

耐震診断結果に基づく既存 RC 学校校舎の 地震被害予測に関する検討

根口百世* 南宏一**

Some Consideration on Earthquake Damage of Existing RC School Buildings
Based on Seismic Performance Indices

Momoyo NEGUCHI* and Koichi MINAMI**

ABSTRACT

After the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, seismic evaluation were carried out at every place of the country. It is very important that we understand the seismic performance of the existing buildings for estimation of building damage by earthquake.

This paper describes structural seismic index (I_s) of Reinforced Concrete school buildings based on the seismic evaluation. The fragility function, which implies the relationship between input earthquake motion intensity and damage probability, is determined from the fitting analyses of damage rate calculated using the statistics of I_s of existing buildings and actual inspected ones due to the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake and so on. The damage rate estimated by our fragility function is well compatible with actual damage rate.

キーワード：フラジリティ曲線，被害率，被害率曲線，学校校舎

Keywords : Fragility Curve, Damage Ratio, Vulnerability Functions, School Buildings

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以来、静岡県、兵庫県をはじめとした多くの県で耐震診断が行われている。また、その結果を用いて、様々な方法によって地震被害予測が行われている。中でも、文献[1]の林らの手法による被害率曲線の構築が多く行われているが、高知県ではまだ被害率曲線を用いた地震被害予測は行われていないのが現状である。

本研究では、四国耐震診断評定会に提出された高知県の第2次および第3次耐震診断結果を用いて以下のことを検討する。

- (1) 被害率曲線を構築し、高知県の既存学校建築物の耐震性能の現状を示し、被害予測を行う。
- (2) 耐震診断と耐震補強の両方を行った建物を抽出し、耐震補強の前後でその耐震性能がどのように変化したのかを調べる。
- (3) 構造耐震指標 I_s (以下 I_s 値) が変化することで、被害率にどのような影響を与えるのかを考察する。

2. 被害率曲線の構築手法

被害率曲線の構築手法について述べる。

まず、既知のものとして、建物被害関数 (I_s 値の相対頻度分布) $P(I_s)$ と、被害率の関係を表す建物被害関数 (フラジリティ曲線) P_f が存在し、未知のものとして、被害率曲線がある。

相対頻度分布 $P(I_s)$ の構築手法の手順を述べる。 I_s 値の相対頻度分布 $P(I_s)$ は、以下のように示される。

$$P(I_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta} \cdot \frac{1}{I_s} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot \frac{(\ln I_s - \lambda)^2}{\zeta^2}\right\}$$

ここで、

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

$$\zeta^2 = \ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2\right\}, \quad \lambda = \ln(\mu) - \frac{1}{2}\mu^2$$

* 福山大学大学院地域空間工学専攻 ** 福山大学建築学科

被害率の関係を表す建物被害関数（フラジリティ曲線） P_f は、以下の式のように示される。

$$P_f(V \cdot I_s) = \Phi \left\{ \ln(V) - \frac{\lambda_f(I_s)}{\zeta_f(I_s)} \right\}$$

$$\lambda_f(I_s) = \ln \left\{ V_0 \cdot \left(\frac{I_s}{I_{s0}} \right) \right\}$$

$$\zeta_f(I_s) = \zeta_f(I_{s0})$$

ここで、 Φ は対数正規分布、 V は最大地動速度、 λ_f は $\ln(V)$ の平均値、 ζ_f は $\ln(V)$ の標準偏差である。被害率の関係を表す建物被害関数（フラジリティ曲線） P_f は、被害程度（軽微、小破、中破、大破、倒壊）ごとに被害率曲線を算出し、そこから、 I_s 値ごとの被害率の関係を表す建物被害関数（フラジリティ曲線） P_f を算出する。なお、RC造建物の被害程度は、以下のように定義する。

軽微：柱・耐力壁・二次壁の損傷が、軽微もしくは、ほとんど損傷がないもの。

小破：柱・耐力壁の損傷は軽微であるが、RC二次壁・階段室のまわりに、せん断ひび割れが見られるもの。

中破：柱に典型的なせん断ひび割れ・曲げひび割れ、耐震壁にせん断ひび割れが見られ、RC二次壁・非構造部材に大きな損傷が見られるもの。

大破：柱のせん断ひび割れ・曲げひび割れによって鉄筋が露出・座屈し、耐震壁に大きなせん断ひび割れが生じて耐力に著しい低下が認められるもの。

倒壊：柱・耐力壁が大破壊し、建物全体または建物の一部が崩壊に至ったもの。

本研究での、被害程度ごとの被害率曲線の算出については、林らによって、兵庫県南部地震で被災したRC学校校舎の被害調査結果をもとにして推定された、 $V_0 = 50$ kine（軽微）、 $V_0 = 100$ kine（小破）、 $V_0 = 150$ kine（中破）、 $V_0 = 200$ kine（大破）、 $V_0 = 250$ kine（倒壊）、 $\zeta_{f0} = 0.6$ を用いる。

以上の値を用いて、フラジリティ曲線 P_f を構築する。

建物被害関数（ I_s 値の相対頻度分布） $P(I_s)$ と、被害率の関係を表す建物被害関数（フラジリティ曲線） P_f を用いて構築する被害率曲線 $P_D(V)$ はつぎの式で表される。

$$P_D(V) = \int P(I_s) \cdot P_f(V \cdot I_s) ds$$

ただし、被害率は必ずしも個々の建物の被害のしやすさ（フラジリティ）を表すものではないということに注意をしなければならない。

3. 高知県の既存RC造学校校舎の耐震性能

図1(a)および(b)はそれぞれ高知県の既存RC学校校舎の第2次診断法および第3次診断法による I_s 値の度数分

布と相対頻度分布を示したものである。また、図2には第2次診断法および第3次診断法による I_s 値の相対頻度分布を比較したものを示す。

文献[2]の中埜らの研究によると、 I_s 値の分布は対数正規分布で表されるということである。しかしながら、図1によると、度数分布と相対頻度分布の形は一致しておらず、対数正規分布では I_s 値の分布を表すことができていないことが分かる。

