

# 論文 材料劣化した構造部材の性能評価のための基礎的研究および軍艦島 構造物 65 号棟梁部材への適用に関する研究

関 新之介\*1・今本 啓一\*2・清原 千鶴\*3

**要旨**：既存構造物の性能評価を行う上で、材料劣化した部材の構造性能を評価する手法を確立することは重要である。本研究は電食させた RC 梁に対して衝撃振動試験および曲げ試験を行い、固有振動数と初期剛性および降伏耐力の関係を検討し、実構造物で構造性能を評価するための手法について検討を行うものである。実験結果から固有振動数と初期剛性および降伏耐力には一定の相関があり、部材の初期剛性もしくは固有振動数の比から降伏強度を推定する方法の可能性を示した。この方法を軍艦島構造物の一棟(65号棟)に準用し、その梁部材の固有振動数の計測結果に基づいて降伏耐力を推定した結果、降伏耐力は健全部と比較して 10% および 20%減少する可能性のあることを示した。

**キーワード**：鉄筋腐食、電食、曲げ耐力、初期剛性、衝撃振動試験、既存構造物、非破壊試験

## 1. はじめに

既存構造物の性能評価を行う上で、材料劣化した部材の構造性能を評価する手法を確立することは重要である。鉄筋腐食等の材料劣化が生じた鉄筋コンクリート(以下 RC)部材の構造性能に関しては関連する知見が集積されつつある<sup>1)</sup>。しかし、これらの知見を実構造物へ応用するにあたっては、劣化した状態を原位置で評価する必要があり、またその評価にあたっては極力非破壊的な手法によることが望ましい。この種の方法の一つとして、材料劣化した実構造物の構造性能を常時を含めた微動計測によって評価する取り組みがあるが、材料劣化を生じた部材への適用は必ずしも多くない。筆者らは既往の研究<sup>2,3)</sup>において実構造物の構造性能調査の方法として軍艦島構造物のスラブにおいて人的載荷試験を実施するとともに、振動計測を同地点で行い、そこで得られた初期剛性と固有振動数を関連付けて材料劣化した実構造物部材の構造性能を簡易的に評価する方法について検討を行っているが、あくまで微動計測に基づく剛性の簡易評価の域を出ておらず、部材耐力の評価に向けた課題は多い。

現在、世界遺産の構成資産となった軍艦島構造物群の保存が要望されている。その保存のための耐力の非破壊的評価方法を開発することを試みた。本研究では鉄筋腐食させた RC 梁に対し、衝撃振動試験及び曲げ試験を行い、固有振動数と初期剛性および降伏耐力の関係を検討し、実構造物で評価可能な構造性能簡易推定手法の確立を試みた。さらに得られた知見を軍艦島 65 号棟の腐食した梁部材に対して応用し、65 号棟梁部材に対して衝撃振動試験を行ってその降伏耐力の予測を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体の寸法及び配筋を図-1 に示す。供試体は実構造物に近づけるため、一般的な梁部材の実寸法の 1/6 程度の縮小模型とした。外形寸法は L1300mm×B60mm×H100mm のモルタル単純梁である。鉄筋(D10)は軸方向鉄筋を供試体上下部に 2 本ずつ配置し、せん断補強筋(Φ4)を 35mm 間隔で配筋した。また、梁の打設後、固定支持することが出来るよう梁の両小口中央にあと施工アンカーを施工した。モルタルの調合および材料物性値を表-1 に、主鉄筋の物性値を表-2 に示す。モルタルには通電をよくするため、練混ぜ水に 10%NaCl 水溶液を使用している。また、RC 梁作製時に強度試験用の円柱試験体も同時に作製した。モルタルの 28 日強度および、梁部材の降伏耐力測定時におけるモルタルの強度特性を表-3 に示す。

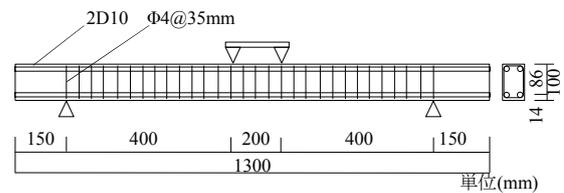


図-1 供試体概要

表-1 モルタル調合および材料物性

混合比			物性値			
水	セメント	細骨材	フロー値 (mm)	空気量 (%)	練温度 (°C)	単位容積 質量 (kg/L)
0.5	1	3	195.6	3	20.3	2.28

