

構造耐震指標 I_s 値を用いた地震リスク評価法と評価ソフトの開発

吉井 靖典 中川 太郎
内田 和弘 馮 徳民

概 要

近年、建物が地震時にいかなる被害を生じるかについて関心が持たれるようになり、建物の地震リスク評価の必要性が認識され、評価用ソフトが建設業各社によって開発されてきている。本研究では、少ない入力項目によって効率的に地震リスク評価を行う評価手法について、昨年度に引き続いて検討した。

本評価手法は大きく分類すると地震危険度評価、被害率評価、損失率評価、地震リスク評価、地震リスクマネジメントの 5 段階に分ける事ができる。昨年度は、地震危険度評価から地震リスク評価までを一通り簡易的に行う手法を構築して報告した。本論文では、その後評価手法に追加した以下の項目について報告する。

1) 構造耐震指標 I_s 値を用いて被害率関数を求める方法 2) I_s 値のばらつきから PML を算出する方法 3) 地震リスクに関するライフサイクルコストの算出方法 4) 日本全国の表層地盤の速度増幅率マップ 5) 一貫計算ソフトの開発

これらによって、PML などの地震リスクをより的確に評価する事が出来るようになった。また I_s 値を用いることで、建物を耐震改修した場合としない場合の地震リスクの比較が可能となった。この比較結果は、ライフサイクルコストを低減させる工法を地震リスクの観点から選択する地震リスクマネジメントに活用する事ができる。

Evaluation of Seismic Risk Assessment Using Seismic Index (I_s) and Development of Assessment Software

Abstract

Due to increasing public concern about seismic damage to buildings, many Japanese construction companies have begun developing computer programs for assessing seismic risk. In this paper, we discuss the further development of a new seismic method for assessing seismic risk that requires fewer input terms than traditional methods (and thereby allows rapid assessment).

Procedures of this system are separated into five steps; seismic hazard assessment, damage ratio assessment, fragility assessment, seismic risk assessment and seismic risk management.

A simplified system consisting of the former 4 steps was reported last year. In this year study, following items are added to the simplified system.

- 1) Calculation method of damage ratio function using Seismic Index (I_s).
- 2) Calculation method of PML using dispersion of I_s .
- 3) Calculation method of seismic risk Life Cycle Cost.
- 4) Map of velocity amplification of surface ground.
- 5) Development of assessment software.

With these improvements, the current system enables assessments to be more accurate than the old system. In addition, the effect of seismic reinforcements on seismic risk can be evaluated more efficiently by using I_s . This comparison allows choice of the appropriate seismic reinforcement technique for reducing "Life Cycle Cost" in terms of seismic risk.

キーワード: 地震リスク評価, ライフサイクルコスト
PML, 地震リスクマネジメント, I_s 値

§1. はじめに

本論文では、昨年度に引き続き地震リスク評価法についての研究を報告する。

地震リスク評価法の目的は、建物の地震に対する危険度を、客観的に知る事にある。またその結果は、建物を新築・改築する際、ライフサイクルコストを低減させる工法を地震リスクの観点から選択する地震リスクマネジメントとして利用する事ができる。

本評価手法の概要を図 1 に示す。評価技術は図の四角の中に示したように、大まかに 地震危険度評価、被害率評価、損失率評価、地震リスク評価、地震リスクマネジメントの 5 段階に分ける事ができる。

