

論文

[1166] 影響因子を考慮した統計解析に基づくコンクリート橋の安全性の経年変化予測

森川英典^{*1}・宮本文穂^{*2}・北村敦彦^{*3}・大山慎一^{*4}

1. はじめに

コンクリート橋の維持管理において必要となる日常点検, 定期点検の方法として, 現状では目視検査が最も一般的で, その他に非破壊検査, 中性化深さ測定, 変位測定等が取り入れられている。目視検査は最も簡便ではあるが, 検査者の経験に基づく専門的判断に依存する部分が多く, 主観的なあいまいさが含まれるために, 今後急増することが予想される劣化橋梁を合理的に管理していくことが困難であると考えられ, 目視に代わる簡便な合理的検査法の確立が要求されている[1]。一方, 構造各部の劣化状態を検査・評価し, その対策(特に補強)を行う場合, 局部的(損傷部のみ)に対処すると橋梁全体系の安全性のバランスに影響を及ぼすことがあるので, 橋梁全体系としての評価を行う必要があるといえる。そこで, 本研究では, 対象橋梁に対して, 現時点での安全性をできる限り簡易的に, 高精度で推定し, また現時点以降の安全性の経年変化予測を行うために, 同一形式のコンクリート橋梁数橋に対して行った実橋載荷および材料試験に基づく安全性評価結果の統計解析を行うことが有効であると考えた。その際に橋梁毎に異なる施工の状態, 環境条件, 荷重条件等を考慮するため, これらの影響を表す因子として中性化速度を取り上げ, また橋梁全体系の劣化状態のバランスを表す影響因子として主桁間剛性比を取り上げて, これらの影響因子の変動を考慮した統計解析手法を検討し, 中性化深さ測定に基づく簡便な安全性予測手法として提案した。さらに本評価法を実橋に適用し, その妥当性の検討を行った。

2. 統計解析に基づく安全性の経年変化の評価法

2.1 実橋試験に基づく安全性評価の流れ

図-1に既存コンクリート橋に対する現場試験に基づく安全性評価の流れを示す[2]。まず, 対象橋梁に対して実施した現場非破壊載荷試験により得られた力学的挙動に対して, 主桁各部の損傷に対する感度解析に基づいたSystem Identification(構造同定, SI)法を適用することによって主桁の曲げ剛性を同定し, 橋梁の現況のモデル化を行う。次に, 本モデルを用いて設計荷重による断面力解析を行い, 断面力(曲げおよびせん断)の確率分布モデルを作成するとともに, 対象橋梁に対する主桁構成材料試験と過去の主桁耐荷力試験結果の統計量を利用して耐荷力(曲げおよびせん断)の確率モデルを作成し, 安全性指標 β を曲げ, せん断毎に算定する。

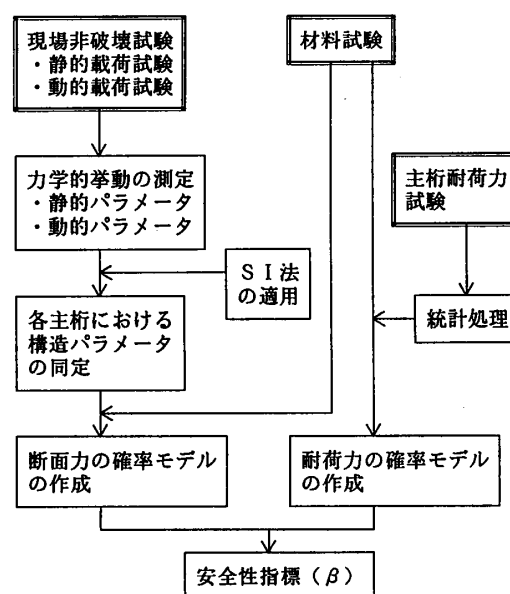


図-1 現場試験に基づく安全性評価の流れ

- *1 神戸大学助手 工学部建設学科, 工修(正会員)
- *2 神戸大学助教授 工学部建設学科, 工博(正会員)
- *3 大阪府, 工修
- *4 神戸大学大学院 工学研究科

2.2 実橋への適用と統計的考察

以上の安全性評価法に従って、横桁を有する3橋の実橋(兵庫県管轄の橋齢27, 37, 52年のRC単純T桁橋)について、端桁、中桁毎に曲げおよびせん断破壊に対する安全性を評価した。図-2に、これら3橋の端桁、中桁の安全性(β^2 と定義)をそれぞれの橋齢と対比させて示す。これ

