

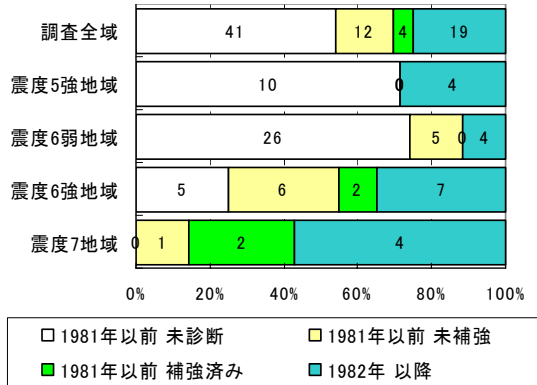
表－1 に学校種別ごとの建設年代，耐震診断および補強の有無ごとの建物棟数を示す。新耐震および補強済みの割合が30%，旧基準で設計されたもののうち未補強，診断未実施が70%と文献1)に示した比率より耐震化率が低くなっている。これは耐震性能残存率Rが算定された建物を対象としたためである。表－2 に震度地域別の建設年代，耐震診断および補強の有無の建物棟数を示す。図－2 は，これを図示したものである。震度7地域では全7棟のうち6棟が新耐震設計法によるもの，または耐震補強実施済みの建物であり，旧基準のものは1棟のみ

表－1 学校種別ごとの耐震化率

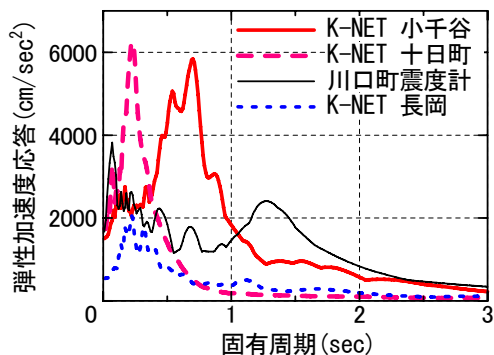
	1981年以前			1982年以降	合計
	未診断	未補強	補強済み	以降	
小学校	19	4	1	15	39
中学校	14	6	3	2	25
高等学校	0	2	0	0	2
その他	8	0	0	2	10
全建物	41	12	4	19	76

表－2 震度地域別ごとの耐震化率

	1981年以前			1982年以降	合計
	未診断	未補強	補強済み	以降	
震度7地域	0	1	2	4	7
震度6強地域	5	6	2	7	20
震度6弱地域	26	5	0	4	35
震度5強地域	10	0	0	4	14
調査全域	41	12	4	19	76



図－2 震度地域別の耐震化率割合



図－4 主な地震動の加速度応答スペクトル

でもっとも耐震化率が高い。次に耐震化率が高いのは震度6強地域となっており対象とした建物では震度の大きい地区ほど耐震化率が高くなっている。このことが後述する震度地域別の被害率に差が見られなかったことの要因と考えられる。

2.2 地震動

使用した地震動の観測点は，防災科学技術研究 K-NET や気象庁観測点，震度観測点のうち，本震時刻歴波形の入手できた観測点のうち 2.1 節で示した対象建物建設地をほぼ包括する様に選択した。図－3 に示す震度5強～7までの14箇所の記録を用いた。計測震度または計測震度相当値をあわせて示す。図－4 に主な地震動として K-NET 小千谷，十日町，長岡，川口町震度計の記録を用いて計算した応答スペクトルを示す。スペクトルは5%減衰で水平2方向のベクトル和である。

