

# 無筋コンクリート防波堤の 耐波性能に着目した劣化度評価の試み

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○長谷 一矢  
佐々木 淳

北海道内で顕在化している無筋コンクリート防波堤の劣化度評価は、クラックや欠損の状態に応じた格付けにより行われる。しかし、堤体重量で耐波性能を確保する防波堤において、この評価が直ちに現状の耐波力を表すわけではない。そこで、防波堤の重量低下を招く損耗と耐波性能に着目し、定量的な劣化度評価を試みた。その結果、無筋コンクリート防波堤における損耗劣化を4つのパターンに分類することにより、損耗量と耐波力の関係を定量的に求めることができること、そして、損耗割合と耐力保有割合の関係から劣化度評価が可能となることの試行結果を得たので報告する。

キーワード：無筋コンクリート、老朽化、損耗、劣化度評価、耐波性能

## 1. はじめに

社会基盤構造物は我々の生活を支える重要な役割を担っているが、高度成長期以降に建設された多くのコンクリート構造物が老朽化の問題に直面している。北海道開発局が所管する港湾施設を例に見ても、建設後50年を迎える施設が急増しており、20年後には港湾整備の約半分を維持工事が占めるようになることも予想されている<sup>1)</sup>。

コンクリート構造物の性能評価に関する検討は、これまで鉄筋コンクリート構造物を中心に行われてきたが、無筋コンクリートについてはあまり行われていない。港湾施設で言えば、無筋コンクリート防波堤が堤体重量で耐波性能や耐震性能を確保する構造体であるため、多少の劣化では施設の性能低下に大きく影響しないと考えられているためであると思われる。そこで、本論文では無筋コンクリート構造物の中から無筋コンクリート防波堤に着目した研究を進めることとした。

無筋コンクリート防波堤の劣化の大部分は干満帯で発生する傾向にある<sup>2)</sup>が、その変状にはクラックや欠損のみならず損耗が多く見られる。維持管理に関するマニュアル<sup>3)</sup>においては、無筋コンクリート防波堤の劣化をクラックや欠損で評価することになっているが、損耗については触れられていない。また、各マニュアルの評価方法をもってしても、無筋コンクリート防波堤の性能を定量的に評価することは困難である。

このような背景から、無筋コンクリート防波堤の損耗劣化と耐波性能に着目し、定量的な劣化度評価を試みたので報告する。



(a) 防波堤の損耗劣化状況 (全景)



(b) 防波堤の損耗劣化状況 (目地部)

写真-1 無筋コンクリート防波堤の損耗劣化状況

## 2. 試行方法

### (1) モデル断面

本試行の対象とした防波堤モデル断面を図-1に示す。また、この防波堤の設計波緒元を表-1に示す。この断面は合田式による波圧算定と安全率法により設計されており、その安全率は滑動時1.709、転倒時1.286である。

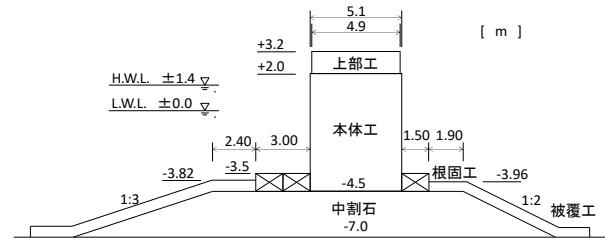


図-1 モデル断面

### (2) 損耗劣化のパターン

本試行では、無筋コンクリート防波堤の本体工に着目し、損耗劣化の進行に伴う耐波性能の低下を試算する。試行における本体工の損耗劣化パターンを図-2に示す。このパターンは過年度の調査結果<sup>2)</sup>に基づき設定したものである。CASE 1は干満帯が損耗するパターンであり、プレパックドコンクリート構造物全体の60%以上で発生している。CASE 2は防波堤基部において損耗するパターンであり、全体の5%程度で発生している。CASE 3は干満帯と基部の損耗が同時に発生しているパターンである。CASE 4は干満帯から基部にかけて均等に損耗するパターンである。過年度の調査結果<sup>2)</sup>によると、本体工の中央部の損耗劣化はその他の部位（干満帯、基部、目地部）に比べかなり少ないが、本試行ではCASE 1、CASE 2、CASE 3の延長線上にある最大限の損耗状態としてCASE 4を設定した。

