

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1225

December 2010

港湾RC構造物の確率論に基づく保有性能評価

加藤 絵万

川端雄一郎

岩波 光保

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 港湾RC部材の劣化度と耐荷性に関する調査 .....	4
2.1 調査の概要 .....	5
2.2 RC部材の劣化度と耐荷性の関係 .....	5
3. 劣化度判定によるRC栈橋上部工の保有性能評価手法の提案 .....	7
3.1 検討の目的 .....	7
3.2 極値統計理論に基づいた耐荷力の推定手法 .....	8
3.3 劣化度判定によるRC部材の耐荷力の推定 .....	8
3.4 RC栈橋上部工の保有性能評価 .....	9
4. まとめ .....	11
謝 辞 .....	11
参考文献 .....	11
付 録 .....	13

# Probabilistic Approach for Structural Performance Evaluation of Port RC Structure

**Ema KATO \***

**Yuichiro KAWABATA \*\***

**Mitsuyasu IWANAMI \*\*\***

## Synopsis

The total of 40 RC slabs extracted from existing port structures was tested in order to evaluate the relationship between visually judged deterioration grades and load carrying capacities. Wide variations were observed in the relationship in each deterioration grade, however, the load carrying capacity tended to be smaller than the design expectations when the symptom of deterioration appeared on the surface of concrete members. Moreover, the relationship was greatly influenced by localized deterioration and its position in the member.

Based on the statistical analysis on the relationship between deterioration grades and load carrying capacities, the probabilistic evaluation method of the load carrying capacities of RC slabs was proposed as quantitative evaluation method of residual structural performance of existing port RC structures.

**Key Words:** RC structure, performance evaluation, deterioration grade, load carrying capacity, extreme value theory

---

\* Senior Researcher, Structural Mechanics Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Researcher, Structural Mechanics Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\* Head, Structural Mechanics Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

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

# 港湾 RC 構造物の確率論に基づく保有性能評価

加藤 絵万\*・川端 雄一郎\*\*・岩波 光保\*\*\*

## 要 旨

港湾 RC 部材の外観上の不具合を保有性能評価に結びつけるための試みとして、既存の港湾構造物から採取した RC 部材について、目視により判定した劣化度と構造性能の関係を調査した。その結果、外観に変状が認められる RC 部材の耐荷性は初期値を下回る可能性があることが分かった。ただし、目視により判定した劣化度と耐荷性の低下の関係には広範なばらつきが見られ、これは部材の耐荷性が変状の発生位置や局所的な鉄筋断面減少に影響されることや、劣化度判定基準にこれらの項目が含まれていないためと考えられた。

また、劣化度と部材の耐荷力の実測データを用いて、各劣化度における RC 部材の耐荷力を確率論的に推定する手法を提案するとともに、提案手法を用いて栈橋上部工の保有性能評価を行った。

キーワード：RC 構造物，保有性能評価，劣化度，耐荷力，極値統計理論

---

\* 地盤・構造部 構造研究チーム主任研究官  
\*\* 地盤・構造部 構造研究チーム研究官  
\*\*\* 地盤・構造部 構造研究チームリーダー  
〒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. はじめに

従来の港湾施設の維持管理では、損傷や劣化などの変状が顕在化して、要求性能が満たされなくなる状態に至った後に補修や更新等の対策を講じる、いわゆる事後保全型の維持管理が一般的であった。これは、港湾施設に要求される機能（例えば、水深や荷役形態、ヤード面積など）の向上スピードが変状の発生や進行に伴う施設の性能低下のスピードを上回っていたために、変状が顕在化する前に、機能向上のための施設の改良あるいは更新が実施されてきたことが1つの要因であると考えられている。しかし、社会構造が成熟しつつある我が国では、今後、機能向上の要請は鈍化することが予測されるため、変状の発生や進行による施設の性能低下に直接的に対応しなければならないケースが増えることが推測される。

港湾施設の戦略的な維持管理の実施を目標として、著者らはライフサイクルマネジメント (LCM) の概念に基づく維持管理を提案している<sup>1)</sup>。LCMに基づく維持管理では、定期的な点検診断により変状を効率的かつ早期に発見し、変状が構造物の保有性能に及ぼす影響を定量的に評価し、さらに将来の性能低下を予測した上で、適時適切な対策を計画し実施していくことが求められる。

図-1に港湾施設に対する点検診断および評価のフローを示す<sup>2)</sup>。港湾施設では部位・部材の大部分が飛沫帯、干満帯あるいは海中に位置しており、日常的に実施する点検により部位・部材の変状を発見することは困難である場合が多い。このため、海面より上の部位・部材を対象とした目視調査を一般定期点検診断、目視が困難な部位・部材の目視調査および変状の進行を把握するための詳細調査を詳細定期点検診断と位置付け、前者については概ね1~2年、後者については概ね5~10年間隔で行うことが推奨されている。いずれの点検診断を実施した場合も、対象施設の各部位・部材に対する点検診断結果に基づいて、施設全体の性能（表-1 施設の性能低下度）を総合的に評価することが標準とされている。

港湾施設を構成する部材の中でも、特に、飛沫帯に位置する栈橋上部工などの鉄筋コンクリート (RC) 部材については、塩害に起因する鉄筋腐食により部材の保有性能が要求性能以下とならぬよう、適切な維持管理が必要である。RC部材の変状が保有性能に及ぼす影響について、特に、RC部材の劣化と構造性能の低下の関係については、近年、多くの知見が得られている<sup>3),4)</sup>。しかし、実構造物においてRC部材の保有性能を定量的に評価するには、高度な専門知識を要する詳細調査が必要となる。全ての部位・部材について詳細調査を行うことは労力や費用の面

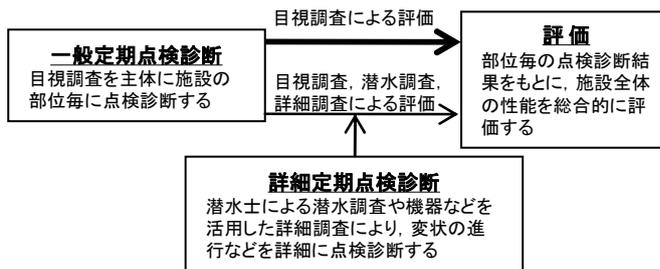


図-1 港湾施設に対する点検診断および評価のフロー<sup>2)</sup>

表-1 評価結果の分類<sup>2)</sup>

評価	施設の状態
A	施設の性能が低下している状態
B	放置した場合に、施設の性能が低下する恐れがある状態
C	施設の性能にかかわる変状は認められないが、継続して観察する必要がある状態
D	変状は認められず、十分な性能を保持している状態

からも困難であり、現状では、全ての部材について外観上の不具合を劣化度として表し、これを部材の保有性能の評価値として用いるのが一般的である。

本研究では、港湾 RC 部材の劣化が部材の保有性能に及ぼす影響を把握するため、さらに、部材の外観上の不具合を保有性能評価に結びつけるための試みとして、既存の港湾構造物から採取した RC 部材について、目視により判定した劣化度と部材の耐荷力について調査した結果を報告する (2.)。

ここで、構造物の構造安全性の問題では、「作用荷重の最大値」と「抵抗強度の最小値」の2つが安全性や信頼性を保証する上で必要なパラメータとなる<sup>5)</sup>。この場合、構造物・部材の「抵抗強度」の極値の取扱いが重要であり、これには極値統計理論の適用が有効である<sup>5)</sup>。このことから、本研究では、目視による劣化度と部材の耐荷力の関係の実測値を用いて、極値統計理論に基づいた RC 部材の耐荷力の推定手法を提案する (3.)。

本研究で提案する港湾 RC 構造物の保有性能評価の結果は、港湾施設の性能低下度を評価するための定量的な判断材料となることが期待できる。

## 2. 港湾RC部材の劣化度と耐荷性に関する調査

港湾 RC 部材の劣化が部材の保有性能に及ぼす影響を把握するため、さらに、部材の外観上の不具合を保有性能評価に結びつけるための試みとして、既存の港湾構造物から採取した計 40 体の RC 部材について、目視により判定した劣化度と部材の耐荷性について調査した結果を報告する。

## 2.1 調査の概要

### (1) RC 部材

本研究では、国内の広範な地域から選定した6港湾にある計7施設より採取したRC部材40体を用いて検討を行った。1施設は機能向上のため、その他の6施設はRC部材の塩害に起因する変状の顕在化により、施設の機能・安全性が低下したと判断され、RC部材の撤去および更新が実施された。写真-1はRC部材の撤去状況の一例である。

