

経年戸建住宅及び各種機械用回転軸の高耐震化技術の発展と 地下埋設パイプの健全性評価技術の確立に関する研究グループ

昇降機等における事故抑制のための構造健全性評価システムに関する研究

青木 義男（日大理工・教授）
邊 吾一（日大生産工・教授）

1 はじめに

近年、建築物の高層化や公共施設のバリアフリー化に伴って昇降機の設置台数は1980年代～90年代に増加の一途を辿り、図1に示すようにエレベータの保守台数は100万台に近づいている。また、これらの機械装置の高速化・多様化に伴って、構造や制御方式も複雑化し、駅舎や歩道橋など公共の場所への設置も増えていることから設置後の安全管理や保守点検が担う役割が大変重要になってきている。ところが、昨今、歩道橋設置昇降機での主索ストランド破断事故例など、昇降機での保守点検の不備による挟まれ死亡事故や落下事故、遊戯機械の強度部材折損による死亡事故など、重大な事例を含めた事故・故障が年間1000件近く発生しており、安全性能確保のための技術目標の確立と共に、安全性能評価法や維持保全技術の開発が緊急の課題となっている。

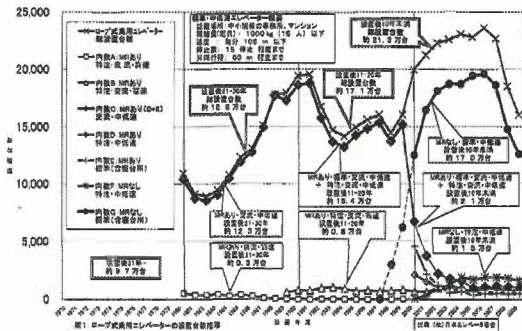


図1 エレベータの設置登録台数の推移

本研究は現行の昇降機・遊戯機械の定期検査制度における緊急課題と考えられる「構造健全性判断基準の定量化」を実施し、「常時の保守点検を支援する健全性評価システム」を開発することでこれらの安全性・信頼性向上を目指すものである。「構造健全性判断基準の定量化」については、昇降機の運用時の材料劣化、腐食、摺動部摩耗や締結部弛緩の許容量について、固体伝達波等から特徴抽出して得られる新たな物理量を定

義し、健全性判断基準について分析し、定期点検での的確な業務方法を提示する。また、「常時の保守点検を支援する健全性評価システム」の開発では、定期検査での予見が難しく、短期間に進行する材料劣化や異常摩耗、締結部弛緩などを検知する構造健全性評価システムの構築と実証実験を行い、保守点検の自動化を検討する。

2 昇降機ワイヤーロープの損傷検知試験

エレベータに用いられる鋼製ワイヤーロープは、軸となる繊維心にストランドという素線を撚り合わせたものを、さらにn本撚り合わせてできている。これをnストランドのワイヤーロープといい、エレベータでは一般的にn=6~8のものが使われている。損傷検知実験では図2右のように直径0.6mmの素線24本を1ストランドとし、これを6ストランドより合わせたワイヤーロープを用い、このワイヤーロープに切り込みを入れた試験体と、図2左のように素線が解けた状態を想定し、10mm程度の短い素線を埋め込んだものの2つの試験体を利用し損傷検知試験を試みた。

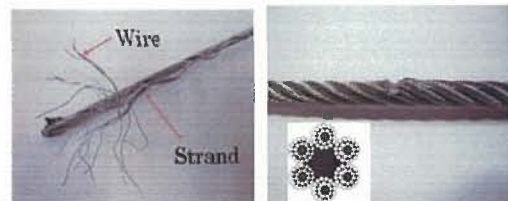


図2 鋼製ワイヤーロープ

まず、自走式検査機器を利用してロープに生じた損傷による応答加速度変動と共に、傷や錆によって生ずる漏洩磁束をワイヤーロープテストで計測し、それらの測定データに対し、信号処理を施して異常判断の可否を調べた。信号処理手法としては、周波数毎のパワースペクトルを分析する際に用いるFFT(高速フーリエ変

換)と、マザーウェーブレットと呼ばれる短い波形を拡大や縮小・平行移動させることで波形を表現するウェーブレット変換の双方で検討した。図3に応答加速度(a)と漏洩磁束強度(b)の計測結果を示す。図3より応答加速度の測定データ(元波形)からは、直接、素線破断や解けは検出し難いが、漏洩磁束強度からは素線破断や錆の発生部分についてもスペクトルの明確な変動が認められる。

