

論文 劣化予測式の違いが道路橋群のLCC算定および年度コスト平準化に与える影響

西村 昌朗*1・服部 篤史*2・河野 広隆*3

要旨: 社会基盤構造物のアセットマネジメントにおいては、ライフサイクルコスト（以下、LCC）算定や年度コスト平準化が重要となる。これらを行うには劣化予測が必要となるが、劣化予測手法として上に凸な2次曲線を用いる例が多い。しかし、実際にはさまざまな劣化機構が存在しており、これ以外の劣化曲線についても検討してみる必要があると考える。以上より、劣化予測式を変化させ、道路橋群のLCCおよび年度コスト平準化に与える影響について検討した。その結果、劣化曲線形状を1次式とした場合や耐久年を短く設定した場合に、平準化がより進んだ。また、大規模橋梁が存在すると、穏やかな劣化を想定した場合の平準化達成度は低かった。

キーワード: 劣化予測式, 道路橋群, LCC, 年度コスト平準化

1. はじめに

限られた予算、人員の下で社会基盤構造物を適切に維持管理するために、アセットマネジメントの概念が注目されている。アセットマネジメントシステムを構成するステップには、LCC算定や年度コスト平準化があるが、それらを行う際にはまず劣化予測を行わねばならない。

劣化予測手法には、劣化のメカニズムに基づく物理・化学モデル式¹⁾、実構造物の測定データの統計処理による式²⁾、簡易な既定形の式の当てはめ^{3~6)}、などの方法がある。これらのうち、構造物に対する維持管理のシナリオについて専門家および一般市民の両者へのアカウンタビリティを適切に果たす必要性を考慮すると、劣化のメカニズムに基づく物理・化学モデル式を用いることが理想であると考えられる。しかし、構造物の種々の劣化機構（例えば、コンクリート構造物の塩害など）ごとの劣化過程のモデル式は全過程にわたっては必ずしも明らかになっていないのも実情である。

そこで、技術的・経済的に取り掛かりやすいという意味で実用的な手法として、健全度（1~5の5段階などで表現）の経時変化に簡易な既定形の式を当てはめる方法が検討されている。この方法を用いるにあたっては、図-1に示すような座標系において、塩害劣化を想定したと思われる上に凸な2次曲線を用いる例が多い^{3~6)}。しかし、実際には塩害以外にさまざまな劣化機構が存在しており、劣化曲線の形状を変えて2次曲線以外の劣化曲線についても検討してみる必要があると考える。

これらの劣化予測に基づいてLCCが算出され、その総額が構造物群の管理者にとって妥当な値（最小値）でも、年度によってコストの変動が激しい場合がある。このとき平準化の操作を行うことで、年度コストのばらつきを抑え、より無理のない予算計画を策定することができる。

劣化予測手法を変化させた場合、LCCおよび年度コスト平準化操作に影響を与えることが予想されるが、その影響がどの程度のものなのかは未だ分かっていない。

よって、本研究では劣化予測手法の違いがLCCおよび年度コスト平準化に与える影響について検討することとした。劣化予測手法としては、先述の健全度の経時変化に簡易な既定形の式を当てはめる方法を採用した。そのうえで、劣化予測手法の違いを出すために、物理・化学モデル式を念頭に既定形の式の形や耐久年をパラメータとして変化させた。これらに基づいて、LCC算定と年度コスト平準化操作を行い、これらに対するパラメータの影響について検討した。

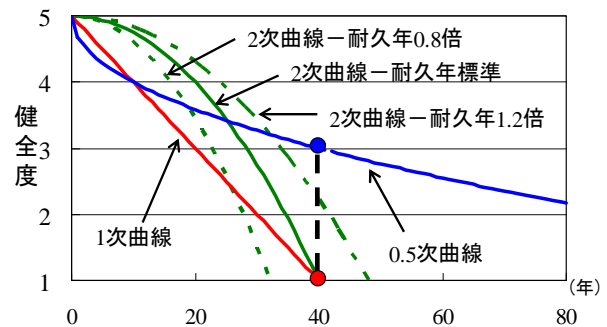


図-1 劣化曲線形状の例

表-1 LCC算出における検討要因

検討要因	本研究での条件	
	条件数	備考
劣化曲線形状	3	2次式, 1次式, 0.5次式
耐久年	3	基準および, その1.2倍, 0.8倍
対策シナリオ	3	使い捨て型, 対症療法型, 危機管理型

