

メンテナンスの力学問題—展望論文—

Mechanics for infrastructure maintenance problems

松本高志*, 石田哲也**, 阿部雅人***

Takashi Matsumoto, Tetsuya Ishida, Masato Abe

*Ph.D., 東京大学講師, 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

**博士 (工学), 東京大学講師, 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

***Ph.D., 東京大学助教授, 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

This paper describes the scope of mechanics for infrastructure maintenance problems. The domain of problems encompasses all the lifecycle stages of structures. Physical, chemical, or mathematical models need to be developed so that understanding, prediction, and control of deterioration mechanisms can be made possible. Those models should take advantage of feedback and interchange of existing structures' state information. The paper is organized with four subjects: fracture and delamination, life-span simulation of concrete materials and structures, structural monitoring and control under service conditions, and system integration. State of the arts and future outlook on the subjects are discussed.

Key Words: lifecycle, life-span simulation, monitoring, system integration

キーワード: ライフサイクル, シミュレーション, モニタリング, システム統合

1. はじめに

メンテナンスの力学問題とは, 社会基盤を構成し長期供用条件下にある施設・構造物・材料の挙動の解明・予測・制御に関する問題である。

今, 社会基盤の施設・構造物・材料を対象として, メンテナンスの力学問題を考える際には, 社会基盤の有する特徴を踏まえる必要がある。

まず, 社会基盤構造物は地球の陸圏・水圏に固定され, 他分野の構造・機械と比較して長期間そして常時供用下にある。これにより, 風雨雪, 熱, 地盤変動, 地震, 波浪, などの自然作用への暴露と, 人間活動に起因する, 繰返し荷重, 振動, などの荷重作用下での供用が不可避となる。

また, 社会基盤構造物は単品性を有し, その仕様, 環境や荷重に対する条件と履歴が個々の構造物によって異なる。さらに, 構造物を構成する材料はその部位によりさらに細かく異なる物理的/化学的/力学的作用に曝されることになり, 材料と構造物の長期耐久性はこうした条件と履歴を考慮せざるを得ない。

そして, 個々の社会基盤構造物は単品性を有しているが, これらの構造物群を総体としての施設としてみた場合には複合性を有している。交通やエネルギーの施設に見られるように, 一つの施設の有する構造物の数は膨大であり, またそれらの位置は空間的に分散しているのみならず, 供用年数も時間的に広がりをもつのである。

このように特徴付けられる社会基盤は国・地域の発展と密接に関係しており, その整備は集中的に行われてきた経緯がある。分散した膨大な数の構造物の寿命を長寿命化・延命化・平準化するためには, 社会基盤の有する特徴を踏まえて, 材料～構造物～施設のそれぞれのレベルにおいて, 解明・予測・制御のための物理・化学・数理モデルが必要とされているのである。

メンテナンスの力学問題は, 構造物の供用後の段階に限らず, 設計から終役までの構造物ライフサイクルの各段階をも対象とすべきである。図-1は構造物のライフサイクルを概念的に表したものであり, 単体の構造物というよりは, 経時的に作られる複数の構造物を対象としている。この図に即して構造物のライフサイクルに含まれる段階と問題の対象範囲を考えることにする。

構造物はある目的を実現することが必要となった場合, 諸要件を満足するように設計され, 施工の後, 社会基盤として供用が開始される。社会基盤構造物は, 比較的長期に渡って安定性の高い材料が用いられるものの, 自然作用や人間活動により構造物は経年劣化から逃れられえない。故に, 構造物には供用中においても適切な維持管理が必要とされ, 場合によっては劣化抑制/耐荷力復元の対策を行わねばならない。診断・予測の段階はこうした対策を行うための必要とされる情報を与えるものである。対策においては, 技術的課題の設定がなされ, 要求性能の明確化の後に既存技術が(保有性能>要求性能)を満たして解決可能であるならば, 既存技術の中から選択・適用される。もし, 既存技術で解決

不可能であるならば、新規技術開発というフィードバックが必要である。ヘルスマonitoringの段階は供用以降定期的に行われ、常に予測と実測の差が許容誤差に収まるかどうかという観点からその精度を検証されるべきであり、もし、誤差が許容できない場合には計測・解析技術の高精度化という診断・予測段階へのフィードバックがなされねばならない。以上の段階を経て、その目的を果たし終えた構造物は終役段階を迎え、供用終了そして解体を迎えることになる。構造物単体としての寿命は終わりであるが、供用期間中に発現した劣化問題については、次に新たに作られる構造物からは劣化因子の設計・施工段階で除去もしくは影響を少なくできるように考えていかなければならない。ここに、設計・施工から供用・経年劣化・終役を経て、再び設計・施工に向かう大きなフィードバックループが形成されることになる。

図-1では三つのフィードバックループを明示的に考えたが、これら三つに限らず各段階において各種・多様のフィードバックもしくはインタラクションがあると考えられる。これは、構造物ライフサイクルでは現実に「目の前に」存在する施設・構造物・材料を時系列に沿った観点から捉えているからである。そして、こうした各段階間でのフィードバックとインタラクションを内包することによりいろいろな問題設定や問題解決を考えることができる。フィードバックループによる、構造物の供用・終役段階を考慮した問題の設定を設計の段階で行うことはその一例である。また、複数の段階からのデータの取得、過去のデータの利用という観点での各段階での時系列データの利用、将来のデータの利用という観点での設計、技術、診断、予測に対する検証、などが考えられ、精密・高密度な情報を基にしたインクリメンタルな形での天気予報にも似た解析なども可能ではないかと考えられる。

一方で、図-1の時系列の方向を規定する損傷劣化過程の定量的な解明は問題の根幹である。解明により問題の在処を知り、予測により挙動を知り、制御により問題が解決される。解明には構造・材料における劣化の因子・機構・過程、予測にはヘルスマonitoring、解析などの劣化診断・予測、制御には補修、補強、因子除去などの劣化対策が含まれる。実験、解析、設計、といった手法により、解明、予測、制御を達成し、個々の現象の予測と制御、構造物や施設というシステム全体の予測と制御、を達成することがメンテナンスの力学問題の目的であると考えられる。

本論文は、構造物を中心に著者らが考えるメンテナンスの力学問題について展望を試みるものである。第2章では、破壊と剥離の予測・制御、補修・補強というテーマのもとに、疲労にみられる長期的なひび割れ挙動と破壊現象、補修・補強で不可避となる異種／異材料間界面剥離、破壊力学の今後の展開について述べている。第3章では、コンクリート材料と構造のライフスパンシミュレーションというテーマで、無機複合材料の熱力学と構造力学の連成について述べ、新設構造物パフォーマンスと既設構造物の維持管理の時系列上評価への展望を示している。第4章のテーマは供用下構造物挙動のモニタリングと予測・制御である。構造物モニタリングの特徴を挙げ、センシング研究の重要性和逆解析・構造同定との融合性への焦点、さらにはモニタリングと制御にお

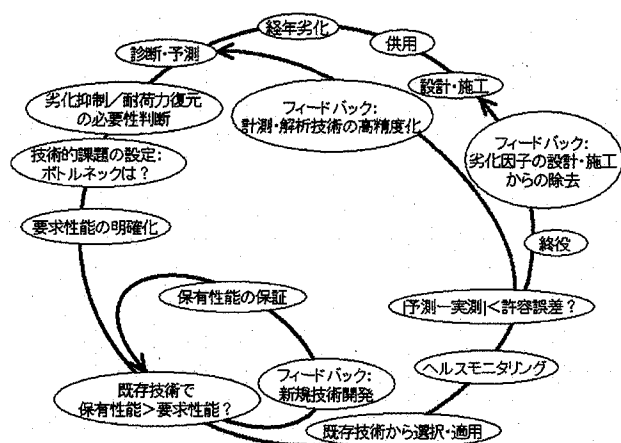


図-1 構造物ライフサイクル

ける研究の必要性を述べている。最後の第5章はより俯瞰的な視点により、技術、問題、施設、財務などの現実世界の事象をモデル化する数理的手法という文脈でシステムインテグレーションの重要性を指摘するものである。

以下の記述は著者らの研究分野に関連しており、分野に偏りがあることをあらかじめ断っておきたい。しかしながら、メンテナンスの力学問題はこれらの分野にとどまるものではなく、地盤、岩盤、港湾、河川、などの分野においても、図-1のライフサイクル上でメンテナンスの力学問題としての物理・化学・数理問題が考えられるであろう。

