

## 論文 熟達点検者の打音点検動作の形式知化に関する基礎的研究

舟波 尚哉\*1・村上 祐貴\*2・外山 茂浩\*3・小海 元暉\*4

**要旨:** 打音点検の実務経験年数および年齢の異なる打音点検実務経験者 31 名を被験者として、人工欠陥を埋設した模擬壁面に対して打音点検を実施した。被験者の欠陥検知率は大きく異なり、最も検知率が高い被験者と最も検知率が低い被験者では、約 50%程度差異があった。欠陥検知率に被験者の年齢や経験年数が及ぼす影響はほとんど認められなかったことから、熟達打音点検者の暗黙知が形式知化されておらず、打音点検の技能継承が適切に行われていないことが示唆された。また、打音点検の打撃動作を測定した結果、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が明らかとなった。

**キーワード:** 打音点検, 欠陥検知率, 打撃動作, 暗黙知

## 1. はじめに

H24 年に発生した笹子トンネル天井板落下事故を契機に H25 年に道路法が改正され、5 年に 1 回の頻度を基本とした近接目視による点検が規定された。近接目視で異常が認められた場合は、必要に応じて触診や打音点検を含む非破壊検査を実施することも明記された。このように我が国では社会資本ストックのメンテナンスサイクルが本格的に始動し、産学官が総力を挙げて、老朽化対策に資する技術開発を精力的に行っている。

コンクリート構造物の点検において、打音点検は容易、安価であることから一次検査に用いられているが、点検者の経験や感覚に依存する官能検査であるため、点検結果は点検者に依存する。そのため、昨今は、ICT (情報通信技術) や RT (ロボット技術) を駆使した定量的な打音点検手法の開発が国家プロジェクト「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」の中で進められており、開発技術の中には実用化段階のものもある。一方、このような最新技術を駆使した次世代打音点検を、すべての既存構造物に展開していくことは、人材、時間、予算の観点から現実的ではなく、従来通りの点検用ハンマーを用いた打音点検が継続される構造物も少なくないと考えられる。

前述したように打音点検は官能検査であり、点検者の経験や感覚に点検結果が大きく左右される。社会インフラは地方公共団体が管理する施設が大部分を占めるが、地方では、人口減少と少子高齢化が加速的に進んでおり、熟達点検者不足が極めて深刻な状況にある。また、若い世代への打音点検技能の継承は主に OJT であり、熟達点検者の技能継承が適切になされているのか、疑問が残る。

このようなことを背景として、著者らは熟達点検者の

暗黙知である打音点検技能を形式知化し、非熟達打音点検者に対する打音点検技能の教授法について検討を行っている。

先行研究<sup>1)</sup>においては、打音点検実務経験者 5 名と非実務経験者 5 名を被験者として、人工欠陥を埋設した模擬壁に対して打音点検を実施し、実務経験者と非実務経験者の欠陥検知率や打撃動作の違いについて検討を行った。その結果、実務経験者の欠陥検知率は非実務経験者に比べて高く、欠陥検知率の向上に資する暗黙知が存在することが示唆された。肘および手首の関節角度変化量、グリップ力が欠陥検知率に影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、実務経験者の打撃は非実務経験者に比べて打撃のバラツキが少なく、打撃面との接触時間が短いことが示唆された。このように、先行研究では非実務経験者と実務経験者の打音点検動作の違いがあることを明らかにしたが、被験者数が少ないことや、実務経験者の中での欠陥検知率や打音点検動作の違いについて検討が不十分であった。

本稿では、実務経験年数や年齢の異なる打音点検実務経験者 31 名を被験者とし、経験年数や年齢が欠陥検知率に及ぼす影響について検討するとともに、被験者の打撃動作の違いについて検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体概要