*1 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 修士課程 (正会員)
 *2 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 准教授 (正会員)
 *3 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 教授 (正会員)

表-2 対策シナリオの例（コンクリート橋主桁・床版）

健全度	使い捨て型			対症療法型			危機管理型		
	対策工法	対策後健全度	対策後耐久年	対策工法	対策後健全度	対策後耐久年	対策工法	対策後健全度	対策後耐久年
4, 5	対策なし			対策なし			対策なし		
3	対策なし			対策なし			電気防食 + 表面被覆	4	40年(基準) 48年(1.2倍) 32年(0.8倍)
2	対策なし			断面修復 + 表面被覆	4	10年(基準) 12年(1.2倍) 8年(0.8倍)	断面修復 + 表面被覆	4	10年(基準) 12年(1.2倍) 8年(0.8倍)
1	架替え (床版・支承)	5	100年(基準) 120年(1.2倍) 80年(0.8倍)	架替え (床版・支承)	5	100年(基準) 120年(1.2倍) 80年(0.8倍)	架替え (床版・支承)	5	100年(基準) 120年(1.2倍) 80年(0.8倍)

2. 研究概要

2.1 検討要因

LCC算出の検討要因を表-1に示す。劣化曲線とする既定形の式の形として、既往の研究で用いられている2次式に加え、1次式（耐久年を同一とした場合に初期の劣化速度が速くなる）および0.5次式（他の式において耐久年を迎えた時点で健全度が3とした式であり、最も緩やかな劣化速度となるように設定）を用いた。耐久年を40年とした場合のこれらの劣化曲線の例を図-1に示す。2次式は塩害による劣化、1次式は疲労による劣化、0.5次式は中性化による劣化を想定した式である。

ここで耐久年（対策前または対策後）とは、それぞれ建設時の健全度=5または対策後の健全度（表-2参照）から、損傷が著しく交通の安全確保の支障となる恐れがあると判断される健全度=1まで健全度が低下する期間のことである。基準の耐久年は既往の研究を参考にして部材種類や対策工法ごとに与えた。今回、感度分析を行うために、基準の耐久年を一律に0.8, 1.2倍にそれぞれ変化させた値も設定した。

どのタイミングにどのような対策を行うかを決定する対策シナリオについては、対象とする道路橋群で一律に、基本的に維持管理を行わない使い捨て型、事後保全的な対症療法型、予防保全的な危機管理型の3種類とした。

以上の27パターンに対して、LCCを算出した。

2.2 LCC算出方法

既往の研究⁴⁾で用いられた仮想のコンクリート製、鋼製の道路橋群（18橋43径間）を対象とし、部材は主桁、床版、支承に限定した。LCC算定期間は100年間とし、この期間にかかる維持管理コストをLCCとして算出した。また、LCC算定期間開始時点において、いくつかの部材がある程度劣化した状況と想定しているため、全ての部材が健全度=5から始まるわけではない。対策シナリオと工事単価の一例をそれぞれ表-2、表-3に示す。

例えば、基準の耐久年を用いた場合に対策シナリオを対症療法型とするとき、健全度が2を下回る前の年に

表-3 単価設定の例（コンクリート橋主桁・床版）

対策工法	単価設定	
	単位	単価(千円)
断面修復	m ²	87
表面被覆	"	13
電気防食	"	120
更新(架替え)	"	1000

表-4 橋梁群のLCC算出結果に対する選定指標と基準

指標と基準	備考
1 欠陥径間率 2%未満	径間内での平均健全度をLCC算定期間内を通じて平均した値が2未満の径間の数の割合
2 最大対策費比 3.0未満	LCC算定期間を通じて最も費用の高い対策工事(1径間・1部材当り)の金額をLCC年平均額で除した値
3 LCC最小	—

「断面修復+表面被覆」を適用し、それにより「対策後健全度」=4まで回復する。対策後の耐久年は対策工法に応じて設定し、この場合は10年として、同じ劣化曲線形状を適用する。

2.3 LCC選定指標と基準

劣化曲線形状、耐久年、対策シナリオをそれぞれ変化させたことで、全27種のパターンを得た。しかし、中には、橋梁群の健全度を適切に維持することができていないものなど、実際の予算策定の場面で棄却されるようなパターンも含まれるので、年度コスト平準化操作を行うべきパターンの選定を行うこととした。

