

委員会報告 非線形有限要素法の利用に関する研究委員会

中村 光^{*1}・金子 佳生^{*2}・佐藤 靖彦^{*2}・佐藤 裕一^{*4}・斉藤 成彦^{*5}・堤 忠彦^{*6}

要旨：本研究委員会は、非線形有限要素解析法の信頼性の向上と利用の拡大を目的に調査・研究活動を行った。具体的には、非線形有限要素法の基礎・基本を手引書の形で整理した上で、その手引書に基づく実解析を通じ、解析上の留意点を分かりやすくまとめた。さらには、非線形有限要素法を活用した検討が、実構造物の施工性の改善や安全性の向上に大きく貢献できる事例を提示した。

キーワード：コンクリート構造物、非線形有限要素法、手引書、トライ&エラー、有効利用

1. はじめに

コンクリート構造物の非線形解析法は、設計・照査の際の実用的な手法として多くの技術者が扱うツールとなりつつある^{1), 2)}。非線形有限要素解析は、複数の構成モデルの組合せ、非線形過程の解析理論の取扱い、コンクリートのような軟化材料を適用した場合の数学的な問題点、等を理解した上で信頼できる解が得られるものである。それゆえ、ある程度の経験を持った技術者のみにモデル化や結果の妥当性の判断が委ねられていた。しかし、多くの技術者が使うツールとなりながらも、過去に蓄積された知見は必ずしも現状の利用に活かされていない。また、得られた結果の妥当性を如何に評価すべきか必ずしも一般化されていない。このことは、非線形有限要素解析の信頼性を損ない、将来の有効利用にも影響する可能性がある。

そこで本研究委員会は、非線形有限要素解析法の信頼性の向上と利用の拡大に資する技術資料の作成を目的とした調査・研究を行った。具体的には、非線形有限要素解析を利用する際の問題点、構造解析モデル作成のための手順、構成モデルの整理と適用範囲、ひずみ等の局所情報の利用法、解析結果の評価法、非線形解析の有効利用法、を検討課題に設定し、その成果を、非線形解析の基礎、非線形解析の応用、非線形解析の実例に分類し、取りまとめた。ここに、その概要を示す。

2. 活動の概要と報告書の構成

2.1 活動の概要

本委員会内に、3つのワーキンググループが設置された。それらは、正しい「解」を引き出すための方法を検討するグループ(WG1)、非線形解析を行う上での留意

点の整理と解析結果の利用方法を検討するグループ(WG2)、実構造物の設計・施工における有効活用のシナリオの構築と活用例を検討するグループ(WG3)である。各グループの委員は表-1に示されている。

2.2 報告書の構成

本委員会の成果を取りまとめる報告書の目次を表-2に示す。第1章には、本委員会の活動目的と主旨が示される。第2章には、アンケート結果をもとに、実務における非線形解析の現状が述べられる。第3章には、非線形有限要素法の基礎・基本を整理した手引書が「非線形解析の基礎」としてまとめられる。第4章には、手引書に基づく実解析を通じた解析上の留意点が「非線形解析の応用」としてまとめられる。第5章には、実構造物を対象とした有効利用事例が「非線形解析の実例」としてまとめられる。そして、第6章は、本委員会活動全般のまとめが示される。本論文において、報告書の第3章、第4章、第5章について略述ことで、本委員会の調査・研究成果を示す。

3. 非線形解析の基礎

正しい解を引き出すためには、計算の目標を明確にし、解析全体の流れをイメージする必要がある。その上で、要素分割、材料モデルの選定、境界条件および解析条件を適切に設定する必要がある。以下に、解析計画を立て、計算を実行し、結果を評価する上での留意点を示す。

3.1 解析計画

まず、非線形解析の計画から実施、評価・利用までの一連の流れ(図-1)を組み立てる必要がある。材料定数の設定、材料のモデル化、形状のモデル化、作用のモデル化は相互に関連するものであり、その流れの中に

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻准教授 Ph.D. (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻准教授 博士(工) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻助教 博士(工) (正会員)

*5 山梨大学大学院 医学工学総合研究部准教授 博士(工) (正会員)

*6 (株)富士ピー・エス 技術製造本部 副本部長 博士(工) (正会員)

