

# 建築年代別構成を考慮した疲労応答スペクトル強度を用いた木造建造物の地震被害予測

村田 晶<sup>1</sup>・今井哲治<sup>2</sup>・北浦 勝<sup>3</sup>・宮島昌克<sup>3</sup>

<sup>1</sup>金沢大学大学院自然科学研究科 助教 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

<sup>2</sup>東京工業大学大学院理工学研究科 大学院生 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>3</sup>金沢大学大学院自然科学研究科 教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

一般に地震動の破壊力を示す指標として、計測震度等が用いられている。しかし、これらの指標は地震動により構造物が何回揺らされ、疲労がどのくらい蓄積されたかという地震動の繰り返しによる影響を十分に考慮していない。特に2004年新潟県中越地震では本震後の余震によって木造建造物の破壊が拡大した。そこで、本研究では建築年代別構成を考慮した疲労応答スペクトル強度指標(FSI)を適用し、被害との関係について考察するとともに、森本・富樫断層が震源となる地震動による金沢市の木造建造物被害予測を行い、震源パラメータの違いによる被害程度を考察する。その結果、建築年代別構成を考慮した疲労応答スペクトル指標の有効性を示すことができた。

**Key Words :** *Fatigue response spectral intensity, Structural response analysis, Prediction of wooden structural damage in Kanazawa City*

## 1. はじめに

地震災害の軽減には、建造物被害を迅速かつ正確に予測するための地震動破壊力指標が必要である。近年の地震では1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震で甚大な建造物被害が発生した。建造物被害の大半は木造建造物で起きている。特にこのような建造物被害に対して、地震発生後の被害予測を迅速に行うことが復旧活動に必要不可欠である。地震動の破壊力を表す指標と建物被害率との関係を検討した研究は、これまでも行われており、現在に至るまで様々な破壊力指標を用いた被害関数が提案されている(例えば<sup>1)~3)</sup>。それらはすべて、最大地動加速度、最大地動速度、震度などで検討されている。

ここで、建造物の応答に着目した指標としては、境ら<sup>4)</sup>が1自由度系による地震応答解析により、強震時の建造物の塑性化による伸びを考えた周期(以下等価周

期)を用いることにより、弾性応答スペクトルから建物被害を予想できるとし、等価周期が弾性周期の何倍になるか検討している。さらに、建物被害をひとつの指標で的確に予想するには、建物の性質を反映させ、建物頻度が高い周期帯のスペクトルに重みを付けることが必要であることを示している。また、吉田<sup>5)</sup>は建築年代別モデルそれぞれに対して被害と相関がよくなる周期帯について検討している。しかしながら、これらの指標は地震動により建造物が何回揺らされる、低サイクルの繰り返しによる疲労がどのくらい蓄積されたかという点を考慮していない。揺らされた回数が多いほど建造物の被害は大きくなると考えられることから、実際の地震動による被害を表すためにはこの点を考慮する必要がある。例えば2004年新潟県中越地震のように本震と同等の地震力を有するような余震が引き続き発生する場合には、本震後の余震によって木造建造物の破壊が拡大したことが知られている。また、東海地

震、東南海地震、南海地震のような地震動継続時間の長いプレート型地震では、木造構造物は地震動の繰り返しによる影響を大きく受けると考えられる。しかし、木造構造物の破壊に対し地震応答の繰り返しがどのように影響しているかについては、未だ定量的に明らかになっていない。

そこで本研究では、既往の研究により提案した木造構造物の建築年代構成、強震時の剛性低下および応答振幅の繰り返しを考慮した指標である疲労応答スペクトル強度（以下、*FSI*値と表記）を用い<sup>例えは<sup>6)</sup></sup>、既往の破壊力指標との比較・検討を行う。このとき、木造構造物については建築年代の違いにより被害に差が生じると考えられることから、本研究では木造構造物の建築年代別固有周期を考慮し、これを木造構造物の建築年代構成を考慮した疲労応答スペクトル強度（以下*FSI'*値と表記）として定義する。さらに、兵庫県南部地震における宝塚市の木造構造物被害データを基に建築年代を考慮した木造構造物群のせん断耐力を推定し、様々な強震観測記録を入力とした地震応答解析結果から地震動破壊力指標の評価および木造構造物被害関数の構築を試みる。このとき、北陸地域にこの被害関数を適用するため、新潟県中越地震による川口町、小千谷市、旧小国町、長岡市の木造構造物被害データを基に地域係数として補正を行う。これらによって得られた木造構造物被害関数を森本・富樫断層を起震断層とする金沢市内の想定地震動による木造構造物被害に適用し、震源パラメータの違いと木造構造物の建築年代分布が被害程度の違いにどのように影響を及ぼすかを考察する。

## 2. 木造構造物地震被害関数の構築

### 2.1 構造物モデル群の作成

現在の設計基準と同等の耐力を有するモデルを設定し、このモデルの耐力に適当なばらつきを与え、これより標準解析モデル群を作成する。これら構造物モデル群の実耐力を推定するために、標準構造物群モデルの耐力を変動させ、観測された被害率を説明するせん断耐力分布を推定する。

地震応答解析に用いる木造構造物モデルは標準的な2階建てをモデル化した、2質点せん断型の振動モデル<sup>7),8)</sup>である。各層のせん断力に対する履歴復元力特性は次式に示すように、復元力を各層重量とベースシア係数の積で除した基準化復元力 $\Phi$ に対し、ポリリニア型とスリップ型の履歴特性を足し合わせる複合型とする。

$$\Phi = \mu\Phi_{OL} + (1 - \mu)\Phi_{SL} \quad (1)$$

ここで、 $\Phi_{OL}$ はポリリニア型履歴特性、 $\Phi_{SL}$ はスリップ型履歴特性、 $\mu$ は両者の複合割合を決める定数である。複合割合 $\mu$ については、既往の研究により実被害との相関が高い、ポリリニア、スリップ型履歴特性の比率を $\mu = 0.4$ とする。またポリリニア型の履歴特性は、第1折点の層間変形角を1/6,000 (rad)に設定する。これにより初期剛性ばねと後述する質量を用いた場合の1次モードにおける、第1折点までの両者の履歴特性を複合した履歴特性に対する固有振動数が4.0Hzとなり、この値は木造構造物として妥当であると考えられる。なお、他のパラメータは兵庫県南部地震における木造構造物31棟の詳細調査の結果から求められたデータ<sup>9)</sup>の平均をとり1階、2階の階高はそれぞれ2.75(m)、2.5(m)、第1層および第2層の重量はそれぞれ155.73(kN)、112.97(kN)とする。

