

常時微動による二階建住家の耐震性評価

中村 豊¹・西永 雅行²

¹正会員 工博 (株) システムアンドデータリサーチ (〒186 東京都国立市中一丁目 18-41 栄ビル)

²正会員 (株) システムアンドデータリサーチ (〒186 東京都国立市中一丁目 18-41 栄ビル)

2階建住家の簡便な耐震性評価手法を提案する。時と場所を選ばずに簡便に精度よく計測できる常時微動を用いて、住家とその基礎地盤の地震動応答特性を把握し、これに基づいて地震時の住家の層変形角に着目した被災危険度指標 K 値を定義した。 K 値に想定地震時の基盤最大加速度を乗じれば、地震時の層変形角が概算できる。ここでは、兵庫県尼崎市下食満および東京都国分寺市高木町などで計測した合計 129 棟の二階建住家の常時微動測定データを用いて、その振動特性、 K 値の妥当性などを検討した。

Keywords: microtremor, 2-stories housing, h/v spectral ratio, QTS, vulnerability indexes, K-values

1. はじめに

兵庫県南部地震で新幹線高架橋がいくつか崩壊した。そのうち尼崎市下食満(シヅマ)地区では周辺住家はそれほど大きな被害を受けていない。そこで、この地域の住家(主として2階建) 28 棟(下食満地区住家)の振動特性を常時微動を用いて調査するとともに、比較対照のため東京国分寺市内の 100 棟の2階建住家(高木町地区住家)ほかにについても同様な調査を行った。これらの調査に先立って実施した予備調査の分析結果を報告するとともに、住家の地震による被災危険度を定量化する被災危険度評価指標を提案し、2階建住家の調査結果を分析する。

によると、長辺(y)方向のスペクトル形状は測点によらずほぼ類似しているが、短辺(x)方向のスペクトルは大きく変化している。その最卓越振動数は、常識に反して、短辺方向(4.6Hz~4.7Hz)が長辺方向(4.3Hz)よりやや高く、1階壁が短辺方向に多いことを反映している。

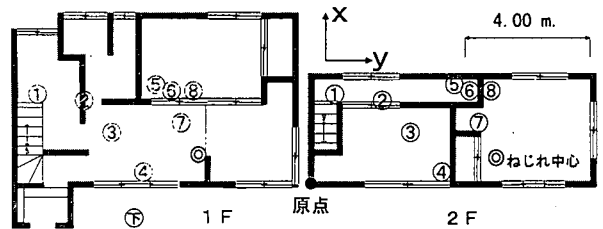


図1 H邸の平面図と測定位置

2. 予備調査

住家の計測方法に関する情報収集と住家の振動特性の概要把握のため、予備調査を行った。対象としたのは、木造2階建(H邸)で、やや詳細に常時微動を測定した。測定では、短辺方向にx方向を設定し、地上部と2階部分の2個所でx, y およびz(上下)方向を同時計測している。

H邸は築後38年(1995年初夏測定)を経過した木造2階建である。ここでは簡便に振動特性が計測できる位置を探るため、2階部分の数箇所を測定して、家屋全体の振動性状を把握した。測点を平面図上に記して図1に示す。この家の特徴は、開口部が多く壁が少ないこと、その壁も短辺(x)方向に多いなど方向性があること、などである。

図2に各測点での水平2方向のスペクトルを示す。これ

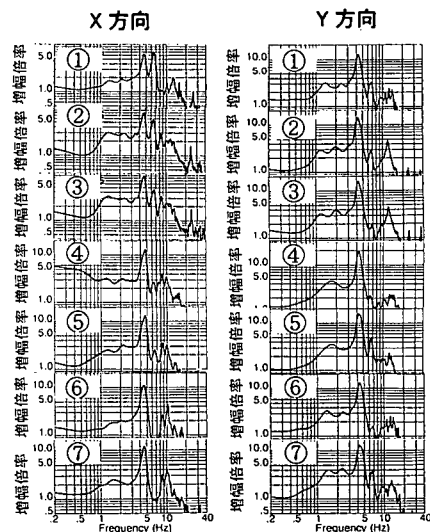


図2 H邸各点の伝達関数

伝達スペクトルには、最も卓越するピーク振動数(4.5Hz前後)よりもやや高いところ(6.5Hz前後)に2次のピークが認められる。1次と2次の卓越振動数と増幅倍率を読み取り、対応する位置に例示したものが図3である。これによると、これらの振動の増幅倍率は場所により異なる。水平振動の増幅は概ね家屋中央ほど大きくなっている。また、常識に反し、長辺方向の振動増幅が短辺方向のそれを大きく上回り、短辺方向に振動し難いことを示している。これも1階壁の偏在に起因する。

