

論文 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

舟波 尚哉*1・山岸 開*2・村上 祐貴*3・外山 茂浩*4

要旨：打音点検実務経験者と非実務経験者を被験者として、人工欠陥を埋設した模擬壁に対して打音試験を実施し、両者の欠陥検知率について検討した。実務経験者の欠陥検知率は非実務経験者に比べて高く、欠陥領域が大きく、また、表層部に位置する程、その傾向は顕著であった。打音点検動作測定試験結果から、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。また、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。

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

H24.12の笹子トンネル天井板落下事故を契機としてH25.9に道路法が改正され、トンネル、道路橋は5年に1回の頻度を基本とした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、内部欠陥の存在を把握できないため、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。点検用ハンマーのみで実施できる打音点検は、点検者の経験や感覚に依存する官能検査である。そのため、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）」の中で進められている。ICTやRTを駆使した次世代打音点検を全ての既存構造物に対して展開していくことは人材、時間、予算の観点から困難であり、多くの既存構造物は従来通りの点検用ハンマーによる打音点検を継続していくことになると思われる。

そこで本研究では、熟達点検者の暗黙知である打音点検技能を可視化し、体系化することで経験の浅い打音点検者の打音点検技能の向上を目的とする。本稿では、その前段階として打音点検実務経験者および非実務経験者の欠陥検知率を評価するとともに、非実務経験者と実務経験者の打音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

試験体概要を図-1に示す。試験体は長さ2000mm、

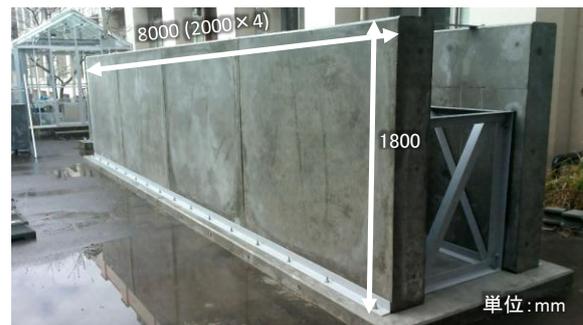


図-1 試験体概要（打音試験）

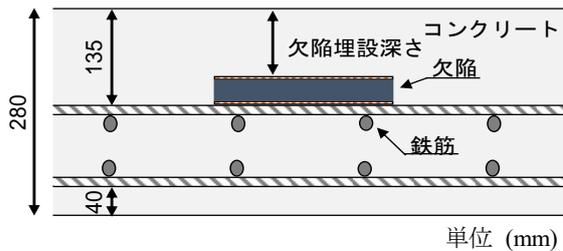


図-2 埋設された人工欠陥

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 ²)	10000, 40000, 90000, 160000
アスペクト比	1:1, 1:2, 1:4, 2:1, 4:1

高さ1800mm、厚さ280mmの壁型パネルであり、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

*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 電子制御工学科

*3 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)

*4 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科教授 博(工)

され、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毎に変化させた。人工欠陥の大きさは、4水準とし、アスペクト比は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。

コンクリートの示方配合を表-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た。試験体の圧縮強度は材齢7日時点で33.2N/mm²であった。

(2) 打音点検動作測定試験

試験体概要を図-3に示す。試験体は断面300mm×300mm、幅50mmの小型の試験体である。同図に示すように、試験体に埋設された鉄板を介してモニターアームと接合した。モニターアームを地面からの高さ1600mmの位置でスライドレールに固定し、模擬壁面を作製した。試験体の各辺は安全対策としてクッションテープで防護した。

2.2 打音試験方法

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。被験者数は非実務経験者5名、実務経験者5名の計10名とした。実務経験者については、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。非実務経験者については、1/4ポンドおよび1/2ポンドの点検用ハンマーを準備したが、全ての非実務経験者が1/4ポンドの点検用ハンマーを選択した。なお、非実務経験者の中には打音点検を知らない被験者がいたため、打音点検に関して説明を行った上で試験を行った。

