

震度の話

松田 敏*

Definition and Characteristics of the JMA Seismic Intensity

Satoshi MATSUDA

1. はじめに

今、日本のどこかで地震が起こったとすると、数分以内に各地の震度情報がテレビやラジオで速報されます。小さな地震は毎日のように起こっていますので、震度が小さければ、いつものことと、あまり気に留められないかもしれません。しかし、震度が大きく、被害の発生が予想されるような場合には、そのレベルや分布に応じて、自治体、警察、消防等によって、被害調査や救援などの必要な初動対応が為されます。このように、地震発生時の対応判断の重要な材料とされる「震度」なる指標は、どのようにして測定され、どのような性質を持っているのでしょうか。

2. 震度の定義

震度とは、地震による地面の揺れ（地震動）の強さの程度を10段階（0～7、内5、6は「弱」と「強」に細分）で表したものです。各震度階級と概ね対応して生起する現象を「気象庁震度階級関連解説表¹⁾」より抜粋して表1に示します。この「解説表」は震度の定義ではありません。震度そのものは、1996年（兵庫県南部地震の翌年）以降、全て「震度計」という計器で計測されています²⁾。それ以前はというと、表1のような「解説表」が震度の定義そのものであって、各地の測候所に配された観測員が、自身の体感や周辺の被害状況を「解説表」と照らして震度を決めていました。人間的ではありますが、それ故、客観性、速報性に欠け、高密度の観測に不向きであったため、1996年

より、現在のように、震度計で自動計測される震度、即ち「計測震度」に切り替えられました。

表1 気象庁震度階級関連解説表¹⁾（抜粋）

計測震度	震度階	人	住宅(木造)
0.0～0.4	0	人は揺れを感じない。	
0.5～1.4	1	屋内にいる人の一部が、わずかな揺れを感じる。	
1.5～2.4	2	屋内にいる人の多くが、揺れを感じる。眠っている人の一部が、目を覚ます。	
2.5～3.4	3	屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。恐怖感を覚える人もいる。	
3.5～4.4	4	かなりの恐怖感があり、一部の人は、身の安全を図ろうとする。眠っている人のほとんどが、目を覚ます。	
4.5～4.9	5弱	多くの人が、身の安全を図ろうとする。一部の人は、行動に支障を感じる。	耐震性の低い住宅では、壁や柱が破損するものがある。
5.0～5.4	5強	非常に恐怖を感じる。多くの人が、行動に支障を感じる。	耐震性の低い住宅では、壁や柱がかなり破損したり、傾くものがある。
5.5～5.9	6弱	立っていることが困難になる。	耐震性の低い住宅では、倒壊するものがある。耐震性の高い住宅でも、壁や柱が破損するものがある。
6.0～6.4	6強	立っていることができず、はわないと動くことができない。	耐震性の低い住宅では、倒壊するものが多い。耐震性の高い住宅でも、壁や柱がかなり破損するものがある。
6.5～	7	揺れにほんろうされ、自分の意志で行動できない。	耐震性の高い住宅でも、傾いたり、大きく破損するものがある。

3. 計測震度の算定

「計測震度」というと、何か「震度」なる物理量があって、それを震度計で「計測」すると思われるかもしれませんが、実際は異なります。震度計は地震動の加速度を計測する「計測部」と、それに基づいて震度を算定する「処理部」により構成されます²⁾。つまり、震度計で直接計測されるのは、地震動の加速度であり、ハードウェアとしては加速度地震計と変わりありません。そして、次に示すような、少々複雑な手順を経て震度が算定されます¹⁾。

