

ハンマ打撃によるコンクリートの圧縮強度推定

ESTIMATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF STRUCTURAL CONCRETE BY MEANS OF HAMMER BLOW

日東建設 (株) 久保 元樹
日東建設 (株) 久保 元
日東建設 (株) 金田 重夫
アプライドリサーチ (株) 境 友昭

著者らは、ハンマ打撃によってコンクリート表面の機械インピーダンスを計測し、圧縮強度を推定する方法を提案している。圧縮強度は、最大許容ひずみ量が一定であれば弾性係数とひずみ量の積として与えられ、機械インピーダンスは、弾性係数の指標値となる。つまり、ハンマ打撃による圧縮強度推定が可能となる。本論は、その理論的背景、特に表面が経年劣化したコンクリートの強度推定に関する本法の適用性について論じる。

キーワード：コンクリート、圧縮強度、ハンマ打撃、機械インピーダンス

1. まえがき

既設コンクリート構造物の維持管理、長寿命化を考慮すると、現況でのコンクリートの状態をできるだけ正確、高速、かつ安価に把握できる非破壊的調査手法が望まれる。今日、非破壊的な手段によって構造体コンクリートの圧縮強度を推定する方法にリバウンドハンマー法がある。リバウンドハンマーは、その構造が JIS 規格¹⁾にも制定されているように、国内でも広く普及している。しかしながら、コンクリートの圧縮強度推定精度については、様々な補正方法が用いられてきたにもかかわらず、多くの疑問点²⁾が指摘されている。特に、表面が劣化したコンクリートの場合には、劣化部分を完全に取り去った後でなければ強度推定試験が実施出来ない、という測定原理上の制限がある。既設コンクリート構造物の中でも特に水路コンクリートは一般的に表面劣化があり、リバウンドハンマー等の既存技術での残存強度推定に困難があると思われる。これに対し、著者らが開発した機械インピーダンス法は、リバウンド側での機械インピーダンスからコンクリート強度の推定を行う、という手法を用いており、表面が劣化した既設コンクリート構造物に対しても強度推定手法としての適用性が高いと考える。本論文では、測定手法の原理に対する考察および実際の既設水路コンクリート構造物を対象として、適用性試験の結果を示し、機械インピーダンス法を表面劣化コンクリート構造物に適用する場合の問題点およびその解決方法について論じる。

2. 打撃式コンクリート強度試験方法

2.1 リバウンドハンマーと機械インピーダンス法

リバウンドハンマーでは、反発度を測定する。反発度は、バネで駆動されたハンマのストロークと、反発した距離の比率を示すものとしている。リバウンドハンマーの測定原理では、エネルギーの釣り合いを前提とし、

$$E_0 = E_p + E_R \quad (1)$$

が成立するとしている。ここで、 E_0, E_p, E_R は、それぞれハンマの運動エネルギー、コンクリート表面での塑性変形によるエネルギー消費量および反発に消費される弾性変形エネルギーである。式(1)が

成立すれば、初期のバネ変位量を x_0 、反発による戻り量を x_R とすれば、

$$R = \left(\frac{x_R}{x_0} \right) = \sqrt{1 - \frac{E_p}{E_0}} \quad (2)$$

であるから、塑性変形に要したエネルギーを求めることができる。リバウンドハンマーは、塑性変形エネルギーから、コンクリートのブリネル硬度を算出し、圧縮強度を推定するという手法を用いている。つまり、表面部分の塑性変形を元に、コンクリートの強度を推定しようとする方法であるから、コンクリート表面の状態が健全でないと、コンクリートの強度推定に結びつかない、という論理である。このため、基本的にリバウンドハンマーは表面が劣化状態にある既設コンクリート構造物の強度測定には使用出来ない、という原理的な限界があることになる。

これに対し、機械インピーダンス法は、コンクリート表面をハンマーで打撃した時の機械インピーダンス値をハンマーの進行過程(アクティブ側)と反発側(リアクティブ側)の両方で算出するという手法を採っており、強度推定では、主としてリアクティブ側の機械インピーダンス値を使用する、という特徴がある。

3. 既設水路コンクリート構造物での実験

3.1 構造物の概要と測定方法

試験対象は、供用後約 40 年経過した寒冷地内陸環境にある農業用水路である。農業用水路の状況を写真 1、測定位置を写真 2 に示す。通常の水位は、写真 1 で水路の色が濃くなっている辺り(写真 2 では、B、C 位置)であるが、試験は水位が下がった状態で実施している。なお、コンクリートの配合は、以下の通りである(当時の資料より)。

