構造解析の省力化を実現する 境界要素法応力解析システム

Boundary Element Stress Analysis System Realizing Labour-saving in Structure Analysis

構造解析でのデータ作成作業の大幅な低減を実現した境界要素法応力解析シ ステム"BEMETHOD/2D"を開発した。本システムは、日立製作所で開発し たデータ入出力を行う機械系統合プリ ポスト プロセッサHICAD/CADAS/W (Hitachi Computer Aided Design/Computer Aided Design Analysis of Structure System/Workstation)のもとで、ホストコンピュータおよびワーク ステーション上で活用が可能である。

江澤良孝* Yoshitaka Ezawa 岡本紀明* Noriaki Okamoto 小林久芳** Hisayoshi Kobayashi 中沢良夫** Yoshio Nakazawa

解析機能としては、一般の応力解析のほかに、機械部品などの接触部の解析、 相対的に摺(しゅう)動している部分の解析、き裂部の強度評価解析、溶接欠陥 など構造欠陥の解析、平板中の小さな穴のような広い領域中の微小部分の解析、 熱による応力発生解析などがある。本システムは、定式化および数値積分など をくふうすることによって、解析の高精度化を実現している。また、接触解析 では、新しいアルゴリズムを採用し、従来手法に比べ約10倍の高速化を実現し

1 はじめに

構造物の設計を行うにあたって,数値構造解析は今や不可 欠なものとなっている。構造解析作業で、いちばん手間がか かるのが入力データの作成である。従来よく使われているFEM (有限要素法)は、入力データの作成で要素分割の作業量が非 常に多くなるという欠点を持っていた。これに対しBEM(境界 要素法)は、構造物の表面だけを要素分割すれば解析が可能と なる特長を持っており、大幅な作業量の低減が可能であるい。 特に,局所的に応力集中のある問題,例えば溶接欠陥のよう な構造欠陥応力,き裂応力,接触応力などの問題の解析には 効果が大きい。BEMETHOD/2Dは、このような特徴を持っ たBEMによる汎(はん)用二次元応力解析システムである。解 析プログラムは、スーパーコンピュータ用、汎用ホストコン ピュータ用およびワークステーション用があり、機械系統合 プリ ポスト プロセッサHICAD/CADAS/W(Hitachi Computer Aided Design/Computer Aided Design Analysis of Structure System/Workstation)のもとで動作する。

2 BEMETHOD/2Dの概要と特長

- (1) 解析対象の境界面だけを要素分割すればよく,入力デー タの作成が容易
- (2) 高い解析精度
- (3) 高速な計算
- (4) 一般応力解析以外の特殊な解析にも対応 解析機能は次のとおりである。
- (1) 一般二次元弹性応力解析
- (2) 接触応力解析
- (3) き裂・欠陥応力解析
- (4) 熱応力解析
- (5) 無限領域の解析

システムの全体構成は、図1のようになっている。入力デ ータの作成は、ワークステーション2050G上のHICAD/ CADAS/Wのプリプロセッサを用いて行う。作成された入力 データは、ワークステーション上のデータベースに登録され る。解析プログラムは、スーパーコンピュータ用、汎用ホス トコンピュータ用およびワークステーション用があり、問題 のサイズに応じて使い分けられる。大形コンピュータで解析

本システムは、次のような特長を持っている。

するときは、作成入力データを大形コンピュータ上のデータ

77

* 日立製作所 機械研究所 工学博士 ** 日立製作所 情報システム開発本部

1072 日立評論 VOL. 73 No. 11(1991-11)

ベースに転送して,解析を実行する。また,大形計算機上で 解析した結果は、ワークステーションに転送し、HICAD/ CADAS/Wのポストプロセッサを用いて出力する。

従来,境界要素解析で等応力線図を出力するときは,内部 にセルと呼ばれる領域を生成する必要があった。しかし、セ ルの生成に手間がかかると、BEMの内部の要素分割が不要と いう長所がなくなりかねない。そこで、BEMETHOD/2Dで は、内部セルを自動生成し、簡単に等高線図が得られるよう にしている。

解析精度の向上 3

BEMは、構造全体の変位uと表面力tの関係を表す境界積分 方程式を求め、それを離散化した連立方程式を解く手法であ る。BEMの解析精度は、この式の境界積分の精度に大きく依 存する。数値積分方法としては、Legendre-Gauss積分公式が 有名である。しかし、この方法では物体表面に近い場所の値 (応力など)を求めるときに、解の精度が極端に悪くなり、解 が発散するという問題があった。そこで、BEMETHOD/2D

では、精度の出にくい特異性を持った積分に対しては、従来 よく使われていたLegendre-Gauss積分公式の代わりに、より 適した二重指数関数形積分公式を導入した2)。

