

정규화된 OEE를 이용한 지진격리장치의 이력거동 추정 Estimation of Hysteretic Behaviors of a Seismic Isolator Using a Regularized Output Error Estimator

박현우* 전영선** 서정문**
Park, Hyun-Woo Choun, Young-Sun Seo, Jeong-Moon

ABSTRACT

Hysteretic behaviors of a seismic isolator are identified by using the regularized output error estimator (OEE) based on the secant stiffness model. A proper regularity condition of tangent stiffness for the current OEE is proposed considering the regularity condition of Duhem hysteretic operator. The proposed regularity condition is defined by L_2 -norm of the tangent stiffness with respect to time. The secant stiffness model for the OEE is obtained by approximating the tangent stiffness under the proposed regularity condition by the secant stiffness at each time step. A least square method is employed to minimize the difference between the calculated response and measured response for the OEE. The regularity condition of the secant stiffness is utilized to alleviate ill-posedness of the OEE and to yield numerically stable solutions through the regularization technique. An optimal regularization factor determined by geometric mean scheme (GMS) is used to yield appropriate regularization effects on the OEE.

1. 서론

지진발생시 원전중대사고에 치명적인 영향을 끼칠 수 있는 가능성이 높은 원전기기 및 구조물에 대해 지진격리장치를 사용함으로써 사고확률을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 최근 미국과 일본에서는 원전기기 및 구조물에 대한 지진격리장치의 이론적 해석, 실험 및 설계기법에 대한 연구들이 진행되어 왔다 [1-2].

지진격리장치가 설비되어 있는 구조물(이하 지진격리 구조물)은 탄성거동을 하는 구조물과는 달리 지진격리장치의 이력거동에 의해 큰 비선형성을 가지게 된다. 수학적 관점에서 지진격리장치는 이력모델(hysteretic model)로 표현할 수 있다 [3]. 다양한 현상학적 이력모델 (phenomenological

* 한국원자력연구소, 박사후 연구원

** 정희원, 한국원자력연구소, 책임연구원

hysteretic model) 들이 전기, 전자, 기계, 토목 등 여러 공학분야에서 사용되어 왔고, 특히 지진격리장치에 대한 구성 모델들도 이러한 현상학적 이력모델에 근거해 있다[3, 8]. 현상학적 이력모델에서 이력형상을 나타내는 매개변수들은 수평전단시험으로 얻어진 힘-변위곡선에 대한 회귀분석을 통해서 구해지게 된다. 그러나 단순 전단시험에 의한 회귀분석을 통해 얻어진 재료의 구성모델을 이용해서 동해석을 수행했을 때의 구조물의 응답은 실제 동적 실험으로부터 얻어진 응답과 큰 차이를 보이게 된다. 이는 이력거동을 하는 재료가 가지고 있는 비선형 동특성에 내재해 있는 여러 가지 다른 역학적 특성들을 단순한 재료실험으로부터 얻어진 구성모델로 모사 하는 것에 한계가 있기 때문이다. 특히, 지진격리장치의 동적 거동은 지진의 비정상성에 의해 발생하는 복잡한 비선형성 때문에 해석하기 매우 힘들다. 이러한 한계점을 해결하기 위해서 실제 이력거동을 하는 구조물의 응답을 직접 이용해서 이력거동이나 모델을 추정하는 연구들이 활발히 진행되어 왔다 [5-10].

이 연구에서는 지진격리장치에 발생하는 이력거동을 할선강성모델(secant stiffness model)과 정규화된 output error estimator(OEE)를 이용해서 추정한다. 시간에 따른 물성 변화의 추정을 위해서 시간에 대한 접선강성의 새로운 정규조건을 기존의 Duhem 이력연산자의 정규조건을 고려하여 제안한다. Duhem 이력연산자에서 사용되는 정규조건은 변위와 복원력에 대해 정의되는 반면 제안된 정규조건은 시간에 대해서 정의된다. 접선강성에 대한 정규조건이 시간에 의해 정의되기 때문에 강성 및 강도 감소등의 다양한 이력거동을 모사할 수 있다. 이력거동 추정을 위한 할선강성모델은 시간에 대한 정규조건으로 정의되는 접선강성을 각 시간단계에서의 할선강성으로 근사하여 얻는다.

OEE에서는 계산된 응답과 예측된 응답의 차이를 최소화시키는 최소자승법을 사용한다. 특히 최소자승법에 근거한 OEE의 경우 예측치에 발생하는 모델링오차나 예측오차에 의해서 수치적인 불안정성을 일으키게 된다 [11]. 추정하려는 매시간 단계에서의 할선강성에 대한 정규조건을 최소자승법에 추가적으로 부과하는 정규화기법을 사용함으로써 수치적 불안정성을 막는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 구할 수 있다. 매 시간단계에서 추정되는 할선강성에 대한 정규조건을 적용시키기 위한 방법으로 티코노프 정규화기법을 사용한다. 티코노프 정규화 기법에서 적절한 정규조건을 발현시키기 위해서 최적 정규화 계수를 사용해야 하는데 기하평균방법(GMS)을 이용하여 최적정규화 계수를 구한다 [11].