2.3 打音点検動作測定試験方法

打音点検は、コンクリート表面を打撃することで、コンクリート内部にある空洞と表面に挟まれた部材をたわみ共振させ、健全部と欠陥部の音の違いから欠陥の存在を判定する点検手法である。欠陥の深さや大きさによって、共振周波数は変化することから、欠陥検知率を向上するためには、より多くの周波数成分を含む打撃を行う必要があると考えられる。すなわち、打撃による入力幅広い周波数成分を含むインパルス入力が理想と考えられる。インパルス入力は、力Fの大きさが無限大であり、接触時間 Δt の大きさが限りなく0であることから、打音点検時の点検用ハンマーが壁面に与える力Fと点検用ハンマーが壁面に接触する

表-2 コンクリートの示方配合

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

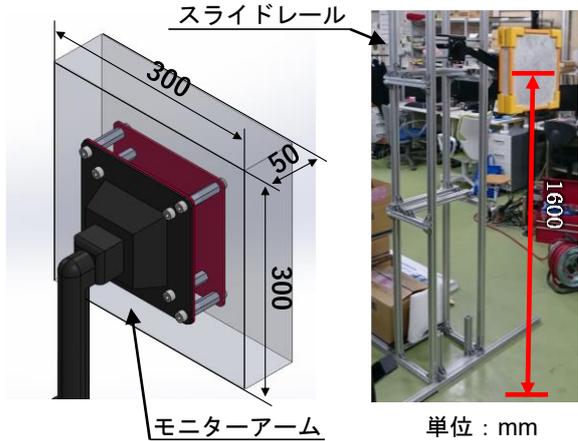


図-3 試験体概要（打音点検動作測定試験）

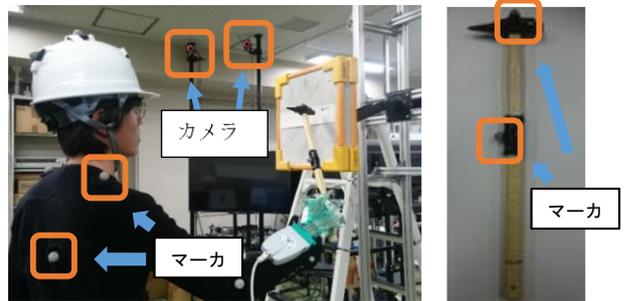


図-4 打音点検動作測定の様子 図-5 点検用ハンマー



図-6 センサシート装着 図-7 点検用ハンマーを握った時の様子

時間 Δt を評価する。Fと Δt に影響を及ぼすと考えられる点検時の点検用ハンマーを握るグリップ力、腕部各関節の関節角度変化量、点検用ハンマーが壁面に当たる接触面積、打撃力を測定した。

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て、10回の打撃動作を撮影し、点検用ハンマーが壁面に接触する時間および打撃時の腕部各関節角度を測定した。8台のカメラから照射された赤外線は、被験者に貼り付けたマーカが反射し、反射した赤外線をカメラで受光することでマーカ位置を測定することができる。図-4に示す通り、計測の際は被験者にボディースーツを着せて、マーカを貼り付けた。また、図-5に示すように、点検用ハンマーにもマーカを貼り付け、点検用ハンマー先端部の位置を計測した。

表-3 非実務経験者の打音試験結果

被験者	年齢	経験年数(年)	欠陥検知率(%)	検知外面積(mm ²)
a	10代		43.3	549947
b	10代		33.9	708069
c	10代		36.5	477488
d	10代		39.6	524327
e	10代		40.0	2557189
平均			38.7	963404

打音点検動作測定時には打撃中の手全体の圧力分布を併せて測定した。図-6、図-7に示すような圧力センサーシートを手全体に装着して測定した。センサーシートでは185個の感圧素子があり、0~345kPaまでの圧力を測定できる。打音点検動作測定試験に使用する点検用ハンマーの重さは、1/4ポンドに統一した。

