

増幅機構を用いた制震構造システムの開発 (その2. 鋭角型トグル機構について)

8

○久保田 雅 春¹ 石 丸 辰 治² 新 谷 隆 弘² 秦 一 平³
Masaharu Kubota Shinji Ishimaru Takahiro Niiya Ippei Hata

〈概 要〉

構造物の振動を制御する装置として、補助質量付きてこ機構が有効であり、その具体的装置として補助質量付きトグル機構を考案した。この機構の利点である地震時の入力低減効果、変位増幅等を実証するために、数学的モデルによる解析と模型による振動実験を行った。この機構を用いることによりコンパクトな制震装置が実現でき、通常のダンパーを併用することによって、主構造物に大きな減衰を付与することが可能となり、大きな制震効果が期待できることが実証された。

〔キーワード〕 増幅機構・てこ機構・制震構造・免震構造・トグル機構・ダンパー・減衰

1. はじめに

その1で制震装置としてトグル機構を用いると、建物の耐震性能を上げることが可能であることを概論的に述べた。そこで、本報その2では、鈍角型トグル機構について模型を用いた振動実験を行い、この制震装置の有効性を示すと共に一質点系の応答解析により理論の実証を行った。なお、鋭角型トグル機構については次報その3で述べることとする。

2. 補助質量付きてこ機構

図2.1に示すシステムは変位増幅機構として、補助質量付きてこ機構を用いたものであり、図中の m , c , k はそれぞれ主構造物の質量、粘性減衰係数、バネ剛性であり、 md , cd , kd はそれぞれ変位増幅部に取り付けられた補助質量、粘性減衰係数、バネ剛性で、 β は、てこ比である。

ここでは説明を簡単にするために、補助質量部の円弧運動により生じる遠心力や補助質量に作用する重力の影響等を無視して考える。主構造物の地盤に対する相対変位を x 、地動変位を y で表す

と、この系の振動方程式は(2-1)式のようなになる。(2-1)式の両辺を $(m+md\beta^2)$ で除して整理すると(2-2)式が得られる。式中の記号の定義は(2-3)～(2-6)式に示す通りであり、 h , ω , T はそれぞれ系の粘性減衰係数、固有円振動数、固有周期を意味しており、右下添字の c , 0 は機構を装備した場合としない場合を表している。

(2-2)式の最大の特徴は地震入力に γc という係数が掛かる事であり、物理的には、系に作用する地震入力が見かけ上 γc 倍されることを意味する。 γc は(2-5)式で定義されるが、 m と md は常に正の値であるため $|\beta| > 1$ となる機構を用いれば、 $0 < \gamma c < 1$ となり、見かけ上地震入力を低減する効果が得られることになる。

さらに(2-3)式から、本デバイスをを用いた場合、変位増幅部にダンパーを設置することで増幅率 β の自乗倍の低減力を得られることが分かる。したがって建築構造物のように、層間変位が小さい場合でも、通常の減衰機を利用でき、より安全で合理的な制震システムとして構成できる可能性が高い。

1. 技術研究所 構造研究室 2. 日本大学 3. 日本大学大学院

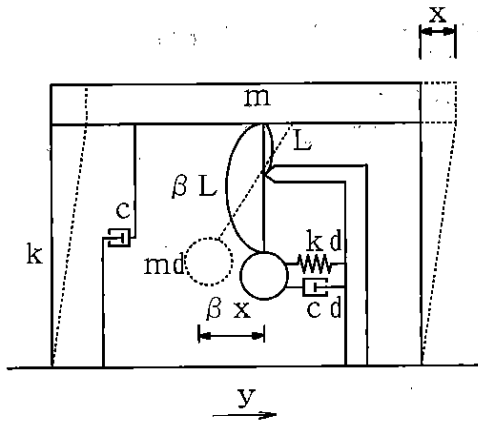


図 2.1 補助質量付きてこ機構のモデル

m 、 c 、 k の md 、 cd 、 kd に対する比を $md/m=3\%$ 、 $cd/c=4\%$ 、 $kd/k=0.5\%$ とした場合について、(2-4)～(2-6)式を用いて検討した結果を図 2.2 に示す。てこ比 β が大きくなるほど、粘性減衰定数比 h/h_0 と固有周期比 T/T_0 は大きくなり、入力低減率 γ_c は小さくなること分かる。すなわち、見かけ上の地震入力の低減や減衰性能の向上を図ることができ、しかもその度合いをてこ比 β で制御できることから、設計者の望む動特性を有する構造物を実現することができる。

