

鋼球打撃によりコンクリート中へ入力される弾性波の周波数特性に関する基礎的検討

構造総研 正会員 〇山根 政夫 富山県立大学 正会員 内田 慎哉
 日東建設 正会員 久保 元樹 リック 正会員 岩野 聡史
 熊本大学 正会員 森 和也 大進コンサルタント 正会員 炭谷 浩一

1. はじめに

本研究では、コンクリートおよび御影石を対象として、鋼球と対象物との接触時間を対象物表面に貼付けたシート状の荷重センサにより測定し、この測定結果とコンクリートを完全弾性体と仮定して Hertz の接触理論に基づいて理論展開して求めた接触時間との比較を行った。続いて、上記の測定結果をもとに、コンクリートへ入力される弾性波の周波数特性について把握することも併せて試みた。

2. 入力される弾性波の周波数

2.1 鋼球の接触時間

鋼球とコンクリートの接触時間は、Hertz の接触理論に基づくと仮定すると、次式により算出する事が可能である。

$$T_C = 4.53 \left\{ \frac{(\delta_s + \delta_c) m_s}{\sqrt{R_s v_0}} \right\}^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

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

$$\delta_c = (1 - \mu_c^2) / (E_c \pi) \quad (3)$$

ここで、 m_s : 鋼球の質量、 R_s : 鋼球半径、 v_0 : 鋼球の衝突速度、 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。

式(1)において、

$$m_s = \rho_s V_s \quad (4)$$

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

として整理すると、式(6)となる。

$$T_C = 5.97 R_s \left\{ \frac{(\delta_s + \delta_c) \rho_s}{h^{0.1}} \right\}^{\frac{2}{5}} \quad (6)$$

式(6)に鋼球とコンクリートの一般的な材料定数を代入し、落下高さ h の影響は小さいとすると、Sansalone らが提唱している接触時間と鋼球直径の関係式 (式(7))¹⁾を得る。

$$T_C = 0.0043D \quad (7)$$

ここで、 ρ_s : 鋼球の密度、 V_s : 鋼球の体積、 g : 重力加速度、 h : 鋼球の落下高さ、 D : 鋼球直径である。

2.2 入力される弾性波の周波数

鋼球打撃によってコンクリートへ入力される入力周波数は、接触時間の逆数となり、使用する鋼球の径によって変化する。コンクリートへ入力される周波数 f は、接触時間の

逆数であるため、式(8)となる。

$$f = 1/T_C \quad (8)$$

Sansalone らは、式(8)に対して 1.25 倍した式(9)を推奨しているため、コンクリートへ入力される弾性波の上限周波数 f_{max} は、式(7)および式(9)より式(10)に示す通りとなる。

$$f = 1.25/T_C \quad (9)$$

$$f_{max} = 291/D \quad (10)$$

3. 実験概要

供試体はコンクリートと御影石の2種類を用いた。コンクリートの寸法は、W600×L900×H600mm であり、W/C=57%と31%の2配合とした。御影石は、1辺が300mmの立方体である。

接触時間の実測は、図1に示す様に、50mm四方で厚さ0.3mmのシート型変動荷重センサ(シートセンサ)を、測定対象に厚さ0.1mmの両面テープで張り付け、シートセンサの上に高さ100mmから鋼球を落下させることより実施した。シートセンサの出力信号は、サンプリング時間間隔0.5μs、サンプリングデータ数10000個で記録した。測定に使用した鋼球は、直径15, 20, 30, 40, 63, 76mmの6種類とした。

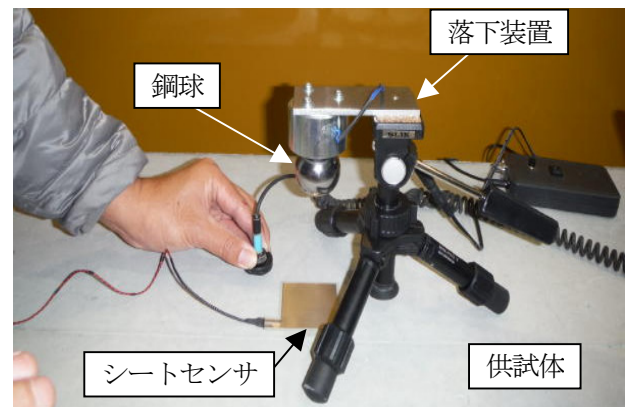


図1 測定状況

4. 実験結果および考察

4.1 円柱供試体

表1に、各配合および御影石の円柱供試体で測定した圧縮強度と弾性係数、およびポアソン比の測定結果を示す。

4.2 鋼球の接触時間

コンクリートおよび御影石を対象に、直径30mmの鋼球

表 1 圧縮強度・弾性係数・ポアソン比測定結果

種類	強度 (N/mm ²)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
W/C57	32.1	28.0	0.19
W/C31	66.6	37.9	0.20
御影石	265.9	117.3	0.25