点検用ハンマーによる打撃力および打撃時の接触面積を計測するために圧力測定フィルムを用いた。フィルムは圧力を受けると赤く発色し、圧力に応じて発色濃度が変化する。この発色濃度、発色面積をスキャナで読み取り、打撃力や接触面積を算出することができる。本研究では、瞬間圧測定範囲50~130MPaの高圧用モノシートタイププレスケールを使用した。コンクリート試験体表面に裁断した圧力フィルムを貼り付け、10回の打撃を行った。測定に使用する点検用ハンマーの重さは1/4ポンドに統一し、実務経験者(被験者Aを除く)は実務で使用している点検用ハンマーでも計測を行った。

3. 打音試験結果

3.1 全体の欠陥検知率

各被験者の欠陥検知率は、式(1)から算出した。

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

表-3, 4に式(1)から算出した非実務経験者、実務経験者の欠陥検知率、プロフィールおよび検知外面積を示す。ここで、検知外面積とは、チョーキングした領域において、非欠陥部の領域のことを指す。被験者全体の欠陥検知率の平均は42.7%であった。欠陥検知率の実務経験者、非実務経験者の平均はそれぞれ46.8%, 38.7%であり、実務経験者の欠陥検知率の方が約8%大きかった。また、非実務経験者の方が実務経験者に比べて検知外面積が大きく、誤判定した領域が大きかった。欠陥検知率が57.2%と被験者Eに次いで高かった被験者Dは、検知外面積が他の実務経験者に比べて大きい。被験者Dは欠陥に対して比較的大きめにチョーキングする様子が見られた。このことより、検知外面積が大きくなったと考えられる。

表-4 実務経験者の打音試験結果

被験者	年齢	経験年数(年)	欠陥検知率(%)	検知外面積(mm ²)
A	40代	2	44.2	141186
B	40代	3	44.3	429403
C	40代	6	31.1	70492
D	50代	8	57.2	1351638
E	60代	9	57.3	273354
平均			46.8	453215

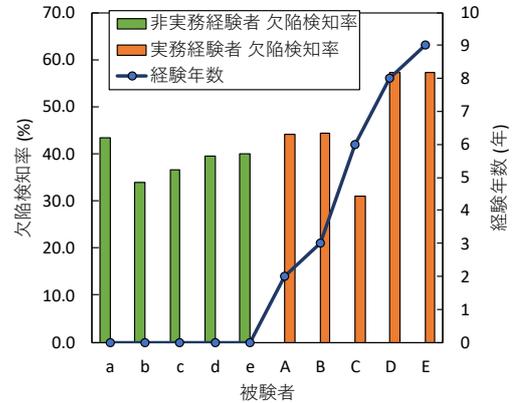
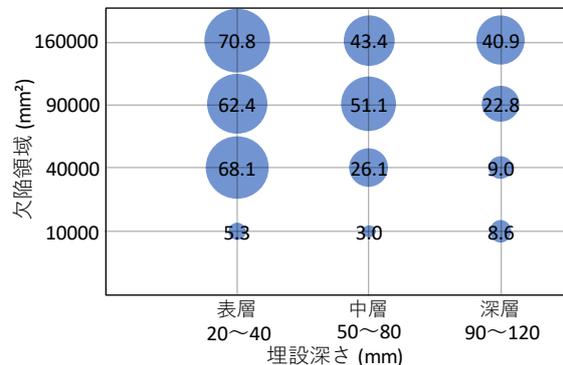
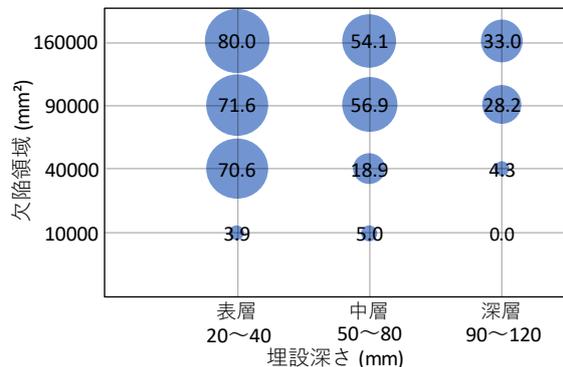


