

# 論文 弱層を有する多層 RC 建物の耐震診断

高田 瑞恵<sup>\*1</sup>・川瀬 喬久<sup>\*2</sup>・市之瀬 敏勝<sup>\*3</sup>・壁谷澤 寿海<sup>\*4</sup>

**要旨：**高さ方向に強度や剛性の偏りがある多層 RC 建物の耐震診断法について論じた。本研究では特に、初期剛性、降伏時割線剛性、終局強度が比例しないようなケースを対象として地震応答解析を行った。地震波には告示波を地盤増幅なしで単純に係数倍して使用した。告示波の何倍の地震動まで耐えられるかという観点から建物の動的  $I_s$  値を定義した。建物の耐震性能に初期剛性が及ぼす影響は小さく、降伏時割線剛性や終局強度の影響の方がはるかに大きかった。これらの影響を考慮した  $F_s$  値および  $I_s$  値算定式を提案し、各層の耐震性能を概ね評価できることを確認した。

**キーワード：**耐震診断, 多層, 剛性率, 割線剛性, 地震応答解析

## 1. はじめに

ピロティ構造にみられるような、ある層の強度および剛性が他の層に比べ低い建物では、変形が弱い層に集中し被害が大きくなることが知られている。現行の耐震診断基準<sup>1)</sup>では、このような建物の耐震性能について初期剛性による剛性率を用いて評価している。応答が弾性範囲にとどまる建物ではこの手法で十分かと考えられる。

しかし、東日本大震災では、鉄骨ブレースで下階のみを補強した RC 建物で、上階での地震被害が報告された<sup>2)</sup>。これは、鉄骨ブレースの初期剛性が低く、終局耐力が高いという特性により、上階の  $F_s$  値が過小評価になったためとされている。このような被害を防ぐには、弾性範囲のみを考慮した初期剛性ではなく、終局状態まで考慮した割線剛性を用いて評価する方法が望ましいと考えられる。

そこで本研究では、初期剛性による評価と割線剛性による評価を比較し、よりよい評価法を検討する。

## 2. 解析モデル概要

4層と8層の RC 建物を対象とする。階高を 3.5 m、各層重量を 1000 kN とする。地震波には告示波のランダム位相 (最大加速度 383 cm/s<sup>2</sup>, 地盤増幅なし) を用いる。解析には、弾塑性解析ソフト SPACE<sup>3)</sup> を用いた。減衰は、主に地盤への逸散減衰が主であると考える、質量比例型 (減衰定数  $h = 1\%$ ) とした。

解析の基本モデルは、全層で  $C/A_i = 0.6$ 、靱性指標  $F = 1.0$  とし、初期剛性を割線剛性の 10 倍とする。基本モデルでは、すべての階で剛性率  $R_s = 1.0$  となる。基本モデルの固有周期を表-1に示す。雑壁の多い建物を想定しているため、通常より短めの固有周期となっている。

解析モデルの第1のパラメータは弱層の位置であり、4

表-1 基本モデルの固有周期

	4層	8層
固有周期 (s)	0.157	0.208

	$C/A_i$	$C/A_i$	$C/A_i$	$C/A_i$	$C/A_i$
検討層 1層	0.6 ~ 2.4	0.6	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6
検討層 4層	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4
検討層 1層	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4
検討層 5層	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4
検討層 8層	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4	0.6 ~ 2.4

図-1 解析モデルの  $C/A_i$  値分布

表-2 解析モデルのパラメータ

	$C/A_i$	$F$	初期剛性 / 割線剛性
一般層	0.6 ~ 2.4	1.0, 1.27	10
検討層 (1層, 5層, 最上層)	0.6	0.8 ~ 2.0	検討層が $R_s = 0.3 \sim 1.5$ になるように設定

層モデルでは1層と最上層、8層モデルでは1層、5層、最上層とする (図-1 参照)。第2のパラメータは弱層以外 (一般層) の強度であり、 $C/A_i$  を 0.6 ~ 2.4 とする (図-1 参照)。なお、すべての階で  $C/A_i = 0.6$  とするモデルでは「弱層」に変形が集中するわけではないので、これ以降は図-1に網掛けをした層を「検討層」と呼ぶ。第3のパラメータは検討層の靱性指標 (0.8 ~ 2.0)、第4のパラメータは一般層の靱性指標 (1.0, 1.27) とする (表-2 参照)。第5のパラメータは検討層の初期剛性とし、検討層の  $R_s$  値が 0.3 ~ 1.5 になるように設定する。

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (学生会員)  
 \*2 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科 (会員外)  
 \*3 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)  
 \*4 東京大学 地震研究所教授 工博 (正会員)

