

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06515

研究課題名（和文）超音波法を利用した完全非破壊によるコンクリート部材の応力推定方法の開発

研究課題名（英文）Stress Estimation Method in Concrete by Ultrasonic Wave

研究代表者

大野 健太郎（OHNO, Kentaro）

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号：80571918

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、プレストレストコンクリート部材におけるコンクリートの応力推定を非破壊で実施するため、超音波法を用いて検討を行った。実験により検出した超音波波形の初動到達部に着目し、超音波速度変化率という指標を用いて圧縮応力との関係について整理した。その結果、超音波速度変化率は作用圧縮応力と比例することが確認された。一方、除荷過程では、載荷過程と異なる履歴を示し、これは粗骨材周囲の遷移帯による影響と推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレストレストコンクリート（PC）構造は、PC鋼材の緊張によりコンクリートに圧縮応力を導入し、比較的大きなスパンの橋梁などに使用されている。ところが、様々な要因により導入プレストレスが減少するなど、供用中のPC橋の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、PC部材の残留応力推定が重要であるが、現在実用化されている技術は、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。したがって、本研究で得られる成果は、非破壊でコンクリートの応力を推定する基礎的検討として重要な意義がある。

研究成果の概要（英文）：Introduced compressive stress in prestressed concrete members decreases with time, because concrete has some characteristics such as creep and dry shrinkage. Therefore, a demand for a stress estimation method in prestressed concrete member has emerged. Current stress estimation methods involve destructive action on a part of concrete.

In this study, stress estimation method in concrete by using ultrasonic wave method is investigated in a laboratory. In the experiment, column concrete specimens were prepared, then ultrasonic wave method were applied to these specimens under the compressive stress. The relation between the compressive stress change and the variation of ultrasonic velocity was investigated. As a result, linear relations of velocity variation and compressive stress ratio were clearly observed during loading state. The applied stress in concrete can be estimated by employing the variation of ultrasonic velocity propagated to the loading direction.

研究分野：コンクリートの非破壊検査

キーワード：コンクリート 応力推定 超音波速度変化率 作用応力比 粗骨材

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プレストレストコンクリート(PC)構造は、道路橋を代表に約60年前から発展し、我が国では6万橋を超えるPC道路橋が供用され、鉄筋コンクリート橋の約3倍となっている¹⁾。PC構造は、PC鋼材を緊張し、あらかじめコンクリートに圧縮応力を導入することによってひび割れを生じさせない構造とすることや、ごくわずかのひび割れ幅に制御することが可能である。このような部材において、グラウト未充填に伴うPC鋼材の腐食に起因する鋼材破断事例が報告されており、また、PC鋼材のリラクゼーションやコンクリートの乾燥収縮、クリープなどにより、導入されたプレストレスの減少が報告されている。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場所である。

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部材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、スロットストレス法、鉄筋切断法、コア切込応力解放法、スリット応力解放法など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。

ここで、非破壊試験法の一つである超音波法により得られる指標がコンクリートの作用応力と相関を示すことが報告されている。文献2)によれば、通常用いられる超音波速度は、超音波の到達時刻と伝搬距離から算出され、この過程から得られる超音波速度は応力が変化しても変化しないが、初動波形以降の干渉波部分では応力の増加に伴い干渉波の到達時刻が相対的に速くなり、圧縮応力と相対弾性波速度変化率の関係は弾性範囲内で線形性を有することが報告されている。すなわち、超音波法を用いることでコンクリートの応力を推定できる可能性が示唆されている。

2. 研究の目的

本研究では、前述の既往文献2)および文献3)を参考に、超音波法によるコンクリートの応力推定手法の構築を目指し、以下の項目について基礎的な検討を行う。まず、超音波速度と圧縮応力の関係をセンサ種別、センサ間距離、コンクリート強度を変えて検討し、超音波速度を評価指標とした場合の関係を整理する。その後、超音波速度とは異なる指標(超音波速度変化率)を用いた検討を行い、再度、応力と各指標の関係を整理する。その後、応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響について、粗骨材の有無による検討を行い、応力-超音波速度変化率関係の成立条件について検討する。

