

コンクリート構造物の非線形解析技術の進化と展望

中村 光*

1. はじめに

非線形解析の対象は、静的荷重作用による、ひび割れ、耐荷力、ポストピーク挙動などだけでなく、動的解析、衝撃解析、クリープ解析、温度応力解析、収縮解析、経時劣化解析、拡散解析など、コンクリート工学におけるほぼすべての挙動に及んでいる。非線形解析は構造物の振舞いを忠実に再現できる可能性を秘めたツールであり、その適切な利用は、コンクリート構造物のもつ性能を十分に活かしたより合理的な設計を可能にするものである。設計・照査の流れの中でその重要性はますます増しており、2007年制定の土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕では、構造解析は非線形の影響を考慮することが原則として示されたり。また、有限要素解析法を用いた場合の応答値の算定方法が、「非線形解析による構造解析」として参考資料に記載された。PC構造物に関連しては、非線形解析による照査を前提とした外ケーブル定着部の性能照査型設計ガイドライン（試案）が2004年に公表されている²⁾。このように非線形解析は、すでに実用的手法となりつつあるが、コンクリート工学の発展とともに今後も進化していくと考えられる。

非線形解析が対象とする範囲は広いが、本論では、力学的作用に関する問題を中心に、非線形解析の発展経緯、最新の非線形解析の事例、今後の展望を論じることとする。非線形解析に対するPC構造物の特徴的な問題としては、PC定着部など局部的な高応力部が存在すること、クリープの影響が大きいこと、などが挙げられるが、多くの問題はRC構造物と同一である。したがって、PC構造物とRC構造物を特段に区別せず、コンクリート構造物として一般的な記述を行うこととする。

2. 非線形解析技術の発展史概略

コンクリート構造物の非線形解析技術は、①有限要素法などの解析理論、②コンクリート構造物に用いる材料モデル、③ひび割れなどの現象を表す力学モデル、などの個別

の技術が統合することで、高精度な解を得ることができる複合技術といえる。コンクリートに特化した技術の発展はこのうち材料モデルと力学モデルであり、特徴的な問題としては多軸圧縮応力下の問題とひび割れに関する問題がある。ここでは、ひび割れに関する問題に焦点をあて、その技術の発展の概略を述べる^{3~5)}。

2.1 非線形解析黎明期（60年代後半）

ひび割れを考慮したコンクリート構造物の有限要素解析は、1967年にNgoとScordelisによってRC梁の解析で初めて行われた⁶⁾。彼らは、図-1(a)のように要素面にひび割れ面を仮定し、ひび割れは引張応力が引張強度に達したら要素接点を分離する離散ひび割れモデルでモデル化した。また、ひび割れ面にリンケージ要素を導入し、ひび割れと骨材のかみ合い効果も同時に考慮した。さらに、コンクリートと鉄筋を別べつの要素を用いて離散化して、付着すべりもモデル化した。コンクリート構造物の特徴的な現象を表す概念が含まれており、以後の発展に大きな影響を及ぼした。

ひび割れのモデルとしては、主引張応力が引張強度に達したらひび割れが発生したとしてその方向に座標系を定義し、図-1(b)のようにひび割れ直交方向では応力を零あるいは徐々に低下させる、分布ひび割れモデルもよく知られている。分布ひび割れモデルは、1968年にRashidが圧力容器の解析でモデル化したものである⁷⁾。このようにひび割れを扱う力学モデルは、コンクリート構造物の非線形解析の始まりと同時に60年代後半に提案された。なお、ひび割れモデルとしては、要素レイアウトの関係で取扱いが容易な分布ひび割れモデルが現在では主流である。

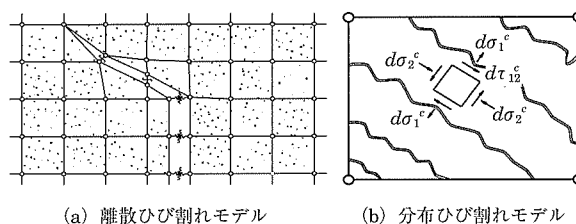


図-1 ひび割れモデル

2.2 材料モデル（平均化構成則）の構築期（70年代、80年代）

70年代と80年代は、材料挙動のモデル化が進歩した時期であり、80年代には現在もよく用いられる材料モデルが提案されるに至った。70年代は、材料モデルの知見の蓄積と試行錯誤期、80年代は平均化構成則の構築期と呼べるか



