

論文 RC フーチングに埋め込まれた鋼製柱基部の腐食と振動特性の関係

柏 宏樹^{*1}・内藤 英樹^{*2}・高橋 実^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨: 鋼コンクリート接合部の非破壊試験に関する基礎的検討として、H 形鋼を RC フーチングに埋め込んだ鋼製柱供試体を作製し、電食試験によってコンクリート内部の鋼材腐食を促進させ、段階的な腐食量ごとに鋼製柱と RC フーチングの振動特性を測定した。その結果、フーチングに腐食ひび割れが生じる前後までに鋼製柱の減衰定数が健全時の 1.5~3 倍程度まで増加することや、供試体寸法が小さい場合には腐食ひび割れによってフーチングの固有振動数が健全時の 8 割程度まで低下した。また、鋼材腐食率(質量減少率)が 30% になるとフーチング上面の柱基部周辺で測定した見掛けの超音波伝搬速度が健全時の 8 割程度まで低下した。

キーワード: 合成構造, 鋼材腐食, 固有振動数, 減衰定数, 超音波伝搬速度

1. はじめに

橋梁, 道路付属物, 建物や機械設備などの鋼材がコンクリートに埋め込まれる接合箇所において, 著しい鋼材腐食が生じている例(以下, 境界部腐食)が報告されている¹⁾。境界部腐食は補修や補強が難しく, 鋼材の塗装後の再劣化も懸念される。また, 合成構造における境界部腐食は, 構造物の安全性を低下させる要因にもなる。しかし, 境界部腐食はコンクリート内部に及ぶ場合もあり, 通常の見視点検では鋼材腐食の発見が困難である。このため, 簡便な手法によって早期に境界部腐食が発見できる非破壊試験法の構築が早急に望まれる。

著者ら²⁾⁴⁾は, 鋼コンクリート接合部の非破壊試験法の可能性を検討するために供試体を作製し, 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てきた。その結果, 境界部腐食に伴う鋼材の固有振動数の変化は小さいが, 減衰定数については健全時よりも増加する傾向が示唆された。しかし, これらの知見は小型供試体の実験によって得られたものであり, 供試体寸法の影響を検討する必要がある。そこで, 本研究では寸法が大きく異なる接合部供試体として, RC フーチングに埋め込まれた鋼製柱供試体を 4 体作製した。そして, 段階的な電食試験での鋼製柱や RC フーチングの固有振動数と減衰定数, フーチング上面の柱基部周辺における超音波伝搬速度を測定し, 異なる供試体寸法に対して, 境界部腐食に伴うこれらの振動特性の変化を整理した。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

供試体の諸元と概略図をそれぞれ表-1 と図-1 に示す。本研究では, 鋼製柱(H 形鋼)が RC フーチングに埋

め込まれる接合形式に着目して, 供試体寸法をパラメータとした 4 体の供試体を作製した。なお, 小型の C-1 および C-2 供試体の実験結果の一部は, 参考文献 3) でも報告した。

寸法が大きい CL20 と CL40 供試体の H 形鋼の断面寸法は, 200 mm × 200 mm × 8 mm × 12 mm (断面高さ × 断面幅 × ウェブ厚さ × フランジ厚さ) であり, 材質は SS 400 を使用した。コンクリートフーチングは, 断面幅 1380 mm, 断面高さ 1500 mm, フーチング高さ 1250 mm である。H 形鋼はフーチング底面まで埋め込み, フーチング内の鋼材端部は鋼製ベースプレート(400 mm × 400 mm × 25 mm)に溶接した。H 形鋼の材料特性は, 降伏強度 264 N/mm², 引張強さ 433 N/mm², 伸び 32% である。コンクリートの材料特性は, 圧縮強度 26.1 N/mm², 動弾性係数 28200 N/mm², 密度 2250 kg/m³ である。