表-1 委員構成

委員 長:	中村 光	(名古屋大学)
副委員 長:	金子 佳生	(東北大学)
幹事 長:	佐藤 靖彦	(北海道大学)
[WG1]		
主査:	佐藤 裕一	(京都大学)
委員:	長谷川俊昭	(清水建設 (株))
	福浦 尚之	(大成建設 (株))
	宮川 義範	((財) 電力中央研究所)
	渡辺 忠朋	(北武コンサルタント (株))
[WG2]		
主査:	齊藤 成彦	(山梨大学)
委員:	上林 厚志	((株) 竹中工務店)
	田嶋 和樹	(日本大学)
	土屋 智史	((株) コムスエンジニアリング)
	牧 剛史	(埼玉大学)
	三木 朋広	(神戸大学)
	米澤 健次	((株) 大林組)
	山本 貴士	(京都大学)
	三輪 健治	((株) 計算力学研究センター)
[WG3]		
主査:	堤 忠彦	((株) 富士ピーエス)
委員:	荒木 秀郎	((株) 構造計画研究所)
	井根達比古	(防災科学技術研究所)
	沖見 芳秀	(鹿島建設 (株))
	柏崎 隆志	(千葉大学)
	甲斐 芳郎	(清水建設 (株))
	川口 和広	(日本電子計算 (株))
	田所 敏弥	((財) 鉄道総合技術研究所)
	三島 徹也	(前田建設工業 (株))
	和田 宣史	(中日本高速道路 (株))
旧委員		
	為広 尚起	((株) 構造計画研究所)
	高橋 昭一	(中日本高速道路 (株))

表-2 報告書の目次

1 章	はじめに
1.1	委員会活動の主旨
1.2	報告書の構成
2 章	非線形解析の利用の現状と利用シナリオ
3 章	非線形解析の基礎
3.1	用語
3.2	適用範囲
3.3	解析計画
3.4	構造物のモデル化と要素分割
3.5	材料モデル
3.6	相互作用
3.7	作用
3.8	解析
3.9	解析結果の評価と利用
4 章	非線形解析の応用
4.1	はじめに
4.2	RC 部材解析における留意点
4.3	非線形解析における留意点
4.4	解析結果を得るためのトライ&エラー
5 章	非線形解析の実例
5.1	アンカーボルト周辺の合理化
5.2	ストッパー桁座の合理化
5.3	接合部の合理化
5.4	RC 柱の非線形静的解析
5.5	6 階建て RC 造建築 1/3 縮小モデルの非線形動的解析
6 章	非線形解析の展望
6.1	PC 橋の合理化
6.2	モニタリングデータとの連動による部材健全度の評価
6.3	大規模建設構造物の数値解析手法
6.4	長周期地震における RC14 階集合住宅の応答
6.5	損傷を受けた構造物の残存耐荷力評価
7 章	まとめ

「モデルの改善」という行為が必要となる。

3.2 構造物のモデル化と要素分割

要素の種類および要素次数が解に及ぼす影響を理解した上で、要素分割が適切になされなければならない。その際、要素の寸法と縦横比、破壊エネルギーと等価長さの考慮、鉄筋の有無、境界条件を総合的に考慮しなければならない。

要素分割の適否の一例が図-2 に、境界条件の設定方法の例が図-3 に示されている。

3.3 材料モデル

3.3.1 コンクリート

数多くのコンクリートモデルが存在する（例えば図-4）。対象とする問題が、弾性、準静的瞬時非線形性、塑性、繰返し、速度効果、長期変形、熱特性・温度依存性といった特性の中で何が支配的なのかを明確にした上で、適切なモデルを設定する必要がある。

