

ハンマ打撃波形によるコンクリートの圧縮強度推定

The estimation of the strength of the concrete
by analyzing the wave form of the hammer blow

金田重夫 久保 元 日東建設株式会社
Shigeo Kaneda Hajime Kubo Nitto construction
境 友昭 アプライドリサーチ(株)
Tomoaki Sakai Applied Research
極 檀 邦夫 東海大学 土木工学科
Kunio Gokudan Dept. of Civil Eng., Tokai University

概 要

ハンマがコンクリートに衝突した時の反発係数を利用して強度推定を行う方法に、シュミットハンマ法がある。しかし、シュミットハンマでは、表面に劣化が生じている場合などではコンクリート強度を過小評価する傾向があるとされている。本研究は、ハンマ打撃を用いて、表面劣化の影響を受けにくいコンクリートの強度推定法に関し、その測定方法および適用性について報告する。

キーワード：コンクリート，強度，非破壊検査，打撃，接触抵抗

1. はじめに

シュミットハンマ法は、ハンマ打撃時の反発係数を測定しコンクリート強度を推定する方法である。シュミットハンマ法は、非破壊という枠組みの中では比較的精度の高い強度推定方法として評価されているが、コンクリートの表面状況の影響を受けるといった問題点などが指摘されていた[1]。これに対し、最近の技術として、コンクリート中の縦弾性波の伝搬速度を測定し、コンクリートの強度を推定する方法が研究されている[2][3]。本研究では、ハンマ打撃時の打撃力波形に着目し、コンクリート強度の推定方法について、測定方法および供試体を用いた試験結果について報告する。

2. 測定原理に関する考察

2.1 接触抵抗

コンクリート構造物を半無限弾性体とみなし得ることを前提とし、質量 m のハンマが速度 v でコンクリート表面に衝突する現象について考える。ハンマの運動エネルギーは衝突によってコンクリート表面のポテンシャルエネルギーに変換される。この過程で、ハンマは速度を減じ、ハンマの運動エネルギーの全てがコンクリート表面でのポテンシャルエネルギーに変換された段階でハンマは停止することになる。仮に、コンクリート表面の変位量とその変位 (x) を生じさせるために必要な力 (F) が比例関係にあるとすれば $F = kx$ の関係が成立する。ここで k は、いわゆるバネ係数である。この時、エネルギーの平衡から、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx^2 \quad (1)$$

が成立する。式(1)の両辺の平方根をとり、式をまとめると、

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

が得られる． F_{\max} は，発生した力の最大値を意味する．式(2)から明らかなように，ハンマの質量が一定であれば，バネ係数は，打撃によって発生した力の最大値をハンマの初速度を除いた値(この値を「接触抵抗」と呼ぶ)の2乗に比例することになる．バネ係数は，コンクリートの弾性的性質を具現化するものであり，コンクリートの弾性係数と対応する関係にある．また，縦弾性波速度と縦弾性係数 E の間には，材料の密度を ρ ，ポアソン比を ν として，

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

が成立することが知られている．式(2)，(3)の比較から明らかなように，接触抵抗と弾性波速度は，比例関係にあることがわかる．弾性波速度とコンクリートの1軸圧縮強度の間に物理的な関係はないものの，弾性波速度がコンクリートの1軸圧縮強度の指標となるとすれば[2][3]，同様に接触抵抗もその指標となり得ることが示される．

ついで，式(2)に現れる諸量の測定方法について検討する．ハンマが剛体とみなし得る場合，慣性の法則から明らかなように，ハンマに加わる動的な力はこれに作用する加速度によって測定することが可能である．つまり，ハンマに加速度計を取り付け，測定された最大加速度とハンマ質量の積を求めることによって得られる．また，ハンマ打撃時の初速度は，同様に加速度を時間積分することによって求められる．これは，コンクリート表面を打撃したハンマに作用する加速度の実際は，ハンマの速度を減じようとする方向に作用する減速加速度であり，時刻0から無限大までの時間積分値は，初速度と等しくなくてはならないからである．

