

エポキシモールド機器の構造最適設計に向けた機械的強度の評価方法

■ 森 佑介
Yusuke Mori

■ 滝澤 明広
Akihiro Takizawa

1 はじめに

エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械的強度が優れており、電力機器の固体絶縁材料として広く用いられている。東光高岳においても、変成器などの電力機器の絶縁媒体にエポキシ樹脂を適用している。エポキシ樹脂のような固体絶縁においては、電気絶縁特性や部分放電特性だけでなく、大電流通電時の電磁力や温度変化による熱応力、その他の外力に対して十分な機械的強度を有する必要がある。したがって、品質を確保するとともに、効率的な製品開発を実現するには、電磁界解析だけでなく、応力解析などによる構造最適化が必要となる。しかし、応力解析を利用した構造最適化の実現には以下の課題がある。

- (1) エポキシ樹脂と金属部材の線膨張係数の差によって生じる熱応力だけでなく、硬化収縮に伴う応力も残留応力として発生する。このため通常の熱応力解析だけでは、正確な残留応力分布の把握は難しい。
- (2) 解析結果の評価に利用される引張強さや曲げ強さなどは材料固有の値と言いきく、実際には寸法効果や応力分布の影響がある。

これらの課題がエポキシモールド機器の機械的強度の予測を難しいものにしてしまうと考えられる。これまで筆者らは、課題(1)に対して、図1に示す一次硬化から徐冷までの製造工程を考慮して、樹脂内部に発生する残留応力の解析に取り組んできた⁽¹⁾。これにより、エポキシ樹脂に発生する応力分布を把握できるようになった。本稿では、エポキシモールド機器の構造最適設計の実現に向けて、もう一方の課題(2)を解決するため、応力解析の評価方法について検討した。

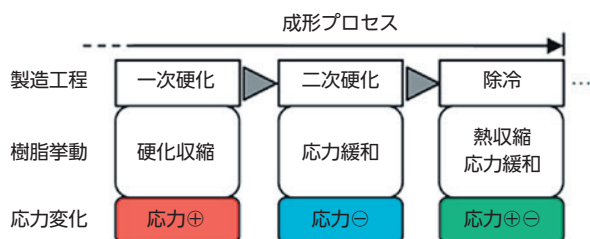


図1 エポキシモールド機器の製造工程と応力変化⁽¹⁾

2 応力分布を考慮した評価方法

2.1 従来の評価方法の課題

従来、応力解析の評価には、引張強さや破壊じん性値などが用いられるが、それぞれ以下のような課題がある。

エポキシ樹脂などの脆性破壊を伴う材料の静的な機械的強度は、最大主応力値と引張試験から得られた引張強さを比較して評価されることが多い（最大主応力説）。しかし、前述のとおり引張強さは材料固有の強度値と言いきく。例えば、図2に示すように、曲げ強さとは試験片破断時に試験片下部に生じていた引張応力（最大主応力）であるが、引張試験から得られる引張強さよりも大きくなる。すなわち、最大主応力値で比較すると、同一の材料であっても曲げ試験片のほうが見かけ上強い材料のようにみえる。この要因として寸法効果が考えられる。すなわち、引張試験は試験片平行部の全領域に一樣な応力が生じるのに対して、曲げ試験においては狭い範囲にのみ強い応力が発生するためである⁽²⁾。これに対して、最大主応力説はある一点の最大主応力値のみを評価するのが一般的であり、応力分布を考慮していない。そのため、複雑な応力分布をもつ解析対象の場合、機械的強度を正確に評価することが難しい場合がある。

一方、破壊じん性値は脆性材料固有の物性値である。破壊じん性値は、き裂の進展の有無を評価するしきい値として用いられる。しかし、これはき裂長さが既知の場合に適用できる考え方であり、破壊じん性値を強度評価に直接使うことは難しい⁽³⁾。もちろんエポキシモールド機器は、き裂のような形状がないように設計されている。

以上のように、エポキシ樹脂の機械的強度には、残留

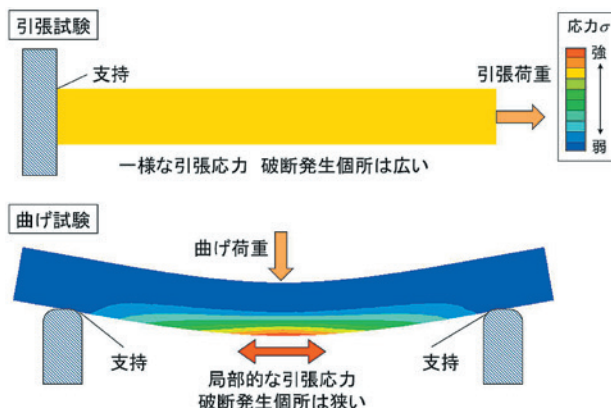


図2 引張／曲げ試験における応力分布の模式図

応力の把握に加えて、応力解析結果の評価に課題があるため、比較的大きめの安全率が設定されることが多い。したがって、製品の小型化などの妨げになることが想定される。応力解析を利用し、効率的な構造最適化を実現するためには、上記の課題を解決する機械的強度の評価方法が必要となる。

