

論文 プレストレス状態における弾性波伝搬特性に関する基礎的検討

松田 秀和^{*1}・佐竹 将也^{*2}・渡辺 健^{*3}・橋本 親典^{*4}

要旨：定期点検における PC 道路橋の健全度評価は，目視を主体とした点検方法が採用されていることが多いが，外観変状からは部材内部の変状や応力状態を把握することは困難であるのが現状である。定期点検時や外ケーブル補強時等においてプレストレス量を把握することは重要であり，プレストレス状態を適切に把握することが課題となっている。本研究は，PC 道路橋のプレストレス量に着目し，弾性波伝搬特性より非破壊的にプレストレス量を把握する手法について検討を行った。その結果，コンクリート中の弾性波の伝搬特性よりコンクリートの応力状態を定性的に評価できる可能性が確認された。

キーワード：プレストレス，非破壊検査，弾性波速度，超音波法，衝撃弾性波法

1. はじめに

現在，国内における PC ポストテンション桁橋は，1953 年完成の十郷橋以来約 60 年が経過し，全国に数多く建設されている。PC グラウトは，現在ではノンブリーディング型グラウト材料やグラウト流量計の開発などが採用され品質を確保する試みがなされているが，改良が加えられる以前は十分なグラウト充填がなされておらず，シース管内における PC 鋼材の腐食やそれに伴う破断およびプレストレス量の低下といった問題が生じている。

プレストレスコンクリートは，外観に変状が現れる前にプレストレス量が減少する可能性がある。プレストレス量の低下に起因した変状が顕在化した場合は，大規模な補修・補強が必要となることや，落橋の危険に至るような深刻な状態になることも想定される。これまで残存プレストレス量を把握する手法として，スロットレス法や鉄筋切断法，コア切込応力解放法¹⁾などが採用されている。これらは，既設構造物に対して微破壊を伴うとともに，調査時間が長いことや費用が高価であるといった問題点がある。これらの問題点を解消するため，非破壊的かつ比較的簡易な手法によりプレストレス量を把握する手法が望まれる。

このような状況の下，コンクリート中を伝搬する弾性波速度を用いて，非破壊的にプレストレス量を把握する手法について研究²⁾が行われている。弾性波動理論によると，コンクリート中を伝搬する弾性波速度に対する算

定式は示されているが，応力下における弾性波速度の算定式は示されていない。しかしながら，既往の研究結果ではプレストレス量の変化に応じて弾性波速度が変化することが報告^{3),4)}されている。

本研究では，コンクリートの応力状態とコンクリート中を伝搬する弾性波速度の関係を既往の研究とは異なるかつ簡易な手法で検証するため，供試体を作製し，超音波法および衝撃弾性波法を用いて基礎的な検討を行ったものである。弾性波速度の測定は，現場での作業性に配慮した小型のハンディタイプの超音波測定器を用いた局所的な計測と，衝撃弾性波法により供試体の平均的な計測を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートの配合，フレッシュ性状を表 - 1 に示す。PC 桁の配合を想定し W/C を 40% 材料は早強セメント，骨材は徳島県産の砕石砕砂を使用した。供試体は，角柱供試体(図 - 1 参照)および，PC 梁供試体(図 - 2 参照)の 2 供試体を作製した。供試体は，28 日間水中養生を実施し，水中養生後，気中で 2 週間乾燥させた供試体 A1 と，28 日間の水中養生後さらに 2 週間(試験の直前まで)水中養生を行った供試体 A2 のそれぞれの供試体について計測を実施した。参考までに別日に打設した同配合での圧縮強度は 75.7 N/mm²，静弾性係数は 31.4 N/mm²であった。

表 - 1 配合表，フレッシュ性状

供試体	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							フレッシュ性状		
		W (水)	C (セメント)	S (砂)	G (粗骨材)	G (細骨材)	AE減水剤	高性能 AE減水剤	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温度()
角柱供試体:100×200×200	40	165	413	757	370	555	1.65	6.20	10.5	5.0	22.6
PC梁供試体:100×200×1800	40	161	403	761	376	563	2.02	6.05	11.0	3.2	23.2

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程 (正会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

