

漁港施設における固有振動及び透過弾性波を用いた  
基礎部と提体内部欠陥の診断手法

適用マニュアル（案）

令和3年10月

水産庁漁港漁場整備部

## 目次

I. 総説	
1. 本適用マニュアル（案）の位置付け	1
2. 本適用マニュアル（案）の活用の考え方	2
3. 本適用マニュアル（案）の適用範囲	4
4. 本適用マニュアル（案）の構成	6
5. 用語の定義	7
【参考文献】	
II. 技術資料	
1. 固有振動法	
1-1 固有振動法	9
1-2 測定機器と方法	12
1-3 測定技術者	14
1-4 測定手順	15
1-5 報告	24
1-6 適用事例	25
1-7 概算費用	35
【参考文献】	
2. 透過弾性波法	
2-1 透過弾性波法	38
2-2 測定機器と方法	40
2-3 測定技術者	42
2-4 測定手順	43
2-5 報告	49
2-5 適用事例	50
2-6 概算費用	52
【参考資料】	

謝辞

まえがき

水産基盤施設は、我が国の水産物の安定供給の基盤となるものであり、これまで継続的かつ重点的に整備がなされてきた。漁港の主要な施設である外郭施設及び係留施設を例に取れば、昭和25年（1950年）から平成25年（2013年）までの間に整備された施設の延長は5,000kmにも及ぶ。これらの施設は、今後急速な老朽化の進行が予想され、維持管理・更新等に係る費用の増大が懸念される。そこで平成20年度より、「水産物供給基盤機能保全事業（水産基盤ストックマネジメント事業）」がスタートし、効果的かつ効率的な漁港施設の維持管理・更新等、施設の長寿命化やライフサイクルコストの縮減が図られることとなった。その中で、漁港施設の機能診断は、簡易調査による目視が主体のため、時間やコスト等の労力に加え、点検技術者による精度のばらつき等の問題がある。特に、施設の大半が水中部に位置する防波堤等の外郭施設においては、その構造の大部分が水面下にあり、部材の状況を陸上から簡易に視認することが難しく、点検の際に潜水等を伴うことによってコストの増大や危険性への直面を余儀なくされている。

水産庁漁港漁場整備部では、平成27～令和元年度の5年間にわたり、構造物自体の内部空洞や基礎欠陥を安全かつ簡易に診断する方法として、漁港構造物の固有振動を用いた手法、および弾性波（透過弾性波法）を用いた手法について検討を進めてきたところである。

本適用マニュアル（案）は、その成果をとりまとめたものであり、漁港管理者や関係者に広く活用され、より一層の効果的かつ効率的な機能診断が実施されることを望んでいる。

令和3年10月

水産庁漁港漁場整備部

## I. 総説

### 1. 本適用マニュアル（案）の位置づけ

本適用マニュアル（案）は、漁港施設を効果的かつ効率的に診断する新たな手法を示し、漁港管理者及び関係者（所有者及び実務点検者）が、日常管理や定期点検において適切に活用することを目的とする。

#### （１）背景

漁港漁場施設をはじめとした水産基盤施設の長寿命化や更新コストの縮減を図るため、水産基盤施設ストックマネジメント事業が進められている。その中で、漁港漁場施設の機能診断は簡易調査にて目視や計測を中心に行うこととなっており、特に水中部においては、潜水や専門機器を用いた詳細調査により評価結果の検証や要因の特定を行う体系となっており、潜水作業を伴うことによる時間やコスト等の労力が大きく、その軽減策が求められている。さらに、潜水作業は終始水中部で行われることから安全面への対応、潜水土不足や高齢化への対応なども必要とされている。<sup>1),2)</sup>。そのため、より実用的な点検・診断手法の開発・導入が期待されている<sup>3)</sup>。

また、漁港漁場施設は、①主要部材がコンクリートであり、無筋コンクリートの割合が多い、②防波堤のような延長が長い施設が多い、③構造物の大部分が地中部もしくは水中部に位置しているといった特徴があり、陸上の安全な場所において構造部材の取り壊しや補修を必要とせずに簡易に行える機能診断手法の普及が期待されている。特に非破壊検査による手法は、目視で確認できない箇所を評価できる可能性が高いもので、点検の実施手順に適切に組み込むことにより点検の効率化に繋がるものと考えられる。

既往の非破壊検査の例として、漁港構造物における多点での強度推定（機械インピーダンス法）<sup>4)</sup>、表面劣化を計測する方法（表面p波法）など<sup>5)</sup>が挙げられる。しかし、これらは構造物の表面状態を診断することを目的としており、構造物の内部空洞や基礎部欠陥といった変状の検出は新に診断手法を確立する必要がある。

#### （２）目的

本適用マニュアル（案）は、非破壊検査手法を用いた漁港施設における防波堤等の内部欠陥や基礎部欠陥を効果的かつ効率的に診断する新たな手法を示し、漁港管理者及び関係者（所有者及び実務点検者）が、日常管理や定期点検における簡易調査（重点項目）において適切に活用できるようその実施手順を示すことを目的とする。

本適用マニュアル（案）を活用することで、漁港管理者及び関係者の作業性や経済性が向上されることを期待する。

## 2. 本適用マニュアル（案）の活用の考え方

本適用マニュアル（案）で示す技術は、固有振動法及び透過弾性波法（以下、「本技術」と称す）であり、これらは漁港施設の日常管理および定期点検の簡易調査（重点項目）及び詳細調査に適用するものである。

漁港施設における維持管理の手順は、図1のとおりである<sup>2)</sup>。漁港管理者は、機能保全計画を策定し、この計画に則って、日常管理や保全対策を実施していくこととされる。また、機能保全計画の中で、日常管理計画も策定され、表1の各種点検を目的や内容に則って、回数や頻度を設定して行うこととされる<sup>2)</sup>。このうち、定期点検の頻度は、漁港の重要度に応じて、5～10年の間隔で実施することとされ、機能保全計画の見直しのために、簡易調査（重点項目）を実施し、必要に応じて詳細調査を実施することとなっている（表1参照）<sup>2)</sup>。

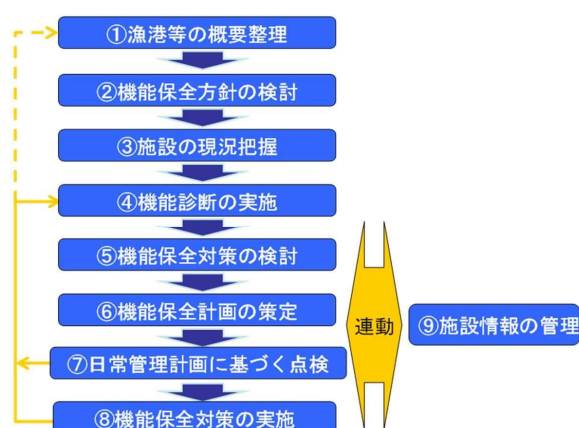


図1 漁港施設維持管理の手順<sup>2)</sup>

表1 日常管理における点検の種類等<sup>2)</sup>

点検の種類	目的・内容	実施時期、頻度等
日常点検	<ul style="list-style-type: none"> <li>簡易調査において把握された老朽化の進行状況の確認、新たな老朽化の発見のため。</li> <li>簡易調査（簡易項目）に沿った目視（陸上）調査。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>概ね1年に1回以上。臨時点検と併せ、1年に複数回実施することが望ましい。</li> <li>漁業者等からの情報提供等により管理者等の体制を補完。</li> </ul>
臨時点検	<ul style="list-style-type: none"> <li>台風による高波浪の来襲後、一定規模以上の震度の地震発生後や船舶の衝突等事案が発生した場合、施設の変状、損傷の有無等の把握のため。</li> <li>簡易調査（簡易項目）に沿った目視（陸上）調査。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>事案発生後可能な限りやかに。</li> <li>地震の規模については管理者等で決定。</li> </ul>
定期点検	<ul style="list-style-type: none"> <li>現行の機能保全計画書の見直しのため。</li> <li>簡易調査（重点項目）を実施。必要に応じて詳細調査を実施。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水産物生産・流通拠点漁港における主要な施設については概ね5年に1回。</li> <li>それ以外の漁港については、漁港等の機能の重要性を踏まえ、概ね5～10年の間隔で適切に設定。</li> </ul>

前述した定期点検における簡易調査（重点項目）では、陸上及び海上からの目視による調査を基本としているため、海中部にある防波堤基礎部の変状を把握することが困難であった。しかし、本技術を用いることで、これら部位の変状の有無を潜水調査や海上調査を行わなくても、簡便に把握することができる。これにより、現場での負担が大きい潜水作業の軽減を図るための潜水調査のスクリーニング（詳細調査点検箇所絞り込み）が可能となり、点検・調査作業の効率化も図られる。

このため、定期点検での防波堤水中部やケーソン内部の簡易調査（重点項目）にあたっては、潜水調査や海上調査に先立ち、本技術を活用することが有効である。

本技術の適用フローを以下に示す（図2参照）。

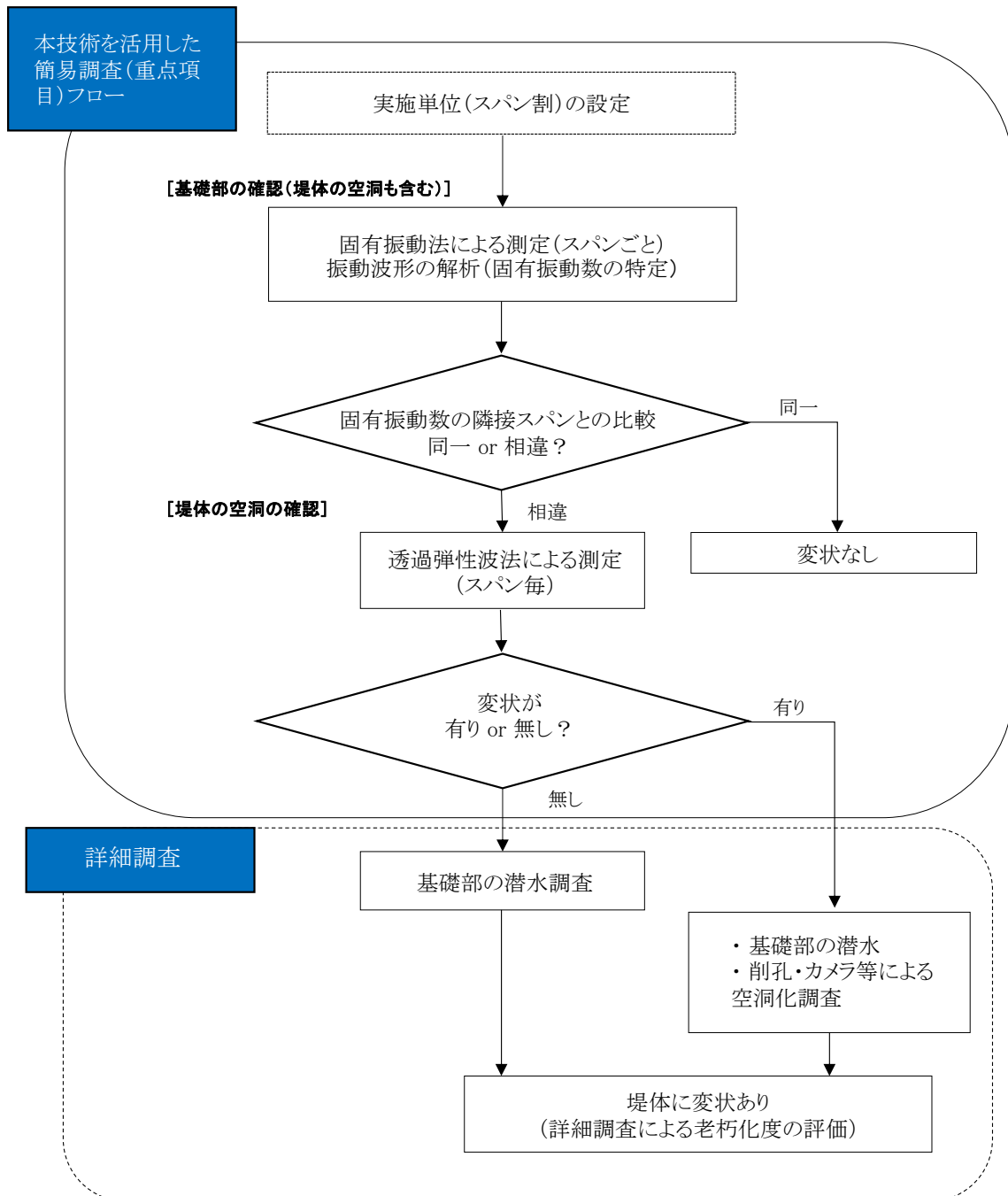


図2 本手法の適用フロー

### 3. 本適用マニュアル（案）の適用範囲

本適用マニュアル（案）は、コンクリート構造物の防波堤（直立堤、混成堤）の基礎部欠陥と堤体の内部欠陥の把握を適用範囲とする。

#### （1）対象施設

本適用マニュアル（案）における対象施設は、主要な材料がコンクリート構造物の防波堤のうち、直立堤と混成堤とする。また、固有振動法はこれら対象施設の基礎部分における洗掘や空洞、堤体底面の欠損といった基礎部欠陥を対象とし、透過弾性波法は対象施設における堤体の内部欠陥を対象とする。なお、杭式や矢板式の構造物は対象外である。

#### （2）留意事項等

固有振動法及び透過弾性波法は、直立堤や混成堤 1 スパンごとに測定することとする。また、計測対象施設の堤体のスパン割が、上部工、本體工、下部工で一致しない場合や堤体が岩盤上に直接設置（岩着形式）される場合は正常な固有振動数を計測できない場合があるので注意を要する。

本適用マニュアル（案）は、固有振動法と透過弾性波法の特性や漁港構造物への適用、試験方法等を検討するため、数値計算、室内試験を行い、実際の構造物で適用性を確認した成果をもとに作成している。

#### （3）地中部もしくは水中部の変状を把握する技術

一般に、地中部もしくは水中部の変状を把握するための点検手法として、電磁波レーダー探査、超音波探査（カラーイメージングソナー）、削孔による目視確認、および潜水による目視確認等が挙げられる（表 2）。

電磁波レーダー探査は、主としてパラペットの地中部における空洞を検出するために採用される。そのため、対象となる箇所のコンクリート部分は 100～200mm 前後である。また、水中部での精度が低く、超音波探査は傭船等を伴うため、手間やコストを要する。削孔による目視確認は、構造物の取り壊しを伴うため、空洞部が判明した後に用いられることが多い。そのため、現状では潜水による目視確認が主に実施されている<sup>7-12)</sup>。潜水による目視確認は、海象条件や作業時間の規制による制約が大きく、調査対象物が長大となるほど手間とコストを要し非効率となる場合が多い。

本適用マニュアル（案）で扱う固有振動法は、構造物上部での陸上作業により振動観測を行い、基礎部欠陥を検出する方法である。本手法による基礎部欠陥の検出は、構造物内部に空洞がないことを前提としているため、固有振動数に異常が見られる場合は、構造物の内部空洞の有無を確認することが望ましい。これを検出する手法が弾性波を構造物に伝搬させることで内部空洞の有無を把握する透過弾性波法である。

