

論文 衝撃弾性波法による沿岸構造物の劣化診断に関する基礎研究

重松 宏和^{*1}・三上 信雄^{*2}・極壇 邦夫^{*3}・笠井 哲郎^{*4}

要旨：近年、コンクリート構造が主要形式である漁港施設等沿岸構造物の老朽化が懸念されており、ライフサイクルマネジメントの導入が進められている。ライフサイクルマネジメントの導入に際しては施設の性能を適切に評価することが不可欠であるが、長大な漁港施設の構造的特徴を踏まえた評価手法について検討された事例は少ない。本研究では維持管理に有効な非破壊検査のうち、漁港施設の特徴に照らして効率的と考えられる衝撃弾性波法の適用に関して基礎的検討を行った。その結果コンクリートの性質や劣化の程度は弾性波速度を指標に評価が可能であり、漁港施設における劣化診断手法として有効であることが示された。

キーワード：漁港施設、コンクリート構造物、劣化診断、非破壊検査、衝撃弾性波法、表面 P 波速度

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施設は、1960 年代以降、特に高度経済成長期に整備された施設が多く、建設時からの材料の経年変化による劣化や波浪等の外力による老朽化が進行しており、維持・補修等に関わる費用の増大が懸念されている。このような状況に対して、漁港施設の供用期間内における総費用の最適化を図ることを目的に、ライフサイクルマネジメント(以下、「LCM」と称す)の導入が進められている¹⁾。

LCM の導入に際しては対象とする施設性能の適切な評価が不可欠であるが、長大なコンクリート構造が主要形式である漁港施設の場合、一定の精度を確保しつつも効率的な劣化診断手法が必要となる。それらについては一部検討されているものの、劣化診断の精度向上や簡易化・効率化等の様々な課題が残されている。

本研究では、漁港施設の主にひび割れを伴う劣化に対する診断の精度向上および効率化を指向し、コンクリートの表面を伝播する P 波(以下、「表面 P 波」と称す)の伝播挙動に着目した衝撃弾性波法の適用について室内試験および現地調査を実施して基礎的検討を行った。

2. 衝撃弾性波法の概要

衝撃弾性波法とは、鋼球やインパクトハンマーの打撃等による衝撃力によってコンクリート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。この手法では図-1 に示すように、進行方向に平行に振動する縦弾性波(P 波)と進行方向と直角に振動する横弾性波(S 波)および表面を鉛直方向に振動する表面波(R 波)の、主にこの 3 種類の弾性波が入力される²⁾。

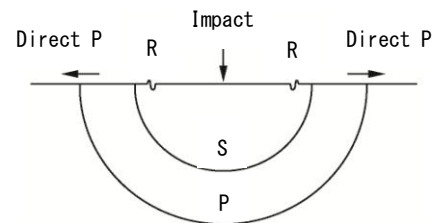


図-1 コンクリート版表面の衝撃点で発生した弾性波²⁾

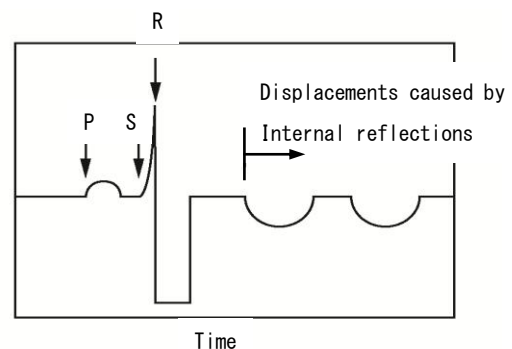


図-2 受信される P 波、S 波、R 波の模式図²⁾

図-2 はコンクリート版の表面を打撃して弾性波を入力し、打撃点と同一表面上に設置されたセンサによって受信される P 波、S 波、R 波の波形を模式的に示したものである²⁾。図のように、受信点には最初に P 波が到達する。そのため図-3 のように弾性波の入力時と初動波の到達時を決定することが出来れば、弾性波の入受信点間の距離とその伝播時間の関係から表面 P 波の伝播速度を算出することができる。

