

論文 常時微動計測による PC 桁の振動特性と鋼材腐食程度の関係

久徳 貢大*1・審良 善和*2・山口 明伸*3・鈴木 雅博*4

要旨：本研究は常時微動計測により PC 桁の健全度を非破壊的に把握する試みであり、鋼材腐食程度が振動特性に及ぼす影響について実験的な検討を実施した。ポストテンション方式の PC 桁試験体に電食を施し、鋼材腐食を促進させて任意の劣化状態ごとに常時微動計測を行った。その結果、劣化状態ごとのスペクトル図を比較すると振動数の一部領域において、卓越する振動数のピーク位置が変化した。これによりごく初期段階でのひび割れの発生や桁の欠損による曲げ剛性の低下を検出できる可能性が示唆された。

キーワード：非破壊検査，振動特性，常時微動，プレストレストコンクリート，鋼材腐食

1. はじめに

高度経済成長期に大量の橋梁が建設された結果、2023 年度末で建設後 50 年を経過した橋梁の割合は国内全橋梁に対して約 4 割を占めている¹⁾。橋梁の老朽化は進んでおり、建設後の経過年数に比例して、定期点検で判定される橋梁の健全度は低下する傾向にあり、架替えや維持管理を要する橋梁の急増が社会的な課題となっている。維持管理時における定期点検では近接目視を基本としているが、RC 構造物のようにひび割れを点検指標にした劣化評価を PC 構造物で行うと、プレストレスによって耐荷性の低下が顕在化しにくいと、ひび割れが検出された時点で劣化が著しく進行している危険性がある²⁾。

非破壊による構造物の健全度診断手法の一例として、振動特性を評価する方法が挙げられる。構造物の振動特性が、その剛性あるいは劣化損傷の程度によって変化すると仮定した場合、固有振動数の変化として現れる³⁾。

特に、老朽化した構造物に加振や衝撃波を与えず、かつ省力化の期待できる評価方法として常時微動計測が注目されている。常時微動は、物体に絶えず存在する微小な振動である。かねてより振動波形から算出される固有振動数による地盤特性の把握⁴⁾などに利用していた経緯があり、土木・建築両分野においても、構造物の固有振動数に近い表現として共振周波数が広く知られている。橋梁下部工における常時微動計測には、一定の知見や適用事例⁵⁾があるものの、上部工での常時微動計測による健全度診断を実用化するには検証が十分ではない。

著者らは常時微動計測による PC 上部工の健全度診断手法に関する研究を行っている⁶⁾。本研究ではプレストレスを導入した試験桁を製作し、電食により鋼材腐食を促進させた。これにより、PC 桁内の鋼材腐食の程度が振動特性に及ぼす影響を実験的検討に実施した。

2. 振動特性の概要

2.1 振動方程式

桁(棒状部材)の振動数 f (Hz) は、振動方程式⁷⁾により、式(1)の関係で算出される。なお、この振動方程式は曲げ振動(横振動)、1 次モード、両端単純支持の条件として簡易化して示している。

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

l は支間長 (m), E はヤング係数 (kN/mm²), I は断面二次モーメント (m⁴), ρ は密度 (kg/m³), A は断面積 (m²) である。この関係式より、振動数 f の大小は、曲げ剛性 (EI) や質量の影響も受けるものの、平方根内のこれらのパラメータに比べて二乗化される支間長の方が影響因子として大きいことがわかる。既往の研究⁸⁾においても、192 橋を対象とした実橋調査にて支間長が長いほど固有振動数が低下する傾向が示されている。

2.2 振動モード

構造物には種々の振動モードが想定される。棒状部材の長手方向では、たわむように曲がる横振動モードや、伸縮方向に変形する縦振動モード(図-1)がある⁹⁾。断面方向において、部材高が低く地盤の揺れに同期するような場合では、前後左右に倒れるように揺れるロッキング振動モードや、スウェイ振動モード¹⁰⁾などが部材の曲げ剛性や支持条件の違いにより発生しうる(図-2)。

