

「鉄筋コンクリート構造物の老朽化・耐震シミュレータの研究開発」

Advanced Algorithm & Systems

1. 緒言
2. 解析方法
 2. 1. 鉄筋コンクリート構造物の老朽化シミュレータ
 2. 1. 1. 部材劣化シミュレータ
 2. 1. 2. 老朽化シミュレータ
 2. 2. 鉄筋コンクリート構造物の耐震シミュレータ
 2. 3. 非破壊検査とシミュレータ
 2. 4. 鉄筋コンクリート構造物の管理・維持
3. 結語

1. 緒言

我が国の橋梁、港湾構造物、高架道路、高架鉄道、ビルディング、公団住宅、マンションなどの鉄筋コンクリート構造物は、高度経済成長期とそれ以降に建設されたものが多く、最近高齢化の問題が生じつつある。そのためには、非破壊検査技術・目視検査技術等を用いて、現在の鉄筋コンクリート構造物の疲労度・老朽度を測定し、必要に応じて適切な補修措置を講じる必要がある。しかし、この非破壊検査・目視検査により得られる情報は完全なものではない。そこで、弊社の保有するシミュレーション技術を応用して、劣化・損傷による（耐震）性能低下の評価と、今後の地震時を含めて劣化・損傷の進行予測をコンピュータによるシミュレーション計算によって行うことを考えたのが、本提案書「コンクリート構造物の老朽化・耐震シミュレータの研究開発」である。

近年、急速に発展したコンピュータシミュレーション技術は、地球シミュレータの例のように、精度の高い気象予測を可能にしている。この例のように、大きなスケールと複雑な現象・構造を持つ対象物であっても、コンピュータシミュレーションは可能になっている。それ故、本提案書において、鉄筋コンクリート構造物の老朽化シミュレータと耐震シミュレータを統合したソフトウェアの開発を目指し、社会基盤としての鉄筋コンクリート構造物を守り、維持していくことを目的とするものである。このシミュレータは、鉄筋コンクリート構造物に用いられている構成部材としてのコンクリート、鉄筋の中性化、塩害、アルカリ骨材反応などによる部材レベルでの劣化シミュレーションと、交通量による荷重疲労・経年風化のデータなどに基づく鉄筋コンクリート構造物全体レベルでの複合的な劣化・損傷シミュレーションと、その解析に基づいた耐震性能シミュレーションから成る。もちろん、このコンピュータシミュレーションには種々の測定データ、非破壊検査・実験等により得られた経験則などが必要であり、これらを基礎としてシミュレータは設計される。

そして、建設されてから現在までの時間経過と共に、鉄筋コンクリート構造物の経年変化をシミュレーション計算し、現在の疲労度・老朽度を推測すること、また、現在の疲労度・老朽度より耐震強度を予測すること、及びその結果に応じて施される補強による効果をシミュレーション予測することを考えている。この結果、効果的な補修を立案する上で、参考となるデータが得られるであろう。また、更に時間経過を進めて、将来の劣化・損傷・耐震性能をシミュレーション予測し、耐用年数を見積もることなども可能になると考えられる。

2. 解析方法

2. 1. 鉄筋コンクリート構造物の老朽化シミュレータ

2. 1. 1. 部材劣化シミュレータ

鉄筋コンクリート構造物の劣化機構として、劣化による影響度が大きい塩害やアルカリ骨材反応が、主に研究されているようですが、長期にわたるものとしてこれら以外に、中性化による鉄筋の腐食や、乾湿繰り返しによる脆弱化、水分の影響による溶脱、硫酸塩による侵食など、多様です。このような内部的な要因と外部環境的な要因の多様性のため、個別の鉄筋コンクリート構造物の劣化曲線は幅広く分布しているものとなっている。鉄

筋コンクリート構造物の劣化機構の多くは、拡散や、浸透、化学反応などに基づくと考えられる。部材劣化シミュレータは構成部材の劣化特性を表し、数値計算により初期状態から劣化状態までを模擬する。これらの構成部材としての結果を、2.1.2の老朽化シミュレータの基礎として応用するものである。

