

損傷前後の層間変形分布不変仮定に基づいた建物耐震性能に及ぼす各部材の影響度評価法の提案と RC 造梁曲げ降伏型全体崩壊形建物への適用性検討

地震発生直後の即時判定を目的とした被災建物の耐震性能残存率評価法の開発 その1

EVALUATION METHOD OF CONTRIBUTION FACTOR OF STRUCTURAL COMPONENTS FOR SEISMIC CAPACITY ASSUMING INVARIABLE INTER-STORY DRIFT BEFORE AND AFTER DAMAGED AND INVESTIGATION OF APPLICABILITY TO RC FRAMES WITH BEAM YIELDING MECHANISM

Development of evaluation method of residual seismic capacity of damaged buildings
for instant inspection after earthquakes Part 1

三浦耕太*¹, 前田匡樹*²

Kota MIURA and Masaki MAEDA

Main purpose of this study is to investigate residual seismic capacity of damaged buildings. An evaluation method of residual seismic capacity (R) using contribution factors of structural components (E_r) was proposed. E_r is evaluated by assuming invariable inter-story drift distribution for a building even after damage to focus on the investigation of effect of location of components. Then, modeling methods of damaged buildings were discussed using SDOF models. Finally, it was shown that the proposed method can estimate R appropriately for buildings with uniform inter-story drift distribution but cannot for buildings with non-uniform distribution through dynamic analyses of prototype frames.

Keywords: Residual seismic capacity ratio, Post-earthquake damage evaluation, Dynamic analysis,

Seismic performance deterioration factor, Contribution factor of structural component

耐震性能残存率, 被災度判定, 地震応答解析, 耐震性能低減係数, 部材の影響度

1. はじめに

巨大地震発生時において、多数の建物を所有あるいは使用している企業が、即時に被害の全体像を認識し、事業継続性の判断や、その後の復旧計画の立案を行うためには、建物の地震被災度を定量的に把握することで、継続使用の可否や復旧対策の優先順位を迅速に判定することが重要である。

既往の建物地震被災度の定量的評価法として、筆者らが提案した RC 造建物の耐震性能残存率算定法¹⁾²⁾がある。耐震性能残存率 R は、被災前(新築時)に対する被災後の耐震性能の比を表すものであり、同手法においては、建物の構造躯体における各部材(箇所)の損傷度に応じて定まる耐震性能低減係数 $\eta^3)$ を、建物耐震性能に及ぼす各部材(箇所)の影響度 E_r で重みづけ平均して、建物全体の耐震性能残存率 R を算出することとしている。しかしながら、影響度 E_r の算定において、ヒンジ数と同回数 Pushover 解析を行う必要があり、実建物、特に大規模建物を対象とした場合には計算量が膨大になると言う問題があった。同文献中では、略算的な影響度 E_r の算定法も提案されているが、現地調査時の手計算による概要把握を目的としたものであり、精度的に十分とは言えない。また、精算的な手法自体の算定精度についても、具体的な検証が行われていない。

建物全体の性能に対する部材の影響度評価に関する他の研究としては、伊藤ら⁴⁾が、構造物内の一部材が消失した場合の性能低下度を、極限解析を用いて定量的に評価する方法を提案しているが、衝突物や落下物による偶発的荷重を想定している点や、鉛直支持能力に基づいて評価を行っているという点で、地震時の水平荷重による被害を受けた建物を対象とする本研究とは目的が異なる。

一方、近年では、地震発生直後における建物被災度の自動判定を目的としたより実用的な研究や、その成果を反映させたシステムの開発も進んでいる。例えば、文献 5)には、限られた階に設置された加速度センサの記録から推定した各層の層間変形角に基づいて、建物各層の被災度を数段階で評価するシステムの構成が示されている。また、文献 6)7)8)においては、同様に数台の加速度センサ記録から各層の応答を推定する手法が示されている他、高密度に配置したセンサ記録を基に、部材毎の損傷度を推定する方法も提案されている。しかしながら、これらの研究は、層や部材の損傷度に基づく避難の要否判断を目的としており、定量的な指標による評価を必要とするものではない。

そこで、本研究では、現行の耐震設計で推奨されている梁曲げ降伏型全体崩壊形建物を対象とし、文献 1)2)において定義されている

*¹ (株)大林組技術研究所 修士(工学)

*² 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・博士(工学)

Obayashi Corporation Technical Research Institute, M.Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tohoku University, Dr.Eng.

各部材（箇所）の影響度 E_r に関して、計算負荷の小さい算定法を新たに提案する。また、地震応答解析により、提案手法及び既往の精算手法による影響度 E_r の算定精度の検証（建物への適用性の検討）を行う。尚、梁曲げ降伏型の建物においては、梁端部における損傷を対象とし、柱梁接合部の損傷については考慮しないこととする。

本論文の構成を以下に示す。2 章では、耐震性能残存率評価法の基本概念を述べ、3 章及び 4 章では、既往の研究及び本研究における影響度 E_r の算定法について説明する。続いて 5 章では、地震応答解析を用いた影響度 E_r の算定精度の検証方法を述べ、6 章で、検証に必要な被災建物モデルの設定方法の検討を行った上で、7 章では、実際に建物モデルを用いて精度検証を行う。

2. 耐震性能残存率評価法の基本概念

2.1 新築建物及び被災建物の耐震性能に関する考え方

現行の新築建物の設計では、単独の地震を想定し、静的設計においては、単調載荷による荷重変形関係（Fig.1(a)実線）によって耐震性能を評価している。一方、既往の研究¹⁾及び本研究では、一度地震による変形を経験した被災建物が再度地震を受けることを想定しているが、その場合、単独の地震を受けた場合と比べて、変形の繰返し回数が増加する。文献 9)10)によると、繰返し変形によるひび割れの閉開等によって、部材の耐力や剛性、変形性能、エネルギー吸収性能（減衰）が低下するとされている。従って、被災建物では、現行の設計では考慮されていない複数回の地震の影響により、Fig.1(a)破線に示すような新築時とは異なる荷重変形関係となり、耐震性能が低下すると考えられる。既往の研究及び本研究では、ここで示した繰返し変形による耐震性能の低下を想定している。

2.2 既往の研究における耐震性能残存率評価法の基本概念

地震被害を受けた被災建物では、各部材の性能が損傷に応じて低下することで、建物全体の耐震性能、即ち荷重変形関係が新築時から変化する。例えば、新築設計時に Fig.1 実線のような荷重変形関係（縮約 1 自由度系の応答加速度 S_a - 応答変位 S_d 関係）並びに安全限界時の層間変形分布を想定していた建物が地震を受けた場合には、下層に損傷が集中し、例えば Fig.2 に示すような状態になると考えられる。この被災建物においては、各部材の耐力減少量の和に比例して、建物全体の耐力（ S_a ）が低下するため、また、下層の性能が相対的に大きく低下することで新築時よりも下層への変形集中が進展し、建物としての変形性能（ S_d ）が低下するために（Fig.1(b)破線）、荷重変形関係が Fig.1(a)破線のような形に変化する。更に、相対的にエネルギー吸収量の大きい下層の部材の性能が低下することで、建物全体のエネルギー吸収性能（減衰）が大きく低下すると考えられる。その結果として、被災前に比べて耐震性能（安全限界時の耐力、変形、減衰）が大きく低下する。

ここで、建物の被災前に対する被災後の耐震性能の比として定義される耐震性能残存率 R は、被災前後の建物のモデルを作成し、静的荷重増分解析あるいは地震応答解析を用いて、各モデルの耐震性能を評価することでも算定可能であるが、その場合、2.3 及び Fig.4 に示す本研究の手法で用いる通常の新築建物モデルに加え、各部材の損傷状態を反映させた被災後の建物モデルを地震後に作成し、解析を行う必要があるため、迅速な判断が必要とされる地震直後の評価には適さないと考えられる。一方、Fig.1, 2 に示した例を見ると、

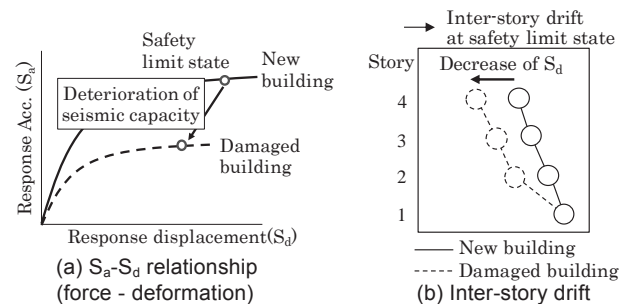


Fig.1 Example of seismic capacity deterioration in a damaged building

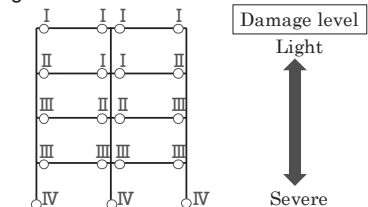


Fig.2 Example of damage level of a building

Table1 Example of damage level - seismic performance deterioration factor (η) relationship

Ductility factor (μ)	Damage level	Seismic performance deterioration factor (η)
$\sim \mu_{cr}$	0	1
$\mu_{cr} \sim 1$	I	0.95
1 \sim 2	II	0.75
2 \sim 3	III	0.5
3 \sim 5	IV	0.2
5 \sim	V	0

