

平成28年度  
水産基盤施設の長寿命化対策検討  
調査事業  
報 告 書

平成29年3月

国立研究開発法人水産研究・教育機構  
一般社団法人水産土木建設技術センター

## 目 次

- a. 課題名
- b. 実施機関名、部局名及び担当者名
- c. ねらい
- d. 方法
  - 1. 水産基盤施設の老朽化の現状把握と中長期的なコスト分析
    - 1-1 漁港ストック量の把握
    - 1-2 今後必要な更新費用等の分析
    - 1-3 データベースの作成
  - 2. ストックマネジメントによるライフサイクルコストの縮減効果
    - 2-1 機能保全計画書データベースの概要
    - 2-2 機能保全計画書データの集計結果
    - 2-3 保全対策時期の検討
    - 2-4 保全対策コストの検討
    - 2-5 コスト縮減効果の検討
  - 3. 漁港施設の構造物全体の機能評価手法の開発・普及
    - 3-1 室内試験
      - (1) 供試体と測定機器
      - (2) 基礎部の条件の違い
      - (3) 形状の違い
      - (4) 海水の影響
      - (5) 破損部の影響
    - 3-2 現地調査
      - (1) 調査場所
      - (2) 調査ケース
      - (3) 調査方法
    - 3-3 数値計算
    - 3-4 暴露試験
      - (1) 暴露試験
      - (2) 蛍光X線分析
- e. 結果
  - 1. 水産基盤施設の老朽化の現状把握と中長期的なコスト分析
    - 1-1 漁港ストック量の把握
      - (1) 主要施設のストック量
      - (2) 全体ストック量
    - 1-2 今後必要な更新費用等の分析
      - (1) 今後の更新を迎える施設の推移
      - (2) 全体今後の更新費用の推移
      - (3) 更新費用が漁港管理者の財政へ及ぼす影響
    - 1-3 データベースの作成
  - 2. ストックマネジメントによるライフサイクルコストの縮減効果
    - 2-1 機能保全計画書データベースの概要

- (1) 漁港の基本数量
- (2) 入力項目
- (3) ファイル構成
- 2-2 機能保全計画書データの集計結果
  - (1) 健全度の分布状況
  - (2) 今後50年間の保全対策施設数の推移
  - (3) 今後50年間の保全対策費の推移
- 2-3 保全対策時期の検討
- 2-4 保全対策コストの検討
  - (1) 保全対策実施率の検討
  - (2) 平均保全対策費
  - (3) 水域施設の検討
- 2-5 コスト縮減効果の検討
  - (1) コスト縮減効果の考え方
  - (2) 維持管理費の検討
  - (3) コスト縮減効果の試算
- 3. 漁港施設の構造物全体の機能評価手法の開発・普及
  - 3-1 室内試験
    - (1) 基礎部の条件の違い
    - (2) 形状の違い
    - (3) 海水の影響
    - (4) 破損部の影響
  - 3-2 現地調査
    - (1) 測定1、2（常時微動）
    - (2) 測定3（打撃）
    - (3) 測定4（透過法）
  - 3-3 数値計算
  - 3-4 暴露試験
    - (1) 暴露試験
    - (2) 供試体の乾湿状態が計測値に与える影響
    - (3) 劣化促進試験における劣化の促進レベル
    - (4) 蛍光X線分析
- f. 今後の課題
  - 1. 水産基盤施設の老朽化の現状把握と中長期的なコスト分析
  - 2. スtockマネジメントによるライフサイクルコストの縮減効果
  - 3. 漁港施設の構造物全体の機能評価手法の開発・普及

# 水産基盤整備調査委託事業報告書

## a. 課題名

平成 28 年度水産基盤施設の長寿命化対策検討調査

## b. 実施機関名、部局名及び担当者名

[国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所]

・水産土木工学部水産基盤グループ

主幹研究員 中村 克彦

主任研究員 佐伯 公康

[一般社団法人水産土木建設技術センター]

・調査研究部

部長 安藤 亘

専門技術員 藤田 孝康

主任研究員 完山 暢

### c. ねらい

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、およ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にも及んでいる。一方、今後はこれらの施設の老朽化が急速に進行することが予想され、維持管理・更新等に係る費用が増大していくことが懸念されている。今般の厳しい財政状況の中、これらの施設がその機能を発揮していくためには、効果的かつ効率的な維持管理・更新等による施設の長寿命化やライフサイクルコストの縮減が強く求められている。

そのため、水産庁では、平成26年8月に「インフラ長寿命化計画（以下「行動計画」という。）」を策定した。行動計画では、国は研修会の開催や新技術の開発・導入等による技術的支援などを図り、地方公共団体は維持管理・更新等で得られる情報のデータベースの整備・活用等を通じた戦略的な維持管理・更新等を図ることとしている。

一方、保全対策工事に対する都道府県からのヒヤリング等では、実際の実施事例や耐用年数に関する情報が不足、ライフサイクルコストの縮減効果やコスト分析の手法が不明、構造物の内部・下部の老朽化の状況が不明といった意見などが多く見られた。

これらの背景から、本事業では、水産基盤施設の老朽化の現状把握、中長期的なコスト分析、ライフサイクルコストの縮減効果に関する調査を実施するとともに、維持管理に関わる技術開発について検討し、長寿命化対策の着実な実施に資する技術的知見の蓄積を図ることを目的とした。

#### （補足）

維持管理に係る技術開発については、平成21～23年度、平成24～26年度の水産庁委託調査で、表面P波法及び機械インピーダンス法による簡易機能診断手法の検討を行った。これらは、コンクリート表層部の老朽化を定量的に評価する非破壊検査手法であり、それまでの目視点検やコア抜きによる圧縮強度の推定に代わるものとして利用でき、コンクリートの状態を簡易かつ定量的に把握できることが特徴である。

しかしながら、いずれの手法も検査担当者が近づいて計測できる場所でしか実施できず、また、表層部しか評価できないため、診断可能な範囲が限定される。

そこで、平成27年度から、海中部も含めた対象区画全体（例えば、防波堤の1スパン）の老朽化を診断できる手法開発に取り組んだ。具体的には、対象施設における常時微動の卓越周波数に着目し、経時的変化や健全部との比較により老朽化の有無を判別しようとするものである。

この手法が確立できれば、点検が困難な堤体基礎部の劣化について簡易かつ短時間で把握できるようになるとともに、更なる実証試験を経れば堤体内部の劣化も把握できるようになる。

これと並行して平成28年度は、コンクリート構造物の内部劣化を測定する非破壊検査手法として透過法を試行した。この手法は、コンクリート内部を伝播する衝撃弾性波の速度変化から空隙やひび割れ箇所の有無を把握しようとするものである。

この透過法の有効性が実構造物で実証できれば、前述の卓越周波数を使った診断手法や表面P波法では検出できないコンクリート内部の劣化を把握することができる。ただし、適用範囲は海面上に限られる。

## d. 方法

### 1. 水産基盤施設の老朽化の現状把握と中長期的なコスト分析

これまで水産基盤整備事業で整備されてきた漁港施設等について、現存するストック量を把握するとともに、建設された年次や各施設の耐用年数等を考慮して、今後どの程度の更新費用が見込まれるか分析することが求められている。

そこで、全国の漁港漁場管理者に対するアンケート調査により、漁港漁場施設のデータを集計・整理し、現時点における漁港漁場施設のストック量を把握した。このストック量を基に、今後必要な更新費用の分析を行った。なお、収集した漁港ストック量はデータベースとして整理した。また、平成 27 年 3 月末段階までの機能保全計画書を整理することによって、漁港漁場施設の老朽化度を整理した。

#### 1-1 漁港ストック量の把握

対象を外郭施設、係留施設、輸送施設、および漁港施設用地等として、それぞれのストック量を以下に従い整理した。

##### (1) 主要施設の漁港ストック量

漁港ストック量を主要な施設別に整理した。主要な施設は、外郭施設では「防波堤、防砂堤等（水門・閘門を除く）」、係留施設では「岸壁、物揚場、船揚場等（係船浮標・くいを除く）」、輸送施設では「道路」、および漁港施設用地等では「人工地盤」に区分して示した。

##### (2) 全体の漁港ストック量

漁港ストック量を施設別に区分して整理した。外郭施設は「防波堤、防砂堤等」、および「水門・閘門」、係留施設は「岸壁、物揚場、船揚場等」。および「係船浮標・くい」、輸送施設は「道路」、および「橋梁」、漁港施設用地等は「人工地盤」に区分して示した。

#### 1-2 今後必要な更新費用等の分析

2016 年 3 月末（平成 28 年 3 月末）の漁港ストック量を基に、今後更新を必要とするストック量、および更新費用を施設別・年度別に整理した。

##### (1) 今後の漁港ストック量の推移

今後、更新を必要とするストック量は、以下の 3 ケースを整理した。

【CASE 1】全施設について、一律、更新年 50 年を適用した。

【CASE 2】構造形式ごとに、財務省令で定める耐用年数を更新年として適用した。

【CASE 3】施設の老朽化状況から、構造形式ごとに耐用年数を設定して適用した。

##### (2) 今後の更新費用の推移

今後、必要とする各施設の更新費は、主要施設について「(1) 今後の漁港ストック量の推移」で適用した 3 ケースで整理した。

なお、更新費の算出は、ストック量における建設価格を用い、建設価格（撤去費は考慮しない）に 2015 年の漁港デフレーター（表 d-1-1-1）を乗じて算定した。

表 d-1-1-1 漁港デフレーター

年	数値	年	数値	年	数値
1955年以前	9.176	1976年	1.995	1997年	1.065
1956年	9.887	1977年	1.864	1998年	1.064
1957年	9.947	1978年	1.733	1999年	1.075
1958年	8.921	1979年	1.580	2000年	1.104
1959年	9.225	1980年	1.424	2001年	1.161
1960年	9.089	1981年	1.419	2002年	1.164
1961年	8.534	1982年	1.206	2003年	1.188
1962年	7.239	1983年	1.191	2004年	1.190
1963年	6.498	1984年	1.186	2005年	1.189
1964年	6.061	1985年	1.174	2006年	1.165
1965年	5.772	1986年	1.158	2007年	1.176
1966年	5.311	1987年	1.148	2008年	1.174
1967年	5.274	1988年	1.162	2009年	1.101
1968年	4.888	1989年	1.143	2010年	1.059
1969年	4.647	1990年	1.147	2011年	1.098
1970年	4.263	1991年	1.134	2012年	1.060
1971年	3.970	1992年	1.080	2013年	1.064
1972年	3.672	1993年	1.048	2014年	1.017
1973年	3.342	1994年	1.031	2015年以降	1.000
1974年	3.060	1995年	1.039		
1975年	2.372	1996年	1.035		

※ 漁港漁場漁村ポケットブック 2016 より引用

### 1-3 データベースの作成

#### (1) データベースの書式

Microsoft Excel (拡張子: .xlsx) によりデータベースを作成した。

#### (2) ファイル容量

発注者の端末 PC で速やかに編集できるように、1ファイル容量を 20MB 程度とした。

#### (3) ファイル構成

漁港管理者からの回答 (記入シート) を基に、図 d-1-1-1 に示す 160 ファイルで構成されるデータベースとした (ただし、1ファイル容量が 20MB 程度を超える場合は適宜ファイル分割した)。

・160 ファイル = 施設別 (4 施設) × 都道府県別 (40 都道府県)

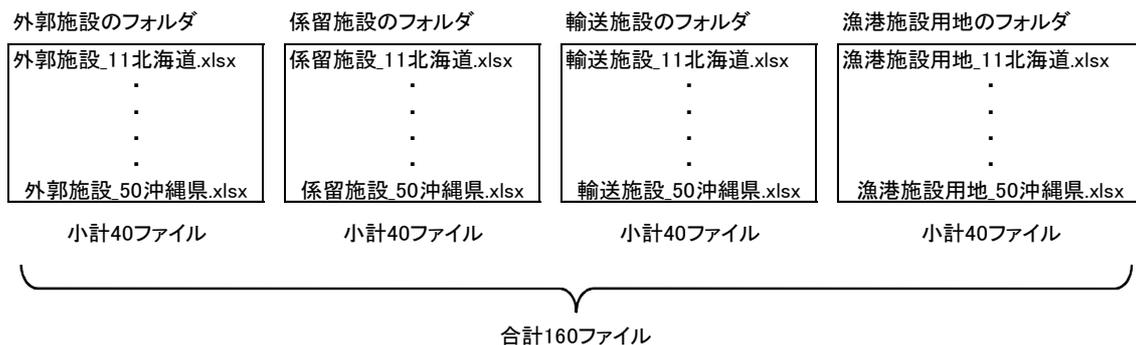


図 d-1-1-1 データベースのファイル構成

#### (4) データシートの基本構成

各施設のフォルダ内に格納する都道府県別のデータシートの基本構成を表 d-1-1-2 に示した。対象施設の構造形式の分類は、水産庁が実施した過年度の分類を踏まえ、表 d-1-1-3 のように設定した。ただし、修正・追加すべき項目があれば、発注者と協議の上、決定した。

表 d-1-1-2 各施設のデータシートの基本構成

【外郭施設】

都道府県名	漁港名	漁港番号	流通拠点 生産拠点	施設分類	種類	施設番号	施設名称	構造形式	施設の現状		数量			建設年又は取得の年		建設価格 (千円)	附帯施設	
									新設・更新	補修・改良	対象延長 (m)	現在の総 延長 (m)	基数 (基)	延べ面積 (㎡)	自(年)		至(年)	防風設備

【保留施設】

都道府県名	漁港名	漁港番号	流通拠点 生産拠点	施設分類	種類	施設番号	施設名称	構造形式	施設の現状		数量			建設年又は取得の年		建設価格 (千円)	附帯施設						
									新設・更新	補修・改良	対象延長 (m)	現在の総 延長 (m)	基数 (基)	延べ面積 (㎡)	自(年)		至(年)	防風設備	防雪設備	防暑設備	清浄海水 導入施設	鳥獣等侵 入防止設 備	魚類移送 施設

【輸送施設】

都道府県名	漁港名	漁港番号	流通拠点 生産拠点	施設分類	種類	施設番号	施設名称	構造形式	施設の現状		数量			建設年又は取得の年		建設価格 (千円)
									新設・更新	補修・改良	対象延長 (m)	現在の総 延長 (m)	基数 (基)	延べ面積 (㎡)	自(年)	

【漁港施設用地等】

都道府県名	漁港名	漁港番号	流通拠点 生産拠点	施設分類	種類	施設番号	施設名称	構造形式	施設の現状		数量			建設年又は取得の年		建設価格 (千円)	附帯施設
									新設・更新	補修・改良	対象延長 (m)	現在の総 延長 (m)	基数 (基)	延べ面積 (㎡)	自(年)		至(年)



表 d-1-1-3 構造形式の区分

施設	施設種類	構造形式		本体工の構造等に着目した分類	本調査の構造形式番号	過年度調査時の構造形式番号		
(漁港施設) 外郭施設、 輸送施設、 漁港施設用地、 水域施設  (漁場施設) 増殖場、 養殖場、 着底基質、 海水交流施設	(外郭施設) 防波堤、 防砂堤、 防潮堤、 導流堤、 防波護岸、 堤防、 突堤、 胸壁	直立堤	消波工付き	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)	1	1		
				鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケーソン式、L型ブロック式)	2			
				鋼構造(鋼製函式)	3			
			消波工なし	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)	4		2	
				鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケーソン式、L型ブロック式)	5			
				鋼構造(鋼製函式)	6			
		(輸送施設) 道路護岸	傾斜堤 (潜堤)	透過式	無筋コンクリート構造(捨ブロック[全断面]式)	7	3	
					石積造(捨石[全断面]式)	8		
				不透過式	無筋コンクリート構造(捨ブロック[中詰]式)	9		4
			石積造(捨石[中詰]式)		10			
			(漁港施設用地) 用地護岸	混成堤	消波工付き	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)	11	5
						鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケーソン式、L型ブロック式)	12	
	鋼構造(鋼製函式)	13						
	消波工なし	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)			14	6		
		鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケーソン式、L型ブロック式)			15			
		鋼構造(鋼製函式)			16			
	(増殖場・養殖場) 消波堤、 潜堤、 離岸堤、 防水堤	その他	矢板式	鋼構造	17	7		
				杭式・カーテン式	鋼構造	18	8	
			浮体式	鋼構造	19	9		
				鉄筋コンクリート構造	20			
				プレストレストコンクリート構造	21			
	その他	複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設	22	-				
	水門			—	23	-		
	開門			—	24	-		
係留施設	岸壁、 物揚げ場、 棧橋、 浮棧橋、 取付護岸	重力式	直立消波式	無筋コンクリート構造	25	10		
			その他	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)	26	11		
			鉄筋コンクリート構造(セルラー式、ケーソン式、L型ブロック式)	27				
		矢板式	鋼構造	28	12			
			棧橋式	鋼構造	29	13		
				階段式	無筋コンクリート構造	30	14	
		浮体式	鋼構造	31	15			
			鉄筋コンクリート構造	32	-			
			プレストレストコンクリート構造	33	-			
		船揚場	斜路式	34	16			
	吊上げ方式		35					
	係船浮標		—	36	17			
	係船くい	—	37	18				
その他	複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設	38	-					
輸送施設	道路	アスファルト舗装	39	-				
		コンクリート舗装	40	-				
		複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設	41	-				
	橋梁	桁橋	42	-				
		アーチ橋	43	-				
		斜張橋	44	-				
		吊橋	45	-				
		トラス橋	46	-				
		複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設	47	-				
		鉄筋コンクリート構造	48	-				
漁港施設用地等  (機能施設) 漁港浄化施設、 廃油処理施設、 荷さばき所	鉄骨鉄筋コンクリート構造	49	-					
	鋼構造	50	-					
	複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設	51	-					

## 2. スtockマネジメントによるライフサイクルコストの縮減効果

### 2-1 機能保全計画書データベースの作成

機能保全計画書は平成24年7月末で255漁港分が策定され、平成25年度業務でこれらを集計して分析・検討が行われた。平成24年8月以降も機能保全計画が新たに策定されており、平成28年3月時点で機能保全計画策定済み漁港は1,575漁港であり、このうち次期長期計画の対象漁港は1,091漁港にのぼる。今年度は、全漁港数のおよそ84%にあたる1,319漁港を検討対象とした。

対象1,319漁港についてMicrosoft Excel（拡張子：.xlsx）により機能保全計画書データベースを作成した。基本データは健全度、保全対策の有無、工種、対策工費、対策年度等とした。

### 2-2 機能保全計画書データの集計結果概要

施設種類別の健全度A～Dの分布状況、および今後50年の保全対策コストの状況を示した。

### 2-3 保全対策時期の検討

機能保全計画書データベースから各施設の老朽化状況と経過年の関係を分析し、施設種類別に適切な耐用年数を試算した（図d-2-1-1【更新コスト】【CASE3】の検討）。

### 2-4 保全対策コストの検討

耐用年数期間内に要対策となった施設の割合を算出した。また、要対策となった施設の保全対策費から、施設種類別に平均対策費を試算した。また実績から水域施設の費用について検討した。

### 2-5 コスト縮減効果の検討

#### （1）更新費用のコスト縮減効果の考え方

機能保全計画書では、保全対策によるコスト縮減額の算出が定められており、機能診断時点から50年間（供用期間）に要する更新費と保全対策費の差として算出される。そこで、機能保全計画書から保全対策費と更新費を抽出し、全体のコスト縮減効果を分析した。縮減効果の指標は、コスト縮減率（ $= 1 - \text{保全対策コスト} / \text{更新コスト}$ ）に着目した。

- |              |
|--------------|
| ◎コスト縮減効果の観点  |
| ➤ 種類別        |
| ➤ 建設時からの経過年数 |

#### （2）維持管理費の検討

コスト縮減効果に加味する維持管理費について検討した。

#### （3）更新費用のコスト縮減効果の試算

保全対策費は、以下の式で試算した。

保全対策費(百万円) = 総延長(m) × 保全対策実施率 × 平均対策費(百万円/m)

コスト縮減効果は、以下の式で試算した。

コスト縮減効果(%) =  $(1 - \text{保全対策費(百万円)} / \text{更新費(百万円)}) \times 100$

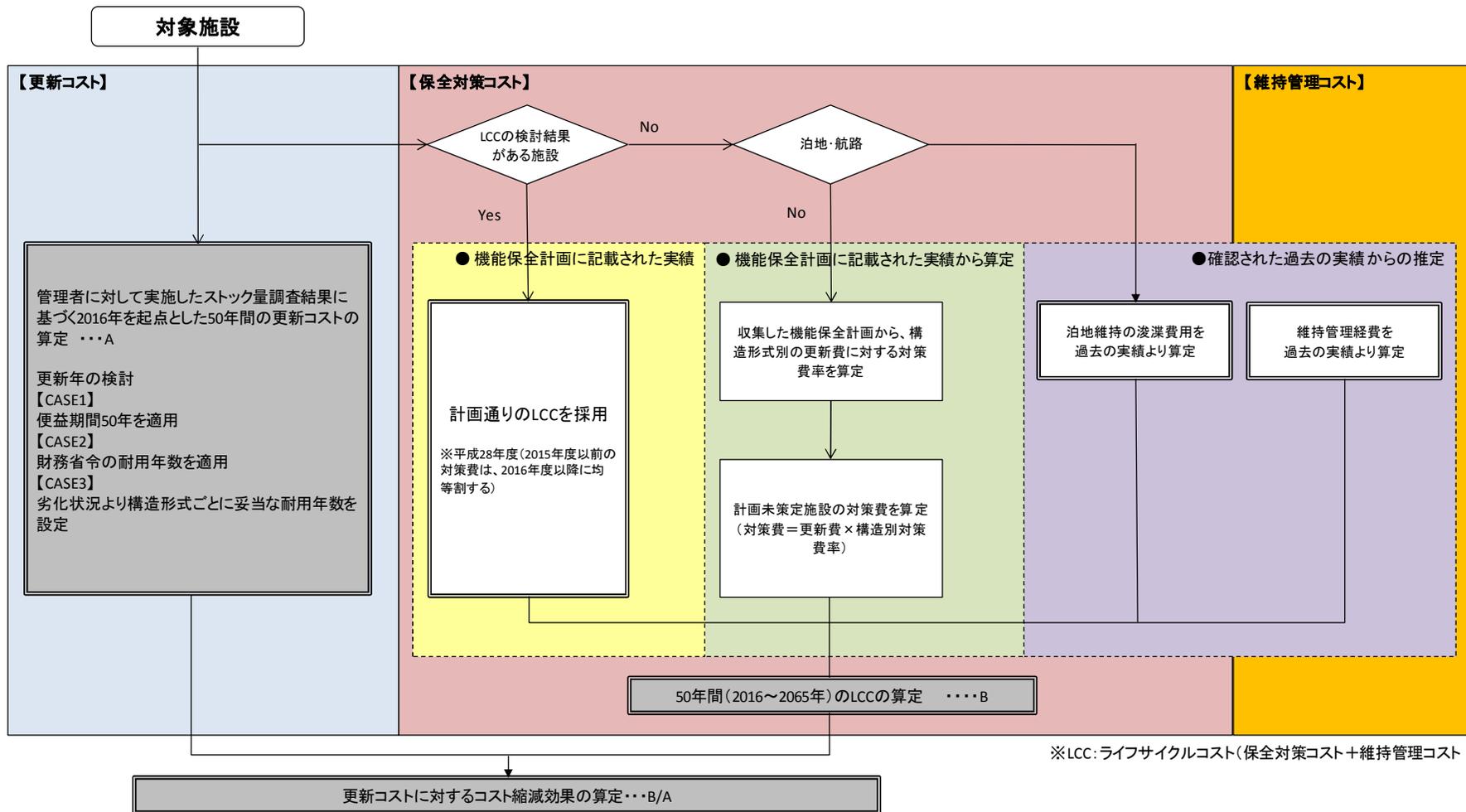


図 d-2-1-1 費用のコスト縮減効果の試算手順

### 3. 漁港施設の構造物全体の機能評価手法の開発・普及

平成 27 年度調査で明らかにした構造物全体の老朽化状態を把握するための測定方法や解析方法等の基本的な特性を踏まえ、平成 28 年度は実構造物の機能診断手法として適用可能な測定方法や解析方法について検討した。

#### 3-1 室内試験

漁港施設で用いることができる測定手法等の基本的な特性等を明らかにするため、実構造物を想定した供試体の固有振動を計測した。

##### (1) 供試体と測定機器

###### ① 供試体 1 (内部空隙なし)

対象施設として、防波堤のコンクリート単塊式、ブロック積み式を想定し、設置面(基礎)の違いが固有振動に与える影響を確認するため、供試体による室内試験を実施した。供試体寸法は、W/C50%の400×500×600mm(重量:270kg)であり、供試体の使用材料や配合は、図 d-3-1-1 のとおりである。



図 d-3-1-1 供試体外観

表 d-3-1-1 供試体の使用材料と配合

		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 <sup>3</sup>					
細骨材	菊川支流産山砂		S	密度:2.59g/cm <sup>3</sup> ,吸水率:2.18%					
粗骨材	青梅産碎石		G	密度:2.70g/cm <sup>3</sup> ,吸水率:0.62%最大寸法:20mm					
混和材料	高性能AE減水剤		SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物					
	AE助剤		AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤					
W/C (%)	s/a (%)	目標スランプ値 (cm)	目標空気量 (cm)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤(kg/m <sup>3</sup> )	
				W	C	S	G	SP	AE
50	45.8	8 ± 2.5	4.5 ± 1.5	167	334	809	998	2.171	0.020

注: s/a; 供試体における全骨材量 (S+G=a) に対する細骨材量 (S) の絶対容積比 (s/a) を百分率で表した値

## ② 供試体 2 (内部空隙あり)

構造物の内部に空隙がある場合の固有振動への影響と空隙の有無を把握する手法を検討するため、内部に擬似的な空隙を持つ供試体を作製した。供試体は、下記のとおり、中央部に発泡スチロールを入れ、空隙の体積が供試体の1/5、1/10となるように作製した。供試体寸法は、W/C50%の400×500×600mmであり、供試体の使用材料や配合は、供試体1と同様とした。



図 d-3-1-2 供試体外観

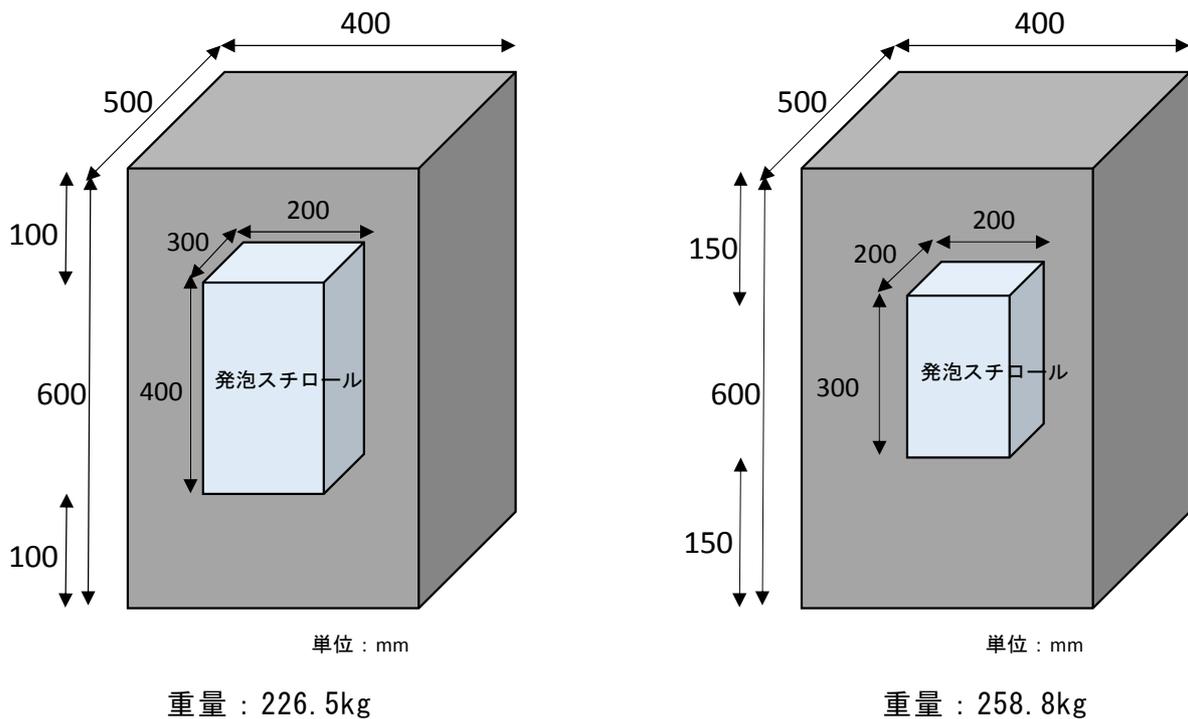


図 d-3-1-3 供試体 2 および空隙寸法

### ③ 測定機器

用いた測定機器は、以下に示す速度計と iTECS とした。

表 d-3-1-2 速度計の基本仕様

センサ	加速度	小型サーボ型速度計 (VSE-14C)
	成分数	3 軸 (3 成分)
	測定範囲	$\pm 0.02\text{m/s}$ ( $\pm 2\text{kine}$ )
	周波数特性	0.1~100Hz
アナログ部	入力最大電圧	$\pm 4.0\text{V}$
	増幅度	$\times 100$
	サンプリング周波数	100、200、500、1KHz
	AD 分解能	24bit
	分解能	$0.25 \mu \text{ m/S}$ ( $25 \mu \text{ kine}$ ) (サンプリング周波数 100Hz、フルスケール時)



図 d-3-1-4 測定に用いた速度計 (左) と測定状況 (右)



図 d-3-1-5 測定に用いた iTECS (左) と測定状況 (右)

## (2) 基礎部の条件の違い

基礎部の違いがどのように影響するかを把握するため、4種類の異なる基礎で検討を行なった。これらの基礎部の違いは、表 d-3-1-3 のとおりである。測定は、供試体上部に速度計を設置して、200Hz で 30 秒を 1 回として、25 または 50 回測定した。

表 d-3-1-3 基礎部の条件とそれぞれの実験ケース

基礎部の条件	実験ケース
圧縮ばね (均等配置)	4、6、8、12、24、48、63 個の 7 ケース
圧縮ばね (偏り配置)	両側抜き (35 個)、片側抜き (49 個)、中央抜き (56 個) の 3 ケース
砂	全面 1、片側 10cm 抜き、両側 10cm ずつ抜き、全面 2、中央 10cm 抜きの 5 ケース
砂利	全面 1、片側 10cm 抜き、両側 10cm ずつ抜き、全面 2、中央 10cm 抜きの 5 ケース

### ア) 圧縮ばね (均等配置)

供試体底面にばね定数が既知である圧縮ばねを用いて、速度計で固有振動を測定した (図 d-3-1-6, d-3-1-7 参照)。圧縮ばねは、図 d-3-1-6 に示すように、4 個、6 個、8 個、12 個、24 個、48 個、63 個と増やして設置した (均等配置)。

測定は、それぞれ 200Hz で 30 秒を 1 回として 50 回測定した。なお、圧縮ばね 1 個のばね定数は、 $K=198.61\text{N/mm}$  であった。

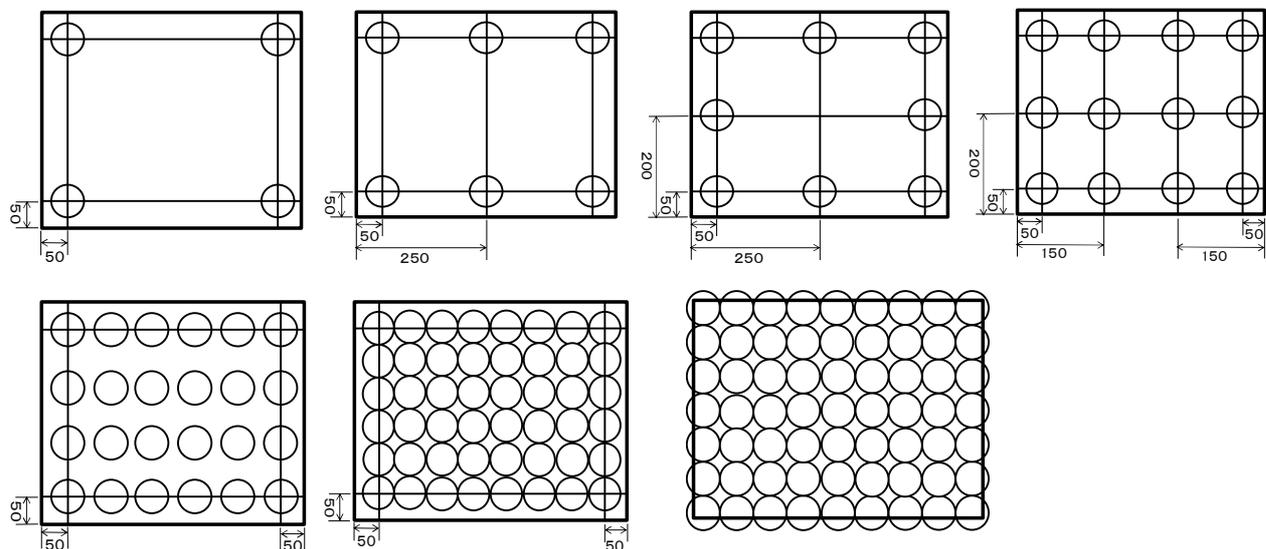


図 d-3-1-6 圧縮ばねの設置方法 (均等配置)

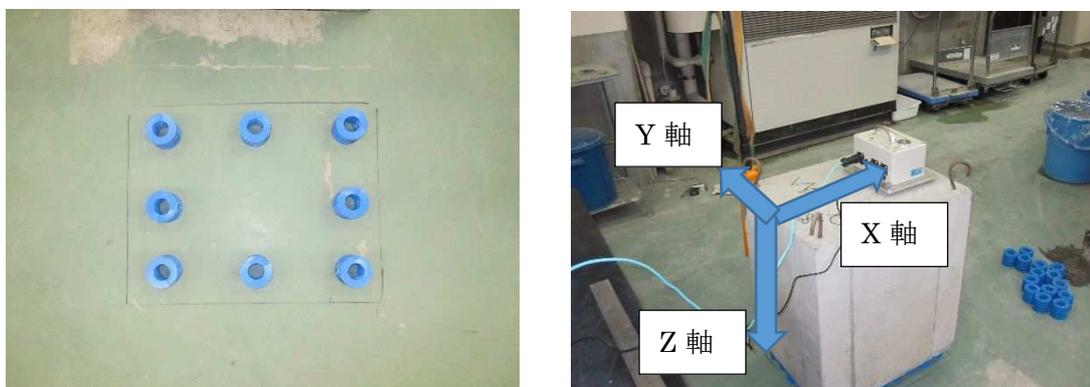


図 d-3-1-7 圧縮ばねの設置例と測定状況



### イ) 圧縮ばね (偏り配置)

前述のア)と同様に、供試体底面にばね定数が既知である圧縮ばねを設置し、速度計で供試体の固有振動を測定した(図 d-3-1-8, d-3-1-9 参照)。圧縮ばねは、図 d-3-1-8 に示すように、供試体の両側空間が多くなる、片側空間が多くなる、中央空間が多くなるというように、偏った配置とした(全面(63個)、片側抜き(49個)、両側抜き(35個)、中央抜き(56個))。

測定は、それぞれ 200Hz で 30 秒を 1 回として 25 回測定した。なお、圧縮ばね 1 個のばね定数は、 $K=198.61\text{N/mm}$  であった。

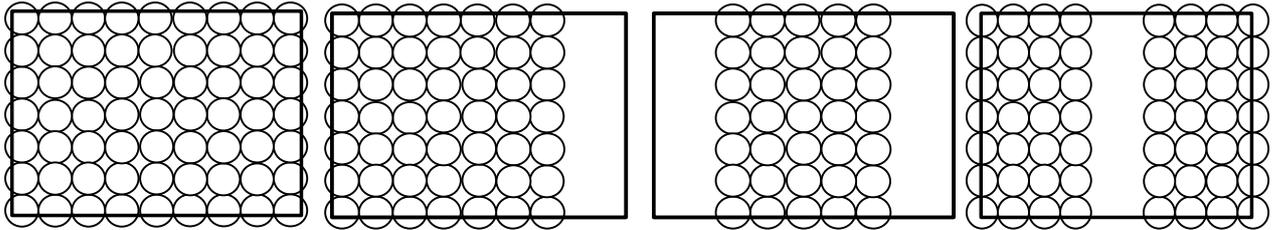


図 d-3-1-8 圧縮ばねの設置方法 (偏り配置)

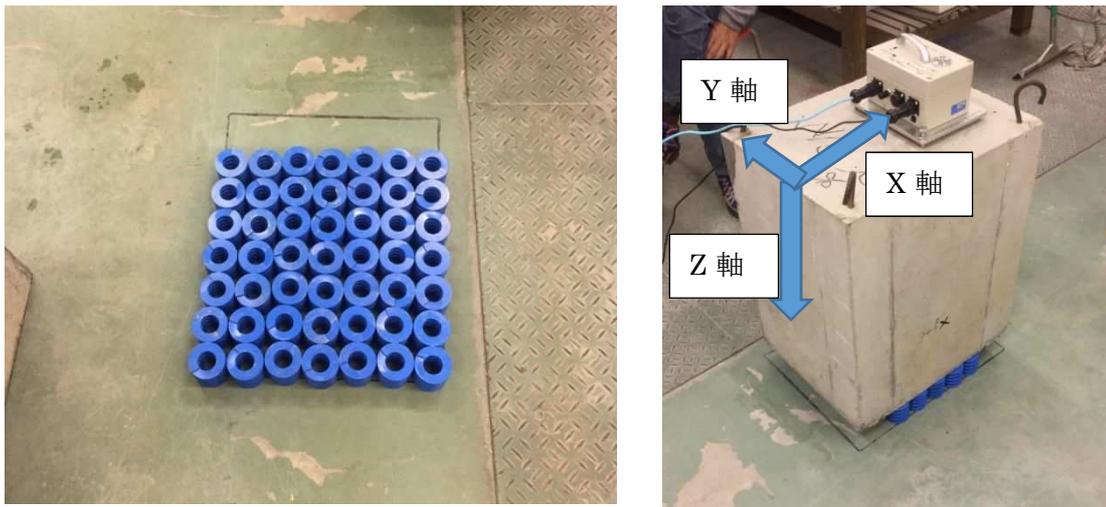


図 d-3-1-9 圧縮ばねの設置例と測定状況

### ウ) 砂

供試体底面に砂を敷詰め、その上に供試体を設置し、速度計で供試体の固有振動を測定した（図 d-3-1-10 参照）。砂は、型枠（600×900×600mm）に入れ、高さが 200mm となるまで締固めた（600×900×200mm）。

測定は、全面→片側削り→両側削りの順に砂を削っていき、その後、同量の砂を敷詰め直し、全面 2→中央削りの順で行った。なお、測定は、200Hz で 30 秒を 1 回として 50 回測定した。

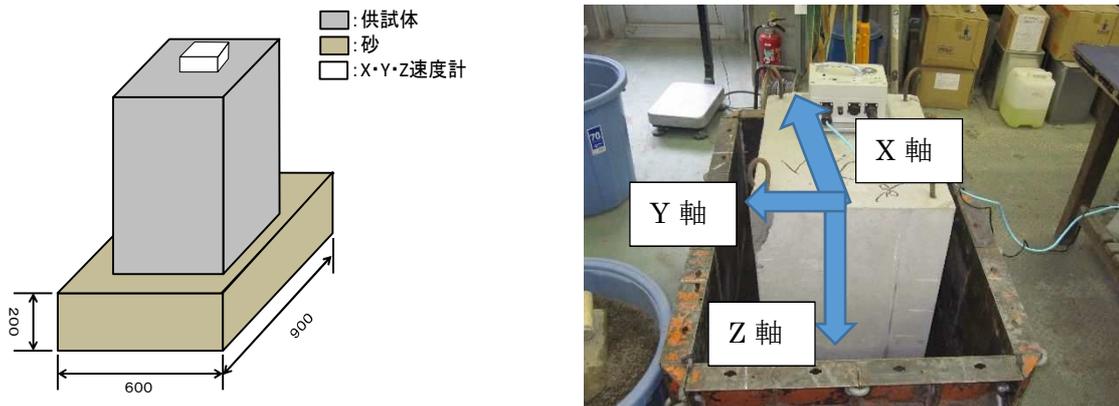


図 d-3-1-10 砂の測定方法（左）と測定状況（右）

## エ) 砂利

混成堤の捨石を想定して、供試体底面に砂利を敷詰め、その上に供試体を設置し、速度計で供試体の固有振動を測定した（図 d-3-1-11 参照）。砂利は、粒径 5~25mm であり、ブロックの枠 (780×930×190mm) に高さ 190mm になるまで敷き詰めた。

測定は、全面→片側削り→両側削りの順に削っていき、その後、同量の砂利を敷詰め直し、全面 2→中央削りの順で行った。なお、測定は、200Hz で 30 秒を 1 回として 50 回測定した。

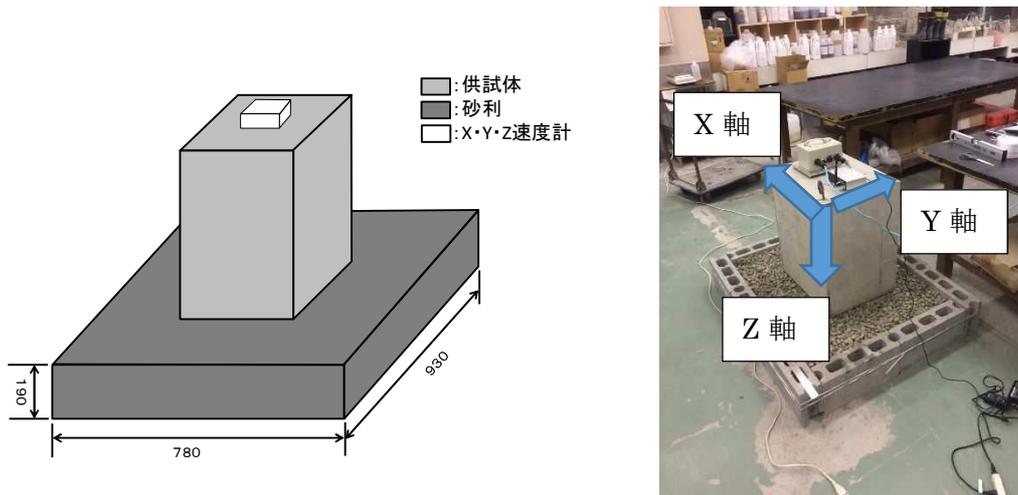


図 d-3-1-11 砂利の測定方法（左）と測定状況（右）

### (3) 形状の違い

漁港構造物における構造形式の違いが固有振動に与える影響を把握するため、ブロック積み式の防波堤を想定し、供試体 1 段と 2 段における固有振動を速度計で測定した（図 d-3-1-12、d-3-1-13、d-3-1-14 参照）。供試体底面には、(2) で測定した圧縮ばねを用いた。

測定は、供試体を横向きにして行い、1 段と 2 段のそれぞれで供試体底面に 4、12、48 個の圧縮ばねを設置して行った。測定は、200Hz で 30 秒を 1 回として 50 回測定した。

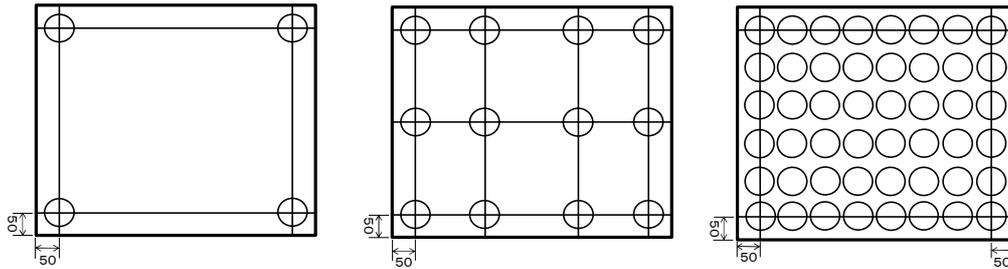


図 d-3-1-12 圧縮ばねの設置方法（形状の違い）



図 d-3-1-13 圧縮ばねの設置状況

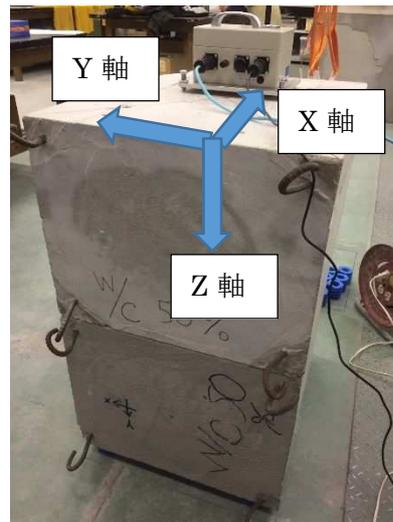


図 d-3-1-14 供試体 2 段の測定状況

#### (4) 海水の影響

実際の漁港構造物は、大半が海水に没しているため、供試体が水に侵かった状態で固有振動を測定し（図 d-3-1-15、d-3-1-16 参照）、その影響を把握した。供試体は、(1) で示したものと同一のものを用いた。

測定は、型枠(600×900×600mm)の中で行った。水位は供試体底面から 20 cm、40 cm となるように水道水を溜めた（図 d-3-1-15 参照）。供試体底面には、圧縮ばねを 4、12、63 個設置した。実験ケースは、合計 9 ケース行った。なお、測定は、200Hz で 30 秒を 1 回として 50 回測定した。

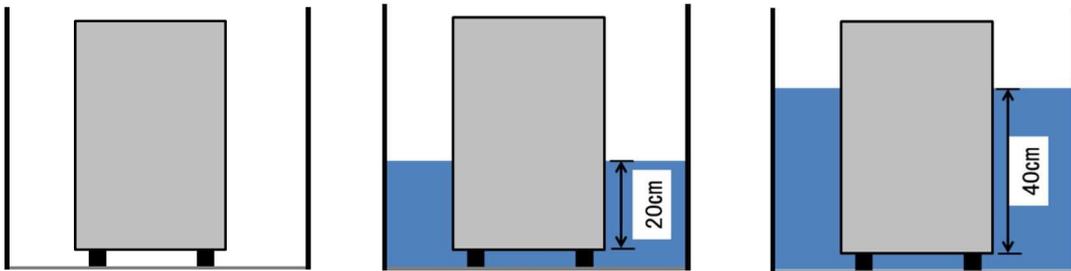


図 d-3-1-15 水位を変えた供試体設置状況

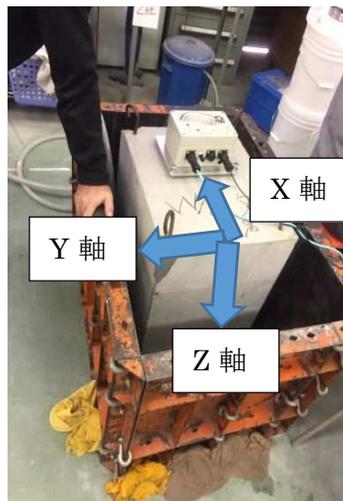


図 d-3-1-16 海水の影響の測定状況

## (5) 破損部の影響

### ア) 固有振動測定 (速度計)

内部に空隙があるときの影響を把握するため、(1)の②の供試体2 (内部空隙あり)を用いて、それぞれの固有振動を速度計で測定した(図 d-3-1-17 参照)。

内部空洞大、小のそれぞれで、供試体底面に圧縮ばねを4、12、63個設置し、合計6ケースで固有振動を測定した。測定は、200Hzで30秒を1回として50回測定した。

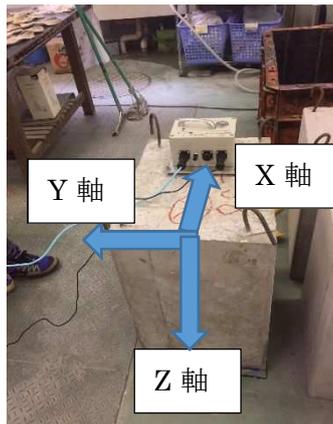


図 d-3-1-17 速度計による破損部の影響の測定状況

### イ) 透過弾性波速度測定 (iTECS)

供試体における内部空隙大、小の影響を把握するため、供試体内を透過する衝撃弾性波の速度を iTECS で測定した(図 d-3-1-18, d-3-1-19 参照)。測定位置は、供試体400×600mmの面をハンマーで打撃し、もう片方に受信機を設置した。

測定は、図 d-3-1-18 に示すとおり10測点とし、1測点で5回の弾性波速度を測定した。

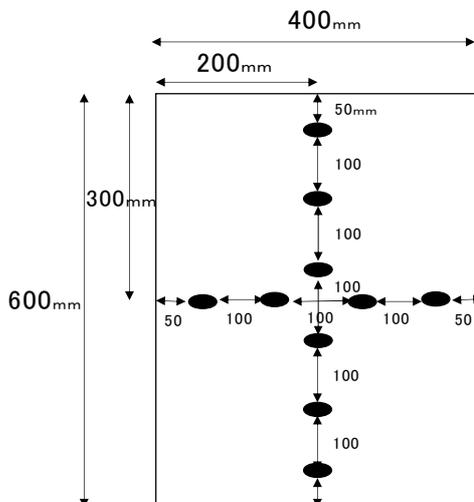


図 d-3-1-18 iTECS 測定箇所



図 d-3-1-19 iTECS による空隙の影響の測定状況

### 3-2 現地調査

実構造物への最適な固有振動計測方法を選定するため、現地調査を実施した。現地調査は、工事前後の振動特性を比較するため、大規模な維持補修工事等を予定している施設において、工事前後の固有振動を測定した。

