

論文 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

古川 愛子*1・梶田 幸秀*2・小野 達也*3・大塚 久哲*4

要旨: 本研究では、高振動数領域の振動特性の変化を計測して RC 構造物のひび割れ発生を検知できるかどうか検討するため、RC 橋台模型の打撃試験と起振実験を行った。打撃試験より、ひび割れによって加速度波形とフーリエスペクトルに変化が見られ、数キロヘルツの振動特性が変化することを確認した。打撃の代わりに、圧電振動板をアクチュエータとして構造物に接着し、マイコンボードで電圧を負荷したところ、数キロヘルツの応答を励起することができた。起振振動数におけるフーリエ振幅がひび割れによって変化することを確認し、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がわかった。

キーワード: 損傷検知, RC 構造物, ひび割れ, 高振動数, 振動特性の変化

1. はじめに

維持管理を目的とした構造物の点検は主に目視によって行われているが、被災箇所によっては目視の出来ない場合があること、人為的な方法では迅速性に欠けるといった問題がある¹⁾。目視に代わる手法として、近年、MEMS と呼ばれる半導体技術を用いた安価な加速度センサと汎用マイコンボードを利用した振動モニタリングが注目を浴びている。構造物に取り付けたマイコンボード上で、加速度のリアルタイム計測と数値処理による被災度判定を行い、判定結果を無線で伝達するシステムなどが開発されており¹⁾²⁾、即時性において優れている。

固有振動数の変化を利用する手法は、構造物が損傷すれば剛性が低下し、固有振動数が低くなることを利用するものである。しかし、低振動数領域の振動特性を利用する手法は、余程大きな損傷でない限り振動特性に有意な変化が見られないので、ひび割れ程度の小さな損傷検出は困難であると考えられる。

地震最中のリアルタイム計測により、地震時に発生する塑性化の程度を推定する研究も行われている。論文¹⁾では、橋脚を単純な 1 自由度系に置き換え、復元力特性を完全弾塑性と仮定すれば、地震前後の固有周期の比率から最大応答塑性率が得られるとしている。数値解析のモデル化において、完全弾塑性で原点指向型の復元力特性を仮定しており、この仮定が成り立つのであれば塑性率を検出可能であることは明らかである。しかし、復元力特性が完全弾塑性の原点指向型に従わない場合、例えば仮に Masing 則に従う場合は、除荷時の勾配は初期勾配と同じであるため、塑性化が進んでも固有周期に有意な変化が見られるとは限らない。従って、地震前後の固

有周期の変化から必ずしも塑性率を推定できるとは限らない。これに対し、復元力特性を直接計測して塑性化程度を推定する試みもなされており³⁾⁴⁾、リアルタイム計測が可能であれば有効な手法であると考えられる。

本研究では、リアルタイム計測データが得られていない場合に、健全時と調査時点での振動特性の比較により損傷を検知する手法について検討する。具体的には、損傷に対する感度の高い高振動数領域の振動特性を利用する。打音検査のような打撃系の診断方法は、20kHz までの比較的高い振動特性を利用するものであり、コンクリートのひび割れ等の検出に実績がある⁵⁾ことから、打撃と同程度の高振動数を扱えば、ひび割れ検知が可能であると考えられる。人力による打撃の代わりに、打撃と同程度の高振動数で起振することのできるアクチュエータを用いて、ひび割れ発生を検知することを想定する⁶⁾。アクチュエータには圧電振動板⁷⁾⁸⁾を採用し、マイコンボードで電圧を負荷し、高速でオンオフを繰り返すことで数キロヘルツの矩形波で構造物を起振する。マイコンボードに加速度センサだけでなくアクチュエータも設置して構造物に取り付けておき、起振と計測を同時に行い高振動数領域の振動特性の変化を捉えることができれば、打音検査で検出可能なレベルの損傷を自動で検知できるようになると考えられる。

