

論文 超音波速度に基づくコンクリートの応力推定における測定面内の鉄筋とセンサ間距離の影響

賀上 諒太郎*1・大野 健太郎*2・小森 由仁*1・永元 直樹*3

要旨：超音波法を用いたコンクリートの応力推定に関する著者らの既往の研究では、コンクリートの材質に起因した超音波速度の測定値の変動を低減させるために測線数を増やすことが重要と示唆された。実橋梁での測定では、測定面内に鉄筋が存在し、超音波が鉄筋を伝搬するため、これらの測線を除去した検討が必要である。本研究では、無筋および2種類の配筋条件とした3水準の供試体に対してセンサ間距離を150, 300mmとして実験を行った。その結果、鉄筋が測定値に及ぼす影響は小さく、測線間隔10mm, センサ間距離300mmとして2方向の測線が重なる面積が最大となる測定が望ましいことが示された。

キーワード：超音波法, 応力推定, 超音波速度変化率, センサ間距離, クロス率, 鉄筋

1. はじめに

我が国で供用されている道路橋のうち約45%はプレストレストコンクリート(PC)橋であり、それらの維持管理の重要性が認識されている。既設ポストテンションPC橋の維持管理では、PCグラウトの充填状態およびPC鋼材の腐食状態や破断の有無を調査した後に、最終的にコンクリートに導入されている残存プレストレス量に関する調査が必要とされている¹⁾。これまで残存プレストレス量の評価手法として、スロットストレス法や鉄筋切断法、コア切込み応力解放法など²⁾が実用化されている。しかし、これらの手法は、既設構造物に対して一部破壊を伴うことから、完全非破壊によるコンクリートの応力推定手法が望まれている。非破壊試験として、超音波法³⁾による検討が実施されており、既設PC部材への適用事例⁴⁾が増えているものの、応力の絶対量評価には課題が残されている。

ここで、筆者らも同様に超音波法によるコンクリートの応力推定手法について検討してきた^{5),6)}。本手法では、圧縮応力導入方向に伝搬するコンクリートの超音波速度 V_S とその直角方向の超音波速度 V_T に着目し、超音波速度変化率 $\Delta V/V_T=(V_S-V_T)/V_T$ がコンクリートの圧縮応力と相関することが示されている⁵⁾。さらに、本手法を既設PC連続箱桁橋へ適用した結果、超音波速度変化率が計算上の応力と相関し、さらにコア切込み応力開放法から得られる応力の推定値とも相関することを報告している⁸⁾。

一方、超音波速度測定において、コンクリートの不均一かつ不均質な材料特性に起因する測定値の変動が応力推定に影響を及ぼすことが課題であった。そこで、筆者らは、測線数に着目し、複数測線の平均値を代表値とすることでコンクリートの材質由来の影響が低減されることを確認した⁹⁾。しかし、コンクリートの材質特性の影

響を低減するために必要な測線の配置方法については明らかとなっていない。本手法の実橋梁への適用を考慮すると、測定面内の鉄筋の存在、および鉄筋と測線の位置関係を踏まえた測線の設定方法が必要と考えられる。

そこで、本研究では、既往の実験方法⁹⁾を参考に、適切な測線の設定方法について検討を行った。その後、無筋コンクリート版供試体および2種類の配筋条件とした版供試体の計3水準を用いた載荷実験を行い、鉄筋の存在が圧縮応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートの配合を表-1に示す。供試体は、図-1に示すように400×400×100mmの版形状とし、無筋コンクリート(P)、D13の鉄筋を2本埋設した鉄筋コンクリート(RC2)および4本埋設した鉄筋コンクリート(RC4)の3種類をそれぞれ1体ずつ作製した。なお、供試体の配筋は、PCグラウト充填不良に起因した維持管理の重要性が高いとされる2000年以前に建設されたPC箱桁橋での、箱桁下床版上面における測定を模擬して鉄筋の間隔を200mmと設定した。RC2およびRC4の鉄筋のかぶり厚は載荷軸方向が43mm、載荷軸直角方向が30mmである。また、コンクリートの締固め時には、粗骨材の局所的な偏りを極力無くするため、棒状バイブレータを使用せず、テーブルバイブレータを使用した。供試体は材齢1日で脱型し、その後材齢28日まで水中養生を行った。その後、40°C、60%R.H.環境にて63日間乾燥させた。これは、既往の検討結果⁷⁾より、コンクリートの含水状態が圧縮応力と超音波速度変化率の関係に影響することが報告されており、供用年数の長いPC箱桁橋の桁内部での測定

