

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

村田 晶¹・北浦 勝²・宮島昌克²・高橋正樹³

¹金沢大学大学院自然科学研究科 助手 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: murata@t.kanazawa-u.ac.jp

²金沢大学大学院自然科学研究科 教授 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: kitaura@t.kanazawa-u.ac.jp, miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

³金沢大学大学院自然科学研究科 大学院生 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: m-takahashi@pbousa9.ce.t.kanazawa-u.ac.jp

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れ、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。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構造物の破壊が拡大した。そこで本研究では木造構造物破壊に及ぼす地震動の累積による影響について検討するとともに、地震動の繰り返しを考慮した疲労応答スペクトル強度指標を適用し、被害との関係について考察する。その結果、地震動の累積による構造物被害への影響を明らかにし、余震による地震動の累積を考慮できる、本研究で提案する地震動破壊力指標の有効性を示すことができた。

Key Words : Niigata-ken Chuetsu earthquake, Wooden structure, Fatigue response spectral intensity, Structural response analysis

1. はじめに

2004年10月23日、新潟県中越地方においてM6.8の地震が発生した。この地震により、新潟県川口町で震度7、小千谷市、山古志村、小国町で震度6強を観測した。また、同日18時11分頃にM6.0、18時34分頃にM6.5の余震が続けて発生し、いずれも最大震度6強を観測した。このような地震災害の軽減には、地震直後の救助活動を効率的に行うことが重要であり、地震直後に建物被害を迅速かつ正確に把握する地震動の破壊力指標が必要である。一般に地震動の破壊力を示す指標として、計測震度、PGA、PGV、SI値が挙げられる(例えば1),2)。しかしながら、これらの指標は地震動により構造物が何回揺られる、低サイクルの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。特に今回の新潟県中越地震では本震後の余震によって木造構造物の破壊が拡大したことが知られている。しかしながら、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、新潟県中越地震における強震観測記録から得られる波形を用いて地震応答解析を行い、木造構造物破壊に及ぼす地震動の累

積による影響を検討する。また、応答振幅の繰り返しと構造物の固有周期範囲を考慮した指標FSI値を算出し、市町村別の木造構造物被害との相関を調べることで、本指標の有効性を検討する。さらに本研究で得られた指標が近年の地震による木造構造物被害と良い対応を示すかについて検討を行う。

2. 新潟県中越地震における木造構造物地震応答解析

(1) 新潟県中越地震の木造構造物被害概要及び地震動特性

新潟県中越地震における市町村ごとの木造構造物全壊率と、その市町村内に存在する強震観測記録から得られる指標値の関係から、地震動破壊力の評価を行う。表1に被害データおよび木造構造物全壊率を示す。ここで、全壊率はある地域における全壊棟数に大規模半壊棟数および半壊棟数の1/2を加えた値を全世帯数で除して求める。

新潟県中越地震本震、余震と近年に発生した地震の計測震度、PGA、PGVならびにSI値を表2に示す。ここで、PGVは振り子法で、SI値は以下に示す式でそれぞれ求める。

$$SI \text{ 値} = \int_{0.1}^{2.5} S_v dT \quad (1)$$

ここで、 S_v は速度応答スペクトルを、 T は周期を表す。

また新潟県中越地震本震のJMA川口（川口町）、JMA小千谷、K-NET小千谷（以上 小千谷市）、JMA小国（小国町）、K-NET十日町（十日町市）、K-NET長岡支所（長岡市）と比較として 1995 年兵庫県南部地震のJMA神戸、葦合（以上 神戸市中央区）、JR鷹取（神戸市長田区）、2000 年鳥取県西部地震のKiK-net日野（日野町）における本震の加速度応答スペクトル（5%減衰）を図 1 に示す。図に示すように、新潟県中越地震に対する加速度応答スペクトル値は比較した地震のそれらと比べ全体的に大きく、K-NET小千谷、K-NET十日町では $4,000(\text{cm/s}^2)$ を超える値となった。しかし卓越周期については、K-NET十日町は 0.2 秒、K-NET小千谷は 0.7 秒と兵庫県南部地震のJR鷹取（神戸市長田区）の 1.2 秒、葦合の 0.9 秒に比べ短いことから、特に十日町市では得られた記録から予想されるほどには大きな被害となっていない。また、K-NET小千谷とJMA小千谷は、直線距離で約 700m程と観測点が近いが、K-NET小千谷ではJMA小千谷より大きな値となっている。しかし、この観測点では局所的な地盤増幅要因による影響を大きく受けていることが考えられるため、統計的な値である木造構造物全壊率とあまり良い対応を示さなかったと考えられる。また、JMA川口では加速度応答スペクトルの卓越周期が 1.3 秒とやや長周期であり、値も $2,000(\text{cm/s}^2)$ を超える木造構造物にとってはかなり厳しい地震動を入力されたことが、全壊率 50%以上につながったのではないかと考えられる。一方、JMA小国では得られた値に対して木造構造物全壊率が大きいと考えられる。このことは、本震のみによる被害よりも、引き続き発生した余震によって被害が拡大したのではないかと考えることもできる。