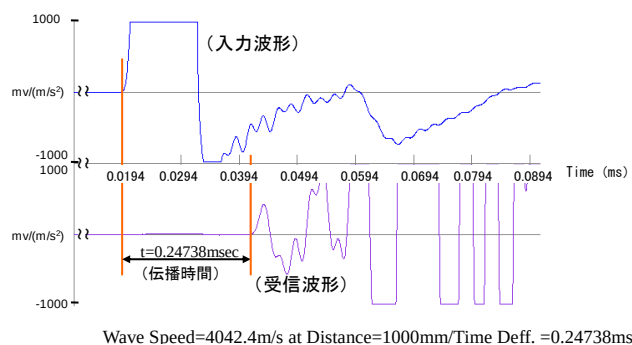
また著者らの一部は、衝撃弾性波法はエネルギーの大きい弾性波を利用することから比較的広い測定領域における調査が可能であり、長大な漁港施設の劣化診断に

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 (独) 水産総合研究センター水産工学研究所 地域基盤研究チーム長 (正会員)

*3 アイテックス技術協会 理事長 (正会員)

*4 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)



図－3 弾性波の受信波形の一例

表－1 使用材料

	種類	記号	物性または主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³
細骨材	大井川産砕砂	S	密度:2.59g/cm ³ 粗粒率:3.00
粗骨材	富士川産砕石	G	密度:2.70g/cm ³ 最大寸法:20mm
混和材料	AE減水剤	AE	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	石灰系膨張材	E	密度:3.16g/cm ³ 標準置換量:20kg/m ³

において効率的であることを報告している³⁾。

3. 衝撃弾性波法の適用に関する基礎検討

漁港施設への適用にあたっては、施設が沿岸域に立地するため海水の影響によるコンクリートの含水率の変化および化学的腐食や凍害などによる表面劣化や膨張性のひび割れなどが表面P波の伝播特性に影響を及ぼすことが考えられる。そこでここでは、このような沿岸構造物の特性を踏まえ、表面P波を利用した衝撃弾性波法の適用性についての基礎的知見を得るために、室内試験においてコンクリートの圧縮強度、含水率およびひび割れの有無が表面P波の伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。

3.1 室内試験の概要

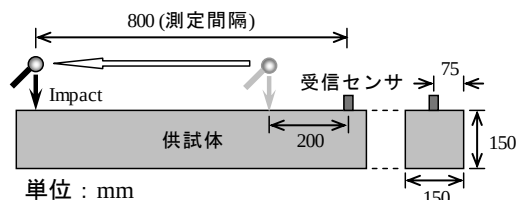
(1) 圧縮強度の影響

コンクリートの使用材料および配合を表－1 および表－2 のシリーズ 1 に示す。コンクリートの配合は水セメント比を 35%, 50%, 65% とし、圧縮強度を 3 水準に設定した。表面 P 波速度測定用の供試体は、配合毎に 150×150×900mm の無筋コンクリート供試体を作製した。圧縮強度試験用の供試体は φ10×20cm の円柱供試体を各配合につき 3 体ずつ作製した。供試体の養生は、打設後 24 時間で脱型し、27 日間水中養生(20±1℃)を行った。コンクリートの試験材齢は 28 日とし、円柱供試体では圧縮強度試験の直前に P 波と S 波の伝播速度を測定し、久保ら⁴⁾の方法により動弾性係数も求めた。

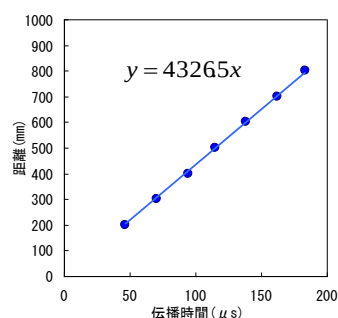
表面 P 波速度の測定方法の概要を図－4 に示す。本研究では、弾性波を入力する打撃点から受信センサ(加速度計: サンプルクロック 0.5μs)の中心までの距離(以下、測定間隔と称す)を 200～800mm まで 100mm ステップで設定し、各測定間隔における表面 P 波の伝播時間を弾性

表－2 配合

シリーズ	No.	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(kg/m ³)	
			W	C	E	S	G	AE	SP
1	1	35	162	463	—	717	998	—	3.01
	2	50	162	324	—	819	1010	0.97	—
	3	65	172	264	—	866	986	0.66	—
2	4	50	162	324	—	819	1010	0.97	—
	5			304	20				—
	6			274	50				—
	7			244	80			1.62	—