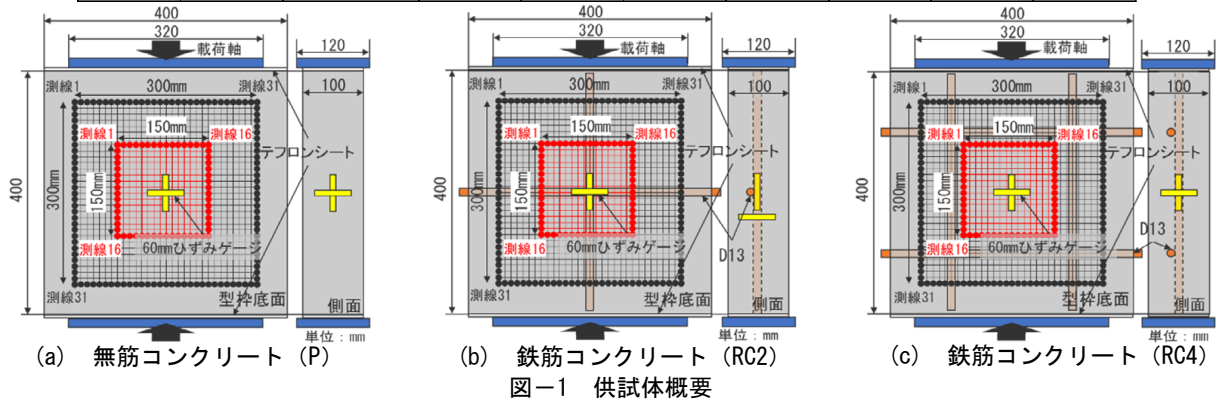
*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域准教授 博士(工学)(正会員)

*3 三井住友建設(株) 土木本部次長 博士(工学)(正会員)

表-1 コンクリートの計画配合

Gmax (mm)	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
20	8	40	4.5	42.4	172	430	710	988	2.150



を考慮し、桁内部は乾燥環境にあることから決定した乾燥期間である。また、φ100×200mmの円柱供試体も同様の養生および乾燥環境に静置し、材齢91日での圧縮強度は58.4N/mm²、静弾性係数は30.9kN/mm²であった。

2.2 荷重方法および荷重試験時の最大圧縮応力

耐圧試験機を用いて400×100mmの面に圧縮応力を作用させた。なお、設備の制約上、荷重板は320×120mmの大きさであり、供試体荷重面よりやや小さい。また、荷重板による供試体の変形を拘束しないように、荷重板と供試体の間にテフロンシートを挿入した。なお、本実験で作用させた最大圧縮応力は12N/mm²であり、圧縮強度の1/3を超えない範囲とした。

2.3 超音波法の測定概要

超音波測定では図-1に示すように、荷重軸方向および荷重軸直角方向において測線間隔を10mmとし、それぞれ31測線（センサ間距離300mm）と16測線（センサ間距離150mm）を設けて型枠底面にて測定した。測定対象となるP波の伝搬経路はスネルの法則に従うことからセンサ間距離は、鉄筋直上の測線において超音波のP波が鉄筋を経由する可能性のある300mmと鉄筋を経由しない150mmに設定した。これは、コンクリートの超音波速度をRC2およびRC4の実測平均速度4307m/s、鉄筋の供試体埋設前の伝搬速度5650m/sを用いた場合、かぶり30mm、センサ間距離が164mm以上となると鉄筋を経由すると試算されたことに基づくものである。なお、測定時にはセンサとコンクリートの接着面にグリセリンペーストを塗布した。超音波入力は、圧縮応力が4N/mm²変化する度にパルサーにてパルス波をAEセンサ（60kHz共振型）に作用させ行った。AEセンサ（60kHz共振型）により検出した信号は、プリアンプにて60dB増幅後、500kHzローパスフィルタ処理を施し、サンプリング時間間隔0.1μsで記録した。なお、1つの測線にて得られた波形は超音波入力時間を基準とし、100波を重ね合わせた1つの波形として処理を行った。

