

建物被害推定に関する検討

— 地震損傷度曲線の簡易推定式の提案 —

龍神 弘明・嶋 登志夫*¹・水谷 守*²

Institute Study of Estimation of Buildings Damage

– Development of Simple Estimate Formula of Seismic Fragility Curve –

Hiroaki RYUJIN, Toshio SHIMA, Mamoru MIZUTANI

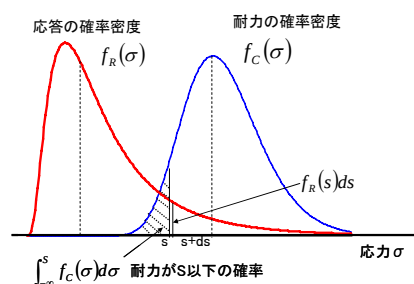


図-1 損傷確率

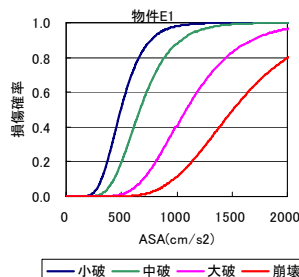


図-2 SFC

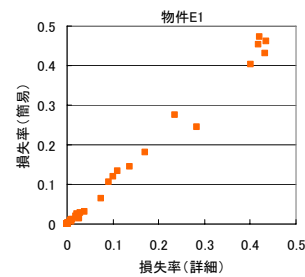


図-3 損傷率比較

研究の目的

近年、注目を集めている事業継続計画（Business Continuity Plan）の検討において、耐震対策案や対策優先順位を決定する際に建物の被害を定量的に評価する必要がある。そのためには、地震動の大きさと被害の発生確率（損傷確率）の関係（地震損傷度曲線: SFC (seismic fragility curve)）を評価する必要がある。

応答確率を推定することが出来れば、構造信頼性の手法を用いて、耐力の確率分布を参照することにより、地震動の大きさに対応した損傷確率を評価することが出来る。構造物の応答確率は、地震動の大きさに依存した応答の大きさとそのばらつきの確率分布を意味するもので、基本的に構造物ごとに評価されるが、個別に評価するにはかなりの労力を要する。そこで、計画段階で簡易的な情報のみで利用できる地震損傷度曲線を作成することは有意義であると考え、本報では、平均応答加速度（ASA）を地震動指標とする SFC の作成手順と、その SFC の簡易推定式の提案を目的としている。

技術の説明

建物は地震による応答が耐力を超えないように設計される。しかし、耐力も応答もばらついている。そこで、構造信頼性理論を利用し、被害の発生（損傷）を構造物に発生する応答値が耐力値を超える現象（図-1）と解釈し、応答の大きさ、耐力の大きさの双方を確率評価し、応答確率が耐力確率を超える確率を算定して損傷確率とする。

耐力確率は、損傷モードごとに層間変形角で中央値を設定し、対数標準偏差は一律0.2とした。応答確率は、さまざまな地震動を用いた非線形応答解析の結果を統計処理することにより評価するものとした。特定の大きさの地震動に対する応答のばらつきを検討する場合、地震動自体のばらつきが応答のばらつきに大きく作用することが考えられるが、本論では100余りの地震動で検討を行った。地震動の大きさの指標としては、応答のばらつきは建物の振動性状に左右されること、応答性状は非定常性と非線形性を示すことを考慮し、対象構造物の応答と関連の大きい周期帯で応答加速度（SA）を平均した平均応答加速度（ASA）を利用している。また、地震動の大きさと応答の大きさの中央値の関係は特定の形式の曲線を仮定し、最小二乗法により未定係数を評価している。

主な結論

非線形応答解析に基づいて、建物ごとに同定した ASA を利用する SFC の評価手順を示し、RC ラーメン構造に対応する SFC の簡易推定式を提案した。また、その簡易 SFC（図-2）を利用して算出した損失率が、概ね詳細検討による損失率を評価できていることを確認した（図-3）。

* 1 本店 リニューアル事業部営業 1 G

* 2 株式会社モダンエンジニアリングアンドデザイン

建物被害推定に関する検討 — 地震損傷度曲線の簡易推定式の提案 —

龍 神 弘 明 嶋 登 志 夫*¹
水 谷 守*²

要 旨

近年、注目を集めている事業継続計画の策定においては、対策案の選定や対策優先順位の決定に資するために、リスクを定量評価することが有効である。地震リスクの定量化においては、地震動の大きさと被害要因の発生確率（損傷確率）の関係を評価することが必要となり、この関係は地震損傷度曲線（SFC）で表現することができる。被害の発生（損傷）を構造物に発生する応答値が耐力値を超える現象と解釈すれば、応答確率と耐力確率を評価し、損傷確率を算定することができる。構造物の応答確率は、地震動の大きさに依存した応答の大きさとそのばらつきの確率分布を意味するもので、構造物ごとに詳細な検討を行って評価されるものであり、多くの労力を要する。多くの構造物を対象とすると、計画段階の構造物を対象とするときなどには、簡易な情報のみで SFC を作成することができれば労力を大幅に削減することができる。本報では、構造物ごとに実施した多数の地震動による応答解析結果に基づき求めた応答の中央値の関係式と対数標準偏差を利用して、RC ラーメン構造に対応する SFC の簡易推定式を提案した。

キーワード 被害推定／地震損傷度曲線／応答確率／平均応答加速度／RC造／簡易推定式

目 次

- | | |
|-------------|-------------|
| 1. はじめに | 4. 簡易推定式の提案 |
| 2. SFC評価の流れ | 5. おわりに |
| 3. 評価結果 | |

INSTITUTE STUDY OF ESTIMATION OF BUILDINGS DAMAGE - DEVELOPMENT OF SIMPLE ESTIMATE FORMULA OF SEISMIC FRAGILITY CURVE -

Hiroaki RYUJIN Toshio SHIMA
Mamoru MIZUTANI

Synopsis:

In Business Continuity Planning, quantitative evaluation of risks is one of major tasks in order to clarify priority levels of countermeasures. As for seismic risk evaluation, relationships of damage probabilities to ground motions; Seismic Fragility Curves, are required. Damage may be considered as a phenomenon that the response of a structure exceeds its capacity level. Then damage probability is calculated from probability function of the response given ground motion and probability function of the capacity. To estimate probability function of the response, in general, lots of response analyses are required.

