

(136) PC橋のライフサイクルコスト算出手法に関する検討

建設省土木研究所 正会員 ○廣松 新
 同 西川 和廣
 同 内田 賢一
 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 伊藤 公彦

1. 背景と目的

我が国の道路橋数は、既に13万（橋長15m以上）を超えており、将来の架換えコストおよび維持管理コストの増大が懸念されるが、その負担軽減の手段として、ライフサイクルコスト（以下LCC）による経済性の評価手法が注目されている。筆者らは、過去に鋼橋のLCCに関する検討を行い、LCCの概念も普及しつつあるが、PC橋のLCCに関しては、鋼橋の考え方をそのまま適用できない部分もあり、これまで本格的な検討は行ってこなかった。本研究は、PC橋のLCC算出手法の確立を最終目標に、その端緒として、PC橋の特性を考慮したLCC算出の基本的な考え方の提案と、それに基づく建設後100年間のLCC試算をモデル橋に対して実施したものである。なお、本研究は建設省土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会で行っている「ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究」の一環として行った。

2. LCC算出の基本的な考え方

(1)LCCの定義

本研究におけるLCCは、これまでの鋼橋における研究にならない、十分長いLCC算出期間内に想定される、初期建設コスト、維持管理コスト、更新（架換え）コストの和で表すこととした。ここで、維持管理コストの内容は、本体補修コスト、付属物コスト、点検コストを想定している。また、更新（架換え）コストの内容は、橋の撤去から新設橋の建設に至るまでのコストを想定している。

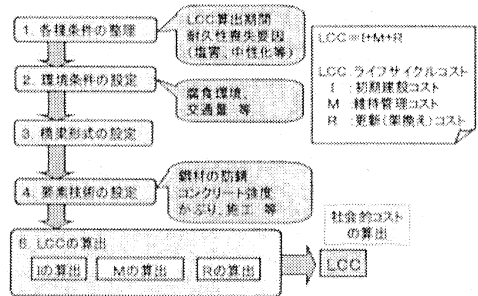


図-1 LCC算出フロー

本研究では、LCC算定期間中の物価の変動や、この間の新材料、新工法等の開発は考慮せず、現時点での単価と工法を用いてコストの試算を行うこととした。

また、架換えや補修工事中の渋滞などによる社会的損失も考慮することが望ましいが、現時点では定量化の手法は確立されておらず、本研究では取り扱わないこととした。

(2)LCC算出手順

図-1に、本研究におけるLCC算出フローを示す。まず、LCC算出期間や耐久性喪失要因の整理を行い、次に、対象とする橋梁の環境条件を設定後、モデル橋の橋梁形式を設定した。続いて、想定した耐久性喪失要因に対応した要素技術（使用材料と耐久性に関わる項目）を設定し、最後に要素技術の効果を反映させて初期建設コスト、維持管理コスト、更新（架換え）コストを算出し、これらを合計してLCCとした。

(3)LCC算出におけるPC橋と鋼橋との違い

筆者らが過去に実施した、鋼橋のLCC算出の際には、橋本体を主桁や床版といったパーツを組合せたものとみなし、それらを適切に維持管理すれば橋全体としての耐久性を確保できると考え、橋本体のLCCを算出した。これに対してPC橋は、PC鋼材と鉄筋がコンクリートに包まれた一体構造であり、コンクリー

ト内部の PC 鋼材と鉄筋の状況が目視では確認できない。したがって、パーツ毎での維持管理や LCC の算出は不可能であり、鋼橋の LCC の考え方をそのまま適用することができない。本研究では、この点を考慮した、PC 橋の LCC 算出手法を提案することとした。

3. LCCの試算

3.1 試算における各種条件

LCC の算定期間は、更新コストを反映できる十分長い期間として、建設後 100 年間とした。

PC 橋本体の損傷要因としては、塩害、中性化、凍結融解作用、アルカリ骨材反応、疲労損傷、事故、地震等が考えられるが、本研究では、耐久性喪失要因としては中性化および塩害に起因する鋼材の腐食のみを想定することとした。

LCC 算出にあたって、PC 橋本体および付属物の耐久性に影響を及ぼすパラメータとして、環境条件（腐食環境、交通量等）、橋種、要素技術を想定した。これらのパラメータに関して、耐久性および LCC の評価の考え方を明確にするため、各パラメータを変えて、それらを適当に組合せたモデル橋を設定し、LCC の試算を実施することとした。

