

平成 25 年度研究実施

(一財)港湾空港総合技術センター研究開発助成

助成番号 : 平成 25 年 1 月 22 日付 第 12-4 号

研究開発項目 : (指定) ①港湾、海岸及び空港の施設の健全度評価に関する研究

鋼コンクリート接合部に鋼材腐食が
生じた港湾・海岸及び空港施設の
健全度評価手法の構築

平成 26 年 4 月 30 日

東北大学大学院 工学研究科
土木工学専攻

鈴木 基行

要 旨

我が国では、公共事業費が縮小される中で、適切な維持管理による既設構造物の長寿命化が必須の課題となっている。定期点検の実施とそのデータを活かした維持管理体制の構築が必要であるが、現在の定期点検は目視によるところが大きく、損傷状況の把握や構造性能の低下を適切に評価した上で、補修工法を定めることは容易ではない。そのような中、道路橋では鋼トラス部材がコンクリート床版に埋め込まれる箇所が発生する鋼材腐食の健全化が問題となっている。橋梁に限らず、港湾構造物や道路付属物や家屋の柱など、多様な構造物中に存在する鋼コンクリート接合部の健全性を点検するためには、簡便な振動試験を用いた検査手法の構築が望ましい。

そこで、本研究では、簡便な検査手法の構築と腐食が生じた鋼部材の構造性能評価への適用性を検討した。検査手法の構築では、トラス橋斜材と片持ち埋込柱を模擬し、H形鋼をコンクリートに埋め込んだ2種類の供試体を作製し、電食試験によって段階的に鋼材腐食を促進させた。この供試体に対し、小型加振器による強制振動試験および超音波試験を行い、コンクリート埋込部における鋼材腐食がH形鋼およびコンクリート部の振動特性に及ぼす影響を検討した。その結果、本実験の範囲では、i) H形鋼の減衰定数は腐食進展の初期(腐食率5%)において増加することから、トラス橋斜材や片持ち埋込柱の境界部腐食を同一手法によって評価できる可能性が示された。ii) コンクリート部の固有振動数(剛性率)から腐食率が推定可能である。iii) コンクリート部の減衰定数は線形に増加するが、ばらつきが大きく測定方法に課題が残された。iv) 超音波伝播速度(剛性率)の低下に着目して、腐食が大きい場合は劣化の有無が判定できるが、腐食率の推定は困難である、などの知見を得ることができた。

また、腐食が生じた鋼部材の構造性能評価を明らかにするため、フランジ幅厚比やウェブ幅厚比、細長比、腐食率、腐食区間をパラメータとした FEM 解析を行い、H 形鋼の座屈性状について整理した。その結果、i) 座屈区間および腐食率により座屈モードが変化する。ii) 腐食区間内で座屈が発生する場合は、座屈荷重が断面減少率と同程度まで低下する。iii) フランジ幅厚比が大きく、弾性座屈する部材では、腐食に伴い塑性座屈へと移行するため座屈変位が極めて大きくなる、などの知見を得た。

以上より、構造性能を評価するためには、鋼部材の寸法と腐食区間、腐食率の情報が必要であり、腐食率および腐食区間は鋼部材の減衰定数およびコンクリート部の固有振動数を測定することで推定可能あることが示唆された。しかし、本研究は基礎検討の段階であり、様々な条件に対し一貫して評価できるまでには至っておらず、今後とも基礎的データの蓄積が必要である。

目 次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究と課題の整理	3
1.2.1 コンクリート埋込部における鋼材腐食率推定に関する研究	3
1.2.2 鋼部材の構造性能に関する研究	4
1.3 研究の目的	6
1.4 本論文の構成	7
 2. 実験概要	12
2.1 概説	12
2.2 供試体諸元	12
2.3 電気腐食による鋼材の腐食促進試験	13
2.4 H 形鋼の曲げ振動試験	14
2.5 コンクリート部の縦振動試験	15
2.6 コンクリート部の超音波試験	16
 3. 鋼材腐食と振動特性に関する実験データの整理	32
3.1 電食試験による鋼材の腐食とコンクリート部のひび割れ状況	32
3.2 鋼材腐食と振動特性の関係	33
3.2.1 H 形鋼の曲げ振動試験	33
3.2.2 コンクリート部の縦振動試験	38
3.2.3 コンクリート部の超音波試験	41

3.3 まとめ	42
4. 腐食を考慮した H 形鋼の座屈解析	67
4.1 概説	67
4.2 解析モデルの概要	67
4.2.1 H 形鋼柱のモデル化	67
4.2.2 腐食パターンの設定	68
4.2.3 座屈荷重および座屈発生時変位の定義	69
4.3 解析結果	69
4.3.1 座屈荷重	69
4.3.2 座屈変位	70
4.4 まとめ	71
5. まとめ	81

1. はじめに

1.1 研究の背景

我が国では、1950年代から1970年代の高度経済成長期に整備された橋梁や、建築物が一斉に老朽化を迎える段階にあり、2030年には、現存する橋梁の約60%が耐用年数を超えることが予想される。これらの社会基盤構造物は、大切な資産として継続的に活用することが重要であり、中長期的な視野で予算配分を行い、効率化を図るアセットマネジメントの概念^{1,1)}が現在の土木技術者に強く求められ、延命化による更新投資の集中回避や維持管理費用の削減、LCCの削減、予算の把握などの効果が期待されている。このような社会情勢の中、変状が検出されてからの受身の処置であった維持管理体制が、構造物の将来の耐力や社会状況を予測し予め将来の維持管理計画を立てる体制へと変わり始めている。従って、将来の構造物の状況を正確に予測することが必要であり、現在の構造物の状況を正確に把握しなければならない。2030年には耐用年数を過ぎた橋梁が約60%にも及ぶ状況を鑑みると、今まで以上に効果的な定期点検の実施が望まれる^{1,2)}。しかし、現在の定期点検は目視や打音による点検が多く、熟練の技術者であっても構造物を適切に評価することができない。コンクリート内部の空隙やひび割れ、塗装した鋼材の腐食、コンクリート中の鋼材腐食などは、目視点検での検出が難しく、劣化度を判断することは極めて困難である。

トラス橋や構造物の柱等で見られる鋼とコンクリートの埋込部において、近年、鋼とコンクリートの境界面で鋼材が著しく腐食している事例が多く報告されている^{1,3),1,4)}。コンクリートの境界部鋼材腐食事例は、2001年の名取らの鋼構造物の調査報告^{1,4)}でも紹介されている。2007年には木曽川大橋、揖斐川大橋、本荘大橋のトラス橋において、写真-1.1に示すように、鋼とコンクリートの境界部でトラス部材が破断する事態が相次いで発見され

た¹⁵⁾。これらのトラス橋では、交通荷重によりコンクリートと斜材の間に隙間が生じ、雨水が浸透することによって斜材の破断が誘引されたとの知見が報告されている。部材の破断は、構造物の使用性や安全性を即時に低下させるため絶対に回避すべき事態であり、定期点検によって鋼材腐食の有無や劣化度を判断して迅速な補修・補強対策を施す必要がある。しかし、このような鋼とコンクリートの境界部腐食はコンクリート内部まで及んでいることから、通常の見視点検では鋼材腐食が著しく進展した場合においても発見は困難であり、発見できたとしても構造物の使用性や安全性を評価することはできない。実際に、上記の木曽川大橋や揖斐川大橋では、通常の定期点検において損傷が発見されず、コンクリートを除去した詳細調査において初めてトラス部材が破断していることが確認された。木曽川大橋、揖斐川大橋の破断事故以後、直轄国道では同形式の全ての鋼橋の一斉詳細点検が行われた。なお、本荘大橋はこのような一斉点検の調査中に、大型車両の通過によってトラス部材が破断したものである。

鋼とコンクリートの境界部鋼材腐食事例はトラス橋に限らず、**写真-1.2**のように住宅や港湾構造物、道路付属物(高欄、標識、街灯)など、多くの構造物が直面している問題である。鋼とコンクリート境界部の鋼材腐食は補修・補強が困難であり¹⁶⁾、塗装の塗り替え後の再劣化も懸念される。また、コンクリート境界部の鋼材腐食が著しく進展すると、木曽川大橋における斜材破断事例のような重大な事故を引き起こす危険性がある。こうした鋼トラス橋の一斉点検は鋼材周辺のコンクリート床版を除去するものであり、多くの労力と費用が費やされた。一方、地方自治体や市町村などが管理する橋梁などに対して一斉点検を実施するためには、コスト面で多くの課題が残されている。このような現状を踏まえると、見視点検では判断できないコンクリート境界部の鋼材腐食に対して、コンクリートを除去せずに鋼材の健全度を評価できる簡便な点検手法が必要であり、内部の状況を把握することが可能な非破壊検査が多方面に亘って研究されている¹⁷⁾。

橋梁、道路付属物、家屋など対象構造物が多数存在する問題に対して、振動特性を用い

た点検システムが数多く研究されている^{1.8)}。しかしながら、鋼材の腐食率推定には至っておらず、点検結果を維持管理に直接反映することはできない。

さらに、検査結果を維持管理に反映させるためには、腐食を考慮した鋼材の構造性能評価を行う必要がある。トラス橋の斜材や道路付属物、家屋の柱などの鋼部材は引張と圧縮を受ける場合とに分けられ、鋼材の引張荷重時の挙動は文献 1.9)でも示されているように、引張強さと伸びは腐食率(断面減少率)に比例して低下する事が知られている。しかし、腐食を考慮した圧縮荷重時の挙動は明らかにされておらず、検査結果から鋼部材の構造性能評価を行うためには、腐食を考慮した柱部材の座屈性状を把握する必要がある。

1.2 既往の研究と課題の整理

1.2.1 コンクリート埋込部における鋼材腐食率推定に関する研究

橋梁の振動特性に関する研究は、数多く報告されており構造形式や橋種、スパンに対する固有振動数と減衰定数に対して整理されている^{1.10)-1.12)}。現在、振動試験による橋梁全体の健全度評価から、木曾川大橋や揖斐川大橋、本荘大橋のトラス橋部材の破断を受けて、振動試験により部材の健全度評価を行う試みが見られるようになった。部材の中の局所的な損傷が橋梁上部工全体の振動特性に及ぼす影響は小さいことが多くの研究によって示されている^{1.13),1.14)}。同様に、橋梁全体の常時微動や衝撃振動からトラス部材の健全度評価を行う方法では、部材損傷度に対して、固有振動数の低下が小さいことが報告されている^{1.15)}。そのため、高次振動モード成分や部分構造(構造部材)の局所的な振動特性に着目する評価方法が提言されている^{1.16)-1.18)}。しかし、高次振動モードに着目して部材の健全度を解析的に評価することは可能であるが、トラス橋部材のように上部工全体の振動に対して揺れの小さい構造部材では、現場試験において常時微動や衝撃振動から高次の固有振動数や減衰定数を精緻に評価することは難しいと考えられる。吉岡ら^{1.19)}は、コンクリート境界部において鋼材腐食が生じたトラス橋の常時微動計測を行っており、トラス橋部材の健全部と損

傷部では、固有振動数に有意な差が見られなかったが、部分的に破断した斜材では明らかに減衰定数が増加傾向にあることを報告している。しかし、トラス橋の常時微動計測では精緻な応答波形を得ることが困難であるため、高次の固有振動数や減衰定数の評価には至っていない。

常時微動計測や衝撃振動試験などの応答加速度からフーリエ解析によって伝達応答関数を得る手法と比較して、加振器を用いて調和振動を与えた強制振動試験は、周波数を連続的に増加させ定常応答に基づいて振動特性を精緻に評価できる¹²⁰⁾。古川ら¹¹⁵⁾は、小型加振器を用いた加振により、トラス部材の振動計測を行っており、常時微動計測との比較から小型加振器による損傷同定の有用性を示した。また、鋼構造の接合部の検討では、接合方法により減衰定数が50%程度増加することが報告されており¹¹⁰⁾、鋼部材接合部の減衰特性に着目することにより、鋼とコンクリートの境界部鋼材腐食の判断が可能となると考えられる。著者ら¹²¹⁾はトラス橋斜材を模擬した供試体に対して、小型加振器を用いた振動試験を行っており、鋼材腐食に伴う固有振動数やフーリエ振幅比の変化は見られなかったが、減衰定数は健全時と比べ2~4割程度増加する傾向があり、損傷の検出が可能であることを報告した。

1.2.2 鋼部材の構造性能に関する研究

鋼コンクリート合成構造において、引張や圧縮を受ける鋼部材の構造性能に関する様々な研究が行われている。引張を受ける鋼部材について、腐食率(質量減少率)に対して鋼材料ごとに降伏点・引張強さ・伸びが直線的に低下することが明らかにされている^{19),122)}。

圧縮を受ける鋼部材については、1970年代から、牧野らに¹²³⁾よって、実験的にH形鋼柱の座屈性状についてまとめられており、フランジ幅厚比やウェブ幅厚比、細長比などをパラメータとして片押し・繰返し載荷実験を行っている。その結果、フランジ幅厚比が大きい場合はフランジ座屈後に耐力低下が生じ、フランジ幅厚比が小さい場合にはウェブ座屈後に耐力低下が生じることが報告されている。また、ウェブ幅厚比が大きい場合に座屈

波高が大きくなるため、最大荷重時変位が増大することも報告されている。H 形鋼柱以外にも、角形鋼管について実験的に座屈性状がまとめられている¹²⁴⁾。以上より、鋼柱の形状やフランジ幅厚比、ウェブ幅厚比、細長比に伴い座屈モードや座屈荷重、座屈発生時変位は複雑に変化することが知られている。そのため、多くの部材寸法に関して実験的に座屈性状を解明することは時間的・コスト的に難しく、従来から解析的な研究が数多く進められている^{125),126)}。

H 形鋼や角形鋼管の局部座屈に関する研究では、i) FEM による有限変位解析¹²⁷⁾、ii) 板要素の弾塑性座屈理論、iii) 降伏線理論(極限解析)¹²⁸⁾などの手法が用いられている。i) の手法は、H 形鋼や角形鋼管をシェル要素でモデル化し、材料非線形と幾何学的非線形を同時に考慮した有限変位解析を行うことによって、全体座屈、横倒れ座屈、局部座屈などの座屈発生点の予測や座屈後挙動も追跡できる。しかし、FEM 解析は広範囲な断面諸元や材料特性に対して汎用性を有しているが、モデル化の煩雑さや計算量、解の安定性などの問題が挙げられる。ii) の手法は、H 形鋼や角形鋼管を構成する板要素に着目し、支持条件(境界条件)と荷重条件を与えた板要素のポテンシャルエネルギーの釣合いを解くことによって、座屈強度を理論的に導くものである。弾性座屈と塑性座屈についても、これまでに様々な支持条件や荷重条件に対する理論解が示されている。iii) の手法は、座屈変形により H 形鋼や角形鋼管に生じる降伏線を予め仮定して、降伏線で消費されるエネルギーの釣合いを解くことによって座屈発生点を評価する。しかし、降伏線理論は、降伏線を仮定する位置に依存して解が著しく異なることが指摘されている。

H 形鋼や角形鋼管に対して、フランジ幅厚比やウェブ幅厚比、細長比、軸力の変化に伴う座屈荷重や座屈発生時変位、局部座屈領域などの座屈性状についてまとめられているが、腐食に対する座屈性状は依然として整理されていない。

1.3 研究の目的

本研究の最終的な目的は、橋梁、港湾構造物、住宅、道路付属物(高欄、標識、街灯)などの構造物に多く存在する鋼とコンクリートの境界部あるいはコンクリート内部の鋼材で発生する腐食に対して、簡易的な点検方法と構造性能評価法を提示することである。本研究は、非破壊検査による鋼材腐食レベルの推定における基礎的データの収集と腐食した鋼部材ごとの構造性能評価を目的として、実験的および解析的検討を行う。

実験的検討では、電食により鋼とコンクリート接合部の鋼材腐食を模擬した供試体を作製し、段階的に進展する鋼材の腐食と振動特性との関係を整理する。既往の研究と課題の整理を踏まえて、鋼とコンクリート境界部の鋼材腐食を評価するためには、橋梁上部工の振動とは分離されたひとつの構造部材の振動特性を評価する必要があると考えられる。そこで、高周波数域までの振動制御が可能な電磁コイル式小型加振器を用いた振動試験や超音波試験を行い、鋼材腐食に伴う固有振動数や減衰定数の変化を検討する。そして、これらの振動試験の結果を踏まえて、振動特性の変化に基づく鋼とコンクリート境界部の鋼材腐食量推定法の可能性を考察する。

解析的検討では、腐食欠損を考慮したH形鋼柱の座屈解析(FEMによる有限変位解析)を行う。これらの解析結果より、フランジ幅厚比やウェブ幅厚比、細長比、腐食率、腐食深さなどがH形鋼柱の座屈性状(座屈モード、座屈荷重、座屈発生時変位)に与える影響を整理する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、本研究の背景、既往の研究と課題を整理し、これらを踏まえ本研究の目的を示した。

第2章では、実験概要として全体の実験フロー、供試体諸元、電食試験、振動試験の概要を示した。

第3章では、H形鋼をコンクリートに埋め込んだ接合部供試体の電食試験の結果と、段階的に進展する鋼材腐食に対してこれらの振動特性を整理した。これらの振動試験より得られたデータを整理し、振動試験に基づく鋼とコンクリート境界部の健全度評価の可能性を考察する。

第4章では、FEM解析を用いて、腐食による断面欠損が生じたH形鋼柱の座屈性状に及ぼす影響を整理した。

第5章は、本論文の結論を示す。

参考文献

- 1.1) 宮川豊章, 保田敬一, 岩城一郎, 横田弘, 服部篤史: 土木技術者のためのアセット
マネジメントーコンクリート構造物を中心としてー, 土木学会論文集 F, Vol.64,
No.1, pp.24-43, 2008.
- 1.2) 小西真治: 鉄道構造物のメンテナンス技術に関する研究開発の現状と展望, 土木学
会論文集 F, Vol.54, No.4, pp.360-380, 2008.
- 1.3) 星野誠, 玉越隆史: 道路付属物支柱基部の腐食発生傾向に関する検討, 土木学会第
66 回年次学術講演会, VI-231, pp.461-462, 2011.
- 1.4) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論
文集, No.668/I-54, pp.299-311, 2001.
- 1.5) 加藤光男: 他人事ではない木曽川大橋の斜材破断, 日経コンストラクション, 2007
年 7 月 27 日号, pp.64-67, 2007.
- 1.6) 日本道路協会: 道路橋補修・補強事例集(2007 年版), 2007.
- 1.7) 土木学会: コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員
会(339 委員会)成果報告書, コンクリート技術シリーズ 88, 2009.
- 1.8) 庄健介, 平塚元康, 北村泰寿: 重錘打撃試験とニュートラルネットワークによる橋
脚の健全性一次診断法, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.105-117, 2003.
- 1.9) 梅田辰将, 藤井堅, 多賀谷宏三, 刈谷秋人: 引張試験による腐食鋼板の力学特性お
よび強度評価法, 土木学会中国支部第 56 回研究発表会, I-22, pp.43-44, 2003.
- 1.10) 伊藤学, 片山恒雄: 橋梁構造の振動減衰, 土木学会論文報告集, No.117, pp.12-21,
1965.
- 1.11) 加藤雅史, 島田静雄: 橋梁実測振動特性の統計解析, 土木学会論文報告集, No.311,
pp.49-58, 1981.

- 1.12) 加藤雅史, 島田静雄: 橋脚振動特性の実測データによる統計分析, 土木学会論文報告集, No.338, pp.229-232, 1983.
- 1.13) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁の損傷評価における力学挙動の有効性, 土木学会論文集, No.372/V-7, pp.75-84, 1986.
- 1.14) 中嶋章典, 阿部英彦, 倉西茂: 合成桁のずれ止め剛度の変化およびその変位が固有振動数に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.957-964, 1991.
- 1.15) 古川愛子, 大塚久哲, 清野純史, 梅林福太郎: 微動・自由振動・起振実験に基づく振動特性のばらつきと検出可能な損傷レベル, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1015-1026, 2005.
- 1.16) 小幡卓司, 早川俊郎, 佐藤浩一, 水草浩一: 振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.531-538, 2000.
- 1.17) 古川愛子, 大塚久哲: 高振動数領域のフーリエ振幅を用いた局所損傷同定, 応用力学論文集, Vol.11, pp.27-37, 2008.
- 1.18) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: 未知の加振力によるフーリエ振幅比を利用した損傷同定手法の実橋梁による検証, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.258-267, 2007.
- 1.19) 吉岡勉, 山口宏樹, 伊藤信, 原田政彦: 鋼トラス橋の振動特性の同定と斜材損傷が及ぼす減衰性能への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.295-305, 2009.
- 1.20) 小坪清真, 鳥野清: 常時微動測定による構造物の振動性状解析, 土木学会論文報告集, No.222, pp.25-36, 1974.
- 1.21) 内藤英樹, 伊東知哉, 青木峻二, 鈴木基行: 鋼材腐食が生じた鋼コンクリート接合部の振動特性に関する基礎的検討, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1060-1073, 2011.
- 1.22) 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, pp.877-882, 1995.

- 1.23) 牧野稔, 松井千秋, 三谷勲 : H 形鋼柱の局部座屈後の変形性状 その 2 荷重－変形関係, 日本建築学会論文報告集, No.286, pp.23-28, 1979.
- 1.24) 山田哲, 秋山宏, 桑村仁 : 局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集, No.444, pp.135-143, 1993.
- 1.25) 元結正次郎, 大塚貴弘 : 局部座屈を考慮した H 形鋼梁要素モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, No.582, pp.81-86, 2005.
- 1.26) 大塚貴弘, 金子健作, 元結正次郎 : 全体および局部座屈を考慮した H 形鋼トラス要素モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, No.636, pp.267-272, 2009.
- 1.27) 鈴木敏郎, 金子洋文 : 有限要素法による部材構成板要素の座屈及び座屈後挙動の大変形解析, 日本建築学会論文報告集, No.316, pp.9-17, 1982.
- 1.28) 加藤勉, 福知保長 : 板要素の変形能力について, 日本建築学会論文報告集, No.147,



※国土交通省三重河川国道事務所 HP より

(a) 木曽川大橋

(b) 本荘大橋

写真－1.1 トラス部材の破断事例



(a) 鉄製支柱

(b) 鋼製標識柱

写真－1.2 鋼部材の腐食事例

2. 実験概要

2.1 概説

本研究では、鋼コンクリート接合部を模擬した供試体を作製し、電食により鋼材腐食を促進させる。そして鋼材腐食率と振動特性に関する基礎的データを得ることにより、非破壊検査の可能性を考察する。供試体は、トラス橋の鋼部材がコンクリート床版や地覆等のコンクリートを貫通した状態にある**Truss** 供試体と、道路付属物や建物、住宅などの片持式の鋼製柱がコンクリートに埋設された状態にある**Column** 供試体の2種類を作製した。

本実験のフローを図-2.1に示す。i)電食試験により、鋼部材を段階的に腐食させ、ii)所定の積算電流量ごとに振動試験を行う(積算電流量とは、電流量[A]×電食時間[h]である)。iii)電食終了後、クエン酸水素二アンモニウム水溶液を用いてH形鋼の錆を除去し腐食率を測定する。振動試験は、鋼部材を対象とした曲げ振動試験と、コンクリート部を対象とした縦振動試験・超音波試験を行う。以下に、供試体諸元および実験概要を記す。

2.2 供試体諸元

木曾川大橋や本荘大橋において斜材の腐食による破断は、コンクリート床版との接合部で発生している。鋼とコンクリート接合部では、車両走行の振動などにより肌隙深さ(コンクリートと鋼部材間の隙間)が大きくなる。この肌隙で鋼材腐食は生じ、肌隙深さ以上は進行しないことが報告されている²¹⁾。通常、斜材はH形鋼や角形鋼が用いられるが、H形鋼は雨水に触れる面積が広いと、角形鋼に比べて腐食進行速度が大きい²²⁾。また、道路付属物や柱部材に関してもコンクリートや地面等の境界面で腐食が生じている²³⁾。そこで本研究では、H形鋼がコンクリートを貫通した接合形式の供試体(以下、**Truss** 供試体)と、コンク

リート内部で定着された接合形式の供試体(以下, **Column 供試体**)を作製して実験を行う。

Truss 供試体の作製にあたり, H 形鋼の寸法とコンクリート部の厚さは, 木曽川大橋におけるトラス部材の振動解析結果と同様の振動特性となるように定めた。汎用有限要素プログラム **MARC** を用いた振動解析の解析モデルおよび解析パラメータを図-2.2, 表-2.1, 2.2 に示す。振動解析の妥当性については, 内藤ら²⁴⁾が行った振動試験との整合性を確認している。木曽川大橋のトラス部材の振動解析では1 次固有振動数と2 次固有振動数の比は $f_1/f_2 = 1.12$ となり, 本実験で作製した供試体の固有振動数比は $f_1/f_2 = 1.19$ となった。以上より, 1 次と2 次の固有振動数比がほぼ等しいことから, H 形鋼の寸法とコンクリート部の厚さは表-2.1 を採用した。供試体概略図を図-2.3, 2.4 に示す。ひび割れの影響を考慮するために, **Truss 供試体**のコンクリート部の断面寸法は $600 \times 600, 300 \times 300$ [mm] の2 通りを作製した。

また, **Column 供試体**の埋め込み深さは, 道路付属物の埋め込み深さを参考にして, 全体の長さとの埋め込み深さの比を 4 : 1 とした。供試体概略図を図-2.5 示す。H 形鋼のコンクリート定着部は特に加工していない。それぞれの供試体について2 体, 計6 体を作製して実験を行った。供試体一覧を表-2.3 に示す。

なお, H 形鋼には一般構造用圧延鋼材 **SS400** を用い, **JIS G 3192** に準拠して, $100 \times 100 \times 6 \times 8$ [mm] (断面高さ×断面幅×ウェブ厚さ×フランジ厚さ)を用いた(図-2.6)。ミルシートに記載された鋼材の物性は, 降伏強度 346 MPa, 引張強度 452 MPa, 伸び 32 %である。また, コンクリートの配合および物性を表-2.4, 2.5, 2.6 に示す。

2.3 電気腐食による鋼材の腐食促進試験

コンクリート内部の鋼材腐食を模擬するにあたって行った電気腐食試験(以下, 電食)の概略と状況を図-2.7, 写真-2.1 に示す。実際の経年劣化と電食では鋼材の腐食性状が異なることが知られているが, 本実験は鋼材腐食率が極めて大きいため, 時間的な制約から

電食試験を行った。

実際のトラス橋の斜材が腐食する場合、斜材腐食面は全断面に亘って劣化しているケースが多い(写真-2.2)が、著者らのこれまでの検討においてコンクリート部の外側に電極(陰極)を設ける場合、フランジ端部が大きく腐食しウェブが腐食しなかった²⁴⁾。そこで、本研究では図-2.7のように、コンクリート内部に電極を設け、5% NaCl 溶液を供給するために電極とコンクリートの間に直径 8 mm の孔を開けている。なお、電極には内寸網目 25 mm の亀甲金網を使用している。

木曽川大橋や本荘大橋の斜材が破断したケースでは鋼材腐食率 60 %に達していたが、このような著しい鋼材腐食であっても定期点検では発見できなかった。そこで、本研究では重大な損傷となる前の検出を目指し、鋼材腐食率 20 % を目標として電食を行った。電食対象区間は Truss 供試体ではコンクリート部の 100 mm 区間、Column 供試体ではコンクリートに埋め込まれた定着長150 mmと定めた。また、腐食ひび割れの発生は特に鋼部材の減衰定数に大きく影響することが著者らのこれまでの研究で示されているため²⁴⁾、ひび割れが発生するまでは電食速度を遅くし、振動試験の測定間隔を短くしている。電食速度を表-2.7に示す。

2.4 H 形鋼の曲げ振動試験

片持ち梁の曲げ固有振動モードは図-2.8 のようになる。部材が劣化すると剛性低下や機構の変化により、固有振動モードや固有振動数、減衰定数が変化する。そのため、固有振動数や減衰定数に関する研究は様々な報告がされている。例えば、式(2.1)に示すように、構造物の剛性低下に伴い固有振動数が低下するため、衝撃振動試験による橋脚の健全度評価や、強制振動試験による橋梁全体の健全度評価が報告されている。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.1)$$

ここで、 f は固有振動数、 A は断面積、 l はスパン、 E は弾性係数、 I は断面2次モーメントである。また、実橋梁やRC供試体を対象とした振動試験によって、剛性低下率と減衰定数との関係がまとめられており²⁵⁾²⁷⁾、剛性低下に伴って減衰定数が増加することが示されている。しかし、コンクリート埋込部における鋼材腐食と振動特性に関するデータはない。鋼とコンクリート境界部の腐食が鋼材の振動特性に及ぼす影響を整理する。

本実験の鋼部材の曲げ振動試験概略図を図-2.9に、強制振動試験機一式を写真-2.3に示す。また、曲げ振動試験状況を写真-2.4に示す。本試験方法は、小型加振器を用いてH形鋼の張出し端部に調和振動を与え、H形鋼の応答加速度を測定し共振曲線(周波数-応答加速度関係と周波数-位相関係)を得る。