上下方向の1次は4.5Hz前後である。その増幅倍率は場所により異なり、最大10倍近くに達する。上下方向の増幅倍率は、測点と1階壁の位置関係に大きく左右され、壁に近い測点②、⑤、および三方から壁が接近している測点③で相対的に小さい。

図3によれば、x,yいずれの方向でも認められる2次振動(6.5Hz)の増幅倍率は測点位置に対応して直線的に変化している。このことと、この振動のx方向とy方向が高い相関を示していることから、この振動は家屋全体のねじれ振動であると推測される。ねじれ中心は図1の○印付近に特定される。ねじれ振動の影響はねじれ中心から離れるほど大きくなり、短辺(x)方向のスペクトル形状が場所により大きく変化するのもこのためである。

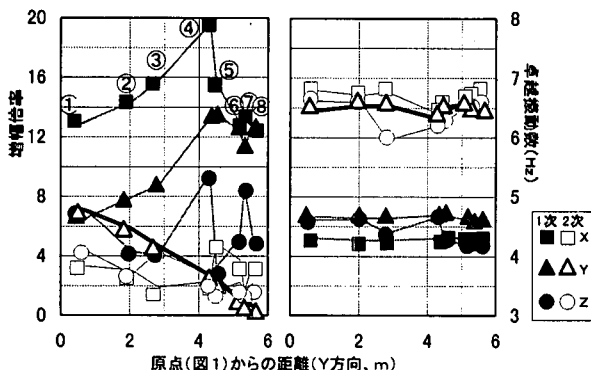


図3 各点の1、2次振動数と倍率

ねじれ振動の存在は構造上好ましくないが、その有無を簡単に調べるにはねじれ中心から離れていると考えられる家屋の端付近で計測するのがよい。一般に階段は住家の端に位置しており、階段を上り切った踊場付近を2階部分の測点にするとねじれ振動検出には都合がよい。また、一般住家を測定の対象とする関係上、プライバシーの問題についても配慮が必要であるが、この点からも、どの部屋を経由することなく玄関から直ちにアクセスできる階段を上り切った踊場付近の測点は理想的である。後述の本調査では、玄関前の地盤上と階段上踊場付近(2階部分)の2点を同時に測定している。

2階建住家の振動特性は1階部分の壁の力学的特性に大きく左右される。しかし、それぞれの壁の力学的特性を目視で判断することは困難である。設計図に基づいた数値モデル解析を試行錯誤的に行えば、正確な特性を把握できるだろうが、設計図判読だけでは壁の特性を正確に把握す

ることはできない。常時微動を用いて実際に住家の振動特性を測定すれば、劣化も含めた現状が把握できるのである。

3. 耐震性評価の基本的な考え方

耐震性は強度と関係する。強度を正確に把握するには対象構造物を破壊せざるを得ない。しかし、剛度は非破壊である程度正確に把握できる。強度と剛度は別の概念であるが、幸いなことに強度と剛度は一般に相関がある。そこで、ここでは剛度を用いて耐震性を評価する。

阪神大震災の2階建住家の被害状況をみると、2階部分はほぼ原形を保ったまま、1階部分が大きくせん断変形しており、ひどいものは崩壊に到っている。そこで、2階建住家の水平方向の地震動応答特性に着目してその耐震性を評価する。ここでは、2階部分を1質点とする1自由度系にモデル化して考える。

風雨・波浪、鉄道・道路、工場などに起因する常時微動は、微細な振動ながら地盤や構造物を全体的に振動させる。したがって、建物の上(S)と下(地表面:G)で同時に常時微動を測定し、両者の対応する方向成分毎のスペクトル比HS/HGを算定することによって建物の地震応答特性を把握することができる。また、表層地盤の地震応答特性は、地表面で測定される常時微動の水平動と上下動のスペクトル比(HG/VG)により推定できる¹⁾。したがって、地盤の影響を考慮した建物の地震応答特性は、常時微動のHS/VGにより算定できる。

