

JAERI-Data/Code

97-054



脆性材料の強度評価コード「STEP」

1997年12月

石原正博・二川正敏

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

脆性材料の強度評価コード「STEP」

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

石原 正博・二川 正敏<sup>+</sup>

(1997年11月28日受理)

黒鉛、セラミックス等の脆性材料を用いた構造設計には、複雑な応力分布を有する構造物の強度評価が必要である。一方、これら脆性材料の強度は応力分布の影響を受けることが一般的に認められているが、現在の構造設計基準では煩雑さを避ける観点から応力分布下の強度特性を考慮せず保守性を優先させた簡略的な応力制限を採用している。このため、複雑な応力分布を有する構造物の強度を脆性材料の破壊理論に基づき合理的に評価することが重要な課題となっているが、現在このような解析コードは皆無である。そこで、競合リスク理論に基づきセラミックスの脆性破壊強度を評価する計算コード「STEP」(Strength Evaluation Program)を開発した。本計算コードは、脆性材料の破壊様式を表面クラックによる表面破壊モードおよび内部クラックによる内部破壊モードに区別して扱い、評価対象物の応力分布の解析結果を用いてその脆性破壊強度を評価するものである。構造物の応力分布は、汎用の有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」で解析し、その応力分布の解析結果を「STEP」コードの入力とすることで、複雑形状の構造物の脆性破壊強度が評価できる。本解析コードは、任意形状をした構造物の構造健全性評価用として、HTTR炉内黒鉛構造物、セラミックス材料を用いた熱交換機等に有用なものである。

本報告書は、「STEP」コードで扱う基礎式、「ABAQUS」コードと組み合わせたシステム構成および検証解析結果について述べている。

Strength Evaluation Code 「STEP」 for Brittle Materials

Masahiro ISHIHARA and Masatoshi FUTAKAWA<sup>+</sup>

Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 28, 1997)

In a structural design using brittle materials such as graphite and/or ceramics it is necessary to evaluate the strength of component under complex stress condition. The strength of ceramic materials is said to be influenced by the stress distribution. However, in the structural design criteria simplified stress limits had been adopted without taking account of the strength change with the stress distribution. It is, therefore, important to evaluate the strength of component on the basis of the fracture model for brittle material. Consequently, the strength evaluation program, STEP, on a brittle fracture of ceramic materials based on the competing risk theory had been developed. Two different brittle fracture modes, a surface layer fracture mode dominated by surface flaws and an internal fracture mode by internal flaws, are treated in the STEP code in order to evaluate the strength of brittle fracture. The STEP code uses stress calculation results including complex shape of structures analyzed by the generalized FEM stress analysis code, ABAQUS, so as to be possible to evaluate the strength of brittle fracture for the structures having complicate shapes. This code is, therefore, useful to evaluate the structural integrity of arbitrary shapes of components such as core graphite components in the HTTR, heat exchanger components made of ceramics materials etc. This paper describes the basic equations applying to the STEP code, code system with a combination of the STEP and the ABAQUS codes and the result of the verification analysis.

Keywords: Strength Analysis, Brittle Fracture, Ceramics, Graphite, Competing Risk Theory,  
Structural Integrity

---

<sup>+</sup> Department of Materials Science and Engineering

## 目 次

1. 緒 論 .....	1
2. 競合リスク理論に基づく強度評価の基礎式 .....	2
3. 離散化した解析モデルへの拡張 .....	5
3.1 任意形状をした評価対象物の破壊の危険率 .....	5
3.2 引張強度に対する破壊の危険率 .....	7
3.3 4点曲げ強度に対する破壊の危険率 .....	8
3.4 任意形状をした評価対象物の強度 .....	10
3.5 解析フロー .....	12
3.6 システム構成 .....	13
4. 検証解析 .....	19
4.1 解析条件 .....	19
4.2 FEM解析モデル .....	19
4.3 FEM解析結果 .....	20
4.4 誤差評価 .....	20
5. 結 言 .....	24
謝 辞 .....	24
参考文献 .....	24
付録 「STEP」コードのプログラム構成 .....	25

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Fundamental Equations Based on the Competing Risk Theory .....	2
3. Analytical Model .....	5
3.1 Risk of Rupture in Arbitrary Shape of Structure .....	5
3.2 Risk of Rupture in Tensile Strength .....	7
3.3 Risk of Rupture in 4-point Bending Strength .....	8
3.4 Strength in Arbitrary Shape of Structure .....	10
3.5 Analytical Flow .....	12
3.6 Analytical System .....	13
4. Verification Analysis .....	19
4.1 Analytical Condition .....	19
4.2 Analytical Model in FEM Analysis .....	19
4.3 Analytical Results in FEM Analysis .....	20
4.4 Evaluation of Analytical Error .....	20
5. Conclusions .....	24
Acknowledgement .....	24
Reference .....	24
Appendix Program Constitution of 「STEP」 Code .....	25

## 1. 緒 論

黒鉛、セラミックス等の脆性材料を用いた構造設計には、複雑な応力分布を有する構造物の強度評価が必要である。これら脆性材料では、強度の応力勾配効果が知られていて、たとえば引張強度よりも応力分布を有した曲げ強度の方が高い値を示す<sup>(1)</sup>。現在確立されている脆性材料の構造設計基準として原子炉用黒鉛構造設計基準<sup>(2)</sup>があるが、基準では煩雑さを避ける観点からこの強度の応力勾配効果を考慮せず保守性を優先させた簡略的な応力制限としている。このため、脆性材料の強度理論に基づき複雑な応力分布を有する構造物の強度を合理的に評価することが、構造設計手法の高度化の観点から重要な課題となっている。

脆性材料の強度理論としては、古くから最弱リンク説として説明される Weibull理論が提案され<sup>(3)</sup>、脆性材料の強度特性を概略評価するものとして広く用いられてきた。しかし、Weibull理論では、応力分布や試験片体積が異なる状態における強度を概略評価する際、強度データを確率論的に扱うことから破壊様式の物理的なモデルとの関連において曖昧さがある。一方、競合リスク理論に基づき脆性材料の破壊を種々の破壊様式に分けて扱う破壊理論も提案されている<sup>(4)</sup>。これは、上述のWeibull理論と比較すると破壊現象との関連がより明確なモデルとなっている。破壊様式として、(1)内部欠陥に起因する破壊様式、(2)表面欠陥に起因する破壊様式および(3)角部の欠陥に起因する破壊様式を想定し、それぞれの破壊様式が支配的な領域として試験片の体積、表面積及び角部の長さを考慮した競合リスク理論に基づく定式化がなされている<sup>(5,6)</sup>。さらに、これを用いてセラミックスの3点曲げ強度試験データあるいは4点曲げ強度試験データの確率分布が検討されている<sup>(6,7)</sup>。

しかし、上述した複雑な応力分布を有する構造物の脆性破壊強度についての検討例はなく、また、当然のことながら脆性材料の強度理論を考慮した強度評価コードも現在皆無の状態にある。そこで、破壊現象との関連が明瞭な競合リスク理論に基づく破壊モデルを適用して、有限要素法による詳細な応力解析結果を用いて脆性破壊強度を解析するコード「STEP」(Strength Evaluation Program)を開発した。また、構造物は一般的に任意形状で荷重負荷条件、拘束条件等が複雑であるため、有限要素法等による応力解析と組み合わせて評価対象物の脆性破壊強度を評価することから、汎用の有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」と組み合わせたコードシステムとした。ここで、「STEP」コードでは、脆性材料の破壊様式として、上記(1)および(2)の表面欠陥および内部欠陥に起因する破壊様式を考慮している。なお、本コードでは有限要素法による詳細な応力解析結果を用いて脆性破壊強度を評価するため、(3)の角部での破壊様式が表面欠陥および内部欠陥による破壊様式として考慮できることから角部の破壊モードは考慮していない。

本報告では、競合リスク理論に基づき脆性破壊強度を評価するための「STEP」コードで扱う基礎式および「STEP」と汎用の有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」とを組み合わせたシステム構成および検証解析結果について述べる。

## 2. 競合リスク理論に基づく強度評価の基礎式

実材料は複数の破壊要因をもつことが多く、いくつもの破壊要因が互いに競合して、そのうち最も弱い破壊要因によって破壊するものと考えられる。Fig.2-1に示すように、 $j$ を破壊要因の種類の数、 $R_k$ を $k$ 番目の破壊要因による(1)式で定義される破壊の危険率 (Risk of rupture)、 $P_k$ を $k$ 番目の破壊要因のみによる破壊の危険率とする。

$$R_k = \int_{V_k} \{(\sigma - \sigma_{uk}) / \sigma_{ok}\}^{m_k} dv_k \quad (1)$$

ここで、 $V_k$  :  $k$ 番目の破壊要因を考慮すべき領域の体積

$\sigma$  : 発生応力

$\sigma_{uk}$  :  $k$ 番目の破壊要因に関する位置母数 (Location parameter)

$\sigma_{ok}$  :  $k$ 番目の破壊要因に関する尺度母数 (Scale parameter)

$m_k$  :  $k$ 番目の破壊要因に関する形状母数 (Shape parameter) またはワイブル係数 (Weibull parameter)

評価対象物全体の破壊しない確率  $1 - P(\sigma)$  は、それぞれの破壊要因により破壊しない確率の積となり、次式で表される。

$$\begin{aligned} 1 - P(\sigma) &= (1 - P_1)(1 - P_2) \cdots (1 - P_j) \\ &= \exp\left\{ - \sum_{k=1}^{k=j} R_k \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

したがって、評価対象物全体の破壊確率  $P(\sigma)$  は、

$$P(\sigma) = 1 - \exp\left\{ - \sum_{k=1}^{k=j} R_k \right\} \quad (3)$$

となり、破壊の危険率の加算性を示す式となる。なお、破壊要因  $k$  をもつ試験片の強度の平均値  $\mu_k$ 、標準偏差  $Std_k$ 、変動係数  $Cov_k$  はそれぞれ以下のように与えられる。

$$\mu_k = \sigma_{ok} \cdot \gamma (1 + 1/m_k) \quad (4)$$

$$Std_k = \sigma_{ok} \cdot \{\gamma (1 + 2/m_k) - \gamma^2 (1 + 1/m_k)\}^{1/2} \quad (5)$$

$$Cov_k = \frac{\{\gamma (1 + 2/m_k) - \gamma^2 (1 + 1/m_k)\}^{1/2}}{\gamma (1 + 1/m_k)} \quad (6)$$



ここで、 $\gamma$ はガンマ関数である。

破壊様式として、表面欠陥に起因する表層破壊様式と内部欠陥に起因する内部破壊様式を考え、それぞれの破壊様式に対する破壊の危険率を $R_s, R_i$ とする。試験片全体の破壊の危険率は、

$$R = R_s + R_i \quad (7)$$

で与えられる。ここで、破壊の危険率 $R_s, R_i$ は、

$$R_s = \int_{V_s} \{(\sigma - \sigma_{us}) / \sigma_{os}\}^{m_s} dv_s \quad (8)$$

$$R_i = \int_{V_i} \{(\sigma - \sigma_{ui}) / \sigma_{oi}\}^{m_i} dv_i \quad (9)$$

で定義され、

$V_s, V_i$  : 表層破壊および内部破壊の支配的な領域の体積

$\sigma_{us}, \sigma_{ui}$  : 表層破壊および内部破壊に対する位置母数 (Location parameter)

$\sigma_{os}, \sigma_{oi}$  : 表層破壊および内部破壊に対する尺度母数 (Scale parameter)

$m_s, m_i$  : 表層破壊および内部破壊に対するWeibull係数

である。

任意形状をした評価対象物の強度は、評価対象物について(7)式により求めた破壊の危険率と標準試験法に従って同じく(7)式で求められる基準強度、たとえば引張強度等に対する破壊の危険率とを等しくおくことにより評価される。