3.2 環境条件の設定

表-1 設定した環境条件

表-1に、本研究で想定した環境条件を示す。腐食環境と凍結融解剤の散布の有無および交通量をパラメータとして、山間部、都市部、海岸部の 3 種類の環境条件を設定

環境条件	腐食環境	凍結融解剤の散布	交通量	備考
山間部	良好	有り	比較的少	腐食条件は良好だが、凍結融解剤を散布する地域を想定
都市部	良好	なし	比較的多	中性化の進行が山間部より若干早いと仮定
海岸部	非常に厳しい	なし	比較的少	飛沫帯を想定

した。各環境における PC 橋本体の耐久性喪失要因は、山間部と都市部では中性化に起因する鋼材の腐食を、海岸部では塩害に起因する鋼材の腐食を想定した。交通量は、付属物の耐用年数のみに影響すると仮定した。

3.3 橋梁形式の設定

表-2 環境条件と橋梁形式の組合せ

橋梁形式は、PC 橋の中で実績の多いポストテンション T 桁橋、箱桁橋、中空床版橋の 3 形式を選定した。適用事例等を考慮して、先に設定した各環境に対し 2 形式ずつ選定を行い、計 6 組の組合せを設定した。表-2に、設定した環境条件と橋梁形式の組合せを示す。

No.	環境条件	橋梁形式	橋長	支間長
1	山間部	3径間連続PC箱桁橋	121.5m	40m
2	山間部	ポストテンション単純T桁橋	30.88m	30m
3	都市部	ポストテンション単純T桁橋	30.88m	30m
4	都市部	3径間連続PC中空床版橋	75m	25m
5	海岸部	3径間連続PC箱桁橋	121.5m	40m
6	海岸部	ポストテンション単純T桁橋	30.88m	30m

3.4 要素技術の設定

(1) 標準橋とミニマムメンテナンス橋

要素技術を変えたり、新たに導入することにより、LCC が変動すると考えられる。その影響を評価するために、想定した環境条件と橋種の組合せに対して、標準橋とミニマムメンテナンス橋（以下 MM 橋）の 2 タイプのモデルを設定して LCC の試算を行うこととした。標準橋は、標準的な設計・施工を前提とした橋梁を想定し、MM 橋は、最小限の維持管理で最大限の長寿命化をめざし、耐久性喪失要因の対策となる要素技術を導入する橋梁を想定した。また、MM 橋では要素技術の導入に加えて高度な施工管理の実施と定期的な劣化度調査と維持管理計画の修正を行うことを想定した。

(2) モデル橋の要素技術の選定

標準橋の要素技術は現行基準を適用したものを想定した。これに対し、MM 橋では、長寿命化を図るため、全モデルでコンクリート強度を標準橋より高めた。これは、間接的に水セメント比を小さくし、想定した耐久性喪失要因である中性化と塩害の進行を遅くするためである。コンクリート強度を上げることで施工

性が低下しないように、あわせて MM 橋のスランブを標準橋より 4cm 増やして 12cm とした。また、MM 橋では舗装の耐久性を向上させるために改質アスファルトを用いることとした。以上を基本とし、各環境条件に合わせて以下のように要素技術を選定した。

1) 山間部および都市部

かぶりを増加することが比較的容易な箱桁橋と中空床版橋では、中性化が鉄筋位置に達する時期を遅くするために、MM 橋のかぶりを標準橋の 15mm 増とした。ただし、T 桁橋の MM 橋では標準桁の断面や配筋を変えないこととし、エポキシ塗装鉄筋を使用することとした。

山間部においては、凍結防止剤の散布による床版部への塩分の浸透が懸念される。橋面防水工は標準橋でも実施しているが、長寿命化を図った MM 橋では、さらに床版部の PC 鋼材のシースをポリエチレン製とし、2重防食とした。