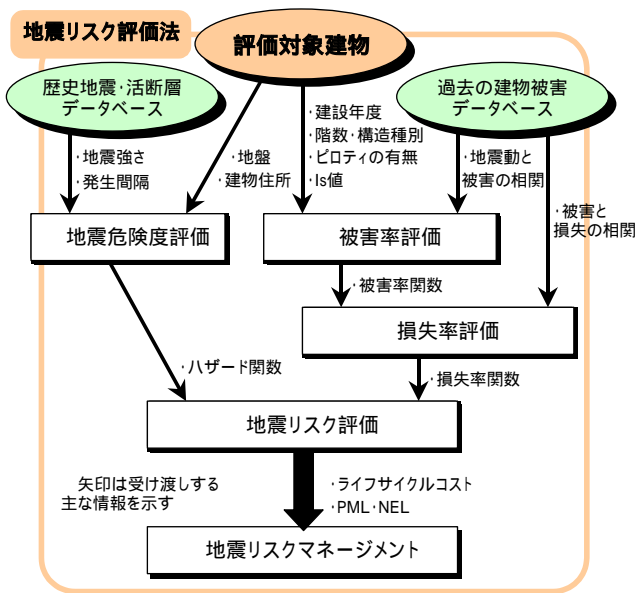


図 1 地震リスク評価手法 概要

昨年度は、 から までを一通り簡易的に行う評価手法を構築して報告した。詳細は文献 1) に譲る。

本論文では、その後新たに追加・開発した点について報告する。概要は以下の通りである。なお < > 内には、その内容が図 1 のどの部分に対応しているかを記した。

- 1) I_s 値を用いて被害率関数を求める方法
建物の持つ構造耐力を適切に評価できるようにする。また、補強前・補強後の比較が可能。 < >
- 2) I_s 値のばらつきから PML を算出する方法
算出方法の提案。 < >
- 3) 地震リスクに関するライフサイクルコストの算出方法
算出方法と、その結果の評価。 < , >
- 4) 日本全国の表層地盤の速度増幅率マップ
速度増幅率データベースの視覚化。 < >
- 5) 一貫計算ソフトの開発

ソフトの使用方法や注意点など。 < ~ >

§2. I_s 値を用いた被害率関数の算出

耐震診断で算出される構造耐震指標 (I_s 値) を利用する事により、対象建物の実状に合った被害率関数を求める事が出来る。また、耐震改修を行う前と後の被害率関数をそれぞれ求められるため、地震リスク評価の観点から改修の効果を確認する事が可能となる。

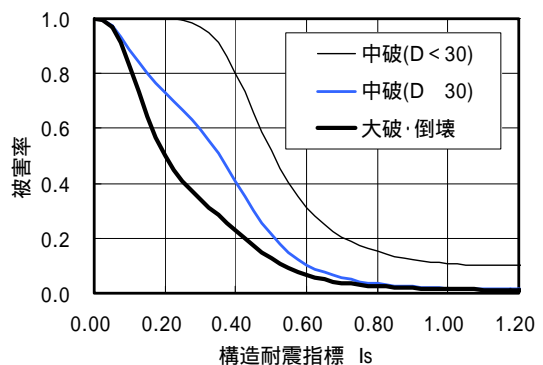
林ら²⁾は兵庫県南部地震の被害調査を基に、RC造建物の被害率 P_f と I_s 値、地表面最大速度 V の関係を次の式 (1) で近似している。

$$P_f(V, I_s) = \Phi\left(\frac{\ln V - \lambda_f(I_s)}{\zeta_f}\right) \quad (1)$$

$$\lambda_f(I_s) = \ln(V_0 \cdot (I_s/0.4)) \quad , \zeta_f = 0.6$$

V_0 は $I_s=0.4$ の時に各被害区分の被害率が 50% になる地表面最大速度であり、軽微 50cm/sec, 小破 100cm/sec, 中破 150cm/sec, 大破 200cm/sec, 倒壊 250cm/sec である。は標準正規累積分布関数である。

式(1)は、図 2 に示した前田らの研究³⁾による兵庫県南部地震の震度 VII 地域に建つ RC 造学校建築物の I_s 値と被害率の関係を参考に推定されたものである。



D は被災度区分判定⁴⁾による損傷割合 D 値を示す。

図 2 I_s 値と被害率の関係

この統計の I_s 値は 2 次診断の値であるため、式(1)を使用する際には 2 次診断の I_s 値を使用する事が望ましい。

本評価手法の被害区分は無被害, 小破, 中破, 大破の 4 種類である。そのため I_s 値から被害率関数を推定する際には、式(1)の V_0 に 100, 150, 200 を代入して小破, 中破, 大破の被害率関数として利用した。

