

漁港施設における機械インピーダンス法を用いたコンクリート強度推定運用マニュアル（案）

平成24年10月

独立行政法人水産総合研究センター
水産工学研究所

I. 総説

1. 趣旨

本マニュアルは、機械インピーダンス法を用いて、漁港施設の強度推定を行う場合の測定方法やデータ処理について水産工学研究所等の研究成果をもとにとりまとめたものである。

漁港施設は、無筋コンクリート構造物が多いため、現場において構造物の劣化状態を評価する場合、剥離や空洞等の欠陥の把握やコンクリート強度の把握などのための試験などが中心に行われる。コンクリート強度は、コア採取による圧縮強度試験(JIS A 1108)や簡易的なリバウンドハンマーによる反発度法(JIS A 1155)が一般的に用いられる。これらのうち、コンクリート強度は、構造物の耐久性に関する指標として重要であり、特に、無筋コンクリートの場合、塩害や中性化による劣化の影響が少ないため、構造物の劣化状態を客観的に把握する手法としてコンクリートの強度試験が広く行われている。

一方、コンクリート強度を測定する方法として、構造物の破壊を伴わない非破壊試験による方法がある。非破壊試験は、前述のように対象施設に損傷を与えず、比較的簡便にその劣化状況を把握できることから、簡易的な劣化状態の推定や詳細調査の予備的な方法として、広く現場での劣化診断に用いられており、測定器械や解析手法の開発が進められている。ここでは、非破壊試験である衝撃弾性波法の1種で‘試験方法が比較的簡便であり、かつ、迅速に測定ができる’という特徴のある機械インピーダンス法による既設漁港施設の強度推定方法等について、記述している。

本マニュアルは、Iで総説(趣旨、適用範囲)をIIで機械インピーダンス法の原理、および、具体的な測定方法、データ処理方法についてとりまとめている。なお、本マニュアルのIIの具体的なデータ処理方法等については、日東建設社製の測定装置(CTS-02 Ver.2)を用いた。

2. 適用範囲

本マニュアルの適用範囲は、機械インピーダンス法を用いて、既設漁港施設（コンクリート部分）の強度を推定する場合とする。

【機械インピーダンス法の概要】

機械インピーダンス法は、インパルスハンマーと呼ばれるハンマー（衝撃入力装置；図1参照）でコンクリート表面を打撃し、その時の打撃力波形から接触インピーダンスを求める方法である。

接触インピーダンスとは、ハンマーの質量とコンクリート表面のバネ係数の積の平方根であり、バネ係数は弾性係数を根拠とすることから、機械インピーダンス法はコンクリートの弾性係数を測定していると見なすことができる。これは、弾性波速度が材料の弾性係数の平方根に比例し、また弾性係数の高いコンクリートほど、概して強度が高いと言う知見を根拠としている。



図1 機械インピーダンス法のインパルスハンマーと測定装置

Ⅱ. 機械インピーダンス法による既設漁港施設の適用マニュアル

1. 機械インピーダンス法

本手法は、ハンマーでコンクリートを打撃した時のハンマーがコンクリート表面を押している時間（ T_A ）とコンクリートの塑性変形によりハンマーが押し戻される時間（ T_R ）の打撃応答波形から機械インピーダンス値を算出する方法である。機械インピーダンス値は、**図 2**に示す打撃応答波形の F_{max} によって算出され、ハンマーが接触する時間における加速度の数値積分値に相当する。 Z_A は T_A の数値積分、 Z_R は T_R の数値積分を表している。このようにして求めた機械インピーダンス値を測定・解析することで、コンクリートの圧縮強度の推定（以下、「機械インピーダンス強度」という）、コンクリート構造物における表面の劣化度合いおよび表面近傍の浮き・剥離を測定するものである。

反発度法で使用するリバウンドハンマー（一般的に言うシュミットハンマー）と比較して、コンクリートの塑性化にも適用でき、打撃が適切であるかを判定しながら測定を続けられるとともに、打撃応答波形についてもデータが得られるという特徴がある。