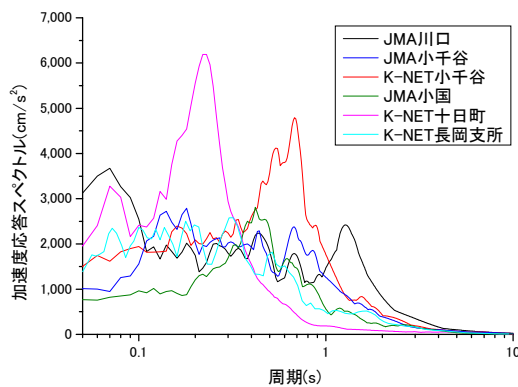
以上より地震動と木造構造物被害との間には相関があると考えられるが、小千谷市のように既往の地震と比較すると、表 2 で示す指標値はほぼ同じような値となっているにもかかわらず同じような木造構造物被害となっていないところがある。また、新潟県中越地震では本震後に大きな余震が立て続けに発生したが、これらの指標値のみからでは木造構造物の破壊に対し地震応答の繰り返しがどのように影響しているかを明らかにしているとは言えない。そこで次章では、強震観測波形を用いて木造構造物の地震応答解析を行い、木造構造物破壊に及ぼす地震動の累積による影響を検討する。特に、余震が構造物応答の履歴に対し、どのように影響を及ぼすかについて詳細な検討を行う。

表1 木造構造物全壊率

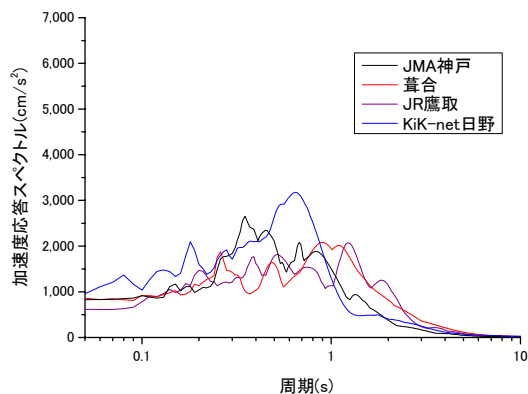
	対象地域	全壊率 (%)	全壊棟数 (棟)	半壊棟数 (棟)	全世帯数 (世帯)
新潟県中越地震 (2004年)	長岡市	5.33	907	4,542	67,846
	川口町	52.32	602	331	1,597
	小千谷市	9.33	662	918	12,316
	十日町市	4.22	103	799	13,342
	小国町	21.14	140	522	2,193
	川西町	2.03	5	76	2,270
	魚沼市 (旧広神村)	1.88	10	64	2,443
	魚沼市 (旧小出町)	0.22	1	16	4,021
兵庫県南部地震 (1995年)	南魚沼市 (旧六日町)	0.04	3	1	8,657
	神戸市中央区	12.73	4,947	3,420	52,283
	神戸市長田区	28.16	12,515	4,994	53,306
	尼崎市	1.34	603	3,966	192,340
鹿児島県北西部 地震(1997年)	宝塚市	4.47	1,339	3,718	71,558
	宮之城町	0.12	2	12	6,608
鳥取県西部地震 (2000年)	川内市	0.02	2	9	27,408
	日野町	22.45	129	441	1,557
	境港市	1.72	71	287	12,505
芸予地震 (2001年)	米子市	1.29	103	1,087	49,985
	呉市	0.24	58	258	79,211
三陸南地震 (2003年)	大船渡市	0.03	2	8	14,880

表2 計測震度、PGA、PGVならびにSI値

	観測点	計測震度	PGA (cm/s^2)	PGV (cm/s)	SI (cm)
新潟県中越地震 (2004年) (10/23 17:56)	JMA川口	6.5	1,676	132	623
	JMA山古志	6.4	722	90	452
	JMA小千谷	6.3	898	90	393
	JMA小国	6.0	692	64	261
	JMA川西	5.7	681	38	165
	JMA長岡	5.5	430	23	90
	JMA六日	5.2	136	25	140
	JMA広神	4.7	334	16	45
	K-NET小千谷	6.7	1,308	134	553
	K-NET長岡支所	6.4	871	119	461
	K-NET十日町	6.2	1,716	58	185
	K-NET小出	5.6	521	33	143
	K-NET長岡	5.5	468	35	152
同 余震 (10/23 18:03)	K-NET小千谷	5.3	225	27	119
	K-NET十日町	3.9	110	5	21
(10/23 18:34)	K-NET小千谷	6.1	794	67	273
	K-NET十日町	6.2	816	58	221
兵庫県南部地震 (1995年)	JMA神戸	6.4	818	85	411
	葦合	6.5	802	130	541
	JR鷹取	6.5	657	124	582
	JR宝塚	6.2	601	83	326
	JR尼崎	5.7	318	43	225
鳥取県西部地震 (2000年)	JR西明石	5.8	474	47	164
	KiK-NET日野	6.6	918	110	402
	JMA境港	6.0	748	81	350
	K-NET米子	5.8	384	56	250



(a) 新潟県中越地震



(b) 兵庫県南部地震, 鳥取県西部地震
図1 加速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

(2) 木造構造物の地震応答解析概要

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³⁾である。ただし、図2に示すように履歴特性は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に対し、ポリリニア型とスリップ型の履歴特性を0.4 : 0.6の割合で足し合わせる。ここでポリリニア型の履歴特性は、第1折点を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次モードに対する固有振動数が3.0Hz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、2層部の剛性は標準的な2階建て木造構造物を考慮して1層部の0.6倍と仮定する。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⁴⁾こと、また、層間変形角が1/10 (rad) を越えるとP- Δ 効果により自壊する⁵⁾こと、が言われている。そこで、1/30 (rad) 以降の履歴特性は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、中破以上の被害に対応する。

