

付録 中長期計画策定に係る参考資料

山形県は、平成19年度に『山形県橋梁長寿命化修繕計画』を策定し、計画で定めた取り組み方針に基づき長寿命化対策を進めてきているところである。

本付録では、今後の長寿命化計画の最適化に向けた参考とするため、平成19年度に策定した中長期計画の考え方や課題等を以下に示す。

(1) 中長期シミュレーションの計算方法

表-1、2に示す管理区分別の対策工法、単価、耐用年数を基に、橋梁個別に対策費用及び対策実施時期を算定するとともに、各年度の対策費用の積み上げを行う。

対策時期については前後5年間のずれがあることを許容して、世代間の負担差の低減を図るため、各年度の対策費用の積み上げ結果に対して10年間（前後5年間）の移動平均により対策費用の平準化を行う。また、架替については、3ヵ年で実施することと仮定し、計算上の実施年より前倒して3ヵ年で費用の振り分けを行う。

なお、計算開始年から数年程度の補修費用については、計算開始年以前の補修履歴情報が不透明であることから、シミュレーション上の費用と個別の診断結果から積み上げる費用（短期計画）が大きく乖離する可能性があるため、個別の診断結果から積み上げる補修費用から設定するものとする。（計画策定時においては、計算開始年以前は補修を行っていないという仮定のもと計算上過去に補修すべきだった橋の1回目の補修費用を全て計算開始年に積み上げ、5年間で振り分けることとしている。）

表-1 予防保全型管理橋梁における工法・単価一覧（山形県のH21年度の設定例）

部材	グループ分類 ^{※1}	対策工法	単価 ^{※2}	初回補修時期 ^{※3}	補修後の耐用年数	備考
主構	鋼橋(海岸線)	再塗装(Rc-I)	10.4千円/m ²	36年 ^{※4}	30年 ^{※5}	
	鋼橋(平地)	再塗装(Rc-I)	10.4千円/m ²	36年 ^{※4}	45年 ^{※5}	
	鋼橋(山岳地)	再塗装(Rc-I)	10.4千円/m ²	36年 ^{※4}	60年 ^{※5}	
	PC橋	断面修復	51千円/m ²	42年 ^{※4} (橋面積の3%)	30年 ^{※4} (橋面積の3%)	
	RC橋	断面修復	51千円/m ²	42年 ^{※4} (橋面積の6%)	30年 ^{※4} (橋面積の1%)	
床版	鋼橋	炭素繊維接着	50千円/m ²	40年 ^{※4} (橋面積の9%)	架替まで対策無	断面修復サイクルに合わせて補正
		断面修復	51千円/m ²	40年 ^{※4} (橋面積の6%)	28年 ^{※4} (橋面積の3%)	
		床版防水	6.5千円/m ²	15年 ^{※7}	15年 ^{※7}	舗装打替えサイクル
	PC橋, RC橋	床版防水	6.5千円/m ²	15年 ^{※7}	15年 ^{※7}	
支承	—	金属溶射	120千円/基	30年 ^{※5}	架替まで対策無	橋長15m未満は対策無
下部工	—	断面修復	51千円/m ²	40年 ^{※4} (下部工面積の10%)	40年 ^{※4} (下部工面積の10%)	
伸縮装置	—	伸縮装置交換	190千円/m	20年 ^{※5}	20年 ^{※5}	鋼製とゴム製の耐用年数の平均
高欄・地覆	—	高欄・地覆交換	84千円/m	30年 ^{※6}	30年 ^{※6}	鋼製と鋳造品の耐用年数の平均
架替	鋼橋	架替	500千円/m ²	90年(100年) ^{※7}	100年 ^{※7}	諸経費含む ()内はH14以降道 示適用橋梁
	PC橋	架替	600千円/m ²	90年(100年) ^{※7}	100年 ^{※7}	
	RC橋	架替	300千円/m ²	90年(100年) ^{※7}	100年 ^{※7}	

表-2 対症療法型管理橋梁における工法・単価一覧（山形県のH21年度の設定例）

部材	グループ分類 ^{※1}	対策工法	単価 ^{※2}	初回補修時期 ^{※3}	補修後の耐用年数	備考
主構	鋼橋(海岸線)	再塗装(Ra-III)	4千円/m ²	36年 ^{※4}	10年 ^{※5}	
	鋼橋(平地)	再塗装(Ra-III)	4千円/m ²	36年 ^{※4}	15年 ^{※5}	
	鋼橋(山岳地)	再塗装(Ra-III)	4千円/m ²	36年 ^{※4}	20年 ^{※5}	
	PC橋	断面修復	51千円/m ²	42年 ^{※4} (橋面積の3%)	架替まで対策無	
	RC橋	断面修復	51千円/m ²	42年 ^{※4} (橋面積の6%)	架替まで対策無	
床版	鋼橋	床版部分打換え	45千円/m ²	45年 ^{※4} (橋面積の5%)	架替まで対策無	
		断面修復	51千円/m ²	40年 ^{※4} (橋面積の6%)	架替まで対策無	
	PC橋, RC橋	—	—	—	—	
支承	—	支承取替え	1300千円/基	40年 ^{※7}	架替まで対策無	橋長15m未満は対策無
下部工	—	断面修復	51千円/m ²	40年 ^{※4} (下部工面積の10%)	架替まで対策無	
伸縮装置	—	伸縮装置交換	190千円/m	30年 ^{※5}	架替まで対策無	走行安全性に影響の大きい鋼製の耐用年数
高欄・地覆	—	高欄取替え	84千円/m	30年 ^{※6}	架替まで対策無	鋼製と鋳造品の耐用年数の平均
架替	鋼橋	架替	500千円/m ²	60年 ^{※7}	100年 ^{※7}	諸経費含む
	PC橋	架替	600千円/m ²	60年 ^{※7}	100年 ^{※7}	諸経費含む
	RC橋	架替	300千円/m ²	60年 ^{※7}	100年 ^{※7}	諸経費含む

