

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

STUDY OF ADAPTATION OF SIMPLE DETERIORATION DIAGNOSIS METHOD
IN MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF COASTAL PROTECTION WORKS

三上信雄¹・藤田孝康²・保坂三美³・極檀邦夫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)水産工学研究所 漁港施設研究室 室長 (〒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 protection works 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 a diagnosis procedure by quantitative and simple setting of the standard is required. In this study, we tested a simple measurement of concrete strength among deterioration diagnosis for concrete structure in coastal protection works. Also, we examined the applicability of the Mechanical-Impedance Method among Impact Elastic Wave Length Method said to be suitable for concrete structures by comparing with Rebound Method and with compressive strength by core in laboratories and practical situations.

Key Words : *Coastal protection works, Life Cycle Management, deterioration diagnosis
Mechanical-Impedance Method*

1. はじめに

我が国の海岸保全施設は、延長約 33,000km に及ぶ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い状況にあるとともに、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、海岸保全施設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:以下、「LCC」という)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(以下、「LCM」という)の適用が注目されている。海岸保全施設を対象とした老朽化診断は、水産庁によって、「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)」が策定され、管理者が海岸保全施設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ている¹⁾。

しかしながら、海岸保全施設への LCM の適用は、緒についたばかりであり、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 LCC 算定の精度向上等、様々な課題がある。特に、老朽化診断の精度向上及び簡易化は、膨大な延長を有する海岸保全施設が対象であること、目視においては診断者の知識・技能の違いにより診断結果が大きく異なること、また対象施設の立地状況(例えば、埋没や消波工設置による見落とし等)によっては目視による老朽化診断が困難であることなどが課題として挙げられる。

このような多くの既存ストックを有し、様々な立地条件における海岸保全施設の維持管理を適切に行うため、一定の精度を確保し、効率的かつ簡易的な老朽化診断手法の開発が求められている。

本研究は、海岸保全施設の主要構造形式であるコ

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コンクリート強度を推定する機械インピーダンス法（以下、「本手法」という）について、その有効性を供試体による室内試験と既存構造物による現地試験により検証したものである。

2. 海岸保全施設に適用可能な老朽化診断手法と機械インピーダンス法

(1) 海岸保全施設の特徴

我が国の海岸保全施設は、昭和30～40年代まで、特に高度経済成長期に整備された施設が多く、建設後の時間が経過し、建設時材料の経年劣化による老朽化や波浪等の外力による変状発生による老朽化が懸念されている（図-1）。これらの施設は今後、ますます老朽化が進行し、維持管理費が増大することが見込まれており、その対応が急がれている。



図-1 老朽化した海岸保全施設の事例

海岸保全施設は、以下のような特徴が挙げられており、このような特徴を踏まえて簡易的な老朽化診断手法を検討する必要がある。

- a) コンクリートが主要材料であり、無筋コンクリート構造の施設が多い。
- b) 沿岸域に設置されており、波浪や海水による物理的磨耗や化学的腐食等によってコンクリート表層部の劣化が生じやすい。

(2) 海岸保全施設に適用可能な老朽化診断法

前述したように海岸保全施設は、無筋コンクリート構造物が多いという特徴を有している。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。このため、構造物の老朽化を評価する場合、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行われる。コンクリート強度は、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ている。剥離や空洞等の欠陥

は、その前兆が見られる場合は詳細調査によって、規模や場所の特定を行う必要があり、衝撃弾性波法や電磁波レーダー法の非破壊試験や、小規模に穴を開けて確認する等の方法も用いられる²⁾。

なお、コンクリート強度については、無筋コンクリートが塩害や中性化による影響が少ないことから、構造物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。コンクリート強度を測定するには、局部的な破壊試験から強度を推定する方法、非破壊試験により強度を推定する方法の2つの方法がある。局部的な破壊試験を行う方法としては前述のコア採取による圧縮強度試験(JIS A1108)が挙げられ、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のコストや時間が生じる等の問題点がある。

コンクリート強度の推定方法としての非破壊試験は、表-1に示すような、反発度法、超音波法、および衝撃弾性波法等が挙げられる。これらの非破壊試験は、前述のように対象施設に損傷を与えず、比較的簡易にその劣化状況を把握できる特徴を有することから、精度向上の検証や補正を前提とした使用や詳細調査の予備的な方法として、広く現場での老朽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³⁾。しかし、その反面、適用範囲が限定される、精度が低い、といった課題も指摘されている²⁾。

