

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04672

研究課題名（和文）弾性波の伝播特性を利用した橋梁用免震ゴム支承の健全性評価指標の開発

研究課題名（英文）Assessment index for seismic isolation rubber bearings for bridges using the propagation characteristics of elastic waves

研究代表者

川崎 佑磨（Kawasaki, Yuma）

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：90633222

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：解析的検討では、検出された弾性波が、健全なゴム支承内部を伝搬した弾性波か、欠陥が存在するゴム支承を伝搬した弾性波かを教師学習により判定できる可能性を示した。実験的検討では、交通振動を模擬した繰返し圧縮載荷試験を行い、載荷試験中にAE計測を行った。AE計測結果から、せん断ひずみ量が多いほどAEヒット数が多いことが分かった。また、AEエネルギーと最大振幅値、AEエネルギーとRMS値で相関比較すると、せん断ひずみ量が多いほど両者の値が大きくなることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震では、ゴム支承の破断が初めて報告され、平成28年（2016年）熊本地震でもゴム支承の破断が報告された。令和6年能登半島地震でも複数のゴム支承の破断が報告されている。これらの破断原因について明確にされていないが、ゴム支承内部の劣化が原因の一つである可能性も挙げられている。また、ゴム支承が破断すると橋桁に作用する水平力を制御できなくなり、橋桁同士が衝突して復旧・復興活動にも大きな影響を及ぼす。ゴム支承の劣化は、橋梁の耐震性能の低下に繋がる重要な課題である。この成果は、地震によりせん断変形を受けたゴム支承の損傷評価にも活用することが可能である。

研究成果の概要（英文）：Analytical investigations showed the possibility of using supervised learning to determine whether the detected elastic waves propagated inside a sound rubber bearing or whether they propagated through a rubber bearing with defects.

In the experimental study, cyclic compression loading tests simulating traffic vibrations were conducted and AE measurements were conducted during the loading tests; the AE measurement results showed that the higher the amount of shear strain, the higher the number of AE hits. Correlation comparisons between AE energy and maximum amplitude values and AE energy and RMS values showed that the higher the amount of shear strain, the greater both values.

研究分野：維持管理

キーワード：橋梁用ゴム支承 AE法 損傷評価

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 全国的に社会基盤施設のさらなる強靱化が進められようとしている中、阪神・淡路大震災を契機に本格的に導入された橋梁用免震ゴム支承の劣化が報告され始めている。ゴムの劣化にはいろいろな種類があるが、屋外に設置されている場合は、紫外線劣化やオゾン劣化でゴム表面からひび割れる。このようなゴム支承は、目視点検で劣化を検出することが可能である。しかし、表面で観察できるひび割れがゴム支承内部のどこまで進展しているかは、目視では評価が困難である。また、長年の交通荷重の作用によってゴム内部が劣化したゴム支承は、周囲を被覆ゴムで覆われているため、目視点検による劣化の早期検出が困難である。

(2) 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震では、ゴム支承の破断が初めて報告され、平成 28 年(2016 年)熊本地震でもゴム支承の破断が報告された。これらの破断原因について明確にされていないが、ゴム支承内部の劣化が原因の一つである可能性も挙げられている。また、ゴム支承が破断すると橋桁に作用する水平力を制御できなくなり、橋桁同士が衝突して復旧・復興活動にも大きな影響を及ぼす。ゴム支承の劣化は、橋梁の耐震性能の低下に繋がる重要な課題である。一方で、ゴム支承の破断に至らなかった場合、橋桁をジャッキアップすることでゴム支承の変形は元に戻る。この時、地震時にゴム支承に対してどのくらいの水平力が作用していたかの確に把握することは困難であり、ゴム支承の継続的利用あるいは取替えの判断が困難であるのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、弾性波の伝播特性を利用して橋梁用ゴム支承の健全性評価方法を開発することを目的とする。この目的を達成するために、ゴム支承内部を伝播する弾性波の特徴量の把握、弾性波パラメータを利用した健全性評価指標の作成、に焦点を充てて研究を進める。特に、常時評価を可能とするために、車両などの交通振動を応用した健全性評価方法を構築することを目指す。

