

京都大学大学院 学生員 C.Scawthorn 京都大学工学部 正員 山田善一  
 京都大学工学部 正員 家村浩和 京都大学大学院 学生員 〇明田 修

1. はじめに

都市域における地震危険度の解析や防災計画を進めるに当って、(a)地震による構造物の被害を地震動の関数として表わすこと、(b)構造物の被害とその設計レベルとの関連の検討などは非常に重要な課題であり、特に建物の大半を占める低層家屋(木造)の被害の検討は不可欠であろう。しかしながら、現在までに提案された関係式には、その精度や解析方法に検討すべき事項が多い。そこで本研究においては、1978年6月に発生した宮城県沖地震に着目して、被害の著しかった仙台市における加速度応答スペクトルと木造住家被害率との相関関係を統計的手法を用いて解析した。さらに、平均的な建物の構造的および非構造的要素を考慮した非線形弾性モデルを提案し、それを用いて低層建築物の地震応答および被害率の予測法を開発した。

2. データ

(a)被害率

仙台市の被害調査報告<sup>1)</sup>より木造住家の被害率を地域ごとに算出した結果を Fig. 1 に示す。計算結果は次の定義に基づいている。

$$\text{住家被害率}(DR_{\text{BDMG}}) = \frac{\text{被害家屋数}}{\text{地域の全戸数}}$$

$$\text{住家全壊率}(DR_{\text{BDST}}) = \frac{\text{全壊家屋数}}{\text{地域の全戸数}}$$

(b)加速度応答スペクトル

まず最初に、仙台市の数地点における最大加速度を岩崎<sup>2)</sup>および Trifunac<sup>3)</sup>の推定式により計算した。報告されている震源を用いて計算した最大加速度は、実測値に比べて極端に小さい値となったので、これを実際に適合させるため、新たに震源を70 km 仙台より仮定して計算をやり直した。これを Table 1 に示すが、Trifunacの式による推定値はほぼ実測値に一致していることがわかる。

次に、仙台市の3地点において、Trifunacの式から仮定の震源を用いて計算した加速度応答スペクトルとその実測値とを比較した。これらはいずれもよく一致したが、その一例を Fig. 2 に示す。したがって、Trifunacの式および仮定の震源を用いて計算した各地域における加速度応答スペクトルは、ほ

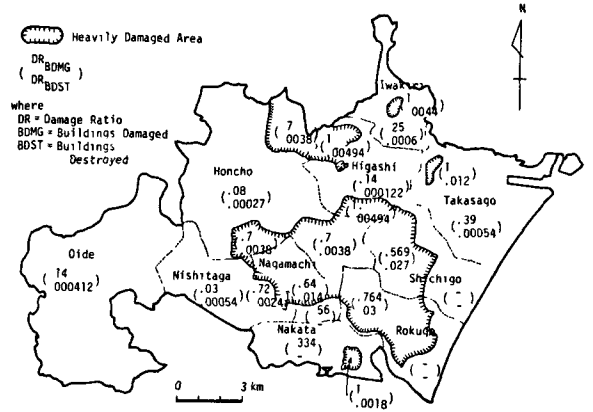


Fig. 1 Sendai City - Damaged Areas and Political Subdivisions

Table 1 Comparison of Recorded and Predicted Max. Ground Accelerations

Location (distance to epicenter of record)	Predicted Ag <sub>max</sub> (gals) using epicenter of record	Recorded Ag <sub>max</sub> *		Predicted Ag <sub>max</sub> using virtual epicenter
		N - S	E - W	
<b>SENDAI</b> (R=110 km)				
Tohoku Univ.	57-67 / 45-49	240	190	100-136 / 183-200
Sumitomo Seimei	" / "	253	227	" / "
JNR	" / "	438 <sup>†</sup>	238	" / "
<b>SHIOGAMA</b> (R=100 km)	62-74 / 49-54	266	288	110-155 / 299-326
<b>KAIHOKU-BASHI</b> (R=80 km)	71-88 / 63-68	200	294	122-176 / 299-326

\*Ref. 4      \*\* Key: 

A
B

      A: Predicted using Iwasaki's regression (Ref. 2)  
 † possible defective instrument mounting      B: using Trifunac (Ref. 3)  
 Both values are range for rock-alluvium

ば実際に近い値を予測しているものと考えられる。

### 3. データの解析

#### (a) 被害率と被害額との関係

仙台市の被害報告<sup>1)</sup>の回帰分析を行なって次式を得た。

$$\text{¥} = 0.5 + 0.434 \times (\text{全壊家屋数}) + 0.0053 \times (\text{被害家屋数})$$

$$r = 0.998$$

ここで ¥ は被害額(億円), r は相関係数である。

#### (b) 被害率と加速度応答スペクトルとの関係

各地域の被害率(Fig. 1)を、上記の方法で算出した各地域の加速度応答スペクトル SA (g) の種々の周期に対する値およびそれらの合成値に、種々の回帰式 (linear, semi-log, log-log, etc) を用いて回帰させ、相関を調べた。その結果、次の事項が判明した。

