

論文 マルチチャンネル衝撃弾性波法により測定した表面波位相速度とコンクリートに作用する圧縮応力との関係

土井 真郷^{*1}・内田 慎哉^{*2}・山下 健太郎^{*3}・桃木 昌平^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート版部材に対して圧縮応力を段階的に導入または解放し、鋼球径の異なる複数の鋼球を使用して、マルチチャンネル衝撃弾性波法による計測を各段階で行い、表面波位相速度とコンクリートに作用している圧縮応力との関係を把握することを試みた。その結果、圧縮応力の導入過程および解放過程のいずれにおいても、また鋼球径の違いにかかわらず、圧縮応力と表面波位相速度は概ね比例関係にあることが明らかになった。さらに、鋼球径が小さいほど、表面波位相速度が圧縮応力の変動に対してより敏感に変化する傾向も確認された。

キーワード：圧縮応力, 非破壊試験, マルチチャンネル衝撃弾性波法, 表面波, 位相速度

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) 構造物は、PC 鋼材を緊張してあらかじめコンクリートに圧縮応力 (プレストレス) を付与することで、荷重により生じる引張応力を打ち消す構造である。PC 構造物の維持管理において、コンクリートに作用している応力を把握することは極めて重要である。作用している応力を適確に推定できれば、設計時の応力との差が把握できるため、外ケーブルによる補強の必要性の判断、あるいは補強時の適切なプレストレス値の計算が可能となり、合理的な維持管理が実現できる。コンクリートに作用する圧縮応力を推定する弾性波を活用した非破壊試験として、縦波の伝搬速度を指標値とする方法が提案¹⁾されている。一方で、著者らは縦波よりもエネルギーの大きい表面波に着目し、その伝搬状況を適切に把握するために、複数の加速度センサを配置したセンサアレイを用いた「マルチチャンネル衝撃弾性波法」を提案²⁾している。これまでの研究では、張出し片持架設工法で建設中の PC 箱桁橋に本手法を適用し、設計上の合成曲げ応力の増加に伴い表面波位相速度も増加することを確認している。しかしながら、コンクリートに作用している実際の応力の違いが表面波位相速度に与える影響や弾性波の入力方法については、十分に検討されていないのが現状である。

そこで、本研究では、まず、コンクリート版部材に作用する圧縮応力をロードセルにより測定しながら、段階的に応力を導入あるいは解放することで圧縮応力を変化させた。その上で、鋼球径の異なる複数の鋼球を使用して、各段階でマルチチャンネル衝撃弾性波法²⁾による計測を行い、表面波位相速度とコンクリートに作用してい

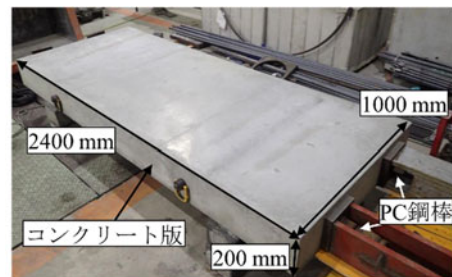


写真-1 供試体

る圧縮応力との関係を把握するとともに、その関係に鋼球径の違いが与える影響についても併せて検討することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体

写真-1 に供試体の概要を示す。コンクリート版の寸法は長さ 2400 mm×幅 1000 mm×高さ 200 mm で、内部にはφ40 mm の鋼製シースが 2 本コンクリート版の長さ方向に沿って配置した。各鋼製シースは、幅方向の中心から 250 mm、芯かぶり 100 mm の位置にあり、鋼製シース内には、それぞれのシース内にφ32 mm の PC 鋼棒が 1 本ずつ配置されている。コンクリートの使用材料は、セメント：中庸熱ポルトランドセメント（密度：3.20 g/cm³）、水：地下水、細骨材 1：葉原産砕砂、細骨材 2：三国産砂、粗骨材 1：若狭産砕石 1505、粗骨材 2：葉原産砕石 2010、混和剤：フローリック SF500S、フローリック AE-9B、混和材：舞鶴産フライアッシュII種である。また、フレッシュコンクリートの性状は、スランプは 18 cm、空気量は 4.5 %であった。表-1 にコンクリートの配(調)

