

論文 橋梁遊間の打音点検法に関する基礎的研究

志田 爲御*1・高橋 知也*2・池田 富士雄*3・村上 祐貴*4

要旨：本研究では、点検者が立ち入ることができない橋梁遊間の打音点検評価を目的とし、橋梁遊間を打撃し打撃音を収録する打撃装置を提案した。また、打撃装置で得られた打撃音を用いてコンクリート内部の欠陥評価することを目的とし、マイクロフォンを用いて得られたフーリエスペクトルを、インパルスハンマーのフーリエスペクトルで除した周波数応答関数（伝達関数）を自己組織化マップに適用した欠陥評価を行った。その結果、インパルスハンマーとマイクロフォンを用いた条件下では、直径 200mm、深さ 50mm の欠陥まで検知することが出来た。また、打撃装置の場合では直径 400mm、深さ 30mm の欠陥中心部のみ検知が可能であり、欠陥検知率の向上には打撃力の増幅が必要であった。

キーワード：遊間部、打音点検、マイクロフォン、自己組織化マップ

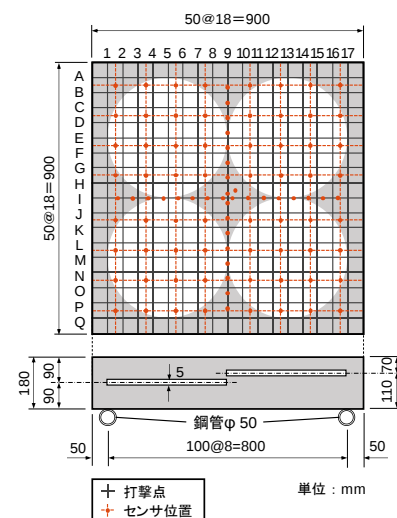
1. はじめに

現在我が国では、高度経済成長期に建設された道路橋の多くで高齢化が進み、今後 10 年間で建設から 50 年を経過する道路橋が、全体の 47% に達するといわれている。

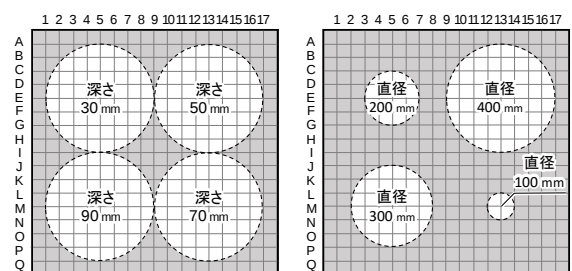
北陸道における橋梁の補修工事に焦点を当てると、橋梁のジョイント部分（遊間部）の補修件数が最多であり、遊間部では止水材の脱落、損傷等により、凍結防止剤を含む路面水が遊間部から流れ落ちる。凍結防止剤は高濃度の塩分を含んでいることから、遊間部では著しく鉄筋腐食が進行する場合がある。

橋梁遊間の幅は広くても 50mm 程度であり、点検者が立ち入ることが出来ず、目視点検や通常の打音点検を実施することは難しい。現状では CCD カメラを遊間内に挿入し、外観変状の観察や、回転式打音点検器を用いて、打音点検を行っている。しかしながら、外観変状から腐食による浮きを検知することが現状では困難であることに加えて、回転式打音点検器では遊間内の一部の領域しか点検が出来ず、腐食劣化状況を適切に評価することが難しい状況にある。

そこで本研究では、点検者が立ち入ることができない橋梁遊間の打音点検評価を目的とし、橋梁遊間を打撃し打撃音を収録する打撃装置を提案した。また、打撃装置で得られた打撃音からコンクリート内部の欠陥評価手法を確立することを目的とし、マイクロフォンによって得られたフーリエスペクトルをインパルスハンマーによるフーリエスペクトルで除した周波数応答関数（伝達関数）を自己組織化マップに適用した欠陥評価を行った。



図－1 試験体概要



(a) 深さ比較試験体

(b) 大きさ比較試験体

図－2 各試験体の欠陥配置

表－1 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメ ント	細骨 材	粗骨 材	AE 減水剤
25	44.0	40.4	4.5	149	339	733	1123	3.61

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (学生会員)