表-2にRC部材の概要を示す。部材No.1~33については、供用約30年以上が経過した栈橋上部工RC床版から、No.34~40については供用44年が経過したRC渡橋床版部から採取したものである。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中の部材の劣化度は、部材の撤去・運搬後、後述する曲げ載荷試験の支点間に相当する範囲の劣化・変状の発生に着目して、表-3に示す点検診断項目および判定基準<sup>2)</sup>に基づき目視により判定したものである。その結果、劣化度dと判定されたものは2部材、劣化度cは17部材、劣化度bは11部材、劣化度aは10部材であった。

### (2) 曲げ載荷試験

通常、栈橋RC上部工床版は、岸壁法線平行および直角方向の支点部および支間部における曲げ耐力が、荷役機械による変動荷重やコンテナ等の上載荷重により発生する作用曲げモーメント以上となるよう設計される。このことから、本研究では、既存構造物から採取したRC部材の保有性能を評価するために曲げ載荷試験を実施し、各部材の曲げ耐力を調査した。なお、部材No.34~40についても栈橋RC上部工床版から切り出した部材と同様に取り扱った。

写真-2に曲げ載荷試験状況の一例を示す。曲げ載荷試験は、No.1~20については2点支持1点集中載荷で、No.21~40については2点支持2点集中載荷で行い、いずれも荷重制御による単調載荷とした。表-2中の部材幅および鉄筋の有効高さは、各部材におけるそれらの実測値の平均を示し、せん断スパン長は曲げ載荷試験での設定値である。なお、せん断スパン長は、部材が曲げ破壊するよう配慮して設定した。

No.1~8およびNo.15~40の部材については、丸鋼および異形鉄筋のいずれの場合でも部材端部から20φ以上に、No.9~14については部材端部から15φ以上に支点を設定することにより、鉄筋の定着が確保されるよう配慮した。



写真-1 RC部材の撤去（部材No.Ma-1）



写真-2 曲げ載荷試験の一例（部材No.Sa-8）

支点部にかぶりの剥落が認められた部材については、モルタルあるいは高強度石膏により支点部断面を修復し載荷試験に供した。なお、曲げ載荷試験の結果、部材端部での鉄筋の拔出しや、定着破壊は認められなかった。

## 2.2 RC部材の劣化度と耐荷性の関係

図-2にRC部材の劣化度と耐荷力比の関係を示す。各部材の耐荷力比は、劣化が生じていないとしては理論により求めた計算曲げ耐力に対する最大荷重の実験値の比を示す。計算曲げ耐力の算出では、コンクリートおよび鉄筋の物性値は一定として取り扱った。コンクリートおよび鉄筋の物性値が全ての部位・部材で一定であることは考え難く、本来であれば、部材毎の特性値を用いるべきである。しかし、前述のとおり、全ての施設について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おらず、また、劣化の発生により健全な状態のコンクリートコアや鉄筋の採取が不可能である場合も多かったため、いずれの部材についても物性値は一定として取り扱った。コンクリートについては、当時の栈橋上部工コンクリートの設計基準強度を参考に、圧縮強度 24 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数 25 kN/mm<sup>2</sup>とした<sup>6)</sup>。鉄筋については、表-4に示す一部の部材から採取した目視で発錆が認められない鉄筋の引張試験結果を参考に、降伏点 345 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数 200 kN/mm<sup>2</sup>とした<sup>7),8)</sup>。

図-2によれば、劣化度 c, b, a と判定された部材にお

表-2 RC 部材の概要

No.	部材 No.	供用年数 (約)	劣化度	部材幅* (mm)	せん断スパン長 (mm)	鉄筋 (軸方向)						最大荷重の実験値 (kN)	破壊形態
						上 段			下 段				
						種類	本数	有効高さ* (mm)	種類	本数	有効高さ* (mm)		
1	HS-1	40	b	1490	400	D13	4	190	D13	8	290	869	曲げ
2	HS-2		a	1500	400	D13	4	190	D13	8	290	498	曲げ
3	HS-3		b	532	450	D13	3	93	D13	3	187	147	曲げ
4	HS-4		c	389	450	D13	2	91	D13	2	187	94	曲げ
5	HS-5		d	575	450	D13	3	82	D13	3	189	159	曲げ
6	HS-6		a	492	450	D13	3	89	D13	3	186	128	曲げ降伏後せん断
7	HS-7		a	408	450	D13	2	77	D13	2	185	86	曲げ
8	HS-8		a	585	450	D13	3	67	D13	3	176	105	曲げ降伏後せん断
9	HS-9		b	537	550	D13	2	94	D13	2	211	162	曲げ
10	HS-10		b	401	550	D13	3	92	D13	3	197	84	曲げ
11	HS-11		b	599	550	D13	3	98	D13	3	180	128	曲げ
12	HS-12		c	578	550	D13	3	122	D13	3	205	178	曲げ降伏後せん断
13	HS-13		c	541	550	D13	3	97	D13	3	203	118	曲げ降伏後せん断
14	HS-14		c	508	550	D13	3	97	D13	3	168	141	曲げ
15	Sa-1	40	d	699	600	φ13	3	140	φ13	5	250	252	曲げ
16	Sa-2		b	535	600	φ13	4	140	φ13	4	250	221	曲げ
17	Sa-3		c	798	600	φ13	3	140	φ13	6	250	196	曲げ
18	Sa-4		c	732	600	φ13	3	150	φ13	5	260	281	曲げ
19	Sa-5		b	569	600	φ13	3	150	φ13	5	260	261	曲げ
20	Sa-6		c	812	600	φ13	3	150	φ13	6	260	212	曲げ
21	Sa-7		40	b	1940	750	D16	13	135	D16	5	242	384
22	Sa-8	a		1987	750	D16	13	135	D16	5	222	224	曲げ
23	Sa-9	a		1984	750	D16	13	135	D16	5	241	267	曲げ
24	Sa-10	a		1964	750	D16	13	135	D16	5	231	243	曲げ
25	Ma-1	32	c	1560	1000	D16	8	86	D19	8	181	379	曲げ
26	Ma-2		c	1500	1000	D16	7	81	D19	8	181	403	曲げ
27	Ma-3		c	1370	1000	D16	7	84	D19	8	181	329	曲げ
28	Ma-4		c	1540	1000	D16	7	75	D19	8	185	351	曲げ
29	Ma-5		c	1385	1000	D16	7	67	D19	8	179	361	曲げ
30	YH-1	41	c	1518	1000	D13	14	80	D13	7	205	247	曲げ
31	YH-2		c	1508	1000	D13	14	73	D13	7	180	201	曲げ
32	Shi-1	30	c	1010	1450	D16	2	225	D13	5	280	139	曲げ
33	Shi-2		b	1010	1450	D16	2	220	D13	5	300	142	曲げ
34	Ka-1	44	b	600	800	φ13	2	89	φ13	3	161	101	曲げ
35	Ka-2		c	595	800	φ13	2	85	φ13	3	159	103	曲げ降伏後せん断
36	Ka-3		a	595	980	φ13	2	94	φ13	3	159	68	曲げ
37	Ka-4		c	590	755	φ13	2	83	φ13	3	151	58	曲げ
38	Ka-5		b	590	755	φ13	2	81	φ13	3	152	45	曲げ
39	Ka-6		a	690	750	φ13	2	86	φ13	4	156	72	曲げ
40	Ka-7		a	685	600	φ13	2	95	φ13	4	163	123	曲げ降伏後せん断

\* 部材内の平均値

表-3 劣化度判定基準<sup>2)</sup>

対象施設	点検項目	点検方法	判定基準	
栈橋 上部工 (床版 下面)	コンクリートの 劣化, 損傷	目視 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数, 長さと同幅 ・かぶりの剥落状況 ・錆汁の発生状況 ・鉄筋の腐食状況	a	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%以上ある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剥落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。
			b	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%未満である。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。
			c	<input type="checkbox"/> 一方向のひび割れもしくは帯状又は線状のゲル析出物がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。
			d	<input type="checkbox"/> 変状なし。

表-4 鉄筋の引張試験結果<sup>7),8)</sup>

部材 No.	鉄筋種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
HS-1~14	D13	386	192
Sa-1~6	φ13	358	218
Shi-1,2	D16	363	183
	D13	380	186
Ka-1~7	φ13	360	212