## (1) 打音試験 (屋外)

打音試験に用いた試験体概要を図-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。各パネルには内部

\*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 環境都市工学科

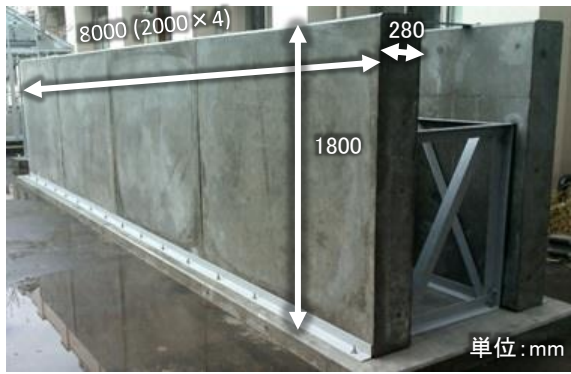


図-1 打音試験 試験体概要

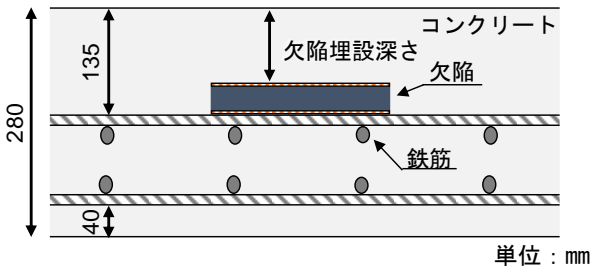


図-2 埋設された人工欠陥

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 <sup>2</sup> )	10000, 40000, 90000, 160000
欠陥の縦横比	1 : 1, 1 : 2, 1 : 4, 2 : 1, 4 : 1

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 に示すように、人工欠陥は、上側鉄筋上に設置し、欠陥の厚みを変えることで打撃面から欠陥表面までの距離（以降埋設深さ）を変えている。表-1 に人工欠陥のパラメータを示す。人工欠陥の埋設深さは 20～120mm の間で 10mm 毎に変化させ、11 水準とした。人工欠陥の大きさは、4 水準とし、欠陥の縦横比は 5 水準とした。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して行うことから、人工欠陥の埋設位置については記述を控える。

表-2 に打音試験に用いた試験体のコンクリートの計画配合を示す。コンクリートの圧縮強度は材齢 7 日時点で 33.2N/mm<sup>2</sup> であった。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

### (2) 打音点検動作測定試験（屋内）

打音点検動作測定試験に用いた試験体概要を図-3 に示す。試験体は長さ 800mm、高さ 550mm、厚さ 120mm のコンクリート試験体である。試験体内部には 760mm×530mm のワイヤメッシュ（網目 150mm）を測定面からかぶり 55mm で埋設した。

表-2 打音試験 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)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					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

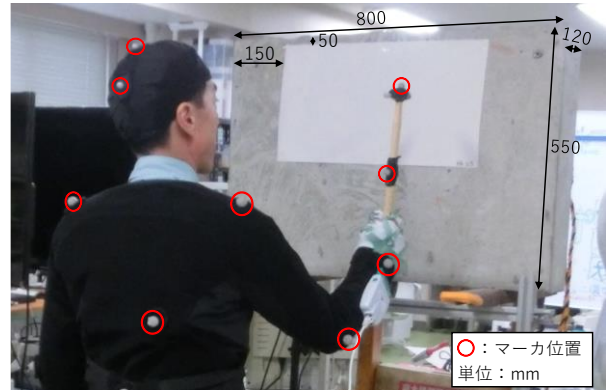
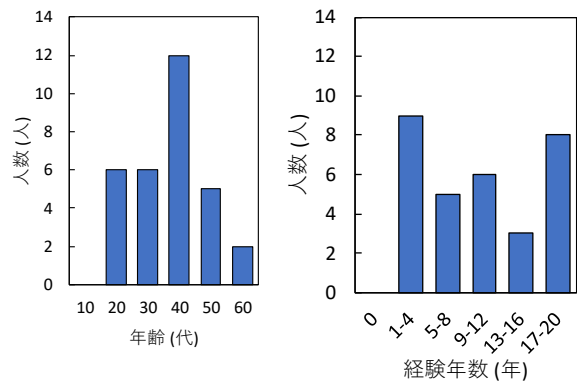


