

コンクリート工学における知識の構造化と橋梁工学への展開

- Multi-scale の観点から -

東京大学 工学系研究科教授 前川 宏一

1. はじめに

コンクリート構造の設計および施工計画段階では、構成素材の特徴や品質を代表する特性値が設定される。これを前提に、構造物に求められる種々の要求事項(安全性, 経済性, 耐久性, 使用/供用性, 美観景観など)が満たされるように、構造諸元や寸法, 材料の配置, 施工手順, 使用方法などが決められる。一方, 仮定された材料特性値が実施工で確実に実現するように, プラント等で材料の生産管理が行われる。特性値は, 素材生産分野と製品(構造物)の製造(設計施工)の間をつなぐ情報である。

この規範は構造工学に限定されたものではないが, コンクリート工学では, 設計特性値が多岐にわたる点特徴的である。指針や基準類の議論の場でも, 特性値の多様性が強く意識させられる。フレッシュ時のコンクリートのスランプ値, 設計基準強度, 収縮特性, 発熱特性, 塩化物イオンの平均拡散係数, 中性化速度係数値などは, 最終製品たる構造物の諸元寸法を有意に左右する。そのため, 社会基盤整備に関わる技術者にとって, 上流側のセメントも自らの守備範囲との意識(他人事ではなく)が形成されている。鋼橋の設計施工では, 鋼材の生産管理や原料にまで遡って特性や品質を技術者間で協議することは, 一般に少ない。特注の特殊鋼材を求める場合もあるが, 鋼材の特性値は生産過程の上流側から下流側に引き渡されるのが一般的である。

コンクリートの多様な特性は, 比較的容易に生産・施工段階で実現が可能である。高い自由度は設計施工に関わる膨大な知識と知恵を生み出す環境につながる。それらを創造的活動に有効活用するための工夫が必要である。材料—設計—施工—維持管理—再生の事業に関わる膨大な知識を構造化する一つの方法として, Multi-scale platformを本文で取りあげることとしたい。多様な知識を組み合わせるに当たり, 定量的であることが創造的活動の支援に不可欠である。そこで, コンクリート橋梁工学に関連する最近の事例を紹介し, 将来における特性値の置き場についての考察を深めてみたい。

2. 特性寸法に応じた知見の引出

知識や経験を有効に活用するには, 機能する整理方法が必要となる。古来から知恵の引出という言葉があるように, 知識の整理方法と記憶の構造には, 共通点があるように思われる。コンクリート工学分野では, 知識や経験が規定される寸法や領域体積を明確にする整理方法を, 多くの技術者は経験を通じて採用してきたと思われる。図-1は基本素材から構造物まで, 特性寸法(REV:referential volume)ごとに, 物理化学的事象が展開される場としての幾何構造を分類したものである。コンクリートは多孔体であり, 微細な空隙寸法毎に工学の対象とする物理化学事象が異なる。寸法自体は連続量であるが, そこに展開される様々な知識や知見を整理するうえで, 特性寸法を軸にして分類することが計量的な推論を展開する上で有効, と考えた。

最も小さい単位はセメント水和結晶間の相間空隙であり, 水分子1つ分の寸法に相当する。ここに存在する水分子の移動は, 常温常圧では殆ど無いといってよい。固体相の一部とも見えるが, 高温時に脱着して, コンクリート複合体の体積を変化させる。次に, ナノメートル寸法のゲル空隙を特性寸法に指定している。

ここに存在する水分子塊の動きが、クリープや乾燥収縮などの時間依存性を支配する。これらの空隙構造が集合して、さらに大きな寸法のキャピラリー空間、ひび割れ空間、インフラ構造空間が形成される¹⁰⁾¹¹⁾。数量科学的な扱いを可能にするために、対数軸を用いることとした。

一例として、初期材齢時に高温養生されたコンクリートやセメント硬化体の特性について考えてみたい。以下のように一見して矛盾に思える実験事実も、上記の知識の分類を通じて、因果関係の繋がりを持つ知識(すなわち構造化)として整理される。

- (1) 水和生成物は高温養生で組織は緻密化され、その結果、密度が大きくなる。
- (2) セメントペーストは高温養生で空隙が粗大化して、物質抵抗性が低下する場合がある。

いずれもセメント・コンクリート工学に関する知見である。(1)はセメントペーストを形成するゲル粒子に対する知識であり、ナノメートルレベルでの知見である。一方、ゲル粒子自体が緻密化する結果、ゲル粒子間の距離が大きくなり、ゲル粒子の集合であるマイクロ・ミリスケールのセメントペーストの物質透過抵抗性は低下する。(2)はキャピラリー空隙寸法での知見である。(1)と(2)は相互に関連した知識であるが、もし両者を同じ「知恵の引出」に入れ込むと、混乱するのが必定。知識の引出を構造化しないで勉強を積むとセンスが悪くなる、とはこのことであろう。

上記の例の通り、寸法の異なる知識は相互に因果関係として繋がっている。一般に小さい寸法の上に蓄積された知識を積分することで、大きな特性寸法での知識が求められる。このMulti-scale Platformは当初、マスコンクリートのひび割れ危険度判定を視野におき、セメントの水和反応に伴うコンクリートの空隙構造の時間的な変化を規定する目的で開発された¹¹⁾。セメントの水和反応では、反応過程で形成される固体が残存する水分を拘束するため、時々刻々と変化する個体の幾何形状と水分の熱力学的な平衡が、以後の反応自体を左右するためである。

一方、ミリ単位で規定される力学機構(特にひび割れ)と橋梁等の実大構造物の挙動とを結びつける multi-scale platformが、1990年半ばにほぼ整備された。この二者を結合して、multi-scaleの知見を基礎とした定量的な推論システム<DuCom-Com3>が整備された¹⁰⁾。このプラットフォームは今日、地盤材料¹⁵⁾¹⁶⁾、微生物反応³⁾、地下水長期環境問題⁵⁾等にも展開の幅を広げている。

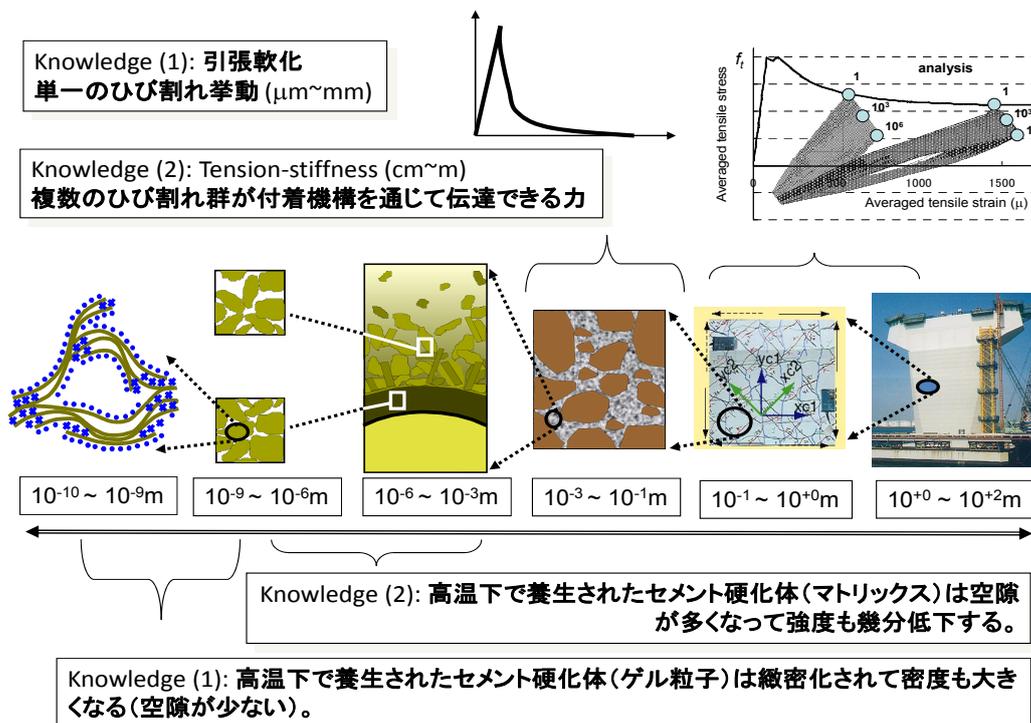


図-1 特性寸法 (REV) ごとに蓄積される知識と構造化

3. 異なる物理化学的事象の知識・経験の連結

2章のプラットフォームの上に塩化物イオンと鋼材腐食，二酸化炭素と炭酸化，カルシウムイオン溶出と移動といった，異なる物理化学事象の知見も同様に整理することができる(図-2)。これにより，複数の物理化学および力学事象が相互に影響を及ぼす関係性(因果関係と相間関係)を，有機的に整理することが可能となる。特に複合劣化問題を扱う場合に有効と考えられる。相互に異なる事象(multi-chemo-physics)の記述は，同じ特性寸法の空間の中でのみ可能である。空間寸法に対して直列的に知識が連結されるとともに，並列して異なる物理化学的事象の相互作用が規定されることで，定量的な推論が可能な領域が広がる。現在，コンクリート中の水分に溶存するイオンとして，ナトリウム，カリウム，カルシウム，シリカ，マグネシウム，アルミニウム，六価クロム等を考慮し，イオン相互作用を考慮した上で，地盤地下水環境の推移を予測することも可能となりつつある。因果関係と相間関係を混乱させない仕組みともいえる。

