

3.1.2.3 SVMによる簡易耐震診断システムの開発

目次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5ヵ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成17年度業務目的

(2) 平成17年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
 - 1) 携帯型ワイヤレスセンサシステムの試作
 - 2) 診断プログラム用基礎データ検討
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成18年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 SVMによる簡易耐震診断システムの開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
慶應義塾大学理工学部	教授	三田彰	mita@sd.keio.ac.jp
近畿大学理工学部	助教授	薛松濤	xue@arch.kindai.ac.jp
慶應義塾大学大学院理工学研究科	大学院生	土方一弘	kunikunn_sw20@hotmail.com

(c) 業務の目的

地震被災度の高い既存木造建物に対して、耐震安全性を高めるため、耐震診断技術の開発、耐震補強指針の開発、行政ならびに市民が容易に理解でき普及可能性の高い耐震補強技術の開発、耐震補強後の建物についての耐震補強診断技術の開発をおこなう。

(d) 5カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1)平成 14 年度：

サポートベクトルマシン (SVM) を用いた、耐震診断手法の理論的な構築を開始する。また、現状の住宅の耐震安全性能についての定量的な評価を行い、開発する耐震診断手法の診断結果の妥当性について検討する。

2)平成 15 年度：

前年度に得られた理論的な成果を基に、SVM を用いた耐震診断システムの開発を開始する。また、耐震安全性レベルに対するユーザーの要求を定量的に把握するための簡便な手法について研究する。

3)平成 16 年度：

ワイヤレスで振動データを取得可能な形態センサシステムの使用について検討し、2つの振動センサからデータ取得可能なワイヤレスセンサシステムを試作する。また、前年度の研究成果に基づいて、携帯端末に搭載可能な診断プログラム用の基礎データについて検討する。

4)平成 17 年度：

開発したワイヤレスセンサの妥当性を検証する。また、木造建物に適用して、その精度と適用可能性について確認する。

5)平成 18 年度

ワイヤレスセンサを用いて取得される診断データおよび診断結果を蓄積する仕組みについて検討すると共に、結果的に蓄積されたデータベースから、保険や保険デリバティブの設計に活用可能で有用な情報を抽出するデータマイニングの仕組みについて検討する。

(e) 平成17年度業務目的

①ワイヤレスセンサを利用したシステムの評価

試作したワイヤレスセンサの適用可能性について検討すると共に、SVMを用いた損傷診断手法への利用について評価を行う。

業務分担責任者（慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科、教授、三田彰、mita@sd.keio.ac.jp）

②木造建物の解体時動特性評価

実験用に建設された木造建物の解体時に振動計測を行って、その動特性を計測して、建物強度と動特性の関係について評価する。

業務分担責任者（近畿大学理工学部建築学科、助教授、薛松濤、xue@arch.kindai.ac.jp）

(2) 平成17年度の成果

(a) 業務の要約

次の業務を行った。

①ワイヤレスセンサを利用したシステムの評価

昨年度試作したワイヤレスセンサを使って実大建物の振動実験を行い、有線の在来型のセンサと比較した。その結果、設置を迅速かつ容易に実施することができ、有線と比較して格段に効率的に実施できることがわかった。木造のように電波の到達に問題がない場合には、特に適したセンサであることが判明した。

②木造建物の解体時動特性評価

近畿大学キャンパス内にある実大建物を解体し、また組み立てなおすことによって、さまざまな損傷状態に対応した骨組みごとに振動実験を行った。固有振動数を求めると共に、小型の模型を用いた振動台実験およびANSYSによるシミュレーションを行って、その動特性を評価した。

③カオス度のSVMへの利用に関する検討

来年度に向けた予備検討として、カオス度をSVMの特徴ベクトルに利用するために新しい算出方法を提案し、その有効性を確かめた。

(b) 業務の実施方法

担当者の専門領域を考慮して、下記のように分担して行った。

- ・ ワイヤレスセンサを利用したシステムの評価
三田彰
- ・ 木造建物の解体時動特性評価
薛松濤

(c) 業務の成果

1) ワイヤレスセンサを用いた解体時動特性評価

a) 実験の概要

実験の対象としたのは近畿大学（大阪、東大阪市）が所有する2棟の木造建造物のうちの一棟である（図1のSE構法棟）。この2棟の建造物は建材リサイクルの研究を主目的として2001年に建てられたものであり、構法の違いによるリサイクル率への影響等を考察する計画となっている。その内の一棟（写真のSE工法棟で、白い建造物）は2005年に解体され、再び骨組みの状態だけで建設された。仕様を表1に示す。

撤去の手順としては、壁及び床を先に撤去し、梁、柱と言う順番で撤去する。そこで、各ステップにおいて建造物を自由振動させ、ワイヤレスセンサと従来の有線センサを併用して、振動データを収集して構造の振動特性を割り出し、性能を評価するとした（図2、図3、図4）。

実建造物の振動特性のデータの正確性を更に確かめるために、建造物に対して自由振動実測を行うだけでなく、模型を別作製して振動台実験を行い、これに数値シミュレーションを加えることで、一般住宅の物理的パラメータをより明らかにする。損傷評価システムを構築する上で重要とされる物理的なパラメータの変化については、実建造物だけでなく、模型の振動台実験及び数値解析によっても検討を行うため、これら3種類の結果を比較検討することで、定性的な傾向がつかめると考えられる。

既存建造物として近畿大学キャンパスにある「リサイクル型まちなか一戸建住宅」の2棟のうちの一棟で、写真のSE構法棟（黄白の方）を用いる。その2棟の外観写真及び2階の平面図を以下に示す。2棟の建造物の仕様データを、以下に併せて示す。



図1 近大キャンパスにある一戸建住宅：リサイクルまちなか住宅

表 1 住宅の仕様一覧

	在来構法	SE構法		在来構法	SE構法
1階面積(m ²)	42.93	37.76	縦(mm)	9900	10920
2階面積(m ²)	40.50	38.91	横(mm)	4950	4550
3階面積(m ²)	40.50	38.91	高さ(mm)	9197	9197
4階面積(m ²)	-	4.96	延べ床面積(m ²)	123.93	120.54

実験は、床、壁、梁及び柱などを撤去することによって損傷を模擬しながら、構造物を自由振動させ、振動データを採取した。図2の写真のように、構造物をある程度まで引っ張り、鍵を開放するやり方で構造物を自由振動させる。

