

## 免震構造と連結制振構造を組み合わせた建物の地震時応答低減特性

正会員 ○村瀬 充<sup>\*1</sup> 同 吉富 信太<sup>\*2</sup>  
同 辻 聖晃<sup>\*3</sup> 同 竹脇 出<sup>\*4</sup>

## 2. 構造—2. 振動

## 地震動, 免震構造, 連結制振構造, ロバスト性, 冗長性

## 1. 序

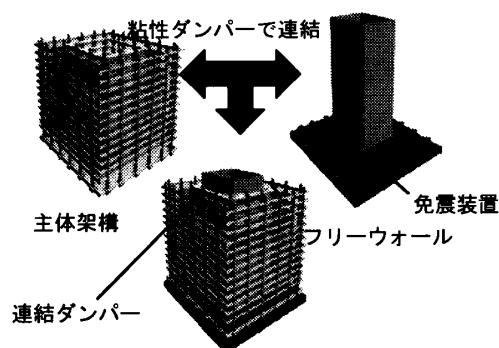
2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震において「想定外」の被害が多数報告され、長周期地震動や高い入力レベルの地震動に対して、現存する建物は多くの耐震性能に関する課題を有することが明らかとなっている。そのような地震動に対してロバスト性や冗長性を向上させた建物が求められている<sup>1)</sup>。

建築構造設計においては従来の耐震構造に加え免震構造や制振構造の研究が数多く報告されている。しかしながら、免震構造と連結制振構造を組み合わせた構造システムの建物は実施例がほとんど無く、提案例のみである。そこで本研究では免震構造と連結制振構造を組み合わせた新しい構造システムを簡易的に設計する方法を導入し、力学的な観点から地震時応答低減特性を解明する。

## 2. 免震と連結制振を組み合わせた構造システム

## 2.1 免震連結モデルの導入

図1は免震構造の超高層RC造純ラーメン架構(主体架構)とRC造連層耐震壁架構(フリーウォール)を粘性ダンパーで連結した新しい構造システムのご概念図を表す。本研究では新しい構造システムを利用した39階建の建物を対象とする。

図1 免震連結構造システム<sup>2)</sup>

解析には図2の6質点簡易モデルを使用する。RC

建物を対象とするが、ここでは理論の単純明快な提示のため線形モデルとして扱う。諸元の設計手順を以下に示す。

## 重量比

- 主体架構：フリーウォール=13：1

## 主体架構上部構造

- 剛性分布：1次モード直線形
- 免震層固定時の1次固有周期=3.0s
- 構造減衰：剛性比例減衰、1次減衰定数=0.02

## フリーウォール

- 剛性分布：1次モード直線形
- 1次固有周期=0.63s
- 構造減衰：剛性比例減衰、1次減衰定数=0.02

## 免震層

- アイソレーター：天然ゴム系
- 主体架構独立時の1次固有周期=6.8s
- 減衰：オイルダンパー、上部剛体モデル(後述)の減衰定数=0.15

## 連結ダンパー

- 減衰：オイルダンパー、上部剛体および剛体連結モデル(後述)の減衰定数=0.15

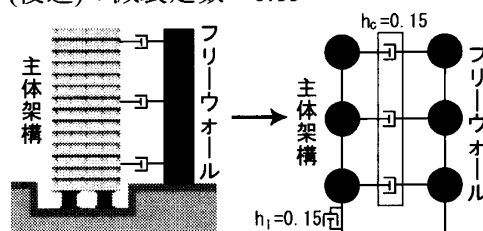


図2 6質点簡易モデル

## 2.2 免震層および連結ダンパーの簡易減衰設計法

免震層の減衰係数は、免震建物の上部構造を1質点と仮定したモデル(上部剛体モデル、図3)の減衰定数が $h_l = 0.15$ となるように設計する。連結ダンパーの減衰係数は主体架構が上部剛体モデルかつフリーウ

Earthquake Response Reduction in Hybrid Control System of Base-isolated Building Connected by Damper with Free-wall

MURASE Mitsuru, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki and TAKEWAKI Izuru

オールが剛体と仮定したモデル(剛体連結モデル、図4)の減衰定数が  $h_c = 0.15$  となるように設計する。また、各連結ダンパーの減衰係数は等分布となるように設計する。この減衰設計法を簡易設計法と呼ぶ。

以上のように設計したモデルを免震連結モデルとする。次に簡易減衰設計法の妥当性を示す。

免震連結モデルの1次の設計減衰定数が0.30であるのに対し、複素固有値解析を用いた免震連結モデル(図2)の1次減衰定数は0.29、上部剛体および剛体連結モデル(図4)の減衰定数は0.30、また剛体連結モデル(図5)の1次減衰定数は0.29であり、誤差が1%程度となっているため、簡易減衰設計法は妥当であると言える。