2. 破壊と剥離の予測・制御、補修・補強

2.1 構造物の損傷劣化

構造物の損傷劣化には、化学反応を伴う機構が主因であるものと物理的な機構が主因であるものがある。さらに、物理的な機構の中でも構造物に作用する外力による力学的な機構については便宜的に分けて扱われることが多い。これらの損傷劣化機構を単独で捉えることは適切ではなく、現実には複合的に影響し合う現象として構造物の長期的挙動を捉える必要がある。

しかしながら、単独の損傷劣化現象においてもなお機構の解明が必要とされている現象があり、これらの現象の支配的機構のモデル化と予測・制御のための解析手法とが必要とされている。

本章では、コンクリート構造物のメンテナンスに関連して、長期的なひび割れ挙動と破壊、異種／異材料間界面剥離の二つを取り上げる。そして最後に、今後の課題と展望を述べる。

2.2 長期的なひび割れ挙動と破壊

長期的なひび割れ挙動には、環境によるものと荷重によるものがあるが、いずれにおいても長期的な材料組成の変化に関する理解とともに破壊力学的な取り扱いが有効であると考えられる。

破壊力学のセメント系材料での発展は仮想ひび割れモデルによるところが大きい。コンクリートをはじめとするセメント

系材料は骨材を結合材で一体化した複合材料であり、微視的レベルでみるひび割れ進展は均質材料中のモードⅠ破壊と比較して複雑である。仮想ひび割れモデルは、ひび割れ間で応力を伝達する様々な機構を、引張軟化曲線という伝達応力と開口幅の関係により表現する点に特徴がある。これにより、破壊エネルギー測定とひび割れを含む構造解析が簡易な形で可能となった。伝達応力と開口幅の関係は軟化と硬化の双方の場合をふくめて架橋則とよばれ、セメント系材料の破壊機構についての様々な知見が得られてきた。繊維により伝達される架橋応力がマイクロメカニクスに基づいてモデル化され、理論的な架橋則が導かれた。この架橋則は繊維・界面・母材の微視的材料定数により記述されており、これらの微視的材料定数を設計することにより、引張応力下にて複数ひび割れと8%に達する引張歪みを実現可能な高靱性セメント複合材料の開発がなされ、新しい構造形式が提案されている¹²⁾。

以上のように、材料評価や構造解析のみならず、材料設計と新構造形式開発にも破壊力学は適用されその役割を果たしてきた。そしてメンテナンスにおいて重要である長期的なひび割れに関してもその取扱い是有効である。ここでは、重交通荷重を受ける構造物において問題となる疲労ひび割れ挙動と破壊を対象とした繊維補強複合材料に関する研究を紹介する。

疲労繰返し荷重下の繊維補強複合材料におけるひび割れ進展挙動は、母材の疲労ひび割れ進展特性、繊維架橋応力によるひび割れ進展抑制効果、疲労荷重下の繊維架橋応力劣化、の三要素によりモデル化することができる³⁾。母材の疲労ひび割れ進展特性はParis則により表され、ひび割れ進展速度はひび割れ先端での応力拡大係数振幅値により記述される。繊維補強複合材料の場合には、ひび割れ面で応力を伝達する架橋領域が母材に比べて非常に大きくなり、これによりひび割れ進展が抑制される。繊維補強複合材料のひび割れ進展速度は母材のそれより抑制されたものとなり、疲労寿命の向上が得られることになる。ひび割れ面での伝達応力は、上記の架橋則に基づき、開口幅とともに変化する。繊維架橋則については、マイクロメカニクスに基づくモデル化がなされており、使用する繊維・母材とその界面の付着性状を表す微視的材料定数により記述されている。

母材の疲労ひび割れ進展特性と繊維架橋応力によるひび割れ進展抑制効果の二要素だけでは、繊維補強複合材料の疲労ひび割れ進展は再現できない。解析によると、強すぎる抑制効果は疲労ひび割れ進展を拘束し、疲労破壊には至らない結果をもたらす。現実には、架橋応力自体も疲労载荷に依存して劣化していくことが実験により確認されており、界面付着劣化と繊維疲労破断のいずれかもしくは双方が劣化原因であると考えられる。

界面付着劣化は、架橋時の繊維応力が繊維強度に比較して小さく、界面付着強度が弱い場合に卓越すると考えられ、破壊断面において繊維が破断せずに抜け出していることで確認できる。直接引張試験により計測された挙動によると、比較的早期に初期強度の80-90%まで減少し、その後長期的にわたって徐々に減少し続け、最小で50%にまで減少する。こ

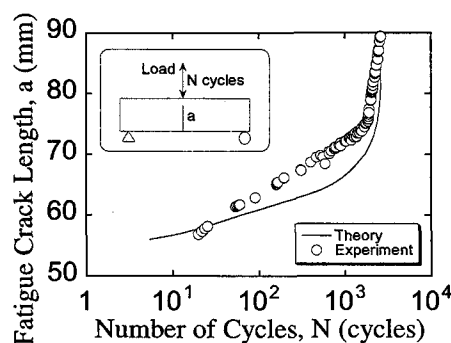


図-2 繊維補強コンクリートの疲労ひび割れ進展

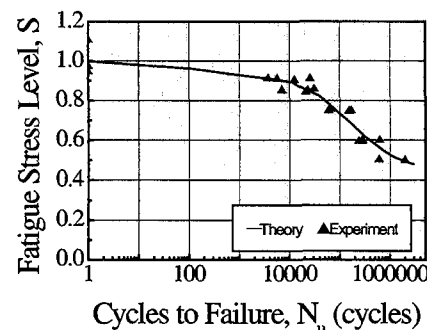


図-3 高靱性セメント複合材料のS-N曲線

の場合には、界面付着劣化を取り入れることにより、疲労ひび割れ進展の解析が可能になる。

繊維疲労破断は、架橋時の繊維応力が繊維強度に比較して大きく、界面付着強度が強い場合に、卓越すると考えられる。破壊断面において、繊維の露出長を比較することにより、繊維疲労破断の存在は容易に確認することができる。繊維疲労破断による架橋応力劣化は、個々の単繊維についてS-N関係を設定し、疲労荷重下で破断基準に達した繊維を除くことにより、架橋応力劣化を推定し、疲労ひび割れ進展の解析を行うことが可能である。繊維疲労破断による架橋応力劣化は、界面付着劣化とは対照的に、ある限界繰返し载荷数に至るまでは疲労破断が生じず、故に架橋応力劣化も見られない。この限界繰返し载荷数を越えて疲労破断繊維数が増加するのに伴い、劣化が顕著になる。現実には、繊維疲労破断が卓越する場合においても界面付着劣化が生じ、早期の若干の劣化が見られるものと考えられる。

いずれの原因にせよ、架橋応力劣化を考慮することにより、疲労ひび割れ進展と破壊寿命の再現が可能になる(図-2と図-3)。有限要素解析においてもひび割れ面での架橋応力劣化を考慮することにより、構造部材の疲労変形、破壊、寿命について解析的な取扱いが可能となり、例えば増厚による延命効果などの推定を行うなど、補修・補強の延命効果の算定などが可能となるのである⁴⁾。

2.3 異種/異齢材料間界面剥離

補修・補強において、異種/異齢材料間界面の形成は不可避である。経年劣化もしくは既存不適格の状態にある構造物においては、既設構造物の内部、表面、もしくは劣化部な

ど一部を取り除いた上で、新たに補修／補強材料を接合させる必要がある。この際、新たに接合させる材料は、種類が異なる(異種)か、材齢が異なる(異齢)組合せとならざるを得ない。様々な材料が用いられる社会基盤構造物には、多種多様の界面が存在し、断面修復、増厚補強、巻き立て補強、繊維シート補強、コーティング、塗装、などが例として挙げられ、ひび割れ充填も広義での界面といえる。界面では、変形適合性、化学的な適合性、などを考慮して設計に注意を払わなければならない。このような異種／異齢材料間界面は複合材料・複合構造においても存在するが、供用下の構造物においては、荷重のみならず環境による負荷をも考慮し、その理解とともに破壊現象として捉える必要があると考えられる。以下では異種／異齢材料間界面の耐久性についての課題と検討について述べる。

異種材料間における界面破壊については、混合モード下の界面ひび割れ進展と母材か接合材いずれかへの屈折ひび割れ進展の双方を考慮しなければならない⁹⁾。また、界面ひび割れ近傍の応力場は材料の弾性挙動の適合性に依存し、界面の抵抗値である界面破壊エネルギーは材料の組合せに依存する(図-4)⁹⁾。このようにモード I 破壊との相違はあるものの、破壊力学的の知見が適用可能である。

