

論文 コンクリート表面に設置した加速度計で測定した応答波形から鋼球とコンクリートの接触時間を推定する方法の実験的検討

久保 元樹^{*1}・内田 慎哉^{*2}・岩野 聡史^{*3}・野崎 峻^{*4}

要旨：本研究では、強度の異なるコンクリートと御影石をそれぞれ対象として、対象物表面に貼り付けたシートセンサで測定した鋼球と対象物の接触時間と、対象物表面に設置した加速度計の応答波形から推定した鋼球と対象物の接触時間を比較し、加速度計の応答波形から接触時間を推定する方法の妥当性を検証した。その結果、コンクリート表面に設置した加速度計の応答波形のうち、レイリー波成分を含む第1波を分析することにより、接触時間を推定できることを明らかとした。

キーワード：非破壊試験, 衝撃弾性波法, 鋼球打撃, レイリー波, 接触時間

1. はじめに

衝撃弾性波法は、鋼球打撃によって弾性波をコンクリート内部へ入力し、その応答を測定・解析することによってコンクリートの部材厚さや内部欠陥の有無を評価しようとする方法である。弾性波の入力波長は、鋼球とコンクリートの接触時間により決定される。Sansalone^ら¹⁾の既往の研究では、評価対象に応じて適切な波長の選択が必要とされている。接触時間は鋼球の質量や、コンクリート表面の硬さ、弾性係数によって決定されるため、鋼球の直径を変えることで容易に調整することが可能である。NDIS2426-2²⁾では、接触理論に基づき³⁾、評価対象の部材厚さに応じた、接触時間および入力波長となる鋼球の直径が例示されている。しかしながら、実際の接触時間と接触理論に基づく接触時間は一致しないことは既に報告済み⁴⁾であるとともに、鋼球打撃した場合に入力波長を確認する方法は確立されていない。つまり、実際の現場でNDIS2426-2などを参考に鋼球を選定しても、確認の方法がなく、実際の接触時間は大きく異なる可能性が排除できないこととなる。これを解決するには、加速度計が組み込まれたハンマを用い直接的に接触時間を測定する方法が最も簡便かつ理想ではあるが、測定条件に応じて様々な鋼球径を用いて測定する衝撃弾性波法にとって、費用や利便性の面からも現実的ではない。このような背景から、著者らは、コンクリート表面に設置した加速度計から接触時間を推定する方法⁵⁾について、特に、弾性波動解析により検討してきた。

そこで本研究では、著者らの解析による既往の研究⁵⁾で得られた成果を検証するため、圧縮強度および静弾性係数の異なる2体のコンクリートおよび御影石を対象として、コンクリート表面を鋼球打撃した際に生じる応答

をコンクリート表面に設置した加速度計により受信し、得られたレイリー波成分からコンクリートと鋼球の接触時間を推定する方法について、実験により検討した。

本研究における具体的な検討項目は、以下に示す2点である。すなわち、1点目は、対象物（コンクリートおよび御影石）表面にシート状の荷重センサ（以降、シートセンサと呼ぶ）を貼付け、シートセンサ上に鋼球を自由落下させて打撃力波形を測定した。また同時に、コンクリート表面に加速度計も設置して応答波形を測定した。両者の波形から接触時間をそれぞれ推定し、比較した。続いて、2点目は、より実際の調査の場面を想定し、コンクリート表面を鋼球で直接打撃した際の応答をコンクリート表面に設置した加速度計で測定し、接触時間の推定を試みるとともに、シートセンサの影響についての考察も行った。なお、本論文では、既往の研究成果と本研究で得られた結果の両者を比較する必要があるため、著者らの実験結果（シートセンサ）⁴⁾を一部引用している。

2. 実験概要

2.1 供試体

接触時間を測定するための供試体は、コンクリートと御影石とした。コンクリート供試体は、幅600mm×長さ900mm×高さ600mmの寸法で、弾性係数およびポアソン比の違いが接触時間に与える影響を把握するため、水セメント比の異なる2種類のコンクリート（呼び強度24N/mm²と設計強度50N/mm²）を作製した。配(調)合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は多賀産砕砂(S1)と宇治産砕砂(S2)を混合したもの、粗骨材は宇治産砕石を使用した。混和材は、W/C=57%はAE減水剤、W/C=31%は高性能AE減水剤を

