

# 慣性接続要素を用いた歴史的建築物の耐震改修に関する研究

日大生産工(学部) ○外山 義行 日大生産工 神田 亮  
日大生産工 大内 宏友 日大生産工 岩田 伸一郎

## 1. はじめに

近年、多くの歴史的建築物が保存されるようになった。その理由として、歴史的建築物はさまざまな価値を有し、社会的にその存在意義が認められてきたことなどがあげられる。その価値をまとめると以下ようになる。

- 建築物がその地域の住民にとって、巨大な記憶装置として存在する歴史的価値
- その時代の新しい美や表現、成熟した空間として存在する芸術的価値
- その時代の技術を残すことによって、今日の技術の変革と発達を自覚することのできる物として存在する技術的価値
- その土地の街並と調和し、存在していることが景観・環境にとって極めて重要であるという景観・環境的価値
- 地域社会の変化や地域の近代化である建築物として存在している社会的価値

このような価値を有している歴史的建築物は、次の世代に持続可能な形で継承していかなくてはならない。

上記の価値を有する建築物を保存する計画例があり、その建築物は明治に建築された創立記念館である。この建築物は千葉県にある S 学院内にあり、S 学院にとってまた歴史的な観点からも、半永久的に保存する価値があるといえる。この建築物を次の世代に継承していくためには、保存するための耐震改修が必要不可欠になってくる。

通常の建築物の耐震改修は耐震性の向上を第一に考え実施されている。しかし、歴史的建築物は耐震性を向上させるだけでなく、上記の価値を損ねてはならない。

そこで本論文は、対象となる歴史的建築物の外観を損ねずに耐震改修する手法を提案し、耐震性向上の可能性を探ることを目的とする。

## 2. 建築物概要

創立記念館は、S 学院の校舎を新築する計画により、配置計画上移築し保存されることになった。この耐震改修を行うにあたって、いくつかの留意点がある。

- ① 建築物の意匠的な価値を損なうことなく耐震改修を行わなくてはならない。
- ② 移築を伴うので現行の基準法を満足する耐震性を有しなくてはならない。

これらの留意点を満足する耐震改修手法が必要になる。

## 3. 耐震改修手法

本章は、前章で述べたような留意点を満足するため、耐震改修手法を比較し、今回の耐震改修で最適と考えられる手法を示す。

### 3-1 耐震改修手法の比較

従来の耐震改修には様々な方法がある。たとえば耐震壁やブレースなどによる改修、制震装置による改修、免震装置による改修などがあげられる。建築物の耐震性向上の面で考えれば、いずれの手法で耐震改修を行っても、現行の耐震基準を満足させることができる。しかし、建築物の外観を損なわず、耐震性能を向上させる方法としては、免震構造が最適であると考えられる。各改修の長所を整理して図 1 に示す。



図 1 耐震改修の比較

Study on Earthquake-Resistant Retrofit for a Historic Wooden Building by Used Inertia Mass

Yoshiyuki TOYAMA, Makoto KANDA, Hiroto OUCHI and Shinichirou IWATA

免震構造は何らかの方法で、建築物と地盤を力学的に絶縁し、建築物に入力される地震力を低減しようとするものである。完全に絶縁できれば地震力の入力もなくなるが、現在の技術では不可能である。そこで、多少生じる入力に対する応答は、ダンパーを用いて低減することが主になされている。現在、絶縁体装置としては、積層ゴムが最もよく用いられている。ダンパーはオイルの粘性を利用するオイルダンパーや、金属を塑性させて履歴エネルギーによるダンピング効果を期待する履歴ダンパーなどが代表的である。

免震構造は、基礎部に免震装置とダンパーを用いるので、上部構造に手を加えることなく、その建築物の耐震性を向上させることが可能である。この時ダンパーの種類として、オイルダンパーや履歴ダンパーを用いて応答低減を行うのだが、図2のようにダンパー量を増加させすぎると、応答変位を減少させる反面、応答加速度は増加する。