§3. I_s 値のばらつきを用いた PML の算出

3.1 目的

PML の算出方法には特にオーソライズされたものはなく、むしろノウハウとして隠され、あまり公開されていないの

が現状である。しかし、ブラックボックス的な算出方法では、計算結果の信頼性に疑問を持たれかねない。

そこで、簡便かつ明快な手法として RC 造建物の PML を、 I_s 値のばらつきを利用して算出する方法を提案する。

3.2 算定条件

例題として 4 棟の建物を想定し、PML・NEL の算定を行う事とする。各建物の設定を表 1 に示す。

case 1a,1b は、詳細な情報がなく、 I_s 値も調査していない建物の PML を用途などから概算的に求める状況を想定している。

case 2a,2b は、 I_s 値が調査済みであるとする。

建設地はすべて同じ場所とする。従って、予想される地震の大きさは全 case とも同じとなる。

表 1 対象とする建物

case	用途	I_s 値 ()内は推定値	共通条件
1a	共同住宅	調査なし(0.585)	・建設地 ... 東京 ・構造種別 ... RC 造 ・ビ・ロイのない整形建物
1b	事務所	調査なし(0.740)	
2a	共同住宅	0.585	
2b	事務所	0.740	

次に、case 1a,1b の I_s 値を推定する。

建物の年代別・用途別に分類し、その I_s 値の分布を調査した報告が幾つかある。(例えば文献 5) 6)

図 3 に、全国各地の事務所・共同住宅の I_s 値を対数正規分布で近似した三上ら⁷⁾による調査結果を示す。

case 1a,1b の I_s 値には、この分布の平均値を用いる事とする。値を表 1 の I_s 値の欄()内に示す。

また、結果を対比させるため、case 2a,2b の I_s 値調査結果はそれぞれ case 1a,1b の推定値と同じであったと設定した。

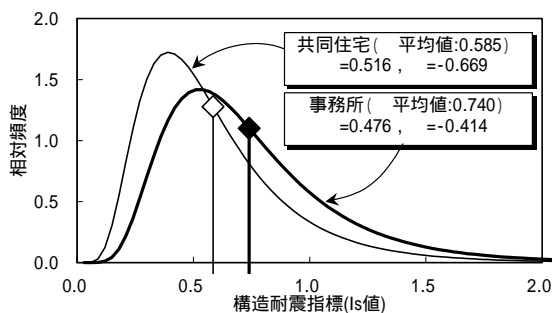


図 3 I_s 値の確率密度分布

この曲線は(2)式で表される対数正規分布関数である。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta \cdot x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2\right)$$

x : 変数 μ : x の平均
 : $\ln x$ の平均 : $\ln x$ の標準偏差

3.3 準備計算

(A)地震動

当該敷地での再現期間 475 年の地震の地表面最大速度は 65cm/sec であるとする。

(B)被害率

式(1)に表 1 の I_s 値を代入する事で求める事とする。例として case 1a の被害率曲線を図 4 に示す。

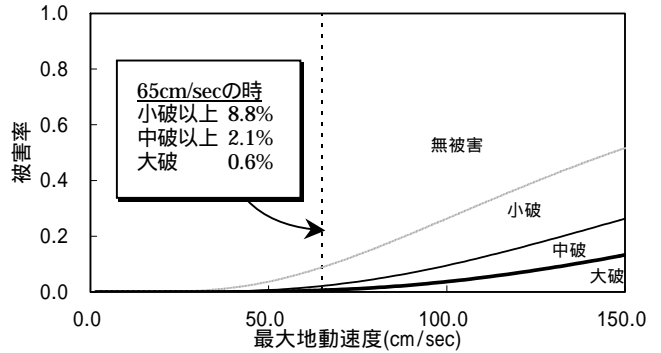


図 4 case 1a の被害率曲線($I_s=0.585$)

(C)損失率

各被害区分に対応する補修費用と損失率は、諏訪ら⁸⁾の研究をもとに表 2 の様に設定する。

表 2 補修費用、損失率の設定

	無被害	小破	中破	大破
補修費用(円/m ²)	0	29,000	60,000	250,000
損失率(%)	0.0	11.6	24.0	100.0

3.4 NEL, PML の算定

NEL

地震動発生時の被害率を被害区分ごとに求め、損失率を乗じて合計する事により、NEL を求める事が出来る。例として case 1a の計算式を式(3)に示す。

$$0.006 \times 1 + (0.021 - 0.006) \times 0.24 + (0.088 - 0.021) \times 0.116 = 0.0175 \quad \text{NEL} = 1.75\% \quad (3)$$

case 1a,2a と case 1b,2b はそれぞれ I_s 値が同じであるため NEL も同じ値となる。表 3 に算定結果を示す。

PML

地震動、被害率、損失率それぞれの値は、確率的なばらつきを持っていると考えられる。ここで式(1)の特性として、 I_s を a 倍しても最大速度 V を $1/a$ 倍しても、得られる P の値が同じである事に着目する。これを利用して、地震動、被害率両方のばらつきを、 I_s 値のばらつきとしてまとめて扱う事とする。損失率のばらつきは、大破の損失率が 100% と、ばらつきを見込んで十分大き目に設定してあると考えて、本検討では無視する。