- 被害率と SA との関係を表わす式として、log-log 式が最も適切である。
- 被害率に對して、 $[SA]_{0.75}$  (固有周期 0.75 秒の SA 値) と  $[SA]_{0.04-7.5}$  (固有周期 0.04 秒から 7.5 秒までの SA の平均値) が良い相関を示す。しかし、 $[SA]_{0.04-7.5}$  は使用上計算が複雑なので  $[SA]_{0.75}$  を以下において用いることにする。

log-log による回帰分析結果は次のようになった。

宮城県沖地震 (n=17)	$DR_{BDMG} = 1.813 ([SA]_{0.75})^{1.744}$	相関係数 $r = 0.75$
(仙台市のデータ)	$DR_{BDMG} = 0.02045 ([SA]_{0.75})^{2.525}$	$r = 0.69$
日本の他の地震 <sup>5)</sup> (n=21)	$DR_{BDMG} = 0.825 ([SA]_{0.75})^{1.1035}$	$r = 0.56$
宮城県沖および他の地震 (n=38)	$DR_{BDMG} = 1.208 ([SA]_{0.75})^{1.324}$	$r = 0.69$

ただし、n はサンプル数である。以上の  $DR_{BDMG}$  の曲線を Fig. 3 に示す。

#### (c) Damage Cost Factor (損害指数)

被害の評価のもう一つの尺度として、Damage Cost Factor (DCF) を考える。これは次のように定義される。

$$DCF = \frac{\text{被害修復費}}{\text{建物の価格}}$$

上の (a)(b) の解析結果から、DCF を導いた。

$$DCF = 0.07456 ([SA]_{0.75})^{1.697}$$

ここでは 建物だけの被害を考えている。また 1 m<sup>2</sup> 当りの家屋の価格を 10 万円とした。

### 4. 家屋の非線形復元力モデル

低層家屋が水平地震力を受けるとき、次のような 3 種の壁がそれに抵抗するものと考えられる。

- (a) 完全壁 (b) 部分壁(扉の上の壁など) (c) 筋かいの入った壁

(a)(b) は非構造的、(c) は構造的要素である。竹山ら<sup>6)</sup> による (a) ~ (c) それぞれの壁体に対しての静的および動的試験から、水平力と変位の関係は次の形で表現できる。

$$P = C + d \log \Delta \quad \Delta > 1 \text{ cm} \quad (1)$$

ここで、P は壁体の上端に作用する水平力 (kg/m)、Δ は壁体の上端の変位 (cm)、C、d は定数で Table 2 にその

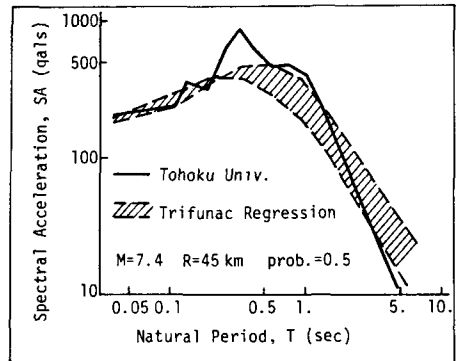


Fig. 2 Tohoku Univ. 5% Damped Spectral Acceleration vs. Predicted

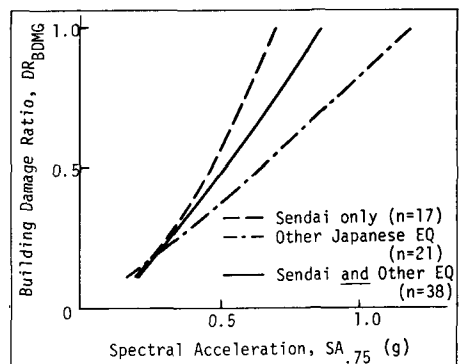


Fig. 3 Building Damage Ratio and Spectral Acceleration

値を示す。

また、単位床面積当りの等価線形剛度は次のように表わされる。

$$K^j = \frac{P^j}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \sum_i R_i^j P_i^j \quad j = 1, 2 \quad (2)$$

ここで、 $j$ は一階、二階の剛を示し、 $i$ は(A)~(C)の種類を示す。 $R$ は単位面積当りの壁長である。この式(2)を用いれば、モードの振動数および形状などが、Fig. 4に示す繰り返し手法により求められる。この方法で計算した建物の固有周期を今までの試験結果<sup>7)9)10)</sup>と比較してみたが、両者はよく一致している。これをFig. 5に示す。

