

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 5 月 31 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560609

研究課題名（和文） 高周波加振に伴う固有振動数の変化を利用した鉄筋コンクリート構造の
損傷診断法の開発研究課題名（英文） A novel damage detection technique of reinforced concrete structure
on higher frequency dependency of natural frequency

研究代表者

金澤 健司（KANAZAWA KENJI）

（財）電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員

研究者番号：00371435

研究成果の概要（和文）：構造ヘルスマモニタリングは、大地震後における建物の継続使用性を診断するための技術であり、既往研究では損傷によって建物の動的特性が変化する現象が基本原理とされてきた。本研究では、鉄筋コンクリート構造部材の共振振動数が高周波振動によって変化する現象を模型実験によって分析し、この現象が健全時の動的特性に係わる事前情報が無い場合であっても建築物の構造性能が診断できる技術の基本原則となりうることを示した。

研究成果の概要（英文）：Structural health monitoring is expected to be a next generation technology for judging whether a quake-stricken building can be continuously used or not, whose basic principle has been that the dynamic properties change with structural damage in the previous studies. This study experimentally clarifies the changes in resonance frequency of reinforced concrete members due to high-frequency vibration, and also shows that these changes can be a basic principle of structural health monitoring applied even when a priori data of dynamic properties in the healthy state are not obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010 度	700,000	210,000	910,000
2011 度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料、構造ヘルスマモニタリング、保全技術、非破壊検査、損傷検知

1. 研究開始当初の背景

(1)1995 年阪神淡路大震災の発生以降、建築物の耐震性能への要求性能として、倒壊を防止し人命を保護するだけでなく、機能維持や修復性などの建物を継続して使用するための構造性能の確保が社会一般のニーズとして強いことが明らかとなった。このような大地震後の建物の継続使用性を判断するため、

あるいは近い将来に発生が危惧される大地震に対する安全性を検討するためには、既存建物の現状における損傷・劣化状態や構造性能を知ることが必要である。以上の背景の下で、構造ヘルスマモニタリングや非破壊検査など、構造健全性診断に関する研究が盛んに実施されている。しかし、従来研究されてきた診断技術は、健全時と評価時点での構造指標を比較するという手段を採るものがほとん

どであり、評価開始時に既に深刻な損傷を有するかもしれない構造物には適用できない。

(2) 研究代表者らは、以前の科研費研究『RC造建築物を対象とした固有周期の日変動メカニズムの解明と早期劣化診断への応用（若手研究(B)，課題番号 16760467，期間 2004～2005 年度）』において、鉄筋コンクリート柱を対象とした実験を行い、温度荷重を付与した直後の固有振動数が健全時には増加し、損傷後には減少する現象を確認し、評価時点の測定データのみから RC 構造の健全性診断が原理的に可能であることを示した[1]。

このメカニズムは、コンクリートの内部の健全時にも存在する空隙（本報告ではボイドと称する）の開閉とその開閉による剛性変化に起因すると考えられている[1]。このメカニズムを利用した診断法は、健全時の動的特性などの事前情報を必要としないため、従来技術では困難であった評価開始時に深刻な損傷が有る場合にも適用できる。しかし、温度荷重が作用するまでの時間が必要であり、診断に時間を要するという欠点があった。

(3) 健全時にも存在するボイドを開閉させて鉄筋コンクリート構造の剛性を変化させる方法として、温度荷重の代わりに高周波振動を使用することも考えられる。高周波振動であれば、鉄筋コンクリート部材にはほぼ瞬間的に応力やひずみを伝達することができるので、短時間で診断できる技術の基本原則となる可能性がある。しかし、通常の構造設計や耐震設計において高周波振動は支配的な荷重とはならないため、高周波振動が鉄筋コンクリート構造の剛性や固有振動数に与える影響を検討した先行研究は見当たらない。

(4) 参考文献

[1] 金澤健司：コンクリート系建物の固有振動数の日変動メカニズムの解明，日本建築学会構造系論文集，第 612 号，pp. 63-71，2007. 2.