原稿受付 平成20年9月25日

*環境都市工学部 建築学科 准教授

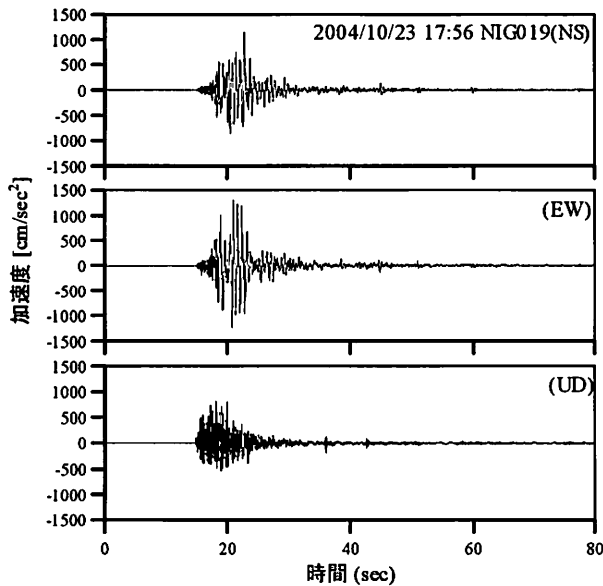


図1 加速度波形（新潟県中越地震 K-NET 小千谷）

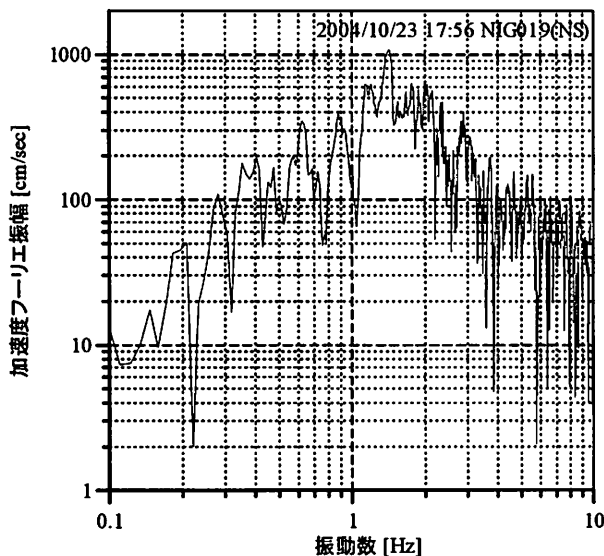


図2 加速度フーリエ振幅スペクトル（NS成分）

【ステップ1】

計測された地動加速度の3成分（水平2成分、鉛直1成分）のそれぞれにフーリエ変換を施す。

ここでは、2004年10月23日に発生した新潟県中越地震のK-NET³⁾の小千谷観測点（NIG019）における加速度観測記録（図1）をサンプルとして、震度算定の手順を追ってみます。加速度波形にフーリエ変換を施すと、図2のようなフーリエスペクトル（NS成分のみ例示）が得られます。

フーリエ変換は、対象の複雑な波形を、様々な振動数と振幅を持つ調和波（正弦波や余弦波）の集まりに分解する操作に相当します。図2のフーリエスペクトル

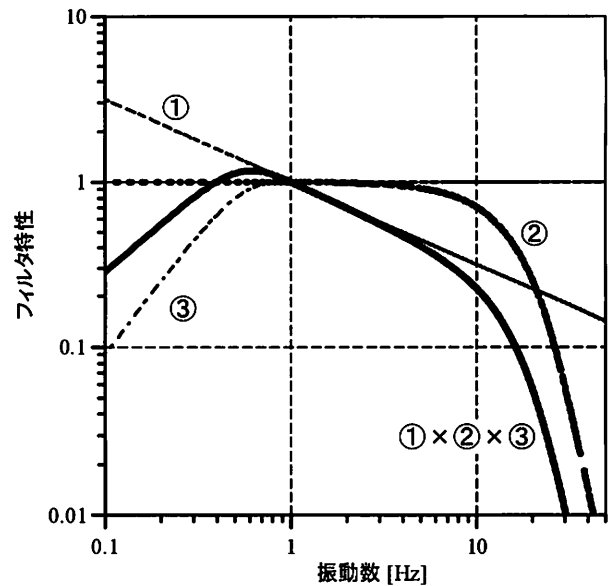


図3 計測震度算定に用いるフィルタの特性

ルの横軸は調和波の振動数（周期の逆数）、縦軸はその振動数成分の振幅を表します。小千谷記録のスペクトルは1.5Hz（周期0.7秒）近傍にピークを持ち、この振動数の成分が豊富に含まれていることがわかります。さて、この地震動で、固有振動数1.5Hzの建物を揺すったらどうなるでしょうか。共振によって大きな応答を生じ、十分な耐震性を備えていなければ、大きな損傷を被るかもしれません。このように、フーリエスペクトルから、地震動の特性に関して、有用かつ重要な情報を読み取ることができます。

