

既存木造建物を対象とした低コスト動的耐震診断手法の開発
DEVELOPMENT OF LOW COST DYNAMIC SEISMIC DIAGNOSIS TECHNIQUE
FOR EXISTING WOOD HOUSE

本川 英治*
Eiji MOTOKAWA

In this study, a simple system of seismic diagnosis is developed. In this system, portable accelerometer and impact force are used. Potable accelerometer was developed by Matsuura and Ohkubo. It is possible to measure vibration easily, because it does not need wiring and it is compact compared with general accelerometers for microtremor. Impact force is used to vibrate wooden house. It can be given by human power, but in this study a vibration exciter is made in order to evaluate the present system precisely. The proposed system is evaluated by measuring the natural period and the damping factor of the experiment wooden house in Kinki University.

Keywords: *dynamic seismic diagnosis, forced vibration, natural period, damping factor.*

動的耐震診断, 起振機, 固有周期, 減衰定数

1. 緒言

近年、東海沖地震、南海沖地震、東南海沖地震などの巨大地震の発生確率が高まる中、新耐震設計法以前に建てられた既存不適格木造建物の耐震化が社会的に急務となっている。耐震改修促進法¹⁾でも、2015年までに耐震化率を90%にすること、また、耐震診断においても5年間で100万戸、10年間で150~200万戸の診断が必要であることが明記されている。

耐震診断の方法は、主に建物の目視による診断が主流であるが、他にも、一般耐震診断法や精密診断による保有水平耐力診断法、時刻歴応答計算法、限界耐力計算法²⁾などがある。しかし、目視による診断評価は、診断士によって評価が異なることがあることや、また、一般耐震診断法、精密診断法は、建物の詳細図面がないと評価することができない。

詳細図面を用いない耐震診断としては、起振機と計測装置を用いた動的耐震診断がしばしば行われている³⁾。この診断は、建物を実際に起振機で加振することによって非耐震要素も考慮した診断が行える。しかし、起振機を含めた装置が非常に高価なため、診断自身にコストがかかるのが現状である。また、各計測装置が大型であり、センサーとアンプの配線が複雑になるなどの計測システムの問題点も挙げられる。

最近では、マイクロ技術またはMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術の発達により、半導体微細加工技術を応用した小型加速度センサーの開発が行われている⁴⁾⁵⁾。また、これに通信機能を備えることで、構造ヘルスマニタリングを可能にし、従来の

計測装置に比べ、安価なものとなり、かつ簡易に計測することができる。

本研究では、木造建物の耐震診断を低コストで効率よく行うため、松浦((有)ALNIC)、大久保(広島大学)らによって開発された小型ポータブル加速度計測装置を用いた動的耐震診断手法の開発を行う。そこで、起振機のコストを下げるため、簡易かつ安価な起振機を独自に開発し、近畿大学工学部キャンパス内にある環境共生型実験住宅を用いて、その有効性を検証する。また、常時微動計測との比較を行う。

本報告第2章では、動的耐震診断に用いるポータブル加速度計と起振機の開発について述べる。第3章では、開発したシステムの有効性を確かめるために、環境共生型実験住宅を対象として、動的耐震診断システムによる加振計測、誘電型速度計による常時微動計測、誘電型速度計と起振機による加振計測を行い、提案システムの検証を行う。第4章では、以上のまとめを述べる。

2. 動的耐震診断システム

2.1 ポータブル加速度計測装置

写真1に、本動的耐震診断システムに用いるポータブル加速度計測装置を示す。この計測装置は、3軸加速度センサー(3cm×5cm)とPCのみで振動計測を行うことができ、複雑な配線が不要であることから設置場所も自由に選択することができる。加速度センサーの機能は、感度±2000~40Gal、分解能0.6~0.01Gal、サンプリング周波数1000Hz、100Hz、計測時間5~200secまで設定す