本研究では、健全度と経済性をともに評価することのできるよう、表-4に示す3つの指標および基準をもって年度コスト平準化操作を行うべき対策シナリオの選定を行った。

基準1は欠陥径間率2%未満とした。これは健全度の低い径間の数が0ではないもののわずかである状況を意図したものであり、今回の43径間中に1径間も存在しない条件を設定した。

基準2に関しては、1径間1部材を対象とする対策工

事であるにもかかわらず、橋梁群全体の LCC 年平均額に比して極めて大きな費用を要しているものがあれば、これにより平準化が大きく阻害されると考えられる。よって、根拠は必ずしも明確ではないものの、比較的小さい値の場合に棄却しない基準とともに設定した。

具体的な選定手順としては、劣化曲線形状および耐久年を変化させた 9 種類のパターンにおいて、基準 1, 2 を満たし、かつ、その中で LCC 最小を示した対策シナリオのパターン（基準 3 を満たしたものを）、年度コスト平準化を行うべきパターンに選択した。

2.4 年度コスト平準化の操作方法

図-2 に示すように、予算額（LCC 年平均額に等しいとする）に対し「山」を崩し「谷」を埋めるという考えのもと、対策の「前倒し」「先送り」を行い、年度コスト平準化を行った。

(1) 「前倒し」「先送り」可能な期間

図-3 に示すような劣化曲線に基づいた階段状の「管理曲線」を設定し、同一段にある期間（健全度ランク維持期間）内で「前倒し」「先送り」を行うことにした。管理曲線は、健全度の中間値において、ランクが変化するものとする。つまり、例えば健全度が 2.5~1.5 だと予測される期間内なら、健全度が 2 の時に実施される対策を前倒し、先送りしてもよいとした。

すなわち、簡略化のため、平準化操作を行うことで健全度ランクが遷移することはなく、それに伴う対策工法の変化も考慮しないことにした。

(2) 優先的に前倒しする対策の順位

表-5 に示す方針のもと、対策シナリオごとに表-6 のように設定した。表-5 について、部材種類に関しては、主要部材の対策を優先的に前倒した。健全度に関しては、低いものほど緊急度が高いと考えられるため、健全度が低いものを優先した。今回考慮した劣化機構に対しては、コンクリート橋は鋼橋に比べ単価の高い対策が多いので優先した。

表-6 の朱書き箇所は、初期の健全度ランクが低い場合に発生する対策を示している。

年度コスト平準化操作は、以上のルールに基づいて手作業で行った。ただし、健全度ランク維持期間中のどの年度に対策工事を「前倒し」「先送り」するかという複数の選択肢から、年度コスト平準化操作実施者が先を見通しつつ、どう選択するかによって、さながら将棋のようにそれ以降の状況が大きく変化することもあり、手順は必ずしも一意的に定まらなかった。よって、高い平準化達成度を目指して、3 手進めては 2 手戻すというような試行錯誤を繰り返した。年度コスト平準化操作の終了条件として、どのような手を指しても、次に述べる平準化達成度の評価指標「平準化指標」の変動値が 0.01 を上