*1 富山県立大学大学院 工学研究科環境・社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 (株) 東洋計測リサーチ 博士 (工学) (正会員)

*4 飛島建設 (株) 技術研究所 博士 (工学)

表-1 コンクリート配(調)合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	SI	S2	G1	G2	Ad
20	18.0	36.0	4.5	44.1	172.5	419	420	280	480	472	5.28

合を示す。材齢 28 日の圧縮強度は 53.8 N/mm²，静弾性係数は 26.5 kN/mm²であった。

油圧ジャッキにより PC 鋼棒に引張荷重を与えることで、コンクリートに圧縮応力を作用させた。引張荷重は、0, 150, 300, 450, 550 kN の 5 段階に設定した。したがって、コンクリートに作用する圧縮応力は、0.00, 0.75, 1.50, 2.25, 2.75 N/mm²となる。

2.2 計測方法

計測は、著者ら²⁾が提案しているマルチチャンネル衝撃弾性波法により行った(写真-2 参照)。計測に使用した 8 個の加速度センサは、コンクリート表面(2400 mm × 1000 mm)の中央部に配置した。具体的には、ポリエチレンクロスを基材とした養生シート用のテープをコンクリート長手方向に貼付け、そのテープ上に加速度センサを 50 mm 間隔で固定した。加速度センサが一定間隔(50 mm)になるように、3D プリンタで製作した専用の治具を使用し、エチレン酢酸ビニル共重合樹脂を主成分とする接着剤で加速度センサを固定した。養生シート用のテープを使用した理由としては、コンクリート表面に接着剤を用いて加速度センサを固定すると、センサを剥がす際に、コンクリート表層部も同時に剥がれる可能性があるためである。なお、表面波の計測において、このテープの影響はほとんど無いことを、既往研究²⁾で確認している。本研究で使用した加速度センサは既往研究²⁾と同じものであり、周波数応答(±3 dB)は 0.2~20000 Hz である。

弾性波の入力には、直径の異なる鋼球(4.0, 4.7, 6.4, 8.0, 9.6 mm)を 5 種類使用した。入力位置は、写真-2 に示すとおり、ch.1 から 25 mm 離れた打撃位置 1 と ch.8 から 25 mm 離れた打撃位置 2 の 2 箇所とした。

マルチチャンネル衝撃弾性波法による計測手順としては、まず、専用の治具を用いて加速度センサをテープ上に固定し、コンクリートに応力が作用していない状態(圧縮応力 0.00 N/mm²)で、打撃位置 1 および打撃位置 2 から弾性波をそれぞれ入力した。コンクリートを伝搬した波動を 8 個の加速度センサで受信し、それらの信号をサンプリング時間間隔 1 μs，データ数 10000 個で波形収集装置に記録した。続いて、加速度センサは固定した状態で、油圧ジャッキを用いてコンクリートに圧縮応力(0.75 N/mm²)を作用させ、表面波の計測を行った。その後も、センサは貼付けたまま、コンクリートに順次、圧縮応力

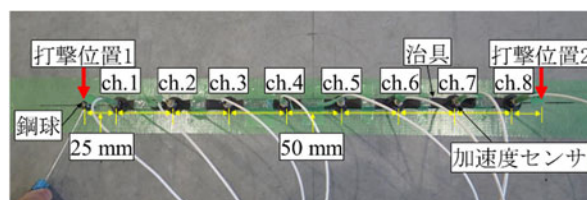


写真-2 計測状況

(1.50, 2.25, 2.75 N/mm²)を作用させ、各段階で表面波の計測を実施した。本研究では、圧縮応力が 0.00 N/mm²から 2.75 N/mm²に増加する過程を「圧縮応力の導入過程」と定義する。圧縮応力の導入過程での計測後、加速度センサは固定した状態で、油圧ジャッキにより圧縮応力を順次解放(2.25, 1.50, 0.75, 0.00 N/mm²)し、各段階で表面波の計測を行った。本研究では、圧縮応力が 2.75 N/mm²から 0.00 N/mm²に減少する過程を「圧縮応力の解放過程」と定義する。

