

# 論文 塩害を受けたRC 栈橋上部工の構造性能評価

渡邊 真史<sup>\*1</sup>・横田 弘<sup>\*2</sup>・岩波 光保<sup>\*3</sup>・下村 匠<sup>\*4</sup>

**要旨** : RC 栈橋上部工から切り出した試験体の劣化調査と曲げ載荷試験を行い, 劣化度と構造性能の関係を調べた。初期剛性の低下は外観調査による劣化度判定によってほぼ評価できたが, 耐荷性の評価には主鉄筋の平均断面減少率と降伏強度およびヤング率の低下を考慮する必要があった。健全部では, 発錆限界を超える塩化物イオン濃度でも鉄筋の腐食はほとんど確認されず, ジャンカ等の初期欠陥が鉄筋腐食の主な原因であった。

**キーワード** : RC 栈橋上部工, 塩害, 鉄筋腐食, 初期剛性, 耐荷性, 劣化度

## 1. はじめに

筆者らは, 塩害等を受けた実際の港湾構造物の構造性能評価に関する研究を進めている。既往の研究<sup>1)</sup>により, 腐食による鉄筋の平均的な断面減少率を考慮することによって, 部材の耐荷性を概ね評価できることを確認している。一方, 曲げひび割れの発生から終局に至るまでの各荷重レベルに応じた部材の構造性能を, 正確かつ簡易的に評価することが望まれている。本研究では, 約40年間供用されたRC 栈橋上部工から切り出した試験体を対象に, 劣化調査と曲げ載荷試験を行い, 構造性能の低下を定量的に把握した。また, これらの構造性能と外観調査から判断した劣化度との対応について考察した。

## 2. 試験体概要

本研究で対象とした栈橋は, 1965年に供用を開始し, 2004年に撤去されるまで約40年間を経たものである。試験体は, この栈橋の法線直角方向に並んだ海側と陸側の2枚のスラブから切り出した, 6体の矩形断面はりである。なお, スラブの下面はHWL+0.9mの高さに位置する。**表-1**に試験体概要を, **図-1**に試験体採取位置を示す。曲げ載荷試験後に試験体から採取した鉄筋とコンクリートコアの強度試験の結果, 鉄筋の降伏強度とヤング率はそれぞれ, 358N/mm<sup>2</sup>および218kN/mm<sup>2</sup>, コンクリートの圧縮強度とヤング率はそれぞれ, 38.6N/mm<sup>2</sup>および29.1kN/mm<sup>2</sup>であった。

表-1 試験体概要

試験体名	1シリーズ(海側)			2シリーズ(陸側)		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
劣化度	O	III	II	I	III	II
断面幅 $b$ (mm) <sup>*1)</sup>	699	535	798	732	569	812
断面高さ $h$ (mm) <sup>*1)</sup>	300	300	300	310	310	310
上段引張主鉄筋本数 $n_1$ (本) <sup>*2)</sup>	3	4	3	3	3	3
下段引張主鉄筋本数 $n_2$ (本) <sup>*2)</sup>	5	4	6	5	5	6
上段有効高さ $d_1$ (mm) <sup>*1)</sup>	140	140	140	150	150	150
下段有効高さ $d_2$ (mm) <sup>*1)</sup>	250	250	250	260	260	260

\*1) 平均値, \*2) すべて直径13mmの丸鋼

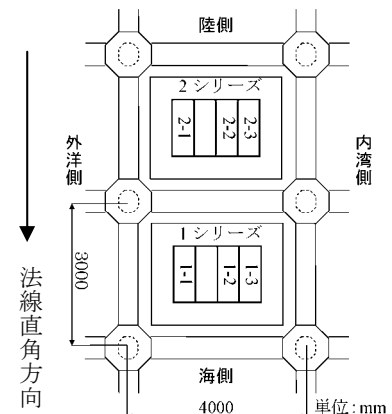


図-1 試験体採取位置

\*1 長岡技術科学大学 工学部建設工学課程 (正会員)

\*2 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 工博 (正会員)

\*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 主任研究官 工博 (正会員)

\*4 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 助教授 工博 (正会員)