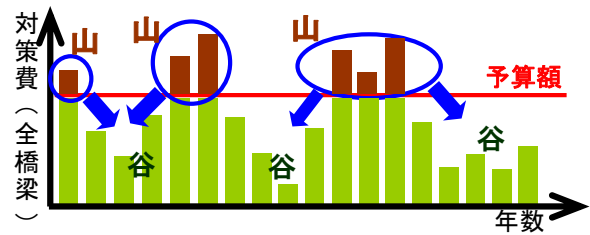


図-2 平準化イメージ³⁾

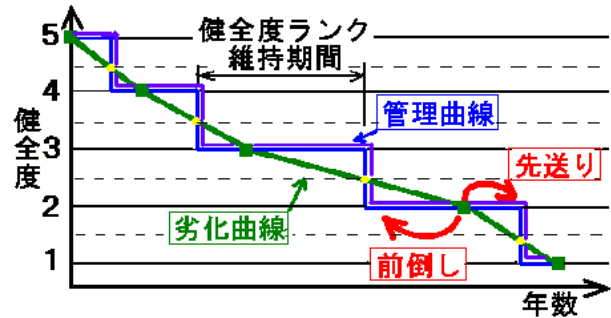


図-3 健全度ランク維持期間

表-5 年度コスト平準化操作における対策時期前倒しの優先順位（方針）

部材種類	健全度	橋梁の種類	対策費	優先順位
主桁	低	コンクリート橋	大	高 ↓ 低
床版	中	リート橋	小	
支承	高	鋼橋		

表-6 年度コスト平準化操作における優先順位の例（危機管理型）

優先順位	橋種	部材	対策工法	対策時健全度
1	コンクリート橋	主桁	架替え	1
2	鋼橋	主桁	架替え	1
3	コンクリート橋	主桁	断面修復 断面修復 +表面被覆	2
4	鋼橋	主桁	塗装塗替 C塗装系	2
5	コンクリート橋	主桁	電気防食 電気防食 +表面被覆	3
6	コンクリート橋	床版	断面修復 断面修復 +表面被覆	2
7	鋼橋	床版	床版打替 合成床版 +床版防水	2
8	コンクリート橋	床版	電気防食 電気防食 +表面被覆	3
9	鋼橋	床版	接着工法 繊維シート接着 +床版防水	3
10	—	支承	支承取替 ゴム支承	1.5
11	—	支承	塗装塗替 C塗装系	2

回らないときとし、結果が作為的にならぬよう配慮した。

2.5 平準化達成度の評価指標^{4), 6)}

各年度コストが予算額を超過しても大幅に下回っても、事業の連続性の観点から望ましくない。また、同じく、突発的な大コストも許容することはできない。

表-7 LCC算出結果

No.	劣化曲線			ライフサイクルコスト選定指標						総合評価	今回実施したパターン
	曲線形状	耐久年(倍率)	対策シナリオ	欠陥径間率 (%)	判定	最大対策費比	判定	LCC年平均額 (百万円)	判定		
1	0.5次式	0.8	使い捨て	18.0	×	10.2	×	144.7	—	×	
2			対症療法	0.6	○	2.04	○	101.5	○	◎	
3			危機管理	0.0	○	1.46	○	200.7	×	×	○
4		1	使い捨て	16.9	×	12.50	×	26.0	—	×	
5			対症療法	0.8	○	3.12	×	66.4	—	×	
6			危機管理	0.0	○	2.09	○	142.4	○	◎	○
7		1.2	使い捨て	16.0	×	7.12	×	9.2	—	×	
8			対症療法	0.6	○	3.89	×	41.1	—	×	
9			危機管理	0.0	○	2.69	○	112.1	○	◎	○
10	1次	0.8	使い捨て	11.4	×	5.43	×	353.9	—	×	
11			対症療法	0.0	○	0.73	○	442.4	×	×	
12			危機管理	0.0	○	0.94	○	344.2	○	◎	○
13		1	使い捨て	4.3	×	8.40	×	228.5	—	×	
14			対症療法	0.0	○	0.59	○	349.0	×	×	
15			危機管理	0.0	○	1.11	○	263.5	○	◎	○
16		1.2	使い捨て	2.4	×	8.43	×	227.7	—	×	
17			対症療法	0.0	○	0.79	○	261.0	×	×	
18			危機管理	0.0	○	1.44	○	205.9	○	◎	○
19	2次	0.8	使い捨て	3.4	×	4.98	×	385.6	—	×	
20			対症療法	0.0	○	0.86	○	377.7	×	×	
21			危機管理	0.0	○	1.47	○	221.1	○	◎	○
22		1	使い捨て	1.4	○	8.38	×	229.1	—	×	
23			対症療法	0.0	○	0.73	○	284.4	×	×	
24			危機管理	0.0	○	1.68	○	181.0	○	◎	○
25		1.2	使い捨て	0.2	○	8.42	×	227.9	—	×	
26			対症療法	0.0	○	1.38	○	235.8	×	×	
27			危機管理	0.0	○	2.15	○	151.0	○	◎	○

(注)判定 ○:該当 ×:該当しない —:判定対象外 (注)総合評価 ◎:採用 ×:不採用

前者の考え方にに基づき、予算額に対して平準化後の各年度コストがどの程度ばらついているかを評価する指標として、「平準化指数」（標準偏差に相当）ならびに「平準化指標」（変動係数に相当）を設定した。

