論文　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

永田　昂大[*1]・大野　健太郎[*2]・篠崎　裕生[*3]・野並　優二[*4]

要旨：筆者らの既往の研究より，コンクリートの圧縮応力漸増過程に超音波法を適用し，無応力状態と各応力状態における検出波形初動部の相互相関係数から得られる超音波速度変化率は，応力と線形関係を示すことが報告されている。本研究では，3 水準の異なる強度を有するコンクリート供試体に対し，弾性波速度に影響するコンクリートの圧縮強度の違いが超音波速度変化率へ及ぼす影響を確認した。さらに，同一応力下での載荷軸方向とその直角方向の超音波波形から超音波速度変化率を求め，無応力状態の超音波波形を用いないコンクリートの応力推定方法を考案し，その妥当性を明らかにした。

キーワード：コンクリート，応力推定，超音波速度変化率，圧縮強度，超音波伝搬方向

1. はじめに

プレストレストコンクリート（PC）構造物は，PC 鋼材を緊張し，あらかじめコンクリートに圧縮応力を作用させることによって，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。そのため，わが国では道路橋を代表に約 60 年前から PC 構造物が発展してきた。わが国では，6 万橋を超える PC 道路橋が供用されており [1]，これらの維持管理のための合理的な点検手法の確立が求められている。

コンクリートに導入されたプレストレスは，鋼材のリラクセーションやコンクリートのクリープ，乾燥収縮に加え，塩害による PC 鋼材の腐食などにより減少する場合があり [2),3),4)]，たわみの増加，ひび割れの発生，振動特性の変化などの変状が発生する [5)]。このようなことから，導入したプレストレスの変化などを測定できる手法が望まれている。現在考案されているプレストレスの測定方法はスロットストレス法，鉄筋切断法，コア切込応力解放法，スリットストレス法などがある [6)]。しかし，いずれもコンクリートの一部を破壊する行為を伴う技術であり，現在のところ，非破壊による応力推定手法は確立されていない。研究段階では，超音波法による検討 [7),8)] が実施されているものの，無応力状態での超音波測定が必須であり，既設PC部材への適用には課題が残されている。

筆者らの既往の基礎研究 [9),10)] では，コンクリート柱状供試体に対し，圧縮応力を漸増させながら超音波を入出力し，超音波速度と作用応力の関係について検討を行った。その結果，無応力状態と各応力状態における超音波波形初動部の相互相関係数を用いて超音波速度変化率を算出することで，作用応力と超音波速度変化率は線形関係を有することが示された。

本研究では，既往の結果 [9),10)] に基づき，超音波法による既設 PC 部材の応力推定手法を構築する目的で，無応力状態での超音波測定を必要としない手法の確立を目指した。具体的には，圧縮強度の違いが応力と超音波速度変化率に及ぼす影響を検討した後，同一応力下での載荷軸方向とその直角方向の超音波波形から超音波速度変化率を求め，無応力状態の超音波波形を用いずに超音波速度変化率を算出する測定方法を検討し，超音波速度変化率と作用応力の関係から本手法の適用性を考察した。

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。本研究では，コンクリートの圧縮強度の違いが応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響を確認するため，3 水準の圧縮強度を有する供試体をそれぞれ 1 体ずつ作製した。それぞれの供試体の配合を**表－1** に示す。なお，供試体名はコンクリートの圧縮強度を反映し，L，M，H とする。それぞれの供試体のコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を**表－2** に示す。なお，圧縮強度と静弾性係数の測定は，それぞれの供試体での超音波の測定日に行った。すなわち供試体 L は材齢 28 日，供試体 M，供試体 H は材齢 29 日である。

2.2 載荷方法および超音波の測定

*1 首都大学東京　都市環境学部　都市基盤環境コース（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)　技術研究所　土木構造グループ　博士（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）

