

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 基本原理)

正会員 ○久保田雅春*¹
正会員 秦 一平*²
正会員 石丸 辰治*³
正会員 新谷 隆弘*⁴

§1-1 序

1995年の兵庫県南部沖地震の被害を教訓として、建築構造物の地震に対する構造安全性が大きな社会問題となっており、これを反映して、積層ゴムを用いた基礎絶縁方式による免震構造が、急速に普及しつつある。免震構造は、建物の基礎部で地震による入力エネルギーの大部分を消費する構造であるため上部構造の設計自由度は高い。しかし、免震構造は、軟弱な地盤、大きな塔状比、高層建築物等には適用が困難であるという欠点がある。一方、既往の制震構造は風対策が主であり地震の対策としては少なく、現在、免震構造の適用が困難な建物に対しても高い対地震構造安全性(対震性)を実現できる構造システムの開発が望まれている。本研究の目的は、デバイスとして増幅機構を用いる事で、より多様な構造物に対して適用可能な制震システムを実現しうるデバイスの開発を目的としたものである。

§1-2 補助質量付き梘子機構

開発しようとする制震デバイスは、建物の剛性を上げず変形を押さえ、大きな減衰を付加しようとするものである。その基本的な原理を1自由度系を用いて説明する。図1-1に示すシステムは変位拡大機構として、補助質量付き梘子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、 m_d 、 c_d 、 k_d はそれぞれ変位拡大部に取り付けられた補助質量、粘性減衰係数、バネ剛性である。 β は梘子比であり図1-1に示すように補助機構の配置により正負両方の値を得る。

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(1-1)式のようになる。(1-1)式の両辺を $(m+m_d\beta^2)$ で除して整理すると(1-2-1)式が得られる。式中の記号の定義は(1-2-2)~(1-2-4)式に示す通りであり、 h 、 ω_c 、 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。

(1-2-1)式の特徴は地震入力 \ddot{y} に γ_c 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 γ_c 倍されることを意味する。 γ_c は(1-2-4)式で定義されるが、 m と m_d 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。

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

$$\ddot{x} + 2h_c\omega_c\dot{x} + \omega_c^2x = -\gamma_c\ddot{y} \quad (1-2-1)$$

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

$$2h_0\omega_0 = \frac{c}{m} \quad (1-2-2)$$

$$\omega_c^2 = \frac{k+k_d\beta^2}{m+m_d\beta^2} = \frac{1+(k_d/k)\beta^2}{1+(m_d/m)\beta^2} \cdot \omega_0^2 \quad (1-2-3)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (1-2-3)$$

$$\gamma_c = \frac{m+(m_d/m)\beta}{m+(m_d/m)\beta^2} \quad (1-2-4)$$

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

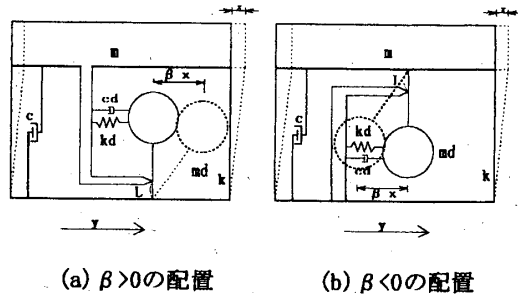


図1-1 増幅機構の基本モデル

また、(1-2-3)式を見ると、 k_d と m_d の値デバイスを付けた場合の系の固有円振動数 ω_d の調整が可能である事が分かるが、デバイスを取り付けることにより、系の固有円振動数を低下させる($\omega_d < \omega_0$ となる)ような設計も可能である点为本デバイスの特徴である。

すなわち本デバイスを用いれば、前述した地震入力の低減効果と合わせて、構造物の変形 x と加速度 $\ddot{x}+\ddot{y}$ とを同時に低減できる可能性があると思われる。

さらに(1-2-2)式から、本デバイスを用いた場合、変位増幅部にダンパーを設置することで梘子比 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、層間の変位や速度が小さい場合にも、より減衰力を高めるように減衰器を利用でき、合理的な制震システムとして構成できる可能性が高いといえる。

