

# 地震時応答観測データのフィードバックによる 逐次修正解析モデルを用いた RC 造建物の即時被災度判定

## QUICK POST-EARTHQUAKE DAMAGE EVALUATION FOR RC BUILDINGS BY USING ADJUSTED ANALYSIS MODEL ACCORDING TO FEEDBACK ON OBSERVED SEISMIC RESPONSE

梨本 優也 (性能制御システム学分野)  
Yuya NASHIMOTO

### Abstract

In order to reduce the time and labor in damage investigation, post-earthquake damage evaluation method in real time for RC buildings using observed ground motion and building response is proposed. First, capacity spectrum of the building is adjusted according to observed acceleration response records since the capacity spectrum using only current analytical method is not always accurate. Adjusted capacity spectrum not only can estimate the building response at the time of earthquake, but also can estimate response for larger earthquake that the building have not experienced. Then based on the estimated response and adjusted analysis model, the damage level and residual seismic capacity are determined and post-earthquake damage is evaluated. The proposed evaluation could estimate accurately the damage level. However, the accuracy decreases at the point just between the borders of damage level.

**Keywords** : Post-earthquake damage evaluation, Capacity spectrum, Equivalent linearization analysis, Observed building response records, Damage level  
被災度判定, 性能曲線, 等価線形解析, 応答観測記録, 損傷度

### 1. はじめに

近年, 人口減少やそれに伴う新築需要の低下などの背景から, 適切な維持管理による建物の耐用年数の長期化が求められている。維持管理にはその建物の損傷状態の評価が不可欠だが, 建物の規模によってはその調査自体に多大な労力と時間を要する。既報, 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 造建物の応答推定と被害推定方法の検討を行った。結果として建物の実性状を精度良く捉えるための解析モデルの設定が必要であること, かつ, 現状のモデル化手法だけではそれが難しいことが分かった。そこで本研究では, 図-1 に示すような建物が経験した中小地震時の観測記録から得られる小変形領域の履歴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性能曲線を推定する手法の提案を行う。また推定された性能曲線を用いて, 任意の地震動に対する応答推定や被災度判定手法を検討することで, 加速度計からの観測応答のみを用いた地震時の即時被災度判定・将来起こり得る地震に対する被害推定方法の提案を目指す。

### 2. 検討に用いる実験の概要

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 (委員長: 塩原等東京大学教授) において 2012 年に E-defense で実施された, 縮小 20 層 RC 造試験体の振動台実験である。以下, 対象実験の概要を説明するが, 詳細については文献 2), 3) を参照されたい。

#### 2.1 試験体

図-2 に試験体図と柱・梁断面の例, 使用材料諸元を示す。試験体は高さ 60m, 20 層 RC 造ラーメン架構の高層建物を想定し, 高層集合住宅の断面・配筋を参考に, 1/4 に縮小したもの (高さ 15m) としている。階高は 750mm, 柱断面は 225mm×225mm, 梁断面は 150mm×200mm である。

#### 2.2 入力地震波

表-1 に主な加振ケースを示す。Run.1, 2, 3 は東北地方太平洋沖地震による東京都での観測波 (以下, 東京観測波) をそれぞれ 100%, 200%, 300% に増幅したものである。Run.4, 5 は南海トラフ地震を想定した愛知県での模擬地震波 (以下, 津島波) を 150%, 200% に増幅したものである。

#### 2.3 実験結果及び解析との比較

表-1 に各加振ケースでの最大層間変形角を示す。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 で梁が降伏し始め Run.4, 5 では柱も降伏した。Run.5 では層間変形角 1/35 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, 建物崩壊形式は梁降伏先行の全体崩壊型であると考えられる。

図-3 に各加振ケースでの試験体の等価一質点系応答履歴<sup>4)</sup>と解析モデルの静的荷重増分解析結果の等価一質点系縮約結果の比較を示す。ここでの解析モデルは現行の設計慣行<sup>5)</sup>に従い柱・梁の寸法, 配筋および材料試験結果等に基づいて各部材の復元力特性を算定したフレームモデルである。結果は実験での耐力を過小評価する結果となった。このことから, 観測値に基づく解析モデルの修正が必要であるといえる。

