

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1307 June 2015

栈橋 RC 上部工の鉄筋腐食モニタリングに関する一検討

加藤 絵万
山本 幸治
川端雄一郎
岩波 光保

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

National Research and Development Agency,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. 序 論	4
2. 上部工部材のセンサ設置の優先度に関する検討	5
2.1 検討の方法	5
2.2 上部工部材の遷移率の比較	6
2.3 上部工部材のセンサ設置優先度と点検診断計画の策定に関する検討.....	8
3. センサを設置した上部工の点検診断計画と点検診断費用の検討	9
3.1 検討対象施設と点検診断計画の設定	9
3.2 センサ設置とデータ計測等費用の設定.....	11
3.3 各ケースにおける点検診断費用の比較	12
3.4 従来手法とセンサを利用する点検診断の比較	13
4. 結 論	14
謝 辞	14
参考文献	15

Application of Corrosion Monitoring Sensor to RC Superstructure of Open-Type Wharf

Ema KATO*

Koji YAMAMOTO**

Yuichiro KAWABATA ***

Mitsuyasu IWANAMI****

Synopsis

To ensure the structural performance of RC superstructure of open-type wharf, which is generally located in the severe corrosion environment, periodic inspection plays a crucial role in the series of maintenance works. Application of corrosion monitoring system and sensors, which can electrochemically detect initiation of corrosion and corrosion rate quantitatively and non-destructively, is one of the most effective methods to achieve the objective inspection and diagnosis. However, applying the corrosion monitoring system and sensors to all reinforced concrete (RC) structural members in a structure is very difficult in light of cost-effective maintenance implementation although, ideally, all members should be monitored to ensure the structural performance of the target structure. It would be promising to install the corrosion sensor into the RC member exposed to the most severe corrosion environment in all members in a target structure.

In this study, the authors analyzed relationships between deterioration rate which is evaluated with visually judged deterioration grades and location of RC members in the superstructures of 12 open-type wharves. Then, the priority of applying the corrosion monitoring was examined to determine the RC members that should be monitored for achievement of strategic maintenance. By comparing the deterioration rates of the RC beams and slabs at each location, efficient sensor installation in a superstructure of an open-type wharf was proposed. The cost analysis clarified that the monitoring using corrosion sensor is more beneficial than the conventional method when the inspection is carried out high-frequently.

Key Words: Open-type wharf, inspection, corrosion monitoring sensor, corrosion initiation, deterioration rate, location of RC member

* Head, Structural Mechanics Group
** Researcher, Structural Mechanics Group
*** Senior Researcher, Structural Mechanics Group
**** Visiting Senior Researcher, LCM Research Center for Coastal Infrastructures
(Professor, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology)
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:katoh-e@pari.go.jp

栈橋 RC 上部工の鉄筋腐食モニタリングに関する一検討

加藤 絵万*・山本 幸治**・川端 雄一郎***・岩波 光保****

要 旨

港湾施設を構成する RC 構造物の中でも、栈橋 RC 上部工は、塩害による劣化の進行が極めて速い。このため、鉄筋腐食の進行により、部材の保有性能が要求性能以下とならぬよう、適切に点検診断・評価・対策を実施することが必要とされている。しかし、上部工の定期点検診断では、上部工下面からボートで対象部材に接近しなければならない場合が多い。また、天候や潮汐による調査時間の制約や波浪などにより、点検診断の実施が困難な場合もある。このため、より効率的かつ確実に点検診断を実施するための手法の開発が望まれている。

一方で、現在、コンクリート中の鉄筋腐食の発生や進行をモニタリングするためのセンサが種々開発されている。しかし、現状では、陸上の RC 構造物と比較して、港湾 RC 構造物では、鉄筋腐食モニタリング技術はあまり活用されていない。これは、効果的かつ効率的な構造物の維持管理を実現するためには、どの部材をモニタリングすればよいのか、どの程度の数量のセンサを設置する必要があるのか等、明らかにされていないことがひとつの要因と考えられる。

本研究は、栈橋 RC 上部工の点検診断の高度化に向けた取り組みの一環として、鉄筋腐食センサを設置する部材の選定方法について検討した。具体的には、既存の 12 施設の栈橋上部工の点検結果から部材ごとの劣化の進行を評価し、どの部材が最も劣化進行速度が大きいのか確率的に評価することにより、部材のセンサ設置の優先度を評価した。さらに、目視調査を主体とした従来の定期点検診断を行う場合と、センサを利用する場合について、種々の点検診断計画を想定し、点検診断に要する費用の比較検討を行った。

キーワード： 栈橋，点検診断，鉄筋腐食センサ，腐食の発生，劣化進行速度，部材位置

* 構造研究領域構造研究チームリーダー

** 構造研究領域構造研究チーム研究官

*** 構造研究領域構造研究チーム主任研究官

**** ライフサイクルマネジメント支援センター 客員研究官（東京工業大学大学院理工学研究科教授）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:katoh-e@pari.go.jp

1. 序 論

平成26年3月に、港湾施設の実践的な点検診断の方法を示した港湾の施設の点検診断ガイドライン¹⁾が公表された。これは、全国一律の考え方により点検診断を実施するためのものであり、管理者による定期点検診断の実施を目標として、構造形式毎の点検診断項目と目視による劣化度の判定基準が示されている。しかし、従来の目視調査に頼る点検診断が、必ずしも合理的な維持管理に繋がるとは限らない。今後、ロボットやセンサ等の活用により、気象・海象に左右されず、また点検者がアクセスできない部位についても、客観的・定量的なデータが得られるような点検診断の実施が早期に実現されることが望まれる。

現在、コンクリート中の鉄筋腐食の発生や進行をモニタリングするためのセンサが種々開発され、実構造物への適用が検討されている^{例えは²⁾}。しかし、現状では、陸上のRC構造物と比較して、港湾RC構造物では、センサによる鉄筋腐食モニタリングはほとんど実施されていない。これは、効果的かつ効率的な構造物の維持管理を実現するためには、どの部材をモニタリングすればよいのか、どの程度の数量のセンサを設置する必要があるのか等、明らかにされていないことがひとつの要因と考えられる。実際に、コンクリート中の鉄筋腐食を精緻に評価するためには、ひとつの部材に対して数十mm～数m程度の間隔で密にセンサを設置する必要があるだろう²⁾。しかし、それは施工やコストの観点から現実的ではない。効果的かつ効率的な構造物の維持管理を実現するためには、対象構造物における部材の重要度や、部材ごとの劣化の進行程度を加味しながら、モニタリングすべき部材を選定し、センサの配置や数量を決定するための方法を示すことが有効と考える。

そこで、本研究では、栈橋RC上部工の点検診断の高度化に向けた取り組みの一環として、鉄筋腐食センサを設置する部材の選定について検討した。具体的には、既存の12施設の栈橋上部工の点検診断結果から部材ごとの劣化の進行を評価し、どの部材が最も劣化進行速度が大きいか確率的に評価し、部材のセンサ設置の優先度の選定と、センサを利用した場合の点検診断計画の策定について試案を示した。

また、鉄筋腐食センサを設置する上部工の概略設計を行い、目視調査を主体とした従来の定期点検診断を行う場合と、センサを利用する場合について、点検診断に要する費用の比較検討を行った。センサ設置の優先度についての検討を踏まえて、複数の部材にセンサを設置する