図－4 表面 P 波速度測定の概要



図－5 最小二乗法による表面 P 波速度の算出

波測定機⁵⁾で測定した。表面 P 波の伝播時間は、加速度計(サンプリングクロック 0.5μs)を内蔵したインパクトハンマーと受信センサのそれぞれより得られる波形の立ち上がりから求めた(図－3 参照)。表面 P 波速度の算出方法は図－5 に示すように、伝播時間を横軸に、測定間隔の距離を縦軸にとり、各測定間隔で得られた伝播時間をプロットして最小二乗法を適用し、そこで得られる回帰直線の傾きを表面 P 波速度として算出した。

(2) 含水率の影響

(1) で使用した 3 水準の表面 P 波速度測定用の供試体を使用し検討を行った。ここでは、材齢 28 日から 90 日まで気中養生(20±1℃-50%R.H.)した乾燥状態の供試体の質量と表面 P 波速度を測定後、その供試体を水中に 3 日間浸漬して吸水させ、再度その直後および 1,2,4 日乾燥経過後に質量と表面 P 波速度を測定した。更にその後、3 日間 105℃の乾燥炉で乾燥した条件でも測定を行った。表面 P 波速度の測定は(1)と同様の方法で行った。また本検討では、コンクリート供試体の質量測定から求めた質量変化率をコンクリートの含水率の変化の指標とした。なお、表面 P 波速度の測定の際には同一バッチのコンクリートで作製した φ10×20cm の円柱供試体を用いて圧縮

表－3 ひび割れの種類

要因	ひび割れ深さ (mm)	ひび割れの 本数
水準	25	1本および2本
	50	

強度および動弾性係数の測定を行った。

(3) ひび割れの影響

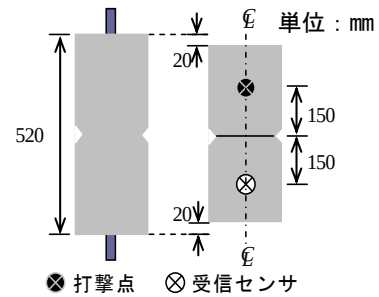
ここでは、図－4 に示した表面 P 波速度測定用の供試体に対し、弾性波の伝播経路を横切るようにダイヤモンドカッター(刃厚：5mm)で人工ひび割れを設けた供試体を使用し、ひび割れが表面 P 波速度に及ぼす影響を検討した。コンクリートの使用材料は表－1 に、配合は表－2 の No. 2 に示したものである。供試体の養生は材齢 28 日まで水中養生し、その後は試験材齢の 56 日まで気中養生を行った。人工ひび割れの種類を表－3 に示す。まず、ひび割れは材齢 56 日において各供試体に 1 本ずつダイヤモンドカッターで切り込んで設けた。そして、直ちに表面 P 波速度を測定後、各供試体に 2 本目のひび割れを 1 本目のひび割れから 50mm 離れた位置に設け、その直後に再度表面 P 波速度を測定した。1 本目のひび割れは受信センサより 400mm の位置とし、2 本目は 350mm の位置とした。表面 P 波速度の測定間隔は 300mm と 500mm とし、ひび割れを跨がない場合と跨いだ場合の結果について 5 回ずつ測定した平均値で評価した。

(4) 膨張性ひび割れの影響

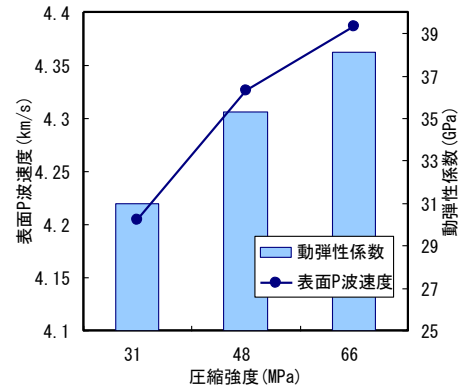
コンクリートの使用材料および配合は表－1 および表－2 のシリーズ 2 である。コンクリートの配合は水セメント比を 50%とし、膨張材の単位置換量を 0, 20, 50, 80kg/m³ の 4 水準に設定した。膨張材の単位置換量の標準値は 20kg/m³ であり、それ以上は過剰混合となるが、それによりコンクリートに膨張性のひび割れを付与した。供試体および試験は(1)と同様に、円柱供試体と表面 P 波速度測定用の供試体を作製し、表面 P 波速度と圧縮強度および動弾性係数を材齢 28 日において測定した。供試体の養生は、脱型後 7 日間水中養生し、その後は気中養生とした。ここでは、膨張量を評価するために長さ変化試験についても併せて実施した。