ることができる。

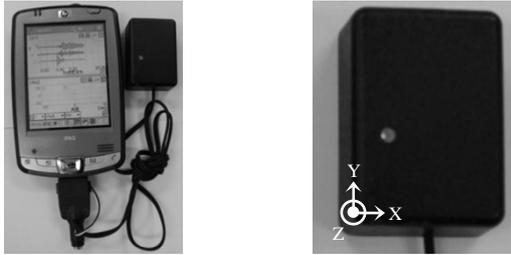


写真1 ポータブル加速度計測装置

2.2 起振機

開発した起振機は、ダンベルによる衝撃型起振機である(図1)。写真に示すように、主にダンベルを支える材料は、ワイヤー(1000mm)を計2本、鉄入りのパイプを計10本、ジョイントを計12本使用している。また、ダンベルが衝突する材料は、板材(720mm×540mm×10mm)を1材、鉄筋(900mm)を2本、木材(115mm×540mm×175mm)を6材使用している。6材の木材には、2か所に穴をあけ、そのうちの2材は、L型金物で板材と固定する。固定面の裏面には、シリコンゴムを用いて2mm程度の層を形成する。組み立てに要する時間10分、総質量15kg、費用15000円程度である。

加振原理は、対象とする建物床に起振機を設置し、ダンベルをある角度まで引き、離すと、ダンベルが木材に衝突する。その時、生まれる衝撃力が、ゴム板の摩擦を介して床に伝わり、建物を起振させる仕組みである。

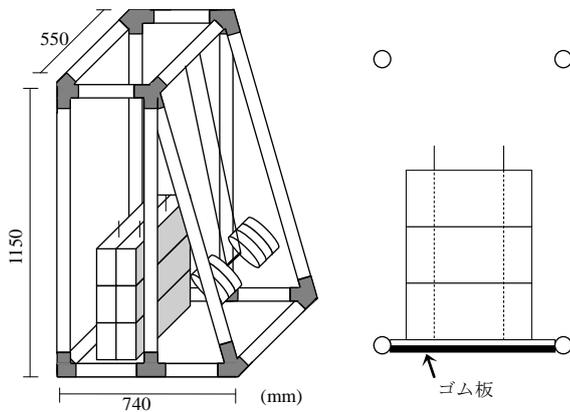


図1 起振機

3. 動的耐震診断システムの有効性

3.1 対象建物概要

対象とする建物は、近畿大学工学部のキャンパス内にある環境共生型実験住宅である(図2)。この環境共生型実験住宅の構法と特徴は、在来軸組み構法であり、外壁には、押出成形セメント板を用いた横張り工法を、屋根部には、空気層ができるように垂木を2重にかけている。

規模は、桁行方向9100mm、張間方向5460mm、軒高6129mm、屋根頂部までの高さ7729mmであり、1階床面積49.69m²、2階床面積44.72m²である。屋根は切妻仕様で、材料はガルバニウム鋼板瓦棒葺を用いている。

表1に、環境共生型実験住宅の質量算定結果を示す。算定方法

は、詳細図面からすべての部材の寸法と材種をあらわし、比重からひとつひとつの部材の質量を求めた。表より、環境共生型実験住宅の質量は、12.39tonと一般住宅に比較して軽量であることがわかる。

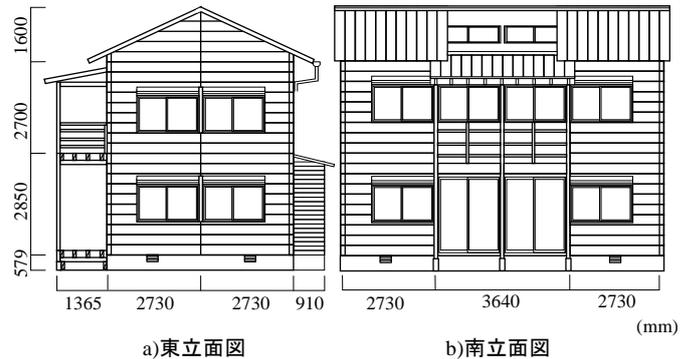


図2 環境共生型実験住宅の外観

表1 環境共生型実験住宅の各階の質量(ton)

	躯体のみ	仕上げのみ	躯体+仕上げ
1階	1.45	3.05	4.50
2階	2.24	2.56	4.80
屋根	2.22	0.78	3.09
計	5.92	6.39	12.39

