

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

The Seismic Capacity and the Effect of Seismic Strengthening Cost of Reinforced Concrete School Buildings

高橋 純一 ・ 岡田 裕*

Junichi TAKAHASHI ・ Yutaka OKADA

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震は、過去に経験したことのない甚大な被害をもたらした。それ以後、全国において昭和56年建築基準法施行令改正（新耐震設計基準）以前に設計された建物、特に公共建物を中心に耐震診断が行われるようになった。

しかし、文部科学省が平成14年春に実施した全国調査によると、学校の耐震診断実施率は30.8%^{1) 2)}と低い値を示している。栃木県においてはそれを大きく下回る13%で、耐震化対策の遅れが懸念される状態となっている。耐震化が進まない理由としては、耐震診断及び改修工事に費用が必要であることが要因となっていると考えられる。

本研究は、栃木県内の学校建築の「耐震診断基準」^{3) 4) 5)}による耐震診断結果・補強計画の資料を用いて、

- (1) 既存建物の耐震性能分布
 - (2) 補強後建物の耐震性能分布
 - (3) 再建築費に対する補強費用効果
- 等について検討を行っている。

2. 耐震診断

日本の建物は、世界の他の地震国の建物に比べかなり耐震安全性が高いために、震度5程度の地震ではほとんど被害は生じない。しかし、兵庫県南部地震のような震度7という大きな地震がいつ起こるか分からない。同地震による被害は、死者6,432人、行方不明者3人、

負傷者44,000人余り、建物被害総数約52万棟にも及んだ。⁶⁾

しかし、兵庫県南部地震において、軽微な被害で済んでいる建物もある。建物の耐震安全性に差があるのは、耐震技術の進歩とそれに裏付けされた耐震規定の変遷ならびに建築物の大型化の進展が原因となっている。表1に近年における主な地震と耐震規定の変遷を要約して示す。太字で示しているものが、現在日本の各種構造の耐震性能に大きく影響している地震および関連規定である。

それではなぜ、既存建物の耐震診断を行わなければならないか。それは、強い地震動に対して顕著な被害を受ける可能性のある建物が多いからである。現在の耐震規定に不適格な建物が現存しているからである。そのような建物を、現在の耐震規定に近づけようとするのが耐震診断および補強設計である。

耐震診断基準で対象としている建物は、一般の5、6階建以下の既存鉄筋コンクリート造建物であり、対象建物の構造自体に関する診断方法と、外壁を中心とする非構造部材に関する診断方法とから成り立っている。なお、両者の診断方法は、簡便な1次診断から、より高度な3次診断までの3つの方法が用意されている。

耐震診断基準は、対象建物の強度と変形性能をできる限り正確に評価することにより、どのくらいの大きさの地震動に耐え得るかを判断する手法である。診断の結果は耐震性能

を表す連続量で表現されるが、その結果に対する判定については、建物の用途に応じ、規定される地震被害の個人および社会に対するインパクトを考慮して、本基準を用いる者が判定を行うこととしている。

耐震診断基準の特徴は、以下の通りである。

- ① 建物の構造躯体に加えて、仕上材など2次部材の診断方法も含まれている。
- ② 多数の建物を簡単に診断する1次診断から、詳細な検討による3次診断までのふり分け方法になっており、どの診断次数からでも始められる。
- ③ 診断結果は総合的に判断された耐震性能の優劣を表す連続量の指標（1つの数値：構造耐震指標 I_s ）で表される。
- ④ 診断結果に対する判定については法規定がないため判定者に任されている。しかし、安全と判定するための推奨値が基準に記されており、公共建物の判定は概ねこれによって行われている。この場合の目標とする地震動の強さは、1968年十勝沖地震程度であり、1923年の関東大地震よりやや弱い。
- ⑤ I_s 指標は、副指標として部材強度および靱性から定まる保有性能基本指標 E_b に

加え、建物形状や部材配置などの耐震的なバランスの良否による形状指標 S_D および構造の経年劣化を評価する経年指標 T を考慮のうえ、算出される。

- ⑥ 建物の強度指標 C と靱性指標 F は、いずれも建物を構成する各部材の曲げ強度とせん断強度に基づいて算出する。特に、曲げ破壊する部材の F 指標は主として（せん断強度 / 曲げ強度）の関数として表