界面破壊については、構成則と破壊エネルギーで捉える必要がある。均質材料中のモード I 破壊に比較して、界面破壊の破壊形成領域は非常に小さいと考えられる。しかしながら、界面破壊を支配しているのは、界面での応力と変位の構成則であり、強度や耐力などは構成則に支配される。さらに、引張軟化曲線、せん断軟化曲線のみならず、引張／圧縮条件下でのせん断、つまり混合モード下についての解明を行わなければ、構造物における界面のひび割れ挙動の予測も行えないことになる。

単調載荷下の界面破壊のみならず、長期的な安定性についても支配的機構の解明が必要である。長期的な安定性については、疲労、温冷、乾湿、凍結融解といった繰返し条件下での検討の他に、紫外線劣化などの環境作用条件下での検討も必要であろう。特に、断面修復材の挙動は、温冷と乾湿に関連した熱膨張係数、吸水膨張率、乾燥収縮率、または材料の体積変化に関連した初期収縮率、長さ変化率により決定されると考えられ、耐久性の高い断面修復材を実現するためには、こうした検討が必要とされる。

構造としての破壊モード、耐力、靱性率、などに界面性状は影響をおよぼす。破壊エネルギー、付着強度、付着剛性、界面破壊エネルギー、を考慮したFRPシート補強梁の解析では、界面付着が支配的な役割を果たすことが示され、耐力向上とRC梁のひび割れ挙動について感度解析がなされている⁷⁾。今後は、粗度を施した界面やアンカーの取り扱い、さらに、接着力向上や覆層化などによる望ましい構造挙動を実現する界面設計などを検討する必要がある。

最後に、界面ひび割れと屈折ひび割れに関する興味深い例を挙げたい⁸⁾。図-5は、増厚補修を模擬した供試体であり、下層の既設部には鉛直切り欠き、界面にはこれにつながる水平切り欠きが、あらかじめ設けてある。上層の補修材には高靱性セメント複合材料が用いられている。通常の補修材で

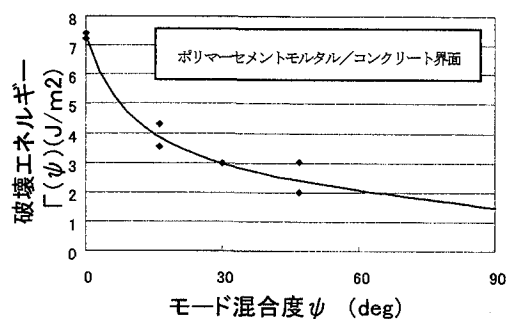


図-4 破壊エネルギーとモード混合度の関係

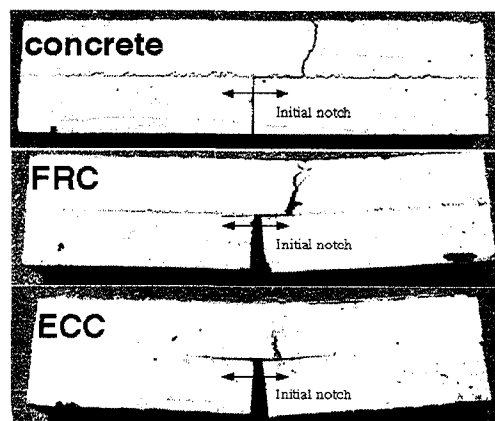


図-5 高靱性セメント複合材料 (ECC) のトラッピング機構⁹⁾ (厚意により転載)

あれば、補修材へのひび割れ進展が界面でのひび割れ進展のいずれかが卓越し、破壊に至る。しかし高靱性セメント複合材料の場合には、界面ひび割れの進展と補修材への屈折進展を繰り返す、いずれかが卓越するということが見られない。これは、当初は屈折ひび割れが界面ひび割れよりエネルギー的に起こりやすいが、屈折進展後のひび割れが伸長するに伴い繊維架橋領域が広がり、応力拡大係数が低減されてひび割れが停止することによって、再び界面ひび割れが伸長する、と説明されている。トラッピングと呼ばれるこの機構に対する理論的説明は定性的なものであり、トラッピングを生成させる条件は限られることになる。より定量的な解析手法の構築が望まれている。

2.4 今後の課題と展望

破壊と剥離についてメンテナンスの力学問題を考えたが、力学の知見を図-1のライフサイクル上で活用することにより、新たな問題設定・解決が図られると考える。

破壊力学による破壊挙動の記述は、現象のモデル化と予測を可能とし、現在の成果につながった。今後はこうした知見を展開することを考えねばならない。例えば、架橋則の逆解析⁹⁾は、ひび割れ伝達応力の推定に適用可能である。逆解析に必要なひび割れ幅分布などの情報は、供用中の構造物から高解像度画像とその処理を経て得ることが現在の技術なら可能だと考える。このような逆解析技術は、内部腐食の推定技術と合わせて、内部鉄筋の劣化度推定精度向上に貢

献するであろう。

ライフサイクル上でのフィードバックとインタラクションを内包して力学の知見を活用する展開は、破壊力学だけにとどまらない。各種材料・各種荷重条件下の材料構成則においてより応用範囲が広く、支配的機構や定数の同定などがメンテナンスにおいても必要となるであろう。

3. コンクリート材料と構造のライフスパンシミュレーション

3.1 はじめに

コンクリート構造物は供用開始後、気象・環境作用並びに荷重作用を受け、材料の状態と構造性能は時系列で変動する。コンクリート構造物を取り巻くメンテナンスの力学問題の中で、本章では特に「RC 構造の硬化プロセスから劣化過程までを評価する数値解析システムの構築と工学的応用」に焦点を絞って議論する。近年、数値解析手法によって材料、及び構造物の挙動を予測する試みが数多くなされているが、本稿では著者の一人が実際に手掛けているプロジェクトを具体例として取り上げ議論する。従って、内容に偏りがある点をあらかじめ御了承頂きたい。

3.2 無機複合材料の熱力学

ナノ～マイクロ空隙を展開場とする熱力学的現象は、気象・環境作用を受ける無機複合材料（コンクリート）の長期安定性と劣化を支配する。形成から劣化に至るまで、RC 構造に生じる代表的な事象を、時系列で順に追っていき（図-6）。コンクリート材料はセメントと水の接触により、発熱を伴う水和反応が進行する。ここでの反応速度は系内の温度と水和のための自由水量に依存するので、熱エネルギーの発生・移動と、微細空隙中の水分相平衡・消費・移動の連成問題¹⁰⁾となる。反応の結果生じた水和生成物は、自由空間に沈殿しネットワーク化することで、セメント硬化体の微細空隙構造を形成する。ナノからマイクロメートルという、4 つのオーダーにまたがって分布する空隙寸法とその幾何学的構造は、コンクリートの強度、剛性、破壊エネルギーといった材料力学特性のみならず、耐久性に関わる水分・ガス・イオンの保持能力、及び移動抵抗性を決定付ける。微視的世界での物質の振る舞いを記述するにあたり、微細空隙構造の姿を適切に数量化することが重要なのである。

供用段階においては、飛来する塩分、環境に起因する酸、及び日射/乾湿繰返し等の持続作用を受け、水和生成物の変性ならびに溶出、空隙水 pH の低下、鋼材腐食が進行する。各現象は初期の硬化段階と異なり、時間軸上で対数的に進