図3(a)および(b)は図2の I_s 値の相対頻度分布を用いて、診断次数別、方向別に被害率曲線を構築したものである。図3(a)からは、最大地動速度が100 kine のとき、X方向では、軽微では76%、小破では43%、中破では25%、大破では15%、倒壊では10%の被害率であることが分かる。一方、Y方向では、軽微では51%、小破では22%、中破では10%、大破では5%、倒壊では3%の被害率という結果となっている。また、図3(b)からは、X方向では、軽微では73%、小破では43%、中破では26%、大破では16%、倒壊では10%の被害率であることが分かる。一方、Y方向では、軽微では43%、小破では18%、中破では8%、大破では5%、倒壊では3%の被害率という結果となっている。平均 I_s 値の小さいX方向の被害率は、軽微から倒壊のどの被害程度をみてもY方向に比べて高くなっているのが特徴である。

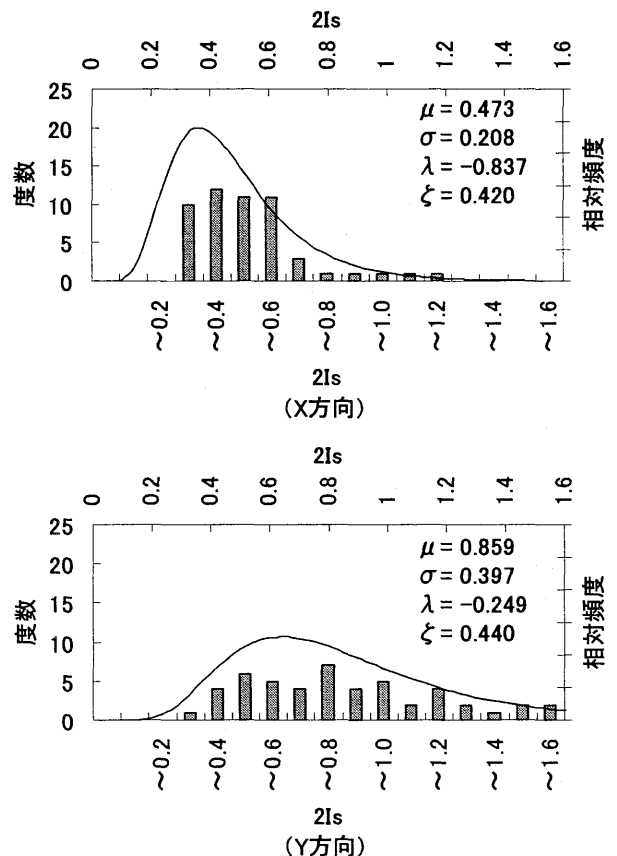


図1(a) 第2次診断 I_s 値 度数分布・相対頻度分布

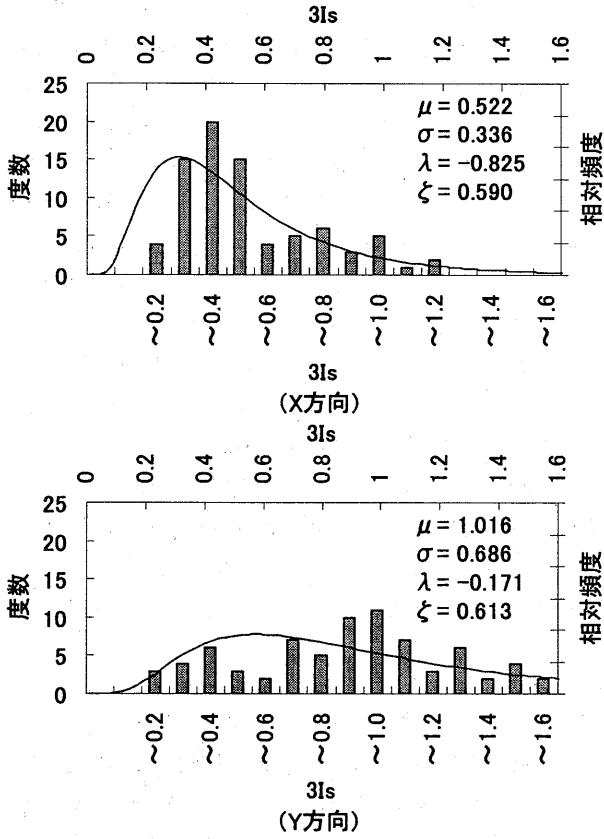
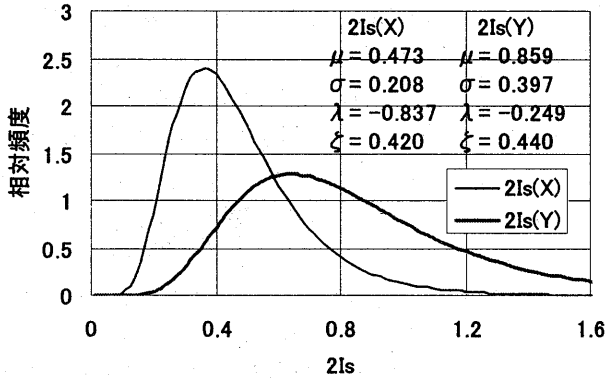
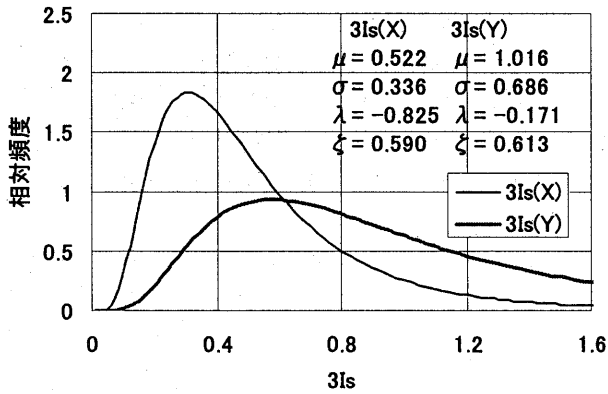