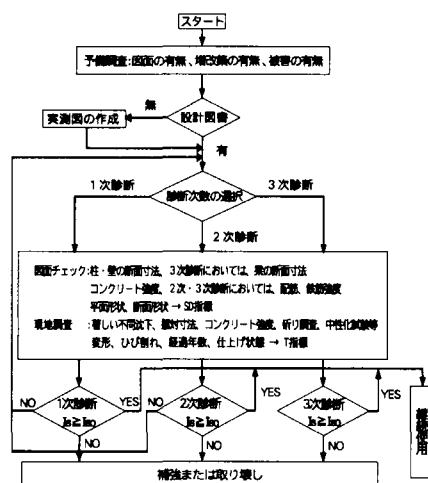


図1 耐震診断フローチャート

表1 地震防災分野の主な行政施策と関連する被害地震

地震	新建築物対策	既存建物および被災建物対策
濃尾地震(1891)		
関東大震災(1923)	市街地建築物法(1919) 同上改正(1924, C=0.1) 学会RC基準(1933)	
福井地震(1948)	建築基準法(1950, C=0.2)	
新潟地震(1964)		
十勝沖地震(1968)	建設省通達(1970, フープなど)	公共建物点検
宮城沖地震(1978)		既存建物診断・補強法(1977, 1978)
日本海中部地震(1983)	建築基準法施行令改正(1981, 新耐震) 設備耐震(1982)	
メキシコ地震(1985)	学会非構造設計指針(1985)	
アルメニア地震(1988)		被災判定・復旧マニュアル(1988)
兵庫県南部地震(1995)		診断改正(1990) 被災指針(1991)

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

された実験式から定めるとしている。

また、耐震診断を行う場合のフローチャートを図1に示す。耐震診断基準の特徴②でも述べたようにどの診断次数から始めても良いことがわかる。

次に、耐震判定の基本的な考え方を表2に示す。

表2 構造耐震指標と耐震判定基準

$$I_s = S_D \times T \times C \times F \geq I_{so} \dots\dots\dots (1)$$

I_s : 構造耐震指標
 I_{so} : 構造耐震判定指標
 S_D : 建物形状による耐震強度低減係数
 T : コンクリートと鉄筋の経年劣化による低減係数
 C : 1つの方向における建物のある階の水平耐力係数
 F : 建物の靱性の度合いによる耐震強度割増係数

耐震診断は、(1)式より求めた構造耐震指標 I_s が、構造耐震判定指標 I_{so} 以上であれば「安全(想定する地震動に対して所要の耐震性を確保している)」とし、下回れば耐震性に「疑問がある」としている。なお、栃木県内の学

校建築の I_{so} は0.7と定められている。

表3に、各診断次数の特徴をまとめて示す。診断次数が上がるに従って、診断結果の精度が上がるのがわかる。

3. 対象建物および収集資料

栃木県建築士事務所協会耐震診断・補強計画判定会に、平成7年から平成12年に申請された栃木県内の鉄筋コンクリート造学校建物103棟を対象としている。なお、高等学校83棟、中学校3棟、小学校17棟となっている。診断次数は、1次、2次、3次が存在するが、申請建物はおもに3次診断で行われている。