#### (1) 調査場所と測定機器

調査場所は、基礎部分に洗掘があり、対策工事を実施予定であった新潟県筒石漁港の東防波堤（岩着基礎、単塊式（ただし、上部工と大型のパラペットあり））とした。

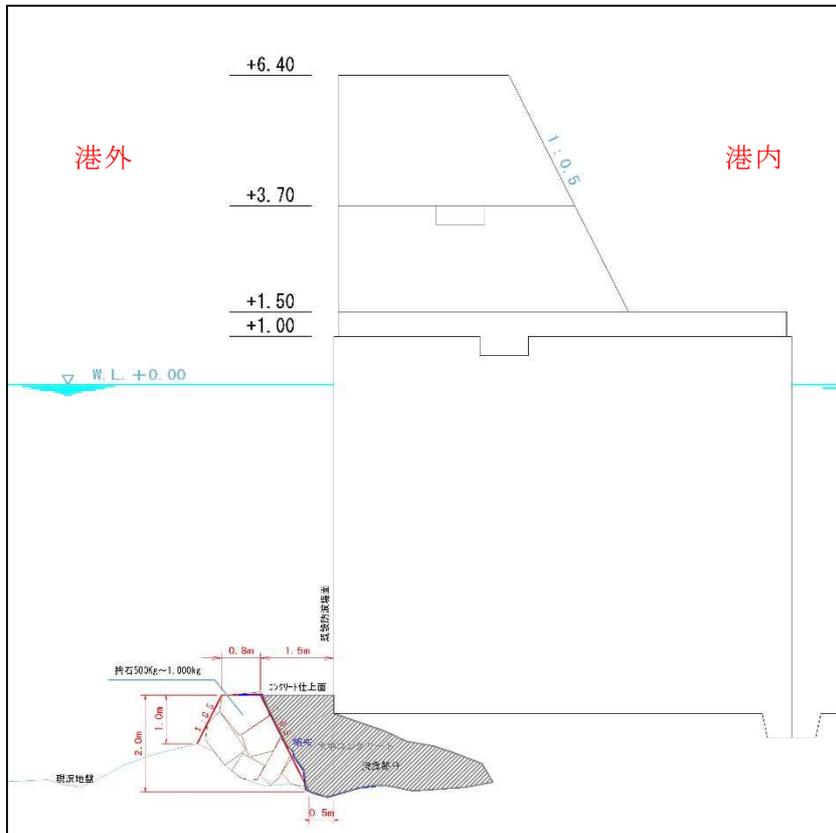
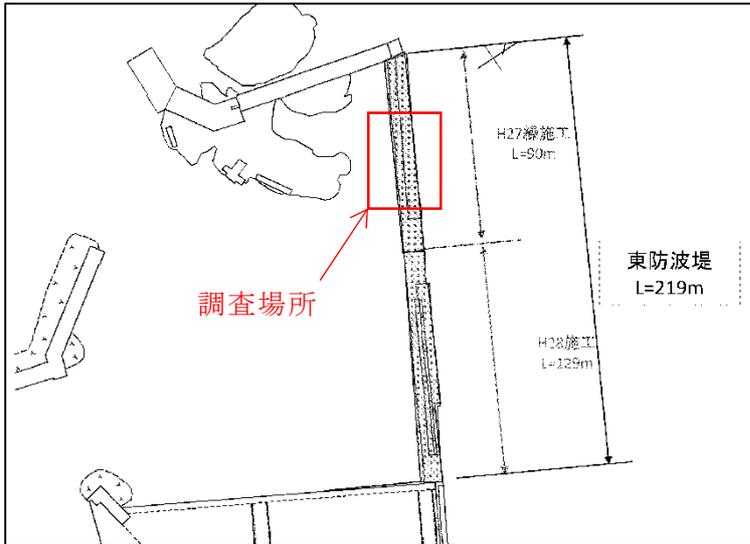
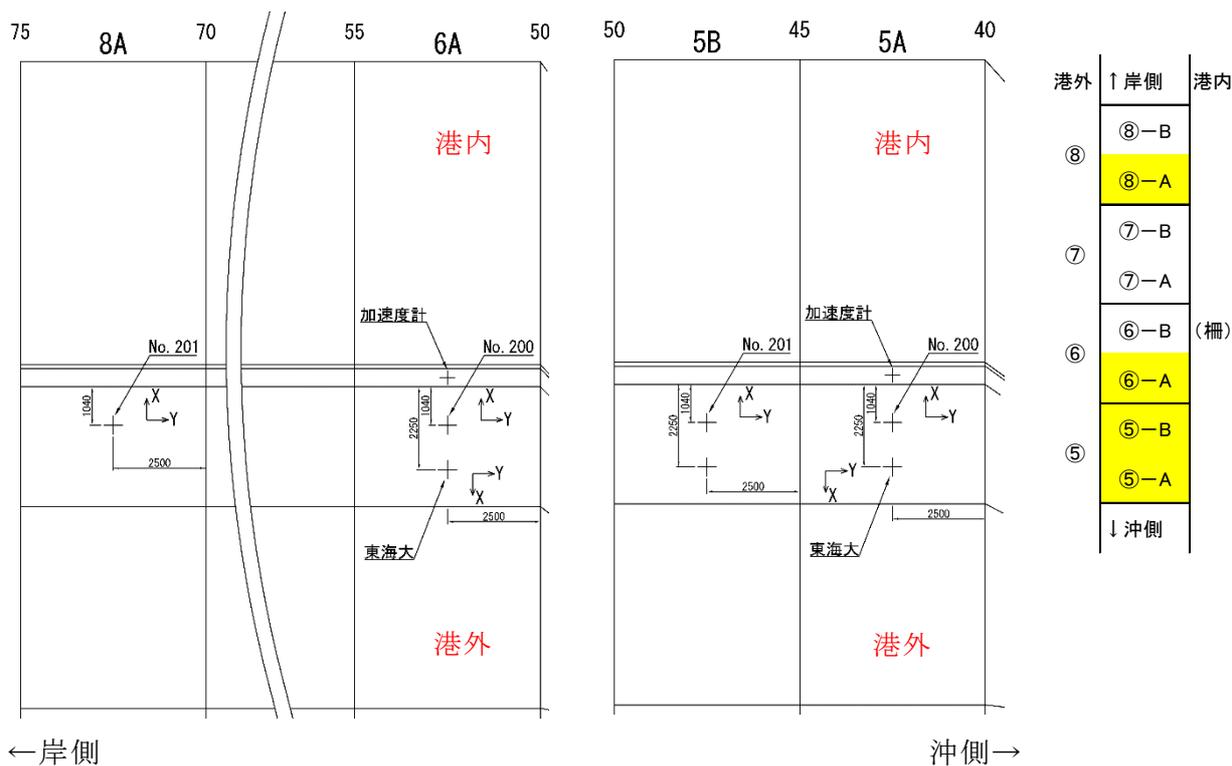


図 d-3-2-1 平面図・断面図



←岸側  
\* 上記右側の「⑧」「⑧-A」はスパン NO. を示す。

図 d-3-2-2 調査地点図

表 d-3-2-1 測定機器

調査地点図における表記	測定機器	備考
NO.200(水工研速度計)	速度計	3-1の(1)で示した仕様の速度計
NO.201(水工研速度計)	速度計	3-1の(1)で示した仕様の速度計
東海大	速度計	3-2の(2)で示した仕様の速度計
加速度計	加速度計	3-2の(2)で示した仕様の加速度計
iTECS	衝撃弾性波測定装置	3-1の(1)で示したiTECS

表 d-3-2-2 NO. 200、201 (水工研速度計) の基本仕様

センサ	加速度	小型サーボ型速度計 (VSE-14C)
	成分数	3軸 (3成分)
	測定範囲	±0.02m/s (±2kine)
	周波数特性	0.1~100Hz
アナログ部	入力最大電圧	±4.0V
	増幅度	×100
	サンプリング周波数	100、200、500、1KHz
	AD分解能	24bit
	分解能	0.25 μ m/S (25 μ kine) (サンプリング周波数 100Hz、フルスケール時)



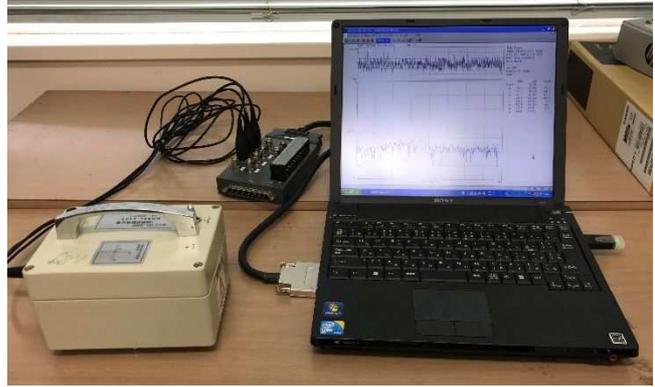


図 d-3-2-3 測定に用いた速度計

(左 ; NO. 200, 201 (水工研速度計)、右 ; 東海大 (速度計))

**【東海大 (速度計)】**

東海大 (速度計) は、速度計 (MODEL-2205: 昭和測器(株)、周波数特性; 1~100Hz) とした。

表 d-3-2-3 東海大 (速度計) の基本仕様

仕様		
形式	MODEL-2205	
検出部	3方向サーボ型加速度計	
	加速度計出力感度	2V/9.8m/s <sup>2</sup>
	加速度計分解能	5 × 10 <sup>-6</sup> G (5 μG) 以下
出力感度 (3軸とも)	加速度モード (AC & DC)	5v (10m/s <sup>2</sup> )
	速度モード <sup>※</sup>	5V/10mm/s
	変位モード <sup>※</sup>	5V/100 μmp-p
周波数範囲 (3軸とも)	DC加速度モード <sup>※</sup>	DC ~ 100Hz (±10%)
	AC加速度モード <sup>※</sup>	0.5 ~ 100Hz (±10%)
	速度モード <sup>※</sup>	1 ~ 100Hz (±10%)
	変位モード <sup>※</sup>	1 ~ 100Hz (±10%)

**【加速度計】**

加速度計は、共振周波数測定装置「RSONA 01」とした。

表 d-3-2-4 加速度計の基本仕様

品名	仕様	数量
超高感度加速度計	10.4V/G	2
ローノイズケーブル	10m	2
アンプ・AD変換器	RSONA01	2
計測アプリケーション	WIN7, 8対応	1
ノートPC	Tough book	1



図 d-3-2-4 測定に用いた加速度計

**【iTECS】**



図 d-3-2-5 測定に用いた iTECS

表 d-3-2-5 iTECS の基本仕様

装置の構成	本体部	アンプ、AD変換、電源		1
	PC	測定制御		
	センサー	超高感度加速度計1～20kHz		1
	インパクト	φ30mm硬球、350kgハンマ		1
	充電用電池	AC100V入力、DC16V出力(PC用)		1
	収納ケース	アルミニウム合金製		1
アンプ部	1ch	約2mA20V定電流駆動源付きアンプ、PCB、Fuji製加速度		
	2ch	計専用、最大入力±1.0V		
AD変換	プレトリガー	弾性波速度測定	0.1マイクロ秒	
		ひび割れ測定	1.0マイクロ秒	
		厚さ測定	10マイクロ秒	
		データ数	測定時間長で設定	
		精度	12Bit	
測定範囲	弾性波速度	センサー間隔による。2000m/sから6000m/s		
	ひび割れ深さ	最小20mm、最大200mm以上		
	厚さ測定	最小100mm、最大1500mm以上		

(2) 調査ケース

現地調査は、前述の調査地点図で示した箇所で工事前後（工事前：7月8、9日、工事後：8月14、15日）で実施した。

表 d-3-2-6 調査ケース

調査ケース	方法	スパンNO.	測定機器				
			NO.200	NO.201	東海大	加速度計	iTECS
			上部設置	上部設置	上部設置	側面打撃	側面打撃
測定1	常時微動	⑤-A	○		○	○	
		⑤-B		○			
測定2		⑥-A	○		○	○	
		⑧-A		○			
測定3	打撃	⑤-A			○	○	
		⑥-A			○	○	
測定4	透過法	⑤-A					○
		⑤-B					○

\*上記測定に加え、常時微動の③-Aでの計測（8月のみ）、打撃の30分計測（⑤-A、⑥-Aの7月のみ）がある。

### (3) 測定方法

#### ① 測定 1、2 (常時微動)

速度計および加速度計を用いて、基礎部の一部が欠損している防波堤で固有振動を測定した(図 d-3-2-6 参照)。当該防波堤は、上部工があるコンクリート単塊式の岩着構造であった。また、当該防波堤は、港外側が波浪等により浸食・吸い出しを受けたような形状となっている。欠損部の断面積は、 $0.5 \times 1.0\text{m}$  から  $2.5 \times 2.0\text{m}$  程度の大きさであり、堤体本体が欠損している箇所もあった。

速度計は、いずれも構造物の上部に設置して測定し、当該防波堤の対象スパンで測定間隔を 30 秒 $\times$ 50 回とし、測定周波数を 200Hz で実施した。加速度計は、センサーを港内側堤体側面に厚さ 6mm の鉄板にねじ止めしたものを機械式アンカーおよびボルトで取り付けて測定した(図 d-3-2-7 参照)。なお、センサーの設置高さは、天端から約 80cm 下(堤体本体工の天端から 30cm 下)の高さとした。



図 d-3-2-6 速度計での計測状況



図 d-3-2-7 加速度計設置状況 (左: 取付け作業状況, 右: 設置状況)

## ② 測定3 (打撃)

防波堤各スパンの固有振動数は、速度計 (MODEL-2205、昭和測器 (株) 社製) と加速度計 (共振周波数測定装置 RSONA01、日東建設 (株) 社製) を用いて計測した。速度計は港内側の堤体端から 1.1m (堤体幅の 1/4) のところに、加速度計は港内側堤体側面の上端 (堤体本体工の上端) から 0.3m のところに設置して計測した。

計測は、サンプリング周波数を 200Hz とし、10~15 秒間/回×10 回とした。また、堤体の固有振動を励起させるため、3 種類の重錘により港外側から衝撃を与え、港内側の堤体側面で固有振動計測を行った。

重錘は、上部工天端に機械式アンカーによって固定したアイボルト等から港外側にロープによって吊り下げた (図 d-3-2-8 参照)。重錘の打撃は、船舶に乗船した作業者が可能な限り引き上げ、振り子の原理で衝突させた。重錘の重さは、30kg、35kg、65kg とし (図 d-3-2-9 参照)、構造物保護のため重錘の表面にゴムシートを取り付けた。

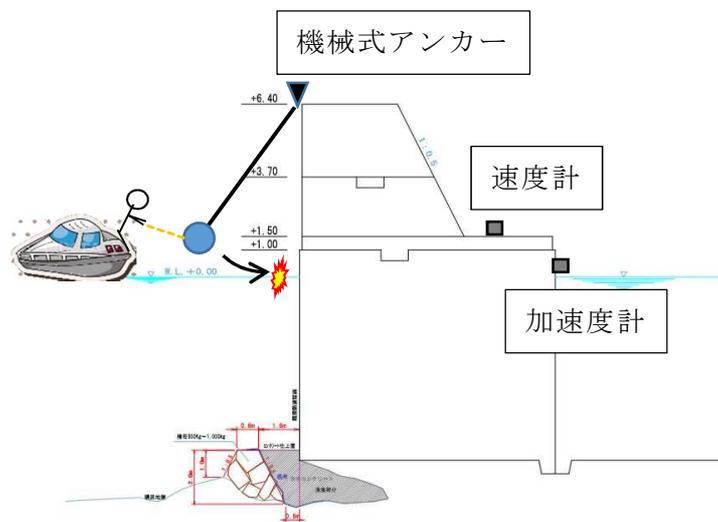


図 d-3-2-8 重錘の吊り下げ状況 (左)、計測状況 (右)



図 d-3-2-9 用いた重錘 (左 : 30kg、中 : 35kg、右 : 65kg)

### ③ 測定 4 (透過法)

透過法は、衝撃弾性波測定装置 (iTECS6、日東建設社製) を用いて計測した。打撃は、CTS-02V4 付属のハンマ (380g) を使用し、測定は、各測定点で 5 回ずつ実施した。透過法による弾性波速度の算出は、実測 (または図面から計算) した伝搬距離を計測した伝搬時間差で除して算出した。

7 月の調査は堤体本体を対象とし、打撃点及び受信点を水平方向に 1m 間隔で移動させ計測した (図 d-3-2-10 参照)。8 月の調査は上部工を対象とし、打撃点及び受信点を鉛直方向に 0.5m 間隔で移動させ計測した (図 d-3-2-11 参照)。なお、擬似的な亀裂部として、堤体測定時は隣接するスパンの継ぎ目、上部工測定時は打ち継ぎ目をそれぞれ計測した。

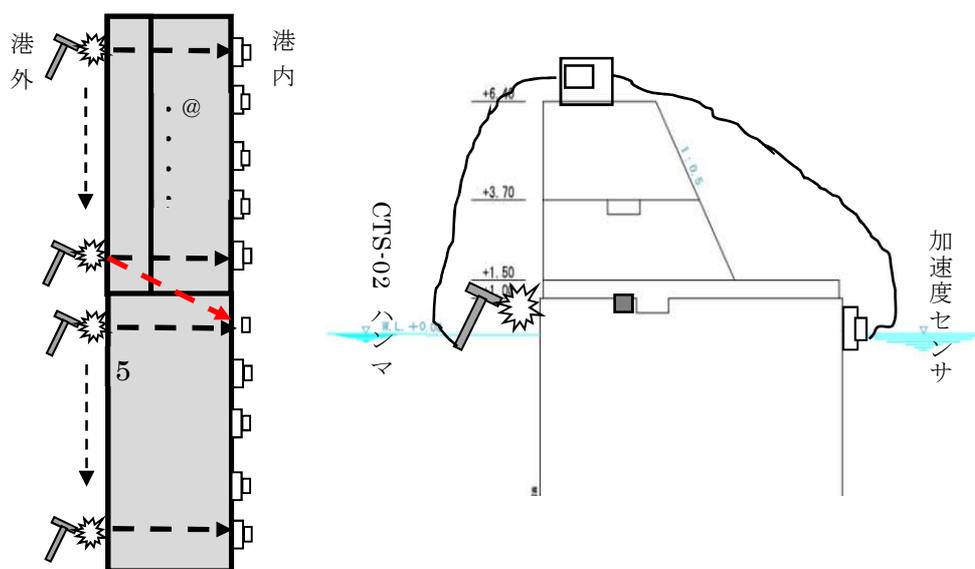


図 d-3-2-10 透過法測定イメージ (堤体本体) (左: 平面図、右: 断面図)

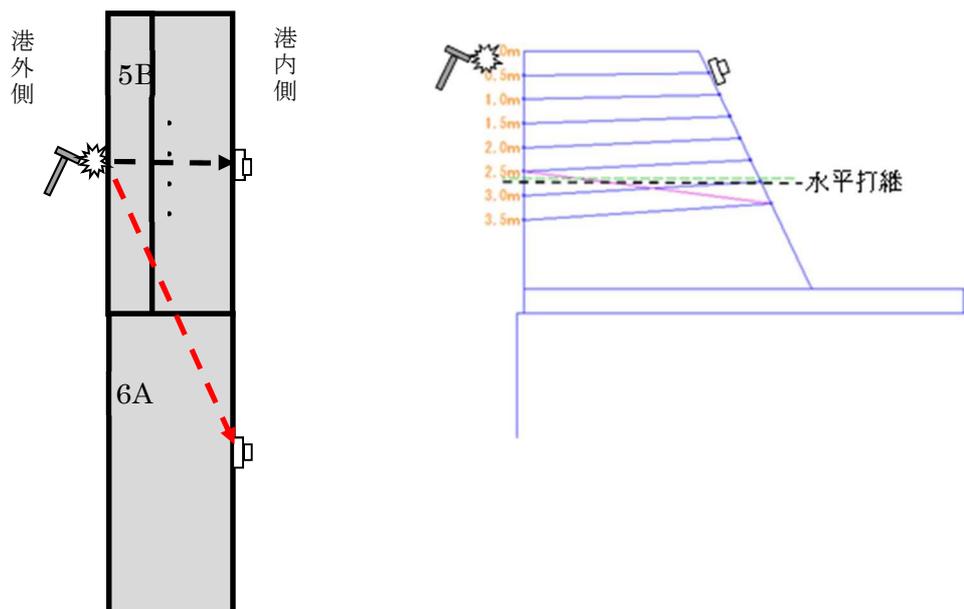


図 d-3-2-11 透過法測定イメージ (上部工) (左: 平面図、右: 断面図)



図 d-3-2-12 計測状況

### 3-3 数値計算

実際の構造物や供試体に対する試験と並行して数値解析を実施すれば、パラメータを種々に設定してその応答を比較したり、構造物・供試体の任意位置の応答を把握したりできるメリットがある。

そこで、解析と実現象の整合性を確認するために、平成 27 年度の本調査で実施された室内実験の供試体をモデル化し、コンクリートの振動を再現する有限要素解析を実施して、その結果を室内試験の結果と照合した。

#### (1) 方法と基本設定

平成 27 年度の本調査の有限要素解析と同様に、ソフトウェア「ANSYS」を使用した。ANSYS は構造解析、流体解析、熱伝導解析などが可能な汎用的なソフトウェアであるが、今回は構造解析機能（“ANSYS Mechanical APDL”）を使用した。

解析では室内実験のコンクリート塊およびその下の床材を有限要素で再現し、時系列解析を行った。基本的な設定は、下記の通りとした。

- ◆ 3次元モデル
- ◆ 解析タイプ：時刻歴応答解析
- ◆ 材料モデル：線形弾性モデル（コンクリート塊を均質な塊としてモデル化し、ヤング率、ポアソン比、密度を入力。床材についてもヤング率、ポアソン比、密度を設定してモデル化。）

床面とコンクリートの上に「ばね要素」を挿入し、27 年度の室内実験で実際に使用したばねのばね定数と本数を再現した。

#### (2) 解析条件

##### ①材料の定数

表 d-3-3-1 のように設定した。コンクリートの密度は H27 の室内実験時の値とし、ヤング率とポアソン比は 27 年度の有限要素解析と同じ値（既往文献<sup>173)</sup>を参考）とした。また床材については、便宜的にいずれもコンクリートと同じ値とした。

表 d-3-3-1 材料の定数

	コンクリート	床材
ヤング率 [N / m <sup>2</sup> ]	2.94 × 10 <sup>10</sup>	2.94 × 10 <sup>10</sup>
ポアソン比	0.17	0.17
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	2400	2400

また、減衰については、後述の時系列解析の設定の中で、レーリー減衰の剛性比例係数  $\beta$  を 0.0005 に設定した。これは 27 年度の有限要素解析と同じ値とした。（コンクリート系の建物で減衰定数  $h$  が 0.02 から 0.04 くらいであるという情報と、H27 の解析試行時にコンクリートに発生した振動が約 20Hz であったことをもとに、 $h=0.03$  と 20Hz に対応する  $\beta$  を設定したもの）

##### ②ばね要素

コンクリートと床材の境界にばね要素を設定した。

27 年度の室内実験時の値に合わせ、ばねの方向は垂直方向とし、一つのばねのばね定数は 198,610 [N / m] とした。

ばねの位置は、図 d-3-3-1 に示す 3 ケース設定した。表 d-3-3-2 に、この 3 ケースに対応する固有振動数を示す。計算式から求まる値と 27 年度室内実験の結果を併載している。

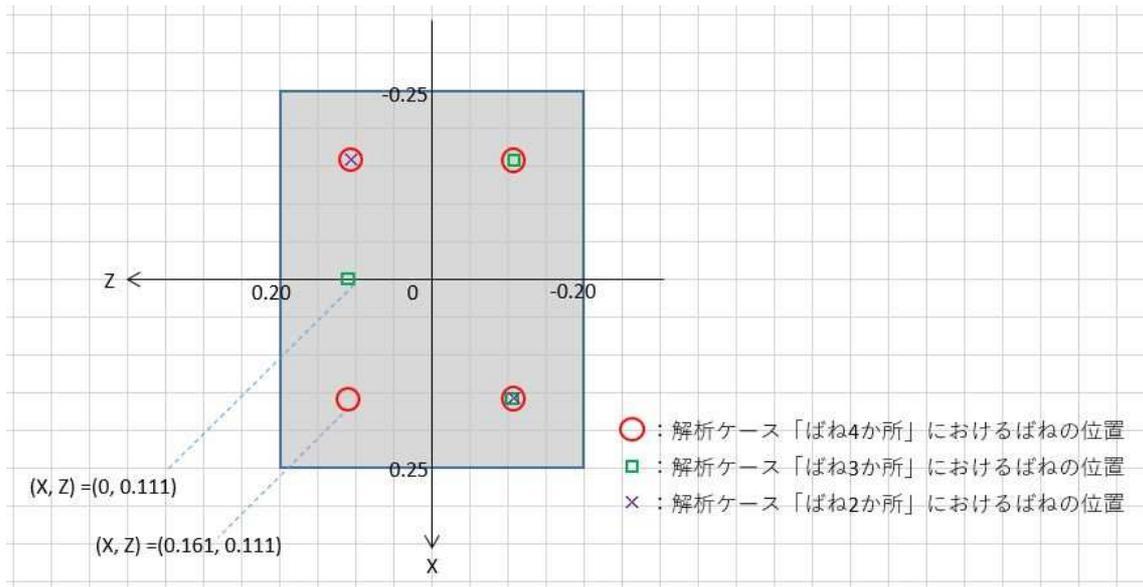


図 d-3-3-1 ばねの位置（コンクリート塊の底面の平面座標上へ図示）

表 d-3-3-2 全体の固有振動数

解析ケース	計算式※から求まる ばね並列時の固有振動数	27 年度の室内実験結果における 固有振動数
ばね 4 か所	8.36	9.00
ばね 2 か所	7.24	7.70
ばね 2 か所	5.91	6.30

※  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$  ,  $M=288\text{kg}$

### ③重力加速度の設定

重力加速度として、モデル全体について鉛直方向に  $9.807[\text{m}/\text{s}^2]$  を設定した。

### ④作成したモデル

図 d-3-3-2～d-3-3-4 に、モデル全体図、横断面図および縦断面図を示す。床材の厚さは  $1.0\text{m}$  としたがこれは便宜的に設定した値である。

また、床材の底面の X, Y, Z 方向の自由度を拘束（変位量=0）した。



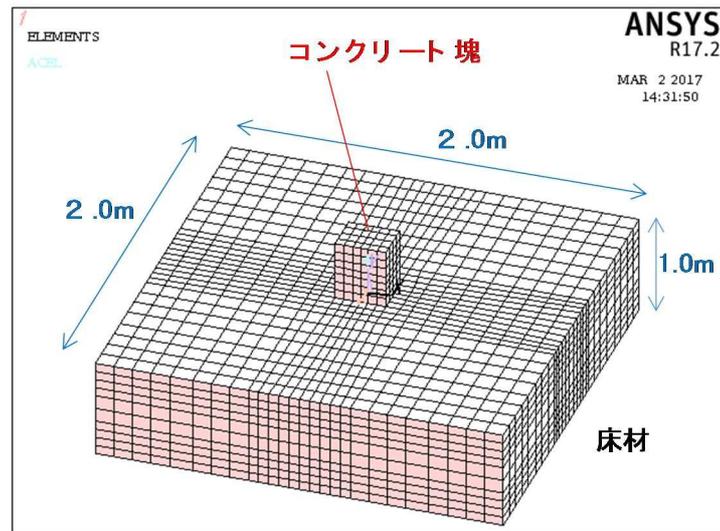


図 d-3-3-2 モデル全体図

(ANSYS の表示画面に寸法を追記。コンクリート塊付近の薄い矢印は座標軸の表示。)

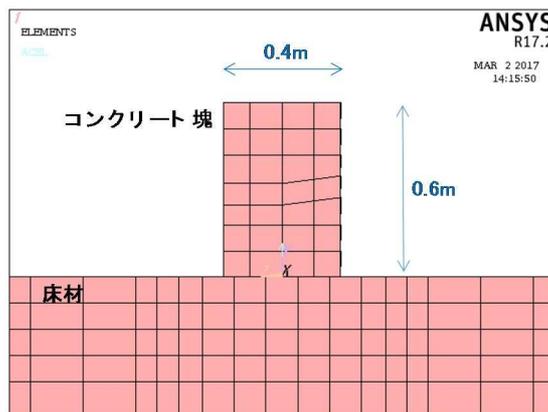


図 d-3-3-3 横断面図

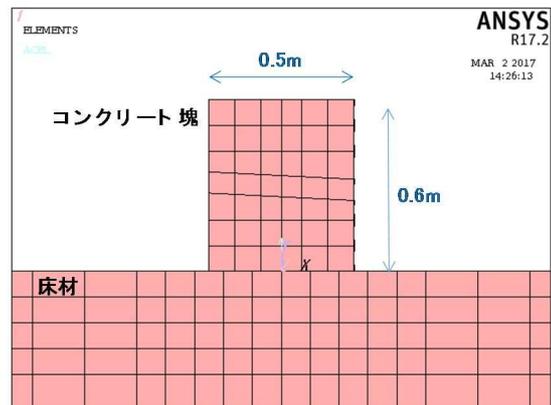


図 d-3-3-4 縦断面図

### ⑤時刻歴応答解析

27年度の室内実験では、発振源が特になく自然発生した振動と、発振源としてコンプレッサーを近くに置いた場合の振動が計測された。しかし解析では前者を再現できない。また後者はコンプレッサーの振動特性が不明である。

そのため今回の解析では床材の上面の一か所の節点が打撃による時刻歴荷重を受けるものとし、打撃後のコンクリート塊の挙動を再現する解析を実施した。

打撃を与える節点は、図 d-3-3-5 に示す「打撃点」とした。

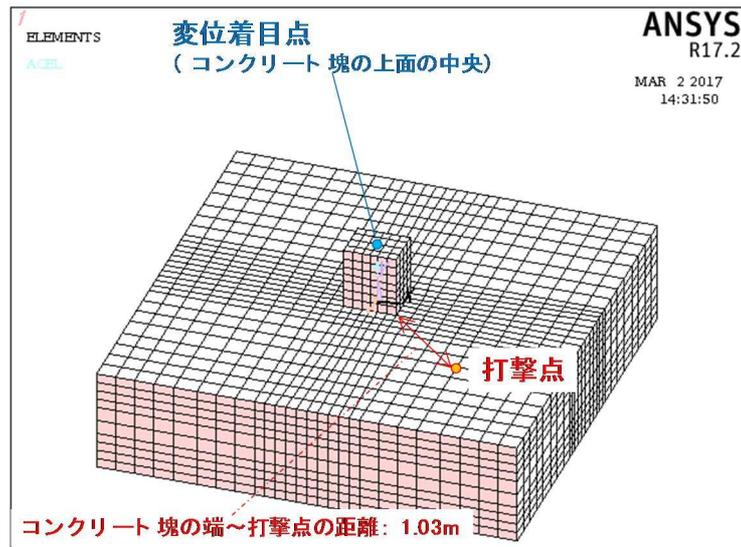


図 d-3-3-5 打撃点と変位着目点

荷重の時系列は図 d-3-3-6 の通りとした。これは 27 年度の有限要素解析と同じとした。(20kg の鋼球を高さ 20cm からコンクリートへ落下させたときの、落下から衝突を経て跳ね返りまでを記録したビデオをもとに、コンクリートと鋼球が接触している時間を 0.01 秒と推定し、運動量と力積の関係式により、5,700N の下向きの力が 0.01 秒作用したと設定したものの。)

解析対象の時間は 1 秒とした。

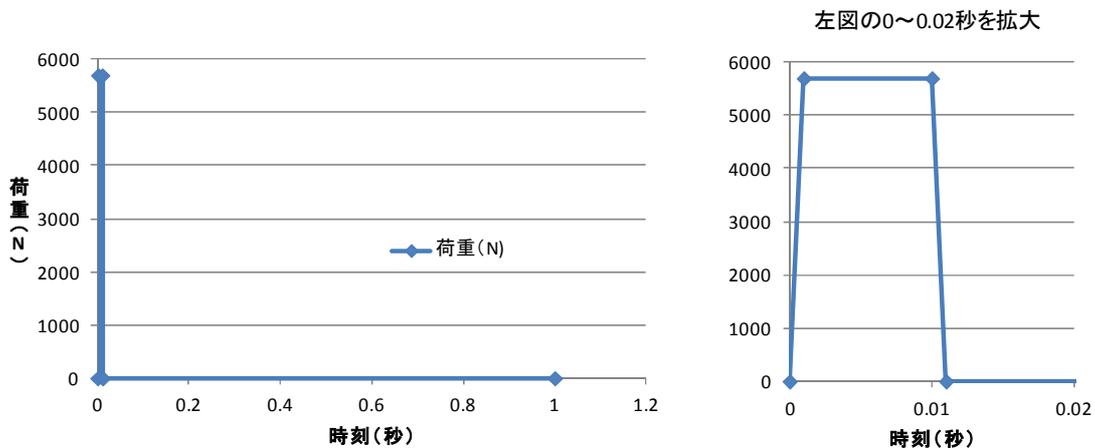


図 d-3-3-6 荷重の時系列

<備考>

ANSYS の操作については、27 年度、農林水産技術会議がソフトウェア取扱会社と締結しているサポート契約を活用し、取扱会社の技術職員の助言を受けて操作手順を確認した。28 年度もその手順に沿って作業を進めた。

【参考文献】

- 1) (財) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成 19 年改訂版 上巻）第 1 編 共通，p.5-16，2007 年。
- 2) 1 次元 FLIP 入力データ作成プログラム 1D-MAKER (20140131 版) Ver. 1.3 操作マニュアル（国土交通省港湾施設研究室ホームページで公開），p. 21。
- 3) FLIP 研究会 14 年間の検討成果 事例編（一般社団法人 FLIP コンソーシアムホームページで公開），p. 3-1-7。

### 3-4 暴露試験

#### (1) 暴露試験

漁港施設におけるコンクリートの老朽化現象について経年的な変化を把握するため、様々な暴露条件を設定するとともに、老朽化を促進させるための暴露条件も加えて試験を実施している。老朽化促進試験は、平成 25 年 10 月に供試体を製作し、これらの供試体を水産工学研究所の室内や港湾空港技術研究所の屋外等で暴露している。

本試験は、老朽化を促進させるため、海水に含まれる硫酸マグネシウム濃度を上げた溶液や海水を用いて暴露している。今年度の計測は、31 ヶ月後および 38 ヶ月後となる時期に計測した。

- ① 水産工学研究所の供試体：5 月 26 日気中暴露後計測（31 ヶ月後）、12 月 6 日湿潤状態計測（38 ヶ月後）。初期値は湿潤状態で計測し、その後の 28 ヶ月後までは全て湿潤状態で計測している。
- ② 港湾空港技術研究所の供試体：5 月 27 日計測（31 ヶ月後）、12 月 5 日計測（38 ヶ月後）

なお、港湾空港技術研究所の供試体は、一時中断していた実験を再開するため、作製後 31 ヶ月経た供試体を計測し、後述する暴露条件に設置した。これらと比較するため、水産工学研究所の供試体も乾燥状態（2 週間気中暴露）として計測した。

本試験に用いた供試体は、以下のとおり、水セメント比が 65、50% の 2 種類である。

表 d-3-4-1 供試体使用材料

	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: 3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	厚木市飯山産砕砂	S1	密度: 2.57g/cm <sup>3</sup>
	富津市湊産山砂	S2	密度: 2.56g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	大船渡市日頃市町産石灰碎石2005	G1	密度: 2.69g/cm <sup>3</sup> 最大寸法: 20mm
	厚木市飯山産碎石2005	G2	密度: 2.69g/cm <sup>3</sup> 最大寸法: 20mm
混和材料	高性能AE減水剤	SP	シーカメントJSR

表 d-3-4-2 供試体配合条件

W/C (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤(kg/m <sup>3</sup> )	s/a	スランプ (cm)	air(%)	混和剤(C×%)
		W	C	S1	S2	G1	G2	SP				SP
50	20	174	348	537	230	500	487	4.180	44.6	12.0	4.5	0.012
65		175	270	596	256	490	474	3.240	47.8	12.0	4.5	0.012

① 水産工学研究所の暴露条件

老朽化促進試験の暴露条件は、表 d-3-4-3 のとおり、1)海水中、2)硫酸マグネシウム 10%、3)硫酸マグネシウム 20.4%（飽和）、4)硫酸マグネシウム 20.4%（飽和）（6 時間ごとに気中への引き上げ（引き上げ時は送風乾燥）と溶液への浸漬を繰り返す）とした。なお、これらの条件の設定温度は、20℃とした。

表 d-3-4-3 老朽化促進試験（水産工学研究所）の条件や項目

供試体	100×100×400mm角柱供試体
	水セメント比：65%、50%（2種類）
暴露条件	0) 気中
暴露条件 （温度は いずれも 20℃）	1) 海水中
	2) 硫酸マグネシウム 10%
	3) 硫酸マグネシウム 20.4%（飽和）
	4) 硫酸マグネシウム 20.4%（飽和）（6 時間ごとに気中への引き上げ（引き上げ時は送風乾燥）と溶液への浸漬を繰り返す）
計測項目	概観目視観測
	長さ
	重量
	動弾性係数
	表面 P 波速度
	機械インピーダンス法（CTS）による平均推定圧縮強度



図 d-3-4-1 1) 海水中



図 d-3-4-2 2) 硫酸マグネシウム 10%

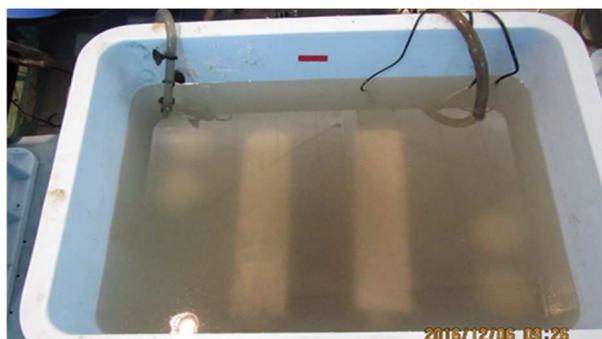


図 d-3-4-3 3) 飽和硫酸マグネシウム



図 d-3-4-4 4) 飽和硫酸マグネシウム  
（乾湿繰返し）

## ② 港湾空港技術研究所の暴露条件

暴露試験の条件は、表 d-3-4-4 のとおり、1) 気中、2) 飛沫帯、3) 海水中、4) 干満帯とした。1) の条件は、神奈川県久里浜湾に面する港湾空港技術研究所の海辺側に設置した。2) の条件は、同研究所の海洋環境の飛沫帯を模した暴露試験場で 1 日 2 回、それぞれ約 3 時間、自然海水が散布される施設に設置した。3) と 4) の条件は、同研究所にある海水循環水槽の海水中、および干満帯に設置した(海水循環水槽は、自然海水を貯留させ、2 回/日の頻度で強制的に水面変動させることで干満帯と類似した条件となる施設である)。なお、供試体は、前ページの水産工学研究所の老朽化促進試験と同材料同配合、かつ同時期に製作した。平成 25 年 10 月に設置後、海水循環水槽工事の関係で 3) 海水中と 4) 干満帯は、平成 26 年 5 月から気中に取り上げ、水工研の実験棟内で保管した。1) 気中と 2) 飛沫帯は、平成 26 年 5 月からそのまま屋外での保管とした。1)～4) は、平成 28 年 5 月 26 日に乾燥状態で計測し、翌 5 月 27 日に再設置した。

表 d-3-4-4 老朽化促進試験（港湾空港技術研究所）の条件や項目

供試体	100×100×400mm 角柱供試体
	水セメント比：65%、50%（2 種類）
暴露条件	1) 気中
	2) 飛沫帯
	3) 海水中
	4) 干満帯
計測項目	概観目視観測
	長さ
	重量
	動弾性係数
	表面 P 波速度
	機械インピーダンス法（CTS）による平均推定圧縮強度



図 d-3-4-5 1) 気中



図 d-3-4-6 2) 飛沫帯



図 d-3-4-7 3) 海水中



図 d-3-4-8 4) 干満帯

### ③ 計測方法

- a) 供試体長さ：デジタル式長さ変化測定器【MIC-184-1-01】で計測した（JIS A 1129 ダイヤルゲージ法に準拠）。
- b) 供試体重量：デジタル台はかり【A&D FG-150KAM】で計測した。
- c) 共鳴振動数：動弾性係数測定機器（テスコ株式会社製の測定装置（KH-1880））によって、共鳴振動数を計測した（JIS A 1127 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法に準拠，図 d-3-4-10 参照）。
- d) 平均表面 P 波速度

衝撃弾性波法のうち「表面 P 波法（ITECS-6V2）」は、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ーにより、その弾性波を受信する手法である。測定箇所はセンサー間隔 30cm とし、両側から 5cm 空けての計測とした（図 d-3-4-11 参照）。各測定 5 回ずつ行いその平均を算出した

(<http://nrife.fra.affrc.go.jp/seika/hyoumenPhahou201604/201604hyoumenPhahoukanisindanmanyuaru.pdf>)。

- e) CTS による推定平均圧縮強度

機械インピーダンス法（CTS-02 Ver.2）により測定した。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。測定は、コンクリート側面に 12 箇所の測定ポイントを均等に設け（5cm 間隔、上下 2 段）、各点の機械インピーダンス値を計測したのち、これらの平均値から圧縮強度を推定した（<http://nrife.fra.affrc.go.jp/seika/kikaiinpi-tansuhoumanyuaru201604/201604kikaiinpi-tansuhoumanyuaru.pdf>）。



図 d-3-4-9 計測状況



図 d-3-4-10 動弾性係数測定機器



図 d-3-4-11 表面 p 波法測定器

## (2) 蛍光X線分析

コンクリートの劣化に関わる要因として、海水中に含まれる硫酸イオンとセメント中の水和物との反応によって生成する針状の結晶(エトリンガイトと呼ばれる)が引き起こす膨張破壊やセメント水和物中の主成分である水酸化カルシウムの溶出による空隙の増加等が主要因とされている。前者の硫酸塩劣化は、マグネシウムイオン、硫酸イオンが水酸化カルシウムと反応すること引き起こされるとされる<sup>1)</sup>。

これまでの老朽化促進試験の結果によると、暴露条件として、硫酸マグネシウム濃度が高いほど、コンクリート表面の劣化が見られ、重量の減少等が確認される傾向があった。

既存の報告によると、海水中に侵漬されたコンクリートの硫酸イオン濃度等を調べ、これらの濃度が最大となる表面からの深さとマグネシウムイオンが浸透した深さに相関が見られたことが報告されている。また、マグネシウムイオンが浸透した範囲では、水酸化カルシウム濃度が減少していることも確認されている<sup>1)</sup>。

以上より、これまで暴露した供試体は、マグネシウム、硫黄、カルシウム等の含有量が表面および深さ方向に異なることが想定され、老朽化が進んだ供試体ほど、マグネシウム、硫黄の含有量が多く、カルシウムの含有量が少なくなっていると考えられる。そこで、これらの供試体のマグネシウム、硫黄、カルシウム含有量を軽元素対応高性能ポータブル型蛍光X線装置(OURSTEX101FA)で測定し、供試体への浸透、および老朽化の影響を把握した<sup>2)</sup>。

供試体への浸透の評価は、供試体の深さ方向における各元素の含有量を評価する必要があり、定量的なEPMAといった測定法がある。しかし、本老朽化促進試験では、分析後も供試体を継続的に使用するため、供試体を割裂できない。ここでは、分析後も供試体を継続して老朽化促進試験を実施するため、表面の含有量を測定することで浸透度合いを評価することとした。

### ① 供試体

水産工学研究所で暴露試験を行っている10種類の供試体(前述の暴露条件0)~4)、W/C=50,65%の2種類)とした。

### ② 試験方法

試験は、供試体が含有するMg、S、Ca元素に着目して、ポータブル型蛍光X線装置(図d-3-4-12参照)を用いて分析した(図d-3-4-13参照)。測定位置は、供試体の各面中央部で測定するものとし、1試験体あたり4箇所測定した。各試験体は、乾燥状態でごみ等をふき取った状態で測定し、表面の研磨は実施しなかった。



図 d-3-4-12 蛍光X線装置

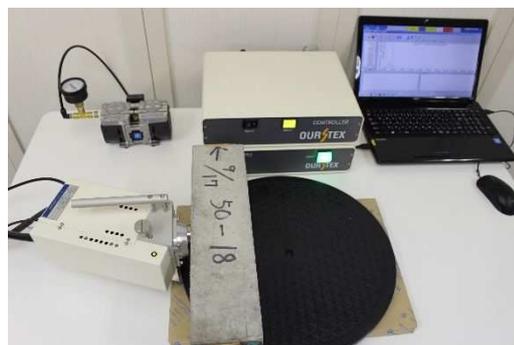


図 d-3-4-13 蛍光X線測定状況

e. 結果

1. 水産基盤施設の老朽化の現状把握と中長期的なコスト分析

1-1 漁港ストック量の把握

(1) 主要施設のストック量

漁港ストック量は、外郭施設、係留施設、輸送施設、および漁港施設用地等ごとに区分して、施設数と延長または面積を示した。

【主要施設の区分】

外郭施設：水門・閘門を除く防波堤、防砂堤等

係留施設：係船浮標・くいを除く岸壁、物揚場、船揚場等

輸送施設：道路

漁港施設用地等：人工地盤

注) 施設数、延長、および面積は、建設年不明の施設も集計している。

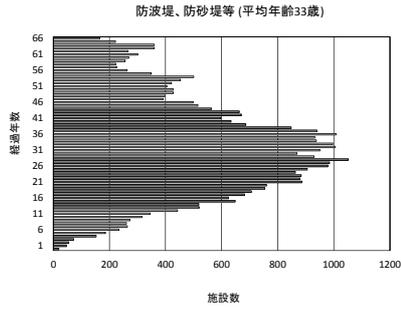
平成 28 年 3 月末における漁港の主要施設ストック量（岩手県、宮城県、福島県を除く）は、表 e-1-1-1 のとおりである。

表 e-1-1-1 主要施設のストック量（平成 28 年 3 月末日段階）

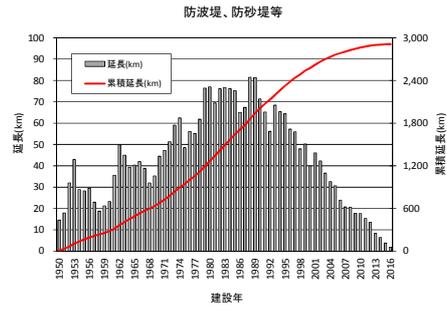
施設名	種類	施設数			延長または面積 (kmまたはha) ※建設年不明施設を含む
		全施設数 A	うち、建設年 不明施設数 B	建設年 不明率(%) B/A	
外郭施設	防波堤、防砂堤 (水門・閘門を除く)	39,293	3,325	8.5%	3,178
係留施設	岩壁、物揚場等 (係船浮標・くいを除く)	19,942	1,323	6.6%	1,414
輸送施設	道路	5,101	555	10.9%	1,803
漁港施設用地等	人工地盤	5,011	70	1.4%	78

主要施設ごとの経過年数別施設数、および建設年別延長は、図 e-1-1-1 に示すとおりである。なお本集計において、経過年数は 2016 年を基準として建設年から算出しており、次頁に示すグラフにおいて、建設年や建設価格が不明なものは除外している。



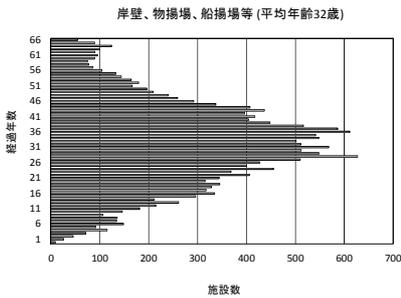


施設数

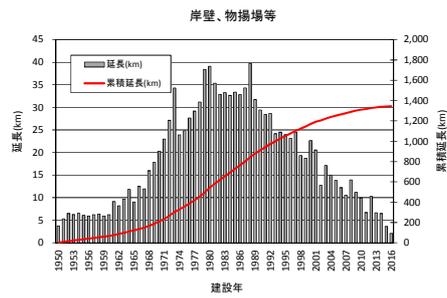


延長

外郭施設（防波堤、防砂堤等）

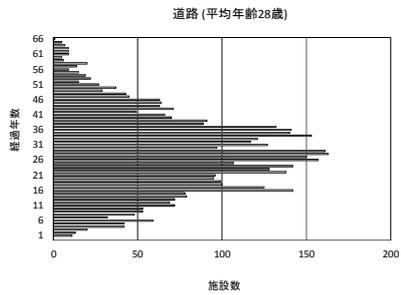


施設数

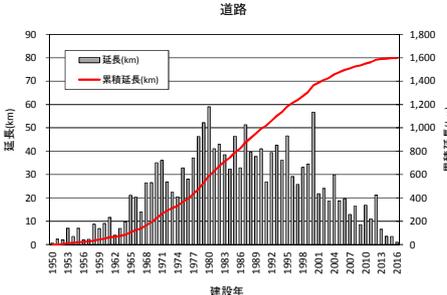


延長

係留施設（岸壁、物揚場、船揚場等）

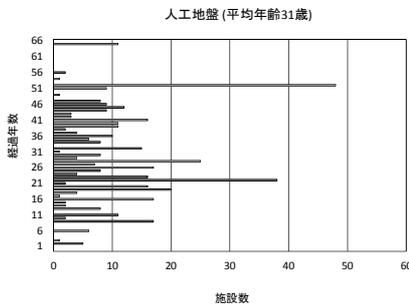


施設数

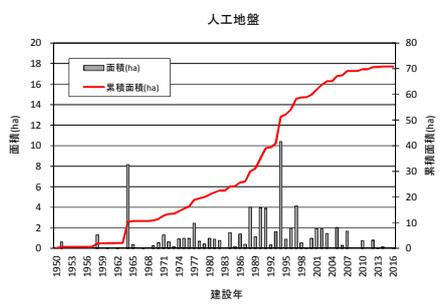


延長

輸送施設（道路）



施設数



面積

漁港施設用地等（人工地盤）

図 e-1-1-1 建設年度別の主要施設のストック量

## (2) 全体ストック量

全体ストック量は、主要施設のストック量同様、外郭施設、係留施設、輸送施設、および漁港施設用地等ごとに区分して、施設数、延長、基数、区画数、延べ面積、および建設価格を示した。

### 【主要施設の区分】

外郭施設：全ての構造形式

係留施設：全ての構造形式

輸送施設：道路、橋梁

漁港施設用地等：人工地盤

注) 建設年不明の施設は、除外している。

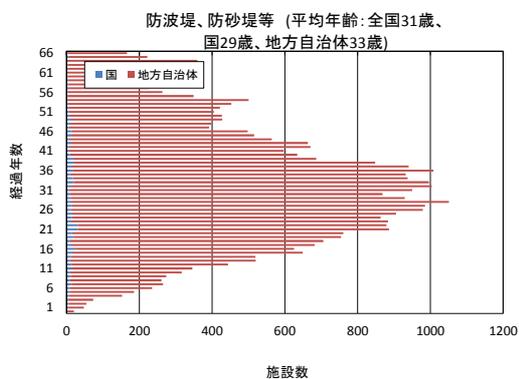
平成28年3月末における漁港の全体ストック量（岩手県、宮城県、福島県を除く）は、表 e-1-1-2 のとおりである。なお、それぞれ1950年以降に建設された施設を対象としている。

