我国の維持管理の展開とその特徴 —橋梁を中心として—

阿部 雅人¹・阿部 允²・藤野 陽三³

¹正会員 株式会社BMC 主幹研究員 (〒261-7125千葉県美浜区中瀬2-6 WBGマリブウエスト25階)
E-mail:masato@hashimori.jp

²フェロー 株式会社BMC 代表取締役 (同上)
E-mail:abem@hashimori.jp

³フェロー 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail:fujino@civil.t.u-tokyo.ac.jp

社会基盤ストックの老朽化を背景として、維持管理に関わる学術や実務の取り組みが強化されている。維持管理は総合的な学術領域に属し、その対象とする技術分野や問題は多岐にわたる。本研究は、俯瞰的な視点から、我国の社会基盤の維持管理の特徴と課題を明らかにすることを目指すものである。橋梁を中心として我国の発展の歴史を振り返るとともに、米国での取り組みとの比較を通して、考察を進める。歴史的には、それぞれの時代に顕在化した陳腐化・劣化・初期不良を背景として維持管理が進展して来た経緯を明らかとし、米国との比較から、我国では維持管理の社会的側面より技術的側面が重視されてきた傾向にあること、また、日米ともに、系統的な検査の実施と情報の管理が、技術の発展に大きな影響を与えていることを論じる。

Key Words : *maintenance engineering, stock management, bridges, history of technology, international comparison*

1. はじめに

社会基盤ストックの老朽化を背景として、維持管理に関わる学術や実務の取り組みが強化されている¹⁾。維持管理は総合的な学術領域に属し、その対象とする技術分野や問題は多岐にわたる。そのため、個別対象別のノウハウ的な蓄積として技術が存在しており、その全体像の把握は容易ではない。

そこで、我国の社会基盤の維持管理のこれまでの発展を整理し、その特徴を明らかにすることを目的として検討を行った。具体的には、我国の技術発展の歴史を振り返るとともに、米国での取り組みとの比較を通して、一つの俯瞰的な視点を与え、今後のあるべき姿について考察を加えるという方法で議論を進める。見通しよく議論を進めるために、取り上げる事例は特徴的なものに限ることとして、網羅的な整理や詳細に関する記述、個別の問題に関する評価等については取り扱わないこととし、参考文献 (例えば文献2)-5)) に譲ることとした。したがって、多くの重要な事例や問題を割愛せざるを得なかったことに留意されたい。また、社会基盤構造物の中でも、

経年が長く、戦前期を含めて既往の維持管理に関する記録が豊富な鋼橋を中心とした記述となっている。

なお、2章、3章で歴史的経緯を踏まえて日米の現況についてレビューし、次いで、4章でそれらの比較考察を行う。

2. 我国における維持管理の発展

ここでは、我国における社会基盤の維持管理の歴史を橋梁を中心として振り返り、現在の維持管理工学の位置について論じる。我国の橋梁技術は、歴史上、鉄道整備を端緒として、その技術および技術者が道路に波及をしていった経緯がある⁶⁾ことから、本報告では、道路橋・鉄道橋とも橋梁技術として一連のものとして捉え、俯瞰的な議論を試みている。特に、戦前期には鉄道整備が社会基盤整備の主体であったことから、構造物の経年が長く、維持管理の歴史も長い鉄道橋に関する記述に重点をおいて議論を進める。

(1) 明治期

我国の近代土木工学は明治維新に始まる。鉄道橋に目を向けると⁷⁾、当初は外国人技術者による設計・施工指導と人材育成が行われており、先進国の技術体系を導入したため、それまでに先進国において経験されている事故の経験も暗黙裡に導入されたと考えられる。例えば、交番応力の影響を考慮する形で、疲労にも一定の配慮がなされていた。また、維持管理の容易さへの配慮も見られ、ポーナル設計による作錬式錬鉄桁（明治 18 年：1885 年）では、再利用を想定して上下フランジの設計が全く同一であった。類似の例として、上下フランジとも走行に利用できる踏面形状となっていた双頭レールがある。なお、鋼鉄道橋は、これ以降も標準設計で整備されることが多かったが、それにより、損傷などの問題が発生した場合の効率的な対処が可能となって、維持管理上極めて有利であった。

その後、日本人による標準設計が行われるようになった。明治 42 年（1909 年）の達 680 号標準桁では、鋼材使用量を減らすため、下フランジプレートの長さを力学的に必要な長さに短縮しているが、そのことによって支点部分にき裂が発生するなどの不具合が発生したことが指摘されている⁸⁾。力学的な材料最適化の重視によって維持管理上の不具合を招いた例はこの後も多いが⁹⁾、その最初の例の一つであると思われる。力学的な検討は理論を学べば可能であるが、維持管理に関わる洞察は経験がないと難しい面があることを示していると考えられる。

この時代の橋桁は、ベースプレートを介して下部構造に面的に支持されていたが、桁端部の損傷の経験から、大正 8 年（1919 年）の達 540 号以降は独立した支承構造が設けられるようになった。このように、外国の技術を取り入れる一方、工夫を加え、失敗も経験しながら技術を進展させていったことがわかる。