申請建物の栃木県内位置を図2に、収集資料内容を表4に示す。申請建物は、県内全域に分布している。

また、申請建物の竣工年度別の分布を図3に示す。現在、昭和36年から昭和49年の建物が多い。

表3 各診断次数のまとめ

	診断特徴		診断の概念図	診断による I_s 指標のばらつき概念図
	特徴	長所・短所		
1次診断	<p>壁率(壁の水平面積/床面積)と柱率(柱の水平面積/由住面積)のみによる簡略な手法であるため、算定される I_s 指標に大きな幅が出る。壁の多い建物に対しては結果の精度にある程度の幅を持たせて判断すれば、おおよその判断が可能と思われるが、壁が著しく偏在している様な場合には、過大評価となりやすいので注意が必要である。壁の少ない建物については、相当に過小評価された I_s 指標が得られることになる。</p>	<p>(長所) 診断の手間が非常に少なくて済む。耐震性の非常に高いと思われる壁の非常に多い建物を短時間に診断するには適している。 (短所) 結果の精度が低い。</p>	<p>コンクリートの柱・壁の水平断面積より耐力を求める。</p>	
2次診断	<p>梁の強度は充分大きいとの仮定により、第1次診断法よりやや詳細な略算法によって求められる柱及び壁の終局強度、破壊形式及び靱性などを評価する手法である。壁の多い建物に適用すると、結果のばらつきは1次診断に比較して小さくなるが、平均的にみると1次診断とそれほど大きな差はない。1次診断で課題評価される建物等は2次診断ではより小さな I_s 指標が得られることになる。 壁が少なく靱性に富んだ建物は、2次診断の方が1次診断に比較してより大きな I_s 指標が得られることになる。</p>	<p>(長所) ラーメン構造に対しては、梁が強い場合、柱部材の強度・靱性評価が可能で、壁の少ない建物については、計算が簡単で比較的正確な値が得られる。 (短所) 梁が無限大に強いと仮定しているため、柱強度の過大評価、靱性の過小評価になりやすく、また、壁についても強度、靱性評価が正確でない。さらに建物全体についても崩壊形、強度、靱性評価が適切ではない。</p>	<p>コンクリートの柱・壁に、鉄筋、柱軸力等を考慮して耐力を求める。</p>	
3次診断	<p>梁の強さや粘り強さも考慮したうえで、柱や壁の耐震強度と粘り強さを総合的に評価する手法である。部材の終局耐力は、第2次診断より詳細に求める。梁の強度を求め骨組の崩壊形を考慮して靱性評価を行っているため、2次診断よりもさらに結果のばらつきが小さくなり、精度が高くなる。</p>	<p>(長所) 他の診断次数より、詳細な結果を求めることができる。 (短所) 骨組の崩壊メカニズムを求めるなど、やや高度な技術が必要とされる。</p>	<p>コンクリートの柱・壁に鉄筋、柱軸力を考慮し、梁も鉄筋を考慮して耐力を求める。また、履歴、垂壁も考慮する。1次、2次診断の平面的考えと違い、建物全体を立体として考える。</p>	<p>第2次診断法による場合よりさらに精度が上がる。</p>

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

ると考えられる。

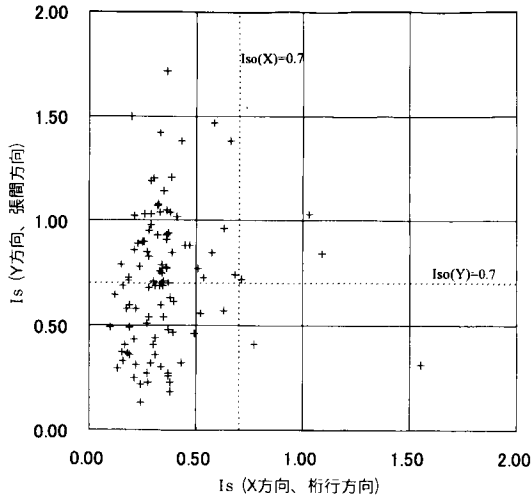


図6 診断方向と構造耐震指標Isとの相関

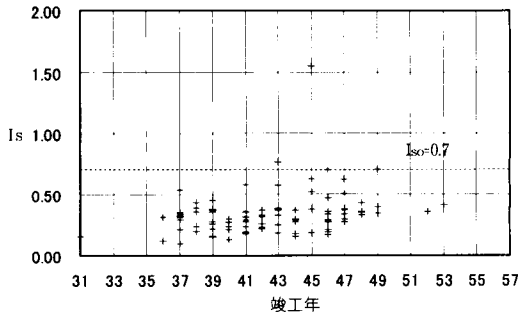


図7 竣工年度別桁行方向構造耐震指標Is

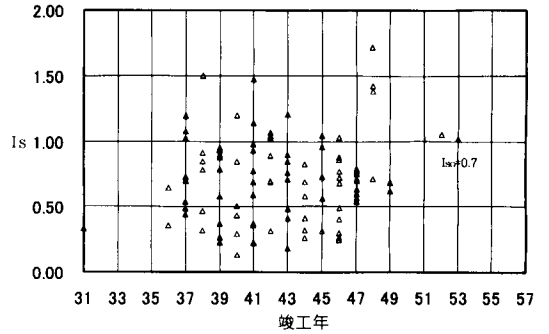


図8 竣工年度別張間方向構造耐震指標Is

5. 既存建物の耐震補強後の耐震性能

実際に使われている補強概要図を表5に示す。また、補強方法の工法別割合を図9に示す。

補強工法としては、鉄骨ブレース増設(SW)、鉄筋コンクリート耐震壁(RW)、腰壁付き柱へのスリット設置(S)、既存壁開口部の改修(K)、袖壁増設(CW)、既存壁に増打ち(M)、既存壁撤去(T)、柱補強(C)が採用されている。