*1 日東建設(株) 札幌支店技術開発部取締役部長 (正会員)

*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 リック(株) 技術研究所課長 博士(工学) (正会員)

*4 立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	SI	S2	G	A
57	47.8	173	304	613	259	952	3.466
31	45.6	175	565	525	222	891	5.933

表-2 円柱供試体の圧縮強度・静弾性係数・ポアソン比

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
W/C 57	32.1	28.0	0.19
W/C 31	66.6	37.9	0.20
御影石	265.9	117.3	0.25

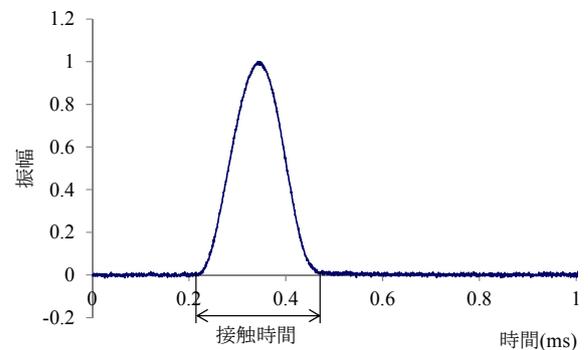
使用した。また、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比を測定するため、供試体作製時に直径 100mm × 高さ 200mm の円柱供試体を各配(調)合 3 本ずつ作製した。この他、完全弾性体に近い材料として御影石も対象とした。御影石はインド産黒御影石であり、寸法は幅 300mm × 長さ 300mm × 高さ 300mm とした。圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比を測定するため、直径 100mm × 高さ 200mm の円柱供試体も 2 本作製した。表-2 に、コンクリートおよび御影石での結果を示す。なお、各種試験は JIS に準拠し、試験時の材齢は、W/C 57% が 100 日、W/C 31% が 92 日である。測定に使用した供試体は、3 種類とも物性に差異があるものとなっている。

2.2 測定方法

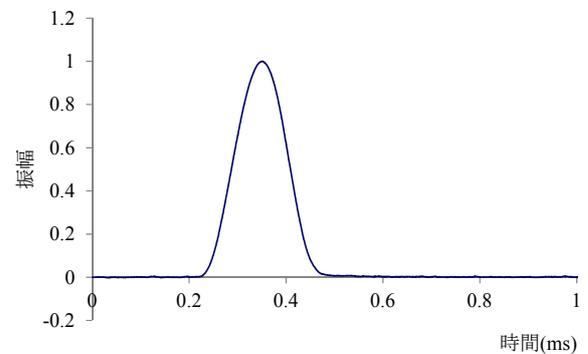
測定状況を図-1 に示す。鋼球打撃は、落下装置により行った。この装置にはコイルが内蔵されており、コイルに流れている電流を遮断することで鋼球を落下させることができる。鋼球の落下高は、100mm に固定した。測定に使用した鋼球は、直径 15mm, 20mm, 30mm, 40mm, 63mm, 76mm の 6 種類とした。測定回数は、各直径いずれも 3 回とした。ただし、1 回の測定でシートセンサおよびコンクリート供試体表面に打撃痕が生じるため、同一点を打撃しないよう、打撃位置を測定ごとに移動させながら測定を行った。接触時間の測定には、シートセンサおよび加速度センサをそれぞれ使用した。使用したシートセンサは、長さ 50mm × 幅 50mm × 厚さ 0.3mm の圧電フィルムの両面に長さ 50mm × 幅 50mm × 厚さ 0.1mm の薄いアルミ板を貼り付けたものである。これを厚さ 0.3mm の両面テープで測定対象に貼り付け、同軸ケーブルを介して波形収集装置と接続している。シートセンサからの出力信号は、サンプリング時間間隔 0.5μs、サンプリング数 10000 個でデジタル化して記録した。一方、加速度計は、圧電型加速度計（周波数範囲 0.2Hz~20kHz）