また、大正 4 年（1915 年）の土木学会誌創刊第 2 号には、枕木の寿命算定⁹⁾や、軌道の経済的取替周期¹⁰⁾に関するドイツ語文献の抄訳が掲載されており、当時、既に、維持管理全般に高い関心が寄せられていたことが伺える。

鉄道以外の分野における明治時代の重要な取り組みとして、小樽港築港工事における廣井勇によるコンクリートの供試体約 6 万個による長期耐久性試験の実施が挙げられる¹¹⁾。その供試体は、現在も定期的に試験が行われ、100 年以上にわたる貴重なデータを提供している。このように、外国技術の導入期においても、長期にわたるデータ収集の重要性が既に認識されており、独自の耐久性への取り組みがなされていたことは注目に値する。

(2) 大正から戦前にかけて

大正期には、明治期に整備された鉄道幹線において、機関車の大型化ならびに高速化によって荷重が増加した

ため、既存の橋梁の耐荷力が不足し、陳腐化が進んだ。なお、本報告では、「陳腐化」は、物理的に性能が低下する「劣化」と対を成す概念として、経済学でいう陳腐化（obsolescence）¹²⁾に相当する意味で用いることとして、社会・経済的条件の変化によって、時を経るにつれて機能が不十分となる過程を指すものとした。

これらの耐荷力が不足する橋梁は、弱小桁と呼ばれ、取替や補強対策の対象となった。維持管理上注目すべき点として、架け替えられた旧桁は、必ずしも廃棄されるのではなく転用・再利用されたことと、補強と取替の選択においてライフサイクルコスト（life cycle cost: LCC）を考慮した経済的検討がなされていることが挙げられる。

転用では、旧桁の耐荷力を向上させる改造をした上で、新線等に用いられた。そのため、特に、交通量が大きくない地方鉄道線や歩道橋、道路として、明治時代の橋桁がこの時期の改造を経て数多く現存している¹³⁾。

この時期の代表的な補強工法は、一種の外ケーブル設置工法であるフィンク補強であった。曲げ耐力の向上を図ったものであって、桁下空頭が十分にある場合に盛んに用いられた。文献 14)では、実際の工事費の比較を行い、フィンク補強の経費が新設の 3 分の 1 程度であることから、5%の金利を前提として、8 年間で償却するという議論を行っている。それに対して、この工法が十数年程度の耐久性があるとして、有効性を示している。これは、初歩的な LCC 分析であったと理解できる。

この補強法は、原理的に、曲げ耐力のみに着目した補強法であることから、水平方向の剛性やせん断耐力が相対的に不足して、補強が実施された橋には振動やき裂などの問題がみられるようになり、戦後、順次取り替えられた。ただし、そもそも十数年程度の延命を意図したものであるから、本来の目的は達成していると考えられる。

その後、溶接技術が進歩したことから、鋼材を既存桁に溶接して断面を増強する溶接補強が主流となる。溶接補強は鋼材使用量が抑えられることも大きなメリットとされた。溶接補強についても、簡単な経済的分析がなされており、耐用年数が 20 年から 30 年と、新桁の耐用年数（40 年から 60 年と想定）のほぼ半分であることから、取替の 40 パーセント以内の経費で実施可能な場合は、溶接補強を採択するという基準で実施されていた¹⁵⁾。

このように、当時、既に、経済性を含めた総合的技術として維持管理が捉えられていたことが伺える。なお、長大橋でも転用や補強が行われており¹⁶⁾、大規模なものとしては、大正14年（1925年）に、関西本線木津川橋梁においてポニートラスを補剛してランガー型式に改造した例がある。これらの対策は、鋼材が貴重であった当時の社会情勢を背景にしているが、現代的な観点からは、廃棄物や環境負荷の問題に示唆を与える取り組みであるとも言えよう。

(a) 塗装

(b) レーシングバー取替

図-1 餘部橋梁の戦前戦後の維持管理

(文献19)より作成。戦後は1947-1964年、戦前は1941年以前の平均値。)

写真-1 餘部橋梁の橋脚

表-1 鉄桁の保守方法と管理費との関係¹⁵⁾ (1955年当時)

塗装周期	推定耐用年数	毎年鉄桁 1t 当り			全鉄桁 60 万 t に対する全管理費 $I+M$
		取替償却費 I	塗装保守費 M	国鉄管理費総額 $I+M$	
無保守	25 年	4,200 円	0 円	4,200 円	25.1 億円
8 年	45 年	2,340 円	375 円	2,715 円	16.4 億円
5 年	70 年	1,500 円	600 円	2,100 円	12.6 億円
2 年	100 年	1,050 円	1,500 円	2,550 円	15.3 億円
1 年	200 年	525 円	3,000 円	3,525 円	21.3 億円

