

社会基盤施設の高精度情報化診断・ 寿命予測技術に関する研究開発

研究代表者：阿部雅人

東京大学大学院 工学系研究科 助教授

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

(TEL: 03-5841-6096, FAX: 03-5841-7454, E-mail: masato@bridge.t.u-tokyo.ac.jp)

1. はじめに

社会基盤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、図面、補修履歴、可能な補修工法、それに伴う社会的コストを含んだ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。そこで、本研究では、最先端の計測・情報処理・解析技術を融合することで社会基盤の寿命予測をネットワーク上でオンライン化して合理化し、診断を支援する統合的な戦略を構築して、情報システムプロトタイプとして具体的に提示することを目標とする。

社会基盤施設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他、定量的、客観的検査が可能な非破壊検査技術の研究・開発が試みられている。しかし、既存の非破壊検査技術は、社会基盤施設のスケールで、また、雑音レベルの高い屋外環境で適用するには経済的、技術的困難があり、社会基盤施設への一般的な適用としては研究段階にとどまっている。そこで、本研究では、社会基盤施設の構造健全性診断の際の作業を効率化し、かつ、空間的に分布した変形データを容易に計測する実用的方法として非接触な計測システムを系統的に開発することを目標に研究を進める。

既設構造物では、設計段階で不確定要因であった施工品質が既に確定した形でコンクリート品質に反映されている上に、建設以降の経年による性状変化が現有性状として確定している。したがって、これらの同定を前提としない既設構造物の劣化予測は非現実的と言わざるを得ない。そのため、これらの研

究成果は既存構造物の劣化予測・診断技術として実用化されるにはいたっておらず、実験や経験に基づく経験的手法が研究・開発の主流となっているのが現状である。そこで、本研究では、上述の非接触計測技術による現有損傷状態の精度の高い同定をベースに、計測ならびにコンクリート工学における最新の成果を統合的に発展させることで、合理的な点検・現有性能判定・将来の劣化予測・補修工法選定を実現することを目標として研究を行う。

2. 情報化システム化・ネットワーク化

(1) 社会基盤マネジメントシステム

本研究では社会基盤構造物マネジメントシステム Civil Asset Management Portal (CAMP) を提案する。CAMP の構成要素は、データベース、アプリケーションおよび Web インターフェースである。アプリケーションは維持管理業務を支援するためのツールを提供し、またユーザがデータの追加・削除・更新等の操作を行うデータ管理機能を含む。Web サーバはシステムをネットワークを通じて利用するためのインターフェースを提供する。データベースに関しては、構造物諸元・履歴等のテキスト情報に加えて、CAD, GIS, モニタリングシステムと連携させてこれらをデータソースとして利用することを検討している。

(2) 情報共有プラットフォーム

本研究では、維持管理業務に関与する参画者間の情報の共有・伝達に着目し、協同作業を支援するシステムの設計を行った。ここでは参画者のデータ・アプリケーション共有を行うために、インターネッ

トを通じた Web システムを提案する。ユーザが使用するアプリケーションやデータはサーバ上で一元管理し、ユーザは Web ブラウザを通してシステムを利用する。ただし、ユーザによって利用形態は異なるため、複数のインターフェースを構築する。橋梁検査員は、主として現場において作業を行うため、現場作業に適したクライアント端末としてノート PC および PDA を採用した。

(3) データマイニングによる知識獲得

本研究では蓄積された情報の再利用・有効活用に着目したシステムの構築手法の検討を行い、データマイニングによる知識（ルール）の抽出を試みた。鋼鉄道橋の検査データを対象に、橋梁形式を上路プレートガーダー、組み立て構造をリベット形式限定し、変状としてき裂の発生の有無を従属変数とし、それ以外の項目を独立変数としてデータマイニングを行った。その結果、いくつかのルールが生成され、橋梁技術者の検証が必要であるが、膨大なデータから効率的に知識を抽出する有効性を示した。

(4) BridgeML に基づくマルチモーダルアクセス

可能な橋梁マネジメントアーキテクチャ

橋梁の維持管理に関する情報の共有・再利用を実現するために、BridgeML を提案する。BridgeML は XML(eXtensible Markup Language)による橋梁の維持管理を記述するための言語である。

