

# 表面劣化コンクリートの機械インピーダンスと弾性波速度による強度推定

Estimation of compressive strength of surface deterioration concrete  
by mechanical impedance and elastic wave velocity

久保 元樹      久保 元      中野 泰宏      金田 重夫  
GENKI KUBO    HAJIME KUBO    YASUHIRO NAKANO    SIGEO KANEDA

日東建設株式会社

Nitto Construction Co. Ltd.

極壇 邦夫 iTECS 技術協会

iTECS Association

## 概 要

表面劣化コンクリートは、農業用水路、漁港施設など水作用を受ける場所では多く見られる。インパルスハンマの打撃力波形は、劣化の塑性変形の影響を受けるが、反作用力、波形前後の接触時間、機械インピーダンスの時間的変化を分析すると、リバウンドハンマよりも強度解析の情報は多い。劣化コンクリートは新設コンクリートと異なり表面の影響を強く受ける。弾性波速度は、弾性係数と密度の関数であるが、表面劣化は表面の弾性係数の不安定、測定波形の歪みなどに影響する。表面劣化コンクリートを対象にして、打撃応答による機械インピーダンスと弾性波速度を比較検討した。

キーワード：機械インピーダンス、弾性波速度、表面劣化、打撃力波形

## 1. まえがき

コンクリート構造物の現状を知る上で、コンクリートの圧縮強度は重要なパラメータの1つと考えられる。非破壊で圧縮強度を推定する手段としては、リバウンドハンマ法や機械インピーダンス法がある。また、国交省では新設構造物を対象として縦弾性波速度による強度推定手法を導入している。しかしながら、非破壊検査技術は、コンクリートの表面を測定対象とするため、表面劣化が進行しているとその適用が難しいというのが実状である。通常、表面に凹凸が認められる場合には、研磨する必要があるが、この研磨作業は容易ではなく、研磨作業を実施せずに圧縮強度を推定する手法の確立が望まれている。機械インピーダンス法は、コンクリート表面をハンマで打撃し、コンクリート表面の機械インピーダンスと打撃力波形の歪み度を指標化することによって、コンクリート構造物の健全性を非破壊で診断する技術である。従来のリバウンドハンマ法と異なり、打撃力波形を記録できるため各方面からの分析が可能であり、表面劣化コンクリートへの適用が期待される。また、コンクリート表面を伝播する弾性波速度は、既往の研究から、ある程度内部を伝播することが知られており、直接表面を打撃して指標値を得る測定手法よりも、表面劣化の影響を受けづらと考えられる。本論では、この機械インピーダンス法と衝撃弾性波法を用いて、表面研磨を実施せずに強度推定を行い、両者の測定値を比較検討した。

## 2. 試験方法

実水路コンクリートを対象として試験を行った。試験対象は、建設後約40年を経過した農業用水路で、写真-1に示すように表面劣化の進行度合いが異なる側壁を試験対象とした。

機械インピーダンス法においては、(a)気中部と(b)水中部で同一点を連続 25 回打撃するという測定を実施した。これは、連続打撃により表面を潰すことで研磨と同等の効果を得るためである。衝撃弾性波法では、気中部と水中部の他に、中間の気水境界部の 3 箇所でも表面を伝播する弾性波速度の測定を実施した。なお、弾性波速度の測定は、写真-2 に示すように 2 つの受信センサーの距離を 200mm から 1000mm まで 100mm ずつ変化させながら測定した。弾性波速度の算出は、センサー間距離と波動の到達時間差をグラフにプロットした際の回帰直線の傾きを弾性波速度とした。試験終了後は、気中部と気水境界部、水中部からそれぞれ直径 100mm のコアを採取し、多重反射法によりコンクリート内部を伝播する弾性波速度の測定も実施した。コア供試体の弾性波速度の測定では、弾性波の入力に直径 10mm の鋼球を用いた。この鋼球の接触時間は約 70  $\mu$ s であり、一般的なコンクリートの持つ弾性波速度 4000m/s を乗じると入力波長は約 300mm となる。この入力波長はコアの直径に対し入力波長が長い棒の速度式  $V_p = \sqrt{E/\rho}$  が適用されている。