既往の制震技術研究<sup>1~3)</sup>で、建物の層間変位に応じて補助質量を配置し、応答制御をする研究が進んでいる。この補助質量のことを慣性接続要素という。この慣性接続要素を用いたダンパーの場合、オイルダンパーや履歴ダンパーと同等、あるいはそれ以上の応答変位低減効果があり、応答加速度の増加量は、通常のダンパーよりも小さい。

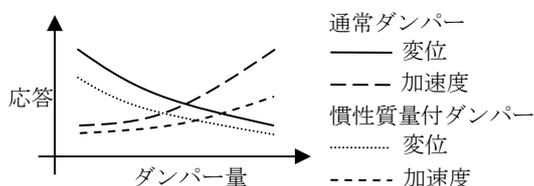


図2 ダンパー量を増加させたときの応答変化

### 3-2 提案手法

前節述べた理由より、今回の耐震改修の手法として、上部構造に手を加えない免震構造と、慣性接続要素を用いた制震構造を組み合わせた免・制震システムを適応する。

## 4. 慣性接続要素

### 4-1 慣性接続要素の概念

図3に慣性接続要素の概念図を示す。この制震装置は回転体に内輪と外輪があり、外輪に質量が集中している物を考える。内輪の接線方向に加速度が生じると外輪に質量が集中しているため、加速度が生じた方向とは逆向きの反力として慣性力が生じる。これによって応答が低減されると考えられる。

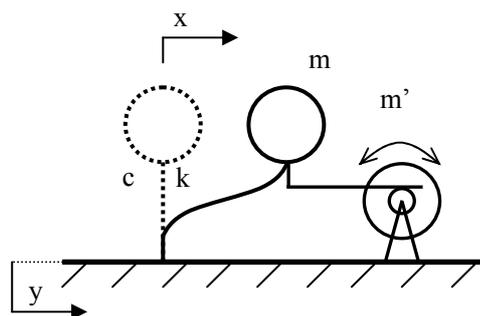


図3 慣性接続要素を用いたモデルの概念図

この慣性接続要素を用いた装置はすでに存在しており、これは慣性質量付減衰こま<sup>1)</sup>(以下、減衰こま)と呼ばれる。この装置を図4に示す。この装置は軸方向運動を内筒の回転体運動へ変換し、中の粘性体でせん断抵抗力を得るものである。また慣性質量効果は、ボールネジの回転部に付加質量を用いることで得ている。減衰こまは粘性減衰装置として設計されたものである。そのため慣性質量効果は副次的なものであるが、石丸らによって積極的な利用が検討されている。本論文は、慣性質量効果も含めて減衰こまを用いることとする。



図4 慣性質量付減衰こま<sup>1)</sup>

### 4-2 慣性接続要素を有する振動系の応答性状

ここで、慣性接続要素を有する振動系の応答性状を数値的に把握する。まず、図3のような1質点系の振動系を考える。地震外乱を受けたとき回転体の回転運動は、質点の地盤からの変

位  $x$  のみ影響を受けており地動  $y$  の影響を受けない。これを振動方程式で表すと次式のように表すことができる。

$$(m + m')\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{y} \quad (1)$$

両辺を  $(m + m')$  で除して整理すると

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2 x = -\eta\ddot{y} \quad (2)$$

となる。ここで

$$\omega = \sqrt{\frac{m}{m + m'}} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$h = \sqrt{\frac{m}{m + m'}} \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad \eta = \frac{m}{m + m'}$$

このことより慣性接続要素を用いると、以下の振動特性の変動を示す。

- 周期を  $\sqrt{\eta}$  倍に伸長変動する。
- 減衰定数を  $\sqrt{\eta}$  倍に低下する。
- 入力を  $\eta$  倍に低減する。

(1)式は両辺の質量項を同一として入力低減効果がわかるように表すと次式のように表すことができる。

$$(m + m')\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -(m + m')\eta\ddot{y} \quad (3)$$