以上の方法により設定した履歴特性に対し、木造構造物質量の1階を36(t)、2階を27(t)とし、ベースシア係数 $C_0=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ とした解析モデルを用いる。考察は1層-2層間における層間変形角について行う。

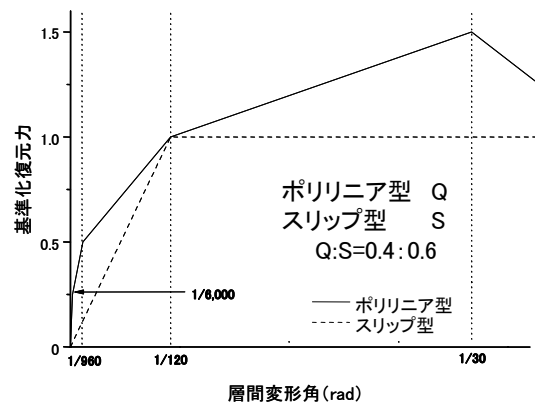


図2 木造構造物モデルの履歴特性

(3) 解析結果及び考察

(a) 新潟県中越地震本震による解析結果

応答解析に用いたJMA川口、JMA小千谷、K-NET小千谷、K-NET十日町での本震における加速度記録を図3～図6に示す。また、構造物のベースシア係数を $C_0=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ としたときの地震応答解析による1層部層間変形角時刻歴を図7～図10にそれぞれ示す。図7～図9に示すように、ベースシア係数が小さい構造物の場合、本震の強震部分が入力されると層間変形角が急激に増加するため、本震のみで倒壊等の深刻な被害の生じる可能性があると考えられる。また、図8、図9に示す小千谷市の強震記録(JMA小千谷、K-NET小千谷)について比較すると、JMA小千谷に比べ直線距離で約700m離れたK-NET小千谷の層間変形角が大きい。この理由として鳥取県西部地震の境港市や、三陸南地震の大船渡市(JMA大船渡とK-NET大船渡)での強震記録差⁶⁾と同様に、局所的な地盤増幅が解析結果に大きく影響したと考えられる。筆者らが行った強震観測点周辺の被害調査結果からも、K-NET観測点周辺の被害が大きかったことから、本解析結果は被害と調和的な傾向であると考えられる。次にK-NET十日町を用いた解析結果において、図10に示すようにベースシア係数の大きさにかかわらず大きな層間変形角が生じていない。これは図1で示した短周期で卓越する強震特性が大きく関係していると考えられるが、その後の余震により被害が拡大した可能性も考えられる。このことは、図11に示すベースシア係数を $C_0=0.3$ としたときの各解析対象地点における最大層間変形角と木造構造物全壊率との関係からも読み取ることができる。ここで、木造構造物全壊率は各市町村別の統計値であり、構造物の被害要因も種々であると考えられるが、それぞれの地域での平均的な木造構造物の被害程度を表していると言える。また、解析による層間変形角は各構造物モデル1棟による値であるが、平均的な木造構造物をモデル化しているため、実際の構造物剛性はばらついている。層間変形角の程度を見ることは、平均的な木造構造物の被害程度を見ることと同義であると考えられることができるため、構造物の層間変形角と木造構造物全壊率

には正の相関があると考えられる。相関が高いほど木造建造物の被害程度を正確に表していると考えられることから、本研究では相関比に着目して検討を行う。ここに両者の関係を表す相関比 R^2 を本研究では以下に示すロジスティック関数を用いた回帰曲線に対する、最小自乗誤差より求める。

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + (x/x_0)^p} + A_2 \quad (2)$$

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_0, p は回帰係数とする。

図 11 に示すように、層間変形角と全壊率の関係は層間変形角の増加に従い全壊率が増加することから、調和的な傾向を示している。また、本地震による被害と、青色の点で示した既往の地震（兵庫県南部地震、鳥取県西部地震）で被害の大きかった地点を比較すると、特に兵庫県南部地震の神戸市では、そこで得られた強震記録を用いベースシア係数 $C_0=0.3$ で解析を行うと、新潟県中越地震の観測記録波形では層間変形角は小さくなるため、図中で示す回帰曲線を基準にすると層間変形角に対し全壊率が大きくなる。このことから、新潟県中越地方の木造建造物は平均的に剛性が高いといえる。さらに、全壊率の高い地域のうち小千谷市では全壊率に比べ層間変形角が大きく、小国町、十日町市では小千谷市における層間変形角と全壊率の関係と比べ、全壊率に対し層間変形角が小さくなる傾向となった。これらより、小国町、十日町市ではその後の余震によって特に被害が拡大したのではないかと考えることができる。そこで、次節では本震後に余震があった場合の被害に対する影響について同様な地震応答解析を行う。

