

# 建物の応答加速度記録を用いた RC 造建物の 地震時即時被害推定と将来の地震動に対する被害予測に関する研究

## QUICK DAMAGE ESTIMATION AND DAMAGE PREDICTION DUE TO FUTURE EARTHQUAKES FOR R/C BUILDINGS BY USING OBSERVATION OF SEISMIC RESPONSE

菊池 友介 (性能制御システム学分野)  
Yuusuke KIKUCHI

### Abstract:

In this study, quick damage estimation and damage prediction methods for RC buildings due to future earthquakes are developed, based on the observed ground motion and seismic response. In order to achieve these purposes, a response prediction method of an equivalent SDOF system, using the equivalent viscous damping coefficient modified from the experienced earthquake response, is first proposed. In addition, for the verification of the response prediction method of an equivalent SDOF system, the simulation analysis, which considers the variability of the strength and stiffness in actual buildings, is carried out, and their seismic responses are compared with the response prediction results, which employ typical analysis models at the structural design practice. From this comparison, it was confirmed that the seismic response of an equivalent SDOF system can be approximately predictable with the prediction method, discussed in this paper. Finally, the residual seismic capacity of the buildings is predicted with the MDOF system, which has partial acceleration response records, and its prediction result is found to agree well with the actual building damage.

**Keywords :** Acceleration response records, Equivalent SDOF response, Simulation analysis, MDOF response,

Post-earthquake damage evaluation

応答加速度記録, 等価一質点系応答, シミュレーション解析, 多質点系応答, 被災度判定

### 1. はじめに

近年, 人口減少による新築建物需要の低下や地球環境問題などの背景から, 建物の耐用年数の長期化が求められている。地震後, 被災建物の復旧を合理的に実施するには, 建物の損傷状態・残存耐震性能の適切な評価が不可欠である。

文献 1) において, 設計慣行に基づいて作成された解析モデルを用いた縮小 20 層 RC 造建物の震動実験における応答・損傷の推定と耐震性能評価手法の検討がなされ, 現行の設計手法による解析モデルでは, 実建物の耐力, 剛性, 重量のばらつき等の影響により, 必ずしも建物の応答性状を精度よく表すことができない場合があることがわかった。

そこで本研究では, 図-1 に示すような建物を経験した中小地震時の観測応答から解析モデルを修正し, 修正解析モデルを用いて未経験領域までを含めた応答を推定することにより, 地震時の即時被害推定手法 (以下, 即時推定) と将来起こり得る地震に対する被害推定手法 (以下, 将来推定) の提案を目指す。

### 2. 検討に用いる実験の概要<sup>2), 3)</sup>

本研究において解析対象とする実験は, 建築基準整備促進事業<sup>2)</sup>において 2012 年に E-defense で実施された, 縮小 20 層 RC 造試験体の震動実験である。図-2 に試験体図を示し, 表-1 には主な加振ケースを示す。実験結果より, Run.1, 2 ではひび割れは発生したが降伏箇所は確認されず, Run.3 では梁が降伏し始め Run.4, 5 では柱も降伏した。Run.5 では層

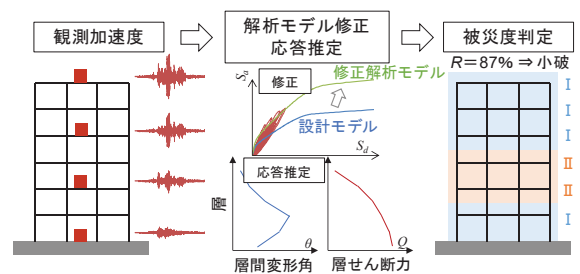


図-1 本研究の流れ

表-1 主な加振ケース

| 加振ケース | 基本波形  | 入力倍率 | 目標層間変形角 (rad.) | 実層間変形角 (rad.) |
|-------|-------|------|----------------|---------------|
| Run.1 | 東京観測波 | 100% | 1/200          | 1/234         |
| Run.2 |       | 200% | 1/100          | 1/137         |
| Run.3 |       | 300% |                | 1/86          |
| Run.4 | 津島波   | 150% | 1/50           | 1/64          |
| Run.5 |       | 200% |                | 1/35          |