伝達棒に貼付した制御加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)の値が一定の加速度振幅となるように、デジタル振動コントローラによって小型加振器の出力を自動制御している。また、加振器・伝達棒・H形鋼はそれぞれ両面テープによって接着している。なお、著者らが所有する試験装置は、2～10,000 Hzの掃引試験(周波数スイープ試験)を可能とする。

振動試験は表-2.8に示す間隔で行った。腐食率3.0%程度までは、初期の腐食ひび割れの影響を捉えるために、測定間隔を短くしている。図-2.9のように、H形鋼の張出し端部から1cmの位置に加速度振幅 2.0 m/s^2 の調和振動を与える。Truss-B供試体は450～600 Hzを1分30秒間、Truss-A供試体は600～650 Hzを1分間、Column供試体は620～670 Hzを1分間で掃引試験を行った。Truss-A、B供試体はH形鋼端部から5cm間隔、Column供試体は10cm間隔に計測加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)を貼付して計測を行った。計測加速度ピックアップ貼付位置を図-2.10に示す。

2.5 コンクリート部の縦振動試験

以降では、曲げ振動試験と異なる縦振動(疎密波)に着目したコンクリート部の強制振動試験を縦振動試験と呼ぶ。図-2.11のように疎密波は加振方向と波の進行方向が同じであ

る。縦振動を用いた健全度評価の研究として、内藤ら^{2,8)}は道路橋 RC 床版の現場試験を行っており、疲労によるコンクリート内部の水平ひび割れが検知できる可能性を示している。また、凍結融解を受けるコンクリートの劣化度の研究では、縦振動試験から得られる固有振動数から算定される残存剛性率を劣化指標としている^{2,9), 2,10)}。従って、縦振動を用いた試験では、縦振動の伝播が及ぶ範囲内のひび割れや材料劣化を固有振動数を用いて評価することが可能である。本実験ではこの方法を用いて、固有振動数の変化を捉えることで、腐食によるコンクリートのひび割れやコンクリートと H 形鋼の乖離を捉えた腐食率推定の可能性を検討する。

コンクリート部の縦振動試験の概略と状況を図-2.12、写真-2.5 に示す。本試験方法は、小型加振器を用いてコンクリート部の側面から調和振動を与え、コンクリート部の応答加速度を測定し、共振曲線(周波数-応答加速度関係と周波数-位相関係)を得る。加振器は振動テーブルに貼付した制御加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)の値が一定の加速度振幅となるように、デジタル振動コントローラによって小型加振器の出力を自動制御している。また、加振器の振動テーブルとコンクリートを両面テープによって接着している。振動試験は表-2.8 に示す間隔で行った。全ての供試体において、図-2.12 の側面図に示す位置に加速度振幅 5.0 m/s^2 の調和振動を与え、 $500 \sim 10000 \text{ Hz}$ の範囲で 4 分間の掃引試験を行った。測定は、H 形鋼の強軸方向と弱軸方向の 2 方向に対して行い、計測加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)の貼付位置は、加振点の反対側のコンクリート側面とした。

2.6 コンクリート部の超音波試験

コンクリート部の超音波試験の概略と状況を図-2.13、2.14、写真-2.6 に示す。超音波試験は図-2.15 のように、ひび割れや鋼コンクリートの腐食損失を検出する試験である。超音波試験は、反射波や表面波、透過波を用いる方法があり、ひび割れや剥離の検出、伝播

距離・伝播時間・ひび割れ位置からひび割れ深さの算出が可能である。本研究では、鋼材腐食によるコンクリートと H 形鋼の剥離や、コンクリート部に発生する腐食ひび割れの検出を期待している。なお、著者らが所有する試験装置は、24kHz の発振・受振器による 2 探触子法である。弾性波を 1 秒間に 3 回送受信する。なお、発振・受振器とコンクリート間の隙間を埋めるためにグリスを接触媒質として用いた。超音波試験は表-2.8 に示す間隔で行った。また、コンクリートのみの部分(図-2.14 の①)と H 形鋼の強軸方向を含む部分(図-2.14 の②, ③), H 形鋼の弱軸方向を含む部分(図-2.14 の④, ⑤)に分け、コンクリート側面と上面から計測を行った。

参考文献

- 2.1) 貝沼重信, 細見直史, 金仁泰, 伊藤義人: 鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.97-114, 2005.
- 2.2) 加藤光男: 他人事ではない木曽川大橋の斜材破断, 日経コンストラクション, 2007年7月27日号, pp.64-67, 2007.
- 2.3) 星野誠, 玉越隆史: 道路付属物支柱基部の腐食発生傾向に関する検討, 土木学会第66回年次学術講演会, VI-231, pp.461-462, 2011.
- 2.4) 内藤英樹, 伊東知哉, 青木峻二, 鈴木基行: 鋼材腐食が生じた鋼コンクリート接合部の振動特性に関する基礎的検討, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1060-1073, 2011.
- 2.5) 小幡卓司, 早川俊郎, 佐藤浩一, 水草浩一: 振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.531-538, 2000.
- 2.6) 吉岡勉, 山口宏樹, 伊藤信, 原田政彦: 鋼トラス橋の振動特性の同定と斜材損傷が及ぼす減衰性能への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.295-305, 2009.
- 2.7) 古川愛子, 大塚久哲, 清野純史, 梅林福太郎: 微動・自由振動・起振実験に基づく振動特性のばらつきと検出可能な損傷レベル, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1015-1026, 2005.
- 2.8) 内藤英樹, 齋木佑介, 鈴木基行, 岩城一郎, 子田康弘, 加藤潔: 小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 4, pp.522-534, 2011.

- 2.9) 内藤英樹，林弘、齋木佑介，山洞晃一，古賀秀幸，鈴木基行：初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.3, pp.436-450, 2011.
- 2.10) 野口博章，満木泰郎，溝渕利明，山田啓介：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化深度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文E, Vol.62, No.3, pp.592-605, 2006.

表-2.1 断面諸元

	H 形鋼材の断面 寸法[mm]	鋼材長さ [mm]	コンクリート寸法 [mm]
実トラス部材	300×300×10×15	1420	1000×1000×220
本実験供試体	100×100×6×8	1300	1000×1000×100

表-2.2 解析パラメータ

	動弾性係数 [MPa]	要素寸法 [mm]
コンクリート(8 節点ソリット要素)	35000	25×25×25
H 形鋼材 (4 節点シェル要素)	200000	25×25

表-2.3 供試体一覧

	コンクリート部寸法 [mm]	鋼材長さ [mm]	構造形式	供試体数
Truss-A 供試体	300×300×100	900	トラス	2 体
Truss-B 供試体	600×600×100	900	トラス	2 体
Column 供試体	300×300×250	600	柱	2 体

表-2.4 コンクリートの示方配合

骨材の 最大寸法 [mm]	水セ メント 比 [%]	細骨 材率 [%]	単位量[kg/m ³]				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤
20	49.5	43.2	173	349	763	1048	3.49

表-2.5 コンクリートの物性

密度 [kg/m ³]	圧縮強度 [kN/mm ²]	動弾性係数 [MPa]	静弾性係数 [MPa]
2390	33.9	35200	28200

表－2.6 H 形鋼の特性

寸法 [mm]	鋼種	降伏強度 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]
100×100×6×8	SS400	346	452	32

表－2.7 電食速度

Truss 供試体	0～47.7[A・h]	47.7～318.3[A・h]
	0.38[A]	0.86[A]
Column 供試体	0～71.6[A・h]	71.6～447.4[A・h]
	0.57[A]	1.29[A]

表－2.8 測定間隔(各積算電流量)

	積算電流量[A・h]										
Truss-A 供試体	0	8.0	15.9	23.2	31.8	39.8	47.7	79.6	159.1	238.7	318.3
Truss-B 供試体											
Column 供試体	0	11.9	23.9	35.8	47.7	59.7	71.6	119.4	238.7	358.1	447.4

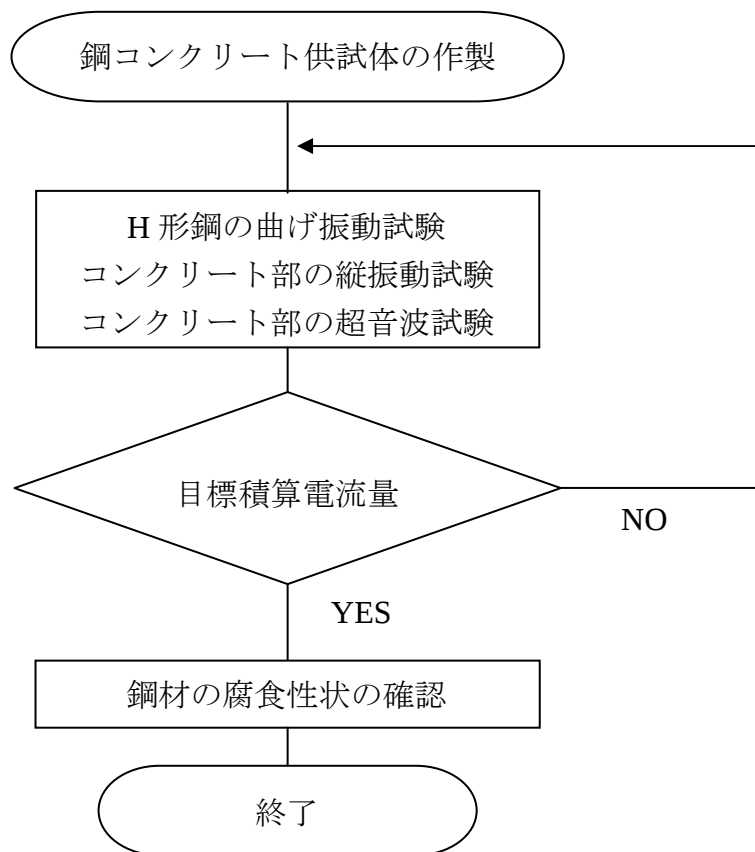


図-2.1 実験のフロー

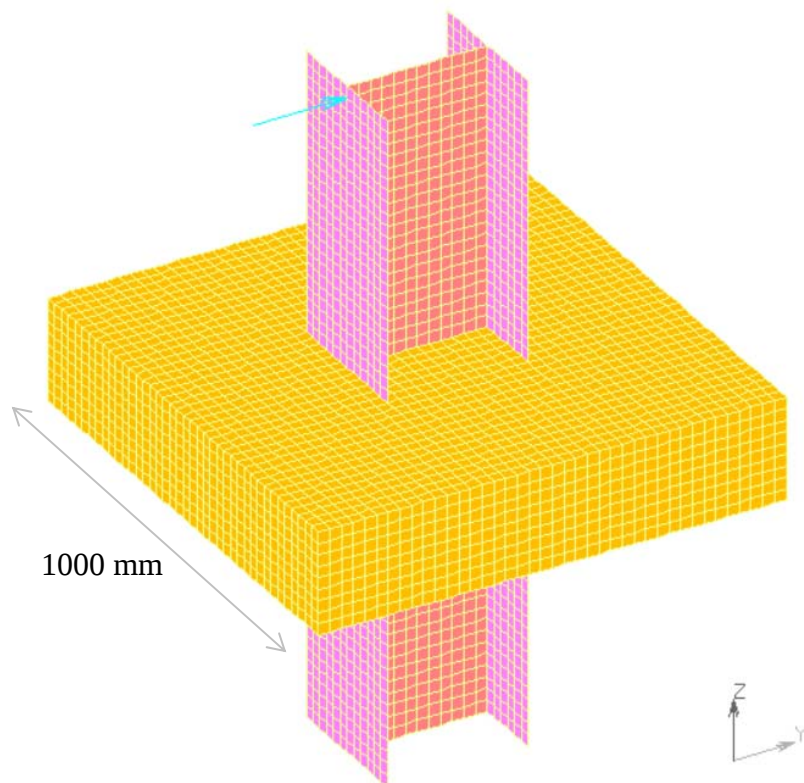
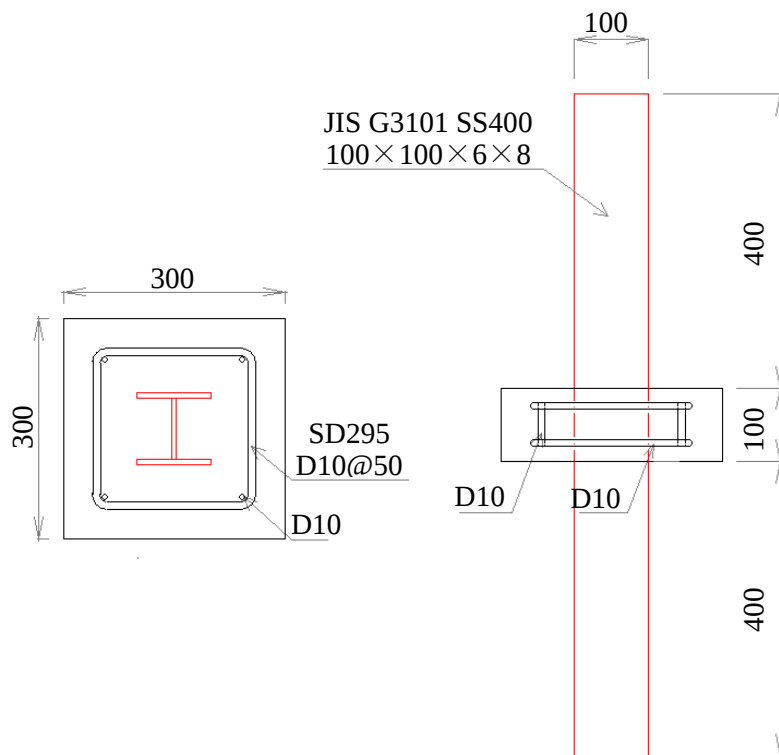
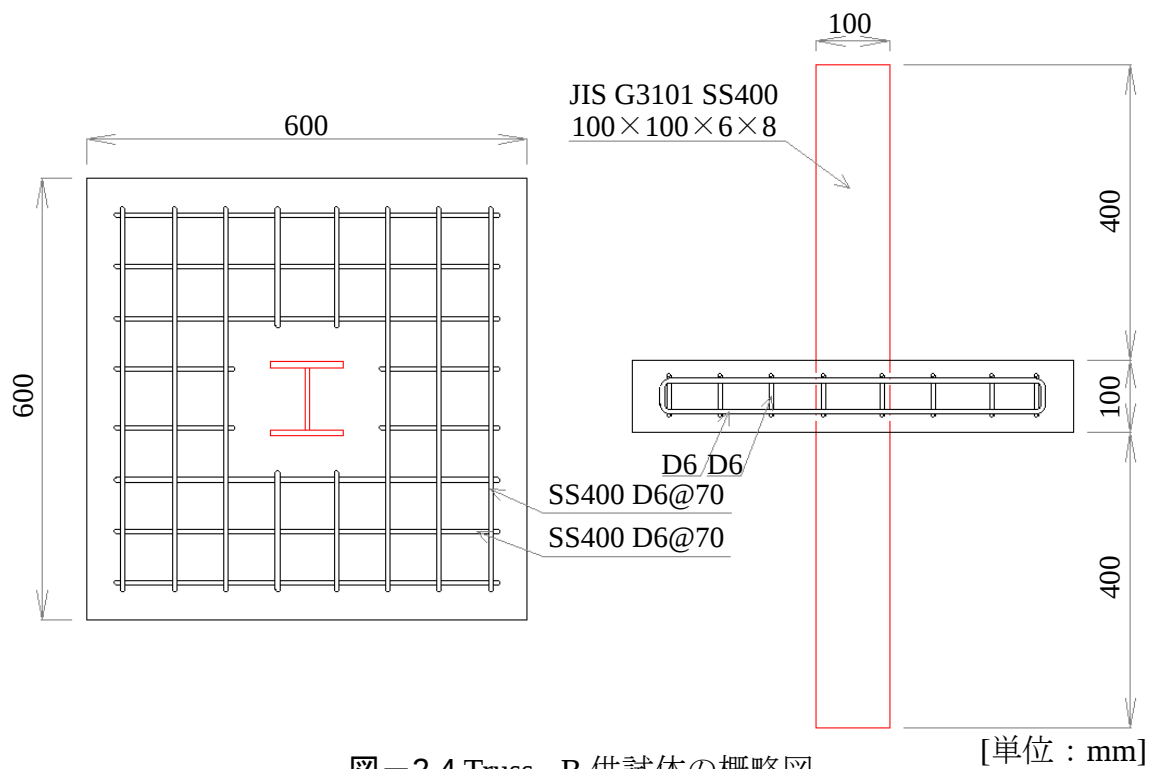


図-2.2 振動解析モデル



図－2.3 Truss - A 供試体の概略図 [単位：mm]



図－2.4 Truss - B 供試体の概略図 [単位：mm]