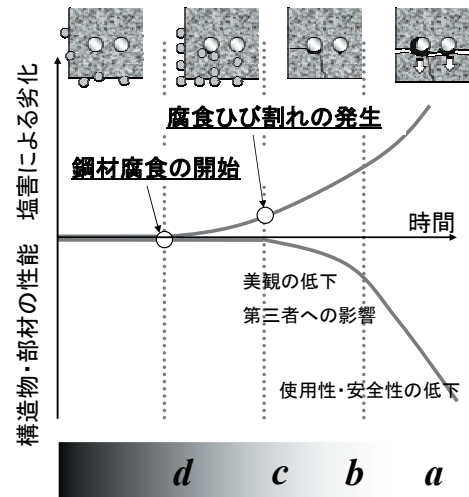


図-1.1 RC 部材の劣化進行過程と劣化度

ケースを想定し、新設あるいは既設の上部工1ブロックあたりのセンサ設置費用および30年間の点検診断費用を試算した。

なお、鉄筋腐食センサを用いたモニタリングは、コンクリート中における鉄筋の腐食発生、およびその後の腐食速度を推定するためのものである。腐食センサの適用範囲は、一般的に、腐食ひび割れが発生する時点とされている。これを、港湾の施設の点検診断ガイドライン¹⁾において、栈橋RC上部工の目視による劣化度判定に置き換えると、劣化度d～cの期間に相当する(図-1.1)。

港湾の施設の点検診断ガイドラインでは、定期的を実施する点検診断の頻度が目安として記載されているが、これは構造物・部材の保有性能が要求される性能を下回っていないことを確認するための最低限の要求頻度である。定期の点検診断の実施間隔が大きいほど、構造物・部材に発生する劣化・損傷を検出する機会が当然ながら少なくなり、性能低下のリスクが高まることは自明である。施設の性能を適切に維持するためには、その施設に要求される性能レベルに応じて、高い頻度で点検診断を行ったり、客観的なデータを得ることが可能な点検技術を取り入れるなどの対応が必要となるが、実際は、予算等の制約により困難な場合が多い。このような場合に対して、直営での実施が可能な鉄筋腐食センサを用いたモニタリングは、点検診断に係る費用の抑制に寄与することが期待される。ただし、鉄筋腐食センサは、栈橋の主要な劣化要因である塩害の進行の把握に特化したセンサであり、他の要因による劣化は検出することはできない。したがって、目視による一般定期点検診断の実施は、これまでのとおり不可欠であることは言うまでもない。

表-2.1 施設の概要

施設 No.	港名	総ブロック数	竣工 (西暦)	点検実施 時期 (西暦)	平均潮位		岸壁の向き (方角)	周辺の年平均気温 (°C)
					L.W.L. (m)	H.W.L. (m)		
A	O	11	1968-1969	2003	0	1.70	東	16.9
B	O	10	1968-1969	2003	0	1.70	東	16.9
C	O	12	1970-1971	2003	0	1.70	東	16.9
D	O	10	1970-1972	2003	0	1.70	東	16.9
E	O	6	1972-1973	2003	0	1.70	東	16.9
F	O	6	1976-1977	2003	0	1.70	東	16.9
G	M	10	1974	2005	0	0.30	北東	14.8
H	HN	9	1969	2002	0	0.65	南西	13.6
I	Y	11	1968	1999	0	2.00	北西	15.8
J	T	15	1969-1970	1999	0	1.50	南東	7.6
K	CN	13	1973	2003	0	2.60	東	15.8
L	CN	13	1973	2003	0	2.60	東	15.8

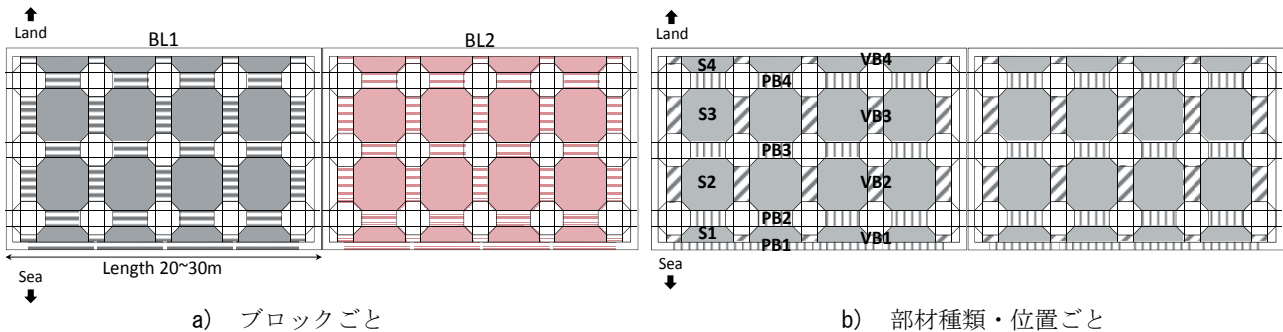


図-2.1 点検データの取りまとめ方法

2. 上部工部材のセンサ設置の優先度に関する検討

栈橋上部工の劣化は、部材の種類や位置ごとにその進行速度が大きく異なるが、劣化の進行速度が早い部材に優先的に鉄筋腐食センサを設置すれば、上部工全体における鉄筋腐食の発生の早期の発見が可能となると考えられる。そこで、既存施設における上部工の空間的な劣化度分布から、部材種類や部材位置ごと劣化進行速度を評価し、部材のセンサ設置の優先度選定と、センサを利用した場合の点検診断計画について考察した。

2.1 検討の方法

(1) 対象施設の概要

既存の12施設のRC上部工、計126ブロックの目視調査により得られた劣化度分布を分析することにより、劣化進行速度が大きい部材を同定した。なお、これらの施設は、基本的に、鉄筋の腐食により劣化が進行したものであり、その他の要因による劣化の影響は排除できるものと仮定した。

検討の対象とした施設の概要を表-2.1に示す。対象施設は国内の広範な地域に位置しており、利用状況はそれ

表-2.2 劣化度判定基準³⁾

	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れがみられる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し	幅数 mm 以上のひび割れ多数	(かぶりの状況で判断)
かぶりの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落が多し	剥離・剥落が著しい

ぞれ異なる。また、一部の施設については設計断面図が残されていたが、全ての施設でコンクリートの配合や使用材料、鉄筋種別等の記録は残されていなかった。

表-2.2に目視調査によるRC上部工部材の劣化度判定基準を示す。本研究では、すべての施設について、港湾構造物の維持・補修マニュアル³⁾にしたがって行われた目視調査結果を利用した。なお、現在は、港湾の施設の点検診断ガイドライン¹⁾に示される4段階の劣化度(劣化度a~d)が用いられている。

(2) 劣化進行の評価方法

本研究では、竣工から点検実施時期までの経過年数が異なる複数施設の調査結果を用いているため、施設間の点検データを直接的に比較することはできない。そこで、点検時(供用 t 年)の劣化度分布をマルコフ連鎖モデル