3.2 誘電型速度計による常時微動計測

動的耐震診断システムの有効性を検証するため、まず、誘電型速度計による常時微動計測を、環境共生型実験住宅で計測を行う。

3.2.1 計測概要

地盤と建物の動的相互作用を考慮したSRモデルによる伝達関数によって、基礎のスウェイ・ロッキングを含む伝達関数(以後、SRB)、基礎のロッキングを含む伝達関数(以後、RB)、基礎固定時の伝達関数⁶⁾を求める。次に、フーリエスペクトル $F(f)$ による3つの伝達関数の算出式を示す。

$$H_{SRB}(f) = \frac{F_T(f)}{F_G(f)} \quad (1)$$

$$H_{RB}(f) = \frac{F_T(f)}{F_G(f) + F_S(f)} \quad (2)$$

$$H_B(f) = \frac{F_T(f)}{F_G(f) + F_S(f) + F_R(f)} \quad (3)$$

(1)式~(3)式の右辺の $F_T(f)$ 、 $F_G(f)$ 、 $F_S(f)$ 、 $F_R(f)$ は、それぞれ、建物頂部、地盤、基礎のスウェイ、ロッキングのフーリエスペクトルである。

また、固有振動数 f_0 のフーリエ振幅 $F(f_0)$ を用いたスウェイ率 S 、ロッキング率 R 、弾性率 B の算出式を次式に示す。

$$S = \frac{F_S(f_0)}{F_T(f_0) - F_G(f_0)} \quad (4)$$

$$R = \frac{F_R(f_0)}{F_T(f_0) - F_G(f_0)} \quad (5)$$

$$B = 1 - S - R \quad (6)$$

図3に、環境共生型実験住宅における誘電型速度計の配置図を示す。図より、微動計の設置場所は、水平動を地盤・1階中央・2階中央・2階端部の計10か所、上下動を地盤・1階端部の計5か

所に設置した。いずれもサンプリング周波数を 100Hz、計測時間を 55 分とし、15 チャンネル同時計測を実施した。また、微動計は、(株)東京測振の動コイル型、固有周期 1sec、感度 1mkine/V を用いた。

計測された速度波形は、20.48sec 間ずつに分割し、交通振動などのノイズが少ない 70 サンプルを選定する。選定した速度波形は、高速フーリエ変換によって速度フーリエスペクトルを算出し、SRB, RB, B の伝達関数および平均伝達関数を算出する。そして、平均伝達関数のピーク振幅の振動数を固有振動数として固有周期を求める。

減衰定数は、まず、70 サンプルをつなぎ合わせた速度波形から速度フーリエスペクトルを算出し、さらに、固有振動数が中央振動数となる矩形の Band 幅±0.5Hz の Filter 処理を行ったのち逆変換する。そして、RD 法⁷⁾を用いて自由振動波形を算出し、その初期の極大値を除く 5 つの極大値を最小自乗法により近似することによって減衰定数を求める。最小自乗法に用いる関数を、次式に示す。

$$X(t) = ae^{-\lambda \omega t} \quad (7)$$

RD 法の小サンプル長さ T は、固有周期の 10 倍とし、また、重ね合わせ個数は、100 個～1000 個まで 100 個ずつ変化させる。

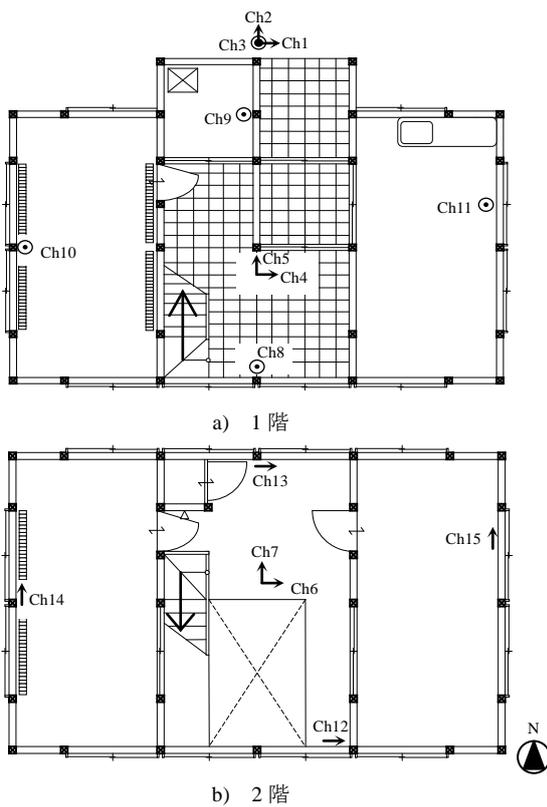


図3 計測計画図

3.2.2 計測結果

図4～図6に、SRB, RB, B の伝達関数を灰色で、平均伝達関数を黒色で示す。図より、どの伝達関数も NS 方向に比べ、EW 方向が大きくなっていることがわかり、また、SRB, RB, B の固有振動数は、EW 方向で、5.18Hz～5.22Hz であり、また、NS 方