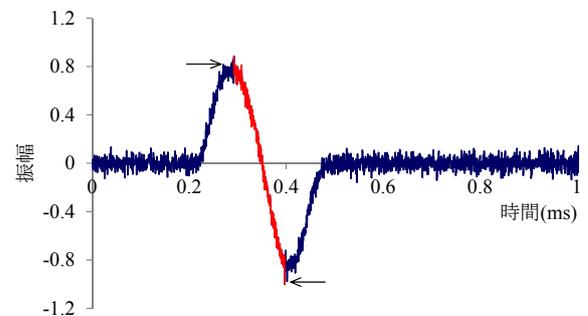
図-1 測定状況



(a) シートセンサで測定した打撃力波形



(b) ローパスフィルタ通過後の波形



(c) ローパス通過波形の微分波形と極値の範囲

図-2 シートセンサで測定した波形の例

(W/C 31% 鋼球直径 30mm)⁴⁾

を用い、サンプリング時間間隔 $2.0\mu\text{s}$ 、サンプリング数 4000 個でデジタル化して記録した。加速度計の設置は、鋼球落下位置から 50mm 程度離れた位置とした。

1 回の鋼球打撃により、シートセンサで打撃力波形を測定し、同時に、加速度計で応答波形を測定している。また、シートセンサの変形などの影響を考慮するため、コンクリートに直接鋼球を落下させ、加速度計でその応答波形を測定する試みも併せて実施している。

3. 接触時間の算出方法

3.1 シートセンサで測定した打撃力波形から算出⁴⁾

図-2 (a)に、W/C 31%の供試体に対して、直径 30mm の鋼球をシートセンサ上に自由落下させたときの打撃力波形を示す。図に示す縦軸の振幅は、最大値が 1 となるように正規化している。図より、単一のパルス状の波形が測定できていることがわかる。鋼球が任意の速度でコンクリートに衝突すると、鋼球は、コンクリート表面を弾性変形させながら減速する。鋼球の速度が 0 となった時刻でコンクリート表面の弾性変形は最大となる。その後は、コンクリートの弾性変形が復元し鋼球を押し戻すこととなる。つまり、鋼球と供試体が接触を開始した時刻から振幅値が徐々に大きくなり、鋼球の運動が停止した時刻で振幅が最大となる。鋼球と供試体の接触が終了すると振幅値は接触開始前と同程度になり、振幅が正の値になっている時間が鋼球とコンクリートが接触している時間となる。この時間を算出すれば接触時間を求めることが可能となる。しかしながら、接触開始時刻と接触終了時刻を具体的に決定する方法がないため、本実験においては、次の手順によって接触時間を算出した。まず、図-2 (a)で得られた打撃力波形に対し、自己帰帰型のローパスフィルタ（カットオフ周波数 25kHz）を通し、高周波成分を除去（図-2 (b)）した。続いて、図-2 (b)の波形を微分し、接触開始時刻および接触終了時刻の位相が 0 となる正弦波の波形に変換（図-2 (c)）した。最後に、図-2 (c)の波形に対し、極大値と極小値（図中矢印に対応）となる時刻を求め、これらの時刻の差を 2 倍したものを接触時間とした。

3.2 加速度計で測定した応答波形から算出

図-3 に示すとおり、コンクリート表面を打撃することによって弾性波が発生するが、発生する弾性波は 1 種類ではなく、P 波、S 波、レイリー波などが同時に発生しコンクリート中を伝搬する。この内、伝搬速度が最も大きい波が P 波であり、振幅が最も大きく速度が最も小さい波がレイリー波である。レイリー波は、表層の体積変化を伝える波である。この体積変化は、鋼球の衝突によって生じるものと考えられる。図-4 (a)に、W/C 31%の供試体に対して、直径 30mm の鋼球をシート上に自由落下させたときの、加速度計で測定した応答波形（加速