(3) 戦中・戦後期

戦中・戦後期においては、輸送需要の急増と資材不足を背景に、維持管理不足による荒廃が進んだ。

戦争末期の昭和19年(1944年)12月20日には、室蘭線鷺別地下道架道橋において、機関車が走行中に主桁が破断するという事故が発生している^{17),18)}。厳しい腐食環境にある餘部橋梁(写真-1)では、戦前に行われていた塗装と腐食レーシングバーの取替による維持管理が、戦争末期から終戦直後にかけて4年間ほど中断したため、腐食が進んだ。図-1に、戦後の維持管理数量と戦前・戦後の平均値を示す。塗装のペースは戦前に比べて30%程度増加している。レーシングバーは、戦後、腐食しにくいタイプレートへの取替えが進められたものの、取替のペースは戦前と同程度のままである。したがって、戦後、必要な維持管理の水準は上昇していると考えられ、戦中に放置されたことによる荒廃の影響が示唆される。

終戦後には、国鉄全線の調査が行われている。その結果、全鉄桁の15%にあたる約10万トンの耐荷力が当時走行機関車荷重以下であることが明らかとなり²⁰⁾、計画

的な取替・補強が進められた。また、塗装不足による劣化も大きかったことから、塗装の最適周期について、表-1のように、国鉄鉄桁60万トンに対する概算の検討が行われている。8年に1回の塗り替えで橋桁本体の耐用年数が45年程度となるという実績に基づいた算定を行って、45年という値を得ている。この値自体は、当時の塗装・ケレン技術や列車からの汚物など、現在とは異なる劣化状態が前提であって、今では意味をもたないが、保有する全橋梁の経費の最小化を意図している点で、一種のストックマネジメントの試みであったと考えられる。さらに、橋梁が強度不足である場合の速度制限や、災害・工事による徐行を対象として、運転経費や時間の損失などの間接費用の評価が行われており、アセットマネジメント的な取り組みもなされていた。

この時期には、戦前からの維持管理技術が高坂¹⁵⁾により整理されるなど、効率化を念頭においた実務的な技術の体系化の動きが進められている。また、国鉄建造物保守心得(案)²¹⁾が策定され、検査や台帳情報管理のシステム化も進められている。

図-2 旧国鉄における対策費と荒廃量の推移

図-3 旧国鉄における管理局別維持管理費水準

図-4 旧国鉄における推計塗装周期

これらの取り組みによって、系統的に構造物の検査結果が得られるようになり、技術的知見の蓄積や統一的な基盤での集計が可能となったことは、その後の維持管理技術の発展上、大きな意義を持つものであった。

この時代は、戦中の放置による劣化の進行を背景として、維持管理の重要性や、ストックとして管理することの必要性が認識され、系統的な取り組みが始められた時期であったと言える。

(4) 高度成長期およびそれ以降

高度経済成長期には、新幹線や高速道路に代表される大量の社会基盤の整備が行われ、設計・施工技术も大きく発展する。この時期に建設された膨大なストックの維持管理・マネジメントが現在の大きな課題となっている。この時代には、耐久性設計・施工の考え方も確立されておらず、現在の基準で考えれば、必ずしも耐久性上優れた品質でないものも多く含まれている可能性が高い²²⁾ことも、問題をより困難としている。

大量整備に伴って、鋼構造では溶接構造が広範囲に採用され、新幹線では鋼橋の疲労損傷が顕在化している。また、道路橋においても RC 床版の疲労問題が発生して合成桁構造が用いられなくなるなどの耐久性に関する問

題が発生している。これらの損傷は、溶接構造や合成桁構造などの、合理化を目指した新しい構造技術の本格的導入に伴って発生した、初期欠陥的な不具合であると考えられる。

このような背景を受けて、道路分野においても維持管理への関心が高まり、道路維持修繕要綱²³⁾や道路橋補修便覧²⁴⁾が刊行され、維持管理工法の標準化が進められた。さらに、道路橋点検要領(案)²⁵⁾が提案されるなど、検査・診断の標準化が進んだ。また、大型車に対する活荷重規定の改定に対応して、既存構造物の耐力不足が生じ、補強が行われるようになる²⁶⁾。荷重の増大に対して、構造物の対策が求められているという点では、大正期の鉄道と類似の情勢であると考えられる。

鉄道分野では、建造物保守心得(案)によって、構造物の情報が一定の水準で集まるようになったが、より定量的かつ客観的な情報を得ることを目的として、建造物検査標準解説²⁷⁾がまとめられるなど、検査の質を高める努力も進められた。さらに、こうして蓄積された情報に基づいて、検査に留まらず、変状の原因の究明や健全度の判定、そして対策措置までを対象とした「土木構造物取替の考え方」²⁸⁾がまとめられ、その後の維持管理の体系的基盤を与えるものとなった。なお、定期的な保守が求められる鉄道軌道については、取替を前提とした最適構造の研究が行なわれており、東海道新幹線の軌道構造設計に反映されている²⁹⁾。

また、構造物検査データの蓄積を背景に、防災投資のあり方についても、具体的な検討がなされるようになってきた。例えば、文献 30)では、図-2 のように、今後 5 年以内に取替または修繕の必要があると認められた建造物の取替・修繕費を荒廃量として集計してその推移を示している。また、その結果に基づいて、荒廃量を低減するためには更なる対策費用が必要であることを主張するとともに、図-3, 4 のような各鉄道管理局の保全費用の比較から、適正な経費投入水準のあり方に関する議論を行っている。