図-2 試験体図 (単位: mm)<sup>2), 3)</sup>

間変形角 1/35rad. という大変形であったが倒壊には至らなかった。主に梁部材に降伏ヒンジが形成されたため, 崩壊形式は梁降伏先行型の全体崩壊形と判断された。

### 3. 等価一質点系応答補正法に関する検討

#### 3.1 等価一質点系応答補正法の概要

文献1)により、図-3に示すように、建物の応答加速度記録を動的縮約した一質点系応答の包絡線との誤差が最小となるように設計モデルの性能曲線を縦・横方向に拡縮し、修正することにより、未経験領域も含めた応答を推定する手法が提案されている。

#### 3.2 逐次等価粘性減衰定数評価式の修正による応答推定手法の改善

等価線形解析を行うにあたり建物の減衰能力を評価する必要があるが、文献2), 3)で用いられたようなスリップ性状が卓越する建物に対しては、式(1)に示す建築基準法告示の等価粘性減衰定数評価式では十分な精度で応答推定を行うことが難しい場合があることがわかっており、観測記録から大変形時の応答を推定するには修正式が必要となる。

$$h_{eq} = 0.05 + 0.25 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $h_{eq}$ ：等価粘性減衰定数、 $\mu$ ：塑性率

そこで、本節では、観測記録から等価粘性減衰定数評価式を修正する手法について提案する。図-4に示すように、観測値から算出する等価粘性減衰定数と塑性率を式(2)に代入することにより、等価粘性減衰定数評価式の $\alpha$ を算出し、経験した地震動による $\alpha$ の平均値により逐次 $\alpha$ を再設定することで、告示式を修正したものを等価粘性減衰定数修正式とした。

$$\alpha = (h_{eq} - h_e) \left( \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\mu} - 1} \right) \quad (2)$$

ここで、 $h_{eq}$ ：等価粘性減衰定数、 $h_e$ ：弾性時減衰、 $\mu$ ：塑性率

図-5に告示式、修正式における応答推定値と実験値をプロットしたグラフを示す。変形応答、加速度応答ともに推定精度の向上がみられ、告示式に比した $\alpha$ の低下による影響をよく捉えられているといえる。以降の検討では本節で提案した修正式を用いて応答推定を行う。

#### 3.3 シミュレーション解析による応答推定手法の推定精度の検証

文献1)における応答推定手法は、2章で述べた縮小20層RC造建物の震動実験結果のみでしか検討を行っておらず、他の建物に適用した場合の程度の範囲で推定が可能であるか等不明瞭な点が多く残るといのが現状である。そこで、以下のシミュレーション解析により、応答推定手法の妥当性の検証と適用範囲の把握を行う。

##### 3.3.1 シミュレーション解析の概要

前述のように、設計慣行に基づく解析モデルでは、材料強度の設計値と実強度の差や、評価式やモデル化の誤差等により、必ずしも建物の応答性状を精度よく表すことができない場合がある。そこで、本節ではまず、設計慣行に基づき設定した解析モデル（以下、設計モデル）と、上記のような特性値のばらつきを想定し設定した解析モデル（以下、実解析モデル）を作成する。次に、設計モデルの性能曲線に前節で提案した応答推定手法を適用することで、実解析モデルの時刻歴応答解析による応答（正解値）を推定し、これにより、応答推定手法の妥当性の検証と適用範囲の把握を行う。

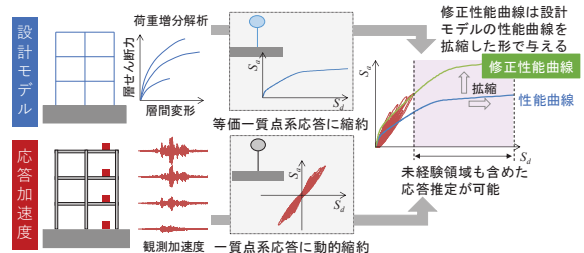


図-3 等価一質点系応答補正法の概要 1)