部材(鉄筋コンクリート)の劣化の要因を以下に挙げる：

- 中性化：本来、コンクリート内部はアルカリ性であり、これによって、コンクリート内部の鋼鉄材表面に不動態被膜が形成され、これが、金属の腐食を防いでいる。しかし、長期にわたる大気中の二酸化炭素の侵入により、コンクリートと内部が中性に変化すると、鋼鉄材表面の不動態被膜が失われ、金属の腐食が進む。
- 塩害：海岸線付近の鉄筋コンクリートでは、塩化物イオンが表面から徐々に浸入することが知られている。長年の海から塩分飛来より、鉄鋼材付近のコンクリートの塩化物イオン濃度が限界値を超えると、鋼鉄材の腐食(さび)が始まる。腐食生成物は、多くの場合膨張を伴い、これが、コンクリートにひび割れを生じさせる。コンクリート表面にひび割れが生じた場合、そこから、更なる塩化物イオンが容易に侵入可能となり、金属腐食を加速させることとなる。
- アルカリ骨材反応：コンクリート内部に湿度として含まれる、アルカリ金属イオン(カリウム、ナトリウム等)の溶け込んだ水溶液(アルカリ性細孔溶液)は、骨材(砂等)の中に含まれるシリカ(二酸化ケイ素)等の鉱物成分と化学反応することがある。この化学反応による生成物は、異常膨張を伴う場合があり、この結果、コンクリートにひび割れが発生する。
- 凍害：コンクリート内部の水分が凍結すると、10%弱の体積膨張が起こり、これによって、コンクリートにひび割れが発生する。一度、コンクリート表面にひび割れが発生すると、そこから水分、二酸化炭素等のコンクリート内部への侵入が加速し、更なる劣化が引き起こされる。

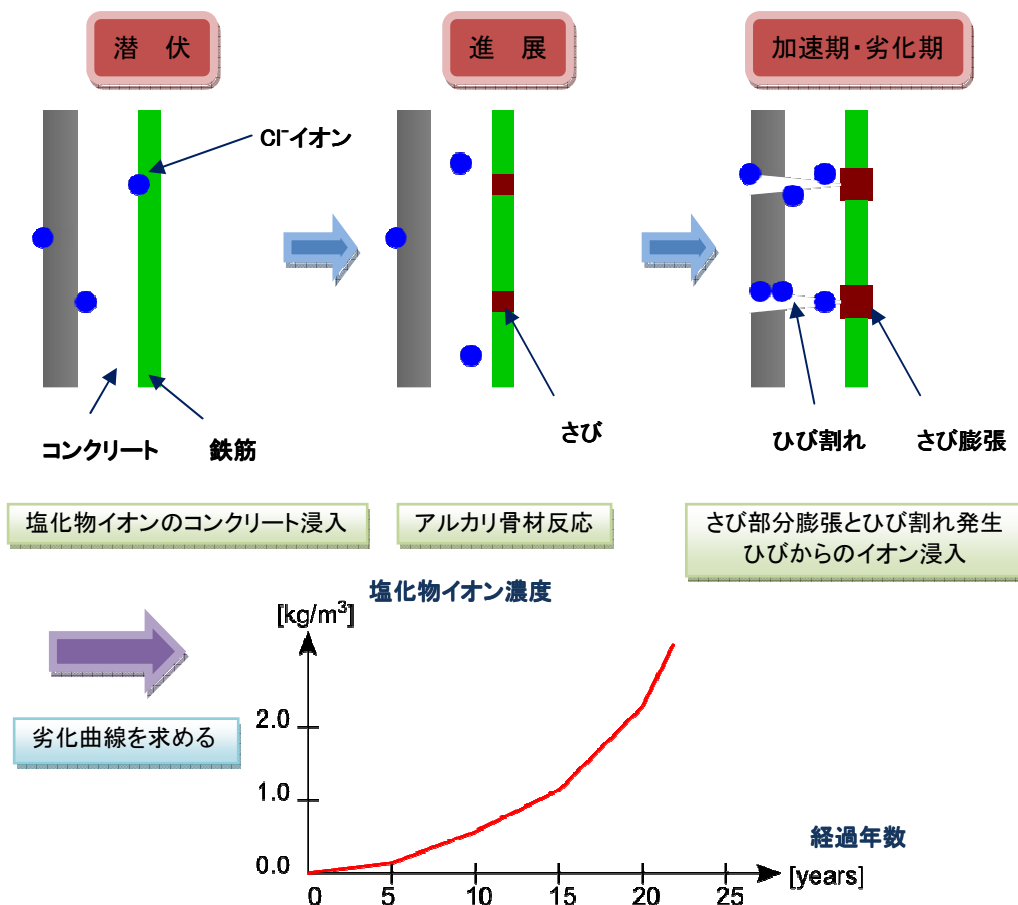
上に列挙した部材(鉄筋コンクリート)の劣化を、数値計算シミュレーションによって予測する方法として、以下のものが考えられる。

1. [炭酸ガス・塩化物イオンの拡散シミュレーション]：二酸化炭素分子、塩化物イオン、共に、コンクリート表面から内部に向かって、フィックの法則に従って拡散して行くと考えて良い。従って、拡散方程式を解くことによって、拡散の度合いが推定出来る。
2. [中性化不動態被膜劣化シミュレーション]：コンクリート内を拡散・浸入する二酸化炭素分子は、コンクリート内部環境をアルカリ性から中性へ変化させ、これが、鋼鉄材表面の不動態被膜の劣化を引き起こす。この様子をシミュレーションする。
3. [アルカリ骨材反応シミュレーション]：コンクリート内部の、アルカリ金属が溶け込んだアルカリ性細孔溶液と、シリカ等の骨材成分の、化学反応進行をシミュレートする。さらに、化学反応生成物の異常膨張を考慮した、コンクリート内部の欠陥・ひび割れ発生の様子をシミュレートすることも重要と考えられる。コンクリート内部の、ランダムに選択された部位で、体積の異常膨張が発生するモデル等が有効かもしれない。
4. [鋼鉄材の腐食による膨張のシミュレーション]：中性化においては、鋼鉄材表面の不動態

