

鉄筋コンクリートの非線形解析の現況と耐震性能照査法の構築に向けた今後の取り組み

前川宏一*, 土屋智史**, 福浦尚之***

*工博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

**工修 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

***工博 大成建設技術研究所土木構造研究室 (〒神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

材料・構造諸元と荷重・境界条件が確定した後,新設構造物の有する耐震性能を事前照査し,要求性能を満たすことを確認することは,耐震性能設計の枠組みの中で根幹をなす。地震作用中と作用後の構造物と構成材料両者の振る舞いを逐次,追跡する動的非線形応答解析から,保有耐震性能照査に必要となる情報の大半が提供される。本文は鉄筋コンクリート構造の材料非線形解析の現況を耐震性能照査法の視点から概括するとともに,開発が急がれる技術項目と地震作用後の残存使用性評価について私見を述べる。非線形応答解析は既設構造物の耐震診断にも適用可能であり,新設構造物の設計と既設構造物の維持管理を有機的に行なう枠組み構築に向けた努力が払われている。

Key Word : Reinforced concrete, Nonlinear dynamic analysis, Seismic performance

1. はじめに

材料・構造諸元と荷重・境界条件が確定した後,新設構造物の保有耐震性能を照査し,要求性能を満たすことを明らかにすることは,耐震性能設計の中の不可欠な要素である¹⁾。地震作用中と作用後の構造物と構成材料の振る舞いを逐次,追跡する動的非線形応答解析は,保有耐震性能照査に必要となる情報の大半を設計者に提供する。本文は鉄筋コンクリート構造(以下,RC 構造)の材料非線形解析の現況を耐震性能照査法の視点から概括し,開発が急がれる技術項目について私見を述べるものである。

図-1 は既往の RC 構造物の動的応答解析法を,"仮説・仮定"を設定する出発点に応じて分類することを試みたものである。出発点とは,そこで実験結果に基づくモデル化が行なわれる場所である。最終目標は,種々の部材によって構成される構造物全体の挙動解析である。部材自体の非線形挙動をモデル化の出発点に置く解析は,しばしば部材モデルあるいはマクロモデルと称される。部材端部のモーメント-回転角で規定される材端バネモデル²⁾,曲げモーメント-曲率に復元力特性を規定するモデル,せん断力-水平変位に履歴特性を規定する部材モデル等は,耐震設計に多くの実績を有する。柱部材に対する TAKEDA model³⁾,武藤モデル⁴⁾,原子力格納容器を構成する耐震壁構造の性能照査に使用される稲田モデル⁵⁾や JEAG モデル⁶⁾は,実務設計の現場でもよく耳にする。これらの部材モデルは,系統的な部材レベルの応答実験結果を基に,部材諸元と材料強度から経験的に履歴特性が規定される。

これに対して,部材を構成している材料の力学特性から部材挙動,ひいては構造系の非線形動的挙動を解析することも可能である。より小さい領域(control volume)に適用

されるモデルから理論を出発させるという意味で,これらをミクロモデルと称する場合もある。材料モデルは,対象構造物の中に展開する主たる応力状態を考慮して,一般に次元を落とす簡略化が図られるが,今日の数値解析環境は次元縮退を前提としない三次元 RC 構成モデル(応力ひずみ関係)から解析を出発させることも,技術的に可能となりつつある。

マクロ・ミクロの差は,出発点となる control volume の寸法差による。構造物全体の挙動(変位や速度や加速度)以外に,材料モデルが規定される control volume の非弾性情報も得られる点が,構造物の性能照査で重要である。ミクロモデルから,構成材料の損傷度や塑性,ひび割れ(幅や方向や密度)などを設計者は入手することができる。マクロになる程,得られる情報は構造物の巨視的挙動に限定されてくるのである。

従来,耐震設計で必要とされる情報(耐荷力,最大応答変位など)は部材モデルではほぼ手中にすることができた。しかし,地震作用後に構造物が保有する使用性や,復旧性を総合的に,かつ一般的な方法によって評価しようとするれば,部位ごとに異なる構成材料の損傷状況が不可欠となる(図-2)。原子力建屋の性能設計では,巨大地震に対する破壊安全余裕度のみならず,核種を含む高压気体のバリアとしての性能が地震直後に求められる。ライナアンカーの損傷制御と,残留ひび割れを有する RC 壁体の透気抵抗性が要求される⁷⁾。このとき,部材モデルで得られる情報量のみでは,地震作用後の構造性能照査は難しい。control volume の小さい材料レベルに立脚したモデルから出発する,動的非線形応答解析が求められる一つの背景がここにある。単純な構造形式を有する橋梁橋脚も,多方向入力下で残留変

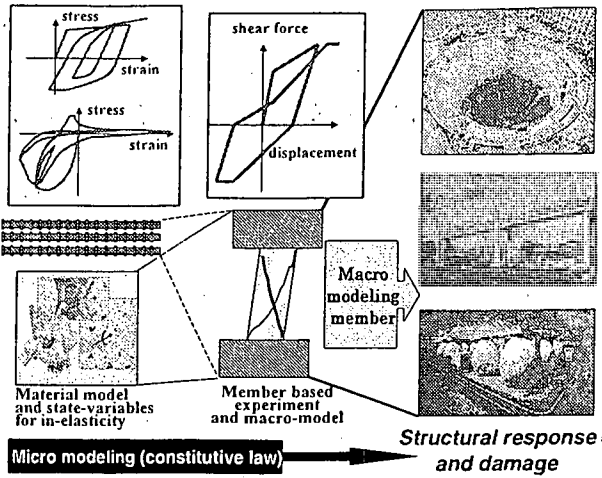


図-1 非線形解析の出発点と適用領域

形を考慮して耐震性能を照査するとなれば、マクロ部材モデルでは対応しきれない。軸力が大きく変動するような場合にもマクロモデルで部材の復元力特性を規定することは難解となり、寧ろ材料モデルの段階から非線形解析を組み上げた方が簡単とも言えよう。

以上の状況を鑑み、本文で概説する対象を『構造・部材を構成する材料モデルに立脚した(動的)非線形解析』に限定することとした。部材マクロモデルとその周辺に関する state-of-the-art は、参考文献^{9),10)}に詳しい。

非線形解析に立脚した耐震性能照査法に関する技術的課題は、大きく以下の二者に集約される。

- (1) 材料モデルを含む、非線形応答解析の精度向上。
- (2) 非線形応答解析結果に立脚した、地震後の使用性・復旧性を含む残存性能判定法の開発。

前者は後者の基盤である。本文は主として非線形応答解析の精度と適用範囲の拡大の視点から、現状をとり纏めるものである。後者は現在、知見の蓄積が遅れている項目である。いかに精度の高い非線形応答解析を実施し、地震後の材料損傷が精度良く定量化されたとしても、損傷を受けた構造物の復旧に要する時間、補修を省いた時の残存耐久性、損傷下での空間保持機能(止水、透気、音、撓み、快適性等)が評価できなければ、種々の要求性能に対応できない。本文では、後者に関する既往の関連研究を概説し、早急に整備すべき課題について私見を述べたい。

非線形応答解析は既設構造物の耐震性能判定にも応用可能である。新設対応の設計では、まだ実現していない材料特性と諸元が入力値であるのに対して、既設対応の診断では、荷重以外は総て確定している物理諸元が入力の対象である²⁾。不確定要因の扱い方に差はあるが、新設構造物の設計と既設構造物の維持管理を、有機的に実施できる枠組みの構築に向けた議論が土木学会コンクリート委員会で行なわれている。この点にも簡単に言及したい。

非線形応答解析は、耐震補強を施した後の既設構造物が有するに至った性能評価にも適用が可能である。補強によって付加される RC 部材の耐震性能は、現在は専ら実験に

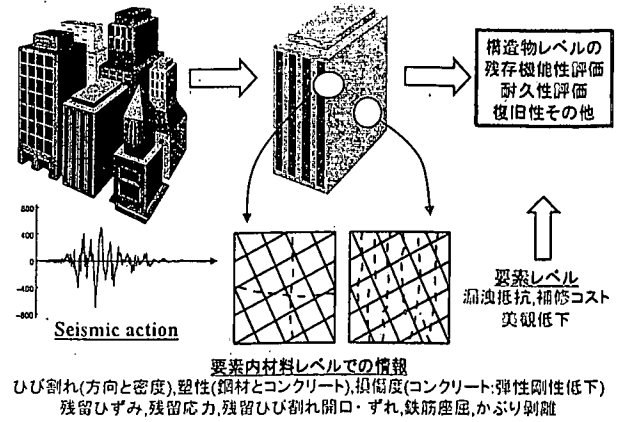


図-2 材料情報と性能判定

よって評価・確認されている。これは、早急に補強の効果判定する必要に迫られてきたこと以外に、鉄板や非金属繊維を既設構造物周辺に配置することにより得られる拘束効果を、現段階では十分に三次元解析の中で評価しきれない事にも因る。その観点から、今日における RC 構造の三次元非線形解析の現状についても言及したい。

2. RC 材料構成モデル

RC 非弾性構成則に関する研究は、1960 年代から今日まで質量ともに多岐にわたる²¹⁾。ただし、動的非線形応答解析に適用されたものは、限られている。本節では既往の研究の中で、動的非線形応答解析に適用された実績を有するものに視点を限定して、概説を試みる。

2.1 RC システムとしての耐荷機構のモデル化

梁・柱要素に基づくファイバーモデルでは、各セルごとに、コンクリートと鉄筋の一軸交番応力-ひずみ構成則が適用される^{11),12)}。鉄筋とコンクリートに展開する応力主軸は、部材軸に沿って固定されるので、比較的細長い部材形状であることが適用条件である。

二次元的広がりを持つ平面要素では、非直交二方向か^{13),14),15),45)}、あるいはそれ以上の方向¹⁶⁾にひび割れが分散して導入されることを考慮する点が、動的応答解析に適用する際のポイントとなる。何れもひび割れに平行および直交方向に流れる応力には、コンクリートの交番繰返し応力-ひずみ関係が適用されている。

二次元平面応力構成モデルでは、主応力軸と主ひずみ軸が、ひび割れ軸から偏差・回転することを考慮しなければならない。ひび割れの発生と鉄筋の存在は、RC 構造の強異方性の源である。ひび割れや鉄筋塑性に伴う剛性の急変は、往々にして二次元面内で主軸の回転をもたらす。応力軸を軸線に固定する柱・梁ファイバーモデルとの根本的な違いである。

既往の研究は、A)ひび割れ面に沿ったせん断伝達応力を、せん断伝達構成則から算定する現象忠実型のモデル(図-3)、B)ひび割れ面上のせん断伝達を無視し、主応力軸をひび割れ軸に固定する簡易モデル、C)主ひずみ軸と主応力軸が

常に一致すると仮定し、あたかもひび割れ軸が連続的に回転するように仮定するモデル^{17),18),19)}に大別できる。

モデル A),B)はひび割れの位置と方向を幾何形状に一致させて構成則に反映させる直接的な方法に対して、C)はひび割れ軸を現実の不連続面ではなく、せん断伝達の存在を間接的に含んだ力の軸として扱った間接法である。その意味で、マイクロプレーンモデルはこの範疇に入る²⁰⁾。

