

維持管理情報データベースを活用した 係留施設・外郭施設の劣化度の遷移率に関する検討

藤木峻*・辰巳大介**・坂田憲治***

要 旨

高度経済成長期に集中的に整備された港湾施設の多くが設計供用期間を超え、維持補修に要するコストが増大していることから港湾施設の戦略的な維持管理が求められている。取得した点検診断データから将来的な劣化状況を簡易に予測・評価するツールとして、部材毎に劣化度の遷移を予測するマルコフ連鎖モデルが主流であるが、その遷移率は施設周辺の自然条件や利用状況等を反映し、同種の部材であっても様々に変動する可能性がある。しかし、データの蓄積不足等の要因から、点検診断データを基に遷移率の変動を分析した事例は限定的である。

本資料では、係留施設および外郭施設を対象に、維持管理情報データベースに蓄積された点検データを活用して部材毎の遷移率の推定を行い、構造形式や部材による遷移率の違いや、遷移率に変動をもたらす可能性のある要因として施設諸元との関係を整理する。さらに、推定した遷移率に基づき劣化度予測を行い、その結果を用いて部材の残存年数の試算を行う。

キーワード：維持管理，点検診断，ライフサイクルコスト，劣化予測

*港湾情報化支援センター 主任研究官
**港湾情報化支援センター 港湾業務情報化研究室長
***前 港湾情報化支援センター 主任研究官（現 京都大学経営管理大学院 客員准教授）

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景と目的	1
1.2 既往研究	1
2. 維持管理情報データベースの概要と分析手法	3
2.1 データベースの開発経緯と登録状況	3
2.2 分析対象データ選定における留意点	4
2.3 部材の遷移率および残存年数の推定方法	5
3. 結果と考察	8
3.1 遷移率の推定方法の検討	8
3.2 部材毎の遷移率の特徴	11
3.3 遷移率と施設諸元の関係	16
3.4 部材の残存年数の試算	18
4. おわりに	19
4.1 主な結論	19
4.2 今後の課題	19
謝辞	20
参考文献	20
付録 A 維持管理情報 DB の登録項目毎のデータ充足率	21
付録 B 部材毎の登録施設数	22
付録 C 部材とその点検診断項目の名称の対応	23
付録 D 各推定手法による遷移率の推定値の平均値・標準偏差	27
付録 E 部材毎の遷移率の推定値の分布	28
付録 F 施設諸元に対する遷移率の分布	35
付録 G 部材毎の残存年数の試算値（平均値・標準偏差）	49

1. はじめに

1.1 背景と目的

近年日本では、高度経済成長期に集中的に整備された港湾施設の多くが標準的な設計供用期間である50年¹⁾を超え、維持補修に要するコストが増大していることから港湾施設の戦略的な維持管理が求められている。国土交通省港湾局では令和6年2月より「港湾施設の持続可能な維持管理に向けた検討会」²⁾を開催し、港湾施設の点検診断の効率化や新技術を活用したメンテナンス体制の検討に関する議論を行っている。その一環として、港湾施設の性能低下度の推移を分析し、現在3年または5年と定められている定期点検診断の間隔の見直し等の検討に向けて検討を行った。しかし、部材毎に行う点検間隔の見直しを、劣化の総合評価の指標である性能低下度の推移を基に検討することは容易ではなく、部材毎の点検データ等のより詳細なデータの分析による検討が必要と指摘されている。

港湾施設の戦略的な維持管理を支えるデータベースとして、維持管理情報データベース（以下、維持管理情報DB）が平成28年に稼働を開始した。維持管理情報DBでは施設毎に施設諸元、維持管理情報、点検診断情報を蓄積している。一部の施設では部材毎の点検診断結果も利用可能であり、建設年、計画水深、施設延長等の施設諸元とあわせて分析すれば、実務・学術両面において有用な知見が得られる可能性がある。日本全国の港湾においては港湾管理者等による施設の点検診断が日々行われており、実務に資する維持管理情報DBの利活用事例の提示等を通じて、これらの点検診断データの維持管理情報DBへの継続的な登録を促していく必要がある。

本研究では、維持管理情報DBに蓄積された部材毎の点検診断データを利用し、港湾施設の劣化状況の分析を行う。劣化状況の分析では、港湾施設の劣化予測に標準的に用いられるマルコフ連鎖モデルの遷移率に着目し、部材毎に遷移率の推定を行い、構造形式や部材による遷移率の特徴の分析を行う。推定した遷移率を用いて、港湾施設の点検間隔設定の参考となる、部材の性能の残存年数の試算を行う。

1.2 既往研究

港湾施設の劣化状況の評価においては、定量的な指標を用いる手法と、定性的な指標を用いる手法がある。定量的な指標を用いる手法では、鋼管杭の肉厚³⁾のような定量的に測定可能な指標により港湾施設の劣化状況の評価する。一方、定性的な指標を用いる手法では、あらかじめ

表-1.1 部材の劣化度判定の基準

劣化度	部材の状態
a	部材の性能が著しく低下している状態
b	部材の性能が低下している状態
c	部材の性能低下はないが、変状が発生している状態
d	変状が認められない状態

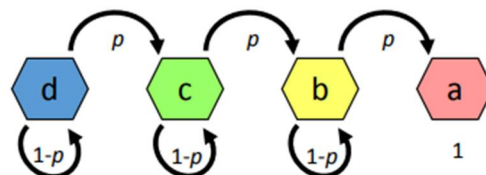


図-1.1 マルコフ連鎖モデルによる劣化予測の概念図

め定めた判定基準に基づいて劣化状況をa,b,c,dの4ランクの質的変数を用いて表-1.1に示すように対応させ、港湾施設の劣化状況の評価する。港湾施設の維持管理においては、a,b,c,dの4段階で劣化度を判定する定性的な指標による劣化度評価が主流であるが、港湾施設が多様な部材から構成されることを反映し、劣化度判定の単位は部材とその点検診断項目毎に細分化されている⁴⁾。劣化度判定の単位は点検診断ブロックと呼ばれ、例えば重力式岸壁であればケーソン1函、矢板式岸壁であれば上部工1スパンが1つの点検診断ブロックに相当する。

港湾施設の劣化状況の把握において、取得した点検診断データを基に将来的な劣化度の推移を予測・評価することは実務上重要である。そのような劣化予測のツールとして、部材の劣化にマルコフ過程の成立を仮定したマルコフ連鎖モデルが主流であり、港湾施設だけではなく、道路分野等の適用事例⁵⁾も知られている。マルコフ過程は、ある状態から別の状態へ一定の確率で遷移することを表現した確率モデルであり、港湾施設の劣化予測においては、ある劣化度からより劣化が進んだ別の劣化度への確率的な遷移を表現する（図-1.1）。マルコフ連鎖モデルにより劣化度a,b,c,dの遷移を予測する式を式-1に示す。

$$y_n = P^n \cdot y_0 \quad (\text{式-1})$$

ここで、 $y_n = (y_{nd}, y_{nc}, y_{nb}, y_{na})^t$ は初回点検からn年経過時の劣化度分布、 $y_0 = (y_{0d}, y_{0c}, y_{0b}, y_{0a})^t$ は初回点検時の劣化度分布である。 P は1年毎の遷移率 $p_{ij}(i, j = d, c, b, a)$ を並べた遷移確率行列として定義され、式-2のように表される。マルコフ連鎖モデルによる標準的な劣

化予測においては、 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ のように、劣化が一方向に進行する状況を扱うため、遷移確率行列 P は下三角行列となる。

$$P = \begin{bmatrix} p_{dd} & 0 & 0 & 0 \\ p_{dc} & p_{cc} & 0 & 0 \\ p_{db} & p_{cb} & p_{bb} & 0 \\ p_{da} & p_{ca} & p_{ba} & p_{aa} \end{bmatrix} \quad (\text{式-2})$$

マルコフ連鎖モデルによる劣化予測の港湾施設への適用においては、劣化度判定の単位が部材とその点検診断項目毎に細分化されていることを踏まえ、部材とその点検診断項目毎に遷移率を設定する。以降、本検討では特に断らない限り、単に遷移率といった場合、部材とその点検診断項目毎の遷移率を指す。

取得した点検診断データから対象施設の劣化予測を合理的に行うには、マルコフ連鎖モデルの遷移率を適切に設定することが重要である。高橋ら⁹⁾は、点検診断結果から簡易な計算で近似的に遷移率を推定する手法を紹介している。小牟禮ら⁷⁾は、目標とする劣化度分布への適合性の向上を意図して、劣化度ランクをマルコフ連鎖モデルの内部でさらに分割し、遷移率の推定を行っている。津田ら⁸⁾は、マルコフ連鎖による劣化度推移を、偶発故障による多段階の劣化度遷移で表現し、各段階のハザード率から遷移率を推定する手法を提案した。さらに青木ら⁹⁾は、偶発故障に加えて初期故障・消耗故障も表現可能なワイブルハザードモデルを提案した。しかし、劣化予測に用いられるマルコフ連鎖モデルの遷移率の算出方法には標準的な手法が無く、状況に応じて様々な方法が適用されているのが現状である。

マルコフ連鎖モデルを用いた港湾施設の劣化予測の応用として、施設の計画、設計、施工、維持管理、解体・撤去といった一連の流れにおいて発生する総費用であるライフサイクルコスト（Life Cycle Cost. 以下、LCCと表記）の簡易な算定が可能となる。国土技術政策総合研究所では、施設の簡易な劣化予測やLCCの推計において港湾管理者等を支援することを目的に、独立行政法人 港湾空港技術研究所（現 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所）と共同でLCC計算プログラムを開発し、平成25年より一般にも利用可能な形で提供している¹⁰⁾。現行の港湾施設のLCC計算プログラムは、係留施設（栈橋、矢板式係船岸、重力式係船岸）、外郭施設（重力式防波堤、矢板式護岸、重力式護岸）、水域施設（航路・泊地）及び臨港交通施設（臨港道路橋、臨港道路）に対応している。また、部材毎の点検診断データがある場合、データを反映した遷移率の設定が可能

表-1.2 LCC 計算プログラムの遷移率の参考値

部材	遷移率の参考値 (%)
上部工（栈橋式）	4.5
上部工（矢板式）	4.2
下部工（鋼材）	3.7
下部工（被覆防食）	6.5
エプロン	3.8
消波工	3.3
渡版	0.9

である。点検診断データが利用できない場合には表-1.2に示す参考値を遷移率として用いている。

港湾施設は施設毎に自然条件、利用状況が異なるため、同種の部材であっても遷移率が個々の施設において異なる値を示す可能性がある。複数の施設群に着目して維持管理を行うアセットマネジメントの観点からは、個々の施設の遷移率を推定することで、対象とした施設群内の劣化傾向にどの程度変動があるのか評価することも重要であると考えられる。古谷ら¹¹⁾は、係留施設の上部工を対象に遷移率の個々の施設におけるばらつきを評価し、遷移率の従う分布の推定を試みている。菅原ら¹²⁾は、維持管理計画書等に収録された点検診断データを収集して劣化度データ数が約25000となるデータセットを作成して遷移率の標準値を推定し、現行のLCC計算プログラムで設定されている遷移率の参考値との比較を行っている。

点検診断データから個々の施設の部材とその点検診断項目毎に遷移率を推定すれば、ある施設群に関して平均的な劣化傾向に加えて、構造形式や部材の違いによる劣化傾向の違いや、施設群内で遷移率にどの程度変動があるのか検討することが可能となる。しかし、点検診断データの蓄積不足等の要因から、施設や部材毎に遷移率を網羅的に算出し、分析した事例は限定的である。そこで本研究では、維持管理情報DBに蓄積されたデータから、部材毎に遷移率を推定してその変動を評価し、構造形式や部材の違いによる劣化傾向の差の分析を試みる。

点検診断データ総括表														
港湾名	〇〇港			点検診断シートの再利用										
地区	△△地区													
施設名	-10mさん橋													
維持管理区分	-10mさん橋													
対象施設	直杭式橋脚橋(ケーソン式)													
点検実施日	2016年1月8日(金)													
点検種別	一般定期点検診断													
点検診断結果														
点検診断の項目1		点検診断の項目2		点検項目	劣化度判定の結果				合計	点検項目の分類				
					BL1	BL2	BL3	BL4	d	c	b	a	合計	ごとの性能低下度
橋脚法線		凹凸、出入り		点検	d	c	d	d	3	1	0	0	4	C
エプロン		沈下、陥没		点検	d	d	d	d	4	0	0	0	4	D
エプロン(通常の場合)		コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷		点検	d	d	d	d	4	0	0	0	4	D
上部工(下面部)(RCの場合)		コンクリートの劣化、損傷		点検	d	d	d	d	4	0	0	0	4	D
上部工(上・側面部)		コンクリートの劣化、損傷		点検	d	d	d	d	4	0	0	0	4	D

図-2.1 維持管理情報 DB で配布する点検診断シートの様式の例

表-2.1 維持管理情報 DB における登録施設数 (2024 年 12 月 25 日時点)

施設・構造形式	係留施設			外郭施設	
	杭式栈橋	重力式岸壁	矢板式岸壁	直立式防波堤 混成式防波堤	直立式護岸 混成式護岸
登録施設数	1263	2090	1722	5843	18441

2. 維持管理情報データベースの概要と分析手法

2.1 データベースの開発経緯と登録状況

港湾施設の維持管理情報DBは、平成28年度から運用が開始され¹³⁾、維持管理計画書等の情報の蓄積に活用されている。港湾の施設の点検診断ガイドラインにおいても、多くの施設を管理するための大量のデータを効率的に扱うシステムとして維持管理情報DBの活用が推奨されており⁴⁾、維持管理計画書や定期点検結果等のデータが蓄積されている。維持管理情報DBに蓄積されたデータは、①経過年数・劣化状況別の施設数の把握、②年度毎の点検や補修工事が必要な施設数の把握、③年度別の補修費の把握、等の計画的な維持管理の検討の基礎資料として活用可能である。また、施設の設置者や管理者が入力したデータは、維持管理情報DB上で国土交通省港湾局や港湾管理者も閲覧可能となるため、被災時における技術的支援を行う場合等に必要なデータ共有を円滑に行うことができる。

維持管理情報DBでは、維持管理計画書や定期点検結果等に加えて、一部の施設では部材毎の点検診断データが利用可能である。維持管理情報DBにおける部材毎の点検診断データは、データ登録の様式・方法の違いにより、システムによる機械判読が可能なデータと不可能なデータに分類される。前者については、維持管理情報DBを操作して入力したものや、所定の様式に沿って入力したデータであり、DB内で機械判読可能なデータとして扱われ、システム内での表示等の操作が可能となる。例えば、維持管理情報DBでは図-2.1に示すような様式の点検診断シートを配布しており、この様式に従って記入したデー

タを登録することでデータが機械判読可能な形式でシステムに取り込まれ、システム内での表示等の操作が可能となる。後者については、維持管理計画や点検診断結果等のデータが、画像やラスタ形式等の文字情報の抽出が困難なファイルで保存されている場合である。その場合でも、維持管理情報DBにアップロード・保存することは可能であるが、システム内での表示等の操作には対応しておらず、データを取得するためには各ユーザが手作業で個々のファイルにアクセスする必要がある。

本検討で行う部材毎の遷移率の推定にあたり、維持管理情報DBに登録された施設から、点検診断データを利用可能な施設の抽出を行った。代表的な施設形式および構造形式として、係留施設からは杭式栈橋、矢板式岸壁、重力式岸壁を、外郭施設からは直立式防波堤、混成式防波堤、直立式護岸、混成式護岸を選定した。以降、特に断らない限り、防波堤は直立式防波堤および混成式防波堤を、護岸は直立式護岸および混成式護岸を指す。港湾施設の維持管理情報DBで登録を確認した施設数を、施設形式および構造形式毎に表-2.1に示す。

維持管理情報DBには、部材毎の点検診断データの他に、施設毎に施設諸元、維持管理情報、点検診断情報が機械判読可能な形式でシステム上に登録されている。例えば、施設諸元としては構造形式、建設終了年、施設延長、施設位置等が、維持管理関連情報としては直近の点検診断の実施時期、実施内容、総合評価による性能低下度等が登録可能である。これらは点検診断データとあわせて分析することで、施設の劣化要因の検討に有用な情報となると考えられる。そこで、本検討で行う部材毎の遷移率の推定に先立ち、維持管理情報DBにおける施設諸元のデ

表-2.2 充足率が50%未満となる項目

施設種類	充足率が50%未満となる項目
係留施設	面積（m ² ）、 位置情報-緯度、位置情報-経度
外郭施設	建設開始年度、消波工延長（m）

表-2.3 部材毎の登録施設数（杭式栈橋、矢板式岸壁）

(a) 杭式栈橋

部材	点検診断データを保有する施設数
上部工	25
エプロン	17（沈下・陥没）、 8（舗装の劣化、損傷※）
栈橋法線	24
鋼管杭	14（鋼材の腐食、亀裂、損傷）、 6（被覆防食）
渡版	10

※「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

(b) 矢板式岸壁

部材	点検診断データを保有する施設数
上部工	59
エプロン	71（沈下・陥没）、 68（舗装の劣化、損傷※）
岸壁法線	57
鋼矢板等	39（鋼材の腐食、亀裂、損傷）、 17（被覆防食）

※「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

ータの充足率を確認した。特に、係留施設と外郭施設の施設諸元の登録項目のうち、データの充足率が50%未満であった項目を表-2.2に示す。その他のすべての項目については、項目毎のデータ充足率を付録Aに示した。例えば係留施設の緯度・経度は港湾施設の設置地域を示すデータであり、施設の劣化要因の分析において重要な情報と考えられるが、表-2.2に示すように充足率は低く、今後の維持管理情報DBの利活用の推進にあたっての課題であると考えられる。なお、付録Aには一般的な係留施設、外郭施設であればデータを有すると考えられる項目について、維持管理情報DBの登録データの充足率を示した。これは、登録データが一部の施設に限定される項目については、充足率が適切に評価できなくなる可能性があるためである。例えば、維持管理情報DBには付帯設備に関する情報として車両乗降設備の基数を登録することができるが、車両乗降設備を有する係留施設は全体の一部に限られる。よって、車両乗降設備のように登録データの存在が一部の施設に限定されると考えられる項目については、充足率の評価対象から除外した。

本検討では、マルコフ連鎖モデルにおける遷移率を推

定するために、個々の施設毎に点検診断データが必要となる。本検討では、多種多様な部材毎の点検診断データを機械的に収集するために、維持管理情報DBのシステム内に機械判読可能な形式で保存されている点検診断データのみを分析対象とした。部材毎の点検診断データを機械的に収集可能だった施設数を、施設形式・構造形式毎に確認した。代表的な例として、杭式栈橋と矢板式岸壁の部材毎の点検診断データの登録数を表-2.3に示す。なお、その他のすべての施設形式・構造形式に関する結果は付録Bに示す。維持管理情報DBで登録を確認できる施設数に対して、部材毎に差はあるものの、部材毎の点検診断データが機械判読可能な形式で利用可能な施設数は、登録施設数の概ね1/10程度に限定されることが分かる。特に、係留施設の中でも杭式栈橋は部材毎の点検診断データを保有する施設数が少ない傾向があるが、これは維持管理情報DBに登録された杭式栈橋の母数が少ないことを反映していると考えられる。

マルコフ連鎖モデルにおける遷移率の推定に用いる劣化度データが少ない場合、推定手法によっては数値的に不安定となる場合がある。本検討においては、劣化度判定の単位である点検診断ブロック数が少なくなるほど、劣化度データ数も少なくなる。対象とした各施設の点検診断ブロック数を部材毎に確認したところ、平均値は2~11程度であり、特に杭式栈橋の鋼管杭や渡版においては点検診断ブロック数の平均値が2とかなり小さくなる傾向が見られた。なお、施設によっては点検診断ブロック数が100を超えるものも存在するが、点検診断データを機械判読可能な形式で保存する際、施設毎の点検診断ブロック数の上限は20に設定されている。本検討では、実際に点検診断で取得された劣化度データの一部を抽出して分析対象としたことに留意が必要である。今回分析対象とした施設形式・構造形式における、部材毎の点検診断ブロック数の平均値は付録Bに示す（表中、「点検BL数」）。

2.2 分析対象データ選定における留意点

本検討では維持管理情報DBから取得した部材毎の点検診断データから遷移率を算出するにあたり、あらかじめ設定した基準を満たす施設のみを分析対象データとして抽出した。データの抽出基準について、維持管理関連情報等から補修履歴を確認できる施設は分析対象から除外した。これは、本検討では港湾施設が主に経年的な要因により劣化・損傷を呈する状況を想定しているのに対し、施設の補修は劣化度を回復させることによって人為的に劣化の進行を抑える効果をもたらすと考えたためである。

補修済の施設を分析対象から除外する影響として、現存する施設群から遷移率が過大な施設に偏ってサンプリングされる可能性と、補修が必要な程劣化が進んだ施設を除外することで遷移率が過小な施設に偏ってサンプリングする可能性が考えられる。補修済みの施設を分析対象から除外した影響として、遷移率の過大評価または過小評価の両面の可能性があることに留意が必要である。

維持管理情報DBから取得した部材毎の点検診断データについては、データを保有する施設数が部材によって異なる場合がある。例えば、係留施設の杭式栈橋において、部材毎のデータを保有する施設数は項目によって異なり、上部工が25施設に対して鋼管杭（無防食）では14施設となっている（表-2.3）。原因の一つとして、すべての部材について点検診断データが機械判読可能な形式で保存されているとは限らず、項目によっては機械判読可能な形式で保存されたデータが少なくなるためであると考えられる。また、杭式栈橋の一般定期点検において、上部工は陸上からの目視で比較的容易に実施可能であるのに対し、鋼管杭（無防食）の点検は海上からの目視が必要になる等、点検診断の実施の難易度の差によって、点検診断データの充実度に差が生じている可能性もある。また、点検診断の実施時に荷さばき地の一部に資材が仮置きされている場合には当該点検診断ブロックにおいて点検診断データが得られない等、施設の利用状況によって一部または全ての点検診断ブロックで点検診断データが欠損する可能性もある。

