

AE センサを用いた鋼棒、鋼管の健全性評価技術の開発

(2) 理論的検討

Development of a new inspection system for steel rod and pipe using AE sensor
(2) Theoretical approach

原子燃料工業株式会社	小川 良太	Ryota OGAWA	Member
原子燃料工業株式会社	松永 嵩	Takashi MATSUNAGA	Member
原子燃料工業株式会社	匂坂 充行	Mitsuyuki SAGISAKA	Member
株式会社アトリー	鶴飼 康史	Yasufumi UKAI	
原子燃料工業株式会社	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member

Abstract

A new inspection technique using AE (acoustic emission) sensor has been developed for the purpose of evaluating the integrity of steel rods and pipes, and sensitivity analyses were made for degradations of steel rods and pipes from a theoretical viewpoint.

The Eigen frequency and modal frequency response analysis were conducted based on FEM (finite element method).

Several peaks due to natural vibrations were observed in the frequency distribution calculated in this study, and comparisons with experimental results obtained from mockups with simulated degradations were reported.

Keywords: steel rod, pipe, new inspection system, finite element method

1. 緒言

原子力発電所では、非常に多くの配管や基礎ボルトが用いられている。これらの基礎ボルトや配管などの鋼棒、鋼管は、周辺環境（設置場所や内部流体、機械振動など）により経年劣化（腐食、摩耗、き裂など）が発生する可能性が潜在している^{1,2}。従って、機器・構造物の安全性・信頼性を確保する観点より、鋼棒、鋼管の経年劣化を検出する非破壊検査技術が望まれている。

このような鋼棒、鋼管の健全性を検査する手法として、一般的には詳細検査として超音波検査やスクリーニング検査として目視検査や打音検査が採用されている^{3,7}。基礎ボルトの場合、詳細検査として実施されている超音波検査は露出部に超音波センサを設置し、反射信号に基づいて、腐食や傷などの欠陥を検出する手法であり、非破壊検査法として一般的に広く使用され

ているが、超音波センサを接触する面の平滑度を考慮する必要があり、形状が複雑なものには適用できない、検査範囲は超音波伝播経路のみに限定される、など事情があり、検査出来る範囲は限定的である。

一方、スクリーニング検査として目視検査や打音検査が採用されているが、目視検査ではナットより下部を確認できない問題がある。また、打音検査は、ハンマーで打撃し、その時にハンマーが発する打音とハンマーを通した打感との二つから、検査員が異常の有無を判定する手法であるが、検査精度は検査員の熟練度に依存しており、また、周囲の環境による影響を受けるため、客観的な基準を設けることが困難である。

本研究では、鋼管や鋼棒等の部材の健全性の評価を詳細検査に比べて、より効率的で簡便かつ短時間で実施できるスクリーニング検査手法として AE(acoustic emission)センサを用いた部材の状態評価方法を構築した。また、構築した AE センサを用いた部材の状態評価方法を確立するために、有限要素法を用いて経年劣化を模擬した部材の複数のモード毎の固有周波数を含む周波数分布について周波数応答解析にて解析を実施し評価す

連絡先：小川良太、〒590-0451 大阪府泉南郡熊取町朝代西1-950、原子燃料工業株式会社
E-mail: ryo-ogawa@nfi.co.jp

る手法を開発した⁸。

本報では、鋼棒、鋼管に対し健全なモデルと機械加工により減肉またはき裂を付与し、腐食、き裂を模擬したモデルを作製し、有限要素法を用いた固有値解析やモーダル周波数応答解析を実施して固有周波数の変化について検討した。また、本検査システムを用いた鋼棒・鋼管の健全性評価による実験結果とも比較し、妥当性を検討した。

2. 解析対象およびモデル

鋼棒については、燃料取り替えタンク等に用いられている基礎ボルトを対象として、直径 60mm、長さ 500mm の鉄製 (S45C) の中実棒をモデル化した。また、健全な鋼棒に加え、片側減肉させた鋼棒および全周腐食により

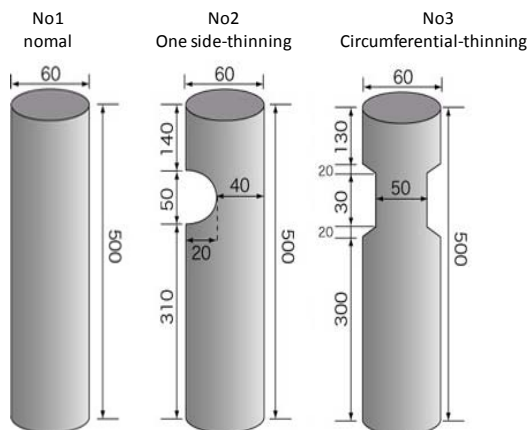


Fig.1 Model dimensions of the steel rod.