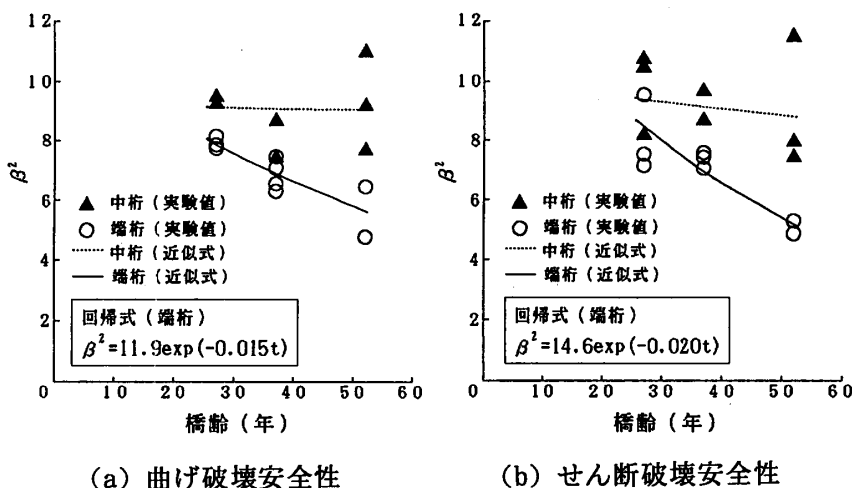


図-2 安全性指標と橋齢との関係

らの結果から、曲げ、せん断ともに端桁の安全性が中桁よりも低くなっており、端桁に関しては橋齢との相関が認められる。

2.3 影響因子の変動を考慮した安全性の経年変化の予測法

前述のように、類似の形式で異なる橋齢のコンクリート橋の安全性評価結果を統計的に処理することにより、ばらつきは大きいものの、安全性の経年変化の定性的な傾向を把握することが可能であることが明らかとなった。いま、安全性 $F = \beta^2$ の経年変化の基準値 $\bar{F}(t)$ を図-2の回帰式と同様な次式で定義することとする。

$$\bar{F}(t) = a \cdot \exp(-bt) \quad (1)$$

ここで、 a, b : 定数, t : 橋齢(年)。

ただし、図-2に示したように標本に用いた各橋梁に対する実験値にはかなりのばらつきが認められる。このようなばらつきは物理的、統計的な誤差および橋梁の安全性に直接影響を与える要因としての施工状態、荷重状態、環境条件、劣化状態等が挙げられる。このうち前者については、標本データの蓄積により軽減可能であるが、後者については、安全性との相関を明確にした上で、その影響を考慮する必要がある。そこで、ここでは、これらの影響因子を考慮した形で安全性の統計解析を行う手法を検討した。

まず、影響因子による安全性の変動 δF を次式のように、時間と影響因子の変動量に関する非線形関数として定義する。

$$\delta F = \sum_{i=1}^n \int_0^{\delta_i} \rho_i(t, x_i) dx_i \quad (2)$$

ここで、 n : 影響因子数, x_i : 影響因子, δ_i : 影響因子の変動量。

いま、

$$\rho_i(t, x_i) = p_i \cdot \exp(q_i t + r_i x_i) \quad (p_i, q_i, r_i : \text{定数}) \quad (3)$$

と仮定すると式(3)は次のように変形される。

$$\delta F = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i} [\exp(q_i t + r_i \delta_i) - \exp(q_i t)] \quad (4)$$

また、ある橋齢 t_1 での影響因子の変動 δ_i のばらつきが、次式に従うものと仮定すると、

$$f(\delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_{\delta_i} \delta_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \delta_i - \lambda_{\delta_i}}{\xi_{\delta_i}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

ただし, $\lambda_{\delta_i} = E[\ln \delta_i]$, $\xi_{\delta_i}^2 = \sigma^2[\ln \delta_i]$.