2.2 最弱リンクモデルに基づく寸法効果

脆性材料の機械的強度は、最弱リンクモデルにより解釈できることが知られている。最弱リンクモデルとは、**図3**のように複数の輪で構成される一本の鎖を考えたとき、最も強度の低い輪が鎖の強度を決定付けるという考え方である。すなわち、輪の数が多いほど、鎖の強度が低下しやすいことを意味する。この考え方はさまざまな材料に対して適用されている^{(4)~(6)}。また、寸法効果と同義であり、輪の数を体積に置き換えれば、最弱リンクモデルは、**式(1)**のようなワイブル分布で表すことができる。

$$F(\sigma) = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\frac{V}{V_0}\left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right\}, & (\sigma - \sigma_u \geq 0) \\ 0, & (\sigma - \sigma_u < 0) \end{cases} \dots\dots (1)$$

ここで F は累積破壊確率、 σ は応力値、 V は対象の体積、 V_0 は基準体積、 m 、 σ_0 、 σ_u はワイブルパラメータとよばれ、それぞれ形状パラメータ、尺度パラメータ、位置パラメータである。 σ には破壊のモードに応じた種類の応力が選択される。**式(1)**より、同じ材料で体積が異なる試験片に、一様な引張応力を発生させた場合、同じ破壊確率となる最大主応力値は以下のような比率となる。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_u)}{(\sigma_2 - \sigma_u)} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ_1 は体積 V_1 の試験片に発生する最大主応力、 σ_2 は体積 V_2 に発生する最大主応力である。**式(1)**、**(2)**より、体積が大きいほど強度が低下することがわかる。

以上のように、一様な応力が発生する条件であれば、寸法効果を考慮して破壊確率を計算することができる。しかし、実際の製品で一様な応力となることはきわめてまれであり、応力分布を考慮した評価方法が必要である。

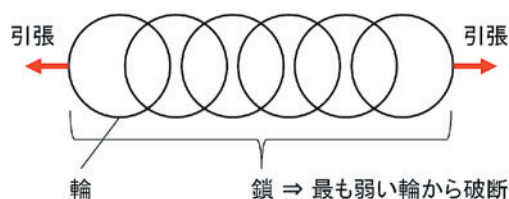


図3 最弱リンクモデルの概念図

2.3 応力分布を考慮した強度評価方法

本稿で紹介する強度評価方法は、最弱リンクモデルの概念を基にして、応力分布を考慮する。具体的な手順を以下に示す。また、**図4**に本評価方法の概念図を示す。

- (i) 有限要素法を用いて応力解析を実施し、最大主応力分布を得る。
- (ii) 最大主応力分布から、各要素を代表する応力値を求める。
- (iii) 各要素の信頼度 R_i (破壊しない確率) を次式より求める。

$$R_i(\sigma_i, V_i) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{V_i}{V_0}\left(\frac{\sigma_i - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right\}, & (\sigma_i - \sigma_u \geq 0) \\ 1, & (\sigma_i - \sigma_u < 0) \end{cases} \dots\dots (3)$$

