

## JIS 意見受付

JIS A 1165 受動弾性波計測手法を用いた  
コンクリート部材の損傷評価法  
原案作成委員会

この JIS は日本非破壊検査協会規則「JIS 原案作成に関する規則」に基づき関係者に JIS の制定前の意見提出期間を設けるために掲載するものです。

意見は規格原案決定の際の参考として取り扱いさせていただきます。

掲載されている JIS についての意見提出は下記メールアドレスまでお願いいたします。

意見受付締切日：2025 年 10 月 28 日（火）

意見提出先：Email:bsn@jsndi.or.jp

---

## 目 次

|    |                                 |    |
|----|---------------------------------|----|
| 1  |                                 |    |
| 2  |                                 |    |
| 3  | 1 適用範囲 .....                    | 1  |
| 4  | 2 引用規格 .....                    | 1  |
| 5  | 3 用語及び定義 .....                  | 1  |
| 6  | 4 試験の準備 .....                   | 2  |
| 7  | 4.1 試験技術者 .....                 | 2  |
| 8  | 4.2 事前調査 .....                  | 2  |
| 9  | 4.3 試験装置 .....                  | 3  |
| 10 | 5 試験の手順 .....                   | 4  |
| 11 | 5.1 AE センサの取付け .....            | 4  |
| 12 | 5.2 AE センサ取付け状況の確認 .....        | 4  |
| 13 | 5.3 背景雑音の強度測定 .....             | 4  |
| 14 | 5.4 しきい値の調整 .....               | 5  |
| 15 | 5.5 AE 計測の実施 .....              | 5  |
| 16 | 6 損傷評価方法 .....                  | 6  |
| 17 | 6.1 損傷評価の手順 .....               | 7  |
| 18 | 6.2 AE 源位置標定 .....              | 8  |
| 19 | 6.3 AE 源分布の導出 .....             | 8  |
| 20 | 6.4 AE 源密度マップの作成 .....          | 8  |
| 21 | 6.5 弾性波伝搬速度マップの作成 .....         | 8  |
| 22 | 6.6 マップの2値化 .....               | 8  |
| 23 | 6.7 損傷の評価 .....                 | 8  |
| 24 | 7 報告書 .....                     | 11 |
| 25 | 附属書 A (参考) AE 源密度マップの作成方法 ..... | 12 |
| 26 | 附属書 B (参考) 基準値の幅の設定 .....       | 14 |
| 27 |                                 |    |
| 28 |                                 |    |
| 29 |                                 |    |

## まえがき

この規格は、産業標準化法第 12 条第 1 項の規定に基づき、一般社団法人日本非破壊検査協会（JSNDI）から、産業標準原案を添えて日本産業規格を制定すべきとの申出があり、日本産業標準調査会の審議を経て、国土交通大臣が制定した日本産業規格である。

この規格は、著作権法で保護対象となっている著作物である。

この規格に従うことは、次の者の有する特許権等の使用に該当するおそれがあるので、留意する。

－ 氏名 1 : 株式会社東芝

－ 住所 1 : 神奈川県川崎市幸区堀川町 72 番地 34

－ 氏名 2 : 国立大学法人京都大学

－ 住所 2 : 京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1

上記の特許権等の権利者は、非差別的かつ合理的な条件でいかなる者に対しても当該特許権等の実施の許諾等をする意思のあることを表明している。ただし、この規格に関連する他の特許権等の権利者に対しては、同様の条件でその実施が許諾されることを条件としている。

この規格に従うことが、必ずしも、特許権の無償公開を意味するものではないことに注意する必要がある。

この規格の一部が、上記に示す以外の特許権等に抵触する可能性がある。国土交通大臣及び日本産業標準調査会は、このような特許権等に関わる確認について、責任はもたない。

なお、ここで“特許権等”とは、特許権、出願公開後の特許出願又は実用新案権をいう。

### 関連特許リスト

1. 特許 6366826 号：構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法
2. 特許 6368040 号：構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法
3. 特許 6917344 号：構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法

# 受動弾性波計測手法を用いたコンクリート部材の損傷評価法

Methods for damage assessment of concrete members by AE  
measurements utilizing passive elastic wave

## 1 適用範囲

この規格は、受動弾性波を計測し、コンクリート部材の損傷を評価する方法について規定する。

## 2 引用規格

次に掲げる引用規格は、この規格に引用されることによって、その一部又は全部がこの規格の要求事項を構成している。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

**JIS Z 2300** 非破壊試験用語

## 3 用語及び定義

この規格で用いる主な用語及び定義は、次によるほか、**JIS Z 2300** による。

### 3.1

#### AE 源 (AE source)

コンクリート部材内のひび割れなどを起因とした AE の発生源

### 3.2

#### 受動弾性波 (passive elastic wave)

部材が外力によって変形した結果生じるひび割れの発生、進展、境界部の相互作用などに伴い発生する弾性波

### 3.3

#### AE 源分布 (AE source distribution)

標定された、AE 源の位置の分布

### 3.4

#### AE 源密度 (AE source density)

単位量（1 次元の場合は単位長さ、2 次元の場合は単位面積、3 次元の場合は単位体積）当たりの、位置標定された AE 源の個数

### 3.5

#### AE 源密度マップ (AE source density map)

AE 源密度の空間的な分布を表示したもの

### 3.6

#### 擬似 AE 源 (Artificial AE source)

AE を模擬して発生させた弾性波源

**注釈 1** 擬似 AE 源は、その周波数帯域が少なくとも使用するセンサが十分な感度をもつ有する範囲を含み、再現性があるものを用いる。シャープペンシル芯圧折又は鋼球打撃などの機械的な方法、又は電気パルス発生装置とそれに接続された AE センサ若しくはそれと同じ帯域のパルサのいずれを用いてもよい。