表 e-1-1-2 施設別に見た全体のストック量

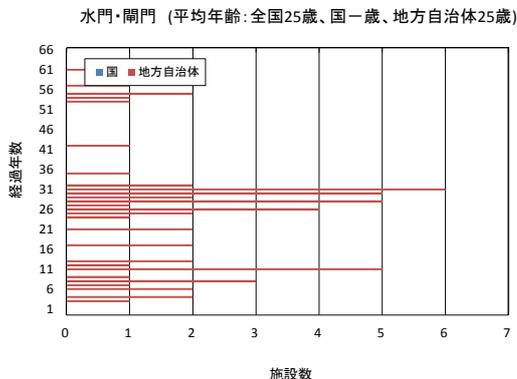
施設名	種類	施設数			延長 (km)	基数	区画数	延べ面積 (ha)	建設または 取得価格 (百万円)
		全施設数 A	うち、建設年 不明施設数 B	建設年 不明率(%) B/A*100					
漁港施設	外郭施設	防波堤、防砂堤 (水門・閘門を除く)	39,293	3,325	8	2,911	-	-	7,857,701
		水門・閘門	67	9	-	-	972	-	24,918
		合計	39,360	3,334	8	2,911	972	-	7,882,619
	係留施設	岩壁、物揚場等 (係船浮標・くいを除く)	19,942	1,323	7	1,345	-	-	1,874,845
		係船浮標・くい	50	14	-	-	154	-	2,543
		合計	19,992	1,337	7	1,345	154	-	1,877,388
	輸送施設	道路	5,101	555	11	1,559	-	-	457,997
		橋梁	472	65	14	-	452	-	120,213
		合計	5,573	620	11	1,559	452	-	578,209
	漁港施設 用地等	人工地盤	513	70	14	-	-	71	8,121
		合計	513	70	14	1,599	-	71	8,121
	上記施設の合計		65,438	5,361	8	7,414	1,578	71	10,346,337

① 経過年別にみた施設別の施設数（国と地方自治体別）

経過年別の施設別の施設数は、図 e-1-1-2(1)～(4)に示すとおりである。なお、グラフでは建設年不明の施設は除外している。

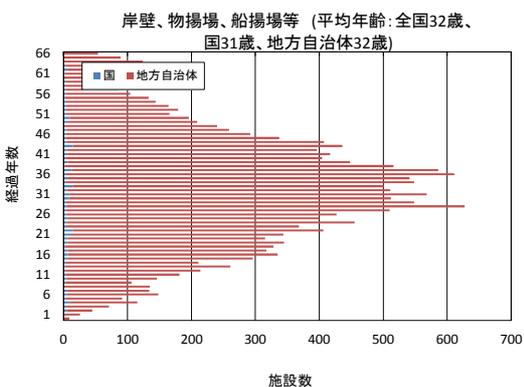


防波堤、防砂堤等

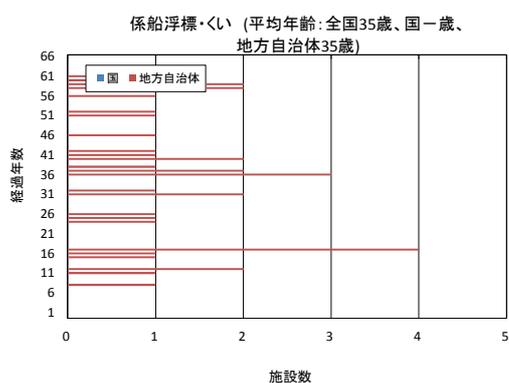


水門・閘門

図 e-1-1-2 (1) 外郭施設

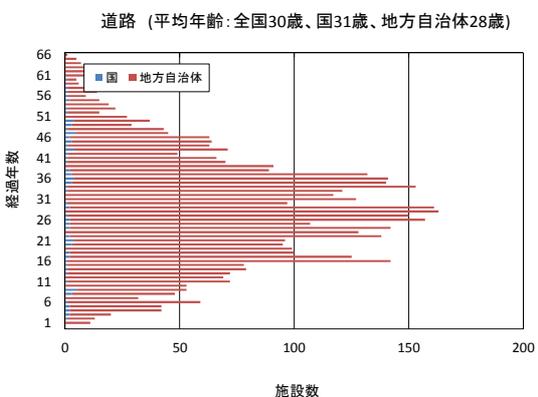


岸壁、物揚場、船揚場等

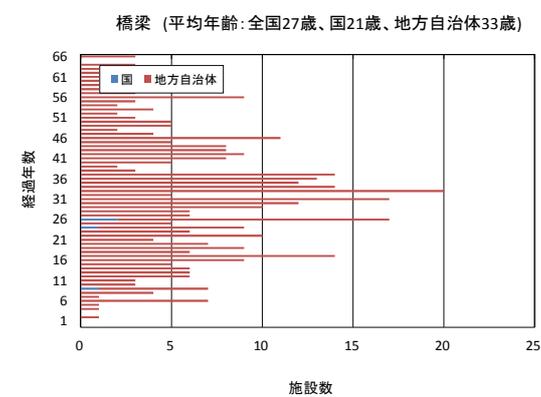


係船浮標・くい

図 e-1-1-2 (2) 係留施設



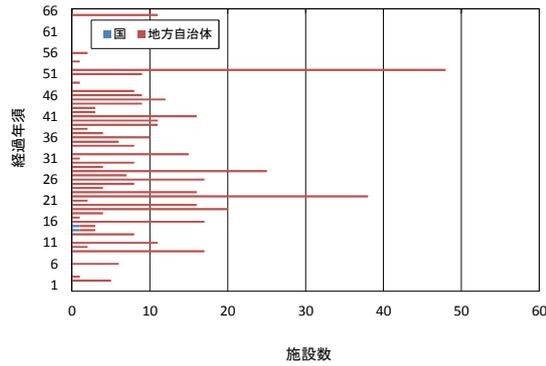
道路



橋梁

図 e-1-1-2 (3) 輸送施設

人工地盤 (平均年齢: 全国23歳、国15歳、地方自治体31歳)

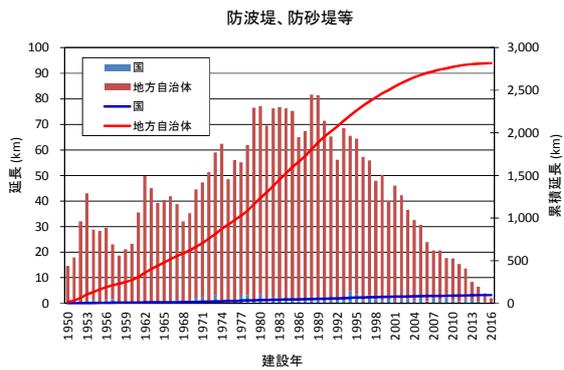


2) 人工地盤

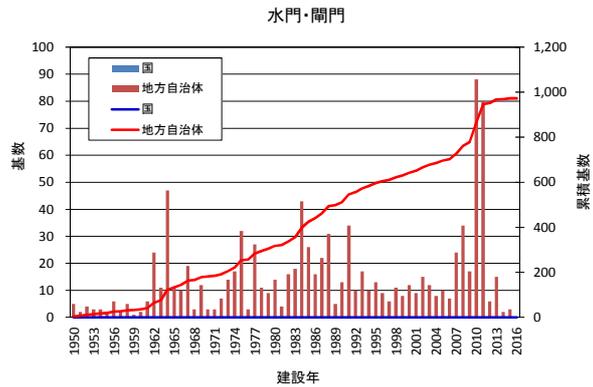
図 e-1-1-2 (4) 漁港施設用地等

② 建設年別の延長、基数、面積

建設年別の延長、基数、面積の推移は、図 e-1-1-3(1)～(4)に示すとおりである。グラフでは建設年不明の施設は除外している。

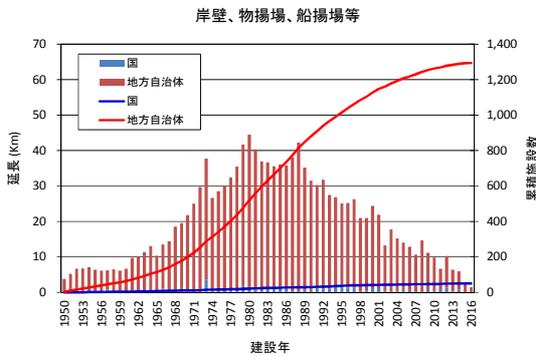


防波堤、防砂堤等

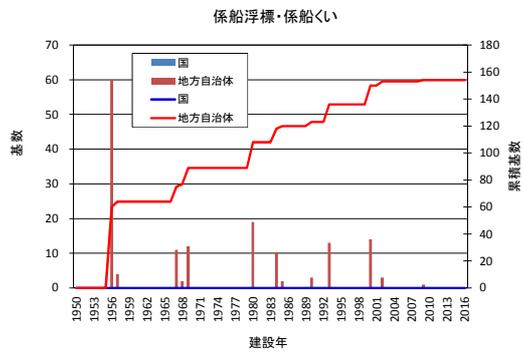


水門・閘門

図 e-1-1-3 (1) 外郭施設の延長、基数の推移

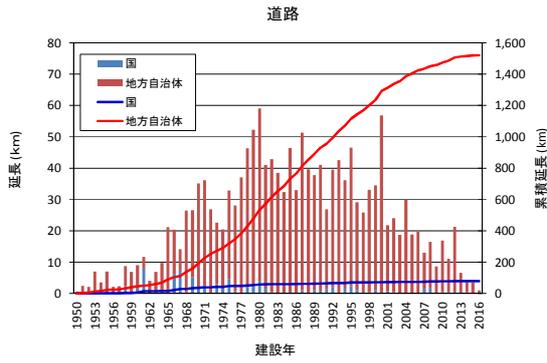


岸壁、物揚場、船揚場等

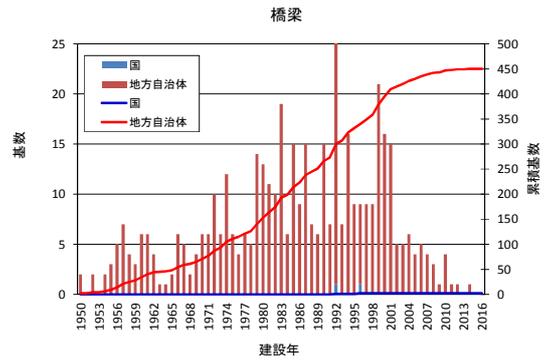


係船浮標・くい

図 e-1-1-3 (2) 係留施設の延長、基数の推移

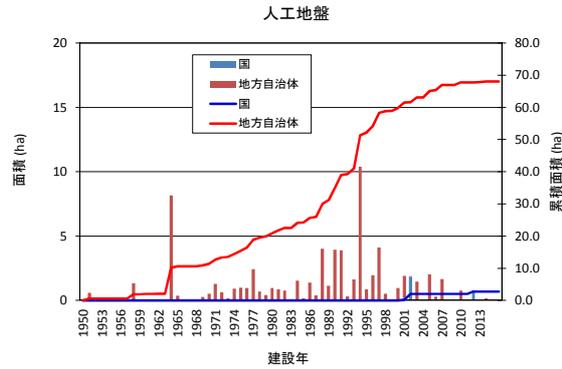


道路



橋梁

図 e-1-1-3 (3) 輸送施設の延長、基数の推移

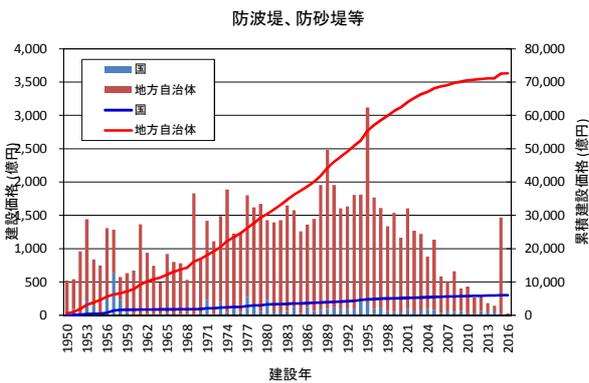


人工地盤

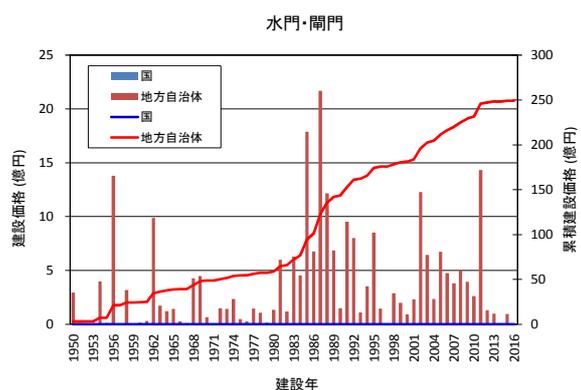
図 e-1-1-3 (4) 漁港施設用地等の面積の推移

③ 建設価格、または取得価格

建設年別の建設価格、または取得価格は、図 e-1-1-4(1)～(4)に示すとおりである。グラフでは建設年不明の施設は除外している。

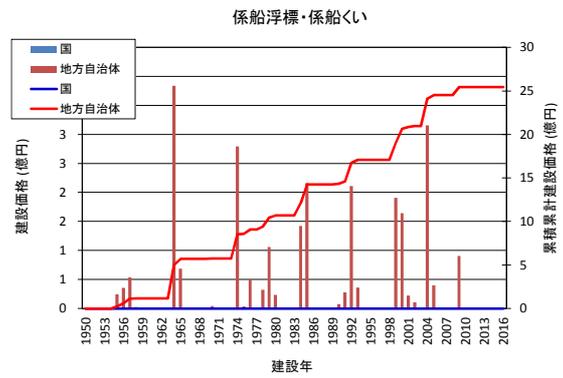
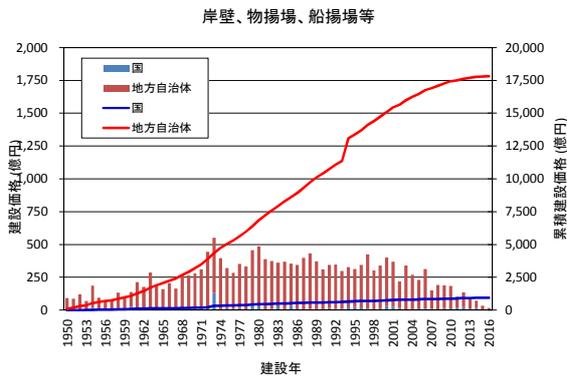


防波堤、防砂堤等



水門・閘門

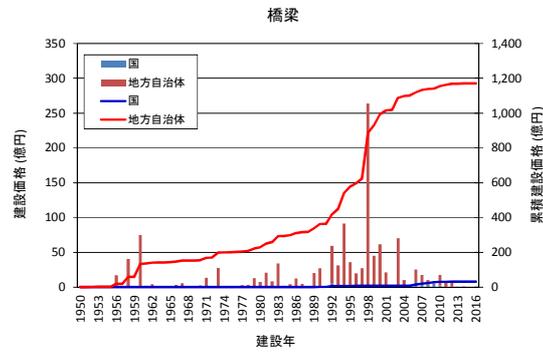
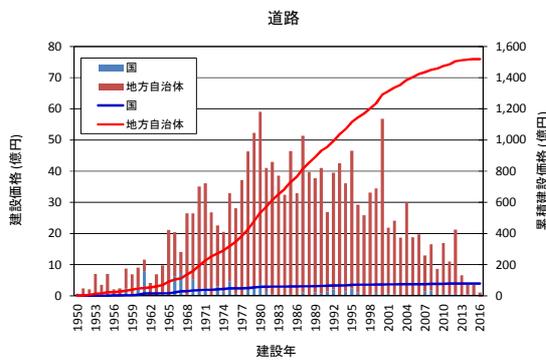
図 e-1-1-4 (1) 外郭施設の建設価格、または取得価格の推移



岸壁、物揚場等

係船浮標・係船くい

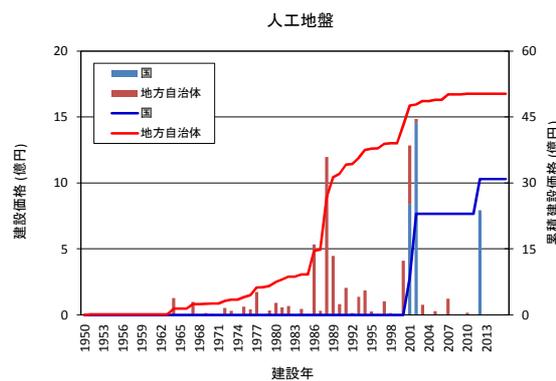
図 e-1-1-4 (2) 係留施設の建設価格、または取得価格の推移



道路

橋梁

図 e-1-1-4 (3) 輸送施設の建設価格、または取得価格の推移



人工地盤

図 e-1-1-4 (4) 漁港施設用地等の建設価格、または取得価格の推移

## 1-2 今後必要な更新費の分析

### (1) 今後の更新を迎える施設の推移

#### 1) 建設後50年以上経過する施設

建設後50年以上経過する施設について、主要なものを抽出し、推移を整理したものは、表 e-1-2-1 のとおりである。表 e-1-2-1 は、「現在（平成28年3月末日段階）」、「10年後（平成38年3月末日段階）」、「20年後（平成48年3月末日段階）」における各施設の推移を示している。

#### 【主要施設の区分】

外郭施設：水門・閘門を除く構造形式の施設

係留施設：係船浮標・くいを除く構造形式の施設

輸送施設：道路

漁港施設用地等：人工地盤

注) 建設年不明の施設は、除外している。

表 e-1-2-1 建設後50年以上経過する主要施設の推移

施設名	種類	平成28年3月(%)	平成38年3月(%)	平成48年3月(%)
外郭施設	防波堤、防砂堤等	15.2	30.0	55.4
係留施設	岩壁、物揚場、船揚場等	10.5	28.7	57.5
輸送施設	道路	4.9	17.0	43.8
漁港施設用地等	人工地盤	16.1	32.4	47.2

それぞれの施設における更新年別の施設数は、図 e-1-2-1 に示すとおりである。

#### 【更新年別の施設数、延長、更新費の区分】

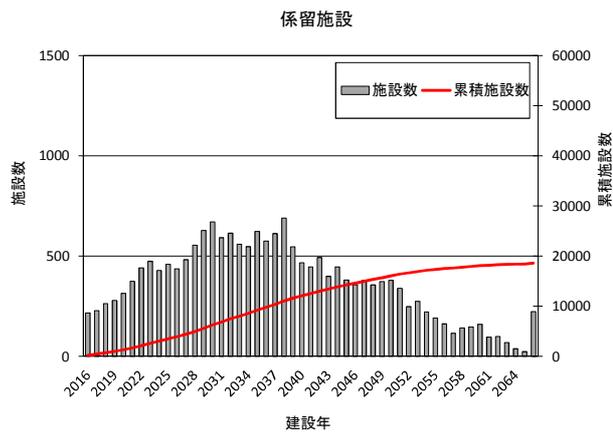
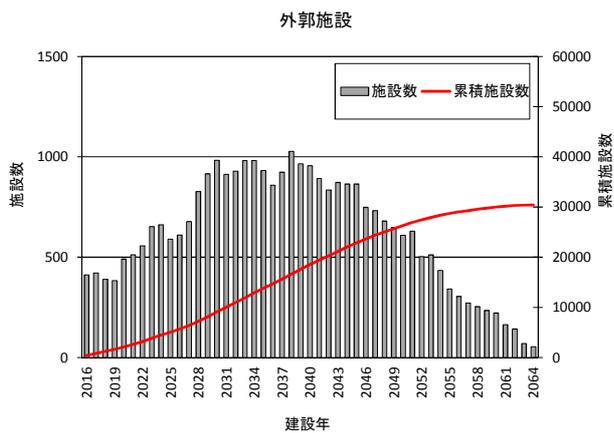
外郭施設：水門・閘門を除く構造形式の施設

係留施設：係船浮標・くいを除く構造形式の施設

輸送施設：道路

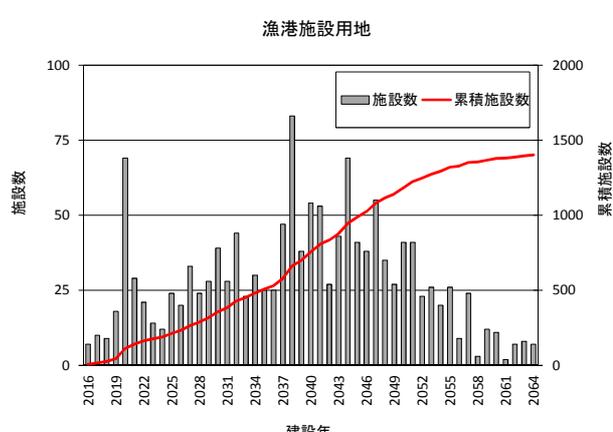
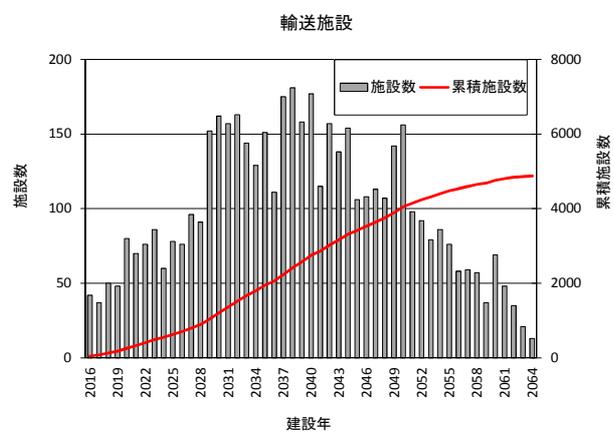
漁港施設用地等：人工地盤

注) 建設年不明の施設は、除外している。



外郭施設（防波堤，防砂堤等）

係留施設（岸壁、物揚場、船揚場等）



輸送施設（道路）

漁港施設用地等（人工地盤）

図 e-1-2-1 建設後 50 年以上経過する主要施設の推移



2) 財務省令で定める耐用年数を経過する施設

ここでは、各漁港施設が「減価償却資産の耐用年数等に関する省令（最終改正：平成28年3月31日財務省令第27号）（以下、「財務省令」という）」で定める耐用年数に準拠して、耐用年数を経過すると仮定した。なお、鉄筋コンクリート、無筋コンクリート、鋼材、アスファルトといった材料に着目し、表 e-1-2-2 のとおり、構造形式ごとに耐用年数を設定した。

表 e-1-2-2 施設耐用年数（財務省法定耐用年数に準じる）

施設	施設種類	構造形式		本体工の構造等に着目した分類	耐用年数の設定(年)
(漁港施設) 外郭施設、 輸送施設、 漁港施設用地、 水域施設  (漁場施設) 増殖場、 養殖場、 着底基質、 海水交流施設	(外郭施設) 防波堤、 防砂堤、 防潮堤、 導流堤、 防波護岸、 堤防、 突堤、 胸壁	直立堤	消波工付き	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)	30
				鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケソン式、L型ブロック式)	50
			鋼構造(鋼製函式)	25	
			消波工なし	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)	30
				鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケソン式、L型ブロック式)	50
		傾斜堤(潜堤)	透過式	無筋コンクリート構造(捨ブロック[全断面]式)	30
				石積造(捨石[全断面]式)	50
			不透過式	無筋コンクリート構造(捨ブロック[中詰]式)	30
				石積造(捨石[中詰]式)	50
			混成堤	消波工付き	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)
	鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケソン式、L型ブロック式)	50			
	鋼構造(鋼製函式)	25			
	消波工なし	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)		30	
		鉄筋コンクリート構造(セルラーブロック式、ケソン式、L型ブロック式)		50	
	鋼構造(鋼製函式)	25			
	その他	矢板式	鋼構造	25	
			杭式・カーテン式	鋼構造	25
		浮体式	鋼構造	25	
			鉄筋コンクリート構造	50	
	プレストレストコンクリート構造	50			
その他	複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設			25	
水門	—			25	
閘門	—			25	
係留施設	岸壁、 物揚げ場、 棧橋、 浮棧橋、 取付護岸	重力式	直立消波式	無筋コンクリート構造	30
			その他	無筋コンクリート構造(コンクリート単塊式、ブロック積式)	30
		鉄筋コンクリート構造(セルラー式、ケソン式、L型ブロック式)	50		
		矢板式	鋼構造	25	
		棧橋式	鋼構造	25	
		階段式	無筋コンクリート構造	30	
		浮体式	鋼構造	25	
	鉄筋コンクリート構造	50			
	プレストレストコンクリート構造	30			
	船揚場	斜路式			30
	係船浮標	吊上げ方式			30
係船くい	—			25	
その他	複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設			25	
輸送施設	道路	アスファルト舗装			10
		コンクリート舗装			15
		複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設			10
	橋梁	桁橋			45
		アーチ橋			45
		斜張橋			45
		吊橋			45
		トラス橋			45
複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設			45		
漁港施設用地、 機能施設	(漁港施設用地)	鉄筋コンクリート構造			50
		鉄骨鉄筋コンクリート構造			50
	(機能施設)	鋼構造			25
		複合した構造形式、或いは上記分類に該当しない施設			25

表 e-1-2-2 の耐用年数に従って、耐用年数を迎えたときに更新する更新年別の施設数は、図 e-1-2-2 に示すとおりである。

【更新年別の施設数、延長、更新費の区分】

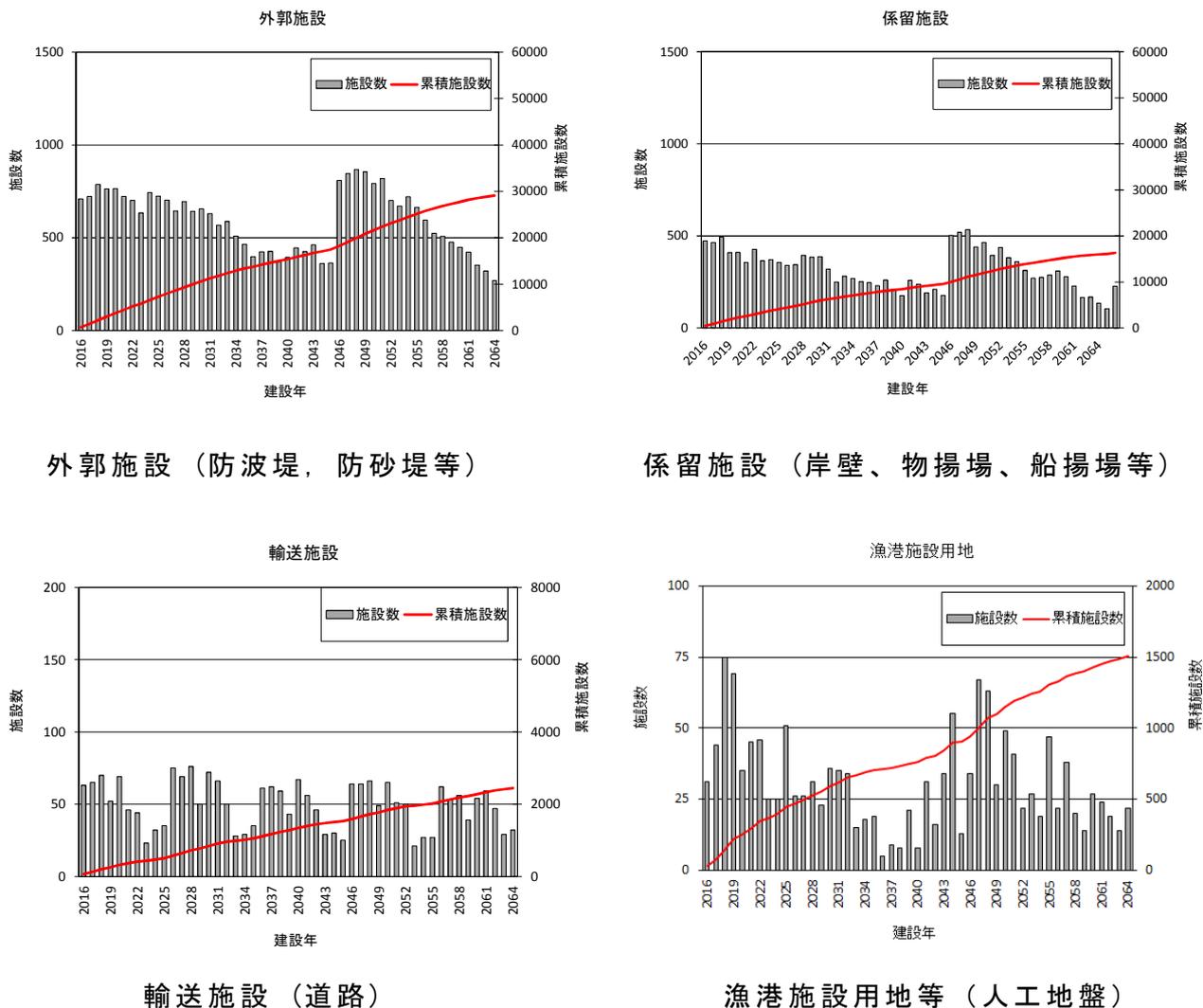
外郭施設：水門・閘門を除く構造形式の施設

係留施設：係船浮標・くいを除く構造形式の施設

輸送施設：道路

漁港施設用地等：人工地盤

注) 建設年不明の施設は、除外している。



外郭施設（防波堤，防砂堤等）

係留施設（岸壁、物揚場、船揚場等）

輸送施設（道路）

漁港施設用地等（人工地盤）

図 e-1-2-2 財務省令で定める耐用年数を経過する施設数

### 3) 対象施設ごとに設定した耐用年数を経過する施設

ここでは、2. スtockマネジメントによるライフサイクルコストの縮減効果において、収集整理した1,319漁港分の機能保全計画書から構造形式ごとに平均耐用年数を算出し、この平均耐用年数に準拠して、それぞれの施設が耐用年数を経過すると仮定した。なお、対象施設ごとに平均耐用年数を算出した結果これを耐用年数と設定して、この耐用年数を経過すると仮定した。なお、対象施設別に構造形式や材料にも着目し、表 e-1-2-3 のとおり、平均耐用年数を設定した。

表 e-1-2-3 対象施設ごとの平均耐用年数

対象施設		全施設数	総耐用年数	平均耐用年数	該当する構造番号	
全体		7,136	364,248	51.0	1~51	
外郭施設	全体	3,724	208,962	56.1	1~24	
	外郭(水門、閘門以外)	コンクリート	1,949	111,005	57.0	1,2,4,5,7,8,9,10,11,12,14,15,20,21
		鋼	263	10,253	39.0	3,6,13,16,17,18,19
		その他	1,500	87,131	58.1	22
	外郭(水門、閘門)	12	573	47.8	23,24	
係留施設	全体	2,688	127,819	47.6	25~37	
	係留(係船浮標、係船くい以外)	コンクリート	1,803	89,092	49.4	25,26,27,30,32,33,34,35
		鋼	638	25,376	39.8	28,29,31
	係留(係船浮標、係船くい、その他)	247	13,351	54.1	36~38	
輸送施設	全体	719	27,170	37.8	39~47	
	道路	632	24,008	38.0	39,40,41	
	道路以外	87	3,162	36.3	42~47	
漁港施設用地等		5	297	59.4	48~51	

表 e-1-2-3 の平均耐用年数に従って、耐用年数を迎えたときに更新する更新年別の施設数は、図 e-1-2-3 に示すとおりである。

【更新年別の施設数、延長、更新費の区分】

外郭施設：水門・閘門を除く構造形式の施設

係留施設：係船浮標・くいを除く構造形式の施設

輸送施設：道路

漁港施設用地等：人工地盤

注) 建設年不明の施設は、除外している。

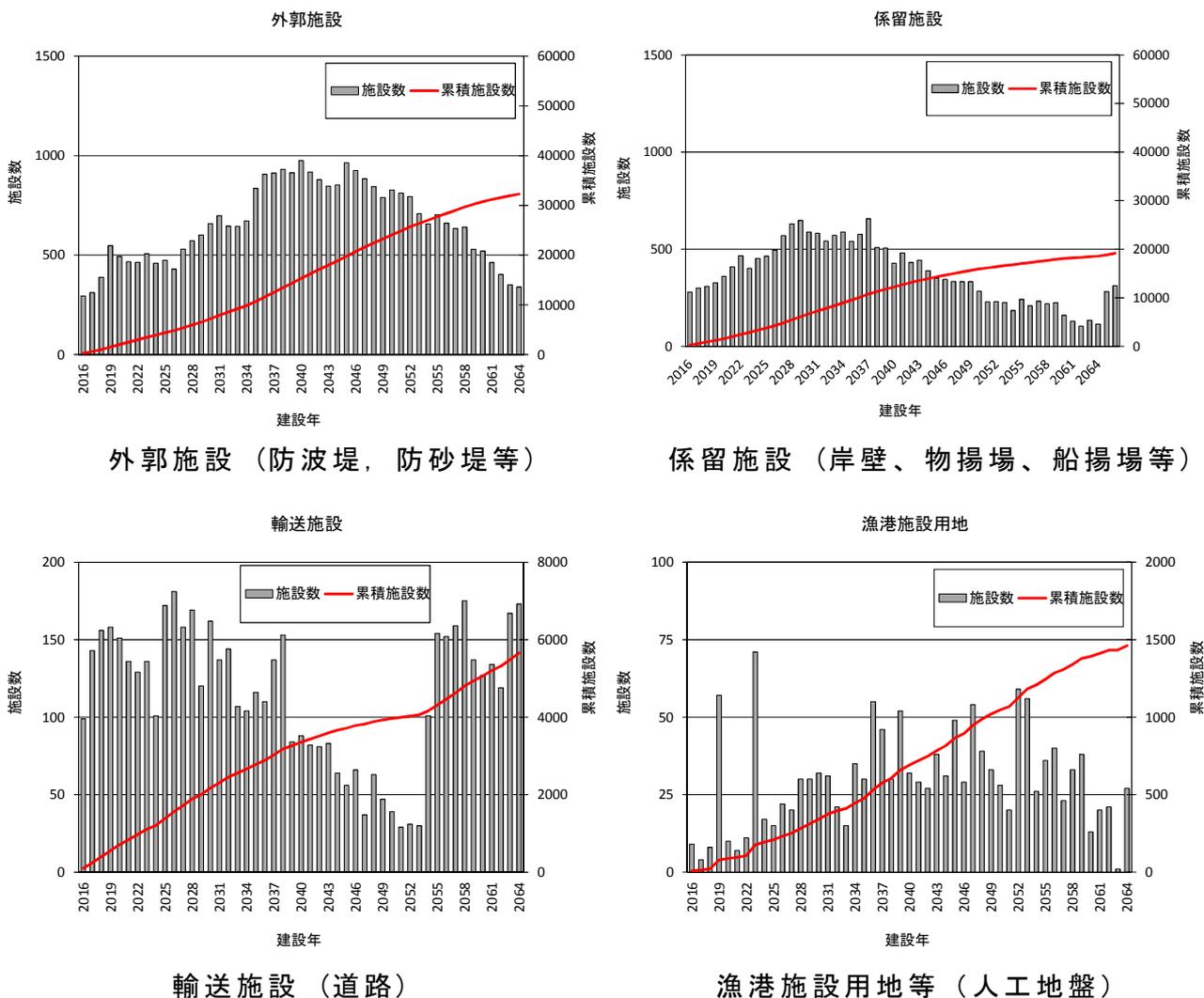


図 e-1-2-3 対象施設別に設定した耐用年数を経過する施設の推移

## (2) 今後の更新費用の推移

### 1) 建設後 50 年以上経過する施設の更新費【CASE1】

(1) の 1) で述べた建設後 50 年以上経過する施設について、更新費を算出した結果は、表 e-1-2-4 のとおりである。また、更新年別の更新費は、図 e-1-2-4 に示すとおりである。なお、グラフでは建設年不明の施設は除外している。

表 e-1-2-4 更新費算出結果

施設名	更新費(億円)		
	耐用年数50年で算定	財務省耐用年数により算定	老朽過度からの推定耐用年数により算定
全体	120,401	203,620	116,135
外郭施設	89,273	135,959	81,943
係留施設	21,499	36,442	23,729
輸送施設	7,430	26,986	8,293
漁港施設用地等	690	1,215	664
漁港施設用地等(人工)	88	174	88

#### 【対象施設の区分】

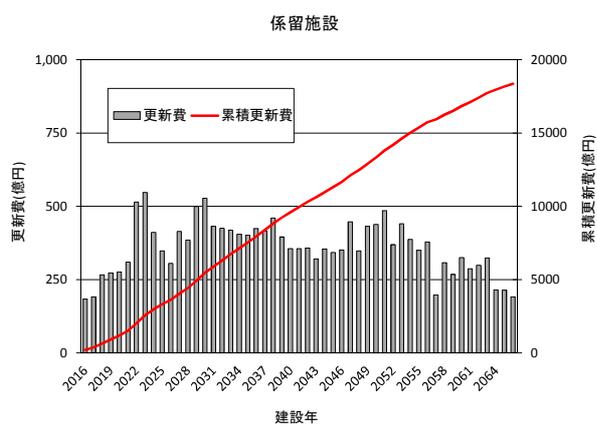
外郭施設：全ての構造形式の施設

係留施設：全ての構造形式の施設

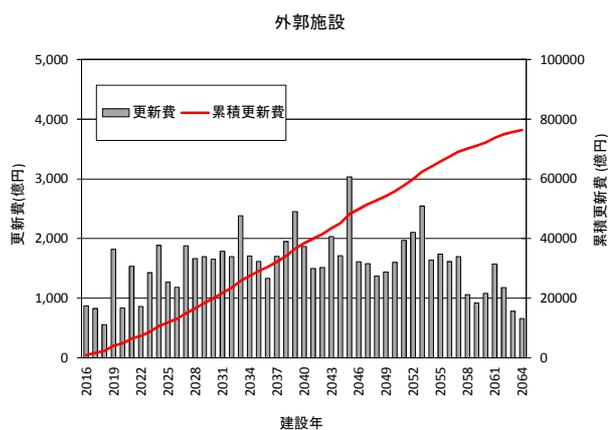
輸送施設：道路、橋梁含む全ての構造形式の施設

漁港施設用地等：人工地盤を含む全ての構造形式の施設

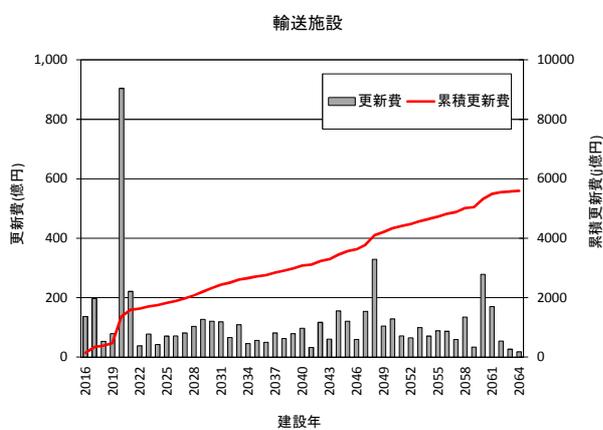
注) 構造形式不明な施設は、それぞれの「その他」としている。建設年不明等の施設は、評価期間に均等分配している。建設金額不明な施設は、除外している。



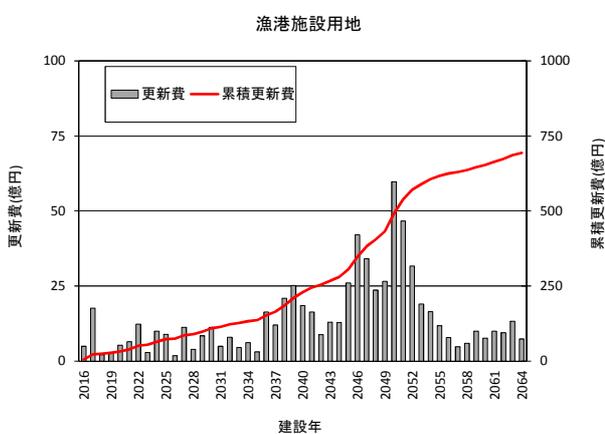
係留施設全体



係留施設全体



輸送施設全体



漁港施設用地等全体

図 e-1-2-4 建設後 50 年以上経過する主要施設の更新費

## 2) 財務省令で定める耐用年数を経過する施設の更新費【CASE2】

(1) の 2) で述べた財務省令で定める耐用年数を経過する施設について、更新費を算出した結果は、前述の表 e-1-2-4 に示した。また、更新年別の更新費は、図 e-1-2-5 に示すとおりである。

### 【対象施設の区分】

外郭施設：全ての構造形式の施設

係留施設：全ての構造形式の施設

輸送施設：道路、橋梁含む全ての構造形式の施設

漁港施設用地等：人工地盤を含む全ての構造形式の施設

注) 構造形式不明な施設は、それぞれの「その他」としている。建設年不明等の施設は、評価期間に均等分配している。建設金額不明な施設は、除外している。

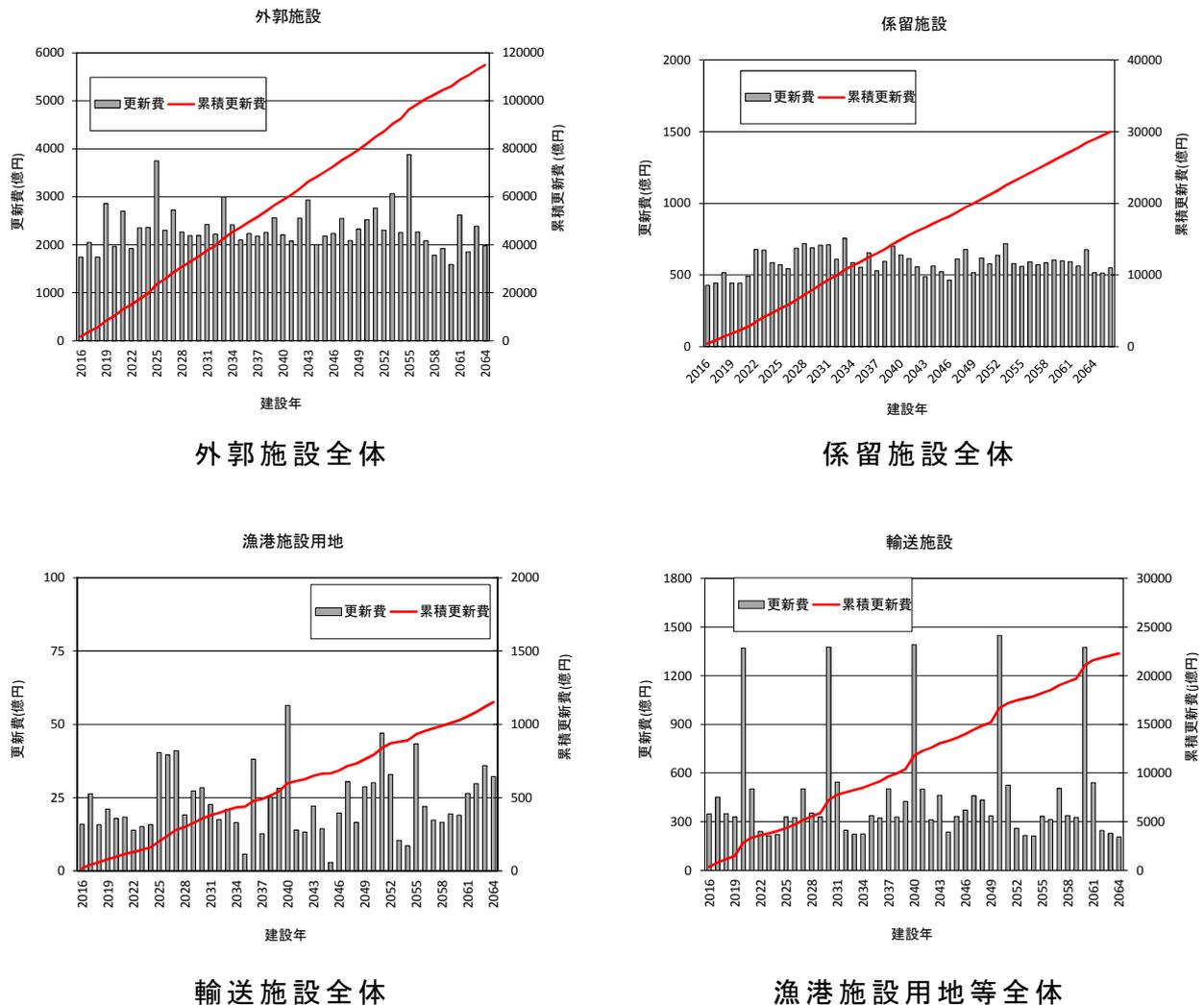


図 e-1-2-5 財務省令で定める耐用年数を経過する主要施設の更新費

### 3) 対象施設ごとに設定した耐用年数を経過する施設の更新費【CASE 3】

(1) の3) で述べた対象施設ごとに設定した耐用年数を経過する施設について、更新費を算出した結果は、前述の表 e-1-2-4 に示した。また、更新年別の更新費は、図 e-1-2-6 に示すとおりである。

#### 【対象施設の区分】

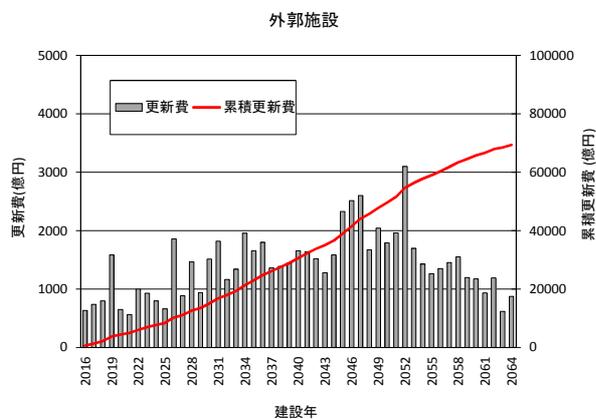
外郭施設：全ての構造形式の施設

係留施設：全ての構造形式の施設

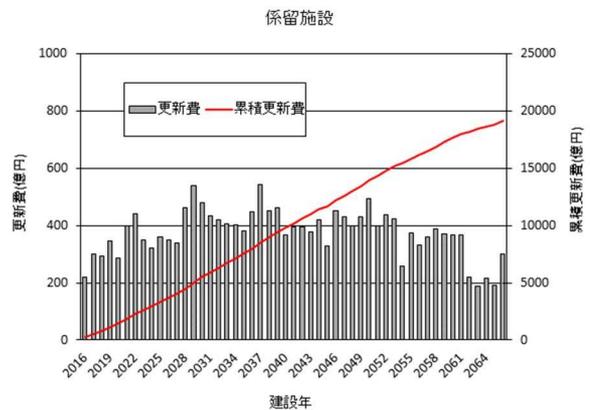
輸送施設：道路、橋梁含む全ての構造形式の施設

漁港施設用地等：人工地盤を含む全ての構造形式の施設

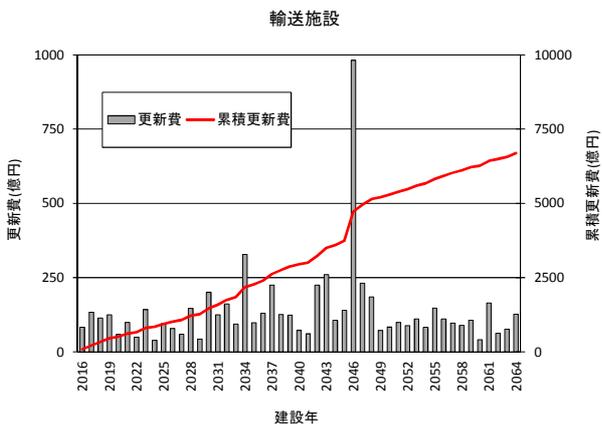
注) 構造形式不明な施設は、それぞれの「その他」としている。建設年不明等の施設は、評価期間に均等分配している。建設金額不明な施設は、除外している。



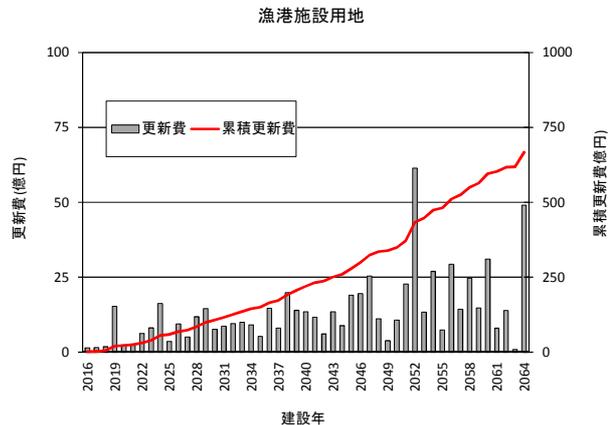
外郭施設全体



係留施設全体



輸送施設全体



漁港施設用地等全体

図 e-1-2-6 対象施設ごとに設定した耐用年数を経過する施設の更新費



### (3) 更新費用が漁港管理者の財政へ及ぼす影響

漁港整備に投じられている予算額と、今後50年間(2016~2066年)の更新費用の平均額を比較し、事後保全的に耐用年数で更新していった場合の財政に及ぼす影響について試算した。なお、漁港整備に投じられている予算額は、平成28年度の当初事業費のうち、下記の事業の合計額を用いることとした。

- ・直轄特定漁港漁場整備事業
- ・水産流通基盤整備事業
- ・水産物供給基盤機能保全事業
- ・漁港施設機能強化事業
- ・水産生産基盤整備事業

集計対象施設は、前述の(2)で対象とした施設であり、表 e-1-2-5 のとおりである。

表 e-1-2-5 平成28年度当初事業費に占める年平均更新費用の割合

		数量
平成28年度当初事業費(復興分を含む) A(億円)		1,032
今後50年間 (2017~2067年) の年平均更新費用の総額	建設後50年で更新する場合 B(億円)	2,408
	財務省令に基づき設定した耐用年数 で更新する場合 C(億円)	4,072
	機能保全計画書に基づき設定した 耐用年数で更新する場合 D(億円)	2,323
割合	B/A	2.3
	C/A	3.9
	D/A	2.2

### 1-3 データベースの作成

前述の内容により、エクセルによるデータベースを作成した(別添)。

## 2. スtockマネジメントによるライフサイクルコストの縮減効果

### 2-1 機能保全計画書データベースの作成

#### (1) 漁港の基本数量

平成28年3月末時点で全国に2,866漁港が供用されている。このうち、機能保全計画策定済みの漁港は1,575漁港である。機能保全計画策定済み1,575漁港のうち1,559漁港分の機能保全計画書を収集し、そのうち1,319漁港分をデータ入力し、機能保全計画書データベース（以下、「機能保全計画書データベース」という）を作成した。

表e-2-1-1 機能保全計画書 収集および入力状況

	No.	項目	合計	流通拠点	生産拠点	一般漁港	拠点不明
基本数量	①	全漁港数	2,866	143	646	160	1,917
	②	次期長計対象	1,091	107	359	94	531
	③	計画策定済	1,575	127	496	76	876
	④	計画書収集済	1,559	127	493	74	865
	⑤	計画書未収集 =③-④	16	0	3	2	11
作業進捗	⑥	入力(フル)	860	124	332	48	356
	⑦	入力(簡易)	459	3	138	23	295
	⑧	入力総数 =⑥+⑦	1,319	127	470	71	651
	⑨	未入力 =④-⑧	240	0	23	3	214