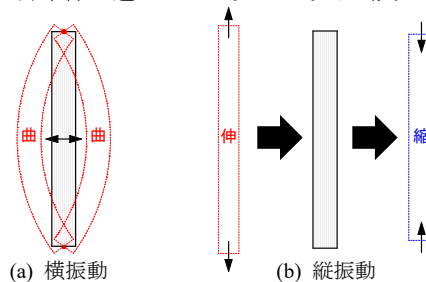


図-1 部材長手方向の振動モードの例

*1 ピーエス・コンストラクション(株) 技術研究所 修士(工学) (正会員)

*2 鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系 教授 博士(工学) (正会員)

*4 ピーエス・コンストラクション(株) 技術研究所所長代理 博士(工学) (正会員)

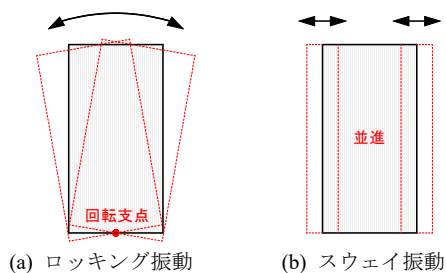


図-2 部材断面方向の振動モードの例

3. 実験概要

3.1 試験桁の製作

試験桁作製に使用した各種材料の物性値を表-1に、配筋図を図-3に示す。図-4に示すように試験桁の引張側に偏心した位置にPC鋼棒を配置し、ポストテンション方式でプレストレスを導入した。ロードセルで計測した導入プレストレス量が600kNのときにナット定着してシース内にグラウトを充填し、硬化後に実験に供した。

振動計測時の支間長は2,000mmとし、支点条件は左右でピン・ローラーとした。

3.2 常時微動の計測条件

試験桁の常時微動計測には、サーボ型センサ内蔵の3軸微振動検出器(出力感度: $\pm 5V/10m/s^2$, 質量: 約2kg)

表-1 各種材料の物性値

材料	測定項目	物性値
レディミクスト コンクリート	圧縮強度	実測 68.6 N/mm^2
	静弾性係数	実測 31.8 kN/mm^2
	割裂引張強度	実測 3.88 N/mm^2
	ポアソン比	実測 0.208
鉄筋 SD345	降伏点または耐力	規格 345 ~ 440 N/mm^2
	引張強さ	規格 ≥ 490 N/mm^2
PC鋼棒 C種 1号	耐力	規格 ≥ 1080 N/mm^2
	引張強さ	規格 ≥ 1230 N/mm^2
グラウト	圧縮強度	実測 56.0 N/mm^2

を使用した。サンプリング周波数を1,000Hzとして時刻履歴加速度を計測した。3軸の測定方向は写真-1に示すように桁の横断方向をX軸、長手方向をY軸、鉛直方向をZ軸とした。測定点は、支間中央(桁上)と床上(屋内コンクリート面)の2箇所とし、検出器は固定せずに置いた状態で同時刻歴での計測を行った。

3.3 固有振動数の算出

計測で得られた各時刻履歴の波形データは、地盤の振動がノイズとして含まれると考えられるため除去を目的に支間中央の値から床上での値を差し引いたのちに、波形データの差分を使った高速フーリエ変換(以下、FFT)によって、フーリエスペクトルと振動数に変換した⁴⁾。FFTでは8,192($=2^{13}$)測点、すなわち約8.2秒間分の波形データから1個のFFTデータを作成するものとした。同一条件で計測・算出した10個のFFTデータを平均してスペクトル図とし、卓越振動数に着目して固有振動数を推定した。

3.4 電食試験

塩害等による鋼材腐食を模擬して電食試験を実施した。電食による鋼材腐食程度(質量減少率)は、既往の文献¹⁾を参考にファラデーの法則により求めた。これにより、任意の鋼材腐食段階ごとに振動計測を実施すべく、腐食

