

地震動特性と地盤と建物の相互作用効果が RC 造建物の被害関数に及ぼす影響

EFFECTS OF EARTHQUAKE MOTION CHARACTERISTICS AND SOIL-STRUCTURE INTERACTION ON FRAGILITY FUNCTION FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURE BUILDINGS

森井雄史*, 宮腰淳一**, 吉田一博*, 遠山奈々***

Takeshi MORII, Junichi MIYAKOSHI, Kazuhiro YOSHIDA and Nana TOYAMA

When the estimation of earthquake damage of buildings is performed, the fragility function which was determined by the data base of damaged buildings during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake is often used in Japan. However, in some cases, the employed fragility function isn't consistent with the building damage caused by the earthquakes occurred in recent years. In this paper, the effects of soil-structure interaction and periodic characteristics of earthquake motion on fragility functions in reinforced concrete structure buildings are examined. It is pointed out from our study that the response reduction effects due to the soil-structure interaction become remarkable in the medium-rise buildings such as 8 and 15 stories when input seismic motion is predominant in the short or long period against natural period.

Keywords: *Fragility Function, Soil-Structure Interaction, Reinforced Concrete Structure Building, Periodic Characteristics of Earthquake Motion*

被害関数, 地盤と建物の相互作用効果, RC 造建物, 地震動の周期特性

1. はじめに

建物の地震被害想定を行う際、1995年兵庫県南部地震の被害事例に基づいて作成された建物の被害関数を用いる事例が多く見られる。しかし、兵庫県南部地震の被害事例を基に作成された建物の被害関数の中には、建物を基礎固定モデルでモデル化し、兵庫県南部地震の観測地震動を用いた地震応答解析の結果から作成されたものもある¹⁾。そのため、観測地震動における地震動特性の違いや地盤と建物の相互作用効果による建物応答の変化について考慮されている訳ではない。地盤と建物の相互作用効果の影響については、過去の地震被害事例や観測地震動を基に、建物応答に及ぼす影響について分析されている事例は見られている^{2,3,4)}。しかし、地盤と建物の相互作用効果による建物応答の変化を系統的にまとめている事例や、地盤と建物の相互作用効果が建物群の被害関数に及ぼす影響について分析された事例は見られていない。

本論文では、地震動特性および地盤と建物の相互作用効果が、RC造建物群の被害関数に及ぼす影響について分析する。まず、第2章では、建物群の被害関数を作成するまでの全体のフローを示すとともに、地盤と建物の相互作用効果による建物応答変化を簡略的に組み入れる方法について記述する。次に、第3章では、本研究で用いる解析方法と解析パラメータについて記述する。本研究では、RC造建物を対象とし、建物階数、建物耐力、建築面積、埋込深さを建物のパラメータとする。建物への入力地震動には、表層地盤の周期、S波速度、土質種別をパラメータとして求めた

地震動を用い、地盤と建物の相互作用効果を考慮した建物の地震応答解析を行う。そして、第4章では、地盤と建物の相互作用効果が建物応答に及ぼす影響について分析し、第5章で基礎固定モデルの建物応答値から相互作用効果を考慮した建物応答値を算定するための建物応答倍率を提案する。なお、本論文では建物応答倍率は、基礎固定モデルの応答値に対するSRモデルの応答値の比と定義している。最後に、第6章では、地盤と建物の相互作用効果と地震動特性が建物群の被害関数に及ぼす影響について検討する。

2. 建物応答倍率を活用した建物群の被害関数の作成手法

地震応答解析に基づいて建物群の被害関数を作成する方法⁵⁾に、建物応答倍率を適用する流れを図1に示す。地震応答解析に基づいて建物群の被害関数を作成する方法では、建物耐力をパラメータとして、基礎固定モデルの地震応答解析を行う。次に、最大層間変形角と被害発生率との関係(変形クライテリア)から、得られた最大層間変形角に対する被害発生率を求め、それに建物耐力の割合(建物耐力分布)を乗じる事で建物群の被害率を算定する。そして、建物群の被害率を地震動レベルごとに求める事で、特定の建物モデルに対する建物群の被害関数を算定する。ここでは、上記の方法で求まる基礎固定モデルの最大層間変形角に、基礎固定モデルの建物応答値から相互作用効果を考慮した建物応答値を算定するための係数(以下では、建物応答倍率と呼ぶ)を乗じ、地盤と建物の相互作用

* 清水建設(株)技術研究所 博士(工学)

** 名古屋大学 減災連携研究センター 博士(工学)

*** 損害保険料率算出機構

Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, Dr. Eng.

Non-Life Insurance Rating Organization of Japan

効果を考慮した最大層間変形角を推定する。最後に、推定した最大層間変形角を用いて、地盤と建物の相互作用効果を考慮した建物群の被害関数を作成する。

3. 相互作用効果を考慮した建物の地震応答解析

3.1 解析モデルの概要

地盤と建物の相互作用効果を考慮した建物の地震応答解析の全体像を図2に示す。ここでの建物の地震応答解析では、解析実績のあるSway-Rocking(SR)モデルを用いる。建物の地震応答解析を実施するために、まず、表層地盤の地震応答解析を実施し、建物の地震応答解析に用いる基礎入力動と、地盤ばねを算定する際に用いる非線形時の表層地盤の地盤物性(S波速度と減衰定数)を求める。建物の地震応答解析に用いる基礎入力動は、建物基礎底面位置での応答波形を抽出している。次に、非線形時の表層地盤の地盤物性と、建物モデルの基礎形式および平面形状のパラメータを合わせて、建物モデル(SRモデル)に用いる地盤ばねを算出する。最後に、先に求

めた基礎入力動とSRモデルを用いて建物の地震応答解析を実施し、最大層間変形角 R_{sr} を求める。一方、基礎固定モデルの地震応答解析では、表層地盤の地震応答解析の結果から地表面上での基礎入力動を用いて、最大層間変形角 R_{fix} を求める。そして、基礎固定モデルの最大層間変形角 R_{fix} に対するSRモデルの最大層間変形角 R_{sr} の比を建物応答倍率(R_{sr}/R_{fix})と定義し、分析に用いる。建物応答倍率が1以下となれば、地盤と建物の相互作用効果によって建物応答が低減されることになる。

解析パラメータは、表1に示すように、表層地盤モデルでは弾性1次固有周期 T_{10} 、表層地盤の等価S波速度 V_s 、層数 n 、土質種別とする。建物モデルはRC造建物の一般住宅を対象とし、建物階数、建物耐力、建物形状(建築面積、アスペクト比)、埋込深さとする。

3.2 表層地盤の地震応答解析(基礎入力動の算定と非線形時のS波速度)