態被膜が劣化し、金属の腐食が発生する。同様に、塩害においては、鋼鉄材が塩化物イオンと結合して金属腐食が生じる。このような金属腐食進行の際、腐食鋼鉄材の体積は膨張し、これがコンクリートにひび割れを生じさせる。このような状況は、腐食金属の膨張率、コンクリート材の圧縮強度、引張強度等のパラメータを考慮した、有限要素法シミュレーションにより、解析が可能と予想される。

5. [ひび割れの成長シミュレーション]: 中性化・塩害・凍害等において発生する、コンクリートのひび割れの、長期間にわたる時間変化を追跡するシミュレーションは、一般的に言って、難しい問題と思われる。ひび割れの成長過程を有限要素法でシミュレートする場合、各要素の形状が時間と共に変化するモデルを採用しなくてはならないかもしれない。この種の問題は、非常に挑戦的な研究テーマと考えられる。

部材劣化シミュレータ



2. 1. 2. 老朽化シミュレータ

鉄筋コンクリート構造物全体の診断について、私どもは安心・安全の視点で社会に貢献できることを目標に、鉄筋コンクリート構造物老朽化シミュレータによって、劣化予測と、維持管理計画、補修計画の立案・実施を行うことを考えている。鉄筋コンクリート構造

物全体に有限要素法を適用し、時間発展を含む構造解析を行う。老朽化シミュレータには、有限要素法に現れる剛性マトリックスを、劣化曲線に基づく時間の関数として与えて、有限要素法による応力解析と、ひび割れや、クラック進展、はく離、はく落の解析を応用することを考えている。これは言わば、化学反応速度論と有限要素法を組み合わせた新規の手法である。建設後の年数経過、即ち時間発展と共に、2.1.1の結果として得られる部材劣化などの経年変化を取り込みながら、交通量に基づく荷重などによる損傷（コンクリートのひび割れ、鉄筋破断）を、部材劣化と結合して複合的にシミュレーション計算する。特に、非破壊検査では検知できない深奥部の損傷を見つけることができるのが特長である。そして、老朽化状態での補修工事の効果を、鉄筋コンクリート構造物各部にかかる応力計算により評価する。その結果、効果的な補修計画の立案を支援できる。また、時間発展を延長することにより、将来の劣化・損傷の進行予測を行うことも可能である。結果的に、耐用年数、建替時期などが予測可能となる。老朽化シミュレータは完成初期状態から現状までの性能低下と、将来状態までの性能低下を模擬する。

鉄筋コンクリート構造物の老朽化について、以下にまとめる：

- 建築部材(鉄筋コンクリート)の劣化データを基にした、構造物全体についてのシミュレーション
- 荷重疲労・経年風化のデータを基にした、構造物全体についてのシミュレーション

鉄筋コンクリート構造物の老朽化シミュレータの具体的な数値計算手法として、以下のものが考えられる。

【有限要素法による構造解析】：一般的な有限要素法による構造解析の手法によって、構造物の各部に、どのような大きさ・方向の応力がかかるかが求められる。特に、応力が微小で重ね合わせが可能な線形解析だけでなく、非線形な領域まで考慮に入れることが可能な点が重要である。具体的には、以下の項目の調査に適している。

【構造物の耐荷力解析】：老朽化した橋梁等に荷重をかけて、どのくらいの重さまで耐えられるか、等について調べる。

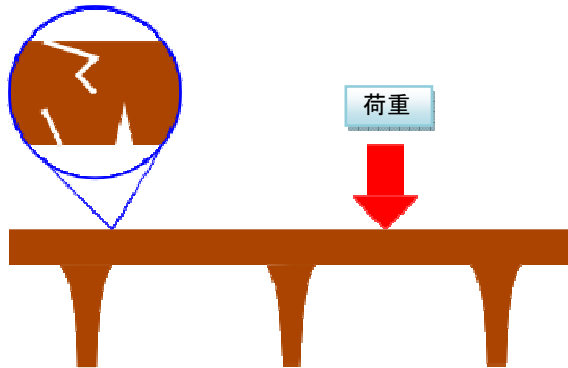
【弾塑性有限変位解析】：構造物に外力が加えられた場合、構造物の要素である柱梁、外壁等の部材は、その応力の大きさ・方向に従って変形する。応力が無くなったとき、変形した部材が元の形状に戻るなら、線形(弾性)変位解析の考え方が適用出来る。一方、変形した部材が、元の形状に戻らない場合は、非線形(塑性)変位解析の考え方を適用しなくてはならない。このような、構造物にかかる応力の、線形・非線形解析を行う。