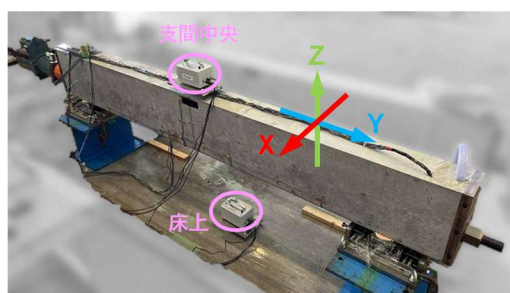


写真-1 測定方向(座標軸)の定義

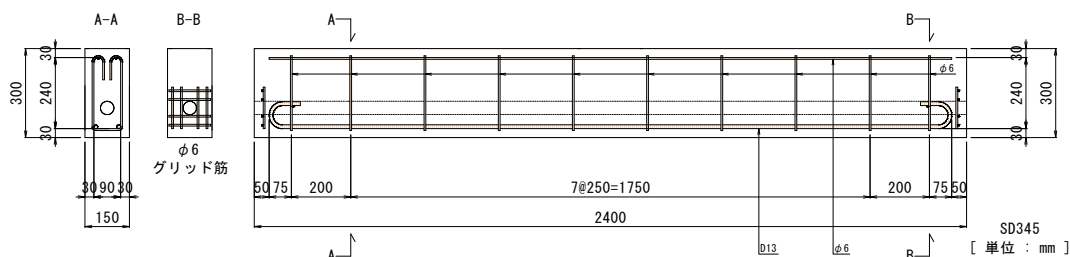


図-3 試験桁の配筋図

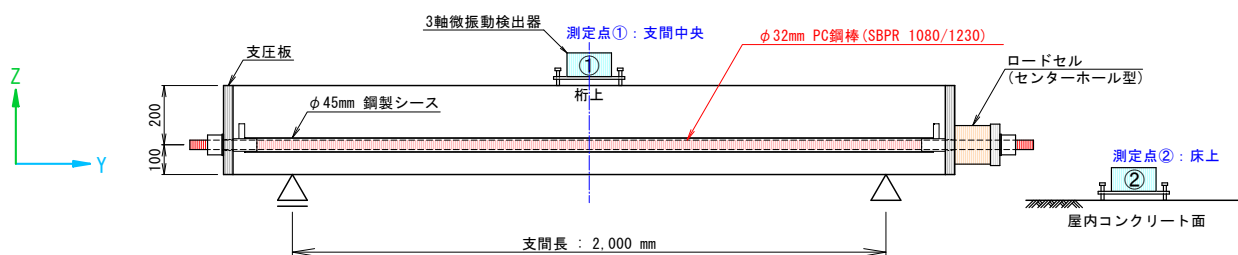


図-4 試験桁の形状および測定点

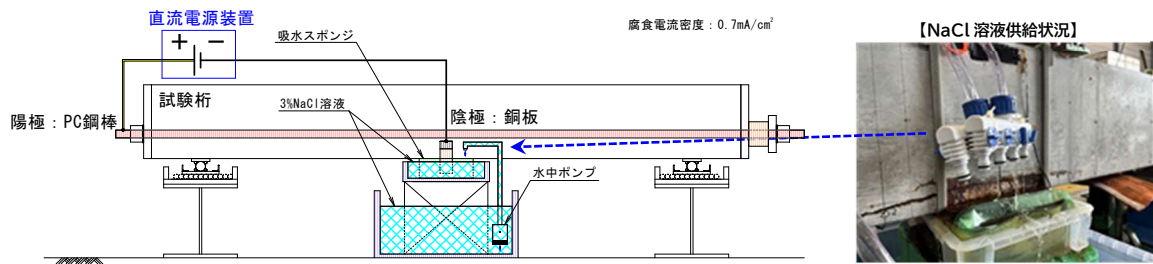


図-5 電食試験の回路および設備

電流密度を $0.7\text{mA}/\text{cm}^2$ に設定したうえで通電期間は逆算で決定した。以降は、目標となる鋼材の質量減少率のことを本稿内では腐食率 (%) と称する。

