

論文 弾性波法による健全部判定に基づくコンクリートおよび断面修復部内部の欠陥検出

鈴木 理絵^{*1}・多田 祐希^{*2}・中村 光^{*3}・三浦 泰人^{*4}

要旨：本研究では、0.5mm～1.5mm 幅の欠陥を有する供試体に対し、鋼球落下実験を行い、打音の周波数分布の基本特性の確認および健全部判定指標を用いた欠陥検出方法の提案を行った。健全部の周波数分布は広がりを持つ山なりの形状となる特徴を有することから、データ処理を行ったうえでのスペクトルパワーを積算し、その値を健全部判定指標とした。本研究で提案した、健全部判定指標を利用した欠陥検出方法によって、表面から 30mm 深さの欠陥を良好に検出することができた。さらに、この欠陥検出方法をより深い、表面から 50mm 深さの欠陥および断面修復部にも適用し、欠陥検出が可能であることを確認した。

キーワード：非破壊検査, 打音法, 周波数特性, 鋼球落下, 衝撃弾性波, ひび割れ, 断面修復

1. 緒言

コンクリートの非破壊検査の一般的な方法として、打音検査が挙げられる。打音検査は、目視では確認不可能なコンクリート内部の欠陥の有無を判別でき、特別な検査機器を必要とせず比較的容易に行うことが可能であるが、検査を行う人の経験に依るところが大きく、定量的な評価手法であるとは言えない。そのため、打音により生じる弾性波を利用してコンクリート内部の空洞やひび割れを定量的に評価する研究がいくつか行われている。例えば、鎌田ら¹⁾は、加速度応答の最大振幅値比や減衰特性、周波数分布、スペクトルピーク値など、様々な指標を用いて欠陥の定量的評価を行っている。既往の研究^{1), 2), 3)}では、幅（空洞厚さ）5～25mm 程度の欠陥を対象としている場合が多いが、腐食ひび割れによる剥落といった第三者被害などの観点からは、より小さな幅の欠陥検出が求められる。また、既往の研究は、インパルスハンマーを用いて入力波形を制御したもの^{2), 3)}や、打撃力が常に一定となるように複数回の打撃の平均値を用いたもの^{1), 3)}がほとんどである。しかし、実際の点検において、同一の点を複数回打撃することや、衝撃荷重、入力波形、打撃方向を正確に制御することは困難である。さらに、近年は補修を行った RC 構造物が増えている。しかし、補修をした後、比較的早期に再劣化する事例が報告されていることから、補修部分の点検を行っていくことも今後重要である。

そこで、本研究では、コンクリートならびに断面修復部内の、幅 0.5～1.5mm の欠陥を対象とした鋼球落下実験を行い、まず、健全部および欠陥部の打音の周波数分布の基本的な特徴と、打撃力および打撃角度による影響

を確認する。その上で、一般には欠陥部の特徴的な打音特性を指標化する方法で欠陥検出が行われているが¹⁾、本研究では健全部の特徴的な打音特性から健全部判定を行い、健全部以外を欠陥部とする判定方法を提案する。これは、打音検査では、欠陥部の見逃しをできるだけ減らすことが重要であり、欠陥部を精度よく判定する指標では、欠陥幅や広さ、打撃力などに相違がある場合に判定指標の値も当然変動し、欠陥部の見逃しをする可能性が高まると考えたためである。

2. 鋼球落下実験の概要

2.1 実験供試体概要

実験供試体の概要を図-1 に示す。コンクリート供試体は、寸法 300×1000×200mm、鉄筋かぶり d=30, 50mm である 2 体の供試体を作製した。欠陥は広さ 120×120mm、幅 1.5, 1.0, 0.5mm である 3 種を、図の通りに配置した。欠陥は、鉄筋間の水平ひび割れを想定し、波型のひび割れ面を再現できる段ボールの中芯⁴⁾によって模擬し、各供試体の鉄筋上に設置した。なお、本研究では、鉄筋か

