

論文 自己組織化マップを用いた打音点検の欠陥検知精度に影響を及ぼす打撃特性の抽出

大越 悠生^{*1}・村上 祐貴^{*2}・井山 徹郎^{*3}・陽田 修^{*4}

要旨：本研究は、打音点検実務経験者 17 名を対象に、人工欠陥が埋設されたコンクリート壁面試験体を用いて欠陥検知精度測定試験および打撃特性測定試験を実施し、打撃特性が欠陥検知精度に影響を及ぼす影響評価を行った。また、測定した打撃特性を入力データとし、自己組織化マップを用いて打音点検の欠陥検知精度に及ぼす打撃特性の抽出を試みた。その結果、欠陥探索時（探索フェーズ）では、打撃力、ハンマの接触面積など打撃スイングに関する打撃特性が重要であり、欠陥の領域同定時（同定フェーズ）では、打撃距離間隔、打撃時の移動速度など叩き方に関する技能が重要であることが示唆された。

キーワード：打音点検、打撃特性、暗黙知、自己組織化マップ

1. はじめに

笹子トンネル事故を契機に、道路構造物等の点検については、H25.9 に道路法が改正された。この改正により、トンネル、道路橋は 5 年に 1 回の頻度で近接目視による点検が法的に義務付けられた。近接目視では、内部欠陥の存在は把握できないため、触診や打音点検等を併用することで、より正確な診断を行うことも明記された。このように打音点検は、既存構造物の維持管理において重要な位置付けにあるが、官能試験であることから、点検精度は点検者の技能レベルに左右される¹⁾。

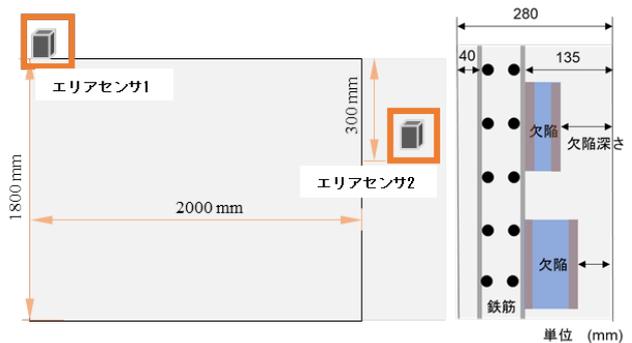
林らはこれまで打音点検実務者の暗黙知であった打撃特性を、各種センサを用いて測定し、欠陥検知率と打撃特性の関連性について検討を行った。その結果、打音点検は、欠陥を探索するフェーズと欠陥領域を同定するフェーズに区分され、各フェーズで要求される打撃特性は異なることを示した²⁾。一方で、打音点検に関連する打撃特性は複数あり、欠陥検知精度向上に資する打撃特性を抽出するまでには至らなかった。

属人化された熟達点検者の技能の標準化には、各熟達点検者の技能の中から共通技能を発見し、形式知化する必要がある。各熟達者から抽出された技能は多次元のビッグデータになる。そこで本研究では、各種センサを用いて測定した実務打音点検者の打撃特性の中から、自己組織化マップを用いて欠陥検知精度に影響を及ぼす打撃特性の抽出を試みた。

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、長さ 2000mm



(a) 正面図 (b) 断面図
図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの計画配合

粗骨材の最大寸法 [mm]	水セメント比 [%]	細骨材率 [%]	空気量 [%]	スランプ [cm]	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	12.0	149	339	733	1123	3.61

表-2 人工欠陥

パラメータ	
欠陥深さ (mm)	10, 20, 50, 60, 70, 90
欠陥領域 (mm ²)	10000, 40000, 90000, 160000

×高さ 1800mm×厚さ 280mm のコンクリート壁型パネルである。試験体の詳細は参考文献 1)を参照されたい。

試験体の計画配合を表-1 に示す。計画配合は同一であるが製作日が異なる。セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、材齢 7 日時点での圧縮強度はそれぞれ 33.2N/mm², 40.1N/mm² であった。本パネルを用いた打音試験は今後も継続することから、人工欠陥の埋設位置情報については、記述を控える。埋設した人工欠陥のパラメータを表-2 に示す。人工欠陥の埋設深さは 10～