### 3. 等価一質点系応答曲線の修正とその精度の検証

#### 3.1 補正方法の考え方

前章までに述べたように、現行の構造設計における架構の復元力特性の評価では、必ずしも実建物の剛性・耐力を正確に評価できない場合がある。しかし図-3に示したように、解析モデルの性能曲線の形と実際の応答の推移の形状は類似している。そこで、「建物の実際の性能曲線は解析モデルによる性能曲線を縦横方向に拡張した形で与えられる」という仮定を用いる。補正方法の手順とその概念図を図-4（図中の各曲線の定義は次節に記す。）に示す。拡張のパターンは縦方向にも横方向にも無数に存在するが、観測記録との誤差を比較し補正曲線の精度の高さを評価する。さらに定めた補正曲線と実験における実際の大変形領域の応答を比較し、その整合具合を推定精度とし、補正方法について検討していく。

#### 3.2 補正・推定・検証の過程で用いる各データの定義

- 1) **解析曲線**：現行の設計手法（解析モデル）を用いた荷重増分解析による等価一質点系縮約結果の荷重変形関係である。
- 2) **補正係数  $\alpha$ ,  $\beta$** ：応答変位（横軸）の補正係数を  $\alpha$ 、応答加速度（縦軸）の補正係数を  $\beta$  とする。 $\alpha$  と  $\beta$  の範囲は 0.5 以上 2 以下で 0.05 刻みとする。これは解析曲線と実建物の性能曲線の間で倍半分以上の乖離は生じないという仮定によるものである。
- 3) **性能曲線**：加速度計から得られた各階の荷重変形関係の履歴を等価一質点系に動的縮約<sup>4)</sup>したものを図-4 (g) に示す。この履歴の各ループの最大耐力点を包絡する曲線を性能曲線と呼ぶこととする。本論で推定の目標値とするものである。
- 4) **観測曲線**：3) の性能曲線と求め方は同じであるが、性能曲線が Run.1 から Run.5 全ての履歴から求めているのに対し、観測曲線では、Run.1 までの履歴、または Run.2 までの履歴、というように経験した応答履歴のみを用いて 5 通り設定する（Run.1 から Run.5 のものは性能曲線と一致する）。観測された地震が Run.□ であるものを観測曲線(Run.□)と示すこととする。
- 5) **観測曲線、性能曲線との誤差  $\Delta_{ob}$ ,  $\Delta_{ca}$** ：補正した曲線（後述 6)）の、性能曲線、観測曲線との離れ具合を示すために、それぞれとの誤差  $\Delta_{ob}$ ,  $\Delta_{ca}$  を図-4 (d) に示す  $\delta_n$  の二乗値の総和として定義する。
- 6) **補正曲線**：解析曲線に補正係数をかけることで得られる ( $\alpha$  の数)  $\times$  ( $\beta$  の数) 通りの曲線を補正曲線と呼ぶこととする。その中で最も誤差  $\Delta_{ob}$  が小さいものを推定最適補正曲線と呼ぶこととする。また、補正曲線中の  $\Delta_{ob}$  が小さい方から上位 10% の曲線の各ステップでの平均をとった曲線を推定平均補正曲線と定義することとする。4) と同様に観測された地震が Run.□ であるものを補正曲線(Run.□)と示すこととする。

#### 3.3 推定結果

図-5に解析曲線、性能曲線、観測曲線(Run.1)及び各補正曲線(Run.1)の比較を示す。補正曲線は、観測曲線との誤差  $\Delta_{ob}$  に従い 10 段階の濃淡で分け、 $\Delta_{ob}$  が小さいほど濃くなるよう

に表示している。誤差の小さい各補正曲線上に性能曲線が重なる結果となったため、振動実験による実際の応答を概ね精度良く推定できていると考えられる。しかし最も  $\Delta_{ob}$  が小さい推定最適補正曲線は性能曲線とは外れる結果となった。この原因についての詳細は文献 6) を参照されたい。一方で  $\Delta_{ob}$  が小さい方から上位 10% の曲線を平均した推定平均補正曲線を求め、これを性能曲線と比較した結果、大変形 (Run.5 の経験領域) に至るまでの荷重変形関係を精度良く推定できることが確認された。補正曲線(Run.2~4)の結果を用いた際においても以上と同様の傾向が見られた。このことから、以後の検討には推定平均補正曲線を用いることとする。