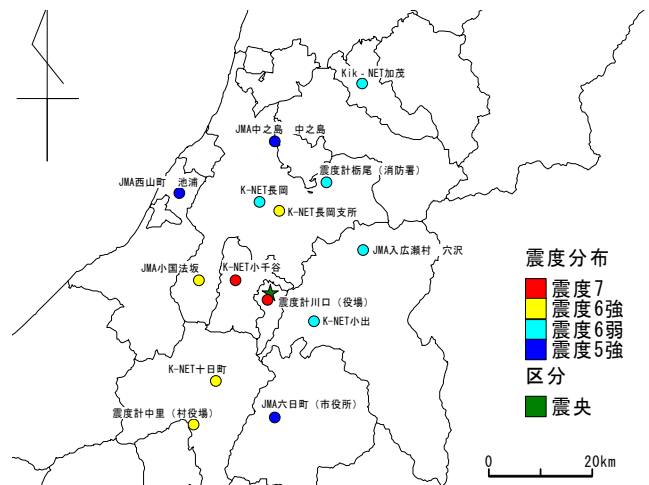
3. 震度地域別の被害と建設年代の関係

3.1 建設年代別の被害

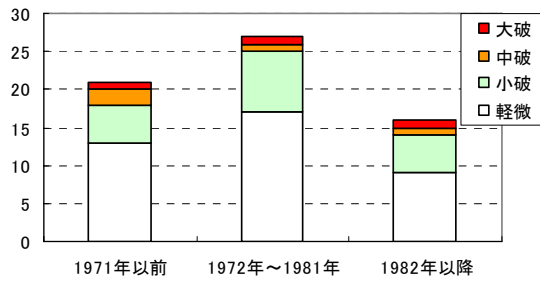
図－5 に建築年代ごとの上部構造の被害割合，図－6 に建築年代ごとの基礎の被害割合を示す。文献1)に示した全体の建物の被害率は，建築年代により異なっているが今回対象とした建物ではあまり差は見られなかった。無被害の建物がないのは，対象建物を耐震性能残存率の算出されたものとした為である。また基礎の被害としては，杭のせん断破壊，杭基礎の破壊によると推察される建物の傾斜などがあつた。基礎被害は，被害が診られた建物のみ上部構造とは別に被害程度を判定していることによる。

3.2 震度地域ごとの建設年代別の被害

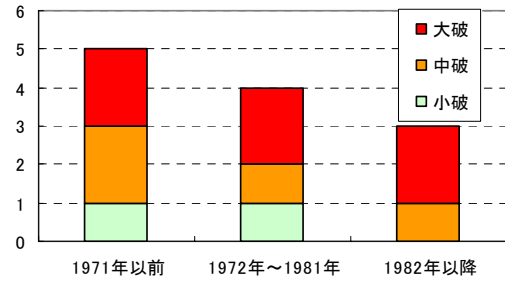
震度地域別の上部構造の被害割合について，それぞれ図－7(1)～(4)に示す。震度7地域で被害が少ないのは耐震化率が高い為である。震度6強地域も耐震化



