

衝撃弾性波速度および超音波速度と コンクリート応力に関する基礎的研究

Fundamental Study on Correlation between Impact Elastic Wave Velocity or Ultrasonic Velocity and Concrete Stress

技術研究所 篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

技術研究所 野並 優二 YUJI NONAMI

環境・リニューアル技術部 玉置 一清 KAZUKIYO TAMAKI

既設 PC 橋のコンクリートに作用している応力を非破壊で調査する手法を検討する目的で、衝撃弾性波と超音波に着目し、コンクリート応力との関係を調べた。衝撃弾性波による方法は、圧縮強度測定装置（聴強器）を改良したものを用いた。PC 鋼棒によりコンクリートにプレストレスを与えた版試験体の計測を行い、コンクリート応力とこれら速度との間には一定の相関があることを確認した。いずれの波を用いてもばらつきは同程度であるが、実用に供するためには更なる精度改善が必要であることが分かった。

キーワード： 衝撃弾性波, 超音波, コンクリート応力, プレストレストコンクリート

In this paper, the nondestructive tests were studied to evaluate the concrete stress of existing PC bridges. Focusing on impact elastic wave and ultrasonic wave, relation between the concrete stress and those waves were investigated. In the case of using the impact elastic wave, an apparatus for measuring the compression strength (named CHOKYOKI) was improved to apply this experiment. The concrete slabs those were prestressed with PC steel bars were used as the test specimens. The test results showed that there was a certain correlation between concrete stress and the velocity of each wave. The variation of those two waves' velocities is about the same and it is necessary to improve accuracy furthermore for the practical use.

Key Words: Impact Elastic Wave, Ultrasonic, Concrete Stress, Prestressed Concrete

1. はじめに

コンクリートの残存プレストレス量は、PC 橋梁の維持管理において健全性判定の際の重要な指標である。これを非破壊で精度良く知ることができれば、合理的な橋梁の維持管理が可能となる。

コンクリートの弾性波速度は、コンクリート表面にセンサを設置し、打撃等で弾性波を生成するだけで計測できる物理量であり、コンクリート応力との相関が確認できれば、非破壊の応力推定手法として有効な指標となり得る。コンクリートの弾性波速度を用いた圧縮強度の推定については、すでに実用的な方法が提案されており、計測装置が市販されている。一方、弾性波速度とコンクリート応力に関する研究は極めて少ない。骨材にガラス球を用いて弾性波の伝搬速度を調べた岩波ら¹⁾

の研究において、骨材界面の性状変化が弾性波の伝搬挙動に大きく影響することが言及されているが、コンクリート応力との関係については明らかにされていない。

本論文では、PC 鋼棒の緊張力でプレストレス量を変化させた版試験体の弾性波速度を、衝撃弾性波と超音波を用いて計測し、コンクリート応力との関係を調べた。

衝撃弾性波を用いた計測は、測定装置として国土交通省の「微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領(案)」に対応した、衝撃弾性波による圧縮強度測定装置（聴強器）を用いた。ここでは、弾性波速度をより精度良く測定するために、装置とソフトウェアの一部改良を実施した。

超音波を用いた計測は、AE センサを 2 つ応力測定方向に並べ、一方のセンサにパルス電圧を印加することで超音波を発生させ、もう一つのセンサでその到達を検出

するものである。

弾性波速度の計測においては、センサに波形が到達した時刻を正確に知ることが重要である。本論文では、両波の到達時刻判定に波形勾配比法²⁾を用いた。この方法は、聴強器で採用されている方法である。

2. 装置の概要

(1) 衝撃弾性波による方法

図-1 に聴強器の外観を示す。2つの圧電型振動センサを組み込んだ振動検出器をコンクリート表面に接触させ、その近傍をハンマで打撃して衝撃弾性波を発生させる。弾性波速度は、振動センサ間の波動伝播時間差と測定距離から算定される。今回の測定では、コンクリートの不均質さが計測結果に与える影響をなるべく小さくすることを目的として、振動センサ間距離を従来の30cmから50cmに伸ばした。また、振動検出器や振動計へ浸入するノイズの抑制、波動到達時間の判定に用いている波形勾配比法の比率を修正したものを用いた。

