

2004 年度 修士論文

耐震補強工法のコストと効果の分析

Cost Effectiveness of Seismic Strengthening Methods

前川 直之

Maekawa, Naoyuki

東京大学 新領域創成科学研究科
環境学専攻 社会文化環境コース

耐震補強工法のコストと効果の分析

目次

1. 序論
 - 1-1 本研究の背景
 - 1-2 既往の研究
 - 1-3 本研究の目的
 - 1-4 本論文の構成
2. 調査概要
 - 2-1 調査方法の概要
 - 2-2 調査物件の仕様特性
 - 2-3 調査物件の構造特性
3. 耐震補強工事事例の評価
 - 3-1 耐震補強費用係数 cs の定義
 - 3-2 調査結果に基づく cs の分布
 - 3-3 耐震補強工事事例の評価手法の提案
 - 3-4 調査事例による評価実例
4. 補強工法による評価
 - 4-1 耐震補強工法の概要
 - 4-2 調査事例の耐震補強工法の分布
 - 4-3 cs と耐震補強工法との関係性
5. 個別事例の評価と分析
 - 5-1 cs の小さな事例の評価
 - 5-2 鉄骨ブレースと RC 壁による補強事例の評価
 - 5-3 cs の大きな事例の評価
 - 5-4 考察
6. 結論

謝辞

参考文献

付録

第1章 序論

1-1 本研究の背景

1-2 既往の研究

1-3 本研究の目的

1-4 本論文の構成

第1章 序論

1-1 本研究の背景

日本は多くの自然災害に囲まれている。中でも地震災害は、被害規模の大きさ、社会的影響の複雑さ等の観点から重要視され、住民・企業・自治体・政府という様々なレベルで対応を求められている。さらに、近年日本国内や海外で多々生じている地震活動から、ますます地震災害への対応が重要になってきている。

2004年10月に起きた新潟県中越地震においては、死者40名、重傷者480名と多大な被害をもたらした。また、この地震による建物被害は、消防庁の調べ(2004.12.24)によると、全壊2842棟、半壊10568棟、一部破損88524棟となっている。また、地震による直接的な被害ではないが、スマトラ島沖地震の被害は死者15万人を越すとも言われ、地震の恐怖を強く感じるものであった。

このように近年日本国内や海外で多々生じている地震活動からも、ますます地震災害への対応が重要になってきている。

では、建築面からの地震対策とはどのようなものだろうか。これまでの地震被害状況を調査した結果、地震で大破・倒壊した建物は1981年以前の古い耐震設計基準で建てられてものがほとんどであり、それ以降に建てられた建物の被害状況は比較的軽微であることが明らかになっている。

このようなふるい耐震設計基準で建てられた建物、いわゆる既存不適格の建物を問題視する動きは以前からあった。そして1995年に起きた兵庫県南部地震を継起に「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行され、現行の耐震設計基準に適合しない耐震既存不適格建築物の耐震改修を目指している。また、いくつかの自治体では耐震改修の推進を目的として、耐震診断や耐震補強にかかる費用に対する補助制度や低利の融資制度をはじめている。

しかし残念ながらこの効果が現れているのは公的な建物ばかりで、一般住宅などの公的ではない建物の耐震補強は依然進んでいない。これには、耐震補強に要する費用の問題、耐震補強を行うことの煩わしさや不安、地震被害に対する認識の低さ、一般の人々にとって耐震補強の便益が見えにくいなどの要因があると考えられる。つまり、人々に耐震補強の効果・便益をわかりやすく定量的に伝えるような手法の提案こそが、個人の主観や都合を排除し、耐震補強の推進につながり、ひいては安全な社会の形成につながるものと考えられる。

また一方で、一般の人々の耐震補強工事に対する認知の低さや、それに伴う不信感も耐震補強

の広がりを妨げている一因と考えられる。最近ワイドショーやニュースなどで多く取り上げられている、耐震補強工事の詐欺もその一つである。地震への恐怖という心理を巧みに利用し、高額なリフォーム工事を行う悪質な業者のことである。

その手口は『無料耐震診断』を売り文句に、特に高齢者の家にセールスマンが訪問。業者は訪問してわずか数分で家の基礎の状態や壁の配置の悪さを指摘。さらに数分間、天井裏をのぞき込み、「耐震診断書」にその家の「倒壊または大倒壊の恐れがある」という評価を書き込む。そして「この家は大地震がきたら倒壊する！」と、恐怖心を煽る。不安になった客は思わず工事契約を結んでしまうのだが、その工事はズサンであったり、法外な値段であったりと、ここ数年、この手口によるトラブルは後を絶たない。誰もが抱いている地震への恐怖心を逆手にとる悪質業者の手口なのである。

耐震補強工事とは、意匠や設備工事に比べ目に付きづらく分かりにくい工事であることも、このような事件の起こる一因だろう。工事がズサン、法外な値段というのも、それらの優劣がわからないからなのだ。耐震補強に関して徐々に関心が広がってはいるものの、実現には至らない理由としてこのような事が挙げられるのではないだろうか。

1-2 既往の研究

このような背景を受け、廣瀬の研究では RC 建築物の耐震補強目標設定として、年期待損失費用を提案した。これは、地震によって建物が被る損失費用の年期待値を用いて、建物の安全性を評価するものである。地震リスクは地震危険度と建物脆弱性の2つの要素によって決まる。建物の地震リスクを「費用」の形で評価することは、この2つを同時に評価できる上、一般の人にもわかりやすい指標であるというメリットがある。

さらにその上で、耐震補強の目標設定のための手法・ツールを提案している。これは、耐震補強目標設定方法として、使用年数を n 年とあらかじめ定めた上、補強後の n 年総地震期待費用を最小化する手法である。使用年数 n は建物計画などに依存し、意思決定者が決定するものとするが、使用年数 n が目標構造耐震指標に対しどのように変化するかを表し、使用年数の違いによる比較を行うことも可能にしている。

1-3 本研究の目的

一般の人たちが補強効果をイメージしやすくなれば、耐震補強に取り組む人が増えるのではないかと予想できる。さらには、実際に耐震補強工事を行うところまでイメージできれば、尚のことである。そこで本研究において、実際の事例から耐震補強の効果をより正確に表し、更に耐震補強工事に対する評価手法を提案し、なかなか進んでいない耐震補強を促進することを目的としている。

1-4 本論文の構成

第 1 章 序論

第 2 章 調査概要と結果

調査項目の調査結果を示す。

第 3 章 耐震補強工事事例の評価

既往の研究において、評価結果に大きな影響を与える係数である耐震補強費用係数 c_s について、実際の耐震補強事例から調べる。

また、それらの耐震補強工事事例の評価手法を提案する。

第 4 章 補強工法による評価

耐震補強工事事例を補強工法ごとに分類し、それらと耐震補強費用係数との関係を示す。また、工法ごとの特徴について考察する。

第 5 章 個別事例の評価と分析

特徴的な事例をいくつか選び、建物条件などを考慮し詳しく調べる。そこから、第 4 章の評価結果を分析する。

第 6 章 結論

第2章 調査概要

2-1 調査方法の概要

2-2 調査物件の仕様特性

2-3 調査物件の構造特性

第2章 調査概要と結果

2-1 調査方法の概要

耐震補強の実例を調べるため、東京都23区の区役所にヒアリング調査を行った。区役所を対象とした理由とは、民間に対して行うと金額にばらつきが出る、またはそもそも金額を公表しない場合が考えられるからである。そこで、東京都23区の区役所へ、区の公共建築物でRC構造の耐震補強事例についてヒアリング調査を行った。

調査項目

竣工年・補強年

建物用途

補強工事費用

延床面積

補強前後のIs値

補強工法と箇所数

調査の結果、7区から73事例が集まった。ほとんどの区が耐震補強事例についてまとめておらず、断片的な情報から集めていくしかなかった。また、資料が莫大な量になる、公表してもよいがどこにあるのかわからない、などの理由で情報を得ることが出来ない区も多かった。

2-2 調査物件の仕様特性

耐震補強を行った公共建築物の用途を図 2.1 に示す。

その多くは学校（小学校、中学校）である。その理由として、小学校、中学校は、万一の災害では少数の教職員が多数の児童・生徒を守らなければならない上に、多くの住民の避難所である場合が多いから、防災拠点同様の耐震性能が求められ特に早急な地震対策が必要だったため、優先的に補強が行われたのだと考えられる。

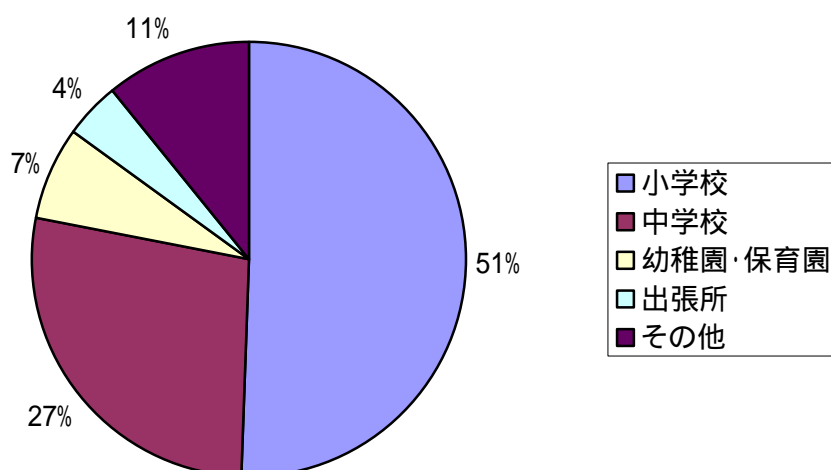


図 2.1 用途別の事例数

竣工年・補強年について図 2.2 に示す。

1981 年（昭和 56 年）以降の新しい耐震設計基準で建てられた建物については特に問題がないものとして、それ以前に建てられたものを耐震診断している。そして補強年については、1995 年（平成 7 年）に兵庫県南部地震を契機に関心が高まり、耐震面を問題視する動きが広まったため、平成 8 年以降に補強した例が多いことがわかる。耐震補強を行うためには大きな予算が必要なためなかなか実現に至らなかったのが、地震をきっかけに予算が通るようになった、というのが現状のようだ。