表2 地中部もしくは水中部の変状を把握するために一般に用いられる点検手法

点検手法	特徴	適用範囲	適用材料	漁港構造物 (水中部)への 適用性
電磁波レーダー 探査 <sup>2), 6), 7), 11)</sup>	非破壊検査手法。 比較的容易に、平面的 に広範囲の測定が出来る。 調査箇所を断面を画像 記録することが出来る。	海水面よりも上 の範囲。 探査深度は地表 面から2 mまで の範囲	コンクリ ート	×
超音波探査(カ ラーイメージン グソナー) <sup>9)</sup>	非破壊検査手法。 比較的容易に、平面的 に広範囲の測定が出来る。 調査箇所を断面を画像 記録とすることが出来る。	構造物全体	コンクリ ート及び 鋼材	○ (陸上からの 確認は限定的 であるため調 査船等を要す る。)
削孔による目視 確認 <sup>2), 6), 7), 11)</sup>	破壊検査手法。 変状の有無、位置、規 模が精度良く把握でき る。 修復に時間と費用を要 する。また、削孔箇所 が弱点部になる。	海水面よりも上 で、作業足場の 確保が可能な範 囲(ただし、事 後の復旧を要す る。)	コンクリ ート	○ (確認できる 範囲は限定的 である。)
潜水による目視 確認 <sup>2), 6), 7)</sup>	潜水による直接目視。 変状の有無、位置、規 模が精度良く把握でき る。 調査には時間と費用を 要する。	構造物全体 (ただし、大深 度になると減圧 を要する。)	コンクリ ート及び 鋼材	○ (海象条件と 深度による制 約がある。)
固有振動法 <sup>14), 15), 16), 17)</sup>	非破壊検査手法。 陸上から広範囲にわた り短時間で精度良く検 査が出来る。	堤体の基礎部欠 陥(洗掘や空 洞、堤体底面の 欠損など)	コンクリ ート	○
透過弾性波法 <sup>12), 13)</sup>	非破壊検査手法。 陸上から広範囲にわた り短時間で精度良く検 査が出来る。	堤体の内部空洞	コンクリ ート	○

#### 4. 本適用マニュアル（案）の構成

「本適用マニュアル（案）」は、「Ⅰ．総説」と「Ⅱ．技術資料」の2部構成とする。

##### （1）本適用マニュアル（案）の構成

本適用マニュアル（案）は、「Ⅰ．総説」と「Ⅱ．技術資料」の2部構成である。Ⅰ．総説では、本適用マニュアル（案）の背景や目的、技術の位置づけ、構成を述べている。また、Ⅱ．技術資料では、1．固有振動法、2．透過弾性波法の2つの技術を記述している。なお、「1．固有振動法」には、自由振動法と強制振動法による方法の2種類がある。

それぞれの章で、技術ごとに、適用範囲、測定機器と方法、測定技術者、測定手順、適用事例を掲載しており、漁港管理者の参考となるよう概算費用を整理している。

## 5. 用語の定義

本適用マニュアル（案）における用語は、「水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン<sup>2)</sup>（p2）」における用語に準拠している。「水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン<sup>2)</sup>」に記載のないものは、以下のとおりである。

**固有振動数**：様々な構造物が固有にもつ振動数が存在し、その振動数を固有振動数という（P9, 10 参照）<sup>18)</sup>

**卓越振動数**：測定された振動の全体で、他と比較して振幅、または応答が最も大きくなることを卓越するといひ、この時の振動数を卓越振動数という<sup>18)</sup>。

**起振機**：構造物に一定振幅の外力を加える（加振する）ために使用される機器のことを起振機という<sup>18)</sup>。

**速度計**：構造物等の測定点に設置することで、測定点の変位（速度計の場合、速度）を測定する機器を速度計という<sup>18)</sup>。

**自由振動**：ある振動系に外力の作用を受けずに生じている振動を自由振動という<sup>18)</sup>。

**強制振動**：強制的な外力の作用で加振した状態で起きている振動を強制振動という<sup>18)</sup>。

**共振曲線**：構造物に対して、起振機の振動数を段階的に変えながら、加振し、その時の振動を速度計で測定すると、それぞれの振動データが各振動数ごとに得られる。これらの最大変位を各振動数ごとにプロットすると共振曲線が得られる<sup>18)</sup>。

**ロッキング振動**：構造物がある点（ロッキング中心）を中心として、回転振動することをロッキング振動という（P9, 10 参照）<sup>18)</sup>。

**フーリエ・スペクトル解析**：振動波形のフーリエ・スペクトルを求めることを指し、これにより振動数成分の検出と時間領域から振動数領域へ変換することを意味している<sup>19)</sup>。

**スムージングバンド幅**：フーリエ・スペクトルは、振幅の凹凸が大きいため、このスペクトルをできるだけなめらかにすることを平滑化（スムージング）という。平滑化は、振動数領域で一定のバンド幅を持つウィンド関数を乗じた移動平均すること等で行われる。このときのバンド幅のことをスムージングバンド幅という。<sup>18), 19)</sup>

**H/Vスペクトル**：3成分の常時微動から算出する水平方向と鉛直方向のスペクトル比のこと<sup>20)</sup>。

## 【参考文献】

- 1) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤施設機能保全計画策定の手引き，平成 27 年 5 月改定
- 2) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン，平成 27 年 5 月改定
- 3) 水産庁：インフラ長寿命化計画（行動計画），平成 26 年 8 月
- 4) <http://nrife.fra.affrc.go.jp/seika/kikaiimpedancehoumanual201604/201604kikaiimpedancehoumanual.pdf>
- 5) <http://nrife.fra.affrc.go.jp/seika/hyoumenphahoumanyuaru/150331hyoumenphahou.pdf>
- 6) 国土交通省：港湾の施設の点検診断ガイドライン【第 2 部 実施要領】，平成 26 年 7 月
- 7) 農林水産庁・国土交通省：海岸保全施設維持管理マニュアル～堤防・護岸・胸壁の点検・評価及び長寿命化計画の立案～，平成 26 年 3 月
- 8) 国土交通省：ダム総合点検実施要領・同解説，平成 26 年 6 月
- 9) 国土交通省：橋梁定期点検要領，平成 26 年 6 月
- 10) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編），平成 19 年 1 月
- 11) 国土交通省：道路トンネル定期点検要領，平成 26 年 6 月
- 12) 日本非破壊検査協会規格：コンクリートの非破壊検査試験－弾性波法－第 2 部：衝撃弾性波，NDIS 2426-2:2014，（社）日本非破壊検査協会，東京，平成 26 年 9 月
- 13) 藤田孝康，松本 力，斎藤将貴，笠井哲郎，奥野正洋，加藤広之，野神功一，不動雅之：透過法衝撃弾性波法による漁港施設の内部欠陥診断手法の検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），74(2)，I\_79-I\_84，2018.
- 14) 藤田孝康，斎藤将貴，三神 厚，笠井哲郎，奥野正洋，加藤広之，野神功一，不動雅之：漁港施設における不可視部の診断手法としての固有振動の適用性検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），74(2)，I\_103-I\_108，2018.
- 15) 藤田孝康，丸山敏生，笠井哲郎，三神 厚：防波堤の固有振動特性を用いた老朽化の評価手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40，No. 2，pp. 1327-1332，2018.
- 16) 斎藤 将貴，藤田孝康，梅津 啓史，三神 厚：起振機実験による防波堤の固有振動特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41，No. 2，pp. 1369-1374，2019.
- 17) 梅津 啓史，藤田孝康，三上 信雄，斎藤 将貴，三神 厚，不動 雅之，井上真仁，笠井 哲郎：漁港施設の機能診断のための固有振動特性の適用性検証，土木学会論文集 B3（海洋開発），75(2)，I\_575-I\_580，2019.
- 18) 小坪清真：土木振動学，森北出版(株)，東京，2006 年 9 月 1 日
- 19) 大崎順彦，地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，東京，1993 年 4 月 30 日
- 20) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告 Vol. 2，No. 4，1988，pp. 18-27.

## II. 技術資料

### 1. 固有振動法

#### 1-1 固有振動法

本適用マニュアル（案）は、固有振動数を用いて、漁港施設のコンクリート構造物の防波堤等の基礎部欠陥の有無を評価するための方法を規定する。

#### 【解説】

##### (1) 固有振動法の測定原理

固有振動法は、構造物を弾性体、底質地盤をばねと仮定して、堤体上部で堤体の振動を計測し、この振動波形から固有振動数を特定する方法である。また、この固有振動数によって、堤体下部および底質地盤の変状（基礎部欠陥）を評価することが可能である<sup>1)</sup>。

本手法は、防波堤に常に周期 0.2 秒前後の振動が生じていること、この振動は捨石基礎という弾性体の上に堤体が載った 1 つの振動系と見なすことができること、この振動はロッキング振動であるという報告をもとにしている<sup>2)</sup>。また、漁港施設の防波堤が図 1 に示すような構造であることから、前述のロッキング振動が水平方向（X 軸方向）で顕著であると考えられ、X 軸方向の固有振動に着目している<sup>3)</sup>。

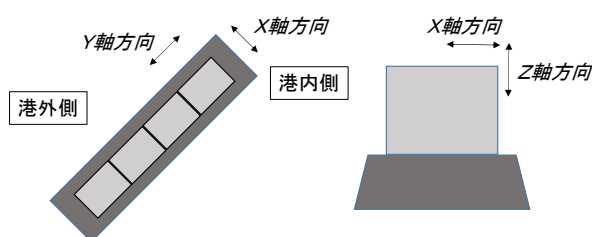


図 1 防波堤等における平面・断面模式図

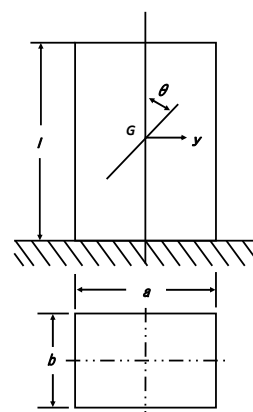


図 2 水平方向振動の模式図

本手法の原理は、土木振動学におけるロッキング振動を参考としている<sup>4)</sup>。

まず、基礎の地盤を等方均質な線形弾性体であると仮定し、このような地盤上に縦横それぞれ a、b、高さ l の長方形コンクリートブロックの水平振動を考える（図 2 参照）。

このブロックの振動は、重心 G（ここではロッキング中心を構造体重心としている）の水平変位 y および重心まわりの回転角  $\theta$  をもつ 2 自由度系であり、この場合の水平復元力は、以下のようなになる。

$$abk_s \left( y - \frac{l}{2} \theta \right)$$

ここで、 $k_s$  は水平地盤係数である。また、重心まわりの復元モーメントは左回りとなる。

$$\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} b \theta \eta k_v \eta d\eta - abk_s \left( y - \frac{l}{2} \theta \right) \frac{l}{2}$$

ここで、 $k_v$ は鉛直地盤係数である。ブロックの質量を $m$ 、重心回りの質量の慣性モーメントを $J$ とすれば、水平振動の方程式は、以下となる。

$$m\ddot{y} + abk_s\left(y - \frac{l}{2}\theta\right) = 0$$

また、回転運動の方程式は、下式となる。

$$J\ddot{\theta} + \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} b\theta\eta k_v \eta d\eta - abk_s\left(y - \frac{l}{2}\theta\right)\frac{l}{2} = 0$$

ここまでは、コンクリートブロックの水平動と回転を考えた2自由度系として取り扱ったものである。

実際の防波堤等では、構造体底面にロッキング中心があることが多いとされる<sup>2)</sup>。そこで、(1)式は、ロッキング中心が構造体底面中央にあると仮定したロッキング振動だけを考えた1自由度の運動方程式である<sup>4)</sup>。なお、 $K_R$ ：ばね定数（または地盤反力係数）、 $J$ ：慣性モーメントを示す。

$$J\ddot{\theta} + K_R\theta = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

固有振動数は、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_R}{J}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

以下より、 $J$ 、 $K_R$ を求め、これらを(2)式に代入することで固有振動数が求められる。

$$K_R\theta = \int_{-a/2}^{a/2} k_v b d\eta \cdot \eta \theta \cdot \eta$$

$$K_R = k_v b \int_{-a/2}^{a/2} \eta^2 d\eta$$

$$K_R = k_v b \int_{-a/2}^{a/2} \eta^2 d\eta = k_v b \left[ \frac{\eta^3}{3} \right]_{-a/2}^{a/2} = \frac{1}{12} k_v b a^3$$

$$J = \int_0^h \int_{-a/2}^{a/2} \rho dy dz b (y^2 + z^2) = \int_{-a/2}^{a/2} \rho b y^2 dy [z]_0^h + \int_0^h \rho b z^2 dz [y]_{-a/2}^{a/2}$$

$$= \int_{-a/2}^{a/2} \rho b h y^2 dy + \int_0^h \rho b a z^2 dz = \rho b h \left[ \frac{y^3}{3} \right]_{-a/2}^{a/2} + \rho b a \left[ \frac{z^3}{3} \right]_0^h$$

$$= \rho b h \frac{a^3}{12} + \rho b a \frac{h^3}{12} = M \left( \frac{a^2}{12} + \frac{h^2}{3} \right)$$

ここで、 $M = \rho a b h$

## (2) 固有振動法による自由振動法と強制振動法

本手法は、常時微動（自由振動）を計測して、その波形を解析する「自由振動法」と起振機による強制的な加振で振動を発生させてこれを計測し、その波形を解析する「強制振動法」による方法の2種類がある。これら2種類の方法を導入する流れは、図3に示すとおりである。

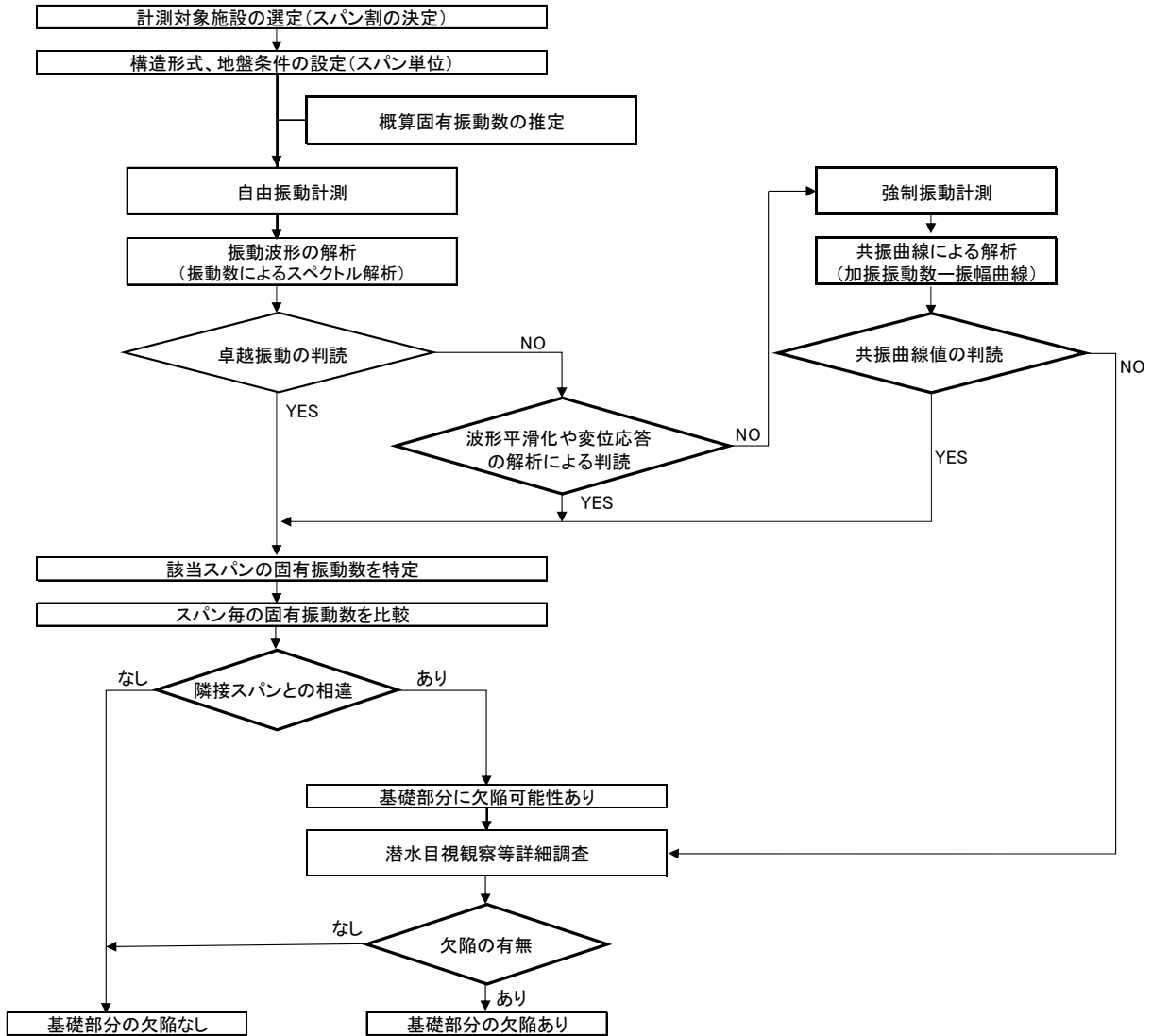


図3 本手法の適用フロー

## (3) 制約条件と留意事項

本手法における対象施設は、I. 総説における3.の(1)で述べたように、主要な材料がコンクリート構造物の防波堤のうち、直立堤と混成堤である。また、対象となる基礎は、直接基礎（岩着式）、捨石式、マウンド式とする。ここでは、主として現地での制約条件と留意事項を述べる。