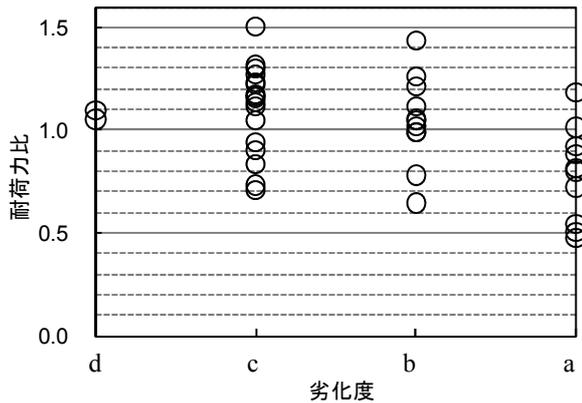


図-2 RC部材の劣化度と耐荷力比の関係

いて耐荷力比が 1.0 以下となるものが存在した。これより、外観に変状が認められるRC部材の耐荷性は、初期値を下回る可能性があるといえる。

Sa-1~6は同施設より採取し寸法も同程度である。しかし、劣化度 c と判定されたSa-3およびSa-6の耐荷力比は、劣化度 b と判定されたSa-2, Sa-5よりも低下する結果となった。曲げ載荷試験前の打音調査によれば、Sa-3およびSa-6のスパン中央部においてかぶりの浮きが確認されている。表-3に示すように、劣化度はRC部材外観から判定されるものであるため、鉄筋の腐食により生じるかぶりの浮きは劣化度には反映されないことがある。また、Sa-3およびSa-6では、複数の微細ひび割れおよび豆板が存在し、鉄筋腐食による外観上の変状が部材表面に現れ難い状態であった。このため、Sa-3およびSa-6については劣化度を健全側に判定する結果となったと考えられる。

上記のように、同一施設から採取した部材で劣化度判定結果と耐荷力比の大小関係が逆転した例が、特に劣化度 b および c の部材間で多数見られた。既往の研究によれば、局所的な鉄筋腐食が生じたRCはり試験体の最大荷重は、はり軸方向鉄筋の腐食発生箇所とその程度、鉄筋径および本数に影響され、これは腐食発生箇所や鉄筋の節の残存による試験体内での応力伝達メカニズムの違いによるものであるとされている<sup>9)</sup>。劣化度は個々の部材に対して部材表面の状況から判定されるが、変状の発生

位置については十分には考慮されない。さらに、劣化度の判定基準には、部材内のひび割れ発生面積は考慮されるが、ひび割れ幅や深さ等、部材内の鉄筋の腐食による断面減少程度に大きく影響する事項は含まれていない。このため、劣化度と耐荷力比の関係は一樣ではなく、劣化度ごとに広範な耐荷力比を示す結果となったものと考えられる。

また、大部分の部材は、曲げ破壊により終局を迎えたが、HS-6など劣化度 a と判定された3部材とKa-2など劣化度 c と判定された3部材では、部材の曲げ降伏後、せん断ひび割れが卓越し終局を迎えた。各部材における破壊モードの変化についても、前述と同様、変状の発生位置や局所的な鉄筋断面の減少による影響であることが考えられる。

ひび割れが発生したRC部材では、ひび割れを通じて酸素や水などの腐食因子が鉄筋に容易に供給されるため、鉄筋の腐食速度が急増することとなる。ひび割れ発生後の劣化の進展速度を考慮すれば、劣化が顕在化する以前、すなわち劣化度 c に至る以前に補修や補強等の対策を実施することが、予防保全の観点から重要であるといえる。

しかし、特に、劣化度 b および cにおいて、計算値を上回る耐荷性を示した部材も存在した。また、本研究で行った曲げ載荷試験の支持条件および作用曲げモーメントは、実際の構造物内での部材の各条件とは異なるものである。このため、外観に変状が認められたからといって、それだけでは実際の施設の使用性や安全性に影響を及ぼすほどの耐荷力の低下は生じていない可能性もある。

上記のような部材の劣化度判定結果と耐荷性の関係に関するばらつきを効率よく取り扱うためにも、確率論を用いた保有性能評価手法の構築が必要である。

### 3. 劣化度判定によるRC栈橋上部工の保有性能評価手法の提案

#### 3.1 検討の目的

2. で述べたように、既存構造物から採取したRC部材の曲げ載荷試験の結果、外観に変状が認められるRC部材の耐荷力比は劣化度ごとに広範な分布を示した。ここでは、耐荷力比のばらつきを確率論的に取り扱い、劣化度判定結果からRC部材の耐荷力を推定する手法について検討する。

前述のとおり、本研究で行った曲げ載荷試験の支持条件および作用曲げモーメントは、実際の構造物内での部材の各条件とは異なる。また、鉄筋腐食が生じたRCはり

試験体の曲げ耐力について検討した著者らの研究によれば、腐食が曲げ耐力の低下に及ぼす影響の程度は、腐食の程度や発生位置、また部材の鉄筋径および鉄筋本数により異なり、これは鉄筋-コンクリート間の応力伝達の影響によるものであることが考えられる<sup>9)</sup>。本章で検討する劣化度判定結果からRC部材の耐荷力を推定する手法は、実構造物内での部材の荷重作用や、鉄筋腐食が部材の曲げ耐力に及ぼすメカニズムについては直接的には考慮していない。あくまで、港湾RC構造物の効率的かつ効果的な維持管理の実現を目的として、目視調査から確率論的に部材の保有性能をおおよそ評価するための手法を提案するものである。

ここで、極値統計理論は、材料の破壊や劣化による寿命のばらつきを統計的に処理する手法として広く利用されている<sup>10)</sup>。特に、金属材料の腐食現象は本質的に確率的性格を有しているため、孔食等の腐食の発生による材料寿命予測については、極値統計的立場からのアプローチが必要とされている<sup>10)</sup>。本研究で用いたRC部材は、主として塩害により、一部の部材では塩害とASRの複合により、劣化・変状が発生・進展したものである。しかし、ASRにより今回の部材で見られる程度の劣化が生じたRC部材の曲げ耐力は、健全な部材と比較してほとんど低下しないとの報告も多い<sup>11)</sup>。このことから、本研究で調査したRC部材の曲げ耐力は、腐食により生じた鉄筋の断面減少が支配的であると判断される。コンクリート中の鉄筋の腐食の進行は、同一部材内においてもばらつくため、鉄筋の断面形状は不均一なものとなる<sup>9)</sup>。鉄筋断面形状の不均一性は、鉄筋自体の応力分布のみならず、鉄筋-コンクリート間の応力伝達に影響を及ぼすことから、結果として、部材の曲げ耐力のばらつきを招くこととなる。

このことから、本研究ではRC部材の曲げ耐力を金属材料単体の腐食と同様に取り扱い、極値統計的立場からの評価を試みた。ここで、RC部材の曲げ耐力データを取り扱う場合、対象とする極値には下限値(0.0)を設定する必要がある。このため、2.で得られたRC部材の耐荷力比データを、Ⅲ型漸近分布であるWeibull分布に適用し、劣化度 a ~ c の部材の耐荷力を確率論的に評価する手法について検討した。

### 3.2 極値統計理論に基づいた耐荷力の推定手法

Weibull分布の累積分布関数は式(1)で表される<sup>5)</sup>。

$$F_{\text{III}}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

ここに、 $\eta$  : 尺度パラメータ、 $\gamma$  : 位置パラメータ、 $m$  :

形状パラメータである。

曲げ載荷試験から得られた劣化度ごとの耐荷力比データは、平均ランク法により累積確率  $F(x_i)$  として表すこととした。耐荷力比データを小さい順に並べた順序統計量  $x_i$  に対して、その累積確率  $F(x_i)$  は式(2)で求められる。

$$F(x_i) = \frac{i}{N+1} \quad (2)$$

ここに、 $i$  : データの順位、 $N$  : 劣化度ごとの耐荷力比データ数である。

ここで、RC部材の耐荷力比を  $x$  とすると、常に、 $x \geq 0.0$  であると考えられるため、式(1)の位置パラメータ  $\gamma$  は 0.0 と設定できる。尺度パラメータ  $\eta$  および形状パラメータ  $m$  については、式(1)から得られる累積確率  $F_{\text{III}}(x)$  と、式(2)から得られる累積確率  $F(x_i)$  の差の2乗和が最小となる値を繰返し計算により求めた。