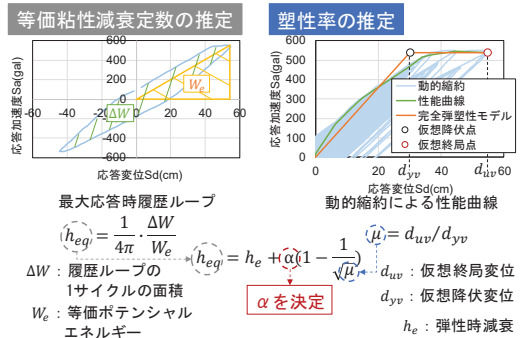


図-4 等価粘性減衰定数評価式の修正方法

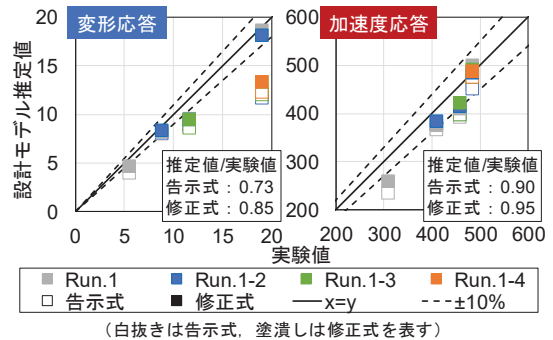


図-5 告示式と修正式による結果比較

表-2 入力地震波倍率

| Run.1 | Run.2 | Run.3 | Run.4 | Run.5 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 50%   | 100%  | 200%  | 300%  | 400%  |

#### 3.3.2 設計モデルの設定

設計モデルは梁曲げ降伏先行型の純ラーメン RC 造建物とする。スパンは 6.5m、階高は 3.0m、柱及び梁を材端弾塑性曲げバネでモデル化した魚骨モデルとし、各階における柱・梁の断面二次モーメント  $I$  はベースシア係数  $C_B$  が 0.2 となるときに最大層間変形角が  $1/500\text{rad}$  となるように定めた。ここで、各階柱・梁の  $I$  は  $A_1$  分布により定まる層せん断力の分布に比例させる。各部材の曲げ強度は  $A_1$  分布による静的弾性解析を行い、 $C_B$  が 0.3 となるときの曲げモーメントに基づき全体崩壊形の挙動を示すよう設定した。また、復元力特性は除荷時剛性低下指数  $\gamma=0.4$  の Takeda モデルとし、粘性減衰は瞬間剛性比例型、減衰定数を 5% と設定し解析を行った。

##### 3.3.3 入力地震波

入力地震波には ElcentroNS 波（以下、Elc 波）、TohokuNS 波（以下、Toh 波）、BCJ-L1 波（以下、L1 波）の 3 波を用い、各入力波に対し Run.1 から Run.5 まで徐々に入力倍率を大きくした連続波を入力する。また、入力倍率は Run.2 時の最大層間変形角を約  $1/200\text{rad}$  に基準化し、各 Run において、表-2 に示す入力倍率を設定し入力地震波を作成した。

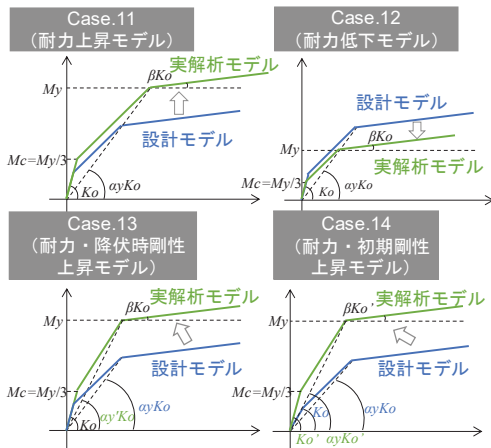


図-6 設計モデルと耐力・剛性の相違を想定した  
実解析モデルの復元力特性の設定

### 3.3.4 耐力・剛性の相違による応答推定への影響の検討

図-6に設計モデルから耐力・剛性の相違を想定した実解析モデルの復元力特性を示す。実解析モデルとして4種類の復元力特性を設定し、表-3に示すパラメータにより、設計モデルと実解析モデルの耐力・剛性が異なった場合の推定精度について検討を行う。