本研究では、BridgeML の 2 つのドラフトを策定した。ドラフト 1 では、橋梁検査の変状記録と変状位置を主に扱い、ドラフト 2 では項目を増やし、検査記録を詳細に記述することが可能になった。またドラフト 2 では、検査記録を変状記録、変状位置、検査情報に分離し、また、ユーザとして検査者、橋梁技術者、構造物管理者を想定したものとなっている。

BridgeML を用いたアプリケーションとしてドラフト 1 を用いた BMS を構築した。サーバ上では橋梁に関する情報を BidgeML で記述し、ユーザが使用するクライアント機器に応じて HTML による出力と、PC 上のクライアントアプリケーションを用いた音声出力を実現した。

(5) 道路高速診断システム(VIMS)

路面状態と車両の振動の関連に注目し、車両の床振動を計測する加速度計と GPS 受信機を用いた計測システムを開発した。本システムは車両を走らせるだけで伸縮継目部などの路面凹凸を計測し、GPS 受信機で劣化場所を特定できるという特徴がある。

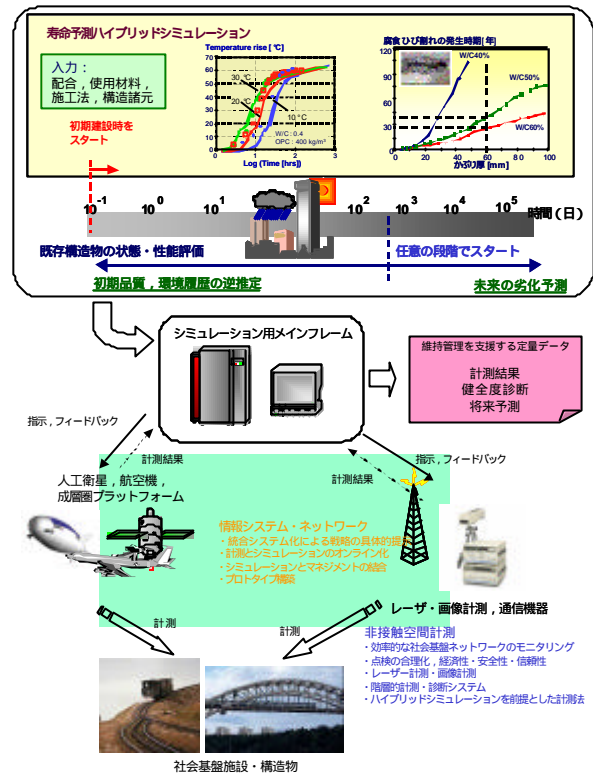


図-1 高精度情報化診断・寿命予測技術を適用した社会基盤施設の管理・運用体制

本研究ではシステム構築後 VIMS を用いた首都高速道路での計測試験を行った。その結果、計測された波形に一定の基準値を設け、その基準値を超えた箇所を補修対象とする点検方法が提案できることが明らかとなった。

(6) 分散型情報技術による社会基盤施設防災・保全現場のインテリジェント化

劣化の進む膨大な量の社会資本ストックの維持のためには、安価で効率的なモニタリング手法が必要不可欠である。本研究では、分散型の計測システムを提案する。小規模な自律型計測モジュールを通信技術により組み合わせ、整理された計測データを低コストに得られるようにすることを目的とする。

本研究では、構造物にセンサユニットを取り付け、無線ネットワークにより計測データを取得するシステムを構築した。センサユニットは加速度計、データ収録機器、バッテリー、無線通信装置により構成され、データ収録は通常の PC または PDA を用いた。

3. 非接触空間計測・診断システム

(1) 画像計測を用いた複合構造の破壊挙動の把握とそのモデル化のための基礎的研究

本研究では、コンクリートのクラック検出にあた

り、遺伝的アルゴリズムを用いた進化的画像処理によって自動化を図った。その結果、アルゴリズムの特性上、計算時間や一様性の点で若干の課題は残るものの、前処理手法の選定に費やす時間及び労力を飛躍的に軽減し、さらに手動処理よりも優れた前処理を自動的に行うことが可能となった(図-2)。