設計基準強度：300kgf/cm² スランプ：8.0cm 空気量：5.0%
最大 W/C：55% 最少セメント量：280kg/m³ セメント種類：普通ポルトランドセメント



写真1 試験対象とした水路(美幌)

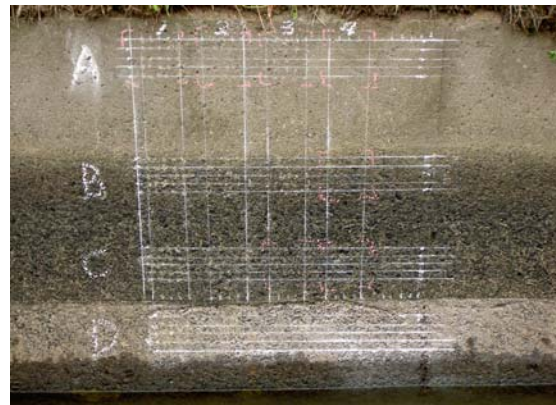


写真2 測定位置

測定は、気中部(写真 2、A 部)、気水境界部(写真 2、B、C 部)、水中部(写真 2、D 部)で各 1 箇所、リバウンドハンマー、機械インピーダンス法の両手法を用いて測定を実施し、両者の比較を行った。

3.2 測定結果

3.2.1 リバウンドハンマー

リバウンドハンマーの測定結果を図 1 及び図 2 に示す。図 1 は、気水境界での研磨深さと反発度の関係を示しており、約 2mm 研磨した段階で最大の反発度となっている。これから、この水路コンクリートの劣化(塑性化)深さは 2mm 程度と推定される。

図 2 はほぼ同一点を連続的に打撃した場合の打撃回数とリバウンドハンマーの反発度の関係である。この試験では、同一箇所を連続して打撃することで脆弱部を意図的に押し潰すことでフレッシュな面

を打撃した場合と同じ反発度が得られるか検証することも目的としている。反発度にばらつきはあるが、打撃回数とともに反発度は上昇し、一定値に収束する傾向を示す。収束に至る打撃回数は、今回の試験ではおおよそ 7~10 回である。1 回目の測定値は、収束値の約 1/2 であり、リバウンドハンマーの場合、表面研磨処理を回避して妥当な反発度を求めることは難しいことがわかる。

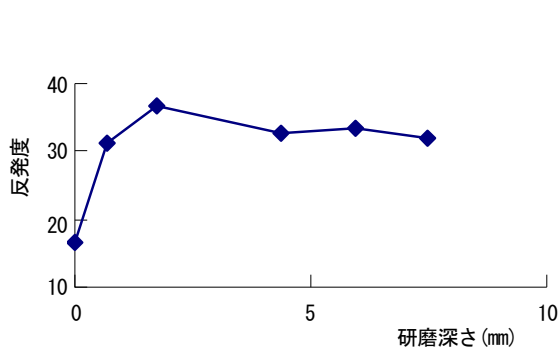


図1 研磨深さと反発度

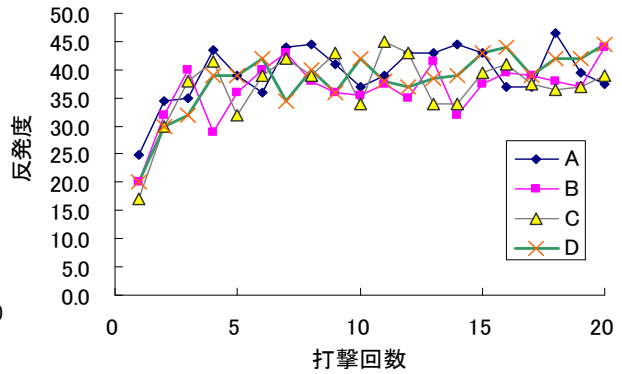


図2 打撃回数と反発度

3.2.2 機械インピーダンス法

図3は、気水境界部において機械インピーダンス法を用いて測定した反発係数の打撃回数変化を示したものである。機械インピーダンス法では、ハンマーがコンクリート面に衝突する時の速度と反発速度を計測しており、図3に示す反発係数は、定義に従った値である。図からわかるように、同一点をほぼ10回以上打撃すると、反発係数は、ほぼ1となっており、傾向はリバウンドハンマーでの試験結果と一致する。上記結果からリバウンドハンマーおよび機械インピーダンス法共に、表面が劣化したコンクリートであっても、連続打撃によって表面の脆弱部分を除去すれば、フレッシュな面に相当する反発係数(度)が得られることがわかった。しかし、リバウンドハンマーでは、図2に示されるとおりバラツキが大きく、変動係数は、12~22%に達する。