(5) ひび割れの接触の影響

ひび割れの接触の影響の検討で使用した供試体の概要を図－6 に示す。コンクリートの使用材料、配合および養生方法は(3)と同様である。ここでは、コンクリートの材齢が 56 日に達した時点で、供試体の断面中央部に埋設した鉄筋(SD295A, D22)に万能試験機で引張荷重を加え、供試体の長さ方向中央部に設けたノッチ部分にひび割れを誘発させた。ひび割れ発生時の荷重は約 110kN であり、この荷重レベルでは鉄筋は弾性領域にあるため載荷荷重を除荷した際にはコンクリートのひび割れ面は



図－6 供試体の概要



図－7 表面 P 波速度と圧縮強度の関係

接触した状態になっていることが観察された。その後、供試体の両端部（20mm）を切断し、ひび割れを接触させるように供試体の軸方向に圧縮荷重を加えながら、各荷重レベルで表面 P 波速度を測定した。供試体は 2 体作製し、ひび割れを誘発したものとししないものについて実験を行った。表面 P 波速度は(3)と同様の方法で測定した。測定間隔は 300mm とし、ひび割れ箇所がその中央に位置するようにした。また、圧縮荷重による供試体の長さ変化をコンタクトゲージ法(JIS A 1129-2)により測定した。

3.2 結果および考察

コンクリートの表面 P 波速度と圧縮強度の関係を図－7 に示す。図より、供試体の圧縮強度が大きくなるのに伴い表面 P 波速度も大きくなる結果となった。表面 P 波(図－1 に示す Direct P)は、表層部を伝播する弾性波であり動ポアソン比の影響を無視するとその速度(V_p)は式(1)より与えられることから、コンクリートの圧縮強度の増加に伴う動弾性係数の増大が、表面 P 波速度を大きくした要因であると考えられる。ここに、 E はコンクリートの動弾性係数、 ρ はコンクリートの密度である。

$$V_p = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

次に、3 日間水中に浸漬し吸水させた供試体の質量変化率を図－8(a)に示す。この質量変化率は、水中への浸漬前の質量を基準とし、その時点からの変化率を式(2)により算出した。

$$\Delta m = \frac{m_d - m_0}{m_0} (\%) \quad (2)$$

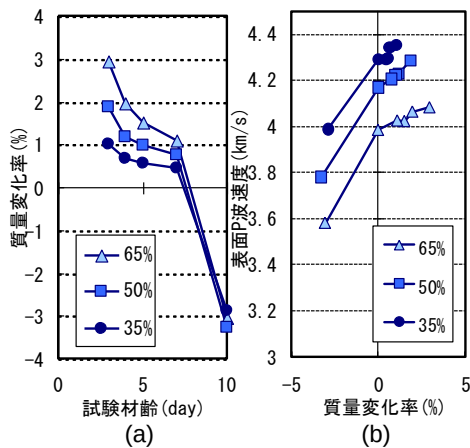


図-8 質量変化率と表面 P 波速度

ここに、 Δm ：質量変化率， m_d ：弾性測定時の供試体質量， m_0 ：浸漬前の供試体質量

図-8(b)は、質量変化率と表面 P 波速度の関係を示したものである。図より、表面 P 波速度は質量変化率の増加に伴い大きくなる。すなわち、表面 P 波速度はコンクリートの含水率の増加に伴って大きくなる結果となった。続いて、表面 P 波速度測定時に円柱供試体で測定した動弾性係数を図-9 に示す。本研究では動弾性係数も同様に、質量変化率に伴って大きくなる結果となった。松下ら⁹⁾は、コンクリートの含水率が增加すると静弾性係数は大きくなることを報告している。ここで測定した動弾性係数も同様の結果となったが、このことと式(1)から図-8(b)のように含水率の変化により表面 P 波速度が変化したものと考えられる。しかし、図-8(b)の各配合における表面 P 波速度の変化傾向は、若干ではあるが上に凸の曲線の傾向を示している。これは、表面 P 波速度に支配的な影響を及ぼす含水率の変化による動弾性係数の変化の影響に加え、式(1)における ρ が乾燥により小さくなると表面 P 波速度が大きくなる要因となることも、ここで測定された表面 P 波速度に影響したためと推察される。

