

## エネルギーの釣合に基づく余震の影響の検討

### Influence of aftershocks based on the energy input

○竹ノ谷幸宏<sup>1</sup>, 石鍋雄一郎<sup>2</sup>, 半貫敏夫<sup>3</sup>, 秋山宏<sup>4</sup>

\*Yukihiko Takenoya<sup>1</sup>, Yuichiro Ishinabe<sup>2</sup>, Toshio Hannuki<sup>3</sup>, Hiroshi Akiyama<sup>4</sup>

Abstract: Tohoku Region Pacific Coast Earthquake occurred on March 11, 2011, and a high acceleration was observed. Then, some severe aftershocks with over 300gal maximum acceleration have been recorded. Aftershocks smaller than the main shock is not generally considered. In the conventional design method, the 300gal of acceleration corresponds to the ultimate strength design level. However, the conventional design method does not consider the aftershocks. Therefore, this study examined the influence for the building by the aftershocks in the sense of energy input to compare the effects of building on the main shock and aftershocks.

#### 1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生し、非常に大きな加速度が各地で観測された。その後、最大加速度 300gal 以上の大きな余震が発生した。一般に、余震は本震に比べて小さく、考慮する必要はないと考えられている。新耐震設計法(現行耐震設計法)では Table1 に示すような地震動を想定しており、300gal の加速度は二次設計に相当する。しかし、新耐震設計法では、余震についての検討はされていない。

そこで、本研究は余震が建物に与える影響についてエネルギーの釣合を用いて検討を行う。余震(aftershock)が建物に与える影響を本震(main shock)と比較考察する。

Table1 Expected ground motion<sup>[1]</sup>

	中地震時 (一次設計)	大地震時 (二次設計)
想定加速度	80~100 gal	300~400 gal
想定速度	25 kine	50 kine

#### 2. 地震波

本研究では、本震後に起きた地震で 3 方向合成最大加速度が 300gal を超えたものを余震と定義する。そのため、東北地方太平洋沖地震では多くの余震が起きたが、本研究の定義における余震としては回数が少なく、同じ観測地点において 1~3 回ほどである。

しかし、Hokota や Hitachi では多くの余震が観測された。本研究で余震の考察を行う地点を Table2 に示す。また、新潟県中越地震でも多くの余震が観測されており、重ねて考察を行う。

Table2 Seismic wave

地震名	地点名	3方向合成最大加速度(gal)		余震回数 300gal以上
		本震	最大余震	
東北地方太平洋沖地震	Hokota	1762	957	5
	Hitachi	1845	594	7
	Kesenuma	431	432	1
新潟県中越地震	Ojya	1502	820	8

#### 2.1 エネルギースペクトル

地震による総入力エネルギー  $E$  は式(1)で示される。

$$E = \frac{MV_E^2}{2} \quad (1)$$

$M$ : 質量  $V_E$ : 総入力エネルギーの速度換算値

エネルギースペクトルの一例を Fig.1 に示す。Fig.1 より、東北地方太平洋沖地震のような極短周期( $T \leq 0.5s$ )が卓越したエネルギースペクトルは設計時に想定しているスペクトルの形(大地震時)<sup>[2]</sup>と大きく異なっている。また、 $V_E$  の値も想定を超えている。これは、余震についても言えることである。

本震の  $V_E$  の最大値は余震の 2 倍以上であり、エネルギー量としては式(1)より 2 乗に比例するため、本震は余震の 4 倍以上のエネルギー量となる。

また、弾性系のエネルギースペクトルは NS 波( $h=0.1$ ) について検討を行う。

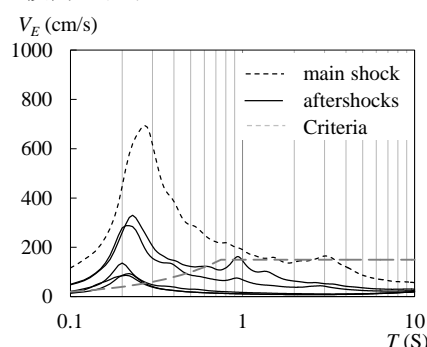


Fig.1 Energy spectra (Hokota, NS,  $h=0.1$ )

#### 2.2 累積 $V_E$ スペクトル

累積  $V_E$  スペクトルとは、余震による入力エネルギーを累積し、式(2)を用いて累積入力エネルギーの速度換算値  $V_E^*$  に変換したものである。

$$V_E^* = \sqrt{mE + aE} \quad (2)$$

$mE$ : 本震の入力エネルギー  $aE$ : 余震の入力エネルギー

1: 日大理工・院(前)・建築, Student, Graduate School of Nihon Univ. 2: 日大理工・教員・建築, Research Associate, Nihon Univ., Dr.Eng.

3: 日大名誉教授, Prof. Emeritus, Nihon Univ., Dr.Eng.