2. 研究の目的

事前情報を必要とせず、かつ短時間で診断結果が得られる構造ヘルスマモニタリングの基本原則を探索するため、鉄筋コンクリート構造を対象として損傷と固有振動数の高周波依存性の関係を実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 実験の全体概要

鉄筋コンクリート柱材を模した試験柱を対象として、試験柱の曲げ振動モードに対する固有振動数の高周波振動依存性を評価した。評価にあたっては、試験柱の軸方向応力

表 1 試験柱のコンクリート材料

RC種類	圧縮強度 (MPa)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)
RC①	31.65	13	6	65	51.6
RC②	24.28	16	4	75	51.6

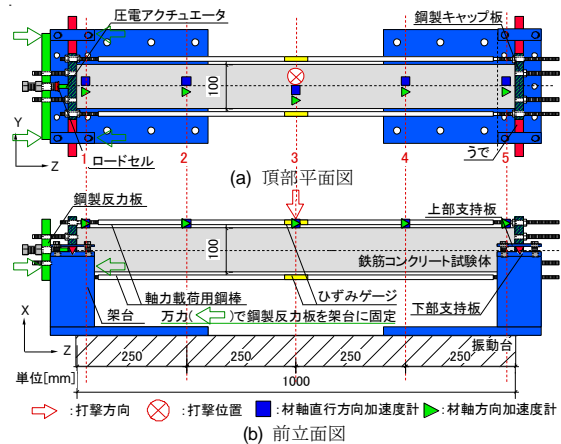


図 1 試験柱とセンサの設置／固定状況

と損傷度をパラメータとした。このうち、軸方向応力は、建物の鉄筋コンクリート柱に加わる積載荷重による軸方向応力を考慮したパラメータであり、圧縮軸力 2 ケースに加えて参考として軸応力を作用させないケース、引張軸力を作用させたケースの全部で 4 段階をパラメータとした。一方で、損傷度は試験柱に曲げ荷重を単調増加させて与えることで曲げひび割れを発生させており、健全時とひび割れ発生時、試験体降伏時の各段階における損傷状態を発生させた。そして、これらの実験に基づいて、曲げひび割れや軸応力による固有振動数およびその高周波振動依存性の変化を分析し、構造ヘルスマモニタリング技術の基本原則への適用可能性について考察する。

(2) 試験柱

試験柱には外形寸法 100×100×1000 mm の鉄筋コンクリート柱を製造して使用した。コンクリートは表 1 に示すように、水セメント比(W/C)を変化させた 2 種類を製した。鉄筋には、異形鉄筋 D10 をかぶり厚さ 15 mm（鉄筋間隔 80 mm）として 4 本を材軸方向に主筋として配筋しており、帯筋は使用しなかった。一連の実験では、表 1 に示す 2 種類のコンクリート材料特性を有する試験柱の各 1 本ずつに対して実施した。本報告では、それぞれを試験柱 RC①および試験柱 RC②と称する。

(3) 曲げ振動モードの固有振動数の測定方法

曲げ振動モードの固有振動数は、両端の境界条件をピン支持とした曲げ梁振動モデルとした状態で、自由振動試験によって評価した。図 1 に試験体の固定状況を示す。この試

験柱の中央部を下側に向けてハンマリングすることによって、曲げ振動モードの自由振動を励起した。また、試験柱の上面に材軸方向に250mmピッチで計測点1から5までを設け、それぞれの計測点に設置した圧電式加速度センサによって試験柱の加速度応答を測定した。加速度の測定成分は、材軸直交方向(X方向)と材軸方向(Z方向)である。

このようにして得た自由振動記録のうち、材軸直交方向の加速度を用いて、曲げ振動モードの振動特性を評価した。固有振動数については、試験柱中央部である計測点3のX成分記録を用いており、AR次数20次の自己回帰モデル(ARモデル)に当てはめて推定した。