3. 実験結果および考察

3.1 受信波形

図-1 (a)に、鋼球 9.6 mm で打撃位置 1 を打撃した際に得られた時刻歴波形の一例を示す。時刻歴波形には、式(1)に示す多項式適合法(2・3 次式)により、50000 Hz のローパスフィルターをかけている。

$$f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (1)$$

ここで、 f : ローパスフィルターの周波数 (=50 kHz)， N : 平滑化点数 (=20 点)， Δt : サンプリング時間間隔 (=1 μs)である。図より、各加速度センサで表面波の成分(加速度センサが信号を検出した直後のおよそ 1 周期分の波形)が受信されていることがわかる。また、打撃位置からの距離に応じて表面波の伝搬が遅くなり、振幅も小さくなっていくことも同時に確認できる。また、図-1 (b)には、打撃位置 2 を打撃した際に得られた時刻歴波形も示す。図より、打撃位置 1 と同様に、表面波が伝搬していることがわかる。なお、これらの傾向は、いずれの鋼球径(4.0, 4.7, 6.4, 8.0 mm)においても確認できた。

3.2 表面波位相速度

図-1 (a)および図-1 (b)に示す表面波成分に着目して、表面波位相速度を算出する。具体的には、まず、打撃位置 1 のケース(図-1 (a)参照)では、ch.1 から ch.8 の各加速度センサで受信した表面波の振幅が最大となる時刻

を表面波が伝搬する時刻として縦軸に、打撃位置から加速度センサまでの距離を横軸にプロットし、表面波の走時曲線を作成した(図-2(a)参照)。続いて、走時曲線の回帰直線式(図-2(a)参照)を求め、その傾きの逆数を表面波位相速度とした。したがって、打撃位置1のケースにおける表面波位相速度は2226 m/sとなる。なお、図中には、走時曲線の回帰直線式の決定係数も併せて示している。同様の手順で、打撃位置2のケース(図-1(b)参照)についても、表面波の走時曲線を作成し、その回帰直線式(図-2(b)参照)から表面波位相速度を算出した。その結果、打撃位置2のケースにおける表面波位相速度は2139 m/sであった。図-2(b)には、回帰直線式の決定係数も併せて示している。なお、次節以降に示す表面波位相速度は、打撃位置1および打撃位置2でそれぞれ3回の計測を行い、合計6回の計測結果の平均値を

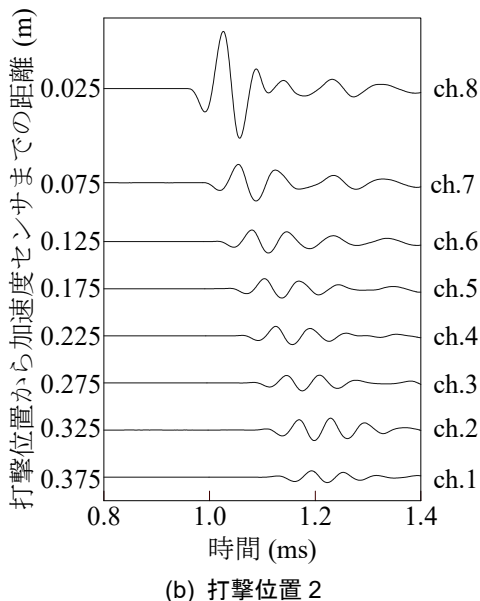
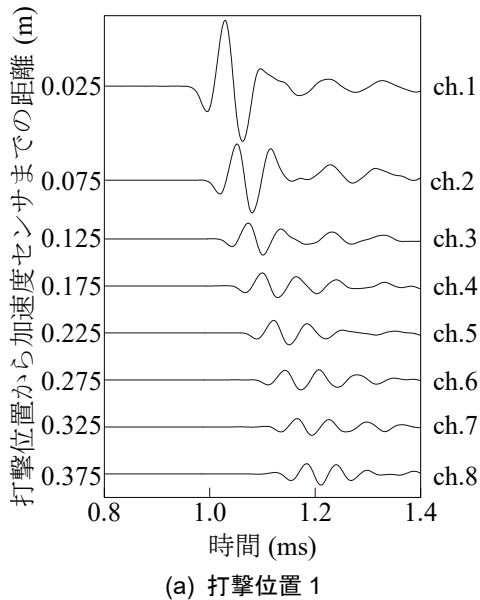


