

## 報告 起振機実験による防波堤の固有振動特性の検討

齋藤 将貴\*1・藤田 孝康\*2・梅津 啓史\*3・三神 厚\*4

**要旨：**港湾・漁港の防波堤は、基礎部洗堀等の変状によって、施設自体が傾斜、または転倒した場合、大きな被害となりやすく、第三者被害も引き起こすこともある。漁港施設の健全性を簡易に評価するため、防波堤上部で微動を測定することで基礎部の変状を評価できる可能性があることを既に報告した。その際の課題として、観測した微動のスペクトルに見られる複数の卓越成分のうち、実際の防波堤の固有振動数がいずれの卓越成分であるかを確認し、波浪等の影響による成分と区別することが残されていた。そこで本報告は、実際の防波堤を起振機によって強制的にロッキング振動させ、その固有振動特性を検討した。

**キーワード：**防波堤、基礎洗堀、ロッキング振動、固有振動

### 1. はじめに

我が国では、高度成長期以降に着実に整備されたインフラが膨大に存在し、これらインフラの多くが老朽化することが懸念されており、これらの安全性や信頼性を確保しながら、戦略的な取組を進めることが求められている<sup>1)</sup>。

このような状況から、国は2013年(平成25年11月)に「インフラ長寿命化計画」を策定した。本計画は、各インフラ管理者が実施する長寿命化計画(行動計画)策定、個別施設毎の長寿命化計画策定、基準・法令等の整備、情報基盤の整備、新技術の開発・導入等の2030年頃までのロードマップを示したものである<sup>2)</sup>。

これら社会インフラのうち、海域周辺に設置されているものとして、港湾施設、漁港施設、海岸保全施設等が挙げられる。港湾は全国に994港、漁港は2,860漁港<sup>3)</sup>が全国各地に点在しており、海岸線は約3.5万km、このうち約1.4万kmが要保全海岸延長とされており、膨大なストック量が存在する<sup>3)</sup>。

港湾・漁港施設は、静穏域を確保し、船舶や漁船を係留する機能があり、この静穏域を確保するために防波堤等の外郭施設、船舶や漁船を係留するための係留施設が全施設に占める割合も多くなっている。特に、これらの主要施設である防波堤は、高度成長期にその多くが整備され、上部工や本体工の老朽化もさることながら、基礎部洗堀等の変状によって、施設自体が傾斜、または転倒した場合、大きな被害となりやすく、第三者被害も引き起こすことが知られている<sup>4)</sup>。漁港防波堤の安定を確保し、維持管理するためにはコンクリート躯体部のみならず基礎部も含めた一体として健全性を評価する必要がある。

しかし、これら防波堤の基礎部は、その大部分が地中、または海中にあるため、海水の濁りや付着物等により、点検・診断しにくい、または点検・診断が困難であり、これらを実施する場合の労力や費用も大きくなる傾向がある。

このため、膨大に存在する防波堤の基礎部を診断する方法を効率化すること(本報告では、防波堤の固有振動を測定することで、一次スクリーニングし、その後、詳細に潜水観察を実施することで効率化する等)は、今後の維持管理を進める上で重要であると考えられる<sup>5) 6)</sup>。

村木ら<sup>7)</sup>は、防波堤上部の振動特性から外力(波や風)によるロッキング振動が顕著であり、このときのロッキング中心の大部分が防波堤底面の中央にあり、このロッキング振動の固有振動周期は0.2秒程度であると報告している。藤田ら<sup>8)</sup>は、この報告をもとに、実際の漁港施設2施設の常時微動から固有振動数を特定し、これを用いて防波堤の基礎変状の有無を検出できる可能性があることを報告した。また、藤田ら<sup>9)</sup>は、防波堤上部におけるコンクリート構造物の底面中心にロッキング中心があり、この構造物がロッキング振動しているという仮定での室内試験、および固有値解析による検証でこれらの仮定が妥当であること、室内試験モデルにおいて、2点の鉛直振動の変位差量からロッキング中心のずれを推定し、基礎欠陥部の有無や規模を評価できる可能性を示し、防波堤上部での2点の鉛直変位差量から基礎部欠陥を評価する方法を提案している。