2 質点での慣性接続要素を用いた式は次式によって表すことができる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\eta\}\{\ddot{y}\} \quad (4)$$

ただし  $[M][C][K]$  は質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{\ddot{x}\}\{\dot{x}\}\{x\}$  は加速度、速度、変位ベクトル、 $\{\ddot{y}\}$  は地動加速度ベクトルであり、入力低減効果  $\{\eta\}$  は以下のように表せる。

$$\{\eta\} = [M]^{-1}[M_0]\{1\} \quad (5)$$

$$[M] = [M_0] + [M'] \quad (6)$$

$$[M_0] = \begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[M'] = \begin{bmatrix} m'_2 & -m'_2 \\ -m'_2 & m'_2 + m'_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$[M_0]$ : 接点質量のみの質量マトリクス

$[M']$ : 慣性接続要素のみの質量マトリクス

この慣性接続要素を用いることによって、地盤への地震入力レベルは低減していないが、地盤から上の応答を低減させることが可能である。

## 5. 解析方法

今回、応答低減を確認する方法として対象建築物をモデル化し、時刻歴応答解析を用いる。

以下にパラメータ設定の詳細を示す。

### 5-1 解析パラメータ

耐震改修前の建築物の解析パラメータの設定として、質量を算定し剛性を固有値解析により求めた。質量の算定は、各部分の面積を求め建築基準法施工令の固定荷重を基に算定を行った。剛性は、各階の床面積比と各階の剛性の比を同じとし、上部構造の固有周期が 0.4 (sec) となるように算定した。一般的な木造住宅の減衰定数は、0.01~0.03 の間に分布しており本解析においては、1 次モードの減衰定数を 0.01 とした。

次に、耐震改修後の解析パラメータの設定を行う。今回の対象建築物は木造建築物であり、軽量のため免震装置を有しても、固有周期が伸長しづらい。そこで鉄骨鉄筋コンクリートを人工地盤に用いて、質量を増加させる。これにより建築物の固有周期が伸長しやすくなり、免震装置の性能を発揮することができる。免震層の剛性は免震層が降伏した後の固有周期を 4 (sec) となるように算定した。免震層を有した時、上部構造の減衰係数は変化させず、減衰こまの減衰係数は 150(kN・s/m) となるように設定した。解析モデルに慣性接続要素を用いるため、最下層に  $m=0$ 、 $k_0=\infty$  のダミー質点を設ける。以上をまとめ、算定した結果とモデルを表 2、図 5 に示す。

### 5-2 地震外力

地震外力は、解析例として兵庫県南部地震での観測波位相を用いた告示波形 ( $A_{max}=362gaI$ ) を用いて時刻歴応答解析を行う。

表 2 解析諸元

層	質量 (ton)	剛性 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
3	5.8	2300	28.0
2	25.2	9982	121.7
1	269.7	811	159.9
0	0	$\infty$	0

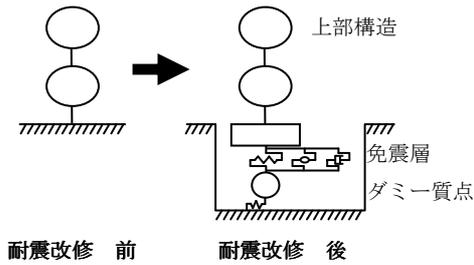


図5 改修前後での解析モデル

## 6. 解析結果

本章は前章に述べた解析を行い、その結果を示す。ここで耐震改修前の振動系を以後、原振動系という。

### 6-1 原振動系と耐震改修後の比較

原振動系の解析結果を図6、免震装置のみと免震装置+減衰こまを用いた時の解析結果を図7に示す。各解析結果を比較すると、耐震改修後は応答、層せん断力、層せん断力係数が大幅に低減できることが確認できる。

