報告　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

三上信雄[*1]・藤田孝康[*2]・極檀邦夫[*3]・笠井哲郎[*4]

要旨：膨大な既存ストックを有する漁港施設は，更新期に近づきその劣化が懸念されており，性能向上や延命化に努めるなど，ライフサイクルマネジメントの導入が求められている。これらの導入には，対象施設の劣化度を的確に把握することが不可欠である。しかし，診断者の違いによる劣化度評価のバラツキの抑制や劣化診断の効率化といった課題があり，明確な判定基準と診断手順の設定および診断の省力化が求められている。本報告では，漁港施設の劣化度の指標化と劣化診断手順の簡易化を指向し，劣化診断手法としての表面P波を用いた衝撃弾性波法の適用性について既存構造物を対象に検討した。

キーワード：漁港施設，ライフサイクルマネジメント，劣化診断，衝撃弾性波，表面P波

1.　はじめに

漁村地域における主要な沿岸構造物である漁港は，全国に約3,000港存在し，膨大な既存ストックを有している。漁港施設の建設は，高度成長期に始まり，建設後30年超のものが約40%に達しており，更新期を迎えその劣化が懸念されている。将来にわたる既存ストックの有効活用のために，国や自治体は，厳しい財政状況の中にありながらも，これらの既存ストックの適時修理・改修に努めるなど適切な機能確保や維持管理を進めていくことが求められている。このような状況に対して，施設の供用期間内における補修・補強・改良など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」と称す）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」と称す）の適用が注目されている。

漁港施設に対するLCMは，水産庁によって，「漁港施設におけるアセットマネジメント導入にあたっての考え方(案)」が示され，今後の漁港施設におけるLCM導入のための基本的な考え方が提示された[1)]（**図－1**にその概略のフローを示す）。しかしながら，漁港施設におけるLCMは，緒についたばかりであり，対象施設の劣化診断手法の明確化，劣化診断の精度向上，点検・診断手法の簡易化，劣化予測やLCC算定の精度向上など，様々な課題を有している。特に，診断精度に関しては，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にあげられる。

本報告は，このような既設漁港施設の維持管理の問題点について検討するとともに，漁港施設の劣化診断の一手法として長大なコンクリート構造物に適用でき，比較的安価でかつ容易に操作が可能である非破壊試験の内，衝撃弾性波法に着目し，その特性と有効性を検討するため，既存の漁港施設を対象として現地試験を実施し，その適用性について検討を行った。

図－1　漁港施設におけるLCMの概略フロー

2.　漁港施設の現状

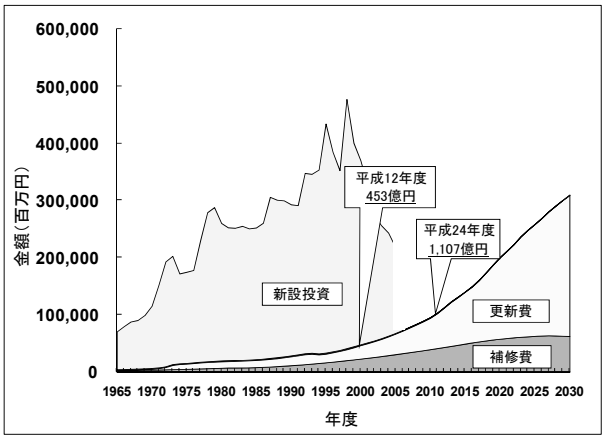
2.1　漁港関連施設の整備状況

我が国の漁港施設は，1960 年代以降，特に，高度経済成長期に建設された施設が多く，その建設費用は，平成 12 年度においては約 10 兆円（累積）に達している。これらの施設は今

写真－1　漁港施設における劣化の現状

*1　（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　(正会員)
*2　（社）水産土木建設技術センター　調査研究部
*3 アイテックス技術協会　理事長　工修　(正会員)
*4 東海大学　工学部土木工学科教授 工博　(正会員)