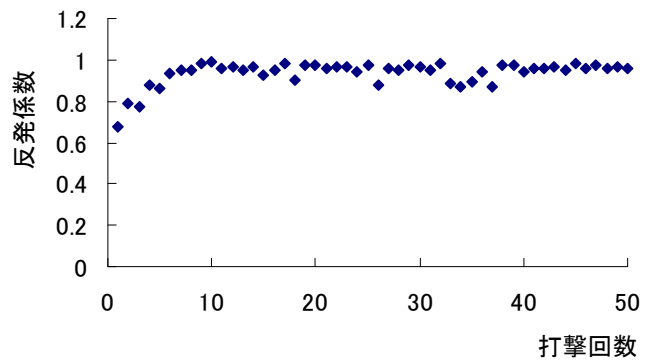


図3 打撃回数と反発係数

図4は、アクティブ側(ハンマーがコンクリート表面を押し、表面変位が進行している状態)と反発側(コンクリート表面の弾性変形が回復過程にあり、ハンマーが押し戻されている状態)での機械インピーダンス値の変化を示したものである。

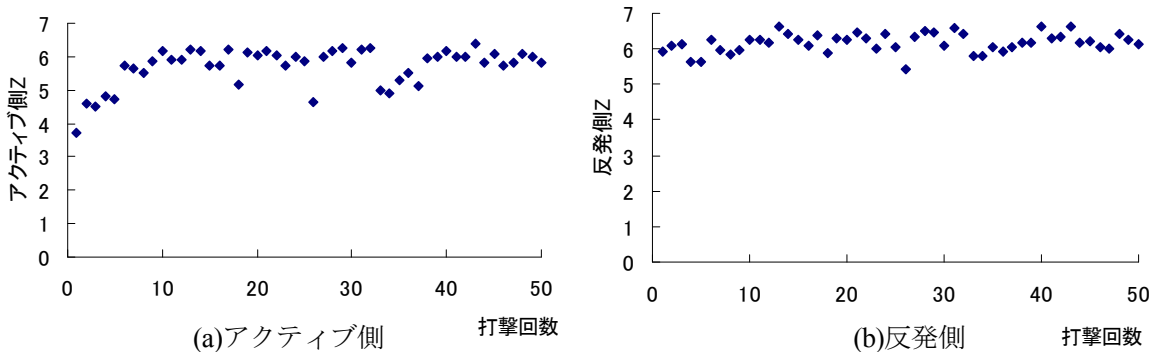


図4 打撃回数と機械インピーダンス値の変化

アクティブ側では、打撃回数とともに機械インピーダンス値が増加する傾向を示すが、反発側では、打撃回数によらずほぼ一定の値となっている。つまり、表面が劣化(塑性化)している場合であっても、反発側の機械インピーダンス値への影響は小さいことがわかる。

3.2.3 信号処理における周波数範囲の検討

リバウンドハンマーと異なり電子計測を行う機械インピーダンス法では、測定波形を元に指標値を算出する過程を持っており、この場合、解析対象とする周波数範囲の設定によって値が異なる。周波数範囲を制限する方法として、測定した波形をフィルターを通して周波数を制限する方法が一般的である。周波数範囲設定を検討するため、測定波形とフィルター通過後の波形を比較し、その残差成分のパワー及び残差の回帰写像での相関係数で評価する方法を用いた。残差は、測定信号を x 、フィルター通過後の信号を \hat{x} とすると、

$$\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3)$$

である。図5に、低域通過フィルター(10kHz)を通した測定波形と残差、また図6には、測定波形のパワースペクトルを示している。パワースペクトル解析から得られる測定波形の周波数範囲は、ほぼ6kHz以下である。すなわち、▼で示す周波数(25kHz付近)は、ハンマの固有振動数、△以上の周波数帯域成分は、アクティブ側に発生している雑音成分であり、これはコンクリート表面の「粗さ」に起因していると考えられる。なお、測定に使用したハンマの質量は190gである。

