

機械インピーダンス法によるコンクリートの材齢変化を利用した 圧縮強度推定方法

Compressive Strength Estimation of Concrete Using Changes of Age
by Mechanical Impedance Method

○久保 元樹

GENKI KUBO

日東建設 (株)

Nitoo Construction Inc.

久保 元

HAJIME KUBO

境 友昭

TOMOAKI SAKAI

アプライドリサーチ (株)

Applied Research Inc.

概 要

機械インピーダンス法で圧縮強度を推定するには、換算式を設定する必要がある。換算式の作成にあたっては、今まで、W/Cの変化に伴う圧縮強度の相違を利用して換算式の作成を実施してきた。一方、衝撃弾性波法などは、コンクリートの材齢変化に伴う圧縮強度の相違を利用して換算式の作成が実施されている。本研究は、機械インピーダンス法においても材齢変化に伴う圧縮強度の相違を利用して換算式の設定が可能であるか実験的に検討したものである。

キーワード 機械インピーダンス 圧縮強度 弾性係数 換算式

1. まえがき

機械インピーダンス法は、加速度計を内蔵したハンマでコンクリートを打撃して得られる打撃力波計からコンクリートの弾性係数に相当する指標となる機械インピーダンスを算出し、非破壊で圧縮強度を推定する方法である。非破壊的な手法から破壊強度を推定するには、当然のことながら、換算式が必要となる。機械インピーダンスから圧縮強度を推定するための換算式として、今まで、コンクリートのW/Cの変化に伴う圧縮強度の相違を利用して作成した換算式を使用してきた。一方、機械インピーダンス法と同じく弾性係数に相当する指標から圧縮強度を推定する方法として衝撃弾性波法がある。衝撃弾性波法では、コンクリートの在来変化に伴う圧縮強度の相違を利用して換算式を作成している。本研究は、機械インピーダンス法を用いて、衝撃弾性波法と同様に材齢変化を利用した換算式の作成が可能であるか検討したものである。

2. 機械インピーダンス法の原理と算出方法

2. 1 機械インピーダンス法の基本原理

図1に示すように、バネ質量系のモデルとして質量 M のハンマが任意の速度 V でバネ係数 K のコンクリートに衝突する現象を考える。ハンマの衝突によってコンクリート表面に変位 D が発生する。エネルギー保存の法則から、打撃体の運動エネルギーとコンクリートの弾性変形エネルギーは等しく、式(1)が成立する。

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}KD_{\max}^2 \quad (1)$$

最大打撃力 F_{\max} は、フックの法則により、

$$F_{\max} = KD_{\max} \quad (2)$$

であり、式(2)を D_{\max} について解き、式(1)に代入し整理すると式(3)が得られる。

$$\frac{F_{\max}}{V} = \sqrt{MK} \quad (3)$$

式(3)に示す \sqrt{MK} は、バネ質量系の機械インピーダンス Z である。機械インピーダンス Z とコンクリートの弾性係数には比例関係があり、機械インピーダンスはコンクリートの弾性的性質を示す指標となる。

2. 2 測定波形からの算出

実際にハンマで打撃して得られる打撃力波形を図2に示す。図中の記号、 A_{\max} および F_{\max} は加速度または力の最大値、 V_A 、 V_R はハンマの衝突速度と反発速度、 T_1 、 T_2 、 T_3 はそれぞれ打撃開始時刻、加速度または力が最大となる時刻、打撃終了時刻を示している。波形は、正規分布に類似した形となり、最大打撃力の時刻より前半はハンマがコンクリートに貫入する過程、後半はコンクリートがハンマを押し戻しハンマが反発する過程に分けることができる。