ひび割れ導入以後の応力抵抗機構に、ひび割れに沿って一次元的に流れるコンクリートの応力(ひび割れにより側方応力は無視できる程度に開放されているとして)と、配筋方向に流れる鉄筋応力の組み合わせでモデル化している点は、どれも共通である。RC 二次元動的非線形応答解析で、有限要素内に適用されている構成モデルの大半は、上記の構成を取っている。

せん断伝達を厳密に考慮する物理モデルは、ひび割れの幾何学的な配向を厳密に扱うので、損傷の表現が直接的であるが、定式化とプログラム化は、一般には複雑となる。現在は数値解析モデルの簡素さや演算の安定性などから、主軸の一致を仮定するモデル、あるいは応力軸の回転を拘束するモデルが動的解析に使用されるケースが多い。対象要素が等方配筋で、主にせん断力が交番し、ひび割れが直交する場を形成する際には、せん断伝達応力は、ひび割れ面形状に左右されず小さい。その場合、上記の簡略法で十分な精度を確保することができる。

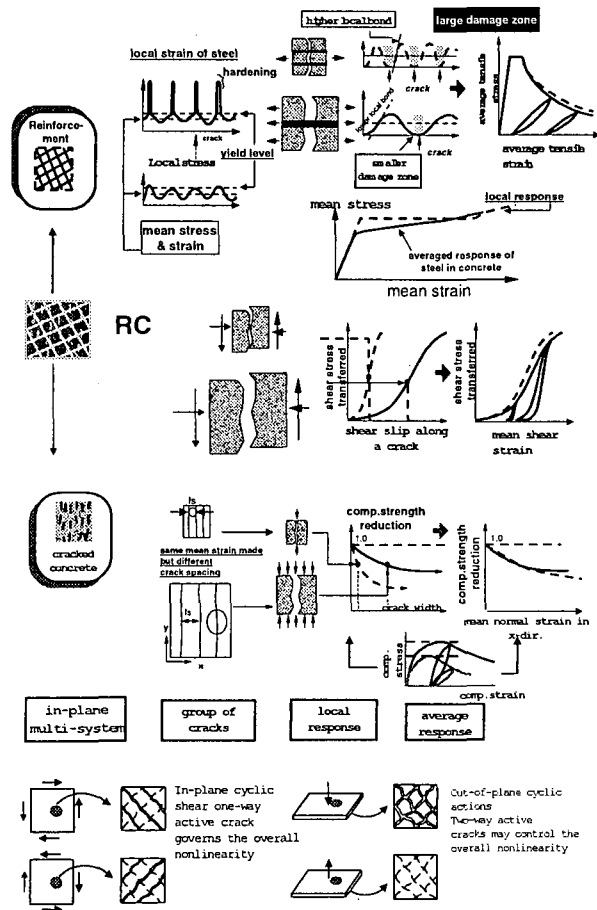


図-3 鉄筋コンクリート二次元要素の耐荷機構と変形

しかし、配筋量が方向によって大きく異なる場合や、ひび割れが三方向以上に導入される場合、あるいは高強度コンクリートのひび割れ面が平滑でせん断伝達機構がほぼ消失する材料を使用する場合などでは、上記簡便法はRC要素の強度を過大評価するので、簡易モデルを採用する際には適用性に注意が必要である^{22),23)}。

三次元 RC シェルは厚み方向に複数の層を想定し、それぞれの層に二次元平面応力構成則を適用することで構築される。幾何非線形性との連成も含めて、RC 非線形解析に適用された事例は多い(RC/PC タンク、ドーム、連層耐震壁など)。各層に適用される平面応力構成モデルの精度と適用範囲が、三次元シェルの性能を決める(図-4)。一次元梁・柱要素同様に自由度を縮退しているため、面外せん断破壊は、層に適用する二次元構成モデルから導くことはできない。自由度を縮退しない三次元構成モデルに立脚した非線形解析に因るしかない。ただし、面外方向のせん断変形の適合条件を新に付与して、簡易に面外せん断破壊を判定する準材料モデルの提案も出てきた^{26),46)}。

応力の縮退を仮定しない RC 三次元材料構成モデルについては、単調載荷に限定したモデル(即ち、ひび割れ面は一方向のみ)は過去に研究成果が報告されているが、交番繰り返しを前提とした、複数のひび割れ面を許容する三次元材料モデルの実績は現時点では稀である^{24),25),27)}。図-5に空間六方向にひび割れを許容する場合の要素構成の一例²⁴⁾を示す。

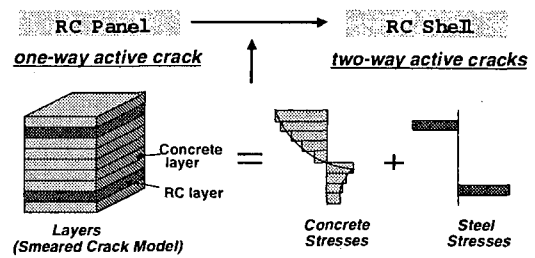


図-4 鉄筋コンクリート三次元シェル要素の構成モデル

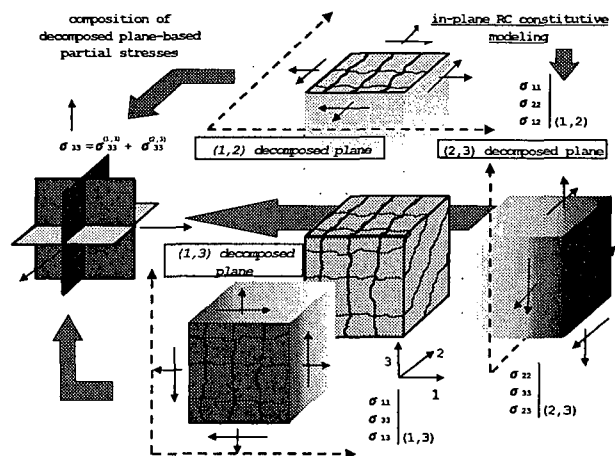


図-5 鉄筋コンクリート三次元固体要素の構成モデル

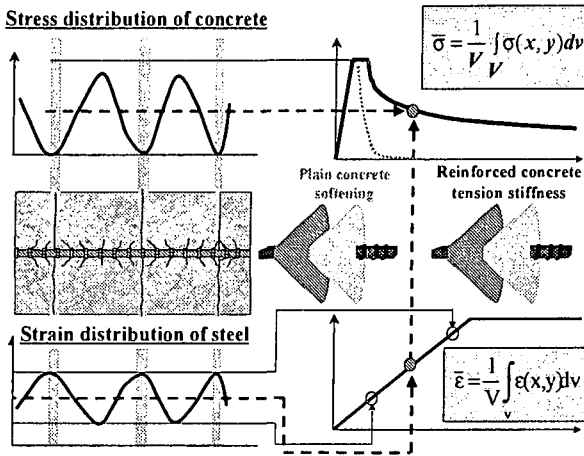


図-6 空間平均化された材料構成モデル

2.2 ひび割れ軸に平行および直交方向の空間平均化されたコンクリート構成モデル(交番繰り返し履歴対応)

ひび割れに平行および直交方向に一軸圧縮引張応力が伝達される際の、要素内の平均応力・ひずみ関係は、最も基本となる材料構成モデルである。要点は、有限要素内に展開する不均一な局所ひずみ・局所応力を、要素体積で空間平均化した構成則である点にある。

図-6 のような有限寸法の要素を考え、この中に複数のひび割れが導入されているとしよう。ひび割れ面上では、ひび割れが開いている限り直応力は殆ど伝達されないが、ひび割れから離れたコンクリートには、鉄筋とコンクリートとの付着作用により引張応力が発生している。ひずみも要素内各所で異なる。ひび割れの上では局所ひずみ自体、有限値を持たない。

ここで、対象有限領域内の空間平均化された応力-ひずみ関係を使用すると、有限要素の節点変位-力関係を連続体力学と準用する事で導くことができる。平均応力-平均ひずみで表現すれば、ひび割れ発生以後、コンクリートは鉄筋との相互作用のもとで引張応力を安定して伝達し続けるのである。これは Tension-stiffness と呼ばれ、ひび割れ以後の部材の変位変形を正確に解析する上で重要である。これは鉄筋とコンクリートとの付着機構を構造解析で扱う一方法でもある。大型構造物に見られるような低鉄筋比の構造物では、非弾性変位量の精度を左右する。

図-7 に動的非線形解析に使用される数値モデルの概略を示した。圧縮・引張交互に繰返しを受ける時の履歴モデル化は、ひび割れの開閉を伴う変形を扱う上で重要な役割を果たす。一軸圧縮引張構成モデルには、古くから多くの式と履歴特性が提案²⁸⁾されており、ここでは、参考文献に詳細を譲る^{13),21)}。

経路依存性を材料モデルの段階で考慮しているため、時間領域で運動方程式の直接積分を実行すれば、履歴減衰は自動的に解析に取り入れられる。大ひずみ領域での材料によるエネルギー消費が、構造応答減衰の主たる機構である。したがって、圧縮・引張両方の内部曲線は、構造物の最

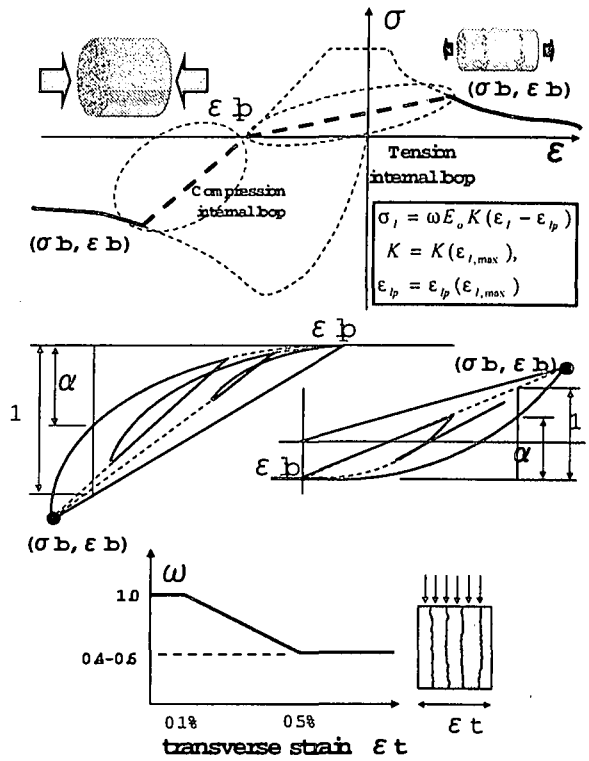


図-7 ひび割れに平行及び直交方向の伝達応力に関する構成モデルの概要

大応答のみならず、以後の振動エネルギーの逸散と減衰の解析結果にも深く関与する。履歴特性は、正確に表現されなければならないことは言うまでもない。

引張・圧縮の状態が転ずる領域での履歴特性も、残留変位・変形の計算精度に効く。図-7 に示す再接触点の位置はひび割れに直交する方向のみならず、ひび割れに沿うせん断ずれ変位によっても変動する。再接触点のモデル化は、耐震壁のような剛構造の場合、高周波成分を含む鉛直振動加速度の解析結果に敏感に影響を及ぼすことが報告されている²⁹⁾。