その原理としては、**図 3**に示すように、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、コンクリートの表面に衝突した場合、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、コンクリート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、 $F = kx$ と表現される。

なお、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ため、 $1/2mv^2 = 1/2kx^2$ となり、 $\sqrt{mk} = F/v$ が得られる。ここで \sqrt{mk} が機械インピーダンスであり、作用した力の最大値をハンマーの初速度で除することで得られることがわかる。

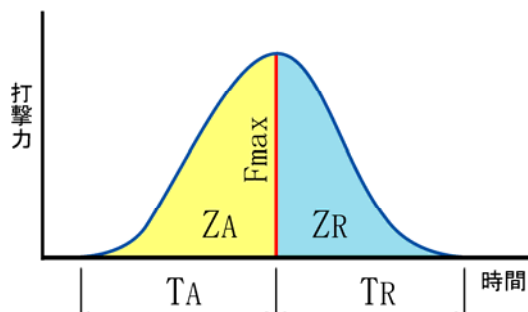


図 2 打撃応答波形の概念図

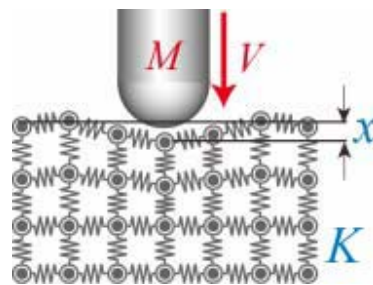


図 3 ハンマーの衝突

2. 測定手順

本手法の測定手順は、「事前準備」「測定場所の決定」、「測定」、「データ処理・検証」とし、推定強度を算定する。

【解説】

測定手順は、図4に示すように、まず、測定のための「事前準備」を行う。現地にて、「測定場所の決定」を行って、「測定」する。測定後、「データ処理」を行って、「データ検証」を行い、「推定強度」を算出する。

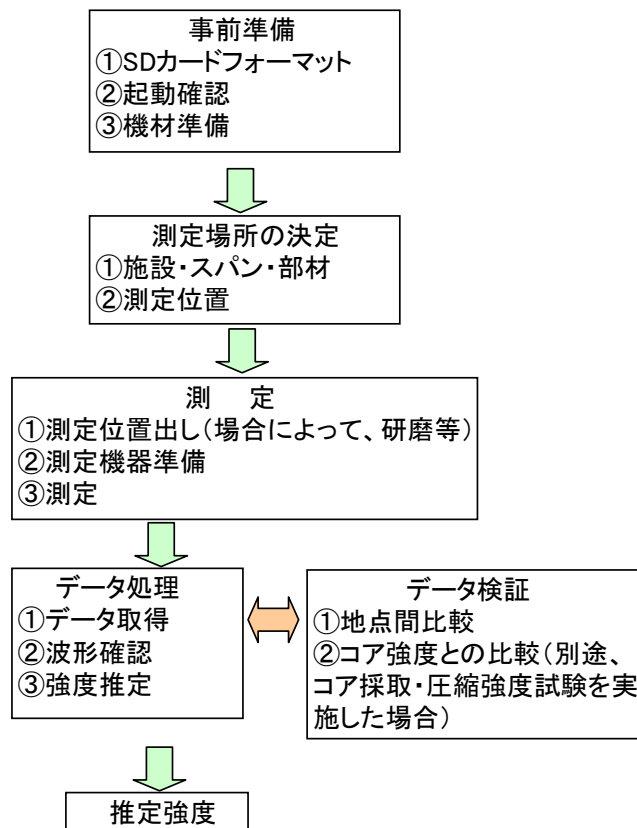


図4 測定フロー

3. 事前準備

事前準備は、「SD カードフォーマット」、「起動確認」、「機材準備」の順で実施する。

【解説】

(1) SD カードフォーマット

SD カードフォーマットは、計測機器（以下 CTS）付属のソフトを用いて実施する。フォーマットの手順は、①SD カードのドライブを選定し、「SDFile クリア」ボタンを押す。②「CTS の時計設定」ボタンを押し、時刻を設定し、「パラメータ設定」ボタンを押す。③パラメータ設定は、必ず「STR 値を旧バージョンで計算する」にチェックを入れ、ハンマー質量（初期値 190）、比例定数（初期値 0.5）を入力することで実施する。