I_s 値の分布が、対数正規分布であるとみなして各 case の対数標準偏差 を定める。地震動のばらつきには、翠川らの研究⁹⁾を参考に、表層地盤のせん断波速度から

速度増幅率を推定する際の算定式のばらつきである

$A=0.345$ を用いた。

被害率(B)のばらつきは次のように定める。

case1a: I_s 値の分布(図 3)より, $B=0.516$ とする。

case1b: I_s 値の分布(図 3)より, $B=0.476$ とする。

case2a,2b: $B=0.240$ と設定した。ばらつきは case1a,1b の様にはならない。図 3 は全国の強弱様々な建物の I_s 値の分布を意味しているが、耐震診断をしている場合、 I_s 値はただ一つに特定されているからである。中埜ら¹⁰⁾は十勝沖、宮城県沖地震で中破以上の被害を受けた RC 造建物の I_s 値分布として E_T 値(平均 0.399, 標準偏差 0.085, 変動係数 0.213 の正規分布)を求めている。この分布を参考に、 I_s 値が持つ耐震性能のばらつきとして B を定めた。($\ln(1/(1-0.213))=0.240$)

地震動、被害率が独立な対数正規確率変数であるとすると、全体でのばらつき ζ_{all} は式(4)によって求められる。

$$\zeta_{all} = \sqrt{\zeta_A^2 + \zeta_B^2} \quad (4)$$

次式より各 case の 90% 超過 I_s 値を求める事が出来る。

$$I_{s90} = I_s \cdot \exp(-1.2816 \zeta_{all} - 0.5 \zeta_{all}^2) \quad (5)$$

計算結果を表 4 に示す。この I_{s90} から求めた平均損失率を PML として採用する。これは建物群のうち、 I_s 値の小さい方から数えて 10% の順位にある建物の NEL を求める事に相当する(図 5)。

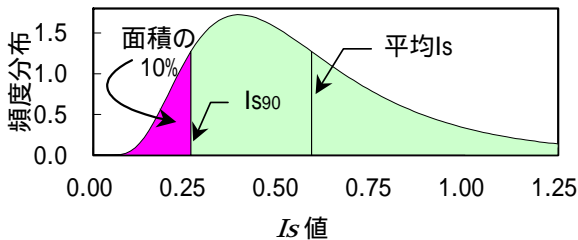


図 5 I_s 値のばらつき

表 3 に PML 算定結果を示す。 I_s 値が小さく、ばらつきが大きい程 PML は大きな値となる。また、耐震診断を行った場合の PML は、行っていない場合に対して約 1/2 に低減されている事が判る。

表 3 各 case の NEL, PML

case	用途	I_s 値	NEL(%)	PML(%) (PML/NEL)
1a	共同住宅	調査	1.75	26.27 (15.01)
1b	事務所	なし	0.71	13.92 (19.61)
2a	共同住宅	調査	1.75	11.94 (6.82)
2b	事務所	あり	0.71	6.26 (8.81)

表 4 各 case の I_s 値とばらつき

case	I_s 値	A	B	ζ_{all}	I_{s90} (I_{s90} / I_s 値)
1a	0.585	0.345	0.516	0.621	0.218 (0.372)
1b	0.740		0.476	0.588	0.293 (0.396)
2a	0.585		0.240	0.420	0.312 (0.534)
2b	0.740				0.396 (0.534)

case2 の設定で、 I_s 値を 0 から 1 まで変化させた場合の損失率を図 6 に示す。PML は NEL に対して、 $I_s=0.2$ のとき 2 倍、 $I_s=0.6$ のとき 7 倍程度の値となっている。