竣工年の図の中で、30 の表記は昭和 29 年、30 年に竣工したもの、32 の表記は昭和 31 年、32 年に竣工したもの、という意味である。

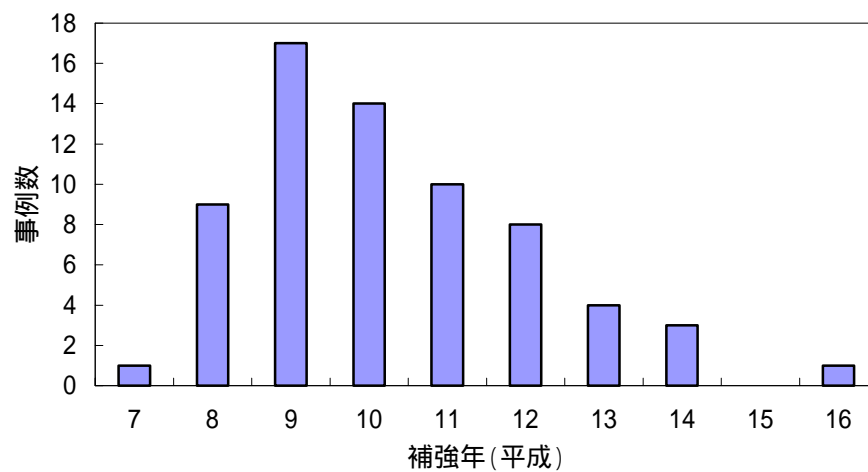
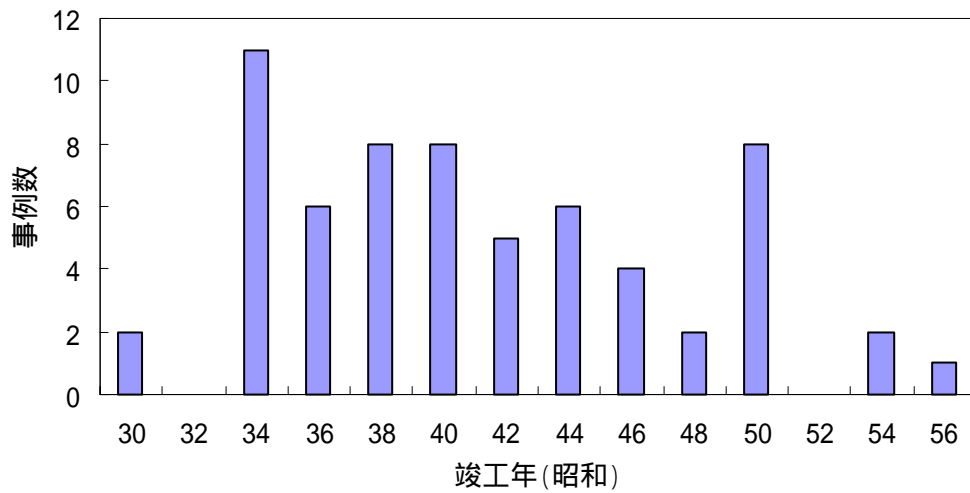


図 2.2 竣工年、補強年別の事例数

耐震補強費用について図 2.3 に示す。

しかし実際には、耐震補強費用としてどこまで含めるのか、定義することは難しい。耐震補強に伴い内装工事や設備工事なども生じるからである。また、リニューアルや大幅な改装と同時に耐震補強を行うケースも多く、そうなるとさらに費用の区分が難しくなる。今回は耐震補強に伴う補強箇所の内装工事や設備工事を含み、同時に行われた他の箇所の改装などは除いた金額となっている。

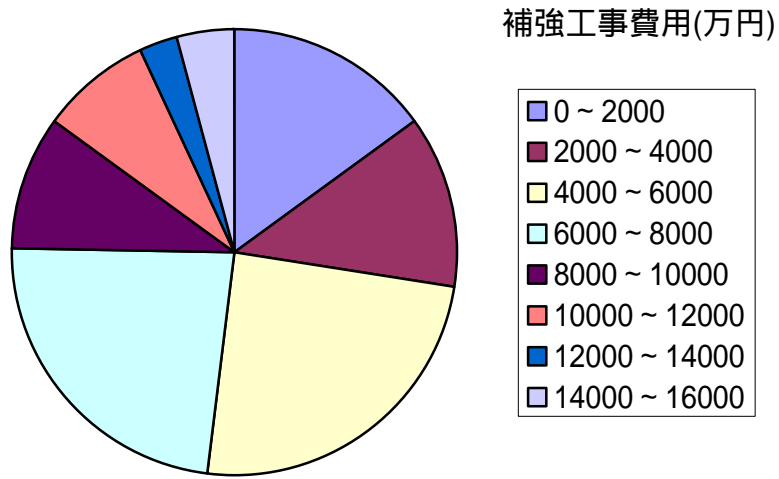


図 2.3 補強費用別の事例数

2-3 調査物件の構造特性

構造を統一するため、RC 建築物のみを対象に調査を行った。調査をしていて、補強を行った多くの建物が RC 建築であったが、一部 S 造のものもあった（それらの多くは体育館である）。

調査事例の延床面積を図 2.4 に示す。

これを用途と比較してみると、保育園・幼稚園、小学校、中学校の順に面積が大きくなっている傾向がある。

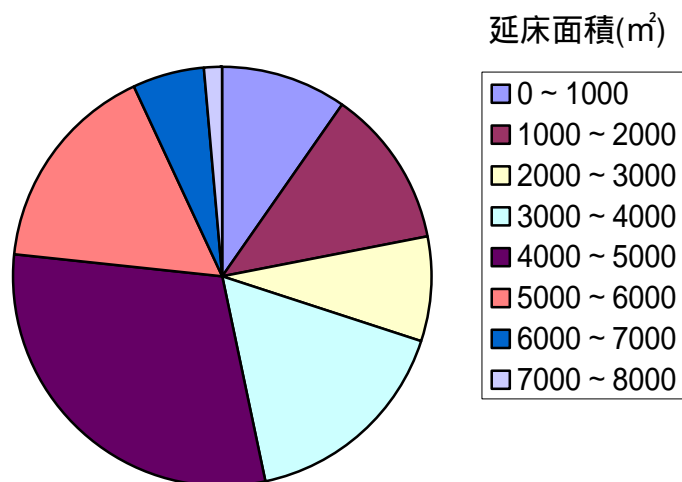


図 2.4 延床面積別の事例数

補強前後の I_s 値を図 2.5 に示す。

鉄筋コンクリート造建物は、「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準」で定められている I_s 値によって耐震性を判定される。 I_s 値とは構造耐震指標であり、構造体の耐震性能を表す指標である。

$$I_s = E_0 \cdot S_D \cdot T \quad (\text{式 2.1})$$

保有性能基本指標 E_0 ：建物が保有している基本的な耐震性能を表す指標で、強度指標

C、靱性指標 F および外力分布による補正係数から算定する

形状指標 S_D ：建物の平面、率面形状または剛性の平面、立面分布を考慮して保有性能

基本指標 E_0 を修正する指標

経年指標 T : 建物の経年変化により、保有性能基本指標 E_0 を修正する指標

強度指標 C : 水平力に対して建物または部材が保有している強度を対象階よりも上の重量で割ったもの

靱性指標 F : 部材の変形能力を表す指標

$$I_{so} = E_s \cdot Z \cdot G \cdot U \quad (\text{式 } 2.2)$$

構造耐震判定指標 I_{so} : 想定した地震動レベルに対して建物が所要の耐震で安全であるために必要とされる構造耐震指標値で、以下の E_s 、 Z 、 G 、 U の積で定義される

耐震判定基本指標 E_s : 建物に要求される基本的な耐震性能を表す指標

地域指標 Z : 地震活動度や地震動強さを考慮するための E_s の補正係数

地盤指標 G : 地盤、地形、地盤と建物の相互作用を考慮するための E_s の補正係数

用途指標 U ; 建物の用途を考慮するための E_s の補正係数

耐震性の判定においては、構造耐震判定指標 I_{so} を用いて $I_s \geq I_{so}$ であれば耐震性を有しているとされる。

この耐震診断基準は 1 次～3 次まで 3 種類の診断方法を用意している。診断の次数が高くなるほどその結果の信頼性が高くなるが、評価方法も複雑化していく。以下に各診断方法の概要をします。

- ・第 1 次診断法 : 主として柱や梁の断面積のみによって耐震性能を評価しようとするもので、建物の耐力評価としてせん断強度だけを略算的に考える簡便法である。
- ・第 2 次診断法 : 1 次診断同様柱と壁といった鉛直部材のみを評価の対象としているが、配筋された鉄筋の断面積・位置が計算に算入され、曲げ強度とせん断強度の双方を考慮することになる。もっとも良く利用される診断方法。
- ・第 3 次診断法 : 梁やスラブの強度も計算に取り入れる。算定手段、方法は耐力評価に水平部材を考慮する程度でほぼ第 2 次診断と同じ。梁より柱のほうがつよい場合は第 2 次診断と同じような耐力の評価結果になる。



図 2.5 全ての事例の補強前後の Is 値

補強工法と箇所数については、第 4 章で示す。

第3章 耐震補強工事事例の評価

- 3-1 耐震補強費用係数 c_s の定義
- 3-2 調査結果に基づく c_s の分布
- 3-3 耐震補強工事事例の評価手法の提案
- 3-4 調査事例による評価実例

第3章 耐震補強工事事例の評価

3-1 耐震補強費用係数 cs の定義

RC 造建物の耐震性能は、一般に第2章で述べたように構造耐震指標 I_s 値によって表される。これを用いて、1 m^2 あたり I_s 値を1あげるのに必要な費用を、耐震補強の評価指標として提案する。

$$\alpha_{CS} = \frac{\text{補強費用}}{\Delta I_s \times \text{延床面積}} \quad (\text{式 3.1})$$

つまり、この指標が小さいということは効率的な補強を行っていることであり、逆に大きいということはあまり効率的ではなかったということになる。

この指標は既往の研究の中で係数として用いられているので、そこで表されているとおり cs とし、補強費用係数と呼ぶことにする。

既往の研究において、総地震期待費用を以下のように定めている。

構造耐震指標が I_s の建物の n 年間の期待損失費用 $C_R(n, I_s)$ の g 倍と補強費用 C_S の和を n 年総自身期待費用と定義する。ここで補強費用 C_S は構造耐震指標の増分に比例するというモデルを用いる。なお、 g は建物被害以外の内容物や営業損失による被害を考慮するための係数である。

$$C_T = C_S + g \cdot C_R(n, I_s) \quad (\text{式 3.2})$$

$$C_S = cs \cdot \Delta I_s \quad (\text{式 3.3})$$

この n 年総地震期待費用 C_T を用いて補強による期待損失低減額、いいかえれば期待利得 C_{eg} は以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} C_{eg} &= C_{T\text{補強前}} - C_{T\text{補強後}} \\ &= g \cdot C_R(n, I_{s\text{補強前}}) - (C_S + g \cdot C_R(n, I_{s\text{補強後}})) \end{aligned} \quad (\text{式 3.4})$$

ここで注目すべきは、補強費用を求める式である。

$$C_S = \alpha_{CS} \cdot (I_{s\text{補強後}} - I_{s\text{補強前}}) \quad (\text{式 3.3})$$

cs : 補強費用係数 [万円 / $m^2 \cdot I_s$]

補強前後の I_s 値の差に乗じて耐震補強費用をモデル化するための係数が、補強費用係数 cs

である。

期待利得はこの補強費用係数 cs に強い影響を受け、値が高いほど利得が発生する領域が狭くなることが確認された。つまりこの補強費用係数 cs をできるだけ正確に把握することが適切な目標設定にもつながるのである。

表 3.1 補強費用係数による補強目標設定への影響

地震危険度と Is値の組合せ		想定使用年数:10年			想定使用年数:20年		
		cs=2.5	cs=5.0	cs=7.5	cs=2.5	cs=5.0	cs=7.5
23[cm/s]	Is=0.4	0.55	0.45	0.4	0.67	0.55	0.49
	Is=0.6	0.6	0.6	0.6	0.67	0.6	0.6
37[cm/s]	Is=0.4	0.88	0.72	0.63	1.07	0.87	0.77
	Is=0.6	0.88	0.72	0.63	1.07	0.87	0.77