ひび割れの影響の検討で得られた表面 P 波速度を図-10 示す。図には、300mm の測定間隔で得られた表面 P 波速度からの速度の変化率を示した。300mm の測定間隔ではひび割れを跨いでいないが、500mm の測定間隔ではひび割れを跨いでいるため表面 P 波速度は低下している。これは、測定間にひび割れを跨いだ場合は弾性波がひび割れ先端を迂回して伝播することから、実際の伝播距離が長くなったためである。また、ひび割れ深さに比例して表面 P 波速度は低下する結果となった。更に、同じ深さのひび割れの本数が増えた場合は、さらに表面 P 波速度は低下する結果となった。このことから、構造物のひび割れによる劣化度を評価できる可能性が示唆された。

膨張性ひび割れの影響の検討における材齢 28 日のコンクリートの長さ変化率を図-11(a)に示す。また、その

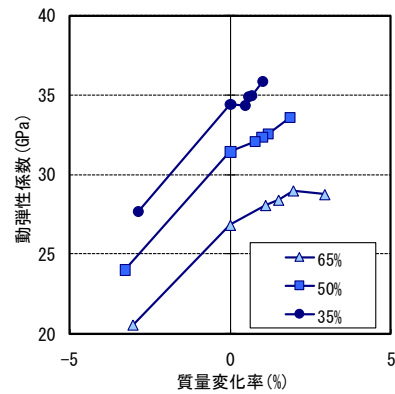


図-9 質量変化率と動弾性係数の関係

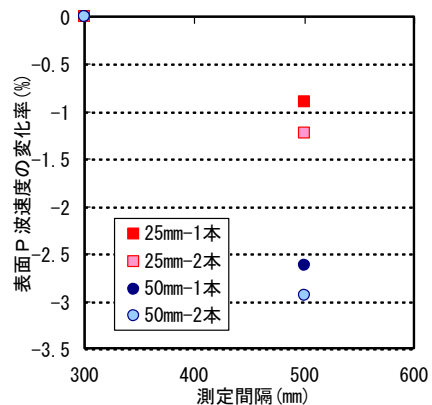


図-10 表面 P 波速度とひび割れの関係

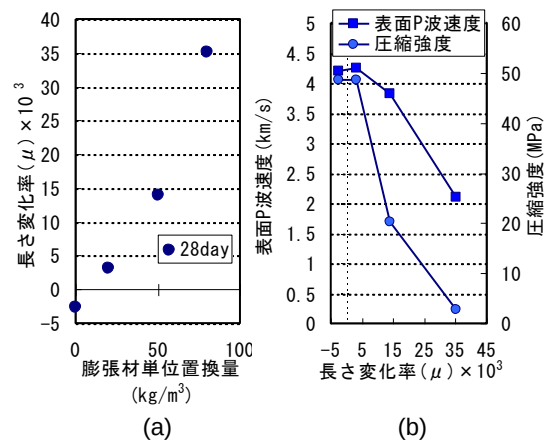


図-11 長さ変化率と表面 P 波速度

長さ変化率と表面波速度および圧縮強度の関係を(b)に示す。図より、長さ変化率の大きなコンクリートほど、表面 P 波速度および圧縮強度が低下する結果となり、コンクリートの表面 P 波速度と圧縮強度は同様の傾向を示した。また、長さ変化率の大きな供試体の表面 P 波速度および圧縮強度は、他の供試体に比べて異常な低下を示している。これは、コンクリートの膨張により生じたひび割れが要因であると推察される。