※1：劣化進行の違い、工法の違い等を考慮してグループ分類を行った。

※2：表中の単価のうち、補修費単価は直接工事費を示し、架替単価は諸経費を含む値を示す。なお、補修費については別途諸経費率1.9を考慮する。

※3：初回補修時期は、架設年又は架替からの年数で設定した。

※4：既往点検結果に基づく劣化予測式から設定した耐用年数。

※5：『鋼橋のライフサイクルコスト2001年改訂版』（社）日本橋梁建設協会より設定した耐用年数。

※6：『既設鋼橋のライフサイクルコストに関する報告書（平成14年11月）』（社）日本橋梁建設協会より設定した耐用年数。

※7：過去の実績等から想定した耐用年数。

※8：表に示す補修時期や耐用年数については、中長期シミュレーション（マクロ的な分析）に用いる年数であり、個別の橋の耐久性判断にこの年数を使用するものではない。

また、表は既設橋の補修に対して設定した指標であるため、新設橋のLCC算定に適用するものではない。

(2) 劣化予測

劣化予測の対象部材は、損傷が進行した場合に架替えの主要因となる部材（主構、RC床版）とする。また、対象とする損傷は、劣化が進行することにより構造安全性や第三者被害への影響が懸念される損傷や、補修費用の占める割合が多い損傷とする。

山形県の中長期計画策定に用いている劣化予測式を表-3に示す。

x : 経過年数

y : 損傷ランク

表-3 劣化予測の設定結果

対象部材	損傷の種類	劣化予測式	損傷等級	耐用年数	損傷発生割合
主構(鋼橋)	腐食	$y=5.0-3.10 \times 10^{-3}x^2$	-	36年	-
RC床版	床版ひび割れ	$y=5.0-1.99 \times 10^{-3}x^2$	D	39年	9%
			E	45年	5%
	剥離・鉄筋露出	$y=5.0-2.56 \times 10^{-3}x^2$	C	28年	3%
主構(コンクリート橋)	剥離・鉄筋露出	$y=5.0-2.29 \times 10^{-3}x^2$	E	40年	6%
			C	30年	RC橋 1%、PC橋 3%
			E	42年	RC橋 6%、PC橋 3%

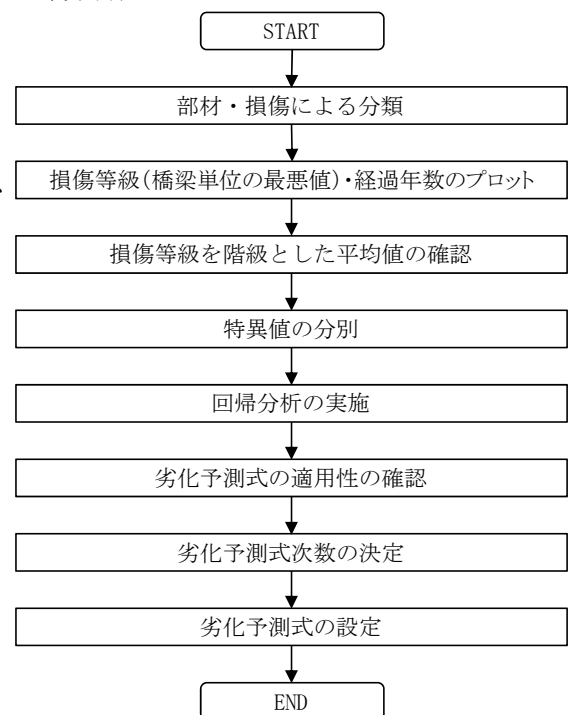
(1) 劣化予測方法

劣化予測を設定した際に検討した2つの手法を以下に示す。

1) 手法1 (損傷等級別の平均年数と損傷等級を用いた回帰分析)

損傷等級毎の補修後からの経過年数（又は架設後からの経過年数）の代表値を算出・プロットし、それらに対して回帰分析を行うことで劣化予測式を設定する。なお、劣化は経年に伴って急速に進展するという仮定から、劣化予測式は上凸型多項式を基本とする。以下に基本式を示す。