* Hikaru NAKAMURA

名古屋大学大学院 工学研究科
教授

もしれない。

ひび割れに関連した材料モデルとしては、図 - 2 に示すように、① ひび割れ直交方向の引張挙動 (引張硬化)、② ひび割れ面に沿ったせん断伝達、③ ひび割れ平行方向の圧縮挙動がある。

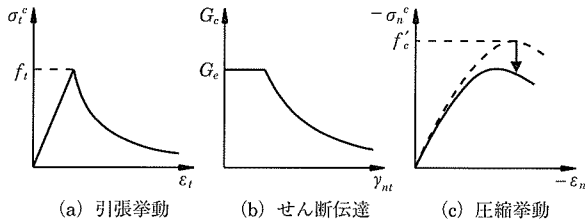


図 - 2 各種平均化構成則

ひび割れ直交方向の引張挙動については、鉄筋との付着により生じるテンションスティフニング効果 (引張硬化) をコンクリートの引張抵抗に置き換え、平均応力ひずみ関係としてモデル化する試みがなされた^{8, 9)}。ひび割れ界面におけるせん断伝達に関しては、ひび割れ面でのすべり変位に伴う膨張効果を考慮し、より合理的なひび割れ挙動が再現できるモデルが提案された^{10, 11)}。ひび割れ平行方向の圧縮挙動については、80年代初めに Vecchio・Collins の純せん断平板実験から、圧縮強度と剛性が、ひび割れの存在により圧縮供試体から得られる値より低下することが指摘された。この挙動を表すように、ひび割れ直交方向のひずみにより圧縮強度が低減するモデルが提案された^{9, 12)}。

ここで上述の3つのモデルに共通する基本概念は、クラックひずみである。これは、ひび割れ位置では本来変位が不連続に変化するが、このひび割れ変位をある領域で平均化することで、平均ひずみとして扱えるようにし、有限要素法の基本である連続体力学の範ちゅうでひび割れを扱えるようにしたものである。上述の3つのモデルは、ひび割れを含む領域において、それぞれの現象を表すように平均化した挙動である。この基本概念は、分布ひび割れモデルの概念も含むものであるため、有限要素法として扱いやすい分布ひび割れモデルと、それに対応する材料モデルが組み合わせることで、非線形解析の精度、とくに壁のような鉄筋が平均的に配置されている構造物での精度が格段に向上した。

2.3 破壊力学の適用期 (80年代, 90年代)

80年代にその基本モデルの多くが提案された平均化構成則は、鉄筋が配置され複数のひび割れがある程度連続的に発生するような場には適しているが、無筋コンクリートのように単一のひび割れが進展拡大していく挙動を扱うには難があった。そのような問題に適した手法として登場したのが、破壊力学の概念であり、70年代後半から非線形解析への適用が検討され始め、80年代中旬以降活発に利用された。破壊力学の概念の導入は、70年代後半に Hillerborg が、ひび割れ進展にともなうコンクリートの破壊現象を数値解析に適用できるよう、引張軟化曲線 (応力-ひび割れ幅関係: 図 - 3 (a)) の面積として破壊エネルギー G_F を提

案したことから始まる¹³⁾。また、Hillerborg は微細ひび割れが局所的に集中して生じる破壊領域の非回復性の変形を1本の仮想ひび割れ幅で表す、仮想ひび割れモデル (Fictitious Crack Model) も提案した。その後同様の考え方に基づき、Bazant と Oh は、この変形をある領域に均等に分布させた、ひび割れ帯モデル (Crack Band Model) を提案した¹⁴⁾。ひび割れ帯モデルは、分布ひび割れモデル同様取扱いの容易さから、現在では主流となっている。このように破壊力学の概念を非線形解析に導入することで、コンクリートのひび割れ進展挙動の解析精度が格段に向上し、せん断破壊や寸法効果の問題が解析可能になった¹⁵⁾。一方、圧縮応力下の挙動についても同様の破壊エネルギーの概念が適用可能との検討結果が90年代後半に示され¹⁶⁾、圧縮破壊エネルギーを考慮した応力-ひずみ関係 (図 - 3 (b)) が利用され始めた。その結果、圧縮破壊が支配的な部材の挙動、たとえば曲げ破壊する場合の変形性能やせん断圧縮破壊が精度よく解析可能になった。