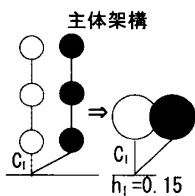


図3 上部剛体モデル

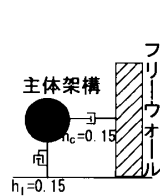


図4 上部剛体および剛体連結モデル

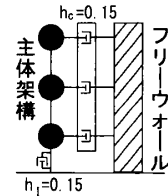


図5 剛体連結モデル

### 2.3 単一構造システムモデル (比較用)

免震と連結制振を組み合わせた構造システムの比較用として免震単一構造モデル、連結単一構造モデルおよび通常耐震モデルを導入する。

免震単一構造モデルは免震連結モデルから連結ダンパーを取り除いたモデルとする。連結単一構造モデルは免震連結モデルの免震層をRC柱に変えたモデルとする。通常耐震モデルは免震連結モデルの連結ダンパーを取り除き、免震層をRC柱に変えたモデルとする。ここで連結単一構造モデルおよび通常耐震モデルの主体架構の1次固有周期は3.0秒とする。以上の4種類のモデルを用いて解析および性能比較を行う。図6に免震連結モデルの複素固有モードを示す。1次～3次モードは主体架構が主に振動するモードで、4次以降はフリーウォールが主に振動するモードとなる。

### 3. 免震連結構造システムのフェイルセーフ機構

#### 3.1 高いレベルの地震動を入力した際の免震層変位

Taft 1952 EW レベル3(レベル1の3倍)を入力した際の免震連結モデル及び免震単一構造モデルの免震層最大変位はそれぞれ36.6cm、65.0cmとなり、免震

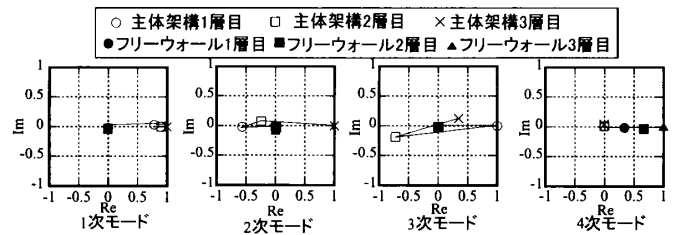


図6 複素固有モード(1次～4次)

単一構造モデルは積層ゴムのせん断歪300%を超えるが免震連結モデルは応答を抑えている。

#### 3.2 フリーウォールとの衝突による冗長性の向上

終局状態として標準3波のレベルを単純倍し、最大棟間変形75cm(主体架構とフリーウォールが衝突する)とした際の免震層最大変位はEl Centro、Taft及びHachinoheでそれぞれ47.0cm、57.8cm、49.4cmとなり、いずれも免震層の擁壁距離(80cm)を下回っている。このことからフリーウォールとの衝突を免震層との衝突より先行させるフェイルセーフ機構が有効であることが明らかとなった。また衝突の際、緩衝材の設置等により安全性を確保する。

### 4. 免震連結構造システムの地震時応答低減特性

2節で導入した4種類のモデルについて、図7は主体架構最上層点の絶対加速度伝達関数を、図8は免震層の変位伝達関数を、図9はフリーウォール最上層点の絶対加速度伝達関数を表している。ただし、伝達関数の絶対値を示している。

単一構造モデルに比べて免震連結モデルはさらに最大応答倍率を低減している。免震層の変位応答倍率の最大値も半減しており、免震層に過大な変形が生じることを防いでいる。フリーウォール最上層点の加速度伝達関数に関しては、主体架構が免震建物、耐震建物に関わらず最大応答倍率が大幅に低下する。