本論文では、静的載荷試験によってひび割れが発生した RC 橋台縮小模型を対象とし、高振動数領域の振動特性が変化するかどうかを、打撃試験と起振実験によって検証した。アクチュエータの起振振動数におけるフーリエ振幅の変化を捉えることで、ひび割れによる振動特性の変化を検知できるかどうか検討を行った。

*1 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 准教授 博(工) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程学生 (非会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 概要

RC橋台の抵抗特性の把握を目的として実橋梁の1/6寸法の橋台供試体を使用して静的載荷実験が実施された⁹⁾。本研究では静的載荷実験によって発生したひび割れによって数キロヘルツの高振動数領域の振動特性がどのように変化するかを検討するため、打撃試験と起振実験を行った。本章では実験概要を述べる。

2.2 静的載荷実験

(1) 供試体概要

供試体を図-1に示す。図-1はウイング部がある供試体であるが、ウイング部の無い供試体の実験も行った。供試体寸法を図-1に、物性値を表-1に示す。堅壁の鉄筋配置は以下の通りである。主鉄筋はかぶり厚が30mmで、径6mmのものが90mmピッチで17本、帯鉄筋は、堅壁の下から50mmの位置から、径6mmのものが100mmピッチで11本入っている。2本の油圧ジャッキでパラペットに水平載荷した。載荷断面は上部構造高さと同軸直角方向幅を実橋梁の1/6にした長方形断面(幅1.34m, 高さ0.32m)となっている。実橋梁の配筋状態を1/6スケールで再現することは不可能であるため、軸方向(鉛直方向)鉄筋は引張鉄筋比が実橋梁と供試体で一致するようにしてある。供試体は、フーチングをボルトで固定した。

(2) 静的載荷実験結果

図-2に、各モデルの載荷荷重とパラペット天端変位の関係と、ひび割れ確認や主鉄筋降伏などのイベントの発生点を示す。ひび割れについては目視による「確認」であるため、ひび割れが「発生」したのは図に示した地点より少し前と考えられる。図は省略するが、パラペット基部の鉄筋と堅壁基部の鉄筋のひずみの計測値より、最初の勾配変化点はおそらく、コンクリートのひび割れ損傷による剛性変化ではないかと考えられる。最初の勾配変化点以降、ウイングが有る場合と無い場合で荷重-変位関係は大きく異なる結果となった。ウイングが無い場合では、剛性はほとんど0となり、変位だけが增大する結果となったが、ウイングが有る場合については、ウイングの抵抗により、その後もある程度の剛性を保ちながら、明確な荷重最大点を取ることが分かる。

次節で述べる損傷検出のための加振実験は、図-2の荷重-変位曲線に●で示す4つの損傷レベルで行った。変位が増加する順に、intact(健全)、damaged1、damaged2、damaged3と呼ぶこととする。写真-1と写真-2に、各損傷レベルにおける損傷状況を示す。撮影部位は図-1に示す。ウイングが無いケースでは、堅壁に曲げひび割れが集中するのに対して、ウイングが有るケースでは堅壁の曲げひび割れだけでなく、供試体側面側のウイング部分にせん断ひび割れが多く発生している事が確認できた。

表-1 実験供試体のコンクリートの物性値

モデル名	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)
ウイング無	2.27	2.55E+04	28.8	2.4	3475	2191
ウイング有	2.23	2.71E+04	31.5	3	3614	2279