以上の自由振動試験は、以下の項目(4)~(6)に述べる高周波振動や軸力、曲げひび割れを付与した状態で実施している。

(4) 試験柱への高周波振動の付与方法

高周波振動は、試験柱の片側端部に設置した圧電アクチュエータによって、縦振動モードを励起することによって付与した。圧電アクチュエータの固定方法は図1に示す通りであり、試験柱の左側の鋼製キャップ板と鋼製反力板の固定用ボルトの間に圧電アクチュエータ(最大荷重3.5kN)とロードセル(定格荷重20kN)を直列に挟み込んで固定した。

高周波荷重を付与するにあたっては、はじめに、圧電アクチュエータの駆動電圧振幅を10Vに固定した上で周波数範囲30~3000Hzの連続スイープ波を与えることによるスイープ波加振を実施した。スイープ波加振で得られた加速度z成分に基づいて、試験柱の縦振動モードの共振周波数(1次と2次)と振動モードを評価した。このようにして評価した1次または2次の共振周波数を加振周波数とする正弦波電圧を圧電アクチュエータに与えることによって、試験柱に縦振動モードの定常波を励起した状態にした上で、さらに、項目(3)で述べた自由振動試験を実施することによって、高周波振動を励起した状態での曲げ振動モードの自由振動波形を測定した。この際における高周波振動の振幅値は、試験柱の両端(計測点1もしくは計測点5)の加速度z方向成分の振幅値を参照して決定した。そして、それらの自由振動波形に基づいて、固有振動数の高周波振動依存性を分析した。

(5) 試験柱への軸力の付与方法

軸力荷重は、図1に示すように、試験柱両側の2枚の鋼製キャップ板にボルト締めして設置した軸力荷重用鋼棒4本に対して、引張力あるいは圧縮力を付与することで実施した。軸力荷重量は、軸力荷重用鋼棒の中央に添付したひずみゲージの計測値に基づいて調整した。本研究では、軸力荷重量は試験柱の軸応力で評価した。設定したパラメータは、

表2 各損傷段階における振動試験内容

順序	軸力 (MPa)	周波数 (Hz)	高周波振幅 (m/s ²)	順序	軸力 (MPa)	周波数 (Hz)	高周波振幅 (m/s ²)
1	0	f ₁	10	13	5.6	f ₁	10
2			5	14			5
3			0	15			0
4		f ₂	10	16		f ₂	10
5			5	17			5
6			0	18			0
7	2.8	f ₁	10	19	1.12	f ₁	10
8			5	20			5
9			0	21			0
10		f ₂	10	22		f ₂	10
11			5	23			5
12			0	24			0

表3 試験柱の損傷付与状況

損傷段階	損傷状況	荷重	RC種類
I	曲げひび割れ発生直後	12kN	RC①
II	曲げひび割れ発生	17kN	RC②
III	損傷Iの2倍の曲げ荷重載荷	24kN	RC①
IV	試験体降伏	36kN	RC②
V		36kN※	RC①

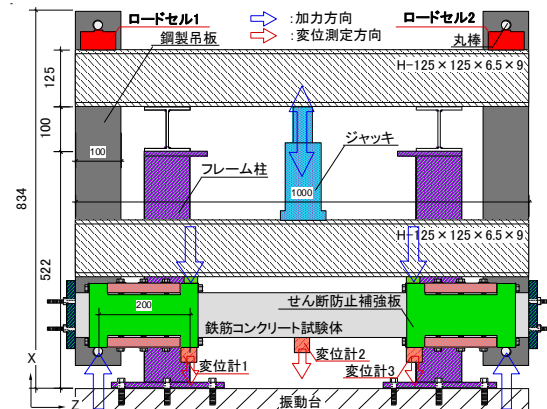


図2 曲げ載荷試験の方法

圧縮軸応力を5.6MPaと2.8MPaの2種類とし、参考として、軸応力0MPaと引張軸応力-1.12MPaである。これらの軸応力は、試験柱のコンクリートの圧縮強度31.65MPaに対して1/5、1/10、0および-1/20に相当する。

