

複数の機械学習の手法を用いた打音診断（その3）

Impact acoustic method using multiple machine learning methods (Part 3)

キーワード

自己組織化マップ(SOM), 多層パーセプトロン(MLP), 打音法

黒田 千歳*, 歌川 紀之*, 安永 守利**

研究概要

コンクリート構造物の打音検査を客観的かつ効率よく実施するため、機械学習の手法を用いて標準欠陥模擬試験体の打音データを学習し、実構造物の判定に用いるシステムを開発してきた。このシステムを実構造物に適用して得られたいくつかの事例を示す。また、録画された動画により打音検査の結果を迅速に確認するため行った工夫についても付記する。

ABSTRACT

We have developed a system that utilizes machine learning methods to conduct impact sound inspections on concrete structures objectively and efficiently. This system is based on learning impact sound data from standard defect simulation test specimens and used for evaluating actual structures. We will present several examples of applying this system to actual structures. Additionally, we have made efforts to enable quick confirmation of impact sound inspection results through recorded videos, and these improvements will also be described.

1 はじめに

著者らは、コンクリート構造物の打音検査が客観的に、かつより効率よく行えるように、何種類かの大きさ、深さの空洞が埋め込まれた欠陥模擬試験体で得られる打音のデータと機械学習の技術を用いた打音法の開発を進めてきた。その概要については4), 5)に述べている。

ここでは、この手法によって実構造物でどのような結果が得られるかをいくつかの例について示す。また、実構造物で打音検査を行った場合、欠陥位置を特定するため打撃位置とその点での結果を照合する必要があるが、この作業を測定の様子を録画した動画により簡単に行う工夫を行ったのでそれについても合わせて述べる。

2 学習を行う欠陥模擬試験体

欠陥模擬試験体は、図-1に示す横幅2m、高さ1.5m、厚さ0.3mのコンクリート躯体に円形空洞として2.5cm厚さの発泡スチロールが埋め込まれたもので、空洞の直径(50,100,150,200,300mm)と深さ(10,20,40,60,80,100mm)の組み合わせは図-2に示すように20種類である。

欠陥模擬試験体の打音データは当社で打音検査のために開発された「健コン診断ポータブル」(図-3)のフード



図-1 欠陥模擬試験体

付きマイクで取得する。

マイクの波形より、FFTで求めた24kHz程度までの周波数の512個の振幅の値を機械学習の入力ベクトルとする。

欠陥試験体の右上の直径50mm、深さ10mmの欠陥は破損して空洞が露出しているため使用せず、学習するものは

* 技術センター 土木研究部, ** 筑波大学

欠陥19種類，健全1種類の合計20種類とする。

3 学習と判定に用いる機械学習

欠陥模擬試験体の周波数ベクトルの学習と判定のためこれまでいろいろな機械学習の手法を適用して検討した。主に用いたものは以下のものである。

- (1) 自己組織化マップ(Self-Organizing Map)：以下 SOM¹⁾ と称する
- (2) 多層パーセプトロン(Multilayer perceptron)：以下 MLP²⁾ と称する
- (3) サポートベクトルマシン(Support Vector Machines)：以下 SVM³⁾ と称する

欠陥と健全の2クラス分類のためには SVM と MLP を用いた。

また，20種類の欠陥と健全の多クラス分類のためには SOM と MLP を用いた。

この結果，20種類のすべての欠陥と健全の多クラス分類を行うためには MLP の精度が一番よく，回帰によって(欠陥の直径，深さ)の値も精度良く推定できるが，未学習の直径，深さの欠陥を与えた場合には全く見当外れの判定となることが多いことがわかった。これは未知の直径または深さを学習済みのものから外挿する場合も内挿する場合も同様であった。実構造物で判定を行う場合は未知の欠陥についても少なくとも学習したもののうち，一番近いものと判定される必要があり，20種類の欠陥と健全を学習した MLP で判定するのは適切ではない(参考文献5を参照)。

一方，欠陥と健全の2クラス分類では MLP も SVM も未学習のものについても判定の精度にはおおむね問題がなかった。また，SOM を用いた場合は他クラス分類でも未学習の直径，深さの欠陥は学習されたものの中の近い直径の欠陥と判断されることが確認された。

以下に，これらの欠陥模擬試験体の打音データを学習した機械学習による判定方法と，インパクトハンマと打撃音の振幅値比による物理的な推定部材厚さ(参考文献4を参照)による実構造物での判定例を示す。