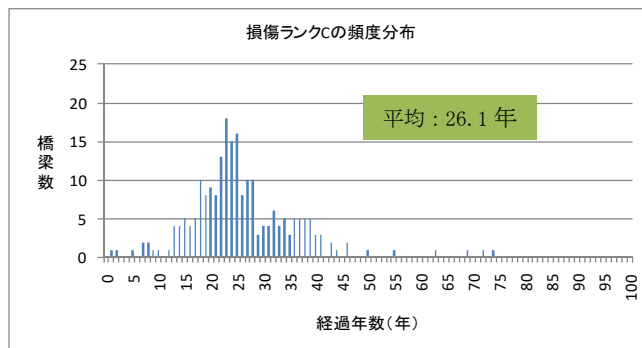
$$y=5.0-ax^n \quad (n=1 \text{ 時は直線式となる})$$



手法1による劣化予測式設定の流れを以下に示す。

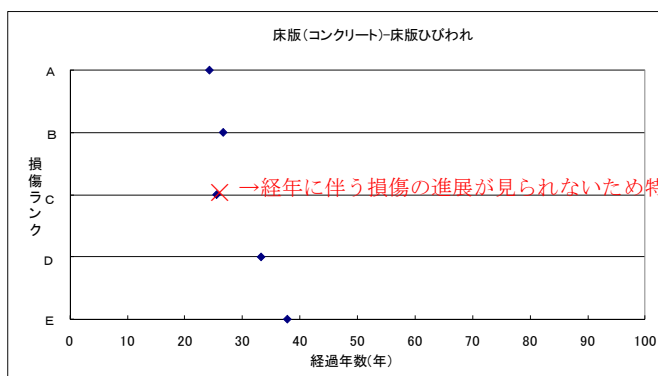
① 損傷等級ごとの頻度分布の作成

損傷等級毎に各経過年数における橋梁数をプロットし、経過年数の平均値を算出する。なお、頻度分布が正規分布となっていない場合やデータ数が十分でない場合は、特異値として分別する。



② 平均値のプロット

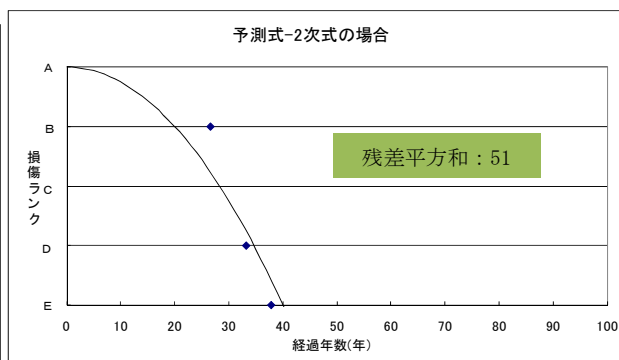
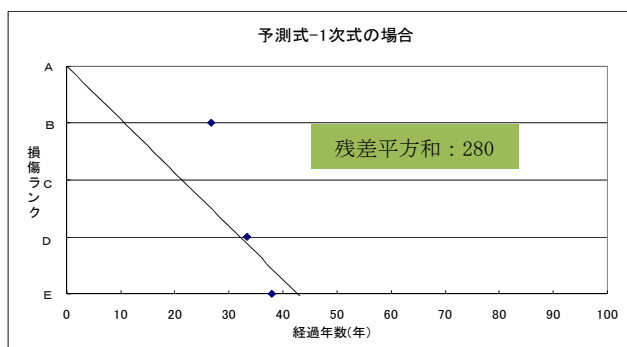
①のデータを基に平均値をプロットする。なお、劣化は経年に伴って進展するという仮定により、経年に伴う損傷の進展が見られない場合は特異として分別する。



③ 回帰分析の実施

プロットを結ぶ回帰式を予測式とする。なお、予測式は架設時点又は補修時点(経過年数0年)での損傷等級をAとする上凸型の多項式 ($y=5.0-ax^n$) として算出する。

次数 n は 1 次と 2 次としたケースで予測式を算出し、プロット点と予測式の差(残差平方和)が小さくなる次数を採用する。(下図のケースでは 2 次式を採用)



2) 手法2 (損傷発生時期・損傷発生面積の予測)

経過年数ごとに、損傷が発生している橋面積の割合を算出し、最も損傷発生割合が多い年数を損傷発生時期と仮定する。但し、劣化予測式の設定が可能な場合は、各損傷等級に至る年数を劣化予測式により算出し、損傷発生時期とする。手法2による劣化予測式設定の流れを以下に示す。

①径間面積の算出

全幅員及び支間長を基に、径間毎の面積を算定する。

表-4 損傷発生面積の算出例 (3段階評価の例)