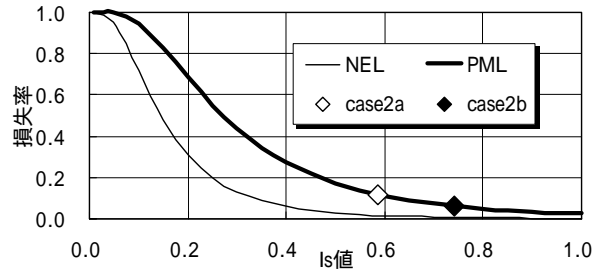


図 6 NEL と PML の関係 ($I_{s90} = I_s \times 0.534$)

PML は、予想の不正確さを補うため NEL に安全率を考慮した値である。従って建物や地震を詳細に検討するほど、PML の値は NEL に近づいていくと考えられる。

§4. ライフサイクルコストの算出

ライフサイクルコスト(LCC)は生涯費用と訳され、建築物の企画設計段階、建設段階、運用管理段階および廃棄処分段階のコストの総計として、金利や物価変動の影響を考慮して求められる値である。

通常この LCC には、地震による損失は含まれない。しかし、地震によって生じる損失率の期待値を求めることで、地震被害を LCC の一要素として考えることができるようになる。

年間期待損失率は式(6)(7)によって求める事ができる。

$$E[L] = \int_0^{\infty} f(v)L(v)dv \quad (6)$$

$$f(v) = -\frac{dP(v)}{dv} \quad (7)$$

ここで、

$E[L]$: 年間期待損失率

$L(v)$: 損失率関数

$f(v)$: 地震動の年超過確率密度分布

$P(v)$: 地震動の年超過確率分布(=ハザード曲線)

v : 地表面最大速度

しかし、損失率関数を数多くの部位の損失の和として求めている関係上、式(6)をそのまま解くのは煩雑となる。そこで、十分大きな値 $v1$ を定めた時、 $v > v1$ であれば $L(v) \approx L(v1)$ であると仮定し、式(8)のように近似した。

$$E[L] \approx \int_0^{v1} f(v)L(v)dv + L(v1) \int_{v1}^{\infty} f(v)dv \quad (8)$$

図7は、東京に建つある建物 (I_s値=0.3)の f(v) × L(v) をグラフ化した例である。ただし図の実線に示すように、式(8)の第1項は長方形に近似させて算出した。

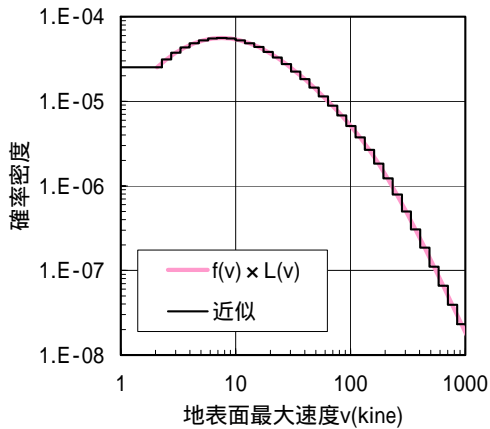


図7 f(v) × L(v)と最大速度 v の関係

年間期待損失率 E[L]を勾配とする直線を描いたグラフが図8である。耐震改修(壁増設 or 制震化)の費用が、縦軸の切片として表現されている。期待損失率が小さい程、このグラフの勾配は小さくなる。

図8の例では、最初に改修費用がかかるものの、改修の効果によって地震リスクが低減されるために、建物を15年以上使用する場合には壁増設をした方がライフサイクルコストの低減効果がある事が読み取れる。同様に、35年以上使用する場合に壁増設よりも制震化した方が有利である。

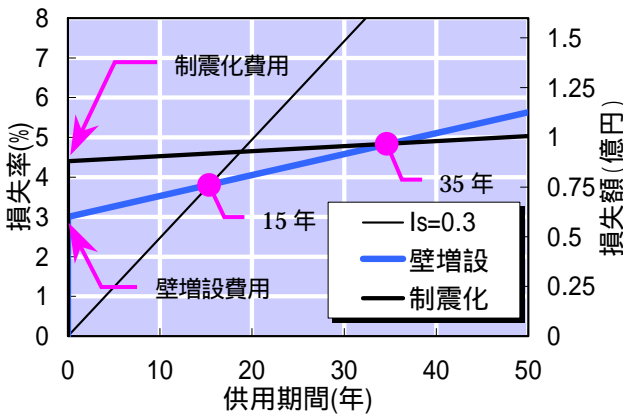


図8 ライフサイクルコスト比較図

§5. 日本全国の表層地盤の速度増幅率マップ

地盤調査結果などのデータがない場合について、松岡、翠川ら¹¹⁾は国土数値情報を用いて、表層地盤の平均せん断波速度 AVS を求める近似式を提案している。

$$\log AVS = c_1 + c_2 \log AL \pm c_3 \quad (9)$$

c₁, c₂, c₃: 表層地盤, 地形, 土質により定まる定数

AL: 標高(m)