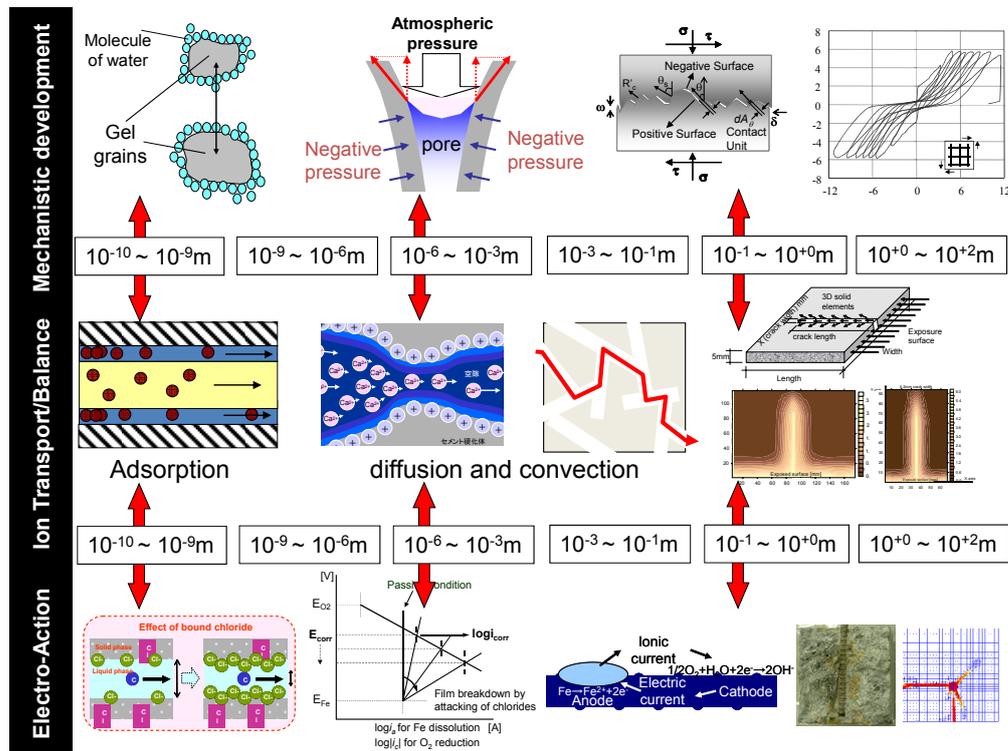


図-2 異なる物理・化学事象の直並列連携と特性寸法

図-3にMulti-scale, multi-chemo-physicsの知見を定量的に構造化する数値計算法の概要を示す。特性寸法に六水準(層間空隙～ひび割れ)を設定し，構造全体応答にわたって同時に計算機上でこれらを再現する¹⁰⁾。物理化学的事象として水和発熱反応，各種イオンの溶脱反応，腐食反応，炭酸化反応を構造工学の問題に対して取りあげている。構造物を構成する有限要素の状態を規定する変数は約400，各寸法において数量化される知見や物理化学事象は約200である。時間と場所ごとに運動量保存則，質量保存則，熱力学第一第二法則を満足する非線形解が数値演算によって探索され，数値演算上の収束条件のもとで確定される。

このプロジェクトを発進した1992年当時の環境では，100有限要素で3つの物理化学事象(水和発熱，細孔組織形成，1つのイオン平衡移動)を50年にわたって推論するのに，約一週間近くを要した。今日では，計算機環境自体は大きな障害となっていない。後章で取り上げるPC橋全橋モデルで100年の動態を計算するのに，一般的なPC計算機環境で1～2日程度である。

