

# 論文 北陸地方での橋梁けた端部コンクリート部材の補修計画の検討

青山 實伸<sup>\*1</sup>・諫山 武歳<sup>\*2</sup>

要旨：北陸地方の橋梁けた端部では，伸縮装置周辺部からの凍結防止剤を含む路面水の漏水により，コンクリート部材に塩害損傷を受けた橋梁が多くある。本文では，損傷を受けた橋梁数が多い RC・PC 中空床版型式の橋梁けた端部コンクリート部材の補修計画を立案するために，劣化予測の基づく補修の優先度や補修の費用対効果（B/C）に関する検討を加える。その結果より，補修計画を立案するうえで反映すべき事項を考察する。

キーワード：塩害，劣化予測，補修効果，補修規模，補修計画

## 1. はじめに

北陸地方の高速道路の橋梁には，供用後 30 年を越えるものもあり，コンクリート部材の損傷が進行している。主な損傷要因は，冬期の気象特性に起因する飛来塩分や凍結防止剤による塩害などによるものがある。

凍結防止剤による塩害は，凍結防止剤（主成分 NaCl）を含む路面水の影響を直接受ける特定の部位に損傷が発生する点と，損傷を受けた橋梁数が多いことが特徴である。橋梁での凍結防止剤の影響は，凍結防止剤を含む路面水の伸縮装置周辺部からの漏水に伴う塩分浸透による塩害損傷として，けた端部のコンクリート部材に多く見られる<sup>1)</sup>。なお，この損傷は，面積が小さいが対象箇所数が多い特徴がある。

橋梁の維持管理では，LCC 最小化やコスト削減の見地から，効率的な維持管理計画を立案することが求められている。そのため著者らは，過去の橋梁の点検データを分析して作成した劣化推移曲線を提案した<sup>2)</sup>。本文では，提案した劣化推移曲線を用い，損傷の多い RC・PC 中空床版型式の橋梁けた端部を対象に，コンクリート部材の補修計画に反映すべき事項を検討する。具体的には，適用する補修工法と補修コストの関係を求め，けた端部の損傷進行に伴う補修費の増加費用より，補修着手の優先度を分析する。さらに，各け

た端部の補修費を予測し，補修規模と補修効果のシミュレーション結果より，補修の費用対効果（B/C）を検討して，補修計画を立案するうえで反映すべき事項を考察する。

## 2. けた端部の損傷特性と劣化予測<sup>2)</sup>

### 2.1 けた端部の損傷特性

北陸地方の橋梁のコンクリート部材では，図 - 1 に示すように鉄筋腐食が先行して発生する浮き・剥離・鉄筋露出の損傷が，けた端部 2 m の部位に集中して発生している。この損傷要因は，凍結防止剤を含む路面水の伸縮装置からの漏水により，付着した塩分がコンクリート中に浸透し，鉄筋腐食を生じさせる塩害であると推

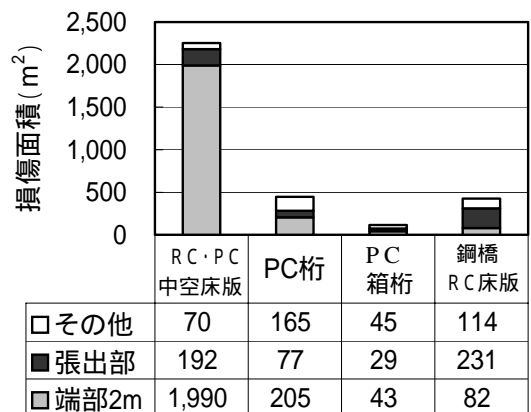


図 - 1 橋梁型式ごとの損傷の発生部位と損傷面積との関係

\*1 (株)クエストエンジニア 土木調査設計部長 工博 (正会員)