### 1) 制約条件

固有振動法は、防波堤等の1スパン（幅5m程度、高さ8m程度）を対象とする。本手法は、自由振動と強制振動の2種類の振動を計測するものであり、これらは外的要因の影響（降雨等）を受け易いため、雨天での計測は不可とする。

また、周辺で振動を伴う工事が実施されている場合や風速10m以上となる場合等は、振動測定ノイズが大きくなるため、測定不可とする。

## 2) 留意事項

対象スパンにおける振動測定は、測定誤差が大きくなるため、周辺の振動（車両、船舶、工事機械等）に留意する。

## 1-2 測定機器と方法

### (1) 測定機器

測定機器は、分解能や測定振動数等、対象構造物の振動を適切に検知できる速度計とする。

### (2) 測定方法

測定は、自由振動及び強制振動の双方とも速度計を対象構造物の上部に水平設置し、測定振動数 100Hz で 1～3 分間計測する。

## 【解説】

### (1) 測定機器

#### ① 自由振動

測定機器は、速度計（または加速度計）と測定振動を記録するための PC 及び付属のアプリケーションとする。なお、速度計は、分解能が  $0.03 \times 10^{-5} \text{m/s}$  ( $0.03 \text{kine}$ ) 程度とし、測定振動数 1Hz 以上が測定可能なものとする。

#### ② 強制振動

強制振動は、強制振動を起こす起振機と前述の速度計および測定振動を記録するための PC 及び付属のアプリケーションとする。起振機は、構造物を起振させるのに十分な加振力を持ったものとし、水平に稼働するものが望ましい。なお、速度計の分解能は、自由振動と同等程度とする。

### (2) 測定方法

#### ① 自由振動

測定は、速度計を対象構造物の上部に水平設置し、自由振動を測定振動数 100Hz で 3 分間測定する。測定した固有振動が構造物自体のものであるか否かを確認するため、構造物と離れた箇所で地盤の振動も併せて測定する。

#### ② 強制振動

測定は、起振機を構造物中央に設置し、速度計を対象構造物の上部に水平設置することで、強制振動を測定振動数 100Hz で 1 分間測定する。なお、構造物が小さく、起振機自体の振動を測定される場合は、中心線から  $1/4$  の箇所に速度計を移動させて測定する。

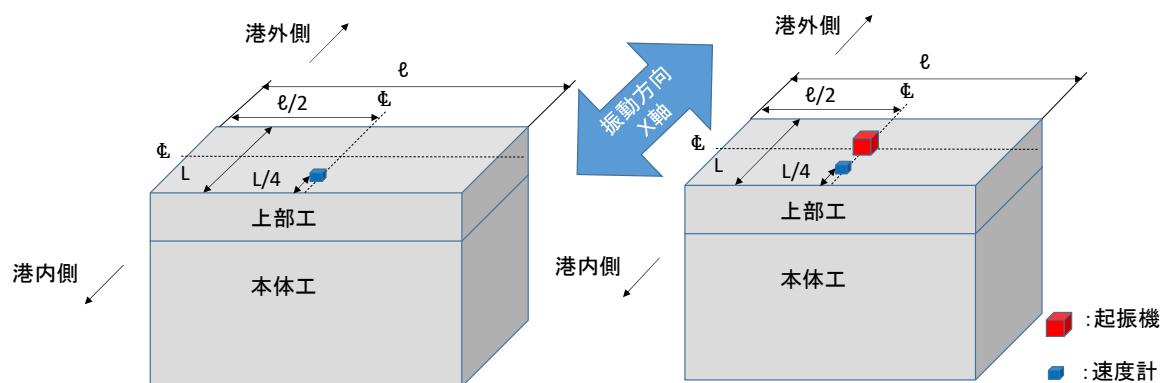


図4 自由振動（左）と強制振動（右）の測定概要

### (3) 測定機器の校正及び点検

測定機器の校正は、定められた期間ごと、または異常が確認された場合に、測定技術者が機器製造者またはその代理人に依頼して行う。

また、測定機器の点検は、測定の事前事後で測定機器の動作に異常がないことを測定技術者が確認する。

### 1-3 測定技術者

本適用マニュアル（案）に基づいて測定を行う技術者は、測定方法の原理、測定機器に関する知識及びコンクリートに関する基礎知識をもつ者とする。

## 1-4 測定手順

本手法における測定手順は、「事前準備」、「測定場所の決定」、「測定」、「データ処理」とする。

### 【解説】

本手法には、自由振動法と強制振動法の2種類があり、それぞれの測定手順は、図5に示すとおりである。

自由振動法と強制振動法のいずれの測定もまず、測定のための「事前準備」を行い、「測定場所の決定」を行って、測定機器等を設置して「測定」する。測定後は、「データ処理」することで固有振動数を特定し、周辺スパン等と比較する。

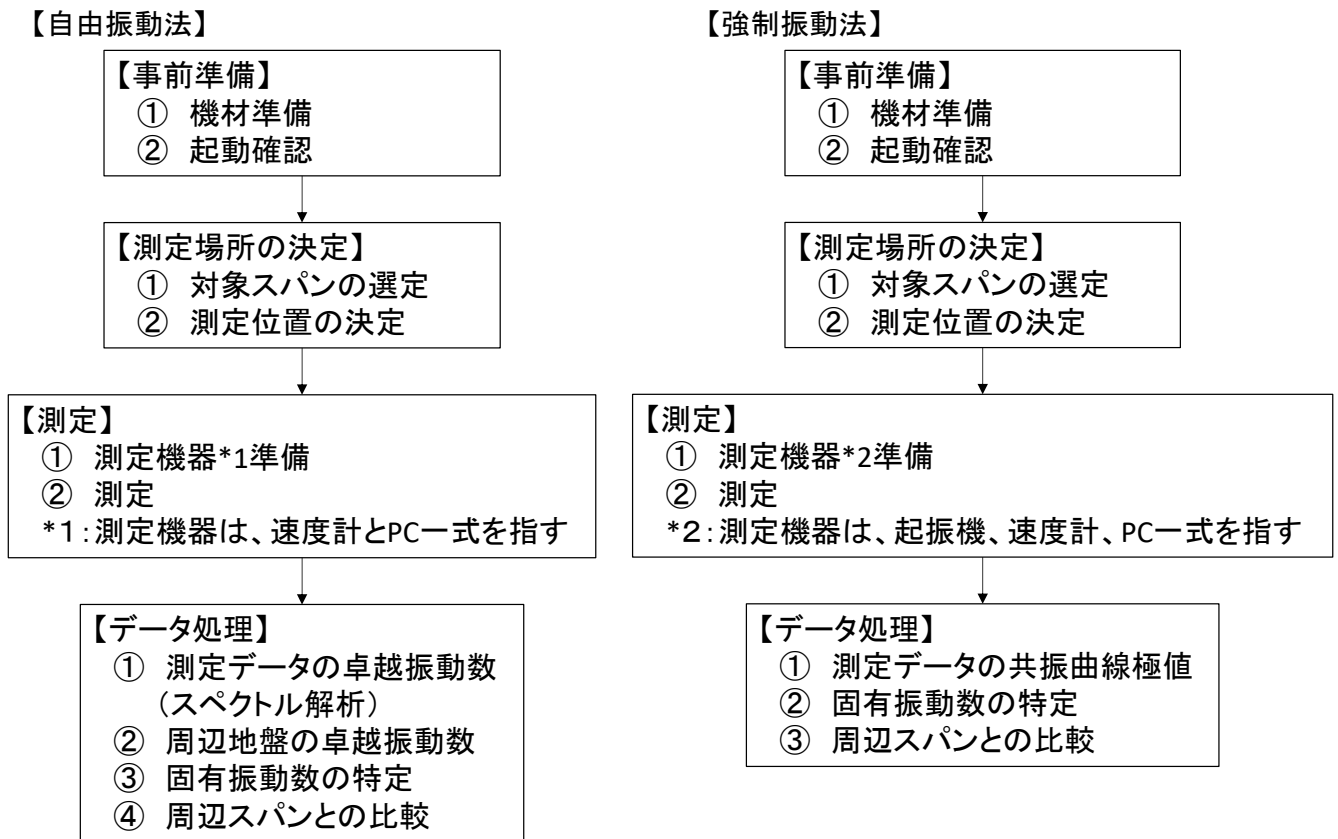


図5 測定フロー

#### 1-4-1 事前準備

事前準備は、「機材準備」、「起動確認」の順で実施する。

##### 【解説】

##### (1) 機材準備

自由振動の機材準備は、速度計一式 (PC 含む)、バッテリーセット、位置出し用機材 (エスロンテープ、コンベックス、チョーク等) 等を用意する。

強制振動の機材準備は、自由振動の機材に加え、起振機一式を準備する。また、発電機や延長ケーブルを準備する。

双方ともに、必要に応じて、測定時にパソコン画面が見やすくなるように、日傘等を用意する。

##### (2) 起動確認

自由振動、強制振動ともに、速度計、PC 及び付属アプリケーション、起振機の起動確認を行う。

## 1-4-2 測定場所の決定

測定場所の決定は、「対象スパンの選定」、「測定位置の決定」の順で実施する。

### 【解説】

#### (1) 対象スパンの選定

対象施設は、本手法の適用検討時に選定しておく。このうち、対象スパンは、原則として、全スパンとする。なお、構造形式が異なる場合は、同じ構造形式群別で区分する。

#### (2) 測定位置の決定

自由振動における測定位置は、速度計を設置する位置とする。この測定位置は、対象スパンごとに1ヶ所ずつ選定する。

測定位置は、基本的に対象スパンにおける上部工上面の中心とし（スパン長(L)の中心： $L/2$ ）、構造物短辺の港内側1/4（スパン幅(W)の1/4： $W/4$ ）とする。ただし、ひびわれ、表面劣化、剥離などの老朽化、またはカキや藻類など付着物がある場所は可能な限り避けることとし、平らで測定機器の水平設置が可能な位置とする。測定位置出しは、エスロンテープ等で計測し、測定位置をチョーキングする。

強制振動における測定位置は、速度計を設置する位置とし、その位置は自由振動と同様とする。強制振動を起こす起振機は、スパン長(L)の中心でスパン幅(W)の中心とすることで対象スパンの中央とする。

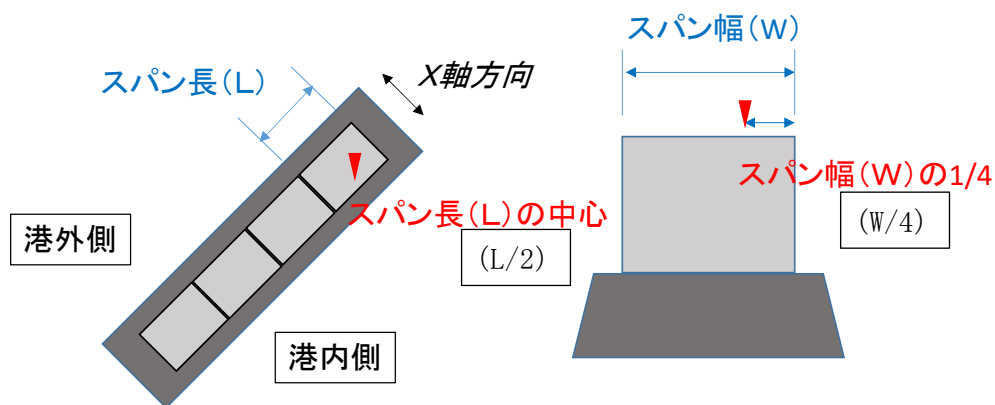


図6 測定位置模式図

### 1-4-3 測定

測定は、「測定機器の準備」、「測定」の順で実施する。

#### 【解説】

#### (1) 測定機器準備

##### ① 自由振動法

自由振動法における主な測定機器は、速度計と PC 一式である。これらの測定機器準備は、以下の手順で実施する。なお、ここでは測定機器の事例として、適用事例（後述）で用いた東京測振社製の小型振動計測装置及び付属のデータ処理ソフト一式を示す。

(手順) PC 立ち上げ前に測定器の準備として

- 1) 速度計を測定位置に水平設置する。
- 2) 速度計の測定方向 (X、Y、Z 軸) を合わせる。
- 3) 速度計、PC、バッテリーそれぞれをケーブルで接続する。
- 4) 速度計、PC、バッテリー等の接続は、ケーブルやケーブル接続部の断線等に留意する。また、バッテリーは事前に十分な充電と予備器を備えておく。

##### ② 強制振動法

強制振動法における主な測定機器は、起振機、速度計、および PC 一式である。速度計、および PC 一式の手順は、自由振動と同様である。ここでは、起振機の手順を示す。なお、ここでは起振機の実例として、適用事例（後述）で用いた (株) サイエス製の永久磁石起振機 SSV-125ME を示す。

(手順) 起振機の準備として

- 1) 起振機の設置場所 (対象スパン中央) にドリル等で穴を明ける。
- 2) 起振機が振動によって動かないようにネジ等で固定する。
- 3) 起振機をケーブルで接続する。
- 4) 起振機の接続は、ケーブルやケーブル接続部の断線等に留意する。また、バッテリーは事前に十分な充電と予備器を備えておく。



起振機	SSV-125ME
最大加振力	588N (60kgf)
振動数範囲	0.1~100Hz
起振方向	水平方向
最大加速度	無負荷14.7m/s <sup>2</sup>
最大変位	80mmp-p
電源	AC100V単相
可動部質量	40kg
寸法	W224×D374×H184mm

