

論文 コンクリートひび割れ部の閉塞状態の違いが表面波・縦波の伝搬特性に基づくひび割れ深さの推定精度に与える影響

水島 龍輝*1・内田 慎哉*2・杉浦 昂樹*3

要旨：本研究では、深さの異なる人工ひび割れを有するコンクリート供試体を対象に、著者らが提案しているマルチチャンネル衝撃弾性波法により表面波の伝搬特性（減衰特性）を計測、また従来法である縦波の伝搬特性（伝搬時間および位相）も計測し、ひび割れ部の閉塞状態（空隙（空気）・水・砂の含水状態）の違いが、ひび割れ深さの推定精度に与える影響について検討した。その結果、表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定手法は、ひび割れ部に水や含水状態の異なる砂があっても、実際のひび割れ深さに対して±15%の範囲で推定でき、縦波の位相や伝搬時間による推定手法よりも、有用性が極めて高いことを明らかにした。

キーワード：ひび割れ深さ、非破壊試験、衝撃弾性波法、表面波、縦波、減衰、伝搬時間、位相

1. はじめに

コンクリート表面に開口部を有するひび割れの深さを非破壊で推定する手法として、縦波¹⁾²⁾や表面波³⁾を利用する方法が提案されている。前者には、弾性波の伝搬時間から幾何学的にひび割れ深さを推定するもの¹⁾²⁾、ひび割れ先端で回折する縦波の位相の反転を利用してひび割れ深さを推定するもの²⁾がある。しかしながら、伝搬時間を用いる方法では、ひび割れ部が水や砂などによって閉塞されている場合、ひび割れ面の局所的な接触によりひび割れ深さを浅く評価することが知られている¹⁾。これに対して、著者らは表面波を活用したひび割れ深さ推定手法を提案³⁾しているものの、ひび割れ部が水や砂などで閉塞された場合の検討については不十分であった。

そこで、本研究では、深さの異なる人工ひび割れを有するコンクリート供試体を対象に、著者らが提案しているマルチチャンネル衝撃弾性波法により表面波の伝搬特性（減衰特性）を計測、また従来法である縦波の伝搬特性（伝搬時間および位相）も計測し、ひび割れ部の閉塞状態（空隙（空気）・水・砂の含水状態）の違いが、前述の3つの伝搬特性でそれぞれ推定したひび割れ深さの推定精度に与える影響について検討した。

向（供試体の長さ方向）中央位置において、厚さ5mmの発泡スチロールを設置することにより模擬した。人工ひび割れの深さは、50, 75, 100および150mmの4ケースに設定した。いずれも、コンクリート硬化後に、発泡スチロールは除去している。また、比較のため、人工ひび割れを有しない健全な供試体（健全供試体）も併せて作製した。したがって、供試体は全部で5体となる。

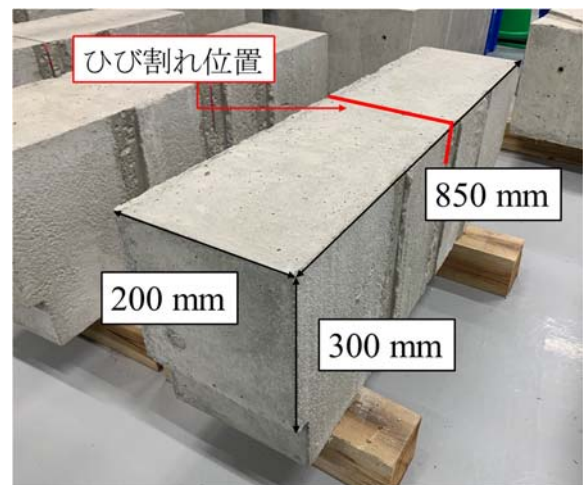


写真-1 供試体の概要

2. 表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定手法

2.1 推定手法³⁾

ここでは、著者らが提案している表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定手法について、既往の研究から実験概要とその結果を一部抜粋して、以下に概説する。

実験に用いた供試体を写真-1に示す。供試体寸法は、長さ850mm×幅200mm×高さ300mmである。人工ひび割れは、コンクリートを打ち込む前に、型枠の長さ方

向に、生コン工場で作成した呼び強度：21を使用した。コンクリートの使用材料は、セメント：普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³）、水：地下水、細骨材：庄川水系陸砂（表乾密度：2.59 g/cm³、粗粒率：2.70）、粗骨材：庄川水系陸砂利（表乾密度：2.61 g/cm³、実積率：63.0%）、混和剤：AE減水剤標準型I種である。表-1にコンクリートの配（調）合を示す。なお、フレッシュコンクリートの性状は、スランプ18.0cm、空気量