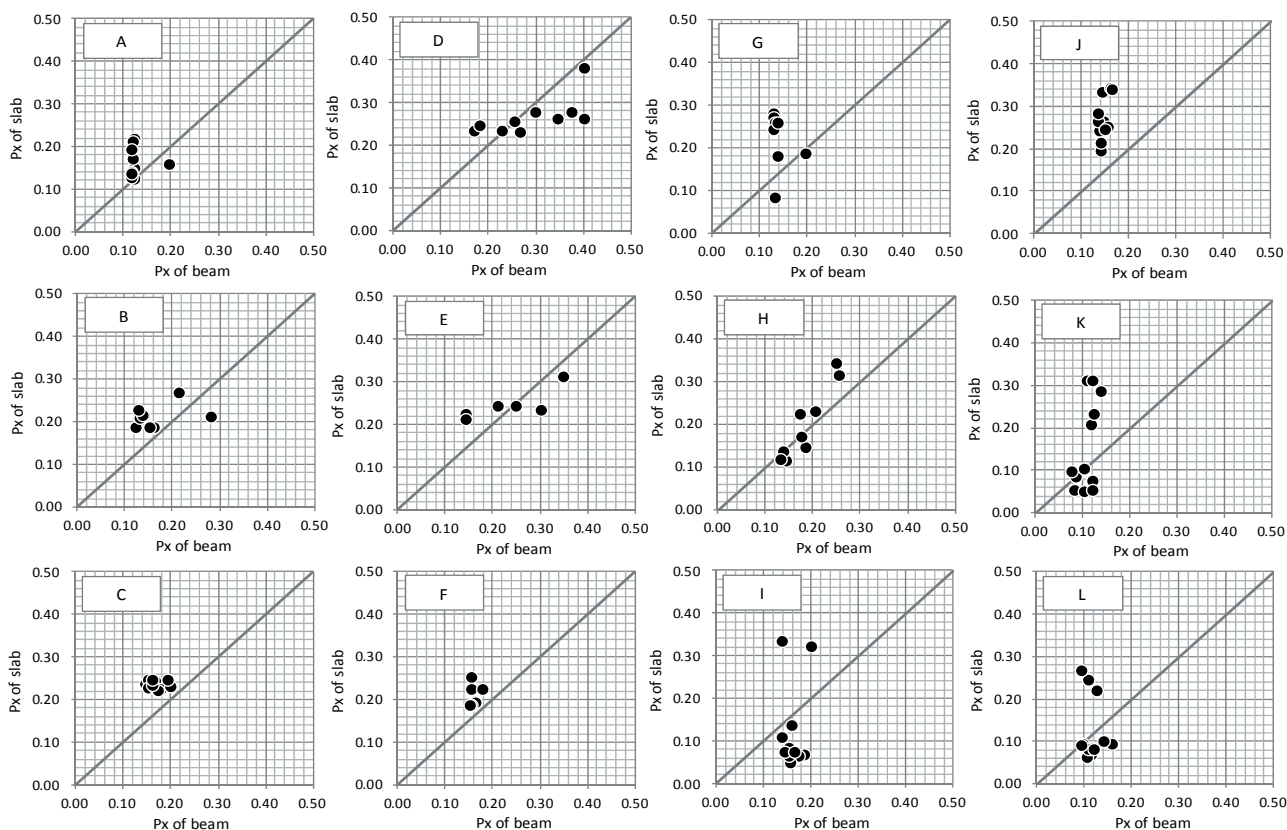


図-2.2 はりと床版の遷移率の関係

に当てはめて算出される遷移率 P_x を評価値として用い、すべての施設の遷移率を一律で比較することとした。本研究では、式(1)に示す劣化度を3分割したマルコフ連鎖モデルにより遷移率 P_x を算出した。つまり、実測された劣化度分布 ($0 \sim V$) と、分割した3項の和 ($0_1 + 0_2 + 0_3, \dots, IV_1 + IV_2 + IV_3, V_1 + V_2 + V_3$) が最も一致する遷移率 P_x である。

$$\begin{pmatrix} 0_1 \\ 0_2 \\ 0_3 \\ \vdots \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-P_x & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_x & 1-P_x & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_x & 1-P_x & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-P_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_x & 1-P_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_x & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(3) センサ設置の優先度の評価方法

通常、栈橋 RC 上部工の点検データは、図-2.1 a) のように、1 ブロックを単位として、はりおよび床版について取りまとめられる。本研究では、通常の方法に加えて、図-2.1 b) に示すように、法線平行方向のはり (PB)、法線直角方向のはり (VB)、および床版 (S) について点検データを取りまとめ、遷移率 P_x を算定した。つまり、

1 施設の点検データから得られる遷移率 P_x は、ブロックごとのはりおよび床版に加えて、ブロックごとおよび 1 施設内の法線平行はり、法線直角はり、床版のそれぞれについて海側からの位置 (図-2.1 b) 中の番号 1, 2, …) を考慮したものとなる。全施設について得られたこれらの遷移率を大局的に比較することにより、一般的な RC 上部工における部材種類や部材位置ごとの劣化の進行程度を加味したセンサ設置の優先度を評価した。

2.2 上部工部材の遷移率の比較

(1) ブロックごとのはりと床版の遷移率 P_x の比較

各施設におけるブロックごとのはりおよび床版の遷移率の関係を、図-2.2 に示す。これによれば、施設 C, F, H では、はりおよび床版の遷移率はほぼ同等であった。一方、施設 A, B, G, J, K では床版の遷移率が大きく、施設 D, E では、横軸方向に広がった分布を示しており、床版よりもはりの遷移率が大きくばらつく結果となった。これより、部材ごとの劣化進行程度を加味しながらセンサの設置の優先度を設定するためには、はりおよび床版という部材種類の違いのみからの評価は困難であるといえる。これは、RC 上部工部材の劣化進行速度が、部材

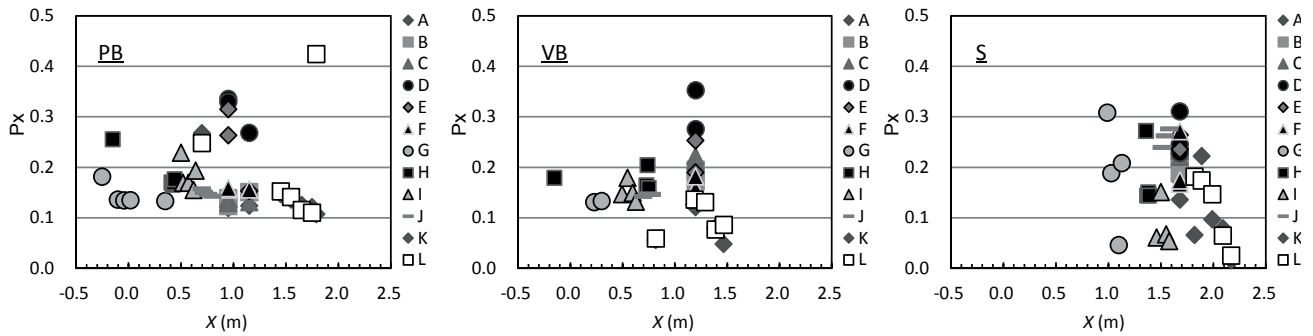


図-2.3 PB, VB, S の遷移率 P_x と $X(m)$ の関係

の種類のみではなく、はりおよび床版のそれぞれの位置に影響を受けるためと考えられる。

なお、得られた遷移率は、実際には、それぞれの対象施設の使用材料、環境条件、利用状況等の影響を受けている。しかし、本研究の範囲では、いずれの施設においても、遷移率の大小と表-2.1 に示した施設の状況（供用年数、岸壁の向きや年平均気温）に明確な関係性は認められなかった。したがって、本研究では、施設の諸元や利用状況等の詳細を加味せず、あくまで大局的に遷移率を比較することにより、上部工部材におけるセンサ設置の優先度について検討することとした。

(2) ブロックごとの PB, VB, S の遷移率 P_x の比較

港湾の施設の技術上の基準・同解説におけるコンクリートの塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食の検討では、上部工下端のコンクリート表面と海水面（H.W.L.）との距離を考慮して、式(2)のように表面塩化物イオン濃度 C_0 を評価する方法が示されている⁴⁾。これは、部材下端が海水面に近いほど塩化物イオンが浸透しやすくなる、つまり鉄筋の腐食が早期に開始される可能性が高くなるという実測データ⁵⁾を基に提案されたものである。

$$C_0 = -6.0X + 15.1 \quad (2)$$

ここに、 X : H.W.L.から部材下端までの距離(m)。ただし、適用範囲は、 $0 \leq X \leq 2.0$ m 程度である。

通常、床版よりもはりの方が部材下端から海面までの距離が小さいため、式(2)を用いた鉄筋腐食の照査においては、はりの方が過酷な塩害環境に曝されるという計算結果が得られる。

図-2.3 に法線平行はり (PB)、法線直角はり (VB)、床版 (S) の 1 ブロックごとの遷移率と、H.W.L.からそれぞれの部材下端までの距離の関係を示す。凡例の種別は、施設 A~L を示している。これによれば、部材種類ごとの遷移率 H.W.L.から部材下端までの距離に関係性は認められない。つまり、コンクリート中への塩化物イオンの浸透を評価するための表面塩化物イオン量 C_0 と異なる