これらで、鉄骨ブレース増設が55%とほぼ半数以上を占めている。これは桁行方向のIsが低いことが影響している。鉄骨ブレースによる補強は、開口を大きくとることが可能で、採光・通風に適していることが採用の要因と考えられる。

表5 補強工法概要

補強方法	補強概要図	補強方法	補強概要図
RW 鉄筋コンクリート造 耐震壁増設		M 既存壁に増打ち	
SB 鉄骨ブレース新設		K 既存開口部閉塞	
CW 袖壁補強		T 既存壁撤去	
C 柱補強		S スリット長柱化	

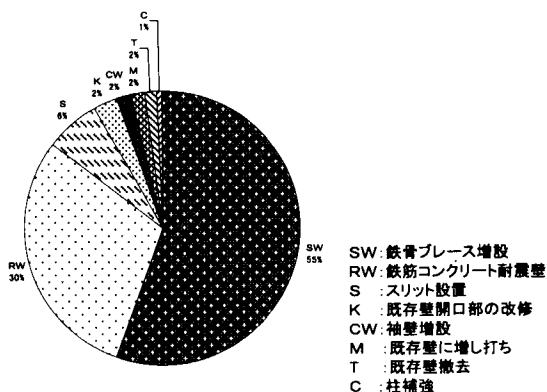


図9 補強方法の工法別割合

栃木県内の学校建築の耐震補強実施件数は、診断実施済み103棟内の61棟で、59%となっている。

耐震補強後（計画案含む）のIsの分布を図10に、補強前後のIsの相関を図11に示す。IsがIso=0.70以上の値に高められていることがわかる。また、0.70付近に値がまとまっていることから、補強が過剰でないことがわかる。

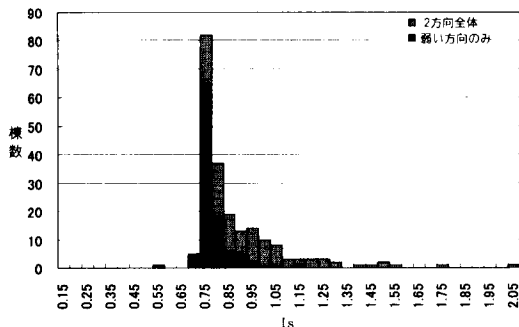


図10 耐震補強後の構造耐震指標Is分布

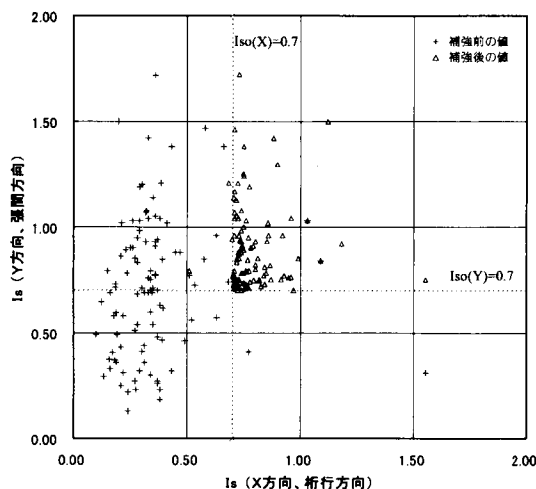


図11 耐震補強前後の構造耐震指標Is（診断方向別）

6. 耐震補強費用効果の検討

耐震補強費用効果を確認する上で、各建物の補強費を、栃木県内の耐震補強計画案概算費用算出に使用している「積算資料」⁷⁾に基づき、補強工法別面積当たりの単価と補強建物の補強面積との積より求めた。また、再建築費(80万円/坪)及び建築費に占める構造躯体費の割合（これを躯体係数と呼ぶこととする。）は、栃木県内の建築設計事務所が設計した建物のデータより算出した。概算の再建築費用を表6に、耐震補強費用を表7に示す。