図-8 欠陥検知率と経験年数



(a) 非実務経験者



(b) 実務経験者

図-9 各欠陥領域の欠陥上検知率

図-8に各被験者の欠陥検知率と第2軸に打音点検実務の経験年数を示す。非実務経験者の欠陥検知率は33.9%~43.3%であり、被験者間の欠陥検知率の差異はそれ程大きくない。一方、実務経験者の場合、欠陥検知率は31.1%~57.3%の範囲にあり、欠陥検知率は被験者によって大きく異なった。全体的な傾向としては経験年数が増えるに従い、欠陥検知率が高くなる傾向にある。このことは、実務経験を重ねる中で適切な打撃

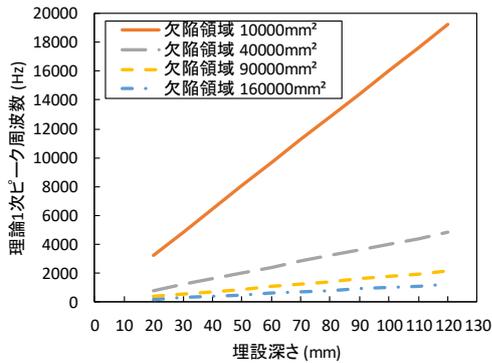


図-10 理論 1 次ピーク周波数

動作が培われ、欠陥検知率が高くなったのではないかと考えられ、後に詳述する。

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。

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

式(1)は、検知外面積を考慮した欠陥検知率だが、欠陥上検知率では、誤判定である検知外面積を含まない。

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、各層における平均値を示した。なお、対象とした欠陥のアスペクト比は1:1である。欠陥領域 10000mm²を除き、いずれの欠陥領域においても、埋設深さが深くなるに従い欠陥上検知率が低くなった。欠陥領域 10000mm²の欠陥上検知率は非実務経験者、実務経験者ともに10%未満であったが、非実務経験者の欠陥上検知率の方が若干大きい。これは、打撃時の欠陥の1次ピーク周波数が関係していると考えられる。図-10に式(3)から算出した埋設深さごとによる理論1次ピーク周波数¹⁾を示す。

$$f_f = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{Ed^2}{12(1-\nu^2)\rho a^4}} \quad (3)$$

ここで、 K_n は振動モードによって異なる値を持つ係数であり、 E 、 ν 、 ρ は、それぞれコンクリートのヤング率、ポアソン比、密度である。また、 a は欠陥の半径、 d は欠陥の深さである。欠陥の形状が正方形のため対角線の半分を半径とした。各パラメータの値は、文献1)の設定値を参考に、 $K_n = 4.99$ 、 $E = 28 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.20$ 、 $\rho = 2380 \text{ kg/m}^3$ とし、 a 、 d にそれぞれ各欠陥の埋設深さ m 、欠陥の対角線の長さの半分の値 m を代入して算出した。同図より欠陥領域が10000mm²の場合は他の欠陥領域

