

エネルギー自己給電式免震装置の構造系と制御系の設計

鹿児島大学 学生会員 堀切 嘉月
鹿児島大学 正会員 三浦 奈々子

1. 序論

東北地方太平洋沖地震では大地震に対する対策の必要性が浮き彫りとなった。振動低減性能の優れた地震対策としてアクティブ振動制御が考えられる。しかし、アクティブ制御を行う場合にはその消費エネルギーが問題となることが多い。停電により外部電源が断たれた場合に所望の応答低減ができないことはアクティブ制御導入の阻害要因の一つに挙げられる。実際、2011年東北地方太平洋沖地震では関東地方で大規模な停電が起き、制御装置が機能しなかった事例が報告されている^[1]。このエネルギーに関する問題を本研究では図1に示すような、振動からのエネルギー回生の考え方をを用いて解決する。振動のエネルギーは通常、ダンパなどで熱となり散逸する。この散逸させていたエネルギーを電気エネルギーとして取り出し（回生）、再び制振装置の動力源として用いる^[2]。振動制御を行いつつ、エネルギー回生を行うには、制御と回生に適した構造系が存在すると考えられる。

本研究では停電時にも稼動可能な自己給電式のアクティブ制御の実現を目指し、装置の構造系と制御系の設計方法とその性能検証を行う。

2. 解析対象

解析対象として図2に示すような、ばね、ダンパおよび制振装置からなるアクティブ免震床を考える。制御力は設置床面と免震床の間に働くものとする、運動方程式は式(1)のように表される。

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

ここで、 m は免震床と積載物の質量の和（775 kg^[2]）、 c は減衰係数、 k は剛性係数、 x は免震床の設置面からの相対変位、 x_g は設置床面の絶対変位、 u は制御力である。

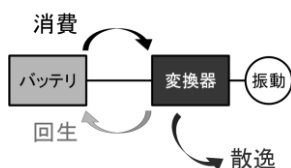


図1 振動制御におけるエネルギーの消費と回生

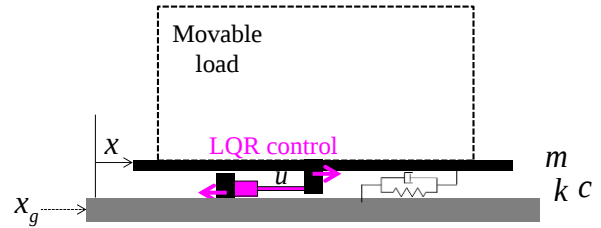


図2 解析モデル

3. 制御系設計

本研究では最適レギュレータ (LQR: Linear-Quadratic Regulator) により振動制御とエネルギーの回生を行う。いま、免震床の絶対加速度応答 $\ddot{x}_g + \ddot{x}$ と変位応答 x の低減を目的（制御量）として最適レギュレータの評価関数を次式のように2次形式で表す。

$$J = \int_0^\infty \{x^2 + R_2(\ddot{x}_g + \ddot{x})^2 + R_1u^2\} dt \quad (2)$$

ここで R_1 と R_2 は2つの制御量項と制御力項の評価関数への寄与度を調整するための重み係数である。

4. 構造系と制御系の同時最適化

振動制御とエネルギー回生に適した構造系と制御系を決定するために、構造系のパラメータ c, k と制御系のパラメータ R_1, R_2 の同時最適化を遺伝的アルゴリズムにより行う。ここで $R_1 = S_1, R_2 = S_2, c = S_3, k = S_4$ とし、遺伝子として $S_1 \sim S_4$ を設定する。ここで変数の範囲は $10^{-10} \leq S_1 \leq 10^{-8}, 10^{-5} \leq S_2 \leq 10^{-3}, 36.5 \leq S_3 \leq 121.7, 1.9 \leq S_4 \leq 7.6$ とする。また、個体数を30、世代数を100、交叉確率を80%、突然変異確率を35%^[4]とする。