表層地盤の地震応答解析ではSHAKEを用い、地盤ばねを算定するための非線形時のS波速度と、建物の地震応答解析に用いる基礎

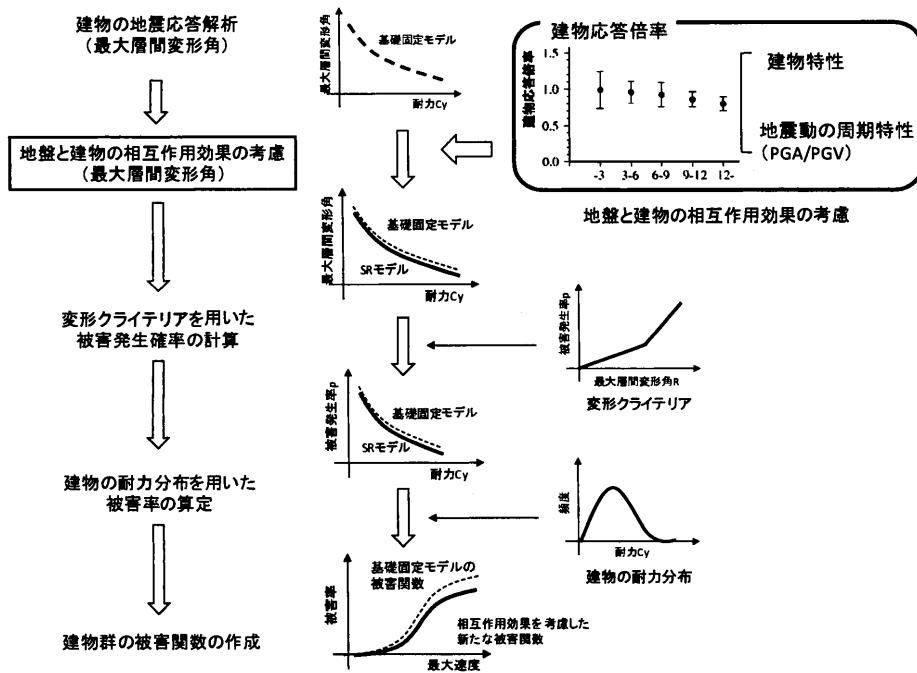


図1 建物群の被害関数の作成方法と建物応答倍率の適用方法

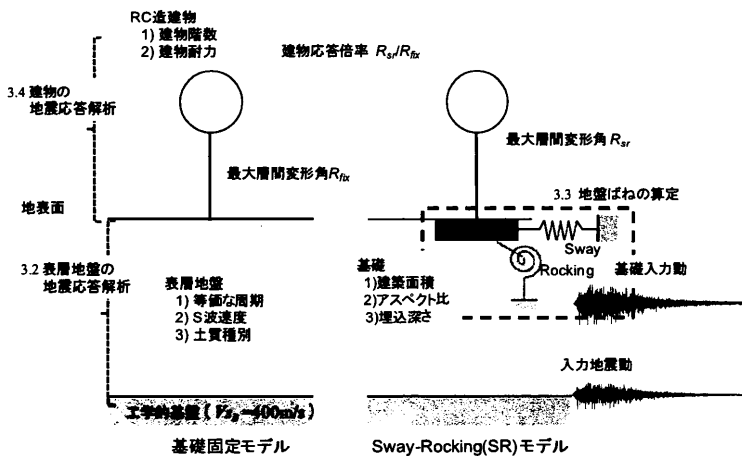


図2 地盤と建物の相互作用効果を考慮した建物の地震応答解析

表1 解析パラメータ

(a) 表層地盤

パラメータ	モデル
1次固有周期 T_{10} (s)	0.25, 0.5, 0.75, 1.0
等価S波速度 V_s (m/s)	150, 200, 250, 300
層数 n	1, 2, 4
土質種別	砂質土, 粘性土

(b) RC造建物

建物階数 N	2	4	8	15
耐力 α	2, 3, 5			
建築面積 A_b (m^2)	50, 100, 150	200, 400	400, 900	
建物長さの比 BC	1, 3			
埋込深さ D (m)	0, 3	3, 6, 10		

入力動を求める。表層地盤への入力地震動には、工学的基盤面の加速度応答スペクトル($h=0.05$)に適合させた乱数位相の模擬地震動を用いる(図3)。なお、加速度応答スペクトルの形状は、限界耐力計算に用いられる工学的基盤面上で設定される加速度応答スペクトルを基準としている⁵⁾。入力レベルは最大速度 V で基準化し、 $V=20\sim 80\text{cm/s}$ の範囲を 20cm/s 刻みで変化させる。

表層地盤および工学的基盤面の密度 ρ は $1.8(\text{g/cm}^3)$ 、ポアソン比は 0.45 と各層で一様とし、工学的基盤面のS波速度 V_{S_b} は 400m/s と設定する。表層地盤の弾性1次固有周期は $0.25\sim 1.0\text{s}$ の範囲を考え、表層地盤の等価なS波速度 V_{S_e} は $150\sim 300\text{m/s}$ とする。層数 n を $2,4$ とした場合、各層のS波速度 V_S を $100\sim 400\text{m/s}$ の範囲で設定し、表層地盤の等価なS波速度 V_{S_e} になるようにしている。想定した土質種別の粘性土、砂質土の非線形特性を表す剛性低下率 G/G_0 と歪 γ との関係および、減衰 h と歪 γ との関係は、図4に示す古山田モデル⁶⁾を用いる。建物の地震応答解析に用いる基礎入力動は、埋込深さを考慮しない場合には地表面上での応答波を用い、埋込深さを考慮する場合には、建物基礎底面位置での応答波を用いる。

なお、表層地盤モデルの地震応答解析を行った結果、表層地盤の歪レベルは、等価なS波速度 $V_{S_e}=150\text{m/s}$ 、層数2及び4の地盤において、表層地盤への入力地震動の最大速度 $V=40\text{cm/s}$ 以上とした場合、歪レベル1%程度を超える場合も見られているが、ここでは、設定した表層地盤のパラメータ解析の一つとしてそのまま用いている。

3.3 地盤ばねの算定

表層地盤の地震応答解析から求めた表層地盤の非線形時のS波速度と、建物モデルの解析パラメータ(建築面積 A_b 、建物長さの短辺と長辺の比(アスペクト比) BC 、埋込深さ D)を用いて、地盤ばねを

算定する。地盤ばねの算定方法には、軸対称FEMを用いる(図5)。同図では、一例として埋込深さ $D=3\text{m}$ 、基礎幅 $B=10\text{m}$ とした場合を示している。基礎面は剛基礎とし、境界条件は側方にはエネルギー伝達境界、底面には粘性境界を用い、基礎底面の中心位置での地盤ばねを算定している。また、低振動数側での剛性が過小評価にならないように、剛基礎の半幅の5倍程度の深さまで地盤をモデル化する。動的地盤ばねは、建物の地震応答解析を行う建物モデルの固有周期を考慮し、 10Hz まで算定している。建築面積は矩形断面で設定しているが、軸対称FEM解析を用いていることから、水平成分については基礎の底面積が等価な円形断面でモデル化し、回転成分(ロッキング成分)については断面2次モーメントが等価な円形断面でモデル化する⁷⁾。地盤ばねの定数化の方法は、地盤ばねの剛性は静的に近い値の実部とする(図6(a))。減衰係数は 10Hz までの振動数ごとに直線で近似した傾きを計算し、その平均値を用いる(図6(b))。本検討では、非常に多くの解析を実施する必要があり、建物ごとに減衰係数を変化させることは困難と判断し、対象建物(2,4,8,15階)の固有値の範囲($1\sim 10\text{Hz}$)で算定した減衰係数の平均値を建物に関わらず用いている。そのため、図6(b)に示すように、建物の固有振動数が 1Hz 付近にある15階建てでは、減衰係数を大きく評価している可能性がある。

3.4 RC造建物の地震応答解析

対象とするRC造建物を以下のような方法でモデル化し、地盤と建物の相互作用効果を考慮した地震応答解析を行う。一例として、4階建て建物の解析モデルを図7に示す。また、建物耐力 C_y と建物周期 T_{b0} との関係を図8に示す。RC造建物の復元力特性には武田モデル⁸⁾を用い、降伏層間変形角 R_y は $R_y=1/150\text{rad}$ とする。第一折点の

