

構造解析ソフトウェア

関口 和彦*

近年の土木・建築構造形式の複雑化、多様化により、従来の骨組理論を主とした設計体系からFEM解析による照査まで含めた幅広い解析手法を取り入れた設計事例が多くなってきた。とくに、ハードウェアの発達や解析ソフトのGUI (Graphical User Interface) 強化により、設計者にとって構造解析ソフトウェアの使用頻度は一段と高まってきた。解析を行うにあたっては、目的に応じて解析ソフトウェアの選定が必要になる。本稿は、汎用性を配慮して設計者が一般的に使用されると思われる以下の6項目に関するソフトウェアを簡単に紹介する。

なお、解析ごとに特定ソフト名は明記しない。一般的に使用するときの名前で紹介する。また、個々のソフトウェアについては最後に表-1で紹介する。

- ① 静的線形骨組解析ソフトウェア
- ② 静的線形FEM解析ソフトウェア
- ③ 静的非線形骨組解析ソフトウェア
- ④ 静的非線形FEM解析ソフトウェア
- ⑤ 動的線形骨組解析ソフトウェア
- ⑥ 動的非線形骨組解析ソフトウェア

(ただし今回は、流体等の非構造解析ソフトウェアは含まない。)

1. 静的線形骨組解析ソフトウェア

1.1 平面解析

(1) 平面格子解析

主として、橋梁の上部構造など面外荷重を受ける任意形平面格子の設計に用いる(図-1)。変位法により影響線解析後、死荷重、活荷重を載荷させて断面力を算出する。ほとんどの形式の橋梁が解析できる。

出力項目は、変位、断面力、反力などがある。

(2) 任意形平面骨組解析

土木構造物全般(橋梁、鉄塔、擁壁、ボックスカルバートなど)の構造物を骨組にモデル化しての応力解析を行う(図-2)。解析方法は、変位法を使用し、境界条件は、固定および弾性支持、連続弾性支持が考えられる。用途により

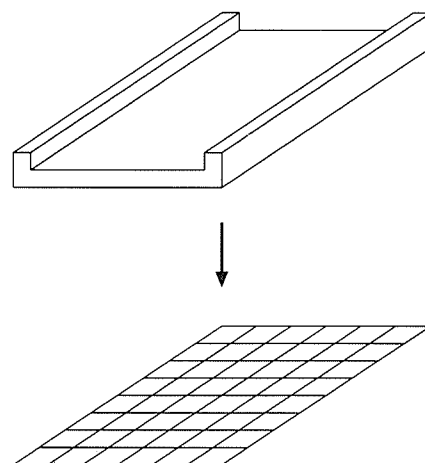


図-1 RC橋脚平面格子モデル

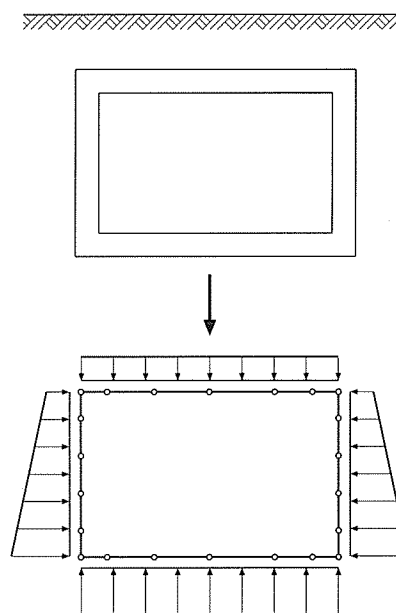


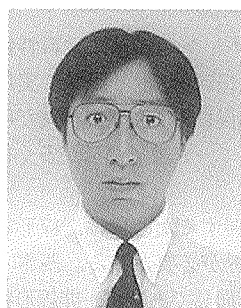
図-2 ボックスカルバート平面骨組モデル

面内・面外方向に分けて解析を行う。土木、建築の解析業務には、不可欠なソフトウェアであり、設計および解析業務に携わる人ならほとんどの方が使用していると思う。

出力項目は、変位、断面力、反力などがある。

1.2 立体骨組解析

解析方法は、平面骨組解析と同様に変位法を用いて断面力を算出する。単純桁、連続桁、ゲルバー桁、ラーメン橋、アーチ橋、斜張橋、吊橋、トラス橋などの橋梁および任意形土木建築構造の立体解析に使用する(図-3)。荷重としては、任意の線分布・集中荷重・集中モーメント・温度