図 1(b) 第 3 次診断 Is 値 度数分布・相対頻度分布



相対頻度分布



相対頻度分布

図 2 Is 値相対頻度分布

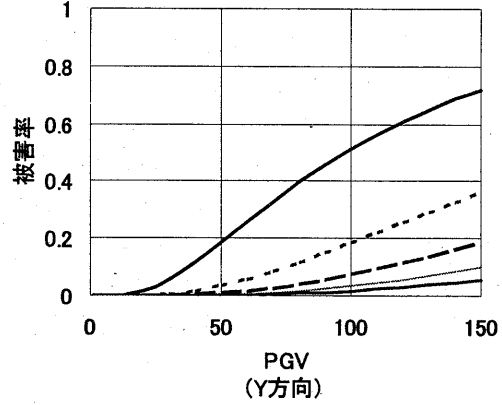
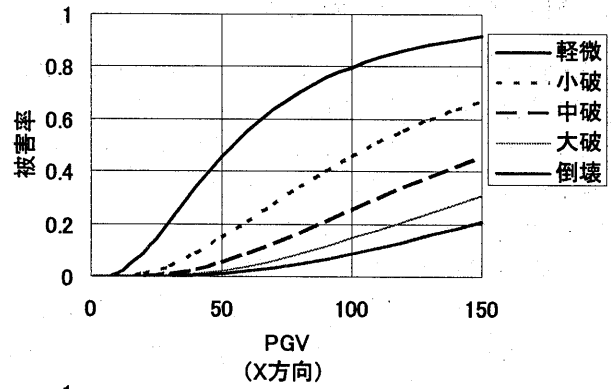


図 3(a) 第 2 次診断 Is 値による被害率曲線

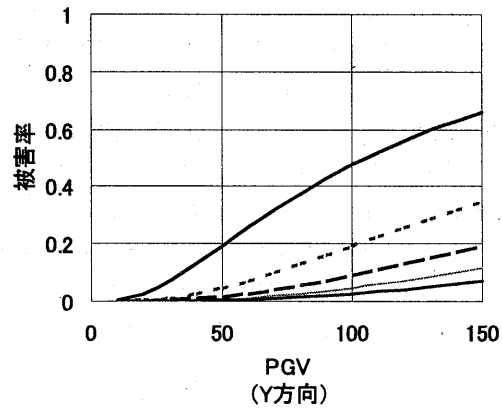
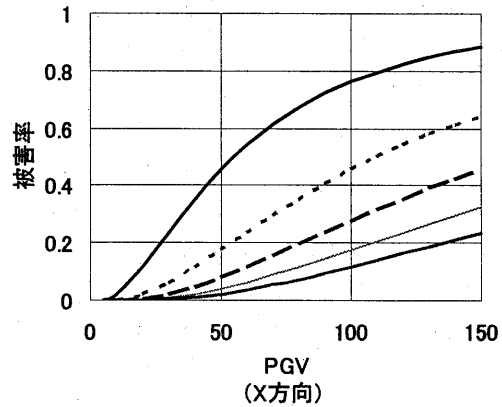


図 3(b) 第 3 次診断 Is 値による被害率曲線

4. 耐震補強による耐震性能の変化

文献[3]で扱ったデータに基づいて、耐震診断が行われた学校校舎の I_s 値が耐震補強によってどのように変化したのかを検討してみる。ここでは、耐震診断による I_s 値と耐震補強による I_s 値の両方が分かっている学校校舎について検討を行う。データ数は、第2次診断法 X 方向では 14 棟、第2次診断法 Y 方向では 10 棟、第3次診断法 X 方向では 35 棟、第3次診断法 Y 方向では 27 棟である。

図 4(a)および(b)は、耐震補強前(耐震診断時)の I_s 値と耐震補強後の I_s 値を診断次数別、方向別に比較したものである。ほとんどの I_s 値が、耐震補強前よりも耐震補強後の方が I_s 値が大きくなっていることがいえるが、第2次診断法の X 方向と第3次診断法の Y 方向において、耐震補強後の方が I_s 値が小さくなっているものがある。しかしながら、これらはいずれも、耐震補強を行う前の I_s 値が構造耐震判定指標値(第2次診断法、第3次診断法ともに $I_{s0} = 0.6$)を上回っており、耐震補強を行った後も、 I_s 値が小さくなったとはいえ、構造耐震判定指標値を下回ってはいないため、あまり問題はないと思われる。

図 5(a)および(b)には、診断次数別、方向別にみた耐震補強の前と後の I_s 値の相対頻度分布を示したものである。また、図 6(a)および(b)は第2次診断法および第3次診断法において、耐震補強を行う前と後の度数分布と相対頻度分布の変化を示す。耐震補強の前と後ではいずれの診断次数、方向とも I_s 値が大きくなっているのが分かる。また、X 方向の I_s 値が大きくなるのが特徴として挙げられるが、これは、Y 方向よりも X 方向の I_s 値が構造耐震判定指標値以下であることが多く、特に X 方向の I_s 値を大きくすることを目的として耐震補強を行うため、 I_s 値が大きくなったことが考えられる。

図 7(a)~(d)は、耐震補強の前と後で被害率曲線にどのような変化が生じたのかを示したものである。この図より、最大地動速度が 50 kine のときと 100 kine のときの被害率に注目して被害別に表にしたものが表 2(a)~(d)である。

まず、図 7(a)および表 2(a)に示される第2次診断法による I_s 値の X 方向を基に構築した被害率曲線について見てみる。軽微な被害については、最大地動速度 50 kine のところでは、耐震補強前には 48.7%だったものが、耐震補強後には 12.8%、100 kine のところでは、耐震補強前には 83.5%だったものが耐震補強後には 49.1%となっている。また、小破・中破・大破・倒壊のいずれの場合も、軽微と同様に被害率が低減されていることが分かるが、特に、100 kine のときの大破や倒壊では被害率が顕著に小さくなっているのが分かる。