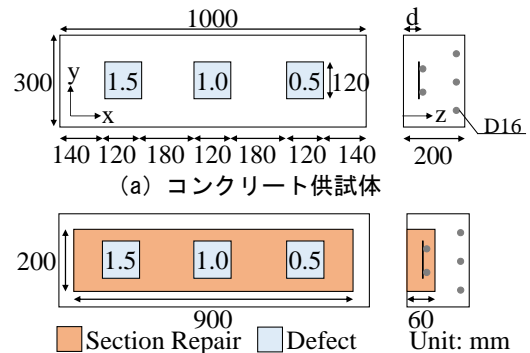


図-1 供試体概要

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 技建開発株式会社 計測技術課 (正会員)

*3 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)

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

ぶり $d=30\text{mm}$ の供試体を基本供試体とする。

一方、断面修復部を有する補修供試体は、基本供試体と同様の供試体寸法に対し、鉄筋奥 60mm までの中央部 $200\times 900\text{mm}$ の範囲を、ポリマーセメント軽量モルタルに置き換えることで作製した。なお、欠陥条件は基本供試体と同様とした。

2.2 打撃方法・測定方法

衝撃は、供試体の厚さが 200mm であることを考慮し、NDIS⁵⁾を参考として、直径 20mm の鋼球を高さ 100mm から自由落下させることで与えた。落下位置は、コンクリート供試体に関しては、図-2 (a) に示すように、各供試体表面における 50mm 間隔のメッシュの交点上とした。補修供試体に関しては、断面修復部上のみを打撃の対象とし、図-2 (a) における A 行および E 行を C 行側に 25mm ずらした上、2~18 列のみを打撃した。さらに、各欠陥上の十分なデータ数を確保するため、図-2 (b) に示すように、各欠陥における 30mm 間隔のメッシュの交点上の打撃も行った。なお、実際の点検を考慮し、各交点で 1 回ずつ鋼球落下を行った。

計測は、 $0.01\sim 20\text{kHz}$ の周波数範囲において 3dB 未満の減衰であるフラットな感度を有するマイクロフォンを用い、各打撃位置から図-2(a)中に示す x 軸方向に 25mm 、z 軸方向（上空）に 30mm 離れた位置にマイク部を置いて行った。なお、トリガーとしてマイクロフォン直下の供試体表面に加速度計を設置し、加速度計が衝撃を感知してから 0.02 秒までの波形をサンプリング時間間隔 $9.77\mu\text{s}$ で 2048 点記録した。本研究では記録した波形の高速フーリエ変換から得られる周波数分布を用いて検討を行うが、本実験の計測時間およびデータ点数から得られる周波数分布は 0.05kHz 刻みとなる。

3. 健全部判定に基づく欠陥検出指標の提案

3.1 基本供試体の周波数分布の基本特性

(1) 健全部および欠陥部の基本特性

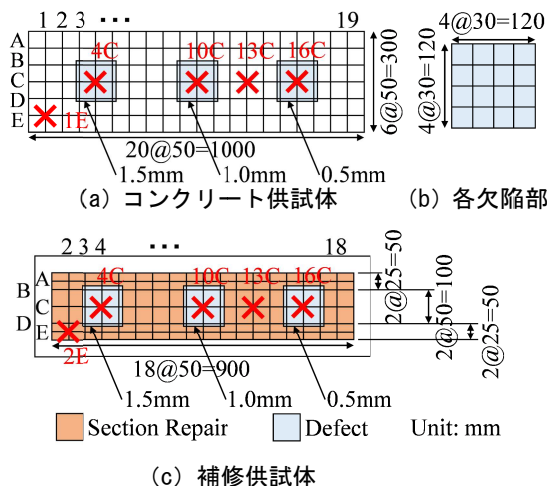


図-2 打撃位置概要

図-3 に、基本供試体の健全部および欠陥部の周波数分布を示す。ここで、健全部は図-2 (a)における供試体中央付近 (13C) および供試体端部 (1E)、欠陥部は各欠陥の中央 (4C, 10C, 16C) である。図-3 から分かるように、健全部では広い周波数範囲で緩やかな山なりの形状となっていることに対し、欠陥部ではたわみ共振現象により $6\sim 8\text{kHz}$ 付近のみで卓越していることが確認できる。このことから、周波数分布が広がりを持っていることが健全部の特徴であり、この特徴を捉えることで、健全部判定が可能であると考えられる。