回路は図-5 に示すように PC 鋼棒端部を陽極、支間中央にて銅板を陰極に接続して電食を実施した。桁下面には電食範囲の幅 220mm となるように吸水スポンジを設置した。タイマー制御で水中ポンプを 90 分おきに稼働させて 3%NaCl 溶液を循環させ、常に吸水スポンジが供給された電解液を含んで湿潤状態となるようにした。通電期間中は、PC 鋼棒の緊張力をモニタリングした。

3.5 曲げ載荷試験

鋼材腐食による試験桁の耐荷性（曲げ剛性）の変化を確認するため、振動計測のタイミングに合わせて曲げ載荷試験を実施した。

載荷条件および通電期間中を含む変位とひずみの計測箇所を図-6 に示す。2 点集中載荷で等曲げモーメン

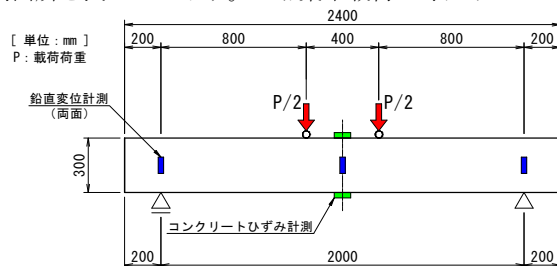


図-6 載荷条件と計測箇所

表-2 通電期間と試験桁の状況変化

通電期間 [Days]	0.0	3.5	11	18	36	72	108
腐食率 [wt%]	0	1	3	5	10	20	30
試験体の 外観	初期値	ひび割れ 錆汁発生 (写真-2)	ひび割れ 進展	ひび割れ 進展	ひび割れ 進展 (写真-3)	ひび割れ 進展 (写真-4)	105日目 桁下面剥離 (写真-5)
載荷試験	○	×	×	×	○	○	△
振動計測	○	○	○	○	○	○	○



写真-2 電食範囲の外観（腐食率 1 %）

ト区間を 400mm とした。支点（支承台）条件は、常時微動計測時と同様にピン・ローラーとした。弾性挙動を示す範囲で載荷を実施し、同一試験桁で通電を再開した。

4. 実験結果

4.1 通電期間と試験桁の状況変化

表-2 に通電期間に応じた試験体の状況変化と載荷試験および振動計測のタイミングを示す。まず腐食率 1% に相当する通電期間 3.5 日時点で引張鉄筋下面付近に相当する位置に発生したひび割れ部からの錆汁の発生が観察された（写真-2）。その後も鋼材腐食によるひび割れは進展し、腐食率 10%では引張鉄筋上面側付近にもひび割れと錆汁が観察され（写真-3），腐食率 20%では腐食



写真-3 電食範囲の外観（腐食率 10%）



写真-4 電食範囲の外観（腐食率 20%）



写真-5 電食範囲の外観（腐食率 30%）

生成物による変色が顕著となった（写真－4）。最終的には腐食率30%となる直前で桁下面コンクリートが剥離し、桁が反り返ったことから上縁側の曲げひび割れが発生し（写真－5）、回路が絶たれて通電不可となったことで電食試験を終了した。

表－3^{12),13)}に腐食生成物と錆汁の色の対応表を示す。腐食率 1%の最初に錆汁が観察されたタイミングでの黒色の錆汁は、一般的に腐食初期に生成する Fe_3O_4 によるものと推定される。その後は錆汁の色が橙色系へ変化したことから、ひび割れの進展と剥離を伴った試験桁の劣化状態と整合する。

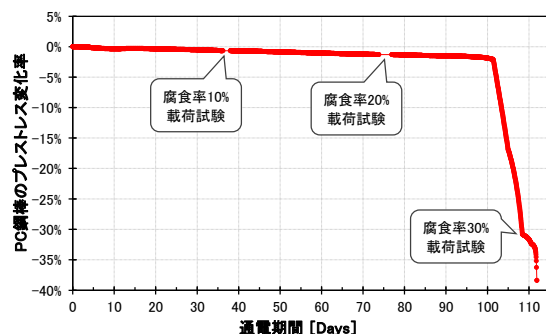
表－3 腐食生成物と錆汁の色

鋼材の腐食条件	生成の可能性がある錆(化合物)	錆汁の色
塩化物を含む コンクリート	Fe_3O_4	黒色
	$\alpha\text{-FeOOH}$	黄色
	無定形オキシ水酸化鉄	褐色
剥離やひび割れによる 鋼材の露出部	$\gamma\text{-FeOOH}$	橙色
	$\alpha\text{-FeOOH}$	黄色
	$\beta\text{-FeOOH}$ (塩化物共存下)	淡褐色～白色