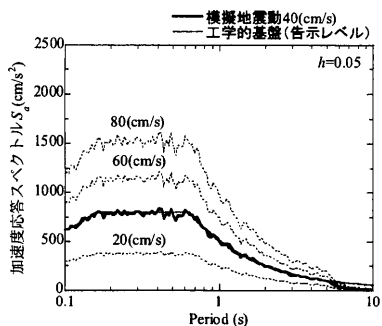


図3 表層地盤モデルへの入力地震動

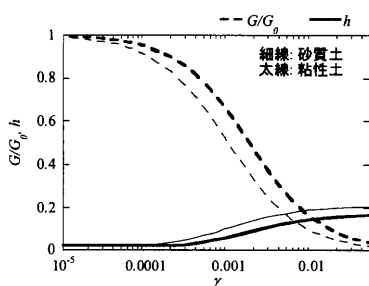


図4 地盤の非線形特性

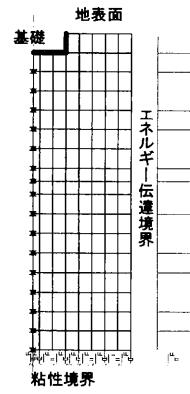


図5 軸対称FEMの解析モデル

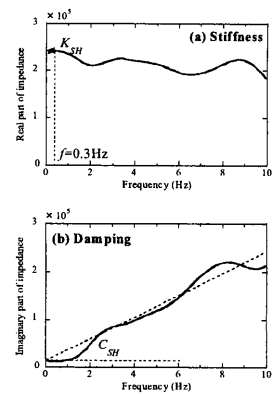


図6 地盤ばねの定数化の方針

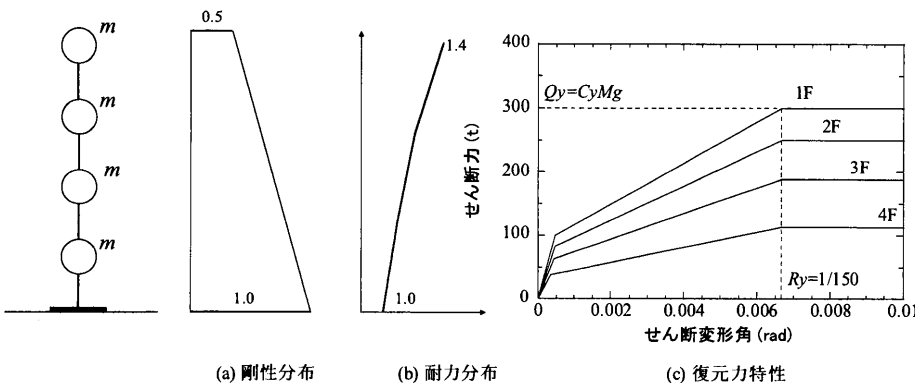


図7 4階建てRC造建物の解析モデルの概要

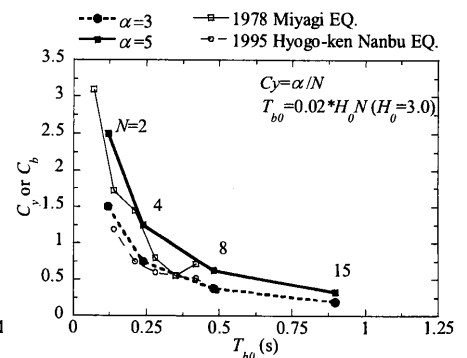


図8 建物耐力 C_y と建物周期 T_{b0} との関係

せん断耐力を $Q_y/3$ とし、第一折点の層間変形角は、建物周期から定まる剛性と第一折点の耐力から設定する。そして、降伏層間変形角 R_y 以上の第三剛性は、初期剛性の 0.01 倍と設定する。建物耐力 C_y は、建物階数 N と建物耐力に関わる係数 α との関係で表し、 $C_y = \alpha/N$ で設定する。各階の質量および階高さは一様として、単位面積あたりの質量は $1t/m^2$ 、階高さは 3m とする。建物高さは $H_b = 3.0N$ となり、建物周期は $T_{b0} = 0.02H_b$ で表す。剛性分布は台形分布とし、1階に対する最上階の比は 0.5、耐力分布は A_i 分布に従う。建物耐力 C_y と建物周期 T_{b0} との関係を見れば、 $\alpha = 3$ とした場合、過去の被害地震における調査建物^{9,10)}と同程度の建物耐力となっている(図 8)。

以下では、地盤と建物の相互作用効果による建物応答倍率を作成するために、設定した基礎入力動と建物モデルを用いて、基礎固定モデルと SR モデルの地震応答解析を行う。

4. 地盤と建物の相互作用効果が建物応答に及ぼす影響

地盤と建物の相互作用効果を考慮した RC 造建物の地震応答解析を実施し、設定した解析パラメータが建物の最大層間変形角や建物応答倍率に及ぼす影響について分析する。先述したとおり、建物応答倍率は、基礎固定モデルの最大層間変形角 R_{fix} に対する SR モデルの最大層間変形角 R_{sr} の比を建物応答倍率(R_{sr}/R_{fix})と定義している。また、地震動特性を分析するにあたり、最大地動加速度 PGA と最大地動速度 PGV の他に、地震動の略算周期 T_{gc} が $T_{gc} = 2\pi / (PGA/PGV)$ と表されることから、 PGA/PGV を地震動の周期特性として分析に用いる。

4.1 地震動特性と最大層間変形角との関係

まず、RC 造建物の地震応答解析に用いた基礎入力動の特性を図 9

に示す。最大地動加速度 PGA は $100 \sim 800 cm/s^2$ に多く分布し、最大値は $1300 cm/s^2$ 程度であり、最大地動速度 PGV は $20 \sim 110 cm/s$ に多く分布し、最大値は $130 cm/s$ 程度となっている。地震動の周期特性 PGA/PGV は $3 \sim 12$ 付近に多く分布しており、略算周期としては、 $0.5 \sim 2s$ 程度の地震動となっている。また、一例として表層地盤への入力地震動の最大速度 $V=40 cm/s$ とした場合の地表面上での加速度応答スペクトルの一部を図 9(b) に示している。地震動の周期特性 PGA/PGV によって加速度応答スペクトルの卓越周期が変化していることが確認できるが、 $9 \leq PGA/PGV < 12$ と $12 \leq PGA/PGV < 18$ では、卓越周期に大きな違いは見られていない。

次に、最大地動速度 PGV と基礎固定モデルの最大層間変形角 R_{fix} との関係を図 10 に示す。各図では、建物階数 N ごとに、建物耐力に関わる係数 $\alpha = 3$ の結果を示している。

最大地動速度 PGV が大きくなるに従い、基礎固定モデルの最大層間変形角 R_{fix} は増大しているが、建物階数に応じて、最大層間変形角 R_{fix} に及ぼす影響が大きい地震動の周期特性 PGA/PGV は変化している。4 階建ての場合には、地震動の周期特性 PGA/PGV が 9 以上と短周期の基礎入力動で最大層間変形角 R_{fix} が大きくなり、中高層建物の場合には、地震動の周期特性 PGA/PGV が 9 以下と比較的長周期の基礎入力動で、最大層間変形角 R_{fix} は大きくなる。

4.2 建物応答倍率の分析に用いる指標の分析

次に、建物応答倍率の分析に用いる指標について分析する。地震動特性や建物応答と、建物応答倍率 R_{sr}/R_{fix} との関係を図 11 に示す。8 階建てで $\alpha = 3$ 、建築面積 $A_b = 400 m^2$ 、アスペクト比 $BC = 1$ 、埋込深さ $D = 3m$ の結果を示している。まず、基礎入力動の最大地動速度 PGV

