

川崎重工業(株) 正会員 熊谷 稔 神戸大学工学部 正会員 宮本文徳  
 神戸大学工学部 正会員 森川英典 神戸大学大学院 学生員 石田宗弘

**1. はじめに** コンクリート橋は、塩害、7ルカリ骨材反応等による早期劣化や交通量の増加、車両の大型化等による損傷事例の増加など、かなり過酷な環境下にあるといえる。このような現状にあって、「調査」→「診断」→「維持管理」の流れを定量的な関係として確立することは、橋梁管理者の重大な関心事であり、特に、この中で「橋梁診断」に対する社会的要請も高まっている。本研究は、過去数橋の既存RC-T桁橋に対して実施した主桁耐荷力試験、主桁構成材料試験の結果<sup>1)</sup>から材料強度の経年劣化、主桁の終局曲げ及びせん断耐荷力のばらつきを考慮することにより、現場非破壊試験に基づく安全性評価法<sup>2)</sup>をより実用的なものにするとともに、コンクリート橋の余寿命を予測する手法について検討したものである。

**2. 材料劣化を考慮した安全性評価** 過去数橋に対して実施した主桁構成材料試験結果<sup>1)</sup>から、コンクリートについては経年による材料劣化がかなり大きい、主鉄筋、スラップ筋では、材質の低下がほとんど見られなかった。コンクリートの劣化を考慮する場合、理想的には供用中の橋梁からコアを抜いて試験を行うことであるが、実際には難しい場合が多い。そこで、実橋においても測定可能であり、コンクリートの劣化に関連する要因をほとんど含んでいると思われる中性化深さを指標として、これとコンクリートの圧縮強度との関係について検討した。図1にコンクリートの圧縮強度と中性化深さの関係を示し、これより次の回帰式を得た。

$$f_c' = -15.6 \cdot C + 209.8 \quad \dots (1)$$

ここで  $f_c'$ : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $C$ : 中性化深さ(cm)

また、主鉄筋、スラップ筋の降伏点強度は、過去数橋の材料試験結果から、 $\sigma_{sy} \approx 3000$ kgf/cm<sup>2</sup>という結果が得られている。

式(1)からコンクリートの圧縮強度を推定し、鉄筋の降伏点強度  $\sigma_{sy} = 3000$ kgf/cm<sup>2</sup>として算定した、過去数橋の終局曲げ及びせん断耐荷力の算定値と実測値との比較を表1に示す。表より、材料劣化を考慮することにより、終局曲げ及びせん断耐荷力の算定値と実測値がかなり近づいていることがわかる。

次に、終局耐荷力、荷重効果はばらつきをもつと考え、信頼性工学に基づく安全性評価指標(安全性指標  $\beta$ 、破壊確率  $P_f$ )を

適用することとした。耐荷力は、ばらつきをもった補正係数  $a$  ( $\mu_a, \sigma_a$ )を、終局耐荷力の算定値である、 $M_{ucal}, S_{ucal}$ に乗ずることで正規化ができる。この補正係数として表1の値を用いることとする。まず曲げについて、補正係数の平均値  $\mu_a$ は、主鉄筋の付着破壊を示した「旧対田橋」を除いた値を、標準偏差  $\sigma_a$ には、予想し得ない付着破壊の可能性を含むこと等を考慮して、「旧対田橋」を含んだ値を選び、 $(\mu_a, \sigma_a) = (1.063, 0.294)$ とした。また、せん断に関しては表1中の値  $(\mu_a, \sigma_a) = (1.034, 0.239)$ を用いることとした。次に荷重効果の正規化を行う。荷重のばらつきについては、阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会報告書<sup>4)</sup>における車重  $W$  (大型車3軸の値(20.30, 3.31))を用いることとし、照査断面に車重  $W$  ( $\mu_w, \sigma_w$ )が作用するときの断面力を影響面<sup>3)</sup>の考え方をういて求めた。