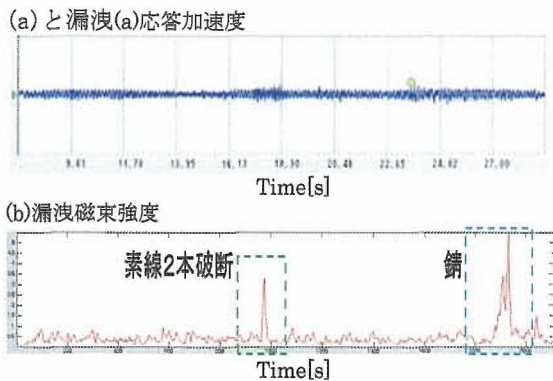


図3 応答加速度と漏洩磁束強度の時刻歴応答

3 信号処理手法

図3(a)の応答加速度の原波形では、損傷の有無、損傷箇所の同定が難しい状態である。そこで、2、3の信号処理手法により、応答加速度によるワイヤーロープの損傷検知の可能性について検討した。最初に計測した応答加速度データにおいて、損傷部分通過の際にスペクトル変動が確認された箇所に離散フーリエ変換を適用して周波数分析を実施し、損傷深さ0mm、0.9mm、1.5mm、1.8mmの試験体において、応答振動の主要な周波数帯域として測定された20Hzまでを拡大して、図4に示すヒストグラムに取り纏めた。

同図より20Hzまでの各周波数において、損傷によって加速度スペクトルの顕著な変動が確認されるのは、5~8Hzである。またこれ以外にも15Hz付近でパワースペクトルが大きく見られるが、これは損傷深さによる変化が少なく、またモータ振動のみのデータと比較したところ、自走型検査機器の駆動モータの振動成分であることが確認されたため、5~8Hzの加速度変動に注目すれば損傷が検知できる可能性がある。次に、同様の応答加速度をウェーブレット変換して帯域分析

した結果を図5に示す。ここで、一番上のsが原波形で、 $a_8, d_8 \sim d_1$ がウェーブレット変換した結果であり、下側が高周波領域の分析結果で、上にいくほど低周波領域の分析結果となる。図5より5~8Hzが含まれている d_7 (4~8Hz)の周波数帯域をみると右側の領域に一段と大きい波形が確認できるが、他の周波数帯域にはあまり変化は認められない。また、図6は損傷のないワイヤーロープの d_7 帯域の結果と図5の d_7 帯域を比較したものであるが、図6下の赤丸部分のスペクトル強度が顕著に大きいことが分かる。素線破断が1本でも存在する場合はどれも $0.2m/s^2$ を超える応答加速度が検出できた。つまり今回のエレベータモデルの構造ヘルスマonitoringに関する健全性判断の閾値は $0.2m/s^2$ 程度と推定される。但し、この健全性評価が利用できるのは、等速運動時の場合に限定され、自走式の計測機器の加減速時にも、図6左の赤丸のように応答加速度が閾値を超えている。これでは損傷による応答振動がその加減速の影響に埋もれてしまう可能性がある。

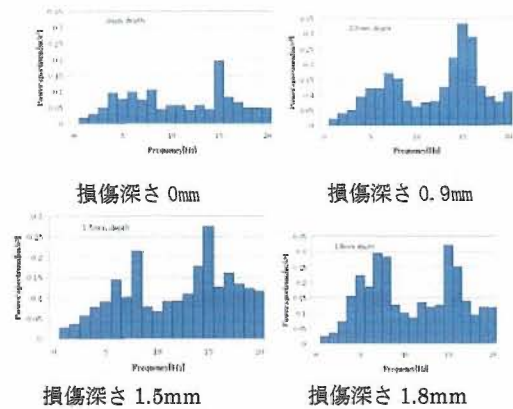


図4 FFT変換結果

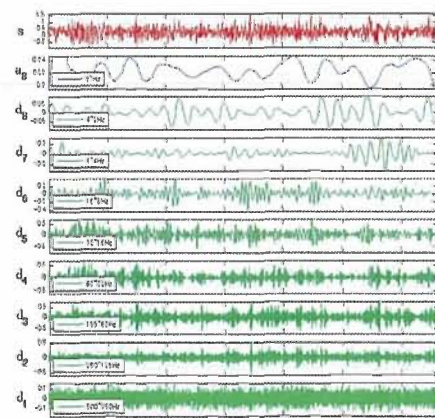


図5 ウェーブレット変換結果

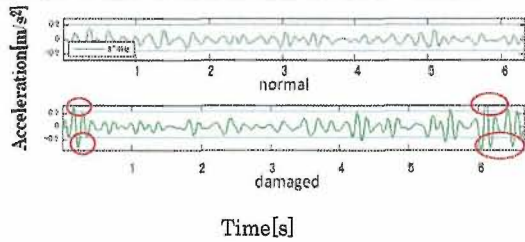


図6 ウェーブレット変換による健全時と異常時の比較

以上より、実際の昇降機で応答加速度による構造健全性評価を行う場合には、設置条件等によって異なる健全時の応答加速度を基準とし、初期損傷個所での加速度変動の特徴信号と閾値を規定することでワイヤーロープの損傷検知が可能と考えられる。