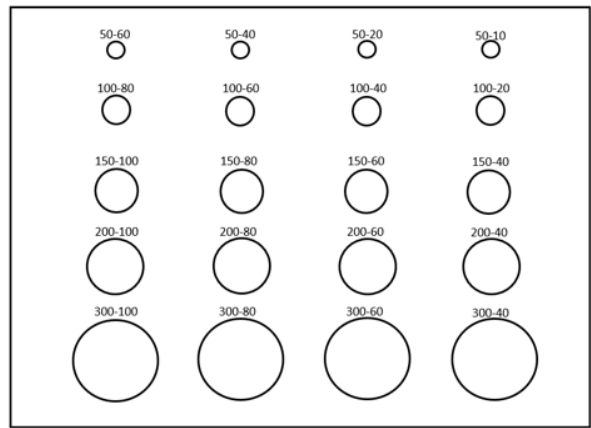
4 実構造物の判定例

4.1 道路橋梁床版

図-4は昭和48年竣工の道路橋梁の床版で，塩害および疲労を受け，鉄筋位置での剥離や土砂化が進行しており，2020年に床版の取替えが実施されたものである。土木研究所構造物メンテナンス研究センターが保有している。表面のアスファルトは剥がされている。表面は土砂化しておらず，鉄筋部分の腐食による剥離欠陥があるものと考えられる。

図の枠で囲んだ範囲を約20cm 間隔で縦6行，横8列を打撃して自己組織化マップを用いて判定すると，図-5のような結果が得られた。図では欠陥と判定された打撃点の位置に実寸に合わせて判定された欠陥の直径の円が描かれている。

円形空洞Φ-d (大きさ-深さ)



2000×1500×300(mm)

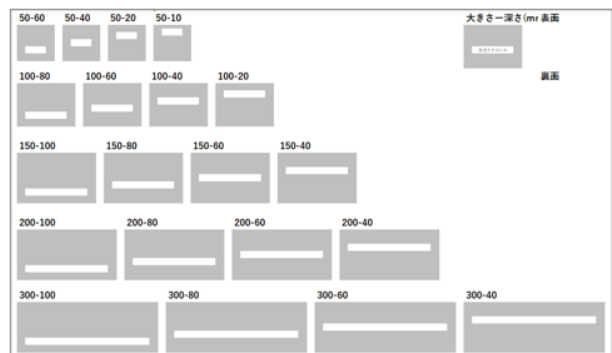
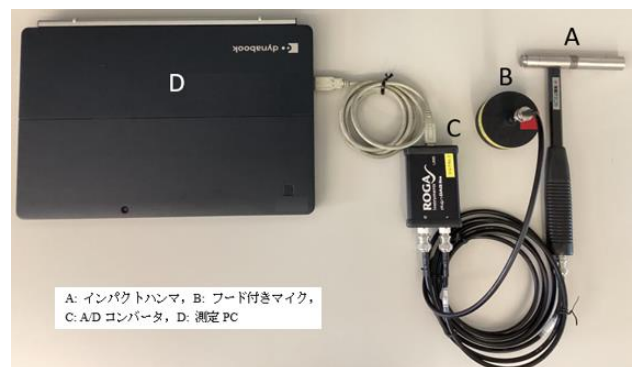


図-2 欠陥種類 直径(mm)-深さ(mm)



A: インパクトハンマ, B: フード付きマイク, C: A/D コンバータ, D: 測定 PC

図-3 健コン診断ポータブル



図-4 試験体

例として，直径300mm，深さ80mm と判定された打撃点(赤丸)での自己組織化マップでの対応したニューロンを

示すと図-6のようになり（赤がマイクの周波数、緑がニューロン）、円形空洞試験体で学習された周波数を持つ欠陥とよく対応していることがわかる。この床版の鉄筋のかぶりは75mmであり、推定結果と合致する。もし、判定結果が学習されたものとは異なる周波数を持つ欠陥の場合は、このようにニューロンとの比較により確認することができる。

また、健全と考えられる点については概ね直径50mm 深さ20mmと判定されているが、マップ上では全て健全との境界付近にあり健全と判定してよいものであった（図-7）。この床版は厚さ195mmであり、学習した欠陥模擬試験体の健全部300mmとは判断されない。