図7 起振機事例

※「強制振動における起振機」の詳細は、起振機の取扱説明書<sup>7)</sup>を参照されたい。

### 【起振機の選定例】

起振機は、検討振動数帯においてフラットな加振力特性（最大加振力 588N）を有することで、十分な応答が得られるかどうかを検査することで選定する。ここでは、構造物上部に起振機を設置し、水平加振することで、構造物底面中心にロッキング中心があるような振動をするものと仮定した検討を行った（図 8 参照）。

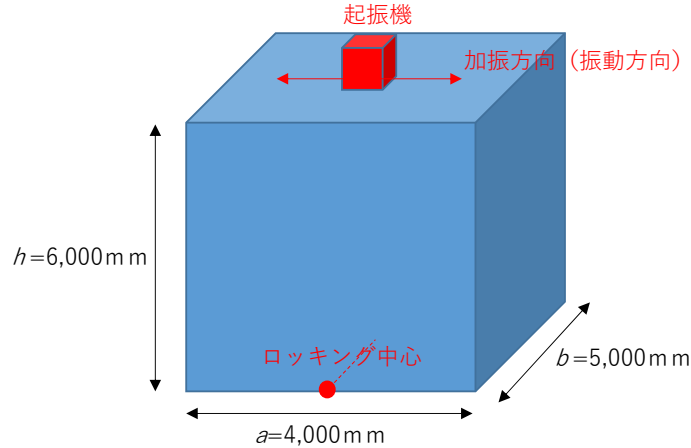


図 8 加振力検討のために想定した構造体

図 6 より、 $a, b$  は、それぞれ剛体ブロックの幅と奥行きであり、 $m, A, h$  は、それぞれ、起振機に載せる質量、起振テーブルの振幅（制約あり）、剛体ブロックの高さである。なお、本検討では、起振機自体の質量は考慮していない。

振幅を  $A$ （最大 25mm）とすると、 $u = A \exp(i\omega t)$  となる。よって、加速度は、 $\ddot{u} = -A\omega^2 \exp(i\omega t)$  となるので、慣性力（加振力）は、 $-m\ddot{u} = mA\omega^2 \exp(i\omega t)$  となる。

このときの運動方程式は、①のとおりである。

$$J\ddot{\theta} + \int_{-a/2}^{a/2} k_v b d\eta \cdot \eta \theta \cdot \eta = mA\omega^2 \exp(i\omega t) \cdot h \quad \text{①}$$

$F(\omega)$  は水平起振力、 $k_v$  : 鉛直方向地盤反力係数、 $K_\theta = \frac{1}{12} k_v b a^3$  である。

①式の計算を進めると、

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} + k_v b \int_{-a/2}^{a/2} \eta^2 d\eta \cdot \theta &= J\ddot{\theta} + \frac{1}{3} k_v b \left[ \eta^3 \right]_{-a/2}^{a/2} \cdot \theta = J\ddot{\theta} + \frac{1}{12} k_v b a^3 \cdot \theta \\ &= J\ddot{\theta} + K_\theta \theta = -mA\omega^2 \exp(i\omega t) \cdot h \end{aligned}$$

これより、 $\theta = \theta_0 \exp(i\omega t)$  とおき、 $F(\omega) = F_0 \exp(i\omega t)$  とすると、 $(K_\theta - \omega^2 J)\theta_0 = F_0 h$ 、よって、

$\theta_0 = \frac{F_0 h}{K_\theta - \omega^2 J}$  が各振動数ごとの回転角となる。得られる応答の推定値とセンサーの最大感度と

分解能を併せて考慮し、3(Hz)以上は一定加振、3(Hz)未満は加振力低下として、3(Hz)で振幅 25mm 加振した場合を基準とした。加速度  $A\omega^2 = 0.025(m) \times (2\pi \times 3\text{Hz})^2 = 8.883(m/s^2)$  となるので、加振力は、 $m A \omega^2 = 50(\text{kg}) \times 8.883(m/s^2) = 444(N) < 588(N)$  最大加振力 588N より小さくなり、十分、応答信号が得られることが見込まれたため、本起振機を選定した。

## (2) 測定

### ① 自由振動法

測定は、速度計の設定を測定振動数 100Hz とし、測定時間 3 分とする。測定中は、自由振動を測定することから、可能な限り、他の振動が測定されないように留意する。また、測定した固有振動が構造物固有のものであるかを確認するため、構造物と異なる箇所では地盤の振動を測定する。



図9 測定状況

#### (測定機器操作手順)

- 1) 速度計、GPS、LAN を接続し、水平を確保した後、速度計を測定できる状態とする（本体の電源を入れる）。
- 2) PC の電源を ON にし、CV-374 フォルダ内にある「RTD FlexStarter」を起動する。
- 3) 設定画面で「Semi-auto mode」, 「計測振動数：100Hz」, 「計測時間：60 秒」を選択し、「TKD」によって、保存するファイル名を設定する（空欄でも可能）。
- 4) 測定表示画面である「Device」をクリックし、接続されている速度計が適正に表示（X、Y、Z 軸）されているか確認して、「OK」をクリックする。
- 5) 測定記録画面である「RTD start」をクリックし、Record コマンドをクリックすると記録が始まり、計測時間である 60 秒経つと自動で終了する。
- 6) 計測日時開始時間がファイル名となるため、記録しておく。
- 7) 「ファイル」終了し、速度計のスイッチを切る。
- 8) PC 主電源を OFF し、接続していたケーブル類を抜く。

※「測定」の詳細は、速度計 CV-374、ネットワークセンサー、受信ソフト一式の取扱説明書<sup>10)</sup>を参照されたい。

### ② 強制振動法

強制振動における起振は、測定対象施設を水平方向に起振可能な起振機によって行う（「(1) 測定機器準備②強制振動法参照）。後述する概算固有振動数（理論値）をもとに、概ね 10 振動数程度の振動数を段階的に変えて起振させ、振動数ごとに測定する。

測定は、自由振動と同様の方法とするものの、各振動数の測定時間は 1 分とする。

### ③ 概算固有振動数の設定

効率的に計測するため、事前に対象スパンの構造形式、規模、基礎条件による理論値から概算固有振動数を設定し、概算固有振動数（理論値から換算）を中心に測定振動数を決めることが望ましい。概算固有振動数の設定は以下のとおりとする。

#### 1) N値の推定

防波堤の基礎地盤は、捨石マウンドや岩着タイプの基礎が一般的であるが、現場では地盤条件としてのN値<sup>11)</sup>や弾性波速度は不明なことが多いことから、概算固有振動数の設定におけるN値として以下の数値を用いることとする。

- ・ 捨石マウンドタイプ : 60 ~ 100 [礫層 (密実な状態)]
- ・ 岩着タイプ : 200 ~ 300 [岩石]

#### 2) 概算固有振動数の設定

基礎地盤タイプ別で推定したN値により理論値を算出し、室内試験における相関関係から換算係数0.7（理論値に対する実測値の割合）を乗じた値を概算固有振動数とする<sup>6)</sup>。

### 【概算固有振動数の算出例】

固有振動法の測定原理における(2)式参照 (P10)

[算出条件]

- ・ 構造物 (スパン) 寸法 :  $a=6.5\text{m}$ ,  $b=6.02\text{m}$ ,  $h=4.5\text{m}$  (陸上:1.75m, 水中:2.75m)
- ・ 基礎構造 : 捨石基礎 :  $N = 60$  or  $100$
- ・  $V_s = 300$ ,  $E_0 = 2,800 \times N \times 1,000$
- ・ \* スパン重量に浮力を考慮

[N値60の場合の固有振動数の理論値]

$$M = 376,710$$

$$E_0 = 2,800 \times 60 \times 1,000 = 168,000,000$$

$$k_v0 = 1/0.3 \times 1 \times 168,000,000 = 560,000,000$$

$$b_v = \sqrt{(6.5 \times 6.02)} = 6.26$$

$$k_v = 560,000,000 \times (6.26/0.3)^{-3/4} = 57,390,204$$

$$k_r = 57,390,204 \times 6.5^3 \times 6.02/12 = 7,906,660,481$$

$$j = 297,388 \times (6.5^2/12 + 6.02^2/3) = 3,865,019$$

$$F_0 = 1/2 \pi \sqrt{(7,906,660,481/3,865,019)} = 7.20$$

[N値100の場合の固有振動数の理論値]

$$M = 376,710$$

$$E_0 = 2,800 \times 100 \times 1,000 = 280,000,000$$

$$k_v0 = 1/0.3 \times 1 \times 280,000,000 = 933,333,333$$

$$b_v = \sqrt{(6.5 \times 6.02)} = 6.26$$

$$k_v = 933,333,333 \times (6.26/0.3)^{-3/4} = 95,650,341$$

$$k_r = 95,650,341 \times 6.5^3 \times 6.02/12 = 13,177,767,461$$

$$j = 297,388 \times (6.5^2/12 + 6.02^2/3) = 3,865,019$$

$$F_0 = 1/2 \pi \sqrt{(13,177,767,461/3,865,019)} = 9.29$$

概算固有振動数 :  $F_0 \times 0.7 = 5.04 \sim 6.50$  (Hz)

#### 1-4-4 データ処理

データ処理は、「測定データの卓越振動数」、「周辺地盤の卓越振動数」、「固有振動数の特定」、「周辺スパンとの比較」の順で実施する。

##### 【解説】

##### (1) 測定データの卓越振動数

測定データは、X軸方向（場合によってはY軸）の振動を対象とする。

測定データは、以下の順で卓越振動数を求める。

- 1) 取得データの振幅を確認して、振幅が安定している測定時間を確認する。
- 2) 水平方向の振動を 0.1Hz 以下の振動数を遮断して 5 区間抽出する。
- 3) 5 区間それぞれのパワースペクトルを求め、スムージング（スムージングバンド幅は、一般的なスムージングバンド幅である 0.2, 0.4Hz とする<sup>6)</sup>）をかけて平滑化する。
- 4) 上記 3) を図化し、振動数の極値（卓越数値）である自由振動の卓越振動数を判別する。

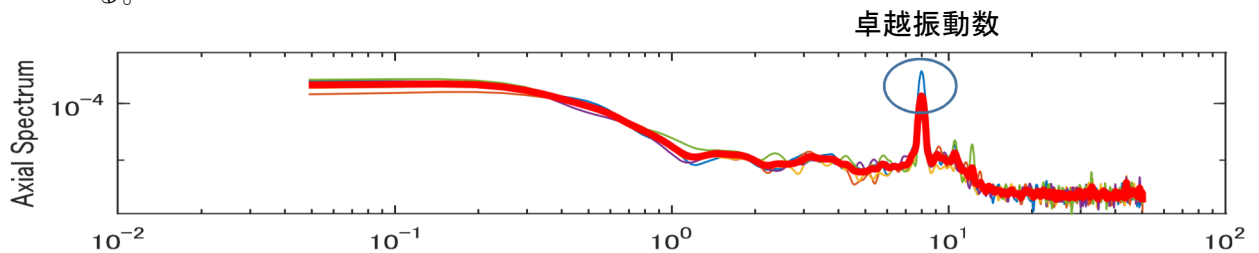


図 10 パワースペクトル図例（スムージング幅：0.4Hz）

上記 1)～4) の解析を行っても、様々な振動ピークが卓越し、図 10 のように明瞭な卓越振動数が現れない場合がある。

このような場合は、①通常のスーミングバンド幅（0.2, 0.4Hz）よりも大きなバンド幅（0.8, 1.6Hz）によりスムージング（平滑化）を行う、②ノイズ成分の低減効果の観点から「変位成分」に注目してスムージング（平滑化）を行うといった方法を用いて、卓越振動数を判別する（適用事例 2 参照）。

## (2) 周辺地盤の卓越振動数

周辺地盤の卓越振動数は、対象とする構造物と離れた場所の地盤の常時微動を対象とする。地盤の振動データは、(1)と同様に、取得データの確認、振幅が安定した時間のデータを用いることとする。周辺地盤の卓越振動数は、3方向の振動波形を元に水平方向と鉛直方向のスペクトルの比(H/Vスペクトル)を図化することで求める。

H/Vスペクトル比から周辺地盤の卓越振動数を求め、この卓越振動数が(1)の測定データにおける卓越周波数と異なることを確認する。

## (3) 固有振動数の特定

固有振動数の特定は、(1)測定データの卓越振動数が(2)周辺地盤の卓越振動数と異なることを確認することで、当該卓越振動数が構造体の固有振動数であることを特定する。なお、X軸以外のY、Z軸も卓越振動数を求めて比較することで、X軸の固有振動数特定の参考となる。

## (4) 隣接スパンとの比較

上記(1)～(3)の手順で特定した各スパンの固有振動数をそれぞれ比較して、相違があるか同一であるかを判断する(図2参照)。

## 1-5 報告

報告する事項は次のとおりである。

- (1) 測定年月日、測定場所、測定者名
- (2) 測定箇所の概要（構造物の概要、測定位置図、断面図等）
- (3) 測定方法及び測定機器の仕様
- (4) 測定結果
- (5) 解析結果

### 【解説】

報告書例を以下に示す。

(1) 測定年月日		測定場所		測定者名	
(2) 測定箇所の概要（構造物の概要、測定位置図、断面図等）					
(3) 測定方法及び測定機器、仕様					
(4) 測定結果					
(5) 解析結果					

## 1-6 適用事例

適用事例を以下に示す。

### 1-6-1 適用事例1 (自由振動法①)

#### (1) 概要

- ① 対象施設 : 重力式防波堤
- ② 構造形式 : 直立堤 (コンクリート単塊式)
- ③ 対象スパン : スパン1 : 洗堀あり、スパン2 : 洗堀なし
- ④ 施設条件 :
  - ・堤体本体 (水中部を除く) に大きな変状がない。
  - ・基礎の幅、奥行ともに 1.0m 以上の基礎部欠陥 (洗堀) がある。