2.2 プレストレス載荷方法

(1) 角柱供試体 (100×200×200mm)

プレストレス状態を模擬するため、作製した角柱供試体に万能試験機を用いた一軸圧縮載荷を 0kN～400kN の範囲で載荷した(写真 - 1 参照)。角柱供試体には、平均で 0～20N/mm² の圧縮応力度が発生している。

(2) PC 梁供試体 (100×200×1800mm)

PC 梁供試体に 20mm の鋼製シース管を設置し、SBPR1080/1230- 18mm の PC 鋼棒を 1 本配置した。なお、供試体の上下縁で発生する応力度を変化させるため、PC 鋼材を中立軸より下側に 50mm 偏心させて配置し、油圧ジャッキにより 0～160kN の荷重を載荷した(表 - 2、写真 - 2 参照)。計算上の応力度は、式(1)より算出した。

$$\sigma = N / A \pm M / Z \quad (1)$$

ここに、N；軸力(N)、A；断面積(mm²)、M；曲げモーメント(N・mm)、Z；断面係数(mm³)を示す。

表 - 2 載荷荷重と計算上の応力度

載荷荷重(kN)	0	40	80	120	160
上縁引張応力度(N/mm ²)	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0
下縁圧縮応力度(N/mm ²)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0

また、梁の上下縁にはひずみゲージを設置した。

2.3 弾性波速度の測定方法

現地での計測を想定して、本研究ではハンディタイプの超音波測定器を使用した(写真 - 3 参照)。本装置は、測定時にセンサを密着させるための接触媒質は不要であり、現場での使用性に優れている。計測器の仕様は、表 - 3 に示すとおり使用超音波周波数 70kHz、送信パルス繰り返し周波数 5～20Hz、測定範囲は深度 10～50mm であり、検出される弾性波は表面を伝搬する縦弾性波となる。

なお、供試体における骨材や内部の空隙に伴う弾性波速度のバラツキを考慮して、計測線は 3 測線とし、各測線で計測を行った。コンクリート表面を伝搬する弾性波の伝搬時間 T_{ps} は式(2)で表すことが出来る。

$$T_{ps} = L_{ch} / V_{ps} \quad (2)$$

ここで L_{ch} は入力点から受信点までの距離(150mm)、V_{ps} はコンクリート表面での縦弾性波速度である。コンクリート内部に鋼材がある場合、伝搬速度に影響する可能性があるため、配筋探査を実施し鋼材を避けて計測するのが望ましい。



写真 - 1 万能試験機による角柱供試体への荷重載荷状況

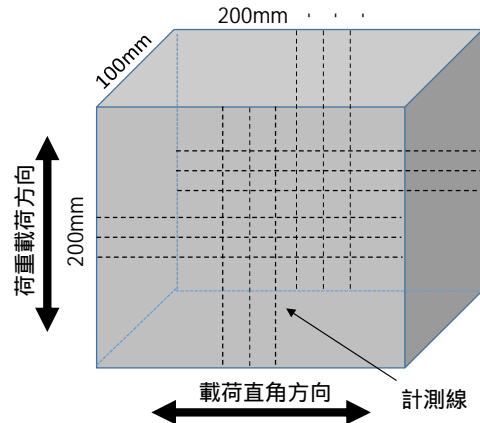


図 - 1 角柱供試体の形状と測定方法

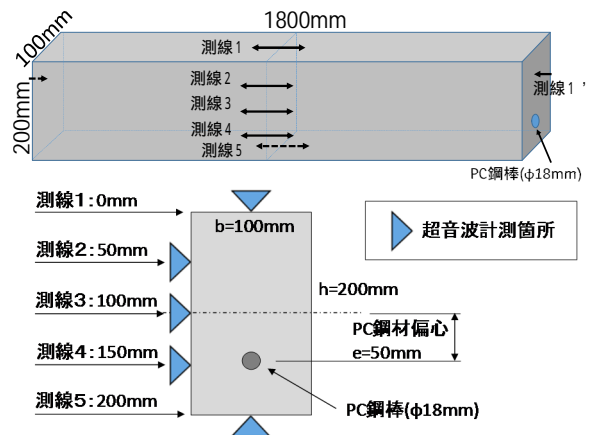


図 - 2 PC 梁供試体の形状と測定方法



写真 - 2 油圧ジャッキによるプレストレス載荷状況



写真 - 3 ハンディタイプの超音波計測機

表 - 3 ハンディタイプの超音波計測機の仕様

項目	仕様
時間測定範囲	15～100 μs
超音波音速測定範囲	1500～9990m/s
亀裂深度測定範囲	10～50mm
時間と音速測定精度	±1%
使用超音波周波数	70kHz