橋梁名	経過年数	径間番号	径間面積	損傷等級					損傷発生面積(C~E)	損傷発生面積(E)
				A	B	C	D	E		
〇〇橋	40年	径間1	300 m ²	80%	-	0%	-	20%	60 m ²	60 m ²
		径間2	400 m ²	70%	-	20%	-	10%	120 m ²	40 m ²
		径間3	300 m ²	80%	-	20%	-	0%	60 m ²	0 m ²
△△橋	30年	径間1	250 m ²	90%	-	10%	-	0%	25 m ²	25 m ²
□□橋	20年	径間1	750 m ²	100%	-	0%	-	0%	0 m ²	0 m ²
合計		-	2000 m ²						265 m ²	125 m ²

②損傷発生面積の算出

径間毎に、損傷が発生している橋面積(損傷発生面積)を把握する。

例：表-4における〇〇橋、2径間目の損傷発生面積

径間面積 400 m²のうち、損傷等級 A の範囲が 70%、損傷等級 C の範囲が 20%、損傷等級 E の範囲が 10%である。そのため、損傷等級 C 以上(C~E)の面積は、400 m²の 30%(C=20%, E=10%)にあたる 120 m²となる。

③損傷発生時期の設定

手法1により設定した劣化予測式に基づいて、損傷発生時期(各損傷等級に至る年数)を設定する。又は、経過年数ごとに、損傷が発生している橋面積の割合(損傷発生割合)を下式により算出し、最も損傷発生割合が多い年数を損傷発生時期と仮定する。

$$\text{損傷発生割合} = \frac{\sum \text{損傷発生面積}}{\sum \text{径間面積}}$$

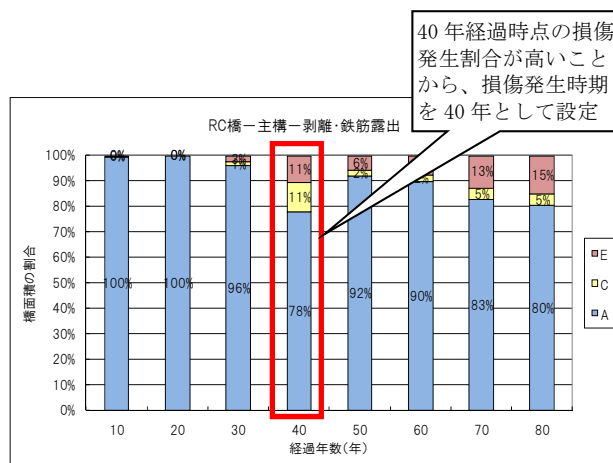


図 損傷発生割合による損傷発生時期の設定

④劣化予測

③で算出した損傷発生時期に補修を行うこととし、その時点における損傷発生割合を補修範囲として予測を実施する。補修範囲の算定方法は③に示す計算式を用いる。

例：表-4における40年時点での損傷発生割合の算出

経過年数 40年の橋梁は〇〇橋のみであり、損傷等級 C 以上(C~E)の損傷発生割合は 13%(=265 m²/2000 m²)、損傷等級 E の損傷発生割合は 6%(=125 m²/2000 m²)となる。

