

報告 固有振動特性を用いた新たな防波堤基礎変状診断方法の提案

齋藤 将貴*1・藤田 孝康*2・三上 信雄*3・笠井 哲郎*4

要旨：港湾・漁港の防波堤は、堤体基礎部分の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、第三者被害をも引き起こしかねないことが知られる。このような防波堤基礎部分の健全性を評価する手法として、防波堤堤体の上部工において強制加振を行い、防波堤上部での振動を計測することで堤体両端の鉛直変位量差を求める方法を提案した。本報告では、本手法の有効性を検証するため、室内モデルと現地構造物を用いた振動試験を行い、固有値解析も踏まえて振動特性を把握した。この結果、変状の規模により、鉛直変位量差が異なることが確認され、変状の規模を推定できる可能性を示した。

キーワード：防波堤、基礎洗堀、固有振動、ロッキング振動、鉛直変位量差

1. はじめに

沿岸域に設置される社会インフラとして、港湾施設、漁港施設、海岸保全施設等が挙げられる。我が国には、993の港湾、2,806の漁港¹⁾が全国各地に点在しており、それぞれに多種多様な構造形式の施設を有し、膨大なストック量が存在している²⁾。これら施設の多くは、高度成長期以降に整備されたものであるため、老朽化が懸念されており、施設の安全性や機能を確保しながら、戦略的な対策を進めていくことが求められている³⁾。

一方、港湾、漁港の各施設は、静穏域を確保し、船舶や漁船を安全に係留する機能を持っており、これらの機能を確保するための施設として、防波堤等の外郭施設、船舶や漁船に係留するために係留施設などが整備されている。特に、主要施設である防波堤は、上部工や本体工の老朽化もさることながら、堤体基礎部分の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、第三者被害をも引き起こしかねないことが知られており⁴⁾、早期発見して対応することが重要である。

一般的にこれら施設の基礎部分の洗堀等の変状は、水中部にあることより、潜水観察に頼っているため、多大な作業や費用がかかる。藤田ら⁵⁾は、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、これらから防波堤の基礎変状の有無を陸上部の堤体上部工から検出できる可能性があることを報告した。また、このような防波堤の固有振動特性から基礎部分状態を診断することが可能であり、現状の診断スキームを効率化することを提案した⁵⁾。さらに、齋藤ら⁶⁾は、現地の実防波堤で起振機を用いて水平方向に強制加振し、その時の振動波形からロッキング振動していることを確かめた上で、変位応答から固有振動数を求め、これらが藤田ら⁵⁾が報告した理論値による推定値と概ね一致することを確認している。

加えて、基礎変状がない防波堤は、防波堤上部の両端部2点での鉛直変位量に差がないことを確認している。しかし、防波堤は、基礎や構造形式の種類、寸法も様々であり、現地条件ごとの理論値の補正等を行う必要があると考えられ、知見を蓄積していくことが重要である。

そこで、本研究では、防波堤の振動特性を用いた基礎部分の診断方法について、実構造物を想定した室内モデルを用いて、強制振動によるロッキング振動や振動特性を確認するとともに、有限要素法によって、基礎の洗堀の有無が固有振動特性に及ぼす影響について固有値解析を行い、ロッキング中心がどのように変化するかを確認した。また、基礎に変状を有する躯体（以下、「スパン」と称す）と変状が無いスパンの双方がある実防波堤を強制加振することで、水平方向の振動特性と両端部2点の鉛直変位量差を把握し、これらの固有振動（水平方向の固有振動数や鉛直変位量差）を用いた基礎変状の診断手法が有効であることを確認したので報告する。

2. 試験方法

2.1 室内試験

現地実構造物を模した室内モデルによって、ロッキング振動の有無と振動特性を確認するため室内試験を実施した。

室内試験は、一般的な防波堤におけるスパンの概ね1/10の寸法の供試体3体を製作した。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、その質量は実測で270kgであった（図-1参照）。これら3体の供試体を並列配置することで実防波堤の設置状態を模し、底面基礎にばね定数が既知である（198.61N/mm/1個あたり）圧縮ばねを敷詰めた（図-1参照）。圧縮ばねは、両外側の供試体底面には下部全面の48個を配置し、中央の供試体を下部

