

論文 鋼とコンクリート境界部の鋼材腐食と振動特性に関する研究

伊東 知哉*1・内藤 英樹*2・阿部 遼太*3・鈴木 基行*4

要旨：近年、鋼とコンクリート境界部の鋼材腐食が顕在化しており、コンクリートを除去することなく鋼材腐食を点検できる手法が望まれる。本研究では、このような点検手法を構築するための基礎的データの収集を目的として、鋼とコンクリート接合部を模した供試体を作製し、鋼材腐食が振動特性に及ぼす影響を検討した。その結果、本実験の範囲において、鋼板を用いた接合部供試体では鋼材腐食による明確な振動特性の変化は確認できなかった。一方、メカニズムは明らかにできなかったが、H形鋼を用いた接合部供試体では、積算電流量 100 A-hour を超えると減衰定数が 10~40%程度増加する傾向が見られた。

キーワード：合成構造, 鋼材腐食, 強制振動試験, 振動特性, 減衰定数

1. はじめに

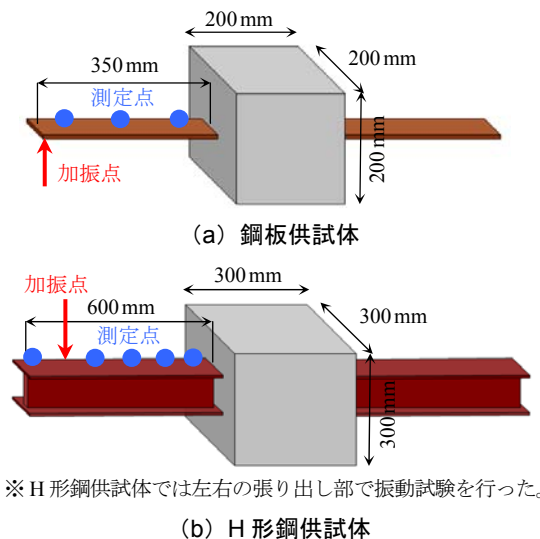
我が国の社会基盤施設は一斉老朽化を迎える段階にある。近年、鋼トラス橋の斜材がコンクリート床版に埋め込まれる接合箇所において、鋼材腐食が健在化している事例が報告されている¹⁾。このような鋼とコンクリート境界部の鋼材腐食はコンクリート内部にも及んでいることから、コンクリート上面からの目視や打音調査によって腐食の有無を判断することは難しい。吉岡ら²⁾は、このような境界部腐食が生じたスパン 72.8m の鋼トラス橋を対象とした常時微動計測を行っている。その結果、ひとつのトラス部材の振動特性に着目すれば、減衰定数を指標としてコンクリート境界部の鋼材腐食が推定できる可能性を示唆している。また、伊藤ら³⁾はリベット接合またはボルト接合構造は溶接構造と比較して約 2 倍の減衰定数を持つことを報告しており、鋼部材の接合部の状態と減衰定数には関係性があると考えられる。

一方、著者ら⁴⁾は、構造部材の振動特性を精緻に評価できる振動試験方法として、小型起振機による強制外力（調和振動）の周波数を連続的に変化させた周波数スイープ試験（以下、強制振動試験）を検討している。運搬が容易な小型起振機を用いて強制振動試験が可能になれば、ひとつのトラス部材の減衰定数などに着目して、鋼とコンクリート境界部における鋼材腐食量の推定が可能になると考えられる。このように、本研究の目的は鋼とコンクリート境界部の簡易点検手法を構築することであるが、ここでは、その前段階として供試体実験による基礎的データの収集に取り組む。具体的には、鋼板およびH形鋼をコンクリートに埋め込んだ接合部供試体を作製し、鋼とコンクリート境界部の鋼材腐食量（電食時間）と減衰定数との関係を整理する。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

