

コンクリートの音弾性効果に関する基礎的研究

京都大学大学院
東京電力株式会社
京都大学大学院
京都大学大学院

学生会員 ○木全 伯光
正会員 岡村 明彦
正会員 大島 義信
フェロー 宮川 豊章

1. はじめに

物体中を伝わる弾性波の伝播速度が応力によって変化する現象は「音弾性効果」と呼ばれ¹⁾、弾性体の微小な非線形現象として知られている²⁾。一般にこの現象を利用した鋼材の残留応力検出などが行われているが、コンクリート中を伝播する弾性波の伝播速度は材料状態など様々な要因による影響を強く受けるため³⁾、コンクリートにおける音弾性効果を定量的に評価することが少なかった。そこで本研究では、一軸圧縮载荷したコンクリート矩形供試体を伝播する弾性波の伝播速度を計測し、コンクリートの音弾性効果に対する定量的な評価を行った。

2. 音弾性効果

単軸応力状態にあるコンクリートの主応力方向（第一軸： σ_1 ）および主応力直角方向（第二軸，第三軸： $\sigma_2=\sigma_3=0$ ）に伝播する縦波弾性波（P波）を想定する。いま，状態 A から状態 B へ主応力が $\Delta\sigma_1$ だけ変化した場合，P波の速度変化量は音弾性理論に基づき以下の式で表すことができる。

$$\frac{V_j^A - V_j^B}{V_j^0} = C_j \Delta\sigma_1 \quad (1)$$

ここで， V_j^i は状態*i*における*j*軸方向に伝播するP波の伝播速度， V_j^0 は無応力状態での*j*軸方向に伝播するP波速度， C_j はそれぞれ*j*軸方向に伝播するP波の音弾性係数である。本研究では，音弾性定数 C_j ($j=1, 2$)に対する定量的な評価を行った。

3. 試験概要

本試験では，図1に示すように，角柱供試体を一軸圧縮载荷した上で，第一軸および第二軸方向に伝播

する弾性波伝播速度を計測した。第一軸，すなわち载荷軸方向に伝播する弾性波については，表面法に基づき表面に取り付けた発信子および加速度ピックアップにより伝播速度を算出した。また第二軸方向に伝播する弾性波については，対称法に基づき伝播速度を算出した。コンクリートは W/C=40%で配合設計し，硬化後の諸物性については，圧縮強度 48.3N/mm²，静弾性係数 32.7 kN/mm²となっている。また圧縮に伴う伝播距離の変化については，ひずみゲージによる補正を行っている。

4. 速度変化量の検出方法

音弾性効果による速度変化は微小であるため，波形の立ち上がり時間の差異には現れにくい。しかし，コンクリートのように散乱の大きい材料に伝達される弾性波は，組織内で乱反射し受信子ではその干渉波として検出される。このような散乱の大きい材料に微小な組織変化が生じた場合，検出波の初期に現れる直接波への影響が少ない反面，後半に現れる干渉波（コーダ波）の形状が大きく変化する。この干渉波の変化を利用した速度変化の検出法が提案されており，コーダ波干渉法（Coda wave interferometry）と呼ばれている⁴⁾。ここでは，コンクリートの音弾性効果の検出に対する，コーダ波干渉法の適用性について検討する。コーダ波干渉法では，受信された二つの波形をある

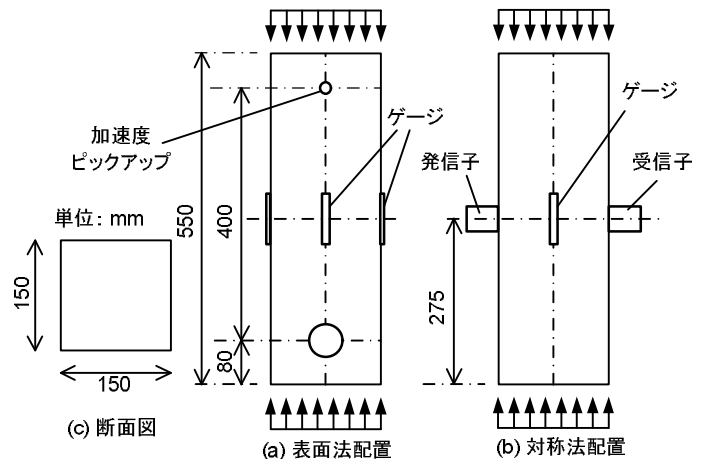


図1 供試体およびセンサ配置図

キーワード 超音波伝播速度，応力状態，音弾性効果

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 TEL：075-383-3173 FAX：075-383-3177

時間帯で区切り、その時間帯における相関が最も大きくなるラグを算出する。コーダ波干渉の理論に基づけば、時間変化に伴うラグの増加率 (τ/t) が速度増加率 ($-\Delta V/V$) に等しくなる。