後，十数年で耐用年数に達するものが急増すると見込まれており，膨大な既存ストックの劣化の問題が顕在化する状況にある（**写真－1** 参照）。なお，既存の漁港施設に対する維持管理コスト（補修・更新費）は，平成 12 年度の約 453 億円から，平成 24 年度には約 1,107 億円と 2.5 倍近くに増加すると予測されている（**図－2** 参照）[2)]。



図－2　漁港施設の既存ストックの維持管理コスト（補修・更新費）の推計

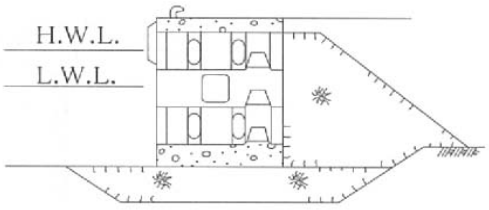
2.2　漁港施設の劣化の特徴

膨大な既存ストック量を有する漁港施設は次のような構造的特徴を有している。

a) 防波堤のように対象施設が長大な構造物が多い
b) 沿岸域に設置されるため，波浪および海水による物理的劣化および化学的腐食によってコンクリート表層部の劣化が生じやすい
c) コンクリートが主要材料であり，護岸施設等には無筋コンクリート構造の施設も多く見られる（護岸施設等の総延長の約 5 割が無筋コンクリート構造）

さらに，

d) 岸壁施設などは，背後が埋め立てられている（**図－3** 参照）ことから，構造物の劣化度の把握には構造物の上面あるいは海側の鉛直部からの評価に限定される。

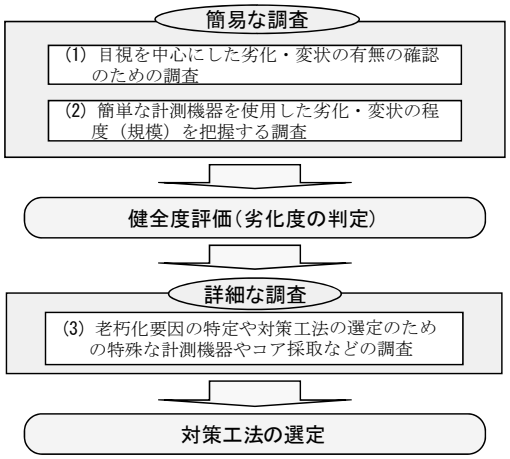


図－3　岸壁の概念図

2.3　漁港施設における劣化診断手法の方向性

これまでの漁港施設においては，新設や増設といった新規投資に重点が置かれ，維持管理への対応が進んでおらず，適切な施設の劣化診断自体が行われていないのが実状であった。そのため，漁港施設の管理者は，沿岸域に点在する多くの漁港施設を適切に管理する必要があるものの，個々の施設における劣化診断の実施に当たって，具体的な手順や明確な手法を持っていない。加えて，膨大な既存ストックに対して，管理者の予算や管理体制には自ずから限界がある。このような状況に対応するためには，以下のように LCM の導入を促進し，効率的かつ適切な施設の維持管理に努めることが重要である。

(1) 劣化する施設に対する的確な維持補修のための対策工法選定の最適化と増大が予想される維持更新のための予算の平滑化を図る。



図－4　劣化診断のフロー

(2) **図－4** に示すような「目的に応じた段階的」な手順に基づき，劣化診断の効率化を図ることにより，施設全体の劣化度の早期把握に努める。
(3) 定量的な指標による簡易でかつ比較的長い区間に適用可能な劣化診断手法を開発する。