なお、破壊の危険率は、引張応力の作用している領域について体積積分することにより評価する。

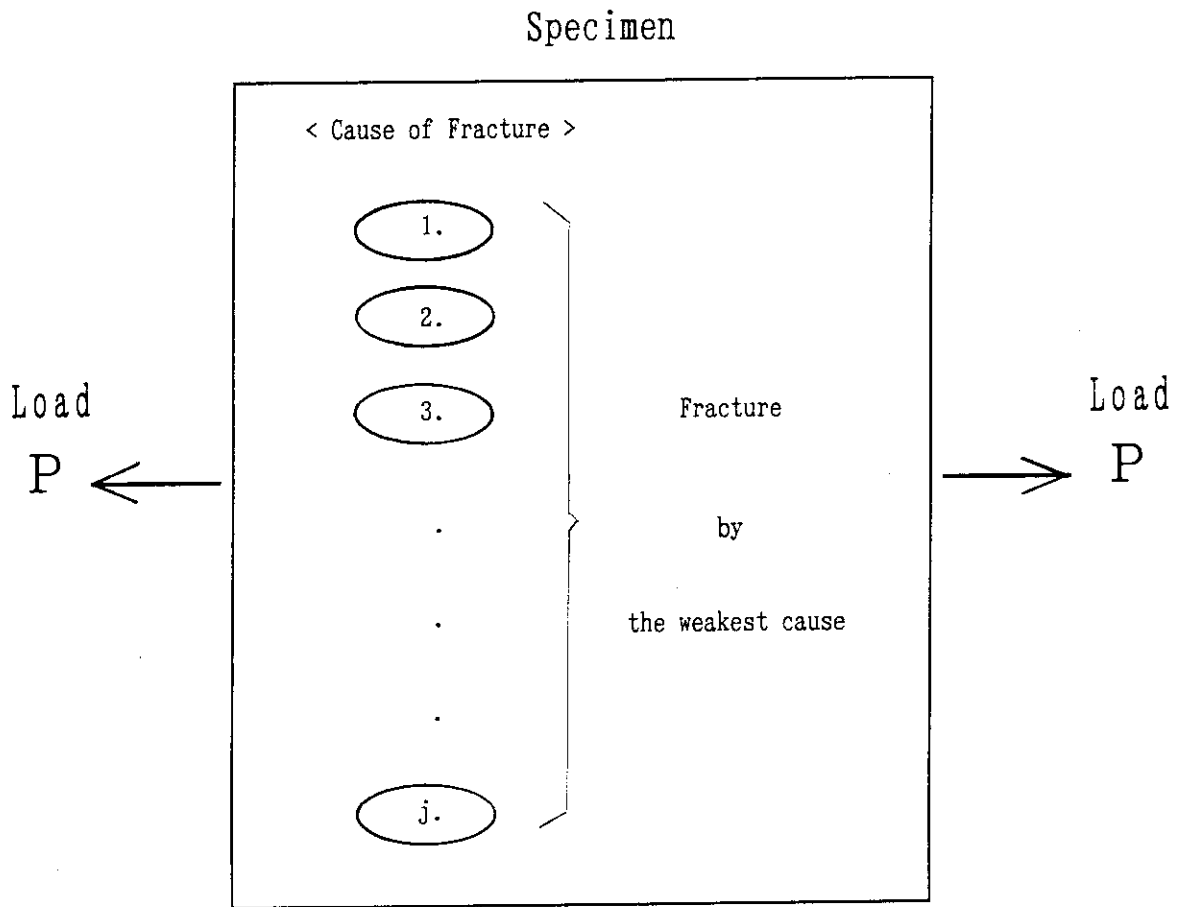


Fig.2-1 Fracture by competing risk model.

### 3. 離散化した解析モデルへの拡張

#### 3. 1 任意形状をした評価対象物の破壊の危険率

一例として、任意形状をした評価対象物の破壊強度を評価するための応力解析メッシュ例を Fig.3-1に示す。同図に示すように、「STEP」コードでは、表面欠陥による表層破壊の支配的な領域として、深さ $h_s$ なる表層部を考慮する。また、内部欠陥による内部破壊の支配的な領域としては、 $h_s$ なる表層部を除いた領域を考慮する。したがって、競合リスク理論に基づく破壊モデルで定式化されている表面破壊および内部破壊の扱いとは異なり、表層部の粗さや損傷等を定量的に評価できる。

Fig.3-1において、 $z$ 方向に $N_z$ 層に分割されたメッシュの $k$ 番目の層に属する要素のうち、要素内の各節点の応力値が正（引張応力）である要素で表層破壊様式および内部破壊様式を考慮する要素数を $N_{k,s}$ 、 $N_{k,i}$ とし、図に示すようにそれぞれの破壊様式を考慮する要素番号を $1, 2, 3, \dots, j, \dots, (N_{k,s}-1), (N_{k,s})$ および $1, 2, 3, \dots, j, \dots, (N_{k,i}-1), (N_{k,i})$ とする。また、 $k$ 層中 $j$ 番目の要素を $elm(k, j)$ とすると、表層破壊および内部破壊様式を考慮すべき要素に対する破壊の危険率 $Relm(k, j)_s$ 、 $Relm(k, j)_i$ は、

$$Relm(k, j)_s = \int_x \int_y \int_z \{(\sigma_{k,j}(x, y, z) - \sigma_{us}) / \sigma_{os}\}^{m_s} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (10)$$

$$Relm(k, j)_i = \int_x \int_y \int_z \{(\sigma_{k,j}(x, y, z) - \sigma_{us}) / \sigma_{os}\}^{m_i} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (11)$$

となる。ここで、 $\sigma_{k,j}(x, y, z)$ は解析対象要素 $elm(k, j)$ 内の応力分布で、体積積分は解析対象要素についておこなう。

したがって、評価対象物全体の表層破壊および内部破壊様式に対する破壊の危険率 $R_s$ 、 $R_i$ は、各要素に対する破壊の危険率を加算して、

$$R_s = (1/F) \cdot \left\{ \sum_{k=1}^{k=N_z} \sum_{j=1}^{j=N_{k,s}} Relm(k, j)_s \right\} \quad (12)$$

$$R_i = (1/F) \cdot \left\{ \sum_{k=1}^{k=N_z} \sum_{j=1}^{j=N_{k,i}} Relm(k, j)_i \right\} \quad (13)$$

ここで、 $F$ はモデリング係数で対象性を考慮したメッシュモデルを用いた場合の補正係数である。

評価対象物について計算した発生応力のうち、最大値 $\sigma_{max}$ を用いて評価対象物全体に対する破壊の危険率 $R_{arbit}$ を以下のように変形しておく。

$$\begin{aligned} R_{arbit} &= R_s + R_i \\ &= (\sigma_{max})^{m_s} \cdot f_1(x, y, z) + (\sigma_{max})^{m_i} \cdot f_2(x, y, z) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $f_1(x, y, z)$ および $f_2(x, y, z)$ は、 $\sigma_{us} = \sigma_{ui} = 0$ のときには、

$$\begin{aligned} f_1(x, y, z) &= (\sigma_{max})^{-m_s} \cdot (1/F) \cdot \left\{ \sum_{j=1}^{j=N_{1,s}} \int_x \int_y \int_z (\sigma_{1,j}(x, y, z) / \sigma_{os})^{m_s} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \right. \\ &\quad \dots + \sum_{j=1}^{j=N_{k,s}} \int_x \int_y \int_z (\sigma_{k,j}(x, y, z) / \sigma_{os})^{m_s} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \\ &\quad \left. \dots + \sum_{j=1}^{j=N_{z,s}} \int_x \int_y \int_z (\sigma_{Nz,j}(x, y, z) / \sigma_{os})^{m_s} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} f_2(x, y, z) &= (\sigma_{max})^{-m_i} \cdot (1/F) \cdot \left\{ \sum_{j=1}^{j=N_{1,i}} \int_x \int_y \int_z (\sigma_{1,j}(x, y, z) / \sigma_{oi})^{m_i} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \right. \\ &\quad \dots + \sum_{j=1}^{j=N_{k,i}} \int_x \int_y \int_z (\sigma_{k,j}(x, y, z) / \sigma_{oi})^{m_i} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \\ &\quad \left. \dots + \sum_{j=1}^{j=N_{z,i}} \int_x \int_y \int_z (\sigma_{Nz,j}(x, y, z) / \sigma_{oi})^{m_i} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

となる。

### 3. 2 引張強度に対する破壊の危険率

任意形状をした評価対象物の強度を引張強度を基準強度として求める場合には、引張強度に対する破壊の危険率を計算する必要がある。

「STEP」コードで扱う引張試験片の形状をFig.3-2に示す。試験片形状は、(1)矩形形状および(2)円柱形状である。これら試験片に発生する引張応力を $\sigma_t$ とすると、引張試験片全体の破壊の危険率 $R_t$ は、それぞれ以下のように計算される。

$$R_t = R_s + R_i$$

$$= \int_{V_s} \{(\sigma_t - \sigma_{us})/\sigma_{os}\}^{ms} dv_s + \int_{V_i} \{(\sigma_t - \sigma_{ui})/\sigma_{oi}\}^{mi} dv_i \quad (17)$$

ここで、表層破壊を考慮する体積 $V_s$ および内部破壊を考慮する体積 $V_i$ は、それぞれ矩形形状および円柱形状の試験片に対して、以下の関係がある。

(1)矩形形状引張試験片

$$\left. \begin{aligned} v_s + v_i &= T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \\ v_i &= (T_1 - 2h_s) \cdot T_2 \cdot (T_3 - 2h_s) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

(2)円柱形状引張試験片

$$\left. \begin{aligned} v_s + v_i &= \pi \cdot (T_4/2)^2 \cdot T_2 \\ v_i &= \pi \cdot \{(T_4 - 2h_s)/2\}^2 \cdot T_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

任意形状をした評価対象物の破壊の危険率と同様、引張応力を $\sigma_t$ を用いて(17)式を以下のように変形する。

$$R_t = R_s + R_i$$

$$= (\sigma_t)^{ms} \cdot f_3 + (\sigma_t)^{mi} \cdot f_4 \quad (20)$$

なお、 $f_3$ および $f_4$ は、位置母数 $\sigma_{us} = \sigma_{ui} = 0$ のときには、

$$f_3 = (\sigma_t)^{-ms} \cdot \int_{V_s} (\sigma_t/\sigma_{os})^{ms} dv_s \quad (21)$$

$$f_4 = (\sigma_t)^{-mi} \cdot \int_{V_i} (\sigma_t/\sigma_{oi})^{mi} dv_i \quad (22)$$

となる。

### 3.3 4点曲げ強度に対する破壊の危険率

4点曲げ強度を基準強度として任意形状をした評価対象物の強度を求める場合には、4点曲げ強度に対する破壊の危険率を計算する必要がある。

「STEP」コードで扱う4点曲げ強度試験片および曲げ荷重の負荷条件をFig.3-3に示す。試験片は、幅**b**、長さ**(L+2a)**、高さ**h**の矩形断面形状の試験片で、4点曲げ荷重は内スパン長さ**L**外スパン長さ**(L+2a)**で負荷する。4点曲げ強度を $\sigma_{4b}$ とすると、Fig.3-3の①、③の領域および②の領域では曲げ応力 $\sigma_b$ は、

$$\begin{aligned}\sigma_{4b} &= My/I_z \\ &= 12 \cdot Pxy / (bh^3) && \text{(①、③の領域)} \\ &= 12 \cdot Pay / (bh^3) && \text{(②の領域)}\end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned}\sigma_{4b} &= My/I_z \\ &= 12 \cdot Pxy / (bh^3) \\ &= 12 \cdot Pay / (bh^3)\end{aligned}} \right\} \quad (23)$$

