

論文 免震建物の経済性に関する基礎的研究

佐藤 健^{*1}・三瓶 昭彦^{*2}・鳥居 次夫^{*3}・五味 晴人^{*4}

要旨：地震荷重の増減による建築物の構造、および建設コストの変動を評価し、得られたコスト上昇係数を利用した際の免震建物のコストを概略算出することで、免震建物のイニシャルコストが、耐震建物との比較で同等になる可能性を示した。また、大地震に遭遇した場合の被害コスト率で、総ライフサイクルコストを評価し、耐震建物に対する免震建物の経済的優位性を確認した。更に、地震に対するリスク管理の技術的手法としての免震構造の可能性と有効性を示唆した。

キーワード：免震構造,地震荷重,構造コスト,建設コスト,被害コスト率,経済性,リスク管理

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以後、地震に対する建物のリスク管理が重要視される中、免震構造はその有効な技術的手法であると思われる。しかし、これまでの免震建物は、現行基準の耐震建物に対して、建設コストで概ね数%のコストアップになり、採用件数もそれ程多くはなかった。そこで、本研究では、コストアップの主な要因が、免震部材の価格と従来の実施建物で採用されてきたベースシア係数にあると判断し、それらを検討パラメータとした。そして、免震建物の経済性について考察するために、幾つかのモデル耐震建物を免震建物とした時の構造コスト、および建設コストを概算し、そのイニシャルコスト、および総ライフサイクルコストについて検討を行う。

2. 地震荷重の増減による構造コストと建設コスト

免震建物のコストを次節で簡易的に評価するため、まず、耐震建物の地震荷重の増減によるコスト変動とコスト上昇係数について予め検討を行う。検討は、表-1の事例-1～4に示す柱RC梁Sとした混合構造建物⁽¹⁾4事例で行う。設計は、文献1の設計クライテリアに基づき、構造計画支援システムFIND⁽²⁾を用いて行う。また、地震荷重の増減によるコスト評価は、式(1)、(3)に示すコスト-地震荷重関係式を基準荷重レベルで基準化した線形式で表した神田ら⁽³⁾の評価手法を用いる。

表-1 検討対象建物概要

	事例-1 ⁽¹⁾	事例-2 ⁽¹⁾	事例-3 ⁽¹⁾	事例-4 ⁽¹⁾	事例-5 ⁽³⁾	事例-6 ⁽³⁾	事例-7 ⁽³⁾	事例-8 ⁽³⁾
構造種別	RCS	RCS	RCS	RCS	RC	RC	S	SRC
構造形式	F	F	F+W	F+W	F	F+W	F	F+W
建物階数	6	12	6	12	6	6	8	9
建物用途	事務所	事務所	事務所	事務所	事務所	事務所	事務所	事務所
延床面積	8,110	16,220	8,110	16,220	6,522	6,522	11,808	6,554

注) 構造種別で、RCSは柱RC梁Sの混合構造を示す。また、構造形式で、Fは純ラーメン構造、F+Wは耐震壁付ラーメン構造を示す。延床面積の単位は平方メートル。

*1 (株) フジタ技術研究所構造研究部構造2グループ主任、工修(正会員)

*2 (株) フジタ技術研究所構造研究部構造2グループ主席研究員(正会員)

*3 (株) フジタ営業本部エンジニアリング設計部構造部リーダー(非会員)

*4 (株) フジタ技術研究所取締役所長(非会員)

構造コストの評価： $Cs(R) = Cso\{1 + ks(R - 1)\} \dots \dots (1)$

R :地震荷重レベル係数($R = r / ro \dots \dots (2)$)

ro :基準の地震荷重レベル（現行基準の地震荷重レベル）

r :任意の地震荷重レベル

ks :構造コスト上昇係数

$Cs(R)$:地震荷重を増減させた時の構造コスト

Cso :基準の地震荷重レベル ro で設計した時の構造コスト

建設コストの評価： $Ct(R) = Cto\{1 + kt(R - 1)\} \dots \dots (3)$

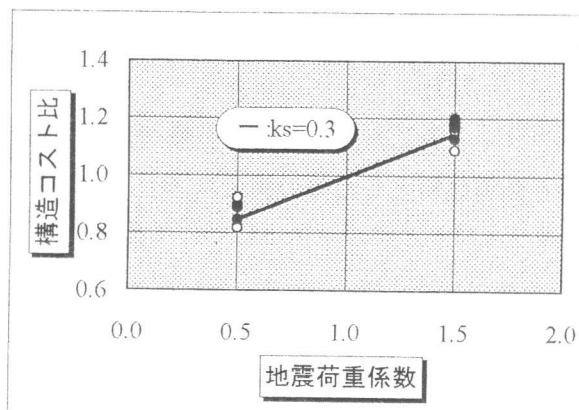
kt :建設コスト上昇係数

$Ct(R)$:地震荷重を増減させた時の建設コスト($Ct(R) = Cs(R) + Ca \dots \dots (4)$)