表2に、「旧中井橋」(昭和3年架設、10@10.72m=107.20m、3主桁)、「旧大安橋」(昭和37年架設、3@14.60m=43.80m、4主桁)の現場非破壊試験結果にSI法<sup>2)</sup>を適用して同定した主桁の曲げ剛性と、それに基づき算定した各安全性評価指標の値を示す。この表から、「旧中井橋」はかなりの剛性低下がみられるとともに、破壊確率の値が

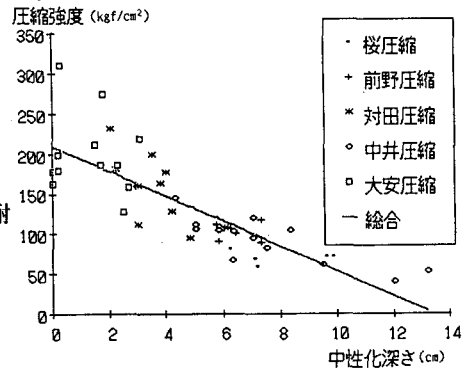


図1 圧縮強度と中性化深さの関係

表1 終局耐荷力の算定値と実測値の比較

	$M_{ut}/M_{ucal}$ (対田橋含む)	$M_{ut}/M_{ucal}$ (対田橋含まず)	$S_{ut}/S_{ucal}$
平均値	0.845	1.063	1.034
標準偏差	0.294	0.115	0.239

$M_{ut}$ : 曲げ耐荷力の実測値  $S_{ut}$ : せん断耐荷力の実測値  
 $M_{ucal}$ : 曲げ耐荷力の算定値  $S_{ucal}$ : せん断耐荷力の算定値

大きくなっており、特に、主桁Cでは $1.181 \times 10^{-1}$ (せん断)とかなり危険側にあると評価される。また、全体的に曲げよりもせん断に関する安全性評価指標の方が小さく、せん断破壊の可能性を支持している。これに対して、「旧大安橋」は剛性低下がほとんどなく、破壊確率の値も設計時の目標値( $10^{-3} \sim 10^{-5}$ )にある

表2 曲げ剛性の同定値と安全性評価指標の算定結果

橋名	主桁設計値	主桁の曲げ剛性同定値	曲げに関する安全性評価指標			せん断に関する安全性評価指標			
			$\gamma_M$	$\beta_M$	$P_{EM}$	$\gamma_S$	$\beta_S$	$P_{ES}$	
中井橋	A	25.90	7.91	4.80	2.380	$8.664 \times 10^{-3}$	1.80	1.326	$9.238 \times 10^{-2}$
	B	17.21	9.11	5.49	2.414	$7.886 \times 10^{-3}$	1.97	1.383	$8.332 \times 10^{-2}$
	C	25.90	8.93	4.31	2.265	$1.176 \times 10^{-2}$	1.87	1.185	$1.181 \times 10^{-1}$
大安橋	A	101.04	110.25	7.68	2.587	$5.103 \times 10^{-3}$	7.02	2.899	$1.846 \times 10^{-3}$
	B	88.32	92.27	16.32	2.877	$1.998 \times 10^{-3}$	11.55	3.013	$8.355 \times 10^{-4}$
	C	88.32	86.41	16.02	2.880	$1.980 \times 10^{-3}$	14.00	3.050	$1.128 \times 10^{-3}$
	D	101.04	89.68	8.41	2.638	$4.158 \times 10^{-3}$	7.96	2.895	$1.272 \times 10^{-3}$

注)曲げ剛性の単位:  $\times 10^{11}$  kgf $\cdot$ cm<sup>2</sup>  $\gamma$ :破壊安全率  $\beta$ :安全性指標  $P_E$ :破壊確率