2.2 測定面の劣化への対応

コンクリート表面が劣化している場合，ハンマ打撃の初期段階ではコンクリート表面劣化部分の塑性変形が進行する．この間，ハンマの運動量は消費されることになる．すなわち，ハンマの初期速度が同一であったとしても，コンクリートの弾性変形量は小さくなるわけであるから，結果的にハンマ打撃によって発生する打撃力は相対的に小さくなる．すなわち，表面劣化コンクリートの接触抵抗は，劣化の影響を強く受けた値となるものと考えられる．この点，シュミットハンマの欠点と同様となる．

この問題を解決するために，表面に塑性領域を持つコンクリートを打撃する場合のハンマの挙動について再度考察する．ハンマの運動過程は，(a)コンクリート表面に接触し劣化部分に塑性変形を与える過程，(b)コンクリート表面に弾性変形を与える過程，および(c)コンクリート表面の弾性変形エネルギーの開放によってハンマが押し戻される過程，によって構成される．(a)から(b)へは，表面が塑性変形によって圧縮されて強度を増し，健全部と力の釣り合うことによって遷移すると考えられる．(b)から(c)へは，ハンマの運動エネルギーの全てがコンクリートの弾性変形エネルギーに転換された段階で移行する．この時，ハンマには最大打撃力が発生し，また運動速度は0となる．コンクリート表面に発生した弾性変形エネルギーの1部は，波動となってコンクリート中に伝搬して逸散減衰するが，コンクリート表面の弾性変形は回復し，変形前の形状となる．(c)は，この過程を意味する．以上の考察から，弾性変形回復過程(c)には，コンクリート表面の劣化の影響が反映されていないことがわかる．よって式(2)で表現される接触抵抗値について，打撃力が最大となる以前と以降に分けて次のような派生定義を設ける．

$$Z_A = \frac{F_{\max}}{2V_A} \quad (4)$$

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{2V_R} \quad (5)$$

ここで、 V_A は、打撃力が最大となるまでの時間での速度(加速度積分値)、 V_R は、打撃力が最大値に達した後の時間での速度である。 Z_A は、変形過程での接触抵抗であるから、コンクリート表面に劣化がある場合の指標値となり、 Z_R は、変形回復過程での接触抵抗であるから、コンクリートの弾性変形に関する指標値となり得る。

3. 実験の概要

3.1 使用したコンクリート供試体

設計強度の異なる8種のコンクリート供試体を用いた。設計強度、圧縮試験結果および縦弾性波速度の測定値を表-1に示す。

表 - 1 使用したコンクリートの圧縮強度と弾性波速度

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)	14.4	21.1	21.9	24.4	24.0	29.4	27.0	28.0
弾性波速度(m/s)	3700	3820	3870	3920	3890	3930	3910	3930