5. 計測結果

図2は、第一軸方向に伝播するP波の受信波形を示す。また図3には、第二軸方向に伝播するP波の受信波形を示す。これらの図より、立ち上がりから速度変化を読み取ることが困難であることがわかる。

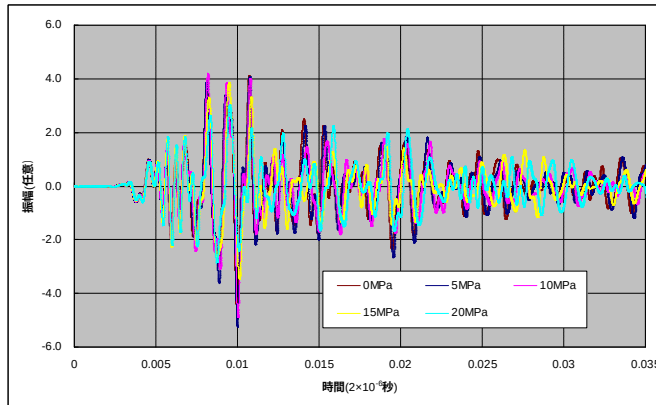


図2 第一軸方向に伝播するP波の受信波形

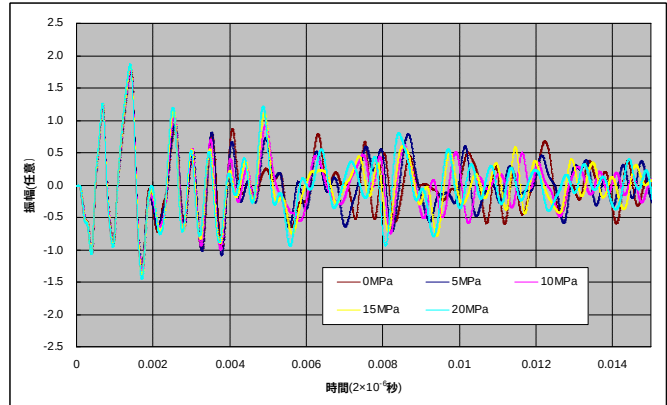


図3 第二軸方向に伝播するP波の受信波形

また図4には、コーダ干渉法より得られた速度比と応力の関係を示す。コーダ干渉法を利用することで、微小な速度変化を捉えることができています。ただし、これらの値は非常に小さなもので、20N/mm²程度の応力変化に対して0.2%程度の速度変化しか生じないことがわかる。いま、コンクリートのP波弾性波速度を4500m/sとすれば、9m/s程度の差しか生じないことになる。この差は非常に微小であり、実構造物などの場合他の要因による速度変化が卓越し、応力に起因する速度変化を正確に捉えることは困難であるといえる。また既往の文献⁵⁾による数値とも近い値となっている。

しかし今回の実験で、受信波形の後半に出現する干渉波（コーダ波）には、応力により大きな変化が生じることがわかった。よって、今後は速度変化だけではなく干渉波の相異を定量的に評価する手法を検討していきたい。

6. まとめ

本研究で得られた知見をまとめる。

1. 受信波形の後半に出現する干渉波に着目すれば、微小な速度変化でも捉えることが可能である。
2. コンクリートの音弾性効果が確認されたが、20N/mm²程度の応力差が発生した場合でも、0.2%程度の速度差しか生じないことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 福岡秀和：音弾性の基礎と応用，オーム社。
- 2) 徳岡ほか：有利連続体力学の基礎，共立出版。
- 3) 大津ほか：コンクリート技術シリーズ 61 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，土木学会。
- 4) Snieder, R.: The theory of coda wave interferometry, Pure appl. Geophys., 163, 455–473, 2006.
- 5) 春田健作・玉越隆史・高橋晃浩・小椋紀彦：PC 道路橋の軸力評価手法に関する実験的研究，土木学会第64回年次学術講演会, pp412-414, 2009

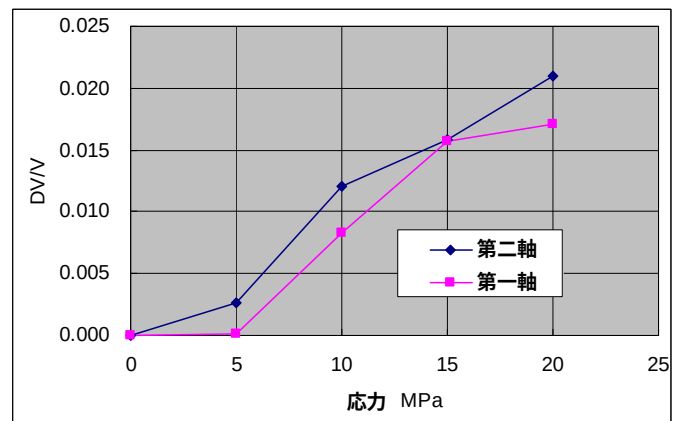


図4 応力変化に伴う弾性波速度の変化率