

論文 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

永田 昂大*1・大野 健太郎*2・玉置 一清*3・野並 優二*4

要旨：筆者らは、超音波法によるプレストレストコンクリートの応力推定に関する既往の研究において、コンクリートの圧縮応力漸増過程時に、載荷軸直角方向に対する載荷軸方向の超音波速度変化率がコンクリートの応力と一定の関係を示すことを明らかにした。本研究では、約1年間圧縮応力を持続させた版状コンクリート供試体に対し、応力と超音波速度変化率それぞれの経時変化の関係について検討を行った。その結果、応力は時間経過に伴い減少し、超音波速度変化率は増加した。また、同一供試体にて、応力を約半分に低下させた場合、超音波速度変化率が約半分に減少し、急激な応力変化に超音波速度変化率が追従した。

キーワード：プレストレストコンクリート、応力推定、超音波速度変化率、経時変化

1. はじめに

プレストレストコンクリート(PC)構造は、PC鋼材を緊張し、導入されたプレストレスにより、コンクリートにひび割れを生じさせない構造とすることや、ひび割れの制御が可能である。現在、わが国で供用されている橋梁数のうち、PC橋の割合は約45%となっており、鉄筋コンクリート橋の約3倍となっている¹⁾。

しかし、過去に建設されたPC道路橋である暮坪陸橋²⁾や須井川橋³⁾、妙高大橋⁴⁾では、PC鋼材の腐食や破断の事例が報告されており、今後、供用されているPC橋の更なる老朽化によって、安全性が危惧されるところである。このような状況下において、補修・補強工法の選定を行うにあたり、PC橋の残留応力を把握することが重要となるが、現在実用化されているプレストレス推定技術は、部材の一部破壊を伴うものであり、完全非破壊による応力推定手法の確立が望まれている。

非破壊によるコンクリートの応力推定に関する研究では、超音波法による検討が実施されている^{5)~11)}。これらによれば、コンクリートの圧縮応力漸増過程に超音波法を適用し、得られた超音波波形のCoda波(初動到達部以降に観測される干渉波)あるいは初動到達部から、無応力状態に対する各応力状態の超音波速度変化率を算出し、応力と超音波速度変化率が一定の関係を有すると報告されている。しかし、実用性を考慮した場合、基準速度となる無応力時の超音波速度を得ることは困難であると考えられる。そこで筆者らは、載荷軸直角方向に対する載荷軸方向の超音波速度変化率とコンクリート応力が相関関係にあることを確認し、無応力時の情報を用いずに超音波速度変化率を用いてコンクリートの応力推定が

行える可能性を示した¹²⁾。

ここで、本手法の長期的なモニタリングの可能性を検討するため、既往の研究¹²⁾で使用した供試体に対し、約1年間応力を持続させ、超音波速度変化率とコンクリート応力の関係について考察を行った。また、同一供試体にて鋼材腐食によるPC鋼材の破断を模擬し、応力を急激に変化させた場合の検討も併せて行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は、図-1に示すように版形状とし、寸法は750×1200×250mmであり、供試体内に圧縮応力を導入するため、コンクリート内に3本のシース管を埋設し、それぞれのシース管内にφ32mmのPC鋼棒を1本ずつ配置した。コンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートの材齢28日での圧縮強度は40.7N/mm²、静弾性係数は24.3kN/mm²であった。

2.2 載荷方法および超音波測定

供試体への載荷は、材齢32日に実施し、シース内の3本のPC鋼棒を油圧式加力機により緊張することで、コンクリートに圧縮応力を導入した。ここで、応力は、PC鋼棒の緊張力をロードセルで測定し、それを供試体の断面積で除すことにより算出し、応力が10N/mm²になるまで載荷を行った。超音波の入力はファンクションジェネレータにて振幅値を15V、継続時間10μsとした矩形波をAEセンサ(60kHz共振型)に作用させ、信号入力を10回行った。測定方向は載荷軸直角方向と載荷軸方向の2方向とし、測定距離は300mmとした。AEセンサ(60kHz

