

打撃行動特性に基づく RC 構造物の打音点検における欠陥の見落とし要因の分類

長岡工業高等専門学校	学生会員	○小林 勇貴
長岡工業高等専門学校	正会員	込山 晃市 陽田 修 村上 祐貴
熊本高等専門学校	非会員	中島 栄俊
長岡技術科学大学	非会員	原川 良介
東北大学	非会員	昆陽 雅司
筑波大学	非会員	本間 康弘
(株)ネクスコ・エンジニアリング新潟	非会員	清水 遼介

1. はじめに

打音点検は、点検用ハンマーによる打撃音を手掛かりに、コンクリート内部の欠陥を探索する方法である。聴覚に基づく判定が点検者の技能に左右されるため、点検精度のばらつきや技能継承が課題となる。見落としに至る過程には、欠陥部を打撃しない場合と、打撃しても発見に至らない場合があり、発見の有無だけではその違いを把握できない。

限られた点検時間の中で見落としを減らすには、探索範囲の網羅性と、打撃後の認識・判断に至る行動を区別して捉える必要がある。点検時間の異なる条件で打撃履歴を比較することにより、見落としが生じる段階の違いを検討できる。

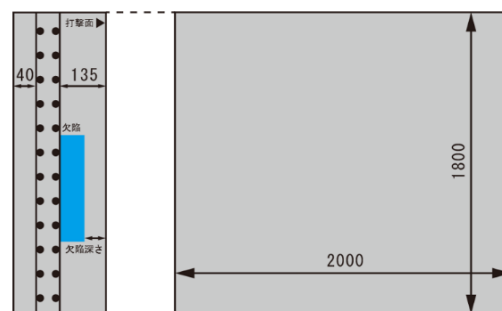
本研究では、VR を用いた打音点検で記録した打撃時刻と位置座標から、欠陥の見落としを打撃の有無と行動上の気づきの兆候に基づいて分類した。さらに、1 m²当たりの設定点検時間が約 60 秒と約 120 秒の 2 条件で欠陥発見割合と見落とし要因別の発生状況を比較し、見落とし過程の違いを検討した。

2. 試験概要

2.1 打撃音の収録

2.1.1 人工欠陥パネル

VR で再生する打撃音の音源として、人工欠陥を埋設した壁型コンクリートパネルを用いた (図 1)。パネルの寸法は 2000 mm×1800 mm×280 mm であり、発泡スチロールにより内部空洞を模擬した。欠陥条件を表 1 に示す。図 2 に、人工欠陥パネルの健全部、欠陥部の領域区分を模式的に示す。なお、図中の欠陥配置は説明用であり、実際の配置とは異なる。深さは 30, 50, 70, 80, 90 mm の 5 水準、欠陥の平面面積は 10,000, 40,000, 90,000, 160,000 mm² の 4 水準と



(a) 側面図 (b) 正面図

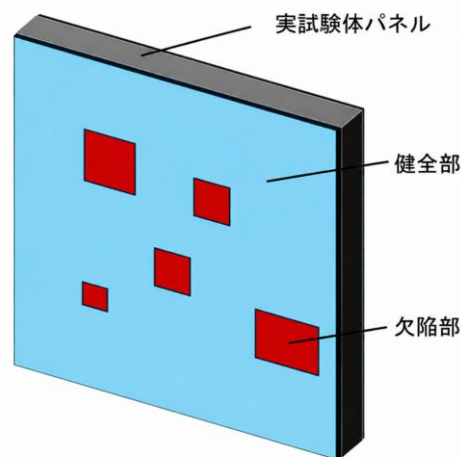
図 1 人工欠陥パネル概要

表 1 欠陥パラメータ

欠陥深さ (mm)	30	50	70	80	90
欠陥領域 (mm ²)	10000	40000	90000	160000	
アスペクト比	1:1	1:2			

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



※実際の欠陥配置とは異なる

図 2 パネルの領域区分の模式図

し、形状のアスペクト比を 1:1 または 1:2 とした。コンクリートの示方配合は表 2 のとおりである。セメントには早強ポルトランドセメントを用い、材齢 7 日の圧縮強度は 33.2 N/mm^2 であった。

2.1.2 打撃音の収録位置

人工欠陥パネルの健全部と欠陥部を 1/4 ポンドの点検用ハンマーで打撃し、VR 用音源を収録した。録音には、リアルタイム計測ソフト O-Solution と計測用マイクロフォン MI-1271 (いずれも小野測器社製) を用いた。健全部は、欠陥の影響を受けない位置で収録した。欠陥部では、図 3 のように、欠陥中心から外周に向かう水平方向に 30 mm 間隔で収録位置を設け、各位置の打撃音を収録した。