\*1 東京理科大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 東京理科大学大学院 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

\*3 東京理科大学大学院 工学部建築学科嘱託補手 工博 (正会員)

表-2 鉄筋の物性

鉄筋		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
呼び径	鋼種		
D10	SD295A	345	477

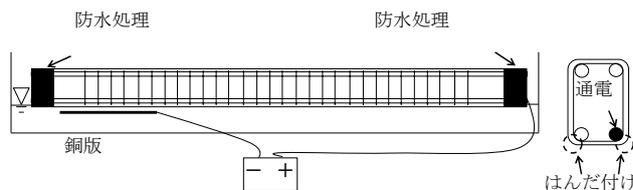
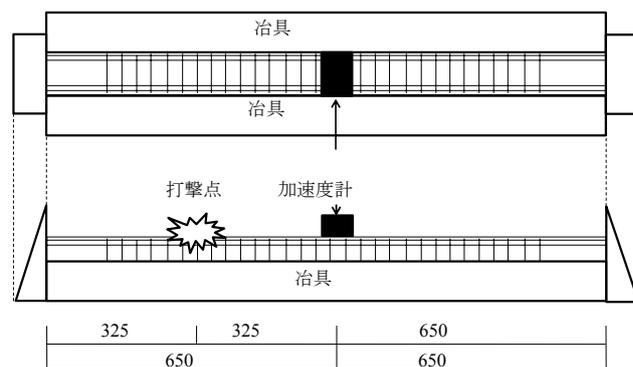


図-2 電食概要

表-3 降伏耐力測定時のモルタルの強度特性

目標腐食率(%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
0	36.3	5.2
5	38.5	5.0
10	39.8	4.5
20	37.7	4.5
25-1		
28日強度	39.1	-



単位: mm

図-3 衝撃振動試験概要

## 2.2 腐食促進試験

塩害、中性化などによる鉄筋腐食を再現するために、鉄筋を電氣的に腐食させる方法(以下、電食)を用いた。電食は図-2 に示すように直流電源装置の陽極と供試体の主筋、陰極と銅版を接続し、供試体と銅版を10%NaCl水溶液の入った水槽に浸して通電させる方法をとった。腐食生成物の流出を極力抑えるため水位は主筋位置より下となるように調節するとともに両端のアンカー部付近のコンクリートに腐食によるひび割れが発生し、振動性状に影響を与えないよう両小口付近にエポキシ樹脂を塗って防水処理を施した。

電食試験を行う研究の多くは主筋の腐食性状と構造性能の相関を検討するため、せん断補強筋を配筋していないケースが多い。一方、実構造物においては、主筋よりかぶりの小さいせん断補強筋が先行して腐食することが考えられる。また、鈴木らの研究<sup>4)</sup>等によればせん断補強筋は主筋の腐食に伴う付着劣化を抑制するとしており、その抑制効果はせん断補強筋の腐食状況によって変化することが推測される。さらに、コンクリート内部のひび割れ性状もせん断補強筋の腐食状況により変化することが想定されるため、本研究においては図-2 に示すようにせん断補強筋と下部主筋二本を結束線として用いた銅線を介してはんだ付けし、二本の主筋の内一本を直流電源装置の陽極に接続することで、せん断補強筋と二本の主筋を電氣的に接続して、せん断補強筋の腐食を誘導した。

電食に用いる腐食減量、通電時間および電流値の関

係には田森らの実験式<sup>5)</sup>を用いて、主筋の腐食率が5%、10%、20%、25%となるように積算電流量を決定し直流電流1Aの通電を行い、一体ずつ供試体を作製した。さらに、腐食の進行によって内部の腐食性状にばらつきが大きくなることを考慮して、目標腐食率25%供試体のみ二体作製した。また、腐食による初期剛性と固有振動数の経時変化を計測するため、目標腐食率5%、10%および20%の供試体は目標腐食率に達する以前に電食を複数回一時的に停止し、曲げ載荷試験による初期剛性測定、衝撃振動試験およびひび割れ幅の目視調査を行った。