3-2 調査結果に基づく cs の分布

調査の結果、補強費用係数 cs の分布は図 3.1 のようになった。ただし、図の中の cs は、
 cs 1 : 0~1
2 : 1~2
の範囲を表している。

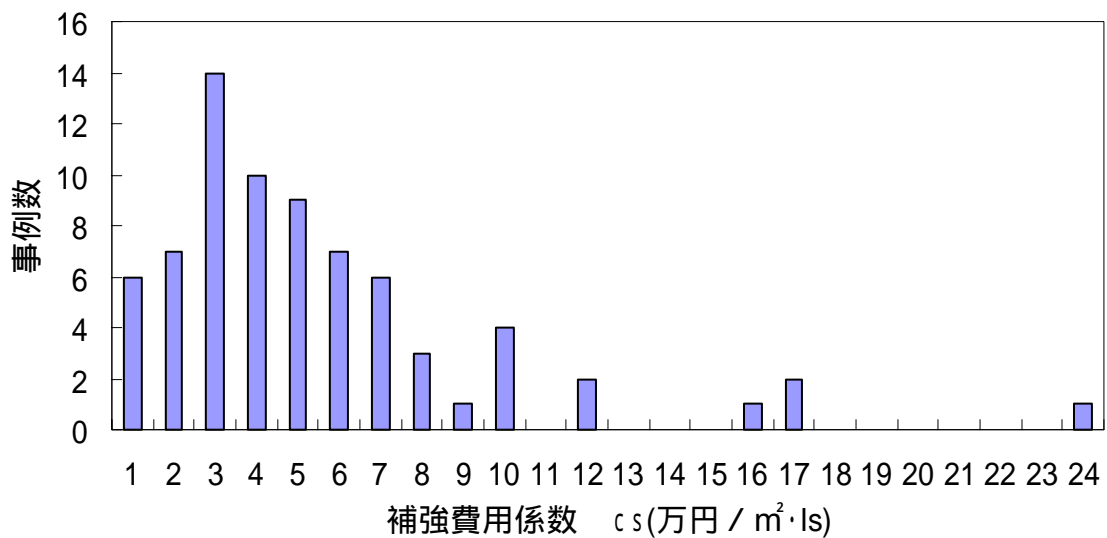


図 3.1 補強費用係数 cs の分布

cs の平均は 5.10、標準偏差は 4.14 となった。

また、補強費用係数 cs と、補強前の Is 値、補強前後の Is 値差、補強年、延床面積との関係を、それぞれ図 3.2、図 3.3、図 3.4、図 3.5 に示す。

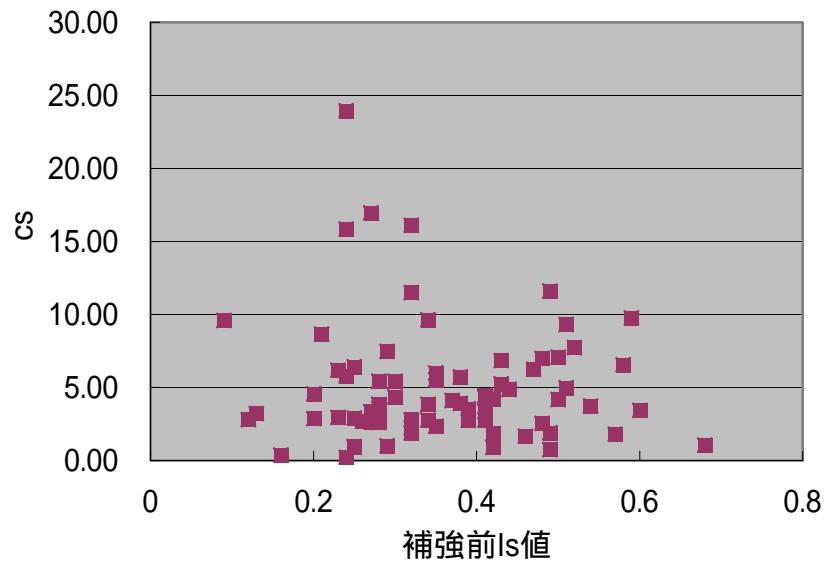


図 3.2 補強費用係数 c_s と補強前 Is 値の関係

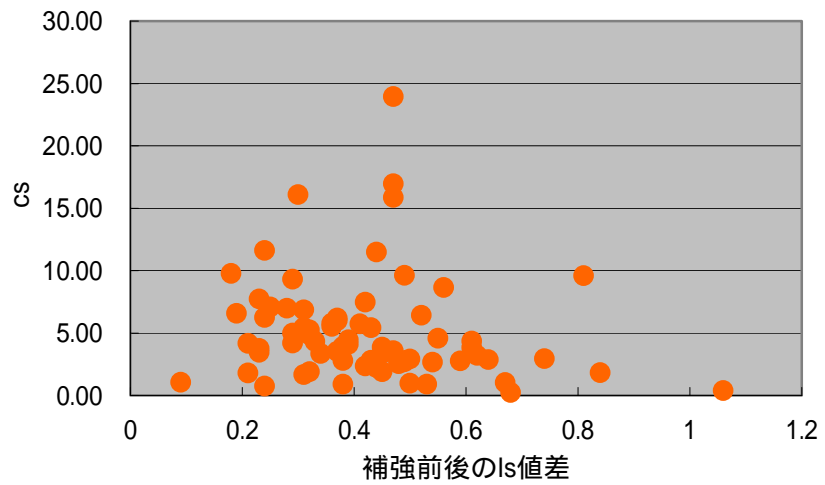


図 3.3 補強係数 c_s と補強前後の Is 値差の関係

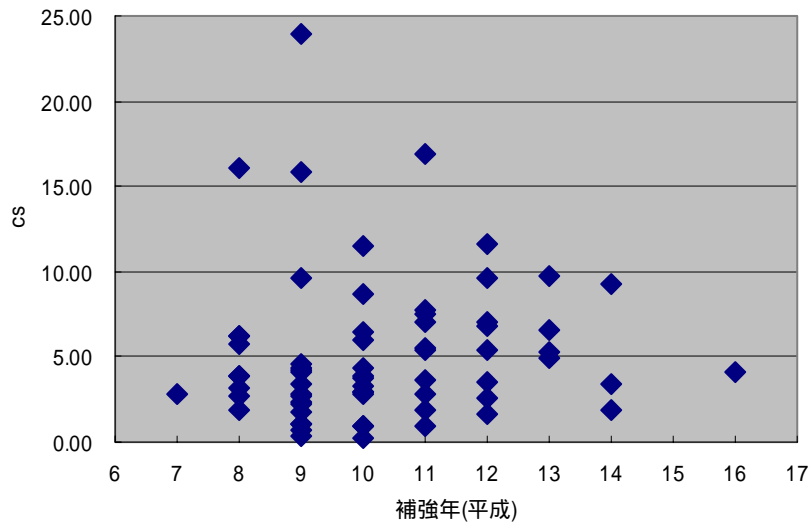


図 3.4 補強費用係数 c_s と補強年の関係

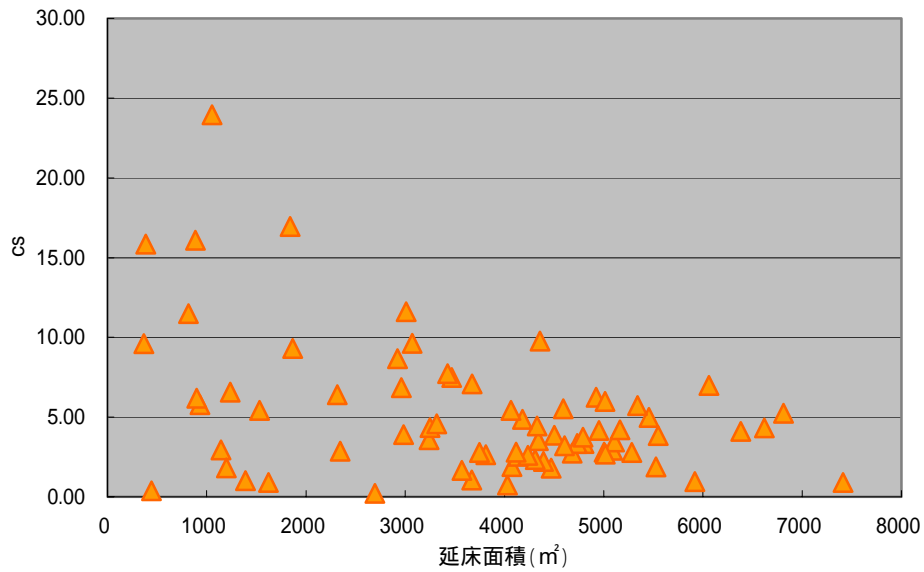


図 3.5 補強費用係数 c_s と延床面積の関係

図 3.2、図 3.3、図 3.4 に示したように、 c_s と、補強前の I_s 値、補強前後の I_s 値差、補強年とは、特に相関は確かめられなかった。しかし、図 3.5 に示した延床面積との関係から、延床面積が小さいほど c_s のばらつきが大きくなり、延床面積が大きくなるにつればらつきは小さくなっている。

表 3.2 面積ごとのばらつき

面積 (m ²)	0 ~ 2000	2000 ~ 4000	4000 ~ 6000	6000 ~ 8000
標準偏差	6.68	3.07	1.73	1.99

これは延床面積が小さい事例では、人件費、仮設工事費などが割合として多くを占める場合がある場合、また小規模な工事で十分な耐震性を確保できた場合、などがあることが原因と考えられる。

今回はなるべく近い条件で比較をするため、ばらつきの大きい 2000 m²未満の事例については省き、2000 m²以上の事例について考察を進めていく。

そこで、2000 m²以上の事例における cs の分布を図 3.6 に示す。

cs の平均は 4.18、標準偏差は 2.36 となった。

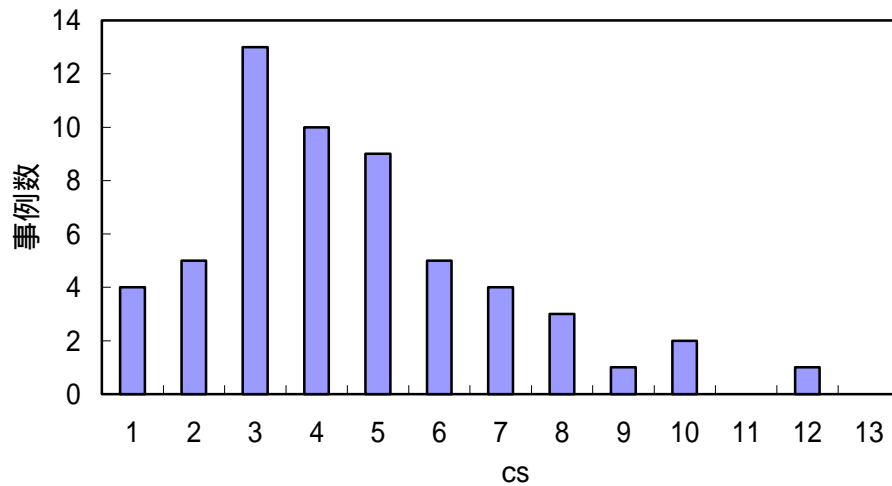


図 3.6 2000 m²以上の事例における補強費用係数 cs の分布

3-3 耐震補強工事事例の評価手法の提案

cs を、耐震補強工事を評価する指標として用い、その大小から工事が効率的であるかどうかを評価する。そのためには cs の大小の基準を設ける必要がある。

そこで、図 3.6 で示された 2000 m²以上の 57 事例について、cs 分布のモデル化を行う。図 3.6 のヒストグラムを確率密度関数で近似したのが図 3.7 である。