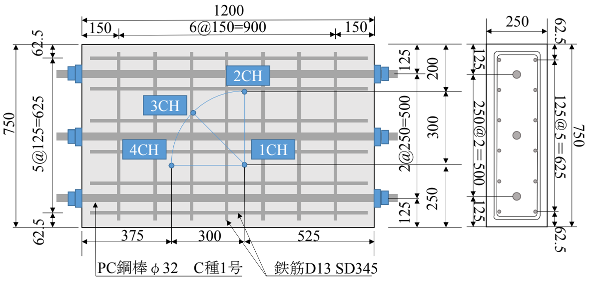
表－1　コンクリートの配合

供試体名	Gmax (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				
						W	*C*	*S*	*G*	*Ad*
L	20	12	68.6	4.5	46.1	173	253	843	1021	2.530
M	20	12	46.0	4.5	40.9	180	392	694	1037	3.920
H	20	21	36.0	3.0	45.6	175	487	762	947	5.600

実験では油圧式加力機により PC 鋼棒を緊張し，コンクリートに圧縮応力を作用させ，載荷過程の応力が 0，2，4，6，8，10N/mm² となった時点および除荷過程の応力が 8，6，4，2，0N/mm² となった時点の 11 段階で超音波計測を行った。超音波の入力に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，信号入力を各応力段階で 10 回行った。超音波の測定方向は載荷軸方向に対して 0°，45°，90° 方向とし，測定距離を 300mm とした。AE センサ（60kHz 共振型）により検出した超音波は，プリアンプにて 40dB 増幅した後，サンプリング間隔 0.1μs で記録した。

表－2　各供試体のコンクリートの力学的特性

供試体名	L	M	H
圧縮強度（N/mm²）	28.0	40.7	68.1
弾性係数（kN/mm²）	26.8	24.3	34.6



図－1　供試体概要とセンサ配置（単位：mm）

3. 無応力状態に対する応力状態の超音波速度変化率

3.1 初動到達部を用いた超音波速度変化率の算出

Planès, T ら [11]によれば，250kHz 以上の探触子を用いた超音波波形に対し Coda 波干渉法を適用することで，コンクリートの応力と超音波速度変化率が線形性を有することが報告されている。一方，Bompan, K., F ら [12]やセンサに 60kHz および 150kHz 共振型の AE センサを用いて検討した著者らの結果 [9),10)]では，検出波形のうちの Coda 波ではなく，検出波形初動部の相互相関関係から得られる超音波速度変化率がコンクリート応力と線形性を有することが確認されている。本研究では，計測に使用するセンサを 60kHz 共振型 AE センサに限定し検討を行うため，波形初動部の相互相関関係に着目し，コンクリート応力との関係を再確認する。ここで，超音波の測定では，P 波，S 波，表面波およびその他の境界面からの反射波等が観測されるが，本研究では P 波成分のみを検討の対象とし，S 波，表面波，反射波等の影響を排除するために，P 波到達時刻から S 波到達部直前の時刻を相互相関区間として設定し，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 $(\Delta V/V_0)$ を算出した。

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

ここに，$h_0(t)$：無応力状態での時刻 t における振幅値，$h_1(t)$：各応力状態での時刻 t における振幅値，τ：時間差，$CC(\tau)$：相互相関係数である。

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

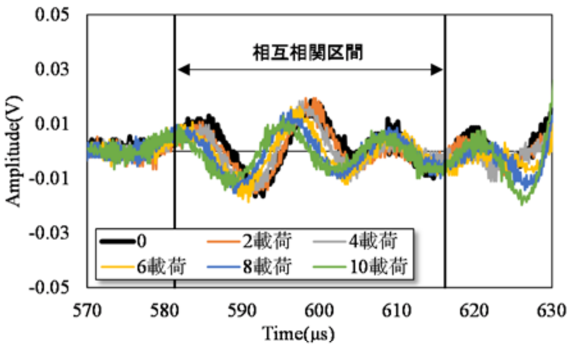
ここに，V_0：無応力状態での超音波速度，V_i：作用応力 i での超音波速度，t_0：無応力状態での超音波発信時刻からの到達時間差，τ：相互相関係数が最大となるときの時間差である。

ここで，超音波速度変化率の算出では，相互相関係数を算出する際の区間設定，すなわち式(1)中の t_1 および t_2 の設定が必要である。t_1 の決定方法は，無応力状態の超音波波形に対し，AIC（赤池情報量規準）法を適用し，AIC が最小値を示す時刻を t_1 とした [13]。また，S 波到達部直前時刻（t_2）は，S 波の速度が P 波速度（V_0）の 0.6 倍程度であることから S 波到達部が区間内に入らないよう S 波速度を高く見積もり，$0.7V_0$ を S 波速度とし，以下の式で決定した。

