

論文 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

岩岸 現^{*1}・柏 宏樹^{*2}・内藤 英樹^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨: 近年、鋼材がコンクリートに埋め込まれる接合部において著しい鋼材腐食が報告されている。本研究では、鋼とコンクリートの接合部供試体を作製した。そして、電食試験によってコンクリート内部の鋼材腐食を段階的に促進させて、強制加振試験による鋼材腐食量の推定の可能性を検討した。その結果、張り出し鋼材の強制加振試験では、鋼材腐食によってコンクリートにひび割れが生じる前後までに減衰定数が健全時の2倍程度まで増加した。さらに、コンクリート被覆部の振動試験では、鋼材腐食量の増加に伴ってコンクリート被覆部の縦振動による固有振動数が低下することが示された。

キーワード: 合成構造, 鋼材腐食, 強制加振試験, 固有振動数, 減衰定数

1. はじめに

近年、橋梁や道路付属物、建物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、接合部腐食)が報告されている¹⁾。接合部腐食は補修や補強が困難であり、鋼材の塗装後の再劣化も懸念される。また、合成構造における接合部の損傷は、構造物の使用性や安全性を大きく低下させる要因にもなる。しかし、これらの劣化性状は、鋼材腐食がコンクリート内部にまで及んでいる場合があり、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、簡便な点検・検査によって早期に接合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。

このような背景に対して、著者ら²⁾は、電食試験によって接合部腐食を促進させた鋼コンクリート接合部の供試体を作製し、コンクリートから張り出した鋼材部分(以下、張り出し鋼材)の振動試験によって鋼材の固有振動数と減衰定数を測定した。その結果、鋼材腐食に伴う固有振動数の変化は小さいが、減衰定数は健全時の2~4割程度に増加する傾向が示唆された。しかし、参考文献2)は限られた供試体諸元によって得られた知見であり、さらに、これらの接合部供試体のコンクリート被覆部には鉄筋を配置していないため、鋼材腐食によるコンクリートひび割れが発生すると同時に供試体が割裂し、実験の終了を余儀なくされた。

本研究はこの追加実験に位置づけられるものであり、鋼材腐食に伴うコンクリートひび割れ発生後の減衰定数の変化を検討するため、新たに4体の接合部供試体を作製した。さらに本研究では、新たな試みとして、コンクリート内部の鋼材腐食に伴うコンクリート被覆部の振動特性の変化も併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

供試体の概略図を図-1に示す。本研究では、参考文献2)と同様に、鋼トラス橋において鋼部材がコンクリート床版に埋め込まれる接合部を模したT供試体と、新たにH形鋼柱がコンクリート内部に定着される接合部を模したC供試体の2種類を設定して、それぞれ2体(合計4体)の供試体を作製した。H形鋼の断面寸法は、いずれも100mm×100mm×6mm×8mm(断面高さ×断面幅×ウェブ厚さ×フランジ厚さ)であり、材質はSS400を使用した。T供試体およびC供試体のコンクリート被覆部の断面寸法は300mm×300mmであり、T供試体のコンクリート厚さ(被覆区間)は100mmとした。C供試体は、厚さ250mmのコンクリートに対して、H形鋼を150mm埋め込んだ。C供試体の定着部は特に加工していない。これらの供試体のコンクリート被覆部には、D10

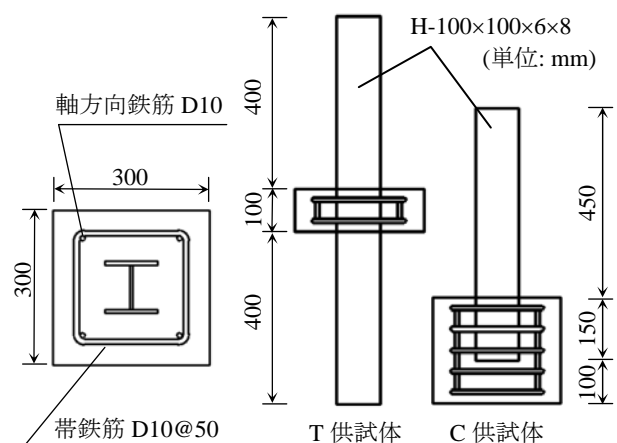


図-1 供試体の概略図

*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 (学生会員)

