応 力 解 析 の 実 際 (2)

—実 際 の 応 用—*

神 近 亮 一**, 大 矢 弘 史***

神 近 亮 一

大 矢 弘 史

Stress Analysis [2] -Application of FEM Stress Analysis to Actual Structures*

by Ryoichi Kamichika** and Hiroshi Ohya***

キーワード：応用解析，有限要素法，FEM，強度計算，強度評価，プリプロセッサ，ポストプロセッサ

1. は じ め に

本実用講座の「応力解析の実際 (I) ¹⁾」において，有限要素法解析：Finite Element Method (以下 FEM と略記する) の基礎原理と適用可能性についてのわかりやすい解説がなされている。本講座の対象が溶接技術であることを考えると，FEM の溶接分野への適用法として直ちに思い浮かぶのは，溶接変形・残留応力や溶接割れなどのいわゆる溶接力学に関連したことであろう。また，溶接施工と関連して，溶接継手の組立治具の設計，拘束部材の寸法形状決定，溶接中の過渡的熱変形，さらには組立精度などの検討用解析ツールとしても FEM を手軽に使うことができる。これらの話題については別の機会に委ねることにして，本稿においては，(I) を受けて，溶接構造物を念頭に置いて，製品や部材の構造設計及び強度評価への FEM 解析の応用の実際について概説し，参考に供したい。

最近では，NASTRAN, MARC, ANSYS, ABAQUS など多くの FEM 構造解析の汎用ソフトが市販されており，使い易さと解析可能な構造規模の両面で格段に進歩している。一方，そのようなプログラムを稼働させるための計算機の進歩も著しい。従来ならワークステーションや大型機でしか利用できなかったような大型汎用ソフトでも，機能を限定してパソコン上でも利用できるようになりつつある。しかしながら，解析ツールの能力が向上するにつれて，狙いとするあるいは要求される解析も複雑かつ大規模になっているために，後述のような実製品の解析を前後処理を含めて組織的に実行するために，大型またはスーパーコンピュータも大いに活用されてい

る。

これから種々の分野で FEM を利用しようと考えている方々が活用現場の実情を知り，種々の活用可能性を知る一助となれば幸いである。

2. 従来の構造設計と FEM 解析

船舶，橋梁，タンク，産業機械などの構造物を設計するにあたっては，種々の材料や部材を組み合わせて結合（たとえばボルト締結や溶接）させた構造体が外力の作用を受けたときに，その構成要素である材料や部材，さらには結合部が供用期間中に破損せず，意図した機能を発揮し続けることが必須の条件となる。FEM が出現し，広く使われるようになる 20 年程前までは，図 1 の左側に

図 1 従来型構造設計と FEM 活用構造設計の相違点

*原稿受付 平成 9 年 1 月 31 日
 **正 員 石川播磨重工業(株) Member, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd.
 *** 石川播磨重工業(株) Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd.

示すように、船舶、建築、橋梁、エネルギープラントなどの構造設計を行う場合、構造力学や材料力学に基づいて部材の断面代表応力（公称応力など）を求め、さらに必要あれば、弾性力学に基づいて求められた応力集中係数や公式を適用して局部応力を算定し、これらの算定応力値が材料強度データに安全マージンを考慮して定めた設計許容応力値以内にあるかどうかによって強度の検討を行っていた。その際、伝統的な構造物については、それぞれの機種別に学会や協会などの公的機関により長い経験を踏まえた設計規準や規則が用意されており、その中には、応力の算出法や許容応力だけでなく、外荷重の算定や材料さらには結合（溶接）法までも規定されている。現在でもこのような設計法が主流である分野も多いが、航空機エンジンや原子力発電プラントなど進歩が著しい分野や安全性が特に要求される分野においては、FEM 解析が次第に多く採り入れられてきている。外力や稼働条件などを十分に考慮した上で、実機に忠実な FEM モデルの応力解析を実施すれば、各部の応力・歪状態などを正確に予測できる。しかし、図 1 の右側に示すように、それを設計に有効に活用するためには、それに見合う詳細かつ高度な強度評価（延性破壊、疲労破壊、座屈、脆性破壊、クリープなど種々の破損形態に対するきめ細かな評価）と十分に管理された施工（基準）とを組み合わせることが必須である。