表-1 非破壊試験の診断目的と概要^{3)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 ・測定される強度のばらつきが大きい
	超音波法	超音波を伝達させて速度を測定する	<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 ・同一箇所には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"> ・長大構造物に適用できる ・表面処理が不要である ・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

これらのことを踏まえ、表-1にあげた試験方法の中でも、“試験方法が比較的簡便である”，“迅速に測定が出来る”，“衝撃による入力エネルギーが大きいことから測定領域が広い”，“同一箇所でも繰り返し測定が可能である”，という特徴を有する衝撃弾性波法が、コンクリート構造が主体の海岸保全施設の老朽化診断に対して適用性が高いと考えた。特に、衝撃弾性波法のうち、より簡易的にコンクリート強度を推定できる機械インピーダンス法について、コンクリート強度推定に関する簡易的手法として有効と考え、既存海岸コンクリート構造物への適用性を検討することとした。

(3) 機械インピーダンス法の特徴

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。なお、接触インピーダンスは、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、本手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。

本手法は、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いう知見を根拠としている。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-2 参照）を測定・解析する事で、コンクリートの圧縮強度の推定、表面の劣化具合および表面近傍の浮き・剥離を測定するものである⁴⁾。

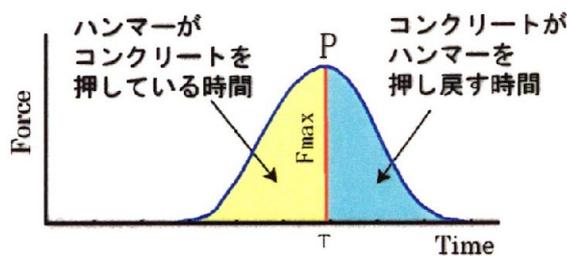


図-2 打撃応答波形の概念図⁴⁾

本手法の測定原理は、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と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 とおくと、 $F=kx$ と表現される。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^{4),5)}（図-3 参照）。また、機械インピーダンス値と圧縮強度には高い相関があることが確認されている^{6),7),8)}。

なお、広く用いられている反発度法はコンクリートの表面をリバウンドハンマーによって打撃し、その反発硬度から圧縮強度を求める方法であり、ハンマーによりコンクリートを打撃した時にリバウンドハンマーの跳ね返り高さ（反発度）とコンクリートの硬さ（ブリネル硬度）およびコンクリート強度には相関があることを根拠としている。

反発度法の適用範囲は、測定機器によっても異なるが、 $10\sim 60\text{N/mm}^2$ のコンクリートとされ、簡易で非

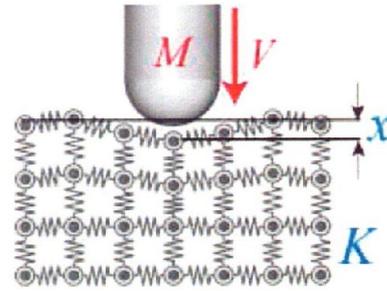


図-3 ハンマーの衝突⁵⁾

破壊なことから目視調査の補完や詳細調査の予備試験に広く用いられている。しかし、測定機器ごとの器差が大きいことや本手法の原理であるコンクリート表面を塑性変形させることによって強度を推定するため、同一箇所を繰り返して測定を行うことが出来ないとされている^{4),5)}。また、反発度法はコンクリート強度の非破壊試験法として広く普及しているが、コンクリートのような不均質材料の場合、衝突点の骨材の有無、表層部の風化、乾湿状態によって反発度が影響されるため、推定強度のバラツキが大きくなることや推定精度が落ちることが指摘されている⁶⁾。

本手法は、反発度法と比較して、ハンマーを使用するためより簡便である、同一箇所連続して測定が可能である、打撃応答波形が得られるため、事後解析によって測定精度の向上が図られるという利点がある。

3. 試験内容

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海岸保全施設への適用性を検証するために、反発度法やコア試験による圧縮強度との比較を室内での供試体と実構造物を対象に試験を実施した。

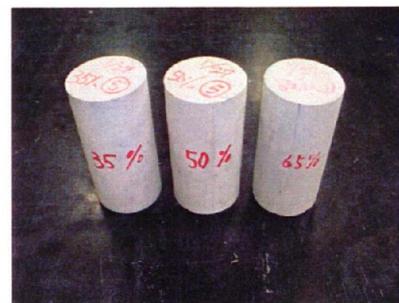


図-4 円柱供試体

(1) 供試体による室内試験

水セメント比(W/C)を35%、50%、65%に設定した円柱供試体($\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$)を3本ずつ作成した(材齢28日：図-4 参照)。これらの供試体をインパルスハンマー、およびリバウンドハンマーで3本 \times 25回ずつ打撃し、それぞれ機械インピーダンス