*1 富山県立大学大学院 工学研究科環境・社会基盤工学専攻（学生会員）

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*3 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科

4.5%である。材齢 28 日に JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき圧縮強度試験を実施した結果、圧縮強度は 26.7 N/mm²であった。

続いて、供試体での計測(写真-2)について説明する。ひび割れ中心から 25 mm 離れた位置に、ch.4 および ch.5 の加速度センサをそれぞれ設置した。また、その位置から供試体長手方向に対して、50 mm 間隔で ch.1~ch.3 および ch.6~ch.8 の加速度センサを 6 個それぞれ設置した。したがって、使用した加速度センサは計 8 個である。なお、健全供試体においても同様に加速度センサを設置した。弾性波の入力には直径 19.1 mm の鋼球を使用し、ch.1 から 25 mm 離れた位置を打撃(写真-2)することでコンクリート中へ弾性波を入力した。弾性波の受信には、周波数応答(±3 dB)が 0.2~20000 Hz の加速度センサを使用した。受信した信号は、サンプリング時間間隔 1 μs、サンプリング数 20000 個、測定時間長 20 ms でデジタル化した後、波形収集装置で記録した。

最後に、表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定式について説明する。導出手順を図-1 に示す。まず、I: 健全供試体を対象に、表面波の位相速度 C_R および周波数 f_R から表面波の波長 λ_R を算出する。続いて、II: 人工ひび割れを有する供試体 4 体から、表面波の振幅減衰 F_R を求める。最後に、III: 前述の I および II の結果から、ひび割れ深さ h の推定式を導出する。具体的には、I について、健全供試体を対象に、ch.1 側から弾性波を入力した際に得られた時刻歴波形を、図-2 に示す。図より、表面波(1 周期分)の振幅が最大となる時刻と打撃点から各加速度センサまでの距離との関係から走時曲線(図中の赤線)を求め、その傾きから表面波の位相速度 C_R 1765 m/s を得た。表面波の周波数 f_R は、ch.1 の表面波成分に対して高速フーリエ変換した結果、6856 Hz となった。したがって、位相速度と周波数の次式に示す関係から、表面波の波長 λ_R 258 mm を求めた。

$$\lambda_R = C_R / f_R \quad (1)$$

続いて、II: 表面波の振幅減衰 F_R の求め方について解説する。人工ひび割れを有する供試体を対象に、表面波の減衰特性 F_R を把握した。すなわち、ひび割れ前後の加速度センサ(ch.3~ch.6)の時刻歴波形に対して、表面波成分を切り出し、FFT を用いて卓越周波数(表面波の周波数)とそのスペクトル強度から、次式により振幅減衰 F_R を算出した。

$$F_R = \frac{A_5 + A_6}{A_3 + A_4} \quad (2)$$

ここで、 A_3, A_4, A_5, A_6 : ch.3, ch.4, ch.5, ch.6 で受信した表面波成分の卓越周波数のスペクトル強度である。最後に、III: I の結果(表面波の波長 λ_R)と II の結果(振幅減衰 F_R)から、ひび割れ深さ推定式を導出する。図-3 に、

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	A
61.5	46.8	171	278	845	966	2.780

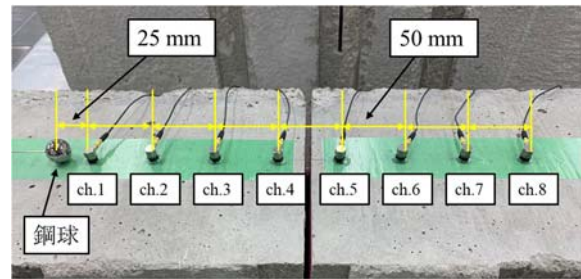


写真-2 計測状況

(表面波の減衰特性・
縦波の伝搬時間によるひび割れ深さ推定手法)