【クリープ、乾燥収縮によるひび割れ解析】：クリープは、鉄筋コンクリート部材等に持続応力が作用して、時間の経過と共に歪みが増大する現象を指す。塑性変形が時間に依存しないのに対し、クリープは時間が経つほど変位量が増える特徴を持っており、従って、この種の問題に対しては、単純な塑性変位解析の考え方が適用出来ないことが分かる。また、コンクリートの湿度が次第に失われ、コンクリート部材が乾燥収縮する現象も、長期に渡る時間経過において見られる現象である。これらの経年劣化は、鉄筋コンクリート構造物全体に、ひび割れを生じさせる。このような、ひび割れの進行をシミュレーションする。

鉄筋コンクリート構造物の老朽化のシミュレーション

構造物の耐荷力解析

中性化・塩害・アルカリ骨材反応・凍害

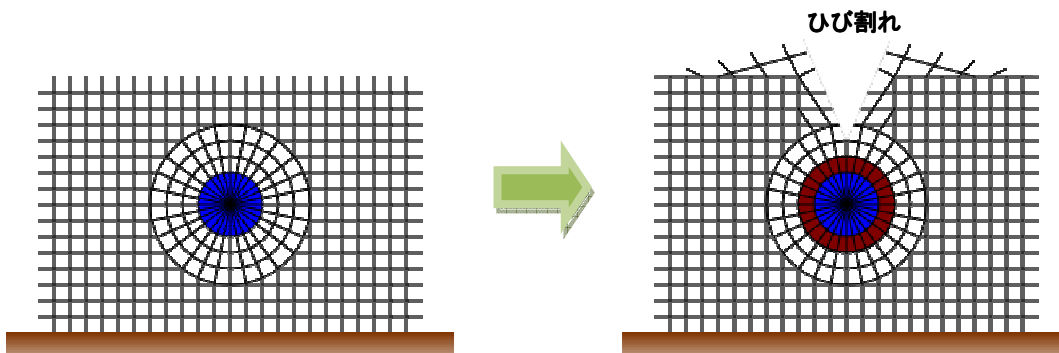


部材劣化シミュレーターによる劣化曲線の推定・導出

有限要素法による構造物全体の解析

建築物の寿命予測

建築物老朽化に関する典型的なデータおよび有限要素法解析の例



コンクリート中の鉄筋をメッシュ分割

腐食部位(さび)の膨張によりひび割れ発生
⇒メッシュ形状の変更

具体的に、どのような物理パラメータが、有限要素法シミュレーションに必要なか？

- コンクリート中の塩化物イオンまたは CO_2 分子の、初期濃度 C_0 および拡散係数 D
- コンクリートの応力に対する耐久強度(圧縮強度 f_c 、引っ張り強度 f_t)
- 金属(鉄筋部分)の腐食速度 Δ 、腐食が始まる限界塩化物イオン濃度 C_{\max}

具体的な数値パラメータの例

項目	値
表面塩化物イオン濃度 C_0 [kg/m ³]	20.0
塩化物イオン拡散濃度 D [mm ² /sec]	1.73×10^{-6}
コンクリート圧縮強度 f_c [N/mm ²]	30.0
コンクリート引っ張り強度 f_t [N/mm ²]	2.2
腐食速度 Δ [%/year]	0.15
限界塩化物イオン濃度 C_{max} [kg/m ³]	1.2

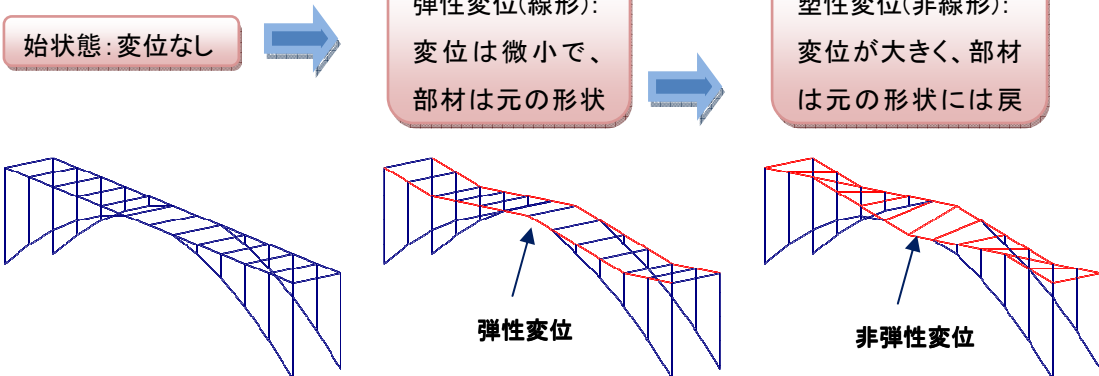
鉄筋と接触しているコンクリート中の有限要素内での塩化物イオン濃度が、 C_{max} を超えた時点で、金属の腐食が始まると仮定している。