図-3 打音点検動作測定試験

表-3 打音点検動作測定試験 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)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
25	55.0	42.0	4.5	12.0	168	305	763	1061	3.05



(a) 年齢 (b) 経験年数

図-4 被験者のパラメータ

表-3 に打音点検動作測定試験に用いた試験体のコンクリートの計画配合を示す。コンクリートの圧縮強度は材齢 7 日時点で 34.3N/mm<sup>2</sup> であった。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

## 2.2 実験方法

図-4 に被験者のパラメータを示す。打音試験（屋外）の被験者数は打音点検実務経験者 31 名とした。被験者の年齢は 20 代～60 代、経験年数は 1～20 年である。被験者全体の平均年齢は 41 歳であり、平均経験年数は 10 年である。なお、打音点検動作測定試験（屋内）では実験を実施していない被験者がいるため、以降は、当該の被験者 2 名を除外した 29 名で検討を行った。

### (1) 打音試験方法（屋外）

被験者は 1 つの模擬壁（長さ 8000mm）につき、試験時間の上限を 30 分として、打音試験を実施し、欠陥部と

判断した領域にチョーキングを行った。打音試験終了後、チョーキング状況をデジタルカメラで撮影し、撮影画像からチョーキング面積等を算出した。点検用ハンマーは、普段の実務で使用している点検用ハンマーを用いて打音試験を行った。

### (2) 打音点検動作測定試験（屋内）

打音点検動作測定試験で使用する試験体は重量物用リフターで試験体底面が地上から 1200mm の位置に固定し、コンクリート壁面を室内で再現した。試験体に埋設されたアンカーとリフターをロープで結束して固定した。本測定試験では被験者は 1/4 ポンドの点検用ハンマーを用いて、30 回の打撃を行い、打撃時における腕部各関節の関節角度変化量、点検用ハンマーの握り方、点検用ハンマーの打撃圧力および接触面積を測定した。

腕部各関節の関節角度変化量はカメラとマーカを用いたモーションキャプチャシステムを用いた。図-3 に示すように赤外線を反射するマーカを被験者の身体各部に 25 点、ハンマーの頂点と中間の 2 点の合計 27 個のマーカを貼り付け、打音点検の打撃動作を屋内の天井付近に合計 8 台の赤外線照射装置を兼ねたカメラで撮影した。モーションキャプチャシステムから得られた 3 次元座標を元に腕部各関節の関節角度変化量を算出した。

図-5 に示すように手全体に圧力センサシートを装着し、打撃時の手全体の圧力分布を測定した。センサシートには 185 個の感圧素子で 0~345kPa までの圧力を測定でき、打撃動作中の手の各部位における圧力の時間変化を測定した。測定時間間隔は 60fps である。

図-3 に示すように点検用ハンマーによる壁面打撃時の打撃圧力および接触面積を計測するために 500mm×270mm の圧力測定フィルムをコンクリート試験体表面に貼り付けた。このフィルムは圧力の大きさに応じて赤色の濃度に変化し、この発色濃度と発色面積を専用スキャナで読み取り、打撃圧力や接触面積を算出することができる。本測定では、瞬間圧測定範囲 50~130MPa の高圧用のフィルムを使用した。

## 3. 打音試験結果（屋外）

### 3.1 被験者のプロフィールが欠陥検知率に及ぼす影響

各被験者の欠陥検知率を式(1)から算出した。

$$\text{欠陥検知率(\%)} = \frac{\text{検知した面積}}{\text{欠陥総面積} + \text{検知外面積}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、検知外面積とはチョーキング面積において、非欠陥部（誤判定領域）の面積を指す。また、検知した面積とはチョーキング面積において欠陥部の面積を指す。

