

## 4. 解析はどこまで信頼できるか

東京都立大学大学院 北山和宏

### 1. はじめに

線材置換による骨組解析と、有限要素法 (FEM) やマクロ・モデルを用いた部材解析とでは、解析結果に対してわれわれの期待するものが異なっている。骨組解析は設計現場において、設計された建物の耐震性能を評価するために利用されることが多い。その際、骨組解析結果の有する精度はそれほど高くはないという判断のもとで、結果を大雑把に評価している。これに対してFEM解析は部材などの実験結果の検証に用いられることが多い。FEM解析では、材料レベルの情報やいろいろな構成則などの精密な (細かい、と言ってもよい) 情報を与えて解析しているの、それなりの解の精度を有しているはず (あるいは、有していなければ納得できない) と考える。

このように骨組解析とFEMなどを用いた部材解析とでは要求するものが異なっているの、以降は部材解析に限定して話を進める。外力を受ける構造部材の物理応答 (強度、変形、破壊に至る経過など) を把握するために、まず実験によって直接確認しようとするのが最もプリミティブな解決方法であろう。しかし実験を実施する場合には、予算、試験体の大きさ (スケール) と個数、測定項目とその点数、加力方法、人的資源などの制約があって、これらが実験の無尽蔵な実施を阻んでいる。そこでFEMやマクロ・モデルを用いた

解析が登場する。FEM解析ならば多数の解析変数を設定することも可能であり、部材全体の力学性状を知ることができる。また得られた結果を詳細に検討することによって、ひびわれの発生位置やその幅、鉄筋とコンクリートとの付着性状や鉄筋のすべり量などを把握できるほか、コンクリートの応力およびひずみの状態などの微視的な情報をも得ることができる。

### 2. 部材解析の限界

しかし、ここで問題が発生する。例えば実験を全く行うことなくFEM解析を実施したとき、得られた解を信頼することはできるだろうか。要素分割や各種の構成則の妥当性について、大丈夫と断言できるだろうか。解析対象のメッシュ分割は、実験におけるひびわれ状況やコンクリートの圧壊状況を観察することによって決めることが多い。そこで実験を実施しない場合には、解析者の経験と勘によってメッシュ分割せざるを得ない。精粗さまざまな有限要素の配置状況によって、解析結果が大きく影響を受けることは周知の事実である。例えば、ある領域を非常に細かく要素分割すると、たった一つのコンクリート要素の圧縮破壊によって耐力が決定されてしまうことが時々起こる。しかしこのような結果は実現象を正しく再現していないことが多い。また、部材のFEM解析を実施する際に、コ

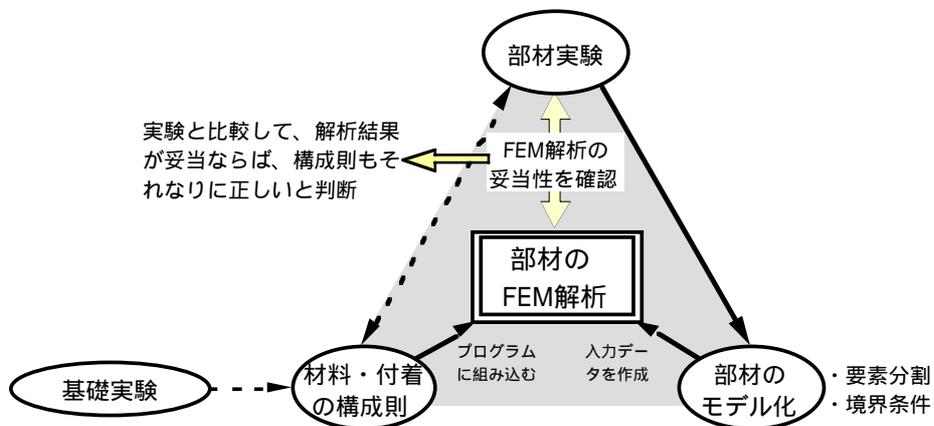


図1 FEM解析、実験、構成則およびモデル化の関係

ンクリートや付着などの構成則を基礎実験によって構築することは稀である。特にコンクリートに関しては、拘束されたコンクリートの圧縮強度の増大や靱性能の向上、ひびわれたコンクリートの圧縮強度の低減、引張りを受けるコンクリートのTension Stiffeningなど、考慮すべき基礎特性が多く存在する。