安全性の変動量 δF の分散は,

$$\sigma_{\delta F}^2 = \sum_{i=1}^n \int_0^\infty \left\{ \frac{\partial \delta F_i}{\partial \delta_i} \delta \delta_i \right\}^2 f(\delta_i) d\delta_i = \sum \int_0^\infty \{ p_i \cdot \exp(q_i t + r_i \delta_i) \delta \delta_i \}^2 f(\delta_i) d\delta_i \quad (6)$$

で求められる。以上の結果より、ある対象橋梁に対する安全性は次式で評価できる。

$$F(t) = \bar{F}(t) + \delta F(t) = a \cdot \exp(-bt_1) + \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i} [\exp(q_i t_1 + r_i \delta_i) - \exp(q_i t_1)] \quad (7)$$

次に、対象橋梁の安全性の現時点からの経年変化の予測が必要となる。そこで、まず安全性評価値(経年変化の基準値) $\bar{F}(t)$ を正規化するため、

$$\bar{R}(t) = \frac{\bar{F}(t)}{a} = \exp(-bt) \quad (8)$$

と定義し、式(7)で表される安全性評価値 $F(t)$ を新たに式(8)で再近似すると、次式が得られる。

$$\bar{R}(t) = \frac{F(t)}{A} = \exp\{-B(t-t_0)\} \quad (t > t_1 > t_0) \quad (9)$$

$$\text{ただし, } A = a \cdot \exp(-bt_0) + \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i} [\exp(q_i t_0 + r_i \delta_i^{t_0}) - \exp(q_i t_0)] \quad (10)$$

$$B = \frac{-1}{t_1 - t_0} \ln \left[\frac{a}{A} \exp(-bt_1) + \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i} \{ \exp(q_i t_1 + r_i \delta_i^{t_1}) - \exp(q_i t_1) \} \right] \quad (11)$$

ここで、 $\delta_i^{t_0}$, $\delta_i^{t_1}$: t_0 , t_1 時における影響因子の変動量。

つまり、 t_0 時における影響因子の変動量が求められると、式(9)により対象橋梁固有の安全性の経年変化予測式が作成できる。

2.4 中性化速度および主桁間剛性比を影響因子とした安全性評価

コンクリートの中性化速度は圧縮強度および弾性係数と相関があることが認められている[3]。一方、この中性化速度は施工の状態、環境条件、荷重条件等により左右され、これらの状態を総合的に評価する指標として考えられ、これを安全性に対する影響因子(式(2)における X_i)として取り上げることとした。ただし、コンクリートの中性化と劣化メカニズムについては完全に解明されているとは言い難い状況にあるため、中性化の進行と材料劣化の程度との関係については、仮定を設けて場合分けを行うこととした。すなわち、

Case 1 [材料劣化を考慮しない場合] : コンクリートの材料特性は中性化速度と相関があることが認められているが、材料劣化を認めない場合、環境条件等が変化しない限り、中性化速度が経年変化することはない、このような環境条件等の変化を無視するものとする、 t_0 時の影響因子変動量は t_1 時の測定結果と等しいとして算定する。

Case 2 [材料劣化を考慮する場合] : コンクリート材料が(例えば疲労クラック発生等により)劣化すると仮定すると、それに対応して中性化速度が増大し、中性化進行を早めることが考えられ

る。このような橋梁に対して、Case 1の仮定に基づく方法では、危険側の評価となる。一方、前述のように、現状においては、この材料劣化を伴う中性化現象のメカニズムが解明されていないために、中性化速度あるいは材料特性の経年変化を測定することが必要となる。しかし、このような経年変化を測定した例はほとんどなく、推定も困難であると考えられる。そこで、本研究では、同一形式の複数の橋梁における測定により得られた橋

齢に対応する中性化速度の変化の特性と対象橋梁の現時点での中性化速度係数の測定結果($A=C\sqrt{t}$, A : 中性化速度係数, C : 中性化深さ, t : 橋齢で、実際には中性化深さを測定)を利用して、Case 1の仮定に基づく方法と合わせて、上限、下限の幅を持った評価を行うこととした。次に、端桁の安全性は中桁の剛性の増加によって高まることが知られている[4]。このことから主桁間の剛性比も安全性に寄与する指標となり得るので、影響因子(式(2)における X_i)として取り上げることとした。

3. 安全性評価式の作成

2. で検討した影響因子による変動を考慮した安全性の経年変化予測式を、実橋のデータを用いて具体的に作成する。まず、式(9)第1項で表される安全性の基準式を作成する場合、影響因子である中性化速度係数および主桁間剛性比の基準値を設定する必要がある。中性化速度係数については図-3に示す実橋において測定された橋齢に対応した中性化速度係数の標準的な値を用いることとした。主桁間の剛性比については端桁