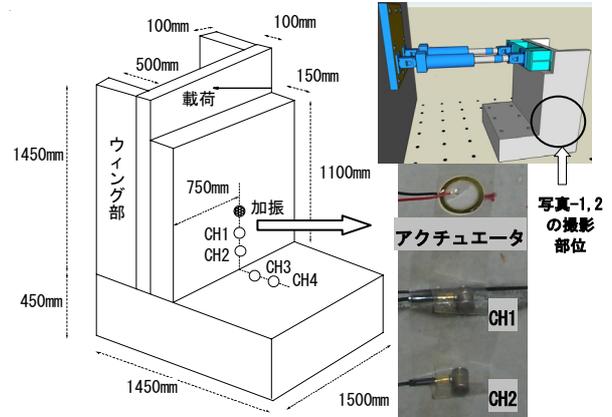
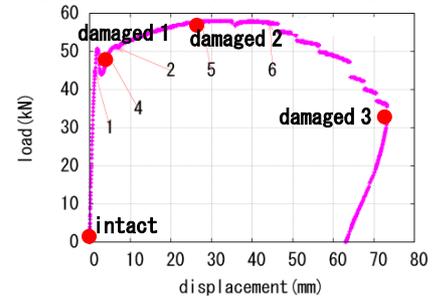
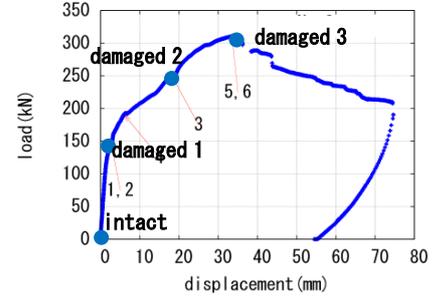


図-1 実験供試体の概要 (ウイング有モデル)



(a) ウイング無モデル



(b) ウイング有モデル

- ①パラペット基部ひび割れ確認 ②堅壁基部ひび割れ確認
③ウイング部ひび割れ確認 ④堅壁基部前面主鉄筋降伏
⑤最大荷重 ⑥堅壁基部背面主鉄筋降伏

図-2 荷重-パラペット天端変位関係



(a) damaged1

(b) damaged2



(c) damaged3

写真-1 橋台基部のひび割れ状況 (ウイング無)

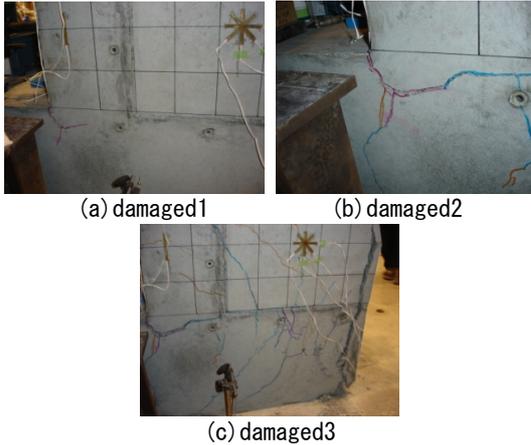


写真-2 橋台基部のひび割れ状況 (ウイング有)

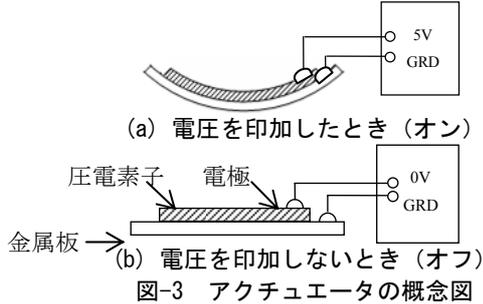


図-3 アクチュエータの概念図

2.3 振動実験 (打撃試験, 起振実験)

(1) 振動実験概要

4つの損傷レベルに対して、打撃試験と起振実験を行った。打撃試験では、コンクリートを傷つけないために直径約30mmのプラスチック製の棒で打撃した。起振実験では、電圧を付加すると圧電素子が変形して力を発生する逆圧電効果を利用した圧電型のアクチュエータ⁶⁾を用い、数キロヘルツの高振動数で起振した。

(2) アクチュエータ⁶⁾⁷⁾⁸⁾

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。加振部には圧電ブザーに利用されている圧電振動板を用いた。圧電ブザーは、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、本研究ではこのたわみ振動を振動源として用いる。コントローラは、マイクロコンピュータ ATmega168 を用いて作成した。

図-3にアクチュエータの概念図を示す。斜線部は圧電素子、白色部が金属板である。圧電振動板の直径は20mm、厚さは1mm程度である。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。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、円形の圧電素子の場合は径方向に圧電素子が変形することとなる。しかし金属板は伸縮しないため、圧電素子が径方向に変形したとき圧電振動板は屈曲する。すなわち、オンの状態のとき圧電振動板は図-3(a)