であるから、破壊の危険率は

$$\begin{aligned}R_{4b} &= R_s + R_i \\ &= \left[ 2 \cdot \int_0^a \int_{(h/2)-hs}^{h/2} \left[ \left\{ (12 \cdot Pxy) / (bh^3) - \sigma_{us} \right\} / \sigma_{os} \right]^{ms} b dx dy \right. \\ &\quad \left. + \int_{(h/2)-hs}^{h/2} \left[ \left\{ (12 \cdot Pay) / (bh^3) - \sigma_{us} \right\} / \sigma_{os} \right]^{ms} b L dy \right] \\ &\quad + \left[ 2 \cdot \int_0^a \int_0^{(h/2)-hs} \left[ \left\{ (12 \cdot Pxy) / (bh^3) - \sigma_{ui} \right\} / \sigma_{oi} \right]^{mi} b dx dy \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{(h/2)-hs} \left[ \left\{ (12 \cdot Pay) / (bh^3) - \sigma_{ui} \right\} / \sigma_{oi} \right]^{mi} b L dy \right] \quad (24)\end{aligned}$$

となる。ここで、4点曲げ強度 $\sigma_{4bmax}$ を用いて(24)式を以下のように変形する。

$$R_{4b} = (\sigma_{4bmax})^{ms} \cdot f_s(x, y) + (\sigma_{4bmax})^{mi} \cdot f_i(x, y) \quad (25)$$

なお、4点曲げ強度 $\sigma_{4bmax}$ は、

$$\sigma_{4bmax} = (6 \cdot Pa) / (bh^2) \quad (26)$$

である。

また、位置母数  $\sigma_{us} = \sigma_{ui} = 0$  のときには、 $f_s(x, y)$  および  $f_o(x, y)$  は

$$f_s(x, y) = \sigma_{os}^{-ms} \left[ 2 \cdot \int_0^a \int_{(h/2) - hs}^{h/2} \{2xy/(ha)\}^{ms} b dx dy \right. \\ \left. + \int_{(h/2) - hs}^{h/2} (2y/h)^{ms} b L dy \right] \quad (27)$$

$$f_o(x, y) = \sigma_{oi}^{-mi} \left[ 2 \cdot \int_0^a \int_0^{(h/2) - hs} \{2xy/(ha)\}^{mi} b dx dy \right. \\ \left. + \int_0^{(h/2) - hs} (2y/h)^{mi} b L dy \right] \quad (28)$$

となる。

### 3. 4 任意形状をした評価対象物の強度

#### (1) 基準強度を引張強度とした場合の評価

任意形状の評価対象物の強度は、(14)および(20)式で計算される破壊の危険率 $R_{arbit}$ および $R_t$ を等しくおくことにより評価される。すなわち、

$$\begin{aligned} (\sigma_{max})^{ms} \cdot f_1(x,y,z) + (\sigma_{max})^{mi} \cdot f_2(x,y,z) \\ = (\sigma_t)^{ms} \cdot f_3 + (\sigma_t)^{mi} \cdot f_4 \end{aligned} \quad (29)$$

である。両辺を $(\sigma_{max})^{ms}$ および $(\sigma_t)^{ms}$ で整理すると

$$\begin{aligned} (\sigma_{max})^{ms} \{f_1(x,y,z) + (\sigma_{max})^{mi-ms} \cdot f_2(x,y,z)\} \\ = (\sigma_t)^{ms} \{f_3 + (\sigma_t)^{mi-ms} \cdot f_4\} \end{aligned} \quad (30)$$

となる。任意形状の評価対象物の強度と引張強度の比 $R_{ft}$ が、

$$\begin{aligned} R_{ft} &= \sigma_{max} / \sigma_t \\ &= \left\{ \frac{f_3 + (\sigma_t)^{mi-ms} \cdot f_4}{f_1(x,y) + (\sigma_{max})^{mi-ms} \cdot f_2(x,y)} \right\}^{1/ms} \end{aligned} \quad (31)$$

により求められる。したがって、任意形状の評価対象物の強度 $\sigma_{max}$ は、

$$\sigma_{max} = R_{ft} \cdot \sigma_t \quad (32)$$

により計算される。

すなわち、引張強度データのみからの情報から任意形状の構造体の強度を評価することが可能となる。



## (2) 基準強度を4点曲げ強度とした場合の評価

任意形状の評価対象物の強度は、(14)式および(25)式で計算される破壊の危険率 $R_{arbit}$ および $R_{4b}$ を等しくおくことにより評価される。すなわち、

$$\begin{aligned} & (\sigma_{\max})^{m_s} \cdot f_1(x, y, z) + (\sigma_{\max})^{m_i} \cdot f_2(x, y, z) \\ & = (\sigma_{4b\max})^{m_s} \cdot f_5(x, y) + (\sigma_{4b\max})^{m_i} \cdot f_6(x, y) \end{aligned} \quad (33)$$

である。両辺を $(\sigma_{\max})^{m_s}$ および $(\sigma_{4b\max})^{m_s}$ で整理すると

$$\begin{aligned} & (\sigma_{\max})^{m_s} \{f_1(x, y, z) + (\sigma_{\max})^{m_i - m_s} \cdot f_2(x, y, z)\} \\ & = (\sigma_{4b\max})^{m_s} \{f_5(x, y) + (\sigma_{4b\max})^{m_i - m_s} \cdot f_6(x, y)\} \end{aligned} \quad (34)$$

となるから、任意形状の評価対象物の強度と4点曲げ強度との比 $R_{f4b}$ が、

$$\begin{aligned} R_{f4b} & = \sigma_{\max} / \sigma_{4b\max} \\ & = \left\{ \frac{f_5(x, y) + (\sigma_{4b\max})^{m_i - m_s} \cdot f_6(x, y)}{f_1(x, y, z) + (\sigma_{\max})^{m_i - m_s} \cdot f_2(x, y, z)} \right\}^{1/m_s} \end{aligned} \quad (35)$$

により求められる。したがって、任意形状の評価対象物の強度 $\sigma_{\max}$ は、

$$\sigma_{\max} = R_{f4b} \cdot \sigma_{4b\max} \quad (36)$$

により計算される。

すなわち、4点曲げ強度データのみ情報から任意形状の構造体の強度を評価することが可能となる。

なお、(31)および(35)式は、一つの式の中に二つの未知数を含んだ不定形となっているため、両辺の値が等しくなるように数値解析的な反復計算フローを用いて解く。

### 3.5 解析フロー

「STEP」コードでは、Fig.3-4に示す解析フローにより任意形状をした評価対象物の強度評価を行う。

- (1)INPUTルーチンでは、有限要素法による詳細な評価対象物の応力解析結果の出力ファイルから、要素および節点に関する情報を解析コードに読み込む。「STEP」コードに必要なデータは、要素数、要素番号と要素を構成する節点番号、節点の座標、節点での応力値である。
- (2)破壊の危険率の計算は、引張応力の生じている領域で考慮するため、解析に必要なデータを入力後、まず、各要素について要素を構成する節点の応力値が全て正（引張応力）となる要素を選ぶ。
- (3)次に、要素を構成する節点の応力値を用いて、要素内の応力分布を多項式近似する。応力分布の評価では、評価対象要素を取り囲む要素の応力値も考慮する。
- (4)各要素について、破壊の危険率を計算する。
- (5)各要素毎の破壊の危険率を表層破壊様式、内部破壊様式に区別して加算し、評価対象物の破壊の危険率を評価する。
- (6)引張あるいは4点曲げ強度試験片に対する破壊の危険率との比較から、評価対象物の強度を評価する。

なお、参考までに「STEP」コードのプログラム構成を別添に示す。

### 3.6 システム構成

「STEP」コードと汎用有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」と組み合わせたシステム構成をFig.3-5に示す。「STEP」コードでは、「ABAQUS」コードの応力計算結果ファイルにアクセスして、要素、節点に関する情報を読み込む。「STEP」コードを作動させるには、このほか解析パラメータ等「STEP」コードの実行データの格納された入力データファイル、さらに「STEP」コードの入出力ファイルを制御するコントロールデータファイルが必要である。「STEP」コードからの出力データは、強度評価結果ファイル、要素・節点情報ファイル、多項式近似結果ファイル、積分データファイルに格納される。

なお、「STEP」コードへの入力データファイルに書き込む主な情報は、

- ・ 表層破壊および内部破壊に対するWeibull parameter
- ・ 表層破壊および内部破壊に対するScale parameter
- ・ 表層破壊を考慮すべき領域の深さ
- ・ 評価対象物に対するモデリング係数
- ・ 基準強度試験片の形状

である。

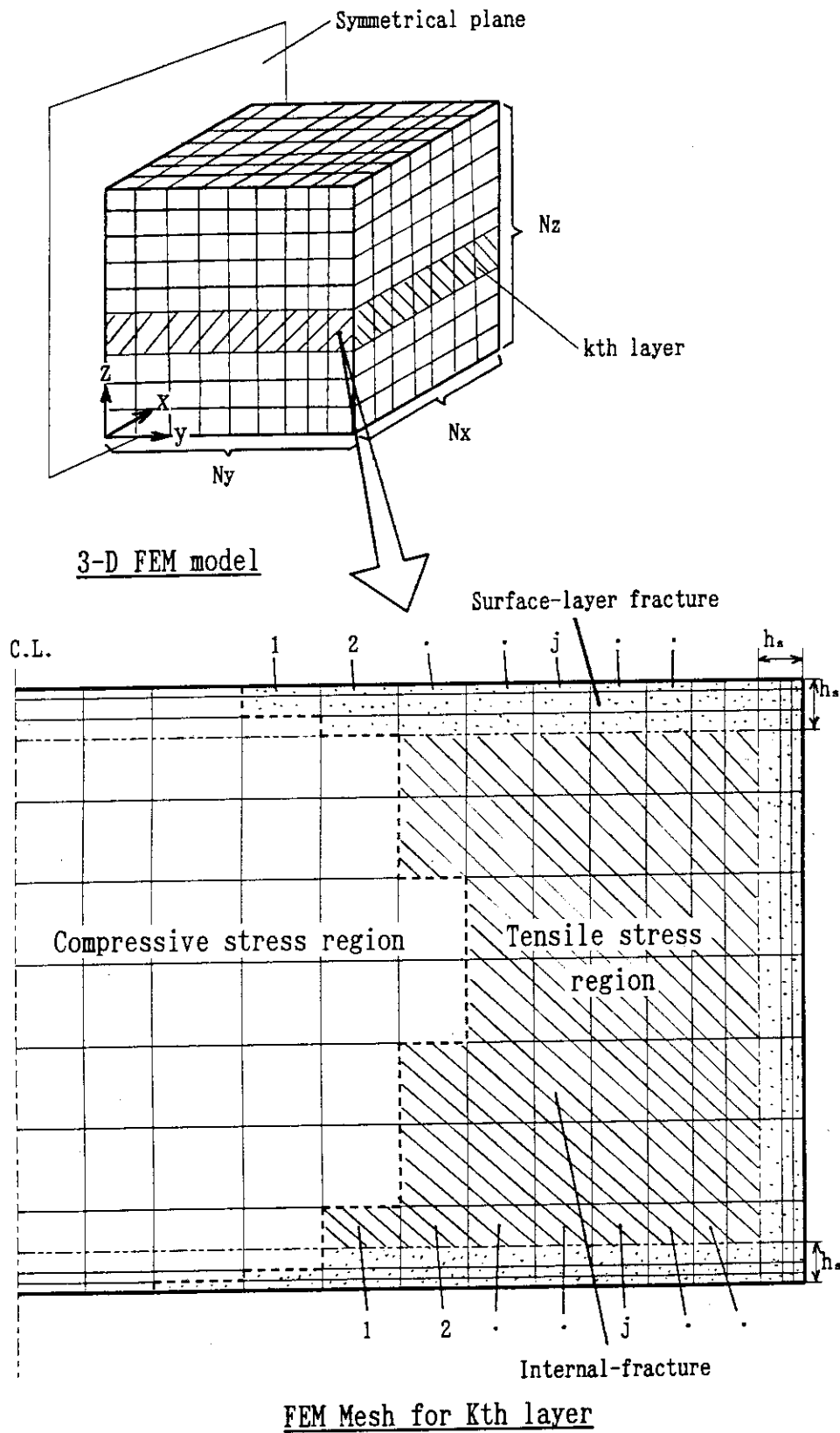
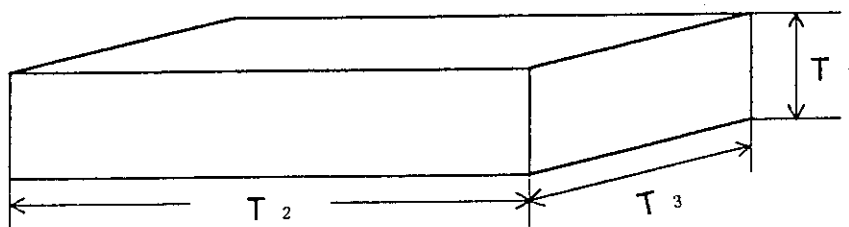
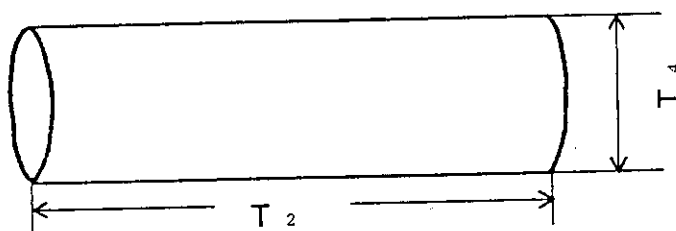


Fig.3-1 Application of the competing risk model to FEM analysis.