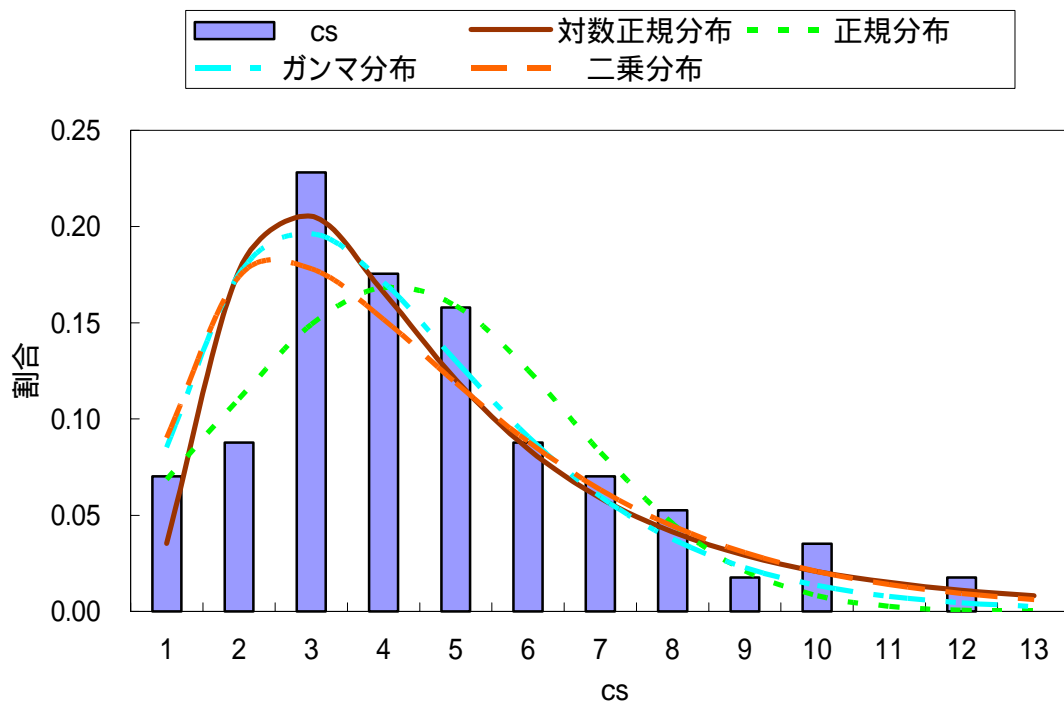


図 3.7 cs ヒストグラムの確率密度関数による近似

これらを比較し、最も近似されている対数正規分布によってモデル化を行うことにする。

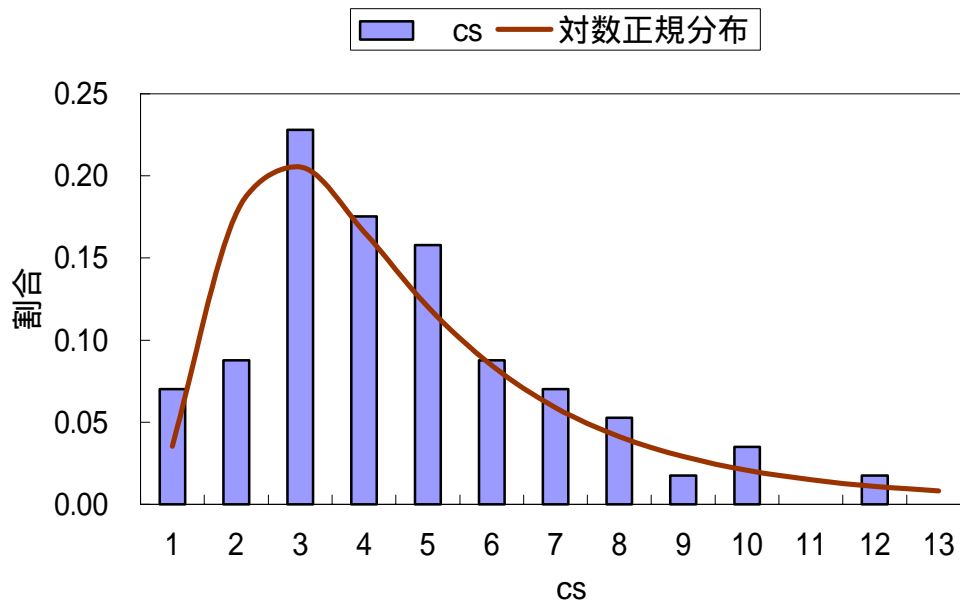


図 3.8 CS ヒストグラムの対数正規分布によるモデル化

以下に対数正規分布の式を示す。

CS の値を x とすると

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta x}} \exp\left\{-\frac{(\log x - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right\} \quad (x > 0)$$

ただし、 $E(x) = \exp(\lambda + \zeta^2/2) = 4.18$ 、 $V(x) = \exp(2\lambda + 2\zeta^2) \{ \exp(\zeta^2) - 1 \} = 2.36$ である。

対数正規分布の累積確率の式は、

$$Q(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta t}} \exp\left\{-\frac{(\log t - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right\} dt$$

となる。

これを用いて、調査した事例から耐震補強工事の効率性を相対的に判断する。効率性指標 $D(x)$ を以下に表す。

$$D(x) = \{1 - Q(x)\} * 10$$

$x - D(x)$ のグラフを図 3.9 に示す。

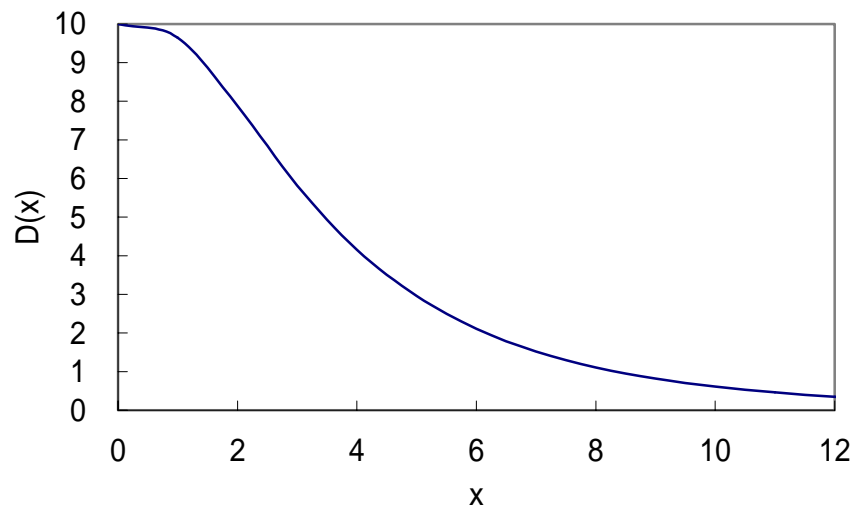


図 3.9 x - D(x)グラフ

D(x)は一般の人にも理解しやすいように、10段階で表された耐震補強工事を評価する判定式である。耐震補強工事に対する認知を上げ、一般の人々が耐震補強工事に対し安心感を持つことは、耐震補強促進の一步となるものである。

これを用いることにより、実際耐震補強工事を行う際にその工事が全体の分布の中でどこに位置しているのかが一目で分かることができる。

3-4 調査事例による評価事例

3-3 で示した指標 $D(x)$ を、調査で得られた事例に当てはめ算出を試みる。
対象として A 小学校について判定を試みる。建物の概要は表 3.3 のとおりである。

表 3.3 A 小学校の建物概要

施設名	A 小学校
構造	RC
階数	4
延床面積 (m^2)	7413
竣工年	S49
補強年	H10
前 Is 値	0.25
後 Is 値	0.78
工事費 (万円)	3550
cs (万円 / $m^2 \cdot Is$)	0.90

この事例の場合、補強費用係数 cs は 0.90 となるので、 $x = 0.90$ とすると $D(x)=9.8$ となる。

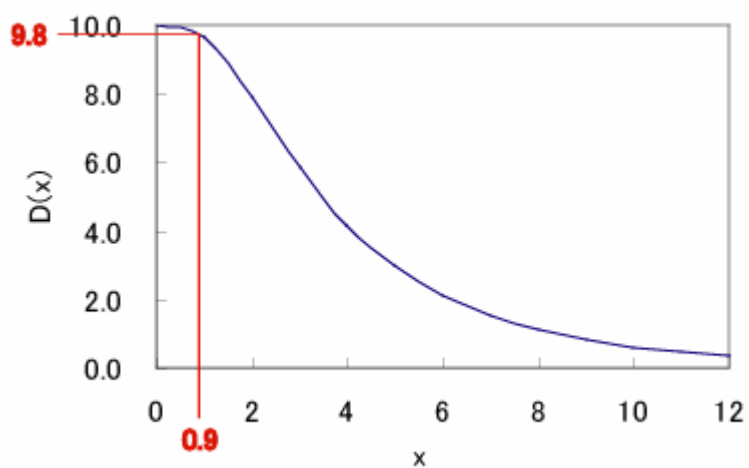


図 3.10 A 小学校の耐震補強工事判定

A 小学校では、 cs が平均の 4.18 よりかなり小さいため、 $D(x)$ は 9.8 という結果になった。これは非常に効率の良い工事と言えるだろう。

同様に B 小学校について判定を試みる。建物の概要は表 3.4 のとおりである。

表 3.4 B 小学校の建物概要

施設名	B 小学校
構造	RC
階数	4
延床面積 (m^2)	4801
竣工年	S44
補強年	H10
前 I_s 値	0.41
後 I_s 値	0.75
工事費 (万円)	5460
cs (万円/ $m^2 \cdot I_s$)	3.34

この事例の場合、補強費用係数 cs は 3.34 となるので、 $x = 3.34$ とすると $D(x)=5.2$ となる。

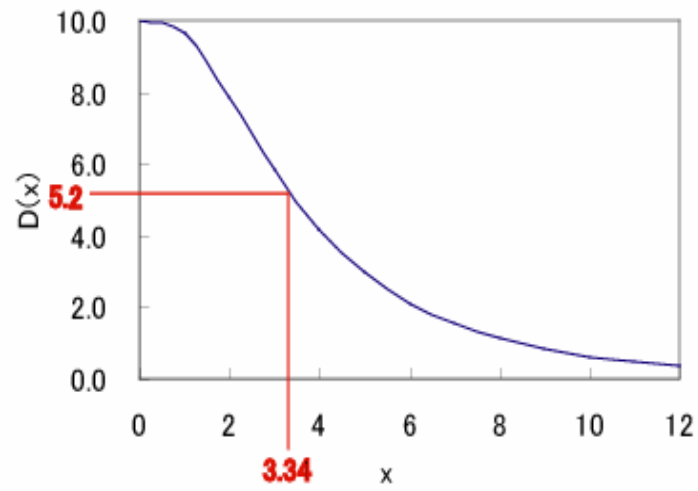


図 3.11 B 小学校の耐震補強工事判定

B 小学校では、 cs が平均とほぼ同じ程度であったため、 $D(x)$ は 5.2 という結果になった。平均的な工事と言えるだろう。

第4章 補強工法による評価

4-1 耐震補強工法の概要

4-2 調査事例の耐震補強工法の分布

4-3 cs と耐震補強工法との関係性

第4章 補強工法による評価

4-1 耐震補強工法の概要

耐震補強工事と一言で言っても、その工法は一つではなくいくつかある。それらの耐震補強工法の中でも、在来工法を以下に示す。ただしどれでも選択できるという訳ではなく、それぞれの工法に長所短所があり、選択できる工法が建物条件により限られる場合が多い。