*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 環境都市工学科教授 博(工) (正会員)

*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 (正会員)

90mm であり、6 水準とした。また、欠陥領域は 4 水準、アスペクト比は 1:1 または 1:2 と設定した。試験体には、大きさ、アスペクト比の異なる人工欠陥を、埋設深さを変えて複数個埋設している。使用した試験体は 2 体であり、使用する試験体は実験の工程上、被験者によって異なるが、2 つの試験体に埋設された欠陥は同一であり、深さは同一で埋設位置のみが異なる。表-3 に示す No.1 の被験者で 2 つの試験体の打音点検（3.1 章で述べる欠陥検知率測定試験と同様の試験方法）を実施した結果、欠陥検知率はそれぞれ 75%、72%であった。このことから試験体の違いが測定結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。

2.2 被験者

被験者は打音点検の実務経験を有する 17 名である。被験者の年齢の範囲は 20~60 代で、打音点検の経験年数は 5 年未満が 8 名、5~10 年未満が 6 名、10 年以上が 3 名である。

3.打音点検技能測定試験

3.1 欠陥検知率の測定

人工欠陥を埋設したコンクリートパネルに対して、制限時間を設け打音点検を実施し、欠陥と判断した領域にチョーキングを行う。試験終了後、チョーキングの状況をデジタルカメラで撮影し、その画像からチョーキング面積等を算出し検知精度の評価を行った。被験者は実務で普段使用している点検ハンマを使用し、打音試験を行った。点検時間は 7 分 30 秒および 3 分の 2 水準で実施し、すべての被験者が点検時間 7 分 30 秒、3 分の順に測定を行った。なお、7 分 30 秒の測定終了後、欠陥埋設位置を被験者に伝えていないが、被験者が自身のチョーキング結果を記憶している可能性があるため、点検時間を 3 分とした試験は、7 分 30 秒の測定から 1 週間以上の期間を空けて試験を行った。

3.2 打撃特性の測定

打撃特性測定試験は欠陥検知率の測定試験と同時に実施した。打撃特性試験では打撃位置、打撃力、打撃時間間隔、コンクリート面とハンマの接触面積、打撃圧力を測定した。打撃力は、著者らが用意した 1/4 ポンドの点検ハンマのヘッド部に取り付けた加速度センサ（感度：0.05[mV/(m/s²)], 分解能：0.4[m/s²], 周波数範囲：0.4~10000[Hz]）から時刻歴波形を取得した。なお、加速度センサは点検用ハンマのヘッド部側面に直径 5mm のねじ穴を開け、加速度センサを取り付けたアルミ角棒をねじで固定し、その後エポキシ樹脂で補強した。各被験者の打撃した位置座標を取得するため、試験体に 2 台のエリアセンサ（操作角度 270 度、走査時間 25msec、角度分解能 0.250 度または 0.125 度、検出距離 20m）を設置した。

