

# 論文 打音点検装置を用いた道路橋遊間部の打音点検法

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、道路橋遊間内部用の小型打音点検装置の開発および自己組織化マップを用いた欠陥検知手法の確立を目的としている。既往の研究で提案した打撃装置において課題であった動作音によるノイズや打撃面の不陸に起因する打撃のバラツキに対応するため、打撃機構を見直した。人工欠陥を埋設した試験体で遊間部を模擬し、改良した装置を用いて打撃試験を行った結果、埋設深さが 20mm の場合は、φ 200mm の人工欠陥まで検知可能であった。埋設深さが 30mm 以深の場合、遊間幅によっては反響音の影響を受け検知率が低下し、検知率の向上には反響音の影響を除去することが必要であることを示した。

**キーワード:** 遊間部, 打音点検, 自己組織化マップ, マイクロフォン, 反響音

## 1. はじめに

北陸沿岸地域では、海からの飛来塩分や冬季に散布する凍結防止剤による塩害が大きな問題となっている。道路橋遊間部に焦点を当てると、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に侵入し、遊間内部において著しく鉄筋腐食が進行する場合がある。道路橋遊間幅は 20mm~100mm 程度であり、点検者が立ち入ることは出来ず、目視点検や通常の打音点検等を実施することが困難である。現状では CCD カメラによる外観変状調査が行われているが、第三者被害に繋がるような浮きや剥離を発見することが難しい。

このような背景から、著者らは点検者が立ち入ることができない道路橋遊間部において、遊間部を打撃し、打撃音を収録する打撃装置を提案した<sup>1)</sup>。しかしながら、先行研究で提案した打撃装置は、歯車を用いた打撃機構であり、動作音によるノイズや打撃面の不陸による打撃のバラツキが課題であった。また、実際のコンクリート構造物の遊間部での検討は行っていなかった。そこで本研究では、先行研究で提案した打撃装置の打撃機構の見直しを行った。人工欠陥を埋設した試験体で模擬した遊間部に対し、改良した打撃装置を用いて打撃試験を実施し、コンクリート内部の欠陥検知精度について検討した。また、実橋梁遊間部での打撃試験を実施した。

## 2. 打撃装置の構成

図-1 に打撃装置の概要を示す。打撃装置は、ローラー機構を有するアームとねじりバネからなる突っ張り機構、および動力源であるソレノイドとハンマー部からなる打撃機構の 2 つで構成される。突っ張り機構においては、車体の前後に取り付けたアームと、その支持部に取

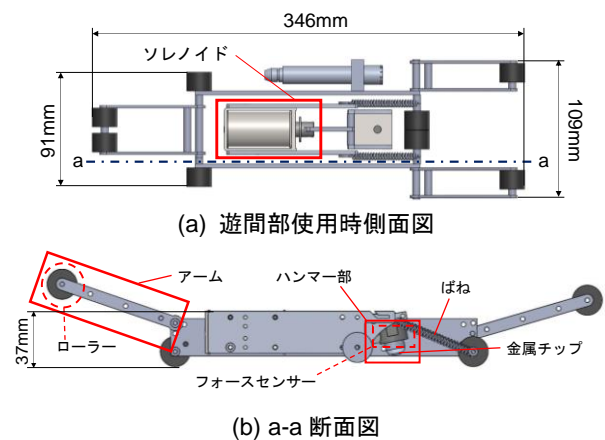


図-1 打撃装置の概要

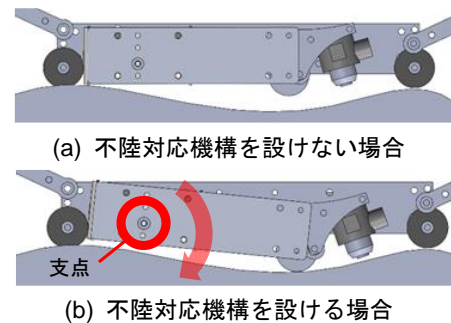


図-2 打撃装置の不陸対応機構

り付けたねじりバネにより遊間部における打撃時の安定性を確保し、アームの先端に取り付けたローラーにより遊間部における円滑な移動を可能にしている。打撃機構においては、電流を流すことによりソレノイドで発生する吸引力を、リンクによってハンマー部に伝達しハンマー部を振り下ろすことで打撃を行う機構となっている。ハンマー部はフォースセンサー(測定範囲:2224N)と金属チップ(打撃面の直径:5mm)で構成される。著者ら