向で、6.64Hz～6.84Hz であった。

表2に、EW, NS 方向のスウェイ率、ロックン率、弾性率を示す。表より、両方向とも弾性率が支配的であり、スウェイ率、ロックン率は、小さいことがわかる。このことから、環境共生型実験住宅は、地盤の影響を受けていないことがわかった。

図7に、重ね合わせ個数の変化における減衰定数の推移を示す。図より、重ね合わせ個数が 100 個の時は、どの ch においても減衰定数のばらつきは多いが、重ね合わせ個数が増えるごとに減衰定数が収束していつていることがわかる。

表3に、EW, NS 方向の SRB, RB, B の固有周期と RD 法による重ね合わせ個数 1000 個のときの平均減衰定数を示す。表より、固有周期および減衰定数は、EW 方向で 0.19sec, 2.4%, NS 方向で 0.15sec, 1.8% となり、NS 方向に比べ、EW 方向のほうが大きくなった。

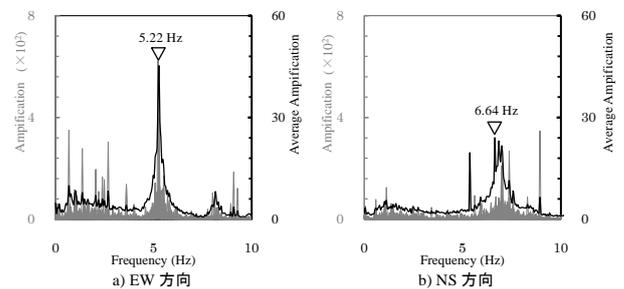


図4 SRB の伝達関数

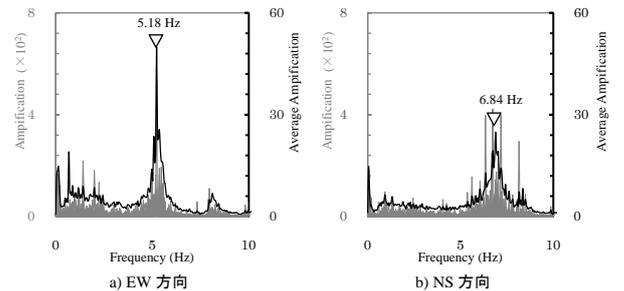


図5 RB の伝達関数

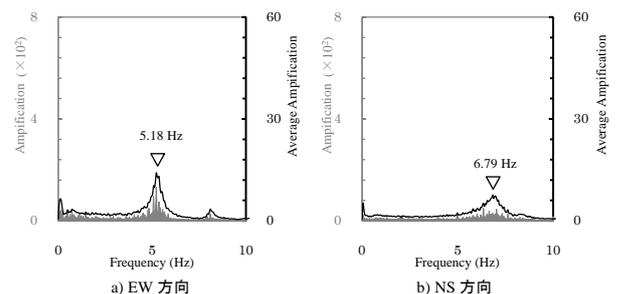


図6 B の伝達関数

表2 EW, NS 方向のスウェイ率,ロックン率,弾性率(%)