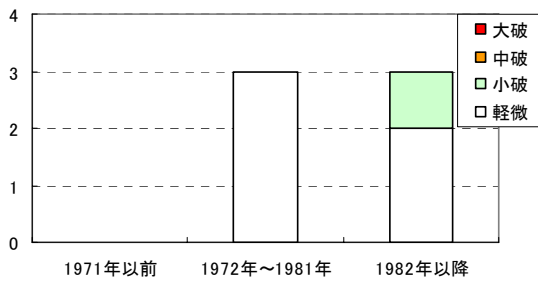
図－3 地震動観測点と計測震度



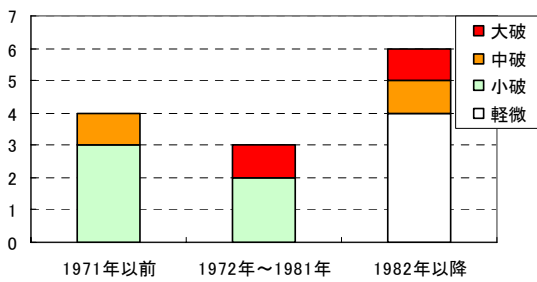
図一5 建築年代ごとの上部構造の被害割合



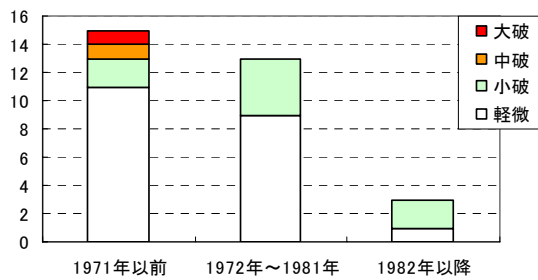
図一6 建築年代ごとの基礎の被害割合



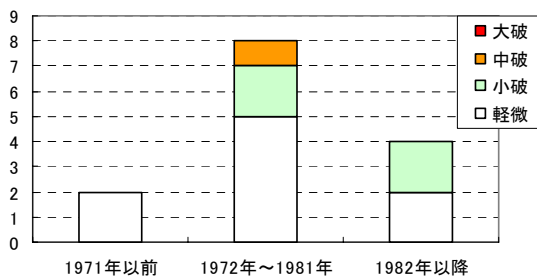
(1) 震度7地域



(2) 震度6強地域



(3) 震度6弱地域



(4) 震度5強地域

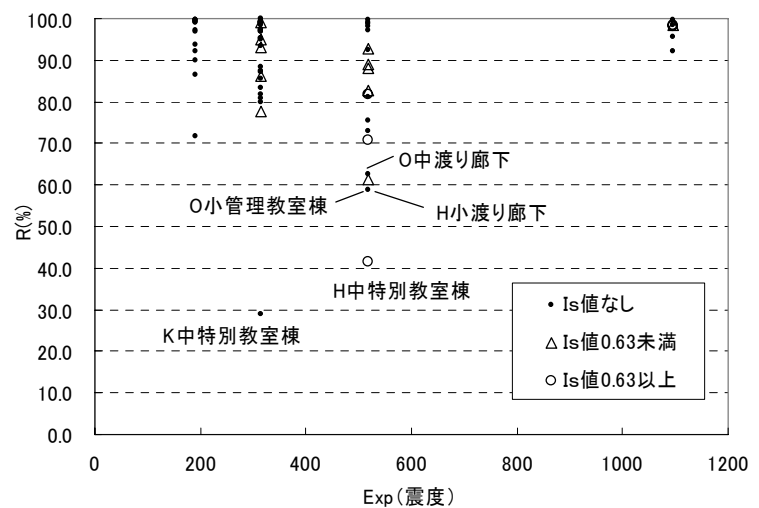
図一7 震度地域別の建築年代ごとの上部構造の被害割合

率が比較的高いため建設年代による被害率の差異はあまり見られない。震度6弱、震度5強地域では古い耐震設計法で設計されている建設年代の古いものほど被害割合が高くなるという一般的な傾向どおりとなっている。

4. 計測震度と建物被害との関係

4.1 震度地域と建物被害との関係

図一8 に計測震度と耐震性能残存率 R の関係を示す。計測震度は加速度時刻歴からもとめる際に対数をとる計算式を用いているので、後述する他の地震動強さ指標と比較しやすくする為にグラフには指数関数を取り $\text{Exp}(\text{震度})$ を示している。小さい黒丸が耐震診断未実施のもの、△印は耐



図一8 計測震度－耐震性能残存率 R 関係

震診断による構造耐震指標 I_s 値が 0.63 以下のもの、○印は I_s 値が 0.63 以上のものである新潟県は地域係数 Z が 0.9 のため、0.7 に 0.9 を乗じた 0.63 で区分して示した。突出して耐震性能残存率が小さい、つまり被害が大きい建物があるが、それらの被害要因としては、ピロティ柱の曲げ破壊（O 中渡り廊下）、極短柱のせん断破壊（H 小管理教室棟）、エキスパンションジョイント衝突による被害（H 小渡り廊下）、1 階柱のせん断破壊（K 中特別教室棟）であり、渡り廊下のように規模の小さい建物で、極短柱やピロティの柱など相対的に弱い部分での被害が大きくなり結果として耐震性能残存率 R が特に小さくなっていると考えられる。