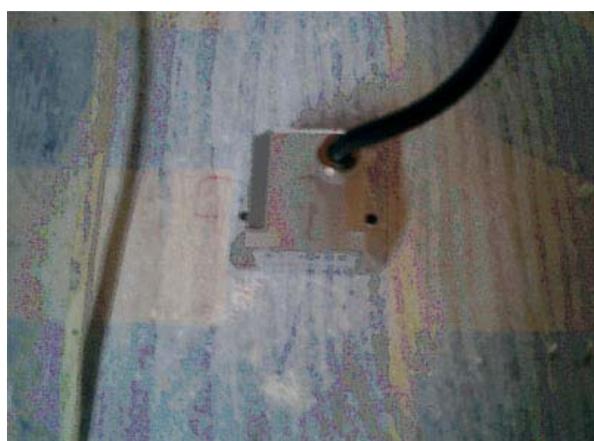
なお、実構造物の振動データ採集するためには、2通りの方法で行った。下記の図2の写真に示しているように、新しく開発されたワイヤレスセンサを用いたデータ採集及び従来どおりの有線センサによるデータ採取である。両者の比較により、全く同様なデータの採集ができた。特に実構造物の場合、ワイヤレスセンサの便利性が顕著であり、その便利さについては後の項目で述べる。



引張りによる自由振動



ワイヤレスセンサによるデータ採取



従来の有線センサによるデータ採取



図2 自由振動及び測定用のセンサ

壁及び床は次のようなスケジュールで撤去した。

- 2005.11.2 エレベーター
- 2005.11.7 屋上東側外壁・3F 外壁半分
- 2005.11.8 屋上内壁半分・屋根瓦
- 2005.11.9 屋上内壁残り・屋根板半分・3F 北側内壁
- 2005.11.10 屋根板残り・3F 西側壁/北側窓/北側中心壁・2F 南西側壁・EV 天井
- 2005.11.11 3F 北西側壁/北東側壁/北側壁一部
- 2005.11.12 3F 南西側壁/南東側壁一部/南側天井一部
- 2005.11.14 3F 南側壁階段ウラ以外/南側天井全部・2F 南側窓枠/北西側壁半分/南西側壁半分
- 2005.11.15 2F 北西側壁残り/南西側壁残り
- 2005.11.16 3F 階段前の床以外の床・2F 北側床撤去/階段裏壁南東側壁
- 2005.11.17 2F 南窓枠/壁全部/南西側床以外の床
- 2005.11.18 3F より上の階段・1F 南側床/北側壁一部/北西側壁/南側壁以外の壁
- 2005.11.19 残りの階段・1F 残りの壁、床
- 2005.11.19 残りの階段・1F残りの壁、床



8月10日



11月9日



12月5日

撤去時の外観写真



11月9日（朝）



11月9日（夕）



11月14日

撤去時の内部写真

図3 床、壁の撤去

梁については、骨組となった構造物の2階の梁を図4の写真のように、順次に撤去した。

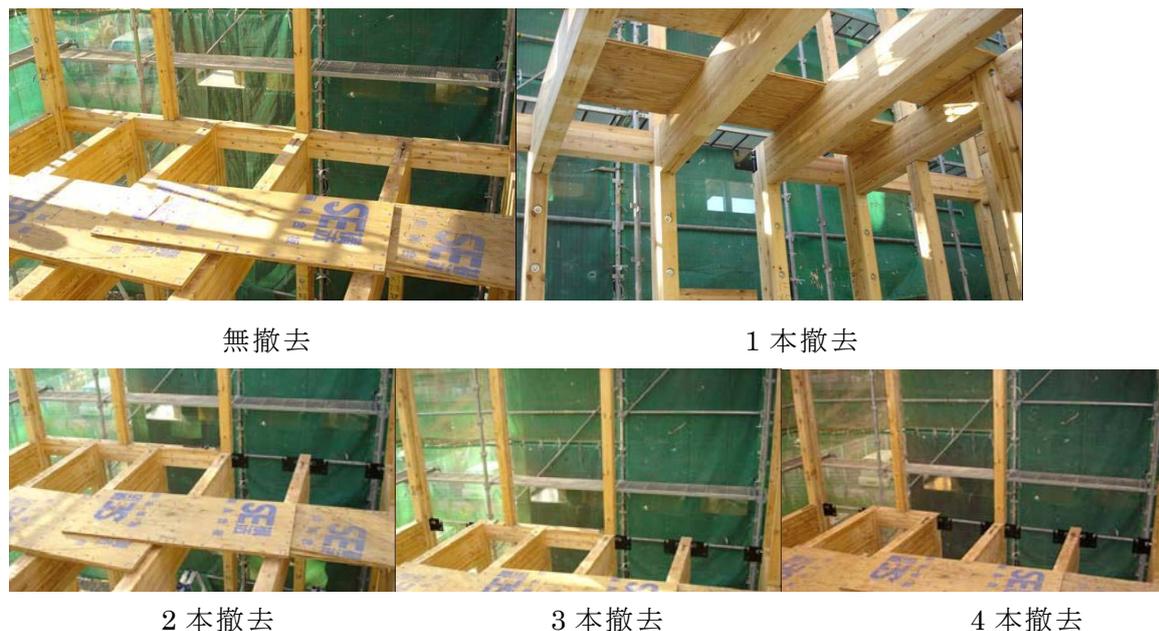


図4 2Fの梁の撤去

b) ワイヤレスセンサの便利性について：

本業務は新しく開発されたワイヤレスセンサと従来の有線センサとの使用比較を行うことでワイヤレスセンサの便利性を検討することも研究目的の一つである。従って、実構造物の振動特性を測定する際、2通りのセンサを用いた。新しく開発されたワイヤレス加速度センサ及び従来型の有線加速度センサである。比較によって、2通りのセンサによる測定した結果は完全に一致していることが分かった。しかし、使用中の便利性が異なる。まず、ここでは、今回使用したワイヤレスセンサと有線センサの測定手順を説明する。

ワイヤレスセンサの測定手順は次の通りである。

- 親機（データを受信する機械）をPCとLANケーブルで接続する。
- 指定のIPアドレスを入力し電波の確認を行う。
- 無線の測定器（加速度計）を任意の場所に設置する。
- 出力は時間領域（gal*Sec）で表される。
- 出力されたデータを付属ソフト『Pwave』にてグラフ化し、またそのソフトにてFFTやテキスト変換などの解析が行える。