\*2 東日本高速道路(株)新潟管理局 保全グループリーダー

察される。

けた端部の劣化評価は、損傷程度を相対的に評価するために、損傷率（けた端部付近の損傷（浮き・剥離・鉄筋露出）の合計面積をけた端部から 2 m までの全面積で除した値を損傷率とする）を用いる。RC 中空床版のけた端部での 3 種類の損傷率の違いによる損傷発生状況の事例を図 - 2 に示す。図 - 2 より、損傷率が小さい場合には、面積の小さい損傷が点在している。他方、損傷率が大きい場合には、面積の大きい損傷を伴うことが示される。

RC 中空床版のけた端部の損傷 1 個の大きさに着目した損傷内およびその周辺での塩分浸透状況の調査結果を図 - 3 に示す。図 - 3 の塩分浸透状況は、損傷面積  $0.5 \text{ m}^2$  以上と  $0.5 \text{ m}^2$  未満に区分して、損傷内およびその周辺におけるコンクリート表面から深さ 20 mm 毎に測定した塩化物イオン濃度データの平均値を示している。損傷面積  $0.5 \text{ m}^2$  以上の損傷内では多くの塩分が深くまで浸透しており、損傷の周辺部でも深さ 30 mm の鉄筋付近での塩分は鋼材腐食発生限界塩分濃度  $1.2 \text{ kg/m}^3$  を越えて浸透している。他方、損傷面積が  $0.5 \text{ m}^2$  未満の場合には、損傷内や周辺部での塩分浸透量は小さい。損傷 1 個の面積が大きい場合には、鉄筋腐食が内部の鉄筋にまで及び、鉄筋周辺の浮き・剥離やひびわれが塩分浸透を促進させ、多くの塩分が深くまで浸透すると考えられる。また、その周辺部においても、鉄筋付近での塩分濃度が鋼材腐食発生限界塩分濃度を越えていることから、今後、損傷が周辺部に拡大すると推察される。他方、損傷面積の小さい箇所では、損傷内および損傷周辺での塩分浸透量や浸透深さが小さいことから、周辺部への損傷の進展が遅いと推察される。

## 2.2 劣化予測

過去 10 年間の点検データによる劣化推移経過の分析結果に基づき、路線ごとの RC・PC 中空床版のけた端部の劣化推移曲線を図 - 4 のように作成した<sup>2)</sup>。この劣化推移曲線を用いることで、けた端部の部材に着目した現状の損傷が