表層地盤の速度増幅率(ARV)は下記の翠川らの式¹²⁾を用いて算出した。

$$\log ARV = 1.98 - 0.71 \log AVS(30) \pm 0.15 \quad (10)$$

AVS(30): GL - 30m までの平均せん断波速度

この式を用いて、日本全国約 1km メッシュの速度増幅率データベースを作成した。色分けして図化したものを図9に示す。

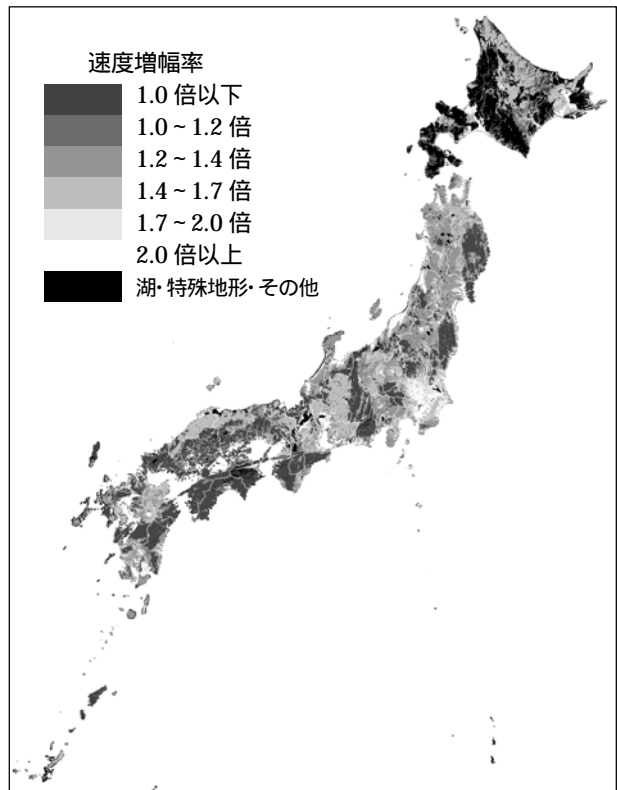


図9 表層地盤の速度増幅率マップ

§6. 一貫計算ソフトの開発

昨年度と本論文の報告内容をもとに、建物の地震リスク評価を表計算ソフト上で一括して行うアプリケーションを作成した。

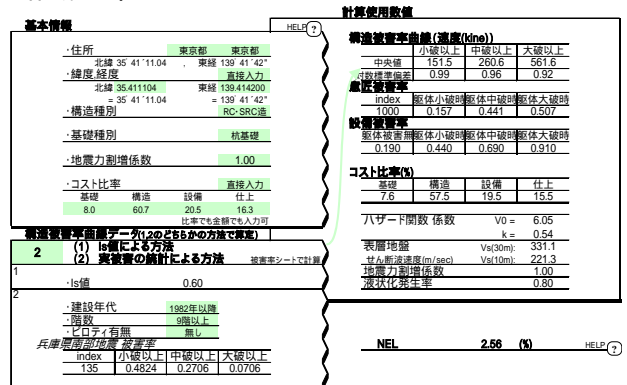


図10 評価ソフト入力画面

基本的には図10の入力画面において、要求された情報を入力・選択するだけで、即時地震リスク評価を行う事が可能である。以下に本ソフトの特徴や注意点を示す。

地震危険度評価：全国都道府県の市町村単位のデータベースから選択する事が出来る。

地盤情報：前章で述べた 1km メッシュのデータベースを用いている。位置が 1km 違うだけで全く違う答えとなる場合があるので、実状の地盤を適切に評価しているかどうかの確認が必要である。敷地の地盤調査結果があれば、それを利用する事が望ましい。

