

論文 免震構造の安全性・修復性のトレードオフ関係を考慮した設計法に関する基礎的研究

大塚 洋平*1・衣笠 秀行*2・大西 直毅*3・向井 智久*4

要旨：現在，大地震時における一般の耐震設計では，安全性を重視し，修復性を軽視する傾向がある。本研究では免震層のダンパー量を変化させた際に発生する修復性と安全性のトレードオフ関係を，積層ゴムのみで剛性に基づく固有周期，建物の階数，ベースシア係数をパラメータにとり，目標修復性と目標安全性を満足する「可能最小損傷」「可能最大安全性」および，トレードオフ関係の強・弱（安全性の向上に伴い発生する損傷量の増加の大小）の観点から分析を行った。

キーワード：鉄筋コンクリート構造，免震構造，安全性，修復性，トレードオフ

1. はじめに

現在，大地震時における一般の耐震設計では，人命保護を最優先に考え，地震時の損傷を建物全体に分散させ，各層の変形を小さくし，十分な安全性を確保する設計が推奨されている。兵庫県南部地震においてこのような設計を行った鉄筋コンクリート造建物において人命保護は出来たが，損傷による修復費用が過大になり建て替えを余儀なくされる事例が発生した。¹⁾ これは安全性を重視したあまり，地震後の建物の修復性，つまり中小地震時の設計で考えられるような財産の保全が軽視あるいは考慮されなかったことが大きな原因であると考えられる。大地震時の設計においても安全性と修復性の二つの性能目標を満足させることが望まれる。

本研究では，地震時に建物の損傷を抑えることが可能となる免震構造を取り上げ，積層ゴムのみで剛性に基づく固有周期，免震層のダンパー量，建物の階数とベースシア係数を変化させたときの大地震時の安全性と修復性の関係について分析を行った。

2. 安全性・修復性の工学的評価

2.1 安全性と修復性の定義

安全性は上部構造の最大変形角と許容値との比較ではなく，免震建物が擁壁に衝突する危険性で考え，免震層の最大変位がクリアランスに達するに必要な地震動の大きさを基準地震波(3.3節参照)に乗じた倍率 α (以下，地震動倍率 α とする)で表現し，これを安全性の指標とする。

修復性は本来，修復のために必要な費用や時間で評価されるべきであるが，ここでは問題を簡単にするため修復難易度の指標として，免震層の最大変位がクリアラ

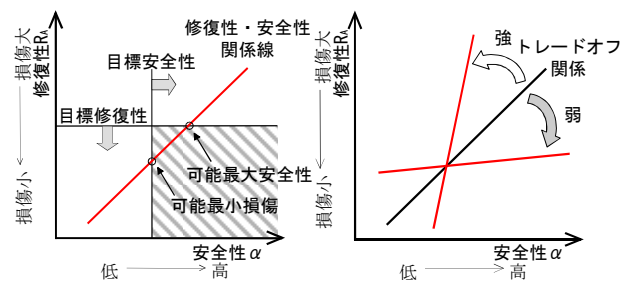
ンスに到達する寸前の免震層を除く建物各層の変形角の合計値 ΣR を階数で除した平均層間変形角 R_A を用いることとした。なお，本研究では，クリアランスを50cmとする。²⁾

2.2 安全性と修復性の関係の評価

図-1に示す修復性・安全性関係上において目標性能の設定および，実現される性能の表示を行うことを考える。何らかの方法によって安全性を向上させたとき，このグラフ上で必ずしも右下がりではなく，右上がりに性能プロットが移動し，安全性を上げるにあたってより多くの損傷を許容するケースも起こり得る。このような場合，安全性の上昇に対して修復性を低下させる，すなわち両性能間にトレードオフの関係が発生したことを意味する。本論文では，免震層のダンパー量を変化させた際に発生するこのトレードオフ関係を明らかにすることを目的とする。

3. 解析の目的及び解析条件

トレードオフ関係に及ぼす積層ゴムの周期，免震層のダンパー量，建物の階数とベースシア係数の影響を，図-1(1)に示した目標修復性と目標安全性を同時に満足



(1)修復性・安全性関係と目標性能 (2)トレードオフ関係の強弱

図-1 修復性と安全性の関係

*1 大成建設(株) (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部建築学科 助教 博(工) (正会員)

*4 独立行政法人 建築研究所 博(工) (正会員)