3. 実験結果

3.1 角柱供試体 (100×200×200mm)

(1) 乾燥状態 (角柱供試体 A1) における弾性波速度

1) 荷重載荷方向

表面乾燥状態(表面水分値:5.0%)の供試体について、万能試験機を用いて徐々に荷重を載荷させ、圧縮応力度を変化させながら、計画した圧縮応力度到達時の供試体表面の弾性波速度を計測した。その結果、荷重載荷方向における弾性波速度は、図-3および表-4に示す結果が得られた。1回目載荷後の無応力状態も含む無応力状態での弾性波速度は約4,000m/sであったが、荷重を載荷させるごとに弾性波速度が向上することが確認され、圧縮応力度が20N/mm²の状態では約4,260 m/s(6.5%上昇)まで上昇した。また、荷重を除荷した後、荷重載荷前の無応力状態より弾性波速度が低下することが確認された。

これら荷重載荷方向における圧縮応力度と供試体表面の弾性波速度の関係は、図-4に示すとおりほぼ線形であり以下の関係式(3)が得られた。供試体の製作誤差による荷重偏載の影響を抑えるため、表と裏面の平均値を採用し、最小二乗法により直線フィッティングを行った。

$$y=12.864 \cdot x+4016.1 \quad (\text{決定係数}=0.98) \quad (3)$$

ここで、 y は弾性波速度(m/s)、 x は圧縮応力度を示す。

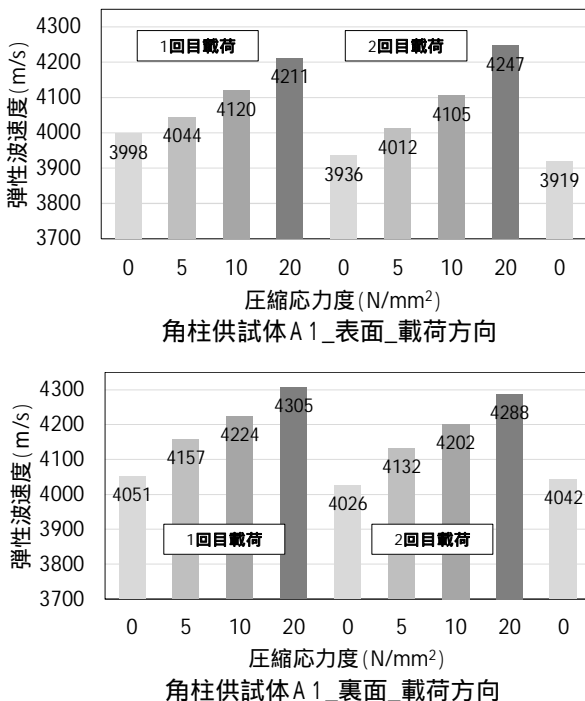


図-3 乾燥状態での応力と弾性波速度(載荷方向)

表-4 乾燥状態での応力と弾性波速度(載荷方向)

		圧縮応力度(N/mm ²)				
		0	5	10	20	
弾性波速度(m/s)	表面	1回目	3998	4044	4120	4211
		2回目	3936	4012	4105	4247
	裏面	1回目	4051	4157	4224	4305
		2回目	4026	4132	4202	4288
平均値		4003	4086	4163	4263	

また、本実験においては、荷重を2回に分けて載荷しているが、表面、裏面ともに1回目の載荷時よりも2回目の載荷時の方が、荷重無載荷状態における弾性波速度が低下していることが確認された。既往の研究⁵⁾によると、弾性域を超える荷重を載荷させた場合、マイクロクラックが発生し弾性波速度が低下することが報告されている。本実験でも弾性限界を超える荷重載荷を行ったため、弾性波速度が低下したと考えられる。