表-3 検知率測定試験結果

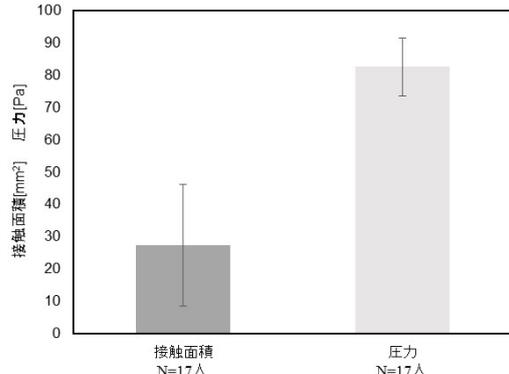
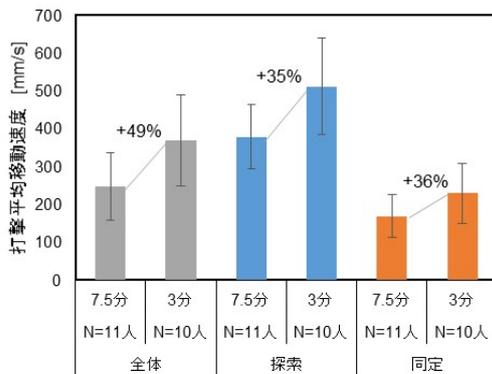
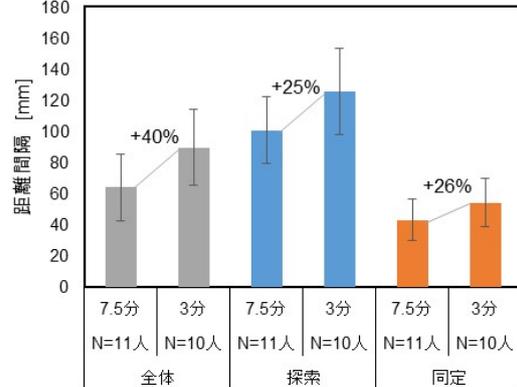
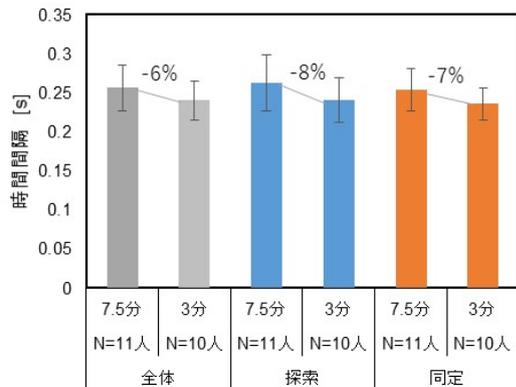
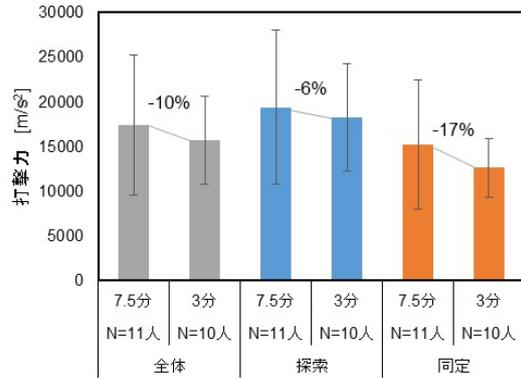
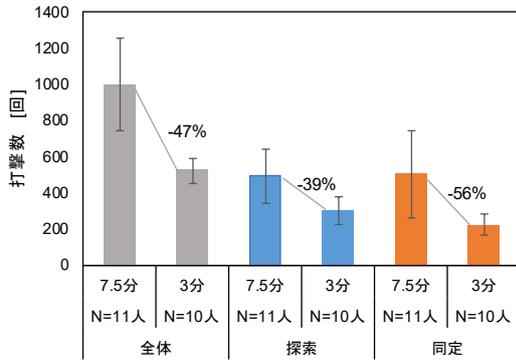
	点検時間：7分30秒		点検時間：3分	
	欠陥検知率	欠陥検知個数	欠陥検知率	欠陥検知個数
No.1	75.0%	8/9	58.4%	6/9
No.2	59.9%	6/9	59.3%	6/9
No.3	56.1%	5/9	62.8%	6/9
No.4	63.5%	6/9	65.6%	7/9
No.5	65.0%	6/9	45.4%	6/9
No.6	66.0%	6/9	56.7%	5/9
No.7	64.1%	6/9	43.0%	5/9
No.8	48.3%	5/9	57.7%	5/9
No.9	53.6%	5/9	21.7%	4/9
No.10	51.4%	5/9	51.2%	5/9
No.11	66.9%	6/9	欠測	欠測
No.12	52.2%	6/9	42.5%	5/9
No.13	51.7%	5/9	57.2%	6/9
No.14	49.1%	5/9	欠測	欠測
No.15	66.9%	6/9	59.3%	5/9
No.16	49.3%	5/9	39.7%	4/9
No.17	53.0%	7/9	60.0%	7/9
平均値	58.4%	6/9	52.0%	5/9

