

# 地震リスク評価プログラムEQRESの開発

淵上 勝志\* 星野 昭雄\*\*

## 要旨

阪神・淡路大震災では、1981年の建築基準法改正以前に設計された建物に大被害を受けたものが多くみられたことから、旧基準で設計された建物は耐震診断・耐震改修を早急を実施することが望まれている。また、近年不動産証券化の開始に伴い、投資不動産に関する詳細かつ多角的な調査（デュー・デリジェンス）の件数が増加している。このような状況で、建物の耐震性能をよりわかりやすく評価するために、建物の地震による損害額を算出する必要性が生じてきた。そこで、極力簡単な入力のみで地震による建物の被害額を評価するプログラムを開発したのでその概要を報告する。

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災では大被害を受けたものの多くが、1981年の建築基準法改正以前に設計された建物であることから、旧基準で設計された建物は耐震診断・耐震改修を早急を実施することが望まれている。また、不動産証券化の開始に伴い、デュー・デリジェンス業務（投資不動産に関する詳細かつ多角的な調査）が増加している。地震国である我が国では、デュー・デリジェンスの調査項目の中で、建物の地震リスク評価は重要な項目である。このような状況で、建物の耐震性能をよりわかりやすく評価するために、建物の地震による損害額（地震リスク）を算出する必要性が生じてきた。地震リスク評価結果は不動産評価の他にも、建物のライフサイクルコストや耐震補強効果の評価などにも利用できる。

リスクの定量化を行うことにより、地震被害に関する因果関係がある程度明確にできる。すなわち地震被害を損害額で表現することで、脆弱な部分が明確になる。その情報に基づいてリスク低減のための方策を選定する。方策を行わない現状でのリスクと実施した場合のリスクの差が、その効果となる。

地震リスク評価プログラムEQRES (Earthquake Risk Evaluation System) は、建物建設地点の基本最大加速度あるいは最大地動速度の年超過確率（年間当たりの地震発生頻度）によるハザード曲線の評価し、対象建物の構造性能を考慮した上で、容易に地震リスク評価を行うことができるプログラムである。EQRESはVBAを用いて開発されており、Microsoft Excel上で起動する。

## 2. 地震リスク評価手法概要

地震被害はどのくらい起こりやすいのか、また被害が発

生した場合に被る損害はどのくらい大きいのか。地震リスク評価ではこれら2つの側面を捉え以下の式を用いてリスクを定量化する。

$$R = P \times C$$

R: リスク(損失期待値) P: 被害の発生確率  
C: 被害に伴う損害の大きさ

リスクは、被害が発生しやすくそれに伴う被害が大きいほど重大であると表現される。

地震被害には程度・規模に大きな幅があり、地震で建物が全壊することもあれば、軽微な構造被害にとどまる場合もある。また、建物が健全でも内容物が壊れ、本来の機能を達成できない場合など、地震被害といっても様々な被害形態が存在している。被害形態は、液状化・構造物破壊・機能障害・火災・延焼など、様々な被害要因の組み合わせによって表現することができる。そこで、システム解析のイベントツリー解析を用い、被害形態の明分化を行う。これは、リスク評価におけるモデル構築を意味し、施設固有の地震被害形態を反映したものとなる。

EQRESでの評価対象となる被害形態は、基礎被害・躯体被害・設備機器被害・仕上げ被害であり、採用したイベントツリーの一例を図-2に示す。

様々な損傷形態を考慮するために、リスクは以下のように表現される。

$$R = \sum (P_i \times C_i)$$

被害形態の発生確率とこれに伴う損害の大きさを乗じ総和することでリスクが定量化される。リスク算定を通して、被害要因の発生確率や損害の大きさ等から、リスクへの寄与度の大きい被害要因を知ることができる。これより施設特有の地震被害の特徴の把握をおこなうと共に、必要な耐震対策の検討に際し有益な情報を提供する。

\*中国支店 \*建築本部建築設計部

施設の地震リスクは、地震動の大きさに依存する事から、地震動を指標とした増加関数(地震ロス関数)として表示され、物的損害と営業損失を足しあわせた損害額として導かれる。