*1 東海大学大学院 工学研究科建築土木工学専攻（学生会員）

*2 一般社団法人水産土木建設技術センター専門技術員 博（工）（正会員）

*3 国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所 博（工）（正会員）

*4 東海大学 工学部土木工学科 工博（正会員）

全面に圧縮ばね 48 個（条件 1），中央を片側 1 列分除いた圧縮ばね 40 個（条件 2）の 2 パターンの配置とした（図-2 参照）。供試体と供試体は，独立して振動するように密着させていない。

供試体を水平方向に振動させるために起振機（最大起振力 9.8N）を用い（図-3 参照），中央の供試体上部中心にこれを設置した。本起振機は，振動数ごとに水平方向に強制加振することが可能であるため，これまでの藤田ら⁵⁾が報告している共振する振動数を目安として前述の 2 つの圧縮ばねパターンで振動させた。また，このように強制加振させたときの振動を計測するため，(株)東京測振製の携帯用振動計 SPC-51A を用いた（以下，「速度計」という）（図-4 参照）。振動計測は，同地点で 3 成分（X, Y, Z 軸）の振動を 100Hz で 1 分間測定した。なお，速度計は，供試体上部の短辺 1/4，長辺中央部に配置した（図-2 参照）。

2.2 固有値解析

本研究で想定している振動現象は，村木ら⁷⁾の研究に基づき，実際の防波堤がその躯体の底面中央をロッキング中心としてロッキング振動（自由振動）する状態を仮定している。基礎部分に変状が生じた場合，健全な場合と比較して底面中央のロッキング中心が移動し，固有振動数が変化する可能性がある^{7~9)}。固有振動数やロッキング中心位置の変化について，2 次元有限要素法を用いた固有値解析によって確認した。

2.3 現地試験

(1) 対象施設

基礎が健全なスパンと変状を有するスパンの両方存在する A 漁港防波堤 2 スパンで現地試験を実施した。また，比較のために，既報告の B 漁港防波堤 2 スパンも記載した⁹⁾。A 漁港防波堤（図-5 参照）は，構造形式が重力式であり，基礎が岩着である。対象スパンの大きさは，長さ 5m×幅 6.9m×鉛直方向 9m（スパン 23, 25）であった（図-6 参照）。A 漁港防波堤のスパン間は，一部に目地材や砂利等が挟まっているため，これらの摩擦の固有振動数への影響は不明である。しかし，筆

者らが実施した他漁港の健全な複数施設（1 施設 2 スパン比較）では，変位量差がなかったため，これらは考慮していない⁶⁾。

B 漁港防波堤（図-7 参照）は，構造形式がコンクリート単塊式で基礎は捨石堤である。対象スパンは，長さ 5.05m×幅 4.1m×鉛直方向 6.35m（スパン 1, 2）である（図-8 参照）。

A, B 漁港防波堤ともに先端部の基礎部分に変状があり，その規模は表-2 のとおりであった。A 漁港防波堤は，スパン底面ほど大きい構造であり，底面部分のスパ

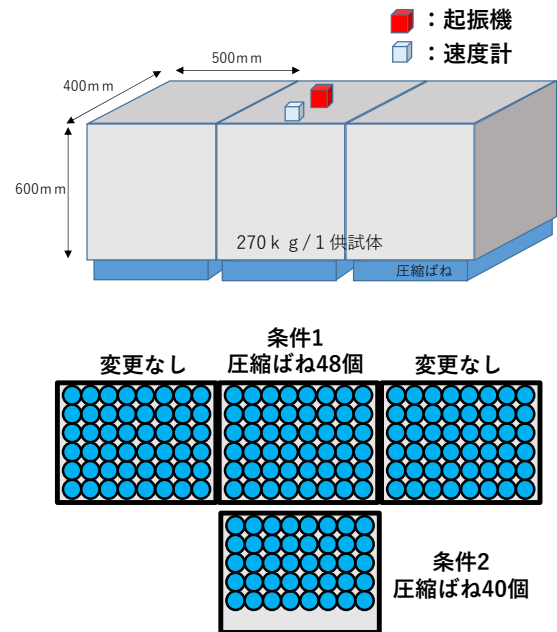


図-2 供試体，起振機，速度計の配置（上）と圧縮ばねの配置（下）

名称	WaveMacker01
振動発生機	SL-0105
コンソール	APA-050FCA
加振力	9.8N
振幅	5mmp-p
最大荷重	50g
可動部荷重	20g
最大加速度	無負荷490m/s ²