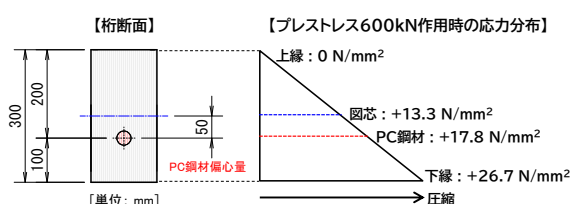
4.2 通電期間中における応力変化のモニタリング

(1) PC 鋼棒の荷重

通電期間とプレストレスの変化率を図－7 に示す。プレストレスは、試験桁端部に設置したセンターホール型ロードセルで計測した PC 鋼棒の荷重値である。グラウト硬化後以降は PC 鋼棒との付着により緊張力が保持されるため、仮に電食範囲で PC 鋼材の断面欠損が発生してもロードセルで計測した荷重値がただちに低下することはない。そのため、通電期間約 100 日までの緩やかなプレストレス低下は、試験桁のクリープ変形や PC 鋼材のリラクセーションによる長さ変化が要因として考えられる。以降の急激なプレストレス低下は、剥離によるグ



図－7 通電期間とプレストレスの変化率



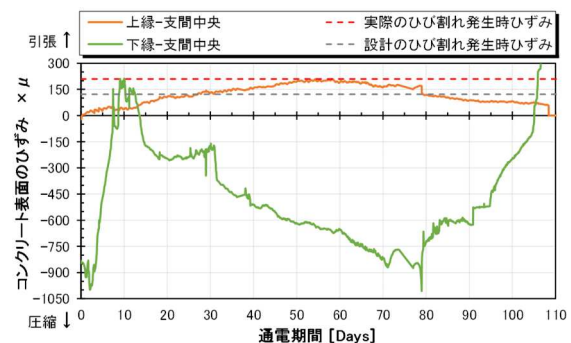
図－8 プレストレスによる応力分布

ラウトの付着切れと桁が反り返ったことによる長さ変化が要因と推察した。

鋼材腐食により桁が重力方向にたわまなかった原因として、試験桁の設計上の応力分布は図－8 に示すように下縁が最大となる全断面圧縮となるため、桁の支間中央付近の下側が欠損して反り返りが生じたと考えられる。

(2) コンクリートのひずみ

プレストレス導入前を起点とした通電期間中のコンクリート表面のひずみの変化を図－9 に示す。下縁側では通電初期に鋼材腐食によって圧縮力が作用したと考えられる。その後、写真－2 に示した明確なひび割れが観察された腐食度 1% (通電期間 3.5 日頃) にひずみが引張側に転じている。このとき、ひび割れ発生によって応力解放となった場合、前掲の図－8 に示したプレストレスによる下縁の圧縮応力 (26.7N/mm^2) と表－1 に示したコンクリートの静弾性係数 (31.8kN/mm^2) から計算される解放されたひずみは約 840μ となり、ひずみの変化量はその値を超過したため、下縁に作用していたプレストレスは消失した蓋然性が高い。以降は、ひずみゲージ貼付箇所のかぶりコンクリートの浮き・はく離により縁が切れていることや、下縁が電解液を含む吸水スポンジとの接触面であることから計測値の信頼性は低い。一方、上縁では下縁の欠損に伴う反り返りから引張力が作用したと推察される。ひずみが約 210μ を超過した際に、上縁では引張ひび割れが発生し、ひずみゲージ貼付箇所のコンクリートはひずみのピーク (通電期間 58 日頃) 以降、応力解放によりひずみが減少したと考えられる。



