

神戸市 正員○大山 慎一 神戸大学工学部 正員 森川 英典
神戸大学大学院 学生員 片山 憲一 神戸大学工学部 正員 宮本 文穂

1. はじめに:著者らはこれまでに数橋のコンクリート橋に対して現場試験に基づく安全性評価手法を適用し、蓄積された評価データを統計解析することによって、安全性の経年変化を予測する評価式を作成した。そこで本研究では、外ヶ浦によるプレストレスト導入工法の安全性に対する補強効果を統計解析に基づいて合理的に評価し、対象橋梁について最適となる維持管理対策(補強時期、補強度)を決定する手法について検討した。

2. 安全性の経年変化:本研究では現場試験結果に基づき、材料強度、通行車両等の統計量を考慮して耐荷力と断面力の確率モデルを作成し、安全性指標 β を算定することによってコンクリート橋の安全性を評価してきた。そこで評価データを統計解析することによって次式のような安全性評価式を作成した。ただし、安全性 $F=\beta^2$ とした。

$$F(t)=\bar{F}(t)+\delta F(t)=a \cdot \exp (-b t_1)+\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i}\left[\exp \left(q_i t_1+r_i \delta_i\right)-\exp \left(q_i t_1\right)\right] \cdots(1), \quad \delta_i: \text { 影響因子の変動量}$$

つまり、第1項で基準となる安全性の経年変化を表し、第2項以下で影響因子による安全性の変動を表す。次に、対象橋梁安全性の現時点以後の経年変化は、式(1)を正規化して、 $R(t)=\frac{F(t)}{A}=\exp \{-B(t-t_0)\} \cdots(2)$

$$\text { ただし、 } A=F\left(t_0\right) \cdots(3), \quad B=\frac{-1}{t_1-t_0} \ln \left\{\frac{a}{A} \exp \left(-b t_1\right)+\frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i}\left[\exp \left(q_i t_1+r_i \delta_i\right)-\exp \left(q_i t_1\right)\right]\right\} \cdots(4),$$

a, b, p, q, r : 定数, $\delta_i^{t_0}, \delta_i^{t_1}$: t_0, t_1 時における影響因子の変動量($t>t_1>t_0$)。

ここで、影響因子とは安全性に直接影響を及ぼすような施工状態、環境条件等の橋梁毎に異なる要因を評価するためのもので、中性化速度係数と主桁間剛性バランスを取り上げた。次式に安全性の基準予測式を、表1に算定された定数 a, b, p, q, r を示す。

$$\text { 曲げ破壊: } \beta^2=8.03 \cdot \exp (-8.99 \times 10^{-3} t) \cdots(5)$$

$$\text { セン断破壊: } \beta^2=11.16 \cdot \exp (-1.48 \times 10^{-2} t) \cdots(6)$$

この評価式を橋齢41年の実橋(3主桁RC単純T桁橋)に適用した結果を図1に示す。図から現場試験から得られた値(実験値)と評価式による値はほぼ一致していることがわかる。

3. プレストレスト導入による補強効果:劣化したRC橋にプレストレストを導入すると、部材に作用している引張応力が減少し、ひびわれが閉じることによって主桁の断面2次モーメントが回復する。そこで補強効果を考慮した断面力解析を行うにあたって次のような仮定を設けた。①プレストレスト導入によって断面2次モーメントのみが回復し、材料強度は回復しない。②導入プレストレスト量と断面2次モーメントの回復量は線形関係にある。③77°プレストレスト導入時には全断面有効となる。次に補強効果を考慮した耐荷力の評価には、曲げの場合は77°PCの終局曲げ耐力評価式であるPannel式を用い、せん断の場合は土木学会コンクリート標準示方書におけるせん断耐力算定式を用いた。以上のようにして評価される断面力および耐荷力に対して材料強度、通行車両等の統計量を導入することによって確率モデルを作成し、その両モデルを用いて安全性指標 β を算定する。このような手法を先ほどの実橋に適用し、安全性の向上度を次式のように各主桁の補強度を用いて重回帰した結果を表2に示す。

$$\delta \beta^2=c_1 r_A+c_2 r_B+c_3 r_C+c_4 \cdots(7)$$

ここで、 $\delta \beta^2$:安全性の向上、 r_A, r_B, r_C :それぞれ主桁A, B, Cの補強度(0~1)。

表1 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	中性化速	正方向	-2.10×10^{-2}	4.39×10^{-2}	7.04×10^{-1}
	度係数	負方向	-2.10×10^{-2}	4.65×10^{-2}	7.04×10^{-1}
	主桁間剛	正方向	3.89×10^{-1}	3.61×10^{-2}	-1.00
	性バランス	負方向	4.10×10^{-1}	3.50×10^{-2}	-1.08
せん断	中性化速	正方向	-1.04	3.75×10^{-2}	-2.40×10^{-2}
	度係数	負方向	-1.00	4.51×10^{-2}	-2.71×10^{-2}
	主桁間剛	正方向	4.51×10^{-2}	7.39×10^{-2}	-6.53×10^{-2}
	性バランス	負方向	4.86×10^{-2}	7.63×10^{-2}	-6.53×10^{-2}