式(1)から算出した全被験者の欠陥検知率の平均は



図-5 圧力センサシートを装着した様子

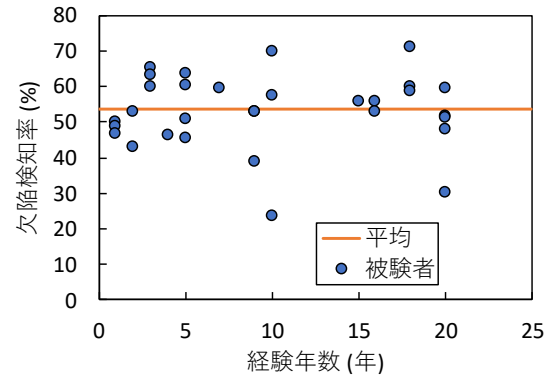


図-6 経験年数と欠陥検知率

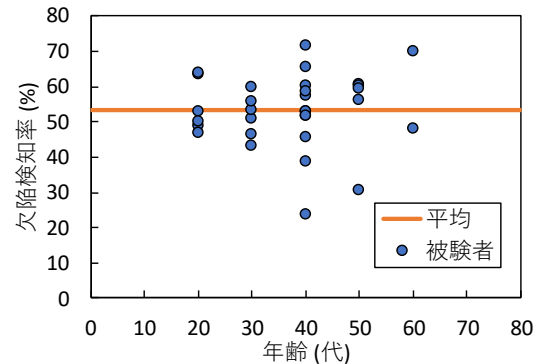


図-7 年齢と欠陥検知率

53.5%であった。欠陥検知率が最も大きい被験者で 71.4%、最も小さい被験者で 23.8%であり、約 50%の差があった。

図-6 に経験年数と欠陥検知率の関係を示す。経験年数と欠陥検知率に相関関係は認められない。なお、経験年数には点検頻度は考慮されておらず、経験年数が高い被験者は経験が多いとは一概に言えないが、経験年数が 1 年の経験者より欠陥検知率が低い被験者もあり、経験年数自体が欠陥検知率に及ぼす影響は小さく、適切な打音点検技能の継承が重要であることが示唆される。

図-7 に年齢と欠陥検知率の関係を示す。後に詳述するが、人間の可聴域は加齢とともに縮小する。本実験では、被験者の可聴域の確認を行っていないため更なる検討が必要であるが、年齢が 40 代の被験者に着目すると、欠陥検知率の差が約 50%であり、同年代の中で欠陥検知率のパラツキは大きい。また、被験者の中で最も可聴域が小さいと考えられる年齢が 60 代の被験者の平均の欠陥検知率は 59.0%であり、全被験者の平均の欠陥検知率を上回るとともに欠陥検知率が 70%を超える被験者もい

たことから、年齢に起因する可聴域の相違が欠陥検知率に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

図-8 に単位チョーキング面積当たりの検知外面積と欠陥検知率を示す。全被験者の単位チョーキング面積当たりの検知外面積の平均は 13.9%であり、最も大きい被験者で 25.8%、最も小さい被験者で 4.5%であった。欠陥検知率との明確な相関は認められず、欠陥検知率の高い被験者は誤判定領域が大きくなるとはいえない。