する「可能最小損傷」「可能最大安全性」および、図-1(2)に示したトレード関係の強・弱（安全性の向上に伴い発生する損傷量の増加の大小）の観点から比較分析を行う。

3.1 解析モデル

(1) 建物モデル概要

解析には免震部材下部を固定とし、免震層と上部構造の各層を1質点に置換した多質点系の等価せん断ばねモデルを用いる（図-2）。

上部構造は鉄筋コンクリート構造を想定しており、建物の規模は超高層として30層、高層として15層、中層として10層、低層として5層の4種類とする。階高を3mとし、単位床面積あたりの重量を14kN/m²、一層あたりの床面積は層数に拘わらず350m²とする。上部構造の減衰定数は瞬間剛性比例型で3%とし、免震層はダンパーの履歴減衰のみとし、数値積分にはNewmark-β法（β=0.25）を用いた。なお、解析プログラムには（株）構造システムのSNAPを使用した。

(2) 免震層部材の復元力特性

免震部材には天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーを用いる。積層ゴムの最大直径は5層、10層、15層では1000mm、30層では1500mmとし、最大面圧が15N/mm²以下となる様に設定した。³⁾

免震層の復元力特性は、積層ゴムが弾性、鉛ダンパーが完全弾塑性であるとみなし、Bi-Linearでモデル化した（図-2(b)）。免震層全体の初期剛性 k_1 は、積層ゴムのみの剛性に基づく固有周期 T_f と建物全体の質量 M から式(1)により定めた積層ゴムの剛性 k_f にダンパーの初期剛性 k_s を加えたものとする。免震層に配する鉛ダンパーは1個あたりの降伏せん断力 $Q_s=98$ [kN]、初期剛性 $k_s=11.8$ [kN/mm]のものとした。

$$k_f = 4\pi^2 M / T_f^2 \quad (1)$$

(3) 上部構造の復元力特性

上部構造の復元力特性にはDegrading Tri-Linearモデルを用いた。降伏耐力 Q_y は(上部構造最下層のベースシア係数 C_B)×(高さ方向分布係数 A_i)×(各階が支える上部の総重量 $W(=\sum W_i)$)とし、ひび割れ耐力 Q_c は降伏耐力の1/3倍とする。降伏点の割線剛性は初期剛性の1/3倍とし、降伏後の剛性低下率は0.001に設定した（図-2(a)）。

上部構造の第 i 層の初期剛性 k_i には式(2)を用いた。⁴⁾ここに、 m は一層あたりの質量であり、 ω は1次固有円振動数で式(3)より求める。 H は建物高さ、 N は層数である。

$$k_i = \left(\sum_{j=i}^N j \right) m \omega^2 = \frac{1}{2} \{ N(N+1) - i(i-1) \} m \omega^2 \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi / T_2, \quad T_2 = 0.02H \quad (3)$$

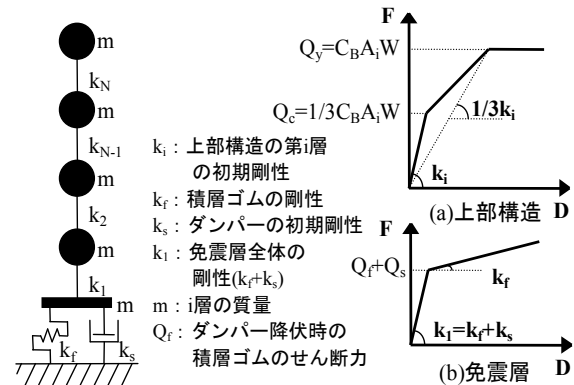


図-2 解析モデル

3.2 解析パラメータ

免震層の最大変位がクリアランスに達したときの地震動倍率 α 及び平均層間変形角 R_A は、積層ゴムの剛性 k_f 、免震層の降伏せん断力 Q_f+Q_s 、上部構造の初期剛性 k_i 及び降伏耐力 Q_y の違いによる影響が大きいと考えられる。そこで、免震層のパラメータとして、積層ゴムのみの剛性に基づく固有周期 T_f とダンパー数を、上部構造のパラメータとして建物階数とベースシア係数 C_B をとり、それらの影響について調べた。

ダンパー数は、0個、1個、5個、10個、…とし、5個以降は5個刻みに解析を行った。 T_f は3.0s、4.0s、5.0s、6.0sとし、建物全体の重量を積層ゴムの総面積で除した積層ゴムの面圧が15 N/mm²を超えないケースのみ解析を行った。

解析範囲は最大層間変形角 R_{max} が0.02rad以下か、 α がおおよそ2.0以下になるまでとした。また、図-1(1)に示した目標安全性として $\alpha \geq 1.0$ 、また目標修復性として $R_A \leq 0.005$ [rad]を想定し、解析を行った。

