



瀬尾 彰

京都大学経営管理大学院
インフラ物性産学共同講座特定教授

インフラ物性研究のアセットマネジメントへの適用

1. はじめに

インフラ資産を計画的・効率的に管理・運用していくためには、策定した長期的な補修シナリオに基づき、現在の状態および劣化の程度を的確に判断したうえで将来の劣化予測を行ない、労働力や予算的制約を加味した適時、適材適所の維持・修繕、資本投下計画を作成、実施すること、すなわちアセットマネジメントのPDCA サイクルを適切に構築・運用することが重要である。

インフラ資産の劣化判定に関する点検・モニタリング、力学的劣化機構の解明、劣化現象の力学的・統計的モデル化についての近年の進歩は大きいものの、インフラ資産を構成する素材そのものの物理化学的特性、劣化の起点や進展のメカニズムに関する研究は始まったばかりであり¹⁾、実務的知見はほとんど蓄積されていない。このため現在のインフラ資産の維持修繕においては、損傷の程度を、主に外観検査により、一部で非破壊計測を活用し耐荷性能の低下を計測し、過去の同様の損傷程度と比較・判定することで、適材適所の補修、修繕を実施している。劣化過程をモデル化、予測することも試みられているが、現実には事後保全により健全性を担保しているのが実情である。

一方で、大型放射光施設 SPring-8 で生成される超高輝度の硬 X 線を用いたミリ・マイクロ・ナノスケールで物体内部を可視化に関する長年の研究により、今日ではインフラ資産内部の微細構造を、非破壊で正確に 3 次元断層画像 (CT 画像) として可視化することが可能となってきた。

そこで本報では、SPring-8 による非破壊計測およびその解析などを活用して、インフラ資産を構成する素材そのものの物理化学的特性ならびにマイクロの物性レベルにおける劣化の起点や、その進展の

メカニズムに関する研究、さらにそれらの成果に基づく劣化予測に関する研究、すなわちインフラ物性研究の進展が、インフラ資産のアセットマネジメントにどう寄与するかを述べる。

2. インフラ資産のアセットマネジメント

インフラ資産のアセットマネジメントは、ISO 55001 の策定などにより方法論が整備されてきた。ここでは対象とする時間軸をに分けて PDCA サイクルを運用・実施するが、長期的な視点で補修シナリオや予算水準を決定する構想レベル、5 年程度の中期的な予算措置や重点的な補修計画を策定する戦略レベル、および各年度の予算において補修箇所優先順位をつけ具体的に補修を行う実施レベルに整理される²⁾。

なお構想レベルのマネジメントは、長期的な計画策定を目的とするため、インフラ資産全体の平均的な劣化予測を行い、補修、投資計画を策定するサイクルである。戦略レベルのマネジメントは、定期点検やモニタリングによるインフラ資産の現在の損傷状態に関するデータに基づき、中長期的な投資、維持管理計画を策定するサイクルであり、個別のインフラ資産ごとに損傷要因を特定したうえで劣化予測を行い、構造安全上の問題が予想される箇所は優先的に更新が行われるように計画する。また実施レベルのマネジメントは、実際の維持修繕を行うサイクルであり、ここでは対象とするインフラ資産の立地条件、規模や損傷要因に基づき、適切な対策となる設計、施工、事後評価のための記録が行われる。

このように現在整備されている方法論においては、短期、中長期の各時間軸において、インフラ資産の供用条件、現況ならびに損傷要因を基に維持修繕の PDCA プロセスを有効に機能させるこ

とを目的としている。

3. インフラ物性研究とアセットマネジメントへの適用

インフラ物性研究は、インフラ資産の大きさ、マクロ、ミクロといった空間的な軸において、維持修繕を研究するものである。具体的には、インフラ資産のマクロの構造物を構成する素材ごとの、ミクロの物性および化学結合の状態を含む界面の相互作用を、SPring-8 による X 線 CT 計測等の微視的計測および解析等により検証し、損傷、破壊の発現の仕方とその進展メカニズムを明らかにすることを試みる。得られた損傷要因に関する知見を基に、インフラ資産の損傷を抑制し長寿命化しうる新技術や新手法を考案することにくわえ、社会実装する際の諸条件を明確にすることを目指している。