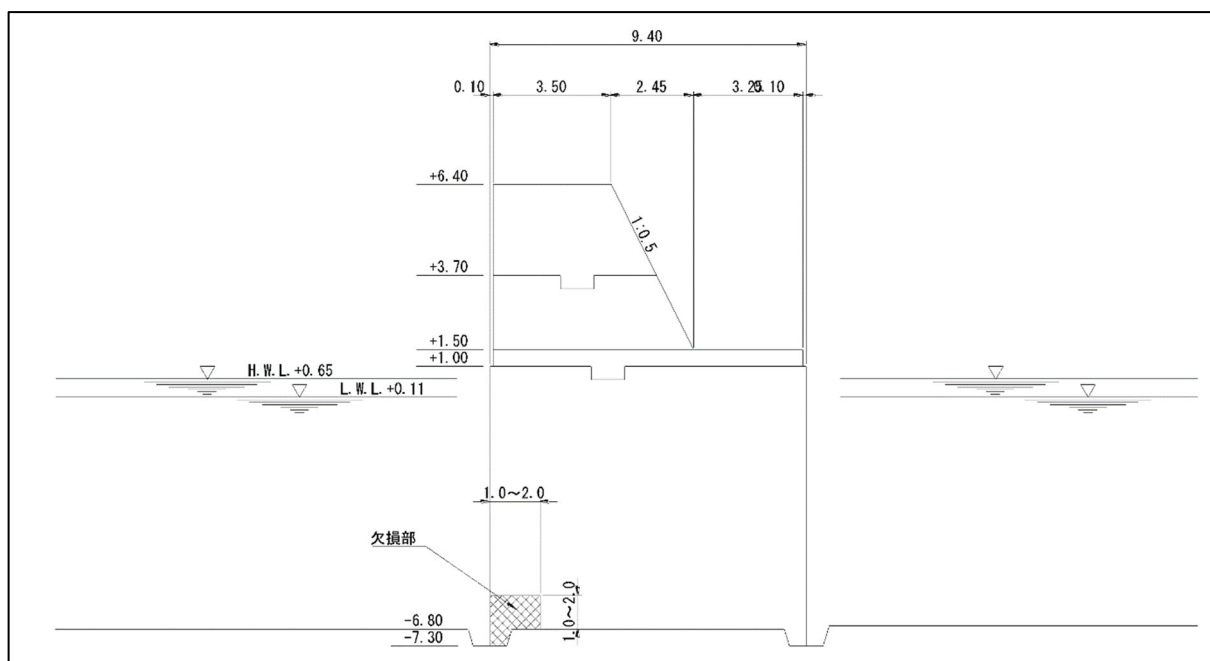
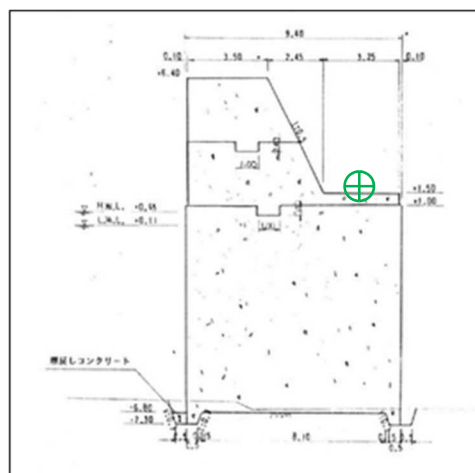


図 11 対象施設の状況 (左上 : 施設全景、右上 : 標準断面図、下 : 損傷図 (基礎部欠陥))

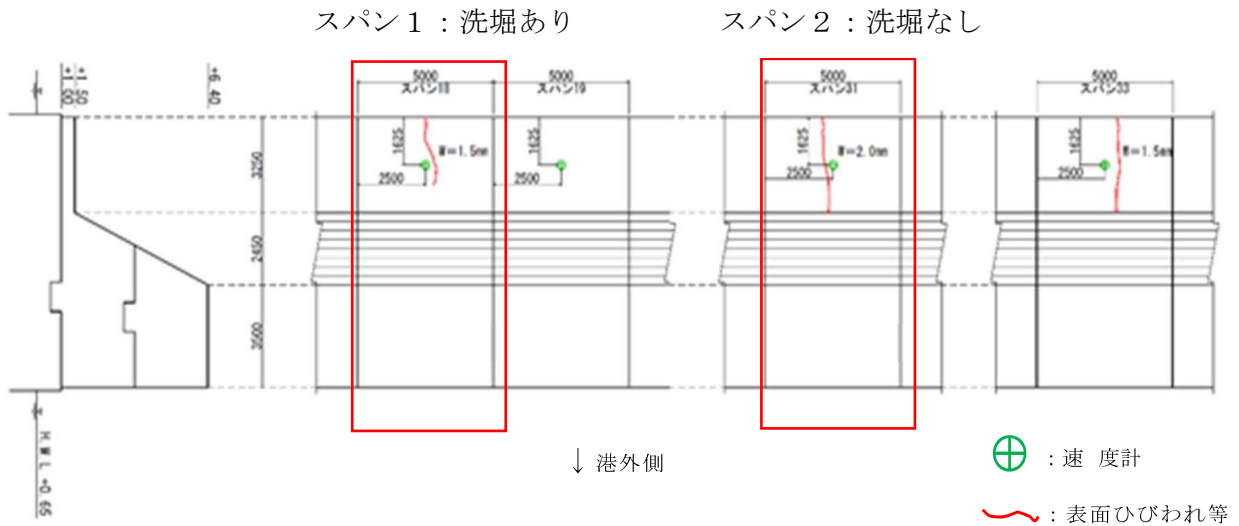


図 12 対象施設の状況（平面図）

## (2) 測定結果

図 13 に測定結果を示す。これは対象 2 スパンで測定した X 軸方向の振動波形を 5 区間抽出して、それぞれ高速フーリエ変換し、スムージングバンド幅を 0.4Hz で平滑化して、これらの平均とともに、パワースペクトルを対数表示したものである。図より、洗堀がないスパンは 5.71Hz、洗堀があるスパンは 4.83Hz が卓越振動数である。洗堀がある（設置面積が少ない）場合、卓越振動数が低下する傾向となっている。

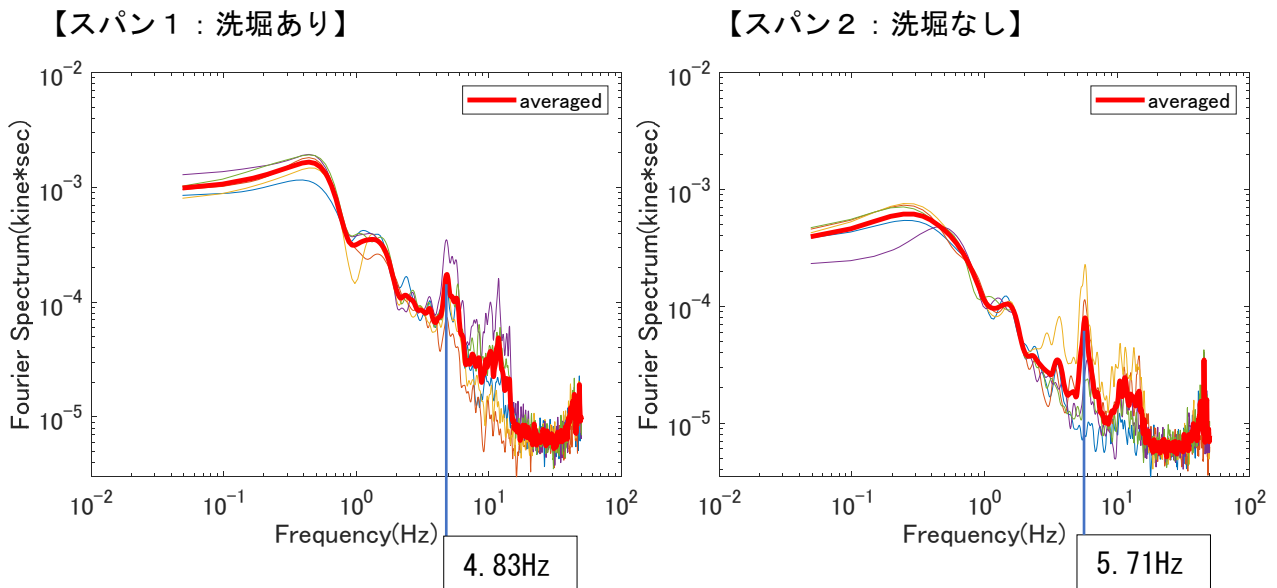


図 13 対象スパンにおける卓越振動数（左：スパン 1、右：スパン 2）

また、周辺地盤の振動を測定し、H/V スペクトル比を求めた結果は、図 14 に示すとおりである。図より、周辺地盤の卓越振動数は、5.86Hz であり、洗堀を有するスパン、洗堀がないスパンの双方の卓越振動数と異なることがわかる。このことより、それぞれの卓越振動数は、当該スパンの固有振動数であると見なせる。

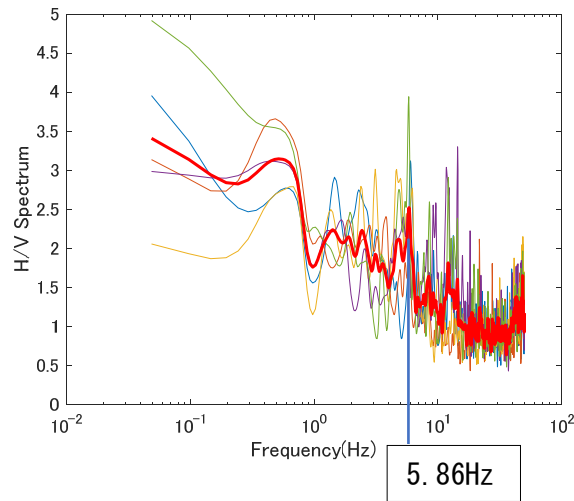


図 14 周辺地盤におけるH/Vスペクトル比

## 1-6-2 適用事例2 (自由振動法②)

### (1) 概要

- ① 対象施設 : 重力式防波堤
- ② 構造形式 : 混成堤 (単塊式)
- ③ 対象スパン : 1スパン (洗堀なし)
- ④ 施設条件 :
  - ・ 堤体本体 (水中部を除く) に大きな変状がない。

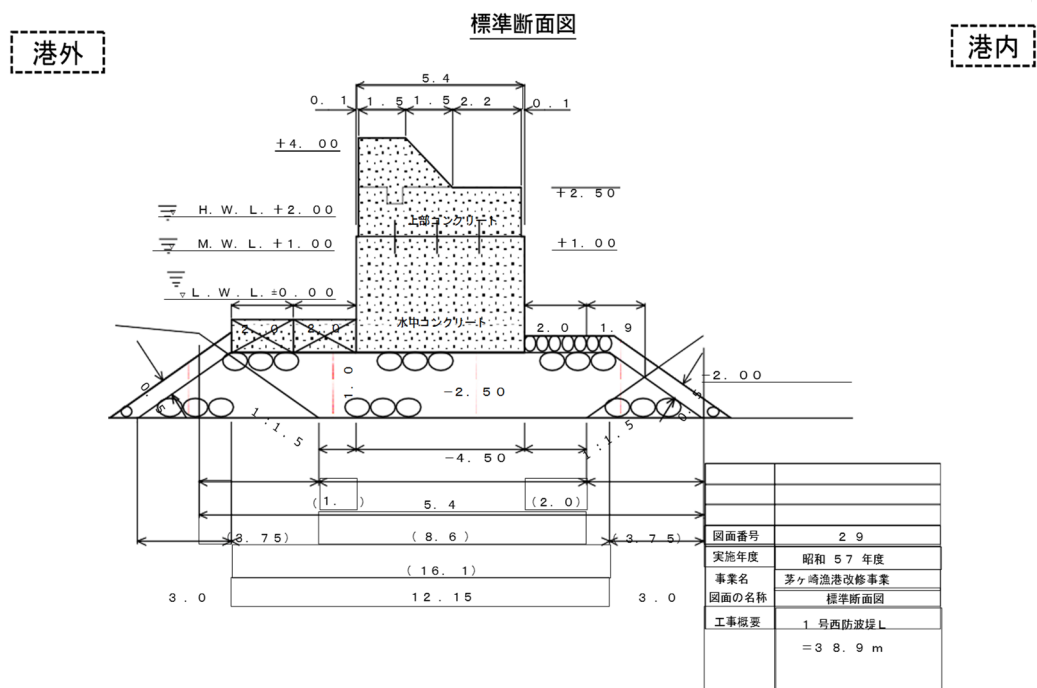
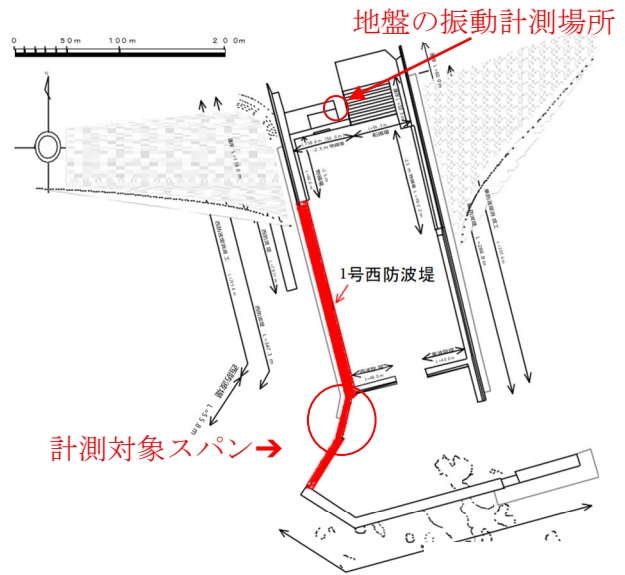


図 15 対象施設の状況 (左上: 施設全景、右上: 平面図、下: 標準断面図)

## (2) 測定結果

図 16 は、対象スパンで測定した X 軸方向の振動波形を 5 区間抽出して、それぞれ高速フーリエ変換し、スムージングバンド幅を 0.2Hz で平滑化して、これらの平均とともに、パワースペクトルを対数表示したものである。図より、明確な卓越振動数が検出できていない。そこで、前述のデータ処理 (P22) で述べたように①スムージングバンド幅の調整、②変位応答によるスムージング処理によるフーリエスペクトル解析を行った。

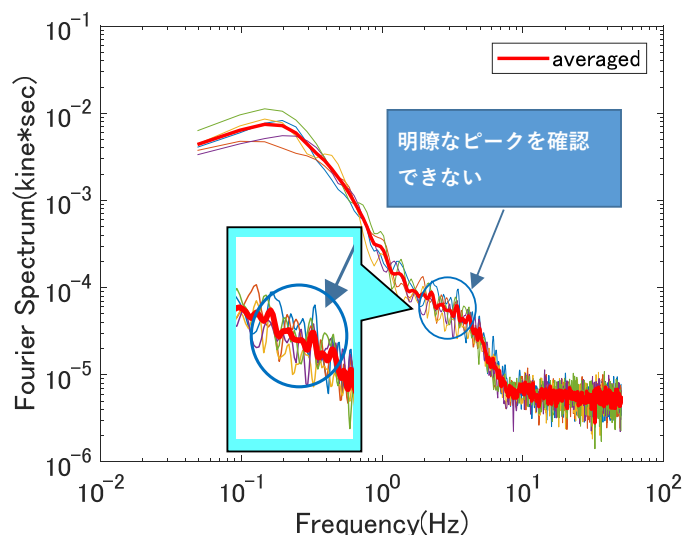


図 16 対象スパンにおけるフーリエスペクトル解析結果  
(スムージングバンド幅 : 0.2Hz)

### ① スムージングバンド幅の調整 (大きなバンド幅によるスムージング処理)

スムージングバンド幅を 0.8Hz と 1.6Hz に設定してスムージング処理をした結果を図 17、18 に示す。0.8Hz で細かいピークが少なくなり全体的に平滑化された。この中で、比較的大きなピーク域 (卓越成分) が残り、卓越振動数が 3.0~4.2Hz の中に存在することが判読できる (図 17 参照)。

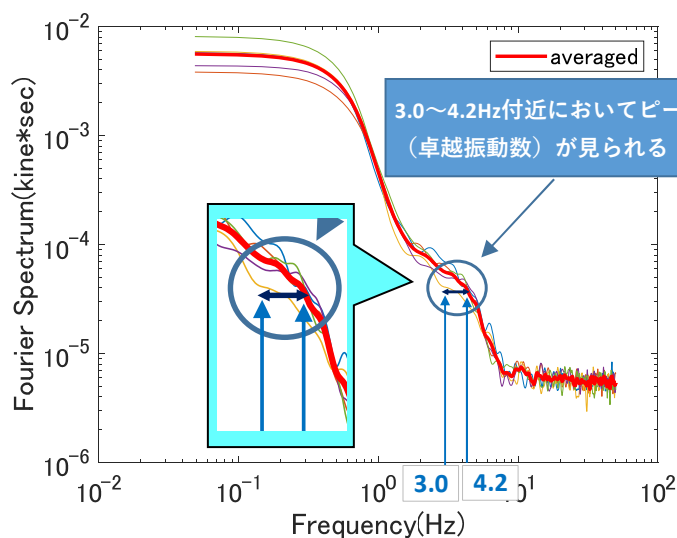


図 17 対象スパンにおけるフーリエスペクトル解析結果  
(スムージングバンド幅 : 0.8Hz)