*2 長岡工業高等専門学校 機械工学科

*3 長岡工業高等専門学校 機械工学科准教授 博(工)

*4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体概要を図-1に示す。試験体は断面900mm×900mm、厚さ180mmの無筋スラブ型コンクリートである。試験体内部には内部欠陥を模した厚さ5mmの円盤状のスチレンボード製の内部空隙を模擬した人工欠陥を、深さや形状を変えて四方を水系で吊って埋設した。

各試験体の欠陥配置を図-2に示す。図-2(a)に示す深さ比較試験体には、直径400mmの人工欠陥を、深さ30mm、50mm、70mmおよび90mmの位置にそれぞれ埋設した。図-2(b)に示す大きさ比較試験体には、直径100mm、200mm、300mmおよび400mmの人工欠陥を深さ50mmの位置に埋設した。深さ比較試験体においては、隣り合う欠陥同士の相互影響が懸念されるが、野内ら²⁾により打撃対象欠陥の応答特性に対象欠陥以外の欠陥が及ぼす影響は無視できることが報告されているためここでは考慮しないものとする。

コンクリートの示方配合は表-1に示す通りであり、セメントには早強ボルトランドセメントを使用した。試験体は打設後7日間湿布養生を行い、その後は気中養生とした。各試験体の圧縮強度は、図-2(a)に示す試験体が、材齢7日で31.7N/mm²、図-2(b)に示す試験体が材齢7日で35.1N/mm²であった。

2.2 実験方法

(1) マイクロフォンによる検討

図-1に示すように試験体は両端部から50mmの位置を直径50mmの鋼管で支持した。打撃試験は、50mm間隔で実施した。各打撃点は図-1に示す座標で称することとし、例えば試験体中心部を打撃した場合の打撃点の名称はI9とする。打撃の入力にはインパルスハンマー(周波数範囲:0~8kHz、測定範囲:2200N、打撃面の直径:5mm)を用い、打撃音の測定にはマイクロフォン(周波数範囲:10Hz~20kHz)を用いた。マイクロフォンは測定者の手で持ち、打撃点からおよそ30mm離れた位置で測定した。また、比較のため、加速度センサー(周波数範囲:2kHz~10kHz、最大使用加速度:700m/s²)を用いて、打撃による表面振動の測定を併せて行った。加速度センサーは打撃点から35mm離れた位置に設置し、厚さ0.4mmの粘着テープを用いて試験体表面に密着させた。加速度センサーの設置位置は図-1を参照されたい。サンプリング周波数は25.6kHz、測定範囲は0~10kHz、データ数は2048とし、5回の打撃の平均値を測定値とした。インパルスハンマーとマイクロフォンより取得したデータはFFTアナライザーによって高速フーリエ変換し、周波数応答関数を算出した。

