

表 1 強震記録と観測点周辺の建物被害率

観測点名(地震名)	PGA	PGV	SI	I _{JMA}	V ₁₋₂	I ₁₋₂	d1	d2
川口町震度計	1667.9	144.66	378.87	6.51	382.77	6.61	19.8	18.0
K-NET小千谷	1500.7	133.36	404.53	6.73	271.43	6.29	0.0	0.0
JMA小千谷	975.0	93.61	274.11	6.33	206.84	6.03	1.8	1.2
十日町市震度計	1339.7	58.32	149.62	5.92	74.91	5.07	0.0	0.0
K-NET十日町	1746.5	65.57	185.63	6.19	71.74	5.03	0.0	0.0
K-NET長岡支所	912.0	71.40	226.33	6.10	153.56	5.75	0.0	0.0
K-NET長岡	542.8	50.98	105.08	5.50	72.57	5.04	0.0	0.0
JMA長岡	436.2	38.30	98.43	5.49	70.12	5.01	0.0	0.0
中里村震度計	768.8	71.87	202.22	5.96	106.25	5.40	0.0	0.0
KiK-net加茂	412.0	28.79	98.37	5.65	44.31	4.58	0.0	0.0
栃尾市震度計	1012.3	34.24	98.41	5.49	48.39	4.66	0.0	0.0
K-NET小出	639.3	39.69	116.75	5.54	94.34	5.29	0.0	0.0
小出市震度計	371.7	27.28	87.38	5.20	76.06	5.09	0.0	0.0
JMA六日町	153.9	27.81	91.81	5.44	103.09	5.37	0.0	0.0
JR鷹取駅(1995年兵庫県南部)	742.7	157.17	412.29	6.48*	391.67	6.63	59.4+	34.9+
大阪ガス基合供給所(〃)	834.0	130.77	376.85	6.49*	305.64	6.40	20.2+	15.3+
大船渡測候所(2003年三陸南)	1106.9	34.54	110.18	5.84	52.50	4.74	0.0	0.0

PGA: 地動最大加速度 (cm/s²), PGV: 地動最大速度 (cm/s), SI: スペクトル強度 (cm), I_{JMA}: 計測震度, V₁₋₂: 減衰定数 5% の 1-2 秒平均速度応答 (cm/s), I₁₋₂: V₁₋₂ を用いた算定法³⁾による震度, d1, d2: それぞれ強震観測点から 200m 以内の木造家屋全壊率, 全建物の大破・全壊率(%), *: 水平 2 方向による値, +: 半径 200m の円にかかる町丁目による値²⁾4)



写真 1 崩壊した木造家屋(川口町震度計周辺)



写真 2 全壊木造家屋(川口町震度計周辺)

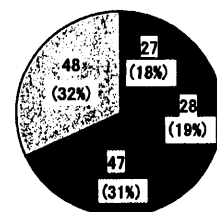


図 2 川口町震度計周辺の被害レベルの割合(全建物)

被害を対象として、多くの建物の弾性周期 (0.2~0.5 秒程度) の 3~4 倍程度の等価周期、即ち、1~2 秒における平均弾性応答 (以下、1-2 秒応答) を、建物被害率を的確に予測する地震動の破壊力指標として提案し、これを用いた被害と対応する震度算定法の提案を行っている³⁾。ここでは、同様の検討を新潟県中越地震に対しても行い、1-2 秒応答の地震動の破壊力指標としての妥当性を再検証する。そして最後に、新潟県中越地震を対象として地震動強さと建物被害率の関係、即ち、被害関数について過去の被害地震と比較検討を行った。

