

解析的研究と実験の関わり—建築分野

野口 博*

1. はじめに

コンクリート構造物の解析手法の進歩には目覚ましいものがある。しかし、解析手法は単独で進化してきたわけではない。初めは、荷重-変形関係の実験結果を再現できるように、試行錯誤の形で解析法の改良がなされてきた。また、この時期の実験は、解析に利用することを意図して行われたものではなく、実験のみから構造部材の性能を把握しようとするものであった。その後、解析の信頼性が高くなるに従って、パラメトリック解析で実験を補完したり、内部応力状態のように実験では把握することが困難な情報を得たりするために解析が利用されるようになってきた。しかし、この段階でも、解析は実験結果をより深く理解するための補足的なもので、実験は解析をあまり意識したものではなかった。

最近では、FEM ミクロモデルやマクロモデルを構築・検証するための基礎実験もようやく行われるようになってきた。将来、さらに解析が進歩した時、実験との関係はどのようになっていくのであろうか。いろいろな構造物の挙動を解析だけで予測できるようになり、実験は不要という時代が来るのであろうか。

図-1に示すように、コンクリート建築構造物の研究に関しては、大別して実験的研究、マクロモデル解析的研究、FEM ミクロモデル解析的研究があり、相互に関

係している。また、これらの研究の成果は、構造物の諸規準や設計方法に応用され、それに携わる設計技術者にも関連している。本文では、図-1の①から⑨で表わした実験、解析的研究、設計の相互の関連に着目しながら、解析と実験の歴史的な変化を紹介し、最近の解析を意識した実験や、それが解析にどのように活かされているのかについて述べたいと思う。

2. RC 構造における基本の重要性

青山は、1999年のボルチモア市でのACI Fall Convention, George Winter 記念講演会で、「Development of Highrise Concrete Construction in Seismic Countries」と題する講演¹⁾を行い、1988年から5年間にわたって行われた高強度コンクリート技術と応用の開発研究としてのNew RCプロジェクトと、その後の日本での超高層RC建物の実施設計や施工への効果について紹介した。その中で、Winter教授の著名な教科書「Design of Concrete Structures」における「基本に重きを置くべき」という教えが、日本の技術者や研究者に大きな影響を与えたと述べている。教科書第8版の序文では、「設計に関する特殊な技術や規準に従う設計手法は、設計技術者として成功するための基礎として十分とはいえない。これらの技術や手法はしばしば変わっていくものだからである。技術者がこれらの早い変化に追随していくためには、構造材料としてのコンクリートや鋼の基本的性能、さらには鉄筋コンクリート(RC)部材やRC構造の弾塑性挙動の基本的性能に関する基礎知識が必要である。」と述べられている。青山は、「1960, 1970年代は、実験式の時代であった。わが国での梁・柱のせん断強度は、米国と同様に、膨大な実験データに基づく実験的手法により定式化されていた。塑性変形に関する非線形パラメータも実験的手法で定式化され、わが国では現在も実際に使われている。しかし、1980年頃から、研究者は実験的手法に辟易し始めたようである。膨大な実験データが必要なために、時間とお金がかかり過ぎるからである。一方、あまり頭は使わなくて済む。われわれは、力学の基礎に基づく合理的な研究手法をできる限り取り入れるよう努力すべきであり、実験的手法は、合理的な手法の正しさを確認するための補助的手段とすべきであると感じている。そして、New RCプロジェクトでは、この

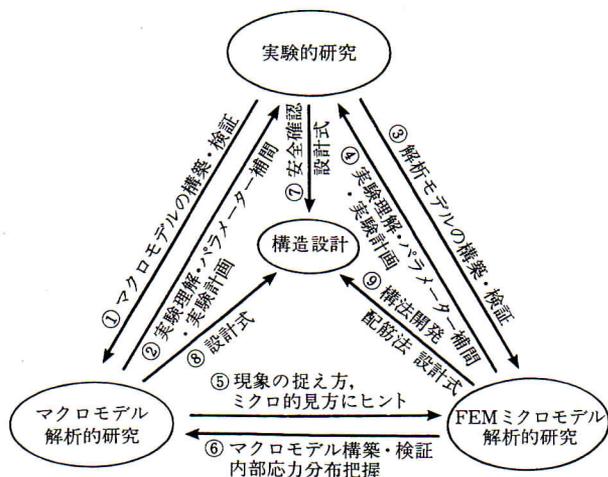


図-1 コンクリート構造の研究と設計の関わり方

* のぐち・ひろし/千葉大学教授 工学部 デザイン工学科建築系 (正会員)