【ステップ2】

ステップ1で得られた3成分のフーリエスペクトルそれぞれに、次の3つのフィルタを乗じる。

- ① $1/f^{1/2}$
- ② $1/(1+0.694x^2+0.241x^4+0.0557x^6+0.009664x^8+0.00134x^{10}+0.000155x^{12})^{1/2}$
- ③ $\{1-e^{-(f/0.5)^3}\}^{1/2}$

ここで、 f は振動数（Hz）、 $x = 10/f$ 。

①～③の概形を図3に示します。フーリエスペクトルを振動数 f で除す操作は、元の時間歴波形を時間について積分することに対応します。元の波形が加速度ならば、この積分により速度が得られます。

建物が「硬く」、その固有振動数が地震動の卓越振動数よりも十分に大きければ、建物は地震動の加速度に比例した変形を生じます。これに対して、建物が「柔らかく」、その固有振動数が十分に小さければ、地震動の変位に比例した変形を生じます。そして、中間

の共振点近くでは、建物がある程度の減衰を持っていれば、その変形は地震動の速度に比例します。ここで、一般的な「硬さ」を持つ建物を対象とすれば、建物の応答と地震動の加速度や速度が強い相関を持つと予想されます（経験的には、地震動の速度の方がより強い相関を持つといわれています）。このことから、改めて①の $f^{1/2}$ で除すという操作の意味を考えてみると、振動数領域での加速度（1倍）と速度（ $1/f$ 倍）の相乗平均により、両者の効果を平均的に考慮することを意図したものと解釈できます。

②はスペクトルの高振動成分を除去するハイカットフィルタ、③は低振動成分を除去するローカットフィルタです。②×③のバンドパスフィルタによって、震度を算定する上で考慮すべき、揺れの体感や建物の振動と相関が強い帯域の成分が抽出されます。

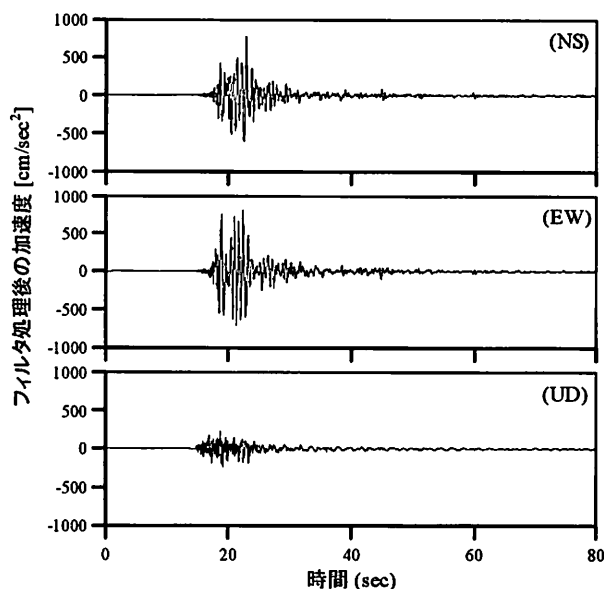


図4 フィルタ処理後の加速度波形

【ステップ3】

ステップ2によりフィルタ処理された3成分のフーリエスペクトルそれぞれにフーリエ逆変換を施し、時刻歴波形を求める。

先に紹介したフーリエ変換は可逆変換で、フーリエスペクトルにフーリエ「逆」変換を施すことにより元の時刻歴波形に戻すことができます。図4にステップ3の操作で得られた時刻歴波形を示します。