法、反発度法によるコンクリート強度の推定を行った。また、コア供試体の圧縮強度試験（JIS A1108）を実施した。

(2) 実構造物での現地試験

神奈川県小田原漁港および長崎県奈留漁港における海岸保全施設を対象として本手法、反発度法による強度推定を行うとともに、同一箇所でもコア採取を行って圧縮強度試験を実施した。なお、両漁港における対象とした海岸保全施設の標準断面図はそれぞれ図-5、図-6の示すとおりである。また、機械インピーダンス法、反発度法による実施状況は、図-7、8に示すとおりである。

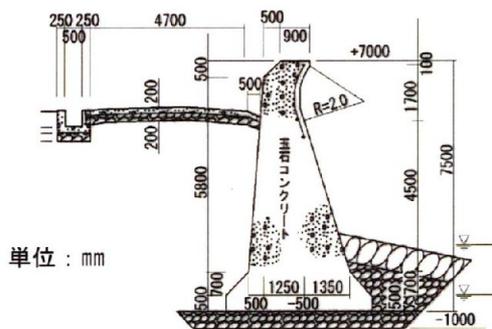


図-5 小田原漁港海岸保全施設の標準断面図

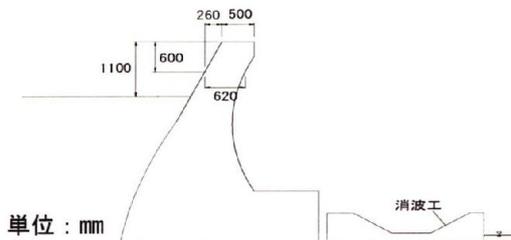


図-6 奈留漁港海岸保全施設の標準断面図

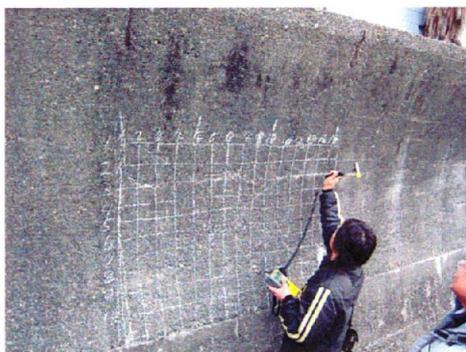


図-7 機械インピーダンス法の実施状況

海岸保全施設は、沿岸域に設置され、波浪や海水の影響を受けてコンクリート表層部が劣化している場合が多い（図-9）。本手法は反発度法においては必要とされる平滑化が不要とされているが、本研究ではこのような表層部の劣化状態による強度特性への影響についても把握することとした。そのため、

長崎県奈留漁港では、コンクリート表面の平滑化処理の有無による強度推定値とコア採取による圧縮強度試験の値の比較を行った。なお、平滑化処理にあたっては、目視によりコンクリート表面に凹凸がないと判断される程度に電動研磨機で表面を研磨した。



図-8 反発度法の実施状況



図-9 表層部が劣化した海岸保全施設の一例

4. 結果と考察

(1) 供試体による室内試験結果

供試体の試験結果を表-2に示す。機械インピーダンス法、反発度法のいずれも75回の打撃による平均値からコンクリート強度の推定を行った。なお、機械インピーダンス法におけるコンクリート強度の推定は、著者らのこれまでの研究^{4), 6), 7), 8)}による機械インピーダンス値と圧縮強度の相関関係から圧縮強度推定式を設定し⁸⁾、推定強度を算出した。一方、反発度法は、反発度（R値）の平均値を日本材料学会の圧縮強度推定式によって推定強度を算出した。

表-2 供試体での測定結果

測定地点	測定方法	室内実験		
		水セメント比 (W/C) 35%	水セメント比 (W/C) 50%	水セメント比 (W/C) 65%
反発度法 (リバウンドハンマー)	推定強度 (N/mm ²)	22.6	20.2	17.9
	標準偏差	4.6	9.1	5.8
機械インピーダンス法 (インパルスハンマー)	推定強度 (N/mm ²)	37.5	33.5	30.9
	標準偏差	5.0	6.9	5.3
コア試験による 圧縮強度試験	平均圧縮強度 (3本の平均値, N/mm ²)	58.9	43.2	38.8

本手法で推定されたコンクリート強度は、水セメント比が 65%、50%、35%の順に、30.9N/mm²、33.5N/mm²、37.5N/mm²であり（コア試験値の約 64～80%）、反発度法で推定したコンクリート強度（それぞれ 17.9N/mm²、20.2N/mm²、22.8N/mm²（コア試験値の約 38～47%））と比較してコア試験による圧縮強度に近い値となっている。また、測定値のバラツキも小さく精度も高い結果が得られた。

