

1. はじめに

1. 1 インフラ構造物の老朽化と維持管理（海外の事例）

図-1.1.1 に示されるように、アメリカでは、第二次大戦前に建設された多くの道路ストックが1980年代になると老朽化が顕在化し、「荒廃するアメリカ」とまで言われた。1980年代以降、道路維持管理予算が増強されたが、2004年度時点でまだ約3割の欠陥橋梁が存在している[1]。これは一旦道路が劣悪な状態になると元に戻すことが困難であることを示すものである。図-1.1.2 に示す今年9月30日に発生したカナダ・モントリオールで高速道路の跨道橋の崩落はこのことを如実に物語っている[2]。

また、アウトバーン網が充実しているドイツでは、連邦交通省道路局から道路橋の補修補強事例集[3]が刊行されているように、いち早く道路構造物の維持補修の重要性を認識し、「既設構造物を如何に安全に長く後世まで使い続けていくか」という命題に対し、新しい技術開発が進められている。例えば、中小の道路橋の耐荷力性能を現場での実地載荷試験のもとで合理的に評価できる試験法の確立を目的として、設計終局荷重載荷のための特殊載荷車両 BELFA（図-1.1.3）が開発された[4]。維持管理に対する新技術開発は、東西ドイツ統一により、旧東ドイツ交通網のレベルアップという形でますます拍車がかけてきた。

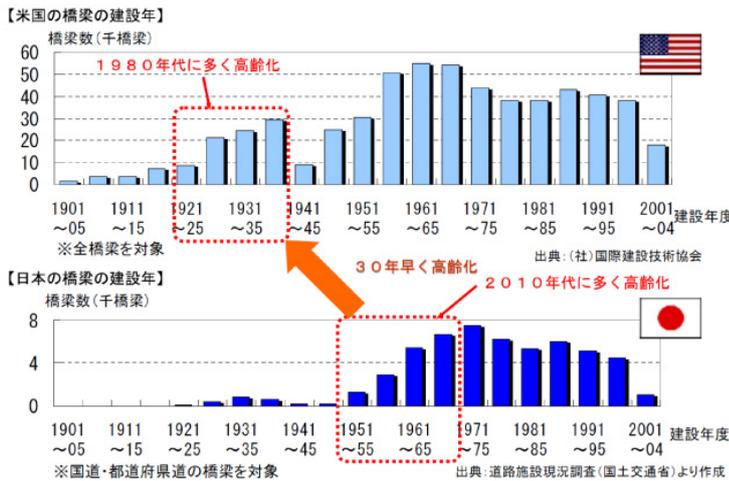


図-1.1.2 高速道路の跨道橋の崩落
(カナダ・モントリオール)

図-1.1.1 日米の道路橋の高齢化の比較[1]

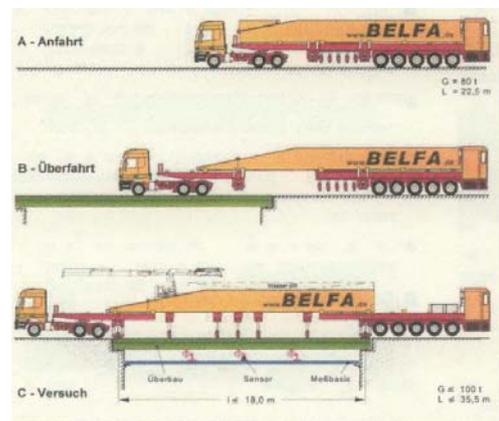


図-1.1.3 実橋耐荷性能試験車 BELFA[4]