供試体の概略図と諸元をそれぞれ図-1 と表-1 に示す。また、供試体の外観を写真-1 に示す。供試体は、トラス部材がコンクリート床版を貫通する様子を模擬して、H形鋼の中央に型枠を組んでコンクリートを打設した（以下、H形鋼供試体）。また、平鋼を用いた供試体（以下、鋼板供試体）も作製した。これらの供試体は、鋼とコンクリート接合部の鋼材腐食と減衰定数に関する基礎的データの収集を目的としている。鋼板およびH形鋼は SS400 を使用し、コンクリート内部には鉄筋は配置していない。鋼板供試体を 4 体、H形鋼供試体を 2 体作製し、電食によってコンクリートに埋め込まれた鋼材を段階的に腐食させる。



※ H形鋼供試体では左右の張り出し部で振動試験を行った。

図-1 供試体概略図

*1 (株) 鹿島建設 北海道支店 修 (工) (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博 (工) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 供試体諸元

供試体名	コンクリートの寸法 (mm)	鋼材の種類	腐食形態
PB1	200×200×200	鋼板 ^{※1}	境界部腐食
PB2			内部腐食
PI1			
PI2			
HB	300×300×300	H形鋼 ^{※2}	境界部腐食
HI			内部腐食

※1：鋼板は幅 38mm，厚さ 4.5mm を使用した。

※2：H形鋼は H-150×150×7×10 を使用した。

2.2 試験方法

(1) 電食試験

電食試験の概要を図-2 に示す。本研究では、鋼材の腐食形態として、i) コンクリート内部において鋼材腐食が均一に分布するもの（以下、内部腐食）、および ii) 鋼材の張り出し基部にて腐食が卓越するもの（以下、境界部腐食）を想定した。これらの2つの腐食形態を電食によって再現するため、コンクリート下面の所定の範囲に塩水が供給されるように吸水材を用いて調整した。

鋼板供試体は、図-2 のように供試体を水槽に設置し、0.2A の直流電流を流した。鋼板供試体は片面からの電食とした。また、H形鋼供試体では、0.2~0.3A の直流電流を流し、供試体の4面を24時間ごとに90°回転させた。

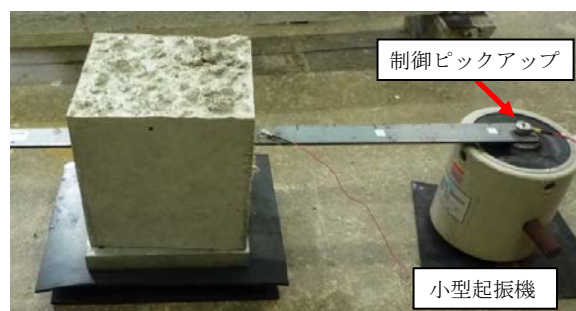
(2) 強制振動試験

小型起振機の設置状況を写真-1 に示す。本試験方法は、起振機の振動テーブルに貼付した制御加速度ピックアップ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起振機の出力を自動制御する。このとき、供試体表面に貼付した計測加速度ピックアップにより、鋼材の応答加速度を測定し、共振曲線（周波数-応答加速度関係と位相特性）を得る。

鋼板供試体では、写真-1 (a) に示すように起振機の振動テーブルに張り出し端部を接地して調和振動を与えた。H形鋼供試体では、写真-1 (b) に示すように張り出し端部（上フランジ面）に小型起振機を置き、振動テーブルに固定した 1.8kg の錘を鉛直に振動させることにより、起振機本体に生じる振動を鋼材に伝達させた。

鋼板供試体は電食 24 時間ごとに供試体を水槽から取り出し、80~3000Hz の周波数スイープ試験を 10 分間で行った。このとき、制御加速度ピックアップは 0.5m/s² で制御した。応答加速度の測定は、図-1 に示すように張り出し端部から基部まで 15cm 間隔に 3 箇所（張り出し端部から 5, 20, 35cm の位置）とした。測定は片方の張り出し部に対してのみ行った。