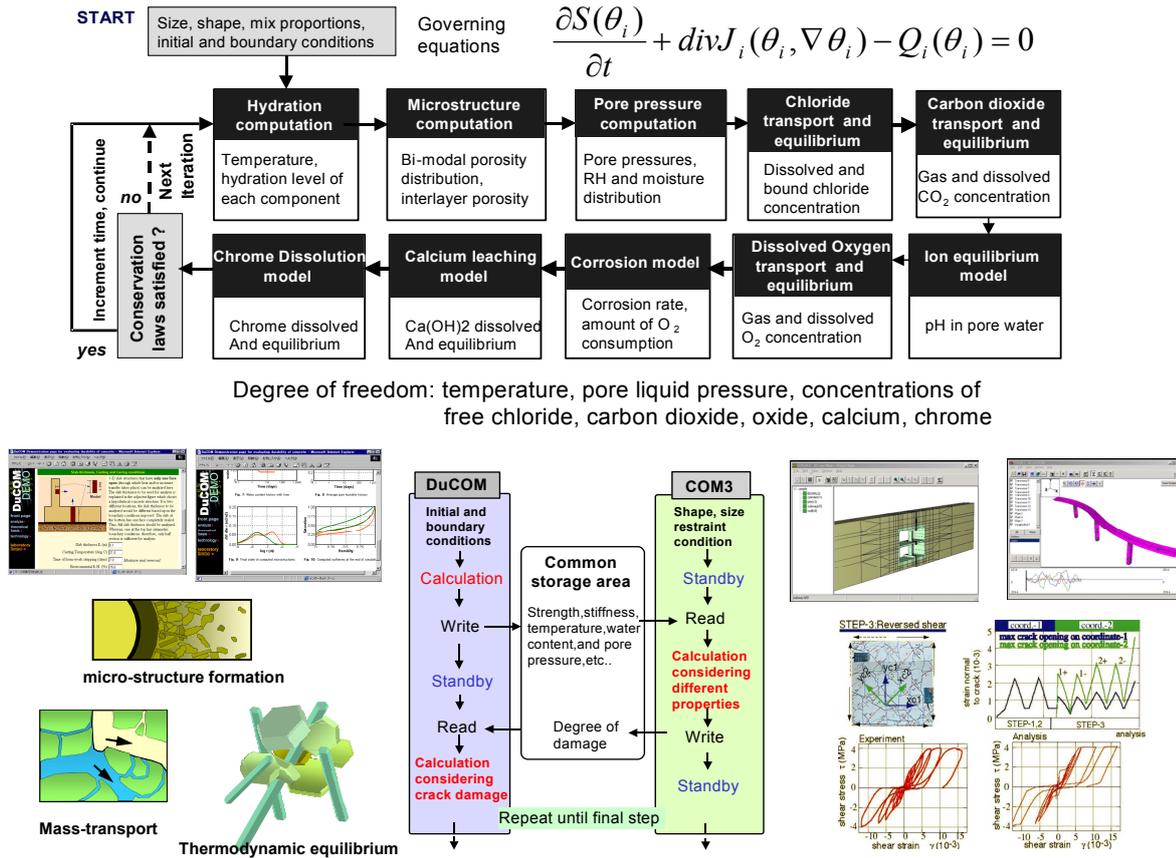


図-3 異なる物理・化学事象の直並列連携と特性寸法

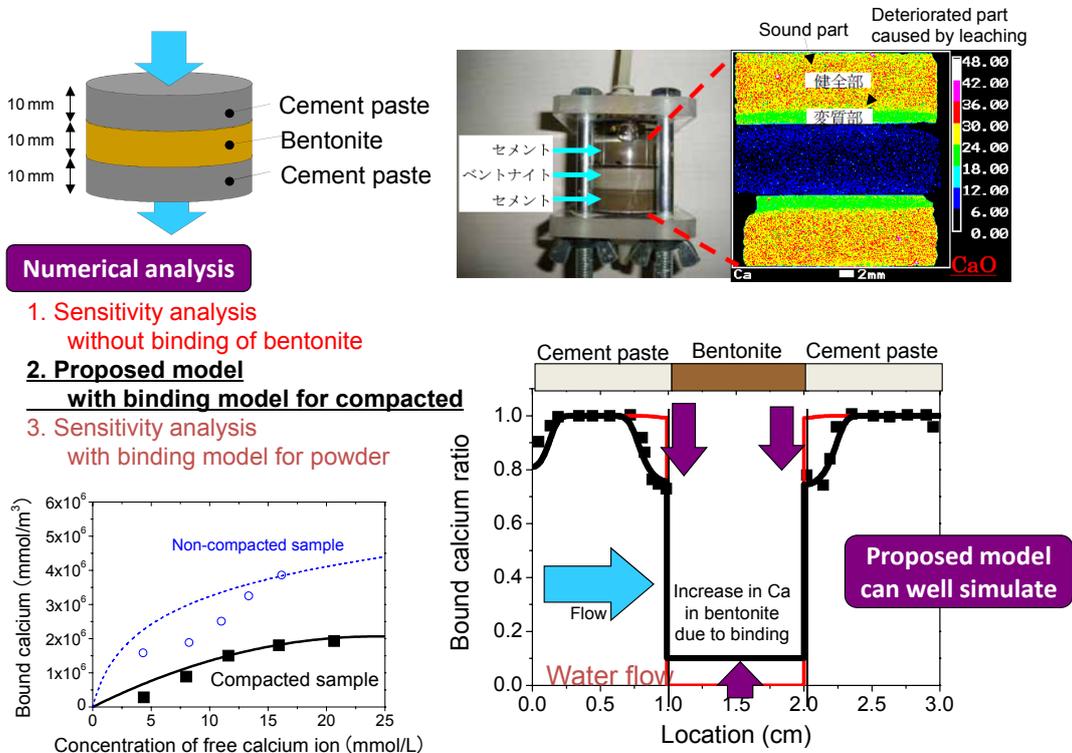
4. 膨大な知見から引き出される推論

多くの微細な空間で進行する物理化学的な事象から推論される、巨視的な挙動や材料特性の中には、それまで知られていなかったもの、あるいは意外にも思える挙動が見つかることがある。図-4は高強度コンクリートとベントナイトを積層した構造を示している。コンクリートは細孔空隙内の水分に溶け込んでいるイオンの拡散に対して高い抵抗性を有し、ベントナイトは高い防水性を有する。これを直列に組み合わせれば、強力なバリアの形成が期待される。両者の加算効果を概算するために事前解析を行ったところ、ベントナイトに接するモルタルから急速にカルシウムが溶脱して、空隙の粗大化が計算上、予見された。セメント硬化体から溶出したカルシウムイオンがベントナイトに吸着され、空隙水中に溶存するカルシウムイオン濃度が低下する。その結果、モルタル表面でのイオン濃度勾配が局所的に高くなり、カルシウムイオンの溶出が加速されることが推定された。高次の非線形現象ゆえに、性能は単に構成材料の単純加算とは言えない。その後、当初は意外に思われたこの特性も、実験によって確認された¹⁹⁾。

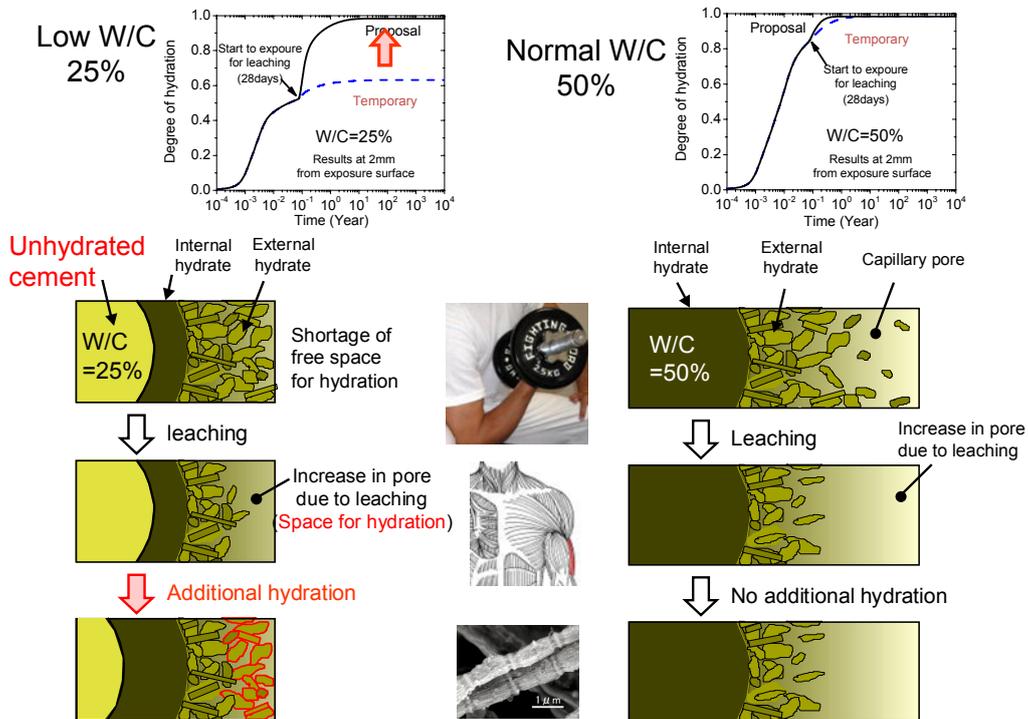
図-5は水分に直接暴露される高強度コンクリート構造のシュミレーション結果である¹⁷⁾。鋼材腐食に対する高強度コンクリートの抵抗性が元々の対象であった。Multi-scale platformを起動すれば、カルシウム溶脱自体が対象でなくても、platformは全ての事象を相互関連あるものとして計算する。その結果、各場所、各時間ごとの物質と構造の挙動が追跡される。

カルシウムが溶脱すれば組織が粗となることは、容易に理解されよう。しかし、解析では溶脱の進行に合わせてコンクリートの微細構造組織が緻密化される、という感覚とは反対の結果が現れた¹⁷⁾。ミスコードが疑われた。詳細に内部変数の推移を追跡した結果、セメント硬化体の弱点である水酸化カルシウム結晶が、まず選択的に溶解して脱落することが分かった(イオン化傾向の違い)。その跡地に、セメント硬化体(新

規に生成される水酸化カルシウム自体も含まれる) が新たに数値計算の中で形成されていた。その結果、大規模な六角版状の水酸化カルシウム結晶が相対的に少なく、かつ緻密な硬化体組織が継続して形成されることが確認された。これは、適切なトレーニングと食事による筋肉の増殖機構と相通じるところがある。知識の構造化が新たな知識を生む拡大生産の基礎になる所以である。これらは自己治癒コンクリートの発想にも関連する。



図—4 異なる物理・化学事象の直並列連携と特性寸法^{17) 19)}



図—5 異なる物理・化学事象の直並列連携と特性寸法

5. 箱型断面を有する長大PC橋梁の過剰たわみ

中央ヒンジ型の箱型中空断面PC上部工の多くが設計段階での予想を上回り、20年程度経過した後にはたわみが過剰となることが内外で報告されている²⁰⁾。そのため、現在では中央径間は連続的に接続されるのが一般的である。しかし、既に建設された中央ヒンジ型の長大PC橋梁に対しては、過剰たわみ機構を理解した上で、適切な対処が求められる。長期変形にコンクリートのクリープと自己及び乾燥収縮が関与していることは疑いもない。