(1) Rectangular specimen



(2) Cylindrical specimen

Fig.3-2 Specimen configuration of tensile strength test.

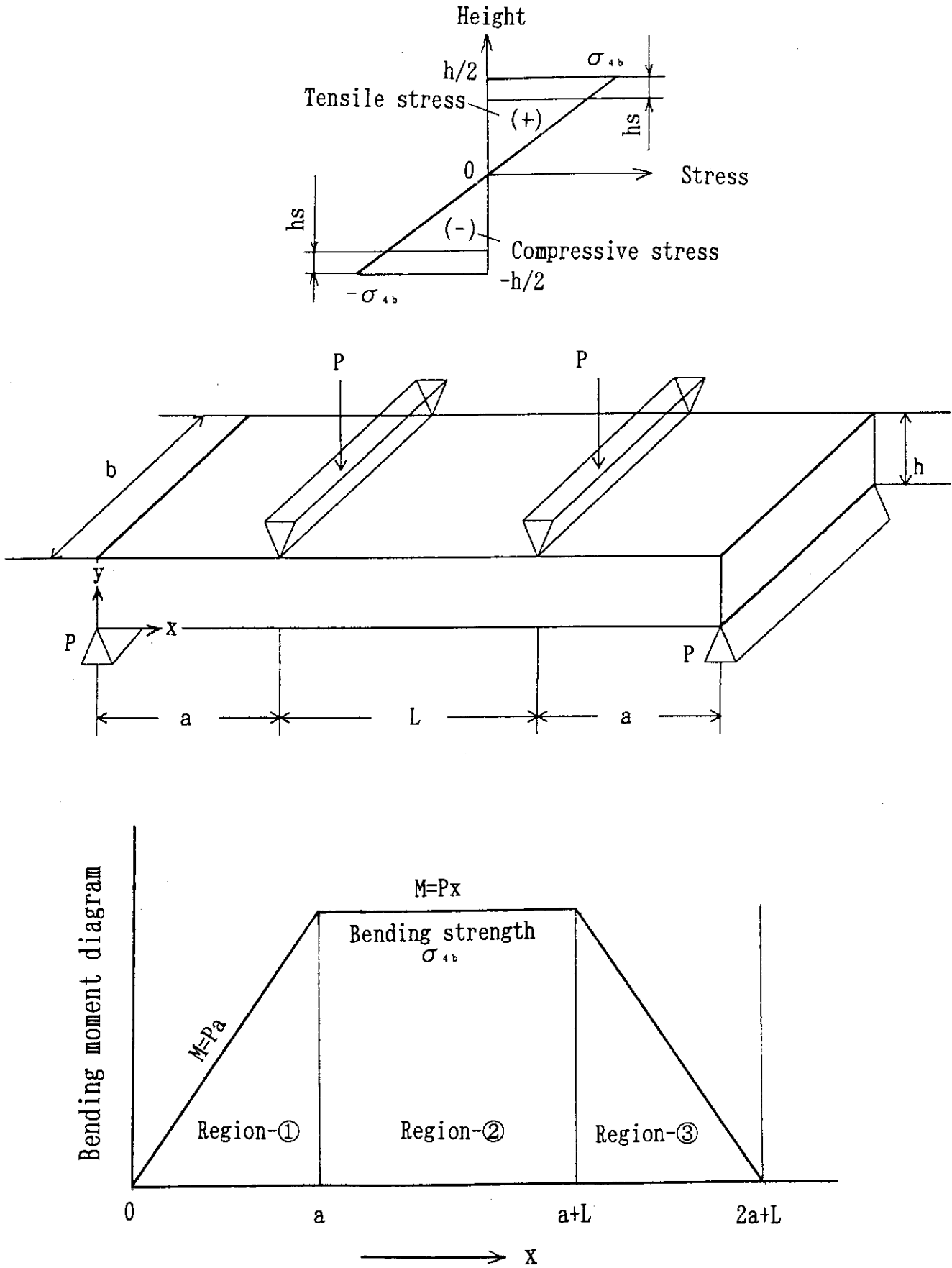


Fig.3-3 Specimen configuration of 4-point bending strength test.

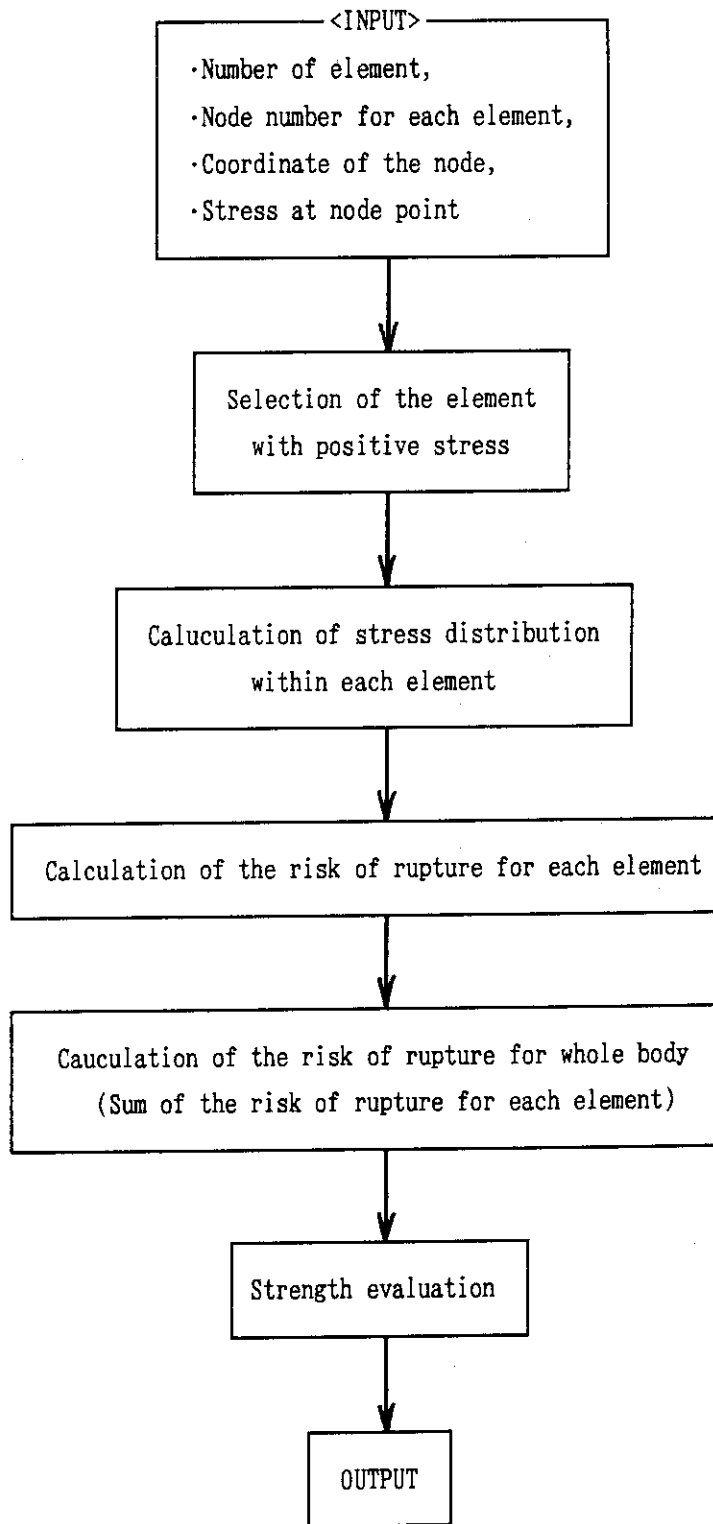


Fig.3-4 Calculation flow in the 「STEP」 code.

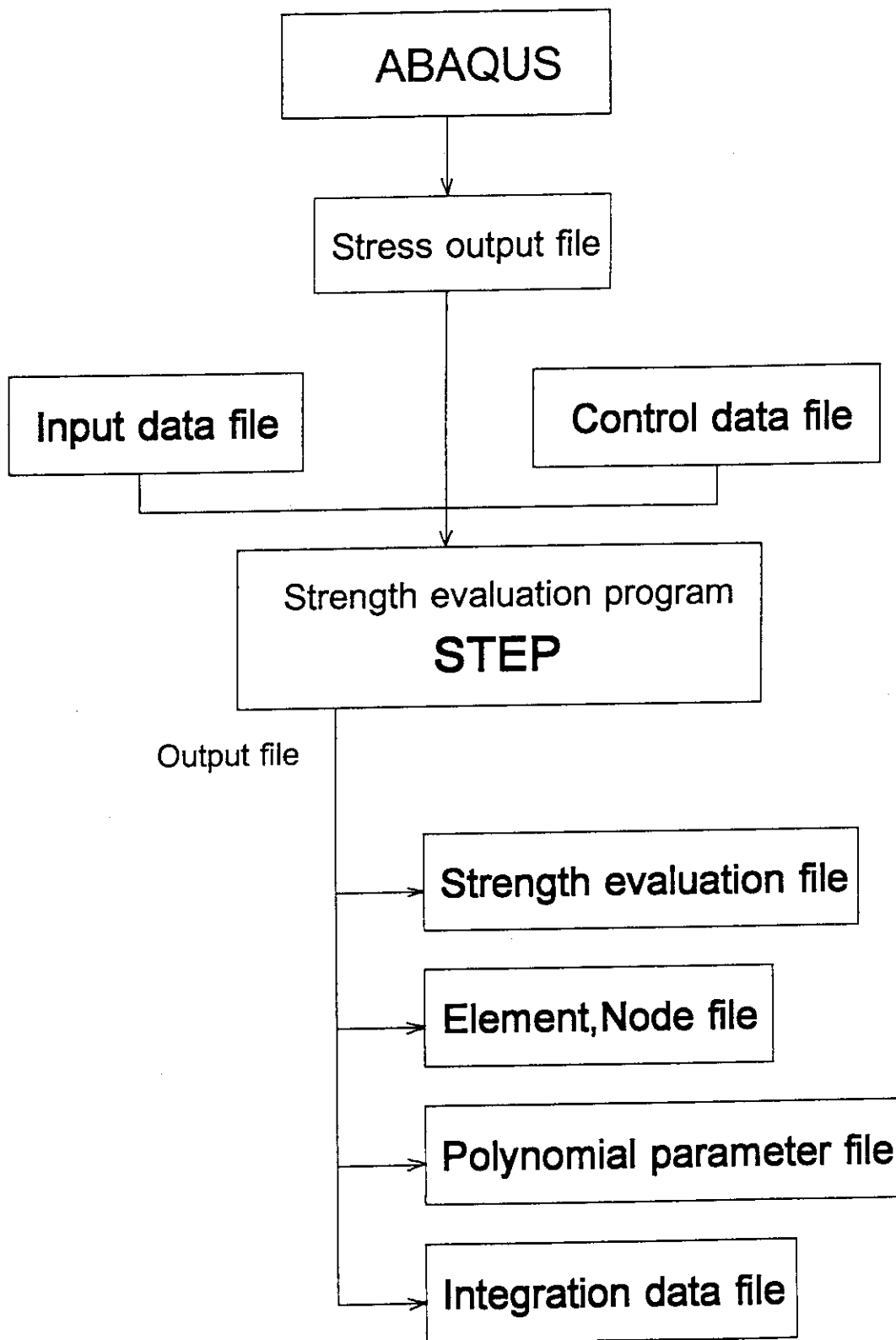


Fig.3-5 STEP code system.