またこれらの成果はアセットマネジメントの各時間軸においては、特に中長期の戦略レベルのマネジメントにおいて、インフラ資産の損傷要因を特定することに寄与し劣化予測の信頼性を高めることが期待できる。実施レベルのマネジメントにおいては、実際の維持修繕を行う際にインフラ資産の長寿命化に資する新材料や新技術の選択、活用の推進が期待できる。

以降、インフラ物性研究の初番として取り組んでいる、アスファルト舗装に関する研究の進展を述べる。

4. アスファルト舗装に関するインフラ物性研究

アスファルト舗装を構成するアスファルト混合物は、供用中の交通荷重による変形や、水、酸素、紫外線等が相互に作用することで、ひび割れ、わだち掘れや剥離といった経年劣化が生じるが、損傷、破壊の発現の仕方と、その進展メカニズムの詳細はいまだに明らかになっていな

・マクロスケール: 構造物

- ・構造 10⁰~10³ m (m ~ km)
- ・骨材 10⁻² m (cm)
- ・わだち掘れ / クラック 10⁻³ m (mm)



・ミクロスケール, 微視的検証: 素材

- ・アスファルト被膜 10⁻⁴~10⁻⁵ m (~1/100mm)
- ・光学顕微鏡 10⁻⁶ m
- ・分子間力 10⁻⁹ m
- ・分子間結合 10⁻¹⁰ m



図1 アスファルト舗装に関するインフラ物性研究の空間的スケール

い。またアスファルト混合物は、碎石、砂、石粉など接着剤であるアスファルトを用いて固めて製造される複合材料であるが、現在の設計方法においては、混合物は均一で一体のもののみならず、各構成成分ごとの特性や界面の相互作用を考慮した既往検討はほとんどなく、正しく混合物内部の挙動を理解できていない可能性が高い。すなわち、ひび割れや骨材からのアスファルトの剥離といった劣化現象や、再生混合物の品質等の課題に対し、有効な対策が採られていない可能性がある。

図1にアスファルト舗装に関するインフラ物性研究の空間的スケールを示す。構造物に対する現在の目視もしくは画像による点検を基礎とする維持修繕においてはマクロスケール、たとえば1mm (10⁻³mm) 程度までの大きさを対象としている。インフラ物性研究においてはアスファルト混合物内部をSPring-8によるX線CTを用いて1 μm (10⁻⁶mm) 程度の空間分解能をもって非破壊で微視的計測および解析を行い、混合物内部の微小な損傷起点の計測ならびに破壊の進展メカニズムを考察する。さらに素材内部の物質の状態や化学結合の状態を10⁻⁹ないし10⁻¹⁰mm程度のスケールで計測し考察することで、舗装損傷や劣化機構の解明を試みる。これらのミクロスケールの計測、解析から得られた知見を基に本質的にアスファルト混合物の損傷抑制に資する新技術を考察し、マクロスケールの舗装事業に対し、実装すべき新技術、新手法、適用条件を提案することを目指している。

5. SPring-8 によるアスファルト混合物の微視的計測

(1) SPring-8 による X 線 CT 計測の有効性

アスファルト混合物の同一箇所を、SPring-8 および産業用 X 線装置を用いて CT 画像を得た。計測条件を表1に、結果を図2に示す。なお図中の黒部分は空気もしくは空隙、薄いグレー部分は骨材、濃いグレー部分はアスファルトを示す。また各 CT 画像はトリミングおよび各画素の輝度の規格化のみ実施している。SPring-8 による CT (図2左) では、混合物中の微細構造、たとえば骨材中のひび割れ、空隙の状況や素材同士の界面を明瞭に識別することができることから、損傷、破壊展メカニズムの考察に有効と