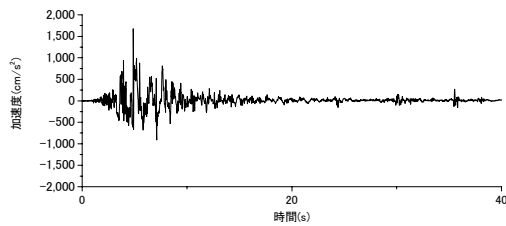


図3 本震における加速度時刻歴（JMA川口）

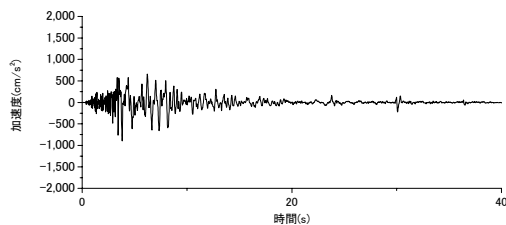


図4 本震における加速度時刻歴（JMA小千谷）

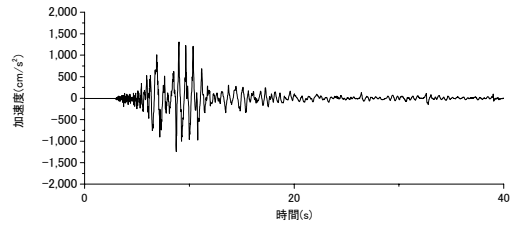


図5 本震における加速度時刻歴（K-NET小千谷）

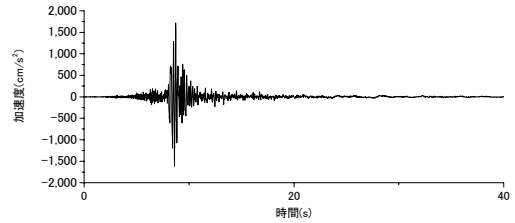


図6 本震における加速度時刻歴（K-NET十日町）

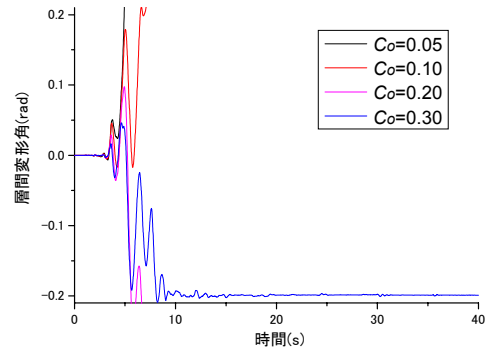


図7 本震による層間変形角時刻歴（JMA川口）

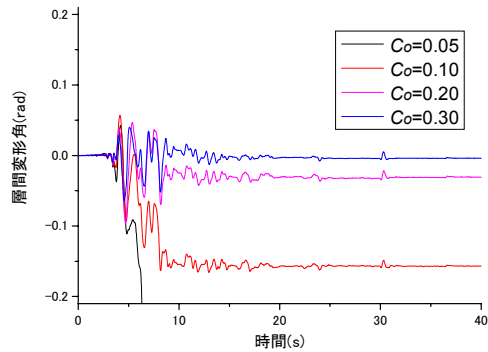


図8 本震による層間変形角時刻歴（JMA小千谷）

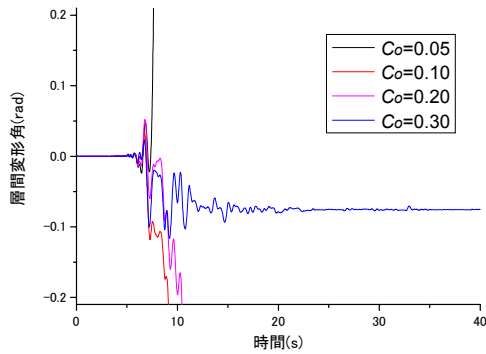


図9 本震による層間変形角時刻歴 (K-NET 小千谷)

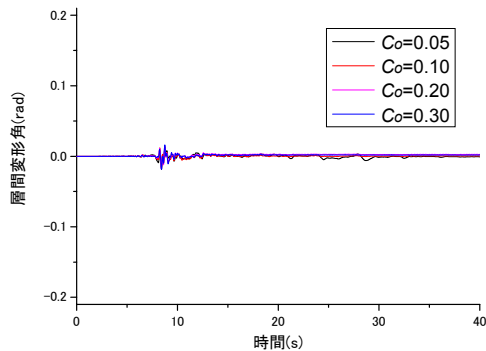


図10 本震による層間変形角時刻歴 (K-NET 十日町)

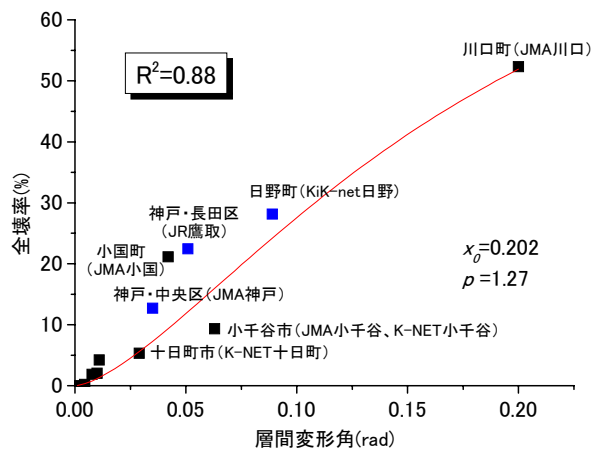


図11 本震による層間変形角と全壊率との関係

(b) 本震と余震を組み合わせた地震動波形による解析結果

新潟県中越地震の特徴の1つに余震の多発が挙げられる。今回の地震では震源の深さが地下20kmと非常に浅かったことから、大きな有感地震が続いた。また、本震発生後2時間の間に3回の震度6(弱1回、強2回)、地震発生日に計164回の有感地震、翌日も計110回の有感地震を観測、その後も余震が続き、12月28日19時まで延べ877回の有感地震を計測した。2005年1月19日現在でも最大震度が3~4に達するような余震が続いている。振動の繰り返しによって引き起こされる木造構造物被害も多く報告されていることから、余震を考慮する