H形鋼供試体は 96 時間ごと（4 面の電食時間）に供試



(a) 鋼板供試体



(b) H形鋼供試体

写真-1 小型起振機の設置

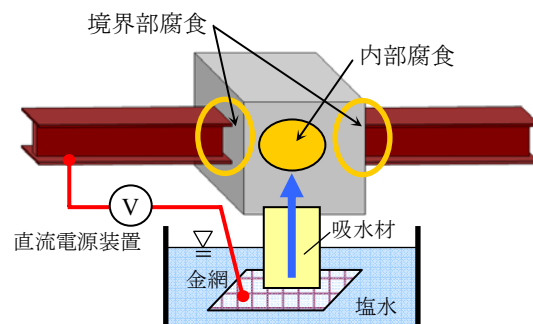


図-2 電食試験の概略図

体を水槽から取り出し、50~1500Hz の周波数スイープ試験を 10 分間で行った。制御加速度ピックアップは 5.0m/s² で制御した。応答加速度の測定は、張り出し端部から基部まで 10cm 間隔に 5 箇所（張り出し端部から 1, 20, 30, 40, 50cm の位置）とした。なお、小型起振機を設置しているため、張り出し端部から 10cm 位置では応答加速度の計測を行っていない。測定は両側の張り出し部（右側と左側）に対して行った。

これらの強制振動試験では、コンクリート床面に厚さ 5mm 程度のゴムシートを敷いて供試体を設置し、小型起振機により調和振動を与えた。供試体は床面に固定せず、拘束力も加えていない。

