

# 報告 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

藤田孝康\*1・丸山敏生\*2・笠井哲郎\*3・三神 厚\*3

**要旨：**高度経済成長期以降に集中的に整備された様々なインフラが今後一斉に老朽化することが懸念され、これに的確に対応することが求められている。港湾施設の計画的な維持管理を推進するため、膨大に存在する港湾施設の防波堤基礎部を潜水調査によらず陸上部で診断する方法は、今後の維持管理を進める上で重要である。本報告は、防波堤の固有振動特性を用いて基礎の欠陥を診断する方法について、理論値と室内試験の実測値を比較することで、理論モデルと実験モデルの整合性を確認し、防波堤が防波堤の軸直角方向にロッキング振動するという前提で、これら変位量の差から基礎欠陥部規模を推定する可能性を示した。

**キーワード：**防波堤, 固有振動, 基礎洗堀, ロッキング中心

## 1. はじめに

我が国では、高度経済成長期以降に集中的に整備された様々なインフラが今後一斉に老朽化することが懸念され、これらに的確に対応することが求められている<sup>1)</sup>。沿岸構造物である港湾施設においても、その主要施設である岸壁は、今後20年で供用開始後50年以上を経過するものが全体の半数以上になるなど、施設の老朽化が進行することが報告されている<sup>2)</sup>。また、港湾施設の計画的な維持管理を推進するため、平成25年に港湾法が改正され、定期的な点検を行うことが明記され、これに則った維持管理等が実施されているところである<sup>3)</sup>。

一方、港湾施設の主要な機能は、静穏域を確保し、船を係留するものであるため、部分的な老朽化もさることながら、基礎部洗堀等の老朽化によって、施設が傾斜または転倒することは第三者被害も含め、大きな被害となりやすいことが知られている<sup>4)</sup>。

しかしながら、これら港湾施設の基礎部は、その大部分が地中または海中にあり、老朽化等を確認する点検でも目視に頼っている部分が多く、海中部は潜水を伴い、海水の濁りや付着物等により、その労力も大きい。膨大に存在する港湾施設の基礎部を診断する方法を簡略化（非破壊検査により、スクリーニングすることで絞り込み、その後に詳細に潜水観察を実施する等）することは、今後の維持管理を進める上で重要であると考えられる。

このような課題に対して、筆者らは、上部のコンクリート構造物を剛体、構造物の底面基礎をばねであると仮定し、構造物上部で振動を計測することで、基礎の欠陥を診断することが可能であることを示した<sup>5)</sup>。本報告は、この方法を用いて、構造物基礎部の欠損（洗堀）を評価する手法の検討を試みたものである。具体的には、基礎に構造物1スパン（4,000×6,000×5,000mm程度の防波堤を想定した）を模した模型を製作し、この模型に発生する固有振動について、理論値と実測値を比較することで、これらの測定方法等の考え方が正しいか否かを確認した。また、固有値解析を実施することで、ロッキング中心を始めとした想定の妥当性を確認した。さらに、ロッキング中心がずれた場合の防波堤の鉛直振動変位の観測によって、基礎洗堀の規模を推定する方法について検討を加えた。

## 2. 沿岸構造物の状況と課題

### 2.1 港湾施設の現状

国土交通省港湾局によると、沿岸構造物の中で、主要な施設でもある港湾施設の現状は、これまでの着実なストック整備の一方で、高度成長期に集中的整備が行われた施設の老朽化が一層進行することが懸念されている。具体的には、図-1に示すように、港湾施設の主要施設である係留施設では、建設後50年以上の施設が2013年

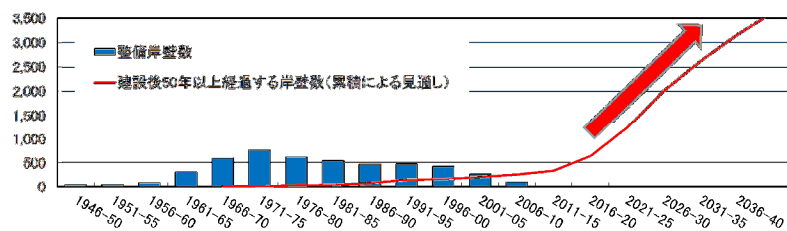


図-1 年度別係留施設整備数と建設後50年以上経過する岸壁の推移<sup>6)</sup>

\*1 日本ミクニヤ株式会社

\*2 東海大学 工学部土木工学科

\*3 東海大学 工学部土木工学科 博(工)