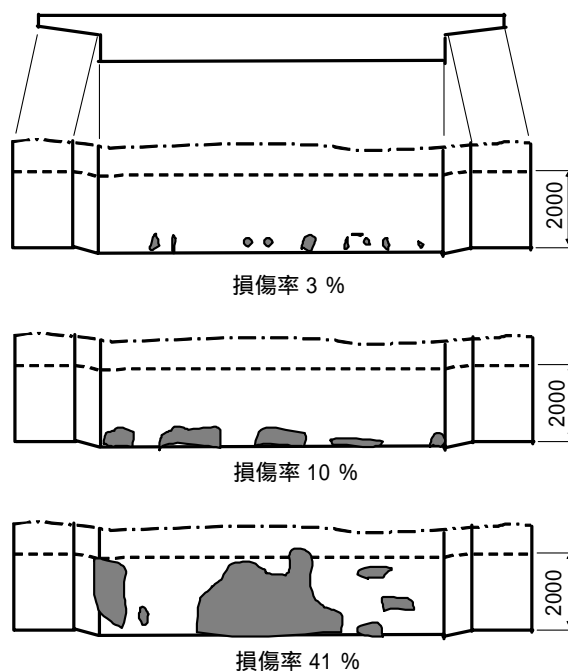


図 - 2 けた端部での 3 種類の損傷率の違いによる損傷発生状況の事例

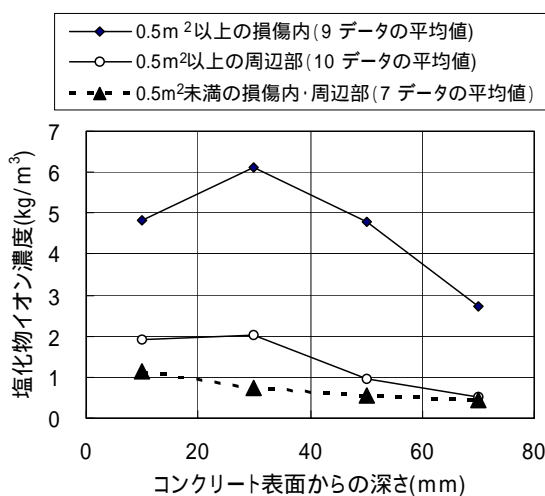


図 - 3 損傷内および周辺部での塩分浸透状況

ら、より定量的な劣化の進行予測ができ、効率的な維持管理計画の検討が可能となる。なお、この劣化推移曲線は、現状の損傷率のみに着目して、該当する年数を基点に今後の経過年数を加えた年数より、今後の損傷率を予測するものである。年数は、経過年数のパラメータでないことに留意する必要がある。

劣化推移曲線は、A 道では 2 次式で、B 道では 3 次式で近似される。豪雪地帯を通過する B 道は、凍結防止剤の使用量が海岸近くを通過す

る A 道の 4 倍であるため、損傷率が 10 % を越えると損傷率の増加率が A 道に比べて大きくなり劣化推移が著しく加速する。損傷率 10 % 程度を越えると、鉄筋腐食量や腐食範囲が増大して損傷面積が大きくなるため、外部環境の影響をより強く受け易くなり、部位の劣化グレードが加速期から劣化期に移行すると推察される。

### 3. 補修計画の検討

#### 3.1 補修方法の検討

##### (1) 適用する補修工法と補修コスト

補修計画検討時に適用する補修工法は、LCC 評価、過去の塩害補修工法、RC 中空床版の端部補修実績の評価結果並びに補修部材の構造特性を勘案して、表 - 1 に示す工法により検討を行う。

漏水が発生しているが損傷の発生していないけた端部には、塩分浸透を防止するための予防保全として補修コストが最小になる塗装および水切設置を適用する。損傷 1 箇所面積の小さい損傷率 10 % 未満のけた端部は、塩分浸透量が少ないと推察されるため、防錆剤混入モルタルによる断面修復工法を適用する。断面修復工法では、新たな塩分の浸透を防ぐため塗装を併用する考え方による。損傷 1 箇所の損傷面積の大きい損傷率 10% 以上のけた端部では、下面に橋軸方向、橋軸直角方向の主鉄筋並びにせん断補強筋が輻そうして配置されていることから、電気防食による補修工法を選定する。

RC 中空床版のけた端部での全体の損傷率を代表させて 3 ~ 80 % の損傷率のけた端部 13 箇所を抽出し、損傷の状況と自然電位を調査し、損傷率と損傷面積に対する断面修復面積比および腐食想定面積比の関係を求め図 - 5 に示す。図 - 5 の断面修復面積は打音法により剥離の確認で

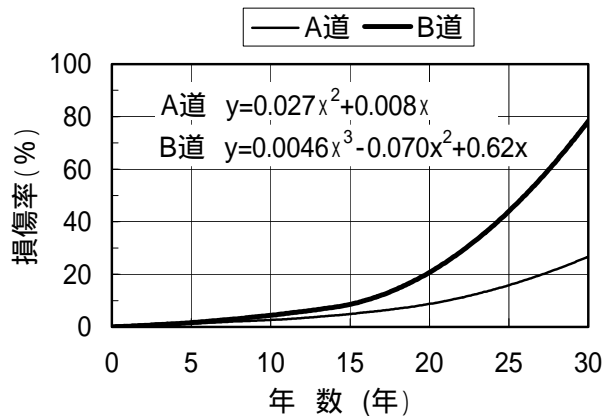


図 - 4 路線ごとのけた端部の劣化推移曲線 (RC・PC中空床版)