3. 研究の方法

(1) 超音波速度と作用圧縮応力の関係

柱状コンクリート供試体を対象とし、超音波速度と圧縮応力の関係について、センサ種別、測定距離、コンクリート強度、測定方向を変えて検討した。

(2) 超音波速度変化率と圧縮応力の関係

前述の超音波速度の検討において、同一応力時に得られる超音波速度は変動が大きく、応力推定が難しいことが示唆されたため、新たに超音波速度変化率を指標とした検討を実施した。

(3) 粗骨材の有無が超音波速度変化率と圧縮応力の関係に及ぼす影響

超音波速度変化率と応力の関係において、載荷時の超音波速度-応力関係のグラフの傾きと除荷時の傾きが異なることがわかった。その載荷時と除荷時の挙動の違いについて検討するため、粗骨材が応力と超音波速度変化率に及ぼす影響について検討し、考察した。

4. 研究成果

(1) 超音波速度と作用応力の関係

超音波法によるコンクリートの応力推定手法構築の基礎検討として、応力を漸増させた柱状供試体に超音波法を適用し、作用応力と速度の関係について検討した。供試体は、図-1に示すように300×300×1000mmの柱状供試体であり、コンクリートの呼び強度を21,40とし、それぞれ1体ずつ作製した。なお、供試体名はそれぞれFc21, Fc40とする。供試体に圧縮応力を作用させ、載荷過程および除荷過程にて超音波測定を行った。超音波の測定では2種類のAEセンサ(60kHz, 150kHz)を用いて信号を送受信し、測定距離を載荷方向に200,400,500,600mm、載荷軸直角方向では200mmとした。

図-2に超音波速度と作用応力の関係を示す。図中には、速度の平均値を示し、各応力における赤線は最大値、最小値を示している。図より、載荷軸方向では、作用応力の増加に伴い平均超音波速度

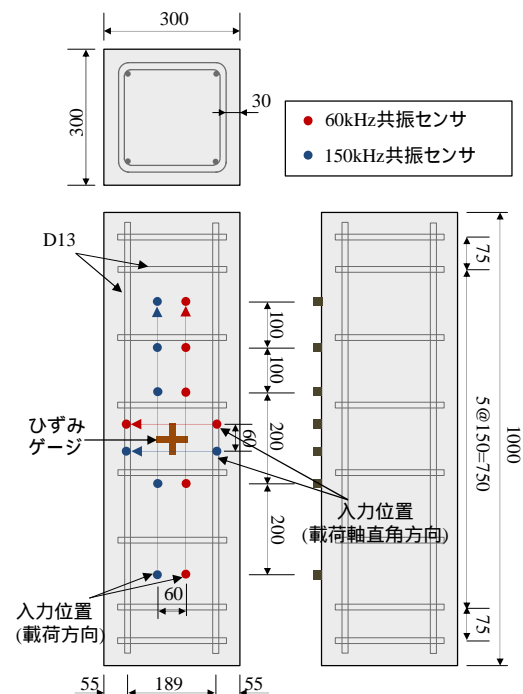


図-1 柱状供試体の概要

は増加しており、一方、荷重軸直角方向では応力変化に対して超音波速度はほぼ一定の値を示すことがわかる。ただし、各作用応力に対して速度の変動が大きいため、超音波速度から作用応力を推定するには精度が低いと考えられる。また、これらの現象は、同一供試体の 150kHz 共振センサおよび Fc40 供試体の計測条件においても同様であった。

