

論文 橋梁通常点検結果を用いた劣化予測式の作成と橋梁補修優先順位の検討

石田 純一^{*1}・森岡 弘道^{*2}・河村 圭^{*3}・宮本 文徳^{*4}

要旨: 本研究では、山口県において策定された橋梁維持管理基本方針に基づいて、一部の地域を対象に実施された橋梁通常点検の結果を用いて、橋梁部材に関する劣化予測式が作成された。作成された劣化予測式の妥当性を検証するため、最小二乗法およびマルコフ連鎖モデルを用いて算出した結果、今回用いた通常点検データにおいては、算出手法の違いによる劣化予測モデルの差異は小さく、劣化予測式の妥当性が確認された。また、本研究では、橋梁の補修・補強計画を立案するために必要とされる、補修・補強の優先順位を設定する手法について、検討が行われた。

キーワード: 橋梁点検, 劣化予測式, 優先順位設定手法

1. はじめに

老朽化する橋梁を計画的に維持管理する取り組みが、いくつかの道路管理機関で始められている。山口県においても、橋梁を計画的に維持管理するために、橋梁維持管理基本方針の策定や、橋梁通常点検マニュアルの作成、およびそれらを用いて、一部の土木建築事務所において通常点検の試行を行っている。また、国土交通省は、地方自治体が管理する橋梁が急速に老朽化することへ対応するため、地方自治体に対して、長寿命化修繕計画の策定に要する費用を援助するための補助事業を創設した¹⁾。事業の創設により、今後多くの道路管理機関が、橋梁長寿命化修繕計画の策定に取り組むことが予想される。しかし、合理的で効果的な橋梁の修繕計画を策定するためには、橋梁の現状を把握し、劣化予測式、ライフサイクルコスト (Life Cycle Cost(以下、LCC と略記する。)) 最小化手法、橋梁の管理水準、予算条件、および橋梁修繕工事を実施するための優先順位などの項目について、検討する必要がある。これらの項目に関する設定手法は、先進的に取り組まれている道路管理機関において、いくつか事例が示されているが、これらの事例を用いるためには、先進的な事例と同様に、例えば国土交通省の「橋梁定期点検要領 (案), 平成 16 年 3 月」や、実際に橋梁部材の試料を採取し、材料状態の点検や調査を行う必要がある。しかし、これらの点検や調査には、比較的費用を要するため、厳しい財政状況にある道路管理機関では、実施が困難である。そこで本県では、点検費用を抑えた独自の橋梁通常点検マニュアルを作成し、一部の土木建築事務所において点検を実施した²⁾。

このように、本県では、独自の点検マニュアルを作成

したことから、独自に、劣化予測式をはじめとした各項目の設定方法について検討する必要が生じた。本研究では、試行により得られた点検結果をもとに、計画的な橋梁の維持管理を進めるために劣化予測式を作成した。また、橋梁維持管理計画を策定するために必要となる、橋梁の補修・補強の優先順位について検討した。

2. 本研究の流れ

本研究では、橋梁維持管理計画を作成するために、図-1 に示すフローに基づいて研究を行った。以下に本研究の流れを示す。

まず、本県の一部の土木建築事務所通常点検を実施し、点検により評価された損傷区分の状況について、部材ごとに整理する。例えば、コンクリート橋の主桁や、鋼橋の RC 床版における点検では、剥離・鉄筋露出の損傷状況について、「a: なし」、「b: 剥離のみ」、「c: 鉄筋露出」の 3 段階で損傷区分が判定される。また、鋼橋の主桁・横桁の塗装では、「a: なし」、「b: 表面錆あり」、「c: 全体的な錆または板厚減少がある」の 3 段階で判定される。

次に、点検結果を用いて劣化予測式を作成する。まず損傷区分を数値化し、損傷度として表す。そして、橋梁の架設後の経過年と数値化された損傷度の関係から、最小二乗法を用いて劣化予測式を算出する。また、コンクリート橋の RC 桁および PC 桁については、最小二乗法およびマルコフ連鎖モデルの 2 つの手法を用いて、劣化予測式を算出し、それぞれの手法の妥当性を検証するために比較を行う。

続いて、橋梁維持管理計画を作成するために必要とな

*1 山口県 土木建築部宇部港湾管理事務所 施設課施設第一班技師 (正会員)

