

# 第1回 構造解析の役割・変遷・今後

講師：前川 宏一\*

## 本講座の開設にあたって

ここ近年におけるIT技術の向上は目覚ましく、われわれはその恩恵を享受して日々生活をしています。

PC (Personal computer ではない) 技術者においても例外ではなく、構造解析に用いるコンピュータの性能の向上や解析ツールの整備が進み、一昔前は多くの時間と労力を費やしていた複雑な解析でも、少数の技術者によって短時間で容易に解が得られるようになってきています。

一方で、コンピュータによる支援を受けることによって設計者としての経験が浅い技術者は、熟練技術者との接点をもつ機会が極端に減ってきています。これは、解析モデルや解析結果の妥当性を判断できる技術を身につけることが容易ではなくなってきたことでもあるため、最近の重要な課題となってきました。

本号より開講する講座「PC技術者のための構造解析入門」では、PC構造物の設計に用いられる構造解析の理論的な背景や基礎知識、モデル作成時の留意事項、適用事例について解説していきます。

また、本講座では全編を通して各構造解析についての概要を解説したあとに「3径間連続PCラーメン箱桁橋」を対象とした実務に近い構造解析事例を紹介する構成としておりますので、実務者に対しても有意義な内容になるように配慮しています。

本講座が、正しい知識と判断力をもったPC技術者が多く輩出される一助になれば幸いです。(文責：講座部会)

## 1. はじめに

設計施工・維持管理の場で構造解析が担ってきた役割は、時とともに変化してきました。今後は新設構造物の建設のみならず、既存構造物の維持管理で期待される構造解析の役割にも目を配っていくことが肝要です。第1回は過去30年の構造解析の変遷を設計施工の観点からとりまとめ、今後、コンクリート構造解析に期待される役割と開発が求められる事項についても、私見と期待感をこめて述べてみたいと思います。

## 2. 構造解析の役割

1980年代の設計基準類をみると、構造解析の役割は「構成部材の断面力を求めること」と明確に位置付けられました。与えられた静的荷重の下で断面力が断面耐力をすべての構成部材で下回っていれば、結果として構造系の安全が担保されると考えられます。ここで構造解析は、構造全体系(マクロ)と構成部材(ミクロ)挙動の両者をつなぐ役割を担います。1990年代以降にはマスコンクリートの熱応力解析が実用化され、温度ひび割れのリスク評価が可能となりました。ここでも構造解析は構造全体系と構成材料挙動との橋渡しを担っており、水和発熱反応と熱拡散解析に代表される物理化学的な現象も併せて考慮されます。構造解析はミクロレベルでの力と変形と、マクロレベ

ルの変位と抵抗力とを繋げる役割を果たします。ファイバーモデルや有限要素法は、与えられた外力や環境条件に対して、ミクロとマクロの関係を近似的に、かつ実務レベルで求められる精度のもとに算定する優れた道具といえます。

技術の進展に伴って、構造解析の適用範囲は拡大してきました。2000年以降には、鋼材の降伏やコンクリートの圧縮破壊に至る領域まで、構造全体系の振る舞いを追跡できるようになってきました。材料や構成部材に発生する応力-ひずみ関係が直線関係から外れ(非線形)、大きな損傷が残るような状態になっても、構造物の挙動がある程度追跡できるようになってきました。これらは耐震設計での地震応答解析に大いに役立ちます。たとえ設計地震力を上回る作用が発生したとしても、人命を守るように構造物の振る舞いを制御し、比較的短期間に復旧できるように構造系を設計します。また、既設構造の補強も可能になります。以上は非線形解析に分類されます。構造解析から断面力のみならず、応答変位、残留変形、ひび割れの位置と幅や鉄筋降伏の有無などの情報も得られます。技術者が設計段階で行うさまざまな判断の助けになるわけです。

今日、上記の非線形解析と熱応力解析の技術を背景にして、対象とする挙動はコンクリート中の水分移動、塩化物イオンの浸入拡散、酸素拡散と鋼材腐食などの物理化学的な現象も同時に扱われる土台が作り込まれてきました<sup>1,2)</sup>。