つぎに、図 7(b)および表 2(b)に示される第2次診断法

による I_s 値の Y 方向を基に構築した被害率曲線について見てみる。軽微な被害については、最大地動速度 50 kine のところでは、耐震補強前には 17.5%だったものが、耐震補強後には 7.7%、100 kine のところでは、耐震補強前には 49.9%だったものが耐震補強後には 35.3%となっている。また、小破・中破・大破・倒壊のいずれの場合も、軽微と同様に被害率が低減されているものの、X 方向に比べると、その低減幅は小さい。これは、Y 方向の耐震性能がもともと X 方向よりも高いためであると考えられる。

図 7(c)および表 2(c)に示される第3次診断法による I_s 値の X 方向を基に構築した被害率曲線についても、軽微な被害については、最大地動速度 50 kine のところでは、耐震補強前には 52.7%だったものが、耐震補強後には 9.0%、100 kine のところでは、耐震補強前には 85.4%だったものが耐震補強後には 41.5%となっている。また、小破・中破・大破・倒壊のいずれの場合も、軽微と同様に被害率が大きく低減されていることが分かる。

また、図 7(d)および表 2(d)に示される第2次診断法による I_s 値の X 方向を基に構築した被害率曲線について見てみる。軽微な被害については、最大地動速度 50 kine のところでは、耐震補強前には 15.4%だったものが、耐震補強後には 8.2%、100 kine のところでは、耐震補強前には 47.7%だったものが耐震補強後には 33.8%となっている。また、小破・中破・大破・倒壊のいずれの場合も、軽微と同様に被害率が大きく低減されていることが分かる。

図 7(a)~(d)のすべてについて、最大地動速度が 50 kine の位置に注目してみると、軽微の被害率曲線は、 I_s 値が大きくなると被害率は低くなっている。それに対して、同じ 50 kine の位置でも、倒壊の被害率曲線は I_s 値を高くしても被害率はあまり変化していないのが特徴である。これは、最大地動速度が 50 kine 程度では建物は倒壊しないということが関係していると思われる。

これに対して、最大地動速度が 100 kine の位置に注目してみると、軽微の被害率曲線は、 I_s 値を上げて 50 kine のときほどは被害を軽減するというようになっていないということがいえる。一方、大破や倒壊の被害率曲線からは、 I_s 値を大きくすることで被害を大きく軽減できるということが分かる。これは、最大地動速度が 100 kine 程度になると軽微な被害を免れることが困難であるということを示している。

以上より、診断次数、方向のいずれに関わらず I_s 値を大きくすることにより、被害率が低くなっているが、被害が小さいものほど、被害率は大きく低減されているのが特徴として挙げられる。このことから、耐震補強により I_s 値を大きくすることが被害の低減に有効であるということが示される。

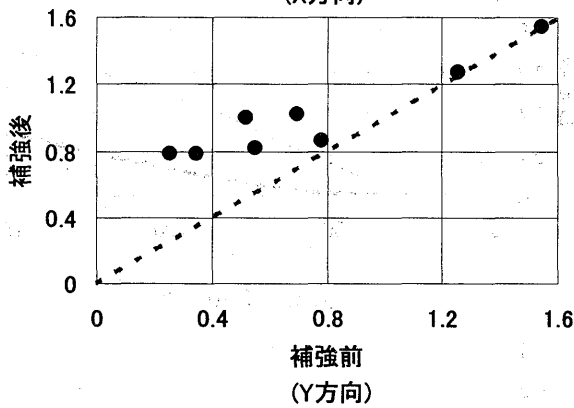
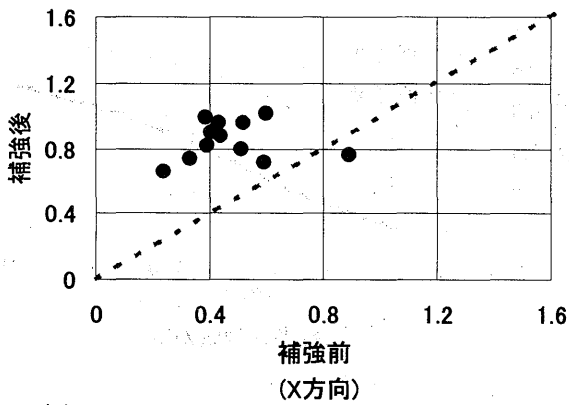


図 4(a) 補強前後の第 2 次診断 Is 値の比較

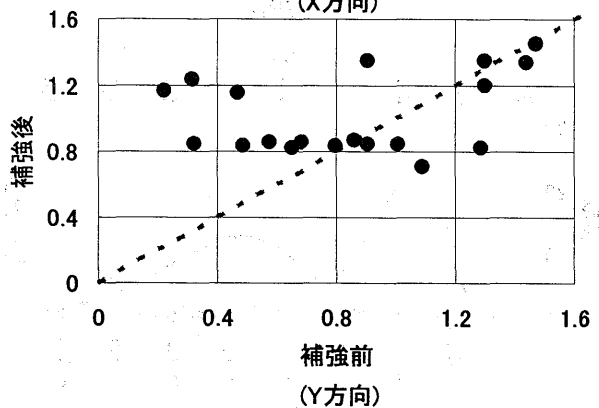
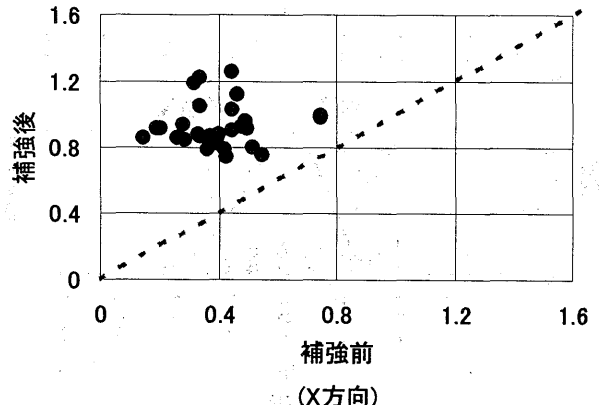


