

微動計測に基づいた在来木造住宅の振動特性の地域性および年代変化 REGIONAL VARIATION AND AGE DEPENDENCY IN VIBRATION CHARACTERISTICS OF CONVENTIONAL WOODEN HOUSES BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENTS

岩本 亮*, 川瀬 博**, 包 那仁満都拉***
Ryo IWAMOTO, Hiroshi KAWASE and Narenmandula HO

We collect resonance periods of 163 two-storied, detached wooden houses with traditional construction method by using in-situ microtremor measurements in various regions of Japan. We grasped their averaged vibration characteristics from samples in different regions with different construction ages. A difference of regional design seismic coefficient did not emerge as a difference in averaged resonance periods. Except for Sapporo region a relatively small regional variation is observed. It is estimated that an older house should have a long resonance period so should have a lower seismic capacity. On the average 30 years of age difference yields about 1.41 times of period ratio. This finding on the age degradation in seismic capacity shows good correlation to the independent results based on the damage statistics in Kobe.

Keywords : *microtremor, dynamic properties, resonant period, wooden detached house, construction age*

常時微動, 振動特性, 共振周期, 木造戸建住宅, 築年

1. はじめに

木造住宅は数の上では日本の建物の大半を占めており、地震被害予測の為にその地震時挙動の定量的把握が求められている。現状では木造建物の挙動解析モデルは、地域・年代ごとの特性の違いを考慮できる程の具体性が不足しており、その正確なモデル化が急務であるといわざるを得ない。そのため、まずできるだけ偏りの無い多くの標本を採取し、実データに基づいて地域性および年代変化による振動特性を把握する必要がある。

そこで本研究では、在来構法による木造2階戸建住宅を対象とし、常時微動計測によって建物の共振周期を求め、異なった地域および異なった建築年の標本から、どのような振動特性となっているかを把握する。また、これらのデータは過去および今後の研究結果と比較・検証するための実測値データとしても有用である。

2. 常時微動計測と波形解析

2. 1 計測建物

対象とする建物種類は在来構法による木造2階戸建住宅とする。対象地域は、図1に示すように、南海地震の被害予測が必要とされる高知市20戸、2004年新潟県中越地震の被災地であり、モデルを構築した場合には実被害との比較が可能な、新潟市36戸・長岡市24戸・三条市12戸をはじめ、札幌市7戸、大阪府18戸、名古屋市8戸、

そして福岡県6戸に、過去に田中・川瀬¹⁾により微動計測が行われていた32戸を加え合計163戸の常時微動波形を採取した。

2. 2 計測方法

今回の計測では、微動計は写真1および図2のように2階の床と、1階の床に設置した。これら2つの微動計は可能な限り、その建物の中心に、かつ互いに同一線上に配置するよう試みたが、絨毯など不安定な場所やタタのリビングなどの生活空間を避けた結果として、玄関付近や階段室付近に設置するものが大半であった。

計測に用いた微動計は、0.1倍から10,000倍のアンプ付き可搬型3成分加速度計ア卡西 SMAR-6A3P で、水平2成分(建物の短辺・長辺)の変位波形を15分間1セットで記録した。ハイカットフィルタ一周波数を50Hz、サンプリング周波数を100Hzとした。時刻校正はGPS時刻信号によって行い、各地点の同時刻性を確保した。また、建築年、建築面積、階高、大まかな形状、写真、緯度経度の位置情報なども調査を行った。実施期間は、2006年9月～2007年9月の1年間である(なお田中・川瀬¹⁾の計測実施は2003年)。

2. 3 微動波形の解析方法

本研究で実施した微動計測の波形処理は既報²⁾³⁾における処理と同様に、1階で得られた計測記録を X_i 、2階で得られた計測記録を Y_i として解析を行った。まずFFTによって i 番目の有限フーリエ変換 $X_i(\omega)$ 、 $Y_i(\omega)$ を求める。

* 佐世保市役所

** 京都大学防災研究所 教授・工博

*** 飛鳥建設株式会社 副主任研究員・工博

Officer, Sasebo City Office

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

Junior Res. Eng., Research Inst. of Technology, Tobishima Corp., Dr. Eng.



図1 対象地域



写真1 計測建物の例

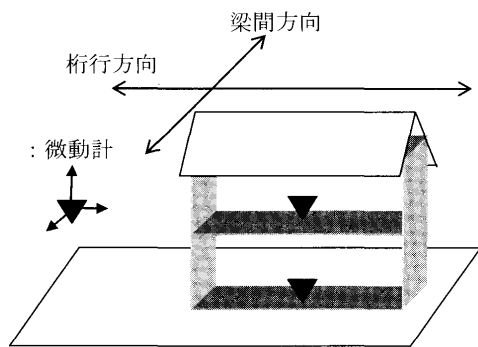


図2 微動計設置例

これを用いて、解析に用いる N 個のブロックのアンサンブル平均からパワースペクトル $S_{XX}(\omega)$, $S_{YY}(\omega)$ とクロススペクトル $S_{XY}(\omega)$ を計算する。

$$S_{XX}(\omega) = 2/NT \sum_{i=1}^n \{X_i(\omega) \cdot X_i^*(\omega)\} \quad (1)$$

$$S_{YY}(\omega) = 2/NT \sum_{i=1}^n \{Y_i(\omega) \cdot Y_i^*(\omega)\} \quad (2)$$

$$S_{XY}(\omega) = 2/NT \sum_{i=1}^n \{Y_i(\omega) \cdot X_i^*(\omega)\} \quad (3)$$