エリアセンサから照射される走査線が物体によって遮断されることにより、エリアセンサから物体までの距離と角度を計測することができる。エリアセンサの設置位置を図-1 に示す。エリアセンサは試験体左上端と試験体右側中段に設置している。事前の検証により、点検ハンマの打撃角度によっては、エリアセンサと点検ハンマヘッド部の間に被験者の手や点検ハンマの柄の部分が入り、1 台のエリアセンサでは座標取得が困難であったことから、エリアセンサは 2 台設置した。また、上記試験とは別に打撃時の点検ハンマの接触面積、打撃圧力を高圧フィルム（瞬間圧測定範囲：50~130[MPa], 厚み：105±10 μm）を用いて測定した。試験体底面から 200mm, 900mm, 1600mm の高さに幅 100mm、長さ 300mm の高圧フィルムを両面テープで貼り付け、被験者は各フィルムに対して 10 回程度、打音点検技能測定試験と同一のハンマで打撃した。試験終了後、高圧フィルムをスキャナでデータを取り込み、コンクリート面とハンマの接触面積、打撃圧力を求めた。なお本試験では、著者らが準備したハンマではなく、被験者が普段実務で使用しているハンマを用いて測定を行った。

4.測定結果

4.1 打音点検精度

各被験者の欠陥検知個数と欠陥検知率を表-3 に示す。なお、No.11, No.14 は実験の都合上、制限時間 3 分の打撃特性試験を実施できなかった。表-3 の欠陥検知個数とは、試験体に埋設した 9 つの欠陥のうち、被験者が発



(a) 打撃回数 (b) 打撃力 (c) 打撃時間間隔 (d) 打撃距離間隔 (e) 打撃平均移動速度 (f) 打撃時の接触面積と圧力

図-2 打撃特性の時間変化

見した欠陥の個数である。欠陥検知率は式(1)より算出した。式中の検知した面積は、欠陥領域上にチョーキングされた面積の総和であり、誤判定面積は健全部にチョーキングされた面積の総和である。

$$\text{欠陥検知率}[\%] = \frac{\text{検知した面積}}{\text{欠陥総面積} + \text{誤判定面積}} \times 100 \quad (1)$$

表-3に示すように、点検時間が7分30秒から3分に短縮したことで、約60%の被験者は欠陥検知率が低下し、その低下量は平均で6.4%であった。また、点検時間が7分30秒の場合では、欠陥検知率の最高値と最低値は75.0%、48.3%であったことに対し、点検時間が3分の場合には65.6%、21.7%であった。打撃欠陥検知個数は測定時

間の減少により、平均で1個減少した。被験者が検知することができなかった欠陥の多くは埋設深さが90mm~120mmの深層の欠陥で、大きさが小さいほど検知できていない傾向にあった。このように、多くの被験者で検知率が低下した原因は、点検時間が短くなり、打撃回数等の打撃特性が変化したことが考えられる。次節では打撃特性の時間変化について詳述する。

4.2 打撃特性

点検時間が3分および7分30秒における各被験者の打撃特性の平均値を図-2に示す。打撃回数を除く各打撃特性の平均値は、被験者毎の打撃特性の中央値を平均化した。図中のエラーバーは標準誤差である。

図中に示す探索と同定とは、林らの論文²⁾を参考に、打音点検の工程を、欠陥を探索するフェーズ(以下、探

索フェーズと称する)と欠陥の領域を判定するフェーズ(以下、同定フェーズ)に区分し、打撃特性を整理した結果である。具体的には探索フェーズを、欠陥を発見し、チョーキングする直前までの打撃、同定のフェーズをチョーキング開始直後から同一の欠陥のチョーキングを終了するまでの打撃とした。被験者の中には欠陥領域を同定する際に一度にチョーキングする被験者や一つの欠陥のチョーキングを完了する前に別の欠陥を探索した被験者がいた。これらに該当する被験者を区分不可能とした。区分可能と区分不可を比較するとフェーズ区分可能の欠陥検知率が高い傾向にあることが明らかとなったことから、打撃を各フェーズに区分することが出来ない被験者6名は検討の対象外とした。なお、図-2(f)に示した打撃時の接触面積と圧力は、3.2節で述べたように感圧シートを10回打撃して得られた結果であり、フェーズを分類できる試験ではないことに留意されたい。