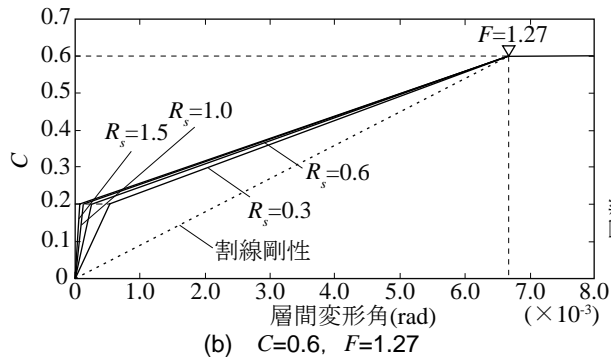
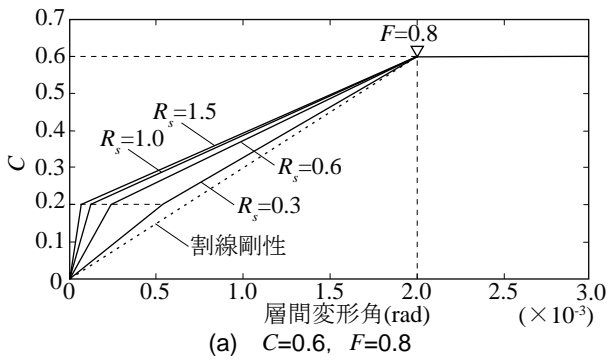


図-2 4層モデル1層の復元力特性

復元力特性は3折れ線型のバネモデルを用いる。第二折れ点は  $F$  値から定める。第一折れ点の強度は第二折れ点の1/3倍とする。検討層が降伏点に達した時点で解析を終えるため、第二折れ点以降の剛性は無視する。図-2に4層モデルに関して、検討層を1層とした場合の1層の復元力特性を  $F$  値が0.8, 1.27について示す。図中には1層の剛性率が0.3, 0.6, 1.0, 1.5の4本の線と割線剛性を記す。

### 3. 割線剛性による剛性率の定義

現行の建築基準法施行令では、 $i$ 層の剛性率を次式により算定している。

$$R_i = \frac{1/R_{1i}}{\text{average}(1/R_{1i})} \quad (1)$$

ここで  $R_{1i}$  は  $i$ 層が  $K_{1i}$  の初期剛性で  $A_i W_i$  の層せん断力を受けるときの層間変形角とし、次式による。

$$R_{1i} = \frac{A_i W_i}{K_{1i}} \quad (2)$$

この論文では、 $i$ 層の割線剛性率 ( $R_{sy}$ ) を次式で定義する。

$$R_{sy} = \frac{1/R_{2i}}{\text{average}(1/R_{2i})} \quad (3)$$

ここで  $R_{2i}$  は  $i$ 層が  $K_{2i}$  の割線剛性で  $A_i W_i$  の層せん断力を受けるときの層間変形角とし、次式による。