また、荷重載荷方向の弾性波速度が応力の増加と共に大きくなる原因としては、弾性波の伝搬を阻害し遅延させる要因となっていた微細な空隙やクラックが閉じて、弾性波が伝搬しやすくなったため、弾性波速度が向上したものと考えられる。

2) 荷重載荷直角方向

荷重載荷直角方向も同様に測定したところ、図-5に示す結果が得られた。(図は、表面の計測結果を代表で示している。)1回目載荷後の無応力状態も含む無応力状態での弾性波速度は平均で約4,050m/sであったが、その後荷重を増加させても荷重載荷方向ほどの弾性波速度の変化はみられなかった。直角方向は、荷重載荷による応力変動が小さいため、弾性波速度におよぼす影響が少なかったものと考えられる。

なお、直角方向においても1回目の載荷時よりも2回目の載荷時の方が、弾性波速度が低下していることが確認された。原因は上記で示した内容と同様であると考えられる。

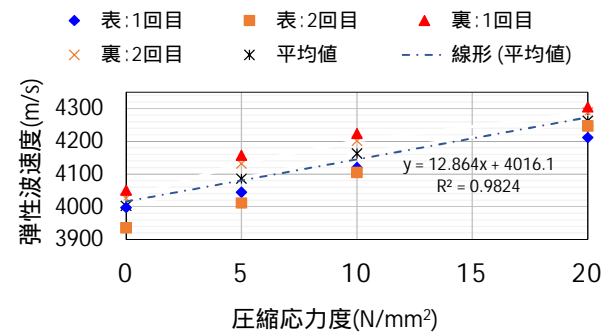


図-4 乾燥状態での応力と弾性波速度の関係

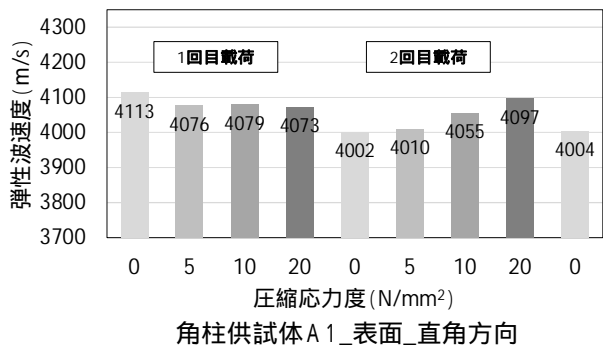


図-5 乾燥状態での応力と弾性波速度(載荷直角方向)

(2) 湿潤状態（角柱供試体 A2）における弾性波速度
1) 荷重載荷方向

続いて湿潤状態（表面水分値：11.2%）の供試体について、同様な試験を実施した。なお、供試体は試験直前まで水中養生を行い、供試体表面をウエスで拭き取った状態で試験を実施した。荷重は万能試験機を用いて徐々に載荷させ、圧縮応力度を変化させながら、計画した圧縮応力度到達時の弾性波速度を計測した。荷重載荷方向における弾性波速度の計測結果を、図-6 および表-5 に示す。1回目載荷後の無応力状態も含む無応力状態での弾性波速度は約4,390m/sであり、乾燥状態よりも高い速度が確認された。また、荷重を載荷させても乾燥状態の供試体ほど、弾性波速度の変化はみられなかった。

無応力状態でも弾性波速度が高く検出された原因として、骨材周辺のポーラスな遷移帯やボンドクラックなどの細孔レベルの空隙に水分が存在することにより、弾性波が伝搬しやすくなったためと考えられる。本供試体は試験直前まで水中養生を行っており、内部の間隙水は、飽和状態に近い状態であったと考えられる。これら荷重載荷方向における圧縮応力度と供試体表面の弾性波速度の関係は、図-7 に示すとともに、以下の関係式(4)が得られた。関係式は、前項の A1 供試体と同様な方法で算