*2 山口県 土木建築部道路整備課 整備班主査

*3 山口大学 大学院理工学研究科環境共生系専攻助教 博士 (工学) (正会員)

*4 山口大学 大学院理工学研究科環境共生系専攻教授 工博 (正会員)

る、(1) 修繕費の設定、(2) 管理水準の設定、(3) 優先順位の設定といった3つの項目について、検討を行う。このうち、優先順位の設定では、重要度係数算出方式を用いる。また、優先順位を設定する項目ごとの重み付けを3パターン設定し、それぞれの重み付けにおける優先順位を算出し、その結果を比較する。

最後に、作成された劣化予測式、設定された修繕費、管理水準および優先順位をもとに、橋梁維持管理計画を策定する。なお、本研究では、予算条件の設定は考慮していない。

本稿では、図-1のフローに基づいて検討された結果のうち、作成された劣化予測式を3章にまとめた。また、4章には、橋梁維持管理計画の作成に関する各項目の検討結果をまとめた。

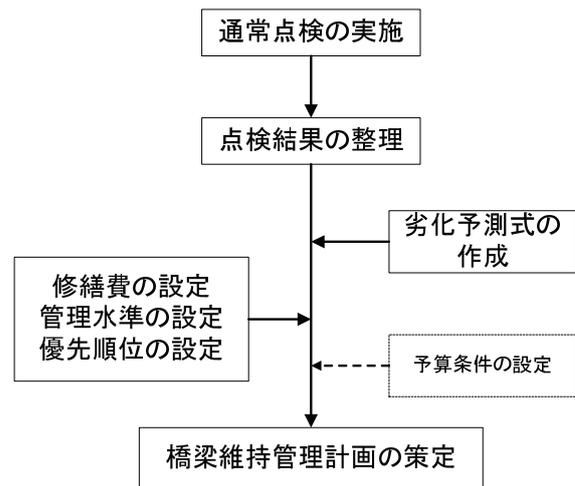


図-1 橋梁維持管理計画を策定するためのフロー

3. 点検結果を用いた劣化予測式の作成

本章では、一部の土木建築事務所で実施された通常点検結果を用いて、劣化予測式を作成する手法を述べるとともに、部材別に作成された劣化予測式を示す。

3.1 最小二乗法による、点検結果を用いた劣化予測式の作成

本節では、点検により得られた損傷の区分から、最小二乗法を用いて、劣化予測式を作成する手法について述べる。本県では、これまで定期的に橋梁の点検を実施していないため、1橋ごとの点検データが乏しく、適切な劣化予測式を作成することが難しい。そこで、本県では、点検で得られた損傷区分をそれぞれ、(1)鋼橋・塗装、(2)鋼橋・RC床版、(3)コンクリート橋・RC桁、(4)コンクリート橋・PC桁の4種類に分類し、合計4種類の劣化予測式を作成した。

劣化予測式を作成するため、本研究では、まず、損傷区分「a」、「b」、「c」を、図-2に示すように、それぞれ「5」、「3」、「1」と数値化し、その値を損傷度と定義した。損傷度は、損傷の状況が悪くなるにつれて、損傷度の数値は小さくなる。ただし、本研究における損傷度は、物理的に定義されていない。また、数値化においては、今後、劣化予測式の精度を高めるために、3段階の点検結果と、詳細点検データを利用して、損傷度を5段階に細分化することを想定し、「a」損傷区分を、図-2に示すように「5」と仮定した。

次に、数値化された結果をもとに、最小二乗法を用いて劣化予測式を作成した。ここで、コンクリート橋のRC桁およびPC桁においては、損傷度を架設後の経過年ごとにまとめ、経過年ごとに損傷度の加重平均値を求めた。図-3には、コンクリート橋のRC桁における経過年と損傷度の状況を示す。ここで、丸の中の数値は、ある経過年に該当する橋梁における、損傷度5、3、1それぞれ

損傷度		
a (点検時に把握)	5	a (5~4)
-	4	b (4~3)
b (点検時に把握)	3	b (3~2)
-	2	c (2~1)
c (点検時に把握)	1	c (1~0)
-	0	