$$R_{2i} = \frac{A_i W_i}{K_{2i}} \quad (4)$$

### 4. 4層モデルの解析結果

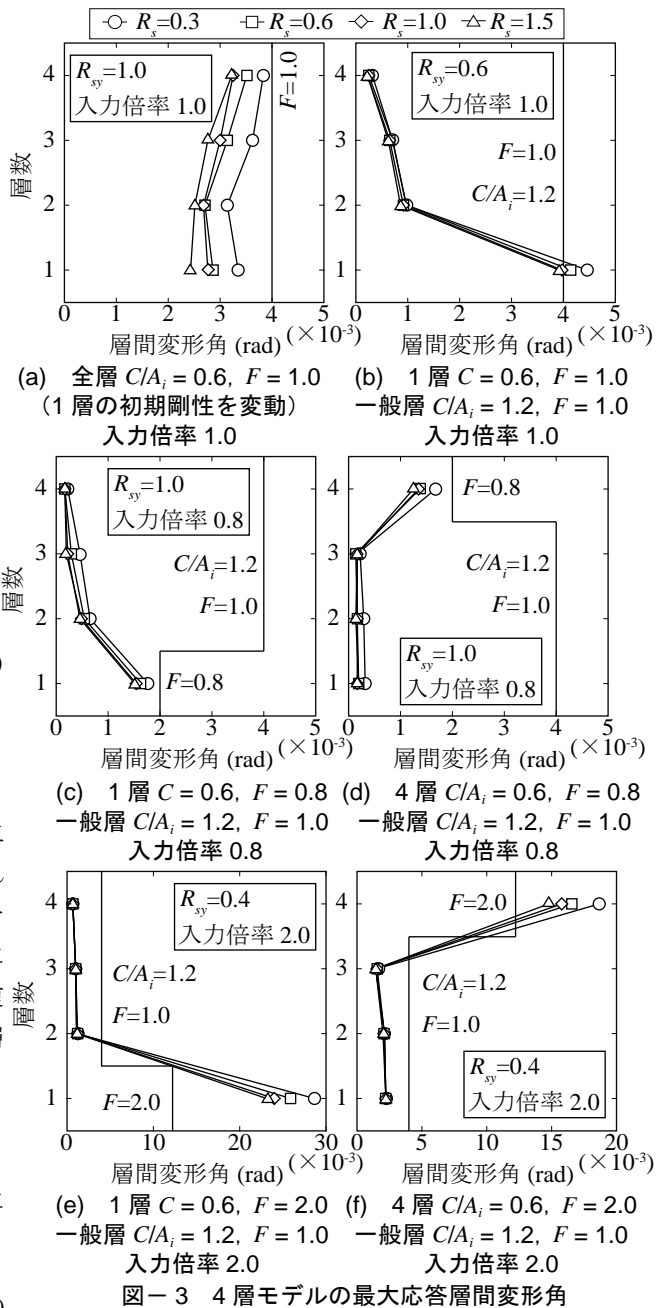


図-3 4層モデルの最大応答層間変形角

本節では、4層モデルに関する応答解析結果の例をいくつか示す。入力倍率を1.0とし、全層を  $C/A_i = 0.6, F = 1.0$  とした場合の最大応答層間変形角を図-3(a)に示す。1層の初期剛性は  $R_{sy}$  が0.3~1.5の値をとるように変化させた。各層の  $C/A_i$  値および  $F$  値が等しいため、 $R_{sy} = 1.0$  としたモデルでは全層の層間変形角がほぼ同程度となる。1層の初期剛性が小さいモデル (○印) では応答変形がやや大きくなる。これは履歴減衰の影響と考えられるが、他との差は小さい。

1層を  $C/A_i = 0.6, F = 1.0$  とし、一般層を  $C/A_i = 1.2, F = 1.0$  とした場合の最大応答層間変形角を図-3(b)に示す。1層の強度が一般層の強度に比べ弱くなるので、変形が1層に集中する。初期剛性による影響はほとんど見られない。図-3(a), (b)の結果は、初期剛性に基づく応答予測が非

常に困難であることを示唆する。

1層を  $C/A_i = 0.6, F = 0.8$  とし、一般層を  $C/A_i = 1.2, F = 1.0$  とした場合の最大応答層間変形角を図-3(c)に示す。入力倍率は1層の  $F$  値に合わせて0.8とした。1層の  $C/A_i$  が一般層の1/2であるが、1層の  $F$  値が0.8であるため降伏変形角が  $2 \times 10^{-3}$  すなわち一般層の1/2となり、割線剛性による剛性率が全階で1となるモデルである。図-3(b)と同様、1層の変形が卓越した。これは、一般層のひび割れ強度が1層より高いためである。1層の最大応答層間変形角は、終局変形角まで至らない。

4層を  $C/A_i = 0.6, F = 0.8$  とし、一般層を  $C/A_i = 1.2, F = 1.0$  とした場合の最大応答層間変形角を図-3(d)に示す。入力倍率は1層の  $F$  値に合わせて0.8とした。図-3(c)と同様、割線剛性による剛性率が全階で1となるモデルである。図-3(c)と同様、 $C/A_i$  が低い層(4層)の変形が卓越した。図-3(c), (d)の結果は、降伏点割線剛性のみに基づく応答予測が困難であり、各層の強度分布を考慮する必要があることを示唆する。

1層を  $C/A_i = 0.6, F = 2.0$  とし、一般層を  $C/A_i = 1.2, F = 1.0$  とした場合の最大応答層間変形角を図-3(e)に示す。入力倍率は1層の  $F$  値に合わせて2.0とした。1層の  $C/A_i$  が一般層の1/2である上、1層の  $F$  値が2.0であるため降伏変形角が  $6.7 \times 10^{-3}$  すなわち一般層の5/3倍となり、割線剛性による1階の剛性率が0.36となるモデルである。塑性変形は1層のみで生じ、終局変形角を超える変形が生じた。

4層を  $C/A_i = 0.6, F = 2.0$  とし、一般層を  $C/A_i = 1.2, F = 1.0$  とした場合の最大応答層間変形角を図-3(f)に示す。入力倍率は4層の  $F$  値に合わせて2.0とした。図-3(e)と同様、 $C/A_i$  が低い層(4層)の変形が卓越したが、その大きさは  $17 \times 10^{-3}$  前後であり、図-3(e)の1層より小さい。一方、一般層の変形は図-3(e)より大きかった。つまり、図-3(f)のように最上層が弱い建物では、図-3(e)のように最下層が弱い建物に比べて弱層への変形集中が少ないと言える。図-3(e), (f)のうち、 $R_s = 1.0$  のモデル(◇印)は、現行計算上、すべての層で  $F_s = 1.0$  かつ  $E_0 = CF/A_i = 1.2$  となる。つまり、すべての層で  $I_s$  が同じになるにもかかわらず、弱層だけが終局変形を超えている。すなわち、図-3(e), (f)の結果は、新たな  $F_s$  値による  $I_s$  値の低減の必要性を示唆する。

