

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3 基本的な制震性能の検討)

正会員 ○ 本間 剛*¹ 同 久保田雅春*²
同 秦 一平*³ 同 石丸 辰治*⁴
同 新谷 隆弘*⁵ 同 帆刈 大慈*⁶

§ 3-1 序

提案する補助質量付きトグル機構は、同名論文(その1)で述べた増幅機構による効果的な制震システムを実現するためのものである。

そこで本報では、提案する機構を設置した一自由度系の数学モデルを対象に基本的な性質を把握し、地震応答解析を行うことにより、その制震効果を検討する。

§ 3-2 振動方程式

ここでは、機構を設置した構造物を図3-1のようにモデル化する(鋭角のトグル機構を用いる場合でも理論展開は全く同一である)。

その基本的な性質は主構造物の地盤に対する相対変位を d 、地動変位を d_0 とすると、一自由度系の振動方程式は(3-1)のようになる。この式の両辺を質量項で除し、粘性減衰定数 h_c 、固有円振動数 ω_c 、入力加速度 \ddot{d}_0 の係数 γ_c を用いて書き直すと、(3-2)式が得られる。添え字の $c, 0$ は機構を設置した場合としない場合を意味する。また、 m, c, k は主構造物の質量、減衰係数、水平剛性であり、 m_d, c_d, k_d は補助質量、機構の減衰係数、機構のバネ剛性である。

式中の β_x, β_y 及び $(\beta_x)', (\beta_y)'$ は次のように説明できる。 β_x, β_y は(3-3)式で表され、それぞれ主構造物の変位 x に対する、補助質量部の増幅率(いわゆる梃子比)を水平成分と垂直成分に分けたものである。符号は図3-1(a)のように機構を設置した場合は負となり、(b)のように設置した場合は正となる。

$(\beta_x)', (\beta_y)'$ は(3-3)式をそれぞれ x で偏微分したもので、(3-4)式のように表現され、複号同順である。これを含む(3-1)式の第3項は、補助質量の円弧運動により生じる遠心力による影響である。また、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。

減衰定数 h_c および固有円振動数 ω_c は、遠心力と重力の影響がなく $k_d=0$ とすれば(3-6)式と(3-7)式のようになり、(3-8)式の γ_c は1以下に設計可能な値であるため、入力低減率と定義する。これらの性質は後の図3-2で、遠心力と重力が系に及ぼす影響については図3-3で説明する。

また、式中の μ_m, μ_c は主構造物に対する機構の質量比、減衰係数比である。

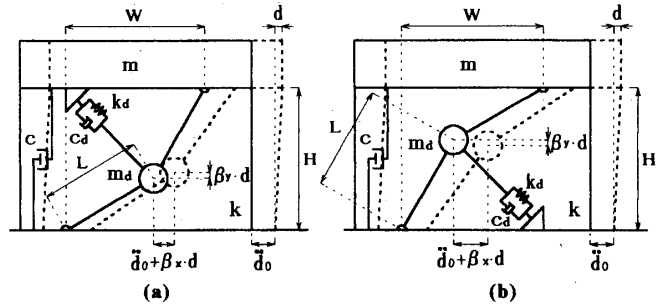


図3-1 提案機構の数学モデル

$$[m + (\beta_x^2 + \beta_y^2)m_d]\ddot{d} + [c + (\beta_x^2 + \beta_y^2)c_d]\dot{d} + [(\beta_x)' \cdot \beta_x + (\beta_y)' \cdot \beta_y]m_d \dot{d}^2 + [k + (\beta_x^2 + \beta_y^2)k_d]d + \beta_y m_d g = -[m + \beta_x m_d]\ddot{d}_0 \quad (3-1)$$

$$\ddot{d} + 2h_c \omega_c \dot{d} + \omega_c^2 d = -\gamma_c \ddot{d}_0 \quad (3-2)$$

$$\beta_x = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{2L^2 H a}{b^3 c} \right), \quad \beta_y = \pm \left(\frac{c}{2b} - \frac{2L^2 a^2}{b^3 c} \right) \quad (3-3)$$

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

$$a = W + d, \quad b = \sqrt{a^2 + H^2}, \quad c = \sqrt{4L^2 - b^2} \quad (3-5)$$

$$h_c = \frac{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_c}{\sqrt{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_m}} \cdot h_0 \quad (3-6)$$

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_m}} \cdot \omega_0 \quad (3-7)$$

$$\gamma_c = \frac{1 + \beta_x \mu_m}{1 + (\beta_x^2 + \beta_y^2)\mu_m} \quad (3-8)$$

$$\mu_m = m_d / m, \quad \mu_c = c_d / c \quad (3-9)$$

§ 3-3 幾何学的非線形性

これまで、機構を構造物に組み込むと、その動特性は非線形となることを説明したが、これは、前報のトグル機構の非線形性によるものである。そのパラメータ変化の一例を変形と関連付けて図3-2に示す。ここでは図3-1(a)の機構を用い、その構成は実際の構造物を意識して $W=6m, H=2.5m, L=3.265m$ とし、 μ_m と μ_c は両方とも0.1に設定、性質を明示するために非線形性の強い領域を選択して、構造物の変形も $\pm 3cm$ と大