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域助教 博士(工学)(正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術本部 環境・リニューアル技術部 リニューアル技術グループ 修士(工学)(正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 修士(工学)(正会員)

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
20	12	46.0	4.5	40.9	180	392	694	1037	3.920

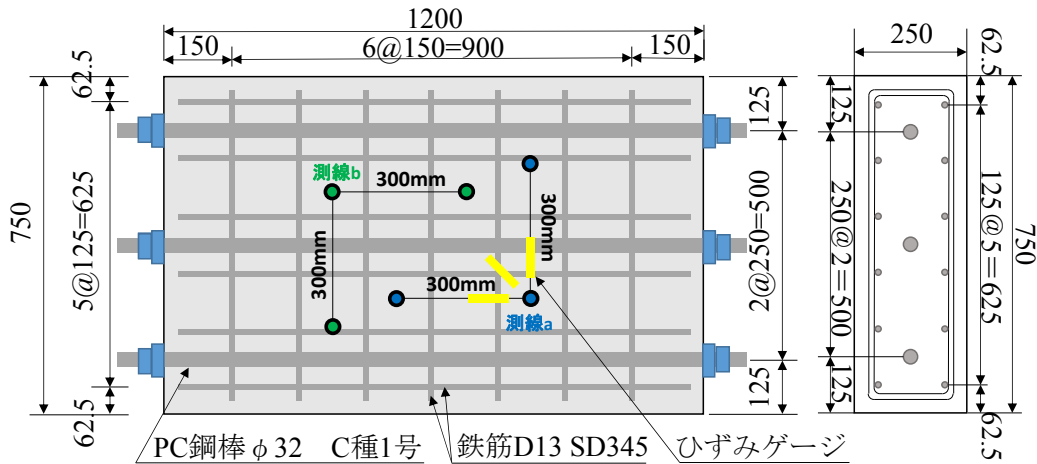


図-1 供試体1の概要図 (単位: mm)

共振型)により検出した超音波は、プリアンプにて60dB増幅(載荷時のみ40dB増幅)した後、500kHzローパスフィルタをかけ、サンプリング間隔0.1μsで記録した。得られた波形は超音波入力時間を基準とし、10波を重ね合わせた1つの波形として処理を行った。

2.3 超音波速度変化率の算出

超音波速度変化率の算出は既往の研究¹²⁾と同様に、以下のように行った。図-2に約8N/mm²載荷時の載荷軸直角方向と載荷軸方向の受信波形初動部の例を示す。図に示すように、載荷軸直角方向の立ち上がり時刻(t_1)から1周期後の時刻(t_2)を相互相関係数算出区間として設定し、式(1)に示す相互相関係数が最大値を示す時間差 τ を求め、式(2)より超音波速度変化率を算出した。

$$CC_{(h_0, h_1)}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_0[t(1+\tau)] \cdot h_1[t] dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_0^2[t(1+\tau)] dt \int_{t_1}^{t_2} h_1^2[t] dt}} \quad (1)$$

ここに、 $h_0(t)$: 載荷軸直角方向での時刻 t における振幅値、 $h_1(t)$: 載荷軸方向での時刻 t における振幅値、 τ : 時間差、 $CC(\tau)$: 相互相関係数である。

$$\frac{\Delta V}{V_v} = \frac{V_h - V_v}{V_v} \times 100 = \left(\frac{t_0}{t_0 - \tau} - 1 \right) \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここに、 V_v : 載荷軸直角方向での超音波速度、 V_h : 載荷軸方向での超音波速度、 t_0 : 載荷軸直角方向で受信した信号の超音波発信時刻からの到達時間差、 τ : 相互相関係数が最大となるときの時間差である。