4.2 切り出し PC 析

図-8は昭和40年から平成17年まで40年間共用され、塩害により撤去されたPC箱桁橋の主桁である。大きなひび割れも入り、激しく損傷している。

図-9に供試体の桁下端のハンチ部分のSOMによる判定結果（上）と健コン診断ポータブルによる推定部材厚さ（下）を示す。推定厚さは、厚さが小さいものを赤、大きいものを緑が濃くなるよう塗り分けている。

打音点は4×9の格子状である。厚めに推定された点がSOMでは概ね健全部と判定されている。実際に計測された波形の周波数と該当するSOMのニューロンのベクトルを比較すると図-10のようになる。同じ欠陥に対応するニューロンでもいくつかのパターンが学習されており、計測された波形に該当するものが選ばれているので欠陥は適切に判定されていることがわかる。

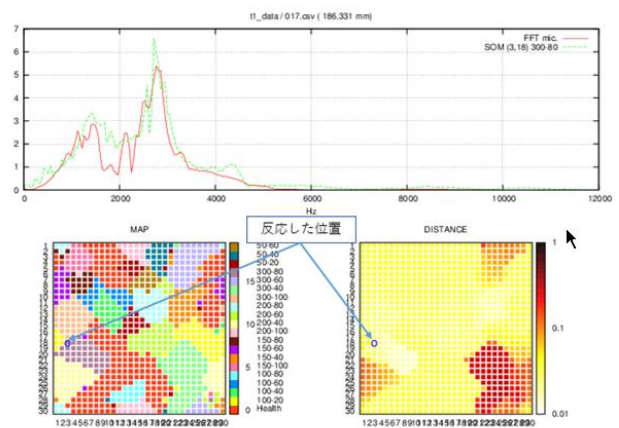
また、供試体の上部は図-11に示す通りハンチとなっており、健全部厚さが30cm以上あるため、SOMで健全部として学習されたものが対応していると考えられる。

4.3 ボイラ室壁面

図-12は海上自衛隊横須賀基地の厚生センター（昭和46年築）のボイラ室の壁面である。図-13にこの壁面を打音して得られた推定部材厚さを示す。厚さが小さいものを赤、大きいものを緑が濃くなるよう塗り分けている。



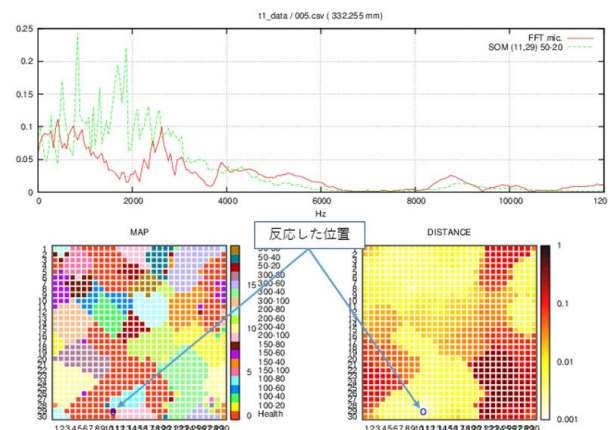
図-5 欠陥種類 直径(mm)-深さ(mm)



自己組織化マップでの位置

自己組織化マップの各ニューロンとの距離（白いほど近い）

図-6 自己組織化マップでの 300-80 に対応したニューロン



自己組織化マップでの位置

自己組織化マップの各ニューロンとの距離（白いほど近い）

図-7 自己組織化マップでの 50-20 に対応したニューロン



図-8 切り出し PC 析供試体

健全部	健全部	健全部	健全部	健全部	健全部	健全部	健全部	健全部
200-60	健全部	200-80	健全部	200-80	200-60	健全部	100-60 D	健全部
200-60	200-60 A	健全部	200-60	200-80	200-80	200-80	200-60 C	健全部
健全部	健全部	健全部 B	健全部	200-60	200-60	200-60	200-60	100-40
235	337	382	407	220	416	322	448	407
155	69	74	61	64	54	63	230	446
139	78	110	49	38	46	47	149	278
410	73	137	63	49	55	68	204	153