上付きの*は共役の複素数であることを示す。

上記のパワースペクトル、クロススペクトルから伝達関数 $H(\omega)$ 、フェイズ関数 $\theta(\omega)$ 、コヒーレンス $coh^2(\omega)$ 、スペクトル比 $R(\omega)$

を次式によって算定する。なお、伝達関数については、入出力ノイズの状態によって幾つかの算定式があるが、構造物については入力側のノイズが少ない事を考慮して次の式を用いた。

$$H(\omega) = \sqrt{S_{XY}(\omega)/S_{XX}(\omega)} \quad (4)$$

$$\theta(\omega) = \tan^{-1} \{ \text{Im}(S_{XY}(\omega)) / \text{Re}(S_{XY}(\omega)) \} \quad (5)$$

$$coh(\omega)^2 = |S_{XY}|^2 / (S_{XX}(\omega) \cdot S_{YY}(\omega)) \quad (6)$$

$$R(\omega) = \sqrt{S_{YY}(\omega)/S_{XX}(\omega)} \quad (7)$$

ここで、 $\text{Im}()$ 、 $\text{Re}()$ はそれぞれ虚部、実部を表している。

データ処理においては、まず微動計測から得られたデータを 50% オーバーラップさせて 40.96 秒の小区間に切り出す。そしてそのフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比を求め、アンサンブル平均値を計算し、求めたフーリエスペクトル比の 1 次ピークを共振振動数とし、建物の梁間方向と桁行方向のそれぞれについて読み取る。この際、伝達関数の位相 ((5) 式) が 0° 付近から 180° 近くまで急速に変化する振動数帯域の中で、 90° 付近の振動数であることや、コヒーレンス ((6) 式) の急激に低下する振動数であることも振動数判定の補助情報とした。図 3 に共振振動数の判定の根拠に利用した伝達関数の位相とコヒーレンスの例を示す。なお本論文では微動から抽出したピーク振動数を「共振振動数」と称している（以下ではその逆数の「共振周期」をもつぱら用いる）。これは構造物の固有振動数で入力微動と共振して大きな振幅となることから、観測ではそれを抽出しているという意味で「共振振動数（共振周期）」と称したもので、木造構造物の場合、実際にはそれはほぼ構造物の一次固有振動数（周期）と解釈される。

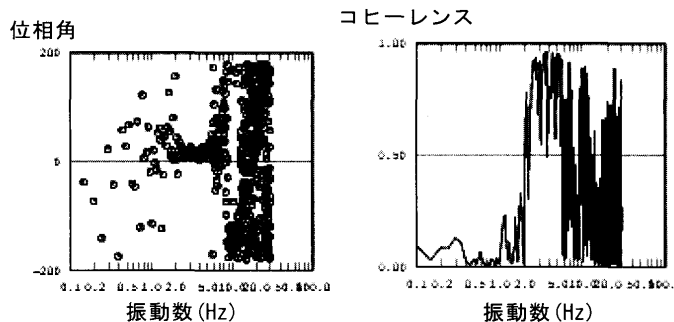


図3 建物の伝達関数の位相（左）とコヒーレンス（右）の例

3. 微動計測による木造2階戸建住宅の振動特性

3. 1 振動特性の地域性比較

図 4 は都市別に共振周期の分布を示したもので、図 5 はその近似直線である。また、以降都市番号として 1 から 8 を、福岡県、高知市、新潟市、長岡市、三条市、札幌市、大阪府、名古屋市の順に与える。これら 2 つの図はともに横軸には建築年をとっており、同様の木造 2 階戸建住宅において、古い建物ほど共振周期が長くなる傾向が明瞭に読み取れる。一方 3. 3 で示すように建築面積と周期との関係はこれに比べるとそれほど大きなものではなかった。