* Kazuhiko SEKIGUCHI

日本電子計算(株)科学技術事業部
建設技術システム部
構造解析グループマネージャー

変化・温度差・プレストレス・強制変形・物体力などを対象とし、影響線による解析も可能であり、橋面死荷重ほか、「道路橋示方書」に準拠した活荷重 (L , T 荷重) や群集荷重、鉄道橋に対する任意の連行荷重を対象とする場合もある。また、各荷重状態に応じた構造系の変更、組合せ (荷重あるいは構造系の変更)、架設段階ごとの解析も行うことが可能である。

出力項目は、変位、断面力、反力などがある。

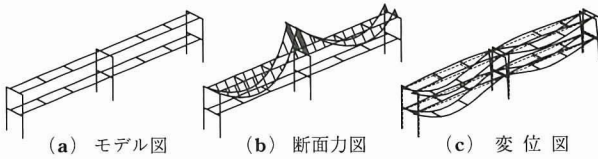


図-3 2径間2層ラーメン橋立体骨組モデル

2. 静的線形FEM解析ソフトウェア

骨組解析などでモデル化することが困難な構造物 (たとえば、着目範囲が隅角部など応力発生傾向が特異になる場合) に対してFEM解析を用いて定性的、定量的な局部発生応力の把握を目的とする解析法である。

対象となる構造物は、コンクリート構造物、鋼構造物、地盤など土木構造物全般にわたっており、また機械系分野においても多く利用されている。

入力に必要な材料定数等は、基本的には骨組解析とほとんど同じであるが、断面積や断面2次モーメントは内部で処理されるので、あえて算出しなくとも構わない。

骨組解析に比べて、使用する要素が多いのもFEM解析の特徴である。FEM解析も骨組解析と同様に平面、立体解析が可能である。

解析の適用例として下記のものが挙げられる。

- 連続ラーメン橋柱頭部の解析 (図-4)
- 外ケーブル定着部の応力解析
- 張出し床版の解析
- 橋台背面ウィングの解析
- マスコンクリート解析

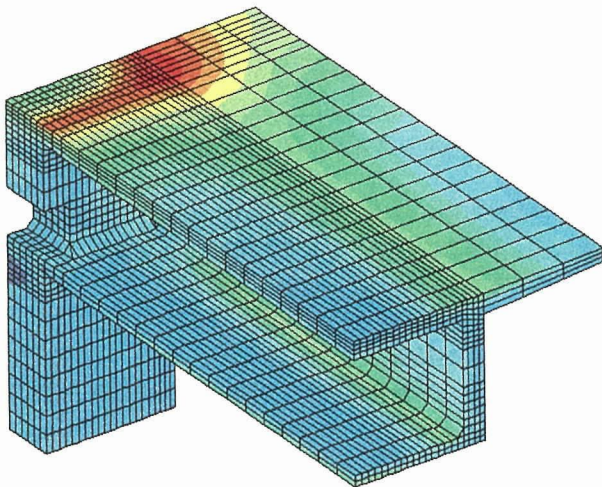


図-4 PC連続ラーメン橋柱頭部FEMモデル (1/4モデル主応力コンター)

- 床版補強解析
- 地盤逐次掘削解析 (トンネル、仮設工事など)

出力項目は、骨組解析の場合と同様に変位、断面力、反力および応力度である。ただし、要素のタイプにより断面力が算出されないものもある。

3. 静的非線形骨組解析ソフトウェア

必要となるデータの内容は、前述の静的線形骨組解析の場合とほとんど同じであるが、図-5に示すように構造物が非線形の挙動を示す領域まで、精度よく解析するには、非線形性を示すパラメーターなどのデータを追加する必要がある。