図-9 切り出し PC 析供試体

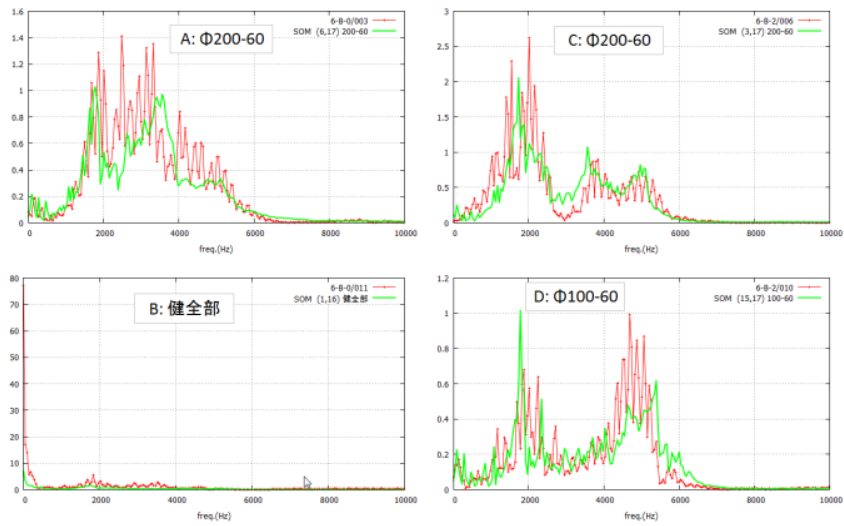


図-10 打音周波数（赤）とニューロン（緑）の比較



図-11 切り出しPC桁供試体



図-12 ボイラ室の壁面

推定部材厚(mm)																
355	214	188	361	341	253	367	140	125	105	83	123	203	224	302	228	346
342	189	330	301	469	310	226	169	216	216	218	245	192	314	187	349	410
356	276	365	336	354	197	322	131	248	234	231	267	250	273	272	327	356
240	431	444	323	333	288	292	164	254	221	228	210	534	174	311	155	197
293	261	203		273	353	355	177	250	354	407	216	203	75	202	270	238
316	534	372	508	275	371	107	250			394	608	292	415	380	214	278
250	346	270	352	324	263	174	259			241	383	227	256	236	422	310

図-13 推定部材厚さ(mm)

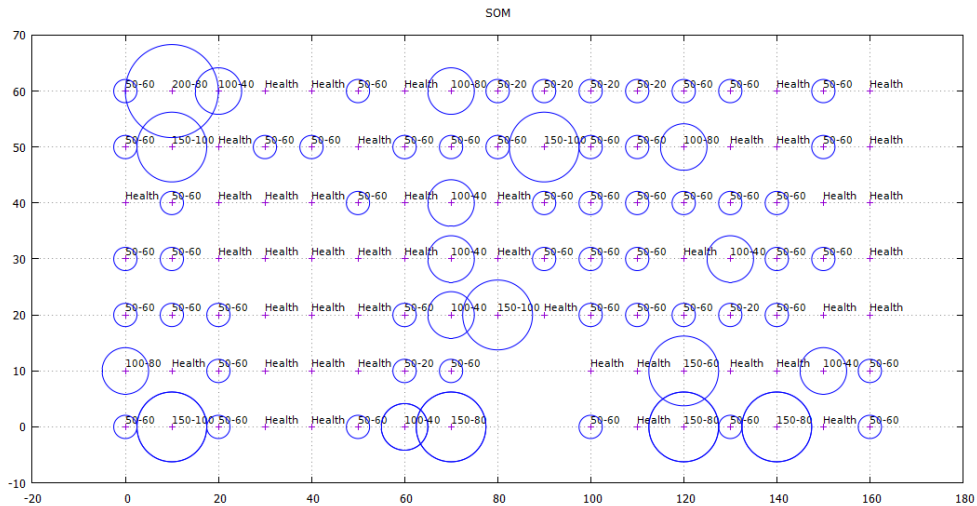


図-14 自己組織化マップ SOM による判定結果

図-14は自己組織化マップ SOM を用いて判定した打撃点の位置に、判定された欠陥の直径を実寸で示した円が描かれている。

この壁は厚さが265mmあり、内側にはかぶり50mm、外側にはかぶり86mmの鉄筋があることがわかっている。

推定部材厚さと SOM による判定結果を比べると、打撃ごとの推定厚さがあまり対応していないところは、外側の鉄筋の腐食による浮きがあって、そこでは深さ約180mmとなるため、SOM では学習されていないため判定できなかった可能性がある。一方、中央縦方向とその上部右側、壁面上部左側、壁面下部右の中央付近の推定厚さが薄い部分は SOM でも欠陥となっており、対応していることがわかる。