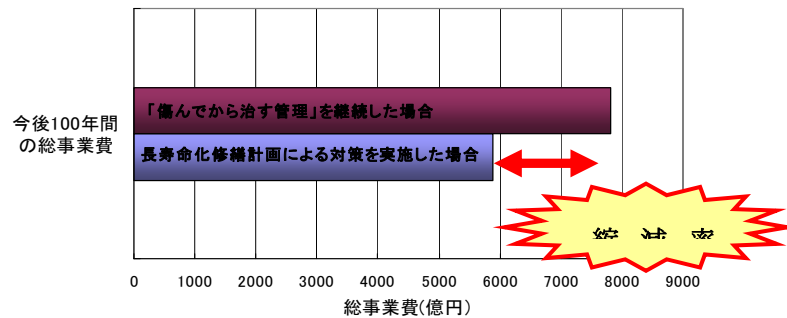
(3) 長寿命化修繕計画による効果

山形県では、長寿命化修繕計画に基づいて事業を実施することによる効果として、コスト縮減、安全安心の確保、予算の平準化について示している。

1) コスト縮減効果

比較対象期間内に生じる総事業費について比較を行う。

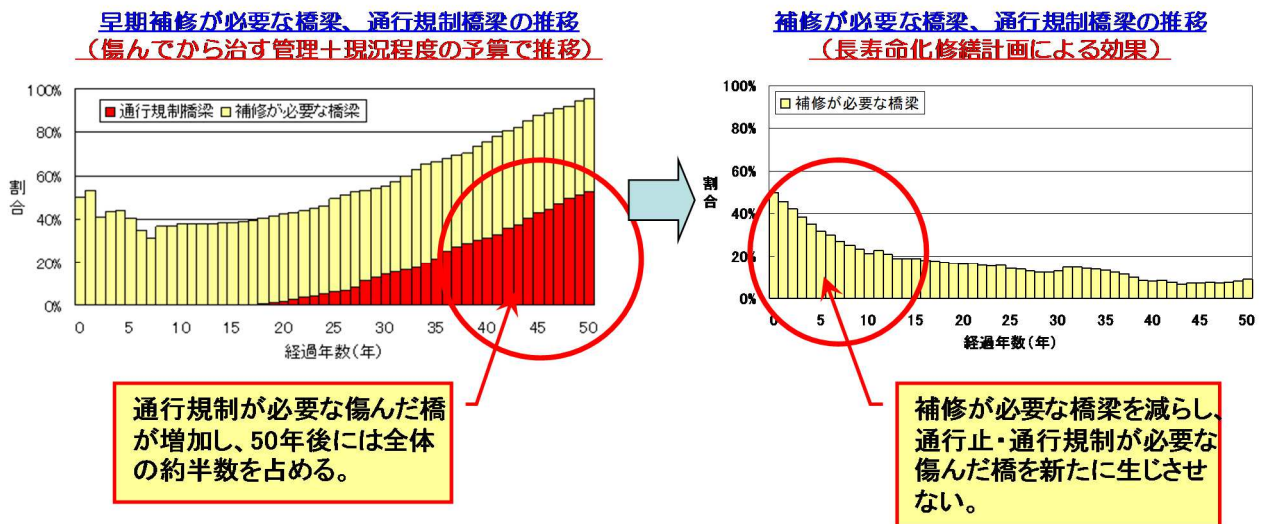
管理水準（予防保全型管理及び対症療法型管理）毎に対策工法（単価や耐用年数）を設定し、比較対象期間内に発生する修繕費用及び更新費用の集計を行う。



2) 安全・安心の確保

対症療法的な維持管理を継続した場合と、長寿命化修繕計画に基づく維持管理を実施した場合における①早期補修が必要な橋梁及び②通行規制橋梁の割合の推移を比較し、改善効果を定量的に示す。

① 早期補修が必要な橋梁については、設定予算に対して劣化予測式に基づいて主構・床版にEランクが確認される橋梁を把握する。また、②通行規制橋梁については、Eランク到達後も修繕ができず、5年過ぎた橋梁数により評価を行う。