In this paper, detailed procedures to estimate response probability function unique to individual facilities are firstly presented and based on estimated results of several facilities a simpler general approach of the estimation are developed.

1. はじめに

近年、注目を集めている事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）の策定においては、対策案の選定や対策優先順位の決定に資するために、リスクを定量評価することが有効である。

リスクを定量化する際、地震国である我が国では、地震によるリスクを含めて考慮することが必要である。地震によるリスクは、以下に示す手順により定量化することができる。

- ① 地震動を原因として対象施設に被害を与える要因を抽出する。
- ② 各要因の組み合わせとして被害形態（損傷モード）を網羅する。
- ③ 各被害形態の被害の大きさ（物理的損失）を推定する。
- ④ 各被害形態が事業継続に与える影響（機能低下量、修復期間など）を評価する。
- ⑤ 地震動の大きさに応じた被害要因の発生確率に基づき各被害形態の発生確率を評価して、被害の大きさと掛け合わせることでリスクを定量化する。

地震リスクの定量化においては、⑤に示すように、地震動の大きさと被害要因の発生確率（損傷確率）の関係を評価することが必要となり、この関係は地震損傷度曲線（SFC：Seismic Fragility Curve）で表現することができる。構造物の SFC に関しては、1970 年代米国における地震 PRA（Probabilistic Risk Assessment）において初めて提示され¹⁾、その後も多くの研究者により様々な SFC が提案²⁾されている。SFC は、十分な数の地震動記録と構造物の被害情報より、統計的に評価することが望ましい。1995 年の阪神大震災の被害データを利用した統計的検討に基づく SFC³⁾ も存在するが、統計的方法のみから SFC を評価することは、構造物に被害が発生したデータは多く存在していないことから困難である。

被害の発生（損傷）を構造物に発生する応答値が耐力値を超える現象と解釈すれば、応答確率と耐力確率を評価し、損傷確率を算定することができる（図-1、図-2）。この構造信頼性理論に基づく損傷確率の推定方法を利用することにより、個々の構造物の応答特性や強度特性を考慮した SFC 評価が可能となる。

構造物の応答確率は、地震動の大きさに依存した応答の大きさとそのばらつきの確率分布を意味するもので、構造物ごとに詳細な検討を行って評価されるものであり、多くの労力を要する。多くの構造物を対象とするとき、計画段階の構造物を対象とするときなどには、個々の建物に対する基本情報（建設年代、構造種別、構造形式、高さ）のみで SFC を作成することができれば労力を大幅に削減することができる。

以上より、本報は、以下の項目について実施した結果を報告するものである。

- ・ 応答解析結果を利用した応答確率評価に基づく SFC の作成手順を提示する。
- ・ RC 造ラーメン構造の複数の建物に対する詳細な SFC 評価結果に基づいて簡易推定式を提案する。
- ・ 簡易推定式と詳細な SFC 評価結果を比較し、簡易推定式の妥当性を評価する。

2. SFC 評価の流れ

2.1 SFC 評価の概要

図-1 から図-3 に SFC 算定における概念図を示す。

SFC は耐力確率分布と応答確率分布から評価する。分布形状は双方とも対数正規分布と仮定している。耐力確率は後述する損傷モードに対応して評価されるが、中央値および対数標準偏差は地震動指標の大きさに依存しない。一方、応答確率の中央値は地震動指標のレベルに対して単調増加し、対数標準偏差は地震動指標のレベルによらず一定と考える（図-1）。

図-2 に示すように応答の確率密度と損傷モードに対応した耐力の確率密度より地震動指標レベルにおける損傷確率が算定できる。従って、損傷確率は式〔1〕に示す地震動指標の関数として算定でき、各地震動指標レベルで算定することにより図-3 に示す SFC が算定できる。

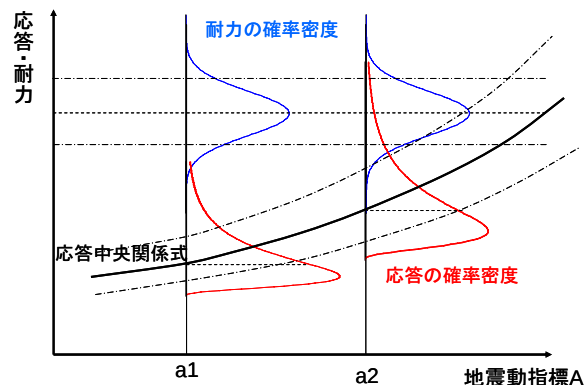


図-1 SFC の算定における概念図

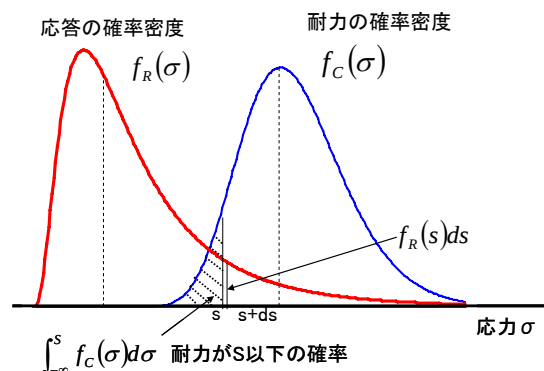


図-2 損傷確率の算定

$$P(A) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(s, A) \int_{-\infty}^s f_C(\sigma) d\sigma \cdot ds \quad [1]$$