必要があると考えられる。そこで図12~図15に示す、本震と余震を組み合わせた強震記録を用いて(a)と同様な方法により解析を行う。本震の強震記録に余震の強震記録を組み合わせる方法は、本震、余震の強震記録に対し、被害に影響を及ぼさないと考えられる振幅レベル(本研究では10cm/s²)を設定して、強震後そのレベルになったときに記録を打ち切り、それぞれの記録をつなぎ合わせ、連続した強震記録として定義する。ここでは本震による解析結果では強震中に大破となる層間変形角にはなるものの、倒壊には至らないJMA小国とJMA小千谷の本震と余震における応答を図16、図17に示す。また、比較として本震記録による解析で倒壊に至ったJMA川口と、本震による解析ではそれほど大きな層間変形角とならなかったK-NET十日町の強震記録を代表例として用いて、木造構造物地震応答解析を行う(図18、図19)。本研究では本震-余震が引き続き構造物に入力したときの構造物応答履歴に着目しているため、解析条件として本震、余震を連続した一連の地震波形としたもの(タイプA)と、本震終了時の残留層間変形角を引き継ぐものの履歴特性は本震-余震の切り替え時に初期状態から始めるもの(タイプB)、の2タイプを行う。強震後の部材の損傷状況は明確ではないものの、前者は損傷状況をそのまま引き継ぐもの、後者は部材の剛性が回復したものであると解釈できる。前者による影響が大きければ、木造構造物被害に対して構造物履歴を考慮することが重要であると考えられるため、構造物応答の累積を考慮した地震動破壊力指標の適用が必要になると考えられる。

JMA小千谷、JMA小国、JMA川口、K-NET十日町における本震と余震を組み合わせた加速度記録を図12~図15にそれぞれ示す。また、これら地点における木造構造物応答解析による層間変形角時刻歴を図16~図19にそれぞれ示す。このとき、建物のベースシア係数を $C_0=0.3$ としている。図16、図17に示すように本震-余震を一連の地震波形とし、履歴特性を引き継いだときには、明らかに残留変形角が増加する。このことから、履歴特性を引き継ぎ本震-余震を連続して入力したときには被害拡大に大きく影響することが分かる。一方、JMA川口のように本震記録による解析で倒壊に至った強震記録の場合、図18に示すように履歴特性を引き継ぐかどうかによらず、余震が加わっても大きな変化が見られない。さらに、本震による解析で大きな変形角とならなかったK-NET十日町では、図19に示すように余震により層間変形角が増加するが、倒壊に至るような解析結果とはならない。また、本震、余震を連続した一連の地震波形としたAタイプにおける残留変形角と、本震終了時の残留層間変形角は引き継ぐものの履歴特性は初期状態から始めるBタイプにおける残留変形角とは差が見られない。しかし、この地点では余震による層間変形角が本震による層間変形角を上回っていることから、余震が被害に対し影響を及ぼしていると考えられる。

以上の結果を層間変形角と全壊率との関係としてまとめたものを図20に示す。図に示すように本震、余震を連続した一連の地震波形として考慮することで、両者の関係を表す相関比 R^2 は余震を考慮しなかった図11よりも大きくなっていることが分かる。ゆえに、余震が立て続けに発生するときには、本震のみではなく余震を考慮した地震動被害指標を考慮する必要があると考えられる。そこで次章では余震を考慮した地震動被害指標を提案し、木造構造物全壊率と良い対応を示すか検討を行う。

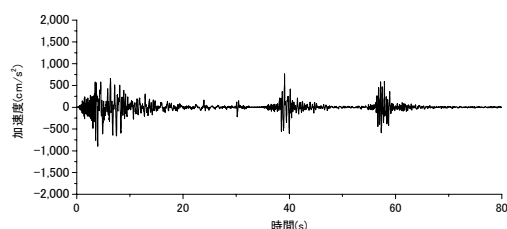


図12 本震と余震を組み合わせた加速度時刻歴 (JMA小千谷)

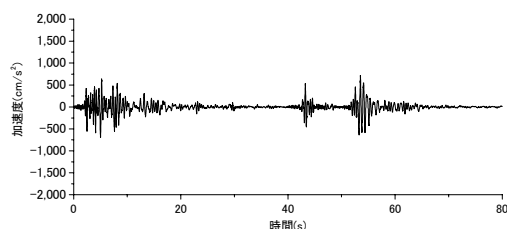


図13 本震と余震を組み合わせた加速度時刻歴 (JMA小国)

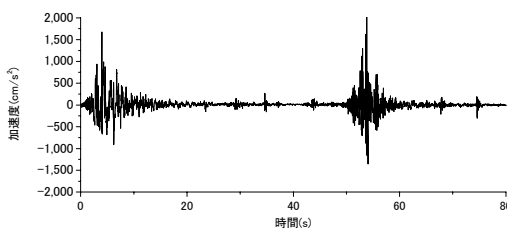


図14 本震と余震を組み合わせた加速度時刻歴 (JMA川口)

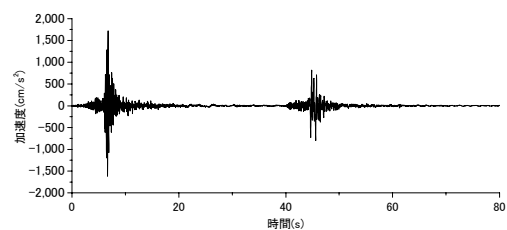


図15 本震と余震を組み合わせた加速度時刻歴 (K-NET十日町)