図 4(b) 補強前後の第 3 次診断 Is 値の比較

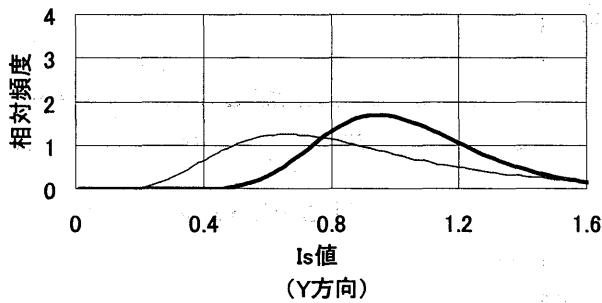
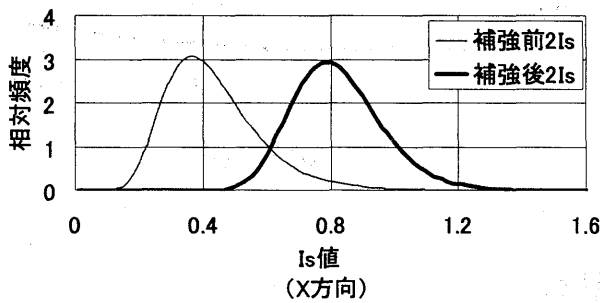


図 5(a) 耐震補強前後の相対頻度分布の比較<2Is>

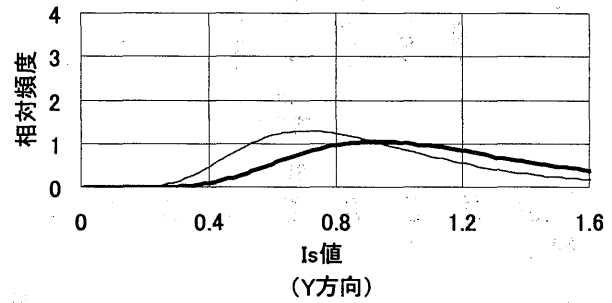
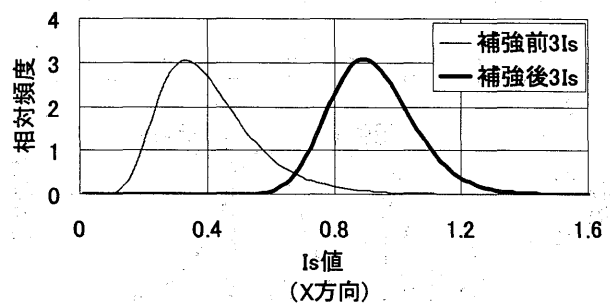


図 5(b) 耐震補強前後の相対頻度分布の比較<3Is>

表 1(a) 耐震補強による各値の変化 (第 2 次診断)

	X方向		Y方向	
	補強前	補強後	補強前	補強後
μ	0.433	0.823	0.882	1.034
σ	0.150	0.141	0.408	0.253
λ	-0.893	-0.209	-0.222	0.004
ζ	0.336	0.170	0.440	0.241

表 1(b) 耐震補強による各値の変化 (第 3 次診断)

	X方向		Y方向	
	補強前	補強後	補強前	補強後
μ	0.408	0.922	0.904	1.158
σ	0.155	0.133	0.378	0.456
λ	-0.963	-0.091	-0.181	0.074
ζ	0.367	0.143	0.401	0.380

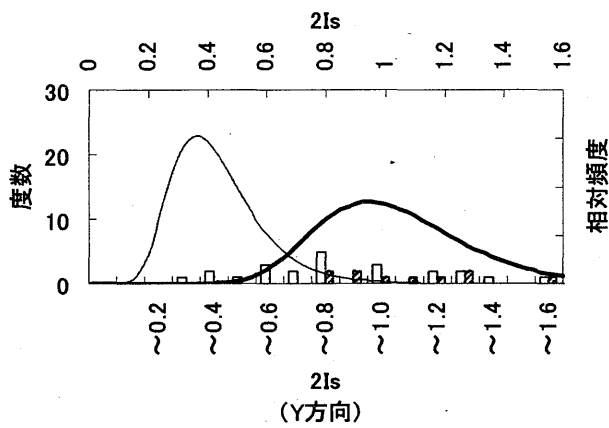
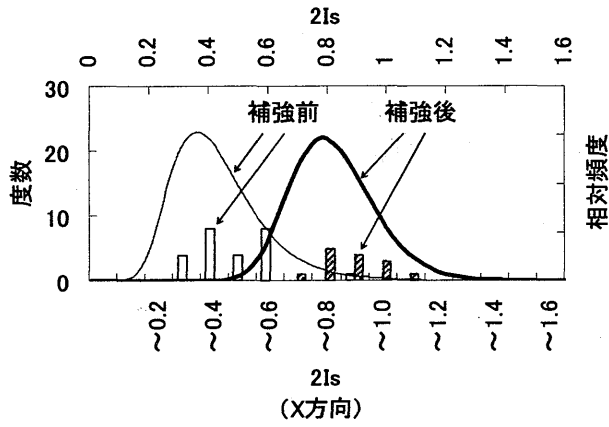