\*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻 (学生会員)  
 \*2 長岡工業高等専門学校 電子機械システム工学専攻  
 \*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)

が先行研究で提案した打撃装置<sup>1)</sup>においては、遊間部の不陸の影響により打撃時にハンマー先端部と打撃対象面が十分に接触せず、加振力が不足する場合があった。また、打撃がなされていないにもかかわらず、自動車の走行音を打撃応答として収録してしまう問題もあった。本打撃装置では打撃部にフォースセンサーが取り付けられており、打撃力を測定することができるためマイクロフォンで取得されたデータが打撃によるものかどうか判定が可能になり、データの信頼性が大きく向上した。また、打撃の入力成分が測定できるため、打撃の周波数スペクトルを考慮した打撃応答特性（周波数応答関数）を取得することができる。

さらに、遊間部の不陸による不十分な打撃を抑制するため、以下の打撃機構の改善を行った。突っ張り機構と打撃機構を一体化する際、完全に固定すると、図-2(a)に示すように不陸部においてハンマー部の先端が壁面まで届かない場合が生じる。そこで、打撃機構を図-2(b)に示すように一つの支点で保持させ、図-1(b)に示すように壁面に向かうばねで押し付けた。これにより打撃機構がこの支点を中心に回転し、不陸部においてもハンマー部と壁面の距離を一定に保つことが可能となった。打撃音の測定にはマイクロフォン（周波数範囲：10Hz～20×10<sup>3</sup>Hz）を用いた。マイクロフォンは打撃装置に取り付け、打撃点からおよそ30mm離れた位置で測定した。

### 3. 実験概要

#### 3.1 試験体概要

##### (1) 小型試験体

4章で述べる遊間幅が打撃応答特性に及ぼす影響について検討するため、図-3に示す小型試験体を作製した。試験体内部には、内部欠陥を模した厚さ5mm、φ300mmのスチレンボード製人工欠陥を、深さ30mmの位置に埋設した。欠陥配置および支持方法は図-3に示す通りである。また、比較のため、人工欠陥を有しない試験体を作製した。ここで、人工欠陥を有する試験体を小型欠陥試験体、有しない試験体を小型健全試験体と称することとする。コンクリートの示方配合は表-1に示す通りであり、セメントには早強ポ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。

##### (2) 大型試験体

開発した打撃装置の欠陥検知精度を評価するため、図-4に示す大型試験体を作製した。試験体内部には、深さや直径を変えて人工欠陥を埋設した。欠陥配置は図-4(a)に示す通りであり、φ100mm、200mm、300mm、400mmの人工欠陥を埋設した。試験体は2体作製し、それぞれ埋設深さd=20mmおよび30mmとした。各試験体