本検討で分析対象とした維持管理情報DB内の部材毎の点検診断データには、文字データとして劣化度判定の結果a,b,c,dのいずれかが記録され、データ欠損の場合は“-”または空白文字が記録されている。しかし、一部の施設においては、数値データや明らかに劣化度判定とは無関係な文字列等、主に記入ミスに由来するものと推察される不良データが見られた。本検討では、文字データとして劣化度判定結果a,b,c,dが記録された点検診断データのみを分析対象とし、その他の不良データが入力されている場合はその部材に関して点検診断データが欠測しているものとみなした。また、一部の施設に関しては維持管理計画書等を確認したところ、点検診断計画に記載のない部材が登録されている等の齟齬が見られたため、そのような施設も分析対象から除外した。

港湾施設の点検診断対象となる部材とその点検診断項目については、標準的な名称が港湾施設の点検診断ガイドラインで示されている⁴⁾。しかし、維持管理情報DBから取得した部材毎の点検診断データの分析にあたり、一部の部材とその点検診断項目の名称には記載の揺れが見

られた。記載の揺れの例として、部材名においては係留施設の矢板式岸壁の「上部工」に対して「上部工」「本体上部工」「上部工（鉄筋コンクリートの場合）」等が、点検診断項目名においては「コンクリートの劣化、損傷」に対して「コンクリートの劣化、損傷」「コンクリートの劣化損傷」等の記載の揺れが見られた。これは、実務における点検診断の実施および取得データの整理は基本的に点検診断ガイドラインを準拠して行われるものの、現地の施設形式等を反映して独自に設定した点検診断項目の記録や、過去の点検診断報告書での名称との整合性の確保等の事情により、点検診断の実施者によって部材やその点検診断項目の名称に多少の揺れが生じているものと考えられる。本検討では、部材とその点検診断項目の名称の揺れがある場合も、いずれかの標準的な名称に対応付けて分析を行った。点検診断ガイドラインに示された標準的な名称と、分析対象データにおける部材とその点検診断項目の名称の対応を付録Cに示す。また、本検討では、本来個別に取り扱うことが望ましい部材についても分析の都合上、大まかな区分で同種の部材として扱っているものがある。例えば、杭式栈橋の部材「上部工」については、点検診断データの上ではさらに上面部・側面部・下面部の区別があり、本来異なる種別の点検結果として取り扱うことが望ましいと考えられるが、上部工の登録データ数が25と限定されていることを考慮し、本検討では上面部・側面部・下面部の区別をせずに取り扱った。

部材毎の点検診断データの中で遷移率の推定の対象としなかった部材について述べる。杭式栈橋や矢板式岸壁の部材である電気防食工については、劣化度はaまたはdの2値により判定される。このような場合、単純にa,b,c,dの4ランクのマルコフ連鎖モデルを適用することは不適切と考えられる。さらに、電気防食工の劣化予測に関しては、陽極の耐用年数としてメーカー指定値を参考として示している事例³⁾もあるため、電気防食工については本検討における遷移率の分析の対象から除外した。

2.3 部材の遷移率および残存年数の推定方法

本検討では、部材毎の遷移率の推定手法として、(1)近似的手法、(2)最小二乗法、(3)ハザードモデル、の3つの手法の適用を検討する。また、推定した遷移率を用いて劣化度予測を行い、所定の劣化度に到達するまでの年数を部材の性能の残存年数とみなすことで、遷移率から部材の残存年数の試算を試みる。まずは、遷移率の推定手法として検討する3つの手法の概要を以下に述べる。

(1)近似的手法

近似的手法は遷移率の推定にあたり、各劣化度の判定に達するまでの経過年数から算出した劣化速度により、遷移率を近似する手法である。具体的な計算方法としては、各劣化度判定の評点を【d=0, c=1, b=2, a=3】として、これを各判定に達した年数で除した値を遷移率とみなすことで、近似的に遷移率を推定する。表-1.1に示したLCC計算プログラムの遷移率の参考値は、当時収集した点検診断データからこの手法を用いて推定されている。近似的手法による遷移確率行列の推定値 $\tilde{P}$ および遷移率の推定値 $\tilde{p}$ を、式-3～5に示す。

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} 1-\tilde{p} & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{p} & 1-\tilde{p} & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{p} & 1-\tilde{p} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{p} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{式-3})$$

$$\tilde{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_n \quad (\text{式-4})$$

$$p_n = \frac{\text{劣化度の推移数}}{\text{経過年}} \quad (\text{式-5})$$

ここで、 p_n : 個別の点検診断ブロックにおける遷移率、 n : 点検診断データ番号、 N : 点検診断データの総数である。本検討では、施設単位で遷移率を推定するため、 N は個々の施設における点検診断データの総数となる。

近似的手法の適用事例として、高橋ら⁶⁾は、総合評価の判定結果から遷移率を推定する方法としてこの手法を紹介している。菅原ら¹²⁾は、総合評価の判定結果ではなく点検診断ブロック毎の劣化度判定データから遷移率を推定している。ただし、この手法に基づく遷移率の推定精度は低いと考えられることから、マクロ的な視点からの検討以外への適用には十分に留意が必要であることが指摘されている⁶⁾。

(2)最小二乗法

遷移率の推定にあたり、各点検年における点検診断データから求められる劣化度分布に最も適合するように、遷移率を収束計算により求める手法である。ここで、劣化度分布は、各点検における劣化度a,b,c,dの比率で定義される。最小二乗法では、劣化度分布の予測二乗誤差を最小とするような遷移率を推定する。最小二乗法による遷移率の推定値を、式-6～8に示す。

最小二乗法では、遷移率推定に利用可能なデータ数が十分にあれば、1年間で2ランク以上劣化度が遷移するようなマルコフ連鎖モデルを推定することも可能である。例えば菅原ら¹²⁾では、分析対象とした全施設の点検診断

データを統合することでデータ数を確保し、1年間の遷移で最大3ランクの劣化度遷移が生じるマルコフ連鎖モデルを検討している。しかし、本検討では、施設単位で遷移率を推定することから、菅原ら¹²⁾に比べて遷移率推定に利用可能なデータ数が限定される。そのため、収束計算における数値的安定性を考慮し、1年間の遷移で最大1ランクだけ劣化度が遷移するマルコフ連鎖モデルに限定して遷移率の推定を行った。

$$\tilde{p} = p \quad \text{s.t.} \quad J(p) \rightarrow \min \quad (\text{式-6})$$

$$J(p) = \sum_{n=t_0, t_1, t_2, \dots} |y_n - P(p)^n \cdot y_0|^2 \quad (\text{式-7})$$

$$P(p) = \begin{bmatrix} 1-p & 0 & 0 & 0 \\ p & 1-p & 0 & 0 \\ 0 & p & 1-p & 0 \\ 0 & 0 & p & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{式-8})$$

ここで、 $y_0 = (y_{0d}, y_{0c}, y_{0b}, y_{0a})^t$: 初回点検時の劣化度分布、 $y_n = (y_{nd}, y_{nc}, y_{nb}, y_{na})^t$: n 年経過時の劣化度分布、 $t_0, t_1, t_2, \dots$: 各点検時における初回点検時からの経過時間(年)である。

(3)ハザードモデル

津田ら⁸⁾は道路橋の劣化過程をハザードモデルにより表現し、そのハザード率からマルコフ連鎖モデルにおける遷移率を推定する手法を提案した。これは、部材の劣化度の遷移が各劣化度における偶発故障により生じるものとみなし、多段階のハザードモデルの導入により部材の劣化度遷移を表現するモデルである。本項では、数式表示の容易さのために、劣化度d,c,b,aをそれぞれ1,2,3,4と表記する。例として p_{11} は p_{dd} を、 p_{12} は p_{dc} を示すものとする。劣化度判定が1,2,3,4の4段階評価で行われる場合、ハザードモデルのパラメータとして推定すべきハザード率は $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の3つとなり、これら3つのパラメータから式-2に示す遷移率を推定可能である。ハザードモデルに基づいて導出される遷移率の推定値について式-9～12に示す。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{22} & 0 & 0 \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} & 0 \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{式-9})$$

$$p_{ii} = \exp(-\theta_i Z), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (\text{式-10})$$

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \\ (i = 1, \dots, 3), (j = i + 1, \dots, 3) \quad (\text{式-11})$$

$$p_{i4} = 1 - \sum_{j=i}^3 p_{ij}, (i = 1, \dots, 3) \quad (\text{式-12})$$

ここで、 θ_k ：各劣化度($k = 1, 2, 3$)におけるハザード率、 Z ：経過年（点検間隔）である。総数 N の各ランク間の遷移データが与えられた場合のハザード率の推定は、式-13に示す対数尤度関数 $\ln L(\theta)$ の最大化により可能である。

$$\tilde{\theta} = \theta \quad \text{s.t.} \\ \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^4 \sum_{n=1}^N \delta_{ij}^n \ln [p_{ij}(Z_n; \theta)] \rightarrow \max \\ (\text{式-13})$$

ここで、 δ_{ij}^n ：各ランク間の遷移データの有無を表すダミー変数、 n ：各ランク間の遷移データのインデックスである。

上記の3つの手法の違いについて述べる。まず、近似的手法では式-3～5から分かるように劣化度の遷移が生じる時点は点検診断時に限られるという仮定を置いている。一方で、最小二乗法およびハザードモデルは、それぞれモデル化が異なるものの、劣化度の遷移が点検診断時を含む任意の年で生じることを許容する手法である。次に、入力データの違いとして、近似的手法およびハザードモデルは、非集計データである点検診断ブロック毎の劣化度の遷移から遷移率を推定する。一方で、最小二乗法は、集計データである劣化度分布の遷移から遷移率を推定する。

遷移率の推定にあたり、推定手法によっては数値的に不安定となる問題が生じる可能性について述べる。近似的手法が簡易な代数的な計算のみで完結する一方で、最小二乗法は式-7に示す劣化度分布の予測二乗誤差を、ハザードモデルは式-13に示す対数尤度を目的関数として収束計算による最適化を行う。本研究では施設単位で遷移率を算出するため、遷移率を算出するための点検データ数が施設によっては少なくなり、遷移率の推定が数値的に不安定となる場合がある。特にハザードモデルでは、対数尤度の最適化において、劣化度 d, c, b におけるハザード率 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ という3つのパラメータを推定する必要があるが、施設によっては劣化度ランクの出現に偏りが生じる可能性がある。例として、点検診断データに d, c の2ランクのみが出現する場合、ハザード率 θ_3 をどのように変

化させても式-13の対数尤度は変化しないため、 θ_3 は推定不能となる。ハザードモデルは、近似的手法および最小二乗法に比べて劣化度ランクの出現の偏りの影響を受けやすいことに留意が必要である。

上記の3つの手法で遷移率を推定したところ、一部において遷移率が0(%)または100(%)という極端な値を示す施設が見られた。遷移率が0(%)となるのは点検診断データがすべて d 判定だった施設に相当し、遷移率が100(%)となるのは極端に劣化が激しい施設に相当すると考えられる。遷移率0(%)の場合は時間経過に対して劣化が全く生じないことになり、一方で遷移率100(%)の場合は、劣化予測を行うと劣化度が d から a に3年で到達することになるが、被災等によるイベント的な損傷を除く通常の劣化過程を考える場合にはそのような状況が生じるとは考えづらい。よって、これらのデータは、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測では取扱いが困難なデータと判断して分析対象から除いた。その結果、遷移率の推定値を得られた施設数は、付録Bに示した部材毎のデータを有する施設数よりも少なくなる。さらに、推定手法によっては先述の数値的不安定性により推定値が得られない場合もあったため、遷移率の推定値を得られた施設数は推定手法によっても異なることに留意が必要である。

港湾施設の点検診断の間隔の検討に資する指標として、推定した遷移率を用いて劣化度分布の予測を行い、特定の劣化度に到達するまでの年数を算出して部材の性能の残存年数とみなして用いることが考えられる。本検討では特に断らない限り、残存年数とは特定の劣化度に到達するまでの年数を部材毎の遷移率から推定したものを指す。具体的な算出方法として、まずは推定した遷移率を用いて劣化度分布の遷移を1年毎に予測する。ここで、初年度はすべての部材の劣化度が d 判定であったと仮定し、劣化度分布の初期値を設定する。予測した各年の劣化度分布から、次に示す基準により各年の劣化度代表値¹⁴⁾を求め、劣化度代表値が c, b, a に初めて到達する年をそれぞれ求め、部材の残存年数とする。

■I 類の点検診断項目に対する劣化度の代表値

劣化度 a ：劣化度 a の部材の割合 $\geq 10\%$

劣化度 b ：劣化度 a + 劣化度 b の部材の割合 $\geq 10\%$

劣化度 c ：劣化度 d の部材の割合 $< 90\%$,

かつ劣化度 a + 劣化度 b の部材の割合 $< 10\%$

劣化度 d ：劣化度 d の部材の割合 $\geq 90\%$

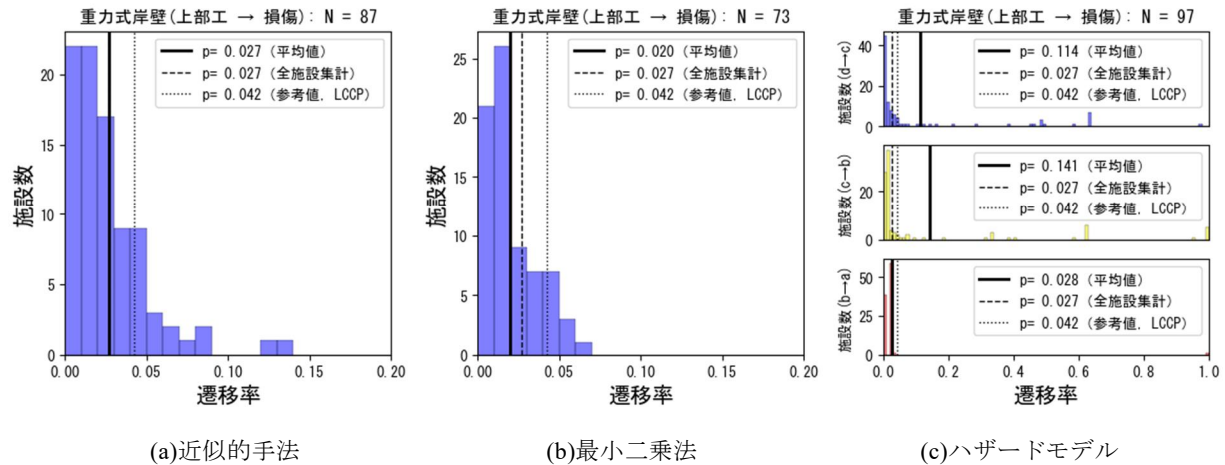


図-3.1 各推定手法による遷移率の比較：重力式岸壁の上部工

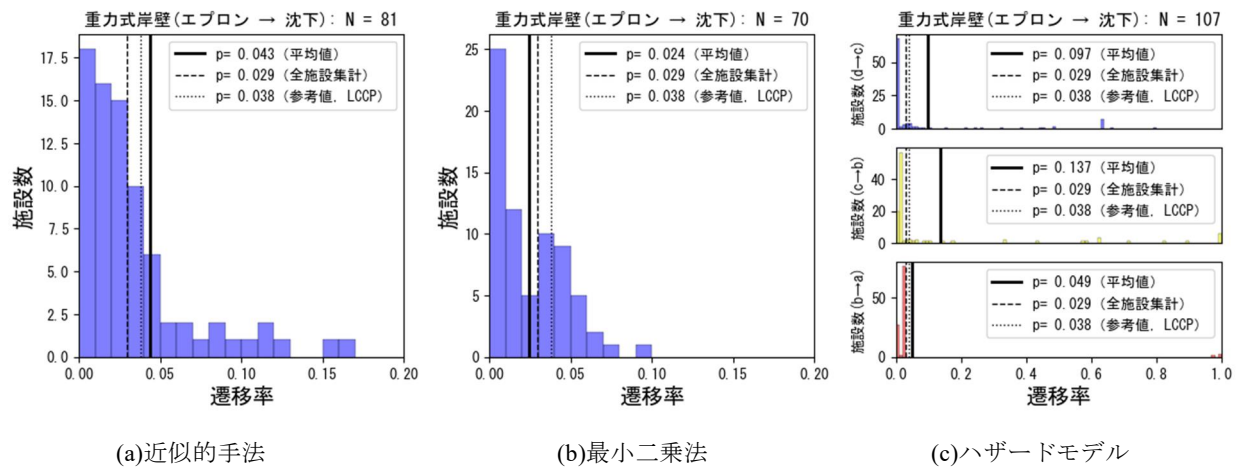


図-3.2 各推定手法による遷移率の比較：重力式岸壁のエプロン（沈下・陥没）

■II類の点検診断項目に対する劣化度の代表値

※維持管理上の限界値を劣化度 b に至る以前とする場合

劣化度 a : 劣化度 a の部材の割合 $\geq 30\%$

劣化度 b : 劣化度 a + 劣化度 b の部材の割合 $\geq 30\%$

劣化度 c : 劣化度 d の部材の割合 $< 70\%$,

かつ劣化度 a + 劣化度 b の部材の割合 $< 30\%$

劣化度 d : 劣化度 d の部材の割合 $\geq 70\%$

本検討では、施設単位で推定した遷移率から残存年数も各施設に対して得られるため、各施設の残存年数の平均値および標準偏差を評価した。なお、遷移率が極端に小さい施設において1000年を超える残存年数も一部で見られたが、残存年数が1000年を超過した施設は除外して平均値および標準偏差の評価を行った。

3. 結果と考察

3.1 遷移率の推定方法の検討

本節では、各手法により推定した遷移率の特徴を分析し、いずれの推定手法が本検討において最も適当かを検討する。代表的な事例として、係留施設の重力式岸壁における結果を取り上げ、部材としては、(1)上部工、(2)エプロン（沈下・陥没）、(3)エプロン（コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷）に着目し、近似的手法、最小二乗法、ハザードモデルによる遷移率のヒストグラムを図-3.1～3.3に示す。ここで、ハザードモデルでは劣化度 d→c, c→b, b→a への遷移に対応する遷移率の推定値を3つのヒストグラムで示している。また、近似的手法と最小二乗法による遷移率の推定値は概ね0～0.2に収まっていたが、ハザードモデルでは推定値が広い範囲にわたって出現していたため、図-3.1～3.3ではハザードモデルの

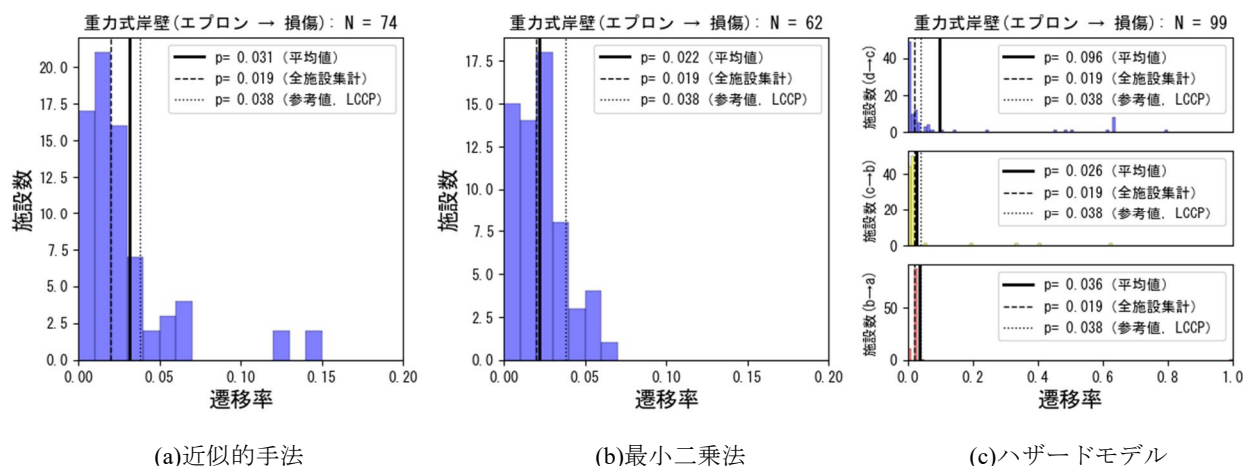


図-3.3 各推定手法による遷移率の比較：重力式岸壁のエプロン（コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷）

み横軸の範囲を0~1に設定している。なお、図-3.1~3.3中のNは遷移率が得られた施設数を示しているが、2.3で述べたように推定手法によって推定値が得られない施設があったため、手法によってNの値が異なっていることに留意が必要である。エプロンの点検診断項目として「沈下・陥没」、「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」の2項目については、それぞれを区別して遷移率を示す。以下では、ヒストグラムに示した各推定手法の推定値の分布から、遷移率の平均値および標準偏差を算出し、各推定手法間の比較を行う。

(1) 上部工（コンクリートの劣化、損傷）

近似的手法、最小二乗法、ハザードモデルにより推定された遷移率のヒストグラムをそれぞれ図-3.1に示す。まず、遷移率の平均値を比較すると、近似的手法で2.67(%)、最小二乗法で2.00(%)、ハザードモデルはd→cで11.39(%)、c→bで14.13(%)、b→aで2.76(%)と、最小二乗法、近似的手法、ハザードモデルの順に大きな値を示す傾向が見られた。特に、ハザードモデルでd→cまたはc→bへの遷移率の推定値は、近似的手法および最小二乗法による推定値の倍以上となる値を示した。次に、遷移率の標準偏差を比較すると、近似的手法で2.44(%)、最小二乗法で1.59(%)、ハザードモデルはd→cで21.53(%)、c→bで27.44(%)、b→aで9.92(%)と、最小二乗法、近似的手法、ハザードモデルの順に大きな値を示す傾向が見られた。