3月には約8%であったものが、20年後には約58%に急増することが報告されている<sup>7)</sup>。

このような状況の中、港湾施設の維持管理に関する取組として、今後急速に老朽化が進行する施設について、厳しい財政状況等を踏まえ、ライフサイクルコストの縮減や施設機能を安定的に確保するため、予防保全の考え方に基づいた維持管理・更新を一層進める必要があり、新たな点検診断ガイドラインの整備、点検・補修技術等に係る新技術開発促進、維持管理情報の蓄積等、総合的かつ重点的に取り組んでいく必要があるとされている<sup>7)</sup>。

## 2.2 港湾施設における機能診断と課題

港湾施設における機能診断は、原則として供用開始前に維持管理計画を策定し、この計画に基づき、点検・調査を実施し施設の健全度を評価して、必要に応じて補修することとなっている<sup>7)</sup>。

港湾施設の主要な構造物である防波堤について、変状が生じる過程を変状連鎖として整理したものが図-2とされる。図より、防波堤の場合、最終的には、構造物の安定性の低下に繋がる。本体根固めブロックの散乱やマウンド被覆石の散乱は、マウンド石の洗堀や地盤の洗堀と沈下にも繋がる<sup>7)</sup>。このような変状連鎖について、点検・調査は、目視に頼る部分が多く、これら変状の途中経過は、地中や海中で発生しており、当初の規模が小さい場合や障害物等によって、発見が遅れる場合も想定される。

一方、中村ら<sup>8)</sup>は、防波堤基礎部の欠陥に関し、構造物上部の振動を測定することで評価できる可能性があることを示した。また、伊藤ら<sup>9)</sup>は、単点での常時微動観測を用いて岸壁背後の空洞の検出について検討し、検出

可能であることを報告している。

そこで、このような課題に対して、陸上で基礎洗堀の状態を評価する方法として、構造物上部で振動を計測し、固有振動数を求める手法を検討することとした。

## 3. 実験および検討

### 3.1 防波堤の固有振動理論値と室内試験による検証

丸山らは<sup>9)</sup>、鉛直方向(Z軸方向)の振動に着目し、供試体を上部構造物、基礎を圧縮ばねと仮定した室内試験によって、計算値と実測値がよく一致することを報告した。しかし、実際の防波堤に働く外力として、地盤や波、風が考えられ、突発的には地震やその他の振動が挙げられる<sup>10)</sup>。また、一般的に3次元空間に存在する物体は、X、Y、Z方向の並進運動とそれぞれの軸回りの回転運動が可能であり、自由度6とされる<sup>11)</sup>。これらの振動のうち、どの振動が顕著であるかについては、防波堤では確認されていないのが現状である。

一方、図-3に示すような最も単純な防波堤を想定した場合、赤矢印で示した区画(以下、「スパン」という)は、XとZ軸方向の振動が顕著になるものと考えられる。また、図-3で、基礎洗堀が発生し、構造物底面の接地面が減少した場合、前述のXとZ軸方向の振動特性が変化すると考えられる。このX軸方向の振動は、村木ら<sup>12)</sup>が実際の防波堤では固有周期0.2秒程度のロッキング振動であること報告している。

そこで、本報告では、このZ軸方向およびX軸方向の2方向の振動に着目する。Z軸方向の振動は、防波堤の底面基礎をばねと仮定した式(1)で表現され、その固有振動数は式(2)となる。

