

(株) 佐藤工業	正員	市原 和彦
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	正員	清野 純史

1. まえがき 地震時における地盤—構造物系の動的安定性を評価するための指標や、基礎と構造物に対する終局安定性の最適な配分法を見いだすためのハイブリッド実験法が最近開発された¹⁾。本研究では、この実験で得られた地盤—構造物系の非線形復元力特性に関する数式モデルの提案のための1つの試みとして、Wenら²⁾の研究による復元力モデルを用い、星谷・丸山³⁾が提案した同定法を併用して実観測記録から復元力特性の同定を行うとともにその妥当性を検討した。

2. 解析方法 同定問題のための定式化に必要な非線形復元力モデルとして、Wenらが提案したVERSATILEモデルを使う。VERSATILEモデルは比較的少数のパラメータで多様な履歴形状を表すことができるので、本研究のようにパラメータ同定を行うことによって復元力特性を決定する場合には、その定式化に適している。VERSATILEモデルは次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= -\alpha |\dot{y}| Z^n - \beta \dot{y} |Z|^n + k \dot{y} & \text{for } n \text{ odd} \\ \dot{Z} &= -\alpha |\dot{y}| Z^{n-1} |Z| - \beta \dot{y} Z^n + k \dot{y} & \text{for } n \text{ even}\end{aligned}$$

ここに、 y は応変位、 Z は復元力、 k , n , α , β は履歴形状を支配するパラメータである。ただし、パラメータ n の値は1に固定した。

システムの状態変数と未知パラメータを直列に並べた状態ベクトルは以下のように選んだ。

$$\mathbf{x} = \{ \{\dot{y}\} \{\dot{y}\} \{y\} \{Z\} \{\alpha\} \{\beta\} \{m\} \{c\} \{k\} \}^T$$

この状態ベクトルを用いると次のような形の状態方程式と観測方程式が得られる。

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{\Gamma}_t \mathbf{w}_t$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{h}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{v}_t$$

この状態方程式と観測方程式を基礎とするカルマンフィルターのアルゴリズムに通すことにより、システムの状態変数の最適推定値と未知パラメータの最適推定値が同時に求まる。

拡張カルマンフィルターをパラメータ同定問題に適用した場合、その同定精度があまり良くないことが指摘されていた。本研究では星谷・齊藤ら⁴⁾が開発した EK-WGI 法を併用して同定精度を高めている。

3. ハイブリッド実験結果への応用 ここでは、直接基礎の並進運動と回転運動に関するハイブリッド振動実験により得られたデータから、その非線形復元力特性の同定を行う。対象とした基礎構造物を表したものが図-1である。また、この直接基礎を1質点2自由度系モデルに置き換えたものが図-2である。

実験に用いた入力加速度は、TaftのEW成分原波形の前半150ステップをカットしたもので、その最大値を180 galに調整したものである。時刻間隔は0.02秒で継続時間は1000ステップ、20秒間である。

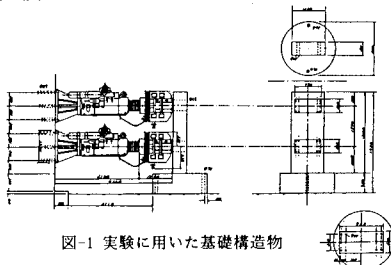


図-1 実験に用いた基礎構造物

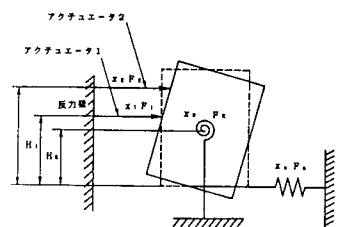


図-2 モデル図

この実験では、2つのアクチュエーターの変位量と反力が直接測定されている。これらを並進運動と回転運動の座標に座標変換したものを観測データとし、また、変位記録を微分して速度記録、加速度記録とした。これらの観測記録を用いて、並進と回転の2つのばねの復元力特性を同定した。図-3は観測された並進

