

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 20 日現在

機関番号：14301
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009 ～ 2011
 課題番号：21760360
 研究課題名（和文）
 高振動数で起振可能なアクチュエータの開発と構造物の微小損傷検出手法の確立
 研究課題名（英文） Development of an actuator and structural damage detection technique for small damage using high-frequency excitation
 研究代表者
 古川 愛子（FURUKAWA AIKO）
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00380585

研究成果の概要（和文）：
 本研究では、超音波ほど高くはないが微動よりは高い振動数、具体的には数キロヘルツの高振動数で構造物を起振することによって、亀裂レベルの小さな損傷の検出と計測の効率化を同時に実現する損傷検出手法を開発することを目的とし、(1)高振動数で構造物を起振するアクチュエータの開発、(2)鋼板とコンクリート構造物を対象とした振動実験による現象の把握、(3)高振動数領域の解析に適したスペクトル要素法プログラムの作成、(4)スペクトル要素法を用いた損傷同定手法の開発と手法の有用性の検証、を実施した。

研究成果の概要（英文）：
 This study developed a structural damage detection technique using excitation at kHz-level frequencies, which is lower than ultrasonic wave and higher than ambient vibration, in order to detect small damage and realize effective measurement. An actuator excitable at kHz-level frequency is developed in the first year. Using this actuator, experiments were done using steel plates and concrete structures to understand the real phenomena. Then, the program of the spectral element method suitable for high frequency domain is developed. Finally, a computer program for damage detection using the spectral element method was developed, and the effectiveness was verified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：損傷検出, 構造物, アクチュエータ, 起振

1. 研究開始当初の背景

大地震後の構造物の被災度判定は、現状では専門家による目視によって行われているが、被災箇所や時間帯によっては目視の出来

ない場合があるので、目視によらずに損傷の有無を簡便に判定する手法の開発は重要な課題である。損傷によって構造物の振動特性が変化することは古くから知られており、振

動特性の変化を利用した損傷検出手法に関する研究は数多い。微動計測のような主に数～数十ヘルツの低い振動特性を扱う手法は、小さな損傷に対する感度が低いため、亀裂レベルの小さな損傷の検出には利用できない。一方、超音波探傷検査のような微小損傷に対して感度の高いメガヘルツの振動特性を扱う手法は、一度に診断できるエリアがクラック近傍などの非常に狭い領域であるので、構造物全体の健全度を即座に診断することは難しい。

2. 研究の目的

本研究では、超音波ほど高くはないが微動よりは高い振動数、具体的には数キロヘルツの高振動数で構造物を起振することによって、亀裂レベルの小さな損傷の検出と計測の効率化を同時に実現する損傷検出手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高い振動数で構造物を正確に起振する圧電型アクチュエータの開発

逆圧電効果を利用した圧電型アクチュエータのコントローラ部を開発する。市販の圧電型アクチュエータでは、本研究が想定する数キロヘルツの起振を行うことが難しい。そこで、アクチュエータのコントローラを、安価なマイクロコンピュータを用いて独自開発する。

(2) 高振動数領域の振動実験によるデータの蓄積と実現現象の把握

作成したアクチュエータを用いて、鋼板とコンクリート構造物を対象とし、損傷を与えない試験体と、損傷を与えた試験体を用意する。構造物がどのように振動するか、損傷によって応答はどのように変わるか、実現現象を系統的に整理する。応答は、時刻歴領域の分析だけでなく、周波数領域、時間-周波数領域にも変換して、様々な角度から分析し、実現現象を正しく理解する。

(3) 数値解析で高振動数領域の応答を精度良く再現するための数理モデルの構築

高振動数領域の応答を扱うため、有限要素法を用いた解析では非常に細かい要素刻みと時間刻みが必要になる。そこで、高振動数領域の解析に適した数値解析手法の導入を検討する。