表2 回帰定数一覧

モード	安全性の向上 $\delta \beta^2$	回帰定数			
		c_1	c_2	c_3	c_4
曲げ	主桁 A	1.017	0.295	0.130	0.105
	主桁 B	0.305	-0.071	0.337	0.032
	主桁 C	0.110	0.278	0.780	0.048
せん断	主桁 A	1.315	0.432	0.159	0.080
	主桁 B	0.485	-0.281	0.543	0.024
	主桁 C	0.105	0.406	0.986	0.060

表から、主桁A、Cについてはいずれの主桁を補強しても安全性は向上するが、主桁Bについては主桁Bを補強すると逆に安全性が低下することがわかる。また主桁Bの安全性は、主桁A、Cを補強することによって向上するが、主桁Cを補強したほうが向上の程度は大きい。これは補強前の剛性が主桁A>主桁Cとなっているためである。

4. 最適維持管理手法:劣化橋梁に補強を行うと、その後の劣化傾向は補強前のものとは異なると考えられ

る。そこで補強前後の安全性の経年変化を図2のように考える。すなわち補強前の安全性の経年変化は1.の手法を用いて曲線ABのように作成できる。次に安全性の限界値 F_{limit} に到る前の時点(t_R 時)に何らかの補強を行い、 $\delta F(t_R)$ だけ安全性が向上する(区間DB)。一方、補強後の主桁間の剛性バランスと同一の剛性バランスを有する橋梁Xを考えた場合、その安全性の経年変化予測式は曲線CGで表される。対象橋梁の補強後の経年変化は曲線CGと同一の傾向を示すものと考え、この曲線CGをD点まで平行移動させた曲線DEで表される。本研究では補強後の安全性が、耐用年数である t_{limit} 時に安全性

$F=F_{limit}$ となる状態が得られる場合の補強対策(補強時期、各主桁の補強度)を決定し、かつ補強による安全性および耐力の向上が最大となる場合を最適維持管理と考えることとした。従って本研究における最適維持管理では多目的な最適化となることから、効用理論を適用することとした。ここで、 F_{limit} すなわち β_{limit}^2 については、数橋の安全性評価結果とアンケートによる余寿命との関係から、曲げの場合は3.068、せん断の場合は3.415と算定された。また耐用年数は曲げで107年、せん断で80年と算定された。以上のような手法を前述と同じ実橋に適用した結果を表3に示す。また耐用年数を85年、90年と変化させた場合もあわせて示す。case1については安全性および耐力の向上の面から中桁の補強度は100%となっている。外桁については補強前の剛性が主桁A>主桁Cとなっていたにも関わらず、補強度が主桁A>主桁Cとなっている。これは補強前の安全性が主桁C>主桁Aとなっていたためである。case2、3については耐用年数が大きくなるほど補強時期は遅くなり、各主桁の補強度も大きくなっている。またcase3については補強時期の限界である橋齢54年に各主桁100%補強するように評価されている。従って本橋では補強回数を1回と考えた場合、橋齢90年以降の供用は危険である。

5. まとめ:①橋齢41年の実橋に対する補強効果を評価した結果、外桁についてはどの主桁を補強しても安全性は向上するが、中桁についてはその桁自身を補強すると逆に安全性は低下する。②橋齢41年の実橋に対する最適な補強対策は中桁を完全に補強し、外桁については主桁間の剛性バランスを均一にするよりも各主桁の安全性を向上させる方向に補強するように評価された。

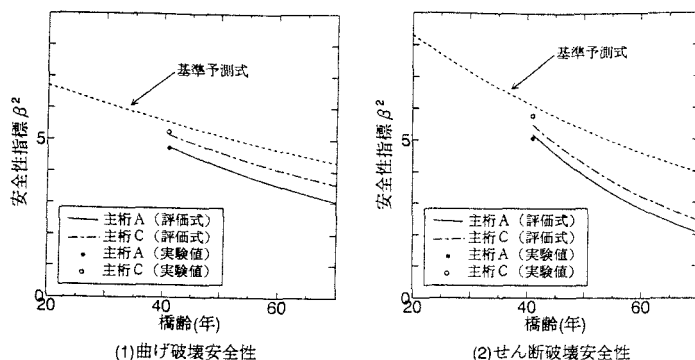


図1 安全性評価結果

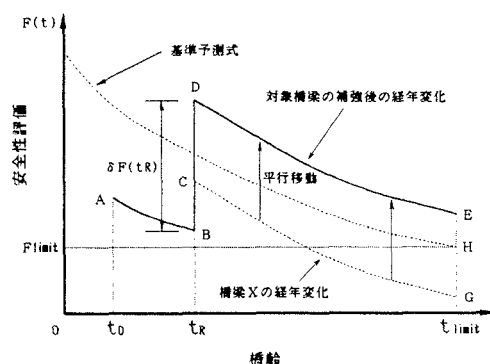


図2 補強前後の安全性の経年変化

表3 最適化結果

case	耐用年数(年)	最適補強対策				
		t_s (年)	f_s^A (%)	f_s^B (%)	f_s^C (%)	f_s^D (%)
1	80	49	90	100	86	
2	85	51	100	98	99	
3	90	54	100	100	100	