一方、地震の発生頻度は地震動の大きさによって異なる。これを示したのが地震ハザード曲線である。これはサイト固有の地震危険度を示したもので、地震動の大きさに対応した年間当たりの地震発生頻度を示している。地震ロス関数と地震ハザード曲線を合積すると、年間当たりの地震リスク密度が計算でき、リスク密度の総面積が年間当たりの地震リスク(PML)となる。得られたPMLと地震動の年超過確率(年間当たりの地震発生頻度)の関係はリスクカーブで表現される。リスクカーブにより任意の再現期間の地震動に対する損失率や年間予想損失を求めることができる。

### 3. 評価フロー

地震リスク評価のフローを図-2に示す。EQRESでは建設地及び簡単な建物情報(構造・規模・コスト・建設年代等)を入力することで、地震リスクを算定する。

### 4. 地震ハザード曲線の作成

地震ハザードは、基本最大加速度を入力することで建築物荷重指針<sup>1)</sup>に記載された極値型分布により評価する方法と最大地動速度の年超過確率を直接入力する方法のいずれかが選択できる。

建築物荷重指針による場合、再現期間年の設計用最大地動速度 $V_0$ は次式より求め、基本最大加速度 $A_0$ は図-3による。

$$V_0 = \frac{1}{15} A_0$$

ここに、

$V_0$ : 標準地盤の地震動の基本最大速度(cm/sec)

$A_0$ : 標準地盤の地震動の基本最大加速度(cm/sec<sup>2</sup>)

の適用範囲としては20年 500年程度と考えられる。

地震動	基礎被害	躯体被害	設備被害	仕上被害	発生確率 P	損害の大きさ C	リスク R
	0.9(無被害)	0.7(無被害)	0.6(無被害)	0.4(無被害)	0.15	0	0.0 億円
				0.6(被害)	0.23	8	1.8 億円
			0.4(被害)	0.4(無被害)	0.10	15	1.5 億円
				0.6(被害)	0.16	23	3.7 億円
		0.3(無被害)	0.6(無被害)	0.4(無被害)	0.06	10	0.6 億円
				0.6(被害)	0.10	18	1.8 億円
			0.4(被害)	0.4(無被害)	0.04	25	1.0 億円
				0.6(被害)	0.06	33	2.0 億円
					0.1	37	3.7 億円
							R = 16.1 億円

図-2 本プログラムで用いたイベントツリーの一例

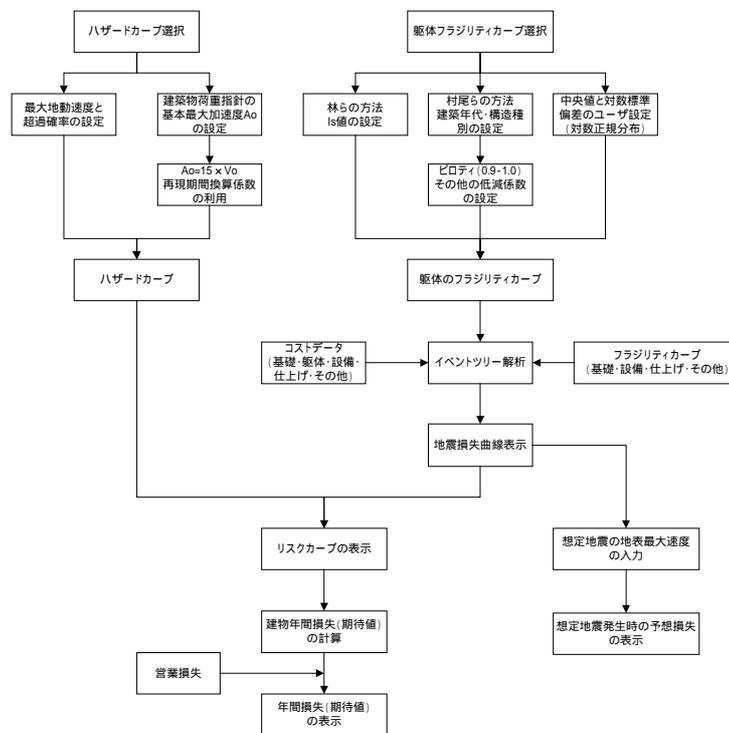


図-1 地震リスク評価フロー



図 - 3 基本最大加速度のマップ  
(Frechet分布による)<sup>1)</sup>

## 5. フラジリティカーブの設定

フラジリティ (fragility) は「こわれやすさ」を示し、地震リスク評価においては、対象物の地震動の大きさに対する脆弱性をあらわす。EQRESでは基礎、躯体、設備、仕上げ、その他の各項目について設定できる。いずれのフラジリティも最大地動速度に依存し、相互に独立の関係にあるものとする。