2.2 VR モデルの構築

本研究では、VR 空間上に実橋梁の外観を反映した 3D モデルを作成した。一眼レフカメラで撮影した橋梁写真を Adobe Photoshop で加工し、モデル表面にテクスチャとして貼り付けた。その表面に、人工欠陥パネルと同じ寸法 (2.0 m×1.8 m、面積 3.6 m²) の点検対象範囲を設けた。VR 環境は Unity (Ver.6000.0.48f1) で構築し、表示・操作には Meta Quest Pro を使用した。

被験者はコントローラを点検ハンマーの代わりに用い、その先端がモデル表面に接触した時刻と位置座標を打撃履歴として記録した。打撃時にはコントローラを振動させた。また、欠陥と判断した箇所をチョーキングし、その位置を記録できるようにした。

VR モデルには、人工欠陥パネルの欠陥配置に対応する欠陥領域を設定した。再生音には 2.1.2 節で収録した音源を用い、健全部と欠陥部にそれぞれ割り当てた。欠陥部では、中心から境界部まで 30 mm 間隔で収録した音源に対応する領域に割り当て、打撃位置が属する領域の音源を再生した。欠陥部の外側では、健全部の音源を再生した。

2.3 被験者

被験者は、橋梁点検業務に従事する技術者 12 名であり、打音点検経験年数は 1~34 年である。

2.4 VR を用いた打音点検試験

試験前に VR 機器の操作方法と打撃動作を確認した。被験者は Meta Quest Pro を装着し、VR 空間内を自由に移動しながら、コントローラでモデル表面を打撃した。欠陥があると判断した箇所にはチョーキ

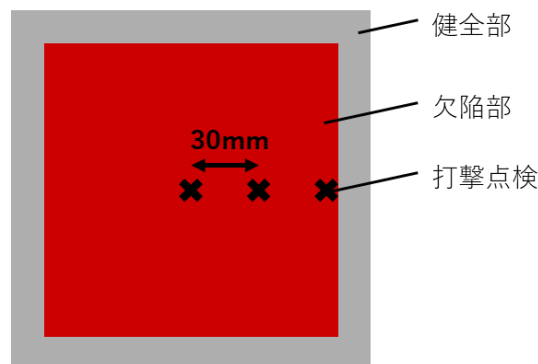


図 3 録音時のパネル表面の概略図

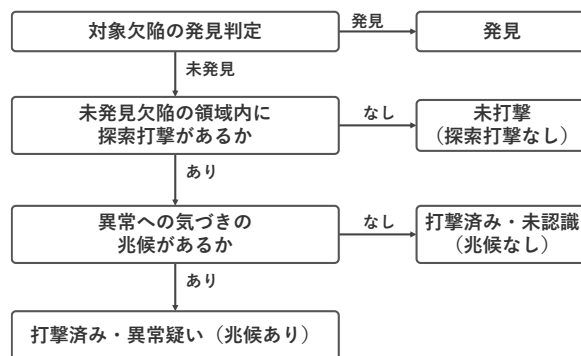


図 4 見落としと分類の判定

ングを行った。試験中は、打撃時刻、打撃位置およびチョーキング位置を記録した。

同一の被験者 12 名に対し、点検時間 3 分 20 秒 (約 60 秒/m²) の試験を実施した後、点検時間 7 分 30 秒 (約 120 秒/m²) の試験を実施した。両条件では欠陥配置の異なるパネルを用い、点検範囲の寸法は同一とした。両条件の 9 欠陥は、幅・高さ・面積・深さが欠陥ごとに対応している。評価対象は各条件 9 欠陥とし、欠陥位置の事前教示および試験後の正解位置の提示は行わなかった。

VR を用いた打音点検については、先行する検討で実パネルとの比較が行われている。同一の被験者 26 名に対し、欠陥配置と点検時間 (7 分 30 秒) を共通とした比較では、欠陥発見割合は実パネルで 52.8%、VR 試験体で 54.7%であった²⁾。

3. 実験結果

3.1 欠陥の見落としと要因の分類

点検行動は、欠陥を探す探索フェーズと、疑わしい箇所の大きさ・範囲を確認する同定フェーズに区分した。打撃およびチョーキングの操作記録と位置の対応に基づいて区分し、本研究では探索打撃を解析対象とした。発見・未発見を判定した後、未発見欠陥を図 4 の手順で 3 要因に分類した。欠陥領域内 (境

界を含む)に探索打撃が記録されていない場合を「未打撃」とした。探索打撃が記録されている場合は、異常への気づきの兆候が認められない場合を「打撃済み・未認識」、認められる場合を「打撃済み・異常疑い」とした。「未打撃」は探索打撃の記録がないことを表し、同定打撃を含む全打撃の不存在を意味しない。「打撃済み・未認識」と「打撃済み・異常疑い」は、いずれも欠陥領域内への探索打撃が記録された要因である。