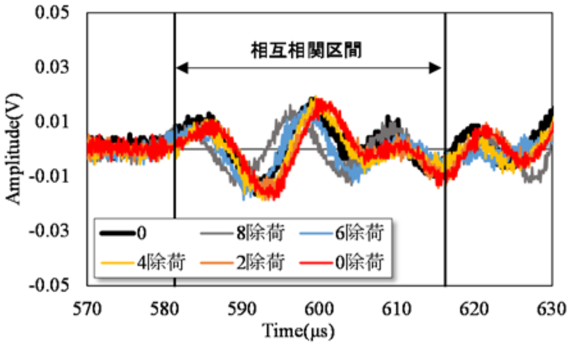
$$t_2=t_{in}+x\,/\,0.7V_0 \qquad (3)$$

ここに，t_{in}：超音波発信時刻，x：センサ間距離である。

図－2 に測定方向が載荷軸方向（1CH-4CH 間，0° 方向）の供試体 M の受信波形の初動部の例と相互相関区間を載荷過程，除荷過程ごとに示す。相互相関区間内の波形を比較すると，無応力状態での波形よりも作用応力が増加するにつれて，載荷過程の各応力状態では波形が数 μs 程度早くなっている様子がわかり，一方，除荷過程では，ある作用応力段階からは無応力状態の波形よりも数 μs 程度遅くなっている。この傾向は他の供試体でも同じであった。そこで，式(1)を用いて相互相関区間内における無応力状態での超音波波形に対する各応力状態での波形の相互相関係数を算出し，式(2)から超音波速度変化率を算出した。その超音波速度変化率と応力との関係を**図－3** に示す。なお，図中では載荷過程塗りつぶしマーカ



(a)　載荷過程



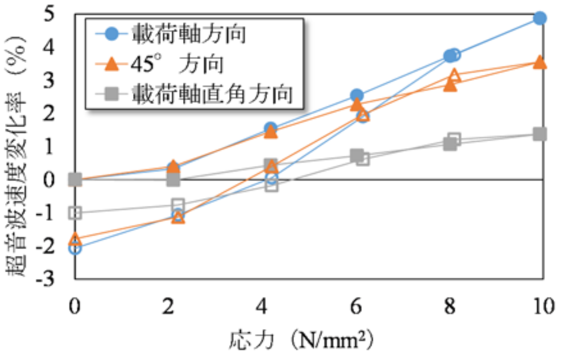
(b)　除荷過程

図−2　各応力段階での載荷軸方向の検出波形初動部と相互相関区間（供試体 M）

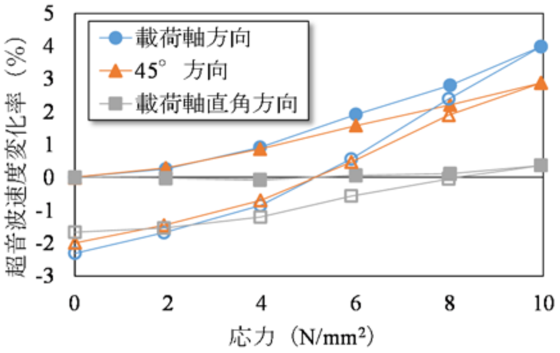
一，除荷過程を白抜きのマーカーで示している。超音波速度変化率は 10 回入力を行った超音波測定の平均値を用いて算出した。