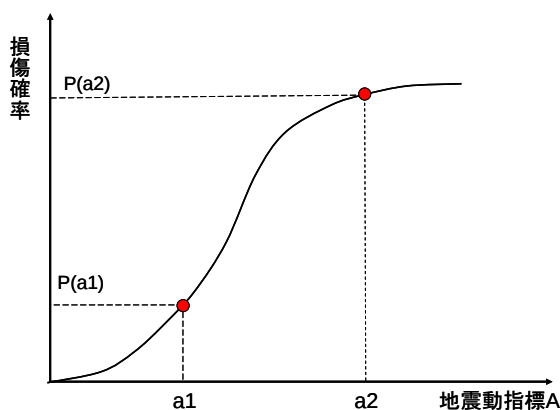


図-3 SFC 概念図

2.2 SFC評価の流れ

図-4 に SFC 評価の手順を示す。

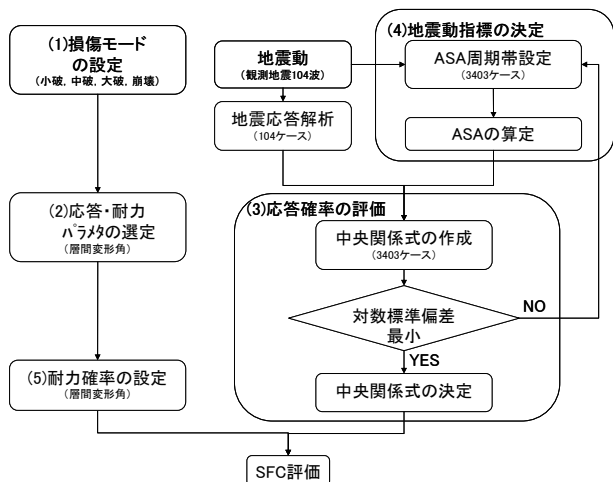


図-4 SFC 評価フロー

(1) 損傷モードの設定

損傷モードは、建物の被害形態の分類で、通常、複数設定される(図-5)。小破、中破、大破といった用語が用いられているが、損傷モードとしては、構造物が弾性変形範囲内、塑性変形範囲ではあるが補修することにより使用可能、構造物の崩壊により使用不可能といったように物理的な状態に対応させて設定されるものである。

損傷モードの分類においては、図-5 に示すようにイベントツリー(ET)を利用し、地震動を原因として建物に被害を与える要因の組み合わせとしてモデル化することが有効である。SFC は、ET の分岐確率の算定に利用する。

本報では、図-5 の ET で構造被害によるものだけを考慮する(地盤被害なし、内容設備被害考慮しない)ものとして、表-1 の四角で囲んだ 5 種類の損傷モードを設定した。ここでは、小破、中破、大破、崩壊の 4 種類の SFC を算定する。

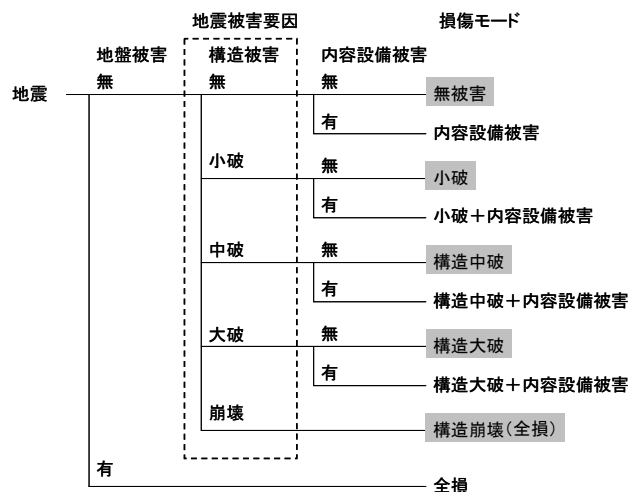


図-5 ET による損傷モードの設定例

表-1 損傷モード

損傷モード	状 況
小破 (非構造部材の損傷)	躯体に異常はないが仕上げ材等の非構造部材に損傷を受け、補修が必要な状態
構造中破	柱・梁等の構造部材が損傷を受け補修が必要な状態
構造大破	建替えにはいたらないが全面修理が必要な状態
構造崩壊 (全損)	地震動による構造崩壊、建替えが必要な状態

(2) 応答・耐力パラメタの選定

前述したように、SFC を評価する場合には、その物理的状态を定義する必要がある。構造物の健全性を示す物理的パラメタとして、層間変形角や層せん断力係数、床の応答加速度などが一般的に利用される。これらのパラメタを用いて、耐力が示されれば、同じパラメタに対する応答値が耐力を超える状態として損傷を定義することができる。

層間変形角は非構造部材に対する強制変形の大きさとも考えることができるため、その損傷を含めて考慮する際にはより合理的なパラメタである。一方、層せん断力係数は、それが設計情報としても用いられるため、設計強度との関連を検討する際には有用なパラメタである。また、床の応答加速度は、設置された機器の健全性の検討に利用することが考えられる。目的に応じて適切なパラメタを選定する必要がある。

本報では、小破を非構造部材の損傷と設定していることより層間変形角をパラメタとする。なお、多層の建物を対象とするため、各階の層間変形角を平均した平均層間変形角を応答・耐力パラメタとして利用する。