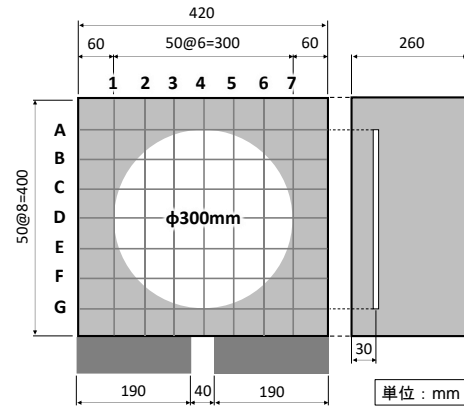
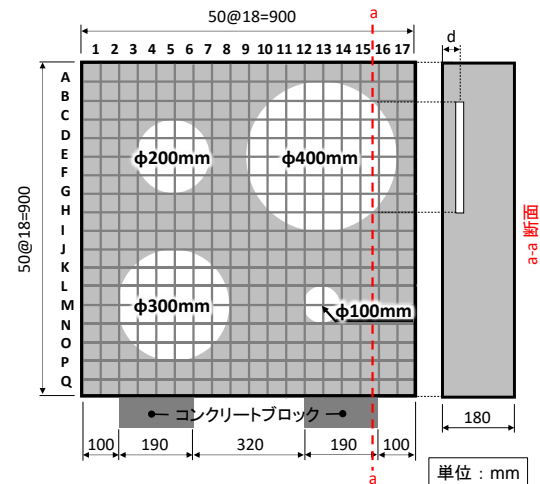


図-3 試験体概要（小型試験体）

表-1 コンクリートの示方配合（小型試験体）

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 <sup>3</sup> )				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	55	42	4.5	155	282	785	1093	2.82



(a) 試験体寸法および欠陥配置



(b) 試験体設置方法

図-4 試験体概要（大型試験体）

表-2 コンクリートの示方配合（大型試験体）

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 <sup>3</sup> )				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	44	40.4	4.5	149	339	733	1123	3.61

は、「大きさ比較試験体－欠陥埋設深さ d mm」と称することとする。また、大きさ比較試験体との比較のため、

人工欠陥を有しない健全試験体を作製した。コンクリートの示方配合は表-2 に示す通りであり、セメントには早強ポ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。

### 3.2 実験方法

#### (1) 小型試験体

欠陥試験体と健全試験体を、コンクリートブロックで支持して遊間を構成し、打撃装置を用いて打撃試験を行った。遊間部における打撃装置の移動は可動式ワイヤーを用いて行った。遊間部の外側に支柱を設置して、遊間内にワイヤーを通した。支柱のワイヤー設置部は回転駆動するため、上下および奥行き方向の移動が可能であり、遊間部全面を打撃することができる(図-4(b)参照)。

サンプリング周波数、測定範囲、データ数(以下、3条件)は、それぞれ  $25.6 \times 10^3 \text{ Hz}$ 、 $0 \sim 10 \times 10^3 \text{ Hz}$ 、2048 とし、3回の打撃の平均値を測定値とした。フォースセンサーで取得した入力データと、マイクロフォンで取得した応答データは、高速フーリエ変換し、周波数応答関数(伝達関数)を算出した。

#### (2) 大型試験体

遊間幅を 50mm および 70mm とし、上下および奥行き方向に 50mm 間隔で打撃試験を行った。各打撃点は図-4(a) 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。ただし、最外縁の打撃点は打撃装置の構造上打撃できないため試験は行っていない。なお、実験条件や測定条件は小型試験体に準ずるものとした。また、打撃装置で取得したデータとの比較を行うため、インパルスハンマーを用いた以下の検討を行った。打撃の入力にはインパルスハンマー(加振周波数範囲:  $0 \sim 8000 \text{ Hz}$ 、測定範囲: 2200N、打撃面の直径: 5mm)、打撃音の測定には打撃装置に取り付けたものと同じマイクロフォンを用いた。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。3条件は打撃装置による検討と同様であり、測定値は5回の打撃の平均値とした。また、本検討においても周波数応答関数を算出した。試験体を横置きにし、野内ら<sup>2)</sup>の先行研究と同様、両端から 50mm の位置を  $\phi 50 \text{ mm}$  の鋼管で支持した。

### 4. 遊間部における音の反響に関する検討

図-5 に、図中に示す各遊間幅において小型欠陥試験体の欠陥中心部打撃時に得られた周波数応答関数を示す。遊間幅は、装置の可動遊間幅を考慮し、図-5 に示す7パターンについて検討を行った。また、参考のため、インパルスハンマー(図中の凡例はハンマー)で小型欠陥試験体の欠陥中心部を打撃した際に得られた周波数応答関数のピーク周波数(以下、開放時一次ピーク周波数)

