

漁港のコンクリート構造物に対する簡易診断法の開発に関する研究

独) 水産総合研究センター水産工学研究所 金田拓也
社) 水産土木建設技術センター 藤田孝康
岡野崇裕
水産庁漁港漁場整備部防災漁村課 浅川典敬
水産庁漁港漁場整備部計画課 三上信雄
東海大学工学部土木工学科 笠井哲郎

目次

1. はじめに	4-2 既存構造物に対する精度向上に関する検討
2. 研究の方法	4-3 既存構造物におけるコンクリート強度の推定
2-1 衝撃弾性波法の特徴	4-4 漁港施設における機械インピーダンス法測定マニュアルの作成
2-2 研究の内容	5. まとめ
2-3 機械インピーダンス法の特徴	6. 今後の展開
3. 適用に関する検討 (室内試験検証)	
4. 有効性に関する検討 (現地試験検証)	
4-1 機械インピーダンス法の有効性の検証	

1. はじめに

漁港施設の整備が始まって現在まで、総額10兆円を超す膨大な社会資本ストックが蓄積されている。こうした漁港施設は波浪による外力や海水による著しい腐食環境下におかれ老朽化の進行も早い。また現在、国や自治体の財政状況が厳しい状況であり、施設の長寿命化等ライフサイクルコストの最小化が求められており、水産庁において水産基盤ストックマネジメント事業を展開している。しかしながら、漁港施設は長大であり漁港の維持管理の予算や管理体制には限界がある。また漁港に多い無筋コンクリート構造物について構造物が老朽化しているかどうかの客観的な評価指標がなく老朽化の予測が困難な状況となっている。

今回、コンクリート構造物の老朽化状態を客観的に把握するため、構造物の破壊を伴わない非破壊検査の一つである衝撃弾性波法を用い、コンクリート構造物の点検・診断手法の簡易化や老朽化診断時における判断指標の定量化を検討したものである。

2. 研究の方法

2-1 衝撃弾性波法の特徴

コンクリート構造物の機能診断等の問題点は、コンクリートの計測・目視による老朽化度の判断にばらつきがあること、コンクリートの計測・目視による対策実施時期等予測が困難なこと、更には膨大な漁港施設の老朽化を診断するためには多くの調査時間・費用が必要なこと等があげられる。また、鋼や鉄筋コンクリートの構造物の老朽化予測手法はある程度確立されているが、無筋コンクリートの老朽化予測手法が確立しておらず、適切な老朽化予測手法の開発が求められている。

一方、コンクリート構造物の老朽化状態を客観的に把握する手法として、局部的な破壊試験から強度を推定する方法等があるが、施設本体の損傷を伴うこと、試験のコストや時間を生じること等の問題点がある。このような問題に対し、構造物の破壊を伴わない非破壊試験法は比較的簡便にその老朽化状況を把握できることから、簡易な老朽化の状態の推定や詳細調査の予備的調査手法として用いられている。

非破壊試験方法の中で、衝撃弾性波法のうち「機械インピーダンス法」や「表面P波法」は、コンクリート構造物の比較的長い部材に対応ができ、試験方法が比較的簡便で迅速に測定ができ、コンクリート構造物の老朽化の特徴であるひび等の表面の老朽化や内部空隙、コンクリート強度等を定量的に把握できるという特徴がある。こうしたことから、衝撃弾性波法を用いた検討を行った。

2-2 研究の内容

本研究では、衝撃弾性波法のうち、コンクリートの圧縮強度を推定できる「機械インピーダンス法」の漁港施設への適用を検討するため、使用する測定装置の性能評価等を室内試験によって検証した。また、衝撃弾性波法を用いた既存施設に対する老朽化診断手法の有効性を検証するため、建設時から30~40年経過した実構造物を対象に現地試験を実施した。

2-3 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（衝撃入力装置）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。

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。 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老朽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）と比較して、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2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