また、後者の考え方に基づいたものとして、LCC算定期間内で最大となった年度コストを予算額で除した指標（以下、「最大年度コスト比」）を用いた。

これら3つの指標は値が小さいほど、より平準化がなされていることを示し、各々以下のような式で表される。

(i) 平準化指数

$$\sigma_a = \sqrt{\left(\sum \sigma_i^2\right) / n} \quad (1)$$

σ_a : 平準化指数 (百万円), n : 対象年数,

σ_i : i 年の対策費-BA, BA : 年平均予算額

(ii) 平準化指標

$$\sigma_b = (\sigma_a + BA) / BA \quad (2)$$

σ_b : 平準化指標

(iii) 最大年度コスト比

$$R = \sigma_{\max} / BA \quad (3)$$

R : 最大年度コスト比, σ_{\max} : 最大の年度対策費

3. 結果および考察

3.1 LCC算出結果

LCCを算出した結果を、表-7に示す。

LCCに着目すると、穏やかな劣化を想定した0.5次式において低く、比較的劣化の早い1次式の場合に高くなっていることが読み取れる。また、耐久年が長いほどLCCは低くなるのが分かる。

総合評価とは、2.3で述べた手順による評価である。各劣化曲線形状、各耐久年において危機管理型を用いた場合に「採用」となっている場合がほとんどとなった。よって、危機管理型は健全度と経済性を両立できる対策シナリオだと考えられる。

年度コスト平準化操作を行うパターンとして、表-7の総合評価欄において◎印の付いた9種類が選定される。しかし、同一の対策シナリオ（危機管理型）での比較のため、今回は9種類のパターン（No.3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27）に対して、1回ずつ手作業で年度コスト平準化操作を行った。このときの「1回ずつ」とは、1手1手試行錯誤しつつ、そのパターンにおける初手から最終手までの一連の操作を行ったことを意味する。

