

# 報告 AE 法による円筒形 PC 構造物の鋼材健全度モニタリングに関する基礎検討

鬼塚 哲雄\*<sup>1</sup>・鎌田 敏郎\*<sup>2</sup>・浅野 雅則\*<sup>3</sup>

**要旨**：本研究では、円筒形 PC 構造物における PC 鋼材の健全度をモニタリングする手法として、AE 法を用いた検討を行った。PC 鋼材切断に起因する AE、および供用中に生じる AE のそれぞれについて計測を行い、両者の AE 特性を評価した。その結果、おのこの波形等の特性（最大振幅値、エネルギーレベル、周波数分布）は大きく異なるものであり、相互に識別が可能であった。これにより、PC 鋼材の健全度をモニタリングする手法として、AE 法の適用可能性が示された。

**キーワード**：AE 法、円筒形 PC 構造物、PC 鋼材、健全度モニタリング

## 1. はじめに

PC 構造物において、PC 鋼材の健全度をモニタリングすることは、耐久性の面から重要なことである。円筒形 PC 構造物で地中部に埋設された外巻きアンボンド PC 鋼材において、PC 鋼材に万が一損傷が発生したとしても、その状況を把握することはできない。地中部の PC 鋼材損傷の有無を確認するためには掘削を必要とする。これらのことから、円筒形 PC 構造物における PC 鋼材の健全度をモニタリングする手法が必要と考えられる。

PC 鋼材の破断をモニタリングする手法として、AE 法を適用した研究事例が既にいくつか報告されている<sup>1)</sup>。しかしながら、何れも PC 桁を対象としたものであり円筒形 PC 構造物に適用した事例はない。

そこで本研究では、AE 法を用いた円筒形 PC 構造物の PC 鋼材健全度モニタリングに関する基礎的な検討を行うこととする。検討に際しては、人為的に PC 鋼材を切断することにより生じる AE（「実験 1」において計測）と、供用中に生じる AE（「実験 2」において計測）のそれぞれについて計測を行い、両者

の特徴を評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 「実験 1」で用いた構造物の概要

「実験 1」では、写真-1 に示す円筒形 PC 構造物にて実験を行った。構造物の平面図を図-1 に示す。本構造物は、外径 15.8m×高さ 4.1m、壁厚が 0.15m であり、PC 鋼材（JIS G 3536, 7 本より線 SWPR7BL φ15.2）を用いて外周を緊張した構造である。

### 2.2 「実験 2」で用いた構造物の概要

「実験 2」で用いた構造物の平面図を図-2 に示す。「実験 1」の構造物同様、外周を PC 鋼材で緊張した構造であるが、外径は 20.7m で、外径の寸法と曝気機を有している点が異なる。曝気機は、定着柱 1 と定着柱 3 の近傍に設置されており、曝気機の先端には、構造物内部の物質を攪拌するためのスクリーが付いている。運転サイクルは、図-3 に示すように、定着柱 1 近傍の曝気機は、24 時間連続で稼働しているが、定着柱 3 近傍の曝気機は、1.5 時間稼働後、2.5 時間停止するサイクルである。

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教授 工博 (正会員)

\*3 岐阜大学大学院 工学研究科生産システム工学専攻 工修 (正会員)

### 2.3 AE 計測

AE センサ(150kHz 共振型)は、**図-1** および **図-2** に示すように、各定着柱に1つずつ貼付し、合計4chとした。センサは接触媒質を用いてコンクリート表面に設置し、ガムテープで固定した。センサの貼付状況を**写真-2**に示す。

計測におけるサンプリングタイムは  $0.5 \mu s$  とし、しきい値は 50dB とした。

また、「実験1」におけるAE計測は、酸素ガスによりPC鋼材を人為的に切断して計測した。PC鋼材は、7本のより線を1本ずつ切断させた。切断箇所は、**図-1** および**図-4**

