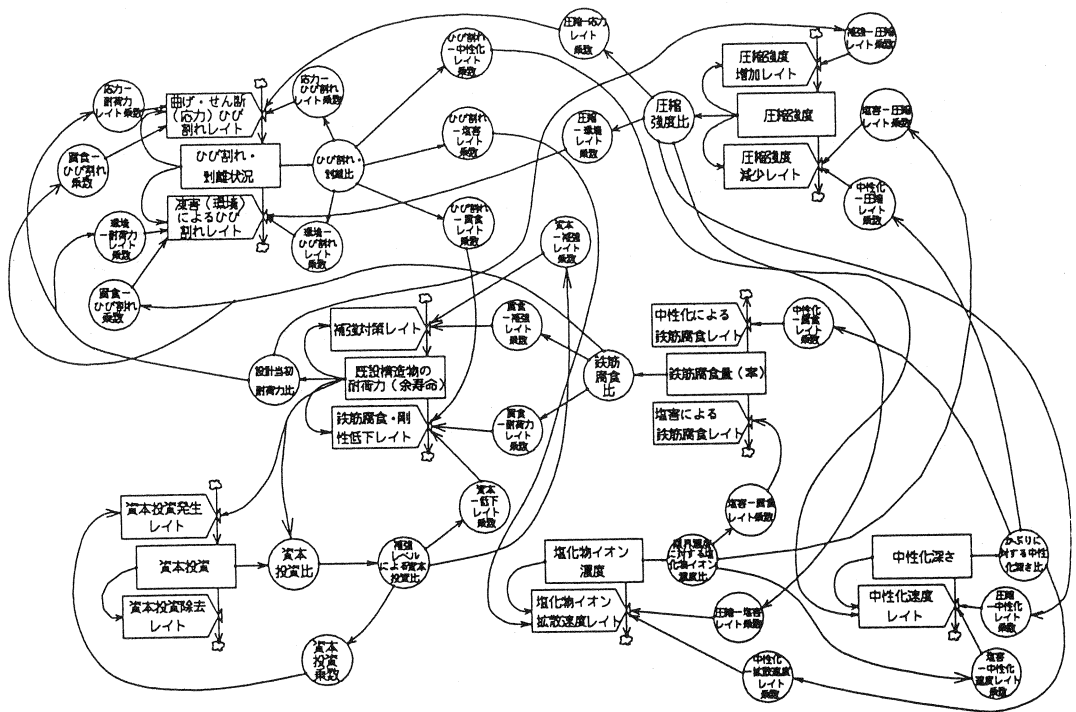


図-3 既設コンクリート構造物余寿命モデル

#### 3.2 差分方程式による繰返し計算

システム・ダイナミクス理論では正負のフィードバックループの構造を抽出することによってシステム構造を掌握する。フィードバックループの中には『レベル』『レイト』が存在する。『レベル』はフローの累積によって作り出される変数であり、ある時点におけるシステムの状態を明らかにするものである。『レイト』はレベルに依存するフローをコントロールする変数であり、コントロールされたフローはレベルを作り出すように累積される。例えば図-4(a)に示すようなモデルにおいて、K時点のレベル変数：L1とすると、K時点よりほんの少し前の時点のレベル変数：LにJK時間に増加するフロー量：R1(JK)の量を加え、また減少するフロー量：R2(JK)を引き、それにDT時間(計算の時間間隔)を掛けるとJK時間

に増加したフロー量が得られる。これによってK時点のレベル量の状態が定義される。これらを方程式で示すと式(1)で表すことができる。

$$L_1 = L + DT (R_1 (JK) - R_2 (JK)) \text{ ----- (1)}$$

なおレベル方程式のDT(計算時間間隔)については本論文では、1年単位に設定してある。

システム・ダイナミクス理論の特徴として2つの変数間の非線形関係を自由に取り扱うことができる点が挙げられる。補助係数A(変数)によりM1、M2の乗数は図-4(b)、(c)のような関係が得られていた場合、

$$X = A(\theta) \text{ の時、 } Y = M_j(\theta) \text{ ( } j=1 \text{ or } 2 \text{)}$$