2. 被害調査および地震動の概要

被害調査を行った強震観測点の位置を図 1 に示す。川口町震度計と K-NET 小千谷の 2 点で震度 7, JMA 小千谷, K-NET 長岡支所, K-NET 十日町の 3 点で震度 6 強を記録し、これ以外の 7 点で震度 6 弱となっている。これら震度 6 弱以上の 12 点と震度 5 強を記録した点の一部の 2 点を加えた計 14 点の強震観測点周りの建物被害調査を行った。調査範囲は、強震観測点を中心とした半径 200m の円内とし、車庫、プレハブを除いた全ての建物について調査を行い、地盤被害、崖崩れなどによるもの、基礎の被害を除いた強震動による上部構造の被害を対象とした。なお、調査は半径 200m 円内のやや外側まで行っているが、半径 200m 以内とやや広げた場合と 3 章以降

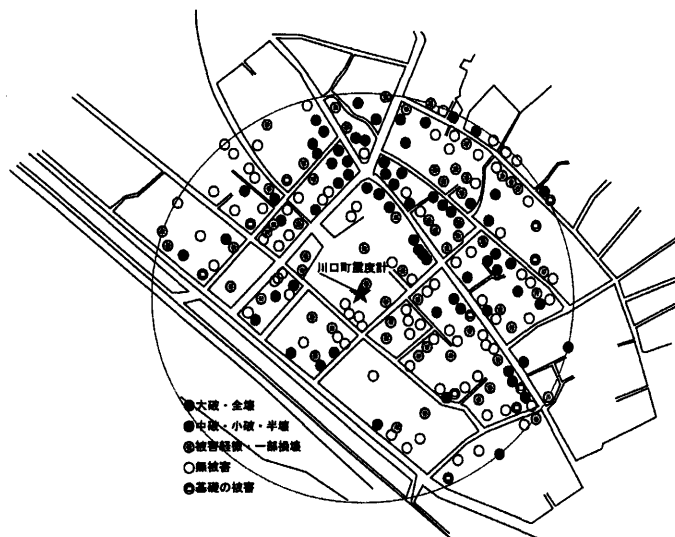


図 3 川口町震度計周辺の建物被害分布 (全建物)

の解析結果にほとんど差が見られなかったために、本論文では半径 200m の円内によるデータに基づいた結果のみを示している。被害レベルは、木造家屋が全壊、半壊、一部損壊、無被害⁵⁾、非木造建物が崩壊、大破、中破、小破、被害軽微、無被害⁶⁾の判定を行った。被害率算出のため、調査範囲の建物数をカウントし、大破・全壊以上の被害建物がある観測点では、木造家屋の全壊率、全建物の大破・

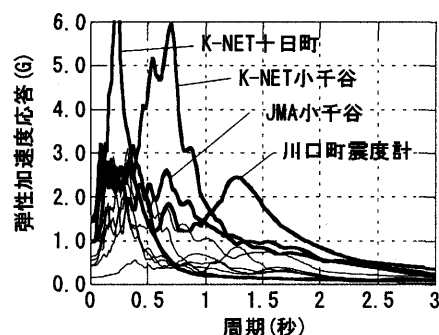
全壊率を算出するために全ての建物の構造種別を調査した。調査結果を川口町震度計を例として図 2, 3 に示す。また、各観測点周辺の木造家屋の全壊率 d1, 全建物の大破・全壊率 d2 を表 1 に示す。

調査の結果、川口町震度計、JMA 小千谷の 2 点の周辺で大破・全壊建物が確認された(写真 1, 2)。しかしながら、その他の観測点周辺では震度 6 強, 6 弱の大きな震度を記録したにもかかわらず、大破・全壊以上の大きな被害は見られなかった⁷⁾。

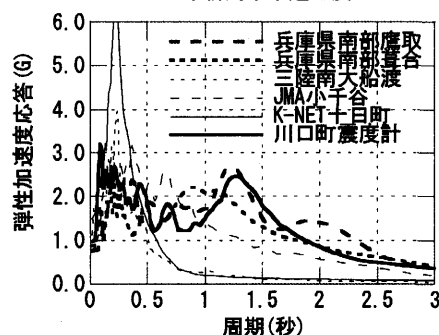
甚大な被害を生じた 1995 年兵庫県南部地震の 2 観測点, 大きな震度や加速度を記録したが、周辺に大きな被害は生じなかった 2003 年三陸南地震の大船渡測候所と併せて、各観測点の地震動の強さ指標を表 1 に示す。これらは、計測震度以外は水平 2 成分ベクトル和を対象として算定した。またノイズ除去のため地震動は、0.1~10Hz のバンドパスフィルタをかけて使用した。ただし、地動最大加速度は加速度データ全長の平均値を引いた値の最大値とした。