### 5. 動的 $F_s$ 値および動的 $I_s$ 値の定義

外力分布による補正係数は  $1/A_i$  として、形状指標  $S_D$  は、剛性率による必要保有水平耐力の割り増し係数  $F_s$  を用いて、 $S_D = 1/F_s$  とする。今回の解析では検討層の  $C/A_i$  をすべて0.6としている。そこで、検討層の耐震診断指標  $I_s$  は次式のように表わされる。

$$I_s = \frac{C/A_i \times F}{F_s} = \frac{0.6 \times F}{F_s} \quad (5)$$

ここで、 $F_s$  は建築基準法告示1792により、 $F_s = 2.0 - R_s/0.6 (R_s < 0.6)$ ,  $F_s > 1.0 (R_s \geq 0.6)$  とする。

全層  $C/A_i = 0.6, F = 1.0, R_s = 1.0$  の4層モデルで、入力倍率を0から1.5まで変化させたときの1層と4層の最大応答層間変形角を図-4(a)に示す。このモデルは4層の変形が最も大きく、入力倍率1.1で終局変形角  $4 \times 10^{-3}$  radに達する。この倍率1.1を「4層の終局時入力倍率」と称する。一方、1層が終局変形角に達するのは入力倍率1.2である。この倍率1.2を「1層の終局時入力倍率」と称する。

告示波でちょうど終局変形に達する建物が  $I_s = 0.6$  であるとし、 $I_s$  値が終局時入力倍率  $a$  に比例すると仮定すれば、動的  $I_s$  値は次式で表すことができる。

$$\text{動的 } I_s = 0.6 \times a \quad (6)$$

図-4(a)のモデルの場合、1層の動的  $I_s$  値は  $0.6 \times 1.2 = 0.72$  となる。このモデルに関する各層の動的  $I_s$  値を図-4(b)に○で示す。

$I_s$  値(式(5))と動的  $I_s$  値(式(6))が等しいものと仮定すると、動的  $F_s$  値は次式で算定できる。

$$\text{動的 } F_s = \frac{F}{a} \quad (7)$$

図-4(a)のモデルの場合、1層の動的  $F_s$  値は  $1/1.2 = 0.83$

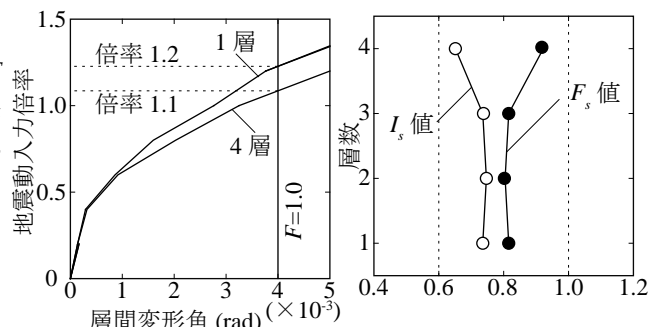


図-4 全層  $C/A_i = 0.6, F = 1.0, R_s = 1.0$  の4層モデル

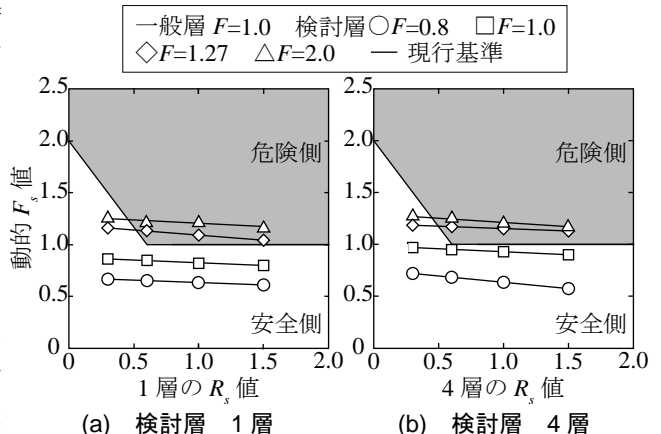


図-5 4層モデルでの  $R_s$  値と動的  $F_s$  値の関係

となる。このモデルに関する各層の動的  $F_s$  値を図-4(b)に●で示す。同じ検討を8層の基本モデルで行うと4層よりもやや低めの動的  $F_s$  値が得られる。これは、式(5)で建物の周期の影響を無視しているためである。また、式(5)で  $A_i$  の代わりに  $(n+i)/(n+1)$  を用いるとすれば、異なる動的  $F_s$  値となることにも留意する必要がある。つまり、式(7)の動的  $F_s$  値は、純粹に多自由度系と一自由度系の相違を表すものではない。しかし、耐震診断法における形状指標の妥当性を動的解析によって検証する目的に対しては式(7)による定義にならざるをえない。

