

論文 音の類似性評価を用いたコンクリートの損傷判定手法の基礎的研究

林 詳悟*1・橋本 和明*2・明石 行雄*3

要旨: コンクリートの内部の損傷の有無を判定する手法として、打音点検は一般的な手法である。しかしながら、打音点検での損傷評価は点検員の主観が入り判定に個人差が出る。筆者らは点検ハンマーでの打撃音を、形状距離という音の類似性尺度により評価することにより、健全な箇所と打撃箇所の音の類似性から、損傷の有無を定量評価する手法を考案した。本論文は、損傷供試体を用いた、音の形状距離による損傷判定の有効性を整理した。

キーワード: 打音点検, 類似性尺度, 維持管理, 赤外線

1. はじめに

近年、笹子トンネルの崩落事故に端を発し、構造物の維持管理の重要性が社会問題となっている。コンクリート構造物の維持管理では、打音点検が行われているが、その判定基準は、健全な箇所を清音、損傷箇所を濁音とするのみで、明確な判断基準が存在しない。このため、打音点検では、点検員の主観的判断となるため、判定に個人差が発生する。しかし、昨今の点検技術者の高齢化や、人材不足などにより、経験の浅い技術者が点検を行う必要に迫られており、点検精度の高い効率的な維持管理手法の確立は、喫緊の課題となっている。

筆者らは、コンクリート構造物の打音点検における損傷判定の新たな評価手法として、音の形状距離という類似性尺度を提案している¹⁾。この形状距離は複数の音の類似性を定量的に数値化できるため、これまで点検員の主観的な判断であった打音点検でのコンクリートの損傷の有無を、客観的に判断できると考えた。

本論文では、形状距離による音の類似性尺度を紹介するとともに、実際のコンクリートはく離を模した供試体を用いて、音の解析による損傷判定の定量化に適した、打撃強度や、適用限界についての検討結果と、今後の技術的課題について報告する。

2. 打音点検の問題点

構造物点検で一般的に実施されている打音点検は、打撃音を聞き分けることで損傷の有無を確認するが、点検員の主観的判断による損傷判定の個人差が問題となっている。本研究は、熟練点検員以上の精度で、かつ経験の有無に関わらず定量的な判定が可能な、打音点検判定支援システムの開発を目的として基礎的検討を行うものである。

3. 打音点検に適した損傷判定基準

既往の研究²⁾では打撃音の周波数解析などにより特徴抽出を試みているが、損傷の大きさ、深さ、部位より卓越周波数が異なるため、定量的な判断基準が得られていない。打音点検のように様々な条件下で定量的な判定を行うには、外乱や環境の影響に対応可能な判定基準の設定が重要となる。

通常、点検員は、音階のような絶対的な音の高低聞き分けるのではなく、健全部と異常部の打撃音の微妙な変化を聞き分けている。本研究では技術者の損傷判定をモデル化した、健全部と異常部の音の違いによる、定量的な損傷判定手法について検討を行った。

3.1 形状距離の特性

筆者らは音の違いを、スペクトルパターンの形状の違いを統計手法によって評価する形状距離という新たな類似性尺度を提案している¹⁾。類似性尺度の数値化は、図-1のように、二つの打撃音からスペクトルパターンを抽出して比較することで算出する。

(1) スペクトルパターン抽出

一般的に、スペクトルパターンの算出方法として、

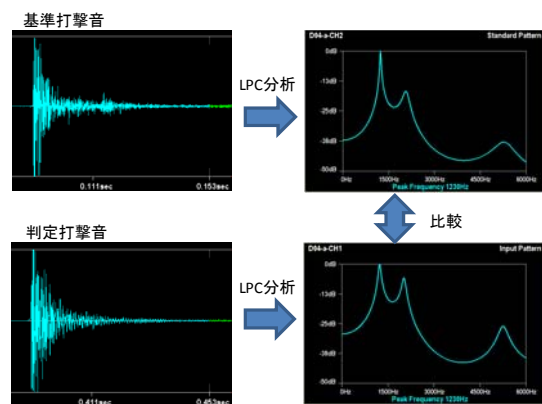


図-1 類似性比較の概要

*1 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 土木事業本部技術部技術課上席主査 (正会員)

*2 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 土木事業本部技術部副部長 (正会員)