### 5.1 躯体のフラジリティの設定

躯体のフラジリティは、1)林ら<sup>2)</sup>の提案による兵庫県南部地震の実被害を踏まえた構造耐震指標 $I_s$ 値に基づく設定による評価、2)村尾ら<sup>3)</sup>による兵庫県南部地震被害の自治体調査に基づく被害関数を用いる評価、3)中央値と対数標準偏差を指定し対数正規分布による評価、の3つの評価法のいずれかが選択できる。いかにそれぞれの評価手法の概要を示す。

#### 5.1.1 構造耐震指標 $I_s$ 値による評価

林らの手法に基づき、構造耐震指標 $I_s$ 値を用いて、被災度レベルごとの建物損傷確率 $P_f(V, I_s)$ を以下のように評価する。 $I_s$ 値を0.4とした場合の躯体の損傷率曲線を図-4に示す。

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

$$\lambda_f(I_s) = \ln(V_0(I_s/0.4))$$

ここに、

$V$  : 最大速度 (cm/sec)

$V_0$  :  $I_s=0.4$  の建物の耐力中央値 (最大速度)

$\zeta_f$  :  $\ln(V)$  の標準偏差 (=0.6)

: 標準正規分布の累積確率分布関数

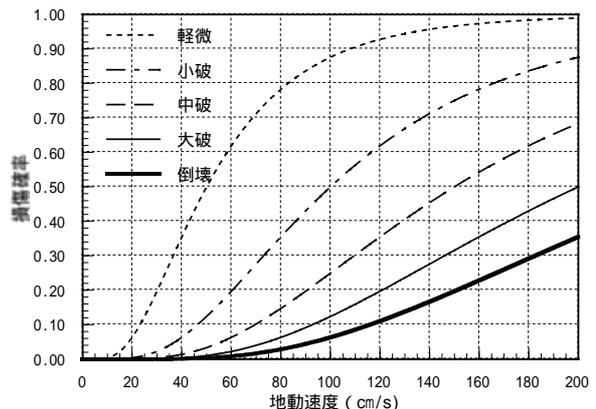


図 - 4  $I_s=0.4$  の損傷率曲線

### 5.1.2 構造種別、建築年代による評価

構造種別、建築年代による評価では、村尾らの手法に基づき、全壊と全半壊の2つの被害形態について、損傷確率が次のように建築年代、構造種別により回帰した値で与えられる。

$$P_f(V) = \phi\left(\frac{\ln(V) - \lambda}{\zeta}\right)$$

ここで、 $V$  : 最大速度

:  $\ln(V)$  の平均値

:  $\ln(V)$  の標準偏差

: 標準正規分布の累積確率分布関数

なお、EQRESでは、 $I_s$ 値に比例すると仮定して、RC耐震診断基準<sup>4)</sup>のピロティの有無による形状係数を導入することで、RC造の建物についてピロティによる構造物の耐力低下を表現することができる。

図-5にピロティの評価の違いによるフラジリティカーブの変化を、表-1にフラジリティ評価に用いた構造種別、建築年代別の耐力中央値及び標準偏差を示す。

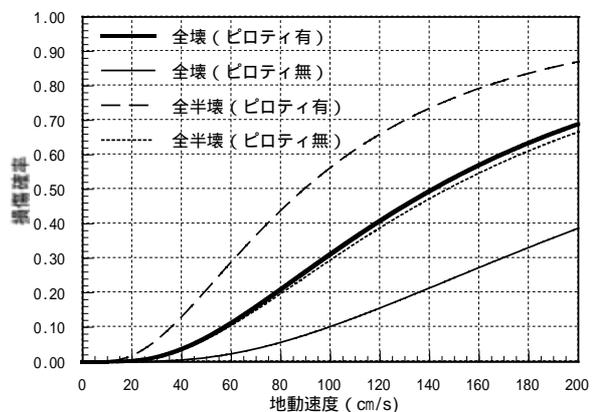


図 - 5 ピロティ有無による損傷確率の比較  
(RC建物: 全年代)