*3 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)

*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 コンクリートの示方配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメ ント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	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 A
20	12	49.5	4.5	43.2	173	349	763	1048	3.490

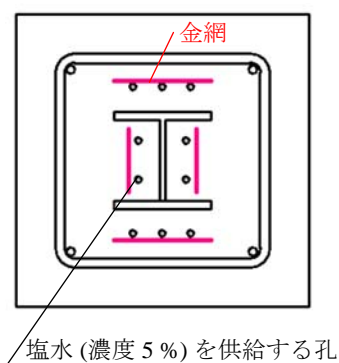


図-2 H形鋼の電食試験

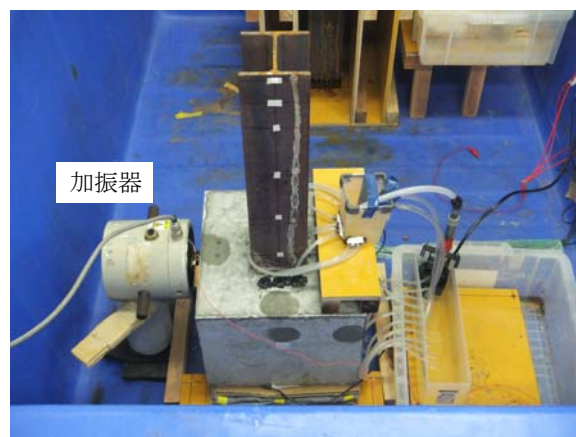


写真-1 電食実験とコンクリートの強制加振試験

(SD295) の帯鉄筋を 50 mm 間隔で配置した。

ミルシートに記載された 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。コンクリートの示方配合を表-1 に示す。セメントは早急セメントを使用した。コンクリートのテストピース (φ100 mm × 200 mm) による材料試験の結果は、圧縮強度 26.6 N/mm²、静弾性係数 28200 N/mm²、動弾性係数 35100 N/mm²、密度 2390 kg/m³ である。

2.2 電食試験

本研究が着目する鋼コンクリート接合部の腐食事例は鋼材面積が大きく、その腐食程度も極めて著しい。コンクリート内部の鋼材のみを腐食させること、また腐食量が大きいことなどを踏まえて、本実験では電食試験を行った。コンクリートに被覆されている H 形鋼の全面において鋼材腐食を促進させるため、図-2 に示すように H 形鋼のフランジとウェブに面して金網を埋め込み、直流電流を継続的に流す電食試験を行った。早急セメントの使用に対して養生期間を十分に設け、材齢 44 日～89 日の間に 4 体の供試体の電食試験を順次開始した。電食試験の状況を写真-1 に示す。本研究は、T 供試体および C 供試体のいずれも目標腐食率を 20 % とした。T 供試体は、鋼材の埋め込み区間 100 mm に対して積算電流量 47.7 A·hour (換算腐食率 3.4 %) までは 0.38 A の直流電流を流し、以降は 0.86 A を基本とした。C 供試体は、鋼材の埋め込み区間 150 mm に対して積算電流量 71.6 A·hour (換算腐食率 1.9 %) までは 0.57 A の直流電流を流し、以降は 1.29 A を基本とした。ここで、換算腐食率とは、積算電

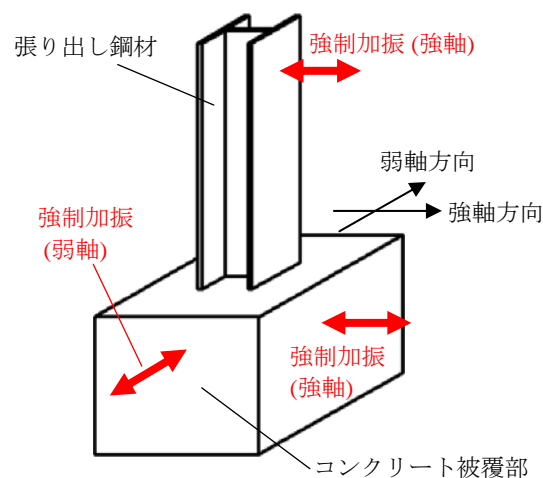


図-3 強制加振試験の加振位置

流量と実験終了後に確認した鋼材腐食率 (コンクリート被覆区間における鋼材の平均質量減少率) 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。電食試験終了後には供試体を解体し、クエン酸二アンモニウム水溶液により H 形鋼の錆を除去して質量と腐食状況を確認した。