図-7に未経験領域塑性率/経験領域塑性率における推定精度のプロットと推定精度の中央値、標準偏差を示す。ここで、経験領域塑性率とは過去に受けた地震動による応答から算出した塑性率（以下、 $\mu p$ ）を、未経験領域塑性率とは将来の地震動による応答から算出した塑性率（以下、 $\mu f$ ）を表す。また、推定精度は修正性能曲線による推定値を実解析モデルの応答値で除す形で与えた。変形、加速度応答ともに概ね応答を捉えられているが、変形応答に関しては $\mu f/\mu p$ が大きくなるほど応答を過大評価し、ばらつきも増大する傾向にある。一方、加速度応答については $\mu f/\mu p$ が大きくなるほどばらつきが多少減少する傾向にあることがわかるが、これは、変形が大きくなると崩壊メカニズムが形成され、耐力が安定するためと考えられる。これに対して、小変形時は加速度応答変化率が大きく、 $\mu f/\mu p$ が小さい領域では推定精度にばらつきが生じるものと考えられる。

### 4. 多質点系における修正解析モデルによる被害推定手法に関する検討

本章では観測層における復元力特性を観測値に基づき修正し、修正した復元力特性を有する質点モデル（以下、修正質点モデル）の時刻歴応答解析を行うことで、層レベルの応答や被害をより詳細に把握可能とする手法を提案する。また、本提案手法を2章で述べた震動実験結果に適用することにより、その妥当性の検証を行う。想定加速度センサ設置数は5点（以下、部分観測）と21点（以下、全層観測）により検討を行った。図-8に修正質点モデルによる推定の概念図を示す。

復元力特性の修正パラメータの決定に際し、観測応答から建物の被害レベルを推定することが必要となる。そこで、本検討では観測応答の $Q-\delta$ 関係における1サイクルの最大応答時の割線剛性により被害レベルの推定を行った。図-9に例として部分観測の場合の1層の割線剛性の推移を示す。推定割

表-3 解析モデルパラメータの設定

|                          | 設計モデル | Case.11 | Case.12 | Case.13 | Case.14 |
|--------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|
| ベースシア係数 $C_B$            | 0.3   | 0.4     | 0.2     | 0.4     | 0.4     |
| 降伏時剛性低下率 $\alpha_y$      | 0.3   | 0.3     | 0.3     | 0.4     | 0.3     |
| $C_B=0.2$ 時最大層間変形角(rad.) | 1/500 | 1/500   | 1/500   | 1/500   | 1/1000  |