ここで、部材のFEM解析、実験、材料構成則および部材のモデル化（要素分割や境界条件など）の関係を図1に示す。材料や付着などの構成則を基礎実験によらずに設定した場合、解析結果と部材実験の結果とを比較して解析の妥当性を確認できれば、構成則もそれなりに正しいと判断される。これに対して参照すべき部材実験がない場合には、解析の前提となる要素分割や構成則に対して磐石の信頼を置けない限り、解析結果についても全幅の信頼を与えることはできないだろう。結局、各種の強度式や変形の推定法などによる結果と比較対照しながら、FEM解析結果の妥当性を主張することになる。

このような観点から、参照できる実験結果が1体でもあれば、FEM解析の持つ信頼性をかなりの程度明示することが可能である。ただし、わずか一体の試験体の結果だけで物事を断定してよいのかなど、実験の抱える本質的なさまざまな問題があるのも事実であるが、これは本稿の主題ではないので、ここではこれ以上触れない。

### 3. FEM解析と実験

「FEM解析の利点のひとつは実験ではわからないことが明瞭になることだ」とよく言われるが、本当だろうか。各要素の応力・ひずみや部材内の応力の流れなどを視覚化することは確かに可能であり、それ自体は貴重な成果である。しかし実験においても、測定を工夫することによって、コンクリートの平均的な主ひずみを知ることは可能である。また実験において、ひびわれ状況を観察することによって応力の流れ方もある程度理解できる。「コンクリートに生じる応力度は実験では分からないだろう」と言うかもしれない。しかし前述のように分割された要素のサイズと配置バランスによっては、局所要素の圧壊によって解析強度が

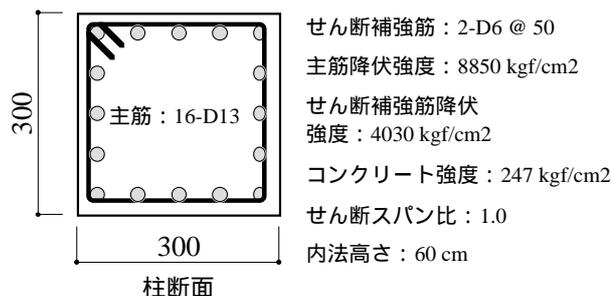


図2 実験および解析に使用した柱試験体の諸元

決定されてしまうことなどを考え合わせると、解析においてもコンクリート要素単独ではなく、ある領域を平均した応力状態で判断する、といったことになる。これなら、実験で測定した平均ひずみからコンクリートの構成則を仮定することによって応力度を求めることと同じである。

そもそも実験で分からないことは、解析でも分からないのではないか。これは折に触れて私の脳裏に浮かんでくる拭い難い疑問であるが、会員諸氏はいかがお考えであろうか。

### 4. 実験、FEM解析および修正圧縮場理論を用いた部材解析の比較例

ここで具体的に、実験結果を参照しながらFEM解析を実施し、その妥当性を検証するためにさらにほかの方法で解析を行なった例を紹介する。鉄筋コンクリート（RC）柱のせん断強度が軸力によってどのように変化するかを検討した。

#### 4.1 実験の概要

RC柱の実験は、建研式の逆対称曲げせん断加力装置を用いて水平力を正負交番載荷することによって行なった。同一配筋のRC柱に3水準の軸力（軸力0、引張り一定22.5 tonf、および引張り一定45 tonf）を与えたときのせん断強度を得た[1]。柱断面の形状などを図2に示す。せん断補強筋比は0.43%、せん断スパン比は1.0である。コンクリート圧縮強度は247 kgf/cm<sup>2</sup>、せん断補強筋の降伏強度は4030 kgf/cm<sup>2</sup>である。実験ではいずれの試験体も主筋が降伏することなく、せん断破壊した。実験では引張り軸力の増大とともにせん断強度は低下し、引張り軸力が大きい場合のせん断強