化合物	色	密度(g/cm ³)	体積膨張率(倍)
Fe(OH) ₂	白	3.4	3.7
FeO	黒	5.9	1.7
Fe ₃ O ₄	黒	5.2	2.1
α -FeOOH	褐～黄	3.3～4.3	3.4
β -FeOOH	白	3.0	4.2
γ -FeOOH	オレンジ	4.1	3.0
δ -FeOOH	褐	3.95	3.2
α -Fe ₂ O ₃	赤～黒	5.2	2.2
γ -Fe ₂ O ₃	褐	4.88	2.3

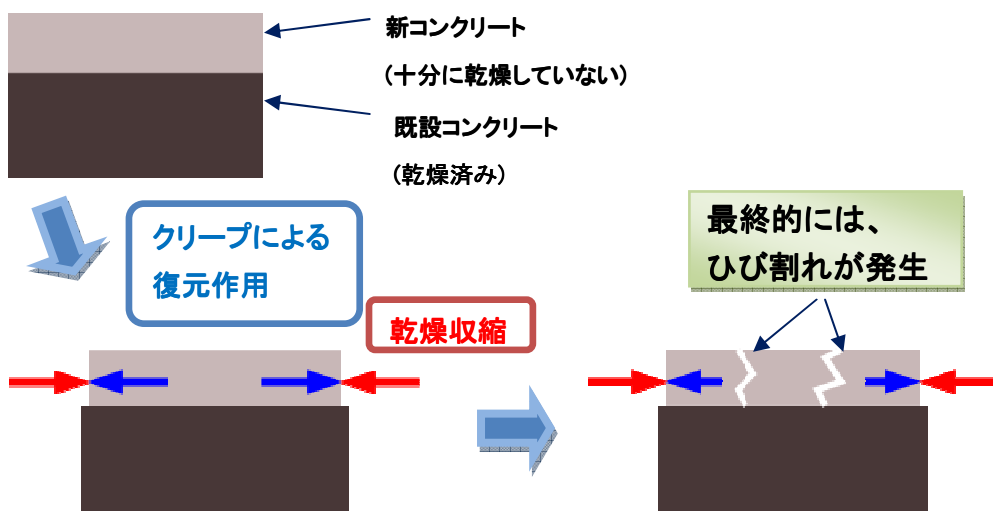
牧野誠太郎 修士論文

(香川大学大学院工学研究科 平成 15 年度)より抜粋

弾塑性有限変位解析



クリープ・乾燥収縮による、ひび割れ解析



2. 2. 鉄筋コンクリート建造物の耐震シミュレータ

上記の「鉄筋コンクリート建造物の老朽化シミュレータ」の解析結果を(初期値)データとして取り込むことが可能な、耐震シミュレータの開発を目指す。

さらに、新規開発する耐震シミュレータに対して、以下の特性を持たせることにする。

- 倒壊可能性判定：どの程度の規模の地震で、建造物が倒壊するかの評価を、具体的な数値として算出
- 被害算出：どの程度の規模の地震で、建造物にどの程度の被害が生じるか評価を、具体的な数値として算出
- 寿命評価：どの程度の規模の地震で、建造物の寿命がどれだけ短縮されるかを、具体的な数値として算出

耐震シミュレータの具体的な数値計算手法として、以下のものが考えられる。

1. 【地震応答解析】：鉄筋コンクリート建造物を振動モデルで表現し、具体的な地震力として適切な波形のパルスを加えて、その応答を数値的に求める。地震による建造物の揺れ具合を調べるのに適しているが、建造物が崩壊するか否かの分析は不可能という欠点がある。従って、このシミュレーション結果データは、被害算出、寿命評価には役立つが、倒壊可能性判定には役立てることが難しい。振動モデルとしては、以下のものが考えられる。

[立体骨組みモデル]：柱梁から成る骨組みモデルで、任意の方向の地震力パルスを受けると仮定する。また、骨組みのたわみは微小で、線形な重ね合わせが成立する範囲内と仮定する。

[平面骨組みモデル]：柱梁から成る骨組みモデルで、平面内の地震力パルス(面内地震力)もしくは平面に垂直な地震力パルス(面外地震力)を受けた場合のみを考慮する。また、骨組みのたわみは微小で、線形な重ね合わせが成立する範囲内と仮定する。

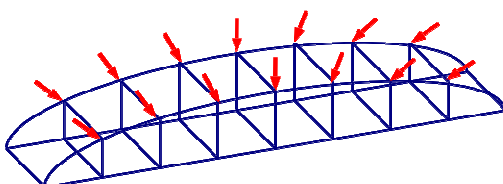
[串団子モデル]：多層の建造物を、串団子、すなわち、ばねで連結された多質点モデルと見なす。建造物の固有振動を調べるのに適している。