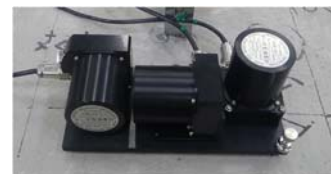
図-3 室内試験に用いた起振機の概要

表-1 供試体の使用材料と配合

W/C (%)	Gmax (mm)	目標ランブ (cm)	ス	目標空気量 (%)	s/a	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (G×%)	
						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
材料	種類	記号	物性または主成分								
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.16g/cm ³								
細骨材	菊川支流産山砂	S	密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 2.18%								
粗骨材	貴梅産砕石	G	密度: 2.70g/cm ³ , 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								



図-1 供試体（左）と圧縮ばね（右）の外観



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

* L, H はそれぞれLow, Highの意味で感度を表す

図-4 速度計の概要

ン幅は6.9mに対し変状が長さ4.2m、幅0.6mであった。
これに対し、B漁港防波堤は、幅4.1mに対し変状が長さ1.2m、幅1.3mであった。

(2) 計測機器と計測方法

A, B 漁港防波堤において、各スパンを強制振動させるため、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-9参照)。本機は、フラットな加振力特性(最大加振力 490N 以上)を有しており、水平方向の加振振動数を設定して加振することが可能である。

表-2 各漁港防波堤の施設と基礎変状の状況

漁港施設	スパン	変状の有無	スパン幅(X軸方向)	変状の規模
A漁港防波堤	23	無	6.9m	長さ4.2m、幅0.6m、鉛直方向0.52m
	25	有		
B漁港防波堤	1	無	4.1m	長さ1.2m、幅1.3m、鉛直方向1.0m
	2	有		



図-5 A 漁港防波堤の外観

この起振機を対象施設上部の中央部に1台設置して、水平方向のそれぞれの端部から1/4の2ヶ所に速度計を設置した。振動は、起振機で強制振動を起こし、2点の鉛直方向(Z軸方向)の振動を速度計で測定した。ただし、そのうち1ヶ所(港内側)で水平方向(X軸方向)の振動も測定した(図-10, 11参照)。

起振機の振動数は、漁港施設防波堤の固有振動数と想定された振動数付近で10ケース程度、段階的に振動数を変化させて加振し、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。

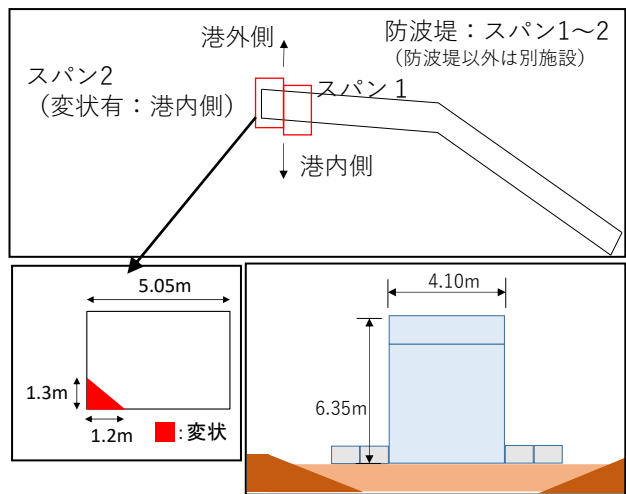


図-8 B 漁港防波堤概略平面(上), 変状平面(左下), および概略断面(右下)