従来通りの有線センサの測定手順は次の通りである。

- アンプ（DRA-101C）をPCとRS232ケーブルにて接続する。
- そのアンプを動かすために専用のUSBをPCに接続する。
- 測定器（加速度計）をアンプに接続する。
- 出力は時間領域（gal*Sec）で表される。
- 出力されたデータをテキスト変換し、Excelなどのソフトにてグラフ化またはFFTなどの解析を行う。

○ワイヤレスセンサの利点

上記のように、建築現場での測定のため、ワイヤレスセンサを用いた際、次に挙げるような多くのメリットがあることが分かった。

- a. ワイヤレスセンサは、小型かつ電池のため、建築現場では運びやすいことと設置しやすいことがある。
- b. 設置と言っても、親機と PC の間にランケーブルをセットするだけでするので、現場での設置時間が短い。
- c. アンプ不要及び直接ノート PC にデータを飛ばすため、大変便利で、建築現場では大変相応しい。
- d. アンプを通さないため、測定時間をその場の状況によって変える事ができる。
- e. 決まった場所に置くだけで、一人での測定が楽に行える。(有線の場合にはアンプからセンサまでコートを通すなどの意味で、一人で難しいときがよくある。)

c) 解体時動特性評価

前項で既に実構造物の撤去日程及び撤去部材の詳細について記述した。ステップバイステップで自由振動をさせ、固有振動数を振動データより計算した。固有振動数の変化を表 2 及び図 5 に示す。表の中の Part 1 及び Part 2 は、2 回測定して採取した結果であり、その平均をグラフに示している。

表 2 固有振動数の変化一覧

	段階	固有振動数 (Hz)					
		Part. 1			Part. 2		
		2階	3階	屋上	2階	3階	屋上
2005. 10. 28	1	5.664	5.664	5.371	5.664	5.664	5.371
2005. 11. 2	2	5.859	5.761	5.761	5.761	5.761	5.761
2005. 11. 7	3	5.371	5.371	5.371	5.273	5.273	5.273
2005. 11. 8	4	5.371	5.664	5.664	5.371	5.664	5.664
2005. 11. 9	5	5.664	5.664	5.664	5.664	5.664	5.664
2005. 11. 10	6	5.664	5.566	5.566	5.664	5.664	5.566
2006. 11. 11	7	4.981	4.981	4.981	4.981	4.981	4.981
2005. 11. 12	8	6.543	6.445	6.445	6.853	6.455	6.347
2005. 11. 14	9	5.761	5.566	5.468	5.761	5.664	4.394
2005. 11. 15	10	4.296	4.296	4.296	4.296	4.296	4.296
2005. 11. 16	11	4.394	4.589	3.613	4.101	4.101	4.003
2005. 11. 17	12	2.636	2.832	2.734	8.105	2.734	2.734
2005. 11. 18	13	2.246	2.246	2.246	2.343	2.734	2.636
2005. 11. 19	14	2.148	2.148	2.148	2.148	2.051	2.051
2005. 11. 21	15	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9

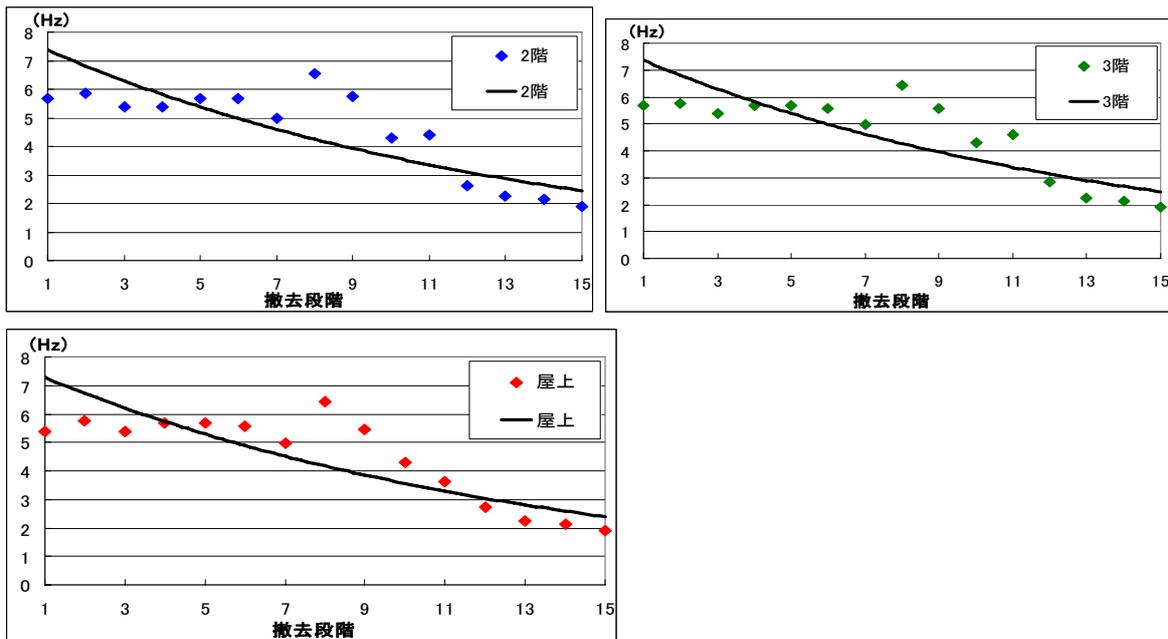


図5 床、壁の撤去による固有振動数の変化

次には、床と壁が撤去した後の骨組みの振動特性を検討するため、梁を撤去しながら自由振動実験を行った。前項の図4の写真に示したように、無撤去のまま、1本撤去、2本撤去、3本撤去そして4本撤去したときに固有振動数変化を検討した。ここでは、1本撤去と下表に示したように、4種類の撤去手法のb,c,d,e(場所の異なる1本撤去)を用いた。2本撤去の時にも、6種類の撤去手法を用いた。詳細は、図6の2F平面図及び撤去手法に示している。そして、各撤去手法に対応し測定した固有振動数を表3に示している。