寸法が小さい C-1 と C-2 供試体の H 形鋼の断面寸法は, 100 mm × 100 mm × 6 mm × 8 mm であり, 材質は SS 400 を使用した。コンクリートフーチングは, 断面幅 300 mm, 断面高さ 300 mm, フーチング高さ 250 mm である。H 形鋼はフーチング上面から深さ 150 mm まで埋め込んでおり, フーチング内の鋼材端部や定着部は特に加工していない。H 形鋼の材料特性は, 降伏強度 346 N/mm², 引張強さ 452 N/mm², 伸び 32% である。コンクリートの材料特性は, 圧縮強度 26.6 N/mm², 動弾性係数 35100 N/mm², 密度 2390 kg/m³ である。

参考文献 5) の道路付属物の点検データを参考にして, CL20 と CL40 供試体では, フーチング上面から深さ 100 mm までの鋼材全面を腐食対象とし, それよりも深い位置では鋼材表面にエポキシ系塗料を塗布して電食を防止した。目標腐食率(腐食区間における鋼材の平均質量減

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

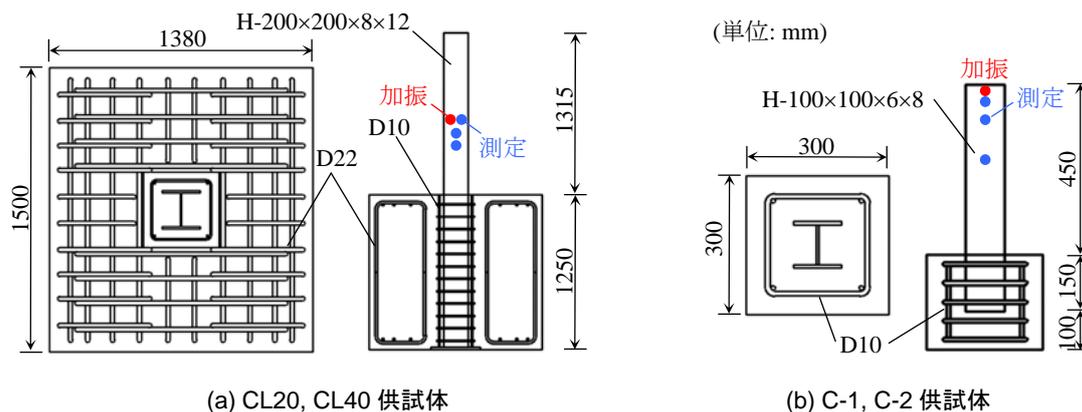
*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 修(工)

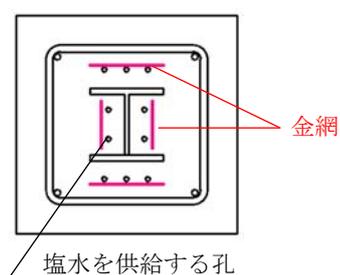
*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表一 供試体諸元

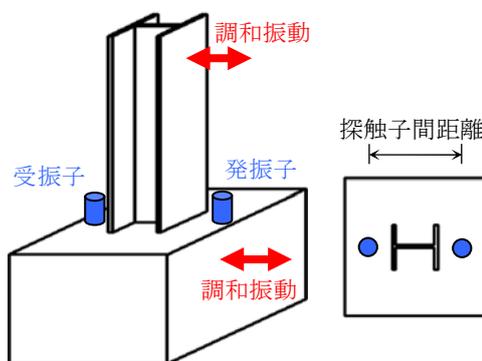
供試体名	鋼製柱 (H形鋼)		コンクリートフーチング		腐食区間 (mm)	目標腐食率 (%)
	断面寸法 (mm)	高さ (mm)	断面幅×断面高さ (mm)	高さ (mm)		
CL20 CL40	200×200×8×12	1315	1380×1500	1250	100	20 40
C-1 ³⁾ C-2 ³⁾	100×100×6×8	450	300×300	250	150	20