合理的な研究手法を研究の方法としてきた。」と述べている。

このRC構造における基本の重要性和それをより深く理解していくためには、より合理的な研究手法を意識して目指すことが、複合構造として複雑なRC構造の研究と実務設計でも今後ますます重要なことを示唆している。

3. 構造物の解析を意識した Collins の平板実験

著者は、この Winter 教授の「RC構造では、基本に重きを置くべき」という教えと青山の講演内容に深い感銘を覚えた。なぜなら、1984年にカナダ・トロント大学の Collins 教授の下に1年間滞在したころの新しい合理的な研究手法を思い出すからである。その頃、Collins 教授は Vecchio らとともに、写真-1に示すようなRC平板のせん断実験手法を開発し、毎週1体の実験を根気よく続けていた。1982年の Vecchio と Collins の論文²⁾によれば、RC構造物を単純な面内応力を主に受ける要素の集合体と捉え、この構成要素である平面応力場の2次元矩形RC要素である平板の挙動を実験的に把握し、定式化して解析モデルに組み込み、後は、FEMミクロ解析やマクロモデル解析により全体構造の挙動をより正確にかつ合理的に予測しようとするものである。

これは、図-2に示すように、複雑な荷重を受ける土木建築構造物を対象とした、費用や時間、人件費がかかる従来の縮尺模型を用いた構造実験に変わる、平板要素を用いた新しい構造実験として提案されたものである。

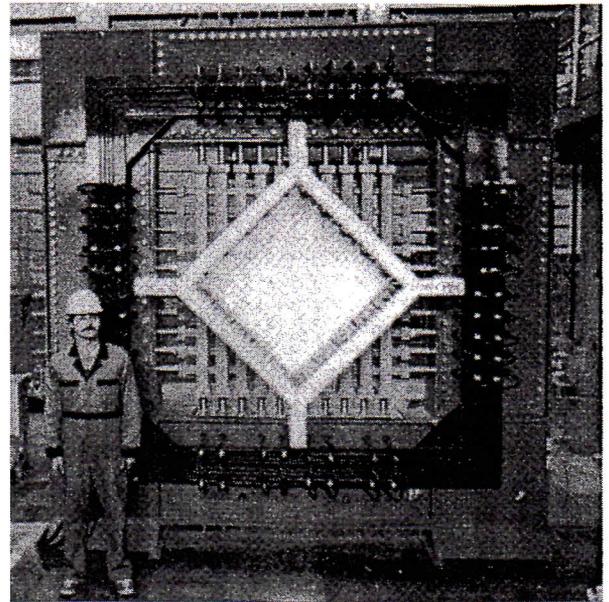


写真-1 Collinsらの平板実験²⁾

日本でもその後、鹿島建設により同様の荷重方法を導入した大型平板実験施設が開発され、トロント大学との平板のせん断挙動における寸法効果などの国際共同実験が行われた³⁾。これらの平板実験は、解析を意識した実験としては、先駆的で、実験方法と実験により得られたひび割れコンクリートの圧縮劣化特性は、以後の日本における解析研究に大きな影響を与えた(図-1での①、③に相当)。FEMミクロモデルやマクロモデルの解析モデル化のための基礎実験と解析モデルの信頼性の評価が重要であることが明らかとなった。

