

VR を用いた打音点検技能診断に向けた打撃特性の分析

長岡工業高等専門学校 学生会員

○Warawat Siriwiwat

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

道路橋やトンネルの維持管理では、定期点検により損傷を把握し、必要な対策につなげることが求められる。打音点検は、ハンマーによる打撃音の変化からコンクリートの浮きやはく離を検知する手法であり、簡便な点検方法として用いられている。一方、音の判別や打撃操作は点検者の技能に依存し、欠陥検知精度に個人差が生じることが報告されている¹⁾。この技能は、現場で指導を受けながら実務を経験するOJT (On-the-Job Training) を通じて習得することが多い。

OJT では指導者の動作を観察し、実践を重ねられる反面、指導内容が経験に左右されやすく、習得状況を共通の基準で定量的に評価することは容易ではない。技能に応じた訓練を行うには、欠陥の検知精度と点検行動を対応づけ、点検者ごとの特徴を把握する必要がある。実構造物では欠陥条件の統一や行動の記録が難しいが、VR では欠陥配置を設定し、打撃位置や時刻を記録しながら試験を実施できる。

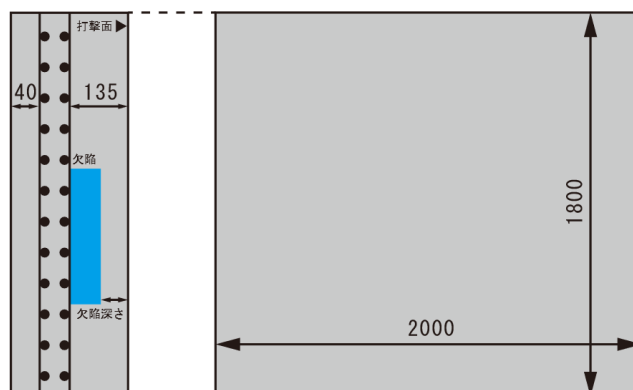
本研究では、VR 打音点検システムを用い、欠陥を発見する探索フェーズと、欠陥範囲を特定する同定フェーズに分けて点検行動を分析する。試験時間の異なる 2 条件で欠陥検知精度および打撃特性を比較する。

さらに、打撃回数と欠陥発見率の関係にみられる個人差を整理し、打音点検技能の診断に向けた基礎資料を得ることを目的とする。

2. 試験概要

2.1 人工欠陥パネル

本試験では、幅 2000 mm、高さ 1800 mm、厚さ 280 mm のコンクリート壁型パネル 1 枚を試験体として使用した。試験体内部には、コンクリート構造物に生じる浮きや剥離等の内部空洞を模擬するため、厚さ 5 mm の発泡スチロールを埋設し、人工欠陥（以下、欠陥）を複数設けた。各欠陥は、埋設深さ、面積およびアスペクト比の異なる条件で構成されており、埋設深さは 30~90 mm の 5 水準、欠陥面積は 10000~160000 mm² の 4 水準、アスペクト比は 1:1 および 1:2 の 2 水準とした。試験体の形状および寸法を図 1 に、各欠陥のパラメータを表 1 に示す。なお、本試験体は今後の打音点検試験においても継続して使用する予定である。そのため、被験者が事前に欠陥の埋設位置を把握することによって点検結果に影響が生じる



(a) 側面図

(b) 正面図

図 1 人工欠陥パネル概要

表 1 人工欠陥パラメータ

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

ことを避けるため、欠陥の詳細な埋設位置については公表しない。

2.2 VR 打音点検システム

2.2.1 VR 試験体の構築

既往研究²⁾と同様に、実寸大の 3D モデルを VR 空間に配置する打音点検システムを用いた。VR 試験体の構築では、実試験体の形状および表面状態を再現するため、Blender を用いて実寸大の 3D モデルを作成した。実試験体の表面を撮影した写真を Adobe Photoshop で補正し、作成した 3D モデルの表面にテクスチャとして貼り付けた。これにより、実試験体の寸法およびコンクリート表面の外観を VR 空間内に再現した。作成した 3D モデルは Unity 上に配置し、Meta Quest Pro を用いて表示した。点検対象範囲は実試験体と同じ寸法の枠内に設定し、実試験体に対応する範囲を VR 空間内で点検できる構成とした。

