

報告 漁港施設の維持管理における簡易的な老朽化診断手法の適用に関する研究

藤田孝康*1・金田拓也*2・富川裕一*3・伊達重之*4

要旨：膨大な既存ストックを有する漁港施設は、建設後30年を越える施設が増加し、これら施設の老朽化が懸念されている。様々な立地条件にある膨大な数の漁港施設の維持管理を効率的に行うため、一定の精度を確保し、かつ簡便な老朽化診断手法の確立が求められている。本報告は、既存漁港施設の簡易的な老朽化診断手法として、反発度法および機械インピーダンス法を活用した衝撃弾性波に着目し、既存漁港施設を対象にした原位置調査を行い、それらの適用性を検討した。その結果、機械インピーダンス法は、反発度法と比較して、打撃応答波形の検討という課題があるものの簡易に強度推定が可能であることが確認された。

キーワード：漁港施設、ストックマネジメント、老朽化診断、コンクリート圧縮強度

1. はじめに

我が国の漁港は、全国に約 2,900 存在し、これらに膨大な既存施設を有している。これら漁港施設の建設は、高度成長期に始まり、建設後 30 年を越える施設が全体の約 40%に達し、これら施設の老朽化が懸念されている¹⁾。

このような状況の中、水産庁は、計画的な維持管理を進め、既存施設の長寿命化と今後の維持管理費用の縮減を図ることを目的に、平成 20 年 4 月に水産基盤ストックマネジメント事業を創設した。各漁港の管理者は、本事業の補助を受け、順次、機能保全計画策定や保全工事を進めているところである²⁾。

しかし、これらの各漁港においては、施設数量が多く、多様な構造形式である一方、特に漁港施設にあっては管理者の大部分が市町村管理であり、維持管理予算が制限される上、専門的知識を有する技術者を確保し難い状況にあるという実態がある。また、調査診断技術においては、老朽化診断手法の明確化と精度の向上、点検・診断手法の簡易化、老朽化予測と LCC 算定の精度向上など、改善が望まれる様々な課題を有している。特に、老朽化診断の精度に関しては、目視・計測における診断者の知識・技能の違いによる影響が大きいことや対象施設の立地条件（例えば、埋没や消波工設置による見落とし）による制約なども課題として挙げられる¹⁾。

このような多くのストックを有し、様々な立地条件にある漁港施設の維持管理を適切に行うため、一定の精度を確保するとともに、客観的、効率的、かつ簡易な老朽化診断手法の確立が求められている。

本報告は、既存漁港施設の簡易な老朽化診断手法として、コンクリートを打撃した反発硬度から圧縮強度を求

める反発度法、および衝撃弾性波のうちハンマーでコンクリートを打撃し、そのときに得られる打撃応答波形から圧縮強度を推定する機械インピーダンス法について、既存漁港施設を対象にした原位置調査を行い、それらの適用性を検討した。

2. 漁港施設の現状と特徴

2.1 漁港施設の現状

我が国の漁港施設は、1960 年代以降、着実な整備が実施されており、2005 年には累積施設延長が 5,000 km を超えている。これらの施設は、今後、耐用年数に達する施設が急増することが見込まれており（図-1 参照）、これらの老朽化の問題が顕在する状況にある（図-2 参照）。

全国の漁港施設量を把握し、管理者別施設別に耐用年数を考慮した試算によると、今後 20 年間の年平均施設更

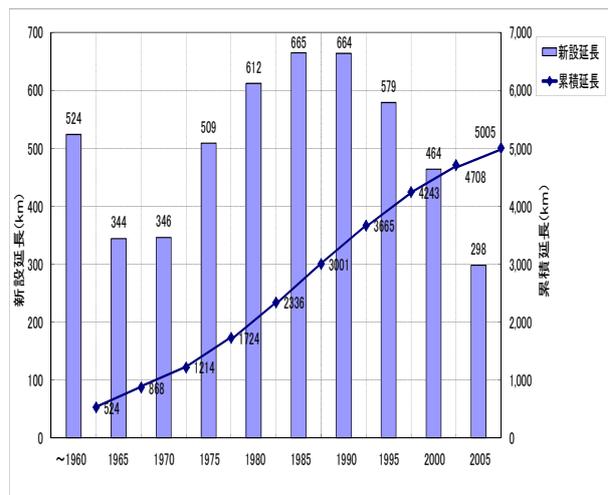


図-1 漁港施設の既存ストック量の推移

*1 (一社) 水産土木建設技術センター 調査研究部 (正会員)