## 6. 初期剛性による $F_s$ 値の検討

4層モデルに関して、全層を  $C/A_i = 0.6$  とし、1層の初期剛性と  $F$  値を変化させたときの、1層の  $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の関係を図-5(a)に示す。図中には、現行基準による剛性率と  $F_s$  値の関係を実線で記す。動的  $F_s$  値は解析モデルが終局状態のときの終局時入力倍率から求めるため、1層の初期剛性のみを変えたモデルでは同程度の動的  $F_s$  値となる。これは一般層の  $C/A_i$  値を変えても同様であり、初期剛性の影響は小さい。

4層の  $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の関係を図-5(b)に示す。検討層を変えても図-5(a)と同様の結果となる。

## 7. 割線剛性による $F_s$ 値の検討

4層モデルで全層  $C/A_i = 0.6$  とした場合について、1層の  $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の関係を図-6(a)に示す。このうち、白抜き記号(○, □など)は一般層の  $F$  値を1としたモデルである。図-6(a)のうち、黒塗りの記号(●, ■など)は一般層の  $F$  値を1.27としたモデルであるが、白抜き記号と同様の傾向を示しており、図-5(a)と対応している。図-5(a)とは違って、明らかに右下がりの傾向が読み取れ、割線剛性を用いることの妥当性が確認できる。なお、現行基準では  $R_{sy} > 0.6$  で  $F_s = 1.0$  としているが、図-6では勾配を緩めて、 $R_{sy} = 0.8$  で  $F_s = 1.0$  となるように改変した修正現行基準を示す。

一般層を  $C/A_i = 1.2$ , 1層を  $C = 0.6$  としたモデルについて、1層の  $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の関係を図-6(b)に示す。一般

層の割線剛性が図-6(a)の2倍になるため、1層の  $R_{sy}$  値は図-6(a)の約1/2になる。つまり、プロットが左側に移動する。応答解析では小さな入力倍率(式(7)の  $a$ )で1層に大きな変形が生じるため、動的  $F_s$  値は大きな値となる。つまり、プロットが上側に移動する。ただし、図-6(b)においてすべてのプロットが右下がりの傾向を示すわけではない。1層を  $F = 2.0$  としたモデル(△印)では、1層に塑性変形が集中するため、1層を  $F = 1.27$  としたモデルより動的  $F_s$  値が大きくなる。これは古くから秋山<sup>4)</sup>によって指摘されてきた現象である。

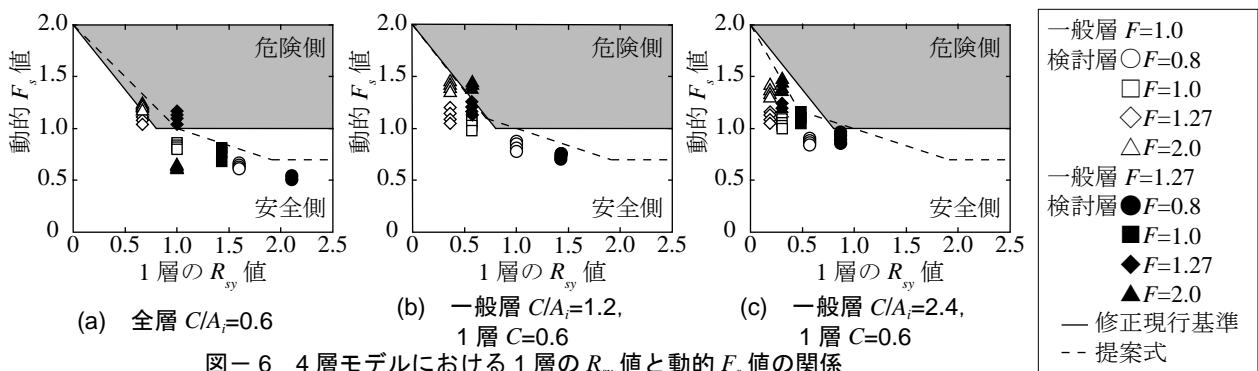
上層を  $C/A_i = 2.4$ , 1層を  $C = 0.6$  としたモデルについて図-6(c)に示す。図-6(b)よりプロットが左に偏る。

8層モデルで全層を  $C/A_i = 0.6$  とした場合について、1層の  $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の関係を図-7(a)に示す。また、一般層を  $C/A_i = 2.4$ , 1層を  $C = 0.6$  としたモデルについて図-7(b)に示す。8層においても一般層の  $C/A_i$  値が大きいほど傾きが大きくなる。また、 $F = 2.0$  としたモデル(△印)では、1層に塑性変形が集中するため、 $F = 1.27$  としたモデルより動的  $F_s$  値が大きくなる。