(2) エプロン（沈下・陥没）

近似的手法、最小二乗法、ハザードモデルにより推定された遷移率のヒストグラムをそれぞれ図-3.2に示す。

まず、遷移率の平均値を比較すると、近似的手法で4.35(%)、最小二乗法で2.43(%)、ハザードモデルはd→cで9.73(%)、c→bで13.72(%)、b→aで4.89(%)と、最小二乗法、近似的手法、ハザードモデルの順に大きな値を示す傾向が見られた。特に、ハザードモデルでd→cまたはc→bへの遷移の推定値は、近似的手法および最小二乗法による推定値の倍以上となる値を示した。次に、遷移率の標準偏差を比較すると、近似的手法で7.51(%)、最小二乗法で2.18(%)、ハザードモデルはd→cで20.10(%)、c→bで28.07(%)、b→aで16.12(%)と、最小二乗法、近似的手法、ハザードモデルの順に大きな値を示す傾向が見られた。

(3) エプロン（コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷）

近似的手法、最小二乗法、ハザードモデルにより推定された遷移率のヒストグラムをそれぞれ図-3.3に示す。まず、遷移率の平均値を比較すると、近似的手法で3.12(%)、最小二乗法で2.19(%)、ハザードモデルはd→cで9.61(%)、c→bで2.63(%)、b→aで3.60(%)と、最小二乗法、近似的手法、ハザードモデル(c→bは除く)の順に大きくなる傾向が見られた。特に、ハザードモデルでdからcへの遷移の推定値は、近似的手法および最小二乗法による推定値の倍以上となる値を示した。次に、遷移率の標準偏差を比較すると、近似的手法で3.93(%)、最小二乗法で1.56(%)、ハザードモデルはd→cで20.51(%)、c→bで8.19(%)、b→aで9.78(%)と、最小二乗法、近似的手法、ハザードモデルの順に大きくなる傾向が見られた。

重力式岸壁の代表的な部材とその点検診断項目について、各手法による遷移率の推定値の特徴を述べる。遷移

率の平均値の比較では、近似的手法および最小二乗法ではいずれの部材においても10%未満の値を示しているのに対し、ハザードモデルでは一部の部材で10%を超える遷移率が見られた。遷移率の標準偏差の比較では、近似的手法、最小二乗法では10%未満と抑えられているのに対し、ハザードモデルでは半数以上の部材で10%を超える値が見られ、部材によっては20%前後の値を示す部材もあった。

以上は、重力式岸壁の代表的な部材とその点検診断項目についての傾向を述べたが、その他の施設形式および部材についても概ね同様の傾向が成り立っていた。その他の施設形式および部材とその点検診断項目に関して、各手法で求めた遷移率の平均・標準偏差を付録Dに示す。特に、ハザードモデルで推定した遷移率の標準偏差は、本検討で遷移率を推定対象とした半数以上の部材で10%を超える値が見られ、近似的手法および最小二乗法に比較して推定値の変動が大きい可能性が示された。

上記結果を踏まえて、遷移率の推定手法として本検討においていずれが適切かを整理する。まず、近似的手法は劣化度遷移の発生が点検診断時に限られるモデルであり、最小二乗法とハザードモデルであればその制約はない。よって、推定値が非現実的な値をとる等の数値安定性に関する問題が無ければ、近似的手法よりも最小二乗法またはハザードモデルによる推定値を用いることが望ましいと考えられる。次に、最小二乗法とハザードモデルを比較したとき、本検討においてハザードモデルで推定した遷移率の標準偏差が大半の部材で10%を超える値を示し、最小二乗法に比較して推定値の変動が大きくなる結果が得られた。標準偏差の小ささは推定手法の妥当性を必ずしも意味しないものの、推定値の標準偏差がより抑えられる手法として、最小二乗法を採用することに一定の合理性があるものと考えられる。

また、ハザードモデルを提案した津田ら⁸⁾は、New York市が取得した橋梁の点検診断データに対して7段階の劣化度遷移を表現するハザードモデルを適用して遷移率を推定しているが、その際には500~1000程度のデータ数を用いて検討している。本検討では4段階の劣化度遷移を表現するハザードモデルを適用しており、港湾施設と橋梁では劣化度の出現傾向も異なると思われるが、遷移率の推定に利用可能なデータ数が1施設当たり平均で2~11と、津田ら⁸⁾の適用事例に比較して少ない。本検討においては、劣化度の出現ランクの偏りの影響により、ハザードモデルによる遷移率の推定値に見かけ上の変動が生じている可能性がある。ただし、今後のデータの蓄積により遷移率の推定に利用可能なデータ数を確保できれば、劣化度

の出現ランクの偏りが低減され、ハザードモデルの適用による遷移率の推定も可能になることが期待される。

以上の議論をもとに、各推定手法の特徴を踏まえて本検討では最小二乗法による推定値を採用する。以降、特に断らない限り、遷移率としては最小二乗法による推定値を指すものとする。ただし、LCC計算プログラムに実装された遷移率の参考値との比較のために、全施設の点検診断データを統合し、近似的手法により推定値を算出したものもグラフ中に併記する。

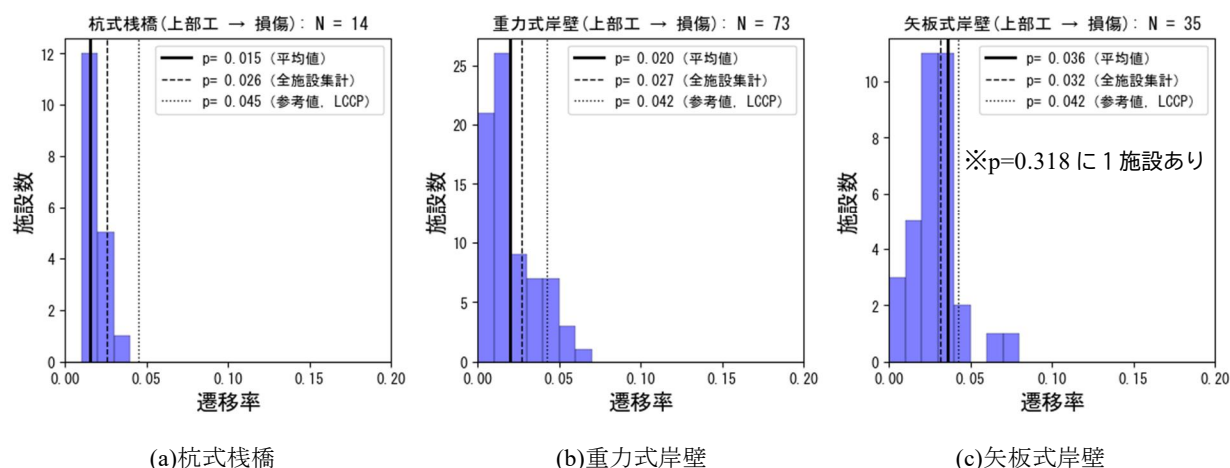


図-3.4 係留施設の上部工の遷移率の比較

3.2 部材毎の遷移率の特徴

本節では、部材毎に推定した遷移率の特徴を分析し、構造形式や部材による劣化傾向の違いを分析する。代表的な部材に着目して遷移率のヒストグラムを図-3.4～3.7に示し、以下に特徴を述べる。図-3.4～3.7には、最小二乗法による遷移率の平均値（図中、「平均値」）に加え、全施設のデータを集計して近似的手法で推定した値（図中、「全施設集計」）および現行のLCC計算プログラムで実装されている遷移率の参考値（図中、「参考値, LCCP」）を表示した。その他の部材の結果については、付録Eに示す。

(1) 上部工（係留施設）

係留施設は、杭式栈橋、重力式岸壁、矢板式岸壁と異なる構造形式の施設に対し、同種の部材として上部工を有する。異なる施設形式における同種の部材の遷移率の比較として、係留施設の上部工の遷移率の分布を図-3.4に示す。

上部工の遷移率の平均値を比較すると、栈橋式で1.54(%)、矢板式で3.59(%)、重力式で2.00(%)と矢板式でやや大きく、栈橋式と重力式ではほぼ同程度の値を示していた。ただし、矢板式は35施設中に1施設のみ遷移率が31.8(%)と他の施設に比較して極端に高い値を示しているデータがあり（図-3.4(c)）、矢板式の上部工の遷移率の平均値が杭式栈橋や重力式岸壁に比べてやや大きな値を示しているのはこの影響を受けている可能性がある。現行のLCC計算プログラムの上部工の遷移率の参考値は栈橋式で4.5(%)、重力式・矢板式で4.2(%)であり、今回の推定値は参考値と比較してより低い値を示していた。なお、上部工に対して遷移率の推定値が得られた施設数に

着目すると、杭式栈橋で最大14施設、重力式岸壁で最大73施設、矢板式岸壁で最大35施設と、構造形式によってかなり差があり、特に杭式栈橋は14施設と限られたサンプルから平均値等の統計値を算出していることに留意が必要である。

図中に「全施設集計」で示した近似的手法による上部工の遷移率は、栈橋式で2.58(%)、矢板式で3.16(%)、重力式で2.66(%)であり、最小二乗法による推定値の平均値と比較すると、栈橋式と重力式で大きく、矢板式で小さい値を示していた。また、参考値(栈橋式で4.5%、重力式・矢板式で4.2%)と比較して、「全施設集計」による遷移率はいずれも小さい値を示していた。

(2) エプロン（係留施設）

係留施設では、杭式栈橋、重力式岸壁、矢板式岸壁と異なる構造形式の施設に対し、同種の部材としてエプロンを備え、そのエプロンの点検診断項目はさらに「沈下・陥没」と「コンクリートまたはアスファルトの劣化、損傷」と細分化されている。異なる施設形式に同種の部材を有し、さらに細分化された点検診断項目の遷移率の比較として、係留施設のエプロンの遷移率の分布を図-3.5に示す。

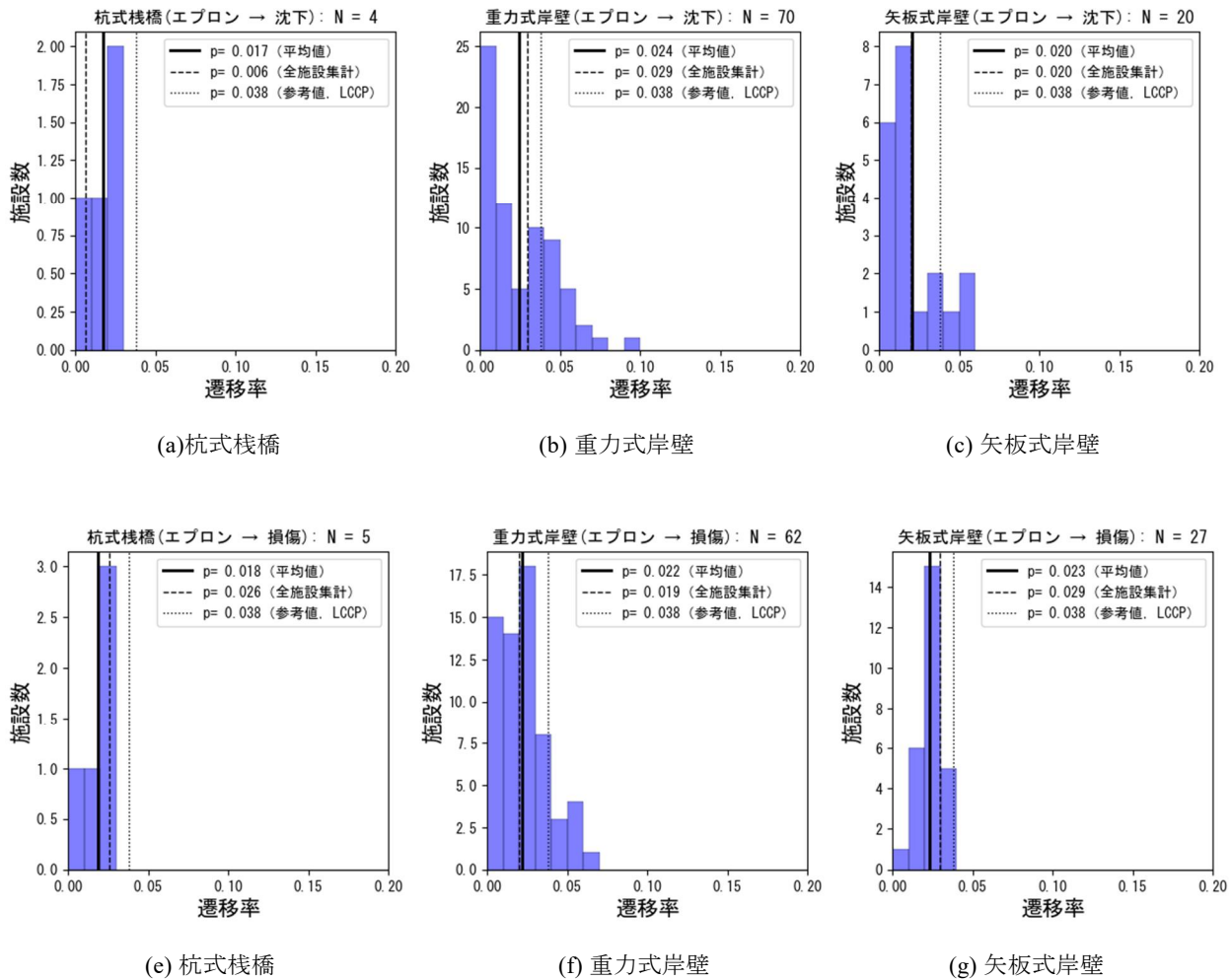


図-3.5 係留施設のエプロンの遷移率の比較:

(a)~(c)は「沈下・陥没」, (d)~(f)は「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」を示す。

部材とその点検診断項目毎に遷移率の平均値を比較すると、エプロンの「沈下・陥没」は栈橋式で1.72(%)、矢板式で2.04(%)、重力式で2.45(%)、エプロンの「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」は栈橋式で1.83(%)、矢板式で2.30(%)、重力式で2.19(%) とほぼ同程度の値を示しており、構造形式や点検診断項目による遷移率の違いは明確には見られなかった。現行のLCC計算プログラムのエプロンの遷移率の参考値は栈橋式・重力式・矢板式いずれの形式においても3.8(%)であり、今回の推定値は参考値と比較してより低い値を示していた。なお、エプロンに対して遷移率の推定値が得られた施設数に着目すると、杭式栈橋で最大5施設、重力式岸壁で最大70施設、矢板式岸壁で最大27施設と、構造形式によってかなり差があり、特に杭式栈橋は5施設と限られたサンプルから平均値等の統計値を算出していることに留意が必要である。

図中に「全施設集計」で示した近似的手法によるエプロンの遷移率は、「沈下・陥没」は栈橋式で0.63(%)、矢板式で1.99(%)、重力式で2.93(%)、エプロンの「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」は栈橋式で2.58(%)、矢板式で2.91(%)、重力式で1.95(%) であり、最小二乗法による推定値の平均値と比較すると、栈橋式と矢板式の「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」、重力式の「沈下・陥没」で大きく、栈橋式と矢板式の「沈下・陥没」と重力式の「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」で小さい値を示しており、特に栈橋式の「沈下・陥没」では最小二乗法による推定値の平均値の半分以下であった。また、参考値(栈橋式・重力式・矢板式のいずれも3.8%)と比較して、「全施設集計」による遷移率はいずれも小さい値を示していた。

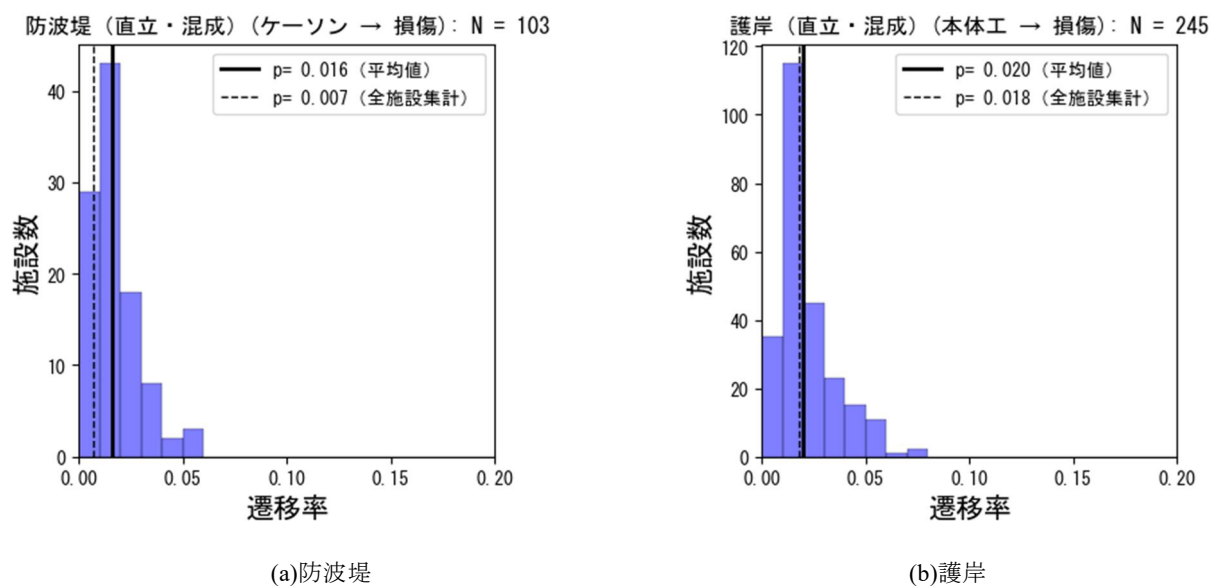


図-3.6 外郭施設のケーソン・本体工の遷移率の比較

(3)ケーソン・本体工（外郭施設）

外郭施設のうち、防波堤は護岸に比べて波浪の影響が比較大きい条件下に設置される傾向があると考えられる。さらに防波堤と護岸は同種の部材としてケーソン・本体工を備える。異なる自然条件が予想される施設が同種の部材を備える場合の遷移率の比較として、防波堤と護岸のケーソン・本体工の遷移率の分布を図-3.6に示す。

部材毎に遷移率の平均値を比較すると、防波堤で1.58(%)、護岸で1.97(%)とほぼ同程度の値を示しており、防波堤と護岸の間で遷移率の違いは明確には見られなかった。現行のLCC計算プログラムでは、外郭施設のケーソン・本体工は劣化予測の対象ではないため、遷移率の参考値の設定はない。なお、ケーソン・本体工に対して遷移率の推定値を得られた施設数に着目すると、防波堤で103施設、護岸で245施設であった。

図中に「全施設集計」で示した近似的手法によるケーソン・本体工の遷移率は、防波堤で0.70(%)、護岸で1.80(%)であり、最小二乗法による推定値の平均値と比較するといずれも小さい値を示しており、特に防波堤では最小二乗法による推定値の平均値の半分以下であった。

(4)消波工（外郭施設）

外郭施設のうち、防波堤は護岸に比べて波浪の影響が比較大きい条件下に設置される傾向があると考えられる。さらに防波堤と護岸は同種の部材として消波工を備え、その点検診断項目は「損傷・亀裂」と「移動、散乱、沈

下」と細分化されている。異なる自然条件が予想される施設が同種の部材を有し、さらにその点検診断項目が細分化されている場合の遷移率の比較として、外郭施設の消波工の遷移率の分布を図-3.7に示す。

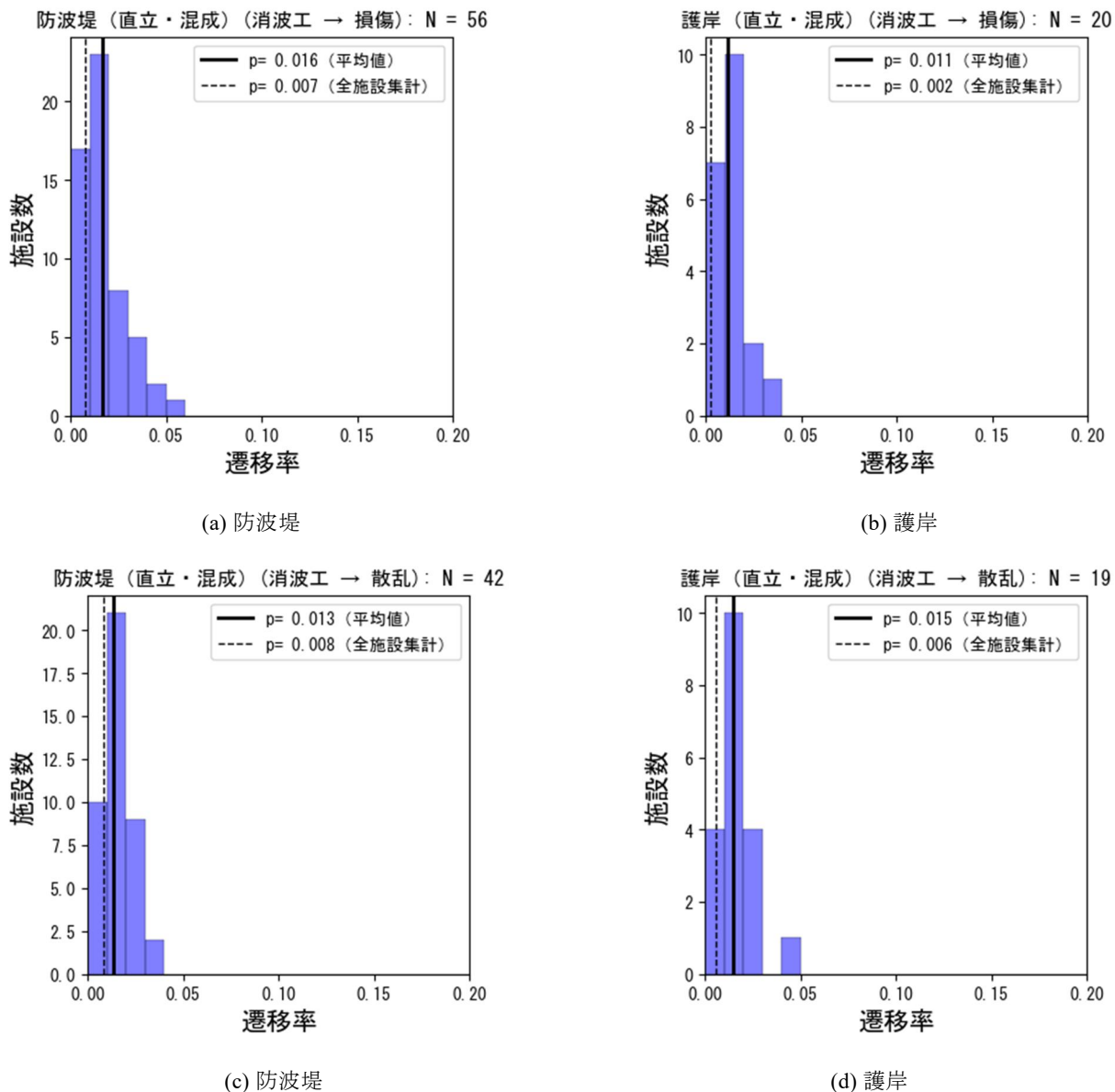


図-3.7 外郭施設の消波工の遷移率の比較：

(a),(b)は「損傷、亀裂」、(c),(d)は「移動、散乱、沈下」を示す。

部材とその点検診断項目毎に遷移率の平均値を比較すると、消波工の「損傷・亀裂」は防波堤で1.62(%)、護岸で1.13(%)、消波工の「移動、散乱、沈下」は防波堤で1.35(%)、護岸で1.45(%)とほぼ同程度の値を示しており、防波堤と護岸の間で遷移率の違いは明確には見られなかった。現行のLCC計算プログラムでは重力式防波堤の消波工の遷移率の参考値として3.3(%)が設定されており、今回の推定値は参考値と比較してより低い値を示していた。なお、消波工に対して遷移率の推定値を得られた施設数に着目すると、防波堤で最大56施設、護岸で最大20施設と、構造形式によってやや差が見られた。