2.3 強制加振試験

(1) 張り出し鋼材のたわみ振動計測

参考文献 2) と同様に、動電式加振器を用いた強制加振試験によって、接合部腐食が生じた張り出し鋼材の振動試験を行う。強制加振試験における加振位置を図-3 に

表一 換算腐食率と供試体の変状

供試体名	錆汁の析出	フランジ面に垂直のひび割れ発生	フランジ端部から斜め方向のひび割れ発生	ウェブ面に垂直のひび割れ発生
T1	0.6 % (7.96)	0.6 % (7.96)	1.2 % (15.92)	1.2 % (15.92)
T2	0.6 % (7.96)	1.7 % (23.87)	2.2 % (31.79)	2.2 % (31.79)
C1	0.3 % (11.94)	0.3 % (11.94)	0.6 % (23.87)	1.5 % (59.68)
C2	0.7 % (23.87)	0.7 % (23.87)	1.0 % (35.81)	1.3 % (47.68)

注) 括弧内は積算電流量 (A・hour) を示す。

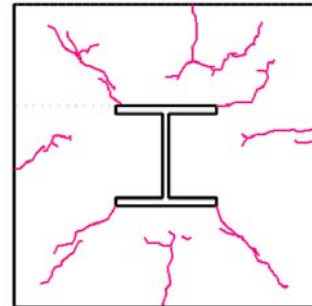
示す。T 供試体および C 供試体ともに、H 形鋼のフランジ面に鋼板 (伝達棒) を介して、強軸方向に調和振動を加えた。加振位置は、H 形鋼の張り出し端部から 10 mm 位置とした。加振条件は、伝達棒の加速度振幅を 2 m/s^2 に一定として、1 分間で 600~650 Hz まで連続的に周波数を変化させた。このとき、加振点と同じフランジ面に計測加速度ピックアップを貼付し、供試体の応答加速度より共振曲線 (周波数-応答加速度関係と位相特性) を得る。計測加速度ピックアップの貼付位置は、T 供試体では張り出し端部から 50, 100, 150, 200, 250 mm の 5 箇所、C 供試体では張り出し端部から 50, 100, 200 mm の 3 箇所とした。振動試験は、換算腐食率 3 % 程度までは腐食率 0.5 % 毎に行い、その後は実験終了まで換算腐食率 5 % 毎の測定とした。

本実験で使用した機材の仕様や実験方法の詳細は、参考文献 2) に示した。

(2) コンクリート被覆部の縦振動計測

著者ら^{3),4)}は、コンクリートはりや床版の強制加振試験を検討しており、コンクリート内部のひび割れによってこれらの固有振動数 (加振方向の縦振動) が低下することを報告した。鋼コンクリート接合部においても、コンクリート内部の腐食生成物によってコンクリート被覆部にひび割れが発生し²⁾、また 20 % 程度の大きな腐食率に達すると、鋼コンクリート間に隙間が生じて縦波の伝播が低減すると考えた。そこで、写真一1 に示すように、コンクリート被覆部の側面から調和振動を与えた縦振動による強制加振試験を行った。

強制加振試験は、図一3 に示すコンクリート被覆部の強軸方向と弱軸方向に対して行った。別途検討した超音波計測で使用したグリスを避けるため、強制加振試験の加振位置は図一3 に示すように側面中央のコンクリート上面から 20 mm とした。加振器の振動テーブルを両面テープによってコンクリート側面に接地し、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 まで連続的に変化させた。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。



図一4 鋼材腐食に伴うひび割れ状況

3. 実験結果

3.1 電食試験

換算腐食率と外観目視による供試体の変状との関係を表一2 に示す。表には、積算電流量も併せて示した。本実験の範囲では、接合形式が異なる T 供試体と C 供試体の変状に大きな差異は見られなかった。T2 供試体の電食終了時 (換算腐食率 22.3 %) のひび割れ状況を図一4 に示す。いずれも換算腐食率 0.5 % 程度で錆汁が析出し、換算腐食率 1 % 程度でフランジ面に対して垂直方向にコンクリートのひび割れが発生した。さらに、換算腐食率 1~2 % 程度になるとフランジ端部から斜め方向に発生するひび割れとウェブ面に垂直のひび割れが発生した。