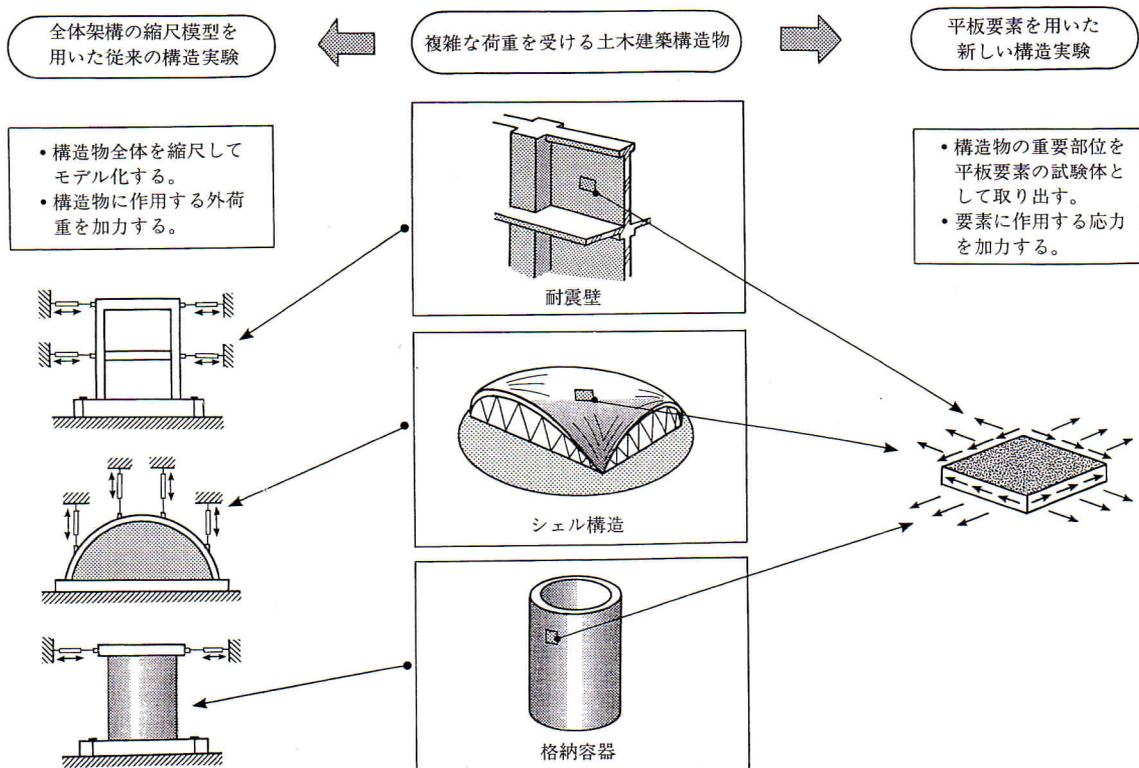


図-2 平板要素を用いた構造実験³⁾

4. 構造物の解析を意識した Collins, Stevens らのシェル要素実験

その後、Collins, Stevens らは、図-3、写真-2 に示すように 60 個のオイルジャッキを用いて、押し引き、ねじり、面外曲げ、面外せん断などを立体的に載荷できる 38 cm 厚の RC シェル要素の実験施設を開発した⁴⁾。この研究の目的も、RC シェル要素の荷重-変形応答を精度良く予測できる、実験により検証された、コンピューターに基づく解析モデルを開発することであった。このモデルにより、厳しい環境下や設計・施工ミスが生じた場合などの大型海洋構造物や複雑なコンクリート土木・建築構造物の実際の挙動を予測することが可能となるとしている (図-1 での①、③に相当)。

5. マクロモデル、FEM ミクロモデルと解析モデル検証用の選定実験試験体

1981~84 年には、日本コンクリート工学協会 (JCI) に RC 構造のせん断強度研究委員会 (委員長: 岡村甫・東大教授) が組織され、RC の耐震設計で重要なせん断問題がマクロモデルと FEM ミクロモデルの立場から討論された。解析モデル検証用の選定実験試験体の実験データをまとめて公表した点に意義があり、若手研究者を中心とした組織的な研究活動により、わずか 4 年間で、この分野の研究は大幅に進んだといえる⁵⁾。

1986 年から 3 年間にわたり文部省科研費総合研究「RC 構造の FEM 解析の精度向上に関する基礎実験と解析モデルの開発」(研究代表者: 森田司郎・京大教授) が行われた⁶⁾。これは、図-1 における、解析の精度向上を意識した基礎実験が解析の進歩にいかに関与したかを示した貴重な研究であった (図-1 での①、③に相当)。