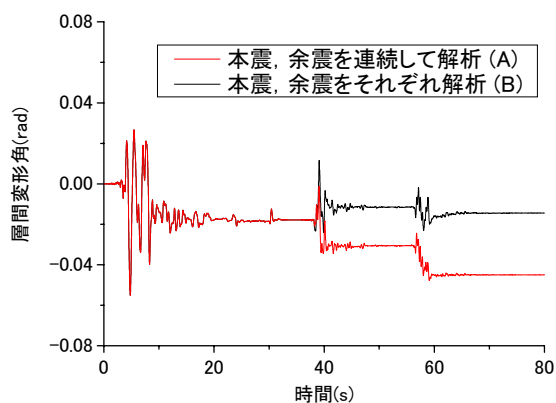


図16 本震と余震を組み合わせた地震応答解析による層間変形角時刻歴 (JMA小千谷)

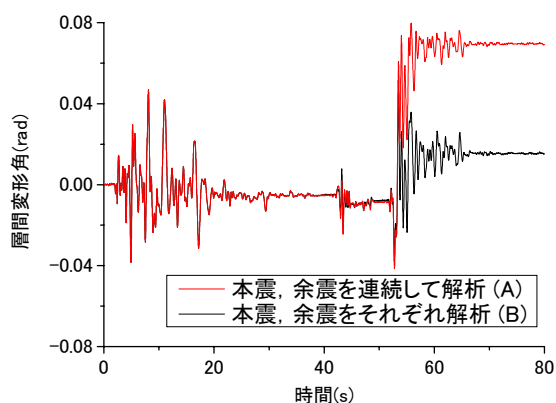


図17 本震と余震を組み合わせた地震応答解析による層間変形角時刻歴 (JMA小国)

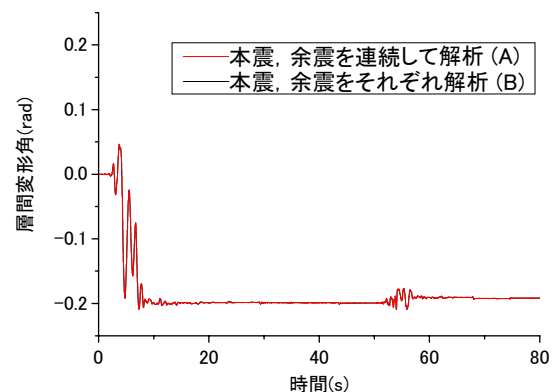


図18 本震と余震を組み合わせた地震応答解析による層間変形角時刻歴 (JMA川口)

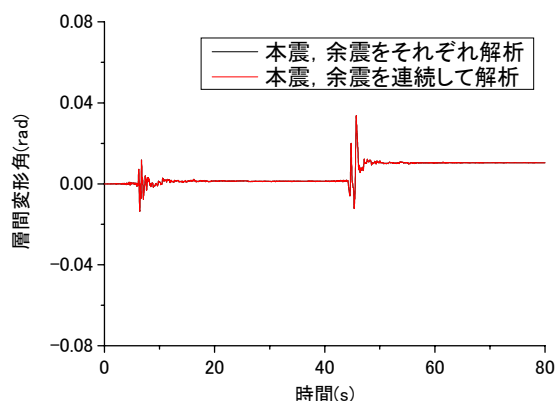


図19 本震と余震を組み合わせた地震応答解析による層間変形角時刻歴 (K-NET十日町)

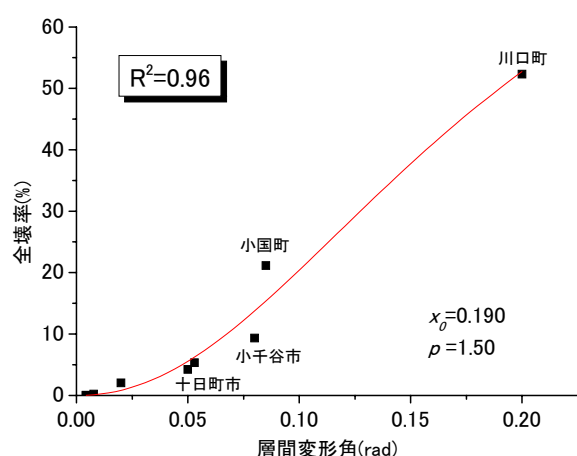


図20 余震を組み込んだ層間変形角と全壊率との関係

3. 地震動破壊力指標の評価

(1) 疲労速度応答スペクトル強度 (FSI_v) の概要⁷⁾

本節では、構造物の応答振幅を用いた指標である SI 値、 FSI_v 値と木造構造物被害の関係について検討する。 FSI_v 値は全時刻歴での構造物の全挙動を考慮するため、精度の良い指標となることが期待できる。本研究で用いている、疲労破壊の概念を考慮した指標 FSI_v は以下の式で求められる。

$$FSI_v \text{ 値} = \int_{\alpha}^{\beta} \int_{0.01S_v}^{S_v} (C_{S_v} \times S_v^2 / g) dS_v dT \quad (3)$$

図 21 に FSI_v の概念図を示す。 FSI_v は地震動の継続時間に着目した指標であり、1 質点系の応答 (減衰定数 5%) で得られる固有周期 α (s) $\sim$ β (s) の応答速度の時刻歴を用いて算出する。地震動が構造物に及ぼすエネルギーを表すため、応答速度波形の振幅を周期ごとにそれぞれ自乗する。ピーク値を速度応答スペクトル (S_v) とし、それを 100 等分にレベル分けし、各レベル内での振動繰り返し回数を C_{S_v} とし、これを重力加速度 (g) で除し、