## 2.3 衝撃振動試験

衝撃振動試験による計測状況を図-3 に示す。治具と固定支持したコンクリート梁の表面を重さ8.4g、径12.6mmの鋼球を高さ1mの地点から自由落下させて打撃し、供試体中央の加速度センサで発生する振動を測定した。実構造物においては梁上部の床スラブによって試験体弱軸方向の振動が拘束される。本研究ではこれを模擬するため梁弱軸方向を治具で固定した。

振動解析は加速度計によって得られる上下振動のみを抽出し、FFT(高速フーリエ)解析した。1回の測定での打撃回数は10回とし、全打撃のアンサンブル平均値をとってフーリエ振幅を求め、その一次ピークから固有振動数を特定した。

## 2.4 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験方法は載荷点間隔200mmの静的2点

曲げ荷重とし、初期剛性計測時には固有振動数との関係を検討するため、図-4 に示すように固定端での荷重を行った。腐食した梁試験体に曲げひび割れが入らないよう注意し、5kN までの荷重を行って初期剛性を得た。降伏耐力を測定する場合には図-1 に示すように支点間隔 1000mm のピン支持とした。

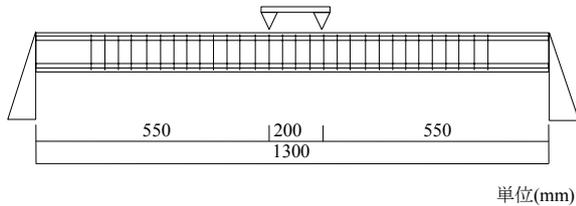
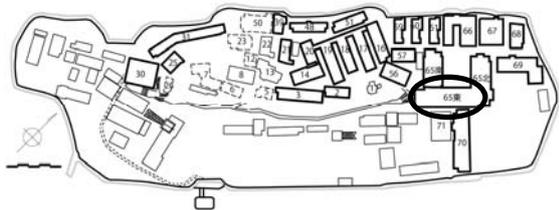


図-4 固定端荷重試験概要

### 3. 実構造物計測概要

#### 3.1 計測対象

対象となる部材は図-5 に示す軍艦島東部に存在する 65 号棟東棟の 3F 梁および 4F 梁部材の中で、腐食の性状が明確に別れた三体に対して行った。既往の研究<sup>9)</sup>において 65 号棟のコア圧縮強度試験等の調査が行われており、参考値として記す。



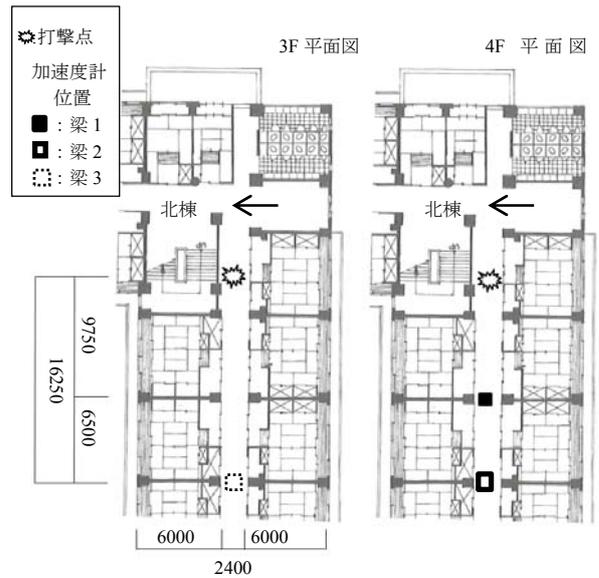
竣工年	2F 内部コア圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1944	30.7

図-5 65号棟東棟位置

#### 3.2 計測方法概要

計測は図-6 に示す位置の梁中央上面の床スラブの上に加速度計を設置し、打撃点において人がジャンプして加振を行った。腐食の進行が軽度な順に梁 1、梁 2 および梁 3 として、計測対象の梁部材の配筋および両側面の腐食性状を図-7、図-8 および図-9 に示す。