※ μ_{cr} : Cracking

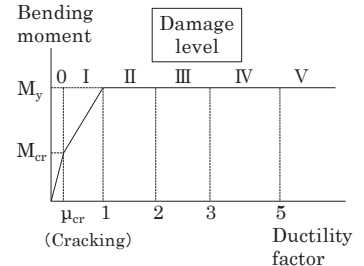


Fig.3 Example of ductility factor - damage level relationship

被災建物の耐震性能残存率 R は、各部材の耐震性能の低下度合、並びに、耐力や減衰、位置等によって決定される建物全体の耐震性能への各部材の影響度の大小によって定まると考えられる。

RC 造建物を対象とした既往の研究¹⁾における評価法は、上述の考えに基づき、被害調査時に目視等で判断した各部材損傷箇所（ヒンジ想定箇所）の損傷度に応じて例えば Table1 のように定義される耐震性能低減係数 η ²⁾を、建物耐震性能に及ぼす各部材損傷箇所（以下各箇所）の影響度 E_r で重み付け平均することで、(1)式で建物の耐震性能残存率 R を算定するというものである。

$$R = \sum(E_{rj} \times \eta_j) \quad (1)$$

ここで、Table1 における損傷度と耐震性能低減係数 η の関係は、文献 3)において安全側の値として定義されているものである。また、塑性率 μ と損傷度の関係は、終局時の塑性率 $\mu=5$ となるような変形性能の高い曲げ部材を想定し、文献 11)を参考にして決定している。尚、図表中の μ_{cr} はひび割れ発生時の塑性率を表している。

2.3 本研究における耐震性能残存率評価法の基本概念

本研究では、(1)式の考えを用い、迅速な現地調査が困難な大規模建物を含めたあらゆる規模及び構造種別の建物において、地震直後に自動的に耐震性能残存率 R を算定可能な仕組みを考える（Fig.4）。

耐震性能低減係数 η は、建物基部に設置した地震計の観測記録を入力波形とする建物フレームモデルの地震応答解析によって推定した各箇所の最大塑性率等に基づいて決定する。RC 造建物であれば、各箇所について、例えば Fig.3 に示すような塑性率と損傷度の関係を定義しておくことで、応答解析結果から耐震性能低減係数 η を求

めることが出来る。また、S造建物においては、文献12)等)に示される方法に基づいて最大塑性率及び累積塑性変形倍率から算定した各箇所の損傷度Dを用いて、(2)式で耐震性能低減係数 η を算定する。

$$\eta = 1 - D \quad (2)$$

影響度 E_r は、建物内の全てのヒンジ想定箇所に対し、4章に示す方法で事前計算しておくものとする。尚、影響度 E_r の算定方法は構造種別によらないため、本研究における耐震性能残存率Rの評価法は、RC造、S造のいずれの建物にも適用可能な手法となるが、以降では、RC造建物を例として検討を行う。

3. 既往の研究における各箇所の影響度 E_r 算定法(精算法)

文献1)2)に3次判定法あるいは精算法として記載されている各部材損傷箇所の影響度 E_r 算定法の概要を以下に示す。尚、以下では同手法を精算法として扱う。

Fig.5に示す通常の解析モデル(基本モデル)及びある箇所の損傷(部材端部の曲げ変形による損傷)が建物の耐震性能に及ぼす影響を評価するため、基本モデルにおけるヒンジ発生位置のうち1箇所の耐力(曲げ終局モーメント)をゼロ、即ちピンとした仮想のモデル(部分ピンモデル)についてPushover解析を行う。外力分布については、通常は A_i 分布に基づく外力分布を用いる。得られた荷重変形関係を等価1自由度系に縮約して求めた応答加速度 S_a —応答変位 S_d 関係と減衰定数 h から、両モデルについて、告示のスペクトルに対する安全限界時(最大層間変形角 $=1/50\text{rad}$ とする)の保有耐震性能指標 α 、 α' を算定する(Fig.6)。基本モデルに対する部分ピンモデルの保有耐震性能指標の減少率 D_r を、(3)式で求める。

$$D_r = 1 - \alpha'/\alpha \quad (3)$$

ただし、(3)式で計算される D_r が負の値となった場合は、 $D_r=0$ とする。全てのヒンジ発生箇所(部材損傷箇所)について減少率 D_r を求め、和が1となるように基準化したものを、各部材損傷箇所の影響度 E_r として定義する((4)式)。(4)式における添え字の j は、ヒンジ発生箇所 j あるいは当該箇所をピンとした部分ピンモデルに対して算定される値であることを示している。

$$E_{rj} = D_{rj} / \sum D_{rj} \quad (4)$$

保有耐震性能指標 α 、 α' は、安全限界時の応答加速度 S_a 、応答変位 S_d 、減衰定数 h に基づいて算定される値であるため、精算法においては、一部材が損傷することによる建物の耐力、変形、減衰それぞれへの影響を総合的に考慮して、影響度 E_r を評価していることとなる。従って、(1)式を用いて被災建物の耐震性能残存率Rを評価する場合においても、2.2の例で示したような、被災建物における耐力、変形、減衰それぞれの変化が考慮されることとなる。尚、実際の建物では、複数の部材が損傷することで建物全体の耐力、変形、減衰に変化が生じるが、当該手法は、部材毎に算定される耐震性能低減係数 η と影響度 E_r の単純な積に基づいて耐震性能残存率Rを算定する(1)式の構成からわかるように、地震直後に行う計算手順を極力簡略化するため、建物全体の变化を各箇所の寄与分(影響度 E_r)に分解して評価していると考えられることが出来る。

ここで、実際の地震応答においては、 A_i 分布に基づくものとは異なる外力分布となるため、地震後の計算量の増加を許容するならば、観測波形を用いた地震応答解析結果から得られた外力分布に基づいて、地震発生後にPushover解析並びに影響度 E_r の評価を行う方法

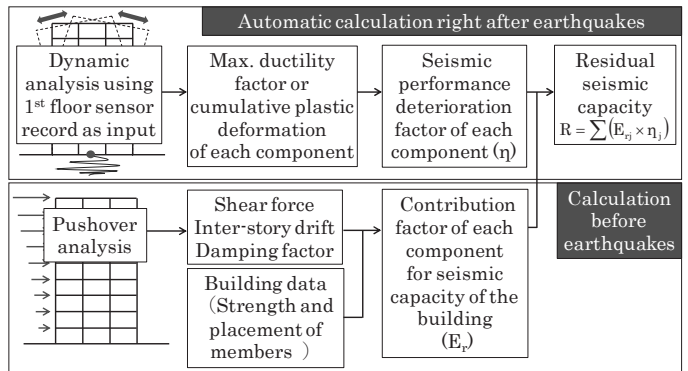


Fig.4 Calculation method of residual seismic capacity (R) in this research

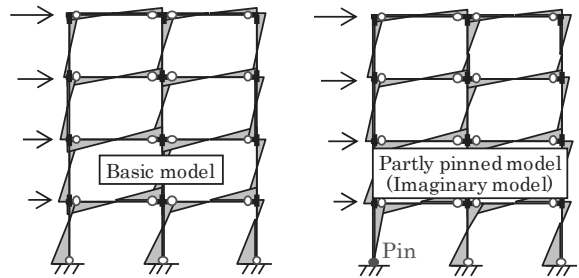


Fig.5 Basic model and partly pinned model

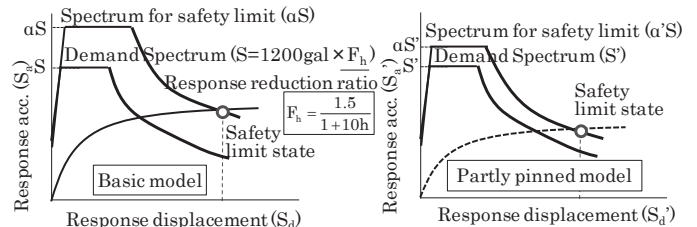


Fig.6 Calculation method of seismic performance index (α, α')

も考えられる。異なる外力分布を用いた場合、一般に、スペクトル形状や層間変形の分布等が変化し、更に、外力分布の差異が大きい場合には、ヒンジ発生箇所が変わる場合もあるため、影響度 E_r の算定値が大きく変化する可能性がある。この性質は、後述する提案手法においても同様であるが、本論文で精算法並びに提案手法を適用している10層以下の中低層建物においては、通常 A_i 分布に基づく分布が用いられることが多く、実地震時の外力分布との差異も小さいと考えられることから、以下では外力分布を A_i 分布に基づく分布に固定して検討を行うこととする。

また、(4)式で算定される影響度 E_r の値は、安全限界時における各部材の応力や変形の分布(相対的な大きさ)によって定まるため、一般には、安全限界を定義する変形角の設定によって、影響度 E_r は異なる値となる。しかしながら、架構のPushover解析においては、メカニズム発生以降は、外力並びに各部材の応力が頭打ちとなるため、各部材の応力や変形の分布は、その後架構の変形が進んでも大きくは変化しない。従って、安全限界時においてメカニズムが形成されているとすれば、影響度 E_r は概ね同じ値になると考えて良い。また、本研究の対象外ではあるが、同様の方法で修復限界や使用限界 α に対して各箇所の影響度 E_r を算定することも出来る。その場合、限界状態時にメカニズムが形成されていないことが想定されるため、影響度 E_r は安全限界を用いた場合とは異なる値となる。また、限界状態の設定変形角によって、影響度 E_r の値が大きく変化する可能性もあるため、注意が必要である。

4. 損傷前後の層間変形分布不変仮定に基づいた簡略的な各箇所の影響度 E_r 算定法 (提案手法: 同一層間変形法)

