

既存 RC 造学校建物の耐震補強における対費用効果

根口 百世* 南 宏一**

Evaluation of Cost Effectiveness for Reinforcing for Seismic Safety
of Existing RC School Buildings

Momoyo NEGUCHI* and Koichi MINAMI**

ABSTRACT

The damage rate was calculated with a seismic evaluation result of existing RC school buildings in Kochi prefecture and comparison of a repair cost when a necessary cost and buildings caught the earthquake damage to let I_s value increase was performed by reinforcing for seismic safety. As a result, from the viewpoint of cost effectiveness, a choice not to reinforce for seismic safety it is possible by I_s values to hold. When I_s values which a building held were small, a earthquake-proof reinforcement cost shrank than a cost to repair it after suffering, and it was provided that there were many economic cases.

キーワード：学校校舎，耐震診断，耐震性能，地震リスク評価，地震被害予測

Keywords: School Buildings, Seismic Evaluation, Seismic Performance, Evaluation of Seismic Risk, Prediction of Seismic Damage

1. はじめに

文献[1]では，保有する構造耐震指標（以下， I_s 値という）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ということを報告した。また，補修コストを考慮した場合， 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対費用効果があるのかということについて，耐震補強コストと地震被害を受けた場合の補修コストの比較を行う必要があることも指摘した。

そこで，本研究では，四国耐震診断評定会に提出された，高知県の既存 RC 造学校校舎の耐震診断結果に基づいて被害率曲線を構築し，以下のことについて検討する。なお，本研究は，地震の発生，被害の発生など，蓋然性を前提に一貫して確率・統計的な方法を採用している。また，定量的な評価ではなく，定性的な評価を行った。

- (1) 現状建物が被害を受けた場合に補修するためのコスト M_1 と，耐震補強のコストと耐震補強を行った建物が地震被害を受けた場合に必要補修コストとの合計 M_2 の比較を行う。
- (2) 現在保有している I_s 値に対して，対費用効果において，より効果があるのは補修と耐震補強のどちらであるかを検討する。
- (3) 耐震補強の目標値である構造耐震判定指標値（以下，

I_{s0} 値という）の数値設定の妥当性について検討する。さらに，既存建物の I_s 値と最大地動速度，耐震補強コストと補修コストの関連をパラメトリックに検討して，対費用効果という観点から I_{s0} 値の妥当性について検討する。

2. 検討の方法

本論では，地震の発生確率や地震発生時と現在との貨幣価値の変動や金利については考慮していないことを前提としていること，また，本研究の結果は，個々の建物について検討したのではなく，多くのデータからなる建物群として扱ったものであることとして検討を行う。

2.1 相対頻度分布

林^[2]は，兵庫県南部地震の実被害データに基づいて，フラジリティ曲線および被害率曲線の構築を行っている。また，フラジリティ曲線や，地震リスクの評価については，あくまでも平均的なものであり，ばらつきを考慮すると，平均値と大きく離れた値となり得ることに注意が必要であることを指摘している。そして，実際の個別建物の地震リスクをより適切に評価・表示するためには，フラジリティ曲線を建物の特性（構造形式や階数など），地盤条件，地震動特性などを適切に考慮して修正

* 大学院博士課程地域空間工学専攻 ** 工学部建築学科

して用いる必要があると述べている。しかしながら、現段階では、上述のこれらの指摘に対して、具体的に対応できる方法がないので、本研究では、林の提案する I_s 値相対頻度分布とフラジリティ曲線から被害率曲線を構築する手法を用いて、建物群の被害率を求めるものとする。被害率曲線は、次の式で表される。