表 - 1 耐力中央値 及び標準偏差 一覧

		全壊		全半壊	
		$\lambda$	$\zeta$	$\lambda$	$\zeta$
RC造	-1971	5.12	0.646	4.72	0.691
	1972-81	5.33	0.575	4.85	0.612
	1982-94	6.00	0.789	5.33	0.789
	全年代	5.50	0.705	4.99	0.716
S造	-1971	4.64	0.619	4.25	0.712
	1972-81	4.97	0.490	4.49	0.549
	1982-94	5.64	0.731	5.01	0.733
	全年代	5.14	0.628	4.69	0.672
軽量 S造	-1971	4.70	0.550	4.41	0.504
	1972-81	5.82	0.972	4.95	0.855
	1982-94	6.19	1.101	5.28	0.865
	全年代	5.03	0.564	4.73	0.601

5.2 躯体以外のフラジリティの設定

基礎、設備、仕上げ、その他の各項目にフラジリティについては、耐力中央値 と対数標準偏差 を指定して対数正規分布により評価することができる。

各項目の中央値と対数標準偏差については、地震リスク研究会で定めた数値がデフォルト値として設定される。設備、仕上げのデフォルト値は、阪神・淡路大震災調査報告<sup>5)6)</sup>を参考に、地震リスク研究会で定めた値を採用している。その他は、仕上げと同じ値をデフォルト値としている。図 - 6 にデフォルト値による設備及び仕上げのフラジリティカーブを示す。

ここで設定した値は、ユーザーの使用により任意に設定することが可能である。

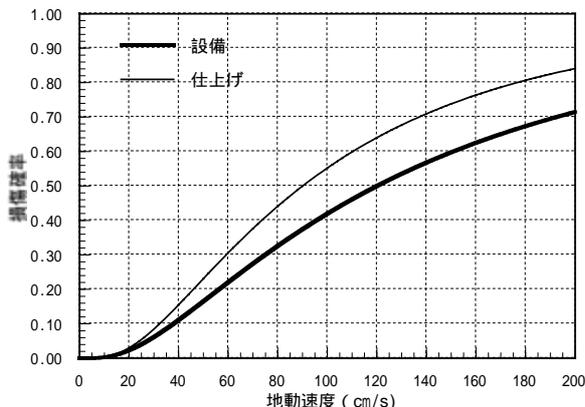


図 - 6 設備機器の損傷率曲線

6. コスト評価

コスト評価のために、基礎・躯体・設備・仕上げ・その他の各項目の再調達価格を設定する。また、躯体はその被害レベルに応じて復旧費用が異なるため、その被害レベルに応じた再調達価格(以後被害復旧価格と略記する)を以下のように設定する。

躯体の被害復旧価格は、再調達価格に対する比率を考慮し、軽微・小破は 10%、中破は 50%、大破・倒壊は 100%として評価する。また、全壊、全半壊については、全壊は大破、倒壊の加重平均値、全半壊は中破以上の被害レベルの加重平均値を設定する。加重平均に際しては、建築研究所の兵庫県南部地震被害調査報告書<sup>7)</sup>のRC・SRC建物被災度別分類を利用する。なお、中破以上の被害比率は、中破 53%、大破 25%、倒壊 22%である。

7. 営業停止による損失評価

地震被害による営業停止に伴う損失評価は、営業停止日数と1日当たりの損失額の乗算により算定する。

躯体の被害レベルに応じた営業停止日数は、過去3年間の新築サンプル物件 450 件から工期と再調達価格との関係を導き出した近似式により評価する。倒壊・大破は工期の 100%、中破は工期の 50%、小破・軽微は「居ながら補修」を前提として工期の 0%として評価した日数を設定している。

全壊、全半壊については、躯体の被害復旧価格と同様に、全壊は大破、倒壊の加重平均値として工期の 100%、全半壊は中破以上の被害レベルの加重平均値として工期の 73%とした日数を設定している。

8. 評価事例

EQRES を用いた検討結果を示す。対象とする建物は、東京都港区に建つ SRC 造 9 階建の事務所ビルとし、地盤による地震動の増幅は考慮しない。耐震診断結果より本建物の  $I_s$  値は 0.56 であった。建物の諸元及び再調達価格、被害復旧価格を表 - 2 に示す。

表 - 2 検討対象建物概要

建設地	建設規模			
	地上階数	地下階数	構造種別	延床面積
東京	9	2	SRC造	3454m <sup>2</sup>
再調達価格	躯体	設備	仕上げ	その他
百万円	197	190	144	17
被害復旧価格	倒壊・大破	中破	小破	軽微
百万円	197	98.5	19.7	19.7