図中に「全施設集計」で示した近似的手法による消波工の遷移率は、「損傷・亀裂」は防波堤で0.74(%)、護岸で0.20(%)、消波工の「移動、散乱、沈下」は防波堤で0.82(%)、護岸で0.56(%)であり、最小二乗法による推定値の平均値と比較するといずれも小さい値を示しており、特に防波堤の「損傷・亀裂」、護岸の「損傷・亀裂」と「移動、散乱、沈下」では最小二乗法による推定値の平均値の半分以下であった。また、参考値(重力式防波堤の消波工で3.3%)と比較して、「全施設集計」による遷移率はいずれも小さい値を示していた。

以上、(1)~(4)まで、部材とその点検診断項目毎について、異なる構造形式の施設が同種の部材を有する場合、異なる自然条件が予想される施設が同種の部材を有する場合、さらに、それらにおいて点検診断項目が細分化されている場合について、遷移率を通じて構造形式や部材による劣化傾向の違いの検討を行ったが、比較した範囲では、遷移率の平均値について明確な傾向や差異を見出すことはできなかった。例として、重力式岸壁および矢板式岸壁のエプロンの場合、沈下・陥没に対しては裏埋土砂の吸出しが、舗装の劣化・損傷に対しては材料的な劣化が、それぞれ主な発生メカニズムになると考えられる。この発生メカニズムの違いを反映して沈下・陥没と舗装の劣化・損傷で遷移率の分布に異なる特徴が現れることが当初は予想されたものの、本検討で推定した遷移率の分布からは、これらの間に明瞭な差を見出すことはできなかった。

遷移率の分布形の比較の手法として、遷移率が近似的に対数正規分布に従うとした報告した古谷ら¹¹⁾のように、Kolmogorov-Smirnov検定等により部材毎に遷移率に従う分布を検討することも考えられる。しかし、本検討においては、杭式栈橋等の特定の構造形式において施設数が極端に少なくなる等、サンプル数が大きく異なる条件での比較検討が困難と考えられたため遷移率の平均値の比較に留め、分布形の検討は行わなかった。

今回算出した遷移率は、最小二乗法による推定値の平均値、全施設の点検診断データを統合し近似的手法により推定した値のいずれも、LCC計算プログラムで用いている参考値と比較して低い値を示していたが、これには複数の原因が考えられる。本検討では補修履歴のある施設を分析対象から除外したが、補修履歴のある施設に古い施設や劣化が比較的早く進んだ施設多く含まれていた場合、本検討での分析対象には健全な施設が相対的に多く含まれるようになることで遷移率が低く算出された可能性がある。また、現行のLCC計算プログラムの参考値の算定はプログラム開発時点（2013年）で収集済みの点検診断データを用いているが、劣化度のランク区分や判定基準が今回の点検診断データとは厳密に対応しないデータも含まれており、点検診断における劣化度の判定基準の変更の影響により今回の差異が生じている可能性もある。

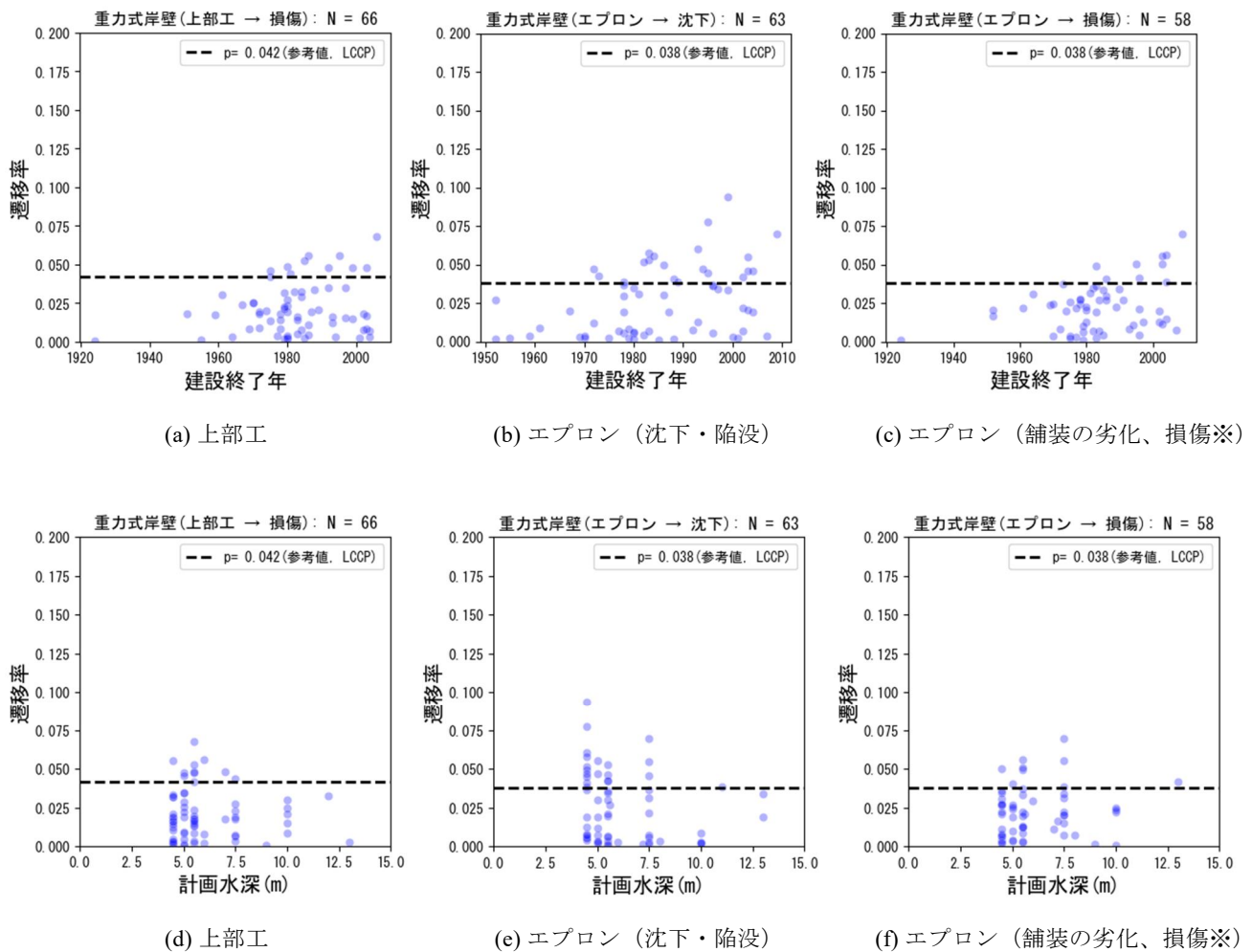


図-3.8 重力式岸壁の部材の遷移率と施設諸元の関係：

(a)～(c)は建設終了年, (d)～(f)は計画水深との対応を示す. ※「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

3.3 遷移率と施設諸元の関係

同一の構造形式の部材であっても、個々の施設に固有の条件に応じて遷移率が異なる可能性も考えられる。例えば、施設規模や整備時期によって設計・施工条件が異なり、その違いが整備完了後の劣化過程に影響を及ぼすことで、施設規模や整備時期と遷移率の間に何らかの対応関係が生じている可能性がある。本節では、維持管理情報DBで参照できる施設諸元に関する情報のうち、建設終了年、計画水深、施設延長と遷移率の間の対応関係を検討する。

本検討で推定した部材毎の遷移率のうち、施設諸元との顕著な対応が見られたものについて、遷移率と施設諸元の関係を図-3.8～3.9に示し、以下にその特徴について述べる。その他の部材の結果については、付録Fに示す。なお、杭式栈橋の栈橋法線および鋼管杭（鋼材の腐食、

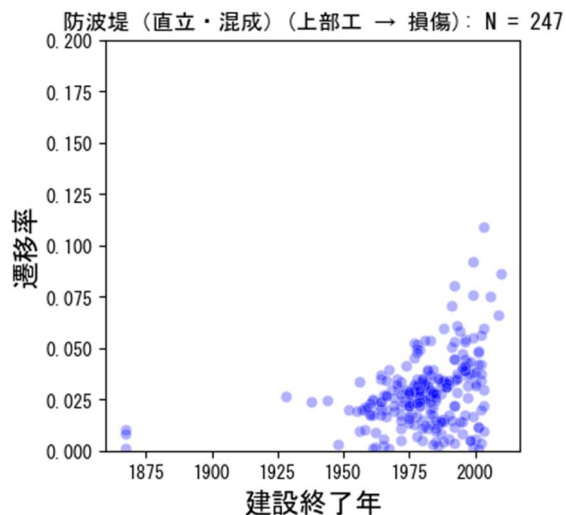
亀裂、損傷）については、推定した遷移率に対して施設諸元情報（建設終了年、計画水深）が登録されていないため、付録F中では「NODATA」と表記している。

(1) 重力式岸壁の上部工・エプロン

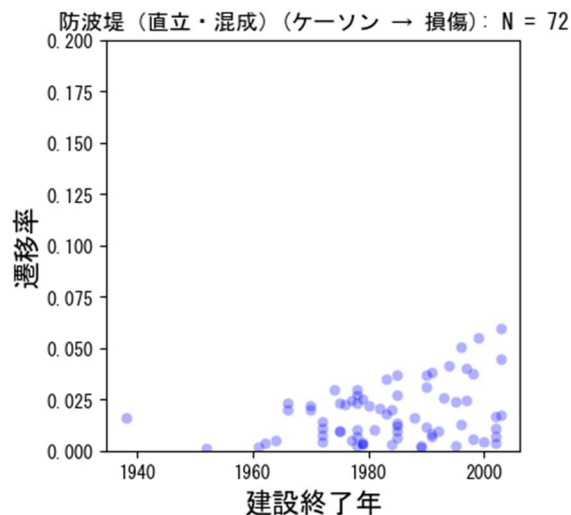
それぞれの部材において、遷移率と建設終了年の関係を図-3.8(a)～(c)に、遷移率と計画水深の関係を図-3.8(d)～(f)に散布図で示す。これらの部材について、計画水深と遷移率との間に明確な関係は見られなかった一方で、建設終了年に対しては、建設時期が新しい程高い遷移率を示す施設が出現する傾向があり、結果として散布図上では遷移率が右肩上がりの分布が見られた。

(2) 防波堤の上部工、ケーソン

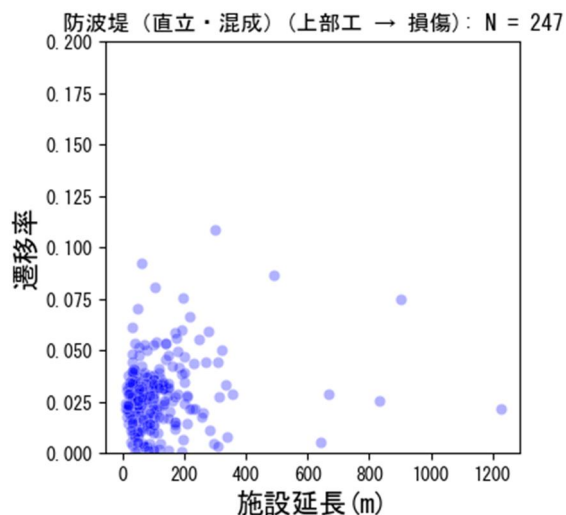
それぞれの部材において、遷移率と建設終了年の関係



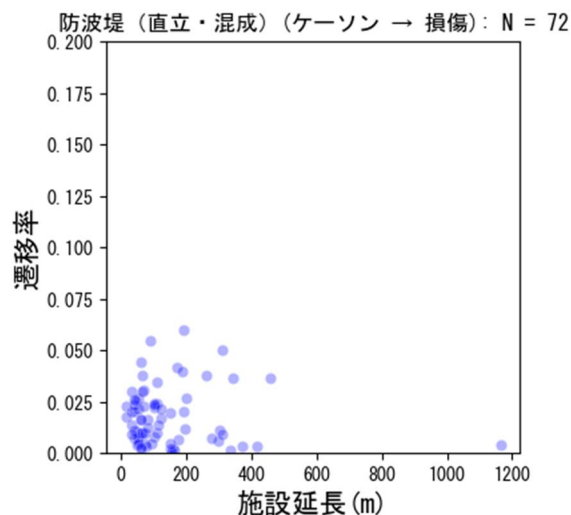
(a) 上部工



(b) ケーソン



(c) 上部工



(d) ケーソン

図-3.9 防波堤の部材の遷移率と施設諸元の関係：
(a),(b)は建設終了年，(c),(d)は施設延長との対応を示す。

を図-3.9(a)～(c)に、遷移率と施設延長との関係を図-3.9(d)～(f)に散布図で示す。これらの部材について、施設延長と遷移率との間に明確な関係は見られなかった一方で、建設終了年に対しては、建設時期が新しい程高い遷移率を示す施設が出現する傾向があり、結果として散布図上では遷移率が右肩上がりの分布が見られた。

施設諸元のうち、施設規模を表す計画水深や施設延長と遷移率の間には明確な関係が見られなかった一方で、建設終了年に対しては、散布図上で遷移率が右肩上がりの分布が見られた。特に後者については、建設時期が新

しい程、高い遷移率を示す施設が出現する傾向があることを示しており、整備後長期間が経過した施設群よりも近年整備された施設群において劣化が進んだ施設が出現しやすいという点で直観に反する結果が得られている。ただし、今回分析対象としたデータが登録施設数の10%に満たないこと、分析対象から除外した補修履歴のある施設に古い施設や劣化が比較的早く進んだ施設多く含まれていた可能性もあることから、サンプリングの偏りにより現れた見かけ上の傾向である可能性に留意が必要である。

表-3.1 遷移率の推定値に基づく部材の残存年数の試算の例

(a)矢板式岸壁

部材	平均値 (年)			標準偏差 (年)		
	c	b	a	c	b	a
上部工	22	68	119	31	94	164
エプロン (沈下・陥没)	9	46	95	8	39	81
エプロン (劣化、損傷※1)	22	66	115	23	71	123
鋼矢板等 (腐食※2)	17	83	171	14	71	147
鋼矢板等 (被覆防食工)	35	107	187	33	99	172

※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

※2 「鋼材の腐食、亀裂、損傷」

(a) 防波堤

部材	平均値 (年)			標準偏差 (年)		
	c	b	a	c	b	a
ケーソン	13	66	136	14	71	148
上部工	22	67	116	21	65	113
消波工 (損傷、亀裂)	37	112	195	30	91	159
消波工 (移動、散乱、沈下)	42	130	226	37	113	197

3.4 部材の残存年数の試算

本検討において推定した遷移率を用いて劣化度分布の予測を行い、2.3に示した方法に従って各劣化度代表値への到達年数を部材の性能の残存年数をみなして、部材の残存年数の試算を行った。遷移率と同様に部材の残存年数も施設単位で推定し、平均値や標準偏差を算出した。代表的な構造形式や部材における試算例として、矢板式岸壁と防波堤における部材の残存年数の平均値と標準偏差を表-3.1に示す。その他の部材については、付録Gに示す。例として、矢板式岸壁の鋼矢板等 (被覆防食工) の残存年数は、各劣化度代表値に到達する年数毎に、cへの到達が35年、bへの到達が107年、aへの到達が187年となった。また、表-3.1に示す残存年数の標準偏差から、残存年数の推定値の変動は平均値と同程度の大きさであったと考えられる。

残存年数の推定値の標準偏差が平均値と同程度に大きくなる理由について述べる。残存年数の試算にあたっては、施設単位で推定した遷移率を用いてマルコフ連鎖モデルによる劣化予測を行い、各劣化度代表値への到達年を残存年数とみなして推定を行った。ここで、施設単位の遷移率から推定した残存年数の分布は、図-3.10に示すように高位の劣化度代表値への到達年ほどばらつきが拡大される傾向が見られる。このように遷移率のわずかな違いが、劣化度予測に基づく残存年数の評価においては拡大されることに留意が必要である。

本検討では推定した遷移率を用いた劣化予測を基に、

所定の劣化度代表値への到達年数を部材の性能の残存年数と見なすことで、遷移率から残存年数の試算を行った。ここで、本検討で試算した残存年数は、部材の劣化度判定結果から得た遷移率のみを用いて推定したものであり、部材の物理的な劣化過程を反映した耐用年数とは異なる点に留意が必要である。物理的な劣化過程に着目した鉄筋コンクリートの耐用年数の評価事例として、かぶり厚さ、水セメント比といった設計・施工条件から中性化の進行予測を行い、耐用年数を評価した事例^{15),16)}がある。本検討で推定した遷移率においても、かぶり厚さ、水セメント比といった部材の物理的な劣化過程に影響する条件の違いは点検時点の劣化状況を通じて間接的に反映されていると考えられる。しかし、数十年先の部材の性能を適切に評価する場合には、遷移率のみから算出した残存年数の適用は不十分であり物理的な劣化過程を考慮して評価することが必要と考えられる。また、本検討で得た残存年数の試算値は、港湾施設の標準的な設計供用期間として設定されることが多い50年と比較して大きい値を示していたが、分析対象としたデータから補修済みの施設を除外したことで現実の施設の劣化進行を過小評価した影響が生じている可能性もある。以上のように、実態を適切に反映して部材の残存年数の評価を行うためには、部材の残存年数の算出方法および分析対象データの抽出方法の両面に留意し、その目的に応じた検討が必要であると考えられる。

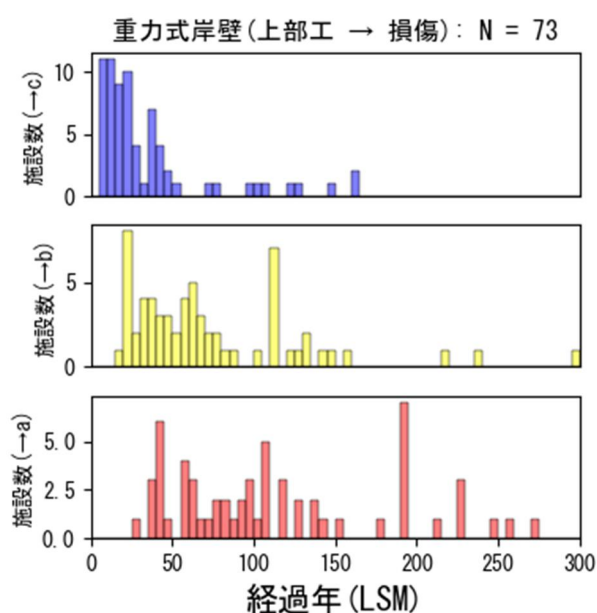


図-3.10 残存年数の変動の拡大の例：
重力式岸壁の上部工

4. おわりに

4.1 主な結論

本検討で得た主な結論を述べる。

維持管理情報DBの充足率を確認したところ、部材毎の点検診断データを機械判読可能な形式で保有する施設数は全体の0.4～8.2%程度であった。また、維持管理情報DBに登録された施設諸元の充足は項目ごとに差があり、係留施設の位置座標のような基礎的で重要な情報であっても充足率が低いものも見られた。

維持管理情報DBに蓄積された点検診断データより、部材毎の遷移率を推定した。遷移率の推定手法の候補として、近似的手法、最小二乗法、ハザードモデルの3種類を検討した。各推定手法におけるモデルの柔軟性や、サンプル数が少ないデータに対する推定値の数値安定性を考慮し、本検討で対象とした施設単位での遷移率の推定手法として最小二乗法を採用した。

部材毎に推定した遷移率について特徴を分析したところ、構造形式や部材の違いによる明瞭な差を見出すことはできなかった。また、現行のLCC計算プログラムに設定された遷移率の参考値に対し、今回推定した遷移率の平均値は概ね低い値を示していた。ただし、補修済の施設の除外や、現行のLCC計算プログラムの参考値の設定に用いられた点検診断データの劣化度判定基準が一致していない等、必ずしも同条件における取得データから推定された遷移率の比較検討となっていない点に留意が