HS/HGから得られる建物の固有振動数 F_w は建物の変形性能と密接な関係にあり、加速度 α が建物(質量 m)に作用したときの建物の層間変形 δ は、

$$\delta = m\alpha/k = \alpha/(2\pi F_w)^2 \quad (1)$$

となる。建物への作用加速度 α は、基盤加速度 α_B を基準に考えると、表層地盤と建物双方の増幅作用を受け、また、地表面加速度 α_S を基準に考えると、建物の増幅作用のみを受けている。すなわち、

$$\alpha = A_{wg} \times \alpha_B = A_w \times \alpha_S \quad (2)$$

A_{wg} は地盤と建物の連成作用を考慮した基盤地震動に対する増幅倍率、 A_w は地表面地震動に対する増幅倍率である。したがって、建物の層変形角 γ は、

$$\gamma = \delta/h \quad (3a)$$

$$= A_{wg}/F_w^2/h/(4\pi^2) \times \alpha_B \quad (3b)$$

$$= A_w/F_w^2/h/(4\pi^2) \times \alpha_S \quad (3c)$$

ここに h は柱の高さである。 h を m で、 α_B を $Gal(cm/s^2)$ で計測すれば、 10^{-6} を単位にした γ は、

$$\gamma = (2500/\pi^2)Awg/Fw^2/h \times \alpha_B \quad (4a)$$

$$= (2500/\pi^2)Aw/Fw^2/h \times \alpha_S \quad (4b)$$

ところで、 α_B は家屋に作用する振動外力を発生させるが、静的に作用する場合よりもその効果は小さい。例えば、正弦振動の場合の実効振幅は最大振幅の約70%である。ここでは、実効層変形角 γ_e を最大層変形角 γ のe%と仮定する。

$$\gamma_e = Kwg(e) \times \alpha_B = Kw(e) \times \alpha_S \quad (5)$$

$$\text{ここに、} Kwg(e) = (25e/\pi^2)Awg/Fw^2/h \quad (6a)$$

$$Kw(e) = (25e/\pi^2)Aw/Fw^2/h \quad (6b)$$

Kwg および Kw が建物の被災危険度指標である。 Kwg は地盤と建物の特性を含み、地震時の耐震性を総合的に判断する際に用いる。 Kw は建物のみ特性しか含まれておらず、経年変化など建物に起因する変化を検討する際に用いる。さらに両者の比率は、地盤による増幅効果分を表す。なお、以下の検討では、とりあえず $e = 60\%$ と置いた。今後詳細に調べたい。柱の高さは実測していないが、ここではすべての住家について2.8mとしてK値を算出している。

4. 下食満と高木町の二階建住家測定結果

尼崎市下食満地区において新幹線と住家とで被害状況が著しく異なった要因を調査するため、この地域で崩壊高架橋周辺の住家28棟の常時微動を1995年夏に測定した。図4は下食満地区での測定住家の位置図である。ここでは、測定した住家の内2階建住家26棟を検討の対象とする。