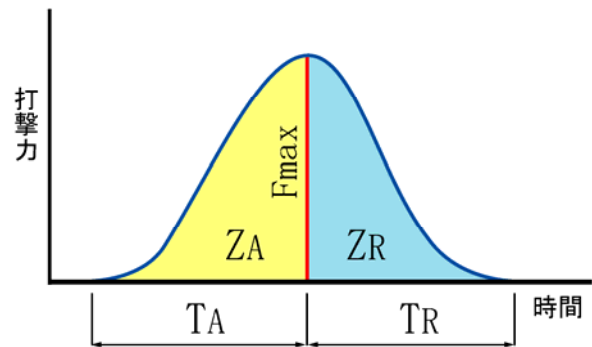


図1 打撃応答波形の概念図

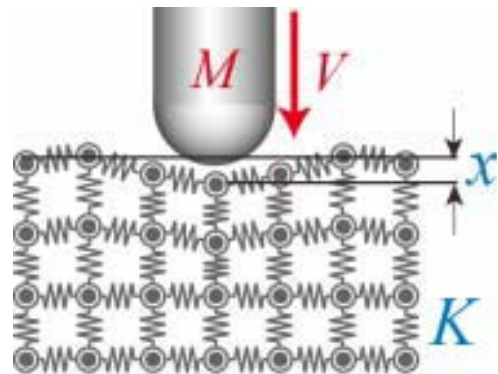


図2 ハンマーの衝突

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。

また、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、10~60MPaのコンクリートとされ、簡易で非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反発度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。さらに、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場合があることが指摘されている。これに比べて、機械インピーダンス法は、次のような利点を有するためその実用化が期待されている。

- ・ハンマーを使用するためより簡便である
- ・同一箇所でも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。

3. 適用に関する検討(室内試験検証)

コンクリート供試体を用いて機械インピーダンス値の測定と圧縮強度の推定を行い、その後、反発度法による圧縮強度とJIS法による静的圧縮強度試験より圧縮強度（以下、「JIS供試体強度」という）を測定した。その結果、機械インピーダンス法で推定されたコンクリートの圧縮強度（以下、「機械インピーダンス強度」という）は、反発度法で推定したコンクリートの圧縮強度と比較しJIS供試体強度に近かった（表1）。

図3に機械インピーダンス法によって、測定した打撃応答波形の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。

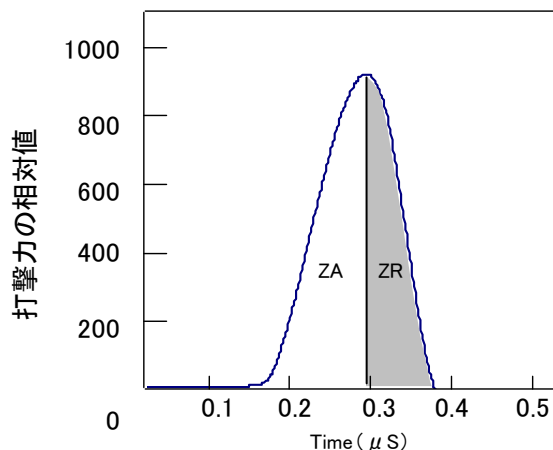


図3 コア供試体による打撃応答波形の一例

表1 円柱供試体による強度の比較

測定方法		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)	平均推定強度 (MPa)	22.6 (38.4%)	20.2 (46.8%)	17.9 (46.2%)
	標準偏差	4.61	9.05	5.79
機械インピーダンス法 (インパルスハンマー)	平均推定強度 (MPa)	37.5 (63.7%)	33.5 (77.6%)	30.9 (79.8%)
	標準偏差	5.0	6.9	5.3
JIS法による円柱供試体の圧縮強度試験	平均JIS供試体強度 (MPa)	58.9	43.2	38.8

4. 有効性に関する検討(現地試験検証)

現地試験においては、機械インピーダンスによる「コンクリート表層部の強度推定」といった診断手法を試行することで、その有効性を検証した。

4-1 機械インピーダンス法の有効性の検証

機械インピーダンス法による老朽化診断試験を小田原漁港（神奈川県）、奈留漁港（長崎県）、滑川漁港（富山県）、銚子漁港（千葉県）、および寄島漁港（岡山県）の5漁港で実施した。機械インピーダンス法の実施状況を写真1に示す。