*2 (独) 水産総合研究センター水産工学研究所 漁港施設研究室長

*3 東海大学 工学部土木工学科

*4 東海大学 工学部土木工学科 工(博) (正会員)

新費用が 2009 年度予算を上回る都道府県は 40 都道府県中 24 府県であり、このうち 2 倍を上回るのは 12 府県に上ることが指摘されている³⁾。

2.2 漁港施設の特徴

膨大な既存ストックを有する漁港施設には、以下の特徴がある。

- 1) コンクリートが主要材料の施設割合が多く、特に、無筋コンクリートの割合が多い⁴⁾。
- 2) 外郭施設（防波堤等）のように延長距離が長い構造物が多い。
- 3) 沿岸域に設置されているため、波浪による影響や海水による劣化を受けやすい。

このような特徴を踏まえた老朽化診断手法の確立が求められている。



図-2 漁港施設における老朽化の状況

3. 漁港施設に適用可能な簡易的な老朽化診断手法

3.1 漁港施設に適用可能な非破壊試験方法

前述したように漁港施設は、その構造が無筋コンクリートの割合が多いという特徴がある。無筋コンクリートにおける老朽化は、ひび割れ、剥離、空洞などの欠陥やコンクリートの圧縮強度を把握することで評価される。

無筋コンクリート構造物においては、塩害の影響を考慮しなくても良いことから、構造物表層部の圧縮強度は老朽化に関する客観的指標として有効であると考えられ

る。また、コンクリートの圧縮強度を調べる方法は、対象施設から採取したコンクリートコアの強度試験（JIS A 1108, JIS A 1113, JIS A 1149）から求める方法が最も信頼できる方法とされるものの、施設本体の損傷を伴うとともに、試験のためのコストや時間が課題である。一方、コンクリートの圧縮強度を推定する他の方法として、コンクリート表面の反発度から強度を推定する方法、局部的な破壊試験により強度を推定する方法などがある。また、剥離や空洞等の欠陥については、超音波や衝撃弾性波による非破壊試験、および小規模コアによる方法なども用いられる⁵⁾。

非破壊試験によるコンクリートの圧縮強度を間接的に推定する方法について表-1 に示した。これらの非破壊試験は、対象施設に損傷を与えず、比較的簡易に測定できることから、

- 1) 詳細調査を実施する前の予備的試験
- 2) コア採取による圧縮強度の測定が困難な場合
- 3) 多くの箇所強度推定が必要な場合

などにおける統計処理や補正を前提とした調査方法として用いられている⁶⁾。一方、これらの方法は精度が低く、適用範囲が限定されることなどの問題点も指摘されている⁵⁾。

本報告では、このような検討事項を踏まえ、既存の漁港施設へ適用するための劣化診断手法として、表-1 に挙げた試験方法の中から、反発度法と衝撃弾性波の一種である機械インピーダンス法を選定した。選定の理由は以下のとおりである。

- 1) 測定方法が簡便である
- 2) 計測時間が短く、多点連続計測も可能

これらの手法の適用性を評価するため、既存漁港施設のコンクリート構造物を対象とした原位置試験を行い、測定精度、測定値のばらつきを評価するとともに構造物の表面粗度の違いの影響について検討を行った。

表-1 非破壊試験の種類、概要および特徴^{6)より改変}

測定目的	種類	概要	特徴
コンクリートの強度	反発度法	コンクリート表面を打撃して反発硬度を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ・測定が簡便である ・測定する対象構造物の形状や寸法にあまり制約がない ・測定値のばらつきが大きい
	超音波法	超音波を伝達させてその速度を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ・測定する対象構造物の形状や寸法にあまり制約がない ・同一箇所に繰り返し適用できる ・鉄筋があると精度が下がる
	衝撃弾性波法	打撃によって弾性波を発生させ、伝達速度を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ・長大構造物に適用可能 ・表面処理不要 ・同一箇所に繰り返し適用できる ・コンクリートの品質によって伝達速度が変化する ・伝達速度と圧縮強度の関係を事前に把握する必要がある