## 4. 検証解析

「STEP」コードの検証解析として、矩形断面形状の試験片に対する4点曲げ強度を評価した。競合リスク理論に基づく4点曲げ強度は、3.3節で示した計算式を用いて解析的に評価できる。この解析的に評価した4点曲げ強度と有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」および「STEP」を用いて評価した4点曲げ強度をした。

### 4.1 解析条件

検証解析として行った4点曲げ試験片の形状および荷重負荷条件をFig.4-1に示す。  
解析条件は、

幅	: $b=4\text{mm}$ 、
長さ	: $(L+2a)=30\text{mm}$ 、
厚さ	: $h=3\text{mm}$
内スパン長さ	: $L=10\text{mm}$
外スパン長さ	: $2a+L=30\text{mm}$

である。また、表層破壊の支配的な領域として、ここでは表面より0.6mmの深さの領域を考慮した。さらに、表層破壊および内部に対するWeibull係数をそれぞれ15,10、Scale parameterを8.82 MPa(0.9 kg/mm<sup>2</sup>)、9.8 MPa(1.0 kg/mm<sup>2</sup>)とし、両破壊モードに対するLocation parameterを0 MPaとした。

### 4.2 FEM解析モデル

ABAQUSによる応力解析モデルをFig.4-2に示す。応力評価モデルでは、試験片の荷重条件および形状の対象性を考慮して、1/2領域をモデル化している。解析は2次元弾性問題とし、平面ひずみ条件で発生応力を求めた。要素には、8節点平面ひずみ要素を用い、使用した要素数は300、節点数は981で、加えた荷重は、鉛直方向1/2領域に 3.92 N (0.4 kg)である。

また、解析に使用した材料物性値は、ヤング率およびポアソン比で以下の値を用いた。

- ・ヤング率 : 382.2 GPa (39000kg/mm<sup>2</sup>)
- ・ポアソン比 : 0.14

### 4.3 FEM解析結果

「ABAQUS」による変位の解析結果をFig.4-3に、応力解析結果（最大主応力）をFig.4-4に示す。「ABAQUS」を用いた曲げ応力の最大値は、内スパンの引張側に生じ、その値は6.603 MPa (0.6738kg/mm<sup>2</sup>)である。一方、解析的に曲げ応力を評価すると、(26)式においてP=3.92 N、a=10 mm、b=4mm、h=3mmであるから、 $\sigma_{4bmax} = 6.533$  MPa となる。したがって、Fig.4-2に示すメッシュ分割をおこなった場合、解析解に対するFEM解析による解析誤差は+1.07%となった。

この「ABAQUS」の応力解析結果を入力として、「STEP」コードでは3.5節に示した解析フローに従い、正の発生応力となる要素を選び、まず要素内の応力分布を評価した。評価した応力分布を用いて各要素毎の破壊の危険率を計算し、それらを加算することにより4点曲げ試験片全体の破壊の危険率を計算し、4点曲げ強度を評価した。

### 4.4 誤差評価

「ABAQUS」で計算した応力分布を用いて「STEP」コードにより評価した4点曲げ強度と解析的に(35)および(36)式を用いて求めた4点曲げ強度の比を表4-1に示す。「ABAQUS」による曲げ応力解析の精度は、前節で述べたように+1.07%であること、および「ABAQUS」-「STEP」コードによる計算値と解析値の差が0.85%であることから、「STEP」コードのみによる計算誤差は-0.22%と見積もられる。「STEP」コードでの誤差は、要素内の応力分布を2次または3次の多項式で近似していることによるが、この程度の誤差は工学的に十分許容されるものと考えられる。

なお、「ABAQUS」による応力解析で、応力勾配の激しい箇所のメッシュ分割を細かくすることにより、「ABAQUS」による計算誤差が小さくなることが期待されるとともに、要素内の応力分布の評価精度も向上することから「STEP」コードの計算精度も向上することが期待される。

表4-1 強度評価結果より求めた計算誤差

	ABAQUS-STEPによる計算	ABAQUSによる計算
STEP、ABAQUSの計算値/解析値	1.0085	1.0107

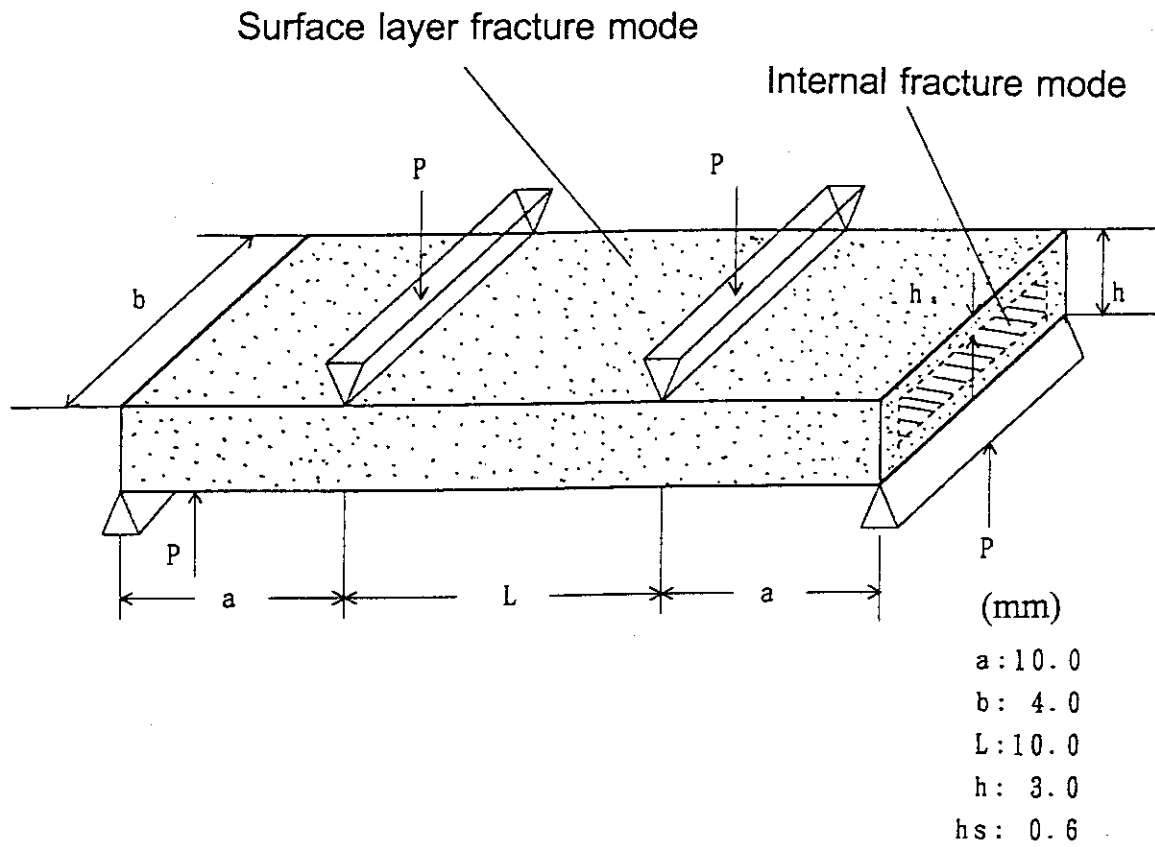


Fig.4-1 Analytical model of 4-point bending test.

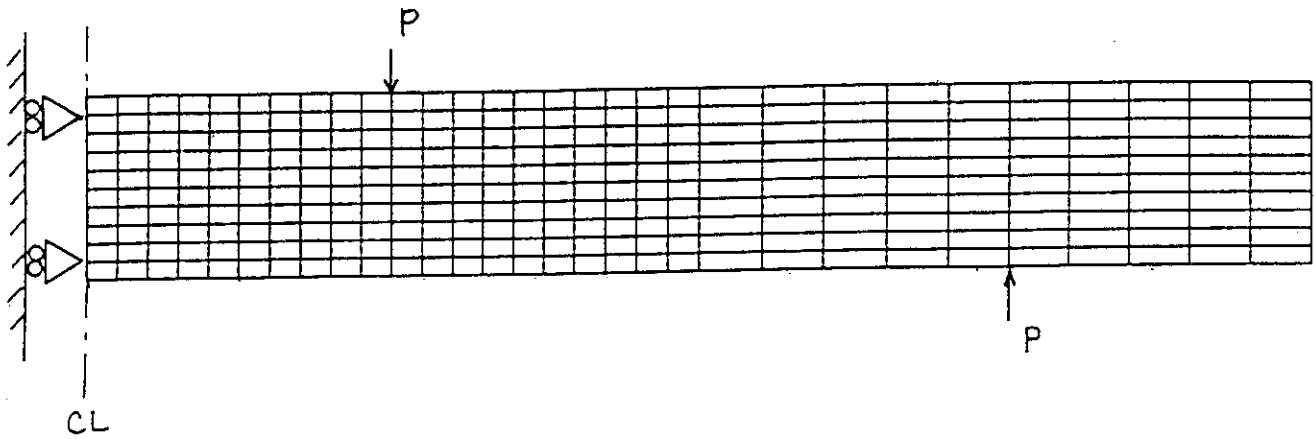


Fig.4-2 Analytical mesh of 4-point bending test.