4 漏洩磁束強度によるワイヤーロープの健全性評価

次にワイヤーロープテストは、図7右に示すように素線破断部や変質部において発生する微小な漏洩磁束を高精度に検知する測定機器であるため、前述のように僅かな損傷や錆の発生箇所で明確な漏洩磁束強度の変動が確認できる。漏洩磁束強度の測定データをウェーブレット変換した結果を図8に示すが、最も低い周波数帯域 (a_4 : 130Hz 以下) に顕著なパワースペクトルの変動が認められており、変動幅の違いで素線破断と錆発生との相違も認識できる可能性がある。そこで、

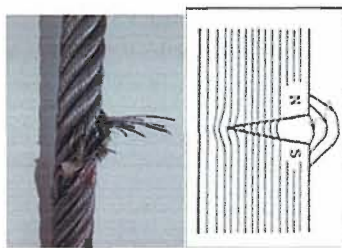


図7 ロープ素線破断と漏洩磁束の流れ

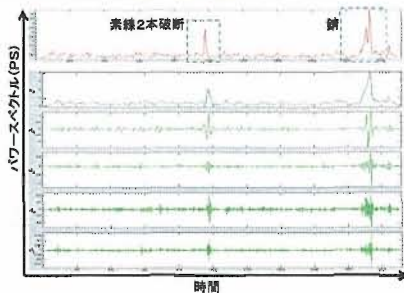


図8 漏洩磁束強度のウェーブレット変換結果

漏洩磁束強度と素線破断本数の関係を調べるため、初期的損傷に相当する素線破断本数 0~5 本までのワイヤーロープのパワースペクトルを測定した結果を図9に示す。この結果より、破断した素線の本数に応じて漏洩磁束強度が比例的に増大することが分かる。また、漏洩磁束強度のデータをウェーブレット変換した後の周波数帯域 130Hz 以下のスペクトルの変動量と変動域の幅については、素線破断と錆部分のより明確に認識できることも判明した。続いて、漏洩磁束強度とワイヤーロープ強度の関係を検証するため、素線破断を有するワイヤーロープの引張試験を行い、引張破断強度の変化を検証した。図10はワイヤーロープ引張試験結果の一例であるが、1 ストランド(素線 24 本)の半数以上の素線が破断するとワイヤーロープの強度が 20%程度低下することが確認された。これらの結果を元にワイヤーロープの引張強度低下率と漏洩磁束強度の関係を検証した。この結果、漏洩磁束強度はワイヤーロープの素線破断本数と共に比例的に増大するが、初期損傷の範囲(素線切れ 1~5 本程度)では引張強度の低下は顕著ではない。しかし、素線破断本数が 10 本近くなると引張強度は徐々に低下し、図11に示すように 9 本から 15 本程度では、概ね直線比例的な引張