6. 構造物の解析精度の向上を目指す解析モデル化のための基礎実験

図-1 での、解析を意識した実験としては、FEM ミクロモデルに関しては、New RC での角らによる平板実験⁷⁾と野口らによるミニ平板実験^{8),9)}などがある。角らは、Collins よりもシンプルなせん断加力形式の平板実験により 100 N/mm² 程度の高強度コンクリート平板のせん断特性を把握した。野口らは、60 N/mm² 程度の高強度コンクリートの 2 軸圧縮応力下の破壊包絡線を求め、高強度コンクリートでは圧縮強度の上昇度に比べ、引張強度の上昇度が鈍いことを反映した普通強度コンクリートとの破壊包絡線の形状の違いを明らかにした⁹⁾。また、鉄筋を含むミニ平板実験からは、ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性を観察し、図-4 に示すような高強度と普通強度でのひび割れコンクリートの圧縮劣化特性の違いを明らかにした⁹⁾。これらの研究は、その後の高強度コンクリート部材のせん断挙動の FEM ミクロ解析の精

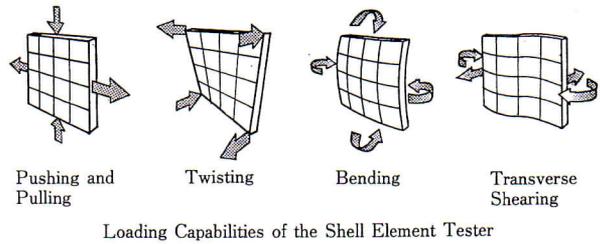


図-3 Collins, Stevens らのシェル要素実験での載荷パターン⁴⁾

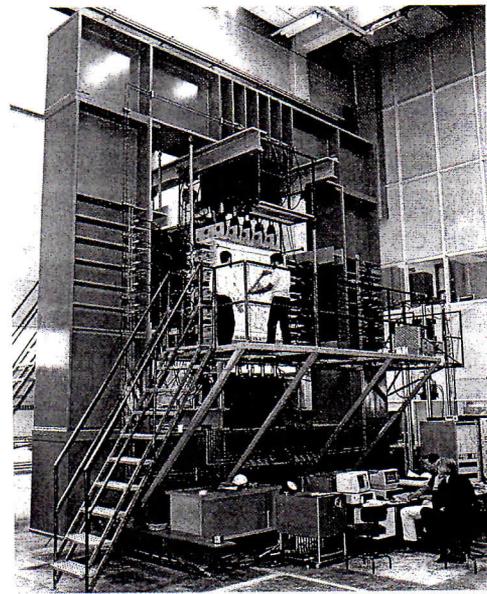


写真-2 Collins, Stevens らのシェル要素実験装置⁴⁾

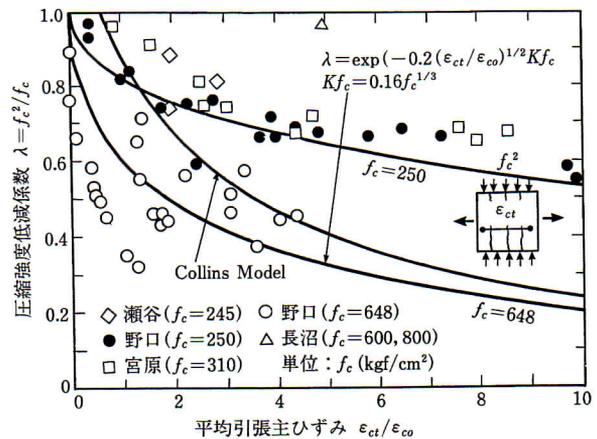


図-4 高強度と普通強度でのひび割れコンクリートの圧縮劣化特性の違い¹⁰⁾

度向上に役立っている¹⁰⁾ (図-1 での③に相当)。

また、鋼管コンクリート柱としての CFT 構造、柱 RC とはり S の RCS 構造のような鋼とコンクリートを適材適所に用いた混合構造の解析では、鋼とコンクリート間の接触機構が部材の剛性や変形性能の解析精度を決めるポイントとなる。野口らは、この接触機構の解析モデル化のための基礎実験を鋼板で挟み込んだコンクリートプリズムを押し抜く形で行った¹¹⁾。その結果を定式化

