

論文 打音点検者の打撃特性が内部欠陥検知精度に及ぼす影響

林 純哉*1・村上 祐貴*2・外山 茂浩*3・井山 徹郎*4

概要：本研究では、打音点検実務経験者 12 名と非実務経験者 2 名を対象に、人工欠陥を埋設したコンクリート壁型パネルに打音試験を実施し、打撃特性と欠陥検知率の関係について検討を行った。実務経験者 4 名と非実務経験者 1 名の打撃特性を分析した結果、欠陥領域を同定する打撃パターンには十字型と放射型の 2 パターンが確認された。また、本実験の範囲内では、打撃間距離が欠陥検知率に及ぼす影響は大きく、欠陥検知率の高い被験者は打撃距離間隔が長くなる傾向が認められた。また、欠陥検知率の高い被験者は、領域を同定する打撃数を少なくすることで欠陥の探索を入念に行っている傾向があった。

キーワード：打音点検, 打撃特性, 暗黙知

1. はじめに

我が国の高度成長期に建設されたトンネルや道路橋等の社会インフラは建設後約 50 年が経過し、老朽化が大きな社会問題となっている。H24 に発生した笹子トンネル崩落事故では甚大な被害が生じ、社会資本ストックの点検のあり方について見直しが図られ、翌年には道路法が改正された。道路法改正により、トンネルや道路橋等は 5 年に一度の近接目視の定期点検が法的に義務付けられたほか、目視で異常があると判断された箇所において、触診や打音点検を併用することも記載された。

打音点検は、検査対象面を点検ハンマーで打撃し、発生した打撃音の違いにより異常を検知する非破壊検査である。打音点検は、その簡便さから一次検査として広く利用されているが、官能試験であるため点検者の技能レベルや経験に依存する。

経験の浅い点検者への打音点検の技能継承は熟達点検者による OJT 方式が一般的である。しかしながら、熟達点検者が若手点検技術者に技能継承すべき打音点検技能が可視化、標準化されておらず、見て覚えるといった徒弟的な技能継承となっている。今後、老朽化した構造物が加速度的に増加する中、打音点検技能の体系的な技能継承プロセスの構築は重要な課題である。

このような背景から著者らは、熟達点検者の暗黙知である打音点検技能の可視化に取り組んできた。先行研究において、実務経験者に模擬欠陥を埋設したコンクリートパネルを対象に打音試験を実施した結果、経験年数と欠陥検知率の間には相関関係は認められず、現状の OJT 方式の技能継承の場合、打音点検技能の継承が適切になされない場合のあることが示唆された。また、打撃特性試験より、欠陥検知率の高い被験者は対象面に対し、打

撃の接触面積が大きく、打撃力が大きいことを明らかにした¹⁾²⁾。一方でこれらの先行研究では、打撃力以外の打撃特性が欠陥検知率に及ぼす影響については未検討であった。

本研究ではこれまで未検討であった、打撃パターン、打撃距離間隔、打撃時間間隔といった打撃特性が欠陥検知率に及ぼす影響について検討を行った。

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 × 高さ 1800mm × 厚さ 280mm のコンクリート壁型パネルであり、このパネルを 4 枚横に並べ、長さ 8000mm の模擬壁を 2 体作製した。コンクリートパネル内部には、内部欠陥を模擬した発泡スチロール製の人工欠陥を複数個埋設してある。人工欠陥の上下面は、厚さ 2.5mm のベニヤ板をボンドで接着させ、側面をアルミテープで巻いた。図-2 に試験体断面図を示す。コンクリート内部に鉄筋を配筋し、コンクリート表面から深さ 135mm に人工欠陥を固定した。人工欠陥の厚さを変化させることにより、打撃面から欠陥表面までの埋設深さを変えている。埋設した人工欠陥のパラメータを表-1 に示す。人工欠陥の埋設深さは 20~120mm であり、埋設深さを 10mm 間隔で変化させ 11 水準とした。また、欠陥領域は 4 水準、アスペクト比を 5 水準に設定した。各パネルに埋設された欠陥領域の割合は、ほぼ同様になるようにした。なお、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については一部記述を控える。