そこでまず、地域の振動特性の平均的な差を把握するために、こ

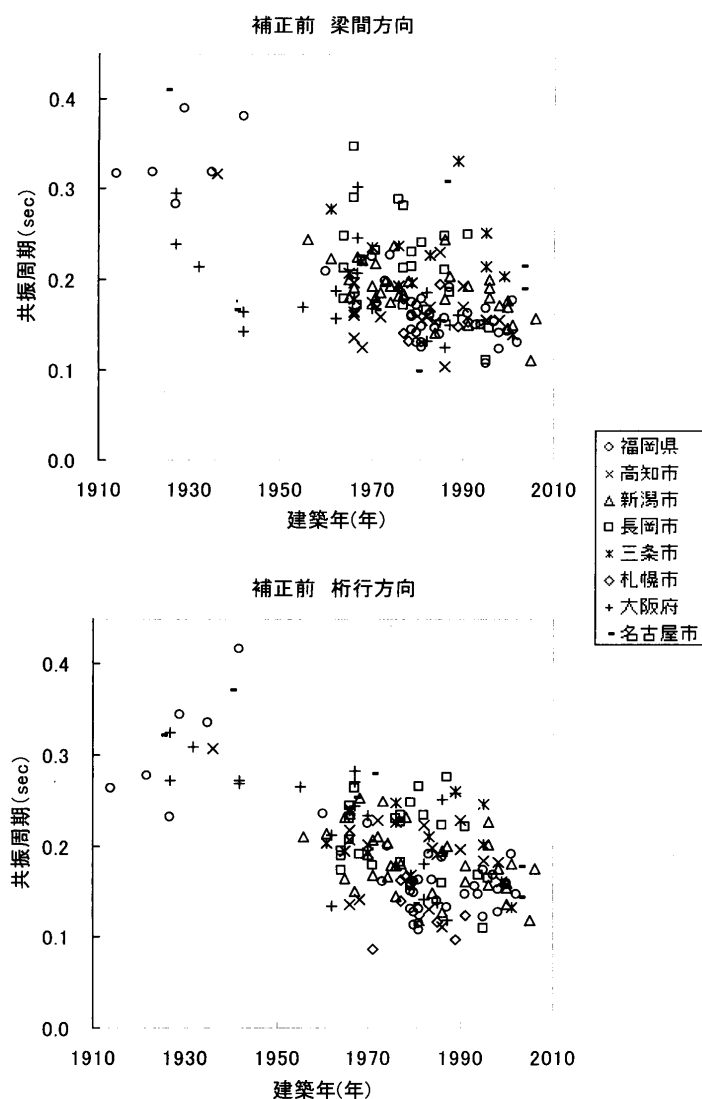


図4 補正前の梁間方向(上)桁行方向(下)の共振周期の分布

ここでは最も影響の大きい都市ごとの建築年代のバラつきを補正することとした。全ての建物は図5の近似直線の傾きの経年変化率で共振周期が短くなっていくと仮定し、平均建築年である1979年を基準にして、図4の各建物の1979年に当たる共振周期を都市ごとに求め補正する。その補正した共振周期を用いて各都市の梁間・桁行方向別に平均値を求めたものが図6である。ただし、札幌市は他に比べ顕著に建築年の分布範囲が狭く、図5の近似直線の傾きの信頼性が低かったのでこの補正は行わず、図6では単純に平均値を用いた。なお、札幌市の建物の平均建築年は1981年であるため、他の都市の基準である1979年との差異は誤差の範囲内と見なせる。

耐力は（限界変位が同じなら）剛性に比例し、剛性は（質量が同じなら）振動数の2乗に比例するという仮定に基づくならば、共振周期が短いほど耐力は高く、共振周期が長いほど耐力は低いと考えられる。その観点からすると、まず三条市の周期が梁間・桁行方向ともに長い、三条市は2004年新潟県中越地震に加えて2004年7月に起きた水害の影響で耐力がさらに低下している可能性がある。また、長岡市でも同時期に水害が起きている。札幌市の共振周期が短いのは積雪荷重を考慮して設計されているのに加え、札幌市では