### 3.2 欠陥のプロファイルが検知率に及ぼす影響

各欠陥上における欠陥上検知率を式(2)から算出した。式(1)は誤判定領域である検知外面積を含むが、式(2)は検知外面積を含まない。

$$\text{欠陥上検知率(\%)} = \frac{\text{検知した面積}}{\text{欠陥面積}} \times 100 \quad (2)$$

式(2)から算出した欠陥領域毎の欠陥上検知率を図-9 に示す。同図では、欠陥埋設深さを表層 (20~40mm)、中層 (50~80mm)、深層 (90~120mm) の3層に区分し、各層における欠陥上検知率の平均値を示した。同図(a)~(c)は、それぞれ全被験者、欠陥検知率上位10名および欠陥検知率下位10名の平均欠陥上検知率である。なお、ここでの欠陥上検知率は、埋設位置比較で使用する試験体を除外した7枚のパネルで算出した。また対象とした欠陥の縦横比は1:1である。同図から、欠陥上検知率はいずれの欠陥領域の大きさにおいても、表層から深層に従い、小さくなるのがわかる。欠陥領域 10000mm<sup>2</sup>の深層は全被験者が検知出来なかった。欠陥検知率上位10名の被験者は欠陥領域 10000mm<sup>2</sup>の深層を除く、すべての欠陥領域で、欠陥を検知するとともにその欠陥上検知率は全被験者の欠陥上検知率を上回った。さらに、欠陥領域 10000mm<sup>2</sup>および欠陥領域 40000mm<sup>2</sup>の深層を除く、全ての欠陥領域において欠陥上検知率が約50%以上であった。欠陥検知率下位10名は、欠陥領域 40000~160000mm<sup>2</sup>の表層において欠陥上検知率が約70%以上であったが、それらを除くいずれの欠陥領域において、欠陥上検知率が50%未満であった。

次に埋設深さごとの欠陥の固有振動数と欠陥検知率の上位10名および欠陥検知率の下位10名の欠陥上検知率の関係を図-10 に示す。埋設深さごとの欠陥の固有振動数  $f$  は式(3)、(4)より算出した。なお、対象とした欠陥の縦横比は1:1である。

$$f = \frac{\lambda\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (3)$$

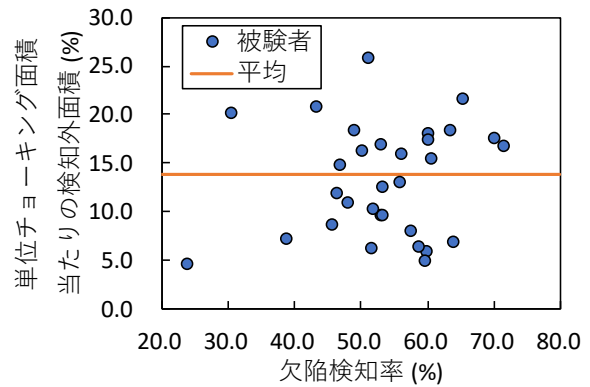
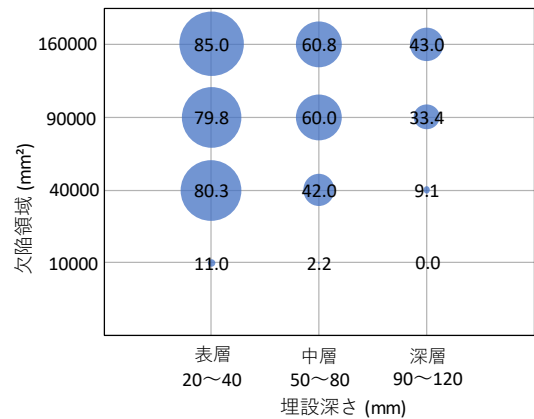
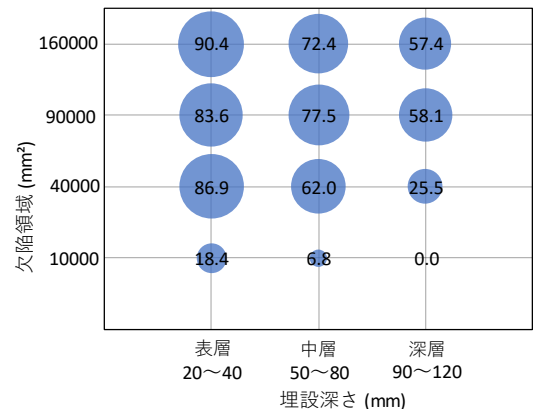