壁型パネル試験体の計画配合を表-2 に示す。セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、供試体の圧

*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 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

*3 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科教授 博(工)

*4 長岡工業高等専門学校 機械工学科准教授 博(工)

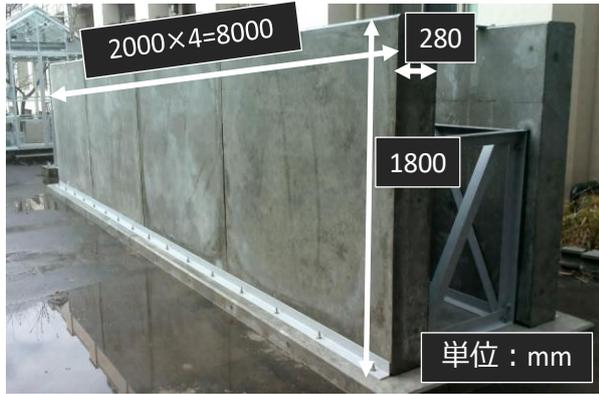


図-1 試験体概要

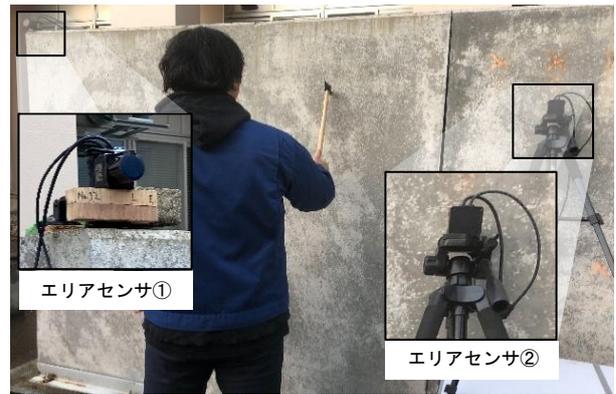


図-3 エリアセンサ設置状況

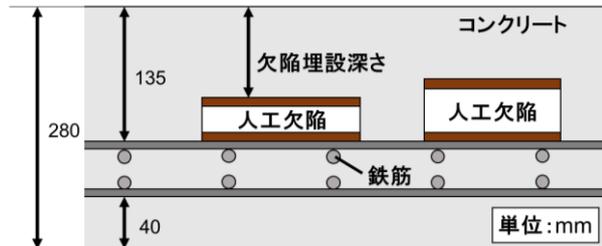


図-2 試験体断面図

表-1 人工欠陥のパラメータ

欠陥埋設深さ[mm]	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120
欠陥領域[mm ²]	10000, 40000, 90000, 160000
アスペクト比	1: 1, 1: 2, 1: 4, 2: 1, 4: 1

表-2 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 [%]	スラブ [cm]	単体量 [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

縮強度は材齢 7 日時点で 33.2N/mm²であった。

2.2 被験者

本研究では、欠陥検知率測定試験と打撃特性測定試験の 2 つの試験を行った。被験者は、埋設されている欠陥の埋設位置や埋設深さ等の情報を知らない実務経験者 12 名と打音点検の非実務経験者 2 名の計 14 名である。

2.3 欠陥検知率測定試験

欠陥検知率測定試験では各被験者の欠陥の検知精度を評価する。人工欠陥を埋設したコンクリートパネル 8 枚に対して、片面 30 分の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た。実務経験者は実務で普段使用している点検ハンマーを使用し、非実務経験者 2 名については、著者らが用意した 1/4 ポンドと 1/2 ポンドハンマーのどちらか片方を使用し、打音試験を行った。

2.4 打撃特性測定試験

打撃特性測定試験では各被験者の打撃特性が欠陥検知精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。被験者はコンクリートパネル 1 枚を対象として打音点検を実施し、欠陥と判断した領域にチョーキングを行う。試験時間は 7 分 30 秒を上限とした。なお、チョーキング面積等は欠陥検知率測定試験と同様に算出する。