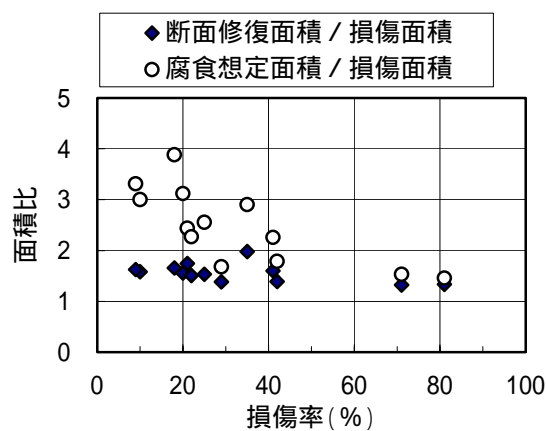


図 - 5 けた端部の損傷率と断面修復面積比および腐食想定面積比の関係

きた範囲とし、腐食想定面積は鉄筋の自然電位の測定値が - 200 mV (CSE) より卑な範囲とし、それぞれに施工余裕を加味して決定している。断面修復面積は損傷面積の 1.3 ~ 1.9 倍、腐食想定面積は損傷面積の 1.4 ~ 3.9 倍であり損傷率が増加するに従い漸減している。調査を行った各けた端部の補修費用を、表 - 1 に示す補修工法を適用して算定する。また、けた端部 2m の範囲を大きく超える損傷率 200% の損傷を想定し、図 - 5 より補修適用範囲を推定して、その補修費用

表 - 1 補修計画検討時の補修工法

区分	適用する箇所	補修工法	適用範囲	補修寿命	
予防保全	漏水あり損傷なし	塗装 + 水切設置	端部 2 m	約 20 年	
損傷あり	損傷面積小	損傷率 10% 未満	防錆剤混入モルタルによる断面修復 & 塗装 (端部 2m)	鉄筋腐食範囲 + 施工余裕	約 20 年
	損傷面積大	損傷率 10% 以上	電気防食 & 塗装 (除電気防食部)	同上	約 20 年

を算定する。算定した補修費用から補修コストを求め、けた端部の損傷率と補修コストの関係を図 - 6 に示す。図 - 6 の補修コストは、けた端部 1 箇所あたりの塗装および水切設置による予防保全を行う場合に要する費用を 100 として示している。けた端部の補修コストと損傷率の関係は、2 次式で近似できる。

(2) 補修優先度

補修計画の検討では、補修に要する総費用を最小にするための補修着手の優先度を検討する。図 - 6 に示す損傷率と補修コストの関係および図 - 4 に示す A 道のけた端部の劣化推移曲線を用い、現況の損傷率を 0 とした場合の経過年数による損傷率の推移より、けた端部の経過年数に伴う予防保全費用を除く補修費の推移を求め図 - 7 に示す。図 - 7 より損傷箇所の補修費は、経過年数に伴う損傷率の推移と同様に、損傷率が大きくなるほど 1 年間の増加額が大きくなる。

この結果、損傷発生箇所の補修は、1 年間の補修費の増加額の大きい箇所を減らすこと、すなわち、「損傷率の大きいけた端部より計画的に補修を実施する」ことで、全箇所の補修に要する総補修費を最小にすることができる。

3.2 補修効果の検討

(1) 補修シミュレーション

けた端部の損傷は、伸縮装置部からの漏水発生箇所が生じることから、伸縮装置の止水性能は今後も変わらないと仮定し、漏水の発生している約1,450 箇所を対象に、補修を実施する場合の年間補修費と補修箇所の総補修費の変化に着目した検討を行う。補修実施時の各けた端部の損傷率は、図 - 4 に示す各該当路線の劣化推移曲線を使用し、現時点の損傷率を起点として経過年数に応じた予測値を用いる。けた端部 1 箇所の補修コストは、図 - 6 の 2 次式を用い各けた端部の幅員等の違いによる面積補正を行って算定する。補修は、補修優先度の検討結果により、損傷率の大きい箇所から順次着手することとする。年間補修費と未補修箇所の総補修費の関係を10年間のシミュレーションにより検討す