3. 載荷日から130日までの応力と超音波速度変化率の関係

3.1 測定概要

筆者らの既往の研究¹²⁾より、短期間(1日内)でコン

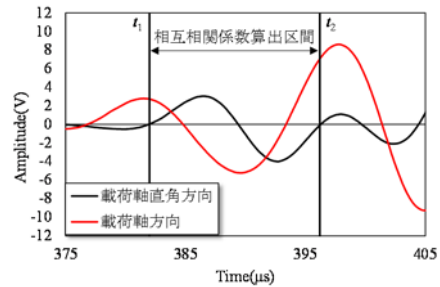


図-2 2方向に伝搬した超音波波形初動到達部

クリートを載荷および除荷した場合、載荷軸直角方向に対する載荷軸方向の超音波速度変化率は、応力と相関することを明らかにした。ここでは、実構造物での測定を念頭に、クリープや乾燥収縮が応力や超音波速度変化率に与える影響を把握するため、プレストレスを導入した際の、圧縮応力と超音波速度変化率の関係について検討を行った。すなわち、既往の研究で用いた供試体(載荷および除荷を1回行った供試体)に対し、再載荷を行い、その後、再載荷時(0日)、35日、130日後にて、超音波測定を行った。得られたデータから、PC鋼棒の緊張力と超音波速度変化率の関係について比較、検討した。なお、各測定日における超音波測定は、測定毎にホットメルトにてセンサの貼付と取り外しを行った。その際、35日の測定においてセンサ直下のコンクリート表面をはく離させたため、測定位置は、載荷時、35日は図-1における測線a、130日後は測線bで行った。

3.2 載荷・除荷および再載荷を行ったコンクリートの超音波速度変化率の変化

図-3に既往の研究¹²⁾にて検討を行った載荷と除荷の応力と超音波速度変化率の関係および再載荷初期値を示す。図より、応力の増減に伴い、超音波速度変化率は増

減し、再載荷後は、1回目の載荷時よりも超音波速度変化率が1.5%程度大きい値を示した。この差が測定誤差の範囲内であるか、あるいは再載荷によって生じたコンクリートの組織的な差により生じたものであるかは現時点で明らかではないため、今後検討する必要があると考えられる。

3.3 緊張力と超音波速度変化率の関係

図-4にPC鋼棒に与えた緊張力の経時変化を、図-5に再載荷後からの超音波速度変化率の経時変化を示す。図より、緊張力は、載荷後130日まで緩やかに低下していることがわかる。一方、超音波速度変化率は、載荷後35日までは変化が小さいが、130日時点で大きく低下した。このような変化は、緊張力の低下のみによる変化とは考えにくく、供試体内で測定箇所を変更したことが要因と考えられたため、次に同一供試体内における測定位置の違いが超音波速度変化率に及ぼす影響を検討した。

3.4 測定位置の違いが超音波速度変化率に及ぼす影響

3.3より、同一供試体内で測定箇所を変更すると、超音波速度変化率が変動する可能性が示唆された。ここでは、その超音波速度変化率の変動について検討するため、以下のような実験を行った。供試体は、3.3で用いた供試体と同配合のコンクリートで、鉄筋の配置条件を変えたものである。(図-6、以下供試体2と称する)。供試体2は、供試体1と同時期に10N/mm²の応力を導入し、245日経過後に超音波測定を行った。なお、超音波測定時の応力は約8.6N/mm²であった。測定エリアは入力点を基準と考え、図-6に示すように4分割し、それぞれをA~Dとする。A~Dの中で5点ずつ超音波入力を行い、計20箇所超音波測定を行った。各測定エリアでは、図-6に示すように、入力点から300mmの位置に載荷軸方向と載荷軸直角方向にセンサを配置し、20箇所それぞれにて超音波速度変化率を算出した。

