

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

STUDY OF SIMPLE DETERIORATION DIAGNOSIS METHOD FOR EFFICIENT MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF COASTAL STRUCTURE

三上信雄¹・藤田孝康²・保坂三美³・極壇邦夫⁴・重松宏和⁵・笠井哲郎⁶
Nobuo MIKAMI, Takayasu FUJITA, Miyoshi HOSAKA, Kunio GOKUDAN,
Hirokazu SHIGEMATSU and Tetsuro KASAI

¹ 正会員 (独)水産総合研究センター 水産工学研究所 (〒314-0408 茨城県神栖市波崎 7620-7)

² (社)水産土木建設技術センター 調査研究部 (〒104-0045 東京都中央区築地 2 丁目 14-5)

³ (財)漁港漁場漁村技術研究所 第1 調査研究部 (〒101-0047 東京都千代田区内神田 1 丁目 14-10)

⁴ 正会員 工修 iTECS 技術協会理事長 (〒300-2633 茨城県つくば市遠東 90-1)

⁵ 東海大学 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

⁶ 正会員 工博 東海大学工学部土木工学科教授 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

The majority of coastal structure in Japan meet the update period, and their deteriorations are concerned. Also, the increase cost of the maintenances and repairs is expected. To reduce the further cost, adaption of Life Cycle Management is examined as the management and maintenance method. It is indispensable to grasp degree of deterioration of the facilities precisely and continuously to adapt the Life cycle management. Yet, there is a problem in differences in quality of evaluation of the deterioration depending on appraisers and efficiency of the diagnosis. Therefore accuracy improvement of diagnosis of deterioration and a diagnosis procedure by quantitative and simple setting of the standard is required. In this study, the formularization of estimated equation of strength of a concrete structure that is the main type of the coastal structure was examined by laboratory and field experiment with Mechanical-Impedance Method.

Key Words : Coastal structure, Life Cycle Management, deterioration diagnosis,
Mechanical-Impedance Method

1. はじめに

我が国の沿岸構造物は、膨大なストックを有しており、その多くが老朽化し、施設の維持・補修等に係わる費用増大が懸念されている。一方、国や自治体の財政状況は厳しさを増しており、維持管理に係わる担当者数は不足している。このような状況の中、社会資本の供用期間内での補修・改良等の維持管理費を含めた総費用（ライフサイクルコスト）の最適化を図る管理手法であるライフサイクルマネジメントの適用が注目されている。

しかしながら、ライフサイクルマネジメントの適用は、対象施設の老朽化診断の精度向上、老朽化診断の簡易化、劣化予測やライフサイクルコスト算定の精度向上等、様々な課題を抱えながら進められているのが現状である。特に、老朽化診断の精度向上及び簡易化は、膨大なストックを有する沿岸構造物

が対象であること、目視においては評価者の知識・技能・経験などの違いにより診断結果が大きく異なること等が課題として挙げられる。

このような状況より、水産庁では、平成 20 年度に「海岸保全施設の老朽化調査及び老朽化対策計画策定のための実務版マニュアル（暫定版）（以下、「マニュアル」という）」¹⁾、平成 21 年度に「機能保全計画策定の手引き（案）（以下、「手引き（案）」という）」²⁾等を策定し、これによって、管理者が沿岸構造物を対象とした老朽化調査、老朽化対策計画の策定、老朽化対策工事を行う際の参考になるように示された。特に、老朽化調査では、効率化の観点から簡易調査と詳細調査による段階的な調査方式によることとされた。簡易調査においては、目視中心の点検方法として、構造形式ごとに老朽化状態を評価するための調査様式（以下、「簡易調査様式」という）が示されており、評価者の違いによる診断結

果のバラツキを低減するよう工夫がなされている。

一方、著者ら³⁾は、海岸保全施設におけるコンクリート構造物を対象とした簡易的な老朽化診断手法として、衝撃弾性波法のうち、ハンマーによるコンクリート打撃応答波形からコンクリートの圧縮強度を推定する機械インピーダンス法の適用性を報告している。

本研究では、沿岸構造物の主要構造形式であるコンクリート構造物を対象として、目視による簡易調査様式の妥当性について実構造物を用いて検証するとともに、簡易的な老朽化診断手法として、機械インピーダンス法（以下、「本手法」という）による強度推定に関して、室内試験および実構造物を用いた現地試験による強度推定式の定式化を検討した。