$$P_d(V) = \int P(I_s) P_f(V, I_s) dI_s \quad (1)$$

ここに、 $P(I_s)$: I_s 値相対頻度分布
 $P_f(V, I_s)$: フラジリティ曲線

2.2 補修コスト M_1

耐震補強を行わないで、現状で建物が地震によって被害を受けた場合の補修コスト M_1 (以後、補修コスト M_1 という) に関しては、平川・神田^{[3][4]}の研究をはじめ、林ら^[5]、井上^[6]、藤堂^[7]の研究などがある。本論で用いる補修コストの平均値は、既往の研究^{[3][4]}を参考にして、Table 1 の値とする。表中の大破と倒壊の場合の補修コストが極端に違うことや、中破と大破の場合の補修コストにあまり差がないことの原因として、使用したデータには、例えば、被害ランクが大破の場合、現実には補修コストが大きくなる場合には補修せずに建て替えるケースが考えられるが、このようなケースは含まれておらず、あくまでも補修を選択した場合のデータであることから、実際よりも小さな値である可能性がある。また、被害ランクが大破の場合でも、部分的な損傷の場合も含まれるために、中破に近い値の場合も含まれている。大破の場合の補修コストは、今後の検討課題である。

補修コスト M_1 は(2)式を用いて求めた。

$$M_1 = \sum_{i=1}^4 (P_{f,i}(a) - P_{f,i+1}(a)) C_i + P_{f,5}(a) C_5 \quad (2)$$

ここに、 i : 被害ランクを表す。 $i=1$ のとき軽微、 $i=2$ のとき小破、 $i=3$ のとき中破、 $i=4$ のとき大破、 $i=5$ のとき倒壊

$P_{f,i}$: 各被害ランクに応じた被害率

C_i : Table 1 に示される各被害ランクの単位面積あたりの補修コストの平均値

この式は、前述したように被害率曲線がその被害ランク以上の被害を受ける確率を示したものであることから、単純に、小破、中破、大破、倒壊の被害率を求めるためには、1つ上のランクからそのランクの被害率の差をとったものに単位面積あたりの補修コストの平均値を乗じてその被害を受けた場合の補修コストを出すものである。したがって、各被害ランクについて求め合計したものを補修コスト M_1 として評価している。

2.3 補強コスト M_2

耐震診断結果に基づいて、耐震補強を行うのに必要なコストと、耐震補強後に地震被害を受けた場合に必要な補修コストを加えたものを M_2 (以後、補強コスト M_2 という) として検討を行う。

耐震補強に必要なコストの算定は文献^[8]に示されてい

Table 1 Repair cost per a unit area

被災度	軽微・小破	中破	大破	倒壊
平均値 C_i [万円/㎡]	2.90	4.27	4.57	30

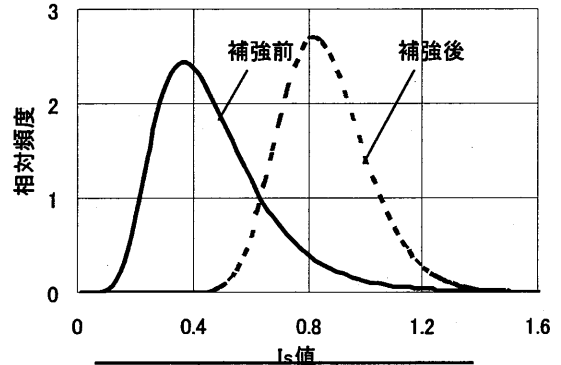


Fig. 1 Distribution of I_s value

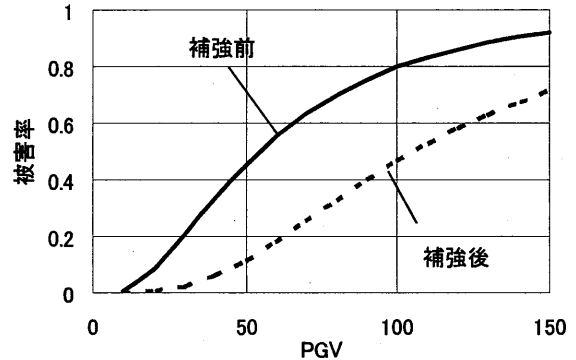


Fig. 2 Distribution of I_s value (Kochi)