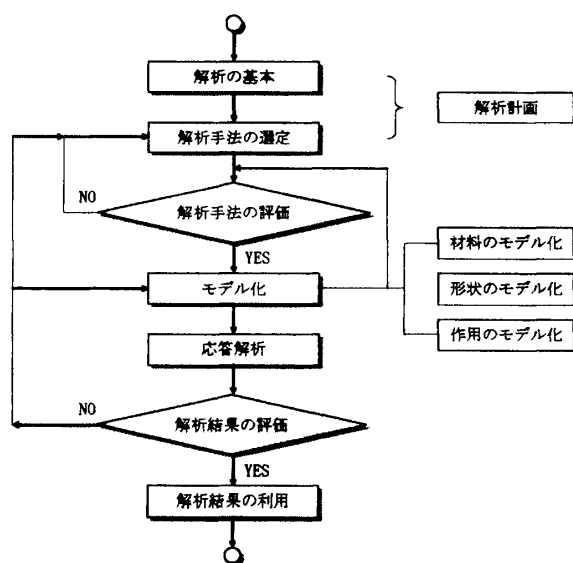


図-1 非線形有限要素解析の評価と利用のフロー

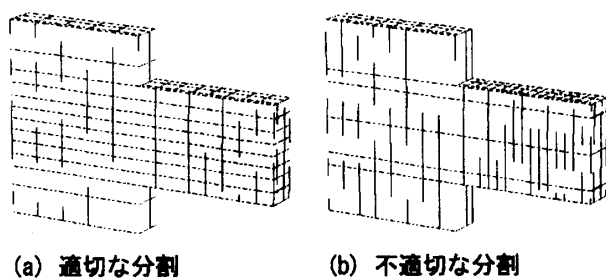


図-2 要素分割の適否

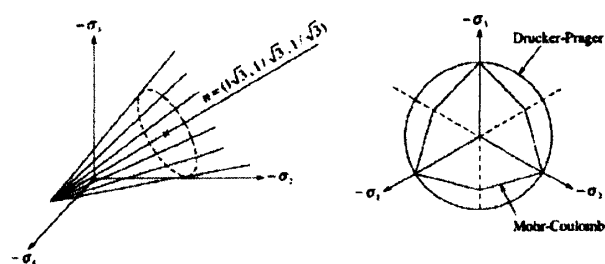


図-5 Drucker-Prager モデル

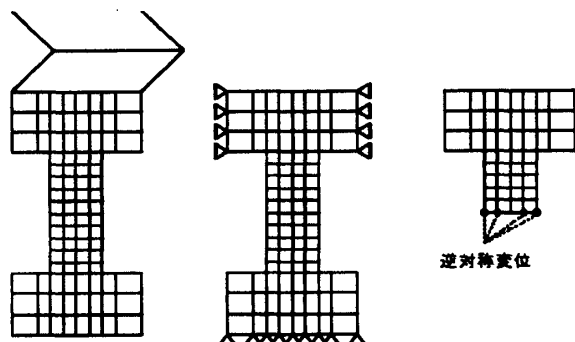


図-3 柱試験体の境界条件

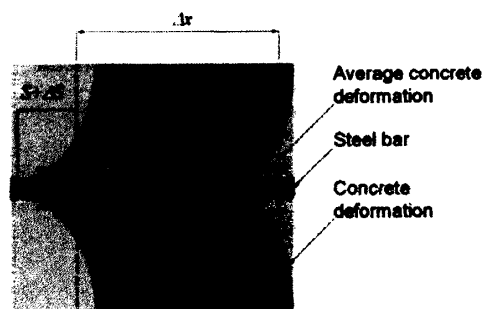


図-6 鉄筋とコンクリート間の付着滑り

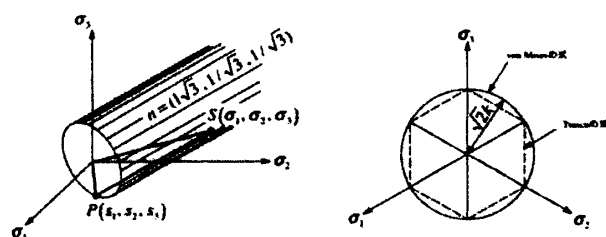


図-4 von Mises モデル 3.3.2 鋼

3.3.2 鋼材

適切な弾塑性構成モデル（例えば図-5）を選定しなければならない。その際、パウジンガー効果の考慮の必要性について検討する必要がある。

3.4 相互作用

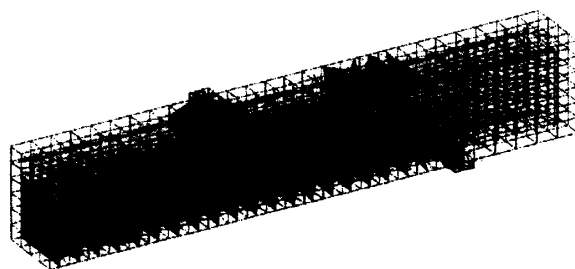
鋼とコンクリートの付着（図-6）作用とひび割れ面における骨材のかみ合い作用は、コンクリート構造物の非線形性に大きな影響を及ぼす。

3.5 作用

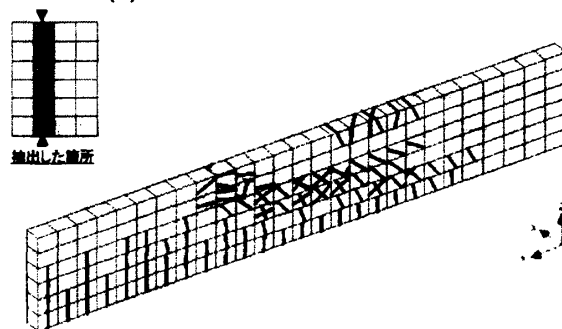
重力、移動物体、地震、流体、プレストレス、衝突・衝撃、境界条件からの作用等、外力・作用の解析上の表現方法は異なる。

3.6 解析

解の収束性は、増分法、求解法、収束の判定法、計算刻みにより異なる。大変形問題を扱う場合には、座屈現象と材料破壊が混在するため、固有値解析などを含めた総合的な評価が必要である。



(a)3次元モデルにおける要素図心



(b)構造物内部のひび割れ状況

図-7 3次元モデルひび割れ分布表示例

3.7 解析結果の評価と利用

解析結果の妥当性を総合的に判断するために、解析より得られる種々の情報について吟味し、応力ひずみ関係レベル（材料モデル）での適用範囲、また、部材・構造物レベルでの応答に関しての適用範囲を確認しなければならない。また評価により妥当と判断された範囲内での解析結果（図-7に示すようなひび割れ分布図等）の情報をを用いて、意思決定を行わなければならない。