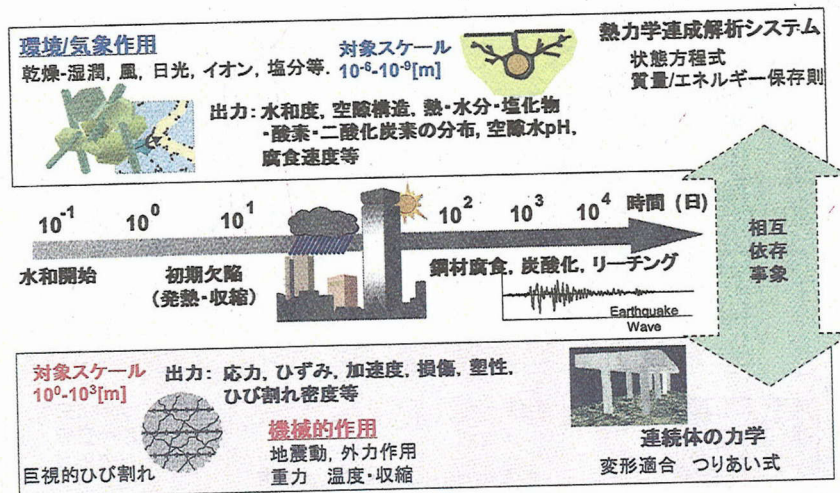


図-6 材料・構造の形成と劣化

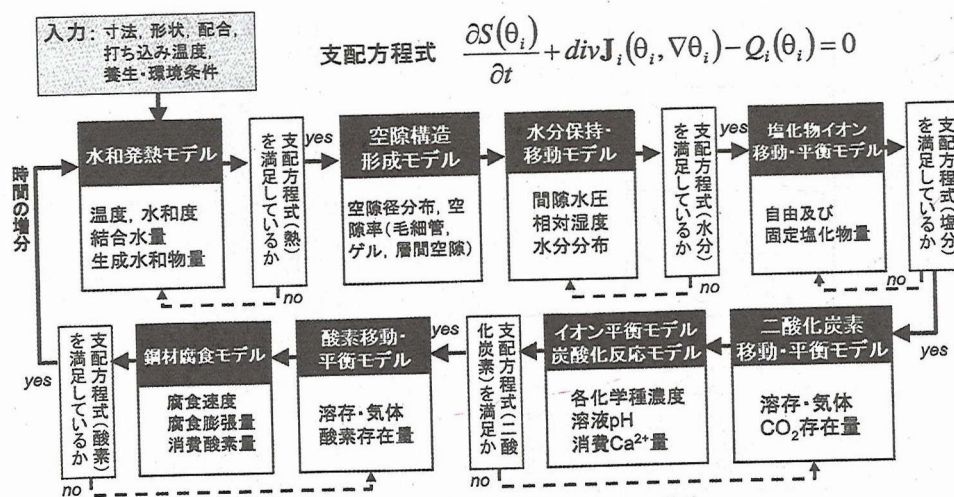


図-7 熱力学連成解析システムの概要¹⁰⁾¹¹⁾

行する緩やかな移動・反応プロセスである。代表的な劣化現象である鋼材腐食は、電気化学的な酸化反応であるため、系内への酸素供給、鉄筋周りの不動態皮膜の形成状況に依存する。ここで不動態の安定性は、鋼材周りのpH値と塩化物イオン量から熱力学的に記述される。すなわち、酸素透過・溶解、二酸化炭素の移動・平衡と酸・塩基反応、ならびに塩化物イオンの移動・平衡現象を連成すれば¹¹⁾、鋼材腐食の進展予測が可能になる。

従来、構造力学の領域では、力学的境界条件のもと、釣り合い条件、変形適合条件、材料構成式を解くことで、力学的応答を得てきた。一方、材料熱力学を取り扱う際も、基本的な手法は全く同一である。初期条件と境界(環境)条件のもとで、支配方程式として質量・エネルギー保存則を解けばよい。例えば、これまでに述べてきた一連の事象をシミュレーションする際、以下の変数をシステムの自由度として取り扱えば良いことになる¹⁰⁾¹¹⁾(図-7)。各モデルは参考文献¹⁰⁾¹⁴⁾に詳しいので、ここでは割愛するが、システムの自由度と基本モデル、対応する実現象は、以下に列举される。

- (a) 熱エネルギー: 水和反応によるエネルギーの放出, 取り巻く温度に依存する反応過程
- (b) 水分: 水和進行のための自由水, 液状水と水蒸気の相平衡・移動, ガス・イオンの溶媒としての役割, 収縮・クリ

ープ等の力学挙動への影響。

- (c) 塩化物イオン: 腐食発生因子, 自由・固定塩化物の相平衡・移動。
- (d) 二酸化炭素: 溶存・気体の相平衡・移動, 酸・塩基反応, 炭酸化, イオン平衡
- (e) 酸素: 溶存・気体の相平衡・移動, 腐食反応

本稿で紹介する解析システムは、図-7に示すように、対象構造物の寸法、形状、コンクリートの配合、施工条件、ならびに環境条件を入力として与えることで、時系列毎の材料状態・品質に関する情報を算出する。非線形構造解析における材料構成則に相当するものとして、相平衡則、反応・移動速度則、自由エネルギー・バランス、電気化学理論、及び物質・エネルギー・固体の状態・適合・構成則を熱力学サブシステムで解き、材料の状態が数学的に記述される。ここで、支配方程式を構成する各項は、全て各自由度の関数として記述される非線形問題である。例えば水分を例に挙げると、液状水・水蒸気の各相の移動速度は、内部の含水状態と過去の履歴に依存する。さらに各解析変数は、相互の連関を有する。すなわち、水和反応による消費項が、水分に関する支配方程式に現れること、また自由水量に影響を受ける水和発熱が、熱エネルギー保存式に取り込まれるといった非線形性を考慮しなくてはならない。

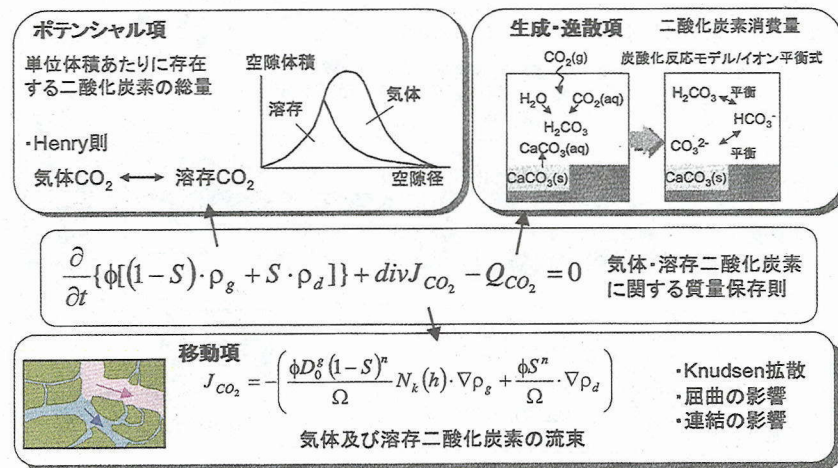


図-8 熱・水・二酸化炭素の非線形問題¹³⁾

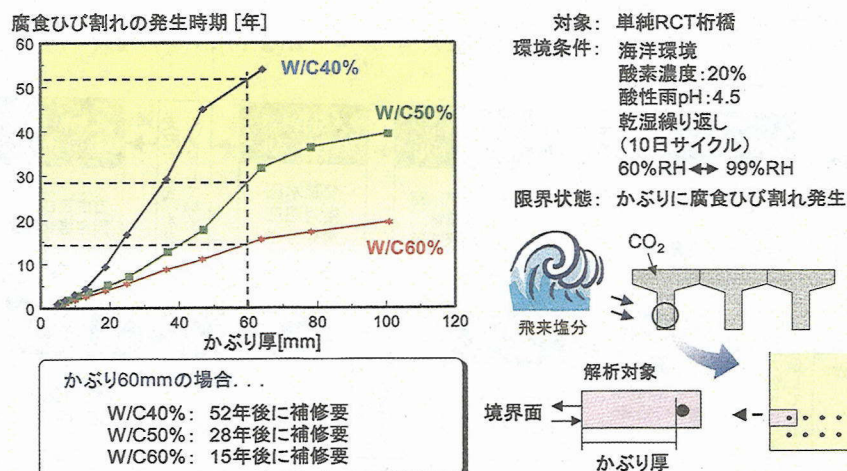


図-9 構造物のライフスパンシミュレーションの例

外部からコンクリートに入り込む二酸化炭素¹³⁾を例に挙げて、水和、水分、気体の相互依存性(熱-水-二酸化炭素の非線形問題)をもう少し詳しく議論したい。微細空隙中に存在する二酸化炭素は、気体と空隙水に溶存する形態の両者を取り得る(図-8)。空隙中の凝縮水は炭酸ガスの溶媒として機能し、イオン反応の場となる。一方で、外部からの内部に到達する二酸化炭素は気体としての移動が卓越するが、凝縮液状水はガスの移動に対する障害となる。また微細構造を担う水和生成物は流束項を支配すると共に、炭酸ガスとの反応種となる。このように、硬化過程で達成される空隙幾何構造、含水状態等を用いて、外部から浸透する環境物質と劣化反応プロセスを順次解いていくのである。