に示す定着柱3の近傍とした。なお、1回目の切断では、AEパラメータを、2回目の切断では、AE波形を計測した。

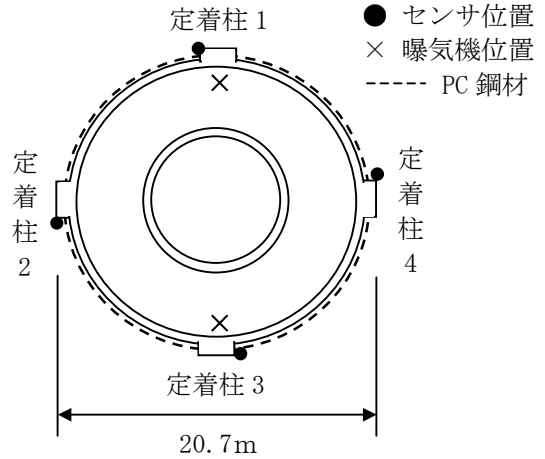


図-2 「実験2」で用いた構造物の平面図

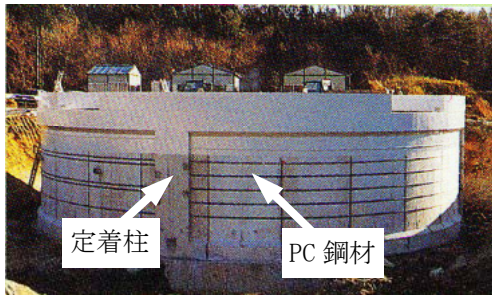


写真-1 「実験1」で用いた構造物

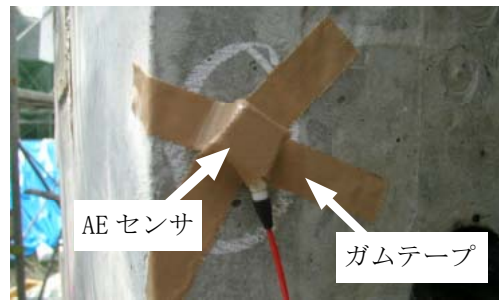


写真-2 AE センサの貼付状況

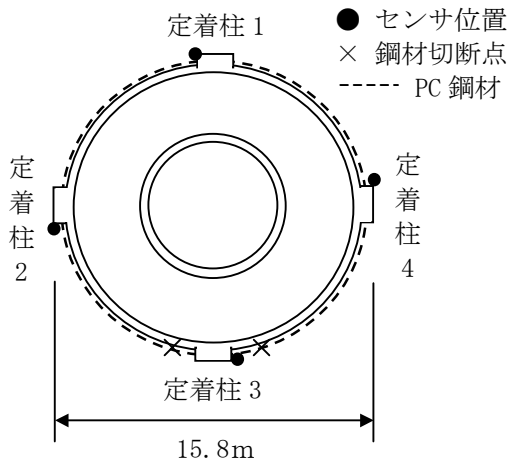


図-1 「実験1」で用いた構造物の平面図

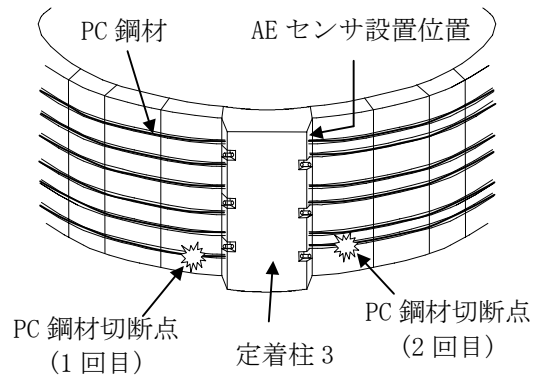


図-4 PC鋼材の切断箇所



図-3 曝気機の運転サイクル

一方、「実験 2」における AE 計測は、供用中に生じる AE を 24 時間連続で計測した。

### 3. AE による評価方法

本研究では、①AE ヒット数、②最大振幅値、③AE エネルギーなどの AE パラメータ<sup>2)</sup>と④AE 波形および周波数分布を評価指標として用いた。このうち、②最大振幅値と③AE エネルギーの定義を図-5 に示す。

本研究では、AE ヒット数により、PC 鋼材切断と、供用中に生じる AE を計測できるかどうかの確認を行った。続いて、最大振幅値および AE エネルギーを用いて、PC 鋼材切断と供用中に生じる AE の事象としての大きさを比較した。なお、AE エネルギーについては、計測された値の範囲が広いため、便宜上、次式により定義されるエネルギーレベルで表現した。

$$EL = 10 \log_{10} \frac{E_d}{E_0} \quad (1)$$

ここで、EL: エネルギーレベル (dB),  $E_d$ : 「実験 1」および「実験 2」で得られた AE エネルギー,  $E_0$ : 基準エネルギーをそれぞれ示している。