以上の方法で試験柱に軸応力を作用させた状態で項目(3)の自由振動試験を実施することによって、曲げ振動モードの固有振動数の軸応力依存性を評価した。項目(4)で述べた高周波振動の付与条件と本項目(5)の軸力条件による各損傷段階における振動試験の内容を表2に整理して示す。

(6) 試験柱の曲げひび割れの付与方法

試験柱に曲げひび割れを付与するための荷重法は、図2に示すように、試験柱の中央部に一定の曲げモーメントを作用させる4点荷重による曲げ載荷試験とした。試験柱の両端部でのせん断破壊を防止するため、両側の荷重点の間には厚さ20mmの鋼製のせん断防

止補強版を設置した。曲げ荷重試験における計測項目は、ロードセル2台による油圧ジャッキの発生荷重と試験柱に設置したレーザー変位計による3点での上下変位量である。

自由振動試験を実施した損傷量を表3に示す。試験柱 RC①では、健全時に加えて、曲げ荷重中に目視で微細な曲げひび割れが確認された直後（損傷段階Ⅰ）、その2倍の荷重荷重を付与した段階（損傷段階Ⅲ）、試験体の変位が降伏変位の2倍程度に達して損傷が大きく進行した段階（損傷段階Ⅴ）とした。一方で、試験柱 RC②では、健全時に加えて、曲げひび割れが発生してある程度の長さに達したとき（損傷段階Ⅱ）、試験体が降伏荷重に達した直後（損傷段階Ⅳ）とした。

4. 研究成果

(1) 曲げひび割れ損傷と縦振動モードに係わる振動特性の関係

① 試験柱の損傷状況

本研究における試験柱の損傷状態を明らかにしておく。試験柱 RC①および試験柱 RC②の荷重-変位関係を図3に、試験柱表面のひび割れ状況を図4に示す。図3の荷重-変位関係より、荷重値5kNで初期ひび割れが発生したと思われる第一折れ点を確認されること、降伏荷重が35kNであること等の点において、試験柱 RC①と RC②の力学性能はほぼ一致している。また、図4より、ひび割れの発生状況は中央部の曲げひび割れが卓越するパターンとなっており、本研究で意図した通りに曲げひび割れが再現できた。いずれの試験柱も降伏時において圧縮側コンクリートの圧壊が確認されなかったことから、鉄筋の付着破壊によって降伏に至ったものと考えられる。

② 縦振動モードに関する評価結果

健全時と損傷時における縦振動モードの振動特性の違いを考察するため、圧電アクチュエータのスweep波加振によって評価された試験柱 RC①の材軸方向(z方向)に対する共振応答曲線を図5に、共振周波数におけるモード形状を図6に示す。図5(a)によれば、健全時における共振曲線には、1500Hz付近と2800Hz以上の2つの共振周波数が確認される。これらの共振周波数は、圧縮側を正として軸力量が大きいほど（圧縮であるほど）、高くなる傾向が認められる。また、図6(a)と(d)によれば、これらの2つの共振周波数に対応するモード形状は、両側を自由端とする1次および2次の振動モードとなっていることが確認できる。