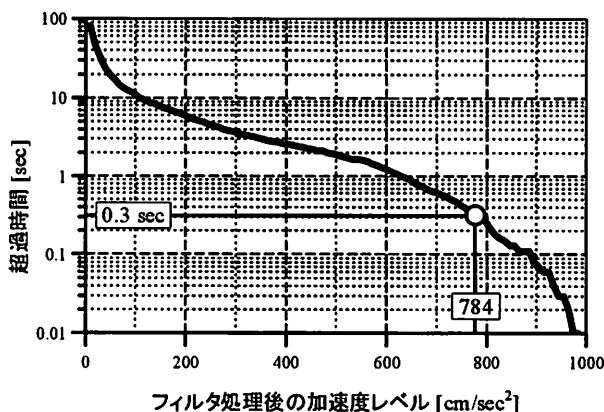


図5 A 値の評価

【ステップ4】

ステップ3で得られた3成分の時刻歴波形をベクトル合成し、その振幅があるレベルAを超過する時間の合計がちょうど0.3秒になるようなAを求める。そして、最後に、次式を用いて計測震度Iを求める。

$$I = 2 \log_{10} A + 0.94 \quad \dots \textcircled{4}$$

ここでは、震度を安定して評価するため、ベクトル振幅の瞬間的な最大値ではなく、累積の継続時間が0.3秒であるようなレベルAが用いられます。小千谷の記録の場合、図5より、Aは784、計測震度Iは6.7、そして表1より震度階は7となります。

4. 計測震度と最大地動加速度、最大地動速度の関係

図1のような時刻歴波形（時々刻々の加速度）で地震動の性質を完全に記述することができますが、完全であるが故に情報量が膨大で、一覧性に欠けます。そこで、その特性を代表的に表わす特性値として、例えば、計測震度を使うことができれば便利かもしれませ

ん。しかし、実際に個別の建物の耐震安全性を検討するような場合、入力として想定する地震動の大きさを、計測震度で規定することはほとんどありません。そもそも、震度は地震動入力に対する結果として生じる（であろう）体感や建物被害を尺度とするもので、入力される地震動の大きさそのものを直接規定するものではありません。このため、入力地震動の特性値としては、その解釈がより簡単で評価が容易な、最大地動加速度（PGA）や最大地動速度（PGV）を用いることが一般的です。では、計測震度とPGAやPGVは相互にどのような関係を持っているのでしょうか。

計測震度、PGA、PGVの何れも、地震動の時刻歴波形が与えられれば一意に求められます。しかし、その逆は不可能です。計測震度やPGAやPGVに一つの値を与えても、対応する時刻歴波形は無数に存在します。また、計測震度は、前節で示したような複雑な手順を経て算定されるため、PGAやPGVとの関係

を解析的に導出することは困難です。そこで、様々な特性を持つ地震動をコンピュータの中で多数生成し、それらの統計分析により、計測震度、PGA、PGV 相互の関係を調べてみました。様々な特性といっても「地震らしい」ものでなくては都合が悪いので、ここでは、筆者らが提案する「地動加速度のパワースペクトル密度関数モデル⁴⁾」を用いてその特性を与えました。解析の結果得られた回帰式を⑤に示します。

$$\log_{10}(A/PGA) = -0.333 + 0.691X - 0.856X^2 + 0.161X^3$$

$$X = \log_{10}(PGA/PGV) \quad \dots \textcircled{5}$$

式中の A はステップ 4 と同じものです。計測震度への変換には④式を用います。図 6 に、横軸 PGV、縦軸 PGA の座標平面上に、計測震度の等高線（各震度階の下限値）を描いたものを示します。等高線間の斜めの細直線は、 $PGA/(2\pi PGV)$ により計算される地震動の卓越振動数の「目安値」を表します。同図上に、併せて、2004年新潟県中越地震における K-NET、KiK-NET⁵⁾、および気象庁観測点¹⁾の、震度 5 弱以上の観測記録の (PGV、PGA) を、震度階毎にシンボルを変えてプロットしています。観測記録の震度階は⑤式から予想される震度階と概ね対応しています。