図-5 構造物の経年と保守経費累積額
(文献 33)より作成)

1980 年代に入ると、「建築物保守管理の標準・同解説」³¹⁾³²⁾が刊行され、基準類の現代化が進められた。同じ時期に、補修費用を考慮した最適取替時期の試算が行われている³³⁾。旧国鉄での 80 年間の保守、大規模修繕累積投資額のデータに基づいて、1980 年の貨幣価値に換算した回帰式を求め、実績から得られなかった 81 年目以降の修繕投資額の予測を行い、統計的に検討したものである。そこで得られた累積維持管理費用曲線を図-5 に示す。こうして得られた維持管理費用と、別途算定した平均取替投資額の和を最小化することによって、最適取替時期が計算されている。その結果、橋梁上部工およびトンネルについては 110 年、橋梁下部工については 60 年という値が得られている。実績に基づく LCC 最小化の試みと言えよう。

図-5 では、累積維持管理費用曲線が 2 次曲線で与えられている。言い換えれば、経年に対して、年平均補修費用が線形に増加していることになる。それを経験的事実として仮定すると、時間を t 、累積補修費用を C_R とすれば、 c_m を定数として、

$$C_R = c_m t^2 \quad (1)$$

と表すことができる。さらに、初期費用を C_I とすれば、年あたり平均費用 c は、相加・相乗平均の関係から、

$$c = \frac{C_I + C_R}{t} \geq 2\sqrt{C_I c_m} \quad (2)$$

となり、平均費用を最小化する最適寿命は、

$$t_{opt} = \sqrt{\frac{C_I}{c_m}} \quad (3)$$

で与えられる。そのときの累積補修費用は

$$C_R(t_{opt}) = c_m t_{opt}^2 = C_I \quad (4)$$

となる。すなわち、「累積補修費用が初期費用と同等になったときが取替時」という経験則が得られる。

図-6 維持管理費水準の国際比較
(文献 34)より作成)

この結果に基づいて、例えば、次のような検討を行うことができよう。ある管理主体で、ストックの総再取得価格の 1% が年あたりの維持管理費用であるとする。その主体におけるストックの経年分布が一樣であるならば、100 年程度の平均寿命が暗黙に想定されていると推論することができる。なお、この維持管理水準の値は、図-6 に挙げた国際的な水準とも整合的である。このように統計が整備されていれば、観察された統計的現象に基づいた推論が可能となる。したがって、当時は、劣化予測などの技術は未発達であったと考えられるものの、検査データに基づいて一定の合理性をもった維持管理を実施する基盤が成立していたと考えられる。

この時代には、高度成長期における従来になく水準の社会基盤の大量整備に伴って発生した初期不良の不具合を背景として維持管理技術が進展するとともに、維持管理技術の基準化が開始されている。また、主として鉄道分野において、それまでに蓄積された維持管理に関する情報から得られた知見が、技術へフィードバックされるようになったことも重要な進展である。

(5) 現代

それまでの維持管理技術への取り組みは、実際のニーズに基づいた実務的な発展が中心であったが、1980 年代後半から、学協会での取り組みや学術的な体系化の動きが本格化している。例えば、日本鋼構造協会においては、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」³⁵⁾が作成されており、土木学会では「コンクリート構造物の耐久性設計指針」³⁶⁾「コンクリート構造物の維持管理指針」³⁷⁾などの作成が進み、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕³⁸⁾につながっている。また、個別の学術的研究の進展もみられた。一例として、道路橋 RC 床版の疲労メカニズムが研究され、耐久性の評価が可能となったことが挙げられる³⁹⁾。さらに、それにより、耐久性を考慮した新しい合成桁構造が提案されるようになり⁴⁰⁾、橋梁工学

における重要なブレイクスルーとなった。このように、維持管理においても、ニーズに基づく学術的な取り組みが推進され、また、そこで得られた学術的成果が実務にフィードバックされるという循環が起こっていることがわかる。この段階において、学術的な意味での維持管理の位置付けが確立したと考えられる。

1995 年の兵庫県南部地震は、土木工学に極めて大きな影響を与えたが、維持管理に関連した課題に限れば、地震被害を受けて、既存ストックの耐震補強が大規模に行われたことが挙げられよう。そのことによって、ストックとして社会資本を捉えることの重要性が明確に示され、また、既存ストックの安全性のあり方に対する問題提起となっていたと言える。その後、コンクリート剥落、鋼橋脚の疲労き裂発生など、維持管理に関連する社会的な影響の大きい問題が頻発するようになった。これら問題が発生した構造物は、高度経済成長期のストックであり、品質の問題²²⁾が顕在化した事例も見られ、社会的にも関心が高まった。