図-10 にその打撃応答波形の 1 例を示す。図に示すように、打撃応答波形の立ち上がりとピークが明確であり、変動も小さいことから信頼性の高いデータであると言える。このように、打撃応答波形の確認、または解析・補正によって、より精度の高いコンクリート強度の推定が可能と考えられる。

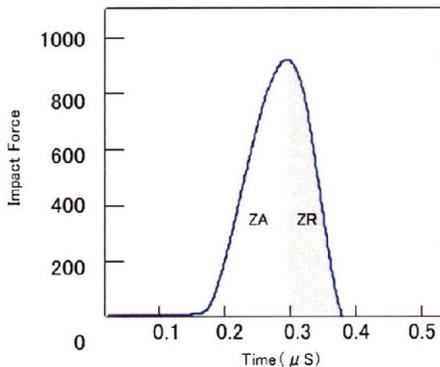


図-10 コア供試体による打撃応答波形の一例

(2) 実構造物での現地試験結果

神奈川県小田原漁港、および長崎県奈留漁港における海岸保全施設の本手法、反発度法、およびコア試験による圧縮強度の値を表-3 に示す。なお、神奈川県小田原漁港の海岸保全施設は、波返工の海側側面と天端側の双方で実施し、長崎県奈留漁港の海岸保全施設は、3箇所（NO.16、NO.29(1)、NO.29(2)）の胸壁背面で測定した。

表-3 実構造物での測定結果

測定場所		神奈川県 小田原漁港		長崎県奈留漁港		
測定方法		波返し工 (海側)	波返し工 (天端)	NO.16	NO.29(1)	NO.29(2)
反発度法 (リバウンドハンマー)	推定強度 (N/mm ²)	16.7	10.9	15.0	11.9	20.7
	標準偏差	7.9	8.1	3.0	5.9	4.2
機械インピーダンス法 (インパルスハンマー)	推定強度 (N/mm ²)	23.6	17.7	28.3	6.3	35.3
	標準偏差	3.3	3.9	8.9	5.6	10.5
コア試験による 圧縮強度試験	平均圧縮強度 (3本の平均値、N/mm ²)	33.4	32.1	44.4	14.3	47.3

両施設は、いずれも昭和 40 年代に建設された施設である。ただし、設計図書等が残されていないため、材料の配合等は不明であった。試験結果においては、両施設ともに反発度法と比較して、本手法による強

度推定値の方が、コア試験による圧縮強度に値に近いものとなった（コア試験値の約 44～75%）。しかし、強度推定値の絶対値としては、反発度法および本手法ともに、コア試験による圧縮強度と比較して、コンクリート強度が低く計測される傾向が見られた。

しかし、奈留漁港の海岸保全施設で実施した対象構造物コンクリート表面の平滑化前後（図-11、12）の測定結果（表-4）が示すように、反発度法、本手法ともに平滑化後の測定値は、コア試験による圧縮強度の値に近づく傾向となった。また、表面平滑化後の測定値とコア試験による圧縮強度の値との割合は、室内試験における測定値とコア試験による圧縮強度の値の割合と同等のものとなるなど、平滑化により強度推定値の精度向上が図られると考えられる。

表-4 奈留漁港における平滑化前後の測定結果

測定場所		長崎県奈留漁港					
		NO.16		NO.29(1)		NO.29(2)	
測定方法		表面 平滑化 前	表面 平滑化 後	表面 平滑化 前	表面 平滑化 後	表面 平滑化 前	表面 平滑化 後
反発度法 (リバウンドハンマー)	推定強度 (N/mm ²)	15.0	30.0	11.9	23.2	20.7	38.3
	標準偏差	3.0	7.6	5.9	10.1	4.2	5.6
機械インピーダンス法 (インパルスハンマー)	推定強度 (N/mm ²)	28.3	38.3	6.3	11.5	35.3	57.8
	標準偏差	8.9	9.4	5.6	7.2	10.5	11.0
コア試験による 圧縮強度試験	平均圧縮強度 (3本の平均値、N/mm ²)	44.4		14.3		47.3	

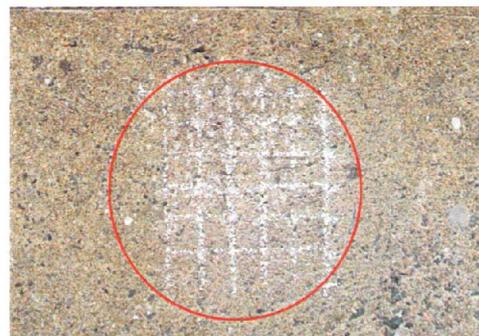


図-11 表層平滑化前(奈留 NO.16)