※簡易入力(459 漁港)は、入力項目を限定して簡易的に入力したものの。

(2) 入力項目

機能保全計画書データベースの入力項目は、表e-2-1-2のとおりである。

表e-2-1-2 入力項目

入力項目		備考	
諸元	都道府県名		
	漁港名		
	漁港番号		
	流通拠点/生産拠点		
	施設分類		
	種類		
	施設名称		
	構造構造形式		
	施設の現状	新設・更新 補修・改良	
	数量	対象延長(m) 現在の総延長(m) 基数(基) 延べ面積(m <sup>2</sup> )	
	建設年又は取得の年	自(年) 至(年)	
	建設価格(千円)		
	付帯施設	防風設備 漂流防止施設 防雪設備 防暑設備 清浄海水導入施設 鳥獣等進入防止施設 魚類移送施設 汚水浄化施設	
	計画水深(m)		
機能保全計画書データ	策定状況		
	健全度	計画書中に明記された健全度	
	対策コスト(百万円)	コストの合計値	
	対策工法		
	更新コスト(百万円)	コストの合計値	
	更新工法		
	機能保全工事の実施(~H28.3) 次期長計(H29~33)中の保全工事見込み		
諸元	次期長計対象		
	防災拠点		
	管理者		
機能保全計画書データ	計画書策定年度		
	保全対策の有無		
	劣化部材(付帯除く)		
	部材影響度		
	変状ランク	a b c d	
	健全度(変状ランクより算定)		
	計画書で現在価値化しているY/N		
対策費(百万円)	H21~H88までの年度毎の対策費		

要

## 2-2 機能保全計画書データの集計結果

### (1) 健全度の分布状況

対象施設における施設別の健全度は、表e-2-2-1のとおりである。

#### 【算出条件】

- ▶ 機能保全計画書中で健全度が明記されていない場合でも、スパン毎の損傷ランクが明記されている場合には、「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」の判定基準に基づいて健全度を試算した。
- ▶ 機能保全計画書中で健全度が明記されておらず、損傷ランクも不明の場合は除外している。

表 e-2-2-1 施設別の健全度分布状況

対象施設		A		B		C		D		合計	
		施設数	%	施設数	%	施設数	%	施設数	%		
全体		2,154	11.3%	4,316	22.7%	8,348	43.8%	4,232	22.2%	19,050	
外郭施設	全体	752	7.4%	2,057	20.1%	4,826	47.2%	2,582	25.3%	10,217	
	外郭(水門、閘門以外)	コンクリート	430	7.6%	1,245	22.1%	2,598	46.2%	1,348	24.0%	5,621
		鋼	96	18.4%	142	27.2%	195	37.3%	90	17.2%	523
		その他	224	5.6%	656	16.3%	2,022	50.1%	1,131	28.0%	4,033
外郭(水門、閘門)		2	5.0%	14	35.0%	11	27.5%	13	32.5%	40	
係留施設	全体	722	10.7%	1,983	29.3%	2,958	43.6%	1,114	16.4%	6,777	
	係留(係船浮標、係船くい以外)	コンクリート	400	7.9%	1,479	29.3%	2,307	45.7%	860	17.0%	5,046
		鋼	225	20.5%	332	30.2%	406	36.9%	137	12.5%	1,100
係留(係船浮標、係船くい、その他)		97	15.4%	172	27.3%	245	38.8%	117	18.5%	631	
輸送施設	全体	677	33.5%	271	13.4%	546	27.0%	527	26.1%	2,021	
	道路	622	34.2%	237	13.0%	488	26.8%	471	25.9%	1,818	
	道路以外	55	27.1%	34	16.7%	58	28.6%	56	27.6%	203	
漁港施設用地等		3	8.6%	5	14.3%	18	51.4%	9	25.7%	35	

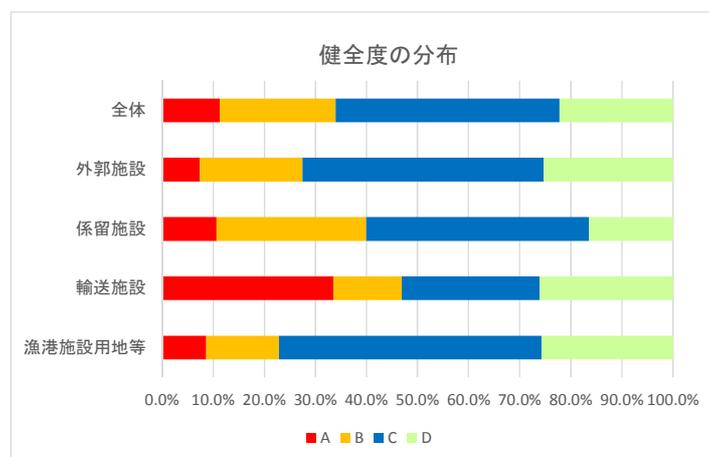


図 e-2-2-1 健全度の分布

## (2) 今後50年間の保全対策施設数の推移

2016年度～2065年度までの保全対策施設数の推移を以下に示す。

なお、ここで示す施設数は、計画書データベースで要保全対策とされた施設の合計である。

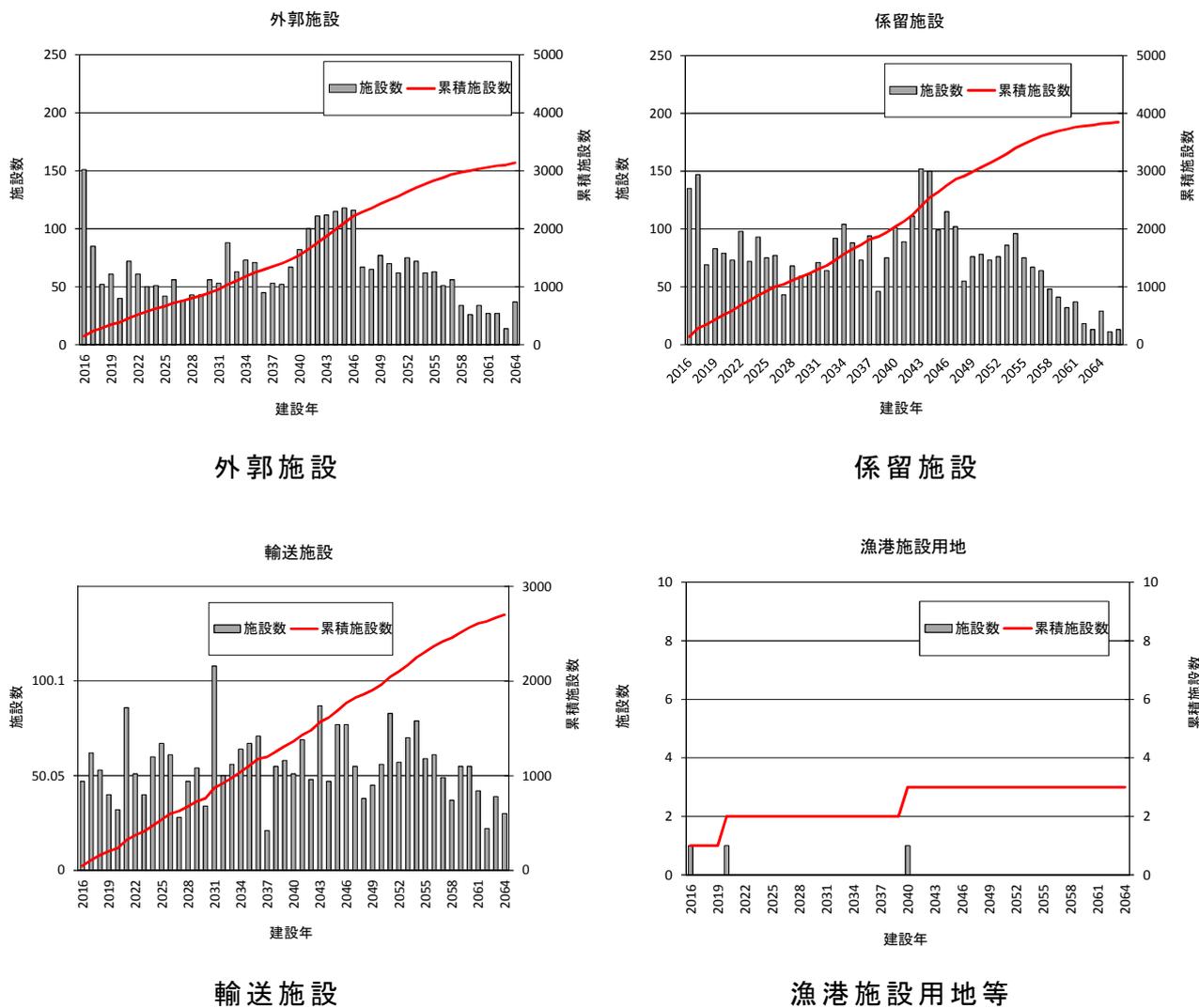


図 e-2-2-2 保全対策施設数の推移 (機能保全計画書データベースより)

### (3) 今後50年間の保全対策費の推移

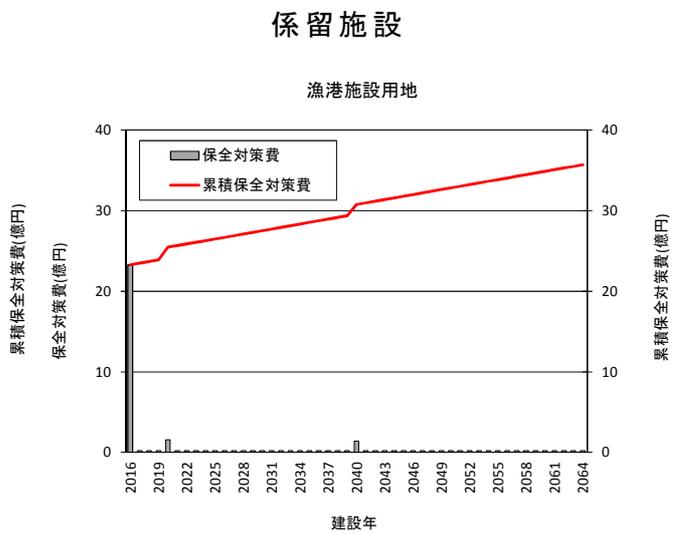
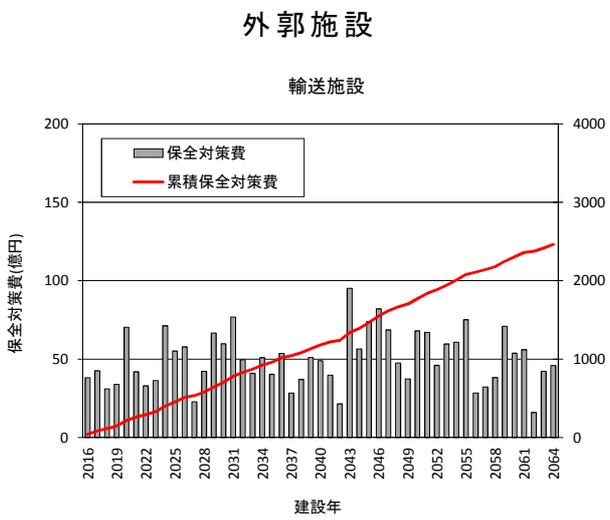
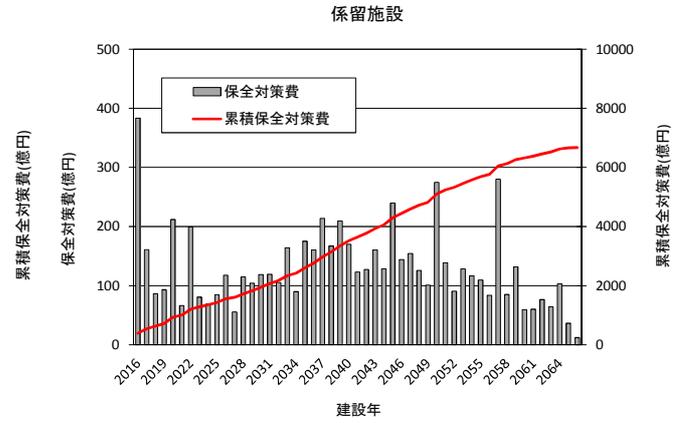
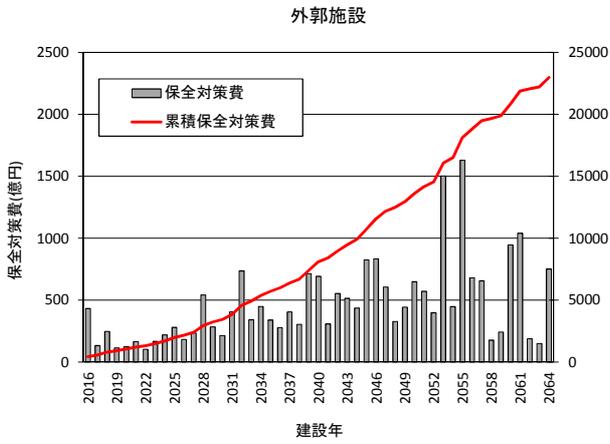
2016年度～2065年度までの保全対策費の推移を以下に示す。

#### 【算出条件】

- 機能保全計画書中において、保全対策費と保全対策年度が明示されている施設のみを各施設種類で集計し、不明な施設は除外した。
- 機能保全計画書からの集計額が、表e-2-2-2で算出した総保全対策費（例えばCASE1外郭施設なら50年間で計2.3兆円）と一致するように、各年度の保全対策費を比例配分で割増した（従ってCASE1～3の対策費の推移は、合計額が違うだけで、グラフの形は同じとなる）。
- 2015年度以前の対策費は、50年間に均等割りして加算した。

表e-2-2-2 今後50年間の保全対策費(単位：億円)

分類		2016-2025	2026-2035	2036-2045	2046-2055	2056-2065	合計
CASE1	外郭施設	1,981.9	3,727.2	5,027.7	7,404.8	4,926.6	23,068.1
	係留施設	1,434.2	1,163.4	1,697.9	1,382.9	978.8	6,657.2
	輸送施設	453.6	507.8	506.0	612.2	402.4	2,482.0
	漁港施設用地等	26.5	2.1	3.3	2.1	2.1	35.9
CASE2	外郭施設	770.2	1,448.4	1,953.8	2,877.5	1,914.5	8,964.3
	係留施設	628.1	509.5	743.5	605.6	428.6	2,915.3
	輸送施設	152.4	170.6	170.0	205.6	135.2	833.7
	漁港施設用地等	19.2	1.5	2.4	1.5	1.5	26.0
CASE3	外郭施設	2,382.3	4,480.1	6,043.4	8,900.7	5,921.8	27,728.4
	係留施設	1,211.8	983.0	1,434.5	1,168.4	827.0	5,624.7
	輸送施設	334.4	374.3	373.1	451.3	296.7	1,829.8
	漁港施設用地等	198.2	15.4	24.3	15.4	15.4	268.6



### 輸送施設

### 漁港施設用地等

図e-2-2-3保全対策費の推移 (CASE1)

### 2-3 保全対策時期の検討

更新時期の目安となる保全対策時期は、一律50年とする【CASE1】、財務省令で定めた耐用年数を適用する【CASE2】があるものの、実際の漁港施設の健全度から耐用年数を試算することでより実態に近い耐用年数を設定できることが期待される。

そこで、平均耐用年数の試算を以下に示す前提条件で設定した。設定した平均耐用年数は、表e-2-3-1のとおりである。

平均耐用年数(年) =

$$\frac{\Sigma(\text{分母のうち保全対策予定施設の耐用年数} + \text{分母のうち保全対策不要かつ50年以上経過施設の耐用年数})}{\text{対象施設数}}$$

#### 【算出条件】

- 建設年、対策の有無、対策年度が不明な施設は、除外した。
- 「保全対策予定施設」：耐用年数 = 初回対策年 - 建設年とした。
- 「保全対策不要かつ50年以上経過施設」：耐用年数 = 経過年 + 財務省耐用年数の20%とした。
- 「保全対策不要かつ50年未満施設」：耐用年数の計算から除外した。

表 e-2-3-1 対象施設別に健全度から設定した平均耐用年数

対象施設		全施設数	総耐用年数	平均耐用年数	該当する構造番号	
全体		7,136	364,248	51.0	1~51	
外郭施設	全体	3,724	208,962	56.1	1~24	
	外郭(水門、閘門以外)	コンクリート	1,949	111,005	57.0	1,2,4,5,7,8,9,10,11,12,14,15,20,21
		鋼	263	10,253	39.0	3,6,13,16,17,18,19
		その他	1,500	87,131	58.1	22
外郭(水門、閘門)		12	573	47.8	23,24	
係留施設	全体	2,688	127,819	47.6	25~37	
	係留(係船浮標、係船くい以外)	コンクリート	1,803	89,092	49.4	25,26,27,30,32,33,34,35
		鋼	638	25,376	39.8	28,29,31
	係留(係船浮標、係船くい、その他)		247	13,351	54.1	36~38
輸送施設	全体	719	27,170	37.8	39~47	
	道路	632	24,008	38.0	39,40,41	
	道路以外	87	3,162	36.3	42~47	
漁港施設用地等		5	297	59.4	48~51	



## 2-4 保全対策費の検討

### (1) 保全対策実施率の検討

対象施設別に保全対策実施率を試算した結果は、表e-2-4-1のとおりである。保全対策実施率は、耐用年数を経過しており、かつ、対策が必要となった施設の割合として試算した。

#### 【算出条件】

- 延長または対策の有無が不明な施設は、除外した。
- 「保全対策予定施設」：対象とした。
- 「保全対策不要かつ耐用年数以上経過施設」：対象とした。
- 「保全対策不要かつ耐用年数未満施設」：対象から除外した。

$$\text{保全対策実施率(\%)} = \frac{\text{保全対策予定施設の総延長}}{(\text{保全対策予定施設} + \text{保全対策不要かつ耐用年数以上経過施設})\text{の総延長}} \times 100$$

なお、施設延長や建設年が不明の施設は除外した。

表 e-2-4-1 対象施設別の保全対策実施率

対象施設	保全対策実施率																
	耐用年数50年で算定					財務省耐用年数により算定					老朽化度からの推定耐用年数により算定						
	対象施設数	保全対策施設数	総延長(km)	保全対策施設延長(km)	実施率(延長当り)	対象施設数	保全対策施設数	総延長(km)	保全対策施設延長(km)	実施率(延長当り)	対象施設数	保全対策施設数	総延長(km)	保全対策施設延長(km)	実施率(延長当り)		
全体(漁港施設用地、機能施設除く)	7493	3844	765.04	425.94	55.7%	12617	1261	1329.10	110.34	8.3%	7372	3704	802.23	378.26	47.2%		
外郭施設	全体	3909	1653	324.26	142.82	44.0%	6338	522	501.09	50.96	10.2%	3500	1989	292.89	169.28	57.8%	
	外郭(水門、閘門以外)	コンクリート	2045	801	183.42	74.96	40.9%	2954	393	257.32	39.38	15.3%	1790	1006	162.06	92.93	57.3%
		鋼	272	210	30.50	20.85	68.4%	399	41	43.94	4.57	10.4%	306	173	34.63	18.15	52.4%
		その他	1580	635	109.75	46.65	42.5%	2957	86	198.39	6.82	3.4%	1392	807	95.60	57.92	60.6%
	外郭(水門、閘門)	12	7	0.60	0.36	60.9%	28	2	1.43	0.19	13.3%	12	3	0.60	0.28	47.4%	
係留施設	全体	2820	1615	236.15	137.36	58.2%	4556	675	361.64	52.68	14.6%	2873	1319	242.21	111.74	46.1%	
	係留(係船浮標、係船くい以外)	コンクリート	1902	1015	154.71	85.81	55.5%	3208	481	246.19	40.31	16.4%	1902	845	154.71	72.79	47.1%
		鋼	648	497	62.30	45.43	72.9%	901	147	86.22	10.32	12.0%	725	353	70.28	31.55	44.9%
	係留(係船浮標、係船くい、その他)	270	103	19.14	6.11	31.9%	447	47	29.23	2.05	7.0%	246	121	17.23	7.39	42.9%	
輸送施設	全体	764	576	204.63	145.76	71.2%	1723	64	466.37	6.70	1.4%	999	396	267.13	97.24	36.4%	
	道路	673	505	193.20	137.21	71.0%	1598	21	444.26	4.62	1.0%	880	352	252.54	91.07	36.1%	
	道路以外	91	71	11.43	8.54	74.8%	125	43	22.11	2.08	9.4%	119	44	14.59	6.17	0.0%	
漁港施設用地等	5	1	0.13	0.01	5.9%	20	0	0.58	0.00	0.0%	3	2	0.10	0.08	77.8%		

## (2) 平均保全対策費

対象施設別の平均保全対策費は、表e-2-4-2のとおりである。

なお、施設延長が不明のものは除外した。

表e-2-4-2 対象施設別の平均保全対策費

対象施設		対象施設数	対象施設延長(m)	保全対策費(百万円)	平均保全対策費(百万円/m)	
全体(漁港施設用地、機能施設除く)		6,262	697,051	564,088	0.81	
外郭施設	全体	2,990	256,154	389,739	1.52	
	外郭(水門、閘門以外)	コンクリート	1,508	141,585	277,118	1.96
		鋼	303	30,886	36,746	1.19
		その他	1,166	82,885	72,669	0.88
	外郭(水門、閘門)	13	798	3,206	4.02	
係留施設	全体	2,459	214,766	138,954	0.65	
	係留(係船浮標、係船くい以外)	コンクリート	1,599	136,145	86,740	0.64
		鋼	678	65,270	44,879	0.69
	係留(係船浮標、係船くい、その他)	182	13,351	7,334	0.55	
輸送施設	全体	813	226,131	35,395	0.16	
	道路	719	214,656	29,432	0.14	
	道路以外	94	11,475	5,963	0.52	
漁港施設用地等		4	137ha	43ha	0.31(百万円/m)	

## (3) 水域施設の検討

泊地を維持するために実施されてきた浚渫についても、水産庁整備課にて確認された過去の実績から将来の維持費用を試算した。集計については、実績データを元に1m<sup>3</sup>あたりの費用を算出し、年間の希望浚渫度量に常時産出された額を毎年実施すると想定し、計上した。算出された費用を以下に示す。

表e-2-4-3 対象施設別の平均保全対策費

対象漁港数	430
合計浚渫土量	2,002,090
平均浚渫回数(回/年)	0.51
平均事業費(千円/m <sup>3</sup> )	3,656
年間浚渫費用(千円)	3,762,079

## 2-5 コスト縮減効果の検討

### (1) コスト縮減効果の考え方

今回、対象とした施設について、施設別（外郭施設、係留施設、輸送施設、漁港施設用地等・機能施設）にコスト縮減率を試算した。ストックの総保全対策費は、以下より、算出した。

保全対策費(百万円) = スtock総延長(m) × 保全対策実施率 × 平均対策費(百万円/m)

個々の施設のコスト縮減率は、以下より、算出した。

$$\text{コスト縮減率 } Y (\%) = 100 - \frac{L a \times (R c \times C r + C m \times P)}{(C a + L a \times C m \times P)}$$

L a : 施設総延長(km)   R c : 対策実施率(%)   C r : Kmあたり対策費(百万円)

C m : Kmあたり維持費(百万円)   P : 耐用年数   C a : 施設総更新費(百万円)

### (2) 維持管理費の検討

維持管理費として、2011～2013年の3年間の実績を元に、今後50年の維持管理費を算出した。

維持管理経費をコスト縮減率に加味するにあたっては、全体の施設延長4,885kmに対する全体の年間維持費48.22億円より、施設延長1kmあたりの維持管理費を0.00987億円とした。

表e-2-5-1 構造形式別の維持管理費

分類	施設延長 (km)	総延長に 対する割合	種類別の 費用内訳 (億円)	
外郭施設	直立堤:消波工付き	445	0.091	4.39
	直立堤:消波工なし	930	0.190	9.18
	傾斜堤:透過式	161	0.033	1.59
	傾斜堤:不透過式	198	0.041	1.96
	混成堤:消波工付き	351	0.072	3.46
	混成堤:消波工なし	391	0.080	3.86
	外郭矢板式	115	0.024	1.13
	杭・カーテン式	35	0.007	0.35
	浮体式	5	0.001	0.05
	その他	400	0.082	3.95
係留施設	直立消波式	2	0.000	0.02
	その他の重力式	9	0.002	0.09
	係留矢板式	1	0.000	0.01
	棧橋式	0	0.000	0.00
	階段式	1	0.000	0.01
	浮体式	1	0.000	0.01
	船揚場	4	0.001	0.04
	その他	2	0.000	0.02
輸送施設	道路	1,717	0.351	16.94
	道路護岸	35	0.007	0.34
漁港施設用地	用地護岸	42	0.009	0.41
水域施設	航路護岸、防砂潜堤	3	0.001	0.03
漁場	消波底、潜堤等	37	0.007	0.04
合計		4,885	1.000	48.22

### (3) コスト縮減効果の試算

コスト縮減率の試算結果は、表e-2-5-2のとおりである。

表e-2-5-2 コスト縮減率

対象施設	km当り 平均保全 対策費 (百万円) ①	km当り 平均維持 費 (百万円) ②	耐用年数50年で算定						財務省耐用年数により算定						老朽化度からの推定耐用年数により算定								
			総施設 延長(km) ③	保全対策 実施率 ④	耐用年数 平均年 ⑤	総保全 対策費 (百万円) ⑥=①× (③×④+②×⑤)	総更新費 (維持費含ま ず) (百万円) ⑦	総更新費 (維持費含む) (百万円) ⑧= ⑦+②×③×⑤	縮減 効果 (%) ⑨=1-⑥/⑧	総施設 延長(km) ⑩	保全対策 実施率 ⑪	耐用年数 平均年 ⑫	総保全 対策費 (百万円) ⑬	総更新費 (維持費含ま ず) (百万円) ⑭	総更新費 (維持費含む) (百万円) ⑮	縮減 効果 (%) ⑯	総施設 延長(km) ⑰	保全対策 実施率 ⑱	耐用年数 平均年 ⑲	総保全 対策費 (百万円) ⑳	総更新費 (建設面格) (百万円) ㉑	総更新費 (維持費含む) (百万円) ㉒	縮減 効果 (%) ㉓
全体	810	0.987	7,029	55.7%	50.0	3,516,647	12,040,078	12,386,949	<b>71.6%</b>	17,292	8.3%	33.6	1,736,323	20,361,972	20,935,435	<b>91.7%</b>	7,527	47.2%	51.0	3,253,661	11,613,483	11,992,374	<b>72.9%</b>
外郭施設	1,520	0.987	3,358	44.0%	50.0	2,413,761	8,927,326	9,093,037	<b>73.5%</b>	5,367	10.2%	35.5	1,017,799	13,595,936	13,783,997	<b>92.6%</b>	3,087	57.8%	56.1	2,883,165	8,194,276	8,365,223	<b>65.5%</b>
係留施設	1,960	0.987	1,683	58.2%	50.0	719,321	2,292,029	2,375,079	<b>69.7%</b>	2,761	14.6%	31.2	346,392	3,928,494	4,013,502	<b>91.4%</b>	1,777	46.1%	47.6	616,352	2,514,996	2,598,485	<b>76.3%</b>
輸送施設	1,190	0.987	1,888	71.2%	50.0	308,331	742,980	836,149	<b>63.1%</b>	8,966	1.4%	20.0	197,600	2,698,555	2,875,548	<b>93.1%</b>	2,560	36.4%	37.8	244,627	829,341	924,854	<b>73.5%</b>
漁港施設用地等	880	0.987	100	5.9%	50.0	6,777	68,965	73,902	<b>90.8%</b>	198	0.0%	37.5	7,329	121,538	128,867	<b>94.3%</b>	103	77.8%	59.4	30,742	66,356	72,366	<b>57.5%</b>

### 3. 漁港施設の構造物全体の機能評価手法の開発・普及

#### 3-1 室内試験

##### (1) 基礎部の条件の違い

###### ア) 圧縮ばね（均等配置）

圧縮ばね（均等配置）は、4～63個まで変化させ、7ケース測定した。測定は、30秒／回×50回とした。測定値はフーリエ変換(FFT)して、スタッキング（重ね合わせ）処理し、卓越周波数を確認した。それぞれの圧縮ばね個数ごとの卓越周波数は、表 e-3-1-1 のとおりである。

表 e-3-1-1 圧縮ばね（均等配置）の卓越周波数（Hz；X, Y, Z 軸）

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)			備考
	X軸	Y軸	Z軸	
4個	4.1	3.0	8.9	
6個	4.2	3.8	10.9	X軸の4.2がZ軸にも
8個	5.2	3.8	12.5	
12個	5.5	4.5	13.3	X軸の5.5がZ軸にも
24個	7.4	6.0	20.6	
48個	9.8	7.4	27.6	X軸の9.8がZ軸にも
63個	12.2	9.3	30.4	X軸の12.2がZ軸にも

X、Y、Z軸方向ともに、底面の圧縮ばね個数が増加するほど、卓越周波数が大きくなる傾向となった。また、Z軸にはX軸や一部Y軸の卓越周波数が出現していることなどから、供試体は3方向の各軸に対し、並進運動と回転運動を起こしていると考えられる。

Z軸方向の振動は、1自由度系振動体とみなすことができ、(a)式で示される  $f$  : 固有振動数が発生すると考えられる（中井博・小林治俊著「土木構造物の振動解析」，森北出版．p8）。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \dots \dots \dots (a)$$

供試体底面に設置した圧縮ばねの1個あたりのばね定数は  $K=198.61\text{N/mm}$  であるため、4～63個となった場合の固有振動数を(a)式で求め、これらを圧縮ばね理論値とした。これら圧縮ばね理論値と表 e-3-1-1 に示した圧縮ばね実測値を比較した結果は、表 e-3-1-2 のとおりであり、両者の関係を図 e-3-1-1 に示した。図より、両者は高い相関があることから ( $R^2=0.9966$ )、Z軸方向の実測値は理論値と一致することが確認できた。

表 e-3-1-2 圧縮ばねにおける理論値と実測値

	4 個	6 個	8 個	12 個	24 個	48 個	63 個
圧縮ばね理論値 (Hz)	8.6	10.6	12.2	15.0	21.2	29.9	34.3
圧縮ばね実測値 (Hz)	8.9	10.9	12.5	15.3	20.6	27.6	30.4

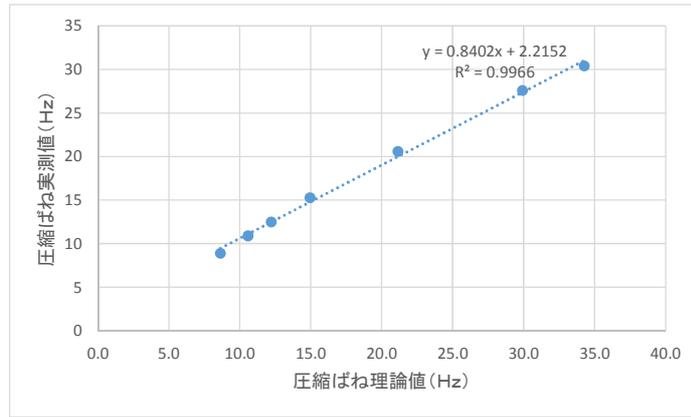


図 e-3-1-1 圧縮ばねにおける理論値 (Hz) と実測値 (Hz) の関係 (Z 軸)

次に、供試体に対し、水平方向となる X、Y 軸方向は、供試体に水平力  $F(t)$  が作用し、水平方向の振動とロッキングによる回転振動が起こり、連成運動が起こっているとみなすことができる (小坪清真著「土木振動学」, 森北出版, p106)。弾性体上 (ここでは圧縮ばね) に置かれた剛体 (ここでは供試体) が回転運動する場合に発生する反力モーメント  $M$  は、供試体高さ  $h$ 、幅  $L$ 、奥行き  $B$  とし、回転中心からの距離を  $x$ 、地盤反力係数を  $k$  (本実験では単位面積あたりのばね定数)、回転角度  $\theta$  (ただし、角度が微小のため、 $\tan \theta = \theta$ ) として下式で表される (右下図参照)。

$$M = kBx\delta x \cdot \tan \theta \approx kBx^2\theta \delta x$$

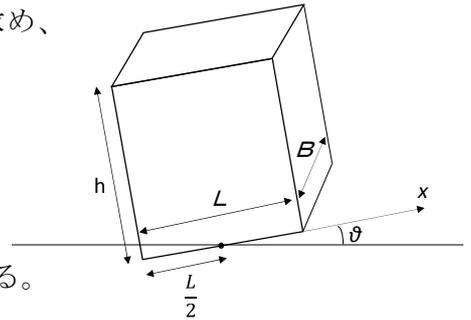
全体モーメントは、 $M$  を堤体幅にわたって積分して求め、

$$R = \int_{-L/2}^{L/2} kB\theta x^2 dx = \left[ \frac{1}{3} kB\theta x^3 \right]_{-L/2}^{L/2} = \frac{1}{12} kBL^3\theta$$

となる。回転運動の運動方程式等から固有振動数  $f$

は、 $I$  を慣性モーメントとした場合に (b) 式で示される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R}{I}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kBL^3}{12I}} \dots\dots\dots (b)$$



供試体底面に設置した圧縮ばねが 4~63 個となった場合の X、Y 軸の振動を (b) 式で求め、これらを圧縮ばね理論値とした。また、供試体上部に速度計を設置して、測定した結果を圧縮ばね実測値とした。これら圧縮ばね理論値と圧縮ばね実測値を比較した結果は、下表のとおりであった。卓越周波数の変化の傾向は一致するものの、いずれも圧縮ばね理論値と比較して、圧縮ばね実測値が小さく出る傾向があり、その比率は 58.0~84.4% であった。

	4 個	6 個	8 個	12 個	24 個	48 個	63 個
圧縮ばね理論値 : a (Hz) X 軸	4.9	5.9	6.9	8.4	11.9	16.8	19.3
圧縮ばね実測値 : b (Hz) X 軸	4.1	4.2	5.2	5.5	7.4	9.8	12.2
b / a × 100 (%)	84.4	70.6	75.7	65.4	62.2	58.3	63.3
圧縮ばね理論値 : a (Hz) Y 軸	3.7	4.5	5.2	6.4	9.0	12.8	14.6
圧縮ばね実測値 : b (Hz) Y 軸	3.0	3.8	3.8	4.5	6.0	7.4	9.3
b / a × 100 (%)	81.5	84.3	73.0	70.6	66.5	58.0	63.7

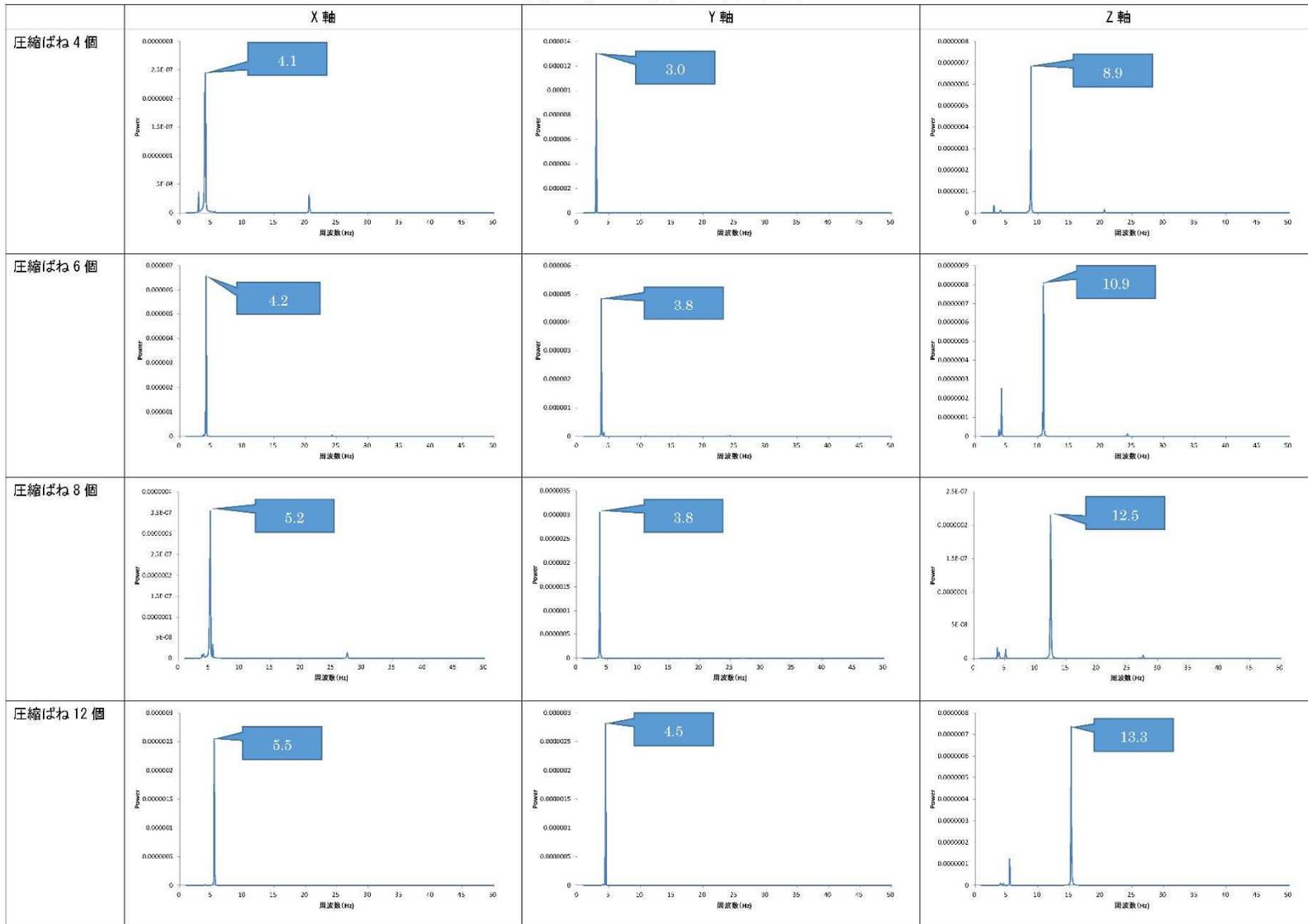


図 e-3-1-2(1) 室内試験—圧縮ばね—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)



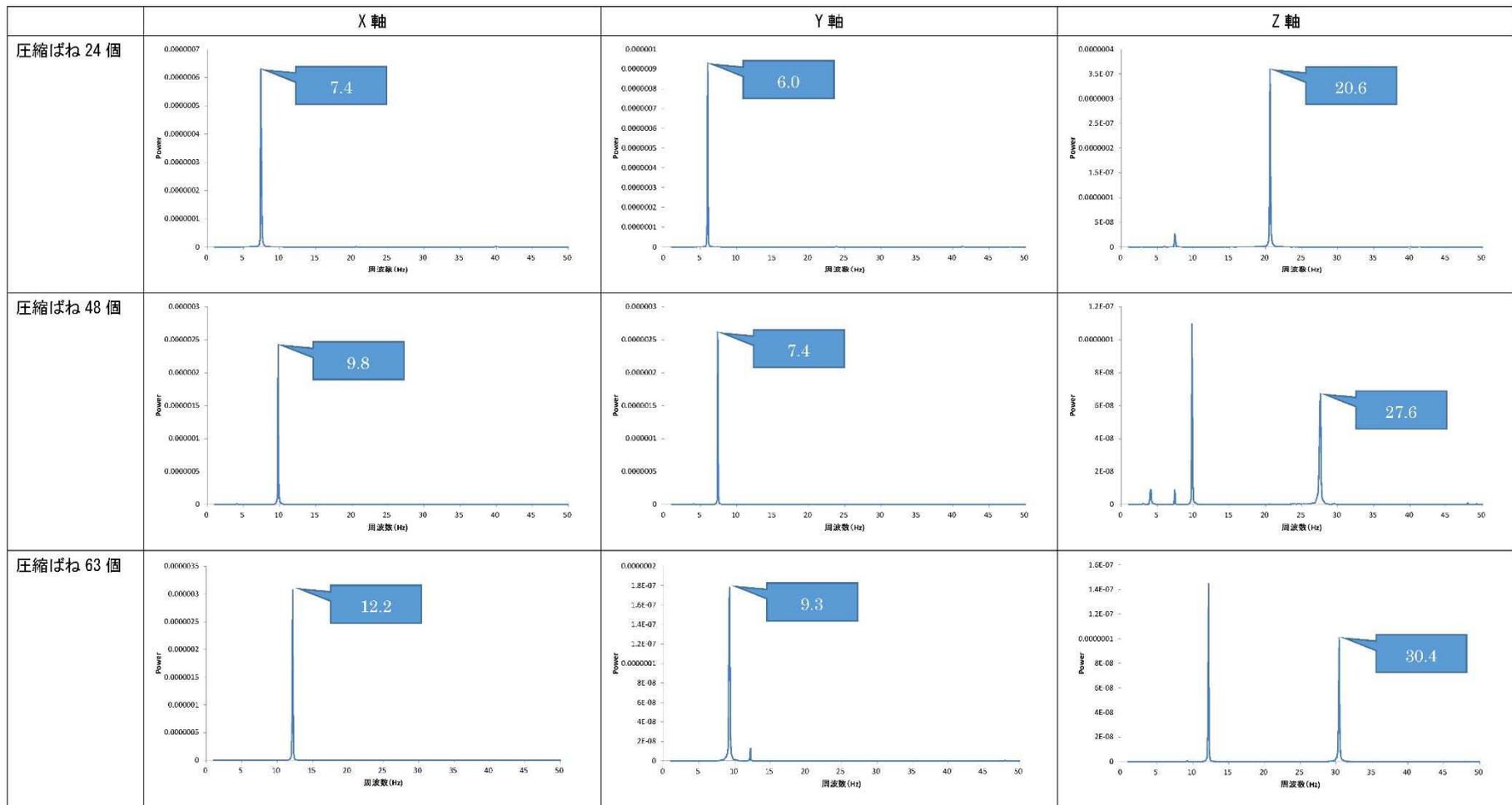


図 e-3-1-2(2) 室内試験—圧縮ばね—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

### イ) 圧縮ばね（偏り配置）

圧縮ばね（偏り配置）は、供試体底面に設置する圧縮ばねの位置と個数を変えて測定した（圧縮ばね全面敷詰め（63個）、片側10cm抜き（49個）、両側10cm抜き（35個）、中央10cm抜き（56個））。測定は、30秒/回×25回とした。測定値はフーリエ変換(FFT)して、スタッキング（重ね合わせ）処理し、卓越周波数を確認した。それぞれの卓越周波数は、表 e-3-1-3 のとおりである。

表 e-3-1-3 圧縮ばね（偏り配置）の卓越周波数（Hz；X, Y, Z 軸）

	X軸	Y軸	Z軸	備考
全面敷詰め(63個)	12.2	9.3	30.4	X軸の12.2がZ軸にも
片側10cm抜き(49個)	8.0	7.4	27.0	
両側10cm抜き(35個)	5.3	6.8	23.8	
中央10cm抜き(56個)	12.3	8.1	28.3	X軸の12.3がZ軸にも

Z軸方向の振動は、圧縮ばねの個数の減少によって卓越周波数が減少した。ア)で述べた(a)式でそれぞれの圧縮ばね個数での理論的な卓越周波数は、それぞれ 34.3, 30.2, 25.6, 32.3 であり、理論値と実測値は、ここでも高い相関 ( $R^2=0.9892$ ) が見られた。

以上より、ばね定数が明らかな圧縮ばねを基礎部に用い、その個数を変化させて、1自由度系の自由振動式((a)式)から算出した理論値と鉛直方向の卓越振動数(Z軸)は、よく整合することを確認した。このことから、室内試験での測定機器、測定方法、解析方法の妥当性を確認した。

一方、X、Y軸ともに圧縮ばね個数が増加すると、卓越周波数が増加する傾向があった。圧縮ばねを基礎に見立て、その一部を抜いて、基礎部に欠陥がある状態を想定した本実験では、基礎部の削除により、X、Y、Z軸の3軸方向の卓越周波数が明確に変化することを確認した。また、ここでもア)で述べた(b)式での卓越周波数を圧縮ばね理論値とし、測定した結果を圧縮ばね実測値とした結果は、表 e-3-1-4 のとおりである。いずれの結果も圧縮ばね理論値と比較して、圧縮ばね実測値が小さくなる傾向があり、その比率は51.6~94.6%であった。なお、この理論値と実測値の整合性に関しては、XとY軸方向で顕著な差は確認できなかった。

表 e-3-1-4 圧縮ばね（偏り配置）の圧縮ばね理論値と圧縮ばね実測値（Hz；X, Y 軸）

	63個	49個	35個	56個
圧縮ばね理論値X軸(Hz): a	13.8	12.2	10.3	13.0
圧縮ばね実測値X軸(Hz): b	12.2	8.0	5.3	12.3
b/a × 100	88.5%	65.8%	51.6%	94.6%
圧縮ばね理論値Y軸(Hz): a	11.3	10.0	9.7	10.7
圧縮ばね実測値Y軸(Hz): b	9.3	7.4	6.8	8.1
b/a × 100	82.2%	74.1%	69.8%	75.9%

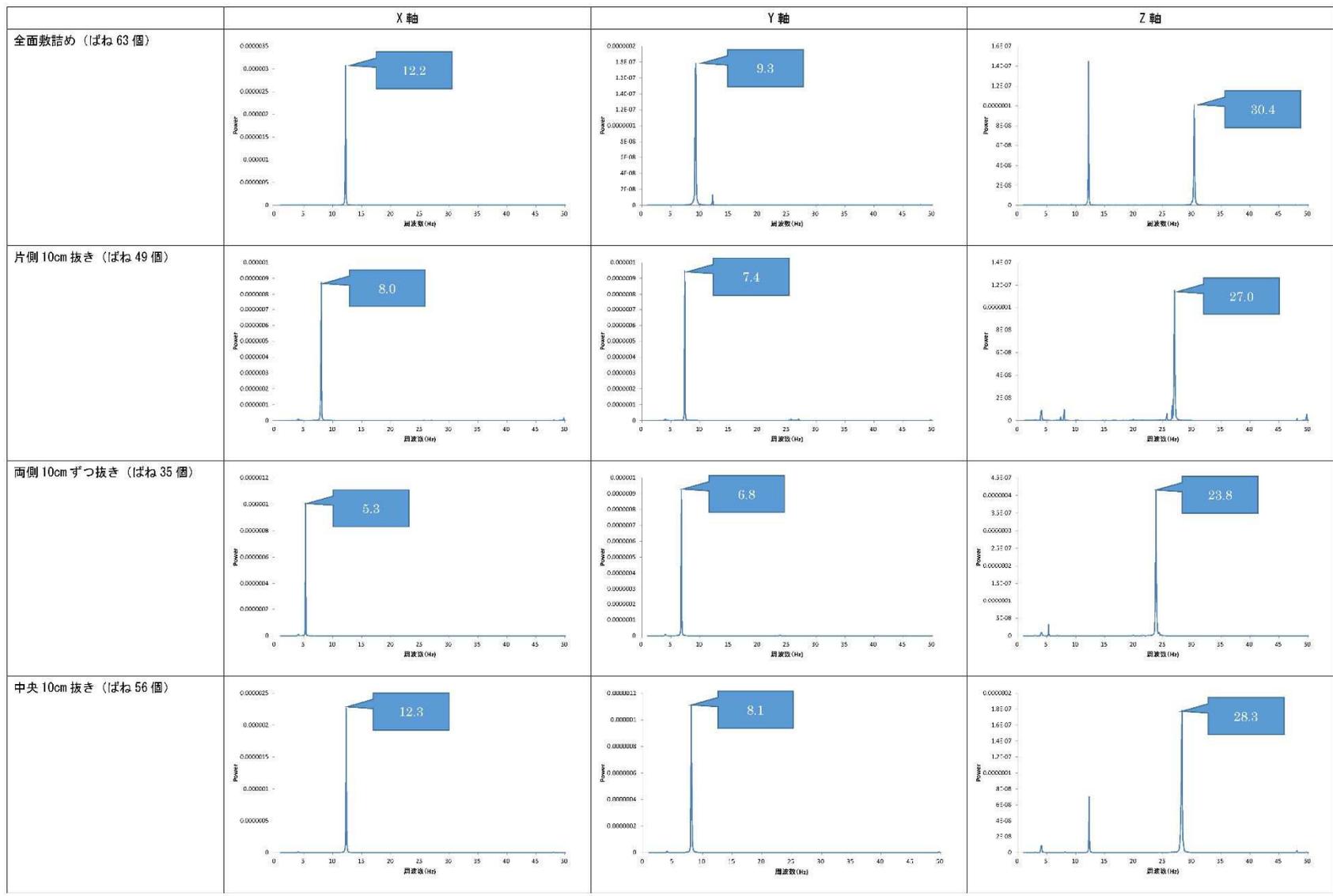


図 e-3-1-3 室内試験—ばね抜き—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

## ウ) 砂

基礎部に砂を敷いた実験は、全面敷詰め、片側 100mm 削除、両側 100mm 削除、中央 100mm 削除の 4 ケース行った。測定は、30 秒/回×50 回とした。測定値は、フーリエ変換(FFT)し、スタッキング(重ね合わせ)処理して、卓越周波数(X軸、Y軸)を確認した。

この砂を基礎とした場合、一部を取り除くと供試体の重さで残りの部分の沈み込みが起こる。このため、接地面下の砂は単位面積あたりのばね定数が大きくなり、X、Y軸方向のいずれの卓越周波数も高くなると考えられる。一方、圧縮ばねを基礎とした実験からは、基礎の端部を取り除いてコンクリート供試体との接地面を小さくすると卓越周波数が低くなること、また、X軸方向の接地面を小さくするとX軸方向の卓越周波数の低下がY軸方向よりも大きくなることが明らかとなっている。

実験結果では、X軸、Y軸のいずれの方向においてもいくつかの卓越周波数が出現したが、上記を踏まえ卓越周波数を特定すると表 e-3-1-5 のとおりとなる。なお、実験において、砂、砂利などの単位面積あたりのばね定数が高い材料を基礎部に設置した場合、Z軸方向の振動は小さく、いくつかの卓越周波数が出現するものの明確なものとは確認できなかったことから、Z軸方向の考察は省略した。

表 e-3-1-5 供試体接地面が砂の卓越周波数 (X, Y, 軸)

	卓越周波数(Hz)		備考
	x軸	Y軸	
全面敷詰め	29.0	16.0	
片側100mm削除	16.5	21.9	
両側100mmずつ削除	14.1	21.5	
全面敷詰め2回目	29.2	21.2	
中央100mm削除	30.0	21.9	