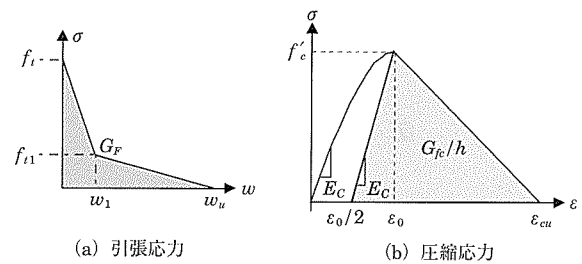


図 - 3 破壊エネルギーを考慮したコンクリートモデル

2.4 モデルおよび適用範囲の拡張期 (90年代後半以降)

前述のように、現在の非線形解析の骨格となるモデルは90年代までには出そろった。近年の進歩は、これらのモデルの高精度化や精微化あるいは適用範囲の拡大が主となっていると思われる。いくつか代表的な例をあげれば、Anらは、構造物中には鉄筋周辺の鉄筋との複合作用が支配的な領域 (RCゾーン: 平均化構成則の適用) とコンクリートのみの挙動が支配的な領域 (PLゾーン: 破壊力学概念の適用) があり、それぞれのゾーンに適したモデルを適用する手法を提案した¹⁷⁾。これにより各材料モデルの特徴をより詳細に構造物中に考慮することになり解の精度向上に役立った。ひび割れモデルに関しては、多方向のひび割れを陽な形で考慮して、より現実に近い挙動を再現することで複雑な荷重履歴にも精度の高い解を保証できるモデルへの拡張が行われた¹⁸⁾。

3. 最新の非線形解析技術

前章で概説した非線形解析技術の進歩の多くは、ひび割れや耐荷力など、短期荷重作用による力学挙動を表すことを主眼としていた。近年、既往の知見の組合せをベースとした手法の高度利用や、短期荷重作用以外への新たな適用等が試みられているので、そのいくつかを紹介する。

3.1 実構造物の解析 (高度利用例)

非線形解析は、従来、部材レベルへの適用が多かったが、

近年のコンピュータ性能の向上とともに、実構造物全体系を対象とした解析も行われるようになってきた。たとえば、図-4は高架橋全体を3次元解析したときの変形性状であるが、約3万個の3次元要素によりその形状を詳細にモデル化し、解析が行われている。また、実構造物を解析する試みとしては、今後の展望に位置づけられると思うが、E-defence（実大三次元震動破壊実験施設）による実大実験を補完するとともに、実験をすることができない巨大構造物の地震時破壊時挙動までをシミュレーションするE-Simulator（数値震動台：高度な数値解析手法と大型計算機を使って所定の地震動に対する動的応答を計算する計算機上の震動台）が開発中であり¹⁹⁾、大規模数値シミュレーションの時代が間近に迫っている。

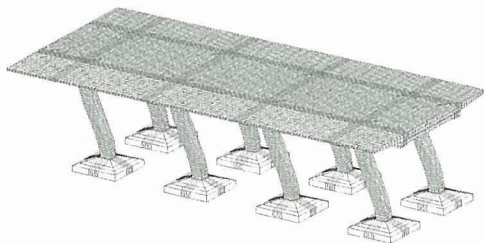


図-4 高架橋の解析例

3.2 マルチスケール統合解析システム（新たな取組み例）

近年のコンピュータの処理能力や非線形解析技術の向上とともに、練混ぜあるいは打込み時からのコンクリート内外の膨大な物理化学現象を考慮しながら、供用期間中のコンクリート構造物の全体挙動をシミュレーションする統合解析システムが現実的なものとなってきている。

前川らの研究グループでは、セメントの水和反応から劣化までのコンクリート材料の挙動を時空間上で逐次解析する熱力学連成解析システム DuCOM と 3次元非線形動的解析システム COM を組み合わせることにより、各種劣化を考慮したコンクリート構造物の性能評価手法を構築している²⁰⁾（図-5）。熱力学連成解析システム DuCOM は、複合水和発熱モデルと空隙構造に立脚した水分移動解析技術を基礎として、若材齢時の固体形成過程における水分の消費や移動、水和物生成に伴う構造変化、熱エネルギーの生成や移動の各現象を、任意の配合および養生条件に対して時空間上で追跡可能な手法として構築された。現在では、塩化物イオン移動モデル、二酸化炭素平衡・移動モデル、炭酸化反応モデル、酸素平衡・移動モデル、鋼材腐食モデルや溶脱モデルも組み込まれ、鉄筋腐食などのさまざまな劣化現象も評価可能なように拡張されている。一方、3次元非線形動的解析システム COM は、繰返しを考慮した各種材料モデルや多方向ひび割れモデルにより、任意の荷重履歴に対する力学挙動を終局域まで追跡可能な手法である。