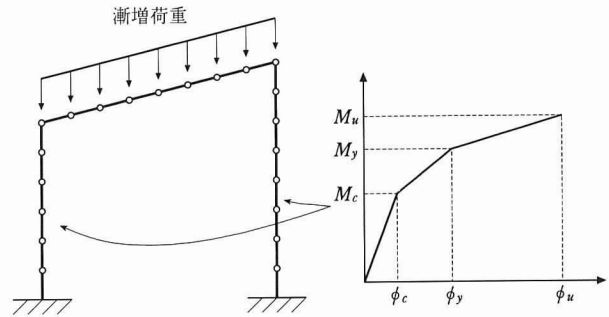


図-5 ロック Shelter の非線形骨組モデル

構造物の非線形性は、大きく2つに分けられる。

①としては、材料非線形性で、たとえばコンクリートのひび割れや鉄筋の降伏を考慮した解析方法である。

非線形の特長には、 $P \sim \delta$ 曲線、 $M \sim \phi$ 曲線、 $\sigma \sim \epsilon$ 曲線、 $M \sim \theta$ 曲線などを考慮できる。橋梁の保有耐荷力解析などはこの解析の一つである。

②としては、幾何学的非線形で、たとえば局部座屈のようなひずみと変形が線形でない構造物の解析に使用する。また、①と②を組み合わせることもできる。

解析の適用例としては、次のものが挙げられる。

- 保有耐荷力解析
- 大変形解析
- 座屈解析
- 応答変位法による解析
- 耐荷力解析

出力項目は、使用する解析によって多少変わるが、線形骨組解析と内容はほとんど同じである。しかし、荷重を漸増して作用させるので、その漸増ステップごとに算出される。

4. 静的非線形FEM解析ソフトウェア

前述の2. 静的線形FEM解析ソフトウェアは、材料特性を線形化し工学的な解を得ることに骨組解析と同様に実用的な手法であるが、有限要素法の発展に伴って研究機関だけでなく構造設計や強度の検討において、非線形解析が多く行われるようになってきている。

対象構造物の挙動を精度よく把握するためには、線形範囲を超えた非線形問題を扱った解析が必要となる。基本となるデータは、静的線形FEM解析と同じであるが、非線形特

性を示すパラメーターなどのデータを作成する必要がある。

解析の適用例としては、次のものが挙げられる。

- 鋼製橋脚の弾塑性解析 (図-6)
- 外ケーブルPC桁耐荷力解析
- 鉄筋コンクリート部材のひび割れ解析
- クリープ・乾燥収縮解析
- ひび割れを考慮したマスコンクリート解析
- 地盤の弾塑性を考慮した逐次掘削解析 (トンネル, 仮設工事など)

出力項目は、変位, 反力および応力度である。

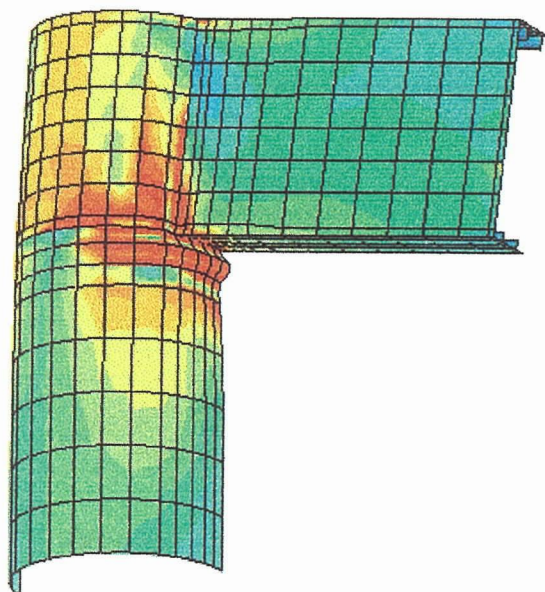


図-6 鋼製橋脚隅角部座屈解析FEMモデル
(フォンミーゼス相当応力コンター)