しかし、これらの報告は、あくまで村木ら<sup>9)</sup>の報告を前提に室内試験や解析を行ったものであり、実際の防波堤がロッキング振動しているか、またロッキング振動している場合の振動特性が検討されていない状況である。さらに、防波堤で起振機による振動特性を検討した例が見当たらない状況でもある。

そこで、本報告は、実際の防波堤上部に設置した起振機によって、調和外力(水平力)を与えることで防波堤を強制的にロッキング振動させ、その時の防波堤上の振動を測定することで、防波堤のロッキング固有振動特性を検討したものである。

\*1 東海大学大学院 工学研究科建築土木工学専攻

\*2 一般社団法人水産土木建設技術センター専門技術員

\*3 国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所

\*4 東海大学 工学部土木工学科 博(工)

## 2. 方法と材料

### 2.1 対象施設

実際の漁港施設における防波堤を対象施設とし、関東地方の2漁港2施設とした。これら防波堤の基礎は、いずれもマウンド式であり、直近で実施された機能診断でいずれも基礎洗堀等の変状がないことが確認されていた。

A 漁港防波堤は、構造形式がコンクリート単塊式で上部工がある構造であり（図-1参照）、対象スパンは、基礎捨石マウンド上に躯体の幅 3.2m×高さ 5.6m×長さ 5m（スパン 13・14）と幅 4.6m×高さ 5.6m×長さ 5mであった（スパン 20・21）（図-2参照）。B 漁港防波堤は、構造形式がケーソン式で上部工がない構造であり（図-3参照）、対象スパンは、基礎捨石マウンド上に躯体の幅 11.5m×高さ 8.45m×長さ 10m の隣接する 2 スパン（スパン 10, 11）とした（図-4参照）。



図-1 A 漁港防波堤の外観

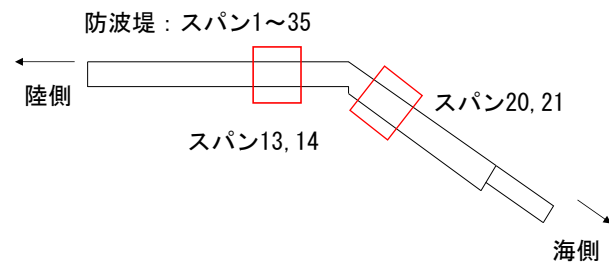


図-2 A 漁港防波堤概略平面（上）と概略断面（下左：スパン 13, 14, 下右：スパン 20, 21）

### 2.2 強制振動させるために用いた起振機

漁港施設防波堤を強制振動させるにあたり、管理上の制約等に配慮したため、ここでは、最大加振490N相当の小型起振機である(株)サンエス製の永久磁石起振機SSV-125MEを用いた（図-5参照）。本機は、水平方向の加振周波数を設定して加振することが可能である。本機を対象施設上部に設置して、10ケース程度の周波数を段階的に変化させて加振した。