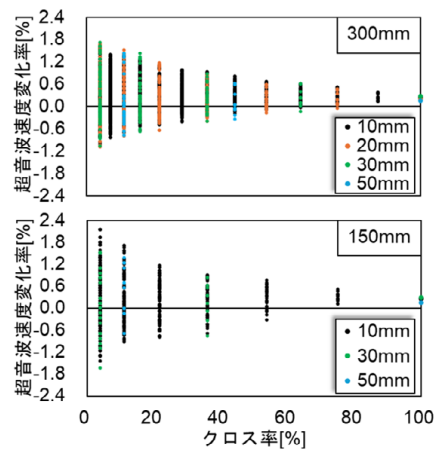


図-2 クロス率と超音波速度変化率の関係

2.4 超音波速度および超音波速度変化率の算出

超音波速度 V はセンサ間距離 L (300mm, 150mm)、および受信センサ検出波形の初動部から求めた到達時刻と超音波発信時刻の時間差 Δt を用いて式(1)より算出した。

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad [m/s] \quad (1)$$

また、超音波速度変化率は無応力時の超音波速度を基準とした式(2)と応力作用直角方向の超音波速度を基準とした式(3)より算出した。

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_i - V_0}{V_0} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

ここに、 V_0 : 無応力時の超音波速度、 V_i : 作用応力 i N/mm² 時の超音波速度である。

$$\frac{\Delta V}{V_V} = \frac{V_S - V_V}{V_V} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

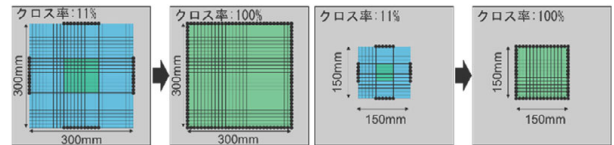
ここに、 V_V : 応力作用直角方向の超音波速度、 V_S : 応力作用方向の超音波速度である。

3. クロス率と超音波速度の関係

図-2に無応力時の供試体Pにおけるクロス率と式(3)から得られる荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率の関係を示す。図中には測線間隔をセンサ間距離300mmで

は 10, 20, 30, 50mm, センサ間距離 150mm では 10, 30, 50mm とした結果を示す。なお、無応力状態では図-1 の左右方向を載荷軸直角方向として扱う。ここで、クロス率とは、図-3 に示すように、2 方向の測線で囲まれる面積の最大値（センサ間距離 300mm では 300×300mm, センサ間距離 150mm では 150×150mm）に対する 2 方向の測線が重なった面積の割合と定義する。本研究では、クロス率を用いて、コンクリートの材質特性の影響を低減するために必要な測線の配置方法について検討を行う。図-2 より、両センサ間距離において、すべての測線間隔でクロス率が高くなるにつれて、超音波速度変化率の変動が小さくなり、超音波速度変化率が 0 に近づくことがわかる。これらの結果は、クロス率が高くなることで粗骨材等のコンクリートの材質特性に起因する測定値の変動が両方向で同程度となり、相互に打ち消し合うためと考えられる。また、図-4 に無応力時にクロス率 100%で測線間隔を変えて測定した供試体 P における載荷軸方向および載荷軸直角方向の超音波速度の変動係数を示す。図より、センサ間距離 300mm では、軸方向の方が直角方向よりも変動係数が大きい。150mm では逆となることわかる。これは、軸および直角方向における測線上の骨材の配置状況の違いが起因していると推察されるが現段階では詳細は不明である。また、センサ間距離 300mm の載荷軸方向では、測線間隔が広く、測線本数が少なくなるにつれて変動係数がわずかに大きくなることわかる。一方、載荷軸直角方向およびセンサ間距離 150mm の測定では測線間隔の変化によらず変動係数は同程度となった。このことから、本供試体においては、測線間隔および測線本数が超音波速度の変動に及ぼす影響は小さいことが示された。ここで、コンクリートはモルタルに比べ超音波速度の変動係数は 2 倍以上大きくなると報告されており⁹⁾、粗骨材の偏在の影響は大きいことがわかる。本手法の実橋梁への適用を考慮すると、この影響を低減することが重要である。そのため、測線数を多くし変動係数を小さくすることが望ましいことから測線間隔は 10mm が適切と考えられる。以上から、本手法では、測線間隔を 10mm とし、クロス率が 100%となる測線の設定方法が望ましいと考えられる。また、図-5 に無応力時に測線間隔 10mm のクロス率 100%で測定した各供試体における載荷軸および載荷軸直角方向の超音波速度の変動係数を示す。なお、後述する理由により RC2 および RC4 は鉄筋付近の測線を除去した結果も併せて示している。図より、300mm は 150mm に比べて概ね変動係数が小さいことがわかる。