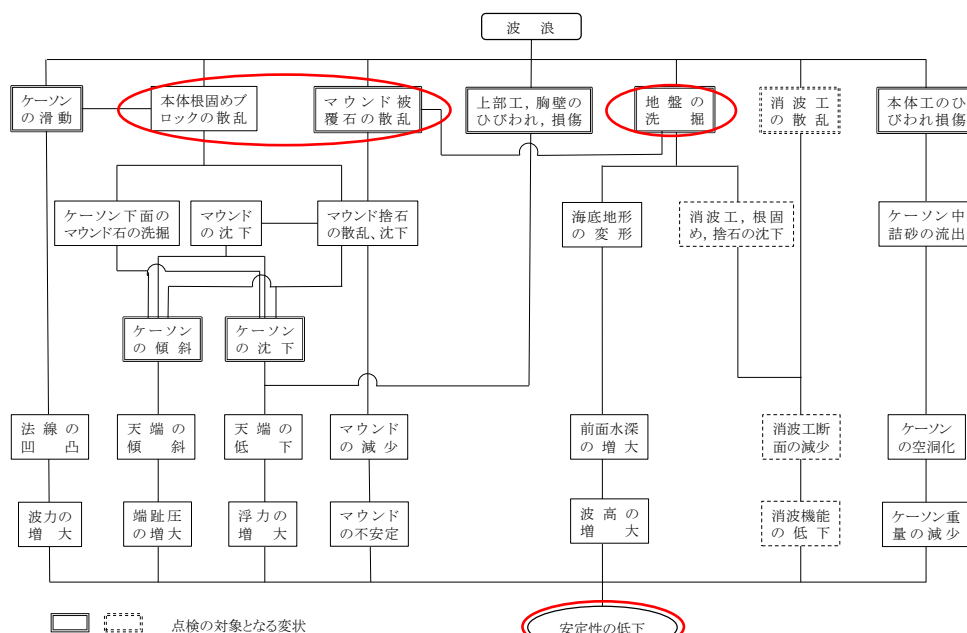


図-2 ケーソン式混成防波堤の主要な変状連鎖<sup>7)</sup>より改変

$$Mg + K_v u = 0 \dots\dots\dots (1)$$

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

ここに、 $M$ は構造物の質量、 $K_v$ はばね定数である。

また、水平方向の振動をロッキング振動と仮定し、ロッキング中心を供試体底面にあるとすると、 $X$ 軸方向の振動は、ロッキング振動していることを想定し、式(3)、(4)とした<sup>11,12)</sup>。ここで、 $J$ は慣性モーメント、 $K_R$ は回転方向のばね定数である。

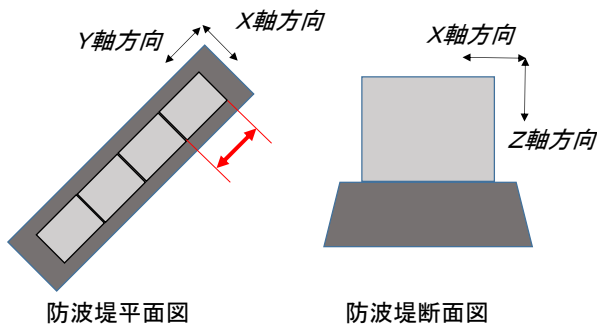


図-3 防波堤の模式図

$$J\ddot{\theta} + K_R \theta = 0 \dots\dots\dots (3)$$

固有振動数は、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_R}{J}} \dots\dots\dots (4)$$

これら2式が防波堤における $Z$ 、 $X$ 軸方向の固有振動と定義して、それぞれの条件における理論値を算出した。算出した理論値は、後述の室内試験で計測した固有振動数と比較した。

室内試験は、一般的な実構造物におけるスパンの概ね1/10の寸法の供試体を製作し、振動数を測定した。供試体は、表-1に示した材料・配合のコンクリートを用い、寸法400×500×600mmとした。ヤング係数は、 $3.33 \times 10^4 (N/m^2)$ であり、その質量は実測で270kgであった(図-4参照)。底面基礎には、ばね定数が既知である(198.61N/mm/1個あたり)圧縮ばねを用いた。圧縮ばねは、供試体下部に4~63個の7パターンで配置した(図-5参照)。

計測は、供試体上部に小型振動計測装置(携帯用振動

計 SPC-51A, (株)東京測振社製)を設置して、静置状態での3成分の振動をそれぞれのパターンごとに、100Hzで3分間計測した。なお、速度計は、短辺の供試体中央部、長辺1/4の箇所に設置した(図-6参照)。