4.1 提案手法の概要及び精算法との比較

精算法の主要な計算部分となる保有耐震性能指標 α の算定には、安全限界時の建物の応答加速度 S_a 、応答変位 S_d 及び減衰定数 h が必要である。精算法では、Fig.7 に示すように、基本モデル、部分ピンモデルそれぞれに対して Pushover 解析を行うことで、上記の3つの指標を算定している。従って、影響度 E_r を求めるために、ヒンジ数と同じ回数だけの Pushover 解析を行う必要があり、実建物、特に大規模建物を対象とした場合には、計算量が膨大になる。また、部分ピンモデルは、建物内の一部分だけが損傷を受けるという極端な状態を仮定したモデルであるため、Pushover 解析を行った場合に建物の崩壊形が変化してしまい、保有耐震性能減少率 D_r が極端に大きくなるケースが生じる等、評価結果が安定しない可能性も考えられる。そこで本研究では、基本モデルにおける Pushover 解析結果と、解析の入力データとしても用いる基本的な部材情報、及びピンとする箇所の部材特性(耐力、減衰)に基づく簡易解析によって、部分ピンモデルにおける安全限界時の応答加速度 S_a' 、応答変位 S_d' 、減衰定数 h' を推定し、保有耐震性能指標 α' 並びに各箇所の影響度 E_r を算定する手法を考案した。提案手法は、精算法における部分ピンモデルの保有耐震性能指標 α' 算定部分を Pushover 解析が不要なものに置換することで、計算負荷を大幅に低減したものである。提案手法の手順を Fig.7 に示す。

ここで、上述の3つの指標 (S_a' , S_d' , h') の算定には、安全限界時における各層のせん断力 $\Sigma Q_i'$ と層間変形 δ_i' 、及び建物の減衰定数 h' (h' の算定の基となる各層(部材)の減衰定数 h_i') が必要となるが、Fig1, 2 に示した例からもわかるように、部材が損傷した建物(部分ピンモデル)において、層間変形 δ_i' の分布が損傷前の建物(基本モデル)からどのように変化するかは、各部材の耐力や位置関係等の様々な条件によって決まっており、層間変形 δ_i' の値の推定には、他の要素に比べて複雑な計算が必要になると考えられる。また、部分ピンモデルにおいて基本モデルからの層間変形 δ_i' の変化を考慮することが、影響度 E_r 並びに耐震性能残存率 R の評価精度の向上に寄与するかは明らかではない。そこで、本研究においては、計算の簡便さを優先し、各層の層間変形 δ_i' が基本モデルと同一であると仮定して、即ち、Fig.8 に示すように、実際には生じる基本モデルからの変化を無視して各指標を算定することとし、後述の7章にて、当該仮定を用いた手法の精度並びに適用範囲について検討を行う。以下では、提案手法を同一層間変形法と呼ぶこととする。

4.2 簡易解析による各指標の算定方法

梁曲げ降伏型の純ラーメン架構を想定し、簡易解析による部分ピンモデルにおける各指標の具体的な算定手順を説明する。

(1) 応答変位 S_d' の算定

縮約1質点系における安全限界時の応答変位 S_d' は、各層の質量 m_i 及び相対変位 D_i' から、(5)式で求められる。

$$S_d' = \frac{\sum_{i=1}^n m_i D_i'^2}{\sum_{i=1}^n m_i D_i'} \quad (5)$$

$$D_i' = \sum_{k=1}^i \delta_k' \quad (6)$$

n : 建物層数, δ_i' : i 層の層間変形

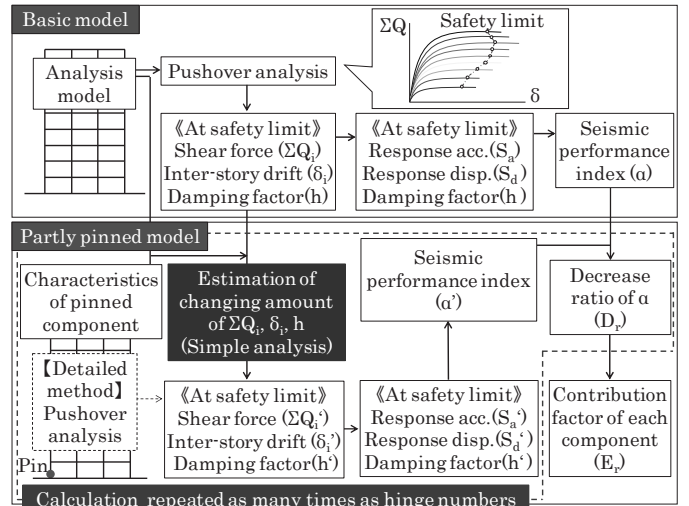


Fig.7 Calculation process of contribution factor (E_r) in the existing detailed method and the proposed simple method assuming invariable inter-story drift in both models.

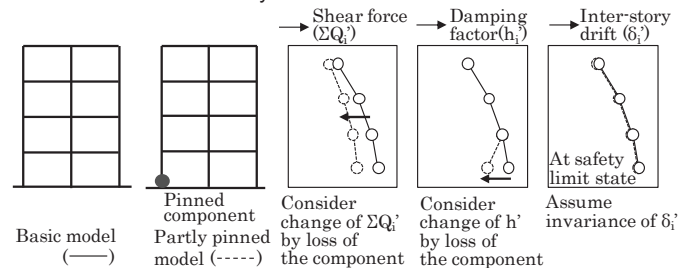


Fig.8 Concept in calculation of three indices ($\Sigma Q_i'$, δ_i' , h') in the proposed simple method assuming invariable inter-story drift

ここで、部分ピンモデルにおける質量 m_i は基本モデルと同一であるため、各層の層間変形 δ_i' が基本モデルにおける値 (δ_i) と同一であると仮定すれば、部分ピンモデルにおける応答変位 S_d' は基本モデルと同一の値として求めることができる。

(2) 応答加速度 S_a' の算定

全てのヒンジ発生位置における曲げ耐力の合計値 ΣM_u を建物全体の耐力と考えると、部分ピンモデルにおける建物の耐力 $\Sigma M_u'$ は、 ΣM_u からピンとする位置(部材)の耐力 M_{up} を減じ、(7)式で求めることができる。

$$\Sigma M_u' = \Sigma M_u - M_{up} \quad (7)$$

また、基本モデルに対する部分ピンモデルの建物耐力の比率(耐力低下率 r) は、(8)式で求められる。

$$r = (\Sigma M_u' - M_{up}) / \Sigma M_u = 1 - M_{up} / \Sigma M_u \quad (8)$$

外力分布が一定と考えた場合、安全限界時の各層のせん断力 $\Sigma Q_i'$ は、建物全体の耐力に比例するため、部分ピンモデルにおける i 層のせん断力 $\Sigma Q_i'$ は、基本モデルの Pushover 解析結果における i 層せん断力 ΣQ_i 及び部分ピンモデルにおける耐力低下率 r を用いて、(9)式で求めることができる。

$$\Sigma Q_i' = r \times \Sigma Q_i \quad (9)$$

また、有効質量 M_{ud}' は、(6)式で求めた各層の相対変位 D_i' 、及び各層の質量 m_i から、(10)式で算定出来る。

$$M_{ud}' = \left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i D_i'^2}{\sum_{i=1}^n m_i D_i'} \right)^2 \quad (10)$$

(9)式で求めた安全限界時の1層せん断力 $\Sigma Q_i'$ を有効質量 M_{ud}' で除し、(11)式で安全限界時の応答加速度 S_a' を求める。

$$S_a' = \Sigma Q_i' / M_{ud}' \quad (11)$$

(3) 減衰定数 h' の算定

本研究では、既往の研究²⁾と同様に、Pushover 解析結果から求めた各部材（パネ）の減衰定数 h_j を歪エネルギー W_j で重み付け平均し、(12)式で基本モデルにおける安全限界時の建物の減衰定数 h を求めることとしている。

$$h = \frac{\sum(h_j W_j)}{\sum W_j} \quad (12)$$

$$h_j = h_0 \quad (\text{塑性率 } \mu_j \leq 1)$$

$$= h_0 + 0.25 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu_j}}\right) \quad (\mu_j > 1) \quad (13)$$

$$W_j = (1/2) M_j \theta_j \quad (14)$$

h_0 : 粘性減衰定数, M_j : Pushover 解析結果における部材端の曲げモーメント, θ_j : Pushover 解析結果における部材の曲げ回転角

ここで、(1)と同様に、部分ピンモデルにおける層間変形 δ_i が基本モデルと同一と仮定した場合、部分ピンモデルにおける各部材の応力と変形角は、ピンとした位置を除き、基本モデルと同一と考えることが出来る。従って、部分ピンモデルにおける建物の減衰定数 h' は、(12)式で求められる基本モデルの減衰定数 h からピン位置の負担を取り除き、(15)式で求められる。

$$h' = \frac{\sum(h_j W_j) - h_p W_p}{\sum W_j - W_p} \quad (15)$$

h_p , W_p : ピン位置の安全限界時の減衰定数, 歪エネルギー。基本モデルの Pushover 解析結果における安全限界時の曲げモーメント M_p と曲げ回転角 θ_p , 塑性率 μ_p から、(13)(14)式に従って求める。