4. 測定面内の配筋が圧縮応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響



$$\text{クロス率} = \frac{S}{A} \times 100$$

S: 2方向の測線が重なった面積
A: 2方向の測線で囲める面積の最大値

図-3 クロス率の概念図

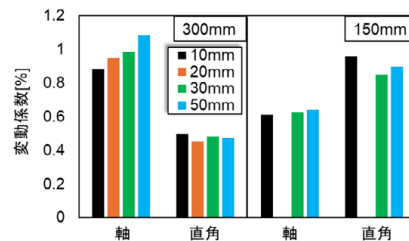


図-4 各測線間隔の超音波速度の変動係数(供試体 P)

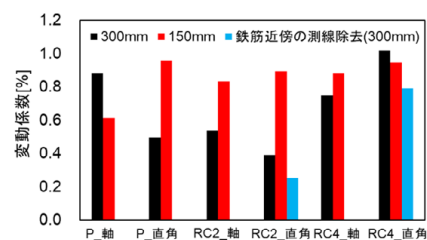


図-5 各水準の超音波速度の変動係数(測線間隔 10mm)

4.1 鉄筋が超音波速度の測定値に及ぼす影響

ここでは、検出波形のうち初動部が鉄筋を経由する可能性のあるセンサ間距離 300mm の測定値について、鉄筋の伝搬有無について検討する。図-6 に RC2 および RC4 の載荷過程における載荷軸および載荷軸直角方向の各測線の超音波速度を示す。図中には、黒線で 0N/mm² 時の 31 測線の超音波速度の平均値を示し、赤線で鉄筋の位置を示している。図より、RC2 および RC4 の載荷軸方向において、鉄筋近傍の測線の超音波速度は他測線と同程度の値を示すことから超音波が鉄筋を経由した可能性は低いと考えられる。一方、載荷軸直角方向においては、両供試体とも鉄筋近傍の測線の超音波速度が他測線よりも比較的高い値を示している。鉄筋直上の測線から 20mm 以内の測線の超音波速度は平均値よりも高いことから、これらの測線は鉄筋を伝搬したと考えられる。載荷軸および載荷軸直角方向において、鉄筋経由の有無が生じたのは、超音波測定面からのかぶり方が載荷軸方向は大きく、載荷軸直角方向は小さいことに起因すると推察される。なお、RC4 の載荷軸直角方向では、12N/mm² 時に超音波速度が大きく低下しているが、この要因は 4.4 に示すようにひび割れの発生によるものと考えられる。

4.2 載荷軸方向における圧縮応力と無応力基準の超音波速度変化率の関係

図-7(a) に載荷軸方向における各供試体の圧縮応力と超音波速度変化率の関係を載荷過程および除荷過程の線形近似直線とともに示す。載荷過程は塗りつぶしのマーカーおよび実線で、除荷過程は白抜きおよび点線で示す。