### 5. モデルの地震応答と被害率

Table 2に示す平均の $R_i$ を都市に存在する低層家屋における代表値とみなすと、先に求めた仙台市の加速度応答スペクトルを用いて、平均的低層家屋の応答変位を次のように決定できる。

$$\Delta = a (SA)_{0.75}^b \quad (3)$$

ここで、 $a$ と $b$ はTable 3に示す定数である。 $\Delta$ は一階建、二階建家屋の上端における変位(cm)を示す。固有周期0.75秒は前述のように被害と最もよく相関するので用いているが、それは次のことから説明できよう。

$$T_1 = 0.33 \Delta^{0.3346} \quad T_2 = 0.55 \Delta^{0.28} \quad (4)$$

(ここで、 $T_1, T_2$ はそれぞれ一階および二階建建物の基本周期である。) また、仙台市においては平均的に $(SA)_{0.75} \approx 0.45g$ であり、その時の家屋の平均変位は9cm(二階建)、3cm(一階建)、周期は1秒(二階建)、0.5秒(一階建)であった。仙台市における一階建および二階建建物の数はほぼ同数であるところから、固有周期0.75秒を代表的に用いることが妥当であると言えよう。

さき、次に、 $(SA)_{0.75}$ より算出された建物の変位 $\Delta$ が、ある変位 $\Delta_{\text{damage}}$ を越えるとき、その建物は被害を生じたとみなし、またその建物数の全体の建物数に対する割合を被害率と定義すると、被害率は次のように表わされる。

$$\text{被害率}(DR_{\text{BDMG}}) = 1. - \Phi \left[ \frac{\Delta_{\text{damage}} - \Delta}{\sigma_{\Delta}} \right]$$

(ここで、 $\Phi(\cdot)$ は正規確率分布である、Fig. 6)

ここで、前出の $DR_{\text{BDMG}}$ と $(SA)_{0.75}$ との回帰式および式(3)を用いて、最小自乗法により $\Delta_{\text{damage}}$ および $\sigma_{\Delta}$ を決定する。全壊率に対しても同じ手法を用いると、その結果次の

Table 2

Item	c	d	Takeyama specimen (Ref. 6)	Avg. R (m/m <sup>2</sup> ) (Ref. 8)
(a) Wall: shinkabe okabe	36.9	136.	SB-6	.134
	95.2	97.9	OC-6	.035
(b) Pierced wall	1.5	53.1	SA-6	.334
(c) Wall w/ bracing	143.6	663.9	OD-6	.086

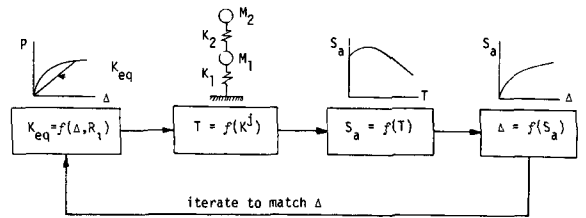


Fig. 4 Response Analysis Method

Table 3

Building	Heavy Roof		Light Roof	
	a	b	a	b
1 story	15.6	1.56	10.6	1.68
2 story	26.7	1.28	24.2	1.32

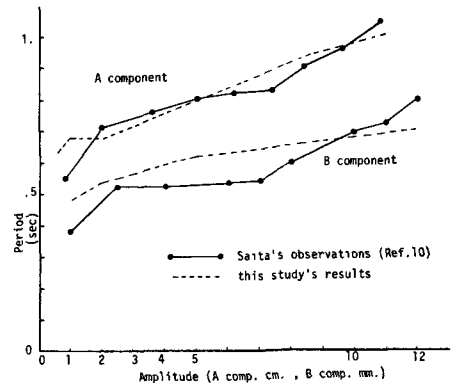


Fig. 5 Test and Model Results

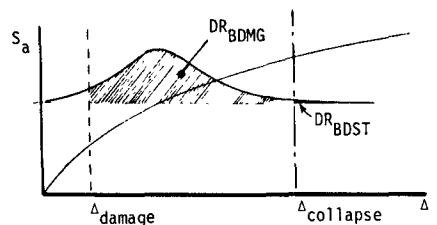


Fig. 6 Damage Ratios

関係式を得る。

$$\text{被害率} (DR_{\text{BDMG}}) = 1. - \Phi \left[ \frac{6.9 - \Delta}{3.4} \right] \quad (5)$$

$$\text{全壊率} (DR_{\text{BDST}}) = 1. - \Phi \left[ \frac{66. - \Delta}{21.1} \right] \quad (6)$$

これらは Fig. 7 に示すように、先に求めた統計関係とよく一致する。ここで、被害を生ずる変位  $\Delta$  damage は約 7cm (これは竹山らの静的試験結果 4cm と大きな矛盾はない)、また全壊変位は約 66cm である。