8層モデルで全層を  $C/A_i = 0.6$  とした場合について、5層の  $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の関係を図-8(a)に示す。また、一般層を  $C/A_i = 2.4$ , 5層を  $C/A_5 = 0.6$  としたモデルについて図-8(b)に示す。検討層を5層としたモデルにおいても各層の  $C/A_i$  値により傾きが変化する。また、各層の  $C/A_i$  値の差が大きくなると、検討層が1層の場合より、動的  $F_s$  値が小さくなる。これは、検討層以下の層でエネルギーが吸収されるためだと考える。

8層モデルで全層を  $C/A_i = 0.6$  とした場合について、8層の  $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の関係を図-9(a)に示す。また、一般層を  $C/A_i = 2.4$ , 8層を  $C/A_8 = 0.6$  としたモデルについて図-9(b)に示す。検討層を8層としたモデルでは、検討層が5層の場合より、さらに多くのエネルギーを下層が吸収するため、検討層を5層としたモデルより動的  $F_s$  値が小さくなる。しかし、安全側に評価できている。

図-6～図-9から、 $R_{sy}$  値と動的  $F_s$  値の強い相関関係は明白であるが、一般層の  $C/A_i$  値の影響( $C/A_i$  値が大



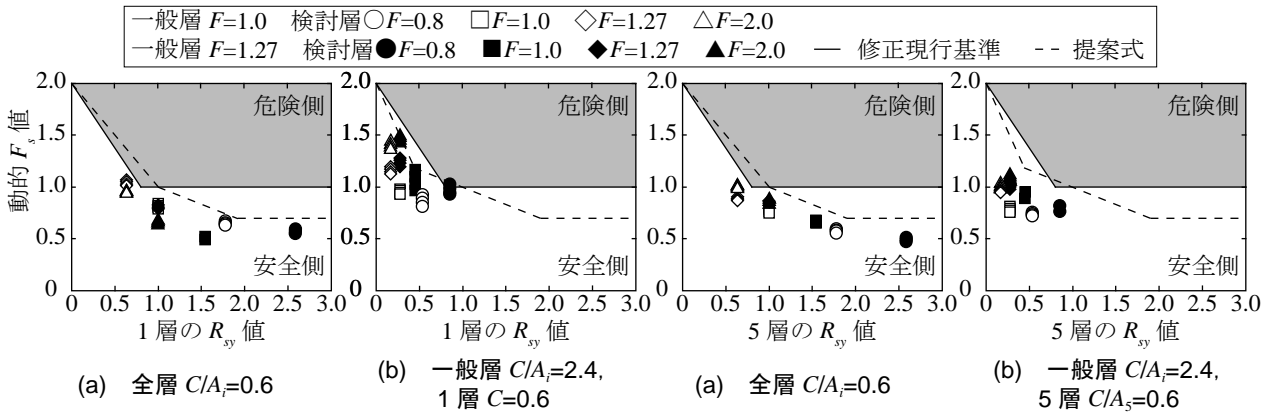


図-7 8層モデルにおける1層の $R_{sy}$ 値と動的 $F_s$ 値の関係

図-8 8層モデルにおける5層の $R_{sy}$ 値と動的 $F_s$ 値の関係

きいほどプロットの傾きが大きくなる傾向)も無視できない。本来なら、各層に生じるせん断力を予想したうえで、各層の真の割線剛性を推測するのが本筋かもしれないが、より簡便な方法として、次のような方法を提案する。まず、式(1)を参考に、 $i$ 層の強度率 $C_s$ を次式で定義する。

$$C_s = \frac{C/A_i}{\text{average}(C/A)} \quad (8)$$

上記の強度率 $C_s$ と割線剛性率 $R_{sy}$ を用いて、 $F_s$ 値を次式により求める。

$$F_s = \max \left[ 2 - \left( \frac{1}{C_s} + 2 \right) \frac{R_{sy}}{3}, \frac{4}{3} - \frac{R_{sy}}{3}, 0.7 \right] \quad (9)$$

式(9)を提案式と呼び、図-6～図-9に破線で記す。動的解析結果のプロットはほとんどが提案式より下側(安全側)に位置している。また、図-9(b)の結果を除けば、大きくかけ離れたものは少ない。ただし、式(9)の妥当性については今後より広範囲の検討が必要である。

### 8. $I_s$ 値の比較

4層モデルの1層に関して、初期剛性に基づく $R_s$ 値を用いた $I_s$ 値と動的 $I_s$ 値の比較を図-10(a)に示す。両者の相関はほとんど見られず、傾向を正しく評価できていない。検討層を $F=1.27$ および $F=2.0$ としたモデルでは、検討層の割線剛性が一般層に比べて低くなる。このため、検討層の変形が大きくなりやすく、現行基準の初期剛性による剛性率を用いる $I_s$ 値よりも動的 $I_s$ 値が小さくなり、危険側に評価されるモデルが見られる。これは8層モデルの検討層を1層としたモデルおよび5層としたモデルでも同様である(図-10(b), 図-10(c)参照)。検討層を8層としたモデルでは危険側の評価はないが、両者の相関はほとんど見られず、傾向を正しく評価できていない(図-10(d)参照)。