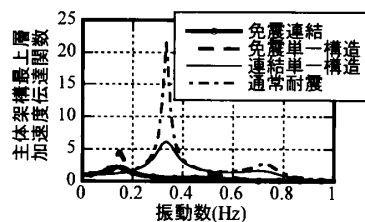


図7 主体架構最上層点加速度伝達関数

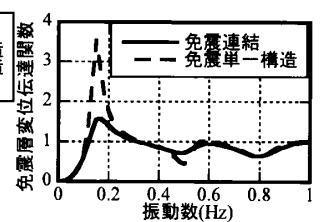


図8 免震層変位伝達関数

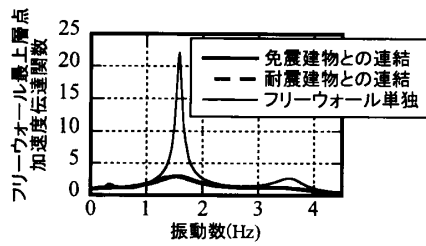


図9 フリーウォール最上層点加速度伝達関数

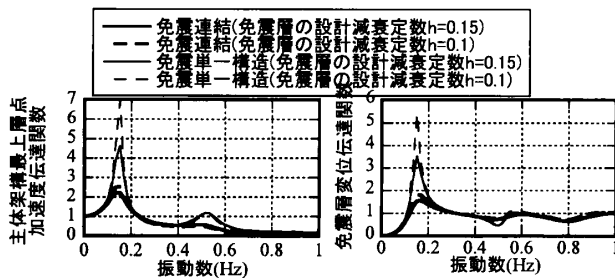
#### 4. 免震連結構造システムのロバスト性

ロバスト性とは構造パラメーターの変化(劣化)に対する性能の変化の鈍感さと定義する。

##### 4.1 免震層の減衰量の低下に関するロバスト性

免震連結モデルおよび免震単一構造モデルに関して、元のモデルと免震層の減衰量を低下させたモデルを比較し、ロバスト性に関して考察する。図10は主体架構最上層点の加速度伝達関数を、図11は免震層の変位伝達関数を表している。

加速度応答倍率の最大値は、免震連結モデルでは13%増加するのに対し免震単一構造モデルでは50%増加する。変位応答倍率の最大値は、免震連結モデルでは15%増加するのに対し免震単一構造モデルでは53%増加する。免震連結モデルでは免震単一構造モデルに比べ、免震層の減衰の変化に関するロバスト性が向上していると言える。



免震層の減衰量の変化に関するロバスト性

図10 主体架構最上層点加速度伝達関数 図11 免震層変位伝達関数

##### 4.2 連結ダンパーの減衰の低下に関するロバスト性

免震連結モデルおよび連結単一構造モデルに関して、元のモデルと3層目の連結ダンパーを取り除いたモデルを比較し、ロバスト性に関して考察する。

図12は主体架構最上層点加速度伝達関数を表す。加速度応答倍率の最大値は、免震連結モデルでは26%増加するのに対し連結単一構造モデルでは84%増加する。免震連結モデルは連結単一構造モデルに

比べ、連結ダンパーの減衰の変化に関するロバスト性が向上していると言える。

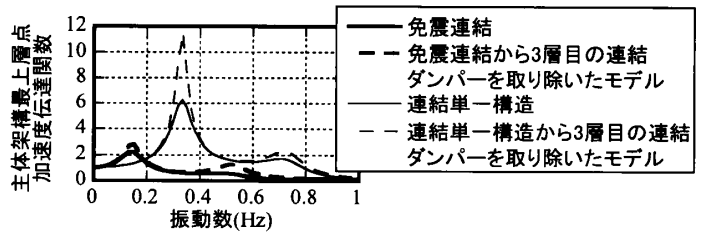


図12 連結ダンパーの減衰量変化に関するロバスト性

#### 5. 連結ダンパー量が地震時最大応答に及ぼす影響

免震単一構造に各層の連結ダンパーを追加し、地震時最大応答の変化を解析して、連結ダンパーの有効な配置について考察する。ただし、解析に用いる応答スペクトルは安全限界スペクトルとし、多質点の最大応答は拡張CQC法(モードの相関を考慮し、非比例減衰建物の最大応答を高精度で評価する手法<sup>3)</sup>)を用いて主体架構最上層点の最大加速度応答および免震層の最大変位応答の解析を行う。

図13は主体架構最上層点の最大加速度応答を、図14は免震層の最大変位応答を表す。1層目の連結ダンパーを増加させた際は最大加速度応答の値が緩やかに減少し、その後緩やかに増加する。2層目の連結ダンパーでは幅広い範囲の減衰量で最大加速度応答が低下するのに対し、3層目の連結ダンパーでは少ない減衰量で最大加速度応答が極小値を取るが、さらに減衰量を増加させると最大応答が急に増加する。

2層目および3層目の連結ダンパーの減衰量を増加させた際の最大加速度応答の極小値は同等であるが、その減衰量における免震層最大変位応答は2層目の連結ダンパーの減衰量を増加させたモデルの方が低減する。つまり、最大加速度応答を増加させずに免震層の最大変位応答を低下させるには2層目の連結ダンパーの減衰量を増加させるのが効果的であるといえる。