\* Koichi MAEKAWA : 東京大学 社会基盤学専攻 教授

耐久設計や既設構造物の維持管理の現場では、遠未来の構造物の振る舞いを予見することも求められ始めました。これまでもクリープ・乾燥収縮を考慮した近未来の構造変位やPC鋼材の応力などを設計段階で考慮してきました。さらに数十年～百年単位で構造物や構成材料が健全な状態に維持されることが、今日の設計・施工計画の目標となっています。PC構造物は元来、長寿の実力があります。ただし、不適切な材料選定、配慮の足りない設計、施工不良などが重なると、短命に終わることも事実。ですので、設計や維持管理の現場で構造解析を用いて、適切な意思決定を行う必要があるのです。

高サイクルの疲労荷重のみならず雨水や日射、乾湿繰返しも構造物に作用します。飛来する塩分のみならず、冬季に多量に散布される凍結防止剤は構造物にとっては怖い相手です。複数の劣化因子が束になってかかってくると、単独よりも一層、手ごわい。「複合劣化」はこれからの重要なキーワードになってくる様相が見て取れます。図-1はミクロとマクロをつなぐ構造解析の階層を図化したものです。マルチスケール解析といわれるものは、構造解析の一般形といってよいと思います。

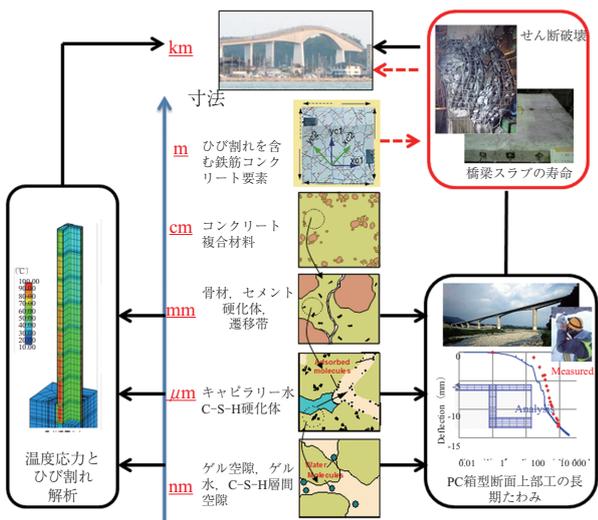


図 - 1 ミクロとマクロをつなぐ構造解析

### 3. 多様な用途とニーズ

構造部材の全体挙動と同時に、構成材料の状態を並行して示したものが図-2です。これは有限要素法を用いた非線形構造解析です。入力荷重が上昇すると曲げひび割れとともに斜めにひび割れが発生して終局耐力を迎え、その後、変位が進みつつ耐荷力が低減します。対象とした部材では最大耐力後、急速に水平抵抗力が失われて、粘りの少ない挙動となっています。図-2のような単純な形状と支持条件のもとでは、実験に基づいた精度の高いせん断耐力算定式が使えますので、非線形解析を用いるまでもありません。しかし、荷重状態や構造形状が複雑になると、実験に基づく経験式が使えません。このとき、任意形状に対応可能な有限要素法などの非線形解析が設計段階で役に立

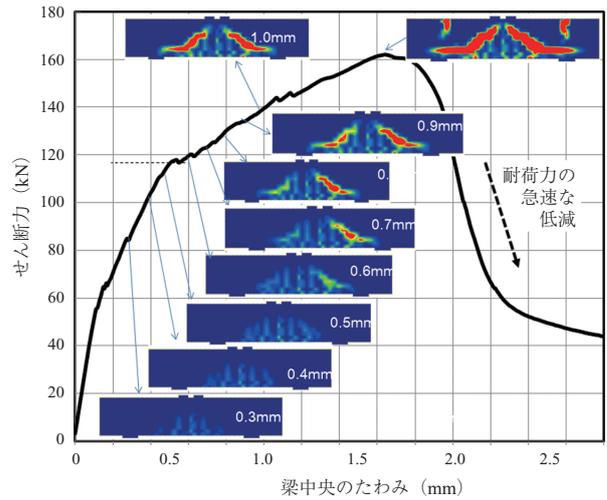


図 - 2 有限要素法に基づく非線形解析例

ちます。複雑な構造形状や支持条件に対する耐力を実験で求めることが困難な場合などにも用いられます。このとき、構造解析の適用範囲と精度から、適切な安全係数を設定して耐力を評価して設計を進めます<sup>3)</sup>。