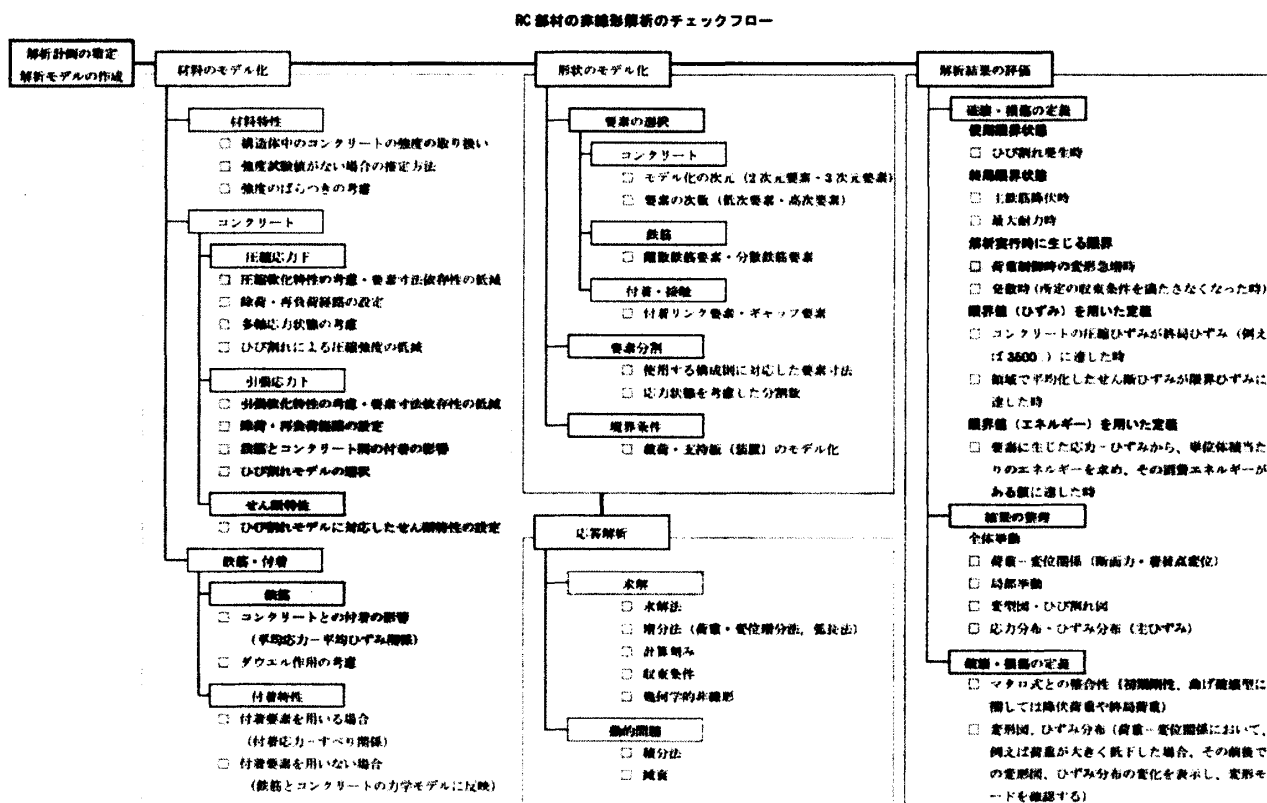


図-8 RC 部材の非線形解析のチェックフロー

4. 非線形解析の応用

4.1 非線形解析の抱える問題

RC 部材の材料非線形解析は有用な性能照査技術となり得るものと期待されているが、その解析技術の複雑さゆえに、実務設計の場において広く利用されるには至っていない。非線形解析を敬遠させる主な要因は、以下のようなものと考えられる。

- 材料構成則：数多く提案されている材料構成則の中でどのモデルをどの組み合わせで選択し、各モデルのパラメータをどのように設定すればよいか分からない。
- 解析対象のモデル化：解析対象構造物、または部材を、その主要な現象の再現性を保持した上でどのようにモデル化 (有限要素メッシュの作成や境界条件の設定等) すればよいか分からない。
- 解析結果の妥当性：計算ステップや収束のための繰返し計算をどのように制御すれば妥当な解が得られるか分からない。また、使用する構成則とそのパラメータ設定の変更や、境界条件の変更等によって解析結果が変化する場合に、解析結果の妥当性をどのように判断すればよいか分からない。
- 解析結果の利用：荷重-変位関係だけでなく、応力やひずみといった解析によって得られる膨大な情