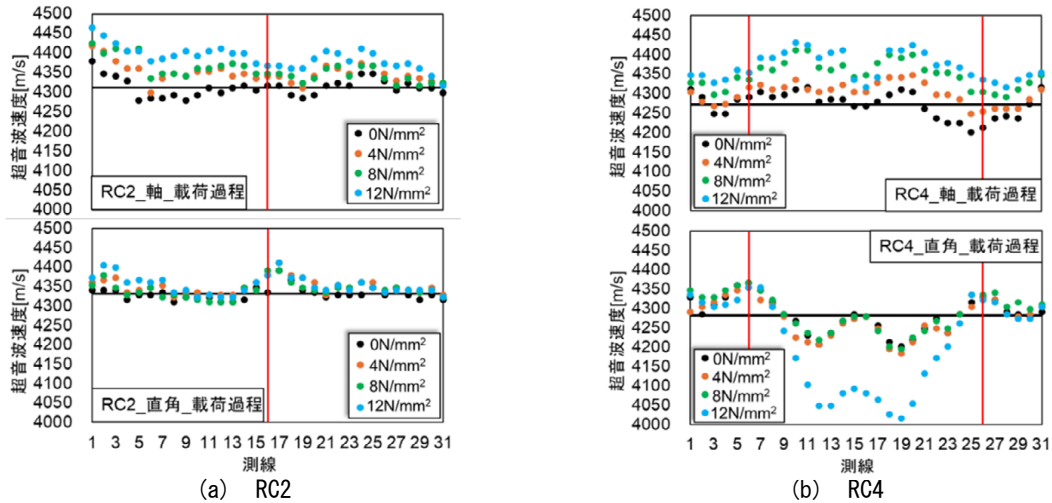


図-6 RC2 および RC4 のセンサ間距離 300mm における各測線の超音波速度

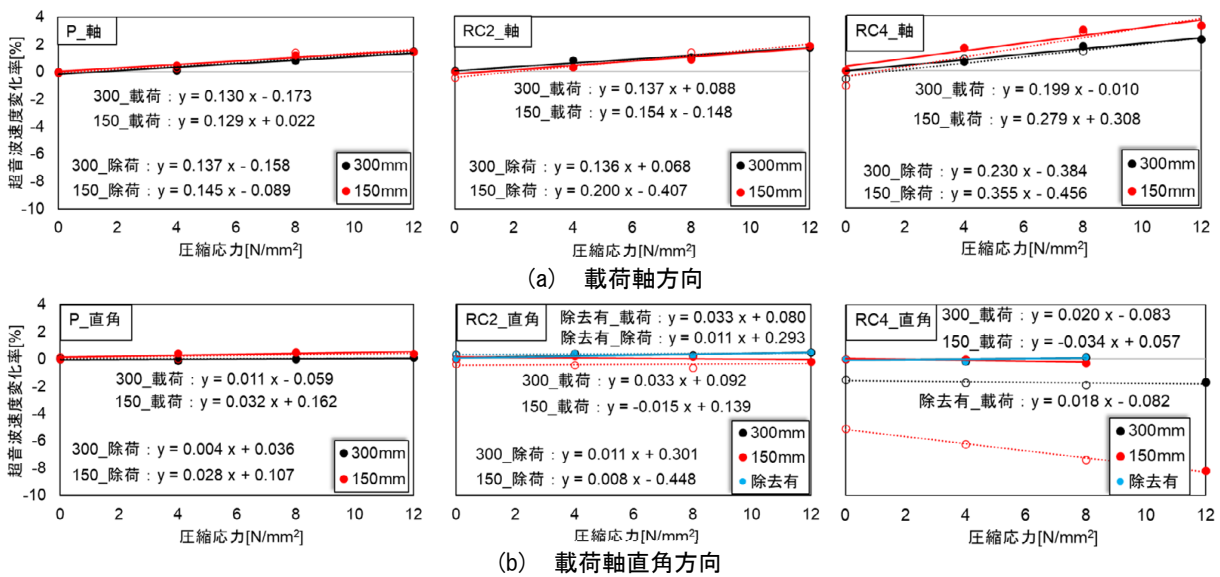


図-7 圧縮応力と無応力基準の超音波速度変化率の関係

以降の図も同様の表記を用いる。超音波速度変化率は 31 測線（センサ間距離 300mm）および 16 測線（センサ間距離 150mm）の超音波速度の平均値を用いて式(2)から算出した。図より、全ての供試体および両センサ間距離において応力の増加に伴い超音波速度変化率は線形的に増加し、応力の減少に伴い線形的に減少することがわかる。また、供試体 P および RC2 の近似直線の傾き（音弾性定数）はセンサ間距離によらず近い値を示した一方で、RC4 の音弾性定数は P および RC2 の約 1.5 倍の値となった。ここで、音弾性定数の違いは超音波法による応力推定値に影響するため、以降では同一条件下（配合、材齢、含水状態等）での音弾性定数について考察する。

4.3 荷重軸直角方向における圧縮応力と無応力基準の超音波速度変化率の関係

図-7(b)に荷重軸直角方向における各供試体の圧縮応力と式(2)から得られる超音波速度変化率の関係を荷重過程および除荷過程の線形近似直線とともに示す。なお、4.1 で超音波が鉄筋を経由した可能性が考えられる測線

を除いた結果も併せて示す。RC4 においては 12N/mm²時に超音波速度が大きく低下したことから荷重過程における近似直線は 8N/mm²までの結果から算出した。図より、各供試体において応力の増減に伴う超音波速度変化率の変化が非常に小さく、荷重および除荷過程で音弾性定数が 0 に近い値を示していることがわかる。荷重軸方向と比較して音弾性定数が小さいことから荷重軸直角方向の超音波速度の応力に対する感度は比較的小さいことがわかる。また、RC2 および RC4 における鉄筋経由の可能性が考えられる測線の除去の有無による音弾性定数の違いはほとんどなく、本供試体においては、荷重軸直角方向の鉄筋が無応力基準の音弾性定数に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4.4 応力ひずみ曲線