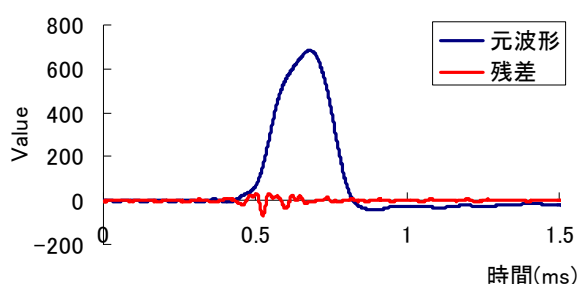


図5 フィルター通過後の波形と残差

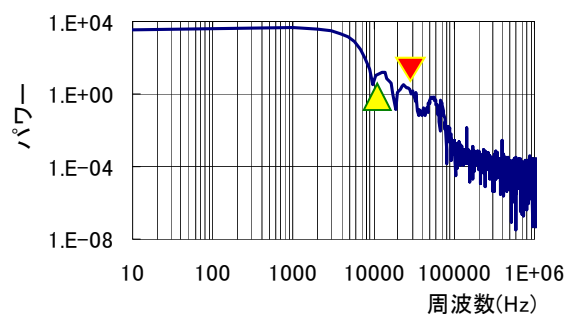


図6 測定波形のパワースペクトル

図7は、低域通過フィルターのカットオフ周波数と残差パワー、また図8は、回帰写像での相関係数について図示したものである。回帰写像は、図9に示すように、時刻 t での残差値と時刻 $t - \Delta t$ での値を平面座標上に展開したものである。この図では、時間間隔を $50\mu\text{s}$ としている。回帰写像での相関係数を求めることによって、残差に特定の周波数成分が含まれているかどうかを判別する。

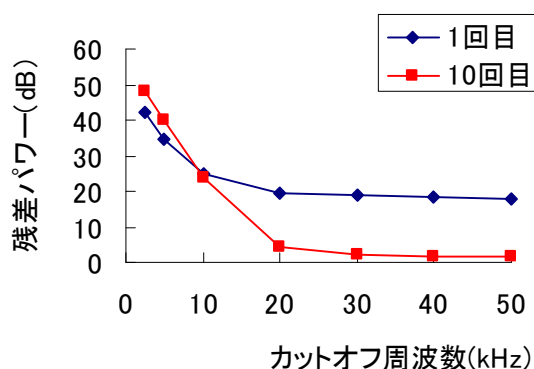


図7 残差パワー

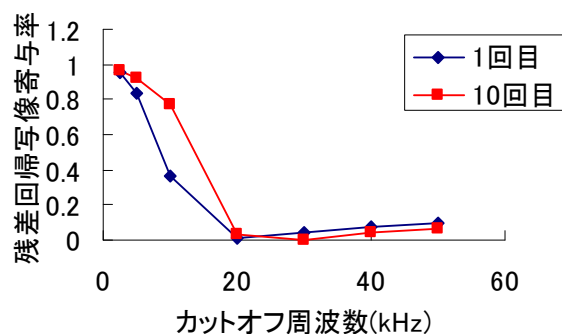


図8 回帰写像での相関係数

図7, 8とも打撃1回目と10回目を比較して示しているが, 図7から, カットオフ周波数を20kHz以下とした場合, 残差パワーが増加する傾向となることがわかる. これは, 実際に測定された信号に20kHz程度までの情報が含まれており, 残差の中に信号成分がリークし, 残差パワーを押し上げたためと考えられる. つまり, カットオフ周波数は, 少なくとも20kHz以上にしないと, 機械インピーダンス測定に必要な情報を失う可能性があることを示している. 1回目と10回目の打撃では, 10回打撃の場合の方が, 残差パワーが小さくなる傾向を示している. これは, 図4(a)に示されるように, 打撃回数が10回程度まではアクティブ側の機械インピーダンス値が安定しないことと同じ要因によるものと考えて良い. すなわち, 打撃面に「粗さ」が残り, これによって高い周波数成分のノイズが発生しており, その周波数帯域は10kHz~20kHzの範囲にあることがわかる. これは, 図6のパワースペクトルにも示されている. 残差の回帰画像解析では, カットオフ周波数を20kHz以上とすることによって, 寄与率が大きく低減している. つまり, 20kHz以上の周波数帯域には, 機械インピーダンスに関する情報成分が殆ど含まれてないことがわかる. 1回目と10回目の打撃波形を比較すると, 1回目の方には, カットオフ周波数10kHzでの寄与率低下が見られ, この図からも1回目の打撃信号には, 20kHz以下の周波数成分が含まれていることが示される.