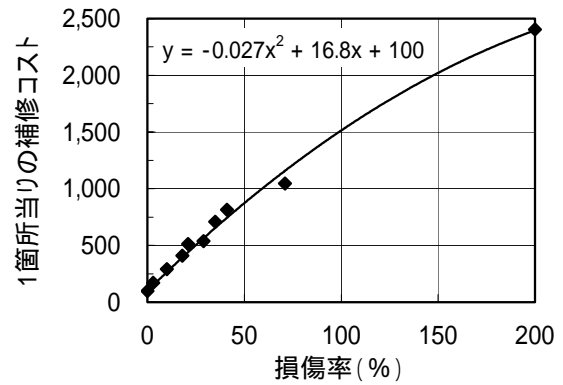


図 - 6 けた端部の損傷率と補修コストの関係

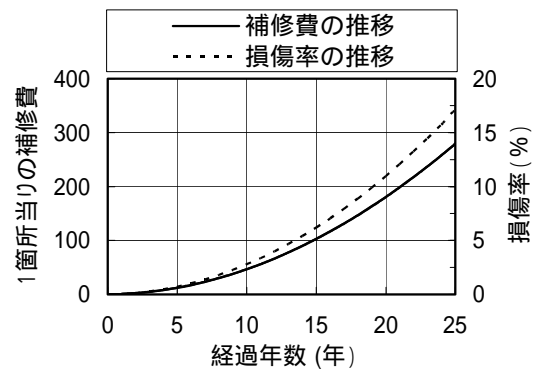


図 - 7 けた端部の経過年数による損傷率および補修費の推移

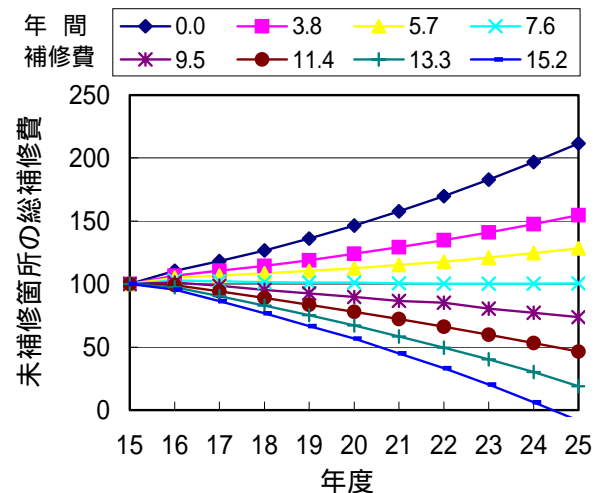


図 - 8 年間補修費と未補修箇所の総補修費の推移との関係のシミュレーション結果

る。年間補修費を変化させた場合、年間補修費と未補修箇所の総補修費の推移との関係のシミュレーション結果を図 - 8 に示す。図 - 8 の補修費は、現時点 (H15 年度) に全てのけた端部を同時に補修する場合に必要なとする総補修費を 100 として、それに対する比で示している。シ



シミュレーション結果では、補修を全く実施せず放置した場合と年間補修費を 3.8～15.2 の範囲で7ケース変化させて 10 年間一定の年間補修費で補修を実施する場合について検討を行っている。例えば、年間補修費 9.5 の場合には、現時点の総補修費の 9.5 % に相当する補修額を意味する。図 - 8 より、補修をせずに放置した場合には、現時点での未補修箇所の総補修費 100 が、10 年後には 212 と現時点の総補修費の 2.1 倍になり、年平均約 8 % 増加することになる。一方、年間補修費 3.8 や 5.7 の補修規模では、未補修箇所の総補修費は現時点より増加する。年間補修費 7.6 では、未補修箇所の総補修費が現状とほぼ変わらず総補修費を低減することができない。年間補修費が 9.5 より大きい場合には、未補修箇所の総補修費を低減でき、とくに年間補修費 15.2 では 10 未満で全ての補修を完了することができる。