必要である。

部材毎の遷移率と施設諸元の間を分析したところ、計画水深（係留施設）、施設延長（外郭施設）と遷移率の間に明瞭な関係は見られなかった。一方で、建設終了年と遷移率の間には、建設時期が新しい程、高い遷移率を示す施設が出現する傾向が見られた。ただし、今回分析対象としたデータが登録施設数の10%に満たないこと、補修履歴のある施設を分析対象から除外した影響による見かけ上の傾向の可能性もあることに留意が必要である。

推定した遷移率を基にした部材の性能の残存年数の試算を行った結果、本検討で試算した部材の残存年数は、港湾施設の標準的な設計供用期間として設定されることが多い50年と比較しても大きい値を示していた。ただし、本検討では遷移率のみから部材の残存年数の評価を行ったことや補修済みの施設を除外していることを踏まえ、実態を適切に反映した残存年数の評価においては、残存年数の算出方法と分析対象データの抽出の両方の影響についての今後の検討が必要であると考えられる。

4.2 今後の課題

本検討では施設単位で部材毎に遷移率を推定するにあたり、遷移率はいずれの劣化度においても変わらないと仮定した1パラメータのマルコフ連鎖モデルを適用した。そのため、本検討は各劣化度における平均的な劣化速度の分析に留まっており、例えば高位の劣化度においてより劣化が早く進む等の高次の効果は分析できていない。今後、平均的な劣化速度だけではなく、高位の劣化度において劣化が加速するような二次的な効果も考慮した劣化過程の分析が必要になると考えられるが、これには各劣化度遷移において異なる遷移率を割り当て可能であるようにパラメータ数を増やしたマルコフ連鎖モデルを適用する必要がある。パラメータ数を増やしたマルコフ連鎖モデルに対して遷移率を安定して推定するためには、施設単位での点検診断データ数を確保する必要があるため、今後点検診断の回数を重ね、利用可能なデータの蓄積が施設単位で進められることが期待される。

本検討では補修済みの施設を除外して部材毎の遷移率の分析を行った。この影響としては、劣化度が回復した施設の除外により実際の施設の劣化状況を過大評価する効果と、補修が必要となるほど劣化が進んだ施設の除外により劣化状況を過小評価する効果の両方が生じる可能性がある。また、補修工の種類は多岐にわたるため、補修の種類によってその後の劣化過程に及ぼす影響は大きく異なると考えられる。よって、維持管理情報DBに蓄積された点検診断データの利活用の推進に向けて、補修工

事関連情報を含めた点検診断データの蓄積および維持管理情報DBの整備が必要と考えられる。

以上を踏まえて、今後の維持管理情報DBに蓄積された点検診断データの利活用の推進に当たっては、引き続き部材毎の点検診断データの蓄積に加えて、補修工事関連情報の充実を含む維持管理情報DB内の登録データの整備の重要性が増すものと考えられる。

(2025年2月12日受付)

謝辞

本研究に用いた維持管理情報DBの点検診断データ収集にあたっては、港湾情報化支援センター 情報システム課にご協力いただいた。また、北海道大学 横田名誉教授、関東地方整備局東京港湾事務所 加藤所長、港湾空港技術研究所 田中主任研究官、菅原主任研究官および国土交通省港湾局技術企画課の各位よりご助言を得ることによって、本検討をとりまとめることが出来た。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 30 年 5 月。
- 2) 国土交通省港湾局：港湾施設の持続可能な維持管理に向けた検討会，第 3 回検討会資料，2024 年 11 月。
www.mlit.go.jp/kowan/kowan_mn5_000037.html（最終閲覧日 2025 年 2 月 12 日）
- 3) 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル，平成 21 年 11 月。
- 4) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン，2014。
www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr5_000051.html（最終閲覧日 2025 年 2 月 12 日）
- 5) 近田 康夫・鈴木 慎也・小川 福嗣：点検結果に基づく劣化予測のためのマルコフ遷移確率推定方法に関する一考察，構造工学論文集 A, 61A 巻, pp.70-80, 2015。
- 6) 高橋宏直・横田弘・岩波光保：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究ー構造性能の低下予測とアセットマネジメントの試行例ー，国土技術政策総合研究所研究報告，第 29 号，2010。
- 7) 小牟禮建一・浜田秀則・横田弘・山路徹：RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，港湾空港技術研究所報告，VOL.41，No.4，2002。
- 8) 津田尚胤・貝戸清之・青木一也・小林潔司：劣化予測のためのマルコフ遷移確率の推定，土木学会論文集，801 号，pp.801_69-801_82，2005。
- 9) 青木一也・山本 浩司・小林 潔司：劣化予測のためのハザードモデルの推計，土木学会論文集，2005 巻，791 号，pp.791_111-791_124，2005。
- 10) 坂田憲治・井山繁・辰巳大介：既存港湾施設の点検・補修・利用制限等の判断に資する情報提供システムの開発及び改良，国土技術政策総合研究所資料，第 1226 号，2022。
- 11) 古谷宏一・横田弘・橋本勝文・花田祥一：マルコフ連鎖モデルを用いた係留施設の劣化進行予測の信頼性評価，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol. 67，No.4，pp.I_159-I_168，2011。
- 12) 菅原 法城・井山 繁・松本 英雄・鈴木 達典：係留施設における劣化予測の精度向上に関する一考察，国土技術政策総合研究所資料，第 1043 号，2018。
- 13) 鈴木 達典・井山 繁・菅原 法城：港湾における施設の劣化傾向に関する分析，国土技術政策総合研究所資料，第 1023 号，2018。
- 14) 加藤絵万・岩波光保・横田弘：栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究，港湾空港技術研究所報告，VOL.48，No.2，2009。
- 15) 土屋 直子・山口修由：建築材料・部材の物理的耐用年数と資源循環性に関する評価技術の開発，平成 27 年度建築研究所 講演会テキスト。
www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h27/pdf/T4.pdf（最終閲覧日 2025 年 2 月 12 日）
- 16) 平松和嗣：既存 RC 建物構造体の実用的な耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007。

付録 A 維持管理情報 DB の登録項目毎のデータ充足率

充足率が 50%未満の項目を着色して示した。“-”は DB で登録項目として設定が無いことを示す。

維持管理情報DBの登録項目		係留施設	外郭施設
施設諸元等			
都道府県	1.00	1.00	
港湾名	1.00	1.00	
港格	1.00	1.00	
地区名	1.00	1.00	
施設種類 1	1.00	1.00	
施設種類 2	1.00	1.00	
施設番号	1.00	1.00	
施設名称	1.00	1.00	
管理者区分	1.00	1.00	
管理者名	1.00	1.00	
設置者区分	1.00	1.00	
設置者名	1.00	1.00	
施設区分	1.00	1.00	
特定技術基準対象施設	1.00	1.00	
予防保全計画掲載対象施設	1.00	1.00	
維持管理区分名称	1.00	1.00	
構造形式	1.00	1.00	
主要用材	0.92	0.86	
延長-取付部を除く延長 (m)	0.94	-	
延長-取付部を含む延長 (m)	0.95	-	
施設の幅 (m)	0.70	-	
エブロン幅 (m)	0.73	-	
面積 (m ²)	0.43	-	
水深-計画上の水深 (m)	0.91	-	
水深-現在の水深 (m)	0.87	-	
天端高 (m)	0.76	0.63	
耐重力 (t/m ²)	0.70	-	
主要利用船舶の種類	0.59	-	
主要取扱貨物名	0.58	-	
対象船舶-船型 (D/W)	0.87	-	
対象船舶-船席数	0.53	-	
位置情報-緯度	0.24	-	
位置情報-経度	0.24	-	
延長-建設延長 (m)	-	0.94	
延長-機能保有延長 (m)	-	0.71	
消波工延長 (m)	-	0.18	
建設開始年度	0.68	0.41	
建設終了年度	0.81	0.57	
維持管理計画等			
維持管理計画の有無	1.00	1.00	
点検診断計画の有無	1.00	1.00	
点検診断施設区分	0.78	0.62	
一般定期点検頻度(年)	0.75	0.58	
詳細定期点検頻度(年)	0.55	0.35	
点検診断関連			
日常点検-実施の有無	1.00	1.00	
日常点検-点検方法	0.68	0.54	
初回点検診断-実施時期(西暦)	0.71	0.55	
初回点検診断-実施時期(月)	0.71	0.55	
初回点検診断-評価-マニュアル	0.52	0.43	
初回点検診断-評価-独自基準	0.09	0.06	

付録 B 部材毎の登録施設数

施設・構造形式	登録施設数 (DBに項目あり)	部材	点検診断項目	登録施設数 (部材毎データあり)	点検BL数 (平均)
杭式栈橋	1263	上部工	コンクリートの劣化、損傷	25	6
		エプロン	沈下、陥没	17	6
			舗装の劣化、損傷 ※1	8	9
		栈橋法線	凹凸、出入り	24	6
		鋼管杭	鋼材の腐食、亀裂、損傷	14	2
			電気防食工	18	6
			被覆防食工	6	4
渡版	本体の損傷、塗装	10	2		
重力式岸壁	2090	上部工	コンクリートの劣化、損傷	138	10
		エプロン	沈下、陥没	158	10
			舗装の劣化、損傷 ※1	135	9
		岸壁法線	凹凸、出入り	142	10
		ケーソン	側壁の劣化、損傷	116	10
矢板式岸壁	1722	上部工	コンクリートの劣化、損傷	59	10
		エプロン	沈下、陥没	71	8
			舗装の劣化、損傷 ※1	68	8
		岸壁法線	凹凸、出入り	57	10
		鋼矢板等	鋼材の腐食、亀裂、損傷	39	11
			電気防食工	39	9
			被覆防食工	17	10
防波堤	5843	移動	-	463	7
		沈下	-	458	7
		ケーソン	コンクリートの劣化、損傷	410	7
		上部工	コンクリートの劣化、損傷	481	7
		消波工	損傷、亀裂	145	9
			移動、散乱、沈下	147	9
護岸	18441	施設全体の移動	-	494	6
		施設全体の沈下	-	508	6
		本体工（重力式）	コンクリートの劣化、損傷	453	6
		上部工	コンクリートの劣化、損傷	81	6
		消波工	損傷、亀裂	72	7
			移動、散乱、沈下	72	8
		波返工	コンクリートの劣化、損傷	134	6

※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

付録 C 部材とその点検診断項目の名称の対応

維持管理情報 DB で登録が確認された部材名とその点検診断項目の名称の組み合わせについて、【部材名】を列挙し、続けて点検診断項目を箇条書きで示す。

(a)杭式栈橋

維持管理情報 DB で登録が確認された名称	本検討で設定した名称
【上部工】、【上部工(下面部)(RC の場合)】、【本体上部工(下面・側面部)】、【本体上部工(上面部)】、【上部工(下面部)(PC の場合)】、【上部工(上・側面部)】 ・コンクリートの劣化、損傷 ・コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	【上部工】 ・コンクリートの劣化、損傷
【エプロン】、【エプロン(通常の場合)】 ・沈下、陥没 ・コンクリートの劣化、損傷 ・コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	【エプロン】 ・沈下、陥没 ・コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷
【栈橋法線】 ・凹凸、出入り	(左に同じ)
【鋼管杭】、【本体下部工(鋼管杭)】 ・鋼材の腐食、亀裂、損傷 ・電気防食工 ・被覆防食工(ペトロラタム被覆) ・被覆防食工(塗装)	【鋼管杭】 ・鋼材の腐食、亀裂、損傷 ・電気防食工 ・被覆防食工
【渡版】 ・本体の損傷、塗装	(左に同じ)

(b)重力式岸壁

維持管理情報 DB で登録が確認された名称	本検討で設定した名称
【上部工】、【本体上部工】、【上部工(側面部)】、【上部工(無筋コンクリートの場合)】、【上部工(鉄筋コンクリートの場合)】、【上部工(上・側面部)】、【上部工(鉄筋コンクリートの場合)】、【上部工(側面部)】 ・コンクリートの劣化、損傷 ・側壁の劣化、損傷	【上部工】 ・コンクリートの劣化、損傷

【エプロン】、【エプロン（通常の場合）】、【エプロン(通常の場合)】 ・沈下、陥没 ・沈下、陥没、コンクリートまたはアスファルトの劣化 ・コンクリートまたはアスファルトの劣化、損傷 ・コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	【エプロン】 ・沈下、陥没 ・コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷
【岸壁法線】 ・凹凸、出入り	(左に同じ)
【土留部(ケーソン、L型ブロック)】、【ケーソン】 ・側壁の劣化、損傷	【ケーソン】 ・側壁の劣化、損傷

(c)矢板式岸壁

維持管理情報 DB で登録が確認された名称	本検討で設定した名称
【上部工】、【本体上部工】、【上部工(鉄筋コンクリートの場合)】 ・コンクリートの劣化、損傷 ・コンクリートの劣化損傷	【上部工】 ・コンクリートの劣化、損傷
【エプロン】、【エプロン(通常の場合)】 ・沈下、陥没 ・陥没・吸出し、コンクリート又はアスファルトの劣化損傷 ・コンクリートの劣化、損傷 ・コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷'	【エプロン】 ・沈下、陥没 ・コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷
【岸壁法線】、【棧橋法線】 ・凹凸、出入り	【岸壁法線】 ・凹凸、出入り
【鋼矢板等】、【本体下部工(鋼矢板)】、【本体下部工(鋼矢板・被覆防食・海底地盤)】、【本体下部工(鋼矢板)・海底地盤】、【土留部(鋼矢板等)】、【鋼管杭】 ・鋼材の腐食、亀裂、損傷・コンクリート被覆・洗掘、堆積 ・鋼材の腐食、亀裂、損傷・洗掘または堆積 ・鋼材の腐食、亀裂、損傷 ・電気防食工 ・被覆防食工(モルタル被覆) ・被覆防食工(塗装)	【鋼矢板等】 ・鋼材の腐食、亀裂、損傷 ・電気防食工 ・被覆防食工

(d)防波堤 ※点検診断項目の名称の設定なし

維持管理情報 DB で登録が確認された名称	本検討で設定した名称
【移動】、【施設全体の移動】 ※	【移動】 ※
【施設全体の沈下】、【沈下】 ※	【沈下】 ※
【ケーソン】 ・コンクリートの劣化、損傷 ・側壁の劣化、損傷	【ケーソン】 ・コンクリートの劣化、損傷
【上部工】、【上部工(鉄筋コンクリート)】、【上部工(鉄筋コンクリートの場合)】 ・コンクリートの劣化、損傷 ・側壁の劣化、損傷	【上部工】 ・コンクリートの劣化、損傷
【消波工】、【消波工(被覆工)】 ・損傷、欠損 ・移動、散乱、沈下	【消波工】 ・損傷、亀裂 ・移動、散乱、沈下

(e)護岸 ※点検診断項目の名称の設定なし

維持管理情報 DB で登録が確認された名称	本検討で設定した名称
【移動】、【施設全体の移動】 ※	【移動】 ※
【施設全体の沈下】、【沈下】 ※	【沈下】 ※
【本体工(重力式)】、【本体工(重力式)(RC の場合)】、【本体工(重力式)】 ・コンクリートの劣化、損傷	【本体工(重力式)】 ・コンクリートの劣化、損傷
【本体上部工】、【上部工】、【上部工(無筋コンクリートの場合)】、【上部工(鉄筋コンクリートの場合)】、【上部工(上・側面部)】、【上部工(鉄筋コンクリートの場合)】、【上部工(側面部)】 ・コンクリートの劣化、損傷	【上部工】 ・コンクリートの劣化、損傷
【消波工】 ・損傷、亀裂 ・損傷、欠損 ・移動、散乱、沈下	【消波工】 ・損傷、亀裂 ・移動、散乱、沈下

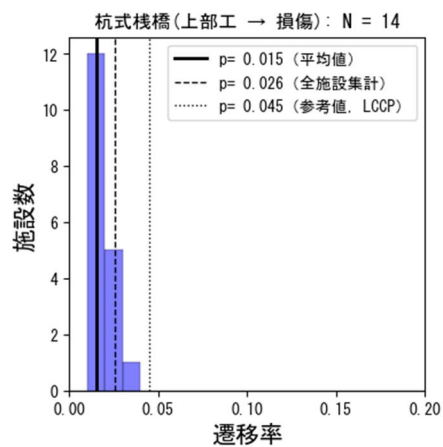
【波返工(無筋の場合)】、【波返工(無筋)】、【波返工(RCの場合)】 ・コンクリートの劣化、損傷	【波返工】 ・コンクリートの劣化、損傷
--	------------------------

付録D 各推定手法による遷移率の推定値の平均値・標準偏差

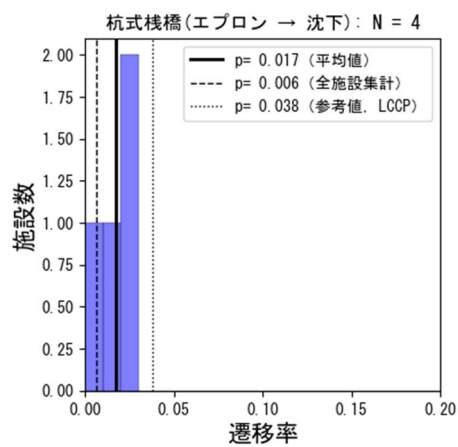
黄色の着色セルは標準偏差が10%を超える項目を示す。

			近似的手法		最小二乗法		ハザードモデル					
							d→c	c→b	b→a	d→c	c→b	b→a
施設・構造形式	部材	点検診断項目	平均 (%)	標準偏差 (%)	平均 (%)	標準偏差 (%)	平均 (%)			標準偏差 (%)		
杭式栈橋	上部工	コンクリートの劣化、損傷	2.67	1.71	1.54	0.69	9.79	1.28	2.60	21.36	0.93	0.98
	エブロン	沈下、陥没	3.39	2.61	1.72	1.01	13.79	10.12	2.61	25.91	25.82	0.98
		コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	2.23	1.03	1.83	1.06	15.20	0.98	1.69	22.80	1.50	1.58
	栈橋法線	凹凸、出入り	推定不可※2	推定不可※2	1.00	0.00	0.16	1.95	2.96	0.38	0.00	0.00
	鋼管杭	鋼材の腐食、亀裂、損傷	推定不可※2	推定不可※2	1.00	0.00	0.35	1.95	2.96	0.49	0.00	0.00
		電気防食工※1										
		被覆防食工	1.52	推定不可※2	0.89	0.24	0.76	12.10	2.94	0.40	24.87	0.03
重力式岸壁	渡版	本体の損傷、塗装	6.67	推定不可※2	2.59	3.55	1.51	1.73	2.96	3.10	0.65	0.00
	上部工	コンクリートの劣化、損傷	2.67	2.44	2.00	1.59	11.39	14.13	2.76	21.53	27.44	9.92
	エブロン	沈下、陥没	4.35	7.51	2.45	2.18	9.73	13.72	4.89	20.10	28.07	16.12
		コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	3.12	3.93	2.19	1.56	9.61	2.63	3.60	20.51	8.19	9.78
	岸壁法線	凹凸、出入り	1.01	1.70	1.12	1.16	2.85	2.08	2.71	11.46	3.34	0.83
	ケーソン	側壁の劣化、損傷	2.96	3.08	1.47	1.16	4.48	4.04	3.80	16.09	14.09	9.69
矢板式岸壁	上部工	コンクリートの劣化、損傷	3.33	2.24	3.59	5.12	25.43	8.15	4.08	27.60	19.84	5.98
	エブロン	沈下、陥没	5.08	6.47	2.04	1.74	7.28	11.75	5.02	18.41	23.87	13.87
		コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	5.02	6.84	2.30	0.85	26.86	4.65	5.88	31.01	10.21	18.49
	岸壁法線	凹凸、出入り	2.28	3.99	1.34	1.64	0.28	1.79	4.92	0.97	0.55	14.02
	鋼矢板等	鋼材の腐食、亀裂、損傷	3.19	2.66	0.76	0.42	7.55	4.85	10.24	19.82	9.01	22.87
		電気防食工※1										
		被覆防食工	3.63	3.68	1.26	1.52	9.80	1.50	10.42	23.93	0.86	26.92
防波堤	移動	-	1.50	2.14	1.48	1.16	5.43	1.77	3.22	16.53	5.36	5.21
	沈下	-	1.28	1.55	1.42	1.22	5.38	1.82	2.80	16.70	3.26	0.66
	ケーソン	コンクリートの劣化、損傷	2.79	5.53	1.58	1.24	5.07	2.87	3.77	16.54	9.81	8.71
	上部工	コンクリートの劣化、損傷	3.03	3.11	2.63	1.68	18.83	8.58	2.81	26.90	21.65	8.66
	消波工	損傷、亀裂	1.41	1.05	1.62	1.22	5.03	1.80	2.93	15.66	3.07	0.27
		移動、散乱、沈下	2.55	3.30	1.35	0.86	4.31	3.95	3.48	14.68	12.16	5.48
護岸	施設全体の移動	-	1.85	2.56	1.43	1.39	2.92	2.82	3.18	11.87	9.21	5.40
	施設全体の沈下	-	1.43	2.10	1.28	1.06	2.23	1.87	3.04	10.63	1.83	2.52
	本体工（重力式）	コンクリートの劣化、損傷	2.60	2.41	1.97	1.49	10.88	6.79	3.43	21.95	18.76	8.78
	上部工	コンクリートの劣化、損傷	2.54	1.46	2.10	1.33	16.17	4.23	2.43	26.10	13.66	1.14
	消波工	損傷、亀裂	1.00	0.91	1.13	0.78	2.22	1.74	4.47	11.16	0.61	12.13
		移動、散乱、沈下	2.28	2.26	1.45	1.03	2.14	2.12	6.42	9.39	3.84	17.29
	波返工	コンクリートの劣化、損傷	2.02	1.77	1.70	1.43	6.40	4.24	3.43	17.00	13.65	8.94