### 4. 将来被災し得る地震動に対する応答推定

本章では 3 章の推定平均補正曲線に等価線形化法を用いることで将来建物が被災し得る大地震時の応答推定を行う。

#### 4.1 等価線形化法による応答推定

建物の等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  の計算には式(1)を用いる。通常粘性減衰項である第一項  $h_e$  は 0.05 を用いるが、本試験体の固有値検索加振より 0.0116 であったためこの値を用いる<sup>2)</sup>。また履歴減衰項である第二項の係数  $\alpha$  は Run.1, 2, 3 推定時には通常 0.25, Run.4, 5 推定時には 0.06 を用いる。これは試験体が振動台により繰り返し載荷を受けて劣化し、スリップ性状を示したため通常より履歴減衰が小さくなったためである<sup>1)</sup>。また、 $\mu$  は塑性率を表す。

$$h_{eq} = h_e + \alpha(1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad \text{式(1)}$$

推定平均補正曲線(Run.1)を用いた推定結果を図-6に示す。Run.2, 3 では過小評価、Run.4, 5 では過大評価となったが、概ね実験値を捉える結果となった。減衰定数の評価は応答に大きく影響するため、観測応答を加味した減衰定数評価法の提案が今後の課題となる。

#### 4.2 層間変形角・層せん断力の推定

本節では層ごとの応答推定について検討する。前節において一質点系での応答点が得られたため、その時の層の応答値を求めるには通常縮約前の解析モデルの同ステップの値を用いる(図-7上)。しかし本研究においては 3 章に示した方法で性能曲線を比例倍することで修正しているため、縮約前の解析モデルも同じように  $\alpha$  倍、 $\beta$  倍した後の同ステップの値を用いる必要がある(図-7下)。図-8に Run.5 における、推定平均補正曲線(Run.1)を用いた層間変形角の推定値（赤線）と、実験値（プロット）の比較を示す。同様に図-9に層せん断力の比較を示す。これらのグラフから分かるように一質点系での応答が精度良く推定出来ていても、各層の変形割合・せん断力の負担割合が解析モデルと異なることで推定値が大きく外れる層が存在する。そこで本節では全層に一律同じ補正係数を乗じるのではなく、層ごとに異なる補正係数  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  ( $i$ : 層数) を用いることを考える。図-10に  $\alpha_i$  の算出方法と適用方法を示す。 $\alpha_i$  は、観測した最大応答変位と同じ応答変位時(図中ステップ  $p$ ) の層間変形角分布  ${}_{am}\theta_i$  と、観測した最大層間変形角分布  ${}_{ob}\theta_i$  から、 $\alpha_i = {}_{ob}\theta_i / {}_{am}\theta_i$  として決定する。これを任意の未経験領域の応答変位(図中ステップ  $q$ ) の時の  ${}_{am}\theta_i$  に乗じる。これにより図-8のように、層間変形

角の推定値（青線）は多くの層で改善された。 $\beta_i$ も同様にして用いた結果、やや推定値が改善された。

### 5. 経験・未経験領域での応答における被災度区分判定

本章では、経験した地震の観測最大応答点での被災度判定、並びに、4章で推定された大地震を受けた場合の推定応答点での被災度判定を実施する。

#### 5.1 被災度区分判定方法

文献6)において現行の被災度区分判定法が規定されている。しかし現行の判定方法は主に中低層の層崩壊型建物を想定して構築されたものであり、今回検討対象としている試験体には適さないものと考えられる。従って本論においては文献7)で包・前田らによって提案された梁降伏型全体崩壊型建物の残存耐震性能評価法を用いて被災度区分判定を行うこととする。この手法は建物の終局時の崩壊メカニズムを想定し、その時に部材端曲げモーメントにより生じる降伏ヒンジの終局耐力 $M_u$ と、その部材の損傷度から得られる耐震性能低減係数 $\eta$ を用いて式(2)により耐震性能残存率 $R$ を算定することで判定を行うものである。

$$R = \frac{\sum \eta M_{u柱} + \sum \eta M_{u梁}}{\sum (M_{u柱} + M_{u梁})} \times 100(\%) \quad \text{式(2)}$$

部材の損傷度は文献7)に従い部材の塑性率と対応させて決定する。塑性率の決定にあたり、性能曲線修正前後で部材の塑性率は不変であると仮定する。

#### 5.2 判定結果

図-11に推定平均補正曲線(Run.1)を用いたRun.1, Run.3, Run.5時の部材の推定損傷度分布・被災度区分と実験値の比較を示す。ただし、実験の損傷度分布はひび割れ図及び主筋に貼付けた歪ゲージによる降伏状況から判断したものである。Run.1, 5の推定結果は $R$ の値・損傷度分布ともに精度の良いものとなったが、Run.3において被害を過小評価する結果となった。これはRun.3で部材が降伏付近の応答を示すこと、図-6で示したように応答を過小評価したことが重なり、損傷度の判定が整合しなかったためと考えられる。