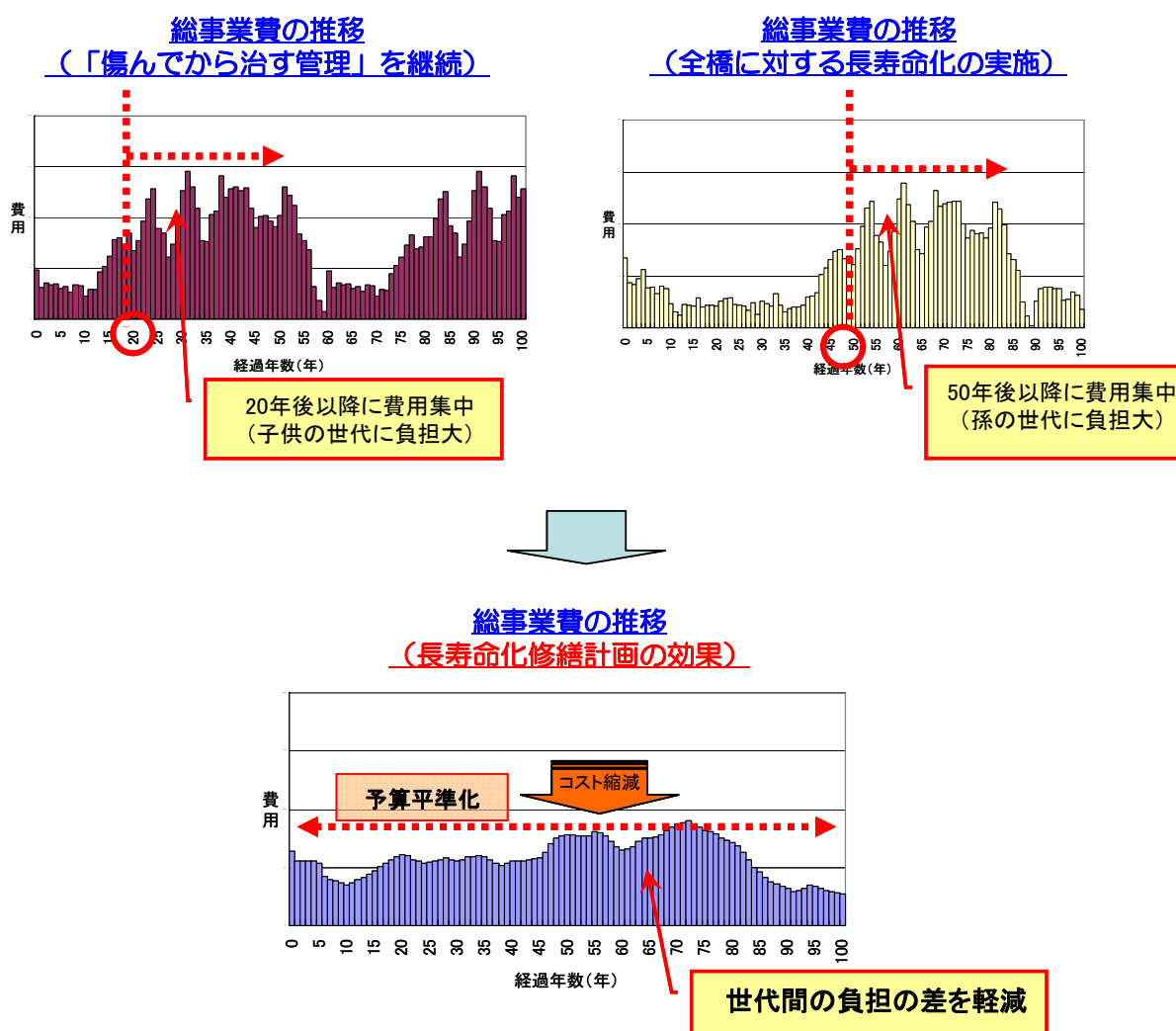


3) 予算の平準化

対症療法的な維持管理を継続した場合における事業費のピーク額が、長寿命化修繕計画に基づく維持管理を実施することにより、どの程度低減できるかを定量的に示す。

一般的に予防保全型管理を行うことにより総事業費の縮減が図れるが、全て同様の維持管理水準で計画を策定した場合、事業費はある時期に集中する。そのため、橋梁の規模や重要度等に応じて管理水準を使い分けることにより、事業費の集中を低減することが可能となる。

平準化効果としては、下図に示すように対症療法型管理（又は予防保全管理）における事業費のピーク額と比較し、長寿命化修繕計画による計画的な対策を実施することで、ピーク額をどの程度低減できるかを定量的に説明する。



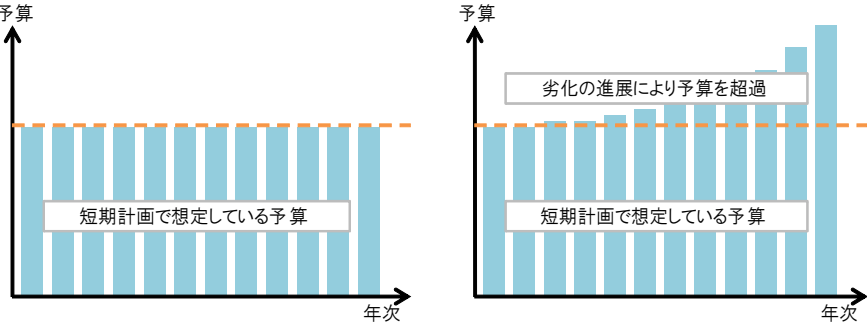
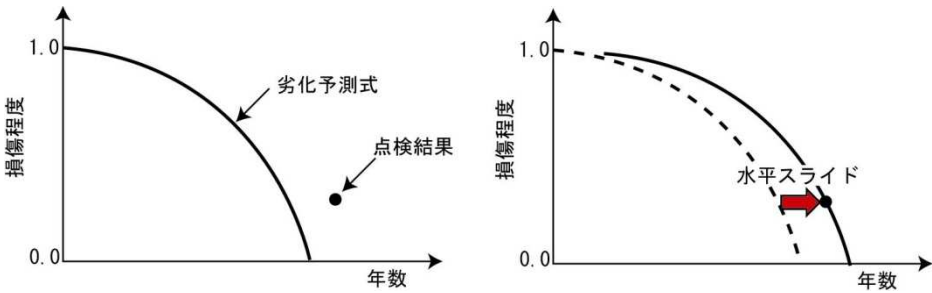
(4) その他の効果

その他の効果として、延命効果や環境負荷低減効果が挙げられる。延命効果は、対症療法型管理から予防保全型管理に移行することで、平均余寿命がどの程度延命化できるかを定量的に比較するものである。また、環境負荷低減効果は、対症療法型管理から予防保全型管理に移行することで、比較対象期間内に想定される修繕及び架替えによるCO₂排出量がどの程度削減できるかを定量的に比較するものである。