(4) 高振動数領域の応答から損傷を検出するための逆解析プログラムの開発

損傷によって高振動数領域の応答が変化することを利用して、損傷を検出するための逆解析プログラムを作成する。

4. 研究成果

(1) 高振動数で起振可能なアクチュエータの作成

a) 概要

本研究では、逆圧電効果を利用した圧電型のアクチュエータを作成した。逆圧電効果とは、電圧を付加すると圧電素子自体が変形して力を発生する現象である。アクチュエータは、構造物を起振する加振部と、加振部を駆動するコントローラ部から構成される。加振部には、安価な圧電部品である圧電振動板を用いることとした。コントローラも、安価なマイクロコンピュータを用いて作成した。具体的には、想定する振動数の起振力を与えられるように、圧電振動板に加える電圧の周期を制御した。

b) 加振部

本研究では、圧電プザーに利用されている圧電振動板をアクチュエータの加振部に用いた。圧電プザーは、圧電素子と金属板を貼り合わせた圧電振動板のたわみ振動を発音源とするものであり、機器の操作確認音や時報、警報、スピーカー、電話機の送受信機などに幅広く応用されている。本研究では、このたわみ振動を振動源として用いる。圧電セラミックスの両面に電極を形成した圧電素子と、金属板を接着した比較的単純な構造をしている。圧電振動板の直径は 20mm、厚さは 1mm 程度である。圧電素子の対向電極間に電圧を印加すると、逆圧電効果により電気的な歪を生じる。円形の圧電素子の場合、径方向に圧電素子が伸び縮みする変位となる。しかし、圧電素子に接着されている金属板は伸縮しないため、圧電素子が径方向に伸びたり縮んだりするとき、圧電振動板は屈曲する。したがって、電極板に交流電圧を印加すると、圧電振動板の屈曲が起これば空気を振動させるので、空気中に音波が発生し、それが音として人間の耳に届くことになる。金属板を構造物に接着すれば、同様の原理で構造物を振動させることができると考えられる。

c) コントローラ部

コントローラは、マイクロコンピュータを用いて作成した。まず、圧電素子のマイナス側の電極をマイコンボードのグラウンド (GRD) に設置し、プラス側の電極を 5V の出力側に設置した。そして、高速で電流のオン/オフを繰り返した。オンの状態のとき、圧電振動板は歪んでおり、オフの状態のときは平らになる。このように、一定の時間間隔でオン/オフを繰り返すことによって、矩形波の電圧を圧電振動板に印加することができる。振動数 f (周期 $T = 1/f$) で構造物を起振したい場合は、オンとオフを $T/2$ 秒間ずつ交互に繰り返せばよい。一般に、大きな振動を発生さ

せるには、大きな電圧を印加する必要があるが、圧電振動板は幾何学的形状に基づく共振振動数を有しているため、共振振動数で電圧を変化させれば小さな電圧でも大きな振動を起こすことができる。本研究では、消費電力を抑えるために、電圧は5Vの一定値にし、圧電振動板の共振振動数に近い振動数で起振した。

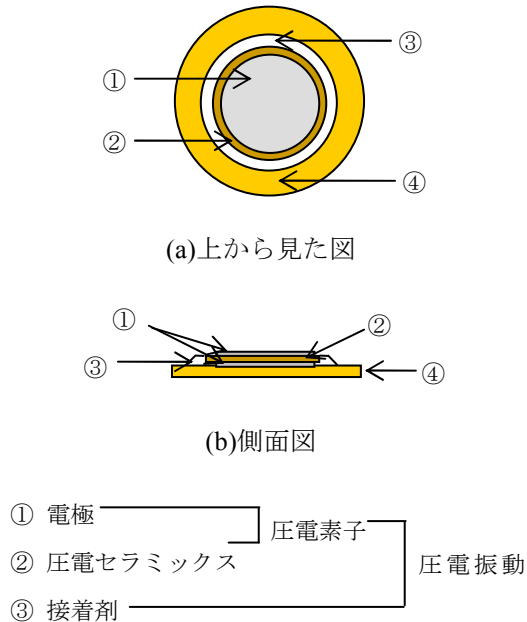
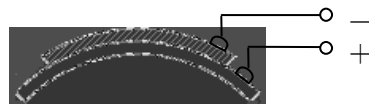