のように歪み、オフの状態のときは図-3(b)のように平らになる。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。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。

圧電振動板の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、電圧を5Vにし、圧電振動板の共振振動数(約6.1kHz)に近い振動数で起振した。印加電圧が一定であるので同じ振動数に対する起振力は常に同じである。供試体への接着は、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接着した(図-1)。

(3) センサ

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。センサを強力な両面テープを用いて供試体に接着し、さらに上からテープで固定した(図-1)。設置面に直交する方向の加速度を計測した。計測時間間隔は4μ秒とし、2500ポイントのデータを取得した。

(4) 供試体, 加振点, 計測点の相互関係

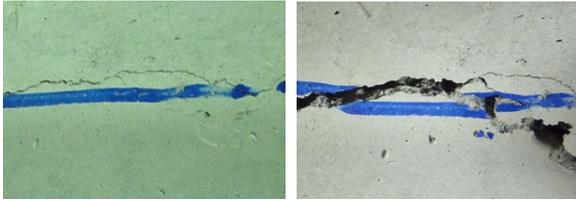
加振点と計測点の配置を図-1に示す。堅壁の前面(載荷側)に設置した。基部中央を基準として、150mm上方に加振点、100mmと50mm上方にCH1とCH2のセンサを設置した。フーチング側では、基部中央を基準として50mmと100mm離れた地点にCH3とCH4のセンサを設置した。鉄筋と各CHの位置関係であるが、各CHの下に主鉄筋(かぶり厚30mm)が配置されており、帯鉄筋はCH2と加振点位置に配置されている。

3. ウィング無モデルの振動実験結果

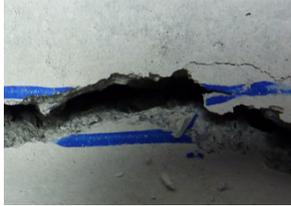
3.1 ひび割れ状況

供試体側面のひび割れ状況を写真-1に示す。写真-3には、CH2とCH3の間(堅壁とフーチングの接合部)に生じたひび割れを示す。写真-3中央部の上方に加振点とCH1,CH2が、手前側にCH3とCH4が位置する。ひび割れは橋台基部に全幅に渡ってほぼ一様に発生した。

載荷が進むにつれて、damaged1において確認できるひび割れが形状を保ったまま、ひび割れ幅が増大していることが見て取れる。図-2より損傷状況を確認すると、damaged1では既に堅壁基部前面主鉄筋が降伏しており、堅壁基部およびパラペット基部においてひび割れが確認されている。damaged2は最大荷重点、damaged3は堅壁基部背面主鉄筋が降伏した後の状態である。即ち、damaged1のひび割れ幅は小さい(写真-3(a))ものの、ひび割れ長さは橋軸方向堅壁幅の8割程度にも及んでおり(写真-1(a))、大きな損傷状態である。



(a) 荷重 51.0kN, ひび割れ幅 0.5mm 以下 (damaged1) (b) 荷重 57.25kN, ひび割れ幅 5mm (damaged2)



(c) 荷重 35.5kN, ひび割れ幅 11mm (damaged3)
写真-3 基部のひび割れ状況 (ウイング無)

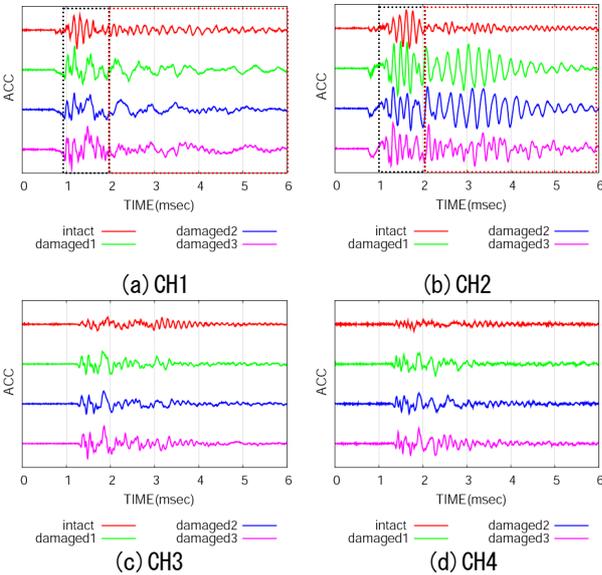


図-4 打撃による応答加速度時刻歴 (ウイング無)