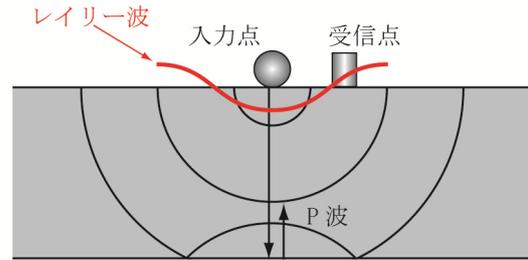
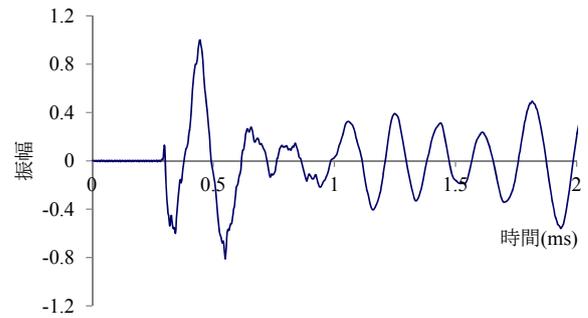
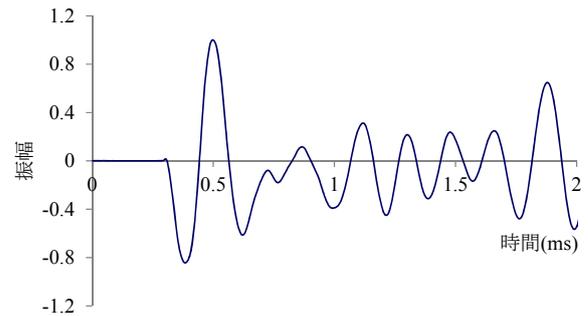


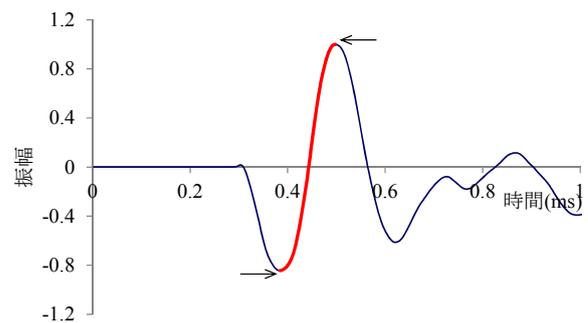
図-3 コンクリートを伝搬する弾性波の模式図



(a) 加速度波形



(b) 速度波形



(c) 速度波形の第 1 波と極値の範囲

図-4 加速度計で測定した応答波形の例
(W/C 31% 鋼球直径 30mm)

度波形) を示す。また、図-4 (b)に、加速度波形を 1 回積分し、速度波形に変換したものを示す。両図ともに縦軸の振幅は、最大値が 1 となるように正規化している。両図に示す応答波形は、P 波、S 波、レイリー波の成分が合成されたものであるが、例えば、図-4 (b)の第 1 波

(振幅が大きい波)の主な成分はレイリー波となる。この第1波の周期を特定することができれば、鋼球とコンクリートとの接触時間を間接的に推定することができる⁵⁾。周期を特定する方法としては、第1波の周期を波形上から読み取る方法、第1波目以降の振幅値を全て0としてフーリエ変換し、卓越周波数の逆数から推定する方法など様々考えられる。本研究では、シートセンサの結果と比較するため、以下の手順により加速度計で測定した応答波形から接触時間を算出した。まず、図-4(a)で得られた波形を1回積分し、速度波形へ変換する(図-4(b))。続いて、速度波形の第1波に着目し、極大値と極小値(図-4(c)矢印に対応)となる時刻を求め、これらの時刻の差を2倍したものを接触時間とした。