図5(b)と(c)によれば、損傷Ⅰと損傷Ⅴの共振周波数は健全時よりも低くなる傾向が認められる。これらの図を詳細に観察すると、

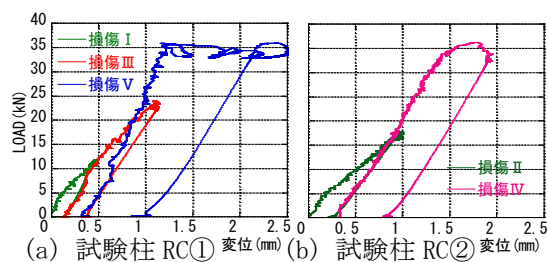


図3 曲げ荷重試験による荷重-変位関係

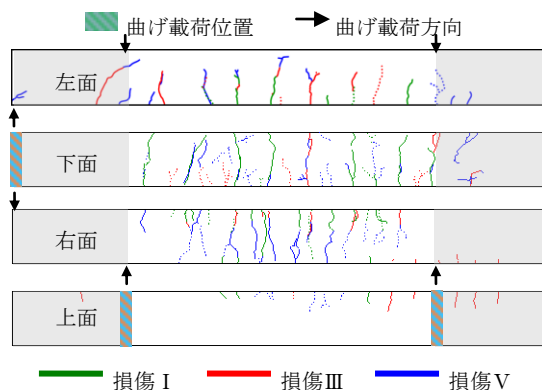


図4 ひび割れ状況（試験柱 RC①）

1次と2次共振周波数の共振ピークが2つないしは複数に割れて、ピークの数が増えたことが確認できる。

また、図6(b)と(e)によれば、損傷Ⅰの1次共振周波数(周波数 f_1)に対応するモード形状は図6(a)に示す健全時のものと等しいものの、2次共振周波数(周波数 f_2)に対応するモード形状は図6(d)に示す健全時のものとは異なる。さらに、損傷Ⅴでは、2次だけでなく1次のモード形状についても健全時とは異なる形状となる様子が確認できる。

③ 縦振動モードと損傷の関係に関する考察

健全時のひび割れが無い状態では、縦振動モードに係わる特徴を明瞭に把握できた。その一方で、曲げひび割れが発生した状態では、各次数の振動特性が複数に分岐して、縦振動モードに係わる特徴を明瞭に把握することが困難になる傾向があることが観察された。その傾向は損傷が大きくなるほど、あるいは高次になるほど顕著になる。

これらの現象は、試験柱にひび割れが発生したことで、試験柱がひび割れ面を境界とするいくつかの部分に分割され、縦振動モードを励起する軸方向の振動成分が乱されたためと考えられる。これらの実験結果は、縦振動モードの評価の“容易さ(困難さ)の度合い”を評価尺度に導入することによって、構造部材の内部に発生したひび割れの状態を把握できることを示唆している。