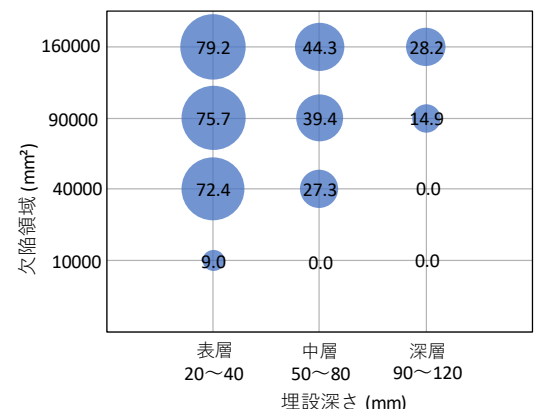
図-8 単位チョーキング面積当たりの検知外面積と欠陥検知率



(a) 全被験者



(b) 上位10名



(c) 下位10名

図-9 各層における欠陥領域毎の欠陥上検知率

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

ここで、 $\rho$ はコンクリートの密度であり、 $\rho=2300\text{kg/m}^3$ とした。また、 $a$ は欠陥の辺の長さ  $m$ 、 $h$ は欠陥の埋設深さ  $m$ である。 $\lambda$ は境界条件、振動モードと縦横比によって異なる値であり、単純支持、1次モードの場合は2となる。 $D$ はコンクリートの曲げ剛性であり、式(4)から算出した。 $E$ 、 $\nu$ は、それぞれコンクリートの弾性係数、ポアソン比であり、 $E=2.8 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ 、 $\nu=0.2$ とした。

同図より、欠陥検知率の下位10名は欠陥検知率の上位10名に比べ、埋設深さごとの欠陥の固有振動数帯においても欠陥上検知率のバラツキが大きいことが分かる。一方、欠陥検知率の上位10名は、欠陥の固有振動数が約8000Hzまでは欠陥上検知率が約30%を超えている。打音点検の測定原理は打撃により欠陥上のコンクリートをたわみ共振させ、発生した音の違いから欠陥の有無を判別する。欠陥の埋設位置が深いあるいは欠陥領域が小さい場合、たわみ共振が生じにくくなることから、欠陥検知率の高い被験者は打撃力が相対的に大きいものと考えられる。また、人間の可聴域は約20~20000Hzであり、加齢に伴い可聴域が狭くなり、50代頃から急激に高周波側の可聴域が狭くなる傾向がある<sup>2)</sup>。また、等ラウドネス曲線(ISO226)を鑑みると、周波数4000Hzを超えると人間の聴覚の感度は低下し、音が聞き取りにくくなるため、欠陥検知率が上位10名は4000Hz以上に欠陥の固有振動数を有する欠陥を検知出来たことは、打撃力が大きく、打撃時の音圧が相対的に大きいためであると考えられる。さらに、欠陥検知率の上位10名は、欠陥の固有振動数が最大で20000Hz以上の欠陥を検知できている。前述したように本実験では、被験者の可聴域の確認を行っていないため更なる検討が必要であるが、被験者の可聴域の広さ、もしくは打音点検動作の影響が要因だと考えられる。

#### 4. 打音点検動作測定試験結果(屋内)

##### 4.1 被験者の打撃圧力と打撃面積

図-11には20回の打撃の打撃圧力、平均打撃面積を、欠陥検知率が上位10名、中位10名、下位9名毎に平均化した値を示している。図中に示すエラーバーは標準偏差である。同図に示すように平均圧力は、欠陥検知率が上位、中位、下位のグループで明確な差異は認められなかった。一方、平均打撃面積は欠陥検知率が高いグループ程、明らかに大きく、点検ハンマーの打撃面全体で打撃を加えていることが明らかとなった。また、平均圧力は各グループで差異が無いことから、欠陥検知率が高い