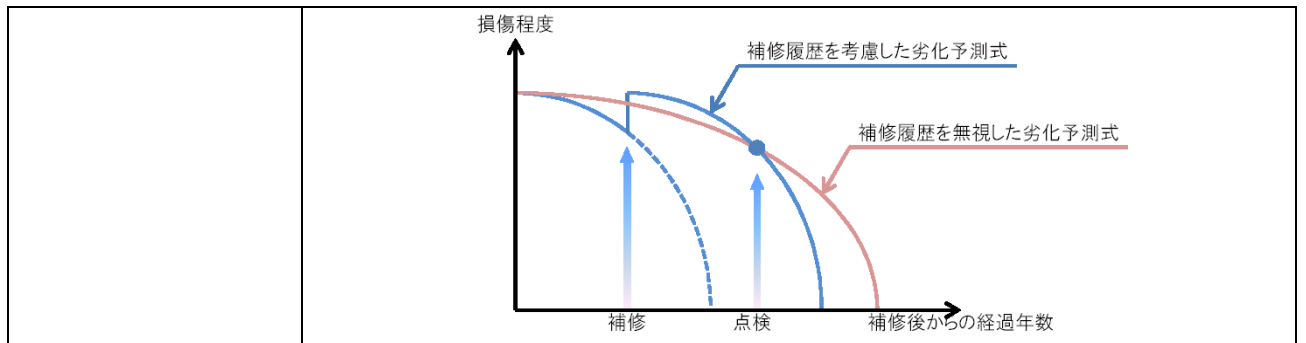
(4) 今後の最適化に向けた留意事項

今後も中長期計画を含めた橋梁長寿命化修繕計画の最適化に向けて基礎情報を蓄積していくものとする。なお、最適化に向けての留意点及び対応方針を表-5に示す。

表-5 最適化に向けた留意点

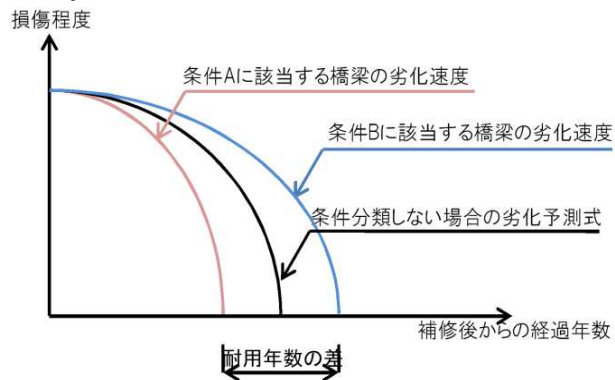
課題・留意点	内容
劣化の進展を踏まえた短期計画の策定	<p>短期計画は過年度の橋梁点検結果に基づいて策定を行うことから、短期計画における対策時期と点検時期に開きがある場合、実施段階においては劣化の進展により当初想定した対策内容や修繕費と乖離が生じる可能性がある。</p> <p>そのため、短期計画策定時には、経年に伴う劣化の進展に留意する必要がある。</p>  <p style="text-align: center;">▲劣化の進展に伴う修繕費の増加</p>
点検結果の考慮	<p>現行の中長期シミュレーションは、シナリオ毎に設定した対策工法別の耐用年数のサイクルで、架設年以降の修繕が繰り返されているとの仮定により事業費の積み上げを実施している。そのため、点検実施時点での損傷状態は、実情とシミュレーションとで差異が生じる。</p> <p>そのため、点検結果に基づいて、劣化予測式の補正を行うことが望ましい。なお、補正方法としては「①劣化予測式を水平スライドする方法」や「②劣化予測式の勾配を変化させる方法」とがある。</p>  <p style="text-align: center;">劣化予測式の補正方法（点検による場合）</p>
損傷等級ごとの損傷割合の把握	<p>損傷割合が適用される損傷（剥離・鉄筋露出やひびわれ）に対する損傷割合の分析に際しては、要素単位の点検結果に基づいて算定している。しかし、現行の点検要領では、端部又は支間中央部の分類で点検結果を整理することから、詳細な損傷割合の把握が困難である。そのため、以下の手順により損傷割合の分析を行うことが望ましい。</p> <p>①点検結果より、損傷等級（a～e）及び年数を把握する。但し、この段階で分析はしない。</p> <p>②補修実施及び補修数量（損傷割合）のデータ蓄積を行う。</p> <p>③①及び②の情報を用いて損傷割合を算定する。</p>

<p>中長期計画と短期計画との整合 (実情との整合)</p>	<p>中長期計画により最適なシナリオ（予算計画）を把握し、短期計画では予算の範囲内で対策区分Ⅳから順次実施していくこととしている。そのため、中長期計画で想定した対策時期と実際の対策時期は整合が取れていないのが現状である。実際の対策時期が、中長期計画上の対策時期より先送りされた場合、劣化の進展による工法の見直し及び費用の増加が生じる。逆に中長期計画上の対策時期より前倒しされた場合、修繕費の縮減が可能となる。</p> <p>このように、長寿命化修繕計画の策定に際しては、中長期計画と短期計画の整合を図ることが重要であるが、全橋に対して上記のシミュレーション（繰り返し計算）を行うためには、システムの構築が必要となる。</p> <pre> graph TD START([START]) --> T[計画策定期間Tの設定] T --> S[シナリオの設定] S --> LCC[個別橋梁のLCC最小化] LCC --> D1{t年のLCC ≤ 予算} D1 -- NO --> PE[優先度評価] D1 -- YES --> T2[t年目の対策工法の設定 (t=1, 2, 3, ..., T)] PE --> T2 T2 --> D2{t = T となったか} D2 -- YES --> SP[修繕計画の保存] D2 -- NO --> T3[t = t+1年とし LCCの最小化] SP --> SC[シナリオの変更] SC --> END([END]) T3 --> LCC </pre> <p>シミュレーションの流れ</p>
<p>補修履歴の蓄積</p>	<p>劣化予測式の設定は、補修後からの点検実施年までの経過年数（補修未実施の橋梁については架設後からの経過年数）と損傷の程度を基に行うが、補修履歴を無視して予測式を設定した場合、見かけ上の劣化速度は遅く評価される（下図参照）。そのため、補修履歴を継続的に蓄積する必要がある。</p>