室内試験で取得した時系列データは、高速フーリエ変換(FFT)し、得られたパワースペクトルを平滑化することで卓越周波数を求めた。なお、地盤や建物の振動の影響を排除するため、地盤や建物(床)の振動を測定し、前述のパワースペクトルと比較して、地盤や建物の振動ではないことを確認した上で卓越周波数を求めた。



図-4 コンクリート供試体外観

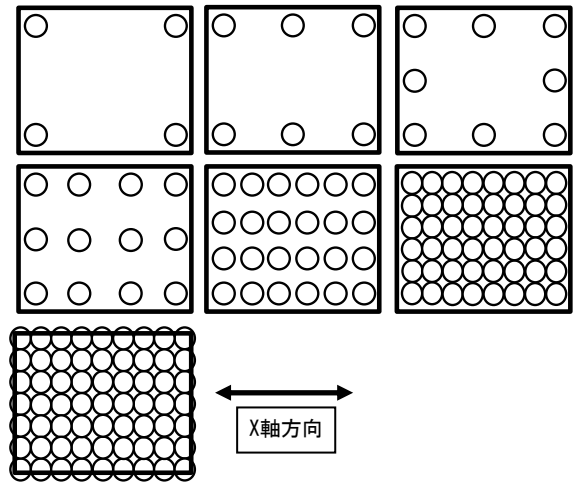


図-5 圧縮ばねの配置(左上から4~63個)



図-6 供試体計測状況(左)と圧縮ばねの配置(右)

表－1 供試体の材料，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	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤						
		AE助剤	AE	マイクロエア202						
W/C (%)	Gmax (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤(C×%)	
					W	C	S	G	SP	AE
50	20	10±2.5	4.5±1.5	45.8	172	344	800	986	0.30	0.005

### 3.2 固有値解析による検証

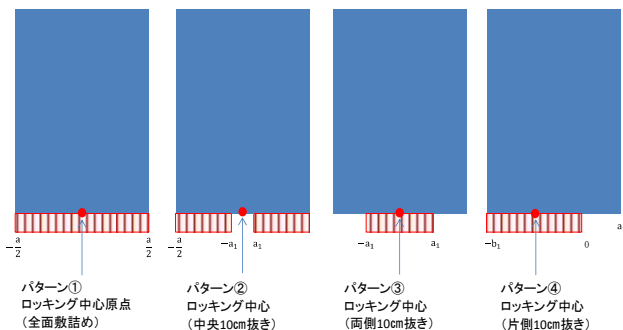
3.1 で述べた X 軸方向のロッキング振動は，この振動の中心が供試体の底面中心にあることを想定している。この想定が正しいか否かを確認するために，2 次元有限要素法を用いた固有値解析を行った。

### 3.3 防波堤基礎洗堀の規模と室内試験による検証

3.1 では，防波堤を模したモデルを用いて，基礎洗堀があることを想定し，4.1 で，構造物上部で Z 軸と X 軸方向の振動を計測することで，理論値と実測値を比較した。ここで，実測値との違いをより分かりやすくするために，X 軸方向は，振動しにくいと考えられる供試体長辺側としている。

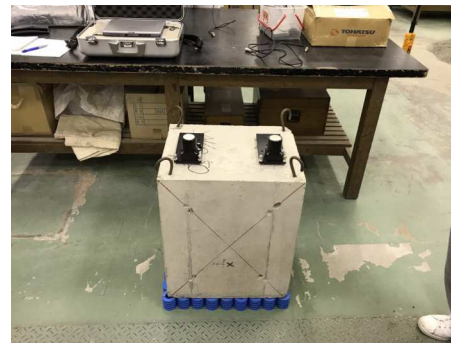
この想定では，Z 軸は圧縮ばねの個数により，ばね定数が増え，設置面積によって基礎洗堀の有無が確認できる。また，この設置面積が減少することで X 軸方向の固有振動数が小さくなることを意図している。仮に，基礎洗堀が存在した場合，底面中心から同距離の 2 点で振動を測定すれば，両者の振動の変位量が異なると考えられる。また，両者の変位量が異なることはロッキング中心がずれているということになる。