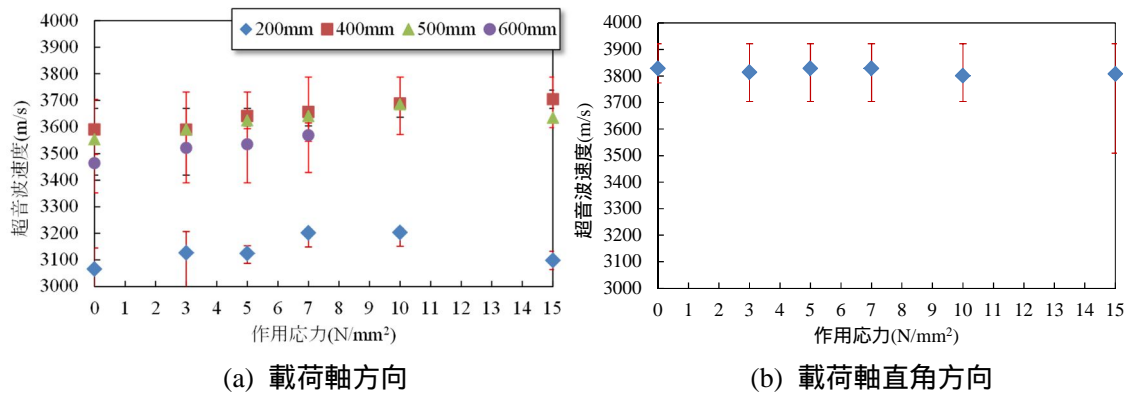


図-2 Fc21，60kHz 共振センサでの作用応力と超音波速度の関係

(2) 超音波速度変化率と作用応力の関係

前述の検討より、超音波速度からコンクリートの作用応力を推定するには精度が低いことが課題として挙げられた。その理由として、図-3 に示すように、信号の初動到達部では、作用応力の増加に伴う到達時刻の変化は非常に小さいことが考えられる。一方、その後の波形では、作用応力の増加に伴い、位相が生じていることがわかる。そこで、本研究では、ある時間区間での無応力状態の超音波波形に対する、各作用応力状態での波形の相互相関係数が最大となる時間差 (τ) を求め、速度変化率 ($\Delta V/V$) を求めた。なお、相互相関係数は式(1)により算出し、速度変化率は式(2)により求めた。

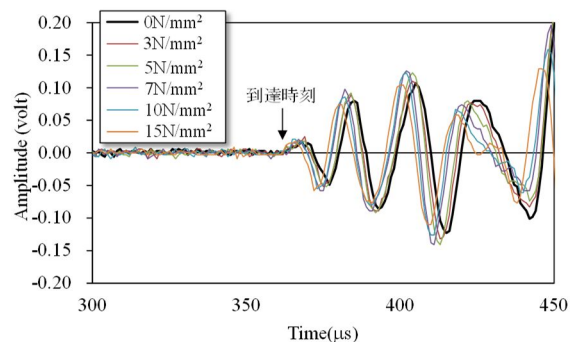


図-3 作用応力と超音波波形
(Fc21, 60kHz, 荷重方向 400mm)

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

ここに、 $h_0(t)$ ：無荷重状態での時刻 t における振幅値、 $h_1(t)$ ：荷重状態での時刻 t における振幅値、 τ ：時間差、 $CC(t)$ ：相互相関係数である。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_i - V_0}{V_0} = \frac{t_0}{t_0 - \tau} - 1 \quad (2)$$

ここに、 V_0 ：無応力状態での超音波速度、 V_i ：作用応力 i での超音波速度、 t_0 ：無応力状態で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時間差である。

図-4 に荷重軸方向の応力比 (σ/f_c ：作用応力 / 圧縮強度) と超音波速度変化率の関係を示す。ここで、図の横軸を応力比とすることで、コンクリートの圧縮強度が変化した場合においても $\Delta V/V_0 - \sigma/f_c$ の関係は保たれ、他のコンクリートへの適用性が高まると考えられる。図より、荷重軸方向の超音波速度変化率は、応力比の増加に伴い増加し、除荷過程では応力比の低下に伴い低下していることがわかる。なお、完全除荷後は無荷重時の速度を下回る結果となった。次に、荷重軸直角方向における応力比と超音波速度変化率の関係を図-5 に示す。荷重軸直角方向では、応力変化にかかわらず、超音波速度変化率の変動は小さく、完全除荷時に超音波速度変化率が初期よりも低下する傾向となった。

これらの結果より、超音波速度変化率は荷重軸方向で応力の変動に伴い増減し、荷重軸直角方向では変動は小さく、また、センサ種別が結果に及ぼす影響は小さくなった。また、応力比が 0.3 を超え、コンクリートの弾性範囲を超えて塑性化する場合には、超音波速度変化率は応力の増加に対して線形性を有さない傾向を示した。したがって、荷重軸方向の超音波波形を用いて、応力比 0.3 以下の範囲内で、超音波速度変化率は応力比と線形性を有することがわかった。すなわち、本研究の範囲内では、弾性範囲内での作用圧縮応力比と超音波速度変化率の関係は以下の式で表される。