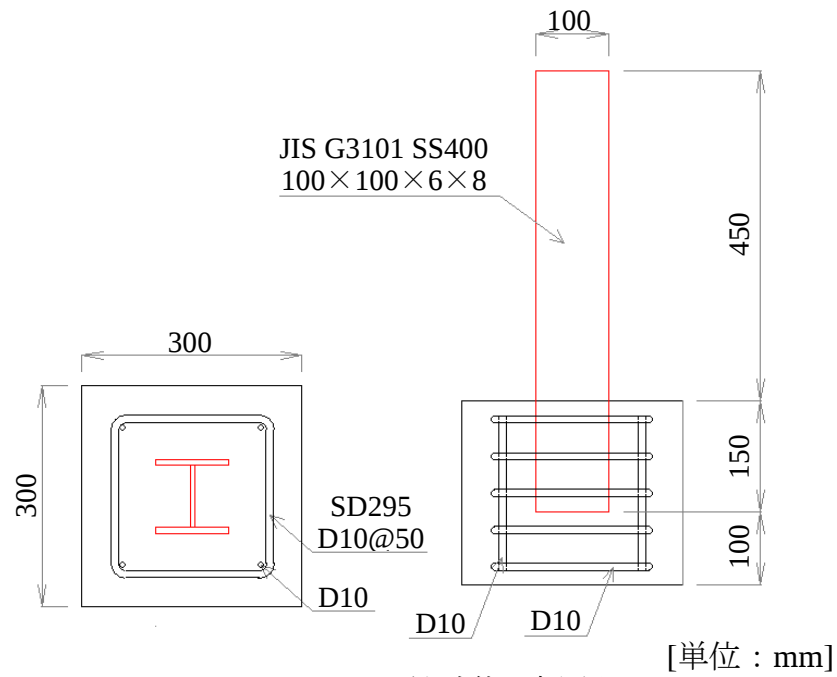


図-2.5 Column 供試体の概略図

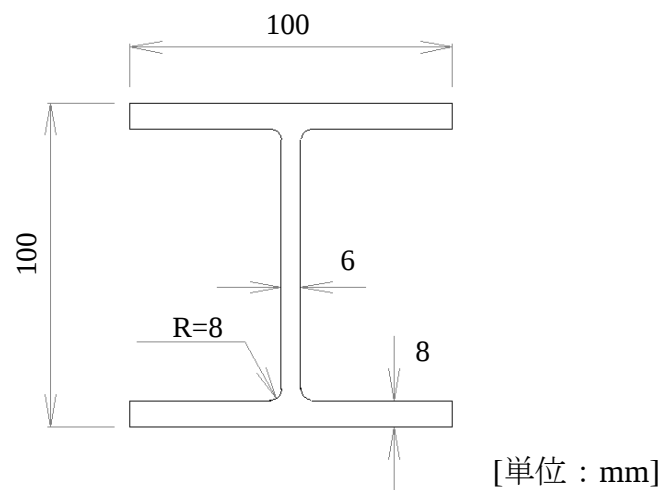


図-2.6 H 形鋼の断面寸法

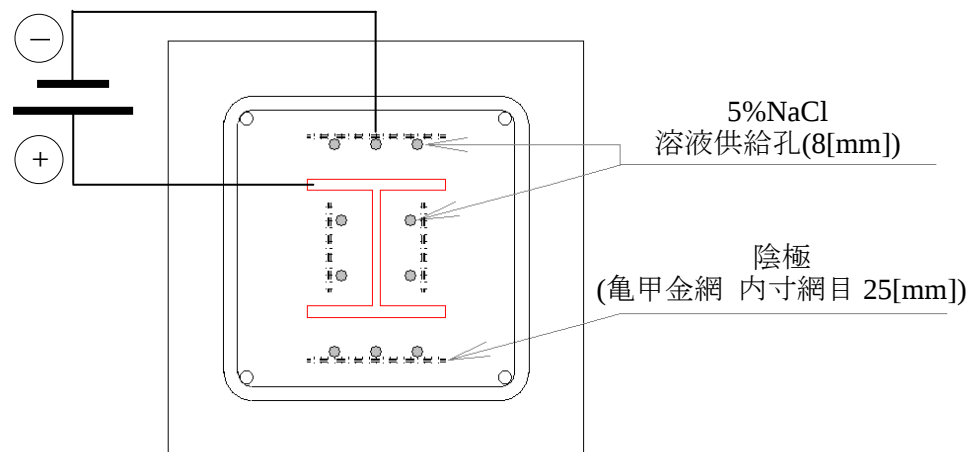


図-2.7 電食試験概略図

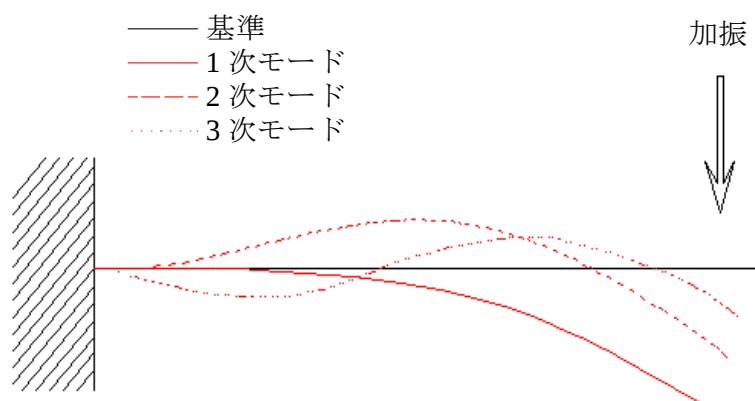


図-2.8 曲げ固有振動モード

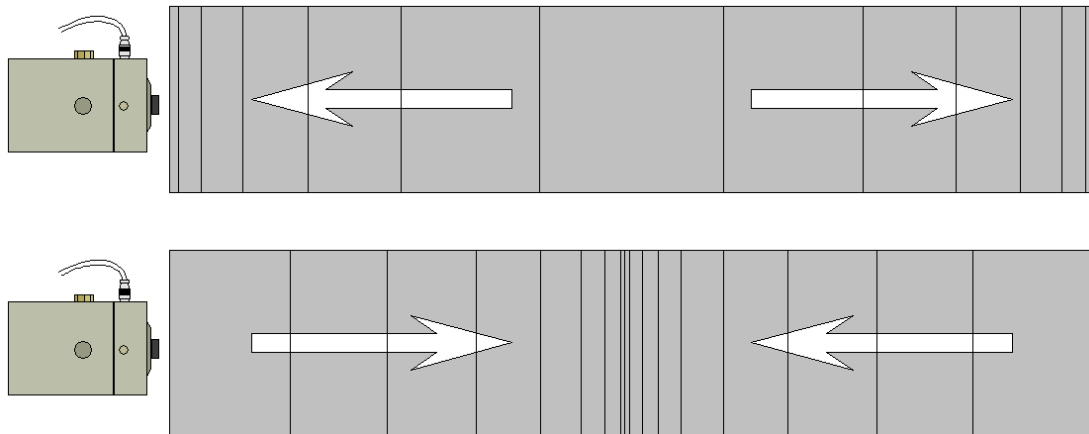


図-2.11 1次固有縦振動モード

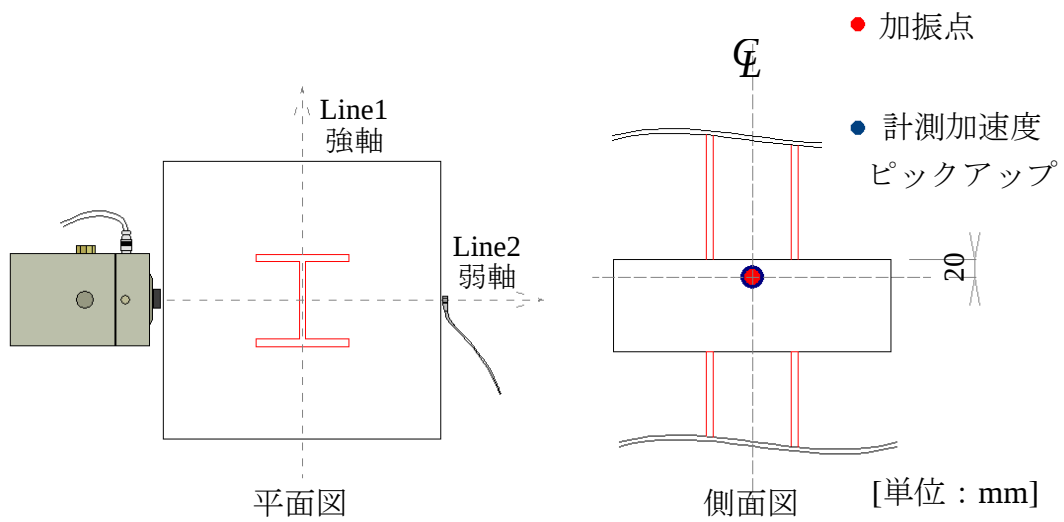


図-2.12 コンクリート部の縦振動試験概略図

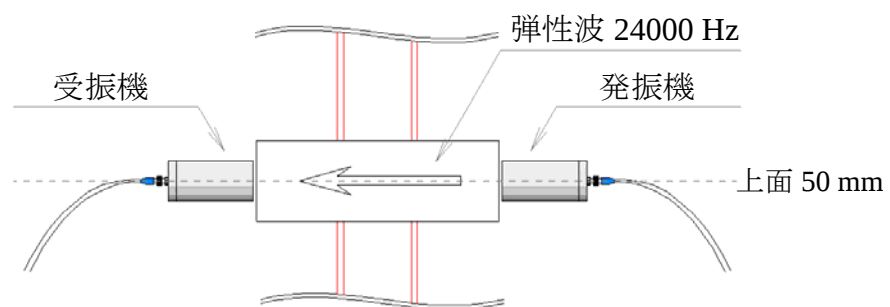


図-2.13 コンクリート部の超音波振動試験概略図

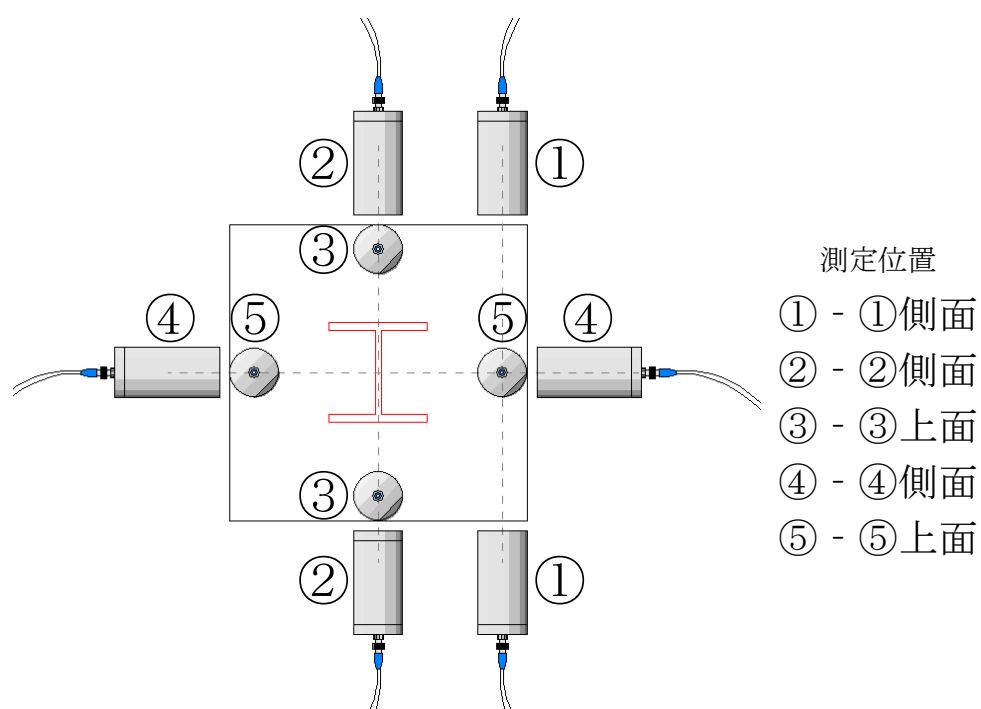


図-2.14 超音波試験の測定位置

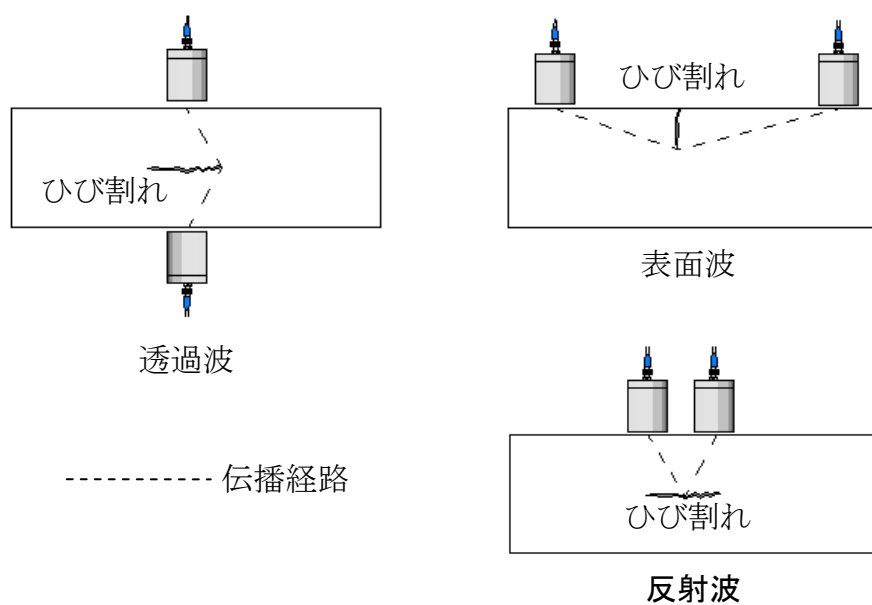


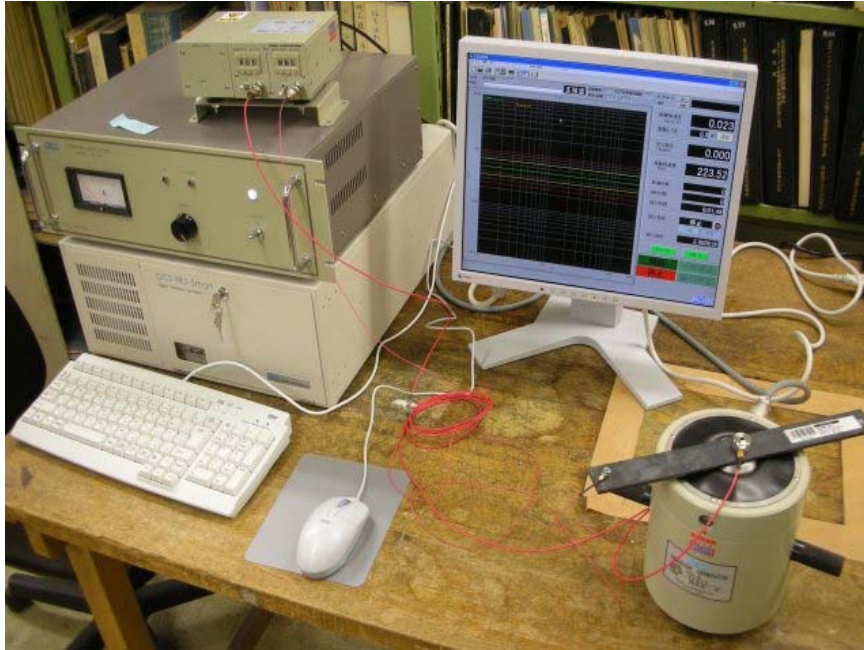
図-2.15 超音波伝播経路



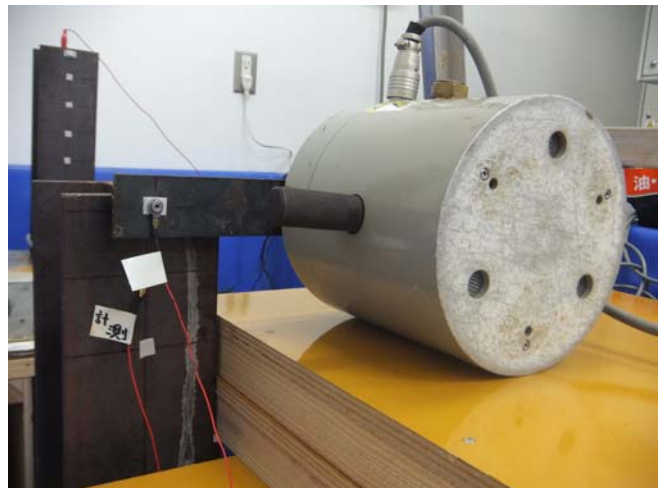
写真-2.1 電食試験の状況



写真-2.2 実トラス部材の腐食状況



写真－2.3 振動試験機一式



写真－2.4 H形鋼の曲げ振動試験状況

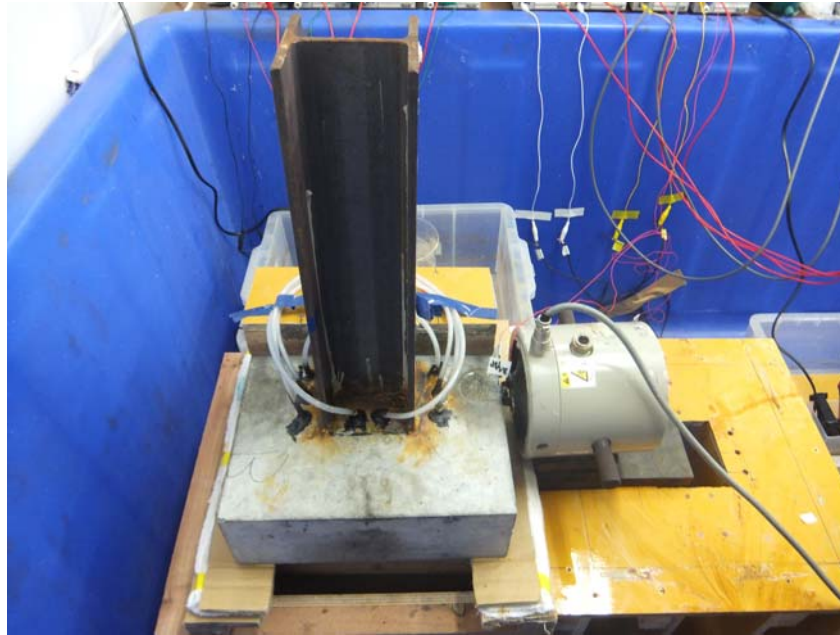


写真-2.5 コンクリート部の縦振動計測状況

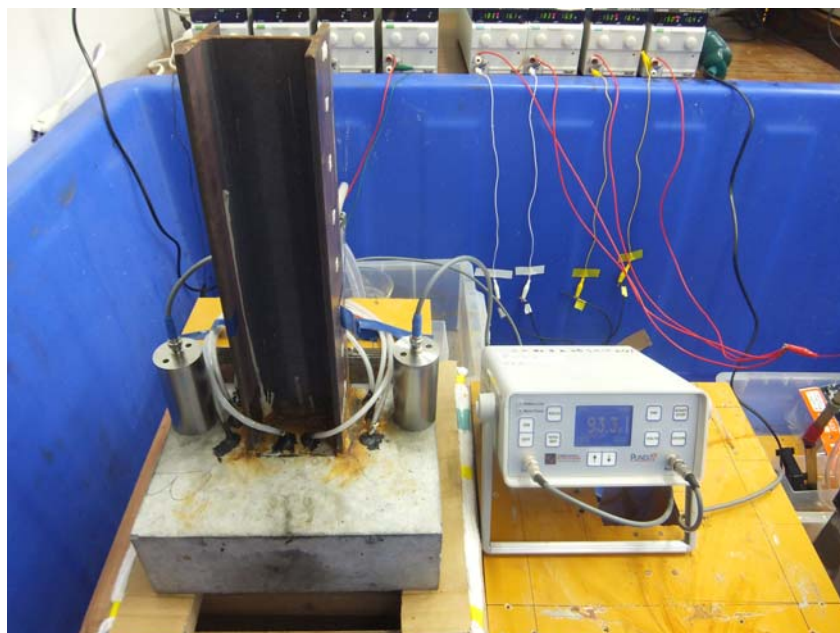


写真-2.6 コンクリート部の超音波振動試験状況

3. 鋼材腐食と振動特性に関する実験データの整理

3.1 電食試験による鋼材の腐食とコンクリート部のひび割れ状況

電食による鋼材腐食の状況を写真-3.1~3.3 と実験終了後に確認した平均腐食率(コンクリート被覆区間における鋼材の平均質量減少率)を表-3.1 に示す。これより、Truss 供試体は約 20 % 腐食しているが、Column 供試体では 13 % 程度に留まっている。Truss 供試体では、H 形鋼のウェブおよびフランジの全面で腐食しており、コンクリート表面近傍での断面欠損が顕著である。

Column 供試体においても H 形鋼のウェブおよびフランジの全面で腐食しており、H 形鋼端部において最も鋼材腐食が顕著である。次いで、コンクリート表面近傍で著しく腐食が進行していた。H 形鋼端部において局所的に腐食が進行した理由として電食実験の影響が考えられる。電気腐食を進行させるためには、NaCl が必要不可欠であり、常に供給し続けなければならない。そのため、NaCl 水溶液をコンクリート内に浸透させるように電食を行っていたが、H 形鋼とコンクリートの間に隙間ができると、構造上、H 形鋼の下側端部に NaCl 水溶液が溜まり腐食が局所化したと考えられる。

次に、鋼材腐食に伴うコンクリート部のひび割れ状況について記述する。図-3.1~3.3 にひび割れ進展図、主な劣化性状と換算腐食率の関係を表-3.2 に示す。ここで、換算腐食率とは、表-3.1 に示した実験終了後の H 形鋼腐食率と積算電流量が比例すると仮定したときに、積算電流量から推定される腐食率(質量減少率)である。全ての供試体において腐食ひび割れよりも先に錆汁が発生しており、錆汁は 0.6%程度で全面から発生している。Truss - A 供試体や Column 供試体のひび割れ状況を見ると、初めにフランジ面に直角なひび割れが発生する。その後フランジ端部から斜めに生じ、最後にウェブ面に直角なひび割

れが発生した。しかし、コンクリート部が大きい **Truss - B** 供試体では、最初にフランジ端部から斜めにひび割れが発生し、その後フランジ面に直角なひび割れ、ウェブ面に直角なひび割れが発生した。**Truss - A** 供試体は腐食率 11.1 %、**Column** 供試体では腐食率 3.1 % で殆どひび割れの進展が終了しているのに対して、**Truss - B** 供試体では、腐食率 21.3 % までひび割れが進展し続けている。**Truss - A** 供試体、**Column** 供試体と **Truss - B** 供試体を比べると、フランジ面やウェブ面に直角なひび割れの発生時期が遅れている。また、フランジ面やウェブ面に直角なひび割れはコンクリート側面から進展することを鑑みると、コンクリート部が大きい実構造物ではこのようなフランジ面やウェブ面に直角なひび割れは発生し難いと考えられる。

3.2 鋼材腐食と振動特性の関係

3.2.1 H 形鋼の曲げ振動試験

本項では、表-2.8 の電食時間ごとに H 形鋼の曲げ振動試験を行い、振動特性の変化を整理する。振動試験から得られる情報は固有振動数や減衰定数などがある。このうち固有振動数については、著者ら^{3.1)}のこれまでの研究と同様に、表-3.1 に示した腐食率の範囲でも健全時からの変化率はわずか数パーセント以内であった。そのため、既往の研究報告と同じく、固有振動数の変化に着目した鋼材腐食率の推定は困難であると判断された。また、修士論文では応答加速度やフーリエ振幅比を検討していないため以降では、特に減衰定数に着目して実験データを整理する。

構造物や部材は、連続体または多自由度系である。多自由度系の共振曲線(周波数-加速度関係)は図-3.4 に示すように、1 自由度系の共振曲線の重ね合わせで表現することが可能である。しかし、ある固有モードの固有振動数付近では、その固有モードが軽減衰である場合、図-3.4 の 1 次成分のようにその固有モードの応答が卓越している。このような場合、その共振峰近傍の共振曲線は 1 自由度系であると見做して、その固有モードの特性を

独立に算出することができる。減衰定数の算定に先立って、周波数－応答加速度関係(図－3.5)と周波数－位相関係(図－3.6)からナイキスト線図(モード円, 図－3.7)を作成して振動試験の精度を検討する。ナイキスト線図は、次式に示すように共振曲線(周波数応答関数)の実部と虚部によって表示される。

$$\begin{aligned} \text{Re} &= a \times \cos(\theta) & \cdots \text{実部} \\ \text{Im} &= a \times \sin(\theta) & \cdots \text{虚部} \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここで、 a は応答加速度、 θ は位相である。

ナイキスト線図には各共振点に近い周波数範囲内のデータだけが円として現れる。さらに、ナイキスト線図(モード円)が明確に存在する場合は、必然的に各固有モードが互いに独立していると見做せる。

このナイキスト線図を用いた 1 自由度系のモード減衰比(減衰定数)の算出を行う。1 自由度系の固有モードのコンプライアンス $G_{(\omega)}$ は式(3.2)となる。

$$G_{(\omega)} = \frac{1/K}{1 - \beta^2 + 2j\zeta\beta} \quad (3.2)$$

$$K = \text{モード剛性}, \zeta = \text{モード減衰比}, j = \text{虚数}, \beta = \frac{f(\text{振動数})}{f_0(\text{固有振動数})}$$

固有モードの実部、虚部、全体の大きさを振動数について表すと、図－3.8 となる。

$$G_R = \frac{(1 - \beta^2)/K}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}, \quad G_I = \frac{-2\zeta\beta/K}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} \quad (3.3)$$

図－3.8 の実部と虚部が交わる周波数を f_1 、 f_2 とし、ナイキスト線図に表すと、図－3.7 となり、原点から中心を結ぶ直線 l と f_1 、 f_2 を結ぶ直線 m が直角に交わる。

ここで、 $\Delta f = f_2 - f_1$ とし、 $f_0 = f_0 \pm \Delta f$ と置き、式(3.3)の関係を式(3.2)に用いて整理する。

$$\begin{aligned} \frac{2}{|G|_{I \max}} &= \frac{\left\{ (1 - (1 \pm \Delta\beta))^2 + (2\zeta \sqrt{1 \pm \Delta\beta})^2 \right\} K}{-2\zeta \sqrt{1 \pm \Delta\beta}} \\ &\approx \frac{K(\Delta\beta^2 + 4\zeta^2)}{2\zeta} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$\beta=1$ のとき, $|G|_{I \max}$ となるから,

$$|G|_{I \max} = |G|_{\max} \approx \frac{1}{2K\zeta} \quad (3.5)$$

式(3.5)を式(3.4)に代入すると,

$$4K\zeta = \frac{K(\Delta\beta^2 + 4\zeta^2)}{2\zeta} \Rightarrow \zeta = \frac{\Delta\beta}{2} = \frac{(f_2 - f_1)}{2f_0} \quad (3.6)$$

以上より, ナイキスト線図を用いて 1 自由度系のモード減衰定数を算出することが可能である.

さらに, 多自由度系において他の固有モードの影響が無視出来ない場合について考えると, 対象とする固有モードによる共振点近傍の狭い周波数範囲内では, 他の固有モードの影響を周波数に無関係な 1 個の複素定数 $R + jI$ で表現できる.

$$G_{(\omega)} = \frac{1/K}{1 - \beta^2 + 2j\zeta\beta} + R + jI \quad (3.7)$$

コンプライアンス $G_{(\omega)}$ は図-3.9 と表され, 中心は(3.8)となる.

$$\text{中心} = \left(R, I - \frac{1}{4K\zeta} \right) \quad (3.8)$$

この円の方程式を実軸 x , 虚軸 y を用いて表現する.

$$(x - R)^2 + \left\{ y - \left(I - \frac{1}{4K\zeta} \right) \right\}^2 = \left(\frac{1}{4K\zeta} \right)^2 \quad (3.9)$$

ここで,

$$a = 2R, \quad b = 2I - \frac{1}{4K\zeta}, \quad c = \frac{I}{4K\zeta} - R^2 - I^2 \quad (3.10)$$

と置くと、モード円の中心と半径は(3.11)となる。

$$\text{中心} = \left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2} \right), \quad \text{半径} = \sqrt{c + \frac{a^2 + b^2}{4}} \quad (3.11)$$

(3.11)の a, b, c は、振動試験より得られたデータから最小二乗法を用いて算出する。

従って、図-3.9 において原点から中心を結ぶ直線 l が通る点の振動数が固有振動数 f_0 ，直線 l と直角に交わる直線 m が通る点の振動数が f_1, f_2 となり，他の固有モードが無視出来ない場合においても，モード減衰定数を算出することが可能となる。

以上より，本研究ではモード円適合(Circle Curve Fitting)の方法を用い減衰定数(モード減衰比)の算出を行う。減衰定数は加振点や測定点ごとに变化しない固有の値であるが，本実験では減衰定数のばらつきを検討するため，図-2.10 のようにいくつかの測定点で応答加速度を得て減衰定数を求めた。

a) 共振曲線とナイキスト線図

H 形鋼の曲げ振動試験から得られた共振曲線の一例を図-3.10～3.15 に示す。図-3.10～3.15 は H 形鋼の端部から 50mm の位置における Truss - A 供試体, Truss - B 供試体および Column 供試体の健全時と電食終了時の共振曲線である。図中に共振周波数と位相との対応を一点鎖線で示している。図より，共振周波数で位相が僅かに ± 90 度からずれていることが確認できる。これは，H 形鋼は多自由度系であり，他の固有モードの影響を僅かに受けているためである。高周波数域では応答が小さいため位相が乱れており，振動の節に近い部分においても応答が小さいため位相が乱れることが分かった。従って，あまりにも応答が小さい場合，計測加速度ピックアップの計測精度に問題が生じるため，低周波数域である 1 次モードのみを用いて，減衰定数の算定を行う。

H 形鋼の曲げ振動試験のナイキスト線図の一例を図-3.16～3.18 に示す。図-3.6～3.18

は H 形鋼端部から 50, 20 [mm]の位置における Truss - A 供試体と Truss - B 供試体の積算電流量 0, 159.1, 318.3 [Ah], Column 供試体の積算電流量 0, 238.7, 477.4 [Ah]時のナイキスト線図である。図より, 全ての積算電流量に対して, ほぼ真円を描くことがわかり, 式(3.3)より精緻に減衰定数を捉えることが可能である。

b) 減衰定数

1 次固有振動モードのナイキスト線図を用いて, 換算腐食率(積算電流量)と減衰定数比の関係を図-3.19～3.21 に示す。図の縦軸は, 健全時の減衰定数を基準とした各腐食ごとの減衰定数を表記した。全ての供試体において, 換算腐食率(積算電流量)が小さい領域で大きく減衰定数が増加しており, 腐食ひび割れが発生することにより H 形鋼埋込み部における応力が開放(接合部の剛結度が変化)するため, 減衰定数が低下する。その後, 低下と増加を繰り返し, 最終的には増加傾向を示す。Truss - A 供試体では, 換算腐食率1.0 %の時, 減衰定数の変化率が約 200 %を示し, フランジ面に垂直のひび割れが発生後, 健全時と同程度の値まで低下する。その後, 換算腐食率 5% 程度から徐々に上昇し, 換算腐食率 10% 以降は減衰定数の変化率140%と一定値を示した。供試体 i および ii では, ひび割れ発生時が異なり, 腐食初期において減衰定数の変動が異なっている。Truss - B 供試体では, 換算腐食率 2.5%の時に減衰定数変化率が約 150 %を示し, フランジ面に垂直のひび割れやフランジ端部からの斜めひび割れが発生後, 変化率が僅かに 130 %まで低下する。その後, 鋼材腐食の進展に伴って徐々に上昇し, 換算腐食率 20 % で減衰定数変化率が約150 % 程度となった。Truss - B 供試体の挙動は Truss - A 供試体と異なり, コンクリート部が大きく, ひび割れに対して拘束効果が大きいため減衰定数が殆ど低下しなかったと考えられる。Column 供試体は Truss - A 供試体や Truss - B 供試体よりも, 減衰定数の変化率が極めて大きいものとなっている。Truss - A 供試体や Truss - B 供試体と同様に, 減衰定数の変化率は約 200%まで増加し, ひび割れ発生後は160 %まで低下する。その後, 鋼材腐食の進展に伴って増加し, 換算腐食率13 %では再び約 200 %となった。

換算腐食率が 5.0 ～10.0 %を超える場合、減衰定数の変化率がある一定の値を取ることから、5.0 ～10.0 % 以上の腐食率に対して検出が可能であることが示された。また、実際の構造物では、腐食ひび割れの拘束力が供試体よりも大きく、ひび割れによる応力の開放が遅れるため、減衰定数の変化量はさらに大きくなることが予想される。さらに、実構造物において、フランジ面に直角なひび割れが生じないとするならば、初期(換算腐食率 2.0%)の減衰定数の大きな変動は少ないものと考えられる。

以上より、Truss - A 供試体、Truss - B 供試体および Column 供試体の H 形鋼の曲げ振動試験の結果を減衰定数について整理した結果、いずれの供試体において減衰定数の変化率の変動の大小は異なるが、変動時期や傾向には差は無く、トラス橋斜材部と柱部材を同一手法によって評価することが可能であると考えられる。また、減衰定数の増加量に関して、腐食区間が 150mm の Column 供試体ではその増加量は大きく、100 mm の Truss - A 供試体や Truss - B 供試体に対して 1.4 倍程度となることから、今後、腐食区間による減衰定数の変化を把握する必要がある。

3.2.2 コンクリート部の縦振動試験

本項では、表-2.8 の電食時間ごとにコンクリート部の縦振動試験を行い、振動特性の変化を整理する。以降では固有振動数と減衰定数に着目して実験データを整理する。なお、著者ら所有する加振器は 2 ～10000 Hz の加振を可能にするが、縦振動による固有振動数は曲げ振動に比べ高周波域にある。コンクリート部の寸法により、Truss - A 供試体と Column 供試体では、2 次固有振動モードの固有振動数を測定することができないため 1 次固有振動モードのみを用いる事とした。

a) 共振曲線

コンクリート部の縦振動試験から得られた共振曲線の一例を図-3.22～3.27 に示す。図-3.22～3.27 は Truss - A 供試体、Truss - B 供試体および Column 供試体の積算電流量 119.4 Ah 毎の共振曲線と位相曲線である。図中には共振周波数と位相との対応を破線で示してい

る．コンクリートのテストピース($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$)より得られた1次固有振動数 9800 Hz から，H形鋼や鉄筋の影響を無視した計算により，Truss - A 供試体および Column 供試体の1次固有振動数は 5903 Hz 付近となり，Truss - B 供試体の1次固有振動数は 2965 Hz 付近であることから，図－3.22～3.27 の一点鎖線にあたる共振周波数は1次固有振動数と判断できる．

b) 剛性率

図－3.22～3.27 から求めた固有振動数を用いて，加振方向の剛性を評価する．加振方向の剛性 E_d は，固有振動数に基づき次式で与えられる．

$$E_d = 4\rho L^2 f^2 \quad (3.12)$$

ここで， ρ は密度， L は部材厚さ， f は縦振動による1次固有振動数である．

さらに，健全時の剛性を基準とした変化率を残存剛性率 R_{Ed} として定義する． R_{Ed} は次式で与えられる．

$$R_{Ed} = \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \quad (3.13)$$

ここで， f_0 は健全時の1次固有振動数である．

換算腐食率(積算電流量)と残存剛性率の関係を図－3.28～3.30 に示す．全ての供試体において，腐食率(積算電流量)が大きくなるにつれてコンクリート部の剛性が20%以上低下した．ひび割れ発生に関らず剛性が低下した．Truss - A 供試体，Column 供試体では，弱軸と強軸方向の違いによって，鋼材腐食に伴う剛性低下が大きく異なった．強軸方向の腐食面(フランジの表面と裏面)は4面あり，弱軸方向に比べ腐食面(ウェブの表面と裏面)が2倍になっている．弱軸と強軸方向の剛性低下を比較すると両者も2倍程度となっており，腐食面との整合性が確認された．一方，Truss - B 供試体では，他の供試体と異なりコンクリート部の断面積が大きく，H形鋼の影響が小さいため弱軸・強軸方向の剛性低下に差が現れなかったと考えられる．このことは，コンクリート部の縦振動に着目した剛性低下は，

コンクリートの腐食ひび割れと合わせて、鋼とコンクリート間の付着損失も剛性低下に大きく寄与していることを示唆する。また、全ての供試体において、強軸方向の残存剛性率はほぼ線形に低下することから、コンクリート部の縦振動試験に基づく残存剛性率の評価によって、腐食率を算定することが可能である。

以上より、Truss - A 供試体、Truss - B 供試体および Column 供試体のコンクリート部縦振動試験の結果を剛性に換算して整理した結果、強軸方向の残存剛性率を指標として、腐食率を推定できる可能性が示唆された。しかしながら、コンクリート部寸法の影響があるため、さらに追加実験を行う必要がある。さらに、1 次固有振動モードの近傍に他の固有振動モードが存在する場合、コンクリート部の 1 次固有振動モードを特定することは難しい等の問題が存在する。

c) 減衰定数

1 次固有振動モードのナイキスト線図の一例を図-3.31～3.33 に示す。Truss - B 供試体において比較的眞円を描くのに対して、腐食した Truss - A 供試体や Column 供試体は眞円を描かない場合が存在する。そのため、腐食率が大きい場合、減衰定数を正確に評価することができない。本研究では、測定データの中でナイキスト線図が眞円に近い形状で描けるもののみを抽出し整理した。

1 次固有振動モードのナイキスト線図を用いて、腐食率(積算電流量)と健全時を基準とした減衰定数の変化率との関係を図-3.34～3.36 に示す。全ての供試体において、換算腐食率(積算電流量)増加に伴い、減衰定数が増加する。換算腐食率 20 % 前後で減衰定数が 2 倍以上になる。また、H 形鋼の曲げ振動による減衰定数は、コンクリートの腐食ひび割れの発生によって大きく変動したが、コンクリート部の縦振動では腐食ひび割れ発生後も減衰定数の増加傾向に大きな変化はない。さらに、コンクリート部の縦振動による剛性評価ではコンクリート部の大きさの影響を受け、また、弱軸・強軸では剛性低下が異なったが、コンクリート部縦振動による減衰定数の変化率は弱軸・強軸においてほぼ等しくなる。

以上より、Truss - A 供試体、Truss - B 供試体および Column 供試体のコンクリート部の縦振動試験の結果を減衰定数について整理した結果、接合形式に関わらず減衰定数の変動は殆ど変わらず、トラス橋斜材部と柱部材を同一方法によって評価することが可能であると考えられる。また、コンクリート部の腐食ひび割れ発生やコンクリート部寸法の影響を受けず一様に増加することから、コンクリート部の縦振動の減衰定数から腐食率のみを評価することが可能であると考えられる。しかし、先述したように、1 次固有振動モード近傍に他の固有振動モードが存在する場合、1 次固有振動モードを特定することは困難である。また、他の固有振動モードが近接するため周波数一位相関係が崩れ、ナイキスト線図を綺麗に描くことができない。そのため、H 形鋼の曲げ振動と比較してコンクリート部の縦振動による減衰定数はばらつきが大きく、算定できない場合もある。コンクリート内部の腐食ひび割れや鋼材との付着損失は、縦振動の特性を複雑に変化させるため、現場試験においても供試体実験以上の測定精度を期待することはできないと考えられる。

3.2.3 コンクリート部の超音波試験

本項では、表-2.8 の電食時間ごとにコンクリート部の超音波試験を行い、伝播時間から剛性の変化を整理する。剛性は次式によって算出する。

$$R_{Ed} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (3.14)$$

ここで、 R_{Ed} は残存剛性率であり式 (3.13) の残存剛性率剛性 R_{Ed} と等価である。 V_0 は健全時の伝播速度である。伝播速度は探触子間の距離 L と伝播時間 T から算出される。

換算腐食率(積算電流量)と残存剛性率の関係を図-3.37～3.39 に示す。全ての供試体において、腐食率(積算電流量)が大きくなるにつれて僅かながら残存剛性率が低下した。

Column 供試体の 1 体を除き、強軸方向のコンクリート表面(図-2.13 ③)は他の 4 点に比べ低下率が大きくなっている。腐食率が小さい場合、残存剛性率が 1 を超え、換算腐食率 5.0 % 付近から 1 を下回る傾向にある

以上より、Truss - A 供試体、Truss - B 供試体および Column 供試体のコンクリート部超音波試験の結果を残存剛性率について整理した結果、腐食率の増加に伴う残存剛性率の変化が小さいため、コンクリート部の超音波試験により H 形鋼の腐食率推定はできないと考えられる。しかしながら、強軸方向のコンクリート表面(図-2.13 ③)については、その他の測定箇所よりも残存剛性率の変化が大きいため、腐食の有無を判断するならば、検非破壊検査としての可能性の余地がある。

3.3 まとめ

本章では H 形鋼を用いたトラス橋部材と柱部材を模擬した供試体を作製し、電食による段階的な鋼材腐食と振動特性との関係を整理した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) H 形鋼の電食試験では、腐食性状は供試体ごとにばらつきがあった。これらの供試体に共通して、コンクリート表面近傍で顕著な断面欠損が生じた。
- 2) H 形鋼の曲げ振動試験では、減衰定数の変化に着目して、トラス橋斜材部と柱部材を同一の手法によって評価することが可能と考えられる。減衰定数増加量は腐食区間と腐食率に依存するものと推察される。また、減衰定数の変化はコンクリート部の腐食ひび割れにも依存し、腐食率が小さい場合には、コンクリート寸法が大きく影響する。
- 3) コンクリート部の縦振動試験では、H 形鋼の腐食進展によりコンクリート部の縦固有振動数は低下し、腐食率10～20%において残存剛性率が一定値を取る。固有振動数が低下することで、他の固有振動モードと近接する場合、1 次縦固有振動数の特定が困難な場合も想定される。また、コンクリート部の減衰定数は、いずれの供試体でも増加傾向にありその変化率も大きい。しかし、ひび割れや鋼材との付着が損失したコンクリート部では減衰定数の評価に大きなばらつきが伴う点が課題として挙げられた。
- 4) 超音波試験では、腐食率に対する実験結果の変化は小さいため、腐食率を推定することとは困難であると判断された。

参考文献

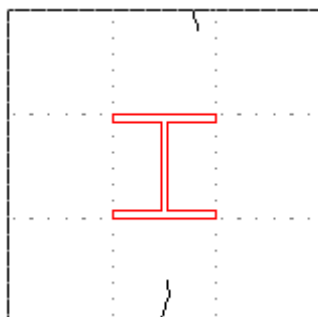
- 3.1) 内藤英樹，伊東知哉，青木峻二，鈴木基行：鋼材腐食が生じた鋼コンクリート接合部の振動特性に関する基礎的検討，構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1060-1073, 2011.