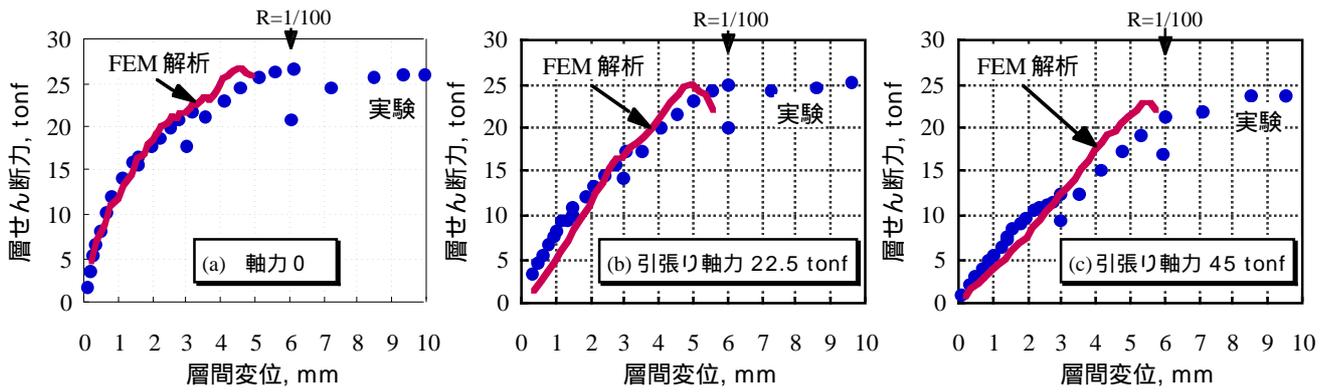


図4 層せん断力-層せん断力関係 (FEM解析と実験)

度は軸力0のときの92%であった。各試験体とも最大耐力に到達する前後に、全ての横補強筋が降伏した。

#### 4.2 FEM解析

この実験を2次元FEM単調載荷解析によって追跡した[1]。試験体の要素分割を図3に示す。なお解析には、千葉大学野口博研究室で開発されたプログラムRCFEM[2]を使用した。上下の加力スタブを平行に維持するためにトラス材を設けた。コンクリートは四角形の八節点アイソ・パラメトリック要素とし、二軸応力下の構成則として Darwin - Pecknold による等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルを使用した。鉄筋は線材要素とした。主筋とコンクリートとは付着作用を表わすボンド・リンクによって接続した。付着強度は柱実験で得られたものを使用した。横補強筋は1本を1要素として、両側の最外縁主筋位置の節点に接合した。コンクリートのひびわれは分布ひびわれモデルによって表現し、危険断面には離散ひびわれを設置した(ただし引張り軸力を与えた場合にはクラック・リンクの開口を禁止した)。コンクリートの圧縮応力度ひずみ関係には Saenz モデル(上昇域)および Kent-Park モデル(下降域)を用い、直交する引張りひずみによる圧縮強度の低減を池田・北山の方法[3]で考慮した。

実験およびFEM単調載荷解析による層せん断力 層間変位関係を図4に示す。実験値(印)は包絡線である。解析・実験ともにコンクリートの圧壊と横補強筋の降伏によって最大耐力に到達した。各試験体とも解析による最大耐力は実験値とほぼ一致

