

# 論文 打音法による模擬ひび割れおよび腐食ひび割れを有するコンクリートの打撃応答特性値の評価

水野 敦大<sup>\*1</sup>・三浦 泰人<sup>\*2</sup>・鈴木 理絵<sup>\*3</sup>・中村 光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、衝撃弾性波法により、コンクリートの内部に導入した模擬ひび割れおよび腐食ひび割れを、加速度波形、周波数スペクトル、波形エネルギー積算値などの指標によって評価した。具体的には、複数の測定点を設けて、異なる径の鋼球を用いて打撃試験を行った。その結果、模擬ひび割れと腐食ひび割れにおいて、同様の加速度応答の傾向が確認されたが、鋼球径が小さいと損傷部の変化が明確でなくなった。また、加速度応答の指標を変えることで、損傷の存在する領域と損傷の程度をそれぞれ評価できる可能性を示した。

**キーワード:** 非破壊検査, 衝撃弾性波法, 内部ひび割れ, 周波数分布

## 1. はじめに

近年、我が国のコンクリート構造物は劣化期を迎えており、その劣化原因の多くはコンクリート内部の鉄筋腐食によるものである。RC 床版など、複数の鉄筋を有するコンクリート構造物の鉄筋に腐食が生じた場合、コンクリート内部の鉄筋間に水平ひび割れが発生することがある。この水平ひび割れは、目視による評価が困難であり、コンクリート構造物の性能低下やかぶりの剥落などを引き起こす可能性があることから、コンクリート内部の健全性を評価するための非破壊検査手法が求められている。

代表的なコンクリートの非破壊検査手法として、打音検査が挙げられる。打音検査はインパルスハンマーなどの反発力<sup>1)</sup>や、打音により発生する音を機械的に評価する<sup>2)</sup>場合もあるが、多くは点検技術者の経験に依るところが多い。打音は、表面部の加速度応答から生じるものであり、打音検査を論理的に行うためには、様々な条件下の加速度応答を理解することが重要である。鎌田ら<sup>3)</sup>は鋼球落下による弾性衝撃波法により、欠陥が存在するコンクリートと健全なコンクリートの間で加速度波形や周波数スペクトルの形状に違いが生じることを明らかにした。しかしながら、これらの研究はひび割れを模擬した人工欠陥を対象としており、実際に鉄筋腐食によって生じる水平ひび割れを対象とした実験は少なく、人工欠陥により与えられた知見の適用についての検討は不十分である。本研究では、模擬ひび割れを導入した供試体と電食試験によりひび割れを導入した供試体を用いて、鋼球径の異なる打撃試験を行い模擬ひび割れと腐食ひび割れの打撃応答について評価を行った。

## 2. 模擬ひび割れを有する供試体の弾性波特性

### 2.1 実験概要

供試体概要を図-1 に示す。供試体寸法は長さ 600mm×幅 600mm×高さ 200mm で、供試体中央にひび割れを模擬した長さ 100mm、幅 100mm、厚さ 10mm の発泡スチロールを埋設した。

弾性波の入力は、鋼球を高さ 10cm の高さから自由落下させることによって行い、周波数範囲が 0.01~7kHz の間でフラットな感度特性を有する加速度計を用いて受信を行った。なお、本実験では、周波数範囲が 0.01~25kHz の加速度計を用いた場合との実験結果に大きな差がないことを確認したうえで計測を行っている。また、既往の研究<sup>4)</sup>により、鋼球径の違いによって周波数スペクトルの形状に違いが生じることが知られているため、本実験では鋼球径 20mm のものと鋼球径 5mm の 2 種類を用いた。また、図-1 に示すように、供試体をメッシュ状に分割し、それぞれの交点上を弾性波の受信位置とした。また、打撃入力位置は、各受信位置の上部 30mm の位置とした。