図－9 コンクリート表面のひずみ

4.3 曲げ載荷試験

載荷試験結果として、載荷荷重と鉛直たわみの関係を腐食率で比較して図－10 に示す。腐食率 30%での載荷は桁が著しく反り返った状態で実施したため参考程度とするが、傾向的には鋼材腐食の進行に伴った曲げ剛性の低下が認められる。腐食による PC 鋼より線の質量減少率をパラメータとした既往の研究¹⁴⁾での載荷試験においても、鋼材の腐食程度が高いほど桁の曲げ剛性が低下する同様の傾向が報告されている。

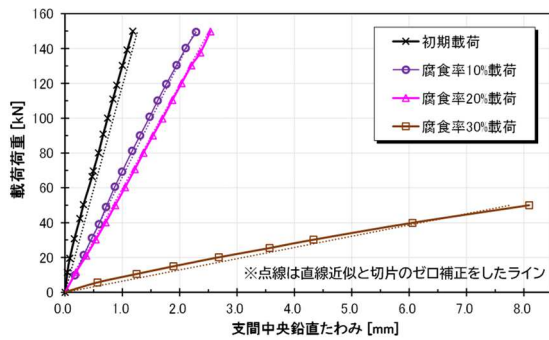


図-10 荷重試験の荷重-たわみ関係

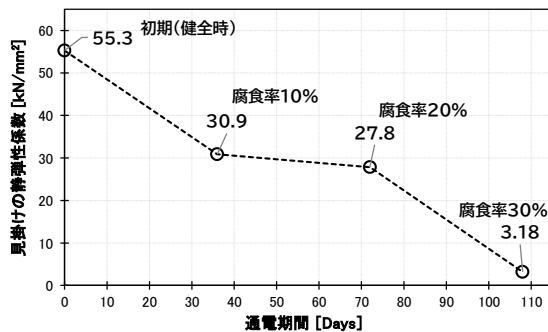


図-11 見掛けの静弾性係数の変化

曲げ剛性に着目するため、荷重試験結果から静弾性係数を未知数として逆算した結果を図-11に示す。断面欠損を無視し、健全時から断面二次モーメントを一定値として腐食率ごとに計算したこれを見掛けの静弾性係数と本稿内では称する。初期値から比較すると腐食率20%で見掛けの静弾性係数が半減したことが確認できる。

4.4 振動計測とスペクトル図

測定方向で比較した加速度フーリエスペクトルの一部振動数領域を抜粋して図-12に示す。著者らのこれまでの研究⁶⁾では、実測における振動方向やFEM解析による振動モードから、11Hz付近のピークを曲げ振動、8Hz付近のピークを伸縮振動等の曲げ以外のモードと推察しており、本稿の測定結果でも同様の振動特性であると考えられる。また、ロッキング-スウェイ振動のような相互干渉も、例えば8.5Hz付近のXY成分で観測される。試験桁の腐食状態で比較すると、鉛直方向は振動数のピークが見られないが、ピークが横断方向では小さくなる方ヘシフトし、長手方向では大きくなる方ヘシフトした。

横断方向における試験桁の腐食率ごとの加速度フーリエスペクトルを図-13に示す。なお、48Hz付近のピークは、床面上での振動計測でも共通して観測されるため、試験桁由来ではなく外的要因由来の振動数と判定した。

前述の伸縮振動と曲げ振動と推察したピークに着目し、パワースペクトルで8Hz付近を図-14に、11Hz付近を図-15に示す。ただし、ピーク位置を比較しやすいように倍率をかけており、その百分率を凡例中の括弧内に示す。図-14では鋼材腐食の進行に伴って振動数のピ