3.2 応力と超音波速度変化率の関係

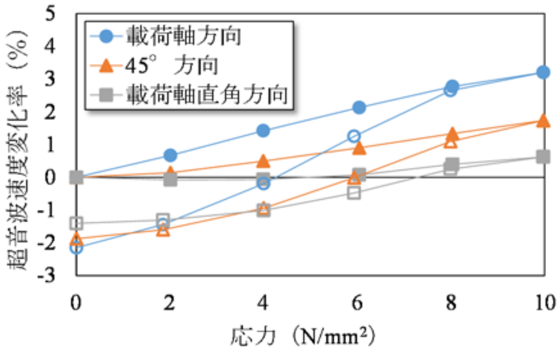
図−3 より，供試体の強度によらず，載荷軸方向と載荷軸 45° 方向においては，応力と超音波速度変化率は線形関係を有し，載荷過程で作用応力の増加に伴い超音波速度変化率は上昇し，除荷過程では低下した。また，45° 方向よりも載荷軸方向の方がグラフの傾きが大きく，応力に対して感度が高いことがわかる。載荷軸直角方向では，応力変化による超音波速度変化率の変化は小さい。また，除荷過程での超音波速度変化率は 6N/mm^2 以下から，載荷過程の超音波速度変化率を下回っており，完全除荷後も超音波速度変化率は 0%には戻らず，負の値となっている。除荷過程の超音波速度変化率が載荷過程での超音波速度変化率を下回る要因は現段階において明確ではないが，供試体内のセメントペーストと骨材界面などの微細組織の変化や微細空隙の変化が影響していると考えられる。すなわち，コンクリートの不均質性より，載荷過程では，局所的に強度の低い微小部分が塑性化し，応力 10N/mm^2 までにこれらの塑性領域が累積する。この段階では，コンクリート全体の組織が緻密化するため微小組織の塑性化の影響は生じないが，除荷過程では，載荷時と同一応力であっても（例えば 4N/mm^2 など），一度 10N/mm^2 まで載荷されたことで微小組織の塑性化が残留していることから，載荷過程と除荷過程では同一の超音波速度変化率とはならないと考えられる。



(a)　供試体 L



(b)　供試体 M



(c)　供試体 H

図−3　応力と超音波速度変化率の関係

4.　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の算出

4.1 載荷軸直角方向および載荷軸方向に伝搬する超音波波形の関係

前章の検討結果から，コンクリートの応力と超音波速度変化率には線形関係が成立することが確認された。この条件下では，無応力状態の超音波波形を基準としており，無応力下での超音波測定を実施することが必須となり，既設 PC 部材への本手法の適用には課題がある。ただし，応力作用下における基準波形の取得が可能となれば，既設 PC 部材への本手法の適用性が高まると考えられる。

そこで，載荷軸直角方向の超音波波形に対する載荷軸

方向の超音波波形に着目した。ここで，**図－3** の応力と超音波速度変化率の関係における載荷軸直角方向のグラフに着目すると，傾きが小さく，載荷軸方向と比較して応力変化に対する感度が比較的低いことがわかる。

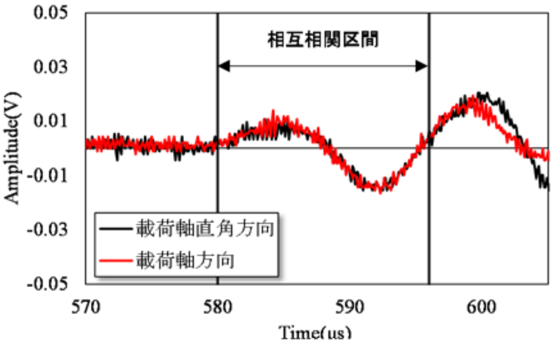
図－4 に応力 0N/mm^2 と 10N/mm^2 時の供試体 M の同じ応力段階における載荷軸直角方向および載荷軸方向に伝搬する超音波波形の初動部をそれぞれ示す。図より，応力 0N/mm^2 では，載荷軸方向と載荷軸直角方向の波形が重なるのに対し，応力 10N/mm^2 では，載荷軸直角方向の波形に対し載荷軸方向の波形が早くなっている。この 2 方向の経路から得られた波形を利用して，式(1)中の h_0 に載荷軸直角方向，h_1 に載荷軸方向の波形を適用し，その後，式(2)から超音波速度変化率を算出した。これにより，無応力状態での超音波の情報を用いずに超音波速度変化率と応力の関係について検討を行った。

