

複数箇所および数種類の損傷を考慮した劣化曲線の検討について

On deterioration curves of bridge members having the possibility of plural damages in one member

北海学園大学大学院工学研究科 ○学生員 工藤正行 (Masayuki Kudo)
北海学園大学工学部 正員 杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)

1. まえがき

近年、橋梁の老朽化が問題視されている。従来の橋梁の更新では、事後保全的な対策が主流で、橋梁がある程度悪くなれば、全体を取り替える、あるいは補修を行なうことを基本としてきた。一方で、橋梁の損傷が深刻化する以前に補修を行なう予防保全的な理念は、中長期的に考えればライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, 以下, LCC) を最適化できるという考え方である。

また、現在は全体を取替えるのではなく、損傷箇所に部分的な補修を行なう部分補修が主流となっている。その際、補修時期の選択の手段として劣化予測が重要である。劣化予測は部材の経年的な劣化挙動を示す劣化曲線を用いて行われる。劣化曲線の作成には部材の損傷の評価および供用年数が必要なため、定期点検の結果が用いられる。しかし、点検は主に損傷箇所に着目し、最も損傷が深刻な1箇所について記録が行なわれる。床版や躯体といった部材は、同一部材内に複数箇所あるいは数種類の損傷が発生する可能性があるため、補修後に健全となった箇所および比較的軽微な損傷箇所の記録はない。

部分補修後の部材に点検が行なわれた場合、補修箇所および未補修箇所が混在する可能性があるため、記録される箇所によって供用年数の取り方に注意が必要となる。

本研究は、建設部の点検結果、写真データおよび補修記録を用いて、補修が行なわれた部材の経年劣化の速度を表す劣化曲線を用いて考察を行ない、特に部分補修後の劣化曲線について述べるものとする。

2. 補修後劣化曲線

橋梁部材の劣化予測は、部材の損傷の評価を表す健全度 (5段階の指標であり [5] が良くて [1] が悪い¹⁾) と供用年数 (新設から点検が行なわれるまでの年数) を基に作成された劣化曲線によって行なわれる。本研究では北海道建設部 (以下、建設部) の定期点検の結果を用いて、劣化曲線の作成を行なった。建設部の定期点検は、約 5,000 橋を対象に平成 12 年度～17 年度に 1 次点検、平成 18 年度～22 年度に 2 次点検を終了し、平成 23 年度～現在において 3 次点検が進行中である。

図-1 は供用開始後に補修が行なわれた部材の補修前後の劣化曲線の概念図である。この部材は新設から曲線 d_0 に従って経年劣化し、健全度が [2] となった i 年に補修工事が実施されたとする。その時、健全度は [5] に回復するとしているが、その後の劣化曲線が、 d_0 と平行な d_0' とするのか、補修前とは経年劣化の速度が異なる d_1 あるいは d_2 のどれをとるかは、中長期の LCC を計算する上では重要な課題となる。