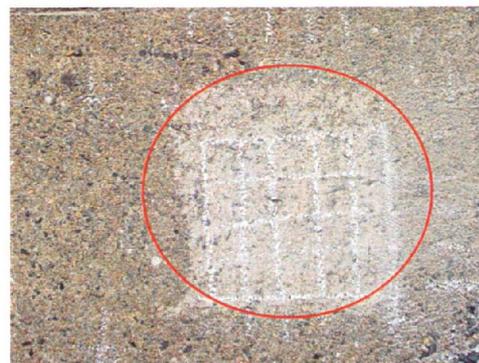


図-12 表層平滑化後(奈留 NO.16)

このことから、劣化が進んだ既存コンクリート構造物における本手法の適用にあたっては、コンクリート表面の状態に留意する必要があることが示された。

図-13に表面が劣化した奈留漁港海岸での試験対象施設において、推定値の誤差が大きくなった結果における打撃応答波形の1例を示す。図からわかるように、波形の立ち上がりとピークが不明確であり、データの変動が大きい。これは、ハンマーがコンクリートを押し続けている時間（ZA）、およびコンクリートがハンマーを押し続けている時間（ZR）のいずれの時間もノイズ等が大きく、適正な解析が困難であることを示している。

それに対し、図-14は試験対象施設の表面平滑化後の打撃応答波形を示したものであるが、図-13と比較して、立ち上がりとピークが明確になっており、供試体による打撃応答波形の図-10に近い波形となっている。これらのことは、建設後相当年数が経過し老朽化が進んでいるコンクリート構造物に機械インピーダンス法を適用する場合は、試験開始前に打撃応答波形を確認し、必要に応じて表面処理を行うことにより推定強度の精度の向上が図られることを示唆するものであり、機械インピーダンス法においても表面処理が重要であると言える。

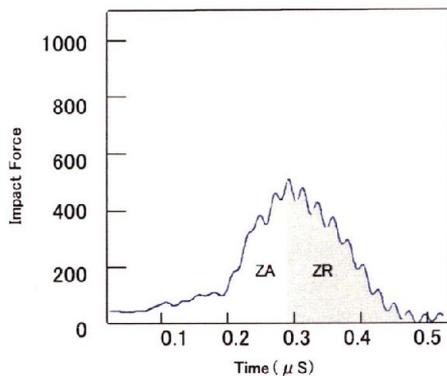


図-13 表面が劣化した海岸保全施設の打撃応答波形（表面平滑化前）の一例

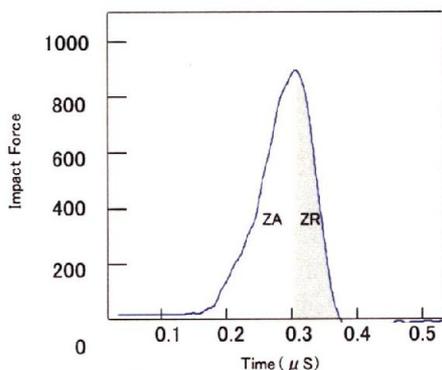


図-14 表面平滑化処理後の打撃応答波形の一例

5. まとめ

限られた予算と担当者により膨大な海岸保全施設の老朽化診断を行うためには、効率的で簡便な老朽化診断手法を確立していくことが重要である。本手法を用いることにより、一般的に用いられる反発度法に比べ、コンクリート強度推定にあたっての精度を高めることができることが示唆された。また、測定操作が反発度法に比べ簡便であることや同一箇所で連続測定が可能であることから、定期点検項目として継続して観測するなど長期的な維持管理において有効と言える。

以上より、本手法は膨大なストック量を有し、長大な海岸保全施設の老朽化診断の簡易調査方法として、適用性が高いと考えられる。

今後は、継続した室内試験および現地試験によってデータを蓄積するとともに、コンクリートの配合条件、材令や表層部劣化等および現地環境条件などによる影響についても検証していく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたって、神奈川県、および富山県の海岸保全施設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) コンクリート診断技術 '09【基礎編】，社団法人コンクリート工学協会，pp. 67-178，2009。
- 3) 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。
- 4) 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
- 5) 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，pp1711-1716，2005. 6
- 6) 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
- 7) 金田重夫，久保元，境友昭，極檀邦夫：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 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。
- 8) 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剝離・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