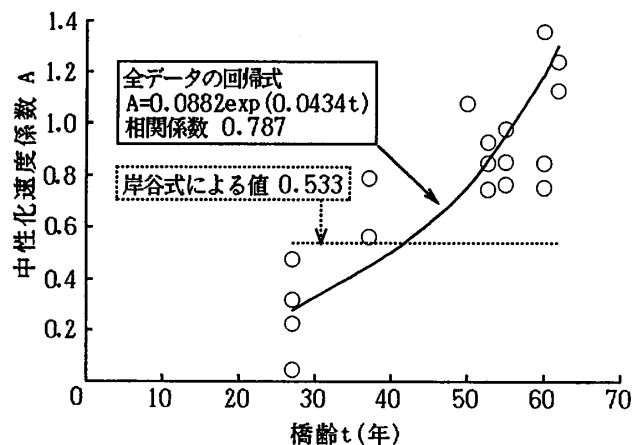


図-3 コンクリートの中性化速度と橋齢との関係

表-1 影響因子の変動量の設定

	δA			δEI
橋齢(年)	27	37	52	27, 37, 52
STEP(-3)	-0.235	-0.377	-0.770	-0.3
STEP(-2)	-0.157	-0.252	-0.513	-0.2
STEP(-1)	-0.078	-0.126	-0.257	-0.1
STEP(0)	0.0	0.0	0.0	0.0
STEP(1)	0.312	0.312	0.312	0.2
STEP(2)	0.623	0.623	0.623	0.3
STEP(3)	0.935	0.935	0.935	0.4

