

機械インピーダンスによるコンクリート圧縮強度の推定

Estimate of compression strength of concrete by mechanical impedance

久保 元樹 極檀 邦夫 宮田 義典 佐々木 博文 東海大学
Genki Kubo, Kunio Gokudan, Yoshinori Miyata, Hirohumi Sasaki, Tokai University

境 友昭 アプライドリサーチ(株)

Tomoaki Sakai Applied Research

久保 元 日東建設(株)

Hajime Kubo Nitto Construction

概 要

機械インピーダンスによってコンクリートの圧縮強度を推定することを目的に基礎的な実験を行った。供試体は、強度の異なる円柱供試体を主とした。直径 15cm, 長さ 30cm の円柱供試体を自作インパルスハンマーで打撃し、打撃波形のピークの後半部はコンクリートの復元力に対応すると仮定して機械インピーダンスを求め、これと、圧縮強度の相関関係を求めた。また、円柱供試体を衝撃すると円柱供試体自身が微少移動すると思われたので、モルタルで板に固定した場合とゴムシートに乗せた場合の機械インピーダンスを比較検討した。

キーワード：コンクリート，圧縮強度，ポアソン比，弾性波速度，品質管理

1. はじめに

コンクリート構造物は本来、100年の年月を経ても安心して供用されるほど信頼性が高いといわれる。しかし、昭和39年の東京オリンピック以降の高度成長期に築造されたコンクリート構造物には欠陥が存在するものもあると報じられている。人の平均年齢が約80年である現在、コンクリートの寿命も同程度は期待されるようになった。

このような気運を反映し、土木学会コンクリート委員会では、2001年に性能照査型の示方書体系の整備を目標として新たにコンクリート標準示方書[維持管理編]、平成11年版コンクリート標準示方書[施工編]-耐久性照査型など、コンクリート構造物の長期的ライフサイクルを考慮するように変化しつつある。

人々の健康管理には定期的な健康診断が欠かせないのと同様にコンクリートにも定期的な健康診断が必要である。現在、非破壊的にコンクリートの健全性を強度の点から検査するものとしてシュミットテストハンマーがあるが、シュミットハンマーは表面が劣化したコンクリートでは測定誤差が大きい、器差による測定値の変動、同一点の測定値のばらつきが大きいなど問題点が多いといわれている[1]。

本研究では、先端を半球状に整形した鋼棒に加速度計を取り付けた自作インパクトハンマーを試作し、ハンマーで打撃した応答波形を解析して、コンクリートの圧縮強度および縦弾性波速度との関係を求めた[2][3][4]。

2. 機械インピーダンスと応答波形

コンクリート構造物を半無限弾性体と仮定して、質量 m のハンマーが速度 v でコンクリート表面に衝突した場合を考える。ハンマーの速度が0となった時のコンクリート表面の変位量を x とし、コンクリート表面の変位と力の間にフックの法則が成立するとする。すなわち、コンクリートの表面に発生する最大抵抗力 F は、コンクリート表面の擬似的なバネ係数を k とおくと、 $F = kx$ として表現される。エネルギーの釣り合いからハンマーの最大運動エネルギーとコンクリート表面の最大ポテンシャルエネルギーは等しいから、エネルギーの釣り合い式を展開し、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx^2, \quad \sqrt{mv} = \sqrt{k}x, \quad \sqrt{mv} = \frac{kx}{\sqrt{k}}, \quad \sqrt{mv} = \frac{F}{\sqrt{k}} \quad (1)$$

が得られる．これから，

$$\sqrt{mk} = \frac{F}{v} \quad (2)$$

がとなる．ここで， \sqrt{mk} は，機械インピーダンスであるが，作用した力の最大値を打撃速度の最大値で除することによって求められることが分かる．作用反作用の法則からコンクリートに発生した力は，ハンマーに生じた力と等しい．また，式(2)から明らかのように，ハンマーの質量が一定であれば，コンクリート表面のバネ係数の平方根は，打撃によって発生した力の最大値をハンマーの初速度を除した値に比例することになる．実際の測定解析では，打撃力波形の前半(最大値に至るまでの時間)と後半を分け，後半部分について，式(3)に示すような機械インピーダンス指標値を用いた．

$$Z_R = \frac{F}{2V_R} \quad (3)$$

これは，図 - 1 に示すように，打撃力波形を最大値に至る前半と後半に分け，後半部分でのコンクリートがハンマーを押し戻す時間に着目したものである．打撃力の前半部分は，ハンマーがコンクリートに力を作用させている時間であり，この間ではコンクリート表面の劣化等の影響を受ける可能性が考えられる．これらに対し，後半部分は，コンクリートが弾性変形エネルギーを放出してハンマーを押し戻す時間であるから，よりコンクリートの弾性的特性を反映した指標となるものと考えられる．