4.2 三角形線形補間法を用いた震度と建物被害との関係

前節では震度を建物建設地の行政区分ごとに示してきたが、あくまで観測された地点での揺れの為、建設地での揺れの大きさを推定する為に三角形線形補間法^{8) -10)}を用いて算定する。

三角形線形補間法とは、図-9 に示すような三角形に囲まれた任意の点に関して近似をするもので、式 (1)、(2) に示すような簡単な連立方程式を解く方法である。

$$u(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i \\ u_j = \alpha_0 + \alpha_1 x_j + \alpha_2 y_j \\ u_k = \alpha_0 + \alpha_1 x_k + \alpha_2 y_k \end{cases} \quad (2)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$: 定数

x_i, x_j, x_k, x : 各点の x 座標

y_i, y_j, y_k, y : 各点の y 座標

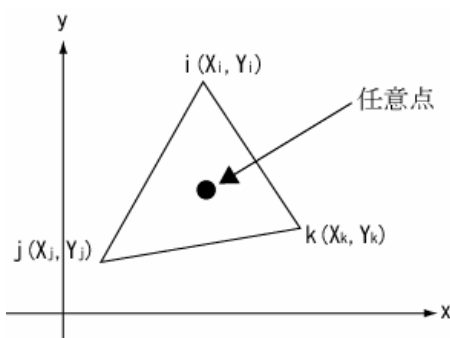


図-9 三角形線形補間法概念図

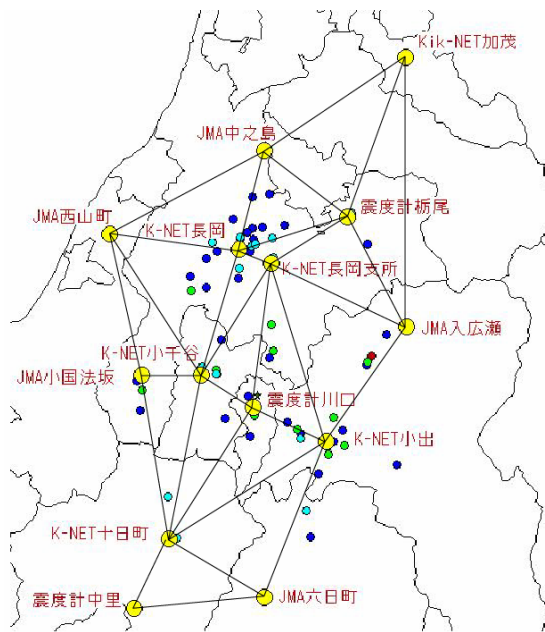


図-10 三角形補間法の適用図

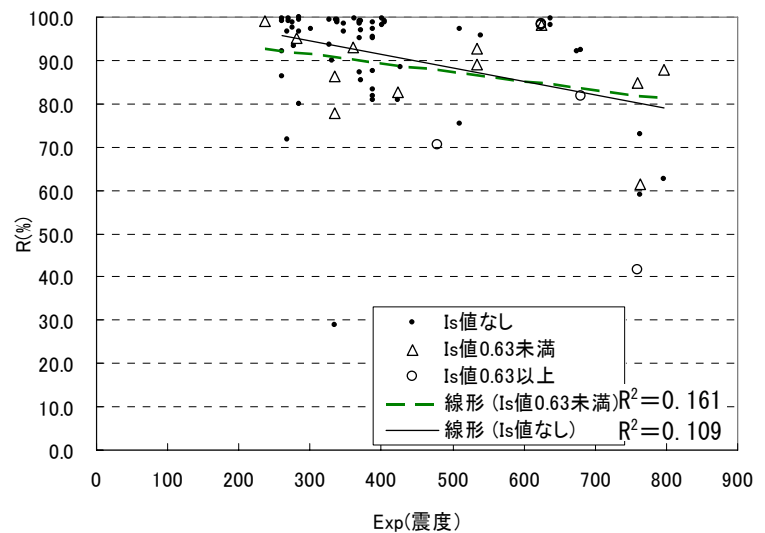


図-11 補間した計測震度－耐震性能残存率 R 関係

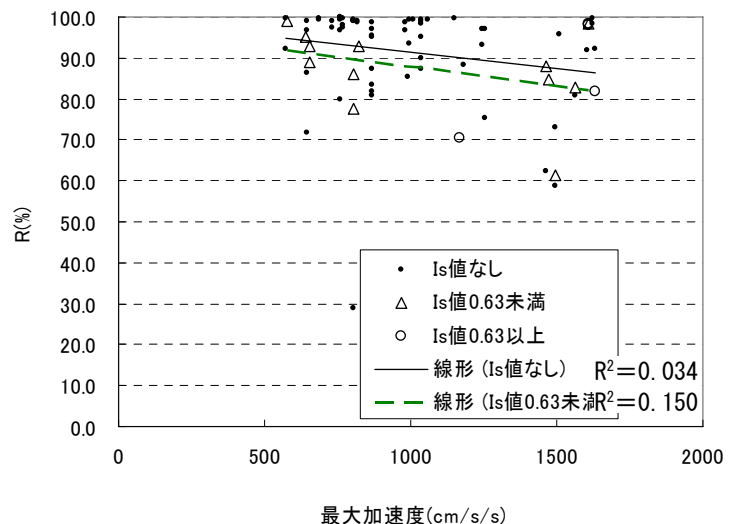


図-12 補間した最大加速度－耐震性能残存率 R 関係