船舶の設計の例をあげると、従来は、船体全体を 1 本の梁と考え、船級協会規則で示された手順にそって、縦強度で主要部材の寸法を決め、さらに横強度と局部強度の検討に基づいて各部材の寸法を決めていく設計方法が長年用いられてきた。現在は、板材を組合わせた船体全体の FEM モデルを作成し、全ての波長成分とその頻度や船体と波浪との相対運動による動的効果なども取り入れた外力に対する詳細な応力解析と強度評価を行っている²⁾。

もう一つの例として、米国機械学会の構造設計基準 (ASME Code) の変遷をたどると興味深い。初期の Sec. I Power Boilers (1914) や Sec. VIII Unfired Pressure Vessels (1925) においては、それまでの実績や事故の教訓を踏まえた標準的な仕様と高い安全率に基づく規格であったのが、原子力発電プラントなどでの評価技術の研究進展やコンピュータを用いた解析技術の進歩を踏まえて、次第に、より合理的な新規格制定の要望が高まり、1963 年には Sec. III Nuclear Vessels が制定されている。この規格では、「応力解析に基づく設計 (Design by Analysis)」の考え方をとっており、種々の破損形態に対する強度評価が要求されている。この規格の発足当初には FEM 解析はまだ十分には普及していなかったと思われるが、現在では、このような規格に基づく構造設計での応力解析の殆どで FEM が使われている。我が国でも原子力発電における通産省令などに Sec. III の考え方を取入れており、信頼性の高い FEM 解析がますます求め

られている。

3. FEM 解析作業の手順

実際の複雑な構造物や機械が稼働状態において、「どういう応力・ひずみ、変形状態になるのか」、そして、「設定した稼働期間中に破損する危険性はないのか」などを判断するためには、構造物を相当に詳細にモデル化して FEM 解析を行うとともにその結果に基づいた丁寧な強度評価を行う必要がある。実際の構造設計の現場における FEM 解析の流れを図 2 に示す。プリプロセッサでは要素分割や各 FEM プログラムでの解析仕様データを作成し、ポストプリプロセッサでは膨大な解析結果を整理・視覚化することによって次段階の評価・判断を助けている。この前後処理のために I-DEAS, PATRAN などの汎用ツールが市販されているが、解析の規模が大きくなるとこれらの前後処理に要する労力も増大する。最後の強度評価は非常に高度かつ多様な処理であり、特定の機種について各企業や機関が専用のツールを開発・使用しているものがあるが、汎用的なものはまだ見られない。もっと手軽に FEM 解析を利用したい場合には、機能を絞った専用のソルバーを使用するか、あるいは、図 2 のフローの右側に示すように、前後処理を省いて、直接汎用ソルバーを用いることもできる。

図 2 FEM 解析作業の手順

図3 片振り荷重を受ける円孔付平板

図4 対称性を利用した要素分割モデル

4. FEM 解析を用いた強度評価の例

本実用講座 (I) において示されたのと同様な図3に示す円孔を有する有限幅の板が片振りの繰返し外荷重 (荷重振幅 $p_0=560\text{kN/mm}$) を受ける場合を例にとり C-D 断面上での荷重方向応力 σ_y の分布を FEM 解析によって求め、さらに、孔縁 C での疲労強度評価を行う。

4.1 応力解析

図4に示す要素分割で、MSC/NASTRAN の CQUAD4 要素を用いて計算を行った。その結果を図5に示す。円孔付有限幅板については、Howland の厳密解が知られており³⁾、 $\sigma_{yA}=378\text{MPa}$ となる。図3の場合は長さが有限であり、条件が少し異なるが、これを正解の目安と考える。計算された最も孔に近い要素の応力をとると、 $\sigma_{yE}=294\text{MPa}$ となり、誤差は 22% でかなり大きい。これに対して、もう一つ内側の要素応力値と合わせて直線外挿すると、 $\sigma_{yC}=336\text{MPa}$ となり、誤差は 11% と小さくなる。