*3 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 土木事業本部技術部長 (正会員)

FFT(Fast Fourier Transform)が用いられるが、信号が減衰する打撃音の場合、FFTでは十分な精度が得られない。よって、本研究では、計算量が多く処理が複雑であるが打撃音の解析に適したLPC(Linear Predictive Coefficient)を採用した。

(2) スペクトルパターンの比較

類似性尺度のアルゴリズムでは、式(1)のように、二つの音が全く同一となる場合、正規分布となるように基準パターンを設定する。すなわち標準パターン s_i と、入力パターン x_i の差に、正規分布を付加する。(図-2(a))

$$r_i \leftarrow r_i + (x_i - s_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (1)$$

次に、式(1)により形状変化させた基準パターンにおいて、音の形状変化を付加して、式(2)を用いて尖度の変化量として数値化する。

$$A = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^m r_i \right\} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^m (L_i)^4 \cdot r_i \right\}}{\left\{ \sum_{i=1}^m (L_i)^2 \cdot r_i \right\}^2} - 3 \quad (2)$$

次に、正規分布の中心軸が移動した場合を考え、成分位置 j ごとに尖度の変化量 A_j を計算し、(3)式を用いて形状距離 d を算出する。

$$d = \sqrt{\sum_{j=1}^m (A_j)^2} \quad (3)$$

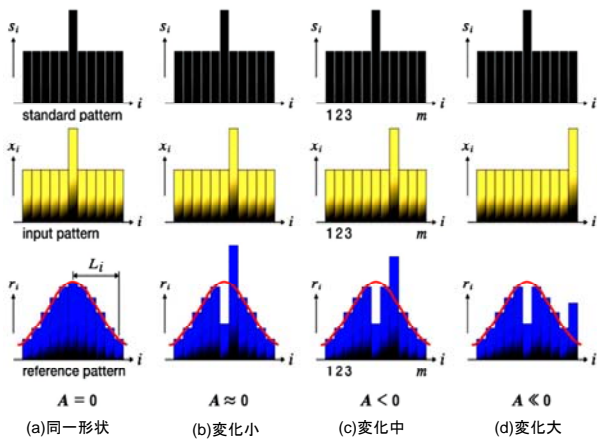


図-2 基準形状と形状変化例

形状距離は、信号のバラツキの影響を受けづらく、周波数と信号強度の違いを、音の類似性として数値化できる(図-2(b~d))¹⁾。

4. 検討概要

打音点検での音の解析では、作業箇所周辺の騒音の影響など、様々な影響が考えられるが、本研究では、以下の項目について検討を行った。

- (1) 打音時の打撃強度の変化の影響
- (2) 損傷形態が判定に及ぼす影響
- (3) 判定可能な損傷深さの限界
- (4) はく離損傷の内部形状と形状距離の関係

4.1 実験機材

打音点検に容易に導入可能な技術とするため、全ての検討は、以下の汎用機器を用いて検討を行った(表-1)。打撃音のサンプリングは、コンクリート表面からの離れを500mmとし、打音点検で通常使用する重量230gの標準ハンマーで打撃した(図-3)。

4.2 実験手順と評価方法

まず、基準となる打撃音(標準音)を、同一供試体の健全部分から20点サンプリングする。次に、形状距離の計測対象となる各打撃点を10回ずつ連続打撃して、評価箇所のサンプリングを行った(図-4)。解析では、各10点データと標準音の形状距離を求め、分布を評価した。

表-1 基準形状と形状変化例

| 項目 | 仕様・方式 |
|-----------|-------------------------------------|
| 録音機器 | 市販ボイスレコーダー |
| 録音形式 | リニアPCM方式 |
| サンプリング周波数 | 48kHz |
| 量子化 | 16ビット、65536階調 (ゲイン幅-32768~32768) |