考えられるが、産業用 X 線 CT (図2右) では分解能が低く、微細構造の把握が困難であることが分かる。

(2) アスファルト混合物の微視的計測事例

SPring-8 による CT 計測により、アスファルト混合物内部の微小な損傷起点の計測および破壊の進展メカニズムを考察することを試みた。実験室内で繰り返し疲労試験 (EN12697-24 ANNEX-E) を実施した後のアスファルト混合物を SPring-8 を用いて、表1に示す条件で計測し、得られた CT を図3に示す。図3左には、いくつかのひび割れおよびその発生過程と考えられる間隙が認められたことから、該当箇所を拡大し図3a)、b)、c) に示す。

図3a) は、骨材表面からアスファルトが剥離することで、間隙が生じていると考えられる箇所である。図上では上下に0.2~0.3mmの間隙が生じているが、図中矢印部分が剥離したと考えられる場所である。図3b) は、アスファルトが凝集破壊することで間隙が生じたと考えられる箇所である。図中矢印部分付近では上部にモルタルがあり、下部の骨材表面にもアスファルトが残存していることが確認できたため、アスファルトが繰り返し载荷による骨材の変位によりアスファルトが内部で凝集破壊を起こしたものと考

表1 X線CT計測条件

X線源	SPring-8 BL28B2	産業用 CT
X線エネルギー	200 keV (ピーク)	180 kV
空間分解能	3.72 μm	63 μm

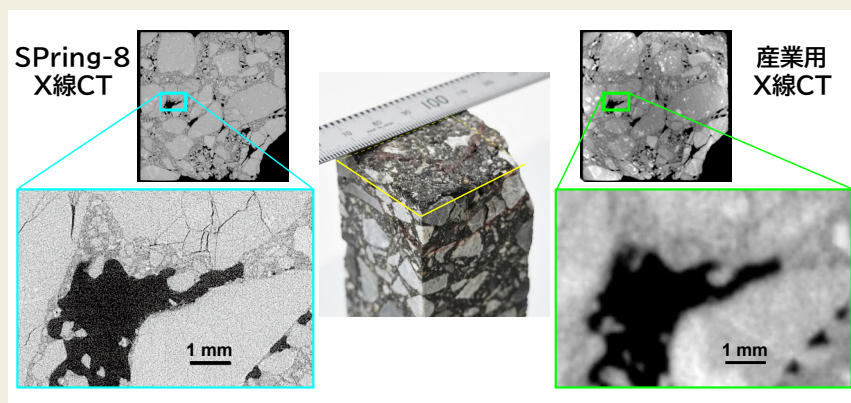


図2 アスファルト混合物のSPring-8および産業用X線装置によるCT画像

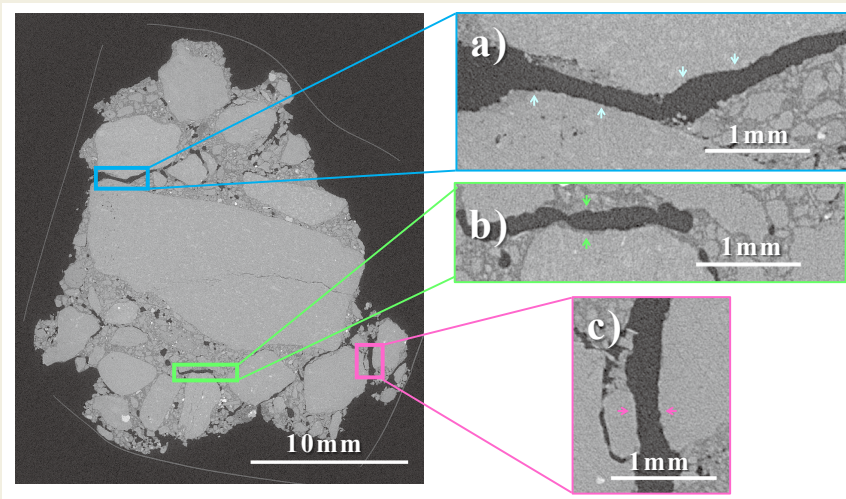


図3 繰り返し疲労試験後のアスファルト混合物のX線CT

えられる。図3c)は、骨材同士が接触していた、もしくはアスファルト被膜が極めて薄かったと考えられる箇所である。ここでは接着剤となるアスファルトがほとんど存在しなかったため、繰り返し载荷による変位により骨材間に容易に空隙が生じたと考えられる。