表3 2Fの梁の撤去の詳細及び固有振動数変化一覧

状況	段階	固有振動数(Hz)					
		Part, 1			Part, 2		
		2階	3階	屋上	2階	3階	屋上
無撤去	a	1.75	1.78	1.78	1.78	1.75	1.75
1本撤去	b	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
	c	1.75	1.73	1.73	1.75	1.75	1.75
	d	1.75	1.75	1.75	1.7	1.75	1.7
	e	1.75	1.7	1.7	1.75	1.7	1.7
2本撤去	f	1.68	1.66	1.66	1.7	1.7	1.7
	g	1.66	1.75	1.75	1.66	1.66	1.66
	h	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
	i	1.63	1.63	1.63	1.66	1.63	1.63
	j	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
3本撤去	k	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
	l	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61
	m	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58
4本撤去	n	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
	o	1.61	1.61	1.61	1.61	1.63	1.63

- 撤去段階の詳細
- a段階 無撤去、b段階 ①のみ
 - c段階 ②のみ、d段階 ③のみ
 - e段階 ④のみ、f段階 ①と④
 - g段階 ①と②、h段階 ①と③
 - i段階 ②と③、j段階 ②と④
 - k段階 ③と④、l段階 ①と③と④
 - m段階 ①と②と③、n段階 ②と③と④
 - o段階 ①と②と③と④

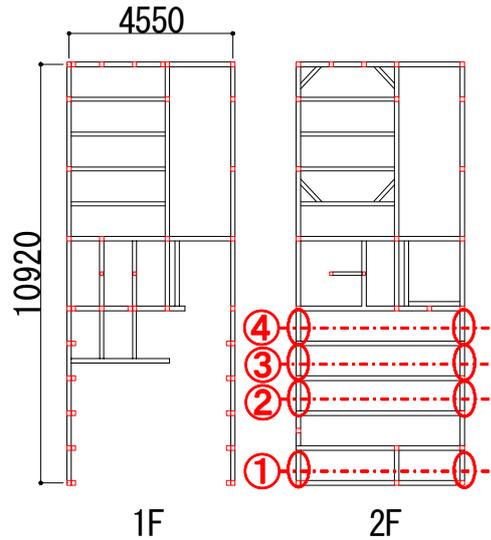


図6 2Fの梁の撤去の詳細及び固有振動数変化

d) 模型振動台実験

昨年度と同じ、構造物の縮小模型を作製して振動台実験を行った。実構造物の梁、柱の撤去の手順と同じ手順で実験を行うことで、より実構造物に近づけたと考えられる。所有する振動台が1m平方のものであり、これにあわせて模型の規模を決定し、その結果、全体のスケールを1/20とした。実木造構造物では、一般的には壁の有無によって耐震性が大きく異なるとされているが、模型の規模が小さく壁を入れることが不可能であるので、省略した。

入力地震波として、正弦波（振幅 10mm）及び新潟県中越地震波（EW,NS の双方、最大振幅 10mm）を用いた。作製した模型及び錘、センサ位置及び固有振動数変化を図7に示す。固有振動数及び最大応答の損傷に対する変化の結果は、次の章に示す。

表4 模型振動台実験の結果

段階	撤去本数	振動数	段階	撤去場所	振動数
a	0本	9 hz	A~I	2・3階の梁・柱	9 hz
b~e	2本	8 hz	J	1階北側の柱	8 hz
f~k	4本	7 hz	K	1階南側の柱・2階梁	7 hz
l.n	6本	6 hz			
o	8本	6 hz			

梁、柱を撤去の際の固有振動数

梁を撤去の際の固有振動数

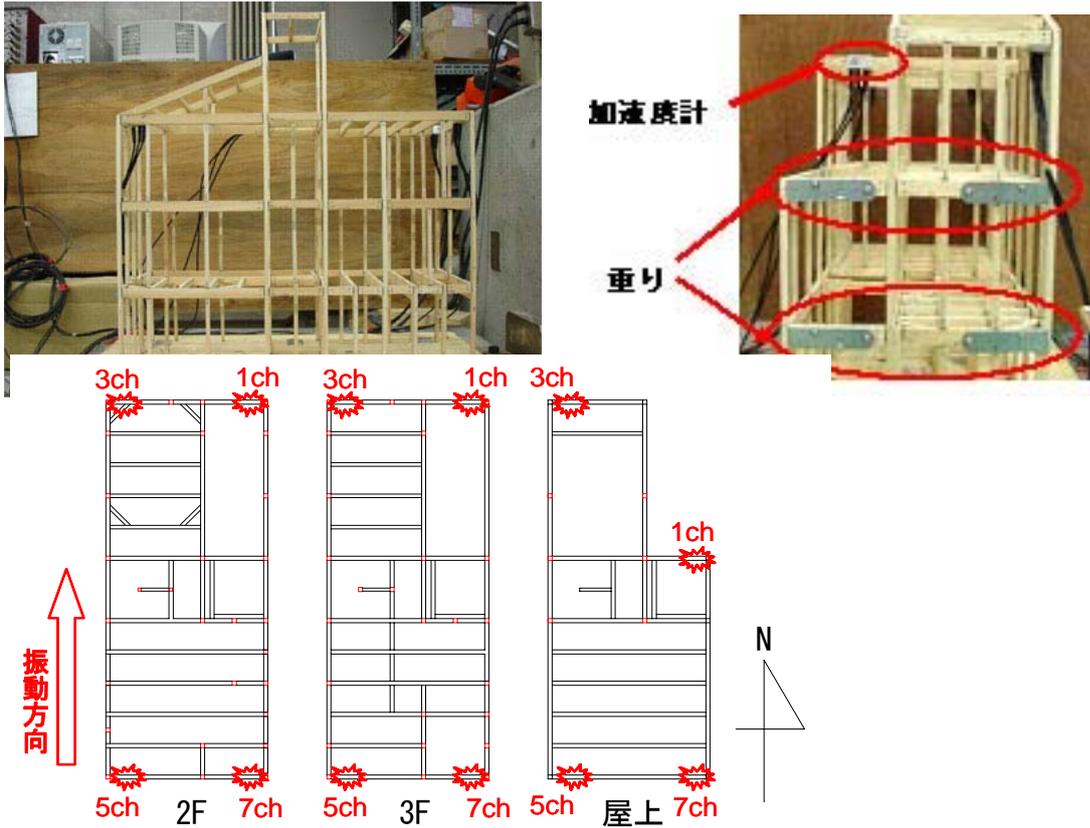


図7 振動台実験

e) 有限要素法による解析評価

大型有限要素ソフト「ANSYS」を用いて、動的解析による構造物の損傷の変化に対する動的パラメータの変化の傾向を調べた。作成したシミュレーション用モデルは、次の2通りである。実構造物と全く同様なもの（床、壁あり）のモデル及び振動台用模型と同様なもの（床、壁なし）のモデルである。作成したモデルは図8の写真に示し、その内の赤○は、センサの位置を表している。柱と梁の接合部のところでは、梁勝ち及び柱勝ちのように、硬いピン接合の表現もできるようにした。入力は、実構造物のモデルの場合は実構造物と同様に自由振動であり、振動台模型のモデルの場合では振動台模型と同じ入力である。固有振動数の変化は表5に示している。