安全係数は信頼度の高い複数の実験と構造解析の結果を比較することで決めることができます。このベンチマーク用の実験は注意深く選定<sup>3)</sup>されなければならないことはいうまでもありません。

次に地震力に耐える橋脚を考えてみましょう。地震によって引き起こされる水平力やねじりに抵抗しながら、軸力を保持し続けることが設計の要件です。図-3は一定の軸力の下で、水平力とねじりモーメントを同時に受ける柱の応答を示します<sup>4)</sup>。多方向に多くのひび割れが交差しつつ構造部材は変形しますので、3次元解析の領域です。曲げ、せん断、ねじり作用のそれぞれに対して鉄筋の必要量

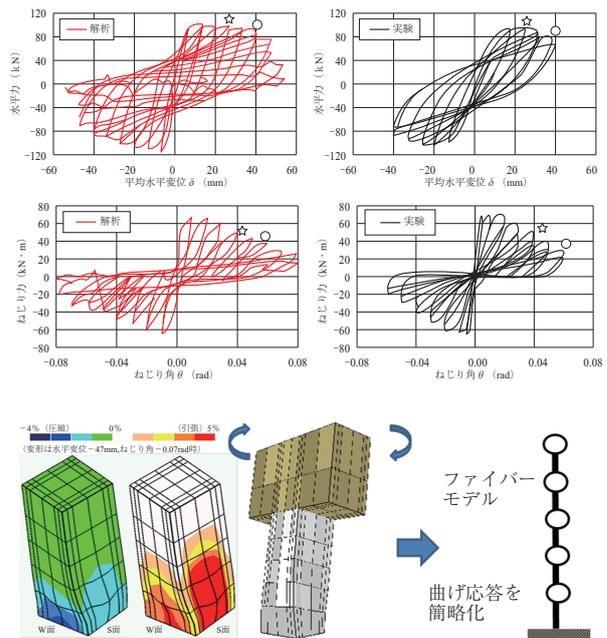


図 - 3 橋脚の複雑な応答と簡略化<sup>4)</sup>

を設計の基準に従って求めることはできますが、これをすべて加算すると、一般には随分、過剰になります。鉄筋はこれらの組合せ外力に対して個別対応しているわけではないからです。このとき、図のような構造解析で鋼材量の適正量をチェックすることができます。非線形解析は、もっぱら緒元等が定まった段階で、確かに構造が適正に挙動するか否かを確認する際に威力を発揮します。仮想現実といったところでしょうか。

せん断補強鉄筋が配置されて斜めひび割れの進展が十分に拘束され、断面保持の仮定が成り立つ場合には、ファイバーモデルを用いることで構造解析を大幅に簡略化できます。計算機の能力向上により、3次元のファイバーモデルによる構造解析は、実務上の大きな力になっています<sup>3)</sup>。

プレストレスロスや中長期の上部工のたわみを算定して、近未来に起こることに準備しておくことは、PC構造物の長寿命化への重要な第一歩です。施工後の2～3年であれば、数十センチ以上の部材厚さを有するコンクリートでは乾燥収縮を考慮しなくても、クリープを考慮した見掛けの弾性係数を用いてたわみや応力ロスを大まかに予測できます。乾燥の影響が構造物の表面に限定されるためです。

しかし、数年～数十年にわたる構造物の変形を求める場合には、1メートル近い部材厚さからも徐々に水分は蒸発逸散することを考慮しなければなりません。数年後には大きな断面部材でも乾燥の影響が徐々に出てきます。もし、上フランジと下フランジの厚さが異なる場合には、収縮のタイミングがずれて曲率が発生し、施工後、数年以上経過してから長スパンの上部構造に大きなたわみが発生することもあります<sup>5, 6)</sup>。