また、現代軸組工法による木造軸組では1/30 (rad)で剛性が低下する<sup>10)</sup>こと、また、層間変形角が1/10 (rad)を越えるとP- $\Delta$ 効果により自壊する<sup>11)</sup>こと、が言われている。そこで、図-1の1/10 (rad)以降の履歴特性については1/5 (rad)で基準化復元力がゼロになるように設定する。その他の折れ点としては、1/960 (rad)、1/120 (rad)を設定する。これら折れ点はそれぞれ一部損壊以上、半壊以上の被害に対応する。

以上の層間復元力と兵庫県南部地震における詳細調査の結果から求められたベースシア係数の平均値、標準偏差を用いて、図-2に示すような正規分布を求め15個の離散化した値とその存在確率を計算し、1階と2階の壁量充足率比を参考に2層の層せん断力係数への倍率 $\nu$ を1.0、1.4、1.8と設定することで、計45個のモデル群を作成し、解析を行う。

### 2.2 建築年代別耐力推定

兵庫県南部地震における宝塚市の建築年代別観測被害率を用いて建築年代別構造物せん断耐力を推定する。解析モデル群にJR宝塚NS方向の地震動を入力し、層間変形角1/30(rad)を超えたものを全壊と定義し、そのモデルの存在確率を解析被害率とする。ここで解析被害率は、文献<sup>12)</sup>を参考に全壊以上をより詳細に評価するため、以下の式(2)で定義する。

$$\text{解析被害率} = 1/10(\text{rad}) \text{ を超えるモデルの存在割合} \\ + 1/30(\text{rad}) \text{ を超えるモデルの存在割合} / 2 \quad \dots (2)$$

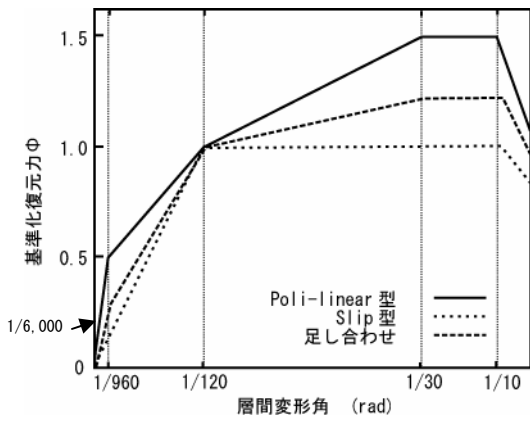


図-1 解析モデルの履歴特性

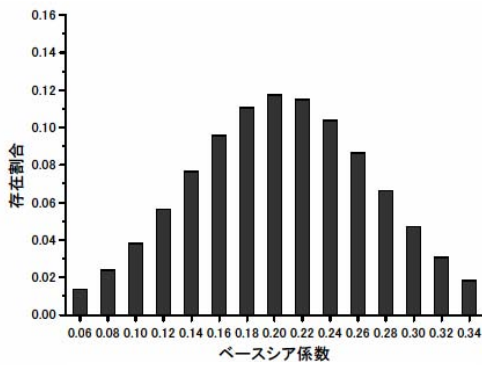


図-2 ベースシア係数の分布

同定耐力の標準構造物耐力との比を  $\alpha$  と定義し標準解析モデル群のベースシア係数に乘じ、その耐力を用いて、建築年代ごとの観測被害率と対応するまで解析を繰り返す。観測被害率とフィットした際の耐力比から各建築年代別の耐力を推定する。 $\alpha$  を変化させて解析を繰り返した結果、図-3 に示す  $\alpha$  を用いると図-4 に示すように観測被害率と解析被害率がほぼ一致した。ここで設定した  $\alpha$  はすべてにおいて 1.0 より大きくなり、兵庫県南部地震における被災木造構造物詳細データより作成された、標準解析モデル群で求められる耐力よりも大きな値を示す。これはベースシア係数には考慮されていない壁の持つ耐力が効いているからであると考えられる。

### 2.3 モデル群の検証

前節では兵庫県南部地震における宝塚市のデータを元に建築年代別の耐力を推定した。しかし、地域により構造の違いなどから被害に差が生じると考えられる。そこで、宝塚市の被害データを元に作成したモデルを他の地域に適用できるかの検討が必要となる。ここでは、作成したモデル群を使用して、兵庫県南部地震に