4. 実験結果および考察

4.1 シートセンサ⁴⁾

シートセンサで測定した打撃力波形から算出した接触時間の測定結果を表-3および図-5に示す。表および図には、理論値を示している。理論値は、式(1)によって算出したものであり、Sansaloneらが提唱している接触時間と鋼球直径との関係式¹⁾である。

$$T_c = 0.0043D \quad (1)$$

ここで、 T_c : 鋼球とコンクリートとの接触時間、 D : 鋼球直径である。

表-3 鋼球直径と接触時間(シートセンサ)⁴⁾に基づき作成

		供試体			
		W/C 57	W/C 31	御影石	理論値
使用鋼球 (mm)	15	159.0	138.0	102.0	64.5
	20	175.0	153.0	122.0	86.0
	30	273.0	238.0	185.0	129.0
	40	423.0	301.0	225.0	172.0
	63	677.0	512.0	316.0	270.9
	76	764.0	575.0	393.0	326.8

単位: μs

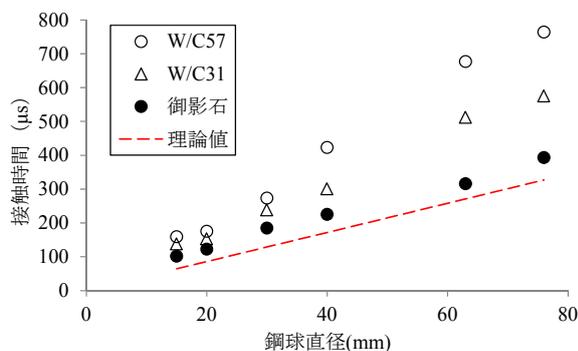


図-5 鋼球直径と接触時間との関係
(シートセンサ)⁴⁾に基づき作成

なお、式(1)は、Hertzの接触理論から導かれる式(2)に、コンクリートおよび鋼球の一般的な材料定数を代入し、鋼球の落下高さの影響は小さく無視できるものとして算出されたものである。

$$T_c = 5.97R_s \left\{ \frac{(\delta_s + \delta_c)\rho_s}{h^{0.1}} \right\}^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

$$\delta_s = (1 - \mu_s^2) / (E_s \pi) \quad (3)$$

$$\delta_c = (1 - \mu_c^2) / (E_c \pi) \quad (4)$$

ここで、 R_s : 鋼球の半径、 ρ_s : 鋼球の密度、 h : 鋼球の落下高さ、 μ_s : 鋼球のポアソン比、 μ_c : コンクリートのポアソン比、 E_s : 鋼球の弾性係数、 E_c : コンクリートの弾性係数である。

シートセンサで測定した打撃力波形から算出した接触時間は、いずれの供試体においても鋼球直径が大きくなると接触時間も大きくなる傾向を示した。また、供試体別に見ても、弾性係数が大きく、硬い材料ほど接触時間が小さくなっており、この傾向は Sansalone らの既往の研究¹⁾に示されるとおりである。しかしながら、式(1)によって算出した理論値と比較すると、全ての鋼球種類および全ての供試体で理論値が最も小さい結果となった。

4.2 加速度計

表-4 鋼球直径と接触時間(加速度計)

		供試体			
		W/C 57	W/C 31	御影石	理論値
使用鋼球 (mm)	15	228.0	204.0	80.0	64.5
	20	241.3	156.0	102.0	86.0
	30	300.0	224.0	—	129.0
	40	362.7	270.0	—	172.0
	63	468.0	420.0	—	270.9
	76	658.7	466.7	—	326.8

単位: μs

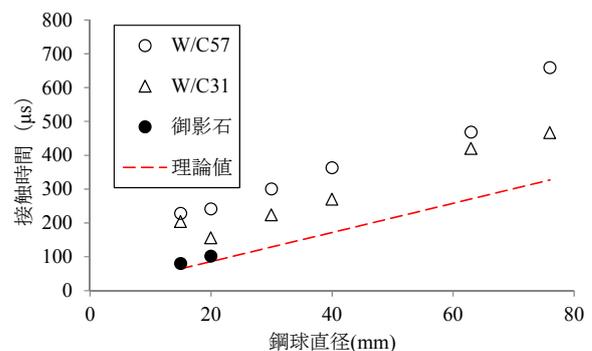


図-6 鋼球直径と接触時間との関係
(加速度計)