より局所的な周波数成分について検討するため, 図10に示すように測定した打撃力波形から振幅が最大値の5%~55%に変化するアクティブ側, また55%~5%に変化する反発側の時間を求め,

$$f = \frac{4}{T} \quad (4)$$

として, 周波数を求め, 打撃回数とこの周波数の関係を分析した. 図11は, 水路気中部での周波数変化である. 反発側の周波数は, 打撃最初から安定しており, ほぼ6kHz前後である. これに対し, アクティブ側の周波数は, 打撃当初は約2kHz, 打撃回数が10回以上になるとほぼ安定し, 約5kHz前後となる. このような周波数推定方法は, 必ずしも, 高精度での周波数同定方法とは言えないが, 周波数の変遷を把握する方法としては有効である. なお, 反発側の周波数が6kHz前後となることは, パワースペクトル分析結果と一致した結果である. 図11は, 気中域での結果であり, この領域ではコンクリート表面に劣化があっても, ほぼ10回の打撃でフレッシュな面に相当する強度が発揮されているものと考えて良い. このように表面に多少の劣化は見られた

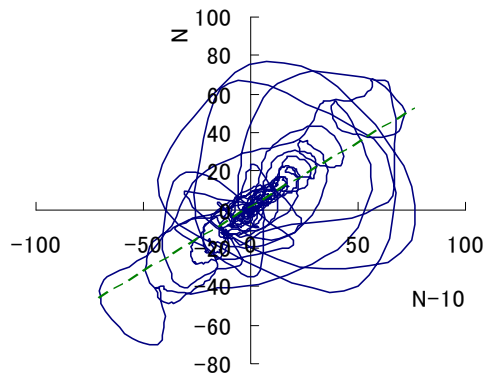


図9 残差の回帰画像

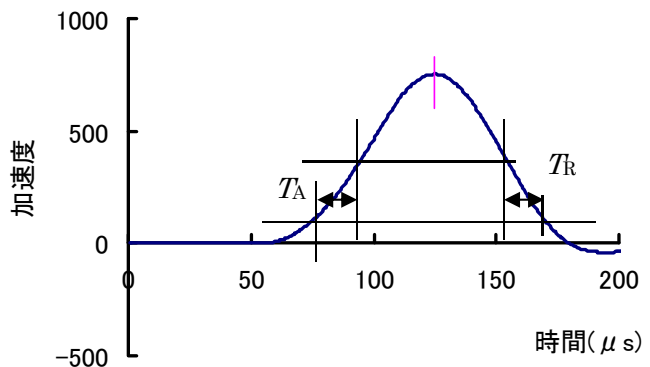


図10 打撃力波形と周波数の計算方法

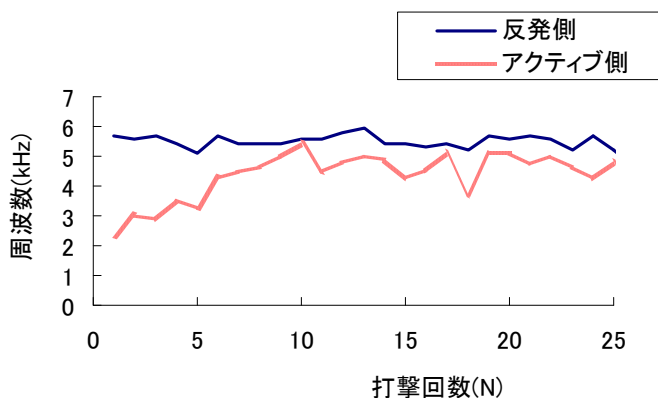


図11 打撃周波数の変化(気中域, 190gハンマ)

としても、劣化が深部まで進行していない領域では、反発側の機械インピーダンスを使用する限りにおいては、最初の打撃であっても、コンクリート内部と同等の値を示していることがわかる。しかし、図12の気水境界、図13の水中域では、反発側でも周波数変動があり、実際の強度推定では、複数回打撃してその平均値を得るという手段が必要である。図14は、打撃回数と平均値の信頼区間(平均値で基準化)の関係を水中域データから求めたものであるが、打撃回数が20回以上になると、平均値の変動範囲は5%以下となることがわかる。