健全部である、供試体中央付近 (13C) と供試体端部 (1E) の周波数分布は、同様な周波数範囲に山なりの広がりを持っている。しかし、供試体端部の周波数分布には、 1kHz 、 2kHz 、 3kHz 付近にそれぞれ明らかにスペクトルパワーが大きい、卓越したピークが見られる。1E 以外の供試体端部のデータでも同様の傾向が多く見られることから、この卓越したピークは供試体端部の境界が影響したものと考えられる。また、このような卓越したピークを示すデータは、例えばスペクトルピーク値を指標に用いた場合、健全部でありながら欠陥部と判定してしまうこともあり得る。

それぞれの幅の欠陥の周波数分布を比較すると、いずれも健全部の周波数分布とは異なる、卓越した周波数を有しているが、 0.5mm 幅欠陥の周波数分布は卓越した周波数の前後も大きな値となっており、比較的健全部に類似した周波数分布の形状となっていることが確認できる。

(2) 打撃力を変更した場合の周波数特性

打撃力による周波数分布の基本特性への影響を確認す

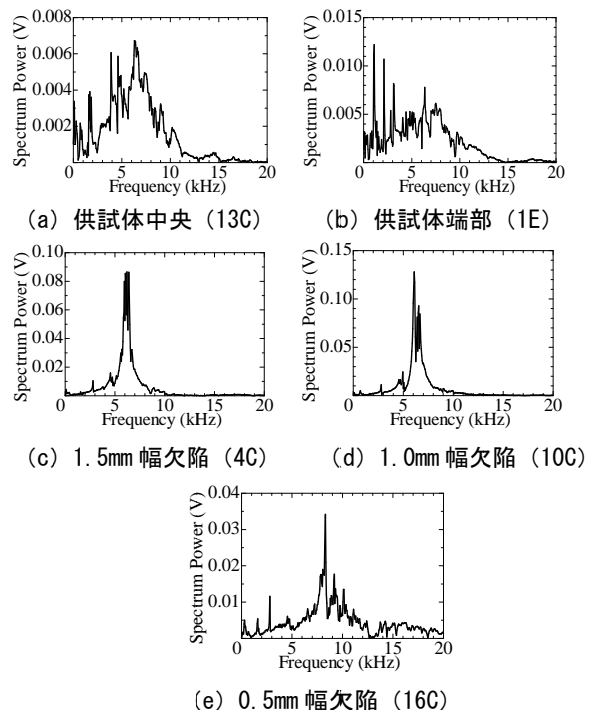


図-3 基本供試体における周波数分布

るため、基本供試体の健全部（13C）および1.5mm幅欠陥中央（4C）に、高さ30mm、100mm、150mmから鋼球を落下させた。図-4に、その周波数分布を示す。打撃力が異なっても、周波数分布の形状には違いが見られず、健全部の特徴的な広がりや欠陥部の卓越を捉えられていることが確認できる。また、健全部の2kHzおよび4kHz付近の卓越したピークや、欠陥部における6~8kHz付近の卓越するスペクトルパワーは、打撃力に応じて明確に変化している。このことは、ある特定の周波数で卓越するような形状が、打撃力に対して高い感度を有することを示しており、打撃力がばらつく場合に、欠陥部・健全部どちらに関してもこのような卓越を捉えることは、欠陥検出に適していない可能性がある。一方で、健全部の特徴である山なりの大きさは、打撃力が異なる場合でも変化が小さいことから、この山なりの形状を捉えることが、健全部判定において有用であると考えられる。