被験者が使用する点検ハンマーは、著者らが用意した 1/4 ポンドの点検ハンマーとし、ヘッド部には加速度センサ (感度: 0.05[mV/(m/s²)], 分解能: 0.4[m/s²], 周波数範囲: 0.4~10000[Hz]) を取り付け、打撃時のハンマーの打撃応答振動を取得した。加速度センサは点検用ハンマー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とエポキシで固定した。

各被験者の打撃点を測定する為、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 または 0.125 度, 検出距離 20m) を設置した。エリアセンサから放出される走査線が遮断されることにより、エリアセンサから走査線を遮断した物体までの距離を計測することができる。エリアセンサの設置状況を図-3 に示す。事前の検証により、点検ハンマーの打撃角度によって 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。エリアセンサ①は試験体上部に固定し、エリアセンサ②は壁面に近接して、およそ 1.7m の高さで設置した。

3. 被験者の欠陥検知率

各被験者の欠陥検知率は、式(1)より算定した。

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

ここで検知した面積とは、コンクリートパネル内部の欠陥領域上にチョーキングされた面積であり、誤判定面

積は健全部にチョーキングされた面積である。

欠陥検知率測定試験での欠陥検知率の分布を、図-4に示す。本実験での欠陥検知率は、非実務経験者を含めた被験者 14 名の欠陥検知率の平均値が 58.2%であり、最も欠陥検知率の高い被験者は 73.6%、最小値は 23.4%であった。

前述したとおり、打音試験は官能試験であり、点検者の感覚によって試験結果が変化する。聴覚の観点では、人間の可聴域は年齢を重ねるごとに狭小となり、打音点検が可聴域の大小のみで決定されるのであれば、年齢が若いほど、欠陥検知率は大きくなる。被験者の年齢と欠陥検知率の関係を図-5に示す。本実験では、各被験者の可聴域の確認は行っていないものの、最も可聴域が狭いと考えられる 60 代の被験者の欠陥検知率が最も高く 70%を超えていた。また、図-5より年齢と欠陥検知率に明確な相関は確認できないことから、可聴域の相違は欠陥検知率に及ぼす影響は小さい、あるいは技能によって補完できると考えられる。次章では打撃特性に着目して検討を行う。

4. 欠陥検知率に及ぼす打撃特性の影響

打音点検の打撃は、大別すれば欠陥を探索する打撃（探索フェーズ）と欠陥を発見し、欠陥の領域を同定する（同定フェーズ）打撃に分類できる。本研究では、探索フェーズおよび同定フェーズにおける打撃数、打撃時間間隔、打撃距離間隔、打撃力について検討することとした。なお、同定フェーズは被験者が欠陥にチョーキングを開始した時点から終了までの打撃とし、探索フェーズはそれ以外の打撃とした。ここでは、実務経験者 12 名のうち、欠陥検知率上位 2 名と下位 2 名と非実務経験者 2 名のうち 1 名の計 5 名のデータを使用した。実務経験者は欠陥検知率が高い順に被験者 A~D と称することとし、非実務経験者は被験者 E と称することとした。なお、被験者 E は、図-4に示す欠陥検知率のデータ区間が 0~29 に位置する被験者である。

4.1 各被験者の打撃座標

被験者 A~E の打撃特性測定試験の欠陥同定・探索フェーズの打撃位置とチョーキング領域と欠陥情報を図-6に示す。また、図中には、探索フェーズ（青）と同定フェーズ（橙）を分けて図示しており、黄枠は埋設している欠陥位置、白で囲まれた領域は、被験者のチョーキング領域を示している。なお、エリアセンサの測定精度上、欠陥同定位置とチョーキング位置に若干の差異が生じているが、大きな差異ではないことから、以降に行う打撃距離間隔の検討には影響しないと考えられる。