表-1 解析ケース

C_B	0.25, 1.0			
階数	5	10	15	30
T_f [s]	3.0, 4.0, 5.0	3.0, 4.0, 5.0	3.0, 4.0, 5.0	4.0, 5.0, 6.0

3.3 入力地震波（基準地震波）

使用する地震波は、構造計画研究所のARTEQを用い

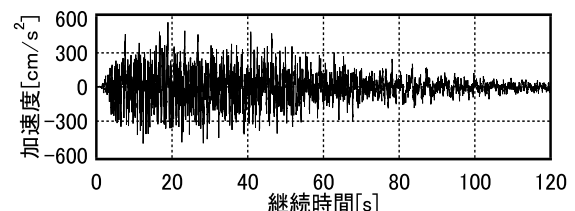


図-3 地震波の加速度波形

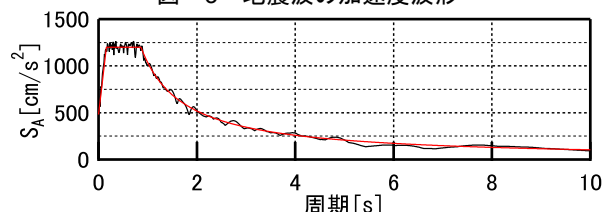


図-4 加速度応答スペクトル

て作成した模擬地震波であり、目標スペクトルを建設省告示第 1461 号に基づく加速度スペクトルに同告示第 1457 号の第 2 種地盤の地盤増幅率 G_s を乗じたものとし、位相角を一様乱数で与え、包絡関数に設計入力地震動作成手法技術指針（案）のレベル 2 を用いて正弦波合成法により作成した。最大加速度は 569cm/s^2 、最大速度は 89cm/s である。この地震波の加速度波形を図-3、加速度応答スペクトルを図-4 に示す。

4. 安全性と修復性のトレードオフ関係

図-5,6,7,8 にダンパー数を増加（図中左から 0, 1, 5, 10 個…）させた際の地震動倍率 α と平均層間変形角 R_A の推移を示す。図中の赤線は 3.2 節で述べた目標安全性および目標修復性を表している。図-5 に 5 層, 10 層, 15 層, 30 層の解析結果をそれぞれ示した。この図からダンパー数が増加すると、グラフの傾きが次第に大きくなり、徐々にトレードオフ関係が強くなっている（図-1 (2)）ことが分かる。これは、ダンパー数が多くなると免震層の剛性が大きく、免震層の変形が小さくなり、ダンパー数が少ない場合に免震層を変形させていた力が、ダンパーが多い場合には上部構造に入り、上部構造の変形が大きくなったためと考えられる。また、各解析で可能最小損傷および可能安全性（図-1 (1)）は大きく異なっている。以下では、 R_A - α 関係に及ぼす各パラメータの影響分析を通して、この傾向を詳しく見ていくことにする。

4.1 固有周期 T_f の違いが性能に及ぼす影響

図-6 は $C_B=0.25$ の 5 層, 10 層, 15 層, 30 層における T_f の違いが地震動倍率 α と平均層間変形角 R_A に及ぼす影響を比較し示したものである。 T_f が 5.0s, 4.0s, 3.0s と短くなるにつれて可能最小損傷は大きく、また、可能最大安全性は小さくなっていることが分かる。また、 $T_f=4.0[\text{s}]$ と $T_f=5.0[\text{s}]$ が概ね同じ傾向を示すが、同じ性能を確保するには、 $T_f=4.0[\text{s}]$ の方がダンパーを 5 個から 10 個多く必要とする。ただし、ダンパーが多くなるにつれて同じダンパー数での R_A - α 関係上の性能差は小さくなる。

