

論文 超音波試験による RC 梁の曲げひび割れと不可視損傷の評価法

森 伸一郎^{*1}・長井 春希^{*2}・三浦 夢乃^{*3}・須賀 幸一^{*4}

要旨：コンクリートのひび割れは、鉄筋コンクリート構造物の防水性・耐久性の観点から安全性を低下させる要因である。荷重载荷に起因するひび割れや表面可視ひび割れを生む潜在的な損傷を定量的に評価することは、ひび割れ進展予測やひび割れ対策効果の評価に有用である。全長 5.5 m、支間長 5.0 m の鉄筋コンクリート梁を対象に 4 点曲げ多段階载荷を行い、载荷段階と除荷時に斜交透過法による超音波試験を行った。可視ひび割れ発生前に超音波速度が低下することとひび割れ進展とともに超音波速度が漸減することを明らかにし、直交・斜交比較法の有効性を明らかにした。

キーワード：超音波試験, コンクリート, ひび割れ, 直交・斜交比較法

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物のひび割れは防水性・耐久性の低下などにより安全性を低下させる要因の一つである。超音波試験はコンクリート内部にあるひび割れ・空洞・他の欠陥を検出できるとされている¹⁾。それら損傷のために見かけの弾性波速度は低くなる²⁾。ために、超音波試験の方法論開発は目視点検との相補的な損傷評価を可能とする。物理的要因の場合、表面可視ひび割れを生む潜在的な状況を定量的に評価することがひび割れ進展予測に寄与する可能性がある。

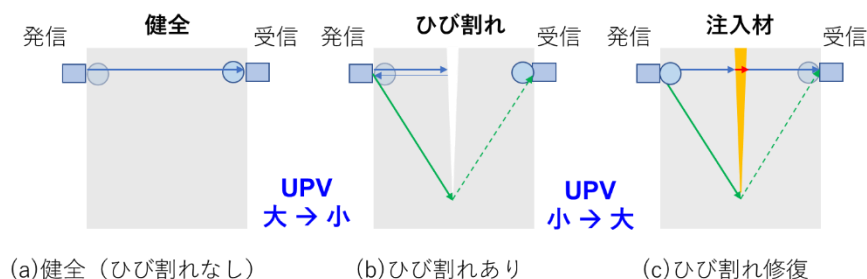
そこで、超音波試験による、可視ひび割れの有無・密度、不可視損傷の評価の可能性を確認することを目的に、曲げ载荷により曲げひび割れが生じている RC 梁試験体を対象に梁軸の直交方向と斜交方向の 2 方向超音波試験を行い、両測線での違いや可視ひび割れ交差の影響を調べ、直交・斜交比較法による超音波試験の有効性を評価した³⁾。

なお、本論文では、外観目視で見えない、内部のひび割れ損傷や内部にある豆板・空洞のほか、ひび割れ幅が通常の視力の点検者には認知することの難しい表面に現れた損傷を不可視損傷とすることにする。

2. 直交・斜交比較法の提案

コンクリート部材部材中の波動伝播現象を考えてみる。

図-1 に (a)健全, (b)ひび割れあり, (c)ひび割れ修復のコンクリート部材中の波動伝播の模式図を示す。健全なコンクリート中の波動伝播は、骨材のサイズより大きな波長であれば、骨材で明瞭な反射することなく通り抜け直進するように起こるものと考えられる。ひび割れが発生した場合は、開口ひび割れは空隙と見なされるため、直交・斜交にかかわらずひび割れと交差する点で全反射して直進では伝播し得ないので、伝播できる経路で回折して迂回伝播するものと考えられる。その場合、伝播経路が長くなる分、見かけの超音波速度 (UPV) が低下する。ひび割れが発生した場合でも、完全な開口状態ではなく閉口部分があれば、そこを介して伝播することが考えられる。また、ひび割れが注入材で補修され、充填された場合には、注入材の弾性波速度がコンクリートのそれにほぼ等しい場合には、直線伝播経路が有効となるため、ひび割れがある場合に比べて伝播経路が短縮されるため弾性波伝播速度が見かけ上で回復されることとなる。このように理解すれば、ひび割れ部材中の波動伝播



