

伝統構法で建てられた鐘楼の制震改修について  
その2 制震改修後の性能に関する検討

正会員 ○石垣秀典\*\*  
同 魚津忠弘\*  
同 石丸辰治\*\*\*

制震設計 伝統構法 地震応答

1. はじめに

近年、免震・制震構造に関する研究が活発に行われており、種々のエネルギー吸収装置が開発されている。木質構造に適用可能な装置も開発されているものの、文化的価値の高い伝統建築に採用する場合には、意匠上の制約などから、最も効果的なエネルギー吸収性能を発揮できるように装置を設置することは困難な場合が多い。本報で制震改修の対象とした鐘楼に関しても、腰貫下部に制震装置を配置しており、軸組の高さと装置設置位置の高さの比率から考えると、エネルギー吸収効率に関しては不利な設置状況となっていることは明らかである。本報においては、そのような設置状況下において最も効率良く制震効果を発揮できるような設計の手法について検討を行なった結果について述べるとともに、鐘楼の制震改修後の性能に関して報告を行なう。

2. 張力導入型トグル制震装置の概要

本改修でエネルギー吸収装置として採用した張力導入型トグル制震装置の概要について述べる。図-1 に装置の概要を示す。

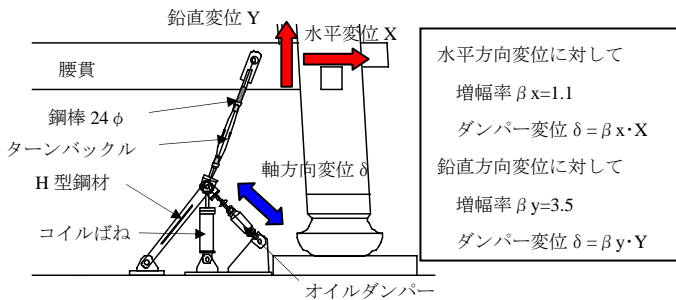


図-1 張力導入型トグル制震装置の概要

本装置は増幅機構であるトグル機構を介してオイルダンパーを設置したものであり、腰貫位置の水平変位および鉛直変位がそれぞれ増幅されてオイルダンパーに伝達される。その際の増幅率を図-1 の図中に示す。各速度も同様に増幅されるため、オイルダンパー単体の減衰係数に増幅率の二乗を乗じた値が装置全体の減衰係数となる。また本装置はコイルばねを装置内に組み込んでおり、鋼棒に設けたターンバックルを締めることにより、トグル機構部分に予張力を生じさせておくことが可能となっている。その利点としては、予張力の大きさを調整するこ

とによって、圧縮力を生じさせずに張力のみでトグル機構を作動させることが可能となるため、小断面の部材で装置を構成することができることにある。ただし、本事例の場合には装置全体が非常に小さく構成されており、鋼棒に圧縮力を負担させることも十分可能であるため、予張力の値は非常に小さな値(0.5kN)となっている。

3. 制震設計の方法

本事例のように、腰貫下部のみに制震装置が設置される場合には、腰貫上部の架構の変形を考慮に入れて減衰性能を評価する必要がある。本報では、図-2 に示すような1質点2自由度の解析モデルを用いて性能評価を行う。同図中において、xおよびvは架構頂部の水平変位と速度を、x<sub>D</sub>は腰貫位置の水平変位を表している。また、K<sub>H</sub>は木造架構の水平方向剛性、C<sub>D</sub>およびK<sub>D</sub>はトグル制震装置の減衰係数と剛性を表している。そして、ばねK<sub>M</sub>は装置に入力される変位を評価するために設けたものであり、図-3 に示すように柱の曲げ剛性をばねK<sub>C</sub>に置換して、装置と架構との接合部の剛性を評価するためのばねK<sub>B</sub>と直列結合して(1)式を用いて算出している。以上の定数を用いて、図-2 の解析モデルに対する状態方程式は、地盤変位をyとすれば(2)のように導くことができる。そして、減衰係数C<sub>D</sub>をパラメータとして、このモデルに対する粘性減衰定数を算出すると、図-4 に示す結果が得られる。

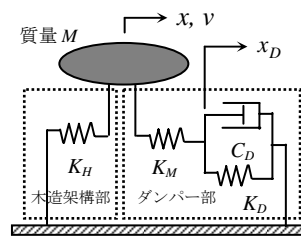


図-2 解析モデル

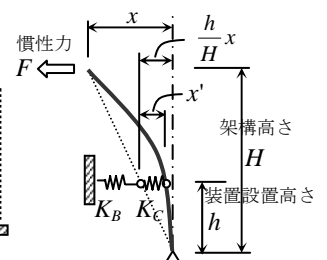


図-3 ばねK<sub>M</sub>の算出方法

$$F = \frac{K_B \cdot K_C}{K_B + K_C} \cdot \frac{h^2}{H^2} \cdot x = K_M x \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{v} \\ \dot{x} \\ \dot{x}_D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_H + K_M}{M} & \frac{K_M}{M} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_M}{C_D} & -\frac{K_D + K_M}{C_D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ x \\ x_D \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{y} \quad (2)$$