(3) 斜めから打撃を与えた場合の周波数特性

打撃角度による周波数分布の基本特性への影響を確認するため、基本供試体の健全部（13C）および1.5mm幅欠陥中央（4C）に、高さ150mmから、供試体表面に対し60°傾斜させた板上を転がして打撃を与えた。図-5に、その周波数分布を示す。健全部・欠陥部ともに、垂直に打撃した場合の周波数分布と大きな違いは見られないが、打撃力を変更した場合と同様に、健全部の2kHzおよび4kHz付近、欠陥部の6~8kHz付近の卓越の仕方が異なっていることが確認できる。

3.2 健全部判定指標のデータ処理および算出方法

(1) 環境音の除去

図-3の健全部の周波数分布で確認できる山なりの形状において、スペクトルパワーは低周波数になるにつれ徐々に減少しているが、0~1kHz付近で増加していることが確認できる。そこで、マイクロフォンが含む、避けられない環境音や機械ノイズといった、打音以外の音を

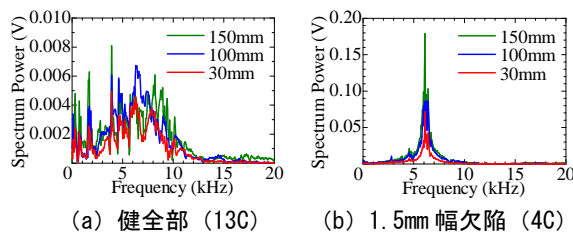


図-4 打撃力による影響

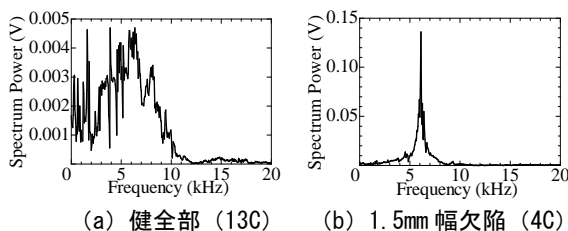


図-5 打撃角度による影響

確認した。ばらつきを考え、場所を変え3回計測を行った。その周波数分布を図-6に示す。図-6から、0.5kHz以下の範囲で打音以外の音が大きくなっていくことが確認できる。健全部判定指標の提案にあたり、打音以外の要素を排除するため、マイクロフォンの測定可能範囲も考慮し、本研究では0.5~20kHzの値を用いることとする。

(2) 正規化周波数積算値

3.1で述べた、健全部の特徴である周波数分布の広がり、横軸がいずれの周波数帯においても0.05kHz刻みのデータを有することから、そのスペクトルパワーを積算することによって数値化することができる。しかし、その積算値は当然、スペクトルパワーの絶対値（振幅の大きさ）によって決定されてしまうことから、各データのスペクトルパワーが同様のオーダーとなるように正規化する必要がある。そこで、各周波数分布のスペクトルパワーの最大値が1となるようにそれぞれの周波数分布を正規化し、スペクトルパワーの積算値を算出した。この正規化周波数積算値を、本研究における健全部判定指標とする。

この正規化において、図-3(b)の1kHz、2kHz、3kHz付近でそれぞれ確認できるような、供試体端部の境界から生じる卓越したピークは、健全部の特徴である山なりの最大値よりも大きく、スペクトルパワーの最大値による正規化の妨げとなる。そのため、こういった卓越したピークは正規化の前に除去する必要があるが、欠陥部による卓越は除去しないよう、区別する必要がある。図-7に、供試体端部の境界から生じる卓越したピークおよび欠陥部による卓越の一例を示す。欠陥部により卓越するスペクトルは徐々に大きくなることに對し、供試体端部の境界から生じる卓越したピークは、ある一点のみが突出していることが確認できる。そこで、ある点とそのひとつ前の点より2倍以上大きな値をとっている場合に、その点の前後それぞれ2点（計4点）の平均値をとることで、突出しているピークを除去した。この除去によって、欠陥部による卓越を処理することなく、健全部の周波数分布の山なりの最大値を捉えた。

3.3 健全部判定指標の平面分布

基本供試体の全面における、健全部判定指標の平面分布を図-8に示す。周波数分布が広がりを持つ健全部では値が大きくなり、欠陥部では小さくなっており、健全

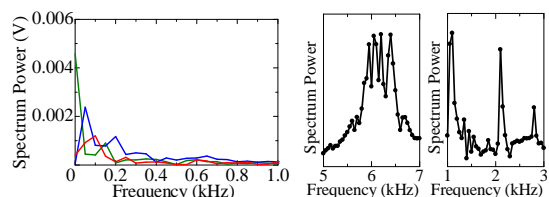


図-6 環境音

(a) 欠陥部 (b) 供試体端部

図-7 卓越の違い

部判定指標が健全部の周波数分布の特徴である山なりを良好にとらえられていることが確認できる。また、供試体端部での値のばらつきも小さく、供試体端部の境界から生じるピークも良好に除去できていることが確認できる。

図-9 に、基本供試体の各点から得られた健全部判定指標のヒストグラムを示す。ヒストグラムは健全部、欠陥部、境界近傍のデータに分類して作成した。ここで、境界近傍とは、各欠陥上の中央以外の点（例えば 1.5mm 幅欠陥上の、図-2 (a) の 4C 以外の点）を指す。図-8 の平面分布の値が 15~150 程度であることに対し、健全部の値は 90~140 の範囲に正規分布に従う形で分布している。一方で、境界近傍の値は広い範囲に分布しており、供試体作製の際に欠陥位置が若干ずれてしまった可能性もあることから、欠陥部・健全部どちらのデータも含んでいると考えられる。こういった、健全部か欠陥部かわからないデータを含んでいる場合には、健全部判定指標の値がばらつき、欠陥検出が困難となる。

ここで、より健全部・欠陥部を視覚的にわかりやすくするため、一例として、図-9 における健全部データの最小値である 80 を閾値とした場合の健全部判定指標の平面分布を、図-10 に示す。このように、閾値を決定することによって健全部と判定された場所が明確になり、欠陥部が浮き出る形で検出できることがわかる。

3.4 健全部判定指標を用いた欠陥検出方法の提案

実構造物の点検をする場合、打音点検前に欠陥部を知

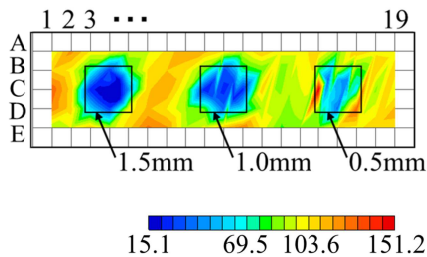


図-8 健全部判定指標平面分布（基本供試体）

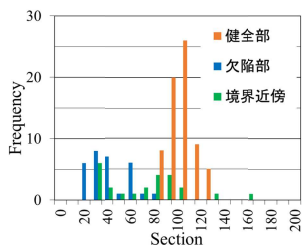


図-9 全面的データのヒストグラム

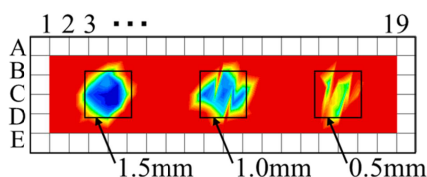


図-10 基本供試体の健全部判定（閾値 80）

ることは困難であるが、健全位置を推定しその打撃データを面的な打撃の前に得ることは比較的簡単である。欠陥部のスペクトルパワーの最大値やピーク周波数は、欠陥の広さ・幅・深さで異なるが、健全部のデータは、場所や打撃力が異なっても、ほぼ同一の周波数分布を有することを既に示した。また、3.3 で示したように、健全部の健全部判定指標の分布から閾値を適切に設定すれば、図-10 のように、明瞭に欠陥部を示すことが可能である。これらの事実から、ある部材の点検を行う際に、①点検に先立ち、健全部と思われる複数箇所、打撃力や角度を変えた打撃データを取得する、②取得した健全部の打撃データから、健全部判定指標のヒストグラムを作成する、③そのヒストグラムから健全部判定の閾値を決定する、④打音検査を点検対象部材に対して行い、健全部判定指標の閾値以上の場合を健全部と判定する、という手順で欠陥を検出する手法を提案する。この方法によれば、異なる部材厚さやコンクリート強度、あるいは補修部のように、構造諸元や材料が異なる場合であっても、対象部材ごとにその健全部の打音特性を打撃のばらつきも含めて考慮し、欠陥検出を行うことができる。

この提案方法では、健全部判定の閾値の決定が重要となる。そこで、基本供試体の健全部である箇所の健全部判定指標の値を調べるため、図-2 (a) の 13C 付近を 90 回、ランダムな打撃力・角度で打撃し、そのヒストグラムを作成した。その結果を図-11 に示す。図-9 の健全部データと同様に、正規分布に従う形となっている。一般に、正規分布から無作為に選んだある一つのデータは、 $\mu \pm \sigma$ (μ : 平均値, σ : 標準偏差) の範囲に 68.27% の確立で存在することが知られている。本研究では、これを利用して、 $\mu - \sigma$ を閾値とする。本実験で得られた 90 個の健全部データから、平均値 $\mu = 96.23$, 標準偏差 $\sigma = 12.46$ が算出されるため、この欠陥検出方法による基本供試体の閾値は、 $\mu - \sigma = 83.8$ と算出される。図-12 に、

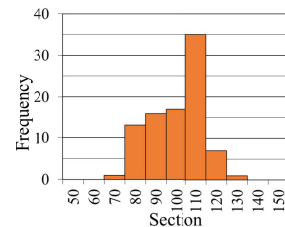


図-11 健全部ヒストグラム（基本供試体）

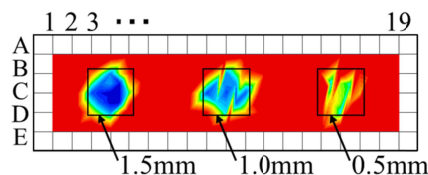


図-12 基本供試体の健全部判定（閾値 83.8）

閾値を83.8として基本供試体で健全部判定を行った結果を示す。閾値80の場合(図-10)とほぼ同じ見え方ではあるが、本研究で提案した健全部判定方法によって、システマティックに欠陥部が評価されたことが示された。

4. 深い位置の欠陥への健全部判定指標の適用

4.1 健全部判定指標を用いた欠陥検出

提案した欠陥検出方法を、鉄筋かぶり $d=50\text{mm}$ の供試体に用い、その適用性を確認する。まず、健全部における健全部判定指標の値を確認するため、3.4と同様に、図-2(a)の13C付近を90回ランダムに打撃した。図-13に、そのヒストグラムを示す。基本供試体と同様の範囲に正規分布に従って分布しており、平均値 $\mu=104.34$ 、標準偏差 $\sigma=8.67$ が得られた。このことから、本研究で提案した欠陥検出方法を用いると、 $d=50\text{mm}$ の供試体の閾値は $\mu - \sigma = 95.7$ と算出される。

4.2 健全部判定指標の平面分布

$d=50\text{mm}$ の供試体の全面における、健全部判定指標の平面分布を図-14に、その閾値を95.7とした平面分布を図-15に示す。図-14から、 $d=50\text{mm}$ の供試体においても、健全部の値は端部や中央部でばらつきが小さく、良好に健全部判定が行われていることが確認できる。また、図-15においても良好に欠陥検出が行われており、欠陥位置が深い場合にも、本研究で提案した欠陥検出方法を適用可能であることが示された。

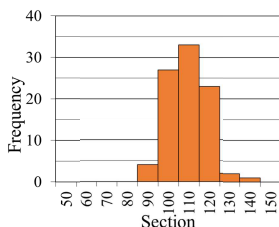


図-13 健全部ヒストグラム ($d=50\text{mm}$ 供試体)