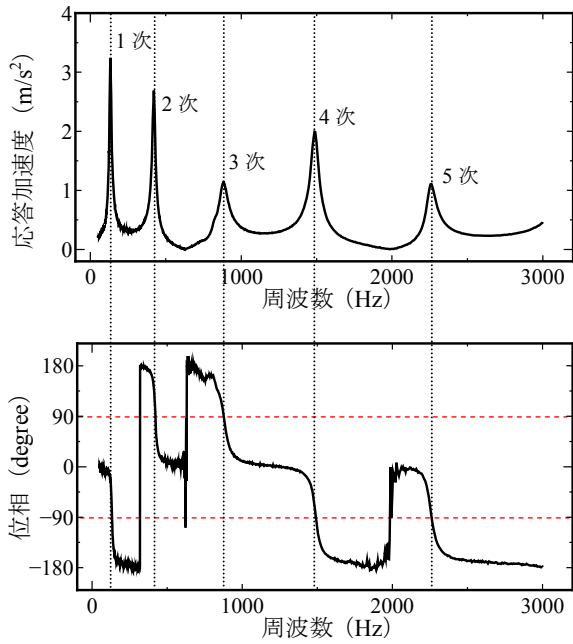


図-3 鋼板供試体の共振曲線

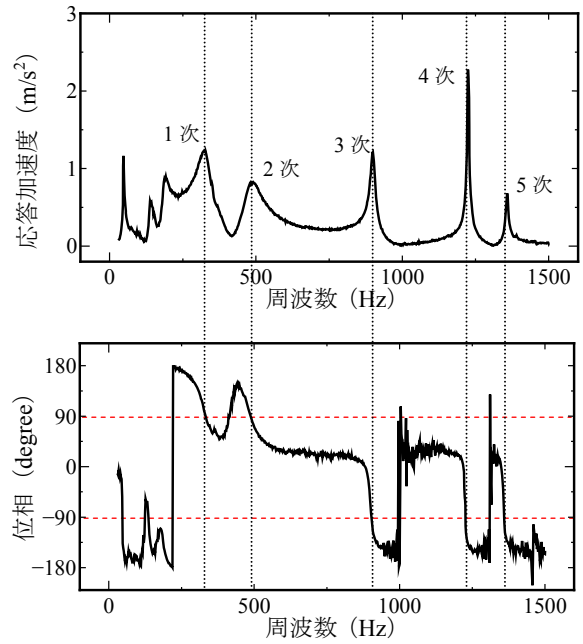


図-4 H形鋼供試体の共振曲線

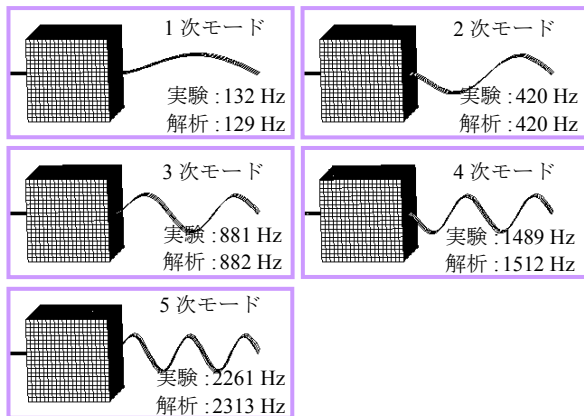


図-5 鋼板供試体の振動モード

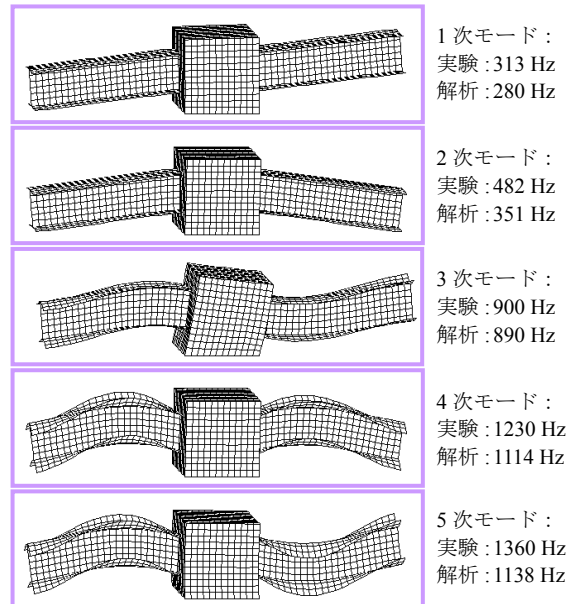


図-6 H形鋼供試体の振動モード

3. 健全供試体の強制振動試験

3.1 共振曲線

電食を開始する前の健全状態に対して、強制振動試験を行った。強制振動試験によって得られた共振曲線の一例として、鋼板供試体およびH形鋼供試体の共振曲線をそれぞれ図-3 および図-4 に示す。応答加速度の測定点は鋼材の中央付近である。図-3 に示す鋼板供試体の共振曲線では、応答加速度に1～5次の明確なピークが表れた。このとき、いずれのピークも位相が $\pm 90^\circ$ に対応することから供試体の固有振動数が得られた⁵⁾。図-4 に示すH形鋼供試体の共振曲線では、供試体が床に固定されていないため、低周波数域での応答加速度が乱れたが、5つの応答加速度のピークが表れた。これらの応答加速度のピークも位相 $\pm 90^\circ$ と対応しており、供試体の固有振動数が得られた。

3.2 振動モード

汎用有限要素解析プログラムMARCを用いて、3次元FEMモデルによるモード解析（固有値解析）を行った。鋼板およびコンクリートをそれぞれ4節点シェル要素と8節点ソリッド要素によってモデル化した。コンクリート内部の鋼材もモデル化し、鋼要素とコンクリート要素の節点を共有した。鋼材は動弾性係数200,000MPa、密度 7.7g/cm^3 とし、コンクリートは動弾性係数20,000MPa、密度 2.3g/cm^3 を仮定した。鋼材とコンクリートの動ポアソン比はそれぞれ0.3と0.17を仮定した。モード