電食試験終了後に、供試体を解体して H 形鋼を取り出した。クエン酸二アンモニウム水溶液を用いて錆を除去し、鋼材の質量を測定した。目視によって観察された鋼材腐食状況は、T 供試体のコンクリート上下面の境界部分において板厚減少が 50 % 程度に及ぶ箇所が見られたが、コンクリート被覆部では概ね一様に板厚が減少していた。また、C 供試体については、コンクリート上面の境界部分と埋め込み端部の鋼材の板厚減少が 50 % 程度に及ぶ箇所が見られたが、コンクリート被覆部では T 供試体と同様に概ね一様に板厚が減少していた。

質量測定に基づく鋼材の腐食率は、T1 供試体が 23.4 %、T2 供試体が 22.3 %、C1 供試体が 12.4 %、C2 供試体が 13.4 % であった。T 供試体では目標腐食率 20 % に対して同程度に腐食させることができたが、接合形式が異な

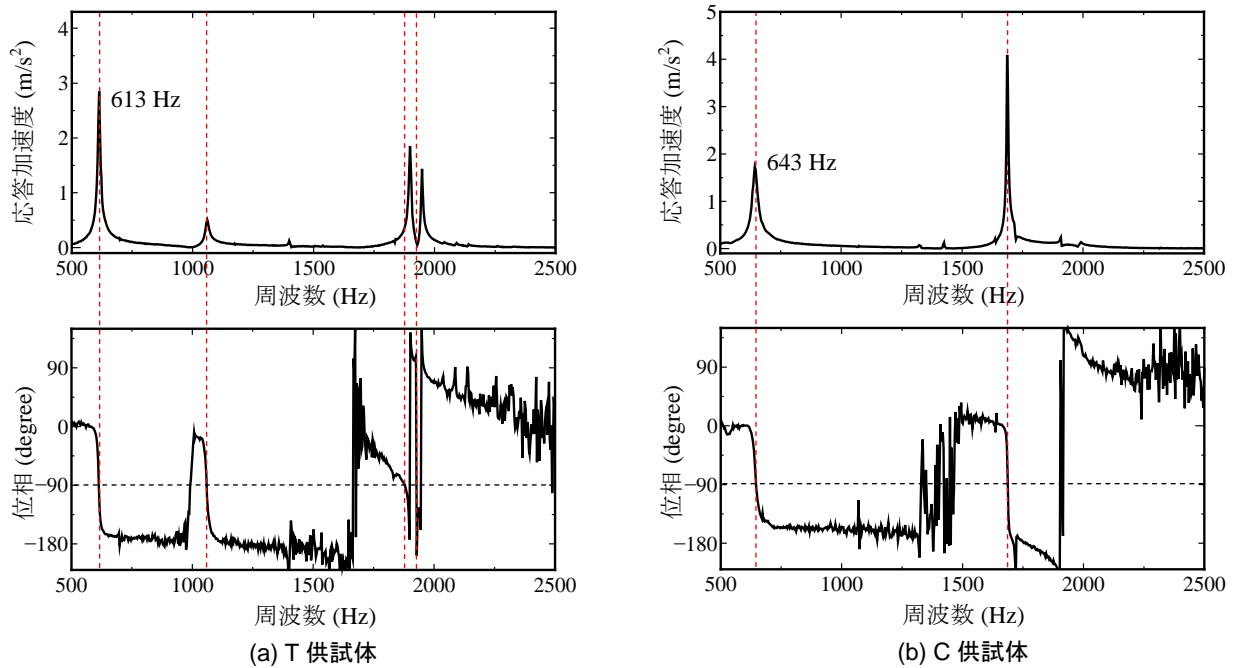


図-5 張り出し鋼材 (H形鋼) の共振曲線

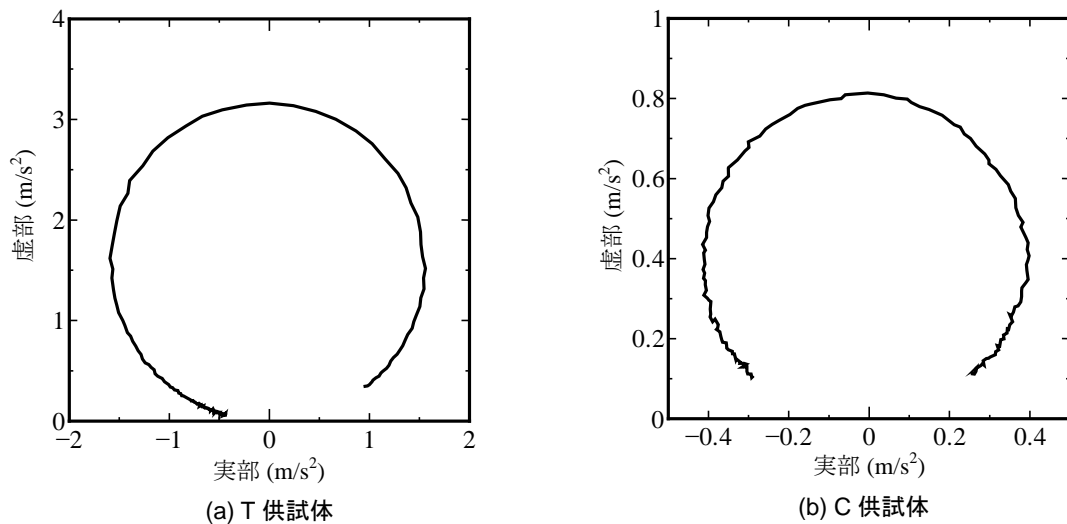


図-6 1次の共振点周りのナイキスト線図