その後、大学での講義⁴¹⁾や学協会での資格講習⁴²⁾⁴³⁾などがスタートし、これまでの、どちらかと言えば実務や研究主体の学術から、教育や人材育成を含めた学術的な体系化が進められている。資格においては、従来からある非破壊検査のような個別技術・技能の認定ではなく、診断や維持管理という総合的な技術領域を主眼としたものとなっていることが特徴である。行政においても、アセットマネジメントや長寿命化への取り組みが本格化している¹⁾。また、先進的な機能を有するデータベースやマネジメントシステムの整備も進められている⁴⁴⁾⁴⁵⁾。

このように、現代は、社会的関心の高まりを背景に、これまでの蓄積の上に新たな展開が模索されている段階であると考えられる。

3. 米国における維持管理の発展

維持管理における検査や情報管理に関して先進的な取り組みで知られ、また、関連した情報も豊富な米国交通省（DOT: Department of Transportation）連邦道路局（FHWA: Federal Highway Administration）の橋梁マネジメント³⁴⁾⁴⁶⁾に焦点を当て、その発展の経緯を概観する。

(1) 橋梁検査プログラムNBIPの発足

FHWAでは、1971年から全米橋梁検査プログラム（NBIP: National Bridge Inspection Program）が実施されている。NBIPは、1967年に死者46名を出したウェストバージニア州ポイント・プレザントにおけるシルバー橋の落橋を契機に発足している⁴⁷⁾。シルバー橋は、アイバーを用いた吊橋であったが、アイバーの応力腐食割れによっ

て橋が崩壊したものである。

この事故を受けて、FHWAは、2年に一度連邦議会に対して全国の橋梁の状態を報告する法的義務を負うこととなった。それ以前は、少なくとも連邦レベルで橋梁の状態を把握する手段が存在していなかったが、NBIPにより、全米橋梁台帳（NBI: National Bridge Inventory）が整備されるとともに、最低2年に一度の検査が義務付けられたため、情報の取得と集計が系統的に行われるようになった。全米約60万橋に対してそれぞれ119項目からなるデータを取得し管理しており、1971年から現在まで35年間の蓄積を有している。橋梁マネジメント上、極めて有効な情報資源であると言える。

NBIPは、事故をきっかけにスタートしたことからも伺えるように、欠陥橋を無くすことを主目的としたものであり、検査結果は、連邦政府の道路橋更新・修繕プログラム（HBRRP: Highway Bridge Replacement and Rehabilitation Program）において、各州に予算を配分するための基礎資料として用いられている。

このように、NBIPは、連邦政府レベルで全国の橋梁の状態を把握するためのものである。維持管理に関わる技術的な観点というよりは、全国の社会資本のマネジメントという観点から開始されているところが興味深く、また、情報管理に重点があることが重要な特徴であると言える。なお、NBIデータは、HP上でも公開されており、州毎にどれぐらいの欠陥橋が存在するか、などを容易に調べることができる⁴⁸⁾。

(2) 橋梁マネジメントから性能評価へ

一方、実際に橋梁の維持管理にあたる州における道路ネットワークレベルの橋梁群のマネジメントには、NBIデータのみでは不十分であることが指摘されるようになり、1990年代より、州レベルの管理者のマネジメント支援のためのデータ整備と検査手法が新たに開発され、実施されるようになった。それを、具体化したものがより詳細な部材レベルの検査と劣化予測を含むPONTISとして知られる橋梁マネジメントソフトウェアである。それにより、米国の橋梁マネジメントは、第2世代に入ったと考えられる。検査の高度化と情報管理が同時に進展していることが興味深い。1983年のマイアナス橋の落橋⁴⁹⁾をはじめとして、1980年代に社会資本の荒廃が進んだ⁵⁰⁾こともこのような展開の背景にあると考えられる。

さらに、2006会計年度より、20年間のプログラムとして、橋梁長期的性能プログラム（LTBPP: Long Term Bridge Performance Program）が開始されている⁵¹⁾。これは、これまでの検査が、目視による定性的な検査が主体で、必ずしも予測モデルの高度化に結びついていないことから、全米で数千の橋を代表サンプル橋として選定し、定量的な計測を含む詳細な検査を実施して性能の変化を追跡す

図-7 社会資本ストック⁵²⁾と実質GDP⁵³⁾の推移

るとともに、その中の数百橋に対しては、継続的なモニタリングシステムを設置して、より詳細なデータを取得するものである。また、廃棄される橋梁に対しては、徹底的な「解剖的調査」を実施して、実性能に関するより精度の高いデータを得ることを目指している。これにより、予測モデルの精度を画期的に向上させるとともに、既存のNBIデータの信頼度を評価することで、より合理的なマネジメントを実現しようとしている。NBIP、PONTISに続く、橋梁マネジメントの第3世代を切り開くプロジェクトと位置付けられている。LTBPPによって、連邦レベルの資源配分に関わるマネジメントからはじまった合理的橋梁マネジメントが、PONTISによる州レベルのマネジメントの合理化を経て、個別橋梁レベルまで適用される段階に入ったと考えられる。