複合構造の有限要素モデル構築において用いる、鋼材料、特に降伏棚を有する鋼材の弾塑性構成則の定式化を行った。多軸応力状態に対応し、弾塑性3次元有限要素解析への適用が明快なChabocheの弾塑性モデルを、降伏棚を有する鋼材料に適用可能にするために、硬化則に塑性ひずみを変数とするシグモイド関数を導入した。その結果、SS400鋼材の繰り返し応力ひずみ関係を、初期降伏状態から、ひずみ硬化が進行している繰り返し載荷後の挙動まで精度良く再現することができた。

(2) レーザードップラ速度計を用いた実構造物の振動計測及び損傷検出

本研究では、従来の目視・打音検査に代わる検査手法として、レーザードップラ速度計を用いた方法を提案する。レーザードップラ速度計による振動計測結果から得られた構造物の動特性に着目することで、信頼性、効率性に優れた損傷検出が可能である。本研究では、振動計測の実構造物への適用を行い振動計測結果の整合性を確認した。更に鋼板継ぎ手部の損傷検出に適用するため、非比例粘性減衰系でモードパラメータを同定し、損傷の定量的評価に成功した。

(3) 高高度ビデオカメラ画像による交通計測

交通渋滞分析、交通環境負荷分析、交通事故分析などの各種交通分析において広範囲かつ定点での詳細観測データの取得が重要である。本研究では、高高度ビデオカメラ画像による交通計測手法を確立した。

背景差分値、オプティカルフローが類似した画素をクラスタとしてまとめる時空間クラスタリング法により車両を認識することを検討し、カメラ画像に適用することで高精度に車両を認識することが確認された(図-3)。

(4) 地盤材料の弾性波速度計測システムの開発

本研究では、地盤材料の弾性波速度を室内で精度良く計測するシステムを新たに開発した。本システムは供試体またはキャップの側面であれば任意の位置に設置可能であり、供試体中に発振・受振素子を挿入する必要がない。また、複数の測線での計測が



図-2 画像計測によるクラックの検出
(左：原画像，右：検出されたクラック)

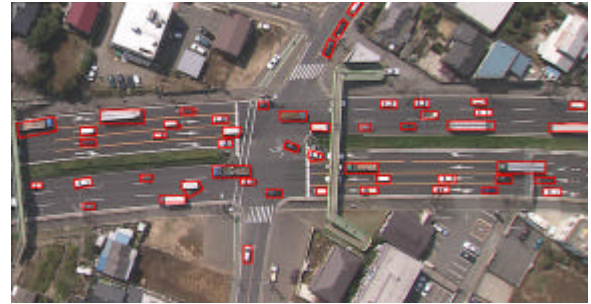


図-3 高高度ビデオカメラ画像による車両認識

可能で、振動源に入力する駆動電圧の波形と周波数を容易に変化させることができる。

大型矩形供試体を用いた基礎的な検討の結果、本システムを用いて計測した動的なヤング率は、その応力レベル依存性が別途計測した静的なヤング率と定性的に整合した。一方で、粗粒地盤材料の場合にはそれぞれの絶対値は必ずしも一致しないことを明らかにした。

小型円柱供試体を用いた検討では、ねじり方向加振を採用することにより、明瞭なS波測定波形が得られた。また、飽和試料においても土粒子骨格を伝播するP波測定がおこなえる可能性を示すデータが得られた。

4. 寿命予測ハイブリッドシミュレーション

(1) コンクリート構造物の性能照査技術

環境・気象作用及び荷重作用を受ける構造体の状態及び性能を、任意の時空間軸で的確に予見するシステムの構築を本研究の目的とした。

様々な内的・外的要因により複数の現象が絡み合い進行する、材料の品質と構造性能変化の予測技術の構築には、大別すると、材料内部で進行する各現象を記述する熱力学システムと、外部からの荷重作用下での構造力学的挙動の数値予測システム、の各構成要素が必要とされる。本研究では、鉄筋コンクリート構造物の変形、構造中の材料の機械的損傷及び微細組織と品質を統合して評価する数値解析手法の開発に着手した。すなわち、材料システムを支配する物質・エネルギーの生成・移動に関する熱力学モデルと、構造力学挙動を支配する変形・応力場に