付着の存在によってひび割れの安定した分散が保証されている場合、RC 平均化構成則は要素内に導入されるひび割れ本数、あるいは要素寸法に殆ど依存しないことが経験的に知られており、理論的にもひび割れ密度非依存性の存在が証明されている²¹⁾。

対象領域に付着による、ひび割れを安定して分散させる機構が存在しない場合、有限要素内にひび割れは高々 1 箇所しか導入されない。この時、空間平均化した引張側の応力-ひずみ関係は RC 構成則とは異なり、空間平均を取る要素体積の大きさによって見かけ上変化する。ただし、単位面積当たりの破壊に要するエネルギーは要素寸法に依存せず、一定と規定される。ここでは RC 要素とは異なり、引張応力は急速に開放される。引張破壊の過程に関するモデル化については、破壊力学に関するいくつかの state-of-the-art に譲り³⁰⁾省略する。

RC 要素の Tension-stiffness モデルに代表される平均化構成則は、比較的大きな寸法の有限要素に適用すること

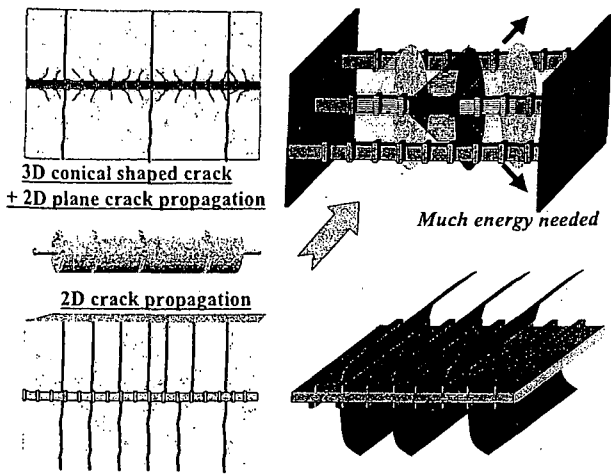


図-8 鉄筋周りの局所ひび割れ三次元分布と二次元解析

ができる。一方、要素寸法を十分に小さくし、ひび割れ間隔以下に設定すれば、要素内に含まれ得るひび割れも高々1本となる。鉄筋個々も有限要素で個別に分割して解析をすれば、コンクリート固体としての Tension-softening を考慮した解析をすれば良い。ただし、自由度を縮退しない三次元解析を行なうことが前提となる³⁴⁾。

これを二次元解析で行なうと、一般には鉄筋周りにひび割れが実際よりも多く、かつ遠方まで進展する結果が得られる^{31),32)}。実際は、鉄筋まわりのひび割れの多くは円錐状に進展しながら広がる為、ひび割れが鉄筋から離れるに従って単位長さの進展に要する破壊エネルギーは急速に大きくなり、進展は早期に収束する。ところが、二次元解析ではひび割れの進展長如何に関わらず、単位進展に要する破壊エネルギーは一定となるため、現実と異なるひび割れ密度を生む(図-8 参照)。

ただし、現実よりも多くのひび割れが解析で導入されても、同時に鉄筋とひび割れが交差する面での付着劣化³³⁾が十分に表せないことが多い。そのため、両者相殺の結果、比較的良好に鉄筋コンクリートの変位を得ることができる場合もある³¹⁾。ここで鉄筋の降伏がひび割れ位置で発生し始めると、弾性範囲では二つの機構が相殺されたとしても、降伏以後の変形を精度良く求めることは難しい³²⁾。二次元解析を前提にして降伏以後の変形を追跡するには、やはり次節の鉄筋平均化構成則を使用する必要がある。

2.3 空間平均化された鉄筋の一軸構成モデル

要素内に存在する鉄筋の局所ひずみ・局所応力分布も、付着の存在によって一様でない。これを空間平均化した構成則を動的な非線形解析に用いることは、コンクリートの場合と基本的に同じである。ただし、全域にわたって鉄筋が弾性状態にある場合は、不均一性の様態の如何に関わらず、平均化応力-ひずみ関係は、鉄筋単体の局所応力-ひずみ関係と厳密に一致、即ち平均化弾性係数は鋼材の材料弾性係数に一致する。

ひび割れ位置で鉄筋が局所降伏し始めると、平均応力-ひずみ関係は、鋼材の局所応力-ひずみ関係とは異なる

(図-9)。鉄筋が降伏した直後は、ひび割れ位置での鉄筋の局所ひずみは他領域のそれと比べて極めて大きい、降伏領域が同時に極めて狭い範囲に限定されるので、要素内の平均ひずみは降伏直前のそれと一致することが報告されている^{33),35)}。即ち、塑性棚は平均化構成則では理論的にも消散するのである。母材の持つひずみ硬化によって、鉄筋の局所降伏領域は荷重に従って漸増し、局所化は解消される方向に向かう。

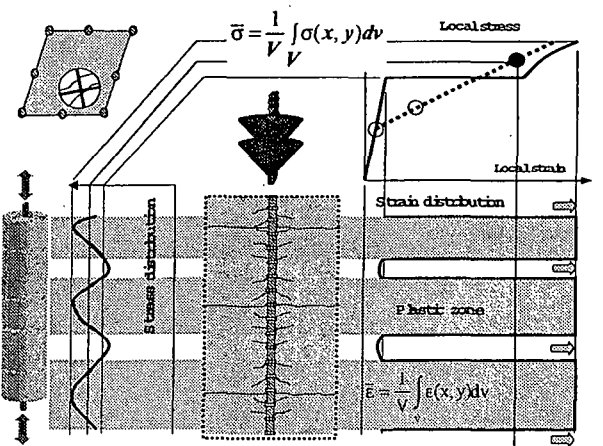
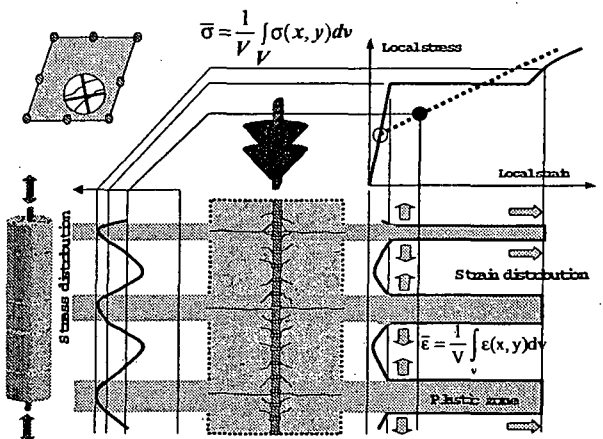
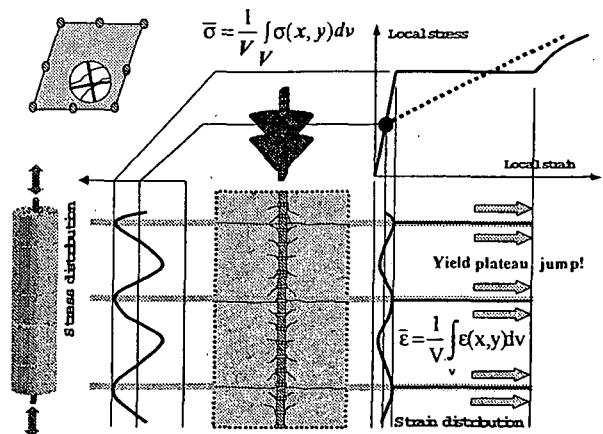


図-9 ひび割れ位置での鉄筋塑性ひずみの局所化と平均化構成モデル

鉄筋降伏の局所化と、要素の平均化された非弾性挙動を混同しないで解析することは、鉄筋降伏直後の変形を解析する上で重要であり、低鉄筋比構造物ではこのモデル化が支配的となる場合もある。鉄筋降伏以後にせん断破壊が発生して変形性能が損なわれるような部材では、局所降伏の効果を正確に扱うことが動的応答解析では肝要である。

材料レベルに立脚する非線形解析で塑性局所化を厳密に扱い、平均化構成則のもとで平均硬化係数を算定した解析を行なっている既往の動的応答解析例は少ない^{13),36)}。多くの場合、数値解析上の安定性を考慮して、鉄筋の応力-ひずみ関係を二直線あるいは三直線で表し、近似したモデルとして塑性棚を構成則から削除しているものが大半である。これは中程度以上の鉄筋比を有する部材では、特に精度低下に繋がらないが、低鉄筋比構造で鉄筋が降伏した後に、部材変形が小さい段階で耐荷力が上昇するケースでは、局所降伏の考慮が不可欠となる。

2.4 せん断伝達構成モデル

ひび割れを有する要素の、ひび割れに沿った方向のせん断剛性は、せん断ずれ方向の変形のみならず、ひび割れ直交方向のひずみの関数となることが知られている。既往の非線形解析では、ひび割れ直交方向のひずみに従って、せん断剛性係数を低減させる(shear retention factor)簡易法が採用されている。ひび割れに沿ったせん断成分の経路依存性を厳密に考慮する方法は、鉄筋配置量に強い異方性がある場合や、多入力地震動のように外荷重方向が大きく変化する場合に、特に有効である。変動するひび割れ開口ひずみと繰り返しせん断が作用する状態で、せん断伝達の履歴特性を表現できるモデルは少ない。接触面密度関数でひび割れ粗面を統計的に扱った伝達モデルは、1991年のベンチマーク比較検討で高い評価を受け、動的応答解析でも実績がある数少ないモデルの一つである。個々のモデル化については、別紙に詳細を譲る^{13),21)}。

3. RC 材料非線形動的応答解析と検証

収束演算中に仮定される変位・変形から経路に依存する構成モデルを用いて応力と等価節点力を算出し、直接積分法によって逐次、運動方程式を時間領域で積分する方法が採用される。経路に依存する復元力特性が材料レベルから考慮されているので、粘性減衰定数などで履歴減衰を間接的に等価置換して考慮する必要はない。

一方、速度に依存する粘性減衰の存在をどのように仮定するかは、動的非線形応答解析に固有の問題である。コンクリートは時間依存性を有する材料であるため、構成則には時間効果が本来、含まれていなければならないが、動的問題に使用されるコンクリートのモデルでは、陽には時間効果が考慮されていない。ひずみ速度の効果は決してゼロではないが、無視しても実質的な誤差となる程ではない、というのが今日の認識である^{37),38)}。当然のことながら、構成モデルの段階で時間を支配パラメータに含んだモデルを使用すれば、粘性減衰特性も陽な形で解析に取り込まれ、粘

性減衰定数を設定する必要はなくなる。設計照査の観点からは、履歴減衰は経路依存型の構成モデルを用いることで考慮し、粘性減衰をゼロとして安全側の評価を得ることで、実務対応に供すれば良いものと思われる。

ひび割れ以後、比較的低い応力範囲での動的応答変位には、履歴減衰のみの解析は準弾性的応答を過大評価する傾向にあることは否めない。この領域ではおよそ2%程度の粘性減衰を便宜的に設定すると良いようである。鉄筋が降伏した後を対象とする非弾性応答領域では、粘性減衰成分は履歴減衰に比較して無視できる程度である。最大応答近辺の解析には、あえて粘性減衰定数を等価に決めて解析しなくても、履歴依存型の構成モデルによる解析で、十分妥当な結果を得ることが可能である³⁹⁾。