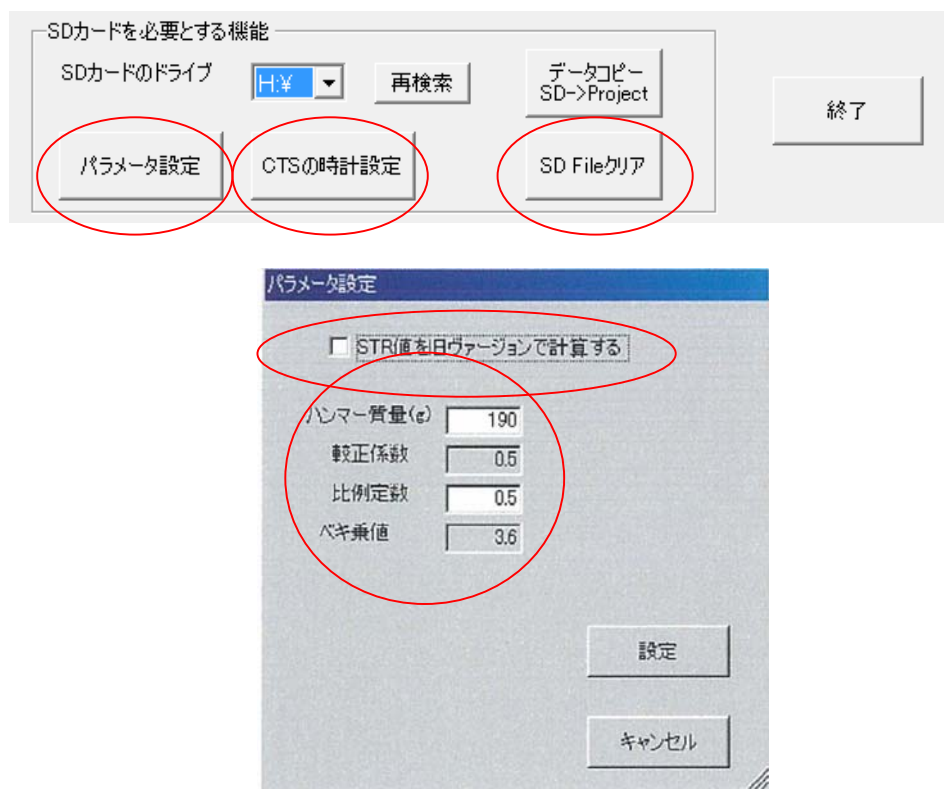


図5 SDカード設定画面

(2) 起動確認

(1) で設定した SD カードを CTS に設置し、起動確認を実施する。

(3) 機材準備

機材準備は、CTS 一式、予備電池（同一社の製品）、位置出し用測定機材（エスロンテープ、コンベックス、チョーク等）等の調査機材に加え、SD フォーマット用 PC を用意する。また、必要に応じて、調査のために、はしご、または、足場などの機材を用意する。

4. 測定場所の決定

測定場所の決定は、「施設・スパン・部材を選定」、「測定位置」の順で実施する。

【解説】

(1) 施設・スパン・部材の選定

施設の選定は、RC、または、無筋コンクリート構造の施設でコンクリート強度を測定する必要がある施設とする。測定する施設のうち、測定するスパンを選定する。選定するスパンは、選定した施設のコンクリート強度を代表させるため、施設の起点、中央、終点の3スパンを目安として選定する。なお、他のスパンと比較して、老朽化や変状が著しい場合や波浪等により測定が困難な場合は、隣接スパンに変更する。部材の選定は、施設の選定と同様、コンクリート強度を測定すべき部材を選定することとするが、測定誤差を極力抑えるために、本体工、上部工の側面等を選定する。なお、本体工は、潮位によって海面下にある場所は選定しない。