中空円筒が内外表面を熱伝達によって熱せられたときの内 側での熱応力を求めたものを図2に示す。Legendre-Gauss積 分公式を用いた手法では、内外表面近くで解が発散している
 のに対し、二重指数関数形積分公式を用いたBEMETHOD/2D の解は、厳密解と非常によく一致していることがわかる。

さらにBEMETHOD/2Dでは、境界積分方程式そのものに も改良を加えている。従来の境界積分方程式は、力の平衡条 件を自動的に満足するようにはなっていなかったため、解析 精度に問題が生じることがあった。そこでBEMETHOD/2D では, Lagrangeの未定乗数法を用いて, 自動的に満足するよ うにした。

片持ばりの変形解析を、従来形の積分方程式を用いた場合 と改良形の方程式を用いた場合で比較したものを図3,4お よび表1に示す。図4から本システムが、従来形の解析より も精度がよいことがわかる。



計算時間の短縮 4

接触応力解析では,接触状態が荷重と変形に依存するため, 非線形問題となる。したがって、接触状態を求めるための反 復計算が不可欠であり,計算時間が長くなる原因となってい た。そこでBEMETHOD/2Dでは、接触解析を行うにあたっ て、接合ブロックの概念を導入した3)。これは、隣り合うブロ



(Hitachi Computer Aided Design/Computer Aided Design Analysis of Structure System/Workstation), CAE (Computer Aided Engineering)

BEMETHOD/2Dのシステム構成 ワークステーション版とホ 义 | ストコンピュータ版の2種から成り、両者はCAE用データファイルを介し て連結される。

78

-400L

注:記号など説明 →→ 厳密解, ● BEMETHOD/2D, O 従来法(ガウス)

図2 厚肉円筒の熱応力 45度の断面上の内部点応力分布を示す。 従来法では表面近傍で解が発散するのに対し,本システムでは厳密解と よく一致する。

構造解析の省力化を実現する境界要素法応力解析システム 1073

ックどうしを結合したり,分離したりする機能を持った特殊 なブロックである。反復計算時には,この接合ブロックの特 性だけを修正するようにした。さらに,反復時の連立方程式 の求解計算では,スーパーコンピュータを使った反復過程の 高速化技法を開発し,BEMETHOD/2Dに組み込んだ。これ は通常,係数マトリックスは,微小変形の仮定を用いること ができるときは,反復計算時の変化はほんのわずかであるこ とに注目した手法である。すなわち,反復時には変化成分が 解に与える影響ベクトルだけを計算するようにした。影響べ クトルはマトリックスの変化する行の数だけ求めればよく, また同じ行が反復修正されるときは改めて求め直す必要はない。さらにアルゴリズムのくふうによって影響ベクトルは複 数同時に求めることができる³⁾。

解析例を図5,6,7に示す。膜の付いた平板の上を円柱

表 | 片持ばりのメッシュ分割数 五つのメッシュ分割タイプを比較して示す。

メッシュ	分	割	要素	数
	т	п	FEM	BEM
А	10	2	20	24
В	20	4	80	48
С	25	5	125	60
D	50	10	500	120
E	100	20	2,000	240

注:略語説明 A, B, C, D, E(メッシュタイプ),

m(横方向分割数), n(縦方向分割数)







注:略語説明 FEM (有限要素法), BEM (境界要素法), n (縦方向分割数), m (横方向分割数), δ (変位)

図3 片持ばりの変形解析 はりの一端を固定し,他端に下向き荷 重をかけたときの変形を解析する。本システムでは,表面だけを要素分 割する。





ブロック1: $E_1 = 177$ MPa $\nu_1 = 0.3$ ブロック2: $E_2 = 245$ MPa $\nu_2 = 0.3$ ブロック3: $E_3 = 147$ MPa $\nu_3 = 0.3$ $\mu = 0.25$



注:略語説明 δ (変位の解析解), δ exact (変位の厳密解)

図 4 曲げ変形の精度比較 境界積分方程式に改良を加えた本シス テムは、従来のBEMに比べて精度が向上している。

注:略語説明 $E(ヤング率), \nu(ポアソン比), \mu(摩擦係数)$

図5 薄膜の付いた平板と円柱面の摺動 薄膜の付いた平板の上 を、円柱状の面を持つブロックが摺(しゅう)動する。

79

1074 日立評論 VOL.73 No.11(1991-11)