ひび割れの接触の影響の検討で測定された表面 P 波速度を図-12 に示す。ひび割れの無い供試体の表面 P 波速度

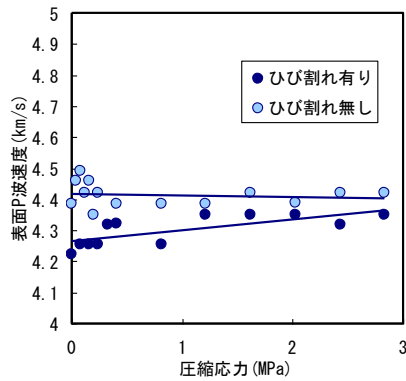


図-12 圧縮応力と表面 P 波速度

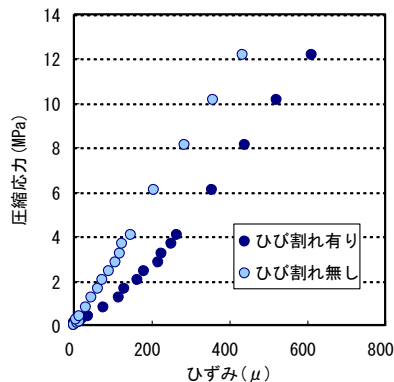


図-13 表面 P 波速度測定時のひずみ

度はコンクリートの圧縮応力が増加してもほぼ一定の値となっている。一方、ひび割れを有する供試体では、圧縮応力の増加に伴いひび割れの無い供試体で測定された表面 P 波速度に漸近するように増大する傾向を示す結果となった。図-13 は、表面 P 波測定時の載荷荷重によりコンクリートに生じた応力とひずみの関係を示したものである。図より、ひび割れを有する供試体の応力-ひずみ関係は徐々にその傾きが大きくなる傾向を示し、応力が 4MPa を超えた領域においてはひび割れの無い供試体とほぼ同じ傾きとなっている。このひび割れを有する供試体の 4MPa 以下の領域における傾きは、ひび割れ面の接触状態が点接触から面接触へと変化した影響により徐々に傾きが大きくなったものと考えられる。これらのことから、ひび割れを圧着する応力が作用することによりひび割れ面の接触状態が変化するため、図-12 のように、ひび割れ面を伝播する表面 P 波速度は応力の増大に伴い大きくなったものと推察される。

4. 衝撃弾性波法の既設構造物への適用

ここでは、前章で得られた表面 P 波を用いた衝撃弾性波法の特性を踏まえ、実際の構造物における劣化診断を通じて衝撃弾性波法の有効性について検討を行った。

4.1 現地調査の概要

(1) 調査対象施設



写真-1 滑川漁港海岸部の概観

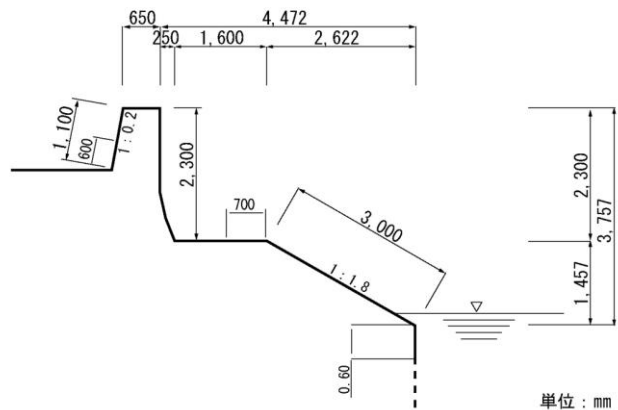


図-14 滑川漁港海岸の標準断面図

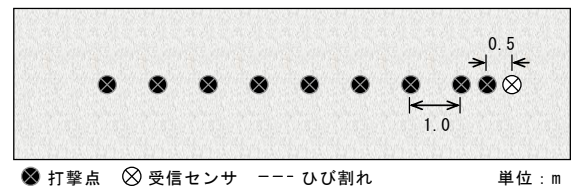


図-15 現地調査での表面 P 波速度の測定方法

本研究では、写真-1 に示す滑川漁港海岸部(富山県)の漁港施設を対象に、衝撃弾性波法による劣化診断を実施した。本施設の標準断面図を図-14 に示す。本施設は海岸部に位置しており、竣工後約 40 年が経過している。本施設は無筋コンクリート構造体であり、コンクリートにはコールドジョイントによるひび割れや、基礎地盤の不等沈下によると見られる貫通ひび割れなどが多数見受けられる。

(2) 調査方法

現地調査における表面 P 波速度の測定方法の概要を図-15 に示す。表面 P 波速度は、3.1(3)と同様に測定間隔と表面 P 波の伝播時間の関係から算出した。測定間隔は 0.5~8.0m までとし、測定間隔が 0.5~1.0m までは 0.5m ステップで、それ以降は 1.0m ステップで打撃点を移動しながら表面 P 波の伝播時間を測定した。また、調査対象物は目地を境界として 2 スパンの構造物を対象に調査を実施した。