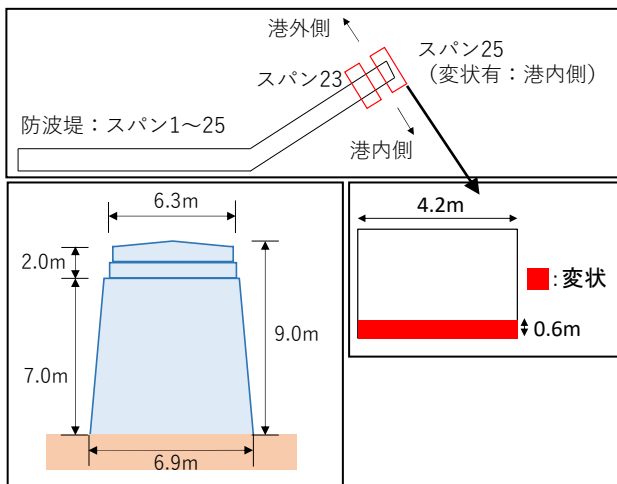


図-6 A 漁港防波堤概略平面(上), 概略断面(左下), および変状平面(右下)



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 ²
最大変位	80mmp-p
電源	AC100V単相
可動部質量	40kg
寸法	W224×D374×H184mm

図-9 起振機の概要



図-7 B 漁港防波堤の外観



図-10 漁港施設防波堤の起振機設置状況

3. 結果と考察

3.1 室内試験

供試体3体を並列配置し、底面を条件1（圧縮ばね48個の配置）とし強制加振したときの水平方向と鉛直方向の時刻歴波形は、図-12に示すとおりである。

図より、室内モデルにおける供試体上部の水平方向と鉛直方向の波形が概ね逆位相となっている。これは、供試体上部での水平動が最大になるタイミングと上下動が最小になるタイミングが合致しており、供試体がロッキング振動していると判断される。

同様に、底面を条件2（圧縮ばね40個の配置（片側抜き））とし強制加振したときの水平方向と鉛直方向の時刻歴波形は、図-13に示すとおりで図-12と同様で、双方のケースでロッキング振動が確認された。なお、本室内モデルでは、供試体の寸法が小さいため、その上部にスペースが確保できなかったため、速度計2台による鉛直変位量を確認できていない。しかしながら、齋藤ら⁶⁾が実施した常時微動による室内モデルにおいては、圧縮ばねを減少させることによって、供試体上部両端部2点の鉛直変位量差が大きくなることを報告しており、今回の強制振動による結果と矛盾しない。

以上より、実構造物の防波堤を模した供試体と圧縮ばねの室内モデルで、ロッキング振動していることが確認され、スパン両端部2点の鉛直変位量の差によって、基礎の変状を検出できることが示唆された。

3.2 固有値解析

固有値解析においては、幅4m、鉛直方向6mのコンクリートブロックが鉛直方向2mの基礎地盤上に設置されていることを想定した。境界条件は、防波堤に多くある岩盤上にマウンドを想定し、マウンドをバネ、岩盤を固定境界として設定した。この場合、コンクリートブロックの単位体積質量 = $2,300\text{kg/m}^3$ 、ヤング係数 = $4 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ 、ポアソン比 = 0.25、地盤の単位体積質量 = $1,800\text{kg/m}^3$ 、地盤のポアソン比 = 0.25とし、2次元有限要素法により解析を行った。図-14は変状がなく健全なスパンの1次の固有振動モードを示しており、ロッキング中心がほぼ底面中央にあるように推察される（○印がロッキング中心と考えた位置）。この時の固有振動数は、 7.9Hz であった。

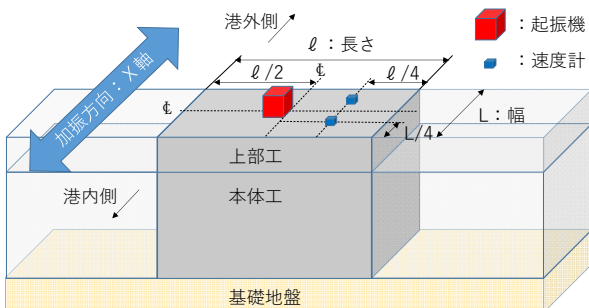


図-11 対象スパンにおける起振機、速度計配置図

次に、変状を有するケースとしてスパンを支持する基礎部分の1/4が欠落したモデルを想定した。その1次の固有振動モードは、図-15に示すとおりである。図より、ロッキング中心が右側に移動していることがわかる（○印がロッキング中心）。このロッキング中心の水平方向の移動は、基礎底面レベル（躯体底面と基礎地盤接合部）において、上方向変位が見られる領域と下方向変位が見られる領域の中間点とした。ただし、ロッキング中心が基礎底面レベルから上下方向に幾分ずれている可能性については考慮できていない。なお、固有振動数は、 5.3Hz となり、基礎が健全な場合と比較して固有振動数が減少し、既存の報告⁸⁾と矛盾しないことが確認された。