### 3.3 劣化度判定によるRC部材の耐荷力の推定

図-3に劣化度 a ~ c の耐荷力比の累積確率の実験値と計算値を、表-5に劣化度ごとのパラメータと代表値、標準偏差を示す。Kolmogorov - Smirnov 検定の結果、仮定した漸近分布は全ての劣化度について有意水準 5 % で妥当であった。耐荷力比の期待値および最頻値は、劣化度の進行に伴い減少する傾向であった。特に、劣化度 a については、耐荷力比の標準偏差が劣化度 c および b と比較して大きく、期待値および最頻値は 1.0 を下回る結果となった。ここで、図-3における累積確率は耐荷力比の最小値が  $x$  以下となる確率を示す。例えば、いずれの劣化度においても  $x = 1.5$  の場合、累積確率はおよそ 1.0 を示すことから、ある劣化度のRC部材の耐荷力比の最小値はほぼ 100 % の確率で 1.5 以下となるといえる。しかし、この表現は、構造物の効率的かつ効果的な維持管理の実施を目的として行われる部材の保有性能評価の指標とするには、概念として不適当である。そこで、縦軸を  $1.0 - F_{\text{III}}(x)$ 、すなわち部材の耐荷力比が  $x$  以上となる確率として図-3を変換したものを図-4に示す。なお、ここでは、図-4をRC部材の保有性能評価の実務に活用することを考慮して、耐荷力比  $x$  の上限を 1.0 として表した。これによれば、例えば、耐荷力比  $x$  が 1.0、つまり劣化の発生以前と同程度を示す可能性は、劣化度 c の部材では約 70 %、劣化度 b の部材では約 60 %、劣化度 a の部材では約 20 % となる。また、それぞれの劣化度で部材数の 95 % が示す耐荷力比は、劣化度 c の部材では 0.72、劣化度 b の部材では 0.65、劣化度 a の部材では 0.35 と推定できる。

ここで、本研究で用いた劣化度 a における耐荷力比の

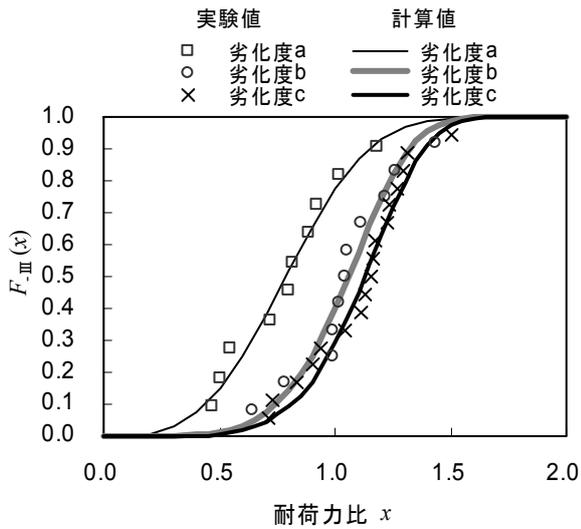


図-3 劣化度毎の耐力比の累積確率

表-5 劣化度毎の各パラメータ，代表値，標準偏差

	劣化度		
	c	b	a
$\eta$	5.80	5.39	3.21
$m$	1.20	1.13	0.88
期待値	1.11	1.04	0.79
最頻値	1.16	1.09	0.78
標準偏差	0.19	0.19	0.25

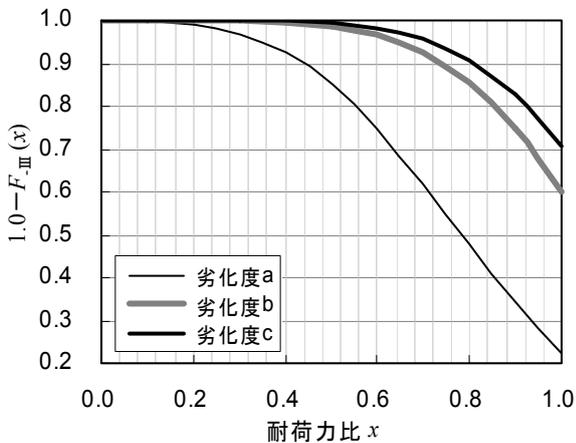


図-4 RC 部材の耐力比が  $x$  以上となる確率

最小データは 0.47 であった。劣化度 a は最も劣化が進行した状態であり，データが増えれば部材の耐力比の最小値は 0.0 に近づくことが予想される。このため，本研究で得られた劣化度 a における耐力比の累積確率分布は，今後のデータの蓄積により，さらに分散傾向となる可能性がある。

また，劣化度 c および b における耐力比の累積確率分布の差は顕著には見られなかった。これは，2. で述べたように，部材の耐力比は部材内での劣化発生の局

所化やその程度に影響されること，また，劣化度の判定には，鉄筋の断面減少程度に大きく影響する事項が含まれていないことが要因と考えられる。

さらに，RC部材の劣化の進展は，環境条件や使用材料，供用年数等により大きく異なるものである。ここで述べた部材の耐力力の推定手法は，国内の広範な地域における港湾構造物から採取したRC部材の耐力力データに基づいているが，これらが国内の全ての港湾構造物の環境条件や使用材料等の条件を包含するものであるとは言い難い。このため，今後，さらなるデータの蓄積とともに，劣化度判定時に劣化発生の局所化等の要因を可能な限り考慮することにより，特に，劣化度c および劣化度 b における部材の耐力力比の推定精度が向上することが期待できる。

### 3.4 RC 栈橋上部工の保有性能評価

ここでは，既存の RC 栈橋上部工の一般点検診断結果を用いて，3.3 の手法により，施設の保有性能評価を行うための手法について検討した。

#### (1) 対象施設の概要

表-6 に検討対象とする 10 施設の概要を示す。対象施設は，竣工および点検年次はそれぞれ異なるが，全て建設から 30 年以上が経過した既存の RC 栈橋である。港湾の施設の維持管理技術マニュアル<sup>2)</sup>によれば，栈橋の点検診断の標準的な実施単位は，上部工 1 ブロックあるいは 1 スパン，評価（施設の性能低下度 A～D（表-1 参照））の実施単位は 1 バースとされている。点検診断結果の例として，表-7 に 1 ブロック毎の上部工はりおよび床版の劣化度の割合の一例を，表-6 に施設全体におけるはりおよび床版の劣化度の割合と，それぞれの劣化度の代表値を示す（全対象施設における 1 ブロック毎のはりおよび床版の劣化度の割合は付録 B を参照）。ブロック毎および施設全体におけるはりおよび床版の劣化度の代表値は下記にしたがって導出した<sup>12)</sup>。

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  $\geq 70\%$

#### (2) 最小耐力比の設定

既往の研究では，部材の劣化度 a ～ d および劣化度 a の下位に劣化度 aa を設けた 5 段階の劣化状態に対してマルコフ連鎖による劣化予測を行い，これまでの工学的知見を基に劣化度毎に定めた評点（aa = 0, a = 80, b = 95, c = 99, d = 100）と施設の劣化度割合の積の総和から「構

表-6 対象施設の概要

施設	ブロック数	竣工年	点検年	経過年数 (点検年-竣工年)	上部工の劣化度の割合 (施設全体)								劣化度の代表値	
					はり				床版				はり	床版
					d	c	b	a	d	c	b	a		
①	9	1970	2006	36	0.00	0.55	0.29	0.16	0.00	0.66	0.23	0.11	b	b
②	10	1975	2005	30	0.00	0.95	0.05	0.00	0.19	0.60	0.20	0.00	c	c
③	8	1971	2005	34	0.61	0.17	0.21	0.01	0.60	0.36	0.04	0.00	c	c
④	9	1971	2005	34	0.57	0.27	0.16	0.00	0.79	0.21	0.00	0.00	c	d
⑤	9	1971	2005	34	0.51	0.16	0.33	0.00	0.44	0.38	0.18	0.00	b	c
⑥	8	1977	2008	31	0.00	0.80	0.18	0.03	0.00	0.90	0.09	0.01	c	c
⑦	14	1971	2003	32	0.00	0.93	0.07	0.00	0.00	0.83	0.17	0.00	c	c
⑧	14	1971	2003	32	0.00	0.87	0.12	0.00	0.00	0.79	0.22	0.00	c	c
⑨	14	1971	2003	32	0.00	0.71	0.27	0.02	0.00	0.71	0.29	0.00	c	c
⑩	14	1971	2003	32	0.00	0.74	0.26	0.01	0.00	0.84	0.16	0.00	c	c

表-7 ブロック毎の劣化度の割合 (施設⑥の場合)

ブロック No.	劣化度の割合								劣化度の代表値	
	はり				床版				はり	床版
	d	c	b	a	d	c	b	a		
1	0.00	0.78	0.22	0.00	0.00	0.93	0.07	0.00	c	c
2	0.00	0.86	0.12	0.01	0.00	0.90	0.10	0.00	c	c
3	0.00	0.79	0.16	0.04	0.00	0.88	0.12	0.00	c	c
4	0.00	0.63	0.30	0.07	0.00	0.87	0.12	0.02	b	c
5	0.00	0.87	0.13	0.00	0.00	0.94	0.04	0.02	c	c
6	0.00	0.62	0.33	0.06	0.00	0.75	0.23	0.02	b	c
7	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	c	c
8	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	c	c