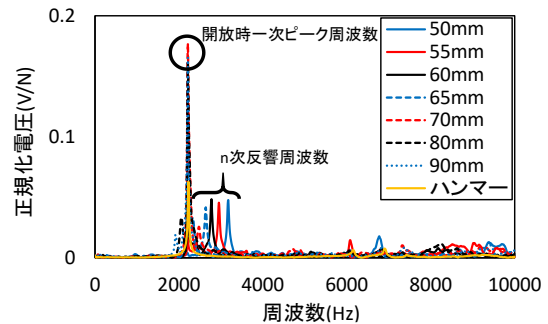


図-5 各遊間幅における小型欠陥試験体欠陥中心部打撃時の周波数応答関数

表-3 理論反響周波数と観測反響周波数

遊間幅 (mm)	理論1次反響周波数 (Hz)	観測1次反響周波数 (Hz)	理論2次反響周波数 (Hz)	観測2次反響周波数 (Hz)
50	3435	3180	6870	6780
55	3123	2950	6246	6080
60	2863	2780	5726	-
65	2642	2640	5284	-
70	2454	2480	4908	-
80	2147	2050	4294	-
90	1908	1930	3816	-

を併せて示した。同図に示すように、遊間部において打撃を行った場合、開放時一次ピーク周波数に近いピーク周波数に加えて、それとは異なるピーク周波数が確認された。これは遊間部壁面における音波の反射によるものであると考えられる。打撃によって発生した直接波と壁面で反射した反射波の間で生じた定常波の  $n$  倍周波数  $f_n$  (以下、 $n$  次反響周波数) は式(1)で表される。

$$f_n \text{ (Hz)} = \frac{\text{音速 (m/s)}}{\text{遊間幅 (m)} \times 2} \times n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

定常波が生じることで、特定の周波数成分の増幅や減衰が起こる。本研究においても、図-5 に示すように遊間部打撃時に特定の周波数成分のみが増幅される現象が確認された。表-3 に、式(1)より算出した理論  $n$  次反響周波数および図-5 において観測された観測  $n$  次反響周波数を示す。理論値の算出の際、音速は  $343.5 \text{ m/s}$  (気温  $20^\circ \text{ C}$  における音速) とした。理論値と観測値の間に多少の誤差はあるものの、全ての遊間幅において理論値と実測値はほぼ同様の値を示している。観測値と理論値の間に生じる誤差の要因としては、遊間幅の誤差が考えられる。また、観測反響周波数が開放時一次ピーク周波数に近づくにつれ、開放時一次ピーク周波数の振幅が増加し、離れるにつれ減少する傾向がみられるが、これは先に述べた定常波の増幅周波数と減衰周波数に起因するものであると考えられる。なお、小型健全試験体における観測一次反響周波数は、小型欠陥試験体における観測一次反響周波数と一致した。健全領域および欠陥領域を見誤らないためには、反響音等の欠陥特性によらないノイズを出来るだけ除外する必要がある。そのため、マイクロフ

オンの集音部を吸音性の高い材料で保護する等して、打撃による直接音のみを取得するような機構を開発することが、現状の打撃装置における今後の課題である。

## 5. 自己組織化マップを用いた欠陥評価手法の検討

### 5.1 自己組織化マップを用いた検討

野内ら<sup>2)</sup>は、加速度センサーとインパルスハンマーによって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を示してきた。

SOMに適用する入力データには、前述の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）を用い、周波数応答面積の積分間隔は100Hz、積分範囲は0～5000Hzとした。また、SOMの解析にはViscovery SOMine 7.0を使用し、ノード数2000、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。

