

エレクトレット MEMS 振動発電を用いた鋼材腐食および塩害環境センシング技術の開発

北海道大学大学院	正会員	○橋本	勝文
アイリスオーヤマ株式会社	非会員	萩原	弘治
株式会社鷺宮製作所	非会員	三屋	裕幸
株式会社鷺宮製作所	非会員	門間	達希

1. 背景および目的

日本の社会資本ストックは高度経済成長期に集中的に整備され、鉄筋コンクリートにより構成される構造物のうち、建設後 50 年以上経過する施設の割合は加速度的に大きくなる。特に、塩化物イオンを含む環境に暴露される場合には、塩害により鉄筋の腐食を伴う著しい劣化を生じる場合がある。塩害環境をモニタリングするため、飛来塩分量を観測する土研式タンク法やドライガーゼ法による汎用的な方法による収集データに関する検証が行われている¹⁾。また、安価なチタンワイヤセンサーを用いたコンクリート中の鉄筋簡易腐食診断を目的とした自然電位の測定手法が提案されている²⁾。このとき、構造物の劣化性状は、日射や風向等の外的要因および材料分離や骨材の配置、ひび割れ等の内的要因の様々な不確定条件により、同一部材内の近接した箇所においても非一様な塩化物イオンの浸透性状や鉄筋腐食の発生位置および進展挙動を示すことが知られている³⁾。コンクリート中の鋼材の腐食状態と塩害環境をモニタリング可能な小型で簡便に使用できる省コスト・低価格のセンサは、三次元空間内の構造物を網羅するために非常に有用である。本研究では、塩化物イオン環境における鋼材ばねの腐食に伴う共振周波数の低下に着目し、エレクトレット MEMS を用いた振動発電の電圧出力特性の変化により無電源で自立的に検知できるデバイスの開発および提案を目的とした。

2. 実験概要

幅 21mm×長さ 30mm×厚さ 0.5mm あるいは 0.8mm の鋼材ばね（以下、板ばね A（厚さ 0.5mm）あるいは板ばね B（厚さ：0.8mm））を塩害環境に暴露する腐食促進試験を実施した。塩害環境は、乾湿繰返しを行う条件（ケース①）と乾湿繰返しを行わない条件（ケース②）を設定した。ケース①では、板ばねを温度 40℃、相対湿度 95%で 3wt%の NaCl 水溶液に 4 日間浸漬させた後に取り出し、続けて温度 40℃・湿度 40%で 3 日間乾燥させる 7 日間の試験を 1 サイクルとして 13 週間（サイクル）に亘って実施した。ケース②では、板ばねを温度 40℃、相対湿度 95%で 3wt%の NaCl 水溶液に浸漬させる試験を 13 週間に亘って継続した。

暴露試験開始前および暴露期間が 4 週間、8 週間、13 週間経過した時点で、板ばねの共振周波数を測定した。図 1 に板ばねと錘を用いた加振機による共振系試験の概要を示す。ばねと錘の共振系において、板ばねが腐食（減肉・割れ等）することで、ばね定数が変化することで共振周波数が変化（低い方にシフト）するため、系に振動を与えたときに錘の振動には加速度ピークの周波数ずれが生じる。このとき、振動発電デバイスの共

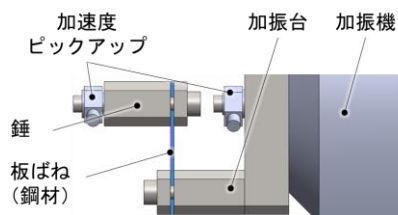


図1 板ばね共振系試験

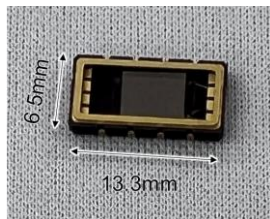


図2 振動発電デバイス写真

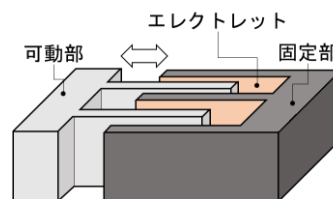


図3 MEMS デバイス櫛歯構造

キーワード 鉄筋コンクリート、塩害、環境、モニタリング、センシング、MEMS、振動発電

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北 13 条西 8 丁目 北海道大学工学部 A4-08

北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門

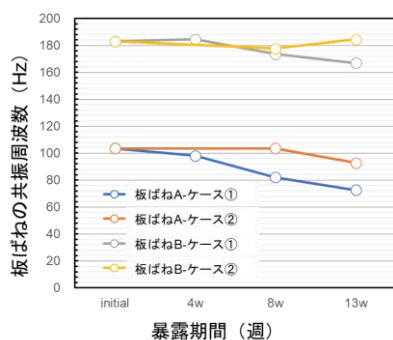


図4 板ばねの共振周波数

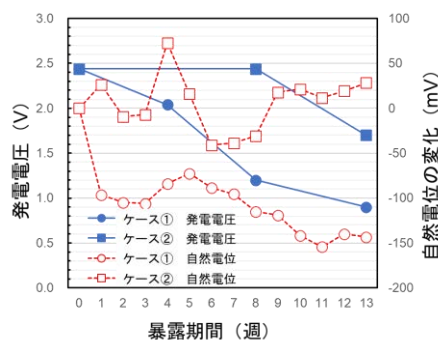


図5 発電電圧 (板ばね A)