4層モデルの1層に関して、割線剛性に基づく $R_{sy}$ 値を用いた修正現行基準による $I_s$ 値と動的 $I_s$ 値の比較を図-11(a)に示す。初期剛性に基づく $R_s$ 値を用いるより傾向を

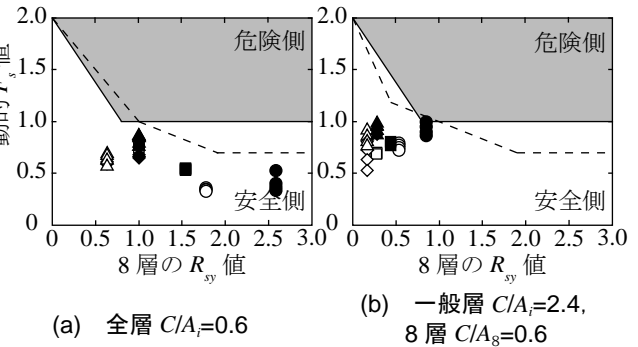


図-9 8層モデルにおける8層の $R_{sy}$ 値と動的 $F_s$ 値の関係

とらえることができた。しかし、検討層を $F=1.27$ および $F=2.0$ としたモデルでは危険側に評価されるモデルがあり、十分に評価できていない。8層モデルに関しては、初期剛性に基づく $R_s$ 値を用いるより、10～20%よく評価できた(図-11(b), 図-11(c), 図-11(d)参照)。

最後に、4層モデルの1層に関して、割線剛性に基づく $R_{sy}$ 値を用い、式(9)による $I_s$ 値と動的 $I_s$ 値の比較を図-12(a)に示す。 $R_{sy}$ 値を用いて式(9)による $I_s$ 値と動的 $I_s$ 値は、60～120%で評価できた。8層モデルの1層に関しては60～110%、5層に関しては50～110%で評価できた(図-12(b), 図-12(c)参照)。8層に関しては、30～100%で評価でき安全側に評価できた(図-12(d)参照)。これは8層より下の層がエネルギーを吸収したことにより、動的 $I_s$ 値が提案式による $I_s$ 値より低くなるためだと考えられる。

### 9. 結論

本研究では、告示波(地盤増幅なし)の何倍の地震動まで耐えられるかという観点から建物の動的 $I_s$ 値を定義した。初期剛性、降伏時割線剛性、終局強度が比例しないようなケースを対象として地震応答解析を行い、次の結論を得た。