振動解析は 2.3 同様に加速度計によって得られる上下振動のみを抽出し、FFT(高速フーリエ)解析した。1 回の測定での打撃回数を 3 回とし、全打撃のアンサンブル平均値をとってフーリエ振幅を求め、その一次ピークから固有振動数を特定した。



単位:mm

図面は文献<sup>7)</sup>より抜粋

図-6 加速度計位置

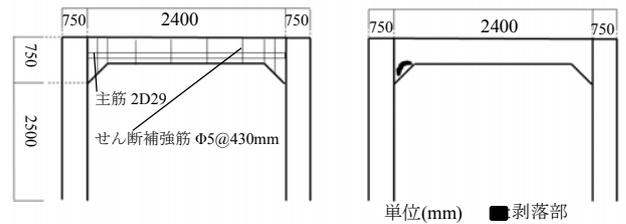


図-7 梁 1 および梁配筋図

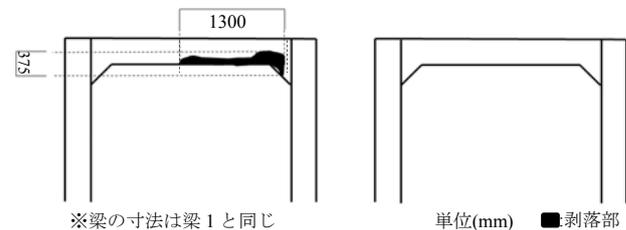


図-8 梁 2 腐食状況

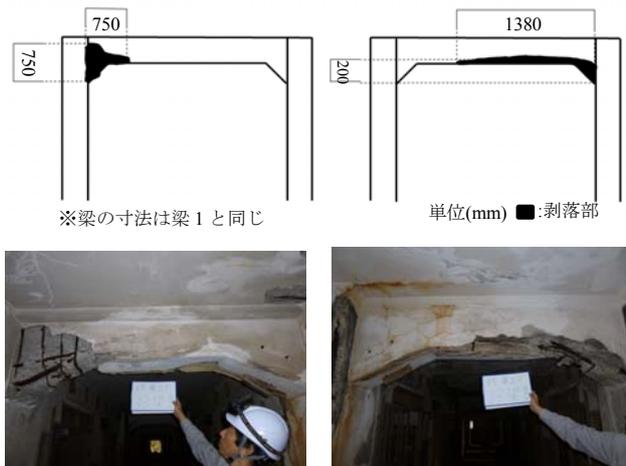


図-9 梁3 腐食状況

#### 4. 実験結果

##### 4.1 腐食促進試験結果

終局耐力を測定した後、曲げ載荷試験および衝撃振動試験結果に影響が大きいと考えられる中央 400mm 地点の鉄筋をはつりだし、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬後、腐食生成物の除去を行って質量を測定し、未腐食時の質量との比からの腐食率を算定した。陽極との接続を行った鉄筋を主筋 1、せん断補強筋を介して電食される鉄筋を主筋 2 として、主筋 1、主筋 2 およびせん断補強筋の腐食率を表-4 に示す。このとき、せん断補強筋は中央 400mm 内に存在するものの平均値である。表-4 に示す通り目標腐食率と実測腐食率は腐食初期においては誤差が少ない傾向にある。また、全腐食減少率において直接陽極と接続された主筋 1 は主筋 2 に比べ、腐食率が大きいことがわかる。予測腐食率 20%以上の個体に関しては主筋 2 の腐食率が小さく、目標腐食率との誤差が大きくなった。これは、腐食が進行し目標腐食率に達する以前にせん断補強筋が切れ、主筋 2 の陽極との接続が切れてしまったことが原因であると考えられる。

表-4 目標腐食率と実測値の関係

目標腐食率(%)	5	10	20	25-1
主筋 1 腐食率(%)	9.62	13.82	19.14	24.65
主筋 2 腐食率(%)	8.89	12.43	12.39	20.04
せん断補強筋 腐食率(%)	6.19	8.86	20.63	19.21