従来、コンクリートの特性値として、乾燥収縮値とクリープ係数値が用いられてきた(図-6)。この特性値はあくまで10cm程度の特性寸法(試験体)に対する知見である。試験体の水分状態は、表面と中心部では均一でないため、特性値自体は試験体寸法に依存する。特性値自体、より小さな事象から導かれる構造応答値である。したがって、この特性値を構造設計に用いる際には、比表面積などを用いた調整が必要となっている。しかし、乾燥収縮もクリープ特性値も指定された環境下での構造応答であることから、実構造物を構成しているコンクリートの、場所毎に異なる熱力学的な環境とは一致していない。10cmオーダーの現行の特性値では、材料と構造の世界を繋ぐ情報として無理がある。

図-6は特性値の出発点を更に小さな領域に求め、微細組織内にある水分の挙動からひも解くことで、橋梁の長期たわみを評価しようとするものである。ここでは、試験体のクリープや乾燥収縮値は、計算されるべき構造応答の一つとして位置づけられる。換言すれば、multi-scale platformでは、使用材料の実験室内での試験値も大型橋梁行動の応答も、多角的な評価対象という意味で同意義といえるのである。特性値の出発点をより上流側の特性寸法に求めることで、変形の時間依存性が統一される。ここではもはやクリープ・乾燥収縮は、特殊環境下でのコンクリート複合体の応答としての意味をもつのみであり、特性値ではない。

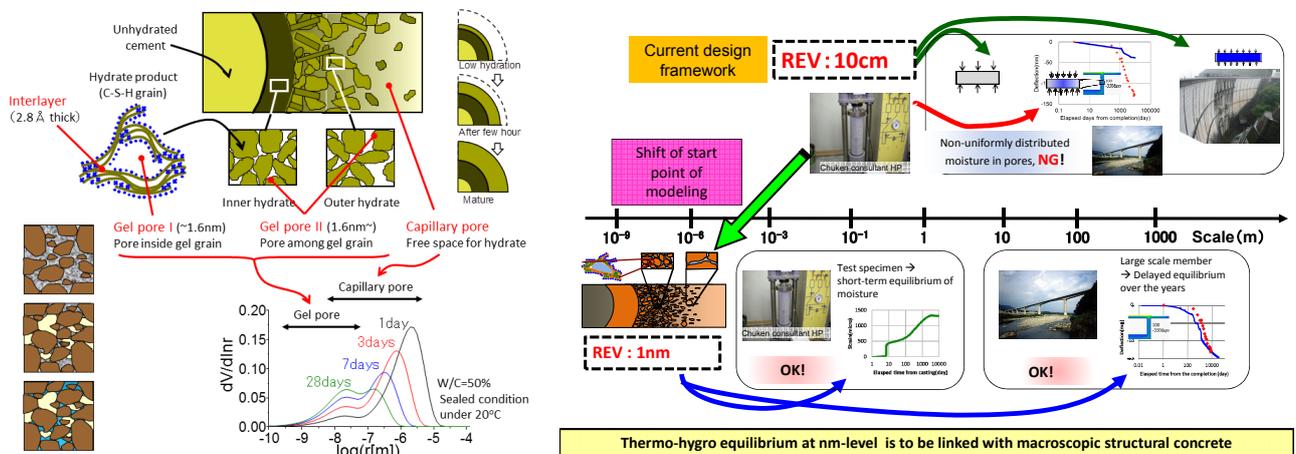
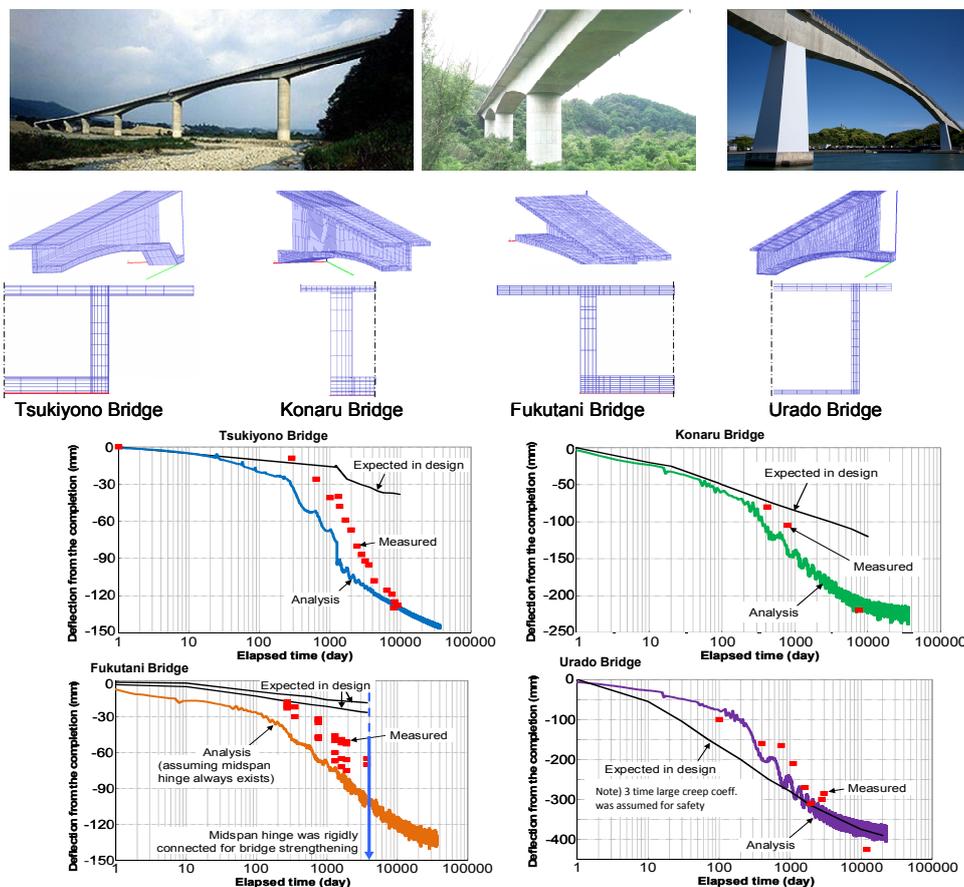


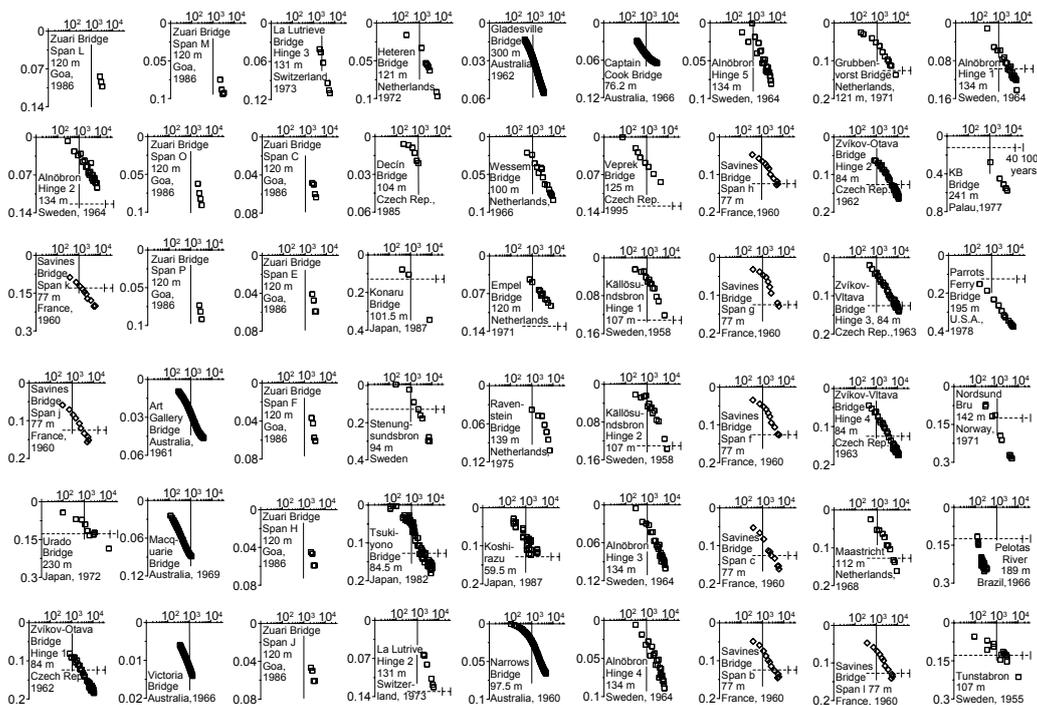
図-6 材料特性を求める特性寸法と巨視的の応答に関わる材料・構造事象

図-7は供用開始後、30年近くにわたる橋梁の長期たわみの実測値を示している。あわせて、従来の特性値から評価されるたわみ推定値と、Multi-scale platformで解析したものとを併記した¹⁴⁾¹⁸⁾。図-8はRILEMの専門委員会で調査された同様の構造形式のたわみ量である。対数軸上では、まだ収束には至っていないようである。建設供用以後、一年程度では既往の特性値に基づくたわみ量の変化は、ほぼ既存の方法に合致している。しかし、数年以後もたわみは継続して増加し続けている。数値解析では短～中長期にわたり、大凡の実現象をとらえている。たわみは構造を構成するコンクリートの絶対変形量ではなく、上下フランジ間の変形の差異(断面内曲率)に起因する。上下フランジの厚さの違いは、環境湿度と平衡に至るまでの時間の違いを与える。下フランジの持続応力下でのクリープは、10年程度経過して乾燥による加速効果が表れる(Pikett効果)のに対して上フランジは建設以後、1年程度で現れる。これらを特定の環境条件から