とすると式(2)に示すような差分方程式が成り立つ。

$A(i) < X < A(i+1)$  より

$$Y = M_j(i) + \frac{M_j(i+1) - M_j(i)}{A(i+1) - A(i)} [X - A(i)] \text{ ----- (2)}$$

これよりフローをコントロールするレート変数が次式(3)、(4)のように定義でき、

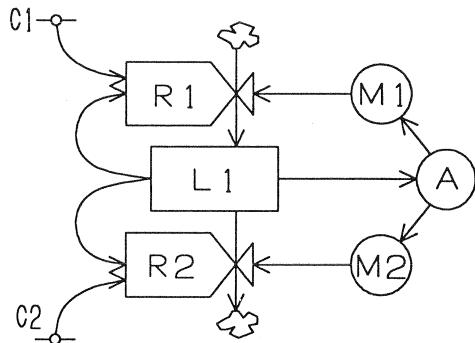
$$R_1 = L_1 \times M_1 \times c_1 \text{ ----- (3)}$$

$$R_2 = L_1 \times M_2 \times c_2 \text{ ----- (4)}$$

経時変化による上式の差分方程式の繰り返し計算によりレベル量を算出ことが可能となる。

先の図-3の余寿命モデルを解析するに当たり、コンクリートコアによる化学的分析より得られた必要基本データ(現状の中性化深さ・塩化物イオン濃度・圧縮強度・コンクリートのひび割れ幅等)から各指標の乗数(変数)間の相互作用を関数式化する必要がある。

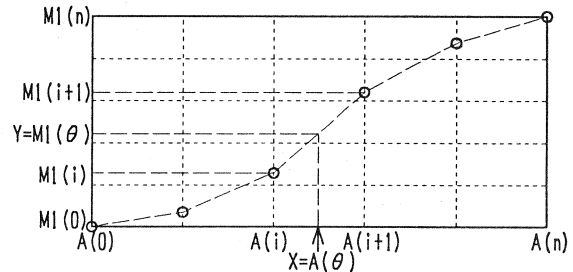
なお各システム間の関数は差分方程式により表現されているため、指標数が少ない場合は問題ないが、多い場合は繰り返し計算時間が長くなるほど誤差が蓄積される傾向にある。従ってファジー理論を援用することにより解析精度を上げている。



- R1: 正レート(変数)
- C1: 初期値(パラメタ)
- L1: レベル
- R2: 負レート(変数)
- C2: 初期値(パラメタ)
- A: 補助係数(変数)
- $A = L_1 / C_3$  (C3: 初期値)

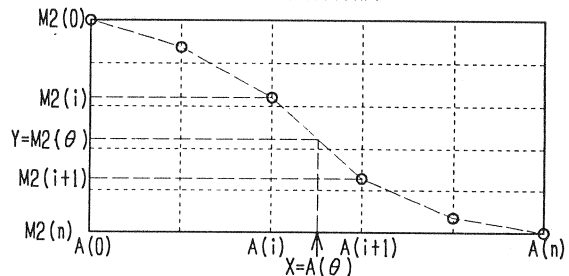
(a)基本ループ

M1: 補助係数-正レート乗数(非線形)



(B) M1: 補助係数-正の乗数

M2: 補助係数-負レート乗数(非線形)