図-1 鋼球 9.6 mm で打撃した際の時刻歴波形

採用した。なお、6回の計測における表面波位相速度の最大値と最小値の差は、いずれの鋼球径および圧縮応力においても、52 m/s~106 m/sの範囲にあり、このばらつきを低減するために、打撃箇所を2箇所に設定した。

3.3 表面波位相速度とコンクリートに作用している圧縮応力との関係

図-3に鋼球 9.6 mm で打撃した際の表面波位相速度とコンクリートに作用している圧縮応力との関係を示す。図には、圧縮応力の導入過程と解放過程の両方で得られ

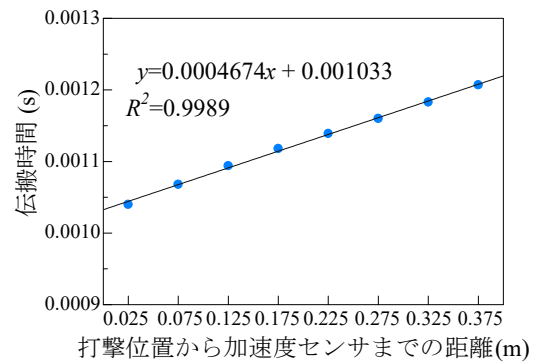
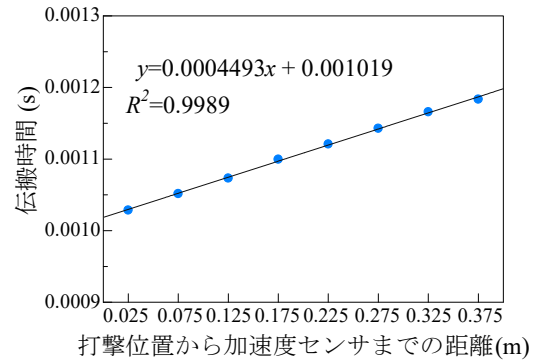


図-2 表面波の走時曲線

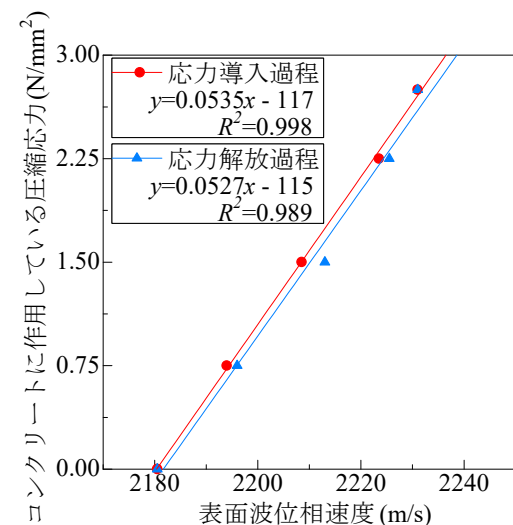
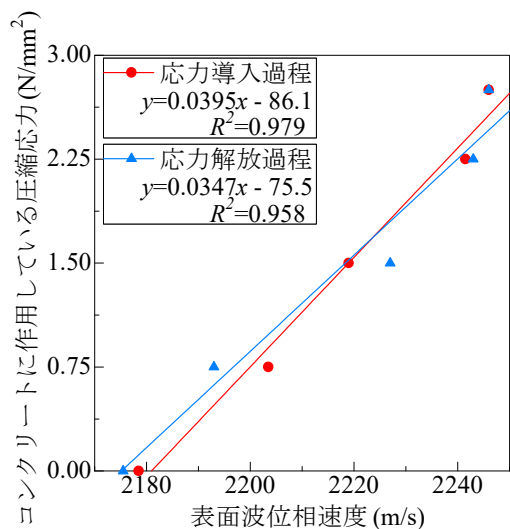
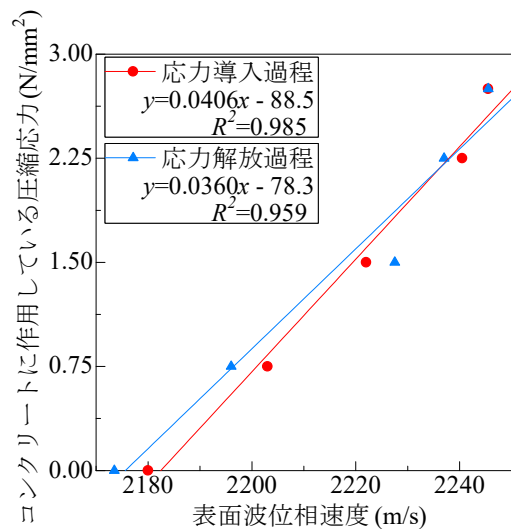