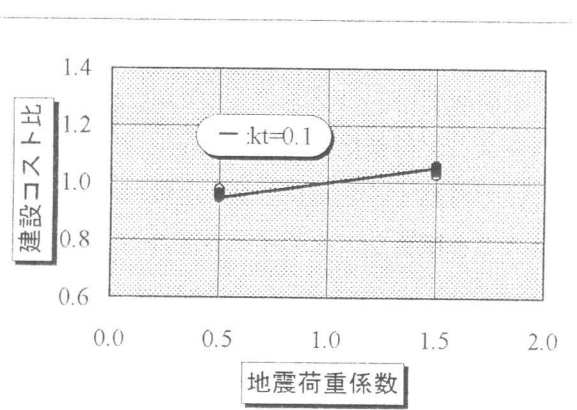
Cto :基準の地震荷重レベル ro で設計した時の建設コスト($Cto = Cso + Ca \dots \dots (5)$)

Ca :建設コストを構成する非構造コスト($Ca / Cso = 6.5 / 3.5 = \text{Const.} \dots \dots (6)$)

地震荷重レベル係数 R による構造コストおよび建設コストの変動を、基準の地震荷重レベル ro で設計した時のコストを1.0としたコスト比で図－1、図－2に文献3の検討結果と併せて示す。本検討事例の混合構造に関しても、文献3で検討された各構造種別と同様にほぼ線形式で表現できることがわかる。また、コスト変動から求められたコスト上昇係数を表－2、表－3に示す。



図－1 地震荷重－構造コストの関係



図－2 地震荷重－建設コストの関係

（図中、○は本研究による事例1～事例4のデータを示し、●は文献3による事例5～事例8のデータを示す）

表－2 構造コスト上昇係数 ks （8事例平均： $ks = 0.29$ ）

R	事例-1	事例-2	事例-3	事例-4	事例-5	事例-6	事例-7	事例-8
0.50	0.20	0.37	0.16	0.36	0.22	0.22	0.30	0.30
1.50	0.38	0.35	0.18	0.32	0.40	0.34	0.34	0.26

表－3 建設コスト上昇係数 kt （8事例平均： $kt = 0.09$ ）

R	事例-1	事例-2	事例-3	事例-4	事例-5	事例-6	事例-7	事例-8
0.50	0.06	0.11	0.05	0.11	0.07	0.07	0.09	0.09
1.50	0.11	0.11	0.05	0.10	0.12	0.10	0.10	0.08

構造コスト上昇係数 ks は平均で0.3程度、建設コスト上昇係数 kt が平均で0.1程度である。本検討結果は、神田ら⁽³⁾、今川⁽⁴⁾の研究成果、および菅野⁽⁵⁾の主張とも概ね一致している。従って、かなり大雑把な評価ではあるが、仮に地震力を5割増して設計すると、構造コストは15%程度アップするが、非構造コストが一定と仮定した建設コストは、僅か5%程度のアップに留まることになる。

3. 免震建物の構造コストと建設コスト

免震建物のコストに関して、前節のコスト上昇係数を用い簡易的に検討を行う。検討事例は、表－1に示した8事例に表－4に示す8事例^{(6),(7)}を加え、全16事例について行う。

表－4 検討対象建物概要

	事例-9	事例-10	事例-11	事例-12 ⁽⁶⁾	事例-13 ⁽⁶⁾	事例-14 ⁽⁶⁾	事例-15 ⁽⁶⁾	事例-16 ⁽⁶⁾
構造種別	RCS	SRC	HPC	S	S	HRC	HRC	RC
構造形式	F	F+W	F+W	F+B	F	F	FS	F+W
建物階数	4	14	13	12	2	30	30	3
建物用途	事務所	ホテル	住宅	事務所	事務所	住宅	住宅	事務所
延床面積	4,200	15,380	12,420	28,000	260	25,030	25,030	760