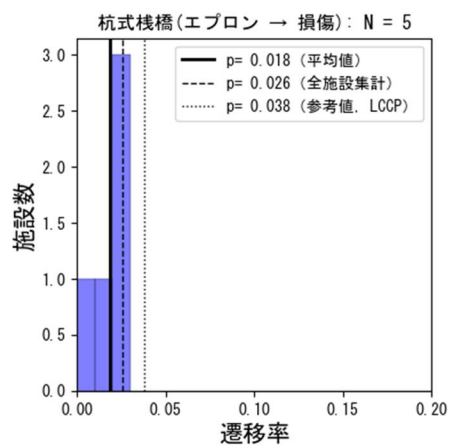
付録 E 部材毎の遷移率の推定値の分布



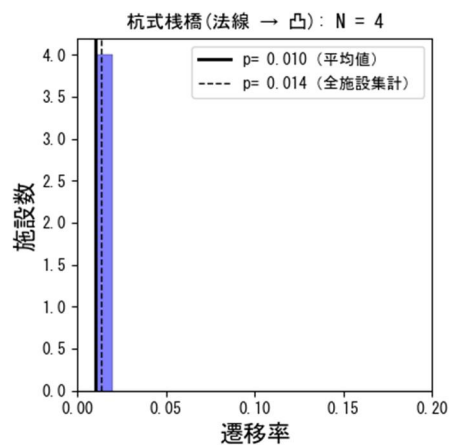
(a) 上部工



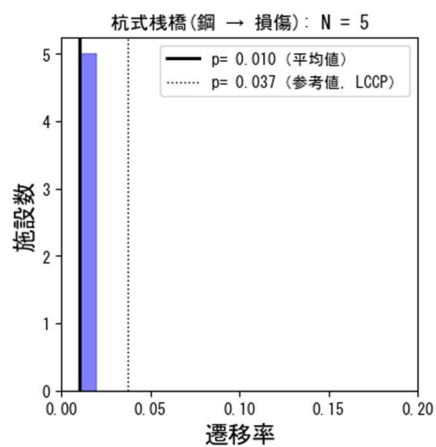
(b) エプロン (沈下・陥没)



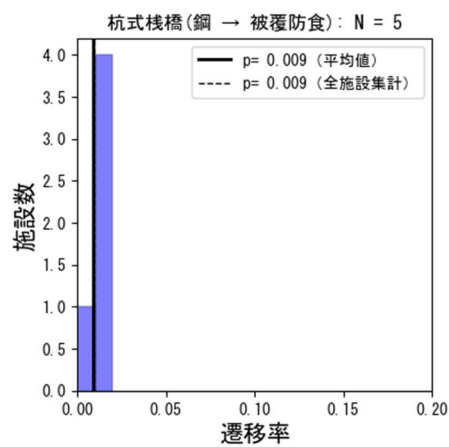
(c) エプロン (劣化・損傷※1)



(d) 栈橋法線



(e) 鋼管杭 (腐食、亀裂、損傷)



(f) 鋼管杭 (被覆防食工)

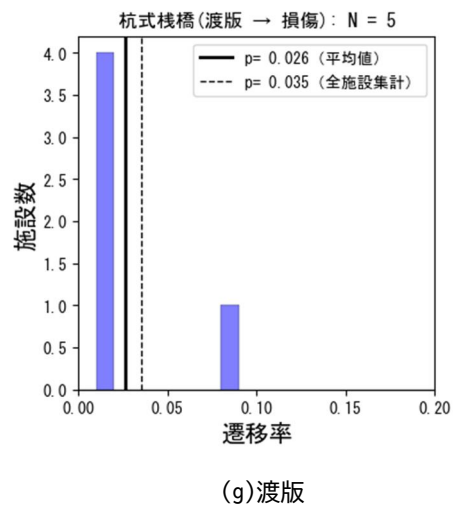
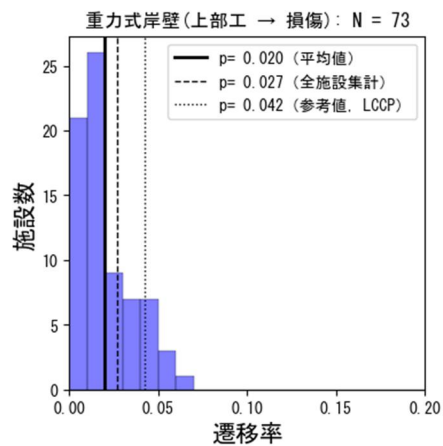
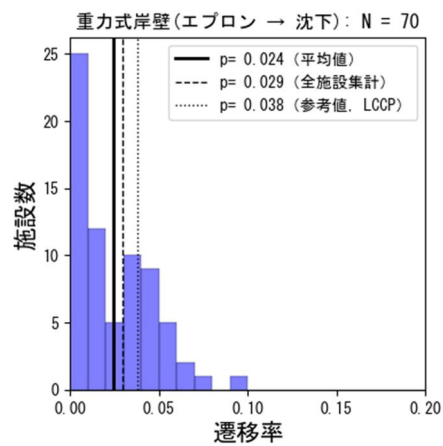


図-1 杭式栈橋の部材の遷移率

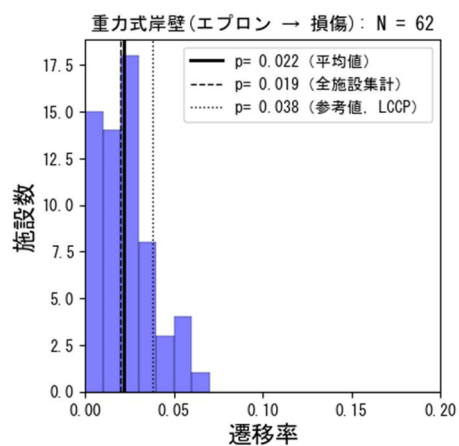
※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」



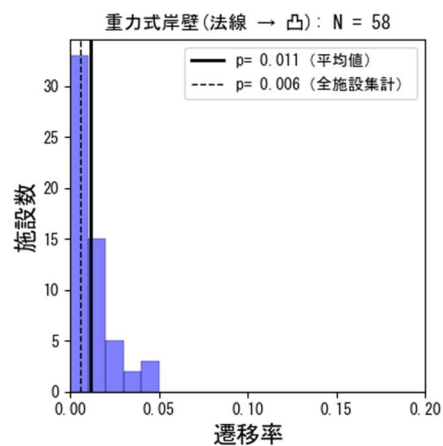
(a) 上部工



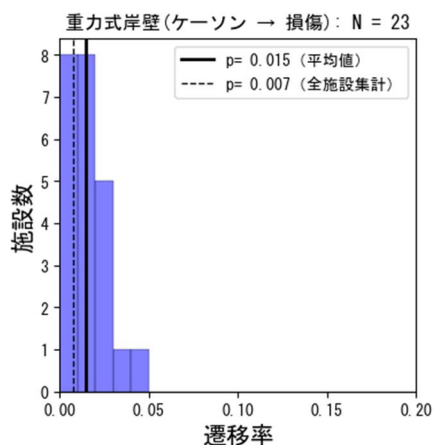
(b) エプロン (沈下・陥没)



(c) エプロン (劣化・損傷※1)



(d) 岸壁法線



(e) ケーソン

図-2 重力式岸壁の部材の遷移率

※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

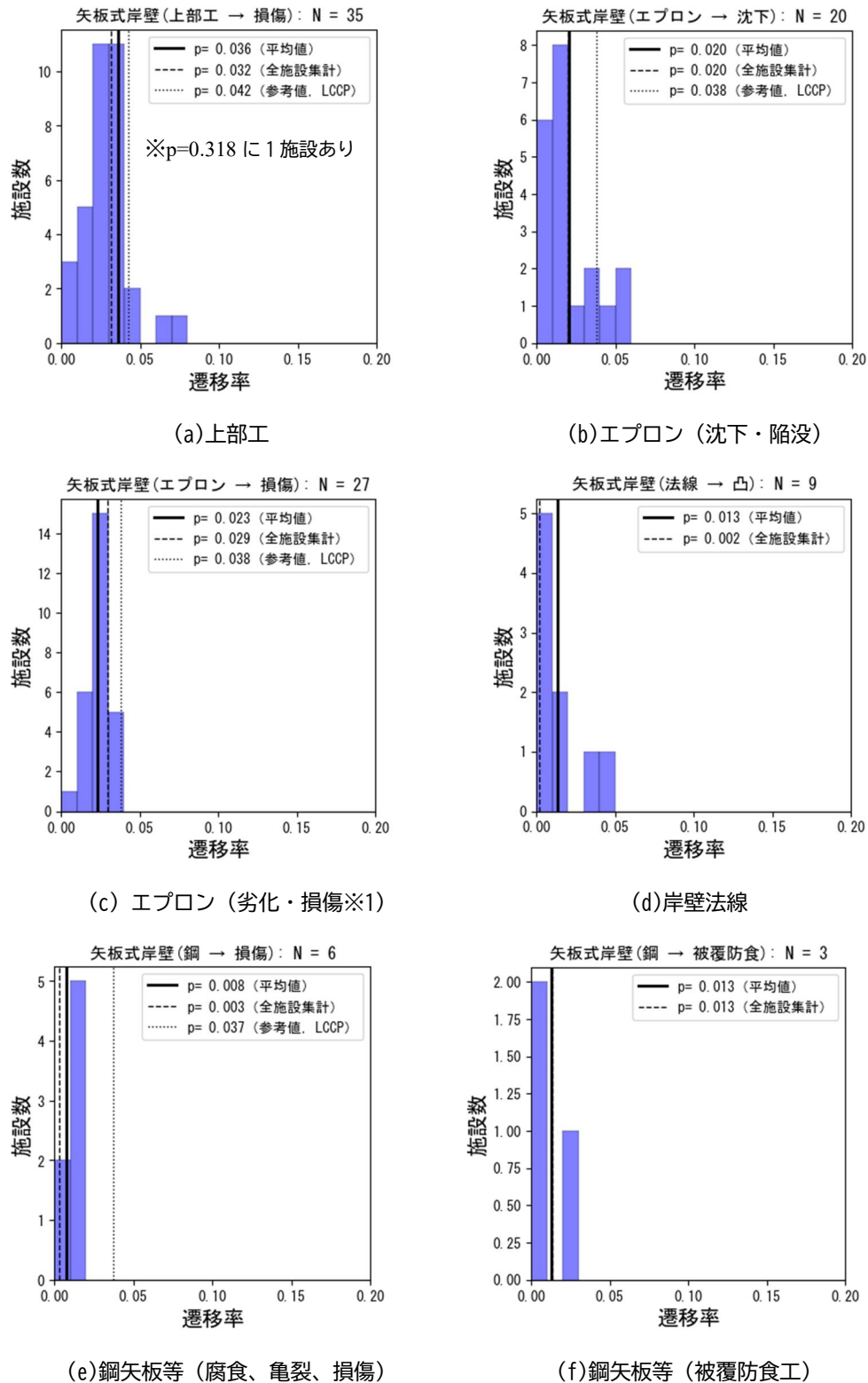
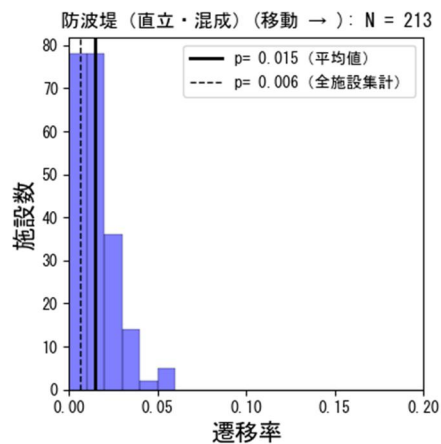
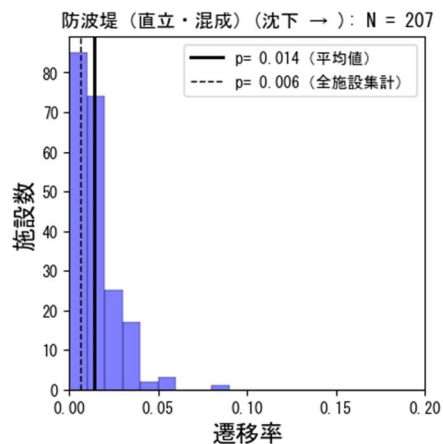


図-3 矢板式岸壁の部材の遷移率

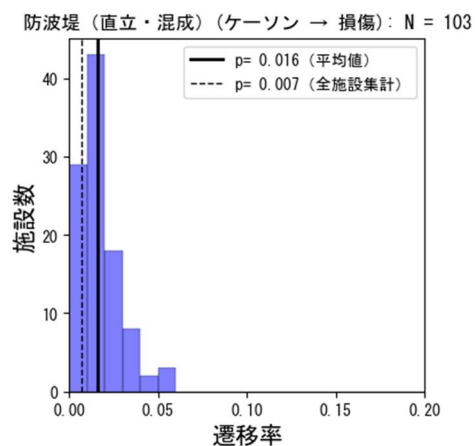
※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」