ここでは、コンクリート表面での計測に加え、コンクリート内部の鉄筋を伝播する衝撃弾性波の速度も計測した。コンクリートよりも均質な材料である鉄筋を媒体とすることで、ばらつきが低減できるのではないかと考えた。計測は各応力段階で50回行った。

(2) 超音波による方法

図-2 に超音波による方法の概要を示す。超音波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 $10\mu\text{s}$ とした矩形波をAEセンサに作用させ、信号入力を各応力段階で20回行った。使用したAEセンサは、60kHz共振型である。AEセンサにより検出した超音波は、プリアンプにて40dB増幅した後、サンプリング周波数1MHz（サンプリング時間間隔 $1\mu\text{s}$ ）、8192個の振幅値データとして記録した。

ここでは、応力作用方向の計測に加えて、直角方向の計測も行った。直角方向は応力変化がないため超音波速度も変化しないことが予想されるが、それを検証するためである。

(3) 弾性波および超音波の到達判定方法

弾性波あるいは超音波が到達した時間を判定する方法として、波形勾配比法²⁾を用いた。これは、聴強器において弾性波の到達時間を決定する方法として用いているものである。図-3 に、その概念を示す。

最初に到達した波の最大勾配を求め、その1/10を波形立ち上がり点とした。聴強器の標準では、1/15を波



図-1 装置の概要（衝撃弾性波）

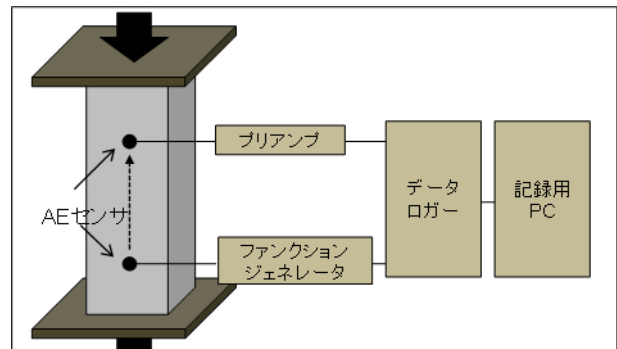


図-2 装置の概要（超音波）

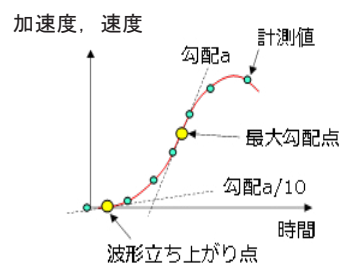


図-3 弾性波および超音波の到達判定方法

形立ち上がり点（到達時点）としているが、今回の試験体を用いてばらつき（標準偏差）を検証したところ、1/10で良い結果が得られたためである。

3. 実験の概要