建物の評価：建物の形が不整形でねじれが大きい場合や、増築・用途の変更により建物重量が増えた場合などにはその影響を考慮する必要がある。偏心率による設計荷重の割増や、設計時重量に対する建物重量の増加比率などを参考に、地震力の割増を行うなどする。

被害率評価：統計資料からと耐震診断結果からの二通りの方法を選択して評価する事ができる。

PML：PML の算出は自動的には行っていない。NEL を割り増す(分散を決めてベータ分布の 90%非超過値とする、2~3 倍程度の倍率で固定するなど)方法や、3 章で述べた Is 値を低減する方法を用いて算出する。

評価結果としては、NEL、年間期待損失率や以下のようなグラフの表示が可能である。

- ・地震ハザード曲線 ・被害率曲線(図4)
- ・損失率曲線(フラジリティ曲線) ・地震リスク曲線
- ・ライフサイクルコスト曲線(図8)

§7. まとめ

本論文では、既に報告した地震リスク評価手法¹⁾に対しての改良・追加点について報告した。概要は以下の通りである。

- 1) Is 値を用いて被害率関数を求める方法
- 2) Is 値のばらつきから PML を算出する方法
- 3) 地震リスクに関するライフサイクルコストの算出方法
- 4) 日本全国の表層地盤の速度増幅率マップ
- 5) 一貫計算ソフトの開発

これらによって、PML などの地震リスクをより的確に評価する事が出来るようになった。また Is 値を用いることで、建物を耐震改修した場合としない場合の地震リスクの比較が可能となった。この比較結果は、地震リスクの観点からライフサイクルコスト的に有利な工法を選択する地震リスクマネジメントに活用する事ができる。

参考文献

- 1) 中川 太郎, 内田 和弘, 馮 徳民, 吉井 靖典; 「兵庫県南部地震の被害調査結果に基づく建築物の簡易的地震リスク評価法に関する研究」, フジタ技術研究報告第

38 号, pp97-102, 2002.11

- 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 No2, pp235-242, 2000.11
- 3) 堀 伸輔, 横松 竜司, 前田 匡樹; 「1995 年兵庫県南部地震により被災した RC 造学校建築物の構造耐震指標 Is 値と被害の関係に関する考察」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp511-512, 1997.9
- 4) 日本建築防災協会; 「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針 (RC 造編)」, 1991.2
- 5) 高橋 雅人, 澤田 幸司, 藤井 賢志, 中埜 良昭, 真田 靖, 岡田 恒男; 「既存鉄筋コンクリート造学校建築物の耐震診断・耐震補強事例の分析 (その 1 既存建物の Is 値分布の地域係数による検討)」: 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp857-858, 2002.8
- 6) 中谷 誠, 張 相律, 西川 忠, 麻里 哲広, 石山 祐二; 「耐震診断結果に基づく北海道の既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震性評価 (その 1 統計的手法による地震被害予測)」: 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp645-646, 1998.9
- 7) 三上 純一郎, 望月 利男, 栗山 利男, 荏本 孝久; 「既存非木造建築物の耐震性能の分布に関する調査研究 その 2: RC 造の構造耐震指標の分布について」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp71-72, 1998.9
- 8) 諏訪 仁, 野畑 有秀, 関 松太郎; 「兵庫県南部地震の被災データベースを用いた既存建築物の地震リスク評価に関する研究」: 日本建築学会技術報告集 第 12 号 pp41-46, 2001.1
- 9) 翠川 三郎, 大竹 雄; 「地震動強さの距離減衰式にみられるパラツキに関する基礎的分析」: 日本地震工学会論文集 第 3 巻 第 1 号 pp59-70, 2003.2
- 10) 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 pp37-43, 1989.12
- 11) 松岡昌志, 翠川三郎; 「国土数値情報を利用した地盤の平均 S 波速度の推定」, 日本建築学会構造系論文集 第 443 号 pp.65-71, 1993
- 12) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一; 「1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価」, 日本建築学会構造系論文集 第 442 号 pp.71-77, 1992



吉井 靖典

ひとこと

地震リスク評価は、建築構造から地震予知、建物利用者の経済活動まで広範な分野をまたいでいるため、色々勉強できて楽しかったです。