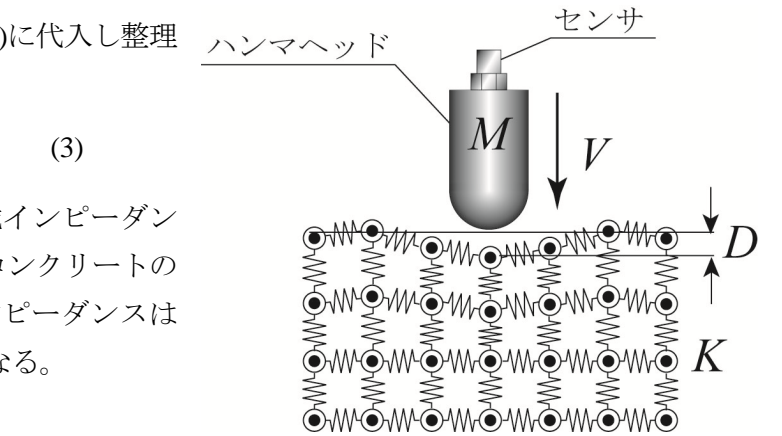


図1 ハンマの衝突モデル

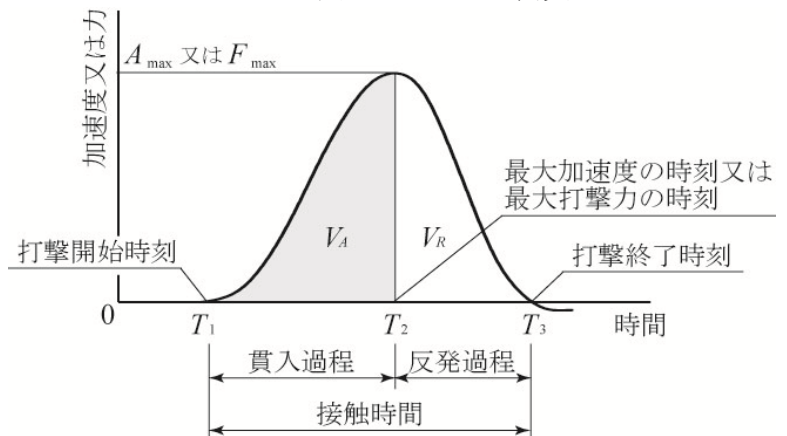


図2 打撃力波形

実際のコンクリートは、完全弾性体ではなく、表面が柔らかい傾向にある。ハンマの貫入過程では、この表面の影響を受けやすいため、圧縮強度の推定の際は、ハンマの反発過程に着目し、反発過程の機械インピーダンス Z_R として式(4)によって算出している。なお式中のべき乗値は、打撃速度による補正項である。

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{V_R^{1.2}} \approx \frac{MA_{\max}}{\left(\int_{T_2}^{T_3} A(t) dt \right)^{1.2}} \quad (4)$$

3. 実験概要

実験は、 $\phi 125\text{mm}$ の円柱供試体を 18 本製作し、材齢 4 日、7 日、11 日、14 日、21 日、28 日の 6 材齢で各 3 本円柱供試体を用いて機械インピーダンスの測定、弾性波速度の測定を実施した。その後、圧縮強度試験を実施し、機械インピーダンスと圧縮強度の関係および、弾性波速度と圧縮強度の関係をそれぞれ求め、換算式の設定を試みた。また、上記実験によって設定した換算式の妥当性を確認するため、円柱供試体とは別に、図3に示す板状供試体も製作し、材齢 300 日に機械インピーダンスと弾性波速度の測定を実施し、その後、 $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体を 12 本採取し

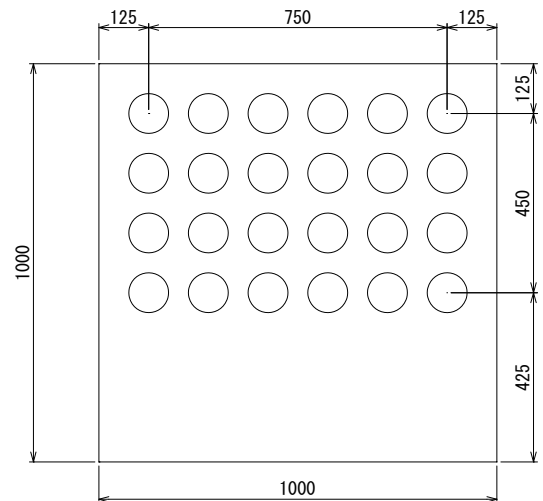


図3 板状供試体

圧縮強度試験を実施した。図 3 の丸印は、コアを採取した場所である。機械インピーダンスの測定では、供試体 1 本につき 25 回の打撃を行い、その平均値を求めた。弾性波速度の測定は、円柱の高さ方向に多重反射する弾性波を 3 回測定し、周波数解析により弾性波速度の平均値を求めた。なお、板状供試体については、コア採取前に機械インピーダンスの測定を実施し、弾性波速度の測定はコア採取後に実施している。