### 2.2 打撃試験結果

図-2 に各径の鋼球を落下させた際の測点 A1(健全部)および測点 F6(欠陥中央部)の加速度波形、周波数スペクトルおよび波形エネルギー積算値を示す。なおこの他の測点においても健全部と欠陥部では同様の結果が確認されている。加速度波形では、鋼球径 20mm を用いたものでは欠陥部と健全部で加速度振幅値に大きな差があることが分かる。しかし、鋼球径 5mm のものでは大差はみられない。これは鋼球径が大きいものでは、与える打撃力が大きくなるため、欠陥の有無によるたわみ振動が顕著

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (学生会員)

\*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教授 博士(工) (正会員)

\*3 名古屋大学 工学部環境土木・建築学科

\*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)

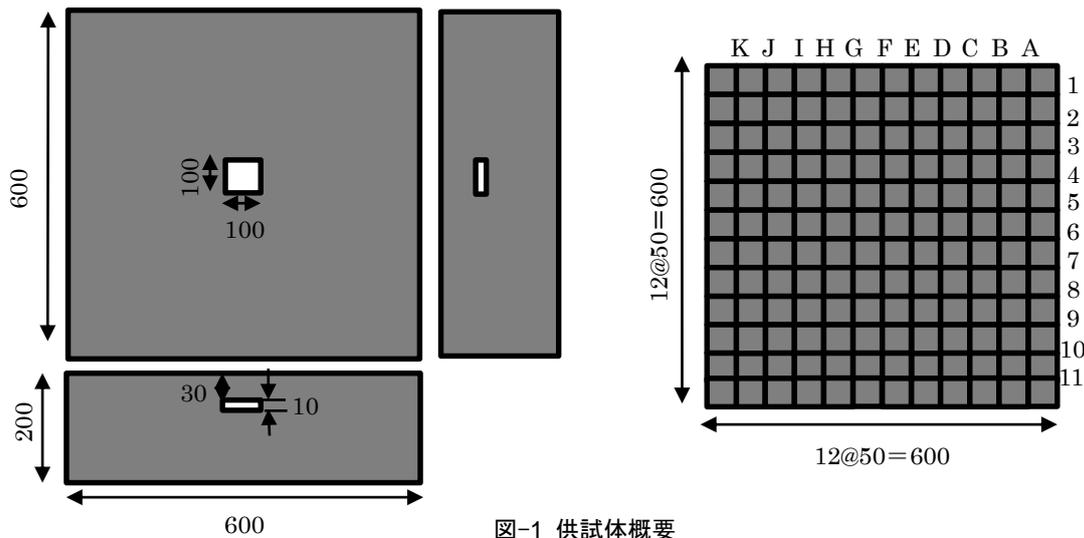


図-1 供試体概要

になるためだと考えられる。また、周波数スペクトルでは、鋼球径の大きさに関わらず、測点 F6 において、8kHz 付近で明瞭なピーク周波数が生じていることが分かる。

また、加速度波形において、欠陥の有無によって、加速度振幅値だけではなく、波形の減衰の仕方にも違いがあることが分かる。鎌田ら<sup>5)</sup>の検討を参考にして、加速度波形の減衰特性を次式によって評価した。

$$E_{min.}(T) = \frac{\sum_{t=1}^T \{y(t)\}^2}{4000 \sum_{t=1} \{y(t)\}^2} \quad (1)$$

ここで  $E_{min.}(T)$  : 波形エネルギー積算値,  $y(t)$  : 時刻  $t$  における加速度波形の振幅値である。また、波形エネルギー積算値を算出する時間範囲は、全ての実験結果において加速度波形の振幅値が十分小さくなる時間とし、本

研究では 4000 $\mu$ s を用いた。

図-2 より、欠陥がある供試体においては波形エネルギー積算値の前半部分の立ち上がりが遅れ、傾きも低下していることが分かる。これは、鎌田ら<sup>5)</sup>の検討が示した垂直方向の模擬ひび割れを有する供試体の解析結果と同じ傾向である。減衰の評価方法に関しては、積算エネルギー勾配をどの点での傾きで算出するかによって大きく結果が異なってくるため、今後も検討が必要である。