3.2 平準化結果

年度コストの推移の一例を図-4(a), (b), (c)に示す。(b)は(a)を平準化したもの、(c)は別の劣化曲線形状、耐

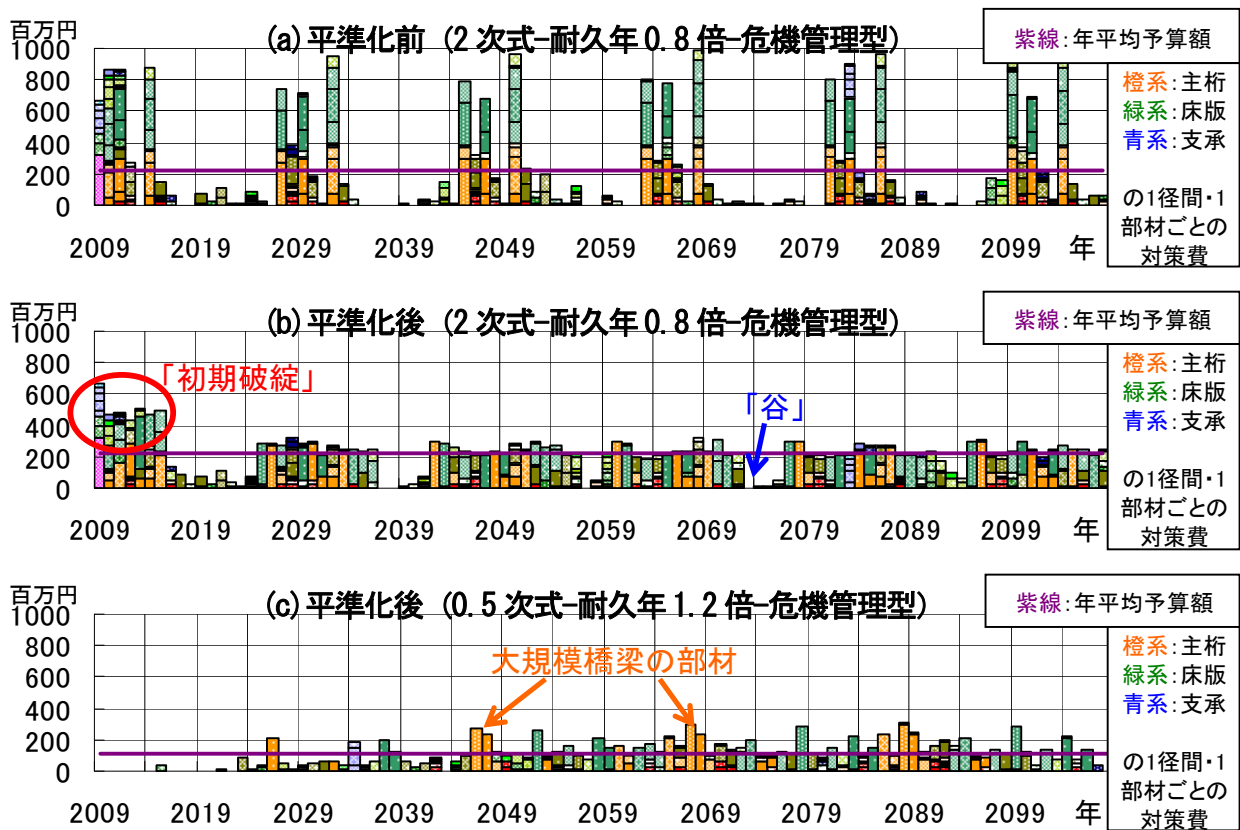


図-4 部材ごと年度コスト推移グラフの一例

久年の場合において平準化したものを示す。初期破綻の傾向が図-4(b)に見られ、初期段階の年度対策費が予算額を大きく上回っている。初期破綻とは、点検において低い健全度にあると診断された部材に対し、LCC 算定期間初期で対策が集中的に必要となることから、対策費が一時的に増加する現象である。

初期破綻が生じた原因としては、耐久年を小さくしたことで点検年からの劣化が早まったことが考えられる。また、次数が高い場合には、健全度ランクが低くなるからの年数が短いという特徴がある。点検時に低い健全度ランクに位置づけられると、対策が必要になるまでの猶予が数年と短いため、初期破綻を起こしやすくなることが考えられる。図-4(b), (c)を比較すると、劣化曲線形状の次数が低いほど、耐久年が大きいほど、初期破綻が起こりにくくなる傾向にあることがわかる。

劣化曲線形状および耐久年と平準化指数との関係を図-5に、平準化指標との関係を図-6に、最大年度コスト比との関係を図-7に示す。

(1) 平準化指数 (図-5)

異なる次数間で比較すると1次式を用いた場合に平準化が進んだことがわかる。この理由として、1次式を用いた場合には、他の場合に比べて(初期の)劣化速度が速いことが挙げられる。このため、頻繁に対策を行う必要があり、図-4(b)に示すような「谷」が狭まり、密にな

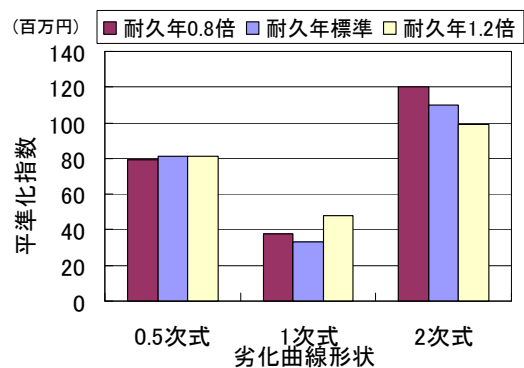


図-5 劣化曲線形状および耐久年と平準化指数との関係

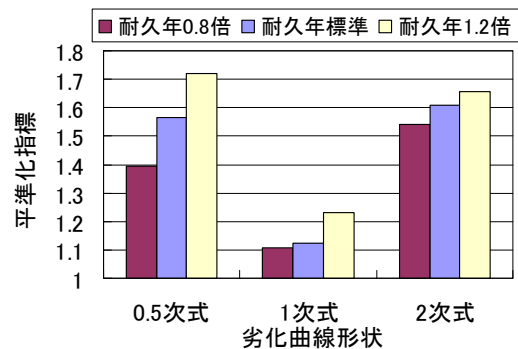


図-6 劣化曲線形状および耐久年と平準化指標との関係

ったと考えられる。

また、穏やかな劣化を想定した 0.5 次式において、あまり平準化が進んでいないこともわかる。この原因として、**図-4(c)**に示すような、1 径間 1 部材当りのコストが大きい大規模橋梁と LCC との関係が挙げられる。0.5 次式の場合、穏やかな劣化を想定していることから、対策を頻繁に行う必要がなく、LCC に基づき設定した予算額が低くなる。しかし、大規模橋梁に対するコストは、劣化曲線形状とは関係なく一定であるので、低く抑えられた予算額を（相対的に）大きく超過してしまう。これにより、平準化が進まなかったものと考えられる。