(2) 測定位置の選定

測定位置の選定は、ひびわれ、表面劣化、剥離などの老朽化、変状から50 cm程度、離れた平らな場所を選定する。また、カキや藻類などの付着物がある場所、粗骨材の露出が著しい場所は可能な限り、避けて選定する。なお、場合によっては、表面を研磨するなどの処置を行う。

5. 測定

測定は、「測定位置出し」、「測定機器準備」、「測定」の順で実施する。

【解説】

(1) 測定位置出し

測定位置出しは、測定位置で5cm×5cmメッシュをチョーキング等して実施する。測定位置の選定で記述したように、付着物や粗骨材が露出している場所は、可能な限り、その場所を避けることが必要であるが、全体的に付着物がある場合や粗骨材が露出している場合等は表面を研磨材やグラインダー等で表面を削って、測定を実施する。なお、測定位置は、CTSのArea番号にて管理する。



図6 研磨状況



図7 メッシュ切状況

(2) 測定機器準備

測定機器準備は、①インパルスハンマー・ケーブルと本体の取付け、②電池ボックスへの電池を設置、③本体の電源ONの順で実施する。インパルスハンマー・ケーブルと本体の取付けは、ケーブルやケーブル接続部の断線等に留意し、慎重に行う。また、電池ボックスへの電池の設置時は、変電を避けるため、使用する電池の製造元が同一社であること等に留意する。なお、本体の電源ONにした状態で選択するモードは、「AREA」モード、「HARD HIT」とする（図8参照）。

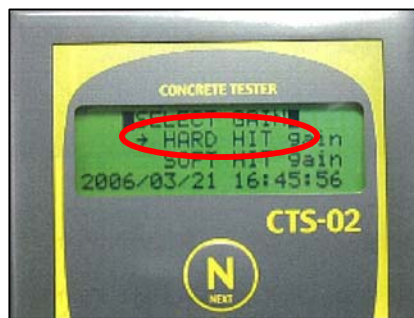


図8 測定装置における「HARD HIT」選択画面

(3) 測定

測定は、(1)で位置だしした25点のメッシュの中を打撃する事によって実施する。なお、打撃は、測定対象物に対し、垂直に打撃を行うことを基本とする。なお、打撃時にはLineの変更を行わず、25点続けて打撃する。打撃終了時は、Enterボタンを押し、測定を終了させる。

新たな測定場所では、常にNew Areaを選択し、測定を行う。また、打撃中、画面STR値にバラつきがある場合、再度続けて同一場所で25点打撃を繰り返す(図10参照)。