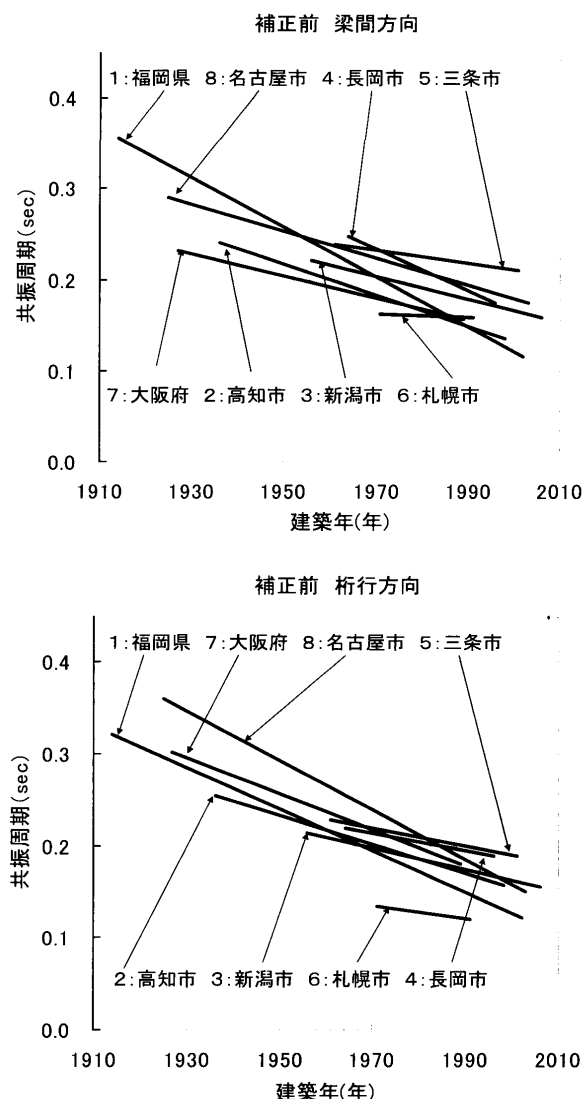


図5 補正前の梁間方向(上)桁行方向(下)の共振周期の近似直線

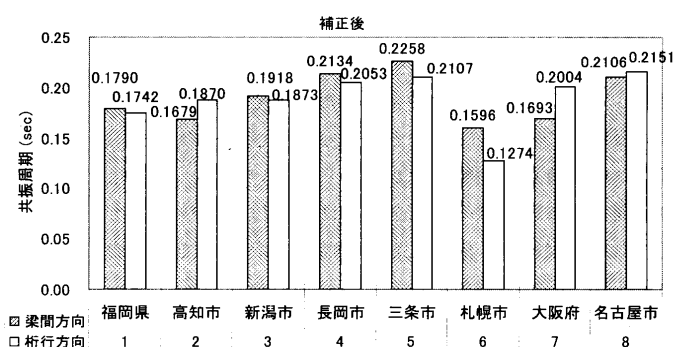


図6 補正後の共振周期による地域性比較

屋根部分をはじめ全体的に太く厚いパーツで構成されている住宅が多く見受けられたが、そういった特有の細部の仕様や構法が影響している可能性が指摘できる。桁行方向の周期が短いのも開口部の比率が小さいことを反映しているのかもしれない。福岡県のデータの大半は2003年田中・川瀬¹⁾が計測したデータなので2005年福岡県西方沖地震の影響は無いといってよい。しかしながら、対象地域の

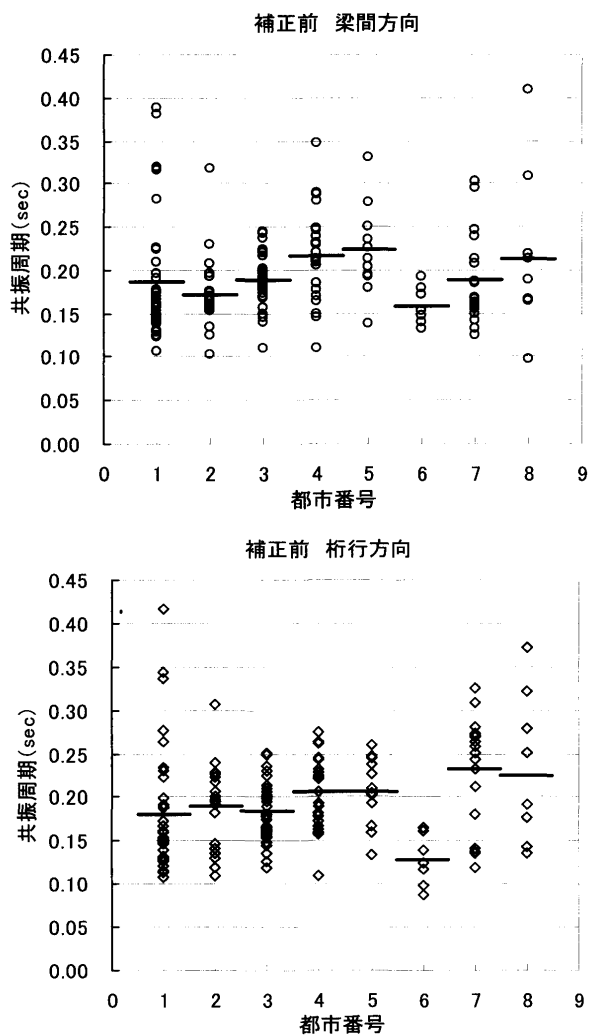


図7 補正前の都市別共振周期分布とその平均値
梁間方向(上)桁行方向(下)

中では福岡県のみ地震地域係数が0.8と他よりも低く設定されているのにも関わらず、共振周期は長いとは言えない結果となった事は興味深い。また、大阪府の住宅は長屋のように隣接する家屋と一部分密着しているというものが多かったが、その影響で梁間と桁行方向の共振周期に差が多く出たと考えられる。以上のように、設計の時点では地震荷重に地域係数が定められているが、今回得られた平均共振周期においてはその区分との関連性はあまり見受けられず、梁間方向で最大約1.4倍(三条と札幌)、桁行方向で最大約1.7倍(大阪と札幌)の地域差があることがわかった。