乾燥収縮やクリープが進行しても、断面保持の仮定はほぼ成立します。そこで厚さの異なる上下フランジ、ウェブごとにコンクリートの乾燥収縮量を長期間にわたって求めて、これをファイバーモデルに用いてたわみや構造物の変形を簡易に求めることができます<sup>5)</sup>。クリープも湿潤状態ごとに異なるので、あわせて部位ごとに異なるクリープひずみを用いると、精度はさらに向上します(図-4)。厳密に計算する場合には、各部位ごとに異なる水分の蒸発逸散を求め、コンクリートの応力ひずみ関係と一緒に解くことでたわみを求めることもできます<sup>6)</sup>。この場合、3次元有限要素法を用います。厳密解法では環境温度と湿度を直接、外環境作用として計算に用いることができます。

図-4はひび割れ発生前の構造解析ですが、応力が引張強度を超過すると、ひび割れが発生します。発生応力の主因は乾燥に伴う体積変化(収縮)であり、クリープは多くの場合、拘束に伴う応力を緩和してくれます。コンクリート温度の上昇・下降が無視できない場合には、さらに温度変化に伴う体積変化が加わります。セメントの水和発熱による温度上昇はコンクリートの剛性が小さい段階で発生しますが、温度が降下する段階ではコンクリートの強度と剛性の発現は大方、終了しています。その結果、収縮時の応力の発生が上昇時のそれと比較して大きくなり、引張強度を超えると、温度ひび割れが発生します(図-1)。ひび

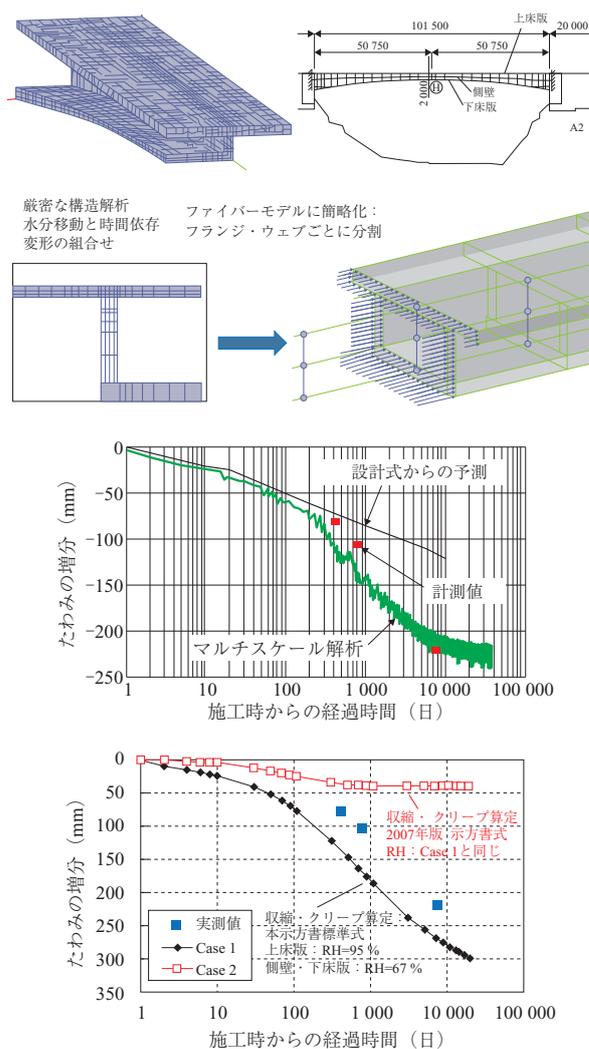


図-4 中空PC橋梁の長期たわみ<sup>5, 6)</sup>

割れ以後は、ひび割れの存在を前提とする非線形解析に戻っていきます。

高サイクル疲労荷重下でのコンクリート構造物の疲労寿命は、鉄筋などの鋼材の疲労破断で決まる場合と、コンクリートの疲労圧縮破壊が限界状態となる場合の二通りがあります。プレストレストコンクリートの場合、PC鋼材の常時応力は高く維持されますが、コンクリートにひび割れが起これなければ、応力振幅は十分に小さくなります。鋼材の疲労はほぼ応力振幅に依存しますので、腐食していなければ鋼材の疲労破断はほぼ回避できます。コンクリートの疲労曲げ圧縮に対しては、強度やフランジの断面寸法を増やす等で対処できます。そうすると、最後に残るのが面外せん断破壊です。