ダンパー数が同じ場合、 T_f が 3.0s, 4.0s, 5.0s と長くなる

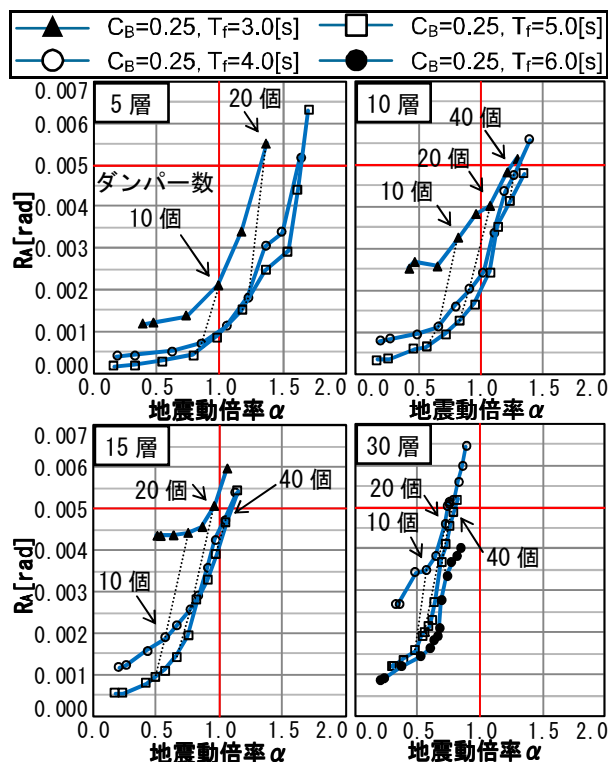


図-6 $C_B=0.25$ における R_A - α 関係

につれ、 α と R_A はともに小さくなる。これは、同じ層数の建物であれば、上部構造の初期剛性 k_i 及び降伏耐力 Q_y は等しく、 T_f が長いと積層ゴムの剛性 k_f が小さくなり、免震層に変形が集中し、上部構造の変形が小さくなるためと考えられる。

4.2 ベースシア係数 C_B の違いが性能に及ぼす影響

図-7 は $T_f=4.0[\text{s}]$ の 5 層, 10 層, 15 層, 30 層におけるベースシア係数 C_B の違いが地震動倍率 α と平均層間変形角 R_A に及ぼす影響を比較し示したものである。この図から、 $C_B=0.25$ は $C_B=1.0$ と比較して、可能最小損傷は大きく、また、可能最大安全性は小さくなっていることが分かる。この差は、 α が 0.5 から 1.0 を境に、 $C_B=0.25$ の方が $C_B=1.0$ と比較して、トレードオフ関係が強くなっている（図-1 (2)）ことに起因する。この傾向は低層の 5 層で特に顕著である。