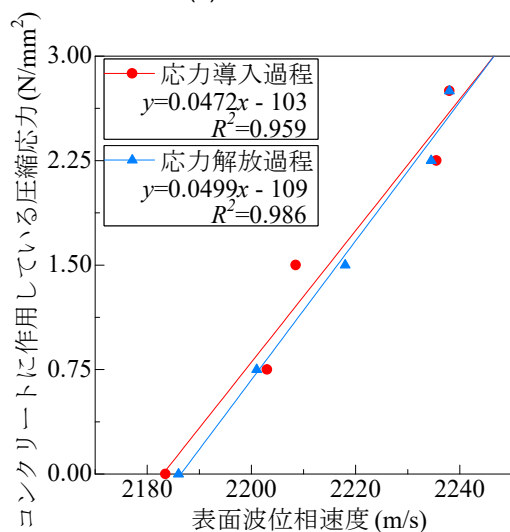
図-3 鋼球 9.6 mm で打撃した際の表面波位相速度とコンクリートに作用している圧縮応力との関係



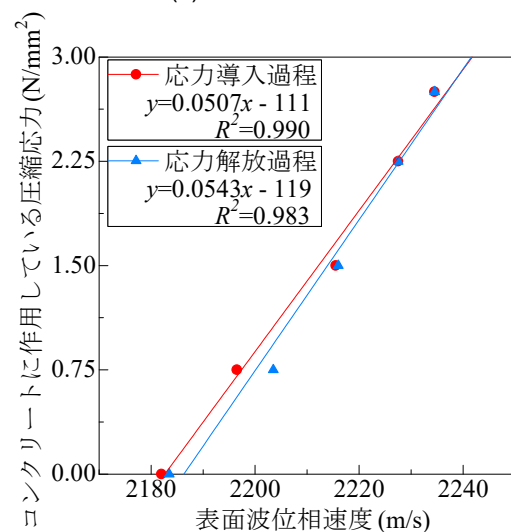
(a) 鋼球 4.0 mm



(b) 鋼球 4.7 mm



(c) 鋼球 6.4 mm



(d) 鋼球 8.0 mm

図-4 各鋼球径における表面波位相速度とコンクリートに作用している圧縮応力との関係

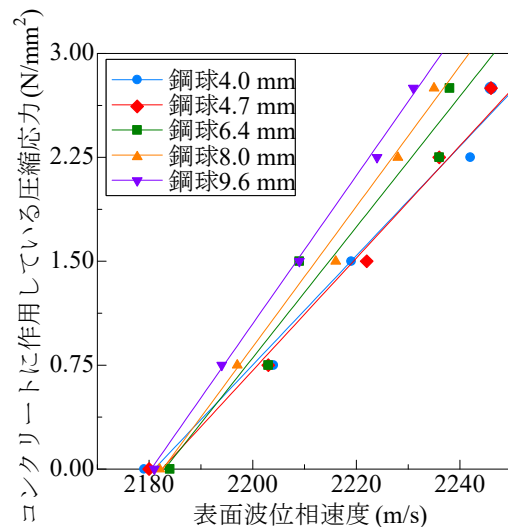
た結果を示しており、回帰直線式とその決定係数も合わせて示している。図より、応力の導入過程では、コンクリートに作用する圧縮応力が大きくなると、表面波位相速度も大きくなることわかる。このような傾向は、著者らの既往研究²⁾でも確認されている。一般的に、圧縮応力の増加とともに表面波位相速度が速くなる理由としては、材齢の経過により静弾性係数が大きくなったこと、圧縮応力により見掛け上の伝搬距離が短くなったこと、圧縮荷重によりコンクリートの微細空隙が閉塞するとともに組織が緻密になったことの3点が考えられる。ここで、材齢について補足すると、本研究における表面波位相速度の計測は1日以内で行っている。そのため、材齢に起因して表面波位相速度が速くなることは考えにくく、既往研究²⁾でも同様の考察をしている。続いて、見掛け上の伝搬距離について考察する。コンクリートの静弾性係数が 26.5 kN/mm^2 のコンクリート版に圧縮応力 2.75 N/mm^2 を作用させた場合、発生するひずみは 103.77μ と