写真1 機械インピーダンス法の実施状況

小田原漁港と奈留漁港における漁港施設の機械インピーダンス法、反発度法、およびコア

試験による圧縮強度の値（以下、「コア供試体強度」という）を比較すると、機械インピーダンス強度の方がコア供試体強度に近い値となっており、機械インピーダンス法の有効性が確認された（表2）。次に、打撃応答波形に対するコンクリートの表面の劣化状態の影響を検討した。その結果、反発度法、機械インピーダンス法ともに平滑化後の測定値は、コア供試体強度に近くなり、その比は室内試験の結果と同等のものであった（表3）。以上より、老朽化が進んだ既存コンクリート構造物での機械インピーダンス法の適用においても、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。

4-2 既存構造物に対する精度向上に関する検討

機械インピーダンス法は、ハンマー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ため、既存構造物は、表層部の老朽化進行によって、打撃応答波形の「乱れ」が生じるケースが多くなる。よって、機械インピーダンス法では、打撃応答波形の「乱れ」を少なくすることが精度向上には効果が高い。そこで、この打撃応答波形の形状を分析することによる

表2 実構造物におけるコンクリート強度の測定結果

測定場所		小田原漁港		奈留漁港		
測定方法		波返し工 (海側)	波返し工 (天端)	NO.1	NO.2	NO.2
反発度法 (リバウンドハンマー)	平均推定強度 (MPa)	16.75 (50.2%)	10.89 (33.9%)	15.01 (33.8%)	11.88 (83.0%)	20.66 (43.7%)
	標準偏差	7.91	8.06	3.00	5.86	4.18
機械インピーダンス法 (インパルスハンマー)	平均推定強度 (MPa)	23.62 (70.8%)	17.74 (55.3%)	28.30 (63.8%)	6.33 (44.3%)	35.29 (74.7%)
	標準偏差	3.25	3.92	8.88	5.57	10.55
JIS法によるコア供試体の 圧縮強度試験	平均コア供試体 強度 (MPa)	33.37	32.10	44.36	14.31	47.27

表3 奈留漁港における平滑化前後の測定結果

測定場所		奈留漁港					
測定方法		NO.1		NO.2		NO.3	
		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)	平均推定強度 (MPa)	15.01 (33.8%)	29.99 (67.6%)	11.88 (83.0%)	23.21 (162.2%)	20.66 (43.7%)	38.31 (81.0%)
	標準偏差	3.00	7.61	5.86	10.11	4.18	5.59
機械インピーダンス法 (インパルスハンマー)	平均推定強度 (MPa)	28.30 (63.8%)	38.31 (86.4%)	6.33 (44.3%)	11.48 (80.2%)	35.29 (74.7%)	57.85 (122.4%)
	標準偏差	8.88	9.38	5.57	7.17	10.55	10.98
JIS法によるコア供試体の 圧縮強度試験	平均コア供試体 強度 (MPa)	44.36		14.31		47.27	

強度推定値の精度向上効果を検討した。

ここでは、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、以下の3タイプに分類した。

- ・ [type1] : ZA と ZR が非対称であり、ZA の波形が乱れる (図4)
- ・ [type2] : ZA と ZR がほぼ対称で波形が乱れていない (図5)
- ・ [type3] : ZA と ZR が非対称であり、双方の波形が乱れる (図6)

その上で、JIS 供試体強度と相関の悪い波形 type3 を除外して機械インピーダンス強度を整理した。その結果、波形分類前の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 (表4)。

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も確認された。ただし、両者を比較した場合、“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強度に近い値となった。

以上より、建設年次が古く表層部の老朽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られる。

表4 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(奈留漁港)

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
標準偏差	8.88	8.19	9.38	9.51
平均コア供試体強度 (N/mm ²)	44.36			