PC鋼棒でプレストレスを導入した、幅500mm、長さ

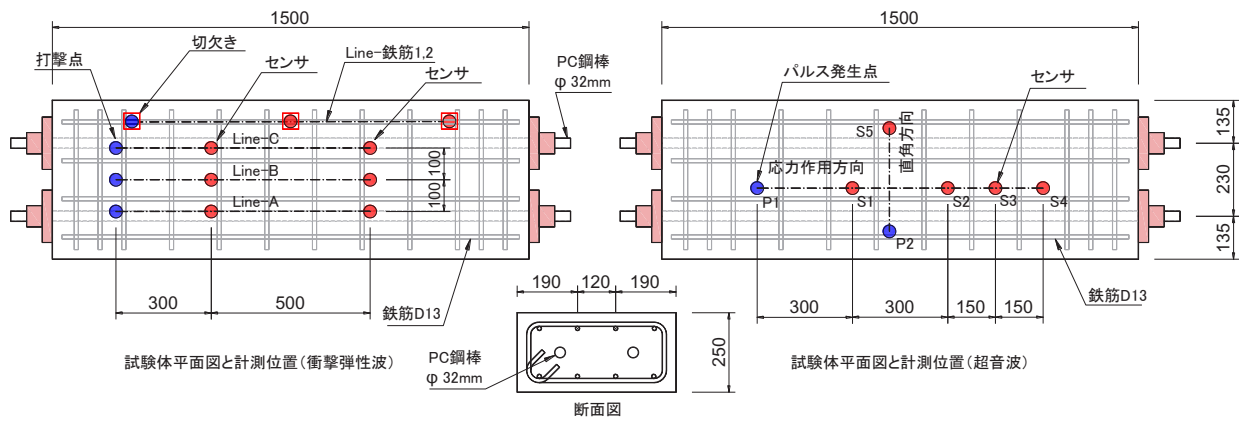


図-4 試験体と測定位置

1,500mm, 厚さ 250mm の試験体 (図-4) を製作した。PC 鋼棒は $\phi 32\text{mm}$ を 2 本配置した。試験体は、衝撃弾性波による方法と超音波による方法でそれぞれ用意した。コンクリートの圧縮強度は衝撃弾性波用の試験体は 51.4N/mm^2 , 超音波用の試験体は 42.2N/mm^2 であった。

衝撃弾性波による方法では、試験体表面の長手方向 3 ライン (A,B,C) と、鉄筋 1,2 ラインで計測を行った。鉄筋 1,2 ラインでは、鉄筋中を伝播する衝撃弾性波の速度を計測する。そのため、3 か所で約 $5 \times 5\text{cm}$ の大きさのかぶりコンクリートを除去して鉄筋を露出させた。鉄筋 1 ラインは図左端の切欠き部で鉄筋を打撃し、中央および右端の切欠き部へ設置したセンサで弾性波速度を計測する。鉄筋 2 ラインは、その逆方向で計測を行った。

PC 鋼棒緊張力は、コンクリート応力で $0 \sim 7.2\text{N/mm}^2$ の間を 4 段階で上昇させた。計測は各荷重 1 ラインで 50 回実施し、平均値をその代表値とした。

超音波による方法では、図-4 右の平面図に示すように、センサ間隔を、応力作用方向では、入力センサ位置 (P1) から 300, 600, 750, 900mm (S1~S4) とし、直角方向では、325mm (P2→S5) とした。しかしながらセンサ間隔が 600mm 以上になると、到達波形が明瞭さを失い、波形勾配比法の適用ができないことが判明した。そのため、4 章の実験結果では、センサ間隔 300mm と直角方向のみを示した。

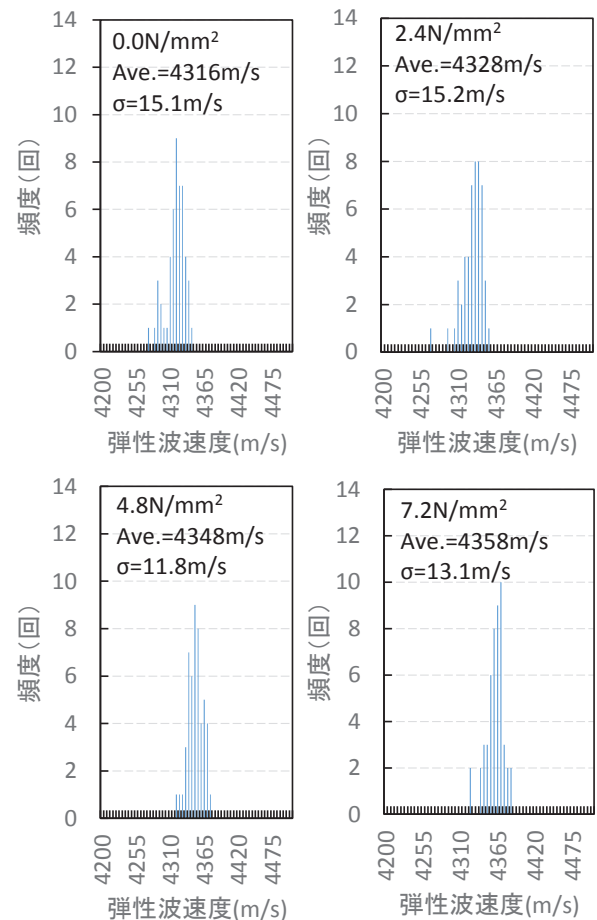


図-5 計測値頻度分布 (衝撃弾性波)