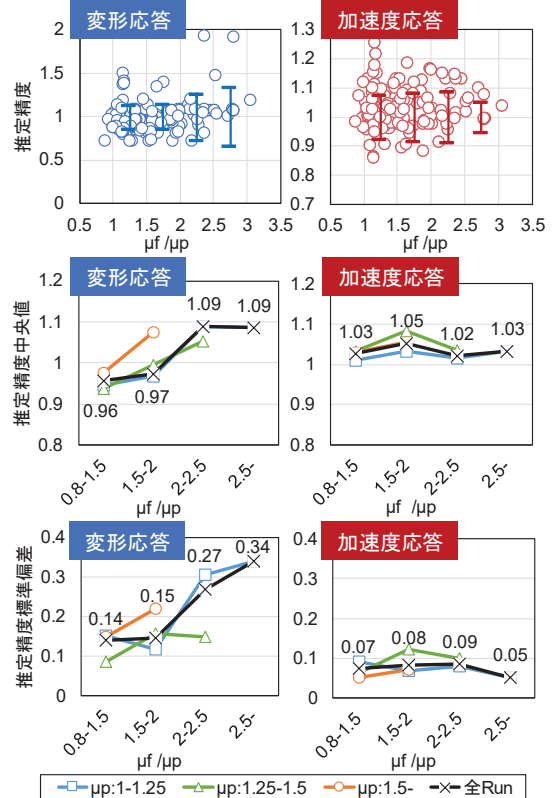


図-7 Case.11-14における応答推定精度

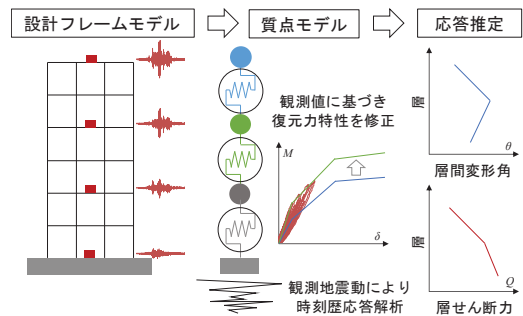


図-8 修正質点モデルによる推定の概要

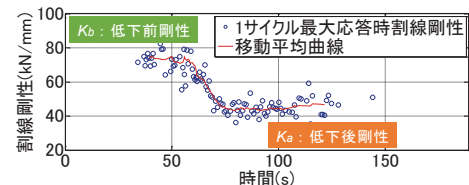


図-9 部分観測における1層の割線剛性推移の例

線剛性は観測割線剛性の移動平均曲線を線形置換することにより算出し、修正質点モデルにおける初期剛性は低下前剛性  $K_b$  を使用した。図-10に部分観測、全層観測における剛性低下率  $K_a/K_b$  を示す。この剛性低下率によりひび割れ・降伏判定用の剛性低下率を定め、判定値を超えた層における耐力を観測値に基づき修正することにより、修正質点モデルを作成した。

図-11 に即時推定における Run.5 応答の推定結果を示す。設計モデルに比べ推定精度の向上がみられるが、全層の観測値を用い修正したモデルによる応答に比べ、部分観測による応答が実験値に近づく結果となった。これは、観測応答を用いて被害推定を行うには建物全体の挙動を捉えることが重要であり、全層の応答に基づき解析モデルを修正することで、逆に観測応答のばらつきが大きく影響し建物全体のバランスが崩れ、実際とは異なる層に変形が集中する等の想定とは異なる挙動を示す場合があることに起因するものと考えられる。

### 5. 地震時即時被害推定と将来の地震動に対する被害予測に関する耐震性能残存率 $R$ による検討

本章では、3, 4 章で述べた等価一質点系応答補正法と修正質点モデルの応答解析結果から、耐震性能残存率  $R$  を評価する。また、これらの結果と、2 章で述べた震動実験における部材の損傷と降伏状況に基づき算出した  $R$  を比較することにより、被害推定手法の妥当性の検証を行う。本検討における  $R$  の算定は、文献 4) で提案された全体崩壊形建物を対象とした残存耐震性能評価法による式(3)を用いた。

$$R = \frac{\sum \eta M_{u,柱} + \sum \eta M_{u,梁}}{\sum (M_{u,柱} + M_{u,梁})} \times 100(\%) \quad (3)$$

ここで、 $M_u$ : 降伏ヒンジの終局耐力、 $\eta$ : 耐震性能低減係数

この際、等価一質点系応答補正法における各部材の損傷度は文献 4) に従いそれぞれの塑性率と対応させて決定した。

また、性能曲線修正前後で部材の塑性率は不変と仮定し、修正性能曲線で最大応答変形が得られたステップと同ステップにおける部材の塑性率により損傷度を算出した。一方、修正質点モデルによる損傷度は各層の塑性率により同様の方法で算出した。

図-12 に即時・将来推定結果における観測値と推定値による  $R$  の比を示す。ここで、 $R_o$  は実験結果による  $R$  の観測値を、 $R_e$  は各推定手法により算出した  $R$  を表す。即時、将来推定結果ともに推定する被害レベルが大きくなるほど推定精度が低下する傾向にあるが、等価一質点系応答補正法による  $R$  は比較的ばらつきが小さく、観測点数が与える推定精度への影響は小さい。また、修正質点モデルについては部分観測による  $R$  の推定精度がより高くなる傾向がみられた。これは、前述のように全層の応答に基づいて解析モデルを修正した場合、観測応答のばらつきにより想定とは異なる挙動を示す場合があるためと考えられ、ある程度質点を集中させ復元力特性を修正することで、建物全体の挙動を概ね捉えることができると予測される。ただし、観測点数がさらに少なくなった場合については推定精度が低下することが予想され、観測点数が与える推定精度への影響については更なる検討が必要であると考えられる。