### 6-2 粘性ダンパーとの比較

免震構造に減衰係数を減衰こまと同じように設定した粘性ダンパーを用いた時の応答を比較し、低減することを確認する。この時の解析結果を図8に示す。この時の結果を比較するとわずかではあるが応答、層せん断力、層せん断力係数が低減していることが確認できる。これによって、免震構造に粘性ダンパーを用いる場合よりも、応答加速度は増加させずに応答低減できる可能性を示している。

## 7 まとめ

本論文では、免震装置と慣性接続要素を用いた制震装置を組み合わせた手法を用いることにより、歴史的建築物の外観を損ねずに、耐震性が向上できる可能性を示すことができた。

(謝辞)

本研究をまとめるにあたって、土屋敬宣君、大内研究室の皆さんには、多くの助言と協力をいただいたことに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 石丸辰治他: 慣性接続要素によるモード分離その1、日本建築学会構造論文集、第576号、pp55-62、2004、2
- 2) 石丸辰治他: 慣性接続要素によるモード分離その2、日本建築学会構造論文集、第601号、pp83-90、2006、3
- 3) 石丸辰治他: DM 効果を利用したよう免震システムに関する基礎的研究(その1~その2)、日本建築学会大会学術講演概集、pp1041~1044、2007、8

表3 各振動系における応答量の比較

		原振動系	免震装置	免震+粘性ダンパー	免震+減衰こま
層せん断力 (kN)	2	143	13.7	8.22	8.15
	1	394	72.8	39.9	39.3
	免震		700	366	330
層せん断力係数	2	2.51	0.24	0.14	0.14
	1	1.30	0.24	0.13	0.12
	免震		0.24	0.11	0.11
加速度 (m/s <sup>2</sup> )	2	24.6	2.36	1.42	1.42
	1	11.2	2.34	1.27	1.14
	免震		2.32	1.21	1.10
変位 (m)	2	0.09	0.88	0.41	0.40
	1	0.04	0.87	0.41	0.40
	免震		0.86	0.41	0.39

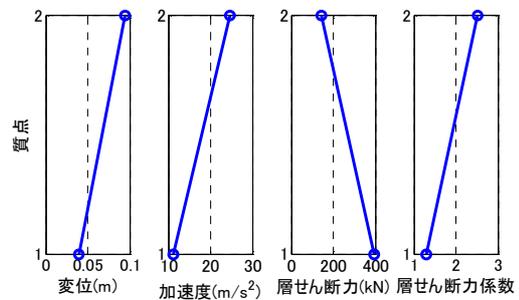


図6 原振動系の時刻歴応答解析結果

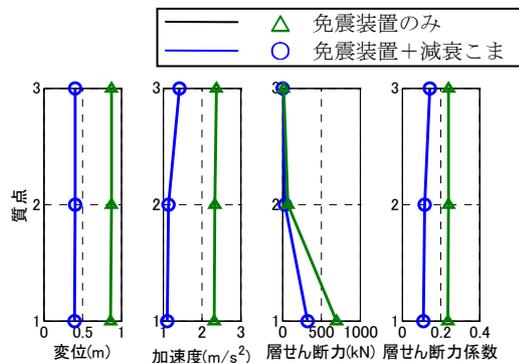


図7 耐震改修後の時刻歴応答解析結果

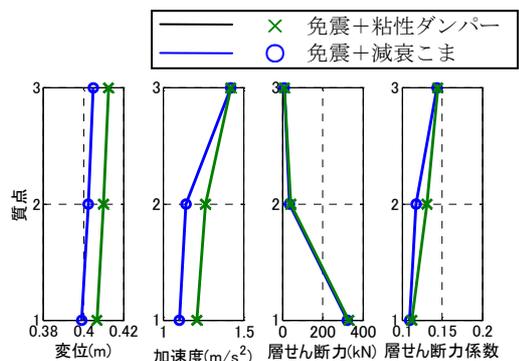


図8 異なるダンパーでの時刻歴応答解析結果