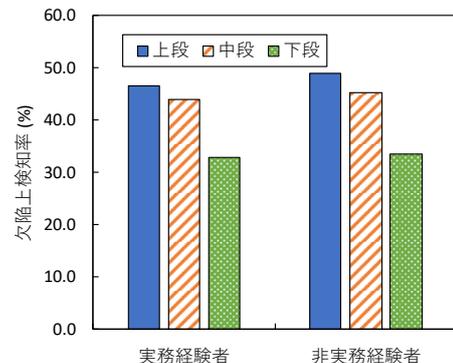


図-11 埋設位置比較

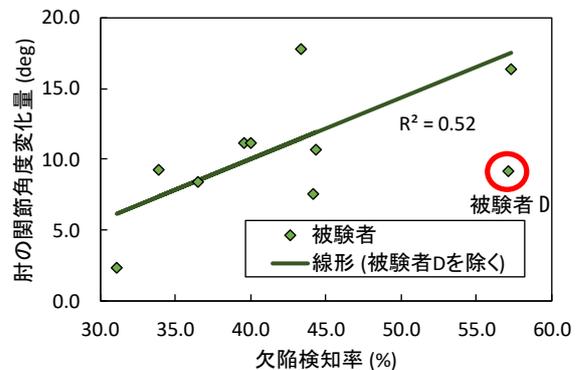


図-12 肘の関節角度変化量と欠陥検知率

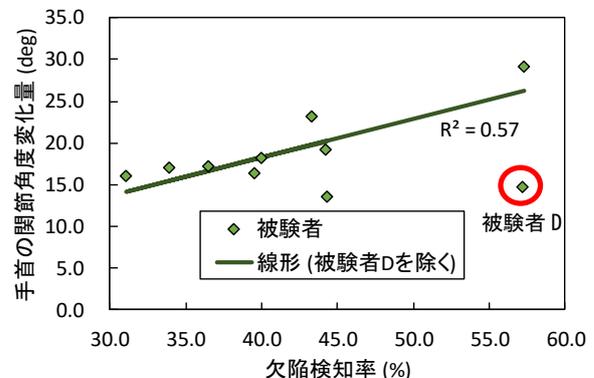


図-13 手首の関節角度変化量と欠陥検知

に比べ、明らかに理論1次ピーク周波数が大きい。人間の可聴域は約20~20000Hzであることから、年齢を重ねる毎に可聴域が狭くなる傾向にあり、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²⁾。このことから10000、40000mm²の場合、非実務経験者の方が欠陥上検知率が高かったことは年齢が若く可聴域が広がったことが要因の1つとして考えられる。実務経験者は欠陥領域が90000、160000mm²の欠陥上検知率が非実務経験者より大きい傾向にあった。コンクリートの内部欠陥が大きいほど、土木構造物への影響が大きいことを考慮すると、大きい欠陥をより正確に検知できた方が良く、図-9の結果からも分かるようにこれらの欠陥領域は経験によって検知率を向上させることが出来ると思われる。

図-11に欠陥埋設位置毎の欠陥上検知率を示す。本試験体のパネルには上段、中段、下段付近に同じ埋設

深さで同じ欠陥領域の欠陥を複数埋設してあるパネルがあり、同図はそのパネルの欠陥上検知率である。上段から下段に伴い、欠陥上検知率が小さくなるのが分かる。上段と下段の欠陥上検知率は 10%以上差異が生じており、下段の打音点検は注意を要する。

4. 打音点検動作測定結果

4.1 欠陥検知率に及ぼす打撃動作の影響

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と打撃時点の肘および手首の関節角度変化量を算出した。関節角度変化量は、10回の打撃動作の平均値である。なお、一部の被験者については、10回目および9回目の打撃動作の適切なデータを取得できていないため、9回、8回の打撃における平均である。図-12、13に各被験者の肘および手首の関節角度変化量と欠陥検知率の関係を示す。同図より肘および手首の関節角度変化量と欠陥検知率は、被験者Dを除き、欠陥検知率と高い相関性が得られ、打撃時の肘および手首の使い方は欠陥検知率に影響を及ぼすものと考えられる。被験者Dの打音動作は特異的である可能性があり、今後さらに検討を行う。

本実験で使用したモーションキャプチャのフレームレート数は 60fps であることから点検用ハンマーと模擬壁面での正確な接触時間を求められない。そこで、点検用ハンマーが壁面に接触した時点から後方に移動する速度が速い程、接触時間は短いと仮定し、点検用ハンマー先端部のマーカ座標から、点検用ハンマーが壁面に接触した時点から 0.1 秒の間に後方へ移動した距離を算出した。なお、一部の被験者については、10回目の打撃後、点検用ハンマーの動きを緩めており、適切なデータを取得できていないため、9回の打撃における平均である。図-14に10回の打撃の点検用ハンマーが壁面に接触した時点から 0.1 秒の間に後方へ移動した平均距離と欠陥検知率の関係を示した。同図より、欠陥検知率が高くなるほど点検用ハンマーが壁面に接触した時点から 0.1 秒の間に後方へ移動した距離が大きくなる傾向にあり、欠陥検知率が高い被験者ほど接触時間の短い打撃を行っていると考えられる。