(3) 応答確率の評価

応答のパラメタが選定されれば、地震動が作用した結果として、構造物に生じる応答の大きさの確率評価を行う。構造物の応答は地震動の大きさによって変化するのには当然であるが、ここでは、同じ大きさの地震動に対して、構造物の応答はどのような確率分布を示すかという点を評価するものである。

応答確率（条件付応答確率）は、特定の大きさとされる多数の地震動が構造物に作用したときに生じる応答を、前節で規定したパラメタ（平均層間変形角）を用いて整理し、統計処理して得られる。なお、この応答確率が耐力確率を超える確率が、その大きさの地震動に対する損傷確率となる。SFC を評価するためには、小さな地震動から非常に大きな地震動まで、様々な大きさの地震動に対して応答確率を評価する必要がある。

本報では、多数の地震動による応答解析結果を統計処理し、中央値の関係式（中央関係式）と対数標準偏差を評価している。なお、中央関係式は特定の曲線と仮定して、最小二乗法により未定係数を評価した。

(4) 地震動指標の評価

本報では、多数の地震動を利用した応答解析結果に基づき、構造物の被害推定に利用すべき地震動指標を統計的に検討した。特定の大きさの地震動に対する応答のばらつきを検討する場合、地震動自体のばらつきが応答のばらつきに大きく作用することが考えられるが、本報では、104 波の地震動で検討を行った。図-6 に検討に用いた地震動⁴⁾の加速度応答スペクトルを示す。

地震被害推定において利用する地震動指標は、対象構造物の応答の大きさをよく説明する地震動の指標を用いるべきである。地震動指標としては、最大加速度、最大速度、計測震度などが良く知られているが、構造物の振動特性を考慮すれば、応答加速度もまた地震動指標として利用価値は高いと思われる。

最大加速度は、構造物の地震被害との関連において大きなばらつきを示すことから、地震被害の地震動指標としては適切であるとは言い難い。

最大速度は、建物被害との関連が大きいということから近年良く用いられるようになった地震動指標である。最大加速度と比較すると、確かに最大速度は地震被害に対する説明力が高い。しかし、最大速度は地震動の比較的長周期の成分を大きく反映するものであり、様々な応答特性を示す多様な構造物に一元的に利用できるのであらうかという疑問も残る。

構造物が線形的な応答特性を示す場合、構造物の共振周期に相当する地震動の周波数成分がその応答に大きく影響することは明らかであるが、地震動はホワイトノイズではなく、また、構造物被害は、多くの場合、線形領域の外で生じることから、応答加速度（SA）がそのまま

構造物の応答を説明する地震動指標に最適であるとはいえない。

本報では、応答のばらつきは構造物の振動性状に左右されること、応答特性は非定常性と非線形性を示すことを考慮し、単一の SA ではなく、対象構造物の応答と関連の大きい周期帯で SA を平均した平均応答加速度（ASA）を利用することにした。

中央関係式に関する対数標準偏差が最も小さくなるように周期帯の同定を行った。従って、建物によって ASA の周期帯は異なる。周期帯同定においては、対数軸上で等間隔に離散化された 82 周期（0.02 秒から 4.00 秒）を対象とした。図-7 に検討方法の概念図を示す。ここでは、ASA の周期帯の短周期側の端点を始端周期、長周期側の端点を終端周期と呼ぶことにする。一つの曲線は始端周期を固定し、終端周期を延長させることにより対数標準偏差がどのように変化するかを示したものである。例えば、始端周期 t_2 に固定した場合は、●は t_2 の SA による対数標準偏差を、▲は周期帯 t_2 - t_4 の ASA による対数標準偏差を、■は周期帯 t_2 - t_5 の ASA による対数標準偏差を示している。このグラフにおいて最も対数標準偏差が小さくなる点に対応する周期帯の ASA を採用した。

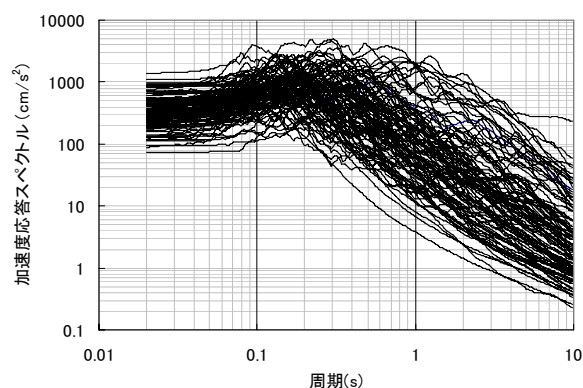


図-6 加速度応答スペクトル

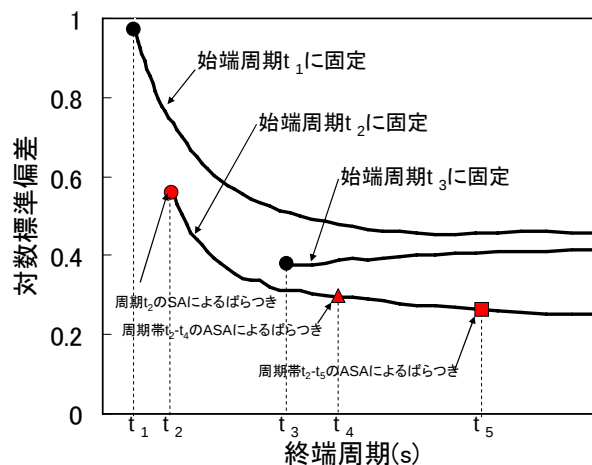


図-7 検討結果概念図

(5) 耐力確率の設定

耐力確率は、損傷モードごとに中央値と対数標準偏差を設定する。本報では、表-2 のように平均層間変形角で中央値を設定した。また、対数標準偏差は一律 0.2 とした。