コンクリート梁中の波動 (超音波) の伝播

図-1 (a) 健全、(b) ひび割れあり、(c) ひび割れ修復の場合のコンクリート部材中の波動伝播の模式図

*1 愛媛大学 大学院理工学研究科 特定教授 博士 (工学) (正会員)

*2 (元・愛媛大学学生) 中電技術コンサルタント (株) 修士 (工学)

*3 (元・愛媛大学学生) 日本シビックコンサルタント (株) 修士 (工学)

*4 (株) 芙蓉コンサルタント 代表取締役社長 博士 (工学)

現象の変化を超音波利用によって評価できるのではないかと動機となった。

周知のように、超音波の伝播経路上に有限深さのひび割れがある場合、コンクリート部材面にひび割れを挟むように設置した発信器・受信器により測定される見かけの超音波速度は、発信器・受信器間の直線経路を伝播する場合に見込まれる値に比べて小さく（遅く）なる。このことを利用して、ひび割れ深さの推定法が古くから提案され、実用に供している。この考え方から前述の理解は支持されると考えられる。

コンクリートの損傷はひび割れだけではなく、長期にわたる雨水の浸透によるカルシウムの溶脱や施工時のジャンカ（豆板, honeycomb）による空隙とそれによる局所的な浸透流路形成ゆえのカルシウム溶脱、そして、それらと長年の交通荷重による土砂化など、様々なメカニズム・形態のものが想定される。それらはひび割れに留まらず同様に見かけの弾性波速度の低下につながるものである。

説明を簡略にするため、有限深さの開口ひび割れを想定して、直交法・斜交法について説明する。図-2 にコンクリート梁に、梁軸方向の曲げにより梁軸直交方向に有限深さの開口ひび割れが入った場合の波動伝播の3次元の斜め透視図を示す。ここでは、発信器—受信器を梁軸に直交するように配置した測定法を「直交法」、梁軸に斜めに交差するように配置した測定法を「斜交法」と定義する。いずれも直接法と言われ、発信器—受信器間を直線的に伝播するため、両方の測定法により得られる伝播速度 V は等しい。健全コンクリートでは V (斜交) = V (直交) である (仮説 1)。

前述と重複するが、理解を深めるため、この図に則して再度記述する。発信器—受信器を直交法により配置した場合、直線経路がひび割れに平行となるとすると、直線経路が開口ひび割れと交差しないので直線経路を伝播する。一方で、斜交法では、発信器・受信器でひび割れを挟むように、その間の直線経路が開口ひび割れと交差するようにセンサーを配置するため、直線経路を伝播しえない。その結果、連続媒体部分を経由して回折する迂回経路を伝播するので、実質の伝播経路は直線経路より長くなる。伝播時間が長くなるので、見かけの伝播速度が小さくなるのである。すなわち、斜交法では直交法よりも伝播速度が小さくなる。そのため、近接する直交・斜交の経路で比較する場合、測定された見かけの伝播速度 V は、 V (斜交) < V (直交) となると考えられる (仮説 2)。

そして、ひび割れが注入材（コンクリートと同等な弾性波速度を有する場合）で充填された場合には、発信器—受信器間の直線経路で伝播するため、おおよそ V (斜

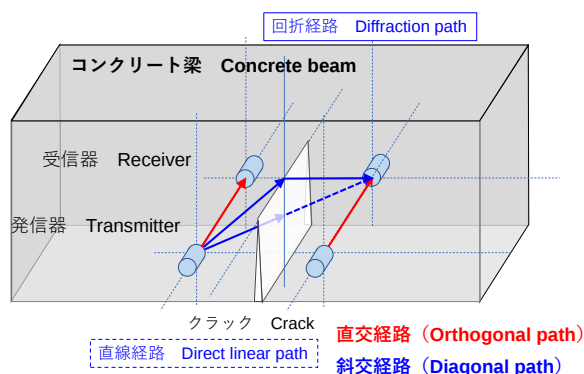


図-2 梁軸直交方向に有限深さの開口ひび割れが入ったコンクリート梁における波動伝播の3次元の斜め透視図

交) = V (直交) となることが想定される (仮説 3)。すなわち、直交法・斜交法の比較によってひび割れの有無・程度・密度を評価し、ひび割れ補修工のひび割れ充填度を評価できる可能性があり、損傷評価・補修効果評価に利用できることにつながる。