図-8 に、型枠底面と打込み面にそれぞれ 3 枚貼付したひずみゲージから取得した応力と縦ひずみの関係を示す。なお、ここでは圧縮を正としている。荷重過程では、供試体 RC4 のひずみが P および RC2 よりも荷重軸方向

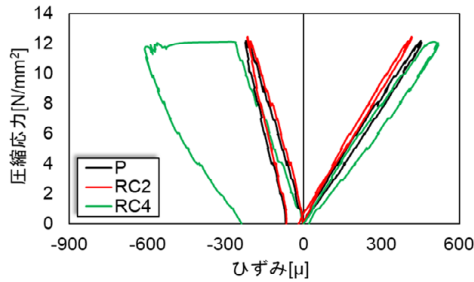


図-8 400×400mmの面の応力と縦ひずみの関係(圧縮:正)

および荷重軸直角方向にて大きい値を示しており、供試体の変形量が大きい結果となった。また、RC4では、12N/mm²時に引張ひずみが顕著に増加していることから、ひび割れが発生したと推察される。なお、ひび割れは目視不可能であった。

4.5 センサ間距離 300mmにおける圧縮応力と荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率の関係

図-9に各供試体のセンサ間距離 300mmにおける圧縮応力と式(3)から得られる荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率の関係を荷重過程および除荷過程の線形近似直線とともに示す。なお、ここでは鉄筋経由の可能性のある測線も含めて考察する。また、RC4はひび割れの影響を除くために荷重過程 8N/mm²までの結果のみ示す。図より、全ての供試体において、圧縮応力と超音波速度変化率は線形関係にあることがわかる。供試体PおよびRC2は、荷重および除荷過程の音弾性定数は同程度の値となることがわかる。また、荷重過程において、RC4の音弾性定数はP、RC2よりも大きい値を示した。これは、4.2の結果よりRC4の荷重軸方向の無応力基準の音弾性定数がP、RC2よりも大きいためと考えられる。

4.6 鉄筋の影響を受ける測線を除去した荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率と圧縮応力の関係

