

I-552

非線形多自由度履歴系の震動特性の同定

横河電機 正 久保田 秀樹
鳥取大学工学部 正 野田 茂

1. まえがき

一般に、強震時の構造物は複雑な非線形劣化履歴復元力特性を示す。その動特性と挙動を解明することは、破壊に至ることなく、構造物の安全性を確保する上で極めて重要である。従って、このような復元力特性を含む非線形劣化履歴構造物に対して、その震動特性を合理的に同定可能なアルゴリズムを開発する意義は大きい¹⁾。

本研究では、剛性劣化を伴う万能型復元力特性モデルを用いて、非線形多自由度構造物の動特性の同定アルゴリズムを開発し、数値例によってその有効性を検討する。同定には、拡張カルマンフィルターを応用し、2段階重み付きグローバルな繰返し法を用いる。

2. 研究の方法

本研究で対象とした構造モデルは、曲げモーメントの作用しないせん断型非線形モデルである。 m_i, c_i, k_i は質点 i の質量、減衰係数と微小振動時の剛性、 u_i は質点 i と質点 $(i-1)$ 間の層間変位とする。 $\ddot{z}_g$ は地動加速度、 z_i は質点 i の履歴変位、 x_i は地面に対する質点 i の相対変位である。このようにすると、質点 i の運動方程式は、次式で表わせる。

$$\ddot{x}_i + f_i - \frac{m_{i+1}}{m_i}(1 - \delta_{in})f_{i+1} = -\ddot{z}_g \quad (1)$$

$$\text{ただし, } f_i = 2h_i\omega_i\dot{u}_i + \alpha_i\omega_i^2u_i + (1 - \alpha_i)\omega_i^2z_i \quad (2)$$

ここに、 h_i, α_i は、減衰定数と剛性の降伏比を表わす。 ω_i は、質点 i を1自由度系とみなしたときの微小振動時における固有円振動数($\sqrt{k_i/m_i}$)である。また、 δ_{in} はクロネッカデルタ記号である。

式(2)における z_i は、万能型復元力モデルにおける履歴変位である。 z_i は次の微分方程式を満たす。

$$\dot{z}_i = \frac{A_i\dot{u}_i - \nu_i(\beta_i|\dot{u}_i||z_i|^{n_i-1}z_i + \gamma_i\dot{u}_i|z_i|^{n_i})}{\eta_i} \quad (3)$$

上式からわかるように、非線形劣化履歴モデルは、パラメーター($n_i, \beta_i, \gamma_i, A_i, \eta_i, \nu_i$)の与え方により、多面的な履歴を示す。式(4)のように、 A_i, η_i と ν_i は、式(5)に示すひずみエネルギー ϵ_i の関数であり、劣化特性を示すパラメーターである。

$$A_i = A_{i0} - \delta_{A_i}\epsilon_i, \quad \eta_i = \eta_{i0} + \delta_{\eta_i}\epsilon_i, \quad \nu_i = \nu_{i0} + \delta_{\nu_i}\epsilon_i \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_i = m_i(1 - \alpha_i)\omega_i^2z_i\dot{u}_i \quad (5)$$

本研究では、質点 i の状態変数として、1) 応答量としての変位 x_i 、速度 $\dot{x}_i$ 、履歴変位 z_i とひずみエネルギー ϵ_i 、2) 線形時のパラメーターである減衰定数 h_i と固有円振動数 ω_i 、3) 6つの非線形パラメーター($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_{A_i}, \delta_{\eta_i}, \delta_{\nu_i}$)を採用する。2)と3)のパラメーターは本質的に経時変化しない。式(4)における A_{i0}, ν_{i0} と η_{i0} は一定値($=1$)に固定した。式(1),(3)と(5)は1階の微分方程式に組み込み、状態方程式を誘導した。遷移行行列は、状態方程式を状態変数で偏微分することによって算出した。