4.2 欠陥検知率に及ぼす打撃の接触面と打撃力の関係

図-15に10回の打撃の接触面積および打撃力の平均値を示す。図中に示すエラーバーは標準偏差を示しているが、本実験の範囲内では非実務経験者と実務経験者の接触面積および打撃力には、統計的に有意な差はないといえる。

点検の欠陥検知率を上昇させるためには、図-10に示した欠陥の位置する埋設深さや欠陥領域によって共振周波数は異なるため、状況に応じて打撃力を自在に

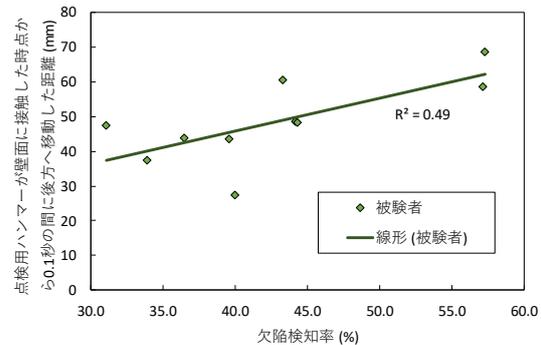


図-14 点検用ハンマーが壁面に接触した時点から 0.1 秒の間に後方へ移動した距離と欠陥検知率

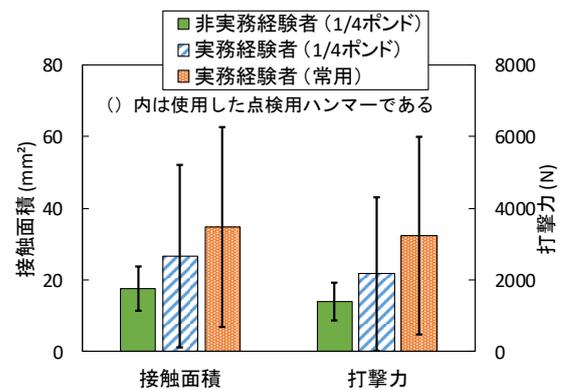


図-15 接触面積と打撃力比較

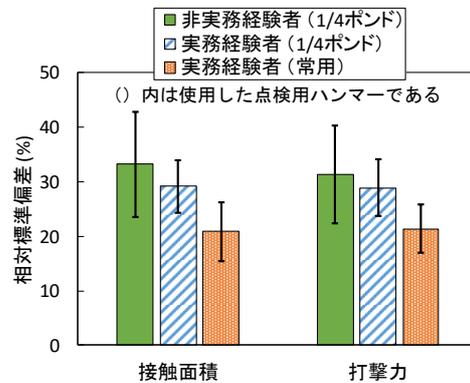


図-16 相対標準偏差

変化させる必要があると考えられる。このことは、すなわち、点検用ハンマーでの打撃を意識的に制御することが重要であると考えられる。図-16は、各被験者の壁面打撃時の接触面積および打撃力の相対標準偏差である。用意した1/4ポンドの点検用ハンマーの場合、非実務経験者に比べて、実務経験者の相対標準偏差は若干小さい。さらに、普段実務で使用している常用の点検用ハンマーの場合（被験者Aを除く）には、相対標準偏差が10%以上低下した。このことから、実務経験者は普段実務で使用している点検用ハンマーを用いた場合、非実務経験者に比べて打撃のばらつきが少なく、点検用ハンマーの打撃を制御できていると考えられる。

4.3 欠陥検知率に及ぼすグリップの影響

図-17に各被験者の点検用ハンマーを最も後方に

引いてから打撃する間の手全体にかかる荷重（グリップ力）を示す。グリップ力は10回の打撃の平均値である。グリップ力は実務経験者、非実務経験者で、57.0N、30.5Nであった。このことより、実務経験者は非実務経験者の約2倍の力で点検用ハンマーを握っていた。また、同図に示すように、グリップ力が大きくなるに伴い欠陥検知率が高くなる傾向にあり、欠陥検知率の向上には点検用ハンマーをしっかりと握る必要があると考えられる。