基準エネルギーとしては、基準供試体 (100mm × 100mm × 400mm, W/C : 0.5, 弾性係数

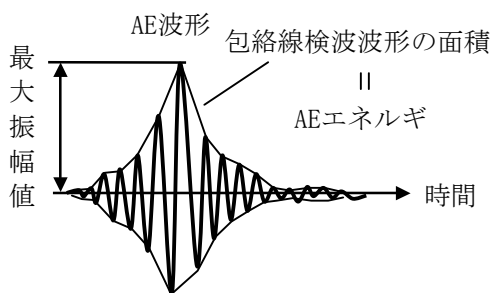


図-5 最大振幅値とAEエネルギーの定義

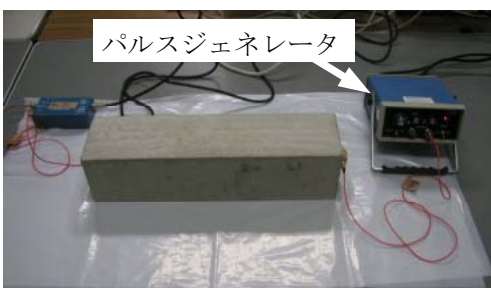


写真-3 基準エネルギーの計測状況

30.0GPa) において、送信電圧 375V のパルスを 400mm 透過させ、対面において計測された AE エネルギーを用いている。基準エネルギーの計測状況を写真-3 に示す。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 AE ヒット数による検討

「実験 1」において計測された AE ヒット数を図-6 に示す。なお、ここでのヒット数は全 ch において得られたものを示している。

AE ヒット数は、図に示すように、7 回断続的に記録されている。これは、PC 鋼材を構成するより線が 1 本ずつ切断したことと対応しているものと考えられる。また、最後のピークは、他のピークに比べてヒット数が多くなっている。これについては、全てのより線が切断されたことにより、PC 鋼材の定着部の抜け出しが生じたため、これに伴う AE も発生したことが原因と考えられる。

次に、「実験 2」の 24 時間モニタリングにおいて得られた AE ヒット数を図-7 に示す。ここでも全 ch において得られた結果を示している。

この図からわかるように、AE ヒット数は、

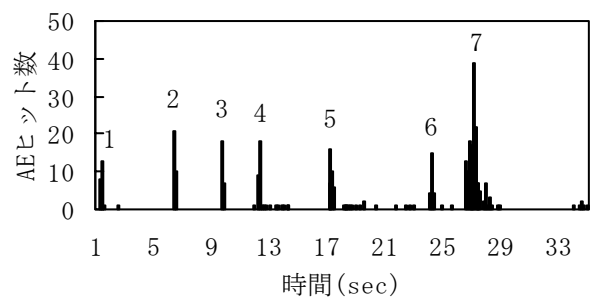


図-6 PC 鋼材切断に伴う AE ヒット数

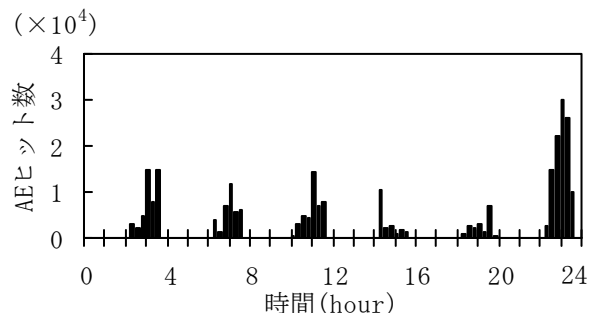


図-7 曝気機の稼働に伴う AE ヒット数

図-3 に示す定着柱 3 の曝気機の稼働時間に対応した挙動を示している。

このように、「実験 1」および「実験 2」で計測された AE は、PC 鋼材の切断と曝気機の稼働に起因することが明らかとなった。一方、AE の発生数のみでは、切断に起因する AE かどうかを判断することは困難であるため、次節では、得られた AE のその他の特性に着目した検討を行う。

#### 4.2 最大振幅値による検討

図-8 に、計測された AE の最大振幅値の頻度分布を示す。なお、図中に示す数値は、縦軸のスケールの制約から、ヒストグラムで表示されていない AE ヒット数を示している。