4. 実験結果

(1) 衝撃弾性波による方法

図-5 は、Line-C の計測値の頻度分布である。50 回の計測値は、概ね正規分布している。その標準偏差は、11 ~ 15m/s であった。これ以外の Line-A,C や鉄筋を打撃したケースについても同様の正規分布を示した。

図-6 は、各 50 回の計測値の標準偏差を示したものである。概ね $10 \sim 30\text{m/s}$ の値となった。鉄筋を打撃したケ

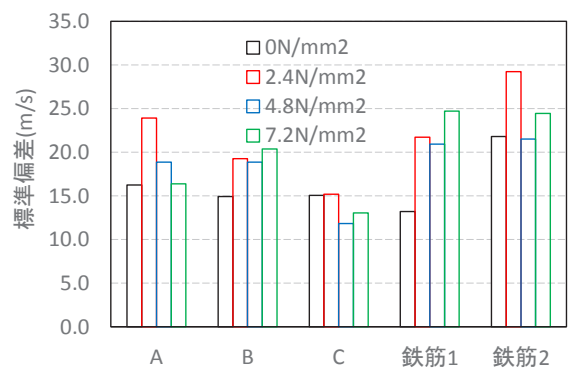


図-6 標準偏差 (衝撃弾性波)

ースにおいても、概ね同様の標準偏差が得られたが、コンクリートを打撃したケースよりも若干劣るようである。

図-7 は、コンクリート応力と弾性波速度の関係を示したものである。Line-B 以外は、コンクリート応力の増加にともない弾性波速度が増加する傾向にあることが分かる。Line-A と C は、ばらつきも少なく速度値は多少異なるものの、同様の右肩上がりの傾向であった。

鉄筋を打撃したケースについても、ばらつきは大きいものの、同様の増加傾向を示しているとともに、速度値もコンクリート面打撃・計測と同様であることが分かった。鉄筋中を伝わる弾性波の速度は、5200m/s 程度²⁾と言われているが、本実験では、コンクリートの弾性波速度と同等の値となった。これは、入力された弾性波は鉄筋とコンクリートの両者に伝播するが、鉄筋中を伝播する波はエネルギー損失ですぐに減衰してしまうのに対し、コンクリートを介した弾性波のエネルギーが卓越するため、これをセンサで検出するためと考えられる。したがって、鉄筋打撃においてもコンクリート応力の増加に応じて弾性波速度が増加していた。

今回の結果では、0~7.2N/mm² の応力変化に対して弾性波速度の変化量が 18~98m/s と、計測位置や打撃対象の違いの影響が大きいことと、標準偏差の値からすると、実用化には更なる精度向上が必要と思われる。また、計測値には、骨材量や配筋状況なども影響すると考えられ、これらの検討も必要である。

(2) 超音波による方法

図-8 に計測値の頻度分布を示す。1 段階あたりの計測回数が 20 回と少ないが、標準偏差は概ね衝撃弾性波の場合と同等であった。供試体コンクリートの圧縮強度が異なるため、計測値は衝撃弾性波による値と比較して 1 割程度小さな値となった。

図-9 は、コンクリート応力と超音波速度の関係を示したものである。各応力段階の 20 回計測値の平均値をプロットした。応力作用方向（軸方向）の超音波速度は、コンクリート応力 0~7.2N/mm² の変化に対して 18m/s 比例的に増加する傾向が見られた。一方、直角方向の超音波速度に明瞭な傾向は見られなかった。また、直角方向の超音波速度は軸方向と比較して 50m/s 程度大きい値となった。これは、計測点間の距離の誤差や、コンクリート内部の異物（鉄筋や PC 鋼棒など）の影響と考えられる。軸方向の超音波速度とコンクリート応力の関係は、衝撃弾性波で得られた傾きよりも若干小さめとなった。