大型建造物の耐震シミュレーション

地震応答解析

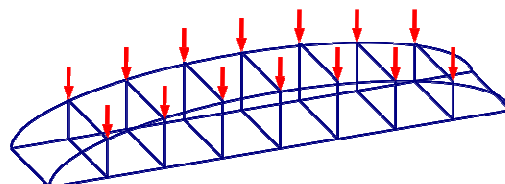
立体骨組みモデル

任意の方向の静的荷重

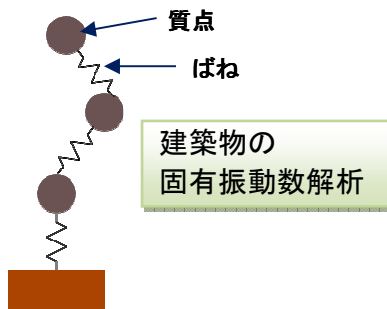


平面骨組みモデル

固定された平面に対して垂直な方向の静的荷重



串団子モデル



2. 【有限要素法による構造解析】：一般的な有限要素法による構造解析の手法によって、強い地震力に対する、鉄筋コンクリート構造物の応答を数値的に求めることが出来る。特に、有限要素法に基づく構造解析は、単純な振動モデル解析と比較して、非線形振動に対する応答を調べられるという長所が有り、より現実に近いシミュレーション結果が得られることが期待出来る。しかし、有限要素法により、構造物を表現するメッシュの形状が固定されているため、地震時に鉄筋コンクリート構造物にどのような大きさ・方向の応力がかかるかは求められるが、構造物の崩壊等の、メッシュ形状を変化させることが必要な解析は、不得手である。従って、このシミュレーション結果データは、被害算出、寿命評価には役立つが、倒壊可能性判定には役立つことが難しい。有限要素法による構造解析が有効な、調査項目として以下が挙げられる。

【構造物の耐荷力解析】：地震が発生した際、橋梁等が、どの程度の荷重に耐えられるかを調べる。

【弾塑性有限変位解析】：地震発生時に構造物に加わる外力によって、構造物の各部材が、どのような線形(弾性)有限変位、あるいは、非線形(塑性)有限変位を受けるかについて、解析を行う。また、これらの線形・非線形現象によって、コンクリート部材の、ひび割れの進行状況が解析可能である。

3. 【有限要素法とフリーメッシュ法を組み合わせた構造解析】：有限要素法による構造解析は、基本的に、建築部材の微小な変位にしか対応できない。これは、部材を分割するメッシュの形状が、予め決まってしまうからである。そこで、鉄筋コンクリート等の部材で生じる大きな変形については、フリーメッシュ法に切り替えて、構造解析シミュレーションを続行するという考え方も有り得る。このような有限要素法とフリーメッシュ法のハイブリッドは、構造物の、微小変形、大変形、崩壊に至るまでの挙動を、統一的にシミュレーションする。(東洋大学 計算力学研究センター 矢川研究室)
4. 【応用要素法による構造解析】：応用要素法(Applied Element Method: AEM)は、解析対象となる構造物を、仮想的に分割された小さな矩形要素の集合体としてメッシュ分割し、さらに、各要素は、複数の分布バネによってつながれているようにモデル化することを特徴としている、比較的新しい手法である。分布バネは、印加された力の大きさによっては、破断することも有り、これによって、構造物が破壊する様子が表現

される。応用要素法による構造解析は、構造物の、微小変形、大変形、崩壊に至るまでの挙動を、統一的にシミュレーションする。(東京大学 生産技術研究所 目黒研究室)

5. 【地震力のモデル化】：モデル化された構造物に対して、地震力として適切な波形のパルスを加える必要がある。この地震力パルス自体も、数値計算に適用し易いものにモデル化する必要がある。地震力のモデル化には、次の 3 つの因子を考慮する必要がある。

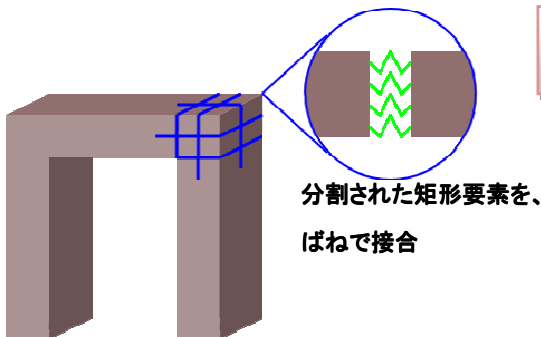
[地域特性]：日本のどの地域の地震であるかによって、想定すべき震度、地震力の波形(縦揺れなのか、横揺れなのか等)を考慮する。

[地盤特性]：構造物が、どのような性質の地盤の上に建てられているかを考慮する。地盤は、軟弱か否か、液状化の可能性は有るか、等の配慮が必要である。

[構造物形状特性]：構造物が、高層ビルなのか、体育館なのか、それとも、防波堤なのか、等によって、加える地震パルス波形等を適切に設定する。

- 有限要素法による構造解析
- 有限要素法とフリーメッシュ法を組み合わせた構造解析
- 応用要素法による構造解析

応用要素法
AEM (Applied Element Method)