### 3.7

#### AE 計測 (AE measurement)

AE センサを用いた計測

**注釈 1** AE センサは超音波帯域 (20 kHz 以上) には限定されず、低周波数帯域 (20 kHz 未満) に対応したものを包含する。

### 3.8

#### 弾性波伝搬速度マップ (elastic wave velocity map)

試験対象の部材中を伝わる弾性波の伝搬速度の空間的な分布を表示したもの

### 3.9

#### AE トモグラフィ (AE tomography)

AE 計測によって得られた信号から AE 源位置を推定し、部材中の AE の伝搬速度の分布を導出する手法

## 4 試験の準備

### 4.1 試験技術者

この規格を適用して試験を行う試験技術者は、試験装置及び試験の原理に加え、コンクリート部材の損傷に関する知識をもつ者でなければならない。

### 4.2 事前調査

#### 4.2.1 形状特性・補修履歴

次のとおり、対象構造物の設計図面、施工記録、維持管理記録などを確認し、対象部材の現況を把握する。

- a) 対象部材の形状を示す図面 (寸法、床版厚、配筋など)
- b) 対象部材の周辺部材との位置関係を示す図
- c) 対象構造物の竣工日、補修履歴

120 d) 対象部材の補修の概要

#### 121 4.2.2 雑音状況の確認

122 試験場所において、特に次の項目について確認を行い、予想される雑音状況を把握してする。

123 a) 空中及び部材を通じて伝わってくる機械的雑音

124 b) 電氣的雑音

#### 125 4.3 試験装置

##### 126 4.3.1 標準的構成

127 試験装置の標準的構成の例を図 1 に示す。

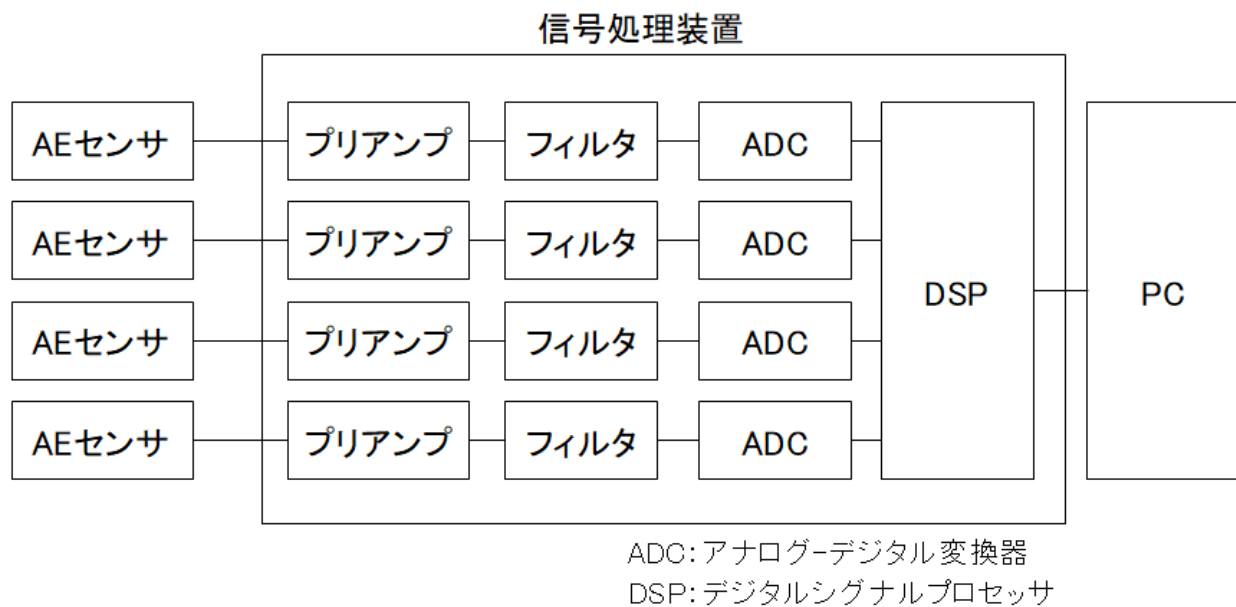


図 1—試験装置の標準的構成の例

##### 130 4.3.2 AE センサ

131 AE センサは感度校正を行い、その周波数特性（一例として 20 kHz～100 kHz の範囲）における最大感度  
132 が 53 dB（1 V/(m/s)の感度を 0 dB とする。この場合、約 0.45 kV/(m/s)) 以上のものを使用する。一般的な  
133 加速度センサのように数 100 Hz～数 10 kHz の帯域で感度特性が平坦（坦）な領域で使用する場合は、  
134 計測において想定される加速度より、次の式によって求まる加速度感度の範囲内の感度特性をもつセンサ  
135 を使用する。

$$S_{\max} = \frac{V_{\max}}{A_{\max}} \dots\dots\dots (1)$$

137 ここで、 $S_{\max}$  : センサ加速度感度上限 (V/(m/ s<sup>2</sup>))

$V_{\max}$  : センサの最大出力電圧 (V)  
 $A_{\max}$  : 計測で想定される最大加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

138

$$S_{\min} = 10 \times \frac{V_{\text{noise}}}{A_{\min}} \dots\dots\dots (2)$$

139

ここで,  $S_{\min}$  : センサ加速度感度下限 ( $\text{V}/(\text{m/s}^2)$ )  
 $V_{\text{noise}}$  : センサの出力換算ノイズ (V)  
 $A_{\min}$  : 計測で想定される最小加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

140 また, 使用する各 AE センサは同一機種を使用し, その特性のばらつきは, 最大感度差 6 dB 以内とする。  
 141 さらに, 定期的 (例として 1 年に 1 回) に感度校正を行い, 顕著な感度低下がないことを確認する。

### 142 4.3.3 試験装置の要件

143 試験装置は, 対象部材の全部又は特定の領域を監視することが可能な数の AE センサ及び計測チャンネルをもつものとする。さらに, 試験装置は, AE (受動弾性波) の発生状況に関して次の情報を記録できない  
 144 なければならない。  
 145

- 146 a) AE 波 (受動弾性波) のセンサ到達時刻
- 147 b) AE 信号振幅又はそれに代わる量

## 148 5 受動弾性波の計測

### 149 5.1 AE センサの取付け

150 AE センサの対象部材への取付け例を図 2 に示す。AE センサは対象部材片面に複数配置し, 反対面で発生し部材を透過した弾性波を検出する。条件は次のとおりとする。

- 152 a) **試験対象領域** 試験対象領域は, AE センサで囲まれた領域とする。
- 153 b) **AE センサの配置** AE センサは, 試験対象領域内で発生した弾性波を, 少なくとも弾性波源の位置標  
 154 定計算に最低限必要な数 (1 次元の場合は 2 個以上, 2 次元の場合は 3 個以上, 3 次元の場合は 4 個以上)  
 155 のセンサで検出可能となるように配置する。
- 156 c) **センサ間隔** AE センサ間隔は, 検出対象として想定する損傷のサイズに対して十分な分解能をもち,  
 157 使用する AE センサの対応する周波数帯域における部材内での弾性波の減衰度も考慮して設定する。  
 158 例として RC 橋りょう (梁) 床版の  $2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  の領域を共振周波数が約 30 kHz の AE センサで計測する  
 159 ことを想定した場合, コンクリートにおける弾性波の減衰を考慮して, AE センサ間隔を 1 m 以下に設定  
 160 することが望ましい。したがって, この場合は 3 行  $\times$  5 列程度の格子配置などが想定される。

### 161 5.2 AE センサ取付け状況の確認

162 AE センサの試験対象に対する音響結合状態及び接続の確認は, AE センサの取付けに引き続いて行う。  
 163 また, 試験の終了直後にも行うことが望ましい。

164 図 3 に AE センサ取付け状況の確認方法について示す。取付け状況確認のための音源は, 擬似 AE 源を用いる。各 AE センサの近傍で擬似 AE を 3 回以上発生させ, 当該 AE センサで信号を検出し, 最大振幅  
 165 値の平均値を得る。この操作を全ての AE センサに対して行い, 得られた全ての平均値のばらつきが 6 dB  
 166 以下に収まるようにする。  
 167

168    **5.3    背景雑音の強度測定**

169        試験に使用する全 AE センサについて、背景雑音の強度（ピーク電圧値）を測定し、記録する。強力な  
170        雑音源があるときには、遮断措置を講じなければならない。床版計測の際には、橋りょう（梁）路面を走  
171        行する車両がない状況において行うことが望ましい。

172    **5.4    しきい値の調整**

173        試験に使用する全ての AE センサの電圧しきい値は、背景雑音で作動しないように調整する。

174    **5.5    AE 計測の実施**

175        橋梁における車両通過など、対象部材への負荷などによって発生する AE を計測する。AE 計測は、少な  
176        くとも 4.3.3 で示したパラメータを計測し、データを記録する。