PC 鋼材切断点近傍（定着柱 3）のセンサで

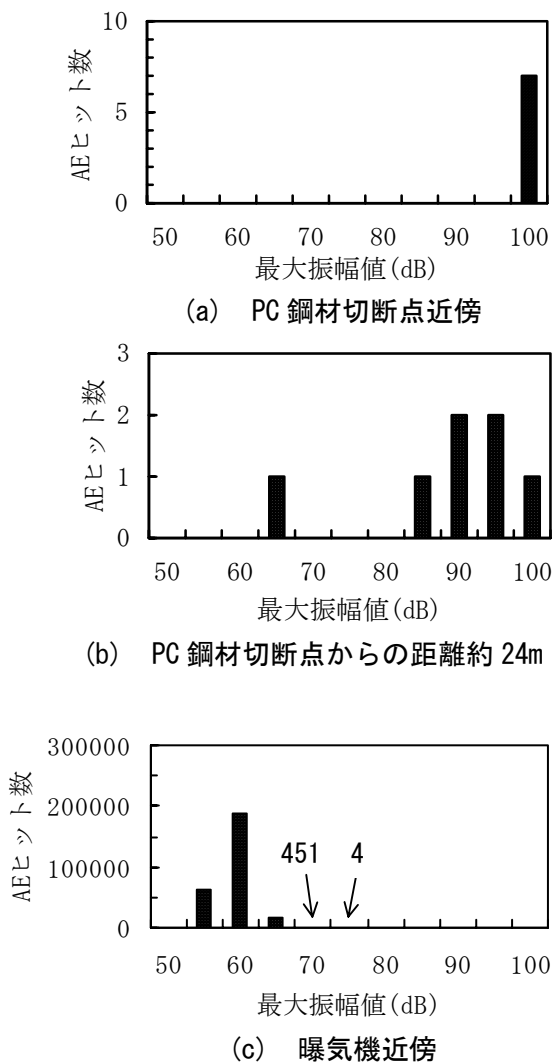


図-8 PC 鋼材切断と曝気機の稼働に伴う AE の最大振幅値

計測された AE の最大振幅値 (図-8(a)) は、100dB のみ存在する。このように、切断点近傍では極めて大きな事象が生じていることがわかる。また、切断点から 24m 離れた位置で計測された AE の最大振幅値 (図-8(b)) は、ほぼ 85dB から 100dB の範囲に分布している。これは、切断点近傍に比べて AE の伝播距離が長いため、弾性波が減衰したことが理由として考えられる。

一方、供用中の構造物における曝気機の稼働に起因する AE の最大振幅値 (図-8(c)) は、最大で 75dB であるが、55~65dB の範囲に発生した AE が殆どであり、70dB 以上の AE は支配的な要因ではないと考えることができる。

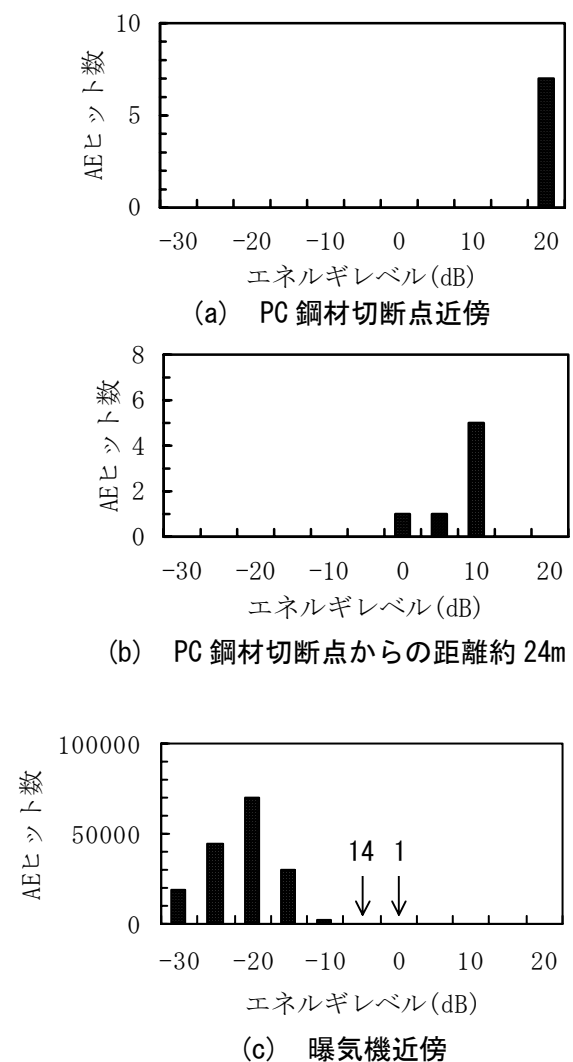


図-9 PC 鋼材切断と曝気機の稼働に伴う AE のエネルギーレベル

以上のように、曝気機の稼働に起因する AE の最大振幅値は、PC 鋼材切断点近傍のものに比べて十分小さく、さらに、切断点より 24m 離れた位置で計測されたものより十分小さいことも示された。したがって、AE の最大振幅値を評価することで、切断と曝気機の稼働に起因する AE を識別することが可能であるものと考えられる。