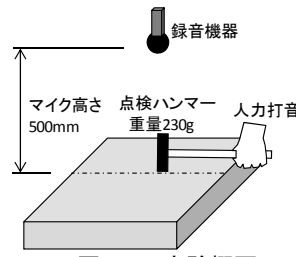


図-3 実験概要

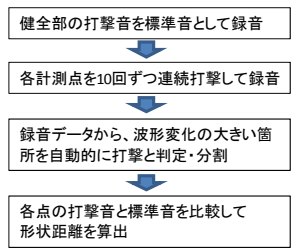


図-4 実験手順

5. 打音時の打撃強度の変化の影響

5.1 録音機器の性能と打撃強度の関係

図-3の録音機器の隣に騒音計を設置して、騒音計の騒音レベルと、打撃音をサンプリングした録音機器の16bitデジタル信号(2¹⁶=65536階調、信号範囲-32768~32768)の波形変化量との関係を整理した。(図-5)

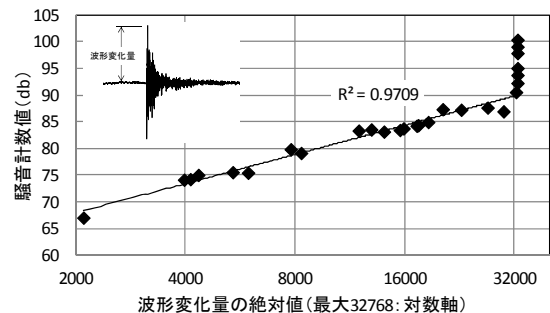


図-5 騒音計の値と波形変化量の関係

騒音計の値が、90db 程度以下の場合には、騒音レベルと波形変化量には、寄与率 0.9709 と高い相関がみられるが、92db を超えると、録音機器の録音レベルの最大値を超えるため、波形変化量が頭打ちになっている。機器の特性を考慮すると 92db を超えない範囲で打撃するのが適切と考える。

5.2 打撃強度が損傷判定に及ぼす影響

同一供試体を、打撃強度、大、中、小の 3 パターンで打撃し、損傷部分の形状距離を算出して、その影響を検

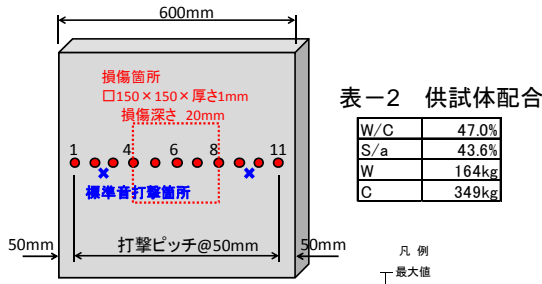


図-6 打撃強度検証供試体

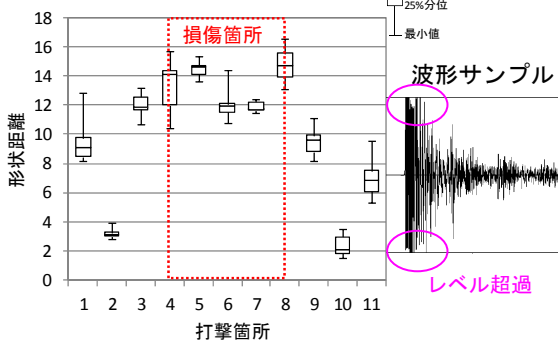


図-7 100db 程度打撃による形状距離

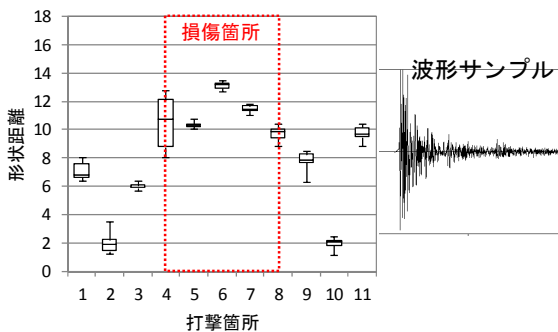


図-8 90db 程度打撃による形状距離

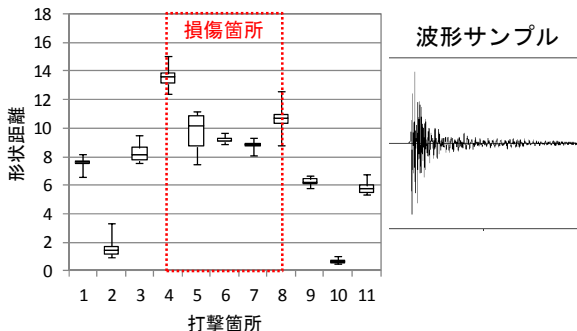


図-9 85db 程度打撃による形状距離

証した。実験には、コンクリート表面から深さ 20mm の箇所に大きさ 150×150mm、厚さ 1mm の発泡スチロールを埋め込むことで擬似損傷を作成した供試体を用いた（図-6、表-2）。標準音は、供試体の両側の健全部から各 10 点ずつ取得し、打撃判定箇所は損傷箇所を横断するように、図-6 の赤丸部分に設定し、1 番から順番に打撃を行った。