177

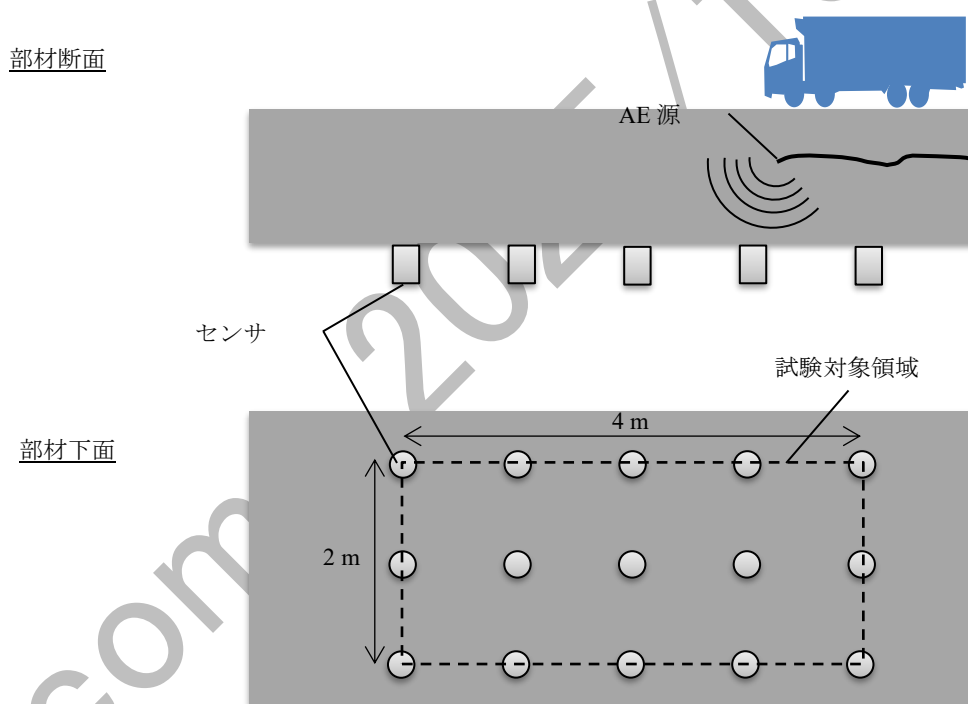


図 2—AE センサの取付け例

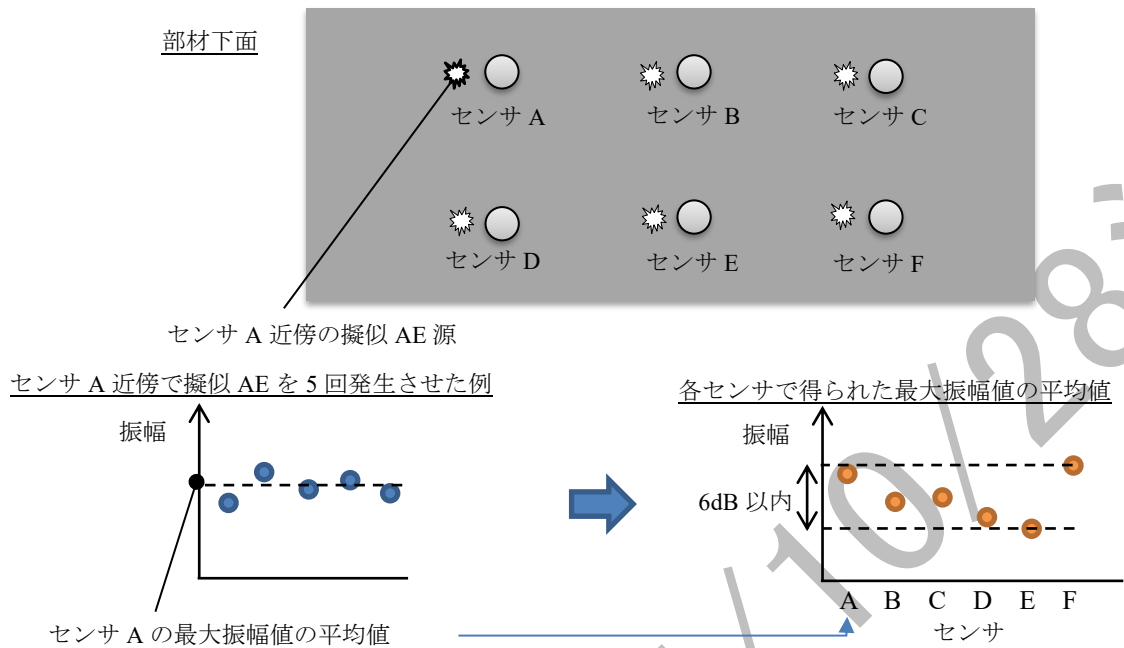


図 3—AE センサ取付け状況の確認方法

## 6 損傷評価方法

### 6.1 損傷評価の手順

損傷評価の流れを図 4 に示す。

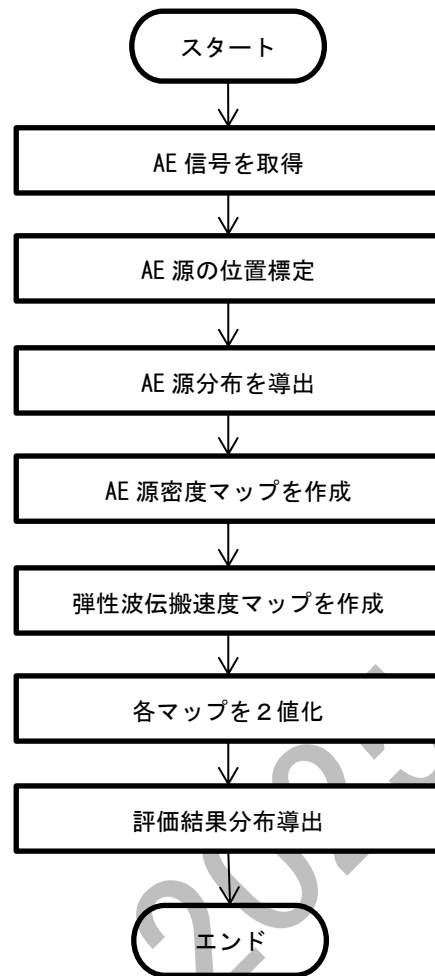


図 4－損傷評価の流れ

## 6.2 AE 源位置標定

弾性波伝搬速度及び各センサへの到達時間差を用いて AE 源の位置標定を行う。位置標定は、二次元での平面的な標定以外にも、対象の構造、センサ配置に応じて、一次元、三次元での標定を行うも可能である。弾性波伝搬速度は、対象部材における弾性波伝搬速度を使用する。具体的には、対象部材に弾性波を発生させ、対象部材の健全な領域を通過した弾性波を計測することによって得られた伝搬速度を使用することが望ましい。

## 6.3 AE 源分布の導出

位置標定によって算出された個々の弾性波源の位置をプロットすることによって、試験対象領域全域における AE 源分布を導出する。

## 6.4 AE 源密度マップの作成

AE 源分布から、AE 源密度を算出し、AE 源密度マップを作成する。AE 源密度マップの作成例を図 5 に示す。例では、試験対象領域をメッシュに区切り、各メッシュ内に標定された AE 源の個数を数える。各メッシュ内の AE 源の数をメッシュの面積で除することによって、メッシュごとの AE 源密度が得られる。