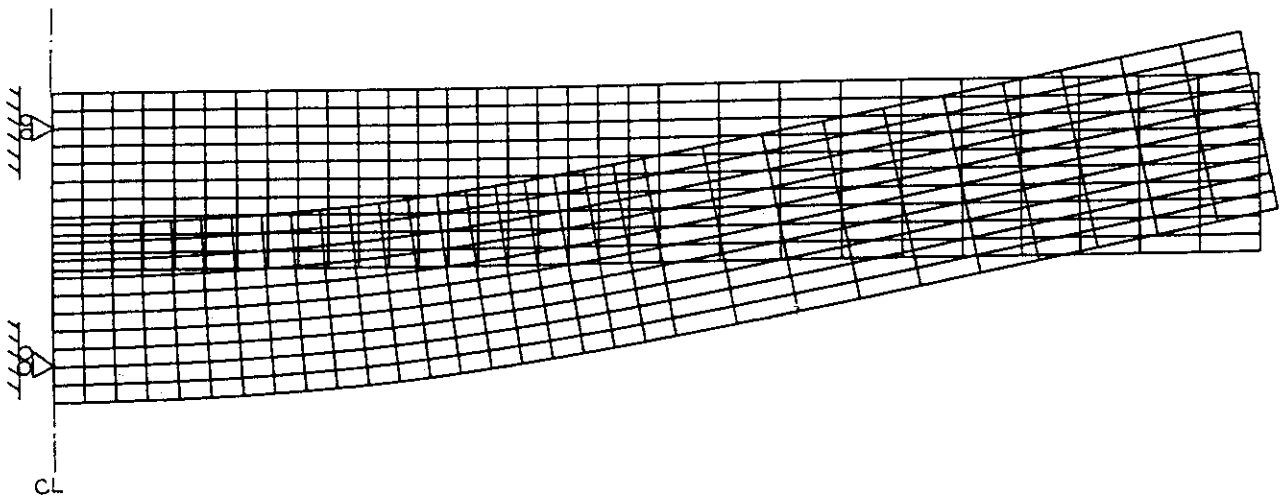
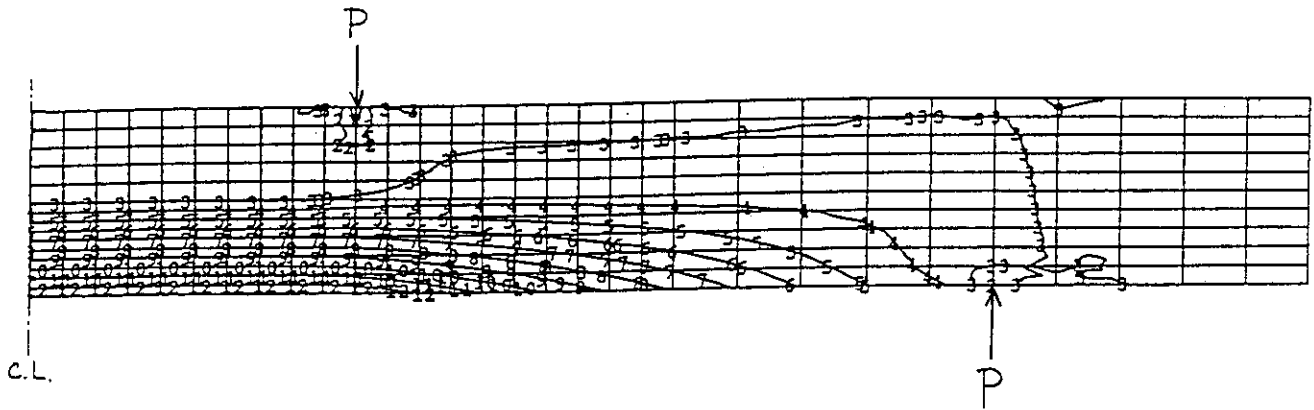


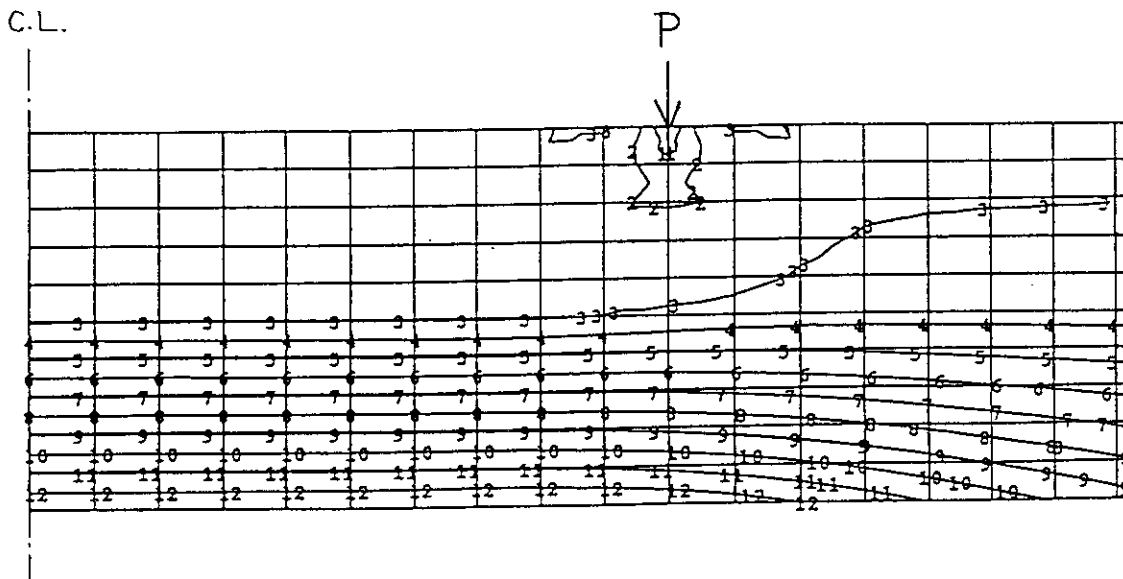
Fig.4-3 Analytical deformation by the ABAQUS code for 4-point bending test.

VALUE x 10 (MPa)

1	-1.38E-01	7	+2.72E-01
2	-6.20E-02	8	+3.39E-01
3	+4.88E-03	9	+4.06E-01
4	+7.17E-02	10	+4.73E-01
5	+1.38E-01	11	+5.40E-01
6	+2.05E-01	12	+6.06E-01



(1) Maximum principal stress (1/2 specimen)



(2) Maximum principal stress (High stress region)

Fig.4-4 Stress distribution analyzed by the ABAQUS code for 4-point bending test.

## 5. 結 言

競合リスク理論に基づき、脆性材料の破壊様式を表面欠陥による表層破壊モードおよび内部欠陥による内部破壊モードに区別して評価する計算コード「STEP」を開発した。本計算コードにより、任意形状をした構造体の脆性破壊強度を評価対象物の応力分布を用いて評価することができる。特に、汎用の有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」と組み合わせた解析ができるように配慮したため、本計算コードは任意形状をした構造物の健全性評価用として、HTTR炉内黒鉛構造物やセラミックス材料を用いた熱交換器等の解析的評価に有用なものである。

本報告では、ここで開発した「STEP」コードで扱う基礎式、「STEP」と「ABAQUS」コードとを組み合わせた解析システムおよび4点曲げ強度について行った検証解析について述べた。検証解析の結果、本計算コードの計算誤差は約0.2%程度で、上で述べた工学的な観点から十分な解析精度があることが明らかとなった。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、高温工学試験研究炉開発部 田中利幸部長、同部HTTR技術開発室 茂木春義室長および同部HTTR試験室伊与久達夫主任研究員に有益な助言を頂きました。ここにこれら関係各位に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 例えば、セラミックス編集委員会講座小委員会、セラミックスの機械的性質、p.22-23、社団法人 窯業協会（昭和54年）。
- (2) 日本原子力研究所、高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)。
- (3) W.Weibull, Trans. ASME, SEr.E., Vol.18, p.293(1951)。
- (4) 例えば、日本セラミックス協会編、セラミック先端材料—強度と微構造—、p.93-99、オーム社（1991）。
- (5) 松尾、位置母数を持つ破壊の多軸確率分布関数の導出とその応用（第1報、分布関数の導出）、日本機械学会論文集（A編）Vol.46, No.411, p.1203(1980)。
- (6) 松尾、永井、末吉、セラミックスの曲げ試験とその確率統計的解析、日本機械学会論文集（A編）Vol.50, No.459, p.1849(1984)。
- (7) 松尾、村田、セラミックスの曲げ試験における強度分布モデルの選択とモンテカルロシミュレーション、材料、Vol.33, No.375, p.1545(1984)。

## 5. 結 言

競合リスク理論に基づき、脆性材料の破壊様式を表面欠陥による表層破壊モードおよび内部欠陥による内部破壊モードに区別して評価する計算コード「STEP」を開発した。本計算コードにより、任意形状をした構造体の脆性破壊強度を評価対象物の応力分布を用いて評価することができる。特に、汎用の有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」と組み合わせた解析ができるように配慮したため、本計算コードは任意形状をした構造物の健全性評価用として、HTTR炉内黒鉛構造物やセラミックス材料を用いた熱交換器等の解析的評価に有用なものである。

本報告では、ここで開発した「STEP」コードで扱う基礎式、「STEP」と「ABAQUS」コードとを組み合わせた解析システムおよび4点曲げ強度について行った検証解析について述べた。検証解析の結果、本計算コードの計算誤差は約0.2%程度で、上で述べた工学的な観点から十分な解析精度があることが明らかとなった。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、高温工学試験研究炉開発部 田中利幸部長、同部HTTR技術開発室 茂木春義室長および同部HTTR試験室伊与久達夫主任研究員に有益な助言を頂きました。ここにこれら関係各位に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 例えば、セラミックス編集委員会講座小委員会、セラミックスの機械的性質、p.22-23、社団法人 窯業協会（昭和54年）。
- (2) 日本原子力研究所、高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)。
- (3) W.Weibull, Trans. ASME, SEr.E., Vol.18, p.293(1951)。
- (4) 例えば、日本セラミックス協会編、セラミックス先端材料－強度と微構造－、p.93-99、オーム社（1991）。
- (5) 松尾、位置母数を持つ破壊の多軸確率分布関数の導出とその応用（第1報、分布関数の導出）、日本機械学会論文集（A編）Vol.46, No.411, p.1203(1980)。
- (6) 松尾、永井、末吉、セラミックスの曲げ試験とその確率統計的解析、日本機械学会論文集（A編）Vol.50, No.459, p.1849(1984)。
- (7) 松尾、村田、セラミックスの曲げ試験における強度分布モデルの選択とモンテカルロシミュレーション、材料、Vol.33, No.375, p.1545(1984)。

## 5. 結 言

競合リスク理論に基づき、脆性材料の破壊様式を表面欠陥による表層破壊モードおよび内部欠陥による内部破壊モードに区別して評価する計算コード「STEP」を開発した。本計算コードにより、任意形状をした構造体の脆性破壊強度を評価対象物の応力分布を用いて評価することができる。特に、汎用の有限要素法による応力解析コード「ABAQUS」と組み合わせた解析ができるように配慮したため、本計算コードは任意形状をした構造物の健全性評価用として、HTTR炉内黒鉛構造物やセラミックス材料を用いた熱交換器等の解析的評価に有用なものである。

本報告では、ここで開発した「STEP」コードで扱う基礎式、「STEP」と「ABAQUS」コードとを組み合わせた解析システムおよび4点曲げ強度について行った検証解析について述べた。検証解析の結果、本計算コードの計算誤差は約0.2%程度で、上で述べた工学的な観点から十分な解析精度があることが明らかとなった。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、高温工学試験研究炉開発部 田中利幸部長、同部HTTR技術開発室 茂木春義室長および同部HTTR試験室伊与久達夫主任研究員に有益な助言を頂きました。ここにこれら関係各位に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 例えば、セラミックス編集委員会講座小委員会、セラミックスの機械的性質、p.22-23、社団法人 窯業協会（昭和54年）。
- (2) 日本原子力研究所、高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)。
- (3) W.Weibull, Trans. ASME, SEr.E., Vol.18, p.293(1951)。
- (4) 例えば、日本セラミックス協会編、セラミック先端材料—強度と微構造—、p.93-99、オーム社（1991）。
- (5) 松尾、位置母数を持つ破壊の多軸確率分布関数の導出とその応用（第1報、分布関数の導出）、日本機械学会論文集（A編）Vol.46, No.411, p.1203(1980)。
- (6) 松尾、永井、末吉、セラミックスの曲げ試験とその確率統計的解析、日本機械学会論文集（A編）Vol.50, No.459, p.1849(1984)。
- (7) 松尾、村田、セラミックスの曲げ試験における強度分布モデルの選択とモンテカルロシミュレーション、材料、Vol.33, No.375, p.1545(1984)。



付 録

「STEP」コードのプログラム構成

「STEP」コードのプログラムツリーをFig.A1に示す。ここで、枠内に網掛けを施したルーチンは、原研大型計算機用JSSL提供モジュールである。

各コモン変数およびモジュールについて、以下記載する。

<コモン変数>

PAM1 , AAF , ELMR , ELMPT , FTPAR , ISF , NODR , PARM , RINPDT , TAISK ,  
ZFK

<モジュール>

DIRRW , ELMK , FUNCTION , FFD , FFOPN , FFCLS , FF56A , FF56B , FR56A ,  
FR56B , HEADER , INDATA , LSQRD , LSQRTR , LSQWT , MAIN , OUTRD , BORUP ,  
SBEND4 , SLITET , STENS , X1 , X2 , X561 , X562 , ZASOT , ZFMAK , ZFSET