尚、厳密には、ヒンジの生じない柱部材においては、部分ピンモデルにおける変形が基本モデルと同一と仮定した場合でも、応力は基本モデルと異なる値となる（耐力低下率 r に応じて小さくなる）が、梁曲げ降伏型建物においては、柱部材の負担する歪エネルギーがヒンジの生じる梁に比べて非常に小さく、(15)式で算定される減衰定数 h' の値に及ぼす影響は無視出来ると考えられるため、同式で部分ピンモデルにおける減衰定数 h' を算定することとしている。

5. 地震応答解析による同一層間変形法及び精算法による影響度 E_r の算定精度検証方法

5.1 精度検証方法の概要

同一層間変形法（提案手法）及び精算法（従来手法）を用いて算定した各箇所の影響度 E_r により、被災建物の耐震性能残存率を精度良くかつ安全側に評価可能であるかを検討し、各々の手法の適用範囲を明らかにするため、梁曲げ降伏型の純ラーメン建物モデルを対象として、各々の手法で算定した影響度 E_r と耐震性能低減係数 η に基づいて(1)式で計算される耐震性能残存率 R と、地震応答解析に基づいて(16)式で計算される耐震性能残存率 R_{dyn} の比較を行う。

$$R_{dyn} = A_2 / A_1 \quad (16)$$

A_1 : 新築建物が 1 回の入力力で安全限界（最大層間変形角 1/50rad. で定義）に達する地震波倍率

A_2 : 被災建物が 2 回目の入力力で安全限界に達する地震波倍率

ここで、 A_1 を新築時の耐震性能、 A_2 を被災後の耐震性能と考えれば、 R_{dyn} は耐震性能残存率の定義（＝被災後耐震性能／新築時耐震性能）に合致する値となる。従って、(1)式で計算される耐震性能残存率 $R \leq R_{dyn}$ となれば、同一層間変形法あるいは精算法を用いて、被災建物の耐震性能残存率を安全側に評価出来ている、即ち、影響度 E_r を適切に評価出来ているものと判断出来る。

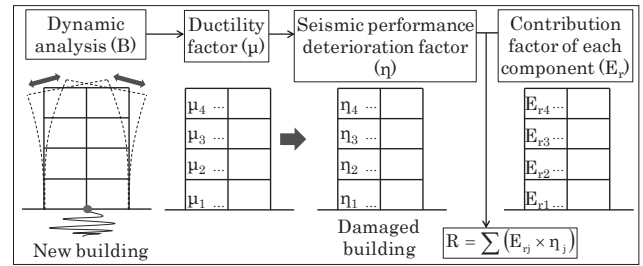


Fig.9 Calculation process of residual seismic capacity (R) based on contribution factor (E_r) (for evaluation right after earthquakes)

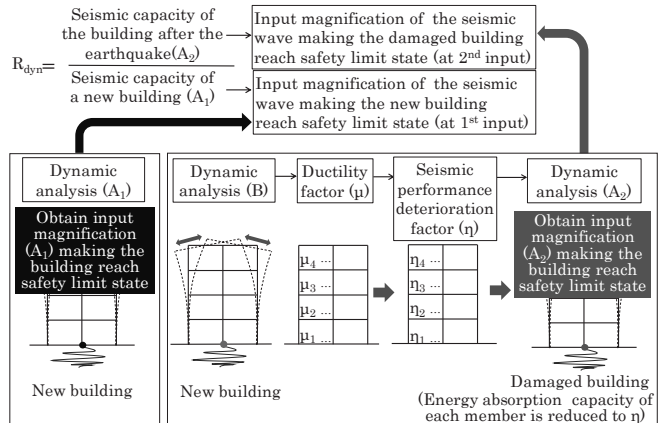


Fig.10 Calculation process of residual seismic capacity (R_{dyn}) based on dynamic analysis (detailed method for accuracy verification)

5.2 耐震性能残存率 R, R_{dyn} の算定手順

(1) 同一層間変形法あるいは精算法で求めた影響度 E_r を用いた耐震性能残存率 R の算定手順

Fig.9 及び以下に示す手順で算定する。

- 1) 3 章及び 4 章に示した方法で、各箇所の影響度 E_r を求める。
- 2) 建物が地震による被害を受けることを想定し、新築建物のモデル（通常のフレームモデル）に対して、任意の波形を用いて地震応答解析を行い、各ヒンジ想定箇所（部材）の最大塑性率 μ を算定する。
- 3) 文献 1)等に基づいて Table1, Fig.3 のように設定した関係を用い、2)で算定した塑性率 μ の値を基に、被災建物における各箇所の耐震性能低減係数 η を求める。
- 4) 影響度 E_r と耐震性能低減係数 η の値に基づき、(1)式で被災建物の耐震性能残存率 R を求める。

(2) 地震応答解析に基づく耐震性能残存率 R_{dyn} の算定手順

Fig.10 及び以下に示す手順で算定する。

- 1) 新築建物モデルに対して、告示波の入力倍率を変化させながら地震応答解析を繰返し行い、丁度安全限界に達するような入力倍率 A_1 を求める。
- 2) 建物が地震による被害を受けることを想定し、新築建物モデルに対して、任意の波形を用いて地震応答解析 (B) を行い、各箇所の最大塑性率 μ を算定する。
- 3) Table1, Fig.3 に示す関係に従い、被災建物における各箇所の耐震性能低減係数 η を求める。
- 4) 3)の結果に基づき、新築建物モデルに対して各箇所（部材）の耐震性能（エネルギー吸収能力）を η 倍に低減したものを被災建物のモデルとする。部材のエネルギー吸収能力を η 倍に低減する方法については、複数が考えられるため、後述の 6 章にて検討を行う。
- 5) 被災建物のモデルに対して、告示波を入力波とした地震応答解析

を繰り返し行い、丁度安全限界に達するような入力倍率 A_2 を求める。
 6) 入力倍率 A_1 及び A_2 に基づき、(16)式で被災建物の耐震性能残存率 R_{dyn} を求める。

6. 部材のエネルギー吸収能力を η 倍に低減した被災建物モデル

5.2 に示した手順で行う検討の目的は、同一層間変形法及び精算法による影響度 E_r の算定精度の検証であるが、5.2(1)(2)の手法による耐震性能残存率 R , R_{dyn} の評価結果には、耐震性能低減係数 η の値が影響を与える。そこで、本章では、(1)で用いる Table1 の η の値と、その値を基に、文献 3)の考えに従って(2)の地震応答解析に用いる被災建物モデルにおける部材の復元力特性を設定した場合の実際の耐震性能の低下率を比較し、両者の関係を定量的に把握する。ここで、被災建物モデルにおいて、 η の値に基づいて復元力特性を定める方法は、複数が考えられるため、各々について上記の比較を行った上で、文献 3)の考えに合致する適切な設定方法を決定する。

6.1 被災建物モデルにおける部材の復元力特性の設定方法

被災度判定の分野においては、建物並びに部材の耐震性能を安全側に評価することが基本方針となっており、本研究で用いている Table1 の η の値も、文献 3)において、被災建物における部材の耐震性能を精度良くかつ安全側に評価するために定められたものである。ここで、耐震性能低減係数 η は、Fig.11 に示すように、エネルギー吸収能力の比に基づいて定義される値となっているため、被災建物のモデルにおいては、各部材の復元力特性の設定において、終局変形に至るまでのエネルギー吸収能力を、新築時の η 倍とすることを考える。エネルギー吸収能力を理論上 η 倍にする方法としては、Fig.12 及び以下に示す 3 通りが考えられる。

- (a) 耐力、剛性を低減する (η 倍とする)。
- (b) 終局変形を低減する
- (c) 履歴減衰を低減する (スリップ型の履歴モデルを用い、履歴ループの面積を η 倍とする)

そこで、次項では、1 質点系建物モデルの地震応答解析結果に基づき、上述の 3 通りの方法の良否、即ち文献 3)の想定通りに、耐震性能を精度良くかつ安全側に評価出来ているかを検討する。尚、上述の 3 通りの方法で被災建物をモデル化することとした根拠の詳細については、付録 1 を参照されたい。

6.2 1 質点系の地震応答解析に基づく検討

(1) 検討方法

Fig.13 及び以下に示す手順で検討を行う。

- 1) Fig.12 に示した各方法で安全限界 (変形角 1/50rad. : 部材の終局変形に対応すると考える) に至るまでのエネルギー吸収能力を理論上 η 倍に低下させた被災建物のモデルと、新築建物のモデルを、1 質点系で作成する。ここで、被災建物のモデルでは、各部材の性能が均等に η 倍に低下することを想定している。
- 2) 各々のモデルに対し、告示波を入力波とした地震応答解析を繰り返し行い、丁度安全限界に達する地震波の入力倍率 A_a , A を求める。
- 3) 地震応答解析結果に基づく、被災建物の実際の耐震性能の低下率として、(17)式で耐震性能残存率 R_{dyn} を求める。

$$R_{dyn} = A_d/A \tag{17}$$

A_d : 被災建物モデルが安全限界に達する地震波倍率

A : 新築建物モデルが安全限界に達する地震波倍率

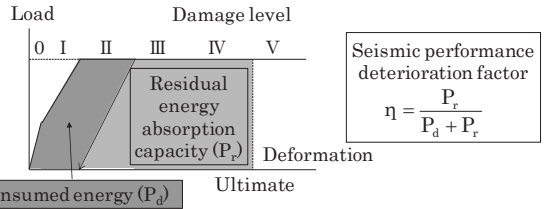


Fig.11 Concept of seismic performance deterioration factor (η)