上記は理想体を想定した記述であるが、仮説 1 から仮説 3 はいずれも直交法と斜交法の測定値の比較によって検証または適用できるものであるので、これらの方法を直交・斜交比較法と呼ぶ。実際の損傷部材で仮説 1 と仮説 2 が成立することを確認するのが本研究の目的である。

3. 実験試験体

実験に用いたのは、終局荷重の約 64 %に相当する荷重までの多段階曲げ載荷した RC 梁試験体（全長 5.5 m, 載荷時単純梁支間長 5.0 m）³⁾であり、曲げひび割れが生じている。載荷試験の前後での一次固有振動数は 23.2 Hz と 21.4 Hz であった。曲げひび割れにより固有振動数が低下しており、図-3 に RC 梁試験体の断面図と側面

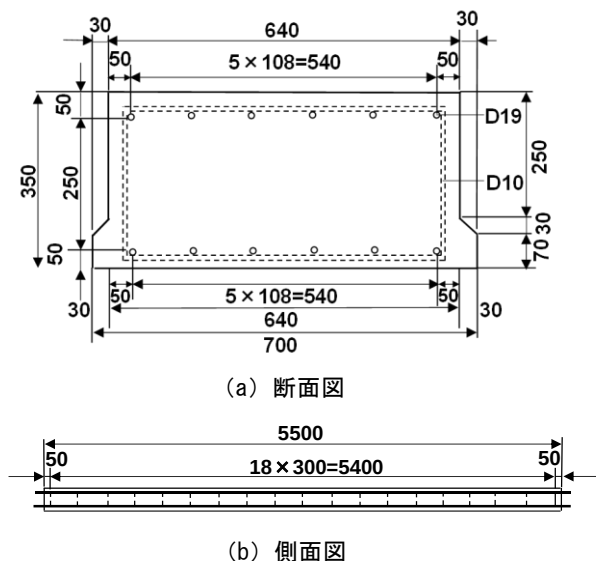


図-3 RC 梁供試体の断面と側面（単位:mm）

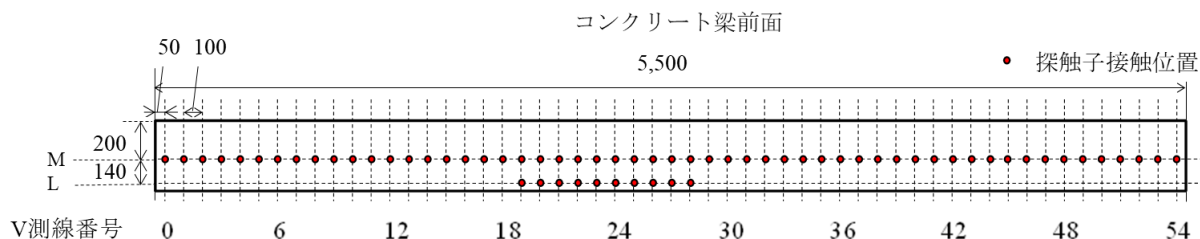


図-4 水平方向断面番号と鉛直方向測線M, L

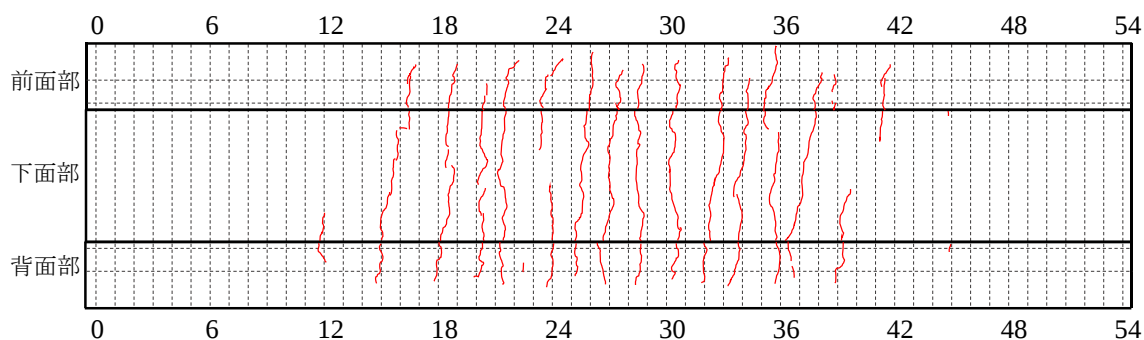


図-5 RC 梁試験体の可視ひび割れ展開図

図を示す。図-4 に今回実施した⁴⁾超音波試験点を示す。梁の水平方向に測線（前面では V0 から V54）と鉛直方向に測線M,Lを設け、それぞれの交点を測点とした。図-5 に可視ひび割れ分布を示す。梁中央にひび割れが集中し、多くが正面から背面まで貫通している。また、ひび割れは断面方向にほぼ平行に生じている。写真-1 に試験体全景を、写真-2 に試験体中央付近の測線とひび割れの状況を示す。