図-7に20箇所の超音波速度変化率を、図-8に2方

向それぞれの超音波速度の変動を示す。図-7より、圧縮応力が約8.6N/mm²導入されていたため、すべての測定箇所超音波速度変化率は正の値を示すが、測定箇所

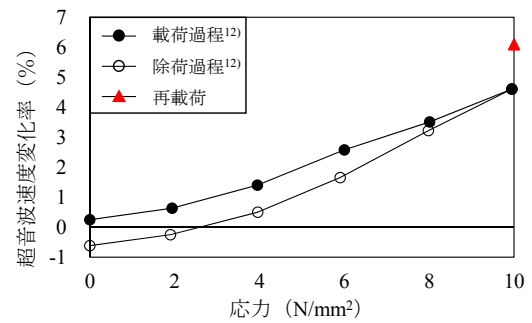


図-3 応力と超音波速度変化率の関係¹²⁾および再載荷初期値

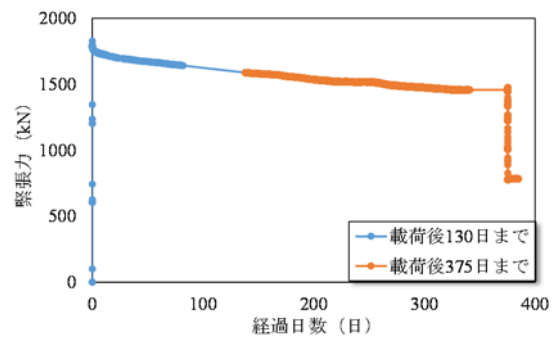


図-4 緊張力の経時変化

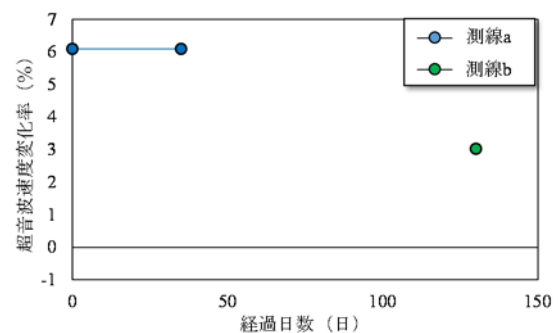


図-5 超音波速度変化率の経時変化 (載荷後130日まで)

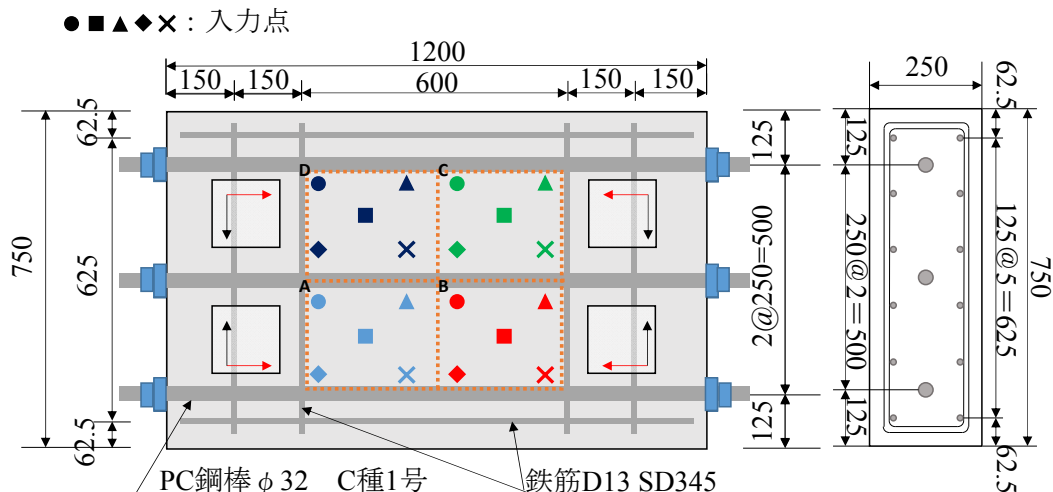


図-6 供試体2の概要図 (単位 mm)