さらに、スムージングバンド幅 1.6Hz で処理した場合、ピークは緩やかになるもの他の主だったピークがなくなるため、4.1Hz 付近に曲線の変曲点を確認でき（図 18 参照）、これが卓越振動数と判断される。

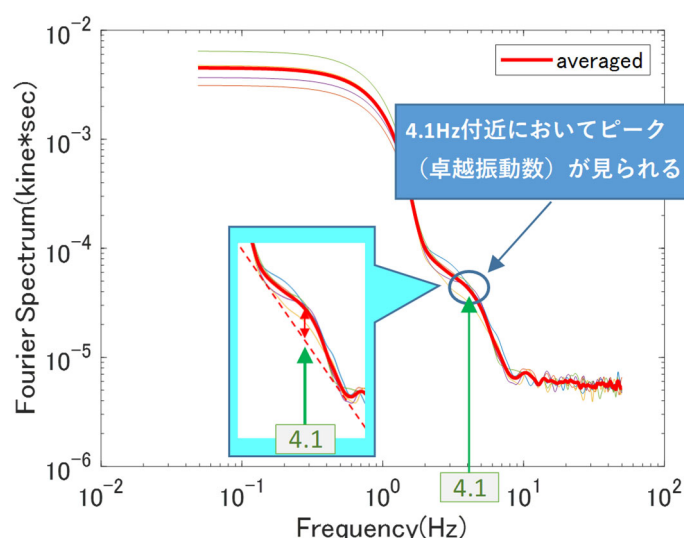


図 18 対象スパンにおけるフーリエスペクトル解析結果  
(スムージングバンド幅 : 1.6Hz)

## ② 変位応答によるスムージング処理によるフーリエスペクトル解析

変位応答によるフーリエスペクトル解析結果を図 19、20、21 に示す。いずれの場合も、自由振動のフーリエスペクトル解析結果の曲線に比べて、細かいピークが少なく滑らかになりピークが見やすくなっていることがわかる。

スムージング幅 0.2Hz では、曲線は滑らかになっているものの他の振動成分のピークが多く、卓越振動数のピークが明瞭になっていない（図 19 参照）。0.8Hz では、かなり細かいピークがなくなっている（図 20 参照）。この中で、比較的大きなピーク域（卓越成分）が残り、卓越振動数が 3.0~4.3Hz の中に存在することが判読できる。さらに、1.6Hz で処理した場合、他の振動のピークがなくなり、4.1Hz 付近に曲線の極値を確認でき（図 21 参照）、ここが卓越振動数と思われる極値であると判断できる。

このように、同一の自由振動計測結果を①スムージングバンド幅の調整、②変位応答によるフーリエスペクトル解析を併用（補完）することにより、これまで特定できなかった固有振動数を把握できる。

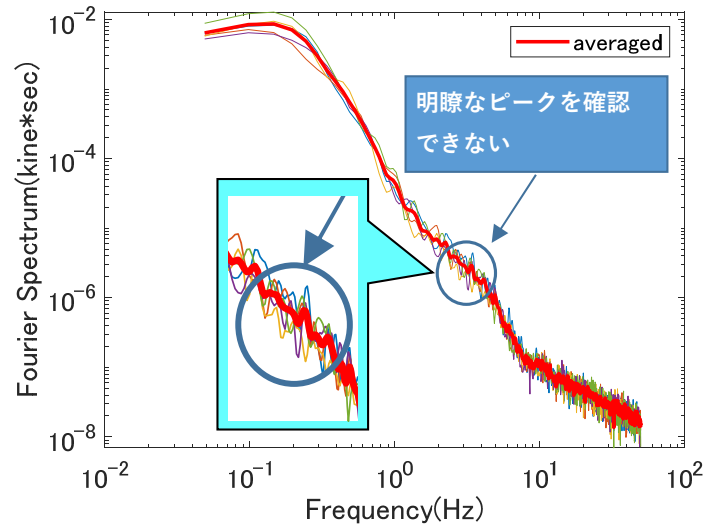


図 19 対象スパンにおける変位応答のフーリエスペクトル解析結果  
(スムージングバンド幅 : 0.2Hz)

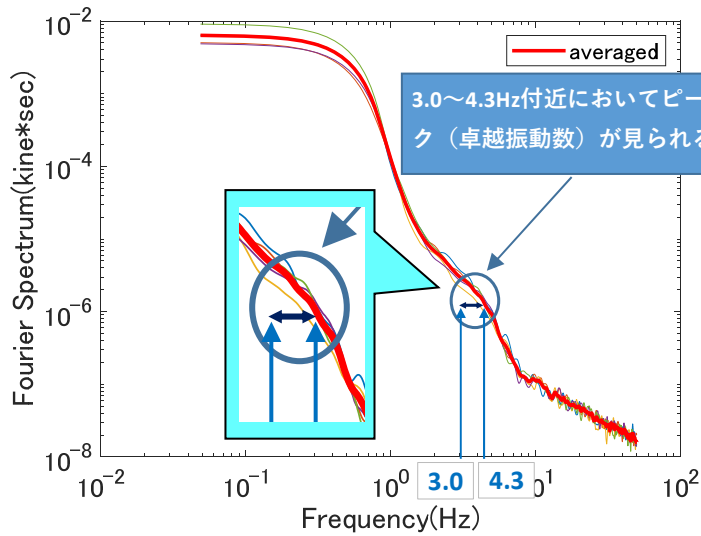


図 20 対象スパンにおける変位応答のフーリエスペクトル解析結果  
(スムージングバンド幅 : 0.8Hz)

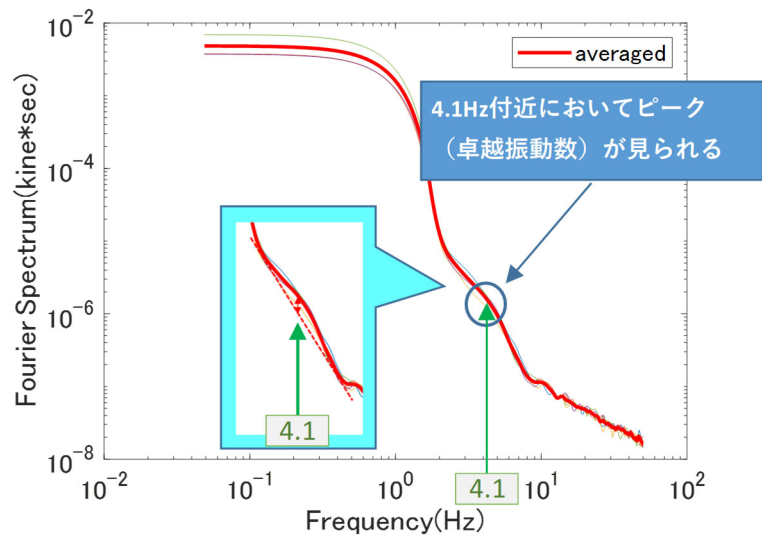


図 21 対象スパンにおける変位応答のフーリエスペクトル解析結果  
(スムージングバンド幅 : 1.6Hz)

### 1-6-3 適用事例3 (強制振動法)

#### (1) 概要

- ① 対象施設 : 重力式防波堤
- ② 構造形式 : 直立堤 (コンクリート単塊式)
- ③ 対象スパン : スパン1 : 洗堀なし、スパン2 : 洗堀あり
- ④ 施設条件 :
  - ・ 堤体本体 (水中部を除く) に大きな変状がない。
  - ・ 基礎の幅、奥行ともに 1.0m 以上の基礎部欠陥 (本体工の欠損) がある。

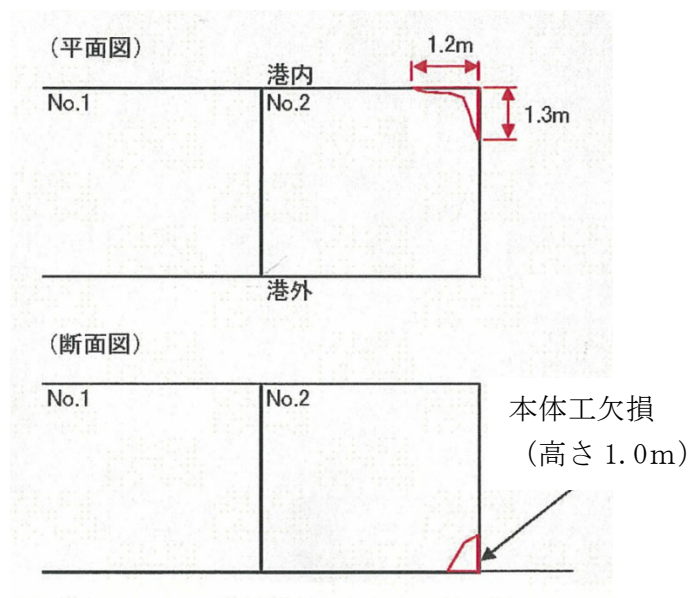
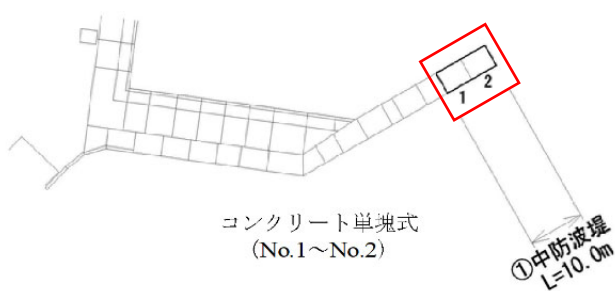
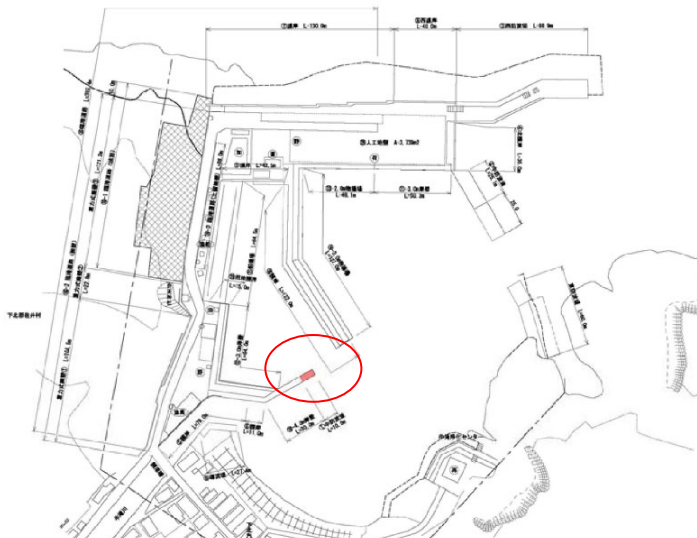


図 22 対象施設の状況

(左上 : 施設全景、右上 : 平面図、下左 : スパン状況、下右 : 変状状況)

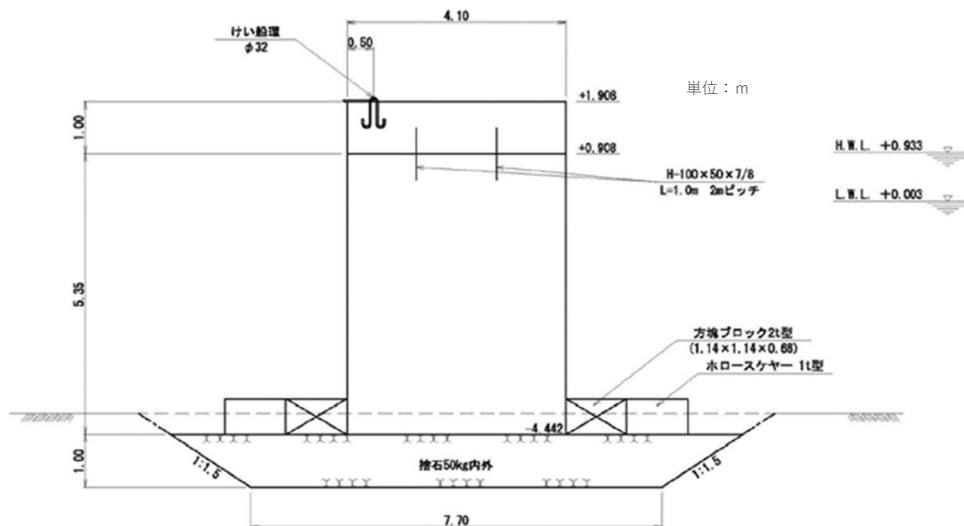


図 23 対象施設の標準断面図

(2) 測定結果

測定は、前述のスパン1、スパン2のそれぞれで起振機をスパン中央に設置し、速度計を設置して、起震機の振動数を段階的に10振動数変えて加振し、このときの振動を1分間ずつ記録した。測定した振動からそれぞれのスパンにおける共振曲線を作成した(図24参照)。それぞれの共振曲線は、明瞭な極値(共振曲線値)が表れており、この卓越振動数が固有振動数であることが判断される。また、基礎部欠陥のないスパン1が6.0Hzであり、基礎部欠陥のあるスパン2が5.5Hzと固有振動数が低下した。

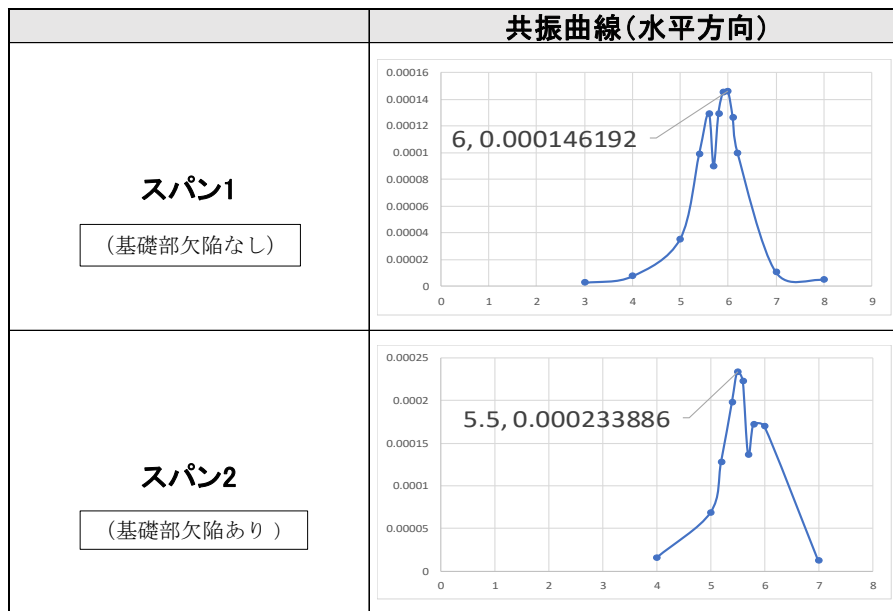


図 24 スパン1、2の共振曲線

## 1-7 概算費用

### (1) 測定機器の概算費用

【速度計】 定価約 420 万円（一式）

測定機器は、東京測振社製の小型振動計測装置及び付属のデータ処理ソフト一式<sup>8), 9)</sup>を事例として用いている。

【起振機】 レンタル（永久磁石起振機 SSV-125ME）：60 万円／30 日

### (2) 調査費の概算費用

参考として、潜水調査、および固有振動法（自由振動、強制振動）による調査の概算費用を以下に示す。なお、実業務においては、仕様条件に従って、積算することとされた。

#### 【積算条件】

- 1) 対象施設：重力式防波堤
- 2) 構造形式：直立堤（コンクリート単塊式）
- 3) 施設規模：延長 200m
- 4) スパン規模：延長 10m×幅 8m×高さ 5m（内、水中部 3m）＝全 20 スパン