### 5.2 グレーディングマップ

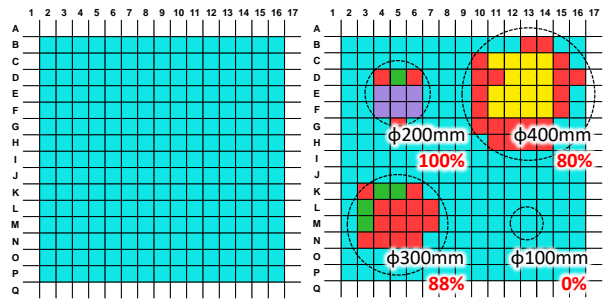
図-6に遊間幅を50mmとした場合に打撃装置による検討より得られた健全試験体および大きさ比較試験体-20mmのグレーディングマップを示す。図中には式(2)から算出した欠陥検知率(%)を併せて示す。

$$\text{欠陥検知率(\%)} = \frac{\text{欠陥判定の打撃点数}}{\text{欠陥上の総打撃点数}} \times 100 \quad (2)$$

マップ中の色は、各打撃点が分類されたクラスタを示すものであり、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に図-6に示す各クラスタのプロファイルおよびプロファイルの二乗和（以下、二乗和）を示す。プロファイルとは、全データの平均値に対する各データの偏差を示すものであり、本解析に用いた試験体の打撃点の多くは健全部であることから、全体の平均値は健全部に近づくと考えられ、偏差の小さいクラスタに分類された打撃点は、健全部であると考えられる。また、二乗和とは、各周波数帯におけるプロファイルを二乗し、総和を取ったものであり、プロファイルが小さいほど二乗和は小さくなる。二乗和は、各クラスタの偏差の大小を定量的に評価し、各クラスタに対して健全部および欠陥部の判定を行うために用いた。

図-7に示した二乗和より、クラスタ1（以下、C1：水色）を健全部とみなし、その他のクラスタは欠陥部とみなした。図-6(b)より、埋設深さ20mmの位置の人工欠陥についてはφ100mmを除き良好に検知できていることがわかる。このことから本打撃装置は、表層部の劣化領域については良好に検知できると考えられる。なお、埋設深さ20mmの位置の人工欠陥については、打撃応答



(a) 健全試験体 (b) 大きさ比較試験体-20mm

図-6 グレーディングマップ（遊間幅 50mm）

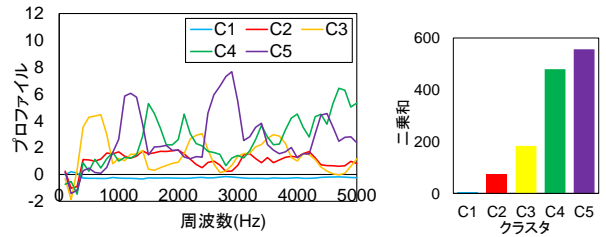
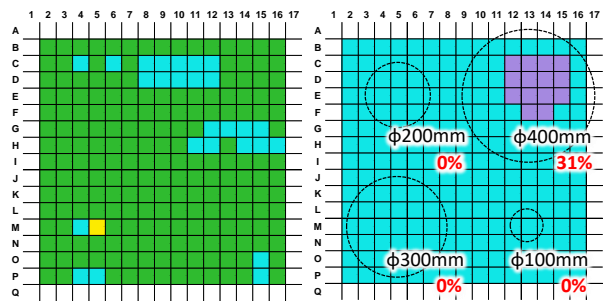
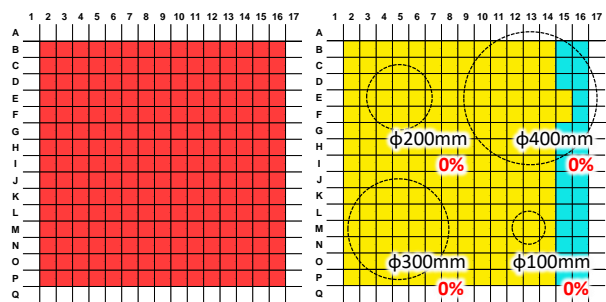