VR 試験体では、コントローラを点検ハンマーの代わりに使用し、先端が壁面に接触すると、振動とともに打撃位置に対応した収録音が提示される。また、欠陥と判断した領域を VR 空間内でチョーキングする機能を設けた。システムでは各打撃の時刻および座標に加え、チョーキングした領域の座標を記録できる構成とした。

2.2.2 再生音の収録と配置

VR で再生する打撃音は、実試験体の表面を点検ハンマーで打撃することで収録した。収録した打撃音を VR 空間内に配置するにあたり、VR 試験体の表面を健全部、健全端部および欠陥部に区分した。健全端部は、パネル外縁の影響を考慮して外縁から 200 mm 以内の範囲とし、それ以外の領域を健全部または欠陥部として区分した。

欠陥部では、欠陥の中心から境界に向かう線上に 30 mm 間隔で収録点を設け、各収録点において打撃音を収録した。図 2 に欠陥部の収録位置を示す。収録した打撃音は各収録点に対応する位置に割り当て、欠陥内部の打撃位置に応じて再生音が切り替わるように設定した。また、アスペクト比が 1:1 以外の欠陥では、長辺方向の中心から境界までの距離を基準として打撃音を配置した。

さらに、打撃時の衝撃加速度に応じて再生音の大きさを变化させるため、式(1)に示す関係を用いて出力音を設定した。本式では、衝撃加速度 100 m/s²を基準とし、打撃時の衝撃加速度に応じて再生音の設定値を变化させる。これにより、VR 試験体では打撃位置だけでなく、衝撃加速度に応じて再生される打撃音が变化する構成とした。

$$\text{出力音[db]} = \frac{\text{衝撃加速度[m/s}^2\text{]}}{100[\text{m/s}^2]} \times \text{挿入音[db]} \quad (1)$$

2.3 被験者

橋梁点検業務に従事する技術者 11 名を対象とした。打音点検の経験年数は 1~34 年である。

2.4 VR を用いた打音点検試験

同一の被験者 11 名を対象として、試験時間の異なる 2 条件で VR 打音点検試験を実施した。試験に先立ち、被験者が VR 機器の操作に慣れることを目的として、3 分間の事前練習を実施した。試験では、被験者がヘッドマウントディスプレイを装着し、VR コントローラを点検ハンマーの代わりに操作して VR 試験体の壁面を打撃した。被験者は打撃時に再生される音の違いを手掛かりとして欠陥の有無を判断し、欠陥を発見した場合にはその範囲を確認しながら欠陥と判断した領域を VR 空間内でチョーキングした。

試験時間は 1 回目を 3 分 20 秒、2 回目を 7 分 30 秒とし、全被験者が同じ順序で両条件の試験を実施した。両試行では試験時間および VR 試験体上の欠陥配置を変更し、その他の試験条件は統一した。各試行の終了後には、被験者がチョーキングした領域の座標と実際の欠陥領域を照合し、欠陥の発見状況および欠陥領域と健全部に対するチョーキング面積を求めた。これらの結果を用いて、欠陥発見率、欠陥上検知率および誤判定割合を算出し、式(2)~(4)により欠陥検知精度を評価した。また、打撃位置や時刻などの行動ログを用いて、試験時間条件による打撃特性の違いや、被験者ごとの打撃行動の特徴について分析した。

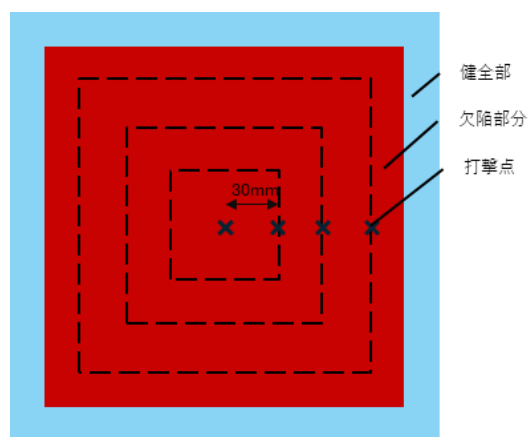


図 2 再生音の収録と配置

$$\text{欠陥発見率[\%]} = \frac{\text{発見した欠陥個数}}{\text{総欠陥個数}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{欠陥上検知率[\%]} = \frac{\text{検出した面積}}{\text{発見した欠陥の総面積}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{誤判定割合[\%]} = \frac{\text{誤判定面積}}{\text{発見した欠陥の総面積}} \times 100 \quad (4)$$