4.2 相互相関区間の設定

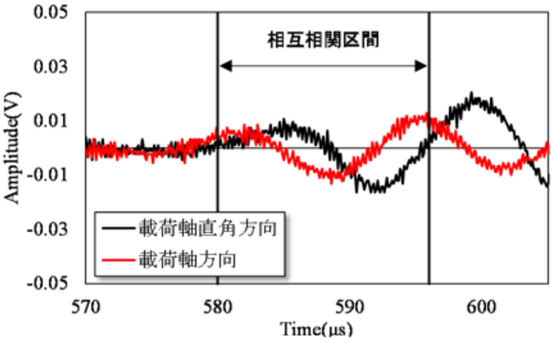
無応力状態に対する各応力段階での超音波速度変化率算出の際は，同センサ間を伝搬した超音波波形を用いて超音波速度変化率の算出を行った。しかし，本検討ではセンサ間距離を統一し，伝搬方向が異なる超音波波形を用いて相互相関係数を算出することになる。事前の検討において，個々のセンサ特性の違いによって検出波形初動部の後半部分で 2 方向の波形の概形が異なることが明らかになった。そのため，本検討での相互相関区間の設定は，これらのセンサ特性による影響が小さいと確認された区間とし，**図－4** に示す初動到達時刻から 1 周期の区間とした。

4.3 2 方向経路から算出した超音波速度変化率と応力の関係

図－5 に供試体別の作用応力と 2 方向経路から得られた超音波速度変化率の関係を示す。なお，図の縦軸の幅は，**図－3** と統一している。図から，無応力状態に対する各応力段階での超音波速度変化率の場合と同様，応力と超音波速度変化率は線形関係を有し，載荷過程では応力の増加に伴い超音波速度変化率は上昇し，除荷過程では低下していることがわかる。また，除荷過程 6N/mm^2 以下では載荷過程時の超音波速度変化率を下回り，完全除荷後は超音波速度変化率が元の値に戻らない結果となった。**図－3** に示すように，無応力状態に対する各応力段階での超音波速度変化率の場合と同じ挙動を示すことから，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を算出することで，無応力状態での超音波波形を