2. 沿岸構造物の老朽化診断と機械インピーダンス法

(1) 沿岸構造物における老朽化診断の評価指標

海岸保全施設や漁港施設等の沿岸構造物は、コンクリート構造物、中でも無筋コンクリート構造物が多いことが知られている⁴⁾。このような沿岸構造物において的確な老朽化診断を実施するためには、「変状の進行状態の的確な把握」と「機能低下に及ぼす影響の程度の把握」を念頭に、現場技術者が比較的容易に施設の老朽化状態と必要となる対策を判断できる実用的な診断手法が必要となる。このため、効率的かつ合理的な老朽化診断が可能となるように、簡易調査様式に具体的かつ分かりやすい判定基準が提示されたところである^{1), 2)}。

しかしながら、目視中心の簡易調査では評価者の違いによるバラツキが出る可能性が指摘されており、現場では評価の補完データとして客観性のある指標の提示が求められている。また、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、構造物の老朽化状態を評価する場合においては、剥離や空洞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が広く行われている。このうち、コンクリート強度は、構造体の耐久性といった老朽化に関する客観的指標として重要である。

コンクリートの強度に関わる試験方法としては、コアによる圧縮強度試験や簡易的な反発度法が一般的に用いられる。圧縮強度試験(JIS A1108)は、非破壊試験よりも推定強度の精度が高いとされるが、施設本体の損傷を伴うことや試験費用が高く、結果を得るまでの時間が長い等の問題点がある。このため、一定の精度を確保した簡易的な老朽化診断手法の開発が期待されているところである³⁾。

(2) 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。

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(TA)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(TR)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-1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。ZAはTAの数値積分、ZRはTR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⁶⁾。

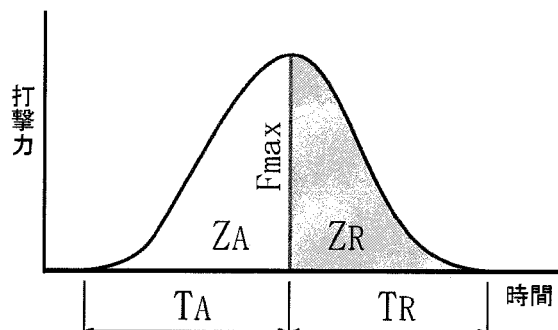


図-1 打撃応答波形の概念図⁶⁾

3. 調査および試験方法

(1) 現地調査による簡易調査様式の検証

千葉県銚子市の銚子漁港（-4.5m岸壁）（図-2参照）において、手引き（案）の簡易調査様式を用いて評価者の違いによる老朽化度評価のバラツキに関する調査を行った。調査は、老朽化調査に関わる経験者7名と未経験者（工学部学生）11名の合計18名で実施した。



図-2 銚子漁港-4.5m岸壁

a) 機械インピーダンス値と JIS 供試体強度の測定
(室内試験)