両者の統合により、材料の状態変化と構造力学挙動の相互依存性を直接に考慮した統合解析が可能になっている。これまでに、鋼材腐食や収縮、クリープによってコンクリート構造物に生じる応力や損傷、構造性能の変化、あるいは

は環境条件の違いによる疲労破壊の変化などの解析事例が報告されている（図-6）。

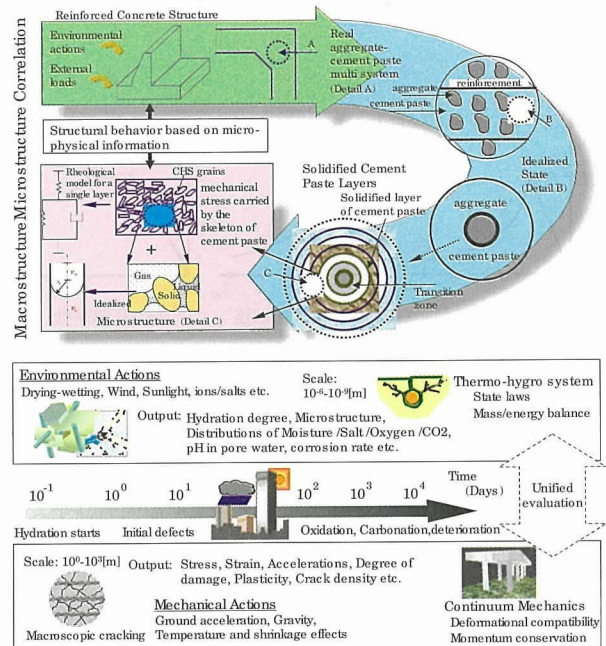


図-5 マルチスケール統合解析システム

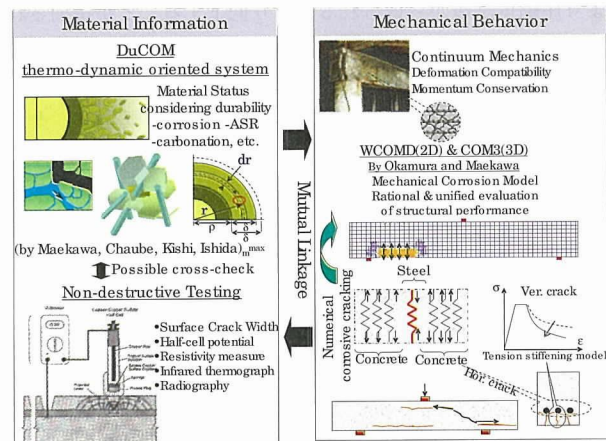


図-6 鋼材腐食と構造性能の統合解析システムと解析事例

3.3 剛体ばねモデル（新たな手法例）

コンクリート構造物の非線形解析ツールとしては、紹介しているように有限要素法が一般的である。有限要素法は、連続体力学に基づき変位の連続性を前提としているが、コンクリート構造物の特徴的な現象であるひび割れや圧壊などは変位が不連続となって生じる現象のため、この食い違いを克服することが、コンクリートの非線形解析分野の重要な課題であった。平均化構成則、分布ひび割れモデル、破壊エネルギーを考慮可能なひび割れ帯モデル、など多くの重要な概念もこの食い違いを考慮したものであった。

それに対し、変位の不連続性を特徴とした手法である剛体ばねモデル（RBSM：Rigid Body Spring Method）が近年注目されている。RBSMは、図-7のように剛体をばねで

繋いだモデルであるため、コンクリートのひび割れ挙動や破壊時のコンクリートのブロック化挙動の表現手段を、ばねの破壊として解析手法がもともと持っている。コンクリート構造物へのRBSMの適用は、Bolander・Saitoにより提示されたポロノイ分割(図-8)を組み合わせた洗練された解析結果に触発されて²¹⁾、この10年で大きく進んだ。その適用範囲は単なる構造物の解析に留まらず、複合材料としてのコンクリート、またはコンクリートから構成される部材・構造物を、空間的、時間的にさまざまなレベルでモデル化するところまで進んできている²²⁾。

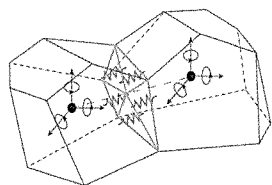


図-7 3次元RBSM

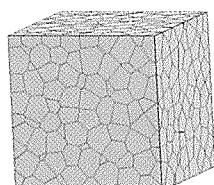
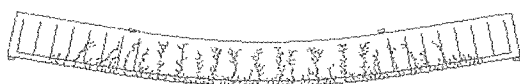