図一 供試体の概略図



図二 電食試験の概略図



図三 振動試験と超音波試験の概略図

少率)は20%と40%とした。C-1とC-2供試体では、フーチングに埋め込んだ鋼材全面(腐食区間150mm)を腐食対象として目標腐食率を20%とした。

2.2 電食試験

本研究が対象とする鋼コンクリート接合部の腐食事例は鋼材の表面積が大きく、その腐食程度も著しい。コンクリート内部の鋼材のみを腐食させること、また腐食量が大いことなどを踏まえて、本実験では電食試験によって鋼材腐食を促進させた。電食試験は、図-2に示すようにH形鋼のフランジとウェブに面して深さ100mmまで金網を埋め込み直流電流を流した。このとき、濃度5%の塩水を供給する孔(直径8~10mm、深さ100mm)を複数設け、錆汁の閉塞を防ぐためにフーチング内の孔の先端からフーチング外側までパイプを連結して塩水を循環させた。

CL20とCL40供試体では、積算電流量114.2 A・hourまで電流密度1.01 mA/cm²の直流電流を流し、以降は電流密度1.47 mA/cm²を基本とした。C-1とC-2供試体では、積算電流量71.6 A・hourまで電流密度0.65 mA/cm²を流し、以降は電流密度1.46 mA/cm²を基本とした。

C-1とC-2供試体は電食試験終了後に解体し、クエン酸二アンモニウム水溶液を用いてH形鋼の錆を除去して質量を測定した。CL20とCL40供試体では、電食試験後の解体やH形鋼の質量測定などは行っていない。