以上より、固有値解析によって、基礎変状の有ることによりロッキング振動の中心が移動することを確認するとともに、固有振動数も減少し、本手法の有効性が確認された。

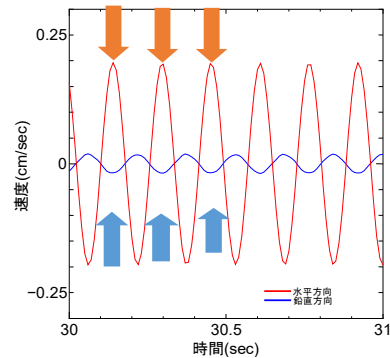


図-12 条件1の水平方向、鉛直方向の時刻歴波形

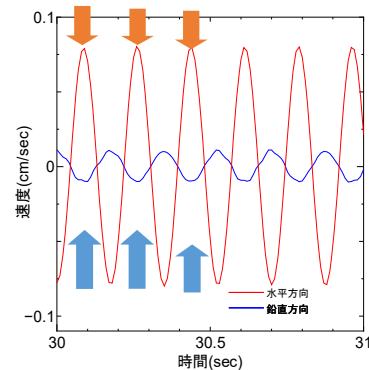


図-13 条件2の水平方向、鉛直方向の時刻歴波形

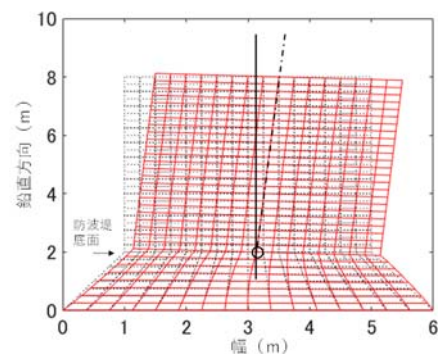


図-14 基礎が健全な防波堤の固有振動モード例 ($f_0 = 7.9\text{Hz}$)

3.3 現地試験

(1) 水平方向と鉛直方向の振動波形

起振機によって加振したA, B漁港防波堤における水平方向, 鉛直方向の時刻歴波形は, 図-16, 17に示すとおりである。図より, 室内試験と同様に両漁港防波堤の水平方向, 鉛直方向の波形は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わかる。このような傾向は, A, B両漁港防波堤の他のスパンでも確認され, 水平方向の加振でロッキング振動していることが確認された。

(2) 強制振動による固有振動数の特定

梅津ら⁹⁾は, 計測された振動の最大振幅を加振振動数ごとにプロットすることで共振曲線を作成し, この曲線の極値を対象スパンの固有振動数であることを報告している。本研究でも同様の方法でそれぞれのスパンで計測した水平方向 (X軸) 振動から共振曲線を作成した。

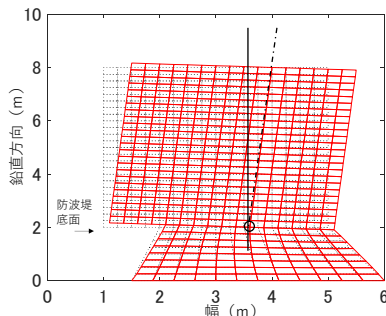


図-15 基礎変状のある防波堤の固有振動モード例 ($f_0 = 5.3\text{Hz}$)