### 3. 腐食ひび割れを有する供試体の弾性波特性

#### 3.1 供試体概要および電食実験内容

図-3 に供試体概要および電食実験概要を示す、供試体寸法は長さ 500mm×幅 800mm×高さ 200mm で、内部に D19 鉄筋を 3 本埋設した。腐食区間は 200mm とし、区間外はエポキシ樹脂でコーティングし、腐食が発生しないようにした。本実験では鉄筋上部に水槽を設置し、水

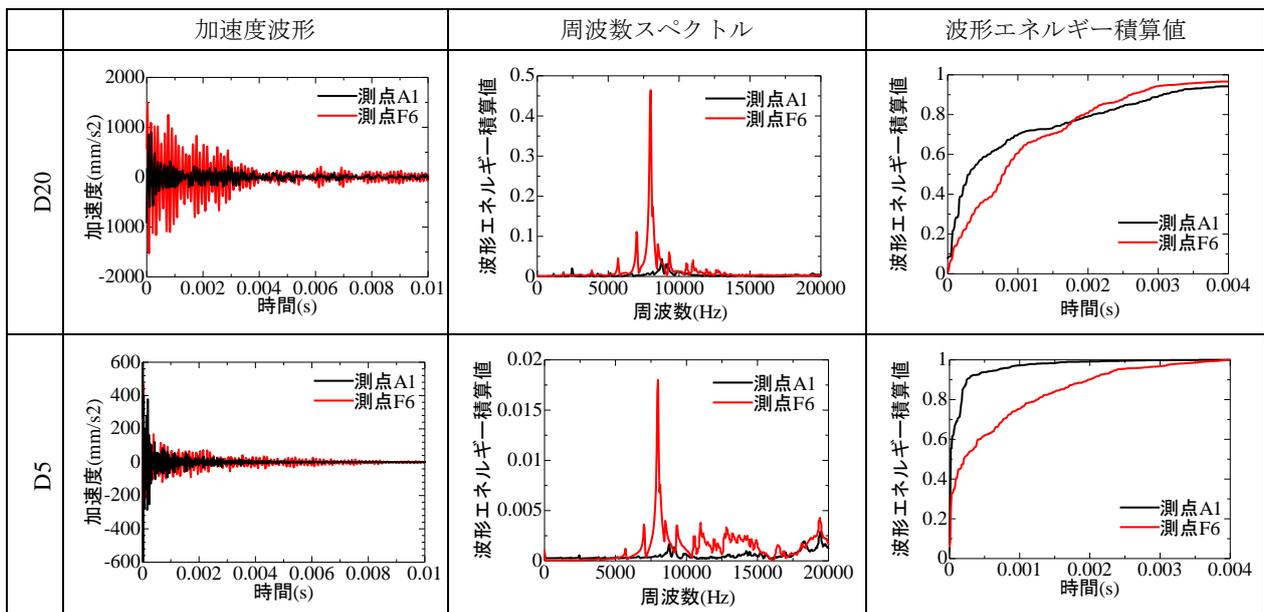


図-2 空隙を有する供試体の各鋼球径ごとの打音特性

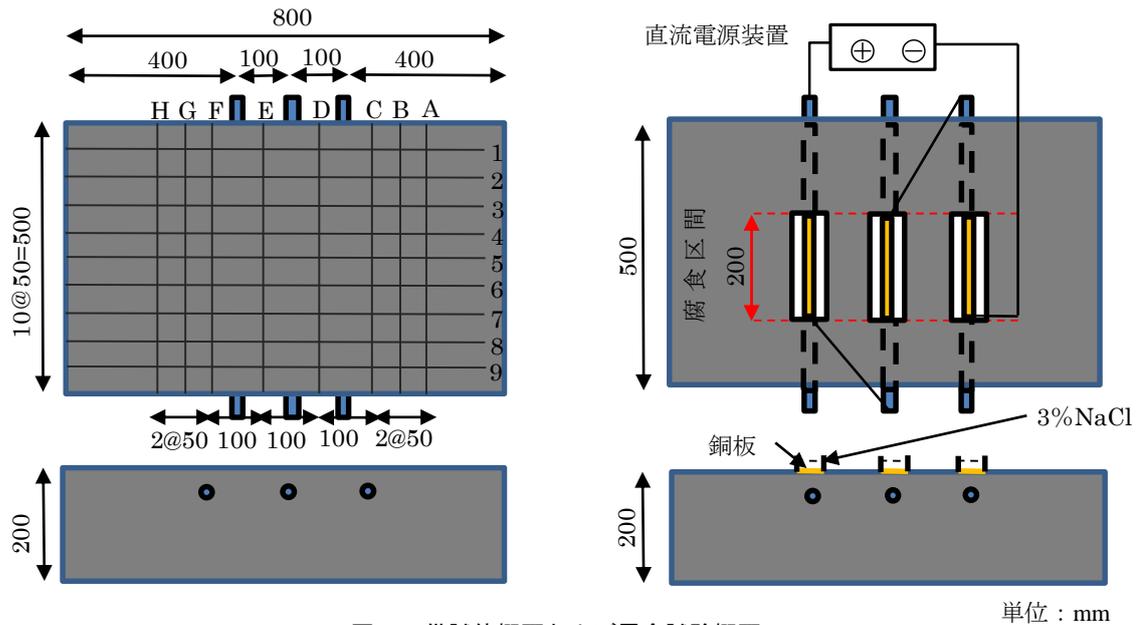


図-3 供試体概要および電食試験概要

槽内に 3%NaCl 水溶液と銅板を入れ、銅板および鉄筋が直列の回路となるように導線を接続した。電流密度は  $900\mu\text{A}/\text{cm}^2$  とし、腐食による質量減少量をファラデーの法則より計算した。

$$\Delta m = ItM/nF \quad (2)$$

ここで  $\Delta m$  : 質量減少量(g),  $I$  : 電流(A),  $t$  : 通電時間(s),  $n$  : 鉄の価数,  $F$  : ファラデー定数である。