 : 設置面を削除した場所

X軸方向は全面→片側→両側と接地面が減少するほど卓越周波数が低下した。接地面の減少に伴い単位面積あたりのばね定数が大きくなったが、それを上回る形で供試体の不安定性増大に伴う卓越周波数の低下が結果に現れたものと考えられる。

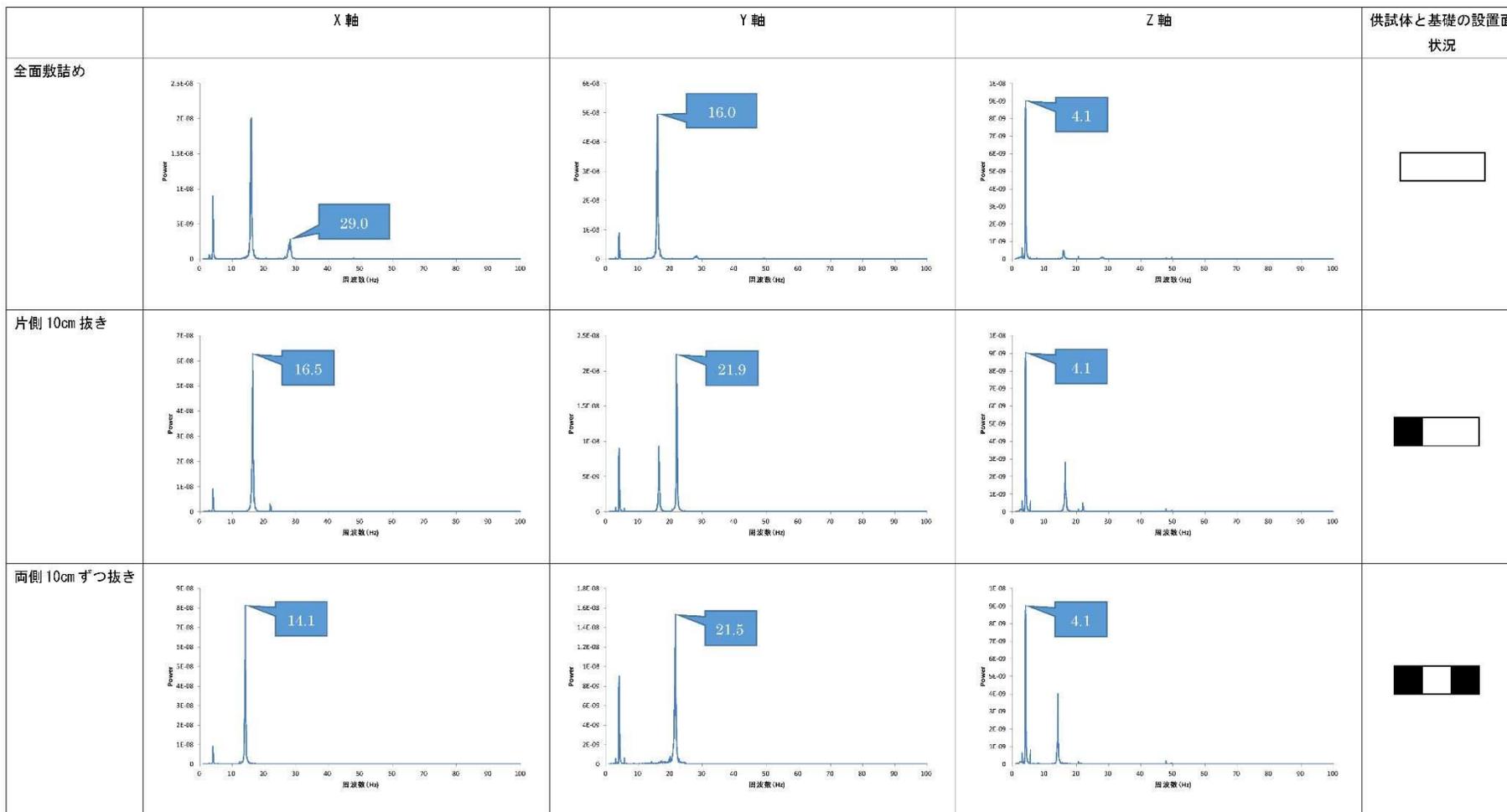
Y軸方向は、全面の卓越周波数が片側・両側より小さいものの、片側→両側では卓越周波数の低下が見られた。X軸と同様に接地面の減少に伴い単位面積あたりのばね定数が大きくなったと考えられるが、供試体の不安定性増大に伴う卓越周波数の低下はX軸方向に比べて小さいと考えられる。

これらの卓越周波数を増減させる要因の影響度は、全面→片側と片側→両側で異なると考えられるが、今年度の実験ケースからは評価することができない。

次に、接地面の中央を取り除いた場合であるが、卓越周波数が全面と同程度または全面よりも高くなる傾向がみられた。これらの要因としては、接地面中央の砂を取り

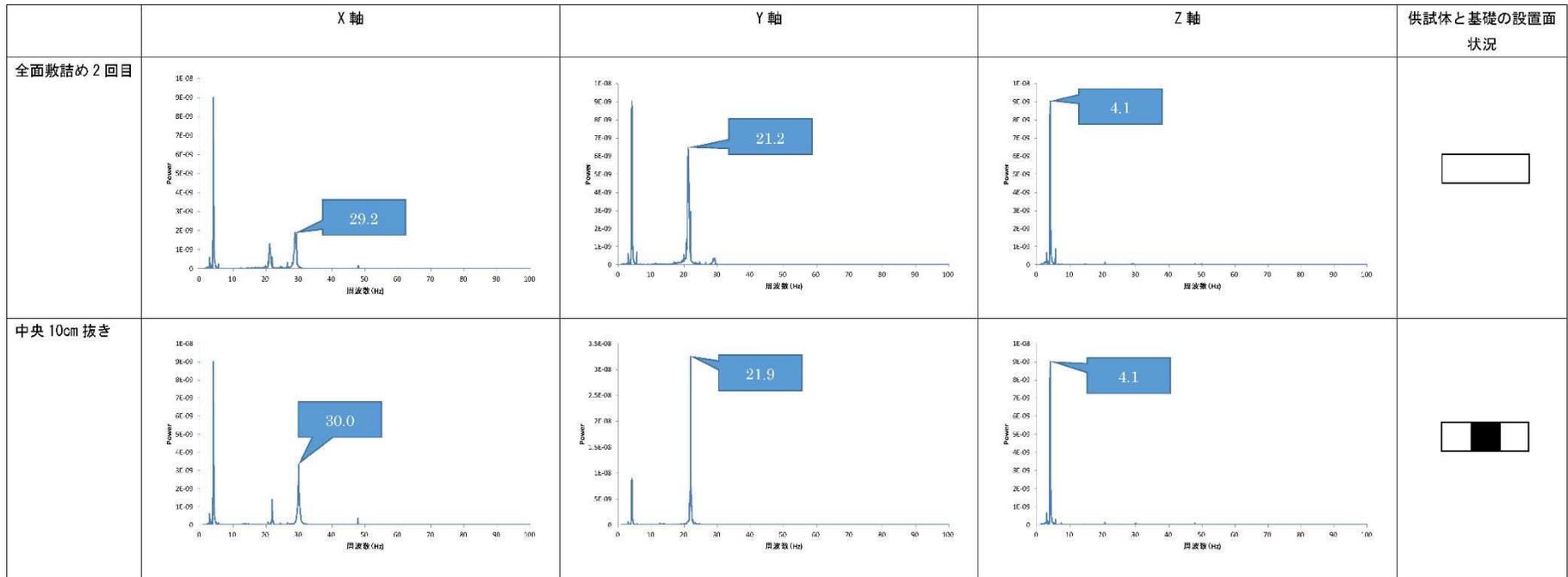
除くことにより供試体が不安定になったこと、一方で前述のように残りの接地面下で砂の単位面積あたりのばね定数が大きくなったことが考えられる。前者は卓越周波数が低下、後者は卓越周波数が高くなる要因であり、実験結果からはこれらがほぼバランスしたものと推測される。なお、中央 100mm 削除を除く X 軸方向の変化を (b) 式に基づき考察すると、接地面の減少によって地盤反力係数  $k$  と設置長さ  $L$  が減少するため、卓越周波数  $f$  が減少したと考えられる。

最後に、3 軸方向のいずれのケースにおいても 4.1Hz に卓越周波数が確認された。この卓越周波数については、実験条件にかかわらず一定値を示したことから実験を行った場所の地盤又は建物からの外部振動を示したものと考えられる。



■ : 設置面を削除した場所

図 e-3-1-4(1) 室内試験—砂—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)



■ : 設置面を削除した場所

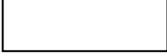
図 e-3-1-4(2) 室内試験—砂—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

## エ) 砂利

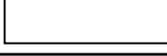
基礎部に砂利を用いた実験は、全面敷詰め、片側 100mm 削除、両側 100mm 削除、中央 100mm 削除の 4 ケース行った。測定は、30 秒/回×50 回とした。測定値はフーリエ変換(FFT)し、スタッキング(重ね合わせ)処理して、卓越周波数(X、Y 軸)を確認した。

砂利を基礎とした場合、砂とは異なり、基礎の一部を取り除いても残りの部分で沈み込みは起きないと想定していた。しかしながら、実験結果では X 軸、Y 軸方向のそれぞれにおいて、基礎の一部を取り除いた場合に卓越周波数が大きくなる傾向も確認されたことから、砂利の場合も砂同様の沈み込みによるバネ定数の上昇が起きているものと推察される。このことを踏まえ、X 軸、Y 軸方向の卓越周波数を特定すると表 e-3-1-6 のとおりとなる。なお、実験において、Z 軸方向の考察を省略した。理由は、ウ) に示すとおりである。

表 e-3-1-6 供試体底面が砂利の卓越周波数(X, Y 軸)

砂利計測1(30秒50回)	卓越周波数(Hz)		備考
	X軸	Y軸	
全面敷詰め	25.00	21.20	
片側100mm削り	15.40	27.60	
両側100mm削り	13.10	24.80	
全面敷詰め2回目(25回測定)	30.60	18.40	
中央100mm削り	32.40	25.70	

砂利計測2(30秒25回)	卓越周波数(Hz)		備考
	X軸	Y軸	
全面敷詰め	28.90	26.10	
片側100mm削り	16.20	21.70	
両側100mm削り	12.30	21.80	
全面敷詰め2回目	34.20	21.60	
中央100mm削り	35.70	26.50	

 : 設置面を削除した場所

X 軸方向は、計測 1、計測 2 とも全面→片側→両側と接地面が減少するほど卓越周波数が低下した。砂の場合と同じく、接地面の減少に伴い単位面積あたりのばね定数が大きくなったが、それを上回る形で供試体の不安定性増大に伴う卓越周波数の低下が結果に現れたものと考えられる。

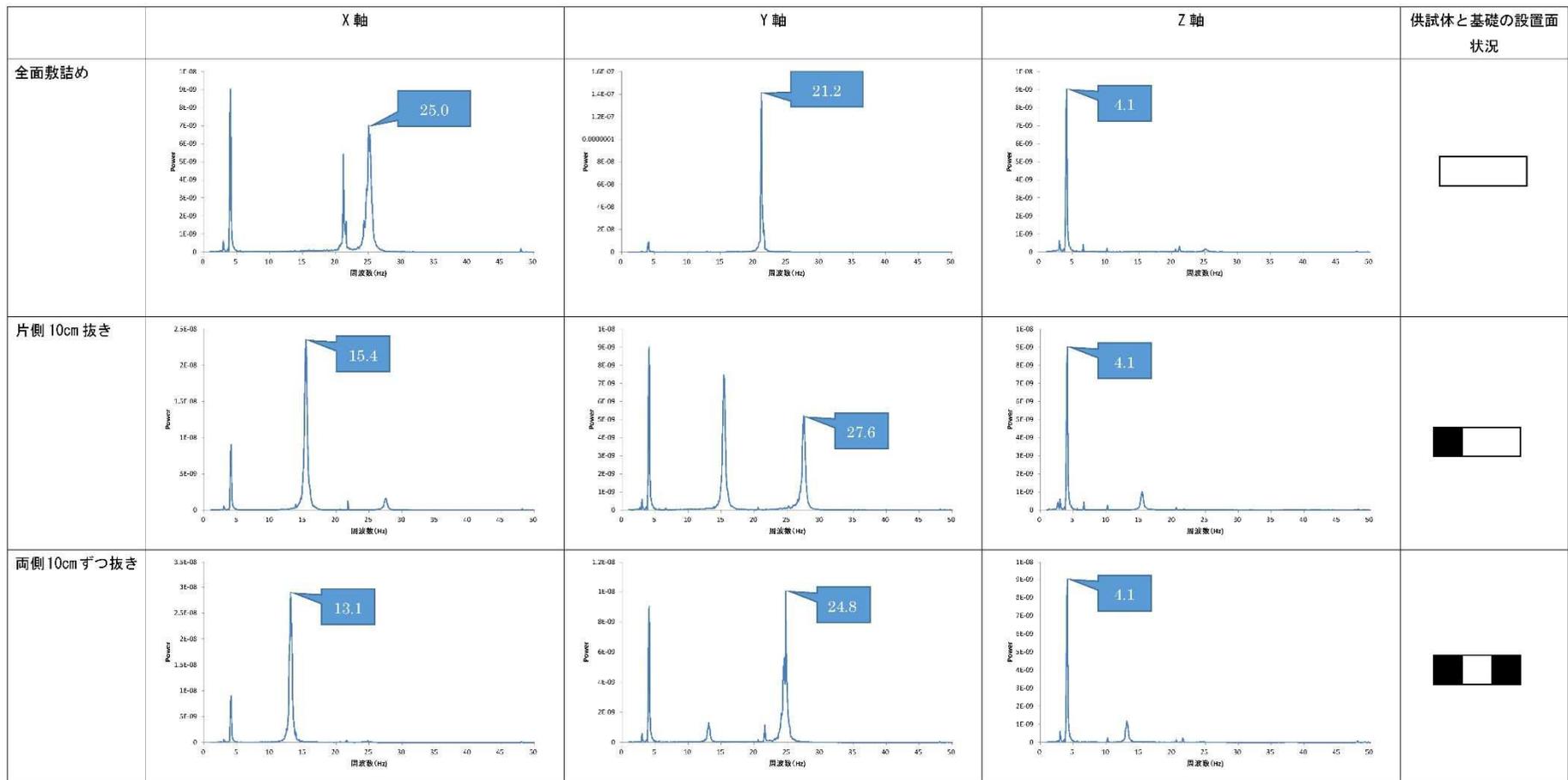
Y 軸方向は、計測 1 と計測 2 で全面→片側→両側と接地面が減少した場合の変化の



傾向が異なった。計測 1 は砂の場合と同じく全面が最も小さい値を示したが、計測 2 の全面は最初に敷き詰めた方で大きな値を示した。これらの原因は明らかでないが、実験条件が影響したものと考えられる。

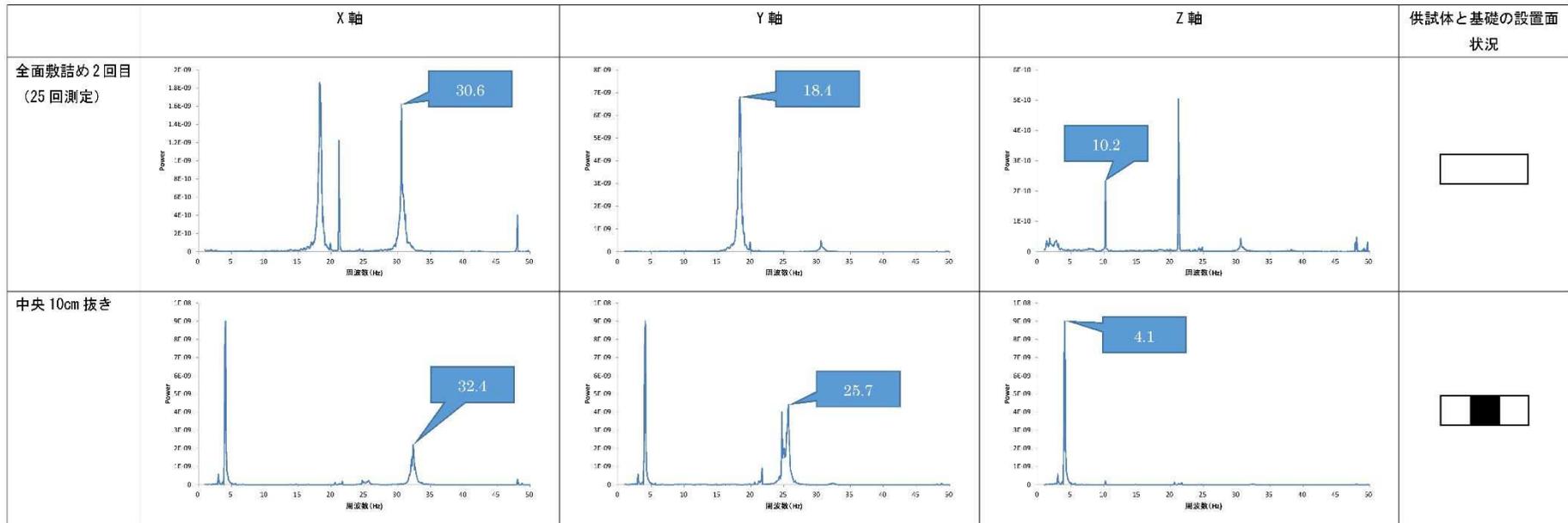
元々、砂の場合と異なり、同じ全面敷き詰めでも、初期と 2 回目の敷き詰め直した場合とでは、X、Y 軸方向で大きく卓越周波数が異なったことから、接地面における砂利のわずかな凹凸が計測結果に影響していると考えられる。一方、基礎に圧縮ばねを用いた実験結果から、X 軸方向の端部を取り除いた場合、供試体の不安定性増大に伴う卓越周波数の変化は、X 軸方向より Y 軸方向が小さいことがわかっている。このため、両軸方向とも接地面の凹凸の影響を受けていると考えられるが、Y 軸方向の振動がその影響を受けやすいものと推測される。

次に、接地面の中央を取り除いた場合、計測 1、計測 2 とも両軸方向で卓越周波数が全面よりも高くなる傾向がみられた。これらの要因としては、接地面中央の砂利を取り除くことにより、残った接地面下で単位面積あたりのばね定数が大きくなったことが強く影響したと考えられる。



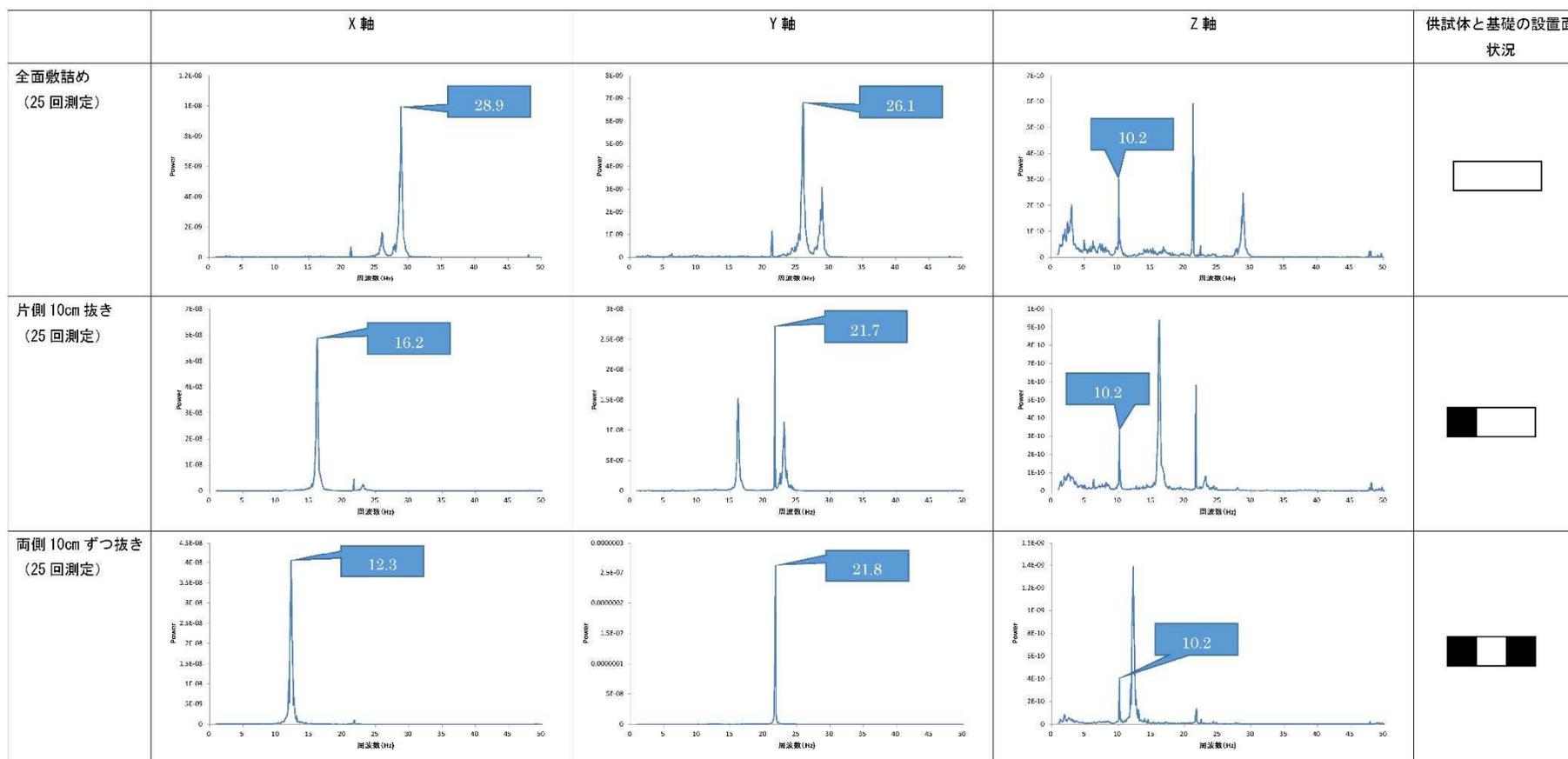
■ : 設置面を削除した場所

図 e-3-1-5(1) 室内試験—砂利 1 回目—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)



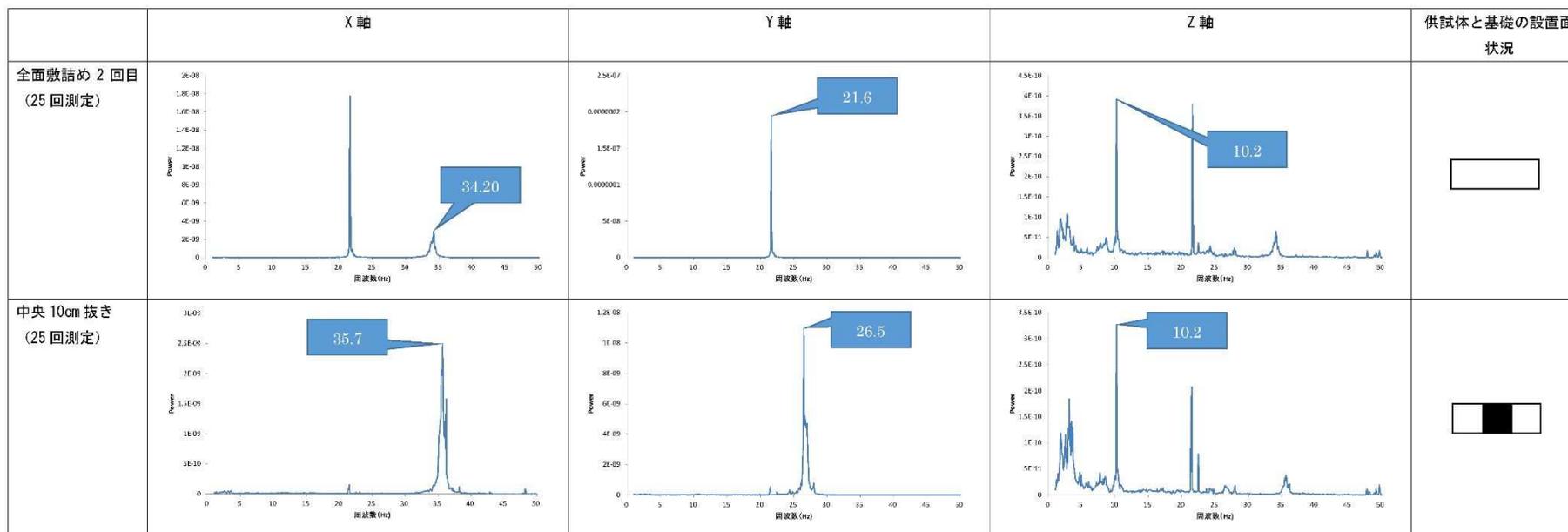
■ : 設置面を削除した場所

図 e-3-1-5(2) 室内試験—砂利 1 回目—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)



■ : 設置面を削除した場所

図 e-3-1-5(3) 室内試験—砂利 2 回目—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)



■ : 設置面を削除した場所

図 e-3-1-5(4) 室内試験—砂利 2 回目—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

## (2) 形状の違い

測定は、1段と2段とし、供試体底面の基礎部は(1)の圧縮ばねを用いた。2段積上げは、(1)で用いた供試体を横向きに倒した形で積上げた。圧縮ばねは、1段および2段それぞれで4、12、48個の3ケースを行い、合計6ケースとした。測定は、30秒/回×50回とした。測定値はフーリエ変換(FFT)し、スタッキング(重ね合わせ)処理して、卓越周波数を確認した。

横向きと縦向きの変化を確認するため、縦向き1段の結果を表 e-3-1-7 に示した。また、横向き1段と2段のケースごとの卓越周波数は、表 e-3-1-8、e-3-1-9 に示した。

表 e-3-1-7 形状の違い(縦向き1段)卓越周波数

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	4.1	3.0	8.9	
12個	5.5	4.5	13.3	X軸の5.5がZ軸にも
48個	9.8	7.4	27.6	X軸の9.8がZ軸にも

表 e-3-1-8 形状の違い(横向き1段)卓越周波数

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	6.2	5.5	8.9	
12個	9.0	7.6	15.0	
48個	12.4	9.2	23.2	Y軸の9.2がX軸にも、X軸の12.4がY軸にも

表 e-3-1-9 形状の違い(横向き2段)卓越周波数

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	2.8	2.3	6.3	
12個	4.1	3.3	10.8	X軸の4.1がZ軸にも
48個	6.2	4.6	19.5	X軸の6.2がY軸にも

縦向き1段と横向き1段に関し、圧縮ばね4個と12個を比較すると、X軸とY軸方向については、横向きが縦向きよりも高い卓越周波数を示した。これは横向きとすることで幅が大きくなり、(b)式におけるLが大きくなったことによるものである。Z軸方向については、圧縮ばね12個で横向きが縦向きよりも大きな値を示した。(a)式から考えると卓越周波数は横向きと縦向きとで変化しないはずであるが、この原因は不明である。

次に、横向き1段と2段を比較すると、3軸方向のいずれにおいても卓越周波数が低下した。これは2段重ねを一つの構造体として考えた場合、(b)式ではIが、(a)式ではmが増加したためである。

この2段重ねを一つの構造体として考えることの妥当性を検証するため、1段と2段の卓越周波数について、その変化の割合を理論式と実測値で比較した(X軸、Z軸)。表 e-3-1-11 で示すように、Z軸の圧縮ばね48個で差があるものの、その他は概ね一致した。実験では、表 e-3-1-9 に示した卓越周波数以外の明確な卓越周波数が確認されなかったことも考慮すると、コンクリート供試体の2段重ねを一体の構造物として

考え、卓越周波数を評価することは概ね妥当と考えられる。

表 e-3-1-10 横向き1段(上)、2段(下)の卓越周波数(理論値)

	卓越周波数(Hz)		
	X軸	Y軸	Z軸
横向き1段・4個	7.1	5.4	8.6
横向き1段・12個	12.3	9.4	15.0
横向き1段・48個	24.7	18.7	29.9

	卓越周波数(Hz)		
	X軸	Y軸	Z軸
横向き2段・4個	3.1	2.5	6.1
横向き2段・12個	5.4	4.4	10.6
横向き2段・48個	10.8	8.7	21.2

表 e-3-1-11 横向き1、2段の卓越周波数理論値と実測値の比較(X軸、Z軸)

横向き1段X軸

個数	4個	12個	48個
理論値:a(Hz)	5.83	10.09	20.19
実測値:b(Hz)	6.20	9.00	12.40
b/a(%)	106.4	89.2	61.4

横向き1段Z軸

個数	4個	12個	48個
理論値:a(Hz)	8.60	15.00	29.90
実測値:b(Hz)	8.90	15.00	23.20
b/a(%)	103.5	100.0	77.6

横向き2段X軸

個数	4個	12個	48個
理論値:a(Hz)	3.01	5.21	10.43
実測値:b(Hz)	2.80	4.10	6.20
b/a(%)	93.0	78.6	59.4

横向き2段Z軸

個数	4個	12個	48個
理論値:a(Hz)	6.10	10.60	21.20
実測値:b(Hz)	6.30	10.80	19.50
b/a(%)	103.3	101.9	92.0

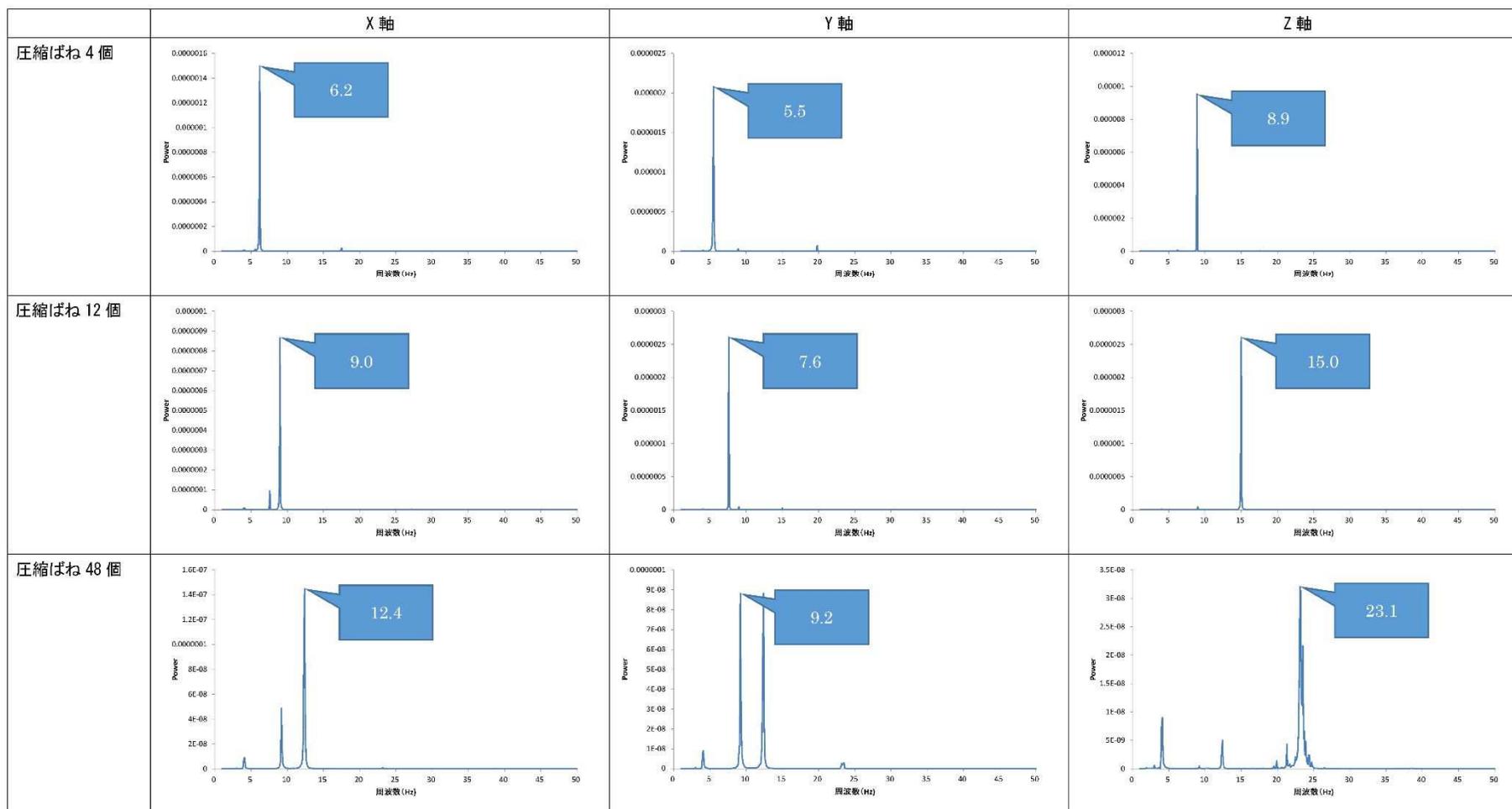


図 e-3-1-6(1) 室内試験—横向き 1 段—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)



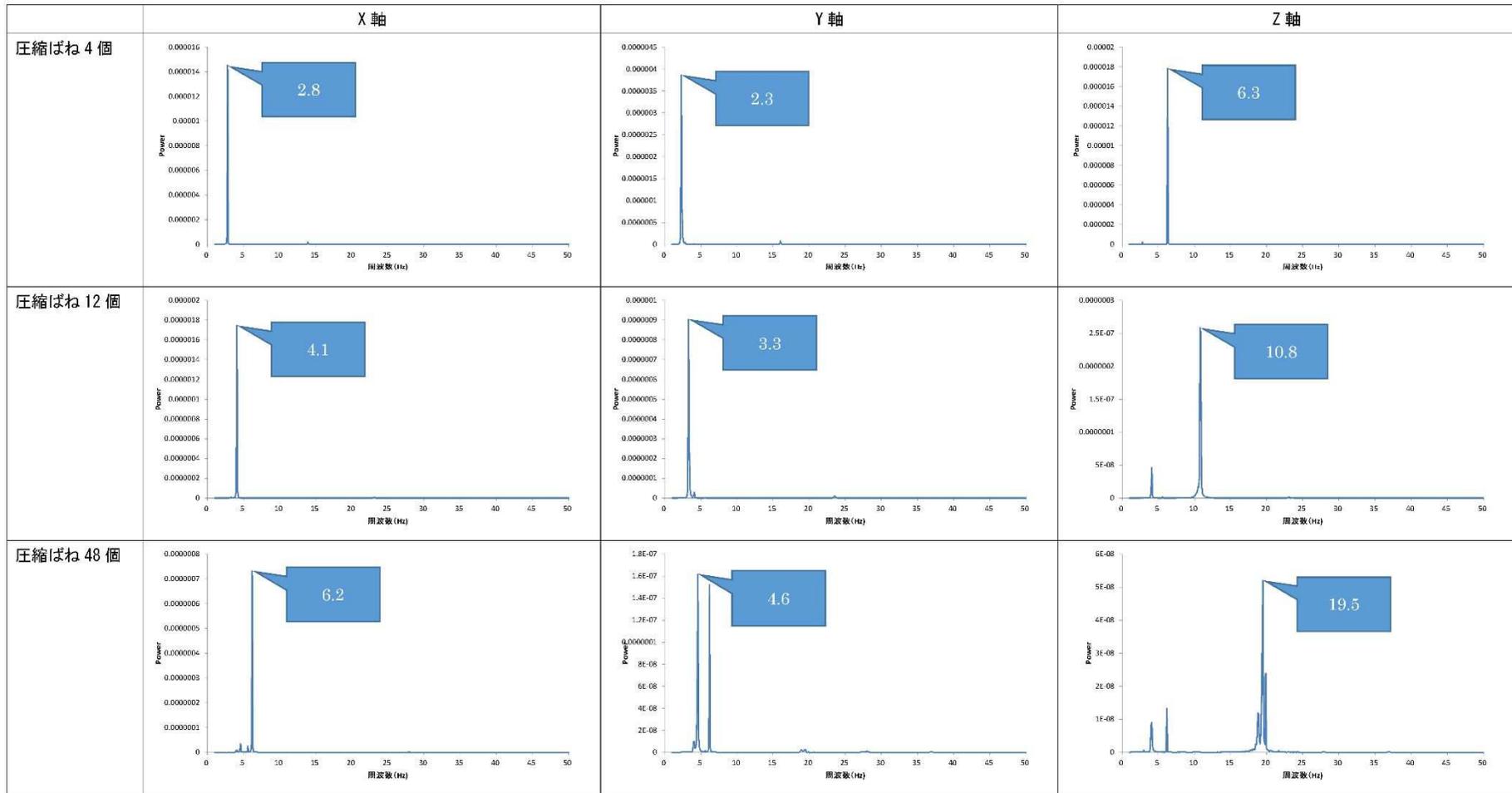


図 e-3-1-6(2) 室内試験一横向き 2 段一測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

### (3) 海水の影響

海水の影響を把握するための実験は、(1)の供試体を用い、供試体底面に圧縮ばねを4、12、63個設置し、水位を20、40cmに変化させて合計6ケース行った。測定は、30秒/回×50回とした。測定値は、フーリエ変換(FFT)し、スタッキング(重ね合わせ)処理して、卓越周波数を確認した。水位0cmの場合も含め、それぞれのケースごとの卓越周波数は、表 e-3-1-12 のとおりであった。

表 e-3-1-12 海水の影響における卓越周波数(実測値)

水位 0 cmの場合

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	4.1	3.0	8.9	
12個	5.5	4.5	13.3	X軸の5.5がZ軸にも
63個	12.2	9.3	30.4	X軸の12.2がZ軸にも

水 20 cmの場合

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	4.1	3.4	8.0	
12個	5.8	4.8	13.6	X軸の5.8がZ軸にも
63個	11.5	7.8	23.1	X軸の11.5がZ軸にも

水 40 cmの場合

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	4.1	3.1	7.7	
12個	5.6	4.4	13.0	X軸の5.6がZ軸にも
63個	11.0	7.1	21.7	X軸の11.0がY, Z軸にも

水深20cm、40cmの卓越周波数を比較した場合、水位が高くなるほど低い値を示す傾向となった。

水位20cm、40cmの場合、浮力を考慮した供試体重量は、230kg、190kgとなる。これらを用いて、(a)式、(b)式からそれぞれの理論値を算定した卓越周波数は、表 e-3-1-13 のとおりである。理論上は、表 e-3-1-13 に示すように、水深が深いほど浮力が大きくなるため、見かけ上の供試体重量が軽くなり、周波数は高くなる。

このように、実測値と理論値の違いで変化の傾向が異なった要因は、水が供試体の振動を抑制するような形で拘束しているためと考えられる。ただし、実測値では水深0cmから20cmまたは40cmの変化について明確な変化の傾向は現れなかった。

表 e-3-1-13 海水の影響における卓越周波数（理論値）

水位 0 cmの場合

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)		
	X軸	Y軸	Z軸
4個	4.6	3.9	8.6
12個	8.0	6.7	15.0
63個	18.3	15.4	34.3

水 20 cmの場合

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)		
	X軸	Y軸	Z軸
4個	5.98	5.26	9.4
12個	10.36	9.11	16.2
63個	23.74	20.88	37.1

水 40 cmの場合

圧縮ばね個数	卓越周波数(Hz)		
	X軸	Y軸	Z軸
4個	6.58	5.79	10.3
12個	11.40	10.03	17.8
63個	26.12	22.98	40.9

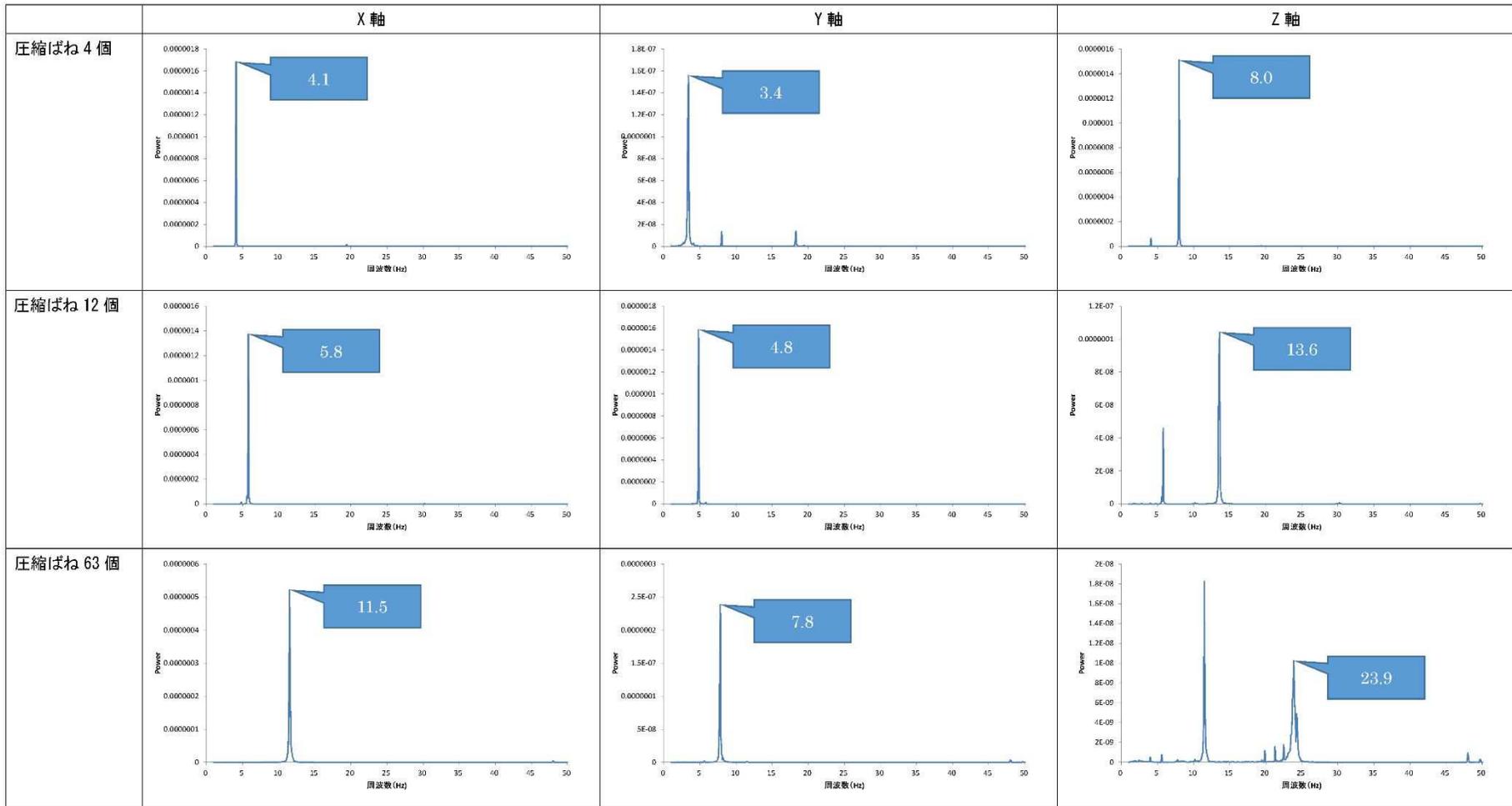


図 e-3-1-7(1) 室内試験—水拘束 (20cm) —測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

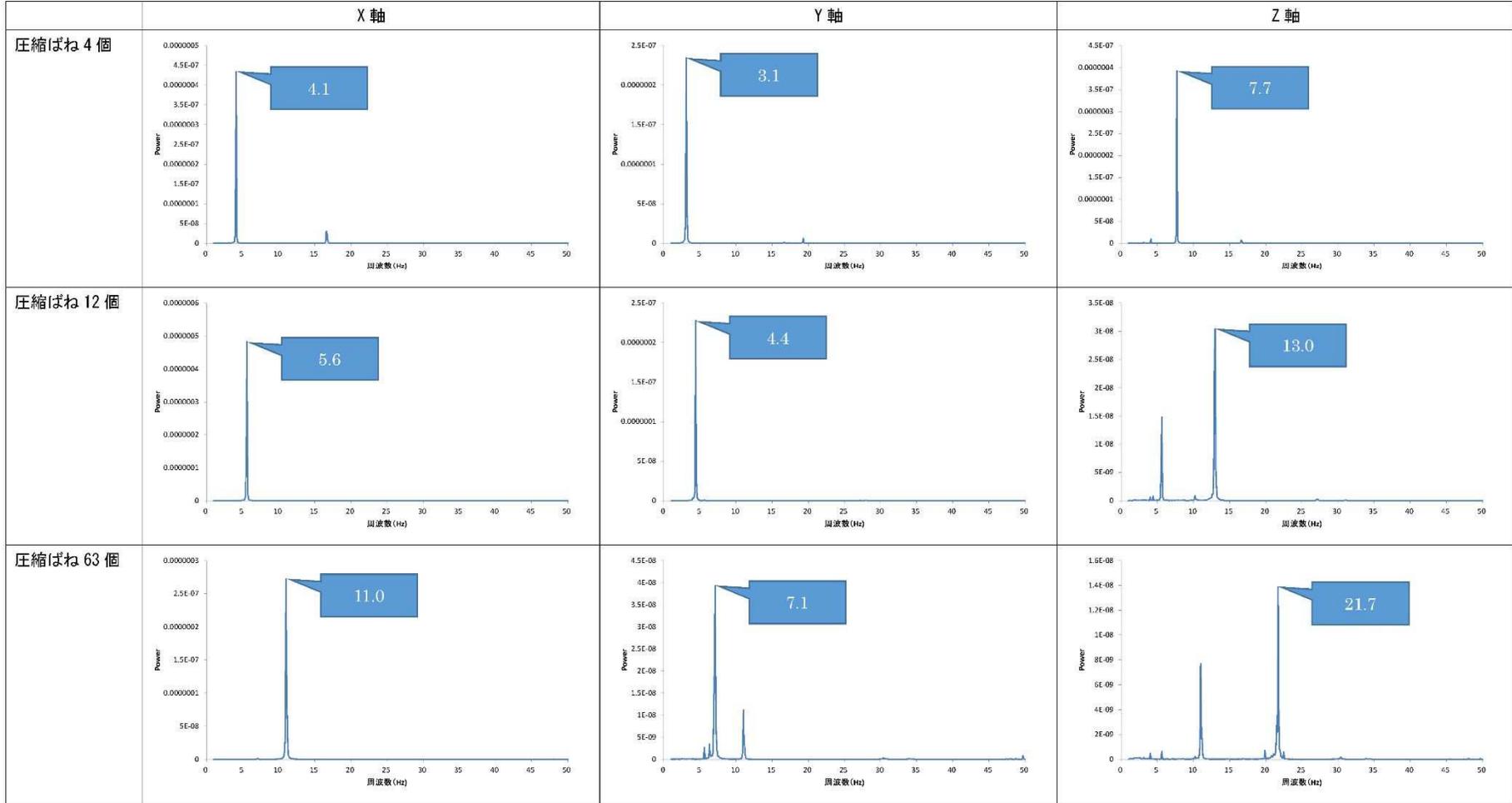


図 e-3-1-7(2) 室内試験—水拘束 (40cm) —測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

#### (4) 破損部の影響

##### ア) 固有振動測定 (速度計)

破損部の影響を把握するための実験は、空洞が小と大の供試体を用い、供試体底面に圧縮ばねを4、12、63個設置して、合計6ケース行った。測定は30秒/回×50回とした。測定値はフーリエ変換 (FFT) し、スタッキング (重ね合わせ) 処理して、卓越周波数を確認した。それぞれのケースごとの卓越周波数は、表 e-3-1-14 のとおりであった。

表 e-3-1-14 空洞部の影響における卓越周波数

##### 空洞なしの場合

圧縮ばね個数	卓越周波数 (Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	4.1	3.0	8.9	
12個	5.5	4.5	13.3	X軸の5.5がZ軸にも
63個	12.2	9.3	30.4	X軸の12.2がZ軸にも

##### 空洞小の場合

圧縮ばね個数	卓越周波数 (Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	4.1	3.3	9.2	
12個	5.6	4.7	15.6	
63個	10.4	7.7	26.5	X軸の10.4がY軸にも

##### 空洞大の場合

圧縮ばね個数	卓越周波数 (Hz)			備考
	x軸	Y軸	Z軸	
4個	4.5	3.6	9.8	
12個	5.9	5.1	16.5	
63個	10.8	9.5	31.7	X軸の10.8がZ軸にも

空洞小と空洞大を比較した場合、3軸方向のいずれも卓越周波数が高くなった。これは空洞により供試体重量が減少したため、(a)式では  $m$ 、(b)式では  $I$  が小さくなったことによるものである。

これらの結果を空洞なしと比較すると、圧縮ばね4個と12個で、3軸方向とも空洞なしの卓越周波数が低く (X軸4個のみ同じ) になった。このことから、空洞により供試体重量が減少した場合、卓越周波数が高くなることが確認できる。

なお、圧縮ばね63個のみを比較した場合、空洞なし、空洞小、空洞大の順に卓越周波数が大きくなり、空洞小が最も小さい値を示した。可能性としては、圧縮ばね63個の全てが供試体底面と密着していなかったことが考えられるが、詳細は不明である。