図 6(a) 度数分布・相対頻度分布の比較<2Is>

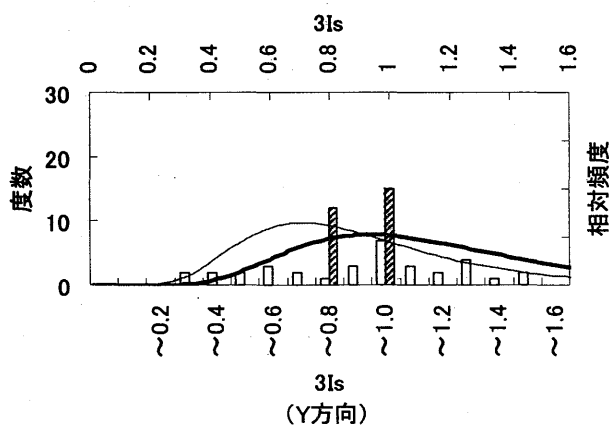
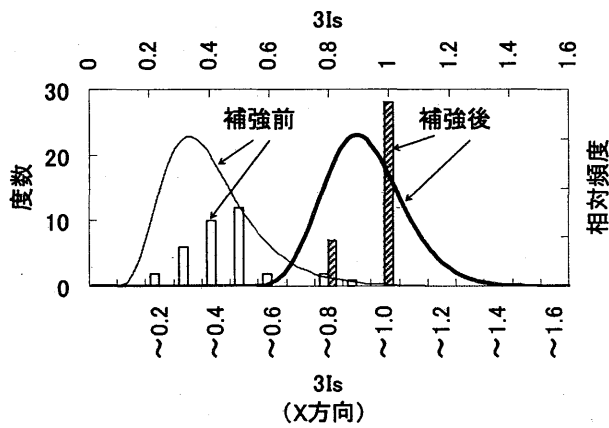


図 6(b) 度数分布・相対頻度分布の比較<3Is>

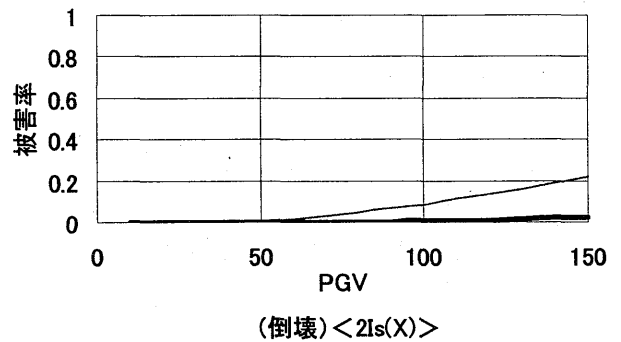
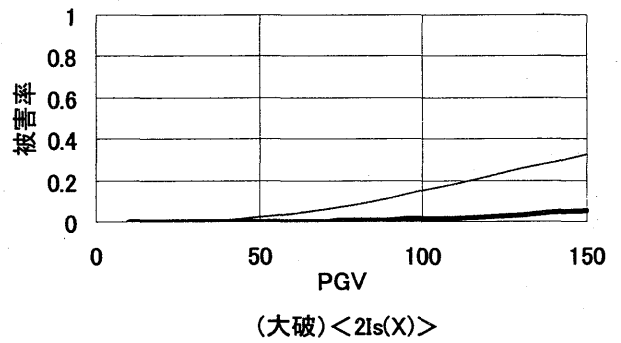
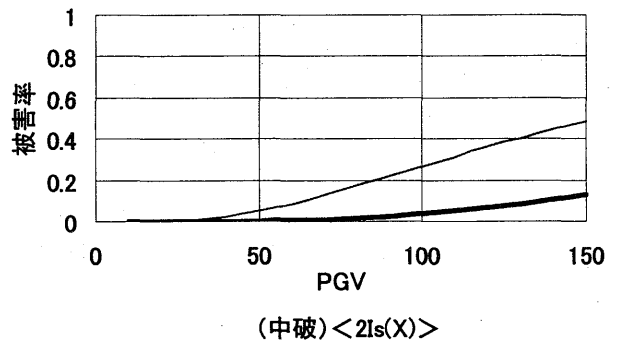
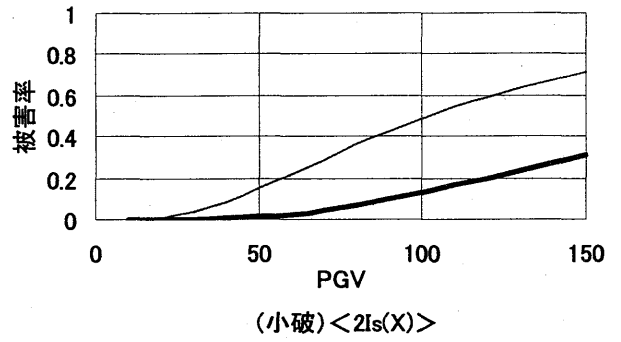
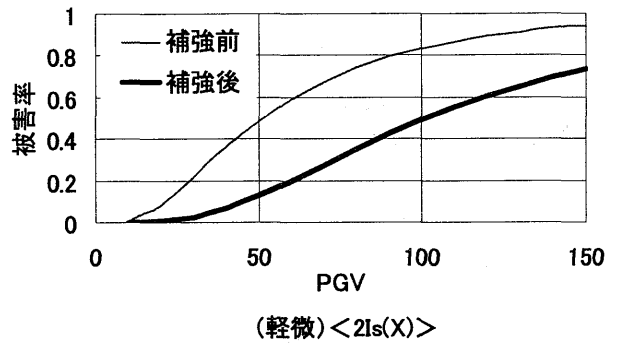
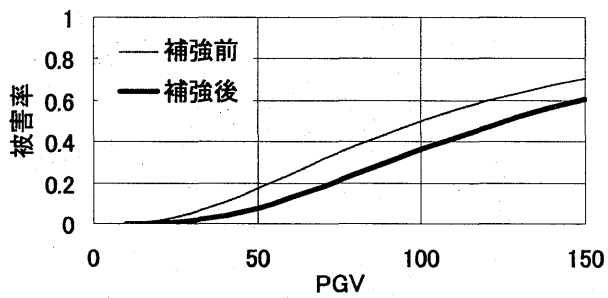
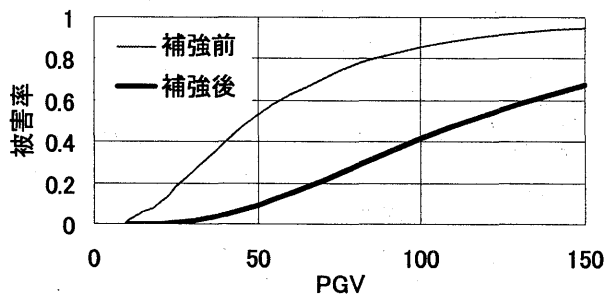