### 3. 劣化調査

#### 3.1 外観調査

6体の試験体それぞれにおいて、鉄筋の腐食、かぶりコンクリートのひび割れと剥離・剥落の状況を目視によって観察し、港湾構造物の維持・補修マニュアル<sup>2)</sup>に示される基準により、劣化度をOからVの6段階で判定した。加えて、コンクリート表面の浮きとジャンカの位置を調べ、鉄筋の腐食位置との比較を行った。

#### 3.2 塩化物イオン量測定

曲げ載荷試験後、下面でひび割れ等の損傷がない健全部から直径75mmのコアを各試験体から1本ずつ採取し、下面から深さ100mmまでの全塩化物イオン量をJCI-SC4に示される電位差滴定法によって10mm毎に測定した。

#### 3.3 鉄筋腐食量測定

各試験体の主鉄筋をはつり出し、曲げスパン内1400mmの鉄筋を14分割し、腐食生成物を除去した後、質量と長さを測定することによって腐食量を求めた。腐食量は式(1)によって評価した。なお、腐食生成物の除去は、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液浸せき、サンドブラスト処理、ハンマー打撃によって行った。

$$R = \left( 1 - \frac{l_0}{m_0} \cdot \frac{m}{l} \right) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $R$ ：鉄筋断面減少率(%),  $l_0/m_0$ ：同試験体の健全鉄筋の単位質量当りの長さ (mm/g),  $m$ ：腐食鉄筋の質量(g),  $l$ ：腐食鉄筋の長さ(mm)

### 4. 曲げ載荷試験

試験体の初期剛性と耐荷性を知るため、曲げ載荷試験を行った。載荷条件と測定項目を図-2に示す。載荷はスパン1400mm、せん断スパン700mmの1点集中載荷とし、破壊に至るまで、載荷荷重、載荷点の鉛直変位と圧縮ひずみ、支点沈下量を両側面で測定した。曲げひび割れ発生荷重と主鉄筋降伏荷重は、荷重-載荷点変位曲線および荷重-圧縮ひずみ曲線の傾きが大きく変化するときの荷重とした。

