

AE センサを用いたケミカルアンカの非破壊検査技術の開発

(1) 実験的検討

Development of non-destructive inspection technique for adhesive anchor bolts using AE sensor

(1) An experimental approach

原子燃料工業株式会社	江藤 淳二	Junji ETOH	Member
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	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member

Abstract

Post-installed adhesive anchor bolts are commonly used on all types projects, from standard buildings to bridges and nuclear power plants. They are exposed to varying and diverse environmental conditions which are significant successfully to make connections to concrete structures for many years.

In order to maintain the safety and reliability of concrete structures such as buildings or bridges on higher level over a long period time, we developed a new non-destructive inspection system of adhesive anchor bolts based on hammering tests using AE (acoustic emission) sensor.

It was confirmed that our developed inspection system based on hammering tests using AE sensor had a large potential to evaluate adhesive anchor bolts.

Keywords: non-destructive inspection, AE sensor, adhesive anchor bolt

1. 緒言

原子力発電所では、機器・構造物をコンクリート基礎に据え付け、固定するに際して、ケミカルアンカを使用することがある。ケミカルアンカの施工は、予めカプセル型の接着剤組成物をコンクリート基礎に設けられた穴に挿入した後、ボルトを打設し、樹脂を化学反応により硬化させて、ボルトを物理的にコンクリートに固着し、固定させる。このような施工方法で固定されたケミカルアンカには、施工不良（樹脂不足・過剰攪拌など）や経年劣化（樹脂の劣化や剥離、コンクリートのひび割れや強度低下など）が発生する可能性が潜在している^{1,2}。

2012年12月には中央自動車道笹子トンネル天井板の落下事故が発生し、本事故に関する調査・検討委員会の事故報告書³によれば、接着系アンカーボルトの施工不良や樹脂部の経年劣化がトンネル天井板落下の原因であると推定されている。従って、機器・構造物の安全性・信頼性を確保する観点より、施工不良や経年劣化が生じたケミカルアンカを検

出する非破壊検査技術が望まれている。

ケミカルアンカの健全性を検査する手法として、一般的には目視検査や打音検査、超音波検査が採用されている⁴⁻⁸。目視検査にはコンクリート基礎に埋め込まれた部分を確認できない問題がある。打音検査は、ケミカルアンカの露出部をハンマーで打撃し、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。超音波検査は、ケミカルアンカの露出部に超音波センサを設置し、ケミカルアンカからの超音波反射信号に基づいて、ケミカルアンカの腐食や傷などの欠陥を検出する手法であり、非破壊検査手法として一般的に広く採用されているが、樹脂の劣化や剥離などを検査することは困難であった。

そこで、本研究では、ケミカルアンカの健全性を評価する AE(acoustic emission)センサを用いた非破壊検査システムを構築した^{9,10}。AE センサは、主に AE センサが設置されているボルトが発する打音信号を受信し、検査環境（騒音・振動など）に比較的依存しないという特徴がある。本報では、AE セン

連絡先：江藤淳二、〒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: junji-etoh@nfi.co.jp

サを用いたケミカルアンカの非破壊検査の一例として、使用する樹脂量を人工的に調整して施工不良を模擬したボルト試験体を作製し、本システムを用いたケミカルアンカの健全性評価に関する有効性について検討する。

2. 試験条件

2.1 供試体

本研究に用いたアンカーボルトの材質は、炭素鋼SS400で、直径、全長及び埋め込み深さは、それぞれ 16mm、160mm 及び 130mm である。一辺が 200mm の立方体型で圧縮強度 28N/mm² のコンクリートブロックに径 18mm、深さ 130mm の孔を穿孔し、施工不良を模擬するために、人工的に樹脂量を調整し、樹脂を孔の下部から充填してボルトを打設することで、施工不良（樹脂量の不足）を模擬したアンカーボルト試験体を作製した。各ボルト試験体の樹脂の充填量を Table1 に示す。本研究では、原子力発電所などで使用されている Decolux 社製の R-N タイプ（変性ビニルエステル樹脂）の樹脂を用いて試験体を作製した。