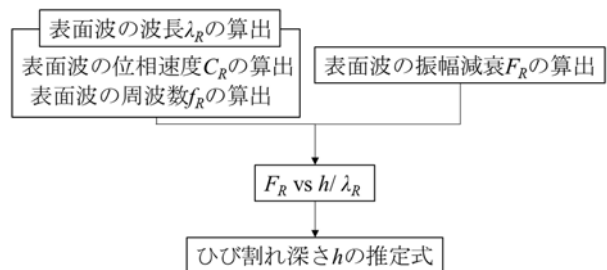


図-1 ひび割れ深さ推定式の導出手順

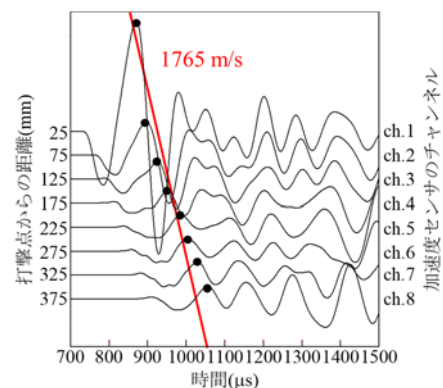


図-2 時刻歴波形の例と表面波の位相速度の算出

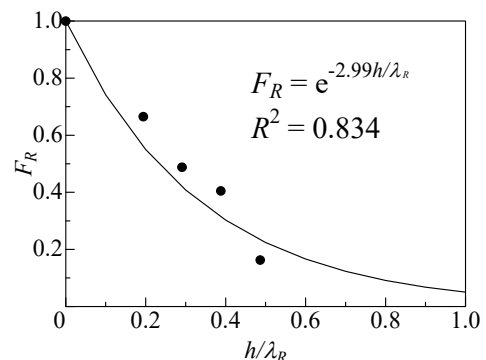


図-3 F_R と h/λ_R との関係

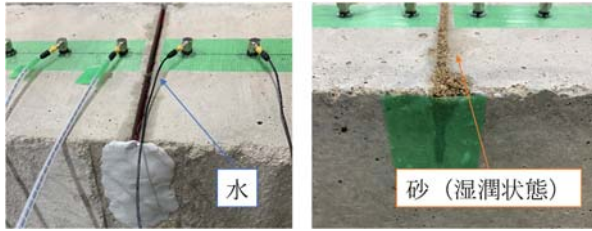


写真-3 水および砂（湿潤状態）の充填状況

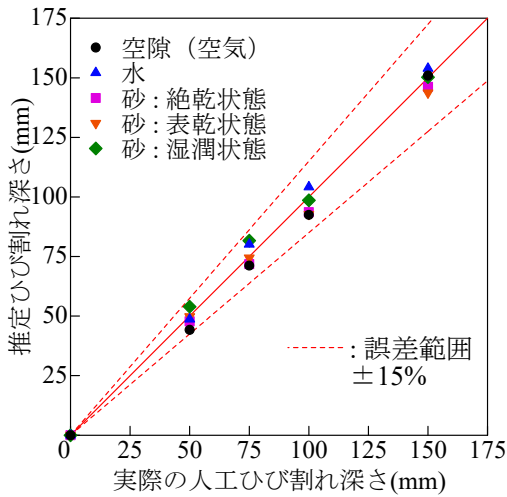


図-4 表面波の減衰特性による人工ひび割れ深さの推定結果

振幅減衰 F_R と人工ひび割れ深さ/表面波の波長の比 (h/λ_R) との関係を示す。図中の近似曲線は、 $h/\lambda_R=0.0$ のときに $F_R = 1.0$ を通る指数関数で近似したものである。図に示す近似曲線から、ひび割れ深さ h は、波長 λ_R と振幅減衰 F_R から、次式で求めることができる。

$$h = -0.33 \cdot \lambda_R \cdot \ln F_R \quad (3)$$

2.2 計測方法

ひび割れ部の閉塞状態の違いが、ひび割れ深さの推定精度に与える影響について把握するため、人工ひび割れ部に水および含水状態の異なる砂をそれぞれ充填した。砂の含水状態は、絶対乾燥状態、表面乾燥飽水状態、湿潤状態の3種類に設定した。なお、湿潤状態の砂を人工ひび割れに充填する際は、突き棒で締めながら行った。写真-3に、水および砂（湿潤状態）の充填状況を示す。また、比較のため、ひび割れ部が閉塞されていない空隙（空気）の場合も計測を行った。