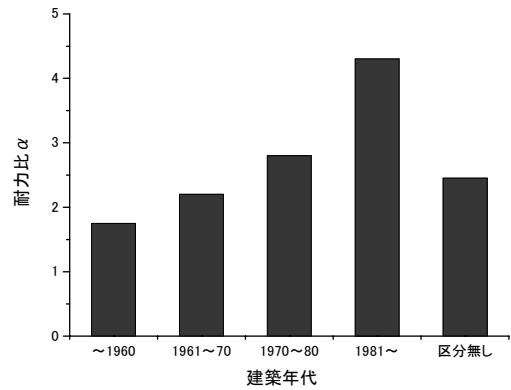


図-3 同定された耐力比  $\alpha$

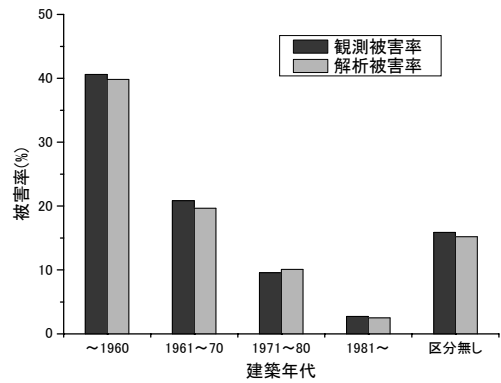


図-4 被害率の比較

$$\begin{aligned} \text{総合解析被害率}(\%) = & 1960 \text{ 年以前の被害率} \times \text{存在割合} \\ & + 1961 \sim 1970 \text{ 年の被害率} \times \text{存在割合} \\ & + 1971 \sim 1980 \text{ 年の被害率} \times \text{存在割合} \\ & + 1981 \text{ 年以降の被害率} \times \text{存在割合} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

おける阪神地域、新潟県中越地震における中越地方の各地の実被害データと解析被害率との比較から、地域による差の検討を行う。ここで建築年代別構成を考慮した総合解析被害率は、式(3)に示すように、各建築年代の被害率と建築年代別の構造物割合との積を全て足し合わせたものとする。

はじめに、宝塚市の被害データから作成したモデルを用いて比較する対象として兵庫県南部地震における神戸市中央区、明石市、尼崎市、神戸市の被害データを用いる。なお、1995年当時における建築年代別構成のデータについては1970年以前、1971~1980年の間、1981年以降の3種しか存在しないため、1960年以前に建築された構造物と1961~1970年に建築された構造物は同じ割合で存在しているものと仮定した。解析被害率と実被害率とに差が生じる場合には、地域補正係数  $\beta$

を用いベースシア係数を補正する。補正方法については、2.2節で示した耐力比 $\alpha$ を導入した全てのモデル群のベースシア係数に対し地域補正係数 $\beta$ を乗じ、実被害データと解析被害率が一致するまで計算を繰り返す。解析に用いる各地の入力地震動、および被害率を表-1に、解析により算出した地域係数を図-5にそれぞれ示す。図に示すように、明石市で $\beta=1.0$ 、それ以外では $\beta=0.9\sim 1.2$ となるが、ほぼ宝塚市に近い値を示している。今回解析に用いた地区はすべて宝塚市と同じ兵庫県内であるため、同等の構造や耐力を持つのであれば各地の地域係数は $\beta=1.0$ 付近となることから、これら地域における構造的なばらつきはほとんどないと考えられる。

次に新潟県中越地震における各地の被害データと建築年代別構成から検討する。検討に用いる地区は、新潟県小千谷市、旧長岡市、川口町、旧小国町である。旧小国町、川口町については小規模な自治体であるため建築年代別構成のデータが無く、両地区に関しては新潟県全体の建築年代別構成データを用いて解析被害率を計算する。解析に用いる各地の入力地震動、および被害率を表-2に、解析により算出した各地の地域係数を図-6にそれぞれ示す。ここで入力地震動の選定については、本震一余震の連続的な発生が木造構造物被害拡大に影響していると考えられる<sup>6)</sup>一方、損傷の累積特性が明確になっていないことや兵庫県南部地震における余震を考慮することができないことから、本研究ではまずは本震だけを用いた検討を行う。解析の結果、図-6に示すようにどの地区でも地域係数は $\beta=1.0$ を超えることがわかる。この結果から地震発生年は異なるものの中越地方の木造構造物は宝塚市の木造構造物よりも耐力が大きいと考えられる。中越地方の耐力が大きくなった理由としては、新潟県は雪国であるため柱や梁が太く強いことなどが要因であると考えられる。また、川口町での地域係数が他に比べ小さかった理由は、全壊率が他の地区に比べ45(%)と非常に大きいことや、被害の大きかった地区が越後川口駅周辺の街道筋に集中していることから、耐力の劣る開口部の大きな商店併用住宅の割合が多かったことが関係しているものと考えられる。以上のことから、新潟県中越地方の木造構造物は宝塚市に比べ約5割増の耐力を持っていると考えられる。なお、金沢市に適用する場合は旧市

街地に川口町のようなタイプの木造構造物が多数存在することから、地域係数を適用する際には川口町における地域係数 $\beta=1.3$ を適用することが妥当であると考えられる。

表-1 入力地震動及び各地の被害率

地区	観測記録名	成分	PGA(gal)	PGV(kine)	全壊率(%)
神戸市中央区	JMA神戸	NS	818.0	85.0	12.0
明石市	JR西明石	NS	473.7	46.8	5.8
尼崎市	尼崎竹谷小	EW	318.2	43.0	12.4
神戸市(鷹取)	JR鷹取	NS	605.6	124.2	14.4

地区		~1970	1971~1980	1981~	計
		住宅数(棟)	19,380	13,110	16,470
神戸市中央区	存在割合(%)	39.6	26.8	33.6	100
	住宅数(棟)	24,590	33,280	31,860	89,730
明石市	存在割合(%)	27.4	37.1	35.5	100
	住宅数(棟)	81,210	49,880	50,810	181,900
尼崎市	存在割合(%)	44.6	27.4	27.9	100
	住宅数(棟)	170,030	134,240	131,800	436,070
兵庫県南部	存在割合(%)	39.0	30.8	30.2	100

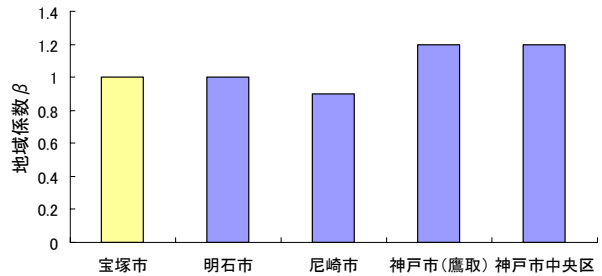


図-5 地域係数(兵庫県南部地震)