図-7 図-6の各クラスタのプロファイルと二乗和



(a) 50mm-健全試験体 (b) 50mm-大きさ比較 30



(c) 70mm-健全試験体 (d) 70mm-大きさ比較 30

図-8 グレーディングマップ（遊間幅 50mm, 70mm）

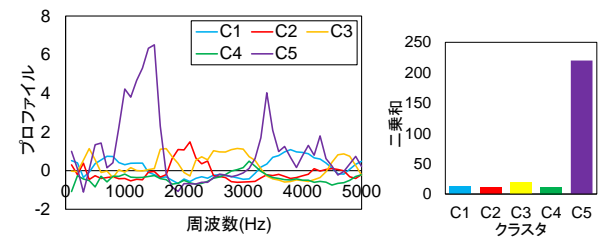


図-9 図-8の各クラスタのプロファイルと二乗和

が非常に大きく前述の音の反響の影響を受けなかったため、遊間幅70mmでの測定は実施していない。

図-8 に遊間幅を 50mm および 70mm とした場合の健全試験体および大きさ比較試験体-30mm のグレーディングマップ、図-9 に図-8 に示す各クラスタのプロファイルおよびプロファイルの二乗和を示す。前述の大きさ比較試験体-20mm については、SOM の解析対象群の中に非常に大きな特徴量をもつデータが含まれている場合、他のデータの特徴が現れにくくなり、欠陥領域であっても健全とみなされる場合がある<sup>3)</sup>。そのため大きさ比較試験体-30mm と健全試験体を SOM に適用しグレーディングマップを作成した。二乗和より、C5：紫色を欠陥部とみなし、その他を健全部とみなした。図-8 (b) および図-8(d) より、遊間幅 50mm の場合はφ400mm の欠陥中心部近傍の検知ができているが、遊間幅 70mm の場合は全く検知できていないことがわかる。ここで、図-10 に、遊間幅 50mm および 70mm において、φ300mm およびφ400mm の人工欠陥中心部(それぞれ M5, E13)、および遊間幅 70mm において健全試験体の M5 および E13 打撃時に得られた周波数応答関数を示す。参考のためインパルスハンマーを用いて打撃試験を行った際の周波数応答関数も併せて示す。遊間幅 50mm 時の周波数応答関数において、M5 は開放時一次ピーク周波数(インパルスハンマーを用いた打撃試験の一次ピーク周波数)付近にピークが現れていないことがわかる。前述したように小型欠陥試験体においても、同一パラメータの人工欠陥中心部打撃時における周波数応答関数では同様の結果が得られており、M5 の開放時一次ピーク周波数は遊間幅 50mm の条件下で反響により減衰される周波数であると考えられる。

次に、遊間幅 70mm 時の波形に注目すると、M5 および E13 において開放時一次ピーク周波数にピークが現れていることが分かるが、SOM による解析では欠陥領域として判別されなかった。これは、E13 については、遊間幅 70mm 時の健全試験体における一次反響周波数の振幅が大きく、開放時一次ピーク周波数が特徴として認識されなかったことが原因であると考えられる。M5 については、開放時一次ピーク周波数にピークが現れ、振幅も大きいので、SOM によって分類されなかった確固たる理由は現在検討中である。

以上の結果をふまえ遊間幅 70mm における健全試験体のデータを除外して SOM に適用した結果得られたグレーディングマップを図-11 に示す。また、図-11 に示す各クラスタのプロファイルとその二乗和を図-12 に示す。二乗和より、C4 および C5 を欠陥部とみなし、その他を健全部とみなした。健全試験体は C2 に分類された 1 点を除き全てが C1 に分類された。図-11(a)および図-11(b)より、遊間幅 70mm 時の大きさ比較試験体-30mm の欠陥検知率が向上した。