得られた乾燥クリープ係数のみで便宜的に表すことは困難である。水分の移動・平衡と力学応答を連結させたmulti-scale platformは、これらの簡便法にとられることなく、過去の知見を構造化した結果としての推定を得ることができる。



図—7 水分の移動と平衡状態に立脚した時間依存性解析と既往の材料特性値による解析



図—8 世界各地の箱型PC長大橋のたわみモニター¹⁾²⁾

実験室内での数メートルスパンの中型部材では、たわみは数年でほぼ終結することが報告され、実構造物とは異なる結果となっている。図-9は幾何的に完全に相似形を保ち、寸法のみを変化させた場合のたわみ量（スパンで正規化）を示したものである。スパンが短くなるにつれて、撓みが終結する時間が早くなる、という寸法効果が同様に見て取れる。中程度の寸法では、コンクリート中の細孔湿度と環境湿度が平衡するのに要する時間が短くなることに起因する。材料にとって、時間の流れは空間の寸法に依存するといってもよいであろう。

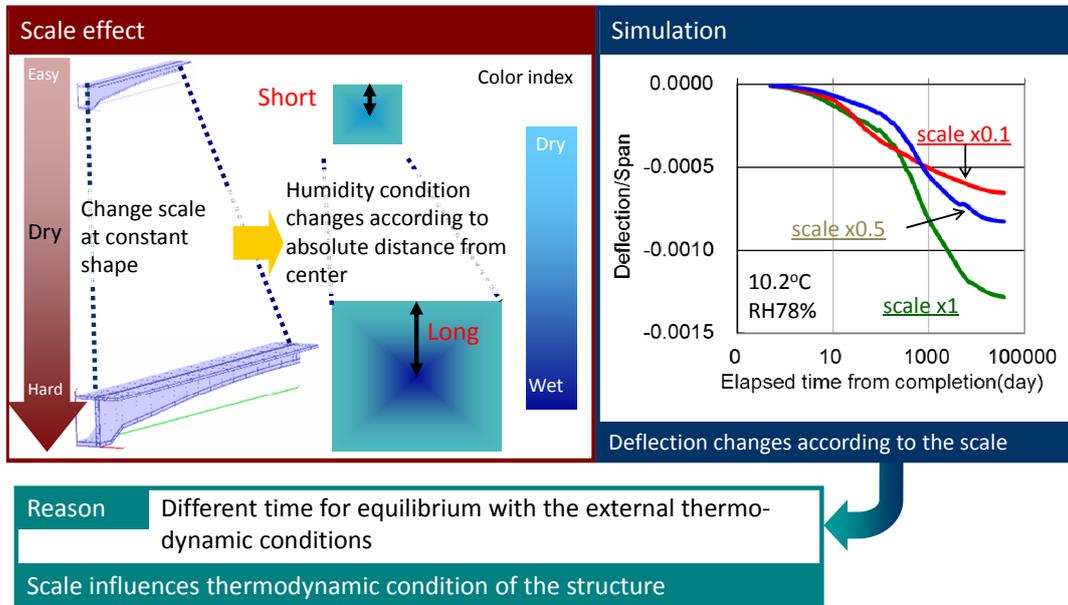
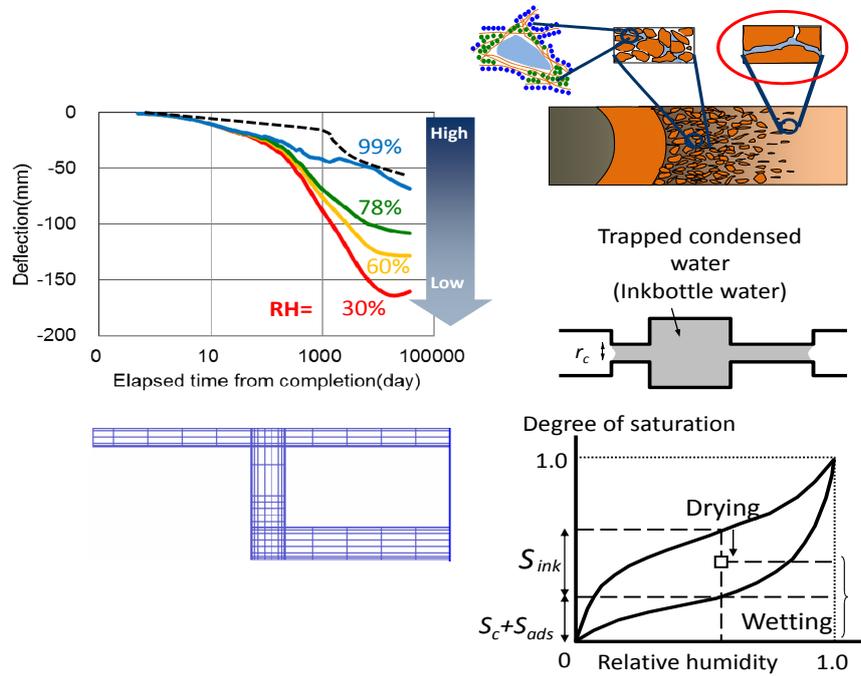


図-9 幾何形状を相似とした長期たわみの寸法効果解析

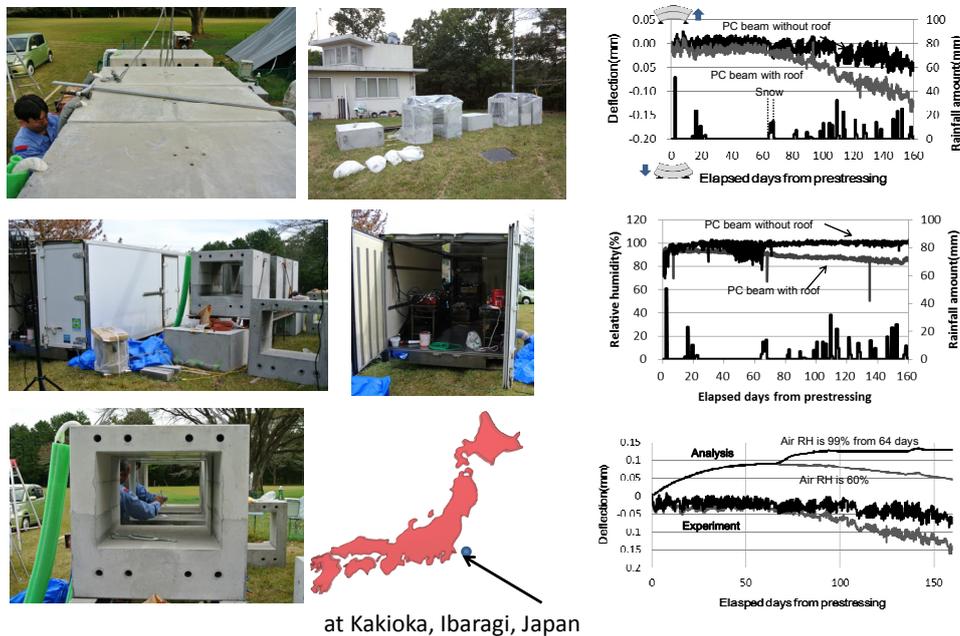
大型PC橋梁のたわみの行方は約百年を経て、周辺環境と熱力学的に平衡に至り、停止すると予想されている。ここで特徴的な点は、一世紀が経過した段階で、環境湿度が低い場合にたわみが反転に転ずることである。提案する知識構造化手法では、特性寸法を上流側に遡ることで、マクロな挙動に関連するミクロな機構をおよそ特定することが可能である(因果関係性の分析)。この反転は、セメントペーストの微細空隙構造内に捕捉される水分の挙動による。比較的、大きな細孔空隙中に熱力学的には不安定な状態で捕捉されている水分（インクボトル効果）が長期間にわたり、徐々に周辺の微細空隙内に放出される現象に由来していた（図-10）。この現象は、コンクリートの温度が60度以上であれば数日で水分開放されるものであるが、常温では数十年にわたると推定されている¹⁰⁾。但し、数十年を経過した長期材料実験の結果は稀である。百年後の当該PC上部工のたわみの計測から、間接的ではあるがインクボトル効果の解放が実証されるかもしれない。既往の知識構造化により、検知困難な微細な空間で展開される事象を、計測が容易な巨視的な挙動から突き詰めることも可能となろう。構造化によって、知識は時空を軽々と飛び越えて繋がる。