写真-1 試験体全景（左手前）



写真-2 試験体中央付近のひび割れの状況

4. 超音波試験

超音波試験には 測定装置として ESI-10（東横エルメス製）を用いた。この装置は、サンプリング時間は 0.1 μ s であり、送信器から出た超音波が受信器に到達するまでの伝播時間を 1 秒間に 10 回測定し、その平均を 1 秒ごとに表示する。閾値を 0.5/1.0/1.5 の 3 段階で設定でき、受信した超音波の波形振幅が閾値を超えた時に到達と判断して、伝播時間を計測するものである。各点で原則 3 回測定し、3 個の伝播時間の平均を各点の伝播時間として伝播速度を求めた。超音波の送受信探触子（プローブ）は「ひび割れ・音速センサー」との名称のついた ESP-10（東横エルメス製）であり、公称周波数は 28 kHz である。

送信プローブから超音波を効果的に測定対象物体に伝播させ、受信プローブで効果的に受信させるために、プローブと対象物体の接触面に生じるわずかな空隙を効果的な伝播媒質で充填する。この媒質を接触媒質（couplant, カプラント）と言う。測定では、接触媒質と

してグリースを用いた

今回の実験では、図-2 に示した梁の前面・背面の測線交点にプローブを当てて測定した。測線Lでの測定は、超音波伝播経路直上に鉄筋があるために、干渉の影響を考慮して、時間的な制約からひび割れの多い測定番号 19 から 28 までの区間に絞った。