図-3 B 漁港防波堤の外観

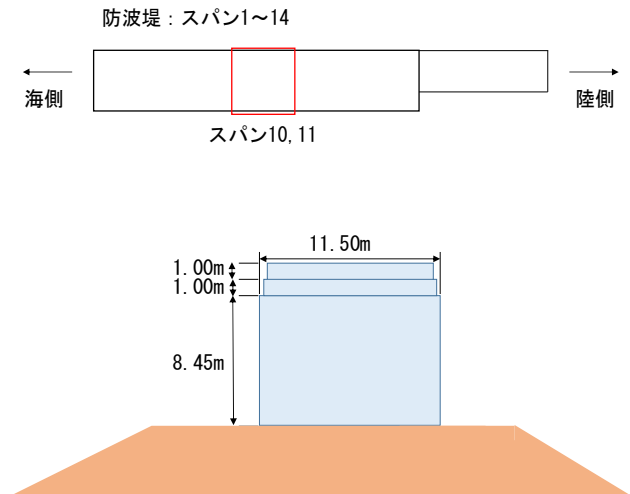


図-4 B 漁港防波堤概略平面（上）と概略断面（下）



図-5 起振機外観

加振に用いた起振機は、今回検討した周波数帯においてフラットな加振力特性（最大加振力490N以上）を有し、この加振によって、十分な応答が得られるかを別途検討した上で選定した。なお、本検討では構造物上部に起振機を設置し、水平加振することで、構造物底面中心にロッキング中心がある振動をするものと仮定している（図-6参照）。

$a, b, h$  は、それぞれ剛体ブロックの幅と奥行きであり、剛体ブロックの高さである。なお、起振機自体の質量は考慮していない。

このときの運動方程式は、式(1)のとおりである。

$$J\ddot{\theta} + C_R\dot{\theta} + \int_{-a/2}^{a/2} k_v b d \eta \cdot \eta \theta \cdot \eta = F(\omega) \cdot h \quad (1)$$

ここで、 $F(\omega)$  は水平起振力、 $k_v$  : 鉛直方向地盤反力係数、

$C_R$  は回転方向の減衰係数、 $K_\theta = \frac{1}{12} k_v b a^3$  である。

式(1)の計算を進めると、

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

となり、式(1)より、 $\theta = \theta_0 \exp(i\omega t)$  とおき、

$F(\omega) = F_0 \exp(i\omega t)$  とすると、

$(K_\theta + i\omega C_R - \omega^2 J) = F_0 h$  となる。

よって、 $\theta_0 = \frac{F_0 h}{K_\theta + i\omega C_R - \omega^2 J}$  が各周波数ごとの回転角と

なる。得られる応答の推定値、センサーの最大感度および分解能を併せて考えると、十分に応答信号が得られることが見込まれたので、最大加振力490Nである本起振機を用いることとした。

### 2.3 測定機器と計測方法

測定に用いた機器は、(株)東京測振製の携帯用振動計SPC-51Aとした（以下、「速度計」という。図-7参照）。測定方法は、それぞれのスパン上部の中央部に起振機1台を設置し、水平方向（Y軸方向）のそれぞれの端部から1/4の2か所に速度計を設置して、2点の鉛直方向（Z軸方向）位置の振動を計測し、うち1ヶ所（港内側）で水平方向（Y軸方向）の振動を計測した（図-8、9参照）。

起振機の周波数は、漁港施設防波堤の固有振動数と想定された周波数付近で10ケース程度、段階的に変化させて加振し、このときの防波堤の振動を1分間ずつ記録した。なお、速度計のサンプリング周波数は、いずれも100Hzとした。

表-2 速度計の基本仕様

	感度	理論分解能	測定周波数
変位	0.2mm/V	0.06 μm	0.2Hz~
速度 (L)	0.01m/s (1kine/V)	0.3 × 10 <sup>-5</sup> m/s (0.3kine)	
速度 (H)	0.001m/s (0.1kine/V)	0.03 × 10 <sup>-5</sup> m/s (0.03kine)	
加速度	2m/s <sup>2</sup> (200Gal/V)	0.0006m/s <sup>2</sup> (0.06Gal)	