写真-2に、計測状況を示す。弾性波の入力に用いた鋼球直径や受信、波形収集装置および計測条件（サンプリング時間間隔、サンプリング数、測定時間長）は、全て2.1と同じである。

2.3 計測結果および考察

2.1に示す式(3)を用いて、全てのケース（空気・水・砂の含水状態）について、人工ひび割れ深さを推定した。

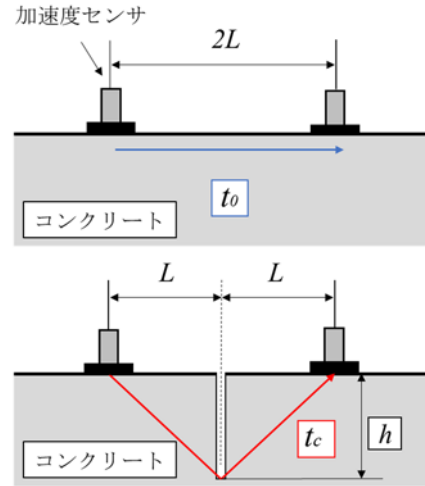


図-5 縦波の伝搬時間によるひび割れ深さ推定手法

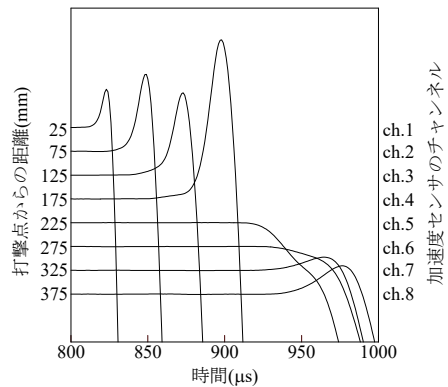


図-6 人工ひび割れ（深さ150mm）を有する供試体で測定した時刻歴波形（初動部を拡大）

その際、表面波の波長は、2.1で得られた λ_R 258 mm を用い、振幅減衰 F_R は2.1の式(2)より求めた。図-4に、表面波の減衰特性により推定した人工ひび割れ深さを実際の人工ひび割れ深さと対比して併せて示す。図より、ひび割れ部が完全に開口した場合（空気）および閉塞している場合（水および含水状態が異なる砂）全てのケースにおいて、誤差15%の範囲内でひび割れ深さを推定できることが明らかとなった。

3. 縦波の伝搬時間によるひび割れ深さ推定手法

3.1 推定手法

縦波の伝搬時間によるひび割れ深さ推定手法の評価原理を、図-5に示す。図に示すように、ひび割れ中心からの距離が L となるよう2つの加速度センサを設置し、ひび割れ先端で回折する縦波の伝搬時間 t_c を計測する。続いて、ひび割れのない健全なコンクリート部分において、センサ間距離が $2L$ となるように加速度センサを2つ設置して、伝搬時間 t_0 を測定する。ひび割れ深さ h は、幾何学的に、次式から求めることができる。

$$h = L \sqrt{\left(\frac{t_c}{t_0}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

3.2 計測方法

写真-2に、計測状況を示す。本研究では、2.1に示す表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定手法で得られた時刻歴波形を利用するため、計測では2.2と同様に加速度センサを8個用いて行った。図-6に、人工ひび割れ深さ150mmを有する供試体で得られた時刻歴波形を、初動部を拡大して示す。図より、縦波がひび割れを通過する前のch.1~ch.4の初動部の位相は、全て上向きになっていることがわかる。これに対して、縦波がひび割れを通過した後のch.5~ch.8の初動部の位相ではch.6までは下向きを示しているものの、ch.7以降は上向きに変化している。通常、図-7に示すとおり、ひび割れ先端での縦波の回折角度 θ が 90° 未満の場合は初動部の位相は下向き(図-7(a)参照)となり、回折角度 θ が 90° 以上になると位相が上向き(図-7(b)参照)になる。今回のひび割れ深さ150mmの場合では、弾性波入力位置からの距離が313mmのときに、回折角度が 90° になる。そのため、ch.6(弾性波の入力位置からの距離275mm)とch.7(弾性波の入力位置からの距離325mm)の間で、位相の逆転が生じることになる。ここで、iTECS SIA-T-04²⁰¹³「試験04-コンクリートのひび割れ深さの試験方法」⁴⁾を参考にすると、伝搬時間によりひび割れ深さを推定する場合、回折角度が 90° 以上になる位置に加速度センサを設置することを推奨している。したがって、本研究では、全ての人工ひび割れの深さに対して回折角度が 90° 以上となるch.7の加速度センサを対象として、伝搬時間 t_c を計算した。一方、縦波がひび割れを通過する前の加速度センサについては、ひび割れからch.7までの距離が125mmであることから、これと同距離となるch.2の加速度センサを対象として、式(4)を用いて幾何学的にひび割れ深さを推定した。なお、健全供試体においても、同様の計測を行い、ch.2とch.7の加速度センサで受信した波形から健全部の伝搬時間 t_0 を算出した。対象とした供試体およびひび割れの閉塞状態は2.2と同じであり、弾性波の入力・受信、波形収集装置および計測条件は2.1と同様である。