注) 構造種別で、RCSは柱RC梁Sの混合構造、HPCはプレキャスト工法によるSRC造、HRCは高層RC造を示す。また、構造形式で、Fは純ラーメン構造、F+Wは耐震壁付ラーメン構造、F+Bはブレース付ラーメン構造、FSはフラットスラブ構造を示す。延床面積の単位は平方メートル。

ここで、検討パラメータは、式(2)に示した地震荷重レベル係数Rと、免震部材の製品価格に取付け工事に伴う養生・仮設費等を加算して単位支持荷重当たりとした免震費用単価Cis(万円/ton)とし、耐震建物に対する免震建物の構造コスト比を式(7)、建設コスト比を式(13)で算出する。

$$\text{構造コスト比の評価: } \frac{\text{isol. Cs(R)}}{\text{conv. Cso}} = \frac{\text{sCs(R)} + \text{Cf} + \text{Cis} \cdot \text{W}}{\text{Cso}} \dots\dots\dots(7)$$

isol. Cs(R): 地震荷重を増減させた時の免震建物の構造コスト

conv. Cso: 現行基準の地震荷重で設計した時の耐震建物の構造コスト

sCs(R): 地震荷重を増減させた時の上部構造のみの構造コスト

$$\text{sCs(R)} = \text{sCso} \{1 + \text{ks(R} - 1)\} \dots\dots\dots(8)$$

sCso: 現行基準の地震荷重で設計した時の上部構造のみの構造コスト

$$\text{sCso} = \text{sCgp} + \text{sCce} \dots\dots\dots(9)$$

sCgp: 上部構造を常時荷重だけで設計した長期コスト (sCgp = 0.2Cto).....(10))

sCce: 上部構造を地震荷重だけで設計した耐震コスト

Cf: 根切り、土工事を含む下部構造の構造コスト (Cf = 0.08Cto).....(11))

W: 免震建物の総重量(ton)

Cso: 現行基準の地震荷重で設計した時の構造コスト (Cso = sCso + Cf).....(12))

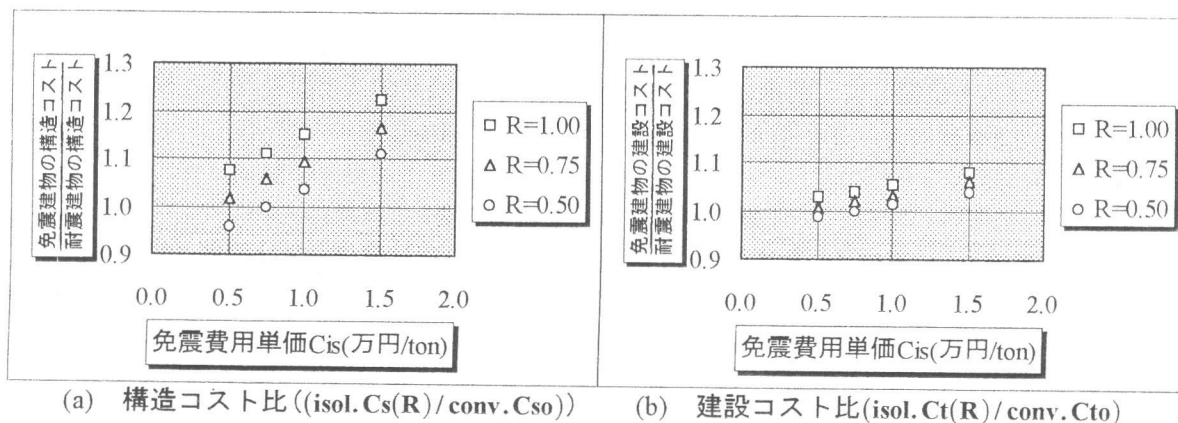
$$\text{建設コスト比の評価: } \frac{\text{isol. Ct(R)}}{\text{conv. Cto}} = \frac{\text{isol. Cs(R)} + \text{Ca}}{\text{Cso} + \text{Ca}} \dots\dots\dots(13)$$