報をどのように利用すればよいか分からない。

RC 部材の非線形解析の広範な利用を妨げているこれらの要因の中でも、「得られた解析結果が果たして妥当なものであるのかどうか？」という疑問が最も切実な問題であると思われる。非線形解析結果の妥当性が問題となる (解析結果がばらつく) 理由は、次のような不確実性を有しているからであると考えられる。

- 離散化における誤差：解析対象を離散化する際に生じる誤差。一般に、弾性計算では有限要素分割を細かくすることで誤差は小さくなるが、材料非線形解析ではそうとは限らない。
- 材料構成則の精度：材料の非線形性をモデル化する際に生じる誤差。使用する構成モデルと要素寸法との関係にも影響を受ける。
- 対象のモデル化における誤差：解析対象物をモデル化 (要素メッシュの作成や境界条件の設定等) する際に生じる誤差。
- 求解における誤差：求解法や収束計算の精度によって生じる誤差。

報告書の「4 章 非線形解析の応用」では、非線形解析の利用に関するこれらの現状を踏まえ、非線形解析を実施する際の一般的な留意点について、解析事例を示しながら解説を行った。記述の範囲は RC 部材の耐荷性状

を評価する場合とし、図-8 に示すように「材料のモデル化」、「形状のモデル化」、「応答解析」、「解析結果の評価と利用方法」に分類して整理した。また、妥当な解析結果を得るまでの過程（トライ&エラー）についても、いくつかの実例を紹介した。

4.2 材料のモデル化

「材料のモデル化」には、材料パラメータや構成モデルの選定に関する留意点をまとめた。解析者の都合のよい結果が得られるように材料定数を設定することは避け、パラメータ設定が解析結果にどのような影響を及ぼすか十分に把握しておく必要がある。また、構成モデルの特徴を理解し、適切な組み合わせで使用されているかを確認することが重要である。

4.3 形状のモデル化

「形状のモデル化」には、要素分割や境界条件の設定など、対象のモデル化に関する留意点をまとめた。要素の選択や要素寸法などは解析者の経験や解析環境に依存しやすいが、使用する構成モデルとの整合性などにも十分注意する必要がある。また、応力集中が生じやすい箇所に特別な処理が必要な場合には、解析が再現し得る破壊モードへの影響に配慮しながら適切に対応する必要がある。

4.4 応答解析

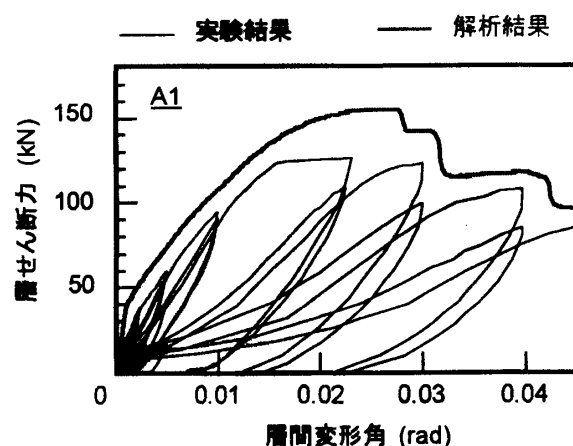
「応答解析」には、解析を実行し解を得る過程で配慮すべき留意点についてまとめた。非線形解析において適切な解を得るには、求解法や収束条件の設定とともに、解が得られる過程での収束状況などについても十分に確認しておく必要がある。

4.5 解析結果の評価と利用方法

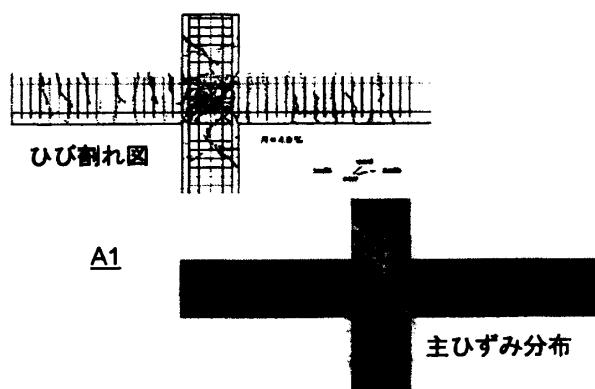
「解析結果の評価」には、解析結果の整理方法や利用方法などについてまとめた。解析結果の妥当性を判断するには、荷重-変位関係だけでなく、変形図やひずみなどのあらゆる情報を利用するのがよい。また、得られた解析結果を利用する際には、破壊や損傷度などを適切に定義するとともに、解析の適用範囲について十分に認識しておく必要がある。