3.3 計測結果および考察

図-8に、縦波の伝搬時間によるひび割れ深さの推定手法により得られた結果を示す。図より、ひび割れ深さ50mmの表乾および湿潤状態を除く全てのケースにおいて、既往の研究⁷⁾で指摘されている通り、実際のひび割れ深さよりも小さく推定していることがわかる。しかも、推定値と実際の値との差(誤差)は15%以上あるケースが多く、表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定手法

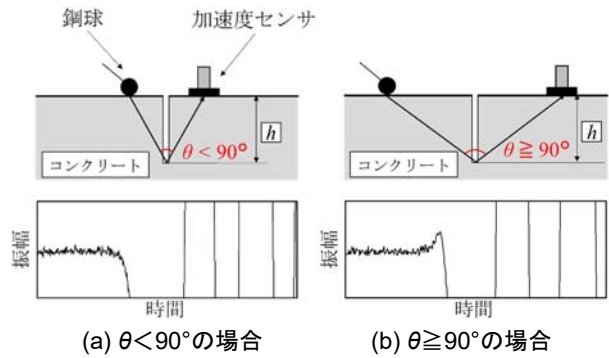


図-7 縦波(初動部)の位相の反転

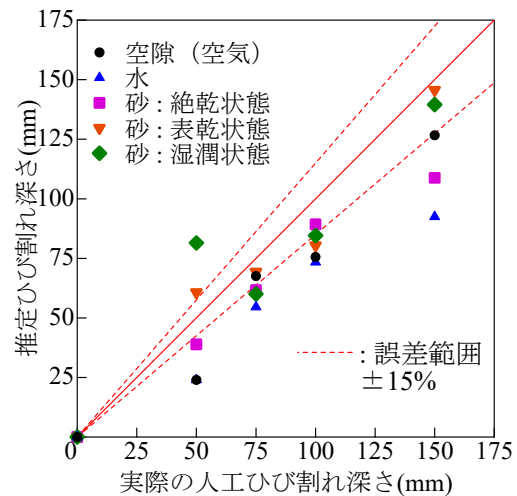


図-8 縦波の伝搬時間による人工ひび割れ深さの推定結果

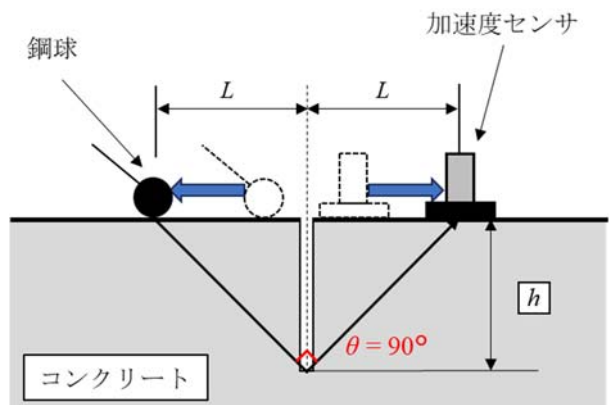


図-9 縦波の位相によるひび割れ深さ推定手法の評価原理

と比較して、推定精度が低いことが明らかとなった。

4. 縦波の位相によるひび割れ深さ推定手法

4.1 推定手法

縦波の位相によるひび割れ深さ推定手法の評価原理を図-9に示す。図に示すとおり、ひび割れから弾性波の

入力位置までの距離を L 、またひび割れから加速度センサの設置位置までの距離も L と同じ距離に設定する。この距離 L が大きくなるように、すなわち、ひび割れから離れる方向に弾性波の入力位置および加速度センサの設置位置の両者を、ひび割れからの距離が同じになるように保った状態で走査をする。時刻歴波形の初動部の位相を確認しながら計測をし、位相が下向きから上向きに変化したとき、ひび割れ先端での回折角が 90° になったときである (図-7 参照)。すなわち、このときのひび割れ中心から弾性波入力位置あるいは加速度センサ設置位置までの距離 L が、ひび割れ深さ h となる。