図-15 叩き点検と厚さ評価の結果

4.4 汽水発電所の揚炭棧橋 RC 床版

図-15は汽水発電所の揚炭棧橋の RC 床版・梁である。海面に近い塩害による鉄筋の腐食に伴う浮きが生じており、足場を用いた点検や補修が実施されている。一般的な RC 構造物に比較して鉄筋のかぶりが大きいいため、通常の叩き点検では浮きの判定が難しい。ここでは、床版を支えるコンクリート梁の側面の調査を実施した例を紹介する。対象とした梁の長さは4.5m、高さ1m、幅1.2mである。図には叩き点検の結果と健コン診断ポータブルでの推定部材厚さを梁に記入している。また、それぞれの打撃点の推定部材厚さと自己組織化マップ (SOM) , サポートベクターマシン (SVM) の結果を表-1に示す。

図-15に示すように、叩き点検からは、中心から左側に浮きがあり、右側は健全であることがわかる。推定部材厚さを見ると左側の浮いている箇所の厚さは200mmを超えており、健全な右側の300mm以上と比較するとあまり差異はなく、深い位置の浮きであるかまたは狭い浮きであることが推定される。SOM の判定は直径150mm、深さ50mmの欠陥、直径150mm、深さ80mm、直径200mm、深さ60mmなどとなり、深い位置の浮きであることがわかる。また、SVM の結果はほぼ経験のある点検者が判断した結果と同様な判定となっており、SVM を用いた方法により欠陥と健全を判定できることがわかった。

5 動画を用いた打音測定

コンクリート構造物の打音調査を行う場合、通常は調査する範囲であらかじめ格子状に打撃点を定めてチョークでマーキングしたり、あるいはランダムに打撃して異音が生じる箇所を探してチョークで印をつけたりする。大したことではないが、現場でマーキングするのは結構手間がかかったり、あとで結果を確認するとき不正確であったりする場合もある。

健コン診断ポータブルで打音調査を行うときにも、インパクトハンマとフード付きマイクで両手がふさがり、一人で打撃点の記録もおこなうのはなかなか大変なことが多い。

そこで、WEBカメラで打撃の様子を録画し、健コン診

表-1 推定部材厚さと自己組織化マップ(SOM), サポートベクターマシン(SVM)の結果

測定点	推定部材厚 (mm)	SOM判定	SVM判定	人による判定	SOMとの不一致	SVMとの不一致
1	184	200-60	欠陥	欠陥		
2	243	150-60	欠陥	欠陥		
3	230	150-60	欠陥	欠陥		
4	165	200-60	欠陥	欠陥		
5	265	150-60	欠陥	欠陥		
6	208	150-80	欠陥	欠陥		
7	301	150-60	健全	欠陥		x
8	232	200-60	欠陥	欠陥		
9	155	200-60	欠陥	欠陥		
10	283	150-60	欠陥	欠陥		
11	211	150-80	欠陥	欠陥		
12	260	Health	欠陥	欠陥	x	
13	216	150-60	欠陥	欠陥		
14	292	150-80	欠陥	欠陥		
15	236	150-60	欠陥	欠陥		
16	326	150-60	欠陥	健全	x	x
17	275	Health	欠陥	健全		x
18	481	Health	健全	健全		
19	340	150-60	健全	健全	x	
20	348	150-60	健全	健全		
21	315	Health	健全	健全		
22	323	Health	健全	健全		
23	292	150-60	健全	健全	x	
24	382	150-60	健全	健全		
25	362	Health	健全	健全		
26	323	200-100	欠陥	健全	x	x
27	350	Health	健全	健全		
28	414	150-60	健全	健全	x	
29	351	Health	健全	健全		
30	309	150-60	健全	健全	x	
31	407	Health	健全	健全		
32	371	150-60	健全	健全	x	
33	353	Health	健全	健全		

断ポータブルの結果を合わせて表示する簡易的な工夫を行ったので、これについて報告する。

5.1 測定の準備

調査範囲全体を見渡すことができる位置に WEB カメラを三脚などで固定し、健コン診断ポータブルで打撃を行っていく。WEB カメラの録画を行うプログラムは健コン診

断ポータブルで調査を実施する PC で起動しておく。

録画された動画から打撃位置を特定するので、インパクトハンマには打撃面での位置がわかるような色のついたテープや目印を付けておく。録画中は、なるべく打撃しているインパクトハンマが隠れないようにする。