(2) 打撃装置による検討

本研究では少遊間部の劣化診断方法として、遠隔操作

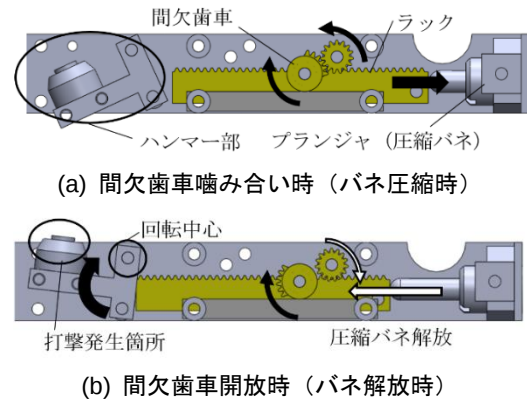


図-3 打撃装置の打撃機構

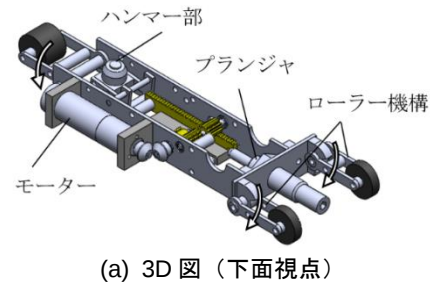


図-4 打撃装置の全体図

により少遊間部を移動させながら一定の時間間隔で打撃力を与える打撃装置の開発を行う。

遊間部の幅は構造物によって異なるが、幅25~35mmに対応できる機構を検討した。また、遊間部の横断方向の幅の変動に対応する機構についても検討を行った。

図-3および図-4に打撃装置の打撃機構および全体図を示す。図-4(a)のモーターの回転運動をマイタギヤ(歯数1:1のかさ歯車)によって回転軸を90度変え、間欠歯車の回転運動に伝える。この間欠歯車と噛み合うピニオンギアの回転運動をラックの直線運動に変換する。間欠歯車が噛み合う間にラックが図-3(a)の右方向に直線運動し、装置後部に取り付けられたプランジヤを圧縮する。間欠歯車の噛み合いが外れると、図-3(b)のように圧縮バネが開放され、ラックを逆方向に直線運動させる。ラック先端部がハンマー部に伝達して打撃とする。移動機構は遊間部の幅の変化に対応し、壁面間を移動可能とするために可動式のローラーを取り付けた。ローラー機構は、ばねによって両壁面を押し付けるように図-4(a)の下方向に押し付けられる。これにより壁面の幅の変化に対してローラー機構が突っ張ることによって対応できる。

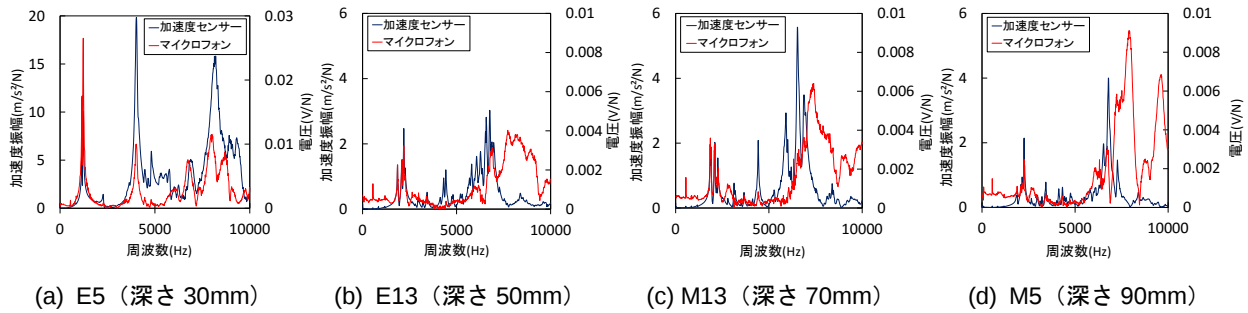


図-5 深さ比較試験体欠陥直上打撃時の周波数応答関数

実構造物の遊間部においては、打撃装置を可動式ワイヤーに吊るして移動させる。遊間部外側に支柱を設置し、可動式ワイヤーを遊間内に通す。ワイヤーを回転駆動することで打撃装置の横断方向の移動が可能となり、ワイヤーの設置高さを上下させることで、遊間内の全面で打音点検が可能となる。

3. 自己組織化マップを用いた欠陥評価手法の検討

3.1 欠陥中心部の周波数応答関数

図-5 に深さ比較試験体の各欠陥中心を打撃した際のマイクロフォンおよび加速度センサーで計測した周波数応答関数を示す。周波数応答関数とは、マイクロフォンあるいは加速度センサーによって得られたフーリエスペクトル（出力）をインパルスハンマーによるフーリエスペクトル（入力）で除したものである。いずれの欠陥中心部においても、マイクロフォンと加速度センサーの周波数応答関数の分布は同様の傾向を示しているが、マイクロフォンの周波数応答関数は加速度センサーの周波数応答関数に比べ波形のノイズが大きく、また卓越周波数での2次、3次ピークが明瞭としない。

3.2 自己組織化マップを用いた欠陥領域評価

(1) 自己組織化マップ

野内ら³⁾は、打撃位置の違いによって、同一欠陥領域上においても得られる周波数応答関数は異なることを指摘しており、特定の打撃応答特性に着目して欠陥評価を行うことは困難であることを指摘している。さらにインパルスハンマーと加速度センサーから得られた周波数応答関数を入力データとして、自己組織化マップ（以下、SOM）に適用することで欠陥領域を良好に評価可能であることが示されている。SOM とは、Kohonen によって提案された教師なしで学習を行う階層型ニューラルネットワークの一種であり、多次元データ間の類似性によって分類を行い二次元的に可視化することを可能にする。