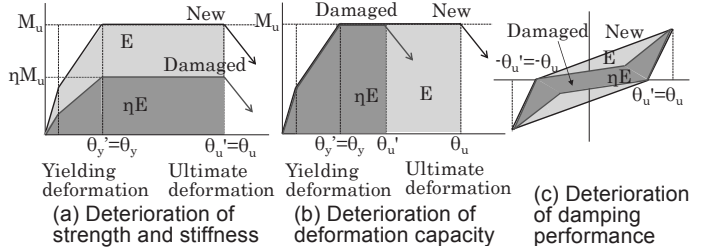


Fig.12 Evaluation methods for restoring force characteristics of members in damaged building models

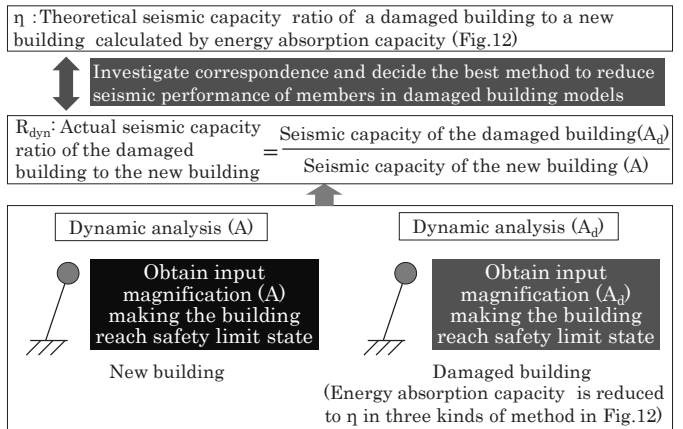


Fig.13 Process to decide the best method to reduce seismic performance of members in damaged building models based on dynamic analyses of SDOF models

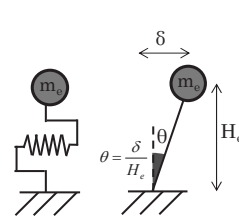


Fig.14 Outline of SDOF model

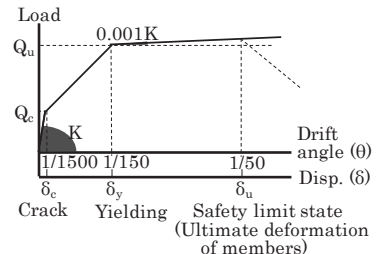


Fig.15 Backbone curve of SDOF model

尚、1 質点系モデルでは建物内の全部材を 1 つの要素に集約しているため、(17)式で求められる R_{dyn} が、各部材の実際の耐震性能の低下率を表していると考えられる。

4) R_{dyn} を理論上の耐震性能 (エネルギー吸収能力) の低下率 η と比較し、各々の手法における復元力特性設定方法の妥当性を検証する。

(2) 建物モデル及び入力地震波

a) 新築建物モデル

新築建物のモデルは、Fig.14 に示すような、3, 5, 7, 10 階建ての RC 造純ラーメン建物を想定した 1 質点系モデルとし、復元力特性は、Fig.15 のように設定する。ここで、 m_c : 建物の 1 次有効質量 [$=0.8 \times$ 建物質量], H_e : 建物の有効高さ [$=0.8H$], H : 建物高さ (m) [$=3.5 \times$ 建物階数], δ : 建物代表変位, θ : 建物代表変形角 [$=\delta/H_e$], Q_u : 降伏強度 [$=0.3 \times W$ ベースシア係数 0.3 を想定], W : 建物重

量, Q_e : ひび割れ強度 $[(1/3)Q_d]$ である。尚, 履歴モデルは, 武田モデルとし, 減衰は瞬間剛性比例型 (初期剛性に対して 5%) とする。

b) 被災建物モデル

被災建物のモデルは, Fig.12 に示した方法を用いて, エネルギー吸収能力 η が理論上, 新築建物モデルの 0.95~0.2 倍 ($\eta=0.95, 0.9, 0.85, 0.8, 0.75, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2$ の 11 ケース) となるようにしたモデルとする。尚, Fig.12(c)の履歴減衰を低減する方法においては, 武田スリップモデルを用いることとする。その場合, 被災建物モデルの復元力 (武田スリップモデル) における定常ループの履歴面積 W_d と新築建物モデルの復元力 (武田モデル) における定常ループの履歴面積 W の比 ($\eta_h=W_d/W$) が(18)式で求められる。

$$\eta_h = \frac{W_d}{W} = \frac{2 - \frac{33}{40}\mu^{\gamma-1} - \frac{33}{40}\mu^{\gamma-\lambda-1}}{2 \left(2 - \frac{33}{40}\mu^{\gamma-1} - \mu^{-\lambda} \right)} \quad (18)$$

γ : 除荷剛性低下係数 (通常 0.4), λ : スリップ剛性低下係数, μ : 塑性率

除荷剛性低下係数 $\gamma=0.4$ とし, 更に, Fig.15 に示すモデルに従って, 塑性率 $\mu=3$ とすると, 履歴面積の比 η_h は, スリップ剛性低下係数 λ の関数となる ((19)式)。

$$\eta_h = \frac{W_d}{W} = \frac{2 - 0.427(1 + 3^{-\lambda})}{4 - 0.854 - 2 \cdot 3^{-\lambda}} \quad (19)$$

ここで, スリップ剛性低下係数 λ は 0~1 の範囲で定義される値であるため, Fig.16 に示すように, 履歴面積比率 η_h は 1~0.58 の範囲で変化することとなる。即ち, η_h を 0.58 以下の値に低減することは出来ない。そこで, (c)減衰を低減する方法に関しては, $\eta=0.95 \sim 0.6$ の範囲で値を変化させたケースについて検討を行う。

c) 入力地震波

入力地震波は, 第 2 種地盤の告示の応答スペクトルに対応した地震波 (ランダム位相) とする。

(3) 解析結果

復元力特性上における理論上の履歴エネルギー吸収能力の低下率 η (耐震性能低減係数) と, 地震応答解析に基づいて(17)式で求めた耐震性能残存率 R_{dyn} (実際の耐震性能の低下率) の関係を Fig.17 に示す。

(c)減衰を低減した場合には, 全体的に R_{dyn} の値が η を大きく上回っている。一方, (a)耐力・剛性を低減した場合, (b)変形を低減した場合には, η が R_{dyn} の大凡下限値を捉えており, 被災建物の耐震性能を精度良くかつ安全側に評価すると言う耐震性能低減係数 η の考えと良く対応している。即ち, 文献 3)の想定に合致する形で被災建物がモデル化出来ていると言える。

ここで, (b)終局変形を低減する方法を用いた場合, 終局変形以前の復元力は, 被災建物と新築建物で同一となる。従って, フレームモデルにおいて同様の方法で各部材の耐震性能を低減し, 被災建物をモデル化することを考えた場合, 応答が終局変形まで達しない部材については, 被災建物モデルにおいても耐震性能が低減されないことになってしまう。一方, (a)耐力・剛性を低減する方法においては, フレームモデルにおいても, 応答レベルに関わらず, 各部材の耐震性能を低減することが出来る。また, 必要な手順は, 復元力特性における耐力及び剛性を η 倍するだけであり, 他の方法に比べて, 被災建物のモデルを簡便に作成することが出来る。

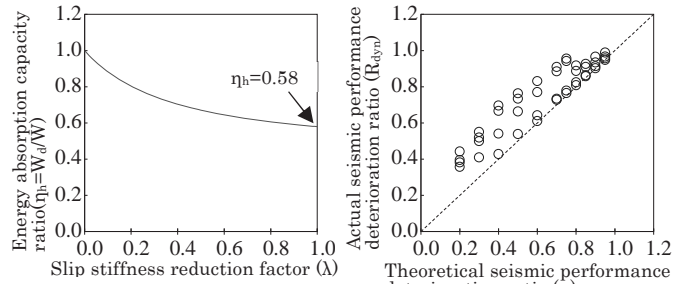


Fig.16 Slip stiffness reduction factor (λ) - energy absorption capacity ratio (η_h) relationship

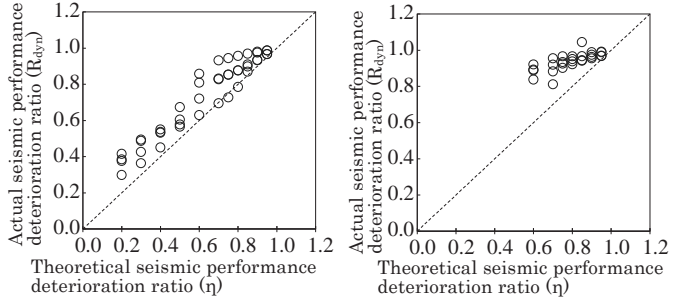


Fig.17 Theoretical seismic performance deterioration ratio (η) - actual seismic performance deterioration ratio (R_{dyn}) relationship

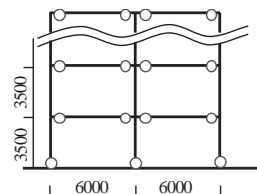


Fig.18 RC building model with beam yielding mechanism

Table2 Coefficient of variation of inter-story drift angle

Story	E-model	B-model	T-model
3	0.05	0.17	0.16
5	0.05	0.25	0.17
7	0.04	0.34	0.29
10	0.06	0.37	0.26