実構造物と同じモデル

振動台用模型と同じモデル

図8 解析モデル

表5 解析による固有振動数一覧

	固有振動数(Hz)		
	2階	3階	屋上
1	8.98	9.38	9.08
2	8.98	9.08	0.88
3	8.98	9.17	0.88
4	8.98	0.97	0.97
5	8.88	0.78	0.78
6	1.07	0.68	0.78
7	1.07	0.68	0.58
8	1.07	0.68	0.58

ANSYSでの実物模型の床、壁の撤去時

撤去段階	固有振動数(Hz)		
	2階	3階	屋上
1	3.24	3.19	2.92
2	3.12	3.06	2.97
3	3.12	3.11	2.83
4	3.12	3.02	2.83
5	3.12	2.92	2.83
6	2.92	2.83	2.83
7	2.83	2.83	2.83
8	2.83	2.83	2.83
9	2.83	2.73	2.83
10	2.83	2.83	2.83
11	2.44	3.02	2.83

ANSYSでの振動台模型の梁、柱撤去時

f) 振動数変化の比較

ここで、実構造物の実験、振動台実験及び ANSYS でのシミュレーションの結果を比較する。

まずは、実構造物及び ANSYS での床、壁の撤去による固有振動数の変化を図 9 で示す。グラフは 2 階、3 階及び屋上で取れたデータより変換したものである。

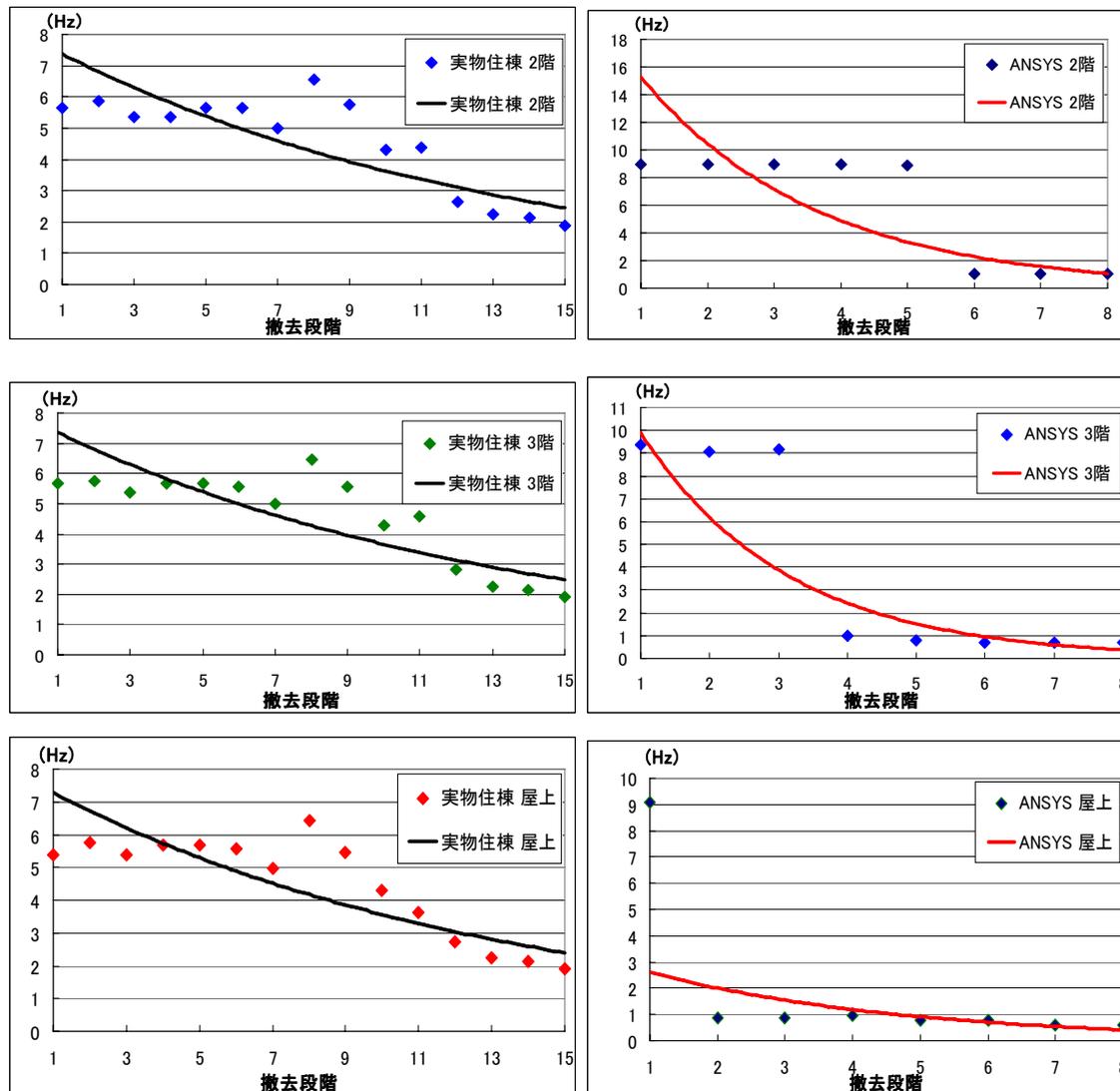
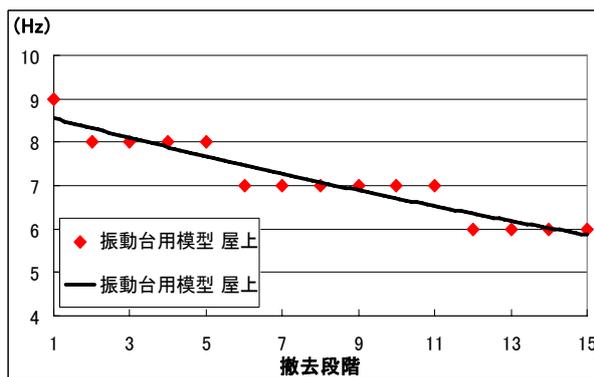