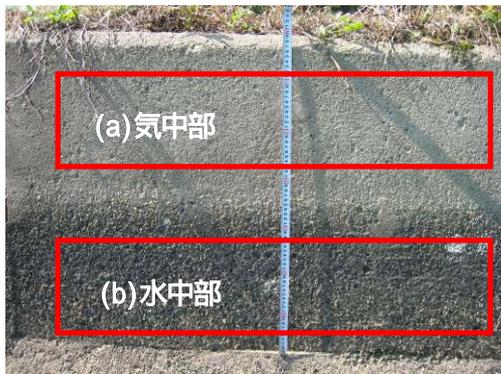


写真-1 試験箇所



写真-2 弾性波速度測定状況

### 3. 測定結果

#### 3.1 機械インピーダンス法の測定結果

図-1 にインパルスハンマでコンクリートを打撃した際に得られる打撃力波形を示す。打撃力波形のピークを  $F_{max}$ 、ピークより前半の接触時間を  $T_A$ 、後半の接触時間を  $T_R$ 、 $F_{max}$  をピークより後半の波形面積で除した値を強度指標値  $Z_R$  としている。

図-2、図-3 に打撃力  $F_{max}$  の時系列変化を、図-4、図-5 に前半接触時間  $T_A$  の時系列変化を示す。 $F_{max}$  について

は、気中部と水中部共に打撃回数を追うごとに増加傾向にあることが分かる。打撃力波形前半の接触時間  $T_A$  は減少傾向にあり、一定値に収束している。 $T_A$  が大きくなるのは、打撃力波形のピークより前半は、ハンマの作用領域であり、ハンマが表面劣化層を塑性変形させながら貫入する時間が含まれるためと考えられる。また、 $F_{max}$  は当然のことながら劣化層が存在すると小さくなる。つまり、図-2 から図-5 に示す測定結果は、連続打撃によって表面状態が徐々に改善されていくことを示している。なお、一定値に収束するまでの打撃回数は、気中部で数回、水中部で 10 回程度と言える。

図-6 と図-7 に後半接触時間  $T_R$  の時系列変化を、図-8 と図-9 に強度指標値の時系列変化を示す。強度指標値では、気中部と水中部で増加傾向が認められるが、後半の接触時間  $T_R$  は水中部においてはあまり明瞭な変化は見られなかった。 $T_R$  の変化が小さいのは、ピークより後半は、コンクリートの反作用領域であり、この時間帯では表面劣化の影響を受けづらいためと考えられる。表面劣化層の塑性変形は、ピークより前半

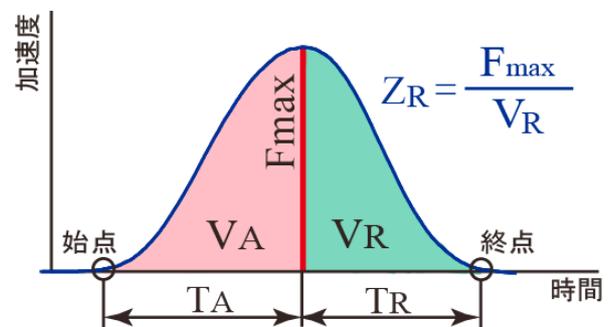


図-1 打撃力波形

の作用領域で終了しているからである。強度指標値においては、連続打撃によって表面状態が徐々に改善されるに伴い、増加したと考えられる。なお、25 回打撃時点での強度指標値は、気中部で 27.9MPa、水中部で 21.3MPa である。

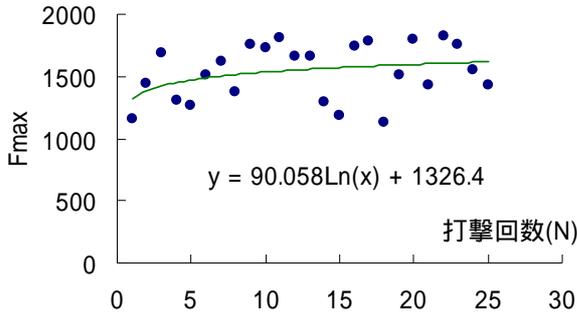


図-2 打撃力 Fmax の時系列変化(気中部)

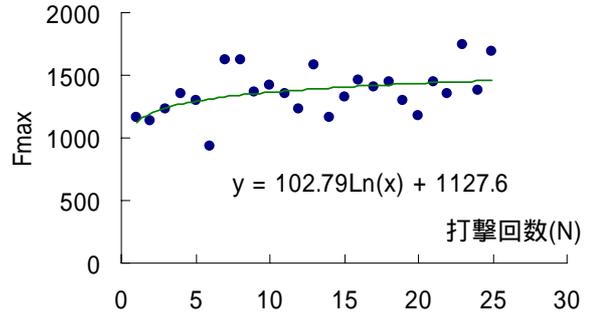


図-3 打撃力 Fmax の時系列変化(水中部)