(3) 微視的計測結果のマクロスケールへの応用

アスファルト混合物の微視的計測により、混合物内部の空隙の形態が複数存在することが明らかとなり、その空隙の生成過程を考察した。そこでこれらの知見を基に、マクロスケールの舗装事業に対し、空隙の発生抑制のために実装すべき新技術、新手法を考察した。第1に、骨材表面からアスファルトが剥離することに対し、骨材とアスファルトは水浸入の場合においても剥離を起こさない程度に、強固に接着させることが望ましい。骨材とアスファルトを共有結合を用いて接着させることも有効と考える。第2として、骨材とアスファルトが強固に接着していることを前提とすれば、骨材の変位に追従し凝集破壊しにくいアスファルトを選択することが有効と考える。第3として、粗骨材同士の接触もしくはアスファルト被膜の極めて薄い箇所の発生を防ぐため

に、あらかじめ粗骨材にアスファルトもしくはモルタル被膜を形成しておくことが有効と考える。

まとめと今後の展望

インフラ資産を計画的・効率的に管理・運用していくためには、アセットマネジメントのPDCAサイクルを適切に構築・運用することが重要である。ここではインフラ資産の損傷要因を特定したうえで劣化予測の信頼性を高めること、くわえて損傷を抑制し長寿命化しうる新技術や新手法を、根拠に基づいて社会実装することが求められる。

インフラ物性研究においては、インフラ資産を構成する素材ごとのミクロの物性をSPring-8による微視的計測および解析等の検証をとおして、損傷、破壊の発現の仕方と進展メカニズムを明らかにし、社会実装可能な対策を提案することを試みる。アスファルト舗装に関する研究においては、主要な損傷であるひび割れの起点および進行途中を計測でき、さらに損傷発生要因の考察を行い損傷を抑制しうる新技術や新手法を例示するに至っており、SPring-8による微視的計測および解析が、インフラ資産の損傷要因の特定および新技術や新手法の提案に

極めて有効であることの好事例と考える。継続して舗装事業における省資源・低炭素の実現にも貢献するため、再生混合物の品質の検証、ならびにアスファルトと骨材のはく離抑制対策を検証する計画である。

なお、インフラ物性研究においては、インフラ構造物に対して微視的検証を行うため計測結果のデータ容量が巨大化する。例えば、アスファルト混合物のCTにおいては、2cm厚の供試体の計測により1TB（1テラバイト）の画像データが生成される。これらを基とした劣化判定や劣化予測、その社会実装においては、AI（人工知能）およびML（機械学習）を活用した短時間で高精度の画像解析を行うことが求められ、スーパーコンピュータの活用も必要とされてくる。

今後は、道路舗装以外のインフラ資産においても、CT計測および画像解析に加え、素材内部の化学反応や結晶構造の変化、素材同士の化学結合の理解に基づく、インフラ資産の本質的な老朽化対策、将来予測を行うことが求められてくる。微視的計測から解析、さらに社会実装のための提案を行う人材の育成も含め、インフラ物性研究が進展することが期待される。

参考文献

- 1) 瀬尾、上杉、竹末、小林：大型放射光施設SPring-8を用いたX線CT像によるアスファルト混合物の微視的計測および損傷メカニズムの考察、土木学会論文集、Vol.80, No.21, 24-21002 (2024)
- 2) 小林、田村編：実践インフラ資産のアセットマネジメントの方法、理工図書 (2015)

せお あきら／京都大学経営管理大学院インフラ物性産学共同講座特定教授。1993年昭和シェル石油株式会社。主にアスファルトを含む舗装資材の技術・研究開発ならびに事業化に従事。2024年5月より現職。