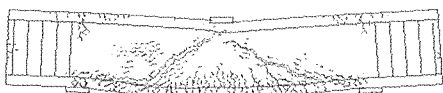
図-8 ポロノイ分割

図-9は、曲げ破壊およびせん断圧縮破壊する部材の解析を行った例である。ひび割れ進展挙動をより現実的に表すことができ、有限要素法と異なる利点があると思う。

図-10は、一軸圧縮破壊をシミュレートした結果である²³⁾。応力ひずみ関係はもちろんのこと、破壊領域や局所的なひずみの進展状況も解析可能になっている。なお、この解析では、骨材寸法程度の要素が用いられるとともに、材料レベルでは圧縮破壊は生じないとして、引張とせん断のばねの破壊のみが仮定されている。このような仮定で、実挙動を再現できたことは、破壊現象のメカニズムを明らかにするための知見も非線形解析から得ることができる可能性を



(a) 曲げ破壊



(b) せん断圧縮破壊

図-9 RBSMによる部材解析例

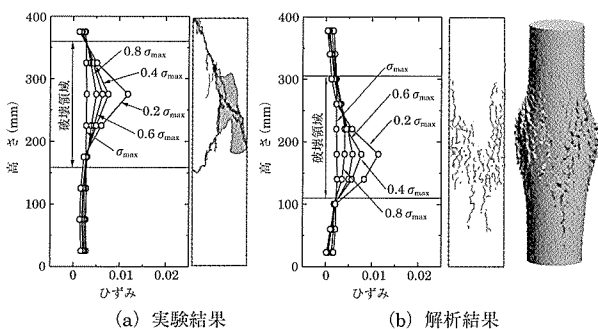
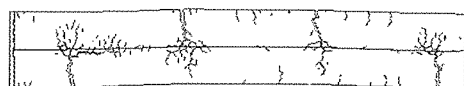


図-10 柱高さ400mmのひずみ分布と破壊状況

示すものである。

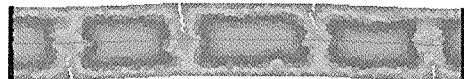
中村らは、RBSMとトラスネットワークモデルを結びつけ、物質移動を考慮した時間依存型構造解析手法を提案した²⁴⁾。その中では、RBSMの特徴を考慮し、物質移動の重要な経路でありかつコンクリートの力学的特徴であるひび割れを主な解析寸法とした。提案手法では、RBSMは構造解析に、トラスネットワークモデルは物質移動解析に用いられている。この手法は、短期挙動としての荷重作用解析と長期挙動としての物質移動解析を統合したものであり、湿気移動による収縮、塩化物イオン拡散により生じる鉄筋腐食などの問題に適用されている。図-11は、湿気移動による収縮ひび割れ進展・塩化物イオンの拡散・塩化物イオン濃度がしきい値を超えた場合の鉄筋腐食膨張・鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生という、コンクリート構造物の典型的な劣化進展挙動をシミュレートした場合の一例を示している。また、この手法の特徴として、ひび割れを直接的に表現できるRBSMの長所を活かし、コンクリート中の物質移動とは別にひび割れ間の物質移動を直接考慮可能なことがあげられる。この特徴により、図-11では収縮により生じたひび割れを通して塩化物イオンの浸入が促進されていることを見ることができる。このように、RBSMはひび割れを直接的に扱えるというメリットを有するため、初期ひび割れの制御予測などに有用な手法となり得るといえる。



(a) ひび割れ図



(b) 相対含水率分布



(c) 塩化物イオン濃度

図-11 乾燥収縮と塩害の統合解析

4. 非線形解析の今後の展望

4.1 非線形解析の課題と目的

非線形解析の課題については、実用的な問題の解析も可能になりつつあった80年代から議論されてきた。研究分野での発展が先行したため、当初は解析研究者と実験研究者のギャップを埋めることが課題とされた。次に、基礎実験と解析精度の検証の重要性が認識された。また、有限要素解析の実務設計への直接応用や有限要素解析によるマクロモデルや設計式の開発が、80年代に将来展望として示されている。近年では、ツールとしては発達したが、ブラックボックス化が進んだため、多数の技術者が間違いなく使用できるような非線形解析のガイドラインを作成する必要性が指摘されている²⁵⁾。また実務者へのアンケート結果より、