3.1 壁式部材・構造

主として面内力を受ける壁構造や、面外作用を受けるシェル(但し面外せん断が発生しない条件下では)、材料構成モデルに立脚した動的非線形応答解析が良好な予測を与える解析対象の代表格と言える。その背景には、

- a) 応力とひずみが比較的緩やかに空間内を分布し、変形の局所化が顕著でない
- b) 破壊に至る終局状態(あるいは最大耐荷力点)でも、材料に発生する平均ひずみは数千マイクロ程度に留まる
- c) かぶりコンクリートの剥離や鉄筋の座屈が終局に至るまで発生しにくいので、仮定した材料構成モデルがほぼ全域で適用可能である

などの好条件が挙げられる。ひずみの分布も直線的であるので、高次内挿関数を用いた有限要素が効力を発揮し易いし、少数の要素で高精度を出すことができる。

壁式構造の復元力特性を実験によって求めるには、通常、大がかりな実験となる。実験には困難が伴うが、解析は仮定と現実が接近しており精度が期待できることから、数値解析の手法の開発を求める環境が揃っていたともいえる。そのため、基礎研究も1980年当初から内外で展開し、知見の蓄積も厚い^{13),21)}というのが、著者らの現状認識である。検証に資する実験結果がトロント大学のCollinsらによって系統的に提供されたことも、この分野の進展に大きな貢献を果たしている¹³⁾。

図-10は1998年9月に公開された実験結果と、5連層耐震壁の振動台破壊実験に関するベンチマーク応募解析^{40),41)}の一部である。図-11に示す実験結果は解析応募者には事前公開されず、実験供試体の諸元、材料特性、入力加速度のみが公示されたblindベンチマークである。材料定数などを操作して解析結果を実験結果に合わせることはできない。解析結果は、応答加速度・変位のみならず、最終破壊位置やひび割れ分布も、かなり高い精度で予測が可能である事が分かる。損傷位置は局所的であり、補修に掛かる労力を推定するのに必要な情報はほぼ揃っているとみてよい。

1995年にもOECD-NEAと原子力発電技術機構の共催による一層耐震壁の動的破壊実験のopen解析予測⁴²⁾が

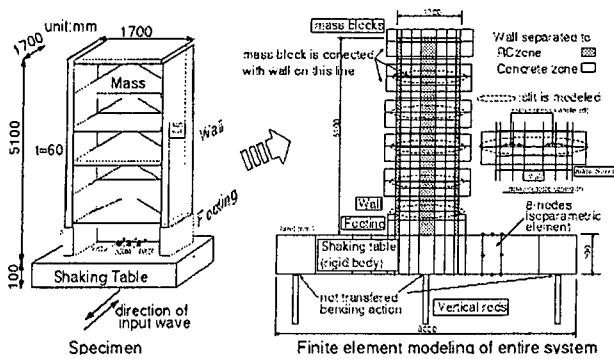
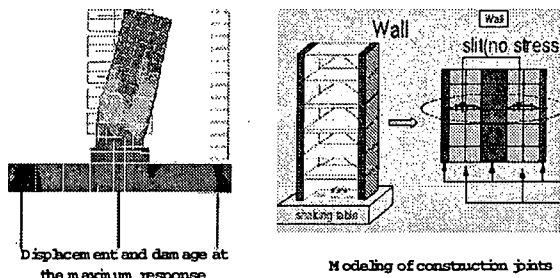


図-10 CAMUS-France ベンチマーク実験概要⁴⁰⁾



Analysis and Experiment : Case-3: reduced tensile strength & slit model

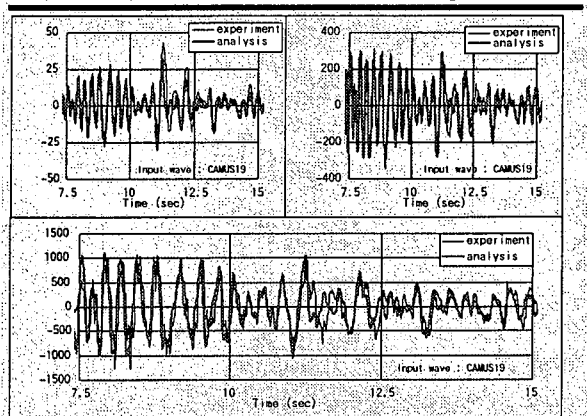


図-11 解析結果と後に公開された実験結果との比較⁴⁰⁾
(WCOMD-SJ Version 7¹³⁾)

行なわれた。古くは1982年にRC板要素レベルでのBlind解析予測競技があり、Cervenka および Okamura-Maekawa が不完全ながらも好成績を納めた。2000年当初には、CAMUS プロジェクトによる2回目のベンチマーク解析が予定されている。また、PC 格納容器の1/30 模型による的破壊実験のベンチマーク解析も、近々予定されている⁴³⁾。

これらのblind ベンチマーク解析から得るものは多い。異なる解析法やソフトによる結果を横並びで比較でき、解析技術の不十分な箇所を見いだすことができるからである。参加者が感度解析を持参して議論に加わるケースも多く、材料モデルが全体の結果に及ぼす効果なども、労せずして情報を共有することができる。主たる抵抗機構が面内せん断による壁構造については、耐震性能 1,2 までは確実に判定できるレベルに来ているとみてよい。

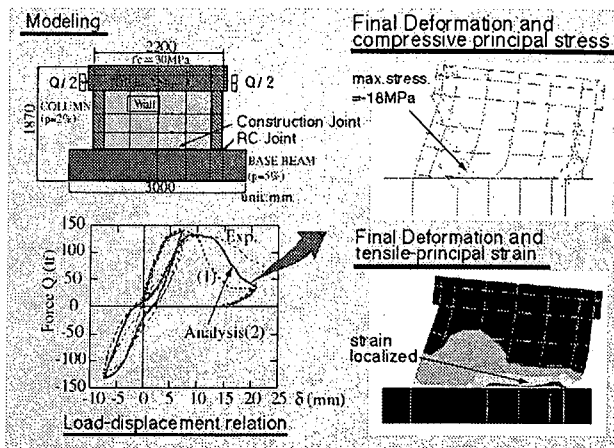


図-12 耐震壁の軟化領域の変形解析

最大耐力以後の軟化挙動が解析で追跡できれば、耐震性能 3(崩壊回避)の直接照査に適用できる(図-12 参照)。軟化領域の解析に踏み込むには、圧縮軟化と局所化を厳密に取り扱うことが求められる⁴⁴⁾。耐震壁の挙動を材料モデルの検証に活用した例が、別紙¹³⁾に示されている。

シェル要素に基づく壁およびシェル構造の三次元解析の精度も近年、検証が進んできており^{46),47),48)}、地下タンクの動的非線形応答解析など、地盤との相互作用を含めた実構造物の性能設計への応用が、土木学会等で活発に議論されているところである。

3.2 柱・はり構造

耐震壁等の面的広がりをもつ RC 部材は『実験は大きいが、解析は比較的容易』であったのに対して、柱梁部材は反対に、『実験による性能評価は比較的容易だが、二次元あるいは三次元解析で詳細に非線形挙動を追うのは、“曲げ卓越型”では容易でない』対象といえる。その背景には、a)変形が限定された領域に集中する、b)局所的なひずみ値が数万 μ に到達することがある、c)かぶりコンクリートの剥離、鉄筋の座屈、鉄筋の破断が全挙動に少なからず影響を及ぼす、d)圧縮軟化が関与することが挙げられる。曲げ降伏以前にせん断破壊を起こす脆性破壊に対しては上記の b),c),d)は関与してこないため、曲げ卓越型の部材の靱性を解析的にシミュレーションすることよりも易しい一面もある。

(1)せん断破先行型

鉄筋降伏前のせん断破壊解析では、ひび割れの不安定成長を解析で追うことがポイントである。ひび割れ開口方向の引張軟化曲線を取り入れた解析により、せん断破壊耐力はせん断耐力設計式と同程度の精度で予測できるようになりつつある^{49),69)}。

せん断破壊耐力には寸法効果が現れることが知られている(図-13)。構造寸法の増加に伴う正規化せん断強度が低下することが正しく計算できなければ、構造耐震性能の寸法効果も考慮できない。せん断補強鉄筋が少ない場合や軸方向配力鉄筋が配置されていない場合には、引張軟化特性を考慮した解析が一定の成果をおさめつつある⁵⁰⁾。

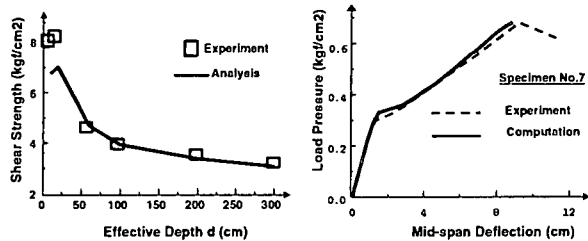
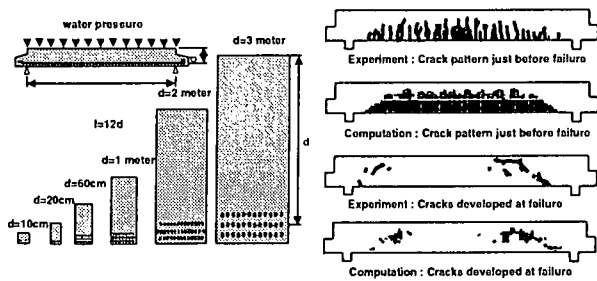


図-13a 鉄筋コンクリートのせん断強度に与える寸法効果

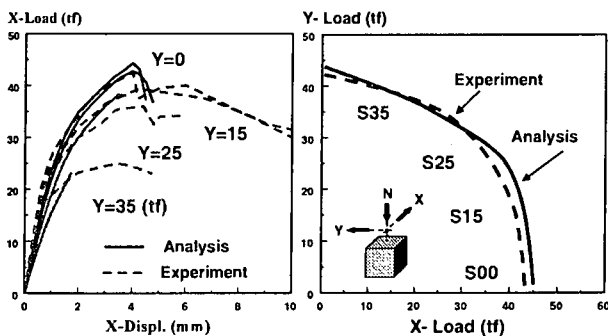
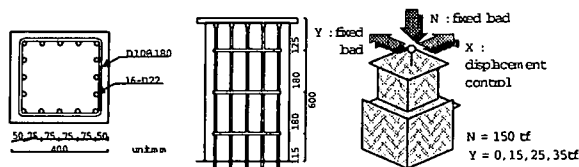


図-13b 二方向同時せん断力を受ける短柱のせん断破壊

部材軸方向の側方鉄筋の存在や、荷重履歴がせん断耐力に与える影響を正しく評価できているかを系統的な実験によって検証することが課題である。鉄筋降伏以前のせん断破壊とそれに伴う耐震性能の低下に関して、非線形動的解析は耐震性能の評価に適用できる段階にきている。

多方向せん断力を受ける柱の三次元せん断破壊は、応力場の縮退を許さない三次元破壊問題である。ここでも、ひび割れの発生と破壊に要するエネルギーを二次元解析同様に考慮した解析を行えば、せん断破壊以後の軟化までを精度良く追跡できるレベルには到らないものの、最大耐力値を求め得る段階にまで、差しかかっているものと思われる^{24),35)}(図-13b)。

