

機械インピーダンス法による各種劣化コンクリート強度の検討

Examination of the strength of various deteriorated concrete by mechanical impedance method

北見工業大学 技術部  
北見工業大学 工学部 社会環境工学科  
北見工業大学 工学部 社会環境工学科  
日東建設㈱  
アブライドリサーチ㈱

正 員 岡田 包儀 (Kaneyoshi Okada)  
正 員 井上 真澄 (Masumi Inoue)  
学生員 須藤 貴史 (Takahumi Sudoh)  
正 員 久保 元 (Hajime Kubo)  
正 員 境 友昭 (Tomoaki Sakai)

1. 緒言

我が国の社会資本は、戦後の高度経済成長とともに整備されてきたが、今後更新時期を迎え維持・管理費の膨大化が懸念されている。社会資本の有効な維持管理においては、此までの損傷等が発生した後に対処する「事後的管理」から、致命的欠陥が発現する前に速やかに措置するという「予防保全的管理」へと転換し、戦略的な維持管理を実施することが求められている。

非破壊試験の中でハンマーによるコンクリート強度を測定する手法としては、一般に広くリバウンドハンマーが使用されている。しかしこのリバウンドハンマーは、強度の推定精度に課題<sup>1)</sup>があり、近年国交省では新設構造物を対象として超音波法及び衝撃弾性波試験法による強度測定手法が導入されている。

しかしながら、各種非破壊強度試験は、コンクリートの平滑な測定面を対象とするため、表面劣化が進行した場合、その適用が難しいというのが実状である。

現行でリバウンドハンマー及び縦弾性波速度等による強度を測定する際コンクリート面に凹凸がある場合等は、研磨処理装置などで平滑に表面処理を施す前処理を行う必要がある。しかし、一般的に非破壊試験では、構造物に損傷を与えず性能を把握すること、調査時間・費用を軽減できること等が求められる。

これらの要望に沿う手法として、最近、機械インピーダンス法<sup>2)</sup>が開発・実用化されている。

使用し、前処理（表面を切削し平滑化）無しではその適用が困難とされている表面劣化が進行したコンクリート面を対象にした強度推定手法の検討を行ってきた<sup>3)</sup>。既往の研究では、水路コンクリート等、土粒子を含む水流の摩耗作用を受けたコンクリートにおいては、表面劣化が進行するが表層内部強度が低下しないため機械インピーダンスハンマーを使用することにより表面劣化の影響を受けず内部の強度を測定することが可能であることが明らかとなっている。

本研究は、この一環として機械インピーダンス法ハンマーを使用し通常よりも表面劣化に加え表層内部の脆弱化が進んだコンクリートを対象とした強度の測定及び評価手法の検討を行った。

2. 研究方法

2.1 コンクリート供試体の作成及び凍結融解試験による劣化コンクリートの作成

(1) 使用材料

コンクリートの使用材料を表1に示す。

表1 コンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	陸砂利（幕別産）	表乾密度 : 2.65 g/cm <sup>3</sup> 最大寸法 : 25 mm
細骨材	陸砂（幕別産）	表乾密度 : 2.62 g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE剤 標準型	

(2) コンクリートの配合

コンクリートの配合については、通常の土木構造物（W/C=55%以下）よりもW/Cが大きい（70%）貧配合のコンクリート（表2参照）を作成した。

表2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	AE剤
70	48	165	236	900	986	C×0.006%

(3) コンクリートの練り上がり性状及びコンクリートの作成

コンクリートの練り上がり目標値については、スラン



写真1 ハンマー（機械インピーダンス法）

本研究で使用した機械インピーダンス法ハンマー（写真1参照）は、ハンマー部に加速度計が内蔵されており、コンクリートを打撃した際に加速度を計測し、打撃力の時間波形を測定・解析することによりコンクリート表面の強度の推定、表面劣化の度合い等を測定できる機能を有している。