ただし，膨大に存在する既存ストックについて，継続的な劣化診断を実施するためには莫大な調査時間・費用が必要となる。また，目視や簡単な計測機器を用いた簡易調査は，調査者の技量や調査対象の立地条件によって，診断結果が左右される（バラツキが多くなる）可能性が高い。さらに，詳細調査は専門的な知識と技術及び高額な調査費を必要とする。そのためにも，前述の(3)で述べたように，簡易調査の段階で，確実で高い精度を備え，かつ的確な診断手法を開発することにより，効率かつ迅速な劣化診断の実施，調査の省力化による調査コストの圧縮，ひいては LCC の低減にも繋がるものと考える。

3.　衝撃弾性波法の選定理由と診断手法の概要

3.1　漁港施設の特徴を踏まえた劣化診断手法

超音波や弾性波などを利用してコンクリート構造物の劣化の程度を把握する非破壊試験は，構造物に損傷を与えず，かつ，比較的簡易にその劣化状況を把握できるこ

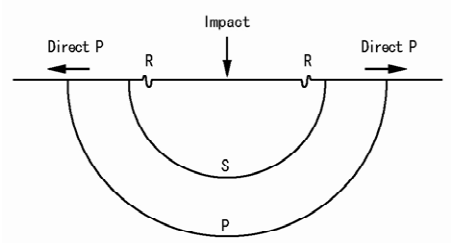
とから，広く現場での劣化診断に用いられおり[3) 4)]，測定器械や解析手法の開発が進められている。

これらの非破壊試験の中で衝撃弾性波法は，測定方法が比較的簡便であり安価で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，波長が長い弾性波を利用することから内部の鉄筋・骨材の影響を受けにくい，測定項目がコンクリートの圧縮強度の推定・内部欠陥探査・ひび割れ深さの測定など多岐にわたる測定が可能である，などの特徴があり，コンクリート構造が主体の漁港施設の劣化診断に対して適用性が高いと考えられる。

衝撃弾性波法は，コンクリート表面に設置した発振子や衝撃入力装置によって内部に弾性波を発生させ，これをコンクリート表面の受振子で測定し，ひび割れや内部の欠陥の位置・寸法を測定する方法である。なお，その適用範囲は周波数によって異なり，低周波数を用いることによって伝搬距離が長くなるといわれている[5)]。

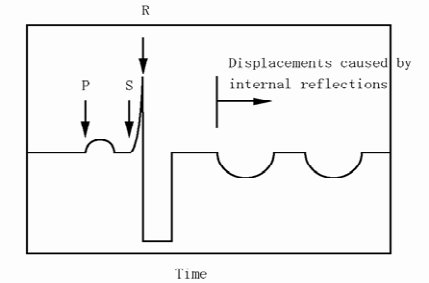
3.2　衝撃弾性波法の特徴

衝撃弾性波法による構造物の診断手法に関しては，海外においてはいくつかの規格が存在するものの[6)]，国内では，規準がないのが現状である。しかし，国土交通省による強度測定の試行[7)]や，コンクリート構造物の厚さ計測や内部欠陥の検出方法[8) 9)]が提案されており，その発展が期待されている。

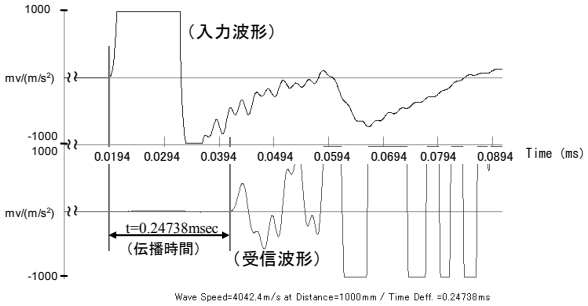


図－5　コンクリート版の表面にある衝撃点で発生した弾性波[10)]

衝撃弾性波法とは，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。衝撃弾性波には，**図－5** 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－6** 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[10)]。そのため，**図－7** のように，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（以下，「表面 P 波」と称す）の伝搬速度を計測することが出来る。海外ではインパクトエコー法として，Nicholas.J.C[11)] らがこの P 波を活用した検査方法としてとりまとめている。国土交通省の強度測定も表面 P 波の伝搬速度を利用したものである。