まず、領域同定の打撃パターンについては、被験者 A、E のような欠陥領域を十字方向に同定するパターンと被

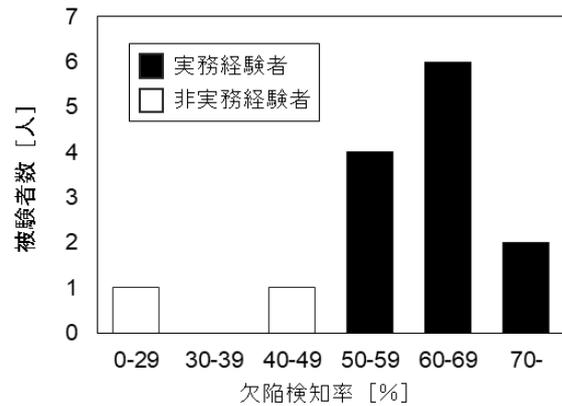


図-4 欠陥検知率の分布

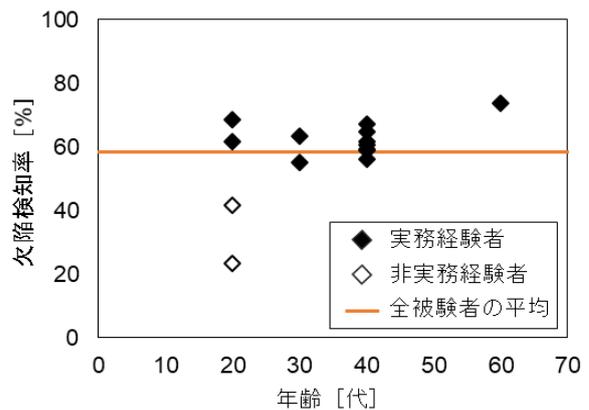


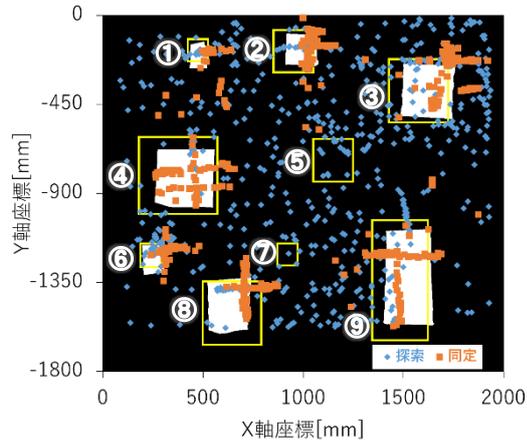
図-5 被験者の年齢と欠陥検知率の関係

験者 B, C, D のような放射状に同定するパターンが確認された。表-3に実務経験者の領域同定パターン別に整理した欠陥検知率等の結果を示す。なお、同定パターンが放射状のデータは被験者 B, C, D の平均値、十字のデータは被験者 A の測定値である。

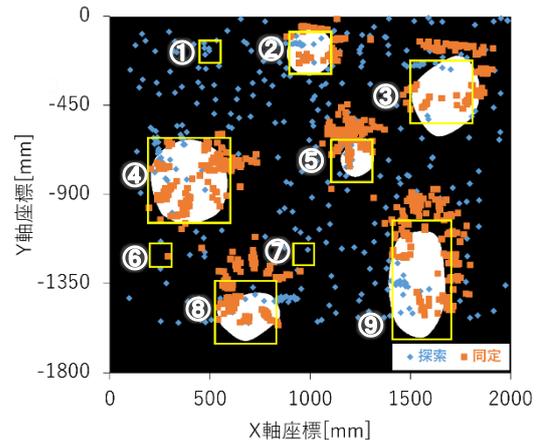
本研究の範囲内では欠陥検知領域は、同定パターンによらず、差異は認められなかった。一方、誤判定領域については、放射状に欠陥を同定する場合は十字に欠陥領域を同定する場合に比べ、誤判定領域は約 2.5 倍大きい。また、欠陥検知率は 12.3% 低かった。4.2 節で詳述するが、十字に欠陥を同定する方法は、境界の周囲を打撃する方法と比べて領域同定に要する打撃数が抑えられ、欠陥探索の時間を他の被験者より確保できた可能性がある。しかしながら、打撃パターンが十字の実務経験者は被験者 A のみであるため、さらなる検討が必要である。