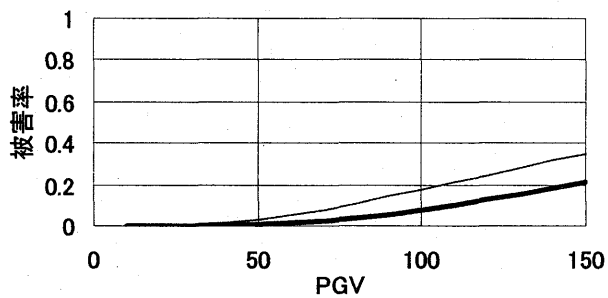
図 7(a) 補強前後の被害率曲線の比較



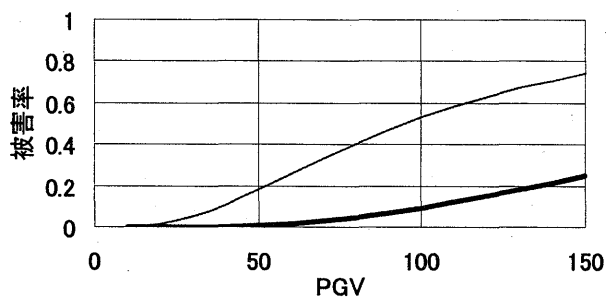
(軽微) <2Is(Y)>



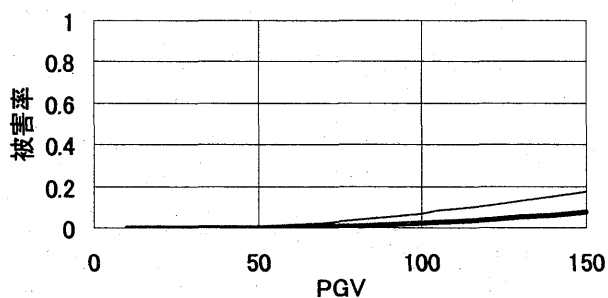
(軽微) <3Is(X)>



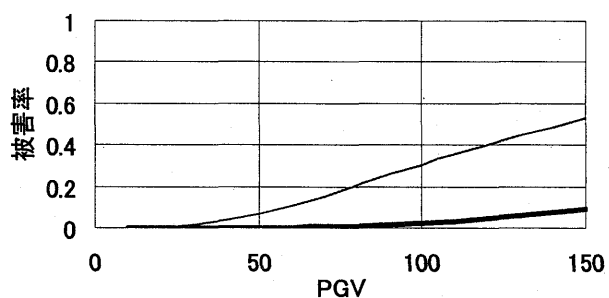
(小破) <2Is(Y)>



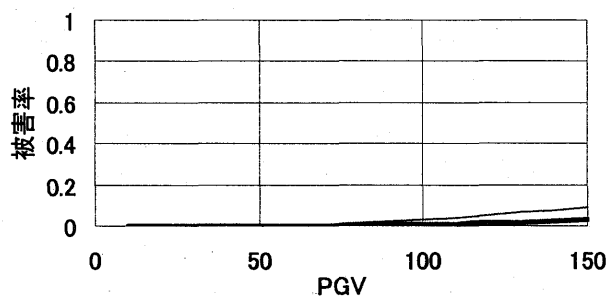
(小破) <3Is(X)>



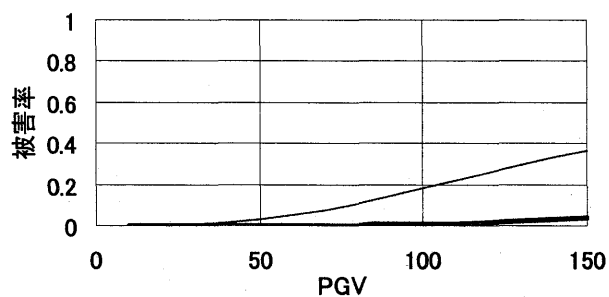
(中破) <2Is(Y)>



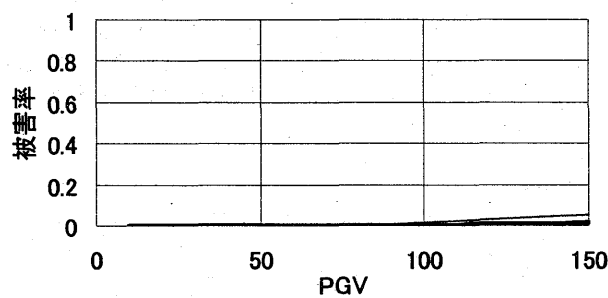
(中破) <3Is(X)>



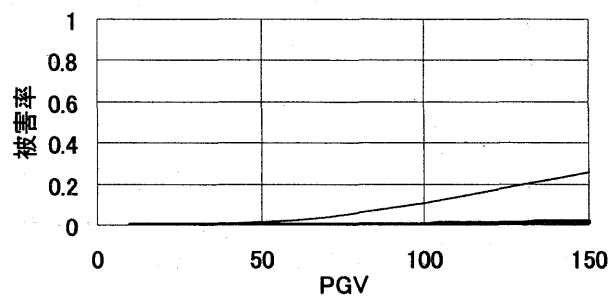
(大破) <2Is(Y)>



(大破) <3Is(X)>



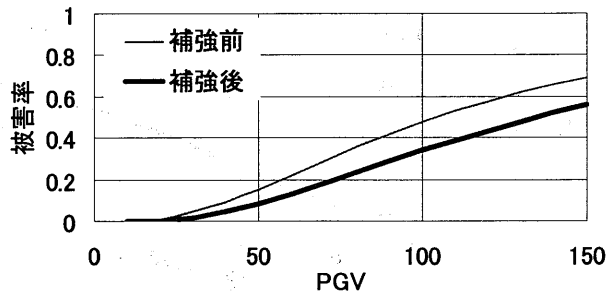
(倒壊) <2Is(Y)>



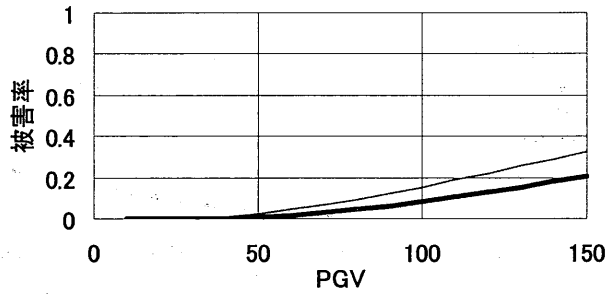
(倒壊) <3Is(X)>

図 7(b) 補強前後の被害率曲線の比較

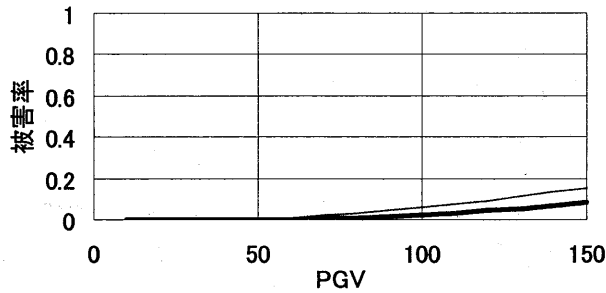
図 7(c) 補強前後の被害率曲線の比較



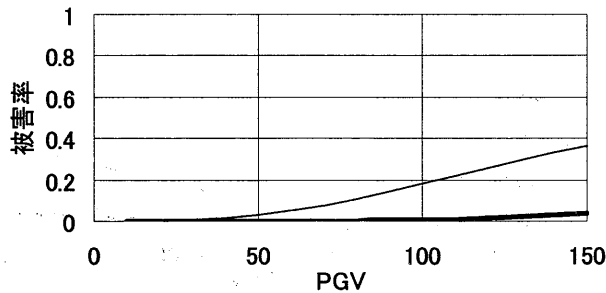
(軽微) $3I_s(Y)$



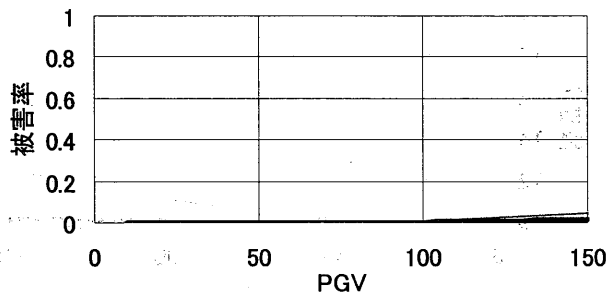
(小破) $3I_s(Y)$



(中破) $3I_s(Y)$



(大破) $3I_s(Y)$



(倒壊) $3I_s(Y)$

図 7(d) 補強前後の被害率曲線の比較

表 2(a) 耐震補強前後の被害率の変化$2I_s(X)$

	50 kine		100 kine	
	補強前	補強後	補強前	補強後
軽微	48.7%	12.8%	83.5%	49.1%
小破	14.9%	1.2%	48.7%	12.8%
中破	5.2%	0.2%	26.7%	3.7%
大破	2.0%	0.0%	14.9%	1.2%
倒壊	0.9%	0.0%	8.6%	0.5%

表 2(b) 耐震補強前後の被害率の変化$2I_s(Y)$