また、免震層の最大変位応答はいずれの層の連結ダンパーの減衰を増加させた際も単調に減少し、上層の連結ダンパーの減衰量を増加させると効率よく減少するといえる。

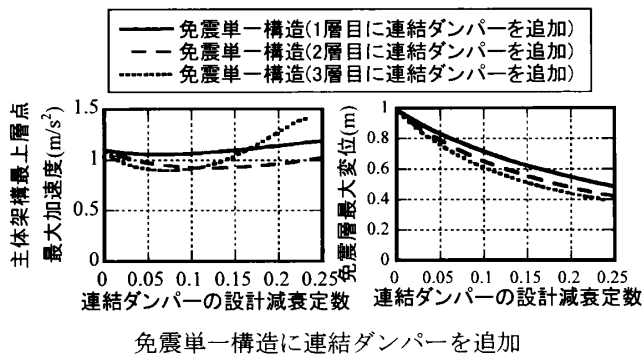


図 13 主体架構最上層点最大加速度

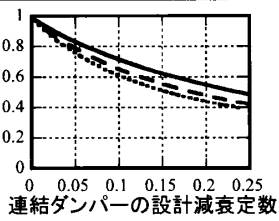


図 14 免震層最大変位

図 15 および図 16 は、それぞれ免震単一構造に 2 層目、3 層目の連結ダンパーの設計減衰定数を増加させた際の、加速度応答スペクトルと主体架構最上層点の刺激関数の絶対値の積の変化を表す。

2 層目の連結ダンパーの設計減衰定数を増加させた際、1 次モードの影響は低下するものの、2 次モードの影響が増加する。また、各次モードの影響の変化は幅広い範囲で単調に変化する。これに対して 3 層目の連結ダンパーの設計減衰定数を増加させた際、大きく異なるのは 4 次モード(フリーウォールが主体となって振動するモード)の影響が急激に増加することである。これから 3 層目の連結ダンパーを通じてフリーウォールから力が伝達していることがわかる。

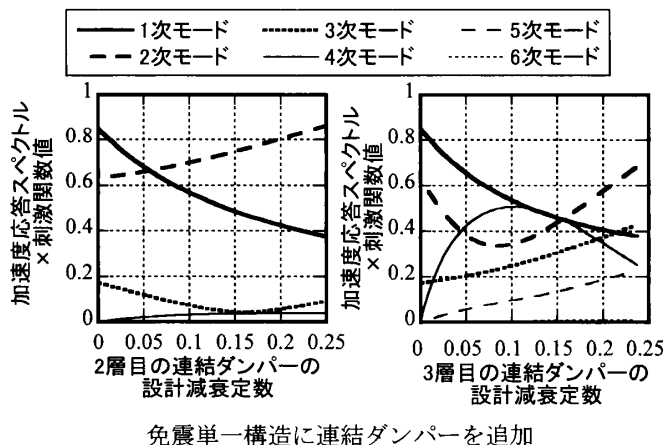


図 15 2 層目の連結ダンパーの減衰を増加した際の加速度応答スペクトル×刺激関数値

図 16 3 層目の連結ダンパーの減衰を増加した際の加速度応答スペクトル×刺激関数値

## 6. 結論

本論文の結論を以下に示す。

- 1) 免震建物(主体架構)の中央吹抜部に、主体架構と比較して 1 次固有周期が短い連層耐震壁架構(フリーウォール)を配置し、それぞれを粘性ダンパーで連結した新しい構造システムの地震時応答低減特性を力学的な観点から明らかにした。
- 2) 免震構造と連結制振構造を組み合わせた新しい構造システムは単一構造システムに比べ免震層や連結ダンパーの減衰の低下に関するロバスト性(構造パラメーターの変化に対する応答の変化の鈍感さ)が向上することを示した。
- 3) 免震層の減衰係数を免震建物上部構造を剛体と仮定した上部剛体モデルの 1 次減衰定数から決定し、連結ダンパーの減衰係数を上部剛体およびフリーウォールを剛体と仮定した剛体連結モデルの 1 次減衰係数から決定する簡易設計法を提案した。またその簡易設計法により定めた減衰量を、設計の際指定した減衰定数と簡易モデルの複素固有値解析を用いた 1 次減衰定数とを比較することによりその妥当性を明らかにした。

本論文における簡易設計法では各連結ダンパーの減衰量を等しく設計した。しかし各連結ダンパーの減衰量の変化による応答の変化に大きな違いがあるため、連結ダンパーの減衰量の効果的な設計法を展開する必要がある。

謝辞 西村勝尚氏(大林組)より貴重な意見を頂戴した。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 竹脇出, 2011年度日本建築学会技術部門設計競技入選作品「ロバスト性・冗長性を向上させた建物の構造デザイン」, 建築雑誌2011年, 11月号, pp73-79.
- 2) 2011年度日本建築学会大会(関東)応用力学部門パネルディスカッション「ロバスト性・冗長性を向上させた建物の構造デザイン」資料(大林組提案モデル).
- 3) J. N. Yang, S. Sarkani and F. X. Long, 'A response spectrum approach for seismic analysis of nonclassically damped structures', *Eng. Struct.* 12, 173--184 (1990).

\*1 京都大学工学部建築学科  
 \*2 京都大学工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)  
 \*3 京都大学工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)  
 \*4 京都大学工学研究科建築学専攻 教授・工博

Undergraduate School of Architecture, Kyoto Univ.,  
 Assistant Prof., Dept. of Arch. and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.  
 Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.  
 Prof., Dept. of Arch. and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.