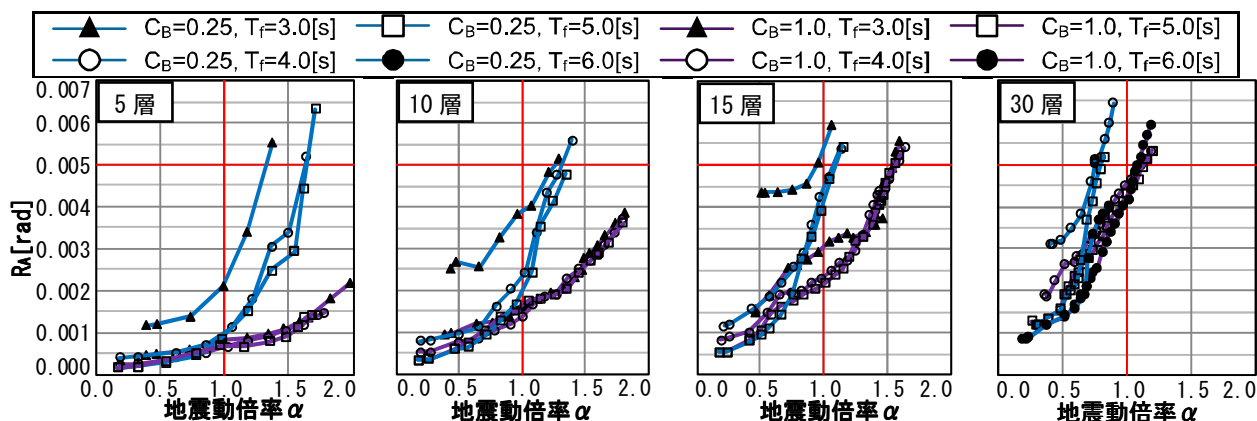


図-5 R_A - α 関係

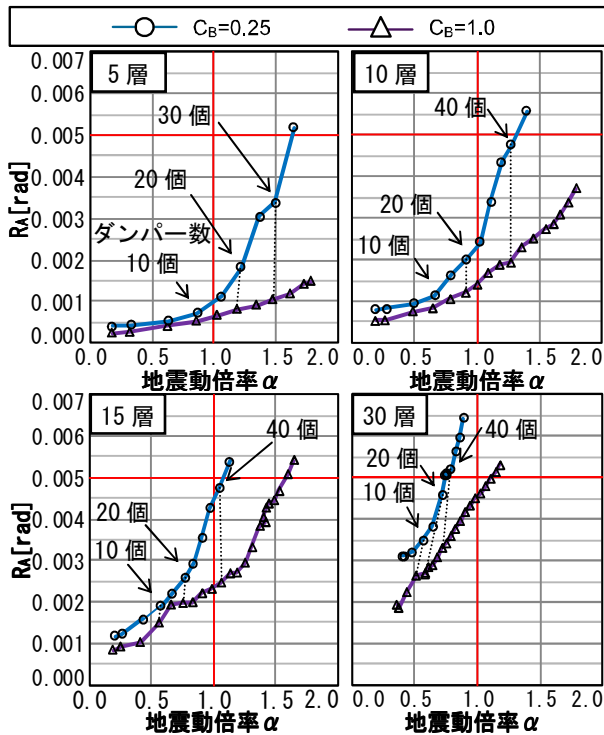


図-7 $T_f=4.0[s]$ における R_A - α 関係

4.3 階数の違いが性能に及ぼす影響

図-8 は、 $C_B=0.25$ 、 $T_f=4.0[s]$ における階数の違いが地震動倍率 α と平均層間変形角 R_A に及ぼす影響を比較したものである。この図では、階数が変化しているが、クリアランスは 50cm で一定となっている。この図から、安全性と修復性を共に確保する目安を満足するときの地震動倍率 α 及び平均層間変形角 R_A は、5 層では $1.0 \leq \alpha \leq 1.625$ 、 $0.0010 \leq R_A \leq 0.0050$ であり、10 層では $1.0 \leq \alpha \leq 1.308$ 、 $0.0024 \leq R_A \leq 0.0050$ であり、15 層では $1.0 \leq \alpha \leq 1.081$ 、 $0.0045 \leq R_A \leq 0.0050$ であることが分かる。このことから、高層の建物ほど可能最小損傷は大きく、可能最大安全性は小さくなると言える。これは、高層の建物ほど免震層の支える重量が大きく免震層に働く地震力が大きくなりやすいが、クリアランスを階数に拘わらず一定にしているため、上部構造の変形低減のための免震層の変形確保を十分できず、上部構造の変形が大きくなったことが原因であると考えられる。

図-8 に示されている各解析ケースの可能最小損傷と可能最大安全性を、10 層 $T_f=4.0[s]$ の値を 1.0 として基準化し比較したものが図-9 と図-10 である。これらの図から、可能最小損傷は 10 層に対して 5 層が約 1/2 倍、15 層が約 2 倍であり、可能最大安全性は 10 層に対して 5 層が約 1.2 倍、15 層が約 0.8 倍、30 層が約 0.6 倍であることが分かる。目標性能である $\alpha \geq 1.0$ 、 $R_A \leq 0.005$ [rad] の範囲において図-8 の各ケースはトレードオフ関係が強く、安全性 (α) の変化率よりも修復性 (R_A) の変化率の方が大きくなっている。