図-10 に線形補完に用いた地震動と建物建設地の関係を示す。小出、六日町より東側では観測点間より外側になり内挿できなかったが、新潟県内に強震記録が入手可能な観測点がなく福島県の観測点では非常に距離があるため図に示した観測点のうちもっとも近い三点の観測点間で補間して用いた。小国町の学校も同様に扱った。

図-11 にこの手法を用いて震度の値を修正したものを示す。ただし、横軸は計測震度そのものの値ではなく指数をとって $\text{Exp}(\text{震度})$ で表している。震度が大きくなるほど被害が大きくなることが見てとれる。図中の実線は、Is 値が算出されていない建物郡を線形に近似したもので、点線は、Is 値が Is_0 より小さい建物である。それぞれ凡例の横には R^2 値を示す。両者を比較すると要補強の建物は震度によらず被害が大きい傾向がある。Is 値が 0.63 以上の建物は数が少なく、東小千谷中で被害が大きいため右肩上がりの線となるので表示していない。

5. 地震動の強さ指標と建物被害との関係

地震動の強さを示す指標として、最大加速度、最大速度、スペクトル強度、1-2 秒平均速度応答について 4 章で示した三角形線形補間を用いて補間を行い建物被害との関係を検討する。

図 12-15 に耐震性能残存率 R と最大加速度、最大速度、スペクトル強度、1-2 秒平均速度応答との関係、近似直線とその時の R^2 値を示す。耐震診断未実施の建物群より耐震診断が終了して Is 値が 0.63 以下で要補強とわかっている建物群の被害程度が大きい傾向が読み取れる。とくに最大加速度と 1-2 秒平均速度応答で明瞭に差が生じていた。スペクトル強度と最大速度では耐震診断実施の有無による違いは少ないが指標の値が大きいほど被害程度が大きくなるという傾向は同様に示している。文献 2) では指標によって被害率との相関に大きな違いが生じたが、今回対象とした学校建物では、76 棟と少ないこともあり、 R^2 値が 0.034~0.185 とすべての指標で小さくなった。