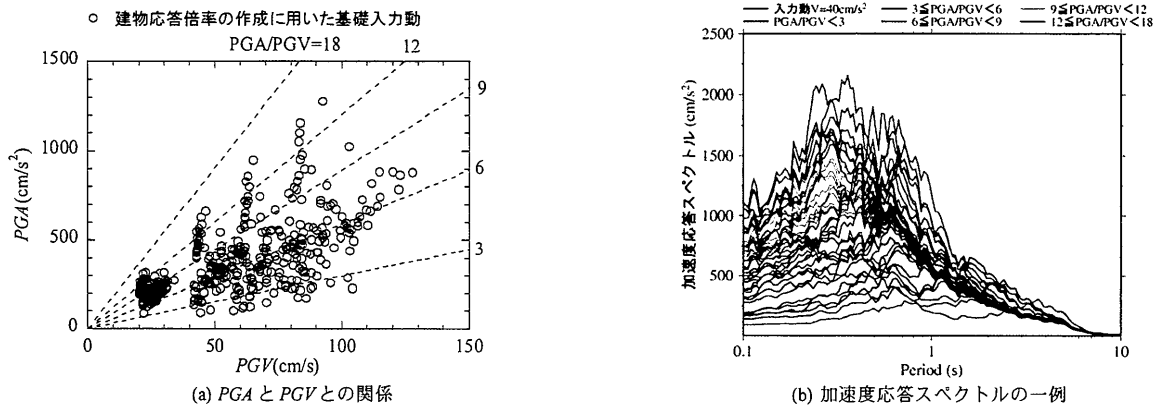


図 9 建物応答倍率の算定に用いた基礎地震動の特性

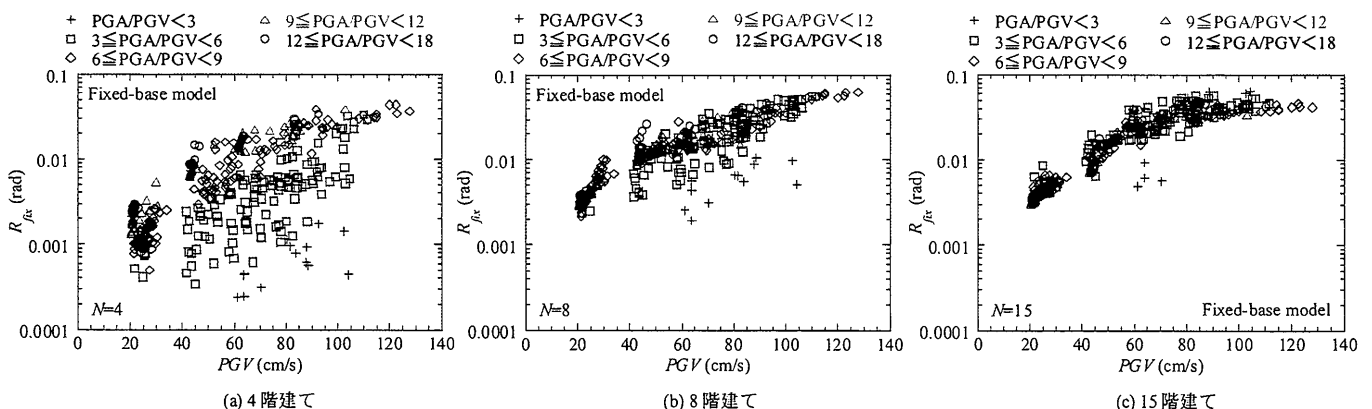


図 10 基礎固定モデルの最大層間変形角 R_{fix} (建物耐力 $\alpha = 3$)

との関係で分析すると、最大地動速度 PGV に関わらず、建物応答倍率は一様に分布しており、最大地動速度による変化はあまり大きくない。次に、基礎固定モデルの最大層間変形角 R_{fix} との関係では、 R_{fix} が $0.005 \sim 0.01$ rad 付近で、建物応答倍率は少し低下しているがあまり顕著ではない。地震動の周期特性 PGA/PGV との関係と比較すると、 PGV や R_{fix} が同程度の場合でも、 PGA/PGV によって建物応答倍率は変化しているように見える。そこで、地震動の略算周期 T_{ge} を建物周期 T_{b0} で基準化した周期特性 T_{ge}/T_{b0} との関係で分析する。基準化した周期特性 T_{ge}/T_{b0} が 2 付近では、建物応答倍率は 1 以上になり、地盤と建物の相互作用効果によって建物応答は増幅している。それに対して、基準化した周期特性 T_{ge}/T_{b0} が 2 付近から離れるに従い、建物応答倍率は 1 以下になり、地盤と建物の相互作用効果によって建物応答は減少している。

以上より、基準化した周期特性 T_{ge}/T_{b0} によって、建物応答倍率が変化していることから、以下では、基準化した周期特性 T_{ge}/T_{b0} を用いて、建物応答倍率を分析する。

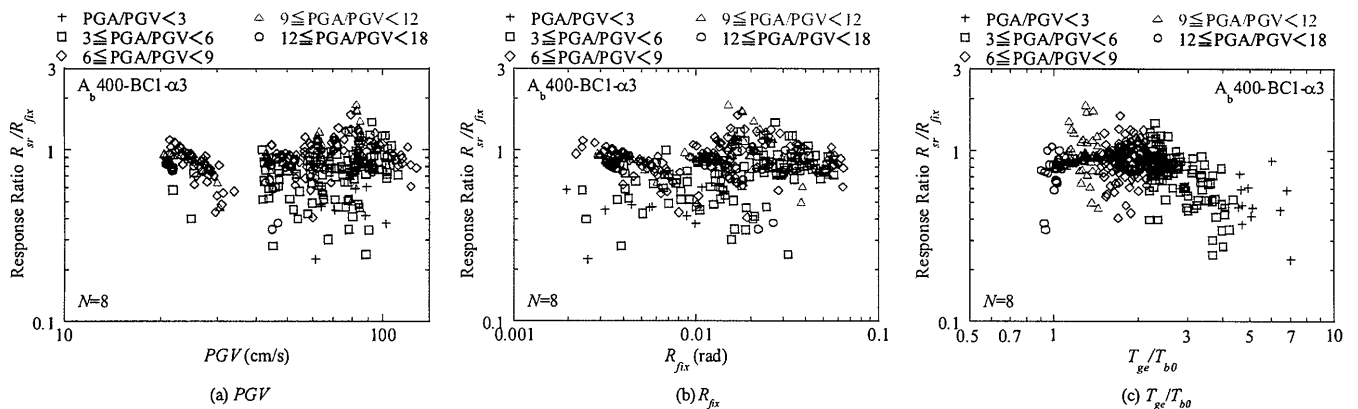


図 11 地震動強さや建物応答と建物応答倍率との関係

4.3 解析パラメータが建物応答倍率に及ぼす影響

解析パラメータが建物応答倍率 R_{sr}/R_{fix} に及ぼす影響を図 12 に示す。8 階建て、建物耐力に関わる係数 $\alpha = 3$ 、建築面積 $A_b = 400 \text{m}^2$ 、埋込深さ $D = 3 \text{m}$ 、アスペクト比 $BC = 1$ の結果を基本として、各解析パラメータによる建物応答倍率の変化を分析する。

(a) 建物耐力、建築面積、アスペクト比、埋込深さの影響

まず、建物耐力が建物応答倍率に及ぼす影響を図 12(a) に示す。建物耐力が高くなるに従い、建物応答倍率が小さくなる傾向が確認できる。次に、建築面積 A_b とアスペクト比 BC の違いが建物応答倍率に及ぼす影響を図 12(b,c) に示す。建築面積やアスペクト比の違いによって、建物応答倍率は殆ど変化しておらず、設定した範囲では、建築面積やアスペクト比が建物応答倍率に及ぼす影響はあまり大きくない。最後に、埋込深さ D の違いが建物応答倍率に及ぼす影響を図 12(d) に示す。埋込深さが深くなるに従い、建物応答倍率は小さくなっており、埋込深さが深くなるに従い、基礎入力動が減少する事が大きく影響している。