そこで本研究では、加速度センサーを用いて取得した周波数応答関数に比べて多くのノイズが含まれているマイクロフォンで得られた周波数応答関数を用いて SOM による欠陥評価が可能かどうか検討した。

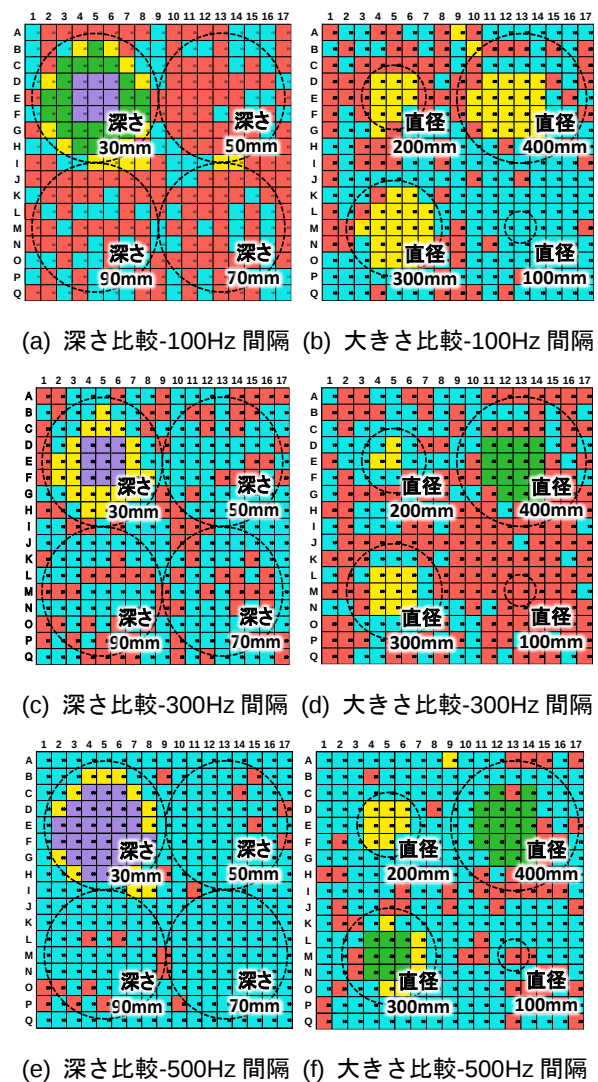
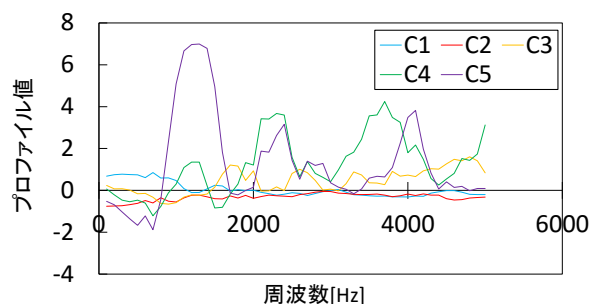