表-2 入力地震動及び各地の被害率

地区	観測記録名	成分	PGA(gal)	PGV(kine)	全壊率(%)
旧小国町	JMA小国	EW	691.8	63.6	5.0
小千谷市	JMA小千谷	EW	897.6	90.4	10.7
川口町	JMA川口	EW	1675.8	131.9	45.0
長岡市	Kik-net長岡	NS	818.2	59.1	6.2

地区		~1960	1961~1970	1971~1980	1981~	計
		住宅数(棟)	1,480	1,590	2,490	4,370
小千谷市	存在割合(%)	14.9	16.0	25.1	44.0	1.0
	住宅数(棟)	4,500	6,690	11,510	29,290	51,990
長岡市	存在割合(%)	8.7	12.9	22.1	56.3	1.0
	住宅数(棟)	80,100	82,600	154,000	343,300	660,000
新潟県	存在割合(%)	12.1	12.5	23.4	52	100

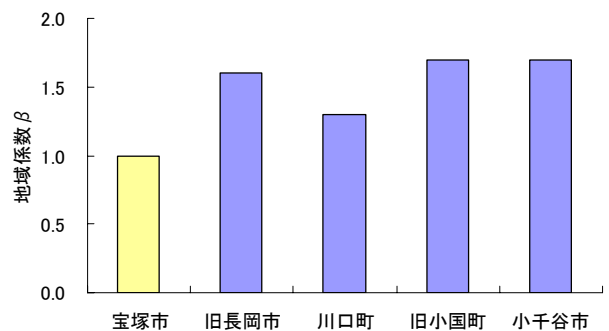


図-6 地域係数(新潟県中越地震)

## 2.4 被害関数の構築

前節でパラメータ同定をした新潟県中越地震における川口町における解析モデルを用いて、木造構造物被害関数の構築を試みる。

木造構造物被害関数構築に用いる入力地震動は表-3に示す兵庫県南部地震，鳥取県西部地震，新潟県中越地震などの観測記録，計 42 地点である。ここで解析に用いる波形としては，水平 2 方向のうち最大となるものを用いる。また，解析被害率は，2.2 節と同様に式(2)で定義する。被害関数は筆者らが提案した疲労応答スペクトル強度 ( $FSI$ ) に対象地域の木造構造物建築年代構成による固有周期の存在確率  $p_i$  を考慮した  $FSI'$  値を用いる。ここで対象地域の木造構造物建築年代構成については，総務省統計局が公表している住宅・土地統計調査における市町村別建築年代構成<sup>13)</sup>を用いる。以上より木造構造物の建築年代構成を考慮した疲労速度応答スペクトル強度 ( $FSIv'$ ) 値は以下の式(4)のように定義される。

$$FSIv' = \int_{\xi}^{\xi} p_i \int_{0.01S_v}^{S_v} C_{S_v} S_v^2 dS_v dt \quad (4)$$

ここで， $p_i$  は対象地域の木造建物建築年代構成による固有周期 ( $t$ ) の存在確率， $S_v$  は速度応答スペクトル， $C_{S_v}$  は各応答レベルでの繰り返し回数とする。また，式(4)に示す周期  $t$ ， $\xi$  については周期範囲を建築年代ごとに変化させることで精度の高い指標値が期待できることから，各周期範囲での被害との相関から適切な周期範囲を決定する。まず式(4)で  $\xi - \xi = 0.1(s)$  としたとき  $\xi$  を  $0.1(s) \sim 2.4(s)$  まで変化させて各周期帯域における  $FSIv'$  値を算出する。そして算出した  $FSIv'$  値と解析被害率とを比較し，指標値と解析被害率との関係から近似の精度を示す決定係数  $R^2$  を求める。この結果から，相関の高い周期範囲を選び，それぞれの建築年代における等価周期を決定する。決定係数  $R^2$  と各周期との関係を図-7に示す。図に示す両者の関係を表す決定係数  $R^2$  は以下の式(5)に示すロジスティック関数  $y$  を用いた回帰曲線に対する，最小自乗誤差より求める。

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + (x/x_0)^p} + A_2 \quad (5)$$

ここで  $A_1, A_2$  はそれぞれ下限値，上限値 ( $A_1=0, A_2=100$ ) とし， $x$  は  $FSIv'$  値， $x_0, p$  は回帰係数とする。図に示す各建築年代の周期帯域を見ると，建築年代の古い構造物は長周期側の地震動に対して全体的に被害と相関が高く，1981 年以降に建築された構造物に対しては，それ以前に建築された構造物に比べて短周期側

表-3 解析対象地点および波形

地震名	観測記録名	成分	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)	
1995年兵庫県南部地震	尼崎竹谷小	EW	318.2	43.0	
	本山第一小	NS	421.3	46.4	
	JR西明石	NS	473.7	46.8	
	JR新大阪	EW	228.9	23.9	
	JR宝塚	EW	600.9	82.5	
	JR鷹取	NS	605.6	124.2	
	尼崎港	EW	472.0	60.7	
	葦合	EW	802.0	130.4	
	関電総合技研	EW	506.6	53.1	
	尼崎高架橋	EW	293.9	48.2	
	JMA神戸	NS	818.0	85.0	
	NTT神戸中央区	NS	330.7	49.7	
1997年鹿児島県北西部地震3/26	六甲アイランド	NS	319.6	73.6	
	K-NET宮之城	EW	493.2	36.9	
	K-NET川内	EW	317.5	31.2	
1997年鹿児島県北西部地震5/13	K-NET宮之城	NS	902.4	37.7	
	K-NET出水	NS	728.2	21.3	
	KiK-NET伯太	NS	719.1	36.9	
2000年鳥取県西部地震	KiK-NET日野	NS	917.8	110.0	
	K-NET米子	EW	383.6	53.6	
	K-NET江府	EW	573.2	28.3	
	K-NET日南	NS	628.2	36.8	
	K-NET松江	EW	175.0	22.6	
	JMA境港	EW	748.4	84.7	
	2001年芸予地震	K-NET東予	EW	462.8	29.7
		K-NET呉	EW	425.0	23.4
		K-NET松山	EW	310.3	25.7
		K-NET三原	NS	642.7	11.9
K-NET大野		EW	447.2	31.6	
2004年新潟県中越地震	K-NET小出	NS	521.4	32.8	
	K-NET長岡	NS	468.4	35.0	
	K-NET長岡支所	NS	871.0	119.0	
	K-NET小千谷	EW	1307.9	133.5	
	K-NET十日町	NS	1715.5	58.3	
	KiK-NET川西	EW	587.9	57.8	
	KiK-NET長岡	NS	818.2	59.1	
	JMA川口	EW	1675.8	131.9	
	JMA小千谷	EW	897.6	90.4	
	JMA山古志	EW	721.8	89.7	
JMA小国	EW	691.8	63.6		
JMA川西	NS	681.4	37.5		
JMA長岡	EW	430.3	23.2		