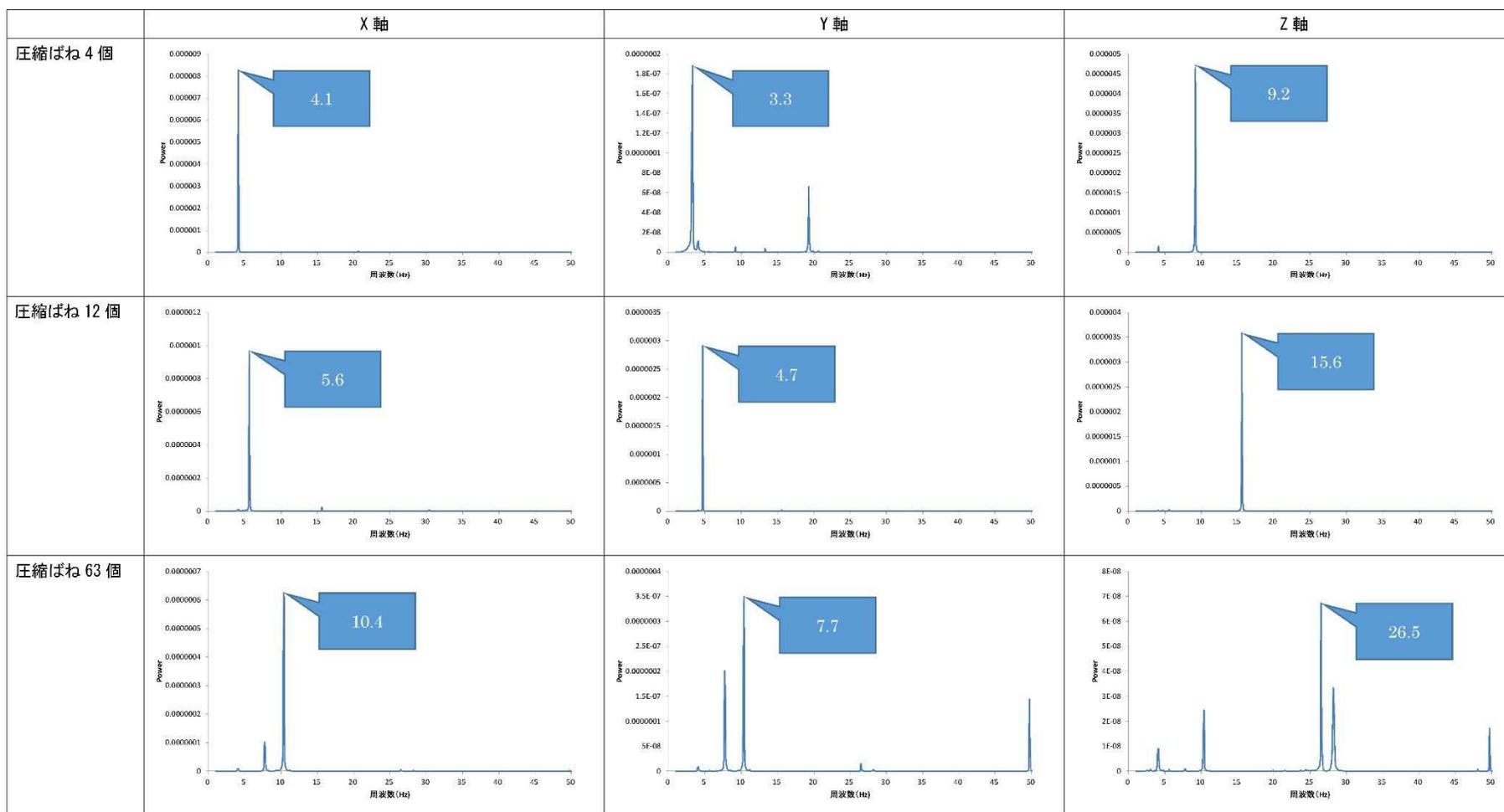


図 e-3-1-8(1) 室内試験—空洞 (小)—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)

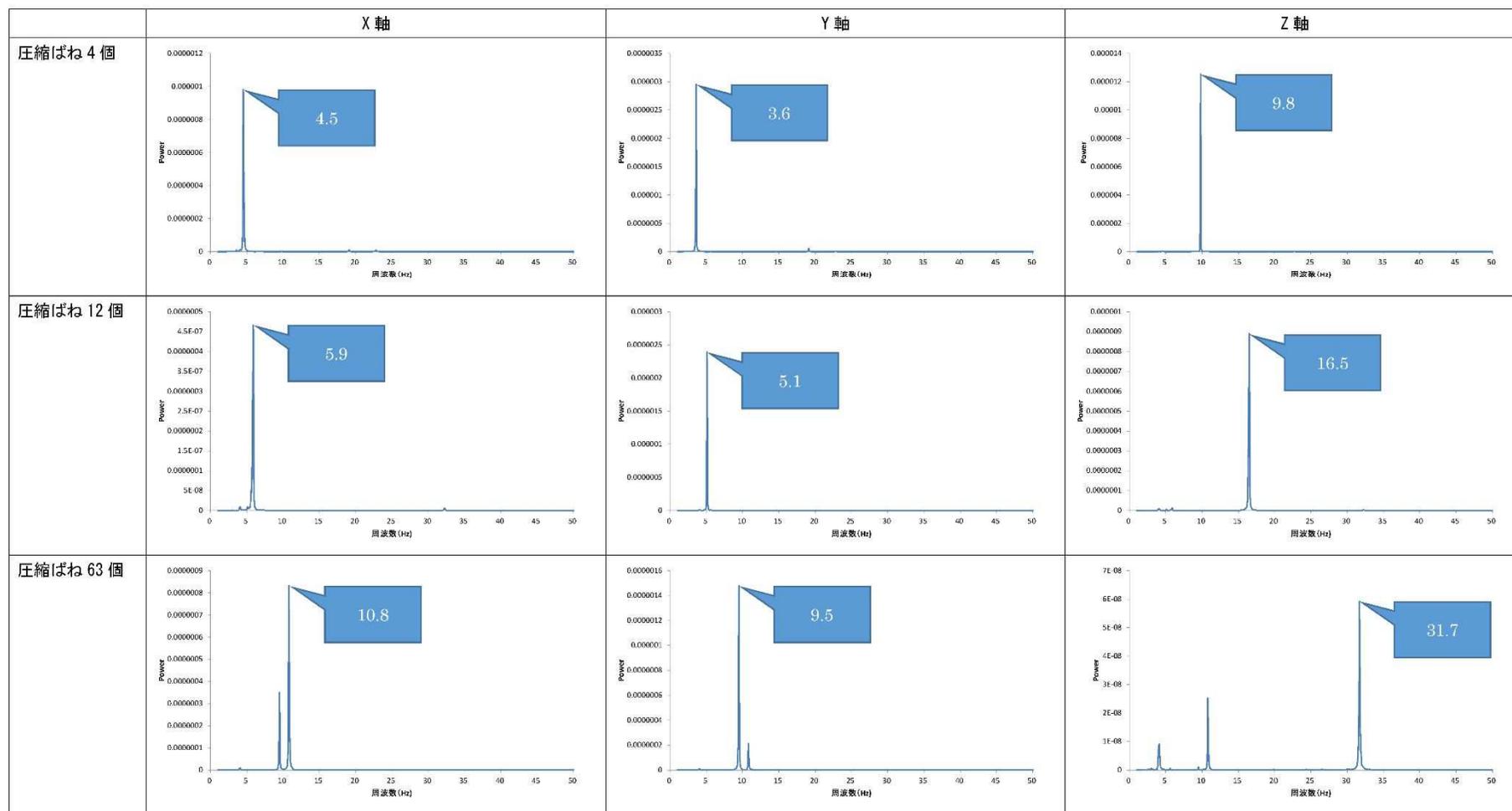


図 e-3-1-8(2) 室内試験—空洞 (大)—測定結果 (X 軸、Y 軸、Z 軸)



### イ) 衝撃弾性波速度 (iTECS)

図 e-3-1-9 に示すように、縦方向の測定点は、上端中央部から 50mm の位置を縦①とし、⑥まで設定した。横方向の測定点は、左端部中央から 50mm の位置を横①とし、④まで設定した。反対側の面にも同様の測定点を配置し、打撃する発信点と受信する受信点間の距離が等しくなるようにした。また、斜めに伝わる弾性波を計測するために、打撃面の縦①と受信面の縦⑥間、また、その反対においても測定した。これらの測定は、1箇所あたり 5回測定し、伝播距離と時間から平均の表面弾性波速度を求めた。

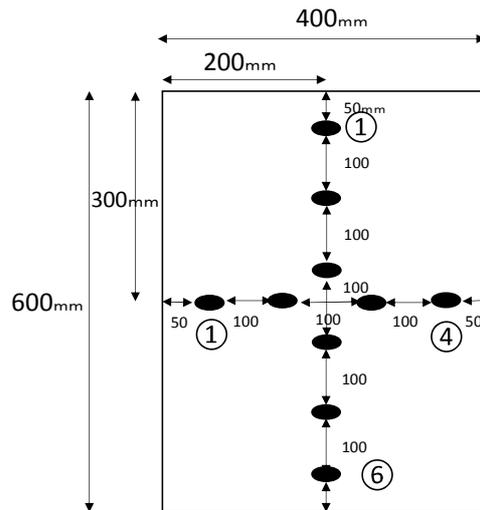


図 e-3-1-9 衝撃弾性波速度の測定点

測定結果は、表 e-3-1-15 のとおりである。いずれの測定条件でも空洞を含む場合、平均弾性波速度が低下する傾向であった。空洞部を通過していないと想定される弾性波速度は、3,866~4,738cm/s であり、空洞部を通過したと想定される弾性波速度は 2,588~3,650cm/s であった。縦方向の計測に関し、空洞大の場合、中央にある 2点とその両隣の 2点では、中央の方が明らかに弾性波速度は低下した。これは、弾性波が空洞部を迂回して伝播する際、両隣 2点よりも迂回距離が長くなった影響であると考えられる。空洞の奥行については、空洞大と空洞小で 100mm の差があり、弾性波速度も空洞小の方が大きくなったが、その差はわずかである。

横方向の計測に関し、空洞大及び小の両供試体とも空洞部を通る測定では、いずれも概ね 3,500m/s となった。奥行き方向の差は明確に確認されなかった。

以上の実験結果から、供試体内部に空洞がある場合、透過法により検出できる可能性があることが分かった。しかしながら、空洞部の奥行については、判別することが難しいと考えられる。

表 e-3-1-15 各測定条件における平均弾性波速度

供試体空洞	測定条件		端部からの距離 (mm)	平均弾性波速度 (cm/s)	備考
大	縦	①	50	4,474	
		②	150	3,565	空洞含む
		③	250	2,588	空洞含む
		④	350	2,717	空洞含む
		⑤	450	3,810	空洞含む
		⑥	550	4,738	
	横	①	50	4,436	
		②	150	3,517	空洞含む
		③	250	3,631	空洞含む
		④	350	4,611	
	斜め	①-⑥	-	3,053	空洞含む
		⑥-①	-	3,005	空洞含む
小	縦	①	50	4,460	
		②	150	3,866	
		③	250	2,950	空洞含む
		④	350	2,862	空洞含む
		⑤	450	4,575	
		⑥	550	4,460	
	横	①	50	4,352	
		②	150	3,650	空洞含む
		③	250	3,360	空洞含む
		④	350	4,309	
	斜め	①-⑥	-	3,670	空洞含む
		⑥-①	-	3,428	空洞含む

### 3-2 現地調査

筒石漁港東防波堤における現地調査の実施日、計測方法、対象スパン等は、表 e-3-2-1 のとおりである。工事前は7月8、9日に、工事後は8月16、17日に実施した。また、予備的計測として、10月20日にもデータ取得を実施した。なお、これまでの実験結果から、防波堤の振動は法線直角方向（計測では X 軸方向）で顕著になると考えられることから、本報告書では X 軸方向の結果を基に卓越周波数の変化を評価した。また、以下に示す現地調査の結果及び考察については、検討の手順がわかるよう時系列的に整理した。

表 e-3-2-1 筒石漁港現地調査一覧

実験日	報告書記載箇所	計測	設置スパン	洗掘状況	仕様機器 (設置位置)	測定周波数	打撃物	秒数	ファイル数
7月8日	(1)①、②	測定1 常時微動	5-A	大	水工研①速度計(No.200) 港内側上面	200Hz	—	30秒	49
	(1)②				東海大速度計 港外側上面	100Hz	—	30秒	50
	(1)②		5-B	中	水工研②速度計(No.201) 港内側上面	200Hz	—	30秒	50
	(1)③		5-A	大	東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz	—	30秒	50
	(1)①、②	測定2 常時微動	6-A	小	水工研①速度計(No.200) 港内側上面	200Hz	—	30秒	50
	(1)②				東海大速度計 港外側上面	100Hz	—	30秒	50
	(1)②		8-A	健全	水工研②速度計(No.201) 港内側上面	200Hz	—	30秒	51
(1)③	6-A	小	東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz	—	30秒	50		
7月9日	(1)②	常時微動 (予備的計測)	3-A	5-A より大	水工研②速度計(No.201) 港内側上面	200Hz	—	30秒	50
7月8日	(1)①、②	測定3 側方打撃	6-A	小	東海大速度計 港外側上面	100Hz	・30kg鉄球 ・35kgタル ・60kg鉄塊	10~15秒	10
	(1)③				東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz		10~15秒	10
	(1)①、②		5-A	大	東海大速度計 港外側上面	100Hz	・60kg鉄塊 ・35kgタル	10~15秒	10
	(1)③				東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz		10~15秒	10
7月9日	(3) (3)	測定4 透過法	5-A 5-B	大 中	ITECS	—	—	—	10測線×5回
8月16日	(1)①、②	測定1 常時微動	5-A	大	水工研①速度計(No.200) 港内側上面	200Hz	—	30秒	50
	(1)②				東海大速度計 港外側上面	100Hz	—	30秒	50
	(1)②		5-B	中	水工研②速度計(No.201) 港内側上面	200Hz	—	30秒	50
	(1)③		5-A	大	東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz	—	30秒	—
	(1)①、②	測定2 常時微動	6-A	小	水工研①速度計(No.200) 港内側上面	200Hz	—	30秒	50
	(1)②				東海大速度計 港外側上面	100Hz	—	30秒	50
	(1)②		8-A	健全	水工研②速度計(No.201) 港内側上面	200Hz	—	30秒	51
(1)③	6-A	小	東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz	—	30秒	—		
8月17日	(1)②	常時微動 (予備的計測)	3-A	5-A より大	水工研②速度計(No.201) 港内側上面	200Hz	—	30秒	50
8月16日	(2)①	測定3 側方打撃	6-A	小	東海大速度計 港外側上面	100Hz	・30kg鉄球 ・35kgタル ・60kg鉄塊	10~15秒	10
	(2)②				東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz		10~15秒	10
	(2)①		5-A	大	東海大速度計 港外側上面	100Hz	・60kg鉄塊 ・35kgタル ・30kg鉄球	10~15秒	10
	(2)②				東洋計測加速度計 港内側側面	200Hz		10~15秒	10
8月17日	(3) (3)	測定4 透過法	5-A 5-B	大 中	ITECS	—	—	—	10測線×5回
10月20日	(1)②	常時微動 (予備的計測)	港内地盤	同時計測	水工研②速度計(No.201) 港内の地盤上	200Hz	—	35秒	50
	(1)②		5-A	同時計測	水工研①速度計(No.200)	200Hz	—	35秒	50
	(1)②		岸壁	同時計測	水工研②速度計(No.201) 東防波堤基部に近い岸壁	200Hz	—	35秒	25
	(1)②		5-A	同時計測	水工研①速度計(No.200)	200Hz	—	35秒	25

### (1) 測定 1、2 (常時微動)

以下、断りがない限り、水産工学研究所の速度計を用いた結果である。

#### ① 測定 1, 2 に係る FFT 処理

理論式 (小坪、土木振動学、ロッキング振動の式) や有識者からの助言等から防波堤の固有振動が数 Hz~80Hz 程度の間で捉えられるものとして計測を実施した。計測は想定した周波数帯に合わせ、サンプリング周波数 200Hz、計測時間 30 秒とし、スタッキングするために 50 回計測とした。取得したデータの解析は、卓越周波数を算定する方法として一般的に用いられている FFT (高速フーリエ変換) 処理を行った。

結果の一部を図 e-3-2-1 に示す。FFT 処理で求めたパワースペクトルは、いくつかの卓越周波数を示したが、明確な卓越周波数は得られなかった。これらの卓越周波数は工事前後で変化したが、その傾向は明瞭ではなかった。

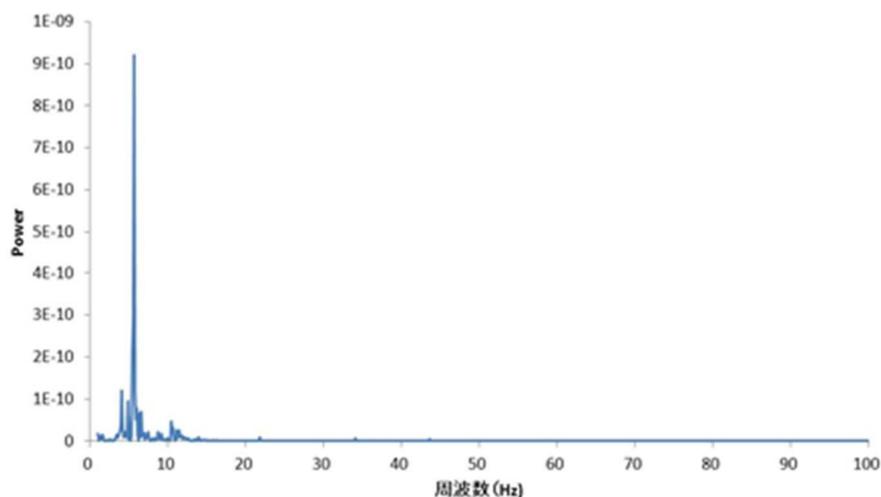


図 e-3-2-1 筒石漁港 7 月 5 - A (X 軸)

## ② 測定 1, 2 のコヒーレンシー解析

①の FFT による解析処理では、着目すべき卓越周波数がいずれであるか判別できなかったため、各測定回において捉えられた共通の周波数があるかどうかを確認する方法として、コヒーレンシー解析を行った（参考 1 参照）。

結果の一部を図 e-3-2-2 に示す。相関の高い卓越周波数を捉えることができたが、FFT 処理で求めたパワースペクトルと組み合わせて評価した場合、構造物の固有振動として着目すべき卓越周波数は判別できなかった。

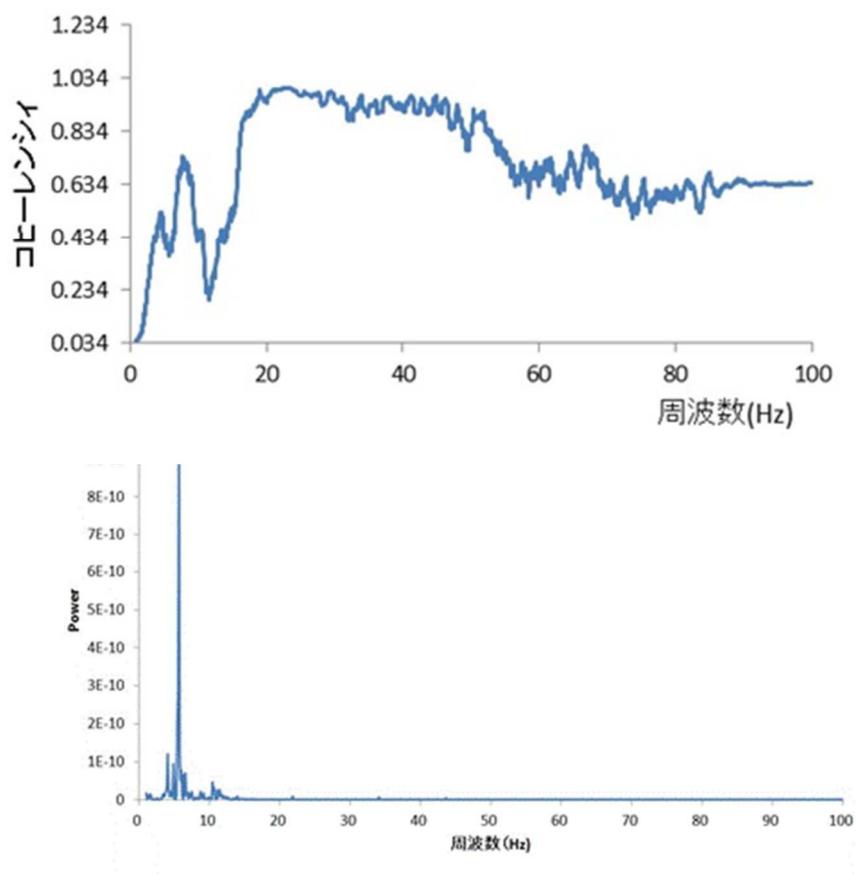


図 e-3-2-2 筒石漁港 7月5 - A (X軸)

【参考1：コヒーレンシー解析】\*\*\*\*\*

コヒーレンシー関数は、入力-出力の信号システムにおいて、入力と出力のそれぞれの信号の相関係数を周波数毎に求めたものであり、以下で定義できる。

$$C_h(\omega) = \frac{C_{xy}^2(\omega)}{|X(\omega)Y(\omega)|}$$

この計算は、複数回の入力信号と出力信号の対を用いており、以下を仮定している。

【仮定】

測定した常時微動波形の中に、共通な周波数があるとするれば、それほどの時間に測定しても、同様に発生する。また、ある測定の中で偶然観測された周波数成分は、他の測定では観測されない場合が多い。

【本調査で用いた方法】

複数回の測定を行い、測定の奇数回目と偶数回目でのパワー、クロスパワーを求めて、これを入力-出力関係とみなし、コヒーレンス関数とした。計算式は、以下のとおりである。

$$C_h(\omega) = \frac{\sum C_{xy}^2(\omega)}{\sum C_{xx}(\omega) \sum C_{yy}(\omega)}$$

なお、 $C_{xx}$ は、奇数回目のパワースペクトル、 $C_{yy}$ は、偶数回目のパワースペクトル、 $C_{xy}$ は、奇数回目と偶数回目のクロスパワースペクトルである。

### ③ 自己相関関数による測定データの周期性確認と AR モデルによる解析

①及び②の検討では、50 回の計測データ全てを用いて解析を行っていたが、試験的に自己相関関数により個々のデータを確認したところ、測定回によっては周期的な振動を捉えられていないことが判明した(図 e-3-2-3(1), e-3-2-3(2)参照)。

(図 e-3-2-3(2)が周期的な振動を捉えていない波形を示す)。また、文献等から、常時微動で励起された構造物の振動は、計測時点における外部振動の影響を受けることや振動自体が非常に微少であることから、建物の振動を計測する場合でも難しいとされている。このため、50 回分のデータを全て同等とみなして解析を行うことは、不適切であると考えられた。

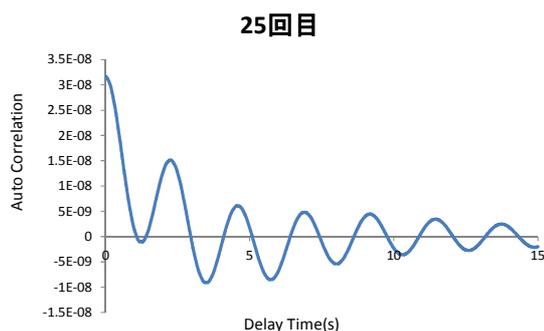


図 e-3-2-3(1) 筒石漁港 8 月 5 - A (X 軸)

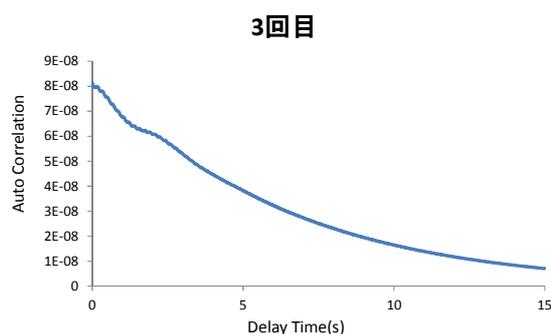


図 e-3-2-3(2) 筒石漁港 8 月 5 - A (X 軸)

一方、①の検討から卓越周波数は 1Hz 以下の低周波数帯にあると考えられたが、FFT 処理では低周波数帯で十分な分解能を得られないこと、FFT ではノイズの影響を受けやすいことから、これらの問題に対応できる自己回帰モデル (AR モデル) で解析を行うことが妥当と考えられた (参考 2 参照)。

そこでまず、自己相関関数により計測データの周期性を確認し、周期性が確認された測定回を抽出し、卓越周波数は、その抽出した測定回のデータを用いて解析した。なお、AR モデルでは、自己相関関数を算定する際に用いる自己回帰係数から MEM 処理によりパワースペクトルを算定するプログラムとなっている。

図 e-3-2-4(1)～(9)は、測定データに周期性が確認された測定回の自己相関関数とパワースペクトルのうち、代表的なものを示した。図から、工事前 (7 月) の卓越周波数は概ね 0.15～0.2Hz であるが、工事後 (10 月) は概ね 0.4～0.45Hz となった。工事後は堤体が安定し卓越周波数が大きくなるため、調査結果は妥当と言える一面もあるが、周波数の変化率がかなり大きくなった。10 月の 5A における測定

結果では、概ね 0.25Hz となった。7 月及び 8 月の測定日は風であったが、波浪の影響は否定できない。なお、新潟県による工事前の潜水調査では、場所により基礎部の吸い出し又は欠損したボリュームが異なっていたが、工事前の計測結果からは、健全な状態に近い 8A で高めの卓越周波数を示したものの、それ以外は場所の違いによる卓越周波数の差違が確認できなかった。