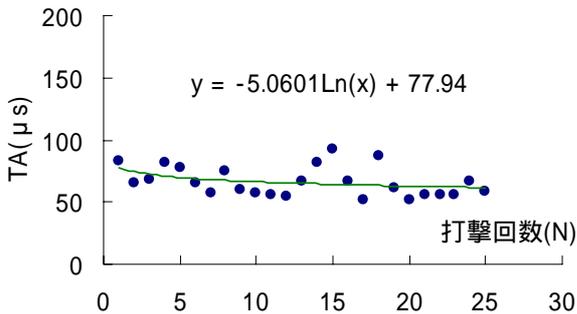


図-4 前半接触時間 TA の時系列変化(気中部)

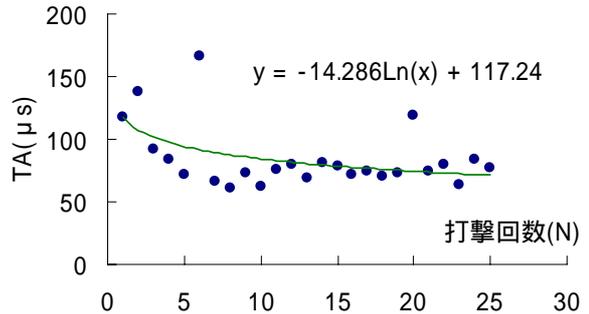


図-5 前半接触時間 TA の時系列変化(水中部)

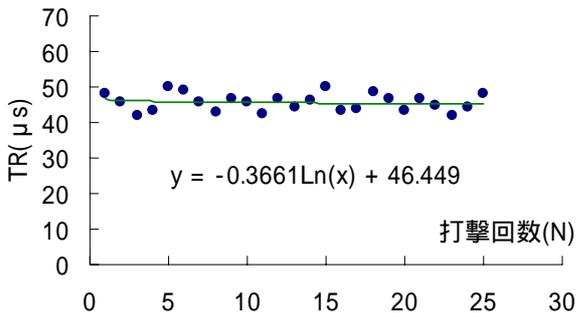


図-6 後半接触時間 TR の時系列変化(気中部)

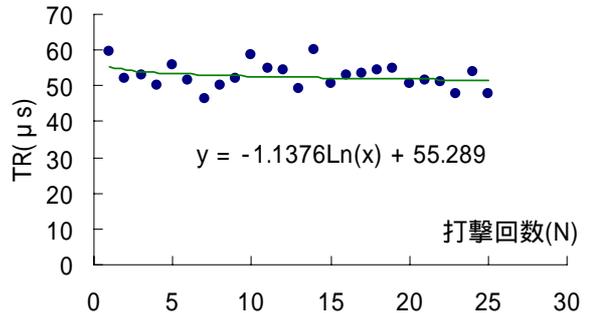


図-7 後半接触時間 TR の時系列変化(水中部)

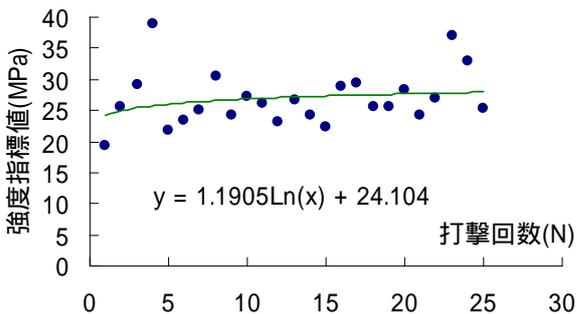


図-8 強度指標値の時系列変化(気中部)

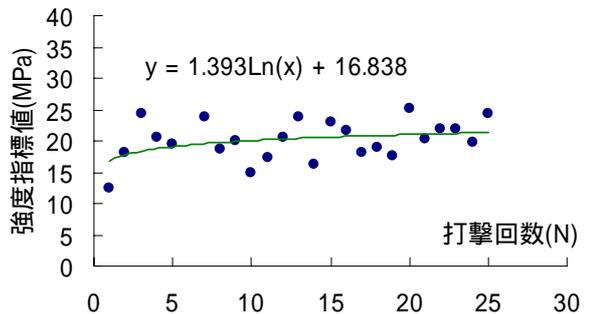


図-9 強度指標値の時系列変化(水中部)