(2)降伏以後のせん断破壊

斜めせん断ひび割れは、部材軸方向の軸圧縮耐荷機構を著しく損なうので、斜めひび割れ発生の有無は RC 柱の耐震性能評価の鍵となることは言を待たない。主鉄筋がせ

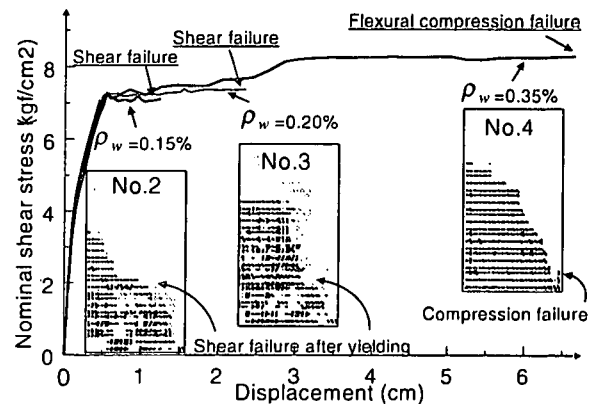
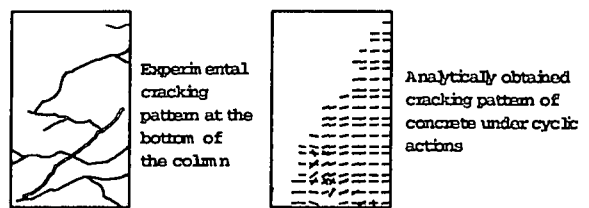
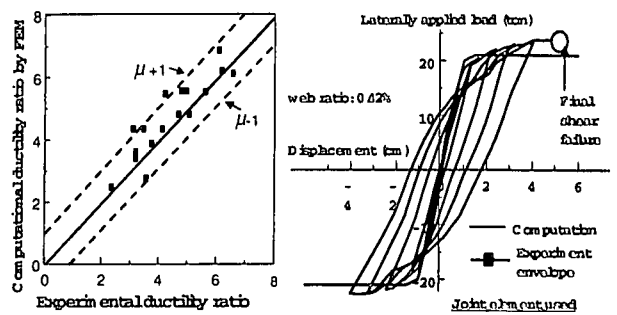


図-14 鉄筋降伏以後のせん断破壊解析と変形能

せん断破壊以前に降伏し、それ以後、入力せん断力が増加しない状況になっても、変形の進展の後に斜めせん断ひび割れが新たに発生、或いは既に導入されていた斜めひび割れが不安定に成長して耐震性能を損なう場合がある⁵²⁾。これは曲げ耐力とせん断耐力(耐力算定式による評価)が近接している場合に起こり、鉄筋降伏以後のせん断破壊が部材の変形能を支配するのである。ここで耐震性能を評価するには、鉄筋降伏以後のせん断破壊と靱性も正しく解析できることが肝要である。現実には、せん断耐力が曲げ耐力に接近している既設構造物がなからず実在する⁵³⁾。

数値解析手法に特別な配慮は必要なく、降伏以前のせん断破壊が追跡できる数値解析法を、そのまま適用することが原則である。ただし、鉄筋降伏以後の構成モデルの精度と適用範囲が高いことが要求される。主鉄筋降伏後に発生、あるいは進展を開始する斜めひび割れは、普通、曲げひび割れに繋がっている。したがって、主鉄筋の降伏に伴う曲げ変形の増加は、斜めひび割れの開口にも影響を及ぼす。このため、ひび割れ位置での鉄筋降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係(平均硬化係数)は、解析精度に少なからず影響を有するのである。当該問題は専ら実験的アプローチに依存しており、非線形解析による既往の研究は極めて限定されている(図-14参照)⁵¹⁾。

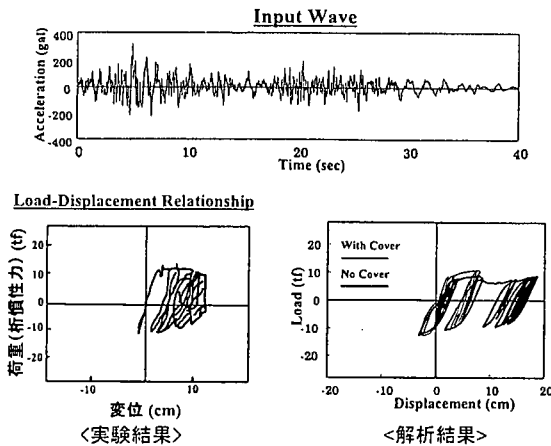
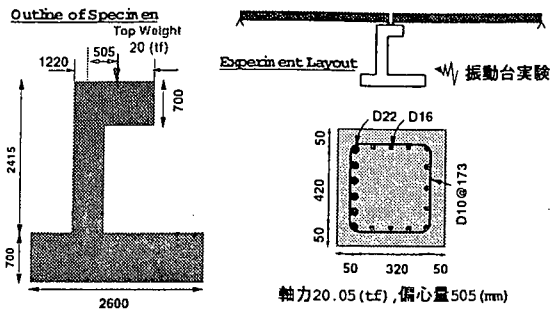


図-15 偏心常時荷重を受けるRC柱の非弾性変位応答

(3) 曲げモード型の部材変形能

せん断耐力が曲げ耐力の1.3倍以上であれば、鉄筋が降伏して非弾性変形が進んでも、もはや斜めひび割れの発生は認められない⁵³⁾。この領域に至れば、およそ耐震性能3(崩壊による人命・財産の消失を回避)は満たされることが、被災建造物の調査からも明らかにされてきた⁵³⁾。したがって、曲げモードで非弾性変形が進展して最終的に靱性を失う状態を数値解析で把えることができれば、地震作用以後の残存機能評価に活用できる。曲げモード卓越領域では、面外方向の破壊の自由度を縮退したはり・柱要素やシェル要素も有効な解析手段である。

しかし前出の通り、かぶりコンクリートの剥離⁵⁴⁾、鉄筋の座屈と後座屈挙動⁵⁵⁾、鉄筋の低サイクル疲労破断がここで大きな問題となる。これらは局所的な非弾性挙動であり、連続体を基本とする有限要素解析の不得手とする対象でもある。大きな残留変形を導入することを意図した、常時偏心荷重を受ける柱の動的応答実験⁵⁶⁾の数値応答解析(梁・柱要素)⁵⁷⁾では、鉄筋座屈とかぶりコンクリートの剥離を無視すると、残留変位を過少評価する(図-15)。

図-16は箱型鉄筋コンクリート橋脚縮小模型にねじりモーメントと交番曲げせん断を作用された実験と、三次元RCシェル要素を用いた解析結果を示したものである。最大耐力までは良好に挙動を追跡できるが、かぶりコンクリートの剥離と鉄筋の座屈が顕著になると、解析と実験は乖離し始める。ねじりモーメントは、最外縁に位置するかぶりコンクリート表面部に発生する圧縮応力流れに強く影

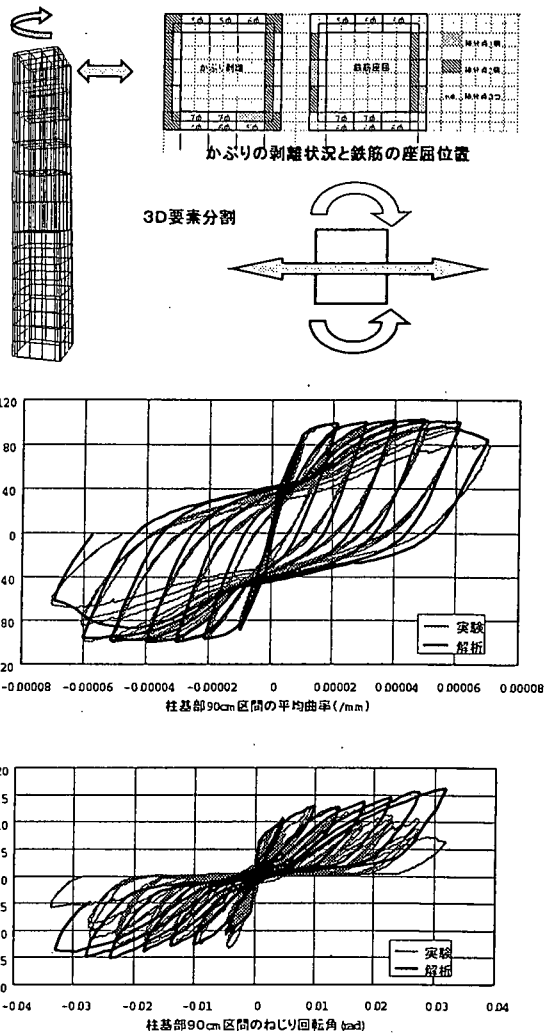


図-16 ねじりと交番曲げせん断を受ける中空箱型橋脚の非弾性応答

響を受けるので、かぶりの剥離の影響は更に拡大される。

以上より、かぶりコンクリートの剥離条件と主鉄筋の座屈判定、座屈領域と後座屈挙動のモデル化が、靱性に富む曲げ部材の変形性能を評価する上で不可欠であることが分かる。建築物の柱では比較的小断面で、鉄筋量が多いことから、かぶりコンクリートの剥離自体は挙動に大きな影響を与えるものではなかった⁵⁴⁾。しかし、土木構造物を対象とした縮小室内実験では無視できず、鉄筋座屈判定規準は、最大耐力以後の解析精度に有為な影響を与えることは上述の通りである。RC柱内に配置された主鉄筋の座屈には、横補強鉄筋の間隔、鉄筋径とオイラー座屈理論値を元にモデルが提案されている⁵⁹⁾。

かぶりコンクリートの剥離には、かぶりコンクリートの破壊エネルギー、部材の曲率、作用曲げ圧縮力を考慮した判定規準も検討されている⁵⁸⁾。この判定規準をRC積層要素の各コンクリート層に適用して、各層の剥離の有無を判定するとともに、剥離規準を満足した場合は、その層を消失させる解析を行なったものが図-16である。解析精度が改善されることが分かる。今後、任意の形状を有するシェ

ルあるいは棒部材要素に適用できるような一般化が、曲げ主体の非線形解析の課題である。縮小模型実験から得られた実験的知見を、実物スケールの構造にまで一般化する際にも、不可欠な検討課題である。

4. 新設および既設構造物の性能照査法への展開

4.1 動的挙動予測

任意の三次元的形状のコンクリート構造物に対して、安定な硬化領域から耐力以後の軟化域に至るまで、動的荷重作用の下での振る舞いを時間領域で精度良く追跡できる技術が確立されれば、それは最も一般化された動的応答評価法となる。耐震性能評価法の確立に向けた研究開発の1つの方向であることは言うまでもない。

しかし前章までに概括した通り、対象により疎密こそあれ、現状は不十分である(常に完全とはなり得ない)。使用できる解析技術の能力と適用範囲、信頼度を考慮して適切な安全余裕を持たせた照査を行なうのが、長年にわたって培われた構造工学の知恵である。現行コンクリート標準示方書設計編によれば、4つの不確定要因(荷重予測・達成材料特性値・構造部材形状精度・解析技術信頼度)を個別に評価して、社会基盤としての構造物の需要度を加味した上で、それぞれの技術項目を自在に組み合わせることができるシステムとなっている。