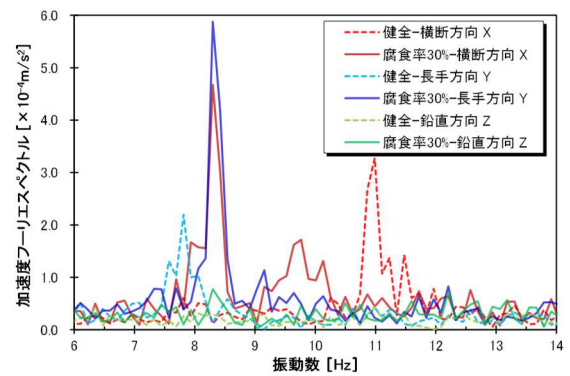


図-12 加速度フーリエスペクトル（方向比較）

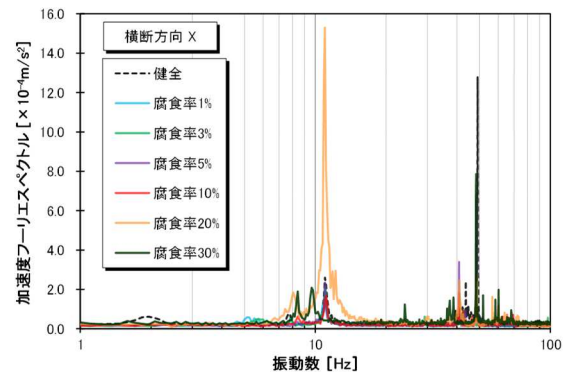


図-13 加速度フーリエスペクトル（横断方向）

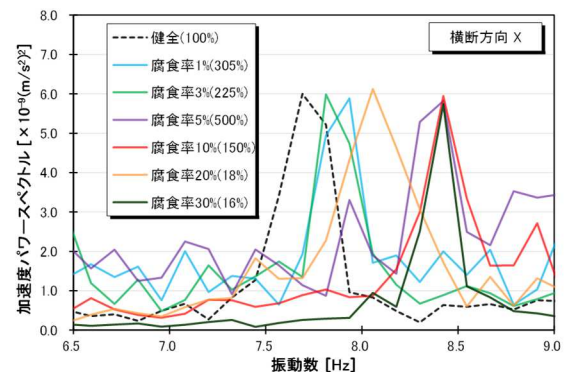


図-14 加速度パワースペクトル（8Hz 付近）

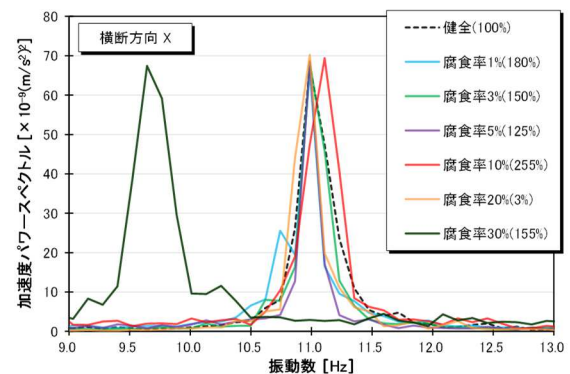


図-15 加速度パワースペクトル（11Hz 付近）

ークが大きい方ヘシフトする傾向が観察された。既報⁶⁾でも示した軸力を考慮した振動方程式⁷⁾は、軸力を圧縮側のプレストレスとした場合、軸力が低下するほど振動

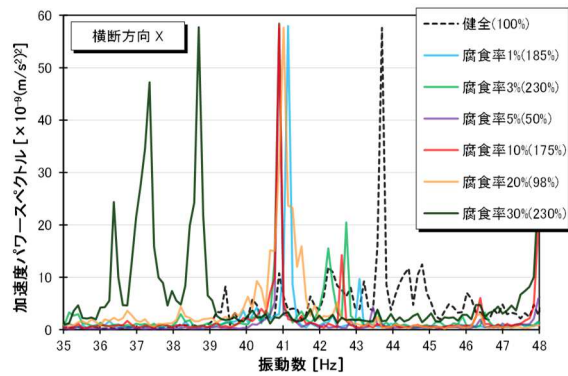


図-16 加速度パワースペクトル (44Hz 付近)