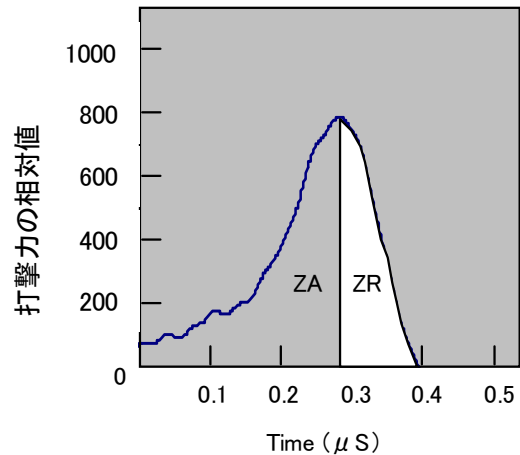


図4 波形 type1

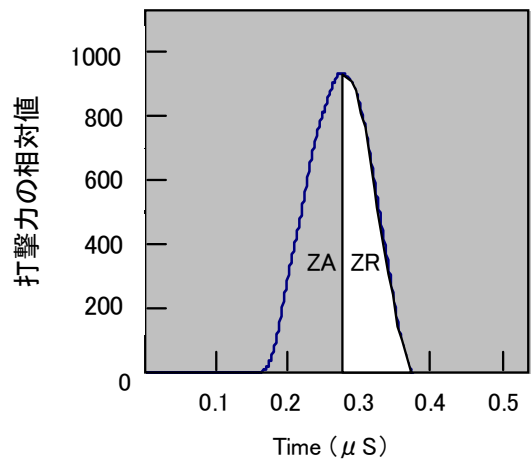


図5 波形 type2

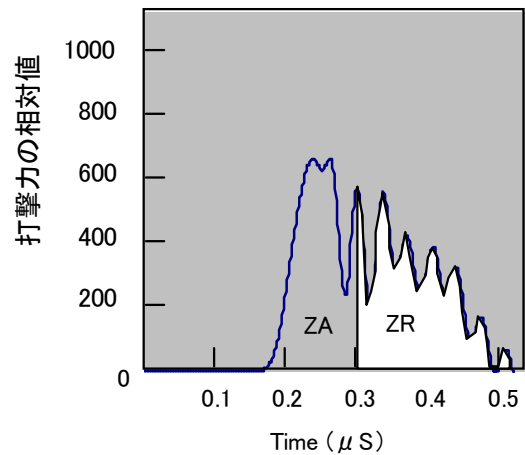


図6 波形 type3

4-3 既存構造物におけるコンクリート強度の推定

既存構造物で測定した波形処理後の機械インピーダンス強度とコア供試体強度の関係は、各漁港における建設年次や環境条件により、バラツキが見られるものの、その相関は高く (図

7 : $R^2=0.74$)、既存構造物のコンクリート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。

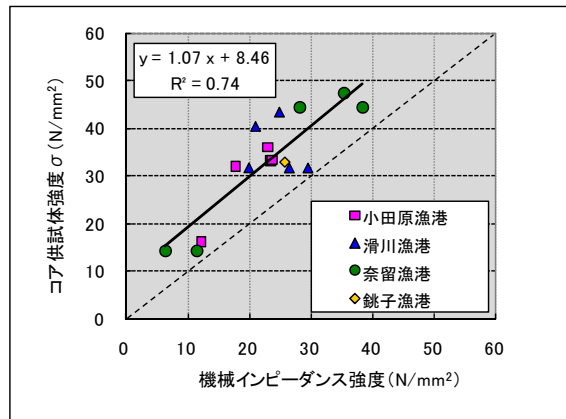


図7 機械インピーダンス強度とコア供試体強度の関係

また、今回の試験結果から、機械インピーダンス法によるコンクリート強度推定（以下、「推定コンクリート強度」という）を行ったところ、コア供試体強度に対する推定コンクリート強度は 25%内に収まっており、良好な相関関係にある（図 8 : $R^2=0.76$ ）。以上より、本手法による一定の精度を確保した簡易的な既設施設のコンクリート強度把握が可能である。