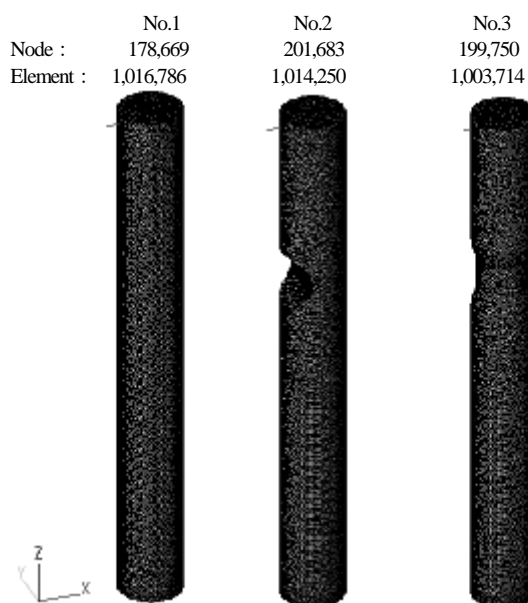


Fig.2 Finite element mesh of steel rod.

直径が一部減少した鋼棒のモデルも作成した。モデル作成に用いたそれぞれの鋼棒の寸法は図 1 に示す。

作成したモデルを有限要素メッシュに分割したメッシュ分割図を図 2 に示す。メッシュ分割した結果、節点は約 17 万から 20 万節点。要素は約 100 万要素である。

次に、鋼管については、直径 42.7mm、長さ 232mm、板厚 3.5mm の鉄製 (S45C) の管をモデル化した。鋼管についても健全なモデルのほか、き裂を入れたモデル、全周腐食により直径が一部減少したモデル、貫通穴が空いたモデルを作成した。モデル作成に用いたそれぞれの鋼管の寸法は図 3 に示す。

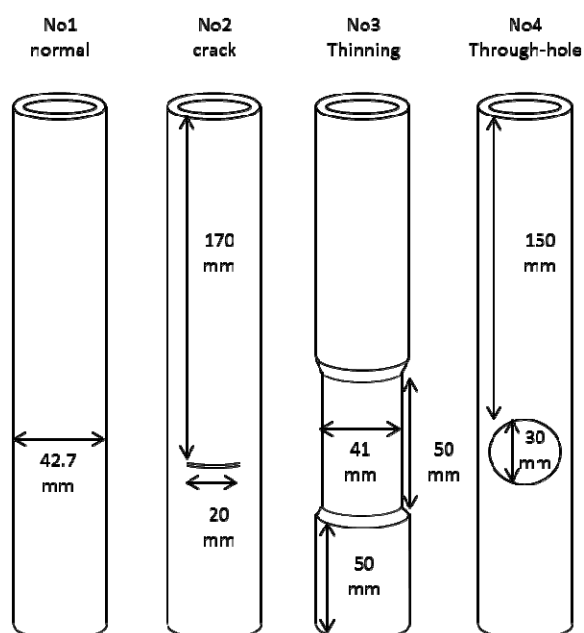


Fig.3 Model dimensions of the steel pipe.

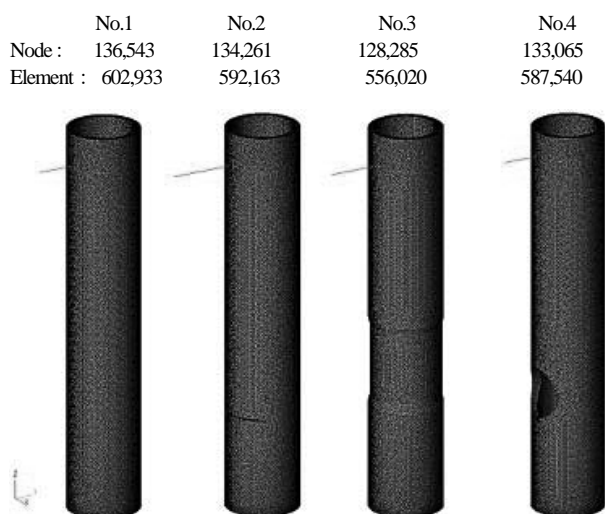


Fig.4 Finite element mesh of steel pipe.