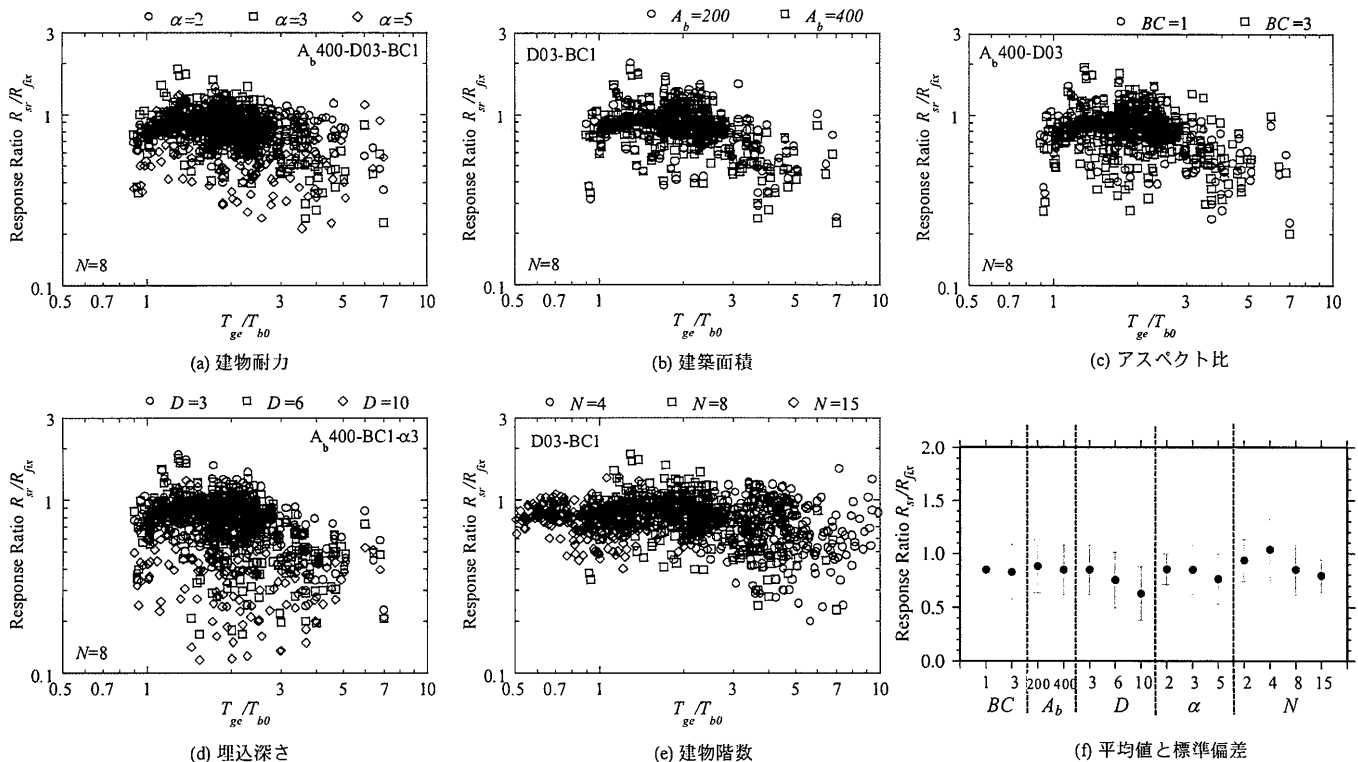


図 12 解析パラメータが建物応答倍率に及ぼす影響

(b) 建物階数が建物応答倍率に及ぼす影響

次に、建物階数が建物応答倍率に及ぼす影響を分析する。4階建てでは建築面積 $A_b=100\text{m}^2$ 、8階建てでは建築面積 $A_b=400\text{m}^2$ 、15階建てでは建築面積 $A_b=900\text{m}^2$ の結果で、埋込深さは $D=3\text{m}$ としている(図12(e))。埋込深さが同じ場合、建物応答倍率は、建物階数による変化はそれほど大きくない。ただし、建物階数が変化することによって、建物周期が変わるため、基準化した周期特性 T_{gs}/T_{b0} との関係が変わっている。

(c) 建物応答倍率の平均値と標準偏差

最後に、建物応答倍率を各解析パラメータで統計的に分析した結果を図12(f)に示す。同図では、平均値を点で示し、平均値 $\pm 1\sigma$ を線で表している。主に8階建ての結果を用い、建物階数での比較では、既存建物の施工状況を調査した結果から、低層建物($N=2,4$)では埋込深さ $D=0\text{m}$ 、中高層建物($N=8,15$)では埋込深さ $D=3\text{m}$ とした場合の結果を示している。建築面積、アスペクト比の影響はあまり大きくなく、埋込深さや建物耐力、建物階数によって、建物応答倍率が大きく異なることが再確認できる。

以上より、建物応答倍率に影響を及ぼす解析パラメータは、建物階数、建物耐力、埋込深さとなる。また先述のように、地震動の周期特性によっても建物応答倍率は変化するため、建物応答倍率を作成する際には、それも考慮する必要がある。

5. 建物応答倍率の提案

5.1 建物応答倍率の算出

建物応答倍率に及ぼす影響が大きい解析パラメータの他に、基礎入力動の周期特性を考慮して建物応答倍率を提案する。基礎入力動の周期特性を考慮する方法として、地震動の周期特性 PGA/PGV を用

いる。

建物階数、建物耐力、埋込深さと地震動の周期特性で分類した建物応答倍率を図13に示す。同図では、建物応答倍率の平均値を黒丸で示し、平均値 $\pm 1\sigma$ を線で表している。先ほどと同様に、埋込深さは低層建物($N=2,4$)では埋込深さ $D=0\text{m}$ 、中高層建物($N=8,15$)では埋込深さ $D=3\text{m}$ とし、建物耐力に関わる係数 $\alpha=3$ の結果を示している。地震動の周期特性は $3 \leq PGA/PGV < 6$ 、 $6 \leq PGA/PGV < 9$ 、 $9 \leq PGA/PGV < 12$ 、 $12 \leq PGA/PGV < 18$ の4種類で区分する。

建物応答倍率は、建物階数によって特性が異なっている。2階建ての場合、ばらつきは大きい平均値は1に近くっており、地盤と建物の相互作用効果はそれほど大きくない。4階建ての場合、 PGA/PGV が大きく、短周期成分が卓越する地震動の場合に、地盤と建物の相互作用効果によって建物応答は大きく変化しているが、建物応答は増幅している。8階および15階建てでは、地震動の周期特性 PGA/PGV が大きいほど建物応答倍率は小さくなり、短周期成分が卓越する地震動の場合に、地盤と建物の相互作用効果による建物応答の低減効果が大きくなる。

建物応答倍率の変化を分析すると、地盤と建物の相互作用効果を考慮した場合、建物周期は基礎固定時よりも建物周期は伸びるため、建物に入力する基礎入力動の強さも変化する。建物周期 T_{b0} よりも周期の長い基礎入力動の場合、建物に入力する基礎入力動が増加することになり、建物の最大層間変形角は増大する。一方、建物周期 T_{b0} よりも周期の短い基礎入力動の場合、建物に入力する基礎入力動が減少することになり、建物の最大層間変形角も小さくなる。実際には、地盤と建物の相互作用効果を考慮する場合には、建物の周期の変化の他に、基礎と地盤でのエネルギー消費があるため、基礎入力動の変化分とエネルギー消費の大小関係も影響するが、地震動の周