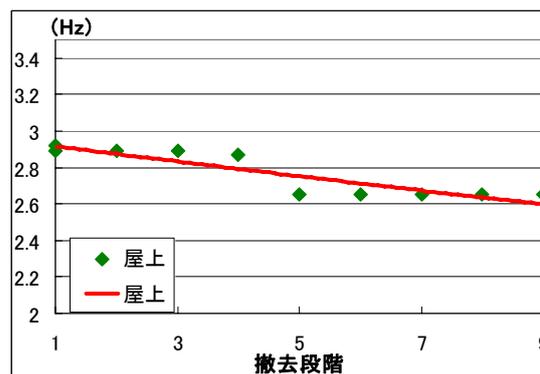
図 9 実構造物と ANSYS モデルの床、壁撤去による固有振動数変化

図 9 に示しているように、床、壁の撤去（損傷の程度）に従い、基本的な傾向としては固有振動数が小さくなることは明らかである。しかし、例えば、実構造物の場合では、7 段階から 9 段階のところでは、かえって固有振動数が増えることが分かった。そして、ANSYS の場合では、固有振動数が急激に変化しないところもあることが分かった。

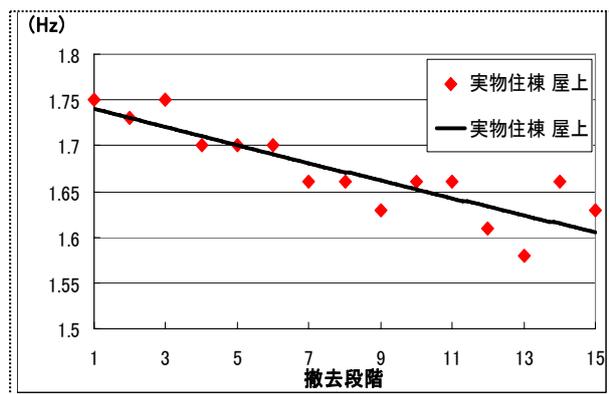
次には、2 階梁の撤去による固有振動数の変化について検討する。振動台の場合、ANSYS での振動台モデルの場合、実構造物の場合及び ANSYS での実構造物の場合の屋上で取れたデータによる固有振動数の変化を図 10 に示す。



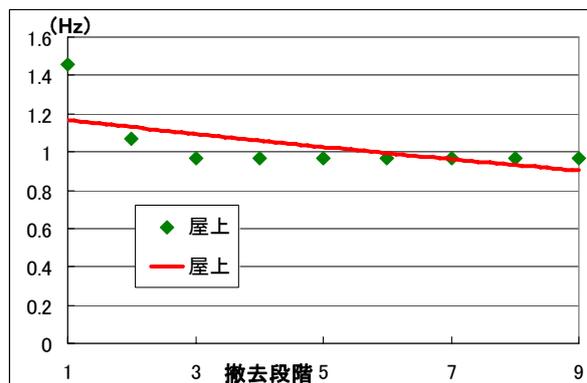
振動台実験の場合



ANSYS での振動台モデルの場合



実構造物の場合



ANSYS での実構造物の場合

図 1 0 実構造物、振動台実験、ANSYS モデルによる振動数変化の比較

図 1 0 に示しているように、梁の撤去に従い、基本的な傾向としては固有振動数が小さくなることは明らかである。梁が撤去しても、固有振動数が変化しない例も見られた。

g) まとめ

本年度は一般の個別住宅建物に適用できる損傷評価システムの提案に必要とされる基本的なデータ・物理的パラメータの変化の傾向について研究を行った。検証対象としたのは、2001年に建築され、本年度に撤去された近畿大学キャンパス内にある2棟の構造物のうちの一棟である。この構造物について撤去しながら実測を行い、固有振動数の変化を求めた。実構造物に対応したモデルを作製し、振動台実験により損傷の程度が固有振動数に及ぼす影響を検討した。さらに、ANSYS を用いて実構造物のモデル及び振動台実験のモデルを作成して振動シミュレーションを行い、振動台実験と同様な検討を行った。振動台実験の結果とシミュレーションの結果ではその傾向がほぼ一致しており、さらに、固有振動数の値もほぼ一致する結果が得られた。

3 者比較の結果として、損傷が増大するに伴い、固有振動数が減少する傾向にあることは確認したが、増大する可能性もあることが分かった。

今後の課題として次を挙げることができる。

- a. 実構造物は、一旦撤去されたが、再び骨組みだけ建設された。従って、これからは、

特に柱、梁の損傷を模擬するために、部材を撤去するだけでなく、本当の意味での損傷を与えながら、振動実験（自由振動）を行って、固有振動数の変化を求める。

- b. 上記の実物実験に伴い、新しい振動台用模型を作成し、部材に損傷を与えながら、振動台実験を行う予定である。
- c. 上記の実物実験に伴い、ANSYS による解析モデルを作成し、接点や接合部などをもつと現実に近づけシミュレーションを行う予定である。

2) 木造建築物のカオス理論と物理パラメタに基づく健全性診断

a) はじめに

1995年の兵庫県南部地震はわが国で初めて震度7を記録した都市直下型地震であり、神戸を中心とした数多くの建築物が甚大な被害を受けた。そのため近年、構造物の健全性（耐震性）を監視する技術である構造ヘルスマモニタリングが注目されている。その実現には、専門家により技術的な判断等が必須となるため、多大なコストがかかる。したがって、実用的なシステムの提案には現在のところ至ってはいない。この問題を解決する一手法として、名古屋工業大学の岡田成幸教授が考案されたカオス解析法がある。本研究の目的は常時微動解析法を基本に置きカオス解析法を使用することによって、個々の建物の耐震性能を定量的に極力小さな誤差で評価することである。さらに最適な損傷モデルを構築し、既存の研究と比較評価することにより、カオス理論と物理パラメタとの関係を明らかにして、安定的で信頼性の高い手法を提案することにある。

b) カオス性計算のアルゴリズム

解析は建物の水平2成分を独立に扱う。

波形の切り出し：それぞれの成分ごとに、ノイズの少ない5秒間程度を切り出す。

前処理：上層階で得られた波形を零線補正、及び基準化をする。

相空間の再構成：時間遅れの方法 $\{x(t), x(t+\tau), x(t+2\tau), \dots, x(t+(n-1)\tau)\}$ により n 次元（埋め込み次元と呼ぶ）の相空間をコンピュータ上に再構成する。この τ は時間遅れであり、建物の固有周期(T)から $\tau=T/4$ で決定させる。