札幌における木造建物の共振周期が短いことは山本・他⁴⁾の報告と一致しているが、彼らは最頻値として0.11秒付近と報告している。しかし彼らの調査には2×4やパネル工法の家屋も含まれており、在来構法に限ると平均値は約0.12秒となる。さらに彼らの建物は1991年築がほとんどなので、その年代を3.2で示した年代変化率で補正すれば1981年築換算では約0.14秒となり、我々の調査とほぼ対応する結果であるといえる。また鏡味・北川⁵⁾は札幌市内の木造家屋の共振周期を調査し年代別平均関係式を提示しているが、それから1981年築換算値を読み取ると約0.15秒となっており、やはり我々の調査結果と対応する。また彼らは金井・他⁶⁾の川崎市における調

査結果の平均値とは系統的に0.04秒の差があることを報告しており、その差は今回の結果に示された札幌市と他の大阪府や名古屋市といった大都市域との差とよく対応している。

しかし明瞭に見られるこの札幌市と他地域との違いを別にとすると、図3・図4に示されているように、同一地域・同一年代においても個々の建物の共振周期のばらつきは大きく、ここで得られた地域ごとの平均値のわずかな違いをそのまま構造物の平均耐力の違いと解釈して応用してよいかどうか、今回の調査だけで断定は困難であり、今後の更なる詳細調査を待つて判断すべきものと考えられる。逆に第一次近似的には地域係数に拘わらず札幌以外は同一と見なしてよい。同様に梁間方向と桁行方向の違いについても札幌と大阪以外では有意な差とはいうには小さく、同一と見なしてよいと考えられる。

3.2 振動特性の年代変化比較

次に、建築年代による共振周期の平均的な変化を把握するため、各都市間の地域差を除去する。そこでまず、都市ごとに共振周期をプロットしさらに平均共振周期を求めたのが図7である。水平バーで各都市の平均共振周期を示した。なお、1～8は先ほど与えた都市番号である。

福岡の共振周期の幅が広いのは標本の建築年代の幅の広さに起因していると思われる。そして、梁間・桁行方向別に全体の平均共振

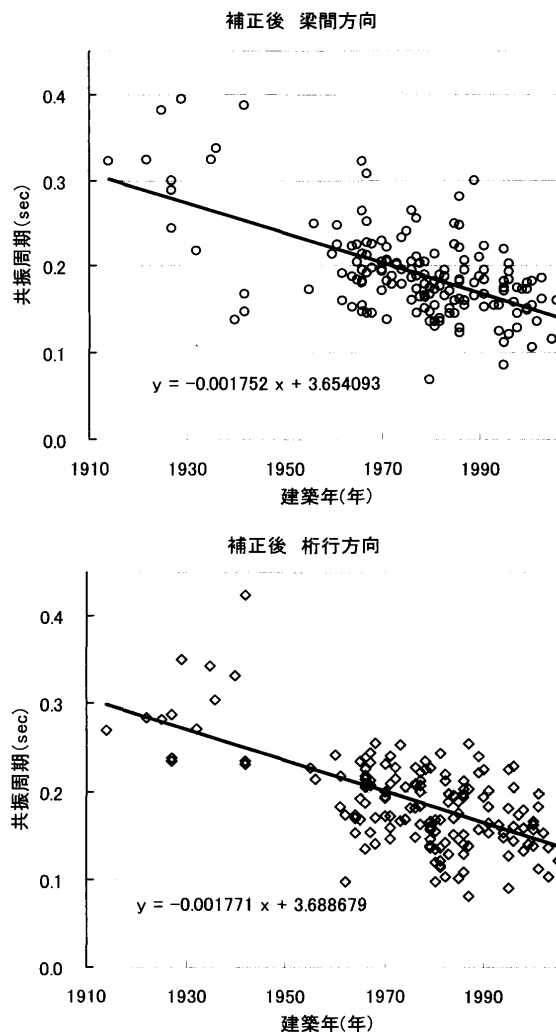


図8 地域性補正後の建築年による共振周期の変化
梁間方向(上)桁行方向(下)