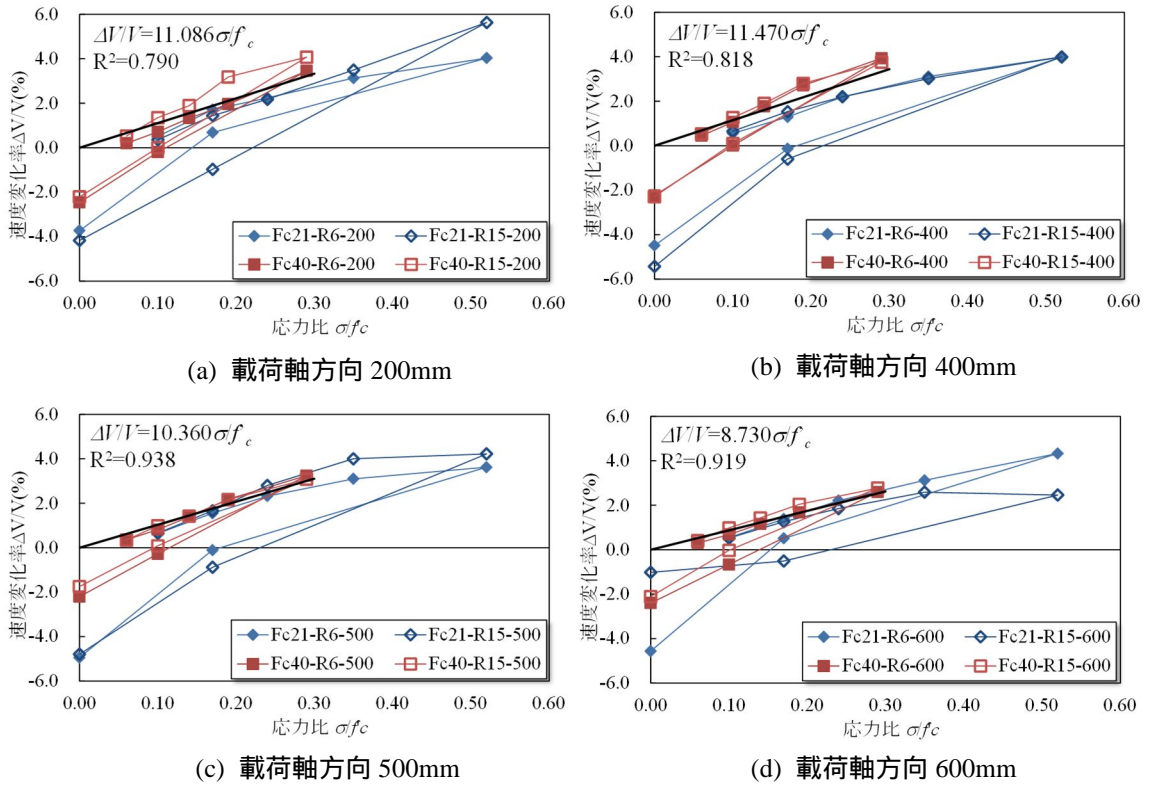


図-4 応力比と速度変化率の関係（載荷軸方向）

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha \cdot \frac{\sigma}{f'_c} \quad (3)$$

(3) 粗骨材の有無が超音波速度変化率と圧縮応力の関係に及ぼす影響

前述の検討より、コンクリートの作用圧縮応力比と超音波速度変化率は弾性範囲内において比例関係を有することがわかった。一方、同一応力時の載荷過程と除荷過程の超音波速度変化率は異なることが認められ、除荷過程の超音波速度変化率の方が載荷過程の超音波速度変化率よりも低い結果となった。これは、粗骨材周りの遷移帯などが載荷過程において一部塑性化し、除荷過程時に遷移帯が周囲の骨材やモルタル/セメントペーストマトリクスの変形挙動に追従できず、弾性波伝搬経路中に伝搬を微小に阻害する形となることが想定されたが、粗骨材周りの影響については未検討であるため、同一水セメント比の角柱コンクリートと角柱モルタル供試体を用いて、作用圧縮応力と超音波速度変化率の関係について整理し、考察した。