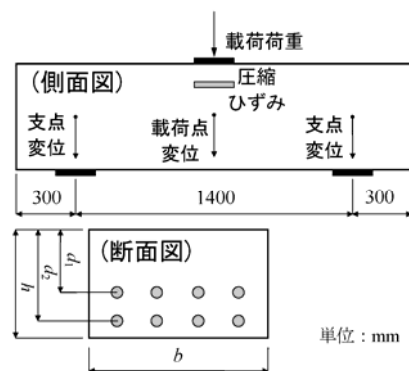


図-2 載荷条件と測定項目

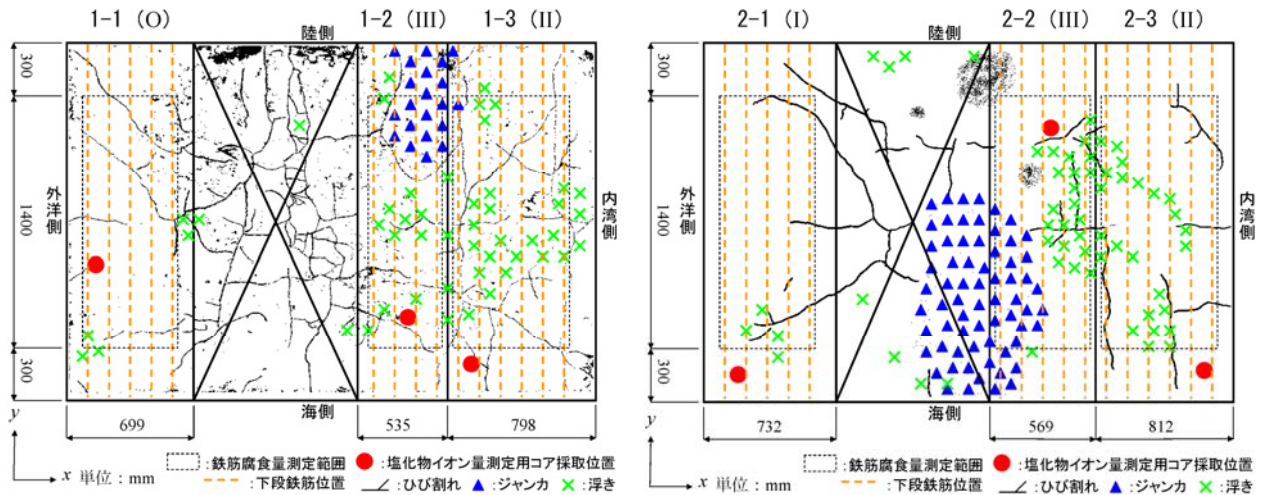
### 5. 実験結果

#### 5.1 外観調査結果

表-1に劣化度判定結果を、図-3にスラブ下面の劣化状況を示す。劣化度がOまたはIの試験体1-1と2-1では、一部に浮きが見られ、劣化度がIIの試験体1-3と2-3では、比較的広範囲に浮きが確認された。劣化度がIIIの試験体1-2と2-2では、広範囲の浮きに加え、下面から深さ約60~90mmのジャンカとその周辺部のコンクリートの剥離が見られ、鉄筋が露出していたとともに、その部分の腐食が顕著であった。

#### 5.2 塩化物イオン量測定結果

図-4に両シリーズの塩化物イオン量分布と、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に基づいた、水セメント比を50%としたときの拡散係数の推定値  $35.9 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$  と、飛沫帯における表面塩化物イオン量の標準値  $13 \text{kg}/\text{m}^3$  を用いたときの塩化物イオン量分布の計算値を示す。また、表-2にFickの第2法則に基づく拡散方程式によって実測値を回帰して求めた、表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数の推定値を示す。下段鉄筋位置までの塩化物イオン量の実測値は、計算値を下回った。海側の1シリーズの試験体において、表面塩化物イオン量が若干多い傾向にあったが、海側の試験体1-3よりも陸側の試験体2-1の方が多い場合もあった。また、両シリーズに共通して、外洋側の表面塩化物イオン量が多かった。飛沫帯では乾湿繰返しの影響を大きく受ける<sup>4)</sup>ということを考慮すると、試験体の部位による乾湿繰返しのサイクルや波浪特性の違い



※) x: 主鉄筋直角方向, y: 主鉄筋方向, ( ) 内の数字は劣化度

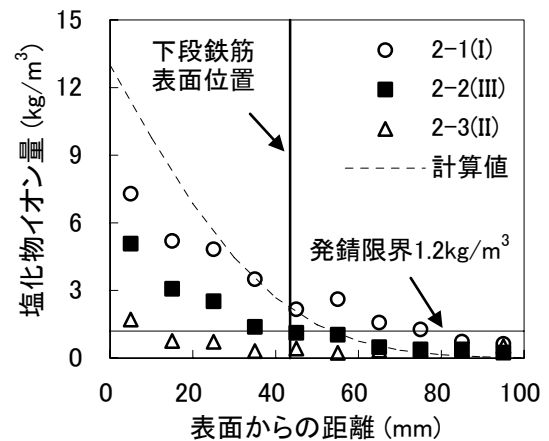
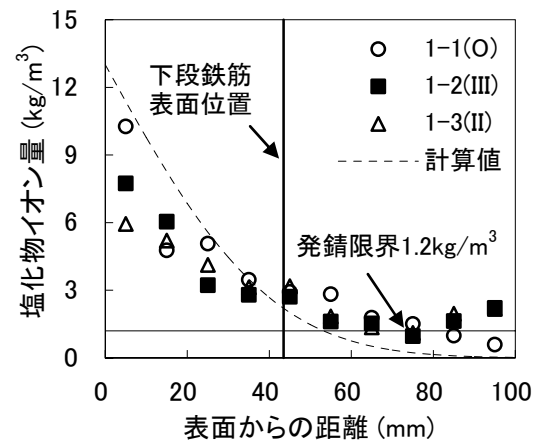
図-3 スラブ下面の劣化状況

によって、表面塩化物イオン量が異なっていたと考えられる。拡散係数はすべての試験体において推定値  $35.9 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$  を下回った。また、塩化物イオン量が下段鉄筋位置で発錆限界を超えていた試験体を含め、塩化物イオン量測定位置近傍の鉄筋の腐食はほとんど確認されなかった。したがって、本研究で対象とした試験体に関しては、ジャンカ等の初期欠陥の有無が、鉄筋の腐食位置とその程度に大きく影響を及ぼしていたものと考えられる。