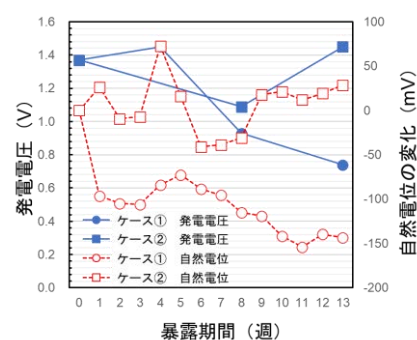


図6 発電電圧 (板ばね B)

共振周波数を系の共振に合わせておくことで、発電量の差から板ばねの腐食状態を検知することが可能になる。

上記塩害環境における板ばねの腐食と同時に、実構造物を想定した場合、塩化物イオンの浸透に伴う対象部材内における鉄筋腐食の進行との対応がセンサ機能に要求される。ここでは、長さ 140mm×縦 40mm×横 40mm の軸方向中心に D10 の鉄筋を配置したモルタル供試体を作製して、上記の暴露環境において 1 週間毎に照合電極に飽和硫酸銅基準電極を使用して、モルタル供試体内部の鉄筋の自然電位を測定した。

3. 振動発電の原理と数値シミュレーション

板バネ端部に MEMS 振動発電デバイス (図 2 参照) を取付けた場合に想定される電圧出力シミュレーションを行った。板ばねの共振周波数に相当する sin 波 (振幅: 0.5m/sec^2) を入力し、図 3 に示す帯電したエレクトレット素子および電極の櫛歯構造が板ばねの振動挙動に基づいて駆動することで電荷の移動が生じ、外部負荷 ($10\text{M}\Omega$) に接続することで電圧として取り出すことができる。

4. 結果および結論

図 4 に暴露期間の経過に伴う板ばねの共振周波数の変化を示す。共振周波数は板ばねの厚さの影響を受けており、板ばね A (0.5mm) の方が板ばね B (0.8mm) よりも低く、暴露期間の経過に伴って周波数が低下しやすいことがわかる。このとき、ケース①と②を比較すると、乾湿繰返し環境の影響により板ばねの腐食進行速度が速くなり、周波数の低下を生じやすいことが分かる。図 5 および図 6 に振動発電の数値シミュレーション結果から得られる発電電圧とモルタル供試体内の鉄筋の自然電位の変化について、板ばね A および板ばね B を用いた場合の結果を示す。各板ばねに取付けたデバイスから得られる発電電圧の計算シミュレーションにおいては、MEMS の共振周波数を 115Hz (板ばね A)、212Hz (板ばね B) とした。初期状態の板ばねの共振周波数の実測値は、約 110Hz (板ばね A)、約 180Hz (板ばね B) であり、板ばねの腐食進行に伴う共振周波数の低下によりデバイスの発電電圧は低下する。なお、ケース① (乾湿繰返し有) ではケース② (乾湿繰返し無) と比較して、経時的にモルタル供試体中の鉄筋の自然電位が低下しており、発電電圧の変化とよく対応していることが分かる。以上より、環境中における塩害進行の劣化因子および環境条件によるモルタル内部の鉄筋腐食の進行と板ばねの腐食挙動および共振周波数の低下には強い関連性があると言える。すなわち、提案する鋼製の板ばねによる振動機構を具備したエレクトレット MEMS 振動発電デバイスを鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食および塩害環境のモニタリングを目的としたセンサとして活用できる可能性が高い。

参考文献

- 1) 武邊勝道, 大屋誠, 安達良, 大田隼也, 落部圭史, 梶谷慧, 北川直樹, 立花裕介, 原貴之: 土研式タンク法とドライガーゼ法で得られる飛来塩分量の比較, 材料と環境, Vol.57, No.11, pp.500-505, 2008
- 2) 杉浦尚樹, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: チタンワイヤセンサーを用いたコンクリート中の鉄筋簡易腐食診断への適用性, コンクリート工学年次論文集, Vo.38, No.1, pp.1233-1238, 2016
- 3) 古谷宏一, 横田弘, 橋本勝文, 加藤絵万: コア採取による塩分浸透性状の評価および腐食開始時期の予測に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vo.34, No.1, pp.814-819, 2016