図-7、8、9 の箱ひげ図は、各打撃箇所の 10 点の形状距離の分布を表している。形状距離は、数値が大きいくほど音の類似性が低くなることから、健全部を基準とした場合、損傷箇所の形状距離は大きくなる。

図-7 のように、録音機器の録音レベルの最大値を超える打撃を行った場合は、全体的に形状距離が大きくなり、かつ形状距離のバラツキも傾向が見られ、図-9 のように弱い打撃を行った場合、形状距離が全体的に小さくなり損傷部の形状距離が卓越しない傾向が見られた。

騒音計音圧レベル 90db 程度の打撃を行った場合（図-8）、損傷箇所中心の形状距離が最も大きくなり、かつ健全部の形状距離のバラツキも少ない結果となった。ただし、全供試体の端部の打撃（打撃箇所 1 番、11 番）では、健全であるにもかかわらず、形状距離が大きくなる傾向が見られた。

このことから、録音機器の録音レベルを超える打撃強度は、サンプリングデータの質を低下させ、逆に打撃強度が小さすぎると十分な打撃エネルギーが得られないと考えられる。適切な強度で打撃した場合は、損傷部の形状距離が卓越し、かつバラツキも少なくなり、損傷箇所の判定が可能と考える。よって以後の検討は、全て 90db 程度の打撃にて行う。ただし、供試体端部や損傷箇所近傍は不連続性の影響により、損傷部と同様に形状距離が大きくなる傾向がみられる。

6. 損傷形態が判定に及ぼす影響

鉄筋コンクリートのはく離は、内部の鉄筋の腐蝕、膨張が原因で発生する。鉄筋膨張により初期に浮きが発生し、鉄筋膨張の進行に伴い、はく離ひび割れが発生、最終的には、片持ち梁状態になるなど、劣化の進行に伴って損傷形態が異なる。損傷の進行に左右されず損傷の有無を定量的に判断できることが重要である。

6.1. 実験概要

図-10、表-3 のように、コンクリート表面から深さ 20mm の箇所に大きさ 150×150mm、厚さ 1mm の発泡スチロールを埋め込むことで擬似損傷を作成した供試体を作製し、コンクリート表面からカッターで徐々に切断することで、損傷の進行を模した供試体とし、各切断段階で打撃音をサンプリングし、形状距離を求め、その傾向を検証した。標準音は、供試体両側の健全部から 40 点を