	スウェイ率	ロックン率	弾性率
EW 方向	1.7	2.8	95.5
NS 方向	2.0	8.2	89

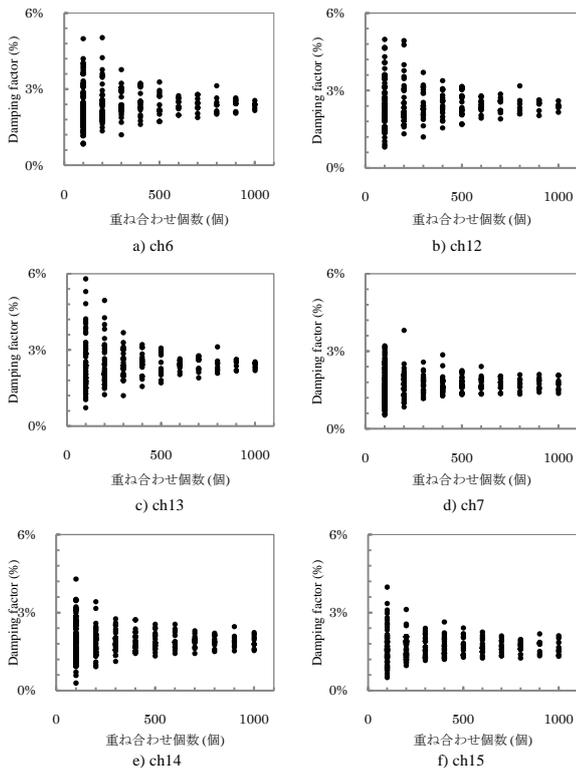


図7 重ね合わせ個数の変化による減衰定数の推移

表3 EW, NS方向の固有周期と減衰定数

	EW方向	NS方向
固有周期(sec)	0.19	0.15
減衰定数(%)	2.4	1.8

3.3 ポータブル加速度計による加振計測

次に、ポータブル加速度計と開発した起振機を用いた動的耐震診断システムの有効性を検証するため、同じ環境共生型実験住宅での計測を行う。

3.3.1 計測概要

ダンベルの質量を 2.5kg, 10kg, 20kg, 30kg, ダンベルを離す時の角度を 10°, 20°, 30°とし、質量と角度の全組み合わせによる加振計測を行う。そして、ダンベルが木材に衝突する時の運動エネルギーに対する固有周期と減衰定数を算定する。

図8に、EW, NS方向加振時の起振機とポータブル加速度計の配置図を示す。図より、起振機は、2階床剛心位置に設置し、EW, NS方向に各5回ずつ加振する。ポータブル加速度計の設置位置は、EW方向加振では、北、重心、南に、NS方向加振では、西、重心、東に設置する。いずれも、サンプリング周波数100Hz、センサー感度±125Gal、1組の計測時間200秒とする。

計測波形は、衝撃力となる振幅を除く5.12秒を抽出し、その波形を高速フーリエ変換によって加速度フーリエスペクトルを算出する。そして、5つの加速度フーリエスペクトルの平均加速度フーリエスペクトルから固有振動数、固有周期を求める。

減衰定数は、加速度フーリエスペクトルに固有振動数が中央振動数をなる矩形のBand幅±0.5HzのFilter処理を行ったのち逆変換す

る。そして、その加速度波形の初期の極大値を除く5つの極大値を最小自乗法で近似させることによって求める。

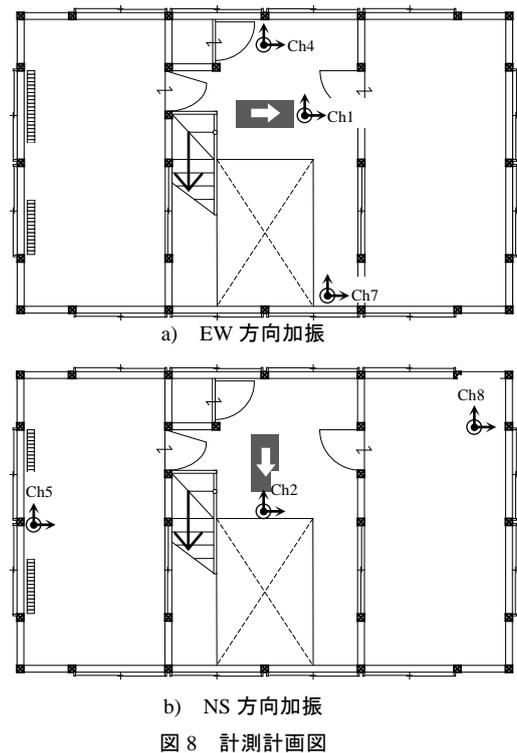


図8 計測計画図

3.3.2 計測結果

図9に、EW, NS方向加振したときのch1, ch2における計測データの平均値と起振機の運動エネルギーの関係を示す。図より、運動エネルギーに対する加速度平均は、2.5kg-10°~30kg-10°まで増加傾向が見てとることがわかる。しかし、30kg-10°より大きい運動エネルギーに対する加速度平均は、増加傾向が見られなかった。これは、ダンベルの衝撃力に対するゴム板の静止摩擦係数が動摩擦係数に移行したためと考えられる。

図10, 11に、EW, NS方向加振の加速度フーリエスペクトル、平均加速度フーリエスペクトルの一例を起振機の運動エネルギーの小さい順に示す。また、両図とも加速度フーリエスペクトルを灰色で、平均加速度フーリエスペクトルを黒色で示す。図より、EW, NS方向とも、一番小さな運動エネルギー(2.5kg-10°)の場合では、明瞭なピーク振幅を確認することができず固有振動数を確認することができない。しかし、それ以降では、ピーク振幅を確認ことができ、EW, NS方向の固有振動数は、それぞれ、5.27~5.47Hz, 6.64~7.03Hzであった。