### 5.3 鉄筋腐食量測定結果

図-5 に下段鉄筋の断面減少率分布を示す。図-3 と図-5 を比較すると、ジャンカと浮きがある部分において鉄筋の断面が減少していることがわかる。特に、ジャンカ部分と部材中央部において鉄筋の断面減少が著しく、初期欠陥とそれに伴うひび割れが鉄筋腐食の主な原因であった。なお、劣化度が II の試験体 2-3 に限り、上段鉄筋の一部において腐食を確認した。

図-6 に鉄筋断面減少率の区間毎の平均値を示す。各試験体において、鉄筋断面減少率の中央2区間の平均値と14区間の平均値を比較すると、劣化度が O または I の試験体 1-1 と 2-1 ではその差が小さかった。劣化度が II 以上の残りの4体の試験体では、鉄筋断面減少率が中央部で高かった。特に、劣化度が III の試験体 1-2 と 2-2 よりも、劣化度が II の試験体 1-3 と 2-3 の方

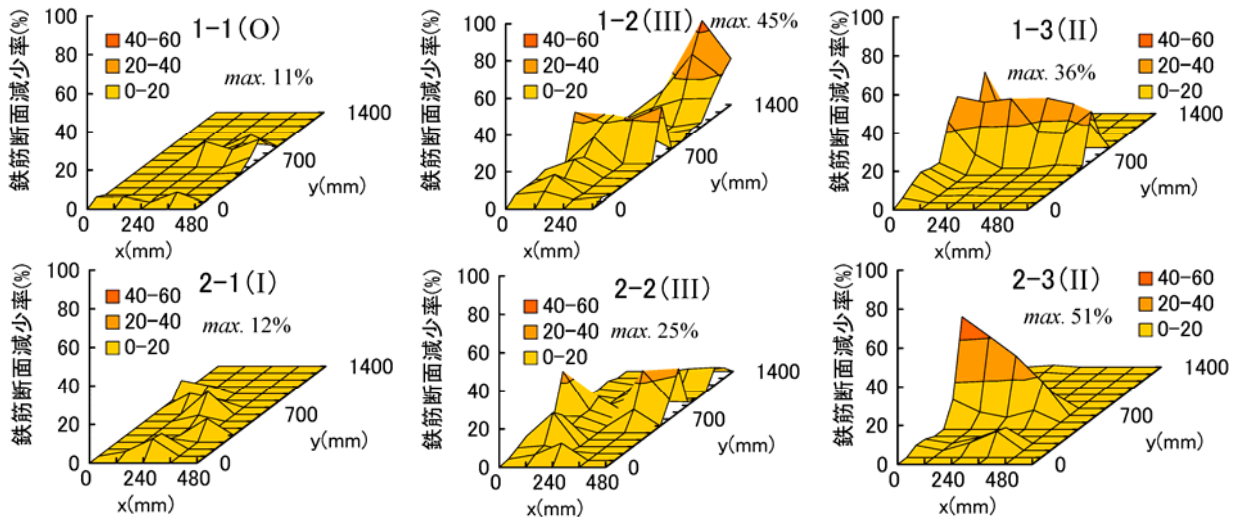


※) ( ) 内の数字は劣化度

図-4 塩化物イオン量分布

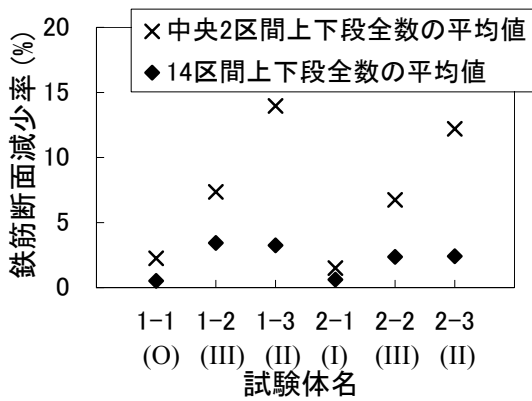
表-2 表面塩化物イオン量  $C_0$  と見かけの拡散係数  $D$  の推定値