3. 評価結果

3.1 検討モデル

構造物の応答確率を評価するために、応答解析モデルを利用し、非線形性を考慮した数値解析実験を行った。

本結果を持いて、簡易推定式を提案することを目的としているために、簡易な情報で建物をグルーピング化したものについて検討する必要がある。ここでは、建設年代、構造種別、構造形式を共通とした。表-3 に検討モデルを示す。1981 年以降に建設された RC 造建物でラーメン構造の 8 建物、10 モデル（建物 E、建物 H は 2 方向をモデル化した）とした。

3.2 応答確率の評価結果

応答確率は、個々の建物に対して図-6 に示す地震動に対する応答結果を以下の方法で統計処理することにより評価した。

地震動の大きさと応答の大きさの中央値の対数の関係は、応答解析結果の散布図を参照して、式〔2〕の特定の形式の曲線を仮定した。この時、応答は対数正規分布を示すと考えられるため、式〔2〕に対して最小二乗法を用いて未定係数を評価している。

$$\ln Y_m(X) = p \cdot (\ln X)^q + r \quad [2]$$

ここで、X は地震波の ASA、Y_m は応答中央値、p,q,r は未定係数である。

式〔2〕は線形独立ではないため、Taylor 展開を利用し、繰り返し計算による最小二乗法を利用した。

同定周期帯範囲の ASA に対して最小二乗法を適用し、その二乗誤差から対数標準偏差を評価する。この対数標準偏差が最小となる周期帯の ASA を採用して中央関係式を決定する。表-4 に同定された ASA の周期帯を示す。始端周期は、対象建物の固有周期の 0.5～0.8 倍程度で固有周期が長くなるほど始端周期が一次固有周期に対しより短くなる傾向がある。一方、終端周期はほとんど 4 秒となった。表-5 に同定した ASA を用いて決定した中央関係式の未定係数 p,q,r の値とその対数標準偏差を示す。

今回検討に利用した非線形応答計算は、各建物に対して 104 地震を用いたものであり、その周期帯同定では、3403 回の最小二乗法を必要とした。なお、最小二乗法でいくつか発散する周期帯があったが、最小値の決定には影響のないところであった。

図-8 に中央関係式と応答値の比較を検討モデルごとに示す。設定した中央関係式が、ASA と層間変形角の関係を適切に表現していることがわかる。

表-2 耐力パラメタ中央値

損傷モード	中央値 (平均層間変形角)
小破(非構造部材の損傷)	1/150
構造中破	1/100
構造大破	1/50
構造崩壊(全損)	1/30

表-3 検討モデル一覧

物件名	階数 (階)	高さ H(m)	一次固有周期 T1(s)
建物A	4	11.5	0.37
建物B	6	17.4	0.44
建物C	6	17.7	0.36
建物D	9	29.6	0.86
建物E1	10	31.2	0.71
建物E2	10	31.2	0.82
建物F	14	41.2	1.08
建物G	14	41.5	1.10
建物H1	14	43.7	0.92
建物H2	14	43.7	1.05

表-4 ASA 周期範囲

物件名	始端周期 Ts(s)	終端周期 Te(s)	Ts/T1
建物A	0.30	4.00	0.81
建物B	0.32	3.78	0.73
建物C	0.27	4.00	0.75
建物D	0.53	4.00	0.62
建物E1	0.38	4.00	0.54
建物E2	0.48	4.00	0.59
建物F	0.50	4.00	0.46
建物G	0.57	4.00	0.52
建物H1	0.50	4.00	0.54
建物H2	0.50	4.00	0.48

表-5 未定係数 p, q, r 一覧表

物件名	p	q	r	対数 標準偏差
建物A	0.029	2.623	-8.074	0.364
建物B	0.020	2.775	-8.360	0.325
建物C	0.023	2.728	-8.702	0.358
建物D	0.234	1.629	-9.205	0.276
建物E1	0.075	2.149	-8.806	0.275
建物E2	0.137	1.868	-8.904	0.275
建物F	0.246	1.624	-9.635	0.268
建物G	0.330	1.483	-9.550	0.250
建物H1	0.196	1.703	-9.305	0.263
建物H2	0.264	1.575	-9.491	0.256

図-9 に ASA の周期帯を変化させた場合の対数標準偏差の大きさを検討モデルごとに示す。図中の破線は物件の一次固有周期を示している。一次固有周期より始端周期が短い場合は、終端周期が 1 秒程度まで急速に対数標準偏差が減少している。それより終端周期を延長しても対数標準偏差の減少は小さい。