\* L, H はそれぞれLow, Highの意味で感度を表す

表-1 起振機の基本仕様

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

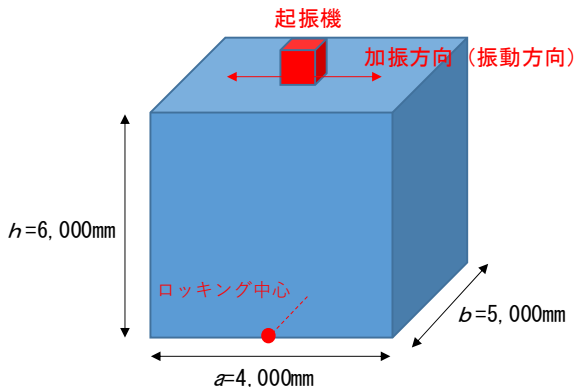


図-6 加振力検討のために想定した構造物

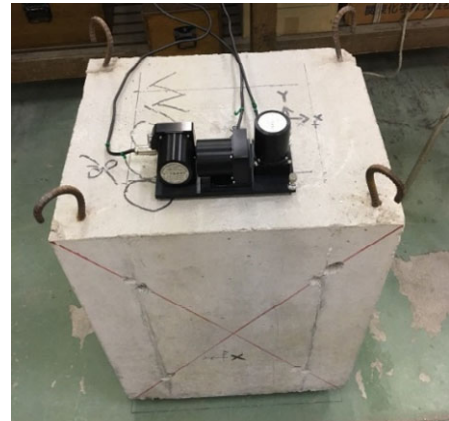


図-7 速度計外観



図-8 漁港施設防波堤の起振機設置状況

### 3. 結果と考察

#### 3.1 定常加振による防波堤の時刻歴波形

##### (1) A 漁港防波堤

A 漁港防波堤スパン13, 14における加振した場合の水平方向（Y軸）時刻歴波形は、図-10に示すとおりである。図-10より、これらの時刻歴波形は、長周期波形に短周期波形が重なった形状となっており、スパン20, 21でも同様の傾向が見られた。なお、これらの時刻歴波形は、1分間の測定のうち、開始時と終了時の15秒ずつを除いた30秒間の時刻歴波形を示したものである。

##### (2) B 漁港防波堤

上記と同様に、B 漁港防波堤スパン 10 の水平方向（Y軸）における時刻歴波形は、図-11に示すとおりであり、A 漁港防波堤の時刻歴波形で見られた長周期波形に短周期波形が重なった波形が確認され、この傾向は、スパン 11でも同様であった。

#### 3.2 変位応答

##### (1) A 漁港防波堤

加振している A 漁港防波堤スパン 20, 21 の水平方向、鉛直方向の時刻歴波形は、図-12に示すとおりである。水平方向、鉛直方向の波形は、概ね逆位相となっており、水平動が最大値に至るタイミングと上下動が最小値に至るタイミングが合致していることを示しており、ロッキング振動していることが確認された。この傾向は、A 漁港防波堤スパン 20, 21でも確認され、これらの漁港防波堤の振動形態が起振機によって、ロッキング振動していると判断される。

次に、起振機で A 漁港防波堤を加振した際、起振機による応答成分は波浪等による微動成分より小さいため、計測された変位のフーリエスペクトルから加振振動数に対応する値を抜き出し、加振振動数ごとに連ねたものを共振曲線の代わりに用いた。