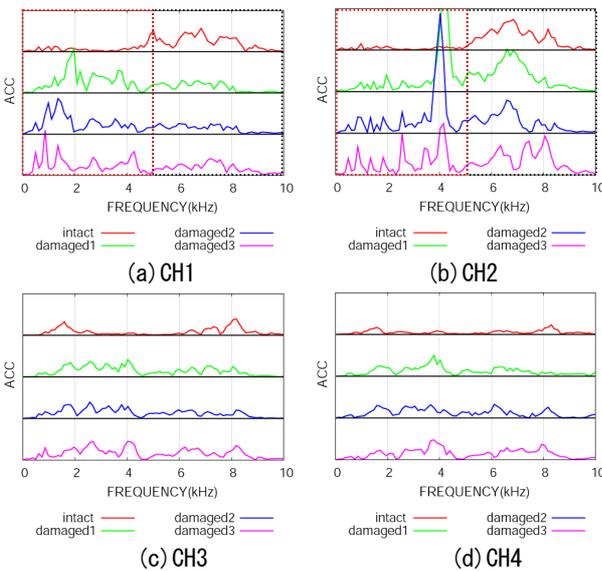


図-5 打撃による応答加速度フーリエスペクトル (ウイング無)

3.2 打撃試験結果

(1) 応答加速度

図-4, 5 に、打撃による応答加速度の時刻歴波形とフーリエスペクトルの形状が、損傷に伴ってどのように変化したかをセンサ毎に示している。波形形状に着目することを目的とするため、振幅のスケールの図示は省略するが、全て同じスケールで振幅調整している。

図-4 (a) (b) に示す壁壁に設置した CH1, CH2 の加速度波形について考察する。intact では、約 1~2msec で振動数の高い波形が見て取れるが、約 2msec 以降では振幅が小さい。一方、damaged1,2,3 では、約 1~2msec で振動数の高い波形が表れ、約 2msec 以降ではそれより低い振動数の波形が見て取れる。CH1, CH2 ほど顕著ではないが、フーチング上に設置した CH3, CH4 の加速度波形も intact と damaged1,2,3 を比較すると波形の形状が異なっているのが見て取れる (図-4 (c) (d))。CH 間で比較すると、打撃した壁壁上に設置した CH1 と CH2 の差異が最も明瞭である。

ひび割れによる差異は、図-5 のフーリエスペクトルにも表れている。図-5 (a) より、損傷を負うごとに CH1 のフーリエスペクトルの卓越振動数が低振動数側へシフトしており、スペクトル形状が明瞭に変化していることがわかる。卓越振動数が低くなったのは、ひび割れの発生により見かけの剛性が小さくなったためと考えられる。図-5 (b) より、CH2 は damaged1 と damaged2 において intact では見られない約 4kHz のピークが見られ、図-4 (b) の約 2msec 以降の成分に対応すると考えられる。損傷後、CH1 では約 1~2kHz の成分が、CH2 では約 4kHz の成分が大きくなっており、センサの位置によって卓越する振動数成分が異なるのは、振動数によってモード形状が異なるためである。図-5 (c) (d) のフーチング上のセンサのフーリエスペクトルからは、卓越振動数のシフトは見取れないが、intact と damaged1,2,3 とで異なる形状であることは見て取れる。