5. 動的線形骨組解析ソフトウェア

わが国は、世界でも有数な地震多発国であり、いく多の大地震を経験してきたが、兵庫県南部地震以降、耐震設計は、従来の震度法から動的解析を考慮する設計方法へ大幅な方向転換をした。

動的解析は1. 静的線形骨組解析の項で作成したモデルを動的に解析するものである。代表的な動的解析法は大別すると以下の3つに分けられる。

- 固有値解析
 - 応答スペクトル解析
 - 時刻歴応答解析
- ① 固有値解析は、動的解析には欠かせないもので、構造物がどのようなモードで振動するかを算出するものである (図-7)。設計水平震度を算出する際にも利用する場合がある。
 - ② 応答スペクトル解析は、スペクトル曲線を用いて簡易的に、その構造物の地震時に発生する最大断面力を算出する解析である。
 - ③ 時刻歴応答解析は、骨組モデルに直接地震波を入力して応答値を算出する解析である。

現在、時刻歴応答解析は非線形部材を考慮して行うこと

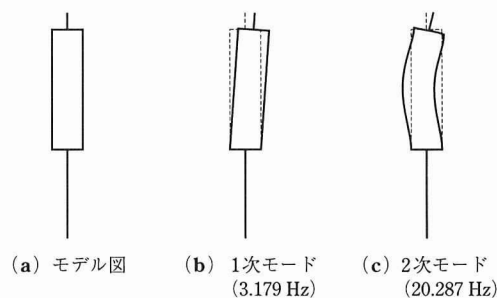
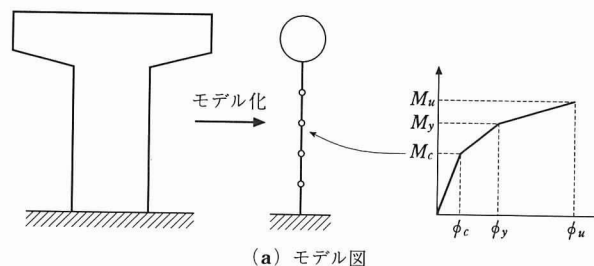
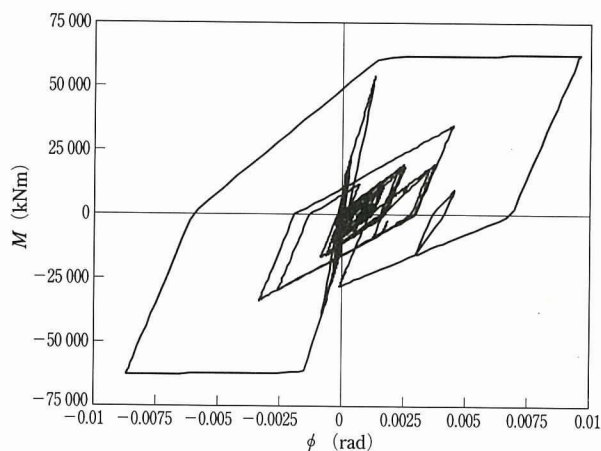