図-2 損傷区分の損傷度への数値化手法

の損傷の数を示す。また、丸の大きさは、該当する損傷の数を視覚的に表現している。なお、図-3では、経過年を5年ごとにまとめて加重平均値を求めた。例えば、経過年が37.5年から42.5年の橋梁における、損傷度「1」の損傷は5箇所、「3」の損傷が1箇所、および「5」の損傷が1箇所あり、これらの結果から加重平均値を求め、その値を経過年40年における損傷度の加重平均値とした。なお、鋼橋の塗装およびRC床版に関する劣化予測式の作成においては、損傷数が少なかったため、加重平均値は求めず、劣化予測式を作成した。このような手法を用いて求められた、4種類の劣化予測式について、以下に述べる。

(1) 鋼橋・塗装の劣化予測式

図-4に、鋼橋の塗装に関する点検結果と架設後もし

くは塗装塗り替え後経過年の関係を示す。なお、近似式を算出するために、架設時または塗装塗り替え年の損傷度を5と仮定し、経過年ごとに算出された損傷度と経過年の関係を1次式で示した。

(2) 鋼橋・RC床版の劣化予測式

RC床版のようなコンクリート部材における劣化は、例えば中性化による劣化では、架設直後から中性化深さが鋼材の腐食発生限界に達するまでは、劣化現象は生じない。したがって、劣化予測式は、1次式ではなく2次式や3次式などが用いられることが一般的である。そこで、2次式で近似した劣化予測式を図-5に示す。図-5では、通常点検データ数が少ないことから、わずか40年足らずで、損傷度が「1」に達してしまっている。しかし、一般的に橋梁の寿命は、十分なメンテナンスを行わないとしても平均60年程度と言われており³⁾、図-5に示す劣化予測式を用いて、今後の維持管理費用を算出した場合、実際の費用よりも多く算出してしまふことが懸念される。そこで、本研究においては、塗装の劣化曲線と同様に、鋼橋のRC床版の劣化予測式を、経過年ごとに算出された損傷度と経過年の関係から、図-6に示す1次の近似式で示した。

(3) コンクリート橋・RC桁

図-7に、コンクリート橋のRC桁に関する点検結果と架設後経過年の関係を示す。本研究では、塗装や鋼橋のRC床版の劣化予測式と同様に、コンクリート橋のRC桁に関する劣化予測式を、経過年0年、つまり架設年における損傷度を「5」と仮定し、1次式を用いて作成した。ただし、RC桁は、鋼橋のRC床版と同様にコンクリート部材であり、2次式や3次式を用いて劣化予測式が作成されることが一般的である。しかしながら、点検データの数が少なく、また、ばらつきが大きいこと、鋼橋のRC床版においては1次式を用いており、本研究での維持管理計画の作成における、コンクリート部材の劣化に対する考え方を簡易にすることから、本研究では、1次の近似式を用いて劣化予測式を作成した。なお、本研究に用いた点検データは非常にばらついている。これは、橋梁の架設環境や構造形式が異なること、および橋梁点検を本県職員が実施したため、点検者によるばらつきが生じている可能性があるためである。したがって、今後多くの橋梁を点検し、架設環境や構造形式ごとに点検データを分類するなど、データのばらつきを抑制し、劣化予測式の精度を向上させる必要がある。