以上の理由から, 次章では, (a)耐力・剛性を低減する方法を用いて被災建物のモデルを作成し, 各箇所の影響度 E_r の算定精度の検証を行うこととする。

7. 地震応答解析による同一層間変形法及び精算法による影響度 E_r の算定精度検証結果

7.1 建物モデル及び入力地震波

対象は, Fig.18 に示す全体崩壊形の RC 造純ラーメン建物とし, 建物層数は 3, 5, 7, 10 の 4 種類とした。それぞれの層数について, 新築建物モデルの Pushover 解析における安全限界時の層間変形が均一な E モデル, 下層の変形が大きい B モデル, 上層の変形が大きい T モデルの 3 種類 (合計 $4 \times 3 = 12$ モデル) を設定した。各モデルにおける安全限界時の層間変形角分布を Fig.19 に, 層間変形角のばらつきを表す指標として, 変動係数を求めた結果を Table2 に, 各モデルの部材断面を Table3 に示す。ここで, モデル名は建物層数とモデルの種類を表している。Table2 より, E モデルは変動係数がいずれも 0.06 以下となっているのに対し, B モデル及び T モデルでは変動係数の値が倍以上大きくなっていることがわかる。

Pushover 解析及び地震応答解析においては, 柱と梁を材端に曲げバネ, 中央にせん断バネと軸バネを持つ線材に置換した。曲げバネ, せん断バネはトリリニア型のモデルを用い, 履歴は武田モデルとした。軸バネは弾性とした。水平外力の分布は A_i 分布に基づく分布とし, 長期荷重は集中荷重として各節点に加えた。各部材の曲げ

Table3 Member list

Member	Floor	Size (mm)	Main bar (SD345)	Size (mm)	Main bar (SD345)	Size (mm)	Main bar (SD345)
3-E 3-B 3-T							
Column	1	650×650	20-D22	600×600	16-D19	650×650	20-D25
	2-3	600×600	20-D22	600×600	16-D19	600×600	20-D25
Beam	2-R	400×600	5-D19	400×650	5-D22	400×600	6-D25
5-E 5-B 5-T							
Column	1	700×700	20-D22	800×800	16-D25	650×650	28-D25
	2-3	700×700	20-D22	750×750	16-D25	650×650	28-D25
	4	650×650	20-D22	750×750	16-D25	650×650	24-D25
	5	650×650	20-D22	700×700	20-D22	650×650	20-D22
Beam	2-3	600×750	6-D25	600×800	6-D25	600×750	7-D25
	4	550×750	5-D25	600×800	6-D25	600×750	6-D25
	5	500×650	5-D22	550×750	5-D25	450×650	6-D19
	R	350×550	4-D19	450×650	4-D22	400×550	4-D19
7-E 7-B 7-T							
Column	1-3	750×750	20-D25	750×750	16-D25	800×800	24-D29
	4	700×700	20-D25	750×750	16-D25	800×800	24-D25
	5	700×700	20-D25	750×750	16-D25	700×700	24-D25
	6	700×700	20-D25	700×700	16-D25	700×700	20-D25
	7	600×600	20-D22	700×700	20-D22	550×550	16-D22
	8	600×800	7+1-D25	700×850	7+1-D25	600×800	7+2-D25
Beam	5	600×800	7+1-D25	700×850	7+1-D25	600×750	7-D25
	6	500×700	5-D25	650×750	6-D25	550×700	6-D25
	7	500×700	6-D22	550×750	6-D22	550×650	6-D22
	R	400×550	4-D19	450×600	5-D19	400×550	4-D19
	10	410×550	5-D19	400×600	5-D19	500×600	5-D19
10-E 10-B 10-T							
Column	1-3	850×850	28-D25	850×850	24-D25	900×900	28-D25
	4	850×850	28-D25	850×850	24-D25	850×850	28-D25
	5-7	800×800	28-D25	800×800	24-D25	800×800	28-D25
	8	700×700	24-D25	800×800	24-D25	700×700	24-D25
	9	700×700	24-D25	750×750	24-D25	600×600	24-D25
	10	600×600	20-D25	750×750	24-D25	600×600	20-D25
Beam	2	770×900	8+4-D25	700×900	8+3-D25	700×900	8+4-D25
	3	770×900	8+4-D25	700×900	8+4-D25	750×920	9+4-D25
	4-5	770×900	8+4-D25	700×900	8+4-D25	700×900	8+4-D25
	6	650×850	8+3-D25	650×850	8+2-D25	700×850	8+4-D25
	7	650×850	8+1-D25	650×850	8+1-D25	650×850	8+2-D25
	8	650×850	7+2-D25	650×850	8+1-D25	650×800	7+2-D25
	9	600×800	6+1-D25	600×810	7-D25	600×750	7-D25
	10	500×650	6-D25	500×750	5-D25	550×700	7-D22
	R	410×550	5-D19	400×600	5-D19	500×600	5-D19

※Hoop(SD295)・2-D10@100 for columns and beams in 3-5 story models
 2-D13@100 for columns and 2-D10@100 for beams in 7 story models
 4-D16@100 for columns and 2-D13@100 for beams in 10 story models
 ※Concrete:Fc21 in 3-7 story models and Fc27 in 10 story models.

及びせん断のひび割れ，終局強度は略算式¹³⁾により算出した。この際，柱では，長期荷重を軸力として終局強度を算定した。

地震被害を想定するための入力地震波 (Fig.9, 10 の応答解析 B で用いる任意の地震波) は，告示波 (ランダム位相) とし，入力倍率は，各々のモデルに対して 0.2~1.3 倍で変化させた。減衰は瞬間剛性比例型 (初期剛性に対して 5%) とした。

7.2 検討結果

同一層間変形法あるいは精算法で求めた各箇所の影響度 E_r を用いて Fig.9 の手順で算定した耐震性能残存率 R と，地震応答解析結果に基づいて Fig.10 の手順で算定した耐震性能残存率 R_{dyn} の比較を Fig.20 に示す。図中には，各手法・モデルにおいて， $R_{dyn} < R$ となる (危険側の評価となる) ケースの割合を合わせて示している。尚，Fig.17 に示したように，耐震性能低減係数 η は安全側の値として設定されている。従って，(1)式で算定される耐震性能残存率 $R > R_{dyn}$ となった場合には，影響度 E_r が大きく危険側の評価になっている可能性が高いと判断出来る。

同一層間変形法を用いた場合，安全限界時の層間変形が均一な E モデルにおいては，耐震性能残存率 R を概ね精度良くかつ安全側に推定出来ているが，層間変形にばらつきのある B モデル，T モデル

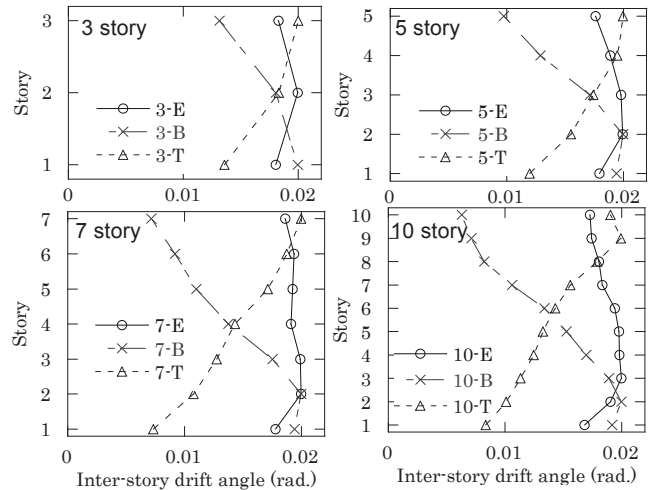
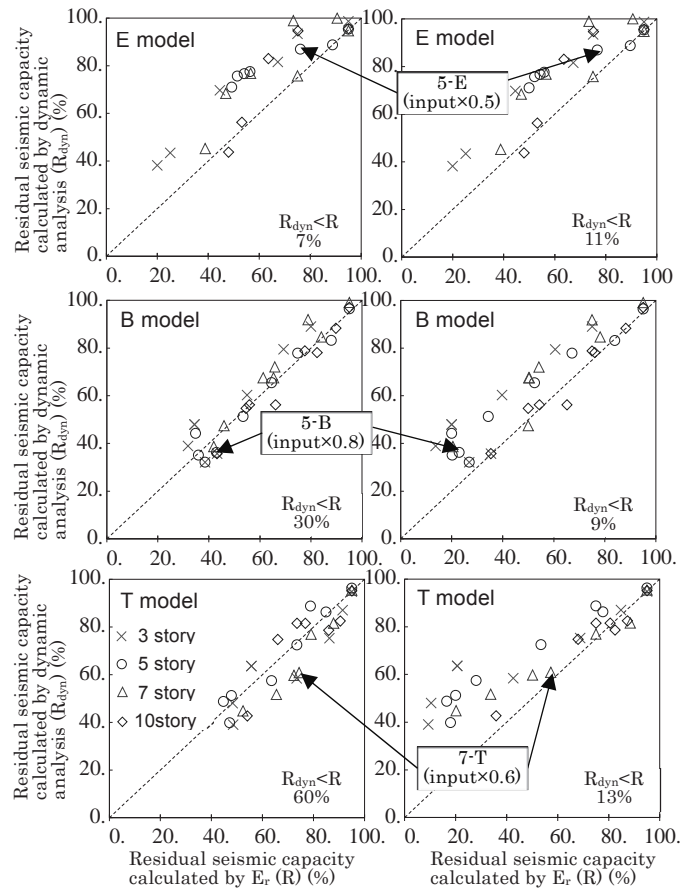


Fig.19 Inter-story drift angle at safety limit state calculated by pushover analysis