ここで、下添え字の i は要素番号を表し、各要素ごとに手順(ii)で求めた応力値および要素の体積に応じた信頼度が計算される。

- (iv) すべての要素が健全である確率 R_{total} から、解析対象の累積破壊確率 F を求める。

$$F = 1 - R_{total} = 1 - \prod_i R_i \dots\dots\dots (4)$$

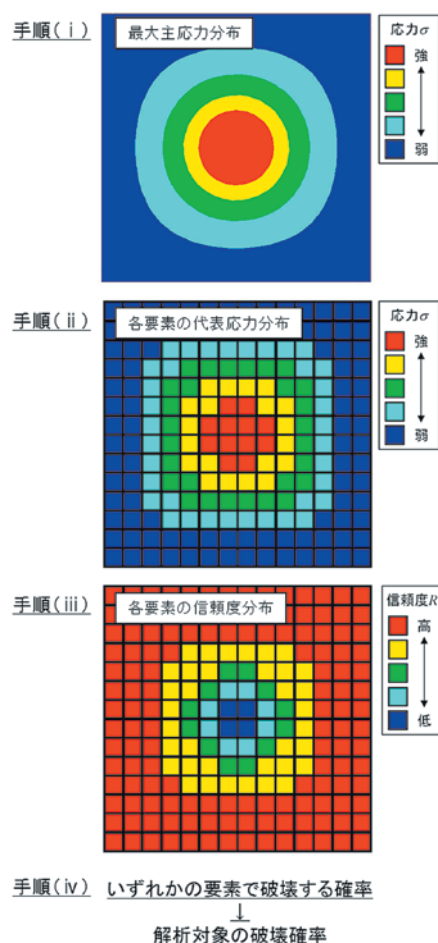


図4 応力分布を考慮した機械的強度評価方法

手順 (iv) は、解析対象のいずれかの個所 (要素) で破壊が生じる確率を求めており、その確率は解析対象の破壊確率でもある。図 3 に示した最弱リンクモデルに置き換えると、解析対象が鎖、要素が輪である。

本評価方法を用いることで、任意の製品形状においても、応力分布を考慮した破壊確率を計算することが可能となる。

3 本評価方法の検証結果

2.3 節に記載し評価方法を適用することで、これまで以上に機械的強度を正確に把握できることを確認した。以下に、簡易的な形状ではあるが、本評価方法を適用し、曲げ試験片の破壊荷重を予測した例を記載する。

3.1 ワイブルパラメータの導出方法

本評価方法を適用するにあたり、エポキシ樹脂の機械的強度に関するワイブルパラメータ (形状パラメータ m 、尺度パラメータ σ_0 、位置パラメータ σ_u) を求める必要がある。ここでは、JIS K 7161 に準拠した 1A 形の引張試験を実施した。引張試験の結果から最尤推定法⁽⁷⁾を用いてワイブルパラメータを求めた。

3.2 解析モデルおよび解析条件

図 5 に解析モデルおよび解析条件を示す。同一のモデルを使用し、機械的特性の異なる 2 種類の樹脂について検証を実施した。ここでは曲げ荷重をパラメータとして解析、評価し、累積破壊確率分布を得る。なお、図 5 に示した要素分割は一例であり、要素サイズや要素形状などの影響も検証した。解析には有限要素法解析ソフト ANSYS を使用した。

3.3 評価結果

本強度評価方法を適用して、曲げ試験片の破壊荷重を予測した結果を図 6 に示す。本評価方法の結果と併せて、従来の最大主応力説による評価結果と実測値も記載

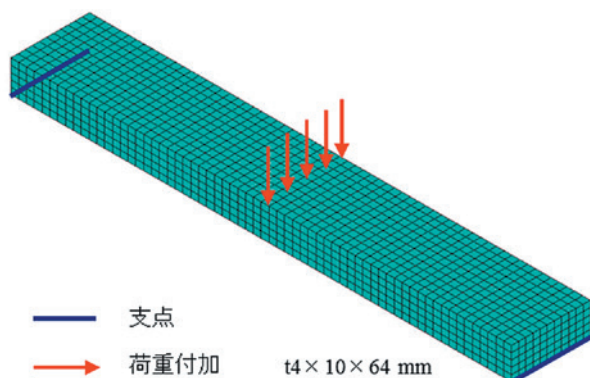


図 5 解析モデルと要素分割の一例

する。最大主応力説のしきい値は、引張試験における平均引張強さである。測定結果の累積破壊確率は、次式に示す平均ランク法で計算した。

$$F = \frac{j}{n+1} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 j は曲げ破壊荷重を小さい順に並べたときの順序数、 n は標本サイズである。

図 6 に示すとおり、従来の最大主応力説による評価結果は、実測の平均曲げ破壊荷重値と 2~3 割程度の差異がある。これまで述べてきたように、最大主応力説では応力分布を考慮していないためと考えられる。これに対して、本評価方法を適用すると実測に近い累積破壊確率分布を予測することができる。平均曲げ破壊荷重値もきわめて良い一致を示し、いずれも実測値の $\pm 2\%$ 以内である。また、同図には、要素数が 10 倍異なる条件で解析した結果を併記しているが、累積破壊確率分布の変動はわずかである。なお、要素形状についても同様に、結果に影響しないことを確認している。

以上のように、従来の最大主応力説では、単純な形状でも破壊荷重を精度良く予測することが困難である。これに対して本評価方法を適用することで、曲げ破壊荷重を精度良く予測できた。また、最大主応力説では対象の