3.2 反発度法および機械インピーダンス法の特徴

反発度法（図-3 参照）は、コンクリート表面をリバウンドハンマーによって打撃し、その反発度から圧縮強度を求める方法である。コア採取によるコンクリート強度測定と比較して、試験方法が簡易なことや構造物への損傷が少ないことなどから、目視調査の補完や予備的試験に広く用いられる。しかし、測定機器の器差が大きいこと、同一箇所でも繰り返し測定できないこと、および材料による推定強度のばらつきが大きいこと等も報告されている^{5), 6), 7)}。

機械インピーダンス法（図-3 参照）は、インパルスハンマーでコンクリート表面を打撃し、その打撃力波形から接触インピーダンスを求め、コンクリート強度を推定する方法である^{7), 8)}。具体的には、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の打撃応答波形（図-4 参照）を測定することで、コンクリートの圧縮強度の推定、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⁹⁾。



図-3 機械インピーダンス法（左、研磨前）と反発度法（右、研磨後）の測定状況

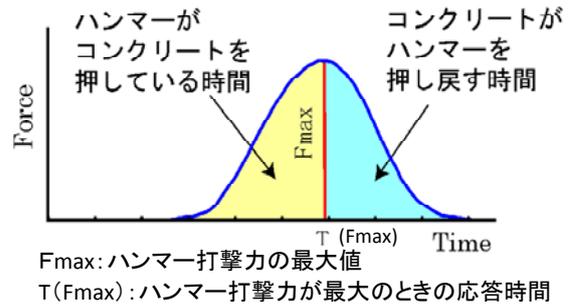


図-4 打撃応答波形の概念図⁹⁾

機械インピーダンス法の測定原理は、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ため、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とすると（図-5 参照）、式(1)と表現される。

$$F = KX \quad (1)$$

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、式(2)となり、式(3)が得られる。

$$1/2MV^2 = 1/2KX^2 \quad (2)$$

$$(MK)^{1/2} = FV \quad (3)$$

ここで $(MK)^{1/2}$ 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^{9), 10)}。

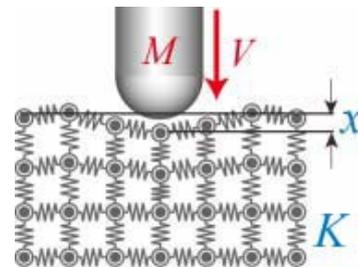


図-5 ハンマーの衝突¹⁰⁾

表-2 既存漁港施設における測定箇所等

都道府県	漁港名	施設名	構造形式	建設年次	測定箇所 (スパンNO.)	測定項目, 測定点数	備考
青森県	宇鉄漁港	東防波堤	コンクリート 単塊式	昭和58年	1箇所 (NO.40)	コア採取による圧縮強度試験: 1点 反発度法: 研磨前後でそれぞれ20点 (3cm間隔メッシュ)	・コア採取による圧縮 強度試験結果は青森 県外ヶ浜町より提供
		護岸		昭和56 ~57年	1箇所 (NO.11)		
		-2.0m 物揚場		昭和57年	1箇所 (NO.2)		
新潟県	筒石漁港	西護岸	重力式 護岸	昭和55年 ~平成18年	1箇所 (NN1)	コア採取による圧縮強度試験: 3点 反発度法: 研磨前後でそれぞれ20点 (3cm間隔メッシュ) 機械インピーダンス法: 研磨前後でそれぞれ25点 (3cm間隔メッシュ)	・コア採取による圧縮 強度試験結果は3本の 平均値
	能生漁港	北防波堤	重力式 防波堤	昭和55年 ~平成17年	2箇所 (TB1, TB3)		

4. 測定対象漁港施設・箇所の選定

反発度法および機械インピーダンス法によるコンクリート強度推定方法について、漁港施設への適用性を検討するため、両手法による測定とともにコアによるコンクリート圧縮強度試験（JIS A 1108, φ100mm, 表面から200mm）もあわせて行った。