表-1 モデル断面の設計波緒元

$H_0$	5.0 m	$\beta$	40°
$T_0$	9.5 s	I	1/100
$H_{max}$	4.0 m	W.L.	+1.4 m
$H_{1/3}$	2.2 m		

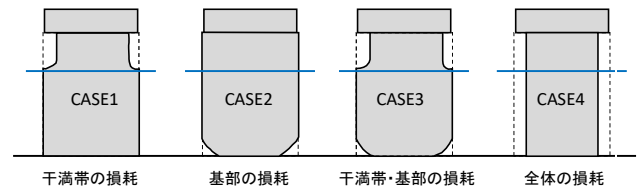


図-2 本試行における防波堤本体工の損耗劣化パターン

### (3) 耐波力の算定方法

各損耗劣化パターンにおける耐波性能は、任意の損耗量を与えた断面における滑動抵抗力と転倒抵抗力を求め、これらと等しくなる堤体前面波力を逆算することにより算定した。以降、これらを滑動耐波力、転倒耐波力と称す。本試行における波力と波高・周期の関係を図-3のように設定した。例えば、波力100 kN/mの場合の波高と周期は $H_{max}=2.5m$ 、 $T=5.8s$ となる。これは、表-1に示した設計波の波高・周期の関係が比例関係にあると仮定して設定したものである。沖波の確率年（波力レベルに相当）と波高・周期の関係を見ても概ね比例関係にあることから、モデル断面における波力レベルの増減は、概ね図-3に示す波高・周期の組合せで表現できるものと判断した。なお、波高・周期の設定は、合田式から求まる波圧分布に影響することから、堤体の転倒耐波力を算出する際に必要となる。

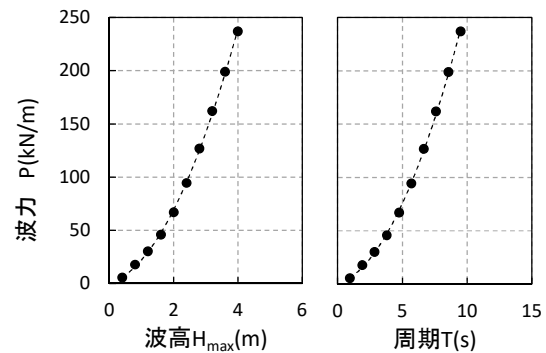


図-3 本試行における波力と波高・周期の関係

損耗量の与え方については、図-2の各損耗劣化パターンに、港外側、港内側の両方から均等な損耗量（損耗深さ）を与えることとした。CASE 1については干満帯のみが矩形に両側から損耗、CASE 2については基部のみが二等辺三角形に両側から損耗、CASE 3についてはCASE 1とCASE 2の両方が等しい損耗量（損耗深さ）で損耗、CASE 4については本体工側面全体が両側から等しく損耗するように仮定した。

## 3. 試行結果

### (1) 損耗劣化パターンと耐波力

図-4、図-5、図-6、図-7は、前述したCASE 1、CASE 2、CASE 3、CASE 4の試算結果である。横軸は平均損耗量を、縦軸は耐波力を示している。滑動耐波力を○で、転倒耐波力を●でプロットしている。また、モデル断面の設計耐波力（安全率=1.0）を一点破線で示している。平均損耗量は港外側損耗量 $d_1$ と港内側損耗量 $d_2$ の平均値であり、片側の損耗量を示す。また、各図の(a)(b)は横軸の表示を変えたものであり、(b)は対数表示で示している。