4. 実験結果

4. 1 円柱供試体の実験結果

図 4 左に機械インピーダンスと圧縮強度の関係、図 4 右に弾性波速度と圧縮強度の関係をそれぞれ示す。各材齢で 3 本ずつ測定を実施しているが、図は、各材齢における 3 本の平均値を示したものである。両指標値ともに圧縮強度とは正の相関関係がある。寄与率は、機械インピーダンスで 0.85、弾性波速度で 0.99 と両者ともに十分に高く、回帰式を換算式と設定することが可能と考えられる。これより、本実験においては、回帰式を各指標値からの換算式と設定する。なお、機械インピーダンスと圧縮強度の関係より、弾性波速度と圧縮強度の関係がより高い傾向にある。両者共に弾性係数に相当する指標であるが、弾性波速度は、弾性波が多重反射する共振周波数から算出しているものであり、供試体の部材全体の情報を反映しているのに対し、機械インピーダンス法は、あくまでも表面近傍の点の情報であることが寄与率の相違として現れた原因と考えている。

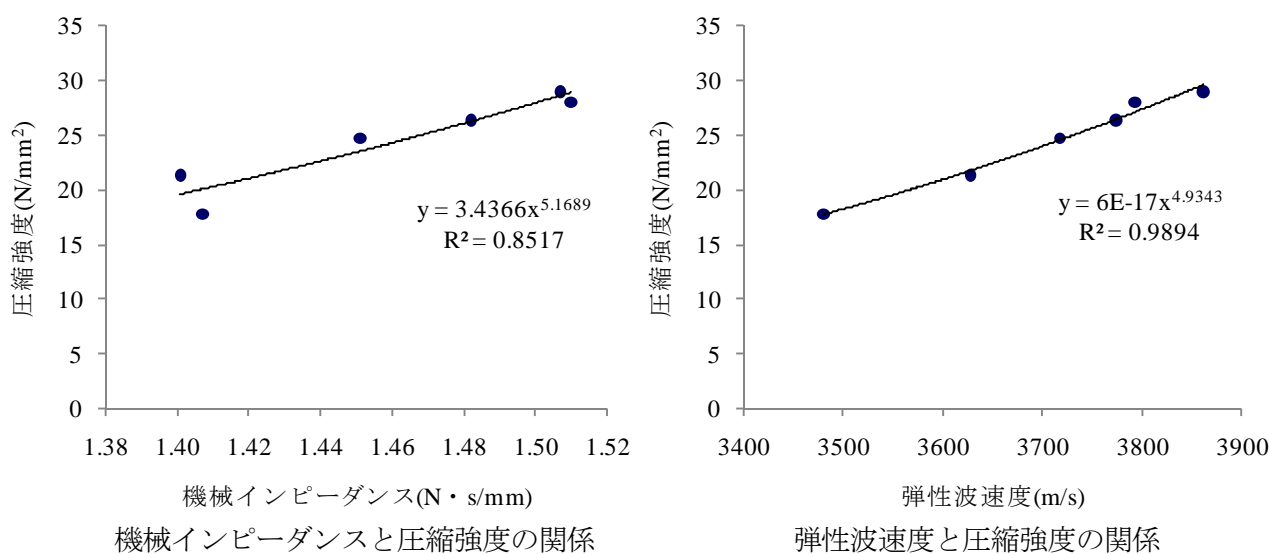


図 4 各指標値と圧縮強度の関係

4. 2 板状供試体の実験結果

板状供試体は、円柱供試体と同時期に施工し、材齢 300 日にて測定を実施した。測定の手順は、まず、板状の状態を図 3 に示す丸印内において 25 回ハンマで打撃し機械インピーダンスを測定後、φ 100mm のコアを採取し、多重反射法によって 3 回弾性波速度の測定を実施した。弾性波速度の測定をコア採取後に実施した理由は、板状の状態でも多重反射法を適用した場合、端部からの反射波等によって周波数スペクトル上で単一のピークを得られない場合があるためである。

表 1 に板状供試体の試験結果を示す。表中の推定強度は「4. 1 章」にて設定した換算式（回帰式）によって算出している。機械インピーダンス法による推定強度は、平均値で 25.6N/mm² となり、弾性波速度では、20.9N/mm² と推定される結果となった。実際の圧縮強度の平均値は 25.5 N/mm² であ