RC(鉄筋コンクリート)耐震壁

柱と柱の間に RC 壁を新設する工法。または、もともとある RC 壁に対し壁厚を増やす、既存壁増し打ち工法。

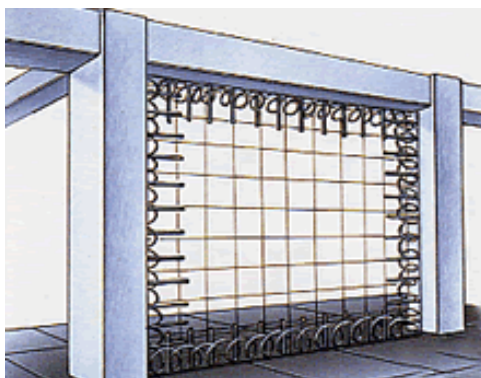


図 4.1 RC 耐震壁

<長所>

- ・ 建物の水平強度を上昇させるのに最も適している。
- ・ 鉄骨ブレースと比較すると安価。

<短所>

- ・ 開口が限定される。(空間機能上障害となる場合がある)
- ・ 重量が大きいため基礎に影響を与える場合がある。

鉄骨ブレース

RC 耐震壁と同様に、鉄骨ブレースを設置する工法。外付けと内付けがある。

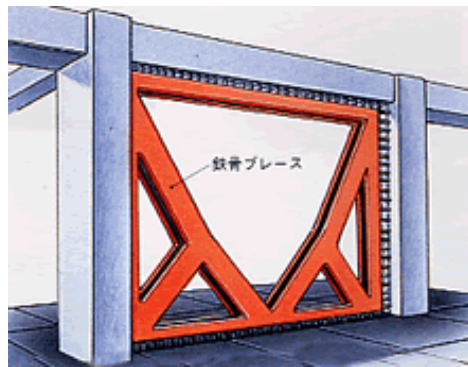


図 4.2 鉄骨ブレース

<長所>

- ・ 高い強度とともに剛性も十分に高くなる。
- ・ 粘りも有り、RC 壁よりは軽い。
- ・ 事前に鉄骨加工が可能であることから、現場施工工期を短縮できる。
- ・ 保有耐力を低下させることなく、適度の大きさの開口を設けることが可能。

<短所>

- ・ 施工が難しく、RC 壁と比べ高価。
- ・ 耐火性及び耐久性について RC 壁よりも劣るので、相応の処理が必要な場合もある。

柱補強

柱の周りに鋼板巻きを施し、コンクリート躯体と鋼板を一体化する工法。

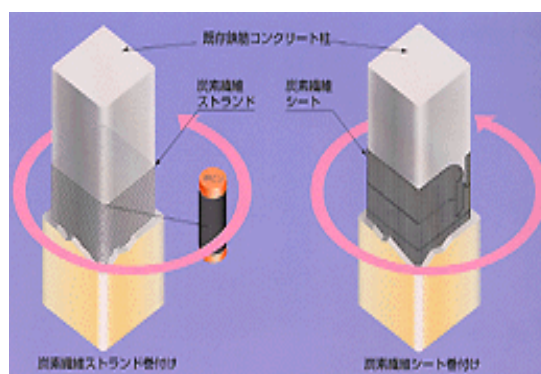


図 4.3 柱補強

<長所>

- ・ 靱性を高めることが出来る。

<短所>

- ・ 多くの柱を補強する必要があり、大掛かりとなる。

構造目地(スリット)

ラーメン架構に垂れ壁や腰壁がつくと、柱の内包高さが短くなり短柱とみなされてしまう。垂れ壁、腰壁によって変形を拘束されるため、それらが無いラーメンよりも剛性が増し、地震力が集中して先に破壊してしまう。そのため柱と垂れ壁、腰壁の間にスリットを入れ、短柱を回避する工法である。

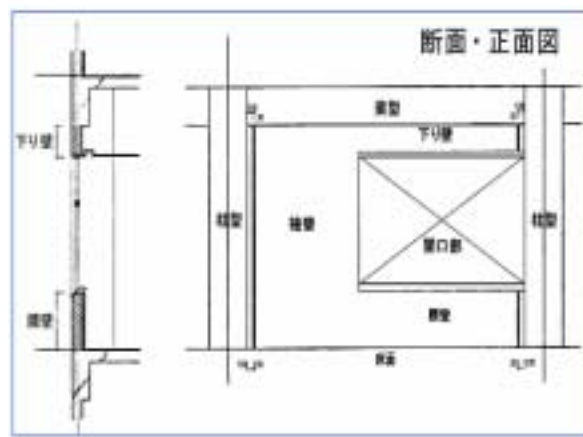


図 4.4 構造目地(スリット)

<長所>

- ・ 極脆性柱を解消する。
- ・ せん断破壊型の柱を曲げ破壊型に改善する。
- ・ 独立柱の形態に改善し、変形能力を高める。

<短所>

- ・ 工事が簡単のため安易に行われる可能性があり、工事管理に要注意。
- ・ 靱性は向上するものの、耐力は減少することに注意が必要。

これらの耐震補強工法の効果と費用に関してまとめると、表 4.1 のようになる。つまり、強度を上げるには RC 壁補強、鉄骨ブレースが有効で、靱性を上げるには柱補強、スリットが有効ということだ。

表 4.1 耐震補強工法ごとの特性

補強方法	強度の増加	靱性の増加	補強工事費
鉄骨ブレース	可	可	高価
RC 壁補強	適	不可	普通
柱補強	不可	適	普通
スリット	不可	適	安価

また、費用に関して岡田らは耐震補強計画案概算費用算出に用いられている積算資料より概算耐震補強費を求めた。その結果を表 4.2 に示す。これについては本研究でも 4-3 で今回の調査事例と比較検討を行っている。

表 4.2 概算耐震補強費

鉄骨ブレース	350 万円 / ケ所
RC 壁補強	150 万円 / ケ所
柱補強	40 万円 / ケ所
構造目地(スリット)	10 万円 / ケ所

4-2 調査事例の耐震補強工法の分布

調査した事例(2000 m²以上)のうち、工法のわかる事例は 43 事例あった。多くは単一の工法のみを採用するのではなく、複数の工法を選択し採用している。下に事例数、箇所数、単位面積あたりの箇所数を示す。複数の工法を選択しているため、それぞれ延べ数になっている。

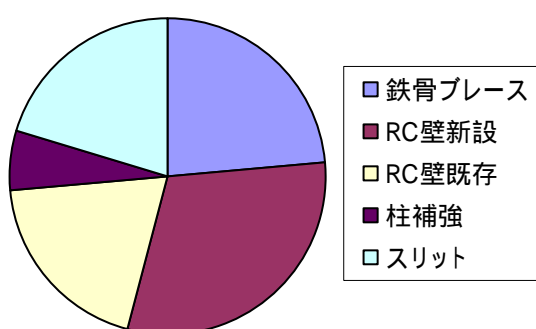


図 4.5 事例数

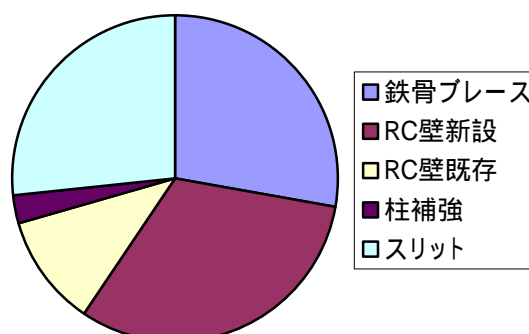


図 4.6 箇所数

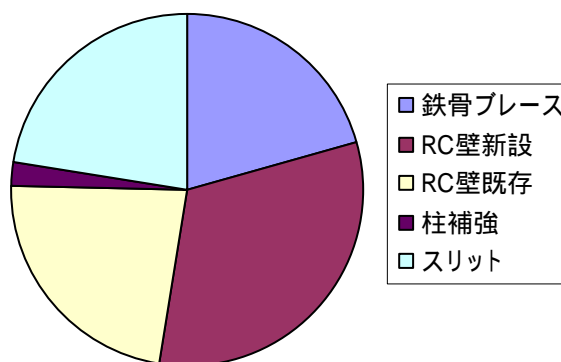


図 4.7 単位面積あたりの箇所数

図 4.5 ~ 4.7 より、RC 壁による補強が多く選択されていることがわかる。特に単位面積あたりの箇所数となると、RC 新設・既存を合わせると半分以上を占めている。また、鉄骨ブレース・RC 壁新設・RC 壁既存の強度をあげる工法が多く選択されている。

4-3 cs と耐震補強工法との関係性

調査事例で単一の工法を採用している事例が少ないため、明確な比較が難しい。単一工法で行った事例数としては、鉄骨ブレースのみで補強を行った事例が7例、RC壁新設のみで行った事例が1事例、スリットのみで補強を行った事例が2例あった。

そこで単一工法で行った事例のうち、鉄骨ブレースとスリットの事例の、cs と単位面積あたりの箇所数との関係を示す。

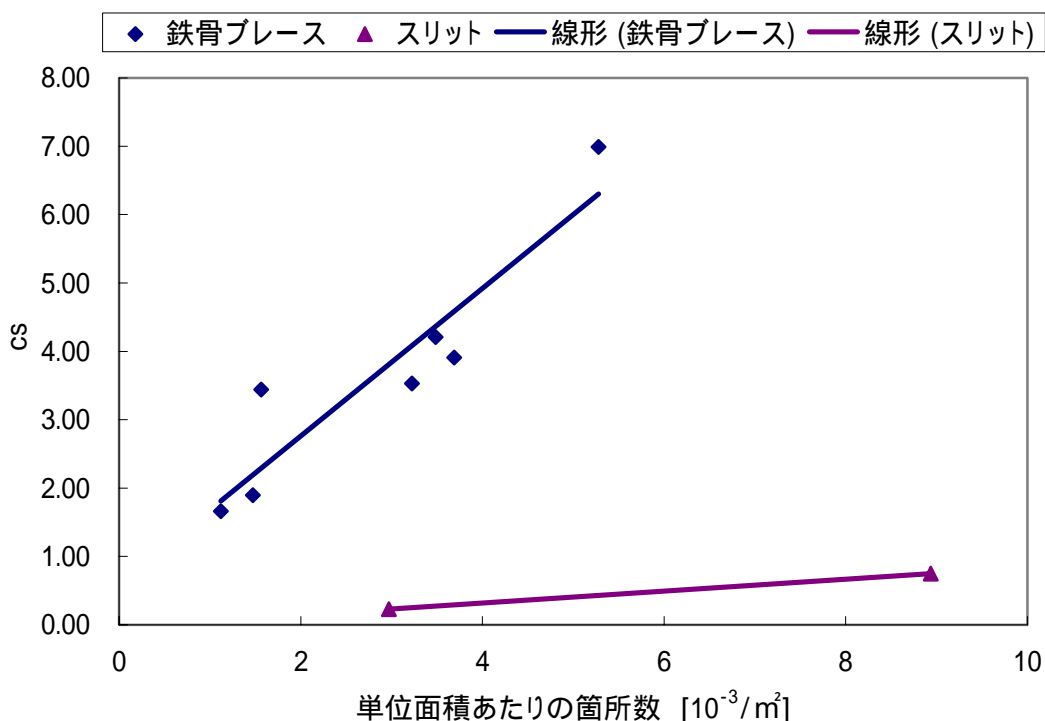


図 4.8 単一工法による事例における cs と単位面積あたりの箇所数との関係

スリットにより補強された事例については2例しかないので言及できないが、図 4.8 より鉄骨ブレースによる事例では、cs と単位面積あたりの箇所数との間に一次相関が見られた。