b) 既存構造物による機械インピーダンス強度の検証（現地試験）

機械インピーダンス法の実施状況を図-3 に、既存構造物の代表的な標準断面図を図-4、5 示す。

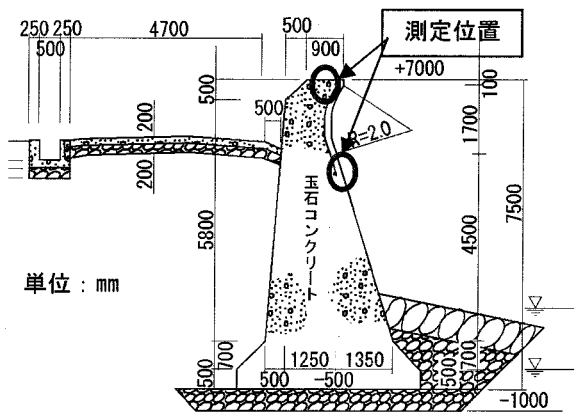


図-4 小田原漁港海岸保全施設の標準断面図



図-3 機械インピーダンス法の実施状況

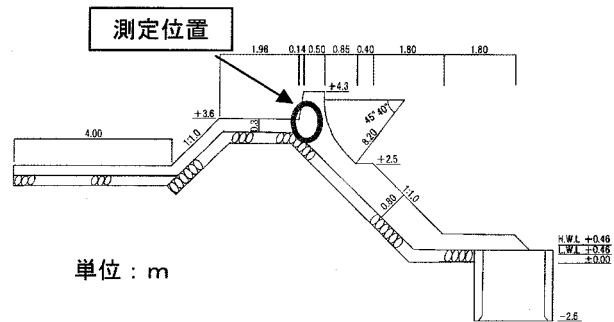


図-5 滑川漁港海岸保全施設の標準断面図

表-1 簡易調査様式（抜粋）の1例

対象施設	調査項目		調査方法	老朽化度の判断基準		判定結果	計測寸法 (最大値)				
矢板式 係船岸	岸壁法線	凹凸、出入り	目視 ・移動量 ・沈下量	a	隣接する上部工との間に20cm以上の凹凸がある。		L = 				
					性能を損なうような法線のはらみ出しがある。						
				b	法線のはらみ出しがある。						
					c			隣接する上部工との間に10～20cm程度の凹凸がある。			
				d	上記以外の場合で、隣接する上部工との間に10cm未満の凹凸がある。						
	エプロン (通常の場合)	沈下、陥没	目視	a	矢板式本体背後の土砂が流出している。		H = 				
					矢板式本体背後のエプロンが陥没している。						
					車両の通行や歩行に重大な支障がある。						
				b	矢板式本体背後の土砂が流出している可能性がある。						
					エプロンに3cm以上の沈下(段差)がある。						
					エプロンと後背地の間に30cm以上の沈下(段差)がある。						
				c	エプロンに3cm未満の沈下(段差)がある。						
					エプロンと後背地の間に30cm未満の沈下(段差)がある。						
				コンクリートまたは アスファルトの劣 化、損傷	目視 ・コンクリートまたはア スファルトのひび割れ、損傷			a	コンクリート舗装でひび割れ度が2m/m以上である。		L =
									アスファルト舗装でひび割れ率が30%以上である。		
		b	車両の通行や歩行に支障があるひび割れや損傷が見られる。								
			コンクリート舗装でひび割れ度が0.5～2m/mである。								
		c	アスファルト舗装でひび割れ率が20～30%である。								
		d	若干のひび割れが見られる。								
		上部工	コンクリートの劣 化、損傷	目視 ・ひび割れ、剥離、損傷 ・鉄筋露出 ・劣化の兆候など	a	係船岸の性能を損なうような損傷がある。		L = B = S = 			
幅3mm以上のひび割れがある。											
b	広範囲に亘り鉄筋が露出している。										
	c				幅3mm未満のひび割れがある。						
d	局部的に鉄筋が露出している。										
	変状なし。										

4. 結果および考察

(1) 簡易調査様式の妥当性の検証結果

簡易調査様式は、表-1 のとおりである。この簡易調査様式を用いて銚子漁港で実施した調査結果を図-6 に示す。ここでは、各調査者の老朽化調査の経験の有無による違いを分析するため、老朽化調査の経験者と未経験者ごとに集計している。図より、経験者と未経験者の評価結果は、項目によって違いはあるものの未経験者においてバラツキが大きい傾向が見られる。

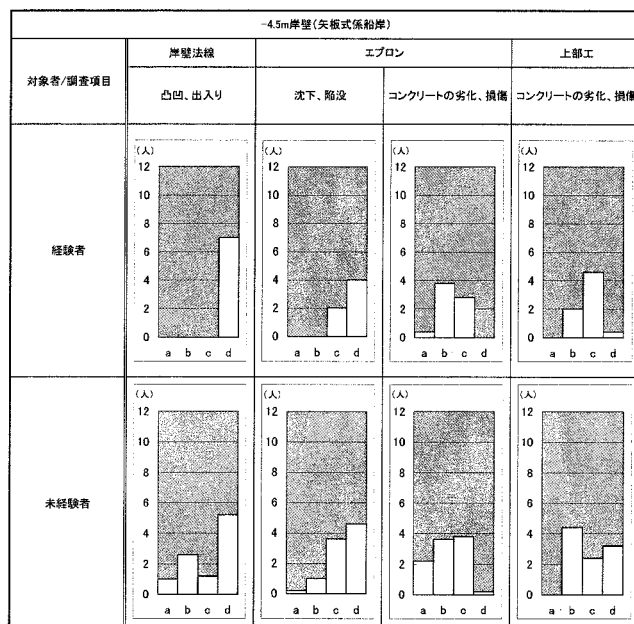


図-6 簡易調査様式による評価結果のバラツキ一覧

次に、経験者と未経験者の各項目ごとのバラツキ度合いを定量的に把握するため、各調査者の評価結果を「a=1」、「b=2」、「c=3」、「d=4」のように点数化し、標準偏差を求めた(表-2)。表より、経験者と未経験者では各調査項目の平均値に関しては大きな違いは見られない。しかし、標準偏差においては、経験者ではエプロンと上部工で若干バラツキ(0.48~0.59)があるものの大幅な相違はないのに対し、未経験者では全体的にバラツキが大きく(0.76~1.10)、調査者の調査経験の有無によって老朽化度の判定が変わる可能性が示唆された。