これらの知見は、将来予想の基に新設構造物の設計に適用可能である⁴⁾²¹⁾が、既存構造物に対する供用性の復旧にも貢献することが求められる。過剰変形の修復には、力による対処が選択されてきた。過剰たわみが細孔内の水分の熱力学的状態の不均一性に起因するものならば、熱力学的状態を場所ごとに意識的に変化させることで修復も可能なはずである。図-11は中型中空コンクリート部材を模擬した梁である。中空内部の環境を能動的に変化させることによって、中長期のたわみ変化を制御する維持管理方法を、数年をかけて検討する予定である。ここで、収縮の大きいコンクリートが必ずしも悪、ということではない。上フランジに収縮の大きいコンクリートを採用すれば、長期たわみを制御することが可能であろう。適材適所に材料を使用、あるいは材料特性値に応じて構造設計（たとえば諸元の決定と導入プレストレス値）を行えると良い。ここでは、コンクリートの収縮特性値は材料製造側と構造設計側の情報媒体となるが、規制値とする必然性

はない。試験体レベルでのコンクリートの収縮特性値は、骨材の品質にも大きく左右される。上記のとおり、設計・建設側で収縮特性に配慮するのが合理的な場合もある。コンクリート試験体レベルでの収縮特性値を情報伝達の媒体とせず、水分と変形に関わるミクロな特性に立脚した構造性能設計に転換できるのではないかとと思われる。



図—10 インクボトル効果の解放と長期構造変位の関連 (予想)



図—11 検証のための中型模擬PC橋梁とマクロ挙動とミクロ挙動

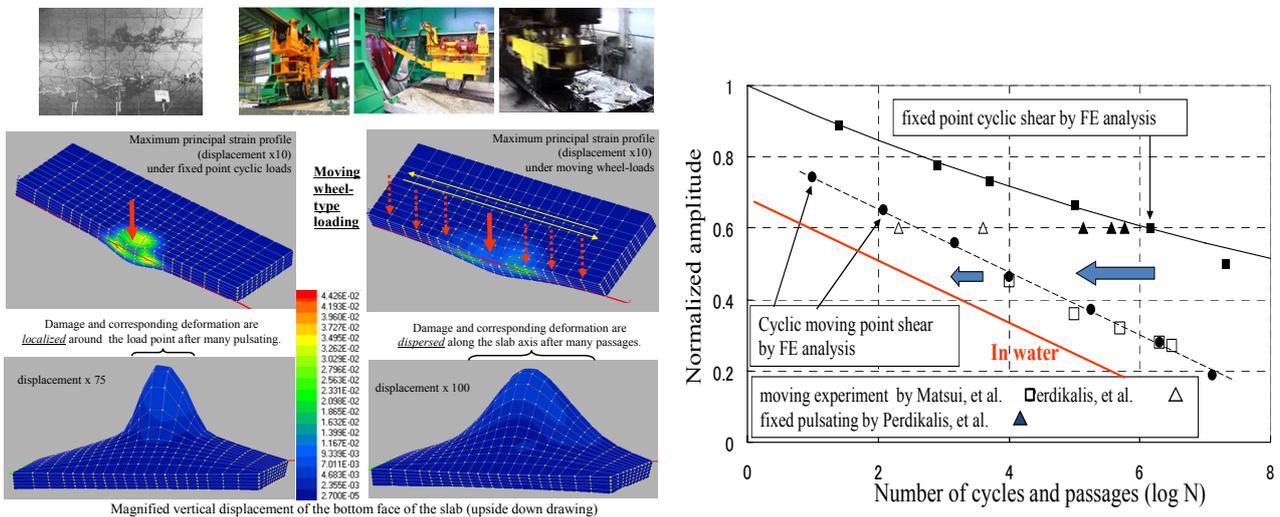
6. 既存道路床版の余寿命推定と補強効果の評価

鉄筋コンクリート要素に様々な方向に力が作用すると、ひび割れが多方向に発生し、かつ交差する。構造物の中では、個々のひび割れに沿って、開口とせん断すべりが同時進行的に繰り返される。これらの動きが巨視的な鉄筋コンクリート要素の応力-歪関係に繋がっている。両者の関係を結びつけたmulti-scale解析

から、高サイクル疲労荷重を受けるコンクリート構造の応答が再現できるようになってきた¹⁰⁾¹²⁾。図—12は橋梁床版に輪荷重が繰り返し走行するときの応答を示したものであり、破壊に至ったときの繰り返し回数からS-N図を表示したものである。ミリオーダーのひび割れを介した応力伝達の知見から、10メートルオーダーの構造部材の応答が算定されることとなる。

これら知識の構造化を既存構造物の将来の挙動予測に適用し、残りの疲労寿命を推定することが可能となりつつある。目視検査で得られるひび割れ図(場所と方向の幅)のみから、計算仮想空間に損傷を人工的に作り込み・pseudo-cracking⁷⁾¹³⁾、その後交通移動荷重を作用させるものである(図-13)。検証には、実際に数年の供用で疲労損傷した実橋梁床版を切り出し、実験室内で疲労荷重を作用させた結果などを検証に用いた¹³⁾。初期損傷の無い試験体の疲労強度も計測し、数値解析との比較検討を行った。

図-14は実務対応を考慮した損傷入力画面と、将来に作用すると推定される交通荷重のもとで得られる余寿命を示している¹³⁾。数値シミュレーションでは膨大な中間出力値が保存され得るが、最終的には余寿命疲労強度曲線のみを橋梁管理者に引き渡す。ここでは設計時に用いられた材料特性値は意味を失い、現時点で達成されている品質を推定し、それを全て受け入れた上で、将来予測につなげることとなる。ここでは維持管理計画と新設構造の設計計画は、表裏一体として扱われる。