4.2 打撃数

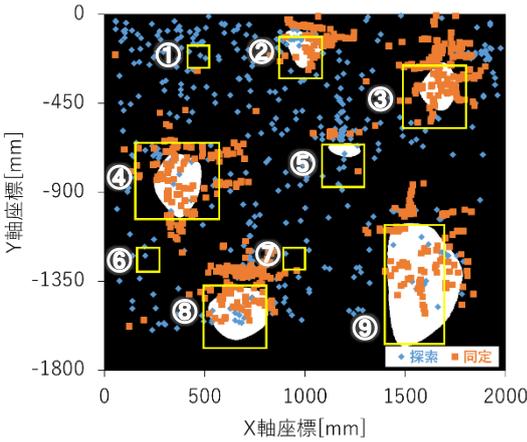
図-7に各被験者の総打撃数を示す。実務経験者 4 名の総打撃数の平均は 1144.5 回であり、非実務経験者 E の打撃数よりも約 19% 多かった。また、表-4に各被験者の打撃特性を示す。フェーズ別に打撃数を整理すると、最も欠陥検知率の高い被験者 A の探索フェーズの打撃回数が最も多かった。図-6に示した打撃位置からも分かるように被験者 A は、欠陥を見逃さないように対象面全



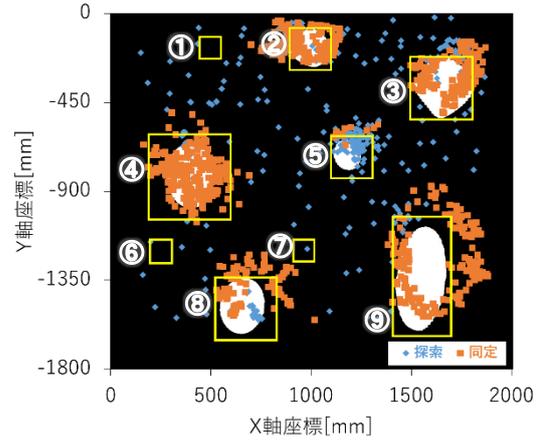
(a)被験者 A (欠陥検知率 : 74.9%)



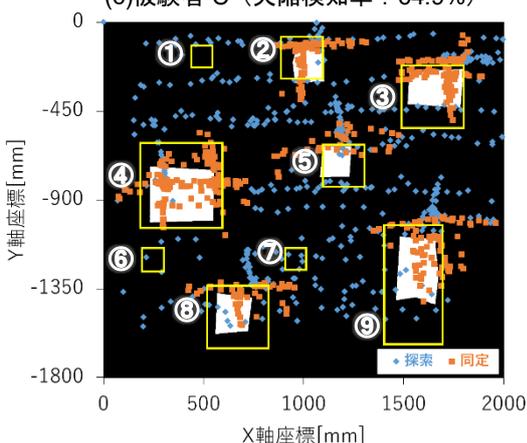
(b)被験者 B (欠陥検知率 : 66.9%)



(c)被験者 C (欠陥検知率 : 64.9%)



(d)被験者 D (欠陥検知率 : 56.0%)



(e)被験者 E (欠陥検知率 : 41.6%)

欠陥番号	欠陥領域面積 [mm ²]	欠陥埋設深さ [mm]
①	10000 (100×100)	50
②	40000 (200×200)	50
③	90000 (300×300)	80
④	160000 (400×400)	70
⑤	40000 (200×200)	90
⑥	10000 (100×100)	30
⑦	10000 (100×100)	90
⑧	90000 (300×300)	70
⑨	160178 (556×283)	50

(f)埋設した欠陥のプロファイル

図-6 欠陥同定・探索フェーズの打撃位置とチョーキング領域および欠陥情報

表-3 同定パターン別の欠陥検知率

同定パターン	検知領域 [mm ²]	誤判定領域[mm ²]	欠陥検知率 [%]
放射状	346400	21965	62.6
十字	335874	8799	74.9