図-1 加振部（圧電振動板）の構造

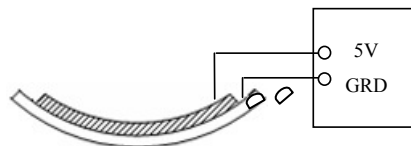


(a) 圧電素子が伸びたとき

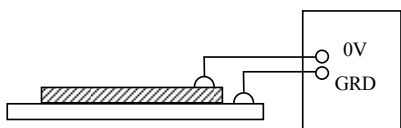


(b) 圧電素子が縮んだとき

図-2 加振部（圧電振動板）の動作原理



(a) 電圧を印加したとき（オン）



(b) 電圧を印加しないとき（オフ）

図-3 作成したアクチュエータの概念図

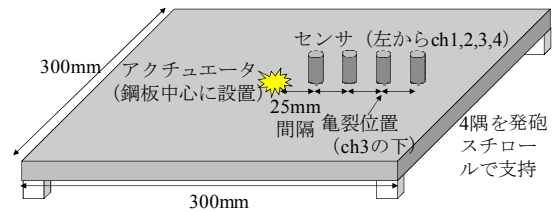


図-4 供試体、アクチュエータ、センサ、亀裂の相互関係

(2) 実験的検討

a) 供試体

供試体は、縦 300mm、横 300mm、厚さ 3.2mm の鋼板である。設置方法は、鋼板を伝播する弾性波だけを対象とするような理想に近い状態にするため、四隅に発砲スチロールを敷き、その上に鋼板を置いた。鋼板は、亀裂のない健全モデルと、中央から右側に 75mm 離れた位置に長さ 10mm の亀裂を与えた損傷モデル 1 と、長さ 50mm の亀裂を与えた損傷モデル 2 の 3 通りとした。亀裂の幅はいずれも 2mm である。

b) アクチュエータの設置

圧電振動板の金属板に比較的強力な両面テープを付けて鋼板の中心に接着した。円形の圧電素子のたわみ振動を加振源としているため、起振力の入力方向は 1 方向ではないが、複数の方向の応答加速度を比較した結果、主たる加振方向は圧電振動板の面に直交する方向であると判断した。

c) センサの設置

計測には、時刻同期の取れた圧電型の加速度センサを 4 つ用いた。センサの共振振動数は 55kHz で、フラットな振動数特性が保証されているのは 16.5kHz までである。このセンサを強力な両面テープを用いて供試体に接着し、鋼板の面に直交する方向の加速度を計測した。センサをチャージアンプに接続して増幅し、デジタルオシロスコープで波形を記録した。センサは、加振点（鋼板の中心）から右側に 25mm、50mm、75mm、100mm の 4 地点にライン状に設置し、それぞれのセンサを ch1、ch2、ch3、ch4 と呼ぶこととした。損傷モデルでは、亀裂（75mm 地点）の上に両面テープを貼ってセンサ（ch3）を設置した。アクチュエータで起振したときは、定常状態になってからの応答加速度を記録した。データのばらつきを調べるために、各ケース 5 回ずつ計測を行った。計測時間間隔は、アクチュエータで起振したときは 4 マイクロ秒とした。2500 ポイントのデータ数を記録した。

d) 損傷の有無の判断に用いる振動特性

起振振動数における応答加速度のフーリエ振幅と、フーリエ位相差の2つを損傷の有無を判断する指標として用いた。フーリエ位相でなくフーリエ位相差を用いた理由は、アクチュエータとセンサ間の時刻同期が取れていないためである。ch1のフーリエ位相との差を用いた。健全時と損傷時とで実験を行い、フーリエ振幅やフーリエ位相差に有意な差があるかどうかで損傷の有無を検出することとした。

e) 実験結果 (フーリエ振幅)

約 5500Hz~6100Hz の高振動数で鋼板を起振した場合、短い波長を励起させることができるため、いずれの振動数でも、健全時と損傷時とでフーリエ振幅に有意な差が生じ、50mm の亀裂を検出することが可能である。波長より短い 10mm の亀裂を検出するには、圧電振動板の共振振動数と鋼板の共振振動数の両方に近い約 5500Hz で鋼板を起振すればよい。なお、圧電振動板の形状を変更して共振振動数を高くすれば、より短い波長の振動を低電圧で励起することができるため、より短い亀裂の検出が可能になると期待される。

f) 実験結果 (フーリエ位相差)