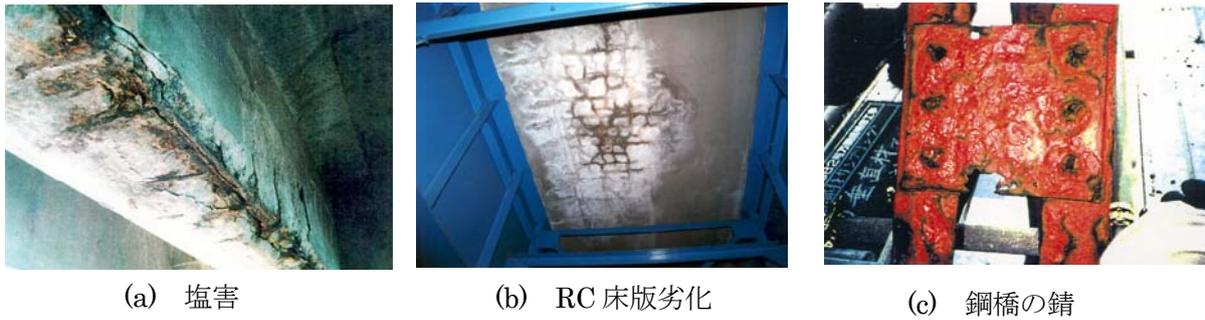


図-1.2.1 道路ストックの劣化・老朽化

1.2 わが国の道路構造物の劣化事例とその対策

わが国は、戦後、急速に社会基盤施設を整備してきたが、トンネルのコンクリート片はく落、鋼製橋脚隅角部の疲労き裂などにみられるように、これまでに建設されてきた道路ストックの劣化・老朽化が急速に進行している（図-1.2.1）。アメリカの例を考慮すると（図-1.1.1）、日本では2010年代以降に多くの老朽化橋梁が出現することが予想されている。その上さらに、わが国の道路ストックは、地震・台風・島国など厳しい地形・自然条件下に存在し、利用者の“安全・安心”を確保するため適切な管理が必要であり、特に条件の厳しい道路では、損傷が顕著であるため早期対策が不可欠である。

図-1.2.2 は公共インフラ構造物のライフサイクルを示したものである。これまでは社会基盤施設を造ること（PLAN、DO）に重心があったが、いま確実に SEE、MAINTAIN に重心が推移しつつある。例えば、土木学会におけるインフラ維持管理に関する研究討論会[5]やコンクリート工学の“最新コンクリート計測技術”の特集[6]は、土木工学分野において“造る土木”から“維持管理工学”への重心の移動を如実に示すものである。

また、トンネルのコンクリート片剥落、鋼製橋脚の疲労き裂発生を契機として、効率的・高精度な面的探傷技術の研究開発が望まれるようになった。さらに、建設構造物のメンテナンスにおける診断・評価は、構造物の保有性能や劣化過程、環境・使用条件が極めて多様で複雑であるのみならず、構造物の現況、設計図面、補修履歴、可能な補修工法、それに伴う社会的コストなどの必要とされる情報も多岐にわたることから極めて高度な工学的判断が求められるのである。

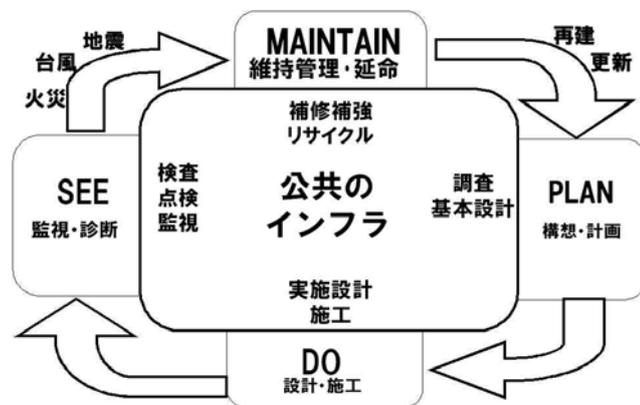


図-1.2.2 公共インフラのライフサイクル

1. 3 計測技術の現状

土木構造物の点検・非破壊検査技術として欠陥の探傷とひずみ測定に大別される[7]。

探傷技術としては、放射線透過試験、超音波探傷試験の内部欠陥検出法、また、表層部欠陥検出法として浸透探傷試験、磁粉探傷試験、電磁誘導試験などが用いられている。これらの方法はいずれも欠陥が既に発生した後に試験する方法である。

ひずみ測定は、疲労や腐食等による既存構造物の経年劣化に対する安全性をモニタリングするために用いられる。ひずみ測定法には多くの方法があるが、その中で最も広く使用されているのはひずみゲージ法で、これは高精度で簡便にひずみ計測が可能である。しかし、ひずみゲージ法で得られるひずみ値は、貼付したゲージ長の平均ひずみ値であり、また一点のみの定点計測値である。そのため、き裂や応力集中などの欠陥を検知するためには、多くのひずみゲージを貼付する必要がある。さらには、ひずみゲージ自体のセンサーとしての耐久性が長期間にわたるモニタリングには課題が残るとともに、対象物に直接ゲージを貼付する必要があるため、環境条件によっては計測が制限される場合もある。