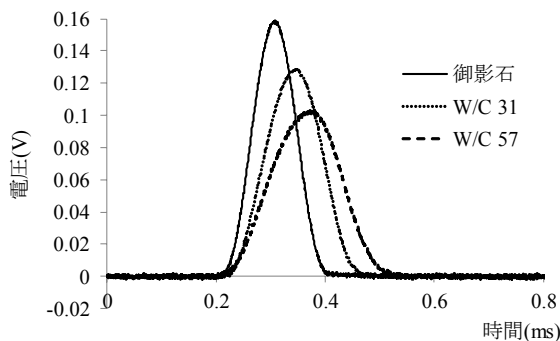


図 2 シートセンサから測定される波形の一例

をシートセンサに落下させた場合に測定される波形の一例を図2に示す。打撃波形において振幅が正の値になっている時間が接触時間となるが、弾性係数が大きくなるほど、接触時間が短くなっている。以上より、シートセンサにより測定対象物の材料定数に対応した接触時間が測定できているものと考えられる。続いて、下記手順により、接触時間を算出した。まず、図2に示す波形に対し、カットオフ周波数 25kHz のローパスフィルターを通し、高周波成分を除去した。その後、ローパスフィルター通過波形を微分し、正弦波の波形に変換した。最後に、微分波形に対し、振幅が極大値および極小値となる時刻を求め、これら時刻の差を2倍したものを接触時間とした。

図3に W/C=31% の供試体で得られた結果を示す。図には、表1に示す材料定数を式(6)に代入して求めた接触時間の理論値も示している。図より、鋼球直径が大きくなると、接触時間も大きくなることが確認できるが、理論値と比較して測定値の接触時間が大きくなる結果となった。これは、コンクリート表層部分の塑性変形が主な原因と考えられる。

4.3 入力される弾性波の周波数

実験から得られた接触時間を式(8)に代入することにより算出した入力周波数と、式(10)より算出した入力周波数との関係を図4に示す。図より、式(10)によって算出した入力周波数と比較して、実際に入力されている周波数は低くなっていることがわかる。回帰式の傾きは、0.44~0.68 であり、Sansalone らの既往の研究¹⁾と比較して1/2程度低い周波数が

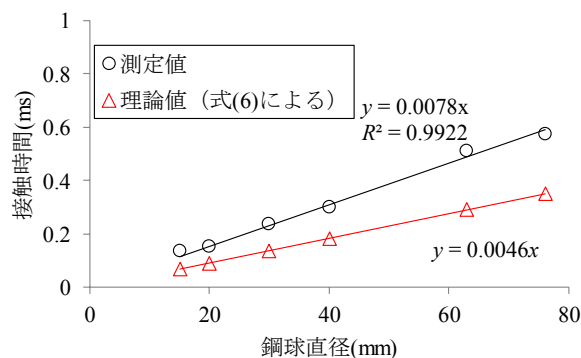


図 3 鋼球直径と接触時間の関係

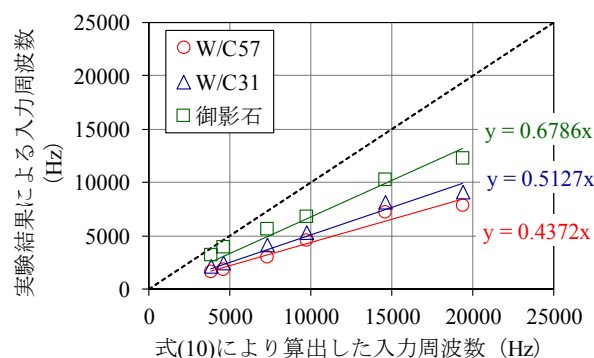


図 4 算出した入力周波数の関係

入力されている。これは、実際の測定において、Sansalone らの既往の研究で示されている式(10)を参考に鋼球を選定した場合、実施に入力される弾性波の周波数は、想定よりも低い周波数になることを意味する。これは、衝撃弾性波法による測定において、コンクリートに弾性波を入力する鋼球の直径は、接触理論に基づき NDIS2426-2²⁾で例示されている鋼球よりも小さくできることを示唆する。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 鋼球打撃による接触時間をシートセンサにより測定した結果、Hertz の衝突理論に基づいて算出された理論値と比較して、接触時間は大きくなることが明らかとなった。
- (2) 鋼球打撃によってコンクリートに入力される周波数は、Sansalone らが提唱している式(10)により算出される周波数よりも低い周波数が入力されていると考察できる。

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.