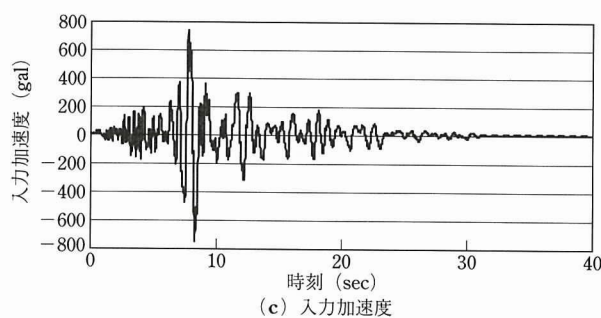
図-7 固有値解析の例



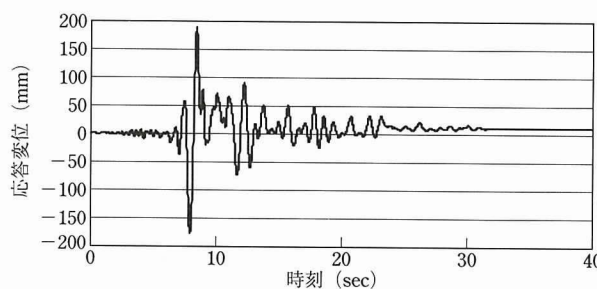
(a) モデル図



(b) M-φ 曲線図 (履歴図)



(c) 入力加速度



(d) 時刻歴応答変位 (天端)

図-8 時刻歴応答解析の結果の一例

が多く、線形時刻歴応答解析は、まれにしか行われない。すべての橋梁に対して適応することができる。

出力項目は、固有周期、断面力、振動数、変位、速度、加速度などがある。骨組だけでなく地盤まで考慮するモデルは、骨組とFEMを組み合わせて解析を行うこともある。ただし、線形解析ではなく非線形解析で行うことが多い。

6. 動的非線形骨組解析ソフトウェア

ほんの10年位前では、研究レベルか一般ではまれな特殊な形状の構造物の検討に使う程度のニーズしかなかったが、平成8年12月に改訂された「道路橋示方書 V耐震設計

編」では、構造物の材料非線形性を取り入れた地震時保有耐荷力解析および動的解析法が耐震設計の主要な設計法として位置づけられた。

解析の中身は、前述の3. 静的非線形骨組解析と5. 動的線形骨組解析を合わせた解析を行うものであるが、非線形部材の履歴特性(図-8)を考慮できる解析である。幾何学的非線形を考慮できる動的非線形解析ソフトもある。

出力項目は、断面力、変位、速度、加速度の最大・最小値である。

以上で、簡単ではあるが構造解析ソフトウェアの紹介を終わる。

表-1 解析ソフトの紹介

解析ソフト名	静的線形骨組解析	静的非線形骨組解析	静的線形FEM解析	静的非線形FEM解析	動的線形骨組解析	動的非線形骨組解析	動的非線形FEM解析	次元			適用
								面内	面外	立体	
FRAME	○							○			設計計算用
FRAMZ	○								○		設計計算用
FANSY/PLANEX	○							○	○		地盤の弾塑性を考慮した杭ラーメン
FANSY/BRIDGE	○							○	○		有限変形解析, 鉄道活荷重載荷
FANSY/GRID3D	○									○	有限変形解析
FANSY/STANCE	○									○	鉄道活荷重
SPACER	○									○	応答スペクトル解析まで可能
GRID	○								○		格子解析
TDAPⅢ	○	○	○	○	○	○	○				汎用非線形動的解析
DYNA2E	○	○	○	○	○	○					○ テトラリニア(静的), 軸力変動
DINAS	○	○	○	○	○	○	○				○ 有効応力解析, 軸力変動
D-LAYS					○						○ 薄層法
PRCFRAN		○							○		軸力変動
DIANA	○	○	○	○	○	○	○				○ 建設分野向け汎用非線形FEM解析
EPASS		○									○ 材料非線形+幾何学的非線形
NASTRAN	○	○	○	○	○	○	○				○ 汎用非線形FEM
MASC			○								○ 温度, 温度応力解析用
FINAL/STATICS			○								○ 床版補強
ABAQUS	○	○	○	○	○	○	○				○ 汎用非線形FEM
MARC	○	○	○	○	○	○	○				○ 汎用非線形FEM
FINAL/PLASTO			○	○					○		○ 逐次解析
SHAKE							○	1次元			○ 重複反射理論による解析
FLUSH							○				○ 等価線形化法による地盤非線形動的解析
FDAPⅢ							○				○ 周波数領域での非線形応答解析

注：○印は該当の意味

【2001年1月30日受付】