表4に、各計測位置で算出した固有周期と減衰定数を、EW, NS方向で平均した値を示す。また、表では起振機の運動エネルギーの小さい順に示している。表より、固有周期は、2.5kg-20°~2.5kg-30°までは、EW, NS方向それぞれ、0.18, 0.14secとなり、30kg-10°以降では、EW, NS方向それぞれ、0.19, 0.15secとなった。また、減衰定数は、EW, NS方向それぞれ、3.2%~3.9%, 2.4%~2.9%となった。

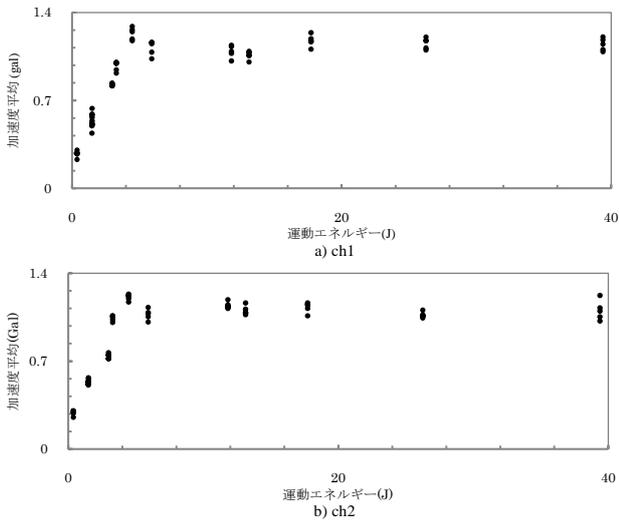


図9 起振機の運動エネルギーと加速度平均の関係

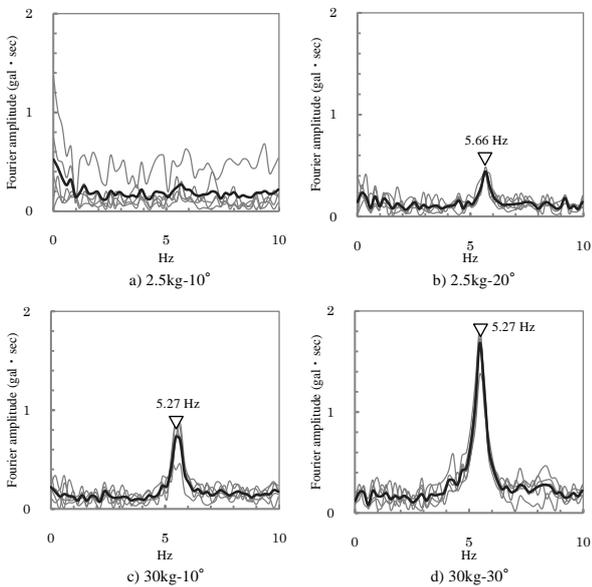


図10 EW方向の加速度フーリエスペクトル(ch4)

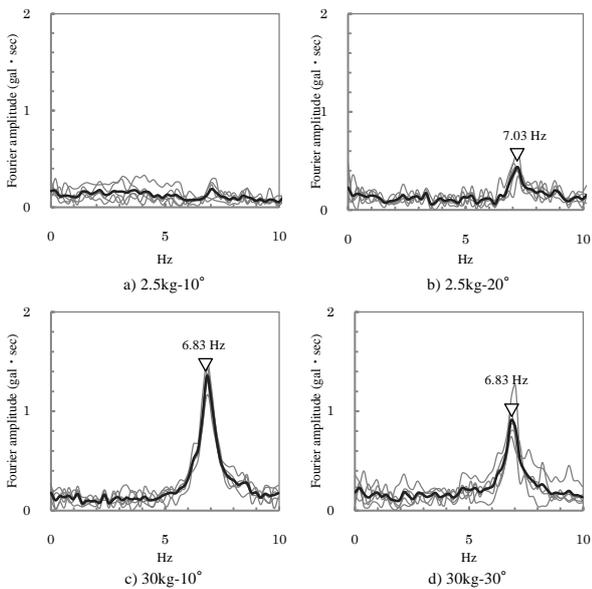


図11 NS方向の加速度フーリエスペクトル(ch8)