によって超音波速度変化率が異なることがわかる。また、**図-8** より全ての測定箇所において、超音波速度は荷重軸方向の方が荷重軸直角方向よりも大きいことがわかるが、超音波速度変化率と同様に測定方向を問わず変動が大きいことがわかった。本研究では、既往の研究¹²⁾同様、コンクリートに埋設したシース、鉄筋および供試体端部の境界面からの反射波の影響を排除するため、受信波形の初動到達時刻から1周期の区間を対象に超音波速度変化率を算出している。そのため、測定距離300mmにおいて、それらの影響で超音波速度変化率および超音波速度に違いが生じるとは考えにくい。また、荷重軸方向と荷重軸直角方向の超音波速度はどちらも測定箇所の変化に伴う変動が大きいことから、応力の有無に関わらず、コンクリート材料自体の不均一性により超音波速度変化率に変動が生じたと考えられる。このことから、超音波速度変化率の経時変化を検討するためには同一箇所での測定を続けることが必要であると考えられる。

4. 荷重後195日からの応力と超音波速度変化率の関係

4.1 測定条件

ここでは、供試体1を用いて、荷重後195日以降の応力および超音波速度変化率の関係について検討する。

3.4より、超音波速度変化率の経時変化の検討を行う上で、超音波を常に同じ組成となる箇所での測定（同一箇所での継続的な測定）することが必要であると考えられた。3章までの測定では、測定日にセンサを貼付し、測定後は取り外していたが、ここでは**図-1**の測線bに示す位置にセンサを固定し、荷重後195日、265日、325日、375日で超音波測定を行い、超音波速度変化率の経時変化について検討を行った。また、荷重後375日の測定後に、PC鋼材破断等による急激な応力低下を模擬するため、PC鋼材の緊張力を約半分（約1450kNから約750kN）に低下させ、低下前と低下後の超音波速度変化率の変化についても検討を行った。

4.2 緊張力と超音波速度変化率の関係

図-4から緊張力は経過日数に伴い徐々に低下していることがわかる。**図-9**に荷重後195日以降の超音波速度変化率の経時変化を、**図-10**に荷重後195日、375日および375日の緊張力操作後の2方向を伝搬した波形の初動到達部を示す。なお、**図-9**には、**図-5**で示した測定値も併せて示している。ここで、測線bにおいて、130日と195日にかけて超音波速度変化率が低下していることがわかる。この差が測定誤差であるか、コンクリート自体の変化が要因であるかは現段階では不明なため、今後の検討課題とする。**図-9**より、緊張力は緩やかに低下するのに対し、超音波速度変化率は荷重後195日から375日の緊張力操作前まで増加していることがわかる。