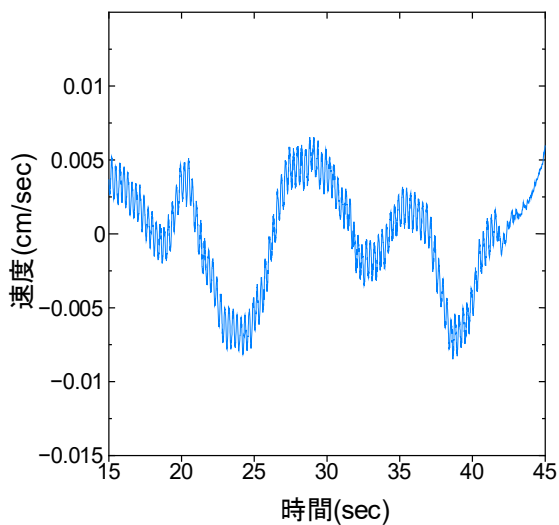


図-10 A 漁港防波堤におけるスパン 13, 14 の時刻歴波形

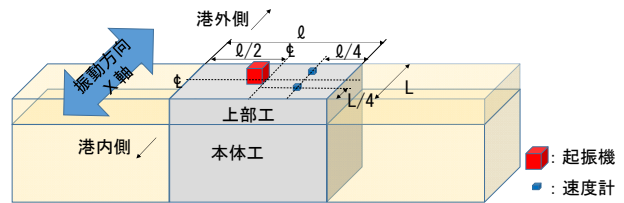
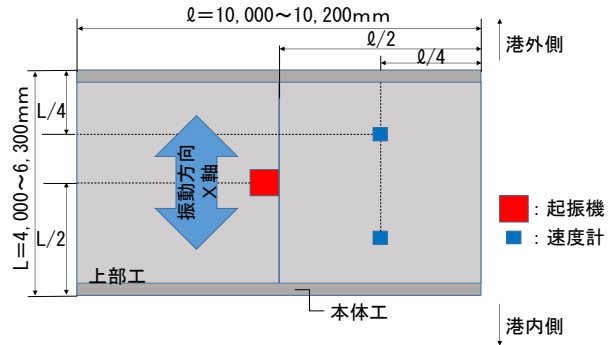


図-9 漁港防波堤における起振機、速度計配置図  
(上：平面、下：立体)

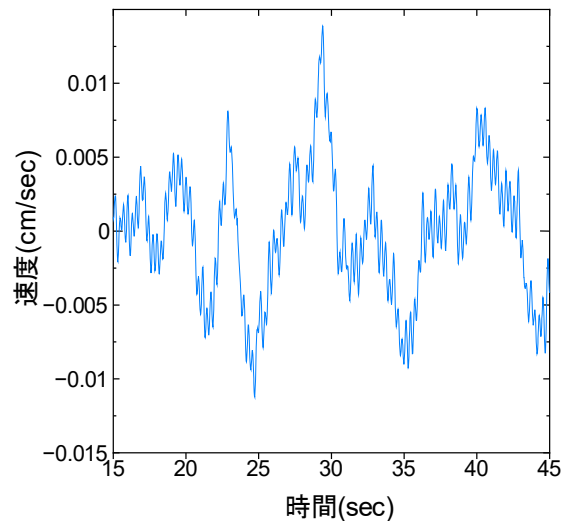


図-11 B 漁港防波堤におけるスパン 10 の時刻歴波形

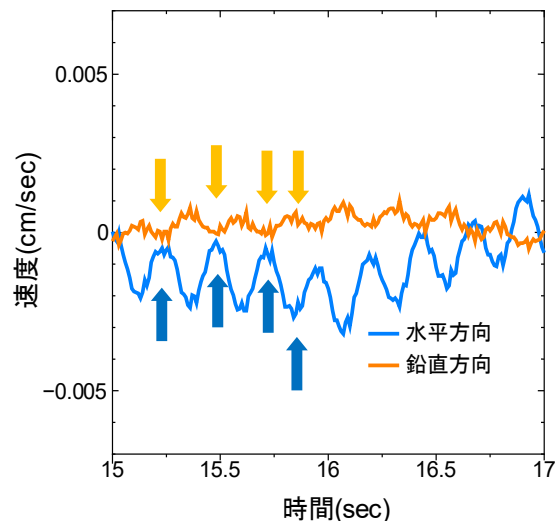


図-12 A 漁港防波堤スパン 20, 21 における水平方向、鉛直方向の時刻歴波形

図-13, 14より, それぞれのスパンにおける共振曲線の極値から固有振動数は, スパン13,14が3.2Hzまたは4.2Hz, スパン20,21が4.2Hzと判断される。これら両スパンは, 防波堤幅が異なるため(図-3参照), 藤田ら<sup>7)</sup>が報告した理論式より算出した理論値は, それぞれ3.1Hz, 4.0Hzであり, 概ね, 実測値と理論値が一致する結果となった。また, 村木ら<sup>9)</sup>が実測した防波堤において, 約0.2秒周期(5Hz)の固有振動が存在するとして報告とも概ね一致する結果であった。したがって, 起振機を用いた強制振動によるロッキング振動の固有振動数は, 前者が3.2Hz, 後者が4.2Hzと判断された。