図9 測定状況

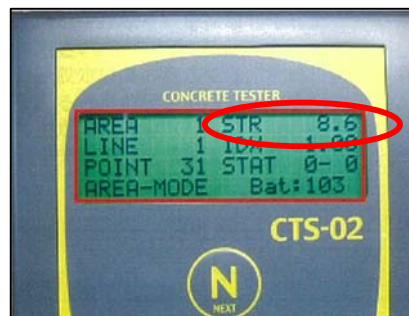


図10 測定装置におけるSTR値確認画面

6. データ処理

データ処理は、「データ取得」、「波形確認」、「強度推定」の順で実施する。

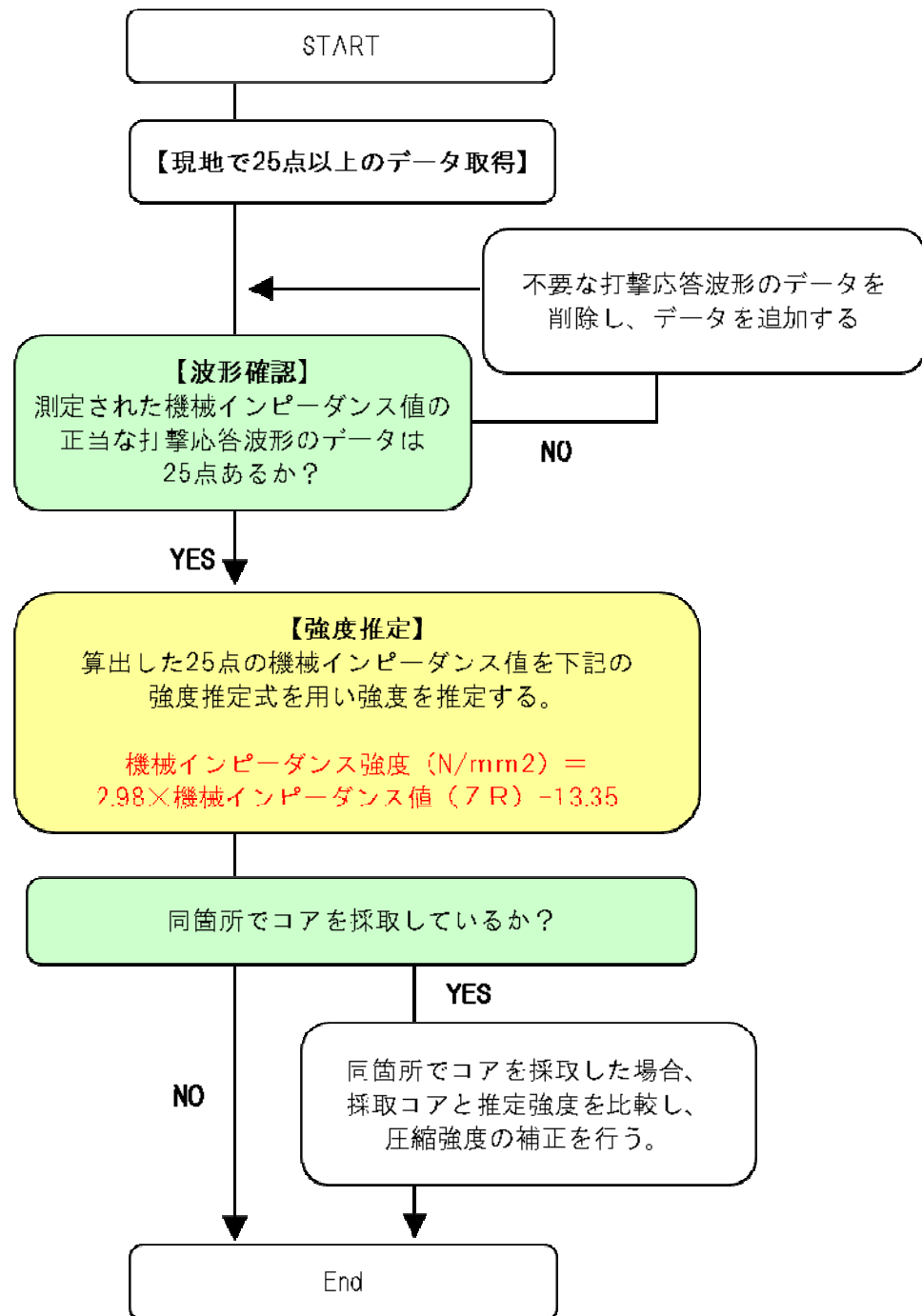


図 11 データ処理フロー図

【解説】

(1) データ取得

データ取得は、CTS 付属のソフトによって実施する。CTS 本体から SD カードを抜き出し、PC のスロットに差し込んで、ドライブの選定を行う。次に、測定した Area 番号を選択して、「結果を Excel ファイルで整理」のボタンを押し、Excel ファイルにデータを出力させる。