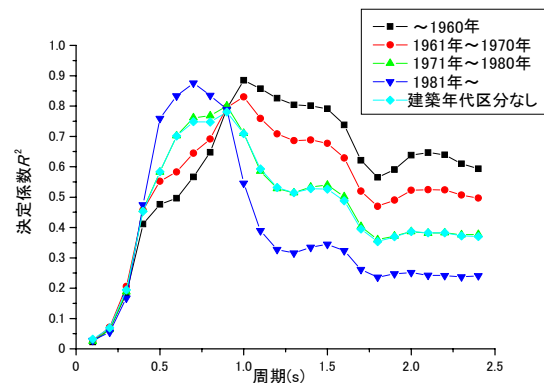


図-7  $FSIv'$  値の周期帯域と解析被害率の決定係数との関係

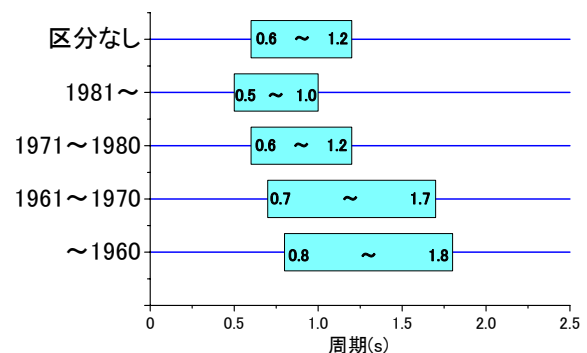


図-8 各建築年代で被害と相関の高い周期帯域



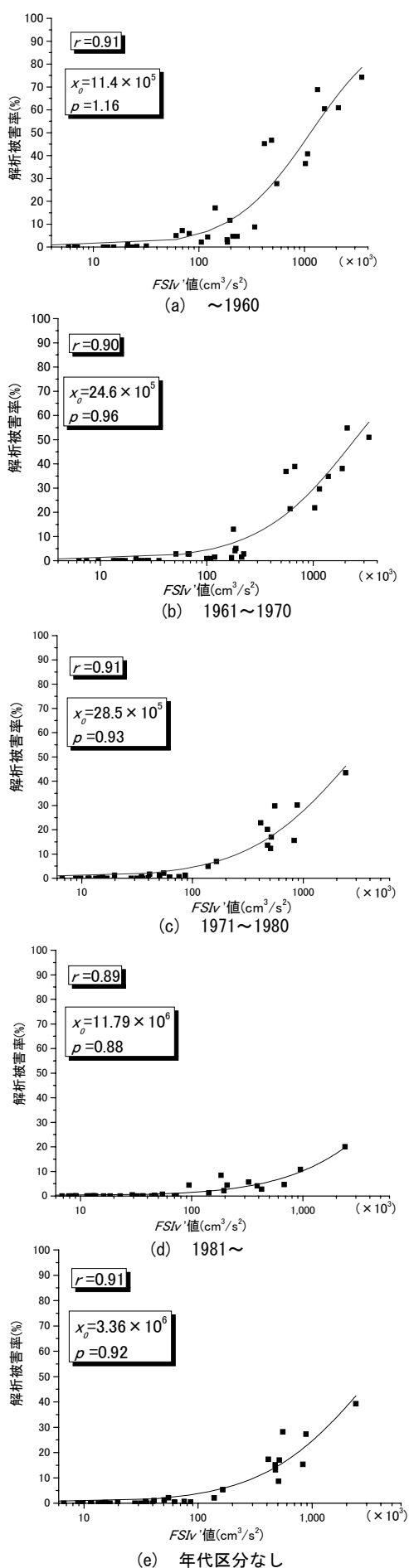


図-9 建築年代別の解析被害関数

の地震動と被害の相関が高い。また、1981年以降に建築された建造物の相関係数が0.5を超えた周期範囲は0.5~1.0(s)であった。他の年代においても、同様な方法でそれぞれ相関の高い周期範囲を選択し、それを各建築年代の周期帯域として求める。以上の方法により求めた各建築年代の周期帯域を図-8に示す。

以上よりFSIv'値を用いた建築年代別の解析被害関数を図-9に示す。図に示すように、指標値FSIv'と被害率の関係は建築年代を問わず高い相関を有していることがわかる。また、建築年代の違いにより被害率が大きく変化しており、1960年以前と1981年以降の建造物では、およそ3倍弱の被害差が生じるといえる。

### 3. 金沢市における地震被害予測

#### 3.1 想定地震動

金沢市内に被害を及ぼした地震としては1799年寛政金沢地震が良く知られているが、その他では歴史的に見ても、1586年天正地震、1717年享保地震、1881年濃尾地震の3つだけである。しかし、石川県内まで目を向けると、1948年福井地震、1985年能登半島沖地震、1993年能登半島沖地震、2007年能登半島地震などがある。これらの地震は比較的近年に発生したものであることから、今後いつ金沢市に大規模な被害をもたらすような地震が発生してもおかしくない状況である。金沢市は戦災を免れた街であり、他の都市に比べて、古い木造建造物が多く存在している。さらに金沢市には森本・富樫断層が走っており、この断層が破壊した場合には大規模な被害を受けることが予想される。