(2) 損傷による振動特性変化

図-6 に intact と damaged1 の CH2 で得られた応答加速度のウェーブレットを示す。連続ウェーブレット変換により求めたもので、マザーウェーブレットにはウェーブ数 6 の Morlet ウェーブレットを用いた。図-6 (a) より、intact について、図-4 (b) に示す CH2 の約 1~2msec の波形は図-5 (b) の約 5~10kHz の振動数成分に対応していることがわかる。図-6 (b) より、damaged1 について、図-4 (b) に示す CH2 の約 1~2msec の波形は図-5 (b) の約 5~10kHz の振動数成分に対応しており、図-4 (b) の約 2msec 以降の波形は図-5 (b) の 5kHz 以下の成分に対応していることがわかる。図は省略するが、CH1 のウェーブレットから、図-4 (a) に示す約 2msec 以降の波形は図-5 (a) の約 2kHz

以下の成分に対応していることがわかった。

損傷による振動特性の変化について見てみると、時刻歴波形では、初期の1~2msecの波形よりも2msec以降の波形に差が大きく見られ、この理由は時間が経過するほどひび割れ部を取った成分を多く含むため差が見られるものと考えられる。また周波数領域では、ひび割れの発生により見かけの剛性が小さくなるため、卓越振動数が低振動数側へシフトする傾向が見て取れた。intact と damaged1 の差は CH1 と CH2 に明瞭に表れた。damaged1 と damaged2 の差は、CH1 の卓越振動数の低下に表れている。damaged 2 と damaged 3 の差は CH1 の卓越振動数の低下と、CH2 の 4kHz 成分の減少に表れている。この中で damaged1 と damaged2 の差が小さいのは、damaged2 で明瞭に見て取れるひび割れ（写真-1 (b)）は、既に damaged1 においてその輪郭が薄く確認できる（写真-1 (a)）ことから、ひび割れ形状が似ているためと考えられる。damaged3 は damaged2 に比べてひび割れ幅が大きく、振動特性が damaged1,2 に比べて異なるものになったと推察する。

3.3 起振実験結果

次に、圧電振動板を高振動数で起振し、起振振動数における振幅が損傷によってどのように変化するか調べた。マイコンボードからの微弱な電圧で大きな起振力が得られる圧電振動板の共振振動数周辺の、5.5kHz、5.9kHz、6.1kHzの3通りで起振を行った。

図-7に、起振振動数における振幅が、損傷とともにどのように変化したかを示す。横軸はセンサ名、縦軸がフーリエ振幅である。電圧は5Vと微弱ではあるが、いずれの振動数においても、intact と damaged 1 の間で振動特性に有意な差が見られ、特にひび割れの発生した基部に近い CH2 の変化が大きい。damaged 1,2,3 モデル間で比較すると、5.9kHz と 6.1kHz で起振した場合は損傷による振幅の変化は明瞭ではないが、5.5kHz で起振した場合は CH2 の応答に大きな変化が見られており、振動特性を変化させるひび割れが起こったと判断することは可能であると考えられる。フーチング上の CH3 と CH4 の振幅は小さく、損傷による有意な差は見られない。なお、いずれの計測も5回ずつ計測を行い、その平均値をとっている。計測毎のばらつきは損傷による変化よりも小さいことを別途確認している。CH1 と CH2 の応答が影響を受ける理由は、CH2 と CH3 の間にあるひび割れ部によって高次モードの振動特性が変化したためであると考えられる。

以上のことから、堅壁上でひび割れの発生し易い基部の近くにセンサを設置して、複数の高振動数で起振すれば、いずれかの振動数に対するフーリエ振幅が変化すると考えられ、ひび割れの検知が可能であると考えられる。