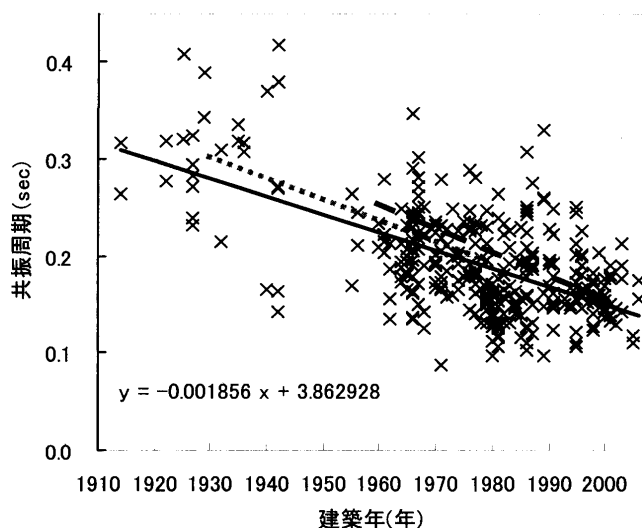


図9 地域性補正後の建築年による共振周期の変化（梁間・桁行）
点線は金井・他⁶⁾の結果、破線は田端・大橋⁷⁾の結果

周期を求め、その平均値を基準とし平均と一致するように、全ての建物の共振周期の値を差分だけ増減させ補正する。例えば全体の梁間方向の共振周期が0.2秒で、福岡県の梁間方向の平均共振周期が0.25秒であったとすると、福岡県の全ての建物について共振周期を0.05秒だけ減らす。このように地域ごとに補正し、地域差を除去した上で建築年を横軸にとりプロットし、近似直線を引いたものが図8である。

図8は地域差を補正した場合の共振周期であるため、これは即ち日本の木造2階戸建住宅の共振周期の年代変化率として捉えることができる。また近似直線の式も合わせて示したが、直線の傾きについて梁間方向と桁行方向にはごく僅かな差しか認められなかったもので、梁間方向と桁行方向を混合して図9に示す。この回帰直線によれば、2007年に建てられた木造2階建て戸建住宅の平均周期は0.138秒、また同様にその30年前である1977年に建てられたものの平均周期は0.194秒であり、これは建ててから30年で約1.4倍になる変化率である。ただし、変化率という言葉を用いたが、本研究ではある1つの建物について時間を追って共振周期を計測したものではなく、この違いには老朽化の影響だけでなく、設計基準・規準や標準的仕様・施工方法の変遷の影響も内包されており、新築の建物の共振周期が経年劣化により何年で何倍に周期が延びるかというような推定には用いるべきではない。また、この直線はある年代の建物の共振周期を求めたい場合に有用であり、例えば図9では1940年代の標本が不足しているが、直線補完によりある程度信頼のある共振周期や耐力を推定することが可能である。

微動による共振周期と建築年代との関係については、古くは金井⁶⁾による川崎市における調査があり、前述の鏡味・北川⁵⁾や田中・川瀬¹⁾でも報告されているが、最近の比較的大規模な調査として田端・大橋⁷⁾により約240棟（その大半は関東地域）に対する調査報告がなされている。ここでは金井⁶⁾の1979年以前の平均関係を点線で、田端・大橋⁷⁾による1960年から2005年の回帰関係を破線で図9に示したが、ばらつきを考慮するとこれらの既往の研究結果と我々の回帰結果はよく対応しており、図9により1914年から2007

年に至る広い年代範囲における平均的共振周期の推定式が提案できたと考えられる。またデータは少ないが我々の結果が金井⁶⁾の結果とほぼ一致したことから、経年劣化の影響は年代別の規準や仕様、施工方法の変遷の与える影響に比べて小さい可能性が示唆される。

3. 3 振動特性の建築面積による変化

最後に、建築面積による共振周期の平均的な変化について検討した結果を報告する。図10には年代補正なしの共振周期と建築面積との関係を示す。梁間方向と桁行方法について区別して表示した。直線は回帰したものでその係数も図中に示した。また縦の一点鎖線は全データの平均面積を示している。この図から常識的に考えられるように建築面積が大きくなると傾向としては共振周期が延びていくこと、しかしその程度はあまり大きくないことがわかる。また両者の相関係数 R^2 も図中に示したがかなり小さい値となっている。回帰で得られた建築面積の大小による共振周期変化の傾きは0.0002から0.0003で、100 m^2 異なると0.02秒から0.03秒差が生じるというレベルに過ぎない。計測した建物の各地域における建築面積平均値が最小で72 m^2 、最大で118 m^2 で多くは100 m^2 前後となっていることから、この建築面積による地域特性への影響は最大でも0.01秒以下と考えられる。