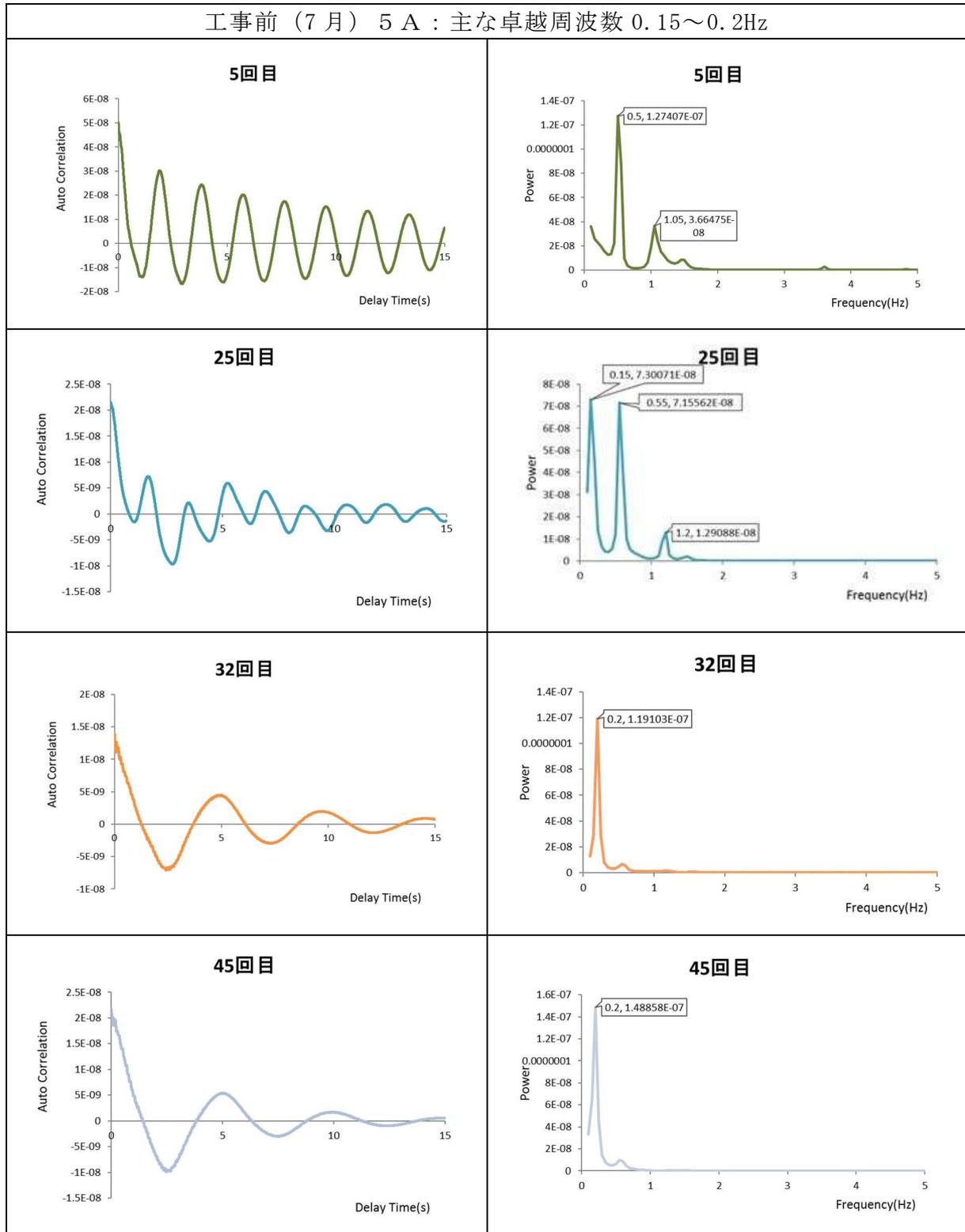


図 e-3-2-4(1) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル



工事前 (7月) 5 B : 主な卓越周波数 0.2Hz

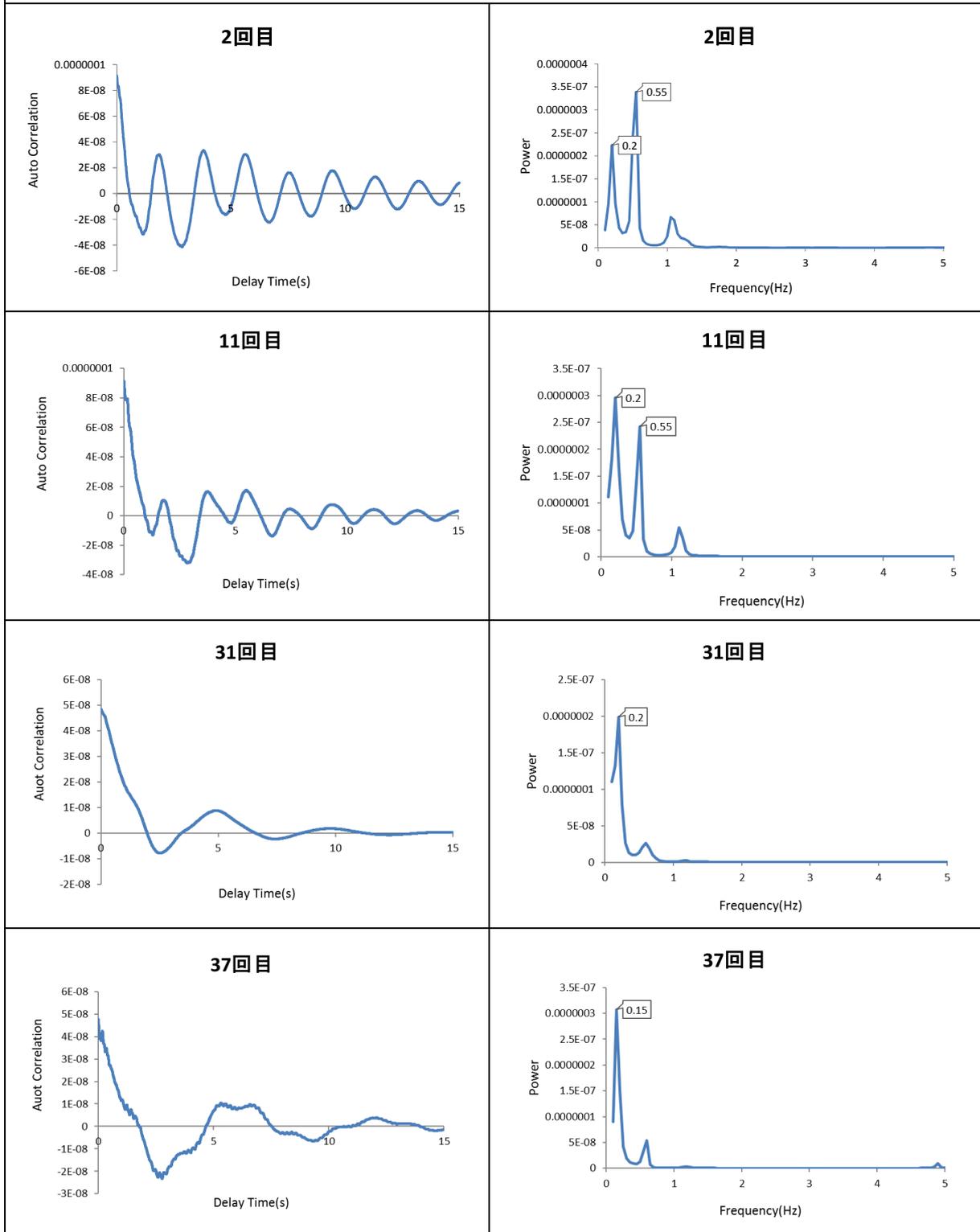


図 e-3-2-4 (2) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

工事前 (7月) 6 A : 主な卓越周波数 0.15~0.2Hz

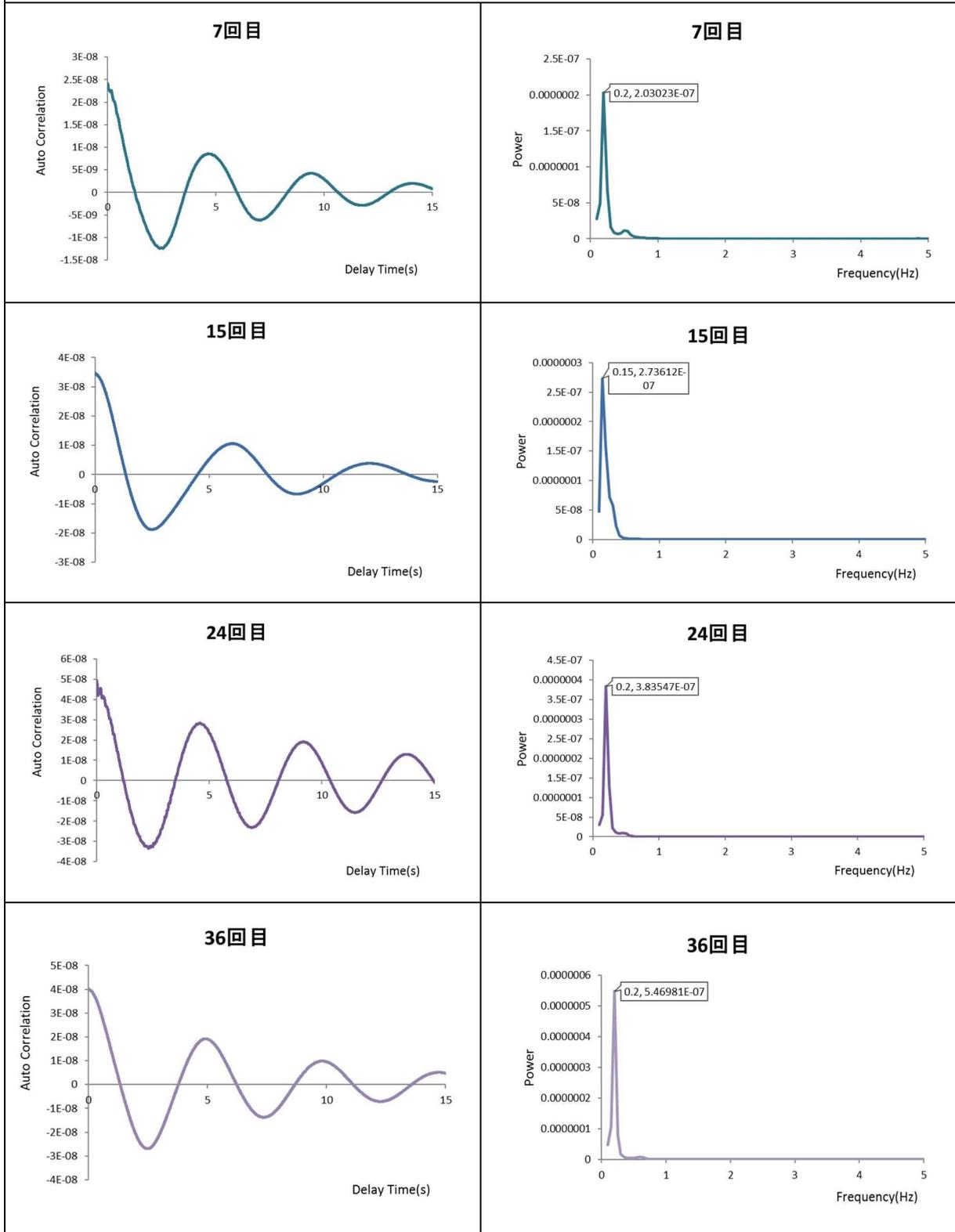


図 e-3-2-4 (3) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

工事前 (7月) 8 A : 主な卓越周波数 0.2~0.25Hz

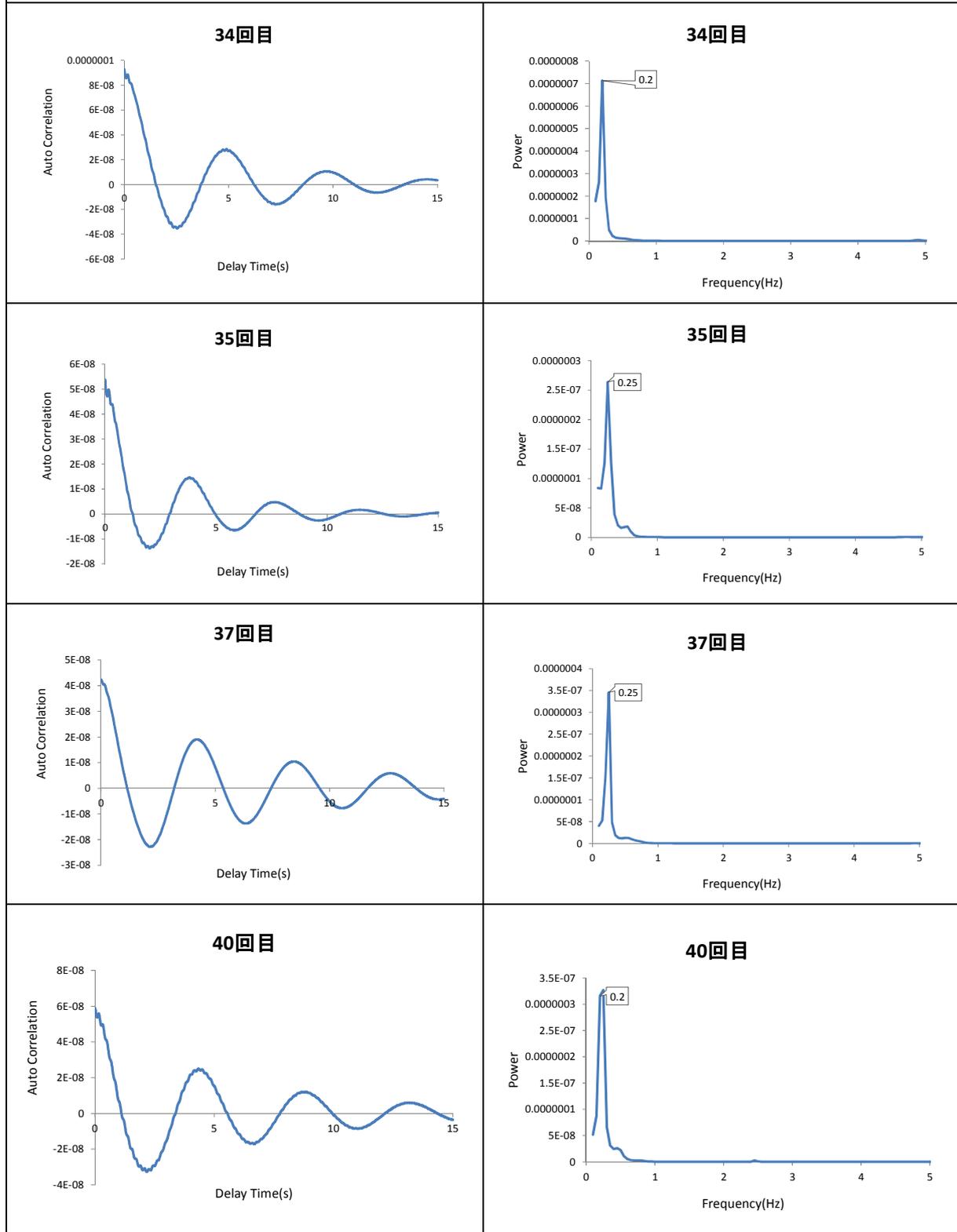


図 e-3-2-4(4) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

工事後 (8月) 5 A : 主な卓越周波数 0.4~0.45Hz

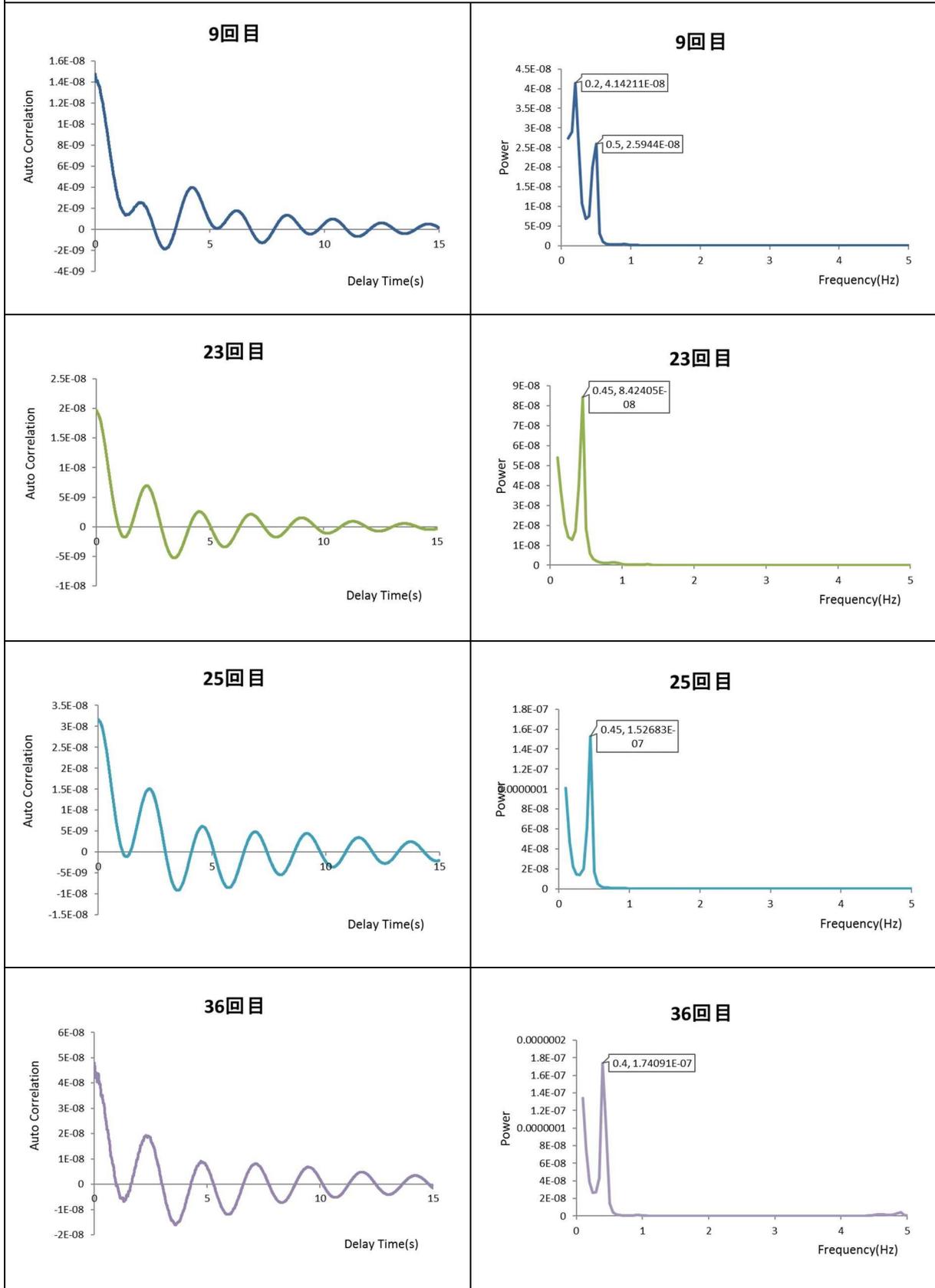


図 e-3-2-4 (5) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

工事後（8月）5B：主な卓越周波数 0.4~0.45Hz

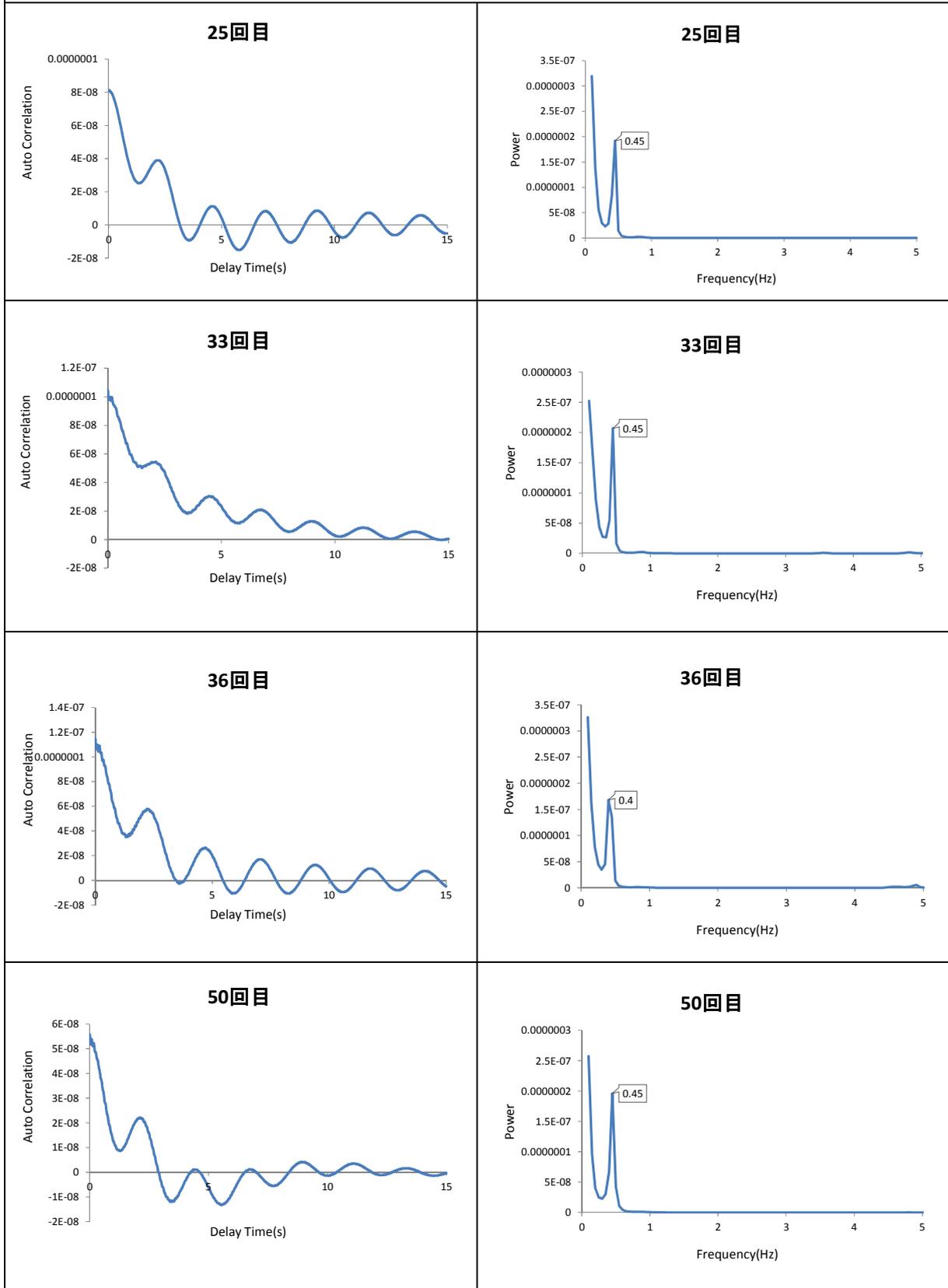


図 e-3-2-4(6) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

工事後 (8月) 6 A : 主な卓越周波数 0.4Hz

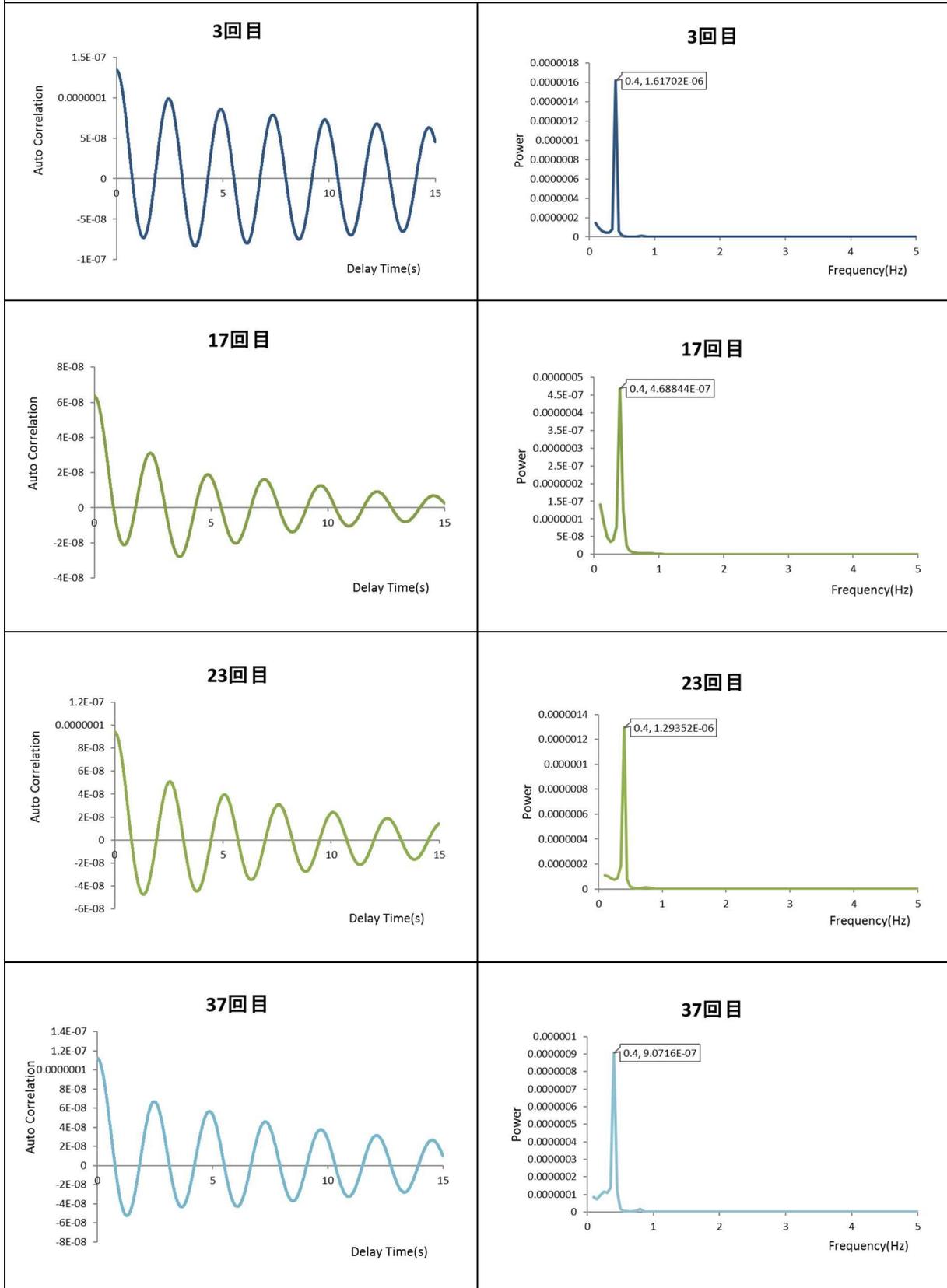


図 e-3-2-4(7) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

工事後 (8月) 8 A 主な卓越周波数 0.4~0.45Hz

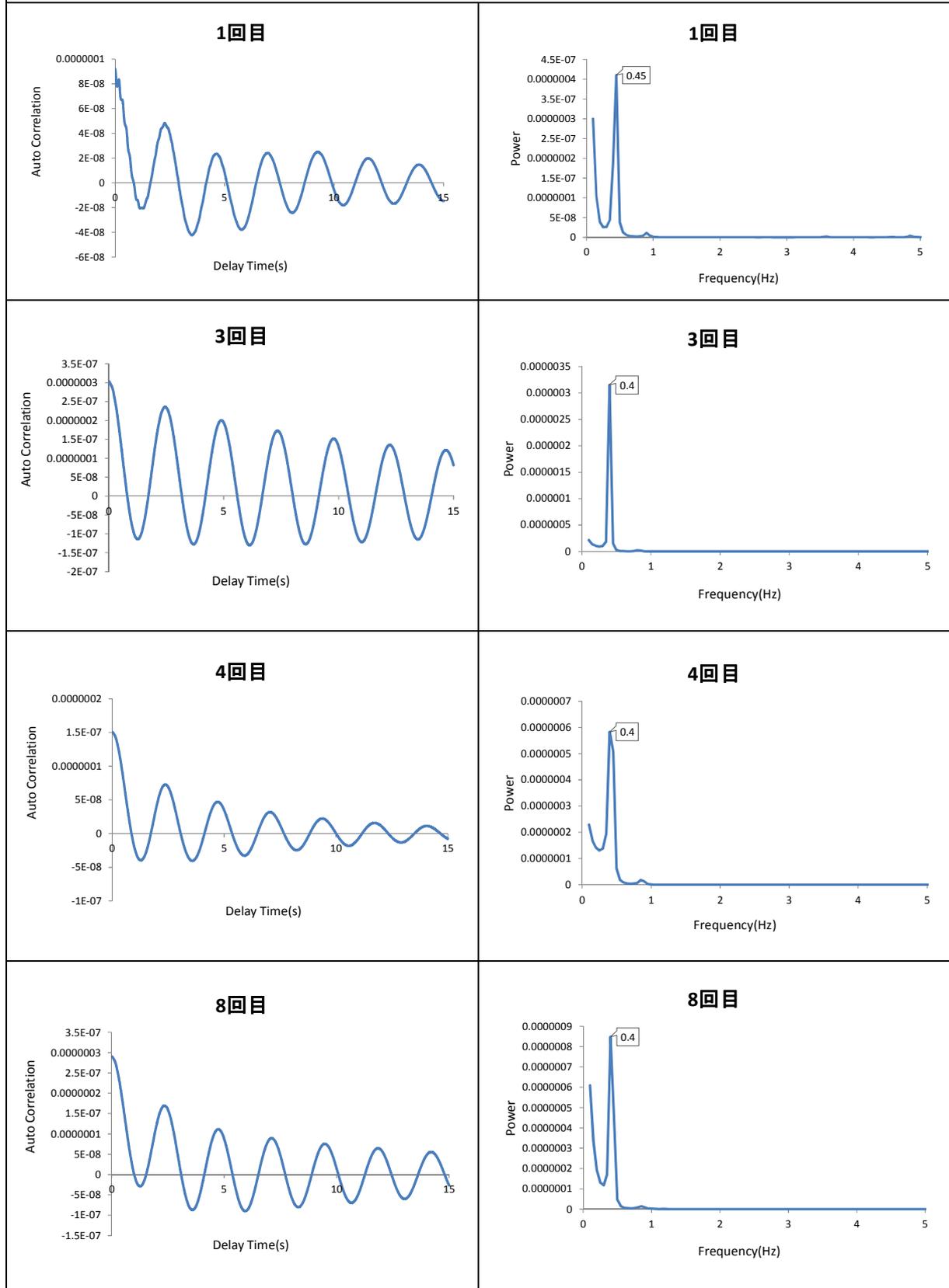


図 e-3-2-4 (8) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

10月5A：主な卓越周波数 0.2~0.25Hz

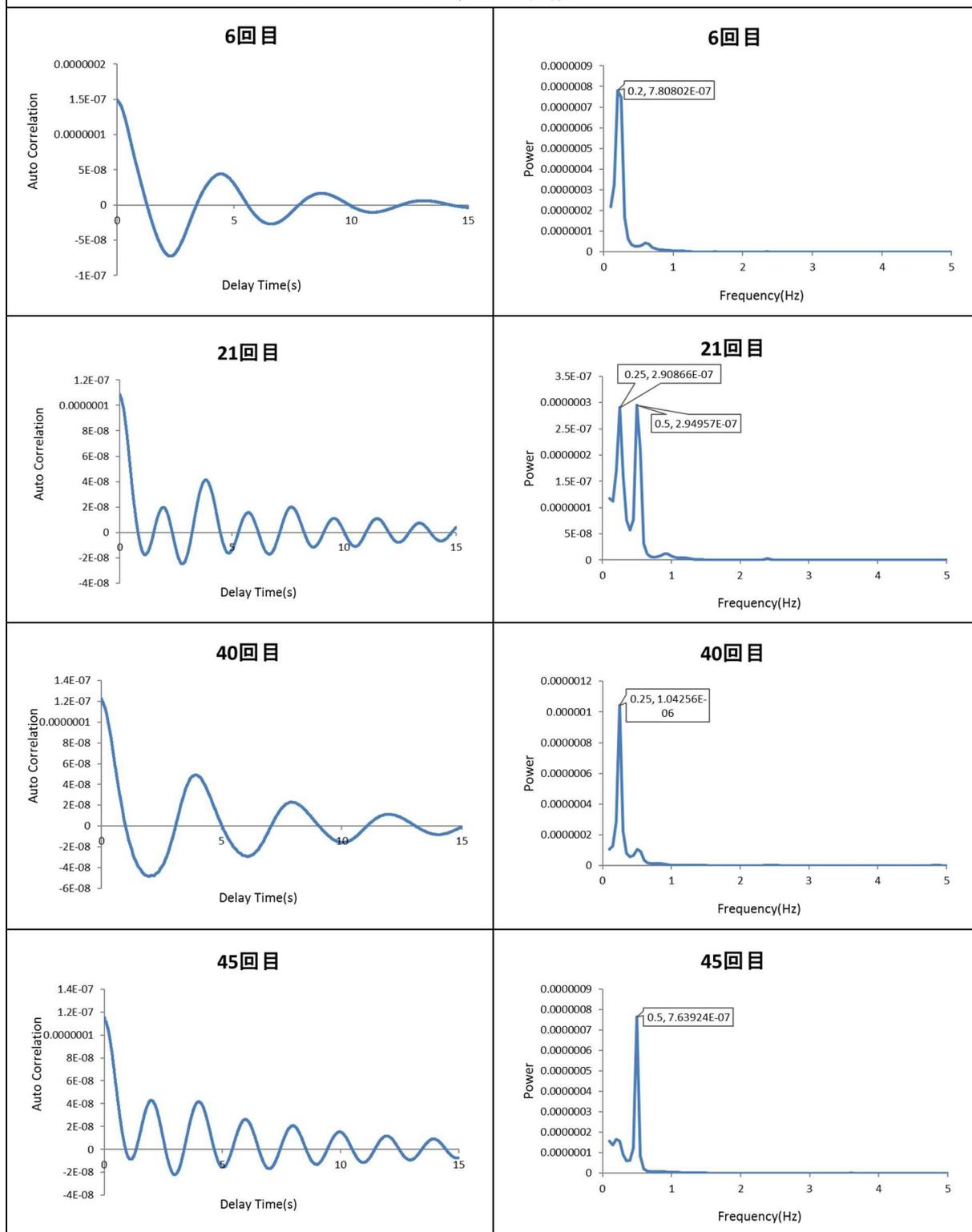


図 e-3-2-4 (9) 代表的な自己相関関数とパワースペクトル

図 e-3-2-5(1)~(4)は、周期性が確認された測定データからパワースペクトル値



を求め、それらをスタッキングして平均化したものである。データ個数は平均 31 個である。平均化することで、一時的に捉えられた外部振動の影響を小さくしようとした。その結果、卓越周波数は、工事前で 0.2Hz、工事後で 0.4Hz (5A, 5B は 0.1Hz も示しているが、0.1Hz は計測値が適切に取得できていない時によく出現するピークであるため、ここでは除外して考える) となり、概ね図 e-3-2-4 で示した結果と一致した。このことから、多少の外部振動がある測定結果でも、多数のデータを平均化することで、卓越周波数を抽出することが可能であることが確認できた。

【参考 2 : 自己相関関数による解析】\*\*\*\*\*

構造物の振動、揺動などの動的運動は、一般に 2 階微分方程式で記述される。この場合の運動は、過去の運動の状態がわかっていると、少なくとも微小な将来の運動についてもある程度の確率で予測可能となる。このような現象を説明する数学モデルとして、自己回帰モデル (AR モデル) がある。自己回帰モデルは、(1) 式で表すことができる。

なお、本モデルは、周波数解析で一般によく用いられている高速フーリエ変換 (FFT) と比較して、ノイズの影響を受けにくいなどの特徴がある。

$$\hat{y}_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} + \dots + a_N y_{i-N} \quad (1)$$

$y$  : 変動値、 $\hat{y}_i$  : 予測値、 $a$  : 係数

式(1)の係数を決定する方法として、予測値と実際の値の誤差が最小となるようにする最小自乗法がある。これは式(2)で表すことができる。

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_{i-1})^2 \quad (2)$$

この  $Q$  が最小となるよう係数  $a_1 \sim a_N$  で偏微分する。すなわち、式(3)が成立する係数を求めることとなる。

$$\frac{\partial Q}{\partial a_i} = 0 \quad (3)$$

式(1)、(2)から

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - a_1 y_{i-1} - a_2 y_{i-2} - a_3 y_{i-3} - \dots - a_N y_{i-N})^2$$

となり、式(3)から  $N$  個の式が得られることから、以下に示す式(4)の連立方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} C(0) & C(1) & \dots & C(N-1) \\ C(1) & C(0) & \dots & C(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(N-1) & C(N-2) & & C(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(1) \\ C(2) \\ \vdots \\ C(N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $C$  は自己相関係数を意味し、括弧内はその遅れの次数である。  
自己相関係数は、離散型の計測データから算出できるため、 $N$  個の連立方程式を解いて係数を求めれば、自己回帰モデルの式(1)が決定できる。

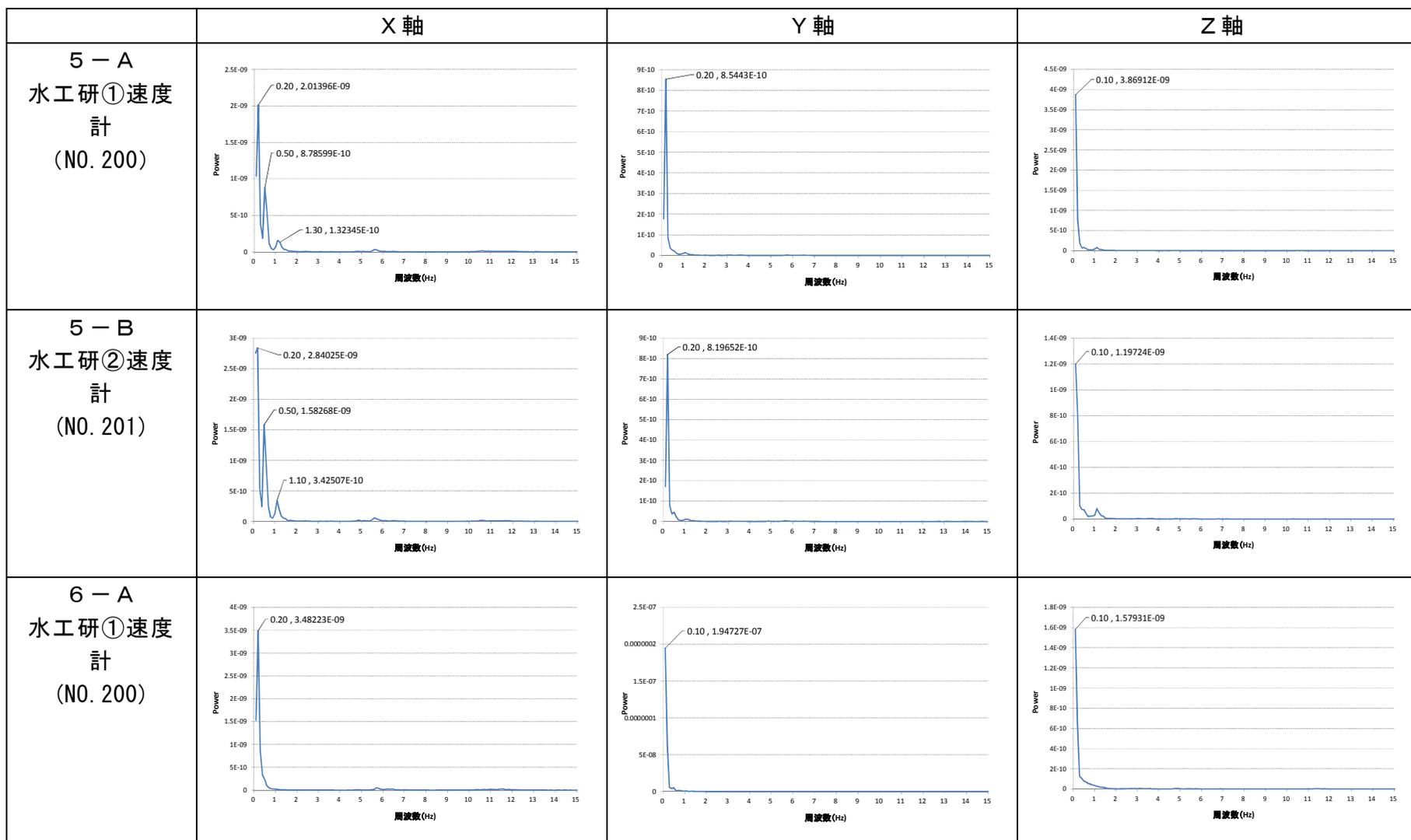


図 e-3-2-5(1) 筒石漁港 7 月常時微動スタッキング解析パワースペクトル (周波数分解能 : 0.05)

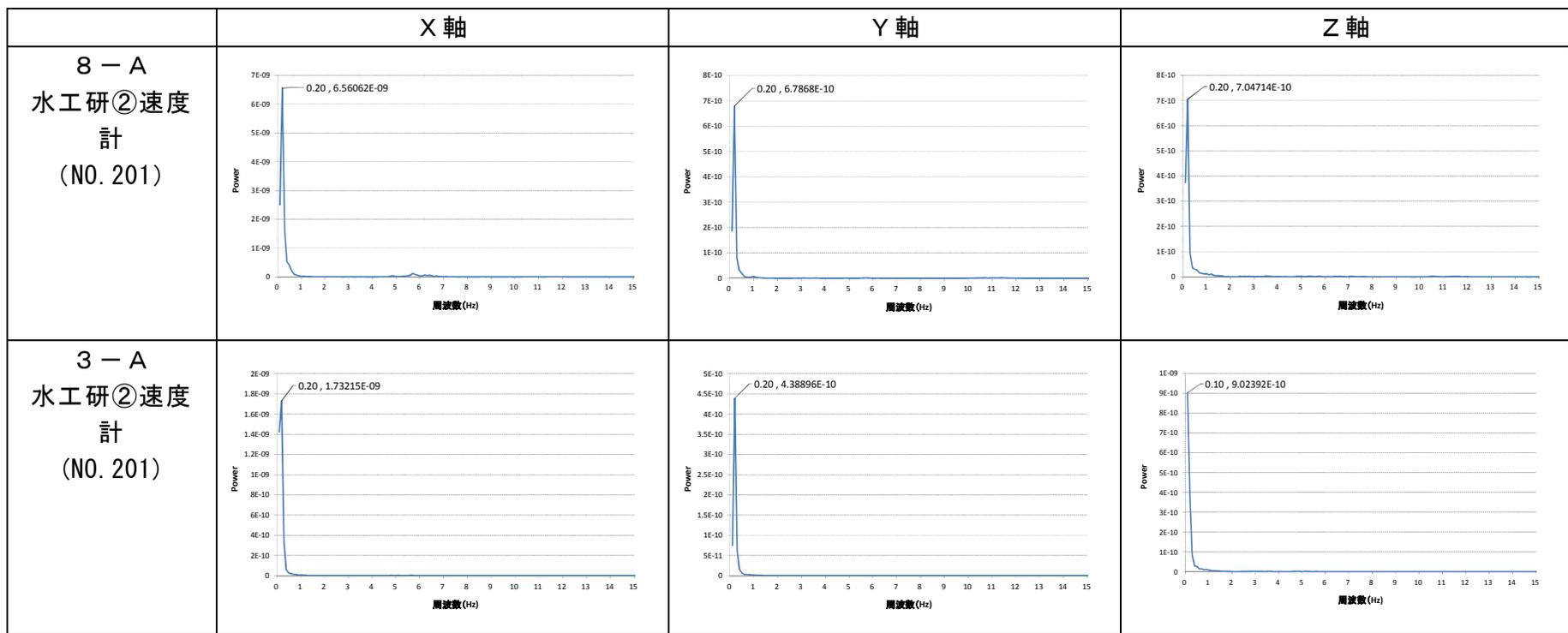


図 e-3-2-5(2) 筒石漁港 7 月常時微動スタッキング解析パワースペクトル (周波数分解能 : 0.05)

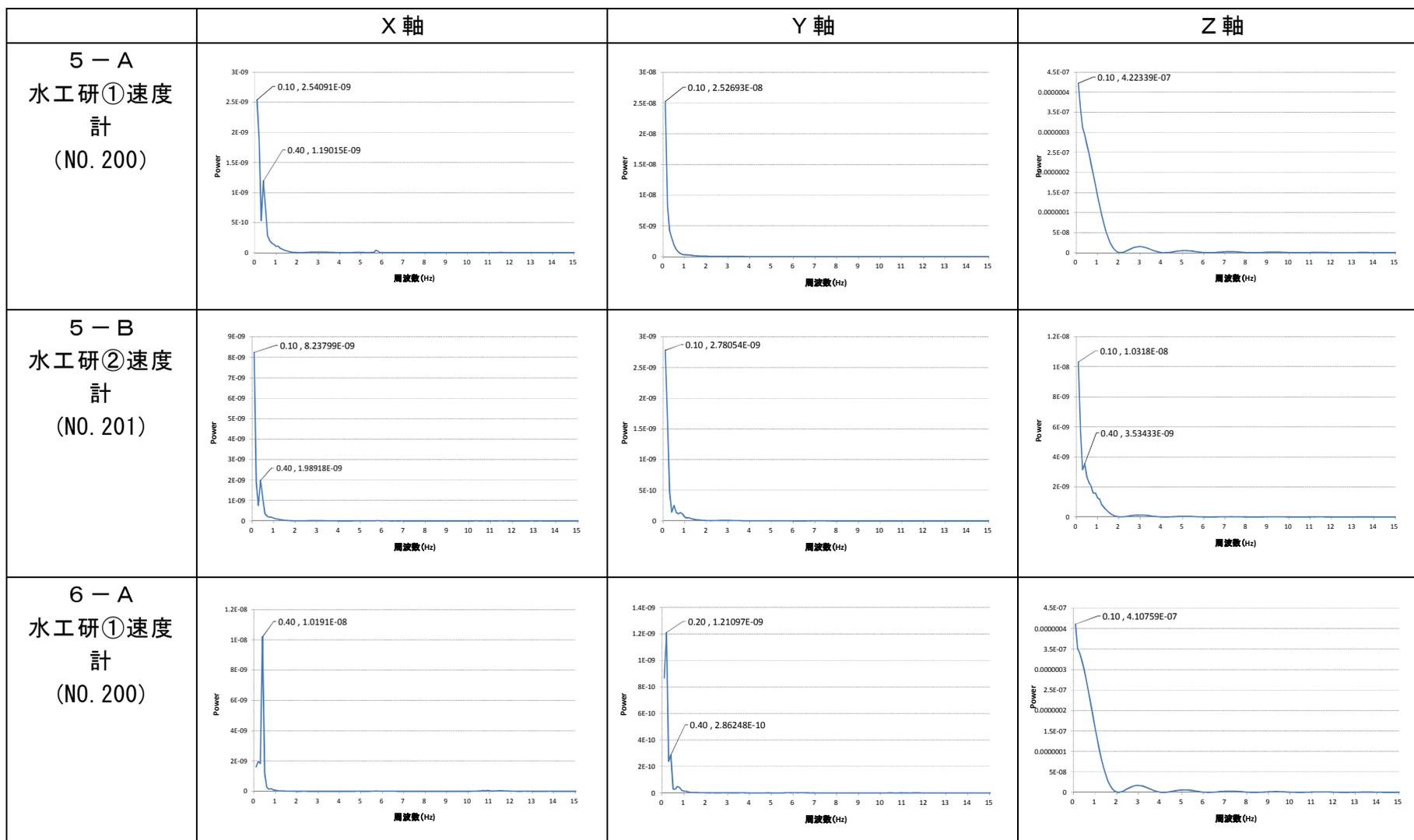


図 e-3-2-5(3) 筒石漁港 8 月常時微動スタッキング解析パワースペクトル (周波数分解能 : 0.05)

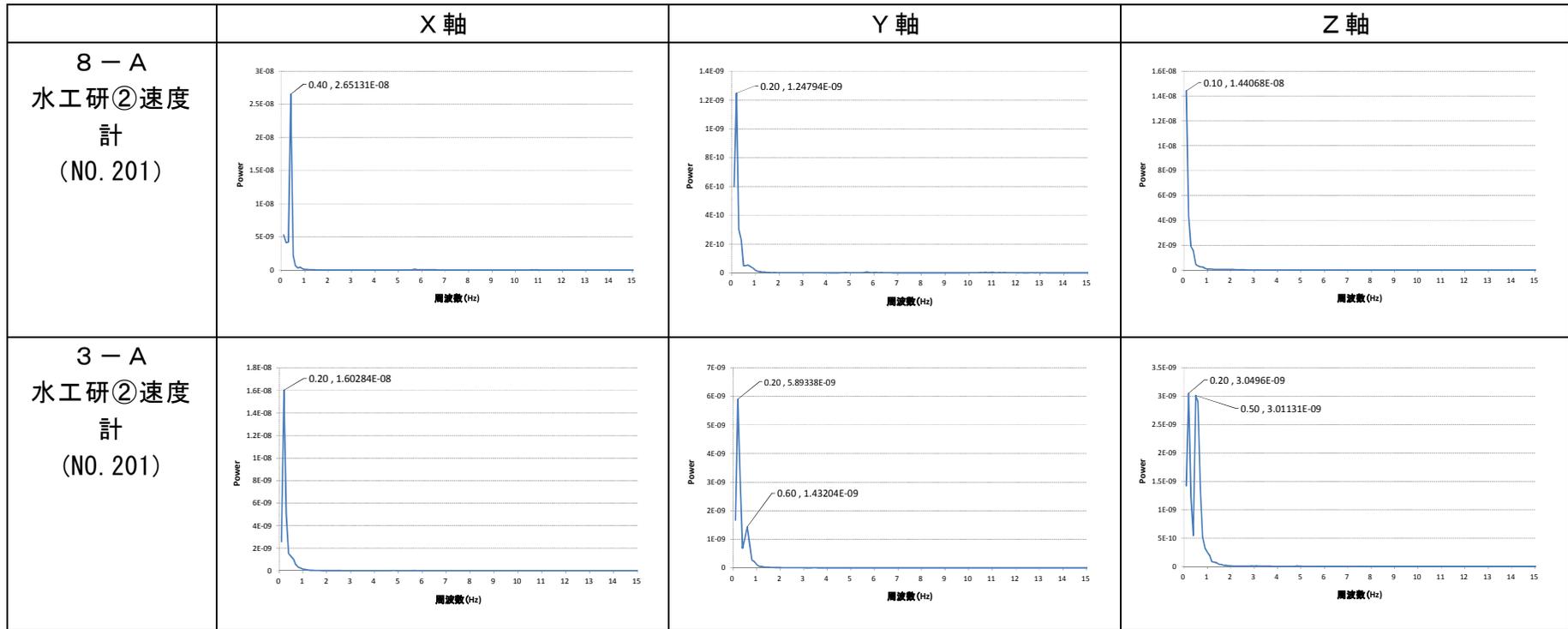


図 e-3-2-5(4) 筒石漁港 8 月常時微動スタッキング解析パワースペクトル (周波数分解能 : 0.05)

【東海大学の速度計を用いた計測結果】

図 e-3-2-6 に東海大学の速度計を用いた計測結果を示す。水産工学研究所の速度計を用いた測定結果とは異なり、卓越周波数は現れず、適切なデータ取得が行われていないことがわかった。この違いは、計測器の検出可能な周波数が異なったためであると考えられる。東海大学の速度計で測定可能な周波数範囲は 1Hz 以上であり、水産工学研究所の速度計は 0.1Hz 以上である。このため、防波堤の振動を計測する場合には、少なくとも 0.1Hz まで検出可能な計測器を使用する必要があると言える。

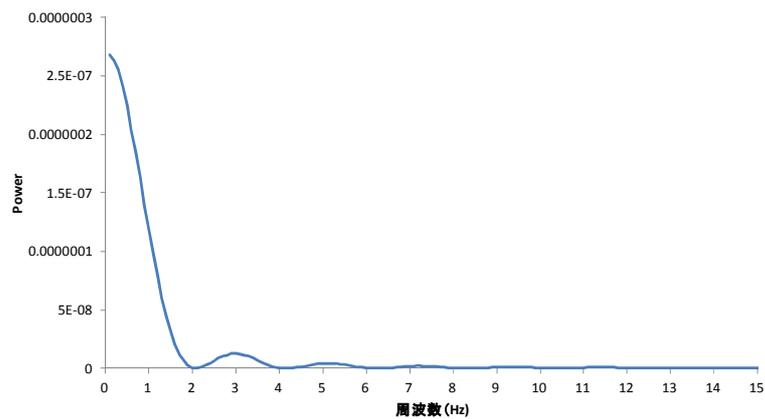


図 e-3-2-6 東海大学の速度計を用いた計測結果

【加速度計を用いた計測結果】

図 e-3-2-7(1)、(2)に加速度計を用いた計測結果を示す。上段が自己相関関数の波形、下段がパワースペクトルを示す。自己相関関数の波形から、水産工学研究所の速度計による計測結果と同様に、周期性が認められるものとそうでないものと混在していることが確認できた。パワースペクトルについては、5-Aが工事前後で0.05Hz、6-Aが工事前後で0.06Hzとなり、測定スパンによって0.01Hzの違いがあるものの、工事前後で差は確認できなかった。加速度計は高感度のものを用いたが、センサーの種類が圧電型（圧電型は低周波領域の振動検出に強くないと言われている。）であることが影響していると考えられる。なお、水産工学研究所及び東海大学の速度計はサーボ型である。

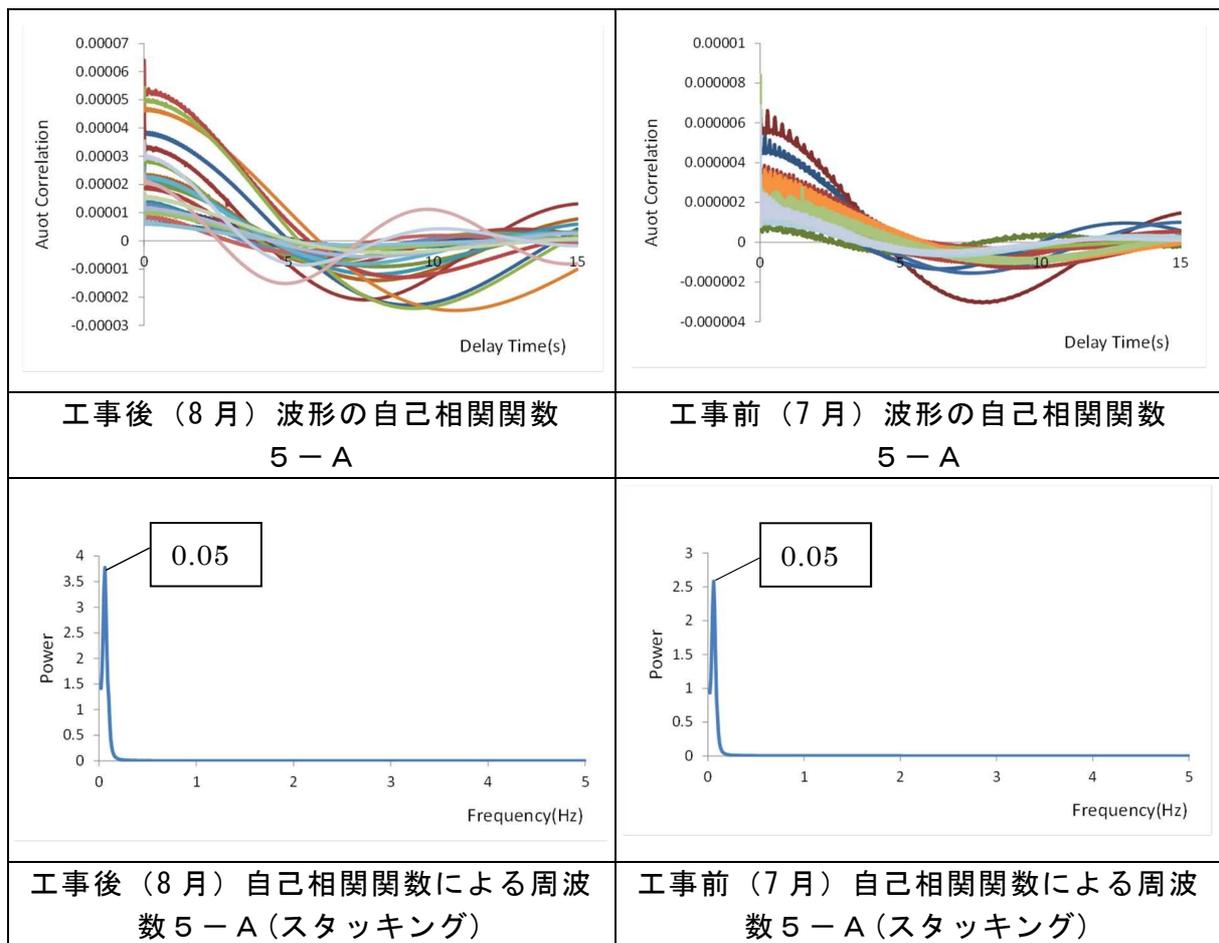


図 e-3-2-7(1) 加速度計を用いた計測結果（5-A）



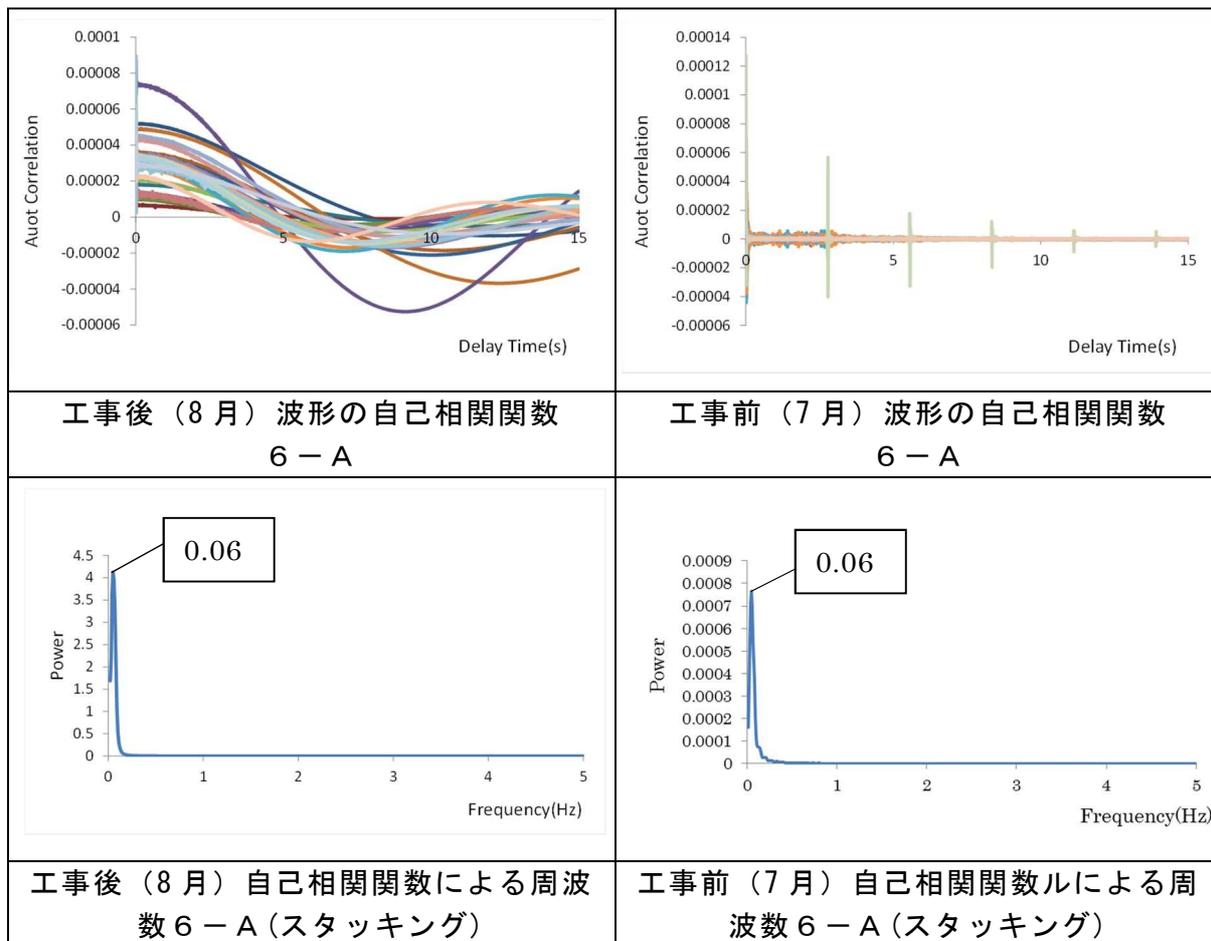


図 e-3-2-7(2) 加速度計を用いた計測結果（6-A）

#### ④ 異なる漁港での検討

③の解析方法が妥当であるかを確認するため、A 漁港において追加調査を実施した（平成 28 年 11 月）。この計測を行った防波堤は、先端が吸い出しを受けて傾斜している。測定は水産工学研究所の速度計（No. 201）を使用し、計測方法は筒石漁港と同じとした。吸い出しを受けている防波堤先端のスパンと健全な防波堤基部のスパンとで計測を行い、周期性が明確に現れた測定回同士を比較した。なお、A 漁港については、吸い出しの状況から最も揺れやすい方向（Y 軸）に着目し、卓越周波数を評価した。

その結果、図 e-3-2-8(1), (2)が示すように、吸い出しを受けている防波堤の先端部（0.15～0.2Hz）は、吸い出しを受けていない防波堤基部（0.25Hz）よりも低い値を示した。これらの卓越周波数が外部から入力された振動でないことを確認するため、スペクトル位相も確認した。位相の反転が見られる周波数は、パワースペクトルを示した図の卓越周波数と概ね一致しており、計測された先端及び基部の卓越周波数は、堤体の共振点を示した妥当なものであると言える。

なお、A 漁港の卓越周波数が筒石漁港と同じ低周波数帯となり、わずかな周波数の違いを議論する必要が生じた。この場合、30 秒計測では計測時間が短く、周波数分解能を上げることができないため、3 分間程度の計測が必要となった。そこで A 漁港において 3 分間計測を試行（平成 29 年 1 月）したところ、先端部（0.08～0.12Hz）及び基部（0.14～0.16Hz）のいずれにおいても卓越周波数が下がったが、先端部は基部よりも低い傾向を示すことは確認できた。

先端部：卓越周波数 0.15~0.2Hz、周波数分解能 0.05

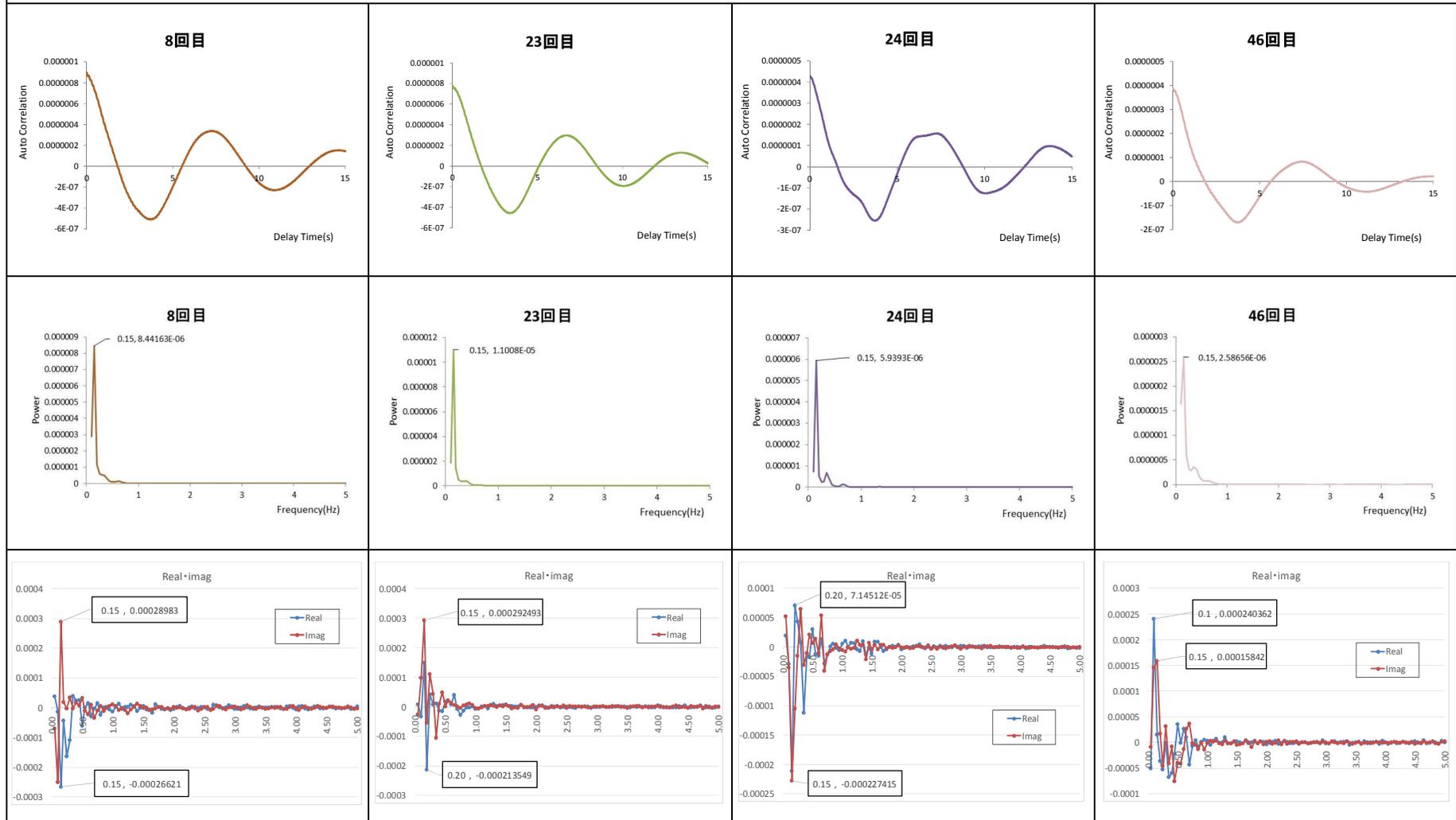


図 e-3-2-8(1) A 漁港での計測結果

基部：卓越周波数 0.2~0.25Hz、周波数分解能 0.05

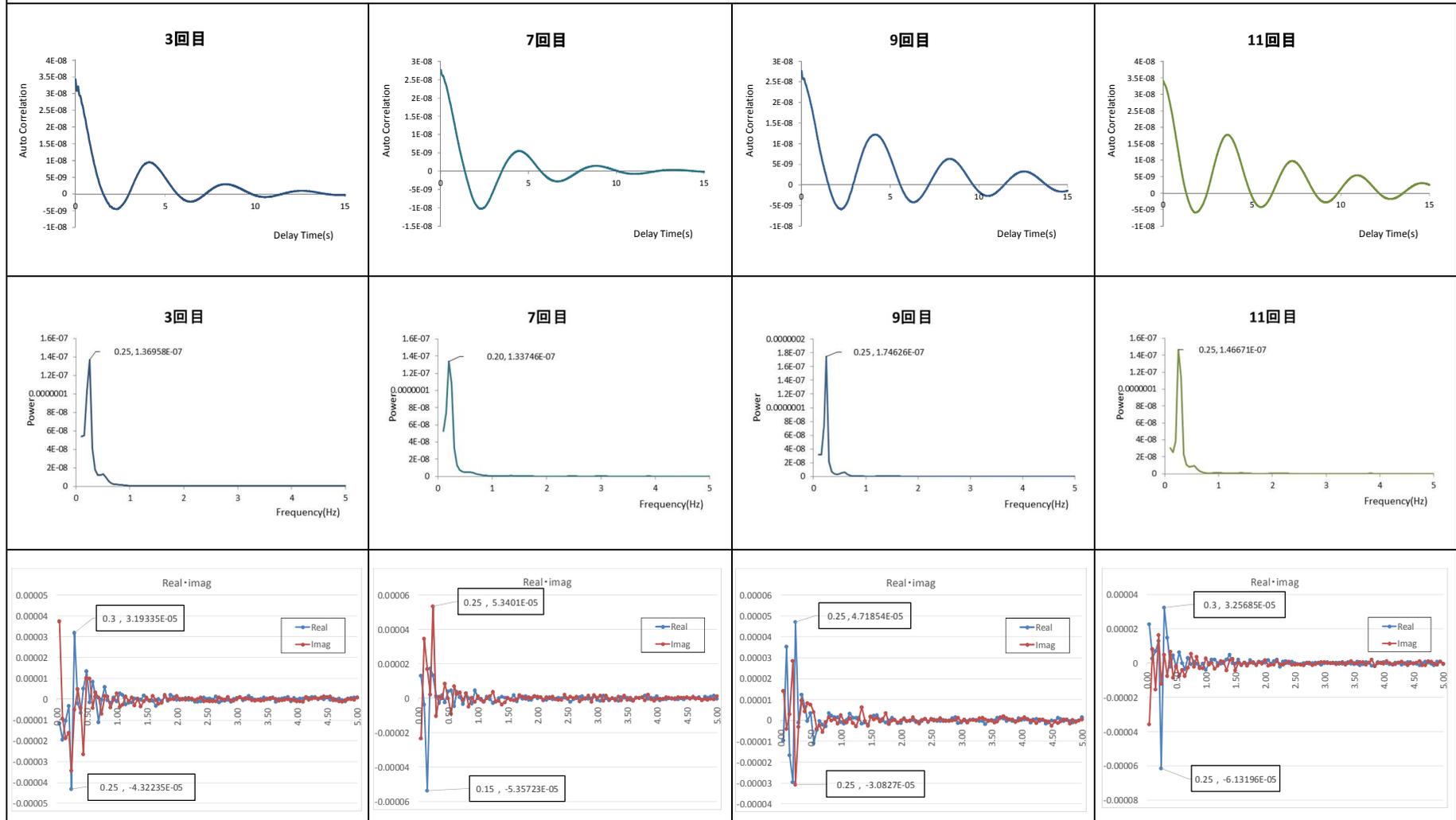


図 e-3-2-8(2) A 漁港での計測結果

(2) 測定3 (側方打撃)

加速度計による計測は、側方打撃と同時に測定を始め、10~15秒間の計測とした。計測した波形から打撃による直接の影響を除くために、打撃による衝撃波のある測定時間のデータを除外し、残ったデータから自己相関関数による周期性の確認とARモデルによる解析を行った。この際、周期性が確認されなかったデータは棄却した。結果は、下図に示すとおりであり、側方打撃による方法でも工事前後での明確な卓越周波数の違いを見出せなかった。なお、(1)の③で示したように、東海大学の速度計では、1Hz以下の周波数を検知できないため、結果は省略した。

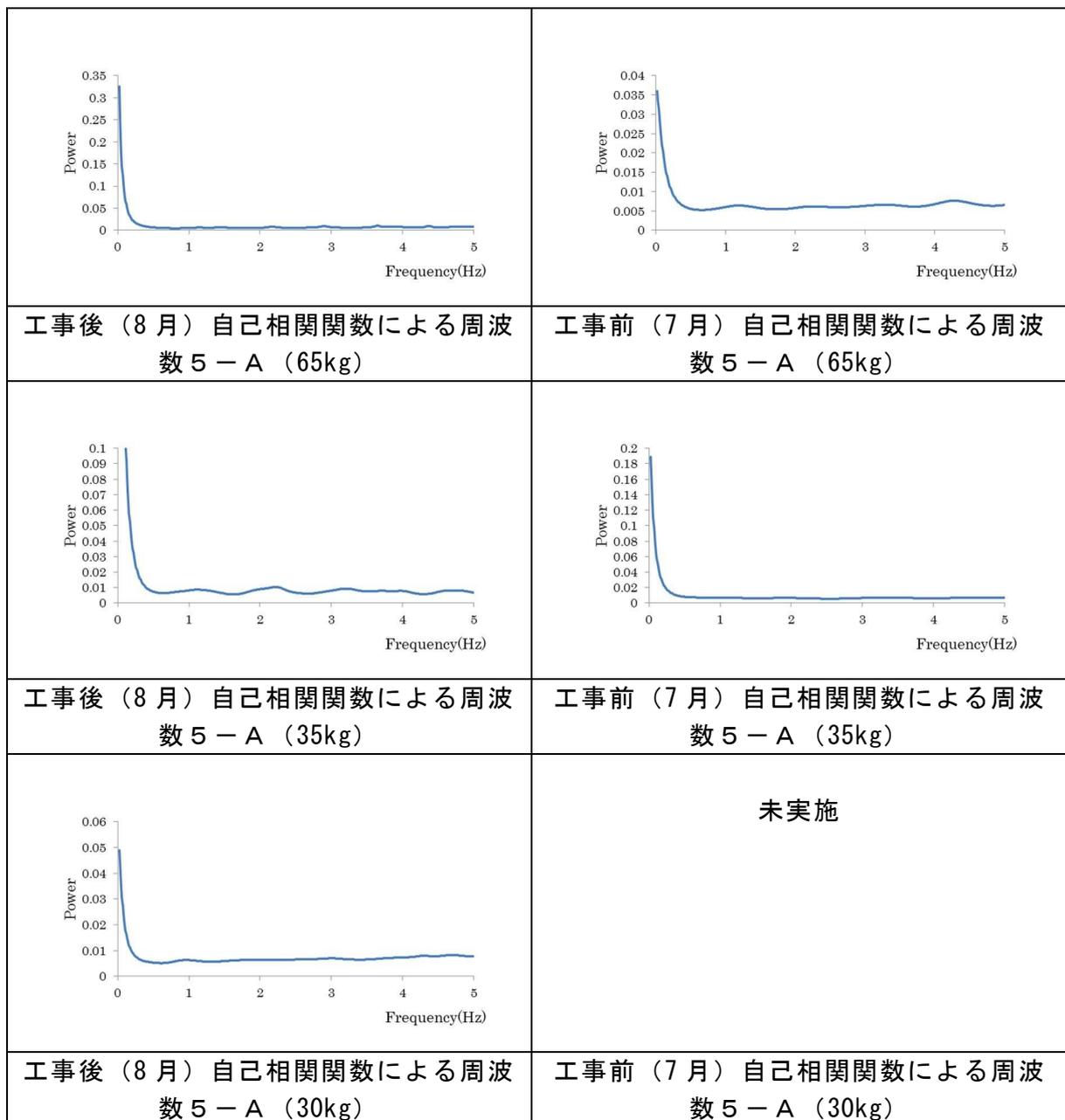


図 e-3-2-9(1) 自己相関によるパワースペクトル (5-A)

