

新日本製鐵(株)正会員○石田宗弘 神戸大学大学院 学生員 北村敦彦
 神戸大学工学部 正会員 森川英典 神戸大学工学部 正会員 宮本文穂
 神戸大学大学院 学生員 久保田裕二

1. はじめに 既存コンクリート橋の安全性評価法の一つとして、著者らは現場試験に基づいて現有耐力と荷重効果を推定し、各種安全性指標により照査する手法の検討を行っている¹⁾。本手法の実用化のために最も重要なことは耐力と荷重をいかに現実に即した形でモデル化するかということである。そこで本研究では、橋梁自身あるいは試験・評価の過程に含まれる種々の不確定性を過去の実橋試験データの各種ばらつき量として統計的に捉えることによって評価し、それに基づいた耐力および荷重の確率モデルを作成することにより不確定性を考慮した安全性評価法を検討した。さらに本手法を実橋に適用することによりその有効性を調べた。

2. 耐力モデルの評価法 既存コンクリート橋の耐力評価に関わる不確定量としては、橋梁自身つまり剛性や材料強度諸量のばらつき、橋梁の寸法諸元測定等における物理的誤差、主桁耐力試験¹⁾や材料試験における測定誤差、また耐力算定式自身の精度などが挙げられる。ここでは、まず、橋梁自身のもつばらつきを考慮して、材料試験等から対象橋梁についてのコンクリートの圧縮強度(f_c)と鉄筋の降伏点強度(f_{sy})の期待値(μ)と標準偏差(σ)を得、さらに相関式等によりコンクリートの弾性係数についてのデータを得ると、曲げおよびせん断耐力に関する推定値($\mu_{Mucal}, \sigma_{Mucal}$), ($\mu_{Sucal}, \sigma_{Sucal}$)が既往の算定式により求められる。次に、その他の誤差等を考慮して、これらの推定値に対して補正係数(μ_a, σ_a)を過去の試験データに基づく統計量として導入することにより、曲げおよびせん断耐力の評価値(μ_{Mu}, σ_{Mu}), (μ_{Su}, σ_{Su})は最終的に次式で表される。

$$\mu_{Mu} = \mu_a \mu_{Mucal} \dots\dots\dots (1), \quad \sigma_{Mu} = \sqrt{(\mu_a^2 + \sigma_a^2)(\mu_{Mucal}^2 + \sigma_{Mucal}^2) - (\mu_a \mu_{Mucal})^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\mu_{Su} = \mu_a' \mu_{Sucal} \dots\dots\dots (3), \quad \sigma_{Su} = \sqrt{(\mu_a'^2 + \sigma_a'^2)(\mu_{Sucal}^2 + \sigma_{Sucal}^2) - (\mu_a' \mu_{Sucal})^2} \dots\dots\dots (4)$$

3. 荷重モデルの評価法 既存コンクリート橋の各主桁に作用する断面力の評価に関わる不確定量としては、橋梁自身の剛性のばらつき、載荷車両の重量のばらつき等が考えられる。ここでは、まず、重錘落下振動試験¹⁾で得られたモーメント-変位にSI(構造同定)法¹⁾を適用して同定された各主桁の剛性に前述の材料試験等から推定されたコンクリートの弾性係数のばらつきを不確定量として導入し、はり要素を用いた格子モデル¹⁾を用いて材料の不確定性を有する断面力解析を逐次摂動法²⁾を適用して効率的に行い、断面力の影響値(η)を求めた。なお、本手法による摂動解はモンテカルロ法によるシミュレーションの結果と高い精度で一致することを確認した。次に、通行車両の重量分布(μ_w, σ_w)を与えると、断面力分布(μ_F, σ_F)は次式で表される。