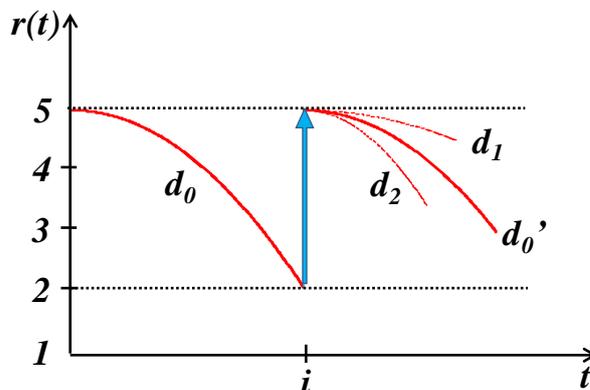


図-1 補修前後の劣化曲線

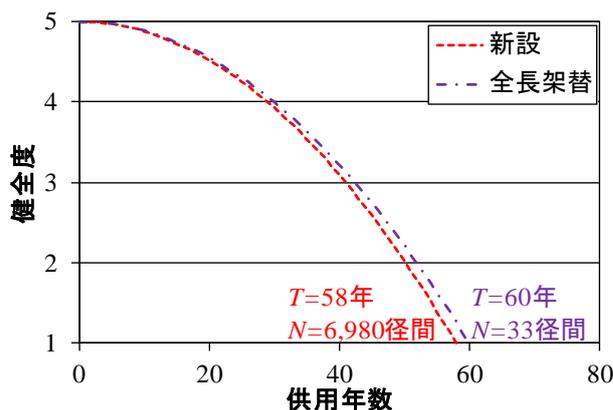


図-2 新設および全長架替後の耐用年数の比較

3. 全長架替後劣化曲線²⁾

補修の手段の1つに全長架替がある。全長架替とは、部材全体を取り替える工法で、建設部では床版 33 径間に対して行なわれた記録がある。図-2 は新設から一度も補修が行なわれていない床版 6,980 径間および全長架替が行なわれた床版 33 径間の劣化曲線を作成した結果である。供用年数は供用開始から点検が行なわれるまでの年数であり、新設の床版の供用開始年は新設時であるのに対し、全長架替が行なわれた床版の供用開始年は全長架替が行なわれた年である。供用開始年から健全度が 1 に至るまでの年数は耐用年数 (T) で表される。新設の床版の場合、耐用年数は 58 年であるのに対し、全長架替が行なわれた床版の耐用年数は 60 年であった。

したがって、全長架替が行なわれた床版および新設の床版は、同程度の速度で経年劣化すると考えられるため、全長架替が行なわれた後の床版の劣化曲線は、 d_0' とすることを示した。

4. 部分補修前後の健全度

表-1 には部分補修が行われた床版および躯体の径間数と、その中で点検結果と写真データがある径間数を示す。本研究で扱うのは補修前後の点検結果と写真データがあった径間で、床版のみに補修が行なわれたのは 122 径間、躯体のみに補修が行なわれたのは 111 径間、床版および躯体に補修が行なわれたのは 56 径間であった。表-2 は床版 178 径間（「床版のみ」122 径間と「床版および躯体」56 径間の和である）の補修前後の健全度を比較したもので、用いた健全度は最悪値である。また、同様に表-3 は躯体 167 径間についての結果を示す。

表-2 および表-3 に示す縦の項目は補修前の健全度で、横の項目は補修後の健全度である。表-2 に示すように、床版において、補修後に健全度が上がった径間数は 39 径間、下がったのは 25 径間であり、補修前後で健全度が変わらなかったのは 114 径間であった。また、表-3 に示すように、躯体においては補修後に健全度が上がった径間数は 45 径間、下がった径間数は 27 径間であり、補修前後で健全度が変わらなかったのは 95 径間であった。これらの床版および躯体のうち、部分補修後の供用年数は最大で 5 年であるのに対し、部分補修後の健全度が [5] まで回復しているものは床版における僅か 1 径間のみであり、残りはすべて健全度 [5] 未満であった。補修後に健全度が回復していない原因を究明するため、本研究では、点検結果以外にも写真データ等を用いて表-4 に示す 7 項目²⁾ ごとの健全度の収集を行なった。その結果、同一部材内に複数箇所および数種類の損傷が確認されたため、それを次節で考察する。

表-1 部分補修前後の写真データの有無

	部分補修が行なわれた部材	補修前後の写真データ	
		全数	有
径間数	床版のみ	403	122
	躯体のみ	309	111
	床版および躯体	242	56
	合計	954	289

表-2 部分補修前後の健全度（床版最悪値）

	補修前健全度	補修後健全度					計
		5	4	3	2	1	
補修前健全度	5		1	7			8
	4		4	9	2		15
	3		7	97	6		110
	2	1	6	23	13		43
	1			1	1		2
計		1	18	137	22	0	178

表-3 部分補修前後の健全度（躯体最悪値）

	補修前健全度	補修後健全度					計
		5	4	3	2	1	
補修前健全度	5		1	6			7
	4		8	14	2		24
	3		8	70	4		82
	2		6	31	17		54
	1						0
計		0	23	121	23	0	167