図-10にセンサ間距離 300mmを対象とし、RC2およびRC4における圧縮応力と鉄筋経由の可能性のある測線を除去した場合の荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率の関係を、荷重過程および除荷過程の線形近似直線とともに示す。ただし、RC4についてはひび割れの影響を除外するため、荷重過程における 8N/mm²までの結果のみを対象とした。測線の除去は、4.1に示したように、荷重軸直角方向において鉄筋直上の測線から 20mm以内の測線を対象とした。図より、音弾性定数は図-9に示すRC2、RC4の音弾性定数と近い値となることがわかる。また、近似直線の切片の値は図-9に示すRC2、RC4の近似直線の切片の値よりも概ね0に近づくことがわかる。これは、鉄筋経由により超音波速度が高い値を示した測線を除去したことで、荷重軸方向および荷重軸直角方向でコンクリートのみを伝搬する超音波速度を対象としたことに起因すると考えられる。以上のことから、本供試体においては、鉄筋の影響を受ける荷重軸直角方向の測線の除去

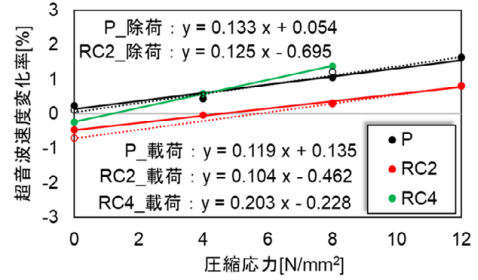


図-9 300mmの圧縮応力と荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率の関係

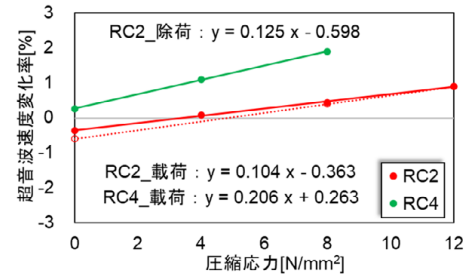


図-10 鉄筋経由の測線除去有の圧縮応力と荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率の関係(300mm)

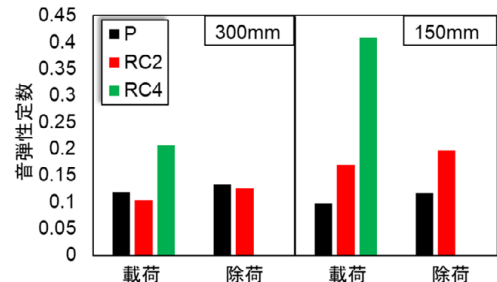


図-11 異なるセンサ間距離の音弾性定数

が荷重軸直角方向基準の音弾性定数および無応力時の超音波速度変化率に及ぼす影響は小さいことがわかった。ただし、近年のPC橋では、鉄筋間隔が 125mm 以下のように密になる場合があり、鉄筋経由の測線が増えることでコンクリートのみを伝搬する測線数が減少し、音弾性定数や無応力時の超音波速度変化率に影響を及ぼす可能性が考えられる。また、実橋梁においては、継続的な圧縮応力作用方向と直角方向にポアソン効果による引張力が生じる可能性があること、およびその引張クリープの影響も考えられることから、ひび割れ等の無い健全なコンクリートのみを伝搬している可能性の低い鉄筋の影響範囲にある測定結果は除去するほうが安全と考えられる。

4.7 センサ間距離の違いが圧縮応力と荷重軸直角方向基準の超音波速度変化率の关系到及ぼす影響

図-11にセンサ間距離 300mm および 150mm の音弾性定数を示す。なお、図-11中の音弾性定数においては、鉄筋の影響を受けない測定結果を比較するために、センサ間距離 300mm は図-9に示す供試体Pの音弾性定数と図-10に示す供試体RC2およびRC4の音弾性定数を対象とした。図より、PおよびRC2、RC4の音弾性定数は、300mmよりも150mmの方が大きく異なる値を示す