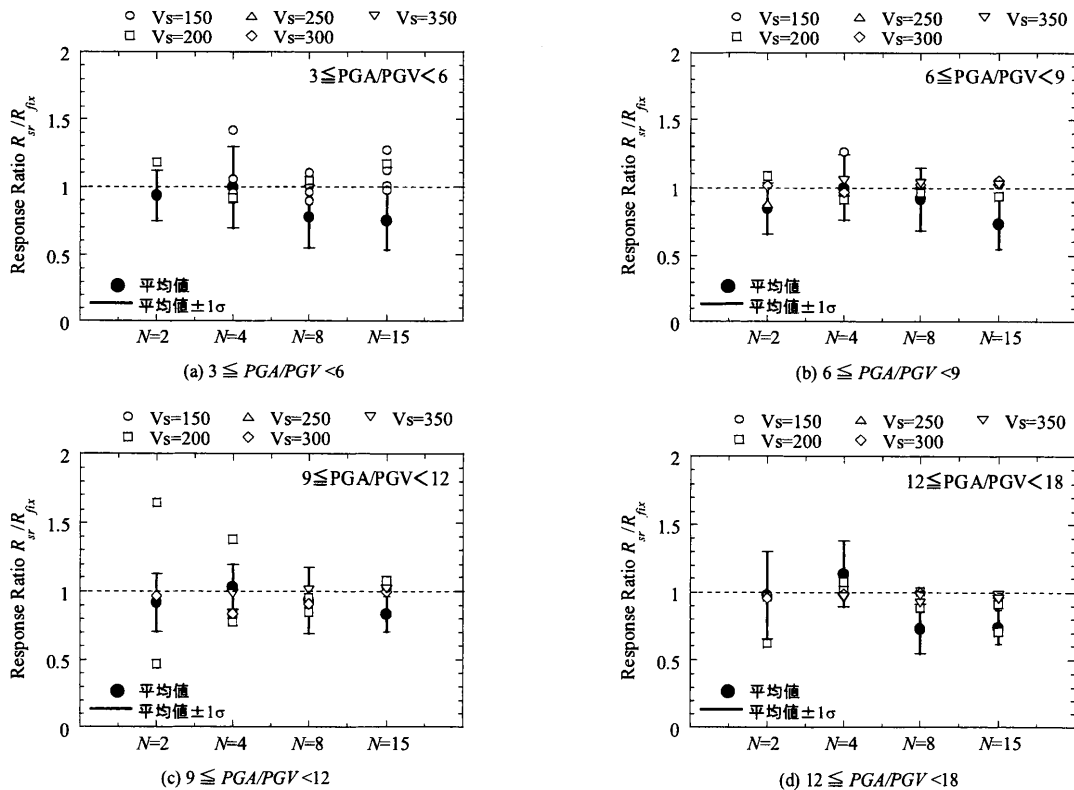


図13 評価モデルと観測地震動を用いた分析結果との比較

期特性と建物応答倍率との関係の影響が大きいと考えられる。そのため、4階建ての場合、建物周期が0.3s付近にあることから、基礎入力動の周期との関係で基礎入力動が増加しやすく、建物の建築面積も小さいことから基礎と地盤でのエネルギー消費も少ないため、建物応答倍率が大きくなる傾向になっていると考えられる。

5.2 観測地震動を用いた建物応答倍率の検討

ここでは、近年の被害地震における観測地震動を用いて建物応答倍率を算定し、提案した建物応答倍率との整合性を確認する。

検討に用いる観測地震動を表2に示す。検討に用いる観測地震動は、1995年兵庫県南部地震以後の主な被害地震の中から、合計20波を選んでいく。各観測地点の地盤情報は、平均S波速度 $AVS30$ を用い、K-NET観測点およびKiK-net観測点では公開されているPS検層結果から算定する。地盤はねは表層地盤のS波速度 V_s を150~350m/sまでを50m/s間隔で変化させた場合で算定し、各観測地点の平均S波速度 $AVS30$ に近い値の結果を用いている。そして基礎入力動は、埋込深さが無い場合($N=2,4$)には、観測地震動をそのまま基礎入力動として用い、埋込深さがある場合($N=8,15$)には、地表面位置に対する基礎底面位置での伝達関数を求め、得られた伝達関数を観測地震動に乗じて基礎入力動を求める。検証に用いる観測地震動の最大地動加速度 PGA と、最大地動速度 PGV との関係を図14に示す。 PGA は200~1600 cm/s^2 程度、 PGV は20~130 cm/s 程度、 PGA/PGV は3~18程度に分布している。

提案した建物応答倍率と観測地震動を用いて算定した建物応答倍率とを比較して、図13に併せて示す。同図では、表層地盤のS波速度 V_s で凡例を分類している。2階および4階建ての低層建物や15階建ての高層建物で、表層地盤のS波速度が200m/s以下と比較的柔ら

かい地盤の場合に、観測地震動を用いて算出した建物応答倍率は、提案した建物応答倍率の平均値 $\pm 1\sigma$ を超えている場合が見られる。

$3 \leq PGA/PGV < 6$ 、 $9 \leq PGA/PGV < 12$ で分類した際の建物応答倍率に大きな違いが見られる観測地震動と、建物応答倍率の算定に用いている基礎入力動の加速度応答スペクトルを比較して図15に示す。なお、観測地震動は、 $3 \leq PGA/PGV < 6$ では豊頃、輪島、 $9 \leq PGA/PGV < 12$ ではJMA神戸とJMA古川市で、最大地動速度50 cm/s で比較している。 $9 \leq PGA/PGV < 12$ では、観測地震動のスペクトル特性は周期0.1~0.4秒付近で大きく凹凸しており、建物周期に近い2,4階建てで建物応答倍率が大きく異なっていると思われる。一方、8,15階建てでは、観測地震動のスペクトル特性は、基礎入力動と近い形状をしており、建物応答倍率は概ね対応している。同様に、 $3 \leq PGA/PGV < 6$ では、観測地震動のスペクトル特性が周期2秒程度で大きく卓越しており、建物周期に近い15階建てで建物応答倍率が大きくなる傾向にあり、提案した建物応答倍率の平均値 $\pm 1\sigma$ を超えていると思われる。そのため、建物応答倍率の作成に用いた基礎入力動と、観測地震動のスペクトル特性が異なる事が影響していると推測される。ただし、全体的には、観測地震動を用いて算定した建物応答倍率は、提案した建物応答倍率の平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲に入っており、概ね対応した結果が得られている。

6. 地震動の周期特性と地盤と建物の相互作用効果を考慮した建物群の被害関数

6.1 建物群の被害関数の算定方法

図1に示したように、5章で提案した建物応答倍率を建物群の被害関数を作成する方法に適用する。建物の地震応答解析では、建物

表2 検討に用いた観測地震動一覧

分類	観測地点名	地震名	方位	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PGA/PGV	AVS30
$9 \leq PGA/PGV < 12$	JMA神戸	1995年兵庫県南部地震	NS	818	87	9.4	203
	JMA古川市	2003年宮城県北部の地震	EW	213	19	10.9	217
	釧路	2003年十勝沖地震	EW	407	43	9.6	203
	JMA川口	2004年新潟県中越沖地震	EW	1667	143	11.6	369
	JMA西山町	2007新潟県中越沖地震	NS	835	76	10.9	308
$12 \leq PGA/PGV < 18$	大野	2001年芸予地震	EW	441	32	14.0	205
	JMA三原	2001年芸予地震	NS	243	20	12.2	200
	JMA栗原市	2008年岩手・宮城内陸地震	EW	689	53	13.0	316
	一関東	2008年岩手・宮城内陸地震	NS	889	63	14.1	434
	JMA御前崎市	2009年駿河湾の地震	EW	773	47	16.6	380

分類	観測地点名	地震名	方位	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PGA/PGV	AVS30
$3 \leq PGA/PGV < 6$	JR鷹取	1995年兵庫県南部地震	EW	657	125	5.3	203
	豊頃	2003年十勝沖地震	EW	404	71	5.7	134
	福岡	2005年福岡県西方沖地震	NS	277	57	4.8	187
	輪島	2007年能登半島地震	EW	439	79	5.5	155
	柏崎	2007新潟県中越沖地震	NS	667	124	5.4	188
$6 \leq PGA/PGV < 9$	JR宝塚	1995年兵庫県南部地震	EW	601	84	7.2	332
	日野	2000年鳥取県西部地震	NS	926	116	8.0	268
	穴水	2007年能登半島地震	EW	782	100	7.8	136
	JMA牧之原市	2009年駿河湾の地震	NS	348	58	6.0	208
	石巻	2011年東北地方太平洋沖地震	NS	458	55	8.4	277