欠陥発見率は、埋設した欠陥個数に対する発見個数の割合である。チョーキング領域が欠陥領域と少しでも重なれば、その欠陥を発見したと判定した。

欠陥上検知率は、発見した欠陥の総面積のうち、チョーキングと重なる欠陥領域の面積の割合を表す。

誤判定割合は、同じ欠陥総面積を基準に、健全部を欠陥と判断した面積を評価する。

図 7・図 8 の欠陥別平均値は、未発見の欠陥の値を 0 と定め、被験者 11 名の値を平均して求めた。打撃回数、座標、時刻、加速度、時間間隔および距離間隔を記録した。

打撃加速度は、Unity 上で取得したコントローラの位置座標の時間変化から速度および加速度を算出し、打撃時の加速度の大きさを用いた。

打撃距離間隔は、試験体表面上における連続する打撃位置について、X 座標および Y 座標から 2 点間の距離を算出した。

打撃テンポは、連続する打撃時刻の差から時間間隔を求め、その逆数を算出して平均値を用いた。

点検行動は探索フェーズと同定フェーズに区分した。欠陥を探索している間の打撃を探索フェーズとし、欠陥に対するチョーキングの開始から終了までの打撃を同定フェーズと定義した。次の欠陥を探索する際の打撃は、再び探索フェーズとして扱った。

3. 試験結果

3.1 試験時間条件と欠陥発見率

図 3 に、各試験時間条件における被験者 11 名の平均欠陥発見率を示す。3 分 20 秒条件では 50.51%、7 分 30 秒条件では 68.69% となり、7 分 30 秒条件の方が 18.18 ポイント高い値を示した。また、標準偏差はそれぞれ 11.95 ポイント、10.40 ポイントであり、7 分 30 秒条件では被験者間のばらつきがやや小さかった。

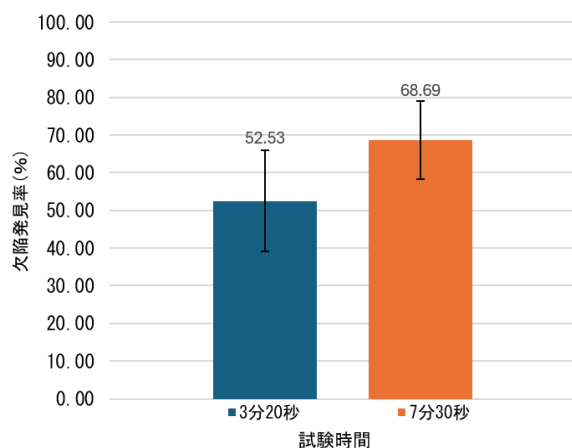


図3 各試験時間条件の欠陥発見率

表2 探索フェーズの打撃特性

	試験時間	
	3分20秒	7分30秒
打撃回数 (回)	304	713
打撃加速度 (m/s^2)	21.5	20.6
打撃距離間 (cm)	9.41	9
打撃テンポ (回/s)	3.44	3.6

なお、図中のエラーバーは標準偏差を示す。ただし、両試行では試験時間に加えて欠陥配置と実施順序も異なるため、欠陥発見率の差を試験時間のみの影響と解釈することはできない。

3.2 探索フェーズの打撃特性

表2に、探索フェーズにおける打撃特性の平均値を示す。打撃回数は3分20秒条件で304回、7分30秒条件で713回となり、7分30秒条件では約2.35倍に増加した。一方、打撃加速度は 21.5 m/s^2 から 20.6 m/s^2 、打撃距離間隔は9.41 cmから9.00 cmとなり、いずれもわずかに減少した。また、打撃テンポは3.44回/sから3.60回/sとなり、わずかに増加した。このように、7分30秒条件では総打撃回数に大きな違いがみられたものの、打撃加速度、打撃距離間隔および打撃テンポの平均値は両条件で近い値を示した。