域を偏りなく打撃していることが分かる。実務経験者内では総打撃数にはほとんど差異が見られないため、被験者 A は入念に探索を行い、領域同定は少ない打撃で実現していると言える。なお、本実験では試験時間は 7 分 30

秒を上限としており、比較的入念に打音点検が行える状況にあるが、試験時間が短くなるほど領域同定にかかる時間を短くする必要があるため、被験者 A とその他の被験者の検知率の差はさらに大きくなると考えられ、今後試験時間を短縮した場合の検証を進めていく。

4.3 打撃距離間隔

表-4 に各被験者の打撃距離間隔を示す。エリアセンサによって測定された打撃座標を用い、一つ前の打撃点の座標からの X (水平方向), Y (鉛直方向) の変化量の

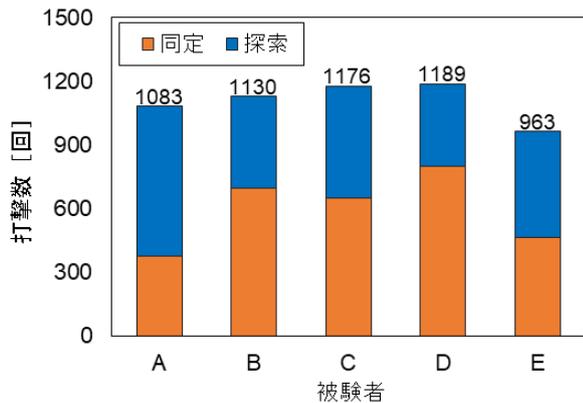


図-7 各被験者の打撃数

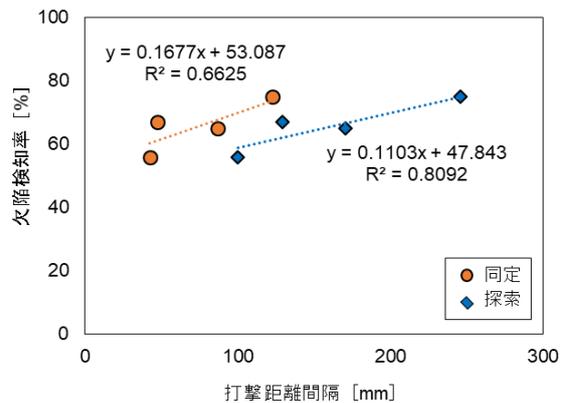


図-8 各フェーズの打撃距離間隔と欠陥検知率の関係

表-4 各被験者の打撃特性

被験者	欠陥検知率 [%]	フェーズ	打撃特性	計算値	探/同比	標準偏差 (変動係数)	
A	74.9	同定	打撃数[回]	375	1.89	261.80(2.13)	
		探索	打撃数[回]	708			
		同定	打撃距離	123.0	2.00		
		探索	打撃距離	246.0			
		同定	打撃時間	0.29	1.10		0.038(0.13)
		探索	打撃時間	0.32			
		同定	加速度平均	20039	1.27		4531(0.23)
		探索	加速度平均	25546			
B	66.9	同定	打撃数[回]	698	0.62	109.40(2.30)	
		探索	打撃数[回]	432			
		同定	打撃距離	47.6	2.72		128.04(0.99)
		探索	打撃距離	129.5			
		同定	打撃時間	0.27	1.09		0.075(0.27)
		探索	打撃時間	0.30			
		同定	加速度平均	22567	1.25		10057(0.45)
		探索	加速度平均	28292			
C	64.9	同定	打撃数[回]	651	0.81	196.00(2.25)	
		探索	打撃数[回]	525			
		同定	打撃距離	87.0	1.96		221.92(1.30)
		探索	打撃距離	170.6			
		同定	打撃時間	0.24	1.08		0.044(0.18)
		探索	打撃時間	0.26			
		同定	加速度平均	16318	1.15		5630(0.35)
		探索	加速度平均	18721			
D	56.0	同定	打撃数[回]	799	0.49	31.06(0.73)	
		探索	打撃数[回]	390			
		同定	打撃距離	42.5	2.36		126.17(1.26)
		探索	打撃距離	100.1			
		同定	打撃時間	0.31	1.09		0.089(0.28)
		探索	打撃時間	0.34			
		同定	加速度平均	14034	1.16		4660(0.33)
		探索	加速度平均	16264			
E	41.6	同定	打撃数[回]	463	1.08	100.56(1.79)	
		探索	打撃数[回]	500			
		同定	打撃距離	56.0	1.77		227.19(2.30)
		探索	打撃距離	98.9			
		同定	打撃時間	0.28	1.00		0.039(0.14)
		探索	打撃時間	0.28			
		同定	加速度平均	33690	0.99		10478(0.31)
		探索	加速度平均	33243			