筆者らは、これまで機械インピーダンス法ハンマーを

ブを  $8.0\text{cm} \pm 1.5\text{cm}$  , 空気量を  $4.5\% \pm 1.0\%$  に設定した。コンクリートの練り上がり性状値については、スランブが  $8.5\text{cm}$ 、空気量が  $4.7\%$  であった。練り上がったコンクリートは、角柱型枠 ( $10 \times 10 \times 40\text{cm}$  : 計 3 体) に打ち込み、その後、材齢 1 日より標準養生を行った。

#### (4) 凍結融解試験による劣化コンクリートの作成

養生後、凍結融解試験を JIS A 1148-2001「コンクリートの凍結融解試験方法」A 法に準じて凍結融解を 300 サイクル実施し劣化コンクリートを作成した。劣化コンクリート供試体 (写真 2 参照) は、表面劣化部強度及び内部強度 ( $20\text{mm}$ ) 測定用とした。

### 2.2 試験方法及び測定原理

#### (1) コンクリート供試体の劣化状況の測定

コンクリート供試体の劣化状況をおさえるため質量、一次共鳴振動数 (JIS A 1127-2001) を測定し凍結融解回数 300 サイクル終了時の相対動弾性係数及び質量減少率を求めた。

また、凍結融解回数 300 サイクル終了時におけるコンクリート表面の平均劣化深さを測定した。

#### (2) 測定位置の設定

##### a) 劣化表面

劣化コンクリートの測定面は、型枠の両側面部に位置するコンクリート面を対象として各面 13 箇所、合計 26 箇所を設定した。(供試体: No.1・No.2)

##### b) 内部測定面 ( $20\text{mm}$ )

前半の劣化面強度測定後、コンクリート内部において劣化の影響が少ないと想定される深さ ( $20\text{mm}$ ) まで、切削・平滑化し内部測定面を設定した。測定面は、切削した 1 側面とし、13 測定箇所を設定した。(供試体: No.1・No.2)

#### (3) 機械インピーダンス法の測定原理

機械インピーダンス法の測定原理は、コンクリート表面のバネ係数を求める方法である。バネ係数、すなわちコンクリート表面の弾性的性質は、材料の弾性係数に依存した量である。つまり、ある程度の誤差を認めれば、弾性係数に比例する測定量を得ることによって、コンクリートの圧縮強度が推定できることを意味する。

機械インピーダンス法では、ハンマーで直接コンクリート面を打撃する。この時、ハンマーの持つ運動エネルギーは、コンクリート表面の変形エネルギーと釣り合う。すなわち、

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

である。ここで、 $M$ 、 $V$  は、ハンマの質量、衝突時の初期速度、また  $K$ 、 $D$  はバネ係数、コンクリート表面の最大変位量である。

$$D = \frac{F}{K} \quad (2)$$

の関係があり、これを代入して、

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2} \frac{F^2}{K} \quad (3)$$

よって、

$$\sqrt{MK} = \frac{F}{V} \quad , \quad K = \frac{1}{M} \left( \frac{F}{V} \right)^2 \quad (4), (5)$$

として、機械インピーダンス値及びコンクリート表面のバネ係数が決定される。なお、 $F$  は最大打撃力であり、ハンマー側にセンサーをつけることによって、 $F$  及び  $V$  は測定することができる。機械インピーダンス法では、リバウンド側の波形によってコンクリート表面のバネ係数を求める方法を用いており、表面劣化の影響を回避することができる。

今回使用した機械インピーダンス法ハンマーは、表面劣化が進行しているためハンマー質量  $380\text{g}$  を使用した。

#### (4) 機械インピーダンス法ハンマーによる測定方法

機械インピーダンス法ハンマーによる強度測定を行う際、日本材料学会の方法<sup>4)</sup>に準じ圧縮試験機を用い測定供試体に圧縮応力  $0.74\text{N/mm}^2$  ( $7.5\text{kg/cm}^2$ ) をかけ圧定して測定した。

強度測定用 No.1

強度測定用 No.2

No.3



写真2 劣化供試体 (凍結融解 300 サイクル終了時)