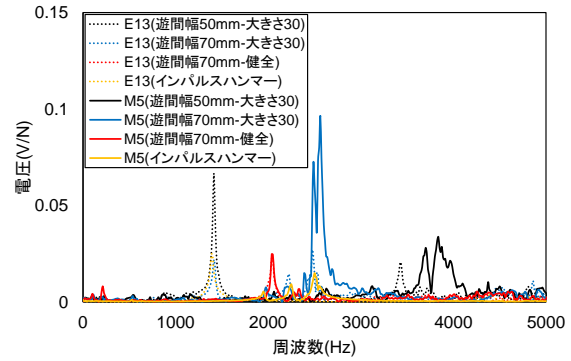
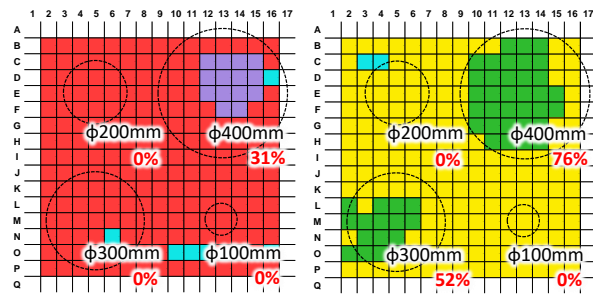


図-10 M5 および E13 打撃時の周波数応答関数



(a) 50mm-大きさ比較 30 (b) 70mm-大きさ比較 30

図-11 グレーディングマップ  
(遊間幅 70mm-健全試験体を除外)

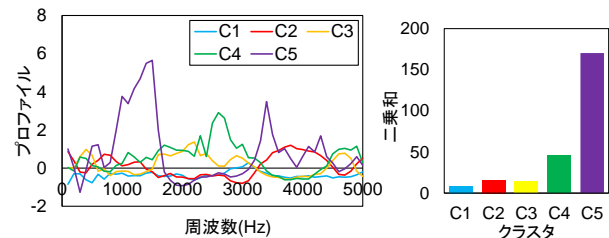


図-12 図-11 の各クラスタのプロファイルと二乗和

## 6. 実構造物への適用

### 6.1 実構造物への適用方法

実構造物においては、前述の大型試験体における打撃装置による検討と同様の方法を用いて測定を行った。実構造物において得られた測定データを、欠陥情報が既知である実験室で得られるデータとともに SOM に適用することで、欠陥部および健全部への分類を行うこととした。例えば、実構造物における一打撃点のデータが、実験室試験体の健全部と同じクラスタに分類された場合は、その打撃点を健全部であるとみなすものとする。

### 6.2 実構造物における測定

#### (1) 測定条件

開発した打撃装置を用いて、高架橋にて、補修後の遊間部および高架橋張り出し部下面(以下、高架橋下面)を対象に測定を行った。遊間部における測定領域は、奥行き方向には 100mm ピッチで 7300mm、高さ方向には下面から 200mm、250mm および 300mm の位置の 3 レーンで、上り方面側と下り方面側の 2 面、合計 438 箇所測定

を行った。高架橋下面においては、点検ハンマーで劣化が確認される箇所と健全部を対象とし、打撃装置を取り付けた栈木を手に持ち、測定箇所当てるようにして測定を行った。両測定とも1箇所につき打撃回数は3回とし、その他の条件は、大型試験体における打撃試験に準ずるものとした。

## (2) 測定結果

前述の通り、実構造物における測定データは、大型試験体から得られるデータとともに SOM に適用することで、欠陥部および健全部への分類を行うこととした。ここでは、大きさ比較試験体-20mm、健全試験体、遊間部測定領域および高架橋下面を解析対象とし、SOM に適用した。本解析により得られたクラスタリングマップを図-13、試験体のグレーディングマップを図-14、各クラスのプロファイルと二乗和を図-15 に示す。この二乗和および大型試験体のグレーディングマップより、C1 および C2 を健全クラスと判断した。図-13 のラベルは、健全部ケンゼンブ、劣化部レッカブの表記が高架橋下面、打撃位置の奥方向座標である数値表記が高架橋遊間部のデータを示す。図-13 より、高架橋遊間部のデータは全て C1、C2 に分類されており、健全であったと考えられる。次に、高架橋下面劣化部（劣化部レッカブと表記）は C5 に分類されており、これは図-14(a) に示す大きさ比較試験体-20mm の欠陥部と同じクラスである。また、健全部（健全部ケンゼンブと表記）は C2 に分類されており、これは図-14(b) に示す健全試験体の各打撃点と同じクラスである。以上より、実構造物において打撃装置を用いて測定したデータについても、欠陥領域が既知である試験体とともに SOM に適用することで、劣化部、健全部の分類を行うことができる。ただし、今回の解析では、大きさ比較試験体-20mm を教師データとした解析であり、表層から 20mm 以深の位置にある内部欠陥については評価対象外であることに留意されたい。