ことからほぼ健全であると判断できる。この評価結果を主桁構成材料試験結果から検証する。表3に「旧中井橋」、「旧大安橋」の主桁構成材料試験結果を示す。この結果からも「旧中井橋」は材料にかなり劣化していたが、「旧大安橋」は比較的健全であるといえる。また、主桁耐荷力試験において「旧中井橋」がせん断破壊を示したことは、安全性評価結果と一致しており、安全性評価結果が妥当であったといえる。

表3 主桁構成材料試験結果

橋梁名	圧縮試験		中性化深さ試験
	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	中性化深さ(cm)
中井橋	59.7	$0.47 \times 10^5$	10.55
大安橋	224.4	$1.92 \times 10^5$	0.70

3. 余寿命予測手法に関する検討

一般にコンクリートの中性化深さ  $P_f$

$\bar{C}_{t_1}$ は時間の関数であり、次式で表すことができる<sup>5)</sup>。

$$\bar{C}_t = A\sqrt{t}, \text{ただし, } A = C_{t_1} / \sqrt{t_1} \quad (A: \text{中性化速度係数}) \quad (2)$$

従って、ある経過時間  $t_1$ における中性化深さ  $\bar{C}_{t_1}$ を測定できれば定数  $A$ を求めることができ、以後の中性化深さの進行が予測できる。また、コンクリートの圧縮強度と中性化深さには式(1)の相関関係があるので、これにより求めた  $f_c'$ を耐荷力算定式に代入することによって、耐荷力の経年劣化が把握できる<sup>1)</sup>。また、耐荷力、荷重効果が経年によりばらつきを持つと考えると、余寿命評価に用いる指標としては、破壊確率が適当である。過去の安全性評価結果から「旧中井橋」の現場試験時を耐用性寿命と考へ、そのときの破壊

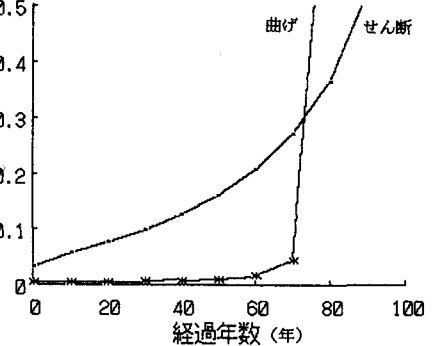


図2 破壊確率と経過年数の対応「旧中井橋」

確率の値 $1.0 \times 10^{-1}$ 付近を耐用性の限界基準値とする。ここで、破壊確率を算定する際の耐荷力の補正係数、断面力の影響値は経年により変化しないとの仮定を設けた。図2に「旧中井橋」の破壊確率と経過年数の対応を示す。この図から、現場試験時(橋齢60年)にはせん断の方が限界基準値に先に達しており、その後、曲げ破壊確率が急激に増加していることがわかる。これは、コンクリートの劣化速度が大きかったことにより、曲げ耐荷力が急激に低下したためである<sup>1)</sup>。また、この余寿命予測は、破壊確率の基準値によって左右されるため、この設定に関しては実測データの蓄積による統計的な検討が必要である。

4. まとめ

- ① 材料劣化を考慮にしていることにより、終局耐荷力の算定値が実測値に近づくことがわかった。また、実橋の安全性評価に取り入れたところ、妥当な評価結果を得ることができた。
- ② コンクリート橋の余寿命予測手法と、実橋への適用方法の検討を行った。今後は、耐荷力、荷重効果の経年変化を明らかにすることと、寿命とした破壊確率の基準値をより統計的に検討することが必要である。

【参考文献】1) 前田 他:コンクリートの経年劣化とRC-T桁橋の耐荷力低下の予測、第45回土木学会年次学術講演会論文集V-169、平成2年、2) 宮本 他:コンクリート橋の安全性評価手法の実用化、コンクリート工学年次論文報告集第11巻、1989、3) 旧阪堺大橋の健全性に関する調査研究委員会:旧阪堺大橋の調査研究報告書、1987、4) 阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会:阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究、1986、5) 和泉:耐久性診断事例中性化、コンクリート工学、vol.26、No.7、1988。