し、接触要素の剛性評価に適用し、RCS柱・はり接合部や架構での剛性や変形性能の解析精度の向上を得ている^{12),13)}(図-1での③に相当)。

図-1に示すマクロモデルの構築・検証を目的とした実験も最近増えてきている。

衣笠、野村は、正負繰り返し履歴を受けるRC部材の曲げ降伏ヒンジの破壊性状について、損傷の集中するヒンジ領域の変形挙動の詳細な計測による実験的検討を行い、塑性域での繰り返し曲げ破壊に特有な破壊形式として、「正負繰り返し履歴破壊」の概念を提示した¹⁴⁾。この破壊形式では、ヒンジ領域のせん断抵抗機構である圧縮束が、荷重方向の変化に伴い、ひび割れの開閉のため一時的な消滅と形成を繰り返すことを検証実験での観察から示し、耐力の急激な低下を伴う正負繰り返し破壊が、荷重方向の変化により一時的に消滅したせん断抵抗機構が再び形成できなくなるために生ずることを明らかにした(図-1での①に相当)。

市之瀬らも実験からRC部材のせん断破壊面が平面でなく、立体的に形成されることを観察し、破壊面の確認実験を行っている¹⁵⁾。3次元破壊領域を考え、コンクリートの応力-ひずみ関係をNew RC式、ひび割れコンクリートの圧縮強度低減を野口らの式により考慮して求めた荷重-変形関係は実験値と良い対応を示した。これは、図-1に示した、マクロモデル構築・検証用に基礎実験を行い、さらに解析を意識した既往の基礎実験による提案式も取り入れている代表的な研究である(図-1での①に相当)。

7. マクロモデル、FEMマイクロモデルとせん断設計法の関わり

1986年からのJCI「RC構造のFEM解析と設計法委員会」(委員長:野口博・千葉大教授)では、第1回日米セミナーで指摘された今後の課題を活動目標とし、設計実務家中心のグループで、「FEM解析をRC構造物の設計に適用する場合の問題点とその対処法についてのガイドライン」を出版した。対象のモデル化や要素種類の選り方、要素分割の方法など解析のノウハウが紹介された意義は大きい¹⁶⁾。また、研究者グループは、FEM解析によりRC部材の既往のせん断強度の提案式やマクロモデルの妥当性を検証し、合理的なマクロモデルや設計式の開発を目指した。建築学会の終局強度型設計指針のせん断設計では、マクロモデルに基づくせん断強度の算定法が採用されたが、これらの研究活動がその導入の基礎となっている¹⁷⁾。これは、図-1でのマクロモデル、FEMマイクロモデル両解析研究と設計との関わりである(図-1での⑧、⑨に相当)。

8. むすび

コンクリート構造の学問は実験で成り立ってきたとい

う経緯があり、いまだに実験だけという研究の数が多い。実験は、実験能力が高ければ、得られた結果の信頼性は高い。しかし、3次元での変形状態や内部応力分布など測定が困難な点が多く、また得られた知見の適用範囲が狭い。また、実験でなぜそのような結果になったのかの解釈が困難な短所がある¹⁸⁾。しかし、今後、実験でのひび割れ、荷重-変形関係など、表に現れる現象の観察のみでなく、内部応力状態、破壊損傷進行度や破壊機構など、構造性能をより合理的に検討するためには、解析的な裏付けや理解を伴わないと、進歩が難しくなるであろう。

図-1の②、③は、マクロモデルとFEMマイクロモデルの解析研究から実験的研究への働きかけとして、「実験をより深く理解するのに役立つ、実験パラメーターを補間して、実験で試験体数が少ないことを補える、実験計画に役立つ」ことなどが考えられる。図-1の⑤、⑥は、マクロモデルからは、「現象の捉え方がうまいマクロモデルから、ミクロ的見方にヒントが与えられる」、マイクロモデルからは、「マクロモデルの構築やモデルや仮定の検証などに役立てられる、内部応力分布の把握がマクロモデルで役に立つ」などがある。

また、図-1の⑦は、従来からあるように、実験が構造設計のための「安全確認に役立ち、実験式としての設計式が構造設計で役立ってきた」ことを示す。

このように、解析研究と実験の関係、またマクロとマイクロの解析研究通しの関連には、互いに補い合うものがあり、今後、実験、マクロモデル解析、およびFEMマイクロモデル解析の研究者は、相互の情報交換のフィードバックを密にして、研究成果を高め、構造設計に役立てていくことが必要である。例を挙げれば、構造物や部材の構造性能を研究するために実験を行う場合、できればマクロモデルやFEMマイクロモデルでその挙動や抵抗機構をあらかじめ検討し、本当に必要なところを見定めてから実験を行う方向を目指したい。

