

## 9. 強震観測施設付近における建物の振動被害と地震動について

曾我部博之

### 1. はじめに

強震観測施設の増加に伴い建物の耐震性や地震の大きさだけで建物被害の大きさを説明できないケースが報告されている<sup>1,2)</sup>。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震における築館（強震観測施設付近）では、震度7、最大加速度2933gal、最大速度107kineであるにも関わらず大きな振動被害は報告されていない。このような傾向は2004年新潟県中越地震や1995年兵庫県南部地震でも報告されている。

本研究は防災科学技術研究所の強震ネットワーク（K-NET）、気象庁（JMA）等の強震記録による弾性及び弾塑性応答スペクトルを計算することによって、地震動とその観測施設付近の建物被害の関係性について検討した。

### 2. 解析方法

#### 2.1 構造物の損傷

地震動を受ける構造物の損傷は、弾塑性振動において次式が成り立つことを仮定して推定した<sup>3)</sup>。

$$W_p + W_e \leq m \frac{V_{max}^2}{2} \quad (1)$$

ここで、 $W_p$ は塑性ひずみエネルギーで、地震によって構造物が塑性変形し蓄えられるエネルギーである。 $W_e$ は弾性振動エネルギーで、地震終了時の運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーの和である。さらに、右辺の $m$ は構造物の質量、 $V_{max}$ は地震によって振動している構造物の最大速度を示している。上式(1)は構造物の損傷に影響を与えるエネルギー（ $W_p + W_e$ ）の上限値が、 $m V_{max}^2/2$ であることを表している。本研究では、弾塑性構造物の固有周期に対する最大速度、すなわち弾塑性速度応答スペクトル $S_V$ を計算することによって構造物の損傷を次式(2)のように評価する。

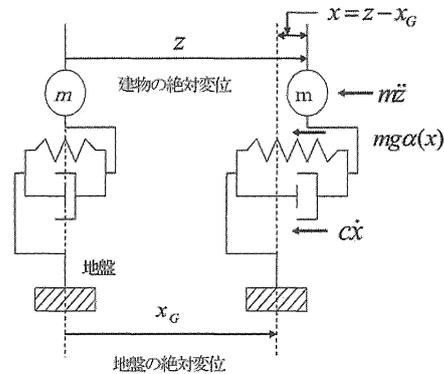
$$S_V = Vmax = \sqrt{\frac{2(W_p + W_e)}{m}} \quad (2)$$

#### 2.2 弾塑性応答スペクトル

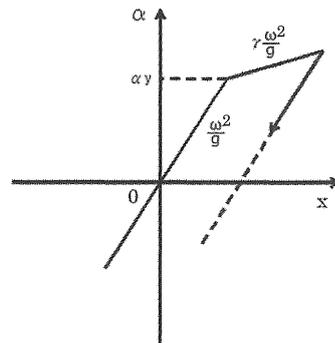
地震動を受ける構造物（図1(a)参照）の弾塑性応答は、次の微分方程式を解くことによって求められる。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + g\alpha(x) = -\ddot{x}_G \quad (3)$$

ここで、 $x = \{x_{EW}, x_{NS}\}^T$ は東西及び南北方向に対する構造物の変位ベクトル、 $h$ は減衰常数、 $\omega$ は振動数、 $g$ は重力加速度、 $\ddot{x}_G = \{\ddot{x}_{G,EW}, \ddot{x}_{G,NS}\}^T$ は東西及び南北方向に対する地震動の加速度ベクトルである。さらに、 $\alpha$ は応答の層せん断力係数で図1(b)のようにBi-linear型の復元力特性と仮定した。本研究では上式(3)の微分方程式を4次のルンゲ・クッタ法によって解き、各時刻に対する構造物の変位、速度、加速度を求めた。弾塑性応答スペクトルは固有周期 $T$ に対する最大応答値を求めることによって算出した。



(a) 力学的モデル



(b) 復元力特性

図1 建物の構造モデル

### 3. 強震観測施設付近における振動被害と地震動の関係性

#### 3.1 地震動と建物被害

本研究で対象とした地震動は、表 1 で示すように兵庫県南部地震、新潟県中越地震、東北地方太平洋沖地震で記録された 10 個の地震動である。本報では網掛け部分の地震動とその強震観測施設周辺の振動被害について述べる。