図－6　P波，S波，R波の波面の到着に伴う波形の概略[10)]



図－7　衝撃弾性波の波形の一例

3.3　漁港施設への衝撃弾性波法の適用

2.2 において示したような漁港施設の特徴（特に，a) 長大な構造物が多い，d) 構造物の上面や側面など片面のみでしか試験が実施できない）を踏まえると，目視中心の簡易調査の補完として伝搬距離が長い衝撃弾性波を活用して，劣化度の客観的な判定基準（指標）を設定することにより，劣化度の評価精度の向上が可能である。そして，弾性波速度による定量的な指標に基づいた定期的な点検モニタリングにより構造物の劣化状態を継続的に把握していくことが膨大な漁港施設の劣化診断においては有効と考える。

そこで，本報告では，非破壊試験の中でもコンクリート構造物への汎用性が高く，比較的長距離の伝搬特性を有する衝撃弾性波法を**図－4** における (2) の調査に適用することを指向し，建設時から 30～40 年近く経過した既存の漁港施設を対象に現地調査を実施した。調査にあたっては，手法が単純で明確である表面 P 波を用いて「コンクリート構造物における劣化位置を特定」および「相対的な劣化状態を評価」といった手法を試行することで衝撃弾性波法の有効性を検討した。また，漁港施設への適用にあたっては，海水による影響が懸念されることから，浸水状況下における衝撃弾性波の伝播状況，化学的腐食に起因する表面劣化による弾性波の発生機構および伝搬特性への影響についても検討する必要がある。

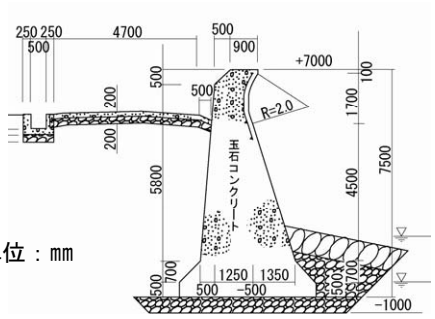
4.　現地調査の概要

実際の漁港施設での現地調査による検証を小田原漁港（神奈川県），奈留漁港（長崎県）の双方で実施した。

4.1 実施場所

(1) 小田原漁港　（神奈川県）

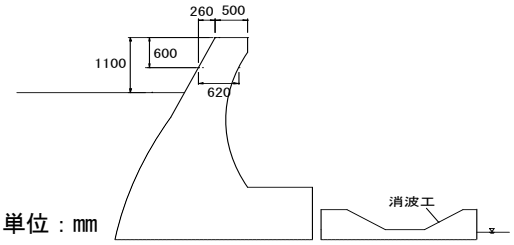
小田原漁港は，相模湾の西部に位置し，管理者が神奈川県の第 3 種漁港である。調査対象施設は，建設年次が昭和 40 年代前半の護岸施設である（**図－8**）。



図－8　調査対象施設（小田原漁港）の標準断面図

(2) 奈留漁港（長崎県）

奈留漁港は，長崎県西部の五島列島奈留島南部に位置し，管理者が長崎県の第3種漁港である。調査対象施設は，建設年次が昭和40年代の護岸施設である（**図－9**）。

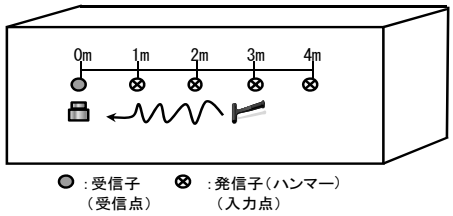


図－9　調査対象施設（奈留漁港）の標準断面図

4.2 実施方法

現地調査は，**図－4**の（1）に示した目視を中心とした劣化・変状の確認を小田原漁港，奈留漁港全域で行い，本研究での調査対象施設として選定し，また，構造体における目地を跨がない位置で試験を実施した。