多くの観測点で非常に大きな地動最大加速度を記録していることがわかる。特に、川口町震度計、K-NET 小千谷、K-NET 十日町では、1.5G を越えており、1G を越えるものが 5 点もある。最も大きな加速度を記録した K-NET 十日町では 1.7G にも達するが、周辺の被害は屋根瓦のずれ、ガラスの破損、雑壁の軽微なひび割れが見られた程度であった⁷⁾。地動最大速度を見ると、川口町震度計、K-NET 小千谷で 1995 年兵庫県南部地震の 2 点に匹敵する値を記録しているが、K-NET 小千谷周辺には大破・全壊建物はなかった(観測点から半径 200m の円のやや外側には何棟かあった)。ただし、10 月 27 日の最大余震記録によれば、小千谷市内は表層地盤の変化が大きく、K-NET 小千谷から数百 m 離れた地点の地震動は大きく異なっている⁸⁾、K-NET 小千谷はごく局所的に大きく揺れた可能性もある。

調査をした観測点の全ての強震記録について減衰定数 5% の弾性加速度応答スペクトル(水平 2 成分ベクトル和)を図 4(a) に示す。多くは 0.5 秒以下の極短周期が卓越した地震動であることがわかるが、小千谷の 2 記録は卓越周期がやや長く、川口町震度計は卓越周期が更に長く、建物の大きな被害を引き起こす 1-2 秒³⁾に大きなパワーをもっていて、他のものと破壊力が全く異なることがわかる。