構造物のライフサイクルをシミュレーションする場合は、反応粉体と水の接触後、短期間に進行する材料硬化過程($10^1 \sim 10^4$ [日]のオーダー)と、劣化現象のように長期持続的な現象($10^3 \sim 10^4$ [日]のオーダー)の両者をカバーする必要がある。従って、精度と所要時間の両者を勘案して時間差分を定めることが不可欠である。解析自由度間の非線形性が強くなる場合、また境界面と部材内部でポテンシャル勾配が大きくなるケースにおいて、十分に小さな時間刻みを設けることで、連成解析システムの安定性は保証される。水和が活発な初期段階、また急速な乾燥・湿潤、酸の作用を受けるといった場合のみ刻みを小さくすることで、全自由度に関する全体行列を解かなくとも、図に示す分散-整合型のアルゴリズムで対応することが技術的に可能になるのである¹²⁾¹⁴⁾。

本システムを用いた解析例を図-9に示す¹¹⁾。ここでの対象は、鉄筋コンクリート T 桁橋であり、乾湿繰返しの下で、塩化物イオンと酸作用を同時に受ける環境条件を設定した。図中のグラフは、部材の設定かぶり厚と、かぶりコンクリートに腐食に起因するひび割れが発生する時期との関係を示している。図示される通り、かぶり厚が減少することで、腐食ひび割れの発生時期は当然早まる。物質進入の境界面から近いために、鋼材周りのアルカリが速やかに低下すると同時に塩分濃度が高まり、腐食速度が速くなるためである。また、初期の配合条件によって腐食発生の時期が大きく異なることが分かる。水セメント比を小さくした場合、緻密な組織構造が形成され、酸・塩化物に対する移動抵抗性が大きくなること、また水酸化カルシウム生成量が多いため、pH 低下に対する抵抗

性が高いことが要因である。W/C60%といった水セメント比が高い場合には、塩化物の速やかな浸透によって腐食が開始され、さらに酸の作用によってその速度は加速される。以上のように、RC 構造の劣化は複数の要因が同時に作用する複合的な場合が多いため、各現象の相互依存性を考慮した複合システムとして対応することが重要である。

初期の配合条件によって腐食発生の時期が大きく異なることが分かる。水セメント比を小さくした場合、緻密な組織構造が形成され、酸・塩化物に対する移動抵抗性が大きくなること、また水酸化カルシウム生成量が多いため、pH 低下に対する抵抗性が大きいことが要因である。W/C60%といった水セメント比が高い場合には、塩化物の速やかな浸透によって腐食が開始され、さらに酸の作用によってその速度は加速される。以上のように、RC 構造の劣化は複数の要因が同時に作用する複合的な場合が多いため、各現象の相互依存性を考慮した複合システムとして対応することが重要である。

3.3 材料熱力学と構造力学の融合

コンクリート材料から構成される構造物においては、熱力学的な事象と構造力学挙動は強い連関を有する。部材の変形、損傷、及びたわみの発生は、作用する外力のみならず、セメント硬化体を構成する C-S-H 水和物壁面への吸着水、及び層状結晶間に存在する層間水の挙動、また凝縮水の空隙水圧の作用に強い影響を受ける。一方、長期耐久性的な観点から言えば、部材に導入される力学的損傷は、有害物質の進入を加速させ、鋼材腐食といった劣化の加速度的な進行をもたらす。以上から、ナノ～マイクロメートルの空間スケールで起こる熱力学的な事象が、微視的な領域に留まらず、構造変形、力学的損傷といったメートルスケールの事象に現れること、また逆に、巨視的な損傷が材料劣化の加速をもたらすこと、の両方向の依存性が成立することが分かる。

図-10は、以上の熱力学と構造力学の融合を目的とした連成解析システムの概要を示している¹¹⁾¹⁴⁾。従来、材料科学的側面と構造力学挙動は別々に取り扱われることが多かった。例外は、ひび割れ危険度を照査する熱応力解析である。熱応力解析においては、材料固有の特性である水和発熱上昇量を熱膨張量に変換して構造解析システムに与え、応力解析を行っている“単方向型”のアルゴリズムである。それに

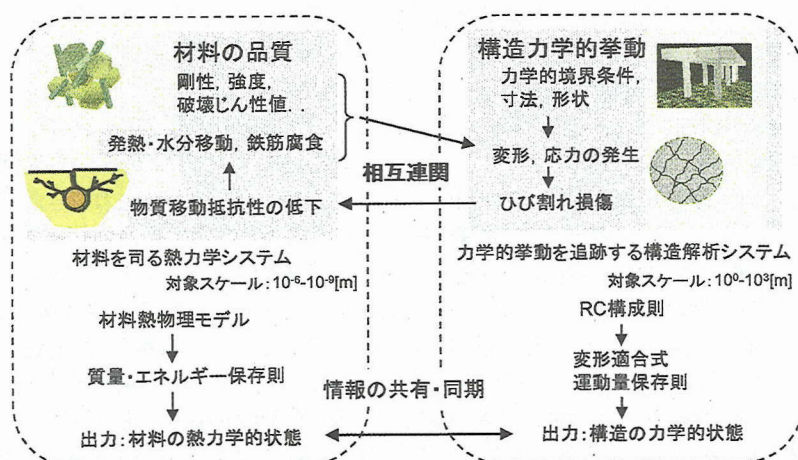


図-10 材料熱力学と構造力学の融合¹⁴⁾

対し、図-10のシステムは、物質移動抵抗性に代表されるコンクリート組織レベルの物性と、機械的な損傷の情報を相互にやりとりする“双方向型”のシステムであることに特長がある。各システムの内部変数を同期しながら両者を有機的に結び付け、連関を取っていくものである。

これらの解析システムを用いて、水和進展・乾燥に伴う体積変化と初期欠陥の発生、またその後に続く物質移動現象の変化、といった解析が現時点までに行われている。ただし、ひび割れ発生下で加速する物質移動速度・量、及び腐食現象の定量化は未だ十分ではない。また現象は古くから知られ、古典的な研究課題である材料・部材の収縮及びクリープ現象(材料と構造の境界領域)を適切に予測することは、現時点のところ難しく、これらの現象を適切に予測する一般化手法の構築が望まれるところである。

3.4 今後の課題と展望

本章では数値解析技術を駆使して、コンクリート材料・構造の振る舞いを予測する手法を概観した。コンクリート工学の体系化、及び知の構造化の達成を、今後10年の研究課題に設定し、全体システムの構築を行ったものである。現時点における技術レベルは高くないが、適用性と精度の限界を知った上で、実構造物への適用、メンテナンス工学への展開を積極的に図ることが今後重要となる。以下、今後の方向性に対する可能性を模索してみたい。

新たに建設する構造物に対しては、設計・照査段階において、種々の段階におけるパフォーマンス(機能性、使用性、耐震性等)を時系列上で評価する必要がある。この際、配合、使用材料、構造諸元、施工法といった初期条件は未確定であるので、建設開始時刻を解析の出発点とする評価になる。打設後発生する熱、また養生中に受ける乾燥によって発生する初期ひび割れに対する照査、またその後の環境作用の下での長期劣化現象に対する照査を十分に行う必要がある。これらの照査において、供用段階に補修を許容して設計する意義は薄い。選定する材料や配合、ならびに施工法に留意すれば、耐久性に優れた構造物は容易にかつ経済的に実現されるからである。良い構造物を安く建設できる手段・技術を、良いものとして正当に評価することが重要であると思われる。

一方、既設構造物に対しては、劣化に応じた適切な維持管理計画を策定する必要がある。ここで数値解析技術を適用するにあたり問題となるのは、対象構造物の建設当時の設計図書、あるいは工事記録等が保存されているとは限らない点である。また、多くの構造物が施工の影響を受ける普通コンクリートを使用しているため、構造中に達成される材料の初期品質は不均一性を有する場合がある。従って、初期条件を同定することが難しい既設構造物の場合、現在の状態を何らかの方法で把握し、それらの情報を既知として与える(現時点の既に劣化を受けた段階を出発点とした)未来予測が現実的であろう。ここで、実際の状態を把握する方法としては、構造物からの直接サンプリング、また非破壊試験等が考えられる。これらの検査システムと解析技術とを融合し、将来にわたる劣化予測評価という姿が、維持管理を運営する上で有効で

はないかと考える。また未来が予測できると言うことは、解析システムを逆に回せば過去を知ることにもなる。時空間を自在に移動するタイムマシンに乗ることもコンクリート工学の世界では夢ではない。

コンクリート材料と構造を取り巻く現象は、巨大で複雑である。高度経済成長期に建設された多くのインフラストラクチャーの劣化が顕在化するまでの時間は残り少ない。団塊の世代に対する対処がエンジニアに求められる前に、知の構造化・体系化の達成と、システムを駆使した工学的応用を可能にすることが、我々に課せられた任務である。