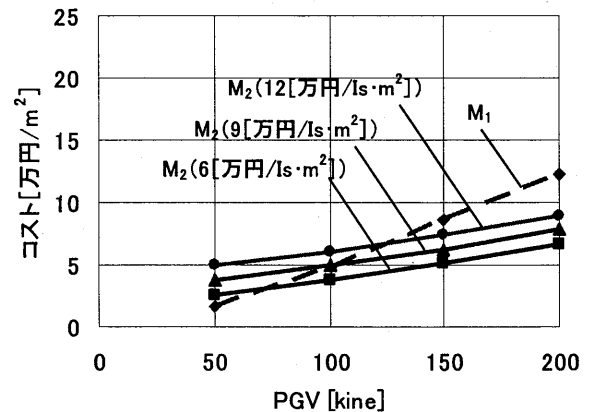


Fig. 3 Cost effectiveness between M_1 and M_2 (Kochi)

るが、この文献では、補強工事が行われた年度を昭和55～57年度、昭和58～60年度、昭和61～63年度の3期に分けて補強コストを集計している。本論では、昭和61～63年度に補強された建物のコストの平均値である5.85 [万円/($Is \cdot m^2$)] を基準にして、補強コストの標準値を簡単のために、6 [万円/($Is \cdot m^2$)] とする。しかしながら、耐震補強に必要なコストは、補強の方法や価格の変動を考慮するために、9, 12 [万円/($Is \cdot m^2$)] の場合についても検討する。

なお、耐震補強を行った後に建物が地震によって被害を受けた場合の補修コストは、(2)式によって求めるが、補修コストの算定に用いる被害率の基となる Is 値の平均値が増加していることから、当然のことながら、補強後の補修コストは、補強しない場合の補修コスト M_1 に比して小さくなることが特徴である。

3. 高知県の学校建物における対費用効果

Fig. 1 には、高知県の学校建物の補強前と補強後の Is 値相対頻度分布を示した。耐震補強前の Is 値の平均値 μ は 0.474 であり、耐震補強後の Is 値の平均値 μ は 0.859 となっており、その平均値は耐震補強の目標値である $Is_0 = 0.70$ を満たしている。

Fig. 2 には被害率の一例として、Fig. 1 に基づいて算定した軽微以上の被害を受ける場合の被害率曲線を示す。耐震補強によって Is 値が増加し、被害率の低減に効果があることが示されている。

Fig. 3 は、Fig. 2 の高知の補強前後の Is 値分布に基づいて、補修コスト M_1 と、補強コスト M_2 を算定した結果を示したものである。横軸は、想定する地震の最大地動速度 PGV を、縦軸は、補修コストと補強コストを示している。破線は、補修コスト M_1 を示している。実線で示される補強コスト M_2 は、 M_2 (6 [万円/($Is \cdot m^2$)])、 M_2 (9 [万円/($Is \cdot m^2$)])、 M_2 (12 [万円/($Is \cdot m^2$)]) と表している。

同図は、想定する地震の最大地動速度において、補修コスト M_1 が補強コスト M_2 よりも下側にある場合には、耐震補強を行うよりも、耐震補強を行わずに地震によって被害を受けた後に補修を行う方がコストを抑えられることを示している。

すなわち、補修コスト M_1 と補強コスト M_2 (6 [万円/($Is \cdot m^2$)]) との交点の PGV は 70[kine]程度であることから、70[kine]程度までは、耐震補強を行わずに、現状で建物が地震被害を受けた場合に補修を行う方がコストを抑えられることを示している。同様に、補強コスト M_2 (9 [万円/($Is \cdot m^2$)]) の場合には、100[kine]程度まで、補強コスト M_2 (12 [万円/($Is \cdot m^2$)]) の場合には 130[kine]程度までであれば、耐震補強を行わずに、現状で建物が地震被害を受けた場合に補修を行う方がコストを抑えられることを示している。

このことから、想定する地震の最大地動速度によっては、必ずしも耐震補強が最良の選択ではなく、対費用効果という点からいえば、 Is_0 値を閾値に 0.70 とすることには、疑問がある。しかしながら、被害率を低減する効果は確かにあるため、コストと安全性の両面から Is_0 値