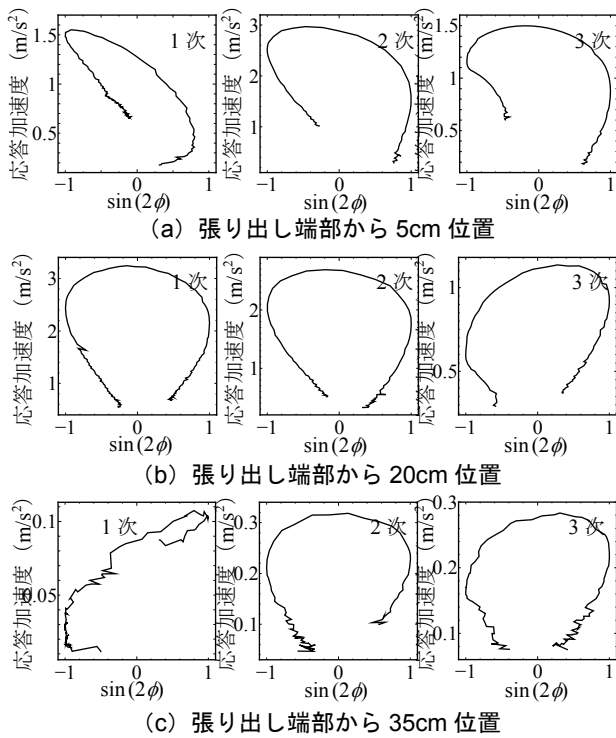


図-7 鋼板供試体のモーダル円 (PB1 供試体)

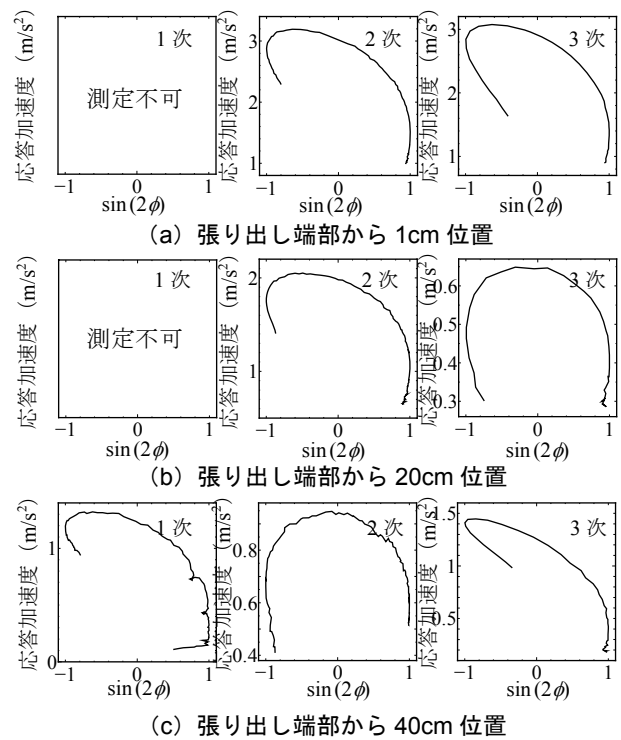


図-8 H形鋼供試体のモーダル円 (HB 供試体)

解析により、供試体の固有振動数と振動モードを得た。

FEM 解析によって得られた鋼板供試体および H 形鋼供試体の振動モードと固有振動数をそれぞれ図-5 および図-6 に示す。これらの図中には、強制振動試験によって得られた固有振動数も併せて示す。なお、振動試験によって得られる各点の応答加速度や位相が、図-5 や図-6 の振動モードと整合することも確認している。

図-5 に示す鋼板供試体では、張り出し基部（コンクリート境界部）を固定条件とする片持ちばりの振動モードが得られた。一方、図-6 の H 形鋼に対してコンクリートの拘束では片持ちばりの振動とはならず、左右の張り出し鋼材は一体となって振動した。

3.3 モーダル円

本研究は、鋼とコンクリート境界部における鋼材腐食と減衰定数の関係に着目している。減衰定数の測定には大きなばらつきを伴うことが指摘されている²⁾。後述する検討では、ハーフパワー法によって各モードの減衰定数を算定するため、ここでは、モーダル円に着目して振動試験の妥当性を検討する⁹⁾。

鋼板供試体の各測定点で得られた 1~3 次モードのモーダル円を図-7 に示す。精緻な振動試験では、モーダル円は真円に近い軌跡を描く⁹⁾。図-7 より、加振点付近と固定端付近（張り出し端部から 5cm と 35cm 位置）では応答加速度が小さく、1 次のモーダル円が楕円形状となったが、その他は真円に近い軌跡を描いた。

一方、図-8 に示す H 形鋼供試体では鋼板供試体と比較してモーダル円が真円になることは少なかった。鋼材



鋼板供試体 (PB2, 積算電流量 96A-hour)