isol. Ct(R): 地震荷重を増減させた時の免震建物の建設コスト

conv. Cto: 現行基準の地震荷重で設計した時の耐震建物の建設コスト

なお、免震建物の構造躯体の低減は、式(8)のように上部構造のみにコスト上昇係数を利用して行う。また、下部構造の構造コストについては、これまでコスト増が強調されてきたが、根切量や地下構造躯体のコスト増分を杭コストの減分で相殺している実施事例⁽⁸⁾や、設計者の姿勢次第では、逆にコストダウンの可能性も考えられることから、免震設計によるコストアップはないものとし、式(11)のように建設コストに対して一律8%を構造コストに加算する。更に、現行基準の地震荷重で設計した時の上部構造のみの構造コストsCsoは、事例12～16については文献6(sCso=0.22～0.33Cto)の結果を用い、他の事例については、文献6の平均値(sCso=0.27Cto)を用いた。

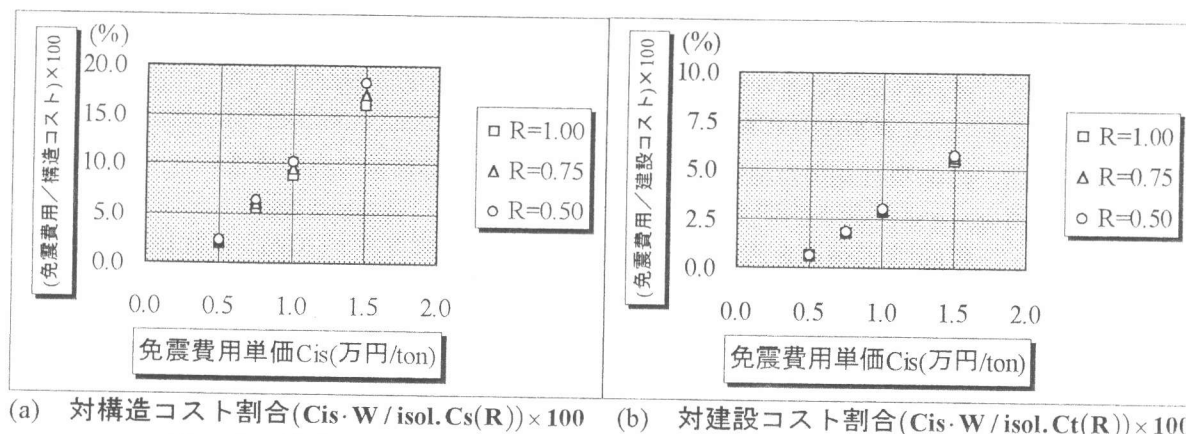
以上の条件から得られた耐震建物に対する免震建物のコスト比を16事例の平均で図－3に示す。



図－3 耐震建物に対する免震建物のコスト比

地震荷重レベル係数 R が大きく、また宮崎⁽⁹⁾が設定したような免震費用単価 C_{is} が比較的大きな場合は、従来の社会通念通り、建設コストで数%程度のコストアップになった。しかし、ごく最近の実施建物⁽⁸⁾のように R が0.75とあまり小さくない場合でも、 C_{is} が小さな場合は、耐震建物と免震建物がほぼ同等のコストになっている。従って、免震費用単価がコストを大きく変動させる要因であると言える。また、同じ R で C_{is} を半分にする場合より、同じ C_{is} で R を半分にする方が僅かにコストダウン効果が大きいと言える。

更に、構造コスト、および建設コストに占める免震費用の割合を16事例の平均で図－4に示す。



図－4 構造コストおよび建設コストに占める免震部材のコストの割合

C_{is} が大きな場合、構造コストに占める免震費用の割合は、10数%を占め、 C_{is} が小さくなれば、僅か2%前後となる。また、建設コストに占める免震費用の割合は、対構造コスト割合の約1/3となり、非常に僅かであると言える。更に、式(13)の評価で免震建物の建設コストが耐震建物よりも安くなる条件式は式(14)である。