シートセンサ上に鋼球を自由落下させて、加速度計で測定した応答波形から算出した接触時間の結果を表-4 および図-6 に示す。シートセンサと同じく、表および図に理論値を示している。なお、直径 30mm 以上の御影石では接触時間を算出できなかったため、表および図中には、その結果を示していない。この理由を考察するため、図-7 に、直径 30mm の鋼球で御影石を打撃した際に得られた応答波形（速度波形）を示す。波形全体にうねりが生じており、第1波の特定が困難であることがわかる。このため、接触時間の算出が不可能であった。供試体表面に設置した加速度計は、供試体内部を伝搬する波動と供試体そのものの振動の両者が計測の対象となる。このため、御影石の寸法（重さ）が小さく、打撃により御影石が並進運動したことが原因と考えられる。

加速度計で測定した応答波形から算出した接触時間は、供試体に関わらず、鋼球直径が大きくなると接触時間も大きくなっている。また、供試体別に見ても弾性係数の上昇とともに、接触時間が小さくなっており、全体的にシートセンサと同じ傾向が確認できた。理論値との比較についても、同じ傾向と言える。しかしながら、シートセンサの結果では、鋼球直径が小さいと理論値との差が小さくなっているのに対し、加速度計の結果では、鋼球径が小さくても、その差があまり変化しない傾向であった。また、この傾向は、W/C 57%の供試体で顕著である。これは、鋼球が小さく、打撃によって発生する力が小さいため、シートセンサがダンパーの役割をしたためと考えられる。シートセンサがダンパーとなる点は、シートセンサでの測定でも同じである。しかしながら、シートセンサでは鋼球とシートセンサの接触時間をシートセンサで直接測定しているのに対し、加速度計ではシートセンサを介してコンクリートが打撃されて発生したレイリー波から推定している。この影響が表れたものと考察できる。

4.3 シートセンサと加速度計との比較

図-8 にシートセンサで測定した打撃力波形から算出した接触時間と、加速度計で測定した応答波形から算出した接触時間との関係を示す。両者には直線比例関係が成立している。図-8 より、鋼球径直径が小さい範囲（直径 15mm~20mm）では、シートセンサに比較して加速度計から算出した接触時間が長く、鋼球直径が大きい範囲（直径 30mm~76mm）では逆に、加速度計から算出した接触時間が短くなっている。この原因については、例えば、前述のとおり、シートセンサがダンパーの役割を果たしていることなど考えられるため、今後、詳細に検討する。しかしながら、全体を通して、回帰直線の傾きが 0.845 となっており、加速度計で測定した応答波形から鋼球の接触時間の推定が概ね可能であると考えられる。

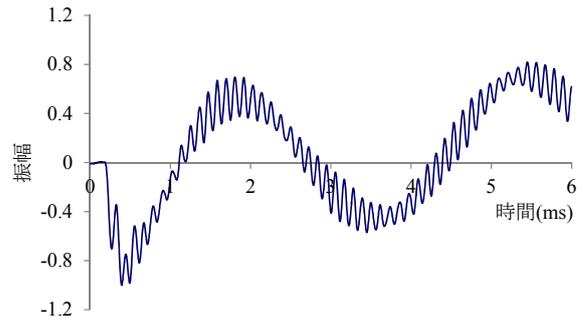


図-7 接触時間の算出が不可能な応答波形の一例
(御影石 鋼球直径 30mm 速度波形)