表-8 各劣化度の最小耐荷力比

確 率	劣化度				劣化度間の差		
	d	c	b	a	d - c	c - b	b - a
99 %	(1.0)	0.54	0.48	0.21	0.46	0.06	0.27
95 %	(1.0)	0.72	0.65	0.35	0.28	0.07	0.30
90 %	(1.0)	0.81	0.75	0.44	0.19	0.07	0.31
85 %	(1.0)	0.88	0.81	0.50	0.12	0.07	0.31
80 %	(1.0)	0.93	0.86	0.55	0.07	0.07	0.31
75 %	(1.0)	0.97	0.90	0.60	0.03	0.07	0.30

造性能指標」を求め、これをもとに施設の性能低下度 A ~ D を導出することを試みている<sup>13)</sup>。本研究では、この考え方を踏襲し、4 段階の劣化度毎に定めた最小耐荷力比と、施設の劣化度割合の積の総和から、上部工全体の最小耐荷力比を求めることとした。

前出の既往の研究<sup>13)</sup>では、劣化度毎の評点を経験的に定めているが、本研究では、図-4 の活用により実験事実を根拠とした評点の設定が可能である。表-8 に累積確率毎の各劣化度の部材の最小耐荷力比を示す。これは、図-4 の各劣化度における累積確率と耐荷力比  $x$  の関係から求められるものであり、例えば、累積確率 95 % 時の耐荷力の最小値が、劣化度 c の部材では 0.72 と推定されることから、これを劣化度 c の部材の最小耐荷力比として示したものである。ここで、本研究では、劣化度 d の部材の耐荷力比データは得られていないため、劣化度 d の部材については、最小耐荷力比は常時 1.0 として取り

扱うこととした。また、劣化度 c の部材の最小耐荷力比が劣化度 d のそれを上回る事態を避ける目的で、表-8 に示す累積確率の下限値を 75 % とした。

表-8 に累積確率毎の各劣化度間の最小耐荷力比の差を示した。実験事実に基づいて設定した劣化度 a ~ c 間での最小耐荷力比の差にはほとんど変化は見られないが、累積確率が大きいほど劣化度 d と劣化度 c 間の差は大きくなる。上部工全体の最小耐荷力比を算出するにあたっては、累積確率の設定、すなわち、どの程度の確率で最小耐荷力比を保証するかが重要となる。ここで、図-2 に示した RC 部材の実測の耐荷力比の最小値は、劣化度 c では 0.70 程度、劣化度 b では 0.65 程度であった。このことから、本研究では、劣化度 c および劣化度 b の最小耐荷力比が最も実験最小値に近い累積確率 95 % を採用することとした。

(3) RC 栈橋上部工の保有性能評価の試行

表-9 最小耐力力比 (累積確率 95%)

施設	劣化度の代表値		施設全体		ブロック最小値	
	はり	床版	はり	床版	はり	床版
①	b	b	0.640	0.663	0.560	0.628
②	c	c	0.716	0.758	0.709	0.684
③	c	c	0.875	0.885	0.790	0.797
④	c	d	0.869	0.941	0.810	0.860
⑤	b	c	0.841	0.832	0.712	0.765
⑥	c	c	0.697	0.710	0.674	0.696
⑦	c	c	0.714	0.707	0.703	0.687
⑧	c	c	0.709	0.705	0.680	0.684
⑨	c	c	0.695	0.700	0.658	0.678
⑩	c	c	0.700	0.709	0.663	0.678

表-9 に検討対象施設における栈橋上部工全体のはりおよび床版の期待最小耐力力比と、期待最小耐力力比のブロック最小値を示す。栈橋上部工全体の期待最小耐力力比は表-6 に示した劣化度割合を、ブロック最小値は、表-7 に例として示した各施設におけるブロックごとの劣化度割合を用いて算出した。

これより、劣化度の代表値で評価した場合、施設②、③、⑥～⑩の施設の保有性能は同等と見なされるが、期待最小耐力力比を導入することにより、同一劣化度の施設においても保有性能の順位付けを行うことが可能である。また、補修実施計画はブロック単位で策定されることが多いが、各施設におけるブロックごとの劣化度割合を用いることにより、ブロック単位での保有性能の順位付けを行うことも可能となる。

ここで、施設⑤のりは劣化度 b とされているが、劣化度 c とされた施設②、⑦～⑩よりも期待最小耐力力比が大きい結果となった。これは、施設②、⑦～⑩では劣化度 d と判定された部材はないが、施設⑤においては約半数を占めていることが、期待最小耐力力比の算出に影響したためと考えられる。通常、劣化が進行した部材ほど補修コストは大きくなる。このことから、期待最小耐力力比の大小比較により、補修に要するコストの検討を行うことが可能にあることが期待される。

実際に、補修等の対策を講じるにあたっては、点検診断結果の総括および劣化予測の結果を踏まえた工学的知見・判断に基づく評価だけでなく、財政面、利用面、施設の重要度等を考慮した現場的・行政的判断に基づく評価を行い、それらを総合的に評価することが必要となる<sup>14)</sup>。本研究で提案した統一的な判断基準に基づいた構造物・部材の保有性能評価手法は、前者の工学的知見・判断に基づく評価を定量的に行える点において、港湾施設のライフサイクルマネジメントの実現に有効な手法であると

考える。今後、本手法による構造物の期待最小耐力力比の評価の妥当性、特に、最適な累積確率の選定と劣化度 d の場合の最小耐力力比の設定について、また、栈橋上部工以外の部材や構造物に対する適用の可能性について、引き続き検討を行う予定である。

#### 4. まとめ

本研究により得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 外観に変状が認められるRC部材の耐力性は初期値を下回る可能性がある。
- (2) 目視により判定したRC部材の劣化度と耐力性の関係には広範なばらつきが見られた。これは、部材の耐力性が変状の発生位置や局所的な鉄筋断面減少に影響されることや、劣化度判定基準にこれらの項目が含まれていないためと考えられる。
- (3) 極値統計解析に基づいて、目視による劣化度判定結果から確率論的にRC部材の耐力力の最小値を推定する手法を提案した。今後、さらにデータを蓄積するとともに、劣化度判定時に部材内の劣化発生局所化を考慮することにより、耐力力比の推定精度が向上できる。

(2010年8月13日受付)

#### 謝 辞

港湾構造物から採取したRC部材の載荷試験は、国土交通省各地方整備局等および港湾管理者各位のご協力により実施が可能となったものである。ここに記し、関係各位に深く感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 横田弘: 港湾施設の維持管理のための考え方とその技術, コンクリート工学, Vol.47, No.5, 2009年, pp.120-123.
- 2) 港湾空港技術研究所編著: 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 沿岸技術研究センター, 2007年.
- 3) 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ 71, 2006年.
- 4) 土木学会: 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ 85, 2009年.
- 5) 伊藤學, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三 訳: 土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善, 1988年.
- 6) 運輸省港湾局: 港湾施設設計指針第I部, 1978年.
- 7) 加藤絵万, 岩波光保, 山路徹, 横田弘: 建設後30年以上が経過した栈橋上部工から切り出したRC部材

の劣化性状と構造性能，港湾空港技術研究所資料，  
No.1140, 2006 年.

- 8) 川端雄一郎，加藤絵万，岩波光保：海洋環境で著しく  
鋼材腐食を生じた RC はりの耐荷性能評価，コンクリ  
ート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウ  
ム論文報告集，Vol.10, 2010 年.（掲載決定）
- 9) 加藤絵万，濱田洋志，岩波光保，横田弘：局所的に生  
じた鉄筋腐食が RC はりの構造性能に及ぼす影響，港  
湾空港技術研究所報告，Vol.47 No.1, 2008 年, pp.57-82.
- 10) 腐食防食協会編：装置材料の寿命予測入門－極値統計  
の腐食への適用－，丸善，1984 年.
- 11) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構  
造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006 年，  
pp.65-69.
- 12) 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 年, pp.3-35.
- 13) 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－構造性能の低下予測とア  
セットマネジメントの試行例－，国土技術政策総合研  
究所研究報告，No.29, 2006 年.
- 14) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の維持管理計画書  
作成の手引き（増補改訂版），港湾空港建設技術サー  
ビスセンター，2008 年.