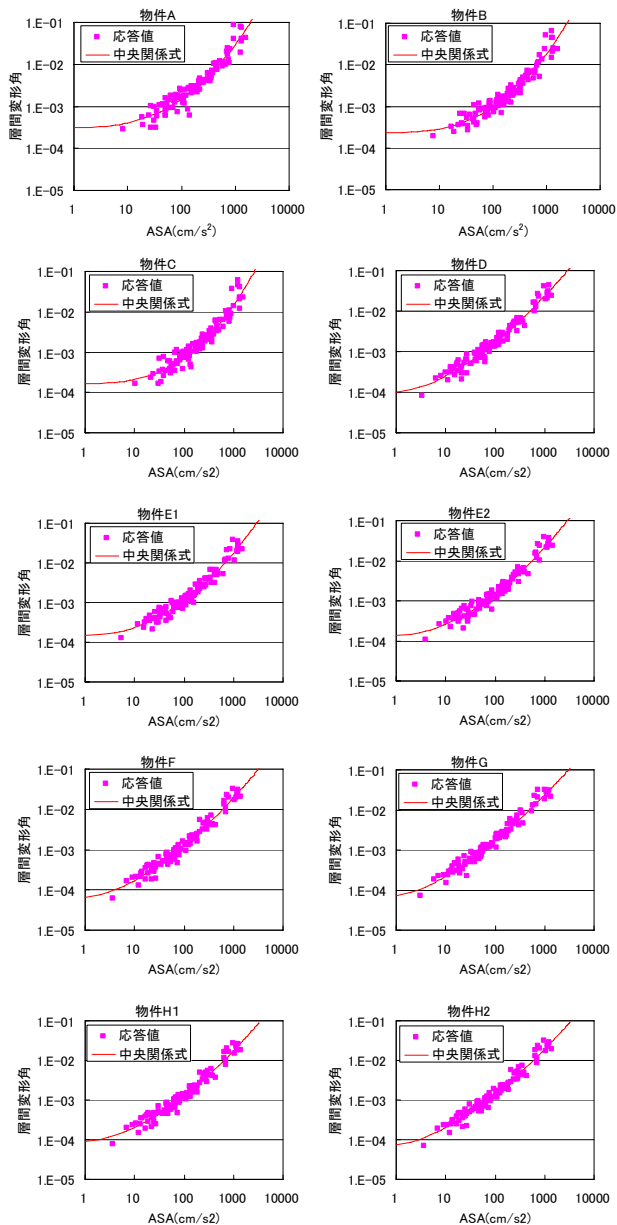


図-8 中央関係式

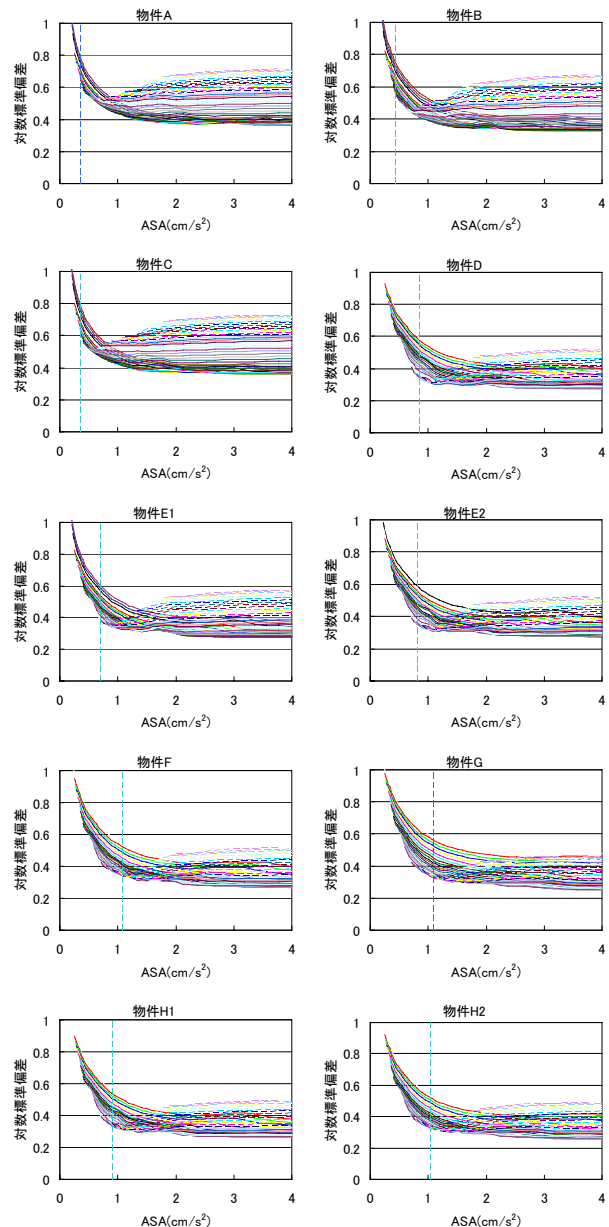


図-9 対数標準偏差

一方、始端周期が一次固有周期より長い場合は、終端周期を延長していくと対数標準偏差が若干増える傾向がある。従って、始端周期は、一次固有周期よりも短く設定しなければならない。適切な始端周期を設定した場合は、終端周期を 4 秒としても、対数標準偏差は大きく変化しない。また、ここでは示していないが、終端周期を 4 秒以上としても大きく変わらないことを確認している。

3.3 SFC評価結果

3.2 で得られた中央関係式と対数標準偏差および表-2 に設定した耐力確率から式〔1〕を利用して各損傷モードの SFC を求められる。図-10 に算定した SFC を示す。この時の ASA は、各建物に対応したもので建物ごとに異なり、一概に、建物間での比較はできないことに留意する。

3.4 地震動指標PGVとの比較

一般的によく地震動指標として利用されている最大速度 (PGV) で中央関係式を求めた。中央関係式の未定係数と対数標準偏差を表-6 に示す。PGV は地震動の速度最大値であり、建物に依存しない指標なので利用しやすいという利点が存在しているが、建物の振動特性を反映していない。

一方、ASA は建物の振動特性を関連付けているパラメタである。ASA を地震動指標とした場合は、PGV の場合より対数標準偏差が小さくなっている (表-5、表-6)。従って、ASA の方が応答を説明する力が高いと考えることができる。ただし、今回利用した地震動は 100 波程度であり、今後さらに多くの地震動を追加した検討を行う必要がある。