図—12 微細ひび割れの相互作用と橋梁床版の疲労寿命¹⁰⁾

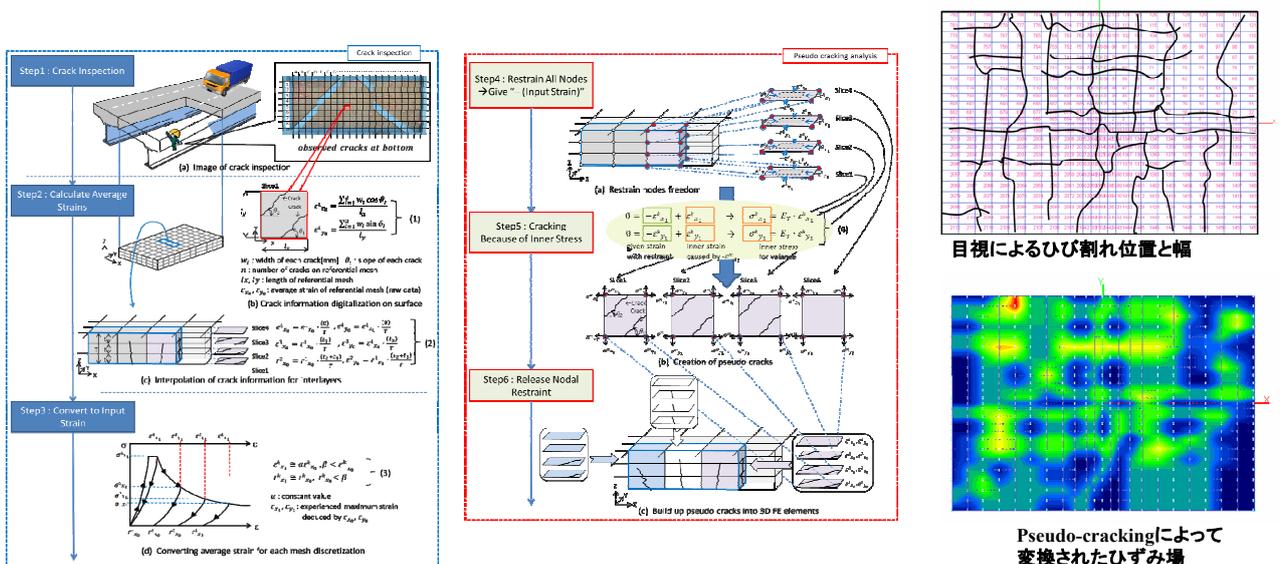


図-13 ひび割れ目視点結果から等価な損傷を再現するPseudo-Cracking法⁷⁾¹³⁾

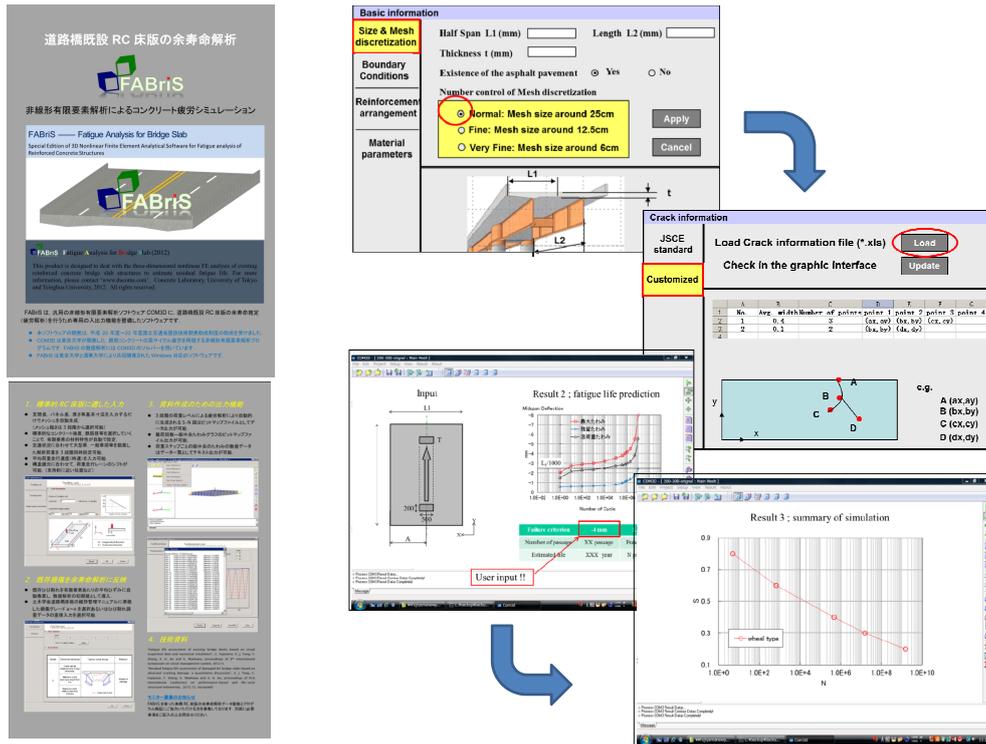


図-14 既設床版の余寿命推定とPseudo-Cracking法⁷⁾¹³⁾

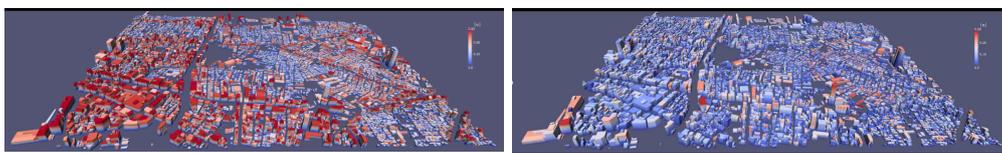
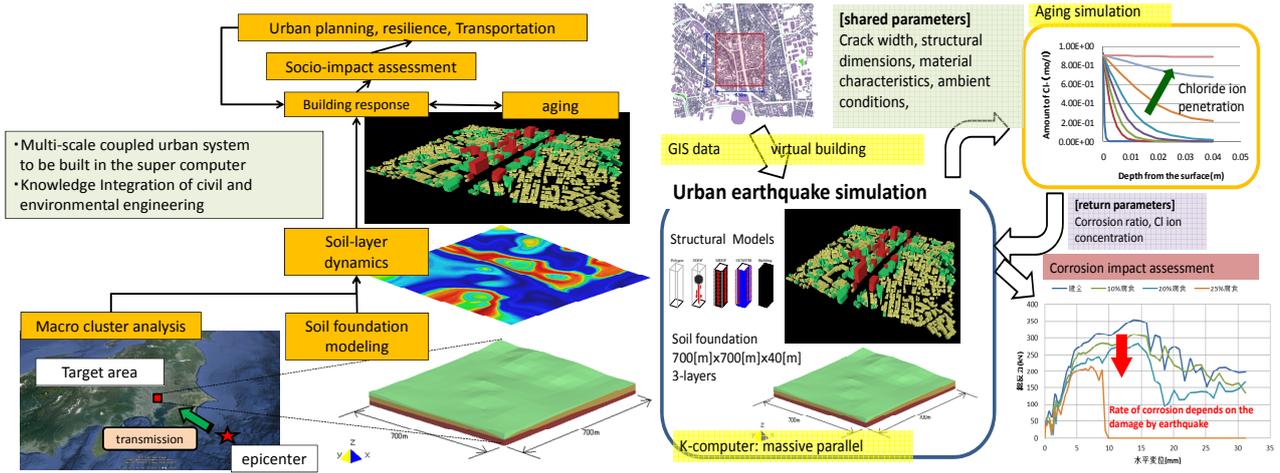
7. 都市システムへの展開

Multi-scale platformは更に数十キロスケールまで、適用の幅を広げつつある。次の10年で、個々のインフラを構成要素とする都市の動態予測が実現すると期待される。東京大学地震研究所・堀一市村研究室と連携し、都市全体の地震時応答解析の原型がほぼ完成している⁸⁾⁹⁾。断層の運動から生成された振動が地殻を伝わり、都市の深部に到達する。そこから表層地盤の特性を考慮して、都市を構成するインフラの下部に到達する地震動が求められる。それを受けて構造物の応答がマルチスケール解析で推定される。これらの手順は全て同時進行で解析され、膨大なインフラ群の地震時応答が計算される。構造物の経年劣化も同時に考慮され⁶⁾、維持管理のレベルに応じた未来都市の地震抵抗力が描画される。

膨大な都市のインフラの位置情報と構造形式は、GISデータと電子地図から取得可能となっている。建築物や社会基盤施設の資産データや、過去の維持管理情報(耐震補強含む)が電子化され、共有できる状況にはまだ至っていないが、今後、進展が期待できる。

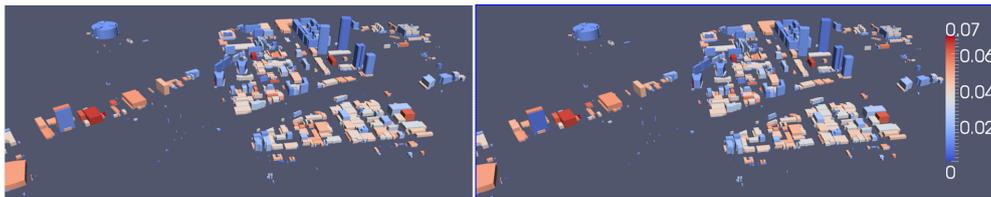
図-15は新宿近傍の構造物群を丸ごと解析した結果、ならびにスーパーコンピュータによる解析データ構造を示したものである⁹⁾。応答変位に応じて色彩トーンをつけている。大きな変位が予想される建築物の分布や、相対的に損傷が高いと思われる区域が容易に判別される。さらに東京湾に面した水際の基盤施設の応答を図-15に示した。鋼材の腐食リスクを考慮した場合、腐食が無く健全に維持された場合との違いを表している。一般に、腐食劣化によって応答変位は増加する傾向にあるが、剛性の低下に伴う振動特性の変化によって、応答変位が小さくなる場合もあることが示されている⁶⁾。