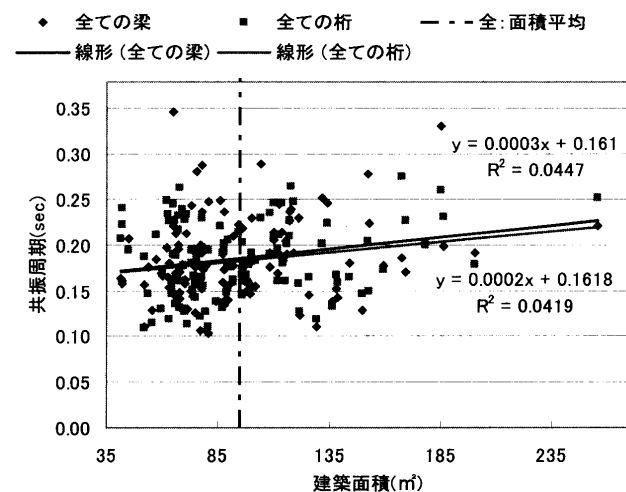


図10 年代補正なしの建築面積による共振周期の変化

4. 実測データとしての他の研究結果との比較

本研究で採取した建物データとして、一部欠けている項目のある標本もあるが、ほとんどの建物について共振周期と建築年、建築面積の他に、階高、大まかな形状、写真、緯度経度の位置情報が得られた（なお階高については物件差は少ない）。これらは異なった地域、異なった建築年の木造2階戸建住宅計163戸の実測値であり、今後の研究ならびに過去の研究結果との比較検証用データとしても有用と考えられる。ここでは図11に吉田ら⁸⁾が推定した、木造建物群の各年代の標準的な設計耐力に対する神戸市域の実建物の推定耐力比 α と比較する。ここで標準的な設計耐力は、水平耐力壁の壁量を建築基準法で要求されている通りに配置した場合に、実験結果に基づいたそれらの壁の耐力を合計して設定したものである。また木造建物群とはその標準的な設計耐力を有する建物を基準にして、実態

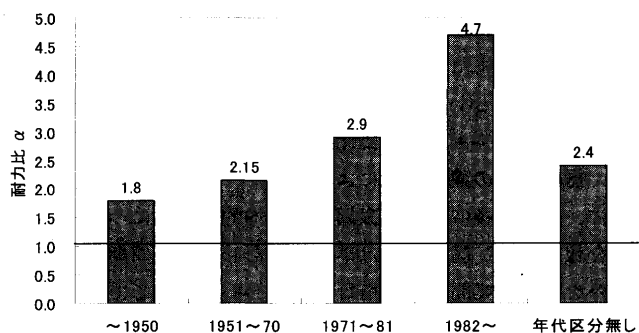


図 1-1 吉田ら⁸⁾が推定した木造住宅の実耐力比

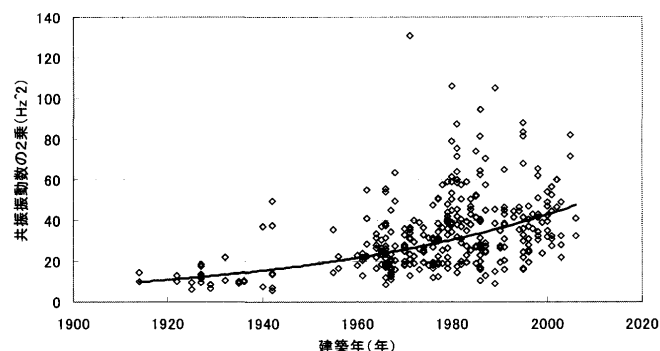


図 1-2 本研究で得られた建築年と 1 次共振振動数の 2 乗の関係

を踏まえて 1 階と 2 階の壁率に異なる値を組み合わせた建物を複数設定し、それぞれのモデルの存在比率を与えたものである。これによって一つの地震波に対して被害率を推定できるという特徴を持っている。

既存木造建物の耐力は、長戸・川瀬⁹⁾によって兵庫県南部地震の建物被害率データと再現強震動に基づき、2 質点系非線形地震応答解析の結果から、観測被害率が再現できるように推定されているが、その基にしている建物被害統計の大破・倒壊率が年代別の統計情報ではなかったため、推定した耐力比 (1.95) は全年代の平均値になっていた。そこで吉田ら⁸⁾は、建築年代別の統計値となっている固定資産台帳に基づいた全壊率を用いて、木造建物群の各年代の標準的な設計耐力に対する実耐力の比を推定した。これが図 1-1 の吉田らの実耐力比 α である。なお右端に示した全年代の平均耐力比が 2.4 と長戸・川瀬⁹⁾の推定結果より上昇している理由は、吉田ら⁸⁾では入力地震動に表層地盤の影響を考慮しているためである。

その推定耐力と比較するために、図 1-2 に本研究のデータから求めた建築年と 1 次共振振動数の 2 乗の関係を示した。耐力は (限界変位が同じなら) 剛性に比例し、剛性は (質量が同じなら) 振動数の 2 乗に比例するという仮定に従ってこの二つの図を比較すると、図 1-2 では 1940 年代の平均と 1990 年代の平均の比は約 2.5 倍、図 1-1 の対応する推定耐力比は 2.6 倍で、平均値としてはよい対応関係にあることがわかる。

5. まとめ

6 つの都市・地域において計 163 戸の微動計測を行い、実測値として有用なデータを採取するとともに、在来構法木造 2 階戸建住宅の振動特性の平均的傾向を把握することができた。以下に本研究の