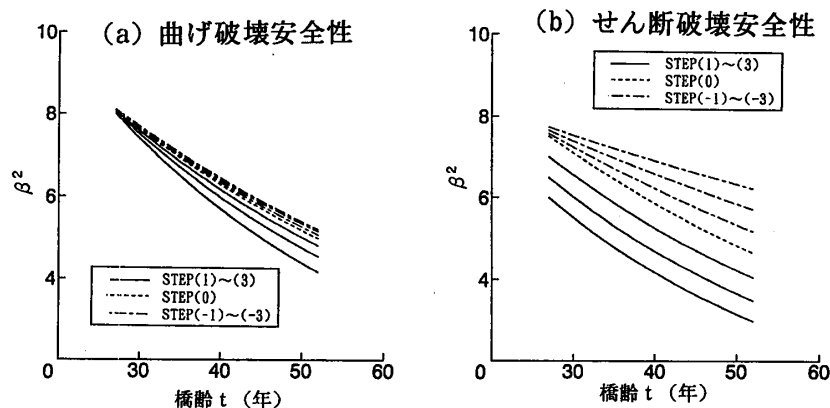


図-4 中性化速度の変動による安全性の変化

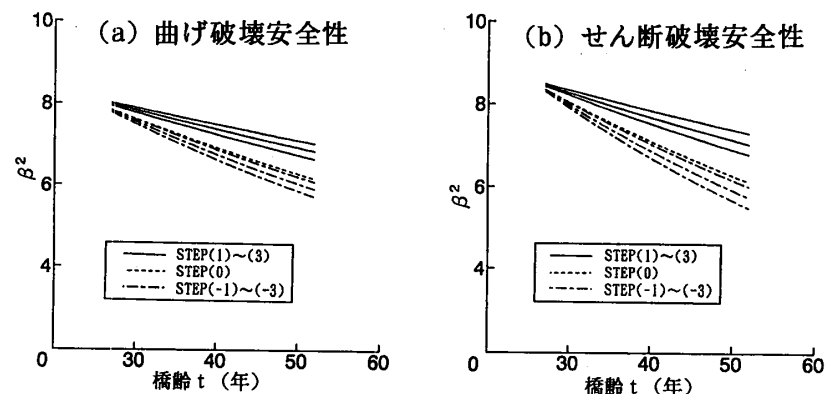


図-5 主桁間剛性比の変動による安全性の変化

に対する中桁の剛性の比を考え、これまでに著者らの行った実橋試験結果よりその平均的な値として、1:0.93をその基準値として設定した。

次に、中性化速度係数の変動が安全性に及ぼす影響を調べるために、中性化速度係数を表-1に示すように基準値から一定の幅で正負各方向に3段階(STEP(1)~(3), STEP(-1)~(-3))に変動させ、各STEPについて曲げおよびせん断破壊安全性を算定した。ここで、変動幅の設定は予測式の適用範囲を規定することになり、STEP(3), STEP(-3)が少なくとも過去の事例の最大変動幅をこえるように設定しておく必要がある。図-4に安全性の計算結果をまとめて示す。これらの結果から、曲げ破壊安全性に関しては橋齢とともに変動量が大きくなっているが、中性化速度の正方向への変動によるせん断破壊安全性の変化については橋齢に関わらずほぼ一定となっていることがわかる。また、曲げよりもせん断の変動量が大きくなっているが、これは中性化の進行と関係のあるコンクリート強度の低下の影響が曲げよりもせん断に大きく作用するためと考えられる。主桁間剛性比についても同様に、表-1に示すように基準値から正負各方向に3段階で変動させることによって安全性を算定した。図-5に計算結果をまとめる。これより、曲げよりもせん断破壊安全性の方が橋齢とともにわずかに変動量が大きくなっていることがわかる。

式(7)の第1項である安全性の基準式は、図-2の回帰式を基に影響因子の基準値への変動を考慮して、曲げ、せん断それぞれに対して次式で表される。

$$\beta^2 = 10.02 \exp(-9.67 \times 10^{-3} t) : (\text{曲げ破壊安全性}) \quad (12)$$

$$\beta^2 = 11.46 \exp(-1.24 \times 10^{-2} t) : (\text{せん断破壊安全性}) \quad (13)$$

次に、式(7)の第2項である安全性の変動量の係数 p_i , q_i , r_i は表-2のように求められる。その際、影響因子の変動量を正負に分けて算出した。

表-2 安全性評価式の係数一覧

影響因子の変動量		p_i	q_i	r_i
曲 げ	中性化速度係数 $\delta A > 0$	-3.14×10^{-2}	6.00×10^{-2}	-2.51×10^{-3}
	中性化速度係数 $\delta A < 0$	-4.01×10^{-2}	4.08×10^{-2}	-2.64×10^{-3}
	主桁間剛性比 $\delta EI > 0$	1.58×10^{-1}	5.63×10^{-2}	-1.45
	主桁間剛性比 $\delta EI < 0$	1.21×10^{-2}	8.58×10^{-2}	-7.78×10^{-1}
せん 断	中性化速度係数 $\delta A > 0$	-1.87	2.20×10^{-3}	-2.22×10^{-1}
	中性化速度係数 $\delta A < 0$	-1.51	6.38×10^{-2}	-1.22×10^{-1}
	主桁間剛性比 $\delta EI > 0$	7.69×10^{-2}	7.63×10^{-2}	-1.35
	主桁間剛性比 $\delta EI < 0$	1.01×10^{-2}	9.56×10^{-2}	-1.35

4. 実橋における安全性評価とその有効性

4.1 「旧壱谷橋」の概要[3]

3.において、試験時橋齢の異なる3橋を標本データとした場合の安全性の経年変化評価式を作成した。ここでは、これらとは別の橋齢41年の「旧壱谷橋」に本手法を適用し、安全性評価を行った。「旧壱谷橋」

は3径間(左岸側からスパン1, 2, 3と称する), 3主桁(上流側からA, B, C桁と称する)で横桁を有するRC単純T桁橋である。橋梁の損傷状態は、主桁については、全体的にかなり多くの曲げひびわれがみられ、そのひびわれ幅はおよそ平均0.8mm程度(最大1.2mm)であった。また排水管が詰まっていたため、両端桁の外側面に広範囲に漏水跡が見られた。床版については、発生ひびわれの方向が2方向で、ひびわれ幅は0.3mm以下のものがほとんどであった。特に、スパン1の床版についてはコンクリートの欠落が多発しており、部分的な補修が施されていた。

4.2 安全性の経年変化評価式の作成とその有効性

試験を行ったスパン1, 2の端桁のうち、中性化速度の大きかったスパン2のC桁を対象に、式(9)を基に、式(12), (13)および表-2係数値を利用して、安全性の経年変化予測式を評価する。まず、「Case 1: 中性化進行に伴う材料劣化を考慮しない場合」については、次式ようになる。

$$\beta^2 = 7.36 \cdot \exp\{-1.07 \times 10^{-2} (t-30)\} : (\text{曲げ破壊安全性}) \quad (14)$$

$$\beta^2 = 7.00 \cdot \exp\{-1.01 \times 10^{-2} (t-30)\} : (\text{せん断破壊安全性}) \quad (15)$$