(2) B 漁港防波堤

B 漁港防波堤でも A 漁港防波堤と同様に, スパン10における水平方向と鉛直方向の時刻歴波形は, 図-15に示すとおりである。B 漁港防波堤でも双方の波形が概ね逆位相となっており, ロッキング振動していることが確認された。なお, スパン11でも同様の傾向であった。

同様に, 起振機で B 漁港防波堤を加振した際も, 起振機による応答成分は波浪等による微動成分より小さいため, 計測された変位のフーリエスペクトルから加振振動数に対応する値を抜き出し, 加振振動数ごとに連ねたものを共振曲線の代わりに用いた。

図-16, 17より, それぞれのスパンにおける共振曲線の極値から, 固有振動数は, いずれも3.0 Hz または3.5Hzと判断される。A 漁港防波堤と同様に, スパン10, 11の寸法から, 藤田ら<sup>8)</sup>が報告した理論式を用いて, 算出した理論値は, 3.0Hzであり, 概ね, 実測値とも一致する。また, 村木ら<sup>9)</sup>が実測した防波堤において, 約0.2秒周期(5Hz)の固有振動が存在するとして報告とも一致した。

以上より, A 漁港防波堤2スパン, B 漁港防波堤2スパンとも藤田ら<sup>8)</sup>や村木ら<sup>9)</sup>の報告とも概ね一致することから, 防波堤におけるロッキング振動の固有振動数は, 3.0~4.2Hzであることがわかった。