表 1 強震記録と観測施設周辺の被害状況<sup>1, 2, 4)</sup>

地震名	地震動名	観測施設住所	最大加速度 (gal)	震度	振動被害率% (大破)
兵庫県 南部地震	JR 鷹取	神戸市須磨区大池町 5	759	7	34.9
	神戸 JMA	神戸市中央区脇浜海岸通 1-4-3	891	7	2.5
新潟県 中越地震	川口町役場	長岡市東川口 1974-26	1722	7	18.0
	K-NET 十日町	十日町市北新田 142-1	1750	6 弱	0.0
	K-NET 小千谷	小千谷市土川 1	1500	7	0.0
東北地方 太平洋沖 地震	K-NET 築館	栗原市築館高田 2-1-10	2933	7	0.0
	JMA 大崎	大崎市古川三日町	568	6 強	2.7
	K-NET 仙台	仙台市宮城野区苦竹 3-6-1	1808	6 強	0.0
	K-NET 塩釜	仙台市宮城野区苦竹 3-6-1	2019	6 強	0.0
	K-NET 須賀川	須賀川市八幡山 239	675	6 強	0.0

#### 3.2 弾性応答スペクトルと建物被害

図 2 は 2 つの強震観測点における加速度応答スペクトル  $S_A$  を地震毎に示したものである。兵庫県南部地震の応答スペクトル (図 2(a) 参照) では、両観測点とも周期 0.1~0.5 秒の範囲で加速度がほぼ同レベルになっているが、周期 0.5~1 秒では神戸 JMA が大きく、1~2 秒では JR 鷹取が大きくなっている。この応答スペクトルの結果から見る限り、固有周期が 1 秒以下となる木造住宅、鉄骨構造物、鉄筋コンクリート構造物で共振による振動被害は、神戸 JMA 周辺で多く見られるはずである。しかしながら、実際には表 1 で示したように神戸 JMA では建物被害が少なく JR 鷹取で被害が多く現れている。同様に新潟県中越地震でも、周期 1 秒以下にピークがある K-NET 十日町周辺では、木造住宅などの低層建物に大きな被害は無く、周期 1~2 秒にピークがある川口町役場の周辺に振動被害が多く現れている。東北地方太平洋沖地震では、K-NET 十日町と同様に周期 1 秒以下に大きなピークがある K-NET 築館において建物被害は無く、周期 1~2 秒にピークがある JMA 大崎で建物被害が少し見られる程度である。

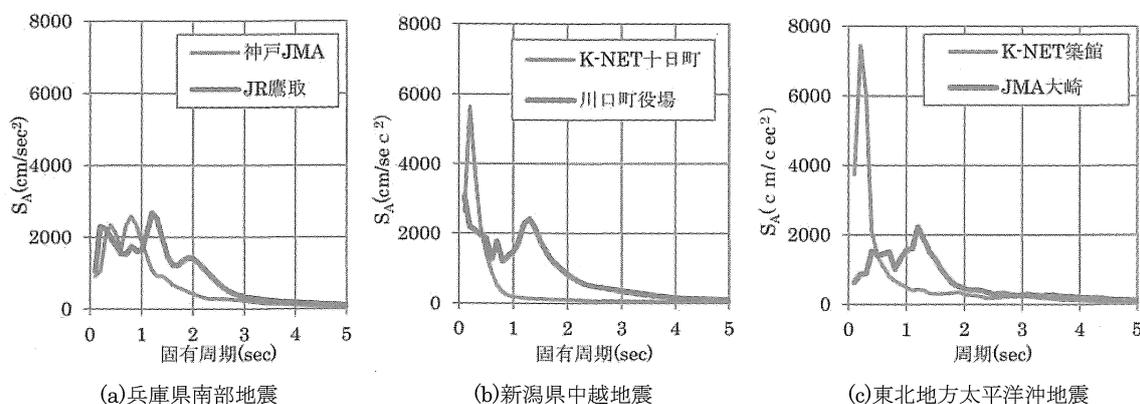


図 2 弾性加速度応答スペクトル (減衰定数  $h = 0.05$ )