(c) M2: 補助係数-負の乗数

図-4 システム・ダイナミクス理論の基本概念

4. 余寿命モデルによる実橋診断

A橋は昭和34年に設計加重L-20により竣工された橋長59.0mの単純RC桁+2径間連続RC桁橋(図-5)である。竣工以来年月が経過し、特に主桁及び床版の中性化によるコンクリート劣化は顕著である。今回の解析に先立って行われた目視調査によると最大ひび割れ幅は1.4mm以上であった。また主桁部においてコンクリートコアを採取し化学分析を行った結果、主桁平均かぶり厚さ30mmに対して①中性化深さ30mm②圧縮強度292kgf/cm<sup>2</sup>(設計時基準強度210kgf/cm<sup>2</sup>)③塩化物イオン濃度85.1g/m<sup>3</sup>(許容塩化物イオン濃度600g/m<sup>3</sup>)の結果が得られた。

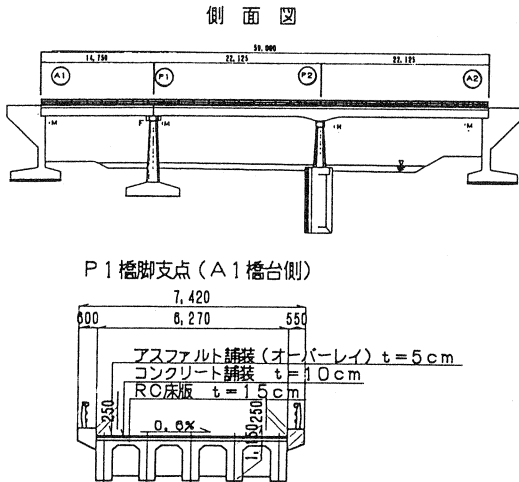


図-5 A橋一般図

図-6は余寿命モデルにより横軸に経過年数、縦軸には(a)鉄筋断面欠損率%(b)主桁基本耐荷力tf(c)主桁せん断耐力tfを示した現状維持の状態と将来供用年数に対する補強レベル(レベル1:現状維持補修、レベル2:劣化コンクリート補強、レベル3:主鉄筋断面増加補強)により得られた解析結果である。この解析結果より必要基本耐荷力を20tfとした場合、現状維持の状態では現在より9年後、補強レベル1では15年後、レベル2では30年後に基本耐荷力を下回る結果が得られ、レベル3においては50年以上の余寿命が得られた。

この解析結果は補強レベル3を行うことにより、近年の重交通にも対応できる橋梁となることが判断できる。同様に活荷重形態をTL-20とした場合のせん断耐力は、現時点では許容値を若干下回っている(許容値39.4tf、解析値39.2tf)ものの、鉄筋の断面欠損率の増加に伴い許容値を上回る結果が得られた。補強レベル1及び2では鉄筋の断面増加にはならず、補強レベル3を対応することにより50年以上の余寿命が得られる結果となった。