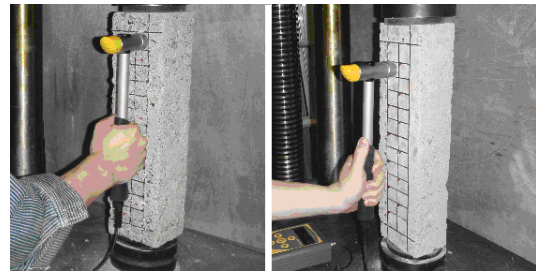


写真3 測定状況 (左: 劣化面, 右: 内部深さ 20mm)

測定は前半 (劣化面) と後半 (内部測定面) に分け前半は、劣化した測定部を前処理無しで打点領域の各測定箇所において同一地点で 10 回連続打撃 (合計 26 箇所) し強度指標値を測定 (写真 3 参照) した。これは、同一点を連続的に打撃することにより脆弱な劣化部を潰し、表層研磨と同等の強度指標値が次第に得られるかどうかを確認するためである。

前半の劣化面測定後、劣化による強度低下の影響が少ないと想定される内部強度測定用供試体を  $20\text{mm}$  切削し作成した。この内部面の測定方法は、各打点領域内で測定打撃点をずらし 4 点ずつデータ (合計 13 箇所) を測定 (写真 3 参照) した。

### 3. 測定結果と考察

#### 3.1 コンクリート供試体の劣化状況の測定結果

凍結融解 300 サイクル終了後の強度の指標を示す相対動弾性係数については、 $81.3\%$  (No.1) ,  $87.9\%$  (No.2)  $90.3\%$  及び (No.3) で平均  $86.5\%$  あった (図 1

参照)。

凍結融解 300 サイクル終了後の表面劣化量の指標を示す質量減少率については、それぞれ 4.40% (No.1) , 3.21% (No.2) 及び 4.00% (No.3) で平均 3.87% あった (図 2 参照)。

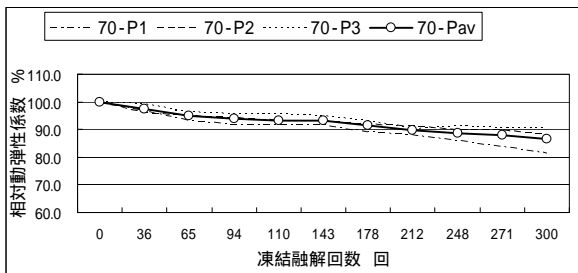


図 1 凍結融解回数と相対動弾性係数の関係

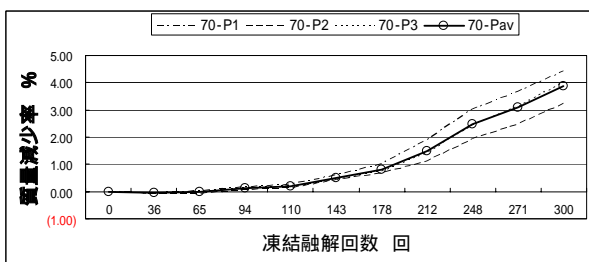


図 2 凍結融解回数と質量減少率の関係

平均劣化深さについては、両側面部を測定対象として求めたが、それぞれ 1.76mm (No.1) 及び 1.41mm (No.2) で平均 1.59mm あった。

今回試験に用いた劣化供試体は、相対動弾性係数の結果 (平均 86.5%) から表面劣化のみならず内部への脆弱化が進行していることが推察できた。

### 3.2 機械インピーダンス法による強度指標値の測定結果及び考察

機械インピーダンス法ハンマー (380g) を使用した表面劣化部 (連続打撃: 計 10 回) と切削後の内部測定面 (20mm) との強度指標値の結果を表 3 に示す。

表 3 機械インピーダンス法ハンマーを使用した表面劣化部と内部測定面との強度指標値の結果

連続打撃回数	切削・研磨前 (前処理無し)			指標値比率 内部強度に対する 表面強度の割合 (%)
	累積平均指標値	全平均に対する各指標値の割合 (%)	全数26中採用率 (偏差 ± 0.2)	
1	1.27	98.6	82.7	87.6
2	1.29	99.8	90.4	88.6
3	1.29	99.8	86.5	88.6
4	1.29	99.8	86.5	88.6
5	1.29	100.2	84.6	89.0
6	1.29	100.2	94.2	89.0
7	1.30	100.5	92.3	89.3
8	1.30	100.5	90.4	89.3
9	1.30	100.5	90.4	89.3
10	1.29	100.2	90.4	89.0