#### a) CASE 1の試行結果

CASE 1は干満帯のみが両側から損耗する場合である

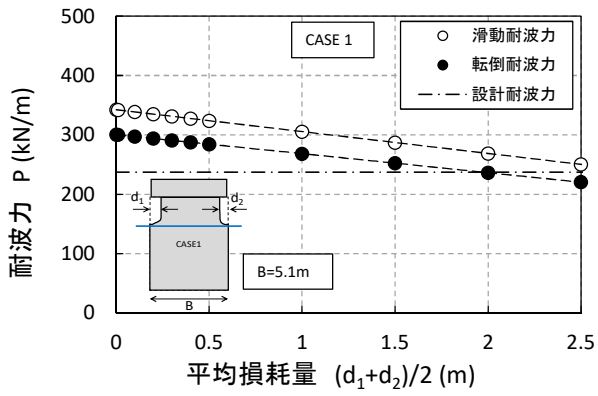


図-4(a) 平均損耗量と耐波力 CASE-1

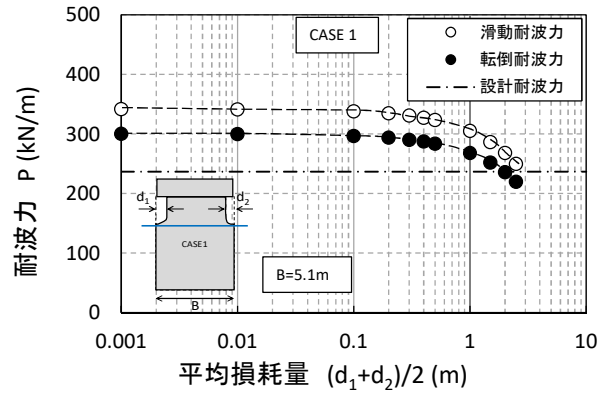


図-4(b) 平均損耗量と耐波力 CASE-1 (対数表示)

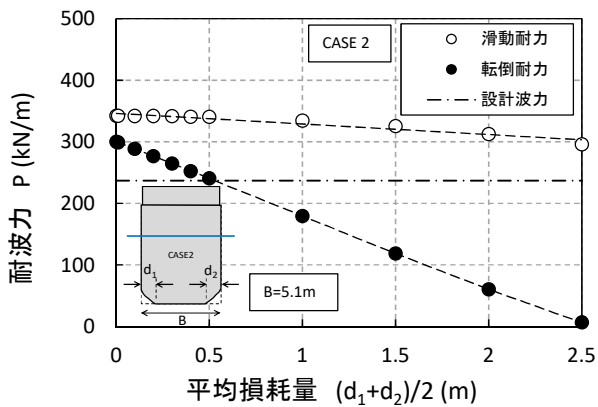


図-5(a) 平均損耗量と耐波力 CASE-2

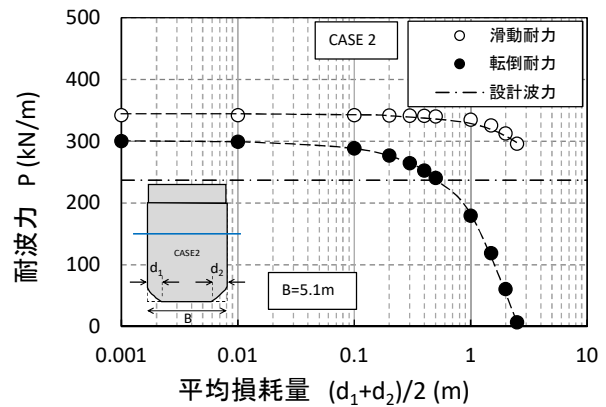


図-5(b) 平均損耗量と耐波力 CASE-2 (対数表示)

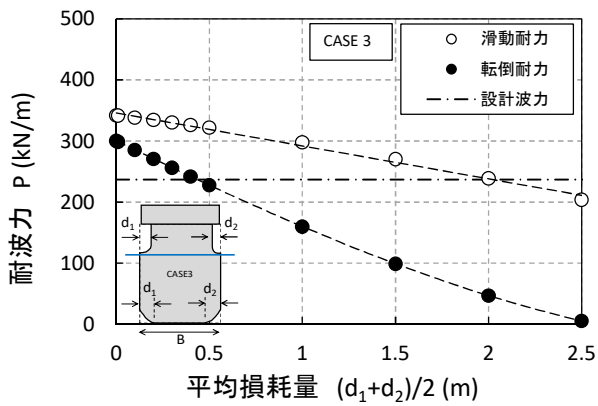


図-6(a) 平均損耗量と耐波力 CASE-3

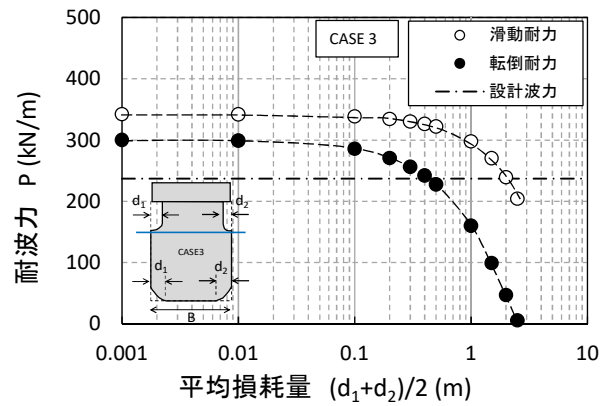


図-6(b) 平均損耗量と耐波力 CASE-3 (対数表示)