4. 供用下構造物挙動のモニタリングと予測・制御

4.1 構造物のモニタリング

膨大な社会基盤のストックを限られた資源投入で効率よく管理していくためには、高い信頼性で構造物の健全性や荷重を評価する技術が必要とされている。しかし、構造物や周囲の環境は極めて複雑な系であり、そのとり得る状態も多岐にわたるため、実際の保有性能を部材・材料レベルの特性試験と解析のみから予測・評価することは極めて困難である。したがって、構造物の現在の保有性能や、環境・荷重条件を継続的かつ経時的にモニタリングすることが必要である。これにより、余寿命や余耐力の正確な評価・予測と延命にむけた適切な制御策をとることが可能となる。さらに、事故・災害時には緊急対応の合理的意思決定を支援可能となる。

しかしながら、構造物のモニタリングには多くの困難が存在する。土木構造物は、屋外環境に暴露されていることから、計測条件が実験室などに比べてはるかに劣悪であること、また、スケールが大きいことや構造物自体の移動が不可能であることから、機械などの分野で用いられる、高精度ではあるが検査領域が小さい非破壊検査法の全数適用は非現実的である。したがって、土木構造物では、目視などの熟練を要する経験的な点検法が現状では主流であるが、その合理化を意図したモニタリング法の開発が活発に行われつつある。

とりわけ、振動計測によって得られる、振動数や減衰などの動的特性は、構造物全体系の特性を反映していると考えられること、また、客観的・定量的データが得られることから、健全性や荷重を評価する上で有効な情報を与えるものと考えられており、ここ数年活発な取り組みがなされてきた。そこで、本論文では、振動計測によるモニタリングに焦点を当てて論じる事とする。

これまで、実構造物における振動計測とその性能評価への応用については数多くの実施例があり、また実計測データに基づいた研究がなされてきた¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。なかでも、田中ら¹⁸⁾、山口ら¹⁹⁾の研究では、動的特性の振幅依存性を具体的に伸縮装置や支承の摩擦として説明しており、Chaudaryら²⁰⁾は、さらにそれを発展させて免震橋の定量的性能評価に結び付けている。しかしながら、実構造物で計測された動的特性に基づいて、構造物の特性や荷重特性を定量的に同定・逆解析した例は希少である。その理由としては、①信頼性の高い逆解析には高次モードを高い精度で同定する必要があるが、それには高精度の計器を高密度で配置する必要がある、②

実構造物は、局所的な摩擦や損傷の影響で複素モード形を有する非比例減衰系となっている場合が多いが、既存の同定手法は実モード形を有する比例減衰系(Rayleigh 減衰など)を仮定している、③また、既存手法は近接モードの影響を取り込めない場合が多い、④モデル化の誤差のため、逆解析の前提となる構造物の基準モデル自体に信頼性がない場合が多い、⑤土木構造物では環境条件の不確実性が大きく供用中においては加振実験が難しいため、常時微動計測などのノイズの高いデータを扱わざるを得ない、などの技術的問題を挙げることが出来る。そのうち、①は主にセンサーハードウェアに関わる実験力学的問題であり、その他は逆解析・同定法など主に理論力学的な問題である。

4.2 モニタリングのセンサーハードウェア

モニタリングのハードウェアをなすセンサー技術は、従来、土木工学の範囲外と捉えられることが多く、実務においても計測会社に外注するものとして、また、学術においても計測データが与えられることを前提として研究が進められてきている場合が多い。しかしながら、センサーは基本的に望ましい計測量を必要な精度で必要な効率で得るための変換機であるから、「何を測りたいのか」という「ニーズ」に強く影響を受けるものである。したがって、他分野で開発されたセンサーをそのままアウトソースして用いることには自ずと限界があり、特に、前記①⑤の問題を解決するには、単に理論力学的な取り扱いのみでなく、センサーハードウェア研究からスタートした実験力学的取り扱いが極めて重要である²¹⁾。センサーハードウェア開発からスタートしたモニタリング研究は端緒をついたばかりであり、体系的に提示するには至っていないため、ここでは、いくつかの例をあげ、その基本コンセプトを解説したい。

現代の計測においては、センサーは、計測したい物理量をコンピュータに読める形のデジタルデータもしくは電気信号に変換するものである。

土木分野で古くから用いられてきており、また、なじみの深いセンサーはひずみゲージであろう。原理が容易で安価であることから広く用いられているが、モニタリング用途で考えた場合は、配線が困難であること、原理的に温度依存性がありその補償をする必要があること、電磁氣的ノイズに弱いこと、クラックなど不連続性を有する部材には適していないこと、などから、限定的な使用に留まっている。この欠点を解決可能なセンサーとして開発されたのが光ファイバーセンサーである。光ファイバーによって配線とセンサーを兼用できること、電磁氣の影響を受けないこと、大スパンの計測が可能であるので不連続性を有する部材にも使用可能であること、また、空間的に分布した計測が可能であるなどのメリットが存在する²²⁾。しかしながら、温度依存性の問題は存在している。上述のセンサーのメンテナンス用途での大きな問題は、接触型のセンサーであることから、既設構造物に設置する作業が伴う事であり、場合によっては高所危険作業となったり足場を必要としてコストアップにつながったりすることである。

それに対して、足場を要しない簡易なモニタリングとして、レーザーを用いる光学式の非接触計測法の開発が進んでい

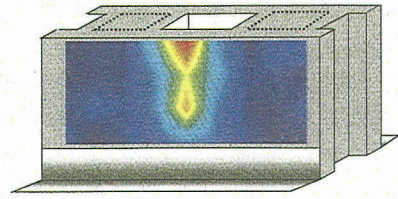


図-11 レーザー計測によるコンクリートの空洞検出例

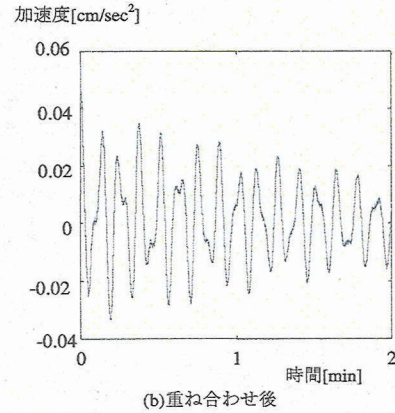
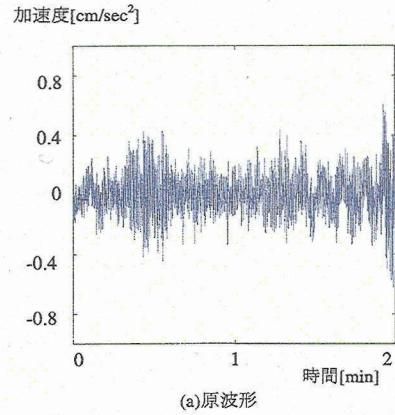


図-12 相互相関関数重ね合わせによって得られた自由振動波形

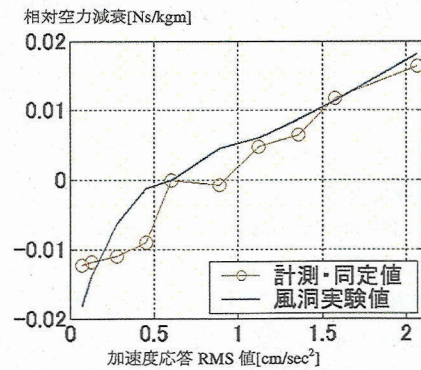


図-13 空力減衰の変化

—: 風洞実験, -○-: 逆解析結果

る²³⁾²⁴⁾。図-11は、レーザーによる表面振動計測から、コンクリートの空洞を検出している例である。また、可視画像や赤外面像からコンクリートのクラックや空隙を検出する研究も進んでいる²⁵⁾。いずれの方法においても、空間的に分布情報を安価に大量に取得可能であることが最大のメリットである。

しかしながら、計測目的によっては空間分解能のスペックが制約となる場合がある。

一方、やや長期的な応用可能性を有するものとしては、スマート構造・材料システムによるモニタリングがあげられる²²⁾。それは、光ファイバーや、ひずみによって電圧を生じる圧電材料を当初から材料内に埋め込む事で、構造系全体をセンサー化するという考え方であり、構造物内部の状況を直接経時的にモニタリングできるため、高い信頼性を有する情報を取得可能である。欧米では、航空分野や土木分野を中心として活発に研究が行われている。