### 3.3 弾塑性応答スペクトルと建物被害

図3は降伏層せん断力係数 $\alpha_y$ を0.5及び0.2とした場合の加速度応答スペクトルである。塑性設計を行うことによって建物が受ける地震力も非常に小さくなっていくことがわかる。降伏層せん断力係数が $\alpha_y = 0.5$ の場合、地震力は平均で47%、最大で88%低下し、 $\alpha_y = 0.2$ の場合、地震力は平均で47%、最大で94%低下している。なお、弾塑性応答加速度が弾性応答加速度/ $\alpha_y$ となっていないのは、応答加速度を絶対加速度(=建物に作用する加速度+地震動の加速度)としているためである。

次に、建物の振動被害を損傷、すなわち速度応答スペクトルで検討する。図4(a1)及び(a2)は、兵庫県南部地震における弾塑性速度応答スペクトルを示したものである。降伏層せん断力係数 $\alpha_y=0.5$ では、周期0.1~1秒間で両者の地震動に大きな違いは認められないが、 $\alpha_y = 0.2$ と強度をさらに低下させた場合には、JR鷹取の応答スペクトルが神戸JMAより大きくなって、建物の損傷が大きくなることを示している。すなわち、強度が低い建物では、JR鷹取で記録されたような地震動(弾性応答スペクトルにおいて周期1~2秒間にピークがある地震動)によって被害が大きくなることを表しており、表1の振動被害率の結果に対応している。図4(b1)及び(b2)に示す新潟県中越地震の弾塑性速度応答スペクトルも兵庫県南部地震と同じような形状になっており、同じ理由によって川口町役場周辺の被害が大きくなっていると考えられる。弾性応答スペクトルにおいて周期1~2秒にピークがある地震動は、砂やシルトを多く含む地盤で起きやすいことが報告されているが<sup>5)</sup>、このような地震動が周期1秒以下の建物に大きな被害を及ぼす理由は、塑性化によって固有周期が伸びるためと考えられる。今後は、塑性化によって建物の固有周期が伸びる量を定量的に検証することが必要である。

図4(c1)及び(c2)に示す東北地方太平洋沖地震では、K-NET築館の応答スペクトルが神戸JMAやK-NET十日町と同レベルであることから被害が無かったものと考えられる。JMA大崎では周期1~2秒にピークがあるもののK-NET築館と同レベルのエネルギーになったために被害が大きくならなかったのではないかと考えられる。

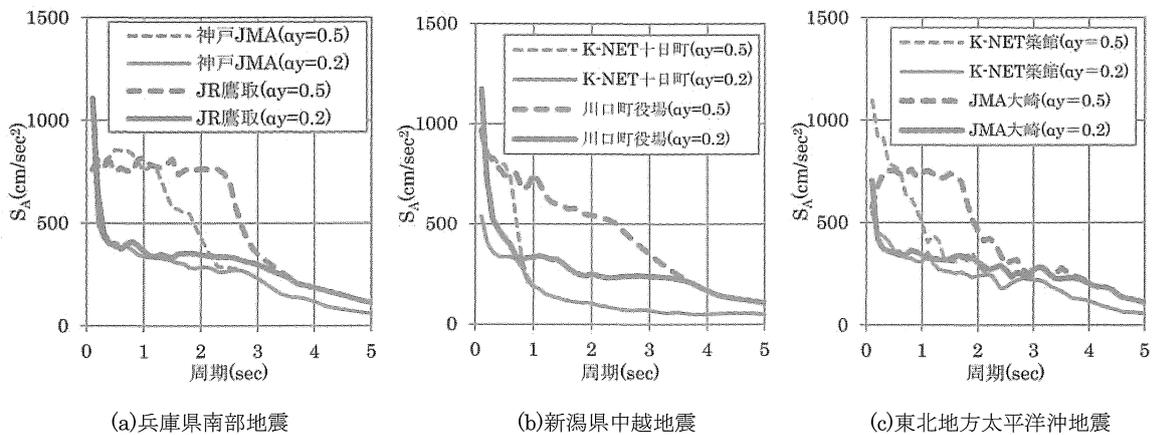


図3 弾塑性加速度応答スペクトル (減衰定数  $h = 0.05$ 、2次勾配  $\nu = 0.01$ )