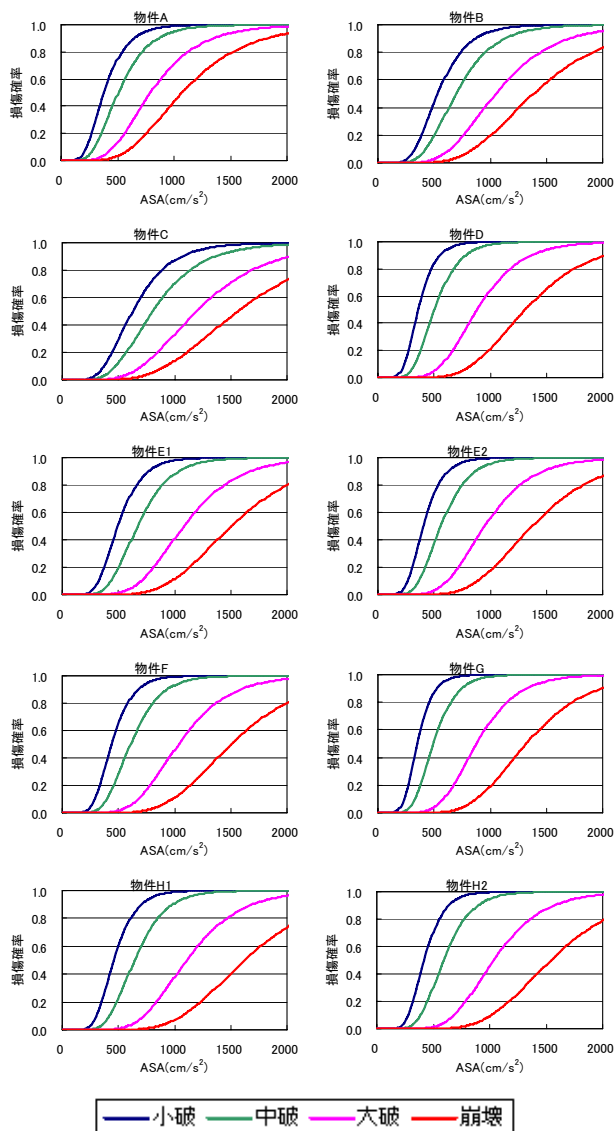


図-10 SFC

表-6 未定係数 p, q, r 一覧表 (PGV)

物件名	p	q	r	対数標準偏差
建物A	0.542	1.455	-8.363	0.425
建物B	0.457	1.535	-8.687	0.368
建物C	0.565	1.419	-8.912	0.438
建物D	0.855	1.229	-9.550	0.358
建物E1	0.726	1.289	-9.256	0.326
建物E2	0.786	1.261	-9.395	0.316
建物F	0.909	1.212	-9.884	0.368
建物G	0.887	1.219	-9.701	0.403
建物H1	0.837	1.231	-9.685	0.344
建物H2	0.869	1.219	-9.706	0.376

5. 簡易推定式の提案

5.1 略算式の提案

特定の構造物の数値モデルを利用し、応答解析結果から、構造物の応答確率の評価を行った。しかし、この方法を用いるためには、構造物の非線形応答解析モデルが

必要であり、限られた情報しか得られない多くの建物に対して、上記の解析を実施して評価することは実用的ではない。そこで、構造物に関してある程度の情報が与えられた場合に、簡便に応答確率を推定する方法を検討する。

本検討では、RC ラーメン構造に構造種別・形式を限定し、応答性状と関係が深いと考えられる建物高さ情報を参照して応答確率を推定する方法を考える。

応答確率を推定するためには、ASA の周期帯（始端周期）、中央関係式の未定係数および応答の対数標準偏差を決定する必要がある。3 章で得られた ASA 始端周期、中央関係式および対数標準偏差を利用し、それぞれの簡易式を提案する。図-11 に ASA の始端周期と建物高さの関係、図-12 に係数 p, q, r および応答の対数標準偏差と建物高さの関係（図-12）を、それぞれ示す。係数 p を指数関数、それ以外を直線で近似することにより、建物高さに基づいて応答確率を評価する ASA 周期帯の始端周期および応答の中央関係式の未定係数を決定する。なお、終端周期は、すべて 4 秒としている。

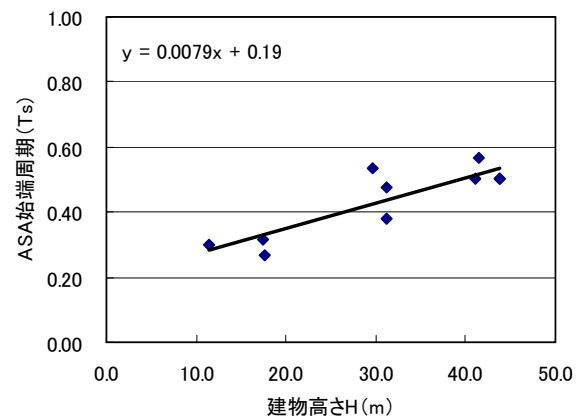


図-11 ASA 始端周期と建物高さ関係

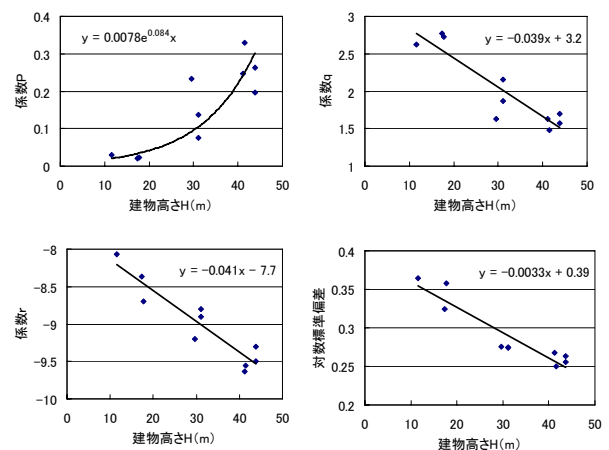


図-12 係数 p, q, r およびばらつきと建物高さ関係

5.2 簡易推定式の精度検証

検討モデルに対して簡易手法を適用した場合の精度検証を行った。簡易推定で利用する ASA と 3 章で利用した詳細検討で利用する ASA は異なるものであるために、SFC 同士を直接比較することはできない。そこで、SFC の利用する目的が、ET を定量化して損失率を算定することであるので、この損失率によって比較することとする。