また、2例しかないがスリットでも一次相関が言えると仮定すれば、鉄骨ブレースよりもスリットのほうが、単位面積あたりの箇所数を増加させても cs は大きくならないと言える。

また、これら単一工法による事例について箇所数による概算補強費用を求めるため、箇所数と補強費用の関係を下に示す。

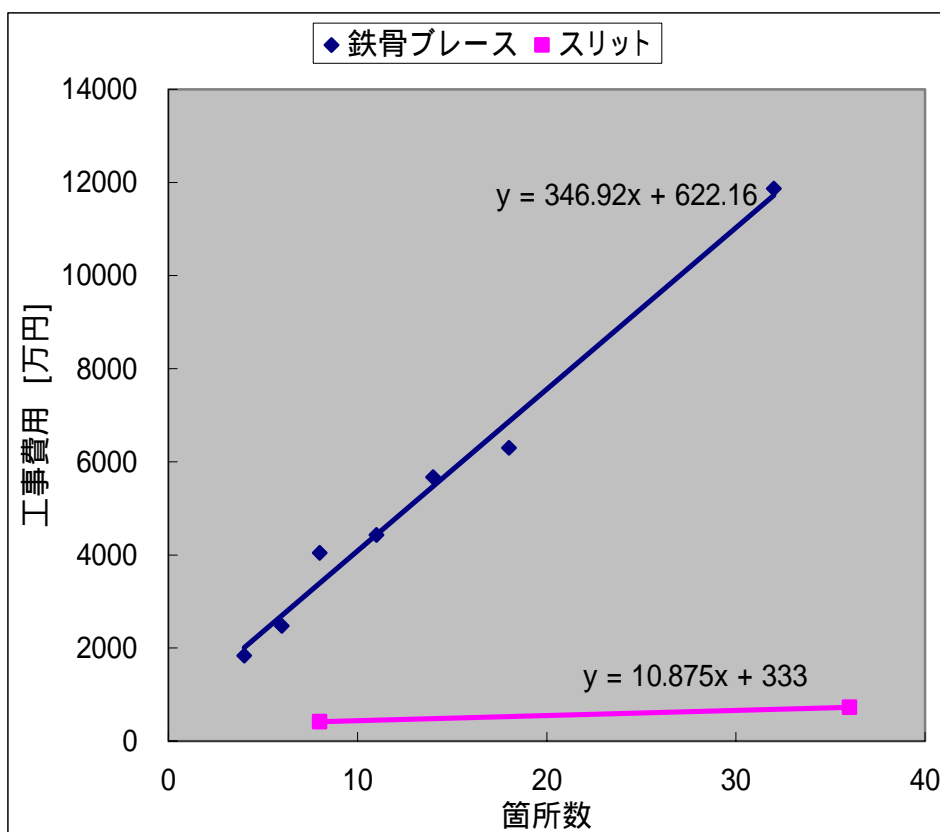


図 4.9 単一工法による事例の箇所数と補強費用の関係

図 9 より、鉄骨ブレースの平均概算補強費は 347 万円 / 箇所、スリット補強の平均概算補強費は 10.9 万円 / 箇所となる。これは、表 4.2 で示した概算補強費の値とほぼ同じ結果となった。

また、これらの事例について単位面積あたりの箇所数と補強前後の I_s 値増加分の関係を下に示す。ただし、事例数が多い鉄骨ブレースについてのみ行った。単位面積あたりの箇所数を増やせば、それに応じた分 I_s 値は増加するものと予想される。

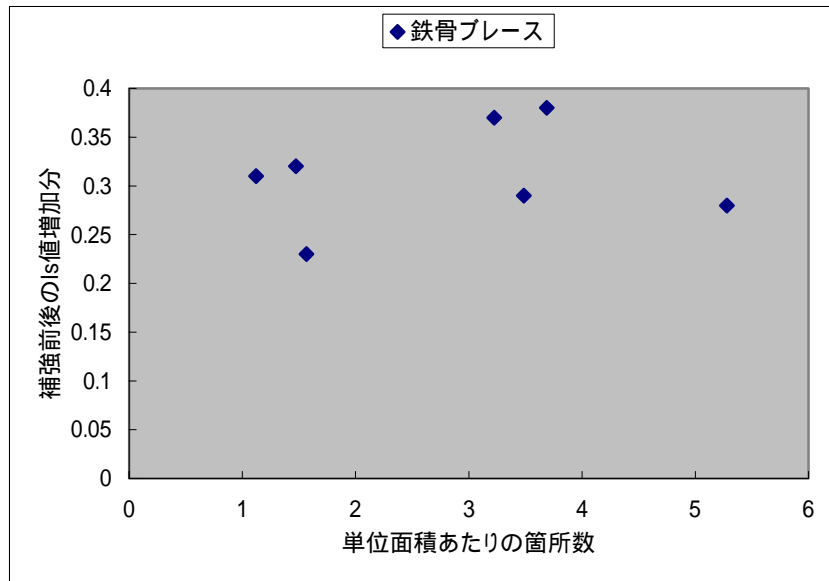


図 4.10 単位面積あたりの箇所数と補強前後の Is 値増加分の関係

しかし予想と反して、単位面積あたりの箇所数を増加しても明確な Is 値の増加は確認できない。このことに関する考察は、第 5 章の 5-4 に示す。

次に複数の工法を選択している事例について検討する。

複数の工法を用いている事例の中から工法ごとに分類するため、4-1 で示した概算耐震補強費を用いる。全ての事例において、その概算耐震補強費の割合で工法ごとの補強費が成り立っていると仮定する。

まず、各工法の単位面積あたりの箇所数に概算耐震補強費を乗じ、費用の重み付けを行う。次に、その重み付けされた単位面積あたりの箇所数の比によって c_s をわかる。

こうして工法ごとに c_s をわけたものを用い、 c_s と単位面積あたりの箇所数との関係を図 4.11 に示す。

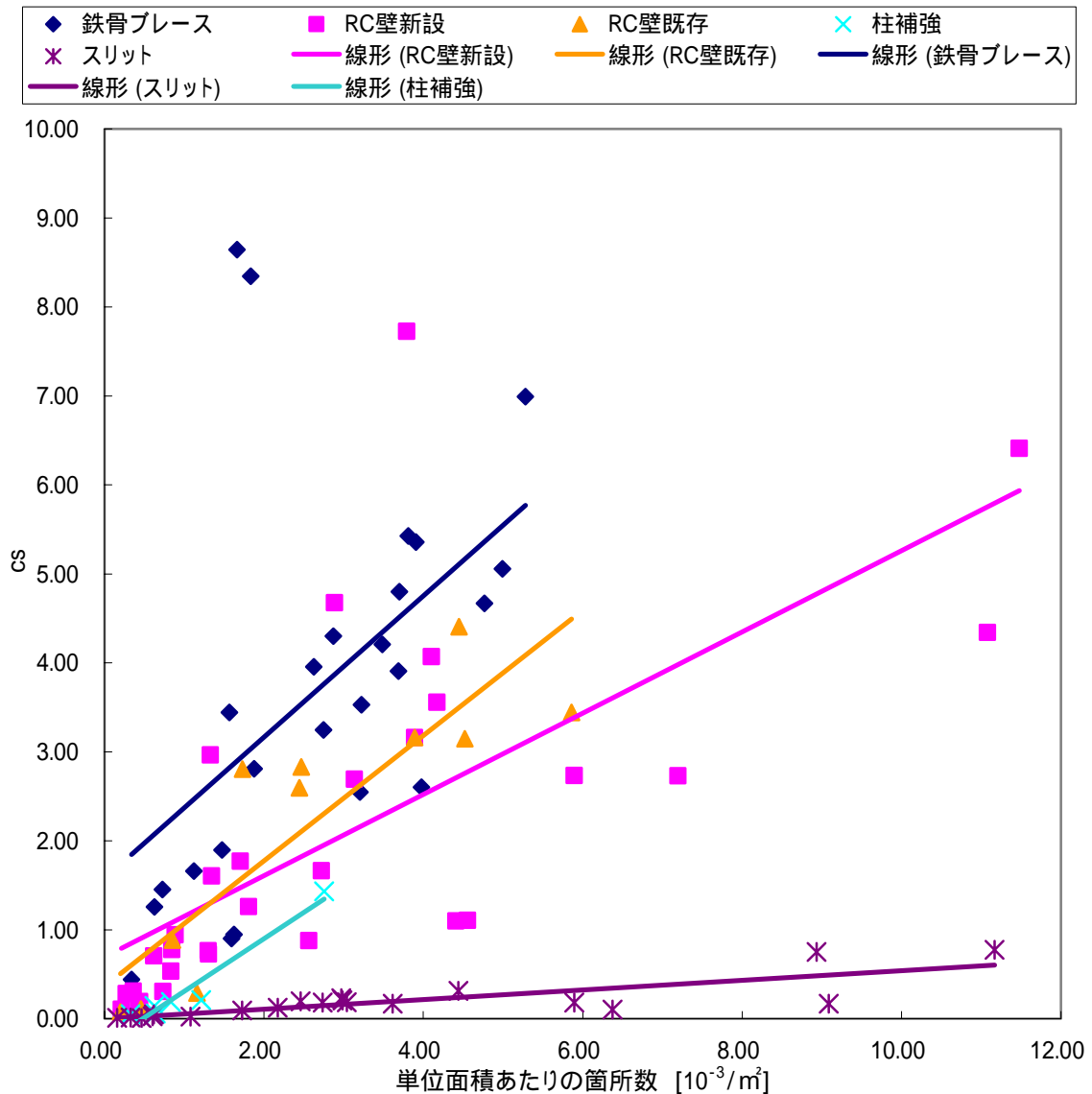


図 4.11 複数工法による事例も含めた全ての c_s と単位面積あたりの箇所数との関係

複数工法を含めると、RC 壁新設補強については大きくばらつきがでてしまった。しかし、スリット、RC 壁既存、鉄骨ブレースについては強い一次相関が見られた。また、柱補強については、事例数が少ないため言及することが少し難しいが、大体の傾向はつかめた。

この結果、単位面積あたりの箇所数を増やすことにより c_s が大きく増大する、つまりより耐震補強工事の効率が悪くなるのが鉄骨ブレースであり、次に RC 壁新設、既存、柱補強が同じ程度で続き、スリットが最も c_s が増加しにくいということがわかった。