4: 東大名誉教授, Prof. Emeritus, Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

ここで、余震の入力エネルギーは卓越周期によって大きく異なるため、狭く限定的な影響となる。そこで、本研究では建物周期の伸びを考慮して、 $T \sim 1.2T$  の範囲の入力エネルギーの最大値を取ることで、余震の影響を広く捉える。累積  $V_E$  スペクトルは\*で表記する。

本震のエネルギースペクトルを Fig.2 に示す。Fig.2 より、新潟県中越地震 Ojiya でのエネルギースペクトルの卓越周期は  $T=0.7s$  であり、東北地方太平洋沖地震とはスペクトル波形が異なる。本震の卓越周期の違いによる余震の影響を考察する。

弾性系の累積  $V_E$  スペクトルを Fig.3 に示す。Fig.3 より、余震の入力エネルギーが累積することで最大応答値が増加し、広い周期帯で  $V_E$  スペクトルが増加した。

また、本震の卓越周期の違いによる累積エネルギーへの影響はみられない。

### 2.3 余震割合 R

本震の入力エネルギー  $_m E$  に対する余震の入力エネルギーの総和  $_a E$  の割合を余震割合と定義する。余震割合  $R$  は式(3)で示される。ここで、弾性範囲内に留まる余震は余震割合から除く。

$$R = \frac{_a E}{_m E} = \frac{\sum _a V_E^2}{_m V_E^2} \quad (3)$$

$_a V_E$  : 余震の速度換算値     $_m V_E$  : 本震の速度換算値

実際の建物は弾塑性系であることから、Table3 に示す解析条件での余震割合  $R$  を検討する。なお、降伏せん断力係数は実際の建物に近い値を設定した。

余震割合  $R$  を Fig.4 に示す。図中の長破線は  $R=1$  となる直線、つまり余震のエネルギー量の総和が本震のエネルギー量と等しくなる直線である。

Fig.4 より、余震のエネルギー量はある周期において、本震程度となる。また、 $T \geq 1.7s$  では全ての余震が弾性範囲内に留まる応答となった。

余震割合は、余震と本震の卓越周期によって様々に変化する。また、余震割合は本震に対する余震の割合であるため、

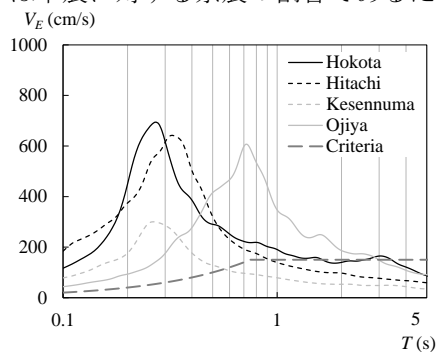


Fig.2 Energy spectra(main shock)

解析モデル	せん断型1質点系
復元力特性モデル	完全弾塑性型
減衰定数	$h=0.02$
建物周期 (s)	$T=0.1 \sim 5.0$ (0.01s 刻み)
降伏せん断力係数	$\alpha=0.2/\sqrt{T}$
降伏変形 (cm)	$\delta_y = \alpha g \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$

$g$  : 重力加速度(980cm/s<sup>2</sup>)

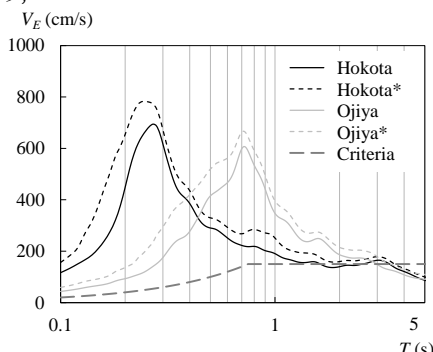


Fig.3 Cumulative energy spectra

本震のエネルギー量によって大きく異なる。

そこで、弾塑性系の累積  $V_E$  スペクトルを Fig.5 に示し、余震によって入力されるエネルギー量を検討する。

弾塑性系(e-p)でも弾性系と同様に、余震の入力エネルギーが累積することで、最大応答値が増加し、広い周期帯で  $V_E$  スペクトルが増加した。このことから、余震により広い周期帯での損傷の進展が考えられる。

弾塑性系でも弾性系と同様の傾向を示すことから、弾性系のエネルギースペクトルだけでも、余震の影響の傾向はつかめる。

### 3. まとめ

余震が建物に与える影響について、エネルギーの釣合を用いて検討を行った。検討を行った地震波について考察した余震の影響を以下に示す。

余震による入力エネルギー量は、ある周期において本震によるエネルギー量と同等となる。また、余震のエネルギーが累積されると広い周期帯で応答が増加する。これにより、本震で損傷を受けた建物への損傷の進展及び広い周期帯での被害の進展が考えられる。

### 4. 参考文献

- [1]日本建築センター：改正建築基準法施行令新耐震基準に基づく構造計算指針・同解説，日本建築センター，pp.198-199，1981
- [2]北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門 第二版，彰国社，2009

#### 【謝辞】

(独)防災科学研究所の強震ネットワーク(K-NET)の地震観測データを利用させて頂きました。感謝申し上げます。

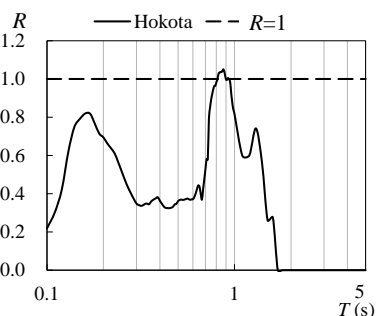


Fig.4 Contribution ratio of aftershocks

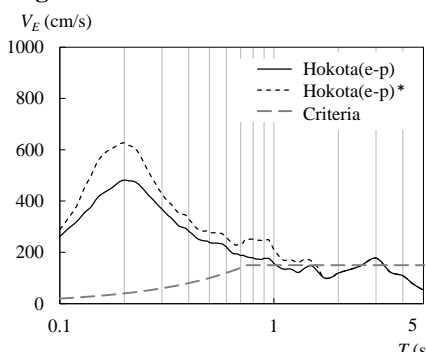


Fig.5 Cumulative energy spectra (Elasto-plasticity,  $h=0.02$ )