(a) 2004 年新潟県中越地震

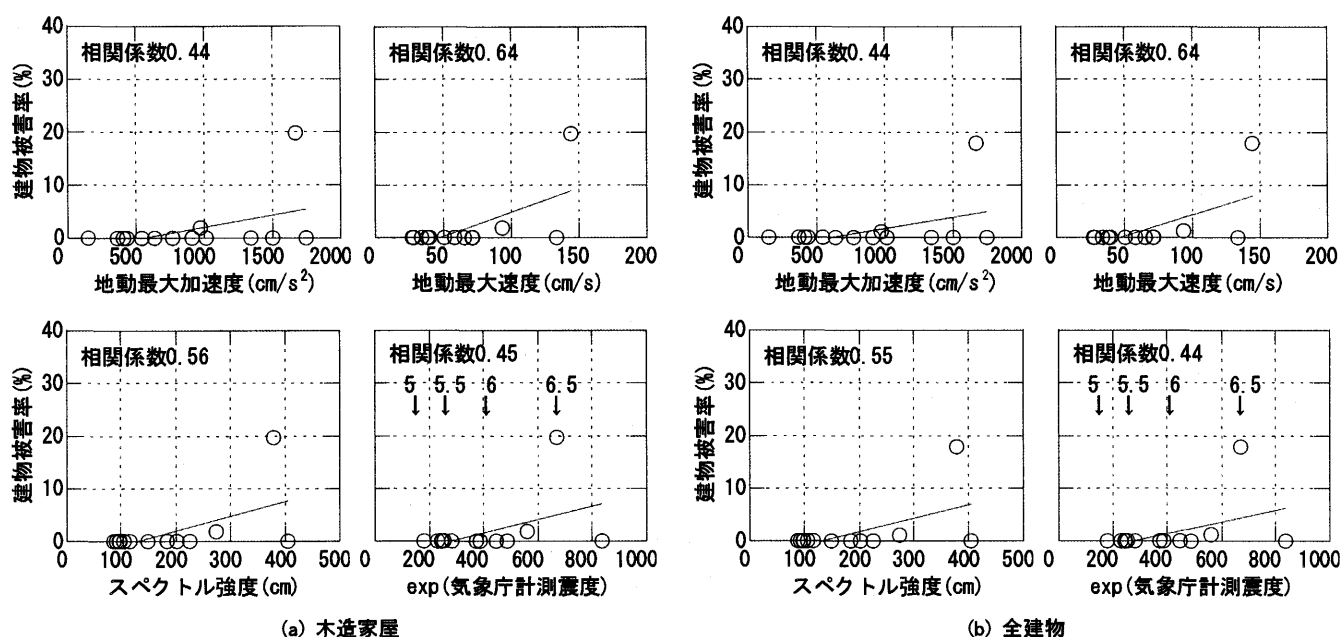


(b) 既往の強震記録との比較

図 4 弾性加速度応答スペクトル

1995 年兵庫県南部地震の震取、震合と比較すると(図 4(b)), 川口町震度計以外の強震記録については、建物の大きな被害を引き起こす 1-2 秒という周期帯における応答は、いずれも 1995 年兵庫県南部地震の記録の半分以下であるが、川口町震度計の 1-2 秒応答は、1995 年兵庫県南部地震のそれに匹敵するレベルであり、その破壊力は他の新潟県中越地震の記録の倍以上であることがわかる。そして実際に川口町震度計周辺では、甚大な被害が生じている。

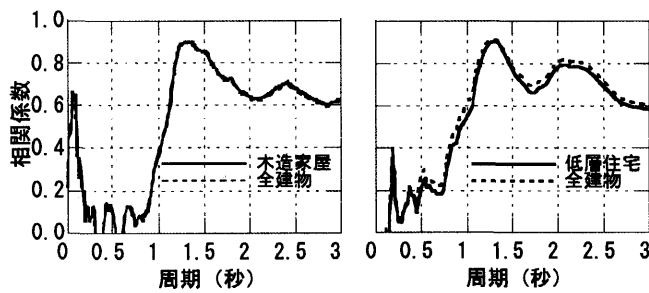
以上のことから、今回の地震で発生した地震動は、その多くが 0.5 秒以下の極短周期応答が大きいため、計測震度や地動最大加速度は



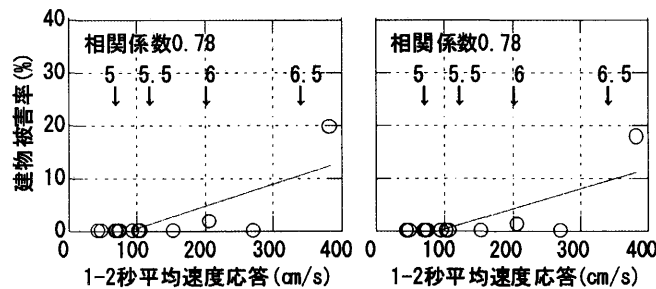
(a) 木造家屋

(b) 全建物

図 5 既往の地震動の破壊力指標と建物被害率の関係



(a) 2004 年新潟県中越地震 (b) 既往の被害地震²³⁾²⁴⁾
図 6 弾性速度応答の周期と建物被害率の関係



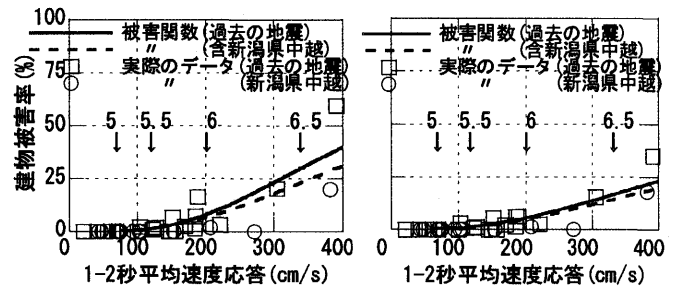
(a) 木造家屋 (b) 全建物
図 7 1-2 秒平均速度応答と建物被害率の関係