4.6 解析結果を得るまでのトライ&エラー

非線形解析では、解析者の経験及び使用する解析コードの選択によって様々な解が得られるため、解析結果の検証や解析条件の見直しなどを丁寧に行うことにより妥当性を判断する必要がある。例えば、同じ解析モデル（要素分割や境界条件）を用いても、使用する解析コードごとのデフォルト設定（構成則の選択やそのパラメータ設定、求解の条件等）が異なることにより、解析コードによって異なる解析結果が得られることになる。また、解析者が異なれば同一の解析コードを用いた場合でも、解析者の経験によってデフォルト設定を変更すること



(a) 荷重-変位関係の比較



(b) 損傷状況の比較

図-9 柱梁接合部の解析事例（ブラインド解析）

があるため、異なる解が得られる場合もある。更に、経験の多い解析者は、解析結果を分析し結果の改善を行うことが可能であり、最終的に経験の乏しい解析者と異なる結果を導き出すことが可能である。そこで、解析を実行しその結果を判断する方法と、妥当な解が得られるまでの点検・改善の繰返し（トライ&エラー）について、いくつかの事例を示した。

例えば、図-9 は、RC 造柱梁接合部の解析事例である。解析対象は、2007 年 4 月にアメリカコンクリート工学会（ACI）の春季大会（Spring Convention）で開催された共通ブラインド解析コンペの RC 造柱梁接合部である³⁾。共通ブラインド解析では、複数の解析者が共通の実験結果を対象として解析を実施するが、実験結果が事前に公表されることはない。解析者は主催者から与えられる事前情報に基づいて実験結果を予測することになるため、現状の解析手法の信頼性を検証する上で、共通ブラインド解析の実施は有効であると考えられる。また、実験結果はブラインド解析結果が揃った段階で公表されるため、実験結果と解析結果を比較することにより、現状の解析技術の問題点を明確にすることができる。このような共通ブラインド解析の利点を活かし、RC 造柱梁接合

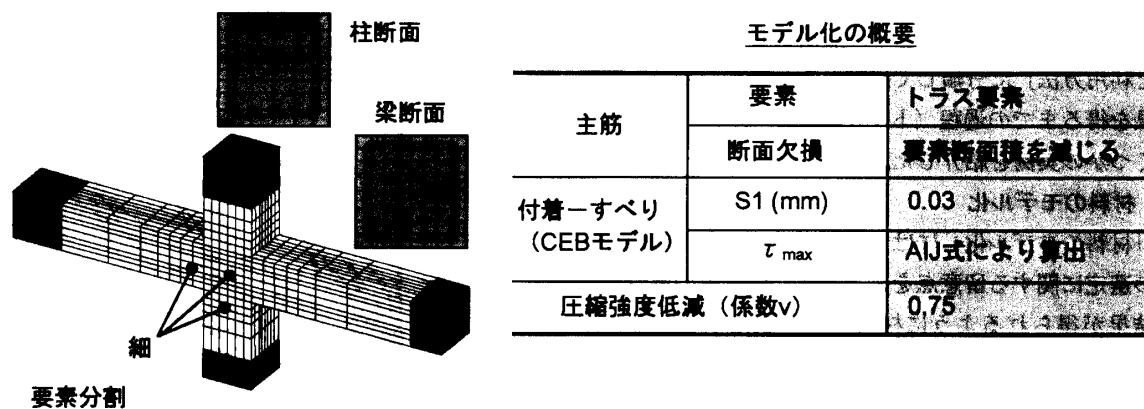


図-10 トライ＆エラーにより導かれた標準的なモデル

部に関する解析モデルの構築を試みている⁴⁾。

本報告書で紹介する柱梁接合部の解析に関するトライ＆エラーでは、要素分割の影響、実験での計測に伴う主筋の断面減少の影響、鉄筋とコンクリート間の付着すべり挙動の影響、ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減の影響などについて検討が行われ、最終的に図-10に示されるような標準的な解析モデルを構築している。このような標準化されたモデルの組み合わせは、個々の解析コードや解析条件によって異なるため、解析者は各自の解析環境においてトライ＆エラーを実行し、妥当な解が得られるプロセスを経験するとともに、各自の標準的なモデルを導く必要がある。

5. 非線形解析の実例

5.1 非線形解析の有効性

近年、コンクリート構造物設計・施工の実務において、FEM 解析をはじめとする高度な解析技術が様々なかたちで活用される場面が増加している。これらは主に、設計マクロ式での詳細な構造決定や、施工時の不具合の発生予測が困難な局所的な挙動に対する安全性を確認することにある。ただし、取り扱う範囲がひび割れ発生までの挙動に限定され、弾性挙動を対象とした解析検討に留まっている場合が多い。しかし、建設コストの削減を目的として構造の合理化を進める上において、構造の安全性を確認するために実物大の試験体を用いた構造検討を実施（図-11 及び図-12）している現状では、これを代用する非線形解析技術の活用は有効である。また過度に安全性を高めた設計による過密配筋などによって施工性の低下を招き、結果的に耐久性を損なうことなどが懸念される場合などにおいても、解析的に合理的な設計が可能になれば、その効果は大きい。