4. 歴史的経緯および地域間の比較を通じた考察

ここでは、2, 3章で述べた歴史的経緯、ならびに米国の比較を通して、維持管理技術の発展の特徴について考察を進める。

(1) 歴史的な位置

2章で述べたように、我国の技術の歴史の中で、維持管理が注目されるのは今回がはじめてではない。大きくは、A.大正期の陳腐化、B.戦中・戦後の劣化、C.高度成長期の大量整備に伴う初期不良、がその背景であったと言える。もちろん、これらの現象自体はいつの時代でも見られることではあるが、この3つの時代に、特に大規模かつ象徴的に顕在化し、維持管理技術の発展に大きな影響を与えている。なお、1990年代の道路橋の活荷重の見直しに伴う補強実施は、Aの陳腐化と同質の背景で

図-8 米国における橋梁欠陥率と道路投資の推移
(文献56)-59)より作成)

あると考えられる。また、耐震補強も、耐震基準の見直しに伴う一種の陳腐化対応であるとも解釈できる。

現代は、膨大となったストックの劣化の懸念から、維持管理に注目が集まっている時代であると考えられ、いわば第4の時代と呼ぶことができよう。これまでの3つの時代のどれとも様相が異なるが、劣化に投資が追いつかないという点では、維持管理不足が大規模劣化を招いた戦中期に近いものであると推測される。戦中期のように全く放置されている状態ではないから、その表れ方はより緩やかであると予想されるが、ストック量は、図-7に示したとおり、当時の比較にならないほど増加している。一方、GDPの伸びは鈍化しているから、単位ストックに必要な維持管理費用が一定であるとする、ストックを維持するためにはGDPのより大きな割合が維持管理に振り向けられざるを得ないことになる。そこで、維持管理不足による経済成長への悪影響⁵⁴⁾や、「成長の限界」⁵⁵⁾が指摘しているような「投資が減耗に追いつかなくなり産業の基盤が崩壊」という破局のシナリオに類似した事態の発生が長期的に懸念されている。したがって、適正な資源の投入水準を明らかにして効率的な維持管理を実施するとともに、革新的な長寿命化のための技術の研究開発が強く求められていると考えられる。

(2) 米国との比較

米国では、検査によって得られた技術情報が集計されて議会に報告され、それが予算配分という社会的意思決定に反映される仕組みが成立していることを指摘した。その結果、図-8に示したとおり、近年の道路投資の増大に伴って、着実に欠陥率が低下している。なお、ここでいう「欠陥橋」は、構造的欠陥あるいは機能的陳腐化を有する橋であり、NBIで定義されている補修が必要な“deficient bridge”を指す。

写真-2 2005年12月28日のI-90架道橋の落橋事故

PC 鋼線の腐食により自重で崩壊したと考えられる。2005 年 8 月に目視検査が実施されていた。Copyright, Pittsburgh Post-Gazette, 2005, all rights reserved. Reprinted with permission.

一方、我国では、前述したように、橋梁マネジメントソフトウェアやデータベースの整備が進展しており、維持管理に関する技術情報を意思決定に反映する基盤が確立されつつあるが、米国の議会報告のような高度な社会的意思決定にフィードバックする仕組みは明確には整っていない。

今後、増大する老朽ストックへの維持管理ニーズに対して、資源投入の正当性を評価し、合理的な資源配分と実施を支援する、技術に基盤を有するマネジメントが求められる。米国の例では、NBIデータによって、資源配分については一定の合理性を持つ決定がなされていると考えられるが、1980年代には財源が不足して荒廃が進むなど、全体の投入水準の合理性・正当性を説明するには至っていないと考えられる。また、最近でも、写真-2のようなPC橋の落橋⁶⁰⁾や、鋼桁の破断⁶¹⁾などの事故が発生している。それが、LTBPP発足の一つの背景ともなっている。

米国では事故を起点としたNBIPの発足が維持管理の発展に大きな影響を与えた。NBIPは、基本的に、予算配分を合理的に行うためのプログラムであって、維持管理への適正な資源配分を通じた社会資本のマネジメントという「社会的側面」が重視された施策であると考えられる。「技術的側面」を重視したLTBPP発足が最近であることからそれが伺える。この発展の経緯は、我国で主流の個別の劣化予測を積み重ねて全体像を把握するという積み上げのアプローチの逆であるとも言え、今後の我国の維持管理・マネジメントの方向を考える上で参考となると思われる。

大局的に記述すれば、米国では、マクロ的な視点で社会的側面から施策が進められた面が強いが、我国では、ミクロ的な視点とも言える技術的側面からの発展が主流である。その理由については、社会的背景を含めて各種

の要因が考えられるが、技術的には、我国においては、当初、外国から高い技術がもたらされたことや、事故などの社会的要請が発生する以前に、高い意識を持った技術者の判断によって耐久性への検討が進められ、結果として米国のような大惨事が発生しなかったことなどが原因として考えられよう。

5. まとめ

ここでは、橋梁を中心として我国における社会基盤の維持管理技術の歴史を振り返り、また、米国での発展の経緯との比較から、その特徴を論じた。主たる結論は以下のとおりである。