表-2 評価結果の点数化によるバラツキの変動性

銚子漁港		経験者(7人)		未経験者(11人)		全体(18人)	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
-4.5m岸壁 (矢板式係船岸)	岸壁法線	4.00	0.00	3.06	1.10	3.53	0.90
	凹凸、出入り	3.67	0.48	3.34	0.76	3.47	0.68
	エプロン (通常の 場合)	2.34	0.59	2.20	0.82	2.26	0.73
	コンクリートまたはアス ファルトの劣化、損傷	2.77	0.55	2.88	0.87	2.84	0.75

また、経験者においても「コンクリートの劣化、損傷」等判定基準が定性的な項目ほどバラツキが大きくなる傾向が現れており、客観的指標による判定基準の明確化や判定事例の提示等の簡易調査様式の改善が必要であると考えられる。

(2) 機械インピーダンス法による強度推定方法の検討

a) 機械インピーダンス値と JIS 供試体強度の関係 (室内試験)

水セメント比(W/C)を8段階(35~80%)変化させたコンクリート円柱供試体($\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$)の配合条件を表-3 に示す。

機械インピーダンス値(Z_R)と JIS 供試体強度の関係を、図-7 に示す。図より、機械インピーダンス値(Z_R)と JIS 供試体強度の相関は高く($R^2=0.93$)、本手法による強度推定の妥当性を示している。

表-3 コンクリート円柱供試体の配合条件 (室内試験)

W/C	s/a	Air	単位量(kg/m ³)				平均圧縮強度
(%)	(%)	(%)	W	C	S	G	(N/mm ²)
35	46.0	4.5	170	486	752	907	70.3
40	47.6			425	802	907	58.9
50	45.0		167	334	795	998	45.1
55	46.0		168	305	822	992	38.8
60	47.0		168	280	850	985	37.3
65	48.0		169	260	875	973	29.1
70	48.5		170	243	890	970	23.7
80	49.5			213	920	964	20.0

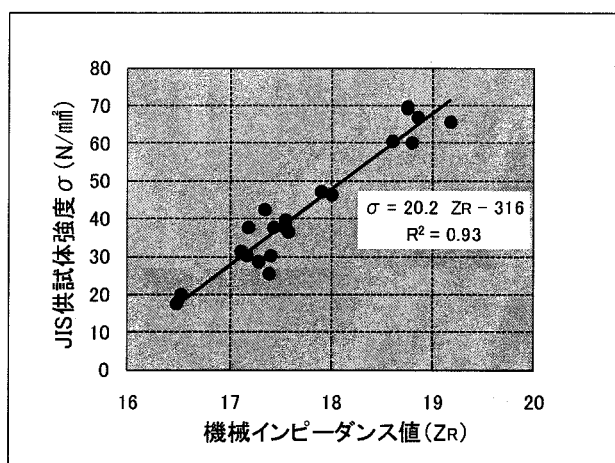


図-7 機械インピーダンス値(Z_R)と JIS 供試体強度の関係 (室内試験)

b) 既存構造物による機械インピーダンス強度の検証 (現地試験)

① 既存沿岸構造物におけるコンクリートの強度推定方法

4 つの漁港の既存構造物において測定した機械インピーダンス強度とコア供試体強度の関係を図-8 に示す。なお、ここで示す機械インピーダンス強度は、久保ら⁶⁾が提唱しているコンクリート材料を変えた検証から導いた推定式(以下、「推定式」という)を用いて機械インピーダンス値(Z_R)から算出

した。図から、各漁港における建設年次や環境条件により強度にバラツキが見られるものの、機械インピーダンス強度とコア供試体強度の相関は良好であり ($R^2=0.74$)、既存構造物におけるコンクリートの強度推定において機械インピーダンス法の適用性が高いことが確認された。