表－3.1 H 形鋼の腐食率(質量減少量)

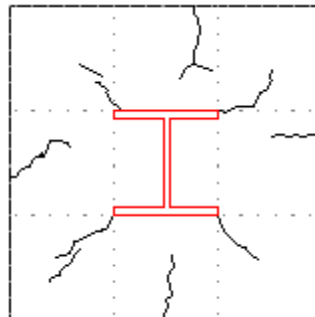
供試体名	電食前質量 [kg]	電食後質量 [kg]	質量減少率 [%]	積算電流量 [A・h]
Truss 供試体 A i	14.011	13.646	23.43	318.29
Truss 供試体 A ii	13.989	13.643	22.25	318.29
Truss 供試体 B i	14.041	13.708	21.31	318.29
Truss 供試体 B ii	14.048	13.661	24.77	318.29
Column 供試体 i	9.343	9.054	12.36	477.44
Column 供試体 ii	9.337	9.025	13.36	477.44

表－3.2 主な劣化性状と換算腐食率との関係

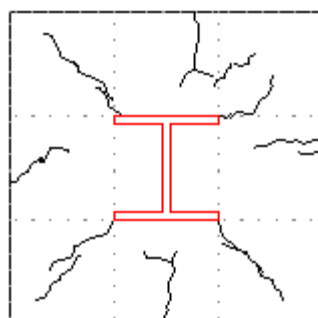
供試体名	錆汁析出	フランジ面に 垂直なひび割 れ発生	フランジ端部か ら斜め方向のひ び割れ発生	ウェブ面に 垂直なひび割 れ発生
Truss 供試体 A i	0.6[%]	0.6[%]	1.2[%]	1.2[%]
Truss 供試体 A ii	0.6[%]	1.7[%]	2.2[%]	2.2[%]
Truss 供試体 B i	0.5[%]	1.6[%]	2.7[%]	5.3[%]
Truss 供試体 B ii	0.6[%]	1.2[%]	0.6[%]	2.5[%]
Column 供試体 i	0.3[%]	0.3[%]	0.6[%]	1.5[%]
Column 供試体 ii	0.7[%]	0.7[%]	1.0[%]	1.3[%]



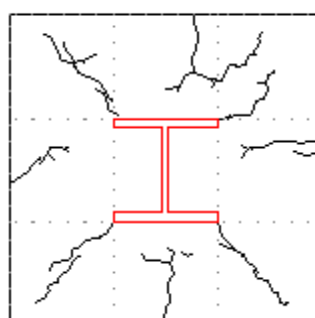
腐食率 1.7 %
積算電流量 (23.9 Ah)



腐食率 5.6 %
積算電流量 (79.6 Ah)

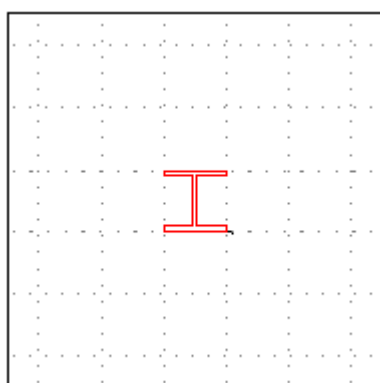


腐食率 11.1 %
積算電流量 (159.1 Ah)

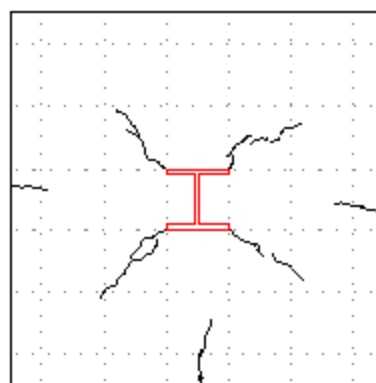


腐食率 22.3 %
積算電流量 (318.3 Ah)

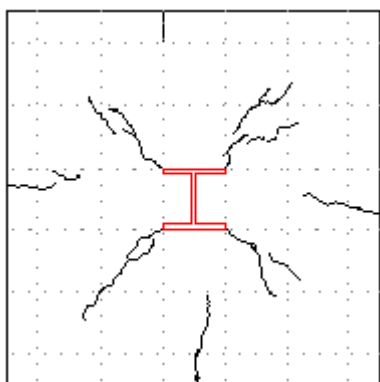
図－3.1 Truss - A 供試体ひび割れ進展図



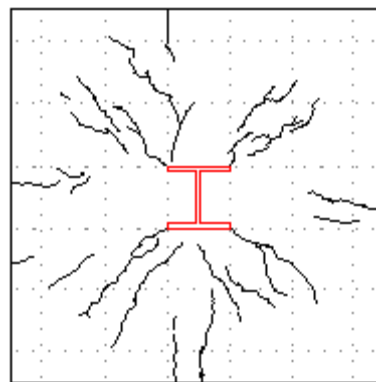
腐食率 2.7 %
積算電流量 (39.8 Ah)



腐食率 5.3 %
積算電流量 (79.6 Ah)

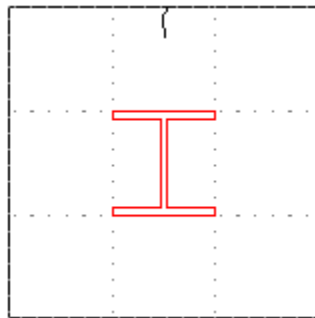


腐食率 10.7 %
積算電流量 (159.1 Ah)

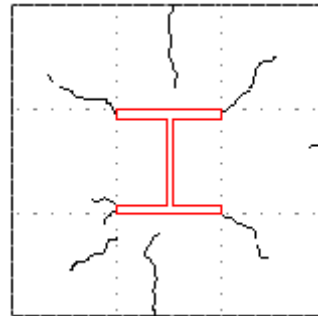


腐食率 21.3 %
積算電流量 (318.3 Ah)

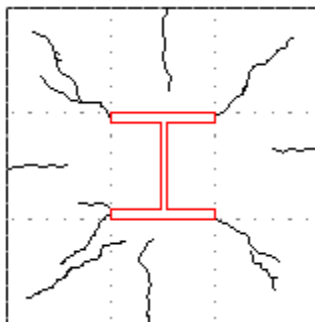
図－3.2 Truss - B 供試体ひび割れ進展図



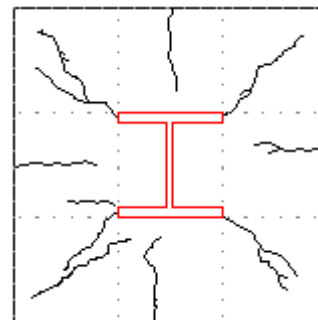
腐食率 0.6 %
積算電流量 (23.9 Ah)



腐食率 1.3 %
積算電流量 (47.7 Ah)



腐食率 3.1 %
積算電流量 (119.4 Ah)



腐食率 12.4 %
積算電流量 (477.4 Ah)

図-3.3 Column 供試体ひび割れ進展図

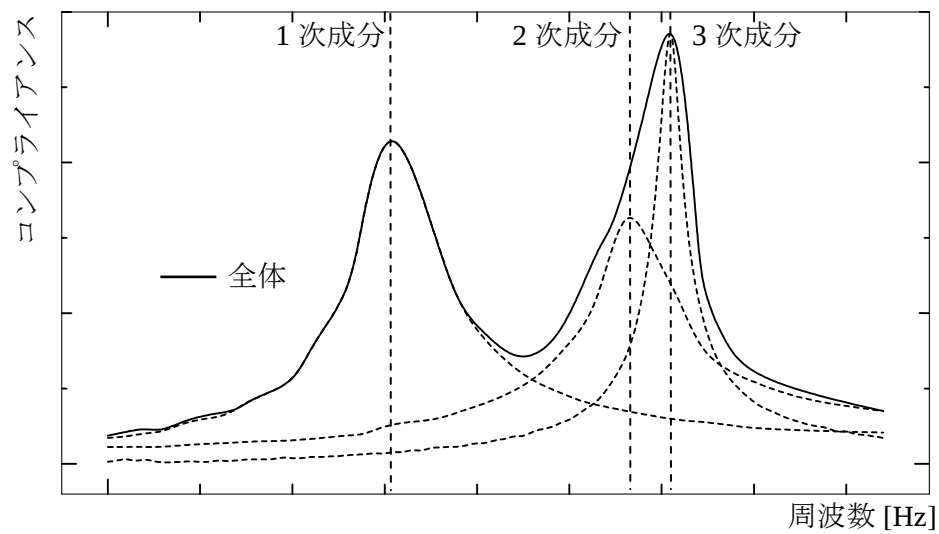


図-3.4 多自由度系の周波数応答曲線

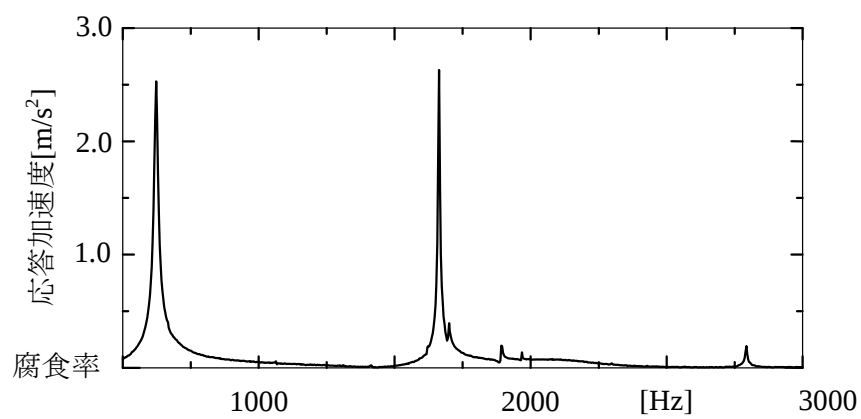


図-3.5 周波数－応答加速度関係

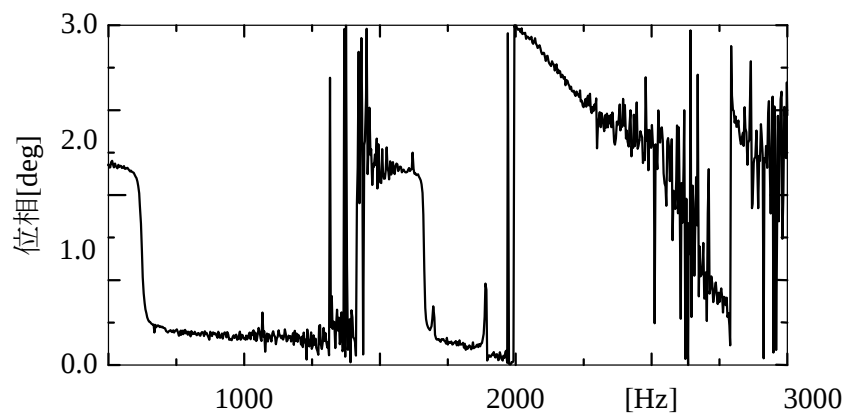


図-3.6 周波数－位相関係

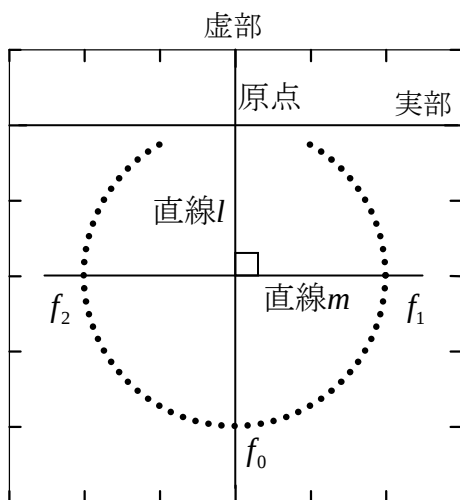


図-3.7 1自由度系ナイキスト線図

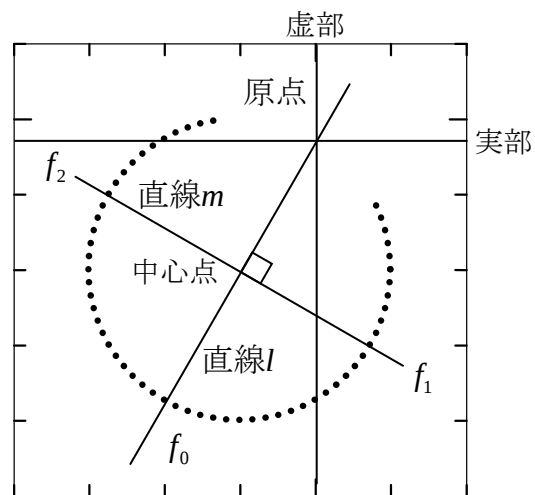


図-3.9 多自由度系ナイキスト線図

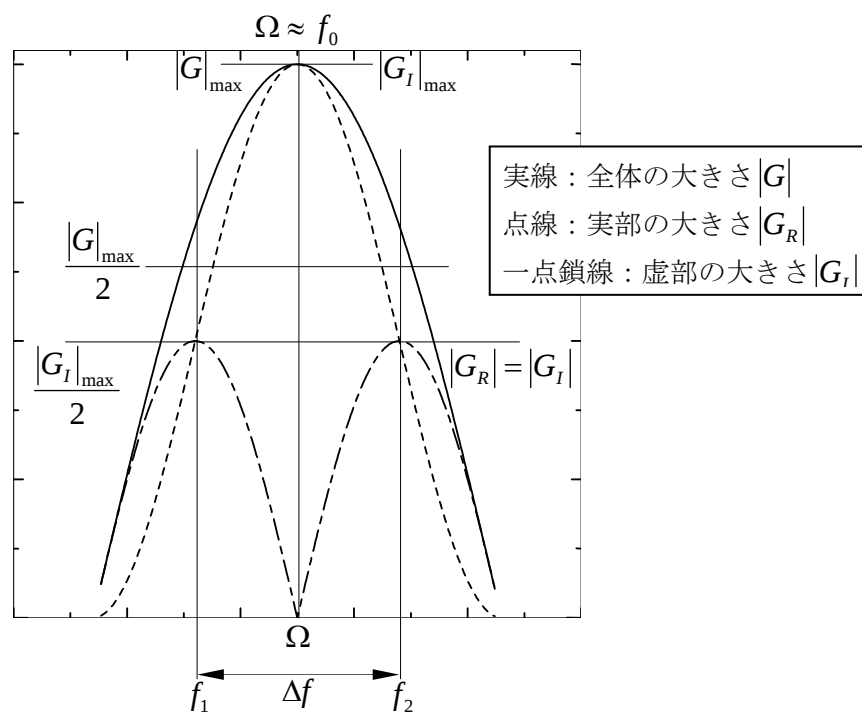


図-3.8 多自由度系における r 次共振峰近傍

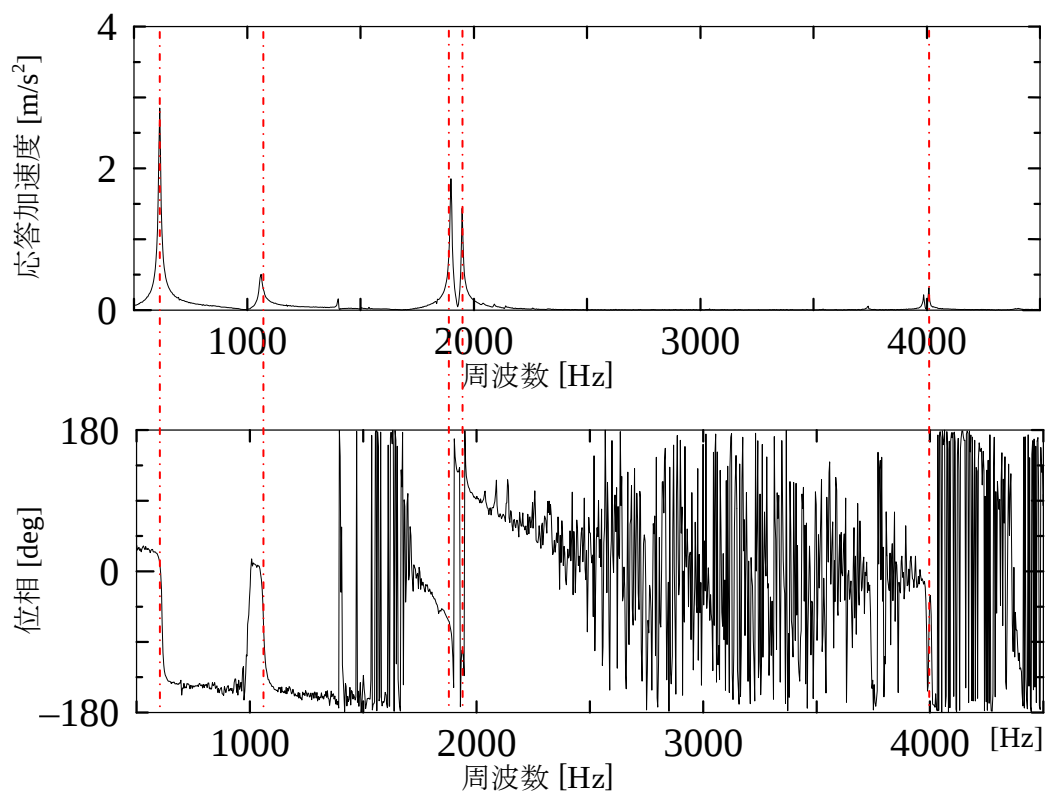


図-3.10 Truss - A 供試体の共振曲線 (健全時)

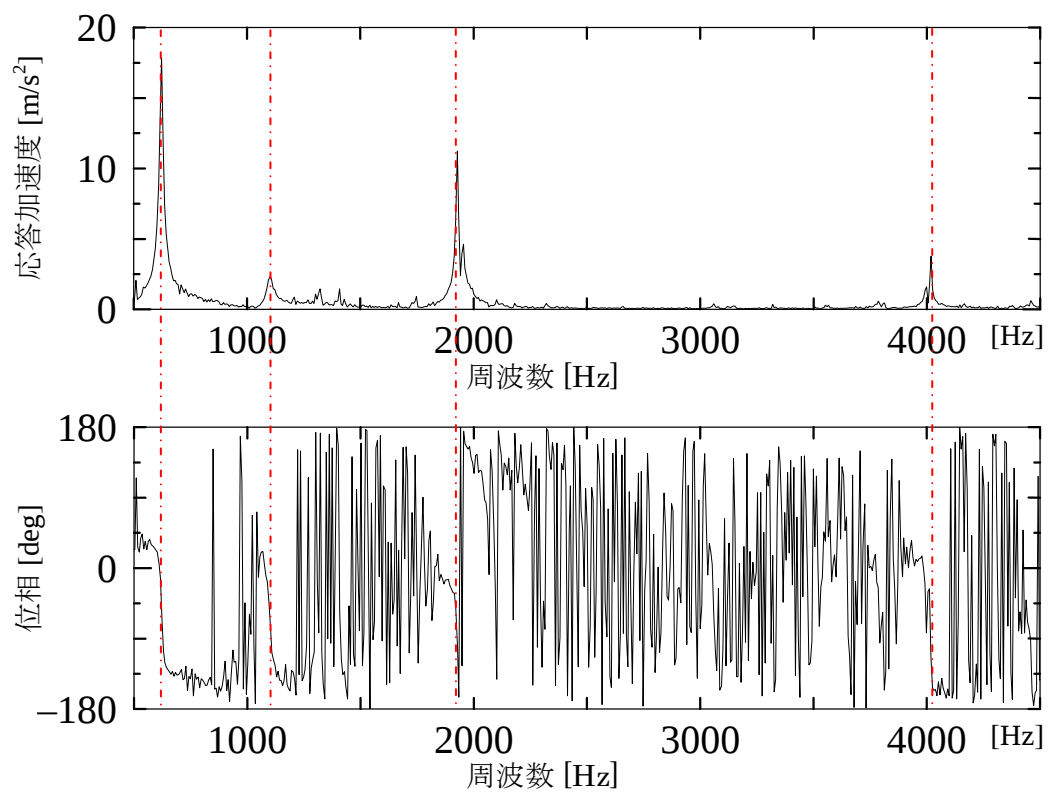


図-3.11 Truss - A 供試体の共振曲線 (換算腐食率 23.4% 時)

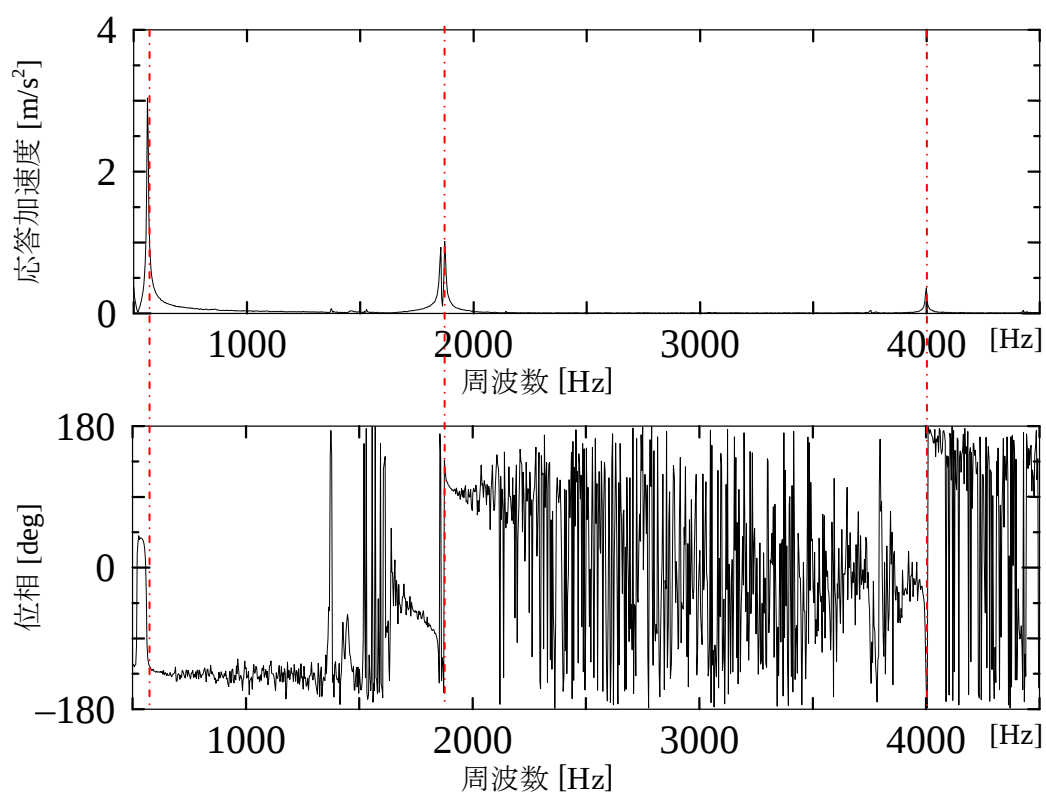


図-3.12 Truss - B 供試体の共振曲線 (健全時)

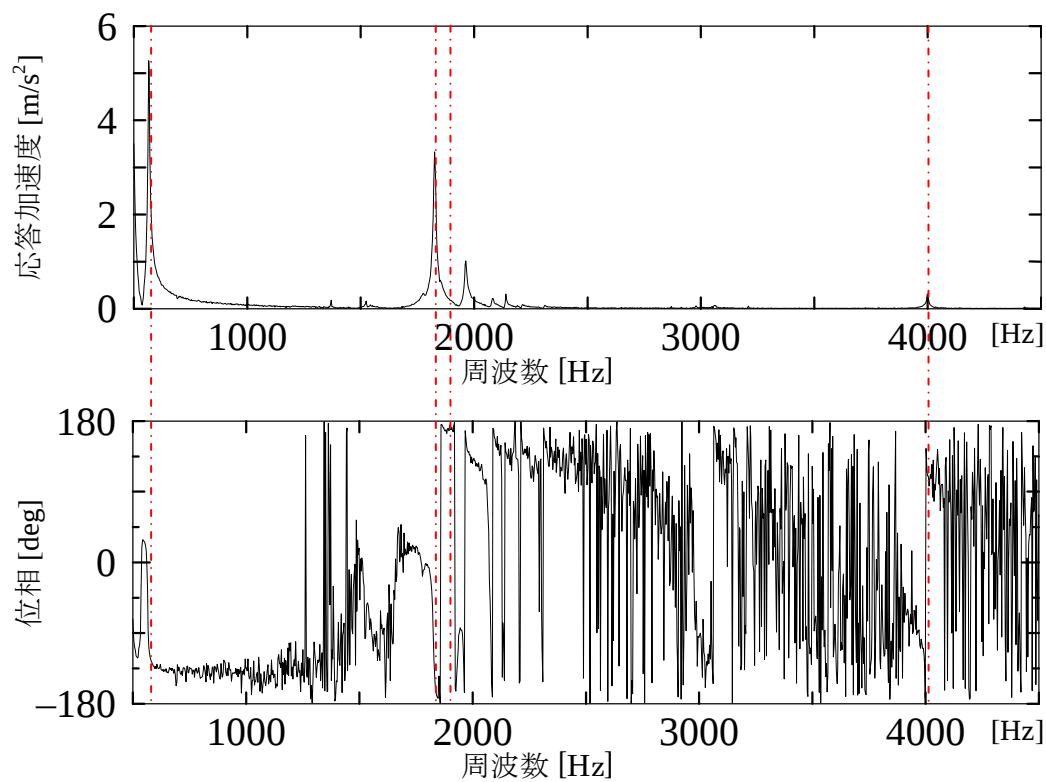


図-3.13 Truss - B 供試体の共振曲線 (換算腐食率21.3 % 時)

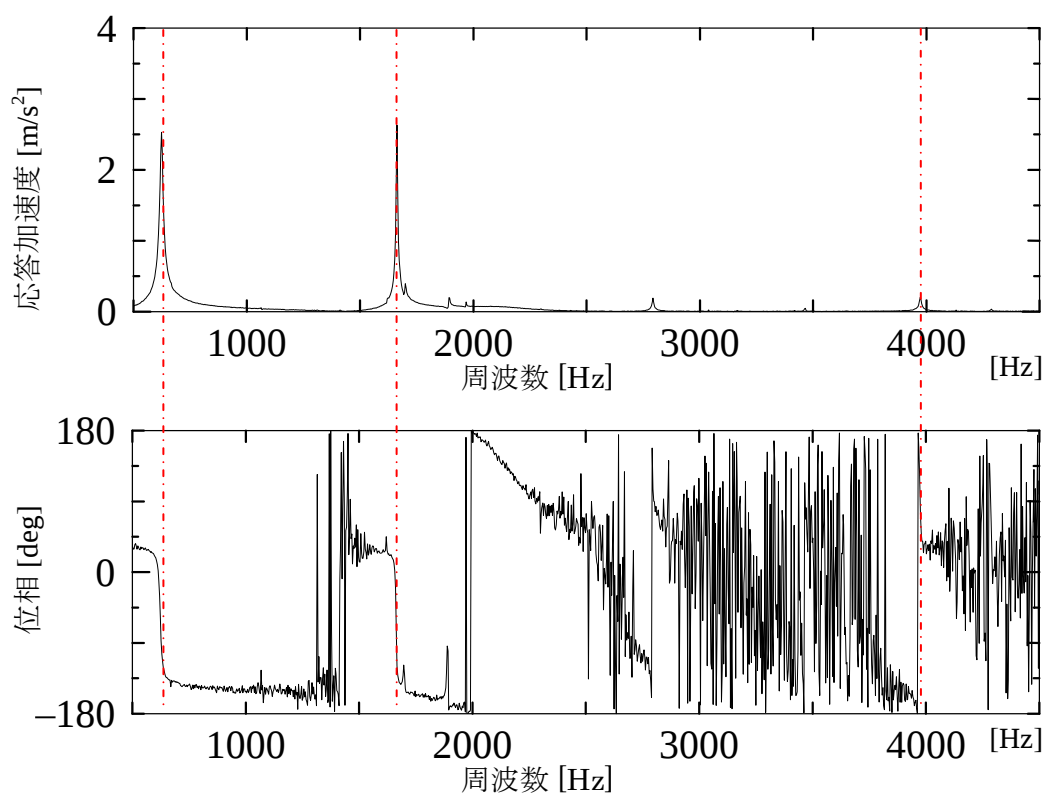


図-3.14 Column 供試体 (健全時)