第5章 個別事例の評価と分析

5-1 cs の小さな事例の評価

5-2 鉄骨ブレースと RC 壁による補強事例の評価

5-3 cs の大きな事例の評価

5-4 考察

第5章 個別事例の評価と分析

5-1 cs の小さな事例の評価

対象として、第3章で耐震補強工事の判定を行った事例のA小学校を扱う。

表 5.1 A 小学校の建物概要

施設名	A 小学校
構造	RC
階数	4
延床面積 (m ²)	7413
竣工年	S49
補強年	H10
前 Is 値	0.25
後 Is 値	0.78
工事費 (万円)	3550
cs(万円/m ² ・Is)	0.90
D(x)	9.8

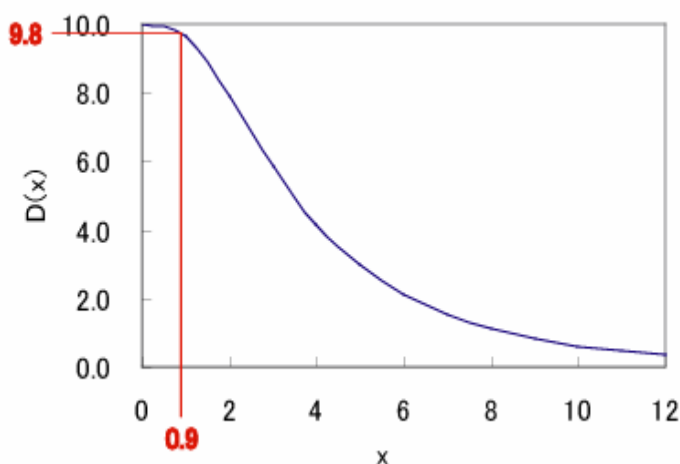


図 5.1 A 小学校の耐震補強工事判定

建物はL字型のため、エキスパンションジョイントを設けA棟B棟の2棟として計算を行った。診断結果、A棟のY方向とB棟のX方向それぞれ全ての階のIs値がIso値に及ばなかった。A棟B棟ともに、問題があるとされる方向とは逆の方向にも脆性部材が存在するが、どれも直交壁が存在するので解消される。壁量は十分にあるため補強されなかった。問題とされた方向では、耐震壁、雑壁などが極めて少ない、という結果になった。

補強方法としては、A棟にはRC増設壁の増設、B棟にはRC増設壁の増設とスリットを設けた。補強数は合わせて、RC壁新設が19箇所、スリットが8箇所となった。

延床面積が大きいのに壁が少ないということで、壁を一枚入れることがIs値に対し大きく影響を与え、19箇所効果的に補強することが出来た結果と考えられる。

5-2 鉄骨ブレースと RC 壁による補強事例の評価

第 3 章で耐震補強工事の判定対象とした B 小学校を扱う。

表 5.2 B 小学校の建物概要

施設名	B 小学校
構造	RC
階数	4
延床面積 (m ²)	4801
竣工年	S44
補強年	H10
前 Is 値	0.41
後 Is 値	0.75
工事費 (万円)	5460
cs(万円/m ² ・Is)	3.34
D(x)	5.2

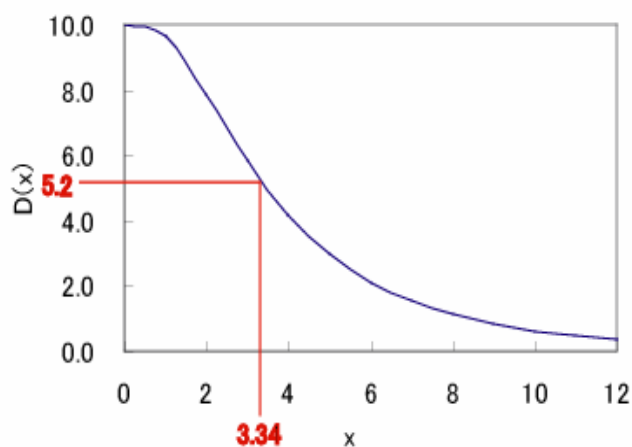


図 5.2 B 小学校の耐震補強工事判定

B 小学校も建物は L 字型で、A 棟 B 棟に分けて診断された。結果、A 棟の X 方向と B 棟の X 方向(4 階を除く),Y 方向(3,4 階を除く)の Is 値が Iso 値に及ばなかった。

その結果、補強数は鉄骨ブレースが 9 箇所、RC 壁新設が 4 箇所となった。

D(x)が 5.2 と平均あたりということで、耐震補強として平均的な事例ということができらう。

同様に鉄骨ブレースと RC 壁で補強された事例として、C 中学校を扱う。

表 5.3 C 中学校の建物概要

施設名	C 中学校
-----	-------

構造	RC
階数	4
延床面積 (m ²)	4593
竣工年	S36
補強年	H11
前 Is 値	0.35
後 Is 値	0.71
工事費 (万円)	9135
cs(万円/m ² ・Is)	5.52
D(x)	2.5

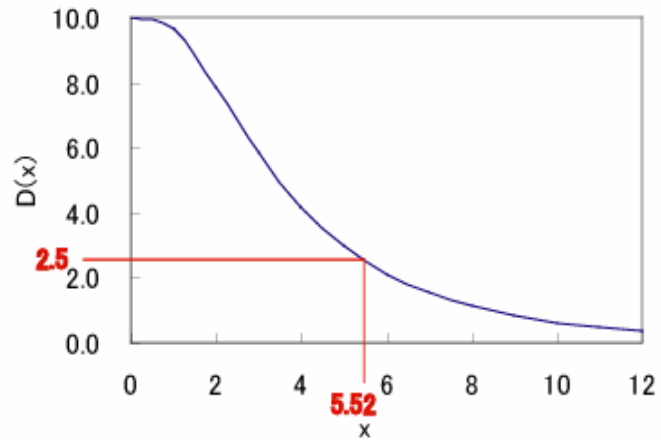


図 5.3 C 中学校の耐震補強工事判定

C 中学校も L 字型となっており、A 棟 B 棟に分けて診断された。結果、A 棟の X 方向(3,4 階を除く)、B 棟の Y 方向(4 階を除く) の Is 値が Iso 値に及ばなかった。

その結果、補強数は鉄骨ブレースが 17 箇所、RC 壁新設が 6 箇所となった。

しかし、D(x)が 2.5 と小さくなったのは、B 小学校と比較し面積・補強による Is 値増加分が同じ程度なのに対して、補強数が 2 倍近くになっていることが原因である。その理由としては、もともとせん断破壊型だった建物を、補強により曲げ破壊型に変えていることが考えられる。それに対し B 小学校では、補強前後ともに曲げ破壊型である。

つまり、Is 値は同じ値でも、破壊型を変えようとする補強量が多くなり、結果 D(x)が小さくなるのである。

5-3 cs の大きな事例の評価

cs の大きな事例として、D 小学校を扱う。

表 5.4 D 小学校の建物概要

施設名	D 小学校
構造	RC
階数	3
延床面積 (m ²)	3071
竣工年	S34
補強年	H12
前 Is 値	0.34
後 Is 値	0.83
工事費 (万円)	14490
cs(万円/m ² ・Is)	9.63
D(x)	0.7

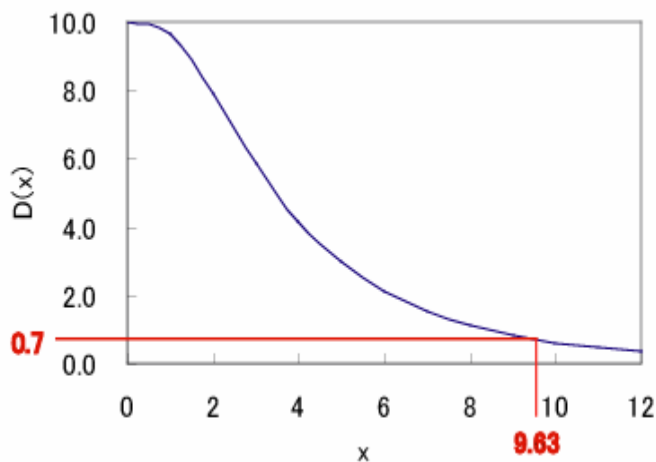


図 5.4 D 小学校の耐震補強工事判定

建物は L 字型のため、エキスパンションジョイントを設け A 棟 B 棟とわけ診断を行った。その結果、A 棟の X 方向(3 階を除く)と B 棟の X(3 階)、Y 方向(2 階)の Is 値が Iso 値に及ばなかった。

さらに、A 棟の一部のコンクリート強度が十分でなかったため、一部を解体撤去とした。そのため、建物解体工事費用が上乘せされているため、工事費が多大なものなり cs が大きくなっている、ということが分かった。

補強数は鉄骨ブレースが 12 箇所、RC 壁新設が 4 箇所、RC 壁そで壁が 18 箇所、柱補強が 1 箇所、スリットが 1 箇所となった。

5-4 考察

まず、5-2 で述べたように同じような工法を選択し I_s 値も同程度の値でも、破壊型を変えようとすると補強量が多くなり、結果見た目では同じ補強事例だとしても耐震補強工事判定式 $D(x)$ は大きく異なることがわかった。また、建物条件により選択できない場合も多いが、スリットを効果的に用いた事例で $D(x)$ が大きくなることもわかった。そして $D(x)$ がとても小さくなる事例では、解体工事など他の費用が含まれている場合もあることがわかった。これは、第 4 章において単位面積あたりの箇所数と cs のグラフで大きく外れている事例(cs が飛びぬけて大きいもの)に当てはまる。

そもそも、このように cs の値に大きくなばらつきが出る原因とは、第 4 章で示した図 4.10 のように単位面積あたりの箇所数を上げて、補強前後の I_s 値増加分が対応していないからである。この原因として下記のようなことが考えられる。

- ・ I_s 値が対象建物の各階ごと、X,Y 方向ごとに計算されているため、補強の必要な階、方向の数により必要な補強箇所数が変わってくるから
- ・ 建物の破壊型を、せん断破壊型 曲げ破壊型と変える場合と、曲げ破壊型 曲げ破壊型と同じ場合とでは、同じ I_s 値でも保有性能基本指標 E_0 の計算の中で選択する値が異なるため、補強数が異なる。破壊型が同じ場合の方が少なく、変える場合の方が多くの補強が必要となる。
- ・ 鉄骨ブレースや RC 壁など一括りにしているが、実際はそれぞれ性能の高低はあるだろう。

第6章 結論

第6章 結論

本研究により、実際の工事事例を用いて耐震補強工事の評価手法を提案し、そこから工法ごとのコストと効果の実態が明らかになった。その分析により判明したのは、補強効果には複雑な建物条件が関係するため、単に補強費用を上げることにより一意的に I_s 値の増加分が定まるのではない、ということである。そこから I_s 値という一つの指標で示すことの出来る限界を感じ、さらに細かく言及しなければ補強工事を理解することはできないとわかった。

以下に各章の結論を示す。

第 3 章では、耐震補強工事の指標である補強費用係数 cs は一意に決まらないものではないことがわかった。そこで cs の分布をモデル化し、実際の耐震補強工事事例が全体の中でどの位置にあるのかを、一般の人でもわかりやすい 10 段階評価により表した。

第 4 章では、補強費用係数 cs のばらつきの大きな原因と考えられる補強工法について事例分析を行い、工法と cs の関係を示した。その結果、工法ごとの単位面積あたりの箇所数と cs が一次相関となっていることがわかった。