(4) コンクリート橋・PC桁

コンクリート橋のPC桁に関する劣化予測式を図-8に示す。鋼橋のRC床版およびコンクリート橋のRC桁と同様に、1次の近似式により、劣化予測式を設定した。

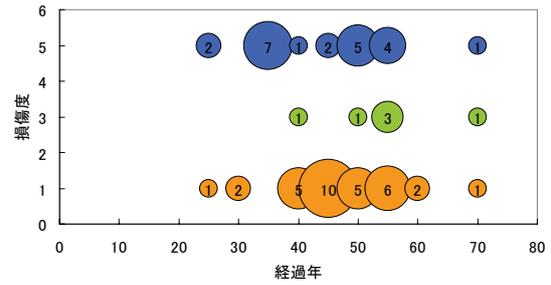


図-3 コンクリート橋RC桁における経過年と損傷度

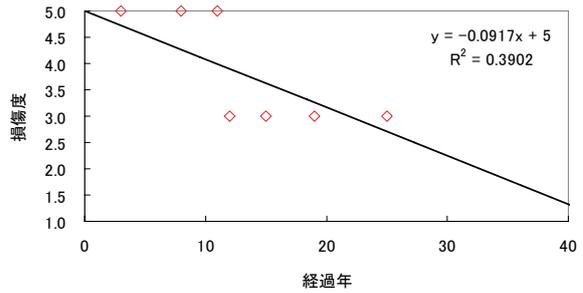


図-4 鋼橋・塗装の劣化予測式

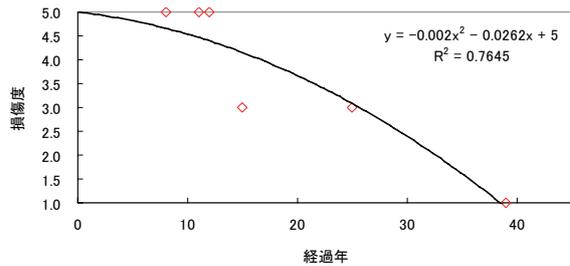


図-5 鋼橋・RC床版の劣化予測式(2次式)

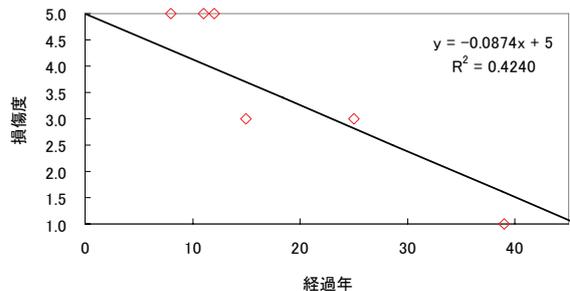


図-6 鋼橋・RC床版の劣化予測式(1次式)

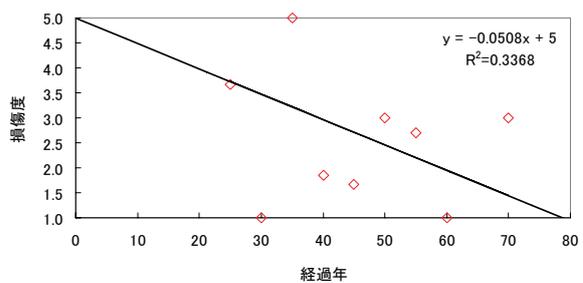


図-7 コンクリート橋・RC桁の劣化予測式

3.2 マルコフ連鎖モデルによる劣化予測式の作成

劣化予測式を算出する方法に、前節に述べた最小二乗法により算出する方法の他に、マルコフ連鎖モデルにより算出する手法があり、これまで研究が進められている⁴⁾。劣化予測式の妥当性に関しては、今後、多くの通常点検結果を収集し再検討することで検証するが、本研究においては、限られたデータにおいて、劣化予測式算出手法の違いによる劣化予測結果について比較を行った。ただし、マルコフ連鎖モデルは、同じ条件の部材を対象とした多くの点検データが存在する場合に適用される。したがって、本県マニュアルによる点検結果に含まれている、橋梁の構造特性や使用環境、目視検査の時間間隔などの異なる条件を考慮できないため、このようなデータを対象としてマルコフ連鎖モデルを適用することはできない。しかしながら、今後、通常点検が実施され、多くの通常点検データが入手された際には、適用できる可能性があることから、本研究において適用を試みた。なお、マルコフ連鎖モデルにより算出された劣化予測式は、コンクリート橋のRC桁およびPC桁である。

(1) コンクリート橋・RC桁における劣化予測モデル

コンクリート橋・RC桁に関する60の点検データを用いて算出されたマトリクスを表-1に示す。マトリクスの最適化には最尤推定法を用いた。その結果、t値は「損傷度1:5.88, 損傷度3:2.90」であった。また、図-9には、表-1に示すマトリクスを用いて、経過年ごとの確率分布および損傷度の期待値について算出された結果を示す。これによると、図-9に示す劣化予測式における架設後60年が経過した時点の損傷度は、2.15であった。これを最小二乗法により求められた図-7と比較すると、図-7では、架設後60年が経過した時点において、損傷度が1.95であり、ほぼ同程度の損傷度であった。