6. まとめ

2004 年新潟県中越地震によって被災し

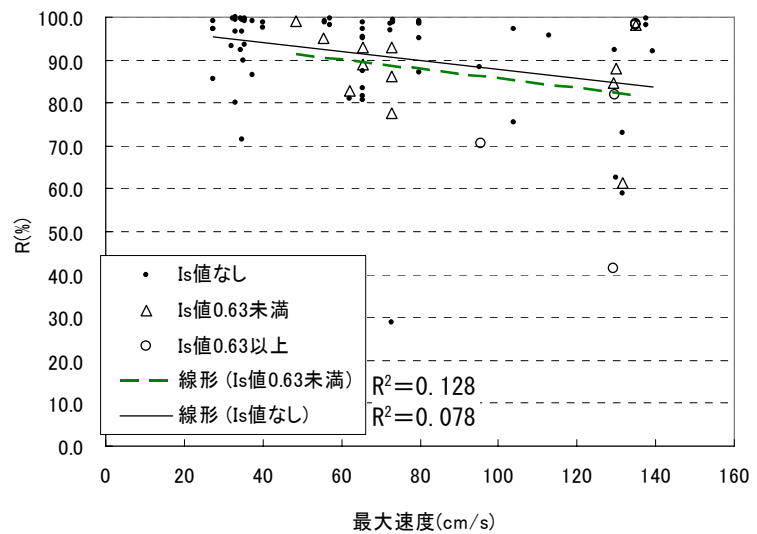


図-13 補間した最大速度－耐震性能残存率 R 関係

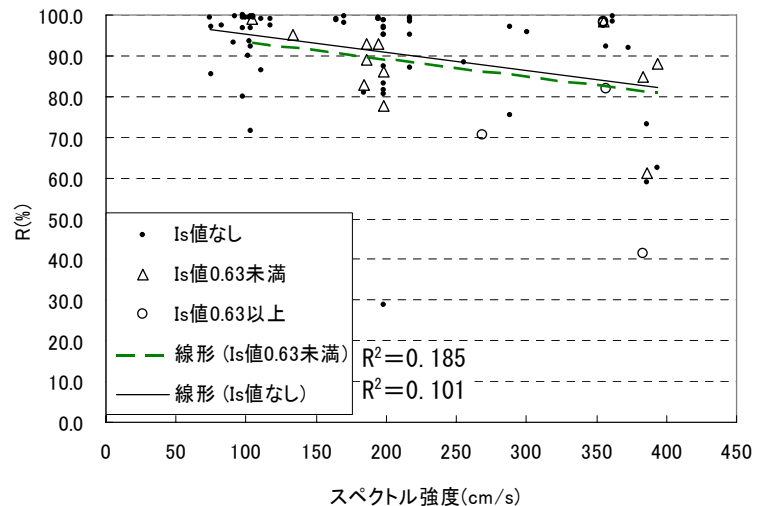


図-14 補間したスペクトル強度－耐震性能残存率 R 関係

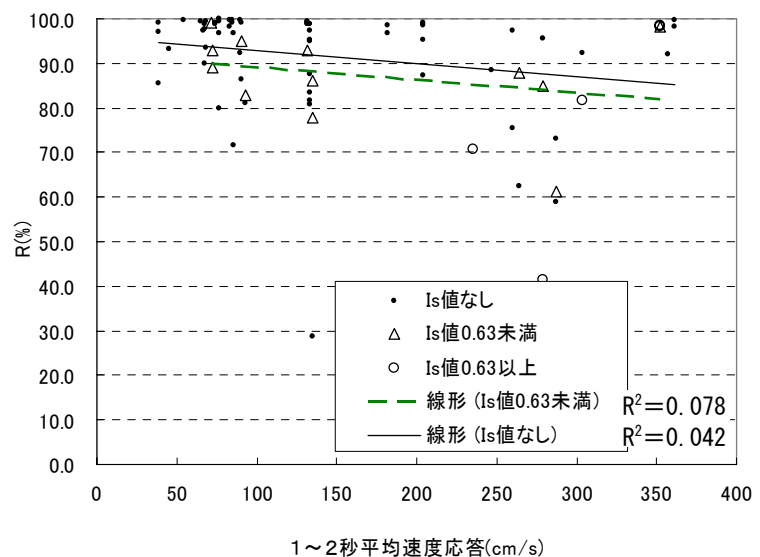


図-15 補間した 1-2 秒平均速度応答－耐震性能残存率 R 関係

た RC 造学校建物のうち被災の程度が調査され耐震性能残存率 R の判明している建物、耐震診断による構造耐震指標 I_s 値の判明している建物を対象として、地震動の破壊力指標との関係について考察した。地震動の各指標は、地震記録が観測された地点間を線形補間することで、それぞれの学校建設地の指標とした。このことで被害と指標との関係が明確に現れた。地震動の破壊力指標としては、気象庁計測震度・最大加速度・最大速度・スペクトル強度・1-2 秒速度応答を用いた。各指標とも大きくなるほど耐震性能残存率 R が小さくなる、すなわち大きな被害を受けていることがわかった。構造耐震指標 I_s が構造耐震判定指標 I_{so} を満たさない建物と、算定されていない建物との比較では、計測震度ではその傾きに違いが見られたのに対して、その他の指標では、耐震性能の低い建物のほうの被害が大きい傾向があることがわかった。

本論では、限られ建物数であった為に、突出して被害が大きい数棟の建物の影響を大きくうける結果となった。また、耐震診断がなされていて I_s 値が 0.63 以上ある建物も数が少なく被害との相関は求めることができなかった。小規模の建物で弱点となる部分に大きな被害が生じると耐震性能残存率が低下するので、統計として用いるには、対象とする建物数を増やすことに加えて、それらの建物の扱いを検討する必要がある。

また、地震動観測点や建設地の地盤状況を考慮せずに行った。被害と地震動指標の対応関係をより正確に示すためには地盤の影響を考慮する必要があるといえる。

謝辞

本論では防災技術研究所 K-NET の強震記録、気象庁より公開された強震記録を使用させていただきました。

注記

本文中の市町村名は、2004 年 10 月の地震発生当時の名称を用いた。