### 6. まとめ

- 1) 文献 1) による応答推定手法に関して、経験した地震動から等価粘性減衰定数評価式を逐次設定することにより応答を推定する手法を提案した。また、この手法を震動実験結果に適用することで、その有用性を示した。
- 2) 設計モデルから実建物を模擬した実解析モデルの応答を推定するシミュレーション解析を行い、設計モデル

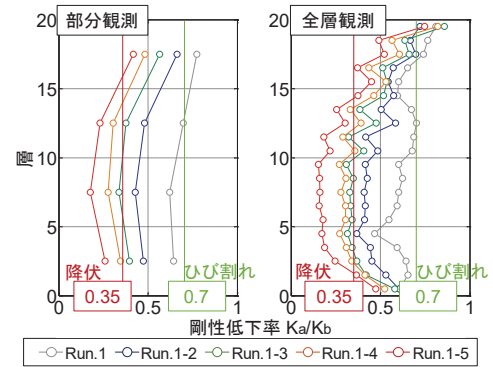


図-10 部分観測、全層観測における剛性低下率  $K_a/K_b$

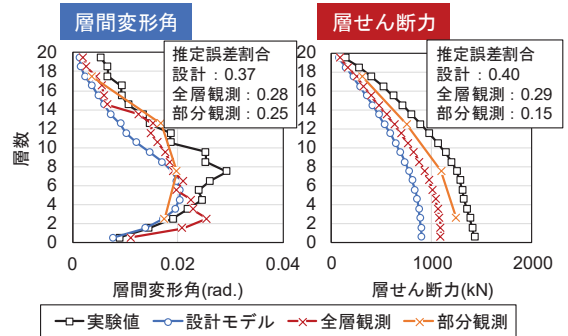


図-11 即時推定における Run.5 応答推定の例

(ここで、推定誤差割合とは  $\Sigma$ (|実験値-推定値|/実験値)/層数を表す)

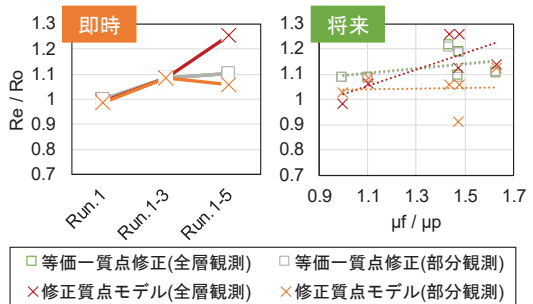


図-12 耐震性能残存率  $R$  の比:  $R_e$ (推定値)/ $R_o$ (観測値)

の耐力・剛性が実建物と異なる場合においても、将来の地震動による応答を概ね捉えられることを確認した。ただし、将来の地震動による塑性率が既に経験した地震動に対して大きくなるほど変形応答の推定値を過大評価し、ばらつきも増大する傾向にある。

- 3) 修正質点モデルによる応答推定手法を提案し、また、修正質点モデルと等価一質点系応答補正法による耐震性能残存性能率  $R$  の推定値を実験に基づく  $R$  の観測値との比較し検討を行った。その結果、等価一質点系応答補正法では、観測点数が  $R$  の推定精度へ与える影響は小さく、また、修正質点モデルについては、本検討条件下では部分観測における修正質点モデルにより実被害が概ね推定可能であることを示した。

#### 参考文献

- 1) 梨本優也, 前田匡樹 ほか: 中小地震観測データを用いた RC 建造物の即時損傷推定と耐震性能評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.679-684, 2015.7
- 2) (株)大林組 ほか: 平成 24 年度 国土交通省 建築基準整備促進事業: 27-1: 長周期地震動に対する鉄筋コンクリート建造物の安全検証方法に関する検討, 平成 25 年 3 月
- 3) 杉本訓洋 ほか: 縮小 20 層 RC 建造物試験体の長周期地震動による震動実験 その 1~その 11, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.653-674, 2013.3
- 4) 包蘇榮 ほか: RC 造梁降伏型全体崩壊形建物の残存耐震性能評価法, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp3255-3260, 2010 年 11 月