いま、入力外乱 $\ddot{x}_g$ として平成12年建設省告示1461号における稀に起こる地震動（以降、告示波）10波を用い、消費エネルギーが負の値をとる（回生）条件の下で、絶対加速度応答 $\ddot{x}_g + \ddot{x}$ を最小化することを考え、適応度としては式(3)を設定する。

$$f = \frac{100}{\max |\ddot{x}_g + \ddot{x}|} \quad (3)$$

なお、エネルギーが正の値をとる場合は適応度の値を0.01とする。ここで消費エネルギーは式(4)で、回生エネルギーは式(5)で与える。

$$E_+ = \int_0^t u \dot{x} d\tau \quad u \dot{x} \geq 0 \quad (4)$$

$$E_- = \int_0^t u \dot{x} d\tau \quad u \dot{x} < 0 \quad (5)$$

E_- すべてが回生エネルギーとして取り出せるわけではないが、本解析では回生率を 100 % とした場合について示している。実際の回生率については今後検討が必要である。

5. 検証結果

遺伝的アルゴリズムにより決定したパラメータ ($R_1 = 2.96 \times 10^{-9}$, $R_2 = 7.78 \times 10^{-5}$, $c = 2.45 \times 10^4$, $k = 1.99 \times 10^3$) を用いて時刻歴応答解析を行った結果を表 1 に示す。入力外乱 $\ddot{x}_g$ としては告示波を用いている。

表 1 より、絶対加速度について、入力 0.804 m/s^2 に対し、制御時は 0.679 m/s^2 となり 84.5 % に減少していることが確認できる。また、変位についても 3 mm 程度と小さく、クリアランスオーバーの危険がないことを確認した。

エネルギーについて、入力終了時の値を表 1 に示す。これより、消費エネルギー 1.044 J に対し、回生エネルギーは 1.043 J となり、入力終了時には概ね初期のバッテリー状態に回復していることが確認できた。また、エネルギーの時刻歴を

図 3 に示す。これより、どの時刻においても概ね 0 J 以下の値をとっており、エネルギー自己給電式で稼働できることが確認できた。

6. 結論

本研究では停電時にも稼働可能な自己給電式のアクティブ制御の実現を目指し、免震装置の構造系と制御系を遺伝的アルゴリズムを用いて設計する方法を示し、その性能検証を行った。提案装置は加速度の低減を回生したエネルギーにより行い、地震終了時には概ね初期のバッテリー状態に回復できることを示した。

本装置は今後、アクティブ制御によるエネルギー消費をせず、回生のみを行うセミアクティブ制御とすることで、発電装置としての用途も考えられる。

表 1 応答低減効果とエネルギー

	入力	制御
絶対加速度	0.804 m/s ²	0.679 m/s ²
変位		0.003 m
消費エネルギー		1.044 J
回生エネルギー		1.043 J

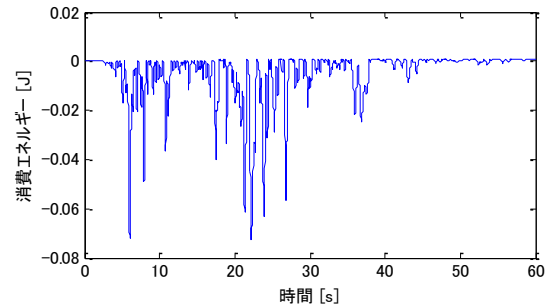


図 3 エネルギーの消費と回生

謝辞

本研究は科学研究費補助金（研究活動スタート支援 No. 26889049）によった。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Nakajima, K., Giron, N., Kohiyama, M., Watanabe, K., Yoshida, M., Yamanaka, M., Inaba, S. and Yoshida, O., Seismic Response Analysis of A Semi-Active-Controlled Base-Isolated Building During The 2011 Great East Japan Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, No. 138 (2012), pp. 1025-1036.
- [2] 須田義大, 中代重幸, 中野公彦, 回生された振動エネルギーを利用するアクティブ制御に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 613 (1997), pp. 3038-3044.
- [3] 原田智也, 荒川利治, 建物の床応答性状を考慮したサーバーラックの振動特性評価, Dynamics & Design Conference 2009, Paper No. 501 (2009), pp. 1-6.
- [4] 三浦奈々子, 高橋正樹, セルフパワード免震装置における制御手法の併用, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Paper No. 3I4-5 (2014), pp. 1-4