フラクタル次元の計算：各次元にその相空間を埋める軌跡のフラクタル次元 ν を以下の式により求める。

$$\nu = C(r) / \log r \quad (1)$$

ここに

$$C(r) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{i,j=1}^m H(r - |x_i - x_j|) \quad (2)$$

この相空間の埋め込み次元数を上げることにより、フラクタル次元がある数値に収束していく。この値をカオス度と呼ぶ。

c) カオス理論と構造物の耐震性との関係

一般に耐震性の高い木造住宅は剛性が高く、図1-1のように建造物全体の一体感が強い。そのため、建造物全体の振動も単振動に近い単純なものとみなされる。しかし、老朽化に伴い建造物が図1-2のようになってくると、建造物全体の一体感が薄れ、部分的に独立した振動が発生し、建造物全体として複雑なゆれをあらわすことが考えられる。したがって建造物の振動の複雑さを計量することにより、耐震性の評価ができる可能性がある。

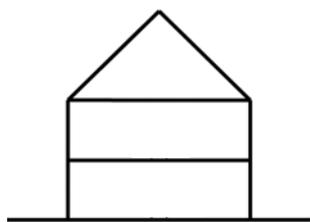


図 1 1 高剛性(健全時)

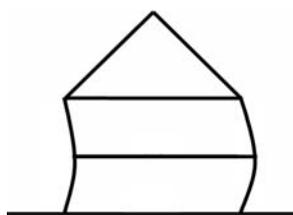


図 1 2 低剛性(老朽化)

d) シミュレーション

解析対象は図 1 3 に示すように等価した木造二階建てモデルとする。詳細として以下の表 6 の数値を使用した。解析方法として、ニューマーク β 法(=1/6)を使用した。

表 6 シミュレーションモデルの詳細データ

	m	c	k
1st	17t	27kNs/m	4.5kN/mm
2nd	8t	15kNs/m	2.5kN/mm

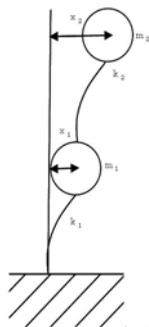


図 1 3 シミュレーションモデル

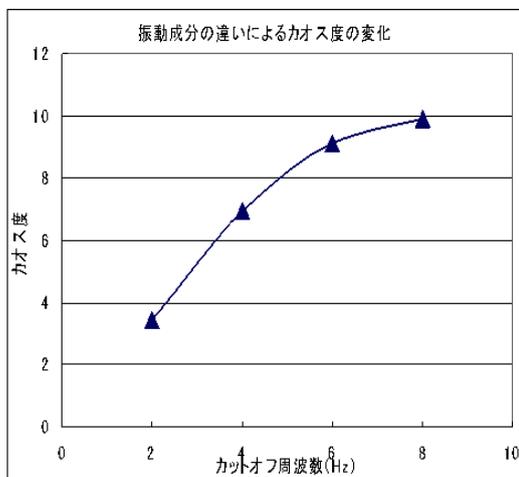


図 1 4 周波数成分の違いによるカオス度

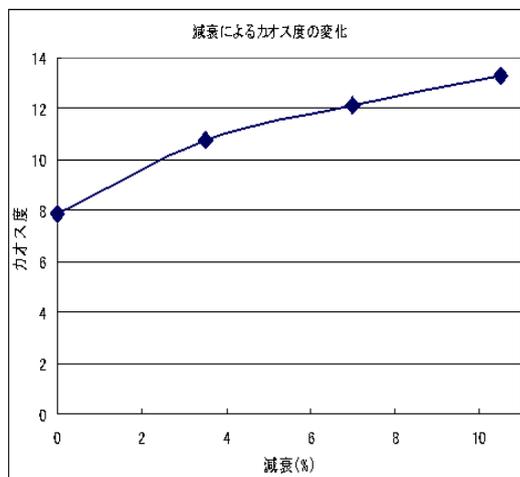


図 1 5 減衰によるカオス度の変化

図14より周波数帯域の違いによってカオス度は上昇することがわかった。これより、振動成分の違いにより、カオス度が変化すると考えられる。図15より減衰を加えていくとカオス度が上がり、減衰がカオス度に影響している。これらからカオス度と関係がある物理パラメータは減衰定数であるということがわかった。

表7 インパルス、ホワイトノイズ応答のカオス度

	インパルス入力	ホワイトノイズ入力
減衰なし	2.97	13.95
減衰あり	2	15

表7より、同じ構造物でもカオス度が異なることがわかる。インパルス入力では構造物がほぼ固有周期で振動をするので、カオス度が低くなると考えられる。

e) 実物大実験への適用

シミュレーションの知見（入力によってカオス度は変化する）を受け、実物大実験を行った。図16に対象建物の写真とその仕様を示す。



図16 設計仕様（左図健全時、右図骨組み時）

表8 自由振動、常時微動におけるカオス度

	自由振動	常時微動
健全時	8.05	11.5
骨組みのみ	3.12	5.27

カオス度の表から、同じ構造物を検証しているのにもかかわらず、入力によって異なることがわかる。同じ構造物でも外乱の影響を受けて、カオス度が変化してしまう。そのため同構造物で等しいカオス度にするため、外乱に依存しないカオス度に変換する必要がある。

f) 外乱に依存しないカオス解析手法の提案

以下に外乱に依存しないカオス解析手法の計算アルゴリズムを以下に示す。

- 常時微動による建物の振動波形の記録をする。
- 前処理で、0線補正、デシメーションをする。
- システム同定によりモデルを推定する。
- 推定したモデルにインパルス入力をして、自由振動の波形の作成をする。
- その作成した波形からカオス度を計算する。