最近、SHM (Structural Health Monitoring) の分野ではMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) によってセンサ・CPU・電源・無線が一体化したセンサをIT技術でモニタリングしようとする研究開発が活発に行われているが、構造物の維持管理のタイムスケールが50年、100年となると、これらを用いても、最終的には設置型センサや計測機器の寿命が問題となる。

一方、建設構造物の構造健全性の診断法としては、目視や打音検査などの経験的方法のほか、放射線透過、サーモグラフィ、レーダー、超音波、衝撃弾性波、AE法などのように、定量的・客観的検査が可能な非破壊検査技術の研究・開発が鋭意試みられている。しかし、これら既存の非破壊検査技術は、建設構造物のスケールや、また、建設現場で施工・検査・補修を行わなければならないことから、土木工学分野では自動車・船舶工学分野に比べるとはるかに悪環境下で計測を行うことが要求される。そのため建設現場で適用するには、経済的かつ技術的に解決しなければならない課題があり、建設構造物への一般的な適用としては、まだ実用化には至っていないものも多い。

また、社会基盤施設の非破壊検査として用いられているものの大部分は構造物の局所的な欠陥検出等に集中したものである。既存インフラの維持管理を考えると、本来の非破壊検査の役割としては、構造物全体としての性能についても検査できることが重要になってくる。

1. 4 光計測技術

こうした中、ひずみゲージ法に代わる計測法として、近年、モアレ法、ホログラフィ法、スペックル法、コースティック法、デジタル画像相関法などの光計測技術を基本としたひずみ測定法の研究開発が鋭意進められている[8]。例えば、スペックル干渉計測法 (ESPI) は、レーザ光を物体に照射した時に得られる斑点状のノイズパターンを利用するもので、CCDカメラで受像したデジタル情報を画像処理することにより、可視光線下でホログラフィ干渉縞と同じような縞模様が観察される。アルミ合金試験片での引張試験を観察すると、一定速度で引張っているにもかかわらず、局所的な干渉縞の脈動が観察される。これらは従来観察されていない新しい現象で、材料の劣化過程を予測するための手がかりとなる可能性を秘めており、材料の物理的変化とスペックルパターンの動的変化とを結び付けることによって、鋼やコンクリート材料の劣化過程や疲労現象のメカニズムの解明が期待できる。

これらの表面計測を基本とした光学的計測技術を用いれば、構造部材を構成する材料の破壊が、いつ、どこに、どのように、生じるかを、非接触かつ全視野で計測することができる。また、光学的計測技術を用いて計測情報の互換性を保持しておけば、機器の変更に関わらず永続的な計測が可能になる。

実構造のメンテナンスを想定すると、設計図面が残っていない構造物の構造・形状データや、老朽化した構造物のひび割れや剥離等の変状がどの程度の年数でどれほど増加したか、などの情報を取得する必要がある。定期的な検査で計測された三次元データは、静的・動的解析による耐震診断法の基礎データとして使用することもできるし、また、三次元データベースの維持管理システムを更新することにより、構造物の劣化に対する予防保全や維持管理に利用できる。そのためには、構造物の三次元データを高精度にできるだけ容易に取得する必要がある。ポータブルな 3D レーザースキャナでは、面的な高密度計測、短時間計測、人の立入りが困難な現場での計測、デジタルデータとしての記録・加工が可能などの特長を有しており、実構造物の変状調査に期待できる。

構造物の劣化を診断し、余寿命を予測するためには、その劣化メカニズムを面的に精確に把握し、劣化に至るまでの状態をリアルタイムに計測する必要がある。また、構造物の表面や内部の情報を遠隔・非接触で効率的に計測し、計測結果の画像情報や物理量をデジタルデータとして保存し、計測情報をデータベース化しておけば、長期にわたる構造物のカルテが蓄積され、構造物の診断に活用することができる。その先に、効果的な補修・補強等の維持管理法があるものと考えられる。