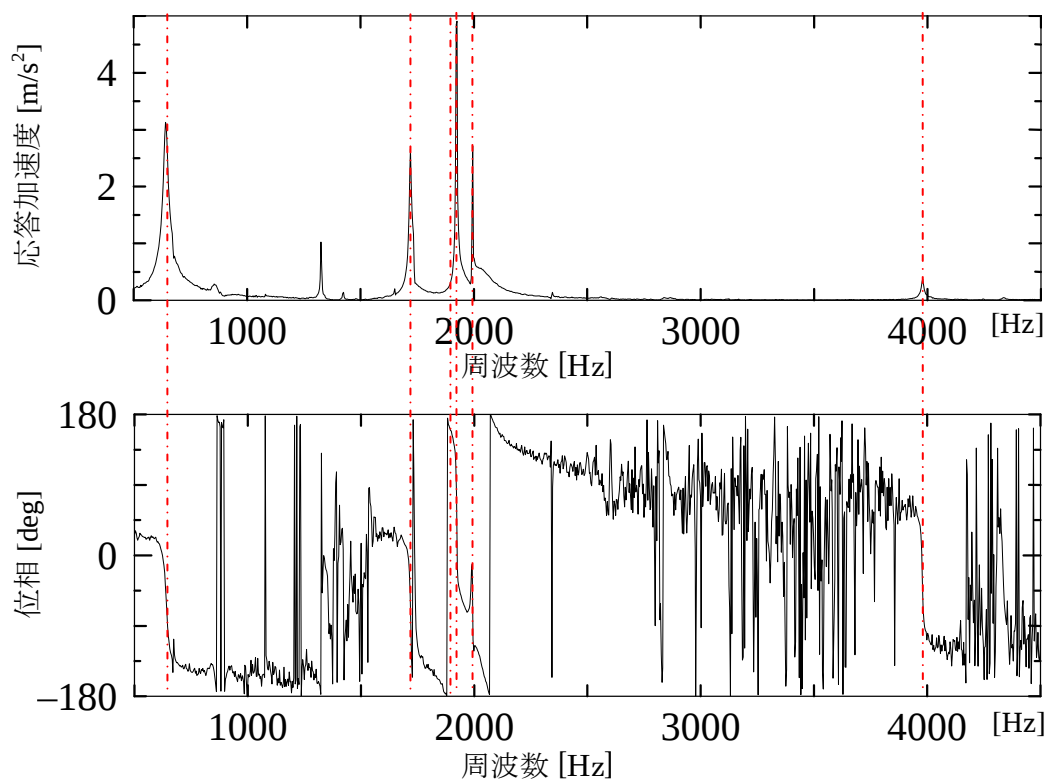


図-3.15 Column 供試体 (換算腐食率 12.4 % 時)

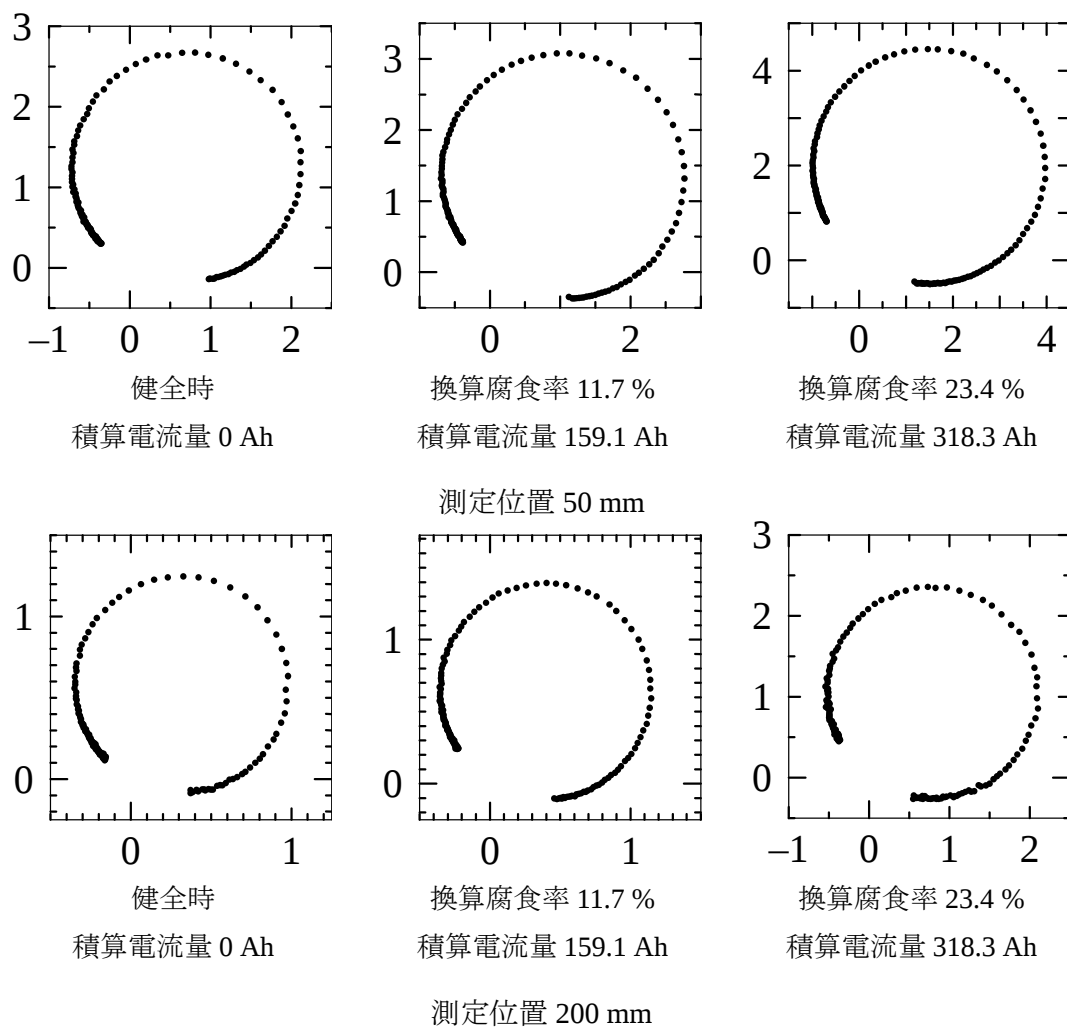


図-3.16 Truss - A 供試体のナイキスト線図

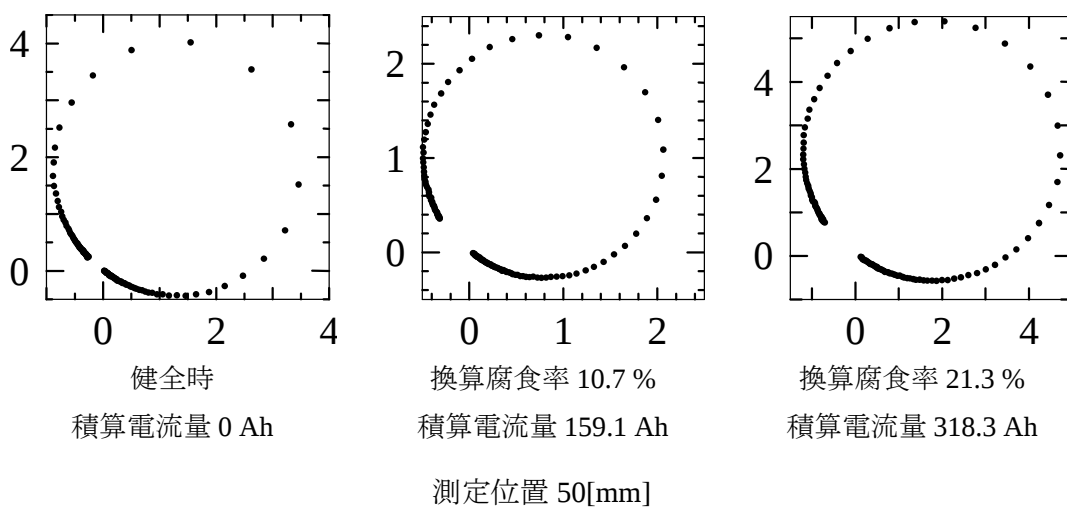


図-3.17 Truss - B 供試体のナイキスト線図

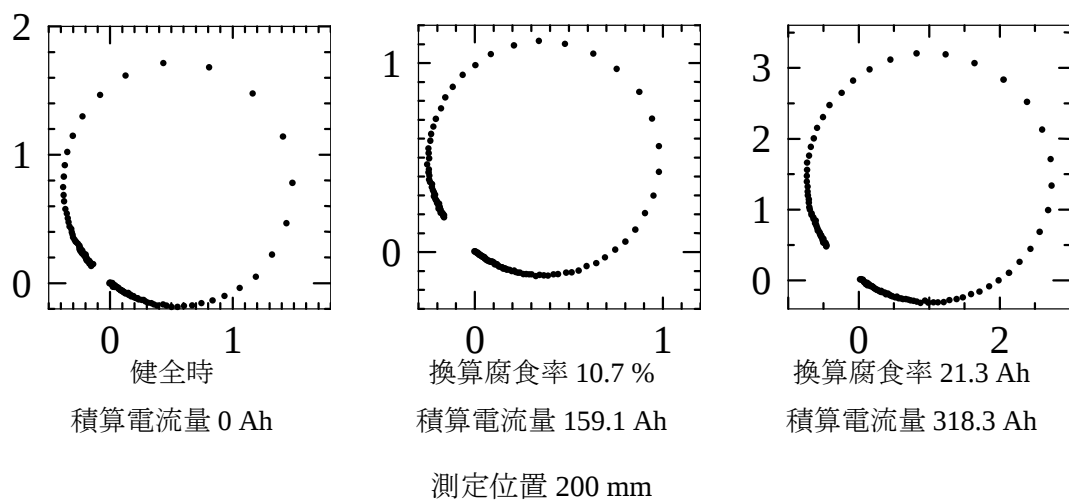


図-3.17 Truss - B 供試体のナイキスト線図

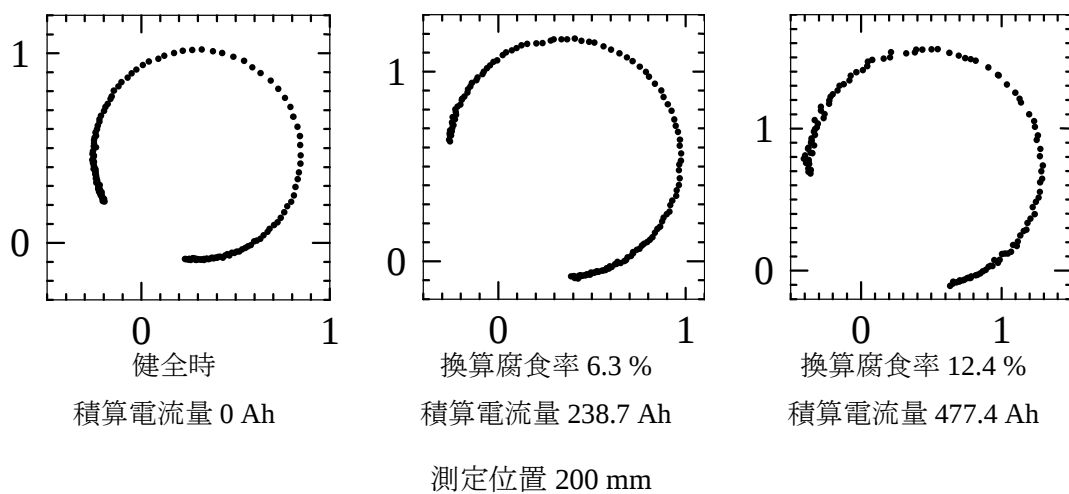
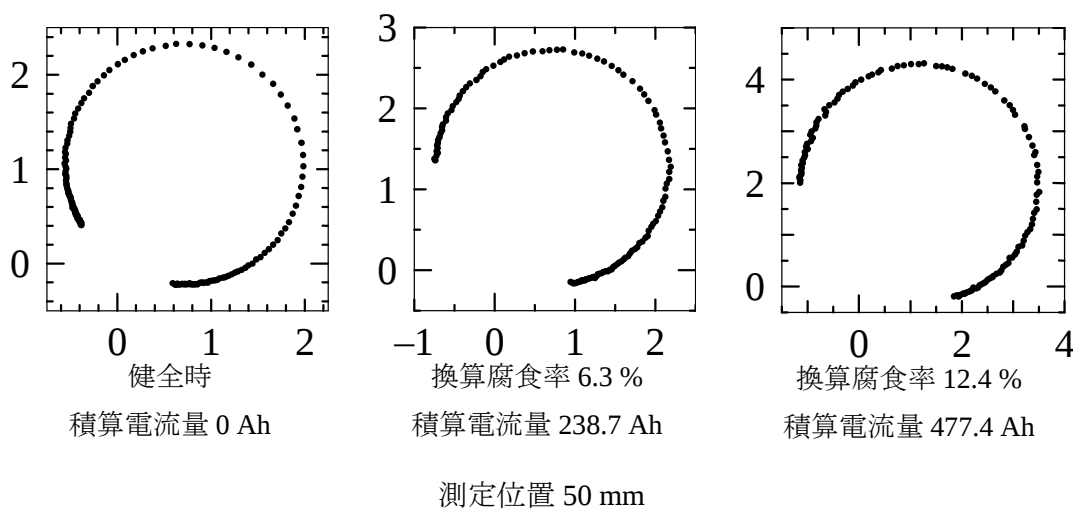


図-3.18 Column 供試体のナイキスト線図

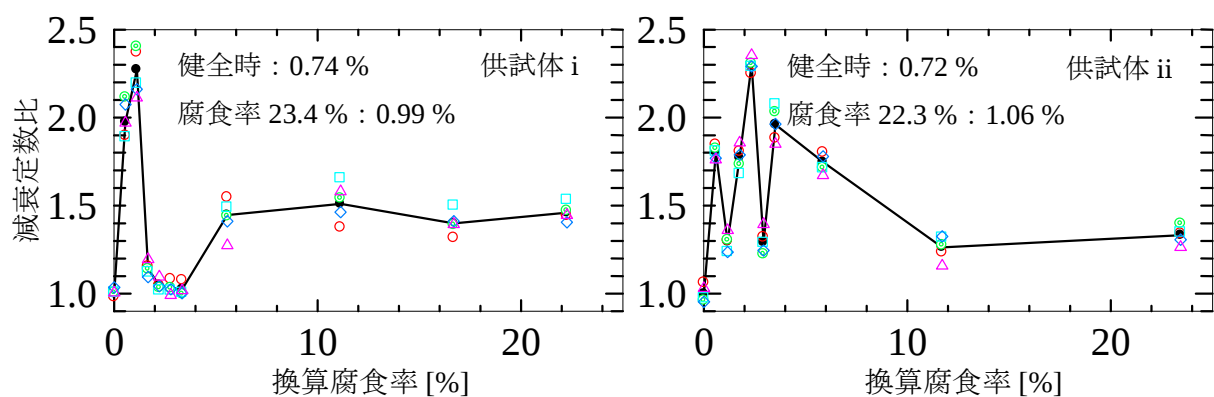


図-3.19 Truss - A 供試体の換算腐食率－減衰定数比関係

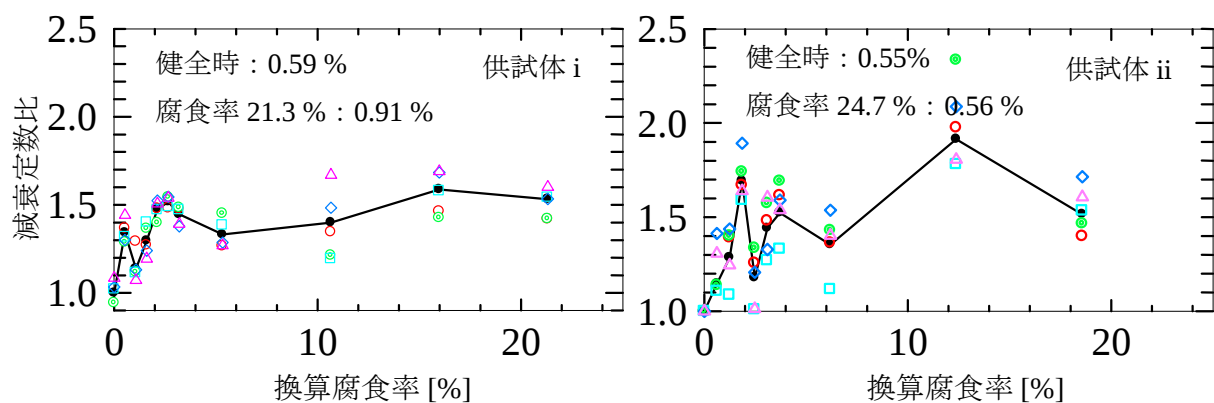


図-3.20 Truss - B 供試体の換算腐食率－減衰定数比関係

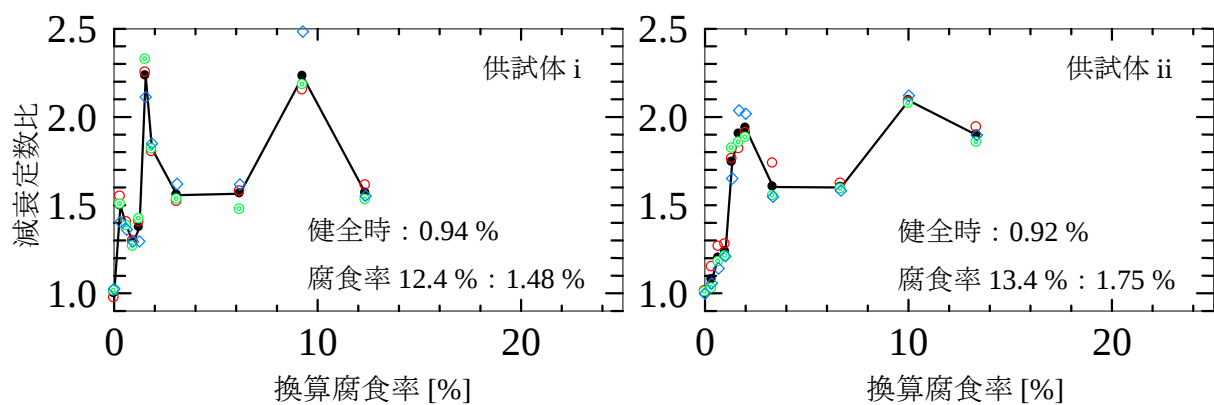
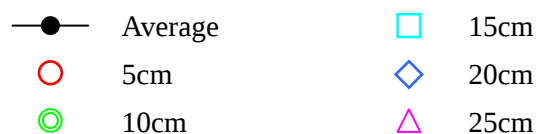
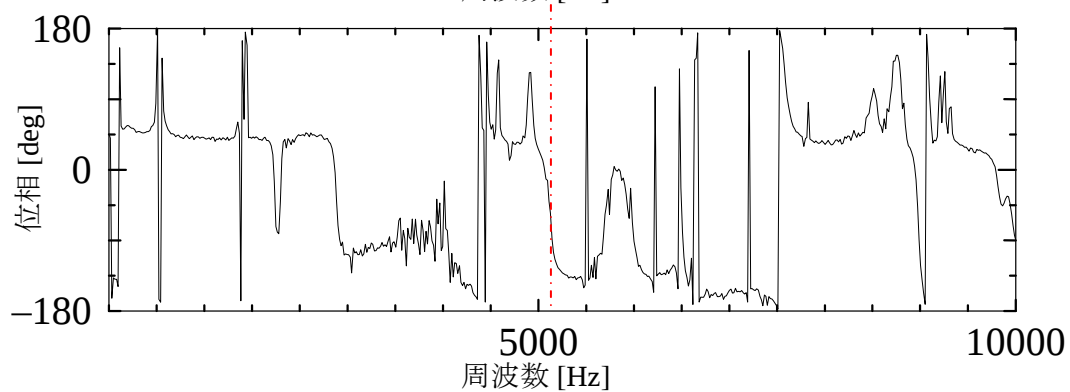
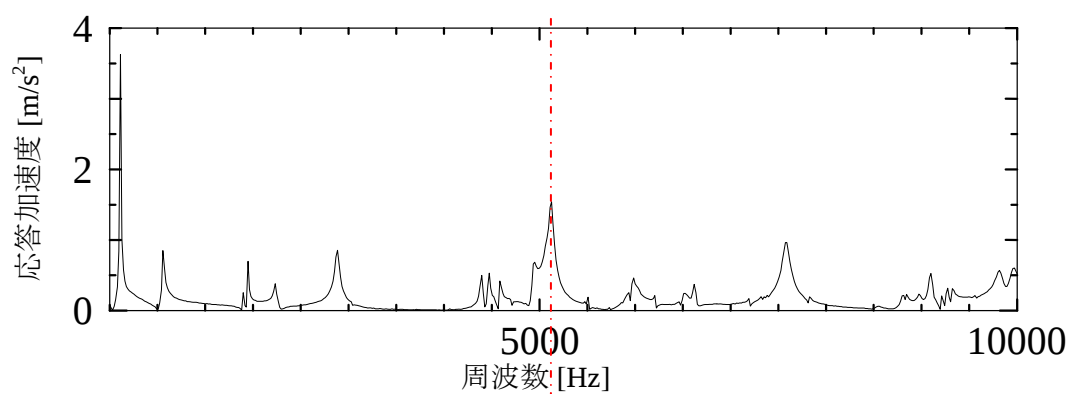
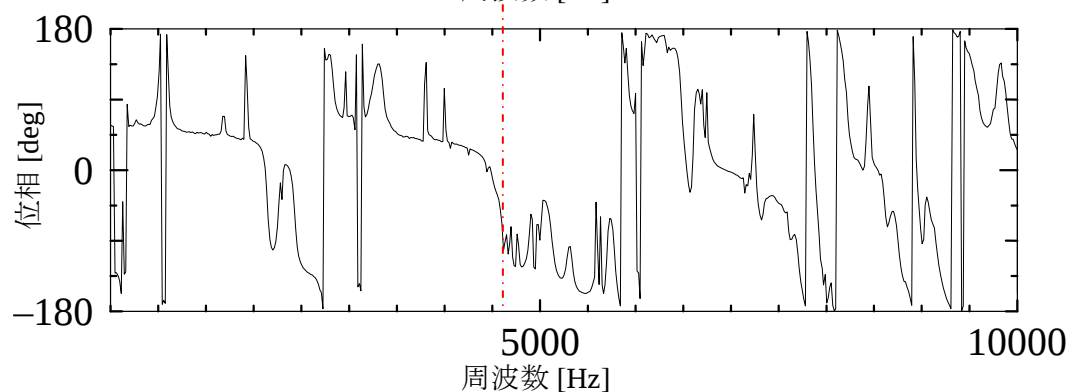
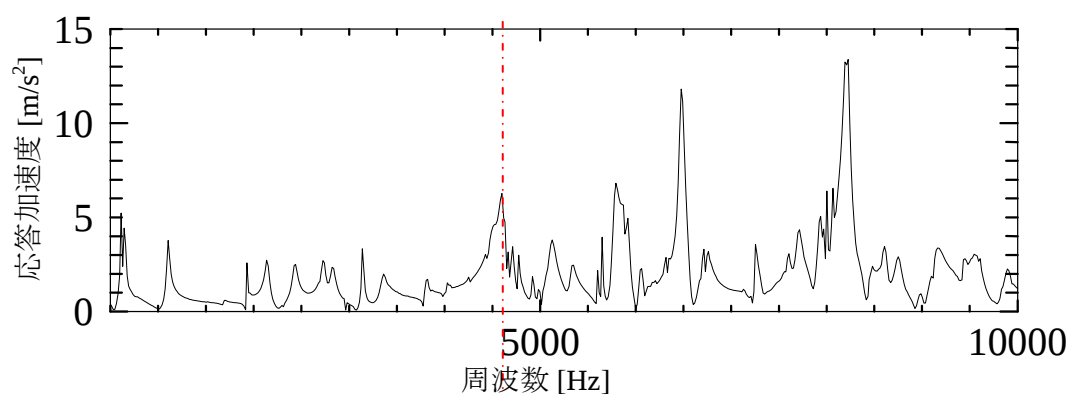


図-3.21 Column 供試体の換算腐食率－減衰定数比関係



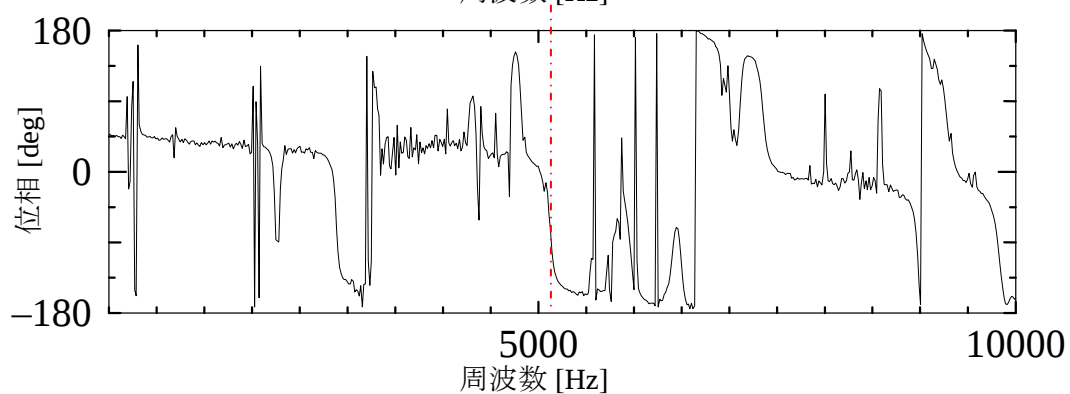
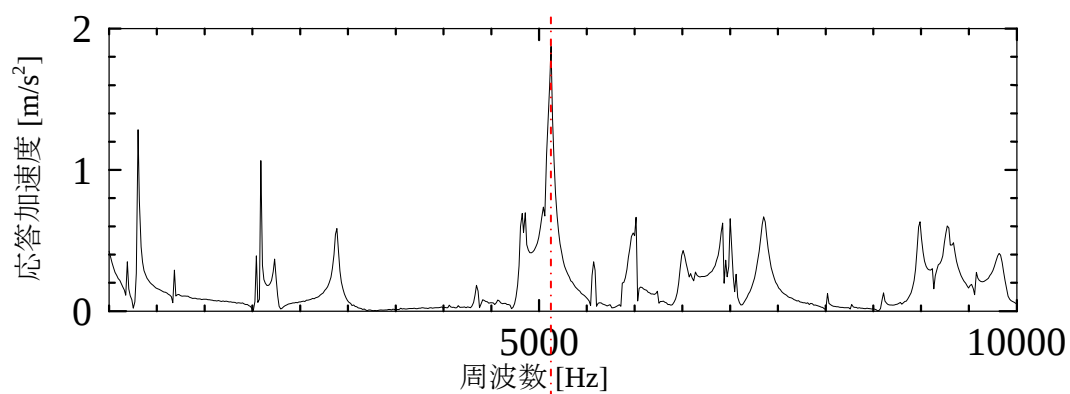


腐食率 0.0 %，積算電流量 0.0 Ah

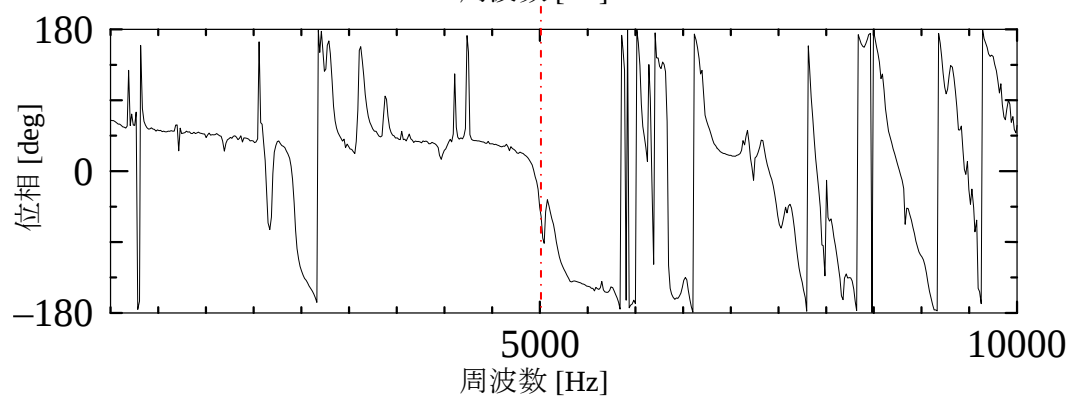
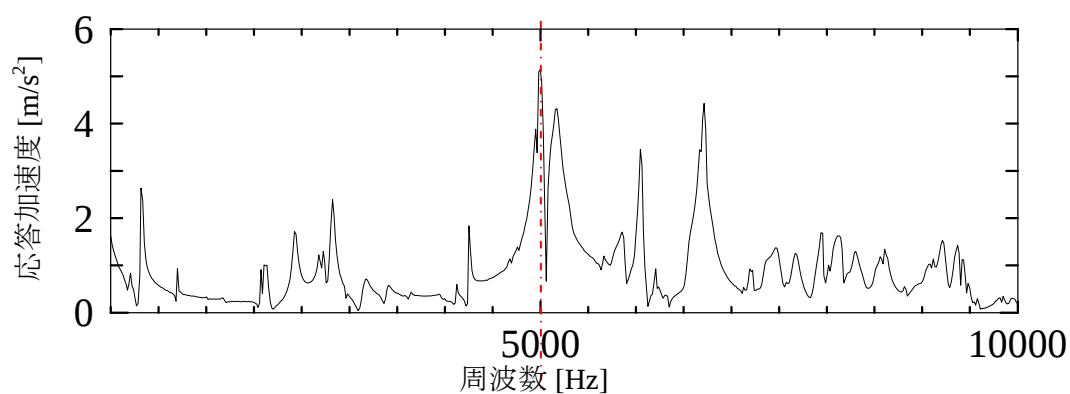