4.2 結果および考察

No.1 の構造物で測定された表面 P 波速度を図-16 に

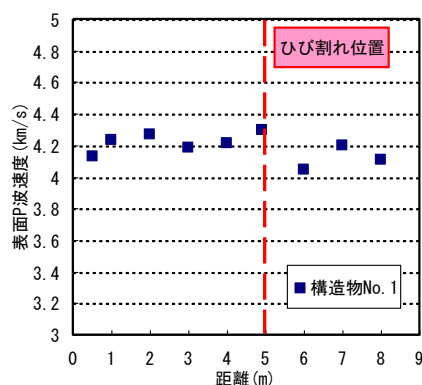


図-16 構造物 No. 1 における表面 P 波速度

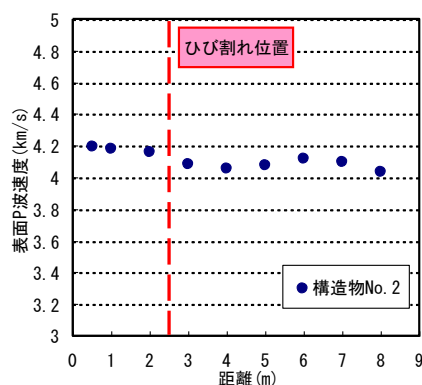


図-17 構造物 No. 2 における表面 P 波速度

示す。この構造物には受信センサより 5m 離れた位置に貫通ひび割れが生じていたため、測定間隔 5m における表面 P 波速度の測定は行っておらず、ひび割れを避けて 4.9m の測定間隔で表面 P 波速度を測定した。そのため図に示すように、そのひび割れを跨いだ測定間隔 6m における表面 P 波速度は急激に低下する結果となった。次に、No.2 の構造物で測定された表面 P 波速度を図-17 に示す。この構造物においては受信センサより 2.5m 離れた位置に貫通ひび割れが生じている。しかし、そのひび割れを跨ぐように測定した測定間隔 3m での表面 P 波速度は、若干低下しているもののその変化は構造物 No.1 と比較して小さい結果となった。そこでひび割れ箇所においてコアを採取し内部を目視観察したところ、No.2 ではひび割れが密着状態であった。このことから、図-17 の結果は 3.1(5)で示したように、ひび割れの圧着により表面 P 波速度の低下が抑制されたことが原因であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、漁港施設等沿岸構造物における劣化診断の精度向上および効率化を指向し、コンクリートの表層部を伝播する表面 P 波に着目した衝撃弾性波法の適用について基礎的検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) コンクリートの圧縮強度が大きくなるのに伴い表面 P 波速度も大きくなる。
- (2) 表面 P 波速度はコンクリートの含水率の増加に伴い大きくなるが、含水率の変化に伴う密度の変化による影響も受ける。
- (3) 弾性波の伝播経路におけるひび割れの深さおよびその数の増加に伴い表面 P 波速度は低下する。
- (4) 膨張によりひび割れが生じたコンクリートの圧縮強度および表面 P 波速度は共に低下する傾向を示す。
- (5) 弾性波の伝播経路に位置するひび割れの接触状態

が面接触にある場合、表面 P 波速度の低下は抑制され、ひび割れの無い場合の速度に近づく。

- (6) 表面 P 波速度を利用した衝撃弾性波法による構造物の劣化診断は効率的であり、実構造物を用いた検証調査においても、表面 P 波速度を指標に構造物の劣化度の評価が可能であった。

今後は、表面 P 波速度を用いた漁港施設の劣化診断手法の確立に向けて、その適用性の明確化や診断精度向上のため、ひび割れ幅や深さによる速度低下の定量的把握や試験方法の省力化などを室内試験や現地検証を通じて検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 農林水産省水産庁漁港漁場整備部：水産関係公共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），2007.
- 2) Mary Sansalone, Jiunn-Ming Lin and William B. Streett, 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
- 3) 三上信雄, 藤田孝康, 極壇邦夫, 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, pp.1555-1560, 2009.7
- 4) 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, 2005.9
- 5) 山下健太郎, 境友昭, 極壇邦夫, 森濱和正：空洞がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響, 日本非破壊検査協会平成 18 年度秋期講演概要集, pp.149-152, 2006.10
- 6) 松下博通, 尾上幸造：セメント硬化体内部空隙中の液体の表面張力が圧縮強度に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, pp.9-18, 2001.8