試験体名	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
$C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	10.8	8.79	6.55	7.80	5.26	2.03
$D(\times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s})$	6.50	5.01	10.4	2.66	5.04	9.99



※) ( ) 内の数字は劣化度, x と y 方向および測定範囲は図—3 に対応

図—5 下段鉄筋の断面減少率分布



※) ( ) 内の数字は劣化度

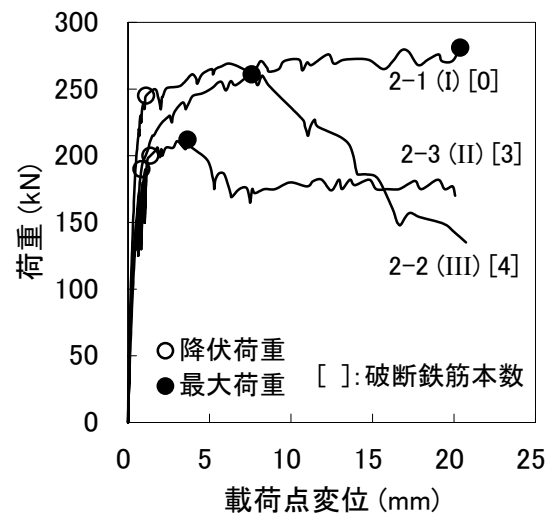
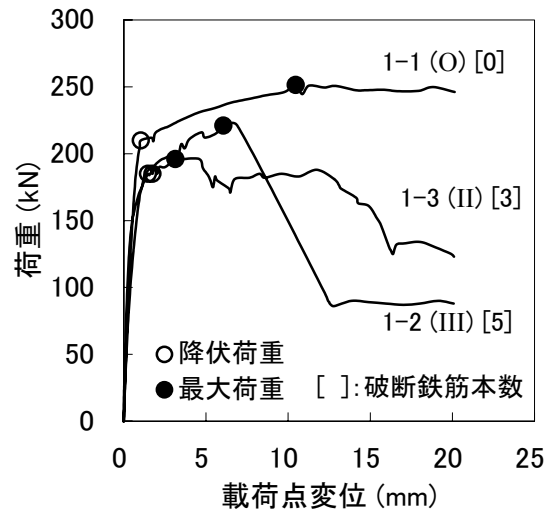
図—6 鉄筋断面減少率の区間毎の平均値

が、中央部における鉄筋断面減少率が高かったということに着目すると、目視による劣化度判定では、劣化度が II または III の試験体において、耐荷性を決定づける局所的な鉄筋の腐食程度を正しく評価していない可能性があった。

#### 5.4 曲げ載荷試験結果

##### (1) 破壊性状

すべての試験体は、主鉄筋降伏後に曲げ破壊した。図—7 に載荷点変位が 20mm に達するまでの荷重と載荷点変位の関係を示す。劣化度が II 以上の試験体において、鉄筋の破断が確認された。また、劣化度が大きいほど鉄筋の破断本数と主鉄筋降伏後の荷重の低下が著しかった。なお、曲げひび割れ発生荷重の実測値は表—3 に示すとおりである。



※) 載荷点変位は支点沈下量を引いた補正值, ( ) 内の数字は劣化度

図—7 荷重と載荷点変位の関係

表-3 曲げひび割れ発生荷重  $P_{cr}$  の実測値

試験体名	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
$P_{cr}$ (kN) <sup>※)</sup>	110	55	80	100	70	90

※) 載荷前に発生していたひび割れが載荷によって進展した際の荷重値も曲げひび割れ発生荷重とした。

(2) 曲げ剛性比

それぞれの試験体がもつ初期剛性の違いを、式(2)に示す曲げ剛性比によって評価した。

$$S = \frac{1}{EI} \cdot \frac{P_{cr} \cdot lz}{4\varepsilon} \quad (2)$$

ここに、 $S$ ：曲げ剛性比、 $EI$ ：2. 試験体概要に記した値から計算した各試験体の健全な場合の曲げ剛性(N・mm<sup>2</sup>)、 $P_{cr}$ ：表-3に示す曲げひび割れ発生荷重の実測値(N)、 $l$ ：スパン(mm)、 $z$ ：図心軸から圧縮ひずみ測定位置までの距離(mm)、 $\varepsilon$ ：曲げひび割れ発生時の圧縮ひずみの実測値