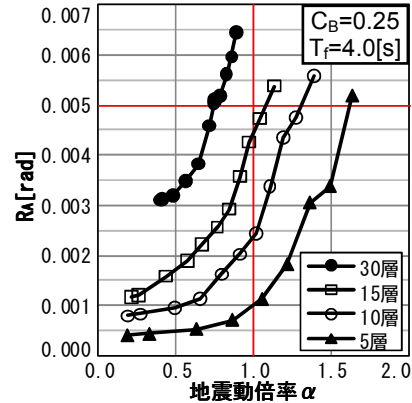


図-8 階数の違いによる R_A - α 関係

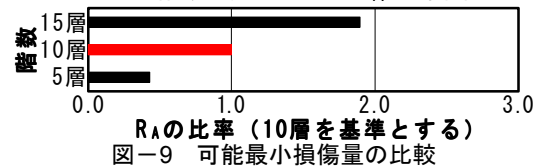


図-9 可能最小損傷量の比較

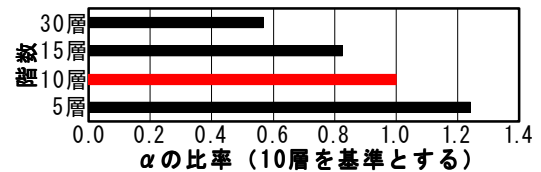


図-10 可能最大安全性の比較

5. 安全性と最大層間変形角 R_{max} の関係

ここまで、損傷の修復難易度の指標として各層の層間変形角の平均値 R_A を用いて考察を行ってきた。しかしながら、最大層間変形角 R_{max} が平均層間変形角 R_A と比較して過大となっている可能性があることから、これを調べるため、図-11 に 5 層、10 層、15 層、30 層の $T_f=4.0[s]$ における平均層間変形角に対する最大層間変形角の比 R_{max}/R_A と地震動倍率 α の関係を示した。図中の赤線は目標安全性 ($\alpha \geq 1.0$) を表している。この図から、あるダンパー数を超えると R_{max}/R_A が増加しており、ある層に変形が集中していることが分かる。階数別に R_{max}/R_A が最小となり増加する直前の地震動倍率 α は 5 層で約 1.05、10 層では約 0.8、15 層では約 0.65、30 層では約 0.5 であり、このときの R_{max}/R_A は 1.2~1.4 となる。同じ安全性であれば高層の建物ほど変形集中が発生しやすくなる。本論文では修復性を平均層間変形角で評価し

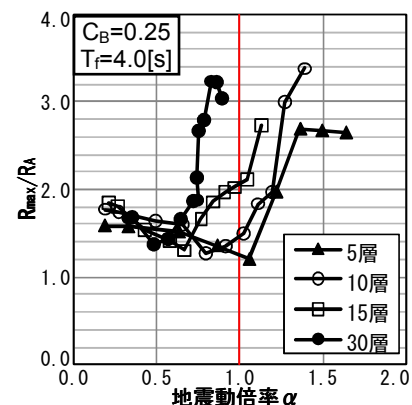


図-11 R_{max}/R_A - α 関係

てきたが、高層建物の設計ではこの点に関する配慮が必要になる。

6. 一般構造物と免震構造物の比較

ここまで、免震構造物における修復性と安全性の関係について考察を行ってきた。ここでは、靱性設計された一般構造物についても安全性と修復性を定義し、トレードオフ関係の観点から免震構造物との性能比較を行い、一般構造物に対する免震構造物の優位性について考える。

6.1 一般構造物の安全性・修復性の工学的評価

一般構造物の安全性は建物が限界状態に達するのに必要な地震動の大きさと定義する。限界塑性率 $\mu_{\max}$ を 5 とし、応答変位が $\mu_{\max}$ に達するに必要な地震動の大きさを、基準地震動 (6.3 節参照) に乗じた倍率 (地震動倍率 α) で表現し、これをもって安全性指標とした。免震構造の安全性の定義は 2.1 節と同様である。

また、一般構造物の修復性は免震構造物と同様に建物各層の変形角の平均値 R_A で定義した。

6.2 解析モデル

(1) 一般構造物の概要

一般構造物は階高 3.5m、スパン 6m の 7 層 3 スパンの純ラーメン鉄筋コンクリート構造物とした。単位床面積あたりの重量は 12kN/m^2 とし、各部材の寸法・強度は文献 1) を参考に表-2 に示すように決定した。建物のモデル化において、柱・梁部材は材端ばね法によりモデル化した。材端ばねの復元力特性には Degrading Tri-linear モデルを用い、せん断ばねはせん断破壊を想定していないため弾性ばねとし、軸ばねには引張、圧縮の剛性を変えた弾性ばねを用いた。また、接合部は剛とした。減衰定数は瞬間剛性比例型で 3% とし、数値積分には Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) を用いた。なお、解析プログラムには SNAP を使用した。

表-2 各部材の寸法・強度

階数	柱断面 $B \times D [\text{mm}]$	梁断面 $B \times D [\text{mm}]$	$F_c [\text{N/mm}^2]$
7F	750×750	450×800	24
6F	750×750	450×800	24
5F	800×800	500×800	24
4F	800×800	500×800	24
3F	850×850	500×850	24
2F	850×850	500×850	24
1F	850×850	500×850	24

(2) 崩壊機構

図-12 のように全体崩壊形の 7 層崩壊モデルから一層ずつ降伏層を少なくした 7 通りの崩壊モードを設定した。なお問題を簡単にし傾向把握を容易にするため、非降伏層 (図-12 のグレー部分) ではコンクリートの剛性と強度を大きくして柱と梁を十分に剛とした。

動的応答解析を行い、各層の梁の降伏耐力を調整す

ることにより、降伏層の最大応答変位が均一に安全限界変位に達するようにした。なお、一般に正負で応答変形が異なるため、ここでは降伏層の安全限界時の塑性率の正負平均値がすべて 5 となるようにした。また、いずれの崩壊モードでも崩壊機構形成時のベースシア係数 C_B が 0.25 となるように 1 階柱脚と降伏層最上階の柱頭の曲げ耐力を調整した。