ここでは、全質点の変位と速度応答を観測量とする観測方程式を導入した。観測量にはホワイトノイズを付加した。カルマンフィルターアルゴリズムにより、最適な状態推定とパラメーター同定は、初期時刻における平均値と誤差共分散を用いて、漸化的に計算できる。

3. 2段階重み付きグローバルな繰返し法

本研究では、初期微動継続時間(線形時間区間)における線形パラメーターの同定と、継続時間全体での非線形パラメーターの同定という2段階アルゴリズムを採用した。

第1段階では、初期条件のもとで、減衰定数 h と固有円振動数 ω を同定した後、その同定結果と予測誤差に重み付けした分散を初期値として採用し、改めて同定する。このような操作を反復的に繰返す。

第2段階では非線形パラメーターを反復的に同定するが、線形パラメーターは第一段階の同定結果を用いる。重みは、各質点ごとにそれぞれ別々に付加した。

以上の操作は、安定性評価基準かパラメーターの収束判定基準を満たすまで、繰返し実施する。安定性評価基準とは、観測波形と最適推定値の差の2乗平均値からなるものである。なお、重みは、グローバルな繰返しにおいて収束速度を速めたり、安定した同定結果が得られるようにするため、物理的に意味のある値を用いた。また、初期の分散値も物理性を考慮して与えた。

4. 数値計算結果および考察

(1) 線形パラメーターの同定

ここでは、3自由度系を対象にして計算を実施した。線形時間区間(3秒)において、観測波形から線形パラメーター(h, ω)の同定を試みた。質点に係わらず、減衰定数の初期値は0.01、固有円振動数のそれは40rad/sとした。図1は評価基準値の収束状況を示す。図2よりわかるように、質点3の線形パラメーターは、最適な推定値($\hat{\omega}_3 = 19.82 \text{ rad/s}$ [19.86 rad/s], $\hat{h}_3 = 0.0198$ [0.02])に収束している([]の数字は真値である)。減衰定数の時系列変化はわずかであるが、グローバルな繰返しに応じてかなり変化している。一方、固有円振動数は繰返しの初期に激しく変動しているが、次第に安定状態へと移行している。図1より、評価基準値は6回目で降さは

ど変化していない。

(2) 非線形パラメーターの同定

ここでは、全継続時間（18秒）で同定を試みた。ただし、降伏比 α は固定した。図3には評価基準値の収束状況を示す。パラメーターの収束判定と併せて考えると、7回の繰返しで収束した。図4には質点3の同定結果を示す。各パラメーターは、繰返しに応じて変化し、最適解に収束していく。質点3の観測応答（変位・速度）が図5である。同定パラメーターに対して得られる応答の推定値は図6のようになるが、図5の真の応答値と酷似している。図4のパラメーターは必ずしも真の値に一致していないが、実測と推定の応答はよく対応している。このことは、非線形パラメーター、特に劣化特性を示すパラメーター（ $\delta_A, \delta_\eta, \delta_\nu$ ）は、振動応答の変化に鈍感であることを意味し、同定の難しさを示唆している。

図7には非線形パラメーター β の収束過程を示す。質点3のパラメーターは、他質点に比し、最適値に至る収束過程がよい。これは、最上階の質点3が最もよく揺れ、他質点に比べて強い非線形劣化履歴特性を示すために、追従性がよいからである。

5. あとがき

本研究では、多質点系の変位と速度応答を観測量とし、劣化履歴復元力特性モデルを用いて、線形・非線形パラメーターを同定するアルゴリズムを提案した。なお、本方法は、1自由度系或多自由度系に係わらず、また線形・非線形にも適用できるような汎用的なアルゴリズムになっており、実用に供するものと考えられる。

参考文献

- 1) 星谷 勝・丸山 収：非線形構造系の地震時挙動特性の同定，土木学会論文報告集，第386号／I-8，pp.397～405，1987年10月。

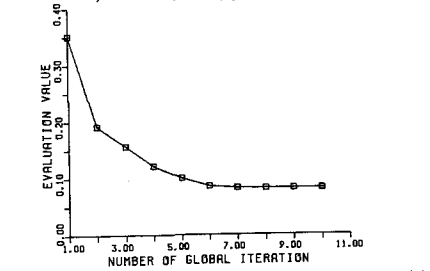


図1 線形時間区間におけるグローバルな繰返し回数に対する評価基準値の変化

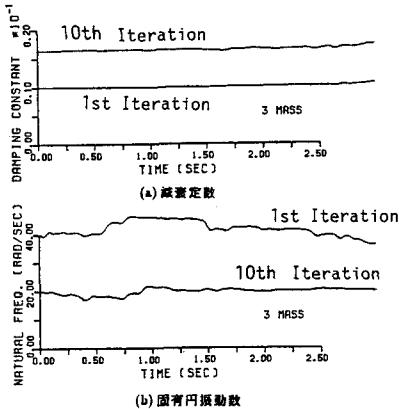


図2 グローバルな繰返し回数に対する質点3の線形パラメーターの変動

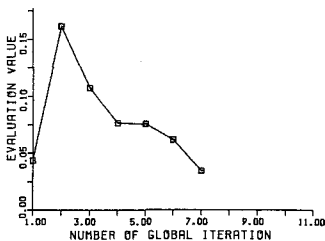
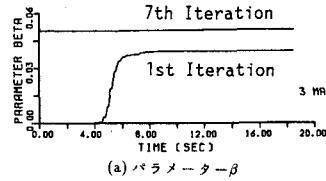
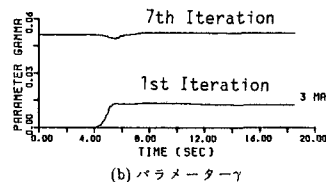


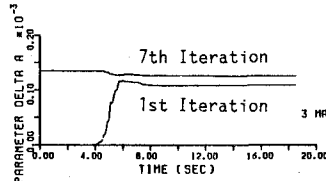
図3 全継続時間区間でのグローバルな繰返し回数に対する評価基準値の変化



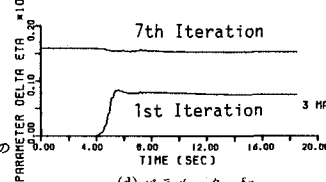
(a) パラメーター β



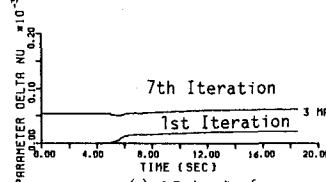
(b) パラメーター γ



(c) パラメーター δA



(d) パラメーター $\delta \eta$



(e) パラメーター $\delta \nu$

図4 グローバルな繰返し回数に対する質点3の非線形パラメーターの変動

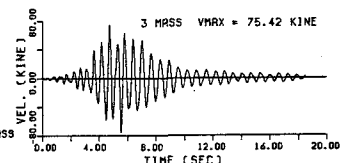
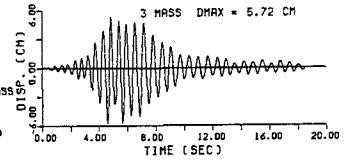


図5 質点3の観測応答（変位・速度）

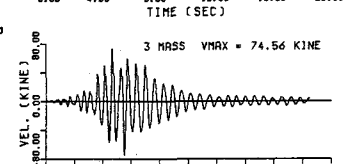
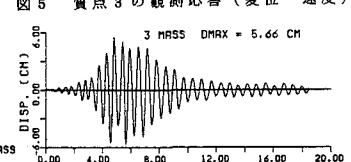


図6 質点3の推定応答（変位・速度）

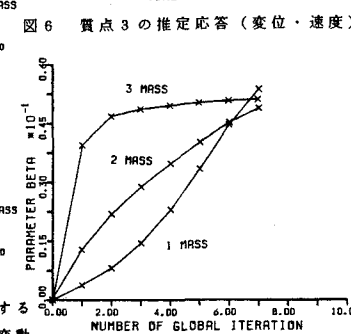


図7 グローバルな繰返し回数に対する非線形パラメーター β の変動