そこで，このような想定を確認するために，3.1 で用いた供試体と圧縮ばねを用いて，室内試験を実施した。供試体底面に設置する圧縮ばねは，図－7 に示すように，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) の 4 パターンとした。



図－7 室内試験での 4 パターン模式図

計測は，供試体上部に小型振動計測装置（携帯用振動計 SPC-51A，（株）東京測振社製）を 2 か所設置して，静置状態での Z 軸方向の振動をサンプリング周波数 100Hz で 3 分間計測した。なお，速度計は，短辺の供試体中央部，長辺 1/4，1/4 の 2 箇所に設置した（図－8 参照）。



図－8 供試体計測状況

## 4. 結果と考察

### 4.1 防波堤の固有振動理論値と室内試験による検証

#### (1) Z 軸方向の振動

供試体底面に配置する圧縮ばねを 4～63 個とした場合の理論値は，式(2)によって，圧縮ばね個数分のばね定数と供試体質量からそれぞれ算出した。実測値は，計測したデータを高速フーリエ変換 (FFT) し，得られたパワースペクトルから卓越周波数を求めた。

なお，測定した室内施設近傍の地盤振動も同様に卓越周波数を求め，それぞれの実測値が地盤振動と異なることを確認した。

理論値と実測値は，図－9 に示すとおりであり，圧縮ばねの個数が増加すれば固有振動数も増加する傾向は両者同じであり，4～48 個までは両者の固有振動数は，ほぼ同じであった。圧縮ばね 63 個が理論値より，若干小さかったが，これは供試体底面の全面に敷詰めした場合，最外周のばねが供試体よりはみ出すため，ばね定数が異なることによるものと考えられる。

以上より、Z 軸方向（防波堤鉛直方向）の振動は、式(2)で再現でき、従来言われているように、基礎のばね定数と構造物質量に依存することを確認した。

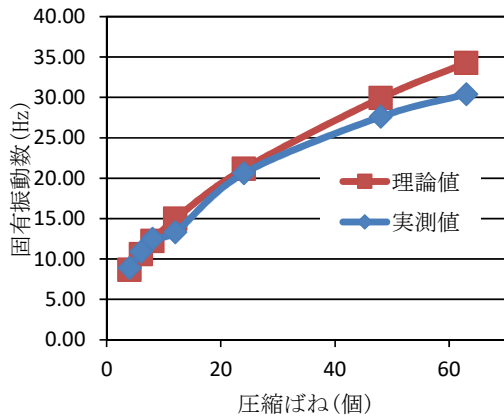


図-9 Z軸方向における理論値と実測値の関係

### (2) X軸方向の振動

X 軸方向の理論値は、式(4)を用いて、ロッキング中心が供試体底面中央にあると仮定した時の回転剛性  $K_R$ 、および慣性モーメント  $J$  を以下の式(5)、(6)で算出した。 $a$  は供試体横幅、 $b$  は供試体奥行、 $h$  は供試体高さとする。

$$K_R = k_v b \int_{-a/2}^{a/2} \eta^2 d\eta = \frac{k_v b}{3} [\eta^3]_{-a/2}^{a/2} = \frac{k_v b}{3} \frac{a^3}{4} = \frac{k_v a^3 b}{12} \quad (5)$$

$$J = \int_0^h \int_{-a/2}^{a/2} \rho dy dz b (y^2 + z^2) = M \left( \frac{a^2}{12} + \frac{h^2}{3} \right) \quad (6)$$

ここで、 $M = \rho abh$

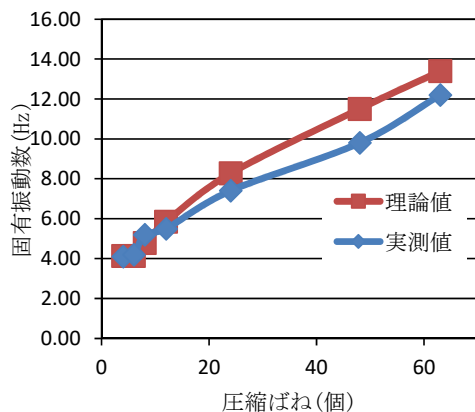


図-10 X軸方向における理論値と実測値の関係

一方、実測値は、Z 軸方向と同様に卓越周波数を求めた。理論値と実測値は、図-10のとおりであり、圧縮ばね 48 個の場合、理論値よりわずかに小さい値となったものの、ほぼ同様の固有振動数となった。