$$(m+m_d\beta^2)\ddot{x}+(c+c_d\beta^2)\dot{x}+(k+k_d\beta^2)x=-(m+m_d\beta)y \quad (2-1)$$

$$\ddot{x}+2h_c\omega_c\dot{x}+\omega_c^2x=-r_c\ddot{y} \quad (2-2)$$

$$2h_c\omega_c = \frac{c+c_d\beta^2}{m+m_d\beta^2} = \frac{1+(c_d/c)\beta^2}{1+(m_d/m)\beta^2} \cdot 2h_0\omega_0, \quad 2h_0\omega_0 = \frac{c}{m} \quad (2-3)$$

$$\omega_c^2 = \frac{k+k_d\beta^2}{m+m_d\beta^2} = \frac{1+(k_d/k)\beta^2}{1+(m_d/m)\beta^2} \cdot \omega_0^2, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (2-4)$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1+(m_d/m)\beta}{1+(m_d/m)\beta^2}, \quad (\beta > 0) \quad (2-5a)$$

$$\gamma_{c2} = \frac{1-(m_d/m)\beta}{1+(m_d/m)\beta^2}, \quad (\beta < 0) \quad (2-5b)$$

$$h_c = \frac{1+(c_d/c)\beta^2}{\sqrt{(1+(m_d/m)\beta^2)(1+(k_d/k)\beta^2)}} \cdot h_0 \quad (2-6)$$

$$\frac{c_d}{c} = \frac{1}{\beta^2} \left[\sqrt{(1+(m_d/m)\beta^2)(1+(k_d/k)\beta^2)} - 1 \right] \cdot \frac{h}{h_0} \quad (2-7)$$

3. トグルの機構概要

この制震理論が成立するためには、主に部材の曲げモーメントによる力の伝達を期待するてこ機構では、部材断面が大きくなり、実用化が難しい。そこで増幅機構の一種であるトグル機構を採用することにした。このトグル機構はその部材構成を