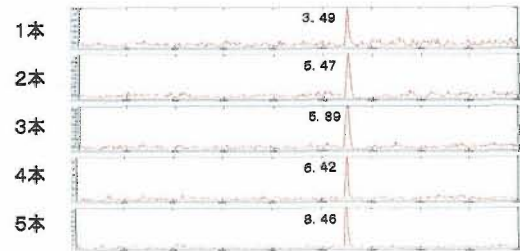


図9 素線切れの本数と漏洩磁束強度の関係

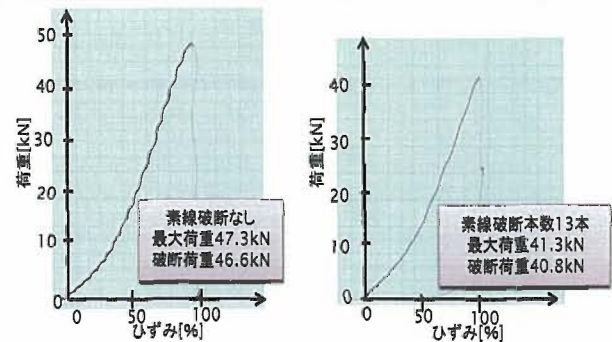


図10 ワイヤロープ引張試験結果

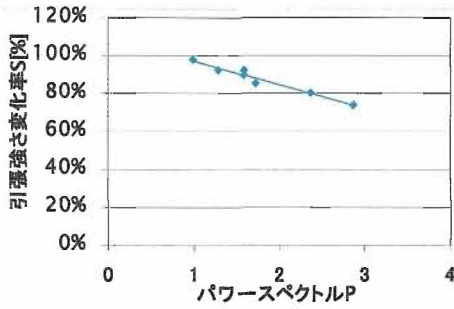
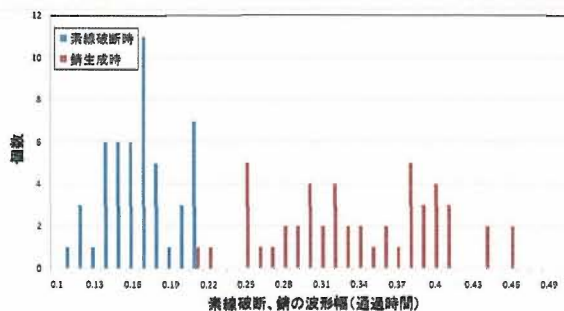


図 11 ワイヤロープ引張強度低下率と漏洩磁束強度の関係

強度の低下を示しており、測定された漏洩磁束強度の測定値から大よその引張強度低下率を推定できる可能性を示唆した。

5 ニューラルネットによるワイヤロープの損傷検知

鋼製ワイヤロープの初期損傷検知実験により、ワイヤロープセンサーによる漏洩磁束強度測定値から初期的素線切れのみならず、錆の発生部分を検出できる可能性が認められた。そこで、初期的損傷に相当する素線切れ1～5本と、錆発生の場合分けの自動認識の可能性を検討するため、ニューラルネットワークによる損傷検知と認知判断を試みた。図12は漏洩磁束強度の変動幅を特徴量として場合分けしたヒストグラムであるが、素線破断(左側分布)と錆発生部位(右側分布)が概ね判別可能であることが分かる。また、図9の結果からは漏洩磁束強度の変動量から、素線切れ本数の場合分けも可能性と考えられる。機械学習に用いたニューラルネットワークは、図13に示すように入力層に漏洩磁束強度(パワースペクトル)の変動量と変動幅を入力すると、出力層に素線切れと錆発生の場合分けと



実験結果における素線破断、錆の波形幅(通過時間)のヒストグラム

図 12 素線破断と錆発生の特徴抽出例

入力すると、出力層に素線切れと錆発生の場合分けと素線切れの場合はその本数を出力する2層構造で中間層10ニューロンの基本的な階層型とした。学習データは、初期の素線切れ(0～5本)と錆を発生させた7種類の試験片において計測した50回の漏洩磁束強度のデータのうちの40個を用い、素線切れなら「0」、錆発生ならば「1」を出力し、素線切れならばその本数「0～5」を出力するようプログラムを構成した。表1は学習させたニューラルネットに、測定データの残り10個の変動量と変動幅を入力し損傷推定を実施した結果であるが、表中2列目の出力値からも分かるように素線切れの本数もほとんど正確に推定していることが分かる。

6 結 言

鋼製ワイヤロープの初期損傷や錆発生を検知するために、加速度センサとワイヤロープテスタを用いた損傷検知実験を行い、特徴量抽出のための適切な信号処理手法や機械学習による認知判断の可能性を検討し、応答加速度や漏洩磁束強度の測定値から、ワイヤロープの初期損傷としての素線切れや錆の発生を、高い精度で検知可能であることを検証した。

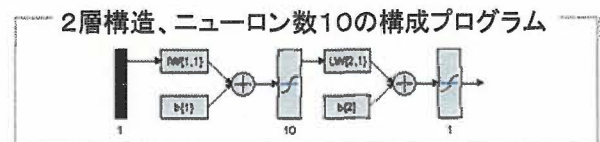


図 13 階層型ニューラルネットワークの構成

表 1 ニューラルネットによる素線破断推定結果

各40個の波形のPS最大値の平均値	学習後の出力値ごとの入力値の平均値	破断本数
0.979	0.982	0
3.486	3.297	1
4.820	4.968	2
6.390	6.268	3
6.455	8.262	4
8.391	9.039	5

7 参考文献

- 1) 新井泰平:「ウェーブレット解析の基礎理論」, 森北出版, pp22-23, 2000.