従来より、構造部材の振動特性と損傷度との関係については、比較的低い振動数を有する曲げ振動モードやせん断型振動モードに着

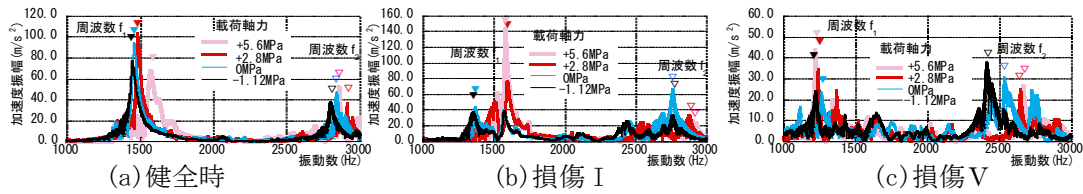


図5 z方向の加速度応答曲線

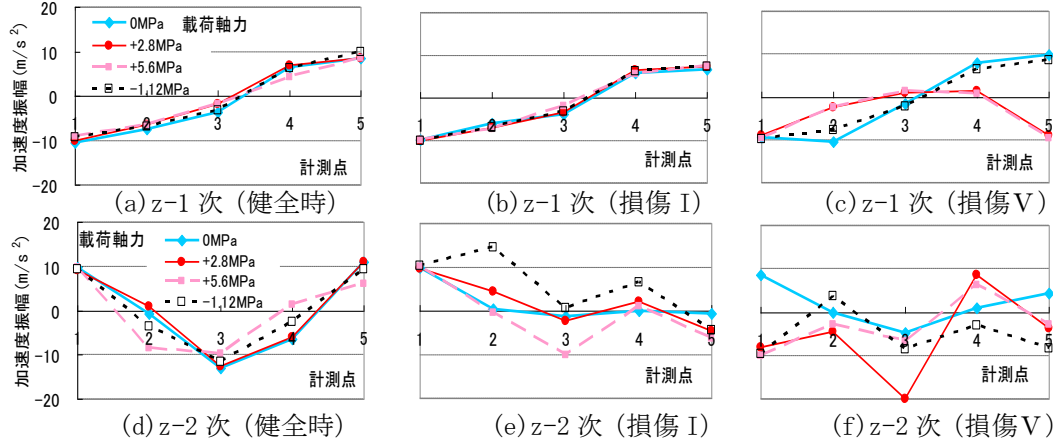


図6 縦振動モードの形状

目した既往研究は数多く存在するものの、本実験で観察された比較的周波数が高い縦振動モードについては議論されてこなかった。これらの縦振動モードと損傷の関係に関する実験結果や知見は、本研究の主な着眼点ではないが、構造ヘルスマニタリングの新しい原理に繋がる可能性があり、興味深い。

(2) 閉じたひび割れが曲げ振動モードの固有振動数に及ぼす影響

①固有振動数の損傷依存性と軸力依存性に関する実験結果

固有振動数の損傷に依存した変化量と固有振動数の軸応力に依存した変化量の相互関係を分析する。打撃振幅 10m/s^2 における固有振動数を読み取り、図7に示す軸応力をパラメータとした固有振動数と損傷の関係を示すグラフを作成した。

軸力が等しい場合には、損傷の増大とともに固有振動数が低下する傾向が確認できる。しかし、損傷後に軸力が変化した場合には、固有振動数を指標とすると損傷度を見誤ることを指摘できる。例えば、損傷Vにおける圧縮軸力 5.6MPa の固有振動数(図中B点)の結果は、損傷IIIにおける軸力 0MPa の固有振動数(図中C点)と等しくなっている。

②構造ヘルスマニタリング技術への留意点

以上のように、降伏荷重を超えて甚大な損傷が発生した状況でも、その後に軸力値が増加した場合には、固有振動数や剛性は見かけ上で増加するため、固有振動数や剛性の低下量に基づいて損傷度を正しく判断できない。

構造ヘルスマニタリングに係わる数多くの既往研究では、固有振動数低下量と損傷度

の相関性、または剛性低下量と損傷度の相関性が原理とされてきた。これらはあくまでも軸力が変化しないという条件で成立する原理であり、それが成立しない場合も考えられるので注意が必要である。

(3) 鉄筋コンクリート構造部材の固有振動数の高周波振動依存性に関する検討

①固有振動数の高周波振動依存性と損傷の関係に関する実験結果

試験柱RC②を対象として、健全時と損傷IV(降伏時)における固有振動数の高周波依存性を比較する。打撃振幅 5m/s^2 における固有振動数を読み取り、高周波振動の加振中の値と高周波加振後の高周波振動を作用させない状態での値との差から読み取った変化量を評価し、载荷軸力量との関係を整理した。図8にその評価結果を示す。

図8によれば、健全時と損傷時における高周波振動に依存した固有振動数の低下量は、载荷された軸応力や損傷の有無によって異なっている。詳細には、圧縮応力時には、健全時の低下量が大きく、損傷時には低下量がほぼゼロとなる。これとは対照的に、軸応力が圧縮でない場合には、損傷が発生したときの方が低下量が大きくなる。以上のように、固有振動数の高周波依存性は、軸応力の状況によって異なることが確認された。特に、圧縮応力下では、健全時には固有振動数の高周波振動依存性が現れるが、損傷時には依存性が小さくなることが確認された。