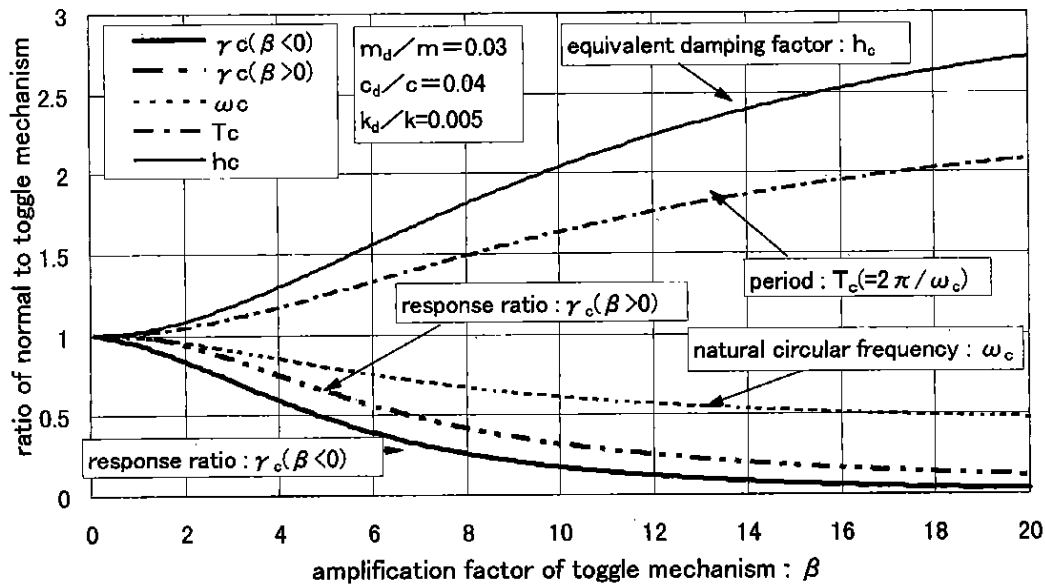


図 2.2 増幅倍率と応答倍率

見ると分かるように2本の腕部材をピン接合していることにより、腕部材に作用する力は軸力のみのものであり、そのため部材断面を小さくすることができる。図3.1に示すように、2本の腕部材のなす角が鈍角なトグル機構をブレースのように架構内に縦型に配置した場合について考える。同図に示すように2本の腕部材を回転可能な支承で上端及び下端の梁に取り付け、2本の腕部材も同様に回転可能な支承で連結する。フレームの変形に対するトグル機構の動きは、図から解るようにフレームが水平方向に変形すると、トグル機構の腕部材の連結部は大きく変形する。この連結部がこの機構の増幅部位となる。さらに、鉛直（上下）方向へあるいは上下左右同時にフレームが変形した場合も、トグル機構はフレームの変形に追従する。つまり、フレームが任意方向に変形した場合でもトグル機構は、増幅部に悪影響を及ぼさず増幅率を得ることが可能である。

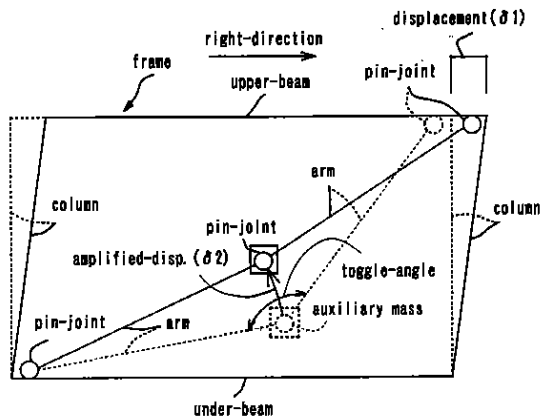


図3.1 トグル機構縦型配置モデル

4. 振動方程式

トグル機構を構造物に組み込んだものは図4.1のようにモデル化できる。式中の m 、 c 、 k 、 m_d 、 c_d 、 k_d 等の記号については2章で示した通りである。 β_x 、 β_y 、 $(\beta_x)'$ 、 $(\beta_y)'$ は次のように定義される。まず β_x 、 β_y は(4-3)式で表現され、それぞれ主構造物の変位 x に対する、補助質量部の円弧運動を水平成分と垂直成分に分けたときの増幅倍率（いわゆるてこ比）で、静止時の両支点の幅 W と高さ H および腕長さ L を定数とし、 x を変数とする無次元の関数で、値は任意に設定

できる。符号は図4.1のように機構を上につけた場合が正（+）で下につけた場合が負（-）となる。また、式中の a 、 b 、 c は(4-5)式の通りである。次に(4-4)式の $(\beta_x)'$ 、 $(\beta_y)'$ であるが、これは(4-3)式をそれぞれ x で偏微分したもので、複合同順である。この値の次元は $[1/L]$ である事から(4-1)式第3項は物理的に $m \nu^2 / \ell$ の形となり、補助質量部の円弧運動により生じる遠心力である事が分かる。(4-1)式第5項は重力加速度 g による影響で、系の剛性を変える働きをする。各式の μ_m 、 μ_c は主構造物に対する機構の質量比、減衰比である。

本機構を構造物に組み込むと、その動特性は非線形となる。なぜなら β_x 、 β_y 、 $(\beta_x)'$ 、 $(\beta_y)'$ が変位 x に依存し、変化するからである。その一例を変形と関連付けて図4.1に示す。ここでは振動実験による模型の諸元から $W=211\text{cm}$ 、 $H=100\text{cm}$ とし、腕長さを $L=119\text{cm}$ 、非線形性の強い領域まで考え、主構造物の変形を $\pm 3.5\text{cm}$ と大きめにした。図4.2から、倍率は変形に伴って無限小・無限大に近づいていく事が分かる。