既存漁港施設における構造形式、建設年次、測定箇所、測定項目および測定地点数は、表-2のとおりである。

青森県宇鉄漁港では、青森県外ヶ浜町が実施したコアによる圧縮強度試験箇所でコンクリート表面を研磨し、その前後で反発度法を実施した。研磨は、目視によってコンクリート表面に凹凸がないと判断できる程度（約1mm）に電動ディスク研磨機（100mm ディスクグラインダ（粒度#60））を用いた。

新潟県筒石漁港、能生漁港では、西護岸（NN1, NN3 の1箇所）、北防波堤（TB1, TB3 の2箇所）において、研磨前後における反発度法と機械インピーダンス法による測定を行い、同一箇所でもコアを採取して圧縮強度試験を行った。なお、研磨は、宇鉄漁港の方法と同様とした。



図-6 宇鉄漁港と能生漁港（北防波堤）の概観

両漁港の施設ともに建設年次に幅があるものの測定箇所は、施設の中でも古い構造体とした。また、これらの施設は、改良等の履歴不明、または実績なしとされており、設計図書等が残されていないため、材料の配合などは不明であったものの、構造形式から無筋コンクリート構造であると想定された。

5. 結果と考察

青森県宇鉄漁港における反発度法およびコア採取による圧縮強度試験の結果を表-3に示す。測定は、いずれも20回の打撃を行って、これらの反発度（R値）の平均値からコンクリート強度を推定した。また、日本材料学会による指針（案）に準拠して、平均値の±20%以上の値を除外したものを有効データ数とし、これらの反発度（R値）の平均値からコンクリート強度の推定を行った¹¹⁾。

研磨前の推定強度は、コアによる圧縮強度より小さくなる傾向であった。いずれの測定地点でも研磨後の推定強度は、コアによる圧縮強度に近づき、研磨前後で変動係数が低下した。反発度法による測定は、研磨により、データのばらつきが低下し、実強度の推定精度が向上するといえる。

本手法の適用にあたっては、従来いわれているように測定面の平滑化が重要であり、コンクリート表面の研磨が必要である¹¹⁾。また、本手法は、不均質材料の場合、打撃点の骨材、コンクリート表面の風化、乾湿状態によって反発度に差が生じるとされることから⁷⁾、対象施設の材料や状況によって、推定精度の悪化やバラつきが

表-3 青森県宇鉄漁港における測定結果

都道府県		青森県					
漁港名		宇鉄漁港					
施設名		東防波堤		護岸		-2.0m物揚場	
測定方法		NO. 40		NO. 11		NO. 2	
		研磨前	研磨後	研磨前	研磨後	研磨前	研磨後
反発度法	データ数	20	20	20	20	20	20
	推定強度：a ^{*1} (N/mm ²)	6.7	16.3	21.6	26.0	11.7	22.4
	標準偏差	4.8	10.2	9.7	5.8	6.3	8.6
	変動係数（%）	71.6%	62.6%	44.9%	22.3%	53.8%	38.4%
	a/c（%）	28.6%	69.7%	83.4%	100.4%	46.4%	88.9%
	有効データ数	11	12	12	17	13	12
	推定強度：b ^{*1} (N/mm ²)	7.8	16.4	19.2	26.3	11.1	22.6
	標準偏差	2.6	2.9	3.3	3.6	2.5	4.2
	変動係数（%）	33.3%	17.7%	17.2%	13.7%	22.5%	18.6%
	b/c（%）	33.3%	70.1%	74.1%	101.5%	44.0%	89.7%
コアによる 圧縮強度試験	圧縮強度：c (N/mm ²)	23.4		25.9		25.2	

*1：反発度法の圧縮強度 a、b は、 $b = -184 + 13.0 * R_0$ によって求めた¹¹⁾。

表-4 新潟県筒石漁港、能生漁港における測定結果

都道府県		新潟県					
漁港名		筒石漁港		能生漁港			
施設名		西護岸		北防波堤			
測定方法		NN1		TB1		TB3	
		研磨前	研磨後	研磨前	研磨後	研磨前	研磨後
反発度法	推定強度：a ^{*1} (N/mm ²)	11.3	28.1	11.6	18.7	14.4	21.9
	標準偏差	1.7	3.1	2.4	3.3	2.7	3.3
	変動係数 (%)	15.0%	11.0%	20.7%	17.6%	18.8%	15.1%
	a/c (%)	41.4%	102.9%	49.8%	80.3%	65.5%	99.5%
機械インピーダンス法	推定強度：b ^{*2} (N/mm ²)	21.6	26.2	22.1	25.3	19.7	23.6
	標準偏差	7.7	7.2	9.5	6.2	2.8	7.3
	変動係数 (%)	35.9%	27.4%	43.1%	24.3%	14.2%	30.9%
	b/c (%)	78.9%	96.0%	94.9%	108.8%	89.6%	107.4%
コア採取による 圧縮強度試験	平均圧縮強度：c (コア3本の平均値, N/mm ²)	27.3		23.3		22.0	