199 各位置のメッシュごとに得られた AE 源密度マップを作成する。AE 源密度マップの作成手順については、  
200 上記に限るものではない。例えば、カーネル密度分布など、AE 源密度と同等の指標を代わりに用いてもよ  
201 い。詳しくは、**附属書 A** 参照。

## 202 6.5 弾性波伝搬速度マップの作成

203 AE トモグラフィなどの手法を用いることによって、部材内での弾性波伝搬速度の分布を算出し、弾性  
204 波伝搬速度マップを作成する。

205 **注記** AE トモグラフィによる速度場マップの算出手順には、参考文献[5], [6]に示す手順もある。

## 206 6.6 マップの 2 値化

207 **6.3, 6.4** で得られた各マップに対して基準値を設定し、基準値に対する大小によってマップを 2 値化す  
208 る。AE 源密度マップは、高密度領域と低密度領域に、弾性波伝搬速度マップは、高速度領域と低速度領域  
209 に分割される。

210 AE 源密度及び弾性波伝搬速度の基準値は、対象部材において計測を実施し、観測された AE 源密度、及  
211 び弾性波伝搬速度の結果に基づき、対象構造物の特性に応じて適切に設定するのが望ましい。基準値の幅  
212 の設定についての詳細は、**附属書 B** 参照。対象部材、それと同等の試験体を用いた試験が可能な場合は、  
213 既知の損傷又は模擬損傷を精度良く特定できる基準値とする方法、実構造物において実施したコア採取な  
214 どを参照して損傷領域を特定可能な基準値を採用するなどの方法がある。

## 215 6.7 損傷の評価

216 2 値化した二つのマップを重ね合わせることによって、試験対象領域は、高密度・高速度／高密度・低  
217 速度／低密度・高速度／低密度・低速度の 4 種類の領域に分類される。この分類に応じて、健全度を 4 段  
218 階で判定する。健全度は、健全度 1, 健全度 2, 健全度 3, 健全度 4 (区分については参考文献[7]など参照)  
219 の順で健全度が低くなっていく。低密度・高速度領域は健全度 1, 高密度・高速度領域は健全度 2, 高密  
220 度・低速度領域は健全度 3, 低密度・低速度領域は健全度 4, と判定される。**図 6** に損傷評価手順を計測結  
221 果に適用した例を示す。

222

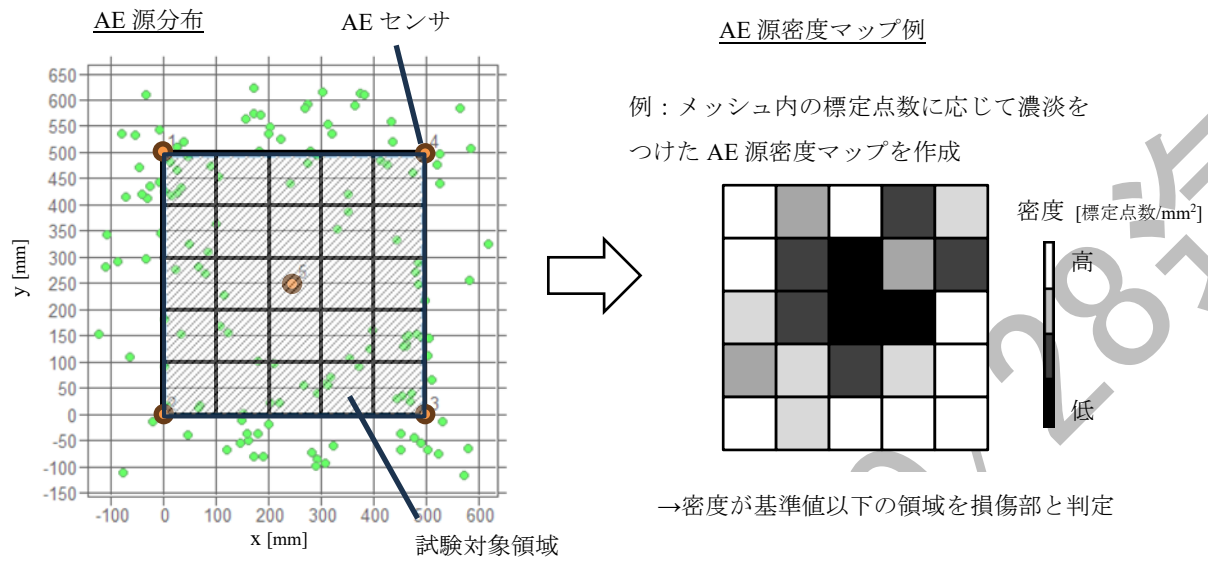


図 5-AE 源密度マップの作成例

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

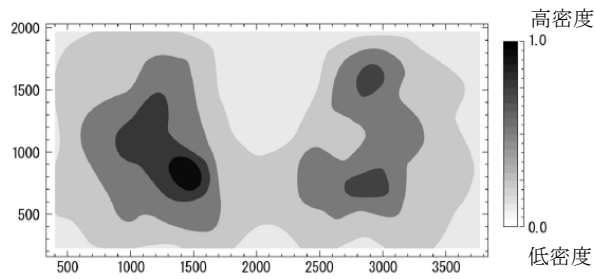
233

234

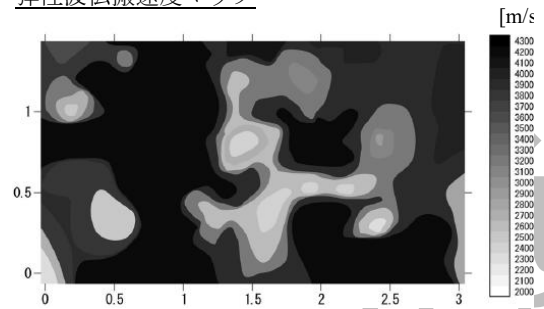
235

236

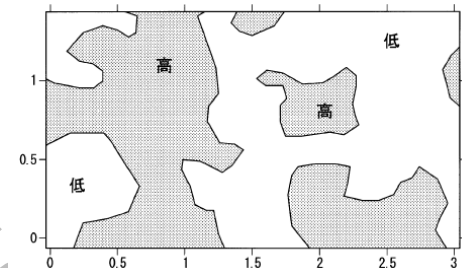
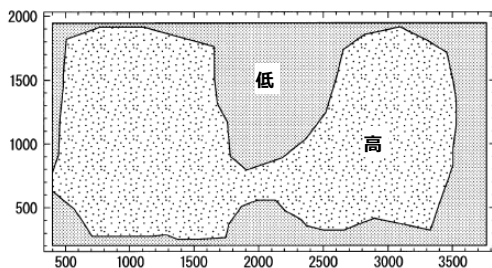
AE 源密度マップ