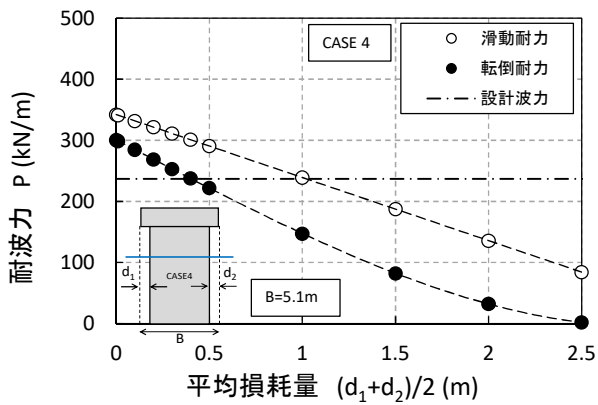


図-7(a) 平均損耗量と耐波力 CASE-4

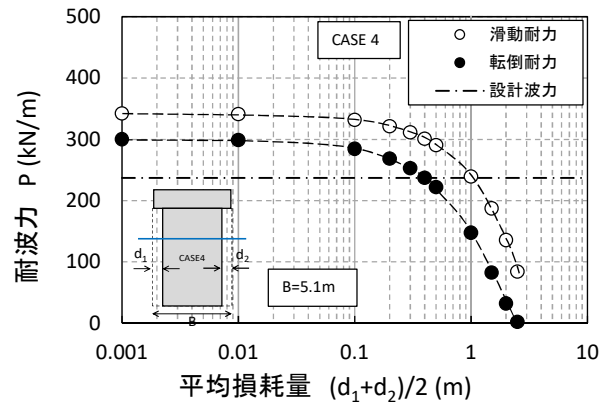


図-7(b) 平均損耗量と耐波力 CASE-4 (対数表示)

が、図-4(a)より、平均損耗量の増加に伴い概ね直線的に耐波力が低下している。そして、滑動耐波力、転倒耐波力ともに耐波力の低下割合は同程度である。滑動耐波力よりも転倒耐波力が小さいのは、モデル断面が転倒時の安定性で決定しているためである。

設計耐波力（安全率=1.0）を基準に図を見てみると、平均損耗量（片側の損耗量）が2m程度以上になった時、設計耐波力を下回ることになる。計算上このような数字が算出されるが、実際にはあり得ない状況である。また、図-4(b)より、平均損耗量が1m以下の結果を見ると、発生頻度の高い数十cmレベルの損耗では、ほとんど耐波性能に影響していないことがわかる。

#### b) CASE 2の試行結果

CASE 2は基部のみが両側から損耗する場合であるが、図-5(a)より、平均損耗量の増加に伴い概ね直線的に耐波力が低下している。CASE 1と比較すると、滑動耐波力の低下割合がやや緩やかになっているが、転倒耐波力は大きく低下している。これは、同じ損耗量（損耗深さ）であっても損耗体積はCASE 1の1/2であり、これに伴い滑動耐波力の減少割合も1/2となったが、基部の堤体幅の減少が転倒耐波力の低下に大きく影響したためである。設計耐波力（安全率=1.0）を基準に図を見てみると、平均損耗量（片側の損耗量）が0.5m程度以上になった時、設計耐波力を下回ることになる。一般に構造物基部の健全性は極めて重要であるが、試算結果からもその重要性が伺える。また、図-5(b)より、平均損耗量が1m以下の結果を見ると、数cm程度の損耗はほとんど耐波性能に影響しないが、数十cmレベルの損耗であれば転倒耐波力の低下に留意する必要がある。

#### c) CASE 3の試行結果

CASE 3は干満帯と基部の両方が堤体の両側から損耗する場合であるが、図-6(a)より、CASE 1とCASE 2の両方の特徴が表れている。設計耐波力（安全率=1.0）を基準に図を見てみると、基部の平均損耗量（片側の損耗量）が0.4m程度以上になった時、設計耐波力を下回ることになる。