3. 研究の方法

(1) ゴム支承内部で発生した弾性波の伝播挙動については、反射や透過など複雑な経路を有すると考えられる。そこで、ゴム支承内部を伝播する弾性波経路および検出された弾性波特性値について解析的な検討を行う。ゴム支承内部を模擬したモデルで数値解析を実施することで、弾性波伝播経路を把握し、現地での計測方法や健全性評価指標の提案の基礎とする。弾性波の発生から検出までの伝播経路を実験的に確認することは非常に困難であるため、CIP(Constrained Interpolation Profile)法を用いて、反射や透過(吸収)などによる影響を 2 次元的に把握することが目的である。解析モデルは実験で使用した供試体を参考にしており、大きさは $180 \times 106 \times 180$ mm の直方体である。解析モデルに設定した座標軸を図 1、断面図を図 2、加振位置を図 3、観測位置を図 4 に示す。加振は、設定した加振点を中心とした半径 10 mm の円に、中心点で最大となり空間的にコサインカーブで小さくなる式で与えられる値を、 $t = 0$ における初期条件として与えた。点加振ではなく幅を持たせた滑らかな条件としたのは、数値解析的になるべく安定した解が得られるようにしたものである。

(2) ゴム支承内部から検出された弾性波の波形から抽出した特徴量(パラメータ)を利用した健全性評価指標の作成を試みる。鋼板による弾性波の反射の影響を受ける場合、「継続時間」が長くなり、その影響はセンサ位置と空洞(劣化・損傷)位置に依存すると推測さ

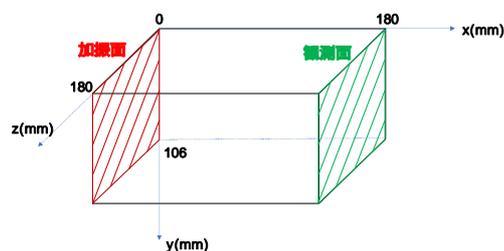


図 1: 解析モデルに設定した座標軸

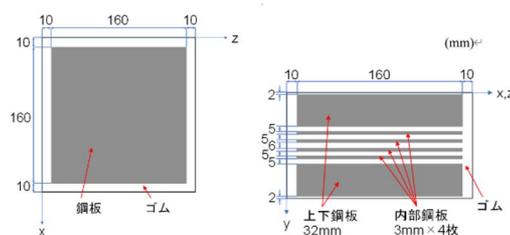


図 2: モデル図(左:側面, 右:平面)