関する構造解析手法を一元的に統合して評価する数値予測手法の開発を第一の目的としている(図-4)。材料と構造の相互連関を考慮する事によって、想定される気象条件や外的条件を入力すれば、構造物の保有性能・状態が、時系列毎に直接算出される手法の開発を目指すものである。ここで、数年～数十年のスパンで進行するコンクリート材料の劣化・変性現象、及び鉄筋コンクリート構造物の性能低下を任意の段階で評価するにあたっては、材料モデルの精度の良否が全てを決定する。本プロジェクトでは、コンクリートの耐久性能にとって最もクリティカルとなる、塩分浸透・鋼材腐食現象の定量化に焦点を絞るものとする。

(2) 熱力学連成解析システム DuCOM

若材齢コンクリートの固体形成過程を、任意の段階においてシミュレーションすることを目指し、水和反応・空隙構造形成・水分移動の相互連関を考慮した3次元有限要素解析システム DuCOMの組み上げが、これまでに行われている。解析に際して、対象となるコンクリートの使用材料及び配合、養生条件、また環境条件を入力する。始めに複合水和発熱モデルに従って、部材各部の温度及び鉱物毎の水和度が決定される。複合水和発熱モデルから与えられる情報である鉱物毎の水和度の平均値、及び化学的結合水量から空隙構造形成モデルをもとに、セメント硬化体の空隙幾何構造が求められる。得られた空隙構造は水分保持及び移動モデルに取り込まれ、空隙内の相対湿度及び水分分布が求められる。ここで、水和による水分の消費は支配方程式となる質量保存則に当然取り込まれ、水分移動現象と、水和の進行の動的依存性が自然に考慮される事になる。以上の様に、空隙構造形成、水分移動、水和発熱現象の相互依存性を考慮し、支配方程式を解く事によって、コンクリート各部位、各時間毎の諸物性が解析によって得られる。

(3) 材料変性・劣化現象を取り扱うシステムの構築

数年～数十年のオーダーで進行するコンクリート材料の劣化・変性現象、及び鉄筋コンクリート構造物の性能低下を任意の段階で把握すべく、従来までの微小空隙を有する固体熱力学システムの拡張を試みた。種々の環境・気象作用を受けた際に、鉄筋コンクリート材料内部で長期間に渡って進行する各種の物理化学現象に関して、熱力学的観点から数量化を試みるものである。

配合の違いにより、侵入する塩化物イオン量、炭酸塩の進行度合いが変化し、腐食速度及びひび割れ

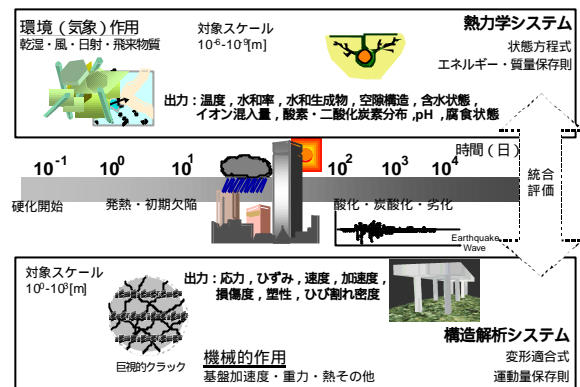


図-4 コンクリート構造物を取り巻く事象と評価技術の構成

に至る腐食進行過程が大きく異なる結果が解析された。

(4) 微細空隙内に存在する塩化物予測手法の高度化

本研究では、塩化物移動モデルが未検証条件下に対しても適用性を有するものであるか確認し、適用性がなければその要因を検討しモデルを改良することで、任意の配合・使用材料・環境条件に対応可能なモデルの確立を目指すこととする。さらにはその過程で、塩化物イオン浸透現象を構成する様々なメカニズムについても知見を得ることを目的とする。

実験結果から高炉スラグ微粉末の置換率が変化することにより、可溶性塩化物量と自由塩化物量の関係は変化することがわかった。これは置換率の変化により、塩化物の吸着性状が変化することを間接的に裏付けている。