5.2 打撃点の追跡

録画した動画より、インパクトハンマの位置をオプティカルフロー⁶⁾の画像処理アルゴリズムにより追跡する。動画を再生しながらインパクトハンマの位置を画面でクリックすると特徴点として追跡される。再生していくとだんだんハンマの位置とずれて行くので、ときどき再生を停止して特徴点の位置を修正する。健コン診断ポータブルの打撃したタイミングの動画のフレームが記録されているので、打撃した瞬間まで再生を飛ばして位置を指定することもできる。

5.3 実行例

5.3.1 例 1

例1は健コン診断ポータブルの部材厚推定の校正用の厚さ50mmの正方板を録画したものである。

推定部材厚さが図-16、SOMの結果が図-17に示されている。推定部材厚さは板の中心付近では実際の厚さ50mm程度であるが、それ以外は板の支持条件が異なり振動が小さいため50mmより大きな値となっている。また、大きな薄板の場合は固有振動によりいくつかの卓越周波数を持つ振動となり、SOMで学習したものと一致しないが、推定部材厚と同様に画像上の打撃点ごとに表示することができる。図-18は打撃点の時間ごとの軌跡を示している。

5.3.2 例 2

例2は同じく校正用の厚さ150mmの正方板の結果である。

厚さがあるため、50mmの場合とは異なり、打撃位置にかかわらず実際の厚さ150mmに近い値となっている。

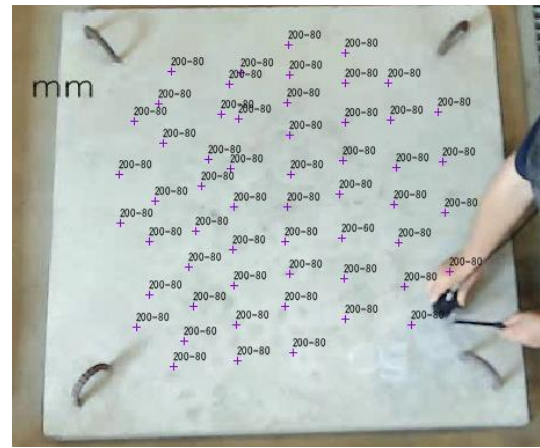


図-17 厚さ 50mm の正方板 SOM

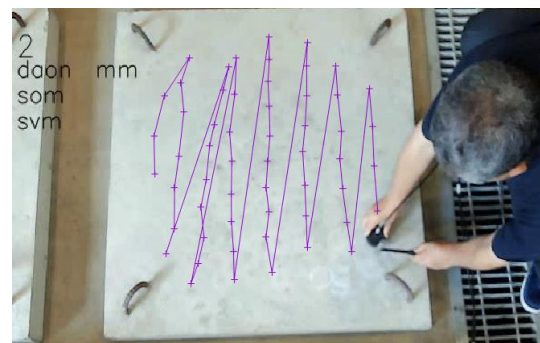


図-18 打撃の軌跡

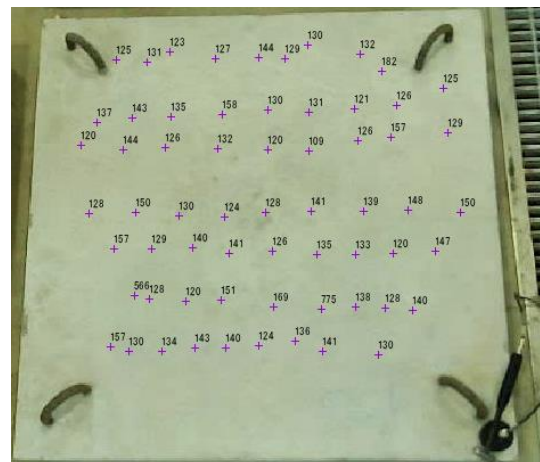


図-19 厚さ 150mm の正方板 推定部材厚さ

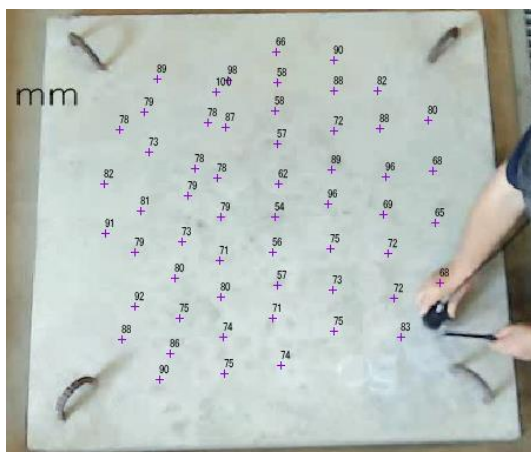


図-16 厚さ 50mm の正方板 推定部材厚さ

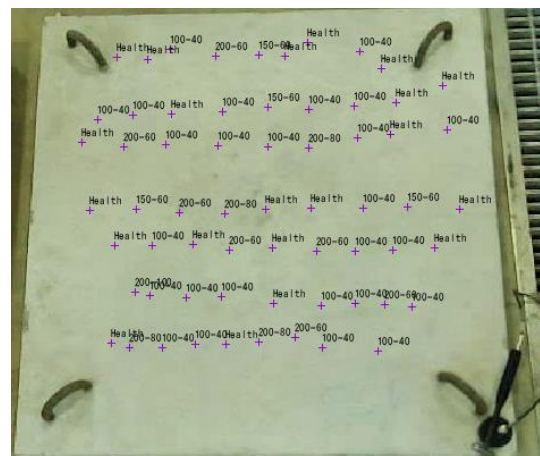


図-20 厚さ 150mm の正方板 SOM

5.3.3 例3

例3は斜めの剥離欠陥を模擬した試験体で、図の左端で表面より250mm、右端で25mmの斜めの剥離斜面が埋め込まれている。

図-22はこの剥離欠陥の左側を健コン診断ポータブルでランダムに打撃して測定された推定部材厚である。等高線を重ねて表示しているが、左側で約200mmの深さ、図の右側で約100mmの深さまで浅くなる様子を推察することができる。図-23にはSOMによる判定結果を示す。左側で健全、右側で大きさ200mm、深さ100mmなどと判定されているのがわかる。

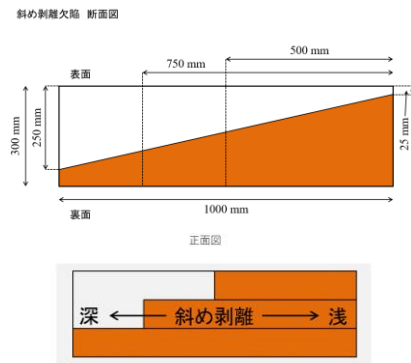


図-21 斜めの剥離欠陥