固有周期 (T) α (s) $\sim$ β (s) まで計算した積分値を FSI_v 値として定義する。通常、 SI 値などは $\alpha=0.1$ (s)、 $\beta=2.5$ (s) として算出されるが、本研究では木造構造物を対象としているため周期範囲を変更して考える。木造構造物の固有周期範囲は一般に 0.1 (s) $\sim$ 0.8 (s) とされている。しかし、実際には地震動を受けることで構造物の剛性が低下して固有周期が伸びることが知られている。本論文では構造物の塑性化による周期の伸びを考慮した周期帯域として、 $\alpha=0.4$ (s)、 $\beta=1.2$ (s) とし、検討を行う。

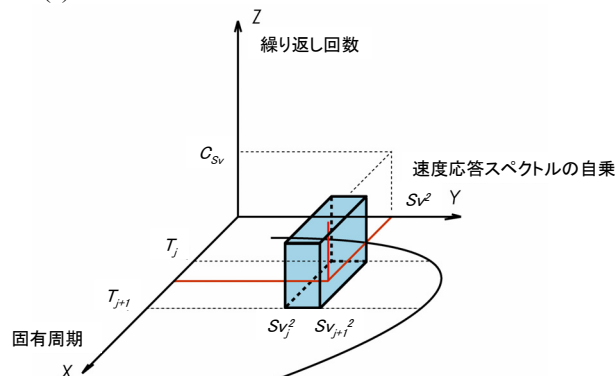


図21 FSI_v の概念図

(2) 解析結果及び考察

新潟県中越地震本震における本指標と建物全壊率の関係を図 22 に示す。また本指標の精度を比較する対象として、破壊力指標のうち計測震度、PGV、 SI 値を選び、これらと建物全壊率の関係を図 23 $\sim$ 図 25 にそれぞれ示す。これらの図に示すように、計測震度を除き、指標と被害率との関係には大きな差は見られない。すなわち、PGV、 SI 値、 FSI_v 値いずれの指標も十分な精度を有していると言える。しかしながら、前章で述べたように、応答解析の結果、その後に発生した余震が構造物被害に対し大きく影響する。そこで、今回の地域で被害拡大に寄与したと思われる、マグニチュード 6 以上の余震記録を含めた強震記録を組み込んだ指標値 FSI_v と建物全壊率の関係を図 26 に示す。図に示すように、明らかに相関精度の向上が見られることから、地震動破壊力指標には余震による構造物の強度低下による影響を考慮する必要があると考えられる。また、今回得られた回帰曲線を表 1 に示す近年の地震 (兵庫県南部地震、鳥取県西部地震、芸予地震、三陸南地震) による被害に適用した結果を図 27 に示す。図に示すように新潟県中越地震は他の地域における被害との関係と比べ、全体的に指標値に対して被害が小さい傾向が見られる。これは、新潟県中越地方が豪雪地域ということもあり、他の地域における住宅と比べ柱、梁も太く、概して強い木造構造物が多いことが原因と考えられる。また図 28 に示す SI 値との比較より、余震を含めて計算すると FSI_v 値の被害指標としての優位性を見て取ることができる。

以上のことより、新潟県中越地震でのマクロ的な

被害を予測するには PGV、 SI 値、 $FSIv$ 値いずれも有効であると考えられるが、余震までの一連の地震を考慮するときには、余震を組み込んで指標値を改訂することができる $FSIv$ 値を破壊力指標とした方が構造物被害を正確に表すことができ、有効であると考えられる。