フーリエ位相差はフーリエ振幅に比べ、計測毎のばらつきが大きく、損傷に対する感度が小さい。大きな加速度応答が得られた約 5500Hz と 6100Hz で起振した場合には、損傷モデル 2 の損傷を検出することができるが、損傷モデル 1 の損傷を検出することはできない。加速度振幅の小さい約 5860Hz で起振した場合は、計測毎のばらつきが大きいため、いずれの損傷も検出することができない。

g) 数値解析による損傷位置の推定に関する検討

鋼板については、数値解析も実施し、損傷の有無の検出だけでなく損傷位置の推定する方法についても検討を行った。

亀裂の位置が振動形状の山となる振動数で起振した場合、比較的大きなフーリエ振幅の変化が見られる場合があることがわかった。よって、ある振動数で起振したときにフーリエ振幅に大きな変化が検知出来たときに、その振動数において振動形状が山となっている地点に損傷があると疑うことによって、損傷箇所を推定することが可能であると考えられる。

フーリエ振幅の変化は、振動形状の山となっているところに大きく表れる傾向があることがわかったが、必ずしも亀裂箇所のフーリエ振幅が大きく変化するとは限らないため、フーリエ振幅が最も大きく変化した地点が損

傷箇所であると判断することはできないこともわかった。

h) RC 構造物を対象とした実験的検討

さらに、RC 構造物のひび割れ発生を検知できるかどうかの実験的検討も行った。具体的には、鉄筋コンクリート柱の静的水平載荷試験によって、ひび割れ発生時、鉄筋の降伏時、ポストピーク時等、様々なレベルの損傷を生じさせたものを対象とした。アクチュエータによって起振した結果、高振動数領域の応答が損傷によって変化し、アクチュエータを用いてひび割れ発生による振動特性の変化を検知できることを確認した。

(3) スペクトル要素法による損傷同定手法の開発

高振動数領域に適した数値解析手法について検討を行った。具体的には、スペクトル要素法に基づく損傷同定手法を提案した。高振動数領域を扱う場合、従来の変位を多項式で補間する有限要素法では要素分割を多くとらなければならなくなり、計算量が膨大になるという問題が生じる。一方、スペクトル要素法では、変位を振動数の関数で補間するため、要素分割を多くとる必要がなく高振動数で起振する場合に適しているといえる。まず、有限要素法とスペクトル要素法の比較解析を行い、高振動数起振におけるスペクトル要素法の優位性を示し、さらに、スペクトル要素法により、構造物の高振動数領域の振動特性が損傷によってどのように変化するかを明らかにした。スペクトル要素法に基づき、損傷を検出するための逆解析プログラムを作成した。起振・計測方法を様々に変え損傷同定の逆解析を行い、部材単位での局所損傷同定における高振動数起振の優位性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

(1) 古川愛子, 松尾卓弥, 西川晃司, スペクトル要素法を用いた高振動数起振による鋼トラス橋の損傷同定に関する研究, 第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, Paper No. 3-049, 2011 年.

(2) 古川愛子, 松尾卓弥, 西川晃司, スペクトル要素法に基づく高振動数起振による構造物の損傷同定について, 橋梁振動コロキウム 2011, 2011 年.

(3) 古川愛子, 梶田幸秀, 小野達也, 大塚久哲, 高振動数で起振可能なアクチュエータを利用した RC 構造物のひび割れ発生検知の可能

性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 2, pp. 943-948, 2011年6月.

(4)古川愛子，小野達也，大塚久哲，高振動数で起振可能なアクチュエータを用いた損傷の有無と位置の推定に関する検討，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) [特]地震工学論文集， Vol. 66, No. 1, 224-232, 2010年12月

(5)古川愛子，小野達也，大塚久哲，高振動数で起振可能なアクチュエータの作成と損傷に伴う鋼板の振動特性の変化に関する実験的検討，応用力学論文集，Vol. 13, pp. 985-996, 2010年3月.

〔学会発表〕(計 3件)

(1)松尾卓弥，古川愛子，西川晃司，スペクトル要素法を用いた高振動数起振による鋼トラス橋の局所損傷同定，第66回土木学会年次学術講演会，愛媛，I-270, 2011年9月.

(2)松尾卓弥，古川愛子，西川晃司，スペクトル要素法に基づく高振動数領域の振動特性を利用した構造物の損傷同定に関する研究，平成23年度土木学会関西支部年次学術講演会，I-26, 2011年6月.

(3)小野達也，古川愛子，大塚久哲，高振動数で起振可能なアクチュエータを用いた鋼板の損傷検出に関する基礎的検討，平成21年度土木学会西部支部研究発表会，熊本，I-36, 2010年3月.

6. 研究組織

(1)研究代表者

古川 愛子 (FURUKAWA AIKO)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00380585