有効活用のシナリオとして、① 設計を合理化する場合、② 現象・機構の解明、③ 実験を補間して評価式を構築する場合、④ 構造の創造、⑤ 補修・補強の計画があげられ、普及のためには、破壊挙動および耐力の評価、施工時点における初期ひび割れの制御が精度良くできることとされている²⁵⁾。このように、課題は技術の発展や社会状況とともに変化している。

非線形解析の今後の展望を見渡すには、非線形解析をなぜ行うのか、実験的手法に対する解析手法のメリットは何かを考えるのがよいと思われる。実験はある条件下のもとでの性能を検査することができるが、多数のパラメータを変化させた検討は、時間や費用の面で困難である。また、構造物を部分的に模した実物大の試験体や縮小試験体で行う場合もあるが、実構造物レベルの実験は非常に困難である。これに対し、解析は寸法の制限を受けることなく、前章で示したように実構造物レベルの数値実験も可能である。さらに、一度モデルができればパラメータを変更することは容易である。また、実構造物のような大きな寸法だけでなく、骨材さらには結晶レベルへとより小さな寸法へも容易に展開できる。時間に関しても、長期にわたる実験は困難であるが、解析ではそのシミュレーションを短時間で行うことができる。このように絶対軸である「空間」と「時間」をコンピュータ上で超越できることが、解析の大きな特徴である。また、非線形解析はかざられた数の微視的なモデルの組合せにより、さまざまな巨視的な挙動を表す。したがって、コンクリート材料・構造の基本挙動を正しくモデル化できなければ多様な適用性は望めない。このことは、科学的にコンクリートの本質を考究するという行為にも繋がることである。

4.2 今後の展望と可能性

解析の可能性はコンピュータの性能に大きく依存し、その性能向上が与えるメリットは大きく二つある。一つは、計算が高速化することでより短時間で解が求められるようになることである。前章で示したように現状においても、実構造物の耐力から時間軸上の問題まで非線形解析は適用され、耐力および破壊挙動の評価、施工時点における初期ひび割れの制御、などもかなりの精度でできるようになっている。多くの問題を実用的なレベルで解析できるようにするためには、汎用的な使用に対する何らかのプレイクダウンが必要になると思うが、解析負荷が小さくなり、身近なツールとなるのは明らかである。二つめのメリットは解析解像度が上がり多くの情報を扱えることである。解析に用いるモデル作成時には、必要となる精度を保持する範囲で簡素化・単純化がなされているが、そのようなことを行わなければ当然より精度を上げることができる。また、多くのモデルを組み合わせさまざまな事象の相互作用も取り入れやすくなる。前章で示したRBSMは、単純なばね挙動を仮定し、要素寸法を細かくすることで、より現実的なひび割れ性状が表現できるようにしたものであり、コンピュータ性能の向上で解析解像度が上がったために有効な手法となった例である。

以下では、今後非線形解析の適用が工学的に有効である

と考えられる問題を紹介する。

(1) 崩壊解析

兵庫県南部地震でのコンクリート構造物の多大な被害を踏まえ、耐震設計では非線形解析を行うことが原則とされた。このことが、非線形解析の実用化に大きな役割を果たしたことはいうまでもない。土木学会コンクリート標準示方書では、耐震性能は3つに分類され、耐震性能3は、「構造物全体系が崩壊しない」と定義されている¹⁾。この定義に従えば、照査手法としては構造物全体系の崩壊をシミュレートできることが要求されるが、現状では耐力以降のポストピーク挙動をある程度まで追跡するのが限界である。崩壊過程をシミュレートするには、材料の破壊による不連続挙動や大変形挙動を適切に評価できることが前提としてあるが、崩壊過程を知ることは、真の限界状態やある限界に至る過程や危険度を明らかにすることにつながり、過大な地震入力に対するより合理的な設計に結びつくと考えられる。

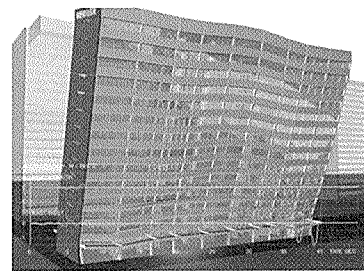
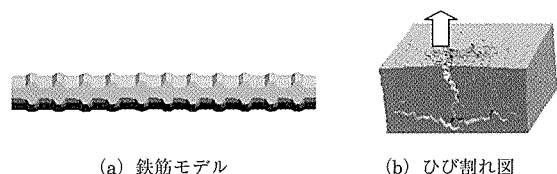