出した。

$$y = 1.203 \cdot x + 4379.6 \quad (\text{決定係数} = 0.68) \quad (4)$$

応力度に対する弾性波速度の増加率が乾燥状態では12.9であったが、湿潤状態では1.2となり低い増加率を示した。

供試体 A2 においても、荷重を2回に分けて載荷しているが、表面、裏面ともに1回目の載荷時よりも2回目の載荷時の方が、若干ではあるが弾性波速度が低下していることが確認された。先に示した結果と同様に弾性限度を超える荷重載荷を行ったため、弾性波速度が低下したと考えられる。

2) 荷重載荷直角方向

荷重載荷直角方向も同様に測定を実施した結果、図-8 に示す結果が得られた。（図は、表面の計測結果を代表で示している。）1回目載荷後の無応力状態も含む無応力状態での弾性波速度は約4,380m/sであったが、荷重を載荷させても弾性波速度に大きな変化はみられなかった。

なお、直角方向においても1回目の載荷時よりも2回目の載荷時の方が、弾性波速度が低下していることが確認された。原因は、前項で示した内容と同様であると考えられる。

なお、PC実構造物では、弾性域内でプレストレスを載荷させるため、塑性化による弾性波速度の影響は少ないと考えられる。

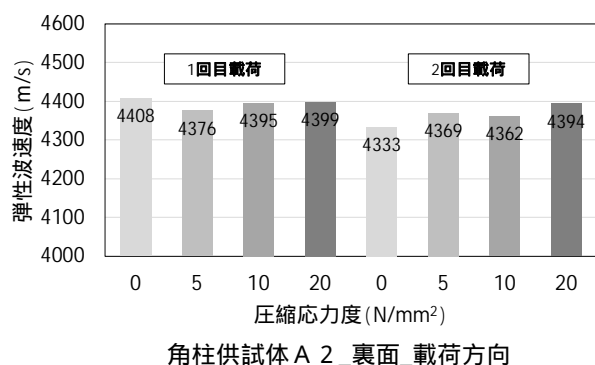
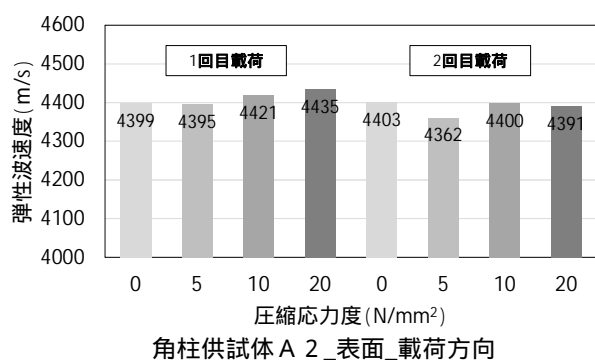


図-6 湿潤状態での応力と弾性波速度(載荷方向)

表-5 湿潤状態での応力と弾性波速度(載荷方向)

弾性波速度 (m/s)		圧縮応力度 (N/mm²)				
		0	5	10	20	
弾性波速度 (m/s)	表面	1回目	4399	4395	4421	4435
		2回目	4403	4362	4400	4391
	裏面	1回目	4408	4376	4395	4399
		2回目	4333	4369	4362	4394
平均値		4386	4376	4395	4405	

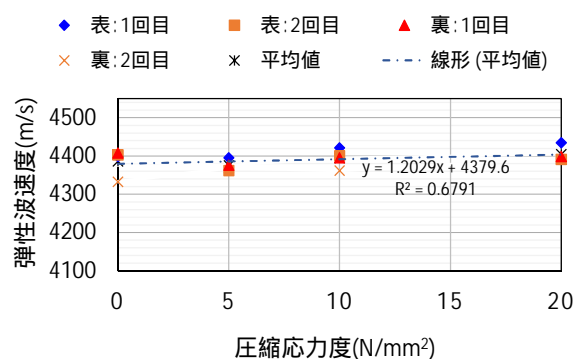


図-7 湿潤状態での応力と弾性波速度の関係

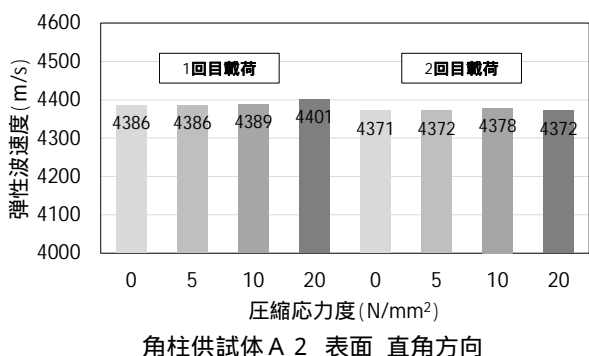


図-8 湿潤状態での応力と弾性波速度(載荷直角方向)