(2) コンクリート橋・PC桁における劣化予測モデル

コンクリート橋・PC桁に関する44の点検データを用いて、遷移確率マトリクスを算出した。算出したマトリクスを表-2に示す。コンクリート橋・RC桁と同様に、マトリクスの最適化には最尤推定法を用いた結果、t値は「損傷度1:4.15, 損傷度3:2.46」であった。また、表-2のマトリクスを用いて求められた、経過年ごとの確率分布および損傷度の期待値を図-10に示す。図-10をみると、損傷度の期待値は、架設後50年を経過した時点で2.74となる。これを、最小二乗法で求められた図-8に示す近似式と比較すると、図-8では架設後50年経過した時点における損傷度が、2.79とほぼ同程度となった。これらの結果から、本研究で用いられたデータにおいては、最小二乗法およびマルコフ連鎖モデルによって、劣化予測式および劣化予測モデルに大きな差異はないことが確認された。

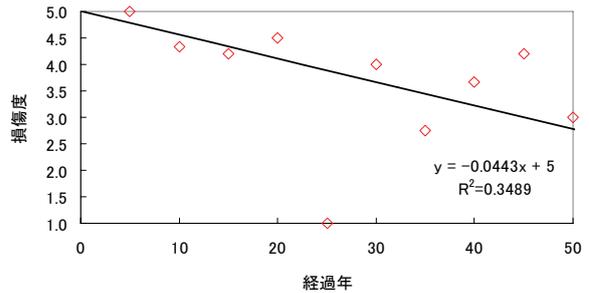


図-8 コンクリート橋・PC桁の劣化予測式

表-1 コンクリート橋・RC桁遷移確率マトリクス

	5	3	1
5	0.9773	0.0215	0.0011
3	0	0.9018	0.0982
1	0	0	1

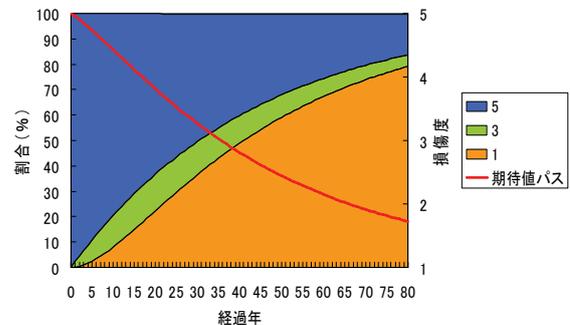


図-9 マルコフ連鎖モデルによるコンクリート橋・RC桁の劣化予測式

表-2 コンクリート橋・PC桁遷移確率マトリクス

	5	3	1
5	0.9783	0.0212	0.0005
3	0	0.9519	0.0481
1	0	0	1

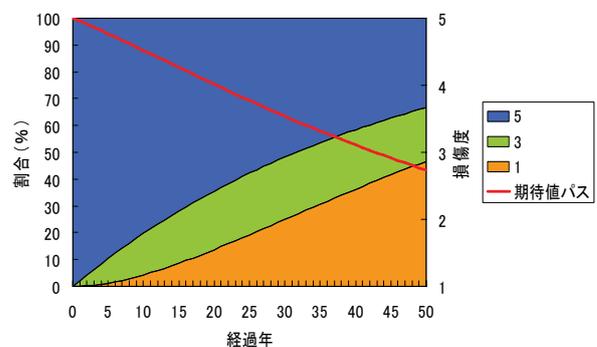


図-10 マルコフ連鎖モデルによるコンクリート橋・PC桁の劣化予測式

4. 補修・補強優先順位の設定

本章では、通常点検データを用いて求められた劣化予測式をもとに、維持管理計画を作成するために必要となる補修費や補修数量を設定するとともに、橋梁に補修・補強を実施するための優先順位について検討した。これらの検討結果について述べる。

4.1 補修費・補修数量の設定

本県では、これまで多くの橋梁補修・補強工事を実施してきており、その概要に関する情報は整備されている。しかし、各種補修工法ごとの補修費や、補修数量といった詳細な情報までは整理されていない。このため、本県が発注した補修工事の実績を用いて、補修費や補修数量を設定することができない。そこで本研究では、各橋梁関係協会が示す、文献5)や6)を参考として、補修費および補修数量を設定した。鋼橋 RC 床版における損傷度ごとの修繕工法と工法単価を表-3に示す。