2.3 非破壊試験

(1) 鋼製柱の振動試験

参考文献3),4)と同様に、加振器を用いて鋼製柱のたわみ振動を測定した。振動試験では、図-3に示すように

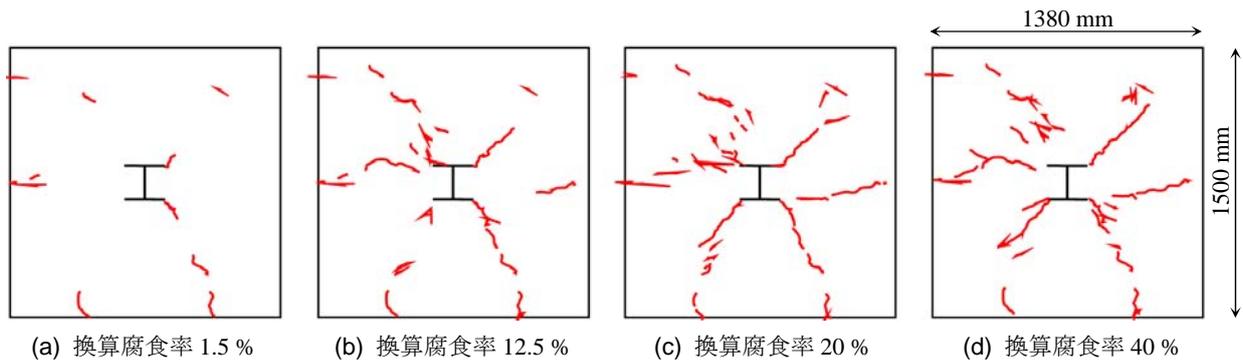


図-4 CL40 供試体のひび割れ進展図

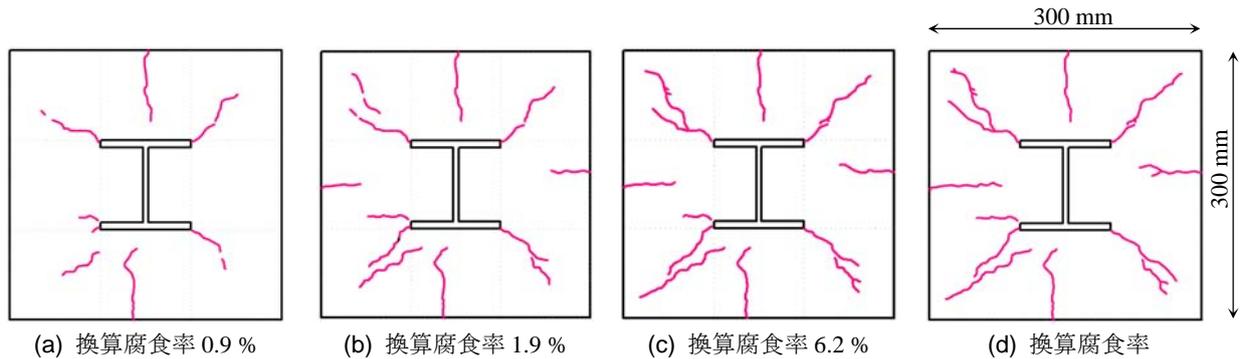


図-5 C-1 供試体のひび割れ進展図

H形鋼のフランジ面を水平方向に加振した。加振は伝達棒（質量 380 g の鋼板）を介して行った。

CL20 と CL40 供試体の加振位置と測定位置を図-1 (a) に示す。加振位置は、フーチング上面から 600 mm 位置とし、伝達棒先端（フランジ面との設置位置）の加速度振幅 2 m/s^2 を基本として、5 分間で周波数を 70~130 Hz まで連続的に上昇させた。このとき、加振点と同じフランジ面に計測加速度ピックアップを貼付し、共振曲線を得た。計測加速度ピックアップの貼付位置は、フーチング上面から 400, 500, 600 mm の 3 箇所とした。

C-1 と C-2 供試体の加振位置と測定位置を図-1 (b) に示す。加振位置は、鋼製柱の端部から 10 mm 位置とし、伝達棒の加速度振幅を 2 m/s^2 として、1 分間で周波数を 600~650 Hz まで連続的に上昇させた。計測加速度ピックアップの貼付位置は、鋼製柱の端部から 50, 100, 200 mm の 3 箇所とした。

(2) RC フーチングの振動試験

鋼材腐食によってコンクリートの腐食ひび割れが発生し、鋼コンクリート間の付着損失によってフーチングの固有振動数が低下すると考えた^{3,4,6)}。図-3 に示すように、フーチング側面から調和振動を与えた強制加振試験によって、縦振動による固有振動数を測定した。

CL20 と CL40 供試体では、フーチング上面から 50 mm 位置の側面を水平方向に加振した。加振器の振動テーブルを両面テープによってフーチング側面に設置し、加速度振幅 10 m/s^2 を一定として、5 分間で周波数を 1000~

2000 Hz まで連続的に上昇させた。加振器の移動部の錘は 0.13 kg である。このとき、加振点付近に計測加速度ピックアップを貼付し、共振曲線を得た。C-1 と C-2 供試体では、フーチング上面から 20 mm 位置の側面を加振した。加振器の加速度振幅 5 m/s^2 を一定として、4 分間で周波数を 500~10000 Hz まで連続的に上昇させた。

(3) フーチング上面の超音波試験

鋼製柱基部の腐食に伴うフーチング上面の超音波伝搬速度の変化を検討する。本実験では、24 kHz の発振子と受振子を用いた表面法によって、見掛けの超音波伝搬速度を測定した。超音波試験は、図-3 に示すように鋼製柱基部を中心にしてフーチング上面に発振子と受振子を設置した。CL20 と CL40 供試体では探触子間距離を 400 mm とし、C-1 と C-2 供試体では 250 mm とした。

3. 実験結果

3.1 電食試験

C-1 と C-2 供試体では、電食試験後に供試体を解体して H 形鋼の質量を計測しており、実際の腐食率はそれぞれ 12.4 % と 13.4 % であった³⁾。目標腐食率 20 % に対して実際の腐食率は小さかったが、その理由は明らかではない。以降では、積算電流量と鋼材腐食量が比例すると仮定して、積算電流量から推定される腐食率（腐食区間における平均質量減少率）を換算腐食率と呼ぶ。