$$\mu_F = 0.4 \mu_w \sum (\mu_{\eta L1} + \mu_{\eta R1}) + 0.1 \mu_w \sum (\mu_{\eta L2} + \mu_{\eta R2}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_F = 0.4 \sum \left\{ \sqrt{(\sigma_w^2 + \mu_w^2)(\sigma_{\eta L1}^2 + \mu_{\eta L1}^2) - (\mu_w \mu_{\eta L1})^2} + \sqrt{(\sigma_w^2 + \mu_w^2)(\sigma_{\eta R1}^2 + \mu_{\eta R1}^2) - (\mu_w \mu_{\eta R1})^2} \right\} \\ + 0.1 \sum \left\{ \sqrt{(\sigma_w^2 + \mu_w^2)(\sigma_{\eta L2}^2 + \mu_{\eta L2}^2) - (\mu_w \mu_{\eta L2})^2} + \sqrt{(\sigma_w^2 + \mu_w^2)(\sigma_{\eta R2}^2 + \mu_{\eta R2}^2) - (\mu_w \mu_{\eta R2})^2} \right\} \dots\dots (6)$$

4. 不確定性を考慮した安全性評価法の実橋への適用 以上に示した耐力および荷重モデルの評価に含まれる各種不確定量を、過去に行った実橋試験データ¹⁾を統計的に整理して評価し、これを考慮した安全性評価法を検討した。まず、耐力算定において考慮する補正係数(μ_a, σ_a)に関しては、過去6橋で行った主桁耐力試験結果について計算値と測定値を比較することにより求め、その結果を表1に示す。また、現場において測定が困難であるコンクリートの弾性係数は、非破壊試験などによって得られるコンクリートの圧縮強度(f_c)から、過去の実橋について実施したコンクリート圧強度試験結果から得られた相関関係を用いて推定することができる。図1に実橋におけるコンクリート圧縮強度と弾性係数との関係を示す。これより両者の関係は次

表1 耐力モデルにおける補正係数の評価値

	μ_a / μ_a'	σ_a / σ_a'
平均値	1.0971	1.0916
標準偏差	0.2987	0.2224

μ_a : 曲げ耐力の実測値, μ_a' : 曲げ耐力の算定値, σ_a : せん断耐力の実測値, σ_a' : せん断耐力の算定値

式で表される。

$$\mu_B = 2497.4 \mu_{fc}^{0.777} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (7),$$

$$\sigma_B = 7832.2 \mu_{fc}^{0.286} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (8),$$

また、通行車両の重量については、ここでは阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会による大型車3軸の値(μ_w, σ_w)=(20.30, 3.37)(tf)を用いた。次に、本手法を昭和12年架設の劣化橋梁「旧青木橋」(3主桁の3径間連続RC-T桁橋)に適用した。表2に本橋の材料強度の不確定量を、表3にそれらを考慮して求めた曲げおよびせん断に関する耐荷力および荷重モデルの評価結果を、さらに表4に安全性評価結果を示す。ただし、評価結果は材料の不確定性を考慮した断面力解析を導入しない場合のものも併記している。表2の結果より、本橋の場合、コンクリートの圧縮強度で変動係数が約0.25、弾性係数で約0.3とばらつきがやや大きくなっている。また表3の結果より、本橋の場合、耐荷力の変動係数は0.1より小さいのに対し、荷重の変動係数が0.2~0.3程度と非常に大きく、また断面力解析に材料不確定性を考慮することの影響もかなり大きいといえる。表3の安全性評価結果より、安全性指標 β 、破壊確率 P_f ともにせん断に関する安全性の方が曲げに関するものよりもかなり小さくなっており、主桁破壊試験においてせん断破壊を起こしたことと一致している。また、安全性指標 β の値では、不確定性解析を導入した場合の方がしない場合より曲げで約0.9倍、せん断で約0.8倍、破壊確率 P_f の値では、曲げで約1.8倍、せん断で約3倍となっており、不確定性解析を導入することによる影響は曲げよりもせん断に対して大きく影響することがわかる。

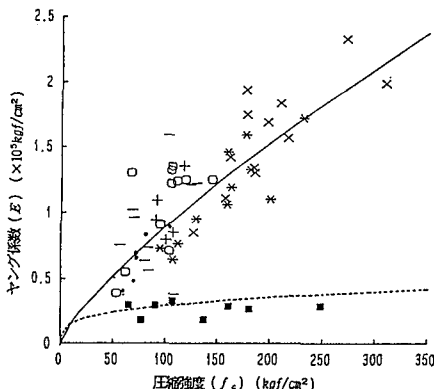


図1 実橋試験結果によるコンクリート圧縮強度と弾性係数との関係

表2 「青木橋」の各主桁における材料特性の評価値

主桁	(μ_{fc}) (kgf/cm ²)	(σ_{fc}) (kgf/cm ²)	(μ_E) (kgf/cm ²)	(σ_E) (kgf/cm ²)
A	116.60	27.11	1.01×10^4	3.05×10^4
B	103.16	24.74	9.19×10^3	2.95×10^4
C	92.88	22.87	8.44×10^3	2.86×10^4