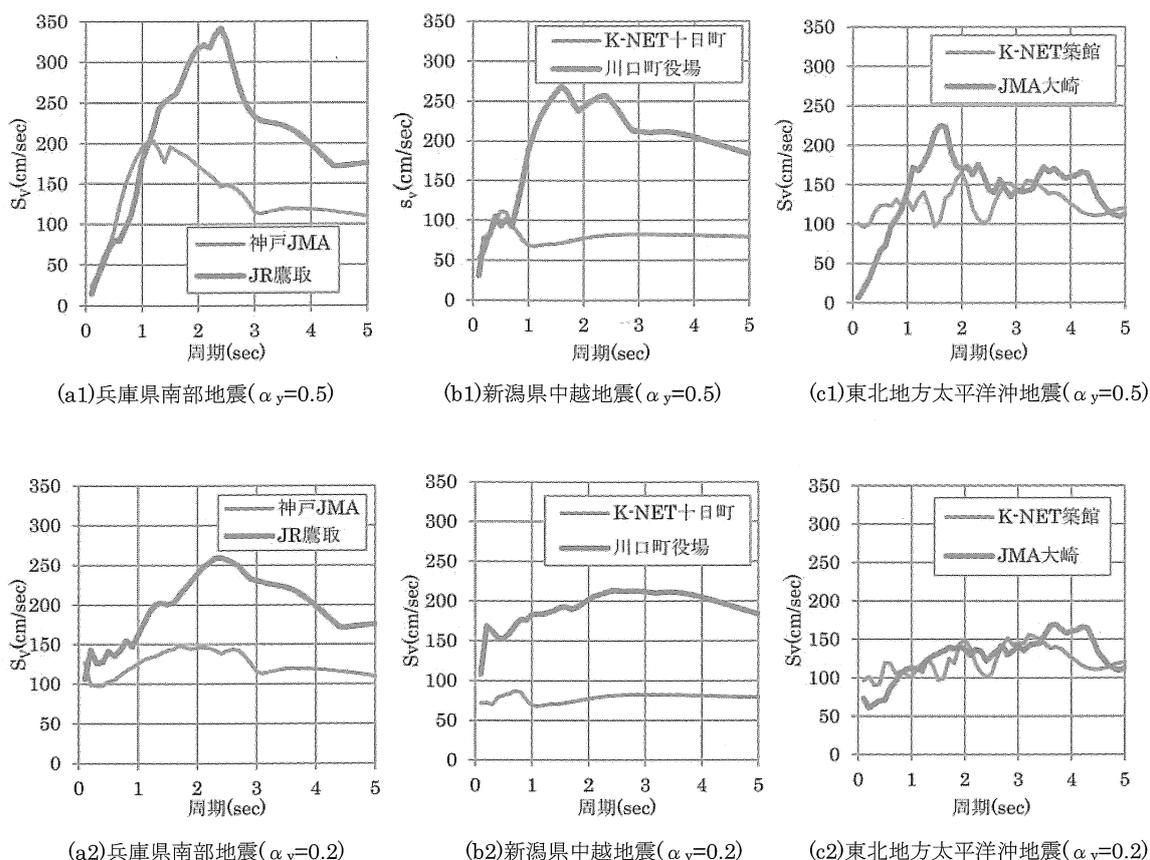


図4 弾塑性速度応答スペクトル (減衰定数  $h = 0.05$ 、2次勾配  $\nu = 0.01$ )

#### 4. おわりに

本研究は弾塑性速度応答スペクトルによって建物の損傷を推定し、強震観測施設付近の建物被害と地震動の関係性について検討した。固有周期 1-2 秒に弾性応答スペクトルのピークがある2つの地震動では、強度の低い建物、本計算例では降伏層せん断力係数が 0.2 程度以下の建物で被害が多くなることを示した。このような地震動の特性と建物被害の関係性については、さらに数多くの検証が必要であると考えられる。

#### 謝辞

本報告をまとめるにあたり、協力を頂いた愛知工業大学工学部建築学科 岩森弘宜君、松下正儀君、山田貴大君、吉村大樹君に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 境有紀, 地震動の性質と建物被害の関係, Bulletin of JAE No.9, 2009.1
- 2) 曾我部博之, 新潟県中越地震における強震観測施設付近の建物被害と強震記録について, 愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書, Vol.2, 2005.7
- 3) 秋山宏, 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版, 1980
- 4) 境有紀, URL<<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/>>
- 5) BRI NEWS, 木造住宅の地震被害と地盤, Epistula, 建築研究所, Vol.44, 2009.1