4.2 管理水準の設定

本研究における管理水準は、合理的で効果的な橋梁維持管理を実施するために、厳しい予算制約のなかで、LCCの最小化を図りつつ、橋梁の部材ごとに、許容される損傷区分の限界を意味する。ただし、LCCは、補修費や補修数量の設定により決定されるため、補修費の設定内容により、管理水準は変化する。また、厳しい予算制約においては、必要な補修予算を確保できないために、管理水準が設定できない。その一方で、現状において、高い橋梁性能が維持されていれば、高い管理水準を維持するための橋梁維持管理計画を作成できる。このように、管理水準の設定においては、様々な要因を考慮する必要がある。ただし、管理水準を設定しなければ、合理的で効果的な維持管理計画の作成が困難であり、また、予算制約条件や通常点検データの取得により、現状の橋梁性能が把握された際には、管理水準の設定も可能である。そこで本研究では、橋梁の上部工を対象として、今後50年程度のLCCを求め、その値が最小となる損傷区分を求めた。また、上部工以外の部材は、対策区分「C」と評価された部材の損傷に対して、対策を実施するよう設定した。

4.3 優先順位の設定

(1) 橋梁の重要度および損傷の重要度に関する項目の重み付けに関する検討

本県における橋梁の補修・補強工事を実施するための優先順位の設定手法を図-11に示す。本県では、図-11に示す(1)安全性、(2)社会的影響、(3)その他影響から橋梁の重要度を算定する。また、(4)損傷の進行性、(5)損傷部位の重要性から損傷の重要度を算出し、橋梁および損傷の重要度から、橋梁の優先順位を設定する。そこで、本研究では、(1)から(5)の各項目の重み付けおよび橋梁の重

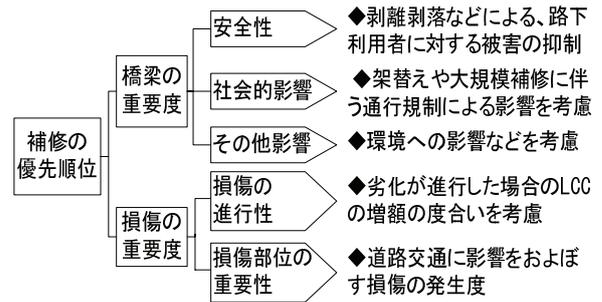


図-11 優先順位の設定手法

表-3 補修費の設定例（鋼橋・RC床版）

損傷度	修繕工法	単価 (千円/m ²)	損傷の 状況例
4~3	炭素繊維接着 60%	51	1方向ひびわれ
3~2	炭素繊維接着 70%	59	
2~1	鋼板接着 70%	82	2方向ひびわれ
1~0	鋼板接着 100% (打ち換え処理)	118	

表-4 橋梁の重要度に関する項目の重み付け例

項目	内容(交差物件)	重み
安全性	鉄道、高速道路	50
	一般道	30
	歩道、駐車場など	20
	その他	0

要度と損傷の重要度の重み付けについて検討を行った。

まず、(1)安全性および(2)社会的影響の項目における重み付けを行った。重み付けの設定手法は様々あるものの、具体的な数値については、各道路管理機関を取り巻く状況により異なる。また、本県においては、各項目にどのような重み付けを与えるかについて、検討された事例はない。そこで、本研究では、各項目を一律に50点満点とした。そして、それぞれの項目について3つまたは4つに区分し、数値を設定した。(1)安全性における重み付けの例を表-4に示す。鉄道や高速道路を跨ぐ橋梁では、橋梁の損傷が進行し、剥離・剥落が発生した際に、重大事故を引き起こす可能性があるため50点とした。また一般道や、歩道、駐車場を跨ぐ橋梁について、それぞれ30点、20点とした。ただし、本研究における重み付けの数値には根拠はないため、今後優先順位の検討結果から、重み付けの数値を見直す必要がある。

次に、損傷の重要度を設定するための(4)損傷の進行性および(5)損傷部位の重要性の項目における重みを設定した。ここで、(4)損傷の進行性については、補修・補強対策を遅らせた場合に発生すると予測されるLCCの増加額を用いて設定することとした。また、(5)損傷部位の