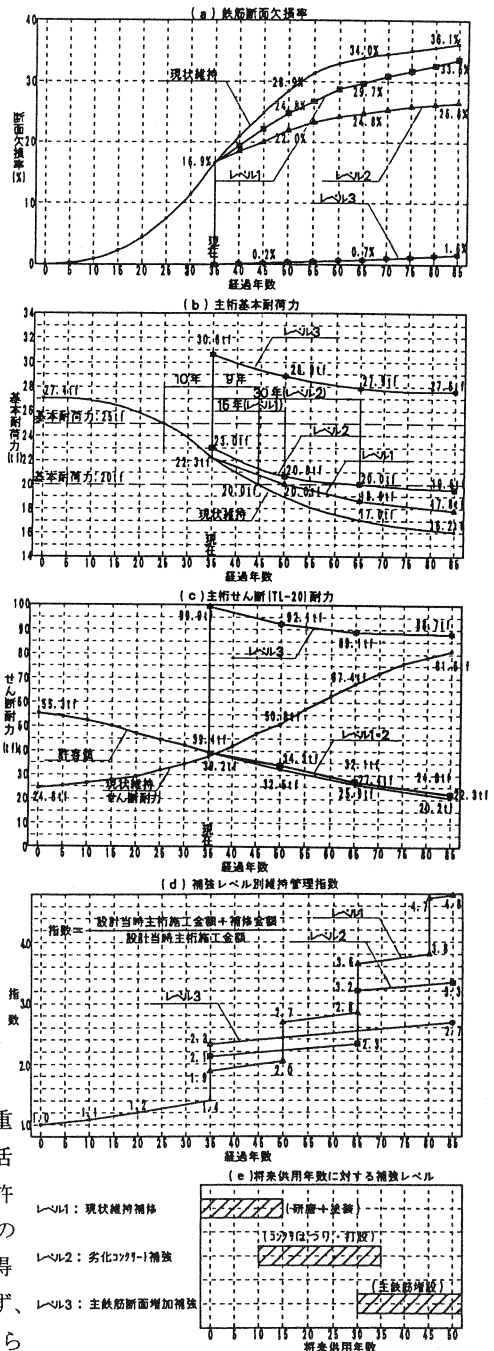


図-6 余寿命モデル解析結果

また将来供用年数を50年と設定した場合の補強レベル別維持管理係数は、設計当時の維持管理指数を1.0とすると、補強レベル1では4回の補強が必要となりその指数は4.8となる。レベル2では2回の補強が必要となり指数は3.3を示し、レベル3では1回の補強で指数は2.7を示した。この結果より、補強時点ではレベル3の補強は高価な対策であるが、将来供用年数を考えた場合は最もコストを抑えることができる対策である。

このように本余寿命モデルは、構造物の余寿命を判定した上で将来供用年数に対応した補修・補強レベル(ライフサイクルコスト)を設定することが可能である。

## 5. まとめ

本論文では既設コンクリート構造物の物理的耐用性を主眼とした診断システム及び補強レベルによる余寿命予測手法の考え方を確立し実橋への適用を示したが、今後に残される課題はなお多いと考えられる。以下に橋梁余寿命予測を含めた診断法開発における今後の課題と考えられるものを挙げてまとめとする。

①本論文で用いた余寿命モデルの各指標の乗数(変数)間の相互作用の関数式化においては、今までのコンクリート劣化調査(調査橋梁数:6橋、コンクリートコア数:50本)により蓄積されたデータから仮定している。関数式化するにはデータの絶対数が少なく、より解析精度を高めるにはデータ<sup>9)</sup>の追跡収集が必要である。

②また海岸部、陸上部等と地域環境をより分類することにより、自然環境による劣化現象を明確に判断することが可能と考えられる。

③現状解析においては補強対策後の劣化抑制効果は明確でなく、現状よりやや劣化が抑制されると仮定して解析を行っている。対策後の余寿命曲線の精度向上を図るには各補強対策ごとの劣化抑制効果を実験等により把握する必要がある。

## 参考文献

- 1)NIKKEI CONSTRUCTION、pp33-34、1996.12
- 2)林、駒澤:数量化理論とデータ処理、朝倉書店
- 3)村坂、西山:ファジー数量化理論による橋梁の健全度診断評価、第26回関東支部技術研究発表会講演概要集、pp878-879、1999.3
- 4)Jay.W.forrester:World-Dynamics、Camdridge Mass、Wright-Allen Press
- 5)西川:ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案、橋梁と基礎、pp64-72、1997.8
- 6)西村、宮本:構造物の損傷度診断の現状、「コンクリート構造物の維持管理」研究討論会資料、土木学会、1987.9
- 7)半身高速道路公団、(財)阪神高速道路管理技術センター:阪神高速道路における活荷重実態調査と荷重評価のための解析実態調査資料集、1984.3
- 8)三宅、宮本、中村、山本:コンクリート橋診断エキスパートシステムの推論機構の再構築と既設橋梁への適用、構造工学論文集、pp1017-1024、Vol44A、1998.3
- 9)村坂、西山:システム・ダイナミクス理論によるコンクリート構造物の余寿命診断と補強設計の実例、コンクリート構造物の補強設計に関するシンポジウム論文集、1998.4