### 4.3 エネルギーレベルによる検討

4.2 で検討した最大振幅値は、AE 発生源の規模の情報を表すものであると考えられる<sup>2)</sup>が、波形の大きさを評価する場合には、振幅に加えて波形の継続時間も重要な要因であるとされている<sup>3)</sup>。エネルギーレベルは、振幅と

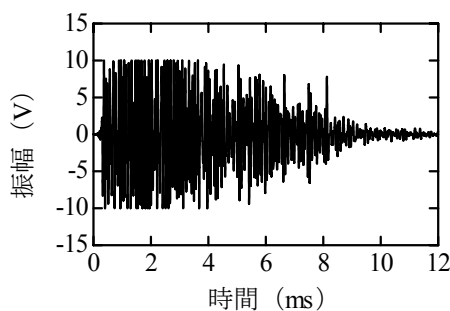
継続時間の両者に関係するものであるため、ここではこのエネルギーレベルを用いた検討を行う。

図-9 に、エネルギーレベルの頻度分布を示す。なお、図中に示す数値は、縦軸のスケールの制約から、ヒストグラムで表示されない AE ヒット数を示している。PC 鋼材切断点近傍における AE のエネルギーレベル(図-9(a))は、20dB のみに存在している。切断点より 24m 離れた位置におけるエネルギーレベル(図-9(b))は、切断点近傍の場合と比べて小さくなっており、最大で 10dB であり、0 (基準エネルギーと同じ値)および 5dB にも 1 ヒッ

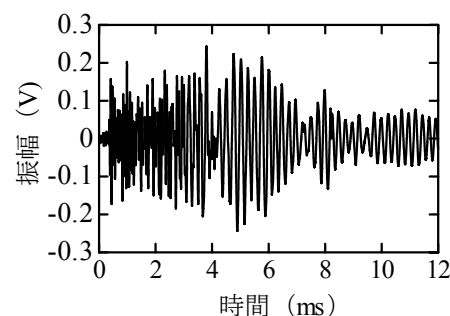
トずつ存在している。最大振幅値の場合と比較して、PC 鋼材切断に起因するエネルギーレベルの分布範囲は小さいことがわかる。この範囲では、エネルギーレベルから考えた場合、事象の相対的な大きさのばらつきが小さく、特徴を把握するのに適しているものと考えられる。

一方、曝気機の稼働に起因する AE のエネルギーレベル(図-9(c))は、おおよそ -30 ~ -10dB の範囲に分布している。

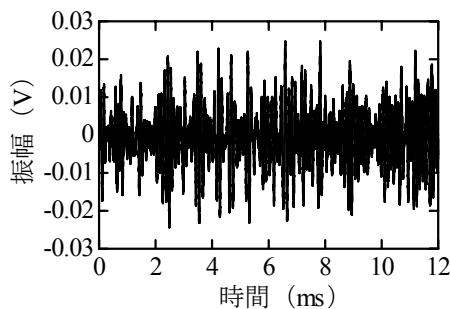
以上のように、曝気機の稼働に起因する AE のエネルギーレベルは、PC 鋼材切断のものよりも十分小さく、両者の識別は可能である。また、エネルギーレベルは、最大振幅値とほぼ同