図-3に大凡、数回～20回程度の繰返しを受ける構造物の応答解析<sup>4)</sup>を示しました。この構造解析法自体は、基本的には高サイクル疲労荷重下の構造物の応答解析に使えます。両者の違いといえば、荷重レベルが地震応答解析と比較して小さいこと、その結果、繰返し回数が4～5桁程度にも及ぶ点です。但し、材料構成則は低・中レベルの応力やひずみの1回の繰返しに対するわずかな損傷や塑性

変形の進展を評価できるものでなければなりません。コンクリートの見掛けの疲労強度は載荷速度に応じて異なることが知られていますので、さらに時間依存性を考慮するモデルとの組合せが必要です。

図 - 5 は荷重の繰返し回数に応じて徐々に斜めせん断ひび割れが発生、進展して終局に至る過程を示しています。この場合、鉄筋の疲労破断までには十分、余裕があるケースに相当します。材料モデルの記述方法にも依存しますが、損傷度を時間増分ごとに積分する場合は、あらかじめ時間の対数で疲労損傷度の増加分を求め、時間の対数に対して差分を取って計算することで、多数回の繰返し計算を効率的に行うことができます<sup>2)</sup>。

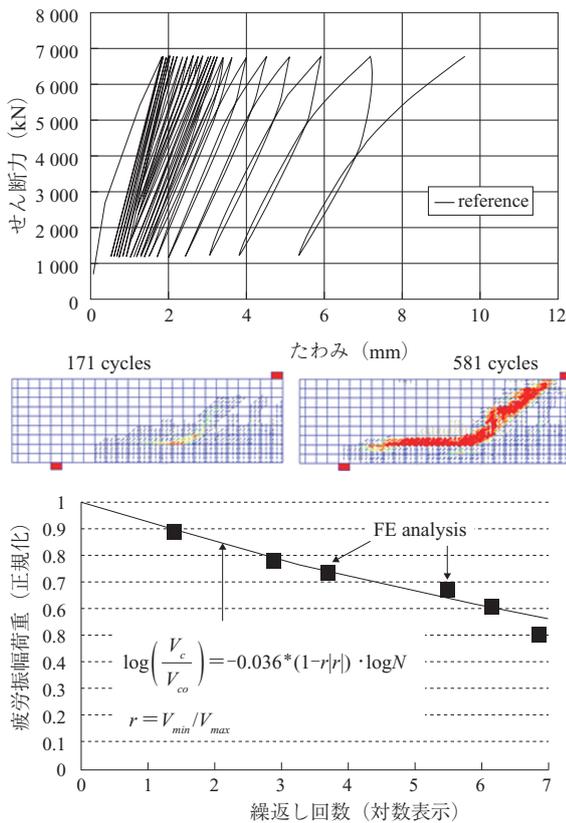


図 - 5 高サイクル疲労荷重を受ける部材のせん断破壊<sup>2)</sup>

#### 4. 構造解析の今後の進展

近い将来、既存橋梁の補修補強に向けられる予算が新設予算を上回ることは不可避です。現存、インフラを如何に有効に賢く利用するかが問われています。この維持管理業務では、点検時点でのインフラの安全性の評価、さらに余寿命の推定が必要であり、これに対して構造解析は答えを出すことが望まれています。これが可能となれば、補修・補強を行った場合の余寿命や補強効果の検証も合理的に行えるでしょう。設計や材料の試行をすべて実験で検証するには、そもそも時間的に限界があります。