6 まとめ

いろいろな直径、深さの欠陥模擬試験体の打音データを何種類かの機械学習の手法で学習し判定する方法を、実際のコンクリート構造物に適用して得られた結果を示した。

測定の事例では詳しく触れられていないが、欠陥模擬試験体の20種の欠陥と健全による判定にはSOMを、欠陥か健全かの判定にはSVMとMLPを用い、合わせて振幅値比による物理的な推定を行う方法の妥当性を多くの事例で確認している。とはいえ、判定結果の正当性を確認することは実構造物では困難な場合が多いが、今後も測定の事例を増やして検証を行っていくつもりである。

謝辞

国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センターには切り出し供試体をご提供頂いた。また、海上自衛隊横須賀基地とJ-POWER（電源開発株式会社）には施設の調査についてご協力頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tevno Kohonen, "Self-Organizing Map (Second Edition)," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995
- 2) Rosenblatt, Frank, "Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms", Washington DC: Spartan Books, 1961
- 3) Comparing support vector machines with Gaussian kernels to radial basis function classifiers, IEEE Trans. Signal Processing, Vol.45, No.11, pp.2758-2765, 1997
- 4) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利: 複数の機械学習の手法を用いた打音診断, 佐藤工業研究所報, No.46, pp.18-25, 2021
- 5) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利: 複数の機械学習の手法を用いた打音診断(その2), 佐藤工業技報, No.47, pp.21-26, 2022
- 6) Braski Gary, Kaehler Adrian: Opencv コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識 松田晃一訳, 2012



図-22 斜めの剥離欠陥 推定部材厚さ(mm)



図-23 斜めの剥離欠陥 SOM