なる。コンクリート版が均質な材料であると仮定すると、ch.1 から ch.8 までの区間 (350 mm) での縮み量は 0.036320 mm となる。したがって、ch.1 から ch.8 までの距離は 349.964 mm に縮小する。この縮小した距離を表面波が一定の位相速度で伝搬することを考える。圧縮応力 0.00 N/mm^2 における表面波位相速度を 2180 m/s (図-3 参照) とすると、伝搬距離 349.964 mm における表面波の伝搬時間は $160.534 \mu\text{s}$ となる。次に、ch.1 から ch.8 までの伝搬距離 350 mm として、表面波が同じ伝搬時間 ($160.534 \mu\text{s}$) で伝搬すると仮定する。この場合の見掛け上の表面波位相速度は、 2180.22 m/s となる。この見掛け上の表面波位相速度 (2180.22 m/s) と、前述の表面波位相速度 (2180 m/s) との差は 0.22 m/s である。この差が、見掛け上の伝搬距離が小さくなった場合における表面波位相速度の変化量を示している。したがって、圧縮応力の増加により伝搬距離が小さくても、表面波位相速度の増加は微小であることがわかる。

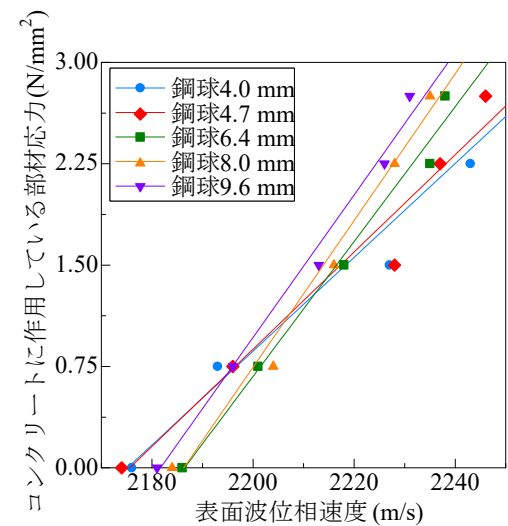
以上のことから、表面波位相速度の増加要因として、コンクリートの緻密性が関係していると考えられる。既往研究でも、応力の増加に伴う縦波速度の上昇は、コンクリートの緻密性が関係していることが指摘されている。今後は、コンクリートの緻密性を、例えば表層透気試験により測定することで、表面波位相速度の増加要因を明らかにしたいと考えている。