図-12 建物の崩壊解析の試み例²⁵⁾

(2) 構造細目解析

構造細目は照査の前提であり、コンクリート構造物成立のための基本である。現状では、構造細目を直接照査する手法がないため、仕様規定としていくつかの厳守すべき事項が定められているが、このことにより過密配筋や設計上のクリティカルとなる場合も少なくない。したがって、構造細目の照査が可能になれば、コンクリート構造物の合理的な設計への寄与は非常に大きいと考えられる。照査の前提となる構造細目は、鉄筋に関する構造細目であり、定着や継手がある。それらは鉄筋節からの力の伝達が重要な役割を占めているため、非線形解析で直接評価するには、図-13のように鉄筋の節までもモデル化した手法が必要となる。鉄筋節近傍の局所的な応力状態の評価法など解決しなければならぬ事項は多いが、解析解像度を上げ、節などのmm単位の寸法を基準としたモデルを用いることで、構造細目も照査可能になる可能性は十分にあり得る。



(a) 鉄筋モデル

(b) ひび割れ図

図-13 鉄筋の節までモデル化した付着解析例

(3) 時間依存構造解析

パラオ共和国の Koror-Babeldaob Bridge (PC 箱桁橋) の落橋事故や垂井高架橋 (PRC 箱桁ラーメン橋) の過度のひび割れ・変形などの変状など、時間経過とともに橋梁に不具合が認められた事例が生じている。

Koror-Babeldaob Bridge については、Prof.Bazant が長期変形予測解析を行い、材齢 3 年以上のクリープデータの蓄積の重要性を指摘するとともに、橋の環境条件 (日射による乾燥、湿度、温度変化) を含めて各部位ごとへの影響を考慮できる 3 次元解析を行うことが重要であることを指摘した²⁶⁾。一方、垂井高架橋に関しては、桁中央部の下側へのたわみが大きくなった理由の一つとして、多数のひび割れの発生が、桁の剛性を低下させ、クリープや収縮差の影響を出しやすくさせたためと報告されている²⁷⁾ (図 - 14)。これらの問題はいずれも時間依存変形とひび割れ発生や剛性変化などの力学問題とのカップリングを考慮することの重要性を指摘するものである。コンピュータ性能向上により実構造物レベルの解析も実用的になりつつあり、クリープ・収縮などの時間依存性問題との統合もなされてきている。さらには崩壊解析までも組み合わせることで、コンクリート橋脚の全体系での長期性状を評価することが近い将来一般的になることを期待したい。

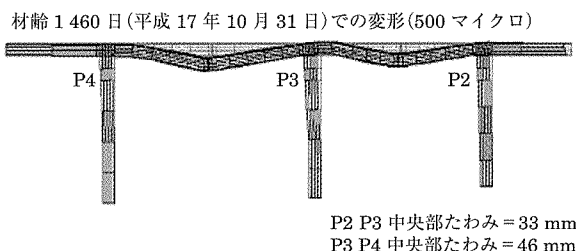


図 - 14 垂井高架橋の収縮による桁の変形解析

5. おわりに

力学的作用に関する問題を中心に、非線形解析技術の発展経緯、最新の非線形解析の事例、今後の展望を論じた。紙面の関係でかざられた情報のみになってしまったが、非線形解析の現在の発展状況を感じ、身近な問題に対する適用の可能性に思いを巡らせていただければ幸いである。設計業務の中での利用であれば簡便さと実用性、さらには既存の設計法に対する有利性も求められる。そのためには非線形解析に対する一層の信頼性の向上と、荷重・変位などのマクロ指標だけでなく、ひずみ・応力などの局所指標が連続的に得られるという解析ならではの利点を活かした指標の構築も望まれる。ただし、役に立つ技術というだけでなく、コンピュータの中にコンクリート構造物のすべての姿を詰め込んで見せてくれるという、夢のある技術としての発展が本当は楽しみである。

参考文献

- 1) 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2007
- 2) PC 定着部の破壊解析に基づく性能設計, PC 箱桁定着部の破壊解