図-2に示した結果から全体の打撃特性は測定時間の影響を受けていることが分かり、特に打撃回数、打撃距離、打撃平均移動速度が変化していた。また、探索と同定フェーズにおいて打撃特性の変化量は異なっていたことから、以降は探索と同定フェーズに区別して考察を行う。図-2(a)の打撃回数に着目すると、測定時間の減少に伴い両フェーズともに減少したが、特に同定フェーズの打撃回数の減少が顕著であり、56%減少した。次に図-2(b),(c)の打撃力、打撃時間間隔に着目すると、点検時間の短縮による影響は小さく、6%~17%の低下であった。図-2(d),(e)の打撃距離間隔、打撃平均移動速度は点検時間の減少に伴い増加する傾向にあった。ここで、打撃平均移動速度は打撃距離間隔を打撃時間間隔で除したものである。打撃距離間隔は探索フェーズに比べて同定フェーズの方が7分30秒で約60mm、3分で約70mm小さい。打撃距離間隔は点検時間の短縮に伴い探索と同定フェーズともに25%程度増加する傾向にあった。また、打撃移動速度も探索と同定フェーズともに35%程度増加していた。以上の結果より、本実験の範囲内では点検時間が短くなることで変化が大きい打撃特性は、打撃回数、打撃距離間隔および打撃移動速度であり、これらが時間的制約により生じる打音点検精度の低下の主たる要因であると考えられる。

図-2(f)打撃時の接触面積および圧力を示したが、圧力の変動係数が12%であったことから被験者間でバラつきが小さい傾向にあった。一方、接触面積は変動係数が77%であったことから被験者間でバラつきが大きいことが分かる。接触面積の最低値は9.7mm²であり、最高値は91.6mm²であった。

表-4 SOM入力データ

入力データ	属性項目
打撃数	回数
打撃力	平均値,中央値,変動係数
打撃時間間隔	平均値,中央値,変動係数
打撃距離間隔	平均値,中央値,変動係数
打撃平均移動速度	平均値,中央値,変動係数
接触面積	平均値,中央値,変動係数
打撃圧力	平均値,中央値,変動係数

5.打音点検技能の抽出

5.1 自己組織化マップ

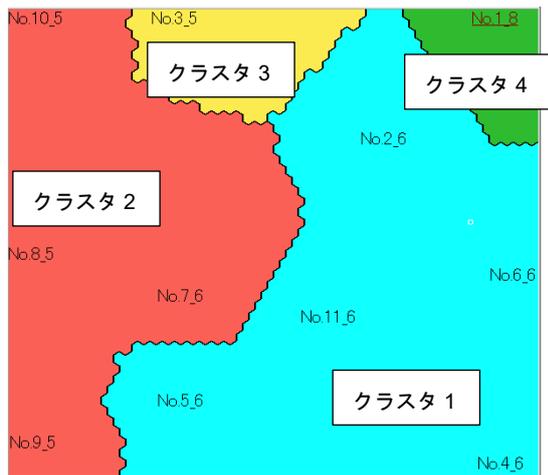
打音点検技能を構成する打撃特性は多次元であり、それらが複雑に関連している。そこで、各被験者の打撃特性を網羅的に利用し、多次元データ間の類似性をもとにクラスタリングを行うことが可能な自己組織化マップ(SOM)を用いて打音点検技能の抽出を試みた。