パターン化に必要な諸元の収集・整理

劣化速度は、構造諸元や架橋位置における環境条件、使用条件等により異なるが、条件別に劣化予測式を設定しなかった場合、予測上の劣化の進展と実情の傾向に大きな乖離が生じる。



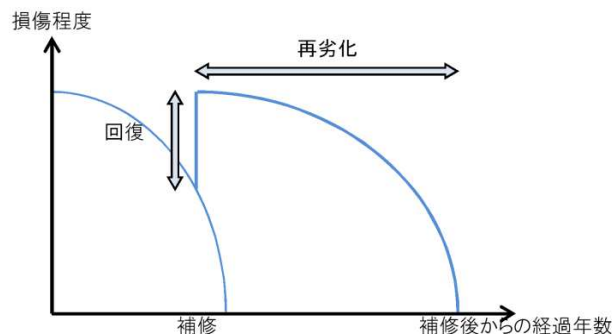
そのため、現段階で想定される劣化速度に影響を与える項目について、データを蓄積することが望ましい。

▼データ蓄積項目例

劣化要因	データ蓄積項目
腐食	塗装系, 塩害対策区分, 海岸線距離, 飛来塩分量, 雨量, 湿度
塩害	塩害対策区分, 海岸線距離, 飛来塩分量, 凍結防止剤散布量
凍害	気温, 方位(日射条件)
RC床版の疲労	大型車交通量, 橋面防水工の実施状況
その他	構造諸元, 縦断勾配, 横断勾配, 桁下条件

補修・補強後の回復度や再劣化予測の評価

補修・補強を実施した部材の回復度合いや再劣化予測の評価は確立されていないため、劣化予測式の設定する上で留意する必要があるとともに、補修履歴の継続的把握及び補修後のモニタリングの実施等により、効果について分析を行う必要がある。



山形県の劣化予測式を用いて中長期シミュレーションを行う場合の留意点

限られたデータのみでの劣化予測式となっているため、今後必要なデータを蓄積していくことで最適化を図っていく必要がある。最適化に向けた部材ごとの課題を下表に示す。

▼劣化予測式における課題

対象部材	損傷の種類	設定根拠	課題、留意点	今後整理が必要なデータ
主構(鋼橋)	腐食	既往点検結果に基づく劣化予測	<ul style="list-style-type: none"> データ数の不足により塗装系や部位(端部、支間中央部等)、架橋位置(庄内、内陸等)ごとの分析ができていないため、全ての条件を一括りにした予測式となっている。 塗装履歴を考慮した分析ができていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 塗装履歴 端部、支間中央部ごとの評価 塗装系、素地調整、耐候性鋼材、普通鋼材の区分 伸縮装置非排水化の有無ごとの評価 飛来塩分、凍結防止剤散布による影響
主構(PC, RC)下部工	剥離・鉄筋露出	既往点検結果に基づく劣化予測	<ul style="list-style-type: none"> 補修後の再劣化については分析できていない。 実際に補修が必要な損傷についての情報が不足している。 	<ul style="list-style-type: none"> 補修履歴 劣化要因の区分 補修実績と損傷の種類の関係 飛来塩分、凍結防止剤散布による影響
床版	床版ひび割れ剥離・鉄筋露出	既往点検結果に基づく劣化予測	<ul style="list-style-type: none"> 防水層の設置有無を考慮した分析ができていない。 床版ひび割れでD, Eランクに至っている橋が少なくCランク以後の劣化速度は信頼性に欠ける。 	<ul style="list-style-type: none"> 補修履歴 防水層の有無ごとの評価 適用示方書、大型車交通量、凍結防止剤散布による影響
支承	—	協会発行図書の鋼製支承の耐用年数を採用	<ul style="list-style-type: none"> 山形県の地域特性に応じた分析を行っていない。 台帳上、鋼製支承とゴム支承の区分が無いため、シミュレーション上は鋼製支承＝橋長15m以上の全橋と仮定している。 	<ul style="list-style-type: none"> 補修履歴 鋼製支承、ゴム支承の区分 伸縮装置非排水化の有無ごとの評価 飛来塩分、凍結防止剤散布による影響
伸縮装置	—	協会発行図書の耐用年数を採用	<ul style="list-style-type: none"> 山形県の地域特性に応じた分析を行っていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 補修履歴 タイプ(鋼製、ゴム)や製品に応じた耐用年数の評価
高欄・地覆	—	協会発行図書の高欄の耐用年数を採用	<ul style="list-style-type: none"> 山形県の地域特性に応じた分析を行っていない。 全橋地覆打ち換えを伴う高欄交換でシミュレーションを行っている。 	<ul style="list-style-type: none"> 補修履歴 地覆、高欄ごとの評価 飛来塩分、凍結防止剤散布による影響