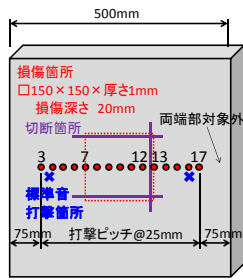


図-10 損傷形態模擬供試体

サンプリングし、不連続性の影響を受ける供試体端部の損傷判定については、対象外とした。

6.2. 検討結果

損傷状態に関わらず健全部と損傷部の形状距離には差が発生することが確認できた。特に、図-11,12,13にかけて、切断部分側の形状距離（打撃番号12番）が次第に

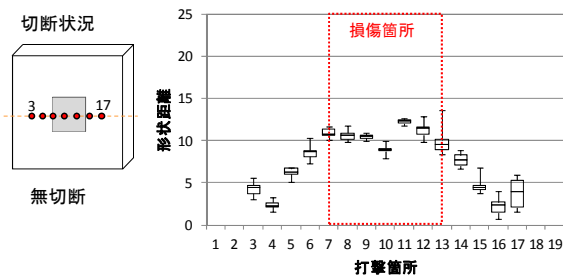


図-11 浮き状態（はく離ひび割れなし）

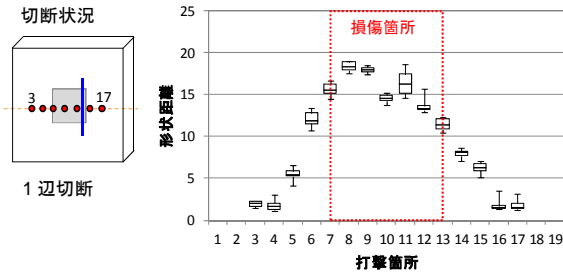


図-12 部分はく離状態

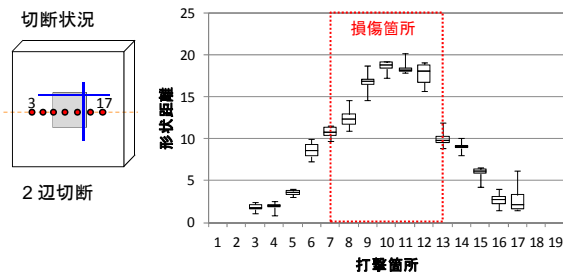


図-13 はく離進展状態

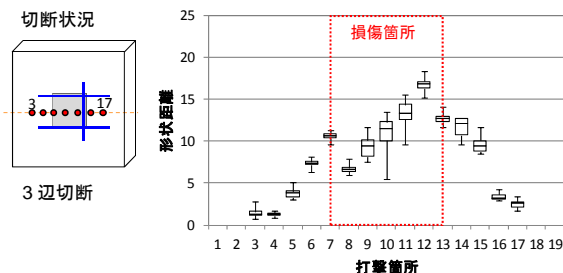


図-14 はく落直前状態

表-3 供試体配合

| | |
|-----|-------|
| W/C | 47.0% |
| S/a | 43.6% |
| W | 164kg |
| C | 349kg |

大きくなる傾向が見られ、損傷端部の音の変化が次第に大きくなるのが分かる。また、損傷が進展すると全体的に形状距離が大きくなる傾向も見られることが分かった。しかし、はく離直前状態では、損傷箇所の形状距離が若干低下する傾向が見られた（図-14）。この現象については更なる検討が必要と考える。

7. 判定可能な損傷深さの限界

打音点検では、損傷のかぶりが深くなると、損傷の判定が困難となる。損傷が小さく、かぶり60mmを超えるような深いかぶりの損傷は、音の違いを人間の感覚判断するのは困難である。

7.1. 実験概要

大きさ150×150mm、厚さ1mmの発泡スチロールによる擬似損傷のかぶり深さが20mmと60mmの2種類の供試体（図-15、表-4）を用いて形状距離の傾向を検証した。標準音は、供試体両側の健全部から40点をサンプリングし、不連続性の影響を受ける供試体端部の損傷判定については、対象外とした。

7.2. 検討結果

図-16と図-17を比較すると、損傷かぶりが深くなると、損傷部の形状距離が小さくなり、音の変化が小さ

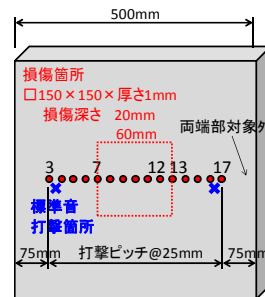


図-15 損傷深さ検証供試体

表-4 供試体配合

| | |
|-----|-------|
| W/C | 47.0% |
| S/a | 43.6% |
| W | 164kg |
| C | 349kg |

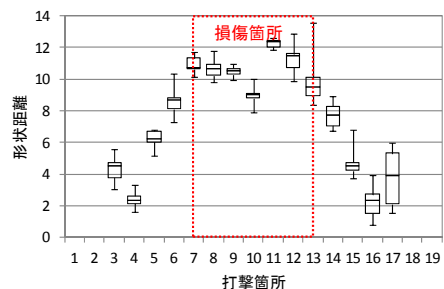


図-16 損傷かぶり20mmの形状距離

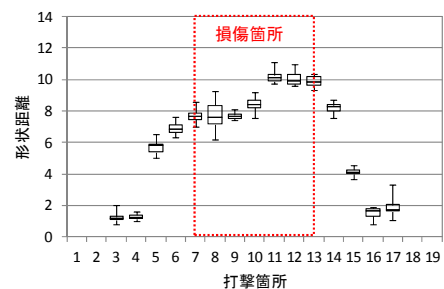


図-17 損傷かぶり60mmの形状距離

くなる傾向となった。また、供試体端部の形状距離は、前述の検討と同じく大きくなる傾向となった。かぶり60mmの場合、人間の感覚では損傷判断が困難であったが、損傷部の形状距離は、健全部と比較して明らかに大きくなっている(図-17)。このことから、形状距離を用いると、人力打音では判定困難な大きさ□150×150×1mm、かぶり60mmの損傷も検出することが可能と考える。