CL20 と CL40 供試体は正負交番載荷試験を行い、その後、腐食性状の確認、鋼材の質量測定の実施を予

表-2 健全時における振動試験と超音波試験の結果

供試体名	鋼製柱 (H 形鋼)		コンクリートフーチング	
	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	固有振動数 (Hz)	超音波伝播速度 (m/s)
CL20	101	0.98	1106	3988
CL40	98	0.53	1063	3766
C-1	622	0.95	5412	4160
C-2	642	0.92	5597	4078

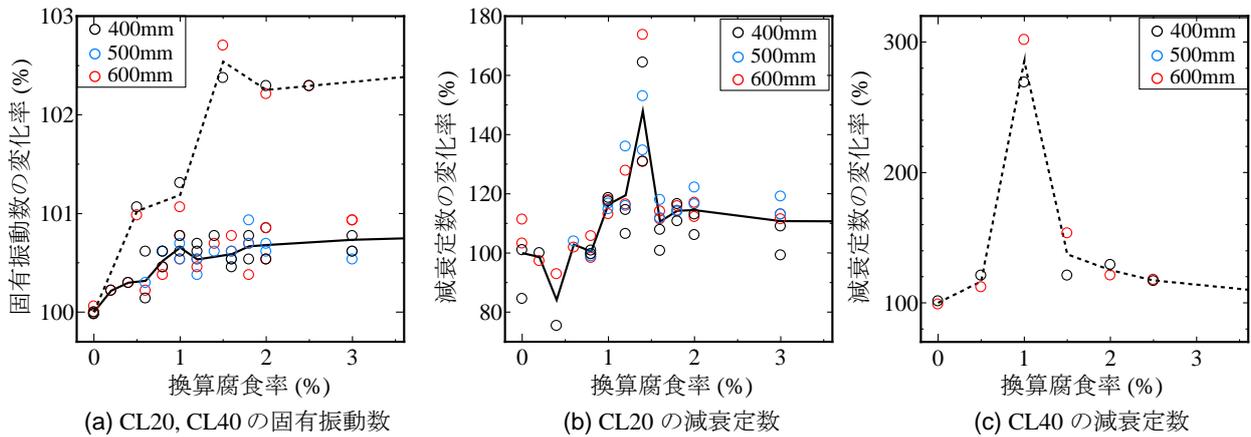


図-6 鋼製柱の固有振動数と減衰定数 (CL20, CL40 供試体)

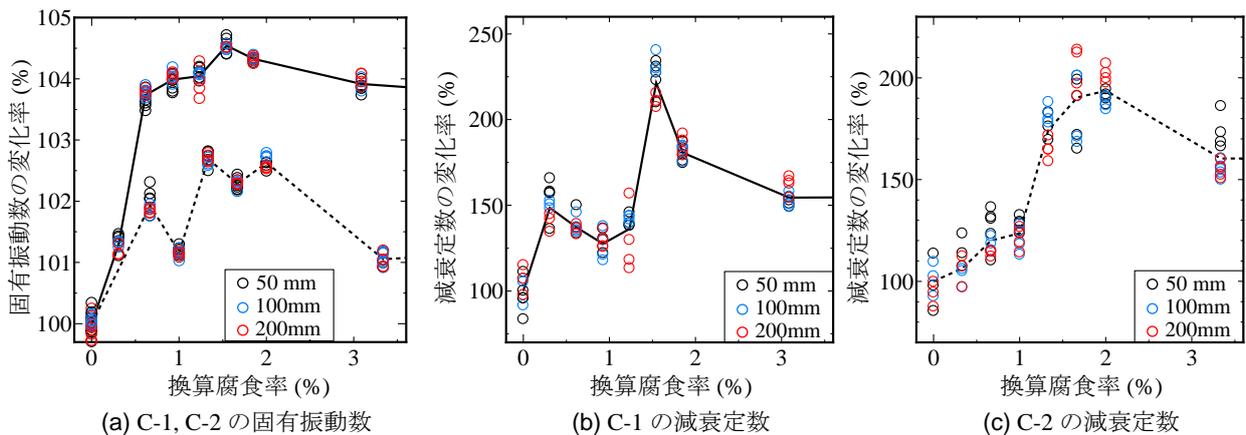


図-7 鋼製柱の固有振動数と減衰定数 (C-1, C-2 供試体)