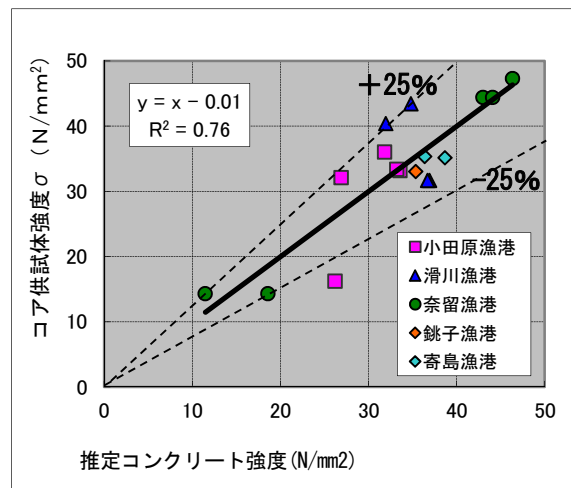


図8 推定コンクリート強度とコア供試体強度の関係

4-4 漁港施設における機械インピーダンス法測定マニュアルの作成

これまで述べたように、室内試験や漁港施設の検証によって、機械インピーダンス法は漁港

施設のコンクリート強度に対して、比較的精度よく簡単に測定できることがわかった。このため、本手法の漁港施設における適用について、運用マニュアル（案）を作成した。本マニュアル（案）は、機械インピーダンス法の原理や機器の説明とともに、機械インピーダンス法の漁港施設における適用にあたっての手順、これらの手順である現地での測定方法やデータ処理を解説したものである。図9に、本マニュアル（案）の適用手順の基本フローを示す。

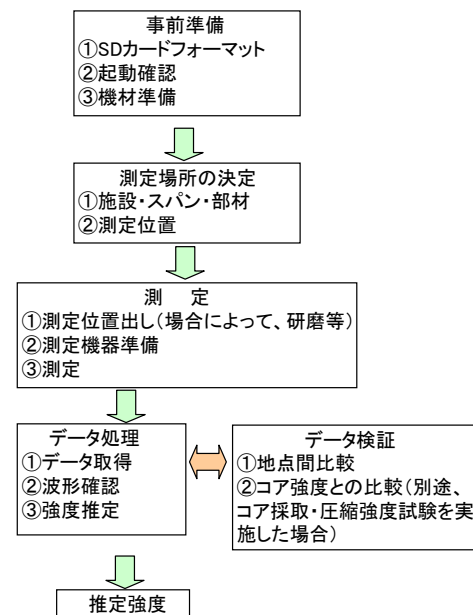


図9 機械インピーダンス法による漁港施設における適用手順

5. まとめ

本研究によって、以下の結論を得た。

- ①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、
 - ア) 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。
 - イ) コア採取による JIS 法の静的圧縮強度試験を実施するにあたって、実施箇所選定における事前調査として有効である。
- ②機械インピーダンス強度の測定は、表面平滑化処理や打撃応答波形の解析により、精度向上が可能である。
- ③機械インピーダンス法の現地適用性は、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。

6. 今後の展開

衝撃弾性波法のうち「表面P波法」は、鋼球やインパクトハンマーの打撃によってコンクリート表面に弾性波を発生させ、コンクリート表面に設置したセンサによりその弾性波を受信する手法である。弾性波には、図10に示すように、進行方向に平行に振動する縦弾性波（P波）、進行方向と直角に振動する横弾性波（S波）、表面を鉛直方向に振動するレイリー波（R波）、が存在する。

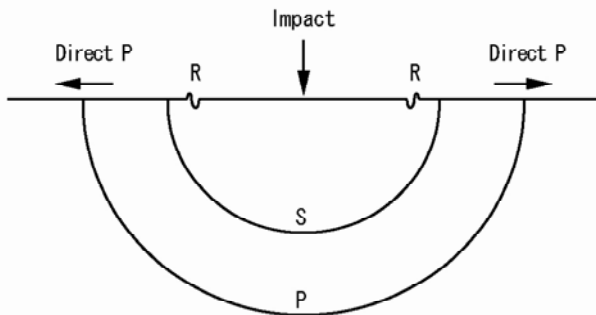


図10 コンクリート版の表面にある衝撃点で発生した弾性波

図11は、弾性波の受信点をコンクリート表面に設置した場合の受信点におけるP波、S波、R波の波形を模式的に示したものであるが、図のように受信点には最初にP波が到達する。そのため、弾性波の初期到達時の立ち上がりを検知することが出来れば、受発信点間の距離とP波の到達時間により表面を伝わるP波の伝搬速度（以下、「表面P波速度」という）を計測することが出来る。