本実験では、腐食区間内の鉄筋の質量減少量が腐食区間内の鉄筋質量の 5% となるまで通電を行った。

### 3.2 腐食ひび割れ性状

図-4 および図-5 に通電後の供試体表面および供試体の切断面を示す。腐食区間内である断面③、断面④、断面⑤、断面⑥に関しては、鉄筋間でひび割れが広がる水平ひび割れが発生しており、ひび割れ幅は 0.3~0.5mm 程度であった。また、腐食区間内において、右端の鉄筋付近には放射状にひび割れが発生しているため、ひび割れ幅は鉛直方向に各ひび割れ幅を足し合わせて算出した。最もひび割れが進展していたのは断面④であり、鉛直方向の合計ひび割れ幅は 2.2mm であった。断面②および断面⑦に関しては、水平方向のひび割れが進展し始めており、断面①および断面⑧に関しては水平方向のひび割れは発生していないことが確認できる。なお、内部ひび割れ幅の分布に関しては、後に図-7 を用いて説明する。

### 3.3 打撃試験

#### (1) 打撃試験概要

図-3 のように供試体をメッシュ状に分割し、分割の交点を打撃力の受信位置とした。弾性波の入力位置、入力方法、受信装置は模擬ひび割れを有する供試体のときと同じものを用いた。