②予想されるメカニズムと構造ヘルスマニタリングへの応用可能性

圧縮応力下における固有振動数の高周波

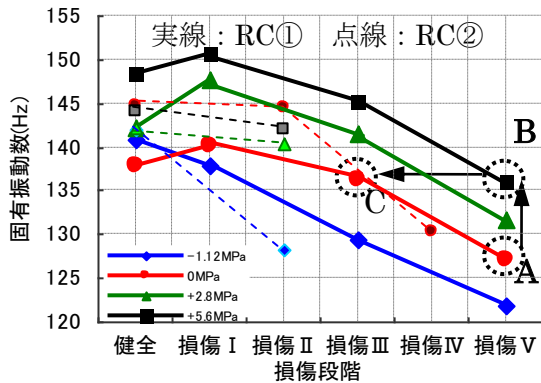


図7 固有振動数と損傷の関係
(閉じた曲げひび割れの影響)

振動依存性は、研究当初に予想したメカニズム(1章の項目(2)と(3)に記載した内容の一部)によって説明することができる。すなわち、健全時には、硬化した後のコンクリート材料に含まれるポイドが高周波振動によって開くメカニズムが作用し、損傷後にはひび割れによって高周波振動の伝達状況が変化しポイドを開くメカニズムが作用しなくなる仕組みで、説明できる。

例えば、建物を支持する意味で最も重要な柱部材はおおむね圧縮条件下にあることを考慮すると、本研究で明らかにした圧縮応力下での固有振動数の高周波振動依存性のメカニズムは、新しい構造ヘルスマonitoringの基本原則となりうると考えられる。

(4) 本研究の意義と今後の展望

本研究の着手時に予想した固有振動数の高周波振動依存性のメカニズムを裏付ける実験データを得ることができた。このメカニズムは、健全時の動的特性に係わる事前情報が無い場合に通用する構造ヘルスマonitoring技術の原理になりうる。

しかし、本報告の結論は限定された実験データに基づく内容であり、さらなるデータを蓄積する必要がある。また、ここで試した高周波振動の付与方法は、一般の建築物に適用できる方法であるとはいいがたく、実用的な手段を開発する必要がある。これらの研究・開発を推し進め、事前情報を必要としない診断技術の実用化を図りたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

- ①高橋悟, 金澤健司, 馬場由佳, 北村春幸. 高周波振動荷重を受ける鉄筋コンクリート柱の自由振動試験, その5 曲げ損傷に伴う試験柱の縦振動モードの変化の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造II(B-2), 印刷中, 2012.
- ②馬場由佳, 金澤健司, 高橋悟, 北村春幸.

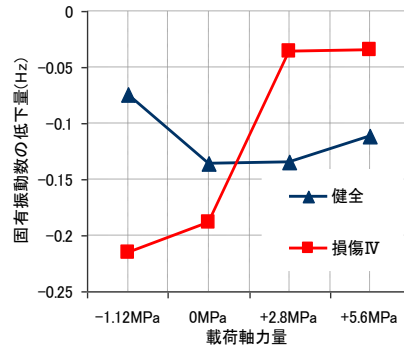


図8 高周波振動に伴う固有振動数の低下量と損傷の関係

高周波振動荷重を受ける鉄筋コンクリート柱の自由振動実験, その6 曲げ損傷に伴う試験柱の横振動モードの変化の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造II(B-2), 印刷中, 2012.

③高橋悟, 金澤健司, 馬場由佳, 北村春幸. 鉄筋コンクリート試験柱の固有振動数の高周波依存性の測定, その4, 2011年度第82回日本建築学会関東支部研究報告I, 査読無し, pp. 337-340, 2012.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: コンクリート部材の健全性診断方法, 健全性診断装置及び健全性診断プログラム
 発明者: 金澤健司
 権利者: (財)電力中央研究所
 種類: 特許
 番号: 特願2010-119844
 出願年月日: 2010年5月25日
 国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金澤 健司 (KANAZAWA KENJI)
 (財)電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員
 研究者番号: 00371435

(2) 研究分担者

永田 聖二 (NAGATA SEIJI)
 (財)電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員
 研究者番号: 00432005

(3) 連携研究者

北村 春幸 (KITAMURA HARUYUKI)
 東京理科大学・理工学部・教授
 研究者番号: 20339112