る C 供試体では目標腐食率 20% に対して実際は小さい腐食率となった。しかし、その理由を明らかにすることはできなかった。

3.2 強制加振試験

(1) H形鋼のたわみ振動計測

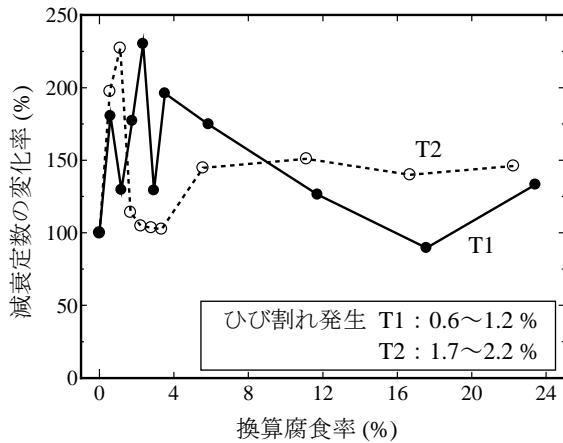
H形鋼の強制加振試験の一例として、T 供試体と C 供試体の健全時の共振曲線を図-5 に示す。ここでは、着目する振動モードを検討するため、500~2500 Hz の周波数で加振した。図より、T 供試体では 613 Hz、C 供試体では 643 Hz に応答加速度のピークが表れており、これらの位相が -90° と概ね整合した⁵⁾。片持ちばりのたわみ振動を考えたとき、1 次の固有振動数の理論値は次式で与

えられる⁶⁾。

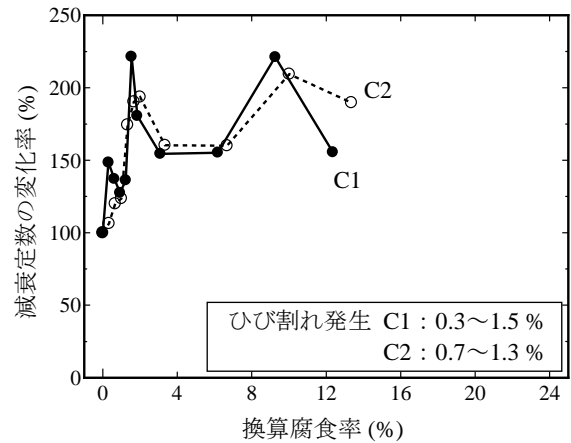
$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{E_d I}{\rho A}} \quad (1)$$

ここで、 f はたわみ振動の固有振動数、 λ は 1.875、 L は片持ちばりの長さ、 E_d は鋼材の動弾性係数、 ρ は鋼材の密度、 I は断面 2 次モーメント、 A は断面積である。