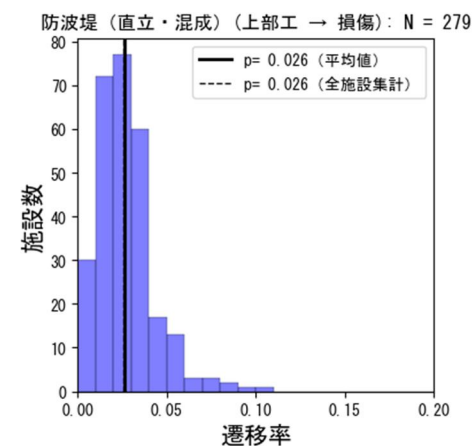
(a)移動



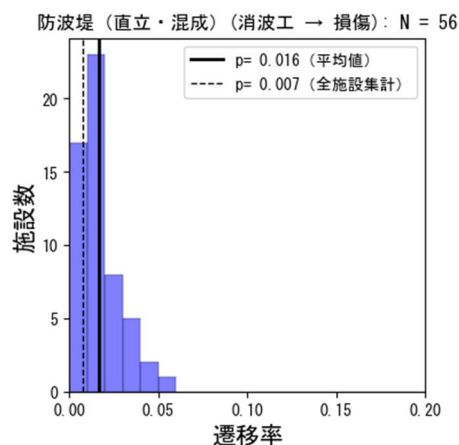
(b)沈下



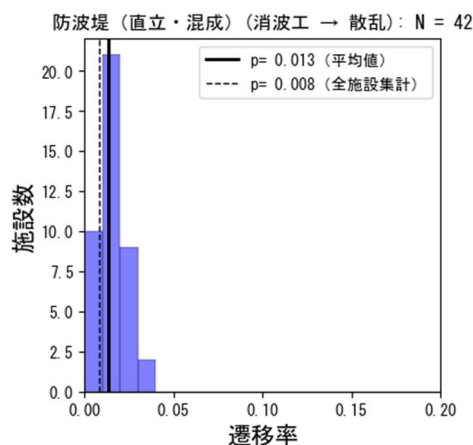
(c)ケーソン



(d)上部工

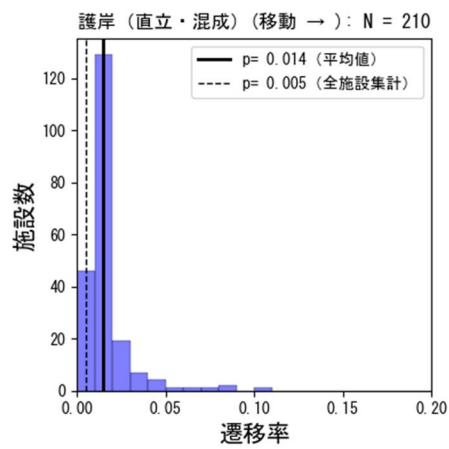


(e)消波工（損傷、亀裂）

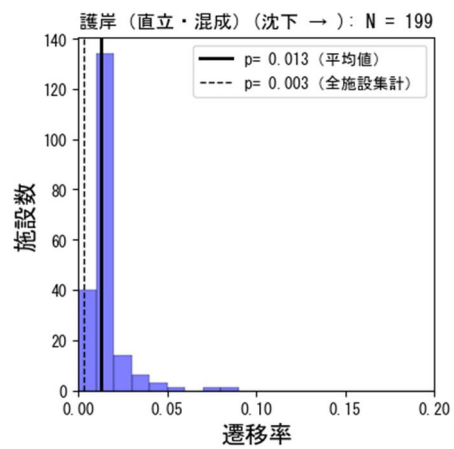


(f)消波工（移動、散乱、沈下）

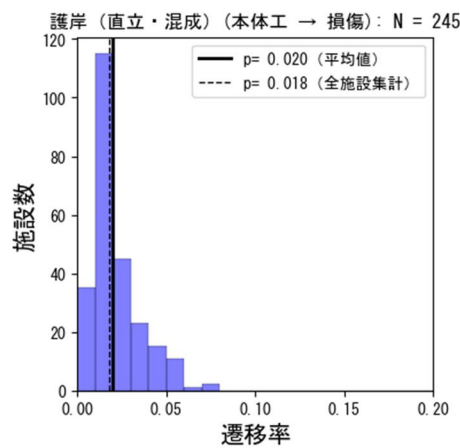
図-4 防波堤の部材の遷移率



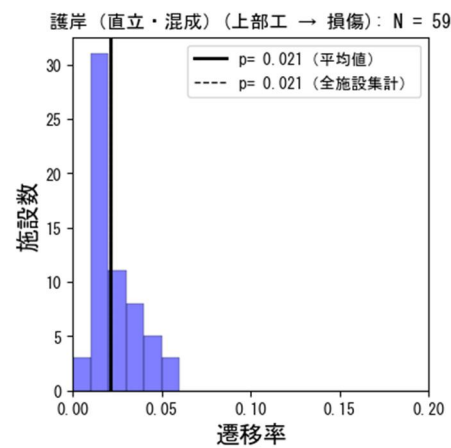
(a) 施設全体の移動



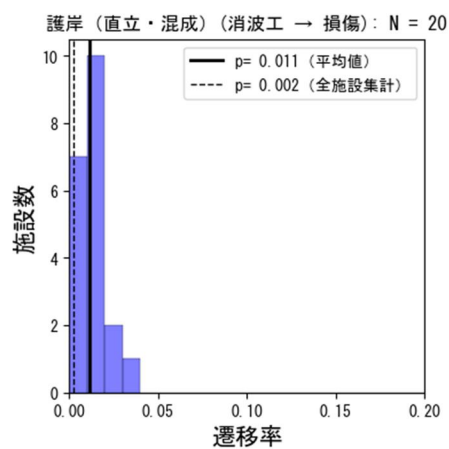
(b) 施設全体の沈下



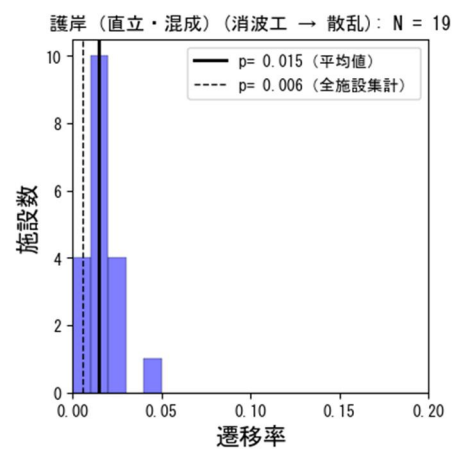
(c) 本体工（重力式）



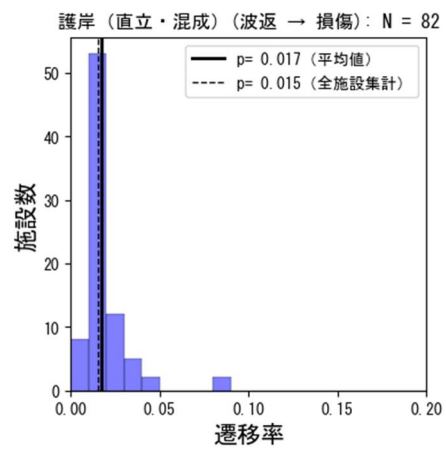
(d) 上部工（コンクリートの劣化、損傷）



(e) 消波工（損傷、亀裂）



(f) 消波工（移動、散乱、沈下）

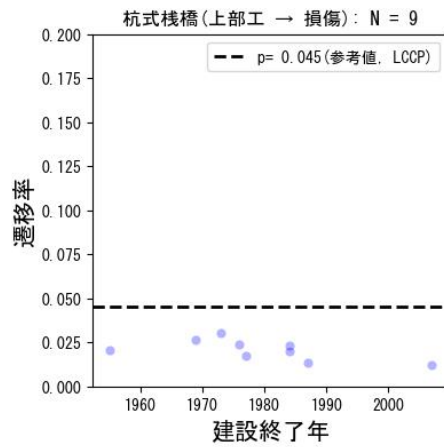


(g)波返工

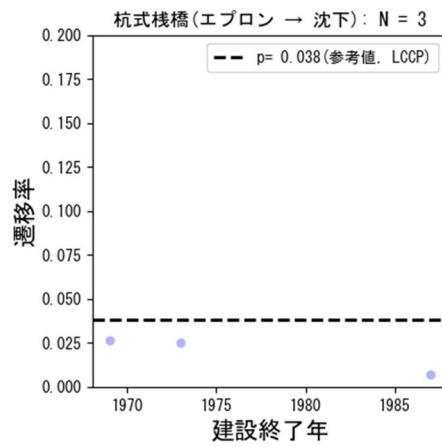
図-5 護岸の部材の遷移率

付録 F 施設諸元に対する遷移率の分布

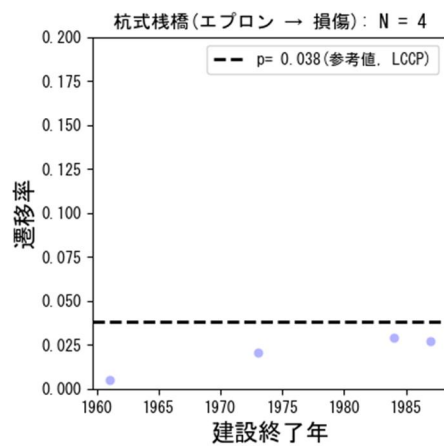
<建設終了年（杭式栈橋）>



(a) 上部工



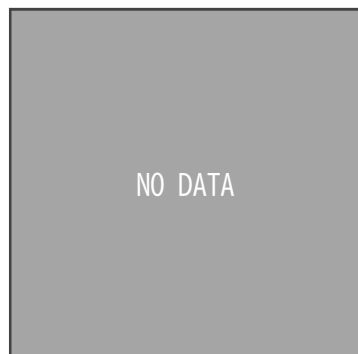
(b) エプロン（沈下・陥没）



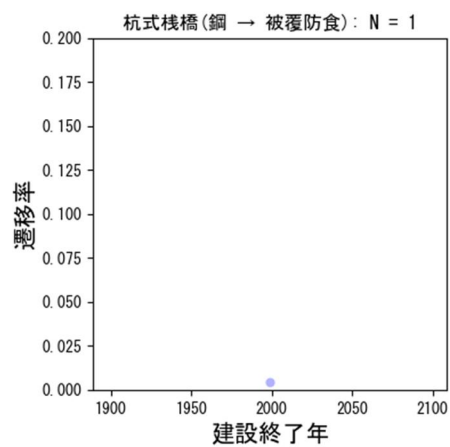
(c) エプロン（劣化・損傷※1）



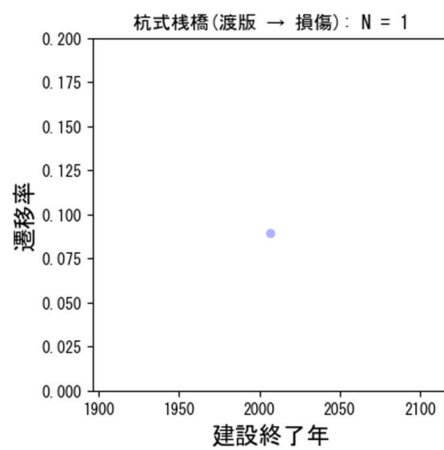
(d) 栈橋法線



(e) 鋼管杭（腐食、亀裂、損傷）

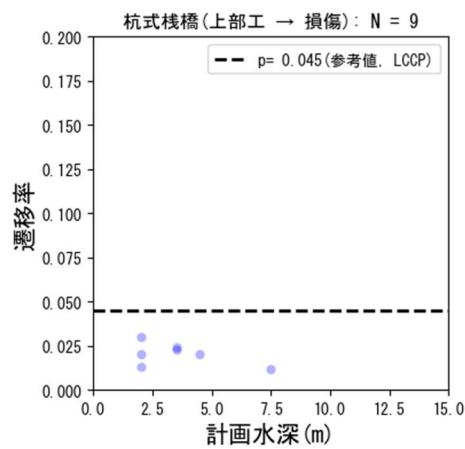


(f) 鋼管杭（被覆防食工）

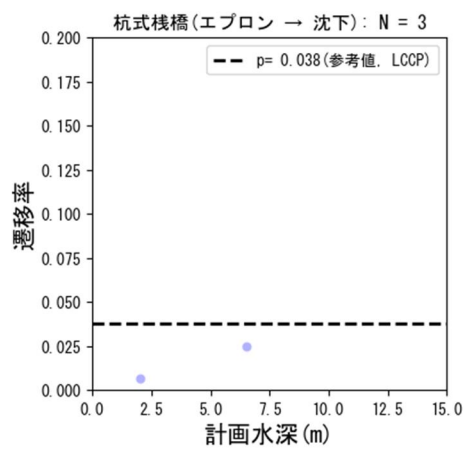


(g)渡版

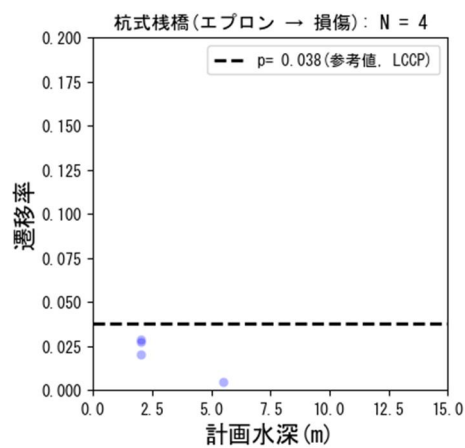
<計画水深（杭式栈橋）>



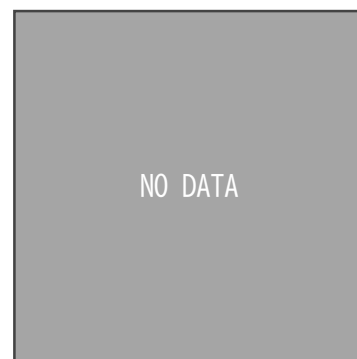
(a) 上部工



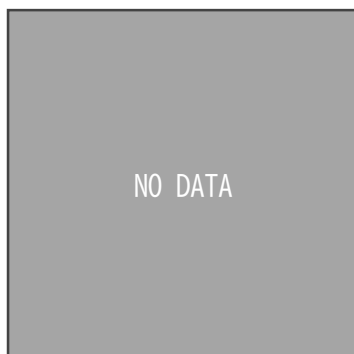
(b) エプロン (沈下・陥没)



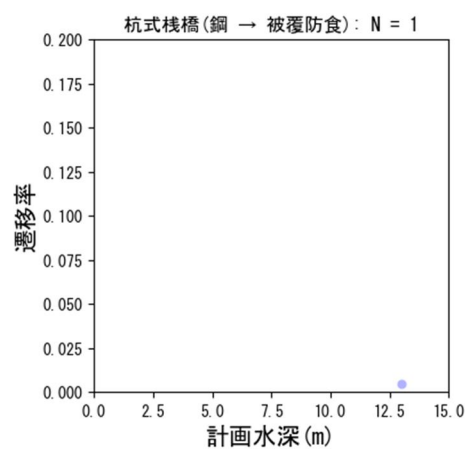
(c) エプロン (劣化・損傷※1)



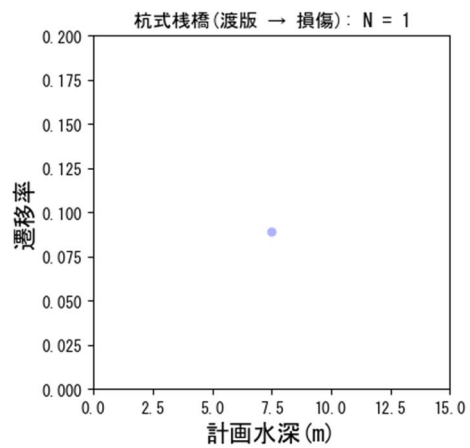
(d) 栈橋法線



(e) 鋼管杭 (腐食、亀裂、損傷)



(f) 鋼管杭 (被覆防食工)

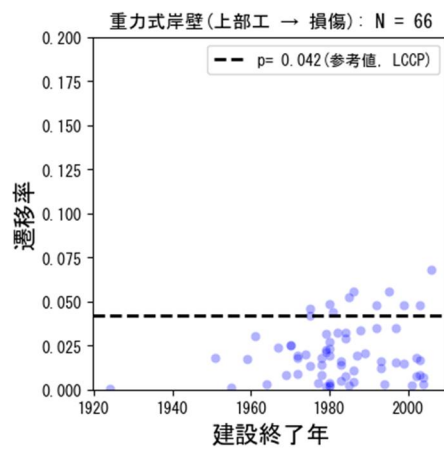


(g) 渡版

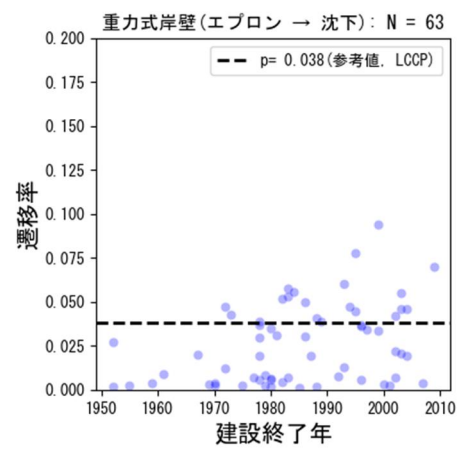
図-1 杭式栈橋の部材の遷移率と計画水深・建設終了年の関係

※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

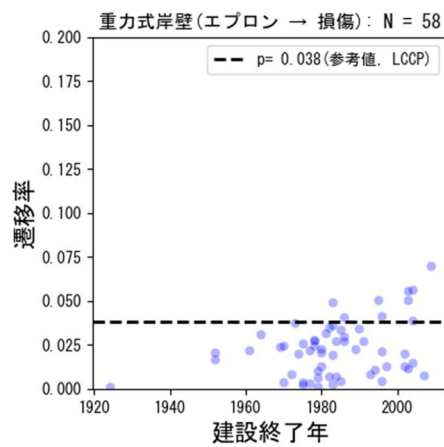
<建設終了年（重力式岸壁）>



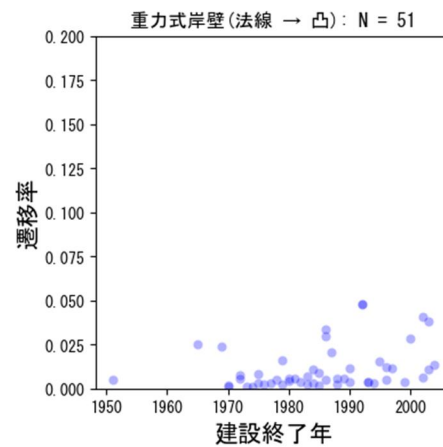
(a) 上部工



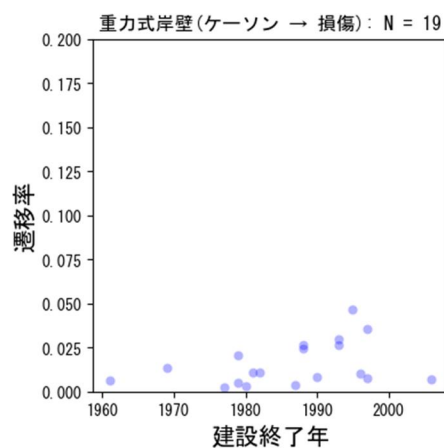
(b) エプロン（沈下・陥没）



(c) エプロン（劣化・損傷※1）

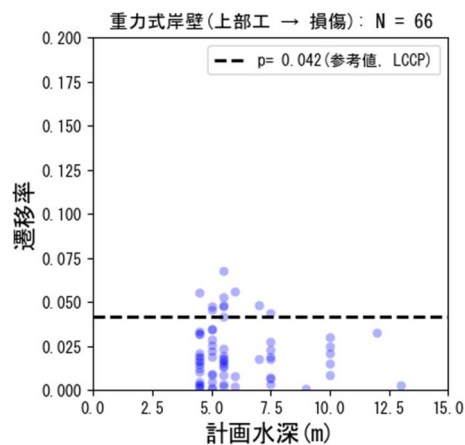


(d) 岸壁法線

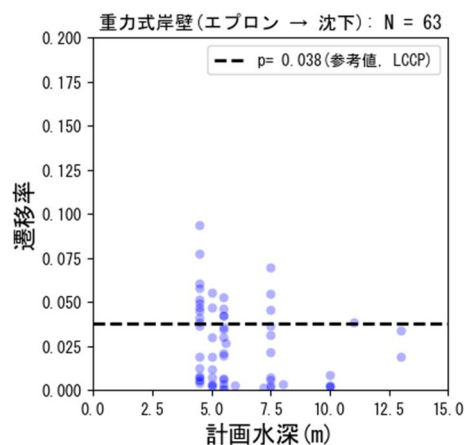


(e) ケーソン

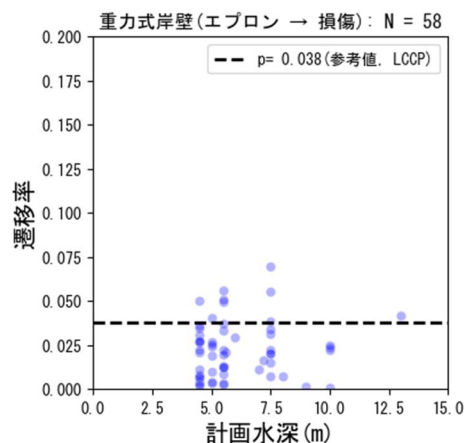
<計画水深（重力式岸壁）>



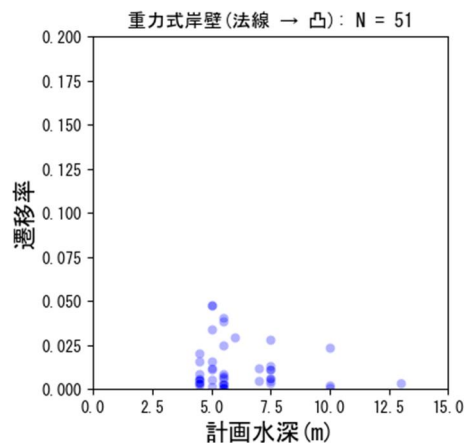
(a) 上部工



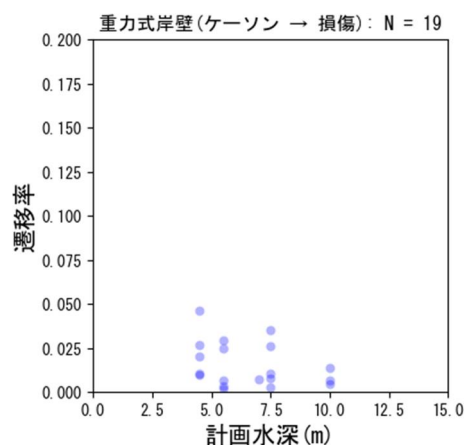
(b) エプロン（沈下・陥没）



(c) エプロン（劣化・損傷※1）



(d) 岸壁法線

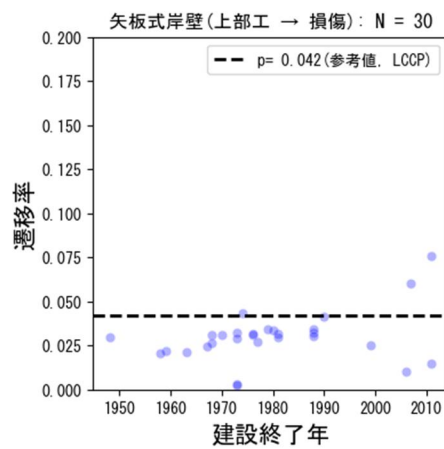


(e) ケーソン

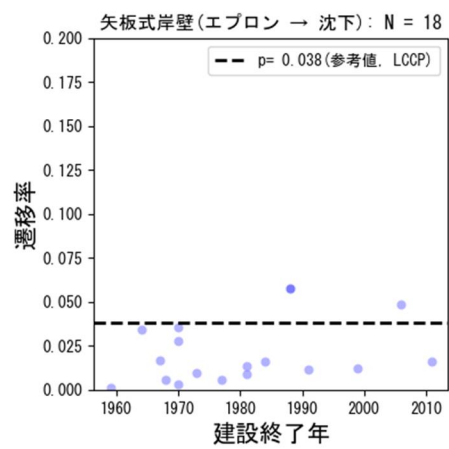
図-2 重力式岸壁の部材の遷移率と計画水深・建設終了年の関係

※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

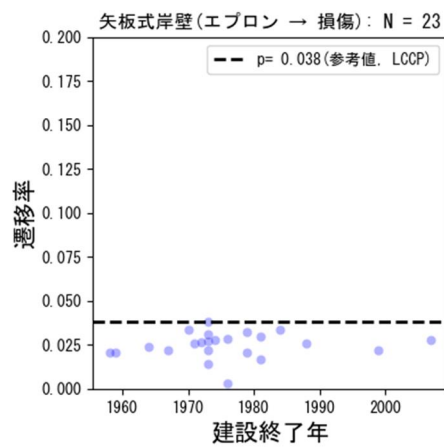
<建設終了年（矢板式岸壁）>



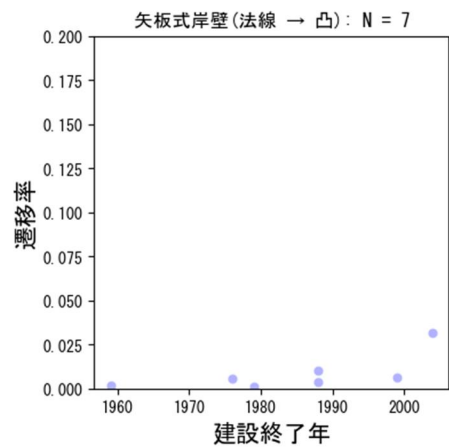
(a) 上部工



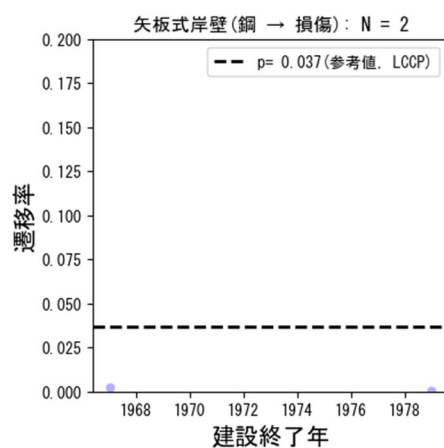
(b) エプロン (沈下・陥没)



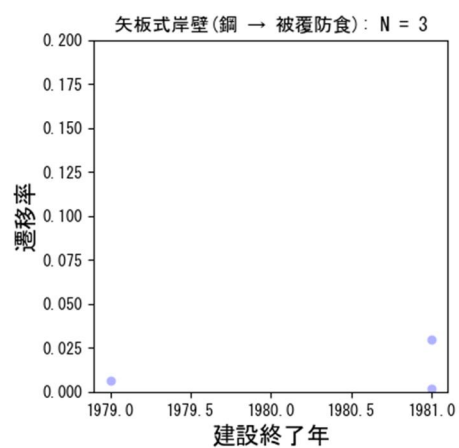
(c) エプロン (劣化・損傷※1)



(d) 岸壁法線

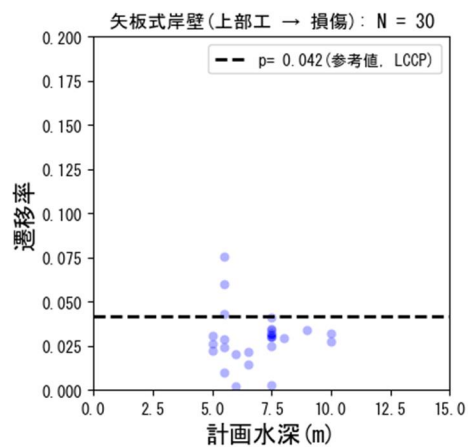


(e) 鋼矢板等 (腐食・亀裂・損傷)

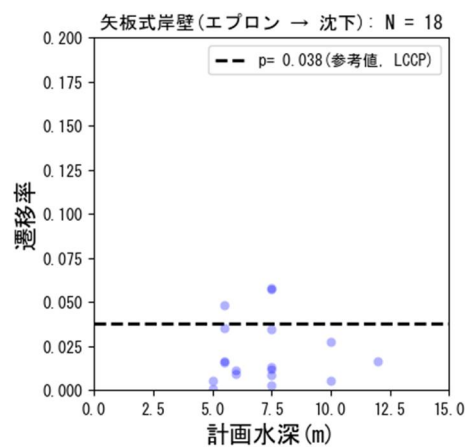


(f) 鋼矢板等 (被覆防食工)