を決定していくことが重要であると思われる。

4. 一般的なコストの比較

3では、高知県の公立既存学校建物の補強前後の Is 値に基づいて対費用効果を検討したが、ここでは、より一般的な場合について検討を行う。

Is 値の相対頻度分布を、 Is 値の平均値 μ をパラメトリックに変化させて、補修コスト M_1 および補強コスト M_2 について検討する。Fig. 4 には、標準偏差を $\sigma = 0.20$ で固定し、 μ が 0.30, 0.50, 0.70 のときの被害率曲線を被害率 P_D 、地動速度 PGV および被害ランクによる3次元空間で表現している。同図から、 Is 値の平均値が大きいかほど被害率が小さくなっていることが分かる。このことから、被害率を低減するには平均値を増加させることが有効であるといえる。なお、被害率は個々の建物の被害のしやすさを表すものではないことに注意しなければならない。

Fig. 5 には、補修コスト M_1 と補強コスト M_2 の比較を Is 値の平均値 μ 別に示したものである。なお、同図では、耐震補強の目標値を $Is_0 = 0.70$ としている。

同図(a)より、補強コスト M_2 (6 [万円/($Is \cdot m^2$)]) および補強コスト M_2 (9 [万円/($Is \cdot m^2$)]) の場合には、補修コスト M_1 との交点はなく、 PGV が 50[kine]以上の場合については、耐震補強を行う方が経済的であることが示される。それに対して、補強コスト M_2 (12 [万円/($Is \cdot m^2$)]) の場合には 55[kine]程度までであれば、耐震補強を行わずに、現状で建物が地震被害を受けた場合に補修を行う方がコストを抑えられることが示される。

同図(b)では、補強コスト M_2 (6 [万円/($Is \cdot m^2$)]) のときには 65[kine]程度、補強コスト M_2 (9 [万円/($Is \cdot m^2$)]) のときには 90[kine]程度、補強コスト M_2 (12 [万円/($Is \cdot m^2$)]) のときには 110[kine]程度までであれば、耐震補強を行わずに、現状の建物が地震被害を受けた場合に補修を行う方がコストを抑えられることが示される。

同図(c)では、 Is 値の平均値 μ と、補強目標値 Is_0 が、ともに 0.70 と等しくなるために、耐震補強を行わないことになり、補修コスト M_1 と全ての補強コスト M_2 (2.3の定義に基づいているので、補強後に被災した場合の補修コストによるもの) のラインが重なり、これらのラインは、 $\mu = 0.70$ の建物が地震被害を受けた場合の補修コストを示していることになる。

以上より、 μ が小さいほど、耐震補強を行う方が対費用効果の面では有利であるといえる。しかしながら、 μ が 0.7 に近づくほど、 PGV によっては現状の建物が地震被害を受けた後に補修を行う方が有利である場合も考えられる。対費用効果の観点からのみでいえば、どの程度の地震に対して対策を講じるのかを明確にすることによって、経済的な方法を選択できるといえる。

なお、耐震補強の目標となる Is_0 値を 0.70 と設定された場合でも、耐震補強が具体的に実施された建物では、 Is 値は 0.70 ではなく、多少上回る結果を与えることが考えられるため、 $Is_0 = 0.70$ だけでなく、 $Is_0 = 0.80, 0.90$ とした場合についても検討を行うことが必要である。