この枠組みを前提とし、近未来の解析技術を予想すれば、表-1に挙げる解析手法の組み合わせが、向こう10年の適用に堪える性能照査法と思われる⁶³⁾。面外せん断については、既往の知見から精度の検証されたせん断耐力算定式が使用できる。これを用いれば、三次元解析の自由度が低減され、高次不静定の構造全体を解析対象とすることができる。これにより構造システム全体の耐震性能を明確に意識した設計が可能となり、耐震設計の自由度が同時に高まる。以下に2つの適用事例を挙げてみた。

これまで多方向入力の効果を一軸独立にチェックすることで間接的に安全性を確保してきたことを、直接的に行なうことが可能となる。図-17は常時偏心軸力を受けるRC柱に、偏心モーメントと直交する方向に水平入力を受

ける場合の応答を示している⁶⁴⁾。

主たる交番荷重が作用する方向には、安定した復元力特性が見取れる。第1の特徴は、偏心を受けない柱の水平復元力特性に見られるピンチ効果⁶⁵⁾が、相当に抑制されている点である。これは常時偏心作用の存在により、柱基部断面の縁は常にどこかで接触しており、曲げ圧縮力がコンクリートを通じて伝達されているため、ひび割れが全断面に開口し、鉄筋のみが曲げ剛性を負担する状態が殆ど起こらないためである。

第2の特徴は、主たる交番荷重が作用している方向ではなく、それと直交する方向に不可逆な残留変形が急速に進展することである。この残留変形は主たる交番水平せん断荷重が掛かる方向の最大応答変位すら遙かに超える量である。これは常時偏心モーメントにおいて曲げ引張側の鉄筋すべてが、直交する主たる交番荷重によって引張塑性履歴を受けるためである。

上記2点は、『三次元的作用を受ける構造の非弾性挙動は、直交二軸独立ではあり得ず、相互に影響を及ぼす』という至極、当然の事実が、設計指標に映し出されたものである。図-17に、表1による三次元非線形解析⁷¹⁾による結果を同時に図示した。三次元効果の2つの特徴が正確に捉えられていることが分かる。ここでは、かぶりの剥離と鉄筋の座屈は考慮されていないので、残留変位は小さめに解析される。この解析法を設計照査に使用する場合には、残留変位に対して大きめの構造解析係数 γ_a (およそ1.3)を用いるとよい。

表-1 耐震性能照査用解析法の標準

照査対象	個々の構成部材と構造全体(三次元)挙動必要に応じて地盤や流体との連成を考慮
入力	水平二方向の設計地震作用 必要に応じて鉛直成分を含む
解析法	時刻歴動的な非線形応答解析 履歴減衰と復元力特性は、材料モデルから構築
部材のモデル化	柱・はり・杭=Fiberモデルに(三次元棒要素) 壁・スラブ=積層シェル要素 地盤・地下水=三次元固体要素
有限要素機能の補完	逐次算定される面外せん断力とせん断耐力マクロ(経験)式から、せん断破壊を別途判定 必要に応じて、せん断耐力値と損傷度を静的三次元非線形解析から別途算定

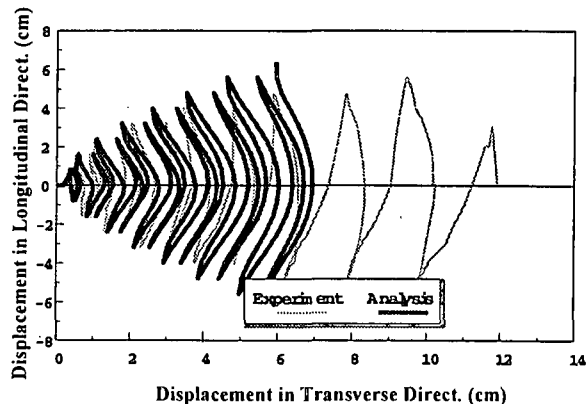
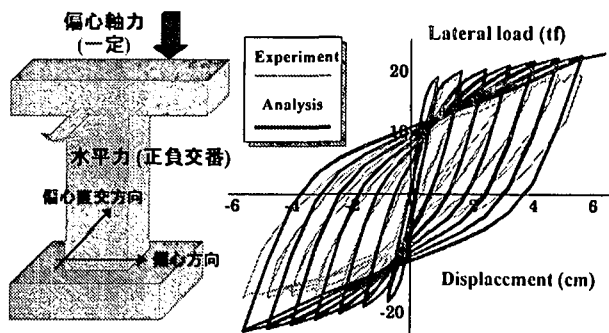


図-17 偏心を受けるRC柱の三次元非弾性変位

これまでの簡易照査では、橋軸方向ならびに橋軸直交方向それぞれ独立に耐震性能をチェックし、両者の交差効果は陽には考慮されていない。この非線形な交差効果を従来型の簡易照査で反映させるには、何らかの等価換算が必要となる。これを行なうよりも、直接照査の方が今日においては容易であると考えられるのである。

上記のケースを更に一般化させて考えると、偏心を受けていない RC 柱でも、多方向入力を受けると、単方向入力荷重よりも大きな残留変位が発生することは容易に想像される⁵⁷⁾。これも二次元あるいは一次元に等価に換算して簡易照査をするとなれば、かなり難しいことになる。

図-18 は鉄道高架橋を想定した立体 RC 骨組み構造である。柱の高さと断面は一様でないため、橋軸直交方向にのみ地震作用を加えても、橋軸方向の変位やねじり運動が励起される。これを橋軸方向と橋軸直交方向に分離して性能照査をするとなれば、まず上部構造の質量をそれぞれの柱にどのように割りつけたらよいか分からない。しかもねじりが作用する効果を間接的にでも考慮しなければならない。この場合も等価置換で苦勞するよりも、三次元的広がりをもつ構造全体と、多方向地震入力を直接扱う方が、今日では寧ろ簡易である。

各柱に作用する二方向せん断力に対しては、せん断耐力の相互作用図²⁵⁾を用いてせん断破壊の判定^{12),63)}を行なう(図-18)。ここで、もし完全三次元非線形動的破壊解析を実施するならば、せん断耐力の相互作用図は不要である²⁵⁾。現時点では、解析精度の信頼性と計算の難度が高いことから現実的ではないが、将来に望む姿である。

4.2 構造応答と構成材料の損傷に基づく残存機能評価

想定した地震作用の下で構造物の応答が判明したら、次はその情報を用いて耐震性能の判定を行なう。一般に斜めひび割れを伴うせん断破壊が軸力を受ける部材に生じた場合は、崩壊に対する安全性が著しく損なわれることが経験的に知られている。この場合は耐震性能 3(崩壊を免れる)は満たされないと判定している。ただし、主たる軸力を担わないはり部材にせん断破壊が生じる場合は、これが構造物の崩壊にいつも繋がる訳ではない。せん断破壊以後の構造挙動を追跡できれば、より合理的な照査が可能である。

耐震性能 2(地震後の残存機能を要求)の照査では、動的応答解析結果から、崩壊に至らないことのみならず、地震作用以後の残存機能の評価と復旧の難易を判定することになる。また、地震作用中の応答結果を基に、地震中の使用性の判定を行なう必要も場合により出てくる。現在、残存機能の評価法は、一般論として言えば、不十分である。

橋梁橋脚の残留変位によるチェックは、撤去の可否判定のために行なわれる。しかし、現時点では補修補強に要する時間やコスト、施工難易を直接評価してはいない。

最大応答の塑性率は、過去の豊富な経験から、およそ橋脚基部の損傷度を表す指標と考えてよい。補修補強の可否、或いは補修補強に掛かる労力をおおよそ判定することが

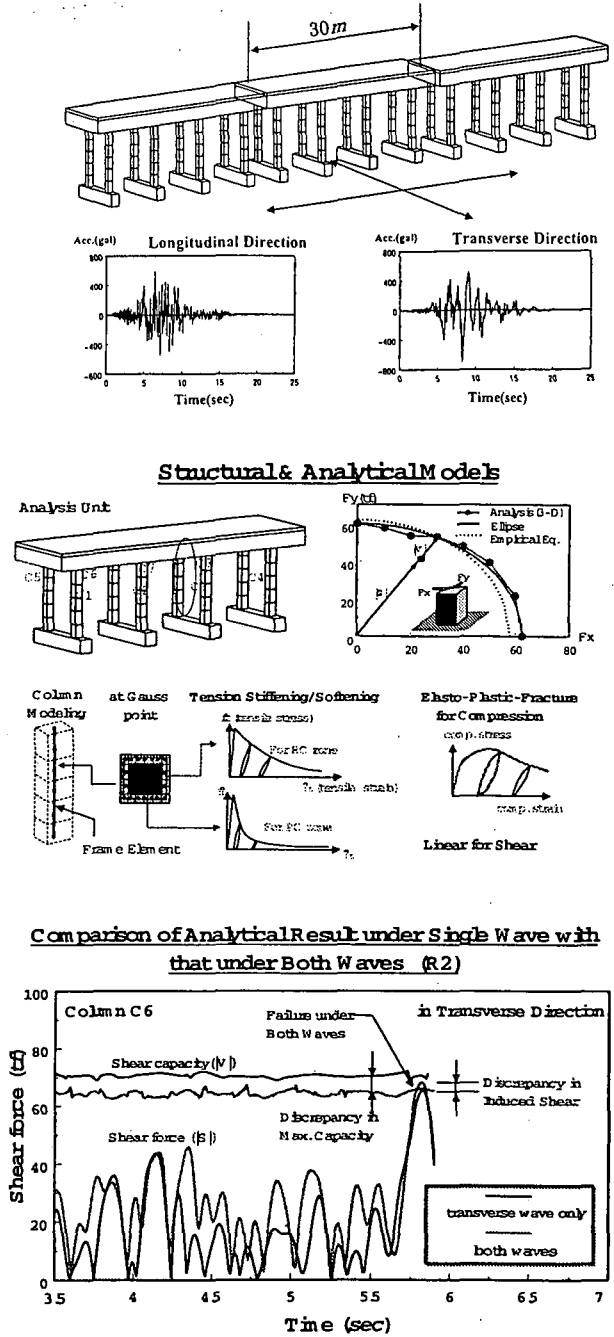


図-18 非対称性を有する立体 RC 橋脚の応答解析と照査

できる。しかし、これは単柱で機能する指標であるが、壁部材には適用することができない。壁部材では塑性開始以後も耐荷力は上昇を続け、塑性開始時の変位の 2~3 倍も変形すれば、崩壊に至る場合もあるが、単柱構造の塑性率 2~3 は、一般に軽度の損傷にすぎない。

原子力格納容器の耐震設計では、残存機能の要求事項として、核種の大気中への逸散防止がある。そのため、壁体に導入される残留ひび割れから漏洩する汚染ガスの透過抵抗性⁶⁾を評価して、残存性能が評価される。地下構造物では、地震後に地下水などの侵入に対する空間保持機能が要求される。これに対しては、ひび割れ直交方向の非弾性ひずみ(ひび割れ開口に対応)とひび割れ密度から、残存性能を定量化しようとする試みもある⁶⁵⁾。