り、鉄筋腐食の発生・顕在化を含めた部材の劣化進行速度については、H.W.L.から部材下端までの距離の影響は小さいといえる。

以上のことから、次項では、1 施設内の法線平行はり、法線直角はり、床版と、法線から陸側に向かってのそれぞれの位置が、遷移率に与える影響に着目して検討を行うこととした。

(3) 施設内の PB, VB, S の比較

表-2.3 に各施設における部材種類(法線平行はり (PB)、法線直角はり (VB)、床版 (S) および部材位置ごとの遷移率を示す。部材種類の後ろに記載した数字は、法線から陸側に向かっての部材位置を示す。例えば、PB4 は、海側から陸側に向かって 4 列目に位置する法線平行はりを示している。また、同表では、1 施設内での部材種類ごとの最大遷移率を太字で、全部材を通じた 1 施設内の最大遷移率を下線で示した。

これによれば、部材種類ごとおよび 1 施設内で最大遷移率を示す部材位置は、施設によって様々である。しかし、半数以上の施設において、法線平行はりでは PB1 および PB2 で、法線直角はりでは VB2 および VB3 で、床版では S2 で、1 施設内での部材種類ごとの最大遷移率を示した。また、1 施設内の最大遷移率は、4 施設が法線平行はりで、1 施設が法線直角はりで、7 施設が床版であった。さらに、全施設を通じて、法線平行はりでは PB3、PB4 において、床版では S4 において、他の位置における部材よりも遷移率が小さくなる傾向がみられた。

表-2.4 に部材種類ごと、あるいは 1 施設内で最大の遷移率を示した部材の割合を示す。これは、表-2.3 で太字あるいは下線で示した遷移率について、その度数と全遷移率データ数に対する割合を、部材位置のみに着目して整理したものである。これによれば、1 施設内での部材種類ごとの最大遷移率については、部材種類ごとに総データ数 C_{total} は異なるものの、法線平行はりでは PB1、法線直角はりでは VB3、床版では S2 において、最大遷移率を示す割合 C_i/C_{total} が概ね高い。また、施設内の最大

表-2.3 各施設における部材種類・部材位置ごとの遷移率 P_x

No.	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6	VB1	VB2	VB3	VB4	VB5
A	データなし	0.120	0.124	0.120	—	—	データなし	0.126	0.121	—	—
B	データなし	0.139	0.151	0.123	—	—	データなし	0.172	0.195	—	—
C	データなし	0.137	0.131	0.129	—	—	データなし	0.212	0.222	—	—
D	データなし	0.335	0.268	0.329	—	—	データなし	0.352	0.275	—	—
E	データなし	0.315	0.153	0.263	—	—	データなし	0.190	0.253	—	—
F	データなし	0.156	0.156	0.158	—	—	データなし	0.158	0.182	—	—
G	0.181	0.136	0.134	0.135	0.133	—	0.131	0.133	データなし	—	—
H	0.255	0.170	0.165	0.169	0.176	—	0.179	0.164	0.204	0.159	—
I	0.229	0.169	0.169	0.155	0.193	—	0.147	0.179	0.149	0.132	—
J	0.157	0.150	0.146	0.143	—	—	0.142	0.147	0.146	—	—
K	0.267	0.147	0.136	0.125	0.121	0.107	0.056	0.127	0.131	0.080	0.048
L	0.248	0.152	0.141	0.115	0.110	0.424	0.059	0.136	0.131	0.077	0.086

No.	S1	S2	S3	S4	S5
A	データなし	0.177	0.174	0.136	—
B	データなし	0.222	0.217	0.188	—
C	データなし	0.261	0.233	0.221	—
D	データなし	0.310	0.245	0.228	—
E	データなし	0.264	0.236	0.235	—
F	データなし	0.167	0.174	0.271	—
G	0.308	0.188	0.046	0.208	—
H	0.272	0.144	0.150	0.144	—
I	0.061	0.151	0.067	0.054	—
J	0.239	0.262	0.276	—	—
K	0.066	0.222	0.097	0.079	0.016
L	0.181	0.174	0.146	0.065	0.025

—: 部材が存在しない箇所, 太字: 1施設内での部材種類ごとの最大 P_x , 下線: 1施設内最大 P_x

表-2.4 最大遷移率を示した部材の割合

	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6	VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	S1	S2	S3	S4	S5
C_{total}	6	12	12	12	5	2	6	12	11	4	2	6	12	12	11	2
C_l	5	3	2	1	0	1	0	6	6	0	0	3	7	1	1	0
C_f	2	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	3	1	1	0
C_l/C_{total}	83%	25%	17%	8%	0%	50%	0%	50%	55%	0%	0%	50%	58%	8%	9%	0%
C_f/C_{total}	33%	8%	0%	0%	0%	50%	0%	8%	0%	0%	0%	33%	25%	8%	9%	0%

C_{total} : 遷移率データ数, C_l : 1施設内での部材種類ごとの最大遷移率データ数, C_f : 1施設内の最大遷移率データ数

遷移率を示す割合 C_f/C_{total} は PB6, すなわち, 最も陸側の法線平行はりの遷移率が大きくなる割合が大きかった。これは背後の護岸からの返し波の影響によるものと考えられるが, 総データ数 C_{total} が少ないため, 今後, データの蓄積により精査しなければならない。これを除けば, PB1, S1, S2 において, 施設内の最大遷移率を示す割合 C_f/C_{total} が大きかった。PB1 (法線平行はり 1 列目) については, 最も海側に位置する部材であるため沖合からの波浪を直接的に受けることや, 風や日射の影響を直接的に受けることが要因であることが考えられる。S1 および S2 については, 陸側に位置する床版 (S3, S4, S5) と比較して, 最も海側の法線平行はり (PB1) の返し波や, 波浪により生じた海水飛沫の影響を受け, 早期に劣化が進行しやすいことが要因と推測された。

2.3 上部工部材のセンサ設置優先度と点検診断計画

の策定に関する検討

本研究では, 既存の 12 施設の栈橋 RC 上部工の点検結果から部材ごとの劣化進行を評価し, どの位置にある部材が最も劣化進行速度が大きいかをマルコフ連鎖モデルにおける遷移率により評価した。本研究の範囲では, 図-2.4 で示した箇所, すなわち海側から 1 列目の法線平行はりとは海側から 1 列目および 2 列目の床版の劣化の進行が早い可能性が高いことが分かった。劣化の空間分布は, 上部工の設置環境や構造諸元に依存することに留意しなければならないが, 波浪の侵入経路等を考慮すれば, 海側に位置する部材の劣化進行速度が大きいの, 概ね妥当な結果と判断される。これらの部材にセンサを設置して, 部材中の鉄筋の腐食傾向をモニタリングすることにより, 上部工全体の劣化の発生をいち早く捉えることが可能となると考えられる。ただし, この結果は, 本研究で対象とした既存の 12 施設の劣化の空間分布から大局

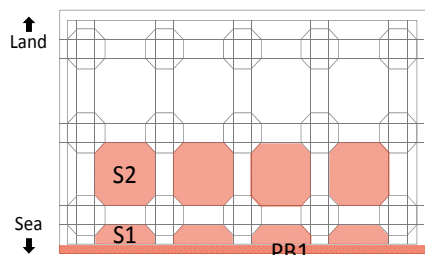


図-2.4 劣化の進行が早い部材 (案)

表-2.5 定期点検診断の実施時期¹⁾

点検診断の種類	通常点検診断施設 (重点点検診断施設以外の技術基準対象施設)	重点点検診断施設 (人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を及ぼすおそれがある技術基準対象施設)
一般定期点検診断	・5年以内ごとに少なくとも1回	・3年以内ごとに少なくとも1回
詳細定期点検診断	・供用期間中の適切な時期に少なくとも1回 ・供用期間延長時	・10～15年以内ごとに少なくとも1回 ・主要な航路に面する特定技術基準対象施設は、10年以内ごとに少なくとも1回