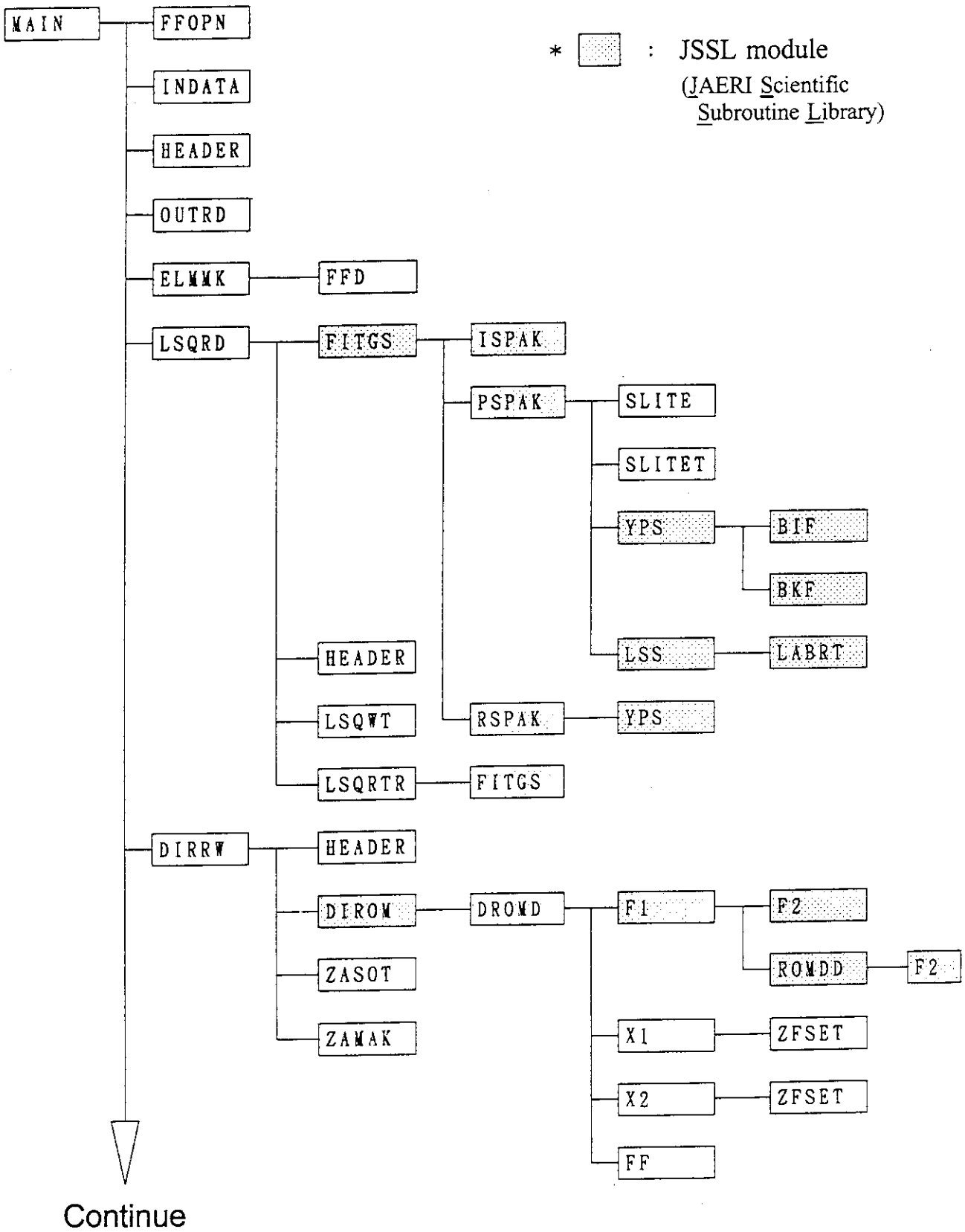


Fig.A1 Program tree of STEP code.

Continue

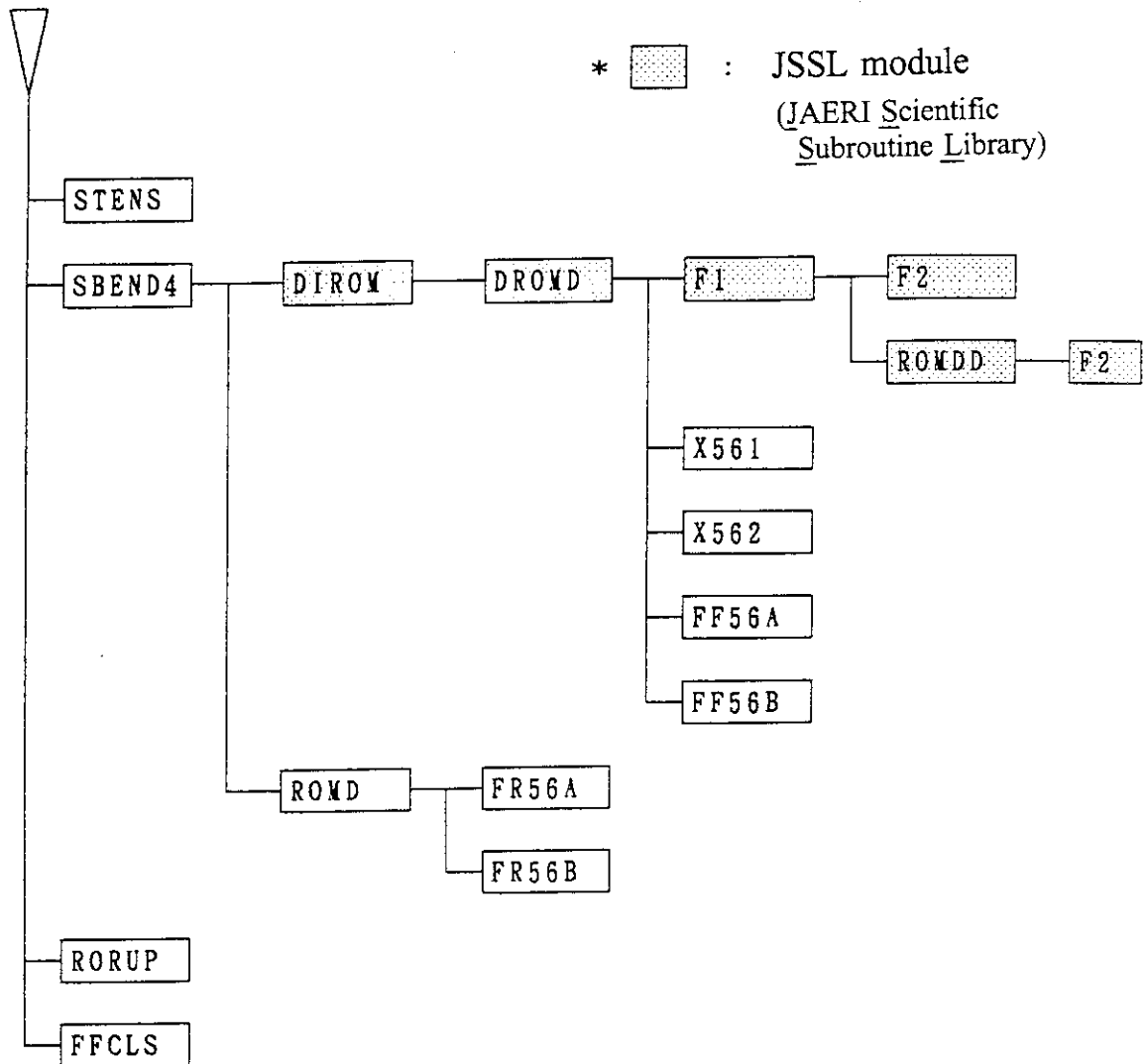


Fig.A1 Continue.

モジュール名	PAM1		
モジュールタイプ	パラメータ		
定数名	型	値	意味
MAXNX	I*4	40	X方向の節点最大数
MAXNY	I*4	20	Y方向の節点最大数
IETYP	I*4	8	エレメントのタイプ =8:8 節点タイプ 通常=8 =4:4 節点タイプ
IDBG	I*4	0	デバッグフラグ 通常=0
IDIM	I*4	2	フィット関数の次元 =2:2次 通常=2 =3:3次
MAXEX	I*4	MAXNX-1	X方向のエレメント最大数
MAXEY	I*4	MAXNY-1	Y方向のエレメント最大数
MAXND	I*4	MAXNX* MAXNY	節点最大数
MAXEM	I*4	MAXEX* MAXEY	エレメント最大数

モジュール名	/AAF /		
モジュールタイプ	コモン		
強度比を格納する。			
変数名	配列	型	意味
AFNC1		R*8	componentの表面破壊の関数値
AFNC2		R*8	componentの内部破壊の関数値
AFNC3		R*8	引張りの表面破壊の関数値
AFNC4		R*8	引張りの内部破壊の関数値
AFNC5		R*8	4点曲げの表面破壊の関数値
AFNC6		R*8	4点曲げの内部破壊の関数値
RBYRS		R*8	引張りに対する強度比
RBYRB		R*8	4点曲げに対する強度比

モジュール名	/ELMR /		
モジュールタイプ	コモン		
エレメント情報を格納する。			
変数名	配列	型	意味
IESU		I*4	エレメントの数
KELM	MAXEM	I*4	エレメント番号
KNOD	(IETYP, MAXEM)	I*4	エレメントの節点番号 8節点、または4節点
ITEL	MAXEM	I*4	エレメントの種別 =1 内部 他 外部

モジュール名	/ELMPT /
モジュールタイプ	コモン

該当エレメントの節点の座標、および応力値を格納する。

変数名	配列	型	意味
POINT	(3, IETYP, MAXEM)	R*8	1: X 座標 2: Y 座標 3: 応力値
SGANS	(IETYP, MAXEM)	R*8	各節点でのフィット関数の計算結果
SGDIF	(IETYP, MAXEM)	R*8	計算値と入力値の差
SGMAX	MAXEM	R*8	要素での最大応力
L TZRO	MAXEM	I*4	負の応力のフラグ

モジュール名	/FTDT /
モジュールタイプ	コモン

2次元多項式を求めるための、観測値を格納する。

変数名	配列	型	意味
NPAR	(MAXEM)	I*4	該当エレメントの観測値セットの数 最大値は40
ZZ	(40, MAXEM)	R*8	従属変数の値 (応力値)
XX	(40, MAXEM)	R*8	独立変数1の値 (X座標値)
YY	(40, MAXEM)	R*8	独立変数2の値 (Y座標値)



モジュール名	/FTPAR /		
モジュールタイプ	コモン		
2次元多項式のハ°ラメ-タを格納する。			
変数名	配列	型	意味
NIK	(MAXEM)	I*4	該当エレメントの多項式のハ°ラメ-タ数 (NND+1)*(NNP+1) MAX=16
NND	(MAXEM)	I*4	独立変数1の次数 MAX=3
NNP	(MAXEM)	I*4	独立変数2の次数 MAX=3
FTPAR	(16, MAXEM)	R*8	ハ°ラメ-タの値

モジュール名	/INPDT /		
モジュールタイプ	コモン		
整数の入力データ			
変数名	配列	型	意味
INPM1		I*4	ワイブル係数 外部破壊
INPM2		I*4	ワイブル係数 内部破壊
INPFLG		I*4	円柱角柱の種別 =1 円柱 他 角柱
IICNT		I*4	要素の添字番号

モジュール名	/ISF /		
モジュールタイプ	コモン		
2次元多項式計算でのフラグ			
変数名	配列	型	意味
IS00F	4	I*4	フラグ

モジュール名	/NDSET/		
モジュールタイプ	コモン		
多項式の観測値収集するための該当エレメントに関する節点番号を格納。			
変数名	配列	型	意味
NODST	(40, MAXEM)	I*8	該当エレメントに関する節点番号