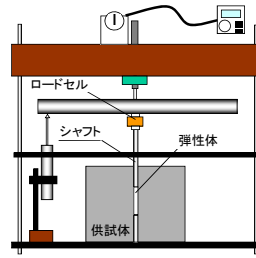


図-18 载荷装置³⁾

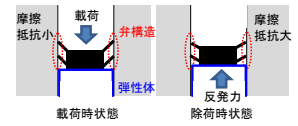


図-19 荷重維持構造³⁾

8. はく離損傷の内部形状と形状距離の関係

8.1. 実験概要

(1) 形状距離の測定

実構造物での適応性について検証するため、実構造物のはく離状態と酷似した供試体を、中村らが開発した特殊な供試体载荷装置³⁾(図-18)により作製し、形状距離の傾向を検証した。なお、標準音は、供試体両側の健全部から40点をサンプリングした。

(2) 損傷の内部形状の把握

室温を制御できる環境試験装置内に供試体を設置し、日較差7℃の環境にて、赤外線サーモグラフィ(最小温度分解能0.025℃)にて撮影を行った。

内部損傷範囲の推定には、熱画像と、林らが研究した画像フィルタ処理⁴⁾を用いた。この画像処理による強調指標は、コンクリートの温度ムラを除去し、損傷部を強調できる。本研究では、この強調指標に閾値を設けて、損傷程度を低いほうから青、黄、赤の3段階に分類した判定画像にて内部の損傷程度を評価した。

この強調指標に閾値を設けて、損傷程度を低いほうから青、黄、赤の3段階に分類した判定画像にて内部の損傷程度を評価した。

8.2. はく離損傷供試体の作製

(1) 作製方法

まず、あらかじめ鉄筋に見立てた穴のあいた供試体を作製する。その穴に、シリコンゴム製の弾性体(縦弾性係数1.39N/mm², ポアソン比0.49)と、その両端に荷重維持する弁(図-19)を挿入する。その後、シャフトを介して弾性体に载荷することより、鉄筋膨張と同様に、コンクリート内部の弾性体を膨張

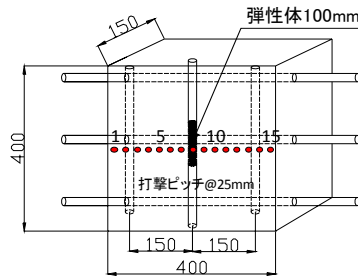


図-20 供試体概要

表-4 種別と配合

| 項目 | 条件・配合 |
|------|-------------|
| 損傷程度 | 低・中・高 3種 |
| かぶり | 20mm |
| 鉄筋径 | D19mm |
| W/C | 60.0% |
| S/a | 50.9% |
| W | 183kg |
| C | 305kg |

させ、コンクリート内部にはく離ひび割れを発生させる。

(2) 供試体形状

はく離供試体内部の弾性体は、図-20のように、供試体中央部に配置し、長さは100mmとした。供試体は、損傷の進展を想定して、はく離程度が異なる3種類の供試体を作製した(表-4)。

表-5 損傷程度と形状距離の関係

| 損傷程度 | 低 | 中 | 高 |
|------|---|---|---|
| 可視画像 | | | |
| 熱画像 | | | |
| 判定画像 | | | |
| 形状距離 | | | |

8.3. 検討結果

(1) はく離損傷の評価

表-5 に、各損傷程度と形状距離の関係を比較する。損傷程度低の供試体は、鉄筋直上に軸方向にごく微細なひび割れが発生しており、損傷の程度が大きくなると、はく離ひび割れが進展している。熱画像では損傷程度が大きくなると、はく離内部の箇所が次第にはっきりと確認できるが、損傷程度低では、温度変化が小さいことから明確に損傷範囲を確認できない。対して判定画像では、温度変化を強調し定量評価することから、損傷程度低から高まで、損傷の存在と劣化の進行を判定色にて明確に検出できている。