今回の試験結果から求められる一次近似式 ($y = 1.07x + 8.46$) を用いて、前述の推定式による推定強度を補正することで、精度の高い圧縮強度の推定が可能となると考えられる。

なお、全体的に機械インピーダンス強度は、コア供試体強度に比べ小さくなる傾向が見られるが、これは、既存構造物における表層部の劣化による機械インピーダンス強度の低下³⁾が影響しているものと思われる。

このように、機械インピーダンス法を用いることにより、一定の精度を確保した既設沿岸コンクリート構造物の強度の簡易的な把握が可能である。

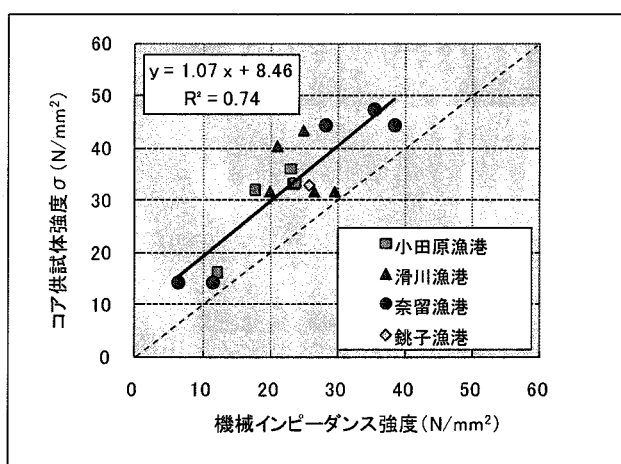


図-8 機械インピーダンス強度とコア供試体強度の関係

② 既存構造物に対する機械インピーダンス強度の精度向上に関する検討

著者らは、詳細な打撃応答波形の解析によって、機械インピーダンス強度の精度向上が可能であることについて報告している³⁾。

機械インピーダンス法は、前述したように、ハンマーがコンクリート表面を押している時間の波形 (ZA) と押し戻される時間の波形 (ZR) を測定している。しかし、既存構造物においては表層部の劣化進行によって、打撃応答波形の乱れが生じる。そこで、奈留漁港における測定値の打撃応答波形をその形状により、次のように3分類した。

- ・ [波形 type1] : ZA と ZR がほぼ対称で波形が乱れていない (図-9)
- ・ [波形 type2] : ZA と ZR が非対称であり、ZA の波形が乱れる (図-10)
- ・ [波形 type3] : ZA と ZR が非対称であり、ZA と ZR の波形が双方ともに乱れる (図-11)