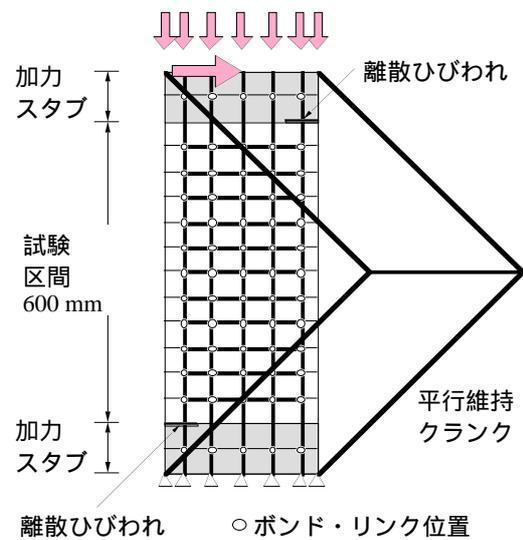


図3 試験体の要素分割

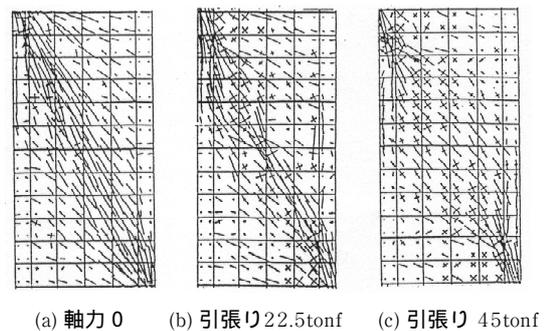


図5 圧縮主応力の流れ

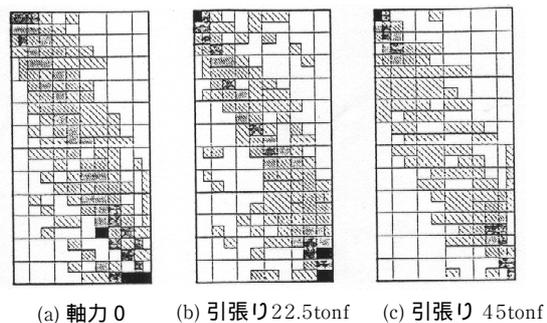


図6 圧縮主応力の分布

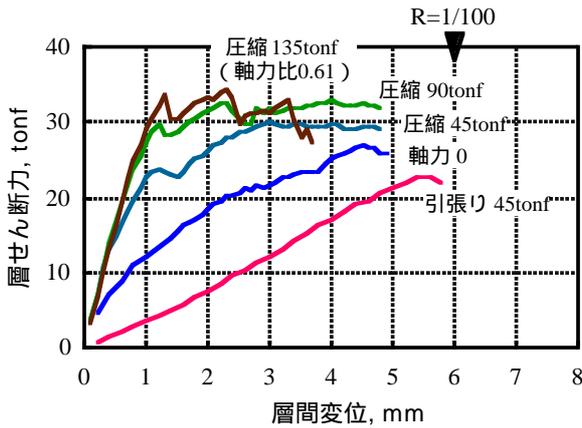


図7 軸力を変数としたFEM解析の結果

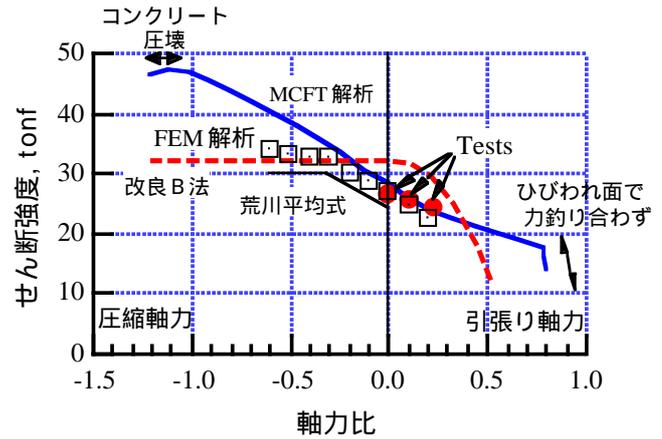


図8 FEM解析、MCFT解析および実験の比較

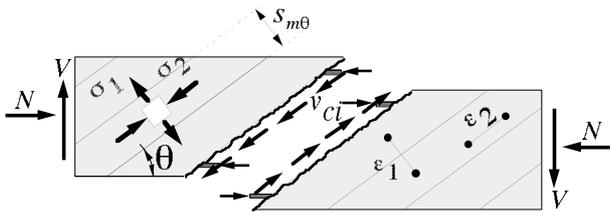


図9 MCFTで考慮する均一な圧縮応力場

した。また実験で主筋に沿った付着劣化が生じたのと同様に、解析ではボンド・リンクの破壊が発生した。コンクリート要素の圧縮主応力の向きおよび大きさを図5に、主応力分布を図6にそれぞれ示す。引張り軸力の増大にともない、主対角線上の圧縮応力が減少し、端部を除いては圧縮応力が均一に分布するようになった。

以上の検討から、FEM解析のモデル化や諸仮定はほぼ妥当であると判断できる。そこで、軸力を解析変数としてさらにFEM解析を実施した。軸力を引張り45 tonfから圧縮135 tonf (軸力比 0.61) まで変化させたときの層せん断力 層間変位関係の例を図7に示す。引張り軸力から圧縮軸力へと推移するとともに、剛性およびせん断強度とも増大し、既往の研究成果と定性的には一致した。圧縮軸力の増大とともに圧壊するコンクリート要素数が増え、部材中央付近にも圧壊が見られるようになった。圧縮軸力135 tonf のときには横補強筋の降伏は発生せず、コンクリートの圧壊によって耐力が決まった。