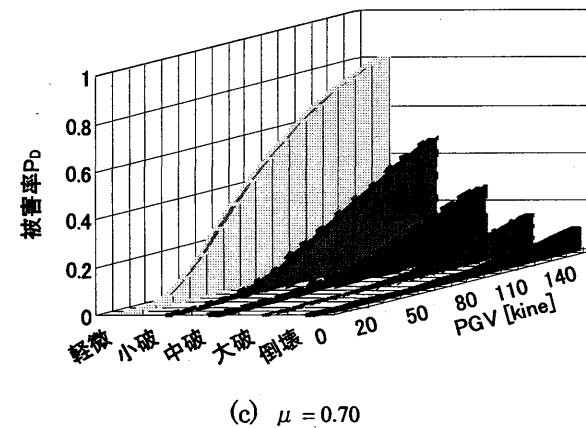
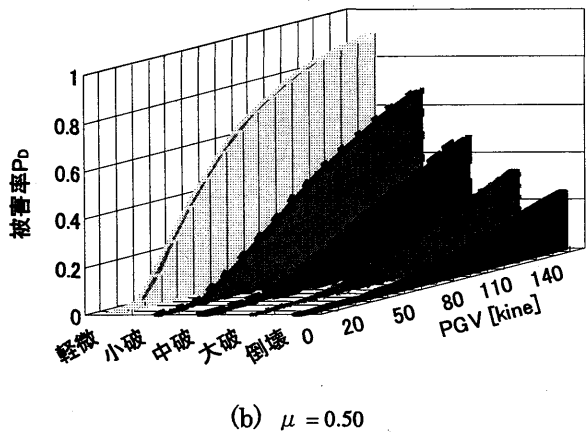
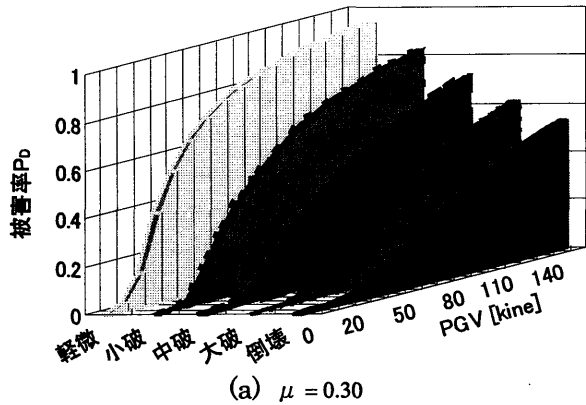


Fig. 4 Vulnerability curve

5. まとめ

本研究では、以下のことが示された。

- 1) 補修コストの平均値については、補修方法や地域による違いがあるため、さらに詳細な調査が必要である。
- 2) 補強コストについては、補強方法によって大きく変動することが予想されるため、どのような補強方法にどれだけコストがかかるのかを調査する必要がある。

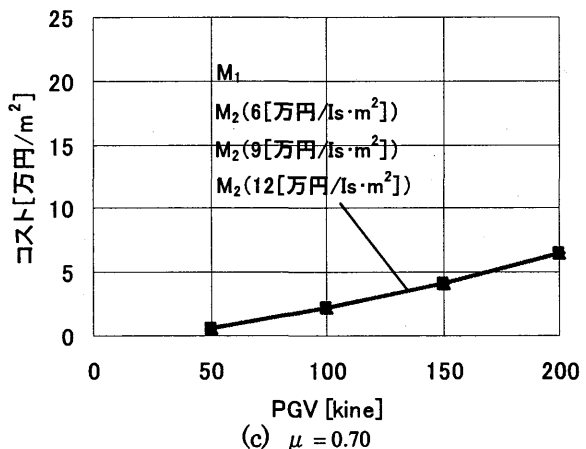
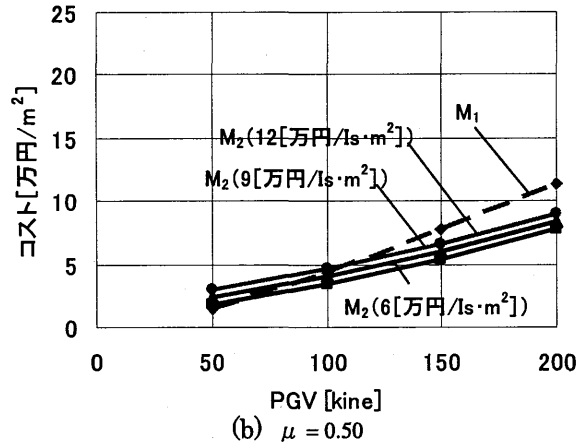
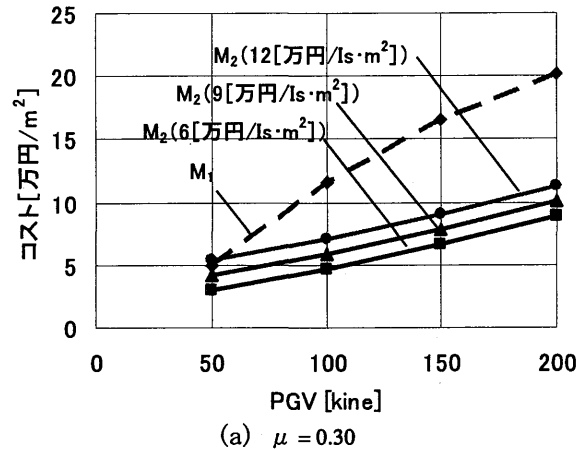