実験に使用したコンクリートおよびモルタルの配合を表-1 および表-2 に示す。供試体には、図-6 に示すような 100×100×400mm の角柱供試体を用いた。供試体は、材齢 1 日で脱型し、その後 28 日まで水中養生を行った。超音波法はコンクリート供試体で材齢 29 日、モルタル供試体で材齢 35 日にて行った。コンクリートおよびモルタルの水セメント比を 60% とし、それぞれの供試体の材齢 28 日における圧縮強度および静弾性係数はコンクリート供試体で 29.9N/mm²、25.5kN/mm² であり、モルタル供試体で 49.1N/mm²、23.8kN/mm² である。

図-7 に受信波形の信号到達部の例を示す。本検討では式(1)における相互相関係数算出において、図-7 中の P 波到達時刻 (t_1) から 1 周期の時刻 (t_2) を相互相関係数の算出区間として設定し、超音波速度変化率を求めた。

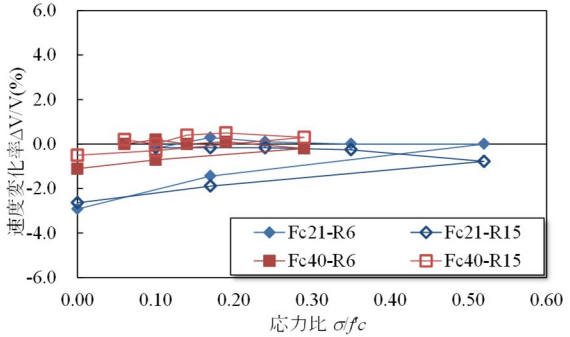


図-5 応力比と速度変化率の関係
(載荷軸直角方向, 200mm)

表-2 モルタルの配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)		
	水 W	セメント C	細骨材 S
60	287	479	1437

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤
20	8.0	60	4.5	47.1	172	287	782	879	1.148

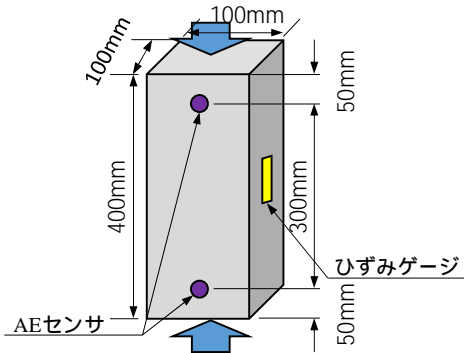


図-6 供試体概要

図-8 に各供試体の応力ひずみ曲線を示す。図より、荷重過程と除荷過程の同一応力時のひずみ差がコンクリートよりもモルタルの方が小さいことがわかる。すなわち、コンクリートの方が非弾性的な挙動をより示すことがわかる。次に、図-9 に各供試体の応力と超音波速度変化率の関係を示す。超音波速度変化率は、コンクリートの方がモルタルよりもグラフの傾き大きく、同一応力時の荷重過程と除荷過程の超音波速度変化率の差も大きくなっている。ここで、コンクリートの圧縮強度とモルタルの圧縮強度を比較すると、モルタルの圧縮強度がコンクリートに比べ約 1.6 倍高いため、傾きが小さく評価された可能性があるため、以下では式(3)を用いて評価した。図-10 に作用応力比と超音波速度変化率の関係を示す。図より、同一作用応力比での超音波速度変化率はコンクリート供試体の方が大きいことがわかる。これは横軸を作用応力比としているため、圧縮強度の影響ではなく、粗骨材周りの遷移帯が占める割合の大きさが影響していると考えられる。遷移帯が応力の増加に伴い収縮し、組織が密となった結果、超音波速度変化率の変化量が大きくなり、同一作用応力比での超音波速度変化率がモルタルと比較して大きくなったと考えられる。また、コンクリートの方が遷移帯が多く、除荷時に遷移帯の一部で組織が疎となる部分が増加することで、除荷過程での超音波速度変化率の低下が大きくなったと考えられる。

以上の結果より、コンクリートの方が同一作用応力比での超音波速度変化率が大きく、荷重過程と除荷過程の超音波速度変化率の差が大きくなることがわかり、これは、粗骨材の存在により、遷移帯量が多くなり、内部組織の変化が大きくなったためと考えられ、完全弾性体に近いほど荷重過程と除荷過程の超音波速度変化率に生じる差は小さくなると示唆された。

< 引用文献 >

- 1) 国土交通省、道路統計年報 2019、橋梁現況総括表、2019。
- 2) Stahler, S., Sens-Schoenfelder, C. and Niederleithinger, E., Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry, Journal of Acoustical Society of America, Vol.129, No.4, pp.1945-1952, 2011.
- 3) Planes, T., Larose, E., A review of ultrasonic coda wave interferometry in concrete, cement and concrete research, Vol.53, pp.248-255, 2013.