定しており、詳細は別途報告する。なお、同じ断面寸法の H 形鋼をコンクリートに埋め込んだ供試体を作製して電食の予備試験を行っており、積算電流量 1872 A・hour に対して鋼材質量測定による腐食率は 32 % であった。この結果から CL20 と CL40 供試体の積算電流量を 1142 A・hour と 2285 A・hour に設定しており、このとき換算腐食率はそれぞれ 20 % と 40 % になる。

CL40 供試体と C-1 供試体のひび割れ進展状況をそれぞれ図-4 と図-5 に示す。4 体の供試体は、換算腐食率 0.9~1.5 % 程度になるとフランジ端部から斜め方向に腐食ひび割れが発生・進展した。フーチング寸法が小さい C-1 と C-2 供試体では換算腐食率 1~2 % 程度でフーチング側面まで腐食ひび割れが達していたが、寸法が大きい

CL20 や CL40 供試体ではフーチング上面で観察された腐食ひび割れの進展が緩やかであり、電食試験終了時でもフーチング側面に明確なひび割れは見られなかった。

3.2 非破壊試験

(1) 鋼製柱の振動試験

鋼製柱のたわみ振動を励起し、1 次モードの固有振動数と減衰定数を求めた。0~3 % までの換算腐食率と固有振動数との関係を図-6 (a) と図-7 (a) に示す。図の縦軸は、表-2 の健全時の固有振動数を基準とした変化率を表記した。なお、換算腐食率 3 % 以降では固有振動数や減衰定数の変化に特定の傾向は見出せなかった。4 体の固有振動数の変化はわずか 4 % 程度以内に収まるため、鋼材腐食量の推定には有用ではないと判断された。しか