【潜水調査】 概算 64 万円

¥32,220（1 スパン当たり）×20 スパン＝¥644,400

※現場稼働日数：2 日程度

【固有振動法】（自由振動法） 概算 37 万円

¥18,271（1 スパン当たり）×20 スパン＝¥365,420

※現場稼働日数：1 日程度

【固有振動法】（強制振動法） 概算 57 万円

¥28,600（1 スパン当たり）×20 スパン＝¥572,000

※現場稼働日数：3 日程度

表 1 潜水調査の概算費用内訳

項目	名称	摘要	単位	数量	単価	金額	備考
潜水調査	トラック	2 t 積み	日	1	38,220	38,220	就業 8H（必要に応じて計上）
簡易調査（重点項目）	測量技師補	測量業務単価*	人	1	29,500	29,500	
	潜水士	ダイバー	人	2	46,400	92,800	潜水器具損料含む
	潜水連絡員		人	1	26,800	26,800	
	潜水送気員		人	1	26,600	26,600	
	調査船運転	FRP D 70P	日	1	88,080	88,080	就業 8H（必要に応じて計上）
	雑材料		%	1		2,994	
	小計①					302,394	1日当たり
とりまとめ	主任技師	設計単価*	人	0.5	53,800	26,900	
（施設現況調査作成）	技師(A)	設計単価*	人	0.5	47,500	23,750	
	技師(B)	設計単価*	人	0.5	39,100	19,550	
	小計②					70,200	1施設当たり
	小計③		施設	10		7,020	1スパン当たり
			スパン	12		84,240	調査1日当たりに要するとりまとめ
潜水調査	合計	小計①+③		12		386,634	1日当たり
						32,220	1スパン当たり

\* 設計単価：平成31年度設計業務委託等技術者単価（国土交通省）<sup>13)</sup>

※漁港漁場関係工事未制定歩掛<sup>13)</sup>より算出

※1日当たりの作業能力 770 m<sup>2</sup>=12 スパン

1 スパン当たりの規模は、延長 10m×水中深さ 3m×2 面（港内+港外）を想定=60 m<sup>2</sup>換算。よって、770 m<sup>2</sup>÷60 m<sup>2</sup>=12 スパン

表 2 固有振動法（自由振動）の概算費用内訳

項目	名称	摘要	単位	数量	単価	金額	備考
調査費	技師(A)	設計単価*	人	1	47,500	47,500	
	技師(B)	設計単価*	人	1	39,100	39,100	
	測定機器使用料	速度計	日	1	20,000	20,000	
	小計①		日	1		106,600	調査1日当たり
解析・診断費	技師(A)	設計単価*	人	1	47,500	47,500	
	技師(B)	設計単価*	人	4	39,100	156,400	
	技師(C)	設計単価*	式	4	32,000	128,000	
	小計②					331,900	調査1日当たりに要する解析費
固有振動法 (自由振動)	合計	小計①+②		24		438,500 18,271	1日当たり 1スパン当たり

\* 設計単価:平成31年度設計業務委託等技術者単価(国土交通省)<sup>13)</sup>

※実績から算出<sup>1), 5), 6)</sup>

※1日当たりの作業能力 24 スパン

1 スパン当たり 25 分（①設置 10 分、②安定 2 分、③測定 3 分、④撤去 5 分）。よって、稼働 8H÷20 分（1 スパン）=24 スパン

表 3 固有振動法（強制振動）の概算費用内訳

項目	名称	摘要	単位	数量	単価	金額	備考
調査費	技師(A)	設計単価*	人	1	47,500	47,500	
	技師(B)	設計単価*	人	1	39,100	39,100	
	技師(C)	設計単価*	人	2	32,000	32,000	
	測定機器使用料	速度計	日	1	20,000	20,000	
	測定機器使用料	起振機	日	1	20,000		600,000円/30日
	小計①		日	1		138,600	調査1日当たり
解析・診断費	技師(A)	設計単価*	人	1	47,500	47,500	
	技師(B)	設計単価*	人	1	39,100	39,100	
	技師(C)	設計単価*	人	1	32,000	32,000	
	小計②		式			118,600	調査1日当たりに要する解析費
固有振動法 (強制振動)	合計	小計①+②		9		257,200 28,600	1日当たり 1スパン当たり

\* 設計単価:平成31年度設計業務委託等技術者単価(国土交通省)<sup>13)</sup>

※実績から算出<sup>5), 6)</sup>

※1日当たりの作業能力=9 スパン

1 スパン当たり 50 分（①設置 10 分、②測定 30 分、④撤去 10 分）。よって、稼働 8H÷50 分（1 スパン）=9 スパン

## 【参考文献】

- 1) 水産庁：平成 29 年度水産基盤施設長寿命化検討調査報告書.
- 2) 村木義男・高島和夫：波による防波堤の振動について－羽幌港における観測結果－，第 12 回海岸工学講演会講演集，pp. 198-204，1965
- 3) 丸山敏生・笠井哲郎・藤田孝康・中村克彦：固有振動を用いた漁港施設における機能診断方法の検討，第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，2017
- 4) 入門建設振動学：小坪清真著，1996 年第 1 版第 1 刷発行，2011 年第 1 版第 11 刷発行，森北出版，東京.
- 5) 水産庁：平成 30 年度水産基盤施設長寿命化検討調査報告書.
- 6) 水産庁：平成 31 年度水産基盤施設長寿命化検討調査報告書.
- 7) 永久磁石起振機 SSV-125ME，仕様書，株式会社サイエス.
- 8) 小型サーボ型速度計 VSE-15D 取扱説明書，株式会社東京測振
- 9) 携帯用振動計 SPC-51A 取扱説明書，株式会社東京測振
- 10) Model：CV-374V，ネットワークセンサーCV-374AV，RTD 受信ソフト（CV-374）取扱説明書，株式会社東京測振
- 11) 月刊基礎工：(株) 総合土木研究所，Vol. 25，No. 12.
- 12) 漁港漁場関係工事未制定歩掛：平成 27 年 4 月，漁港漁場関係積算施工技術協議会
- 13) 国土交通省：平成 31 年度設計業務委託等技術者単価

## 2. 透過弾性波法

### 2-1 透過弾性波法

本技術資料は、透過弾性波法を用いて、漁港施設のコンクリート構造物の防波堤等堤体の内部空洞を確認するための方法を規定する。

#### 【解説】

##### (1) 透過弾性波法の測定原理

透過弾性波法は、弾性波を用いた手法の一つである。図1に示すとおり<sup>1),2)</sup>、対象となる構造物に弾性波を透過（入力点と測定点を対面配置）させ、その伝搬速度から構造物を評価する方法を透過弾性波法と呼ぶ。

弾性波を用いた手法は、ハンマの打撃等による衝撃力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方法である。

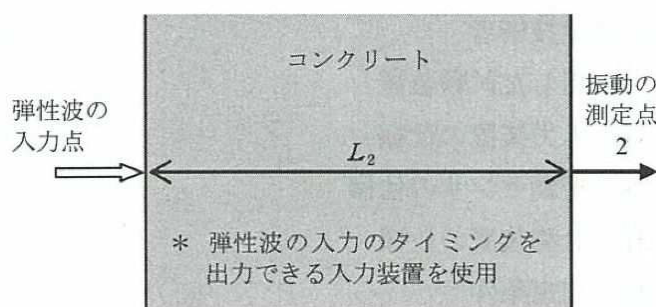


図1 弾性波の入力点及び振動の測定点の配置例（測定点の対面配置）

弾性波には、図2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3は、これらの弾性波が対象構造物上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。このように受信点の波形は、最初にP波が到達する。そのため、これら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弾性波の到達時間により、弾性波伝搬度を計測することが出来る。

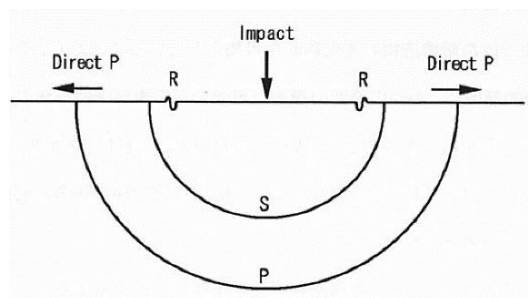


図2 コンクリート版表面の衝撃点で発生した弾性波

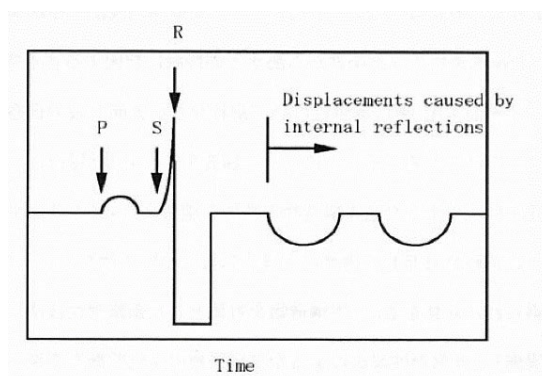


図3 受信されるP波、S波、R波の模式図

## (2) 制約条件と留意事項

本手法における対象施設は、I. 総説における3. の(1)で述べたように、主要な材料がコンクリート構造物の防波堤のうち、直立堤と混成堤である。このうち、透過弾性波法は、堤体の内部欠陥を対象としている。

ここでは、主として現地での制約条件と留意事項を述べる。

### 1) 制約条件

透過弾性波法は、堤体の内部空洞を確認する方法であるため、入力装置と振動センサが対象構造物をはさみこむ測定となる。このため、一方に障害物や異なる構造体（消波工や胸壁等）が隣接している場合等、入力装置や振動センサの設置が困難となり、測定もできない。

ハンマで衝撃を与える（入力装置）箇所と振動センサの設置箇所の距離は0.2m以上9.0m以内とする。したがって、9.0mを超える構造物は対象外となる<sup>2)</sup>。

### 2) 留意事項

測定位置に、ひびわれ、表面劣化、剥離などの老朽化、またはカキや藻類など付着物がある場所は可能な限り避ける。困難な場合は、研磨等により測定面を平滑にする必要がある。

## 2-2 測定機器と方法

### (1) 測定機器

測定機器は、入力装置（ハンマ）、振動センサ、測定装置で構成され、弾性波速度及びパワー伝送比を適切に検知できるものとする。

### (2) 測定方法

測定は、透過（対面配置）によるものとし、測線を1mピッチ、測定回数を5回ずつ行うものとする。

## 【解説】

### (1) 測定機器

弾性波速度を測定する機器として、その一例であるアプライドリサーチ社製の測定装置一式（iTECS）を示す（写真1）。iTECSの取扱注意事項を含め以下に解説する。

#### 1) 入力装置（ハンマ）

弾性波を入力するためのハンマは、測定対象物の表面において、振動センサで弾性波を検出するための振動振幅を励起できるものとする。なお、ハンマは、380gのCTS用（日東建設社製）であれば、漁港施設において適切に弾性波速度が伝搬することができ、長期使用に耐えることができる。

#### 2) 振動センサ

振動センサは、入力装置によって、入力された弾性波の波形を検出するのに十分な感度及び分解能をもつものとする。

#### 3) 測定装置

測定装置は、振動センサの出力振動を時間波形として表示及び記録でき、サンプリング時間間隔、サンプリング数、測定時間長、電圧範囲、トリガなどが測定に必要な条件の範囲で設定可能であり、波形の到達時間が測定できるものとする。

表示画面において、受信波形が観察可能で、受信波形上の時間及び振幅値を読み取る機能をもつものが望ましい。なお、電源は、携帯型の電池（バッテリーセット）を用意する。夏期や冬期は、測定器の電池やバッテリーセットの電池の消耗が著しいため、それぞれ温度対策を行い、予備電池を多めに準備する必要がある。



写真1 測定機器（iTECS）

## (2) 測定方法

測定は、iTECS を用い打撃点と受信点を対面配置し、入力装置（ハンマ）により打撃し、振動センサにて受信する。測定点は、打撃点及び受信点を水平方向に 1m 間隔で移動させ、各測定点で 5 回ずつ測定し、サンプリング時間  $0.5 \mu s$  とする。

測定した弾性波が正常値であるか否かを確認するため、隣接の健全スパンの弾性波も併せて測定する。

## (3) 測定装置の校正及び点検

測定装置の校正は、定められた期間ごとまたは異常が確認された場合に、測定技術者が機器製造者またはその代理人に依頼して行う。iTECS の例では、原則として、1 年に 1 回、メーカーによる検定（校正）を行う。

測定装置の点検は、測定前後に測定機器に異常がないことを測定技術者が確認する。

### 2-3 測定技術者

本技術資料に基づいて測定を行う技術者は、測定方法の原理、測定機器に関する知識及びコンクリートに関する基礎知識をもつ者とする。

## 2-4 測定手順

本手法の測定手順は、「事前準備」、「測定場所の決定」、「測定」、「データ処理」とする。

### 【解説】

測定手順は、図4に示すとおりである。

まず、測定のための「事前準備」を行う。次に、「測定場所の決定」を行って、「測定」する。測定後は、「データ処理」することで弾性波 度及びパワー伝送比を検出する。

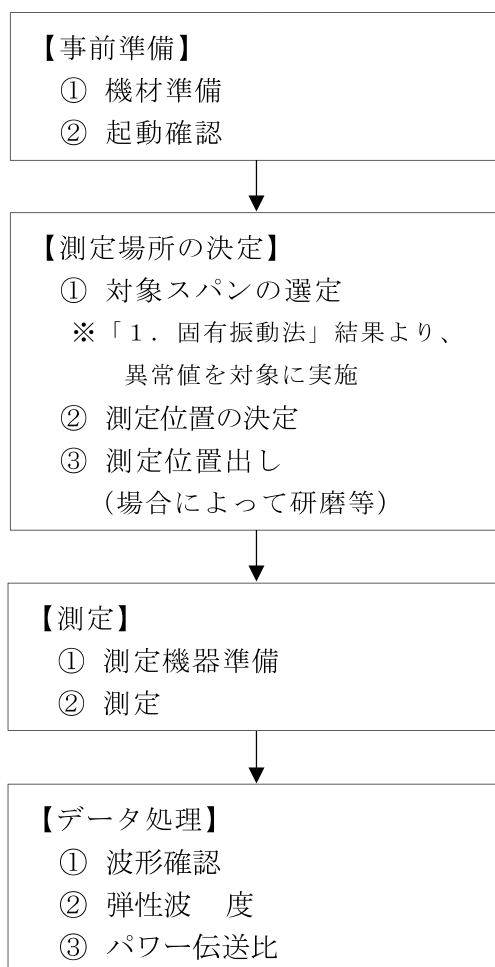


図4 測定フロー

## 2-4-1 事前準備

事前準備は、「機材準備」、「起動確認」の順で実施する。

### 【解説】

#### (1) 機材準備

機材準備は、iTECS 一式 (PC 含む)、バッテリーセット、位置出し用測定機材 (エスロンテープ、コンベックス、チョーク等) 等の調査機材を用意する。また、必要に応じて、はしご、足場、日傘等を用意する。