図-5 に示した ET において、地盤被害なし、内容設備被害の発生を無視した場合を対象に、損傷モードに対する損失を表-7 のように設定して、損失率の計算を行った。図-13 に算定結果の比較を示す。グラフの横軸は建物個別に求めた SFC を利用して推定した損失率（詳細）で、縦軸は簡易式で求めた SFC を利用して推定した損失率（簡易）である。

図-13 から、簡易式は損失率を概ね評価できていることが分かる。ただし、簡易手法による結果が、詳細検討結果を下回ることが好ましくない。従って、簡易推定に用いる対数標準偏差に安全率を付加し、詳細検討した損失率より大きめの評価（安全側の評価）にする必要がある。今後、対数標準偏差の設定に関して、さらなる検討が必要と考える。

6. おわりに

本報では 10 モデルの RC ラーメン構造の建物によって検討を進めた。SFC を評価する際に建物の応答特性を考慮することを目的に、非線形応答解析に基づいて建物に対応した ASA を同定して利用する一連の詳細な手続きが整理された。ASA を用いることによって、応答をより良く推定できることが判明した。また、詳細手法による評価結果を参照して、応答解析を行うことなく建物高さのみを利用する簡易手法を提案した。簡易手法による推定結果に関しては精度を向上させる余地があり、そのためにはさらに多くの建物に対する詳細手法を用いた評価結果が必要である。

謝辞：本研究では、地震波は防災科学技術研究所の K-NET データを利用して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) U. S. Nuclear Regulatory Commission(NRC): SSMRP Phase I Final Report, NUREG/CR-2015, 1981
- 2) 松原正芳, 水谷守, 武田正紀, 甲斐芳郎: 確率論的手法による一般建築物の機能損傷評価の試み, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990.
- 3) 防災科学技術研究所: 構造物の地震損傷度評価手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 237 号, 2003.
- 4) 独立行政法人防災科学技術研究所: 強震ネットワーク, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.

表-7 損失の設定

損傷モード	損失
小破（非構造部材の損傷）	0.05
構造中破	0.10
構造大破	0.30
構造崩壊	1.00

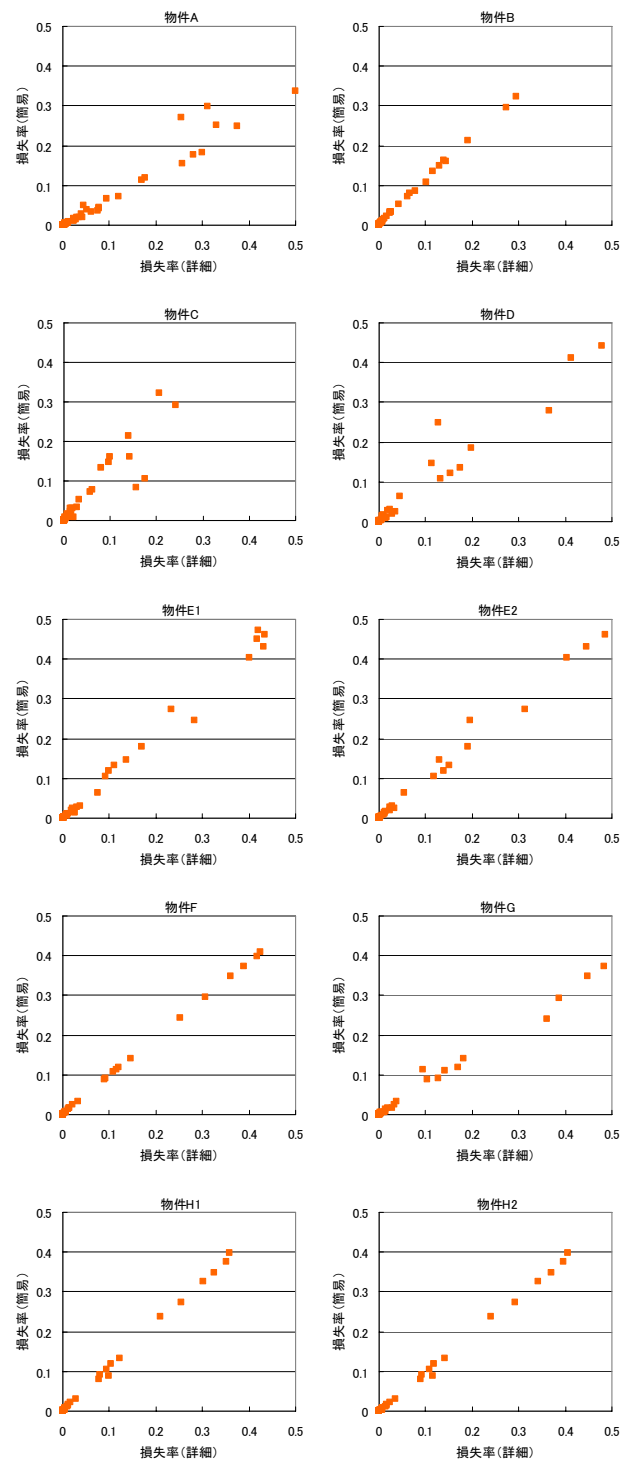


図-13 損傷率の比較