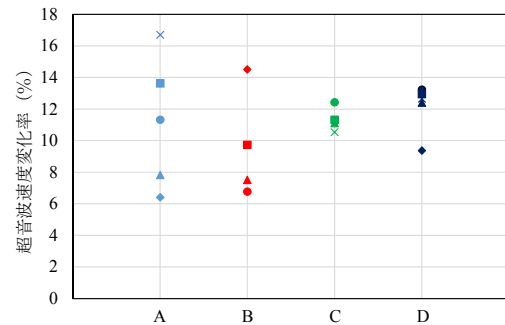


図-7 20測線それぞれの超音波速度変化率

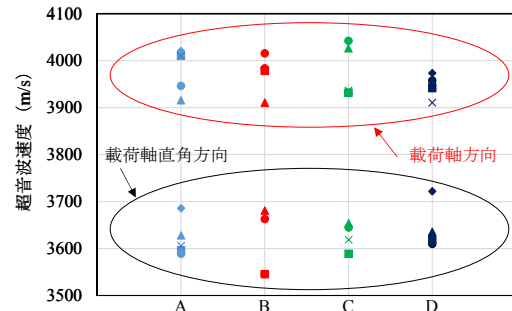


図-8 20箇所の超音波速度測定結果

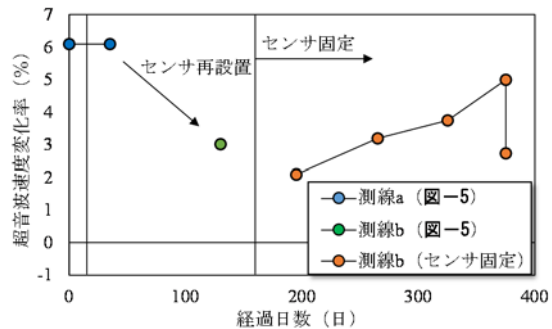


図-9 超音波速度変化率の経時変化

また、荷重後375日の緊張力操作後は、超音波速度変化率は約5.0%から約2.7%に低下した。これは、**図-10**(a)と(b)の波形初動部において、荷重軸直角方向に対して、荷重軸方向の波形が数μ秒早く到達しており、(b)と(c)の比較から両者の違いが小さくなったことから確認できる。ここで、荷重後195日から375日の緊張力操作前まで超音波速度変化率が増加した要因として、コンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響が考えられたため、コンクリートのひずみと2方向の超音波速度の変動から考察を行う。

4.3 2方向の超音波速度とひずみの経時変化

図-11に荷重軸方向および荷重軸直角方向の超音波速度の経時変化を、**図-12**に2方向のひずみの経時変化を示す。なお、ひずみは、荷重軸方向に貼付したひずみゲージが長期間の使用により測定不可となったため、参考として荷重軸に対して45°方向のひずみも示している。**図-11**より、どの測定時においても荷重軸方向の方が荷重軸直角方向よりも超音波速度が大きく、測定日間

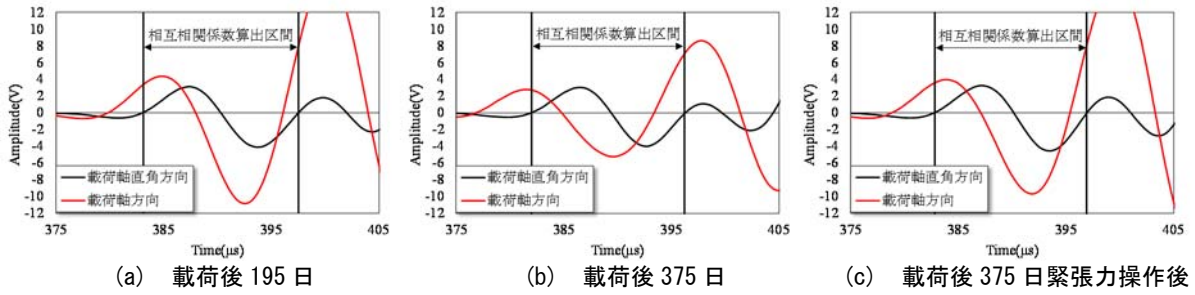


図-10 各測定時の2方向を伝搬した超音波波形初動到達部

の超音波速度の増減の関係は2方向で同様となった。また、195日から265日にかけて、どちらの方向においても超音波速度は減少したが、そこから375日にかけて、超音波速度は増加していることがわかり、載荷軸方向の方が増加量は大きい。ここで、図-12のひずみの経時変化より、載荷軸方向のデータは不明だが、265日付近で収縮ひずみが一度減少し、その後再度収縮ひずみは増加している。この収縮ひずみの挙動から、超音波速度はひずみの変化に対応して変化することがわかる。一方、図-9においてこのような超音波速度変化率の変動が見られなかったのは、載荷軸直角方向および載荷軸方向のひずみが同様の挙動を示し、その挙動は超音波速度変化率を算出することで打ち消すことができたためと考えられる。また、載荷後375日で行った緊張力低下後は、2方向どちらも超音波速度が低下し、載荷軸方向のほうが減少量は大きくなった。ここで、緊張力操作前までの超音波速度の変動について、本実験においては、センサを固定し測定を続けたため、測定面の誤差要因や変動は小さいと考えられ、供試体の微小組織の変化、すなわちコンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響が要因の1つであると考えられたため、次にこれらの影響について検討を行う。