SOMによるクラスタリングマップの作成にはViscovery SOMine 7.0を使用し、野内らの研究を参考にノード数2000、テンション(近傍半径)0.5、とした³⁾。クラスタ数は被験者数を考慮し、本研究においては4とした。入力値には表-4に示す各打撃特性を使用した。解析は探索フェーズと同定フェーズに区分して実施した。ただし、打撃の接触面積と圧力については前述したように、各フェーズに分類できるデータではないので、各フェーズで入力データは同じである。なお、解析に使用した被験者の打撃特性は探索フェーズと同定フェーズを区分可能であった11名である。

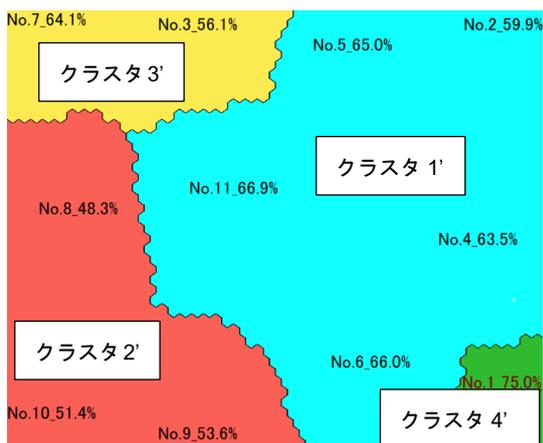
5.2 SOMによる分類評価

SOMは、教師無し学習法であることから、各クラスタの合理的な意味付けは解析者が行うことになる。本解析では打音点検の欠陥検知精度向上に影響する打音点検技能の抽出を目的としていることから、各クラスタの意味付けの指標として、探索フェーズでは点検時間7分30秒の欠陥検知個数、同定フェーズでは点検時間7分30秒の欠陥検知率を用いることとした。なお、本研究ではこれらの指標を用いて各被験者を上位、中位(2クラスタ)、下位に分類し、各クラスタの打撃特性について評価することを想定し、クラスタ数を4つとした。

図-3にSOMのクラスタリングマップを示す。図-3(a)は探索フェーズの結果であり、図中のラベルは被験者No.と欠陥検知個数を示している。図-3(b)は同定フェーズの結果であり、図中のラベルは被験者No.と欠陥検知率を示している。クラスタ毎に色分けしているが、前述した通り、各フェーズの解析は別々に実施していることから、同色のクラスタであっても全く別のクラスタであることに留意されたい。



(a) 探索フェーズ



(b) 同定フェーズ

図-3 フェーズごとの結果

まず図-3 (a) に示した探索フェーズのクラスタリングマップでは、欠陥検知個数が 8 個の被験者がクラスタ 4 を形成し、他のクラスタに属する全ての被験者の欠陥検知個数は 5 個または 6 個であった。このことから卓越した探索技能を有しているクラスタ 4 に属している No.1 と他の被験者に分類することができた。

次に図-3 (b) に示した同定フェーズのクラスタリングマップでは、欠陥検知率の低い下位 3 名である No.8, No.9, No.10 に着目すると、3 名の被験者がすべてクラスタ 2' を形成した。また、検知率が最も高かった No.1 の被験者がクラスタ 4', 欠陥検知率が 60% 程度の被験者がクラスタ 1' を形成していた。一方、欠陥検知率が 64.1% の被験者 No.7 は欠陥検知率が比較的低い被験者 No.3 と同一のクラスタであった。これは、No.7 は No.3 に比べて欠陥検知個数が多かったことから、No.3 に比べて探索フェーズでの技能が高く、欠陥検知率に差異が生じたと解釈した。以上のことから、図-3 (b) のマップは欠陥検知率との相関があると判断した。SOM は教師無し学習法であり形成されたクラスタが解釈不能であれば、SOM に入力する変数の取捨選択や、変数の重みづけを変更する。本解析では上述の通り、形成されたクラスタの解釈

表-5 各フェーズにおける重要打撃特性 (降順)