4.2 計測方法

写真-4 に、計測状況を示す。弾性波入力位置および加速度センサを、ひび割れ中心からの距離が同じになるように、1mm 間隔で走査した。初動部の位相が下向きから上向きへ変化したとき、この位置から人工ひび割れ中心までの距離 L を測定し、人工ひび割れの深さとした。なお、対象とした供試体およびひび割れの閉塞状態は 2.2 と同じであり、弾性波の入力に使用した鋼球、加速度センサ、波形収集装置および計測条件は 2.1 と同様である。

4.3 計測結果および考察

図-10 に、縦波の位相により推定した人工ひび割れ深さを実際の人工ひび割れ深さと対比して示す。ひび割れ部が空気・砂で満たされた場合では、誤差 15% の範囲で人工ひび割れ深さを推定できることが明らかとなった。しかしながら、水で満たされた場合は、いずれの場合も、初動部の位相が反転せず、常に上向きだったため、ひび割れ深さを推定することができなかった。ここで、結果の一例として、図-11 に、人工ひび割れ深さ 150mm でひび割れ部が水で満たされている場合の回折角度 θ が 90° 未満となるケース (ひび割れ中心からの距離 100mm) の時刻歴波形と、回折角度 θ が 90° となるケース (ひび割れ中心からの距離 150mm) の時刻歴波形を、健全部での時刻歴波形 (図-6 に示す ch.4 と同じ) と併せて示す。図より、いずれのケースにおいても、初動部の位相は、上向きになっていることがわかる。これは、縦波がコンクリート表層 (ひび割れ部の水を含む) を伝搬したため、縦波の位相が反転しなかったと考えられる。したがって、本手法では、ひび割れ部が水で満たされている場合は、ひび割れ深さを推定することが困難であることが明らかになった。

5. 表面波・縦波の伝搬特性に基づく各種推定手法の特徴

表-2 に、表面波・縦波の伝搬特性に基づく各種推定手法の特徴を示す。表中の○印は誤差 15% 以内、△印は

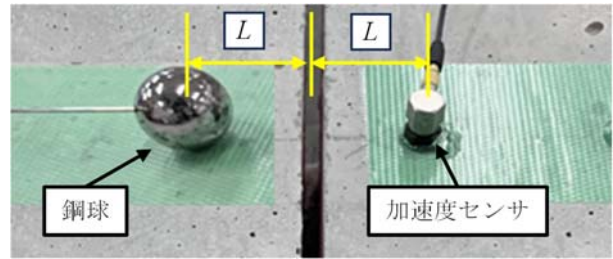


写真-4 計測状況
(縦波の位相によるひび割れ深さ推定手法)