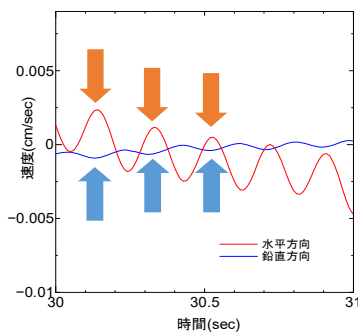


図-16 A漁港防波堤スパン23における水平方向, 鉛直方向の時刻歴波形

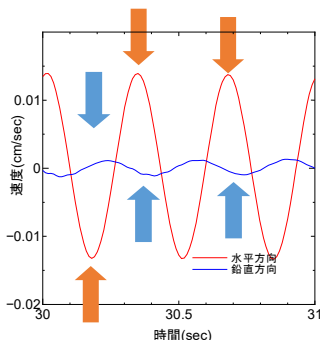


図-17 B漁港防波堤スパン1における水平方向, 鉛直方向の時刻歴波形

これらのうち, いずれも健全なA漁港防波堤スパン23, B漁港防波堤スパン1の共振曲線は, 図-18に示すとおりである。図より, それぞれの共振曲線の極値から固有振動数は, A漁港防波堤スパン23が5.2Hz, B漁港防波堤スパン1が6.0Hzと判断される。これらの固有振動数は, 藤田⁵⁾や齋藤⁶⁾が報告した理論式を用いて算出した振動数と概ね一致し, かつ村木ら⁷⁾が実測した防波堤における約0.2秒周期 (5Hz) の固有振動周期とも概ね合致するものであった。

(3) 2点の鉛直変位量差

前述した共振曲線によって, 求めたA, B漁港防波堤それぞれのスパンを固有振動数で振動させたときの計測時間内における, 速度波形を港内側と港外側それぞれ積分することにより算出された変位量の絶対値の平均値を鉛直変位量とし, それらの差から変位量差を求めた (表-3参照)。表より, A, B漁港防波堤のいずれも基礎変状が「無」スパンと比較して, 基礎変状が「有」スパンの鉛直変位量差が明らかに大きかった。この結果は, 藤田ら⁸⁾が室内モデルにより, 基礎変状がある場合, 明らかな鉛直変位量差が出るという報告を実構造物で実証した結果である。また, 齋藤ら⁶⁾が報告した基礎変状のないスパンで変位量差がほぼないとした報告と矛盾せず, 梅津ら⁹⁾が報告した結果とも合致した。なお, 波の影響については, 国土交通省による全国港湾海洋波浪情報網によって, 静穏な日における有義波周期が1~2秒程度であり, この周期からその振動数が0.5~1.0Hz程度であったため, この振動数帯を今回の検討対象から除外した。

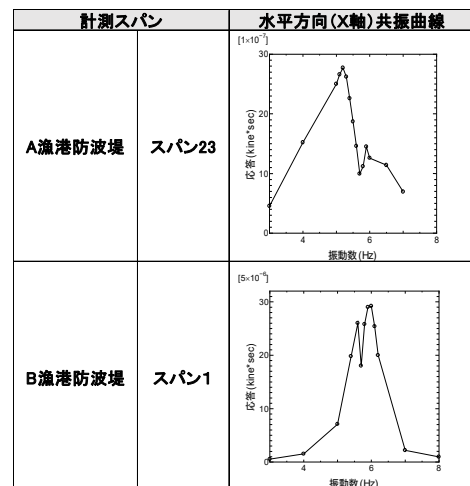


図-18 A漁港防波堤スパン23とB漁港防波堤スパン1における共振曲線

表-3 防波堤上部における両端部2点での鉛直変位量および変位量差

漁港施設	スパン	変状の有無	加振振動数	鉛直変位量 (mm)		変位量差 (mm)
				港内側	港外側	
A漁港防波堤	23	無	5.2Hz	0.0034865	0.0035032	0.000017
	25	有	5.2Hz	0.0011704	0.0006024	0.000568
B漁港防波堤	1	無	6.0Hz	0.0013600	0.0015200	0.000160
	2	有	5.6Hz	0.0025900	0.0014800	0.001110

基礎変状「有」のA漁港防波堤スパン25とB漁港防波堤スパン2は、防波堤躯体と基礎部の接地部分が減少することで、ロッキング中心が底面中央から移動し、鉛直変位量が変状のある港内側で大きくなり、結果として、変位量差が生じると考えられる(図-19参照)。