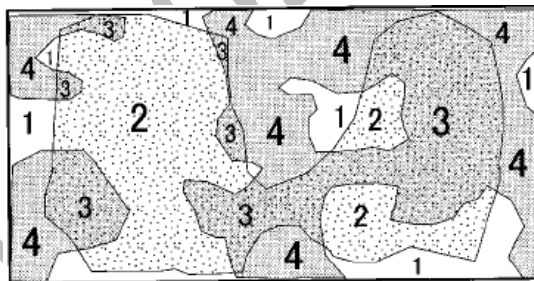
弾性波伝搬速度マップ



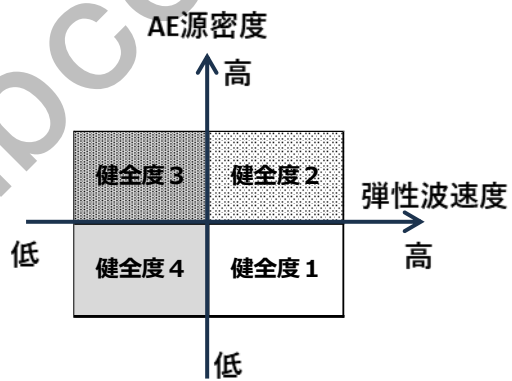
基準値によって2値化



重ね合わせる



密度と速度の組み合わせによって健全度を評価



| 弾性波速度 | AE源密度 | 判定    |
|-------|-------|-------|
| 高     | 低     | 健全度 1 |
| 高     | 高     | 健全度 2 |
| 低     | 高     | 健全度 3 |
| 低     | 低     | 健全度 4 |

図 6—損傷評価の例

## 7 報告書

結果の報告には、通常、次の項目を含む。

- a) 試験対象（4.2.1 の記載内容を含む）
- b) 試験日時
- c) 試験実施場所
- d) 試験装置の性能確認の結果
- e) AE センサの配置及び取付方法
- f) 計測設定（しきい値など）
- g) 背景雑音の状況
- h) AE の発生状況（AE のセンサ到達時刻，AE 信号振幅又はそれに代わる量など）
- i) 試験結果の分析の手順及びその結果
- j) 試験技術者（氏名，所属など）
- k) 試験装置の仕様（表 1 参照）

表 1－試験装置の仕様例

| 項目          | センサ | プリアンプ | 信号処理装置 |
|-------------|-----|-------|--------|
| 型式          |     |       |        |
| 利得（ゲイン）（dB） |     |       |        |
| 周波数通過帯域（Hz） |     |       |        |

## 附属書 A

### (参考)

## AE 源密度マップの作成方法

### A.1 カーネル密度推定を用いた AE 源密度マップの作成

標定された AE 源を，確率分布を示すカーネルに置き換えて積算することでカーネル密度分布が得ることが可能である。図 A.1 にカーネル密度推定による AE 源密度マップ作成の概略であり，その手順を次に示す。

標定された AE 源を，カーネル関数に置き換える。図には，カーネル関数にガウス分布を採用した例を示す。点 $(x_0, y_0)$ に対するガウス分布のカーネル関数は式(A.1)の  $K_h(x, y)$  で表せる。式中の  $h$  は関数のバンド幅を示す。

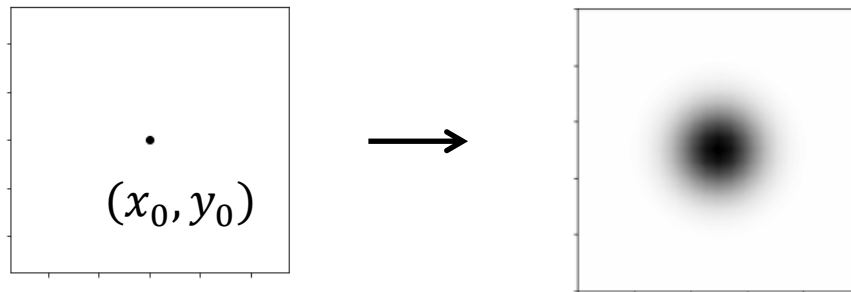
$$\begin{aligned} (x_0, y_0) &\rightarrow K_h(x, y) \\ &= \frac{1}{2\pi h^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2h^2}\right) \dots\dots\dots (A.1) \end{aligned}$$

カーネル関数は，積分値が 1 となっており，関数の値はある位置に標定点が存在する確率と考えてよい。確率分布の広がりにはバンド幅によって規定が可能である。バンド幅の設定に当たっては，標定精度が悪い場合にバンド幅を大きくするなど，標定誤差を反映させてもよい。式(A.2)に示すように，カーネル関数を全ての AE 源について足し合わせることで，全体の AE 源密度  $f(x, y)$  が得られる。式中の  $N$  は AE 源の総数を示す。

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_h(x - x_i, y - y_i) \dots\dots\dots (A.2)$$

足し合わせて得られた密度の総和を標定点の数で除することによって，全体の密度が 1 に正規化される。この場合，得られる密度の値は，一つの標定点が試験対象領域のある評価位置で観測される確率に相当すると考えられる。 $f(x, y)$  をコンター図などで平面上に表示したものが AE 源密度マップとなる。

# カーネル関数



## AE 源密度マップ

バンド幅 : 60 mm

メッシュサイズ : 20 mm × 20 mm

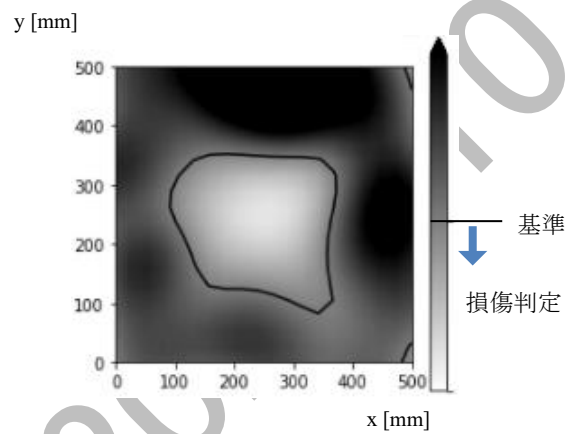


図 A.1ーカーネル密度推定による AE 密度マップ作成

## 附属書 B

## (参考)

## 基準値の幅の設定

図 B.1 に示すように、基準値を一つの値に定めず、ある程度幅をもたせて評価してもよい。図のように基準値に上限と下限を設け、上限より大きい値の領域を“高”，下限より小さい値の領域を“低”と判定する。基準値に幅を持たせることによって、明確な分類を行える領域だけを評価し、より信頼性の高い結果を得ることが可能である。