的に推定されたものである。また、背後護岸の波返しの影響が大きい施設も存在する可能性が示されたことから、今後、更なるデータの蓄積と検証が必要である。

ここで、平成26年3月に改正された維持告示により、定期的な点検診断は5年（施設の損壊に伴い、人命、財産または社会経済活動に重大な影響を及ぼす恐れのあるもの（重点点検施設と称する）については3年）以内毎に行うことが規定されており、主に目視調査により実施する一般定期点検診断については、これに準じなければならない。また、詳細定期点検診断（水中部の目視調査や機器等を用いた調査）については、港湾の施設の点検診断ガイドライン¹⁾により、通常の施設については供用期間中の適切な時期に1回、重点点検施設については10～15年以内に1回実施することが目安とされている（表-2.5）。上部工のなかでも劣化の進行が比較的早い部材に鉄筋腐食の発生を検知するセンサを設置し常時モニタリングすることにより、実際の劣化進行状況に見合ったより効果的な点検診断計画の検討が可能になる。

例えば、上部工の一般定期点検診断では、全部材について目視により劣化度を判定するが、センサが鉄筋腐食の発生を検知する以前は、部材表面に表れる変状は腐食に起因するものではない。このため、変状が発見された場合は、使用材料や施工方法、作用外力のいずれに起因するものであるか要因を特定するとともに、変状が塩害の進行に及ぼす影響を評価して以降の定期点検診断の間隔を定める。例えば、塩害の進行に及ぼす影響が大きい場合、変状が発見された部材の目視調査の頻度を高くす

るなどの措置を取ることが有効となる。

また、上部工の詳細定期点検診断においてコア採取によるコンクリート中の塩化物イオン濃度測定を実施する場合、センサを設置した部材については鉄筋腐食の発生を検知する以前に行う必要があるが、センサを設置していない部材をコア採取の対象とする場合は、鉄筋腐食の発生がセンサで検知された時点で調査を行えば、上部工全体としての塩害の進行を安全側で把握することが可能となる。

3. センサを設置した上部工の点検診断計画と点検診断費用の検討

目視調査を主体とした従来の定期点検診断を行う場合と、センサを利用する場合について、上部工の点検診断に要する費用の比較検討を行った。2.で検討した部材位置毎のセンサ設置の優先度を踏まえて、新設あるいは既設の上部工に鉄筋腐食センサを設置した場合について、30年間の点検診断費用を試算した。

3.1 検討対象施設と点検診断計画の設定

(1) 検討対象施設

新設1ケースおよび既設2ケースの上部工1ブロックを検討の対象とする。各ケースの概要を以下に示す。

a) ケース1N

ケース1Nは、新設時から鉄筋腐食センサを設置する場合を想定した。図-3.1に、ケース1の栈橋の標準断面図を示す。1ブロックあたりの上部工の面積（平面）は、20m×20mとする。

b) ケース1E

ケース1Eは、ケース1Nと同様の構造および設置環境とするが、既設（供用中）の状態を想定した。

c) ケース2E

ケース2Eは既設（供用中）の状態を想定した。上部工の構造はケース1Nと同様であるが、設置環境として上部工下端部（はり下面）の高さが+2.0mの場合を想定した。つまり、ケース2Eでは、H.W.L.時に上部工下端部が浸水する。ケース2Eの栈橋の標準断面図を図-3.2に示す。

(2) 点検診断計画の策定期間

普通ポルトランドセメント（OPC）と高炉セメントB種（BB）を用いたコンクリートについて、水セメント比を50%、鉄筋のかぶりを70mmとした場合の設計上の鉄筋腐食の開始時期（文献4に基づき算定）を表-3.1に示す。本研究で設定したケース1Nおよび1Eの場合、はり

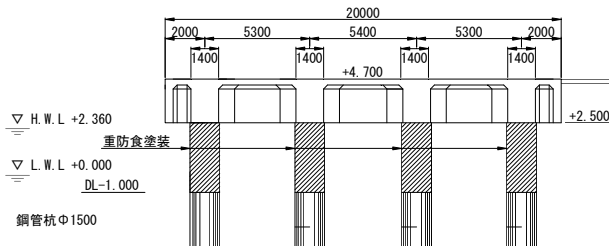


図-3.1 ケース 1N, 1E 標準断面図

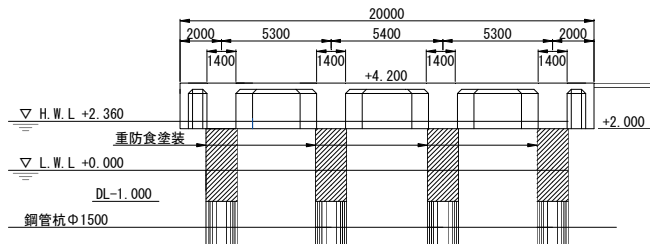


図-3.2 ケース 2E 標準断面図

下端から H.W.L. までの距離は 0.3 m 程度、床版下端から H.W.L. までの距離は 2.0 m 弱となる。また、ケース 2E の場合、はり下端から H.W.L. までの距離は 0.0 m 以下（浸水する）、床版下端から H.W.L. までの距離は 1.5 m 程度である。つまり、設定したすべてのケースにおいて、設計上、建設後 30 年までに鉄筋の腐食が開始すると算定される。本研究で使用を想定したセンサ（詳細は 3.2 (1) のとおり）は、鉄筋の電気化学的特性値とコンクリート抵抗を計測するためのものであるが、鉄筋腐食の進行により鉄筋周囲のコンクリートに腐食ひび割れが発生した後は、その測定原理を考慮すれば、データの信頼性はきわめて低くなる。このため、すべてのケースについて建設直後から施設の供用が開始されたとして、供用から 30 年間の点検診断計画を策定し、点検診断に係る費用を算出することとした。既設を想定したケース 1E およびケース 2E のセンサを利用した点検診断計画および費用の算定については、供用開始からまもなくコンクリート中にセンサを設置したとして、同様に 30 年間の点検診断計画を策定した。

(3) 点検診断計画の策定

各ケースの点検診断計画の考え方を a)~c) に示す。いずれのケースについても、表-2.5 に示した港湾の施設の点検診断ガイドライン¹⁾の考え方を参考に、点検診断の実施時期および調査項目を設定した。

a) ケース 1N

従来の定期点検診断を行う場合を 1N-I、新設時から鉄筋腐食センサを設置しモニタリングを実施する場合を 1N-S とする。

1N-I では、上部工下面部の目視調査と、コアを採取しコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定する調査（コアによる調査とする）を実施する計画とした。目視調査およびコアによる調査で想定される作業フローを図-3.3 に、作業に係る費用の内訳を表-3.2 に示す。なお、調査に係る費用は、公表されている積算基準、物価資料、労務単価等から算出した直接業務費であり、諸経費および消費税は含んでいない。

表-3.1 設計上の鉄筋腐食開始時期

セメント種類	部材下端から海面までの距離(m)	設計上の鉄筋腐食開始時期(年)
OPC	1.5	20
	1.0	13
	0.5	10
	0.0	8
BB	1.5	30
	1.0	19
	0.5	15
	0.0	13

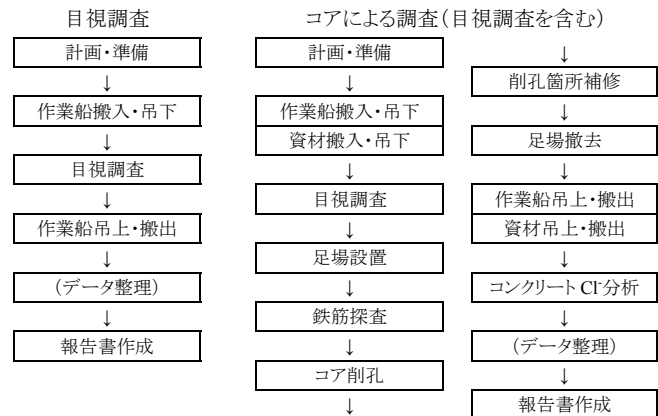


図-3.3 調査の作業フロー

表-3.2 調査に係る費用（1回あたり）

(単位: 円)