衝撃弾性波法による調査は，小田原漁港，奈留漁港の双方において，それぞれの漁港施設で衝撃弾性波測定装置[7]を用いて，コンクリート表層の表面P波の伝搬速度を計測した。本調査で行った表面P波の計測方法の一例を**図－10**に示す。コンクリート構造物の任意の点に受振子として加速度計（P社製，サンプリングクロック：0.5μs）をコンクリート表面と加速度計が密着するよう接着剤で接着し，受振子から1m～4mに一定間隔ごとに離れた場所に発信子として衝撃加速度計（P社製）を取り付けたインパクトハンマーで打撃を与えて，入力波形と受信波形を測定するものである[12]。



図－10　　表面P波の測定方法

小田原漁港の調査対象施設は，**写真－2**に示すように目視で確認できるようなひび割れなどは発生してないものの波浪と海水による化学的腐食等により骨材が露出するなどの表面の劣化が生じている状況が多く確認された。そのため，小田原漁港では，経年劣化による速度特性の評価を比較するために，調査地点周辺に設置された新設コンクリートブロック（2.5m×5m×2m）表層部の表面P波速度を計測し（**写真－3**参照），既設の漁港施設における表面P波速度の特性と比較した。なお，新設コンクリートブロックには，目視によりひび割れや欠陥分は認められなかった。

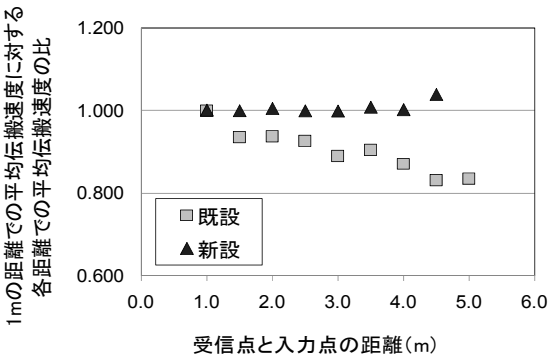
また，奈留漁港の調査対象施設では，衝撃弾性波法がひび割れを検出できるかを評価するために，目視で確認される程度のひび割れを跨いで表面P波速度の計測を行った。なお，後述するように，漁港施設における既設構造物は，波浪および海水によってコンクリート表層部の劣化が生じやすいため，測定にあたってはコンクリート表面を平滑に研磨する必要があると考えられる。測定値に対するコンクリートの表面状態の影響を確認するために，平滑化前後の表面P波速度も計測した。

写真－2 調査対象施設の状況（小田原漁港）

写真－3　衝撃弾性波調査状況（小田原漁港）

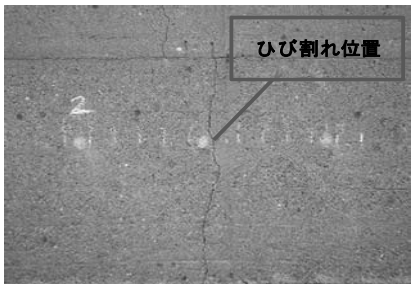
5. 結果および考察

図－11は，受信点を固定して入力点を1m～4mと移動させて表面P波の伝播時間を測定し，その伝播時間と受発信点間の距離により受信点と入力点の距離に応じた表面P波の平均伝播速度と受発信点間の距離の関係を示したものである。なお，平均伝搬速度は，同一点で5回表面P波速度を計測したものを平均したものである。**図**より，新設構造体では，受信点と入力点の距離に無関係に伝播速度はほぼ一定であるが，既設構造体では2.5m～3.0mの距離以降で伝播速度が小さくなっている。伝播時間の変化または伝播速度の低下は，受信点と入力点間に存在するひび割れ等の劣化の程度と量に比例して生じるものと考えられるため，この結果から小田原漁港の既設構造体にはこの区間に伝播速度の低下の原因となる何等かの欠陥部が存在しているものと推察できる。