Table1. Amount of resin

樹脂量 (cm ³)	樹脂量 (mm)
18	130
13.3	110
10	80
9.3	75
6.6	60
6	55
3.3	35

2.2 試験方法

AE センサを用いたケミカルあんかの検査システムの概要を Figure1 に示す。ボルトは、55×55×4.3mm の鉄板に対して、ワッシャ及びスプリングワッシャをナットで締付けトルク 30Nm で固定して試験を実施した。また、ナットで締付けていない場合についても試験を実施した。AE センサは、NF 社製の広帯域 AE センサを使用し、センサをコンクリートから露出しているボルト頭頂部に設置した。ハンマーでボルトを打撃し、

設置した AE センサで信号波形を取得して、デジタルオシロスコープにデータを取り込んだ。打撃により AE センサで取得される信号波形例を Figure2 に示す。1つのボルトに対して 10 回打撃し、周波数解析を実施し、打撃信号の周波数分布を平均化处理した。周波数解析で得られたボルトの固有周波数と樹脂量の関係から、本検査システムのケミカルアンカの健全性評価に関する有効性について検討した。

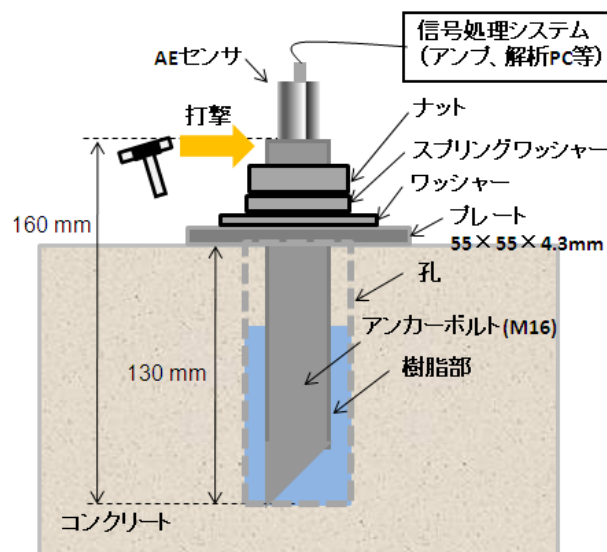


Figure 1. A schematic diagram of inspection system.

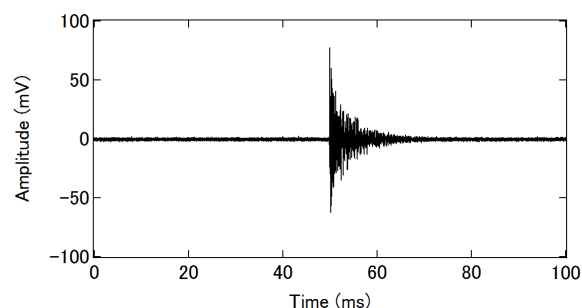


Figure 2. Example of acoustic signal obtained from AE sensor.

3. 結果と考察

3.1 実験結果

人工的に樹脂量を調整して施工不良を模擬した試験体に対して、AE センサを用いた検査システムで非破壊検査試験を行った。Figure3 にボルトをナットで締付けていない場合の実験結果を示す。ボルトをナットで締付けていない場合には、通常施工の樹脂量である

130mm から樹脂量が減少するにつれて固有周波数が低周波側へシフトする結果が得られた。これは樹脂量が減少することにより、樹脂が物理的に固着しているボルト長さが短くなり、ボルトの固着力が低下したためと考えられる。

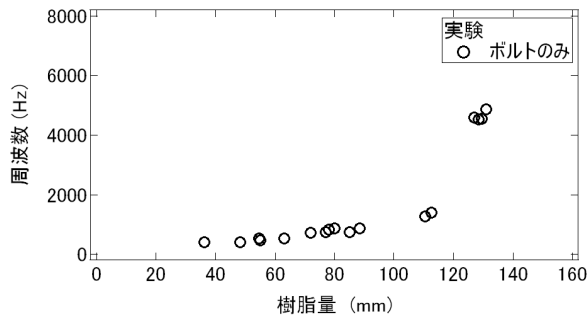


Figure 3. Natural vibration frequency of bolts vs amount of resin (The bolts were not tightened).