項目	ケース 1N, 1E	ケース 2E	備考(数量)
計画・準備	168,569	168,569	
作業船搬入・吊下	31,376	31,376	
目視調査	16,000	119,600	上部工全下面
作業船吊上・搬出	31,376	31,376	
報告書作成	156,247	156,247	
足場設置/撤去	129,312	129,312	
鉄筋探査	48,275	72,625	5箇所
コア削孔	107,460	192,865	5箇所
削孔箇所補修	130,420	280,745	5箇所
コンクリートCI分析	625,000	625,000	コア 5本

また、1N-I の調査の頻度は、a) 目視調査を 5 年ごとに 1 回、コアによる調査を 15 年目に 1 回行う場合（1N-I-a とする）、b) 目視調査を 3 年ごとに 1 回、コアによる調査を 12、21、30 年目に行う場合（1N-I-b とする）、の 2

パターンとした。

センサを利用する 1N-S について、本研究では 1 ブロックあたり計 5 部材にセンサを設置する計画とした（詳細は 3.2）。また、想定したセンサは、鉄筋腐食の発生・進行を検知するためのものであり、それ以外の変状の発生・進行の検知は不可能である。このため、センサを設置した場合についても、定期的に上部工下面部の目視調査を実施する必要がある。そこで、センサデータの収集を 1 年ごとに 1 回行うほか、上部工下面部のすべての部材についての目視調査を 10 年ごとに 1 回行う計画とした。目視調査の作業フローおよび調査に係る費用は、図-3.3 および表-3.2 のとおりであり、センサの設置費用およびモニタリング費用については、3.2 で詳述する。

b) ケース 1E

従来の定期点検診断を行う場合は、1N-I と同様の内容、費用となるため省略する。

センサを利用するケース 1E-S については、1N-S と同様の考え方に基づいて、センサによる計測およびデータ収集を 1 年ごとに 1 回行うほか、上部工下面部のすべての部材についての目視調査を 10 年ごとに 1 回行う計画とした。ただし、1E-S と 1N-S ではセンサの設置費用が異なるものとなる。これについては、3.2 で詳述する。

c) ケース 2E

従来の定期点検診断を行う場合を 2E-I、センサを設置しモニタリングを実施する場合を 2E-S とする。

ケース 2E では、栈橋上部工下面と海水面とのクリアランスが十分に確保されない場合を想定しており、船上から目視調査を行うことはできない。また、コアによる調査についても、コアの採取等の作業は干潮時あるいは水中にて行うこととなる。このため、目視調査およびコアの採取の作業は、すべて潜水士により行われるものとして、調査に係る費用を設定した（表-3.2）。

ここで、港湾の施設の点検診断ガイドラインでは、潜水士による水中部の目視調査は詳細定期点検診断での調査項目として位置づけられている¹⁾。このため、2E-I では、表-2.5 の詳細点検診断の実施時期を参考として、潜水士による目視調査の実施頻度を設定した。

2E-I の点検診断計画は、a) 目視調査とコアによる調査を 15 年ごとに 1 回行う場合（2E-I-a とする）、b) 目視調査とコアによる調査を 10 年ごとに 1 回行う場合（2E-I-b とする）、の 2 パターンとした。

センサを利用するケース 2E-S については、1N-S と同様の考え方に基づいて、センサによる計測およびデータ収集を 1 年ごとに 1 回行うほか、a) 上部工下面部のすべての部材についての目視調査を 15 年ごとに 1 回（2E-S-a

表-3.3 点検診断計画の概要（調査項目と実施年）

検討ケース	目視調査	コアによる調査	センサデータ収集
1N-I-a	5, 10, …, 25, 30	15	—
1N-I-b	3, 6, …, 27, 30	12, 21, 30	—
1N-S	10, 20, 30	—	1, 2, …, 29, 30
1E-S	10, 20, 30	—	1, 2, …, 29, 30
2E-I-a	15, 30	15, 30	—
2E-I-b	10, 20, 30	10, 20, 30	—
2E-S-a	15, 30	—	1, 2, …, 29, 30
2E-S-b	10, 20, 30	—	1, 2, …, 29, 30

とする)、および b) 10 年ごとに 1 回（2E-S-b とする）行う計画とした。センサの設置方法については、3.2 で詳述する。

以上のように設定した計 8 ケースの点検診断計画について、調査項目と実施年次を表-3.3 に示す。なお、本研究で設定した点検診断計画は、仮想の上部工の点検診断費用を算定するためのものであり、実際の上部工に対して、ここで設定した点検診断の調査項目や実施の頻度を推奨するものではない。不適切な調査項目が選定されたり、定期の点検診断の実施間隔が大きくなるほど、供用期間中の施設の性能低下のリスクは高まる。

3.2 センサ設置とデータ計測等費用の設定

3.1 でセンサの利用を想定したケース（1N-S、1E-S、2E-S）について、センサ設置および点検診断に係る費用の設定は以下のとおりとした。

(1) センサの設置数量および設置位置

使用するセンサは、埋設型ミニセンサー（寸法 φ13×7 mm）⁶⁾とした。このセンサは、実際の栈橋 RC 上部工で約 15 年間実施されている鉄筋腐食モニタリング実験に適用されている⁷⁾。ここでは、劣化進行速度が他と比べて大きい傾向を示す部材にのみセンサを設置する場合を想定し、1 ブロックあたり法線平行はり 3 部材、床版 2 部材にセンサを設置した（図-3.4）。部材中のセンサの取付位置は、図-3.5 に示すとおり、はりでは下面端部帯鉄筋、床版は下鉄筋を想定した。

(2) センサ取付けのための作業フローと作業範囲

各ケースの上部工にセンサを設置する際に考えられる作業フローを図-3.6 に示す。

新設を想定したケース 1N-S 1 の場合、配筋が終了した時点で施工足場を利用してセンサを鉄筋に取付けることができる。また、後述するセンサケーブルの配線・配管工についても、上部工コンクリートの打設前に配置することが可能である。