1. 5 本研究の目的、活動内容、および報告書の内容

科学研究費の助成に先立って、日本コンクリート工学協会（JCI）九州支部の「コンクリートの硬化・劣化過程の非接触全視野ひずみ計測」に関する研究専門委員会では、2004（H16）年度から、スペckル干渉計測法、デジタル画像相関法、赤外線サーモグラフィ、3次元写真計測、3次元レーザ計測等々の光学的計測法を用いて、コンクリートの硬化・劣化過程における非接触全視野計測の適用可能性・有効性を追求するとともに、インフラ構造物のメンテナンスへの光学的計測法の利活用法について活動してきた。

これらの計測法は、(a)非接触、(b)高精度、(c)高速、(d)全視野計測が可能等、多くの利点を有しており、コンピュータやその周辺機器や画像処理技術の進歩により、より使いやすく、信頼性の高いものとなっている。また、種々の構造物の複雑化が進む中、光学的計測法を劣化検査に用いるだけでなく、非線形 FEM などの計算力学的な解析と組み合わせることで、さらには、前述の既存のサーモグラフィ、超音波、AE などの非破壊検査技術を併用することにより、より信頼性の高い診断評価を行うことができる。

2005（H17）年度の科学研究費の申請に際して、JCI 九州研究専門委員会の委員（大学・高等工業専門学校の研究者）も共同研究者として参画していただいた。したがって、JCI 九州研究専門委員会の委員は本研究課題の共同研究者でもある。幸い、申請した研究課題が採択され、JCI 九州研究専門委員会の研究活動にも拍車がかかった。

その成果として、下記に示すように、2005 年 12 月に日本実験力学会光学的的手法分科会（分科会主査：豊岡了埼玉大学教授）とのジョイントセミナーを開催し、さらに、2006 年に「光学的計測法によるインフラ構造物の新しい計測法」に関する講習会を開催した。2006 年 12 月に開催した JCI 講習会では、科学研究費補助金の研究成果報告書（本報告書）の作成を念頭において報告書を作成した。本報告書は、そのときの報告書に、さらにいくつかの研究成果を取り入れて再編集したものである。

本報告書は、まず、第 1 章で本研究の背景と目的を概説している。第 2 章で光学的全視野計測法として、スペckル干渉法、デジタルホログラフィ法、デジタル画像相関法、赤外線サーモグラフィ、レーザを用いた 3D 計測、および 3D 写真計測法の原理と概要について解説している。次に、

第3章では、本研究会の委員自らが実施しているコンクリート構造や鋼構造などの研究に光学的手法を取り入れた実験室レベルでの事例報告について報告している。そこではひずみゲージ法では得られない全視野計測による新しい知見が得られている。さらに、第4章では、現在実用化されている光学計測法の例として、トンネルのひび割れ連続計測法、3Dレーザスキャナの構造物（歴史的構造物も含む）の維持管理への利用法、鋼橋数値仮組立シミュレーション、既設コンクリート橋のメンテナンスへの適用性、などを紹介するとともに、本研究会で実施した講演会や勉強会での議論を基に光学的全視野計測法の実際と将来性などについてとりまとめたものである。

<参考文献>

- [1] 「荒廃する日本」としないための道路管理、国土交通省道路局社会資本整備審議会道路分科会 第14回基本政策部会資料、<http://www.mlit.go.jp/road/ir/kihon/14/52.pdf>
- [2] 日経コンストラクション、No.2006.11.10号、p.24、2006
- [3] 山崎淳・成井信監訳、上阪康雄・松田浩共訳：ドイツ連邦交通省道路建設局「道路橋の補修・補強事例集」報告書1990、土木施工4月臨時増刊、山海堂、1995
- [4] 上阪康雄・松田浩・M.Gutermann：ドイツの実橋耐荷性能試験車BELFA紹介、橋梁と基礎、pp.27 - 32、2006
- [5] 例えば、鋼構造委員会：鋼橋における点検・診断技術の高度化、研-25、土木学会平成18年度全国大会研究討論会資料、2006
- [6] コンクリート工学：特集“最新コンクリート計測技術”、Vol.44、No.5、2006
- [7] イラストで学ぶ非破壊試験入門、日本非破壊検査協会、2002
- [8] 特集光学的全視野計測法とその標準化、日本実験力学学会誌、Vol.2、No.1、pp.2 - 60、2002

(松田 浩)