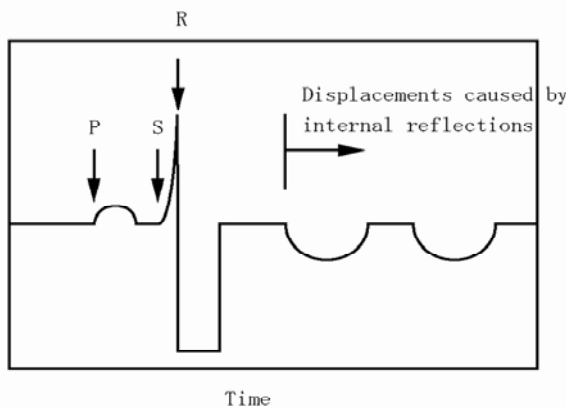


図11 P波、S波、R波の波面の到着に伴う波形の概略

図12は奈留漁港における受信点と入力点の区間にひび割れを有するコンクリート構造物での表面P波速度と測定距離との関係を示したものである。図より、2.5m~3.0mの位置で急激に表面P波速度が低下している。この位置は、ひび割れ発生位置と一致しており、表面P波法によって、測定区間におけるひび割れ等の発生やその位置を推定できるものと考えられる。このように、測定区間内にひび割れや表面の老朽化などが存在する場合、表面P波速度が健全部に比べ低下する。

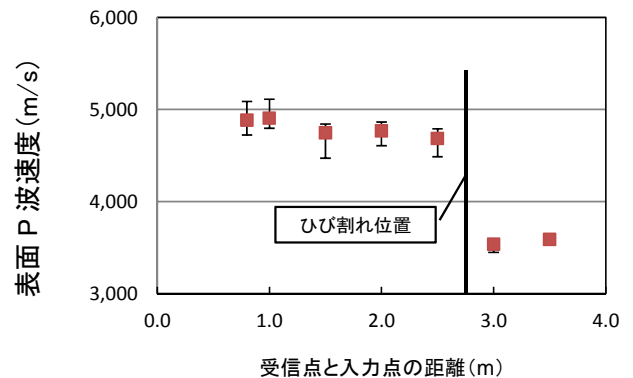


図12 ひび割れを跨いだ表面P波の平均伝搬速度の変化（奈留漁港）

こうしたことから、コンクリート構造物について、「表面P波法」の表面P波速度により、①老朽化状況の簡易調査や詳細調査実施箇所の絞り込みができ、②「対策が必要」等という老朽化状況を定量的に判断ができ、また、③表面P波速度を経年的に計測することにより、対策実施時期等の老朽化予測を定量的に把握できる可能性が高いと考える。今後、それらについての検討を行う予定である。

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。また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。ここに記して感謝の意を表す。

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：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.
- 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：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
- 3) 社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術、'12「基礎編」、pp. 110-117、2012.
- 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、pp. 1995-2000、2004.
- 5) 久保元樹、極壇邦夫、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、土木学会第 60 回年次学術講演会 講演概要集、第 V 部、pp. 1207-1208、2005.
- 6) 金田重夫、久保元、境友昭、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 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.
- 7) 社団法人日本非破壊検査協会編：新コンクリートの非破壊試験、pp. 67-84、技報堂、2010.
- 8) 岩野聡史ほか：衝撃弾性波法を適用した新設コンクリート構造物での圧縮強度推定および内部欠陥探査に関する検討、日本非破壊検査協会 コンクリート構造物の非破壊検査への展開論文集 (Vol. 2)、pp. 475-482、2006.
- 9) 岩野聡史ほか：衝撃弾性波法による新設コンクリート構造物での初期不良の評価について、日本非破壊検査協会 平成 19 年度春期大会概要集、pp. 41-44、2007.
- 10) 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 トンネル技術研究発表会論文集、pp. 72-82、2007.
- 11) Mary, S. et al, : A Procedure for Determining P-Wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a P-Wave Speed Measurement Technique, ACI MATERIALS JOURNAL, pp. 531-539, 1997.
- 12) N. J. Carino, : THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW, NIST, pp. 2-15, 2001