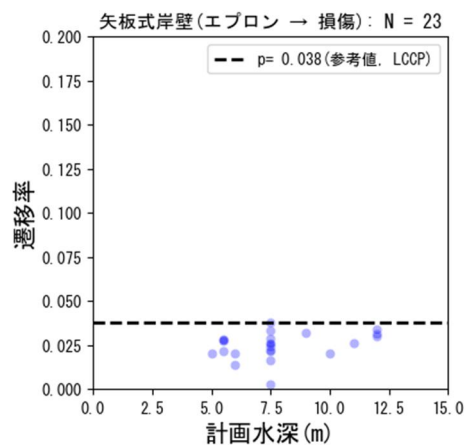
<計画水深（矢板式岸壁）>



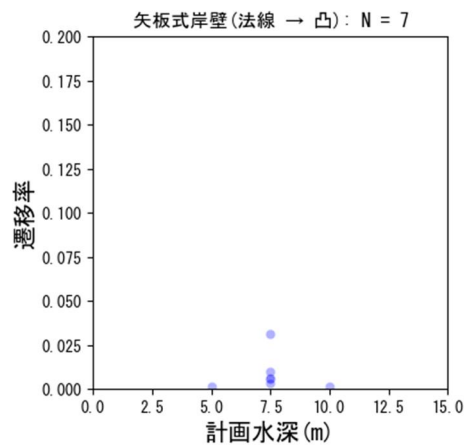
(a) 上部工



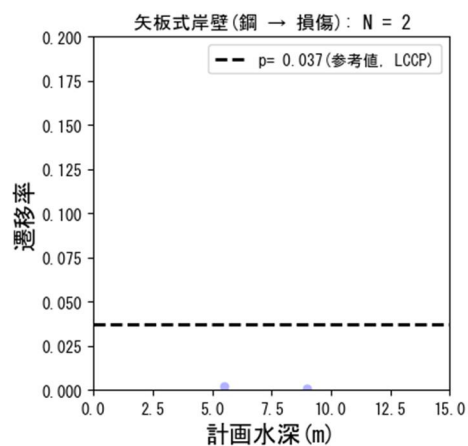
(b) エプロン（沈下・陥没）



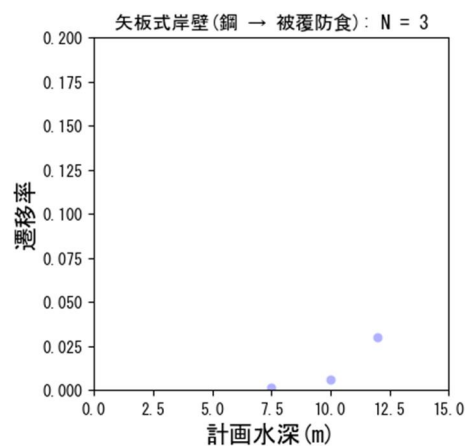
(c) エプロン（劣化・損傷※1）



(d) 岸壁法線



(e) 鋼矢板等（腐食、亀裂、損傷）

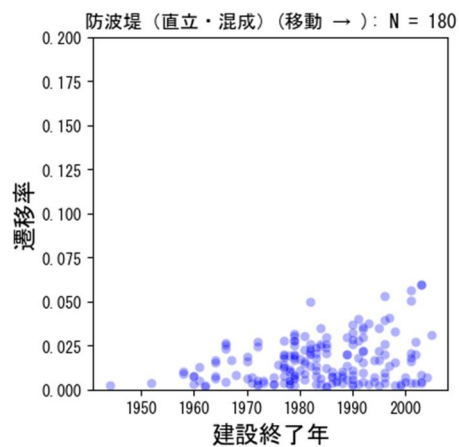


(f) 鋼矢板等（被覆防食工）

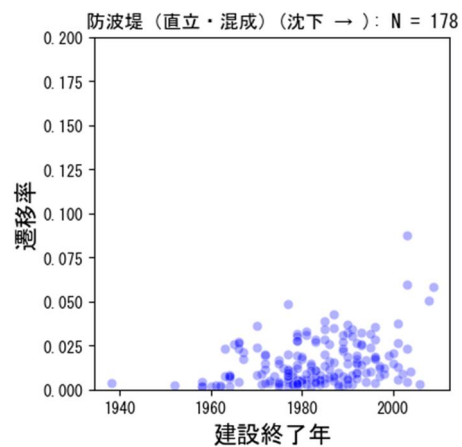
図-3 矢板式岸壁の部材の遷移率と計画水深・建設終了年の関係

※1 「コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷」

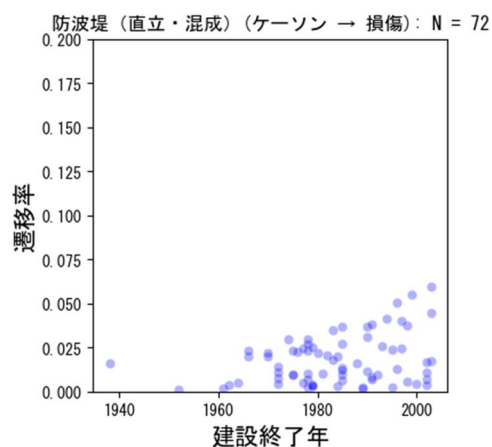
<建設終了年（防波堤）>



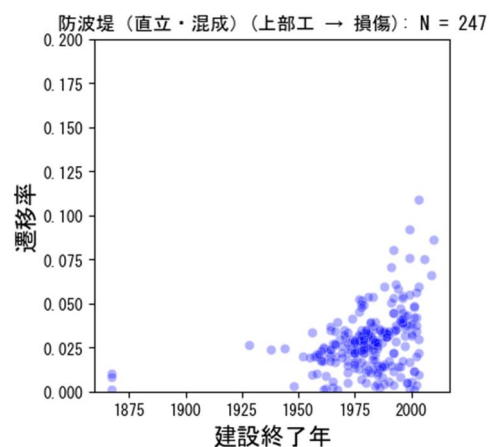
(a)移動



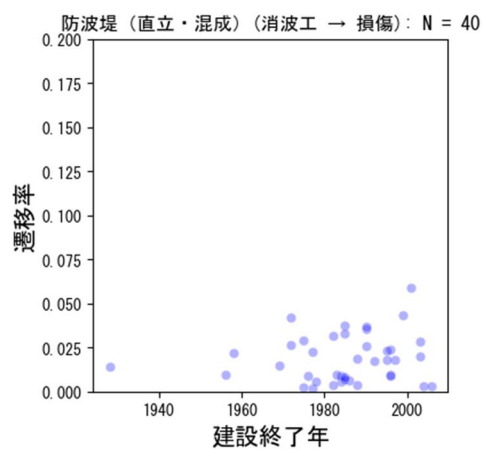
(b)沈下



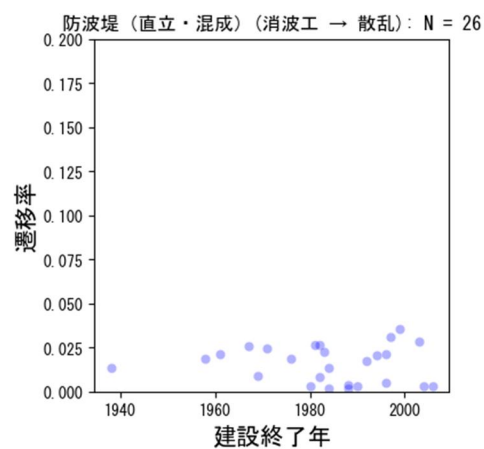
(c)ケーソン



(d)上部工

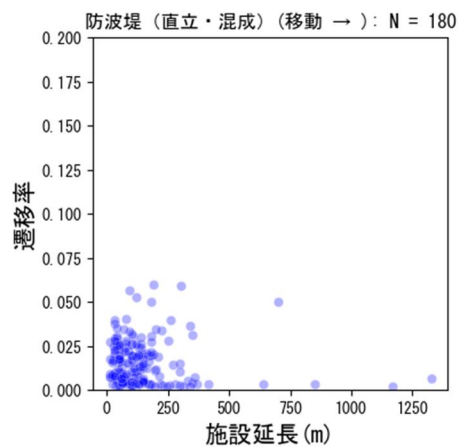


(e)消波工（損傷、亀裂）

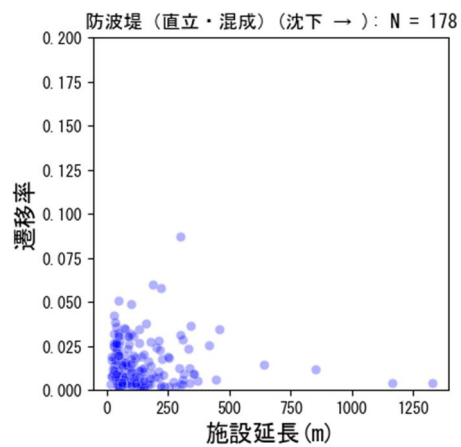


(f)消波工（移動、散乱、沈下）

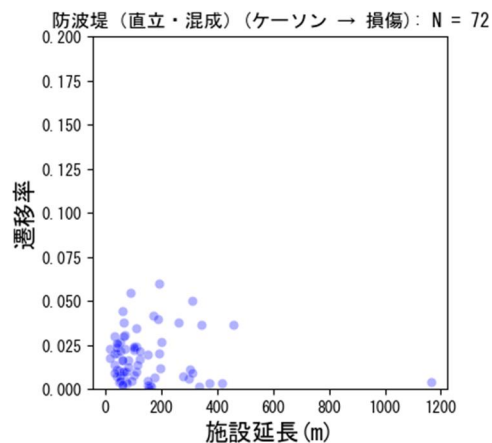
<施設延長（防波堤）>



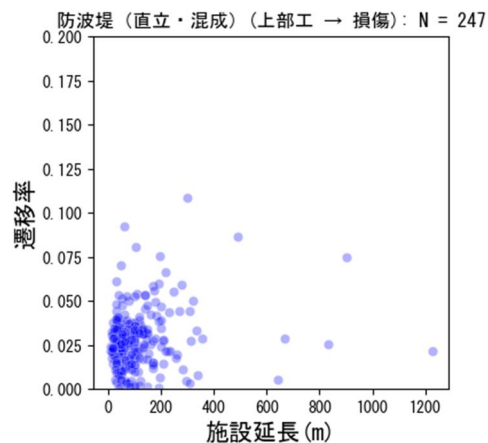
(a)移動



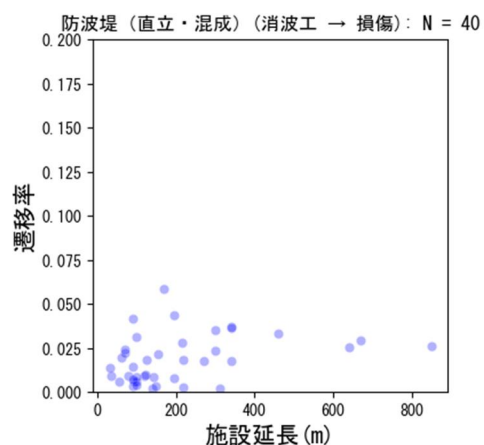
(b)沈下



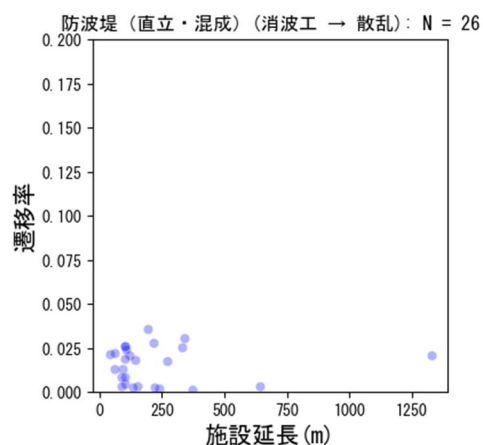
(c)ケーソン



(d)上部工



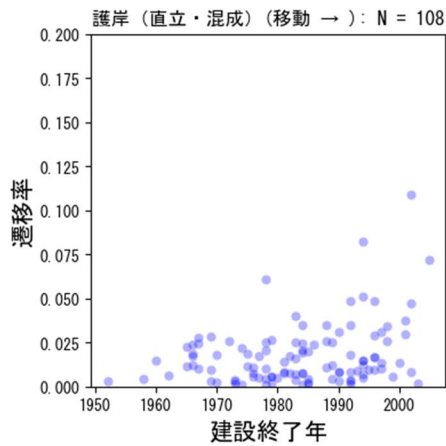
(e)消波工（損傷、亀裂）



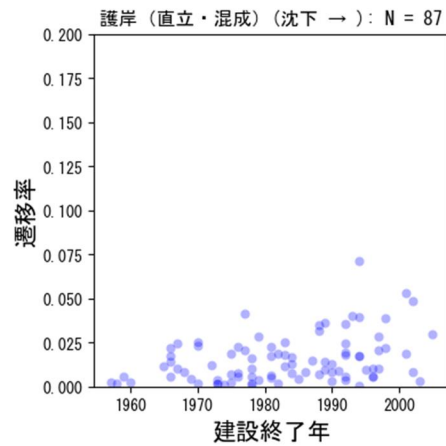
(f)消波工（移動、散乱、沈下）

図-4 防波堤の部材の遷移率と施設延長・建設終了年の関係

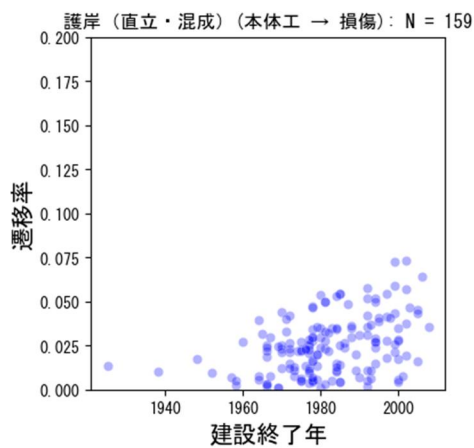
<建設終了年（護岸）>



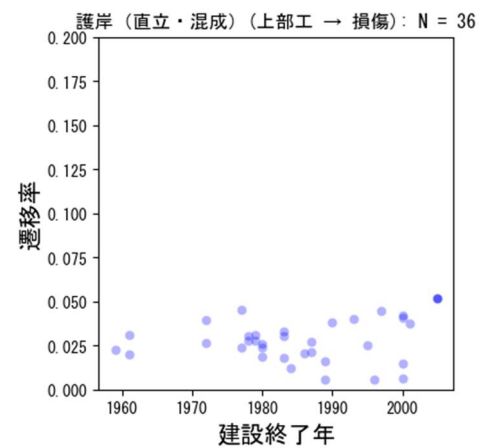
(a) 施設全体の移動



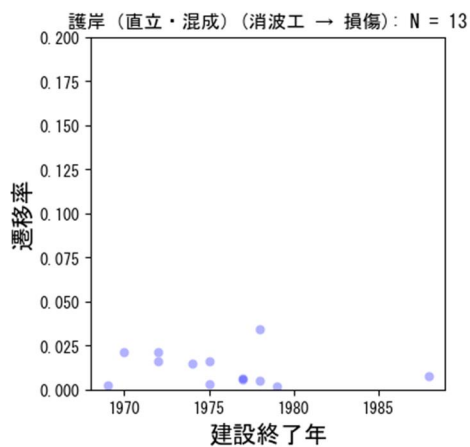
(b) 施設全体の沈下



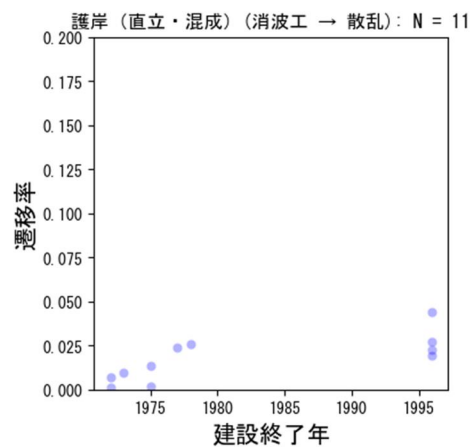
(c) 本体工（重力式）



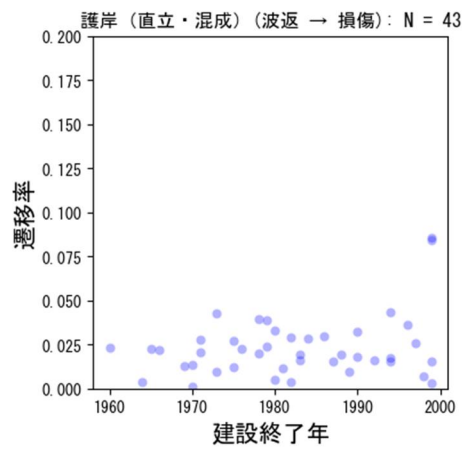
(d) 上部工



(e) 消波工（損傷、亀裂）

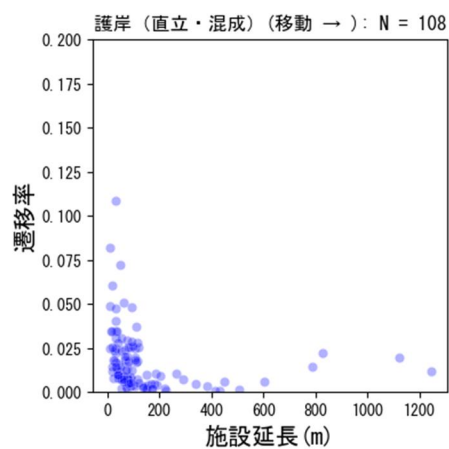


(f) 消波工（移動、散乱、沈下）

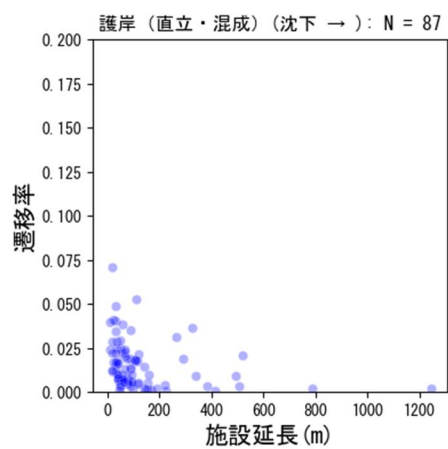


(g)波返工

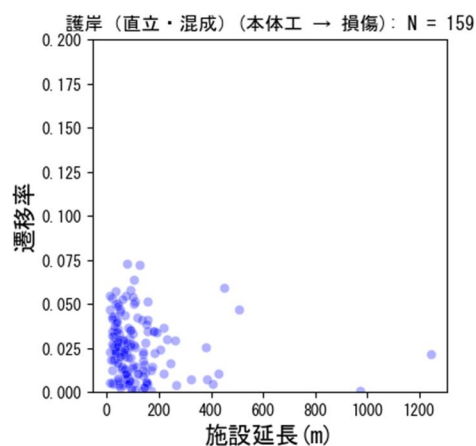
<施設延長（護岸）>



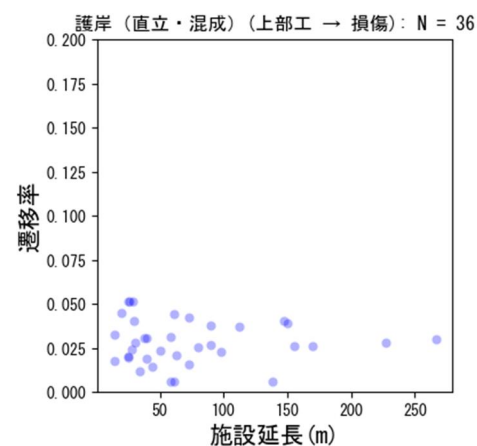
(a)施設全体の移動



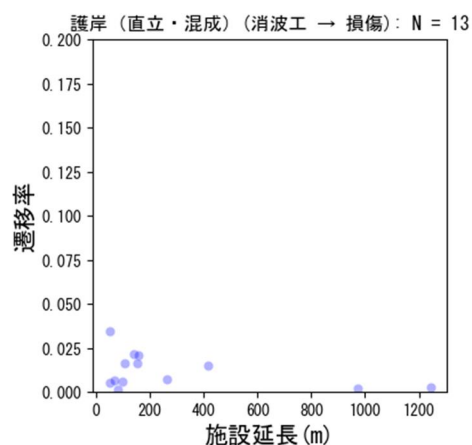
(b)施設全体の沈下



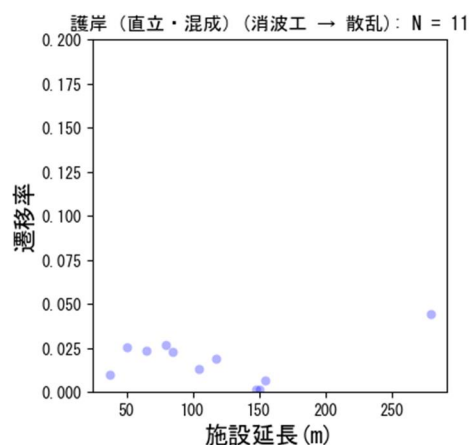
(c)本体工（重力式）



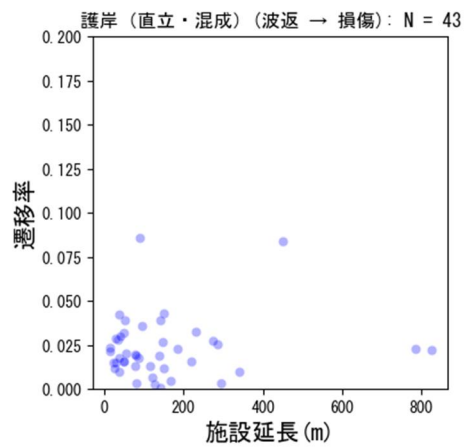
(d) 上部工



(e) 消波工（損傷、亀裂）



(f) 消波工（移動、散乱、沈下）



(g)波返工

図-5 護岸の部材の遷移率と施設延長・建設終了年の関係

付録 G 部材毎の残存年数の試算値（平均値・標準偏差）

※1：電気防食工は残存年数の試算の対象外とした。			部材毎の残存年数の試算値					
			平均（年）			標準偏差（年）		
施設・構造形式	部材	点検診断項目	c	b	a	c	b	a
杭式栈橋	上部工	コンクリートの劣化、損傷	28	84	146	10	30	52
	エプロン	沈下、陥没	9	43	89	5	27	55
		コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	31	94	164	26	80	139
	栈橋法線	凹凸、出入り	11	54	111	0	0	0
	鋼管杭	鋼材の腐食、亀裂、損傷	11	54	111	0	0	0
		電気防食工※1						
		被覆防食工	44	135	236	18	56	98
重力式岸壁	渡版	本体の損傷、塗装	30	91	158	14	43	76
	上部工	コンクリートの劣化、損傷	35	108	188	38	116	202
	エプロン	沈下、陥没	14	70	145	17	83	172
		コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	32	97	168	34	105	183
	岸壁法線	凹凸、出入り	21	106	219	19	96	198
矢板式岸壁	ケーソン	側壁の劣化、損傷	13	65	135	11	54	112
	上部工	コンクリートの劣化、損傷	22	68	119	31	94	164
	エプロン	沈下、陥没	9	46	95	8	39	81
		コンクリート又はアスファルトの劣化、損傷	22	66	115	23	71	123
	岸壁法線	凹凸、出入り	26	128	265	26	133	275
	鋼矢板等	鋼材の腐食、亀裂、損傷	17	83	171	14	71	147
		電気防食工※1						
防波堤		被覆防食工	35	107	187	33	99	172
	移動	-	14	68	140	12	58	120
	沈下	-	44	135	235	35	108	188
	ケーソン	コンクリートの劣化、損傷	13	66	136	14	71	148
	上部工	コンクリートの劣化、損傷	22	67	116	21	65	113
	消波工	損傷、亀裂	37	112	195	30	91	159
		移動、散乱、沈下	42	130	226	37	113	197
護岸	施設全体の移動	-	13	63	130	11	58	119
	施設全体の沈下	-	13	65	134	12	59	122
	本土工（重力式）	コンクリートの劣化、損傷	30	90	157	22	68	118
	上部工	コンクリートの劣化、損傷	25	77	134	14	43	75
	消波工	損傷、亀裂	47	144	251	39	120	210
		移動、散乱、沈下	29	88	153	12	37	64
	波返工	コンクリートの劣化、損傷	10	46	96	6	29	59