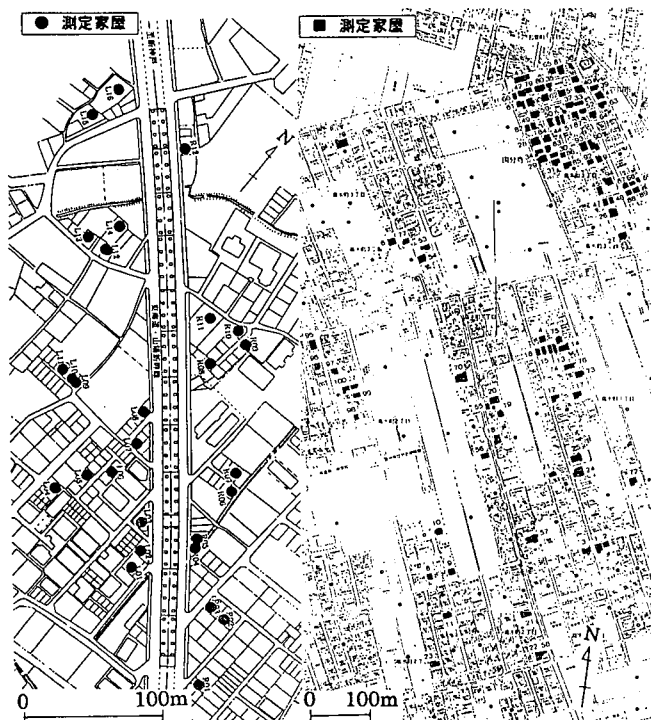


図4 下食満地区測定家屋 図5 高木町地区測定家屋

下食満地区は破壊的地震の洗礼を受けた後の調査であり、地震により崩壊はしなかったものの、調査結果に地震による損傷の影響が入り込むのは免れない。

そこで破壊的地震の洗礼を受けていない東京都分寺市高木町で比較的近接した2階建住家100棟を1996年夏に調査した。図5は高木町地区での測定住家の位置図である。主として木造であるが、2×4工法、軽量鉄骨造、鉄骨造なども含まれている。高木町地区では、築年数などを聞き取り、諸特性が築年数で変化する様子なども調査した。新築から築後40年までに分布しているが、2階が増改築された家屋も少なくない。予備調査1棟と軽量鉄骨造および木造2階建各1棟のデータも高木町に含めた。

常時微動の測定方向は、住家の長・短辺方向に設定した。以下、両地区の測定結果について述べる。

(1) 固有振動数Fと増幅倍率Aの関係

図6は、下食満地区および高木町地区における調査住家の固有振動数 Fw と増幅倍率 Aw の関係を示したものである。両地区のデータは、ほぼ同じようなところに分布しているが、下食満地区の方がやや高い増幅倍率に位置しているのが認められる。震災による影響かもしれない。

また、 Fw と Aw の間には、一方が大きくなれば他方は小さくなるという関係が認められる。これは、高架橋などでも認められる。つまり、構造物による地震動増幅は、構造物の固有振動数が高くなるほど小さくなり、構造物に作用する慣性力が小さくなると期待される。固有振動数が高ければ建物の変形が小さくなることと相俟って、定性的には固有振動数が高いほど耐震性は高いと判断できる。

住家の固有振動数は、両地域とも3.5Hzから10Hzに分布し、増幅倍率は2.5倍から15倍(高木町)または20倍(下食満)に分布している。特に下食満地区では3.5Hz以上で、崩壊した高架橋(固有振動数2Hz強)よりかなり高い。周辺住家が倒壊しなかった要因のひとつであろう。

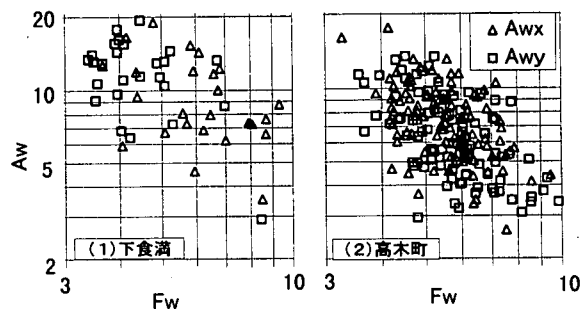


図6 地点の Fw と Aw の関係

(2) 表層地盤の影響

両地区とも地盤はそれほど悪くはなく、むしろ良好な部類に属する。しかし、図7に示した両地区の Kwg と Kw の関係をみると、河川の流域にある下食満地区よりも関東ローム台地上にある高木町地区の方が Kwg/Kw の比率が大きく、地盤の増幅作用が顕著である。

住家の地震動に対する地盤の増幅効果には、地盤特性だ

けでなく住家との連成作用が重要となる。連成作用は、住家によって異なるので、住家と表層地盤の振動特性を同時に計測することが肝要である。

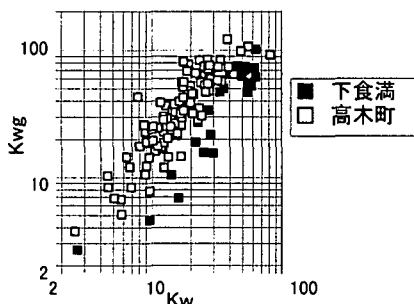


図7 Kw と Kwg の関係

(3) 築年数と Kw の関係

図8は、高木町地区の住家の築年数に対する Kw 値の分布である。築30年を超えるデータが少ないが、多くが30年前後で建替えられることを示唆している。

2×4工法、軽量鉄骨造および鉄骨造による住家の Kw 値は木造住家と大差ないが、データが少ないので、以下の検討は木造のみを対象とする。

全体的な傾向として、Kw は築年数とともに大きくなる傾向がみられ、特に25年を過ぎたあたりから急激に増大する兆候が認められる。しかし、データのばらつきは大きく、築年数が30年を過ぎても、それほど大きい訳ではない。脆弱な住家が建替えにより淘汰されたのだろうか？