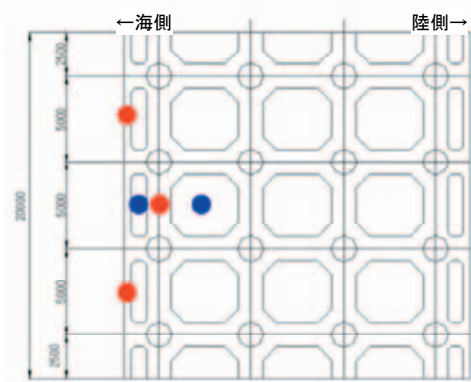


図-3.4 1ブロックのセンサ取付け位置

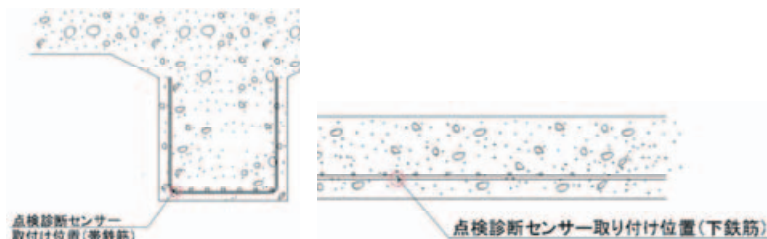


図-3.5 部材中のセンサ取付け位置

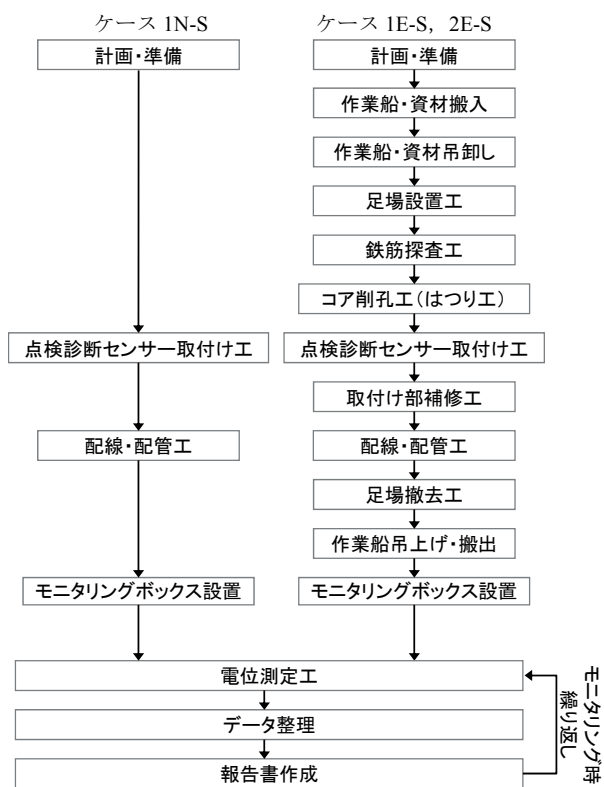


図-3.6 センサ取付けのための作業フロー

既設を想定したケース 1E-S および 2E-S については、作業船を使用して足場を設置しセンサを取付ける。このとき、コンクリートを削孔して鉄筋を露出し、センサを設置した後、削孔部を無収縮モルタル等の補修材にて断面復旧する必要がある。また、センサ設置のための足場の施工に際しては、一部、潜水士による作業をとまなう。さらに、ケース 2E-S については、はり下端が水中に位置するため、センサ取付けについても潜水士が実施することになる。また、ケース 1E-S およびケース 2E-S については、図-3.7 のように足場（単管パイプ+エキスパンドメタル）の設置範囲を設定した。

ケース 1N-S, 1E-S, 2E-S のすべてについて、センサケーブルを栈橋上部工の上部に集積し、計測時に、都度、

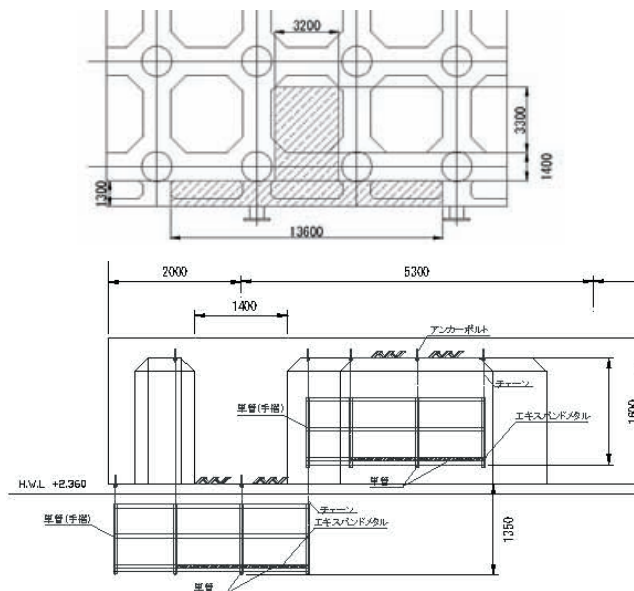


図-3.7 足場設置範囲

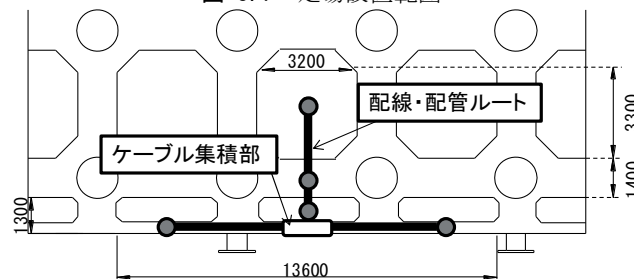


図-3.8 配線・配管ルート

ケーブルをデータロガーに接続することにより、データを収集することを想定した⁸⁾。センサ設置時にケーブル配線・配管を行う必要があるが、全てのケースについてセンサ設置位置を海側部材としたことから、ケーブルを海側の陸上に設置することとして、配線・配管のルートを決めた（図-3.8）。

(3) センサ設置およびデータ計測等費用

以上の想定のもと、上部工へのセンサ設置に係る費用を表-3.4 のように設定した。また、あわせて、表-3.4 に、センサによる計測期間中の計測・データ収集およびデータ整理に係る費用を示す。いずれのケースについても、計測およびデータ収集は陸上からの実施を想定しているため、データ計測等の費用は等しくなる。

3.3 各ケースにおける点検診断費用の比較

目視調査を主体とした従来の定期点検診断を行う場合と、鉄筋腐食を検知するセンサを利用した場合について、上部工の点検診断に要する費用を比較した。

ケース 1N および ケース 1E の点検診断費用の試算結果を図-3.9 に示す。センサを新設時あるいは既設時から利用する 1N-S、1E-S は、1N-I-a と比較すると、30 年間における総点検診断費用は大きくなった。これは、1N-I-a では目視調査およびコアによる調査の実施回数が少ないためである。しかし、1N-S、1E-S と、点検診断の実施頻度が高い 1N-I-b を比較すると、12 年目で総点検診断費用がほぼ同等となり、最終的にはセンサを利用するケースの方が総点検診断費用は抑制される結果となった。これより、施設の性能を適切に維持するために高頻度な点検診断の実施を計画する場合、センサの利用が有効となるといえる。

ケース 2E の点検診断費用の試算結果を図-3.10 に示す。ケース 2E では、点検診断の実施頻度を低く設定したため、センサを利用する 2E-S-a、2E-S-b と比較して、2E-I-a の総点検診断費用が最も小さくなった。ここで、ケース 1N と ケース 2E では、上部工の設置環境が異なるが、新設時にセンサを設置するための工事費用については両者で大きな差は生じないことが予測される。このため、新設時からのセンサの設置を想定した 1N-S の点検診断費用の推移についても、図-3.10 にあわせて示す。従来の点検診断の実施頻度を 10 年ごとに 1 回とした 2E-I-b では、点検診断の実施時期ごとに総点検診断費用が 1N-S とほぼ同等となった。

本研究で設定した点検診断計画では、センサを利用する場合の総点検診断費用が、1 年ごとに 1 回行うセンサによる計測およびデータ収集の影響により、従来の点検診断と比較して大きくなった。しかし、上部工の設置環境によらず、新設時からセンサを設置する方がコスト面で有利となること、また、従来の点検診断の実施頻度が高い場合はセンサの利用がコスト面で有利となる場合があることが分かった。

なお、参考までに、本研究で設定したセンサを利用するケース 1N-S、1E-S、2E-S-a、2E-S-b について、センサ設置に係る費用が 30 年間の総点検診断費用に占める割合を表-3.5 に示す。

3.4 従来手法とセンサを利用する点検診断の比較

栈橋上部工の点検診断計画の策定にあたっては、上部工に必要とされる性能を適切に維持することを目的に、実行可能な点検診断の方法、項目、頻度を設定すること

表-3.4 センサ設置等に係る費用 (1BL あたり)