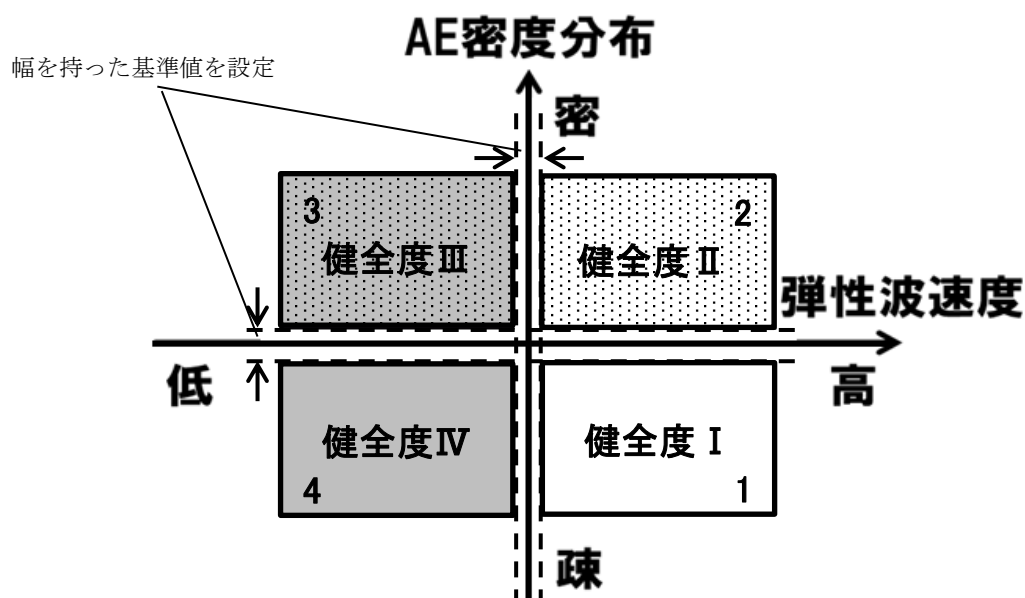


図 B.1—基準値の幅

## 参考文献

- [1] E. Whitehurst, Soniscope tests concrete structures, J Am Concr Inst 47, 1951, 433-444.
- [2] P.Turgut, Research into the correlation between concrete strength and UPV values, e-Journal of Nondestructive Testing, 2004, 12(12)
- [3] 岡田, 六車 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 1981, 朝倉書店, 520-530.
- [4] 相互校正法によるアコースティック・エミッション変換子の絶対感度校正方法, NDIS 2109:2004
- [5] 塩谷, 奥出, 桃木, 小林 “AE トモグラフィーによるインフラ構造物の健全性評価手法の提案”, 日本非破壊検査協会 第 18 回 AE 総合コンファレンス論文集, 2011, 39-42.
- [6] F.Shubert, Tomography Techniques for Acoustic Emission Monitoring, proceedings of ECNDT 2006, 1-13.
- [7] 国土交通省, 橋梁定期点検要領, 2019, p27

JIS A 1165 : 0000

## 受動弾性波計測手法を用いたコンクリート部材の損傷評価法 解 説

この解説は、規格に規定・記載した事柄を説明するもので、規格の一部ではない。

この解説は、日本規格協会が編集・発行するものであり、これに関する問合せ先は日本規格協会である。

### 1 制定の趣旨

社会インフラ構造物，なかでもコンクリート構造物は高度経済成長期に大量に建設され，その経年劣化が顕在化しつつある。一方で，我が国の構造的な課題として労働力人口の減少もあり，こうした構造物の効率的な維持管理が社会的要請となっている。損傷が顕在化してから修繕を行う事後保全型から，損傷が軽微なうちに補修を行う予防保全型への転換は，その対策として基本となる取組みである。予防保全型の維持管理を進めるためには，コンクリート部材の場合，表面ひび割れだけを根拠とした判断だけでなく試験による内部損傷把握が必要であるとの認識が広がっており，潜在的な内部損傷を早期に検知する技術が必要となる。一方で，事後保全においても顕在化した損傷が定量化できる技術は必要であり，これによって合理的な大規模補修計画に対する貢献が可能となる。また，損傷が進行して補修が必要な構造物についても内部の変状を加味して評価すべきである。このような背景のもと，この規格は，コンクリート部材の内部のひび割れなどの損傷を，部材表面に設置した AE センサを用いた計測によって評価することを目的として作成された。

### 2 制定の経緯

この規格は，**JIS A1164**（能動弾性波計測手法を用いたコンクリート部材の損傷評価法）と同時期に作成された。**JIS A1164** が，能動弾性波（ハンマ，散水による液滴などの人工的な現象，降雨による雨滴などの自然現象，などによる外部からの衝撃が，コンクリート部材表面に作用して発生する弾性波）を計測して，内部損傷を評価するのに対して，この規格は，部材が外力によって変形した結果生じるひび割れの発生，進展，境界部の相互作用などに伴い発生する弾性波（これを受動弾性波と呼ぶ）を利用する。受動弾性波として，橋梁床版が交通荷重を受けて発生した AE を利用したケース[1]が報告され，鉄筋コンクリート床版の内部損傷評価へ適用した場合の有効性が確認されている。

### 3 審議中に特に問題となった事項

#### 3.1 規格化の方針

JIS A 1164 能動弾性波計測手法を用いたコンクリート部材の損傷評価法と JIS A 1165 受動弾性波計測手法を用いたコンクリート部材の損傷評価法の元となった NDIS(NDIS 2434, NDIS2435)の策定に当たっては両者を単一の規格として作成することを当初は想定していたが、両者で損傷評価の流れが異なるため、別規格として作成する方針とした。また、通例、NDIS は計測方法の規格だが、将来の ISO 化も見据えて、評価指標の算出方法を含む「評価方法」の規格化を行っており、本 JIS 策定においても同様の方針とした。

#### 3.2 適用範囲

評価対象として、“床版、桁など”といった具体例を記載すると、使用者としてはイメージしやすいが、対象が限定されるような誤解を与えるおそれがある。また、限定を避けるための“など”という表現では対象が曖昧になるため、“コンクリート部材”のみの記載とした。

#### 3.3 “損傷”の定義

コンクリート部材の“損傷”はコンクリート標準示方書（土木学会）などに定義があるが、本規格における“損傷”はより広い一般的な意味で使われるものであることから、本文での用語としての定義は行わず、詳細を解説に記載することとした。また、本手法の対象となる損傷は、弾性波伝搬を阻害するものである旨を解説に明記した。

#### 3.4 センサ設置間隔

センサ設置間隔を具体的に記載すべきという議論があり、要求事項として記載することを検討した。しかし、様々な現場の条件があるため一意には決められないという結論に至り、経験的に RC 橋梁床版における減衰を加味した間隔として、1m 以下を推奨事項とした。

#### 3.5 AE 源位置標定における弾性波速度

評価に用いる弾性波速度は、対象構造物の健全な領域で計測した値を用いるのが本来であるが、実構造物で健全領域を特定するのは容易ではないため、本文では要求事項ではなく推奨事項とした。また、その他の手法については解説に記載した。別途、対象と同等の供試体を準備し計測した値を用いることも併記することを検討していたが、本規格内で供試体仕様を定義するのは困難なため、供試体に関する記載は見送った。

#### 3.6 健全性判断の基準値

健全性を判断する評価指標（弾性波速度、AE 源密度など）は定義するが、絶対値（基準値）は環境（対象の管理者、リスク、諸元など）にもより、また、経年による陳腐化の恐れなどもあるため、考え方を示すにとどめ、絶対値そのものは記載しないこととした。

また、本節のタイトルも含めて、損傷度、健全度、健全性といった用語の統一についての議論もあった。議論の結果、基準値に基づいて損傷を評価することを健全度判定と定義して本体で統一して用いることとした。なお、損傷度は損傷している度合であり、状態を表すもののなのに対して、健全性は損傷度などを元に管理側が判定するもので、状況により変わるものである。

### 3.7 AE 信号振幅の表記

AE センサの感度の記述に関連して、AE 信号振幅の対数値に関する記述を解説に記載した。この表記に関して、dBAE か dB<sub>AE</sub> について議論し、JIS Z2300 の記載とは異なるものの、ISO 規格ほかで採用されている後者を採用することとした。