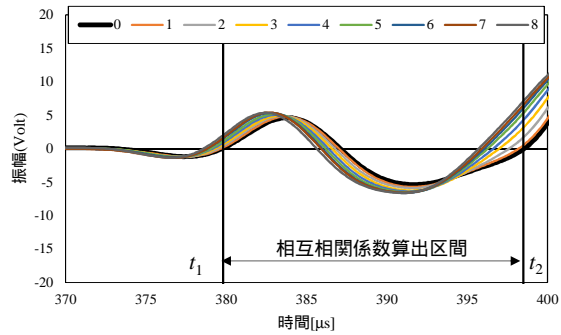


図-7 受信波形初動到達部の例

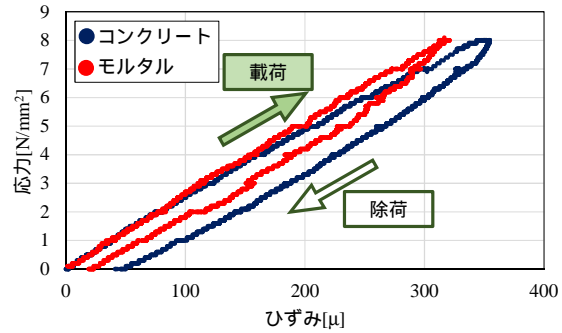


図-8 各供試体の応力ひずみ関係

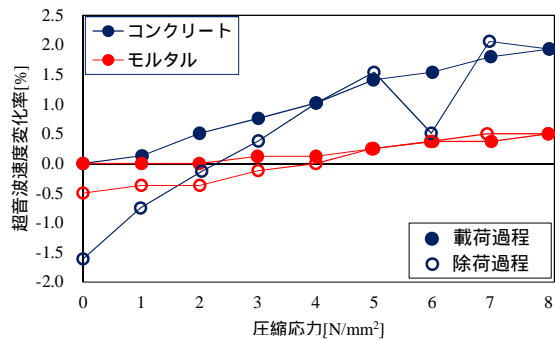


図-9 各供試体の応力と超音波速度変化率の関係

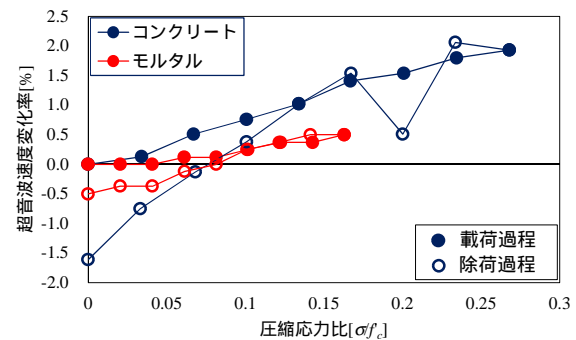


図-10 各供試体の作用応力比と超音波速度変化率の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 永田昂大, 大野健太郎, 篠崎裕生, 野並優二	4. 巻 41
2. 論文標題 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検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1805-1810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 森拓末, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦, 篠崎裕生, 玉置一清, 野並優二
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro OHNO, Kimitaka UJI, Atsushi UENO, Hiroo SHINOZAKI, Kazukiyo TAMAKI and Yuji NONAMI
2. 発表標題 The relation between applied stress and ultrasonic velocity variation in concrete under uniaxial compressive stress
3. 学会等名 24th International Acoustic Emission Symposium (IAES) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森拓末, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦, 篠崎裕生, 玉置一清, 野並優二
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田昂大, 大野健太郎, 上野敦, 宇治公隆, 篠崎裕生, 玉置一清, 野並優二, 湯浅香織
2. 発表標題 コンクリートの応力と超音波速度変化率の關係に及ぼす鉄筋の影響
3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会大74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永田昂大, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦, 篠崎裕生, 玉置一清, 野並優二, 湯浅香織
2. 発表標題 コンクリートの応力と超音波速度および速度変化率の關係
3. 学会等名 第22回アコースティック・エミッション総合コンファレンス
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考