図-12より、載荷軸直角方向は収縮ひずみの増加が小さいのに対し、載荷軸方向に対して45°方向の収縮ひずみの増加が大きいことから、載荷軸方向の収縮ひずみの増加はさらに大きいと考えられる。ここで、図-12の各方向の測定ひずみから各方向の載荷による弾性ひずみを差し引き、乾燥収縮およびクリープによる収縮ひずみとしたものを図-13に示す。図より、乾燥収縮およびクリープによる収縮ひずみは時間の経過とともに増加している。また、乾燥収縮およびクリープの影響が考えられる45°方向および載荷軸方向の収縮ひずみは、乾燥収縮のみの影響を受けている載荷軸直角方向の収縮ひずみの増加量より大きいことがわかる。その影響で、載荷軸方向の超音波速度の増加量が大きくなったと考えられる。

4.4 超音波速度変化率の増加と今後の課題

4.3より、2方向のコンクリートの内部組織の変化には差が生じていると考えられ、基準となる載荷軸直角方

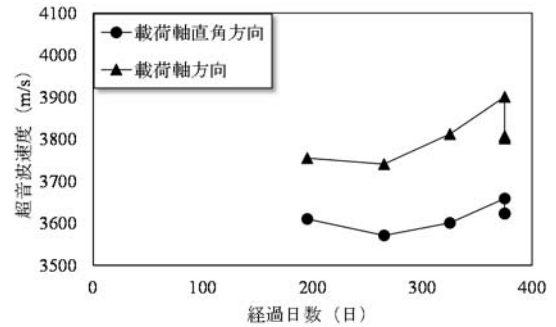


図-11 2方向それぞれの超音波速度の経時変化

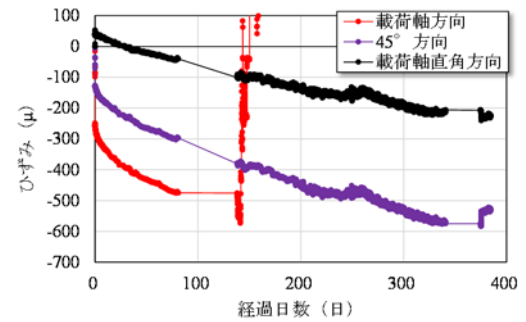


図-12 ひずみの経時変化

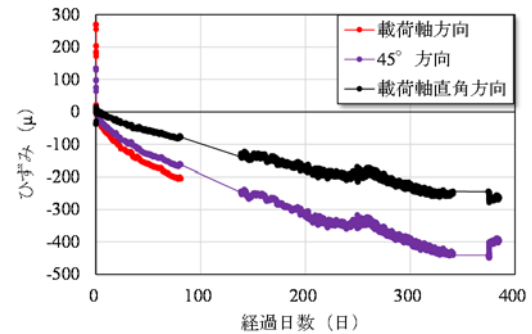


図-13 収縮ひずみの経時変化

向はコンクリートの乾燥収縮の影響を、載荷軸方向は乾燥収縮に加え、クリープの影響を受けることから、超音波速度変化率は増加したと考えられる。しかし、超音波速度変化率は、時間の経過に伴い増加したものの、緊張力の急激な低下には追従した。このことから、現段階では、センサを長期的に固定し、超音波測定をある一定期間の間隔で行うことで、PC構造物の急激な応力低下の検出が行える可能性が示唆された。今後、超音波速度変化率の増加の要因について更なる検討を進めるとともに、コンクリートの乾燥収縮およびクリープが止まった時点