		ケース 1N	ケース 1E	ケース 2E
センサ 設置 工事 (1 回)	計画・準備	168,569	168,569	168,569
	作業船搬入・吊下	-	31,376	31,376
	足場設置	-	64,656	64,656
	鉄筋探査	-	48,275	72,625
	コア削孔	-	107,460	192,865
	センサ取付け	64,940	64,940	87,665
	取付け部補修	-	130,420	280,745
	配線・配管	95,225	186,770	433,590
	足場撤去	-	64,656	64,656
	作業船吊上・搬出	-	31,376	31,376
モニタリングボックス設置	105,650	105,650	105,650	
データ収 集(1 回 あたり)	計測・データ回収		18,455	
	データ整理		7,700	
	報告書作成		92,800	

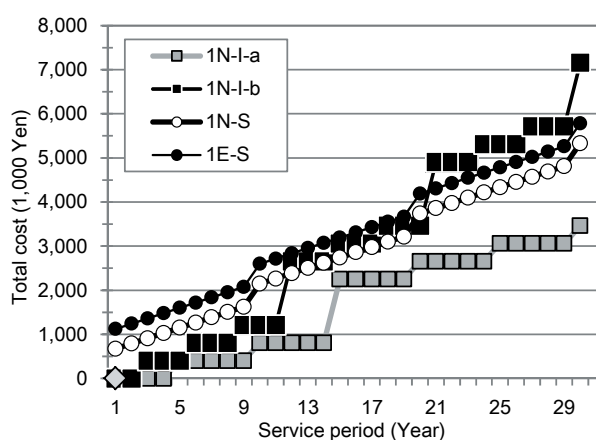


図-3.9 点検診断費用の推移 (ケース 1N, 1E)

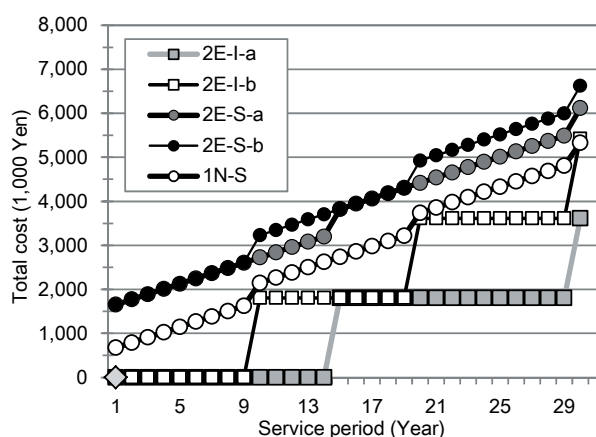


図-3.10 点検診断費用の推移 (ケース 2E)

表-3.5 センサ設置費用が総費用に占める割合

検討 ケース	センサ設置に係る 費用の割合
1N-S	10.6%
1E-S	19.4%
2E-I-a	25.4%
2E-I-b	23.7%

表-3.6 従来の点検診断とセンサ利用の比較（栈橋 RC 上部工の塩害を対象として）

比較項目	従来の点検診断 (一般定期点検診断:目視調査, 詳細定期点検診断:CI分析, 電気化学的特性値計測(微破壊試験)を想定)	センサの利用 (電気化学的特性値計測)
適用期間	目視調査:制限無し CI分析:鉄筋腐食開始以前まで 電気化学的特性値計測:かぶりにひび割れが発生する以前まで	かぶりにひび割れが発生する以前まで
点検診断が可能な部材	目視調査:全部材 CI分析:コア採取箇所のみ 電気化学的特性値計測:計測箇所のみ	センサ設置箇所のみ
データ取得のための足場の要否	目視調査:不要 CI分析, 電気化学的特性値計測:要	不要
点検実施者	目視調査についてのみ, 直営での実施が可能. ただし, 設置条件により潜水土のみ.	測定機器を保有している場合, 直営での計測が可能
点検実施者の安全の確保	海象に影響される	海象の影響は小さい
点検実施者の技量差の影響	目視による劣化度判定の場合, あり	なし
データ判定のための専門的知識	機器等を用いる場合, 要	自然電位, 分極抵抗の判定基準の利用により不要. ただし, 異常値検出の場合, 要
連続データの取得(常時計測)	不可	データロガーの設置により可能
表面保護工 [*] が適用された部材の点検診断	目視調査, 電気化学的特性値計測は不可. ただし, 表面保護工を取り除けば可能	可能
点検時の施設の利用制限	要	ケーブルやデータロガー設置の工夫により, 不要
その他	—	センサ, ケーブルの耐久性の確認が必要

* 表面被覆材や埋設型枠など, コンクリート表面を保護する工法

が重要となる。前節までの検討から、鉄筋腐食を検知するためのセンサの利用が供用期間中の点検診断費用の抑制に繋がるか否かについては、定期点検診断の実施頻度と調査項目に大きく影響されることは明らかである。しかし、定期点検診断の本来の目的を踏まえれば、センサを利用する場合については、部材の劣化の現況の客観的な判断に加えて劣化予測の実施も可能とする定量的なデータの取得、常時モニタリングの実施により早期に劣化の発生を検知できること等の利点を考慮することが重要である。

従来の手法による一般・詳細定期点検診断の実施と、センサを利用する点検診断について、点検診断に係る費用以外の観点で比較すると、表-3.6のようにまとめることができる。

4. 結論

本研究は、港湾に建設されるコンクリート構造物のうち、維持管理上の課題が最も多い栈橋RC上部工の点検診断の高度化に向けた取り組みの一環として、鉄筋腐食センサを設置する部材の選定方法について検討するとともに、従来の目視調査を主体とする点検診断と、センサを利用する場合について点検診断計画を策定し、費用面その他について比較検討を行った。

本研究の範囲では、上部工部材のうち海側から1列目の法線平行はりと海側から1, 2列目の床版の劣化の進行が

早い可能性が大きい。これらの部材の鉄筋の腐食傾向をモニタリングすることにより、上部工全体の劣化進行に対して安全側の対応をとることが可能となる。また、センサを利用する点検診断計画については、上部工の設置環境によらず、新設時からセンサを設置する方がコスト面で有利となること、施設の性能を適切に維持するために高頻度に点検診断を行う場合には、センサの利用がコスト面で有効となることがわかった。

本研究で用いた栈橋RC上部工の点検診断結果は、限られた施設から得られたものであり、これらが国内すべての上部工の劣化進行状況を代表しているとは言い難い。また、構造物の諸元、設置状況、利用状況等はそれぞれ異なるものであるため、センサ設置費用や点検診断費用の試算結果については、あくまで参考値として取り扱うことが望ましい。また、実際に、センサを利用する点検診断計画を検討する際には、費用面、運用面、施設の重要度、利用計画等を踏まえて、様々な側面からセンサ利用の効果を評価する必要がある。しかしながら、本研究で提案したセンサ設置の優先度設定手法や、点検診断計画の比較結果は、今後の港湾コンクリート構造物の効率的な維持管理の推進に向けて、有益な情報を提供するものと期待している。

(2015年2月6日受付)

謝 辞

本研究の一部は、SIPインフラ維持管理・更新・マネジ

メント技術「港湾構造物のライフサイクルマネジメントの高度化のための点検診断および性能評価に関する技術開発」によって実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岡崎慎一郎，加藤絵万，川端雄一郎，岩波光保：埋設型センサによる栈橋上部工RC部材の鉄筋腐食モニタリングに関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1294，2014.
- 3) 港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，1999.
- 4) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の規準・同解説，p.488，2007.
- 5) 山路徹：現地調査および長期暴露試験結果に基づいた港湾コンクリート構造物の耐久性能評価手法，平成18年度港湾空港技術講演会講演集，pp.41-58，2006.
- 6) 下澤和幸，田村博，永山勝，：小型埋設センサーによる鉄筋腐食モニタリング，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.793-795，1994.
- 7) 岩波光保，加藤絵万，川端雄一郎：栈橋上部工コンクリートにおける鉄筋腐食モニタリング実証実験，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集，V-346，pp.691-692，2010.

港湾空港技術研究所資料 No.1307

2015.6

編集兼発行人 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

発行所 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2015) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています