

地盤-構造物系の動的相互作用を考慮した振動制御

京都大学防災研究所 正 員 土岐 憲三

京都大学防災研究所 正 員 佐藤 忠信

京都大学防災研究所 学生員 ○松島 秀典

1.はじめに 地震等の不規則外力に対する構造物の応答を制御するために、地盤-構造物系の動的相互作用を考慮した制御則を提案し、その適用例を示すと共に計算時間の短縮化に用いた手法の検証を行った。

2.動的相互作用を考慮した最適制御の定式化 複素剛性 $k^*(\omega)$ を用いることにより、地盤-構造物系の動的相互作用特性を表現した。複素剛性を用いた運動方程式は、次式のように表される。

ここで、 $k^*(t)$ は $k^*(\omega)$ のフーリエ逆変換である。

$$m\ddot{x}(t) + c_0\dot{x}(t) + k_0x(t) = -m\ddot{X}_0(t) - \int_{-\infty}^{\infty} k^*(t-\tau)k_0x(\tau)d\tau \quad (1)$$

式(1)の積分項は $(-\infty, \infty)$ の範囲の積分となり、解くことは不可能となる。そこでヒルバート変換を用いることによって $k^*(\omega)$ の実部から虚部を求め、因果性を有するという条件を満たすように $k^*(t)$ を決定する。次に、ヒルバート変換を行って解析可能となった運動方程式を示す。

$$m\ddot{x}(t) + c_0\dot{x}(t) + k_0x(t) = -m\ddot{X}_0(t) - \int_0^t k^*(t-\tau)k_0x(\tau)d\tau \quad (2)$$

本研究では数値ヒルバート変換を用いた。従来の公式を用いたヒルバート変換では複素剛性の実数部が定式化されていなければならなかったが数値ヒルバート変換を用いることにより、実数部が定式化されていない場合でもヒル

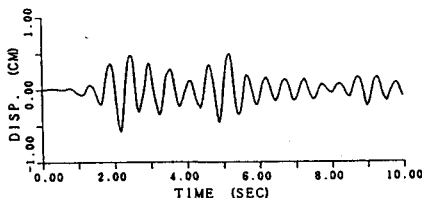


図1

バート変換が行えるようになり、より汎用性の広いものとなった。図1は、公式によりヒルバート変換を行った場合と数値ヒルバート変換を行った場合の基礎の応答の時刻歴曲線を重ね合わせたものである。2つの曲線は、振幅、位相、全く同一であり数値ヒルバート変換を用いてもなんら問題の無いと判断できる。なお、解析のモデルとしては図2に示すように、上部構造物と基礎を4質点系の集中質量系とし、変位はSwayのみを考えた。また上部構造物の復元力特性を線形とした。質点No. は上部から順に1から4である。

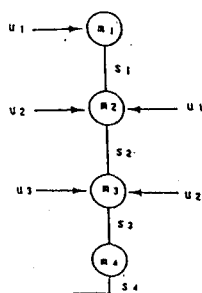


図2

3.地盤の種類による動的相互作用の影響の比較 図3の左側は剛な地盤に、右側は弱性地盤に構造物が支

えられている場合の質点1の応答を示す。図4は地盤バネを線形及び複素バネとした場合に得られる質点1の変位の時刻歴曲線2つを重ね合わせたものであり、2つの曲線の間に相違がみられる。

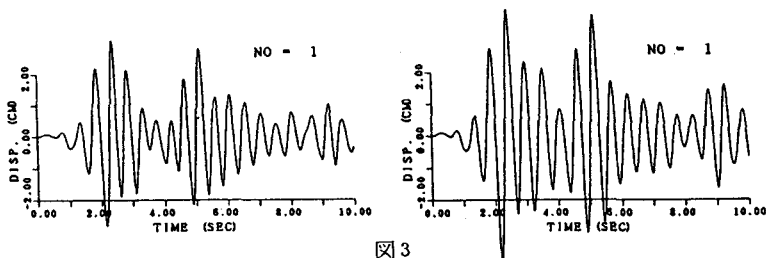


図3

4. 重みの検討 Yang¹⁾等による現時刻の情報のみで制御を行う

ための時間依存型評価関数に、構造物に入力されるエネルギーを考慮した評価関数は次式のように表される²⁾。

$$J(t) = z^T(t)Q_1z(t) + u^T(t)Ru(t) + \alpha\{z^T(t)Q_2z(t) + z^T(t)W_2\ddot{X}_0(t) + E(t - \Delta t)\} \quad (3)$$