図-13 に塑性率均一モデルでの降伏機構形成時の最大応答塑性率の分布を示す。ヒンジが発生する降伏層の最大応答塑性率、最大応答変形角がほぼ設定した値となっており、十分に剛とした非降伏層の変形が無視できるほど小さくなっていることが分かる。

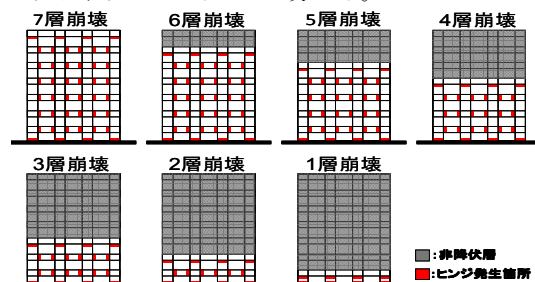


図-12 崩壊モード

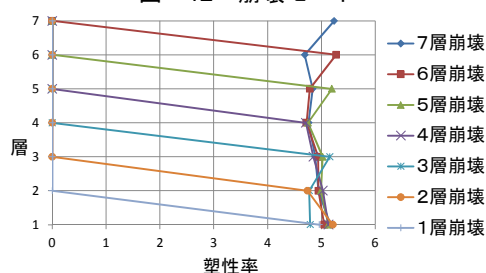


図-13 応答塑性率の比較

(3) 上部構造の復元力特性

安全限界塑性率を 5.0 とした静的弾塑性解析を行い、図-14 のようにトリリニア化した $Q-\delta$ 関係から降伏変位 δ_y を求め、 δ_y に安全限界塑性率を掛け限界変位 δ_u を定める。塑性率 5 はおよそ層間変形角 $R_{\max}=0.02[\text{rad}]$ と対応する。

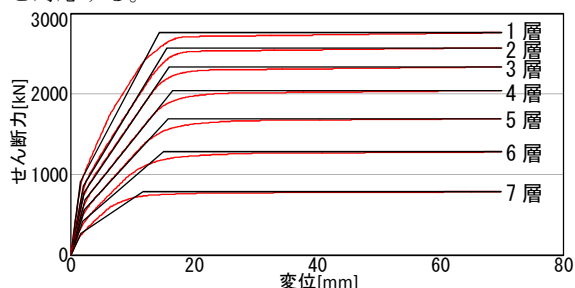


図-14 7 層崩壊の $Q-\delta$ 関係

6.3 入力地震波 (基準地震波)

目標スペクトルは 3.1 節と同様にし、位相角を KOBE の NS 成分 (神戸海洋気象台で観測した兵庫県南部地震の加速度記録: 原波で最大加速度 821 cm/s^2) で与え、包

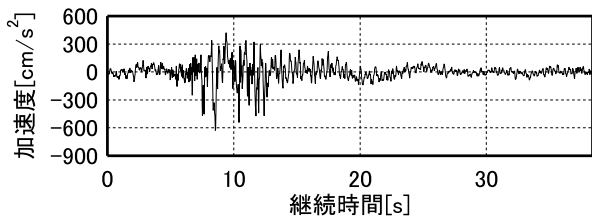


図-15 地震波の波形

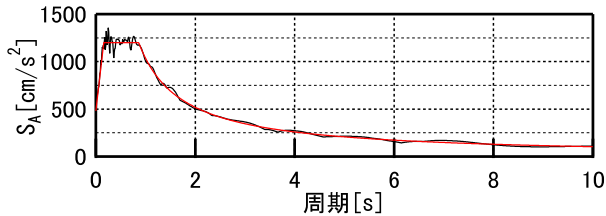


図-16 加速度応答スペクトル

絡関数を用いずに作成した模擬地震波である。最大加速度は 630 cm/s^2 である。この地震波の加速度波形を図-15、加速度応答スペクトルを図-16に示す。

6.4 一般構造と免震構造の安全性と修復性の関係

図-17 は一般構造と免震構造における地震動倍率 α と平均層間変形角 R_A の関係を示している。免震構造のプロットは、これまでと同様にダンパー数を徐々に大きくし安全性を高くしたものであり、一般構造物では、図-12に示すように崩壊モードを1層崩壊から7層崩壊（全層崩壊）まで変化させることによって安全性を増大させたものとなっている。また、この比較における免震構造物の上部構造物は一般構造物と同じものを質点系にモデル化したものとしている。