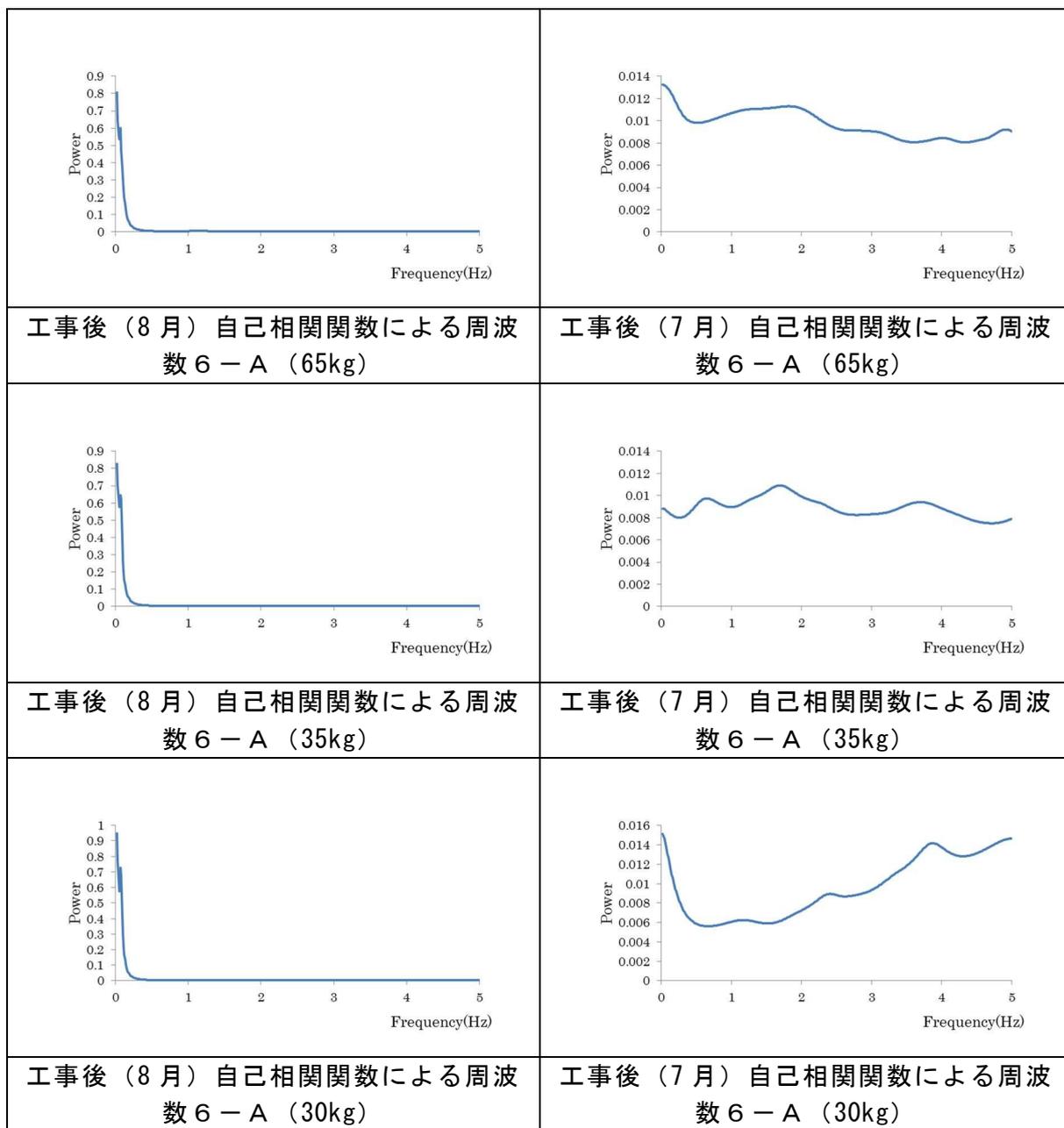


図 e-3-2-9(2) 自己相関によるパワースペクトル（6-A）

### (3) 測定4 (透過法)

#### ①弾性波速度

堤体本体の弾性波速度を図 e-3-2-10 に示す。各測定点での弾性波速度は、3,900～3,970m/s の間を示し、平均値は 3,944m/s、標準偏差は 15.8 であった。測定した施設の内部状態は確認できなかったが、いずれの測定点においても概ね一定の弾性波速度を示したことから、内部に大きな劣化及び損傷は無いと考えられる。一方、隣接するスパンの継ぎ目を跨いで測定したケースでは、平均値より 2%程度 の速度低下が見られた。視認できる範囲では、継ぎ目に砂や小石が密に詰まっている所が多かった。このため、衝撃弾性波は比較的伝搬しやすい状態であったと考えられるが、これらを伝搬する際に速度が低下したことや砂や小石がないところでは空隙部を迂回した分、時間を要することとなり、弾性波速度が低下したと考えられる。

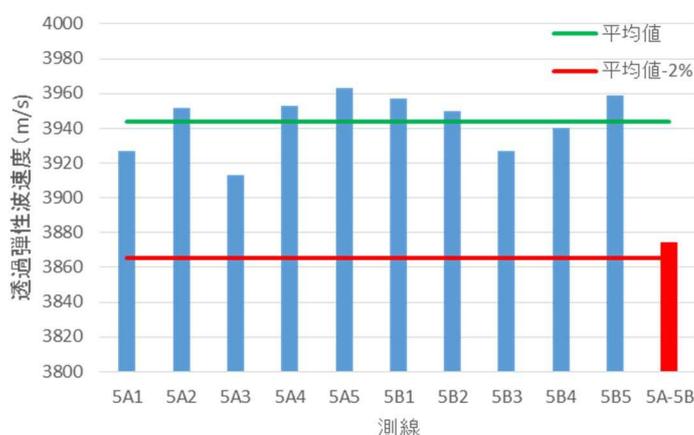


図 e-3-2-10 堤体本体の測定結果

次に、上部工の弾性波速度を図 e-3-2-11 に示す。横軸は上部工天端からの距離を示している。測定した構造物の上部工は、2段積みになっており、天端から 2.7m 下の位置に水平方向の打ち継ぎ目があった。この打ち継ぎ目の少し上にあたる 2.5m の位置で、スパン間の垂直方向の継ぎ目を跨いで測定した結果、5A-5B は 5B の値と比較して 12% 速度低下が見られたが、5B-6A では 3% しか低下しなかった。この要因は、弾性波の伝搬経路上にある継ぎ目部分の目詰まりの有無が影響したものと考えられ、5B-6A では打撃点と受信点を結ぶ直線上に比較的密な目詰まりがあったものと考えられる。

なお、上部工上段では測定位置が下がるほど弾性波速度が速くなる傾向が見られるが、1.0m 付近からその傾向は緩やかになる。一方、上部工下段では上段の 1.0～2.5m とほぼ同じ値を示した。これは、コンクリート表層付近の劣化部が影響したと考えられる。このような劣化部では弾性波速度が遅くなるためである。測定した構造物は、天端から下に行くほど上部工の幅が大きくなり、測点間隔 (打撃点と受信点) は広がる。このため、弾性波速度の遅くなる劣化部の割合は、測点間隔に対して小さくなり、測点間の平均弾性波速度が速くなったと考えられる。

以上のことから、透過法を用いる場合、コンクリート表層付近の劣化部に留意する必要があるものの、衝撃弾性波の伝搬経路上にひび割れや空隙があった場合、透過法により検知することが可能であると言える。

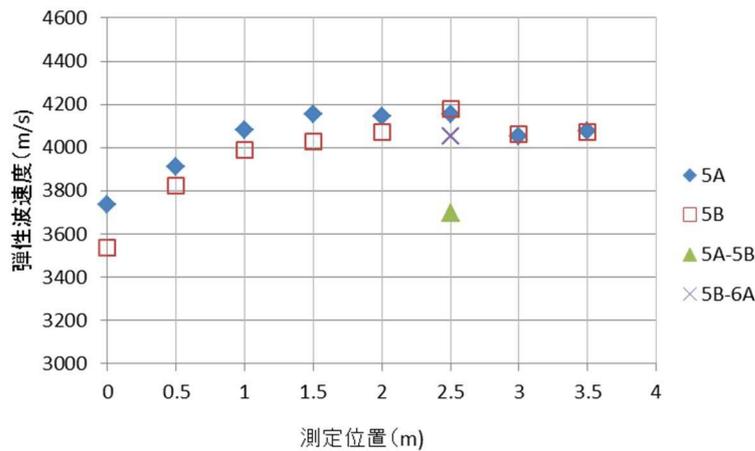


図 e-3-2-11 上部工の測定結果

## ②パワー伝送比

5Aにおける水平打ち継ぎ目を跨がない計測（入力側 2.5m-受信側 2.5m）と跨いだ計測（入力側 2.5m-受信側 3.5m）での観測波形結果を図 e-3-2-12 に示す。弾性波速度は、前者が 4,141m/s で後者が 4,034m/s であった。水平打ち継ぎ目があることで、弾性波速度が 2.6%減少した。これらの受信波形の第 1 波目に着目すると、打ち継ぎ目を跨いだ方に振幅の減衰が見受けられる。ここで、式 e-3-2-1 に示すように入力波の振幅と、受振第一波の振幅値から、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、打ち継ぎ目を跨いだ方が、パワーの伝達が明らかに低下することがわかった。

このことから、内部に亀裂や大きな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た。

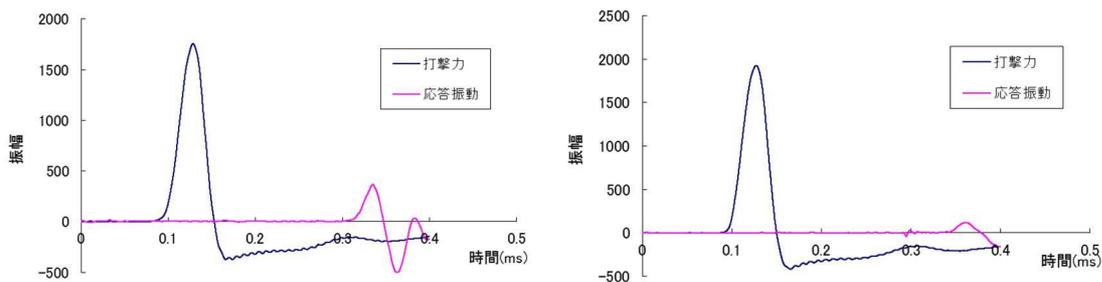


図 e-3-2-12 5A における 2.5-2.5m (左) と 2.5-3.5m (右) の観測波形

### 式 e-3-2-1 パワー伝送比の算出式

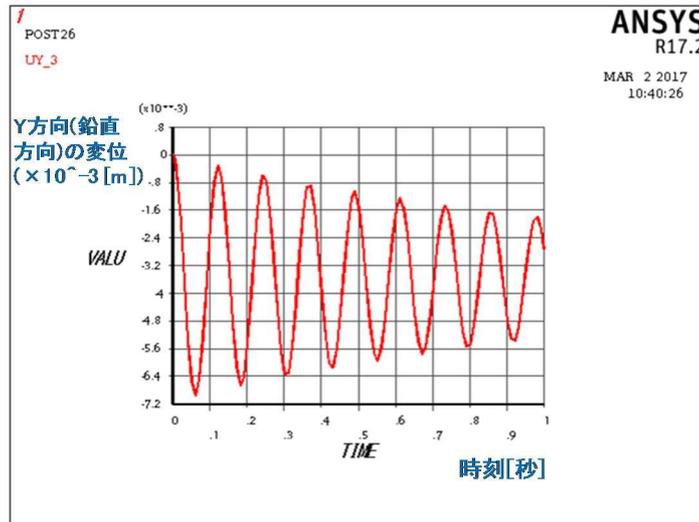
$$H = -20 \log \frac{A_{input}}{A_{output}}$$

\*  $A_{input}$  は入力加速度振幅、 $A_{output}$  は受振波の加速度振幅を示す

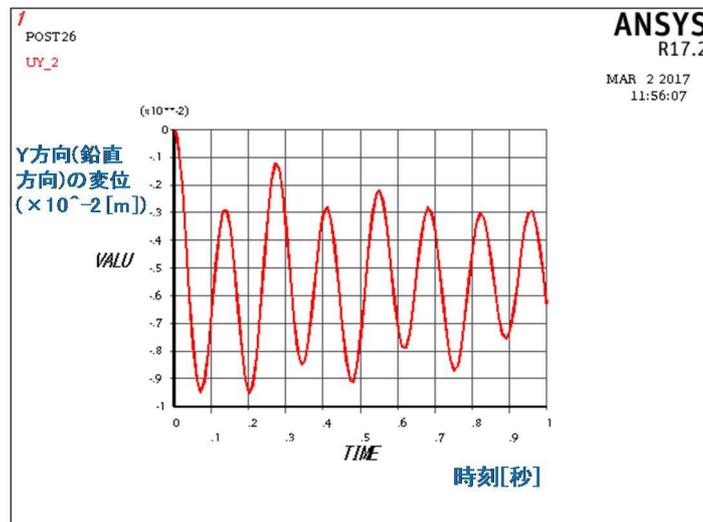


### 3-3 数値計算

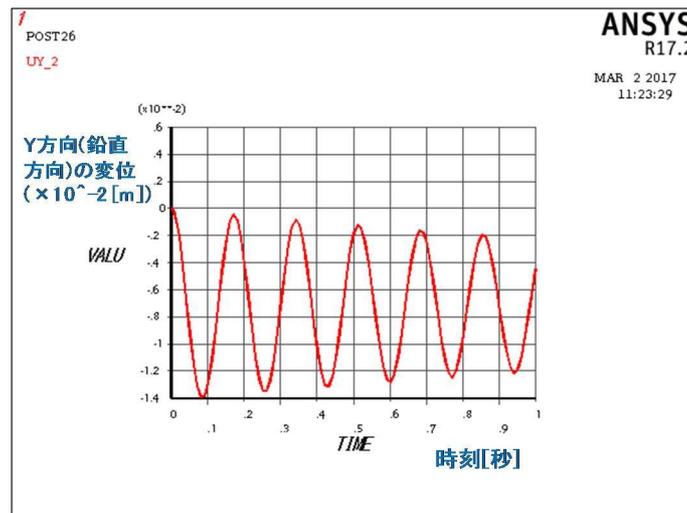
解析の結果得られた変位の時系列を図 e-3-3-1 に示す。これは、図 d-3-3-2 に示した変位着目点（コンクリート塊の上面の中央の1点）について、時刻と鉛直方向変位の関係を描いたものである。ばねの箇所数を変えた3ケースの結果を示す。



①解析ケース「ばね4か所」



②解析ケース「ばね3か所」



### ③解析ケース「ばね 2 か所」

図 e-3-3-1 変位の時系列

それぞれの正弦波状の時系列曲線から固有周波数を読み取ると、「ばね 4 か所」のケースが 8.2Hz、「ばね 3 か所」のケースが 7.3Hz、「ばね 2 か所」のケースが 5.8Hz であった。

いずれも、計算式から求まる固有振動数に近く、27 年度室内実験結果における固有振動数（表 d-3-3-2 参照）とも近い結果となった。

これにより、有限要素解析におけるコンクリートの固有振動数の再現性が示された。

今後の方向性としては、現地試験についても物性値、減衰等の設定を吟味しながら実構造物を有限要素でモデル化し、その後、コンクリートの物性値、底面の支持条件、ひび割れ状況など種々に条件を変えた解析を実施し、条件による結果の違いに着目して考察を進めることが考えられる。

### 3-4 暴露試験

#### (1) 暴露試験

##### ① 長さ変化率

長さ変化率の算出方法（JIS A 1129 に準拠）は、以下のとおりである。

$$\text{長さ変化率 (\%)} = \frac{((X_{\text{標準尺(当初)}} - X_{\text{供試体(当初)}) - (X_{\text{標準尺(測定時)}} - X_{\text{供試体(測定時)}))}{\text{基長}} \times 100$$

$X_{\text{標準尺(当初)}}$ 、 $X_{\text{供試体(当初)}}$  : それぞれ当初時点での、標準尺と供試体の測定値

$X_{\text{標準尺(測定時)}}$ 、 $X_{\text{供試体(測定時)}}$  : それぞれ測定時点での、標準尺と供試体の測定値

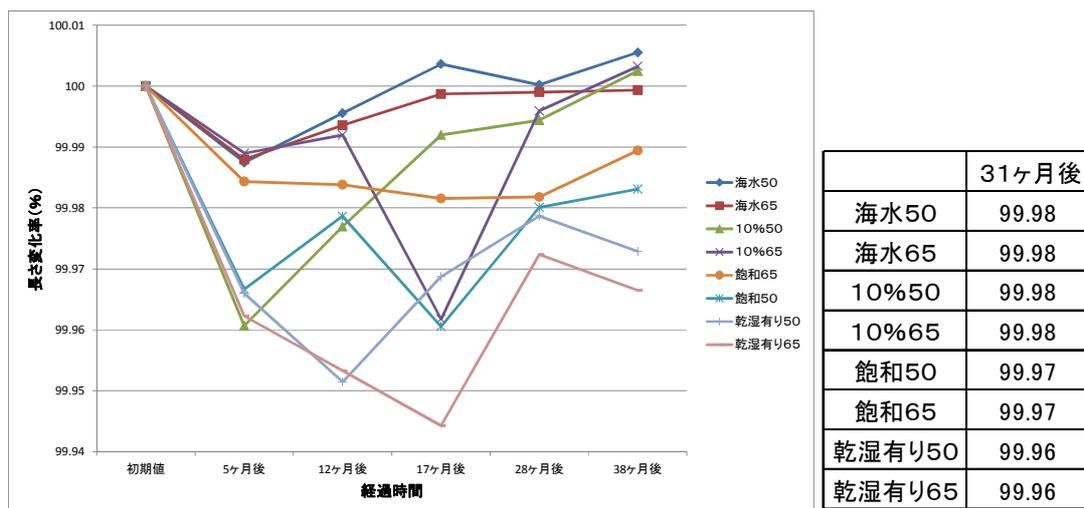


図 e-3-4-1 長さ変化率の推移（初期値を 100 として換算）

全てのケースにおいて 5 ヶ月後に低下傾向を示したが、その後は、増減を繰り返すケースも多く、一定の傾向は示していない。いずれにしてもこれらの変動は極わずかであり、計測精度が影響している可能性がある。なお、31 ヶ月後に供試体を乾燥状態として測定した結果は、図 e-3-4-1 の右側に示すとおりである。

## ② 質量変化率

質量減少率の算出方法は、以下のとおりである。

$$\text{質量変化率 (\%)} = (W(\text{測定時}) - W(\text{当初})) / W(\text{測定時}) \times 100$$

W(測定時) : 測定時の供試体の質量 (g)

W(当初) : 当初の供試体の質量(g)

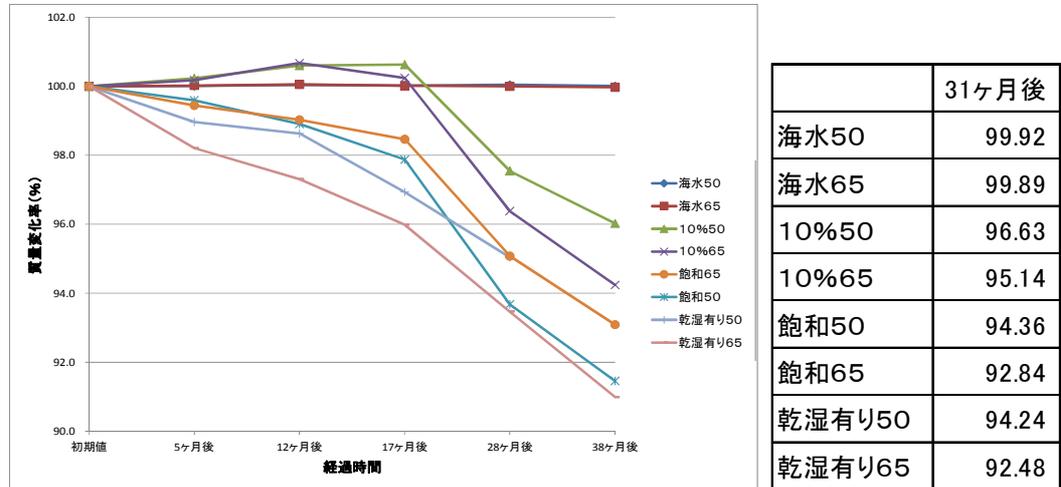


図 e-3-4-2 質量変化率の推移（初期値を 100 として換算）

「海水」は、38ヶ月後まで明確な質量変化は認められなかった。一方、硫酸マグネシウム溶液に暴露した供試体は、「10%50」において17ヶ月後まで、「10%65」において12ヶ月後まで増加傾向を示したものの、それ以外は減少傾向を示した。硫酸マグネシウムにより、表面のセメント成分が溶出して質量の減少が進んだためである。

31ヶ月後に供試体を乾燥状態で測定した結果は、図 e-3-4-2 の右側に示すとおりである。気乾状態で計測した31ヶ月後の変化率は、「飽和50」を除き、いずれも38ヶ月後に近い値を示した。31ヶ月時点から考えると、気乾による含水率の低下と、7ヶ月間のセメント成分の溶出が質量的に同レベルであったと考えられる。

### ③ 相対動弾性係数

相対動弾性係数の算出方法（JIS A 1127：2010）は、以下のとおりである。

$$\text{相対動弾性係数（\%）} = f(\text{測定時})^2 / f(\text{当初})^2 \times 100$$

f(測定時)：測定時のたわみ振動の一次共鳴振動数（Hz）

f(当初)：実験開始前のたわみ振動の一次共鳴振動数（Hz）

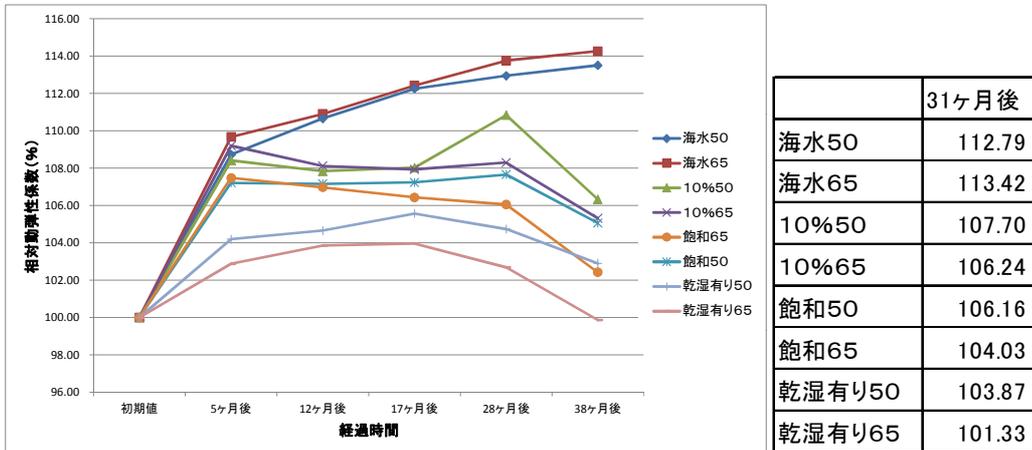


図 e-3-4-3 相対動弾性係数の推移

「海水」は、当初から一貫して相対動弾性係数が大きくなっており、コンクリートの水和反応が継続していることがわかる。そのほかの硫酸マグネシウム溶液に暴露した供試体は、5ヶ月から28ヶ月の間のいずれかで最大値を示し、28ヶ月から38ヶ月にかけては全てのケースで減少傾向を示した。5ヶ月から28ヶ月後までは、供試体の水和反応と硫酸マグネシウムによる劣化が概ねバランスしていたが、28ヶ月以降は相対的に劣化が顕著になったと考えられる。

31ヶ月後に供試体を乾燥状態で測定した結果は、図 e-3-4-3 の右側に示すとおりである。気乾状態で計測した31ヶ月後の相対動弾性係数は、「海水」で38ヶ月後よりも大きく下回る値を示したが、硫酸マグネシウム溶液に暴露した供試体では、同様の傾向が見られなかった。ただし、「海水」以外の31ヶ月後は、いずれのケースにおいても w/c=50% で38ヶ月後より小さくなり、w/c=65% ではその逆となった。

#### ④ 表面 p 波速度の変化率

表面 p 波速度の変化率の算出方法は、以下のとおりである。

$$\text{表面 p 波速度の変化率} = (\text{Vp(測定時)} - \text{Vp(当初)}) / \text{Vp(当初)} \times 100$$

Vp(測定時) : 測定時の表面 p 波速度

Vp(当初) : 当初の表面 p 波速度

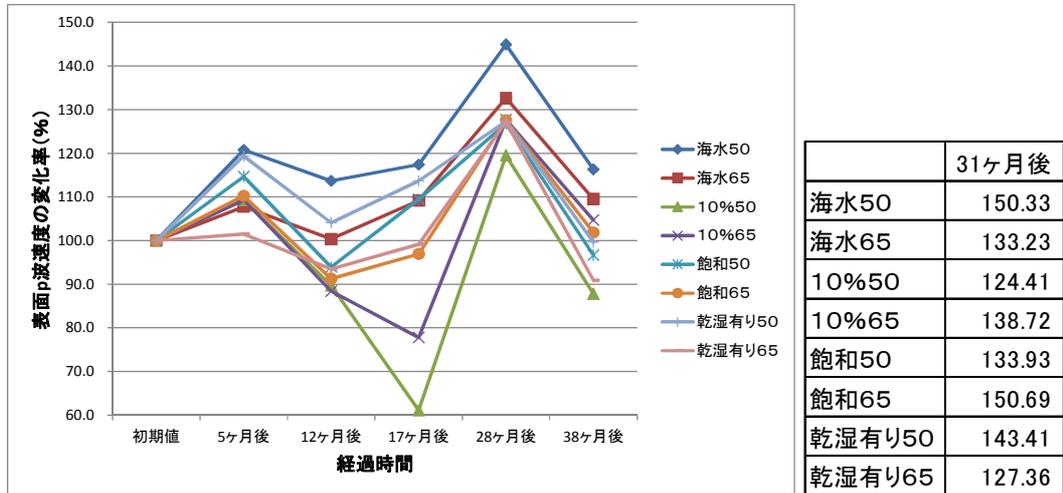


図 e-3-4-4 表面 p 波速度変化率の推移

供試体の劣化がほとんど進行していない「海水」も含め、全体として経年変化に一定の傾向は見られず、上下変動を繰り返している。暴露条件の違いによる変化も見られなかった。

31ヶ月後に供試体を乾燥状態で測定した結果は、図 e-3-4-4 の右側に示すとおりである。気乾状態で計測した31ヶ月後の変化率は、いずれのケースも28ヶ月後に近い変化率を示し、38ヶ月後よりもかなり大きい変化率を示した。変化率は「海水」も含め、全体的に28ヶ月で高い値を示し、38ヶ月で低下していることから、何らかの測定条件の差が影響した可能性が考えられる。

⑤ 機械インピーダンス法（CTS）による平均推定圧縮強度の変化率

機械インピーダンス法（CTS）による平均推定圧縮強度の変化率の算出方法は、以下のとおりである。

$$\text{平均推定圧縮強度の変化率} = (P(\text{測定時}) - P(\text{当初})) / P(\text{当初}) \times 100$$

P(測定時)：測定時の推定圧縮強度

P(当初)：当初の推定圧縮強度

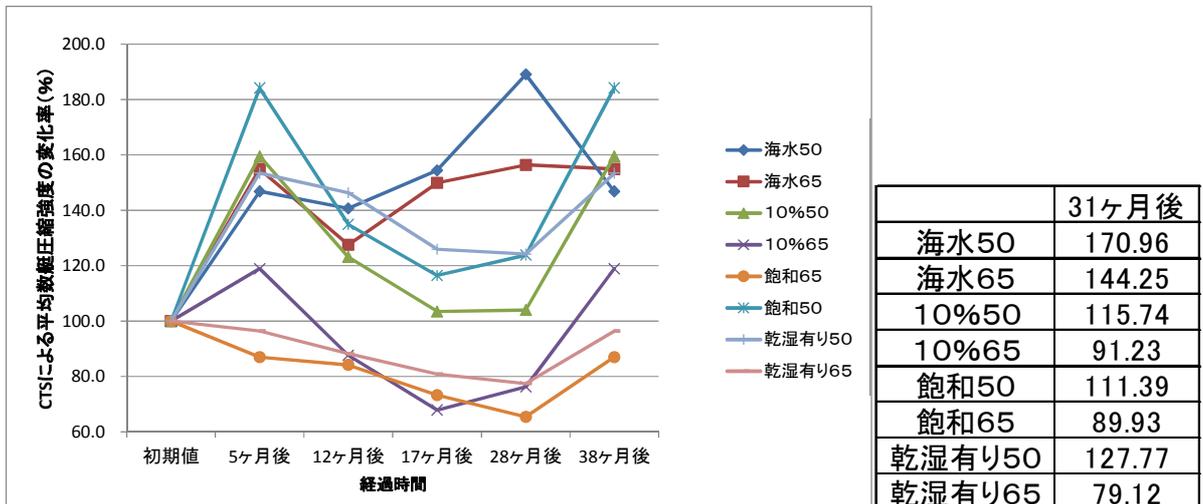


図 e-3-4-5 CTS による平均推定圧縮強度の変化率の推移  
(初期値を 100 として換算)

供試体の劣化がほとんど進行していない「海水」も含め、全体として経年変化に一定の傾向は見られず、上下変動を繰り返している。ただし、一部を除くと 5 ヶ月後に変化率が高くなり、12 ヶ月後に低下する傾向は、表面 P 波速度の場合と類似している。

31 ヶ月後に供試体を乾燥状態で測定した結果は、図 e-3-4-5 の右側に示すとおりである。気乾状態で計測した 31 ヶ月後の変化率は、28 ヶ月後又は 38 ヶ月後のいずれとも明確な関係性を見いだすことはできなかった。

⑥ 港湾空港技術研究所での暴露試験

前述したように、港湾空港研究所の暴露試験は、1) 気中、2) 飛沫帯、3) 海水中、4) 干満帯の条件で実施している。今年度の測定は、31ヶ月後（再設置前、乾燥状態）、38ヵ月後で実施した。

暴露試験中断前の5ヶ月後、および38ヶ月後のそれぞれの暴露条件での供試体長さ、平均質量、平均共鳴振動数、平均表面p波速度、CTSによる平均推定圧縮強度は、下記のとおりである。なお、再設置前の31ヶ月後は、参考値として示している。各値は、増減があり、一定の傾向を示していない。暴露試験を約2年中断していたため、今後の結果を見守るとともに、今年度は考察を省略した。

表 e-3-4-1 港湾空港技術研究所での暴露試験における測定値

標準尺からの長さ変化量(mm×10 <sup>-6</sup> )	5ヶ月後	38ヵ月後	31ヶ月後
気中50	20.55	20.21	20.19
気中65	17.81	17.48	17.46
飛沫帯50	20.39	20.13	20.03
飛沫帯65	18.84	18.58	18.50
海中50	17.20	17.77	17.74
海中65	17.20	16.84	16.89
干満体50	14.74	14.41	14.59
干満体65	15.50	15.18	15.05

平均質量(g)	5ヶ月後	38ヵ月後	31ヶ月後
気中50	9,321	9,220	9,300
気中65	9,284	9,179	9,255
飛沫帯50	9,384	9,371	9,370
飛沫帯65	9,231	9,228	9,238
海中50	9,464	9,413	9,427
海中65	9,384	9,295	9,363
干満体50	9,353	9,484	9,384
干満体65	9,228	9,422	9,272

平均共鳴振動数(Hz)	5ヶ月後	38ヵ月後	31ヶ月後
気中50	2,092	2,050	2,120
気中65	2,033	1,933	2,024
飛沫帯50	2,087	2,179	2,169
飛沫帯65	2,073	2,091	2,079
海中50	2,177	2,202	2,112
海中65	2,142	2,114	2,052
干満体50	2,174	2,195	2,097
干満体65	2,104	2,152	2,006

平均表面p波速度(cm/s)	5ヶ月後	38ヵ月後	31ヶ月後
気中50	4,041	3,861	4,556
気中65	3,991	3,948	4,667
飛沫帯50	4,120	3,533	5,039
飛沫帯65	3,956	4,089	4,962
海中50	4,303	3,884	4,862
海中65	4,167	4,080	5,119
干満体50	4,178	3,448	5,026
干満体65	3,970	3,898	4,778



平均圧縮強度(N/m <sup>2</sup> )	5ヶ月後	38ヵ月後	31ヶ月後
気中50	40.6	54.3	45.4
気中65	41.7	45.2	31.8
飛沫帯50	43.8	52.9	40.8
飛沫帯65	42.0	46.5	32.6
海中50	42.6	54.1	36.5
海中65	37.6	48.1	31.2
干満体50	50.5	52.5	37.7
干満体65	48.2	50.1	31.7

## (2) 供試体の乾湿状態が計測値に与える影響

硫酸マグネシウム溶液に暴露した劣化促進試験の供試体に関し、気乾状態(31ヶ月)と湿潤状態(28ヶ月)で各計測値を比較したところ(「参考」参照)、気乾状態のものが、表面P波速度は高い値を示し、動弾性速度が小さい値を示した。いずれもその差は小さい。

一方、CTSによる推定圧縮強度については、気乾と湿潤の比較で一定の傾向が認められなかった。

### 【参考3：気乾及び湿潤供試体の比較】\*\*\*\*\*

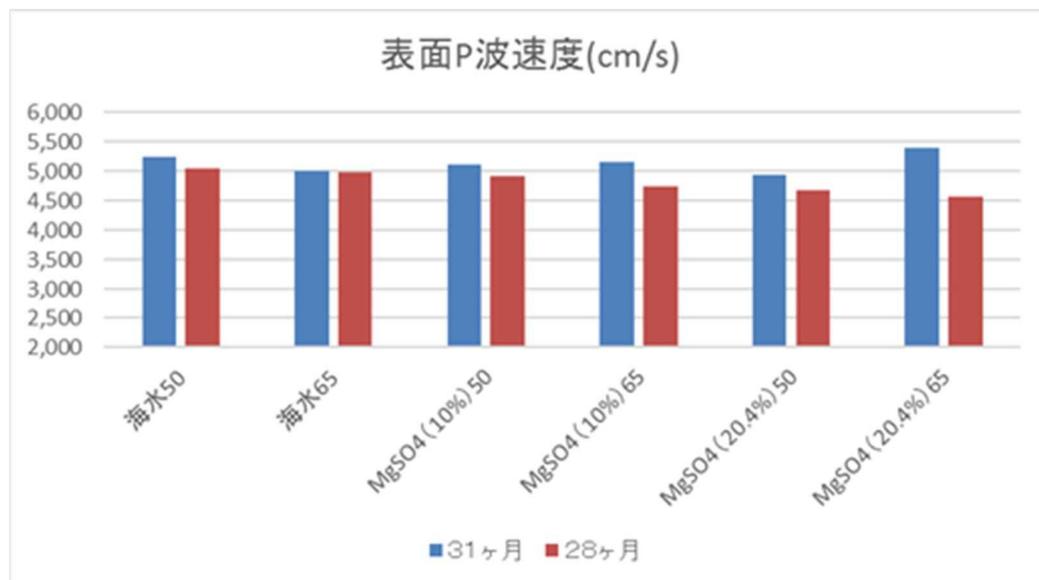
劣化促進試験の供試体を31ヶ月後に気乾状態で計測し、28ヶ月後の湿潤状態の測定値と比較した。

#### ① 気乾供試体の比較

28ヶ月、31ヶ月の気乾供試体(水セメント比50及び65)同士の計測値を比較した。その結果、表面p波速度、動弾性係数はいずれも概ね同じ値を示した。CTSによる推定圧縮強度は、31ヶ月の測定値がいずれの水セメント比の供試体においても、6N/mm<sup>2</sup>程度下回った。CTSの測定値が大きく異なった理由は不明である。

#### ② 表面p波速度

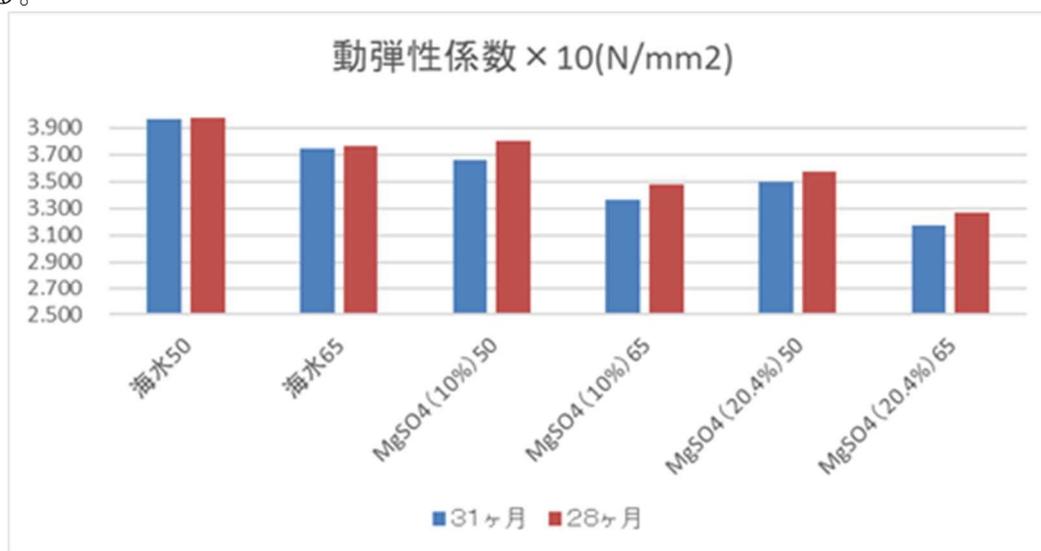
表面p波速度は全てのケースにおいて31ヶ月の測定値が上回った。このことは、弾性波速度とコンクリートの含水率との関係を明らかにした試験結果<sup>1)</sup>とも一致する。



### ③ 動弾性係数

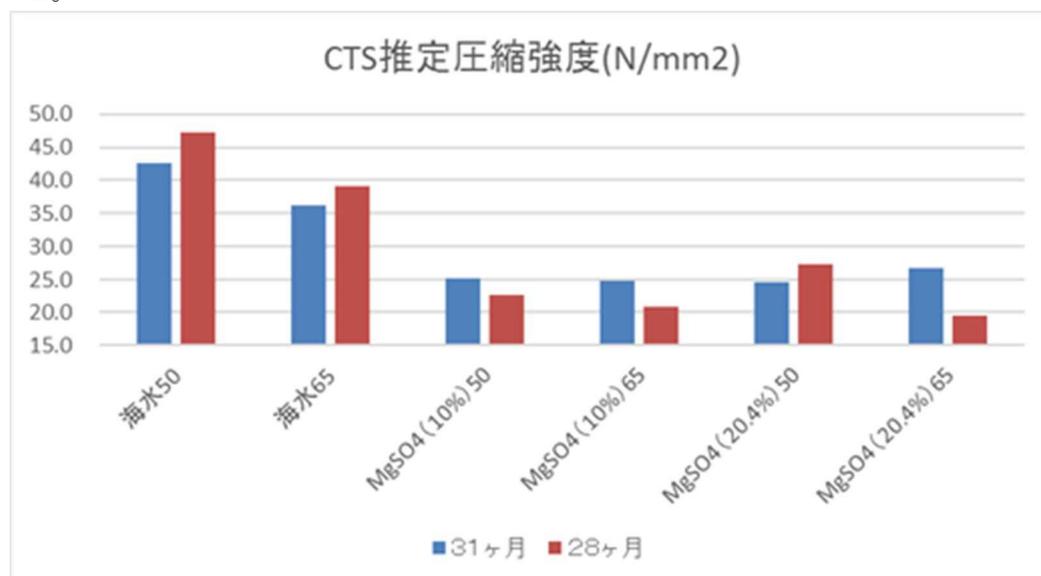
動弾性係数は、表面 p 波速度とは逆に、全てのケースにおいて 31 ヶ月の測定値が下回った。動弾性係数は波動伝達速度の 2 乗に比例する<sup>2)</sup>ことを考えると、31 ヶ月の表面 p 波速度が 28 ヶ月をいずれも上回ったことから、動弾性係数も大きくなると考えられるが、測定結果は逆となった。

海水に暴露した供試体では差がほとんどなく、硫酸マグネシウムに浸漬した供試体で差が生じていることから、3 ヶ月間の劣化促進が動弾性係数に影響を与えた可能性はある。



### ④ CTS

CTSによる推定圧縮強度は、31 ヶ月と 28 ヶ月との比較で一定の傾向は確認されなかった。



### (3) 劣化促進試験における劣化の促進レベル

平成 27 年度の本調査で検討した 44 年間海水暴露供試体の圧縮強度は、港湾空港技術研究所の試験結果<sup>3)</sup>から、5 年後程度で最大の圧縮強度を示した後、徐々に低下し、概ね一定の強度を維持したものと考えられる。一方、劣化促進試験では、5 ヶ月後までいずれの計測結果も概ね圧縮強度の増大を裏付ける数値が計測されている。このことから、少なくとも劣化促進試験の 5 ヶ月は実際の 5 年程度以下に相当すると言える。

また、劣化促進試験の 5 ヶ月以降は、概ね各測定値が減少傾向にあるため、実際の 5 年程度の期間に相当する時期が、劣化促進試験の 5～12 ヶ月の間にあると推察される。しかしながら、表面 P 波速度は 17 ヶ月以降、再び増大傾向を示すケースもあるため、正確な評価は難しい。また、劣化促進試験におけるこれらの変化の傾向については、硫酸マグネシウムの濃度による違いは生じていない。

#### 【参考文献】

- 1) コンクリート工学の基礎、共立出版、p130
- 2) コンクリートの縦弾性波速度の測定方法に関する実験的検討、山下健太郎、境友昭、極檀邦夫
- 3) コンクリートの耐海水性に関する研究、昭和 56 年 3 月、運輸省港湾技術研究所、社団法人セメント協会、p35～40

#### (4) 蛍光 X 線分析

海水によるコンクリートの劣化原因としては、海水中に含まれる硫酸イオンとセメント中の水和物との反応によって生成するエトリンガイドが引き起こす膨張破壊やセメント水和物中の主成分である水酸化カルシウムの溶出による空隙の増加が考えられる。一方、長期間海水中に浸漬されたコンクリートの劣化状況に関わる既存報告では、硫酸イオン、マグネシウムイオン、水酸化カルシウムの濃度分布を分析し、供試体表面からの深さにおいて、硫酸イオン濃度が高くなる箇所でもマグネシウムイオン濃度が増加し、水酸化カルシウムの濃度が低下することが報告されている<sup>1)</sup>。

そこで、本暴露試験では、供試体を継続使用するため、表面での蛍光 X 線分析を行うこととし、硫酸イオン、マグネシウムイオン、水酸化カルシウムに含まれる S、Mg、Ca の各元素を分析した<sup>2)</sup>。

まず、各供試体表面における S の含有量は、気中より海中が低いものの、その他の暴露条件では大幅に含有量が多い結果となった。また、海中、10%、飽和、乾湿繰り返しでは、W/C50%より W/C65%での含有量が低い結果となった（図 e-3-4-12 参照）。

次に、各供試体表面における Mg の含有量は、海中の W/C65%で若干低いものの、硫酸マグネシウムが多い暴露条件になるほど（気中→海中→10%→飽和）、含有量が高くなっている。また、S と同様に、海中、10%、飽和、乾湿繰り返しでは、W/C50%より W/C65%での含有量が低い結果となった（図 e-3-4-13 参照）。

反対に、Ca の含有量は、気中や海中が高くなり、硫酸マグネシウムが多い暴露条件ほど含有量が低い結果となった（図 e-3-4-14 参照）。なお、Ca の含有量について、海中と 10%を W/C50、60%のそれぞれで比較すると、W/C50%で 4.3 倍、W/C65%で 3.6 倍海中が高い。

以上より、硫酸マグネシウム濃度が高いほど、供試体表面の S、Mg の含有量が増加し、Ca の含有量が減少する傾向を確認することができた。さらに、乾湿繰り返しの条件が加われば、その傾向が大きくなることも確認できた。この供試体表面における S、Mg、Ca の含有量の関係は、上記の既存報告とも一致していると言える。今後、浸透方向でも供試体表面と同様に含有量を評価することで、老朽化速度を評価できる可能性があると考えられる。

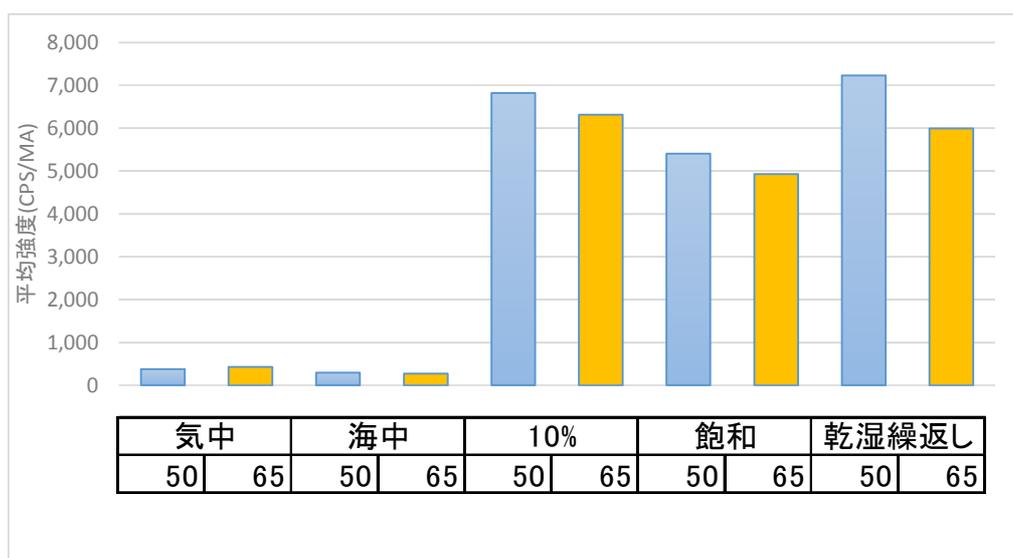


図 e-3-4-12 S の蛍光 X 線分析結果

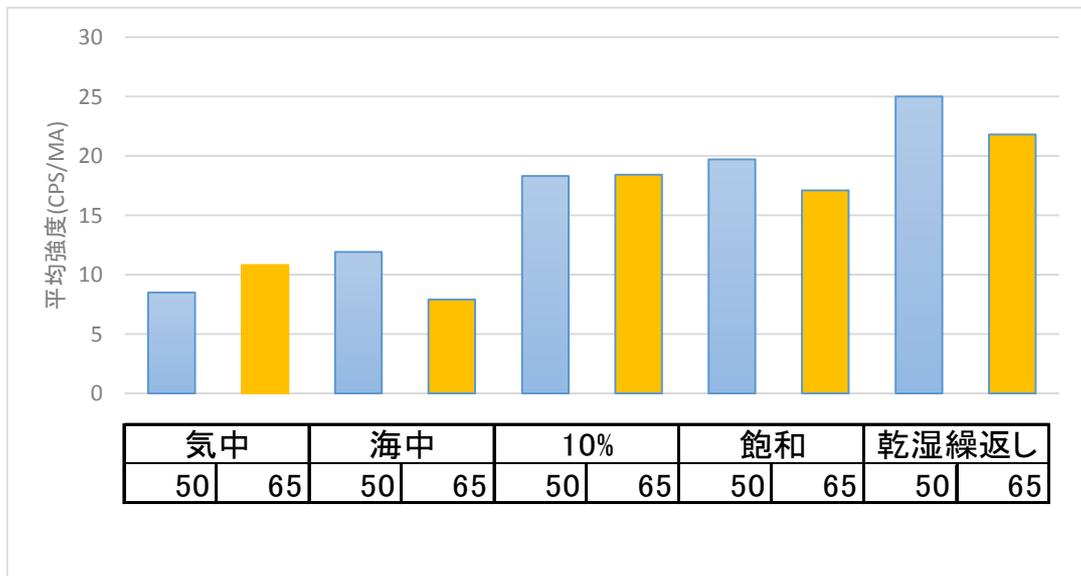


図 e-3-4-13 Mg の蛍光 X 線分析結果

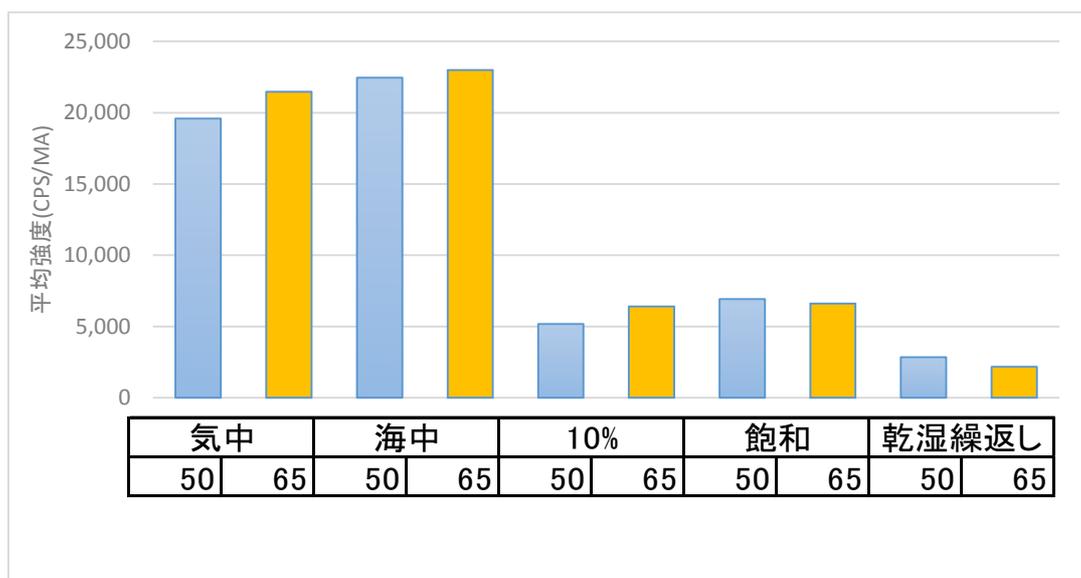


図 e-3-4-14 Ca の蛍光 X 線分析結果

【参考文献】

- 1) 「長期間海水中に侵漬されたコンクリートの劣化状況および簡易な劣化指標に関する検討」 港湾空港技術研究所報告, NO. 1150, 2007
- 2) 中井泉編集「蛍光 X 線分析の実際」 榊朝倉書店, 東京, 2012.

## f. 課題

### 1. 水産基盤施設の老朽化の現状把握と中長期的なコスト分析

#### (1) データ精度向上

- 被災3県データが収集できず、今後の課題である。

#### (2) 試算の各パラメータの見直し

- 老朽化度から試算した耐用年数の算定方法の再検討が必要である（本業務では初回対策年ー建設年としている）。
- その他の更新費の考え方を検討する必要がある（CASE1～3以外の耐用年数設定方法）。
- H29.3策定分も含め、未入力の機能保全計画書への対応が必要である。

### 2. スtockマネジメントによるライフサイクルコストの縮減効果

#### (1) コスト縮減率の考え方

- 新たなコスト縮減率試算方法の妥当性を確認する必要がある。この際、評価期間の延長方法が課題となり、①初回対策年から耐用年数分延長する、②マルコフ連鎖モデル等で施設の耐用年数を推定する、等の方法が考えられる。

### 3. 漁港施設の構造物全体の機能評価手法の開発・普及

#### (1) 室内試験

- 基礎部条件ごとの実験結果をロッキング振動の(b)式で説明できるように係数等の検討を行う必要がある。このことについては、現地調査結果についても同様である。
- 基礎部を砂、砂利とした場合の実験の再現性を確認する必要がある。
- 実験を行った砂、砂利の状態を示す指標を確認する必要がある（N値測定等）。
- 最も単純な形状（直方体）でしか試験を行っていないため、上部工付などの形状での検討が必要である。
- 現場で起こりうる複雑な吸出しの状況を想定して、卓越周波数の変化を確認しておく必要がある。
- 透過法は、空隙の確認しか実施していないため、ひび割れや表面劣化に対する検討が必要である。

#### (2) 現地調査

- 周波数分解能を高めて卓越周波数の変化をより詳細に把握するため、3分計測データが必要である。
- 当該計測手法の妥当性を確認するため、吸出しを受けた様々な防波堤において計測を行い、データ蓄積が必要である。
- 対象とする防波堤の振動特性を明らかにするため、堤体1スパン及び防波堤全体の振動モードを計測する必要がある。
- 透過法について、検知できる劣化部の大きさや、測定精度を確認するため、実際に劣化した場所での検証が必要である。

#### (3) 数値計算

- 室内試験又は現地試験とは異なる条件でも解析を行い、種々の条件下における応答の比較が必要である。

#### (4) 暴露試験

- 老朽化促進している供試体の表面劣化が大きく、非破壊試験が困難となっている。中断か継続の判断が必要である。
- 浸透速度を評価するため、割裂試験を実施するか否かの判断が必要である。