- 析委員会報告書, プレストレストコンクリート技術協会, 2004
- 3) 白井伸明: コンクリート構造物の設計手法としての FEM 解析 (その 3) コンクリート構造物と FEM 解析, コンクリート工学, Vol.30, No.6, PP.86 - 93, 1992
- 4) 吉川弘道: コンクリート構造物の設計手法としての FEM 解析 (その 5) ひび割れたコンクリートの特性とモデル化, コンクリート工学, Vol.30, No.9, PP.65 - 71, 1992
- 5) コンクリートの力学特性に関する調査研究報告, コンクリートライブラリー 69, 土木学会, 1991
- 6) Ngo, D. and Scordelis, A.C. : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, 64, pp.152 - 163, 1967
- 7) Rashid, Y.R. : Ultimate Strength Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels, Nuclear Engineering and Design, Vol.7, pp.334 - 344, 1968
- 8) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析, 土木学会論文報告集, 第 360 号, pp.1 - 10, 1985
- 9) Vecchio, F.J. and Collins, M.P. : The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, No.83, pp.219 - 231, 1986
- 10) Walraven, J.C. : Fundamental Analysis of Aggregate Interlock, ASCE, Vol.107, No.ST11, pp.2245 - 2270, 1981
- 11) 李宝祿, 前川宏一: 接触面密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式, コンクリート工学, Vo.28No.1, pp.123 - 137, 1988
- 12) 前川宏一, 岡村甫: 弾塑性破壊理論に基づくコンクリートの構成則, 第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.1 - 8, 1983
- 13) Hillerborg, A. : A model for fracture analysis, Report TVBM-3005, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1978
- 14) Bazant, Z.P. and Oh, B. H. : Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structure, Vol.16, No.93, pp.155 - 177, 1983
- 15) 破壊力学の応用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993
- 16) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471 - 487, 2001
- 17) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H. : Numerical of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Journal of Materials, Concrete Structure and Pavements, JSCE, No.564/V - 35, pp.297 - 316, 1997
- 18) 福浦尚之, 前川宏一: 非直交する独立 4 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成則, 土木学会論文集, No.634/V - 45, pp.177 - 195, 1999
- 19) 独立行政法人防災科学研究所, 兵庫耐震工学研究センターホームページ, <http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html>
- 20) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale modeling of concrete performance, -Integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete technology, JCI, Vol.1, No.2, pp.91 - 126, 2003
- 21) Bolander, J. and Saito, S. : Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5 - 6, pp.569 - 591, 1998
- 22) 剛体ばねモデル (RBSM) の進化とコンクリートの解析技術セミナー報告書, 名古屋大学, 2008
- 23) 山本佳人, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.612 - 630, 2008
- 24) Nakamura, H., Srisoros, W., Yashiro R. and Kunieda M. : Time-Dependent Structural Analysis Considering Mass Transfer to Evaluate Deterioration Process of RC Structures, Journal of Advanced Concrete Technology, JCI, Vol.4, No.1, pp.147 - 158, 2006
- 25) 構造技術者のための非線形有限要素法の基礎と応用と実例, 非線

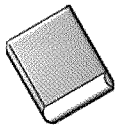
形有限要素解析法の利用に関する研究委員会報告書, JCI, 2008

26) Bazant, Z.P., Li, G.H. and YU, Q.: Explanation of Excessive Long Time Deflections of Collapsed Record-Span Box Girder Bridge in Palau, Concreep8, 2008

<http://concrete-lab.civil.nagoya-u.ac.jp/concreep8/index.htm>

27) 垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書, 垂井高架橋損傷対策特別委員会, 土木学会, 2005

【2009年2月5日受付】

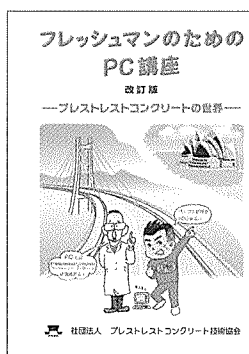


新刊図書案内

フレッシュマンのためのPC講座・改訂版 — プレストレスコンクリートの世界 —

大変ご好評をいただいております「フレッシュマンのためのPC講座」も平成9年に第一版が発刊されてから約10年が経過いたしました。

その間に、基準値・規格値をはじめとした技術基準が従来単位系からSI単位系に移行しました。また、プレストレストコンクリート構造物においても、複合構造等の新しい構造物が誕生しています。そこで、これらの項目を新しく見直して、改訂版を発刊することにいたしました。これからの技術者を育てるためには、大変有意義な図書であると確信しておりますので、是非有効利用されることをお勧めいたします。



主な改訂項目

- ・従来単位系からSI単位系に変更しました。
- ・PCを利用した構造物の紹介に、最近の新しい構造物を盛り込みました。

発刊日：2007年3月

定価：3,600円／送料400円／冊

会員特価：3,000円／送料400円／冊

体裁：A4判, 140頁

申込先：社団法人プレストレストコンクリート技術協会