直交方向は、前面・背面で梁軸に直交する相対する測

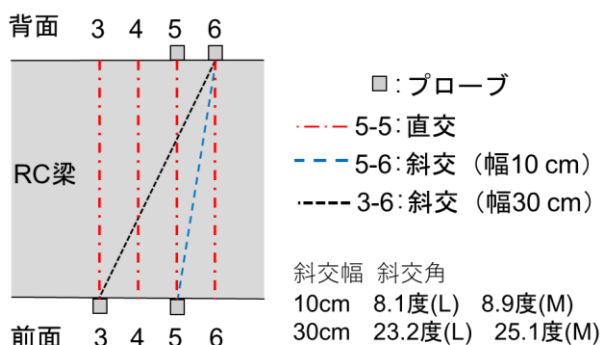


図-6 超音波試験のプロープ配置

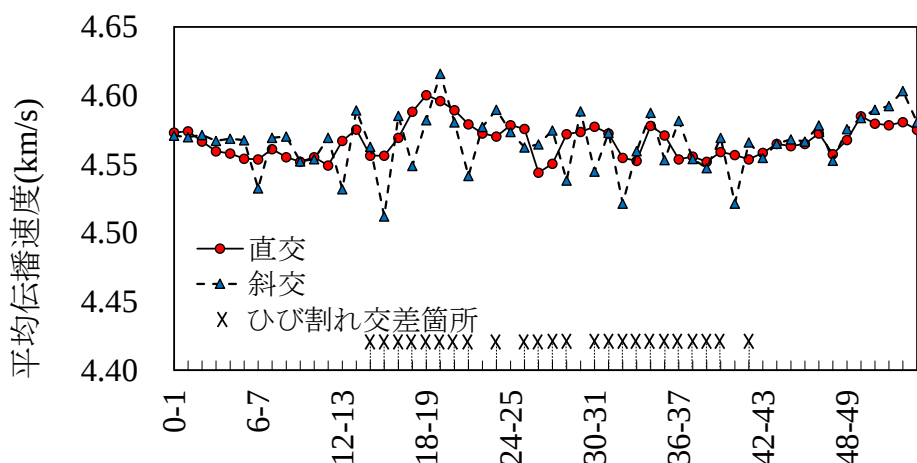
点を挟むようにプローブを接触させた。曲げひび割れとほぼ平行な配置となっている。一方、斜交方向は、前面・背面で高さの測線（LまたはM）は同じで水平に異なる測線を結ぶような水平面で斜交配置となるようにプローブを接着させた。プローブ間を結ぶ直線がひび割れと交差する配置となっている。

図-6 に超音波試験のプロープ配置（測定方向）を示す。今回は、測線 M では直交方向と斜交幅 10 cm と 30

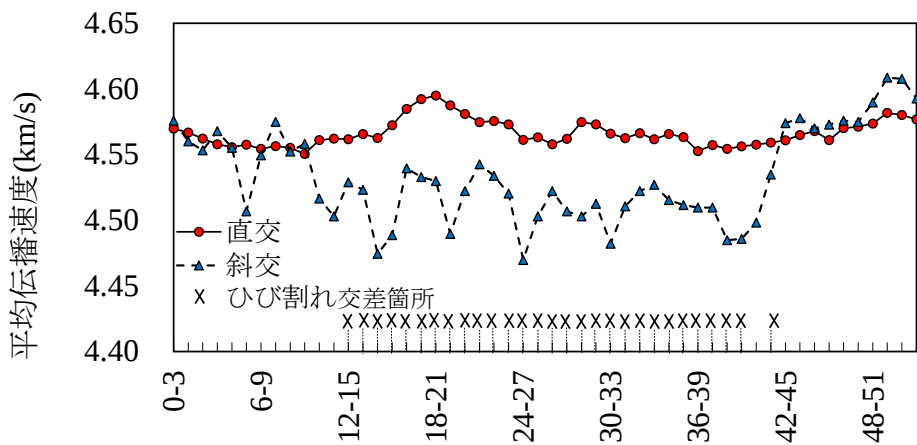


写真-3 超音波試験の状況

cm の斜交方向、測線 L では直交方向と斜交幅 10 cm の斜交方向の測定を実施した。斜交幅 10 cm と 30 cm は、斜交角 8.1～8.9 度と 23～25 度に対応する。直交と斜交の比較は、本来であれば、斜交の場合、斜交伝播経路長の重み付き平均で評価することが妥当であると考えられるが、ここでは斜交経路両端のプローブ位置での直交方向測定値の平均値と比較した。前面側プローブを当てる鉛直線（V）で、例えば V5、背面側プローブを当てる



(a) 測線M 斜交幅 10 cm



(b) 測線M 斜交幅 30 cm

図-7 直交法・斜交法による超音波伝播速度の分布（測線M）

鉛直線を V5' の場合で上下位置が M の場合には V5-5'M と記す。ただし、M が多数で L が少数なので M の場合は省略して記さない。V5-5' は直交方向の測定である。一方、前面側が V5M で背面側が V6'M の場合、V5-6' は斜交方向の測定である。すなわち、図-6 の場合では、V5-6' と $(V5-5'+V6-6')/2$ を、V3-6' と $(V3-3'+V6-6')/2$ を比較した。 $(V3-3'+2 \times V4-4'+2 \times V5-5'+V6-6')/6$ と V3-6' の比較はしていない。写真-3 に超音波試験の状況を示す。