り、両手法とも 20%程度以内の精度で圧縮強度が推定されているのがわかる。

図 5 に板状供試体の機械インピーダンスおよび弾性波速度と圧縮強度の関係を示す。図 5 は、円柱供試体の測定結果（図 4）に板状供試体の結果を重ねたものである。図中赤破線は、換算式より±20%の範囲を示している。弾性波速度では強度を過小評価する傾向にあった。この原因は、供試体の乾燥状態が影響したものと考えている。円柱供試体は標準養生であり、水から上げて数時間後に測定を実施しているのに対し、板状供試体は屋外にて散水養生を実施している。また、測定材齢が 300 日程度であることも考慮すれば、円柱供試体と板状供試体では含水比に相違があるものと考えられる。これが原因で過小評価になったものと考えられる。

表 1 板状供試体の試験結果

No.	機械インピーダンス法		衝撃弾性波法		推定強度 (N/mm ²)
	Z _R (N・s/m)	推定強度 (N/mm ²)	V _P (m/s)	推定強度 (N/mm ²)	
1	1.464	24.6	3653	22.8	27.8
2	1.476	25.7	3571	20.4	26.9
3	1.421	21.1	3687	23.8	24.6
4	1.485	26.6	3587	20.8	24.3
5	1.476	25.7	3524	19.1	26.2
6	1.491	27.1	3653	22.8	25.7
7	1.503	28.3	3540	19.5	25.1
8	1.460	24.3	3571	20.4	25.5
9	1.480	26.1	3463	17.5	25.0
10	1.477	25.9	3604	21.3	24.7
11	1.494	27.4	3540	19.5	25.9
12	1.465	24.8	3670	23.3	24.8
平均値	1.474	25.6	3589	20.9	25.5

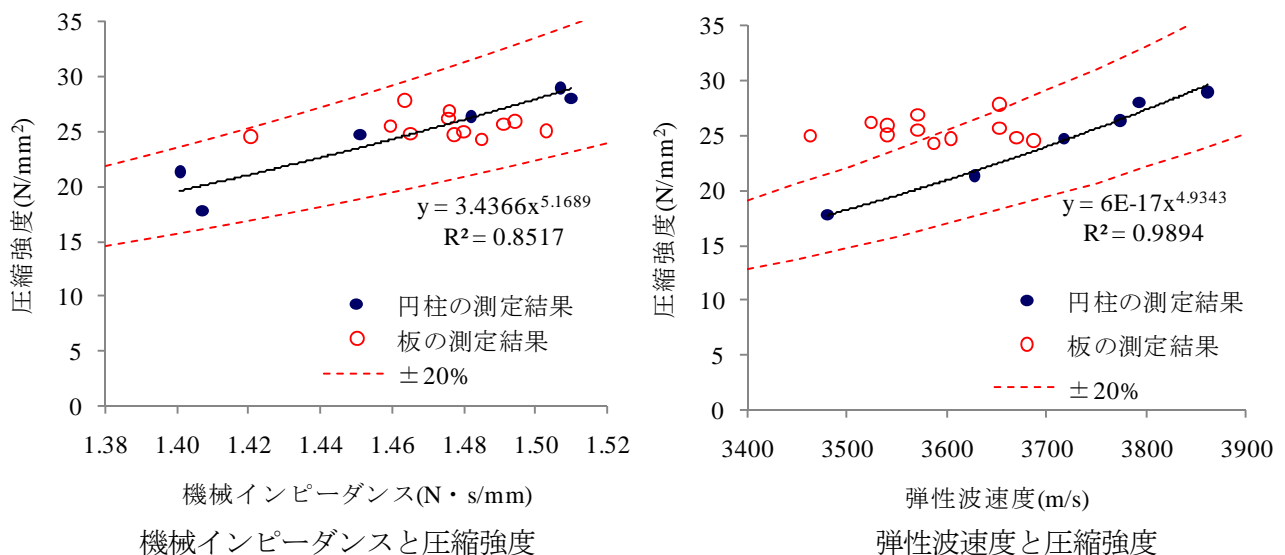


図 5 板状供試体の測定結果

5. まとめ

本実験の結果、機械インピーダンス法においても、弾性波速度と同様に材齢変化に伴う強度変化を利用して換算式の設定が可能であることが分かった。本実験では、1 種類の配合により実験を行ったものであり、今後もパターン数を増やし、再現性の確認を実施していきたい。