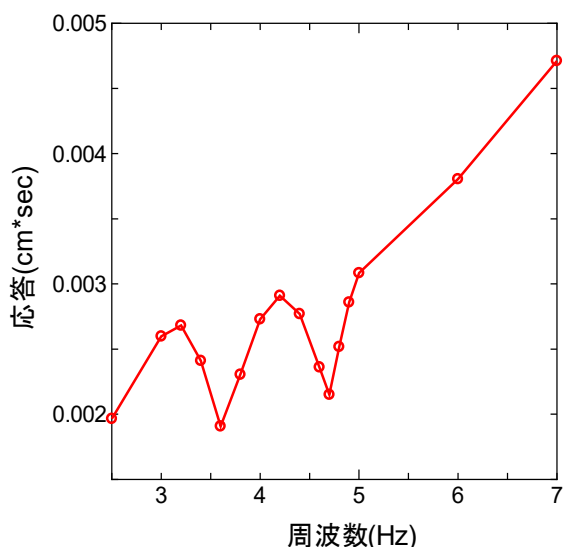


図-13 A 漁港防波堤スパン13,14における変位応答

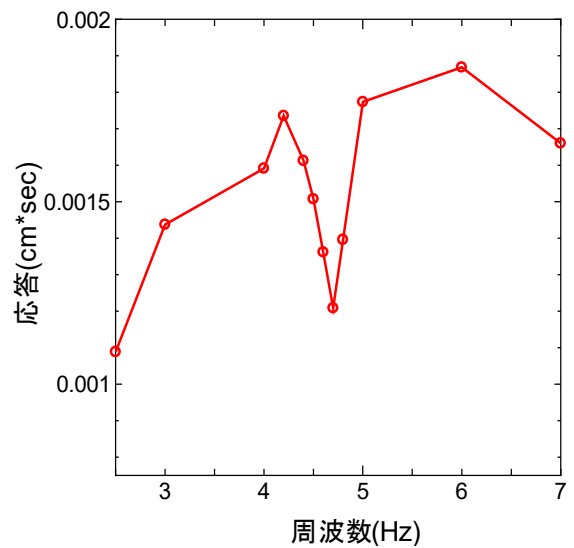


図-14 A 漁港防波堤スパン20,21における変位応答

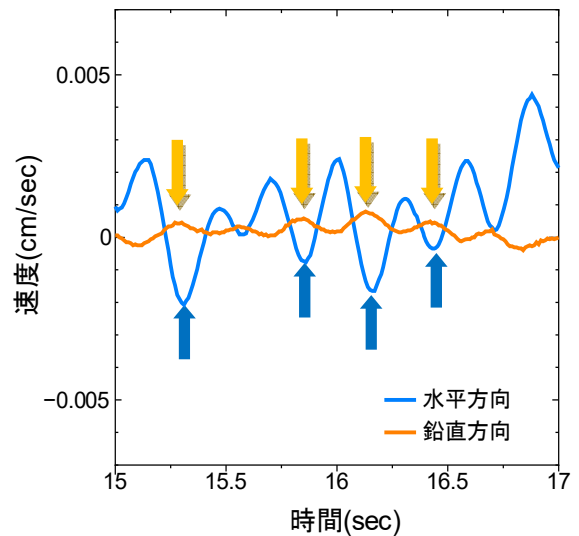


図-15 B 漁港防波堤スパン10における水平方向, 鉛直方向の時刻歴波形

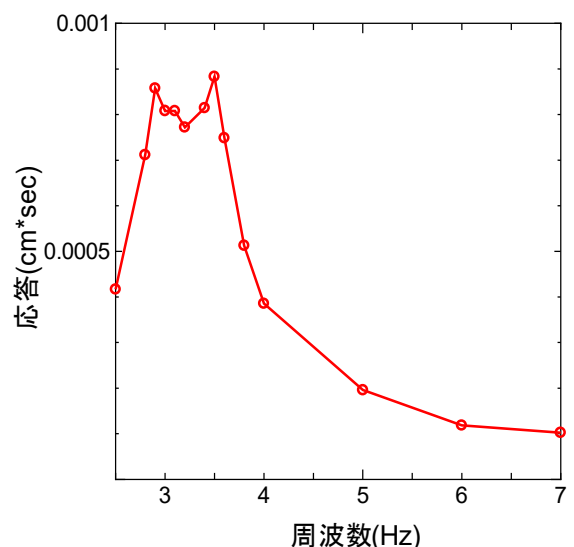


図-16 B 漁港防波堤スパン10における変位応答

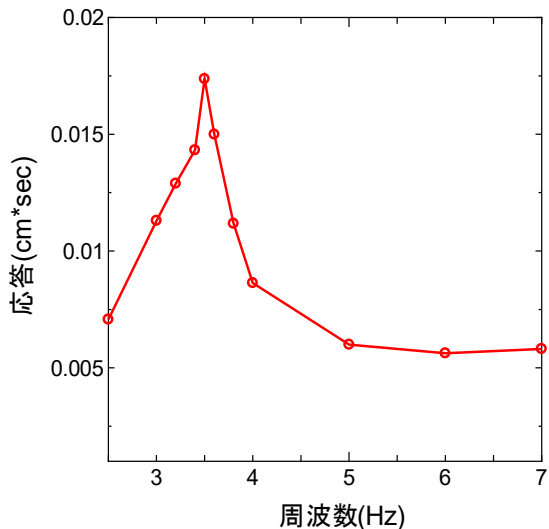


図-1 7 B 漁港防波堤スパン 11 における変位応答

### 3.3 2 点の鉛直変位量

起振機実験による防波堤の振動は、図-1 2, 1 5 で示したように、水平方向 (Y 軸) と鉛直方向 (Z 軸) の振動が逆位相を示している。起振機によって、漁港施設防波堤が強制振動し、ロッキング振動していることが確認された。このようなロッキング振動しているとき、鉛直方向の変位の絶対値の平均値を鉛直変位量 (mm)、鉛直変位量 (mm) の差分の絶対値を変位量差 (mm) とした。A 漁港防波堤と B 漁港防波堤の各スパンにおける 2 点の鉛直変位量 (mm) と 2 点間の変位量差 (mm) は、表-3 のとおりである。表-3 より、2 点の鉛直変位量には明瞭な差異が認められない。強制振動によって共振させた状態であっても 2 点の Z 軸方向の変位量が同程度であり、かつ構造物基礎部の変位がないことが確認されていることから、ロッキング中心が構造物底面の中心付近にあるものと考えられる。藤田ら<sup>7)</sup>が提案した 2 点計測による防波堤基礎部変位の規模を推定する方法と矛盾しない。