図6 接触点近傍の主せん断応力分布 薄膜中に応力の最大点が生じていることがわかる。

したものである。最大主せん断応力が、膜内になることがこ



図7 接触解析での求解CPU時間の比較 反復2回目以降では、従 来手法に比べて約10倍高速化している。

80

の解析からわかり,破壊開始が膜内から生じることなどが予 測できる。CPU時間は図7のようになる。ここでは初回(反復 番号=0)の計算に縦ブロックガウス法を用いている。反復2 回目以降は,CPU時間は従来解法の約10倍の高速化になって いる。本解析では3回の反復修正で解が収束した。反復回数 が多くなればなるほど,本手法が有利になってくることは明 らかである。

5 破壊強度のシミュレーション

構造物の強度を評価するときに問題になることのひとつは, 構造に生じたき裂や構造欠陥部分の応力集中である。破壊力 学では,応力拡大係数Kという概念でこの応力集中を評価し ている。応力拡大係数Kがある値以上になると破壊が始まる。 したがって,この応力拡大係数Kを正確に求めることが重要 になる。BEMETHOD/2Dでは,き裂および構造欠陥部分の 応力の特異性を表す特異要素を新たに開発し,応力拡大係数 を簡便かつ正確に求めることを可能とした⁴⁾。

フレッティング疲労試験に適用した例⁵が図8で,解析に用いたモデルの寸法,形状を示す。き裂は,実際のフレッティング疲労試験結果を参考にして,パッドとの接触端に接触面に垂直方向に入れた。

BEMETHOD/2Dを使って応力拡大係数Kを求めた例が 図9で、き裂長さとの関係を示している。同図から、変位を 一定値にする負荷制御方法のときには、き裂が長い領域では き裂長さが増加しても、応力拡大係数Kはあまり増加しない ことがわかる。すなわち、破壊が起こりにくいことがわかる。 これに対し荷重を一定値にする制御方法のときは、応力拡大

一定 状の面を持つブロックが摺(しゅう)動する問題を図5で示し き裂 ている。膜と円柱面の間に仮想的な接合ブロックを挿入した。 こと その解析結果が図6で,接触点近傍の主せん断応力分布を示 これ



a (き裂長さ), l (き裂までの距離)

図8 フレッティング疲労解析モデル 試験片の両側にパッドで圧 力を加え,き裂と垂直方向の荷重または変位を制御する。



図9 き裂長さと応力拡大係数の関係 変位制御条件下では、き裂 が長い領域ではき裂長さが増加しても、応力拡大係数Kはあまり増加し ないことがわかる。



図10 平板とブロックの接触応力分布 主せん断応力の分布をHICAD/CADAS/Wで出力した。要 素分割は各ブロックの周辺だけ行えばよい。

係数Kは単調増加し,破壊が進展することがわかる。

この解析例からもわかるように、BEMETHOD/2Dを用い

6 HICAD/CADAS/Wによる出力例

て,き裂・欠陥応力集中部の応力解析および応力拡大係数計 算を簡便に行うことができる。

BEMETHOD/2Dを使って解析し、HICAD/CADAS/Wか ら出力した例を次に述べる。

平板にブロックを押し込んだときの, 主せん断応力分布を 解析した例を図10に示す。ブロック角部近傍は応力集中が生

81

1076 日立評論 VOL.73 No. II(1991-II)



図II ガスタービンブレード取付部応力分布 主応力の分布を示す。赤は引張応力,青は圧縮 応力を示す。

じるので、FEMで解析するときには、角部近傍の要素分割を かなり細かくする必要がある。しかし、BEMETHOD/2Dで は、表面だけの分割で簡便に精度よく解析できる。

ガスタービンブレードの軸取付部の主応力分布を解析した 例を図11に示す。このようなより複雑な形状でも簡単に解析 することができる。

7 おわりに

構造解析での入力データ作成作業の大幅な低減を実現した 境界要素法応力解析システム "BEMETHOD/2D"は,機械 系統合プリポスト プロセッサHICAD/CADAS/Wのもとで, 簡便かつ高精度な解析環境を実現している。

参考文献

- Brebbia, C. A. : The Boundary Element Method for Engineering, Pentech Press Ltd. (1978)
- 2) 東町,外:境界要素法による構造解析の高精度化と実用化, 日本機械学会論文集,第468号A編,1967~1972(昭60-8)
- 3) Ezawa, Y., et al. : High-Speed Boundary Element Contact Stress Analysis Using a Super Computer, Boundary Element Techniques, Computational Mechanics Publications. (1989)
- 4) Ezawa, Y., et al.: Singularity Modeling in Two- and Three-dimensional Stress Intensity Factor Computation Using the Boundary Element Method, Boundary Elements VII, Springer-Verlag. (1985)
- 5) 坂田,外:フレッティング疲労き裂の停留・進展挙動,日本機 械学会日立地方講演会論文集,37~39(昭60-9)