3.2 PC 梁供試体 (100×200×1800mm)

(1) 超音波計測器による弾性波速度

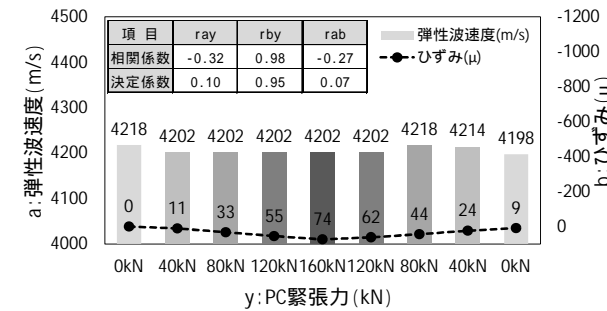
PC 緊張力と計算上の応力度、ひずみゲージによる梁上下縁のひずみ計測結果を表 - 6 に示す。(表面水分値 4.9%)

緊張力は油圧ジャッキにて、0kN～160kN まで載荷した。最大荷重載荷後は、PC 桁の劣化に伴う緊張力の低下を再現するため、PC 緊張力を徐々に低下させていき、超音波計測機により弾性波速度の変化が把握できるか検証した。測線 1 と測線 5 は、梁の上下面で計測し、測線 2～4 は梁側面で計測し、上縁からそれぞれ 50mm、100mm、150mm の箇所 (図 - 2) で計測した。

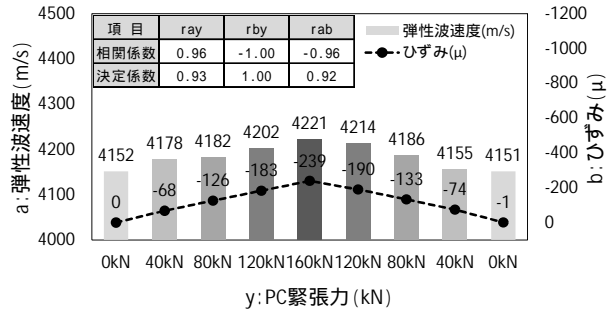
PC 梁方向における弾性波速度、およびひずみの計測結果を図 - 9 に示す。ここで、荷重未載荷時に各測点で弾性波速度が異なる原因は、骨材の分布状態や微細なひびわれ等の内部欠陥が影響していると考えられる。また、測線 2～4 のひずみは、測線 1 と 5 を直線補間することで算出している。応力変動の小さい「測線 1」では、弾性波速度の変化はほとんどみられなかったが、応力度(ひずみ)の変動が最も大きい「測線 5」に近づくに従い、PC 緊張力の増加に応じて弾性波速度が上昇することが確認でき

た。その他、PC 鋼材の緊張力を除荷した場合も、応力度(プレストレス量)の低下に伴い、弾性波速度が低下することが確認できたと共に、荷重載荷中と荷重除荷中の弾性波速度はほぼ同様な値を示すことを確認した。

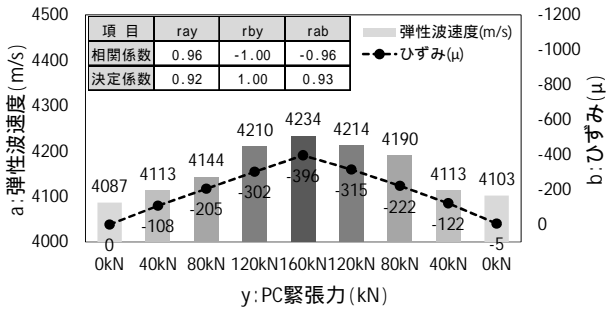
PC 鋼材の緊張力により、弾性波の伝搬を阻害し遅延させる要因となっていた微細な空隙やクラックが閉じて、弾性波が伝搬しやすくなったため弾性波速度が向上したものと考えられる。なお、角柱供試体で見られた荷重除荷後の圧縮領域における弾性波速度が低下する傾向は見られなかった。これは、荷重載荷後の残留ひずみが原因の一つであると考えられる。