本章では構築した木造建造物被害関数である式(5)を用いて、地震時における金沢市の木造建造物の被害を推定する。なお、地震被害の推定において使用する想定地震の波形は、防災科学技術研究所が詳細法により求めた工学的基盤における速度波形<sup>14)</sup>を用いる。

森本・富樫断層は、長期評価によると石川県かほく市津幡町から金沢市を経て白山市鶴来町に至る長さ26kmの断層帯で、断層帯の東側が西側に乗り上げる逆断層である。過去の最新の活動は約2000年前以後、約200年前以前にあったと考えられており、今後30年の間に地震が発生する可能性が、確率の最大値をとると日本の主な活断層の中では発生確率の高いグループに

属している。本研究では、長期評価にもとづき上記の断層帯に対応するひとつのセグメントからなる断層を想定する震源断層とした。

断層面の傾斜角は、長期評価では「断層面の傾斜と深部形状については十分な資料がない」としていることから、傾斜角 60°、45°、30° の3通りを設定する。ただし傾斜角 45° のケースについてはアスペリティの位置を南端に配置したケース 1a、アスペリティの位置を中央に配置し深さを変化させたケース 1b~1d を設定する。そして傾斜角 60°、30° の場合についてはアスペリティの位置を南端、深さを中央に配置し、それぞれケース 2、3 とする。以上をまとめた各断層のモデルパラメータを表-4 に、断層モデルケースを図-10 にそれぞれ示す。

表-4 各断層モデルケースパラメータ

	ケース	1a				2		3		
		1b	1c	1d						
巨視的震源特性	断層総面積	513				420	676			
	地震モーメント	1.1				0.82	1.7			
	地震規模	6.6				6.5	6.8			
	短周期レベル	A				1.2	1.4			
	基準点の位置	(北端)~(南端)								
	基準点の北緯	36° 40' ~ 36° 28'								
	基準点の東経	136° 44' ~ 136° 37'								
	走向	N257° E								
	傾斜角	45° E				60° E	30° E			
	平均滑り量	D				66	60	76		
	滑り方向	東側隆起の逆断層								
	地震発生層深さ	4~18								
断層面の長さ	L				26					
断層面の幅	W				20	16	26			
微視的震源特性	地震モーメント	MOa				3.2	2.3	4.7		
	面積	Sa				73	60	96		
	平均滑り量	Da				130	120	150		
	静的応力降下量	$\Delta\sigma_a$				16	16	16		
	短周期レベル	A				1.2	5.9	1.2		
	地震モーメント	MOb				0.8	0.6	1.2		
	面積	Sb				440	360	580		
	平均滑り量	Db				55	50	64		
	実効応力	$\Delta\sigma_b$				2.9	3.2	2.6		
	その他の震源特性	アスペリティ位置	南端		中央		南端			
		アスペリティ深さ	中央	中央	上端	下端	中央			
		破壊開始点	南端		中央		南端			
破壊開始点の深さ		アスペリティ下端								
破壊様式		同心円状								
破壊伝播速度		2.5( $\beta=3.46$ の72%)								
Fmax	6									
震源時間関数	中村・宮武(2000)による									

その他: S波速度( $\beta$ )=3.46km/s、密度( $\rho$ )=2.7g/cm<sup>3</sup>、剛性率( $\mu$ )=3.2323×10(N/m<sup>2</sup>)

### 3.2 被害予測結果

2.4節で構築した被害関数および、地震応答解析から求められる  $FSI_v$  値を用いて、金沢市内 27 地点における木造建造物の被害予測を行う。なお、使用する波形には NS, EW 成分があるが、より安全側に被害予測を行うために、各ケース PGV の大きい成分の波形を用いる。各ケースにおける金沢市内 27 地点における木造建造物の被害予測結果を表-5 に示す。表に示すように各ケースでの予測は大きくばらついており、アスペリティの影響が大きいといえる。また、傾斜角 30° のケースではほとんど被害が発生しない。これらより断層モデル作成には十分注意を払う必要があるといえる。地域別では古い住宅が密集している犀川と浅野川に挟まれた地域で大きな被害が高い。ただし、地区 7, 8 のような比較的古い建造物が多いが台地となっている地区ではそれほど大きな被害率とならないことから、建築年代が被害に影響しているものの、地盤震動による影響も十分大きいことが分かる。

また、上に述べた全ケースを考慮した上での危険度予測を行うため、ここでは全てのケースが同じ確率で発生すると仮定し、それぞれの地区で全ケース被害率の総和をとったものを危険度予測の指標値とする。この結果から、森本・富樫断層が震源断層となる場合の金沢市内の危険地域を予測する。ただし、被害率が

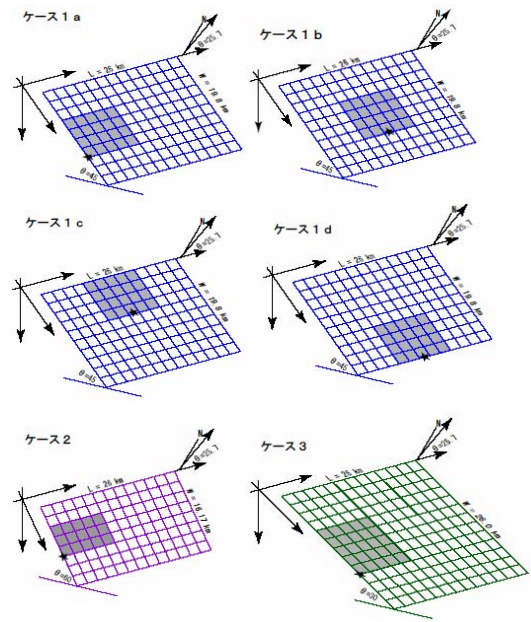


図-10 各断層モデルケース

50(%)以上の被害となると、対象地区はほぼ壊滅的な状態となると考えられることから、被害率が 50(%)以上となる地域については全て同様な実被害となると仮定し、被害率を 50(%)として危険度を予測する。また、危険度を示す指標値として、以下の式を提案する。