鋼棒と同様に作成したモデルを有限要素メッシュに分割したメッシュ分割図を図4に示す。メッシュ分割した結果、節点は約12万から14万節点。要素は約60万要素である。

3. 解析条件

前章にて作成した有限要素モデルを用いて、FEM解析を実施する。FEM解析を実施するにあたって設定した条件について以下に示す。

材料特性については、鋼棒、鋼管ともに鉄製(S45C)として、ヤング率 2.05×10^5 [MPa]、ポアソン比0.3、材料密度 7.84×10^9 [ton/mm³]を設定した。

拘束条件としては、AEセンサを用いた鋼棒、鋼管の健全性評価技術の検証のために実施した実験において、固定なしの状態で行ったことを考慮して、拘束なしの状態で行った。

解析の種類としては、固有値解析を200モードまで実施した。また、その結果を用いてモーダル周波数応答解析で加振位置を指定して解析を実施した。

4. 解析結果と考察

AEセンサを用いた部材の状態評価法は、AEセンサが設置されている検査対象が発する打音信号を受信することにより部材の状態評価を実施する。

まず、固有値解析を実施した結果、得られた各モードの変形図のうち、例として鋼棒の1~4モードまでの変形図を図5に示す。

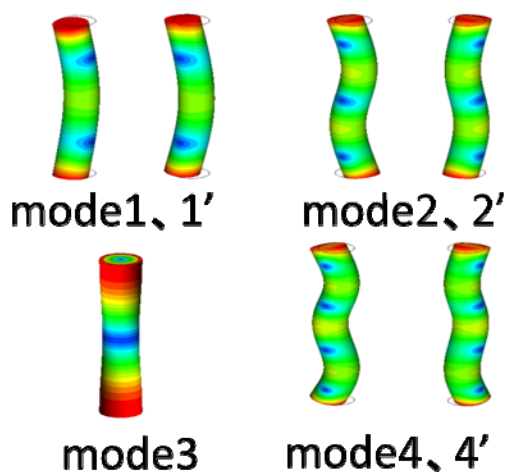


Fig.5 Deformation diagram by eigenvalue analysis results of the steel rod

次に、モーダル周波数応答解析を実施した結果を次に示す。

まず、健全な鋼棒において、上端から10mmの位置を加振した場合の鋼棒上端中央部のZ方向の節点速度の結果を図6に示す。同様に、健全な鋼管における上端から10mmの位置を加振した場合の打撃位置の上端のZ方向の節点速度の結果を図7に示す。図6,7では横軸に加振周波数を示し、縦軸に解析にて得られた節点速度を示している。また、実験にて得られたFFT解析結果も縦軸を強度として示している。

これらの結果から、実験とFEM解析では同様の周波数でピークが発生していることから、FEMモデルの妥当性が確認できた。

続いて、経年劣化を模擬したモデルの結果について、鋼棒については図8、鋼管については図9に示す。鋼棒の加振点および評価点は健全な鋼棒と同じ場所を利用した。なお、経年劣化の模擬として作成したNo.2のモデルについては、片側減肉させた部分の直上の位置で上端から10mmの位置を加振点とした。鋼管につ

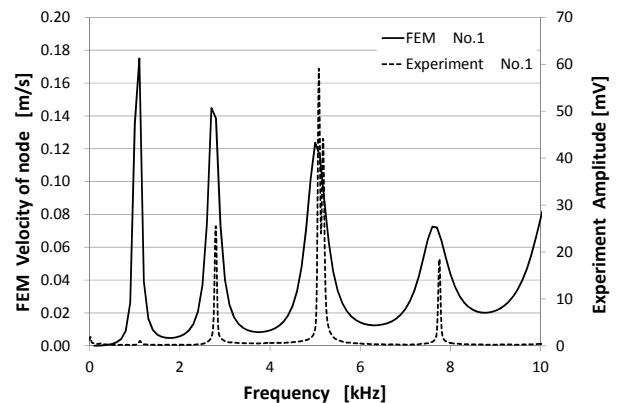


Fig.6 Modal frequency response analysis results of the steel rod.

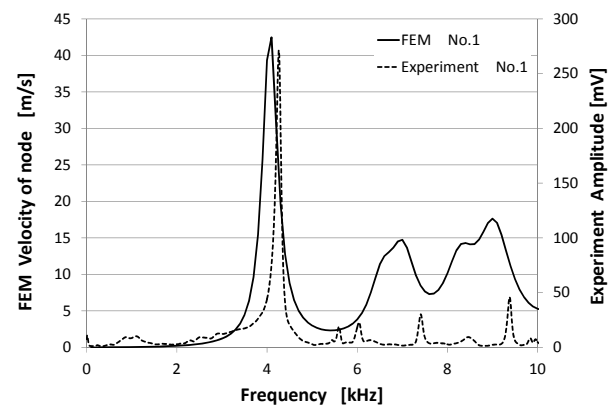


Fig.7 Modal frequency response analysis results of the steel pipe.