重要性に関する項目では、通常点検により評価された対策区分、損傷度、および損傷部位を用いて重みを設定した。

(2) 橋梁の重要度および損傷の重要度の重み付けに関する検討

本検討では、橋梁の重要度および損傷の重要度にそれぞれの程度の重みを与えることが、橋梁事業に従事する本県職員にとって妥当と判断されるかを明らかにするために、表-5 に示す3ケースの重要度係数を設定し、それぞれにおける橋梁の優先順位を算出するとともに、それぞれの妥当性について検討した。表-5 に示すように、case1 から徐々に損傷の重要度における重みの数値を大きくした結果、図-12 と比較して、図-14 には、図-12 には示されなかった、橋梁の重要度に比べ、損傷の重要度の数値が大きな、a 橋や b 橋といった橋梁の優先順位が高くなった。この結果を、これまで橋梁の維持管理業務や橋梁の建設事業に、概ね3年程度携わった本県職員で構成される、橋梁維持管理計画策定検討ワーキンググループにおいて検討したところ、通常点検を実施したある地域に限れば、case2 が妥当であると判断できるものの、全県への適用するためには、多くの通常点検データを収集したうえでの検討の必要性が確認された。

5. まとめ

本研究では、通常点検データを用いて劣化予測式を作成するとともに、橋梁の補修・補強の優先順位について検討を行った。本研究の成果は以下のとおりである。

- (1) 最小二乗法およびマルコフ連鎖モデルを用いて、通常点検データをもとに劣化予測式を設定した。2つの手法を用いて検討した結果、どちらの手法を用いても、ほぼ同様の劣化予測モデルが得られた。
- (2) 限られた点検データをもとに、優先順位を設定した。
- (3) 優先順位を設定するため、橋梁の重要度および損傷の重要度において3ケースの重みを与え、検証をおこなった結果、「橋梁の重要度：損傷の重要度＝30:70」とした結果が、ある地域における優先順位としては妥当と判断された。ただし県全域への適用については、今後通常点検データを収集したうえで、再度検討する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：「荒廃する日本」としないための道路管理，2007.1
- 2) 河村 圭，石田 純一，宮本 文穂，中村 秀明：山口県における橋梁通常点検の実施とその有効性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.3，pp.1705-1710，2007.7

表-5 橋梁の重要度および損傷の重要度の重み付け

	橋梁重要度	損傷重要度
case1	0.5	0.5
case2	0.3	0.7
case3	0.2	0.8

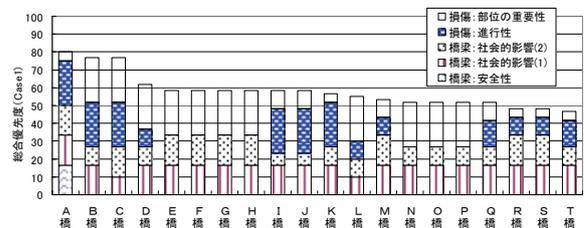


図-12 重要度係数算出(加算)方式、重み付け case1 における優先順位

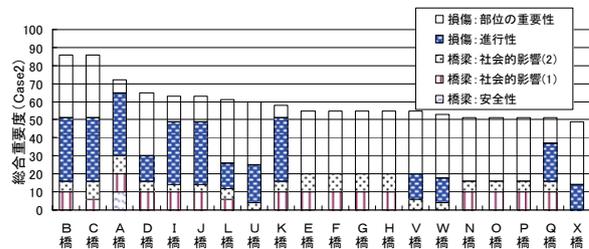


図-13 重要度係数算出(加算)方式、重み付け case2 における優先順位

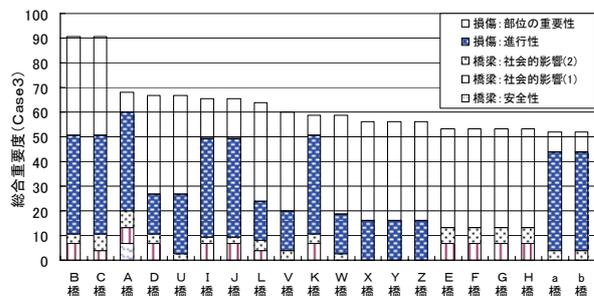


図-14 重要度係数算出(加算)方式、重み付け case3 における優先順位

- 3) Calqaro, J.A. and Lacroix, R. : 橋の診断と補修 (MAINTENANCE ET RÉPARATION DES PONTS), 日本構造物診断技術協会の監修・訳, 山海堂, 2002.6
- 4) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.10
- 5) (社)日本橋梁建設協会: '06 デザインデータブック, 2006.1
- 6) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC 道路橋計画マニュアル, 1997.3