第 5 章では、単位面積あたりの箇所数と補強前後の I_s 値増加分が比例しない原因を探った。各事例で条件が異なるため定量的な判断によるものではないが、各事例を細かく調査することで考察を行った。結果、以下のような原因があると考えられた。

- ・ I_s 値が対象建物の各階ごと、X,Y 方向ごとに計算されているため、補強の必要な階、方向の数により必要な補強箇所数が変わってくるから
- ・ 建物の破壊型を、せん断破壊型 曲げ破壊型と変える場合と、曲げ破壊型 曲げ破壊型と同じ場合とでは、同じ I_s 値でも保有性能基本指標 E_0 の計算の中で選択する値が異なるため、補強数が異なる。破壊型が同じ場合の方が少なく、変える場合の方が多くの補強が必要となる。
- ・ 鉄骨ブレースや RC 壁など一括りにしているが、実際はそれぞれ性能の高低はあるだろう。

謝辭

謝辞

修士論文を提出するにあたり、お世話になった方々にこの場を借りてお礼申し上げます。

主査の神田順教授にはこの2年間の研究室生活全般にわたりお世話になりました。なかなか研究が進まない自分を叱咤激励していただき、最後までご指導いただけたことに感謝の気持ちでいっぱいです。原田昇教授には、お忙しい中本論文の副査として時間を割いていただき、他分野を専門とされている立場からの貴重なご意見をいただきました。ほんとうにありがとうございます。高田毅士教授、崔恒助教授、岩崎良二助手のお三方には研究室内でたくさんの助言をいただき、大変感謝をしております。清家剛助教授にブラッセルズでいただいた助言には、先が見えず不安だった私にとってとても助かりました。ありがとうございました。

そして、神田・高田・崔研究室の方々には大変お世話になりました。特に研究を始め多くのことを教えてくださった、廣瀬さん、野口さんにはとても感謝しています。また、高橋さんをはじめ11号館のみなさんのおかげで楽しい研究室生活が送れました、ありがとうございました。おいしい紅茶を入れてくれた大淵君、ご馳走様でした。そして、ともに修士の二年間を過ごした、菅野君、西川君、畑さんにはとてもお世話になりました。

その他、研究にご協力いただいた皆様にお礼を申し上げます。

参考文献

参考文献

<論文>

- ・ 廣瀬 隆治：「期待損失費用を考慮した既存 RC 造建築物の耐震補強に関する研究」
東京大学大学院,修士論文 2004.3
- ・ 岡田 裕：「鉄筋コンクリート造学校建築の耐震性能と耐震補強費用効果」日本建築
学会大会学術講演梗概集 P511-512 2004.8
- ・ 諏訪 仁：「兵庫県南部地震における建物の補修費用に関する統計的評価」日本建築
学会大会構造工学論文集 P149-154 2004.3
- ・ 吉村 美保：「既存建物の耐震補強に対する費用対効果に関する地震予知情報の利用
法」生産研究 53 巻 11・12 号 P16-20 2001.11
- ・ 中埜 良昭：「日本における鉄筋コンクリート造建築物の耐震補強工法の現状」生産
研究 46 巻 4 号 P16-21 1994.4
- ・ 藤井 賢志：「既存鉄筋コンクリート造公共建築物の耐震補強に関する事例分析」生
産研究 52 巻 12 号 P48-51 2000.12

<書物>

- ・ 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診断基準」
- ・ 建設省建築研究所 広沢雅也・山崎裕：「復旧事例にみる耐震診断補強設計の実務」
- ・ 上野 嘉久：「構造計算書で学ぶ鉄筋コンクリート構造」
- ・ 建築耐震設計者連合：「性能時代の建築リノベーション」
- ・ 鹿島都市防災研究会：「耐震診断と補強・補修」

<雑誌>

- ・ 建築技術：「既存 RC 造建物の耐震診断と耐震補強技術」 1995.9
- ・ 建築技術：「既存 RC 造建物の新しい耐震診断と補強」 2004.5

<インターネット>

- ・ 建物の構造性能評価 <http://ssweb.k.u-tokyo.ac.jp/>
- ・ 東武建築企画 <http://www1.ocn.ne.jp/~tobukk/TAISIN/kouhou1.html>
- ・ 内閣府防災担当
http://www.bousai.go.jp/kinkyu/041023jishin_niigata/jishin_niigata_51.pdf
- ・ 日本テレビ <http://www.ntv.co.jp/tokuso/main/20040221.html>
- ・

付録

・調査事例のうち、2000 m²以上の補強事例一覧

	構造	階数	延床面積(m ²)	竣工年	補強年	前 Is 値	後 Is 値	工事費(万円)	万円/m ² ・Is
1	RC	4・0	2314	S44	H10	0.25	0.77	7718	6.41
2	RC	4・0	2346	S44	H9	0.2	0.84	4295	2.86
3	RC	4・1	2693	S36	H10	0.24	0.92	420	0.23
4	RC	4・0	2924	S35	H10	0.21	0.77	14175	8.66
5	RC	4・0	2962	S36	H12	0.43	0.74	6289	6.85
6	RC	4	2982	S34	H8	0.38	0.76	4429	3.91
7	RC	4・0	3009		H12	0.49	0.73	8382	11.61
8	RC	3	3071	S34	H12	0.34	0.83	14490	9.63
9	RC	4・0	3242	S42	H11	0.28	0.75	5460	3.58
10	RC	4・0	3249		H9	0.3	0.91	8606	4.34
11	RC	5・0	3318	S34	H9	0.2	0.75	8348	4.57
12	RC	3・1	3427	S39	H11	0.52	0.75	6090	7.73
13	RC	4・1	3467	S40	H11	0.29	0.71	10889	7.48
14	RC	3	3570	S38	H12	0.46	0.77	1838	1.66
15	RC	3	3672	S30	H9	0.68	0.77	350	1.06
16	RC	4	3674	S46	H12	0.5	0.75	6510	7.09
17	RC	3	4029	S30	H9	0.49	0.73	724.5	0.75
18	RC	3	4076	S33	H8	0.49	0.81	2472	1.90
19	RC	5	4310	S49	H9	0.35	0.77	4239	2.34
20	RC	3	4342	S36	H12	0.39	0.76	5670	3.53
21	RC	3	4357	S34	H13	0.59	0.77	7665	9.77
22	RC	4	4392	S50	H9	0.32	0.76	4295.6	2.22
23	RC	3	4470	S50	H9	0.57	0.78	1690.5	1.80
24	RC	4・0	4503	S42	H10	0.28	0.73	7812	3.86
25	RC	4	4593	S36	H11	0.35	0.71	9135	5.52
26	RC	4	4682	S40	H8	0.39	0.87	6180	2.75
27	RC	4	4734	S45	H9	0.27	0.72	7140	3.35
28	RC	5・1	4793	S37	H10	0.54	0.77	4130.5	3.75

29	RC	4	4801	S44	H10	0.41	0.75	5460	3.34
30	RC	3·1	4953	S42	H16	0.5	0.71	4330	4.16
31	RC	5	5004	S50	H10	0.32	0.75	6040.1	2.81
32	RC	5	5090	S49	H10	0.25	0.75	7418.8	2.92
33	RC	5	5111	S56	H14	0.6	0.83	4044.9	3.44
34	RC	3	5164	S36	H9	0.42	0.71	6300	4.21
35	RC	3	5283	S33	H11	0.34	0.93	8642	2.77
36	RC	4	5457	S37	H13	0.51	0.8	7875	4.98
37	RC	5·1	5527	S54	H14	0.32	0.77	4698.9	1.89
38	RC	5	5919	S53	H11	0.25	0.75	2856	0.97
39	RC	4	6061	S34	H11	0.48	0.76	11865	6.99
40	RC	4	6380	S46	H9	0.37	0.76	10198.6	4.10
41	RC	4	6620	S43	H10	0.41	0.74	9450	4.33
42	RC	4	6811	S37	H13	0.43	0.75	11438	5.25
43	RC	4	7413	S49	H10	0.25	0.78	3549.7	0.90

44	RC	3·0	4133			0.48	0.96	5041	2.54
45	RC	4·0	3812	S40	H9	0.27	0.81	5450	2.65
46	RC	4·0	5016			0.26	0.75	6589	2.68
47	RC	4·0	3748			0.41	0.79	3965	2.78
48	RC	3·0	4328			0.41	0.8	7509	4.45
49	RC	3·0	4180			0.44	0.76	6510	4.87
50	RC	3·0	5341			0.38	0.79	12540	5.73
51	RC	3	1199	S48	H11	0.42	1.26	1838.6	1.83
52	RC	4	5548	S39	H8	0.34	0.95	12987.1	3.84
53	RC	4	4065	S33	H12	0.3	0.61	6824.1	5.42
54	RC	3	4604	S39	H8	0.13	0.75	9156.8	3.21
55	RC	3	4923	S37	H8	0.47	0.71	7376.8	6.24
56	RC	3	4237	S38	H12	0.28	0.71	4738.9	2.60
57	RC	4	4117	S33	H7	0.12	0.61	5644.1	2.80
58	RC	4	5013	S34	H10	0.35	0.72	11088.6	5.98

・選択された補強工法一覧

	延床面積(m ²)	鉄骨ブレース	RC壁新設	RC壁既存	柱補強	スリット
	単位面積あたりの箇所数(10 ⁻³)					
1	2314	0	3.889	3.889	0	1.7286
2	2346	0	1.705	0.853	0	2.9838
3	2693	0	0	0	0	2.9707
4	2924	0	4.104	4.446	0	2.736
5	2962	0.33761	11.48	0	0	0
6	2982	3.68865	0	0	0	0
7	3009	1.66161	1.329	0	0	0
8	3071	3.90743	1.302	5.861	0.326	0.3256
9	3242	0	0.617	2.468	0	0.6169
10	3249	0	11.08	0	0	0
11	3318	0	1.808	4.521	0	3.6166
12	3427	0	3.793	0	0	0
13	3467	0	2.884	1.731	0	0
14	3570	1.1205	0	0	0	0
15	3672	0	0.272	0	0	11.166
16	3674	3.81073	2.722	0	0	0
17	4029	0	0	0	0	8.9352
18	4076	1.47196	0	0	0	0
19	4310	1.62413	4.408	1.16	0	0.464
20	4342	3.22397	0	0	0	0
21	4357	1.83624	0	0	2.754	0
22	4392	1.59381	4.554	0.455	0	6.3752
23	4470	0	1.342	0	0	2.4609
24	4503	0	0.888	2.443	0	4.4415
25	4593	3.70112	1.306	0	0	0
26	4682	3.20385	0.427	0	0.641	0
27	4734	2.74611	0.211	0	0	0
28	4793	0	4.173	0	0.835	0

29	4801	1.87464	0.833	0	0	0
30	4953	2.62467	0	0	1.211	0
31	5004	0	7.194	0.2	0	0
32	5090	0	5.894	0	0	5.8939
33	5111	1.56525	0	0	0	0
34	5164	3.48576	0	0	0	0
35	5283	3.97532	0	0	0	9.0865
36	5457	4.76433	0.733	0	0	0
37	5527	0.72372	0.362	0	0	2.1712
38	5919	0	0.845	0	0	3.0411
39	6061	5.27937	0	0	0	0
40	6380	0.62696	3.135	0	0.627	0.1567
41	6620	2.87012	0	0	0	0.6042
42	6811	4.99173	0.44	0	0	0
43	7413	0	2.563	0	0	1.0792