3.2 行動特徴量に基づく気づきの兆候の判定

本試験では、被験者の異常への気づきを直接計測していないため、打撃時刻と位置座標から探索行動の変化を捉えた。打撃音に違和感を覚えた際には、打撃位置の局所的な集中や方向の変化、動作の停滞が生じると考え、これらの変化を捉える6種類の行動特徴量を用いた²⁾。いずれかが所定の判定基準を満たす場合を「異常への気づきの兆候あり」、いずれも満たさない場合を「兆候なし」とした。行動特徴量は、同定打撃またはチョーキングで区切った探索区間ごとに算出し、兆候が成立した打撃点の位置に基づいて各欠陥に対応付けた。この判定と前節の分類は行動指標に基づくものであり、被験者の認識状態を直接示すものではない。特徴量の式・閾値等の詳細は特許出願を考慮して非開示とする。本稿の比較では両条件に同じ兆候判定基準を適用した。独立した観察判定との一致による妥当性検証は未実施であり、本分類は行動指標に基づく探索的な分類として位置付ける。

3.3 点検時間条件別の欠陥発見割合

各条件の9個の欠陥について、チョーキング記録から対象欠陥を確認し、線で囲まれた領域が欠陥領域と一部でも重なるか、両者の境界が接触する場合を「発見」とした。判定には欠陥領域そのものを用い、周辺への拡張は行わなかった。閉じていないチョーキング線は、始点と終点を直線で結んで囲み領域を構成した。両時間条件に同一の判定基準を適用した。被験者ごとの欠陥発見割合は、発見数を9個で除して求めた。図5に12名の平均を示す。3分20秒条件は50.9%、7分30秒条件は69.4%で、差は18.5ポイントであった。1人当たりの平均発見数は、それぞれ4.58個、6.25個であった。図5および図8の棒は個人別割合の平均、エラーバーは標準偏差を示す(各条

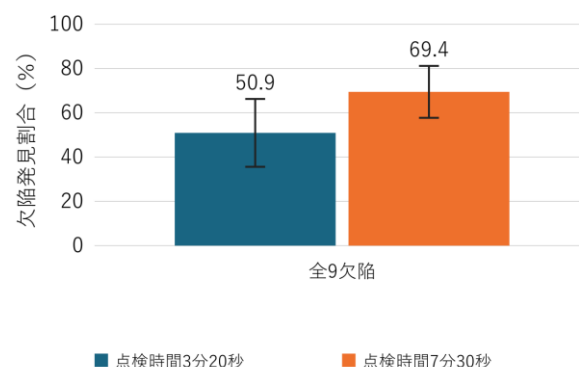


図5 平均欠陥発見割合

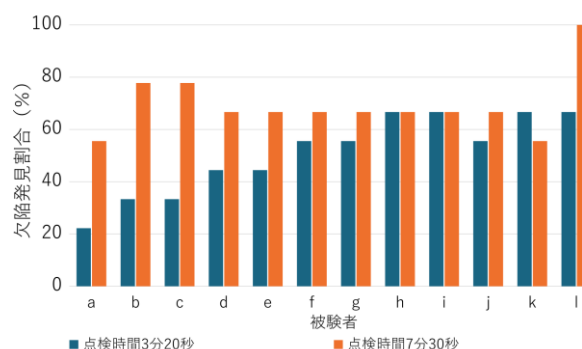


図6 被験者ごとの欠陥発見割合

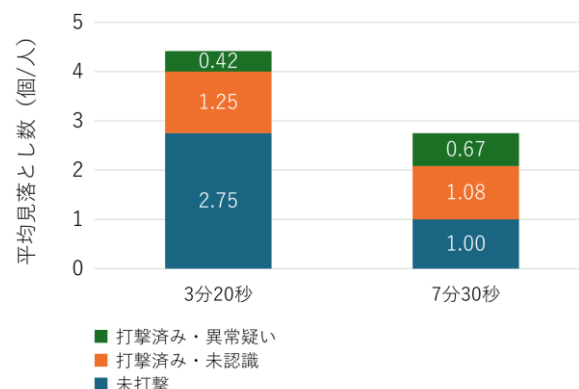


図7 要因別の平均見落とし数

件 n=12)。

図6に、被験者12名(a~l)の欠陥発見割合を示す。3分20秒条件と比べて7分30秒条件で発見数が多かった者は9名、同数は2名、少なかった者は1名であった。多くの被験者で7分30秒条件の値が高かったが、条件間の変化には個人差がみられた。