年間補修費と10年後の未補修箇所数および未補修箇所の総補修費の現時点の総補修費からの削減額の関係を示す。図 - 9 より、補修規模は年間補修費 8 程度以上を継続させないと、劣化進展に伴う補修費の増加額は補修実施額を上回り、未補修箇所の総補修費を低減できないことが示される。

また、図 - 8 の未補修箇所の総補修費の推移曲線より年間補修費と補修完了期間の関係を求めると図 - 10 のようになる。補修完了期間は、年間補修費 10 で 21 年、年間補修費 9 で 30 年程度となる。

## (2) 補修効果の評価

補修効果の評価は、本来、補修実施による橋梁の延命化や、それに伴う地域社会や道路を利用するお客様の受ける便益を勘案すべきであるが、ここでは、けた端部の総補修費の低減額に着目した評価を行う。補修を実施することによる10年間の総補修費 C と、未補修箇所の総補修費の低減額より算定する10年間の補修便益 B は、図 - 8 のシミュレーション結果を用いて式(1) お

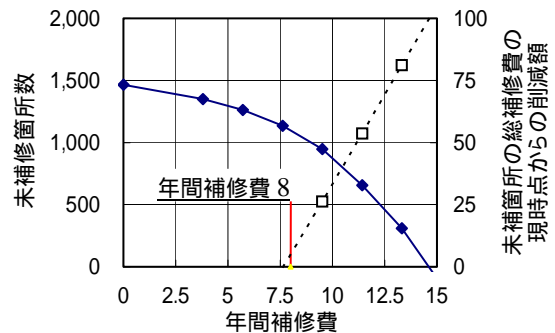


図 - 9 年間補修費と10年後の未補修箇所数および未補修箇所の総補修費の現時点からの削減額の関係

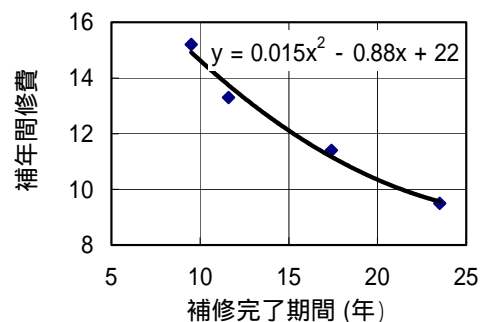


図 - 10 年間補修費と補修完了期間の関係

よび式(2)により求めることができる。

$$C = \sum_{t=1}^{10} (C_t) \quad (1)$$

$$B = \sum_{t=0}^9 [(M_{0,t+1} - M_{0,t}) - (M_{t,t+1} - M_t)] \quad (2)$$

ここに、C：10年間の総補修費

$C_t$ ：t年後の年間補修費

B：10年間の補修便益

$M_{0,t}$ ：補修なしの場合の t 年後の未補修箇所の総補修費

$M_t$ ：年間補修費  $C_t$  で補修した場合の t 年後の未補修箇所の総補修費

t 年後の年間補修費および t 年後の未補修箇所の総補修費は、社会的割引率 4 % を勘案して現在価値に変換して算定する<sup>3)</sup>。

年間補修費を変化させた場合、10年間の総補修費 C、10年間の補修便益 B 並びに費用対効果 B/C の関係を求め、図 - 11 に示す。図 - 11 に示

す総費用は、現時点（H15 年度）に全てのけた端部を補修する場合に必要とする総補修費 100 に対する比で示している。図 - 11 より、補修実施による費用対効果 B/C は、年間補修費に係わらず約 1.5 程度であり、補修費の投資額の約 1.5 倍の補修効果があることが示される。