探索フェーズ		同定フェーズ	
属性項目		属性項目	
大項目	小項目	大項目	小項目
打撃回数	回数	打撃回数	回数
接触面積	変動係数	打撃平均移動速度	中央値
打撃圧力	中央値	打撃距離間隔	中央値
打撃圧力	平均値	打撃平均移動速度	平均値
打撃力	平均値	打撃距離間隔	平均値
打撃力	中央値	接触面積	平均値
接触面積	中央値	接触面積	中央値
接触面積	平均値	打撃力	平均値
打撃距離間隔	平均値	打撃力	中央値
打撃平均移動速度	平均値	打撃圧力	平均値
打撃平均移動速度	中央値	打撃圧力	中央値
打撃距離間隔	中央値	打撃圧力	変動係数
打撃力	変動係数	打撃平均移動速度	変動係数
打撃距離間隔	変動係数	打撃距離間隔	変動係数
打撃平均移動速度	変動係数	打撃力	変動係数
打撃時間間隔	平均値	打撃時間間隔	変動係数
打撃時間間隔	中央値	打撃時間間隔	中央値
打撃時間間隔	変動係数	打撃時間間隔	平均値
打撃圧力	変動係数	接触面積	変動係数

に、ある程度の合理性が得られたため、変数の取捨選択や変数の重みの変更は行わなかった。

5.3 打音点検精度に影響する打音点検技能の抽出

表-5 は図-3 のクラスタリングマップの作成に際し、SOM によるクラスタリングの際に影響の高い打撃特性順に並べたものである。探索フェーズにおいてはハンマの接触面積、打撃圧力、打撃力をはじめとした力学的な打撃特性が上位に位置している。一方、同定フェーズにおいては、移動速度や距離間隔など叩き方に関する打撃特性が上位に位置している。このように、表-5 の結果から、重要な打撃特性は両フェーズで異なることが示唆された。なお、打撃回数は、両フェーズにおいて最も重要な打撃特性であった。

各フェーズの重要打撃特性を抽出し、作成したレーダーチャートを図-4 に示す。ここで、重要打撃特性は表-5 の上位 5 項目を用いた。ただし、平均値と中央値は同一の打撃特性として、中央値を用いることとした。図中の数値はそれぞれの評価指標において最も値が高かった No.1 の被験者のクラスタ 4 またはクラスタ 4' の各打撃特性で正規化している。

探索フェーズにおいて図-4 の打撃回数に着目するとクラスタ 4 とクラスタ 2 は同程度であったが、クラスタ 3, 4 は 0.5 以下の値となった。接触面積の変動係数についても同様の傾向がみられる。一方で、打撃力はクラスタ 4 とクラスタ 1 が同程度の値で、クラスタ 2 が 0.42 と最も低い値を示した。接触面積の中央値についてはクラスタ 4 が卓越した値であり、他のクラスタ群は 0.4 以下の結果となった。以上のことから探索フェーズにおいて、