5. 実験結果

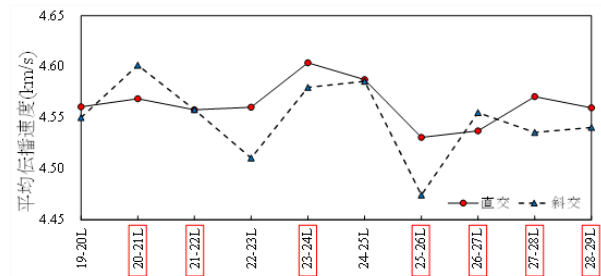
図-7 に M 測線における斜交幅 10 cm、斜交幅 30 cm の直交・斜交方向の伝播速度の分布を示す。斜交方向の見かけの伝播経路が可視ひび割れを交差した箇所に×印をつけている。

斜交幅 30 cm の場合は、測線 V0～V3 から測線 V9～V12 まで（測線 5-8 除く）の区間と測線 V42～V45 から測線 V51～V54 までの区間では斜交は直交とほぼ同じ速度値である。また、斜交幅 10cm の場合は、測線 0-1 から測線 9-10 まで（測線 6-7 除く）と 42-43 測線から 53-54 測線までの区間でも斜交は直交とほぼ同じ速度値である。これらの区間は 4 点曲げ載荷の際の載荷点より外側であり、支点に近づくほど曲げ応力が減少していく区間であり、曲げひび割れも生じていない。すなわち、ひび割れが生じていない区間（損傷のない区間）では、斜交と直交の伝播速度は同じであることがわかった。仮説 1 が検証できた。

斜交幅 10 cm では、ひび割れ交差があった 31 測線のうち 16 測線で斜交方向の伝播速度が減少し、斜交幅 30 cm では、ひび割れ交差があった 29 測線のうち全ての測線で減少した。ひび割れを回折するために超音波の伝播経路が長くなり、斜交方向の見かけの伝播速度が低下したものと考えられる。また、斜交幅 30 cm の方が斜交幅 10 cm より伝播速度が大きく減少している。斜交幅が広いと交差するひび割れの数も増えるために、ひび割れの有無や程度が効果的に判別できるものと考えられる。

しかし、これらは減少している測線の数であり、斜交幅 10 cm の場合には 15 測線で増加しており、減少・増加を判定できるものではないし、斜交幅 30cm で全て減少するものの、有意であるかどうかはわからない。

図-8 に L 測線における斜交幅 10 cm の直交・斜交方向の伝播速度の分布を示す。L 測線は、M 測線に比べてひび割れ先端までの距離が長いので、伝播距離が相対的に長くなると想定されるため、平均伝播速度も低下すると想定される。対象の 10 測線で、ひび割れ交差があった 7 測線のうち 5 測線で斜交方向の伝播速度が減少した。斜交は直交に比べて、V28-29'L と V28-29'M、V25-26'L



横軸で赤く囲った部分はひび割れを交差していた

図-8 直交法・斜交法による超音波伝播速度の分布（測線 L、斜交幅 10 cm）

と V25-26'M はともに減少している。V23-24'M は増加していたが、V23-24'L では減少しており、前述の想定と符合している。V20-21'M は減少していたが、V20-21'L は増加しており、当初の想定とは逆の傾向が認められた。ひび割れの進展状態は直線的・平面的でもなく 3 次元的に変化しながら発展しているために、伝播経路は単純なものではないためである可能性がある。したがって、統計的な評価が行えるように、ある程度の数や密度で測定することが必要であると考えられる。