また、床や屋根は比較的大きい変位においてのみ被害を受けると考えると、被害指数 (DCF) は次の形に書ける。

$$DCF = f \left( \frac{\Delta}{60} \right)^2 \quad (7)$$

これは、Fig. 7 に示すように、先に求めた統計的關係と観測される加速度の範囲内でよく合致していることがわかる。

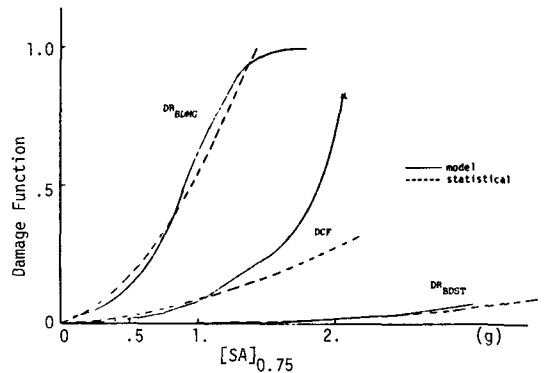


Fig. 7 Comparison of Model and Statistical Results

## 6. モデルによる耐震性向上の検討

例えば、一階に使用されている筋かいの量を2倍に増やしたと仮定してみる。モデルを使用して計算すると、家屋の剛性は約  $2/3$  増加することがわかる。強い加速度を受ける場合は被害家屋数はあまり減少しないが、中程度の加速度を受ける場合にその数は約半分に減少するであろう。ただし、どの程度の加速度であっても被害額、全壊家屋数については約  $1/3$  減少すると思われる。

## 7. 考察および結論

本研究で得た被害率に関する回帰式は、建物の被害の評価に用いられ、またそれらは火災発生数、負傷者数などの評価に応用できる。これらと、被害額に関する関係式とを同時に用いれば、被害の金銭的評価も可能であろう。固有周期 0.75 秒付近の加速度応答スペクトルが被害率と最も良く相関した理由としては、以下のように考えられる。小さな振幅では固有周期の範囲は一階建てで 0.18 ~ 0.4 秒、二階建てで 0.25 ~ 0.6 秒であるが、宮城県沖地震で経験したような大きな振幅ではこれらの固有周期は2倍ないしは3倍に増加する。このことは、竹山ら<sup>6)</sup>の研究でも述べられているし、また本研究でも、モデルの解析から最初 0.2 ~ 0.5 秒であった家屋の固有周期が振動を受けるとすぐに増加して 0.75 秒に近づいていくことを立証した。もう一つの理由として、宮城県沖地震で被害の大きかった沖積層の地盤卓越周期が 0.7 ~ 0.8 秒<sup>4)</sup>であったこともあげられよう。

本研究ではまた、低層建築物の単純なモデルを提案し、地震力を受ける時の構造的挙動を考えた。そして、非構造的要素(筋かいなど)を考えた時の考察を若干試みた。このようなモデルと Damage Cost Factor とを共に用いることにより、構造物の最適耐震設計の開発を可能にするであろうと考えられる。

## (参考文献)

- 1) 仙台市災害対策本部, 「宮城県沖地震による一般住家の被害実態調査(中間報告)」, 1978年7月
- 2) Iwasaki, T. et al., "Statistical Analysis of Strong-Motion Acceleration Records", 9th Jt. Mtg., US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, Tokyo, 1977.
- 3) Trifunac, M.D. et al., "Preliminary Empirical Models for Scaling Absolute Acceleration Spectra", U.South. Calif., Dept. Civ. Engg., CE-77-03, 1977.
- 4) 鋼材建築部, 「1978年宮城県沖地震の被害調査報告」, 1978年8月
- 5) Scawthorn, C. et al., "Seismic Risk Analysis of Urban Regions", 5th Japan Earthquake Engg. Symposium, Tokyo, 1978.
- 6) Takeyama, K. et al., "Behavior and Design of Wooden Buildings Subjected to Earthquake", 2 World Conf. Earthquake Engg., Tokyo, 1960.
- 7) Kanai, K. et al., "Relation between Earthquake Damage and Nature of the Ground. II." Bull. Earthquake Research Inst. (BERI), Vol. 41, 1963, pp. 271-277.
- 8) 建築資料研究社, 「二階建小住宅震害調査」, 東京, 1970.
- 9) 大沢 賢, 山本 正勝, 「昭和 36 年 2 月 2 日 長岡地震の家屋被害について」, 地震研究所要報 第 39 号, 1961. 549-559 頁
- 10) 斎田 時太郎, 「木造家屋の振動及び耐震実験」, 地震研究所要報 第 17 号, 1939, 152-157 頁