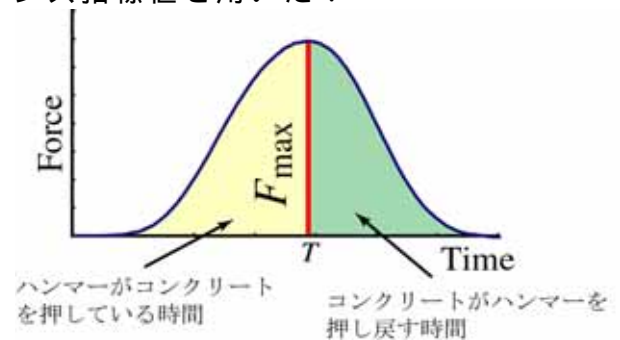


図 - 1 打撃力の模式図

3. 実験方法および実験結果

3.1 設置方法(較正試験方法)の検討

打撃による測定方法を用いる場合，反力の発生機構について考慮する必要がある．すなわち，打撃によって供試体が運動すれば，打撃エネルギーが供試体の運動エネルギーに吸収され式(2)の関係が成立しない．このような影響は，シュミットハンマーの場合に見られることが知られている．



写真 - 1 実験状況

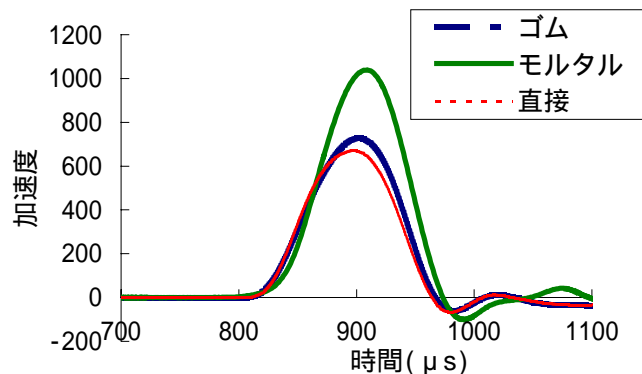


図 - 2 測定波形

この実験では、同一配合のコンクリート(W/C=50%、スランプ 80mm)を用いて6個のテストピースを製作し、テストピースの設置方法を3条件(防振ゴムの上に置く、コンクリート床に直接置く、モルタルでコンクリート床に接合する)とし、機械インピーダンスに変化があるかどうかを検討した。実験の状況を写真-1に示す。打撃には、半径10mmの球面を持つ質量30gのハンマーに加速度計PCB 350B03を取り付けたハウスメイドのインパルスハンマーを用いた。弾性波速度の測定には、加速度計PCB352C66をテストピースの測定面に押しつけて測定した振動応答から算出した。測定は、テストピースの中心から25mmの位置を打撃し、また振動応答は打撃点から50mm離れた点で行った。なお、測定装置は、2ch同時測定、サンプリング時間1 μ s、サンプリングデータ数8000個である。ハンマーで測定した加速度波形を図-2に示す。打撃の強さは、試行ごとに異なるが、波形の継続時間は、ほぼ同様となっている。

表-1に実験結果を示す。なお、実験後、テストピースの1軸圧縮試験を行ったが、その結果を表-1に併記している。各要因の分散は、残差3,401,057に対し、(A)テストピース間2,597,367、(B)支持条件間46,514であり、支持条件による測定値に違いはないことが分かった。また、テストピースの1軸圧縮強度に違いはあるが、分散分析では、テストピース間の有意差は、検出されなかった。

表 - 1 支持条件の影響

テストピース番号		1	2	3	4	5	6	
圧縮強度(N/mm ²)		39.1	36.8	40.2	39.3	40.7	37.6	
イン ピー ダン ス	設置 方法	ゴム	24547	24101	26778	25986	24852	26301
		直接	24698	24693	24486	23961	25317	29736
		モルタル	23637	29426	20524	32300	22811	26253
	平均	24294	26073	23929	27416	24327	27430	

3.2 機械インピーダンスによる圧縮強度の推定

表-2に示す強度の異なる8種のコンクリートを用い、機械インピーダンスによる圧縮強度推定実験を行った。コンクリートは、いずれもスランプ150mm、最大骨材25mm、テストピースの寸法は、150mm \times 300mmである。実験では、設置方法を防振ゴム上に置く方法と直接コンクリート上に置く方法を用いた。測定項目は、表-2に示すとおり、弾性波速度および式(3)による機械インピーダンス指標値であり、実験後1軸圧縮試験を行っている。弾性波速度は、テストピース(高さL)の軸方向に多重反射する弾性波の固有周波数(f_0)を測定し、 $v=2f_0L$ として算出した。