ここに、非線形有限要素解析を用いて高精度に構造物の挙動を把握し、構造を合理化して、施工性の改善や安全性の向上に資する内容について解析的な検討を行った

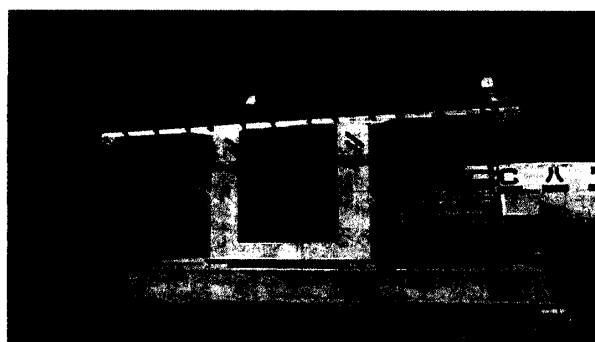


図-11 ストラットに支持された床版載荷実験

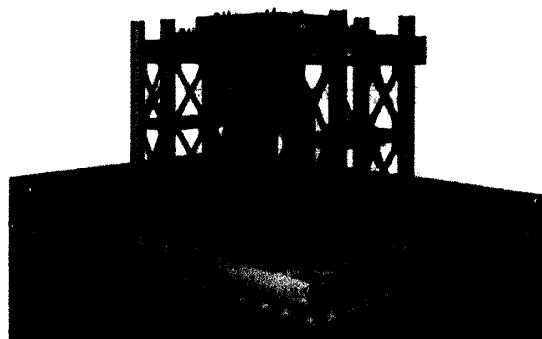


図-12 実物大橋脚振動実験

幾つかの例を示す。

5.2 非線形解析による検討例

5.2.1

非線形解析の適用は、ラーメン構造の梁-柱接合部やPC 上部工のウェブなど、主にせん断破壊が支配的となる部位の設計に有効であり、また現状の解析技術の精度に課題があると判断し、これらを検討の対象とした。また、検討のカテゴリーとして、短期的なスパンで有効性が発揮できると考えられるものと、将来的な中・長期での技術開発に期待をして有効活用のシナリオを示すものと

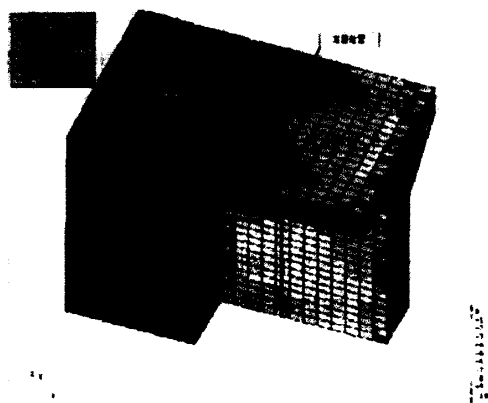


図-13 プレキャストTげた橋

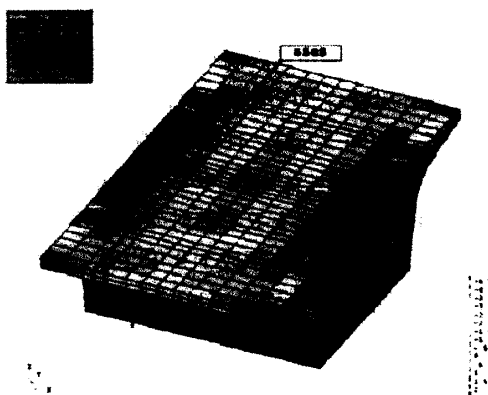


図-14 連続箱げた橋（中間支点）

大きく2つを対象とした。ここでは、これら検討対象のうち、主なものの概要を紹介する。

5.2.2 短期の解析例

(1) アンカーボルト周辺の合理化

過密な鉄筋配置によって施工性の低下が指摘されることの多いPC 上部工のアンカーボルト周辺の合理的な構造について検討を行った。検討は、プレキャストTげた橋と箱げた橋について、橋軸方向と橋軸直角方向の地震力を対象とした。解析モデルを図-13 および図-14 に示す。検討結果をもとに、破壊モード及び補強と安全率の関係を示し、合理的なアンカーボルト周辺の構造決定例を示す予定である。

(2) コンクリート接合部の合理化

プレキャスト鉄筋コンクリート部材どうしやプレキャスト部材と現場打ちコンクリートなど接合面を有する合成構造物の性能評価を行う上で、接合部構造の挙動の把握とその評価は重要である。本例では、既往のプッシュオフ試験⁵⁾を対象にして、ずれ止め鉄筋比と接合面の仕上げ状態がせん断挙動に及ぼす影響を調べるための非線形解析を行いモデル化方法や解析パラメータの検討を実施した。解析モデル概要（1/2 対称モデル）