$$\text{危険度} = \frac{\text{全ケース被害率の合計値}}{\text{合計被害率の最大値}} \quad \dots (6)$$

今回の場合、全ケース被害率の合計値が最大となったのは地区 26（元町・浅野本町）であるため、この地区の合計値を分母として用いる。前述の表-5 及び図-11 に危険度予測結果を示す。図に示すように断層近傍の地区よりやや海側の、沖積層が堆積している地区の危険度が高めとなった。また、地区 7、8 のような比較的古い構造物が多いが台地となっている地区の危険度はそれほど高くないことが分かる。すなわち、今回の解析では建築年代よりも地盤震動による影響の方が高いと考えられる。ただし、地区 3、4、26 など金沢市中心部においては建築年代の古い構造物が多いことが危険度を高くしていること、一方海岸部の地区 27 については比較的最近町が構成されているため危険度が低いことから、1981 年以降に建てられた構造物が多い地域では危険度が十分小さくなることも明らかとなった。

本研究で求めた危険度予測は、全てのケースが同じ確率で起こると仮定し、同じ重みで危険度を算出した。しかし、実際は全てのケースが同じ確率で発生するとは限らないため、今後は各ケースの発生確率を考慮した危険度予測を行う必要がある。

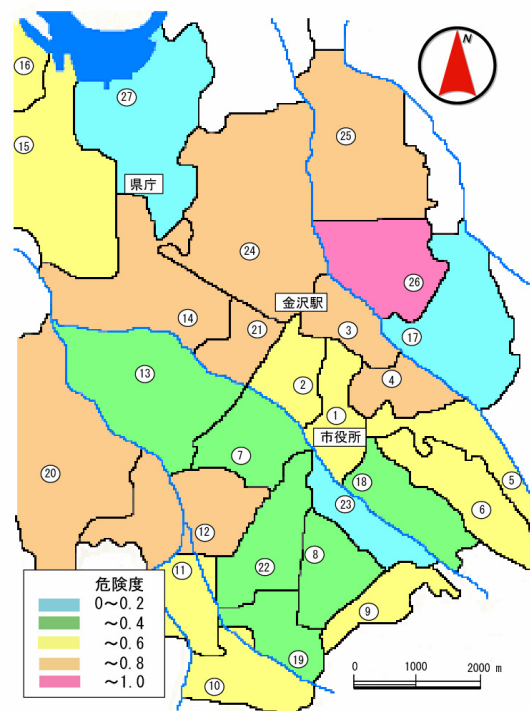


図-11 危険度算出結果

表-5 被害予測結果

No.	地区	断層ケース(表内の数字は被害率(%))						危険度
		1a	1b	1c	1d	2	3	
1	片町・香林坊	19.9	16.2	29.4	6.0	15.4	0.2	0.49
2	長町	29.2	4.7	16.1	2.6	21.1	0.3	0.42
3	尾張・安江町	19.9	31.7	72.6	9.6	16.2	0.1	0.72
4	丸の内	16.1	59.7	82.6	13.3	10.5	0.2	0.79
5	天神・旭町	16.1	27.6	26.4	13.9	6.5	0.3	0.51
6	小立野	17.0	15.5	45.7	10.9	14.7	0.4	0.59
7	増泉・野町	33.3	2.2	2.2	1.4	8.9	0.1	0.27
8	泉野	15.7	4.1	4.3	5.1	16.2	0.1	0.26
9	長坂・平和町	18.9	5.3	26.1	7.7	34.6	0.2	0.52
10	窪	28.1	18.6	21.6	14.3	23.0	0.7	0.60
11	横川・久安	28.7	4.5	15.2	3.0	36.8	0.3	0.50
12	西泉	46.4	18.9	28.9	7.0	40.2	0.3	0.80
13	新神田・入江	11.3	6.9	14.9	3.5	10.8	0.1	0.27
14	藤江	31.3	36.1	53.7	19.3	2.7	0.1	0.78
15	畝田・松村	18.4	19.9	24.6	15.1	4.1	0.6	0.46
16	金石	13.0	21.3	35.3	9.9	3.0	1.2	0.47
17	東山・鳴和	2.7	5.6	23.6	2.9	1.3	0.1	0.20
18	笠舞・本多町	19.3	6.8	19.5	4.4	18.6	0.2	0.39
19	円光寺・富樫	11.9	2.6	15.6	2.1	11.6	0.2	0.25
20	西金沢・八日市	38.8	15.1	20.5	6.8	30.4	0.1	0.63
21	中橋	15.1	27.4	60.9	10.0	21.8	0.3	0.70
22	有松	9.1	17.1	11.4	3.1	9.1	0.2	0.28
23	寺町	6.7	2.8	8.0	1.7	3.6	0.2	0.13
24	広岡・北安江	18.9	32.0	34.7	18.3	6.7	0.2	0.62
25	高柳・田中	30.6	22.3	17.8	16.1	18.8	0.7	0.60
26	元町・浅野本町	24.9	48.0	51.3	27.1	27.6	0.4	1.00
27	鞍月	9.5	9.2	8.4	3.6	3.5	0.3	0.19

#### 4. まとめ

本研究では、兵庫県南部地震における宝塚市の被害データを用いて建築年代ごとに耐力の異なるモデルを作成し、 $FSIv'$ 値を用いて木造構造物被害関数を構築し、その被害関数を用いて森本・富樫断層が破壊した際の金沢市における木造構造物被害予測を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 解析モデル群に耐力比 $\alpha$ を導入することにより、建築年代による耐力の差を表現することができた。特に1981年以降に建築された構造物の耐力は著しく大きく、1960年代前に建築された構造物に比べ3倍弱の耐力を持っているという結果となった。