Fig. 5 Cost effectiveness between M_1 and M_2

る。

- 3) 高知県の公立既存学校建物については、補強コスト M_2 が 6 [万円/(Is·m²)] の場合には、想定する PGV が 70[kine]程度まで、補強コスト M_2 が 9 [万円/(Is·m²)] の場合には、100[kine]まで、さらに、補強コスト M_2 が 12 [万円/(Is·m²)] の場合には 130[kine]までであれば、耐震補強を行わずに、現状のままで建物が地震被害を受けた場合に補修を行う方が経済的であることが示された。

- 4) 耐震補強を行うにあたっては、建物の保有する I_s 値が小さいほど対費用効果が大きく、 $I_s = 0.30$ 程度の建物では、 $I_{s0} = 0.70$ を目標とすることが妥当なものといえる。しかしながら、 I_s 値が $I_{s0} = 0.70$ に近づくほど、PGV によっては、耐震補強を選択しない方が対費用効果が大きいことがあるので、対策を講じようとしている地震の強さによっては経済的な方法が異なることが示された。
- 5) 高知県では $I_{s0} = 0.70$ を目標として耐震補強を行っているが、実際の補強後の I_s 値の平均値は 0.859 であった。さらに、 $I_{s0} = 0.80$ 、 0.90 と高い I_{s0} を設定した場合についても検討を行う必要がある。
- 6) 構造耐震判定指標 I_{s0} 値の設定にあたっては、対費用効果と耐震安全性の両方の観点を考慮することが肝要である。

参考文献

- [1] 根口百世, 南宏一: 既存 RC 造学校校舎の耐震性能評価に関する一考察, 福山大学紀要, 第 28 巻, pp.113-120, 2004.12
- [2] 林康裕: 耐震診断結果を利用した地震リスク表示の試み, シンポジウム「耐震診断・耐震補強の現状と今後の課題」, 日本建築学会関東支部, pp.37-42, 2000.11
- [3] 平川倫生, 神田順: 終局限界状態以前に発生する破壊時の費用の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.69-70, 1997.9
- [4] 神田順: 損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用地震荷重, pp.5-20, 1998.6
- [5] 林康裕, 鈴木祥之, 宮腰淳一, 渡辺基史: 耐震診断結果を利用した既存 RC 既存 RC 造建築物の地震リスク表示, 地域安全学会論文集, No.2, pp.1-8, 2000.11
- [6] 井上超: 耐震補強による地震期待損失額の低減, ハザマ研究年報, pp.15-19, 2002.12
- [7] 藤堂正喜, 千葉脩, 大井貴之: 地震被害調査資料に基づく地震リスク評価, 戸田建設技術報告, Vol.29, pp.1-8, 2003
- [8] 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震補強事例集—静岡県内における耐震補強事例—, pp.16-25
- [9] 柴田明德: 確率論的手法による構造安全性の解析, 森北出版, 2005
- [10] 星谷勝, 中村孝明: 構造物の地震リスクマネジメント, 山海堂, 2002

謝辞

既存建物の I_s 値相対頻度分布のための資料については、四国耐震診断評定会にご配慮をいただきました。ここに記して深甚より謝意を表します。