図－11　既設と新設コンクリートの表面P波の平均伝搬速度の変化（小田原漁港）

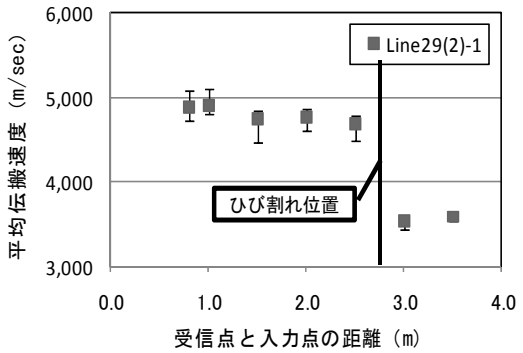
図－12は，**写真－4**に示すように，奈留漁港における受信点と入力点の区間にひび割れを有する構造体コンクリートでの表面P波伝搬速度と測定距離との関係を示したものである。**図**において，2.5m～3.0mの位置で急激に伝搬速度が低下している。この位置は，**写真－4**におけるひび割れ発生位置と一致しており，本手法により測定区間におけるひび割れ等の発生やその位置を推定できるものと考えられる。このように，測定区間内にひび割れ



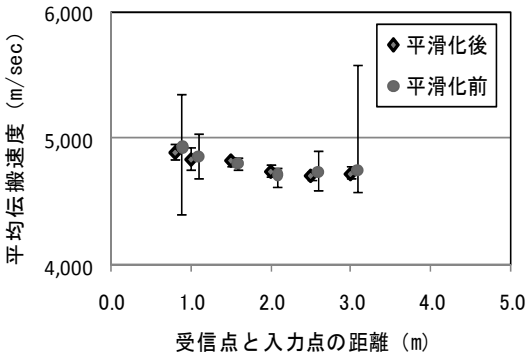
写真－4　コンクリートの表面状況およびひび割れの状況（奈留漁港）

や表面劣化などが存在する場合，伝搬速度が健全部に比べ低下する。したがって，局所的な欠陥分の検知のみならず，特定区間において衝撃弾性波の継続観測を実施することによる伝播速度の変化を同一箇所で経年計測から，構造体としての劣化進行を定量的に評価できるものと考えられる。さらに，本手法は，コア採取による圧縮強度試験や反発法などに比べ測定が簡便で計測時間も短く、また、国土交通省が試行している固定法（測定間隔30cm）や平均法（測定間隔20～100cm）に比べ、一度に比較的長い区間（範囲）の劣化進行の程度を評価できることから，漁港施設の劣化診断手法の一つとして有効な方法であると考えられる。ただし，その適用範囲，精度等について今後とも検討が必要である。

図－13は，表面P波の伝達精度を向上させるため受信点と入力点のコンクリート表面を表面が平滑となるよう研磨した場合した場合としない場合の表面P波伝搬速度と受発信点間の距離の関係を示しものである。**図**より，表面の平滑化処理の有無による表面P波伝播速度を比較すると，平均値としては大きな違いは生じないものの，平滑化処理を行わない場合，各点の測定値はバラツキが大きくなり精度が低下することがわかった。これは，平滑化処理前後の衝撃弾性波の波形の一例をそれぞれ**図－14，15**に示すが，平滑化前の受信波の立ち上がりが不明瞭であり，立ち上がり部分の特定にずれが生じやすいことも起因していると思われる。これらのことから，漁港