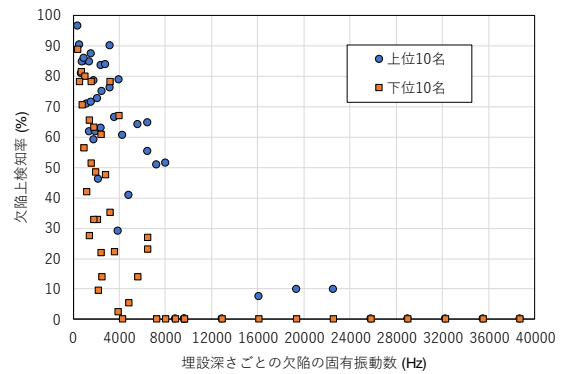
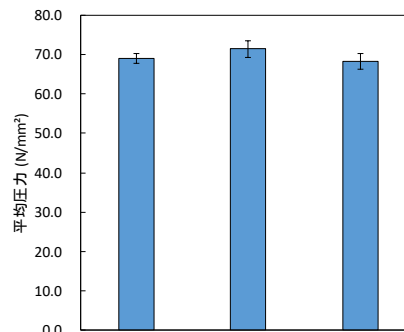
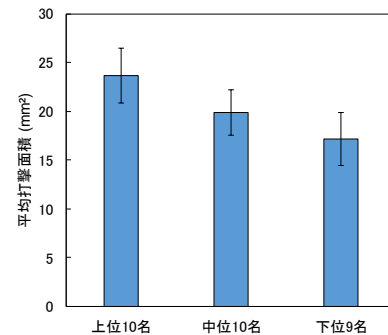


図-10 埋設深さごとの欠陥の固有振動数と欠陥上検知率



(a) 平均打撃圧力



(b) 平均打撃面積

図-11 各グループの平均圧力、平均打撃面積

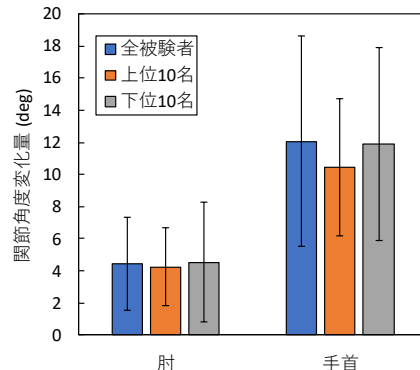


図-12 肘および手首の関節角度変化量

グループ程、打撃力が大きいと言え、本実験の範囲内では、欠陥検知率上位10名の平均打撃力は約1638Nであった。

##### 4.2 被験者の打撃動作

###### (1) 被験者の腕部各関節の関節角度変化量

計測されたマーカの空間座標から点検用ハンマーを

最も後方に引いた時点から壁面を打撃時の腕部各関節の関節角度変化量を算出した。カメラからマーカの位置が隠れる打撃動作があったため、カメラから見える打撃動作から 20 回の打撃を抽出し、腕部各関節の関節角度変化量の 20 回の平均を算出した。なお、欠陥検知率 46.4% の被験者は、16 回の平均である。図-12 に全被験者、欠陥検知率の上位 10 名、下位 10 名の肘および手首の関節角度変化量を示す。図中のエラーバーは標準偏差を示している。肘の関節角度変化量や手首の関節角度変化量は正規分布に従うと仮定して、スミルノフ・グラブズ検定から肘の関節角度変化量については、欠陥検知率 70.0%、50.1% の被験者を検討対象から除外した。手首の関節角度変化量についても、欠陥検知率 70.0%、50.1% の被験者を検討対象から除外した。