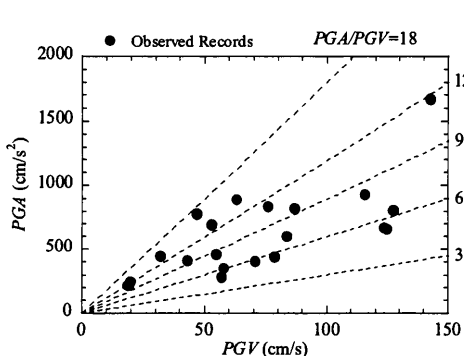
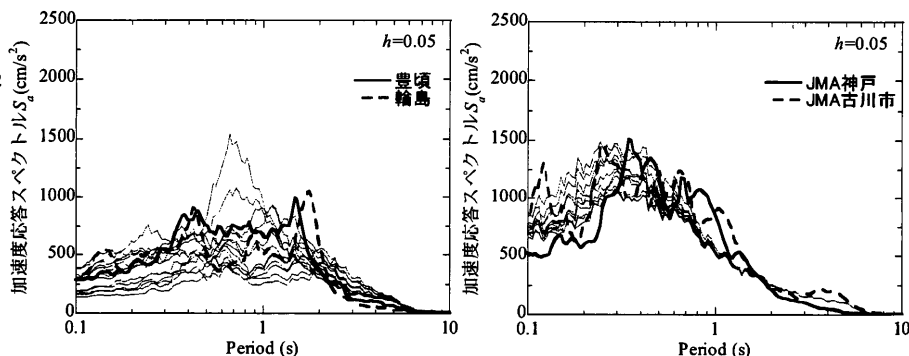


図14 観測地震動のPGAとPGVとの関係



(a) $3 \leq PGA/PGV < 6$

(b) $9 \leq PGA/PGV < 12$

図15 加速度応答スペクトルの比較

耐力（降伏ベースシア係数）は、 $C_y = 0.1 \sim 2.0$ の間を、 $C_y = 1.0$ までは0.05刻みで変化させ、 $C_y = 1.0 \sim 2.0$ は0.1刻みで変化させる。そして、各観測地震動の最大地動速度は、 $PGV = 10 \sim 200 \text{ cm/s}$ の範囲を10 cm/s刻みで変化させ、建物耐力と最大地動速度の全組み合わせに対して、建物の地震応答解析を行う。建物の耐力分布および被害発生率と最大層間変形角との関係(変形クライテリア)は、1995年兵庫県南部地震時の建物被害を説明できるように設定されたモデルを用いる(図16, 図17)¹⁾。ここでは、4階建てと8階建ての建物を対象とし、4階建ての場合には建物階数区分が3-5F、8階建ての場合には建物階数区分が6-10Fの耐力分布を用いる。損傷レベルは、全損以上を対象とする(図17)。

地盤と建物の相互作用効果による建物応答の変化を考慮する際には、基礎固定モデルの最大層間変形角に建物応答倍率を乗じる。提案した建物応答倍率では、建物耐力を低、中、高($\alpha = 2, 3, 5$)の3種類で分けて求めている。そのため、建物群の被害関数に適用する際には、表3のように、建物階数と建物耐力ごとに、補間して用いる。例えば、4階建てでは、建物耐力が $C_y = 0.1 \sim 0.6$ では $\alpha = 2$ の建物応答倍率を用い、 $C_y = 0.65 \sim 1.0$ では $\alpha = 3$ の結果、 $C_y = 1.1 \sim 2.0$ では $\alpha = 5$ の建物応答倍率を用いる。

6.2 地盤と建物の相互作用効果と地震動の周期特性が建物群の被害関数に及ぼす影響

最後に、地震動の周期特性と地盤と建物の相互作用効果が、建物群の被害関数に及ぼす影響について分析する。表2に示した観測地震動を用い、6.1節に示した設定で建物の地震応答解析を行い、地震動の周期特性 PGA/PGV の区分ごとに最大層間変形角の平均値を算出し、建物群の被害関数を求める。

建物群の被害関数を推定するために求めた最大層間変形角の分布を図18に示す。地震動の入力レベル $PGV = 50 \text{ cm/s}$ の結果を示している。また、4階建てと8階建ての建物群の被害関数を比較して、図19および図20に示す。各図では、地震動の周期特性を考慮した場合と、地盤と建物の相互作用効果を考慮した場合 ($6 \leq PGA/PGV < 9$, $12 \leq PGA/PGV < 18$) を比較している。まず、低層建物($N=4$)では、地震動の周期特性 PGA/PGV が大きくなる(短周期成分が卓越する)場合に、被害率が大きくなり、 $PGV = 100 \text{ cm/s}$ で15%程度被害率に差がでてくる(図19(a))。地震動レベルが同じ場合でも地震動の周期特性によって、最大層間変形角が大きく異なっていることが影響している(図18(a))。一方、地盤と建物の相互作用効果は、地震動に周期特性に関わらずそれほど大きくなく、 $PGV = 100 \text{ cm/s}$ で3%程度増加している(図19(b,c))。

次に、中層建物($N=8$)の被害関数では、 $PGV = 100 \text{ cm/s}$ までに差が生じているが、地震動の周期特性 PGA/PGV による大きな差は見られていない(図20(a))。建物耐力が高い場合には、地震動の周期特性が異なっても同程度の最大層間変形角となっているのに対し、建物耐力が低い場合には、最大層間変形角に差が生じている(図18(b))。そのため、中層建物の被害関数では、周期特性の違いがあまり大きく影響していないと思われる。また、中層建物($N=8$)の場合、地震動の周期特性の影響が小さくなる理由として、高次モードの影響によって、最大層間変形角が生じる建物階は変化するが、最大層間変形角はあまり変化しないことも影響していると推測される。地盤と建物の相互作用効果の影響を分析すると、地震動の周期特性 PGA/PGV が $6 \leq PGA/PGV < 9$ の場合には、被害関数はほとんど変化していないが、地震動の周期特性 PGA/PGV が $12 \leq PGA/PGV < 18$ の場合に、建

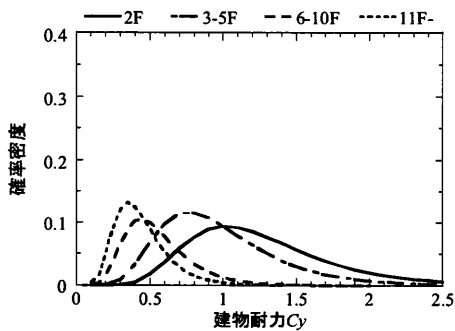


図16 設定した建物耐力分布¹⁾

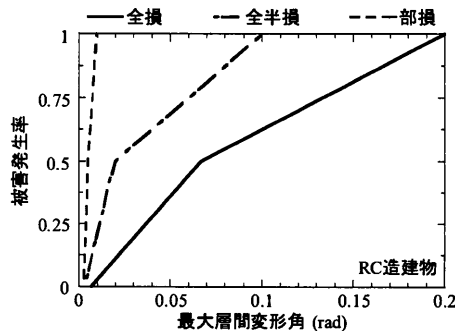
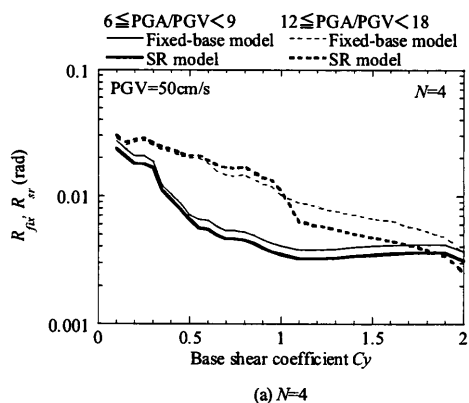


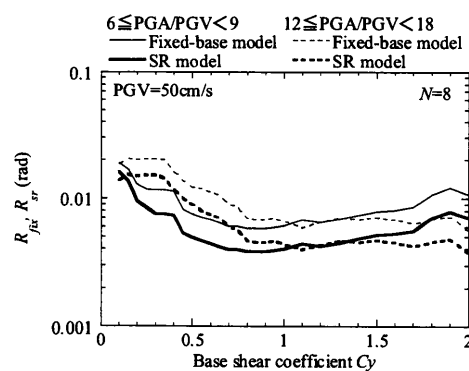
図17 被害発生率と最大層間変形角との関係¹⁾

表3 建物応答倍率を用いる建物耐力の範囲

建物階数	建物耐力に関わる係数 α	建物耐力(ベースシア係数) C_y
2階 (1-2F)	2	0.1-1.3
	3	1.3-1.9
	5	1.9-2.0
4階 (3-5F)	2	0.1-0.6
	3	0.65-1.0
	5	1.1-2.0
8階 (6-10F)	2	0.1-0.35
	3	0.4-0.5
	5	0.55-2.0
15階 (11F-)	2	0.1-0.2
	3	0.25-0.3
	5	0.35-2.0