*1：反発度法の推定強度 a は、 $a = -184 + 13.0 \cdot R_0$ によって求めた¹¹⁾。
 *2：機械インピーダンス法の推定強度 b は、 $b = 2.98 \times \text{機械インピーダンス値} - 13.35$ によって求めた¹²⁾。

大きくなる場合があります、適用にあたっては研磨の実施、機器や施設ごとの実強度との比較などが必要である。

表-4は、新潟県筒石漁港、能生漁港における反発度法、機械インピーダンス法およびコア採取による圧縮強度試験の結果を示したものである。反発度法の測定および推定強度は、青森県宇鉄漁港の方法と同様とした。また、機械インピーダンス法の測定および推定強度は、「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）」に準拠した¹²⁾。

反発度法の測定結果は、青森県宇鉄漁港の結果と同様、研磨前の推定強度がいずれもコアによる圧縮強度より小さく（a/cが41.4～65.5%）、研磨後の推定強度がコアによる圧縮強度に近づく傾向があった（a/cが80.3～102.9%）。本手法の適用にあたっては、研磨による平滑化が重要であることを示しており、今回の結果ではコアによる圧縮強度と比較して、±20%範囲になった。

機械インピーダンス法による測定結果は、研磨前の推定強度bがコアによる圧縮強度cより小さくなる傾向があったものの反発度法の測定結果よりcに近い傾向があった（b/cが78.9～94.9%）。本手法は、研磨前で、約8割程度の精度で実強度を推定できることを示しており、研磨した反発度法と同程度の差であった。一方、研磨後の測定結果は、反発度法と同様、コアによる圧縮強度cに近づく傾向があった（b/cが96.0～108.8%）。この傾向は、海岸保全施設でも報告されており¹³⁾、本手法も反発

度法と同様、コンクリート表面を研磨することによって、測定精度の向上が図られる。

本手法は、打撃のたびに応答波形を記録して測定を行うため、多くのデータ取得が可能である。図-7にコア供試体の表面を測定した打撃応答波形の一例を示す。図-5で示したハンマーがコンクリート表面を押している時間の波形とコンクリートがハンマーを押し戻す時間の波形は左右対称であるとともに、立ち上がりが滑らかでかつピークが明確になる打撃応答波形が多い場合、測定値の変動も少なく、信頼性の高いデータと言える^{12,13)}。

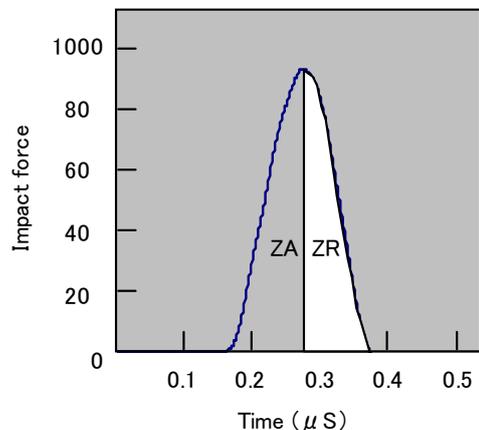


図-7 コンクリート表面の打撃応答波形の一例¹³⁾

反対にこのような打撃応答波形でない場合（図-8 参

照), このようなデータを除外して, 測定精度を確保することが可能である。したがって, 本手法は, 打撃応答波形が正しく記録されていない場合や研磨しないことなど, 打撃点の骨材やコンクリート表面の状態等が違って多めにデータを採取することで, 測定精度を確保できる。