3.3 打撃回数と欠陥発見率の個人差

打撃回数の増加に対する欠陥発見率の変化に異なる傾向がみられた被験者5名を抽出し、打撃特性と欠陥発見率の関係を比較した。図4～図6に、探索フェーズにおける各被験者の打撃回数、打撃距離間隔および打撃テンポを示す。各図の棒上の数値は打撃特性を、括弧内の数値は欠陥発見率(%)を示す。

図5および図6のエラーバーは、各被験者の試行内における打撃距離間隔および打撃テンポの標準偏差を示し、打撃行動のばらつきを表している。

図4より、5名すべてで7分30秒条件の打撃回数が増加したが、欠陥発見率の変化は一様ではなかつ

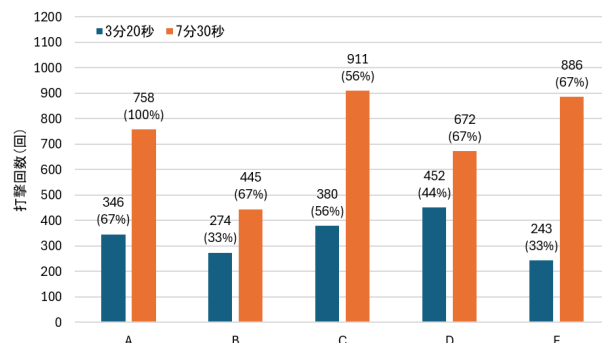


図4 探索フェーズの打撃回数と欠陥発見率

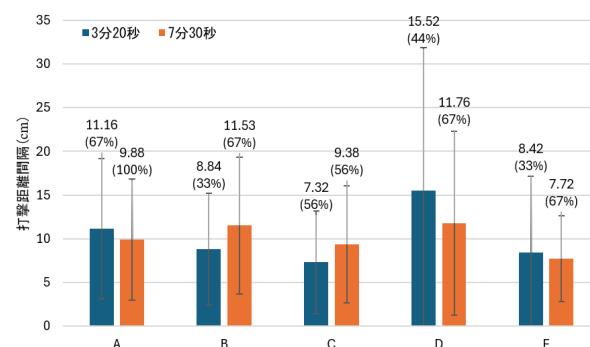


図5 探索フェーズの打撃距離間隔と欠陥発見率

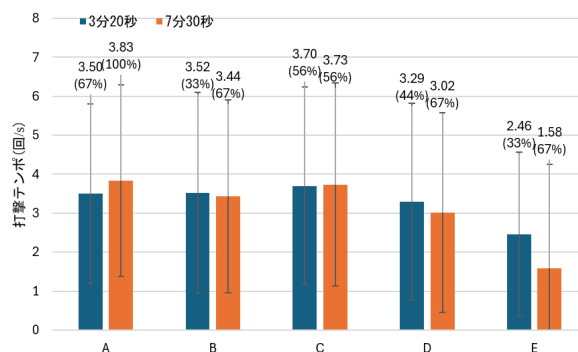


図6 探索フェーズにの打撃テンポと欠陥発見率

た。被験者B、D、Eは7分30秒条件でいずれも約67%の欠陥発見率を示した一方、打撃回数はそれぞれ445回、672回、886回と異なっていた。このことから、同程度の欠陥発見率であっても、実施した打撃回数には個人差が認められた。

また、被験者Cは打撃回数が380回から911回に増加したものの、欠陥発見率は約56%で変化しなかった。一方、被験者Aでは346回から758回への増加に伴い、欠陥発見率が約67%から100%となった。このように、打撃回数が増加した場合でも、欠陥発見率の変化は被験者によって異なることが確認された。

図5および図6に示す打撃距離間隔と打撃テンポについても、両条件間の変化方向や変化量は被験者によって異なっていた。これらの結果から、打撃回数のみでは被験者ごとの打撃行動の特徴を十分に捉えられない可能性がある。したがって、打音点検技能の評価に向けては、打撃回数に加え、打撃距離間隔や打撃テンポなどの行動指標を併せて検討することが重要であると考えられる。