2) 海岸部

標準橋の要素技術は、塩害対策指針(案)⁹⁾に準拠して決定し、箱桁橋ではかぶりを 70mm とし、T 桁橋では標準桁の断面や配筋を変えないこととし、エポキシ塗装鉄筋を使用することとした。非常に厳しい腐食環境下では、塩害による損傷が顕在化した場合、延命が困難であることが過去の事例からも明らかになっているため、長寿命化を図った MM 橋では、塩分をコンクリート内部に浸透させないことと、仮に塩分が浸透しても鋼材を腐食させないという 2重防食の考え方を基本に要素技術を選定した。具体的には、コンクリート塗装を実施し塩化物の遮断を図った上で、さらにエポキシ塗装鉄筋とエポキシ塗装 PC 鋼材およびポリエチレンシースを採用し、鋼材を防錆することとした。表-3に、モデル橋に採用した要素技術を示す。

表-2(a) 要素技術表(No.1 山間部箱桁橋)

本体工要素技術項目	標準橋	MM橋
主桁コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 50\text{N/mm}^2$
スランブ	8cm	12cm
鉄筋	普通鉄筋	鋼索
かぶり	35mm	50mm
シース管(主桁ウェブ、横筋部)	鋼製シース	同左
シース管(床版部)	鋼製シース	ポリエチレンシース
PC鋼材	普通PC鋼材	同左
コンクリート塗装	無し	同左
舗装工	普通アスファルト	改質アスファルト
橋面防水工	有り	同左

表-2(b) 要素技術表(No.2 山間部T桁橋)

本体工要素技術項目	標準橋	MM橋
主桁コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 50\text{N/mm}^2$
横組工コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 30\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$
スランブ	8cm	12cm
鉄筋	普通鉄筋	エポキシ塗装鉄筋
かぶり	35mm	同左
シース管(主桁ウェブ、横筋部)	鋼製シース	同左
シース管(床版部)	鋼製シース	ポリエチレンシース
PC鋼材	普通PC鋼材	同左
コンクリート塗装	無し	同左
舗装工	普通アスファルト	改質アスファルト
橋面防水工	有り	同左

表-2(c) 要素技術表(No.3 都市部T桁橋)

本体工要素技術項目	標準橋	MM橋
主桁コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 50\text{N/mm}^2$
横組工コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 30\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$
スランブ	8cm	12cm
鉄筋	普通鉄筋	エポキシ塗装鉄筋
かぶり	35mm	同左
シース管(主桁ウェブ、横筋部)	鋼製シース	同左
シース管(床版部)	鋼製シース	同左
PC鋼材	普通PC鋼材	同左
コンクリート塗装	無し	同左
舗装工	普通アスファルト	改質アスファルト
橋面防水工	有り	同左

表-2(d) 要素技術表(No.4 都市部中空床版橋)

本体工要素技術項目	標準橋	MM橋
主桁コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 50\text{N/mm}^2$
スランブ	8cm	12cm
鉄筋	普通鉄筋	同左
かぶり	35mm	50mm
シース管	鋼製シース	同左
PC鋼材	普通PC鋼材	同左
コンクリート塗装	無し	同左
舗装工	普通アスファルト	改質アスファルト
橋面防水工	有り	同左

表-2(e) 要素技術表(No.5 海岸部箱桁橋)

本体工要素技術項目	標準橋	MM橋
主桁コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 50\text{N/mm}^2$
スランブ	8cm	12cm
鉄筋	普通鉄筋	エポキシ塗装鉄筋
かぶり	35mm	50mm
シース管	鋼製シース	ポリエチレンシース
PC鋼材	普通PC鋼材	エポキシ塗装鋼材
コンクリート塗装	無し	有り
舗装工	普通アスファルト	改質アスファルト
橋面防水工	有り	同左

表-2(f) 要素技術表(No.6 海岸部T桁橋)

本体工要素技術項目	標準橋	MM橋
主桁コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 50\text{N/mm}^2$
横組工コンクリート強度	$\sigma_{ck} \geq 30\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$
スランブ	8cm	12cm
鉄筋	エポキシ塗装鉄筋	エポキシ塗装鉄筋
かぶり	35mm	同左
シース管(主桁ウェブ、横筋部)	鋼製シース	ポリエチレンシース
シース管(床版部)	鋼製シース	ポリエチレンシース
PC鋼材	普通PC鋼材	エポキシ塗装鋼材
コンクリート塗装	無し	有り
舗装工	普通アスファルト	改質アスファルト
橋面防水工	有り	同左

3.5 LCCの算出

(1) 初期建設コスト

初期建設コストは、標準橋では、各橋種毎に主要数量を算出して現行基準に準じて積算を行った。MM橋には、標準橋から材料単価が変わるものについては適宜修正するとともに、積算基準がないものについてはヒアリングにより単価を決定し積算を行った。さらに、MM橋では高度な施工管理費用分として、全体工費を割増することとした。