大型建築物の変形・破壊・崩壊を、
統一的な手法でモデリング

2. 3. 非破壊検査とシミュレータ

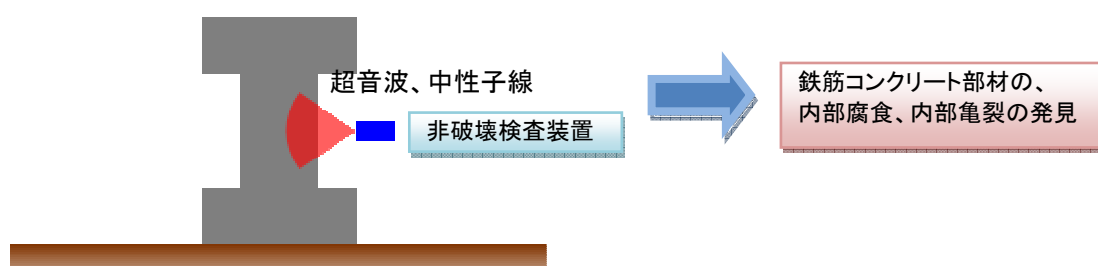
前記の、構成部材対象の「部材劣化シミュレータ」と鉄筋コンクリート構造物対象の「老朽化シミュレータ」だけでは、精度の高いシミュレーションは不可能である。やはり、非破壊検査結果に合わせこむことで、初めて正確なシミュレーション解析が可能となる。例えば、研究室や現場で鉄筋腐食を解析する目的で、「部材劣化シミュレータ」を開発する際に計算式を導く上で、コンクリート破砕は困難で超音波法・中性子イメージングなどによる鉄筋腐食の非破壊検査[1]が必要不可欠である。内部で進行するコンクリートの劣化・ひび割れについても同様で、その非破壊検査[2]などによって初めて正確な定式化ができる。また、中性子線を用いた非破壊検査によれば、その強い透過力により、コンクリートの深奥部まで測定可能となる。一方、鉄筋コンクリート構造物に対する「老朽化シミュレータ」による計算結果に基づいて、劣化の激しい部分を特定し、重点的にその場所

の非破壊検査を行うことで、全体として効率良く、精度の高い劣化診断を可能とすることが考えられる。以上、非破壊検査とシミュレータによる数値計算は車の両輪と言えるものであり、両者の相乗効果により、成果は著しく発展することであろう。

定期的に、鉄筋コンクリート構造物に非破壊検査を実施し、得られる物理的なパラメータを、シミュレータにデータとして入力出来るようにする。以下に非破壊検査の方法を列挙する。

- シュミットハンマー法：コンクリートの圧縮強度を測定する。
- 分極抵抗法：コンクリート表面に電極を接触させ、(露出した)鉄鋼材に導線を接続し、電極-鉄鋼材間に微小な電流を流して、電位・電流の変化を測定し、これによって得られた分極抵抗から、鋼鉄材の腐食度を推定する。
- 超音波法：超音波伝搬速度の測定により、コンクリートの静弾性係数が推定出来る。また、超音波の透過強度から、コンクリートの充填度が推定出来る。
- 放射線(X線)透過試験：コンクリート内部の欠陥を見つけ出すのに有効。
- 電磁波レーダー法：コンクリート内部の鉄筋の位置・形状を、おおよそではあるが測定出来る。また、コンクリート内部の欠陥を見付けることも可能である。
- 赤外線法：コンクリート表面の温度分布を精密に測定する。これにより、コンクリート内部の欠陥を見つけ出すことが出来る。
- コア抜きによるテスト・ピース採取：これは、厳密には、非破壊検査とは言えないが、構造物の鉄筋コンクリートから、試験体を採取し、圧縮強度、引張強度、静弾性係数等を測定する。さらに、コンクリートの中性化の度合い、塩化物イオン濃度も測定出来る。