#### d) CASE 4の試行結果

CASE 4は本体工側面全体が両側から等しく損耗する場合であるが、図-7(a)より、CASE 3に比べて滑動耐波力が大きく低下している。これは、側面全体の損耗による堤体重量の低下によるものである。設計耐波力（安全率=1.0）を基準に図を見てみると、平均損耗量（片側の損耗量）が0.4m程度以上になった時に設計耐波力を下回することはCASE 3と変わらないが、滑動耐波力と転倒耐波力の値が接近してきていることには留意が必要である。

### (2) 耐波性能に着目した劣化度評価

図-8は、図-4、図-5、図-6、図-7の結果を整理したものである。横軸は損耗割合を、縦軸は耐力保有割合を示している。CASE 1を○で、CASE 2を△で、CASE 3を□

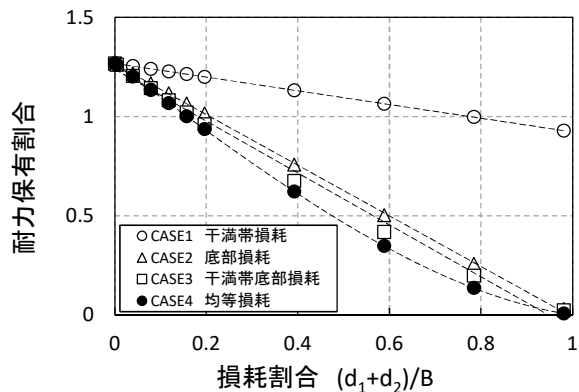


図-8(a) 損耗割合と耐波性能比

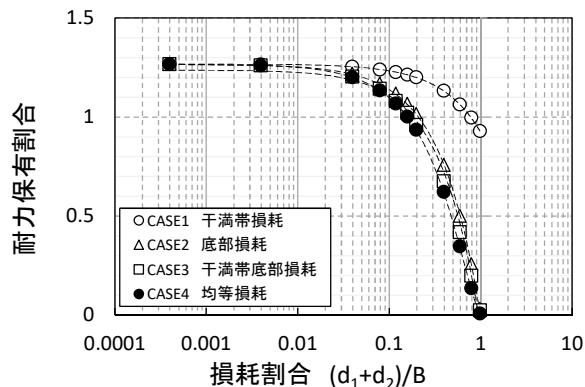


図-8(a) 損耗割合と耐波性能比 (対数表示)

で、CASE 4を●でプロットしている。横軸の損耗割合は堤体幅Bに対する全損耗量（港外側、港内側の合計値）の割合を示している。縦軸の耐力保有割合は設計耐波力に対する滑動耐波力または転倒耐波力の小さい方との比であり、防波堤設計時における安全率に相当する。また、各図の(a)(b)は横軸の表示を変えたものであり、(b)は対数表示で示している。

本試行のモデル断面は転倒時の安定性で断面決定しているため、損耗劣化後の耐波力は転倒耐波力となる。したがって、図-8のデータは転倒耐波力のデータをプロットしている。図に示すとおり、基部の損耗がないCASE 1と基部の損耗があるCASE 2、CASE 3、CASE 4で大きく傾向が異なっている。他のモデル断面での検証が必要であるが、損耗劣化に着目した劣化度評価においては、基部の損耗の有無が重要であると考えられる。本試行では基部に損耗があり干満帯の損耗も進行していることを想定して、CASE 3により劣化度評価を試みることにする。

防波堤の維持管理においては、要求性能上の限界を下回らないことを原則に管理を行わなければならない。本試行では、要求性能上の限界を防波堤設計における安全率1.0に相当する耐力保有割合1.0とする。なお、要求性能上の限界を安全率1.2とすべきという考え方もあると思われるが、これについては別途議論したい。劣化度の分類は既存の技術マニュアル等<sup>3,4)</sup>を参考にa、b、c、dの



表-2 損耗劣化に着目した劣化度分類の試行例

対象施設	点検診断項目の分類	点検診断の項目		点検方法	劣化度の判定基準	
		本土工 (重力式)	コンクリートの劣化 損傷		a	b
防波堤 (無筋の場合)	Ⅱ類	本土工 (重力式)	コンクリートの劣化 損傷	目視 ・損耗	a	基部の平均損耗量が堤体幅の15%以上である。
					b	平均損耗量が堤体幅の10%以上15%未満である。
					c	平均損耗量が堤体幅の3%以上10%未満である。
					d	基部の平均損耗量が堤体幅の3%未満である。