- ・ 我国では、戦前より、主に技術的観点から維持管理の重要性が認識されており、維持管理上の不具合の設計へのフィードバックや、経済面を含めた検討が行われている。また、鋼材が貴重であったことを背景として、各種補修工法の開発や再利用なども活発に行われていた。
- ・ 歴史的に、維持管理技術は、ストックのA.陳腐化、B.劣化、C.初期不良を背景として発展してきたことを論じた。それぞれの課題は、Aについては大正時代の機関車大型化に伴う橋梁の弱小化、Bでは戦時中の維持管理不足、Cでは高度経済成長に伴う大量整備、を背景として顕在化し、維持管理に大きな影響を与えている。
- ・ 米国では、橋梁の事故を起点として、連邦政府レベルで全米の橋梁の状態を把握する検査プログラムであるNBIPが発足し、本格的な維持管理対策が実施されるようになった。次いで、橋梁群のマネジメントシステムの構築が行われ、現在は、長期橋梁性能のモニタリングが進められている。
- ・ 国際的な比較では、米国では維持管理を社会的な側面から資源配分の問題と捉える傾向が見られ、社会資本マネジメントの観点が先行していると考えられる。それに対して、我国は、技術的な問題意識を起点として維持管理が発展してきた傾向がある。
- ・ 日米ともに、系統的な検査の実施と情報の管理が、技術の発展に大きな影響を与えている。

現代は、膨大となったストックの劣化の懸念から、維持管理に注目が集まっている時代であると考えられ、いわば「第4の時代」と位置付けられる。これまでの時代に見られなかった、極めて大規模なストックの管理に対応する革新的な技術が求められている時代であると考えられることができる。

なお、本研究は、橋梁を中心として歴史的視点ならびに日米の国際比較から、維持管理分野全体の俯瞰を試み

たものであり、さらに客観的かつ深化された議論を進めるには、より幅広い社会基盤構造物ならびに多国間の分析が求められる。その意味では、本研究の対象は限定的ではあるが、発展的な分析のための基盤を与えるものであると位置付けられよう。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、FHWA・Turner-Fairbank Highway Research CenterのSteven B. Chase氏には、米国における橋梁検査・維持管理の現状およびLTBPPに関してヒアリングに応じて頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 国土交通省：道路構造物の今後の管理・更新等のあり方提言，2003。
- 多田宏行：橋梁技術の変遷，鹿島出版会，2000。
- 日本国有鉄道：鉄道技術発達史，1958。
- 鉄道施設技術発達史編纂委員会：鉄道施設技術発達史，日本鉄道施設協会，1994。
- 阿部允，阿部雅人：橋梁のメンテナンス，日本鉄道施設協会誌，Vol.44, No.6, pp.2-5, 2006。
- 中井祐：近代日本の橋梁デザイン思想—三人のエンジニアの生涯と仕事，東京大学出版会，2005。
- 久保田敬一：本邦鉄道橋梁ノ沿革ニ就テ，業務研究資料，鉄道大臣官房研究所，Vol.22, No.2, 1934。
- 東憲昭：軌道構造と材料，交通新聞社，2001。
- 枕木の平均寿命の算出の一法，土木学会誌，Vol.1, No.2, pp.687-694, 1915。
- 軌道の経済的敷設年限，土木学会誌，Vol.1, No.2, pp.694-699, 1915。
- 高崎哲郎：評伝 山に向かいて目を挙ぐ—工学博士・広井勇の生涯，鹿島出版会，2003。
- Bosworth, D.L.: The rate of obsolescence of technical knowledge—a note, *The Journal of Industrial Economics*, Vol.26, No.3, pp.273-279, 1978。
- 梶川康男：鋼橋の大移動地図—既存ストックの有効活用の実例—，JSSC，No.57, pp.1-11, 2005。
- 中原壽一郎，大津寛，飯田三郎：飯桁のトラストビーム式補強法並びに其の效果に就いて，業務研究資料，鉄道大臣官房研究所，Vol.17, No.2, pp.165-179, 1929。
- 高坂紫朗：鉄道防災改良施工法，三報社，1955。
- 西村俊夫：国鉄トラス橋総覧，鉄道技術研究資料，Vol.14, No.12, 1957。
- 西村俊夫：溶接鉄道橋の破損事故，溶接学会誌，Vol.37, No.10, pp.12-16, 1968。
- 西村俊夫，三木千寿：引張応力に起因する鋼橋梁の変状，土木学会誌，Vol.60, No.12, pp.55-64, 1975。
- 西村俊夫，大野正：餘部橋梁の実態と対策，構造物設計資料，No.5, pp.190-197, 日本国有鉄道構造物設計事務所，1966。
- 友永和夫：鉄道橋の保守ならびに補強法について，昭和 26 年度土木学会夏期講習会テキスト，1951。
- 日本国有鉄道施設局：建造物保守心得（案），1956。
- 小林一輔：コンクリートが危ない，岩波書店，1999。
- 日本道路協会：道路維持修繕要綱，1978。
- 日本道路協会：道路橋補修便覧，1979。
- 建設省土木研究所：橋梁点検要領（案），土木研究所資料，No.2651, 1988。
- 松井繁之編著：外ケーブルによる鋼橋の補強，森北出版，2005。
- 日本国有鉄道：建造物検査標準解説，日本鉄道施設協会，1966。
- 日本国有鉄道施設局土木課：土木建造物取替の考え方，日本鉄道施設協会，1974。
- 日本国有鉄道鉄道技術研究所監修：高速鉄道の研究—主として東海道新幹線について—，研友社，1967。
- 牧添親男：防災投資の基本的な考え方，鉄道土木，Vol.15, No.6, pp.79-81, 1973。
- 鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説（鋼構造物），1987。
- 鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説（コンクリート構造），1987。
- 村上温：維持管理と施設寿命，土木計画学シンポジウム，No.17, pp.30-36, 土木学会，1983。
- Yanev, B.: *Bridge Management*, John Wiley & Sons, 2007。
- 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993。
- 土木学会：コンクリート構造物の耐久性設計指針（試案），コンクリートライブラリー，No.65, 1989。
- 土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針（案），コンクリートライブラリー，No.81, 1995。
- 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2001。
- 前田幸雄，松井繁之：移動輪荷重走行装置による道路橋床板の疲労に関する研究，第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集，1984。
- 新しい鋼橋の設計編集委員会：新しい鋼橋の設計，山海堂，2002。
- 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会，2004。
- 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'06，2006。
- 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術，2005。
- 室井智文，窪田賢司，紫桃孝一郎，稲葉尚文，横山和昭，山根立行：橋梁マネジメントシステムにおける劣化度評価手法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.51, pp.1139-1146, 2005。
- 道路管理データベースシステム MICHI，道路保全技術センター，<http://www.hozon.or.jp/center/business/michi.html>
- 東京大学 21 世紀 COE プログラム「都市空間の持続再生学の創出」：都市のストックデータのマネジメントと利用に関するセミナー講演資料集，2006。
- Weingroff, R.F.: A peaceful campaign of progress and reform: The Federal Highway Administration at 100, *Public Roads*, Vol.57, No.2, 1993。
- Bridge Technology, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/britab.htm>
- ダンカー，K.F.，ラバット，B.G.：米国の橋はなぜ落ちる，日経サイエンス，Vol.23, No.5, pp.78-86, 1993。
- 大石久和：荒廃したアメリカに学べ，中央公論，8 月号，pp.232-242, 2006。
- Chase, S.B., Duwadi, S.R. and Hooks, J.M.: Getting ahead of the curve, *Public Roads*, Vol.67, No.3, 2003。
- 内閣府政策統括官編：日本の社会資本，財務省印刷局，2002。
- 内閣府経済社会 総合研究所国民経済計算部：長期時系列（GDP・雇用者所得）（68SNA，平成 2 年基準），昭和 30