## 4 構成要素について

この規格の内容、使用されている表現などについて、補足説明をする。

### 4.1 “損傷” の用法

“損傷” という用語の定義について、ここで使用する“損傷”は、コンクリート標準示方書などで定義される、土木・コンクリート分野での一般的な“損傷”の定義とは異なる。この規格で定義した“損傷”とは、コンクリート標準示方書の定義での、“損傷”と（短時間のうちに発生し、その後は時間経過で進行しないもの）、“劣化”と（時間経過に伴い進行するもの）、並びに“初期欠陥”と（施工時に生じ、有害となる可能性のあるもの）を合わせた“変状”に近いものであり、弾性波の伝搬を阻害するものである。

### 4.2 AE センサの絶対感度（本体の 4.3.2）

使用する AE センサは感度校正を行い、その周波数特性において最大感度の周波数が 20 kHz～100 kHz の範囲にあり、最大感度が 53 dB(約 0.45 kV/(m/s)) 以上のものを使用する。また、使用する各 AE センサは同一機種を使用し、その特性のばらつきは、最大感度差 6 dB 以内とする。この規格では、AE センサの絶対感度の単位として、1 V/(m/s)を基準とした電圧の対数値を用いた。振動センサは一般的に、参考文献 [2]-[4]などにあるように、共振周波数付近においては振動速度に比例する物理量を計測している。1 V/(m/s) は、1 m/s の振動速度を検知した際に AE センサから出力される電圧が 1 Vであることを示す。対数値は、dB を用いて表し、対数値(dB)=20 log<sub>10</sub>(A<sub>I</sub>/A<sub>0</sub>)で換算される。この対数値は、JIS Z 2300 で最大振幅値の値として用いられる dB<sub>AE</sub>とは異なることに注意が必要である。なお、dB<sub>AE</sub> は、JIS Z 2300 で次のように定義されている。

dB<sub>AE</sub> (でしべるえーいー) : 1 μV (マイクロボルト) を基準に取ったときの、AE 信号振幅の対数値。信号の最大振幅値 [(dB<sub>AE</sub>)=20 log<sub>10</sub>(A<sub>I</sub>/A<sub>0</sub>)] で表され、センサ出力端電圧比に対応する。ここに、A<sub>0</sub>: 1 μV , A<sub>I</sub>: センサ出力端 (増幅される前) において測定された AE 信号電圧の最大値(μV)

また、計測したい弾性波の周波数帯域が数 10 kHz 以下などと低い場合は、AE センサの代わりに加速度センサを用いることもできる。加速度センサ感度については、計測において想定される加速度より、以下によって求まる加速度感度の範囲内の感度特性を持つセンサを使用する。

$$S_{\max} = \frac{V_{\max}}{A_{\max}} \dots \dots \dots (1)$$

$$S_{\min} = 10 \times \frac{V_{\text{noise}}}{A_{\min}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、S<sub>max</sub>: センサ加速度感度上限 (V/(m/s<sup>2</sup>)), S<sub>min</sub>: センサ加速度感度下限 (V/(m/s<sup>2</sup>)), V<sub>max</sub>: センサの最大出力電圧 (V), V<sub>noise</sub>: センサの出力換算ノイズ (V), A<sub>max</sub>: 計測で想定される最大加速度 (m/s<sup>2</sup>), A<sub>min</sub>: 計測で想定される最小加速度 (m/s<sup>2</sup>)

とする。例えば、V<sub>max</sub>=5 V, A<sub>max</sub>=1000 m/s<sup>2</sup>, V<sub>noise</sub>=100 μV, A<sub>min</sub>=1 m/s<sup>2</sup> を想定した場合、感度上限は 5

402 mV/(m/s<sup>2</sup>), 感度下限は 1 mV/(m/s<sup>2</sup>)となるため, 1 mV/(m/s<sup>2</sup>) から 5 mV/(m/s<sup>2</sup>)の範囲の感度を持つ加速度  
403 センサを使用する。

404

#### 405 4.3 鋼球打撃の上限周波数 (本体の 5.2)

406 擬似 AE 源として鋼球打撃を用いる場合, 使用する鋼球の直径が大きいほど励起される上限周波数は低  
407 くなる。鋼球により励起される上限周波数は, Sansalone らにより式(3)のような関係式が示されている[5]。

$$408 \quad f_{\max} = \frac{291}{D} \dots \dots \dots (3)$$

409 ここで,  $f_{\max}$  (kHz)は上限周波数,  $D$  (mm)は鋼球の直径を示す。使用するセンサが感度を持つ周波数帯域に  
410 留意して鋼球を選定する。

#### 411 4.4 AE センサ取付け状況の確認 (本体の 5.2)

412 試験対象に設置した AE センサの動作確認として, 試験対象に対する音響結合状態及び接続の確認を行  
413 う手順を定めている。動作確認においては, 擬似 AE をセンサ“近傍”で発生させる。ここで“近傍”と  
414 は, 擬似 AE 源からセンサまでの間にひび割れなどの損傷部を挟まない近い位置で, という意味を含む。  
415 損傷部を経由すると擬似 AE 源で発生した弾性波が減衰するため, 損傷の影響がない状態で検出信号の最  
416 大振幅値の確認を行い, 最大振幅値の差を 6 dB 以内とする。最大振幅値の差の値については, 参考文献[6]-  
417 [9]を根拠とした。損傷などの影響を避けられず, 最大振幅値の低下が見られる場合は, センサ配置の変更  
418 も検討する。

#### 419 4.5 AE 源位置標定における弾性波伝搬速度の設定 (本体の 6.2)

420 AE 源分布を求めるに当たっては, 弾性波の伝搬速度と各センサへの到達時間差とを用いて AE 源の位置  
421 標定を行う。AE 源位置標定では, 計算に用いる弾性波の伝搬速度を設定する必要がある。弾性波の伝搬速  
422 度は, 対象部材における弾性波伝搬速度を使用する。具体的には, 対象部材に弾性波を発生させ, 対象部  
423 材の健全な領域を通過した弾性波を計測することによって得られた弾性波伝搬速度を使用することが望ま  
424 しい。また, 簡易的に, 参考文献[10], [11]などを参照して弾性波伝搬速度を設定してもよい。例えば, コ  
425 ンクリート内での一般的な P 波伝搬速度として 4 000 m/s 程度の値を用いる。又は, S/N が悪く P 波の立ち  
426 上がりが検出不可な場合などに, S 波の伝搬速度を用いる。S 波速度は P 波速度の 6 割程度になり, P 波  
427 伝搬速度を 4 000 m/s と想定した場合, 2 400 m/s 程度となる。

428

#### 429 4.6 AE 源位置標定の次元 (本体の 6.2)

430 AE 源位置標定においては, 二次元での平面的な標定以外にも, 対象の構造, センサ配置に応じて, 一次  
431 元, 三次元での標定を使用することも可能である。一次元標定は細長い構造において AE 源位置を標定で  
432 きるが, 床版のような平面的な広がりをもつ構造物に対しては, 正確な標定が困難である。また, 三次元  
433 標定において正確な標定を行うためには, 対象を取り囲む形で三次元的にセンサを配置することが望まし  
434 い。