### 6. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 建物に設置した加速度計記録から得られた地震時応答観測データを用いて、建物の解析モデルを等価一質点系応答レベルで修正する手法を提案した。またそれを縮小20層RC造試験体の振動台実験に適用することで、その有用性を示した。
- (2) 修正した性能曲線を用いた等価線形化法による応答推定を行った。これにより将来建物が被災し得る地震動に対する応答の推定を行い、さらにそれを層ごとの応答推定に拡張した。
- (3) 上記手法を用いて、経験・未経験応答における被災度区分判定を行った。降伏前後のような損傷度が大きく変わる応答では課題が残ったものの、概ね良い推定結果が得られた。これにより建物の即時被災度判定の可能性を示唆した。

### 謝辞

本研究で検討の対象に震動実験は平成23, 24年度国交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造建築物の安全性検証方法に関する検討)の一環として実施されたものである。実験結果や解析方法については、委員会の検討結果や報告書を参考とさせていただいた。また、実験データは大林組よりご提供頂き、特に杉本訓祥氏にはデータ提供等で多大なご尽力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 梨本優也 ほか: 縮小20層RC造架構の震動実験を用いた損傷推定手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.259-264, 2014
- 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造建築物の安全性検証方法に関する検討, 平成25年3月
- 3) 杉本訓祥 ほか: 縮小20層RC造建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) 倉本洋: 多層建築物における等価1自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予測, 日本建築学会構造系論文集, No.580, pp.61-68, 2004.6
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010
- 6) 梨本優也 ほか: 中小地震観測データを用いたRC造建築物の性能曲線推定手法における平均化処理方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.359-360, 2015.9
- 7) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針, 2002.8
- 8) 包蘇栄 ほか: RC造梁降伏型全体崩壊型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, pp.3255-3260, 2010年11月

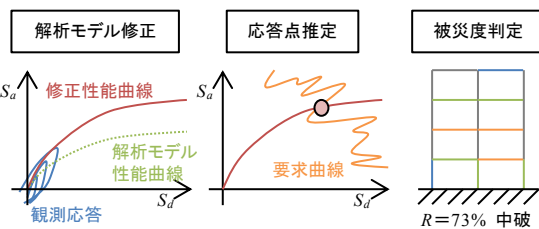


図-1 本研究での提案手法の概念図

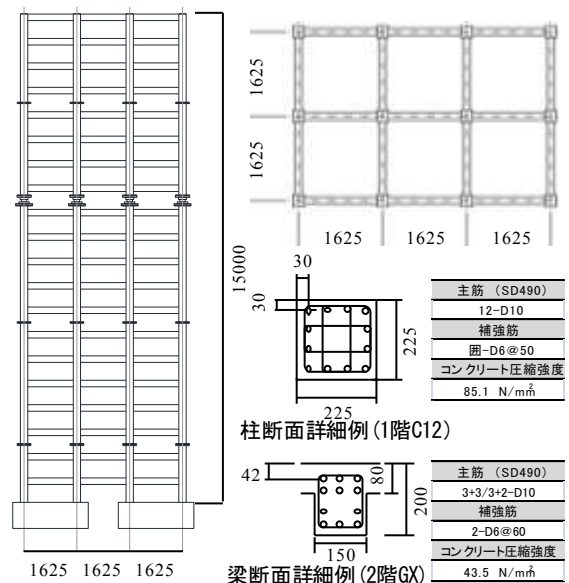


図-2 試験体図, 柱・梁断面図 (単位: mm) ²)

表-1 主な加振ケース

加振ケース	基本波形	入力倍率	目標応答層間変形角	実層間変形角
Run.1 (1-5)	東京観測波	100%	1/200	1/234
Run.2 (2-2)		200%		1/137
Run.3 (2-6)		300%		1/86
Run.4 (3-2)	津島波	150%	1/50	1/64
Run.5 (3-5)		200%		1/35