(a) $N=4$



(b) $N=8$

図18 地震動の周期特性と地盤と建物の相互作用効果による最大層間変形角の変化

物群の被害率は、 $PGV=100\text{cm/s}$ で10%程度減少している(図20(b,c))。図18(b)に示したように、最大層間変形角の変化からもその影響を確認することができる。

以上より、地震動の周期特性 PGA/PGV と、地盤と建物の相互作用効果が建物群の被害関数に及ぼす影響を比較すると、その影響は建物階数によって変化している。地震動の周期特性 PGA/PGV の影響は、低層建物($N=4$)の場合に顕著になり、地震動の周期特性 PGA/PGV によって、建物群の被害関数は大きく変化する。一方、地盤と建物の相互作用効果が大きく表れるのは、中層建物($N=8$)で、地震動の周期特性が $12 \leq PGA/PGV < 18$ と短周期の場合に顕著になり、建物群の被害率は $PGV=100\text{cm/s}$ で10%程度減少している。なお、ここでは結果を示していないが、2階建ては4階建てと、15階建ては8階建てと同様の傾向が得られている。

7. まとめ

本論文では、地震動特性および地盤と建物の相互作用効果が建物群の被害関数に及ぼす影響について、RC造建物を対象として分析を行った。基礎固定モデルの最大層間変形角に対するSRモデルの最大層間変形角の比を建物応答倍率と定義し、その特性を分析した。建物群の被害関数に及ぼす影響の分析では、建物階数が2,4階建てでは、埋込深さが無い場合を想定し、建物階数が8,15階建てでは、埋込深さが3mの場合を想定して検討を行った。以下に得られた知見をまとめて示す。

- 1) 設定した解析パラメータでは、建物階数、建物耐力、埋込深さが建物応答倍率に及ぼす影響が大きい。ただし、建物応答倍率は地震動の周期特性によっても変化する。

- 2) 地震動の周期特性が建物群の被害関数に及ぼす影響は、2,4階建ての建物で大きく現れ、地震動の周期特性 PGA/PGV が大きく建物周期に近づくにつれ、建物被害率は増加する。
- 3) 建物群の被害関数が地盤と建物の相互作用効果によって低減する効果は、8,15階建ての建物で、地震動の周期特性が $3 \leq PGA/PGV < 6$ 、 $12 \leq PGA/PGV < 18$ のように、建物の固有周期から離れる場合に大きくなる。

謝辞

本研究は、地震保険調査研究費による調査研究事業の一環として実施しました。また、K-NET, KiK-net 観測網、気象庁による地震観測記録を使用させて頂いた。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 宮腰淳一, 神原浩, 石井大吾, 田村和夫, 山口亮, 名取晶子, 吉村昌宏: 建物耐力と変形性能のばらつきを考慮した被害関数の作成手法, 構造工学論文集, B51, pp.105-110, 2005.
- 2) 高橋郁夫, 林 康裕: 地盤-建物相互作用による建物の地震応答低減効果-近年の地震観測記録を用いた検討-, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.50B, pp.1-11, 2004.
- 3) 安井 譲, 井口道雄, 赤木久真, 林 康裕, 中村 充: 1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.111-118, 1998.
- 4) 中村壮志, 川瀬 博, 中村尚弘: 動的相互作用を考慮した非線形応答解析によるRC造被害予測用数値解析建物群モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, No.631, pp.1543-1550, 2008.
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課他編集: 2001年版限界耐力計算法の計算例とその解説, 2001.
- 6) 古山田耕司, 宮本祐司, 三浦賢治: 多地点での原位置採取試料から評価

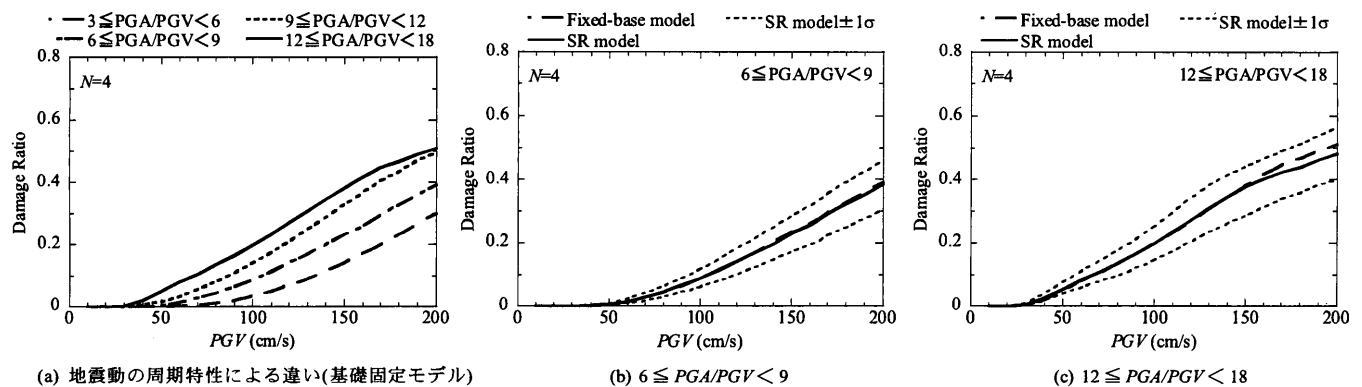


図19 4階建てRC造建物の結果

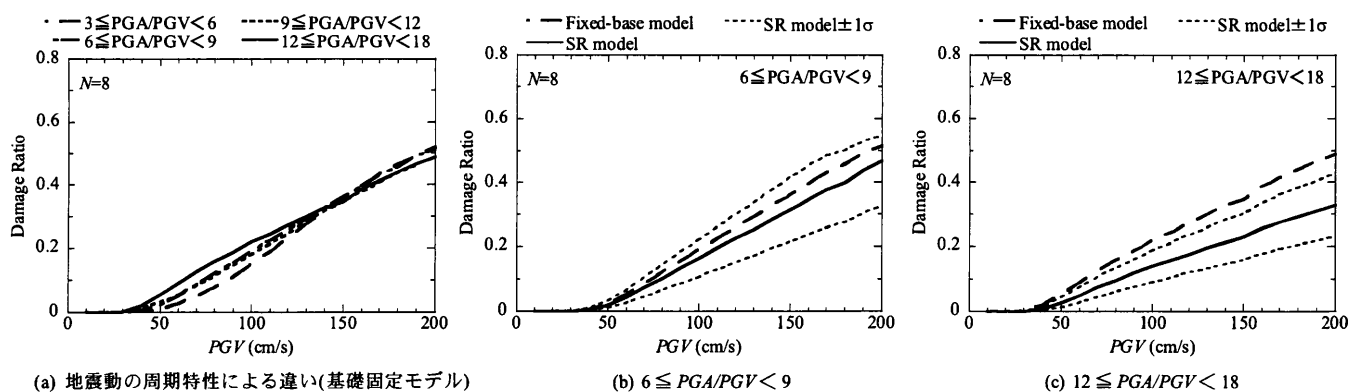


図20 8階建てRC造建物の結果

- した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学研究発表会, pp.2077-2078, 2003.
- 7) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.
- 8) Takeda, T., Sozen, M., A., and Nielsen, N.,N. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST12, pp.2557-2573.1970.
- 9) 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会: 1995年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書, 1996.
- 10) 小野瀬順一: 鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布, 第6回日本地震工学シンポジウム, pp.2081-2088, 1982.