(a) Proposed simple method assuming invariable inter-story drift (b) Existing detailed method
 Fig.20 Residual seismic capacity calculated by E_r (R) - that by dynamic analysis (R_{dyn}) relationship

においては，危険側の評価を与える傾向が見られる。

その原因を検討するため，上記の傾向が見られた典型的な例として，5-E, 5-B, 7-T モデルにおける被災建物の (Fig.9, 10 の応答解析 B の結果に基づく) 損傷度分布を Fig.21 に，地震応答解析結果 (Fig.10 の応答解析 A₁, A₂) における新築建物モデル，被災建物モデルの安全限界時の層間変形角分布を Fig.22 に示す。5-E では，各層の損傷度分布がほぼ均一であるため，被災建物においても，新築建物モデルから安全限界時の層間変形角分布並びに建物としての変形性能 S_d の変化はほとんど生じていない。即ち，部材の損傷によ

て層間変形分布に偏りが生じ、建物の変形性能 S_d が低下することが無い場合、各箇所の影響度 E_r の算定において、部分ピンモデルにおける層間変形分布が基本モデルと同一であると仮定しても、即ち、部材損傷による建物の変形性能 S_d の変化は無いと仮定しても問題は無いと考えられる。一方、5-B では、被災建物モデルにおける損傷が下層に集中するため (Fig.21)、新築建物モデルに比べて、安全限界時の層間変形分布の偏りが大きくなり、建物の変形性能 S_d が低下する (Fig.22)。即ち、下層の部材が損傷することで建物の性能が大きく低下することとなるため、影響度 E_r の算定においては、下層の部材の値を大きめに評価する必要があるが、同一層間変形法においては、その傾向を考慮することが出来ないため、被災建物の耐震性能残存率 R を危険側に評価する結果になっていると考えられる。7-T においても、同様に、上層の部材が損傷することによる建物の変形性能の低下を考慮することが出来ないため、耐震性能残存率 R を危険側に評価する結果になっていると言える。

一方、精算法を用いた場合には、いずれのモデルにおいても、耐震性能残存率 R を概ね精度良く安全側に評価することが出来る (Fig.20)。精算法においては、部分ピンモデルにおける層間変形分布が基本モデルから変化することを考慮して、各箇所の影響度 E_r を算定しているため、B モデルにおいては下層、T モデルにおいては上層の部材の影響度 E_r が大きくなることを、定量的に評価することが出来る (Fig.23)。即ち、被災建物において、層間変形分布の偏りが大きくなることで建物の変形性能 S_d が低下するという、Fig.22 に示した傾向を適切に考慮することが出来るため、層間変形分布のばらつきの有無に関わらず、建物の耐震性能残存率 R を安全側に評価出来るものと考えられる。

以上の結果から、梁曲げ降伏型の RC 造中低層建物に関して、安全限界時の層間変形分布が均等な場合においては、本研究で提案する同一層間変形法を用いて、建物耐震性能に及ぼす各箇所の影響度 E_r 並びに被災建物の耐震性能残存率 R を概ね適切に評価可能であるが、層間変形分布にばらつきがあるような建物に対しては、耐震性能残存率 R を危険側に評価する、即ち、耐震性能低減係数 η が安全側の値になっていることを考えると、影響度 E_r を大きく危険側に評価する可能性が高いと言える。Table2 に示した値に基づけば、同一層間変形法の適用範囲は、安全限界時における各層の層間変形角のばらつきを表す変動係数が 0.06 以下となるような、変形分布が均等な建物に限られると結論づけられる。

一方、既往の研究における精算法を用いることで、あらゆる層間変形分布を持つ建物に対して、耐震性能残存率 R を概ね精度良くかつ安全側に評価出来るという結果が得られたことから、提案手法に

おいても、部分ピンモデルにおける層間変形の変化を考慮して影響度 E_r の算定を行うことで、影響度 E_r 並びに耐震性能残存率 R の評価精度が改善するものと考えられる。

今後は、部分ピンモデルにおける層間変形の変化を簡便に推定する方法を開発することで、あらゆる建物において高精度な評価が可能かつ実用的な耐震性能残存率評価法を構築する予定である。

8. まとめ

(1) 大規模建物にも適用可能な、簡便な被災建物の耐震性能残存率評価法として、部材特性を用いる簡易解析に基づいて算定した、建物耐震性能に及ぼす各箇所の影響度 E_r で、観測記録を入力波形とした地震応答解析等によって推定される各箇所の耐震性能低減係数 η を重み付けする手法を提案した。

(2) 提案手法においては、一般的な建物モデル (基本モデル) の Pushover 解析結果と、解析の入力データとしても用いる基本的な部材特性 (耐力, 減衰等) を用いた簡易解析によって、建物内のヒンジ想定箇所のうち一つの耐力をゼロとした部分ピンモデルにおける耐震性能並びに基本モデルからの耐震性能の減少率を推定し、その結果に基づいて各箇所の影響度 E_r を求めることとした。ここで、計算の簡略化のため、部分ピンモデルにおける層間変形分布は、基本モデルと同一であると仮定した (=同一層間変形法)。

(3) 階数及び層間変形分布をパラメータとした RC 造梁曲げ降伏型の

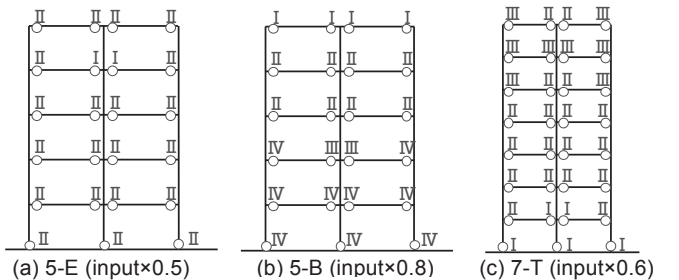


Fig.21 Damage level of building models

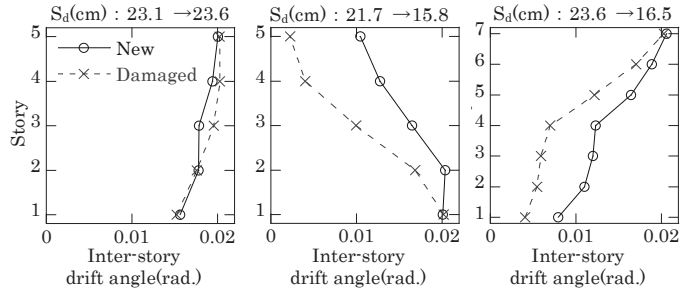


Fig.22 Inter-story drift angle at safety limit state of new and damaged building models calculated by dynamic analysis

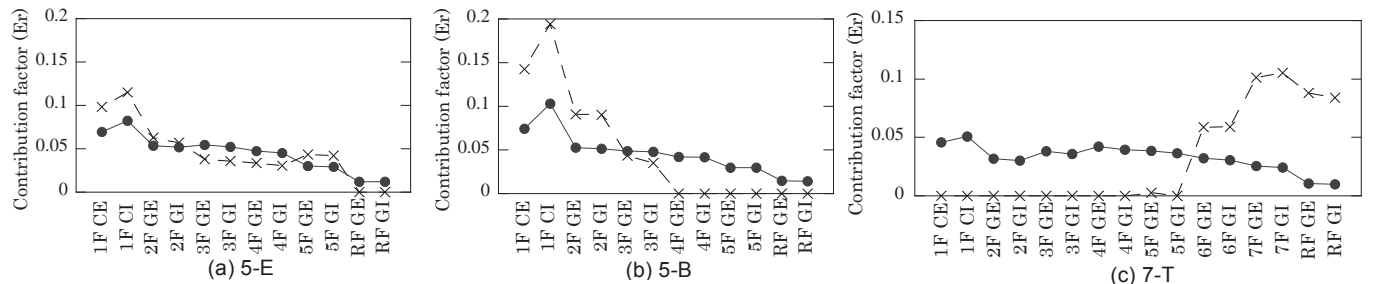


Fig.23 Contribution factor (E_r) calculated by the existing detailed method and the proposed simple method assuming invariable inter-story drift

建物モデルに対して、同一層間変形法を用いて求めた影響度 E_r に基づいて算定した被災建物の耐震性能残存率 R (提案手法による算定値) と、地震応答解析に基づいて算定した耐震性能残存率 R_{dyn} の値 (正解値) を比較したところ、各層の層間変形が均一な建物においては、提案手法によって耐震性能残存率 R_{dyn} を概ね精度良く安全側に評価出来るが、層間変形にばらつきがある建物においては、危険側に評価する可能性が高いことがわかった。

(4) 一方、影響度 E_r の算定に、部分ピンモデルにおける層間変形の変化を考慮した詳細な計算に基づく既往の手法を用いたところ、いずれの建物においても、耐震性能残存率 R を概ね精度良く安全側に評価出来る結果となった。提案手法においても、部分ピンモデルにおける層間変形の変化を考慮して影響度 E_r の算定を行うことで、評価精度が改善するものと考えられる。

(5) 今後は、部分ピンモデルにおける層間変形の変化を簡便に推定する方法を開発することで、あらゆる建物において高精度な評価が可能かつ実用的な耐震性能残存率評価法を構築する予定である。