$L=450 \text{ mm}$ を仮定して、健全時の鋼材の材料特性を式 (1) に代入すると、理論値として $f=609 \text{ Hz}$ が得られた。強制加振試験の図-5 より、613 Hz や 643 Hz が 1 次のたわみ振動の固有振動数であると判断できた。なお、図-5 では、これよりも高い周波数においても共振点が得られているが、本研究ではこれらの振動モードは明らかに



(a) T 供試体



(b) C 供試体

図-7 積算電流量と H 形鋼の減衰定数(たわみ振動) との関係

していない。

次に、減衰定数の算定に先立って、ナイキスト線図⁵⁾を描いて共振点周りの応答加速度と位相特性との整合性を確認する。T 供試体と C 供試体のナイキスト線図を図-6 に示す。いずれの接合形式でもナイキスト線図は真円に近い軌跡を描いており、強制加振試験の妥当性が確認できた。以降では、ナイキスト線図を描いて、ハーフパワー法によって減衰定数を算定した^{2),5)}。T 供試体および C 供試体の健全時の減衰定数はそれぞれ 0.7% および 0.9% であった。

換算腐食率と減衰定数との関係を図-7 に示す。図の縦軸は、減衰定数を健全時の値で除した変化率として表記した。T 供試体および C 供試体の実験結果は、ひび割れ発生の前後までに減衰定数が 2 倍程度まで増加する傾向が示された⁷⁾。なお、参考文献 2) に示した著者らの接合部供試体でも、ひび割れが発生するまでに減衰定数が増加することを示している。T 供試体と C 供試体および参考文献 2) の供試体のいずれも、ひび割れが発生するときの換算腐食率は 1~2% 程度であり、これは鋼部材の構造性能(剛性、耐荷力、変形性能)を低下させる前段階の損傷程度であると考えられる²⁾。このように減衰定数の増加に着目することによって、コンクリートのひび割れ発生までの鋼材腐食量を推定できる可能性が示唆された。一方、図-7 に示すように、ひび割れ発生後には減衰定数が増減しており、この測定結果のみでは鋼材腐食量を推定することは困難であると判断された。

なお、別途検討した固有振動数については、健全時から実験終了時までの変化率がわずか数パーセント程度であり、鋼材腐食量の推定は困難であると判断した^{2),8)}。

(2) コンクリート被覆部の縦振動計測

写真-1 に示すように、コンクリート被覆部の側面から調和振動を与え、加振方向の縦振動を励起させた³⁾。T

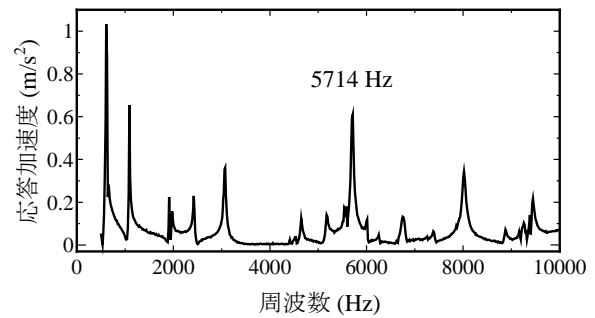


図-8 コンクリートの共振曲線(T 供試体)

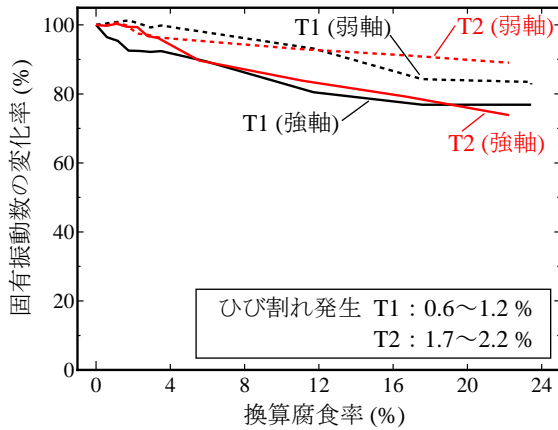
供試体の健全時の共振曲線を図-8 に示す。図-8 の共振曲線には応答加速度のピークが複数表れた。両端自由の棒部材の縦振動を考えたとき、1 次の固有振動数は次式で表される⁶⁾。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (2)$$