以上より、X 軸方向（防波堤水平方向）の振動は、式(4)~(6)によって、再現できることを確認した。

### 4.2 固有値解析による検証

図-11に結果の一例として、幅 4(m)、高さ 6(m)のコンクリートブロックが高さ 2(m)の基礎地盤上に設置されている場合の 1 次の固有振動モードを示す（○印がロッキング中心）。なお、コンクリートブロックの単位堆積質量 = 2,300(kg/m<sup>3</sup>)、ヤング係数 = 4 × 10<sup>10</sup>(N/m<sup>2</sup>)、ポアソン比 = 0.25、地盤の単位堆積質量 = 1,800(kg/m<sup>3</sup>)、地盤のポアソン比 = 0.45 である。

本解析では、基礎部の地盤として N 値 50 程度を仮定しているものの、通常、コンクリート部と基礎地盤部の剛性の違いが大きいため、ロッキング中心は基礎底面レベルに近いところに位置するものと考えられる。

以上より、固有値解析によって、ロッキング振動の中心は、供試体底面の中心にあることが確認でき、沿岸構造物を模した室内モデルでの式(2)の適用は妥当といえる。

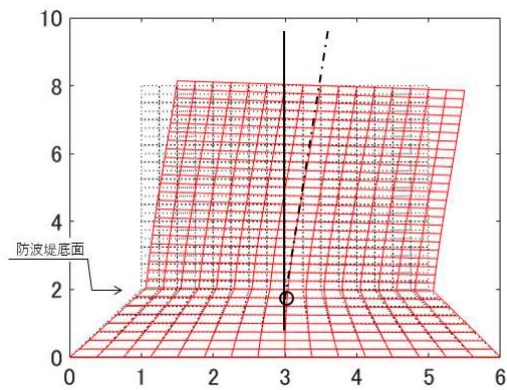


図-11 防波堤の固有振動モードの例 ( $f_0 = 5.63(\text{Hz})$ )

### 4.3 防波堤基礎洗堀の規模と室内試験による検証

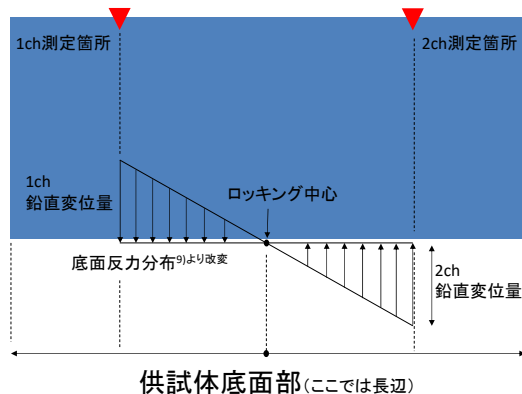
4.1 より、供試体における X 軸方向の振動は、ロッキング中心を供試体底面中央にあると仮定した理論値と実測値が整合することが確認された。

ここでは、このロッキング振動を活用して、防波堤基礎洗堀の規模を把握する方法を室内試験で検証した。図-12は、供試体による 2 点計測の測定箇所や底面反力分布、およびこのときの鉛直変位量を模式図に示したものである。ロッキング中心が 4.1 のように全て供試体底面中央にある場合、この中心から同距離（ここでは、それぞれ長辺の 1/4）で測定すれば、2 地点の鉛直変位は、同振幅で逆位相になるはずである。

表-2にそれぞれの供試体における鉛直変位量を示した。鉛直変位量は、2 点の測定箇所における振動波形を鉛直変位に換算して算出した。

表より、全面敷詰め（63 個）、両側 10cm 抜き（35 個）、中央 10cm 抜き（56 個）では、若干の違いがあるものの、1ch と 2ch の鉛直変位量がほぼ同じとなった。一方、片側