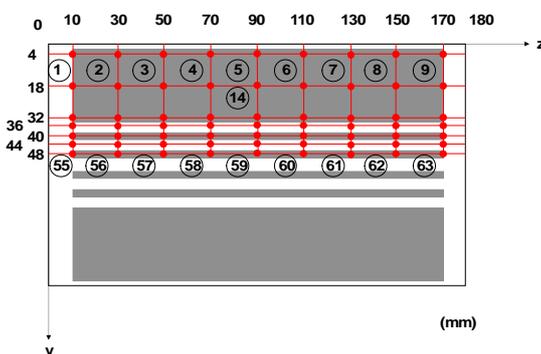


図 3: 加振位置

れる。また、空洞（劣化・損傷）の大きさは、「最大振幅値」と波形全体の包括面積を示す「エネルギー」に影響すると推測される。本研究では、実橋梁においてゴム支承が受ける交通振動を仮定して鉛直方向の繰返し圧縮載荷試験を実施し、その際にゴム支承が圧縮載荷・除荷されることによって内部の空隙が開閉することで弾性波が発生することを想定してAE計測を行った。繰返し圧縮載荷試験の概要を図4に示す。最低荷重値から最大荷重値までを10回の繰返しサイクルで載荷した。最低荷重値は、死荷重相当の支承設計値が面圧6MPaに相当する圧縮力とされている。よって本供試体では、153.6kN(=160mm×160mm×6MPa)に設定した。最大荷重値は、ゴム支承の一次形状係数によって決まる許容最大圧縮応力度から算出される。AE計測は、共振周波数60kHzのAEセンサを8個使用し、せん断試験で最も変形していると考えられる上鋼板と内部ゴムの高さに4個、下鋼板と内部ゴムの間の高さに4個設置した。AE計測状況を図5に示す。また、AE計測におけるしきい値は40dBとし、得られたAE現象のうち、AEパラメータのカウント数が1、AEエネルギーが0のAE現象と平均周波数30kHz~200kHz以外のAE現象はノイズとして除去した。

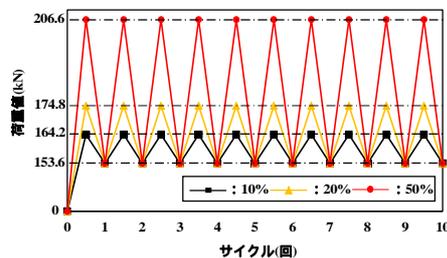


図4：繰返し圧縮載荷試験の概要



図5：AE計測状況

4. 研究成果

(1) ゴム支承内部の弾性波伝搬に関わる解析的検討の成果

機械学習を活用してゴム支承の内部損傷を検知する手法について検討を行った。ゴム支承の表面で加振して発生させた弾性波が支承内部を伝播する様子を、CIP法(Constrained Interpolation Profile Scheme)による数値解析で求めた。ゴム支承内部に損傷がない場合に、支承表面のさまざまな点において観測される波形データを数多く集め、それを健全データセットとした。その健全データセットを元に、機械学習における教師なし異常検知手法の一つである One Class Support Vector Machine (以下、OCSVM) によって学習を行った。異常値かどうかを判定するのに使うデータの特徴量として、スペクトル尖度、フーリエスペクトルの卓越振動数など20弱の指標を考えた。図6にその結果を示す。水色が健全データの分布で、茶色が損傷のあるデータの分布である。横軸が負の領域に損傷のあるデータが存在していることが、異常検知できたことを表している。内部損傷がある場合の解析結果を判定させると、いくつかのケースで異常と判定することができた。今後、より多くの健全データを収集するとともに実験データも学習させ、異常検知精度を向上させることが今後の課題である。

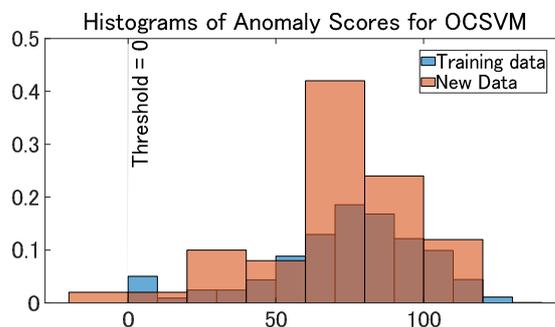


図6：異常検知の例

(2) 弾性波の波形から抽出した特徴量(パラメータ)を利用した健全性評価指標に関する成果

本研究で用いた供試体は、天然ゴムを使用した天然積層ゴム支承(以下、RBと示す)である。同じ諸元を有する荷重未載荷の供試体3体に対して表1のようにせん断試験を行った。1つ目の供試体にせん断ひずみ100%、2つ目の供試体にせん断ひずみ200%、3つ目の供試体にせん断ひずみ300%を加振し、加振回数は5回とした。これらの供試体に対して繰返し圧縮載荷試験を行い、AE計測を行った。AE計測結果として、AEヒット数とAEエネルギーの時刻歴変化に着目した。AEヒット数はAEセンサが弾性波を検出した数であり、発生したAE現象の多少を示す。AEエネルギーは包絡線波形の面積を表し、発生したAE現象のエネルギーを相対的に比較する。図7から、せん断ひずみが100%、200%、300%と増加するほど、検出したAEヒット数が増加していることがわかる。