表6 概算再建築費用

学校名	坪単価	備考
町立某小学校	80万円	解体費用含む
県立某高等学校	90万円	太陽熱発電機含む

表7 概算耐震補強費用

補強方法	記号	補強費用	備考
鉄筋コンクリート造増設壁	RW	¥1,500,000	壁寸法 H3150xW7210 一カ所あたり
鉄骨ブレース増設壁	SW	¥3,500,000	壁寸法 H3150xW7210 一カ所あたり
そで壁増設	CW	¥300,000	そで壁寸法 H3150xW1000 一カ所あたり
柱補強	C	¥400,000	柱一本あたり (鋼板巻き、炭素繊維巻き)
増し打ち	M	¥1,500,000	壁寸法 H3150xW7210 一カ所あたり
既存壁開口部の改修	K	¥200,000	開口寸法 H1500xW2000 一カ所あたり
既存壁撤去	T	¥60,000	5㎡程度の既存壁の撤去
スリット設置	SW	¥25,000	スリット高さH1500一カ所あたり

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

各建物の残余年数を、耐用年数と竣工年からの経過年数との差より求めた。耐用年数は、財務省令「所得税法・法人税法」⁸⁾より、既存建物では60年、新築建物では47年とした。

これより求めた残余年数1年当たりの補強費（補強費／残余年数）と耐用年数1年当たりの建築費（再建築費×躯体係数／耐用年数）との関係を図12に示す。残余年数1年当たりの補強費が耐用年数1年当たりの建築費と同額以下の建物は80%を占めている。

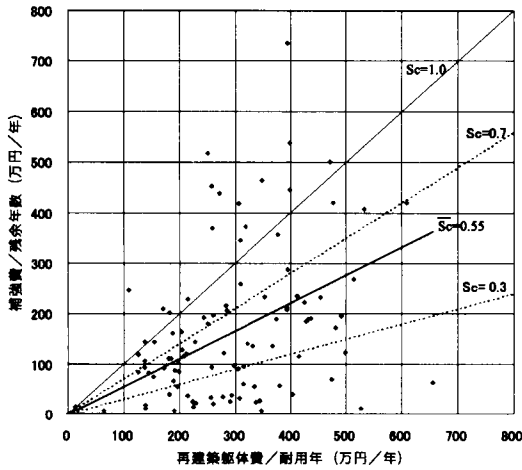


図12 補強費と再建築費との比較

耐震補強費用効果を確認する上で、工事費用から推定する表8の(2)式を提案し、検討を行った。ここで、Scを耐震補強費用効果指標と呼ぶこととする。式中に補正係数 γ の重み付けをしている。この γ は、躯体以外の建築費、解体廃棄処分費、建物の使用性、経年等を考慮して決定すべきものと考えている。

補強費用効果を、表9に示すScの境界値より判定することとした。Scの値が1.0より大きい場合は、単位年数あたりの補強費用が再建築費を上回ることを示している。1.0以下の値をほぼ3等分して、補強効果の判定値とした。0.30より小さい場合は、補強効果が大きいことから、積極的に補強を行ったほうがよいことを示す。0.3~0.7の間は、補強効果があり、補強を行った方がよいことを示す。0.7~1.0の間は、補強効果が少なく補強に検討を要することを示す。

表8 耐震補強費用効果指標

$$Sc = \gamma \frac{\frac{\text{補強費}}{\text{残余年数}}}{\frac{\text{再建築費} \times \text{躯体係数}}{\text{耐用年数}}} \dots\dots\dots (2)$$

Sc : 耐震補強費用効果指標
 γ : 補正係数(1.00≦)
 耐用年数⁷⁾: 既存学校建築 (60年)
 新築学校建築 (47年)
 残余年数: 60-経過年数
 躯体係数: 建築費に構造躯体費が占める割合(0.2)

表9 耐震補強費用効果指標判定値

Sc	判定
$1.0 < Sc$	補強計画に疑問
$1.0 > Sc \geq 0.7$	補強効果が少ない
$0.7 > Sc \geq 0.3$	補強効果が適正
$0.3 > Sc$	補強効果大きい