各試験体のひび割れ幅を 5cm 間隔で目視調査し、得られたひび割れ幅の平均と田森らの実験式<sup>5)</sup>より積算電流量の値から計算する鉄筋の推測腐食率の関係を図-10 に示す。鉄筋の腐食率が上昇すればひび割れ幅も

増大することがわかる。剥落が発生した目標腐食率 25%の試験体に関しては剥落部を除いて算出しているため、測定結果にばらつきがある。図-10 に示す近似式は腐食率 20%までのものである。

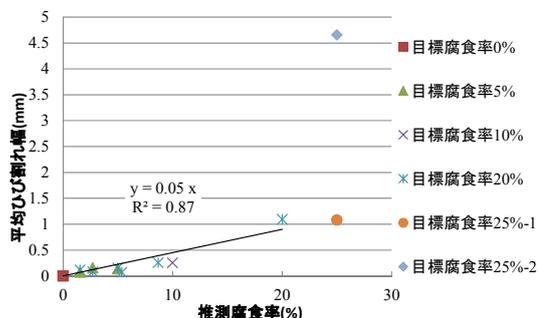


図-10 推測腐食率と平均ひび割れ幅

##### 4.2 衝撃振動試験および曲げ載荷試験結果

曲げ載荷試験結果および衝撃振動試験結果を図-11 および図-12 に示す。予測腐食率が 20%までの場合、腐食が進行するに連れて固有振動数、初期剛性ともに減少する傾向を示す。

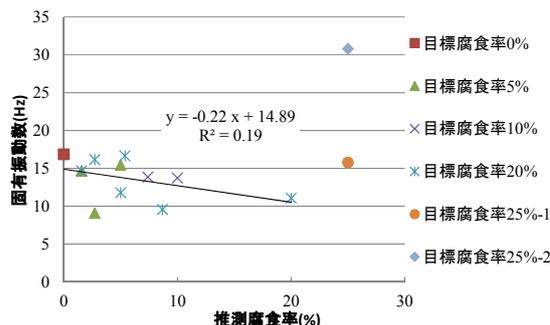


図-11 推測腐食率と固有振動数

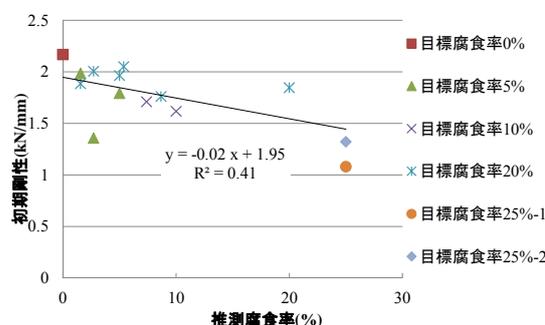


図-12 推測腐食率と初期剛性

図-13 に予測腐食率 20%の初期剛性および固有振動数の推移を示す。これによれば予測腐食率 20%までの固有振動数の推移は初期剛性の推移と概ね一致しており、固有振動数の測定によって部材の初期剛性を評価

することが可能になるものと思われる。

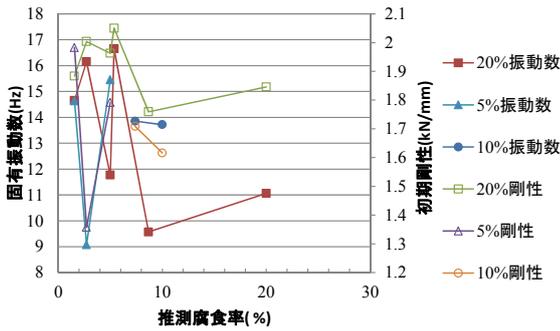


図-13 初期剛性および固有振動数の推移

なお、腐食の推移において一時的に初期剛性が上昇している点が存在するが、これは腐食生成物が液体となって流出し、剛性が上昇したものと推測する。この挙動が現実の部材においても生じるか否かは今後の検討が必要であるが、総じて、初期剛性、固有振動数は腐食によって減少の傾向を見せると判断できる。