付録A 栈橋上部工全体における部材耐荷力の極値の推定

付録B 栈橋上部工はりおよび床版の劣化度の割合

## 付録A

### 栈橋上部工全体における部材耐荷力の極値の推定

本付録では、栈橋RC上部工中の一部の部材の耐荷力から、上部工全体における部材群の耐荷力の極値を推定する手法について検討し、提案手法の適用上の問題点や推定精度の向上のための方策について述べる。

#### 1. 検討の目的

港湾施設においては、一部の構造部材に著しい劣化の発生が発見されながらも、施設の利用状況や利用者の要望等により、完全な供用停止が困難であることがある。また、施設を供用しながら、その一部に対して維持補修工事を行う事例も多い。この場合、施設全体の安全性がどの程度確保されているのか評価することが求められることとなる。

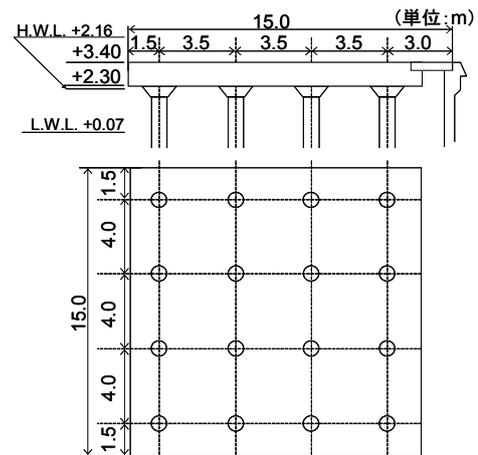
ここで、極値統計解析では、実測データから求めた累積分布関数  $F(x)$  と、評価対象区画に対する実測区画の比である再帰期間  $T$  を用いて、式(付A1)により評価対象区画全体の極値  $x_m$  を推定することができる<sup>(付A1)</sup>。

$$T = \frac{1}{1 - F(x_m)} \quad (\text{付A1})$$

同一構造物、すなわち環境条件や使用材料、供用年数等の条件が全て同様とみなせるRC部材群の耐荷力については、式(付A1)を用いることにより、構造物中の一一部の部材の耐荷力データから、構造物全体における部材の耐荷力を確率論的に推定することが可能となると考えられる。さらに、得られた情報を根拠として、構造物の供用のためのより効率的な安全対策を講じることが可能となることが期待される。

そこで、同一施設から採取した部材 HS-1~14(本編表-2)を上記の実測区画として取り扱い、計14部材の耐荷力データから、栈橋上部工全体における部材耐荷力の極値の推定を試みた。

ここで、部材の耐荷力により構造物の安全性や信頼性を保証する上では、部材群の耐荷力の最小値が適切な評価指標となるのが一般的である。しかし、部材群の耐荷力の最小値だけでなく、例えば、最大値についても予定された性能限界を下回った場合、構造物は非常に危険な状態であることが容易に判断されることとなる。このため、本研究では、検討の対象とする栈橋上部工全体の部材耐荷力の最小値の極値とあわせて、最大値の極値を確率論的に推定することを試みた。



付図-A1 栈橋の標準断面および平面図

#### 2. 施設概要と部材耐荷力の算定

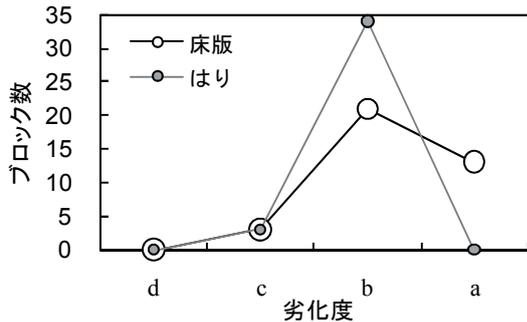
##### (1) 対象施設の概要

検討の対象は、1964~1966年に建設され、著しい劣化により2004~2008年に撤去された栈橋RC上部工(全37ブロック)である。栈橋の標準断面図および1ブロックの平面図を付図-A1に示す。

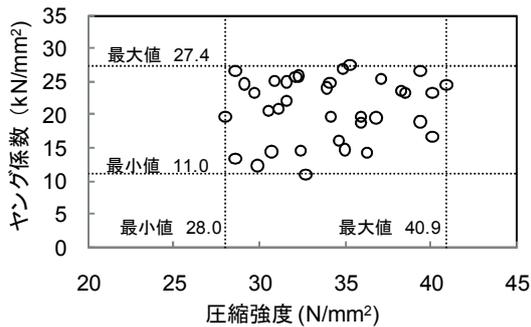
当該施設は、塩害に起因する変状の顕在化により、施設の機能や安全性が低下したと判断され、栈橋上部工全体の撤去および更新が行われた。上部工の撤去は、まず、床版中央部(約1.5m×1.5m)をコンクリートカッターにより切り出し、その後、はり部分をワイヤーソーにより切り出すことにより行われた。撤去工事期間は約5年であり、その間、工事未着手のブロックでは、著しい劣化により安全性が低下していると判断された部材(主として床版)上の荷役作業は禁止された。しかし、その他の部材上は作業可能であり、施設全体としては、ほぼ当初の目的通り供用されていた。なお、荷役作業禁止部材では、アスファルト舗装上に立入り禁止の旨を明示することにより、利用者への注意喚起がなされていた。

付図-A2に、2002年に判定された床版およびはりの劣化度分布を示す。ここで、劣化度 a~d は、一般に、部材ごとに判定されるものであるが、付図-A2では、各ブロックにおける床版およびはりの代表的な劣化度を示している。ほぼ全ての部材で主に塩害による劣化が顕在化しており、はりよりも床版の方が劣化の進行が著しい状況であった。

床版のひび割れおよび浮きが認められない箇所からコアを採取し、圧縮強度試験を行った。付図-A3にコア計35本の圧縮強度およびヤング係数を示す。コンクリートの力学的性質はばらつきが大きく、化学分析の結果より、アルカリ骨材反応による損傷の影響であることが考えら



付図-A2 栈橋上部工の劣化度分



付図-A3 コンクリートの力学的特

付表-A1 部材 HS-1~14 の劣化度ごとの部材数

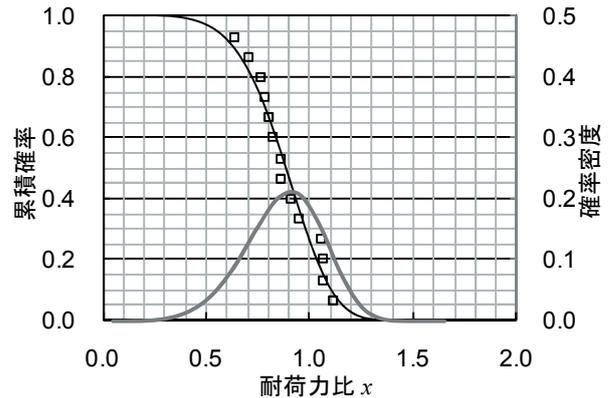
劣化度	試験部材数	換算部材数 $n_s$
d	1	0.4
c	4	1.3
b	5	2.4
a	4	2.0
計	14	6.1

れた<sup>付A2)</sup>。また、比較的劣化が進行していない床版から採取した、目視で発錆が認められない鉄筋の降伏点およびヤング係数は本編表-4に示したとおりである<sup>付A2)</sup>。本編2章で述べたとおり、当該施設のコンクリートの配合、鉄筋種別等や、各ブロックの建設時期は不明であるため、以降では、全ての部材に同材料が使用され同時期に建設されたとして取り扱うこととした。

#### (2) 実測区画と部材の耐力比の算定方法

付表A-1に、部材 HS-1~14における劣化度ごとの部材数を示す。同表における換算部材数  $n_s$  は、床版中央部(約 1.5 m×1.5 m)を 1.0 とした場合の部材HS-1~14の部材下面部の面積比である。本研究では、換算部材数  $n_s$  の総和を実測区画として取り扱い、栈橋上部工全体における部材耐力の極値を求めることとした。

部材 HS-1~14の耐力比は、本編2章で述べた曲げ載荷試験により得られた最大荷重を、劣化が生じていないとしてはり理論により求めた計算曲げ耐力で除することにより求めた。計算曲げ耐力の算出には、いずれの部材



付図-A4 耐力比の最小値分布

付表-A2 各パラメータと代表値、標準偏差(最小値)

尺度パラメータ $\eta$	5.41
形状パラメータ $m$	0.95
期待値	0.87
最頻値	0.91
標準偏差	0.16

についても、鉄筋の物性値は実測値を用いた。また、コンクリートの圧縮強度およびヤング係数は、部材の耐力比に対して安全側の評価を行うこと目的として、コアの圧縮試験から得られた両者の最大値を用いた(付図-A3)。ここで得られる耐力比は、本編2章で計算された値とは異なるものとなる。