表1：適用したせん断試験の概要

	せん断ひずみ	加振回数
供試体	100% (±35mm)	5回
供試体	200% (±70mm)	5回
供試体	300% (±105mm)	5回

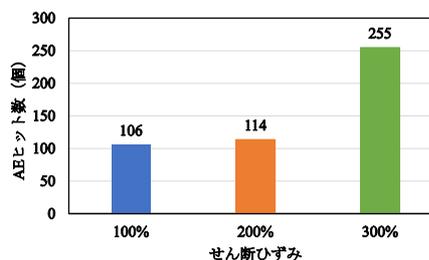


図7：AEヒット数の結果

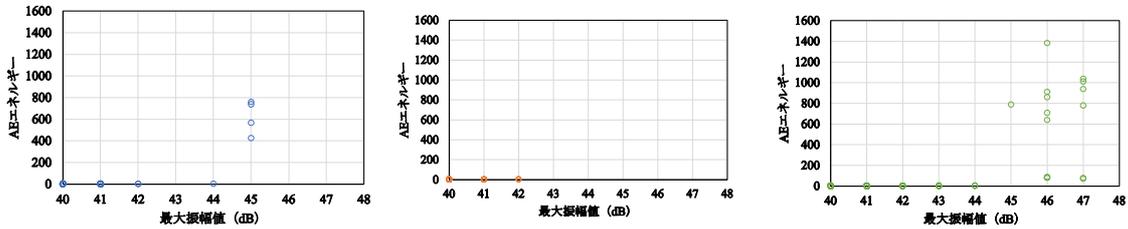


図 8 : AE エネルギーと最大振幅値の相関 (左 : 100% , 中 : 200% , 右 : 300%)

特にせん断ひずみ 300%では、せん断ひずみ 100%、200%の 2 倍以上の検出数を示している。せん断ひずみ 300%はせん断ひずみ 100%、200%と比較して、内部に損傷を蓄積していると考えられる。図 8 に AE エネルギーと最大振幅値の相関を示す。せん断ひずみ 300%の結果では、せん断ひずみ 100%、200%よりも、高い AE エネルギーおよび大きな最大振幅値の検出が確認された。

図 9 に AE エネルギーと RMS 値の関係を示す。RMS (実効値電圧)とは、波形の振幅を 2 乗して相加平均し平方根を求めた値で AE の発生率を評価するパラメータの一つである。せん断ひずみ 300%はせん断ひずみ 200%と比較すると、RMS が大きいことがわかる。また、せん断ひずみ 100%、300%でも検出されている AE エネルギー 800 程度の AE 現象については、せん断ひずみ 300%の方が高い RMS を示している。これより、せん断ひずみ 300%はせん断ひずみ 100%、200%よりも AE 発生率が高いと考えられる。以上より、最大振幅値と AE エネルギーの関係から、せん断ひずみ 300%はせん断ひずみ 100%、200%と比較して、最大振幅値と AE エネルギーともに大きいことが分かった。これらより、せん断ひずみ 300%は、せん断ひずみ 100%、200%と比較して、より内部に損傷を蓄積していることが考えられる。さらに AE エネルギーと RMS の結果から、せん断ひずみ 300%はせん断ひずみ 100%、200%よりも AE 発生率が高いことが分かった。これは AE ヒット数の増加と同様の結果であると考えられ、内部損傷の蓄積を示すと考えられる。