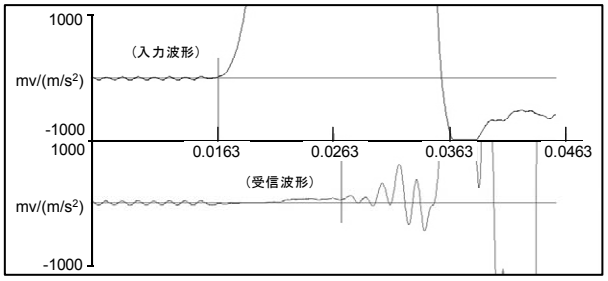


図－12　ひび割れを跨いだ表面P波の平均伝搬速度の変化（奈留漁港）

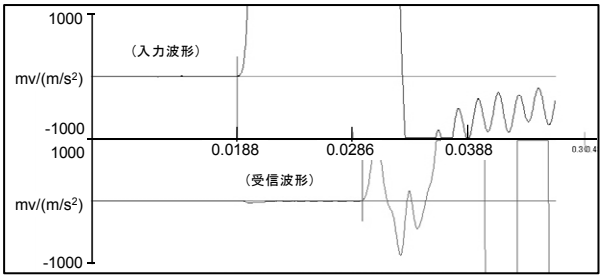


図－13　コンクリートの表面の平滑化処理の有無によるデータのバラツキ（奈留漁港）

施設のように，海水の作用によって物理・化学的な劣化を受け，骨材が露出した凹凸状になっているコンクリート構造物の表面P波速度を計測する場合は，表面を平滑に処理することで，その測定精度を向上できるものと考えられる。



図－14　コンクリートの表面の平滑化処理の前の表面P波の波形（奈留漁港）



図－15　コンクリートの表面の平滑化処理の後の表面P波の波形（奈留漁港）

6. まとめ

既設漁港コンクリート構造物の維持管理の問題点とその劣化診断への衝撃弾性波法の適用に関し検討した結果，以下の結論が得られた。

(1) 膨大な漁港施設を限られた予算や担当者によって適切に維持管理していくためには，施設の特徴を十分踏まえ，目的に応じて，段階的な調査による効率的な劣化診断手法を確立していくことが不可欠である。

(2) 目視を中心とした劣化診断では，担当者の知識や技能，対象施設の立地条件によって，評価が大きく左右されるため，非破壊試験を活用して評価基準を定量化することにより，客観的な評価が可能になる。

(3) 衝撃弾性波法による表面P波伝播速度を計測することによって，一度に比較的長い区間の劣化度を診断することができる。このことより，長大な漁港施設の診断手法として適用性が高いと考えられる。

(4) 既設構造物の測定区間の相違による表面P波の伝搬速度の変化を計測することは，ひび割れ発生位置の特定，相対的な劣化の進行の把握が可能である。

(5) 測定点のコンクリート表面の平滑化処理の有無に関し，測定回数を5回とすることでそれらの平均値に及ぼす影響は小さい結果となったが，平滑化しない場合の同一点でのデータのばらつきは大きくなった。

今後は，表面P波を用いた衝撃弾性波による劣化診断手法の確立に向け，その適用性の明確化や診断精度向上のため，ひび割れ幅や深さなどにより速度低下がどの程度になるかなどを室内試験等と並行し検討が必要である。

謝辞：

調査の実施にあたっては，水産庁，神奈川県，長崎県，（財）漁港漁場漁村技術研究所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) 水産庁漁港漁場整備部：漁港施設におけるアセットマネジメント導入に当たっての考え方（案），pp.1-52，2007.3
2) 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，p.31-51，2006.3
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
4) 社団法人日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の非破壊試験法，養賢堂，pp.3-8, 1994
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，‘06「基礎編」，pp.105-112，2004
6) ASTM-C 1383-04：Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the lmpact-Echo Method , pp.1-7, Apr. 1999
7) リック株式会社, 独立法人土木研究所編：衝撃弾性波試験itecs法による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案）（修正），pp.1-7，2007.5
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A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.475-482，2006.8
9) 岩野聡史ほか：衝撃弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の推定コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1637-1642，2003.7
10) 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，Nov./Dec. 1997
11) Nicholas,J.C. et al, : THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW，NIST，pp.2-15 , May.2001
12) 山下健太郎ほか：衝撃弾性波法による表面縦弾性波速度の測定に関する実験的検討, 日本非破壊検査協会平成20年度秋季大会講演概要集，pp.103-106，2008.1