3.2節で確認したように、躯体底面の接地面が減少した場合、基礎変状「有」のスパンにおけるロッキング中心が移動するため、2点の変位量とスパン幅の比からA漁港防波堤スパン25とB漁港防波堤スパン2の変状幅を推定した。推定結果は、前者が1.02m(中心軸の移動0.51m)、後者が0.54m(中心軸の移動0.27m)となった(図-20参照)。これに対し、潜水観察による実際のスパン変状は、図-21に示すとおり、A漁港防波堤スパン25で0.60m、B漁港防波堤スパン2で0.15m(図の三角形の変状を長辺方向に平準化した幅)であり、精度に課題があるものの、本手法により、陸上部から両端部2点の変位量差を求めることで基礎変状の検出が可能となり、その規模を概ね推定できる可能性がある。

4. まとめ

本研究で以下の結論を得た。今後は、構造形式等が異

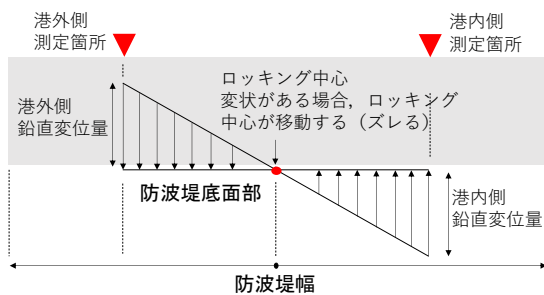


図-19 防波堤躯体の底面反力分布と2点変位模式図

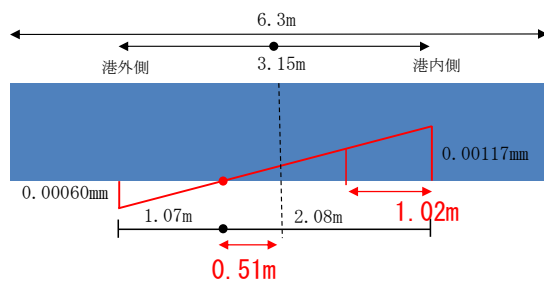


図-20 A漁港防波堤スパン25の2点変位模式図

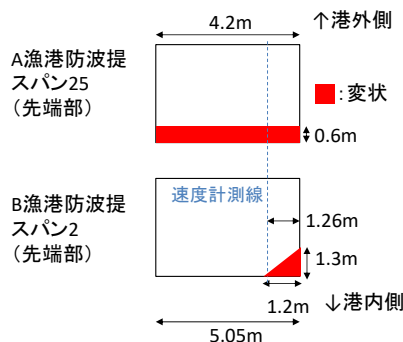


図-21 A, B漁港防波堤スパンの変状概要図

なるデータの検証や推定向上の検討を行う予定である。

- (1) 供試体と圧縮ばねの室内モデルで、強制振動によるロッキング振動を確認し、両端部2点の鉛直変位量差で基礎変状を検出できることが示唆された。
- (2) 固有値解析により、基礎変状の有無でロッキング中心が移動することを確認した。
- (3) 基礎変状「有」、「無」の防波堤スパンで両端部2点の鉛直変位量差を算出し、「有」の場合に変位量差が大きくなることを確認した。また、この変位量差からロッキング中心の移動を推定し、変状規模を推定できる可能性を示すことで本手法の有効性を確認した。

謝辞

本研究の実施にあたり、東海大学工学部の三上厚教授、水産土木建設技術センター松本力氏、完山暢氏に様々な助言や協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人全国漁港漁場協会：2019漁港漁場漁村ポケットブック，pp.19-21，2019.9
- 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/hou_bun.pdf (閲覧日 2019年12月15日)
- 3) 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，2016.5
- 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) 藤田孝康，齋藤将貴，三神厚，笠井哲郎，奥野正洋，加藤広之，野神功一，不動雅之：漁港施設における不可視部の診断手法としての固有振動の適用性検討，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.74，No.2，I_103-I_108，2018
- 6) 齋藤将貴，藤田孝康，梅津啓史，三神厚：起振機実験による防波堤の固有振動特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1327-1332，2018
- 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，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
- 9) 梅津啓史，藤田孝康，三上信雄，齋藤将貴，三神厚，不動雅之，井上真仁，笠井哲郎：漁港施設の機能診断のための固有振動特性の適用性検証，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.75，No.2，I_575-I_580，2019