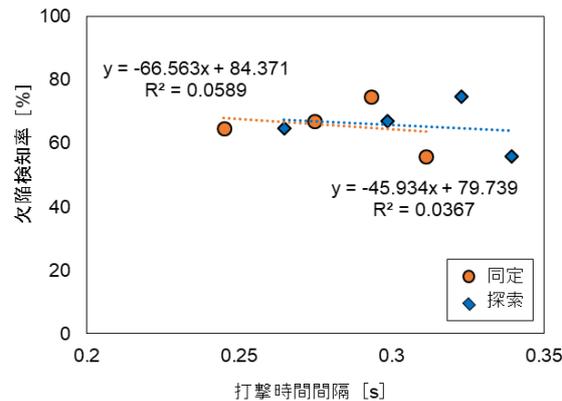


図-9 各フェーズの打撃時間間隔と欠陥検知率の関係

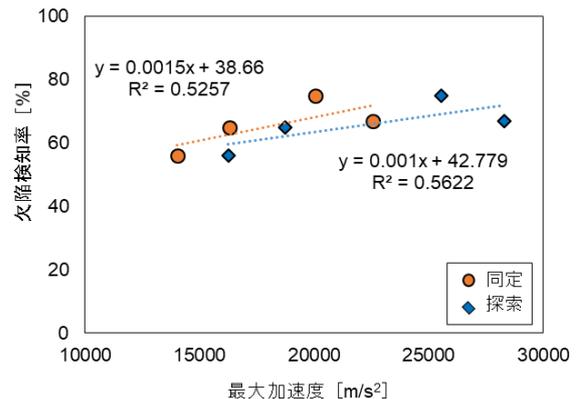


図-10 各フェーズの最大加速度と欠陥検知率の関係

絶対値から打撃距離間隔を算出した。いずれの被験者においても探索フェーズの打撃距離間隔は、同定フェーズよりも大きくなった。図-8 に実務経験者の各フェーズにおける打撃距離間隔と欠陥検知率の関係を示す。両フェーズともに打撃距離間隔と欠陥検知率には強い相関が認められ、打撃距離間隔が大きいほど、欠陥検知率は高くなる傾向が認められた。打音点検は官能試験であるため、打撃音の相対比較によって欠陥を検知する。その際、打撃距離間隔が小さすぎると、音の違いが明瞭ではなくなり、欠陥検知率が低下する可能性がある。当然、打撃距離間隔が大きくなりすぎれば欠陥検知率は低下すると考えられる。

4.4 打撃時間間隔

表-4 に各被験者の打撃時間間隔を示す。なお、試験中、被験者がチョーキングを行っている時間は対象外としている。表-4 より、全ての実務経験者の探索フェーズの打撃時間間隔は同定フェーズよりも10%程度大きく、非実務経験者である被験者Eの打撃時間間隔はフェーズによらず同程度あった。欠陥を同定する際は欠陥領域を正確に定めるために打撃時間間隔を短くすることにより、音の違いを判別しやすくしている可能性がある。