きめにした。図中の■と●はそれぞれ増幅率 β_x と β_y で、□は減衰定数倍率 h_c/h_0 、○は固有円振動数倍率 ω_c/ω_0 、◇は入力低減率 γ_c である。図から■と●は変形の増大とともに無限大に近づいていくことが分かる。そのため、各パラメータは静止時で既に $h_c/h_0=17$ 、 $\omega_c/\omega_0=0.6$ 、 $\gamma_c=0.3$ となっているが、変形の増大に伴い各値は更に増幅または低減することから、構造物の応答を小さくできる可能性がある。

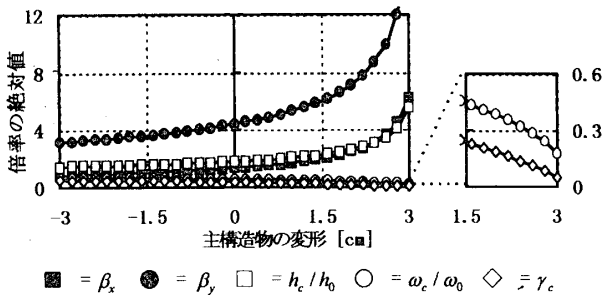


図 3-2 幾何学的非線形性

§ 3-4 解析手法及びシミュレーション

前述のように、提案機構を設置した系のパラメータは変形と速度に依存する形で時々刻々変化するため、応答計算の各ステップで収束計算を行い、加速度、速度、変位の各応答値について相対誤差が 1.0×10^{-6} 以下となるようにした。

ここでは、図 3-2 と同じ条件で構成した機構を構造物に左右対称に 2 つ設置し、それについて(3-1)式をもとに非減衰自由振動のシミュレーションを行い、動的な力の釣り合い関係を抽出したものを図 3-3 に示す。補助質量部に働く遠心力により加振され、同様に補助質量部に働く重力により系の剛性がハードニングとなるが、補助質量が増幅率(図 3-2 の β_x 、 β_y)の自乗倍の質量効果を発揮し、慣性力の殆どを受け持つことにより、結果的に構造物の応答値は低減されるのである。

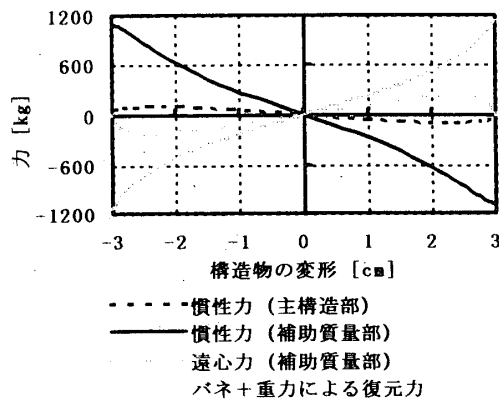


図 3-3 動的な力の釣り合い関係

§ 3-5 提案機構による減衰効果

$h_0=0.03$ 、 $\omega_0=10$ である構造物に、 $W=6m$ 、 $H=2.5m$ 、 $L=3.6m$ 、 $\mu_c=1.0$ とした機構を左右対称に設置したものと、機構を設置せず $h_0=0.1$ とした構造物の応答計算結果を比較したものを図 3-4 に示す。

両者がほとんど一致していることから、提案機構を介してダンパーを設置すれば、内部減衰係数と同程度の小さな減衰係数しかもたないダンパーでも構造物に大きな減衰性能を付与しうることが分かる。

このような大きな減衰が簡単に得られるのは、変形拡大部にダンパーを設置しているため、ダンパーに層間速度の何倍もの大きな速度が生じるためである。よって、本提案機構を用いることにより、様々なダンパーの性能を有効に引き出すことができ、効率のよいコンパクトな減衰システムを構成できると言えよう。

解析に用いた入力加速度波形は JMA KOBE N-S 成分(Max=818[gal])である。

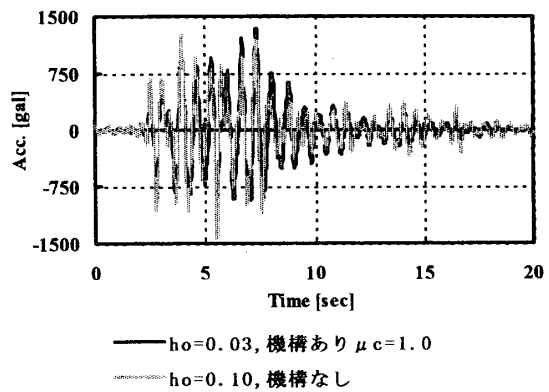


図 3-4 機構を介した減衰効果

§ 3-6 まとめ

コンパクトで設計自由度が高く、なおかつ構造物に高い制震性能を付与しうる補助質量付きトグル機構を設置した系の振動方程式を誘導することにより、その基本的な性質を把握した。また、それをもとに地震応答解析を行い、効果的な制震効果が得られる可能性があることを示した。

《参考文献》

- 1) 本間剛, 帆刈大慈: 「倍力機構を用いた制振デバイスに関する基礎的研究」、日本建築学会卒業論文最優秀賞投稿論文、1997. 3. 31
- 2) 一柳正和 訳: Cornelius Lanczos 「解析力学と変分原理」、日刊工業新聞社

*1 日建ハウジングシステム
*2 飛鳥建設
*3 日本大学大学院博士前期課程
*4 日本大学理工学部 教授・工博
*5 日本大学理工学部 助手

Technical Department Nikken-housing system.
Tobishima Corporation.
Graduate Student, Master Course, Graduate School of Nihon University.
Professor, College of Science and Technology, Nihon University, Dr. Eng.
Research Associate, College of Science and Technology, Nihon University.

*6 大成建設 Tobishima Corporation.