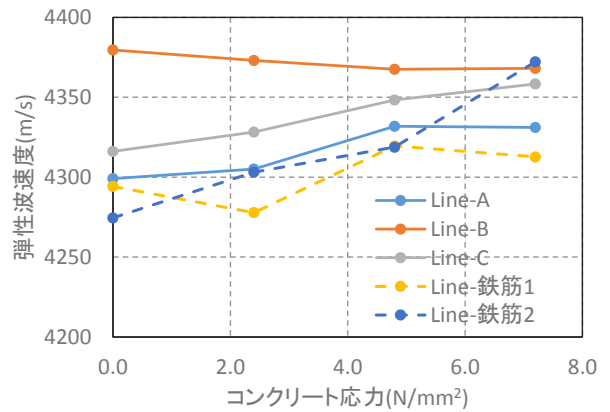


図-7 コンクリート応力と弾性波速度の関係 (衝撃弾性波)

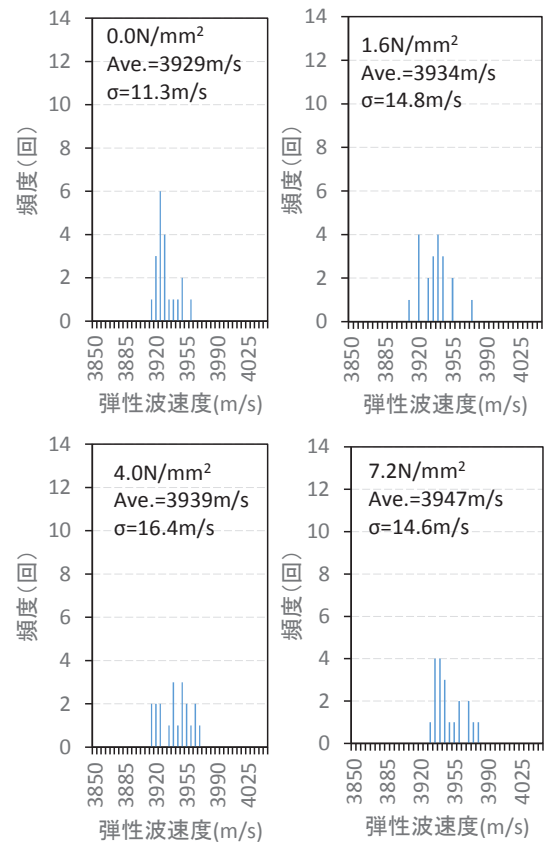


図-8 計測値頻度分布 (超音波法)

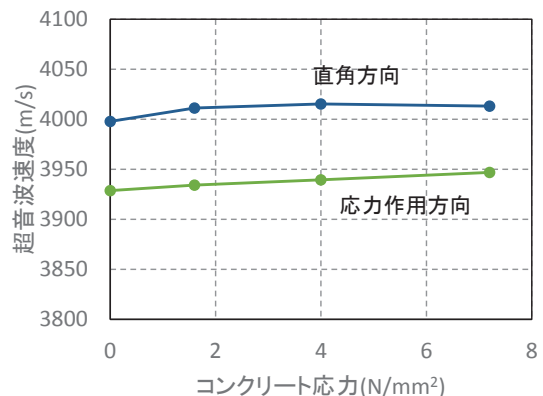


図-9 コンクリート応力と超音波速度の関係

5. まとめ

衝撃弾性波と超音波がコンクリート内を伝播する速度を計測した。波が到達した時間の判定方法は、両波で同じ方法を用いた。これにより以下が明らかとなった。

- (1) いずれの波を用いても、コンクリート応力の増加にともない速度が増加する傾向が確認できた。
- (2) コンクリート内の鉄筋を伝播する衝撃弾性波の速度も、コンクリート表面で計測した場合と同様に応力との相関が見られた。
- (3) 1 応力段階あたり、衝撃弾性波 50 回、超音波 20 回の計測を実施して、標準偏差がほぼ同等であることを確認した。

謝辞：超音波の計測は、首都大学東京都市環境科学研究科 大野健太郎助教に、聴強器による衝撃弾性波の計測は、(株)コスモブラニング・テクノソリューション部 立見栄司氏のご指導を賜りました。また、データ分析においてお二人に多くの御助言をいただいたことをこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岩波, 大即, 二羽, 鎌田, 長瀧: コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.627/V-44, 223-238, 1999.8
- 2) 立見: コンクリートの非破壊圧縮強度推定法の開発, 三井住友建設技術研究所報告第 3 号, pp.133-141, 2005