図-8に曲げ剛性比と劣化度、図-9に曲げ剛性比と鉄筋断面減少率の関係を示す。ここで、初期剛性はスパン全域の鉄筋の腐食程度に依存すると仮定し、鉄筋断面減少率は14区間の平均

値を採用した。図-8より、曲げ剛性比の値から評価した初期剛性の低下は試験体のシリーズによって若干傾向が異なったが、目視による劣化度判定によってほぼ評価できた。さらに、図-9より初期剛性はスパン全域の平均的な鉄筋の腐食程度で決定されていたことがわかる。

(3) 耐荷性

表-1に示す断面諸元の試験体において、健全な場合の主鉄筋降伏荷重と最大荷重を表-4に示す条件で計算し、これに対する主鉄筋降伏荷重と最大荷重の実測値の割合をそれぞれ、降伏荷重比、最大荷重比とし、耐荷性を評価した。

図-10に降伏荷重比と劣化度、図-11に降伏荷重比と鉄筋断面減少率、図-12に最大

表-4 計算条件

		主鉄筋降伏時	最大荷重時
応力状態	コンクリート	圧縮のみ 弾性体	示方書 <sup>5)</sup> の応力-ひずみ関係
	鉄筋	降伏	降伏

※) 材料強度はすべて2. 試験体概要に記した値

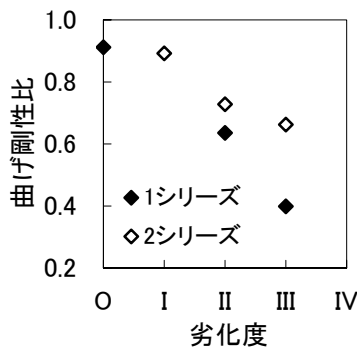


図-8 曲げ剛性比と劣化度の関係

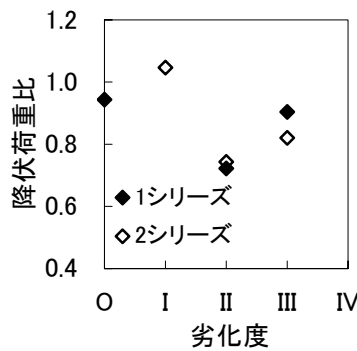


図-10 降伏荷重比と劣化度の関係

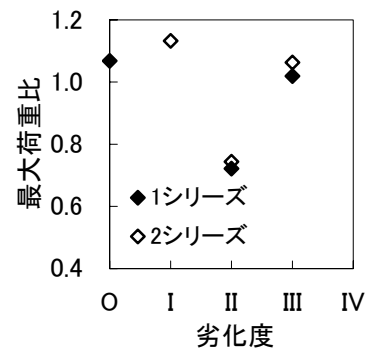


図-12 最大荷重比と劣化度の関係

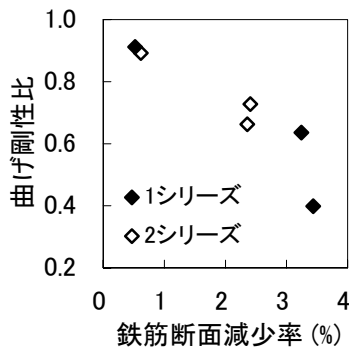


図-9 曲げ剛性比と鉄筋断面減少率の関係

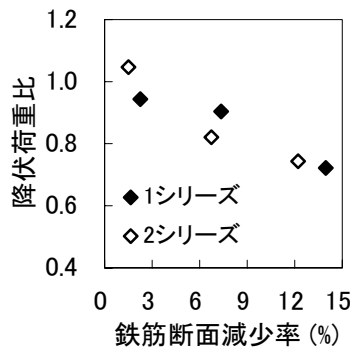


図-11 降伏荷重比と鉄筋断面減少率の関係

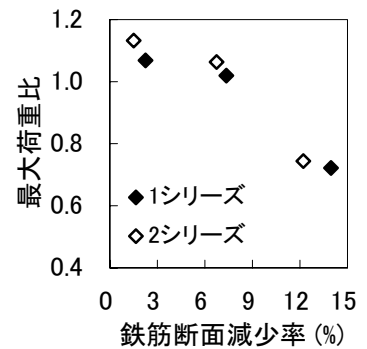
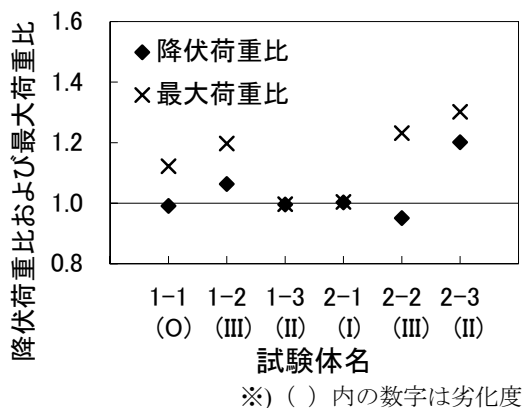


図-13 最大荷重比と鉄筋断面減少率の関係

荷重比と劣化度，**図-13**に最大荷重比と鉄筋断面減少率の関係を示す。ここで，部材の耐荷性は力学的に厳しい部位における鉄筋の腐食程度に左右されると仮定し，鉄筋断面減少率は中央2区間の平均値を採用した。なお，すべての試験体の破壊は中央2区間の範囲内で生じた。

**図-12**より，劣化度と降伏荷重比および最大荷重比の関係に相関は見られなかった。劣化度がOまたはIの試験体では耐荷性の低下はなかった。また，劣化度IIの試験体よりも劣化度IIIの試験体の方が耐荷性に優れていた。これは前述したとおり，スパン中央部における鉄筋の腐食が，劣化度IIの試験体の方が著しかったためである。また，**図-11**および**図-13**より，スパン中央の鉄筋の腐食程度を考慮することで，降伏荷重比および最大荷重比の低下を評価できることが確認された。