同図に示すように、本実験の範囲内では肘および手首ともに打撃中の肘および手首の関節角度変化量はバラツキが大きく、統計的に有意な差は認められなかった。

今後、打撃動作時の関節角度速度や加速度等について詳細に検討を行う予定である。

## (2) 被験者の手の圧力分布

被験者によって握り方が異なっていることから、握り方別にデータを整理した。各被験者の点検用ハンマーの握り方は大きく分けて 3 つのパターンに分類される。表-4 に示すように、 $\alpha$ ：親指を人差し指の上に乗せる、 $\beta$ ：親指を立てる、 $\gamma$ ：人差し指を立てる、3 つのパターンがある。 $\alpha$  と  $\beta$  の握り方をする被験者が多かったため、この 2 つの握り方を対象とし、 $\gamma$  の握り方をする被験者は少なかったため検討対象外とした。

握り方別に欠陥検知率上位 3 名と欠陥検知率下位 3 名の手の圧力分布の比較を図-13 に示す。図中のエラーバーは標準偏差を示している。いずれの握り方においてもばらつきが大きい。欠陥検知率が上位 3 名はいずれの握り方においても親指の圧力が大きい傾向にある。点検ハンマーを親指で固定することで打撃の軌道を安定させ、これによって打撃面積が大きくなっている可能性がある。

## 5 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 経験年数と欠陥検知率には明確な相関が認められず、経験年数自体が欠陥検知率に及ぼす影響は小さいと考えられる。
- (2) 年齢に起因する可聴域の相違が欠陥検知率に及ぼす影響は小さいものと考えられる。
- (3) 欠陥検知率上位 10 名と下位 9 名に打撃時の平均圧力に差異は無いが、欠陥検知率上位 10 名は平均打撃面積が大きい。本実験の範囲内では欠陥検知率上

表-4 握り方の分類

分類	握り方	人数(名)	欠陥検知率(%)
$\alpha$	親指を人差し指の上に乗せる	12	38.9~60.0
$\beta$	親指を立てる	14	23.8~71.4
$\gamma$	人差し指を立てる	3	30.5~53.2

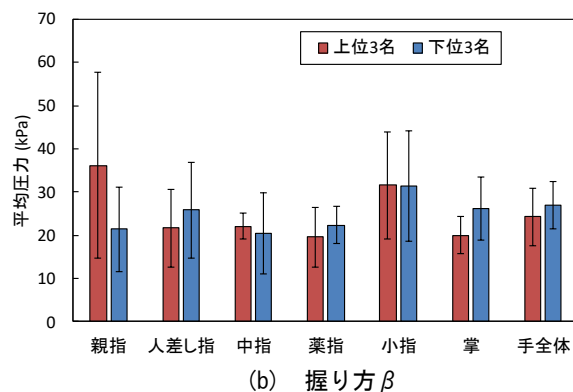
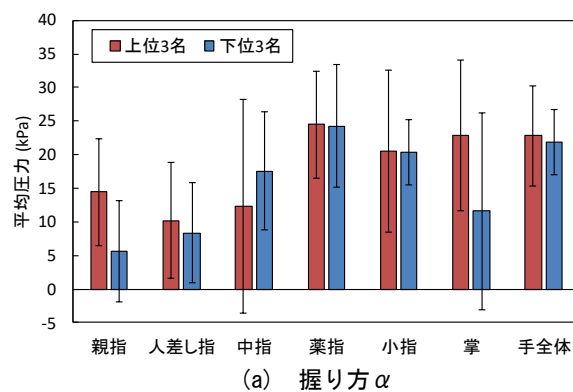


図-13 握り方別の比較

位 10 名の平均打撃力は約 1638N であった。

- (4) いずれの点検用ハンマーの握り方においても、欠陥検知率上位 3 名は下位 3 名に比べて、親指の圧力が大きく、点検用ハンマーを親指で固定することで打撃の軌道を安定させ、これによって打撃面積が大きくなっている可能性がある。

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る

## 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) 立木孝, 笹森史朗, 南吉昇, 一戸孝七, 村井和夫, 村井盛子, 河嶋寛: 日本人聴力の加齢変化の研究, AUDIOLOGY JAPAN, 45 巻 3 号, pp.241-250, 2002.3