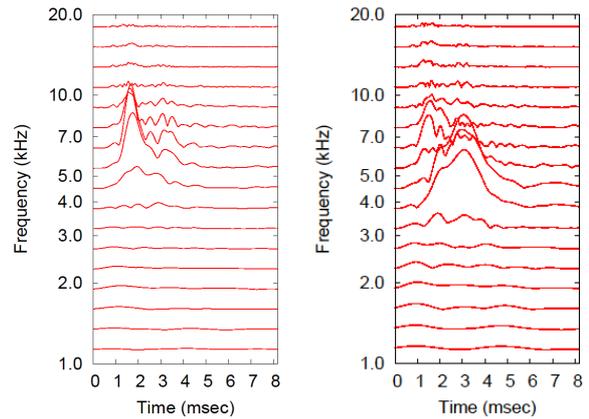


図-6 打撃による CH2 の応答加速度のウェーブレット (ウイング無)

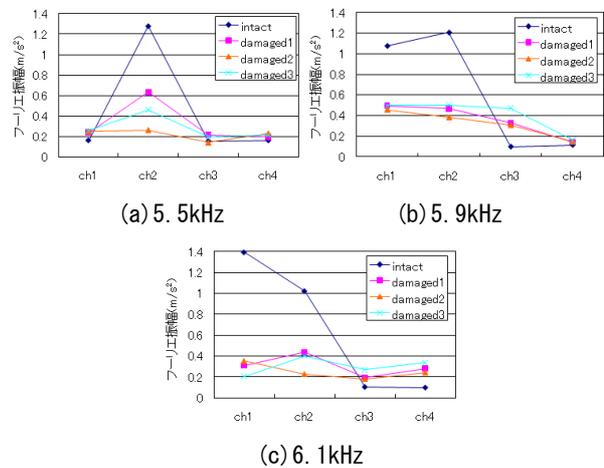


図-7 起振振動数における応答加速度のフーリエ振幅 (ウイング無)

4. ウィング有モデルの振動実験結果

4.1 ひび割れ状況

ひびわれ状況を写真-2に示す。CH2 と CH3 のセンサ間のひび割れ幅は、damaged1 では0.5mm以下、damaged2 では3mm、damaged3 では8mmであった。写真-3と同様に、ひび割れは橋台基部に全幅に渡ってほぼ一様に発生した。各損傷モデルは、図-2の荷重-変位曲線上の●の位置に対応する。

4.2 打撃実験結果

ウィング無モデルの結果と同様に、ひび割れによる応答の差は CH3 と CH4 よりも CH1 と CH2 に明瞭に表れていたため、ここでは CH1 と CH2 の応答加速度のみを図-8,9に示す。

図-8の時刻歴波形より、ひび割れの影響を多く含むと考えられる約2msec以降の形状が損傷の存在により大きく変わっている。図-9のフーリエスペクトルの比較より、ひび割れにより卓越振動数が低くなる傾向も見取れる。

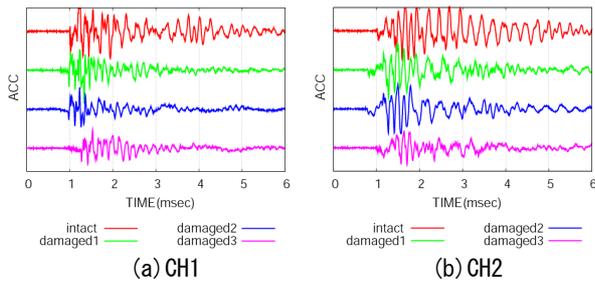


図-8 打撃による応答加速度時刻歴 (ウイング有)

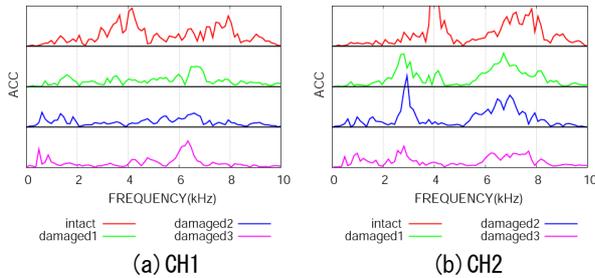


図-9 打撃による応答加速度フーリエスペクトル (ウイング有)