2) 地域係数 $\beta$ を用いて宝塚モデルと兵庫県内の各地の被害データを用いた解析結果では、兵庫県内ではほぼ同じ耐力を得ることができた。このことから、神戸周辺地区の構造物耐力には大きな差はないものと考えられる。一方、新潟県中越地域で同様の比較を行うと、川口町における耐力に差が生じたことから、地方部で発生する地震では町の構成要素に留意してモデルを構築する必要がある。

3) 新潟県中越地震の被害データを用いて宝塚モデル



と比較した結果、中越地方の木造構造物は宝塚市の木造構造物に比べ約 1.5 倍程度の耐力を持つことが分かった。

4) 本研究で考慮した 6 つの断層破壊ケースにおいて最も大きな被害が予想されるのは、ケース 1c であった。このケースでは犀川と浅野川に挟まれた地域で大きな被害が予想される。これは、ケース 1c ではアスペリティが浅く、金沢市に非常に近い位置で断層が破壊することを仮定しているということと、尾張・安江町や丸の内など金沢市中心部においてはまだ建築年代の古い構造物が多いことが要因として挙げられる。

さらに精度の高い被害予測を行うためにはいくつかの考慮すべき点がある。以下に、その点を今後の課題として述べる。

1) 金沢市で被害予測を行う際に、本研究では  $\beta = 1.3$  として川口町と同等の耐力を持つと仮定したが、実際には川口町と金沢市では古い構造物の特性が異なるであろうと考えられる。したがって、金沢市の木造構造物の特徴を捉えて地域係数を再決定する必要がある。

2) 本研究では新潟県中越地震のような本震—余震の連続的な発生を考慮した地震応答解析を行っていない。木造構造物被害拡大に影響していると考えられる一方、損傷の累積と余震の影響関係が明確になっていないことから、実大木造構造物による震動試験などにより損傷の累積に関するモデル化を行い、解析に取り入れる必要がある。

3) 今回の木造構造物被害モデル構築、および被害想定に用いた入力地震動は直下型地震動であるため、今世紀中にも発生すると予想される東海・東南海地震において本方法で地震被害予測を行う際には、海溝型地震動に対する被害関数、考慮する周期範囲を再構築する必要がある。ただし、海溝型地震は一般的には長時間であるため、地震動の繰り返しによる疲労を考慮した  $FSI_v$  値がより有効な指標となると考えられる。

謝辞： 本研究で用いた強震記録は K-NET, KiK-net(防災科学技術研究所), 気象庁, JR, 関震協提供によるも

ののです。以上の各機関に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，No.1, pp.51-56, 1999.
- 2) 山口直也・山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定，土木学会論文集，No.612/I-46, pp.325-336, 1999.
- 3) 林康裕・宮越淳一・田村和夫・川瀬博：1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定，日本建築学会構造系論文集，第494号，pp. 59-66, 1997.
- 4) 境有紀・瀬瀬一起・神野達夫：地震被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案，日本建築学会構造系論文集，第555号，pp.85-91, 2002.
- 5) 吉田研史：木造建物群の建築年代別予測モデルの構築と破壊力指標の提案，工学院大学大学院工学研究科建築学専攻修士論文便概集，2004.
- 6) 村田晶・北浦勝・宮島昌克・高橋正樹：応答の繰り返しを考慮した地震動破壊力指標の新潟県中越地震被害への適用，土木学会地震工学論文集，Vol.28, No.137, CD-ROM, 2005.
- 7) 中治弘行：木造建物の耐震性能評価に関する研究，京都大学博士学位論文，1999.
- 8) 林康裕 他：2000年鳥取県西部地震の地震動強さの評価，日本建築学会構造系論文集，第548号，pp.35-41, 2001.10.
- 9) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，建設省建築研究所，1996.
- 10) 鈴木祥之 他：強震動下における木造建物の地震応答と耐震性評価，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム，pp.211-214, 1997.
- 11) 鈴木三四郎 他：軸組木造住宅の地震応答解析 その1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 205-210, 2001.
- 12) 山口直也 他：地震応答解析に基づく建物被害関数の構築，土木学会大会学術講演梗概集，pp. 562-563, 2000.
- 13) 総務庁統計局：住宅・土地統計調査  
<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/index.htm>
- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動の評価，2003.

(2007.4.6 受付)

PREDICTING DAMAGE INDEX OF WOODEN STRUCTURES USING FATIGUE  
RESPONSE SPECTRAL INTENSITY INDEX CONSIDERING THE  
CONSTRUCTION AGE AND NUMBER OF SEISMIC RESPONSE CYCLES

村田 晶, 今井 哲治, 北浦 勝, 宮島昌克

*Akira Murata, Tetsuharu Imai, Masaru Kitaura and Masakatsu Miyajima*

In general, seismic intensity, peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV) and spectral intensity (SI) have been used as the indices of destructive power on earthquake motion. However, it is quite important to consider the number of earthquake response cycles in the vicinity of the maximum response and natural period of structures for predicting damage to structures. Especially, destruction of the wooden structure was expanded by aftershock after the main shock in 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake. In this study, the influence by accumulation of the earthquake motion on wooden structure destruction is considered. The fatigue response spectral intensity (FSI) of having taken the repetition of earthquake motion into consideration is applied, and a relation with wooden structure damage is considered. In addition, existing probability of natural period of wooden houses is taking into account in this index. In this study, It is predicted to the wooden structure damage using the FSI index in Kanazawa City. As a result, it was clarified that accumulation of an earthquake motion influences structure damage and the earthquake motion destructive power index proposed by this research that accumulation of the earthquake motion can be taken into consideration is effective.