モジュール名	/NODR /		
モジュールタイプ	コモン		
節点の座標値、応力値を格納。			
変数名	配列	型	意味
INSU		I*4	節点の数
JNOD	(MAXND)	I*4	節点番号
XDT	(MAXND)	R*8	X座標
YDT	(MAXND)	R*8	Y座標
SGMA	(MAXND)	R*8	応力
SNDMAX		R*8	最大応力

モジュール名	/PARM /		
モジュールタイプ	コモン		
2次元多項式の $\Lambda$ パラメータを格納。			
変数名	配列	型	意味
IAP		I*4	多項式の $\Lambda$ パラメータ数 (IAND+1)*(IANP+1) MAX=16
IAND		I*4	独立変数1の次数 MAX=3
IANP		I*4	独立変数2の次数 MAX=3
APAR	16	R*8	$\Lambda$ パラメータの値

モジュール名	/RINPDT/		
モジュールタイプ	コモン		
実数の入力データ。			
変数名	配列	型	意味
RSGMA1		R*8	尺度母数
RSGMA2		R*8	尺度母数
RRDHS		R*8	表面破壊を考慮する領域の厚さ
RRDT1		R*8	引張り試験片の高さ
RRDT2		R*8	引張り試験片の長さ
RRDT3		R*8	引張り試験片の幅
RRDT4		R*8	引張り試験片の直径
RRDH		R*8	4点曲げ試験片
RRDL		R*8	4点曲げ試験片内スパンと外スパンの差の半分の長さ
RRDL		R*8	4点曲げ試験片内スパンの半分の長さ
RRDB		R*8	4点曲げ試験片の幅
RFACT		R*8	モデリング係数

モジュール名	/TAISK /		
モジュールタイプ	コモン		
2重積分結果を格納。			
変数名	配列	型	意味
DANS	(MAXEM)	R*8	該当エレメントの2重積分結果

モジュール名	/ZAHYO /		
モジュールタイプ	コモン		
積分区間をもとめる為の座標を格納			
変数名	配列	型	意味
ZAH	(2, 4, 2)	R*8	該当エレメントを4辺形として編集。 8節点の場合は2個に分割

モジュール名	/ZFK /		
モジュールタイプ	コモン		
積分区間の関数パラメータを格納			
変数名	配列	型	意味
AAA	4	R*8	勾配
BBB	4	R*8	切辺
FX1	2	R*8	該当区間の下限を求める関数のパラメータ
FX2	2	R*8	該当区間の上限を求める関数のパラメータ

モジュール名	/ZST /		
モジュールタイプ	コモン		
積分区間を格納			
変数名	配列	型	意味
XX	(4)	R*8	積分区間の X 座標
YY	(4)	R*8	積分区間の Y 座標
YMIN		R*8	積分区間 Y の最小値
YMAX		R*8	積分区間 Y の最大値

モジュール名	DIRRW			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	2重積分用のデータを収集し、2重積分モジュールをコールする。			
呼出形式	CALL DIRRW			
呼出モジュール	DIROM ZASOT ZAMAK HEADER			
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配列	I/O	備考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/ELMR /            /AAF / /FTPAR /          /ELMPT / /PARM /            /INPDT / /TAISK /          /RINPDT/ /ZAHYO /          /NODR / /ZST /			



モジュール名	ELMMK			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	エレメント情報と、ノード情報をリンクし、関数近似用のデータを作成する。			
呼出形式	CALL ELMMK			
呼出モジュール	FFD			
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/ELMPT / /ELMR / /FTDT / /NDSET / /NODR /			

モジュール名	FF			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	<p>2次元多項式の該当点の値を計算する。 /PAM/により制御される。X, Yとも最大3次まで。</p>			
呼出形式	RES = FF(X, Y)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	DROMD			
引き数	型	配列	I/O	備考
X	R*8		I	X座標
Y	R*8		I	Y座標
RES	R*8		O	結果
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	<pre> /PARM / /ELMR / /INPDT / /RINPDT/ </pre>			

モジュール名	FFD			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	2次元多項式の値を求める。			
呼出形式	RES = FFD(X, Y, IAP, APAR)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	ELMMK			
引き数	型	配列	I/O	備考
X	R*8	16	I	X座標
Y	R*8		I	Y座標
IAP	I*4		I	パラメータ数
APAR	R*8		I	パラメータの値
RES	R*8		0	結果
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数				

モジュール名	FFOPN			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	<p>ファイルをオープンする。  制御ファイル、入力データファイル、ワークファイルをオープンする</p>			
呼出形式	CALL FFOPN			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数				

モジュール名	FFCLS			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	ファイルをクローズする。 制御ファイル、入力データファイル、ワークファイルをクローズする			
呼出形式	CALL FFCLS			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数				

モジュール名	FF56A			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	被積分関数 $RES = (2.0 * X * Y / h / a)^{m1 * b}$ 該当関数が2重積分される。			
呼出形式	RES = FF56A(X, Y)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	DROMD			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
X	R*8		I	X座標
Y	R*8		I	Y座標
RES	R*8		O	結果
IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力				
コモン変数	/INPDT / /RINPDT/			

モジュール名	FF56B			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	被積分関数 $RES = (2.0 * X * Y / h / a)^{m^2 * b}$ 該当関数が2重積分される。			
呼出形式	RES = FF56B(X, Y)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	DROMD			
引き数	型	配列	I/O	備考
X	R*8		I	X座標
Y	R*8		I	Y座標
RES	R*8		O	結果
IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力				
コモン変数	/INPDT / /RINPDT/			

モジュール名	FR56A			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	被積分関数 $RES = (2.0 * Y / h)^{n1} * b * L$ 該当関数が積分される。			
呼出形式	RES = FR56A(X, Y)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	ROMD			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
X	R*8		I	X座標
Y	R*8		I	Y座標
RES	R*8		0	結果
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/INPDT / /RINPDT/			



モジュール名	FR56B			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	被積分関数 $RES = (2.0 * Y / h)^{a^2} * b * L$ 該当関数が積分される。			
呼出形式	RES = FR56B(X, Y)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	ROMD			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
X	R*8		I	X座標
Y	R*8		I	Y座標
RES	R*8		O	結果
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/INPDT / /RINPDT/			

モジュール名	HEADER			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	改ページの後、バージョン情報を印字する。 計算のタイトル情報を印字する。			
呼出形式	CALL HEADER			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	MAIN DIRRW INDATA			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/TITL /			

モジュール名	INDATA			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	入力項目の読み込みを行い、エコーバック印字を行う。			
呼出形式	CALL INDATA(IR)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
IR	INT		0	結果コード =0 正常終了 他 入力データ不良  IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/TITL / /INPDT / /RINPDT/			

モジュール名	LSQRD			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	エレメント情報を、編集し関数近似（2次元多項式）をコールする。			
呼出形式	CALL LSQRD			
呼出モジュール	FITGS LSQWT LSQRTR			
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/ELMPT / /ELMR / /FTDT / /FTPAR / /NODR /			

モジュール名	LSQRTR			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	関数近似（2次元多項式）の結果と、解析結果の偏差が一定以上の場合、再度関数近似を行う。			
呼出形式	CALL LSQRTR(K)			
呼出モジュール	FITGS LSQWT			
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配列	I/O	備考
K	INT		I	要素の添字番号  IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/ELMPT / /ELMR / /FTDT / /FTPAR / /NODR /			

モジュール名	LSQWT			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	2次元多項式による計算結果を出力する。			
呼出形式	CALL LSQWT(IELM)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	LSQRD			
引き数	型	配列	I/O	備考
IELM	I*4		I	エlement番号  IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/ELMR / /ELMPT / /FTDT / /FTPAR / /NDSET / /NODR /			

モジュール名	MAIN			
モジュールタイプ				
機能	体積効果評価プログラムメインルーチン			
呼出形式				
呼出モジュール	OUTRD, ELRD, RLMK, LSQRD, DIRRW, FFOPN, HEADER, INDATA STENS, SBEND4, RORUP, FFCLS			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数				

モジュール名	OUTRD			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	ABAQUS出力結果の読み出しを行う。			
呼出形式	CALL OUTRD			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/NODR / /ELMR / /EGAIB / /RINPDT/			



モジュール名	RORUP			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	強度比の計算を行う。			
呼出形式	CALL RORUP			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/AAF / /INPDT / /RINPDT/			

モジュール名	SBEND4			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	4点曲げの体積積分を行う。			
呼出形式	CALL SBEND4			
呼出モジュール	ROMD、DIROM			
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配列	I/O	備考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/AAF / /INPDT / /RINPDT/			

モジュール名	SLITET			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	フラグのチェックを行う。			
呼出形式	CALL SLITET(I, J)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	PSPAK, RSPAK, YPS			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
I	I*4		I	チェックする番号
J	I*4		0	チェック結果
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数				
/ISF /				

モジュール名	STENS			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	引っ張り試験片の体積積分を行う。			
呼出形式	CALL STENS			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	MAIN			
引き数	型	配列	I/O	備考
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/AAF / /INPDT / /RINPDT/			

モジュール名	X1			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	2重積分の、X値の下限を計算する。			
呼出形式	XMIN = X1(Y)			
呼出モジュール	ZASET			
被呼出モジュール	DROMD			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
Y	R*8		I	Y値  IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/ZFK /			

モジュール名	X2						
モジュールタイプ	FUNCTION						
機能	2重積分の、X値の上限を計算する。						
呼出形式	XMIN = X2(Y)	(Y)X = X(Y)					
呼出モジュール	ZASET	ZASET					
被呼出モジュール	DROMD	DROMD					
引き数	型	配列	I/O	備	考	考	考
Y	R*8		I	Y値			
	変数	変数					
	変数	変数					
	変数	変数					
					IN : 入力		
					OUT : 出力		
					I/O : 入出力		
コモン変数	/ZFK /						

モジュール名	X561			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	4点曲げ試験片の2重積分の、X値の下限を計算する。			
呼出形式	XMIN = X561(Y)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	DROMD			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
Y	R*8		I	Y値  IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/RINPDT/			

モジュール名	X562			
モジュールタイプ	FUNCTION			
機能	4点曲げ試験片の2重積分の、X値の上限を計算する。			
呼出形式	XMIN = X562(Y)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	DROMD			
引き数	型	配列	I/O	備考
Y	R*8		I	Y値  IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数	/RINPDT/			



モジュール名	ZASOT			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能				
呼出形式	CALL ZASOT(IELM, ZAH)			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	DIRRW			
引き数	型	配 列	I/O	備 考
IELM	I*4		I	エレメント番号
ZAH	R*8	(2, 4)	0	2重積分をする4角形の座標
				IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力
コモン変数				
/ZST	/			

モジュール名	ZFMAK			
モジュールタイプ	SUBROUTINE			
機能	<p>4角形の各辺の関数を求める。  <math>Y = aX + b</math> の <math>a, b</math> を計算する。</p>			
呼出形式	CALL ZFMAK			
呼出モジュール				
被呼出モジュール	DIRRW			
引き数	型	配列	I/O	備考
				<p>IN : 入力                  OUT : 出力                  I/O : 入出力</p>
コモン変数	<p>/ZFK /                  /ZST /</p>			

モジュール名	ZFSET																		
モジュールタイプ	SUBROUTINE																		
機能	該当値に対する、2組の関数を選択する。																		
呼出形式	CALL ZFSET(Y)																		
呼出モジュール																			
被呼出モジュール	X1, X2																		
引き数	型	配列	I/O	備考															
Y	Y*8		I	2重積分のY値  IN : 入力 OUT : 出力 I/O : 入出力															
<table border="1"> <tr> <td>コモン変数</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>/ZFK</td> <td colspan="4">/</td> </tr> <tr> <td>/ZST</td> <td colspan="4">/</td> </tr> </table>					コモン変数					/ZFK	/				/ZST	/			
コモン変数																			
/ZFK	/																		
/ZST	/																		