の履歴曲線、図-4は観測された回転の履歴曲線である。これに対して図-5は同定された並進の履歴曲線、図-6は同定された回転の履歴曲線である。

同定された応答波形や復元力は、いずれもその振幅が小さめに同定されており、また同定された履歴曲線は並進、回転共に全体の傾きが少し大きくなっている。これは観測ノイズとして、実験に伴う加振の制御などに起因するノイズが除去されていることによるものと思われる。また、回転の履歴曲線は時間とともにその傾きが徐々に小さくなっており、剛性が低下していることがわかる。ここでは復元力も観測されているので、未知パラメータの経時変化を追うことも可能である。図-7(a), (b), (c), (d)、図-8(a), (b), (c), (d)は同定された未知パラメータ k , c , α , β の経時変化を示したものである。ここでも回転のパラメータ k は時間が経つにつれ減少しており、回転ばねの剛性が劣化していることを示している。

4. まとめ 本研究では、カルマンフィルターと VERSATILE モデルによる多自由度振動系の非線形復元力特性の同定法の妥当性について検討した。直接基礎のハイブリッド実験で観測されたデータを使い、地盤-構造物系の復元力特性の同定を行った結果、アクチュエーターの変位量が微小であるため加振の制御等に起因する誤差を正確に求めることができれば、本手法は非常に有効な解析手法となり得ることが確認できた。また、状態ベクトルのなかのパラメータの経時変化については、今後さらに時間依存の定式化を行うことによって剛性劣化等の傾向をより正確に、かつ定量的に把握して行く予定である。

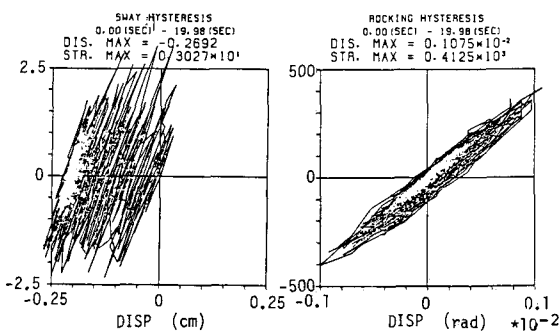


図-3 観測データ（並進）

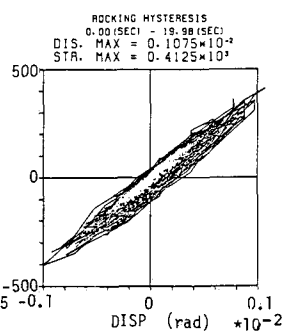


図-4 観測データ（回転）

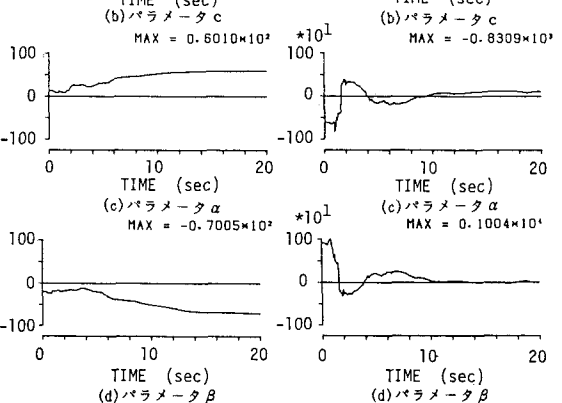
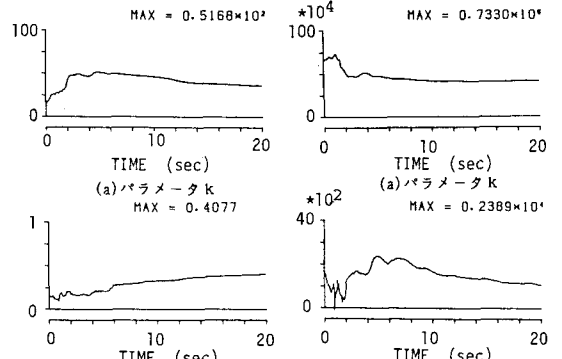


図-7 同定されたパラメータ（並進） 図-8 同定されたパラメータ（回転）

参考文献 1) 土岐ら：土木構造物の耐震設計における終局耐力の最適分配に関する研究、昭和62年度科学研究費総合(A)研究成果報告書、昭和63年。 2) Wen: Method for random vibration of hysteretic systems, EM2, Vol.102, pp249-263, 1976. 3) 星谷・丸山：非線形構造系の地震時挙動特性の同定、土木学会論文集、第386号/1-1, pp.397-405, 1987. 4) 星谷・斎藤：線形多自由度系の動特性の推定、土木学会論文集、第344号/1-1, 1984.