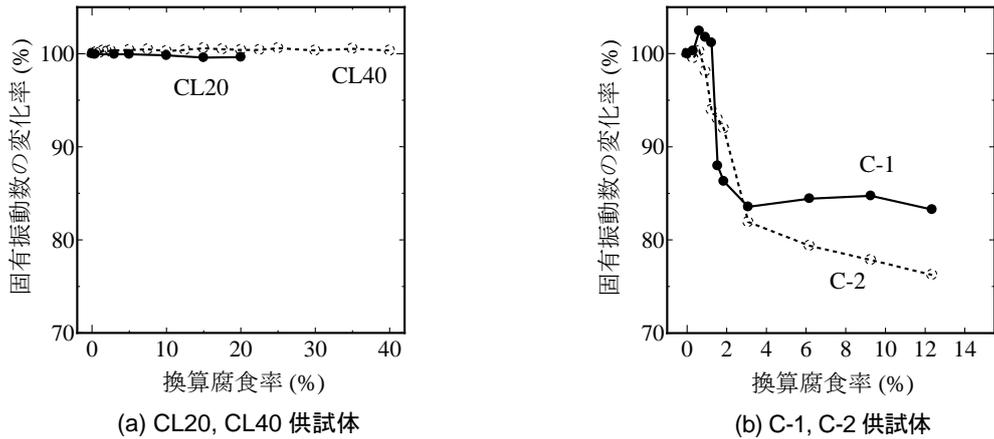


図-8 換算腐食率とフーチングの固有振動数の関係

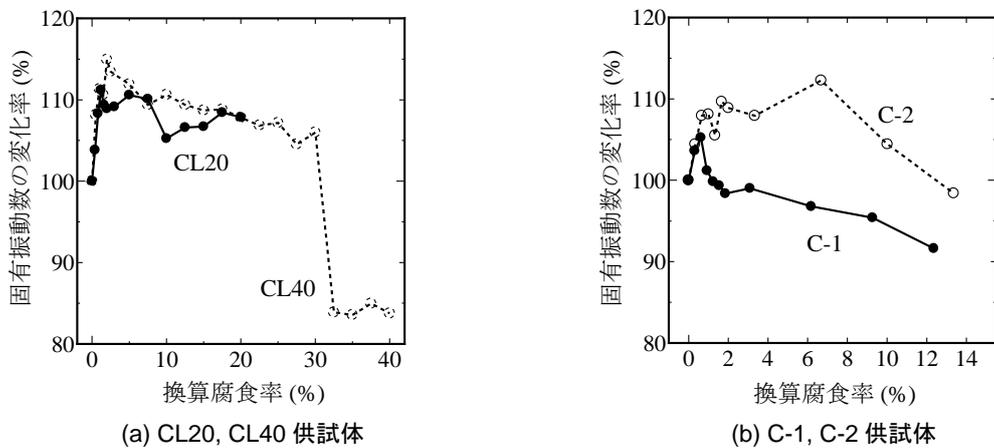


図-9 換算腐食率とフーチング上面の超音波伝播速度の関係

し、いずれの供試体でも換算腐食率 0~2% 程度までにならずかな固有振動数の増加が見られた。詳細な実験データは測定していないが、腐食ひび割れ(フランジ端部からの斜めひび割れ)が発生・進展するまでに腐食生成物の膨張圧が鋼製柱基部を拘束したと推察される。後述する超音波伝搬速度でも同様の増加傾向が見出せた。

換算腐食率とハーフパワー法^{3),7)}による減衰定数の関係を図-6(b)(c)と図-7(b)(c)に示す。なお、図中の測定値については、複数回の測定を実施して実験データの再現性を確認している。図-6と図-7より、換算腐食率 0~2% 程度までに減衰定数が健全時の 1.5~3 倍程度に増加する傾向が見られた。減衰が増加するメカニズムは明らかではないが、鋼部材の検討⁸⁾でもボルト接合は溶接の 2 倍程度の減衰定数を示すことや、著者ら^{2,4)}の他の接合部供試体でも腐食ひび割れの発生前後までに減衰定数の増加が示されていることから、鋼製柱周辺の腐食生成物やコンクリートひび割れに減衰効果があるものと推察される。

(2) RC フーチングの振動試験

図-3 に示すようにフーチング側方から縦振動を励起し、固有振動数を測定した。換算腐食率と固有振動数との関係を図-8 に示す。C-1 と C-2 供試体では、ひび割れ発生・進展と対応する換算腐食率 1~2% 程度までに固有振動数が健全時の 8 割程度まで低下する傾向が示された。腐食生成物の発生によって鋼コンクリート間の縦波の伝搬が低減することや、図-5(b) に示すように腐食ひび割れが側面まで及ぶためにフーチングの固有振動数が低下したものと推察される。一方、フーチングの寸法が大きい CL20 や CL40 供試体では、このような鋼材腐食に伴うフーチングの固有振動数の低下はほとんどない。これらの供試体は、フーチング高さ 1250 mm に対して腐食区間はわずか 100 mm であり、前記のように電食試験終了時でもフーチング上面に見られる腐食ひび割れは側面まで及んでいなかった。このため、フーチング内部の鋼材腐食がフーチングの振動特性に及ぼす影響が小さかったものと考えられる。

(3) フーチング上面の超音波試験

図-3 に示した表面法によってフーチング上面の柱基

部周辺の超音波伝搬速度を測定した。なお、以降の超音波伝搬速度は、超音波の到達時間を探触子間距離で除した見掛けの伝搬速度である。換算腐食率と超音波伝搬速度との関係を図-9に示す。4体の供試体は腐食率0~2%程度までに超音波伝搬速度の増加が見られた。詳細な実験データは測定していないが、伝搬速度の増加は図-6(a)や図-7(a)に示した鋼製柱の固有振動数の増加とも概ね対応している。なお、CL40供試体やC-1供試体では、その後の腐食率の増加に伴って超音波伝搬速度の緩やかな低下傾向が見られた。特に、CL40供試体では、換算腐食率30%に達したときに超音波伝搬速度が健全時の8割程度まで急激に低下した。鋼やコンクリート中の超音波伝搬速度が変化しないと考えれば、鋼材腐食に伴うコンクリートひび割れの発生や鋼コンクリート間の付着損失などによって伝搬経路が大きく変化したと推察される。