#### (2) 起動確認

測定装置の起動確認を実施する。また、測定前に一通りの測定ができるように確認をしておく。

## 2-4-2 測定場所の決定

測定場所の決定は、「対象スパンの選定」、「測定位置の決定」、「測定位置出し」の順で実施する。

### 【解説】

#### (1) 対象スパンの選定

測定場所は、「1. 固有振動法」の結果から、異常値が確認されたスパンの上部工となる。なお、可能な限り1施設に対し、健全部を1スパン測定しておくことを推奨する。

#### (2) 測定位置の決定

測定位置の決定は、対象スパンの透過（対面配置）可能な方向に、1,000mmピッチを目安とする（図5）。ただし、ひびわれ、表面劣化、剥離などの老朽化、またはカキや藻類など付着物がある場所は可能な限り避け、平らで測定器の水平設置が可能な位置とする。また、潮位によって海面下となる位置は選定しない。

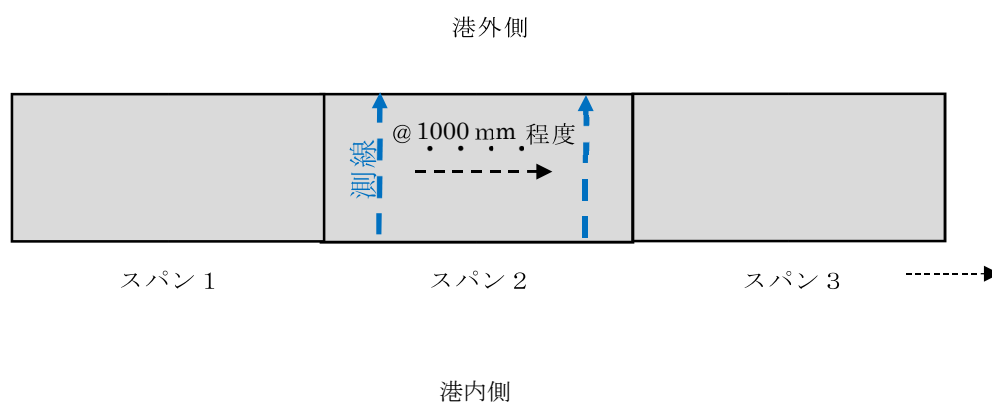


図5 測定位置模式図

#### (3) 測定位置出し

測定位置出しは、エスロンテープ等の計測機材を用い、測定位置をチョーキング等して実施する。付着物や粗骨材が露出している場所は、可能な限り避けることが必要であるが、全体的に付着物がある場合や粗骨材が露出している場合等は表面を研磨材やグラインダー等で削って平滑にする必要がある。

### 2-4-3 測定

測定は、「測定機器準備」、「測定」の順で実施する。

#### 【解説】

#### (1) 測定機器準備

測定機器準備は、以下の手順で実施する。なお、測定機器は、アプライドリサーチ社製の測定装置 iTECS 及び付属のデータ処理ソフト一式を事例として用いた。

(手順) PC 立ち上げ前に、測定機器の準備として

- ①ハンマ・センサ・ケーブルの取り付けを行う。
- ②iTECS と PC をケーブルで取り付けを行う。
- ③PC とバッテリーをケーブルで取り付けを行う。

iTECS、PC、バッテリー等の接続は、ケーブルやケーブル接続部の断線等に留意する。また、バッテリーは事前の十分な充電と予備器を備えておく。

#### (2) 測定

測定は、iTECS を用いて入力装置（ハンマ）により打撃し、振動センサにて受信する。弾性波の応答波形は、高感度加速度計（100mV/G）を用いる。各測定点で5回ずつ測定し、サンプリング時間  $0.5\mu s$  とする。

図6に示すとおり、打撃点および受信点を水平方向に1,000mm程度間隔で移動させて測定する。

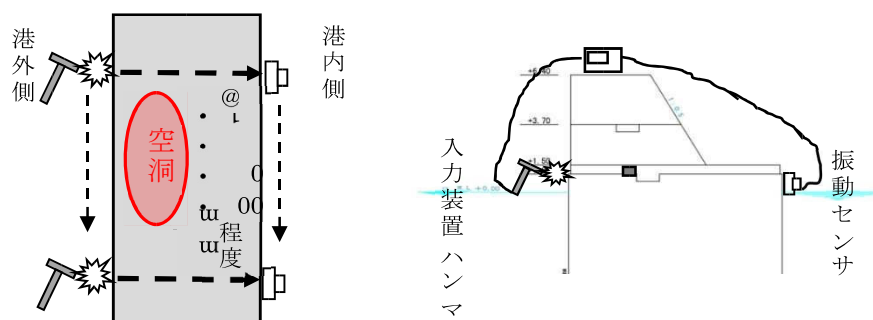


図6 測定イメージ

(手順) PC の電源を ON にすると、

- ① 自動的に windows および付属ソフト iTECS が立ち上がる。
- ② 画面右上の設定ボタン（黄色）を選択
  - 1) 測定条件の設定 測定項目：弾性波 度を選択
  - 2) 入力点と受信点の間隔を設定（1m以上の設定は「2-4-4 データ処理」注1を参照）
  - 3) 保存ファイルを作る場合は、プロジェクト名を変更。キーボード画面にて入力（プロジェクト名の上で選択）または直接入力。
  - 4) 戻る（緑色）を選択する。

- ③ 分析パラメータの入力点、受信点の間隔が②2)と同じことを確認。違う場合は変更する。
- ④ 度測定（緑色）を選択する。度測定（緑色）が打撃待ちのメッセージに変わると測定（打撃）OK。
- ⑤ 位置出しした入力点をハンマで打撃し、受信点において表面P波をセンサで受信することによって実施する。なお、打撃は測定対象物に対し、垂直に打撃を行うことを基本とする。
- ⑥ 波形を確認し、入力点、受信点で弾性波の立ち上がりが捉えられている場合、保存を選択、ファイル名を入れ保存する。
- ⑦ 連続して測定する場合は、度測定（緑色）を選択、以後④～⑥の繰り返し5回分のデータを捉える。5回連続して行っても弾性波度が捉えられない場合は、弾性波度が捉えられないものとして処理する。

※「測定」の詳細については、iTECSの取扱説明書<sup>3)</sup>を参照されたい。

## 2-4-4 データ処理

データ処理は、「データ取得」、「波形確認」、「弾性波速度」、「パワー伝送比」の順で実施する。

### 【解説】

#### (1) データ取得

データ取得は、iTECS の付属の分析用ソフトによって実施する。データを別途 PC に移し解析することもできる。まず、センサ距離を入力点と受信点の距離に合わせ、「ファイルを開く」のボタンを押して弾性波速度のデータを抽出する。

#### (2) 波形確認

入力波と受信波の立ち上がりを確認し、立ち上がりの有無を波形で確認を行う。立ち上がりが検出できない場合には、弾性波速度が検出できないとする。

#### (3) 弾性波速度

入力波形と受信波形の立ち上がり箇所から、それぞれの時間を読み取り、その時間差とセンサ距離から弾性波速度を算出する。得られた弾性波は平均する。

(注1：入力点と受信点の距離について)

入力点と受信点の距離がある一定の距離 (1m) 以上は画面上・プログラム上表示できない。このため、例えば入力点と受信点の距離が 3m の施設の測定では、センサ距離を 1/10 の 300mm とし、弾性波速度を計算 (弾性波速度 398.2m/s) させ、後でこの度を 10 倍

(3,982m/s) して正式な値とする。なお、時間差が出ているので (753.4 $\mu$ m :  $\mu$  = 100 万分の 1)、ここからでも弾性波速度を計算できる (3m $\div$ 753.4 $\mu$ m = 3,982m/s)。

#### (4) パワー伝送比

弾性波の減衰量であるパワー伝送比は、(1)式によって表され、測定した波形の振幅から求める (図7) ここで、 $A_{input}$  は、入力時の加速度振幅であり、 $A_{output}$  は、受信時の加速度振幅を示しており、式(1)によるパワー伝送比の値が大きいことは減衰が大きいことを意味している<sup>4)</sup>。

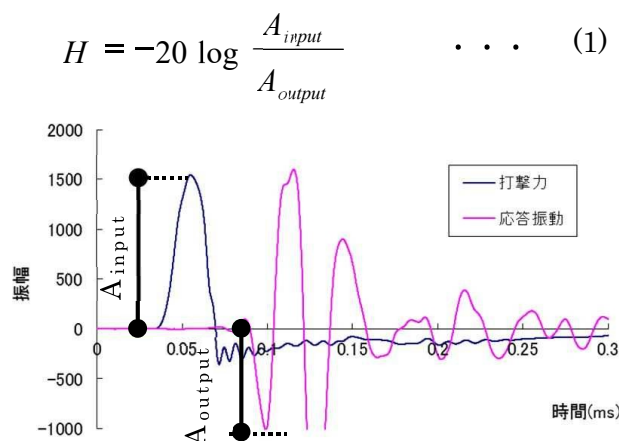


図7 弾性波観測波形例

※「データ処理」の詳細については、iTECS の取扱説明書<sup>3)</sup>を参照されたい。

## 2-5 報告

報告する事項は次のとおりである。

- (1) 測定年月日、測定場所、測定者名
- (2) 測定箇所の概要（構造物の概要、測定位置図、断面図等）
- (3) 測定機器の型式、仕様
- (4) 測定結果

### 【解説】

報告書例を以下に示す。

(1) 測定年月日		測定場所		測定者名	
(2) 測定箇所の概要（構造物の概要、測定位置図、断面図等）					
(3) 測定機器の型式、仕様					
(4) 測定結果					



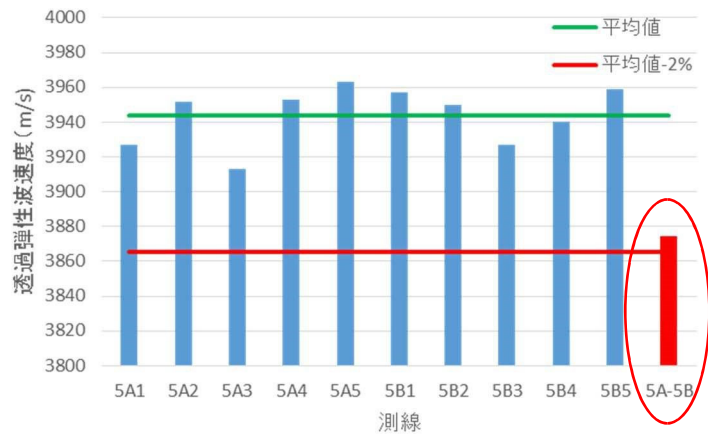


図9 堤体本体の弾性波速度

## 2) パワー伝送比

図10に測定結果を示す。これは弾性波速度が4,141m/sの健全部と、4,034m/sの欠陥部を示す。これらの受信波形の第1波目に着目すると、欠陥部（継目部）に振幅の減衰が見受けられる。ここで、(1)式（2-4-4データ処理参照）に示すように入力波の振幅と、受振第1波の振幅値から、波動の伝達率（パワー伝送比）を計算した場合、伝送比は概ね10程度異なることが確認され、欠陥部のパワー伝達が明らかに低下することがわかる。

このことから、内部欠陥（空洞等）がある場合は、弾性波速度の変化に加えて、波動のパワー伝送比（伝達量）に着目した解析方法も有効であると考えられる。

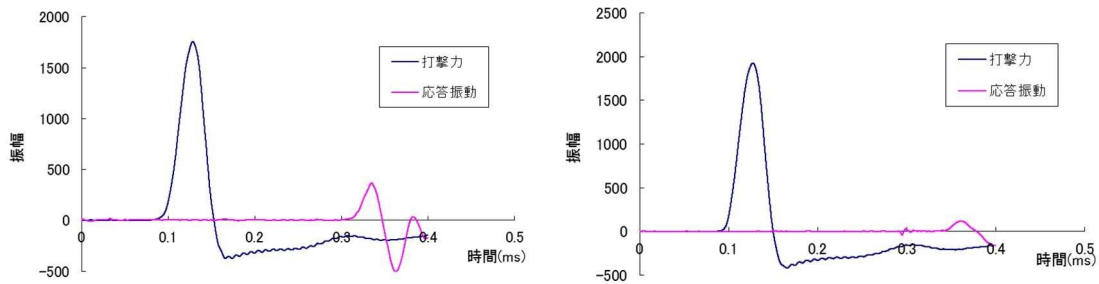


図10 観測波形（左：健全部、右：欠陥部）

## 2-7 概算費用

### (1) 測定器の概算費用

【iTECS】定価約 230 万円

### (2) 概算費用

参考として、透過弾性波法の概算費用を以下に示す。本手法は、固有振動法によるスクリーニング後に適用するため、①1日当たり、②1スパン当たりの積算とした。積算条件及び内訳は、表5のとおりである。実業務においては、仕様条件に従って、積算することとされたい。

#### 【積算条件】

- ・スパン規模：延長 10m×幅 8m＝測定点 10 点（1 スパン当たり）

#### 【透過弾性波法】

①1日当たり：概算 42 円

②1スパン当たり：概算 1.7 万円

表 1 透過弾性波法の概算費用内訳

項目	名称	摘要	単位	数量	単価	金額	備考
調査費	技師(A)	設計単価*	人	1	47,500	47,500	
	技師(B)	設計単価*	人	1	39,100	39,100	
	測定器使用料	iTEC	日	1	32,000	32,000	
	小計①		日	1		118,600	調査1日当たり
解析・診断費	主任技師	設計単価*	人	5	53,800	269,000	
	技師(C)	設計単価*	式	1	32,000	32,000	
	小計②					301,000	調査1日当たりに要する解析費
透過弾性波速度	合計	小計①+②		24		419,600	1日当たり
						17,483	1スパン当たり

\*設計単価:平成31年度設計業務委託等技術者単価(国土交通省)<sup>13)</sup>

※NETIS 登録 No. QS-040028-V より算出

※1日当たりの作業能力=24 スパン

1スパン長 10m として、測定点数 10 点≒20 分（①準備 3 分、②測定 1 分×10 測定点、③撤去 3 分）。よって、稼働 8H÷20 分（1 スパン）=24 スパン

## 【参考文献】

- 1) コンクリートの非破壊試験－弾性波法－第2部：衝撃弾性波法，平成26年11月改正，一般社団法人日本非破壊検査協会，NDIS2426-2
- 2) 漁港施設における表面P波法による簡易機能（老朽化）診断手法適用マニュアル（案），平成28年4月，国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所
- 3) iTECS-6V2(R4)取扱説明書，Version2.1.4，2009年3月，アプライドリサーチ株式会社
- 4) 山下健太郎・境友昭・極壇邦夫・池端宏太：衝撃弾性波法を用いたあと施工アンカーボルトの健全性調査，第68回年次学術講演会大会講演概要集，2013年9月
- 5) 国土交通省：平成31年度設計業務委託等技術者単価

## 謝辞

本成果は、水産庁基盤整備調査委託事業「長寿命化対策検討調査」による結果をとりまとめたものである。現地試験の実施にあたって、岩手県、神奈川県、千葉県、新潟県の関係者の皆様にご協力頂いた。本成果の作成にあたって、現地試験や室内試験の整理等で東海大学工学部土木工学科の笠井教授、三神教授のご指導・ご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。