(2) 形状距離による評価

供試体端部の形状距離（損傷程度低、打撃箇所1番）は、前述の検討と同じく、供試体端部の不連続性の影響により大きくなる傾向となった。また、はく離端部（損傷程度中、打撃箇所13番）の形状距離は、損傷形態と形状距離の検討と同じく（図-13,14）健全部との差が大きく、はく離端部の音の変化が顕著であるのが分かる。さらに、形状距離は、はく離の進展に伴い徐々に大きく傾向がみられることから、形状距離の大きさに損傷の程度を推定することも可能と思われる。

(3) はく離損傷範囲と形状距離の比較

熱画像と判定画像により判定した推定損傷エリア（表-5 赤点線）と形状距離を比較すると、形状距離が5よりも大きい範囲は、損傷部分とほぼ一致しており、損傷範囲を定量的に評価できると考える。

(4) 損傷検出精度

表-5 の形状距離5以上の値を損傷と判定した場合、全ての損傷を検出できており、全体で89.3%、供試体端部の影響を除くと95.4%と高い検出精度となった。（表-6）

表-6 損傷検出結果

| | | 形状距離判定 | | 合計 | 摘要 |
|----|-------|---------|---------|-----|-----------|
| | | 健全(d<5) | 損傷(d≥5) | | |
| 健全 | 通常部 | 98 | 12 | 110 | 打撃箇所2~14番 |
| | 供試体端部 | 42 | 18 | 60 | 打撃箇所1,15番 |
| 合計 | | 140 | 30 | 170 | |
| 損傷 | | | 250 | 250 | |

判定精度 全体 89.3% =250箇所/280箇所
供試体端部を除く 95.4% =250箇所/262箇所

9. まとめ

- (1) 打撃音のサンプリングでは、録音機器の最大録音レベルを超えると、データ質が低下するため、打撃音の強弱に合わせて、録音レベルの設定や打撃点から機器までの距離を調整する必要がある。
- (2) 打撃力が小さく、検出かぶり深さに対して打撃エネルギーが十分ではない場合、損傷部の音の変化が小さくなり損傷部を検出できない恐れがある。

- (3) 定量的な損傷判定を行うには、打撃音が大きすぎるもしくは小さすぎる場合、点検員に注意を促し、打撃力を最適化する工夫が必要である。
- (4) 供試体の充実部の健全部の打撃音を標準音として用いると、不連続性の影響により、供試体端部や損傷部近傍の音の形状距離が大きくなる。不連続性を考慮した判定基準の検討が課題である。
- (5) 形状距離では、微細な音の変化も定量評価できるため、人力打音だけでは検出が困難な、深いかぶりの小さな損傷も検出できる。
- (6) 形状距離は損傷の形態に関わらず音の変化を定量評価できる。特にはく離端部は健全部の音の違いが顕著な形状距離の差となって現れる。
- (7) 損傷の進行の伴い形状距離が大きくなる傾向がみられ、損傷の進行過程と傾向が一致する。将来的には形状距離の大きさに損傷程度を評価できる可能性がある。
- (8) 形状距離は、健全部との音の違いを定量的に評価できるため、形状距離に閾値を設けて、閾値以上を損傷箇所と判断した場合、客観的な判定が可能である。
- (9) 形状距離に設定する閾値は、コンクリートの特性により異なる可能性があるため、検討が必要である。

謝辞

本研究に当たり、京都大学、名古屋女子大学の方々に、多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表したい。

参考文献

- 1) 神内教博, 橋本和明, 林詳悟, 福見稔: 打音によるコンクリートの損傷深さの推定, 第68回土木学会年次学術講演会, VI-101, 2013.9
- 2) 中山慎也, 玉井宏樹, 坂田力: コンクリートの欠陥状態が判別可能な打音特徴量関数の提案に向けた基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1811-1816, 2011.7
- 3) 中村繁貴, 高谷哲, 坂口和也, 山本貴士, 宮川豊章: 測定温度環境が赤外線サーモグラフィによるはく落予測モデルに与える影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, pp.357-362, 2012.11
- 4) 林詳悟, 橋本和明, 明石行雄: 赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート損傷の検出精度向上, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp. 1813 - 1818, 2013.7