図 6 によって、計測震度と、耐震工学の分野で常用される PGA や PGV との関係を見ることができます。例えば、耐震設計に際して、建物が損傷を受けないことを保証する地震動強さ（損傷限界）の目安とされる「レベル 1 の地震動」は $PGV=25\text{cm/sec}$ で規定されますが、これを震度 5 弱相当とすれば $PGA=100\text{cm/sec}^2$ 程度となります。また、建物が崩壊しないことを保証する地震動強さ（安全限界）の目安とされる「レベル 2 の地震動」は $PGV=50\text{cm/sec}$ で規定され、震度 6 弱相当とすれば $PGA=300\sim 400\text{cm/sec}^2$ 程度となります。新潟県中越地震では、設計時に想定した地震動の強さを超えた可能性のある観測点が多数あることがわかります。しかし、そのような観測点で、全ての建物が被害を受けたわけではありません。損傷限界や安全限界では、損傷しないこと、崩壊しないことが確かめられるのであって、そのレベルを超えると、即、損傷を生じたり、崩壊したりするわけではありません。実際の建物はある程度の余力を持っています。設計時に想定した強さを超える地震動に遭遇した建物が重大な損傷を被らなかったとすれば、この余力のおかげと考えられるでしょう。余力の大小は、設計者の判断や、構造設計時に考慮していない 2 次的な部材の耐力にも依存し、殆どの場合、特に定量化はされておられません。

損傷を受けなかったことは幸いですが、それが建物によってまちまちで、曖昧な余力のおかげとなると不

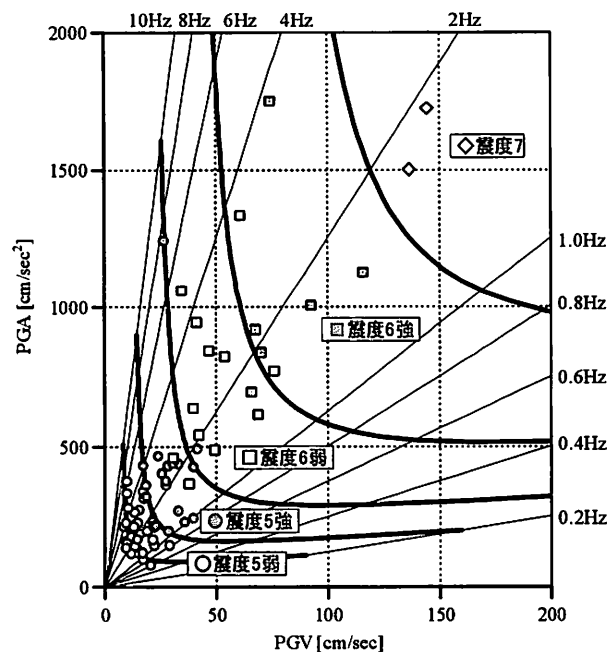


図 6 計測震度と PGA、PGV の関係

安を感じられるでしょう。地震動の強さと建物被害との関係を明らかにするためには、このような余力を含む、建物の「真の強さ」の定量化が必要です。

5. おわりに

「震度の話」にからめて、地震動の性質、それを調べるための基本的なテクニック、そして、建物の応答との関係についての概説を試みました。拙文が、地震と建物の関係について興味を持っていただくきっかけになれば幸いです。

謝 辞

本稿の解析では、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-NET、および気象庁の観測記録を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：<http://www.jma.go.jp>
- 2) 気象庁 (2007)：正確な震度観測を行うために
- 3) 防災科学技術研究所：強震観測網 (K-NET)、<http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 4) 松田・浅野 (2005)：日本建築学会構造系論文集、598, 69-74
- 5) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網 (KiK-NET)、<http://www.kik.bosai.go.jp>