E:ヤング係数, fc:圧縮強度

表3 「青木橋」の耐荷力および荷重モデルの評価結果

(曲げ)

主桁	($\mu_{M_{suc}}$) (tf·m)	($\sigma_{M_{suc}}$) (tf·m)	(μ_{M_i}) (tf·m)	(σ_{M_i}) (tf·m)	(μ_{M_e}) (tf·m)	(σ_{M_e}) (tf·m)
A	54.68	4.79	12.83	3.33(2.16)	9.16	2.51(0)
B	55.22	4.77	9.76	2.73(1.64)	9.25	2.65(0)
C	55.14	4.78	10.33	3.00(1.74)	7.76	2.25(0)

ただし、 $\mu_{M_{suc}}$: 破壊曲げモーメント算定値の期待値、 $\sigma_{M_{suc}}$: 破壊曲げモーメント算定値の標準偏差、 μ_{M_i} : TL-20荷重による曲げモーメントの期待値、 σ_{M_i} : TL-20荷重による曲げモーメントの標準偏差、 μ_{M_e} : 死荷重による曲げモーメントの期待値、 σ_{M_e} : 死荷重による曲げモーメントの標準偏差
()内の数値は不確定性を考慮しない断面力解析を行った場合のもの

(せん断)

主桁	($\mu_{V_{suc}}$) (tf)	($\sigma_{V_{suc}}$) (tf)	(μ_{V_i}) (tf)	(σ_{V_i}) (tf)	(μ_{V_e}) (tf)	(σ_{V_e}) (tf)
A 3L/4	21.72	1.44	7.77	1.92(1.31)	5.088	1.240(0)
B 3L/4	21.25	1.43	6.47	1.72(1.09)	5.819	1.542(0)
C L/4	20.88	1.41	6.61	1.90(1.11)	5.32	1.52(0)

ただし、 $\mu_{V_{suc}}$: 最終せん断力算定値の期待値、 $\sigma_{V_{suc}}$: 最終せん断力算定値の標準偏差、 μ_{V_i} : TL-20荷重によるせん断力の期待値、 σ_{V_i} : TL-20荷重によるせん断力の標準偏差、 μ_{V_e} : 死荷重によるせん断力の期待値、 σ_{V_e} : 死荷重によるせん断力の標準偏差
()内の数値は不確定性を考慮しない断面力解析を行った場合のもの

表4 「青木橋」の安全性評価結果

(曲げ)

主桁	β		P_f	
	導入前	導入後	導入前	導入後
A	2.314	2.097	1.03×10^{-3}	1.80×10^{-3}
B	2.517	2.307	5.90×10^{-3}	1.05×10^{-2}
C	2.569	2.350	5.10×10^{-3}	9.40×10^{-3}

(せん断)

主桁	β		P_f	
	導入前	導入後	導入前	導入後
A 3L/4	2.195	1.795	1.41×10^{-3}	3.63×10^{-3}
B 3L/4	2.280	1.864	1.13×10^{-3}	3.12×10^{-3}
C L/4	2.307	1.841	1.05×10^{-3}	3.28×10^{-3}

5. まとめ 過去の実橋試験データを統計的に取扱って各種不確定量を算定し、また不確定性解析を導入して荷重と耐荷力を確率モデルとして評価することで不確定性を考慮した安全性評価の手法を検討した。また本手法を「旧青木橋」に適用した結果、これらの不確定性が安全性評価結果に及ぼす影響は非常に大きく、不確定性を考慮する必要性が示された。

【参考文献】 1)宮本他:コンクリート橋安全性の経年変化と寿命予測, JCOSSAR'91 論文集, 1991. 2)中桐他:確率有限要素法入門, 培風館, 1985.