以上より、起振機による強制加振によって、防波堤をロッキング振動させ、防波堤上の端部 2 点で計測し、2 点間の鉛直変位量差を把握し、基礎を評価する方法について、現地漁港施設防波堤でも適用可能であることが確認された。

## 4. まとめ

実際の漁港施設防波堤において、強制加振させた振動を計測し、以下の結論を得た。

- (1) 起振機実験によって、実際の漁港施設防波堤がロッキング振動していることを確認した。
- (2) 当該漁港施設防波堤におけるロッキング振動の固有振動数は、3.5~4.2Hz であり、これは村木ら<sup>9)</sup>が報告した値とも近く、藤田ら<sup>8)</sup>が報告した理論式から算出した理論値ともほぼ一致することから、これらが当該漁港施設防波堤の固有振動数と判断される。
- (3) 基礎変位がない当該漁港施設防波堤は、防波堤上の端部 2 点で計測した鉛直変位量差が確認されなかった。

表-3 防波堤上部における端部 2 点での鉛直変位量および変位量差 (単位: mm)

漁港名	スパン名 (加振周波数)	鉛直変位量 (mm)		変位量差 (mm)
		1ch	2ch	
A 漁港	スパン13.14 (3.6Hz)	0.00009	0.00009	0.00001
	スパン20.21 (4.2Hz)	0.00010	0.00013	0.00003
B 漁港	スパン10 (3.5Hz)	0.00009	0.00010	0.00001
	スパン11 (3.5Hz)	0.00022	0.00023	0.00001

このことは、藤田ら<sup>7)</sup>が提案した方法と矛盾せず、実際の漁港施設防波堤でも適用可能であることが確認された。

今後は、本成果を踏まえ、基礎変位がある場合とない場合で検証するとともに、これら手法の適用条件を明らかにするため、立地場所、構造形式等が異なるデータの検証を進める予定である。

## 謝辞:

本研究の実施にあたり、東海大学工学部の笠井哲郎教授、相澤氏、新井氏、水産工学研究所の三上信雄氏、一般社団法人水産土木建設技術センターの松本力氏、同完山鴨氏、日本ミクニヤ (株) の谷口氏に様々な助言、協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：今後の港湾施設の維持管理等の課題に対する対応方針，平成26年5月
- 2) インフラ長寿命化基本計画 参照：  
[http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra\\_roukyuuka/pdf/houbun.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/pdf/houbun.pdf)
- 3) 公益社団法人全国漁港漁場協会：2017漁港漁場漁村ポケットブック，pp.19-21，平成29年9月
- 4) 佐藤徹，加藤絵万，川端雄一郎，岡崎慎一郎：港湾施設の空洞化調査に関する報告，土木学会論文集B3 (海洋開発)，Vol.70, No.2, I\_552-I\_557, 2014
- 5) 丸山敏生，笠井哲郎，藤田孝康，中村克彦：固有振動を用いた漁港施設における機能診断方法の検討，第44回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，2017
- 6) 中村克彦，藤田孝康，笠井哲郎，丸山敏生，朝倉邦友：防波堤不可視部の機能診断技術の開発，平成29年度日本水産工学会学術講演会，113
- 7) 村木義男，高島和夫：波による防波堤の振動について，羽幌港における観測結果，第12回海岸工学講演会講演集，pp.198-204，1965
- 8) 藤田孝康ほか：漁港施設における不可視部の診断手法としての固有振動の適用性検討，土木学会論文集B3 (海洋開発)，Vol.74, No.2, I\_103-I\_108, 2018
- 9) 藤田孝康，丸山敏生，笠井哲郎，三神厚：防波堤の固有振動特性を用いた老朽化の評価手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.2, pp.1327-1332, 2018