換算腐食率 23.4 %，積算電流量 318.3 Ah

図-3.22 Truss - A 供試体における縦振動試験強軸方向の共振曲線

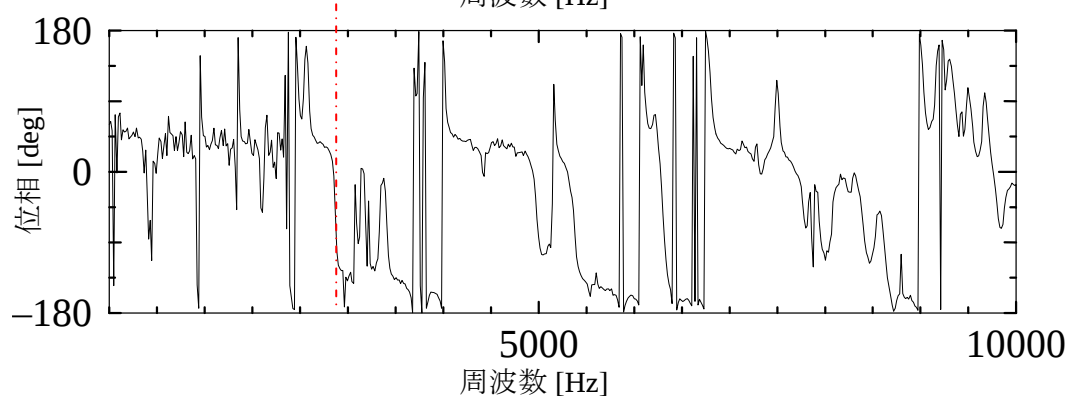
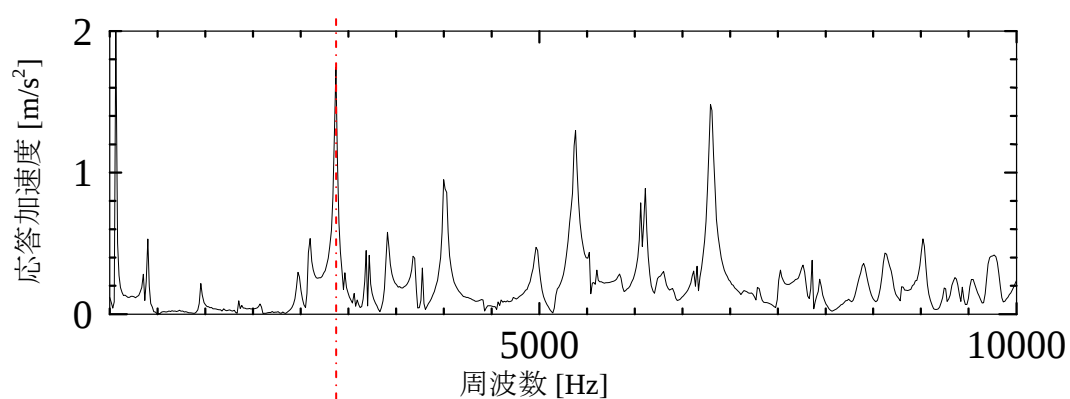


腐食率 0.0 % , 積算電流量 0.0 Ah

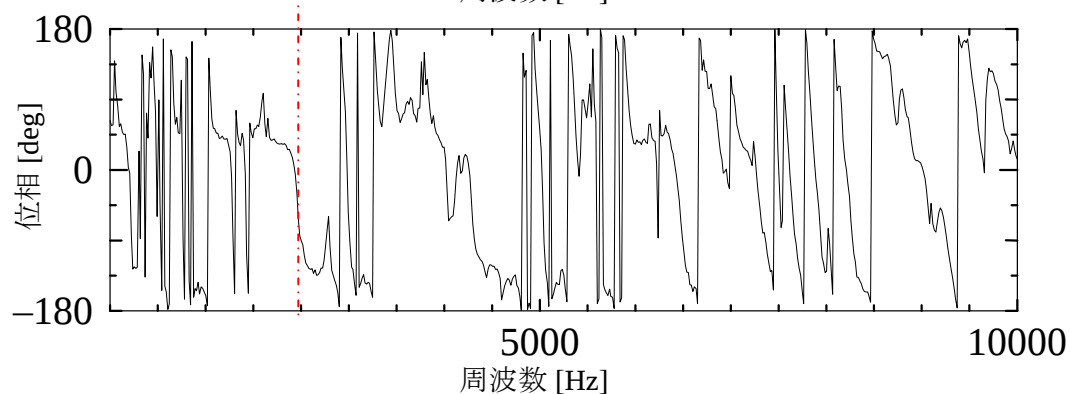
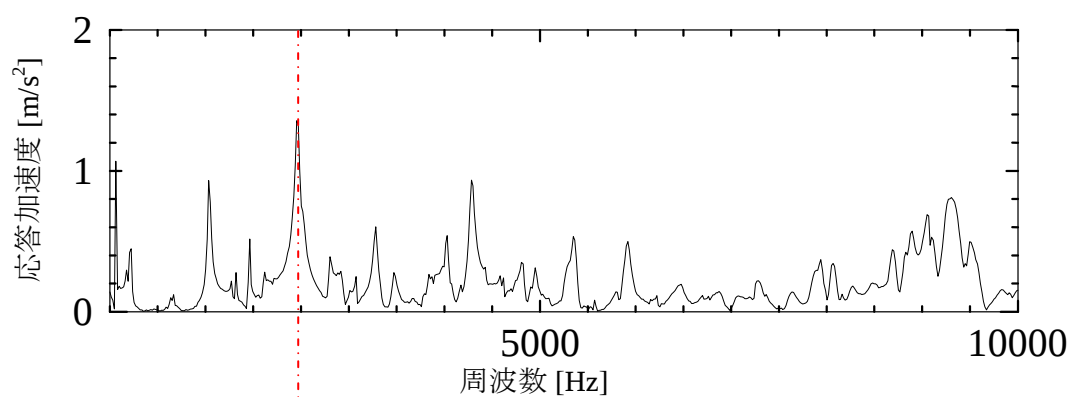


換算腐食率 23.4 % , 積算電流量 318.3 Ah

図-3.23 Truss - A 供試体における縦振動試験弱軸方向の共振曲線



腐食率 0.0 %, 積算電流量 0.0 Ah



換算腐食率 21.3 %, 積算電流量 318.3 Ah

図-3.24 Truss - B 供試体における縦振動試験強軸方向の共振曲線

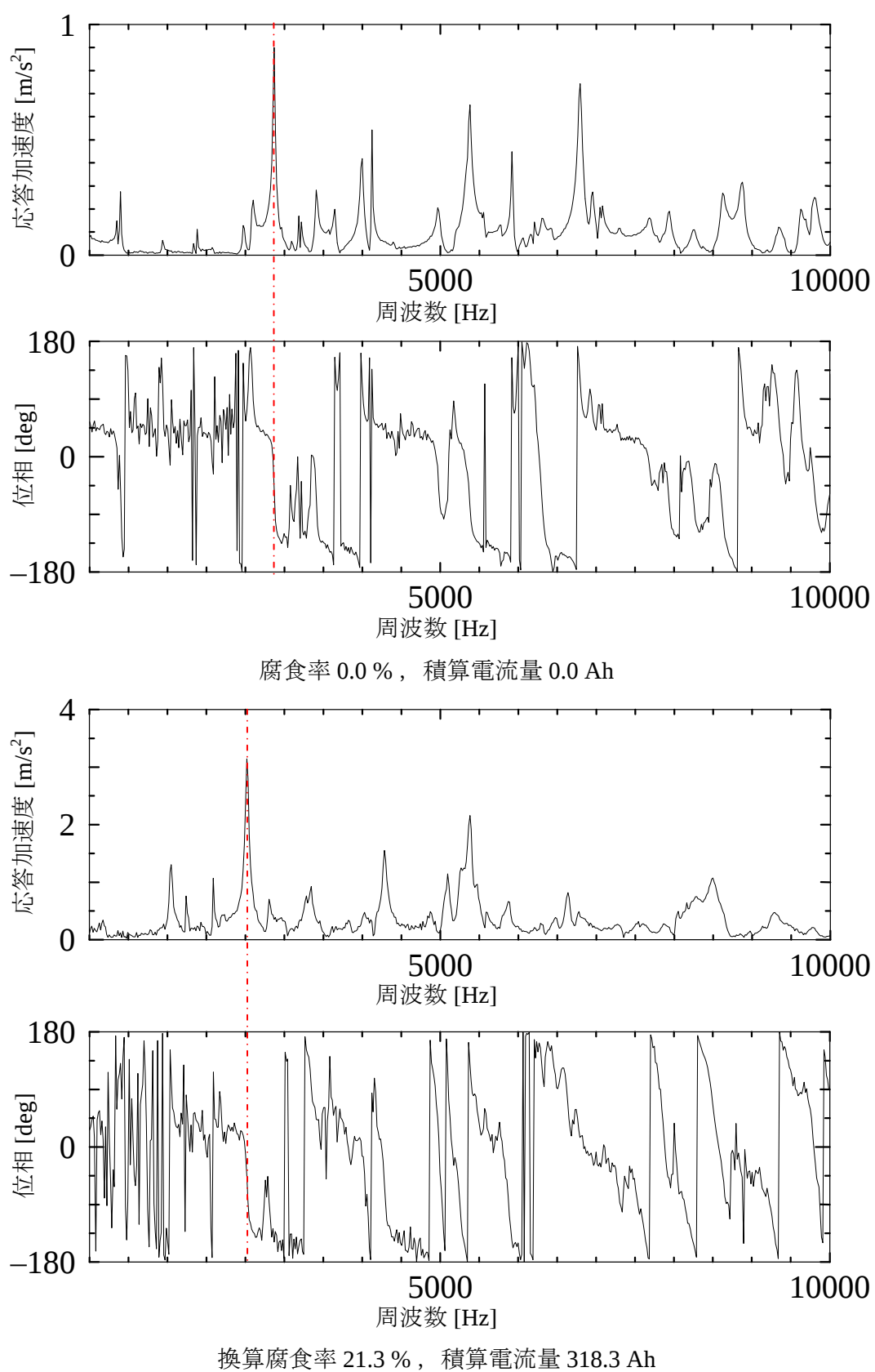


図-3.25 Truss - B 供試体における縦振動試験弱軸方向の共振曲線

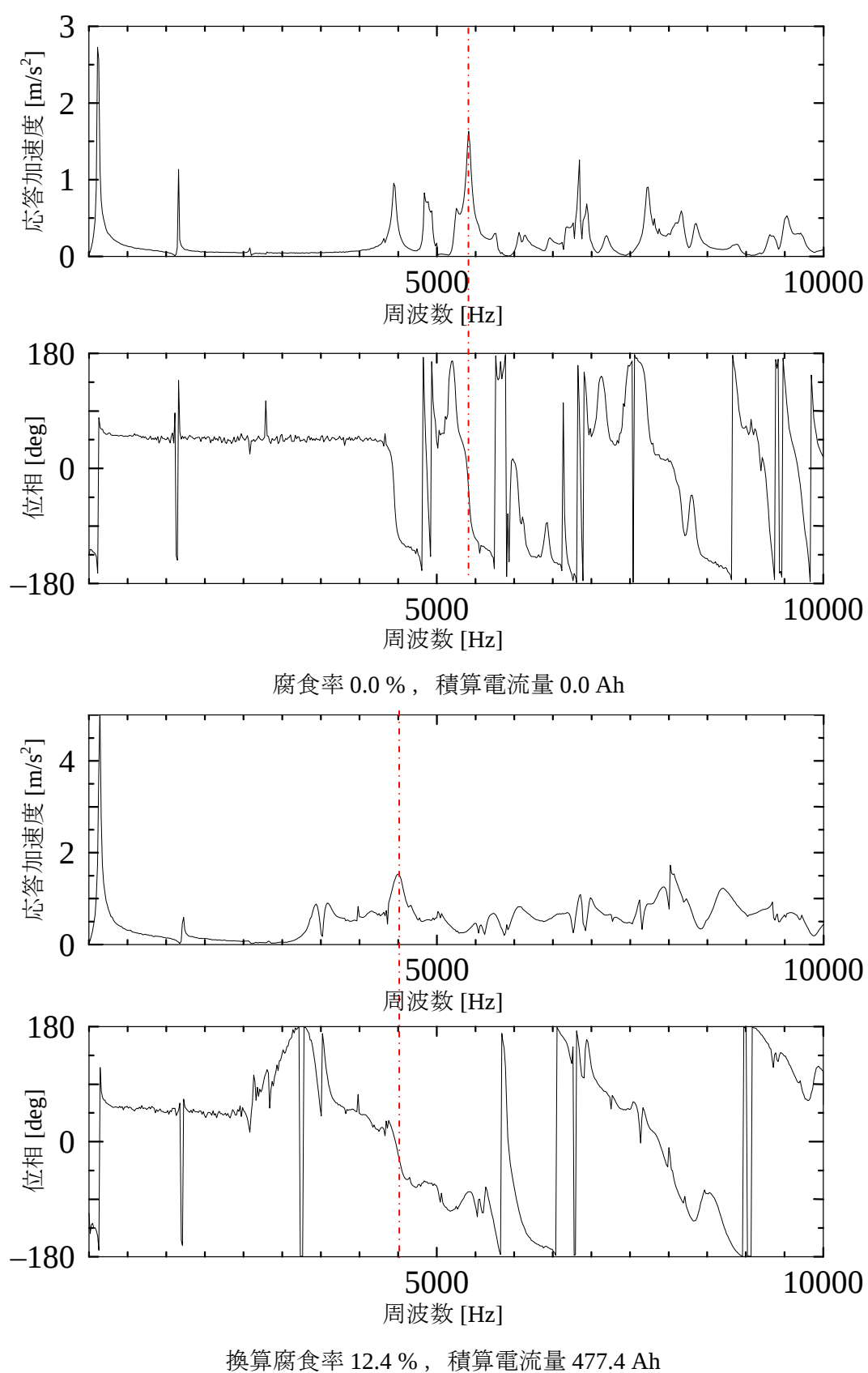
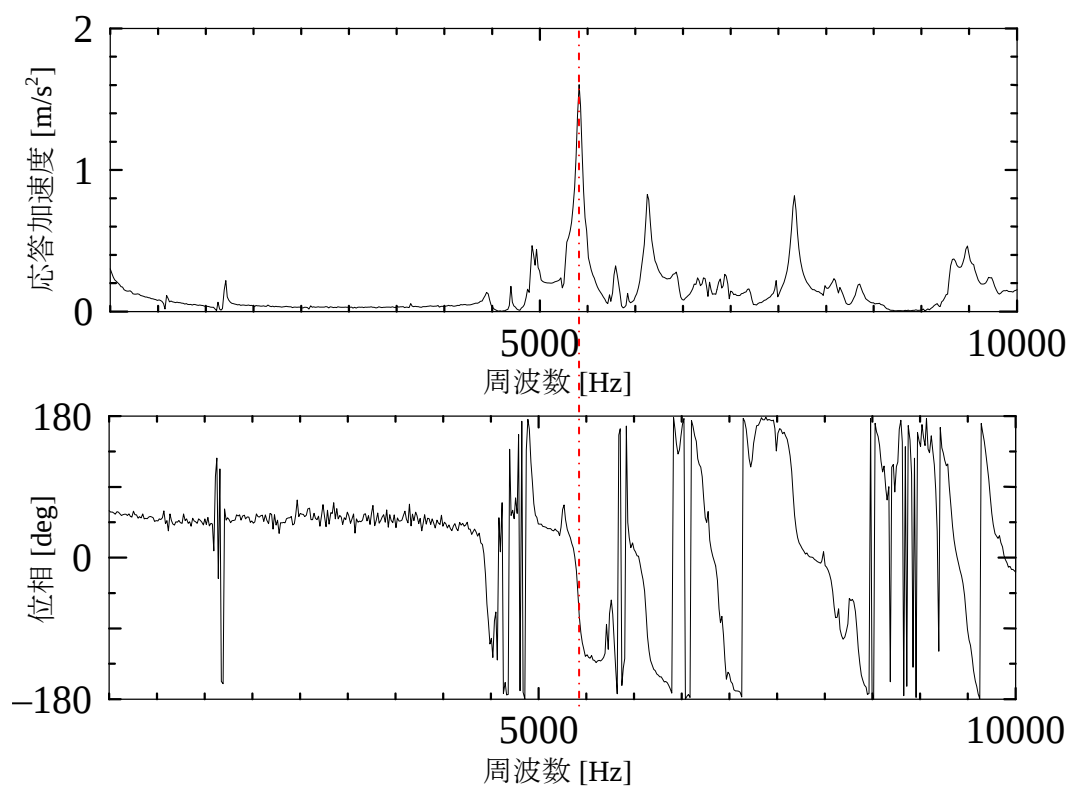
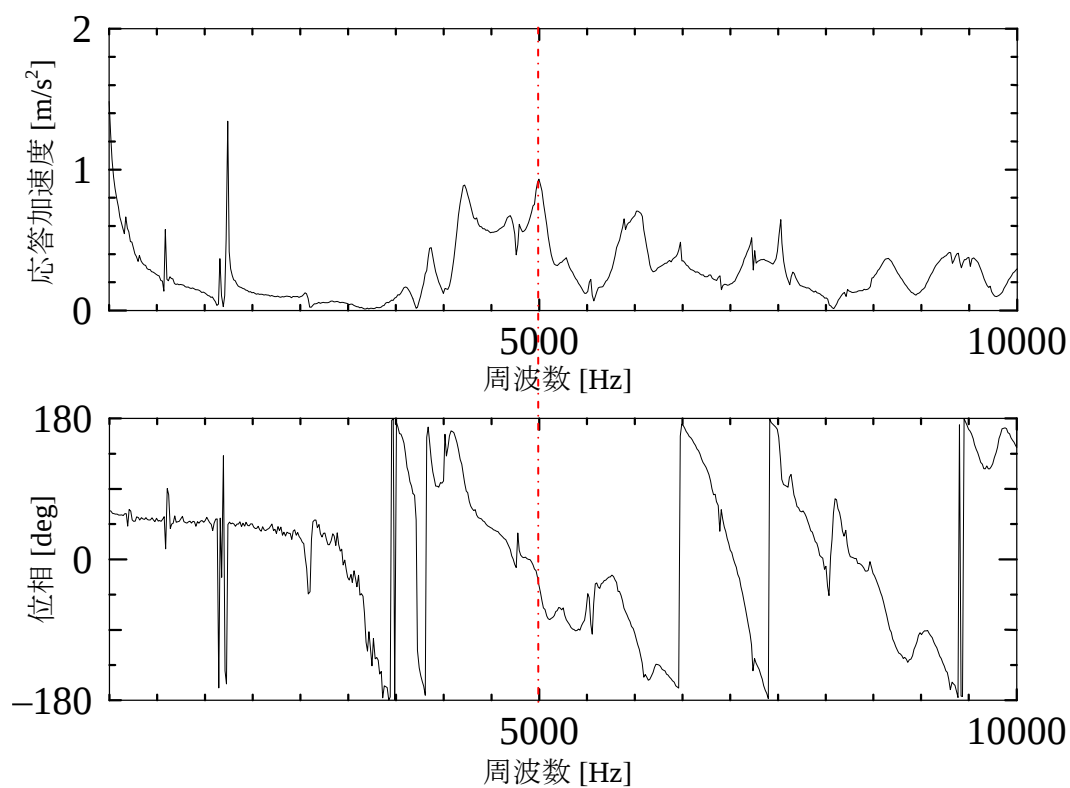