### 3.3 補修規模に関する考察

補修の達成度として補修実施による 10 年後の未補修箇所の最大損傷率、10 年後の未補修箇所の総補修費の削減額並びに補修完了期間に着目した検討を行う。年間補修費と 10 年後の未補修箇所の最大損傷率の関係を図 - 12 に示す。図 - 12 より、10 年後の未補修箇所の最大損傷率を劣化が加速する 10 % 程度までに抑制するためには、年間補修費 10 程度が必要となる。年間補修費 10 程度であれば、図 - 9 より 10 年後の未補修箇所を 40 % 総補修費を 33 % 程度削減できる。また、図 - 10 より年間補修費 10 程度の場合の補修完了期間は、概ね 20 年である。コンクリート塗装の耐用年数は 20 年程度と推定され<sup>4)</sup>、補修箇所の再補修が必要となるまでの期間を 20 年程度と考えると、年間補修費 10 程度であればけた端部の補修をひと通り完了できる。

以上の結果、年間補修費の規模は、現時点の総補修費の 10 % 程度を継続させる補修計画を立案することが望ましいと推察する。

### 4. まとめ

北陸地方の損傷数の多い橋梁けた端部の補修を劣化予測等に基づき分析した結果、補修計画の立案に反映すべき事項は次のようである。

- 1) 補修は、損傷率の大きい箇所から優先的に着手することで、総補修費を最小にできる。
- 2) 未補修箇所の総補修費を低減させるためには、現時点の総補修費の 8 % 程度以上の年間補修費の規模を継続させる必要がある。
- 3) けた端部の補修効果を総補修費の低減額で評価した場合の費用対効果 (B/C) は約 1.5 程度であり、補修費の約 1.5 倍の補修効果がある。
- 4) 10 年後の未補修箇所の損傷率の低減や総補修

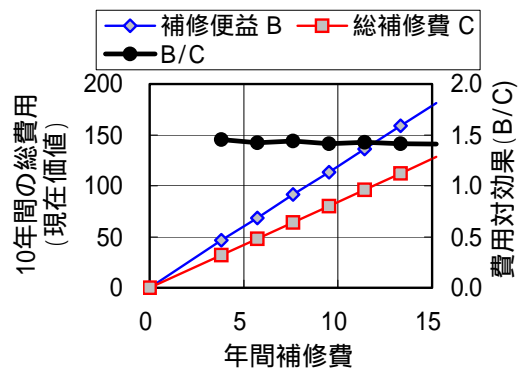


図 - 11 10年間の総補修費 C、補修便益 B 並びに費用対効果 B/C の関係

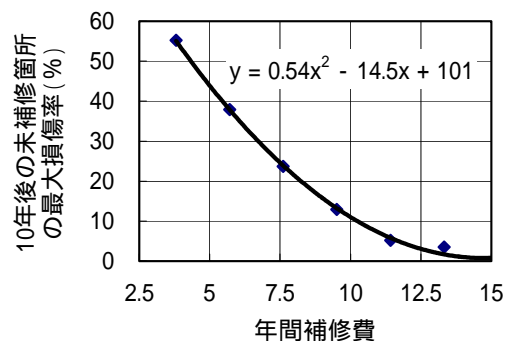


図 - 12 年間補修費と10年後の未補修箇所の最大損傷率の関係

費の削減等を勘案すると、年間補修費の規模は、現時点の総補修費の 10 % 程度を継続させる補修計画を立案することが望ましいと推察する。

### 参考文献

- 1) 青山實伸, 松田哲夫: 凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp. 807-812, 2004.7
- 2) 熊谷和男, 高橋秀樹, 青山實伸: 北陸地方の橋梁けた端部のコンクリート部材の損傷特性と劣化推移, 土木学会論文集, No.798/ -68, pp.31-39, 2005.9
- 3) 日本総合研究所: 道路投資の評価に関する指針(案), pp.40, 1998.6
- 4) 青山實伸, 松田哲夫: 厳しい塩害環境下の新設コンクリート橋に適用した各種の表面被覆方法の効果, コンクリート工学, Vol.41, No.9, pp.30-35, 2003.9