図-10 および図-11 に気中部と水中部の 1 回目, 11 回目, 21 回目打撃時の打撃力波形を示しているが、気中部においては、初回打撃時に表面劣化の影響を受け、前半が間延びしているものの、後半では 11 回目および 21 回目打撃時の波形と大きな違いはない。水中部では、初回打撃時の波形は複数のピークを持っており、波形は大きく乱れており、強度推定には向かないことが分かるが、11 回目打撃時には既に左右対称の波形となっており、強度推定が可能な状態といえる。

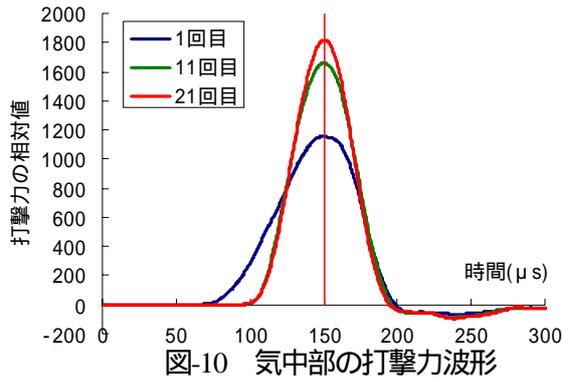


図-10 気中部の打撃力波形

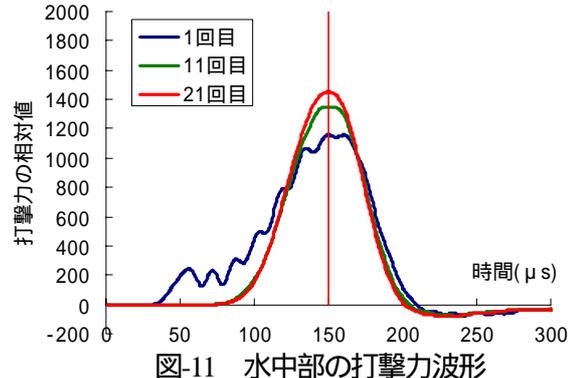


図-11 水中部の打撃力波形

### 3. 2 弾性波速度の測定結果

コンクリートの表面を伝播する表面弾性波速度と採取したコア供試体の内部を伝播する多重反射の弾性波速度の測定結果を表-3に示す。弾性波速度は、どちらもほぼ同等の測定値が得られており、今回実施した程度の表面劣化では、弾性波速度に影響を与えないといえる。

表-3 弾性波速度測定結果

採取位置	圧縮強度(MPa)	多重 Vp(m/s)	表面 Vp(m/s)	機械インピーダンス
気中部	26.8	3701	3738	27.9
気水境界部	27.2	3794	3842	--
水中部	31.3	3829	3890	21.3

### 4. まとめ

農業用水路の気中部と劣化度重症の水中部を対象として検討した。表面縦弾性波速度と機械インピーダンスから算出した強度指標値とを検討した結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 表面劣化の進行が浅い気中部では、前半の接触時間は打撃回数に比例して減少傾向にあるが、後半の接触時間はほぼ一定である。これは、表面劣化層の叩き潰しは、ハンマがコンクリートを押す波形前半の時間帯に起こるためと考えられ、波形後半にはほとんど影響しないことを反映している。Fmax は打撃回数の増加に比例して増加するが、その割合は小さく、数回程度の打撃回数で一定値に収束することがわかった。
- 2) 表面劣化が進行している水中部では、気中部に比較してデータの変動が大きい。一定値に収束するには10回程度の打撃が必要である。気中部、水中部の両者ともデータから回帰式を最小2乗法で算出し、変化率に閾値を設定して最終推定値か否かの判定をする。最終推定値によって圧縮強度の指標値を求める。
- 3) 表面劣化がある場合、連続打撃を行うことで、表面が締め固められ、表面状態が改善されることが分かった。しかしながら、打撃による表面の締め固めには限界があると考えられる。また劣化層が薄い場合と厚い場合では締め固め度合いも異なる。当然のことながら締め固め効果は表面劣化がない健全なコンクリートの硬化状態とは異なる。これはコンクリートのバネ係数に関連すると推測される。
- 4) 表面を伝播する弾性波速度は、表面劣化で打撃力波形が多少乱れても、2chとも受信センサーとすることで、立ち上がり時間差の読取り誤差を少なくでき、表面劣化の影響を軽減できると考えられる。また、弾性波は、既往の研究からある程度深度を持って伝播することが知られており、表面劣化が数mmである場合には、表面劣化の影響は小さいと考えられる。表面弾性波速度は、表層コンクリートの弾性係数と密度の関数であるので、表層から10mm程度より深い内部のコンクリートが健全であれば正常な速度を示すと考えて良い。