- (1) 解析モデルの耐震性能に初期剛性が及ぼす影響は小さく、降伏時割線剛性や終局強度の影響の方がはる

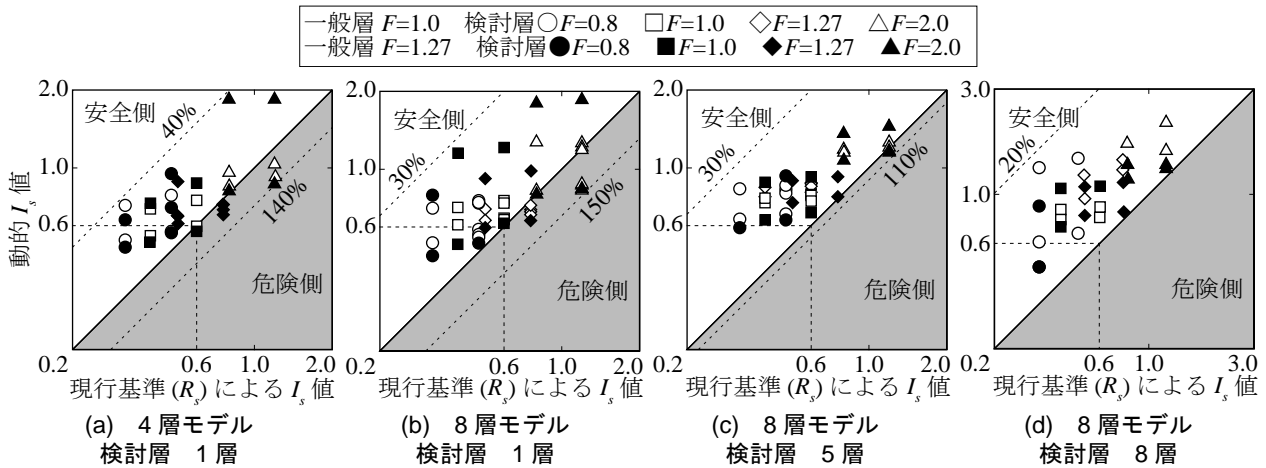


図-10  $R_s$  値を用いた現行基準による  $I_s$  値と動的  $I_s$  値の比較

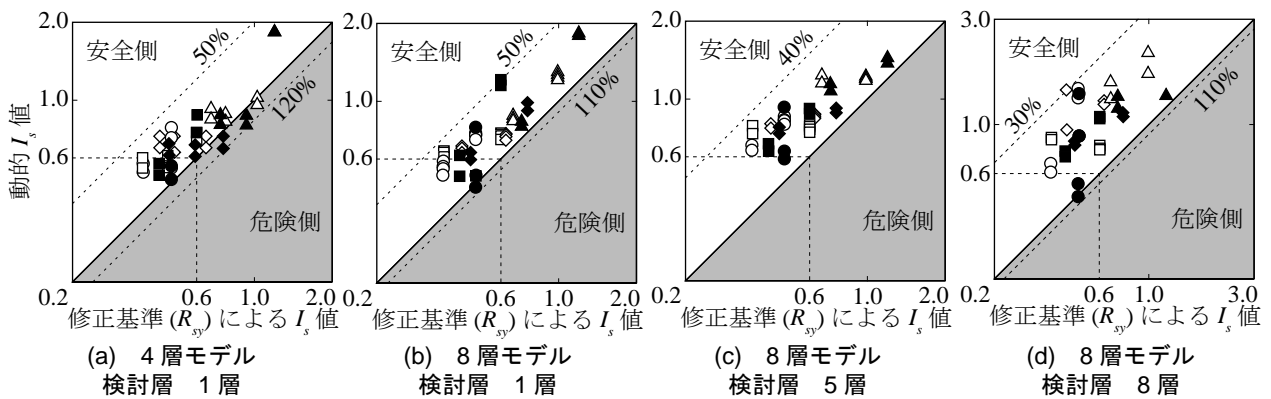


図-11  $R_{sy}$  値を用いた修正現行基準による  $I_s$  値と動的  $I_s$  値の比較

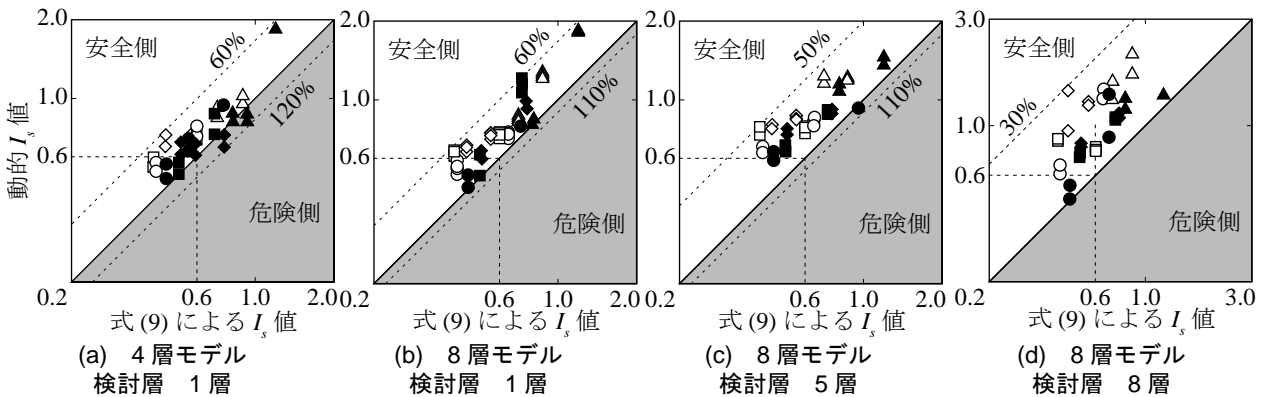


図-12  $R_{sy}$  値を用いた式 (9) による  $I_s$  値と動的  $I_s$  値の比較

かに大きい。よって、初期剛性のみに基づく  $F_s$  値を用いて  $I_s$  値を算定すると、解析モデルの耐震性能を正しく評価できない。

- (2) 降伏時割線剛性に基づいて剛性率  $R_{sy}$  を計算し、図-6の実線のように、 $R_{sy} = 0.8$  で  $F_s = 1.0$  となるように  $F_s$  を算定すると、評価精度はかなり改善される。
- (3) 式 (9) のように、降伏時割線剛性と終局強度に基づく  $F_s$  値を用いて  $I_s$  値を算定すると、評価精度はさらに改善される。ただし、式 (9) の妥当性については今後より広範囲の検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，2001
- 2) 日本建築学会：文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書，2012.3
- 3) 名城大学理工学部建築学科村田研究室，同・武藤研究室，(株)飯島建築事務所，岐阜工業専門学校：SPACE(ver.3.55)，2010
- 4) 秋山 宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999