ことがわかる。ここで、既往の研究より、圧縮応力と超音波速度変化率の関係における音弾性定数は、粗骨材量や飽水度の違いによって変化することが報告されている。本実験では、同一配合および同一の乾燥状態のコンクリートを対象とした測定であるにもかかわらず、150mmにおいて音弾性定数が比較的大きく変化した。また、図-5から、センサ間距離150mmでは300mmよりも各測線の超音波速度の変動係数が比較的大きいことが確認された。さらに、圧縮応力の変化に伴う超音波速度の変化は粗骨材周りの遷移帯の影響を大きく受けることから、各測線中にできるだけ均一な量の粗骨材が配置されることが望ましい。そのため、センサ間距離が比較的長く測線数が多い方が粗骨材の偏りの影響などを抑えられると考えられる。以上のことから、本研究ではセンサ間距離300mm、測線間隔10mmとした測定が望ましいと考えられる。

5. まとめ

本研究では、コンクリートの材質特性の影響を低減するために必要な測線の設定方法および鉄筋が圧縮応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 無応力状態のコンクリートにおいてクロス率を変え超音波速度測定を行った結果、クロス率の増加およびそれに伴う測線数の増加により超音波速度変化率の変動は小さくなり、0に近づくことがわかった。これは、コンクリートの材質特性に起因する測定値の変動が両方向で同程度となり、相互に打ち消し合うためと考えられる。以上のことから、本手法では測線間隔を10mmとし、クロス率100%となる測線の設定が望ましいと考えられる。
- (2) 载荷軸方向および载荷軸直角方向に配置された鉄筋の影響について検討した結果、本供試体では圧縮応力と無応力基準の超音波速度変化率の関係に鉄筋が及ぼす影響は小さいことがわかった。これは、载荷軸方向では鉄筋を経由する測線が存在しないこと、ならびに载荷軸直角方向では応力変化に伴うコンクリートの超音波速度変化率の変化が非常に小さいことに起因すると考えられる。また、圧縮応力と载荷軸直角方向基準の超音波速度変化率の関係から、鉄筋の影響を受ける载荷軸直角方向の測線の除去が载荷軸直角方向基準の音弾性定数および無応力時の超音波速度変化率に及ぼす影響は小さいことがわかった。
- (3) センサ間距離150mmおよび300mmを用いて载荷実験を行った結果、圧縮応力と超音波速度変化率の関係から得られる各供試体の音弾性定数は300mm

よりも150mmの方が大きく異なる値を示した。また、無応力時における各測線の超音波速度の変動係数は300mmの方が150mmよりも小さくなることが確認された。これらのことから、本研究では、センサ間距離300mmを用いる測定が望ましいと考えられる。

謝辞

本研究に際し、東京都立大学の上野敦准教授、鎌田知久助教にご助言いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2023 橋梁の現況、(<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2023/nenpo03.html>)
- 2) 公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会：既設 PC ポストテンション橋保全技術指針, p.79, 2022.7
- 3) 松田秀和ほか：弾性波伝搬速度を利用したコンクリートへの作用応力度評価に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第19巻，2019.10
- 4) 北野勇一，大久保孝，西本英司，渡辺健，超音波伝搬速度を用いた PC 橋間詰床版の応力評価に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第24巻，pp.559-564，2024.10
- 5) 永田昂大，大野健太郎，玉置一清，上野敦：伝搬経路の異なる超音波の速度変化率を用いたコンクリートの応力推定手法の基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1805-1810，2019.6
- 6) 永田昂大，大野健太郎，玉置一清，上野敦：プレストレスを導入したコンクリートの超音波速度変化率の経時変化とその変動要因に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1606-1611，2020.6
- 7) 永田昂大，大野健太郎，玉置一清，上野敦：コンクリート圧縮応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす諸要因の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1121-1126，2021.6
- 8) 大野健太郎，玉置一清，永元直樹，広野邦彦：超音波法による PC 連続箱桁橋のコンクリート応力推定法の提案と実橋検討，プレストレストコンクリート工学会，シンポジウム論文集，pp.339-342，2022.10
- 9) 賀上諒太郎，大野健太郎，小森由仁，永元直樹：プレストレストコンクリートの超音波法による応力推定に関する検討，プレストレストコンクリート工学会，シンポジウム論文集，pp.289-292，2023.10