得られたせん断強度 ( 印) と柱軸力との関係を実験結果 ( 印) とともに図8に示す。圧縮軸力比が0.3

を超えると、せん断強度の増加傾向が鈍化した。これは、それまでは横補強筋の降伏と柱の上下端部のコンクリートの圧壊によって最大耐力に達したのに対して、軸力比0.3以降はこれらの現象も生じるものの部材中央付近のコンクリート要素の圧壊によって耐力が決定されたためと考える。

図8には後述する別解析の計算値、本会靱性保証型耐震設計指針[4]のせん断強度設計式 (改良B法) による計算値 (破線) および荒川平均式による計算値 (細実線) をあわせて示した。改良B法による計算値は、引張り軸力下でのせん断強度の低下を定性的には表現できるが、実験値よりも大きくなった。またこの例では圧縮軸力下のせん断強度は一定となった。圧縮軸力比0.3以降では、FEM解析結果と改良B法によるせん断強度とが接近した。荒川平均式と較べるとFEM解析結果は若干過大となったが、定性的には一致した。

圧縮軸力下のせん断強度解析値が定量的に妥当かどうかさらに検討するため、以下の解析を実施した。

#### 4.3 修正圧縮場理論を用いたせん断強度解析

ここではBhide・Collins[5]が提案した修正圧縮場理論 (Modified Compression Field Theory - 以下MCFTと略記) を用いた解析を実施した。MCFTとは図9のように部材全体に均一な圧縮応力場が形成されると仮定し、応力の釣り合い条件とひびわれを含む平均ひずみを用いた変形の適合条件とを使用してせん断強度を求める方法である。ひびわれ面での骨材の噛み合い作用によるせん断力の伝達を考慮する。解析では引張り主ひずみを増加させてゆき、所定の軸力を保持できなく

なるか、コンクリートの圧縮主応力度がコンクリート強度に達するまで繰り返し収束計算を行った。MCFTで判別できる破壊モードは(1)ひびわれ幅の拡大によってひびわれ面でのせん断伝達が不能になりせん断強度に至る場合と、(2)コンクリートの圧壊、である。

MCFTによる計算結果を図8に太実線で示した。引張り軸力下では、実験と両解析の結果とがよく一致した。圧縮軸力下では軸力比0.3程度までは、両解析の結果がほぼ一致したが、それ以降はFEM解析による計算値がMCFT解析によるそれよりも過小となり、両者のあいだに乖離が生じた。今までの筆者の経験では(曖昧な表現だが、本稿は論文ではないのでご寛恕を)、圧縮軸力が大きい場合にはMCFT解析は実験値を過大評価することが多かった。これより、圧縮軸力比0.3以上での真のせん断強度はMCFT解析による計算値よりも小さいと予想されるので、FEM解析による計算値は正解に近いと考えても良さそうである。しかし、「本当にそうかな」と言った疑問を払拭することはやはり難しい。ここから先の判断はパネル・ディスカッションに参加している諸氏にお任せする。

## 5. まとめ

本稿の目的は、解析の持つ信頼性を実験と対比しながら論じることであった。「解析はどこまで信頼できるか」という問題に一樣な結論を賦与することは不可能である、というのが(陳腐ではあるが)筆者の考えである。もとよりFEM解析などの数値解析が有用であることは論を待たない。しかし解析結果の持つ意味を考える際には慎重を期すべきであり、特に定量的な評価を為す場合には相当の検証が必要である。例示したように試験体が1体でもあれば、解析の持つ信頼性を高められる。また、既往の研究成果やほかの解析などを併用しながら、解析結果を補強することも有効である。このような傍証を積み重ねることによってはじめて、解析結果は信頼できるようになるだろう。なお本稿では、解析の基盤となる数値計算などのテクニックについては全く触れなかったことを付記する。

## 参考文献

- [1] 吉田格英、北山和宏、西川孝夫：引張り軸力を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18-2、1996、pp.875-880.
- [2] 内田和弘、野口博：混合構造接合部の有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14-2、1992、pp.15-20.
- [3] 池田浩一郎、北山和宏：拘束筋を有するひびわれコンクリートの圧縮性能劣化に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17-2、1995、pp.1299-1304.
- [4] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999.
- [5] Bhide, S.B. and M.P.Collins : Influence of Axial Tension on the Shear Capacity of Reinforced Concrete Members, ACI Structural Journal, Sept.-Oct., 1989, pp.570-581.