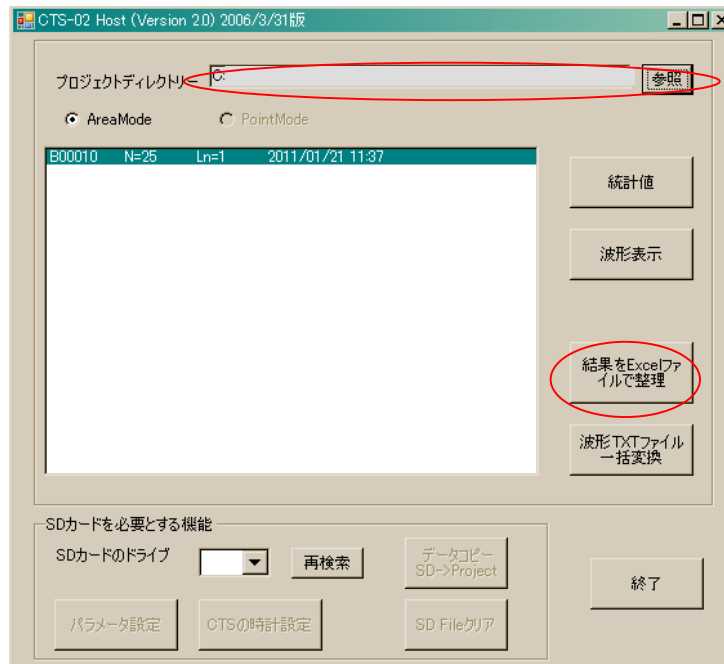


図 11 プログラムの起動画面

(2) 波形確認

波形確認は、(1) で使用した CTS 付属のソフトによって、実施する。まず、「波形表示」のボタンを押して、それぞれの波形を確認する。なお、この波形確認によって、必要であるデータと不要なデータに仕分ける。なお、必要であるデータは、図 13 にあるような ZA、ZR がほぼ対称、または ZA は乱れているが、ZR は乱れていない波形の事を指している。一方、不要であるデータは、図 14 にあるような ZA、ZR がともに乱れるものを指しており、不要な波形データは必ず画面右上の Point を確認する。また、現地にて STR 値のバラつきが多いため打撃数を増加した場合、**正当な打撃応答波形により 25 点を抽出し、その強度の値を平均化する。**

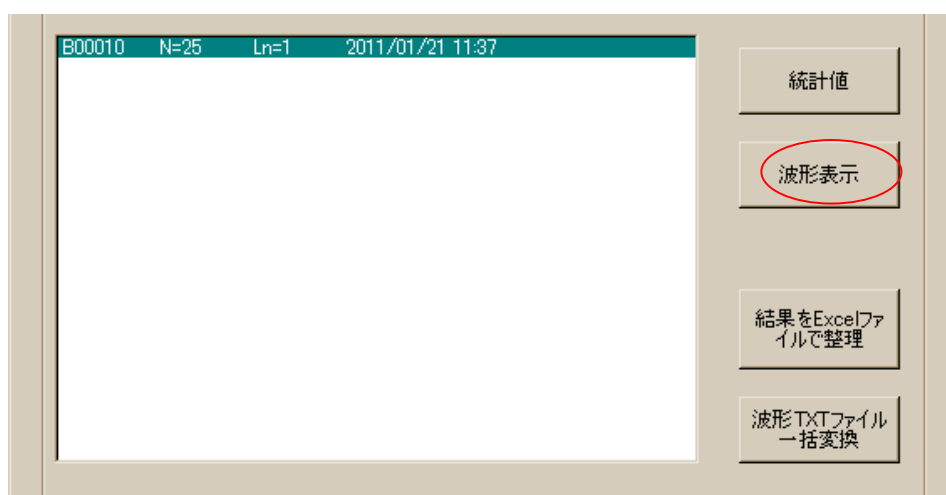


図 12 波形標示選定画面



図 13 必要とするデータの打撃応答波形



図 14 不要とするデータの打撃応答波形

(3) 強度推定

強度推定は(1)で作成した Excel ファイルで実施する。Excel ファイルの「強度」シートにて、抽出した不要なデータの強度を取り除いたものを各 Area ごとに平均値を算出する。このようにして、算出した平均値(機械インピーダンス値※)に漁港施設で得られた下記の強度推定式を使用して、各施設の平均強度を求める。

$$\text{機械インピーダンス強度 (N/mm}^2\text{)} = 2.98 \times \text{機械インピーダンス値 (Z R)} - 13.35$$