(5) 高炉スラグ微粉末混入系における塩化物固定化性状

高炉スラグ微粉末が混入することによる固定化性状の変化について検証する。固定塩化物は、フリーデル氏塩として固相にとりこまれる固相塩化物と、空隙壁面に電氣的拘束により固定される吸着塩化物の2種類に分類することができる。

本研究の実験結果から、吸着塩化物量と比較し固相塩化物量は割合として小さいことがわかった。このような結果を踏まえると、固相塩化物のモデル化に際しても普通セメント単体においてゲル量の割合で表すモデルを応用すれば、工学的に十分精度を有するモデルが構築可能だと考えられる。

(6) 高炉スラグ微粉末混入系における塩化物浸透性状

高炉スラグ微粉末を混入することによる耐塩性向上のメカニズムの解明を試みた。具体的な手法とし

ては、高炉スラグ微粉末混入系のモデルを現在の解析手法に導入し、実験結果と比較することにより提案モデルの妥当性を検討した。

5. まとめ

本研究では、近年発展が著しい計測・解析法と高度な情報処理技術、ネットワーク技術とを融合させることにより高精度かつ効率的な社会基盤施設の統合的診断・寿命予測技術を実現した。研究項目は、1)情報システム化・ネットワーク化に関する研究開発、2)非接触空間計測・診断システムに関する研究開発、3)寿命予測ハイブリッドシミュレーションシステムに関する研究開発に大別される。情報システム化・ネットワークに関する研究開発では、ネットワークに接続されたデータベース・アプリケーションで構成される構造物の維持管理支援システムのフレームワークを構築し、また、各種の構造物に対するモニタリングシステムを試行した。非接触空間計測・診断システムでは、レーザードップラ速度計や画像による計測システムを構築し、また、地盤材料の弾性波速度を精度良く測定するシステムを開発した。寿命予測ハイブリッドシミュレーションシステムに関する研究開発では、若材齢コンクリートの過程を追跡するシステム、材料変性・劣化現象を高精度に取り扱うシステムを構築した。

参考文献

- 1) 水野, 阿部, 藤野, 阿部: Webシステムを用いた橋梁維持管理における協同作業支援環境, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, 2002.9.
- 2) 水野, 阿部, 藤野, S. Meret, 阿部: データベース技術を用いた社会基盤構造物に関する維持管理データ管理手法の提案, コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.77-82, 2002.12.
- 3) S. Meret, M.Abe, and Y. Fujino: Towards a Computer Assisted Maintenance of Bridges, Proc. of the 57th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineering 2002.9.
- 4) 河野, 阿部, 藤野, 平林: 道路高速診察システム(VIMS)の実用化に向けた研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, 2003.9.
- 5) 青木, 藤野, 阿部: 分散型情報技術によるインテリジェントモニタリングシステムの開発, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, 2003.9.
- 6) 西川, 吉田, 阿部, 藤野: 画像解析によるクラック検出・計測の自動化処理, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, 2003.9.
- 7) 村田, 阿部, 藤野: レーザードップラ速度計を用いた継ぎ手部の損傷検出, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 2001.9.
- 8) たとえば T.Fuse, E.Shimizu, and R.Maeda: Development of Techniques for Vehicle Maneuvers Recognition with Sequential Images from High Altitude Platforms, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.34, Part.5, pp.561-566, 2002.
- 9) たとえば L.Q.AnhDan, J.Koseki, and T.Sato: Comparison of Young's moduli of dense sand and gravel measured by dynamic and static methods, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.25, No.4, pp.349-368, 2002.
- 10) R. Sahamitmongkol, and T.Kishi: The Effect of Restrained Level on Cracking Resistance for Chemically Prestressed Reinforced Concrete, Proc. of the JCI, 2003.7.
- 11) 田中, 吉田, 岸: 低応力場における膨張コンクリートの付着性状, 土木学会第 58 回年次学術講演会第 部門講演概要集, 2003.9.
- 12) 吉田, 田中, 岸, 勝木: 膨張コンクリートと鉄筋の付着特性に関する研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会第 部門講演概要集, 2003.9.