写真-2 鋼材腐食によるコンクリートのひび割れ

の断面形状、供試体の固定条件、加振方法、振動モードと測定点の関係などが原因と考えられたが、本検討の範囲ではその理由を明らかにすることはできなかった。

4. 鋼材腐食と減衰定数の関係

4.1 電食試験による鋼材の腐食状況

図-2 の電食試験によって境界部腐食と内部腐食の再現を試みた。境界部腐食を想定した供試体 (PB1, PB2, HB) では、電食開始後に張り出し部の基部に腐食生成物が発生し、錆汁の析出が見られた。その後、写真-2 に示すように、鋼材に沿ったコンクリートのひび割れが目視によって確認された。実験終了後に取り出した鋼板の

腐食状況の一例を写真-3 (a) に示す。なお、写真中に示す質量減少率は、コンクリートに埋め込まれる範囲 (20cm) での平均的な質量減少率である。質量減少率 17%の境界部腐食 (PB1) では、両側のコンクリート境界部に著しい断面欠損が見られたが、コンクリート内部の腐食は比較的軽微であった。

内部腐食の供試体 (PI1, PI2, HI) でも、鋼材の基部にて錆汁が析出し、写真-2 に示すようなコンクリートのひび割れが確認された。鋼板の腐食状況の一例を写真-3 (b) に示す。平均質量減少率 24%の内部腐食 (PI1) では、片側の張り出し基部に著しい断面欠損が生じており、さらに、コンクリート内部の広い範囲で腐食による鋼材厚さの減少も見られた。

H 形鋼供試体では、鋼材腐食に伴って上フランジと下フランジのそれぞれの端部からひび割れが発生した。鋼材の腐食状況は鋼板供試体と同様であったが、H 形鋼の平均質量減少率は 2~3%程度であり、鋼板供試体と比較して小さい。

4.2 減衰定数

電食時間と鋼材の振動特性の関係を検討した。図-3 および図-4 に示す共振曲線から、1~5 次の固有振動数と減衰定数を求めた。固有振動数については、いずれの供試体も健全時に対して±5%程度の小さな変化であるため²⁾、詳細を割愛する。減衰定数は、図-7 や図-8 に示したモーダル円に基づきハーフパワー法⁶⁾によって



(a) 境界部腐食: PB1 (質量減少率: 17%)



(b) 内部腐食: PI1 (質量減少率: 24%)

写真-3 鋼材の腐食状況

得た。低次かつ複数の測定点において良好なモーダル円が得られることから、鋼板供試体と H 形鋼供試体のいずれも 2 次モードの減衰定数に着目して実験データを整理した。なお、H 形鋼供試体の張り出し基部 (端部より 50cm 位置) では信頼できる実験データが得られなかった。