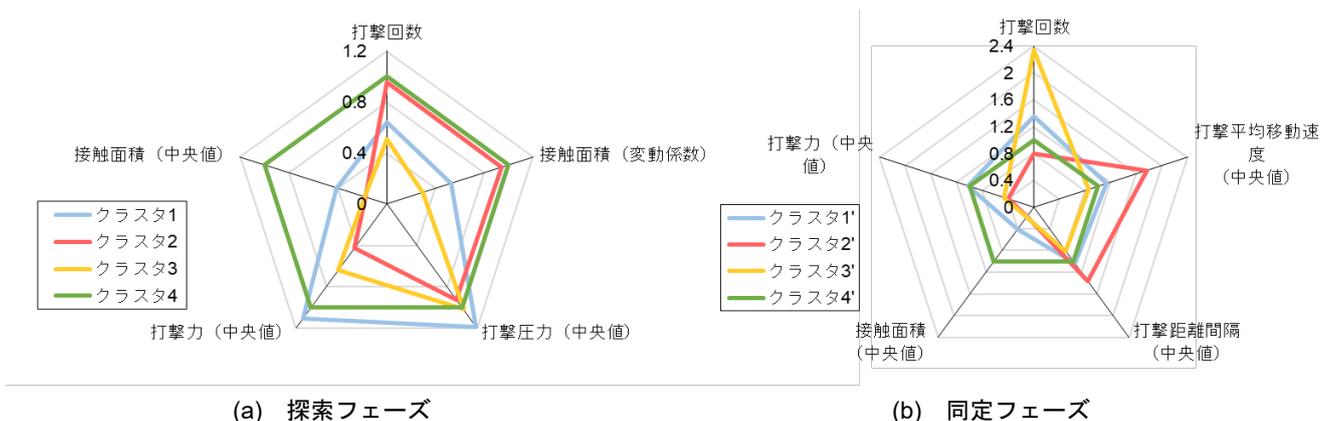


図-4 打音点検精度に影響を与える打撃特性

クラスタ2に属する被験者は打撃力と接触面積の打撃特性を改善することで、欠陥の探索精度が向上する可能性が考えられる。クラスタ1に属する被験者はハンマの接触面積を向上させる打撃を行うことで、探索フェーズの点検精度の向上が期待できる。クラスタ3に属する被験者は総合的に打撃特性を改善する必要がある。

同定フェーズの打撃特性については全体的な傾向としてクラスタ1'~3'は接触面積が0.4以下と小さく、欠陥上部のコンクリートを十分に加振できていない可能性がある。クラスタ1'は打撃回数、打撃平均移動速度(中央値)、打撃距離間隔(中央値)、打撃力(中央値)はクラスタ4'と同程度の値であり、接触面積を向上させる打撃をすることができれば、クラスタ4'に属する被験者と同程度まで領域同定の精度を向上できる可能性がある。クラスタ2'の打撃距離間隔が1.4、打撃平均移動速度の値が1.8となった。このことから、他のクラスタ群と打撃特性を比較するとクラスタ2'に属する被験者は欠陥の領域同定時に打撃が粗くなる傾向にあることが示唆される。クラスタ2'に属している被験者の欠陥検知率が50%前後であることから、欠陥検知率を低下させている要因として、打撃距離間隔がある可能性が考えられる。クラスタ3'に着目すると、打撃回数の値が2.3であり、他のクラスタ群の被験者に比べて、2倍以上の回数を要している結果となった。クラスタ3'に属している被験者は必要以上に同定の打撃をしており、打音の聞き分けが上手くできていない可能性がある。

6.まとめ

本研究で得られた知見は以下に示す通りである。

- 1) 測定時間が7分30秒から3分に低下することで、被験者の58.8%は欠陥検知率が低下し、平均で6.4%低下した。
- 2) 被験者のコンクリート面とハンマの接触面積の最低値は9.7mm²、最高値は91.6mm²であり、接触面

積が最も大きかった被験者は、点検時間が7分30秒の時の欠陥検知率が最も高かった。

- 3) 本実験の範囲内では点検時間が短くなることで変化が大きい打撃特性は、打撃回数、打撃距離間隔および打撃移動速度であり、これらが時間的制約により生じる打音点検精度の低下の主たる要因であると考えられる。
- 4) 打音点検精度に影響を及ぼす技能は打音点検における各フェーズによって異なり、探索フェーズにおいては打撃力、接触面積、圧力など打撃のスイングに関係する技能が重要である。同定フェーズにおいては打撃距離間隔、打撃平均移動速度など叩き方に関係する技能が重要である。また、打撃回数は両フェーズともに最も重要な打撃特性であった。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B), 課題番号:17H03290)により行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 舟波尚哉, 山岸開, 村上祐貴, 外山茂浩: 打音点検の打撃動作がコンクリート構造物の内部欠陥検知率に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1773-1778, 2018.7
- 2) 林純哉, 村上祐貴, 外山茂浩, 井山徹郎: 打音点検の打撃特性が内部欠陥検知精度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.42, No.1, pp.1660-1665, 2020.7
- 3) 野内彩可, 村上祐貴, 井山徹郎, 池田富士雄: 応答信号取得位置を固定した打撃試験における自己組織化マップによるコンクリート内部の欠陥領域判定, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1755-1760, 2018