図8に示した三角印は、2階を増改築したことが確認された住家であり、ほかの住家比べて Kw 値が大きい傾向を示す。また、◎は老朽化が著しい住家で、最も大きな Kw 値となっている。逆三角形印は屋根を軽くした住家で Kw 値は小さい。屋根を軽くして、Kw 値を小さくする(耐震性を向上させる)可能性を示唆している。

以上のことは、Kw 値が住家の現状を的確に表現していることを示し、目視では判別しにくいことも Kw 値によって定量化できることを示している。いずれにせよ、築年数だけでは耐震性を判断できないことは明らかである。

(4) 被害と Kwg の関係

図9は両地区での Kwg 値の頻度分布を見たものである。Kwg 値は、概ね80が上限、5が下限となっており、両地区で大差ない。両地区とも、頻度分布が40~45を谷とする前後ふたつの山に分かれる。ただし、高木町が Kw 値の小さい方により多く分布するのに対し、阪神大震災の影響か、下食満は Kw 値の大きい方により多く分布している。

層変形角は設計上 1/120 以下になるように規定されており、1/60 を下回れば崩壊するとされる。阪神大震災時の下食満地区の基盤加速度は 50Gal~100Gal と推定され、100Gal としても最大で 1/100 程度の層変形角であったろうと推定される。下食満の住家が大きな損傷を受けたけれども倒壊までには到らなかった被災結果と整合している。

また、下食満地区では、全く被害がなかった RC 造住家の Kwg 値は3弱ときわめて小さく、屋根が損傷してビニ

ールシートで覆った住家では 19~76、壁がかなり損傷した住家では 56~63、また古い伝統的な木造瓦屋根住家では地区最大の 102 が計測されている。

以上のように、Kwg 値と損傷の間には相関が認められる。Kwg 値には基礎地盤と家屋の相互作用効果が含まれており、目視による耐震診断よりもはるかに合理的である。

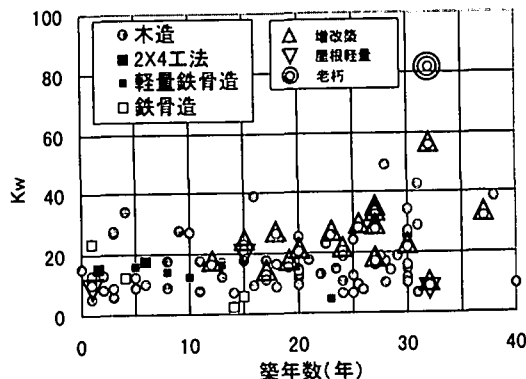


図8 Kw と築年数の関係

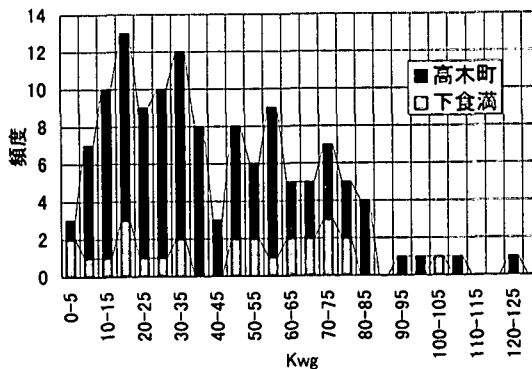


図9 両地区での Kwg の頻度分布

5. まとめ

尼崎市下食満地区と国分寺市高木町地区とで合計 129 棟の住家の常時微動を測定して、その地震動特性を把握するとともに、耐震性を簡便に評価する手法を提案した。提案した被災危険度評価指標 Kwg 値の有効性を、Kw 値が被害や老朽度等と相関が高いことなどから確認した。

謝辞:住家測定は多くの方々のご協力で実現した。下食満地区についての NHK 大阪 (当時) の川口良治氏のご尽力、高木町地区についての高木町自治会生活会議 (熊谷政子自治会長) の全面的なご協力、に対し厚く御礼申し上げます。また、測定・解析作業に参加していただいた、JR 鉄道総研の井上英司技師、上半文昭技師、(株)システムドデータの子の中山沢子女史、戸田弓子女史、川崎工科大学の堀内信彦君、山口岳君、輪竹剛君、に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 豊・上野 真: 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.265-270, 1986.
- 2) 中嶋 繁・中村 豊: 常時微動による高架橋の地震応答特性の推定、第44回土木年次学術講演集, I-437, pp.926-927, 1989.