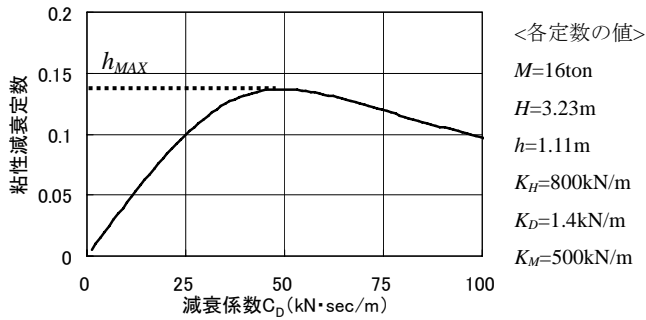


図-4 粘性減衰定数

図-4 の結果から、粘性減衰定数は極値を有していることが分かる。その極値を示す時の減衰係数  $C_D$  と粘性減衰定数  $h_{MAX}$  の値は(3)式および(4)式を用いて、各定数の値から算出することができる<sup>1)</sup>。

$$C_D = \sqrt{M} \sqrt[4]{K_D K_H + K_M K_H + K_D K_M} \sqrt[4]{\left(\frac{K_D + K_M}{K_H + K_M}\right)^3} \quad (3)$$

$$h_{max} = \frac{I}{2} \left( \sqrt{\frac{K_H + K_M}{K_H + \frac{K_D K_M}{K_D + K_M}}} - I \right) \quad (4)$$

架構の中間位置に減衰装置を設置する場合には、この解析結果のように減衰性能に限界があるため、大きな減衰係数のダンパーを設置しても効率の良い制震効果は期待できない。そのため設計の初期段階で、(3)式および(4)式を用いて性能の見積もりを行っておく必要があるだろう。

#### 4. 制震改修後の性能

本節では、制震改修を行った鐘樓の性能について地震応答解析による検討を行った結果について述べる。解析は図-5 に示すような桁行方向架構を対象にした平面骨組モデルを用いて行なった。モデルを構成する部材の諸元を表-1 に示す。なお、柱脚には浮き上がりを模擬するための非線形ばねを設けている。

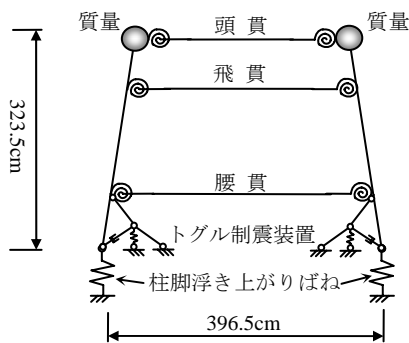


図-5 骨組解析モデル

表-1 部材諸元

部材	樹種	断面寸法[cm] 高さ×幅	断面積 [cm <sup>2</sup> ]	断面2次モーメント [cm <sup>4</sup> ]
柱	ケヤキ	33.0φ	3419.5	58213.8
頭貫		21.0×30.0	6300.0	47250.0
飛貫		10.0×24.0	2400.0	11520.0
腰貫		10.0×24.0	2400.0	11520.0

制震装置が設置されていない時の架構の復元力特性は、図-6 に示すように柱の傾斜復元力特性、貫のめり込み抵抗から構成されている。

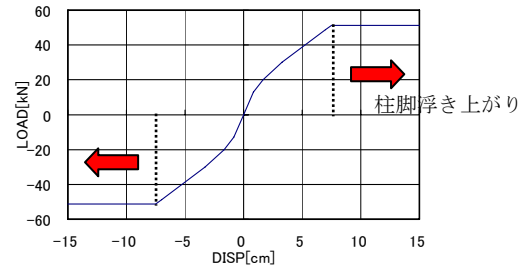


図-6 木造架構の復元力特性

表-2 および表-3 に表中の地震動波形を用いて行なった応答解析の結果を示す。結果から、最大応答変形角は 1/60 となっており、改修前と比較して応答値が大きく低減されていることが分かる。

表-2 改修前の地震応答解析結果

入力地震波	入力最大加速度 (cm/sec <sup>2</sup> )	入力方向	最大応答値		
			絶対加速度 (cm/sec <sup>2</sup> )	速度 (cm/sec)	変位 (cm)
El-Centro 1940 NS (最大速度50cm/sec基準化)	511	桁行	364	122.1	22.6
		梁間	362	122.5	21.7
Taft 1952 EW (最大速度50cm/sec基準化)	497	桁行	353	99.6	17.2
		梁間	355	95.3	15.8
Hachinohe 1968 NS (最大速度50cm/sec基準化)	330	桁行	359	102.8	21.1
		梁間	358	99.7	19.4

表-3 改修後の地震応答解析結果

入力地震波	入力最大加速度 (cm/sec <sup>2</sup> )	入力方向	最大応答値		
			絶対加速度 (cm/sec <sup>2</sup> )	速度 (cm/sec)	変位 (cm)
El-Centro 1940 NS (最大速度50cm/sec基準化)	511	桁行	693	55.6	5.9
		梁間	705	54.3	5.9
Taft 1952 EW (最大速度50cm/sec基準化)	497	桁行	530	42.4	5.3
		梁間	546	42.4	5.2
Hachinohe 1968 NS (最大速度50cm/sec基準化)	330	桁行	295	32.4	2.9
		梁間	307	32.7	2.7

#### 5. まとめ

制震改修を行った鐘樓の対地震性能について検討を行なった結果について述べた。上下方向地震動に対する評価については今後検討を行なう予定である。

<参考文献>

- 1) 石垣秀典他:制震装置を設置した伝統木造架構の動特性に関する研究,第3回日本制震(振)シンポジウム論文集,2004.12

\* 魚津社寺工務店 修士(工学)  
 \*\* ハウスプラス住宅保証株式会社 博士(工学)  
 \*\*\* 日本大学理工学部 教授・工博

\* Uotsu Syaji Corporation  
 \*\* Houseplus Corporation, Inc., Dr.Eng.  
 \*\*\* Prof., College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.