図-3.26 Column 供試体における縦振動試験強軸方向の共振曲線

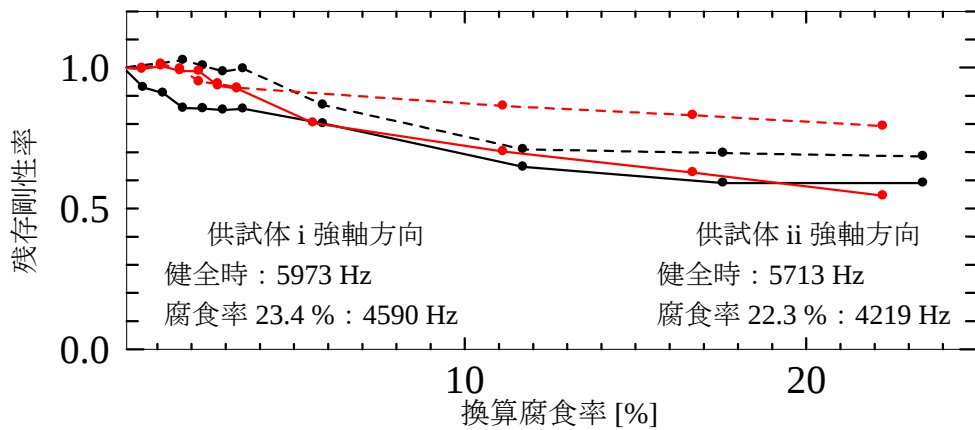


腐食率 0.0 % , 積算電流量 0.0 Ah

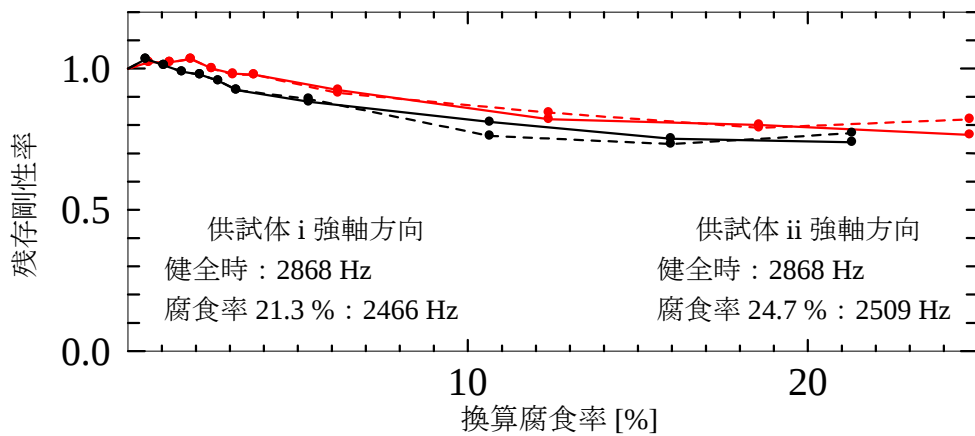


換算腐食率 12.4 % , 積算電流量 477.4 Ah

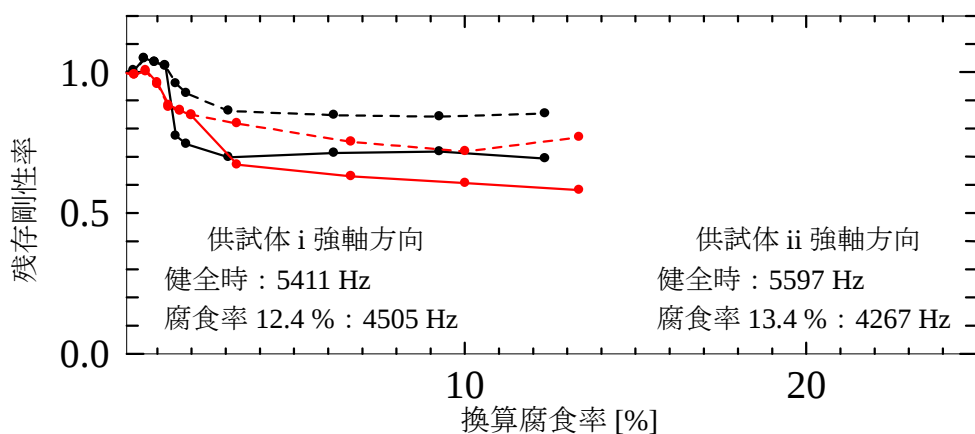
図-3.27 Column 供試体における縦振動試験弱軸方向の共振曲線



図－3.28 Truss - A 供試体の換算腐食率－残存剛性率関係



図－3.29 Truss - B 供試体の換算腐食率－残存剛性率関係



図－3.30 Column 供試体の換算腐食率－残存剛性率関係

— 供試体 i 強軸方向 - - - 供試体 i 弱軸方向
 — 供試体 ii 強軸方向 - - - 供試体 ii 弱軸方向

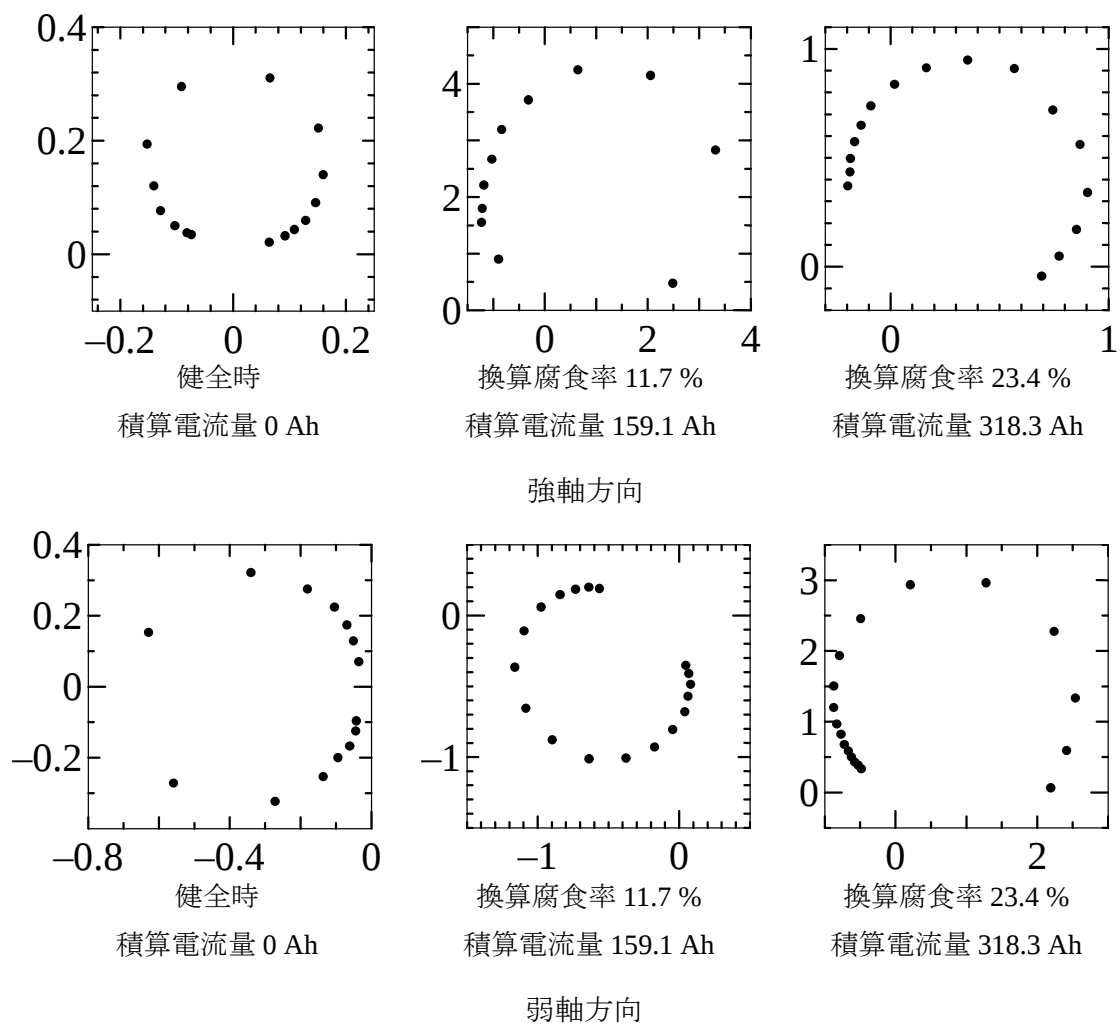


図-3.31 Truss - A 供試体のナイキスト線図

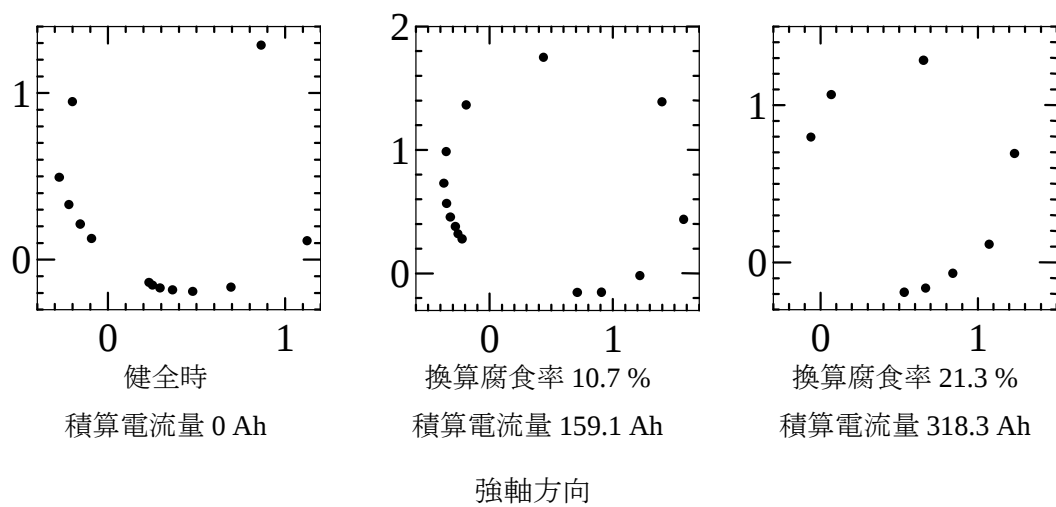


図-3.32 Truss - B 供試体のナイキスト線図

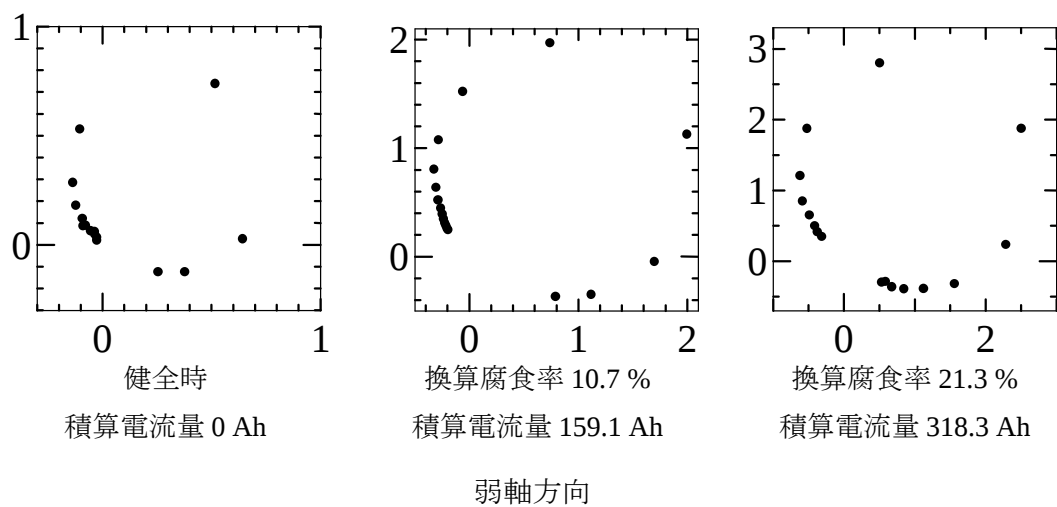


図-3.32 Truss - B 供試体のナイキスト線図

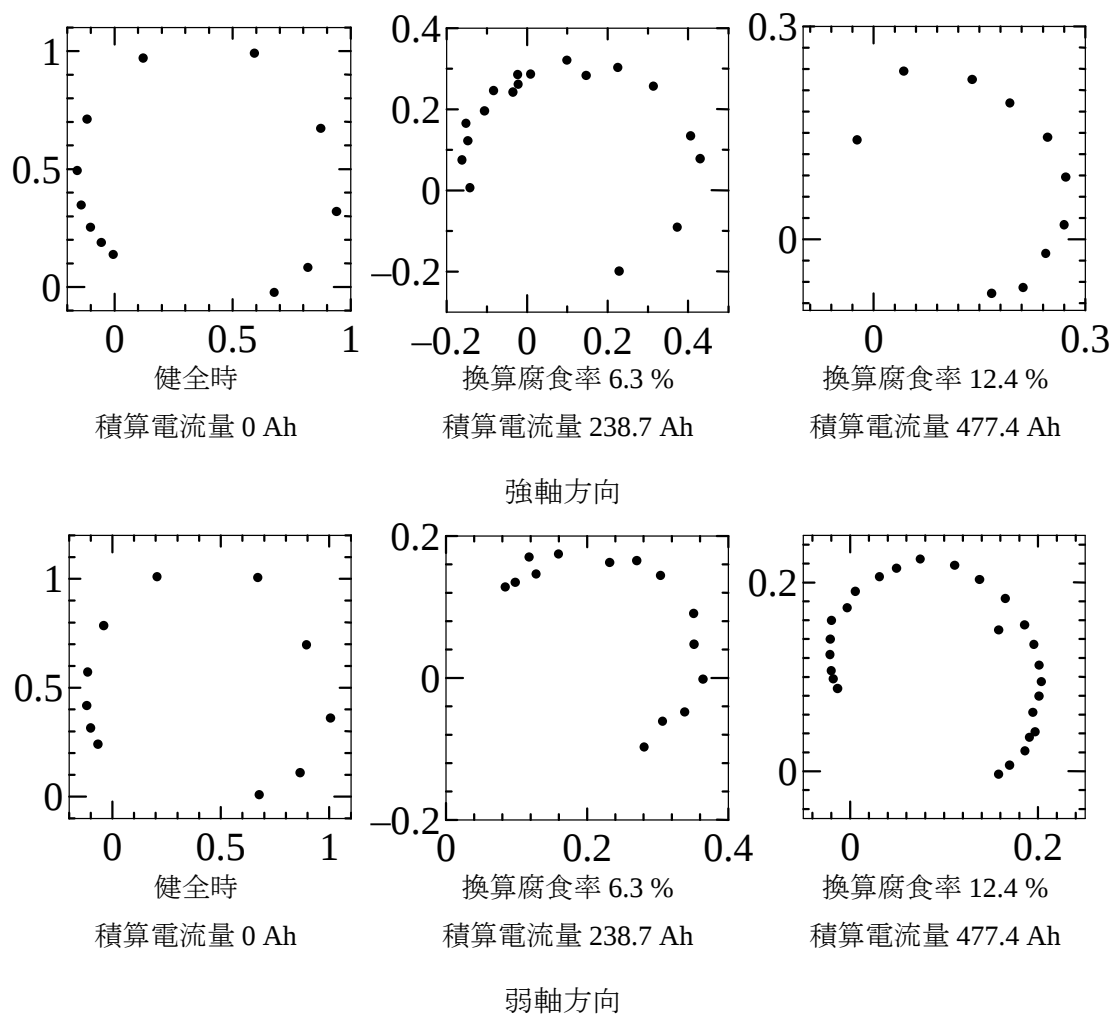


図-3.33 Column 供試体のナイキスト線図

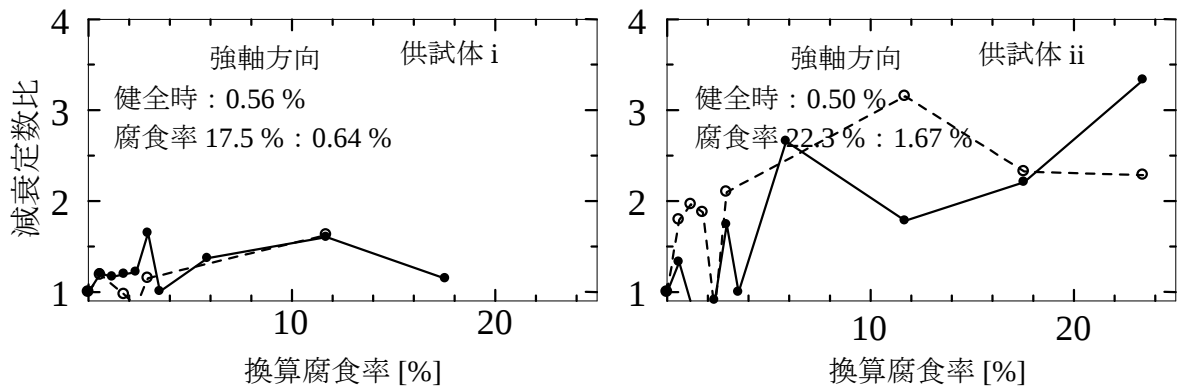


図-3.34 Truss - A 供試体の換算腐食率－減衰定数比関係

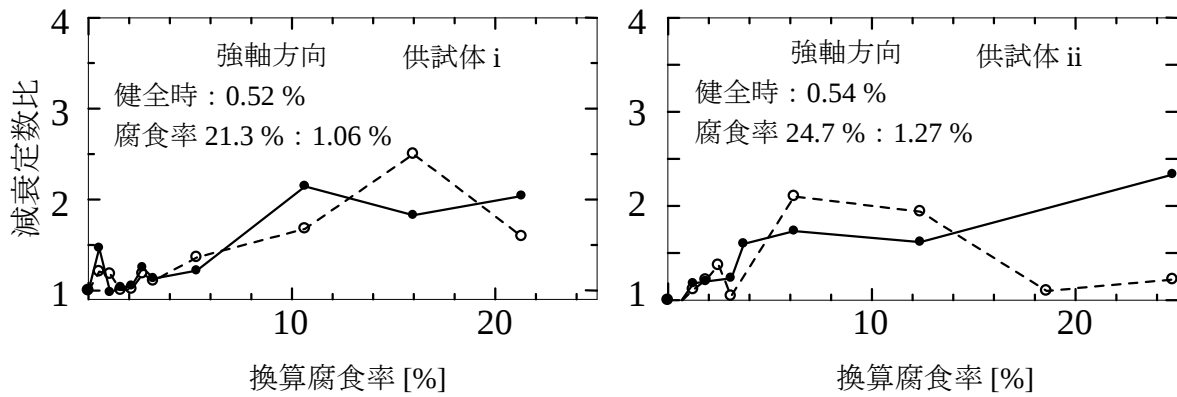


図-3.35 Truss - B 供試体の換算腐食率－減衰定数比関係

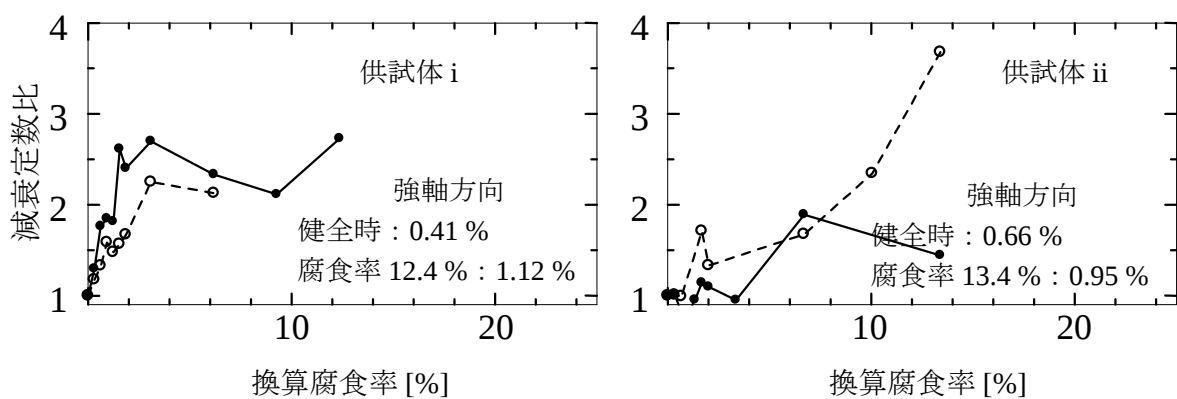


図-3.36 Column 供試体の換算腐食率－減衰定数比関係

—●— 強軸
- - -○- - 弱軸

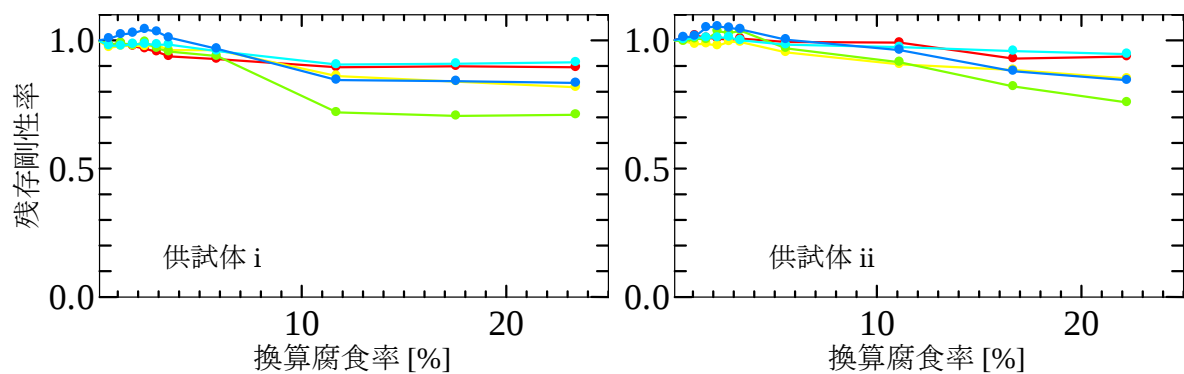


図-3.37 Truss - A 供試体の換算腐食率－残存剛性率関係

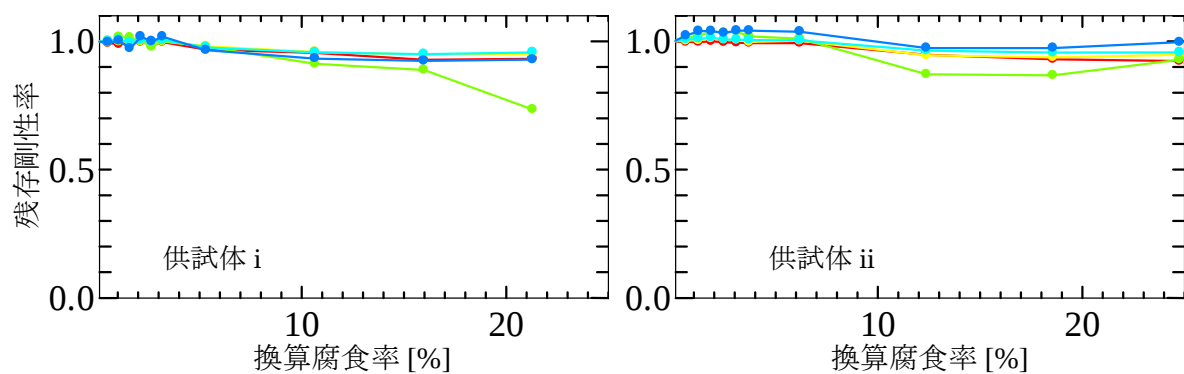


図-3.38 Truss - B 供試体の換算腐食率－残存剛性率関係

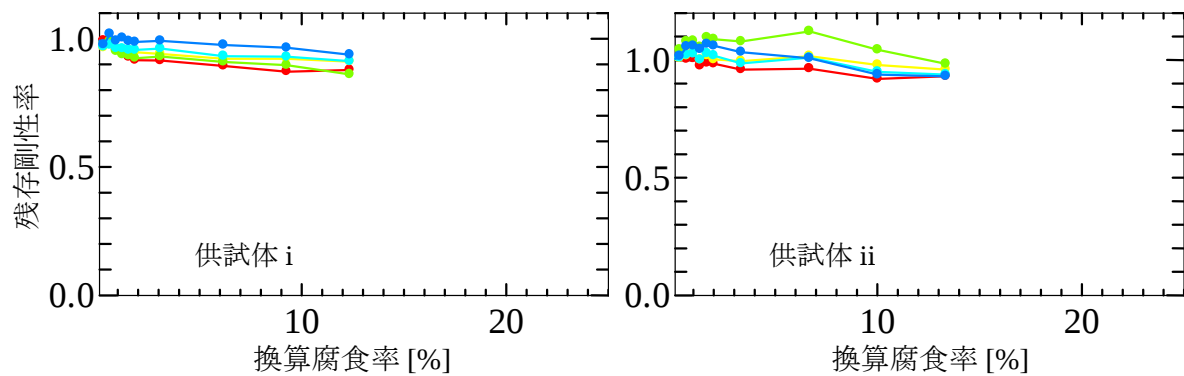
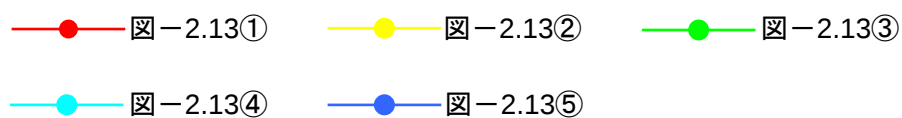


図-3.39 Column 供試体の換算腐食率－残存剛性率関係





写真－3.1 Truss - A 供試体



写真－3.2 Truss - B 供試体



写真－3.3 Column 供試体

4. 腐食を考慮した H 形鋼の座屈解析

4.1 概説

第 2・3 章では、コンクリート埋込部における鋼材腐食率の推定に関する非破壊検査法を検討した。しかし、現状では鋼材腐食率の推定手法がないことに併せて、腐食率が推定できても構造劣化特性との関係が明らかにされていない。本研究はコンクリート埋込部における点検(劣化検出+構造性能評価)手法の確立にあり、非破壊検査法の検討と平行して劣化部材の構造性能評価を検討する必要がある。数多く存在する社会基盤構造物の維持管理を考えると、腐食率や部材寸法等から簡便に構造性能を推定しなければならない。そこで、本章ではトラス橋斜材や道路付属物、家屋の柱などの軸力が生じる部材に対し、FEM 解析を用いて腐食が生じた鋼部材の構造性能を整理した。第 1 章に示したように、引張を受ける柱部材は断面欠損率に伴い、引張荷重および伸びは線形に低下する^{4.1)}。しかし、圧縮を受ける柱部材の座屈性状は柱長さや断面形状に影響を受けるため、様々な部材寸法に対して曲げ座屈試験^{4.2)}や曲げ座屈解析^{4.3)}が行われている。しかしながら、腐食を考慮した座屈性状についての研究例は少ない。そこで、腐食による断面欠損を考慮した H 形鋼柱の曲げ座屈解析を行い、鋼材腐食率が座屈荷重や座屈発生時変位に及ぼす影響を整理する。

4.2 解析モデルの概要

4.2.1 H 形鋼柱のモデル化

汎用 FEM 解析プログラム MARC を用いて座屈解析を行う。FEM 解析は内藤ら^{4.4)}が行った実験および解析に基づいて行っており、トラス橋斜材や家屋の柱などに一般的に使用される H 形鋼を対象として、曲げ座屈解析を行った。図-4.1 に示すように、コンクリート

部から上部の H 形鋼を 4 節点厚肉シェル要素によってモデル化した。H 形鋼基部は下端固定とした。H 形鋼の断面寸法はウェブ高さ h とフランジ幅 b をいずれも 300 mm 一定として、ウェブ厚さ t_w とフランジ厚さ t_f を変化させウェブ幅厚比 D/w 、フランジ幅厚比 b/f の影響を考慮する。また、部材長を変化させ細長比 λ についても考慮した。板厚や部材長などの部材寸法を表-4.1 に示す。

要素は 25mm×25mm の 4 節点厚肉シェル要素を用い、H 形鋼の応力-ひずみ関係はひずみ硬化を考慮したトリリニアモデル(図-2)を用い、Von Mises の降伏関数を適応した。トリリニアモデルは内藤ら⁴⁴⁾の引張試験に基づいている。

載荷は片押し載荷とし、H 形鋼の上端部強軸方向に水平載荷する(図-4.1)。なお、座屈し易いように初期不整として、弱軸方向に水平力 1 N を与えている。

4.2.2 腐食パラメータの設定

既往の研究において鋼材腐食に伴う静弾性係数の変化は無いことが報告されており⁴⁵⁾、鋼材腐食を考慮した FEM 解析では鋼材断面欠損、つまり板厚を減少させる。本解析においても鋼材腐食を単に H 形鋼の板厚減少と捉え解析を行う。また、フランジ・ウェブ面に対して腐食速度は一定と仮定し、フランジとウェブの板厚を同じだけ減少させた。従って、ウェブ幅厚比とフランジ幅厚比の比(Df/wb)が異なる部材に対しては、腐食進行に伴いフランジとウェブの幅厚比の差が広がる。ウェブ幅厚比とフランジ幅厚比の比(Df/wb)が 6 以上となる場合、ウェブ座屈後の垂直座屈を有し劣化勾配が極めて大きいものとなる⁴⁶⁾ことが指摘されており、ウェブとフランジの幅厚比が 6 以上となるものは省くことにした。また、腐食率(断面減少率)は 20%、40%とし、健全時との比較を行う。

腐食区間については、貝沼ら^{47), 48)}の行なった乾湿繰返し試験と星野ら⁴⁹⁾が道路付属物への調査により 40～50 mm において、環境差(酸素濃度、pH、温湿度など)により腐食が著しく進行していることが報告されている。また、トラス橋においてコンクリート埋込部全面に亘って腐食が進行しているケースが多く、木曽川橋では 220 mm のコンクリート区間

全域で腐食が進行している．そこで，腐食区間を 50, 100, 200 mm として解析を行う．

4.2.3 座屈荷重および座屈発生時変位の定義

座屈の分類として，部材全体が座屈する全体曲げ座屈，ねじれ座屈，部材の一部が座屈する局部座屈が考えられる．FEM は材料非線性を考慮した追跡による非線形解析であるため，フランジ幅厚比 b/f やウェブ幅厚比 D/w ，細長比 λ によって，発生する座屈モードや発生の順番が異なり，固有値を一意に得られない．そこで，最大荷重となる点を座屈点として，そのときの変位を座屈発生時変位とする．

4.3 解析結果

4.3.1 座屈荷重

図-4.3～4.5 に細長比 λ ごとの腐食区間一座屈荷重関係を示す．ここで，座屈荷重の変化率とは，健全時の座屈変荷重との比である．

腐食区間が小さい場合(50mm)では，フランジ幅厚比 b/f の影響が大きい． b/f が小さいときは座屈荷重の低下は殆ど見られないが， b/f が大きいときは座屈荷重の低下が著しい．また，僅かなばらつきは見られるが，ウェブ幅厚比 D/w は座屈荷重低下に影響していない．さらに，細長比 λ に着目すると， λ が大きいとき，腐食率に伴う座屈荷重低下が僅かに小さくなる．

腐食区間が大きい場合(100～200 mm)では，フランジ幅厚比 b/f とウェブ幅厚比 D/w の影響が大きい． b/f と D/w が小さい場合は腐食率 20%であっても座屈荷重は殆ど低下しない．また， b/f が大きいとき座屈荷重低下は D/w に関らず断面減少率とほぼ等しくなる．しかし， b/f が小さい場合は， D/w ごとのばらつきが大きく座屈荷重は断面減少率よりも小さくなる場合も存在する．細長比 λ に着目すると， λ が小さい場合には荷重低下が少なくなる傾向にある．

座屈荷重の低下率が異なる理由は，モデルごとに座屈モードが異なるためと考えられる．

フランジやウェブで局部座屈が発生するモデルでは、腐食を想定した区間で座屈が発生するため、座屈が生じる区間の断面積が座屈荷重の低下に大きく影響する。しかし、ねじれ座屈が発生するモデルにおいて、腐食を想定した区間はねじれの範囲から外れ、式(4.1)に示す l が短くなる。そのため、ねじれ座屈発生応力 σ_{cr} が増加したと考えられる。

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{4 \left(\sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_f} \cdot \frac{l}{b}} \right)^2} \quad (4.1)$$

ここで、 E は弾性係数、 l は座屈長、 A_w はウェブの断面積、 A_f はフランジの断面積である。

4.3.2 座屈変位

図-4.6～4.8に細長比 λ ごとの腐食区間と座屈変位の変化率の関係を示す。ここで、座屈変位の変化率とは、健全時の座屈変位との比である。 $b/f=10$ 、 $D/w=20$ 、 $\lambda=7.4$ 、腐食率40%時の座屈モード図と載荷点における荷重－変位関係を図-4.9、4.10に示す。

フランジ幅厚比 $b/f=5$ の健全時では、座屈モードは全体ねじれ座屈である。腐食率40%では、フランジ座屈が先行し全体ねじれ座屈が発生するため、座屈変位が低下する。しかし、座屈モードが変化しないウェブ幅厚比 D/w が小さい場合、腐食区間以外でねじれ座屈が発生することで、 $D/w=15$ において座屈荷重と共に座屈変位が増加した。

フランジ幅厚比 $b/f=10$ の健全時では、座屈モードは殆ど弾性的なねじれ座屈を示すのに対して、腐食を考慮したモデルでは塑性域でねじり座屈が発生している。そのため座屈変位が健全時に比べ著しく増加している。しかし、腐食区間200mmでは腐食区間内でフランジ座屈が発生するため、座屈時変位が低下した。

フランジ幅厚比 $b/f=15$ の健全時では、座屈モードは全体曲げの弾性座屈であるが、腐食時においても座屈モードは変化せず、座屈変位は断面減少率と同程度低下している。しかし、 D/w が小さい場合、塑性座屈しフランジ座屈後もウェブが荷重を受持つため座屈変位が極めて大きくなった。

4.4 まとめ

本章ではトラス橋斜材や道路付属物、家屋の柱などの軸力が生じる部材に対して FEM 解析を用いて座屈挙動に着目した構造性能評価を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) フランジ幅厚比 b/f およびウェブ幅厚比 D/w が大きい場合、腐食区間の影響は 50mm 程度であり、腐食区間 50 mm までは座屈荷重比と腐食区間に線径の関係が見られた。また、腐食区間が 50mm を超える場合、座屈荷重比は断面減少率と同程度低下する。
- 2) フランジ幅厚比 b/f およびウェブ幅厚比 D/w が小さい場合、20 % 程度の腐食による座屈荷重への影響は殆ど無い。しかし、 D/w の増加に伴う座屈荷重低下は著しく、断面減少率よりも低下する可能性がある。
- 3) 細長比 λ が大きくなるにつれ、ウェブ幅厚比 D/w の影響が小さくなり、フランジ幅厚比 b/f が小さい場合を除いて、 b/f と腐食率、腐食区間の情報だけで座屈荷重の推定が可能である。
- 4) 腐食区間により、同じ腐食率であっても座屈モードが異なり、座屈変位が増減する。しかし、フランジ幅厚比 b/f が大きい場合を除き、腐食に伴う座屈変位は増加傾向にある。
- 5) 健全時において弾性座屈に至る部材では、腐食に伴い塑性領域で座屈が発生する。そのため、健全時に比べ極めて座屈変位が増加する ($b/f = 10, 15$)。しかし、健全時で塑性座屈をとる $b/f = 5$ のような部材に対しては、座屈変位は 2 倍程度に収まっている。

以上より、腐食区間は腐食率と同様に、柱部材の構造性能を決める上で重要なパラメータになることが明らかになった。従って、コンクリート埋込部における鋼部材の点検を行う上で、腐食率と腐食区間を推定する手法が必要である。

参考文献

- 4.1) 梅田辰将, 藤井堅, 多賀谷宏三, 刈谷秋人: 引張試験による腐食鋼板の力学特性および強度評価法, 土木学会中国支部第 56 回研究発表会, I-22, pp.43-44, 2003.
- 4.2) 牧野稔, 松井千秋, 三谷勲: H 形鋼柱の局部座屈後の変形性状 その 2 荷重-変形関係, 日本建築学会論文報告集, No.286, pp.23-28, 1979.
- 4.3) 山田哲, 秋山宏, 桑村仁: 局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集, No.444, pp.135-143, 1993.
- 4.4) 内藤英樹, 秋山充良, 鈴木基行, 白濱永才, 高田真人: 降伏線理論による H 形鋼の局部座屈に着目した SRC 柱の変形性能評価, 土木学会第 60 回年次学術講演会, V-494, pp.987-988, 2005.
- 4.5) 岩波光保, 横田弘, 佐藤文則: 鉄筋腐食が RC はり耐荷性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1501-1506, 2002.
- 4.6) 五十嵐規矩夫, 小田部敏明, 王韜: ウェブ幅厚比の大きな H 形断面梁の塑性変形能力と座屈後繰返し挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.646, pp.2345-2354, 2009.
- 4.7) 貝沼重信, 細見直史: 鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的腐食表面性状の数値シミュレーション, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.2, pp.440-453, 2006.
- 4.8) 細見直史, 貝沼重信: コンクリート境界部で腐食した鋼構造部材の疲労挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.333-349, 2008.
- 4.9) 星野誠, 玉越隆史: 道路付属物支柱基部の腐食発生傾向に関する検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会, VI-231, pp.461-462, 2011.