ここで、コンクリート床版を例に取り上げ、構造解析の今後に期待される役割について私見を交えて述べてみたいと思います。交通荷重を直接受ける床版は橋梁を構成する

部材の一つですが、もし技術の進展がなく、現在の延長が未来であるとするれば、将来の維持管理予算の相当分を消費してしまうと推定されています。

図 - 6 は移動荷重を受ける RC 床版の疲労寿命を、荷重レベルに応じて示した疲労寿命曲線 (S-N 図) です<sup>2)</sup>。定点に荷重が作用する場合と比較すると、実験・解析共ども大きく疲労寿命が低下することが知られています。水が床版の上に滞留すると、寿命はさらに低下します。これらの挙動や傾向は、十分な施工と養生がなされた場合には、非線形構造解析で大凡、疲労寿命が推定可能となってきました。

乾燥収縮などによるひび割れが床版の上面に存在していると、なお寿命は短くなります。水の存在でひび割れ内や細孔内の圧力上昇を引き起こし、コンクリート固体に損傷を与えます。床版の寿命は、施工品質や養生の良否にも大きく影響される所以です。

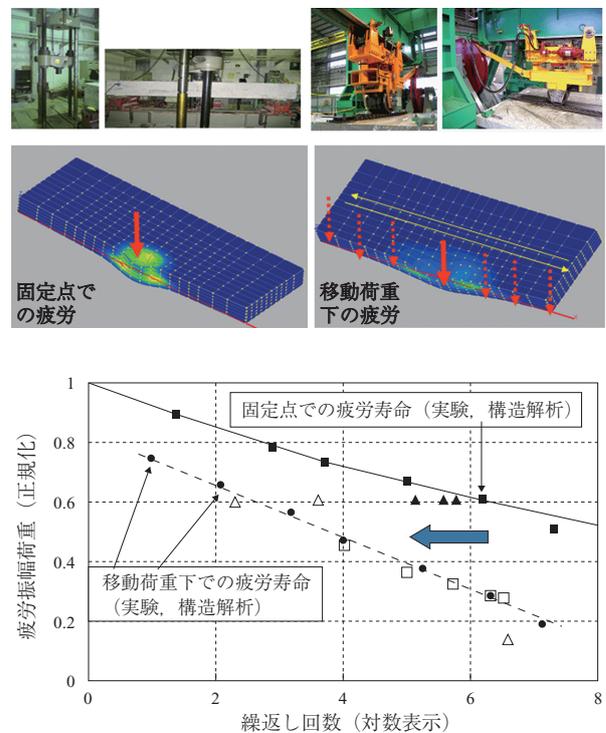


図 - 6 移動荷重下の RC 床版の疲労強度<sup>2)</sup>

図 - 7 は鉄筋が腐食した床版の輪荷重走行試験の結果を示したものです<sup>7)</sup>。鋼材の腐食によって、コンクリート床版表面に腐食ひび割れが発生しましたが、既往の研究成果から鑑みて、静的耐力が低下するレベルには至っていません。しかし、高サイクル疲労荷重を受ける場合には、疲労寿命は 10 分の 1 程度にまで低下してしまいます。疲労寿命の絶対値では実験値と差があるものの、鋼材腐食の有無による寿命低下はほぼ同じ程度に解析でも再現されます。橋梁の主要な部材である床版の性能 (交通を安全かつ快適に通過させる) は、力と環境作用の複合に大きく影響を受けることがポイントで、いわゆる複合劣化の一例です<sup>7)</sup>。