構造工学は個々の建築物やインフラ施設を主たる対象としてきたが、構造物の集合を扱うことで(量)、都市における避難誘導、街路閉塞危険性評価、都市復興財務の計画、再生における材料循環と調達計画など、社会システム・社会科学との連携を視野に入れることが可能となってきた(量から質への転換)。ミクロからマクロへの因果関係の繋がりを知見を実社会で有効利用するにあたり、よりミクロな特性を直接的に受け入れて、目体たる社会の安定と福祉に繋げる仕組みの拡大を求めたい。

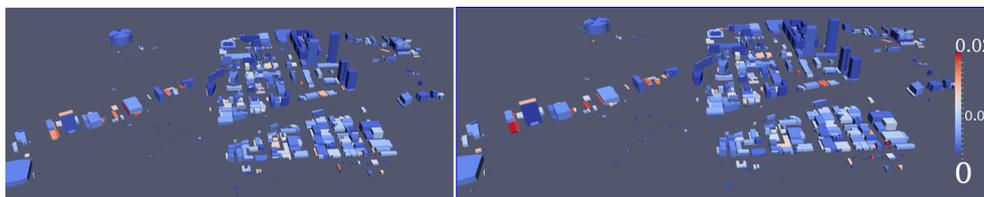


新宿周辺のすべての建物の応答解析と分布 : 応答変位ごとに色調を変化

最大層間変形(左: 腐食考慮無し、右: 腐食考慮)



残存層間変形(左: 腐食考慮無し、右: 腐食考慮)



東京湾ウォーターフロントの建物群の応答分布と塩害腐食を想定した応答の変化

図—15 都市基盤一体解析と東京の基盤—建物の応答

8. まとめ

2011年に学習と推論システムを搭載したIBMのsuper computer Watsonはクイズ番組に登場し、二人の歴代全米クイズチャンピオンを圧倒して勝利した。今日の最高速のスパコンによる言語処理では、およそ20秒で全人類が有史以来交わってきた全ての会話を分析できる。但し、コンクリート工学に関しては、今のところWatsonの知識は特性寸法に対して蓄積されていない。よって、その推論は混乱し、定量的・計量的ではあり得ない。Watsonを稼働させて推論するには、ビル数棟分を日々稼働させるのに相当する巨大な電力が必要である。ちなみに人間の脳が推論に要するエネルギーは高々15ワット（電球1個以下）である。しかし、いずれ速度もエネルギー効率も個人所有できるレベルに来ることが予想される。現在のノートパソコンは僅か16年前のスーパーコンピュータにも匹敵するのである。

ここで翻って考えてみたい。知識をため込み、言語を理解して学習を積んだ箱でも、設計はできない。設計は価値観や世界観にまで連なる創造的活動だからである。Watsonは質問された後、言語を理解して推論

を始める。しかし、皆が楽しめて、わくわくするようなクイズの問題や、社会を風刺したような捻くれた設問を創造することはできない。人間（技術者）は創造と進歩を担い、ITは知識（記憶）と蓄積を担う。性能設計はこの関係性に基づくものと理解されよう。材料特性値を介在とする分業体制は、そろそろ厳しくなってきた。インフラ施設の多様なニーズに応えるための材料特性値が多岐にわたってきたために、それらを同時に満たす材料・製造側の解が見つからない場合も散見されるようになってきた。このとき、材料特性値を与える特性寸法を小さくすることで、創造的活動の幅と選択の余地が大きく広がる。確かに、特性値から予見されなければならない構造や施設の応答の推論は難しくなるが、“潤滑に動く引出、勘の良い記憶の箱”を設ける方向で、これに対応することとしたい。

参考文献

- 1) Bazant, Z. P., Yu, Q., Li, G. H., Klein, G. and Kristek, V.: Excessive deflections of record-span prestressed box girder, *Concrete International*, ACI, 32(6), 2010.
- 2) Bazant, Z. P., Hubler, M. H. and Yu, Q. : Pervasiveness of Excessive Segmental Bridge Deflections: Wake-Up Call for Creep, *Structural Journal*, ACI, 108(6), 766-774, 2011.
- 3) Bongochgetsakul, N, and Ishida, T.: A new analytical approach to optimizing the design of large-scale composting systems, *Bioresource Technology*, 99 (6), 1630-1641, 2008.
- 4) 土木学会, 2012年版コンクリート標準示方書「設計編」, 2013.3.
- 5) Elakneswaran, Y. and Ishida, T.: Coupled physical and geochemical model for external sulfate attack in concrete, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.34, No.1, 754-759, 2012
- 6) 千々和伸浩:大規模解析に向けた劣化構造物の残存構造評価手法,*Sustainable Urban Regeneration*, Center for Sustainable Urban Regeneration, The University of Tokyo, Vol.28, 12-15, 2013.
- 7) Fujiyama, C., Tang, X.J., Maekawa, K. and An, X. H.: Pseudo-cracking approach to fatigue life assessment of RC bridge decks in service, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 11, 7-21, 2013.
- 8) 堀 宗朗:統合シミュレーターの全貌,*Sustainable Urban Regeneration*, Center for Sustainable Urban Regeneration, The University of Tokyo, Vol.28, 4-7, 2013.
- 9) Lalith, M.:大規模解析を実現する数値解析手法,*Sustainable Urban Regeneration*, Center for Sustainable Urban Regeneration, The University of Tokyo, Vol.28, 16-15, 2013.
- 10) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: *Multiscale Modeling of Structural Concrete*, Taylor & Frances, 2008.
- 11) Maekawa, K., Chaube, R. P. and Kishi, T.: *Modeling of Concrete Performance*, E & FN Spon, 1999.
- 12) 前川宏一・藤山知加子・石田哲也:ひび割れ間に捕捉される水分の動的挙動とコンクリート構造の累積損傷,-Piezo-Durability Mechanics of Cracked Structural Concrete-,耐久性力学に基づく収縮影響評価に関する報告会, 2012.10.
- 13) 前川宏一・藤山知加子・Tang XueJuan・小林 薫: 擬似クラック法に基づく疲労応答解析と既設RC床版の余寿命推定,平成24年度国土交通省国土技術研究会, 2012.
- 14) Maekawa, K., Chijiwa, N. and Ishida, T. : Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites, *Cement and Concrete Research*, 2011.
- 15) Maekawa, K., Nakarai, K. and Ishida, T.: Chemo-physical and mechanical approach to performance assessment of structural concrete and soil foundation, *Transport Properties and Concrete Quality*, John Wiley & Sons, 2007.
- 16) Mohammed, A. M. Y., Okhovat, M. R. and Maekawa, K.: Numerical investigation on damage evolution of piles inside liquefied soil foundation, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 71, 2012.
- 17) 半井健一郎,石田哲也,前川宏一,中根理史:セメント系多孔体の水和組織形成とイオン平衡を考慮した強相関カルシウム溶脱連成解析,土木学会論文集 No.802/V-69, 79-96, 2005.11.
- 18) Ohno, M., Chijiwa, N., Suryanto, B. and Maekawa, K.: An investigation into the long-term excessive deflection of PC viaducts by using 3D multi-scale integrated analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.10, pp.47-58, 2012.
- 19) 田真 仁, 坂本浩幸: 圧縮ベントナイトとセメント相互作用の評価手法の検討, 日本原子力学会2005 年秋の大会, p.590, 2005.

- 20) Watanabe, Y., Ohura, T., Nishio, H. and Tezuka, M.: Practical prediction of creep, shrinkage and durability of concrete in Japan, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Proceedings of the CONCREEP 8 Conference, Ise-Shima 30 September-2 October 2008, Florida: CRC Press, 529-536, 2008.
- 21) 渡邊忠朋, 土屋智史, 坂口淳一, 笠井尚樹: 断面の部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによるPC橋梁の長期たわみ解析, 土木学会論文集E2, Vol. 69, No. 2, 2013.