いても、鋼棒と同様に健全と同じ場所の加振点と評価点を用いた。経年劣化を模擬したモデルにおいては、き裂または貫通穴を付けた部分の直上で上端から10mmの位置を加振点とした。

経年劣化を模擬した鋼棒においては、第1ピーク、第2ピークともに健全な鋼棒に比べて周波数が低下することがFEM解析でも実験でも確認することができた。同様に鋼管についても、第1ピークについては経年劣化を模擬したモデルにおいて、健全な鋼管より周波数が低下することがFEM解析でも実験でも確認することができた。

以上のことから、スクリーニング検査として鋼棒、鋼管に対する経年劣化はピーク周波数が低下することが確認できることから、測定できる可能性が確認できた。

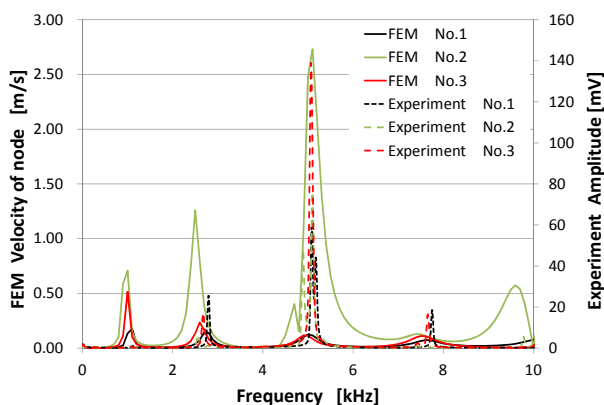


Fig.8 Modal frequency response analysis results of the steel rod, including the aging degradation.

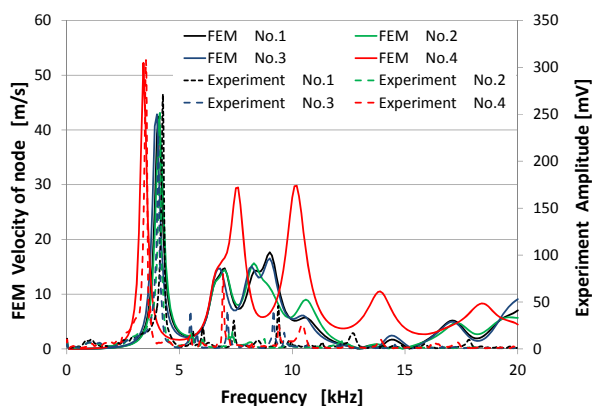


Fig.9 Modal frequency response analysis results of the steel pipe, including the aging degradation.

5. 結言

本研究では、鋼棒、鋼管のスクリーニング検査としての効率的で簡便かつ短時間で実施できるAEセンサを用いた部材の健全性評価方法において、健全および経年劣化を模擬したFEM解析モデルを作成し、固有値解析およびモーダル周波数応答解析を実施することにより、以下の結果が得られた。

- (1) 健全な鋼棒、鋼管のモデルにおいて、実験と概ね一致する結果が得られたことから、モデルの妥当性が確認できた。
- (2) 経年劣化を模擬したモデルにおいては、健全なモデルに対して周波数ピークの位置の変化が確認できた。
- (3) スクリーニング検査として本手法で経年劣化を検出できる可能性が確認できた。

参考文献

- [1] ”高浜発電所3号炉 高経年化技術評価書”，関西電力株式会社(2014).
- [2] “女川原子力発電所1号炉 高経年化技術評価書”，東北電力株式会社(2013).
- [3] 林山, 福富広幸, 熊野秀樹, 伊藤圭介,”埋め込み基礎ボルトにおける減肉欠陥の検出及びその深さの推定”，日本機械学会論文集(A編), 77巻 783号, pp.1851-1858, 2011.
- [4] 小平小次郎, 米谷豊, 河野尚幸, 馬場淳史, 黒崎裕一, “基礎ボルトの超音波探傷技術の適用と開発”，非破壊検査第59巻6号, pp.254-258, 2010.
- [5] 秋山哲治, 清宮理, 北澤壮介, 内藤英晴, “合成部材でのコンクリート充填性検査としての打音法の適用性”，コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
- [6] 熊野秀樹, 伊藤圭介, 山本千秋, 加古晃弘, 藤尾武成, 城下悟, 林山, 福富広幸, “基礎ボルトの減肉検査技術開発”，日本保全学会第7回学術講演会要旨集, (2010), pp.58-60
- [7] 竹之内博行, 榎園正義, 谷倉泉, 半澤貢, “ボルトの疲労き裂検出に対する超音波探傷法の適用性”，土木学会論文集, No.404(1989), pp443-449
- [8] 原子燃料工業株式会社, “部材の状態評価方法”，特願 2014-250151