積算電流量 (電流×電食時間) と減衰定数の関係を図-9 および図-10 に示す。図中には、錆汁の析出とコンクリートのひび割れが目視によって確認できた点を併

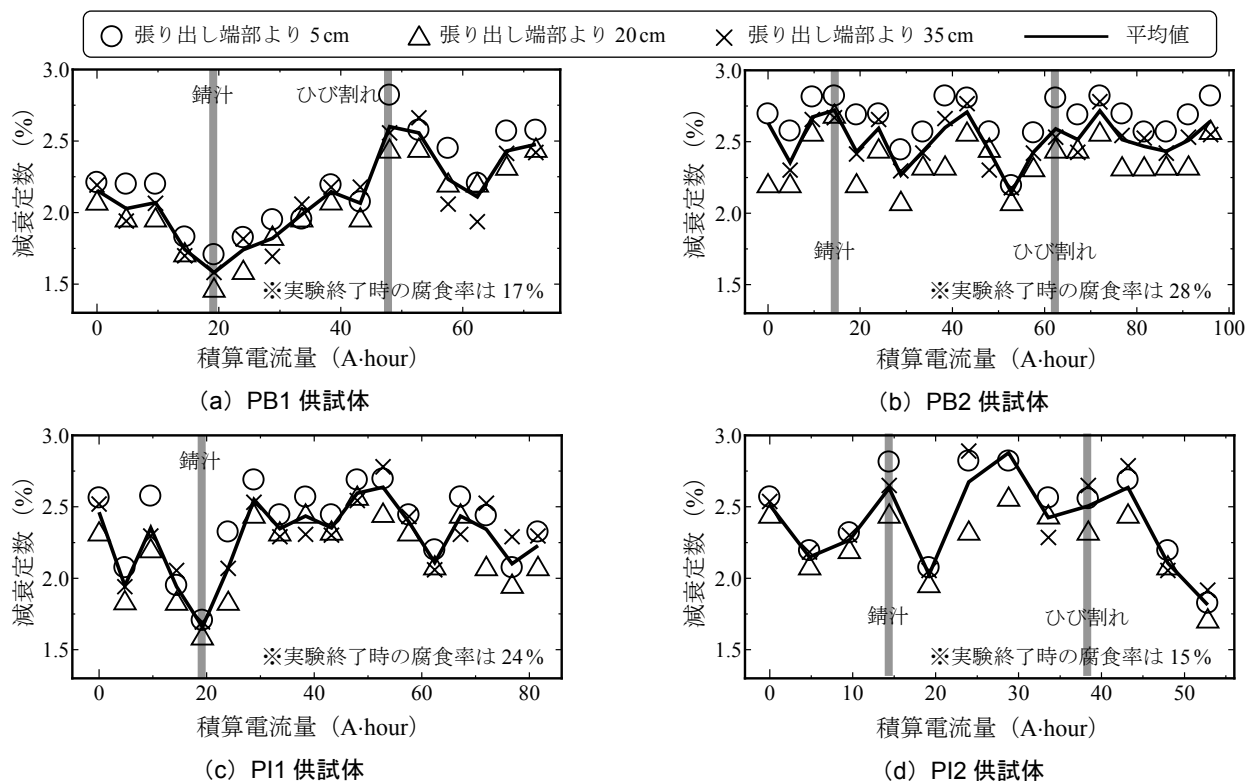


図-9 鋼板供試体の減衰定数 (2次モード)