ここで、部材 HS-1~14は、栈橋上部工37ブロック中の数ブロックにおける床版中央部から採取したものである。また、本研究でははり部材の耐力比調査は行っていない。しかし、検討対象とした栈橋上部工は、はりよりも床版の方が劣化の進行が著しく、一部では、かぶりの大部分の剥落だけでなく主鉄筋が腐食により破断している床版も見られた。このことから、はりよりも床版の方が栈橋上部工全体の構造安全性に与える影響は大きいと考え、床版の耐力に関する限られたデータから、栈橋上部工全体における部材の耐力の極値を推定した。

### 3. 栈橋上部工全体における部材耐力の極値の推定

#### (1) 部材耐力の最小値の推定

部材の耐力比の最小値分布は、本編3章と同様に、下限値を 0.0 としたWeibull分布の累積分布関数で表した。Weibull分布の各パラメータは、累積確率  $F_{III}(x)$  と累積確率  $F(x_i)$  の差の2乗和が最小となる値を繰返し計算により求めた。

極値統計解析では、評価対象区画に対する実測区画の比を再帰期間  $T$  として、対象区画全体の極値を推定することができる。検討対象とした栈橋上部工では、1ブロック

あたり9部材の床版が存在する．そこで，式（付A2）により算出した再帰期間  $T$  を用いて，式（付A1）から栈橋上部工全体における部材の耐荷力比の最小値を推定した．

$$T = N_s / \sum n_s \quad (\text{付A2})$$

ここに， $T$ ：再帰期間， $N_s$ ：栈橋上部工床版の部材総数（333部材 = 9部材×37ブロック）， $n_s$ ：HS-1～14の各換算部材数である．

付図-A4に耐荷力比の最小値の累積確率の実験値と計算値，および確率密度分布を示す．また，付表A-2に推定した漸近分布のパラメータと代表値，標準偏差を示す．なお，Kolmogonov - Smirnov 検定の結果，仮定した漸近分布は有意水準 5 % で妥当であった．付図-A4の耐荷力比の最小値分布は，左縦軸を  $1.0 - F_{III}(x)$ ，すなわち部材の耐荷力比の最小値が  $x$  以上となる確率として示している．式（付A1）より，検討対象とした栈橋上部工37ブロックにおける部材の耐荷力比の最小値は 0.45 と推定された．

#### (2) 部材耐荷力の最大値の推定

栈橋上部工全体における部材の耐荷力比の最大値の上限値は概念的に 1.0 と予測される．しかし，設計時の安全率の設定により，実際の部材の耐荷力は計算値のそれを上回る可能性が高い．本研究でも，劣化が生じていないとして求めた各部材の計算曲げ耐力に安全率を考慮していないことから，耐荷力比が1.0 を上回る部材が多数見られた．このことから，最大値の推定においては，耐荷力比に上限値を設定することは不適當であると考えられる．したがって，耐荷力比の最大値分布は，I型最大値漸近分布であるGumbel分布により表すこととした<sup>(付A3)</sup>．なお，Gumbel分布は，金属材料の最大孔食深さの推定に一般的に適用される極限形である<sup>(付A1)</sup>．

Gumbel分布の累積分布関数は式（付A3）で表される．

$$F_I(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\alpha}\right)\right] \quad (\text{付A3})$$

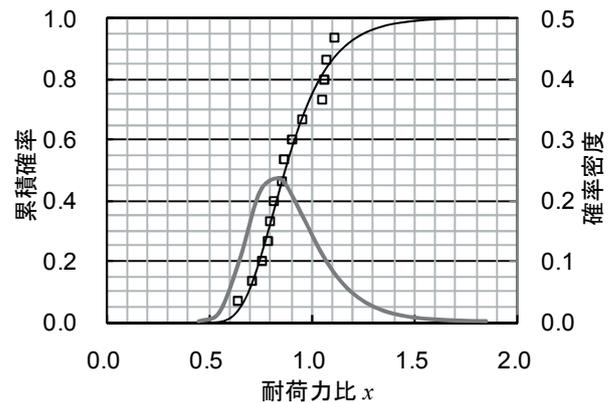
ここに， $\alpha$ ：尺度パラメータ， $\lambda$ ：位置パラメータである．

実験値の累積確率  $F(x_i)$  は，部材HS-1～14の耐荷力比データを大きい順に並べた順序統計量  $x_i$  を，式（付A4）に適用することにより算出した．

$$F(x_i) = \frac{i}{N+1} \quad (\text{付A4})$$

ここに， $i$ ：データの順位， $N$ ：劣化度ごとの耐荷力比データ数である．

Gumbel分布の各パラメータは，累積確率  $F_I(x)$  と累積確率  $F(x_i)$  の差の2乗和が最小となる値を繰返し計算によ



付図-A5 耐荷力比の最大値分布

付表-A3 各パラメータと代表値，標準偏差（最大

尺度パラメータ $\alpha$	0.15
位置パラメータ $\lambda$	0.81
期待値	0.90
最頻値	0.81
標準偏差	0.19

り求めた．

栈橋上部工全体における部材の耐荷力比の最大値については，最小値と同様に，式（付A2）による再帰期間  $T$  を用いて式（付A1）により推定した．

付図-A5に耐荷力比の最大値の累積確率の実験値と計算値，および確率密度分布を示す．また，付表A-3に推定した漸近分布のパラメータと代表値，標準偏差を示す．なお，Kolmogonov - Smirnov 検定の結果，仮定した漸近分布は有意水準 5 % で妥当であった．付図-A5の累積確率分布は，耐荷力比の最大値が  $x$  以上となる確率を示す．式（付A1）より，検討対象とした栈橋上部工37ブロックにおける部材の耐荷力比の最大値は 1.41 と推定された．

なお，耐荷力比の最小値および最大値の確率分布関数は，それぞれ独立した漸近分布に基づくものである．このため，耐荷力比の最小値と最大値の極値を比較することは，極値統計解析の目的に合致しないことを付記する．

#### 4. 部材耐荷力の極値の推定における今後の課題

本付録では，構造物中の一部の部材の耐荷力データから，構造物全体における部材の耐荷力の最小値および最大値の極値の推定を試みた．最小値および最大値のいずれの累積確率分布においても，極値は再帰期間  $T$  に大きく影響される．このため，提案した手法により構造物全体における部材の耐荷力の極値を求め，構造物の保有性能を評価する場合は，再帰期間の妥当性について検討することが必要である．

また，本研究では，同一構造物から複数のRC部材を採

取し、部材の耐荷力を直接調査することができた。しかし、実際に提案手法により部材耐荷力の極値の推定を行うには、複数のRC部材の破壊試験が必要となる。このため、提案手法を実構造物の維持管理の実務に適用することは困難であると言わざるを得ない。しかし、例えば、羽瀨ら<sup>(付A4)</sup>により提案された小型FWDによる損傷度調査のように、非破壊試験を利用し収集した部材の構造性能データを活用することで、確率論的に栈橋上部工全体における部材の保有性能評価を行うことも可能であると考えられる。効率的かつ効果的な維持管理の実現のためにも、今後、実構造物の詳細点検診断における構造性能データの有効な取得方法について検討する必要があるといえる。

#### 参考文献

- 付A1) 腐食防食協会編：装置材料の寿命予測入門－極値統計の腐食への適用－，丸善，1984年。
- 付A2) 加藤絵万，岩波光保，山路徹，横田弘：建設後30年以上が経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能，港湾空港技術研究所資料，No.1140，2006年。
- 付A3) 伊藤學，亀田弘行，黒田勝彦，藤野陽三 訳：土木・建築のための確率・統計の応用，丸善，1988年。
- 付A4) 羽瀨貴士，田中亮一，樋渡健，佐藤孝次：小型FWDを用いたASR劣化栈橋上部工の損傷度調査方法の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.7，2007年，pp.403-408。

付録B

栈橋上部工はりおよび床版の劣化度の割合

付表-B1 ブロック毎の劣化度の割合（施設①の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
2	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
3	0.00	0.67	0.33	0.00	0.00	0.54	0.38	0.08
4	0.00	0.73	0.17	0.10	0.00	0.67	0.17	0.17
5	0.00	0.29	0.60	0.10	0.00	0.67	0.33	0.00
6	0.00	0.42	0.35	0.23	0.00	0.79	0.21	0.00
7	0.00	0.42	0.19	0.40	0.00	0.67	0.13	0.21
8	0.00	0.63	0.29	0.08	0.00	0.58	0.21	0.21
9	0.00	0.42	0.23	0.35	0.00	0.63	0.17	0.21
10	0.00	0.77	0.21	0.03	0.00	0.65	0.35	0.00