表 - 2 強度の異なるテストピースによる実験結果

供試体番号		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	
設計強度(N/mm ²)		15	18	21	24	27	30	33	36	
W/C		65.0	58.0	53.2	48.5	45.2	41.8	38.9	37.0	
圧縮強度(N/mm ²)		16.7	22.0	23.2	29.0	30.7	30.9	30.9	32.5	
弾性波速度(m/s)		3447	3635	3680	3750	3825	3825	3710	3780	
イン ピー ダン ス	設置 方法	ゴム	22155	23879	24231	24916	25117	27220	26626	26531
		直接	23627	22148	24178	26142	25942	25335	24769	24074
	平均	22891	23014	24204	25529	25530	26278	25697	25303	

実験結果を図 - 3 および図 - 4 に示す。図 - 3 は、機械インピーダンス指標値と圧縮強度の関係、また図 - 4 は、弾性波速度と圧縮強度の関係を示している。図に示すように、いずれも圧縮強度と相関関係はあるが、弾性波速度の方が高い相関係数となっている。

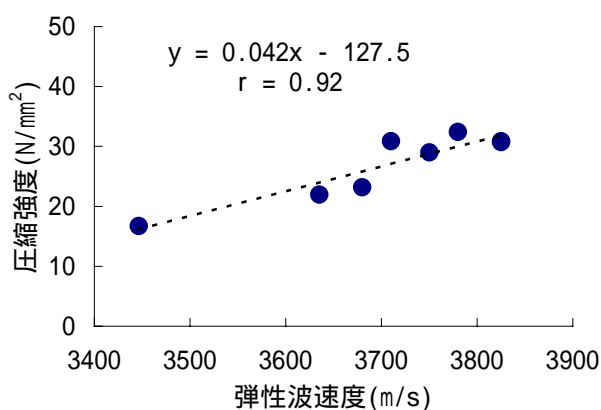
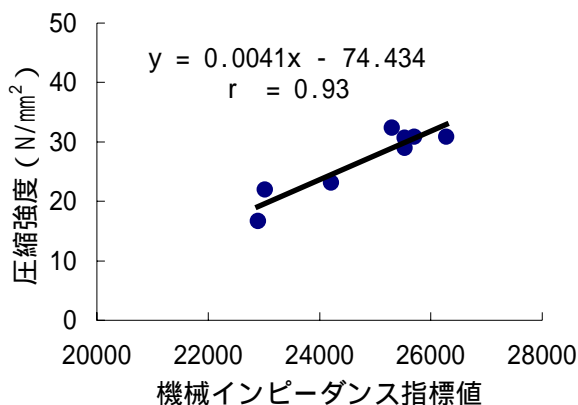


図 - 3 機械インピーダンスと圧縮強度

図 - 4 弾性波速度と圧縮強度

5. まとめ

テストピースの設置方法による機械インピーダンス指標値の測定結果に違いは認められなかった。このことは、本測定方法を適用する場合にコンクリート供試体の支持条件について厳密な管理が必要でないことを意味している。ハンマーの質量が 150g の場合についても同様に支持条件による測定値の違いは見られなかった。

機械インピーダンスによる圧縮強度推定では、ブロック状の供試体を対象として場合と比較して、テストピースを用いた場合の方が高い相関係数を示した。しかしながら、図 - 2 に示すように圧縮強度が 30N/mm² を越える供試体では、機械インピーダンス指標値と圧縮強度の関係が乖離する傾向が見られる。弾性波速度と圧縮強度の相関は、機械インピーダンスの場合よりも高いが、これは測定手法の違いによるものと考えられる。すなわち、弾性波速度は、テストピースの軸方向に伝搬する波動の多重反射周波数から求めており、テストピース全体の平均的な弾性率を反映した値であるのに対し、機械インピーダンス指標値は、テストピースの測定表面近傍の弾性率を反映している値であるためと考えられる。

参考文献

- 1) 古賀裕久ほか：反発度法による新設構造物検査に関する検討，日本道路協会第 24 回日本道路会議一般論文集 (A)，pp.342-343，2001.10
- 2) Stephan P. Pessiki, Nicolas J. Carino: Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact Echo Method, ACI Materials Journal, 1988 September-October, pp.398-399,1988
- 3) 岩野聡史，境友昭，極檀邦夫，森濱和正：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究 その 2 3 弾性波法によるコンクリート強度の推定，日本非破壊検査協会平成 13 年度秋季大会講演概要集，pp.111-114，2001.10
- 4) 境友昭，極檀邦夫，久保元樹，久保元：接触抵抗によるコンクリート強度の推定,日本非破壊検査協会シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集，pp.57-64, 2003.7