参考文献

- 1) 長橋鉄雄, 中村健一郎, 本多良政, 加藤大介: 新潟県中越地震における RC 造建物の被害と耐震性能の関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, 2007.7
- 2) 日本建築防災協会: 再使用の可能性を判定し, 復旧するための震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針, 平成 13 年 9 月
- 3) 境有紀, 中村友紀子, 大月俊典, 小杉慎司: 2004 年新潟県中越地震で発生した地震動と建物被害の対応性, 日本建築学会構造系論文集, No.601, pp.69-73
- 4) 日本建築学会北陸支部・災害調査 WG: 2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震の災害調査速報
- 5) 日本建築学会文教施設委員会: 文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書, 2005.3
- 6) 本多良政, 加藤大介, 中村友紀子: 2004 年新潟県中越地震における耐震補強した RC 造建築物の被害, 日本建築学会北陸支部研梗概集, 2005
- 7) 本多良政, 加藤大介: 2004 年新潟県中越地震における耐震補強した RC 造建物の耐震性能に関する考察, 日本建築学会大会, 2005
- 8) 川名清三, 今北純夫, 柴山明寛, 佐久間景子, 久田嘉章: 広域な面的震度情報を対象とした関東におけるリアルタイム地震情報システムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.65-68, 2000.9
- 9) 菅原裕太, 前田匡樹, 三辻和弥: 耐震診断結果に基づく宮城県の RC 造学校建築物の地震時被害推定コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1261-1266, 2007
- 10) 境有紀: 地震直後の地震動強さや建物・人的被害の面的分布の推定方法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.339-340, 2007.8