(2) 維持管理コスト

維持管理コストは、本体補修コストと付属物コストと点検コストで構成される。表-4に、維持管理コストの試算条件を示す。以下、各コストの算出根拠について述べる。

表-4 維持管理コスト試算条件

	山間部		都市部		海岸部		備考(数値の設定根拠等)			
	標準橋	MM橋	標準橋	MM橋	標準橋	MM橋				
本体 関連	本体工	時期	25年	60年	20年	50年	20年	50年	かぶり量、エポキシ鉄筋、外面塗装の適用の有無より、標準橋とMM橋に格差を設定。	
		内容	断面修復(修復深さはかぶりと同数値)						全面吊り足場を想定、MM橋は足場設置費用を20%低減。	
	本体工(T桁のみ)	面積	20%	10%(5%)	20%	10%(5%)	100%	5%	高度な施工管理により、MM橋は補修面積低減。()内はエポキシ塗装鉄筋使用時	
		内容	後打ち床版部打継目のひびわれに対する樹脂注入						断面補修と同時期と仮定	
付属 物 関連	コンクリート塗装塗り替え	延長	20%	10%	20%	10%	20%	10%	目地延長に対する比率	
		時期	100年						50年	ヒアリング結果より設定。全面塗り替えを想定。
	支保工	時期	100年							文献③を参考に設定。標準橋とMM橋は同じ仕様のものを設定。
	伸縮装置工	時期	30年							ヒアリング結果より設定。標準橋とMM橋は同じ仕様のものを設定。
橋梁点検	舗装工	時期	15年	20年	10年	15年	15年	20年	文献③を参考に、交通環境と舗装仕様の違いを考慮し設定。	
	橋面防水工	時期	舗装工の補修時と同様							文献③を参考に設定。
	橋梁点検	時期	10年に1回							文献②を参考に設定。補修前の点検コストは20%増

注1) 表中の時期については本体工は建設後の経年数、その他は建設後の補修、点検サイクルである。

注2) 表中の補修面積は桁表面積に対する比率である。

注3) 付属物関連の補修は、全交換を想定。

注4) 舗装工の仕様は、標準橋は普通アスファルト舗装、MM橋は改質アスファルト舗装である。

1) 本体補修コスト

本体補修に関しては、比較的早期に劣化が顕在化する橋梁を想定し、損傷状況、補修時期、補修数量、補修内容を以下のように仮定し、現行基準に準じて積算した。

i) 損傷状況

損傷状況は、山間部、都市部では中性化、海岸部では塩害に起因して、最外縁の鋼材が腐食し、また T桁橋の後打ち床版部の打継目にひびわれが発生するものとした。

ii) 補修時期

山間部と都市部においては、文献 6) を参考に、都市部の標準橋(かぶり 35mm)では建設後 20 年、山間部の標準橋では建設後 25 年で補修を行うと仮定した。MM 橋では、かぶり増、またはエポキシ鉄筋の採用により補修時期が標準橋より遅れると仮定した。補修時期は、かぶり増で対応する場合、中性化の進行深さは時間の平方根に比例し、中性化残り 10mm で腐食すると仮定し、都市部で 50 年、山間部で 60 年とした。エポキシ塗装鉄筋で対応する橋梁に関しては、実績データが少ないため、かぶりを増したものと同時期に補修を行うと仮定した。

海岸部においては、標準橋は塩害対策指針(案)⁹⁾に対応した桁ではあるが、建設後 20 年で補修を行うと仮定した。MM 橋では、採用したコンクリート塗装の塗り替え時期を建設後 50 年(ヒアリング結果より設定)としており、その時に損傷が現れている部分を補修することとした。

T 桁橋の後打ち床版部の打継目に発生したひびわれに対する補修は、全て鋼材腐食に対する補修と同時期に行うこととした。

iii) 補修数量

山間部と都市部においては、文献 6) を参考に、標準橋は桁下面および側面の表面積(以下表面積)の 20% を補修すると仮定した。また、T 桁橋の後打ち床版部の打継目においては、目地部延長の 20% に対し補修すると仮定した。MM 橋では、高度な施工(施工管理)を実施することにより、補修面積が表面積の 10% に、T 桁橋の後打ち床版部の打継目の補修延長は目地延長の 10% になると仮定した。ただし、エポキシ