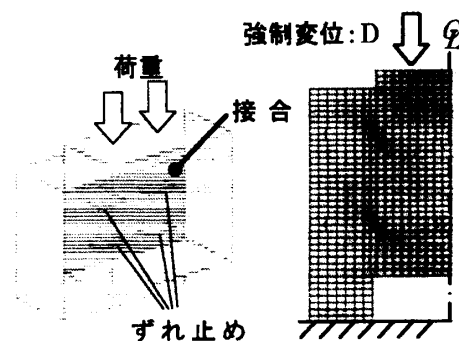


図-15 解析モデル概要および解析結果例

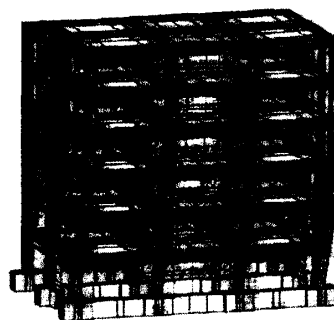


図-16 6階建てRC造建築物の非線形動的解析

および解析結果の一例（コンクリートの最大主応力ベクトル図）を図-15 に示す。試験結果の破壊モードやせん断耐力について解析結果を比較することにより、せん断耐力評価に寄与する解析パラメータを検討し、コンクリート接合部の合理化設計等に対する解析検討の参考データの一例を示す予定である。

5.2.3 将来的な有効活用

建築物の動的応答シミュレーション

連続体力学に基づく、建築物の精密（ソリッド要素）モデルによる動的応答解析は構造細部の破壊現象を精密に調べることを可能とする。重要度の高い建築物の地震被災後の事業継続性や既存構造の耐震余裕度の検討は、既設社会基盤の地震防災促進や減災対策費用低減の意味でも重要であるが、精密モデルによる動的応答解析を実施することで、高い精度の地震被災状況が予測でき、より現実的な耐震対策の立案が可能となる。図-16 に、精密モデルの例として6階建てRC造建築物の地震破壊シミュレーションを示す。ひび割れに伴う損傷、大変形の様子を把握できる。

6. まとめ

本研究委員会では、先述したように非線形有限要素解析に関する既往の知見を整理し、非線形有限要素解析の信頼性向上と一般化のための検討を行ってきた。委員会

の構成メンバーは、土木、建築それぞれの分野から研究・開発及び設計領域で、非線形有限要素解析を活用している技術者及び研究者で構成されている。そのため、土木と建築の非線形有限要素解析の利用法やその設計の実情について、お互いの理解を深めるとともに、互いの長所を共有できるような活動を行ってきた。

本研究委員会が目指した目標の一つが、非線形有限要素解析の実務設計への応用であるが、どのように活用されるべきかについては、各人の意見がわかれるところである。ここでは、非線形有限要素解析とのつきあい方の一例について簡単に述べる。まず、設計技術とは、研究や技術開発の成果をベースに常に発展すべきものであり、その目的は、構造物の使用材料や部材形状を決定することである。次に、設計された構造物の性能を検証する必要がある、実験及びマイクロモデル(有限要素法)・マクロモデル(各種力学モデル)が論理的に協調し合う状態で、性能検証がなされる。最終的には、実験と有限要素解析、及びそれらから得た知見をベースにしたマクロモデル解析の相互検証により、実務設計は完了される。また、実験とマイクロモデルの進化に適応して、マクロモデルも進化し、実施設計で活用されるものと考ええる。

新しい設計手法の確立によりその自由度は広がるが自然の節理に適った耐力、靱性、バランスのよい剛性分布を確保するという観点がこれまで以上に重要になってく

る。また、ポストピーク挙動に代表される構造物の最終形を把握することにより、真の性能を評価するという姿勢が望まれる。本委員会の活動が、設計の本質をベースにして、構造性能を解析的に評価するための「道しるべ」として多いに活用される事を期待する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン，1989
- 2) 土木学会：非線形解析によるコンクリート構造物の性能照査，コンクリート技術シリーズ 66，2005
- 3) 楠原文雄，塩原等：ACI 春季大会（鉄筋コンクリート造柱梁接合部の共通ブラインド解析），コンクリート工学，Vol.45，No.8，pp.48-49，2007
- 4) 白井伸明，田嶋和樹，橋本浩：3 次元 FEM による RC 造柱梁接合部に関する解析モデル確立へのアプローチ（その 1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 分冊，pp.145-146，2007 年 8 月
- 5) 橋梁用プレキャスト P C 部材の接合技術に関する共同研究報告（Ⅰ）平成 19 年 2 月 独立行政法人土木研究所，（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会