参考文献

- 1) Kota MIURA, Masaki MAEDA et al.: Application of Residual Seismic Capacity Evaluation to Multi-story RC Buildings Based on Contribution Factors in Structural Elements, Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.34, No.2, pp.847-852, 2012.7 (in Japanese)
三浦耕太, 前田匡樹ほか: 架構耐震性能に及ぼす各部位の影響度に基づいた RC 造被災建物の残存耐震性能評価法の多層建物への拡張, コンクリート工学年次論文集 Vol.34, No.2, pp.847-852, 2012.7
- 2) Kota MIURA, Masaki MAEDA et al.: Evaluation Method of Contribution Factor of Structural Member for Seismic Capacity of Single-story RC frames Considering Strength and Energy Dissipation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.678, pp.1283-1290, 2012.8 (in Japanese)
三浦耕太, 前田匡樹ほか: 部材耐力と減衰を考慮した RC 造 1 層架構の耐震性能に及ぼす各部位の影響度評価法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.678, pp.1283-1290, 2012.8
- 3) Japan Building Disaster Prevention Association: Standard for Post-earthquake Damage Level Classification of Buildings, 2016.3 (in Japanese)
日本建築防災協会: 震災建築物の被災区分判定基準及び復旧技術指針, 2016.3
- 4) Takumi ITO, Kenichi OHI and Zhenglin LI: A Sensitivity Analysis Related to Redundancy of Framed Structures Subjected to Vertical Loads, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.70, No.593, pp.145-151, 2005.7 (in Japanese)
伊藤拓海, 大井謙一, 李正林: 鉛直荷重を受ける骨組構造物の冗長性に関わる感度解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.70, No.593, pp.145-151, 2005.7
- 5) Takashi KATO, Shigeki SAKAI and Kenichi NAKANO: Structural Health Monitoring System to Support the Evaluation of Building Safety and Usability After an Earthquake, Summary of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.99-100, 2014.9 (in Japanese)
加藤貴司, 境茂樹, 仲野健一: 地震後における建物の安全性・使用性判定支援のための構造ヘルスマニタリングシステム, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.99-100, 2014.9
- 6) Tomoo SAITO and Michito SHIRAISHI: Monitoring and Prompt Condition Assessment of Superstructures (Part 2-3), Summary of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.77-80, 2013.8 (in Japanese)
斉藤知生, 白石理人: 建物の健全度モニタリング (上部構造) に関する研究開発 (その 2~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.77-80, 2013.8
- 7) Michito SHIRAISHI, Koichi SUGIMOTO et al.: Monitoring and Prompt Condition Assessment of Superstructures (Part 4-6), Summary of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.63-68, 2014.9 (in Japanese)
白石理人, 杉本浩一ほか: 建物の健全度モニタリング (上部構造) に関する研究開発 (その 4~6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.63-68, 2014.9
- 8) Michito SHIRAISHI, Koichi SUGIMOTO et al.: Monitoring and Prompt Condition Assessment of Superstructures (Part 7-9), Summary of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.937-942, 2015.9 (in Japanese)
白石理人, 杉本浩一ほか: 建物の健全度モニタリング (上部構造) に関する研究開発 (その 7~9), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.937-942, 2015.9
- 9) Hisashi UMEMURA, Toshikatsu ICHINOSE et al.: Development of Hysteretic Model for RC Member Considering Strength Deterioration, Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.24, No.2, pp.1147-1152, 2002.7 (in Japanese)
梅村恒, 市之瀬敏勝ほか: 耐力低下を考慮した RC 部材の復元力モデルの開発, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.2, pp.1147-1152, 2002.7
- 10) Tomohisa MUKAI, Tadashi KAJIWARA and Setsurou Nomura: An Experimental Study on Damage and Energy Dissipation Capacity of R/C Beam with Flexural Yielding under Earthquake, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.71, No.601, pp.129-136, 2006.3 (in Japanese)
向井智久, 梶原唯史, 野村設郎: 曲げ降伏する RC 造梁部材の地震時損傷とエネルギー吸収性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, No.601, pp.129-136, 2006.3
- 11) Architectural Institute of Japan: Guidelines for Performance Evaluation of Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings (Draft), 2004.7 (in Japanese)
日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説, 2004.7
- 12) Yoshitaka SUZUKI, Norihide KOSHIKA et al.: Study on Safety Assessment Methods for Super-high-rise Steel Buildings against Long-period Earthquake Ground Motions (Part 22), Summary of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-III, pp.1091-1092, 2013.8 (in Japanese)
鈴木芳隆, 小鹿紀英ほか: 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討 (その 22), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.1091-1092, 2013.8
- 13) Information Center for Building Administration: Technological Standard Related to Structures of Buildings, 2015.6 (in Japanese)
建築行政情報センター: 2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2015.6

付録 1: 影響度 E_r の算定精度検証に用いる被災建物モデルの設定根拠

文献 3)において、部材の耐震性能低減係数 η は、損傷度に応じて低下するという考えが示されており、曲げ部材に関しては、部材実験の結果を安全側に評価するものとして、Table1 の値が示されている。ここで、 η の値は、エネルギー吸収性能の低下率に基づいて定められているが、同文献中では、性能低下の具体的な要因までは言及されていない。一方、文献 9)10)から、梁降伏型の被災建物では、地震による繰返し変形の影響により、新築建物よりも各部材 (曲げ部材) の耐力と剛性、変形能力、減衰が低下すると考えられる。従って、理想的には、各々の性能低下要因の割合を正確に評価し、被災建物のモデルに反映すべきであるが、現状では、そのための知見は十分ではない。

一方で、上述の性能低下原因のいずれか一つを考慮した場合、Fig.12 に示す方法で、部材のエネルギー吸収性能を、理論上、明確に新築時の η 倍とすることが出来る。また、本論文の主目的は影響度 E_r の算定精度の検証であることから、被災建物のモデル化においては、文献 3)の考えに従って、部材のエネルギー吸収性能を新築時の η 倍とした上で、Fig.17 に示すような耐震性能低減係数 η と実際の建物における耐震性能の低下率 R_{dyn} の関係を定量的に捉えることが出来ていれば、必ずしも実建物の挙動を正確に再現したモデルにする必要はないと考えられる。そこで、本研究では、性能低下の要因を 1 つに集約する形で、Fig.12 の方法のいずれかによって被災建物モデルを作成することとし、6 章の検討を行った。

EVALUATION METHOD OF CONTRIBUTION FACTOR OF STRUCTURAL COMPONENTS FOR SEISMIC CAPACITY ASSUMING INVARIABLE INTER-STORY DRIFT BEFORE AND AFTER DAMAGED AND INVESTIGATION OF APPLICABILITY TO RC FRAMES WITH BEAM YIELDING MECHANISM

Development of evaluation method of residual seismic capacity of damaged buildings
for instant inspection after earthquakes Part 1

Kota MIURA *¹ and *Masaki MAEDA* *²

*¹Obayashi Corporation Technical Research Institute, M.Eng.

*²Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tohoku University, Dr.Eng.

After an earthquake, it is important to know quantitative damage level of buildings to judge safety and make an efficient recovery plan. For that purpose, an evaluation method of residual seismic capacity for damaged RC buildings using performance deterioration factors of structural components (η) and contribution factors of each component (E_r) was proposed in our previous research. In this existing method, η is estimated on an observational survey and E_r is calculated by repetitive pushover analyses. But it is difficult to evaluate E_r for actual buildings because the computational load is so heavy. Furthermore, there was no investigation of accuracy of the method in the research. Therefore, in this paper, a new evaluation method of residual seismic capacity for buildings with beam yielding mechanism based on a simple E_r calculation method was proposed and accuracy of the method was discussed by dynamic analysis. The basic idea of the proposed method is the following.

At first, E_r is calculated by simple analysis using characteristics of components in advance. Then, when an earthquake happens, η of each component is estimated by dynamic analysis using an observed wave as input. With these two factors, residual seismic capacity is calculated automatically right after an earthquake. The detailed calculation process of E_r is explained after this paragraph with comparison to the process of the existing method.

The existing E_r calculation method is as follows. At first, pushover analysis is applied to a normal building model (basic model) and a seismic performance index (α) is calculated based on the result. Next, another model in which one component is damaged (partly pinned model) is prepared and a seismic performance index (α') is calculated in the same way. Because of the damage, α' is lower than α , and E_r of the component is calculated based on the difference. In the E_r calculation process of all components, as many pushover analyses as the number of components are needed, and so the computational load is so heavy. Therefore, a new method with a less computational load was proposed in this paper. In this method, change of seismic performance of partly pinned models from a basic model is estimated on characteristics of structural components by simple analysis which assumes that inter-story drift distribution of partly pinned models doesn't change from that of the basic model. The assumption was applied because estimation of change of inter-story drift was so difficult and it wasn't clear that the assumption had a great influence on the accuracy.

To examine accuracy of the proposed method, dynamic analyses of frame models of new buildings and damaged buildings were performed. In advance of that, modeling methods of damaged buildings were discussed by SDOF models and it was shown that seismic performance deterioration of each structural component was simulated most appropriately when strength and stiffness were reduced based on damage level (η). Next, residual seismic capacity estimated based on E_r and actual capacity calculated by dynamic analysis were compared for RC beam yielding frame models which have differences in story numbers and inter-story drift distribution. As a result, it was shown that the proposed method can estimate residual seismic capacity appropriately for frames with uniform inter-story drift distribution but cannot for frames with non-uniform distribution because inter-story drift in the latter ones generally changes by damage. But, on additional investigation, it was also shown that the accuracy was improved if E_r by the detailed existing method was used in place of that by the proposed method, and so applicability of the proposed method can be improved considering change of inter-story drift distribution in partly pinned models.

(2017年7月10日原稿受理, 2018年2月6日採用決定)