そこで、統計的有意性を検討するために、2 群の平均値の差の検定を行うべく、直交方向と斜交方向の平均伝播速度の差の検定を行った。直交での測定群と斜交での測定群が同じ母集団に属するかどうかを検定する分散分析法（F 検定）を用いることが望ましいが、ここでは、平均値の差の検定を採用した。また、測定装置の持つ誤差（系統誤差、偶然誤差）の分散については考慮していないため、検定方法に課題が残っている。表-1 に検定の結果を示す。ひび割れのある区間では、平均の差が大きくなったが統計的有意差があると判別できるのは 30 cm 区間のみであった。斜交幅が 10 cm と狭い場合には明確な差として検出できない可能性があるが、30 cm にまで広げた場合には、明瞭に判別できることがわかり、斜交法は有効な測定法であると言える。

このように、斜交幅 30 cm の場合には有効であること

表-1 超音波伝播速度平均の差の検定

クラックあり		直交	斜交	統計的有意差
10 cm区間	伝播速度(km/s)	4.57	4.57	
	変動係数(%)	0.39	0.63	なし
	サンプル数	31	31	
30cm区間	伝播速度(km/s)	4.57	4.51	あり
	変動係数(%)	0.29	0.44	
	サンプル数	29	29	
クラックなし		直交	斜交	
10cm区間	伝播速度(km/s)	4.57	4.57	なし
	変動係数(%)	0.23	0.45	
	サンプル数	33	33	
30cm区間	伝播速度(km/s)	4.56	4.56	なし
	変動係数(%)	0.23	0.67	
	サンプル数	23	23	

がわかったので、結果を詳細に見てみる。測線 V5～V8, V10～V13, V11～V14, V40～V43 では、直交に対して斜交の伝播速度は有意に小さいが、その斜交幅の内部に可視ひび割れは存在していない。これは、内部の不可視損傷を評価しているものと考えられる。すなわち、直交・斜交比較法による超音波試験は、不可視損傷の検出・評価にも有効であることがわかる。

6. 結 論

超音波試験による、可視ひび割れの有無・密度、不可視損傷の評価の可能性を確認することを目的に、曲げ載荷により曲げひび割れが生じている RC 梁試験体を対象に梁軸の直交方向と斜交方向の 2 方向超音波試験を行い、直交・斜交比較法による超音波試験の有効性を評価した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 損傷のない健全なコンクリート部材では斜交方向と直交方向の超音波伝播速度はほぼ等しい（仮説 1）ことが検証できた。
- (2) 直交方向に卓越する曲げひび割れがある部材では、近接する直交・斜交の経路で比較すると測定された見かけの伝播速度は、斜交の方が直交よりも小さくなる（仮説 2）ことが検証できた。
- (3) 統計的有意性は、斜交幅 10 cm の場合には認められなかったが、斜交幅 30 cm の場合には認められた。それぞれ対応する斜交角が 8.1～8.9 度と 23～25 度であることから、斜交角が 23 度程度あれば有効である。
- (4) RC 梁のひび割れ損傷評価法として、直交・斜交比較法による超音波試験が有効である。
- (5) 直交・斜交比較法による超音波試験は、不可視損傷の検出・評価にも有効である。

謝辞 元愛媛大学学生の江見 和泰様、田村 健悟様には実験と分析で、協力を得ました。また、実験では（株）愛橋の工場の皆様にはお世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:「非破壊手法を用いたコンクリート構造物の補修効果」に関するシンポジウム, 3-4p, 2018.
- 2) 日本建築学会: コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 34-36p, 1983.
- 3) 森 伸一郎, 小林 巧: 段階的損傷進展に伴う鉄筋コンクリート梁の AE 発生状況, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, 第 I 部門, 2018.
- 4) 長井 春希, 田村 健悟, 三浦 夢乃, 森 伸一郎: 鉄筋コンクリート梁の超音波測定による曲げによるひび割れと

不可視損傷の評価, 土木学会四国支部第 27 回技術研究発表会講演概要集, JSCE7-156, 2021.5.

- 5) 森 伸一郎, 長井 春希, 三浦 夢乃, 江見 和泰, 田村 健悟: 超音波測定による鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れと不可視損傷の評価, 日本非破壊検査協会秋季大会, 2021.11.