#### (2) 時刻歴応答波形および周波数応答特性

図-6 に各鋼球径ごとの測点 A5 と測点 E5 における加速度波形および周波数スペクトルおよび波形エネルギー積算値を示す。鋼球径 20mm を用いた結果では、模擬ひび割れを導入した供試体を打撃したときと同様に、加速度の振幅値に違いがあることが分かる。しかし、鋼球径 5mm を用いた結果では加速度振幅値に大きな違いは見ることができない。また、周波数スペクトルでは、鋼球径 20mm を用いた結果と鋼球径 5mm を用いた結果の腐食ひび割れが発生している点でスペクトル強度が大きくなるといった傾向がみられた。鋼球径 20mm を用いたものでは、打音位置による周波数スペクトルの形状にほとんど違いは見られなかったが、鋼球径 5mm を用いたものでは、打音位置によるスペクトル周波数の形状が変化していることから、鋼球径 5mm の結果は鋼球径 20mm を用いた結果よりも信憑性は低いと考えられる。打音位置による周波数スペクトルの影響に関しては、今後も検討していく必要があるが、与えられる打撃力が小さいこと、

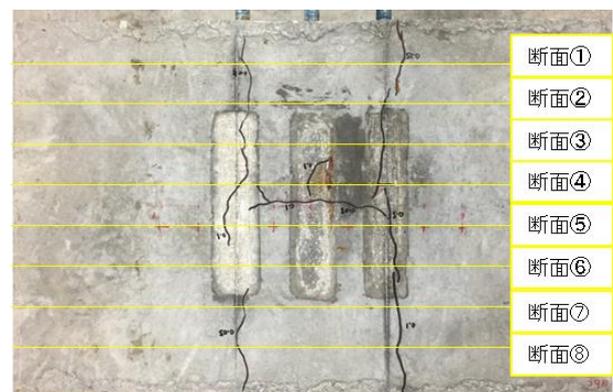


図-4 表面ひび割れ性状

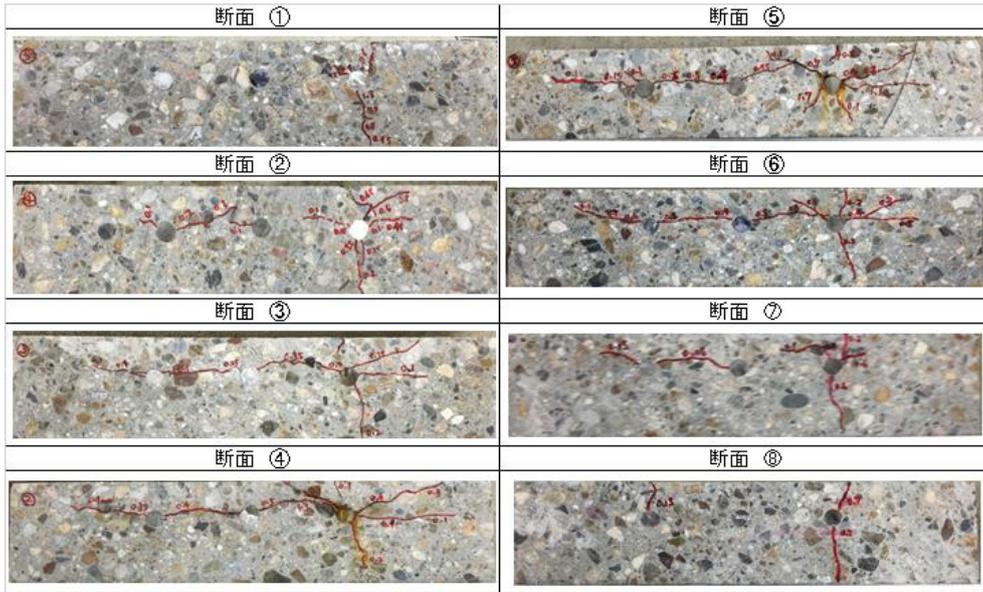


図-5 内部ひび割れ性状

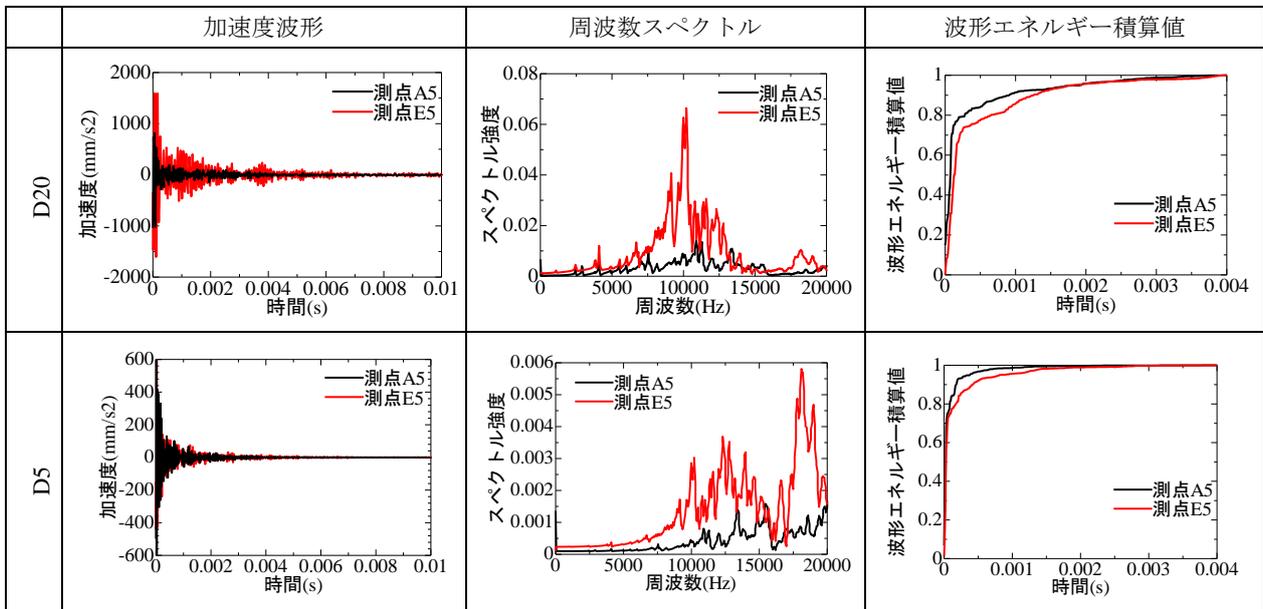


図-6 腐食ひび割れを有する供試体の各鋼球径ごとの打音特性

また、打音ごとのばらつきが大きいことを考えると、小さい径の鋼球を用いるのは適切でないと言える。また、波形エネルギー積算値に関しては鋼球径 20mm と鋼球径 5mm を用いた結果からは、明確なエネルギー勾配の差を見ることはできない。模擬ひび割れ供試体と比較して、ひび割れ幅が小さいことを考えると、ひび割れ幅がある程度大きくなければ、減衰形状に影響が表れない可能性がある。