表-4 床版や躯体の点検項目

損傷の種類						
ひびわれ	剥離・鉄筋露出	遊離石灰	豆板・空洞	変色・劣化	漏水・滞水	欠損

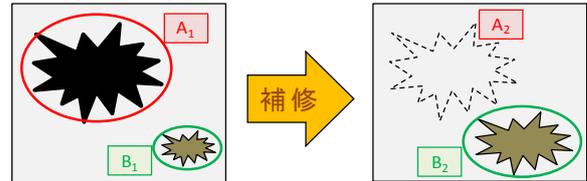


図-3 同一部材内の複数箇所の損傷

表-5 同一部材の複数箇所の健全度

部分補修前		部分補修後	
損傷箇所	健全度	損傷箇所	健全度
A ₁	2	A ₂	5
B ₁	4	B ₂	3

5. 同一部材内での複数箇所および数種類の損傷

部分補修後の床版や躯体は、補修後の供用年数が最大で 5 年であるにもかかわらず、健全度が回復していなかった。そこで、写真データを確認してみると、部分補修後の点検では未補修箇所の損傷が記録されている事例が確認³⁾された。床版や躯体は、複数箇所に損傷が発生する可能性があるが、点検では最も損傷が深刻な箇所の健全度を記録するのみにとどまり、記録された箇所が補修箇所か未補修箇所かは明らかにならない。このとき、健全度が最悪値となった箇所が、補修後に再劣化したならば全長架替後と同様に補修時が供用開始年となるが、健全度が最悪値となる箇所が未補修箇所の場合は、供用開始年は新設時となる。つまり、同一部材内の同一年の点検において複数箇所の健全度、供用年数および、それに対応する劣化曲線が存在し得る。

図-3 には、床版や躯体といった部材内に複数箇所の損傷が発生した場合の部分補修前後の点検の記録に関する概念図を示す。図-3 のような部材の部分補修前の状態には A₁ と B₁ の 2 箇所に損傷があるものとし、A₁ の損傷は B₁ よりも状態が悪い。また、表-5 に示すように部分補修前の A₁ の箇所の健全度は [2] とし、B₁ の箇所の健全度は [4] とする。最悪値をとるのは A₁ の箇所で、この部材の健全度は [2] となる。この点検の後、A₁ の損傷には部分補修を行なうものの B₁ の損傷には補修を行なわなかったとすると、部分補修後の点検では A₂ の損傷は部分補修により改善（健全度は [2] から [5] に回復）するが、B₂ の損傷は劣化（健全度 [3] に劣化）が更に進行する可能性がある。その場合、部分補修後の部材において、最悪値をとるのは B₂ の箇所であり健全度は [3] となる。

健全度の最悪値は部分補修の前後で [2] から [3] となっており、表-2 で示す床版 23 径間および表-3 で示す躯体 31 径間と同様のケースとなる。

表-2 および表-3 では健全度の最悪値を用いていたが、部分補修が行なわれた場合、点検項目によっては必ずしも回復はしない。極端な例ではあるが、鋼製部材に塗装を行なったとき、「腐食」や「塗装劣化」は改善しても「破断」や「変形」は改善されないと考えられる。

表-6 は床版および躯体に対して行なわれる部分補修の各工法と点検項目ごとの補修効果の関係を示す。表-6 に示す通り、コンクリート部材に対して部分打替工が行なわれた場合、「剥離・鉄筋露出」、「遊離石灰」、「漏水・滞水」および「欠損」の項目は補修効果が期待出来るとされ、「ひびわれ」、「豆板・空洞」および「変色・劣化」の項目は補修効果が期待出来ないとされている。また、床版や躯体の部分補修後の点検では、補修で改善されなかった項目の損傷が点検結果として記録される事があると考えられる。つまり、部分補修後の点検では、健全度の最悪値をとる箇所が、補修箇所か未補修箇所かの判断に加え、点検項目ごとの補修効果の差異によって、複数の供用年数および劣化曲線が存在しうる。

表-7 は部分打替工が行なわれた躯体に関する補修前後の7項目ごとの健全度を示す。補修前後の健全度の最悪値は [2] から [2] となっており、表-3 の 17 径間の中に含まれている。7 項目ごとの補修前後の健全度の変化を見てみると、補修効果が期待出来る「剥離・鉄筋露出」の健全度は [3] から [3] と変化が無く、「遊離石灰」は [2] から [3] となっており、健全度が [1] しか回復していない。また、「漏水・滞水」および「欠損」はいずれも [5] から [5] のままであった。一方で、「ひびわれ」は [3] から [2] となり、「豆板・空洞」は [5] から [4] となっており、それぞれ健全度の悪化が確認された。このとき、補修前後の写真データを用いて部材の状態を比較した。写真-1 は補修前の状態を示しており、写真-2 は補修後の状態を示している。写真-1 では3箇所損傷が確認され、写真-2 では補修が行なわれた項目と同一項目における未補修箇所の損傷の顕在化（損傷箇所 b）や、補修で改善しきれなかった項目の損傷の悪化（損傷箇所 c）が確認された。それぞれの写真において3箇所の損傷について考察を行なうものとし、3箇所の損傷の種類と健全度を表-8 にまとめた。