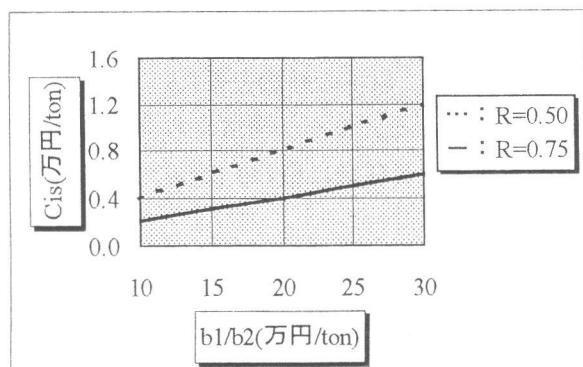
免震建物の方が耐震建物よりも安くなる条件式：

$$C_{is} \leq \frac{b1}{b2} \left[1.0 - \left\{ \frac{sC_{so}}{C_{to}} (1 + ks(R-1)) + \frac{C_f}{C_{to}} + \frac{C_a}{C_{to}} \right\} \right] \dots\dots (14)$$

$b1$: 建物の単位床面積当たりの建設コスト(万円/ m^2)

$b2$: 建物の単位床面積当たりの重量(ton/m^2)

そこで、式(14)に式(15)～(18)に示す本検討事例の平均値を代入し、 R と $b1/b2$ の2のパラメータのみで、その条件式を図示すると図－5になる。



図ー5 免震建物の経済性判断指標

$$\frac{sC_{s0}}{C_{to}} = 0.27 \dots (15)$$

$$\frac{C_f}{C_{to}} = 0.08 \dots (16)$$

$$\frac{C_a}{C_{to}} = 0.65 \dots (17)$$

$$k_s = 0.30 \dots (18)$$

各々のRにおいて、免震費用が直線を超えない範囲ならば、免震建物の方が耐震建物よりも安くなることを示している。

4. 総ライフサイクルコストの評価

前節までのイニシャルコストの評価に加えて、建物の耐用年限中に遭遇する可能性のある大地震によって被災した場合の総ライフサイクルコストを被害コスト率Drで評価を行う。被害コスト率とは、修繕コスト／イニシャルコストを表す。また、修繕コストは、構造、意匠、設備を合計したもので、各々の仮設費・経費等を含んだものとする。

そこで、1995年兵庫県南部地震の際に、神戸市を中心とした震度6以上の地域で実際に被災し、現行基準で耐震設計された8棟の建物の被害コスト率を建物概要と併せて表ー5に示す。

表ー5 調査対象建物概要と被害コスト率Dr (8事例平均：Dr=8.6%)

	事例-A	事例-B	事例-C	事例-D	事例-E	事例-F	事例-G	事例-H
所在地	伊丹市	芦屋市	東灘区	芦屋市	東灘区	東灘区	東灘区	須磨区
構造種別	RC	SRC	SRC+S	RC	SRC	SRC	RC	S
建物階数	9	12	13	4	14	14	8	3
建物用途	住宅	店舗+住宅	店舗+住宅	研究所	住宅	住宅	住宅	住宅
延床面積	27,024	51,764	45,342	1,188	27,218	42,059	3,095	521
被害状況	C/B	B/B	B/B	B/B	C/B	C/B	C/B	C/B
竣工年月	S60.3	H6.6	H4.10	H2.5	H1.3	H3.2	S59.2	S60.6
Dr(%)	9.3	3.7	20.5	3.8	1.9	2.3	6.8	20.8

注) 被害状況は、構造躯体の損傷レベル／非構造部材の損傷レベルを示し、各々Bは中被害、Cは小被害以下を示す。延床面積の単位は平方メートル。

各建物への実際の地震入力レベルは特定できないが、調査結果による耐震建物の被害コスト率Drは平均で9%程度、調査建物における最大は20%程度であった。本調査結果は石塚の試算(想定Dr=6%)⁽¹⁰⁾、あるいは発注者のアクセプタブルダメージの調査結果(許容Dr=14~18%)⁽¹¹⁾とも概ね一致する。更に、0.4gを超える地震入力を想定した免震建物の被害コスト率は耐震建物の概ね1/5程度としたMayesらの研究成果⁽¹²⁾を参考とすれば、耐震建物の被害コスト率を仮に10%と想定しても、免震建物の被害コスト率は僅かに2%程度となることが予想される。従って、震度6クラスを超える大地震を建物のライフサイクルで想定した場合、耐震建物のイニシャルコストで基準化して、耐震建物の修繕コストとして10%を想定したとしても、免震建物は、イニシャルコストの増分と修繕コストを合わせても、耐震建物よりも低い4~5%程度のアップで済む。更に、ここでは建物内部の収容物の損失や、復旧期間中に建物が使用不能や営業不能となる経済的損失については考慮していないため、応答加速度が著しく低減される免震建物の経済的優位性は明白である。