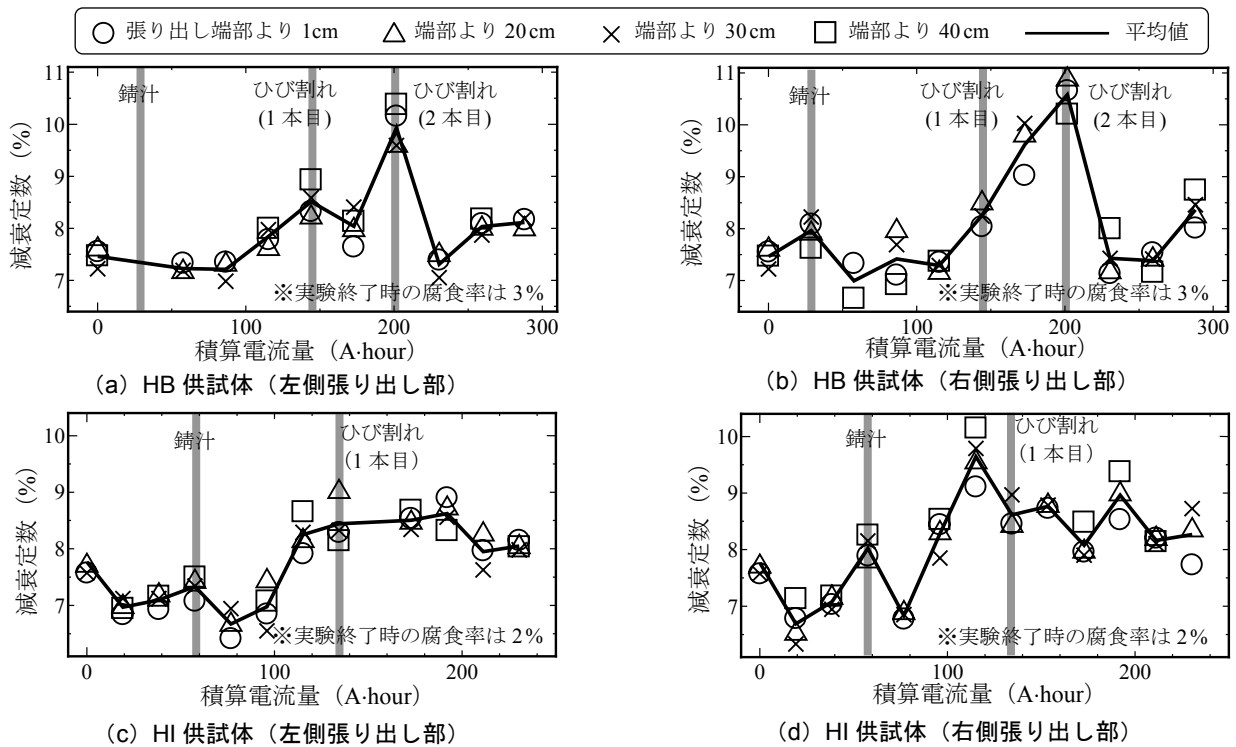


図-10 積算電流量と減衰定数の関係 (H形鋼供試体：2次モード)

記した。なお、PII 供試体のみ、目視ではひび割れの発生が確認できなかった。良好なモーダル円が得られた2次モードに着目することにより、図-9と図-10に示す実験結果では、測定点(図中のマーク)による減衰定数のばらつきは小さい。なお、モーダル円が真円を描かないモード次数の検討では、測定点ごとの減衰定数にばらつきが見られた。

図-9に示す4体の鋼板供試体では、鋼材腐食量(電食時間)に伴う減衰定数の変化に特定の傾向を見出すことができなかった。一方、限られた条件での実験データではあるが、図-10のH形鋼供試体は積算電流量100A-hour程度まで減衰定数はほとんど変化せず、その後の鋼材腐食に伴って減衰定数が増加する傾向が示された。鋼材の腐食状況との関係性までは明らかにできなかったが、鋼とコンクリート接合部の鋼材腐食を想定したH形鋼供試体の検討では、健全状態と比較して10~40%程度の減衰定数の増加を示した。なお、境界部腐食(HB)では、2本目のひび割れ後に減衰定数が低下したが、ひび割れが1本しか発生しなかった内部腐食(HI)では、減衰定数の急激な低下は見られなかった。

5. まとめ

本研究は、鋼とコンクリート接合部を模擬した供試体を作製し、鋼材腐食量(電食時間)と減衰定数の関係を整理した。その結果、鋼板をコンクリートに埋め込んだ供試体では、鋼材腐食量と減衰定数の関係に明確な傾向

を見出すことが出来なかったが、H形鋼を用いた接合部供試体では、積算電流量が100A-hour程度を超えると、減衰定数が10~40%程度増加する傾向が見られた。

しかし、本検討の範囲では、H形鋼供試体において減衰定数が変動するメカニズムや、鋼板供試体とH形鋼供試体では実験結果が異なった理由などを明らかにすることができなかった。さらなる実験データの蓄積や振動試験の高精度化を検討し、供試体諸元や腐食形態と減衰定数との関係についての現象を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 加藤光男：他人事ではない木曾川大橋の斜材破断，日経コンストラクション，pp.64-67，2007.7
- 2) 吉岡勉，原田政彦，山口宏樹，伊藤信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討，構造工学論文集，Vol.54A，pp.199-208，2008.3
- 3) 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.12-21，1965.5
- 4) 伊東知哉，内藤英樹，鈴木基行，青木峻二：共鳴振動試験を用いた鋼とコンクリート境界部の健全度評価，土木学会第64回年次学術講演会，V-213，pp.423-424，2009.9
- 5) 小坪清眞：入門建設振動学，森北出版，2000.
- 6) 岡内功，宮田利雄，辰巳正明，佐々木伸幸：大振幅加振による長大斜張橋の実橋振動実験，土木学会論文集，No.455/I-21，pp.75-84，1992.10