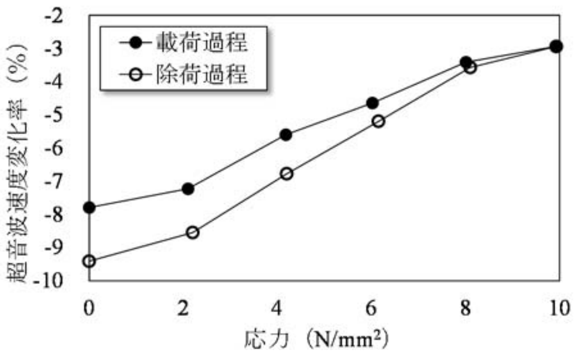


(a)　作用応力 0N/mm^2 時の検出波形初動部

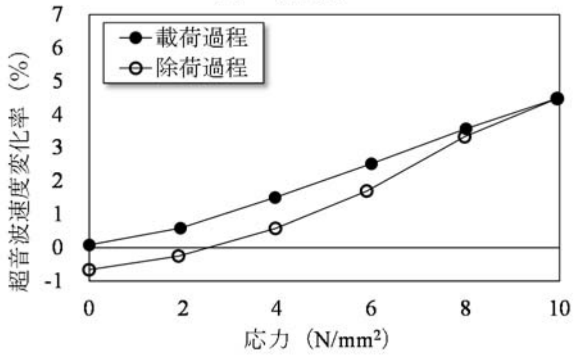


(b)　作用応力 10N/mm^2 時の検出波形初動部

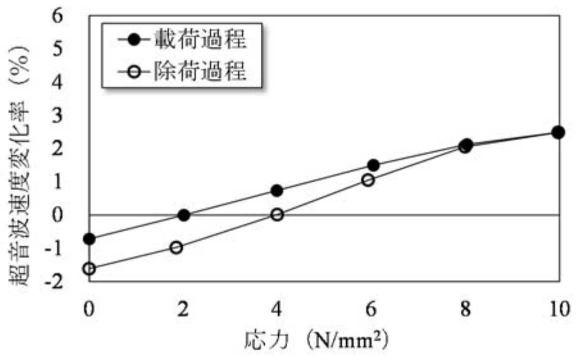
図－4　応力段階別 0°と 90°方向の検出波形初動部



(a)　供試体 L



(b)　供試体 M



(c)　供試体 H

図－5　応力と超音波速度変化率の関係（2 方向経路）

用いずに応力推定が行える可能性を示すことができた。なお，供試体 L においては，超音波速度変化率の絶対値が異なっているものの，全体的な挙動は一致している。ここで，**図－6** に示す供試体 L の無応力時の検出波形に着目すると，載荷軸方向の波形と載荷軸直角方向の波形が一致していないことがわかる。これは，供試体 L のコンクリート強度が低く，低品質であったことが要因と考えられるが，現段階で明確な理由は不明である。この波形の不一致のために，超音波速度変化率が全て負の値となったと考えられる。測定時の測線を複数取ることで本研究内の供試体 L のような無応力時の波形の不一致を未然に防ぐことができると考えられる。

5. 作用応力比と超音波速度変化率の関係

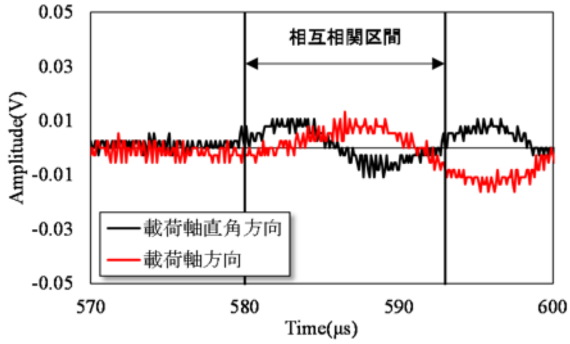
3.2 と 4.3 より，応力と超音波速度変化率の間には，線形関係があることがわかった。しかし，同じ応力が作用しても，コンクリートの圧縮強度によって超音波速度変化率は異なる。本手法の汎用性を考えた場合，異なる強度のコンクリートであっても，作用応力と超音波速度変化率が一定の関係を示すことが望ましい。そこで，**図－7** にコンクリートの圧縮強度に対する応力比，すなわち作用応力比 (σ/f'_c) と超音波速度変化率の関係を示す。**図－3，5** と同様に除荷過程を白抜きのマーカーで示す。横軸の作用応力比 (σ/f'_c) は，超音波測定時の応力を**表－2** の同一試験日に測定した円柱供試体から得られたコンクリートの圧縮強度で除すことで算出した。なお，**図－5(a)** で，応力 0N/mm^2 時の検出波形不一致のために超音波速度変化率の値が全て負の値となった供試体 L については，本検討では考察の対象外とした。

図－7(a) では，3 水準の供試体間で，傾向は一致しているものの，同一作用応力比の時の超音波速度変化率の値は，強度が高くなるほど大きくなっている。一方，**図－7(b)** では，供試体 L の情報は無いが，供試体 M と供試体 H の同一作用応力比での超音波速度変化率の値が一致している。**図－7(a)** の同一作用応力比の時の超音波速度変化率の値が一致しない理由として，内部組織の密実性の影響が考えられる。コンクリートの密実性は強度に関連し，低強度では微細空隙が多く，高強度では少なくなる。そのため，作用応力と無応力状態に対する各応力状態での超音波速度変化率の関係では，同一作用応力比の時の超音波速度変化率の値が一致しないと考えられる。一方，**図－7(b)** で，同一作用応力比での超音波速度変化率の値が供試体間で一致したのは，相互相関の対象が，同一応力時の載荷軸直角方向に対する載荷軸方向の超音波波形であるため，この内部組織の密実性の差による影響が排除できたからであると考えられる。

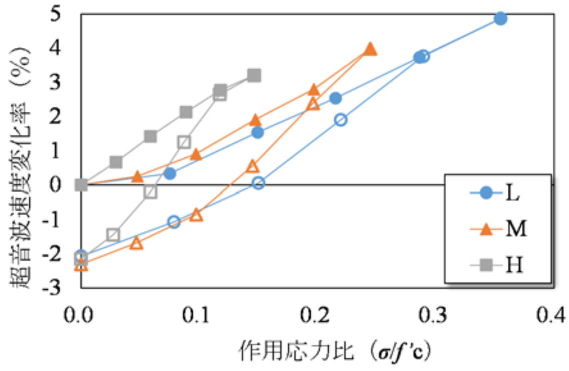
図中の線形近似直線より，作用応力比と載荷軸直角方向に対する載荷軸方向の超音波速度変化率を指標とすることで，コンクリートの強度の違いによらず，載荷過程では双方の間には有効な線形性が認められ，その関係は次式で表すことができる。