補助質量付き梘子機構をデバイスとして用いれば上述のような好ましい制震性能を得られることを以下に示す。

m_d, c_d, k_d の m, c, k に対する比を $m_d/m=3\%$ 、 $c_d/c=4\%$ 、 $k_d/k=0.5\%$ とした場合について、(1-2-3)~(1-2-5)式を用いて検討した。結果を図1-2に示すが、梘子比 β が大きくなるほど、粘性減衰定数比 h_c/h_0 と固有周期比 T_c/T_0 は大きくなり、入力低減率 γ_c は小さくなる事が分かる。すなわち、長周期化と同時に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梘子比 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できる可能性が示されたと言える。

しかし、この制震理論が成立するためには、梘子の腕や支点を構成する部材に、変形が無視できる程度の高い剛性を備えている事が要求される。この為には、主に部材の曲げモーメントによる力の伝達を期待する梘子機構では、部材断面が大きくなり、制震機構として使いづらいものになってしまうという問題が生じる。

§1-3 トグル機構の提案

増幅機構として梘子機構を用いた場合、上述したように、剛性を確保するためには大きな部材断面が要求され、構造物への実装という点から問題が発生する可能性がある。これを解決する方法としては、軸力により力を伝達する部材で構成された増幅機構を利用する事が考えられる。なぜならば、曲げモーメントによる力の伝達では、部材断面の端部しか有効に働かないのに比べ、軸力による伝達では部材の全断面が力の伝達に寄与できるからである。

これを実現する機構として、図1-3に示すトグル機構を提案する。トグル機構は2本のリンクを結んだだけの単純なものであるが、A点の変位がB点に伝わる時、変位は大きく増幅されるシステムであり、当然、B点に作用する力は大きく増幅されてA点に伝わるという特性がある。したがって、C点を基礎部に固定し、A点を構造物につないでB点に補助質量やダンパーを設置すれば、上述した補助質量付き梘子機構と同様な性能を発揮できる可能性がある。

§1-4 まとめ

構造物の対地震構造安全性を向上させるためのデバイスとして増幅機構を用いることの長所を補助質量付き梘子機構を例として示した。また、機構の剛性をコンパクトな部材で確保する事が難しいという梘子機構の欠点を改善する方法としてトグル機構を提案した。

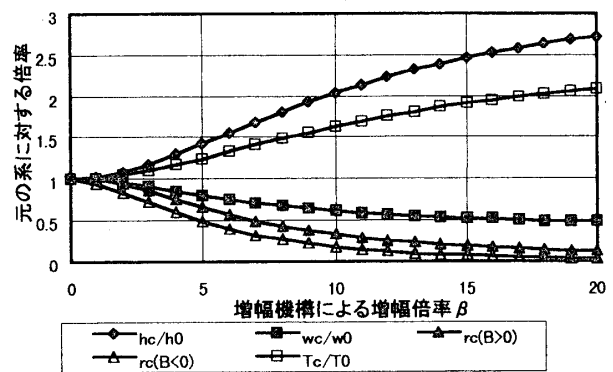


図1-2 増幅倍率と入力低減率

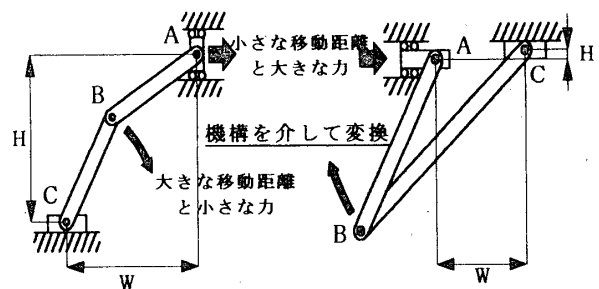


図1-3 倍力機構(トグル機構)の略図

《参考文献》

- 1) 石丸辰治、新谷隆弘、浜辺淳：「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.36B、1990
- 2) 芦葉清三郎：「機械運動機構(13章 倍力機構)」

*1 飛鳥建設(株) Tobishima Corporation
 *2 日本大学大学院博士前期課程 Graduate Student, Master Course, Graduate School of Nihon University
 *3 日本大学理工学部 教授・工博 professor, College of Science and Technology, Nihon University
 *4 日本大学理工学部 助手 Research Associate, College of Science and Technology, Nihon University