点検用ハンマーを最も後方に引いてから打撃する間の点検用ハンマーを握る各指の平均圧力を図-18に示す。図中の値は10回の打撃の平均である。各指の平均圧力に着目すると、実務経験者は非実務経験者に比べて特に小指と親指の圧力が大きい。親指と小指で点検用ハンマーを上下でしっかりと固定することで打撃のバラツキの減少や接触時間の短い打撃を行っている可能性がある。このように、打音点検時の点検用ハンマーの握り方や打撃動作は欠陥検知率に影響を及ぼしていると考えられ、今後も引き続き検討を続けていく。

5 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実務経験者の欠陥検知率は46.8%で非実務経験者に比べて約8%高い。また、非実務経験者は実務経験者に比べて検知外面積が大きく、打撃時の健全部と欠陥部の音の判別が曖昧だと考えられる。
- (2) 欠陥の埋設深さが深層になるに従い欠陥上検知率が低くなった。欠陥領域10000mm²では実務経験の有無によらず欠陥上検知率が10%未満であった。また、実務経験者の方が非実務経験者に比べて欠陥上検知率が小さかった。これは加齢による人間の可聴域の変化による影響だと考えられる。
- (3) 実務経験者と非実務経験者の欠陥上検知率は欠陥領域が大きい程、欠陥埋設深さが浅い程、実務経験者の検知率が大きくなる傾向にあった。
- (4) 壁面の欠陥埋設位置が下方になる程、欠陥上検知率が低下した。
- (5) 欠陥検知率と打撃時の肘および手首の関節角度変化量には相関性が認められ、打撃時の肘および手首の関節角度変化量が大きいほど欠陥検知率が高い傾向にあった。
- (6) 点検用ハンマーが壁面に接触した時点から点検用ハンマーが0.1秒の間に後方へ移動した距離が大きくなるほど欠陥検知率が高くなる傾向にあった。このことより、欠陥検知率の向上には接触時間の短い打撃の入力が必要であることが示唆

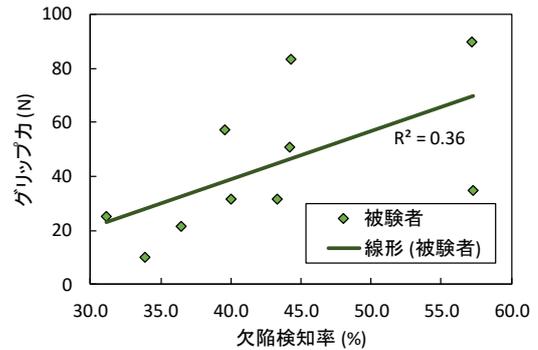


図-17 グリップ力と欠陥検知率

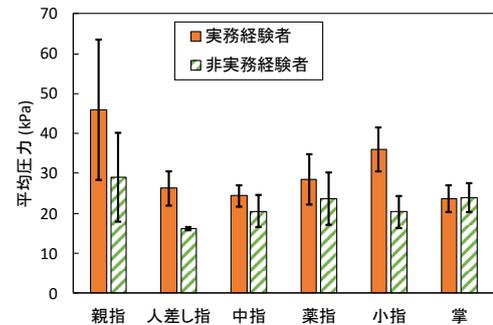


図-18 各指の圧力平均

された。

- (7) 欠陥検知率に及ぼす打撃動作中の手全体にかかる荷重（グリップ力）が大きくなるに従い、欠陥検知率が高くなる傾向にあることから、打音点検時の点検用ハンマーをしっかりと握る必要があることが分かる。
- (8) 点検用ハンマーを最も後方に引いてから打撃する間の各指の平均圧力は、実務経験者は非実務経験者に比べて大きい。特に小指と親指の圧力が大きいことから、親指と小指で点検用ハンマーを上下でしっかりと固定することで打撃のバラツキの減少や接触時間の短い打撃を行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：17K03290）により行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 森和也, Andrea SPAGNOLI, 村上敬宜, 鳥越一平: コンクリート構造物の圧力波を用いた新しい非接触非破壊検査法, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1473-1478, 2002.6
- 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