非常に大きな値となったが、建物の大きな被害を引き起こす性質のものではなかったと考えられる。対照的に、川口町震度計は建物の大きな被害を引き起こす 1-2 秒にパワーをもっていて、それが大きな被害に繋がったと考えられる。

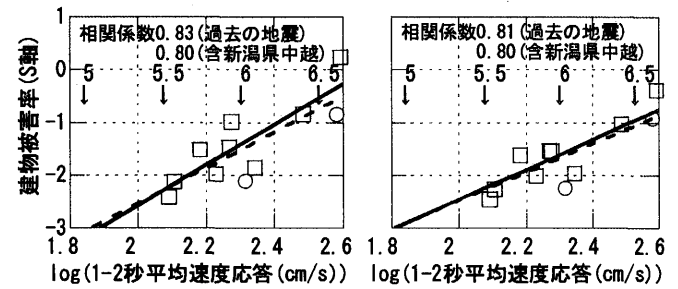
3. 既往の地震動の破壊力指標と建物被害との対応

2 章で地震動の性質と実際に生じた建物被害についてやや定性的な考察を行ったが、ここではより定量的な検討を行うために、まず既往の地震動の破壊力指標と建物被害率との相関性について相関分析により検討した。なお、地震動の破壊力指標と建物被害率の関係は、5 章で被害関数に標準正規分布の累積確率による対数正規分布を用いているように線形ではないが、ここでは建物被害率が大きいものに重きを置くためにあえて線形の相関分析を行っている。建物被害率は、木造家屋の全壊率、全建物の大破・全壊率の 2 通りを対象とした。既往の地震動の破壊力指標としてよく用いられる地動最大加速度、地動最大速度、スペクトル強度、計測震度について建物被害率との関係を図 5 に示す。なお、計測震度は地動最大加速度に対して対数の関係があるので、横軸に計測震度の指数をとっており、対応する計測震度の値を図中に矢印で示している。

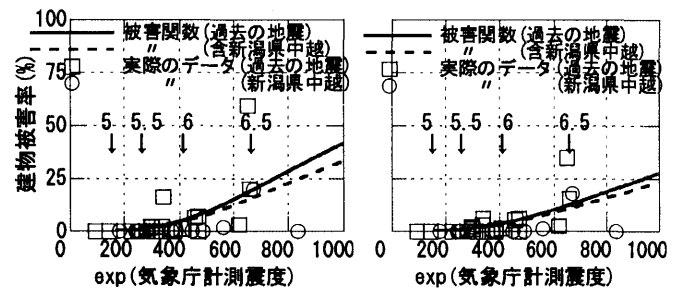
いずれの既往の地震動の破壊力指標も実際の建物被害との相関はよくない。最も相関係数が高い地動最大速度でも 0.6 程度であり、既往の検討¹²⁾と同様に、これらの指標では建物被害を的確に予測できないという結果となった。地動最大加速度は、剛体（周期 0 秒）の応答、地動最大速度は周期 10～15 秒の高減衰系の応答⁹⁾、スペクトル強度は、0.1～2.5 秒という非常に広範囲の応答の平均値、計測震度は、0.1～1 秒という短周期の応答と相関があり³⁴⁾、これらの指標の対象とする地震動の周期帯が建物被害と相関のある周期帯とずれていることが原因であると考えられる。



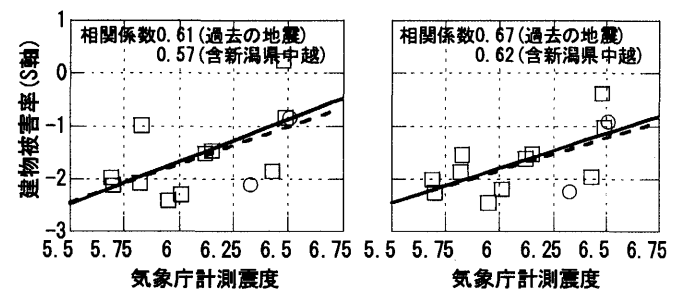
(a) 木造家屋 (b) 全建物
図 8 被害関数の過去の地震との比較 (1-2 秒応答)