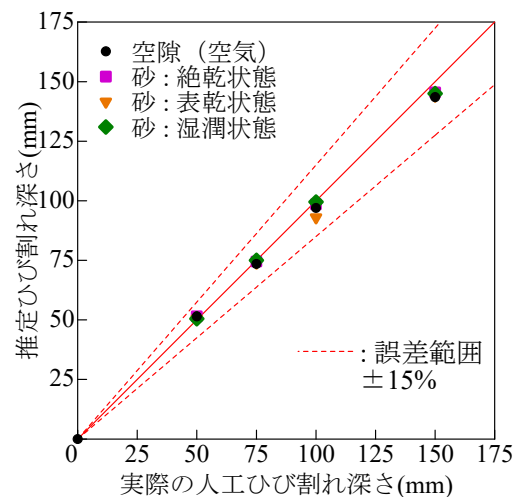


図-10 縦波の位相による人工ひび割れ深さの推定結果

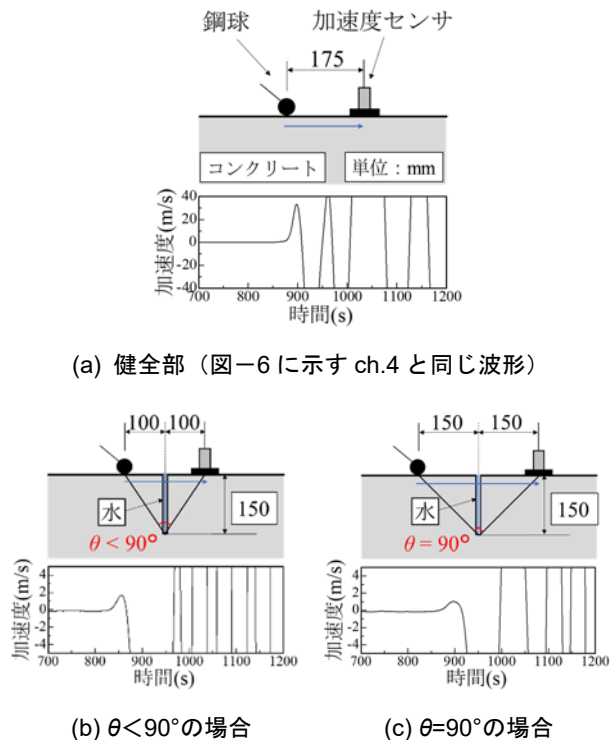


図-11 コンクリート表層 (ひび割れ部が水で満たされている場合も含む) を伝搬する縦波とその位相

表-2 表面波・縦波の伝搬特性に基づく
各種推定手法の特徴

		ひび割れ深さ推定手法		
		表面波	縦波(時間)	縦波(位相)
ひび割れ部の閉塞状態	空隙	○	△	○
	水	○	△	×
	砂	○	△	○

○：誤差 15%以内，△：誤差 15%以上
×：測定不可能

誤差 15%以上で人工ひび割れを推定したことを意味している。一方、×印は、人工ひび割れ深さを推定できなかったケースである。表から明らかなおり、著者らが提案している表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定手法が、ひび割れ部の閉塞状態の違いによる影響を受けず、既存の手法である縦波の伝搬時間や位相による推定手法よりも、汎用性が極めて高い。なお、表中では誤差 15%以内を全て○印で示しているが、誤差が最も小さくなった推定手法は、縦波の位相を利用した場合であった。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 表面波の減衰特性によるひび割れ深さの推定手法では、ひび割れ部に水や含水状態の異なる砂があっても、ひび割れ部が完全に開口した場合(空隙(空気))と同様、実際のひび割れ深さに対して±15%の範囲で推定できることを明らかにした。
- (2) 縦波の伝搬時間によるひび割れ深さの推定手法では、既往の研究で指摘されているとおり、ひび割れ部の閉塞の有無やその状態に関わらず、実際のひび割れ

深さよりも小さく評価する場合が多いことがわかった。

- (3) 縦波の位相によるひび割れ深さの推定手法では、ひび割れ部が空隙(空気)・砂で満たされた場合では、表面波の場合と同様、±15%の範囲の精度で推定できるものの、水で満たされた場合はひび割れ深さを推定することが困難であった。
- (4) 上記(1)~(3)より、表面波の伝搬特性は、ひび割れ部の閉塞の有無やその状態に関わらずひび割れ深さを推定できるため、その他の手法と比較して汎用性が極めて高いことが明らかになった。

今後は、荷重の作用で生じた曲げひび割れなど、ひび割れの界面が部分的に接触している実際のひび割れを対象に、本研究で得られた知見を確認する予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C) 22K04272)の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎, 内田慎哉: コンクリート構造物の診断における非破壊検査の適用の現状と今後の展望, 物理探査, 第 60 巻, 第 3 号, pp.253-263, 2007.6.
- 2) NDIS 2426-2²⁰¹⁴: コンクリートの非破壊試験-弾性波法-第 2 部: 衝撃弾性波法, 一般社団法人日本非破壊検査協会, 2014
- 3) 水島龍輝, 内田慎哉, 兵動太一: 表面波の減衰特性に基づくコンクリートのひび割れ深さ推定に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1498-1503, 2023
- 4) iTECS SIA-T-04²⁰¹³: 試験 04-コンクリートのひび割れ深さの試験方法, 一般社団法人 iTECS 技術協会, 2013