20mm 切削・研磨後の健全部の平均強度指標値: 1.45

採用データ (偏差 ± 0.2) 全総数 52 点中採用率: 98.1%

表 3 の結果は、No.1 及び No.2 供試体の平均値である。

#### a) 表面劣化部

表面劣化部の強度指標値については、1.27 ~ 1.30 の範

囲 (平均 1.29) で同一点の連続打撃回数に関わらず比較的安定した値を得た。各強度指標値の累積打撃回数の平均値に対し 1 打撃目の打撃値については、98.6%と若干の低下傾向が認められるが推定強度に大きな影響が少ないものといえる。この結果から打撃回数については、実用上劣化面でも 1 打撃のみでデータを採用できることが確認された。

#### b) 内部測定面 (切削深さ: 20mm)

表面の劣化強度に影響が少ないと想定される深さ (20mm) の内部面における平均強度指標値は、1.45 となった。内部測定面に対する表面劣化部の強度指標値については、全平均で 88.8%となり表面劣化部が低い結果が得られた。

この結果から、表面の劣化のみならず表層内部まで強度の低下 (組織の脆弱化) が確認された。

### 3.3 各種劣化コンクリートの測定結果からの考察

#### (1) 激しい凍結融解を受けた水セメント比の高い貧配合のコンクリート

前述の 3.1 及び 3.2 の結果から総合判断し本研究で使

用した劣化コンクリートは、表面部の劣化のみならず表層内部の強度低下 (組織脆弱性) が認められた。

また、比較的表層内部まで脆弱化が進行している場合、

機械インピーダンス法ハンマーの強度指標値は、コン

クリート表層部の表面近傍部の値を取得していることが確

認できた。

#### (2) 農業用水路の水中部コンクリートの劣化検討事例

##### a) 調査構造物の概要

用途: 農業用水路コンクリート構造物,

供用年数: 39 年, 環境: 寒冷地内陸環境

##### b) コンクリートの配合条件 (当時の資料より)

$F'_{ck}$ : 300kgf/cm<sup>2</sup>, スランプ: 8.0cm,

空気量: 5.0%, 最大水セメント比: 55%,

最小単位セメント量: 280kg/m<sup>3</sup>,

セメント種類: 普通ポルトランドセメント

##### c) 秋期と冬期の農業用水路の暴露状況

寒冷地内陸環境下に設置されている農業用水路の秋期 (渇水期) と冬期の暴露状況を示す (写真 4 参照)。この用水路においては、冬期において用水路が積雪に覆われ水中部においては凍結融解回数が気中部に比べ比較的少ないことが推察される。



写真 4 農業用水路 (左: 秋期 (渇水期), 右: 冬期)

##### d) 農業用水路コンクリートの水中部における劣化状況及び表層強度の推察

本用水路において気中部と比べ凍害の影響が比較的小さい水中部コンクリートにおいては、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の溶脱による細孔構造の粗大化<sup>5)</sup>及び土粒子含む水流の摩耗作用等で粗骨材及び細骨材が露出し表面劣化が進行 (写真 5 参照) するが、一方で春期から秋期の水分の供給による



水和作用の働きで表層含め強度が確保される。このため機械インピーダンス法ハンマーによる水中部の劣化面強度は、コンクリート内部と比較的同等な強度が得られるものと推察される。

従って、水中部コンクリートの表層部の脆弱化が進行しない外的要因としては、冬期における凍結融解回数が積雪に覆われるため気中部に比べ比較的少ない、土粒子を含む水流の摩耗作用により極表面の細孔構造の粗大化部の損失のみで深部には影響していない、表層部の水分の供給による水和作用で強度低下が抑制される。

また、内的要因として 当時、既に使用されていた AE 剤による凍害の抑制作用、最大水セメント比が、55%以下に設定されているため透水係数が小さく水密性の確保<sup>6)</sup>等が挙げられる。