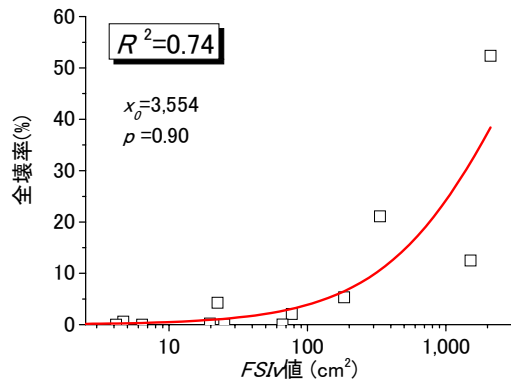


図22 $FSIv$ 値と木造構造物全壊率の関係

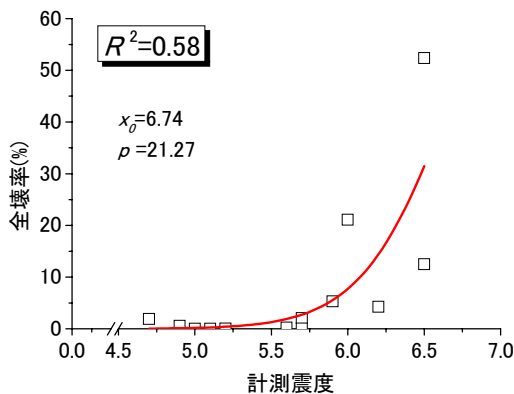


図23 計測震度と木造構造物全壊率との関係

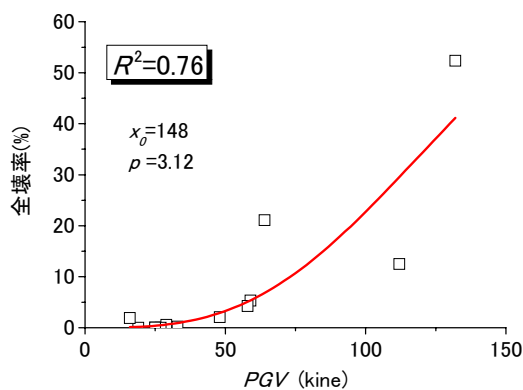


図24 PGVと木造構造物全壊率との関係

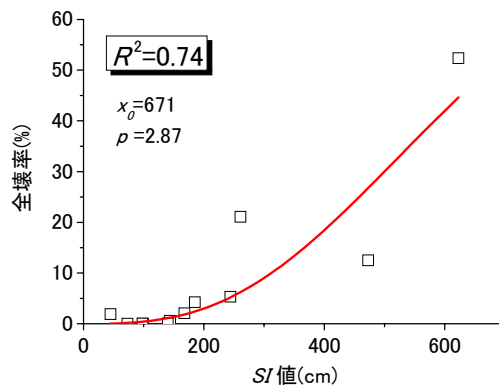


図25 SI 値と木造構造物全壊率の関係

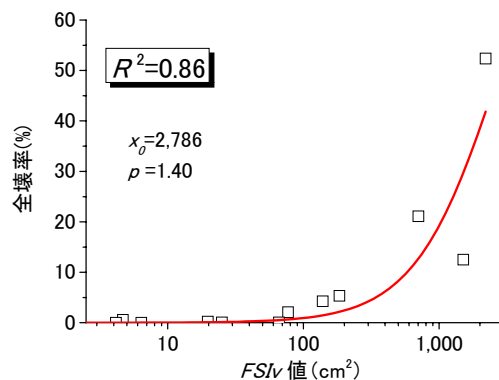


図26 余震を組み込んだ $FSIv$ 値と全壊率との関係

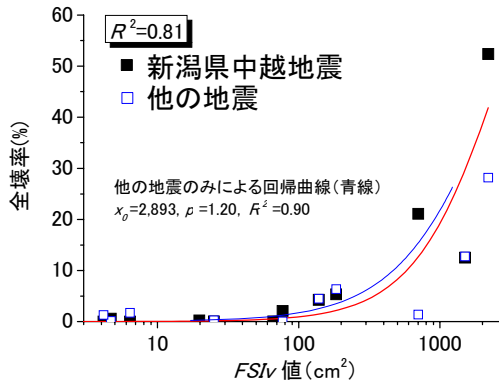


図27 近年の地震による全壊率と $FSIv$ 値との関係

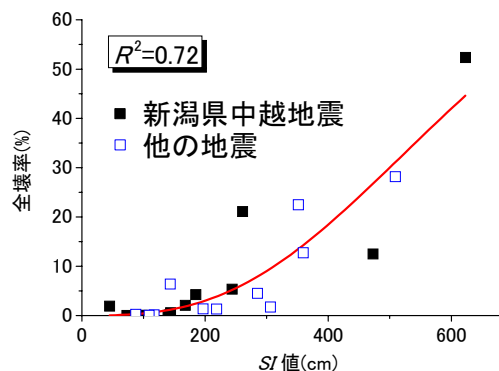


図28 近年の地震による全壊率と SI 値との関係

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

1. 本震、余震を連続した一連の地震波形として考慮することで、本震—余震の連続が木造構造物被害の拡大に大きく影響することを明らかにした。ただし川口町のような激震地区ではベースシア係数が小さい構造物の場合、本震の強震部分が入力されると層間変形角が急激に増加するため、本震のみで大破・倒壊等の深刻な被害の生じる可能性がある。
2. 新潟県中越地震でのマクロ的な被害を予測するにはPGV、*SI*値、*FSI*値いずれも有効であると考えられるが、余震までの一連の地震を考慮するときには、余震を組み込んで指標値を改訂することができる*FSI*値を破壊力指標とした方が構造物被害を正確に表現でき、有効であると考えられる。

今後、被災地区での木造構造物被害を詳細に調査し、解析パラメータを最適化することで、より詳細に被害メカニズムが解明できるものと考えられる。

謝辞： 本研究で用いた強震記録は K-NET、KiK-net(防災科学研究所)、気象庁、JR、関震協提供によるものである。また、被害データについては新潟県発表の情報を参考にした。以上の各機関に感謝の意

を表します。

参考文献

- 1) 境有紀 他：建物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.
- 2) 翠川三郎 他：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、vol. 1、pp.51-56、1999.
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 堂下翔平 他：常時微動を用いた大船渡町の深部地下構造の推定、第22回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、pp.3-4、2003.
- 7) Murata, A., et. al : Prediction of Damage to Structures Through Fatigue Response Spectra Considering Number of Earthquake Response Cycles, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, No.648, 2004.

(2005. 3. 14 受付)

Application of earthquake destructive index considering number of earthquake response cycles to damage in Niigata-ken Chuetsu earthquake

Akira Murata, Masaru Kitaura, Masakatsu Miyajima and Masaki Takahashi

In general, peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), seismic intensity 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. This index, which is called as FSI, is defined as integrated value on tripartite coordinates: natural period of wooden structures, pseudo-response velocity spectra and number of seismic response cycles. FSI was calculated by using the response to recent earthquakes in Japan such as the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake and so on. 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 by aftershock can be taken into consideration is effective. Based on this study it is concluded that FSI value demonstrate the damage ratio more accurately than alternative indices such as seismic intensity, PGV, and SI value.