付表-B2 ブロック毎の劣化度の割合（施設②の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.00	0.90	0.10	0.00	0.00	0.71	0.29	0.00
2	0.00	0.96	0.04	0.00	0.13	0.63	0.25	0.00
3	0.00	0.96	0.04	0.00	0.17	0.63	0.21	0.00
4	0.00	0.94	0.06	0.00	0.17	0.46	0.38	0.00
5	0.00	0.96	0.04	0.00	0.21	0.58	0.21	0.00
6	0.00	1.00	0.00	0.00	0.33	0.54	0.13	0.00
7	0.00	1.00	0.00	0.00	0.33	0.58	0.08	0.00
8	0.00	0.94	0.06	0.00	0.25	0.58	0.17	0.00
9	0.00	0.98	0.02	0.00	0.29	0.63	0.08	0.00
10	0.00	0.85	0.15	0.00	0.00	0.70	0.25	0.05

付表-B3 ブロック毎の劣化度の割合（施設③の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.63	0.17	0.21	0.00	0.30	0.60	0.10	0.00
2	0.41	0.14	0.41	0.05	0.63	0.38	0.00	0.00
3	0.45	0.27	0.27	0.00	0.38	0.63	0.00	0.00
4	0.68	0.09	0.23	0.00	0.38	0.50	0.13	0.00
5	0.59	0.18	0.23	0.00	0.75	0.13	0.13	0.00
6	0.64	0.18	0.18	0.00	0.63	0.38	0.00	0.00
7	0.77	0.18	0.05	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
8	0.73	0.18	0.09	0.00	0.75	0.25	0.00	0.00

付表-B4 ブロック毎の劣化度の割合（施設④の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.73	0.23	0.05	0.00	0.88	0.13	0.00	0.00
2	0.68	0.23	0.09	0.00	0.75	0.25	0.00	0.00
3	0.50	0.41	0.09	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
4	0.64	0.27	0.09	0.00	0.75	0.25	0.00	0.00
5	0.41	0.32	0.27	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
6	0.41	0.23	0.36	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00
7	0.59	0.23	0.18	0.00	0.63	0.38	0.00	0.00
8	0.50	0.32	0.18	0.00	0.88	0.13	0.00	0.00
9	0.68	0.18	0.14	0.00	0.75	0.25	0.00	0.00

付表-B5 ブロック毎の劣化度の割合（施設⑤の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.59	0.18	0.23	0.00	0.38	0.63	0.00	0.00
2	0.68	0.18	0.14	0.00	0.25	0.38	0.38	0.00
3	0.45	0.14	0.41	0.00	0.38	0.50	0.13	0.00
4	0.45	0.23	0.32	0.00	0.25	0.75	0.00	0.00
5	0.36	0.18	0.45	0.00	0.63	0.13	0.25	0.00
6	0.14	0.18	0.68	0.00	0.25	0.63	0.13	0.00
7	0.55	0.23	0.23	0.00	0.38	0.25	0.38	0.00
8	0.68	0.05	0.27	0.00	0.75	0.00	0.25	0.00
9	0.68	0.09	0.23	0.00	0.75	0.13	0.13	0.00

付表-B6 ブロック毎の劣化度の割合（施設⑥の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.00	0.78	0.22	0.00	0.00	0.93	0.07	0.00
2	0.00	0.86	0.12	0.01	0.00	0.90	0.10	0.00
3	0.00	0.79	0.16	0.04	0.00	0.88	0.12	0.00
4	0.00	0.63	0.30	0.07	0.00	0.87	0.12	0.02
5	0.00	0.87	0.13	0.00	0.00	0.94	0.04	0.02
6	0.00	0.62	0.33	0.06	0.00	0.75	0.23	0.02
7	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
8	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00

付表-B7 ブロック毎の劣化度の割合（施設⑦の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.00	0.86	0.14	0.00	0.00	0.84	0.16	0.00
2	0.00	0.96	0.04	0.00	0.00	0.96	0.04	0.00
3	0.00	0.98	0.02	0.00	0.00	0.89	0.11	0.00
4	0.00	0.92	0.08	0.00	0.00	0.86	0.14	0.00
5	0.00	0.88	0.12	0.00	0.00	0.93	0.07	0.00
6	0.00	0.98	0.02	0.00	0.00	0.75	0.25	0.00
7	0.00	0.94	0.06	0.00	0.00	0.68	0.32	0.00
8	0.00	0.96	0.02	0.02	0.00	0.79	0.21	0.00
9	0.00	0.98	0.02	0.00	0.00	0.75	0.25	0.00
10	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.25	0.00
11	0.00	0.96	0.04	0.00	0.00	0.96	0.04	0.00
12	0.00	0.92	0.08	0.00	0.00	0.68	0.29	0.04
13	0.00	0.76	0.24	0.00	0.00	0.86	0.14	0.00
14	0.00	0.86	0.14	0.00	0.00	0.93	0.07	0.00

付表-B8 ブロック毎の劣化度の割合（施設⑧の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.00	0.92	0.06	0.02	0.00	0.82	0.18	0.00
2	0.00	0.90	0.08	0.02	0.00	0.79	0.21	0.00
3	0.00	0.76	0.24	0.00	0.00	0.46	0.54	0.00
4	0.00	0.96	0.04	0.00	0.00	0.86	0.14	0.00
5	0.00	0.86	0.14	0.00	0.00	0.96	0.04	0.00
6	0.00	0.90	0.10	0.00	0.00	0.82	0.18	0.00
7	0.00	0.41	0.59	0.00	0.00	0.82	0.18	0.00
8	0.00	0.92	0.08	0.00	0.00	0.68	0.32	0.00
9	0.00	0.92	0.08	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
10	0.00	0.90	0.10	0.00	0.00	0.79	0.21	0.00
11	0.00	0.96	0.02	0.02	0.00	0.68	0.32	0.00
12	0.00	0.91	0.09	0.00	0.00	0.71	0.29	0.00
13	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.18	0.00
14	0.00	0.86	0.14	0.00	0.00	0.85	0.15	0.00

付表-B9 ブロック毎の劣化度の割合（施設⑨の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.00	0.91	0.09	0.00	0.00	0.85	0.15	0.00
2	0.00	0.79	0.18	0.04	0.00	0.82	0.18	0.00
3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.12	0.00
4	0.00	0.93	0.05	0.02	0.00	0.82	0.18	0.00
5	0.00	0.95	0.05	0.00	0.00	0.65	0.35	0.00
6	0.00	0.63	0.32	0.05	0.00	0.65	0.35	0.00
7	0.00	0.82	0.14	0.04	0.00	0.79	0.21	0.00
8	0.00	0.79	0.21	0.00	0.00	0.68	0.32	0.00
9	0.00	0.79	0.18	0.04	0.00	0.50	0.50	0.00
10	0.00	0.82	0.18	0.00	0.00	0.79	0.21	0.00
11	0.00	0.56	0.44	0.00	0.00	0.97	0.03	0.00
12	0.00	0.67	0.33	0.00	0.00	0.65	0.35	0.00
13	0.00	0.16	0.82	0.02	0.00	0.38	0.62	0.00
14	0.00	0.16	0.82	0.02	0.00	0.56	0.44	0.00

付表-B10 ブロック毎の劣化度の割合（施設⑩の場合）

ブロック No.	劣化度の割合							
	はり				床版			
	d	c	b	a	d	c	b	a
1	0.00	0.16	0.84	0.00	0.00	0.65	0.35	0.00
2	0.00	0.49	0.49	0.02	0.00	0.53	0.47	0.00
3	0.00	0.18	0.82	0.00	0.00	0.38	0.62	0.00
4	0.00	0.81	0.18	0.02	0.00	0.82	0.18	0.00
5	0.00	0.70	0.28	0.02	0.00	0.82	0.18	0.00
6	0.00	0.88	0.12	0.00	0.00	0.71	0.29	0.00
7	0.00	0.88	0.12	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
8	0.00	0.56	0.42	0.02	0.00	0.94	0.06	0.00
9	0.00	0.93	0.05	0.02	0.00	1.00	0.00	0.00
10	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
11	0.00	0.95	0.05	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
12	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
13	0.00	0.95	0.05	0.00	0.00	0.97	0.03	0.00
14	0.00	0.86	0.14	0.00	0.00	0.97	0.03	0.00

港湾空港技術研究所資料 No.1225

2010.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政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 © (2010) 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