図-6 グレーディングマップ



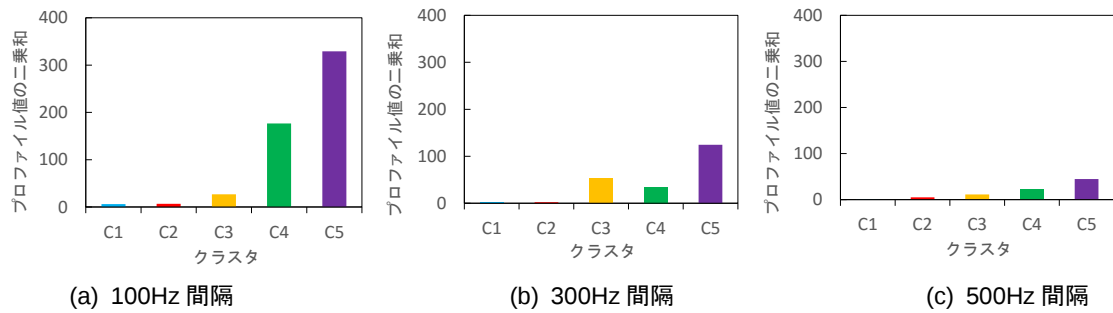


図-8 深さ・大きさ比較試験体における各クラスタの二乗和（周波数範囲 0~5kHz）

入力データには周波数応答関数を所定の間隔で積分した面積（以下、周波数応答面積と称する）を用いた。本実験におけるグレーディングマップの作成には Viscovery SOMine 7.0 を使用し、ノード数 2000、テンション（近傍半径）0.5、クラスタ数 5、クラスタ手法は凝集性のあるクラスタを算出する SOM-Ward に設定した。

(2) 周波数応答関数の積分間隔の検討

マイクロフォンで取得した周波数スペクトルにはノイズが含まれるため、ノイズの影響を考慮し、周波数応答面積を 100Hz、300 Hz、500Hz 間隔の 3 パターンで算出して検討を行った。例えば 100Hz 間隔で周波数応答面積を算出した場合、8kHz の周波数範囲の場合で 1 つの打撃点は 80 個のデータセットとなる。

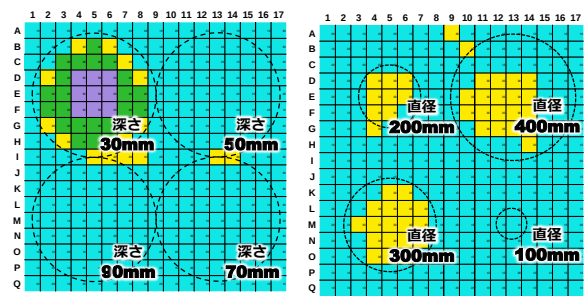
(3) 周波数応答関数の積分範囲の検討

マイクロフォンで取得した周波数スペクトルでは、5kHz 以上の周波数帯で波形の乱れがみられるため、SOM に適用する周波数応答関数の周波数範囲を、0~5kHz および 0~8kHz の 2 パターンとした。

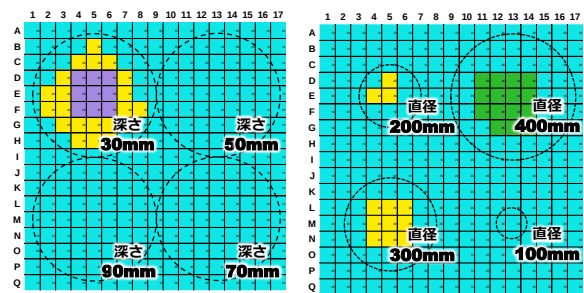
4. マイクとセンサーの欠陥検知率の各種検討

4.1 深さ比較試験体

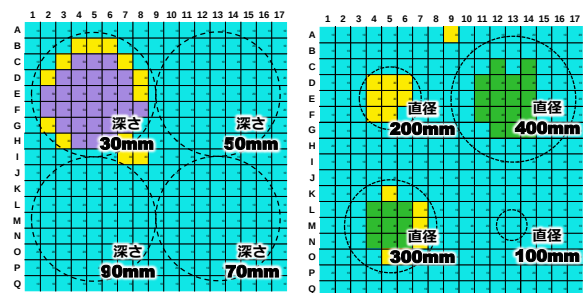
図-6(a), (c), (e)に、周波数範囲を 0~5kHz にした際の深さ比較試験体のグレーディングマップを示す。マップ中の色は、同色であれば同じクラスタに分類されていることを示す。図-7 に一例として 100Hz 間隔で積分した際の各クラスタのプロファイルを示す。ここでプロファイルとは、全打撃点の平均周波数応答面積分布に対する各クラスタに配置された打撃点の平均周波数応答面積分布の偏差を示したものである。図-7 よりクラスタ C1 およびクラスタ C2 は、他のクラスタに比べて周波数全域にわたり偏差が小さい。前述したようにプロファイルとはデータ全体の平均から各クラスタの平均の偏差であり、プロファイルが全域にわたり、偏差がゼロに近いクラスタは、クラスタ全体の平均を支配するデータの集合であるといえる。したがって本実験の場合は、健全部、あるいは欠陥部において打撃によるたわみ振動が生じず、健全部と波形が同一とみなせる領域がこれに相当する。



(a) 深さ比較-100Hz 間隔 (b) 大きさ比較-100Hz 間隔



(c) 深さ比較-300Hz 間隔 (d) 大きさ比較-300Hz 間隔



(e) 深さ比較-500Hz 間隔 (f) 大きさ比較-500Hz 間隔

図-9 C1 と C2 を同一化したグレーディングマップ

図-8 に、周波数範囲を 0~5kHz にした際の、深さ、大きさ比較床版における各クラスタのプロファイルの二乗和（以下、二乗和と称する）を示す。クラスタ C1 および C2 の二乗和は、100Hz、300Hz では特に他のクラスタに比べて非常に小さい値であり、健全部あるいは欠陥未検知部として同一のクラスタとみなすこととした。図-9(a), (c), (e)にクラスタ C1 および C2 を同一クラスタとしてみなした場合のグレーディングマップを示す。

図-9(a), (c), (e)より、深さ比較試験体では深さ 30mm の欠陥はいずれの積分間隔でも高い精度で検知できた。また、同一欠陥上でも複数のクラスタに分かれており、同心円状にクラスタが変化する傾向にある。これは、欠陥中心部から離れるに従い、打撃応答特性が変化するためであると考えられる。積分間隔が欠陥検知率に及ぼす影響については積分間隔を 300Hz にした場合では、他の積分間隔に比べて欠陥検知率が若干低下した。また、図-6(a), (c), (e)より、積分間隔を広くするほど赤色のクラスタ C2 に分類される打撃点数が減少した。このように、積分間隔は欠陥検知率に影響を及ぼすものと考えられる。なお、周波数範囲を 0~8kHz にした場合でも 0~5kHz の場合と同様の結果が得られた。

4.2 大きさ比較試験体

図-6(b), (d), (f)に大きさ比較試験体におけるグレーディングマップを示す。積分範囲を 0~5kHz にした場合、深さ比較試験体の場合と同様に、積分間隔が 300Hz の時に欠陥検知率が低下し、積分間隔を広げることで C2 に分類される打撃点数が低下した。

深さ比較試験体の場合と同様、図-9(b), (d), (f)にクラスタ C1 および C2 を同一クラスタとしてみなした場合のグレーディングマップを示す。深さ比較試験体では検知されなかった直径 400mm、深さ 50mm の欠陥が検知された。深さ比較試験体と大きさ比較試験体は、直径 400mm、深さ 50mm の同一条件の欠陥を有するが、グレーディングマップにおける結果が異なっている。図-6(b)の結果より、深さ 50mm 直径 200mm の欠陥まで検知されていることを鑑みれば、図-6(a)の深さ 50mm の欠陥は所定の位置に埋設されていない可能性があるが、確固たる原因は不明である。

両試験体における結果より、マイクロフォンによる欠陥検知では直径 200mm、深さ 50mm の欠陥が検知限界であると考えられる。なお、積分範囲を 0-8kHz にした場合、積分間隔を変化させることによって、積分間隔が 300Hz の際に他の組み合わせでは検知可能であった直径 200mm、400mm の欠陥が検知できなかった。

4.3 欠陥検知率の検討

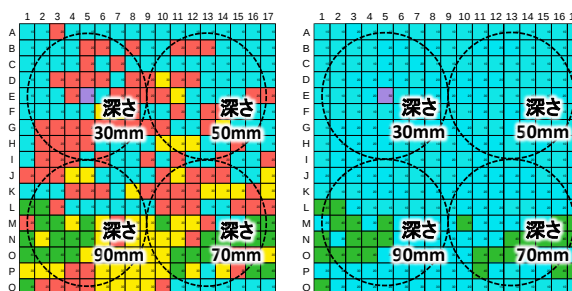
表-2 にマイクロフォンと加速度センサーの欠陥検知率を示す。欠陥検知率は式(1)から算出した。

$$\text{欠陥検知率(\%)} = \frac{\text{欠陥判定の打撃点数}}{\text{欠陥上の総打撃点数}} \times 100 \quad (1)$$

前述したように、積分間隔を 300Hz とした際の結果は他の 2 パターンに比べ欠陥検知率が大きく低下した。特に周波数範囲が 0~8kHz の場合では、他の積分間隔で検知できた欠陥直径 200mm、400mm の欠陥が検知できなかった。なお、積分間隔が 100Hz と 500Hz については、

表-2 欠陥検知率

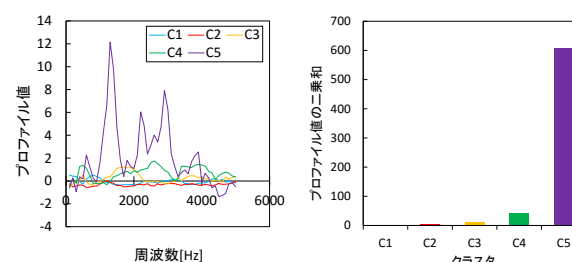
周波数範囲	積分間隔	欠陥検知率(%)									
		欠陥深さ[mm]					欠陥直径[mm]				
		30	50	70	90	全体	100	200	300	400	全体
5kHz	100Hz	91.1	0.0	0.0	0.0	22.8	0.0	88.9	76.0	40.0	56.2
5kHz	300Hz	66.7	0.0	0.0	0.0	16.7	0.0	33.3	36.0	33.3	33.7
5kHz	500Hz	88.9	0.0	0.0	0.0	22.2	0.0	88.9	60.0	37.8	50.0
8kHz	100Hz	73.3	0.0	0.0	0.0	18.3	0.0	88.9	36.0	35.5	41.2
8kHz	300Hz	71.1	0.0	0.0	0.0	18.3	0.0	0.0	36.0	0.0	11.2
8kHz	500Hz	71.1	0.0	0.0	0.0	17.8	0.0	77.8	52.0	66.7	62.5
センサー		95.6	0.0	0.0	0.0	23.9	0.0	77.8	84.0	71.1	75.0



(a) 修正前

(b) 修正後

図-10 グレーディング結果（打撃装置）



(a) プロファイル値

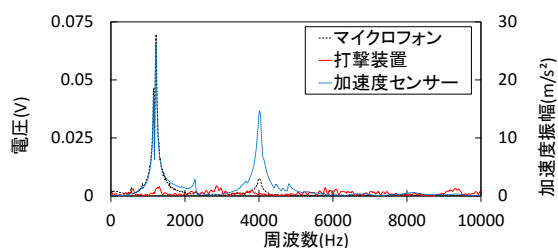
(b) 二乗和

図-11 プロファイル値と二乗和

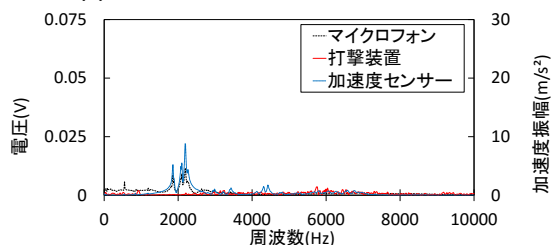
いずれの積分範囲でもほぼ同様の結果が得られた。また、加速度センサーの結果はマイクロフォンに比べ高い欠陥検知率を有しているという結果が得られた。このことは、図-5 に示したようにマイクロフォンで取得した周波数応答関数には、ノイズが多く含まれることに加え、加速度センサーの場合に比べて、2次、3次ピークが明瞭とせず、各打撃点のスペクトルの特徴的な部分が低減されたことが主たる要因であると考えられる。

5. 打撃装置による欠陥検知

作製した打撃装置に 2.2 節(1)で述べたマイクロフォンを取り付け、深さ比較試験体を対象に 2.2 節(1)で述べた方法で打撃試験を行った。なお、SOM に用いるデータは、加振スペクトルを考慮していない周波数スペクトルを用いた。図-10(a)に打撃装置によって得られたデータによるグレーディングマップ、図-11 には、各クラスタのプロファイル値と二乗和を示す。図-10(b)には図-11(b)の結果に基づき、C1~C3 を同一化したグレーディングマップを示す。

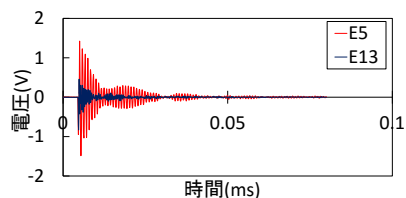


(a) 深さ比較試験体 E5 (深さ 30mm)

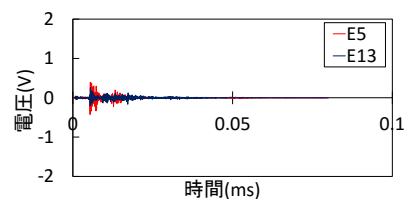


(b) 深さ比較試験体 E13 (深さ 50mm)

図-12 欠陥中心部におけるパワースペクトルの比較



(a) マイクロフォン



(b) 打撃装置

図-13 欠陥中心部における時刻歴応答波形の比較

図-11(b)に示すように E5 (欠陥深さ 30mm) のみが明らかな欠陥として検知された。また、クラスタ C4 もプロファイルにおける偏差が大きいが、クラスタ C4 に分類された打撃点がインパルスハンマーとマイクロフォンでは検知不可能であった欠陥上であることや、後述の加振力の影響を考慮すると、C4 に分類された打撃点は欠陥を検知したとはいえない。

図-12 に深さ比較試験体の打撃点 E5 (深さ 30mm 欠陥中心) および E13 (深さ 50mm 欠陥中心) における周波数スペクトルの比較を示す。また、図-13 に打撃点 E5 および E13 における時刻歴応答波形の比較を示す。図-12(a)に示すように周波数スペクトルでは、1500Hz 付近にいずれの測定方法でも卓越周波数が確認された。しかしながら、打撃装置の卓越周波数の大きさは他の 2 つに比べ微小なものであり、加振力の不足が影響していると考えられる。また、E13 においては、E5 で確認されたピークが確認されなくなり、これ以深の欠陥中心部でも同様の結果が得られた。時刻歴応答波形においても、マイ

表-3 ロードセルによる打撃力測定結果

	打撃力(N)					
	1	2	3	4	5	平均
インパルスハンマー	347	413	487	467	587	460
打撃装置	66.7	66.0	66.7	60.0	66.7	65.2

クロフォンに比べ打撃装置の波形の振幅は小さく加振力不足が影響していると考えられる。

以上の結果を踏まえて打撃装置およびインパルスハンマーによる 5 回の打撃力をロードセルで測定した。その結果を表-3 に示す。打撃装置の平均打撃力は 65.2N、インパルスハンマーの平均値は 460N であり、打撃装置の打撃力の約 7 倍であった。したがって、打撃点 E5 は最も振動しやすい箇所であるため欠陥にたわみ振動を生じさせることができ、図-12(a)に示したように特徴的な卓越周波数がわずかに現れたため、欠陥判定ができたと考えられる。今後は打撃装置の加振力を増加させ、打撃装置による欠陥検知精度を向上させることを目指す。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) インパルスハンマーとマイクロフォンを用いた SOM による欠陥検知では、周波数応答面積の積分間隔および積分範囲が、欠陥検知に影響を及ぼす。
- (2) 本実験の範囲内では、インパルスハンマーとマイクロフォンから得られた周波数応答関数を SOM に適用することで、深さ 50mm、直径 200mm までの欠陥検知が可能であった。
- (3) 本研究で開発した打撃装置では、埋設深さ 30mm、直径 400mm の欠陥の中心部のみ検知が可能であった。加振力不足が主たる要因と考えられ、今後加振力を増幅させる打撃機構の改良・検討を進める。

謝辞 本研究を実施するに際し、株式会社 NEXCO メンテナンス新潟 (株) に協力頂いた。ここに記して謝辞を表す。

参考文献

- 1) 石川裕一:凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の耐久性向上に関する研究,長岡技術科学大学博士論文, 2013
- 2) 野内彩可, 村上祐貴, 井山徹郎, 池田富士雄: 打撃による加振特性を考慮した周波数応答関数に基づくコンクリート内部の欠陥評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2133-2138, 2016
- 3) 野内彩可, 村上祐貴, 井山徹郎, 池田富士雄, 外山茂浩: 打撃試験に基づくコンクリート内部の欠陥評価に打撃位置が及ぼす影響,土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, Vol.34, pp.344-347, 2016