この計算アルゴリズムにより、入力が一定となり、外乱に依存しなく、カオス度が安定して求められ、基準化することができる。

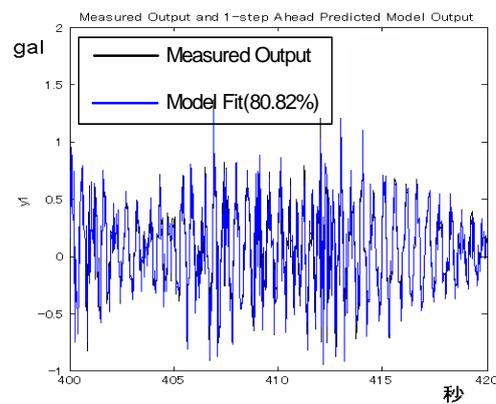


図 1 7 推定したモデルのフィット率

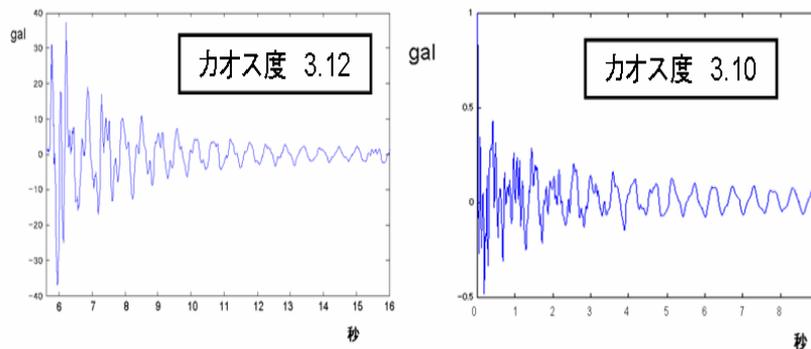


図 1 8 実物大の自由振動(左) モデルのインパルス応答(右)

推定したモデルのフィット率を見てみると、うまく推定ができています。そして、実物大実験の自由振動応答とモデルで推定したインパルス応答は、ほぼ等しい波形をしています。さらに、両方のカオス度もほぼ合致していることがわかります。よって、この計算法により入力は常に一定となり、入力特性の影響を排除することができました。そして新しいカオス度計算手法の実用性が示されました。

g) まとめ

シミュレーションと実物構造物実験から、カオス度の変化を検証した。これより、(1) カオス度は減衰定数と関係がある (2) 周波数の帯域が広がることによってカオス度は上昇する (3) 同じ構造物でも地動の入力の違いによりカオス度は変化していく、ことなどが判明した。以上の知見を活用し、入力には常に一定とする入力特性に依存しないカオス度の算出方法を提案した。よって、カオス理論と物理パラメタのひとつである減衰定数との関係を明らかにし、安定的で信頼性の高い手法を提案できた。

謝辞

カオス度評価に関し、名古屋工業大学の岡田教授に多大なご協力・ご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

(d) 結論ならびに今後の課題

昨年度試作したワイヤレスセンサを使って、実大建物の振動実験を行い、有線の在来型のセンサと比較した。その結果、設置を迅速にかつ容易に実施することができ、有線と比較して格段に効率的に実施できることがわかった。木造のように電波の到達に問題がない場合には、特に適したセンサであることが判明した。

近畿大学キャンパス内にある実大建物を解体し、また組み立てなおすことによって、さまざまな損傷状態に対応した骨組みごとに振動実験を行った。固有振動数を求めるとともに、小型の模型を用いた振動台実験および ANSYS によるシミュレーションを行って、その動特性を評価した。

来年度に向けた予備検討として、カオス度を SVM の特徴ベクトルに利用するために新しい算出方法を提案し、その有効性を確かめた。

SVM を利用した簡易耐震診断システムの確立に向けた要素研究がほぼ出揃ったので、来年度はそれらの知見を活かして現実的な手法の提案をしていきたい。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1. 宮内賢治、富士谷成俊、薛松濤：ANSYS 及び振動実験による木造構造物の振動特性、その 1、ANSYS 及び模型作成の概要、発表番号 21039、日本建築学会 2005 年度大会（近畿）
2. 富士谷成俊、宮内賢治、薛松濤：ANSYS 及び振動実験による木造構造物の振動特性、その 2、結果及び考察、発表番号 21040、日本建築学会 2005 年度大会（近畿）
3. S. XUE, N. FUJITANI, Z. WEI and H. TANG: Comparison on variations of natural frequencies for wooden structural models with and without damages, part 1, Ansys based results, Proceedings of 2nd International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Nov. 2005, Shenzhen, CHINA,

pp.1097-1099

4. S. XUE, N. FUJITANI, Z. WEI and H. TANG: Comparison on variations of natural frequencies for wooden structural models with and without damages, part 2, Shaking table based results, Proceedings of 2nd International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Nov. 2005, Shenzhen, CHINA, pp.1101-1104
5. S. LI, Z. WU and S. XUE: Damage locating based on dynamic measurements from long-gage fiber optic sensors, Proceedings of 2nd International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Nov. 2005, Shenzhen, CHINA, pp.1105-1111
6. S. XUE, N. FUJITANI and Z. WEI: Model and Simulations on Variations of Natural Frequencies for Wooden Structure with and Without Damages, Proceedings of the International Symposium on Innovation and Sustainability of Structures in Civil Engineering, Nov. 2005, Nanjing, China, pp.2427-2433
7. 土方一弘, 三田彰「損傷パラメタを考慮に入れた木造建築物の健全性診断とカオス理論との関係について」日本地震工学会大会 2005 梗概集, 54-55(2005.11)

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成18年度業務計画案

次の二つの検討を行う。

① 振動データからの損傷データ抽出方法に関する研究

実際の建物の観測データおよびシミュレーションによる振動データから、保険や保険デリバティブに有用なデータの抽出のための評価手順を確立する。

② ワイヤレスセンサを用いた木造建物の動特性評価

実験用に建設された木造建物の解体時および組み立て時にワイヤレスセンサによる振動計測を行って、その動特性を計測し、建物強度と動特性の関係について評価するとともに、ワイヤレスセンサを使った振動実験およびデータ収録手順を確立する。

米国サンディエゴで開催される第4回構造制御とモニタリングに関する国際会議に参加して、これまでの成果を発表すると共に耐震診断に関する最新の知見について調査する。