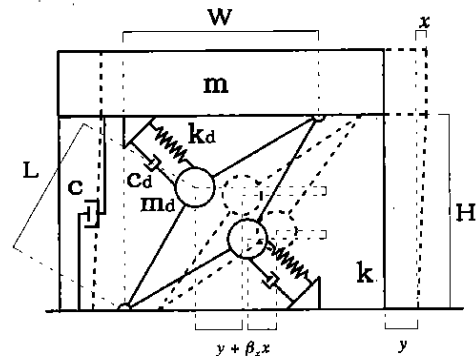


図4.1 補助質量付きてこ機構の数学モデル

$$[m + (\beta_x^2 + \beta_y^2)m_d]\ddot{x} + [c + (\beta_x^2 + \beta_y^2)c_d]\dot{x} + [(\beta_x)' \cdot \beta_x + (\beta_y)' \cdot \beta_y]m_d \dot{x}^2 + [k + (\beta_x^2 + \beta_y^2)k_d]x + \beta_y m_d g = -[m + \beta_x m_d]\ddot{y} \quad (4-1)$$

$$\ddot{x} + 2h_c \omega_c \dot{x} + \omega_c^2 x = -\gamma_c \ddot{y} \quad (4-2)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_x &= \left(\frac{1}{2} \pm \frac{2L^2 Ha}{b^3 c} \right) \\ \beta_y &= \pm \left(\frac{c}{2b} - \frac{2L^2 a^2}{b^3 c} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

$$\left. \begin{aligned} (\beta_x) &= \mp \frac{2L^2 H}{b^3 c} \left(1 - \frac{3a^2}{b^2} + \frac{a^2}{c^2} \right) \\ (\beta_y) &= \mp \frac{a}{b} \left(\frac{1}{2c} + \frac{c}{2b^2} + \frac{4L^2}{b^2 c} - \frac{6L^2 a^2}{b^4 c} + \frac{2L^2 a^2}{b^2 c^3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

$$a = W + x, \quad b = \sqrt{a^2 + H^2}, \quad c = \sqrt{4L^2 - b^2} \quad (4-5)$$

$$k_d = 0, \quad 2h_0\omega_0 = c/m, \quad \omega_0^2 = k/m$$

$$h_c = \frac{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_c}{\sqrt{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_m}} \cdot h_0 \quad (4-6)$$

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_m}} \cdot \omega_0 \quad (4-7)$$

$$\gamma_c = \frac{1 + \beta_x \mu_m}{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_m} \quad (4-8)$$

$$\mu_m = m_d / m, \quad \mu_c = c_d / c \quad (4-9)$$

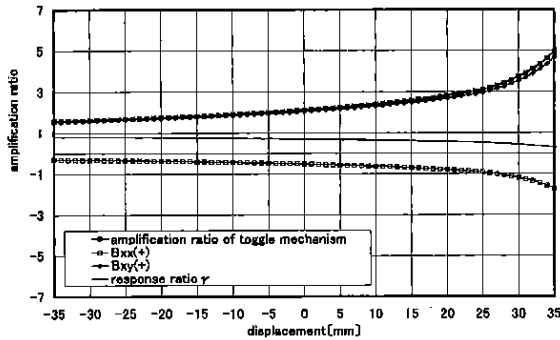


図 4.2 変形量に対する増幅率

5. 実験の概要

トグル機構の有効性を把握するため模型による振動実験を行った。試験体は減衰装置および補助質量をもつトグル機構を組み込んだ一層フレームとする。この試験体を1次元振動台に設置し、正弦波による定常波加振実験、地震波入力実験を行った。

試験体は図5.1に示すように4本の柱(板ばね)でフレームを構成し、H鋼等により一層の天井床部分の面内剛性を強固に保つと共に試験体の質量としている。柱として用いる板ばねは厚さ11mm、幅100mm、取付け高さ1000mmの焼入れ鋼を使

用している。諸元は表5.1に示すとおりである。ここで、LとWとHは図4.1のL、W、Hに対応している。トグル機構の腕部材のフレーム取付部および連結部に当たる回転支承はトグル機構の設置、組立てに支障をきたさないよう一方方向ピンとユニバーサルジョイントとし、また、解析上問題となる摩擦等の影響が出ないようにしている。