判定会に審査提出された学校建築の耐震補強費用効果指標Scと構造耐震指標Isの関係を図13に示す。なおScの判定値を図13に併記する。

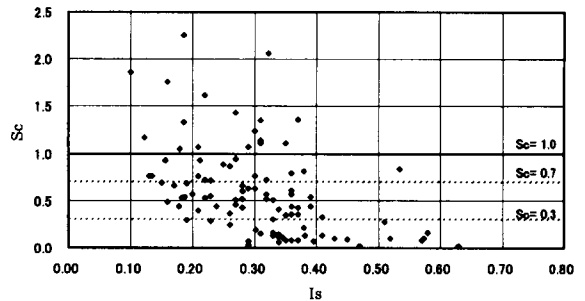


図13 Isと耐震補強費用効果指標Sc

Scが、1.0を超える建物が約20%、下回る建物の内で、0.7を超えるものが約10%、0.3を下回るものが約30%となっている。なおここで補正係数 γ は1.0としている。建物の約70%が、補強効果が適正であると判断される。また、全建物のScの平均値は0.55となっている。

本耐震補強費用効果指標より、栃木県内の学校建築の耐震補強は、大部分が適正であると考えられる。

図14に、桁行方向の構造耐震指標 I_s と床面積あたりの補強費用を示す。 I_s は各建物の最小値を示す。データ数が少ないことから相関が弱いですが、データ数を増やし、この値を整理して相関が求めることができれば、耐震診断の I_s より概算耐震補強費用が求められるようになると思われる。ただし、張間方向においては、補強が必要となることも少なく、データ数も少ないことから、相関を求めることは容易ではない。

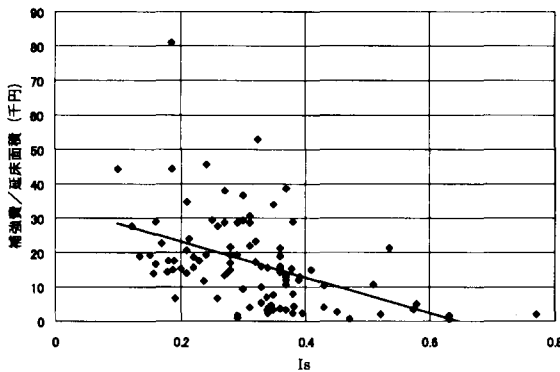


図14 桁行方向 I_s と耐震補強費との比較

栃木県内学校建築の耐震診断は、県立高校については平成15年度中に残りの建物の耐震診断を終了予定で、平成16年度より診断結果に基づき順次耐震補強を実施予定とのことである。また、小中学校については現在対象建物が約985棟存在し、平成17年度中に耐震診断を終了予定とのことである⁹⁾。

7. まとめ

栃木県内学校建築の耐震診断結果および耐震補強計画を用いて、耐震補強費用面から耐震補強の効果を推定する方法を提案した。

この指標は、補強の実施を決定する際の一つの判断の指標となり得ると考える。耐震診断済み建物の補強実施の順番を決める場合や、補強を行わず建て替えを決定する場合などにこの指標は有効と考える。

耐震診断後の補強案に、この指標を適用することにより、耐震補強が妥当かを判断する

ことが可能となると考える。

今後、Sc算出時使用の補正係数及びSc判定値は、資料を増した検討が必要と考える。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、その基礎となる「耐震診断判定会資料」¹⁰⁾を提供していただいた(社)栃木県建築士事務所協会耐震診断・補強計画判定会(委員長田中淳夫宇都宮大学名誉教授)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 下野新聞：平成14年8月27日付紙面
- 2) 日経アーキテクチャ：検証 放置される危険耐震化進まず、日経BP社、平成14年9月30日 No728 P56
- 3) 日本防災協会：改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説、平成2年12月26日改訂
- 4) 日本防災協会：改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針同解説 平成2年12月26日改訂
- 5) 日本防災協会：改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・耐震改修設計指針適用の手引き、平成2年12月26日改訂
- 6) 消防庁：阪神・淡路大震災について(第105報)、2001.1
- 7) 全国ビルリフォーム協同組合連合会 九州地区協議会：平成10年度版建築改修工事共通仕様書準拠 積算資料
- 8) 財務省：所得税法および法人税法、平成13年度
- 9) 日本工業経済新聞：平成14年9月25日付紙面
- 10) 栃木県建築士事務所協会：耐震診断判定会資料、1995-2001
- 11) 岡田恒男他：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能一年代別、用途、層数別の構造耐震指標の分布の検討一、日本建築学会関東支部研究報告集、1988
- 12) 中埜良昭、岡田恒男：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、1989

〔受理年月日 2003年9月30日〕

* (有)岡田建築設計事務所 (平成14年度建築学専攻修了)