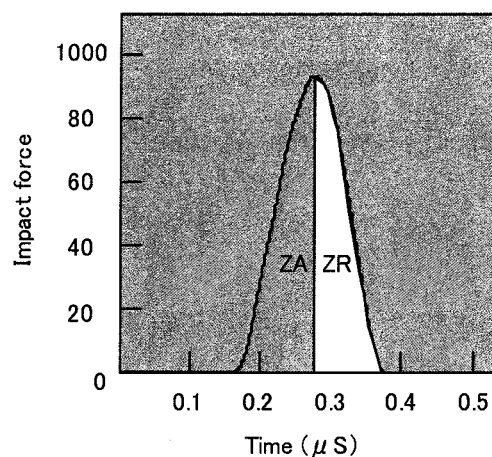


図-9 波形 type1

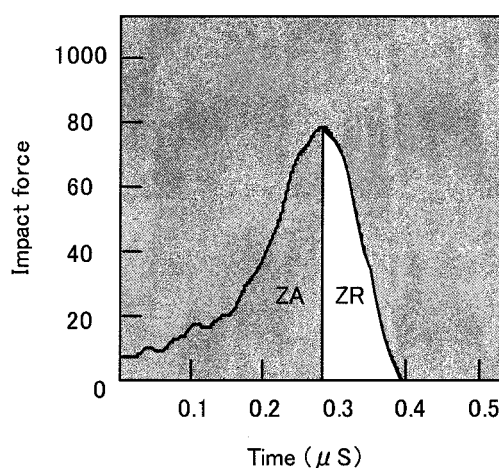


図-10 波形 type2

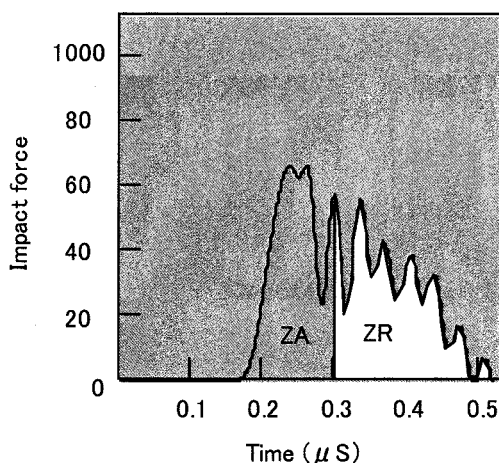


図-11 波形 type3

これまでの測定結果を分析すると、波形 type3 は、ZA がピークまで達していないため機械インピーダンス強度が正しく推定できておらず、コア供試体 JIS 強度との相関は悪い。そこで、既存構造物の機械インピーダンス強度の推定精度向上を検討するため、奈留漁港における測定データを基に、波形 type3

を除外して機械インピーダンス強度の整理を行った。その結果を表-4に示す。表からわかるように、type3に属するデータを除外して推定した機械インピーダンス強度は、波形分類前の前データによるものと比べコア供試体強度に近づく結果となった。

また、併せて精度向上策として考えられているコンクリート表面の平滑化処理による測定結果についても同様な処理を行った。その結果、type3の波形自体が減少しており、平滑化による精度向上策の有効性が確認された。ただし、“平滑化処理による推定強度”よりも“波形処理による推定強度”の方がよりコア供試体 JIS 強度に近い値となっている。

これらより、建設年次が古く、表層部の劣化が進行している沿岸域のコンクリート構造物における機械インピーダンス強度の測定にあたっては、現地での作業を伴う表面平滑化処理よりも、波形分類による解析処理の方が、効率性および簡易化の観点から有効と考える。

表-4 奈留漁港における表面平滑化前後の打撃応答波形処理による推定強度とコア供試体強度の比較

測定項目	奈留漁港			
	波形処理前	波形処理後	波形処理前	波形処理後
	表面平滑化前		表面平滑化後	
強度推定対象データ数	100	63	100	83
機械インピーダンス強度 (N/mm ²)	28.30	44.07	38.31	46.63
平均コア供試体強度 (N/mm ²)	44.36			

5. まとめ

本研究では、既存沿岸コンクリート構造物を対象として、簡易的な老朽化診断手法に関して検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 簡易調査様式を用いた老朽化度評価は、平均的には経験者と未経験者で大幅な相違がなく、初期段階の概略的な老朽化状態の評価において効果的である。
- (2) 簡易調査様式の個別評価事項に関しては、老朽化調査経験の有無により評価結果が変動する可能性があり、客観的指標による判定基準の明確化や判定事例の提示等の様式の改善が必要である。

- (3) 機械インピーダンス強度は、コア供試体強度と高い相関が見られ、精度の高いコンクリート構造物の簡易強度推定手法として有効である。
- (4) 既存沿岸コンクリート構造物における機械インピーダンス強度の測定にあたっては、表層部の劣化等によって強度推定精度が落ちるが、表面平滑化処理や打撃応答波形の解析によって、精度向上が可能である。
- (5) 機械インピーダンス法の現地適用性に関しては、効率性および簡易化の観点から、現地の作業を伴う表面平滑化よりも波形分類による解析処理の方が有効である。

今後の課題としては、コンクリートの材齢や含水状況などの材料特性に関する検証を進める必要があると考える。今後は、室内試験や現地試験を継続し、材料特性による推定強度の影響、これらによる打撃応答波形の類型化について検討を進め、実用性の向上の観点から研究を行う予定である。

謝辞：本研究は、（財）漁港漁場漁村技術研究所の研究助成事業による研究成果をとりまとめたものである。また現地試験の実施にあたって、千葉県、神奈川県、富山県、および長崎県の関係者の皆様にご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 農林水産省水産庁防災漁村課：海岸保全施設の老朽化調査及び老朽化対策計画策定のための実務版マニュアル（暫定版），2008。
- 2) 農林水産省水産庁漁港漁場整備部：機能保全計画策定の手引き（案），2009。
- 3) 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な老朽化診断手法の適用に関する研究，海洋開発論文集，Vol. 25，pp. 181-186，2009. 6。
- 4) 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. 31，No. 2，pp181-186，2009。
- 5) 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，pp1995-2000，2004. 6。
- 6) 久保元樹，中野泰宏，大高道夫，小島俊一，極檀邦夫：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トンネル技術研究発表会論文集，pp. 72-82，2007. 2。