Area番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
B00001	16.6	16.3	16.6	19.1	17.2	15.1	14.7	17.0	17.8	18.7	22.2	18.4	9.6	11.8
B00002	16.6	13.8	18.8	18.6	14.8	12.2	12.8	17.6	14.3	15.3	15.7	17.6	20.0	19.5
B00003	14.8	16.7	15.5	14.1	17.9	12.0	15.9	16.9	15.6	16.6	18.2	16.6	19.9	18.4
B00004	17.4	13.7	18.1	16.1	14.4	14.7	18.4	20.6	17.0	14.5	19.0	15.8	16.3	19.8
B00005	15.7	18.4	17.0	15.5	18.0	17.3	16.8	18.2	18.0	15.2	17.7	16.7	17.0	17.8

図 15 強度推定操作画面

※測定時に“STR 値を旧バージョン計算する”にチェックを入れなかった場合、下記の数式を使用し、機械インピーダンス値 (Z R) を算出する。

$$\text{機械インピーダンス値 (Z R)} = \text{IF}((\text{機械インピーダンス強度} \times 10)^{(1/2)} < 16.5, (\text{機械インピーダンス強度} \times 10)^{(1/2)}, (\text{機械インピーダンス強度} + 87.7) / 6.97)$$

7. データ検証

データ検証は、「地点間の値を比較し」、突出した値は割愛する。なお、別途、コア採取、および圧縮強度試験を行っている場合は、これらのコア強度と比較してデータを検証する。

【解説】

(1) 地点間比較

地点間比較は、5.(2)で抽出したデータを用いて実施する。また、各施設ごとの抽出されたデータにおいても比較して、突出した値は、割愛する。

(2) コア強度との比較

コア強度との比較は、5.(2)で抽出したデータを用いて実施する。

Ⅲ. 資料編

(1) 測定機器の取扱注意事項

- ・ 電池は、同一社によって製造されたものを使用する。
- ・ 電池や SD カードの予備は、必ず持参する。特に、冬季は電池消耗が著しいため、予備電池を多めに準備する。
- ・ CTS ケーブル、およびケーブル接続部は、断線または破損しやすいため、慎重に作業を行う。
- ・ CTS は、防水仕様が施されていないため、雨天時や飛沫帯での使用には防水対策に留意する。
- ・ SD カードのフォーマットエラーにより、測定時にファイルオープンエラーになる場合があるため、再フォーマット用の PC は必ず現地に持参する。

(2) 機器校正等

- ・ 機器の校正は、原則として、1年に1回、メーカーによる検定を行う。
- ・ 取得したデータの異常値が多い場合、データ破損した場合等、SD フォーマットを適宜行うとともに、メーカーによる検定と校正をはかることが望ましい。

(3) 参考文献

- ①三上信雄，藤田孝康，保坂三美，極壇邦夫，重松宏和，笠井哲郎：沿岸構造物の効率的な維持管理のための簡易的な老朽化診断手法に関する研究，海洋開発論文集，vol. 26, pp. 165-170, 2010. 6
- ②三上信雄，藤田孝康，保坂三美，極壇邦夫，重松宏和，笠井哲郎：海岸保全施設の維持管理における簡易的な老朽化診断手法に適用に関する研究，Vol. 25, pp181-186, 2009. 6.
- ③三上信雄，藤田孝康，極壇邦夫，笠井哲郎：既設漁港コンクリート構造物の表層部劣化診断への衝撃弾性波法の適用，コンクリート工学年次論文集 Vol. 31, No. 2, pp181-186, 2009.
- ④極壇邦夫，久保元樹，境友昭，久保元：機械インピーダンスによる円柱供試体の圧縮強度の推定，コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 1, pp1955-2000, 2004. 6.
- ⑤久保元樹，中野泰宏，大高道夫，小島俊一，極壇邦夫：コンクリートテスターによるトンネルの剥離・強度の推定，北海道土木技術会トンネル研究委員会 2007 トンネル技術研究所発表会論文集 pp72-82, 2007. 2.

謝辞：本成果は、(財) 漁港漁場漁村技術研究所の研究助成事業及び水産庁水産基盤整備調査委託事業「漁港漁場施設の設計基準の構築」による研究成果をとりまとめたものである。現地試験の実施にあたって、千葉県、神奈川県、富山県、岡山県および長崎県の関係者の皆様にご協力頂いた。また、本成果は東海大学笠井教授にご指導・ご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。