4. まとめ

本研究では、鋼コンクリート接合部の非破壊試験の可能性の検討および基礎的データの収集を目的として、RCフーチングに埋め込まれた鋼製柱供試体を作製し、電食試験によってコンクリート内部の鋼材腐食(境界部腐食)を段階的に促進させた。特に、本研究では供試体寸法に着目して、境界部腐食が各種の振動特性に及ぼす影響を検討した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

1) 供試体寸法に依らず、境界部腐食に伴う鋼製柱の固有振動数の変化は小さかった。一方、RCフーチングに腐食ひび割れが発生する前後(腐食率0~2%)までに鋼製柱の減衰定数は健全時の1.5~3倍に増加する傾向が示唆された。

2) 供試体寸法が小さい場合には、フーチング上面の柱基部から発生した腐食ひび割れがフーチング側面まで及んだ。このとき、側面からの加振によるフーチングの固有振動数は、健全時の8割程度まで低下した。一方、供試体寸法が大きい場合には、フーチング側面まで腐食ひび割れが及んでおらず、固有振動数はほとんど変化しなかった。

3) 寸法が大きい供試体のみ腐食率40%まで電食試験を継続した。その結果、腐食率30%程度では柱基部周辺に著しい腐食ひび割れや腐食生成物が見られた。このとき、フーチング上面の柱基部周辺で測定した見掛けの超音波伝搬速度は健全時の8割程度まで急激に低下した。

以上より、境界部腐食による供試体の劣化性状は鋼材腐食量や供試体寸法などによって異なることが示され、その劣化性状に応じて、鋼製柱の減衰定数やフーチングの固有振動数、あるいはフーチング上面の見掛けの超音波伝搬速度が変化する可能性が示唆された。今後、境界

部腐食に伴う供試体の劣化性状と、非破壊試験に用いる指標の整理が課題である。

なお、これらの知見は限られた供試体諸元と電食試験によって得られたものであり、実際の鋼コンクリート接合部の腐食性状とは異なると考えられる。しかし、電食実験による基礎的検討であっても、コンクリート内部の鋼材腐食推定の可能性を幾つか見出し、その適用条件を整理することができれば、現場試験への試行に繋げることができると考えている。今後、供試体実験による基礎的データの蓄積や計測精度の向上を図るとともに、現場試験あるいは実構造物から採取した実部材の振動試験との整合性を検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、(独)土木研究所と東北大学による共同研究「コンクリート埋込部における鋼部材の腐食欠損等の共鳴振動評価法に関する研究」(平成23年度~24年度)の一環として実施したものである。ここに記して、関係者各位に謝意を表します。

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，2007年7月27日号，pp.64-67，2007.7
- 2) 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.1060-1073，2011.3
- 3) 岩岸現，柏宏樹，内藤英樹，鈴木基行：鋼コンクリート接合部に生じた鋼材腐食量の推定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1231-1236，2012.7
- 4) H. Kashiwa, H. Naito and M. Suzuki: Vibration and Buckling Characteristics of I-Shaped Steel Column Corroded on Boundary with Concrete, *Proceedings of The 15th World Conference on Earthquake Engineering, The 15th WCEE*, 0219, 2012.9
- 5) 星野誠，玉越隆史：道路附属物支柱基部の腐食発生傾向に関する検討，土木学会年次学術講演会，Vol.66，VI-231，pp.461-462，2011.9
- 6) 内藤英樹，齊木佑介，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.522-534，2011.10
- 7) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，2009.
- 8) 伊藤学，片山恒雄：橋梁構造の振動減衰，土木学会論文集，No.117，pp.12-22，1965.5