表4 EW, NS方向の固有周期と減衰定数

	固有周期(sec)		減衰定数(%)	
	EW方向	NS方向	EW方向	NS方向
2.5kg-10°	-	-	-	-
2.5kg-20°	0.18	0.14	3.6	2.4
10kg-10°	0.18	0.14	3.2	2.6
20kg-10°	0.18	0.14	3.4	2.7
2.5kg-30°	0.18	0.14	3.6	2.6
30kg-10°	0.19	0.15	3.4	2.9
10kg-20°	0.19	0.15	3.4	2.8
20kg-20°	0.19	0.15	3.7	2.7
10kg-30°	0.19	0.15	3.6	2.9
30kg-20°	0.19	0.15	3.9	2.8
20kg-30°	0.19	0.15	3.6	2.8
30kg-30°	0.19	0.15	3.6	2.6

3.4 誘電型速度計による加振計測

さらに、ポータブル加速度計の有効性を検証するため、同じ起振機を用いて誘電型速度計による計測を行う。

3.4.1 計測概要

計測概要は、起振機を2階床の剛心位置に、誘電型速度計を2階床両端に設置する(図12)。

加振方法は、3.3.1項と同様である。ただし、加振力は、十分大きいものとした。計測波形は、EW方向に加振した時は、ch1, ch2を、NS方向に加振した時は、ch3, ch4を用いる。

計測波形の処理方法は、計測波形の起振力となる振幅を除く5.12秒間を高速フーリエ変換することで速度フーリエスペクトル求め、それから固有周期を求める。

減衰定数は、速度フーリエスペクトルに、Band幅±0.5HzのFilter処理をした速度波形のピーク振幅を除く5つの極大値を最小自乗法によって近似させることによって求める。

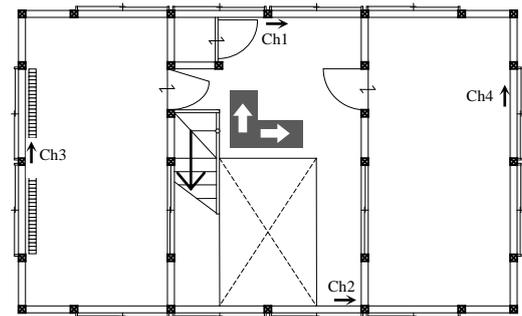


図12 計測計画図

3.4.2 計測結果

図13, 14にEW, NS方向加振による各chの速度フーリエスペクトルを示す。図より、固有振動数は、EW, NS方向それぞれ、5.27Hz, 6.83Hzとなった。

表5に、EW, NS方向の減衰定数と固有周期の算定結果を示す。表より、EW, NS方向それぞれ0.19sec, 0.15secの固有周期となり、また、減衰定数は、それぞれ、3.5%, 2.6%となった。

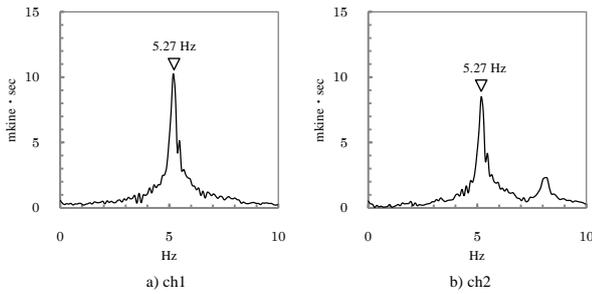


図 13 EW 方向速度フーリエスペクトル

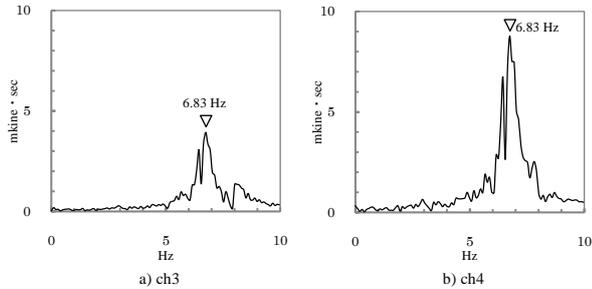


図 14 NS 方向の速度フーリエスペクトル

表 5 各方向における固有周期と減衰定数

	EW 方向			NS 方向		
	ch1	ch2	平均	ch3	ch4	平均
固有周期(sec)	0.19	0.19	0.19	0.15	0.15	0.15
減衰定数(%)	3.6	3.4	3.5	2.5	2.6	2.6