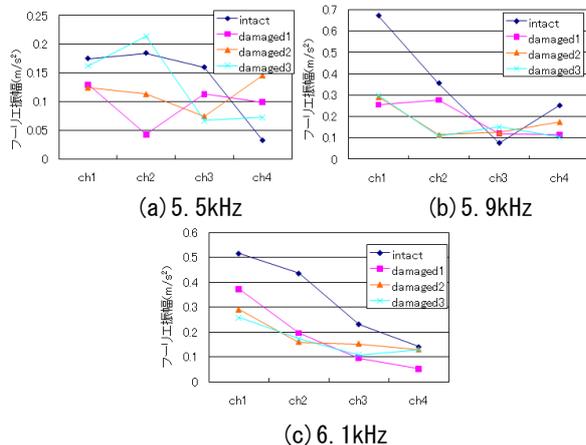


図-10 起振振動数における応答加速度のフーリエ振幅 (ウイング有)

4.3 起振実験結果

図-10 に、起振振動数における振幅が、損傷とともにどのように変化したかを示す。横軸はセンサ名、縦軸がフーリエ振幅である。ひび割れの進展に伴い、フーリエ振幅が変化していることが見て取れる。ウイング無のケースでは縦壁にひび割れが集中したのに対して、ウイング有のケースでは縦壁の曲げひび割れだけでなく供試体側面のウイング部分にもせん断ひび割れが多く発生したため、CH2 だけでなく CH1 の応答にも損傷による差が明瞭に表れている。いずれの振動数においても、intact と damaged1 のフーリエ振幅の差異、damaged1 と damaged 2 の差異は見取れる。damaged 2 と damaged 3 の差異は、5.5kHz で起振したときに最も大きく表れた。以上のことから、出来るだけ多くの種類の振動数で起振して応答を比較することによって、損傷検出の見逃しを減らす事が可能になると考えられる。

5. まとめ

打撃試験と数キロヘルツの高振動数で起振可能なアクチュエータを用いた起振実験を行った結果、RC 橋台のひび割れによって高振動数領域の振動特性が変化することを確認できた。アクチュエータとセンサをセットで構造物に取り付けておけば、定期点検や緊急点検の際に自動で起振と計測を行い損傷に敏感な高振動数領域の振動特性を捉えることが可能であるため、点検員が現場に行かず健全度の自動診断が可能になる可能性があると考えられる。

本研究で扱った供試体は、既往の研究などで採用されている直方体の供試体⁵⁾と違い、より現実の構造物に近い形状である。そのため、振動特性が複雑で、ひび割れによる振動特性の変化に関する定性的な傾向を捉えることが困難であった。今後はより単純な供試体を用いて高振動数領域の振動特性変化のメカニズムを詳細に検討する予定である。

謝辞 本研究は科学研究費補助金 (課題番号 21760360) の援助を受けました。

参考文献

- 1) 小林寛, 運上茂樹, 加納匠: 加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 2005.08.
- 2) 小野祐輔・清野純史・小林望・新垣芳一・高橋天平: 小型センサーを用いた構造物の地震被害の即時判定法の提案, 土木学会地震工学論文集, Vol.30, 2009.12.
- 3) 本多弘明, 堀宗朗: 地震被害応急判定を目的とした構造物の復元力特性の計測方法の開発, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009.12.
- 4) 竹渕悟, 小国健二: 加速度計のみを用いた構造物の復元力特性計測の可能性の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.53, I-032, 2008.09.
- 5) 伊東良浩, 魚本健人: ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁の打撃音, 土木学会論文集, No.564/V-35, 169-176, 1997.05.
- 6) 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, 2010.08.
- 7) 村田製作所: Piezoelectric sound components, <http://www.murata.co.jp/catalog/p43j6.pdf>, 2003.
- 8) FDK CORPORATION: 圧電ブザー注意書き, <http://www.fdk.co.jp/cyber-j/pdf/bz-caution.pdf>, 2008.
- 9) 梶田幸秀, 内海寿紀, 大塚久哲, 田崎賢治, 曳野誠也: 1/6スケール橋台供試体の静的載荷実験とシミュレーション解析, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 2010.11.