- 年-平成 13 年 1-3 月期 : <http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/qe011-68/gdemenuj68.html>
- 54) Kalaitzidakis, P. and Sarantis Kalyvitis, S.: On the macroeconomic implications of maintenance in public capital, *Journal of Public Economics*, Vol.88, No.3-4, pp. 695-712, 2004.
- 55) D.H.メドウズ, D.L.メドウズ, J.ラーンダズ, W.W.ベアランズ 3 世 (大来佐武郎監訳) : 成長の限界, ダイヤモンド社, 1972.
- 56) 国土交通省 : 平成 14 年度国土交通白書, ぎょうせい, 2002.
- 57) U.S. Department of Transportation: Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: 2004 Conditions and Performance, Report to Congress, 2006.
- 58) U.S. Department of Transportation: 1999 Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: Conditions and Performance Report, Report to Congress, 2000.
- 59) 米国連邦議会技術評価局編 (建設経済研究所訳著) : 社会基盤の再建, 開発問題研究所, 1992.
- 60) Westbound I-70 reopens after overpass collapses, *Pittsburgh Post-Gazette*, December 28th, 2005.
- 61) Fischer, J.W., Kaufmann, E.J., Wright, W., Xi, Z., Tjian, H., Sivakumar, B. and Edberg, W.: Hoan Bridge Forensic Investigation Failure Analysis Final Report, Wisconsin Department of Transportation and the Federal Highway Administration, 2001.

(2006. 9. 4 受付)

DEVELOPMENT AND CHARACTERISTICS OF INFRASTRUCTURE MAINTENANCE OF JAPAN WITH EMPHASIS ON BRIDGES

Masato ABE, Makoto ABE and Yozo FUJINO

The paper presents characteristics and challenges of Japanese maintenance technology through investigation of historical development and comparison with U.S. It is shown that Japanese development is motivated by the status of infrastructure stock of each age, i.e., A) functional obsolescence at Taisho era, B) deterioration at WWII period, and C) initial defect at post war economic growth period. In comparison to U.S., Japanese development is more focused to technological aspects, while importance of resource allocation is stressed in U.S. from social point of view. In both countries, technological development is highly influenced by implementation of systematic inspection and information management