図5.1に示す試験体の増幅率は、図4.2に示すようにフレームの変形量が約2cm以内であると増幅率は平均2.5倍程度で、ほぼリニアな性状を示すような設計としている。

表 5.1 試験体諸元

L[cm]	W[cm]	H[cm]	ω_0 [rad]	h_0	μ_m	μ_c
119	211	100	8	0.005	0.02	5

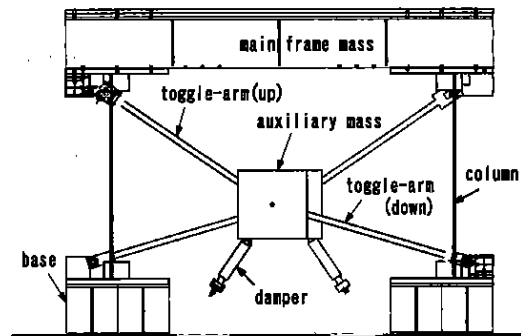


図 5.1 試験体概要

6. 振動実験結果

6.1 正弦波入力加振実験

入力の変位振幅を5~10mmで振動数0.1~10Hzまでを0.1Hz刻みで正弦波による定常波加振実験を行い加速度応答倍率を求め、トグル機構の伝達特性の把握を行った。

加速度応答倍率は振動台加速度とフレーム頂部の応答加速度の倍率としている。

図6.1~図6.2に示すようにダンパーを油圧ダンパー、ゴムダンパーとし、1質点系の調和振動に対する定常振動の共振曲線と実験結果を比較した。

油圧ダンパーを付加した場合は、加速度応答倍率は共振時においても1.5倍と小さく、制震効

果が期待できると考えられる。1質点系の加速度応答倍率曲線より減衰定数はほぼ40%程度と推定される。

ゴムダンパーを付加した場合は、油圧ダンパーに比べ加速度応答倍率は大きくなっている。1質点系の加速度応答倍率曲線より減衰定数はほぼ10%程度と推定される。

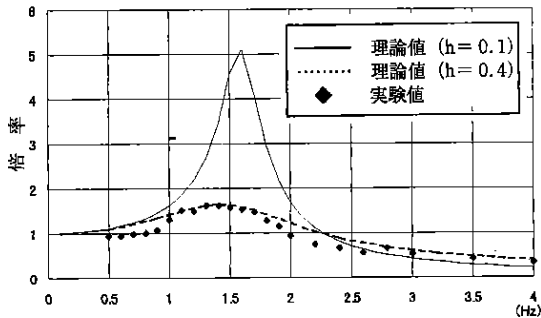


図 6.1 加速度応答倍率 (油圧ダンパー)

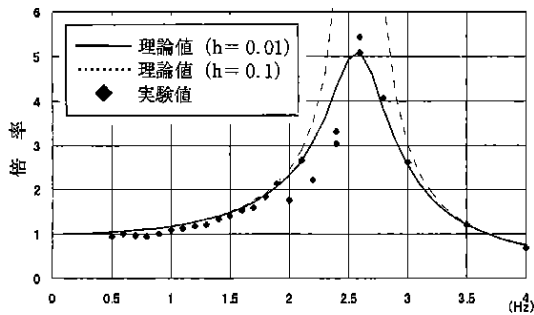


図 6.2 加速度応答倍率 (ゴムダンパー)

6.2 地震波入力加振実験

地震波入力による加振実験によりトグル機構の制震効果の把握を行った。使用した入力地震波は、神戸海洋気象台で記録されたNS成分³⁾(以下JMA神戸NS波と略す)、適宜最大加速度を調整して入力した。

図 6.3 に一例として油圧ダンパーを用いた場合の入力加速度と応答加速度との比較を示す。

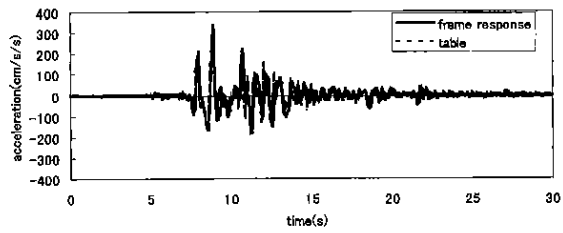


図 6.3 入力加速度と応答加速度の比較

表 6.1 にJMA神戸NS波(実記録の約30%)の場合を示す。これより、ダンパーを付加した場合は、応答結果が小さくなり、制震効果が期待できることがわかる。

表 6.1 最大応答値の比較

	最大加速度 (cm/s^2)		最大変位 (cm)		応答倍率比較 (架構/振動台)	
	振動台	架構	振動台	架構	最大加速度	最大変位
油圧ダンパー	251.7	343.3	7.6	2.85	1.36	0.38
ゴムダンパー	269.5	395.1	7.57	1.21	1.47	0.18