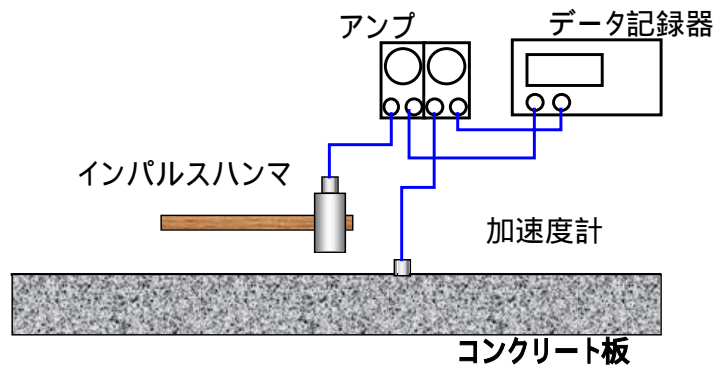


図 - 1 測定システム

3.2 測定装置

測定システムの概要を図-1に示す。打撃は、インパルスハンマによって行った。インパルスハンマでは打撃力波形を直接計測する。

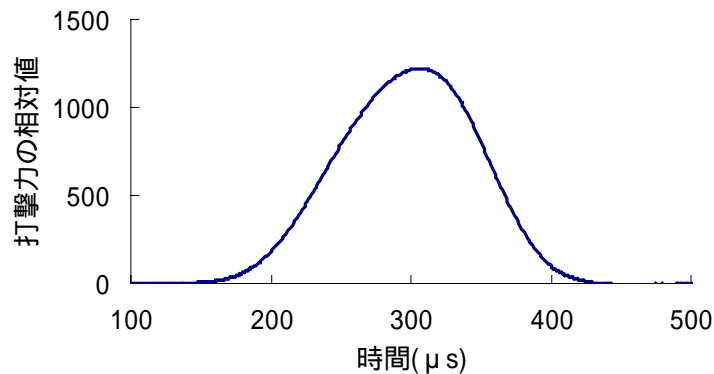


図 - 2 ハンマで測定した力波形

3.3 測定波形と処理方法

インパルスハンマでの測定波形例を図 - 2 に示す。図中の打撃力値は、A/D 変換の相対値となっており、力の指標値に過ぎない。波形は、上に凸でほぼ対称な波形であるが、やや打撃力がピークとなった以降の時間が短い。

4. 実験結果

図 - 3 に強度指標 Z_R (補正接触抵抗) と 1 軸圧縮強度との関係、また図 - 4 には、弾性波速度と圧縮強度の関係を示す。両者の図の比較から、弾性波速度の方が圧縮強度との相関が高いことが分かる。なお、図 - 3 では、表 - 1 に示す 8 種以外に測定したデータもまとめて示している。

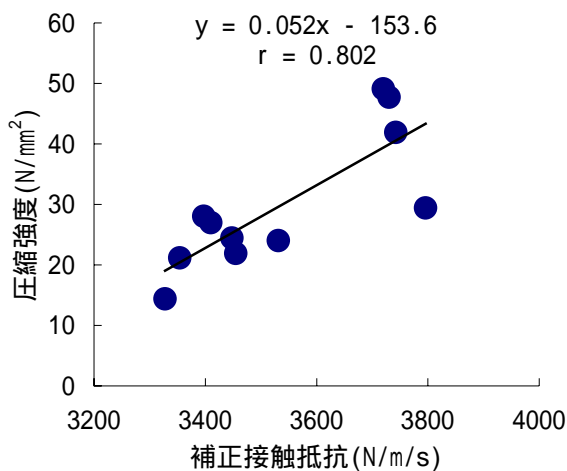


図 - 3 補正接触抵抗と圧縮強度

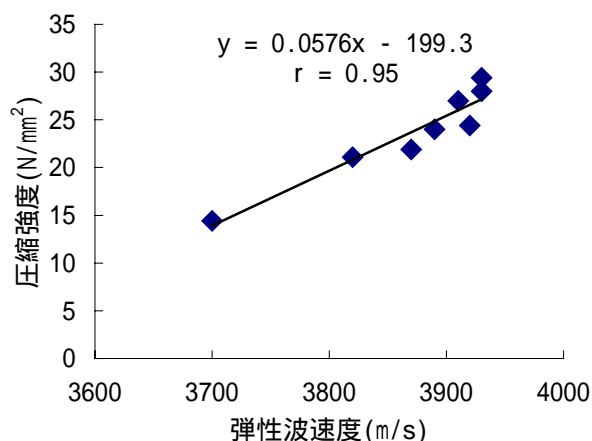


図-4 弾性波速度と圧縮強度

5. まとめ

補正接触抵抗と圧縮強度の間に正の相関があることは図 - 3 に示すとおり明らかである。しかし、弾性波速度との関係と比較すると、相対的に相関の度合いが低い。これは、接触抵抗法が表面近傍の特性を測定する方法であるのに対して、弾性波測定法ではコンクリート板の厚さ方向の平均的な特性を把握していることに関係しているものと思われる。また、今回の試験では比較的接触面積の小さいインパルスハンマを使用しており、接触抵抗の測定値がコンクリート表面の局所的状況に左右された値となったこともその原因と思われる。図には示していないが、 Z_A と Z_R の比は、フレッシュなコンクリートにも関わらず $0.84 (Z_A = 0.84 Z_R)$ となっている。これは、インパルスハンマの接触面積が小さいため、コンクリート表面が塑性変形を受けたためと考えられる。

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