5. まとめ

地震荷重の増減によるコスト変動と免震建物の経済性について、以下の結論を得た。

- 1) 地震荷重の増減による構造コスト上昇係数は概ね0.3程度である。また、構造コストが建設コストの1/3程度であれば、地震荷重の増減による建設コスト上昇係数は概ね0.1程度である。
- 2) コスト－地震荷重レベル関係式が線形式でほぼ評価できる。
- 3) 免震建物と耐震建物とのイニシャルコスト比較では、地震力の低減と免震費用単価次第では、免震建物が耐震建物よりも安くなる可能性を示した。また、免震部材の製品価格が低下する傾向にある現状と、設計者の基礎構造計画に対する設計的配慮⁽¹⁶⁾により、その可能性は大幅にアップすると考えられる。
- 4) 大地震に遭遇した場合の総ライフサイクルコスト評価では、大地震の発生確率の問題は残るものの、耐震建物との比較において免震建物の経済的優位性を確認できた。
- 5) 地震に対する建物のリスク管理⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を含めた、ライフサイクルコストの適切な評価⁽¹⁵⁾と低減が重要であるが、リスク管理の技術的手段としての免震構造の可能性と有効性を示唆した。

(謝辞) 本研究は、(財)日本建築センターの「ハイブリッド構造に関する日米共同研究」におけるテーマ・ストラクチャーの試設計を参考にさせて頂きました。また、イニシャルコストの検討にあたり、フジタ東京支店積算部の加納部長、深石リーダーに、被害コスト率の調査では、同大阪支店積算部の三宅部長、清原チーフエンジニアに多大な協力を得ました。さらに、(株)フジタ免震構造利用促進委員会、ならびに(株)大林組東北支店設計部の富澤氏には貴重なご意見を頂きました。皆様方に深く感謝いたします。

(参考文献)

- 1) 佐藤,五味,胡木,内田:偏心K型ブレース付き柱RC・梁S構造の設計法に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.17,No.2,pp.1113-1118,1995
- 2) 片岡,松林,堤:構造計画支援システムFINDの開発,第16回情報システム利用技術シンポジウム,pp.37-42,1993
- 3) 神田,浅野,石井,鈴木,橋元:地震荷重を変動させた時の各種建物の建設費について,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.15-16,1994.9
- 4) 今川:耐震性向上コスト試算,日経アーキテクチュア, pp.184-187,1995.5.22号
- 5) 菅野:特集を読んで 耐震コストは5%か,建築雑誌,Vol.09,No.1358,pp.56,1994.6
- 6) 瀬川:中高層ビルにおける耐震コスト,建築雑誌,Vol.09,No.1352,pp.26-29,1994.1
- 7) 瀬川:地震と建築コスト,シンポジウム1995年兵庫県南部地震－建物被害とその復旧－,pp.102-105,平成7年6月
- 8) 上野,竹中,斉藤:最近の免震建築紹介,MENSIN,No.9,pp.4-7,1995.8
- 9) 宮崎:免震建築は安いのか高いか,建築雑誌,Vol.109,No.1352,pp.37-39,1994.1
- 10) 石塚:耐震改修は経済的にメリットあり,日経アーキテクチュア, pp.118-123,1995.11.6号
- 11) 川村,太田,斉藤,桑原:阪神大震災から半年Part2発注者はこう考える,日経アーキテクチュア, pp.83-88,1995.7.17号
- 12) Ronald L. Mayes, M. EERI, Lindsay R. Jones, and Trevor E. Kelly:The Economics of Seismic Isolation in Buildings,Earthquake Spectra,Vol.6,No.2,pp.245-263,1990
- 13) 辰巳,長能,杉本,瀬谷,佐藤:建築物の地震リスク評価のためのエキスパートシステム,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.263-266,1992.8
- 14) 鈴木:柱、壁の補強工事増える投資効果の明確化がカギ(地震の危険度・被害額を数値化),日経ビジネス,pp.134-136,1995.8.28号
- 15) 例えば、岩田,和田,田村,小波:建物が寿命中に受ける総地震被害に注目した耐震設計,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.47-50,1995.8
- 16) 例えば、免震構造協会編:免震構造入門,オーム社,pp.35,平成7年9月