#### 435 4.7 AE 源位置標定の信頼性 (本体の 6.2)

AE 源位置標定には、初めに同一イベントを構成する複数センサのヒットを特定する。通常、一定の時間幅（例えば同一イベントに含めるセンサ間隔が最大 1200 mm で弾性波速度 2400 m/s の場合、0.5 ms 程度に設定する等）のウィンドウを設定し、そのウィンドウ内で検知された複数センサのヒットを同一イベントの構成要素として抽出する。抽出されたヒットから位置標定を行い、弾性波源を標定する。ここで信頼性を担保するためには、各センサと弾性波源との距離を考慮し、各ヒットの信号振幅が妥当であるかを確認することが望ましい。

また、AE 源位置標定により算出された AE 源位置に関して結果の信頼性を評価する手法の一例として、LUCY (Location UnCertaintY) がある。LUCY は位置標定結果の信頼性を示す指標値で、参考文献[12]に示されているように、式(4)で定義される。 $D_i$ は式(5)に示すように、“ $i$  番目のヒットセンサで計測された第 1 ヒットセンサに対する時刻差  $dt_i$ ” と“設定した弾性伝搬速度  $v$ ” とを掛け合わせて得られる距離、 $P_i$ は式(6)に示すように、標定された点から“ $i$  番目のヒットセンサまでの距離  $R_i$ ” と“第 1 ヒットセンサまでの距離  $R_1$ ” の差を示し、両者が乖離していると LUCY の値は大きくなり、位置標定結果の信頼性が低いことを意味する。

$$LUCY = \sqrt{\sum_{i=2}^n \frac{(D_i - P_i)^2}{(n-1)}} \dots\dots\dots (4)$$

$$D_i = dt_i \times v \dots\dots\dots (5)$$

$$P_i = R_i - R_1 \dots\dots\dots (6)$$

LUCY の値の大きい弾性波源をフィルタリングして取り除くことにより、弾性波源分布の信頼性を向上させることができる。

#### 4.8 マップの 2 値化 (本体の 6.6)

損傷の評価に当たって、6.4 で得られた AE 源密度マップ、及び 6.5 で得られた弾性波伝搬速度マップに対して基準値を設定し、基準値に対する大小によってマップを 2 値化する。AE 源密度マップは、高密度領域と低密度領域に、弾性波伝搬速度マップは、高速度領域と低速度領域に分割される。

AE 源密度及び弾性波伝搬速度の基準値は、対象部材において計測を実施し、観測された AE 源密度、及び弾性波伝搬速度を元に構造物管理者などと十分協議の上、設定するのが望ましい。対象部材、それと同等の試験体を用いた試験が可能な場合は、既知の損傷又は模擬損傷を精度良く特定できる基準値とする方法、実構造物において実施したコア採取などを参照して損傷領域を特定可能な基準値を採用するなどの方法がある。

表 1 に示す弾性波伝搬速度とコンクリートの品質の関係を参考に、健全性の判定基準を定めてもよい。

表 1－弾性波伝搬速度による健全性判定例

| 弾性波伝搬速度               | 健全性 |
|-----------------------|-----|
| 4.6 km/s ~            | 優   |
| 3.70 km/s ~ 4.60 km/s | 良   |
| 3.10 km/s ~ 3.70 km/s | やや良 |
| 2.10 km/s ~ 3.10 km/s | 不良  |
| ~ 2.10 km/s           | 不可  |

## 参考文献

- [1] K. Watabe, H. Takamine, T. Nishida and T. Shiotani, Novel Non-destructive Technique of Internal Deterioration in Concrete Deck with Elastic Wave Approaches, 2017, Proc. 12th WCEAM, 665-676
- [2] 湯山, 西本, 安藤, アコースティック・エミッションによる IoT/AI の基礎と実用例, 2018, 朝日出版社
- [3] F. S. Tse, I. E. Morse and R. T. Hinkle, MECHANICAL VIBRATIONS (1st edition), 1963, Allyn & Bacon
- [4] 古川, 振動および衝撃測定, 1966, 誠文堂光社
- [5] M. Sansalone and W. Streett, Impact-Echo, 1997, Bullbrier Press
- [6] コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法, NDIS 2421:2000
- [7] Non-destructive testing - Acoustic emission testing - Measurement method for acoustic emission signals in concrete, ISO 16836:2019
- [8] Non-destructive testing - Acoustic emission testing - Test method for damage qualification of reinforced concrete beams, ISO 16837:2019
- [9] Non-destructive testing - Acoustic emission testing - Test method for classification of active cracks in concrete structures, ISO 16838:2019
- [10] 岡田, 六車, 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 1981, 朝倉書店, 520-530.
- [11] E. Whitehurst, Soniscope tests concrete structures, J Am Concr Inst 47, 1951, 433-444.
- [12] M. Hamstad, Acoustic emission source location in a thick steel plate by lamb modes, J. AE, 2007, **25**, 194-214.

## 5 原案作成委員会の構成表

原案作成委員会の構成表を, 次に示す。

### 受動弾性波計測手法を用いたコンクリート部材の損傷評価法 JIS 原案作成委員会 構成表

|       | 氏名    | 所属              |
|-------|-------|-----------------|
| (委員長) | 塩谷智基  | 京都大学            |
| (幹事)  | 渡部一雄  | 株式会社東芝          |
| (委員)  | 大岡紀一  | 一般社団法人日本非破壊検査協会 |
|       | 大野健太郎 | 東京都立大学          |
|       | 川崎佑磨  | 立命館大学           |
|       | 北田靖典  | 国土交通省道路局国道・技術課  |
|       | 古賀裕久  | 国立研究開発法人土木研究所   |
|       | 下津礼志  | 一般財団法人日本規格協会    |

|       |                   |                           |
|-------|-------------------|---------------------------|
|       | 水谷義弘              | 東京科学大学                    |
|       | 森谷祐一              | 東北大学                      |
|       | 結城宏信              | 電気通信大学                    |
|       | 渡辺健               | 徳島大学                      |
|       | 福本伸太郎             | 株式会社 IHI 検査計測             |
|       | 山本伊織              | 株式会社富士セラミックス              |
|       | 上田憲寿              | 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社     |
|       | 奥出信博              | 一般財団法人東海技術センター            |
|       | 小椋紀彦              | 株式会社 CORE 技術研究所           |
|       | 國居史武              | 独立行政法人水資源機構               |
|       | 戸本悟史              | 株式会社建設技術研究所               |
|       | 佐光正和              | 株式会社構研エンジニアリング            |
| (関係者) | 畑明仁               | 大成建設株式会社                  |
|       | 薄井和善              | 経済産業省イノベーション・環境局国際標準課     |
|       | 種子田翔一             | 国土交通省住宅局住宅生産課             |
|       | 上野敦               | 公益社団法人土木学会（東京都立大学）        |
| (事務局) | 瀬古繁喜              | 公益社団法人日本コンクリート工学会（愛知工業大学） |
|       | 伊藤佳亮              | 一般社団法人日本非破壊検査協会           |
|       | 三上靖浩              | 一般社団法人日本非破壊検査協会           |
|       | 山口光輝              | 一般社団法人日本非破壊検査協会           |
|       | (執筆者 塩谷 智基、渡部 一雄) |                           |