表-3 (参考) 港湾の施設の維持管理技術マニュアルにおける劣化度分類

対象施設	点検診断項目の分類	点検診断の項目		点検方法	劣化度の判定基準	
		本土工 (重力式)	コンクリートの劣化 損傷		a	b
防潮堤 護岸 堤防	Ⅱ類	本土工 (重力式)	コンクリートの劣化 損傷	目視 ・ひび割れ、損傷、欠損 ・劣化の兆候 等	a	性能に影響を及ぼす程度の欠損がある。
					b	幅1cm以上のひび割れがある。
						小規模な欠損がある
					c	幅1cm未満のひび割れがある。
d	変状なし。					

表-4 (参考) 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における劣化度分類

対象施設	点検診断項目の分類	調査項目		調査方法	老朽化度の評価基準	
		本土工 (側壁、スリット部)	コンクリートの劣化 損傷 (無筋の場合)		a	b
重力式 防波堤 (消波堤)	-	本土工 (側壁、スリット部)	コンクリートの劣化 損傷 (無筋の場合)	目視 ・ひび割れ、剥離、損傷、欠損 ・老朽化の兆候	a	性能に影響を及ぼす程度の欠損がある。
					b	幅1cm以上のひび割れがある。
						小規模な欠損がある
					c	幅1cm未満のひび割れがある。
d	老朽化なし。					

4段階とした。そして、劣化度の判断指標は損耗割合とした。図-8より、CASE 3において耐力保有割合1.0の時の損耗割合は約0.15であるので、これを要求性能上の限界値と考え劣化度aとbの閾値とする。そして、耐力保有割合1.2となる損耗割合は約0.03であるので、これを耐波性能に影響し始める限界値として劣化度cとdの閾値とする。両者の中間に位置する耐波性能比1.1の損耗割合は約0.1であるので、これを劣化度bとcの閾値とする。これらの閾値を用いて表に整理すると表-2のとおりとなる。比較参照のため、港湾の施設の維持管理技術マニュアル<sup>3)</sup>における劣化度分類を表-3に、水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン<sup>4)</sup>における劣化度分類を表-4に示す。

無筋コンクリート防波堤における損耗劣化は数多く報告されているが、要求性能上の限界を下回るレベルにまで進行した事例はほとんどないと思われる。しかしながら、損耗劣化は経過年数とともに進行するため、理論的

にはやがて要求性能上の限界を下回ることとなる。表-2は耐波性能の観点から現時点の劣化レベルを定量的に評価するために有用であると思われる。また、予防保全の考えに基づく維持管理計画の検討にも利用できると考えられる。表-2はモデル断面を対象に劣化度分類した結果であり一般化された劣化度判定基準ではないが、各構造断面ごとにこの一連の考え方を適用することで、耐波性能に着目した劣化度評価が可能になるものと考えられる。

## 5. まとめ

本報告では、無筋コンクリート防波堤の損耗劣化に着目した定量的な劣化度評価を試みた。その主要な結論を以下に示す。

- (1) 無筋コンクリート防波堤における損耗劣化を4つのパターンに分類することにより、損耗量と耐波力の関係を定量的に求めることができる。
- (2) この結果に基づき、損耗劣化後の耐波力と設計耐波力の比で定義する耐力保有割合と、損耗量と設計時の堤体幅の比で定義される損耗割合の関係を求めることができ、耐力保有割合に劣化の程度に応じた任意の閾値を設定することで、損耗割合を指標とした劣化度評価ができる。
- (3) 本試行における耐力保有割合の閾値は、1.0、1.1、1.2としている。これらは、防波堤における要求性能上の限界値（安全率1.0相当）として耐力保有割合1.0、設計時の安全率1.2相当として耐力保有割合1.2、両者の中間値として耐力保有割合1.1を根拠としている。

今後は、係留施設も含めて幅広い設計条件での試行を実施し劣化度分類の一般化に向けた検討を進めるとともに、無筋コンクリート構造物を対象としたライフサイクルコストの最適化にむけた検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 斎藤真樹・飯田誠：北海道における国有港湾施設の現状と維持管理上の課題，北海道開発局技術研究発表会論文集，第59回，2016.
- 2) 長谷一矢・増田亨：無筋コンクリート構造物に着目した既往健全度調査評価結果の整理と一考察，北海道開発局技術研究発表会論文集，第62回，2019.
- 3) 一般財団法人沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル（改訂版），平成30年7月.
- 4) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン，平成27年5月.