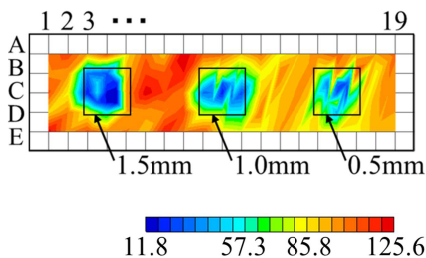


図-14 健全部判定指標平面分布 ($d=50\text{mm}$ 供試体)

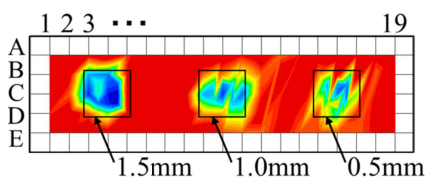


図-15 $d=50\text{mm}$ 供試体の健全部判定 (閾値 95.7)

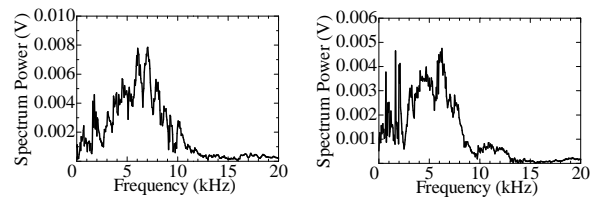
5. 補修供試体への健全部判断指標の適用

5.1 断面修復部での周波数分布の基本特性

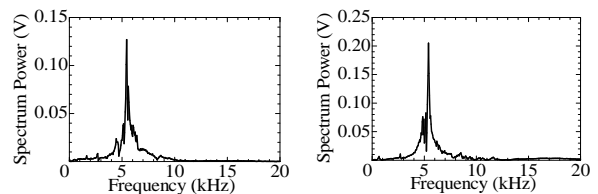
補修供試体へ本研究で提案した欠陥検出方法を適用するにあたり、断面修復部での周波数分布の基本特性を確認した。断面修復部上の、健全部および欠陥部の周波数分布を図-16に示す。基本供試体と同様に、健全部の周波数分布は広い周波数範囲で山なりの形状となっており、欠陥部は6~8kHz付近のみで卓越していることが確認できる。このことから、断面修復部であっても、健全部判定指標によって健全部の特徴を捉えられることがわかる。また、健全部端部の周波数分布には、1kHz, 2kHz付近のそれぞれに境界によるものと考えられるスペクトルパワーの大きな卓越が見られる。しかし、この卓越は、基本供試体端部(図-3(b))では健全部の特徴である山なりの最大値よりかなり大きなスペクトルパワーであったことに対し、補修供試体端部(図-16(b))では山なりの最大値と同程度の大きさとなっている。これは、断面修復部の端部(2E)が供試体自体の端部からやや離れていることから、供試体端部の境界の影響が減少したためであると考えられる。欠陥部の周波数分布についても、基本供試体と同様に、0.5mm幅欠陥の周波数分布は卓越した周波数の前後も大きな値となっており、比較的健全部に類似した周波数分布の形状となっている。

5.2 健全部判定指標を用いた欠陥検出

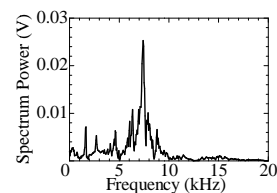
以上のように、断面修復部においても、健全部・欠陥部ともに基本供試体と同様な周波数分布となることがわかった。すなわち、健全部の周波数分布の特徴である山なりの形状を、断面修復部でも利用することができる。



(a) 健全部中央 (13C) (b) 健全部端部 (2E)



(c) 1.5mm 幅欠陥 (4C) (d) 1.0mm 幅欠陥 (10C)



(e) 0.5mm 幅欠陥 (16C)