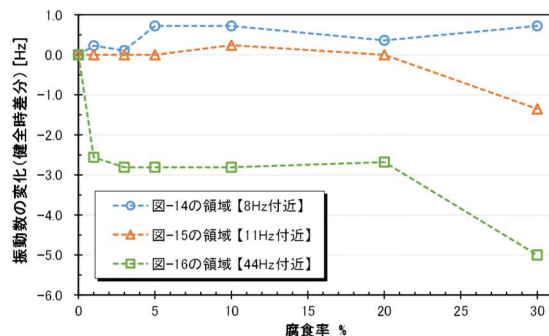


図-17 健全時からの振動数変化

数は高まるため、プレストレスの漸減に伴ってこの領域での振動数が漸増した可能性が考えられる。

一方、図-15では腐食率30%の振動数のピークがそれ以外の状態と比べて小さい方へシフトする傾向が認められた。前述の傾向と異なり、曲げ振動モードの領域では、桁下面コンクリートの剥離で試験桁が曲げ変形したことで曲げ剛性変化の影響が卓越した可能性が考えられる。

図-16には、600kNのプレストレス導入後⁵⁾では検出されず、グラウト充填後に検出された振動数のピーク、すなわちグラウトとPC鋼棒の付着の影響が想定される44Hz付近の加速度パワースペクトルを示す。おおまかに、健全時(44Hz)、腐食率1~20%(41Hz付近)、腐食率30%(35~39Hz)の3段階で視覚的に区別できる。ピークの数増加は、グラウトの付着切れの影響も考えられる。

図-17に健全時からの振動数変化を各ピーク位置の領域で比較して示す。今回の検討範囲内では、8~11Hz程度の低次数の振動モードよりも、比較的高次数である44Hz程度の領域に着目した方が鋼材腐食発生時(腐食率1%)の微細なひび割れを振動数あるいはスペクトル図の変化で検出できる可能性が示唆された。

5. まとめ

PC桁の鋼材腐食が振動特性に及ぼす影響の調査を目的とした実験的検討の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 鋼材腐食の腐食程度ごとのPC桁の振動特性の変化を、加振や衝撃波を与えない常時微動計測で検出できた。
- (2) 着目する振動数領域によっては、ごく初期のひび割

れ発生をスペクトル図の変化で検出できた。

今後の課題として、鋼材腐食が振動特性に及ぼす影響の定量評価および着目すべき振動数の領域に対する詳細調査に加え、実橋で振動計測やモニタリングを行い、非破壊検査手法としての適用性を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路メンテナンス年報（令和5年度），
https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/r05/r05_08maint.pdf（閲覧日：2024年12月12日）
- 2) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の維持保全—PC橋の更なる予防保全に向けて—〔2015年版〕，pp.74-75，2015.3
- 3) (公社)日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'24〔基礎編〕，pp.270-272，2024.3
- 4) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.5
- 5) 阿部慶太，名取努，小湊祐輝，関口琢己，山野明義，王林：固有振動数と相関を有する健全度診断指標を用いた鉄道橋梁橋脚の健全度の状態監視手法，土木学会論文集A1，Vol.72，No.1，pp.21-40，2016
- 6) 久徳貢大，東青龍，審良善和，鈴木雅博：常時微動計測によるPC橋の振動特性に関する研究，プレストレストコンクリート工学会第33回シンポジウム論文集，pp.157-162，2024.10
- 7) 西岡隆：土木工学基礎シリーズ4 構造振動解析，培風館，1987.4
- 8) 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，第311号，pp.49-58，1981
- 9) 幸節雄二：構造振動学の基礎，九州大学出版会，2010.10
- 10) (社)日本建築学会：入門・建物と地盤の動的相互作用，pp.71-73，1996.4
- 11) 高谷哲，西澤彩，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，vol.71，No.3，pp.235-247，2015
- 12) 鈴木三馨，堀口賢一，福浦尚之，丸屋剛：鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1081-1086，2009
- 13) 三沢俊平：鉄さび生成の現状と未解明点，防食技術，Vol.32，No.11，pp.657-667，1983
- 14) 横田敏広：腐食したPC鋼材を有するPC梁の耐力特性と解析的性能評価手法に関する研究，埼玉大学大学院理工学研究科博士学位論文，2018.9