(a) 木造家屋 (b) 全建物
図 9 被害関数の当てはめと相関係数 (1-2 秒応答)



(a) 木造家屋 (b) 全建物
図 10 被害関数の過去の地震との比較 (計測震度)



(a) 木造家屋 (b) 全建物
図 11 被害関数の当てはめと相関係数 (計測震度)

4. 建物被害と相関をもつ地震動の周期帯

そこで、建物被害率とより相関性の高い地震動の破壊力指標、地震動の周期帯を探すことを目的として、文献 1)-4)と同様に弾性応答スペクトルのどの周期の値が建物被害と相関があるかについて相関分析を用いて調べた。横軸に弾性速度応答スペクトル(減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和)の弾性周期、縦軸にその周期における弾性速度応答と建物被害率の相関係数をとって図 6(a)に示す。ここでは速度応答の結果のみを示すが、加速度応答を用いた場合も結果はほとんど同じだった。また比較のため、1995 年兵庫県南部地震などの過去の地震の強震記録と周辺の大破・全壊以上の建物被害データを用いた同様の解析結果²³⁾を図 6(b)に示す。

今回の解析結果(図 6(a))は、過去の日本の被害地震を対象とした場合(図 6(b))と非常に似た傾向になった。即ち、建物の弾性周期(日本の建物の場合、その大部分が 0.2~0.5 秒程度²⁾)における弾性スペクトルは建物被害との相関は低く、その 3~4 倍の 1-2 秒程度の等価周期に対応する周期帯における弾性スペクトルの値が建物被害と相関をもつ結果となっている。

1-2 秒平均速度応答(1-2 秒応答)と建物被害率の関係を図 5 と同様に図 7 に示す。図 7 には、1-2 秒応答を基に被害と対応するように提案した³⁾式(1)による震度(1-2 秒震度)も示しており、各強震記録の 1-2 秒応答、1-2 秒震度の値も表 1 に示している。

$$I_{1-2} = 2.171 \cdot \log(V_{1-2}) + 1.002 \quad (1)$$

ここで、 I_{1-2} : 1-2 秒震度、 V_{1-2} : 1-2 秒平均速度応答 (cm/s)。

1-2 秒応答は、既往の地震動の破壊力指標よりも建物被害と相関が高く、建物被害を予測する指標としてより適していることが今回の解析でも確認される。この 1-2 秒という周期帯は、建物の塑性化による周期の伸びを考慮に入れた等価周期に対応していると考えられ、建物の地震応答性状からも裏付けのあるものである。

5. 被害関数の過去の被害地震との比較

最後に、地震動強さと建物被害率の関係、即ち、被害関数について過去の被害地震と比較した。地震動強さとしては、建物被害率と相関のある 1-2 秒応答を用いるが、参考までに計測震度についても示した。

1-2 秒応答と建物被害率の関係を木造家屋、全建物のそれぞれについて、1995 年兵庫県南部地震を中心とした過去の地震²³⁾⁴⁾と比較して図 8 に示す。図 8 には、標準正規分布の累積確率による対数正規分布を用いた 1-2 秒応答による被害関数を、過去の地震によるデータによるもの、過去のデータに新潟県中越地震のデータを加えたものについて示し、被害関数の当てはめの状況、相関係数を図 9 に示している。また、参考までに計測震度を対象として同様の図をそれぞれ図 10, 11 に示す。

地震動強さ(1-2 秒応答)に対する建物被害率、即ち、被害関数は、新潟県中越地震を含めた場合、過去の地震に比べて小さくなっていることがわかる。その結果、新潟県中越地震を含めた被害関数の当てはめの相関係数も若干小さくなっている。これは、過去の地震の多くが 1995 年兵庫県南部地震のデータであり、屋根瓦が重いとされる関西地方に対して積雪を考慮した新潟県地方という、木造家屋の耐震性能の地方性が原因の 1 つとして考えられる。このことは、全建物の場合は木造家屋ほど差がないことから裏付けられる。しかし、被害調査による実際の状況は、全壊家屋のほとんどが非常に古く老朽化したものや 1 階が商店となっていて 1 階の剛性が極端に低いものなどであり⁷⁾、図 9 を見るとデータ全体のばらつきの範囲内と見ることもでき、より詳細な検討、あるいは、将来得られるデータに期待する必要があるだろう。