#### 4. 各指標による内部ひび割れ分布の評価

ここで、これまで検討した加速度応答の指標を用いてすべての観測点の結果をもとに、内部ひび割れ分布の評価を行った。

まず、図-7 に 3.2 で前述した内部ひび割れ幅の分布を

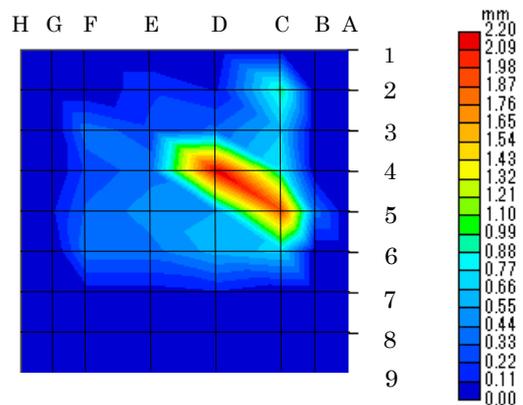


図-7 内部ひび割れ分布

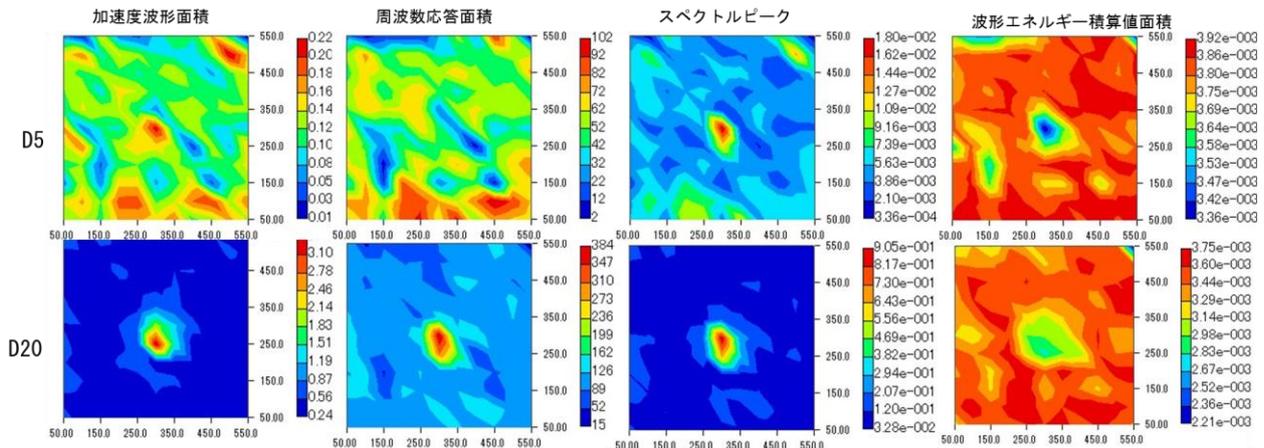
示す。これによると単一の水平ひび割れが生じた領域と複数のひび割れが重なっている領域が確認できる。

図-8 に模擬ひび割れを有する供試体の各指標の平面分布および腐食ひび割れを有する供試体の各指標の平面分布を示す。ここで、各指標は、加速度波形面積、周波数スペクトル面積、周波数スペクトルピーク値、波形エネルギー積算値面積である。ここで、加速度波形面積は、0.02秒までの加速度波形の振幅値の積分値、周波数スペクトル面積は、40000Hzまでのスペクトル強度の積分値を指す。また、波形エネルギー積算値面積は、波形エネルギー積算値が0.8となる時間までの波形エネルギー積算値の積分値を指す。図-7の内部ひび割れ分布と照らし合わせながら、各指標による分布を評価する。以降、この図をもとに加速度波形面積、周波数応答面積、スペクトルピーク、波形エネルギー積算値面積の平面分布を評価していく。

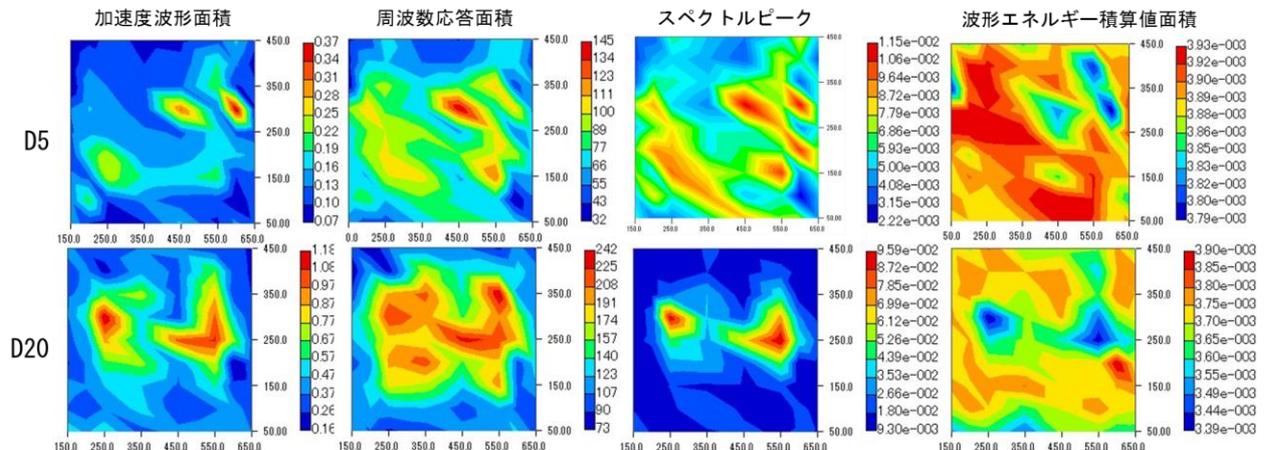
図-8(a)より、模擬ひび割れを有する供試体に、鋼球径20mmを用いた際には、供試体の中心付近に変化が集中しており、ひび割れ位置を把握することが可能であるといえる。しかし、鋼球径5mmを用いた場合では、スペク