からの超音波速度変化率の経時変化について検討を行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、短期の圧縮応力漸増過程にて、応力と相関関係にある超音波速度変化率について、長期間の応力作用下での経時変化および、超音波速度変化率に及ぼすコンクリートの局所的な組織変化について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 載荷後 130 日までの緊張力および超音波速度変化率の経時変化において、載荷後 35 日までは緊張力に追従し、超音波速度変化率が変化した。一方、載荷を維持した状態で、載荷後 130 日での測定では超音波速度変化率が低下した。これは、緊張力の低下ではなく、測定箇所の変更による影響が卓越したと考えられる。
- (2) 一様に応力が作用しているコンクリート供試体において、20 箇所超音波測定を行い、超音波速度変化率を算出した。その結果、測定箇所によって超音波速度変化率および 2 方向の超音波速度が変わることが確認された。これは、コンクリートの局所的な不均一性によるものと考えられる。
- (3) 載荷後 195 日から 375 日までの 2 方向の超音波速度とひずみから、超音波速度は、コンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響を受け、載荷軸直角方向と載荷軸方向で時間経過に伴う超音波速度の変化量が異なることがわかった。
- (4) 載荷後 195 日から 180 日間で緊張力は徐々に低下したのに対し、超音波速度変化率は増加した。これは、基準とした載荷軸直角方向が乾燥収縮の影響が卓越した結果であるのに対し、載荷軸方向は乾燥収縮に加えクリープの影響を受け、載荷軸方向の組織変化が大きいためであると推察される。
- (5) 載荷後 375 日に行った緊張力操作前後の超音波速度変化率について、緊張力を約 1450kN から約 750kN に低下させると、超音波速度変化率は約 5.0%から約 2.7%に低下した。このことから、現段階では、センサを固定し、ある一定の間隔で本手法を適用することで、PC 部材の急激な応力低下の検出が行える可能性が示唆された。

謝辞

本研究に際し、首都大学東京の宇治公隆教授、上野敦准教授にご助言いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省発行：道路統計年報 2019, 橋梁現況総括

表, 2019.

- 2) 三浦尚, 西川和廣, 見波潔, 上坂康雄: 暮坪陸橋の塩害による損傷と対策— (2) PC 鋼材の腐食とその補強対策, 橋梁と基礎, Vol.27, No.12, pp.37-40, 1993.
- 3) 鴨谷知繁, 森川英典, 白川祐太: 実橋の腐食ひび割れを考慮した塩害劣化 PC 橋の安全性低下予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.517-522, 2010.
- 4) 小林憲一, 大平英生, 登石清隆, 羽田伸介: 妙高大橋の PC ケーブル破断調査と対策, 橋梁と基礎, Vol.45, No.9, pp.32-38, 2011.
- 5) 木全伯光, 岡村明彦, 大島義信, 宮川豊章: コンクリートの音弾性効果に関する基礎的研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-246, pp.491-492, 2010.9
- 6) Oshima, Y., Okamura, A., and Kawano, H.: Stress evaluation in concrete members using ultrasonic propagation velocity, Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading - Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions(CONSEC2010), pp127-134, 2010.
- 7) Ohno, K. et al.: The relation between applied stress and ultrasonic velocity variation in concrete under uniaxial compressive stress, PROGRESS in ACOUSTIC EMISSION XIX, The Japanese Society for NDI, pp.33-38, 2018.11
- 8) 森拓未, 大野健太郎ほか: コンクリートの作用応力と超音波速度変化率に関する基礎的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, V-173, pp.345-346, 2018.8
- 9) Planès, T., Larose, E.: A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 53, pp.248-255, 2013.7
- 10) Bompan, K., F., Haach, V., G.: Ultrasonic tests in the evaluation of the stress level in concrete prisms based on the acoustoelasticity, Construction and Building Materials, Vol.162, pp.740-750, 2018.
- 11) 永田昂大, 大野健太郎ほか: コンクリートの応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす鉄筋の影響: 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, V-553, 2019.8
- 12) 永田昂大, 大野健太郎, 篠崎裕生, 野並優二: 伝搬方向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的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1805-1810, 2019.6