図-14に腐食前の試験体の測定値を1とした場合の腐食率20%までの初期剛性比と固有振動数比の関係を示す。初期剛性比と固有振動比には一定の相関が存在し、固有振動数の変化量の0.4程度の低下量で初期剛性が変化している。

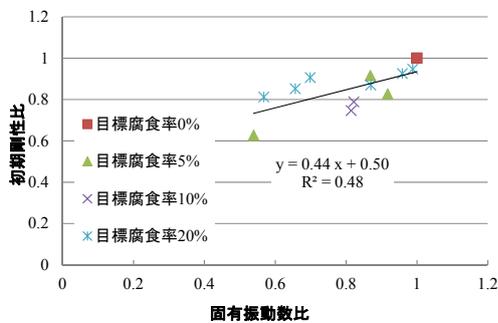


図-14 初期剛性比と固有振動数比

なお、腐食率25%地点において固有振動数が再び上昇したため、衝撃振動試験終了後、25%-2試験体の打撃部直下を切断し、断面のひび割れ性状を確認した(写真-1)。その結果、上部鉄筋にも腐食が確認され、上面から25mm付近とせん断補強筋に沿ったひび割れが確認された。このひび割れによって打撃面にうきが生じ、固有振動数に影響したと考えられる。これはせん断補強筋を通して微量な電流が上部鉄筋に流れ、腐食が進行したことで発生したと推測される。

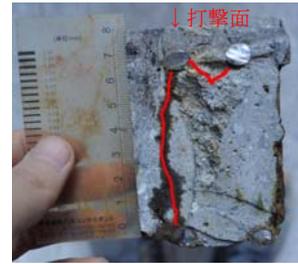


写真-1 打撃直下の断面

図-15および図-16に腐食前の試験体の測定値を1とした降伏強度比と初期剛性比および腐食率20%までの固有振動数比の相関を示す。固有振動数比および初期剛性比はどちらも降伏強度比と一定の相関をもち、健全な部材と腐食した部材の初期剛性もしくは固有振動数の比を得ることが出来れば、降伏強度の推定が可能であると考えられる。

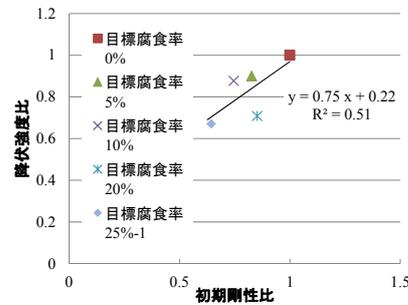


図-15 初期剛性比と降伏強度比

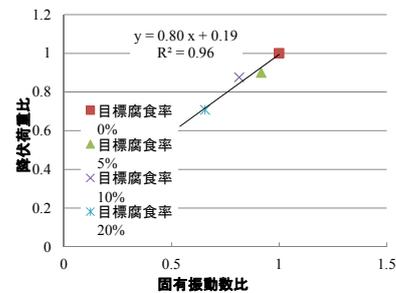


図-16 固有振動比と降伏強度比

RC梁の曲げ降伏モーメントは式(1)により表すことが出来る。ここで健全部材の曲げ降伏時の荷重を求め、図-15および図-16の結果から初期剛性比および固有振動数比を用いて腐食部材の降伏荷重を以下の式(2)および式(3)と表すこととした。これらの計算結果および実際の測定結果を表-5に記す。これによると式(2)、式(3)ともに実測値をよく表していると考えられる。

$$M_{Ry} = 0.9 \times a_t \times s \sigma_y \times d \quad (1)$$

$$P_f = (0.75 \times k_a/k_n + 0.22) \times P_n \quad (2)$$

$$P_f = (0.8 \times \omega_d/\omega_n + 0.19) \times P_n \quad (3)$$

ここに,

$M_{Ry}$ : 曲げ降伏モーメント(kN\*mm)

$a_t$ : 引張鉄筋の断面積(mm<sup>2</sup>)

$\sigma_y$ : 引張鉄筋降伏強度(N/mm<sup>2</sup>),  $d$ : 有効梁せい(mm)

$P_f$ : 腐食部材の予測降伏曲げ耐力(kN)