写真-1において、補修前の a および b には「遊離石灰」が発生し、c には「ひびわれ」が発生している。a の「遊離石灰」は補修前点検（2007年）で健全度 [2] が記録され、2009年の補修を経て写真-2（2012年）では改善されているのがわかる。また、状態が改善したため、補修後の a の健全度は不明となった。a と同じ点検項目である「遊離石灰」が発生した b の箇所は、補修前では a よりも軽微で放置され、補修後点検では損傷が悪化し、健全度 [3] が記録された。また、b の健全度は補修前に最悪値ではないため、補修前の記録は無い。前記の通り、「ひびわれ」への対策は部分打替工では行なわれないと考えられているため、c の箇所に補修は行われずに補修後の健全度は悪化したものと考えられる。

表-6 点検項目と補修効果の関係

損傷の種類	補修工法				
	表面被覆工	断面補修工	部分打替工	ひび割れ補修工	防水工
ひびわれ	○	○	●	○	
剥離・鉄筋露出	○	○	○		
遊離石灰	○	○	○	○	○
豆板・空洞	○	○	●		
変色・劣化	○		●		
漏水・滞水	○	○	○	○	○
欠損	○		○		

表-7 ある躯体の部分補修前後の健全度

点検時期	健全度							補修工法	
	ひびわれ	剥離・鉄筋露出	遊離石灰	豆板・空洞	変色・劣化	漏水・滞水	欠損		最悪値
補修前	3	3	2	5	5	5	5	2	部分打替工
補修後	2	3	3	4	5	5	5	2	



写真-1 補修前の躯体（2007年撮影）

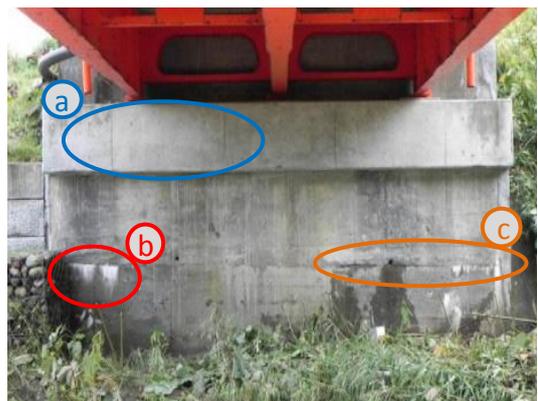


写真-2 補修後の躯体（2012年撮影）

表-8 3箇所の損傷の種類と健全度

点検項目	健全度		損傷箇所
	補修前	補修後	
遊離石灰	2	—	a
	—	3	b
ひびわれ	3	2	c

以上をまとめると、部分補修後の部材には、未補修箇所の損傷や補修で改善出来なかった項目の損傷が残っている事があり、それらの箇所と補修箇所の供用年数は異なる。また、同一の点検項目においては、点検で記録される箇所が、部分補修の前後で異なる場合がある。

そこで、本研究では点検結果および写真データを用いて、床版 178 径間および躯体 167 径間の補修前後の状態を確認した。その結果、補修後点検で健全度が最悪値となる箇所は、すべて未補修箇所であることが確認された。すなわち、現状では部分補修後の部材の供用開始年は新設時となる。

6. 部分補修後劣化曲線

床版や躯体といった面的な広がりをもつ部材は部分補修の前後の点検で、健全度が最悪値をとる箇所が変化する可能性をもつことを示した。部分補修後の部材内に補修箇所および未補修箇所が混在する場合、それぞれの箇所に対する健全度や供用年数および劣化曲線については今後検討が必要である。

図-4 では、写真-1 および写真-2 で示した部分補修が行なわれた躯体において、「遊離石灰」が発生した箇所 a および b を例とし、面的な広がりをもつ部材に部分補修が行なわれた場合の劣化曲線について説明する。

この躯体は、供用開始から i 年が経過した時点で補修前点検が行なわれ、 a の箇所に健全度 [2] の損傷 (A_i) が検出された。このとき、 b の箇所にも損傷が発生しているが、 a の箇所と比較して軽微であるため、記録は行われず。補修の際、最も損傷が深刻な a の箇所にのみ部分補修を行なうことで、 a の箇所は健全度が [5] まで回復 ($A_i \rightarrow A_i'$) した。その後、部分補修が行なわれてから x 年が経過した j 年には補修後点検が行なわれた。補修後点検では、 a の箇所の損傷は検出されなかったが、部分補修時に未補修であった b の箇所の損傷 (B_j) が進行し、最悪値となる健全度 [3] が検出された。このとき、補修前点検と補修後点検では、健全度が最悪値をとる箇所が変わることから、取り得る供用年数および劣化曲線が変化する。つまり、この部材で検討すべき劣化曲線は、補修前点検では A_i に関する曲線であり、補修後点検では B_j に関する曲線に代わる。また、補修前点検での供用年数は i 年 (A_i に関する箇所) であり、補修後点検での供用年数は j 年 (B_j に関する箇所) となるため、いずれも供用開始年は新設時となる。