トルピーク値および波形エネルギー積算値面積において、中心付近に変化が生じているものの、周波数スペクトル面積および加速度波形面積では、明確な傾向が見られない。腐食ひび割れを有する供試体に関しても同様に、鋼球径20mmを用いた場合には、ひび割れ付近に変化が集中しており、腐食によるひび割れ領域をおおむね捉えることが可能であると言える。しかし、鋼球径5mmを用いた場合では模擬ひび割れを打音した時と同様、損傷による明確な変化は見られない。これは、3.3節で述べた値のばらつきや打撃力が低いことが原因であると考えられる。

以上のことから、加速度波形面積、周波数応答面積、波形エネルギー積算値面積では、減衰やスペクトルピーク以外の影響を含むことから、可視化される損傷領域は図-7の淡い青色で示されたひび割れ幅の小さい領域も含むと考えられる。一方で、スペクトルピークに関しては、損傷の程度による変化が明確に表れることから、特にひび割れ幅の大きい領域が可視化されている。すなわち、評価指標を変えることで、損傷した領域と、損傷の程度をそれぞれ評価できる可能性がある。



a) 模擬ひび割れを有するコンクリートの各指標の平面分布



b) 腐食ひび割れ有するコンクリートの各指標の平面分布

図-8 空隙および腐食ひび割れ有するコンクリートの各指標の平面分布

## 5. まとめ

以下に本研究で得られた結論を示す。

- (1) 模擬ひび割れを導入した供試体について、鋼球径 20mm の場合では、加速度波形、周波数スペクトル、波形エネルギー積算値面積によって損傷評価可能であった。一方で、5mm の場合では、加速度波形を除いて損傷によって明確に変化があらわれた。
- (2) 電食試験により腐食ひび割れを導入した供試体について、鋼球径 20mm の場合では、加速度波形、周波数スペクトルによって損傷評価可能であった。一方で、5mm の場合では、打撃力が小さく打撃位置によって周波数スペクトル形状にばらつきがあることから、損傷による明確な変化は見られない。
- (3) 各指標を用いて、内部ひび割れの分布を評価したところ、評価指標を変えることで、損傷領域と損傷の程度をそれぞれ評価できる可能性を示した。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの技術シリーズ 88 コンクリート建造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339 委員会)成果報告書, pp.48, 2009
- 2) 土木学会：コンクリートの技術シリーズ 88 コンクリート建造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339 委員会)成果報告書, pp.56, 2009
- 3) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲：コンクリート内部欠陥の寸法および深さと打音特性値との定量的関係, コンクリート工学年次論文集, Vol, 23, No, 1, pp.589-594, 2001
- 4) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲ら：コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用, コンクリート工学年次論文集, vol.24, No.1, pp.1545-1550, 2002
- 5) 石田卓也, 鎌田敏郎, 内田慎哉ら：弾性波法に基づく鋼板接着補強した RC 床版内部の損傷評価手法に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, vol.37, No.1, pp.1855-1860, 2015