図-9 に実務経験者の各フェーズにおける打撃時間間隔と欠陥検知率の関係を示す。いずれのフェーズにおい

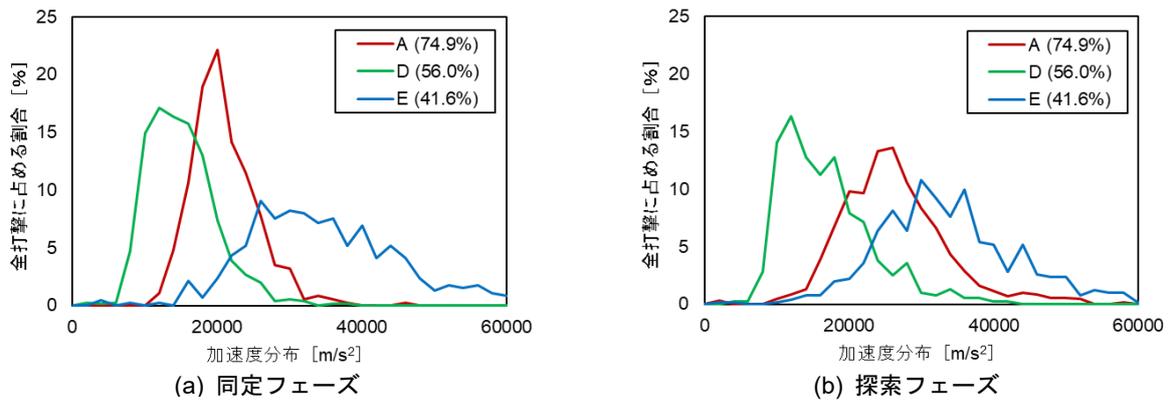


図-11 各フェーズの加速度ヒストグラム

ても打撃時間間隔と欠陥検知率との相関は低い。

4.5 打撃時の最大加速度

図-10 に実務経験者の各フェーズにおける打撃時の点検ハンマーの最大加速度と欠陥検知率の関係を示す。いずれのフェーズにおいても欠陥検知率と加速度には正の相関が認められ、打撃時の最大加速度が大きいくほど欠陥検知率が高くなる傾向にあった。また、表-4 に示した加速度の探索同定比(探索時の最大加速度/同定時の最大加速度)から、実務経験者の探索フェーズの最大加速度は同定フェーズに比べ大きく、欠陥検知率の高い被験者ほどその傾向が顕著であった。欠陥検知率が高い被験者は、欠陥が深部にある場合においても欠陥上部のコンクリートを加振できるように探索時の打撃力が大きくなるものと推察される。

図-11 に、実務経験者の中で最も検知率の高い被験者 A と最も検知率が低い D および非実務経験者 E の各フェーズにおける加速度のヒストグラムを示す。加速度ヒストグラムは、データ区間 0~60000[m/s²]で 2000[m/s²]毎の階級とした。打撃数の差異を考慮するため、相対度数分布とした。両フェーズにおいて、実務経験者のヒストグラムが非実務経験者に比べ、バラツキの少ない山型になっており、実務経験者の打撃はバラツキが少ないことが分かる。実務経験者である被験者 A は被験者 D と比較すると、被験者 A はいずれのフェーズにおいても被験者 D に比べて最大加速度が大きく、強い打撃力でコンクリート表面を打撃することで欠陥上部のコンクリートを加振していると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下に示すとおりである。

- (1) 本実験の範囲内では、実務経験者の探索フェーズの最大加速度は同定フェーズに比べ大きく欠陥検知率の高い被験者ほど、その傾向が顕著であった。
- (2) 実務経験者の探索フェーズの打撃時の最大加速度、打撃時間間隔、打撃距離間隔は同定フェーズよりも大きい。
- (3) 本実験の範囲内では、欠陥検知率の高い被験者は探索・同定フェーズにおいて打撃距離間隔が大きくなる傾向が見られた。探索・同定フェーズの打撃距離間隔には最適値が存在すると考えられ、本実験で確認された打撃距離間隔以上で打撃した場合、欠陥検知率は低下する可能性がある。

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) 舟波尚哉, 村上祐貴, 外山茂浩, 小海元暉: 熟達点検者の打音点検動作の形式化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1871-1876, 2019.7