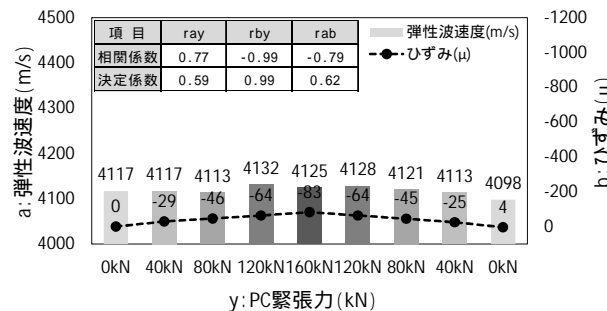
PC 梁供試体_測線 1 (載荷方向)



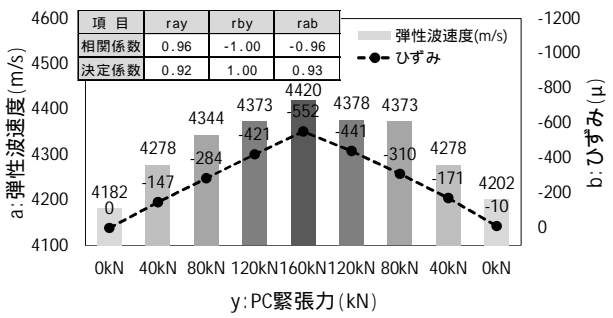
PC 梁供試体_測線 3 (載荷方向)



PC 梁供試体_測線 4 (載荷方向)



PC 梁供試体_測線 2 (載荷方向)



PC 梁供試体_測線 5 (載荷方向)

図 - 9 PC 梁方向における弾性波速度 (載荷方向)

表 - 6 PC 鋼材の緊張力と計算上の応力度、ひずみ

緊張力 (kN)	0	40	80	120	160	120	80	40	0
計算上の上縁引張応力度(N/mm ²)	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0
計算上の下縁圧縮応力度(N/mm ²)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	15.0	10.0	5.0	0.0
上縁ひずみ(μ) (+)伸び	0	11	33	55	74	62	44	24	9
下縁ひずみ(μ) (-)縮み	0	-147	-284	-421	-552	-441	-310	-171	-10
表面水分率	4.9								

応力変動が最も大きい測線 5 の圧縮応力度と供試体表面の弾性波速度は、図 - 10 に示すとおりほぼ線形の関係にあり、以下の関係式(5)が得られた。関係式は、前項の A1 供試体と同様な方法で算出した。

$$y = 10.72 \cdot x + 4223 \quad (\text{決定係数} = 0.92) \quad (5)$$

ここで、 y は弾性波速度(m/s)、 x は圧縮応力度を示す。なお、弾性波速度の変化率は、前項で示した乾燥状態の角柱供試体の増加率とほぼ同様な値を示した。また、荷重除荷時の速度の低下率もほぼ同様な傾向となった。

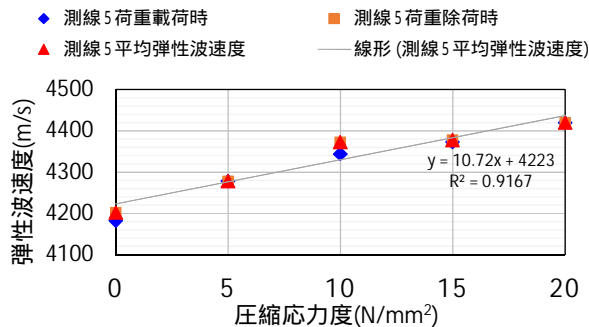


図 - 10 PC 梁の応力度と弾性波速度の関係

(2) 衝撃弾性波による弾性波速度

衝撃弾性波法：透過法(図 - 11, 写真 - 4)により、弾性波速度の計測を行った。直径 17mm の鋼球で衝撃弾性波を発生させ、計測は PC 梁の両端部に設置した AE センサにより計測した。なおセンサは、梁上縁部より 70mm の位置で計測を行った。なお、衝撃弾性波の計測も超音波法と同じ荷重載荷時に計測している。衝撃弾性波法による PC 梁方向における弾性波速度の計測結果を図 - 12 に示す。"測線 2~3"付近で計測を行ったが、衝撃弾性波法においても超音波法と同様に PC 緊張力の増加に応じて弾性波速度が上昇、低下することが確認できた。