表-4.1 部材寸法

供試体	フランジ板厚 [mm]	ウェブ板厚 [mm]	部材長 [mm]	断面 2 次モーメント ×10 ⁴ [mm ⁴]	腐食率 [%]	腐食区間 [mm]
1	30	20	1000 2000 3000	36972	20	50
2						100
3						300
4					40	50
5						100
6						300
7		15		35964	20	50
8						100
9						300
10					40	50
11						100
12						300
13		10		34956	20	50
14						100
15						300
16		7.5		34452	20	50
17						100
18						300

供試体	フランジ板厚 [mm]	ウェブ板厚 [mm]	部材長 [mm]	断面 2 次モーメント $\times 10^4$ [mm ⁴]	腐食率 [%]	腐食区間 [mm]
19	15	15	1000 2000 3000	22598	20	50
20						100
21						300
22					40	50
23						100
24						300

供試体	フランジ板厚 [mm]	ウェブ板厚 [mm]	部材長 [mm]	断面 2 次モーメント $\times 10^4 [\text{mm}^4]$	腐食率 [%]	腐食区間 [mm]
25	15	10	1000	21163	20	50
26						100
27						300
28					40	50
29						100
30						300
31		7.5	2000	20445	20	50
32						100
33						300
34					40	50
35						100
36						300

供試体	フランジ板厚 [mm]	ウェブ板厚 [mm]	部材長 [mm]	断面 2 次モーメント $\times 10^4 [\text{mm}^4]$	腐食率 [%]	腐食区間 [mm]
37	10	20	1000	17422	20	50
38						100
39						300
40					40	50
41						100
42						300
43		15	2000	15821	20	50
44						100
45						300
46					40	50
47						100
48						300
49		7.5	3000	15021	20	50
50						100
51						300
52					40	50
53						100
54						300

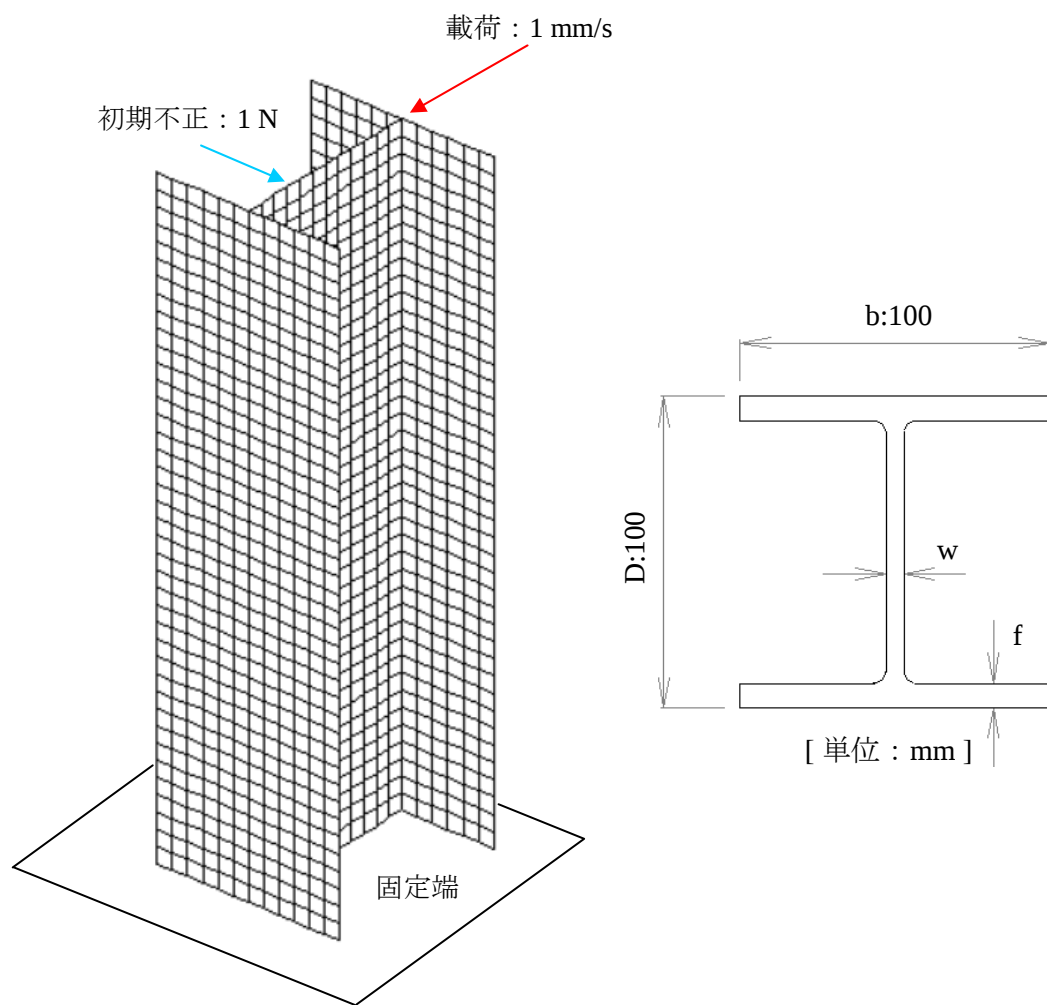


図-4.1 解析モデル

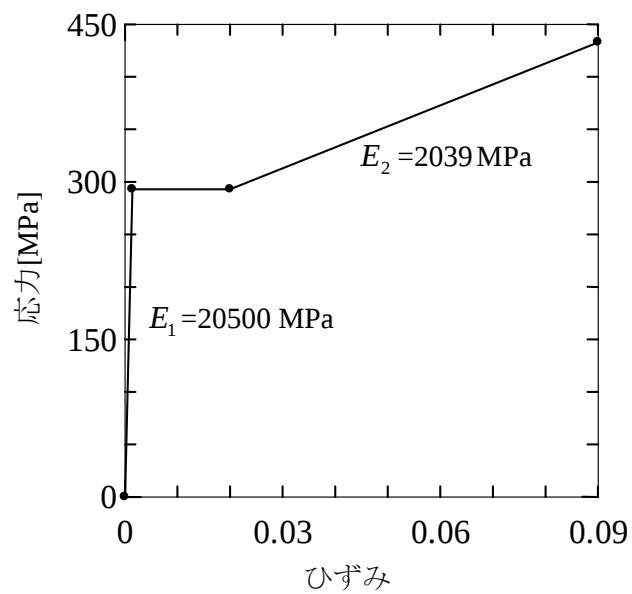


図-4.2 トリリニアモデル

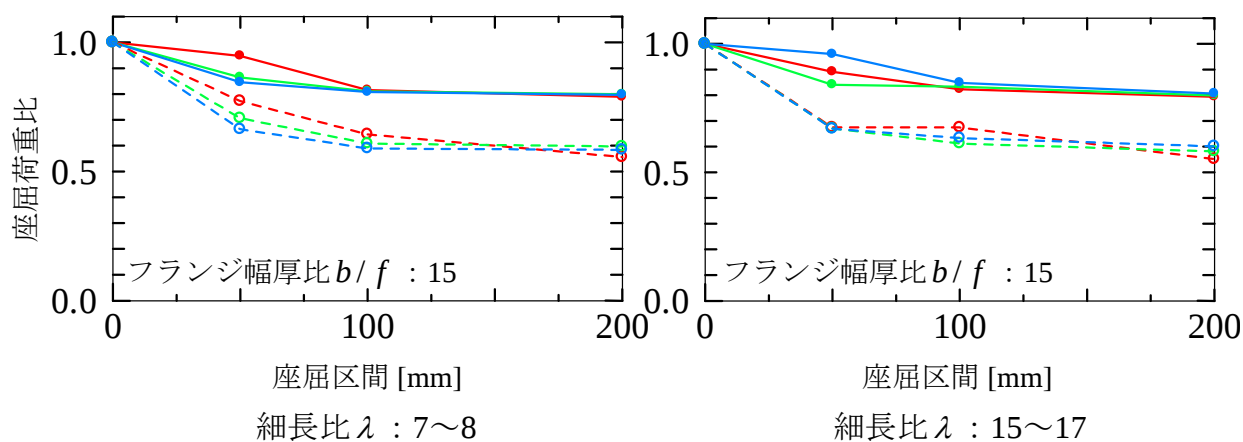
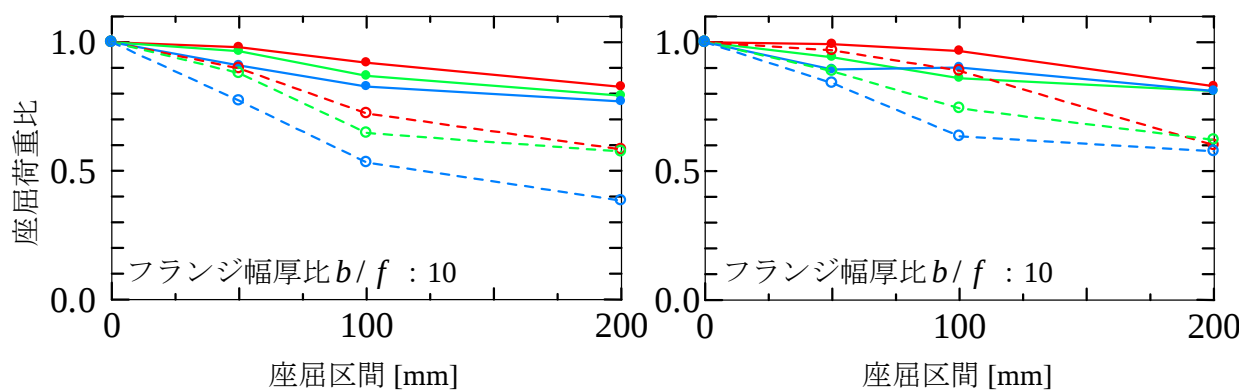
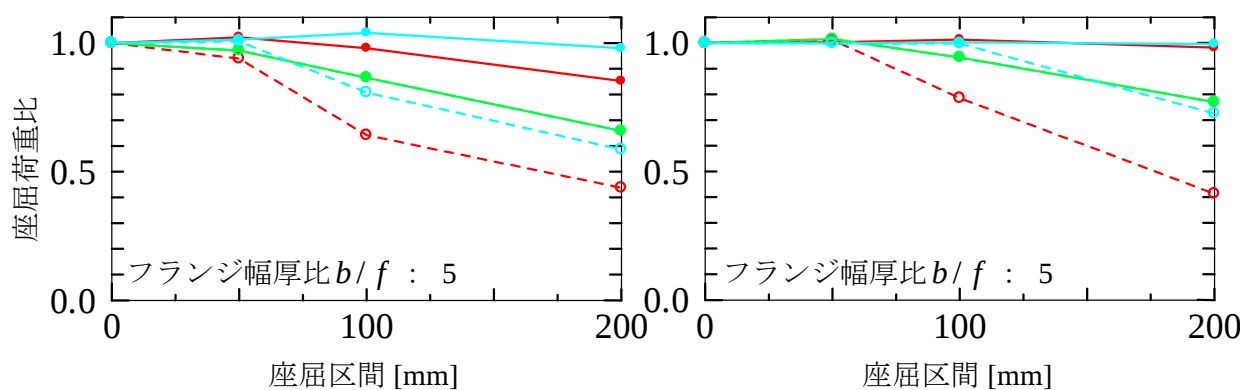
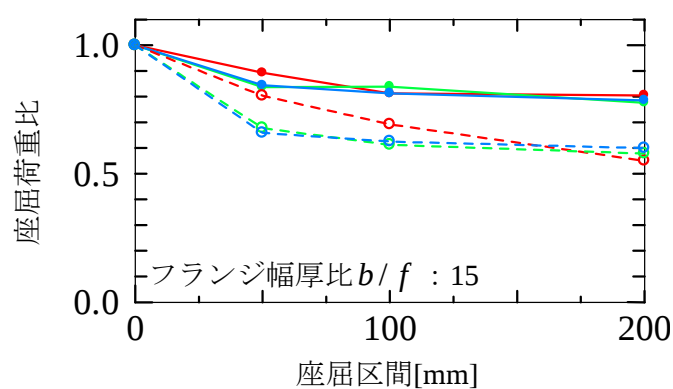
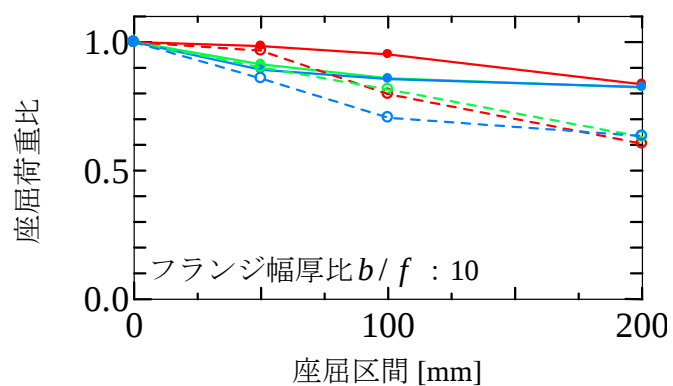
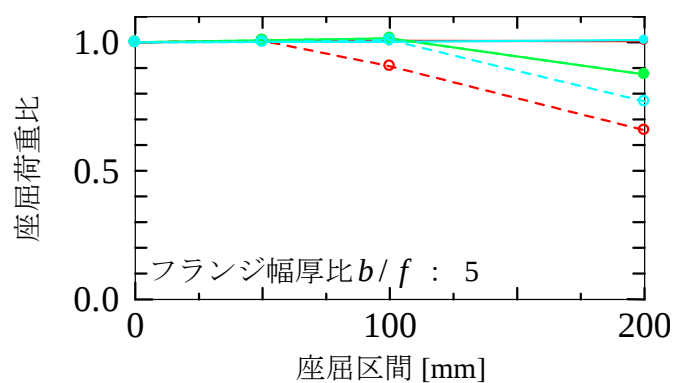


図-4.4 腐食区間一座屈荷重比関係

- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 15
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 20
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 30
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 40
- 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 15
- 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 20
- 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 30
- 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 40



細長比 λ : 22~24

図-4.5 腐食区間一座屈荷重比関係

- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 15
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 20
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 30
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 40
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 15
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 20
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 30
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 40

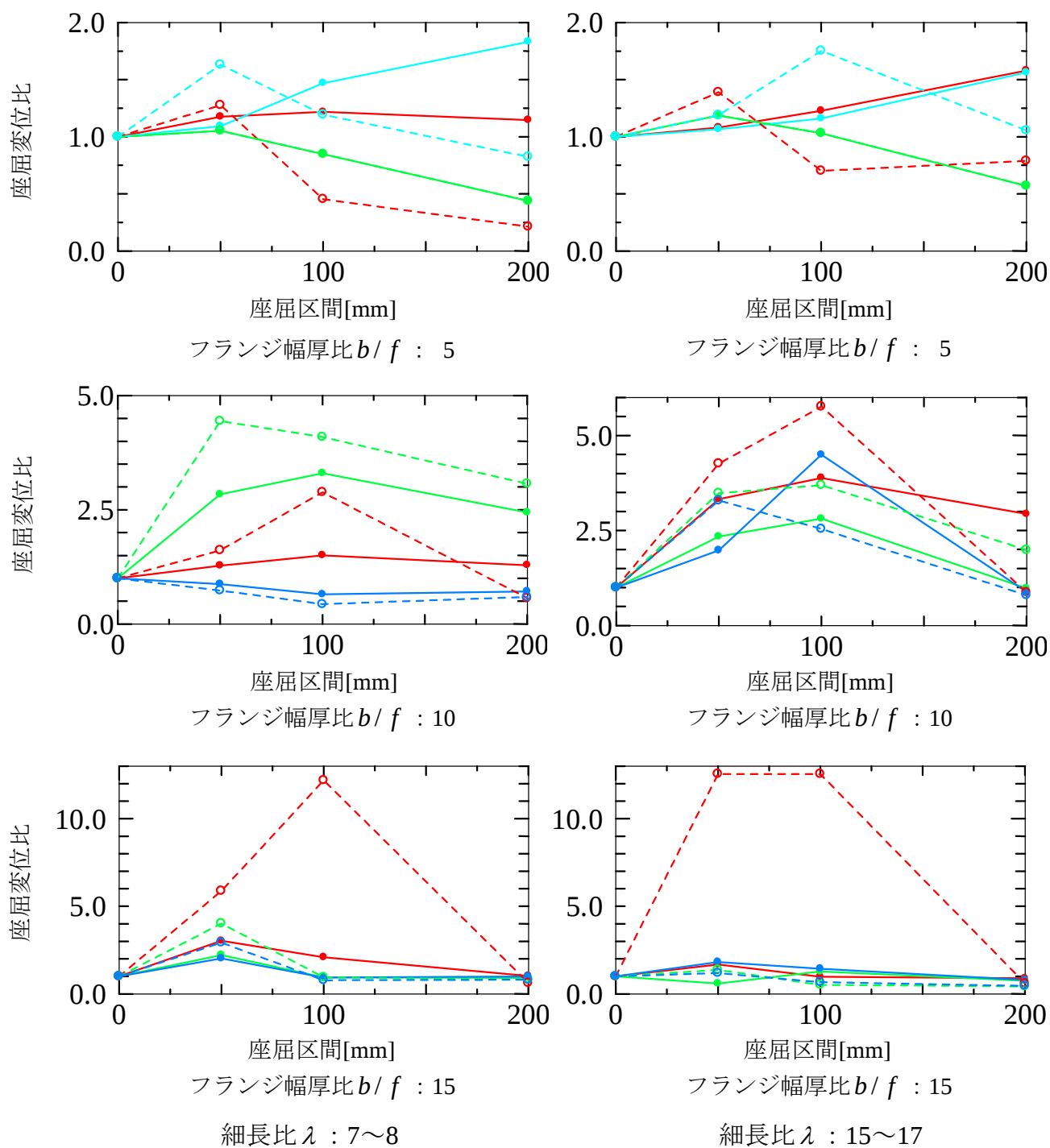
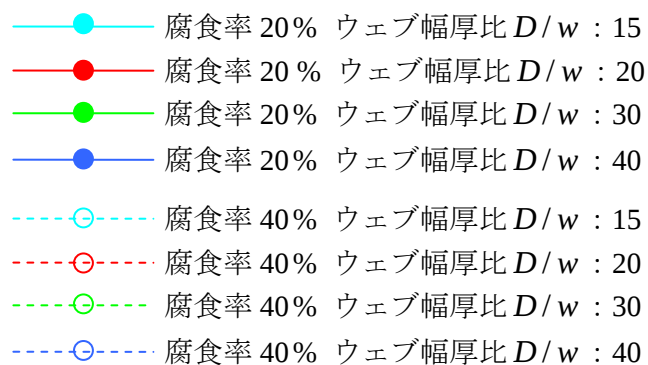
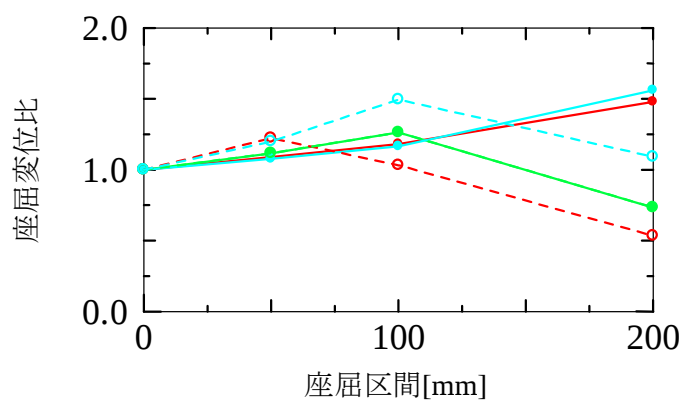


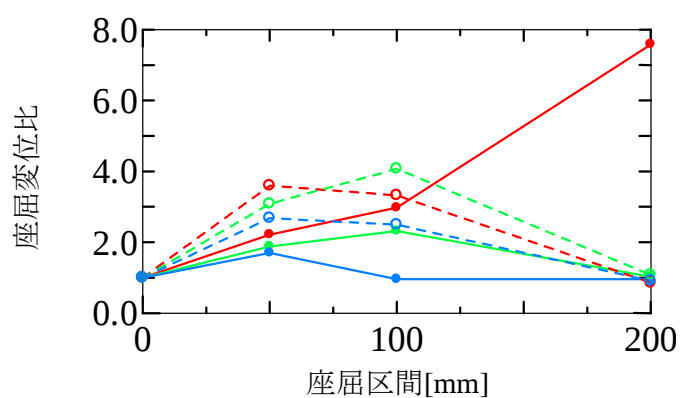
図-4.6 腐食区間－座屈変位比関係

図-4.7 腐食区間－座屈変位比関係

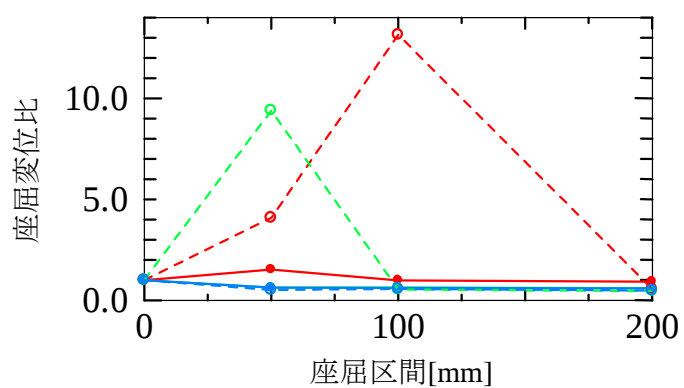




フランジ幅厚比 b/f : 5



フランジ幅厚比 b/f : 10



フランジ幅厚比 b/f : 15

細長比 λ : 22~24

図-4.8 腐食区間-座屈変位比関係

- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 15
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 20
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 30
- 腐食率 20% ウェブ幅厚比 D/w : 40
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 15
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 20
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 30
- -○- - 腐食率 40% ウェブ幅厚比 D/w : 40

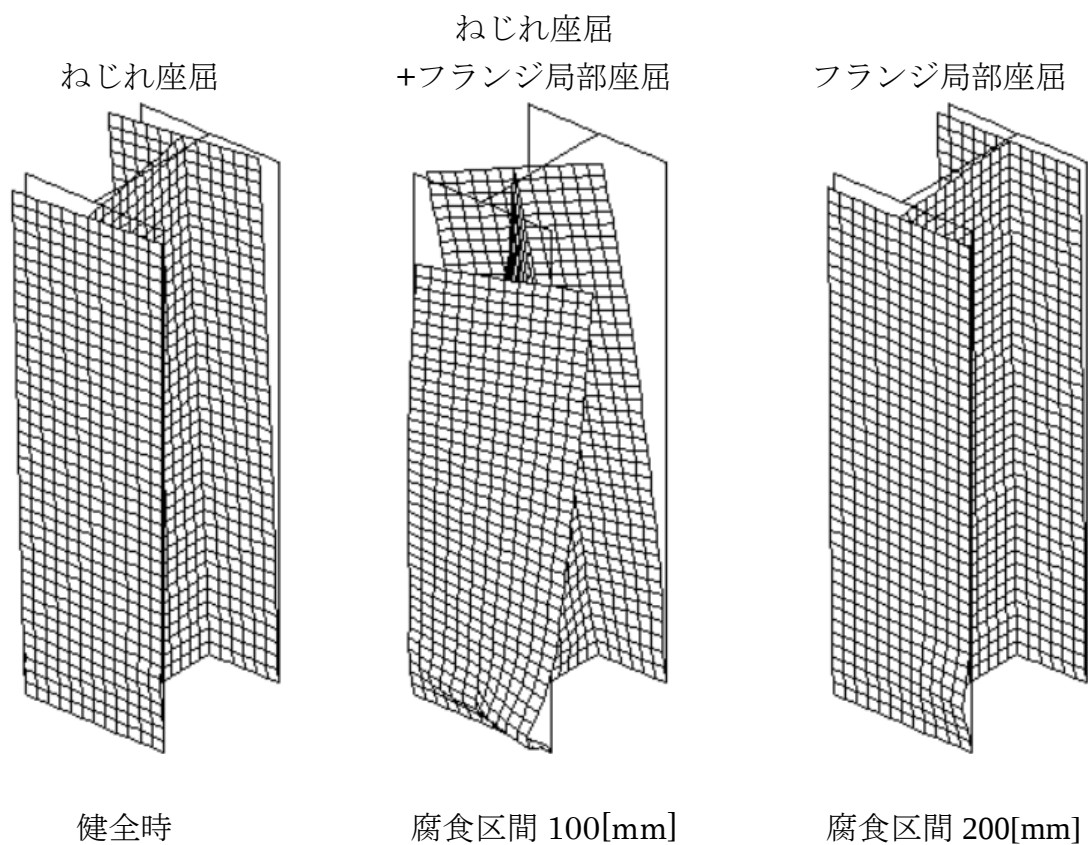


図-4.9 座屈モード図

$b/f=10$, $D/w=20$, $\lambda=7.4$, 腐食率 40[%]

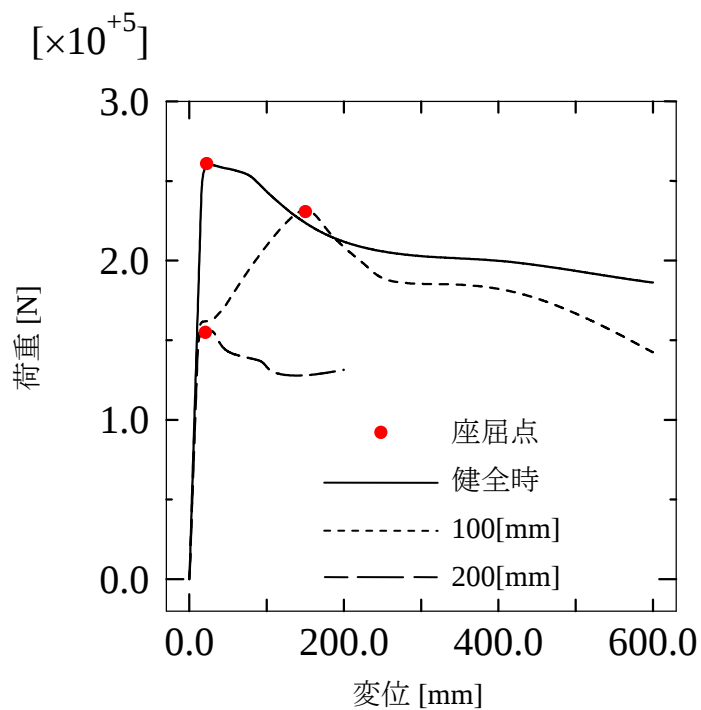


図-4.10 荷重-変位関係

$b/f=10$, $D/w=20$, $\lambda=7.4$, 腐食率 40[%]

5. 結論

本研究では，コンクリート埋込部における鋼材腐食に着目し，簡便な振動試験による鋼部材の点検手法の確立を目的として，コンクリート埋込部における鋼材腐食が鋼部材およびコンクリートの振動特性に及ぼす影響を実験によって検討し，さらに鋼材腐食が鋼部材の構造性能に及ぼす影響を FEM 解析によって検討した．

鋼材腐食が鋼部材およびコンクリートの振動特性に及ぼす影響は，電食によって鋼材腐食を促進させた供試体を作製し，小型加振器を用いて強制振動試験により鋼材およびコンクリートの振動特性に関するデータを収集した．

本研究では，トラス橋の斜材を模擬して，H 形鋼をコンクリートに貫通させた Truss - A 供試体と Truss - B 供試体，および柱部材を模擬して H 形鋼端部をコンクリートに埋め込んだ Column 供試体を作製した．これらの供試体実験から得られた知見を以下に列挙する．

- 1) H 形鋼の曲げ振動試験では，鋼材腐食に伴って減衰定数の増加傾向が確認された．トラス橋斜材部と柱部材を同一手法によって評価することが可能と考えられ，減衰定数増加量は腐食区間と腐食率に依存するものと推察される．
- 2) コンクリート部の縦振動試験では，H 形鋼腐食進展によりコンクリート部の縦固有振動数は低下し，腐食率のみを評価することが可能である．また，減衰定数は，算定が困難であるが，腐食率のみを評価することが可能である．
- 3) コンクリート部の超音波試験では，腐食の有無を判断することが可能である．次に，実部材への適用の検討では，

- 1) 縦振動試験による固有振動数の低下から、腐食率推定への可能性が見出せた。しかし、減衰定数の算定は非常に困難である。
- 2) 超音波計測では、鋼管とコンクリートの剥離およびひび割れの影響を確認できたが、腐食の有無および腐食率推定には至っていない。

鋼材腐食が鋼部材の構造性能に及ぼす影響については、汎用 FEM 解析プログラム MARC を用いて、鋼材腐食(腐食率+腐食区間)の影響について、圧縮力を受ける柱部材を想定し検討した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 座屈区間および腐食率により座屈モードが変化する。
- 2) 腐食区間内で座屈が発生する場合は、座屈荷重が断面減少率と同程度まで低下する。
- 3) フランジ幅厚比 b/f が大きく、弾性座屈する部材では、腐食に伴う塑性座屈により、座屈変位が極めて大きくなる。

以上より、構造性能を評価するためには、鋼部材の寸法と腐食区間、腐食率が必要であり、腐食率および腐食区間は鋼部材の減衰定数およびコンクリート部の固有振動数を用いることで推定可能あることが示唆された。しかし、角形鋼管や丸形鋼管、腐食面積などの様々な条件に対しての傾向は不明であり、今後も基礎的データの蓄積が必要である。