$$\Delta V/V = \alpha\sigma/f'_c \qquad (4)$$

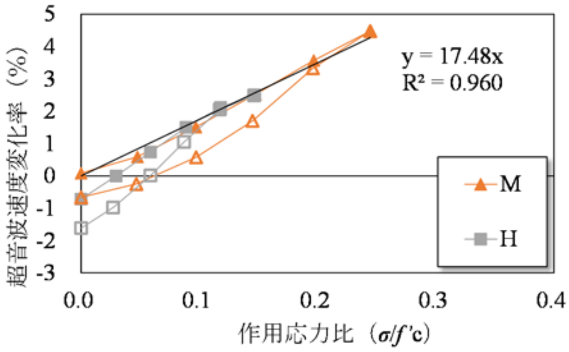
ここに，$\Delta V/V$：載荷軸直角方向に対する載荷軸方向の超音波速度変化率，α：比例定数，σ/f'_c：作用応力比である。



図－6　供試体 L の検出波形初動部（応力 0N/mm^2 時）



(a)　無応力状態に対する各応力段階での超音波速度変化率の（図－3 の横軸を作用応力比とした）場合



(b)　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の（図－5 の横軸を作用応力比とした）場合

図－7　作用応力比と超音波速度変化率の関係

6. まとめ

本研究では，超音波法を用いたコンクリートの応力推定手法の基礎的検討として，コンクリートの圧縮強度が超音波速度変化率と作用応力の関係に及ぼす影響の有無を検討した。また，無応力状態の超音波波形を必要とし

ないコンクリートの応力推定方法を提案し，その適用性を考察した。得られた知見を以下に示す。

(1) 無応力状態に対する各応力状態での超音波速度変化率において，超音波の初動到達時刻から，S 波到達時刻直前部までを相互相関区間として設定し，超音波速度変化率を算出することで，コンクリートの圧縮強度が異なる場合においても，作用応力と超音波速度変化率に線形関係があることがわかった。
(2) 本研究の全ての場合において，除荷過程でのうち，作用応力 6N/mm^2 以下から超音波速度変化率が載荷過程の同一応力時の超音波速度変化率よりも低く，完全除荷後の超音波速度変化率は 0%には戻らず，負の値を示した。明確な理由は不明であるが，コンクリートの不均質性より，載荷過程では，局所的に強度の低い微小部分が塑性化し，除荷過程ではその塑性化が残留していることから超音波速度変化率が低下したと考えられる。
(3) コンクリートの作用応力と無応力状態に対する各応力段階での超音波速度変化率の関係は，どの強度の供試体の結果も，測定方向が載荷軸方向の場合に作用応力に対する感度が最も高く，載荷軸直角方向では感度が低いことがわかった。
(4) 作用応力に対する感度が低い載荷軸直角方向を伝搬した超音波波形に対し，感度が高い載荷軸方向の超音波波形から超音波速度変化率を算出すると，応力と超音波速度変化率に良好な線形性が認められ，無応力状態での超音波情報を用いずに，コンクリートの応力推定が行える可能性が示唆された。
(5) コンクリートの圧縮強度に対する応力の比（作用応力比）と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の関係には，載荷過程においてコンクリートの圧縮強度によらず一定の比例関係が存在することが認められた。

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る。

参考文献

1) 国土技術政策総合研究所：平成 24 年度道路構造物に関する基本データ集，国土技術政策総合研究所資料第 776 号，2014.
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.37-40，1993.12
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.517-522，2010.2
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.32-38，2011.9
5) 公益社団法人　プレストレストコンクリート工学会：コンクリート診断技術，pp.25-26，2016.4
6) 公益社団法人　プレストレストコンクリート工学会：コンクリート診断技術，pp.68-70，2016.4
7) 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
8) 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.
9) 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
10) 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
11) Planès, T., Larose, E.: A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 53, pp.248-255, 2013.7
12) 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.
13) 前田直樹：地震波自動処理システムにおける読み取りおよび評価，地震，第 2 輯，第 38 巻，pp.365-379，1985.