結論を述べる。

(1) 振動特性の地域性

地震地域係数が同じ地域間でも、共振周期の平均値には差が見られた。逆に地震地域係数の違いが実際の共振周期の違いにそのまま現れることはなかった。構法・工法の違いや地震や水害の被災経験の有無の影響も含めて、同じ木造 2 階戸建住宅でも、地域によって梁間方向で最大約 1.4 倍、桁行方向で最大約 1.7 倍程度の共振周期の差が見られた。他地域と比較して平均値の差が最も大きかったのは札幌市で、既往の研究結果ともよく対応していたところから、この差は有意なものと考えられる。しかし個々の建物の共振周期のばらつきは大きく、ここで得られた札幌市以外の各地域の平均値のわずかな違いをそのまま構造物の平均耐力の違いと解釈してさらに応用していったらよいのかについては慎重な判断が必要である。逆に、地域係数の如何にかかわらず、北海道を除く地域での在来木造モデルとしては第一次近似的には同一のモデルを用いてもよいと解釈できる。

(2) 振動特性の年代変化

これまでも指摘されているように、新しい建物ほど共振周期が短く、従って耐力が高く、古い建物ほど共振周期が長く耐力が低いと推定された。その直線回帰式から、築年が 30 年異なっていると共振周期は約 1.4 倍異なるという事実がわかり、1910 年代から現代に至る広い範囲で、共振周期の年代変化の平均的傾向を把握できた。ただし上記の傾向は現時点での築年による変動を示すもので、同一建物の年代変化を示したものではないことに注意が必要である。またこの年代変化の傾向は既往の研究とよい対応を示した。1979 年時点の観測データの回帰式と今回のその年代の回帰式とが近接していることから、材料等の経年劣化の影響は設計基・規準や告示・構法・施工方法等の変遷による影響に比べ小さいことが示唆された。

(3) 建築面積と共振周期

建築面積が大きくなると共振周期が延びていくこと、しかしその程度は 100m² の差で 0.02 秒とあまり大きくないことがわかった。地域ごとの観測建物の平均面積には大きな違いはないことから、上記 (1) に指摘した地域性には建築面積は大きく影響していないものと考えられる。

(4) 年代別推定耐力比と共振振動数の 2 乗の関係

本研究で得た共振振動数の 2 乗と非線形応答解析モデルから推定した年代別耐力比と比較したところ、両者はよく対応することが分かった。

以上、今回は得られた共振周期の地域別・年代別の平均的特性を抽出し、既往の結果と比較したが、地域性の抽出に関しては個別建物の違いが大きく、データ数を飛躍的に増大させることは容易ではないので、微動共振周期に及ぼす様々なファクター (例えば壁率・偏心率など) の分析とその補正方法の提案を行って、補正周期のばらつきを減らすことが必要であり、今後の課題と考えている。

謝辞

計 163 戸という数多くの微動計測には、研究室の先生方をはじめ、諸先輩方、そしてご自宅の調査を快く了承してく下さった住民の皆様のご協力が不可欠でした。貴重なお時間を割いてご協力いただいたことに対してここに深く感謝の意を表します。本研究の一部は科

学研究費補助金基盤研究 B「警固断層による福岡都市圏の地震被害予測とその環境的・経済的発災インパクト評価」(平成 18～20 年度, 代表者 川瀬博)により実施されました。

参考文献

- 1) 田中宏明・川瀬博:「実測データに基づく木造住宅の三次元非線形動的挙動解析モデルの構築」, 日本建築学会構造系論文集, 第 592 号, 121-128, 2005. 6
- 2) 包那仁満都拉・川瀬博:「常時微動計測に基づく中低層 RC 造建物の振動特性とその耐震性評価」, 日本建築学会構造系論文集, 第 577 号, 29-36, 2004. 3
- 3) 鶴村香苗・川瀬博:「常時微動計測に基づく福岡県西方沖地震前後における RC 造中低層建物の振動特性比較」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, B-2, 339-340, 2006. 7
- 4) 山本浩之・林勝朗・西川忠: 木造住宅の振動特性に関する研究 (常時微

動測定による固有周期), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, B-2, 131-132, 1992. 8.

- 5) 鏡味洋史・北川論: 積雪寒冷地の木造建築物の被害想定手法の検討—微動による木造住宅の固有周期の測定—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, B-2, 23-24, 1998. 9.
- 6) 金井清: 木造家屋の耐震性調査、川崎市の震災予防に関する調査報告書 II, 川崎市防災会議地震専門部会, 107-129, 1979.
- 7) 田端千夏子, 大橋好光: 微動測定とその耐震診断への応用の可能性, —木造建築物の耐震診断法に関する研究 その 2—, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, 141-147, 2007. 6.
- 8) 吉田研史・久田嘉章・川瀬博: 建設年代を考慮した木造建物群被害予測モデルの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, B-2, 1059-1060, 2004. 8.
- 9) 長戸健一郎・川瀬博: 観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物被害予測モデルの構築と観測強震動への適用, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, 2002. 11.

(2008年3月10日原稿受理, 2008年10月6日採用決定)