非破壊検査



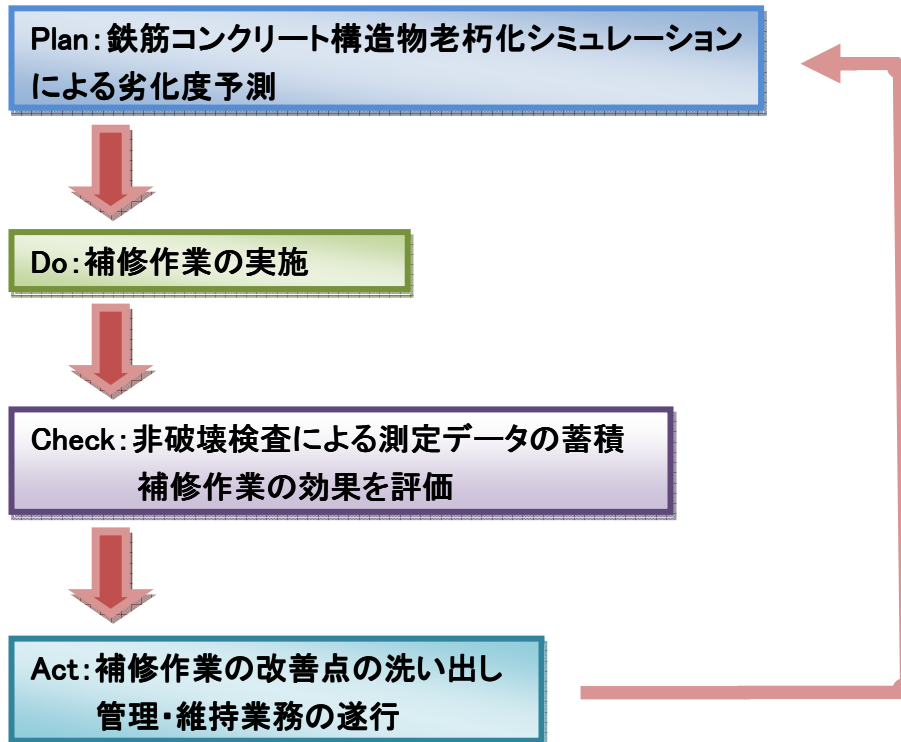
2. 4. 鉄筋コンクリート構造物の管理・維持

鉄筋コンクリート構造物の管理・維持 PDCA サイクルについて、以下の4つの業務遂行サイクルを確立させ、継続的な鉄筋コンクリート構造物の管理・維持を行う。

1. [Plan]: 鉄筋コンクリート構造物の老朽化シミュレーションにより、劣化度予測を行う。この結果に基づいて、補修計画を立案する。

2. [Do] : 鉄筋コンクリート構造物補修作業の実施
3. [Check] : 非破壊検査による測定データを蓄積し、補修作業の効果を評価する。
4. [Act] : 既の実施した補修作業に関して、改善点を見つけ出す。この結果を踏まえて、鉄筋コンクリート構造物の管理・維持業務を遂行する。

管理・維持 PDCA サイクル



具体的な維持・補修作業について、鉄筋コンクリート構造物の、老朽化を防ぎ良好な状態を維持する、または、発生してしまった老朽化を補修する作業として、以下のものが考えられる。

- [表面被覆工法] : コンクリート表面を塗装材料により被覆する工法を指す。エポキシ樹脂材をコンクリート表面に塗装し、二酸化炭素、塩化物イオン、水分等の、コンクリート内部への侵入を防ぐ。
- [大断面修復工法] : コンクリート構造物の大きな欠損断面に対して、型枠を設置して、注入材を充填することで修復する工法を指す。ポリマーセメントモルタルと呼ばれる材料が注入される場合が多い。
- [ウォータージェット工法] : 高圧水をノズルから噴射して、劣化したコンクリート部分のみを、はつり取る工法を指す。
- [脱塩工法] : コンクリート表面に、電解質溶液($\text{Ca}(\text{OH})_2$, LiOH , LiCO_3 等)を保持出来る陽極材を設置し、コンクリート内部の鋼鉄材を陰極として、直流電流を 2 カ月ほど流す。これにより、コンクリート内部の塩化物イオンが、電気泳動で陽極側の電解質溶液中に回収される。塩害を受けた鉄筋コンクリートの補修に有効である。
- [再アルカリ化工法] : コンクリート表面に、アルカリ性溶液(NaCO_2 , K_2CO_3 等)を保持出来る陽極材を設置し、コンクリート内部の鋼鉄材を陰極として、直流電流を 1 週間

ほど流す。これにより、アルカリ性溶液がコンクリート内部に電気浸透し、コンクリート内部の中性化された領域がアルカリ性に回復される。中性化した鉄筋コンクリートの補修に有効である。

3. 結語

この「鉄筋コンクリート構造物老朽化・耐震シミュレータ」は世界に前例のほとんどないものである。それだけに興味深いテーマであり、やりがいのある研究開発である。しかし、この研究開発の過程で、困難が生じることも予想され、開発期間も長期とならざるをえないと思われる。ただし、気象予報に役立っている地球シミュレータのように、今後増大する老朽化鉄筋コンクリート構造物数を考慮すると、利用価値は高いものと言える。以上、まだ概略を説明したに過ぎないが、開発趣旨は理解して頂けたのではないだろうか。最後に、将来、もし鉄筋コンクリート構造物設計段階で環境条件等を考慮して、老朽化予測できるようになれば、立案者として望外の喜びである。

参考文献

- [1] 森濱和正、超音波テクノ、vol.12、(2000/10)、25～28
- [2] 山口哲夫、超音波テクノ、vol.12、(2000/10)、20～24