1999年4月から4年間、日本建築学会構造委員会RC運営委員会の基に、「コンクリート系構造の部材解析モデル検証小委員会」が筆者を主査として組織され、コンクリート系建築物の構造設計を性能評価型として確立するために、材料および構造部材の力学的挙動を精度よく予測する手法を開発することを目標として活動を行っている。この活動の中で、FEMマイクロモデルを実験計画でも活用できるような環境作りと、研究成果を実務設計に応用していく点にも力点を置きたいと思う。また、新しい構造性能評価型の設計法の開発に役立てるためには、非線形FEM解析結果の評価を、より緻密にビジュアルに行うことにより、FEM解析の利用方法を考えていく必要がある。

い。
は
こ
ど
目
が
ハ
の
ひ
の
き
な
的
ろ

ミ
デ
「実
-を
は
験
」,
ハ
る」,
レ
や
屋
が

参考文献

- 1) Aoyama, H., "Development of Highrise Concrete Construction in Seismic Countries," George Winter Commemorative Lecture, ACI Fall Convention, November, 1999, Lecture note was printed by Nihon University, pps. 69
- 2) Vecchio, F. and Collins, M. P., "The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses," Research Report No. 46, March 1982, pps. 82-03
- 3) 鹿島建設(株)技術研究所：大型平板実験施設，パンフレット，1988年
- 4) Stevens, N. J., Uzumeri, S. M. and Collins, M. P., "Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Shear — Experiments and Constitutive Model," ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 2, March, 1991
- 5) RC 構造のせん断強度研究委員会：RC 構造物のせん断問題に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，1982. 6
- 6) 森田司郎（研究代表）：鉄筋コンクリート構造の FEM 解析の精度向上に必要な基礎実験と解析モデルの開発，昭和 63 年度科学研究費補助金（総合研究（A））研究成果報告書，平成元年 3 月
- 7) 国土開発技術センター，平成 4 年度高強度鉄筋分科会報告書，pp. 4-132~4-151, 1993 年 5 月
- 8) 大久保雅章・二村有則・野口 博：超高強度コンクリートの二軸応力下の破壊条件に関する実験的研究（その 4：破壊モードと破壊包絡線），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 475~476, 1991 年 9 月
- 9) 米澤健次・野口 博：ひび割れた超高強度コンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 479~480, 1991 年 9 月
- 10) 飯塚崇文・野口 博：普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリート部材の非線形有限要素解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 2, pp. 9~14, 1992 年
- 11) 金 汎演・米澤健次・野口 博：鋼とコンクリートからなる合成構造の付着特性に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1631~1632, 1994 年 9 月
- 12) 米澤健次・野口 博：三次元有限要素法を用いた混合構造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 471, pp. 181~190, 1995 年 5 月
- 13) 内田和弘・野口 博：梁貫通型接合部を有する柱 RC 梁 S 構造 2 層 2 スパン架構の力学的挙動に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 514, pp. 207~216, 1998 年 12 月
- 14) 衣笠秀行・野村設郎：正負繰り返し履歴による曲げ降伏ヒンジの破壊性状，コンクリート工学論文集，第 5 巻，第 2 号，pp. 21~32, 1994 年 7 月
- 15) 大橋一仁・岡野忠司・市之瀬敏勝・脇田直弥：三次元的破壊領域を考慮した RC 部材のせん断強度解析の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 3, pp. 991~996, 2001 年 7 月
- 16) RC 構造の FEM 解析と設計法研究委員会：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，日本コンクリート工学協会，JCI-C16, 1989. 3
- 17) RC 構造の FEM 解析と設計法研究委員会：RC 耐震壁のマクロモデルと FEM ミクロモデルに関する解析的研究論文集，日本コンクリート工学協会，JCI-C18, 1989
- 18) 市之瀬敏勝：マクロモデルによる RC 接合部の研究，シンポジウム論文集「RC 建物の柱梁接合部に関する研究の現状と将来」，日本建築学会関東支部構造部会，pp. 37~44, 1993 年 12 月

が
構
の
設

と
ミ
の
が
イ
ミ
-ド
立
て
部
材
れ
ば
亢
機
め
て

RC
折
モ
コ
ン
立
す
よ
く
っ
て
計
画
設
計
，
新
こ
は
，
ア
ル
い
く