一方、参考までに示した、地震動強さを計測震度とした場合(図 10, 11)の被害関数も、地震動強さを 1-2 秒応答とした場合と同様に、新潟県中越地震を含めた場合は、過去の地震に比べて小さくなっている。しかし、計測震度と建物被害率の相関自体が低いため(相関係数が 0.6 程度)、被害関数の定量的な議論はあまり意味がないと考えられるべきであろう。

6. まとめ

2004 年新潟県中越地震の強震観測点周りの建物被害調査を行い、強震記録と周辺の建物被害データを用いて、地震動の性質と建物被害の関係、具体的には、建物被害と既往の地震動の破壊力指標の相関性、建物被害と相関をもつ地震動の周期帯、地震動強さと建物被害率の関係、即ち、被害関数について検討した。その結果、地動最大加速度、地動最大速度、スペクトル強度、計測震度の既往の地震動の破壊力指標は、建物被害と相関が低く、建物被害を的確に予測できないこと、提案する 1-2 秒における弾性応答が既往の地震動の破壊力指標より建物被害との相関が高く、建物被害を予測する指標としてより適していることが今回の解析でも確認された。また、地震動強さと建物被害率の関係、即ち、被害関数は、木造家屋の場合について 1995 年兵庫県南部地震などの過去の日本の被害地震の場合と比べてやや小さめになり、木造家屋の耐震性の地方性の影響も考えられるが、ばらつきの範囲内と見なすこともでき、今後より詳細な検討が必要だろう。

謝辞

強震記録は、防災科学技術研究所、気象庁、鉄道総合技術研究所¹⁰⁾、大阪ガスより提供を受けました。地震被害調査の際には、現地の方々には、被災されているにもかかわらず、快く様々なデータを提供していただき、また、東京大学地震研究所地震火山災害部門にご協力をいただきました。気象庁計測震度を求めるプログラムは、文献 11)の巻末のリストを基に早稲田大学山田眞先生、中村操氏らがコーディングし、東京電力植竹富一氏が修正したものに手を加えて使わせていただきました。査読者のコメントにより論文を改善することができました。各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 境有紀, 吉岡伸悟, 額額一起, 壁谷澤寿海, 1999 年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 549 号, 43-50, 2001.11.
- 2) 境有紀, 額額一起, 神野達夫, 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, 85-91, 2002.5.
- 3) 境有紀, 神野達夫, 額額一起, 建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, 2002.11.
- 4) 境有紀, 神野達夫, 額額一起, 震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, 71-76, 2004.11.
- 5) 岡田成幸, 高井伸雄, 地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文集, No.524, 65-72, 1999.10.
- 6) 日本建築学会, 1978 年宮城県沖地震災害調査報告, 142, 1980.2.
- 7) 境有紀, 大月俊典, 小杉慎司, 中村友紀子, 強震動と建物被害, 平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集, 日本地震工学会, 27-34, 2004.12.
- 8) 山中浩明, 元木健太郎, 福元俊一, 高橋寿幸, 2004 年新潟県中越地震の余震および微動の観測, 平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集, 日本地震工学会, 35-38, 2004.12.
- 9) 渡部丹, 大橋雄二, 長谷部廣行: 高層建築物の耐震設計用入力地震動について(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B 構造 I, 135-136, 1985.
- 10) 中村豊, 上半文昭, 井上英司: 1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II), JR 地震情報, No.23d, 1996.3.
- 11) 気象庁: 震度を知る 基礎知識とその活用, ぎょうせい, 1996.9.

(2005 年 7 月 8 日原稿受理, 2005 年 11 月 18 日採用決定)