一方、図-3 に示す応力の解放過程では、圧縮応力が小さくなると、表面波位相速度も低下していくことがわかる。したがって、圧縮応力の導入過程および解放過程において、圧縮応力と表面波位相速度の関係は、概ね比例関係にあることが明らかとなった。しかしながら、圧縮応力の導入過程と解放過程での回帰直線を比較すると、両者の回帰式が異なっていることがわかる。これにより、圧縮応力と表面波位相速度との間には一対一の対応関係が成立していないことが示された。この結果は、コンクリートを伝搬する表面波位相速度が同じであっても、それがコンクリートに作用する圧縮応力の導入過程で得られたものなのか、あるいは解放過程で得られたものなのかによって、位相速度から推定される応力が異なることを意味している。なお、このような傾向は、全ての鋼球径において確認された（図-4 参照）。

鋼球径の違いが表面波位相速度に与える影響を視覚的に把握するため、鋼球径ごとに分類して示した図-3 および図-4 の結果を、圧縮応力の導入過程および解放過程で分類し、図-5 に示した。また、表-2 には鋼球径ごとの回帰直線式の決定係数を再掲した。図-5 (a)より、鋼球径が小さいほど、回帰直線の傾きが小さくなるのがわかる。特に、圧縮応力が 0.00 N/mm^2 の場合、全ての鋼球径で位相速度は概ね 2180 m/s となるが、圧縮応力が増加するにつれて、位相速度の差が次第に広がる点の特徴的である。この傾向の要因は明らかではないが、鋼球径が小さいほど、応力の変動に対して表面波位相速度がより敏感に反応することが確認された。図-5 (b)では、圧縮応力の解放過程において、圧縮応力の導入過程と同様に、鋼球径が小さくなるほど回帰直線の傾きは小さくなり、応力の変動に対して敏感に変化することがわかる。しかしながら、図-3 および図-4 で述べたとおり、同一鋼球径でも導入過程と解放過程で回帰直線式が異なる。また、全ての鋼球において、コンクリートに作用した圧縮応力を解放した際の表面波位相速度（図-5 (a)の圧縮応力 0.00 N/mm^2 ）は、応力導入前の表面波位相速度（図-5 (b)の圧縮応力 0.00 N/mm^2 ）には戻らないことが確認できた。この点についても、先に述べた表層透気試験によるコンクリートの緻密性の評価と関連させて、今後検討していく予定である。



(a) 圧縮応力の導入過程



(b) 圧縮応力の解放過程

図-5 導入過程と解放過程における表面波位相速度とコンクリートに作用している圧縮応力との関係

表-2 鋼球径ごとの決定係数

鋼球径 (mm)	4.0	4.7	6.4	8.0	9.6
導入過程	0.979	0.985	0.959	0.990	0.998
解放過程	0.958	0.959	0.986	0.983	0.989

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 圧縮応力の導入過程では、コンクリートに作用する圧縮応力が増加するにつれて、表面波位相速度も増加する。一方、解放過程では、圧縮応力が減少するにつれて、表面波位相速度も減少する傾向が見られた。これにより、圧縮応力と表面波位相速度との間には、概ね比例関係が成立していることが明らかになった。
- (2) ただし、圧縮応力の導入過程における圧縮応力と表面波位相速度との関係から求めた回帰直線式は、解

放過程における回帰直線式と一致しないことがわかった。この傾向は、いずれの鋼球径においても共通してみられた。したがって、圧縮応力と表面波位相速度の間には、一対一の対応関係が成立しないことが示された。

- (3) 鋼球径が小さいほど、表面波位相速度が圧縮応力の変動に対してより敏感に変化することが確認された。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C）22K04272）の援助を受けて行った。また、実験は、オリエンタル白石株式会社様にご協力をいただいた。

た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、松田秀和, 佐竹将也, 渡辺 健, 橋本親典: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1727-1732, 2019.
- 2) 例えば、内田慎哉, 山本紗衣, 土井真郷, 桃木昌平: マルチチャンネル衝撃弾性波法に基づく PC 橋梁に作用する合成曲げ応力の非破壊評価手法, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.3, No.1, pp.126-135, 2024.