10cm 抜きについては、1ch=0.100mm、2ch=0.059mm となり、両者に明らかな差が確認された。両者の値より、ロッキング中心を算出すると、片側 10cm 抜きでは、供試体中心から圧縮ばねを除いた方向に 6.25cm ずれた位置にあることが確認された。このことは、基礎洗堀が発生して、供試体が基礎と接地していない場合、ロッキング中心は接地面に沿って、ずれることとなり、特に洗堀が顕著な場合には、2 地点の鉛直変位は振幅の異なる値が観測される可能性もある。さらに、基礎の欠損（洗堀）に伴うロッキング中心の移動現象に着目した防波堤鉛直変位観測を活用すること（構造体上部で中心からの同一距離での 2 地点 Z 軸方向の振動計測）で構造体基礎部の洗堀の規模を推定できる可能性を示唆するものである。



図一 1 2 供試体による 2 点計測の底面反力分布と鉛直変位量の関係のイメージ図

表一 2 供試体におけるそれぞれの条件での鉛直変位量

自由振動	鉛直変位量(mm)	
	1ch	2ch
全面敷詰め(圧縮ばね63個)	0.0525	0.0514
片側10cm抜き(圧縮ばね49個)	0.1002	0.0590
両側10cm抜き(圧縮ばね35個)	0.1122	0.1307
中央10cm抜き(圧縮ばね56個)	0.0604	0.0563

## 5. まとめ

沿岸構造物の主要な施設である防波堤を想定し、その固有振動特性に着目して、基礎洗堀の変状を評価する方法を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 室内試験による Z 軸方向（防波堤鉛直方向）の振動は、式(2)と高い相関性を示し、その鉛直方向の固有振動特性は、基礎を想定したばね定数に依存することを確認した。
- 2) 室内試験による X 軸方向（防波堤水平方向）の振動は、式(4)～(6)と相関があり、ロッキング振動を供試体上部での振動測定から再現できることを確認した。
- 3) 固有値解析によって、ロッキング振動の中心が、供試体底面の中心付近にあることが確認でき、室内モデルでの式(4)～(6)の適用は妥当である。

- 4) 2), 3)より、防波堤を模した室内モデルで 2 点を計測し、その鉛直変位量を比較することで、基礎洗堀の規模を推定することが可能である。

以上より、沿岸構造物の主要な防波堤で X 軸方向の測定、2 点での Z 軸方向の測定が基礎洗堀を評価する方法によって、防波堤基礎洗堀欠陥を陸上で（潜水調査することなく）計測・評価できる可能性が高い。今後は、現地での検証も踏まえ、立地場所、構造形式、建設年次が異なるデータを蓄積し、検討を進める予定である。

## 謝辞：

本研究の実施にあたり、東海大学の山本紘輔、斎藤将貴および日本クニヤ株式会社松本力各氏に多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) インフラ長寿命化基本計画，  
[http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra\\_roukyuuka/pdf/houbun.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/pdf/houbun.pdf)
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 鈴木高二朗，高橋重雄，高野忠志，下迫健一郎：砂地盤の吸出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について—現地調査と大規模実験—，港湾空港技術研究所報告，第41号，第1号，pp.51-89，2002,3
- 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) 国土交通省港湾局技術企画課：港湾施設の維持管理の現状と課題，平成26年度港湾施設の維持管理に関する技術講習会資料 1，平成27年2月4日。
- 7) 港湾空港技術研究所編著：港湾の維持管理技術マニュアル，沿岸技術ライブラリーNo.26，沿岸技術研究センター。2007。
- 8) 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。
- 9) 伊藤佳洋，長尾毅，山田雅行，森田真弘：岸壁の空洞調査における単点常時微動観測の適用性に関する基礎的考察，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.72，No.2，I\_760-I\_765，2016。
- 10) 小坪清真，土木振動学，東京，森北出版社，2006。
- 11) 小坪清真，入門建設振動学，東京，森北出版社，1996。
- 12) 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。