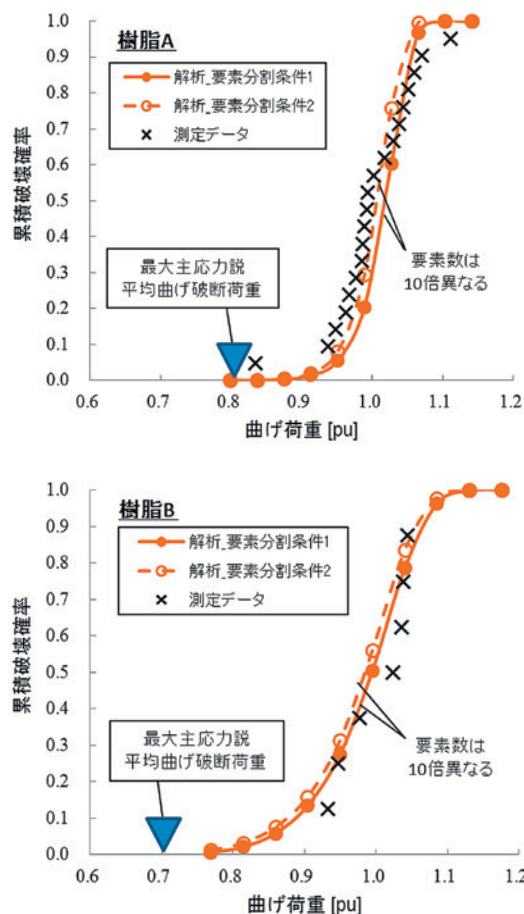


図 6 曲げ破壊荷重予測結果 (1 pu = 測定データ平均値)

形状や寸法、荷重の様相によって、応力解析結果から予測した強度と実際の強度との差異の程度は多様になることが想定される。これに対して本評価方法では、今回の例のように単純な形状だけでなく、応力分布が正しく計算されていれば、どのような形状にも対応し、精度良く機械的強度を予測できると考えられる。

4 おわりに

さまざまな製品に共通するが、特にエポキシモールド機器の開発においては、試作前に電気的特性の最適化、構造最適化、樹脂の硬化プロセスの最適化などを実施できれば、品質を確保するとともに、開発期間やコストの低減が見込まれる。本稿では、エポキシモールド機器の効率的な構造最適化を実現するために、解析対象の機械的強度を精度良く評価する方法について記載した。本評価方法は、一般的に利用される最大主応力説とは異なり、応力分布を考慮して機械的強度を評価する方法である。ここでは単純な曲げ試験片を対象としたが、どのような応力分布のものでも評価可能である。したがって、複雑な応力分布となるような製品にも適用できると考えている。本評価方法の特長として、解析対象の機械的強度を精度良く評価でき、さらに図4のように機械的強度の分布も事前に把握することができる。構造的に信頼性の高い製品を開発するためには、開発品が有する平均強度だけでなく、下限値も正確に把握したいが、そのためには多数の試作品が必要になると考えられる。しかし、エポキシモールド機器の試作においては、金型の製作やモールドされるコイルなどの各種部品の準備のほか、エポキシ樹脂の注型や硬化といったプロセスが含まれるため、試作台数の確保には時間を要する。それに対して、本評価方法を適用することで、平均強度だけでな

く、下限値も把握することができる。したがって、機械的強度の分布も考慮したうえで構造最適化を実現でき、信頼性の高い製品の開発を効率的に行えるようになる。

本稿では、エポキシモールド機器の機械的強度に焦点を当てたが、要求されるさまざまな性能を試作前に評価し、設計・製造プロセスの改善に貢献できるよう解析技術の構築を目指していく所存である。

■参考文献

- (1) 滝澤明広，森佑介：「エポキシモールド機器の最適設計に向けた応力緩和解析」，東光高岳技報 No. 3 (2016)
- (2) 坂田勝：「ぜい性材料の破壊の統計的扱い」，精機学会誌，Vol.39，No.11 (1973)
- (3) 泉聡志，酒井信介：「実践有限要素法シミュレーション」，森北出版 (2010)
- (4) W. Weibull：「A Statistical Distribution Function of Wide Applicability」，J. Appl. Mech.，Vol.18 (1951)
- (5) 吉田智：「入門：ガラスの破壊学」，NEW GLASS，Vol. 23，No. 3 (2008)
- (6) 南二三吉：「ワイブル応力を用いた破壊評価手法PART1」，溶接学会誌，Vol. 75，No. 5 (2006)
- (7) 野中保雄：「信頼性データのとり方，まとめ方」，日科技連出版 (1983)



森 佑介

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属
解析技術の研究に従事
電気学会会員



滝澤 明広

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属
電力機器の開発・設計，および解析技術の研究に従事