この図から、一般構造よりも免震構造の方が傾きが小さく、両性能のトレードオフ関係は免震構造の方が弱い（図-1(2)）ことが分かる。一般構造の3~7層崩壊と同じ地震動倍率（安全性）を免震構造で確保する場合、平均層間変形角 R_A （損傷量）を $T_f=3.0[\text{s}]$ で約 $1/3 \sim 1/4$ 倍、 $T_f=4.0[\text{s}]$ で約 $1/5 \sim 1/6$ 倍にできることが分かる。特に、 α が1.0となる5層崩壊と比較すると、 R_A を $T_f=3.0[\text{s}]$ で約

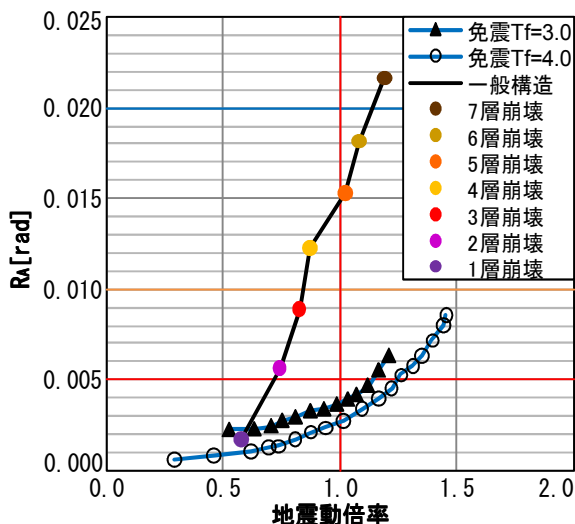


図-17 一般構造と免震構造の安全性と修復性の関係

$1/4$ 倍、 $T_f=4.0[\text{s}]$ で約 $1/5$ 倍にすることができ、一般構造に比べて免震構造は損傷低減に対して非常に有効と言える。

7. まとめ

免震層のダンパー量を変化させた際に発生する修復性と安全性のトレードオフ関係を、「可能最小損傷」「可能最大安全性」（図-1(1)）および、トレードオフ関係の強・弱（安全性の向上に伴い発生する損傷量の増加の大小）（図-1(2)）の観点から分析を行った。これにより次の知見が得られた。

- (1) ダンパー数が増加すると、徐々にトレードオフ関係が強くなり、安全性の向上に伴い発生する損傷量は大きくなる。
- (2) 積層ゴムの周期 T_f が小さくなるにつれて「可能最小損傷」は大きく、また、「可能最大安全性」は小さくなる。 $T_f=4.0[\text{s}]$ と $T_f=5.0[\text{s}]$ では概ね同じ傾向を示すが、同じ性能を確保するには、 $T_f=4.0[\text{s}]$ の方がダンパー数を多く必要とする。
- (3) ベースシア係数 C_B の違いでは、 $C_B=0.25$ のものは $C_B=1.0$ と比較して、「可能最小損傷」は大きく、また、「可能最大安全性」は小さくなる。この差は、地震動倍率 α が 0.5 から 1.0 を境に、 $C_B=0.25$ の方にトレードオフ関係が強くなることに起因する。
- (4) 設定した目標性能（地震動倍率 $\alpha=1.0$ 以上かつ平均層間変形角 $R_A=0.005$ 以下）では、可能最小損傷は10層建物に対して5層が約 $1/2$ 倍、15層が約2倍であり、可能最大安全性は10層建物に対して5層が約1.2倍、15層が約0.8倍、30層が約0.6倍となった。
- (5) 靱性設計した一般構造物の崩壊モードの差によって発生する修復性と安全性のトレードオフ関係との比較から、免震構造のトレードオフ関係は一般構造に比べて弱く、同じ安全性を確保すると、免震構造の損傷量は一般構造物の損傷量の約 $1/3 \sim 1/6$ 倍とすることができる。

参考文献

- 1) 新井組技術研究部ほか：新井組技術研究報告集，第8号，新井組技術本部技術研究部，1995.10
- 2) 田中佑治：性能評定・評価資料のデータベース化に基づく国内免震建物の現状について，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.303-304，2010.9
- 3) 鈴木重信：建物免震技術の現状と今後の展望，日本機械学会2001年度年次大会講演資料集（VII），pp.251-252，2001.8
- 4) 柴田明徳：最新耐震構造解析 第2版，森北出版，pp.78-79，2003.5