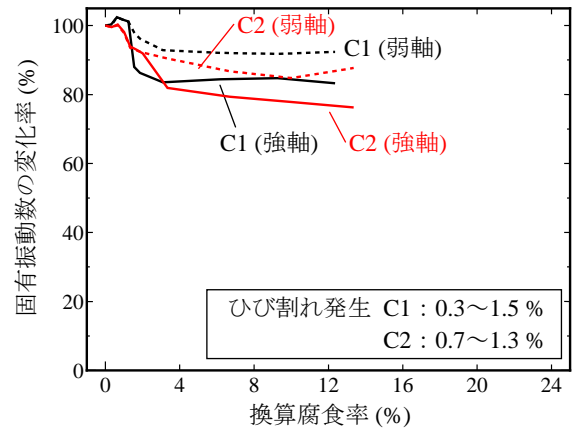
ここで、 f は縦振動の固有振動数、 L は加振方向のコンクリート厚さ、 E_d はコンクリートの動弾性係数、 ρ はコンクリートの密度である。

鉄筋の影響を無視して、材料試験によるコンクリートの物性を式(1)に代入すると、固有振動数の理論値として $f = 6387$ Hz が得られた。これより、図-8 の実験結果において 5714 Hz が縦振動の固有振動数であると推察される。なお、本実験では鋼材腐食に伴って縦振動の共振点と他のモードが近接し、妥当な減衰定数が得られない場合があった。このため、以降では、固有振動数のみに着目して鋼材腐食量推定の可能性を検討した。

換算腐食率と固有振動数との関係を図-9 に示す。図の縦軸は、固有振動数を健全時の値で除した変化率として表記した。図-9 より、T 供試体では換算腐食率の増加に伴って固有振動数が低下する傾向が示された。この



(a) T 供試体



(b) C 供試体

図-9 積算電流量とコンクリートの固有振動数(縦振動)との関係

低下傾向は、特に強軸方向において顕著であった。C 供試体では、ひび割れ発生と概ね対応する換算腐食率 0～2% 程度までに固有振動数の低下が見られ、その傾向は強軸方向において顕著であった。これらの実験結果では、腐食生成物の発生によって、鋼とコンクリート間の縦波の伝播が低減することと、鋼材周辺のコンクリートにひび割れが発生することにより、コンクリート被覆部の固有振動数が低下したものと推察される。図-9 に示すように、T 供試体と C 供試体の強軸方向の加振では、実験終了時まで健全時の 80% 程度まで固有振動数が低下した。強軸方向の加振では、2 つのフランジ面を介して縦振動が伝播するため、1 つのウェブ面を介する弱軸方向の加振と比較して、固有振動数の低下が顕著に表れたものと推察される。

以上より、鋼材腐食に伴うコンクリートのひび割れ発生前後までは、張り出し鋼材のたわみ振動による減衰定数の増加に着目して、鋼材腐食量推定の可能性が示唆された。また、コンクリート被覆部の縦振動(強軸方向)の固有振動数の低下に着目して、コンクリート内部の鋼材腐食量推定の可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、鋼材がコンクリートに埋め込まれた接合部供試体を作製し、電食試験によってコンクリート内部の鋼材腐食を段階的に促進させた。強制加振試験の結果より、張り出し鋼材のたわみ振動計測では、コンクリートのひび割れが発生する換算腐食率 1～2% 程度までに、減衰定数が健全時の 2 倍程度まで増加する傾向が示された。また、鋼材腐食によってコンクリート被覆部の縦振動の固有振動数が低下することが示された。

なお、これらの知見は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とは腐食性状が異

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が複数見出せれば、その幾つかは現場試験への試行につなげていくことができると考えている。今後、供試体実験によってさらなる基礎的データを収集するとともに、現場試験あるいは実構造物から採取した撤去部材などの振動試験を行い、これらの実験結果との整合性を検討する必要がある。

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，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) 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
- 4) 内藤英樹，林弘，齊木佑介，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. 436-450，2011.9
- 5) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，2009.
- 6) 小坪清真：入門建設振動学，森北出版，2000.
- 7) 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.
- 8) 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