油圧ダンパーの最大加速度倍率は、入力地震波の最大加速度が200～300gal程度のとき1.0～1.5倍程度となっている。ダンパーがない場合は2.5倍程度であり、油圧ダンパーにより制震効果が期待できることがわかる。

ゴムダンパーの最大加速度倍率は、入力地震波の最大加速度が200～300gal程度のとき1.6倍程度となっており、油圧ダンパーに比べると、最大加速度倍率はやや大きくなっている。

またダンパーの無い補助質量のみの効果についてみると図 6.4 に増幅部位(トグル部)とフレーム頂部の変位波形を示す。

トグル機構の増幅率は理論通りフレーム頂部の変形に対して設計時に設定した約2.0～3.0倍となっている。フレーム頂部とトグルの増幅部の時刻歴波形はほぼ相似な形をしており、今回の実験で比較的線形な範囲で動的な場合においても増幅効果は認められた。

なお、ダンパーを付けない場合、フレームのみ(機構なし)のとき、JMA神戸NS波の加速度振幅約5%の入力に対するフレーム頂部の最大応答加速度は約2.6倍となっているのに対して補助質量を付けた場合、主架構の質量に対して補助質量

を4.0%で最大応答加速度は約2.3倍、8.0%で約1.8倍と入力低減の効果が表れている。

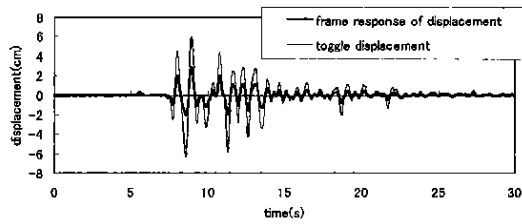


図 6.4 トグル部とフレーム頂部の変位波形

7. 解析値と実験値の比較

実験結果と解析結果を比較したのが図 7.1 である。両者はよく一致しており、式 (4-1) を用いることでトグル機構を構造物に設置した場合の応答値を予測できることがわかった。

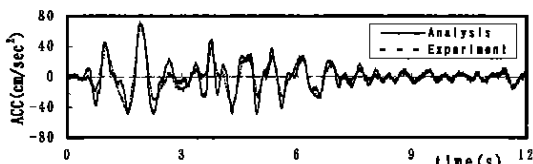


図 7.1 解析値と実験値の加速度比較

8. まとめ

増幅機構を用いた制震装置の開発において、補助質量付きこの機構が有効であることがわかり、その具体的装置としてトグル機構を考案した。

今回は、一質点系モデルにおいてトグル機構の対地震性能について解析及び実験を通じて、その効果の検討を行った。補助質量付きトグル機構は、構造物の相対変位が生じる部位に効率よく配置することができれば、地震入力を低減し建物に大きな減衰性能を付与することが可能であり、対地震安全性向上に有効な構造システムであることがわかった。現在、幾何学的非線形におけるハードスプリングを考慮した設計等について検討中である。

参考文献

- 1) 石丸辰治、他 2 名：地震応答を低減するためのモード制御法、構造工学論文集 Vol. 36 B, 1990
- 2) 石丸辰治、他：増幅機構を用いた制震構造システムに関する基礎的研究(その 1～その 3)、日本建築学会学術講演梗概集 (関東)、1997
- 3) 気象庁：1995 年兵庫県南部地震気象庁 87 型電磁式強震計記録、1995. 2
- 4) 石丸辰治：構造物の動的解析、建築技術
- 5) 機構学のアプローチ：大河出版
- 6) 吉田正、松森徳衛、他：工学者のための変分学入門、現代工学社