$E(t - \Delta t)$ は全エネルギー量における現時刻に関係のない項の総和を、 α は評価関数中でのエネルギー量に対する、 Q は状態量則ち変位に対する、 R は制御量に対する各々重みを表す。この評価関数を最小にすることにより最適制御を行う。図5は、 Q を1000と固定した時の、 α , R 各重みの変化と最大変位及び最大制御力の関係を表すグラフである。横軸に α/R を、

左側の縦軸はグラフに最大変位を右側グラフは最大制御力を示している。グラフより、 Q/R がどのような比であっても α/R を $10^0 \sim 10^1$ とした場合に最大変位は抑えられ、また最大制御力も小さなものとなっていることが読み取れる。よって α/R が $10^0 \sim 10^1$ の時、最も効率の良い制御が行えることがわかる。

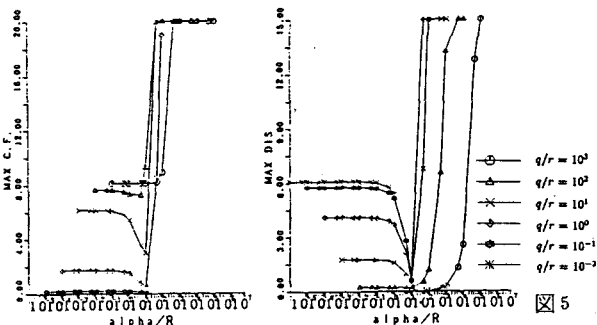


図5

5. 計算時間の短縮化 式(2)の運動方程式には、合成積の項が含まれており制御時間が長くなればなる程計算時間も長くなるという問題がある。また、構造物に加わる力は不定要因なものが多く、積分開始時刻を決定するのは困難なことも多い。そこで、これらの問題点を克服するため、次式を提案する。

$$m\ddot{x}(t) + c_0\dot{x}(t) + k_0x(t) = -m\ddot{X}_0(t) - \int_{t-t_0}^t k^*(t-t_0-\tau)x(\tau)d\tau \quad (4)$$

ただし、 t_0 は定数で積分時間を表す。式(2)を用いた従来の手法による解析結果を厳密解とし、提案式を用いた解析結果の検証を行うため、誤差のばらつきを表す指標として右のような値 b を用いた結果を図6に示す。

ここで、 σ_0^2 : 厳密解より求められた全計算時間における応答変位の分散、 σ_{cr}^2 : 提案式を用いて求められた変位と厳密解により求められた変位の差の分散である。

図6のグラフは、縦軸に b を横軸に積分時間を表したグラフである。図より、どのような重みの比であっても、積分時間が約3秒から5秒で誤差は収束しており、また、その値も非常に小さいものであることから、提案式が充分従来の手法に代用できると考えられる。

なお今回、微分方程式を解く際に用いられる推移行列に変わりバーゼ近似³⁾を用いたが、従来の手法及びバーゼ近似と提案式による手法のcpu-timeは前者が3:21、後者が2:14であった。

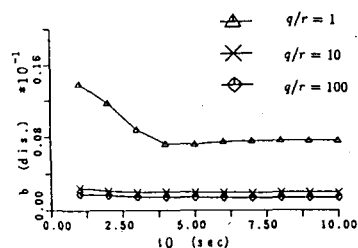


図6

参考文献：1) J. N. Yang, M. ASCE, A. Akbarpour and P. Ghaemmaghami : New Optima Control Algorithms for Structural Control, journal of Engineering mechanims Div ision ASCE, Vol113, No. 9, pp. 1369-1387, Sep. 1987. 2) 家村浩和, 芽野茂: 多自由度履歴構造物における地震入力エネルギーの分担率と耐震設計, 土木学会第41回年次学術講演会概要, pp. 1113-1114, 1986. 3) 清水信行: 大次元常微分方程式の直接数値積分法, 日本機械学会論文集43巻368号, 昭和52. 4