また、犠牲材を用いた疲労モニタリングシステムの開発も行われている(例えば Komon²⁷⁾)。これは、構造物に、亀裂の進展しやすいようにノッチなどを入れた材料をはりつけ、その犠牲材の疲労状況から、構造物の劣化状況を判定するものである。構造物自体を直接測定するものではないため高精度の計測は望めないが、環境履歴を含めたアウトプットが得られることや、簡便であることから、土木構造物のモニタリングに適したものであるといえよう。また、疲労以外の種々の劣化現象にも犠牲材を用いるコンセプトは拡張可能であるし、構造物の劣化状況との関連を明確にする逆解析手法が開発されれば、極めて有力な技術となりえる。

その他極めて多くのセンサーが開発されつつあり、それらをここで全てリストアップする事は困難であるが、基本的に上述の、①接触型、②非接触型、③スマート構造型の3タイプに類型化される。また、多様な例については文献²⁵⁾や、土木学会メンテナンス工学連合小委員会 HP²⁸⁾を参照されたい。

4.3 逆解析・同定法

理論面では、例えば、文献¹⁶⁾¹⁷⁾で、歴史を踏まえたレビューがある。ここでは、主に、それ以降の発展と今後の展望を論じる。ここ数年の大きな進歩としては、従来、計算量などの問題から困難とされてきた、複数多数点における長時間計測／データ解析の実現と、それを背景とした非比例減衰系の取り扱いが大きく進んだところにある。前述②で述べたように、これは損傷検出に向けた大きな進展につながり得る重要な進歩である。

加振源がホワイトノイズと考えられる場合には、計測2点間の相互相関関数は自由応答波形と等しくなることが知られている²⁹⁾。相互相関関数はクロススペクトルをフーリエ逆変換することで求められるから、各2点間のクロススペクトルを重ね合わせ、平均化したものから自由振動波形を作成することにした。図-12(a)は実際の橋梁で計測した原波形であり、(b)はクロススペクトルから再構成した波形である。常時微動を加振源としても、良好な結果が得られることがわかる。また、各計測点における自由振動波形をベースにそれと適合した固有値／固有ベクトルを特異値分解によって求める方法として、ERA法(Eigensystem Realization Algorithm)が開発されている³⁰⁾。ERA法では、振動モード数 N 、計測点数 P の場合に $50NP \times 10N$ 程度の Hankel 行列の特異値分解が必要とされるが、それは、Kalman Filter で要求される Hankel 行列サイズが $2NP \times 2NP$ 、共分散行列サイズが $2NP^2 \times 2NP^2$ であること

を考えると、特に多点／多モードの解析において実用性が高い方法となっている。

このようにして得られた振動特性に基づいて構造特性を逆解析する手法としては、特に前述④の問題を念頭に、構造モデルに依存せずに、かつ非比例減衰系を扱うことの出来る手法が開発されている³¹⁾。これら解析手法を応用して、実際の長大吊橋の常時微動計測結果を用いたモニタリング研究が行われており³²⁾、図-13に示したとおり、空力減衰値などが求められている。

従来の構造同定の理論体系は、計測コストや計算コストの制約から、限られたデータから物理量を得ることに主眼が置かれていた。しかし、前節で述べたように、センサー技術の進展は目覚しく、既存理論が想定している以上に大量で高品質のデータが安価に得られる場合が、特に、構造物については多い。むしろ、従来の比較的データ数が限られた場面を想定した理論とは異なり、多くのデータを前提として、また、高い電算性能を前提とした、高い精度の同定を可能とする理論体系が望まれる。このように、センサー開発動向に大きく理論体系が影響を受けており、その観点からも、センサー研究と逆解析研究は、切り離された個別のものではなく、強いフィードバック関係にあると考えるべきであろう。

4.4 モニタリングによる制御

このように、モニタリングによって得られた損傷や劣化に関する情報にもとづいて、構造物のライフサイクル／余命を制御することが可能である。具体的には、①補修補強によって構造物の保有性能を向上させる、②交通制限等によって要求性能を低減させる、③継続的モニタリングを前提とした安全率の低減を行う、という選択がある。しかしながら、現状においては、それを理論的にどう取り扱うべきかについては、ほとんど研究が進んでいない。新設の際の安全率の取り扱いについては、信頼性理論をベースとした完成度の高い枠組みが存在するが、既設構造物において、初期品質や現有性能がある不確定を有しながらもモニタリングあるいは点検されている段階で意思決定を如何に行うのが合理的であるか、この部分は、現場技術者の試行錯誤に全て負っているのが現状であると言えよう。

5 システムインテグレーション

5.1 メインテナンスとシステム、ニーズとシーズ

メインテナンスは、構造物の保有性能や劣化過程、そのおかれる環境・使用条件が極めて多様で複雑であるのみならず、判断のベースとなる構造物の現況、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情報も多岐にわたる。したがって、単一のブレイクスルー的シーズ技術によって解決を図ることは本質的に不可能であり、経済的にありえるオプションの中で、既存シーズ技術や新規開発シーズ技術を組み合わせたシステムインテグレーションが必須となる。

言い換えると、ニーズとシーズ間にミスマッチが生じる場合にシステムが用いられるということである。複雑な問題(現実

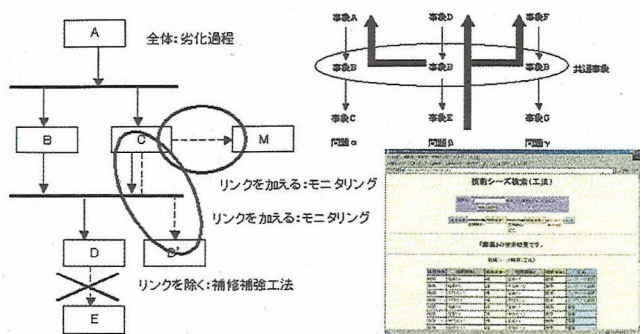


図-14 現象のグラフ表記と検索システム

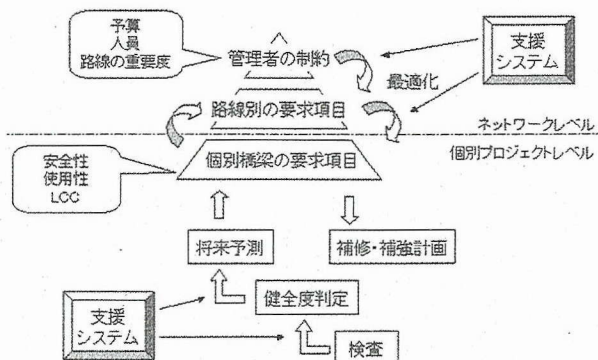


図-15 構造物メンテナンスの全体像（橋梁を例として）

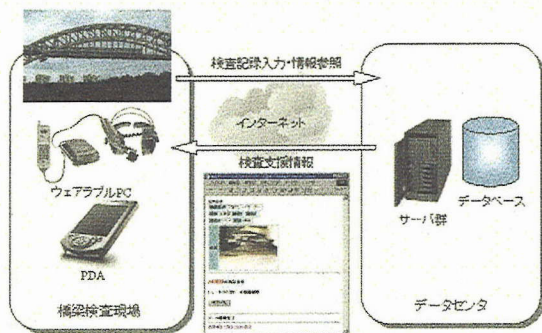


図-16 目視検査支援システムのインテグレーション例

のニーズ)には複雑な解(複数シーズの組合せ)しかない、と言う場合である。ニーズとシーズが1対1に対応している時は、システムの必要性は低い。複雑な現実をそのまま扱わざるを得ないメンテナンスにおいては単一シーズでの解決を望めるべくも無く、システムとして対処することが前提となることが理解されよう。現在においてはシステムインテグレーションを強力に支援する技術として情報技術が存在しており、それを工学的な実現可能性という点から支えている。この分野は、いわゆる「IT 革命」が進展する中で急速な進展をしており、発展途上にある。IT 技術の向上を背景として、グラフ理論、論理学、などの離散数学によるモデル化が必要とされてきている³³⁾(図-14)。