塗装鉄筋を使用した場合は、鉄筋塗装のピンホール部分の腐食に対する補修を実施すると考え、補修面積を表面積の5%とした。

海岸部においては、劣化の顕在化が部分的なものであっても、塩分が橋梁本体の全体に浸透している可能性があるため、標準橋では箱桁橋、T桁橋とも、表面積の全範囲を補修すると考えた。MM橋の場合は、コンクリート塗装を採用しており、鉄筋塗装のピンホール部分の腐食に対する補修のみを行うと考え、補修面積は表面積の5%とした。T桁橋の後打ち床版部の打継目部の補修に関しては山間部、都市部と同様に補修延長を仮定した。

iv)補修内容

鋼材腐食に対する補修内容は、ハツリ工、鉄筋防錆、断面修復、外面塗装工を考慮した。T桁橋の後打ち床版部の打継目のひびわれに対しては、樹脂注入工を想定した。また補修時には全面吊り足場を設置すると仮定した。

2)付属物コスト

付属物に関するコストとして、支承工、伸縮装置工、舗装工、防水工を想定した。付属物の耐用年数とコストについては、文献3)を参考に数値を決定した。

3)点検コスト

点検の種類としては、通常点検（路上および路下）と定期点検（遠望および近接）があるが、実際に大きな費用が必要になるのは定期点検（近接）だけであるため、このコストのみを計上した。点検頻度は文献2)を参考に1回/10年とし、一回の点検コストは文献3)を参考に橋長を考慮して決定し、補修前の点検コストは20%増とした。なお、標準橋とMM橋の点検内容は同じとした。

(3)更新コスト

架換え時期については、標準橋は比較的早く劣化が進行する橋を想定し、50年で架換えると仮定した。MM橋は耐久性喪失要因の対策となる要素技術の導入に加えて、高度な施工管理の実施、および定期的な劣化度調査を行い、維持管理計画を適宜修正することを前提としているため、建設後100年間では架換えの必要は生じないと仮定した。標準橋の更新コストは、文献3)を参考に、初期建設コストの3倍を計上した。

3.6 LCC試算結果

図-2にLCCの試算結果を示す。図中のLCCの値は、標準橋の初期建設コストを1としたときの比率（以下LCC比率）である。以下、LCC比率に着目して試算結果の概要および考察を述べる。

架橋環境と橋種が同じ場合、MM橋は標準橋と比較して初期建設コストは山間部および都市部で9~16%、海岸部で22~44%増加したが、LCC比率では全てのケースで標準橋を大きく下回り、本試算においては、耐久性向上に関する要素技術を導入して長寿命化を図ったMM橋とすることが正当化される結果となった。これは、架換えの有無が最も大きく影響しており、次に本体補修費の差が影響している。

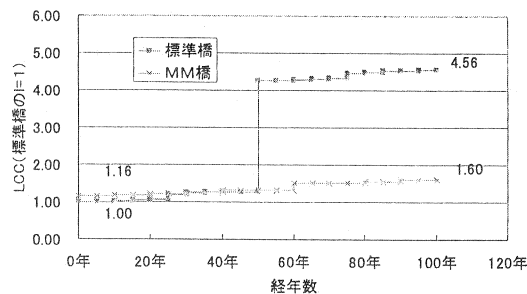


図-2(a) LCC試算結果(No.1 山間部箱桁橋)

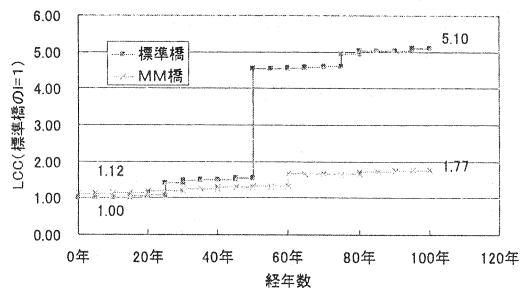


図-2(b) LCC試算結果(No.2 山間部T桁橋)