3.5 全体の考察

表 6 に、本提案システムと他の計測結果を示す。また、本提案システムの結果は抜粋して示している。表より、固有周期は、本提案システムと他の 2 計測はよく一致していることがわかる。また、減衰定数は、本提案システムと誘電型速度計を用いた加振計測は、ほぼ同様な結果が得られた。しかし、常時微動計測による RD 法を用いた減衰定数は、本提案システムより小さい値となった。これは、本提案システムと常時微動計測の計測波形には、明瞭な振幅差あることが原因と考えられる。

表 6 各計測方法による固有周期(sec)と減衰定数(%)

		EW 方向		NS 方向	
		固有周期	減衰定数	固有周期	減衰定数
提案システム	2.5kg-20°	0.14	3.6	0.18	2.4
	30kg-10°	0.15	3.6	0.19	2.9
	30kg-30°	0.15	3.6	0.19	2.6
誘電型速度計による加振計測		0.15	3.5	0.19	2.6
常時微動計測		0.15	2.4	0.19	1.8

4. 結言

本報では、既存不適格木造建物の耐震診断を効率よく行うために、ポータブル加速度計測装置を用いた動的耐震診断手法の開発を行った。その結果、本提案システムのポータブル加速度計測装置、ダンベルも含めた衝撃型起振機の価格は、それぞれ、70 万円、3 万円程度に抑えることができ、従来、1000 万円程度かかっていた診断コストより下げることができた。なお、ポータブル加速度計測装置の価格は、現時点の価格であり、現在も性能、価格向上に向けて開発が行われている。

本提案システムの有効性を検証するため、環境共生型実験住宅を対象とした加振計測を行った。その結果、起振機の運動エネルギーをある程度大きくし、5 回程度の加振に対するスペクトルの平均をとることで、有効な EW、NS 方向の固有周期、減衰定数が求まることがわかった。また、誘電型速度計による同建物での計測を行った結果、本提案システムと同様な値を得られたことから、本提案システムの有効性が確かめられた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、広島大学の松本慎也氏に、誘電型速度計による計測ならびに貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 木村惇一, 田原賢, 木造住宅[耐震診断・改修]コンプリートガイド, エクスナレッジ, pp22, 2007
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課, 木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と補強方法(改訂版), 財団法人日本建築防災協会, pp7-pp12, 2006
- 3) 毎熊輝記, 小林直太, 山田真, 住宅の動的耐震性評価に関する試み, 物理探査学会第 104 回学術講演会論文集, pp31-pp34, 2001
- 4) 中村充, 柳瀬高仁, 池ヶ谷靖, 圓幸四郎, 米山健一郎, 建造物のヘルスマニタリングを目指したスマート加速度センサーの開発, 日本建築学会技術報告集, NO.27, pp153-158, 2008
- 5) 倉田成人, 猿渡俊介, 堀江信吾, 森川博之, 青山友紀, ユビキタス・センサネットワーク用加速度センサモジュールの開発, 日本建築学会大会学術講演便概集, pp419-420, 2006
- 6) 日本建築学会, 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 丸善, pp19-20, 2006
- 7) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫, RD 法による建造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文集, No.454, pp29-38, 1993
- 8) 佐々木淳, 田村幸雄, 塚越治夫, RD 法による建造物の減衰評価, 日本建築学会大会学術講演便概集, pp809-810, 1991
- 9) 佐々木淳, 田村幸雄, 塚越治夫, RD 法による建造物の減衰評価: その 2 パフティング振動している 1 質点系への適用, 日本建築学会大会学術講演便概集, pp1149-1150, 1992
- 10) 佐々木淳, 田村幸雄, 塚越治夫, RD 法による建造物の減衰評価: その 3 パフティング振動している 2 質点系への適用, 日本建築学会大会学術講演便概集, pp1151-1152, 1992
- 11) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島, 2000
- 12) 佐藤友彦, 五十田博, 槌本敬大, 河合直人, 清水秀丸, 既存木造住宅と補強した住宅の動的耐震診断とその精度検証, 日本建築学会構造系論文集, No.618, pp159-166, 2007
- 13) 豊田実希, 法橋篤, 松本慎也, 神野達也, 三浦賢治, 常時微動測定に基づく東広島に現存する木造建物の振動特性, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 32 巻, 1417