写真5 水中部劣化状況（左：表面，右：側面）

このため、表面劣化コンクリートにおいては、マクロ的にみれば深部にかけ脆弱化が進行しているケースと、農業用水路の水中部コンクリートの様に表層部の脆弱化が進行していないケースに大別されることが推察される（図3参照）。以上のことから、機械インピーダンス法ハンマーを使用した際の劣化面の強度測定値の見解を表4に示す。



図3 表面劣化コンクリートの概念図

（左：水中部コンクリート，右：表層脆弱コンクリート）

表4 機械インピーダンス法ハンマーを使用した各種強度測定値の見解

対象事例： コンクリート	表面劣化が少ない	農業用水路の水中部(W/C=55%以下, AE)	激しい凍害(W/C大, 貧配合, nonAE)
コンクリートの劣化状態	比較的健全	表面劣化: + 表層内部健全	表面劣化 + 表層内部脆弱
同一点打撃数	1打	通常1打(数打), 380g	通常1打
前処理の有無	不要	不要	不要
取得強度	内部(全体)強度	内部(全体)強度	表層近傍部強度

## 4. 結論

### 4.1 凍結融解作用を受けた W/C が大きいコンクリートの表層部の強度指標値<sup>8)</sup>

(1) 凍結融解作用を受けた W/C が大きい(70%)貧配合コンクリートにおいて、機械インピーダンス法ハンマー(380g)による内部測定面に対する表面劣化部の強度指標値については、全平均で 88.8%となり、表層内部の強度低下(組織の脆弱)を確認した。また、表層内部まで脆弱化が進行している場合、機械インピーダンス法ハンマーの強度指標値は、コンクリート表層部の表面近傍部の値を取得していることが確認できた。

(2) ハンマーによる累積打撃回数(各点 10 回)の平均強度指標値に対し 1 打目の測定値は、98.6%となり比較的安定した値を得た。従って、同一点を多数回打撃しつつ劣化部分を除去するような所作は不必要である。

(3) 表面劣化に加え表層内部が脆弱化したコンクリート面に対しても機械インピーダンス法ハンマー(380g)による強度測定は、健全部と同様の調査方法が適用できる。

### 4.2 農業用水路の水中部コンクリートの劣化状況及び強度の推察

凍害の影響が少ない水中部コンクリートは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱による細孔構造の粗大化<sup>5)</sup>及び土粒子を含む水流の摩耗作用等で表面劣化が生ずるが、水分の供給による水和作用の働きで表層含め強度が確保される。このため機械インピーダンス法ハンマーによる水中部の劣化面強度測定値は、コンクリート内部と比較的同等な結果が得られるものと推察される。

## 参考文献

- 1) JSCE-G504-2007：硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（案），2007 年制定コンクリート標準示方書規準編，土木学会，pp253-256,2008.5
- 2) 久保元，金田重夫，久保元樹，極壇邦夫：ハンマ打撃によるコンクリート強度の推定，コンクリート工学，5月号 Vol.44, No.5, pp41-44, 2006.5
- 3) 岡田包儀，猪狩平三郎，久保元，金田重夫，久保元樹，境友昭：機械インピーダンス法による表層劣化水路コンクリートの強度推定，農業農村工学会北海道支部第58回研究発表会，2009.10.28
- 4) 日本材料試験協会，シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定試験方法指針（案）：材料試験，第7巻，第59号，pp.427-430, 1958.8
- 5) 地濃茂雄，平野隆，仕入豊和：養生条件とコンクリート表層部の細孔構造，セメント技術年報，38，pp266-269，1984
- 6) 施工標準 2.6 水密性，2007 年制定コンクリート標準示方書施工編，土木学会，pp39-40, 2008.3
- 7) 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル：編著（独）土木研究所，（社）日本非破壊検査協会，pp148-153, 2010.8.6
- 8) 岡田包儀，井上真澄，須藤貴史，久保元，境友昭：表面劣化コンクリートの強度推定手法の検討，農業農村工学会北海道支部第61回研究発表会，2012.10.30