また、実構造においては、より多い箇所に損傷が発生する可能性があり、更には点検項目ごとに劣化曲線が存在すると考えられるため、同一部材内に無数の劣化曲線が存在するといえる。しかしながら、同一部材内に複数の劣化曲線が存在したとしても、健全度が最悪値をとる箇所が未補修箇所である限りは、供用開始年は新設時と考えて劣化曲線を作成することが可能である事を示した。また、図-2 で示した通り、補修が一度も行なわれていない部材の供用開始年は新設時であるため、部分補修が行なわれた部材のデータもこれに属すると考えられる。したがって、現状では全長架替のような部材全体を取替えた部材のみ供用開始年が補修時になる。

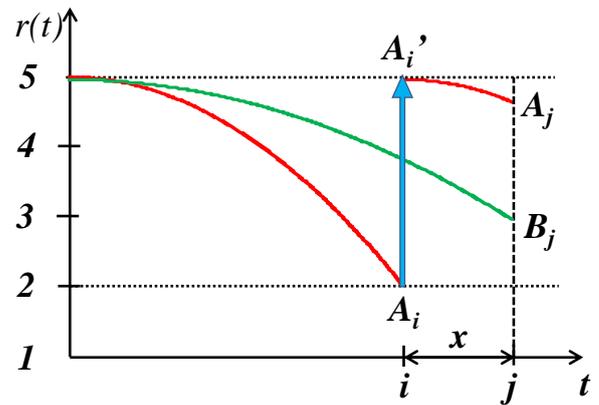


図-4 部分補修前後の劣化曲線

7. まとめ

本論文は、建設部が行なった定期点検の結果、写真データおよび補修記録を基に、床版 178 径間および躯体 167 径間の補修前後の劣化曲線に関する考察を行なった。床版や躯体のように面的な広がりをもつ部材は、複数の箇所および数種類の損傷が発生する可能性があり、同一部材内に無数の劣化曲線が存在しうる。

供用開始年は、新設部材と部分補修の前後の状況がわかる部材は新設時で、全長架替を行なった部材は架替時となることが確認された。ただし、補修後のデータは多いとはいえ、対象が道内橋梁に限られているため、今後は損傷が軽微な箇所や補修後に健全となった箇所の追跡調査、他の地域で供用される橋梁の検討が求められる。

国は、橋梁やトンネルといった道路構造物の点検要領について、5年に1度の頻度で近接目視を行なうことを義務化した。また、橋梁の状態をより明確に把握するためには、定期点検以外にも日常パトロールの実施が有効である。その際、橋梁端部は構造的な弱点となりやすいが、近接目視が困難な場合は点検車等が必要となる。しかし、橋脚に検査路を設置することで、点検車等を利用せずに橋梁端部の近接目視がある程度可能となり、中長期的な LCC の削減のための一考となり得る。現在、道内では、いくつかの橋梁管理者において、技術者不足が課題とされている。したがって、橋梁管理者が、より少ない負担で日常パトロールを行なうためには、検査路の設置は有効であると考えられる。

また、断続的に損傷が発生する部材の補修時期は、早急な対策が必要で無いならば、部分補修を繰り返すよりも、ある程度放置した後に架替等の大規模補修を行なうことで LCC 最小化につながるかもしれない。

参考文献

- 1) 北海道建設部：橋梁点検・維持管理要領，2013。
- 2) Hiroyuki Sugimoto, Naotaka Shibuya. : ON THE DETERIORATION TENDENCY OF BRIDGE SLABS AFTER REPAIR WORK (IN THE CASE OF A LOCAL AUTONOMY), EASEC-13, E-2-6, 2013.
- 3) 工藤正行, 杉本博之：床版と躯体橋梁部材の部分補修後劣化曲線について，土木学会第 69 回年次学術講演会（平成 26 年度）I-553, 2014.