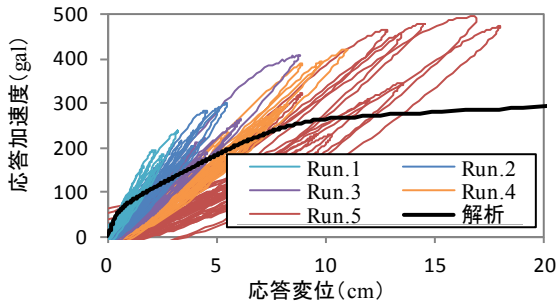


図-3 等価一質点系での観測応答と解析の比較

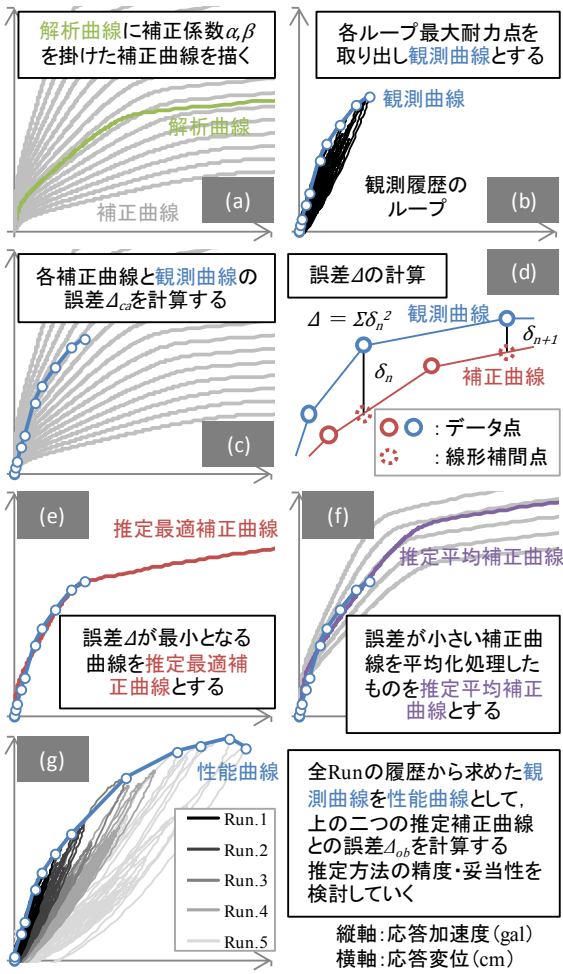


図-4 推定方法とその検討の流れ

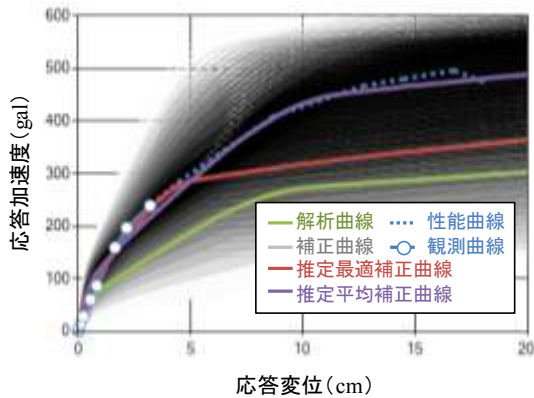


図-5 Run.1 観測時の各曲線

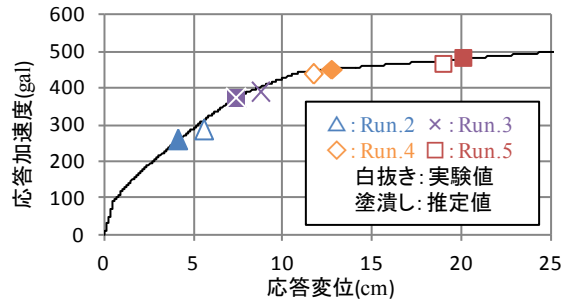


図-6 推定平均補正曲線(Run.1)を用いた推定結果

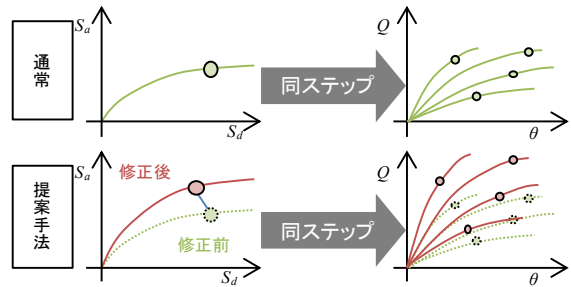


図-7 等価一質点系応答と層の荷重-変形関係の対応

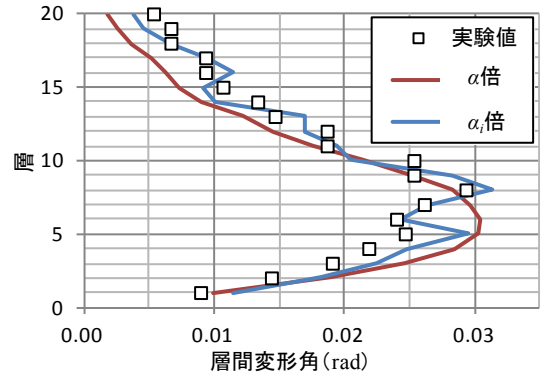