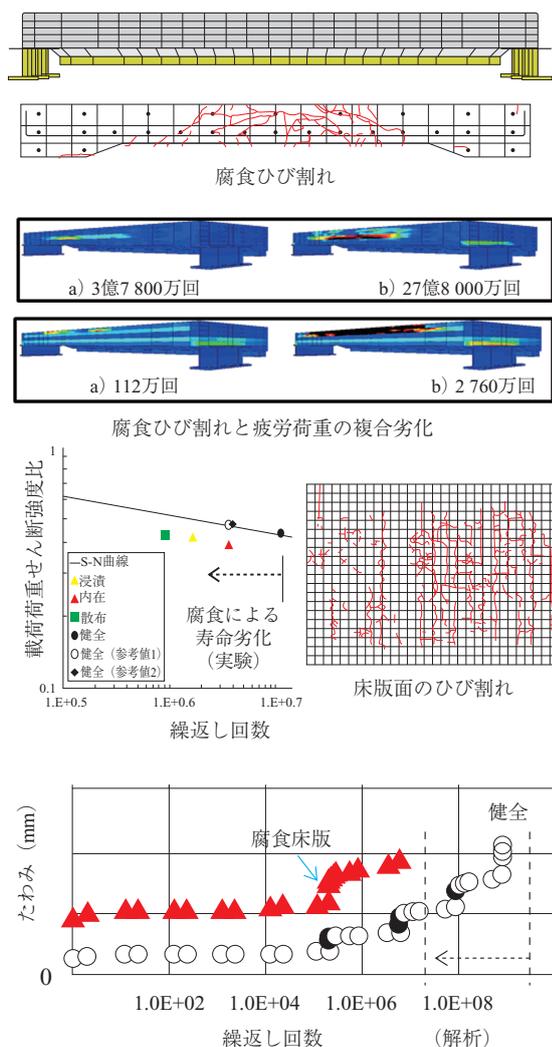


図 - 7 腐食と移動荷重を受ける RC 床版の疲労強度<sup>7)</sup>

アルカリシリカ反応の進行と交通荷重との組み合わせも、床版の劣化を考えるうえで今後、重要です。荷重も環境条件も、構造物と構成材料にさまざまに影響を与えます。これらの組合せは、少なくとも個々の影響の足し合せでないことは明らかです。維持管理の現場で求められる要求に対して、構造解析は応えていくことが望めます。個別の知識や評価法は、かなりの進歩を過去 10 年で得られたものと思います。これらを横に繋ぐことが肝要と考えます。

## 5. ま と め

水の存在と荷重的作用により、ひび割れの間やコンクリートの細孔中の圧力が変動し、これがコンクリート構造に過剰な劣化を導入します。構造解析では液体-固体の混合システムを扱う相互作用モデルを使います<sup>8)</sup>。

これは地盤の液状化解析や圧密解析と同じ方法で、1960年代に確立された構造解析法<sup>9)</sup>です。アルカリシリカゲルや腐食ゲルは固体の性質と液体の性質を併せもちます。これらとコンクリート構造との相互作用も同様に、考慮されます<sup>8)</sup>。コンクリートに関する構造解析も進化しつつあるといえます。換言すれば、技術はつねに不完全であるともいえるでしょう。工学はその時点その場所で、不十分ながらも適材適所で使われてきました。技術の現状と力量をよく理解したうえで、技術者の利益を拡大すべく、適切に使っていくことが肝要です。そのために、事実に基づく検証がなされることが本質的に必要です。開発-検証-改良の繰返しから技術の進展が生まれます。ここに基準類が時々において改定される所以です。構造解析も然りです。

## 参考文献

- 1) 前川宏一: 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 - (特別講演), プレストレストコンクリート工学会, 第 22 回シンポジウム論文集, 2013
- 2) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 2008
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編 -2012 年制定
- 4) Tsuchita, S., Maekawa, K. and Kawashima, K.: Three-dimensional cyclic behavior simulation of RC columns under combined flexural moment and torsion coupled with axial and shear forces, Journal of Advanced Concrete Technology, 5 (3), 409-421, 2007
- 5) 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, 69 (2), 207-226, 2013
- 6) 千々和伸浩, 石田哲也, 前川宏一: コンクリートの微細空隙中の水分と PC 橋の長期変位, 橋梁と基礎, 45 (1), 2011
- 7) 前島 拓, 子田康弘, 土屋智史, 岩城一郎: 塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響: 土木学会論文集 E2, 70 (2), 208-225, 2014
- 8) 前川宏一: 間隙水の動態から見るコンクリート構造工学と地盤力学, 地盤工学会誌, Vol.61, No.11/12, 2013
- 9) Biot, M. A.: Theory of stability and consolidation of a porous media under initial stress, Journal of Mathematics and Mechanics, 12 (2), 521-541, 1963

[2014 年 11 月 5 日受付]