## 7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 遊間幅におけるマイクロフォンを用いた測定では、音の反響による特定の周波数の増幅および減衰が確認された。
- (2) 本研究で提案した打撃装置では、埋設深さ 20mm の場合  $\phi 200\text{mm}$  の人工欠陥まで検知が可能であった。埋設深さ 30mm 以深の欠陥については、遊間幅によっては反響音の影響により SOM による分類が適切に行われなくなる可能性が懸念され、それらのノイズの影響を除外できるような手法の検討が必要である。
- (3) 欠陥領域が既知である試験体とともに SOM に適用

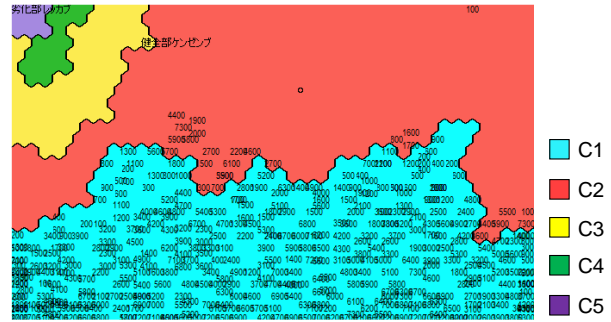
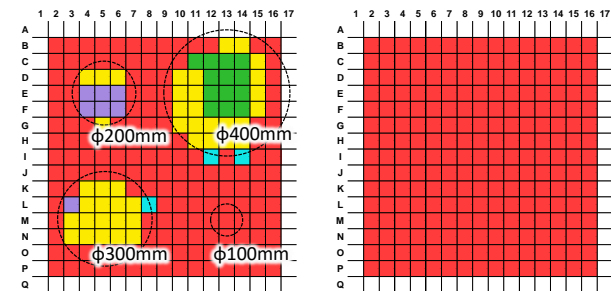


図-13 クラスタリングマップ



(a) 50mm-大きさ比較 20 (b) 50mm-健全試験体

図-14 グレーディングマップ

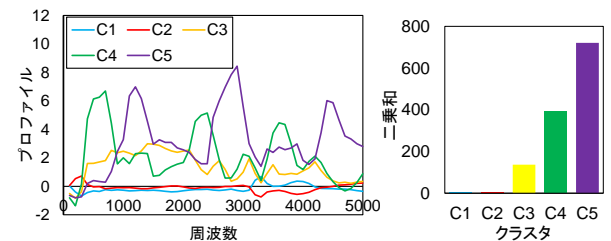


図-15 図-14 の各クラスのプロファイルと二乗和

することで、実構造物上で取得したデータについても劣化部、健全部への分類を行うことができた。

謝辞 本研究を実施するに際し、株式会社ネクスコ・メンテナンス新潟に協力頂いた。ここに記して謝辞を表す。

## 参考文献

- 1) 志田爲御, 高橋知也, 池田富士雄, 村上祐貴: 橋梁遊間の打音点検法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1891-1896, 2017.7
- 2) 野内彩可, 村上祐貴, 井山徹郎, 外山茂浩: 打撃応答特性を自己組織化マップに適用したコンクリート内部の領域判定, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp. 1879-1884, 2017.7
- 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, 2016.11