	50 kine		100 kine	
	補強前	補強後	補強前	補強後
軽微	17.5%	7.7%	49.9%	36.3%
小破	3.1%	0.6%	17.5%	7.7%
中破	0.8%	0.1%	7.0%	2.0%
大破	0.3%	0.0%	3.1%	0.6%
倒壊	0.1%	0.0%	1.5%	0.2%

表 2(c) 耐震補強前後の被害率の変化$3I_s(X)$

	50 kine		100 kine	
	補強前	補強後	補強前	補強後
軽微	52.7%	9.0%	85.4%	41.5%
小破	18.0%	0.7%	52.7%	9.0%
中破	6.7%	0.1%	30.6%	2.3%
大破	2.8%	0.0%	18.0%	0.7%
倒壊	1.3%	0.0%	10.8%	0.2%

表 2(d) 耐震補強前後の被害率の変化$3I_s(Y)$

	50 kine		100 kine	
	補強前	補強後	補強前	補強後
軽微	15.4%	8.2%	47.7%	33.8%
小破	2.4%	0.9%	15.4%	8.2%
中破	0.6%	0.2%	5.7%	2.5%
大破	0.2%	0.0%	2.4%	0.9%
倒壊	0.1%	0.0%	1.1%	0.4%

5. まとめ

- (1) 高知県の既存 RC 学校校舎の I_s 値は対数正規分布に従っていないため、よりフィットする分布形を考える必要がある。
- (2) I_s 値を大きくすることによって被害率は小さくなる。保有する I_s 値が小さい建物ほど、 I_s 値を大きくすることで被害率を低減する効果は高いが、耐震補強にかかる費用も考慮すると、 I_s 値を単純に大きくすることが必ずしも良いとはいえず、 I_s 値がどの程度の建物を耐震補強すれば効果があるのかということについて、耐震補強の費用と地震被害を受けた後の補修費用等を含めた比較を行う必要がある。

参考文献

- [1] 林康裕:耐震診断結果を利用した地震リスク表示の試み, pp.37-42, 2000年 [2] 中埜良昭 他:信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第406号, pp.37-43, 1989年 [3] 根口百世, 南宏一:既存 RC 造学校校舎の耐震性能評価における第1次診断法の意義に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.635-636, 2003年