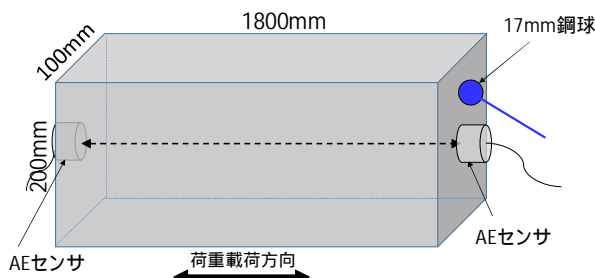


図 - 11 衝撃弾性波による計測概要

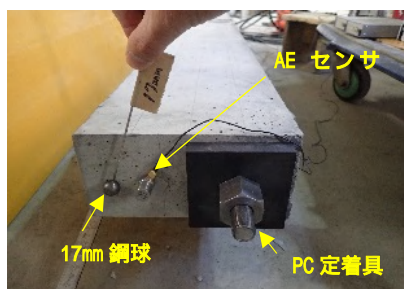


写真 - 4 衝撃弾性波による計測状況

PC 梁供試体 測線 2 ~ 3
(衝撃弾性波：透過法)

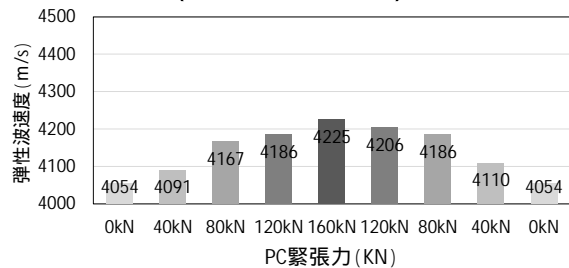


図 - 12 衝撃弾性波法における弾性波速度(載荷方向)

4. まとめ

試験の結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 乾燥状態の供試体について、応力度を変化させながら供試体表面の弾性波速度を計測した結果、現地での作業性に優れるハンディタイプの超音波計測機でも、応力度の変化に応じた弾性波速度の変化が定性的に把握できることが示された。
- 2) 湿潤状態の供試体では、無応力状態でも弾性波速度が高く検出され、応力度を変化させても弾性波速度にほとんど影響しないことが確認された。
- 3) PC 梁供試体での試験結果より、載荷荷重、ひずみ、弾性波速度について、高い相関性が確認された。
- 4) 弾性域を超える荷重を載荷させた後では、乾燥状態および湿潤状態ともに、コンクリート中を伝搬する弾性波速度が低下することが確認できた。
- 5) PC 鋼材の緊張力を徐々に低下させた場合でも弾性波速度の変化が検出可能であることが確認できた。また、荷重載荷中と荷重除荷中の弾性波速度はほぼ同様な値を示すことが確認できた。

参考文献

- 1) 公益社団法人 PC 工学会：コンクリート構造診断技術，公益社団法人 PC 工学会，pp.67，2014.4
- 2) 二井谷 教治，渡瀬 博，阪田 憲次，綾野 克紀：コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究，コンクリート工学論文集，第 20 巻第 2 号，2009.5
- 3) 国土技術政策総合研究所：PC 道路橋の健全度評価の高度化に関する共同研究，国土技術政策総合研究所，2010.10
- 4) 篠崎 裕，野並 優二，立見 栄司：コンクリート応力と衝撃弾性波速度との相関に関する実験的検討，土木学会第 73 回年次学術講演会，土木学会，2018.8
- 5) 森 拓未ほか：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，土木学会，2018.8