本検討で用いた躯体・設備・仕上げ・その他(内容物等)のフラジリティカーブを図 - 7、8 に示す。

また比較検討の為に、躯体のフラジリティカーブの中央値及び対数標準偏差を、質点系振動モデルを用いた非

線形地震応答解析から求め、検討した結果を図 - 9 に示す。

地震応答解析からフラジリティカーブを算定する方法を以下に示す。

建物の立体骨組みによる荷重増分解析から得られる層せん断力 - 層間変形角関係から各層のばねを決定する。ばねモデルは Tri-linear 型とする。

得られた各層のばねを用いて、9 質点系非線形せん断ばねモデルを作成する。減衰は瞬間剛性比例型とし、一次固有周期に対して 3% を与える。

地震応答解析に用いた地震動は、地震規模と震源距離を考慮した 200 波の工学的基盤での模擬地震動であり、表層の増幅特性は考慮しない。

上述の設定条件に基づき、図 - 3 の基本最大加速度マップより基本加速度を  $200\text{cm/s}^2$  として、本建物の 90% 非超過確率の年超過確率と地震損失率の関係を示すリスクカーブを算定した結果を図 - 10 に示す。

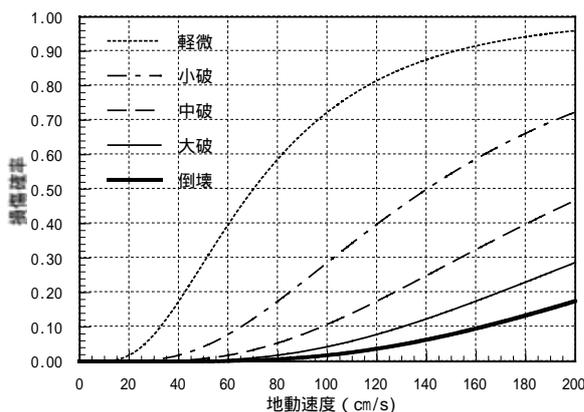


図 - 7 躯体のフラジリティ曲線 ( $I_s=0.56$ )

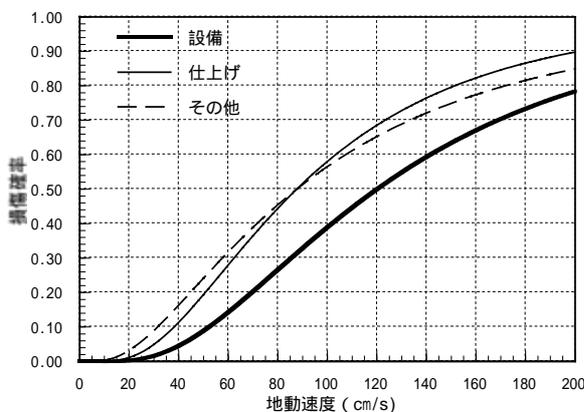


図 - 8 設備・仕上げ・その他のフラジリティ曲線

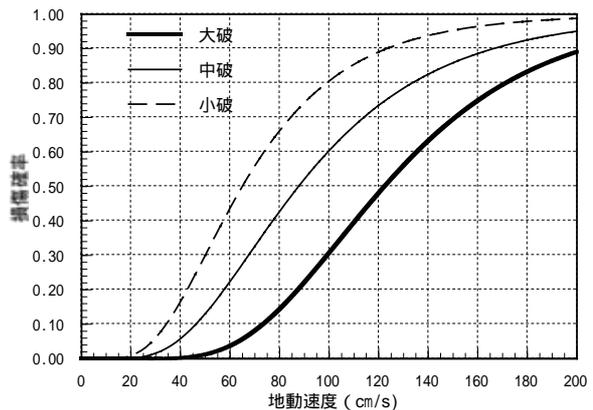


図 - 9 躯体のフラジリティ曲線  
(応答解析結果より算定)