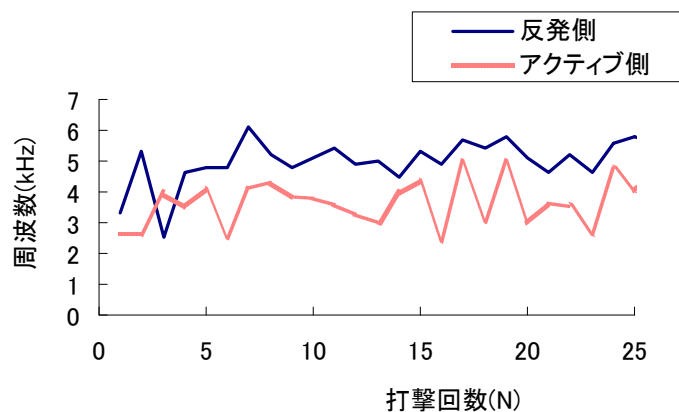


図12 打撃周波数の変化(気水境界)

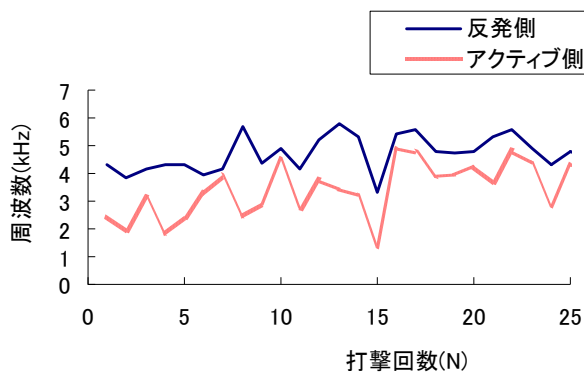


図13 打撃周波数の変化(水中域)

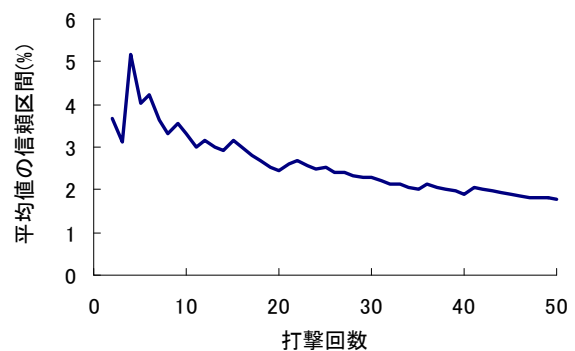


図14 打撃回数と平均値の信頼区間(水中域)

4. まとめ

表面劣化が考えられる実コンクリート構造物の残存強度推定に、リバウンドハンマー法および機械インピーダンス法を適用した結果について報告した。測定原理から明らかとなっており、表面が劣化したコンクリート構造物に対し、表面を研磨しない状態でリバウンドハンマー法を適用すると、測定値のばらつきが大きく、また強度推定値が低くなることがわかった。機械インピーダンス法の場合、反発側の機械インピーダンス値を採用しているため、表面劣化の影響は、原理的には受けないが、実際には気水境界部や水中部で測定値の変動が存在し、少なくとも1回打撃のみでの残存強度推定が難しいことが明らかとなった。しかし、t分布を用いた平均値の信頼区間推定を用いると、約20回測定し、その平均値を得れば、5%以内の誤差で機械インピーダンス値の測定が可能であることがわかった。

測定波形に含まれる周波数を分析した結果、190gハンマーで打撃した場合の主たる信号領域は、10kHz以下であり、劣化コンクリート表面の「粗さ」に起因するノイズは10kHz～20kHzに発生することがわかった。また、20kHzを越える周波数領域には、機械インピーダンス値の反映される情報は無いため、実際の測定装置を設計する場合、周波数上限を20kHz前後とすることが望ましいことがわかった。

参考文献

- 1) JIS A 1155 2003: コンクリートの反発度の測定方法, 平成15年5月28日制定, 日本規格協会発行
- 2) 谷口秀明: テストハンマーによる構造体コンクリートの強度推定法に関する研究, 三井住友建設技術研究所報告第5号, pp.39-50, 2007