ただし、式(9)中の t_0 は、安全性評価式の作成に用いた標本データが橋齢27～52年の範囲であることから、 $t_0 = 30$ 年とした。

同様に、Case 2：中性化進行に伴う材料劣化を考慮する場合」は、次式のようにになる。

$$\beta^2 = 7.44 \cdot \exp\{-1.16 \times 10^{-2}(t-30)\} : (\text{曲げ破壊安全性}) \quad (16)$$

$$\beta^2 = 7.41 \cdot \exp\{-1.92 \times 10^{-2}(t-30)\} : (\text{せん断破壊安全性}) \quad (17)$$

図-6に、Case 1, Case 2の両手法による曲げおよびせん断破壊に対する安全性指標 β^2 の経年変化の予測結果と実橋試験による評価結果を比較して示す。これらの結果から、曲げに関しては、評価式による推定値と実験値との間にやや相違が見られるが、せん断に

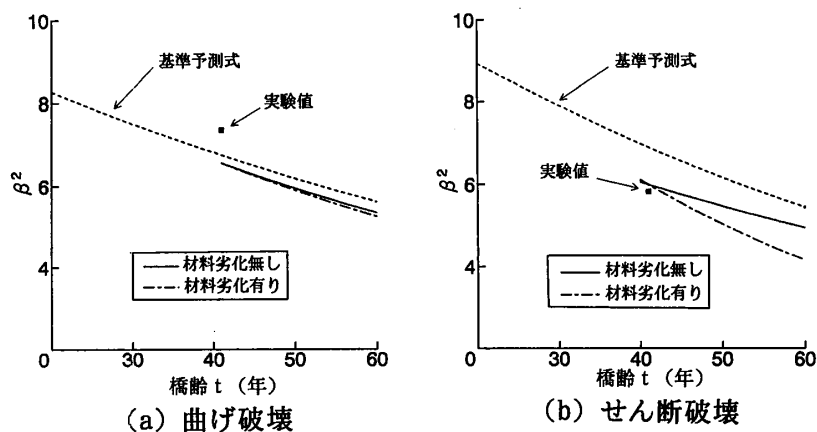


図-6 「旧檜谷橋」についての安全性予測

しては、両者はほぼ一致していることがわかる。また、本橋の場合、安全性評価の結果、曲げ破壊安全性がせん断破壊安全性よりもかなり高くなったため、基本的には後者で管理すれば良いものと考えられる。

5. 結論

本研究は、過去に蓄積された安全性評価データに対して、影響因子としてコンクリートの中性化速度と主桁間剛性比を考慮した統計解析を行うことにより、簡易な材料試験に基づいて安全性の経年変化を推定する手法を検討したものである。得られた結論を以下にまとめる。

(1) 安全性指標 β^2 の統計量に及ぼす影響因子としてコンクリートの中性化速度と主桁間剛性比を取り上げ、その感度特性を調べた上で、安全性経年変化予測式への導入を試みた。その際、中性化のメカニズムが現状において十分解明されていないため、コンクリートの材料劣化が伴わない場合と伴う場合の両方を考慮した。後者については、数橋の実橋において測定された中性化速度の測定結果から平均的な基準値の経年変化特性を評価し、対象橋梁の現時点での中性化速度の測定結果とあわせて劣化特性の評価を行った。その結果、コンクリートの中性化深さおよび主桁間剛性比の測定によって安全性経年変化の予測を比較的高精度で行うことを可能とした。

(2) 本手法を試験時が橋齢41年である「旧檜谷橋」のスパン2のC桁に適用した結果、曲げに関しては安全性評価値と実験値の間にやや相違が見られたが、せん断に関しては両者はほぼ一致した。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書改訂小委員会:コンクリート標準示方書(平成3年版)改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向,コンクリートライブラリー70,1991.7.
- 2) 宮本文穂・森川英典・石田宗弘:統計データに基づく不確定性を考慮した既存コンクリート橋の安全性評価,土木学会論文集, No. 472/V-20, pp. 49～58, 1993. 8.
- 3) (財)建設工学研究所:県道411号「旧檜谷橋」耐用性診断報告書,1993. 3.
- 4) (財)建設工学研究所:国道176号「旧大安橋」耐用性診断報告書,1990. 3.