4.2 疲労強度評価

疲労強度は、縦軸に応力振幅 σ_a をとり、横軸に破断ま

図5 応力分布の計算結果

図6 設計曲線による疲労強度評価の例

での繰返し数 N (対数目盛で表示) をとった $S-N$ 曲線で示される。今、図6に模式的に示す同一材質の平滑材片振り疲労試験データが得られており、これに稼働環境や材質ばらつきなどの要因に対する安全裕度を考慮した実線で示す疲労強度設計線図 ($S-N$ 線図) が与えられたとする。この設計線図を用いて上記の応力解析結果の評価を行ってみる。使用材料の静的引張強度を $\sigma_u=600\text{MPa}$ とし、図6の縦軸に合わせて応力解析値 σ_{yC} (外挿値) を σ_u で無次元化すると、 $\sigma_{yC}/\sigma_u=0.56$ となる。縦軸にこの値をとって設計曲線との交点を求め、この交点位置の横軸の値を読みとると、 $N=1.2 \times 10^4$ となっている。設計条件での稼働期間内の繰返し数が $N=2 \times 10^4$ であるとする、設計条件を満たさないことになるので、板厚を増すなどして公称応力を減らす必要があることがわかる。もし、応力解析結果として外挿値 σ_{yC} の代わりに要素応力 σ_{yE} をとる場合には、 $\sigma_{yE}/\sigma_u=0.49$ となり、図6に破線で示すように、これから破断までの回数を読みとると、 $N=2.1 \times 10^4$ となり、設計条件を満たしているという判断ミスを犯すことになる。このような例からも FEM 解析結果の数値の取り扱いには注意が必要であることがわかる。上記例のように素材のなめらかな形状の応力集中だけがある場合には、直接的に平滑材の疲労試験データが

図7 浮体式LPG貯蔵設備の全体解析モデル

図9 ジェットエンジンの全体解析モデル

(a) タンク前後端壁フレーム

(b) タンク垂直支持台

図8 ズーミング解析モデル

活用できるが、溶接継手のように幾何学的および材質的な応力集中が不明確な場合には、強度算定精度が格段に悪くなる。このために安全裕度を大きく取らざるを得なくなる。これを避けるためには、溶接継手は極力完全溶け込みとし、ビード止端を滑らかにすることが望ましい。

5. 実際の構造での適用例

FEMは、簡単な構造から実際の複雑な構造まで、またICチップのような小さいものから、船舶のような大きなものまで適用され解析が行われているが、ここでは、実際の複雑な構造物へ適用した例を示す。

(1) 浮体式LPG貯蔵設備の解析⁴⁾

浮体式LPG貯蔵設備は、海上に係留され、パイプラインにより陸上施設から搬送されるLPGの貯蔵積出しに使われる設備である。この設備は、低温用鋼製タンクを3基持っており、波荷重による溶接部の疲労強度が問題

となる。解析は、高い応力が発生する部材を確認する全体解析、その結果を用いて細部の精密な応力分布を求めるズーミング解析を行っている。全体解析およびズーミング解析のモデルを図7、図8に示す。ズーミング解析により求めた溶接ビード近傍の局部応力を用いて疲労強度評価を実施している。

(2) ジェットエンジンの解析

ジェット機の大型化・高効率化はジェットエンジンの構造にも大きな影響を及ぼしてきている。高効率化のためには、エンジンはできる限り軽くしなければならない。従って、エンジンは大型化に伴い、柔構造となり、ロータブレードとケーシングの接触の問題、振動の問題が重要となる⁵⁾。エンジン全体の解析により、運行荷重下での変形、応力が求められている。エンジン全体の解析モデルを図9に示す。

6. おわりに

本稿においては、主として、弾性変形範囲内での静解析と解析結果に基づく強度評価について触れたが、実製品の構造強度設計をFEM解析を利用して行うためには、この他に、熱変形・熱応力解析、動的解析、座屈強度解析、高温構造設計、接触問題など非線形性の強い高度な解析を伴うことが多い。これらについては、他の教科書や専門書を参考にされたい。

参考文献

- 1) 藤久保昌彦：応力解析の実際(Ⅰ)FEM解析，溶接学会誌，第66巻第3号(1997)
- 2) 岡田哲男他：直接計算に基づく船体構造設計，石川島播磨技報，第35巻第5号(1995年9月)
- 3) 西田正孝：応力集中，森北出版(1988)
- 4) 真鍋英男他：浮体式LPG貯蔵設備(LPGFSO)の構造設計，石川島播磨技報，第36巻第2号(1996年3月)
- 5) 大鍋寿一，船渡川始：有限要素法による構造設計の現状と将来，日本ガスタービン学会誌，Vol. 18, No. 71(1990)