図-8 補正係数  $\alpha$ ,  $\alpha_i$  を用いた Run.5 時の層間変形角分布

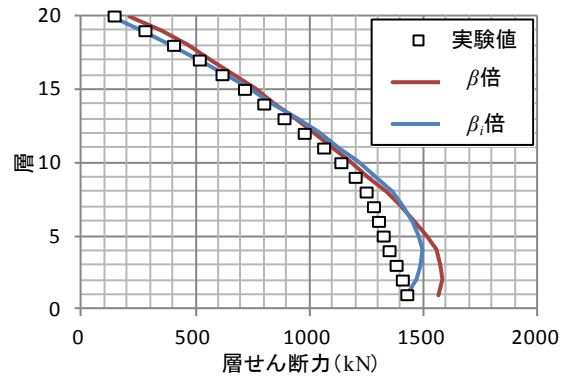


図-9 補正係数  $\beta$ ,  $\beta_i$  を用いた Run.5 時の層せん断力分布

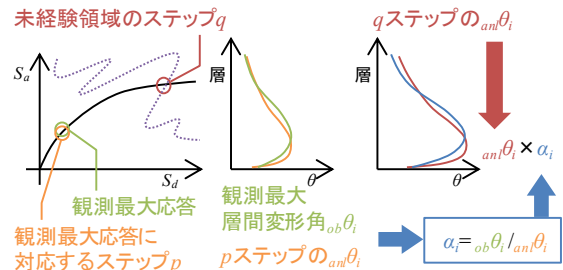


図-10 補正係数  $\alpha_i$  の算出・適用方法

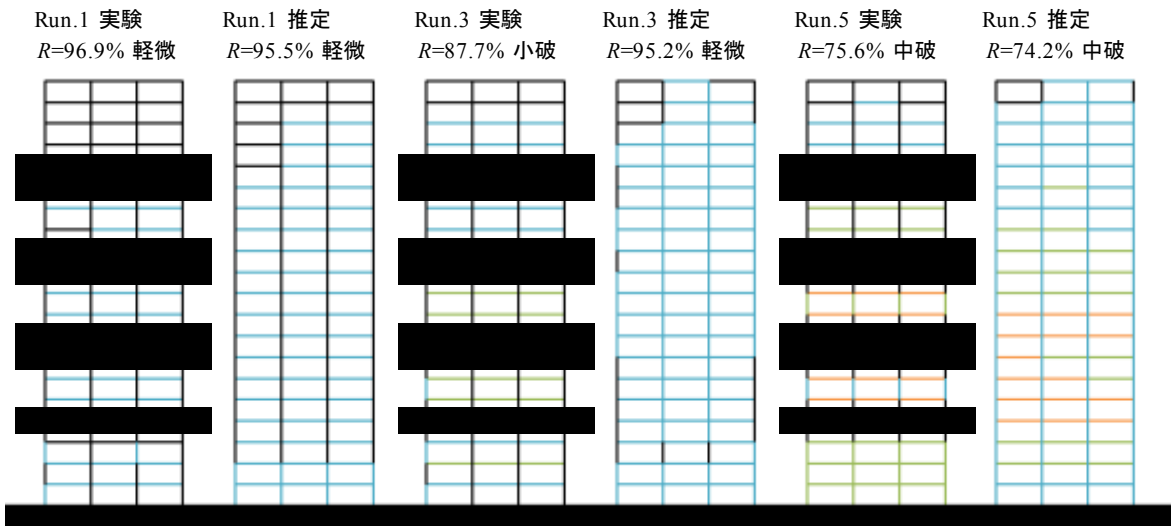


図-11 推定平均補正曲線(Run.1)を用いた Run.1, Run.3, Run.5 時の部材の推定損傷度分布・被災度区分と実験値の比較  
(実験の網掛け部は治具などの都合で観測していない部分である)