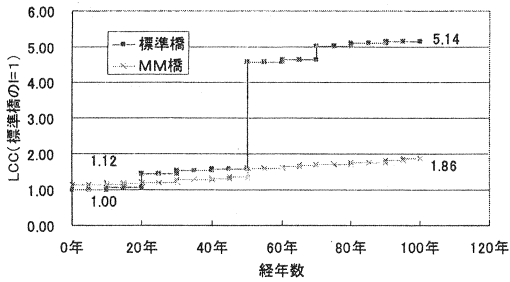


図-2(c) LCC試算結果(No.3 都市部T桁橋)

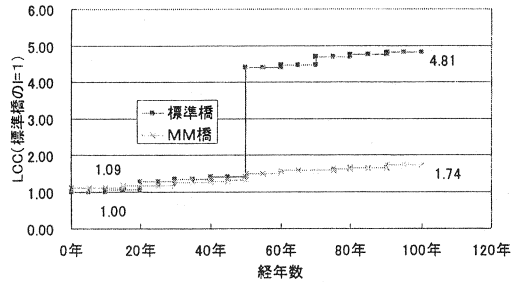


図-2(d) LCC試算結果(No.4 都市部中空床版橋)

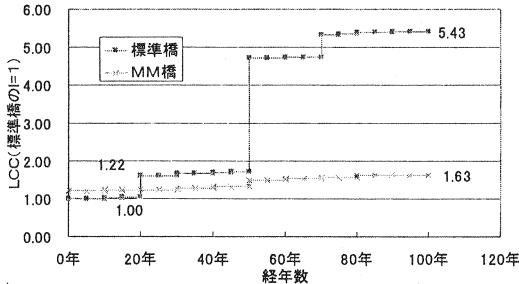


図-2(e) LCC試算結果(No.5 海岸部箱桁橋)

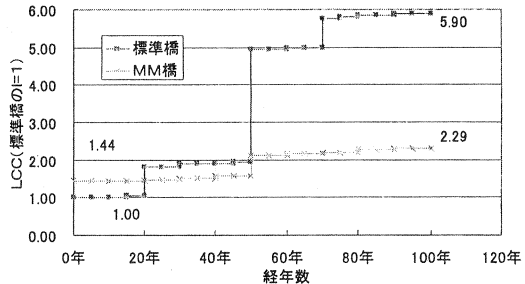


図-2(f) LCC試算結果(No.6 海岸部T桁橋)

標準橋同士およびMM橋同士の、同環境条件下でのT桁橋とそれ以外の橋梁形式のLCC比率を比較すると、全ケースで、T桁橋のLCC比率が他の橋種のLCC比率を上回る結果となった。これはT桁橋は他の橋梁形式よりも相対的な表面積が大きく、相対的な補修コストが高くなったことと、T桁橋は床版後打ち部の補修コストを別途計上することを想定したことが主な要因である。LCC比率が小さかったのは山間部箱桁橋のMM橋と海岸部箱桁橋のMM橋であった。これはT桁橋とは逆に、箱桁橋では相対的な表面積が小さいため、相対的な補修コストが他の橋梁形式よりも低くなったためである。

4. まとめと今後の課題

本研究では、PC橋の特性を考慮したライフサイクルコスト(LCC)算出の基本的な考え方を提案した。また、提案に基づき、異なる環境条件と橋種を組合せ、各組合せ毎に、標準的な設計施工を想定した橋梁(標準橋)と、最小限の維持管理で最大限の長寿命化をめざして要素技術を導入した橋梁(ミニマムメンテナンス橋)の2種類のモデル橋を設定し、モデル橋に対して100年間のLCC試算を行った。

本研究でのLCC試算においては、架換え年数、補修時期、補修数量等に関しては、現在入手できるデータをもとにした仮定の数値を用いて評価しているが、今後は詳細な実態調査のデータ等をもとにLCCに関する諸数値を提案していく予定である。また本研究では、各環境と橋梁形式の組合せに対して標準橋とMM橋の2パターンでしか試算を行わなかったが、今後は要素技術の組合せを変えてLCC評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 西川他：橋梁の架替に関する調査結果(Ⅲ),建設省土木研究所資料第3512号,1997.10
- 2) 佐伯,藤原他：橋梁点検要領(案),建設省土木研究所資料第2651号,1988.7
- 3) 西川他：ミニマムメンテナンス橋に関する検討,建設省土木研究所資料第3506号,1997.6
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ コンクリート橋編,1996.12
- 5) (社)日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説,1984.2
- 6) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会九州支部：橋梁調査報告書,1994.3