耐久年と平準化指数との関係をこのグラフから見出すのは難しいが、耐久年は劣化曲線形状よりも平準化指数に与える影響が小さいことが考えられる。

(2) 平準化指標 (図-6)

異なる次数間では、平準化指数と同様の、むしろ平準化指数よりも差が強調された結果となった。これは 1 次式において、LCC 年平均額である予算額が大きくなったことから (**表-7** 参照)、平準化指標の分母が大きくなり、より指標の値が小さくなったことによると考えられる。

同じ次数では、耐久年が小さいほど平準化指標が小さく、より平準化される傾向を読み取ることができ、平準化指数では得られなかった情報を得ることができた。耐久年が小さいほどより平準化された原因としては、先に述べた、対策を頻繁に行う必要から密になることが考えられる。

(3) 最大年度コスト比 (図-7)

異なる次数間で比較すると、2 次式において最大年度コスト比が大きくなっている。これは、**3.2**の初めに述べたように、2 次式に初期破綻を起こす傾向があったため、LCC 算定期間の初期に対策工事が集中したと考えることができる。また、0.5 次式においても最大比率が大きくなった原因としては、LCC 年平均額が低く抑えられたために、**図-4(c)**のように大規模橋梁への対策費が突出したことが考えられる。これらの問題を抱えることのなかった 1 次式においては、最大年度コスト比が最も小さくなったものと思われる。

同じ次数で比較すると、耐久年が短くなるほど最大年度コスト比が小さくなるものの、2 次式-耐久年 0.8 倍の場合のみ結果が逆転してしまつたと捉えることができる。これは、耐久年が短くなることにより、対策が頻繁に行われ、**図-4(b)**に示すような「谷」が狭まって密になったことから、深い「谷」や高い「山」が存在しにくくなったと説明することができる。2 次式-耐久年 0.8 倍の場合、劣化曲線形状と耐久年の組合せにより、LCC 算定期間初期に対策工事が集中してしまつたと考えられる。

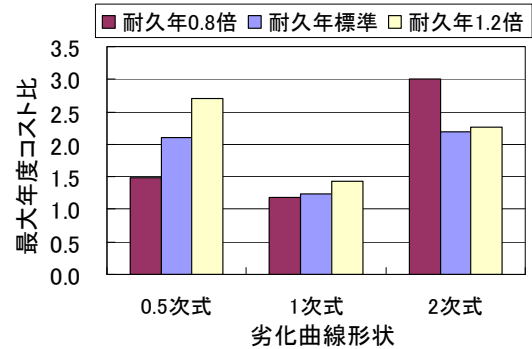


図-7 劣化曲線形状および耐久年と最大年度コスト比との関係

4. まとめ

- (1) 劣化曲線形状の次数が低いほど、耐久年が大きいほど、初期破綻が起こりにくくなる。
- (2) 劣化曲線形状が 1 次式の場合や、耐久年が短い場合に、年度コストのばらつきを小さくできた。つまり平準化がより進んだ。
- (3) 穏やかな劣化を想定した 0.5 次式の場合に、より平準化されるというわけではない。この原因としては、大規模橋梁（径間）の存在が考えられる。

参考文献

- 1) 高橋稔明, 酒井通孝, 関博, 松島学: 塩害環境下における RC 構造物の LCC 算定と補修工法選択システムの開発, コンクリート工学論文集, 第 16 巻第 3 号, pp.21-29, 2005.9
- 2) 保田敬一, 安野貴人: 橋梁における劣化予測手法の違いが評価に及ぼす影響, 第 6 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCOSSAR2007) 論文集, pp.57-64, 2007.6
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 第 4 号 住宅・社会資本の管理運営技術の開発, 2006
- 4) (社)建設コンサルタンツ協会近畿支部 アセットマネジメント研究委員会: アセットマネジメントの普及を目指して, 2007
- 5) 久後雅治, 平川淳, 鎌谷太郎, 服部篤史, 坂野昌弘: 小規模な既設橋梁群を対象とした簡便な LCC 算定法の提案, 鋼構造年次論文報告集, Vol.16, pp.681-688, 2008.11
- 6) 保田敬一, 中西卓也, 藤井友行, 服部篤史, 坂野昌弘: 小規模な既設橋梁群における年度コスト平準化に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, pp.689-696, Vol.16, 2008.11