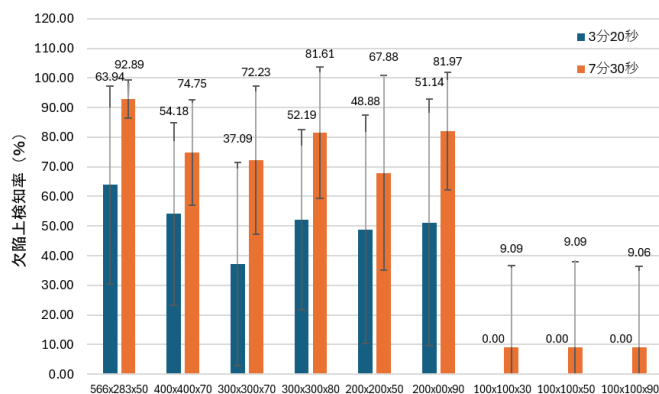


図7 欠陥ごとの欠陥上検知率

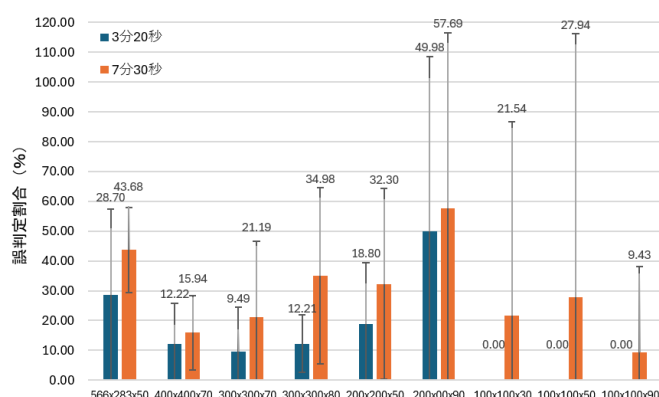


図8 欠陥ごとの誤判定割合

表3 同定フェーズの打撃特性

	試験時間	
	3分20秒	7分30秒
打撃回数 (回)	175	296
打撃加速度 (m/s^2)	19	19.5
打撃距離間 (cm)	5.73	5.45
打撃テンポ (回/s)	3.37	3.45

3.4 欠陥上検知率と誤判定割合

図7・図8に、欠陥別の欠陥上検知率および誤判定割合を示す。横軸の寸法は幅×高さ×埋設深さ(mm)を表す。9欠陥全てで、両指標の平均値は7分30秒条件の方が高かった。欠陥上検知率は、566×283×50mmで63.94%から92.89となった一方、誤判定割合も28.70%から43.68%となった。この結果から、7分30秒条件では欠陥領域内の検知割合が高いものの、健全部を欠陥と判定する割合も高いことが確認された。

ただし、これらは未発見の欠陥を0%として含めているため、欠陥の発見状況の違いも反映されている。

3.5 同定フェーズの打撃特性

表3に、全被験者の同定フェーズにおける打撃特性の平均値を示す。打撃回数は3分20秒条件で175回、7分30秒条件で296回となり、7分30秒条件で増加した。一方、打撃加速度はそれぞれ19.0 m/s^2 、19.5 m/s^2 、打撃距離間隔は5.73 cm、5.45 cm、打撃テンポは3.37 回/s、3.45 回/sであり、いずれも両条件で近い平均値を示した。探索フェーズと同様に、同定フェーズにおいても総打撃回数に違いがみられた。

4. まとめ

(1) 平均欠陥発見率は、3分20秒条件で50.51%、7分30秒条件で68.69%であり、後者が18.18ポイント高かった。

(2) 探索・同定フェーズともに、7分30秒条件で打撃回数が増加した。打撃加速度、距離間隔およびテンポの平均値は、両条件で近い値を示した。

(3) 11名の平均値では、9欠陥全てで7分30秒条件の欠陥上検知率と誤判定割合が高かった。これらの平均には未発見の欠陥を0として含むため、欠陥の発見状況も考慮する必要がある。

(4) 図示した5名では、同程度の欠陥発見率でも打撃回数が異なり、回数の増加に対する発見率の変化にも個人差があった。打撃回数のみで技能を評価することは難しいと考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 基盤研究(B) (JP24K00964) および挑戦的研究(萌芽) (JP25K22119) の助成を受けて実施した。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, 令和8年度土木学会全国大会 第81回年次学術講演会, VI-142, 2026.