$P_n$ : 式(1)から求める健全部材の降伏曲げ耐力(kN)

$k_d$ : 腐食部材の初期剛性(kN/mm)

$k_n$ : 健全部材の初期剛性(kN/mm)

$\omega_d$ : 腐食部材の固有振動数(Hz)

$\omega_n$ : 健全部材の固有振動数(Hz)

表-5 測定降伏荷重と計算による降伏荷重

鉄筋腐食率 (%)	測定降伏荷重: A(kN)	式(2)結果: B(kN)	式(3)結果: C(kN)	B/A	C/A
5	17.46	16	17.6	0.92	1.01
10	16.99	14.85	16.03	0.87	0.94
20	13.73	16.36	13.63	1.19	0.99
25-1	13	13.39	-	1.03	-

## 5. 実構造物計測結果

表-6 に計測された固有振動数, 式(2)によって算定された降伏耐力および目視上健全部材と判断される梁1(図-7 参照)の固有振動数および降伏耐力を1とした場合の各はく離などの劣化を生じた部材の固有振動数比および降伏耐力比を示す。なお, 鋼材の力学性質は表-7 に基づいた。これによれば, 腐食の進行によって固有振動数は減少することが示されており, 一方, それによって予測される降伏耐力も減少することがわかる。すなわち, 梁2のような腐食性状(断面欠損率約3%)の場合10%, 梁3のような腐食性状(断面欠損率約9%)の場合は20%, 降伏耐力が減少していることがわかる。今後は実構造物での载荷試験などを通して微動計測結果より構造性能評価に向けたアプローチのためのデータをさらに集積していくことが重要であると考えられる。

表-6 各梁の固有振動数および降伏耐力比

	梁1	梁2	梁3
固有振動数(Hz)	14.74	13.28	11.04
固有振動数比	1	0.9	0.75
終局耐力(kN)	292.12	265.83	239.54
終局耐力比	1	0.91	0.82

表-7 梁1計算時の鉄筋の物性値

鉄筋	降伏強度
呼び径	鋼種 (N/mm <sup>2</sup> )
D25	SD295A 295

## 6. 結論

本研究における知見を以下に示す。

- 健全な部材との初期剛性比および固有振動数比によって, 腐食部材の降伏耐力をある程度予測できる。
- 本実験においては固有振動数測定が初期剛性を推定することが可能なのは腐食率20%までであった。
- 軍艦島65号棟の腐食梁に対して衝撃振動試験を行った結果, 本調査におけるような梁部材の腐食性状では降伏耐力は10%および20%減少していると予測できる。

今後は暴露供試体および実寸法供試体等を用いてより実構造物に近い実験を行って初期剛性と固有振動数測定を行うとともに実構造物部材のデータの蓄積を行って, 初期剛性および固有振動数と降伏耐力の関係性のデータの蓄積に努めたい。

## 謝辞

本論で使用した写真は長崎市の特別な許可を得て掲載したものです。論文作成にあたっては東京工業大学特別研究員飯山かほり博士の多大なご助力を賜りましたことに深く感謝の意を表します。

本研究は東京大学院工学研究科建築学専攻野口貴文教授が主査を務める軍艦島コンクリート調査WGの活動から続くものであり, 関係各位の御助力に対して付して謝意を表します。

## 参考文献

- 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, 2009
- 関新之介 今本啓一他: 軍艦島におけるバルトコンベアフレームの段階的劣化と構造物特性 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1147-1148, 2014
- 関新之介, 今本啓一他: 軍艦島65号棟における鉄筋コンクリート床スラブのたわみ剛性に関する研究 日本建築学会関東支部大会, pp.205-208, 2014
- 鈴木綾他: 繰り返し载荷を受ける鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する研究, 第39回土木学会関東支部技術研究発表会, V-10, 2012
- 田森清美他: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.269-276, 2004.4
- 今本啓一他: 軍艦島構造物群の劣化調査 その1 島内構造物群の概要と目視調査結果 日本建築学会学術講演梗概集 PP.1205-1206 2012
- 阿久井喜孝, 滋賀秀實 軍艦島実測調査資料集 東京電機大学出版局, 1984