(a) PC 鋼材切断点近傍

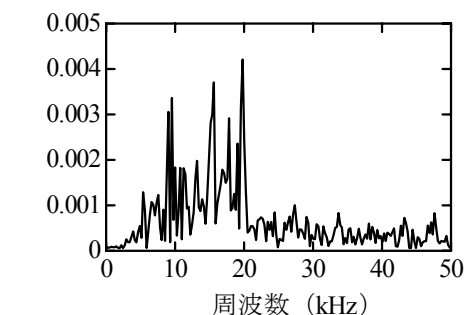


(b) PC 鋼材切断点からの距離約 24m

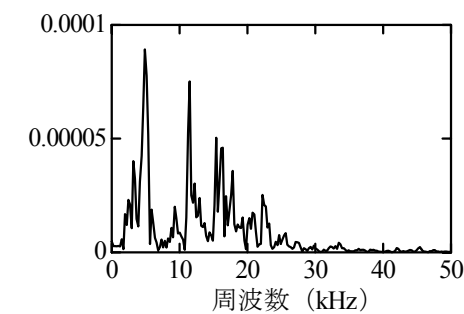


(c) 曝気機近傍

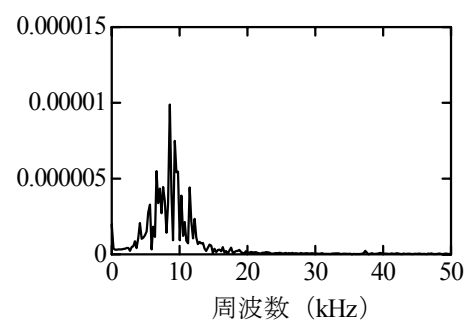
図-10 PC 鋼材切断と曝気機の稼働に伴う AE 波形



(a) PC 鋼材切断点近傍



(b) PC 鋼材切断点からの距離約 24m



(c) 曝気機近傍

図-11 PC 鋼材切断と曝気機の稼働に伴う AE の周波数分布

じ傾向を示すパラメータであることも明らかとなった。

#### 4.4 AE 波形および周波数分布による検討

PC 鋼材切断および曝気機の稼働時において得られた波形を図-10 にそれぞれ示す。なお、計測機器における増幅率や基準電圧の関係上、10V 以上の振幅は表示されていない。これらの図からわかるように、PC 鋼材切断点近傍での波形（図-10(a)）は、切断点から 24m 離れた位置でのもの（図-10(b)）や、曝気機の稼働のもの（図-10(c)）よりも明らかに振幅が大きいことがわかる。このことが、4.2 および 4.3 で検討してきた AE パラメータの違いとして現れたものと考えられる。

次に、FFT により得られた各波形の周波数分布を図-11 に示す。

図からわかるように、PC 鋼材切断点近傍で計測された AE の周波数成分（図-11(a)）は、波形の飽和の影響により精度の点では一部問題を含んではいるが、10~20kHz の成分が特に多い傾向は明らかである。切断に伴う AE には、PC 鋼材定着部を通じて発生する AE のみならず、PC 鋼材の抜け出しに伴う構造物壁面との摩擦等により生じた可能性も考えられる。これが様々な周波数の AE が生じた原因と考えられる。

また、切断点より約 24m 離れた位置における AE の周波数分布（図-11(b)）は、切断点近傍の周波数分布と比べ、20kHz 付近の成分が少ない。これは、高周波成分は伝播する過程で減衰しやすいためと考えられる。

一方で、曝気機の稼働に起因する AE の周波数分布（図-11(c)）を見ると、8kHz 付近の成分が卓越しており、また、狭い周波数範囲に集中している。このことから、この AE は、曝気機の機械特性を捉えている。

以上のように、PC 鋼材切断に伴う AE は、曝気機の稼働に伴う AE と比較して、波形の振幅が大きく、その周波数成分は広い範囲に分布することが示された。したがって、波形

やその周波数分布においても、両者の識別は可能であるものと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 本研究で対象とした構造物において、PC 鋼材切断および曝気機の稼働に起因する AE は、定着柱のコンクリート表面に設置した AE センサで受振できることが確認できた。
- 2) パラメータとして最大振幅値を用いた場合、PC 鋼材切断に起因する最大振幅値は、曝気機の稼働のものに比べて十分大きく、両者の識別は可能であった。この傾向は、エネルギーレベルを用いた場合にも同様であり、両パラメータの大きさの違いに注目した評価の可能性が示された。
- 3) PC 鋼材切断に伴う AE は、曝気機の稼働のものと比較して、波形の振幅が大きく、その周波数成分は広い範囲に分布した。これにより、波形やその周波数分布においても、評価の可能性が示された。

AE 計測を行うにあたっては、現地のノイズ除去のためのしきい値の決定方法や、稼働中の曝気機特性の把握等が重要と考えられ、今後の検討課題である。

謝辞：本研究を行うにあたり、(株)安部工業所のご助力を得た。記してここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Austin Adkins, Frank Carlyle, David Youdan: The Use of Acoustic Monitoring to Extend the Life of Post-Tensioned Overbridges at Huntingdon and Mossband, UK, The 9<sup>th</sup> International Conference on Structural Faults and Repair, 別刷, 2001.7
- 2) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版社, 1988
- 3) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析, 鹿島出版会, 1994