次に、鉄板に対して、ワッシャ及びスプリングワッシャをナットで締付トルク 30Nm で固定した場合の実験結果を Figure 4 に示す。ボルトを締付けていない場合に比較して、固有周波数が高周波側へシフトする結果が得られた。これは、ナットで締付けたことにより、ボルトが拘束されることによって高周波側へシフトしたと考えられる。一方で、樹脂量に対しては、樹脂量が減少するにつれて低周波側へシフトする結果が得られ、通常施工の樹脂量である 130mm に比較して、ボルトの固着力が低下したためと考えられる。

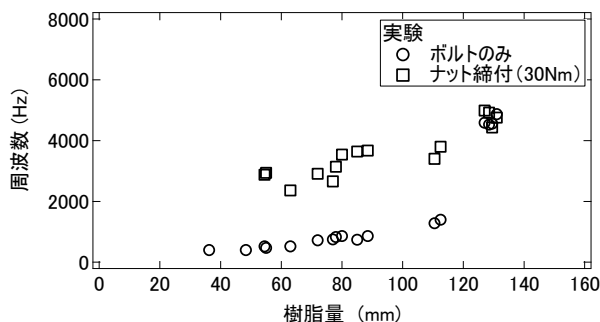


Figure 4. Natural vibration frequency of bolts vs amount of resin (The bolts were tightened with 30Nm torque).

3.2 有効性評価

中央自動車道笹子トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会の事故報告書³によれば、目視点検や打音等では個々のボルトの引抜強度の正確な把

握はできないことが、既存の検査技術における技術的な限界として指摘されている。Figure 5 に打音点検と引抜強度の関係を示す。打音点検では、ほとんど機能を喪失しているボルトは検出可能であるが、それ以外のボルトは診断が困難であった。特に、機能を喪失する直前のボルトに対しては、打音点検では検出が困難であることが確認できる。

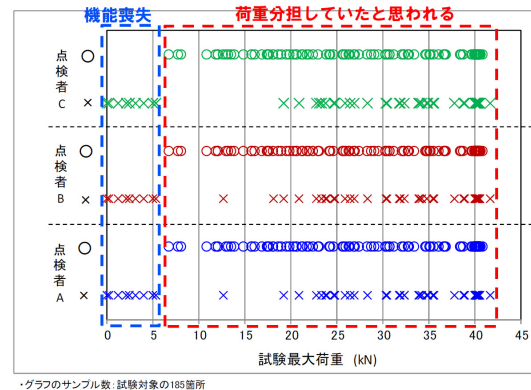


Figure 5. Comparison with the results of hammering test and pull-out strength³

AE センサを用いた検査システムでは、ほとんど機能を喪失する前のボルトであっても検出が可能である結果が得られ、さらに、ナットで締付けた場合であっても検出が可能である結果が得られた。このことから、本検査システムは、従来の打音点検と同等以上の性能があり、ケミカルアンカの健全性を評価する上で、有効な検査技術になりうる可能性があると考えられる。

3. 結言

本研究では、ケミカルアンカの健全性を評価する AE センサを用いた非破壊検査システムを構築し、人工的に樹脂量を調整することにより施工不良を模擬した試験体を作製して、構築した非破壊検査システムの検出性について評価し、以下の結果を得た。

- ① 既存の打音検査と同様に、ほとんど機能を喪失しているボルトを診断可能であった。
- ② 試験結果では、樹脂量が減少するに従って、固有周波数が低周波側へシフトする結果が得られ、ボルトをナットで締付けた場合であっても、施工不良（樹脂量の不足）を診断可能であった。

今後は、引抜試験を実施して、ボルトの固有周波数と引抜強度との対応を評価することを検討する。

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] “トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書”, トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会(2013).
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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

- [7] 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
- [8] 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
- [9] 原子燃料工業株式会社, “アンカーボルトの検査方法及び非破壊検査装置”, 特願2013-161144
- [10] 原子燃料工業株式会社, “アンカーボルトの状態評価方法”, 特願2013-179792

(平成26年6月26)