これまで得ることの難しかった構造物の損傷情報を提供するための、動的非線形応答解析の開発に多くの努力が注がれてきた。今後は、その情報から復旧難易度や残存使用性を構造種別毎に算定するための研究開発が、早急に求められている。

5. コンクリート標準示方書の性能設計への移行

土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編⁶⁾は 1996 年 7 月に耐震性能照査を基本とする性能設計の大枠を取り入れ、近未来の示方書性能規定化と国際標準との整合への足掛かりとした。その後、耐震性能のみならず安全性能、使用性、美観景観、耐久性能、施工性も含めた総合的な性能設計の枠組みに関する検討に入り⁶⁰⁾、1998 年 7 月に、高流動コンクリート施工指針を性能規定に準拠した初めての指針として発刊し、1999 年には、コンクリート標準示方書施工編を性能規定化(特に施工性と耐久性能)すべく、検討を重ねている。コンクリート標準示方書設計編は既に限界状態設計のフレームを採用しているので、構造安全性能の要求レベルに幅を持たせ、それに対応する限界状態の具体的な設定方法を与える等の一般化を図る予定で、改定作業が検討されている。これら中期展望に基づく示方書改訂の検討資料は、土木学会ホームページを通じて公開され、会員からの批判と助言を広く求めている。

一連の議論の中で、耐震(性能)設計は今日において最も具体化された対象として、耐久性や施工性の議論の場ではしばしば参照、取り上げられている。耐久性能や施工性の照査・検査項目と具体的な技術開発の方向を考える際の身近な実例たる存在でもあった。

耐久性や施工性に関する性能設計の枠組みが、耐震性能の周辺で徐々に具体化されつつある今日、新しい流れが形成されてきている。統合化である。耐震性能は構造諸元や使用材料の機械的性質のみに依存する訳ではなく、環境条件とそれに伴う供用期間中の材料の変質(例えば鉄筋腐食)、施工段階での管理(例えば圧接工事の管理水準)とも無関係ではない^{66),67)}。一方、材料の長期にわたる品質も、地震作用のもとで残留する損傷度や補修補強の実際にも影響を受ける。この観点で現在の設計が定量的に進められている訳ではない。

性能設計の枠組みが耐震のみならず、耐久性や施工性まで広がることは自然の方向とも思われる。これらの統合が合理的に整備されれば、例えば震災によって被災した構造物と建設施工管理水準の因果関係に関する調査結果などを、次の構造物の設計に反映させることが容易となろう。性能評価法は対象として新設・既設の別を問わない共通の技術である。したがって、新設構造物の設計・計画と、建設以後の検査と維持管理を有機的に運用することも視野に置くことができる⁶⁸⁾。

6. まとめと課題

第 5 章までを鑑みれば、耐震性能照査法を与える非線形

応答解析技術もまだ十分ではなく、今後、すそ野を広げるべき項目も多い。以下に短期・中期的観点から、今後の研究課題について私見を述べて、本文の結論としたい。

6.1 補修・補強工法の非線形解析による評価

既設構造物の耐震性能の評価は、新設構造物のそれと基本的に同じ方法で判定可能であるが(入力情報は異なる)、耐震補強した後に獲得される性能については、これまで実験による検証が主体であった。今後、任意の補強材料・補強方法による既設構造物の耐震性能の向上を定量的に算定する技術が求められよう²⁵⁾。この場合、応力の流れを制限しない一般的な RC 材料構成則に基づく三次元非線形解析がその役割を担うものと思われる。耐震補強には、コンクリートに対する三次元拘束に補強効果を求めるものも少なくないからである。また、鋼板や連続繊維を補強材として使用するため、適用領域を RC に限定することは意味がない。この方向で日本コンクリート工学協会に、当該問題に対する研究委員会が活動を開始した。

図-19 はせん断耐力と曲げ耐力が接近している実構造物を想定した柱に、鋼板を巻き付けた場合の、構造応答を 3 次元非線形有限要素解析で評価したものである⁷²⁾。破壊モードがせん断から曲げに移行し、耐力の上昇と靱性の向上が見られる。まだ静的解析の段階であるが、将来的には補強された構造物の動的挙動も、それほど遠くない将来に可能となるものと期待される。

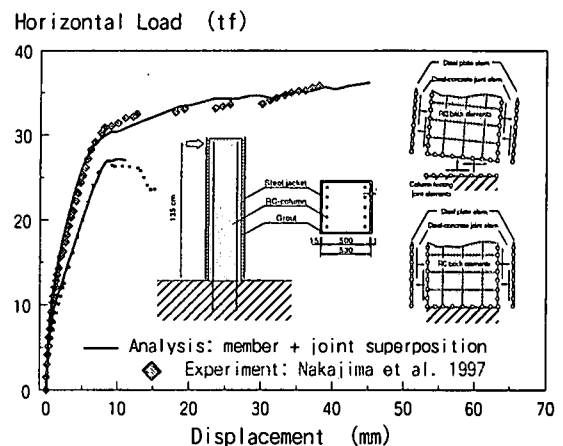


図-19 鋼板で補強された既設 RC 柱の性能向上⁷²⁾

6.2 自然・人工環境作用下の構造物の耐震性能評価

耐震性能のみならず、使用性・耐久性の議論も、性能評価の軸に乗ってくるようになった。今後、これら複数の性能評価を構築していく上で、種々の技術の統合がすすめられていくと想像される。耐震性能評価では、これまで環境作用や施工の要因は、少なくとも陽な形では評価されてこなかった。腐食や乾燥・湿潤などの自然環境作用を長期に受ける構造物の耐震性能の移り変わりを、時間軸で捉える視点が今後、望まれる。

これまで、耐久性の概念は必ずしも定量的なものではなく、一言で『劣化』といっても、構造安全性能や使用性や美

観がそれぞれどの程度、定量的に低下したかは問われなかった。そのため、自然環境下の作用を受けて変状が見つかったとしても、安全・使用・美観に関する性能を判定できていないため、往々にして、維持管理計画を策定しにくい嫌があった。安全性や耐震性能、使用性、美観などが環境・荷重作用下でそれぞれ時系列的に定量評価できるようにすることが、耐久性に関する性能規定を実現する方法と理解し、コンクリート委員会・示方書委員会幹事会は耐久設計と安全設計の統合を、中期的展望に含めている。

6.3 損傷を受けた構造物の残存機能評価

今後の動的非線形応答解析の進展を考えると、比較的近い将来、地震以後の残存使用性や復旧難易度を判定する基礎情報が、さらに揃ってくるものと期待できる。地震作用により導入される損傷と、残存使用性能や復旧難易度の関係がおおよそ分かっているものは、現時点で少ない。過去に大きな地震被害を受けていない地下エネルギー施設等は、未経験な要素が多い。早急に残存性能・機能照査の観点で研究を進めることが求められる。橋梁橋脚では、単柱では既往の多くの実験と震災経験から、おおまかな指標と限界状態が設定できる。しかし、ラーメン橋脚や不整形構造では、その知見を直接、当てはめることは難しい。

6.4 地盤との連成、異種部材との統合を含めた動的応答解析の高度化・一般化

動的非線形応答解析を用いて構造物の性能照査に資する情報を得る上で、使用材料の種別は問題とならない。合成構造、混合構造の可能性を存分に引き出し、構造システム系の耐震設計を合理化することは、性能設計の上で直接的に行なう土俵を与える点で、耐震性能照査型の枠組みは魅力的である。

ここで RC に関わる技術者の受け持つべき事項は、応答解析の三次元化を更に推進すること、異種部材間の接合に関わる非線形性と限界状態を明確にすること、が望まれる。

1997 年には、土木学会鋼構造委員会、構造工学委員会、コンクリート委員会合同で、統合化された設計システムの構築に向けた組織的な研究を推進するための、研究費獲得に向けた努力を始め、本年度からは連合の小委員会を設置して、戦略を固めていく作業に入る予定である。

参考文献

- 1) 前川宏一、宮本幸始：土木構造物における性能照査型基準の方向、コンクリート工学、Vol.35, No.11, pp.14-18, 1997.11.
- 2) 土木学会コンクリート委員会：既設コンクリート構造物の耐震診断と耐震補強(試案)、平成 8 年制定コンクリート標準示方書(耐震設計編)改訂資料、コンクリートライブラリー 87, pp.20-29, 1996.7.
- 3) 睦好宏史、町田篤彦、鶴田和久：地震力を受ける鉄筋コンクリートラーメン構造物の弾塑性応答に関する研究、土木学会論文集、No.378/V-6, pp.117-126, 1987.2.
- 4) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N. : Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ST12, ASCE, pp.2557-2573, December, 1970.
- 5) Jennings, P.C. : Periodic response of a general yielding structures, Proc. of ASCE, Vol.90, No.EM2, pp.131-166, 1963.
- 6) 稲田泰夫：原子炉建屋に用いられる鉄筋コンクリート造立体耐震壁の地震時復元力特性に関する研究、清水建設研究報告別冊、第 27 号、1989.11
- 7) 電気技術基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991,(4 章)建物・構築物の復元力特性の評価法、社団法人・日本電気協会、1991.
- 8) 鈴木敏郎、滝口克己、井上豊、堀田久人：ひび割れの生じたコンクリート壁からの各種気体の漏洩に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 391 号、pp.10-17, 1988.9.
- 9) 「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム-過大地震入力による構造物の崩壊防止をめざして-委員会報告書・論文集、コンクリート工学協会、1998.8.
- 10) 土木学会コンクリート委員会構成モデル小委員会：コンクリート構造物の耐震技術-現状と展望-、コンクリート技術シリーズ 20, 1997.7
- 11) Yamada, Y., Iemura, H., Matsumoto, T., Ristic, D. and Ukon, H. : Stress-strain based inelastic earthquake response analysis of reinforced concrete frame structures, Computational Mechanics of Concrete Structures, IABSE colloquium (Delft), Vol.54, 1987.
- 12) Kim, I., Okamura, H. and Maekawa, K. : Method for checking seismic performance of concrete structures and its effectiveness, Journal of Structural Engineering, Vol. 44A, 1998.
- 13) Okamura, H. and Maekawa, K. : Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete, Gihodo, Tokyo, 1991.5
- 14) Ueda, M., Seya, H., Ohmiya, Y., Taniguchi, H. and Kambayashi, A. : Nonlinear analysis on RC shear wall shaking table test, Transaction of SMiRT14, Vol.5, Division H, 433-440, August, 1997.
- 15) Yang, K., Inoue, N. and Shibata, A. : Nonlinear analysis of 3-D RC shear walls by finite element method, 構造工学論文集, Vol.41B, 1995.3.
- 16) Fukuura, N. and Maekawa, K. : Multi-directional crack model for in-plane reinforced concrete under reversed cyclic actions- 4 way fixed crack formulation and verification, Computational Modeling of Concrete Structures, Euro-C, pp. 143-152, 1998.
- 17) Vecchio, F. and Collins, M.P. : The modified

- compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *ACI Journal*, pp.219-231, 3-4, 1986.
- 18) J. G. Rots : Computational modeling of Concrete Fracture, Ph.D. Thesis, Delft Univ. of Tech., 1987.
 - 19) R. de Borst and P. Nauta : Non-orthogonal cracks in a smeared finite element model, *Engineering Computations*, Vol. 2, pp.35-46, 1985.3.
 - 20) 長谷川俊昭：一般化マイクロプレーンコンクリートモデルの再構築, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.129-147, 1996.5.
 - 21) 前川宏一, 長谷川俊昭：コンクリート構成則の研究動向と課題, *コンクリート工学*, Vol. 32, No. 5, pp.13-22, 1994.5.
 - 22) Collins, M. P., Vecchio, F. and Mehirhorn, G. : An international competition to predict the response of reinforced concrete panels, *Festschrift prof. Dr. Bruno Thurlimann zum 60. Geburtstag*, pp.471-491, 1983.
 - 23) 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, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp.1-10, 1985.8.
 - 24) Maekawa, K., Irawan, P. and Okamura, H. : Path-dependent three-dimensional constitutive laws of reinforced concrete - formulation and experimental verification, *Structural Eng. and Mechanics*. Vol.5, No.6, pp.743-754, 1997.
 - 25) Hauke, B. and Maekawa, K. : Three-dimensional R/C model with multi-directional cracking, *Computational Modeling of Concrete Structures*, Euro-C, pp. 93-102, 1998.
 - 26) Polak, M. : Reinforced Concrete Shell Elements Subjected to Bending and Membrane Loads, Ph.D Thesis, University of Toronto, Toronto, 1992.
 - 27) Li, Y., Ozbolt, J. and Eligehausen, R. : Numerical verification of the new microplane model for concrete, *Computational Modeling of Concrete Structures*, Euro-C, pp. 127-132, 1998.
 - 28) Aoyama, H. and Noguchi, H. : Mechanical properties of concrete under load cycles idealizing seismic actions, State of the Art Report, Proc. of AZCAP-CEB Symposium, Rome, CEB Bulletin d'Information, No.131N, pp. 31-63, 1979.5.
 - 29) Ghavamian, S., Mazars, J., Claeson, C., Gylltoft, K. and Paultre, P. : Geometric nonlinear effect in the behavior of damageable structures. Prediction of the ultimate capacity using a simplified approach, Third International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Gifu, 1988.
 - 30) 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, 1993.10.
 - 31) Cervenka, V. and Margoldova, J. : Tension stiffening effect in smeared crack model, ACSE EMD Specialty Conference, May 21-24, University of Colorado, Boulder, USA, 1995.
 - 32) 渡辺忠朋, 松岡茂, 武田康司：破壊力学に基づくRC部材のせん断耐力の研究, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.25-36, 1998.5.
 - 33) Shima, H., Chou, L. and Okamura, H. : Micro and macro models for bond in reinforced concrete, *Journal of The Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B)*, Vol.39, No 2, 1987.
 - 34) 土木学会コンクリート委員会：構成モデル小委員会(301)成果報告書, *コンクリート技術シリーズ 21*, 1997.7.
 - 35) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, *コンクリート工学論文集*, Vol.25, No.9, pp.107-120, 1987.
 - 36) Hsu, T.T.C. : *Unified Theory of Reinforced Concrete*, CRC Press Inc., 1993.
 - 37) 睦好宏史, 町田篤彦, 鶴田和久：ひずみ速度を考慮した鉄筋コンクリート部材の動的非線形地震応答解析, 土木学会論文集, No.366/V-4, pp.113-122, 1986.2.
 - 38) 細矢 博, 岡田恒男他：地震時のひずみ速度の影響による鉄筋コンクリート部材の耐力の増大と破壊モードとの関係に関する研究, *日本建築学会構造系論文集*, 日本建築学会, 第 492 号, pp.69-77, 1991.
 - 39) Song, C. and Maekawa, K. : Dynamic nonlinear finite element analysis of reinforced concrete, *Journal of The Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B)*, Vol. XLI, No 1, 1991.
 - 40) Commissariat a l'Energie Atomique : CAMUS International Benchmark - Experimental results synthesis of the participants' report - CEA and GEO, a French research network, part of the CAMUS Working Group under the auspices of the French Association of Earthquake Engineering (AFPS), 1998.7.
 - 41) Mazars, J. , Ragueneau, F. and La Borderie C. : Material dissipation and boundary conditions in seismic behaviour of reinforced concrete structures, *Computational Modeling of Concrete Structures*, Euro-C, pp. 579-592, 1998.
 - 42) Kitada, Y., Akino, K., Terada, K., Aoyama, H., Miller, A. : Report on seismic shear wall international standard problem organized by OECD/NEA/CSNI, *Transaction of SMiRT14*, Vol.5 Division H, 321-332, August, 1997.
 - 43) Dameron, R.A., Rashid, Y.R., Luk, V.K. and

- Hessheimer, M.F. : Preliminary analysis of a 1:4 scale prestressed concrete containment vessel model, Trans. of the 14th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lyon, August, 1997.
- 44) Tanabe, T., Yu, G. and Salamy, M. : Analysis of the localized failure phenomenon in reinforced concrete shear walls, Computational Modeling of Concrete Structures, Euro-C, pp. 265-274, 1998.
- 45) Stevens, N. J., Uzumeri, S. M. and Collins, M. P. : Analytical modeling of reinforced concrete subjected to monotonic and reversed loadings, University of Toronto, 1986.
- 46) Polak, M. A. and Vecchio, F. J. : Reinforced concrete shell element subjected to bending and membrane loads, ACI Structural Journal, 91(3), pp.261-268, 1994.
- 47) Irawan, P. and Maekawa, K. : Path-dependent nonlinear analysis of reinforced concrete shells, Journal of Materials, Concrete Structures, Pavements, JSCE, Vol. 34, No. 557, pp. 121-134, 1997.
- 48) 鳥田晴彦,西川孝夫他 : 斜め加力による RC ボックス型耐震壁の復元力特性,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 日本建築学会, 1998.9.
- 49) Mihashi, H., Okamura, H. and Bazant, Z. : Size Effect in Concrete Structures, E & FN SPON, 1994.
- 50) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H. : Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams, Journal of Materials, Concrete Structures, Pavements, JSCE, Vol. 35, No. 564, pp. 297-316, 1997.5.
- 51) An, X. and Maekawa, K. : Shear resistance and ductility of RC columns after yield of main reinforcement, Journal of Materials, Concrete Structures, Pavements, JSCE, Vol. 38, No. 585, pp. 233-247, 1998.2.
- 52) 土木学会コンクリート委員会 : 鉄筋コンクリート部材の靱性率評価式について, -阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式- 阪神淡路大震災調査研究特別委員会 WG 報告, コンクリート技術シリーズ 12, pp.42-82, 1996.7.
- 53) Ishibashi, T. and Okamura, H. : Study on the design earthquake resistance and degree of earthquake damage of reinforced concrete viaducts, Cement and Concrete Composites, pp. 193-201, 1997.
- 54) 加藤大介 : 鉄筋コンクリート造部材の配筋設計法に関する研究-コンクリートの拘束筋と主筋の座屈防止筋に関する考察-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 452 号, pp.99-107, 1993.10.
- 55) 須田他 : RC 橋脚における柱筋座屈メカニズムの考察, 阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.571-578, 1996.1.
- 56) 川島一彦,運上茂樹,長島博之,飯田寛之,向秀毅 : RC 橋脚の動的耐力に関する実験的研究(その 5) 偏心曲げを受ける RC 橋脚の動的耐力・変形性能, 土木研究所資料第 3319 号, 1995.1.
- 57) 土屋智史,福浦尚之,前川宏一 : Fiber Model を用いた 3 次元有限要素動的解析による多方向入力を受ける RC 橋脚の応答, 塑性域の繰り返し劣化性状に関するシンポジウム論文集, pp.359-368, 1998.8.
- 58) 須田久美子 : 中空断鉄筋コンクリート高橋脚の地震時変形性能に関する研究, 東京大学学位論文, 1998.
- 59) Suda, K., etc. : Buckling of longitudinal reinforcing bars in concrete column subjected to reverse lateral loading, 第 11 回世界地震工学会議論文集, 1996.6.
- 60) 前川宏一 : 土木構造設計における性能照査型基準の方向, 土木学会平成 9 年度全国大会研究討論会「コンクリート構造物の次世代設計法のゆくえ」資料, 1997.9.
- 61) コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1998.7.
- 62) 土木学会コンクリート委員会 : コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像-性能照査型補強設計指針(試案)-, コンクリート技術シリーズ 28, 1998.4.
- 63) Okamura, H. and Kim, I. : Size effect and failure of RC structures under earthquake, 3rd International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FRAMCOS-3, Gifu, Japan, 1998.10.
- 64) 小坂寛己,小笠原政文,津野和宏,福田暁 : ねじりモーメントが作用する RC 橋脚の耐震性能確認実験, 第一回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 1998.1.
- 65) Shawky, A. and Maekawa, K. : Nonlinear response of underground RC structures under shear, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 538, Vol. 31, pp. 195-206, 1996.
- 66) 青山敏幸,下村 匠,丸山久一 : 塩害により鉄筋が腐食した RC 部材の曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, V.20/2, pp.883-888, 1998.7.
- 67) Okada, K., Kobayashi, K., Miyagawa, T. : Influence of longitudinal cracking due to reinforcement corrosion on characteristics of reinforced concrete members, ACI Struct. Journal, Title no.85-S16, pp.134-140, March/April, 1988.
- 68) Kawamura, A., Maruyama, K., Yoshida, S. and Masuda, T. : Residual capacity of concrete beams damaged by salt attack, Concrete Under Severe Conditions-Environment and Loading, edited by K.

- Sakai, N. Bantia and O.E. Gjorv, E & FN Spon, pp.1448-1457, 1995.
- 69) 土木学会コンクリート委員会：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式 [土木学会阪神淡路大震災調査研究特別委員 WG 報告], コンクリート技術シリーズ 12, 1996.7.
- 70) 中村光：軸方向鉄筋の塑性座屈挙動の解析, コンクリート建造物の耐震技術 - 現状と将来展望 -, コンクリート技術シリーズ 20, pp. 98-100, 1997.7.
- 71) 土屋智史,小笠原政文,市川衛,細田暁：偏心軸力が作用する RC 橋脚の非線形解析, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 1998.10.
- 72) Hauke, B. : Three-dimensional model of reinforced concrete and steel-concrete composites, Ph.D. dissertation, The University of Tokyo, 1998.9.
- (1998年8月17日受付)

NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE AND SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION

Koichi MAEKAWA, Satoshi TSUCHIYA and Naoyuki FUKUURA

Within a new framework of performance based design, it is indispensable to ensure the required seismic performance of designed structures under specified loads and actions, dimensioning, detailing and materials used. The dynamic nonlinear analysis, which simulates the structural behaviors as well as the constituent material's mechanical states, is regarded as the mean to offer primary information on which the verification of seismic performance during and after the quake is based. This state-of-the-art report summaries recent status of reinforced concrete oriented nonlinear analysis and comments on the evaluation for residual functionality of post-quake damaged reinforced concrete. Since the nonlinear structural/material analysis is capable of contributing to both design dedicated to newly constructed structures and check of seismic performance of existing ones, the authors intend to state on the effort to build the integrated design and maintenance for reinforced concrete in general.