しかし、それらの差は顕著な差とは言えず、損傷領域から検出された弾性波であるかは、より詳細な研究が必要と考える。

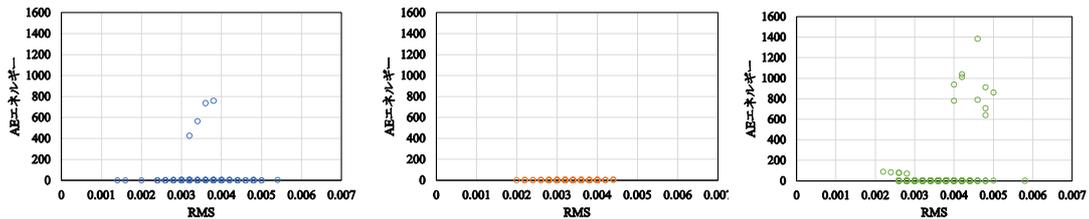


図 9 : AE エネルギーと RMS 値の相関 (左 : 100% , 中 : 200% , 右 : 300%)

せん断試験および AE 計測を行った後、これらのゴム支承供試体を切断して、マイクロスコブで内部の断面観察を行った。その結果、観察により発見できた損傷数を図 10 に示す。せん断ひずみの増加に伴って内部損傷の増加が確認され、せん断ひずみ 300%は最も損傷しているという結果が得られた。せん断ひずみ 200%はせん断ひずみ 100%より明らかに損傷が多い結果になったものの、AE ヒット数の結果ではせん断ひずみ 100%と 200%にはあまり差がなく、AE エネルギーと最大振幅値の結果ではせん断ひずみ 100%の方が 200%よりも大きな値が検出されたことから、AE 計測結果のみで内部損傷の増減を推測することは難しい。AE 計測で差が生じ始める損傷レベルが存在する可能性もあり、引き続き詳細な検討を進めていきたい。

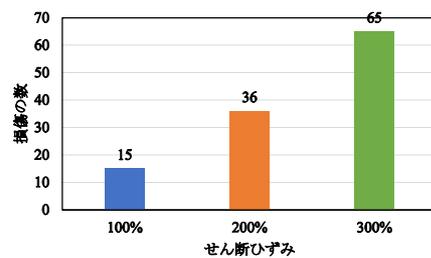


図 10 : ゴム支承内部の損傷数

せん断ひずみ 100%と 200%にはあまり差がなく、AE エネルギーと最大振幅値の結果ではせん断ひずみ 100%の方が 200%よりも大きな値が検出されたことから、AE 計測結果のみで内部損傷の増減を推測することは難しい。AE 計測で差が生じ始める損傷レベルが存在する可能性もあり、引き続き詳細な検討を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Kajiki, K. Ueda, K. Izuno and Y. Kawasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on Damage Evaluation of Laminated Rubber Bearings using AE Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 室田亮馬、川崎佑磨、井上和真、姫野岳彦
2. 発表標題 積層ゴム支承の残存耐震性能とAEパラメータの相関に関する研究
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 室田亮馬、川崎佑磨、井上和真、姫野岳彦、後智貴、井澤亮介
2. 発表標題 AE法を用いた高減衰積層ゴム支承の残存耐震性能の推定に関する試み
3. 学会等名 第43回地震工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森川康平、川崎佑磨、野村泰稔、伊津野和行
2. 発表標題 機械学習を活用したゴム支承の内部損傷検知に関する研究
3. 学会等名 第16回日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加治木悠斗、植田健介、伊津野和行、川崎佑磨
2. 発表標題 せん断ひずみを与えた積層ゴム支承の圧縮載荷時に得られたAE 特性に関する研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kajiki, K. Ueda, K. Izuno and Y. Kawasaki
2. 発表標題 Study on Damage Evaluation of Laminated Rubber Bearings using AE Method
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加治木悠斗、植田健介、伊津野和行、川崎佑磨
2. 発表標題 橋梁用積層ゴム支承のAE法による非破壊評価と断面観察に関する研究
3. 学会等名 土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------