5.2 メンテナンスにおける実装例

メンテナンスにおける点検から補修意思決定までの流れ

を図化したものが図-15である。これに対して、補修計画の最適化は、個別構造物の劣化状況のみならず、路線の社会的影響度や投入可能な資源量など多岐にわたる情報に基づいて行う必要があるため、この部分に情報システムを導入する検討は比較的古くから行われている³⁴⁾³⁵⁾。また、それを支援する最適化に関する研究も数多い³⁶⁾。こういったシステムの運用に当たっての今日的問題は、①インプットデータ(点検データ)の質が、基本的に目視検査など個人の技量に基づいているため不均質で定量的でないこと、②劣化予測の信頼性が必ずしも最適化を支援するレベルに達していないこと、③図面・補修履歴・点検結果、場合によっては非破壊検査結果など取り扱うべき情報が極めて大量であるが、そのマネジメント技術が確立されていないこと、などがボトルネックとなっている。このうち②については論文前半でその精度・信頼性向上に向けた展望が与えられているので、①、③について主に議論する。①については、例えば、将来的には前述のモニタリングによる解決があり得るが、現状ではコストや効率を考えると、それらのシーズ技術は不十分であると言わざるを得ない。したがって、図における検査を直に支援する情報システムのインテグレーションによって解決することがより現実的である。その一例が図-16³⁷⁾である。ここでは、シーズ技術としてのモバイル端末とインターネット技術に着目して、現場にいながらにして最先端の技術情報にアクセスを実現するとともに、レポート作成などの手間を大幅に軽減しているものであり、一部実用化しつつある。また、③については、データマイニングの技術が鍵になると考えられており、活発に研究が進められている。また、それを支援するために、橋梁について維持管理の用語の統一を図る動きがスタートするなど³⁸⁾、徐々に研究が進んでいるが、いまだ体系的な取扱法は存在せず、十分な域には達していないと考えられる。このように、システムインテグレーションは、メンテナンスを支える主要な部分であるのみならず、単一の答えが存在しない複雑な問題に対処する方法論を構築すると言う意味でも挑戦的な課題である。

応用力学を「力学という体系的シーズをどう応用するかを考える所作」という狭義にとれば、システムインテグレーションは枠外、とも言えるが、「困難かつ複雑な問題である「ニーズ」に対して、数理的手法をベースに応用として意味のある解を得る所作」と考えれば、今日の情報技術に支援されたシステムインテグレーションは、まさにその根幹をなすものである。したがって、システムインテグレーションのあり方の理論化・体系化は、次世代の応用力学の中心課題として取り上げることが適切であろう。

6. 最後に

我が国を含む先進国では、膨大で高度な社会基盤により自然災害に対する生活の安全が保たれ、日々の経済・社会活動が構成されている。これらの社会資本ストックは次世代への資産として継承していかなければならない。メンテナンスの力学問題は以下の三点の背景において、工学の基礎を支える役割と発展が期待される。まず、我が国は過酷な自然条

件を有しており、メンテナンスの重要性が高い点である。次に、先進国の特徴であり、特に我が国では急速に進展する少子高齢化・人口減少に対応して、メンテナンスの生産性を上げる必要があるという点である。最後に、急速な社会基盤構築を遂げつつある国々が将来同様の問題を抱えるであろうという事態は想像に難くない。我が国の経験と知識を活かした先導的な役割が期待されている点も留意しておくべきである。これらを背景として、焦眉の問題へ答える工学の基礎としての役割が応用力学に求められている。本文を記述するに当たって各方面の方々から議論を通して有益な示唆を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Li, V. C.: From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, No. 471/I-24, pp. 1-12, 1993.
- 2) Kanda, T. and Li, V. C.: New micromechanics design theory for pseudostrain hardening cementitious composite, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 125, No. 4, pp. 373-381, 1999.
- 3) Matsumoto, T. and Li, V. C.: Fatigue life analysis of fiber reinforced concrete with a fracture mechanics based model, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, No. 4, pp. 249-261, 1999.
- 4) Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T., and Horii, H.: Fatigue life analysis of reinforced steel-fiber-concrete beams, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 23, No. 3, pp. 127-132, 2001.
- 5) Hutchinson, J. W. and Suo, Z.: Mixed mode cracking in layered materials, *Advances in Applied Mechanics*, pp. 63-191, 1992.
- 6) 磐田吾郎, 松本高志: ポリマーモルタル/コンクリート間界面剥離の実験と解析, 年次学術講演会講演概要集, 土木学会, V-590, pp. 1180-1181, 2001.
- 7) Yin, J. and Wu, Z. S.: Simulations on crack distribution in FRP-strengthened concrete beams with interfacial fictitious crack model, *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, pp. 1079-1086, 2001.
- 8) Lim, Y. M. and Li, V. C.: Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, pp. 373-385, 1997.
- 9) Cox, B. N. and Marshall, D. B.: The determination of crack bridging forces, *International Journal of Fracture*, Vol. 49, pp. 159-176, 1991.
- 10) Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T.: Modelling of concrete performance, *E&FN SPON*, 1999.
- 11) 石田哲也: 微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム, 東京大学学位論文, 1999.3.
- 12) 前川宏一, 石田哲也, 土屋智史: 非線形解析技術 – ナノからマクロへの連携 –, *プレストレストコンクリート*, Vol. 43, No. 2, pp. 43-49, 2001.
- 13) 石田哲也, 前川宏一: 物質移動則と化学平衡論に基づく空隙水の pH 評価モデル, *土木学会論文集*, No. 648/V-47, pp. 203-215, 2000.5.
- 14) 石田哲也, 前川宏一: 物質・エネルギーの生成・移動と応力場に関する連成解析システム, *土木学会論文集*, No. 627/V-44, pp. 13-26, 1999.8.
- 15) 土木学会: 橋梁振動モニタリングのガイドライン, *構造工学シリーズ* 10, 2000.
- 16) 土木学会: 土木工学における逆問題入門, 2000.
- 17) Abé, M.: Structural monitoring using vibration measurement - current practice and future -, *Artificial Intelligence in Structural Engineering, Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1454, pp. 1-18, 1998.
- 18) 田中淳之, 淵田政信, 岩屋勝司: 大鳴門橋振動実験の報告, *本四技報*, No. 36, pp. 30-37, 1985.
- 19) 山口宏樹, 高野春夫, 小笠原政文, 下里哲弘, 加藤真志, 岡田淳: 鶴見つばさ橋の振動試験による動的特性の同定, *土木学会論文集*, No. 543/I-36, pp. 247-258, 1996.
- 20) Chaudhary, M. T. A., Abé, M., Fujino, Y., and Yoshida, J.: System identification of two base-isolated bridges using seismic records, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, pp. 1187-1195, 2000.
- 21) Fujino, Y. and Abe, M.: Importance of structural health monitoring of civil infrastructures and some related research at the University of Tokyo, 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, invited paper, 2001.
- 22) 三田彰: スマート建築構造と光ファイバセンサ, 第50回理論応用力学講演会, 基調講演, 2001.
- 23) 呉智深, 周平, 田名部菊次郎, 西澤修: 非接触レーザー速度計による炭素繊維シートの界面欠陥の測定法に関する研究, *コンクリート工学論文集*, Vol. 12, No. 1, pp. 13-21, 2001.1.
- 24) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和宏: レーザードップラ速度計を用いたコンクリート構造物の空隙検出, *土木学会論文集*, No. 690, pp. 121-132, 2001.
- 25) 魚本健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.
- 26) Abé, M., Park, G., and Inman, D. J.: Impedance-based monitoring of stress in thin structural members, 11th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, 2000.
- 27) Komon, K., Abé, M., and Mori, T.: Application of fatigue damage monitoring sensor, First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2002.
- 28) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会 HP: <http://www.ohriki.tu-tokyo.ac.jp/~matsumoto/Maintenance/home.htm>
- 29) Farrar, C. R. and James III, G. H.: System identification from ambient vibration measurement on a bridge, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 205, No. 1, pp. 1-18, 1997.
- 30) Juang, J.N. and Pappa, R.S.: An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, Sept-Oct, pp. 620-627, 1985.
- 31) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, Hong Vu Manh: 振動特性の逆解析による減衰付加構造系の損傷検出, *応用力学論文集*, 2002.
- 32) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例, *土木学会論文集*, No. 689, pp. 261-274, 2001.
- 33) 阿部敦壽, 松本高志: 技術シーズと問題ニーズに関するマネジメントシステムの基礎的研究, *土木学会第 57 回年次学術講演会*, 2002.
- 34) Bridge Management System Web Portal (Pontis の紹介): <http://www.bmsportal.com>
- 35) Miyamoto, A.: Development of a bridge management system (JBMS) in Japan, Life cycle cost analysis and design of civil infrastructure systems, ASCE, 2000.
- 36) 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, *土木計画学研究・論文集*, No. 18(1), pp. 97-107, 2001.
- 37) 水野裕介, 阿部雅人, 藤野陽三, 阿部允: 情報技術(IT)援用による橋梁の目視検査支援システムの構築, 第25回土木情報システムシンポジウム論文集, 2000.
- 38) Meret, S., Abé, M., and Fujino, Y.: Towards a coordinated computer assisted maintenance for bridges, *土木学会第 57 回年次学術講演会*, 2002.

(2002年4月19日 受付)