図-16 補修供試体における周波数分布

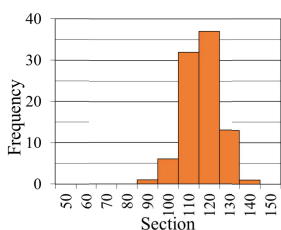


図-17 健全部ヒストグラム（補修供試体）

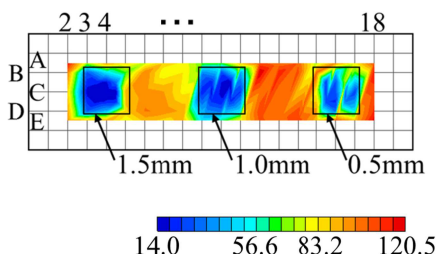


図-18 健全部判定指標平面分布（補修供試体）

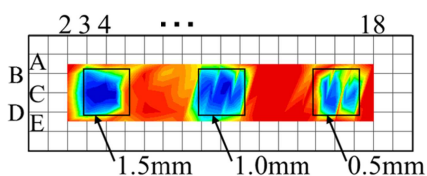


図-19 補修供試体の健全部判定（閾値 102.6）

そこで、3章で提案した健全部判定指標および欠陥検出方法を補修供試体に適用し、欠陥検出を試みた。

断面修復部上の健全部における健全部判定指標の値を確認するため、図-2 (a) の 13C 付近を 90 回ランダムに打撃して作成したヒストグラムを、図-17 に示す。基本供試体の場合と同様の範囲に正規分布に従っていることが確認できる。平均値 $\mu=111.39$ 、標準偏差 $\sigma=8.76$ であることから、本研究で提案した欠陥検出方法を用いると、補修供試体の閾値は $\mu - \sigma = 102.6$ と算出される。

5.3 健全部判定指標の平面分布

供試体の全面における、健全部判定指標の平面分布を図-18 に、その閾値を 102.6 とした平面分布を図-19 に示す。図-18 について、ほとんどの健全部でオレンジ～赤色となっており、断面修復部でも良好に健全部判定が行われていることがわかる。図-19 においても、視覚的にわかりやすく欠陥部が浮き出ており、補修供試体においても、本研究で提案した欠陥検出方法を適用可能であることが示された。

6. 結言

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 鋼球落下実験によって得られる、健全部および 0.5mm～1.5mm 幅欠陥の周波数分布を確認したところ、健全部では広い周波数範囲で緩やかな山なりの

形状となっていることに対し、欠陥部ではある周波数付近のみで卓越していることがわかった。

- (2) 健全部判定指標は、健全部の特徴である山なりの形状を捉え、健全部を良好に判定できていることがわかった。また、本研究で対象とした打撃方法に対し、幅 0.5mm、深さ 50mm の平面分布する欠陥の位置を特定可能であることが確認された。
- (3) 本研究では、健全部判定指標を用い、部材内の健全部を特定することによる欠陥検出方法を提案した。この方法の中で、健全部における健全部判定指標のヒストグラムを用いて閾値を定めた。その結果、欠陥部が浮き出る形で良好に欠陥検出を行うことができた。
- (4) 本研究で提案した欠陥検出方法を、欠陥深さ 50mm の供試体および断面修復部に用い、その適用性を確認した。どちらの場合でも、健全部判定指標は良好に健全部の特徴を捉えられ、欠陥検出を行うことができた。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）によって実施されました。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.65-79, 2002.5
- 2) 園田佳巨, 川端健太, 別府万寿博, 福井雄気: 打音データを用いたコンクリート内部欠陥の評価に関する基礎的考察, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.802-811, 2011.3
- 3) 小池耕太郎, 井山徹郎, 野内彩可, 村上祐貴: コンクリート内部の欠陥深さが打音特性に及ぼす影響: コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1849-1854, 2015
- 4) Fu L., Nakamura H., Yamamoto Y., Miura T.: Investigation of Influence of Section Pre-Crack on Shear Strength and Shear Resistance Mechanism of RC Beams by Experiment and 3-D RBSM Analysis, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.15, pp.700-712, Nov. 2017
- 5) 日本非破壊検査協会: NDIS 2426-2 コンクリートの非破壊試験—弾性波法—第 2 部: 衝撃弾性波法, pp.9-12, 2014