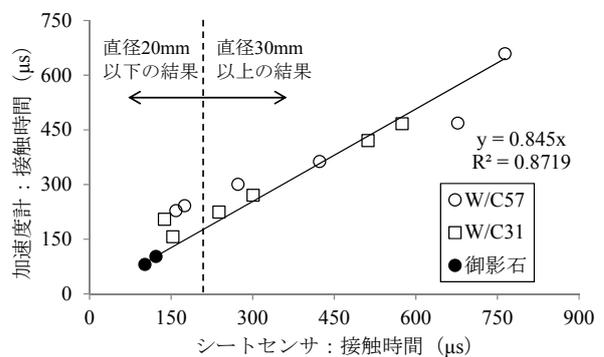


図-8 シートセンサと加速度計の接触時間の関係

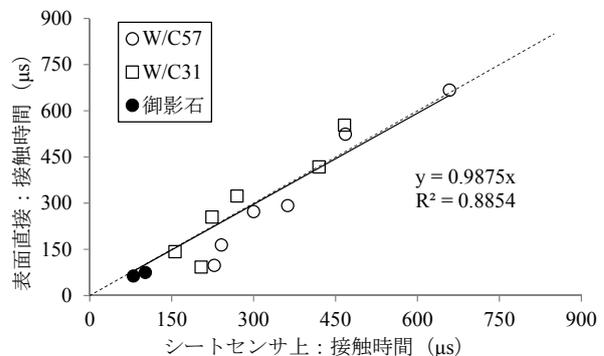


図-9 シート上と直接落下の場合の接触時間の関係

4.4 シートセンサの影響

図-9 に、シートセンサ上に鋼球を落下させた場合とコンクリート表面に直接鋼球を落下させた場合に、加速度計で測定した応答波形から算出したそれぞれの接触時間の対応関係を示す。W/C 57%の供試体では、鋼球径が小さい範囲でコンクリート表面に直接鋼球を落下させた場合に比較して接触時間が長くなっている。これは、前述のとおり、測定対象の弾性係数が小さく、柔らかい材料ほど打撃力が発生しないため、シートセンサがダンパーとして働いた影響と考えられる。しかしながら、回帰直線の傾きが 0.9875 とほぼ 1 に近いことを考慮すると、今回用いた供試体の範囲であれば、加速度計で測定した

応答波形から鋼球の接触時間の推定が可能であった。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) シートセンサ上に鋼球を落下させ、シートセンサにて打撃力波形を測定すると同時に、コンクリート表面に設置した加速度計で測定した応答波形を測定し、両者から求まる接触時間を比較した。この結果、コンクリート表面に設置した加速度計の応答波形から接触時間を推定できることが明らかとなった。
- (2) シートセンサ上に鋼球を落下させた場合とコンクリート表面に直接鋼球を落下させた場合に、加速度計で測定した応答波形から接触時間をそれぞれ算出し比較した。その結果、シートセンサがダンパーとして働いた影響は一部で生じるが、両者は概ね同じ値を示した。したがって、シートセンサの影響は小さいと考えられる。
- (3) 上記(1)および(2)より、コンクリート表面を鋼球打撃した際に生じる応答をコンクリート表面に設置した加速度計により受信し、得られたレイリー波成分からコンクリートと鋼球の接触時間を推定できることを実験により明らかにした。

ただし、測定対象の寸法が小さく打撃により並進運動する場合や、表層の劣化が進行しているコンクリート部材では、加速度計で受信した波形からレイリー波を特定することが困難となる。

謝辞

本研究は、日本非破壊検査協会 鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験部門内に設置された衝撃弾性波法研究委員会（委員長：渡辺 健 徳島大学大学院 准教授）で得られた成果の一部を取りまとめたものである。また、研究を実施するにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C）15K06173）の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) M. Sansalone, and W. B. Streett, Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y.", 1997.
- 2) NDIS 2426-2 : 2014 : コンクリートの非破壊試験－弾性波法－第2部 : 衝撃弾性波法, 日本非破壊検査協会, p.9, 2014.9.
- 3) W. Goldsmith, Impact The Theory of Physical Behaviour of Colliding Solids, Doverpublications, 1960
- 4) 久保元樹, 内田慎哉, 岩野聡史, 森 和也, 炭谷浩一 : 鋼球打撃によりコンクリートへ入力される弾性波の周波数特性に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.515-520, 2017.10.
- 5) 岩野聡史, 内田慎哉, 久保元樹, 山下健太郎, 渡部正 : コンクリート表面での振動測定による鋼球とコンクリートとの接触時間の測定方法の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.509-514, 2017.10.