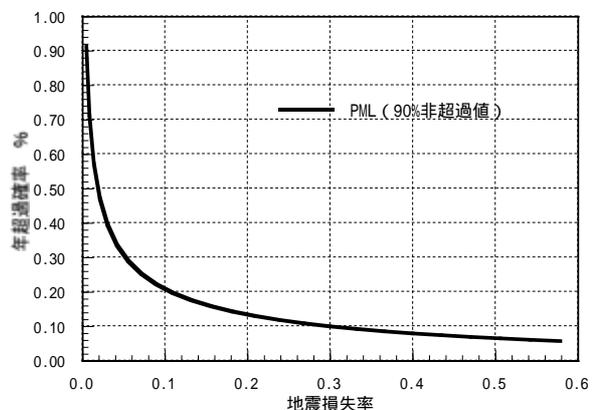


図 - 10 リスクカーブ  
(建物の  $I_s$  値より算定)

検討から得られた平均予想損失 (NEL)、最大予想損失 (PML)、年間予想損失 (AEL) 及び営業停止日数を表 - 3 に示す。

また、EQRES は特定の地震に対しての予想被害額と被害形態に関する情報を提示することが可能である。建物の  $I_s$  値から算定した再現期間 475 年に相当する地震に対しての検討結果の例を図 - 11 に示す。

フラジリティの評価の違いによる予想損失 (NEL、PML、AEL) の算定結果を比較すると、両者はほぼ一致する。

表 - 3 検討結果

	$I_s$ に基づく算定結果	応答解析に基づく算定結果
平均予想損失 NEL	1619万円 (2.93%)	1669万円 (3.09%)
最大予想損失 PML	5342万円 (9.76%)	5508万円 (10.21%)
年間予想損失 AEL	19万円 (0.03%)	23.3万円 (0.04%)
営業停止日数(期待値)	0.02日	0.1日

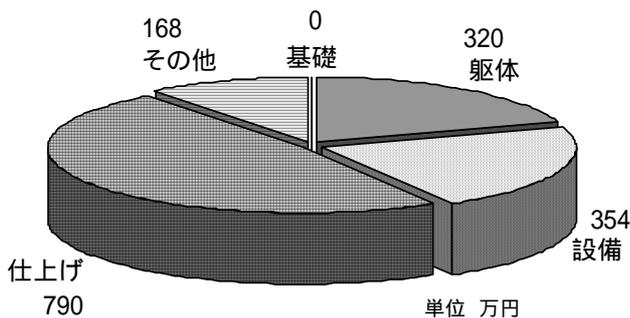


図 - 11 想定地震での被害評価  
(再現期間 475 年:地表最大速度 31.0cm/sec)  
(被害形態別の被害額)

## 9. まとめ

EQRES は簡単な入力のみで地震リスクを算定する目的で開発したプログラムである。本報告では、EQRESの概要を紹介するとともに、躯体のフラジリティ曲線を地震応答解析から詳細に求めた結果と比較し、本プログラムの有効性について検討した。

その結果、

$I_s$ 値及び応答解析結果から得られたフラジリティカーブを比較すると、地盤増幅等により、建設地に大きな地震動が発生する場合には、応答解析から求めた被害発生確率が大きくなる。

$I_s$ 値及び応答解析結果からのPMLの算定結果を比較すると、両者はほぼ一致する。

以上より、躯体の被害算定に差異があるものの、簡易な入力にみよる地震リスクの評価という点からは、 $I_s$ による評価と詳細検討結果はほぼ一致し、プログラムの有効性が確認される。

今後は、プログラムの精度を高めるとともに、火災・延焼被害などその他の被害形態も考慮した損傷評価を可能にするプログラムの拡張を進めていく考えである。

## 【参考文献】

- 1) (社)日本建築学会:建築物荷重指針・同解説、1993年
- 2) 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造建築物の地震リスク表示、地域安全学会論文集 No.2、2000年11月
- 3) 村尾修、山崎文雄:自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数、日本建築学会構造系論文集 第527号、pp.189-196、2000年1月
- 4) 国土交通省住宅局建設指導課監修、既存鉄筋コンク

リート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説、2001年

5) 日本建築学会他、阪神・淡路大震災調査報告 建築編-5 非構造部材、材料・施工、2000年

6) 日本建築学会他、阪神・淡路大震災調査報告 建築編-7 建築設備・建築環境、2000年

7) 建設省建築研究所、平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書、1996年

## 【謝辞】

本プログラムの開発は、地震リスク研究会(五洋建設株式会社・株式会社青木建設・株式会社構造計画研究所・株式会社銭高組・株式会社間組・株式会社松村組)の1年間の成果である。開発にあたり御協力頂いた関係各位に感謝いたします。