3.4 点検時間条件別に見落とし要因

未発見欠陥を3.1節に示した3要因に分類し、各要因の見落とし数を点検時間別に比較した。図7に、要因別の1人当たり平均見落とし数を示す。合計は、点検時間3分20秒で4.42個/人、点検時間7分30秒

で 2.75 個/人であった。

「未打撃」は、点検時間 3 分 20 秒で 2.75 個/人、点検時間 7 分 30 秒で 1.00 個/人であった。全欠陥に占める割合は、それぞれ 30.6%、11.1%であった。点検時間 3 分 20 秒では、「未打撃」が 3 要因の中で最も多かった。探索打撃が記録された欠陥に限定し、被験者ごとに、探索打撃が 1 回以上記録された欠陥数を分母、そのうち発見と判定された欠陥数を分子として欠陥発見割合を算出した。両条件とも、発見した欠陥には欠陥領域内の探索打撃が記録されていた。両点検時間とも分母がゼロの被験者はいなかった。

図 8 に、全 9 欠陥を対象とした割合と、探索打撃が記録された欠陥に限定した割合について、被験者ごとに算出した割合を 12 名で平均した値を示す。探索打撃が記録された欠陥に限定した割合は、点検時間 3 分 20 秒で 74.8%、点検時間 7 分 30 秒で 78.6%であり、差は 3.8 ポイントであった。全 9 欠陥を対象とした場合の差である 18.5 ポイントと比較して、その差は小さかった。ただし、両点検時間で探索打撃が記録された欠陥が同一とは限らないため、この比較を打撃後の認識・判断能力の差として解釈することはできない。

「打撃済み・未認識」は、点検時間 3 分 20 秒で 1.25 個/人、点検時間 7 分 30 秒で 1.08 個/人であり、両点検時間で近い値を示した。

「打撃済み・異常疑い」は、点検時間 3 分 20 秒で 0.42 個/人、点検時間 7 分 30 秒で 0.67 個/人であり、両点検時間で認められた。

両点検時間で最も大きな差がみられたのは「未打撃」であり、「打撃済み・未認識」および「打撃済み・異常疑い」も両点検時間で確認された。ただし、試験順序が固定され、使用したパネルも異なるため、両点検時間の違いを点検時間のみの影響と断定することはできない。今後は、探索範囲を確保する手順に加え、打音の違いを捉える練習や、疑わしい箇所の追加打撃による確認手順を、見落とし要因に応じた訓練の候補として検討する必要がある。これらの訓練効果は本試験では検証しておらず、今後の検証課題とする。

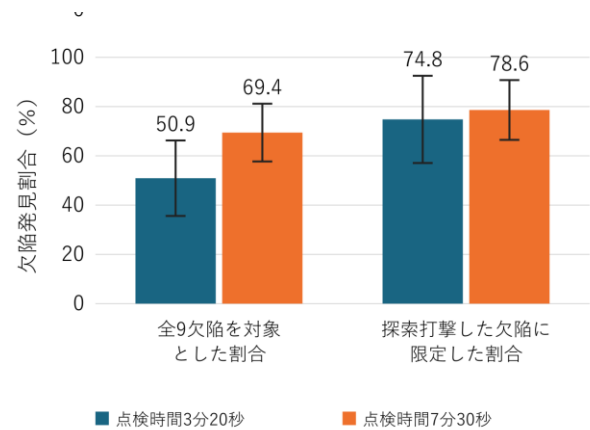


図 8 対象欠陥別の発見割合

4. まとめ

(1) 行動特徴量から異常への気づきの兆候を判定し、未発見欠陥を「未打撃」「打撃済み・未認識」「打撃済み・異常疑い」の 3 要因に分類した。

(2) 欠陥発見割合は点検時間 3 分 20 秒で 50.9%、点検時間 7 分 30 秒で 69.4%であり、差は 18.5 ポイントであった。12 名中 9 名で 7 分 30 秒条件の発見数が多かった。

(3) 「未打撃」の平均見落とし数は点検時間 3 分 20 秒で 2.75 個/人、点検時間 7 分 30 秒で 1.00 個/人であった。打撃後の 2 要因も両条件で認められた。

(4) 見落とし低減には、探索範囲の確保に加え、「打撃済み・未認識」や「打撃済み・異常疑い」などの見落とし要因に応じた訓練方法の検討が必要であることが示唆された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K00964, JP25K22119 の助成を受け実施した。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.
- 2) 小林勇貴, 込山晃市, 清水遼介, 陽田修, 原川良介, 昆陽雅司, 本間康弘, 中島栄俊, 村上祐貴: 打撃パターンに基づく RC 構造物の打音点検における欠陥の見落とし要因の分類, 土木学会第 81 回年次学術講演会, VI-142, 2026.