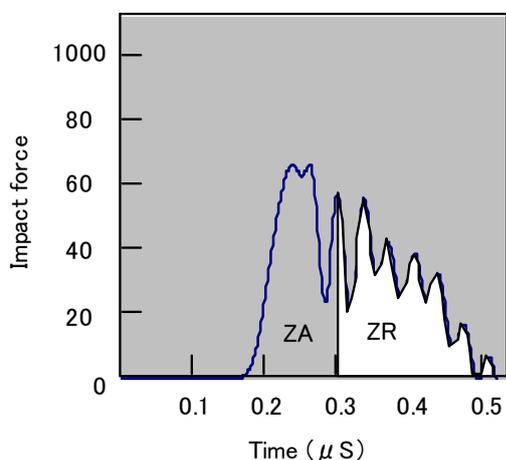


図-8 コンクリート表面の打撃応答波形の一例¹³⁾

6. まとめ

反発度法および機械インピーダンス法を既存漁港施設への簡便な老朽化診断手法としての適用性を検討した結果, 以下の結論を得た。

- 1) 反発度法は, 測定面を研磨し, 推定強度を求めることで漁港施設への適用も可能である。ただし, 構造形式や建設年次ごとにコアによる圧縮強度との関係を確認することが望ましい。
- 2) 機械インピーダンス法は, 研磨前の推定強度でも反発度法のものより, コアによる圧縮強度試験結果と近くなる傾向があった。また, 本手法は, 研磨しなくとも, 打撃応答波形を確認することで一定の精度を確保できるため, 現地では反発度法より現地での簡易計測が可能である¹²⁾。

以上より, 長大かつ多くのストックがある漁港施設の簡易的な圧縮強度推定には機械インピーダンス法の適用が望ましい。今後もこれらの手法に着目して, 立地場所, 構造形式, 建設年次が異なるデータを蓄積するとともに, 材料, 材齢やコンクリート表面の劣化状況等の影響についても検討する予定である。

なお, 本研究の一部は, 水産庁水産基盤調査委託事業「漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」により調査したデータをもとに, 筆者らがとりまとめたものである。

謝辞:

調査の実施にあたり, 水産庁, 新潟県, 青森県, およ

び青森県外ヶ浜町の関係者の方々に多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三上信雄, 藤田孝康, 極檀邦夫, 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. 131, NO. 2, pp. 1555-1560, 2009
- 2) 漁港漁場漁村ポケットハンドブック編集委員会: 漁港漁場漁村ポケットブック2000. 社団法人全国漁港協会, 東京, p217, 2012
- 3) 梅津啓史, 林浩志, 三上信雄: 漁港施設のこれまでの整備状況と今後の維持・更新対策の必要性, 水産工学, Vol. 46, NO. 2, pp. 181-186, 2009
- 4) 水産庁漁港漁場整備部, 財団法人漁港漁場漁村技術研究所: 効率的な維持更新方策の検討調査報告書, pp. 31-51, 2006. 3
- 5) 社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術, '09「基礎編」, pp. 67-178, 2009
- 6) 日経コンストラクション編: これから始めるコンクリート補修講座, 日経BP, pp. 3-8, 2002
- 7) 久保元樹, 極檀邦夫, 境友昭, 久保元: 円柱供試体の圧縮強度と弾性波速度, 機械インピーダンスおよび弾性係数の相関関係, 第60回土木学会学術講演大会講演概要集, 第V部, pp. 1207-1208, 2005, 9
- 8) 金田元樹, 久保元, 境友昭, 極檀邦夫: ハンマー打撃によるコンクリート強度の推定, コンクリート工学2006年5月特集号, 最新コンクリート計測技術, Vol. 44, No. 5, pp. 41-44, 2006
- 9) 極檀邦夫, 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, pp. 1995-2000, 2004. 6
- 10) 久保元樹, 極檀邦夫, 森濱和正, 境友昭: 機械インピーダンスおよび衝撃弾性波法による実物大模型擁壁の健全性の測定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 1711-1716, 2005. 6
- 11) 社団法人日本材料学会: 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方法指針(案), 材料試験, 第7巻, 第59号, pp. 426-430, 1958. 8
- 12) http://nrife.fra.affrc.go.jp/seika/inpidansuhoumanyuaru/inpitannsu_index.html
- 13) 三上信雄, 藤田孝康, 保坂三美, 極檀邦夫, 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の適用に関する研究, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 181-186, 2009. 6