よって，力学的に厳しい部位の鉄筋の腐食程度の把握が部材の耐荷性評価の上で必要不可欠であると考えられる。

中央2区間の鉄筋断面減少率とこれに対応する鉄筋の見かけの降伏強度およびヤング率の低下<sup>6)</sup>を考慮し，各試験体の主鉄筋降伏荷重と最大荷重の値を計算し，これに対する主鉄筋降伏荷重と最大荷重の実測値の割合をそれぞれ降伏荷重比，最大荷重比として求めた。その結果を**図-14**に示す。最大荷重比の値は1.0~1.3であり，すべての試験体において計算値は実測値をより小さく評価したが，降伏荷重比の値は0.95~1.2であり，試験体1-1と2-2のみ，計算値は実測値をより大きく評価した。腐食に伴う



**図-14** 降伏荷重比と最大荷重比

鉄筋の降伏強度とヤング率の低下程度は，鉄筋の材質や腐食部分の形状，腐食環境によって異なる<sup>6)</sup>。そのため，降伏荷重比が1.0を下回った試験体1-1と2-2では，腐食部分の形状によって載荷時に鉄筋に発生する応力が局部的に集中し，耐荷性が損なわれた可能性がある。

## 6. まとめ

- (1) 施工不良によるジャンカとそれに伴うひび割れが，鉄筋腐食の主な原因であった。
- (2) 外観調査による劣化度判定から部材全体の平均的な鉄筋の腐食程度を把握でき，その結果は，曲げひび割れ発生時の部材の力学的挙動とよく整合した。
- (3) 部材の耐荷性は，力学的に厳しい部位の鉄筋断面減少率と，鉄筋の降伏強度およびヤング率の低下に依存した。また，外観調査による劣化度判定のみでは耐荷性を危険側に評価する恐れがある。

## 参考文献

- 1) 横沢篤，加藤絵万，横田弘，下村匠：供用40年が経過したRC栈橋上部工の劣化と構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.1591-1596, 2005.
- 2) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術研究センター，pp.95-97, 1999.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，p.80, 2002.
- 4) 丸屋剛，Somnuk TANGTERMSIRIKUL，松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化，土木学会論文集，No.585/V-38, pp.79-95, 1998.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，p.26, 2002.
- 6) 李翰承，友澤史紀，野口貴文：鉄筋の腐食がその力学的性能の低下に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.877-882, 1995.