제안된 방법을 지진격리장치의 이력거동 추정문제에 적용시켜 타당성을 검증한다.

2. Secant stiffness model과 정규조건

지진격리장치의 이력거동을 추정하기 위한 방법은 미분방정식에 근거한 이력모델의 매개변수 추정 방법과 ARMA나 직교다항식을 이용한 비매개변수 추정방법으로 대별될 수 있다 [5-10]. 여기서 매개변수라고 함은 미분방정식으로부터 유도된 내연적, 외연적으로 물리적인 의미를 가진 항들을 의미한다. 예를 들면, 그림 1의 쌍일차모델의 경우는 항복변위, 항복전 강성, 항복후 강성이 매개변수로 취급될 수 있다. 일반적으로 매개변수 추정방법은 추정모델이 미리 지정되어 있기 때문에 적은 개수의 매개변수로도 비선형거동을 평균적으로 모사하게 된다. 단순한 이력모델을 사용하게 되면 매개변수의 개수도 적고 알고리즘은 간단하지만 이력모델이 추정의 유연성이 감소함으

로써 복잡한 이력거동을 모사하기 힘들 수도 있다. 보다 정확하고 유연한 이력거동의 추정을 위해서는 정교하고 복잡한 이력모델을 사용하게 되는데 추정의 유연성이 향상되지만 매개변수의 개수가 늘어나고 계산 비용이 증가하게 된다. 매개변수 추정방법이 가지는 복잡성을 탈피하고 보다 유연한 추정을 위해서 비매개변수 추정법을 사용하게 되는데, 이 때 추정되는 변수들은 매개변수 추정법과는 달리 물리적인 특성과는 무관하게 된다. 각각의 방법이 장점을 취하기 위해서 Masri는 위의 두가지 방법을 혼용한 혼합방법(hybrid method)을 제안한 바 있다 [7].

이 연구에서는 할선강성모델을 이용하여 이력거동을 추정하고자 한다. 그림 2와 같이 할선강성 모델은 매 시간단계에서 재료의 할선강성을 추정함으로써 전체시간에서의 이력거동을 추정하게 된다. 이력모델의 추정에 할선강성모델을 적용시킬 수 있는 이론적 배경은 Duhem 이력연산자로부터 유도되는 힘과 변위와의 증분식에서 찾을 수 있다 [3-4].

$$\begin{aligned} dR &= k^+(u, R)du^+ - k^-(u, R)du^- \\ du^+ &\equiv \max(0, du) \quad du^- \equiv \min(0, du) \\ k^+(u, R), k^-(u, R) &\in H(u, R) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, R 과 u 는 복원력과 변위를 나타내고 $H(u, R)$ 는 힘과 변위에 대해 유일한 값을 가지는 임의의 연속 함수들의 공간(holonomic function space)이다 [3-4]. 식 (1)을 살펴보면 함수 k^+ 과 k^- 가 각각 양의 속도와 음의 속도 방향에 대한 접선강성(tangent stiffness)임을 알 수 있다. 식 (1)을 시간 t 에 대해서 다시 나타내면 다음과 같다.

$$k' \equiv \frac{dR'}{du'}, k' \in H(u, R) \quad (2)$$

식 (2)에서 정의되는 접선강성은 Duhem 이력연산자에서 정의된 k^+ 와 k^- 가 지니는 정규조건을 따르게 되고, 시간 t 에서 추정되는 할선강성에 의해 복원되는 이력곡선은 모양은 Duhem 이력연산자가 표현할 수 있는 이력곡선의 한도에 국한된다. 이 연구에서는 식(2)의 접선강성으로 표현할 수 있는 이력거동을 확장시킬 수 있는 새로운 정규조건을 제안한다. 기존의 Duhem 이력연산자가 변위와 복원력에 의해서 정의되는 접선강성의 정규조건을 사용하는 대신 시간에 의해서 정의되는 새로운 정규조건을 적용한다. 이를 이용하면 할선강성이 속한 함수공간에 대한 정규조건이 이완되기 때문에 강성 감소를 포함한 강도 감소등 여러 가지 다양한 이력거동을 추정할 수 있게 된다. 접선강성이 가질 수 있는 가장 일반적인 형태의 정규조건은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k' \in L_2 \equiv \{x \mid \int_0^T (x - x_0)^2 dt < \infty\} \quad (3)$$

여기서 L_2 는 x_0 을 중심으로 시간에 대해서 제곱적분가능한 함수공간을 나타내는 것으로 시간에 대해서 접선강성이 조각연속함수(piecewise continuous function)임을 나타낸다 [12].

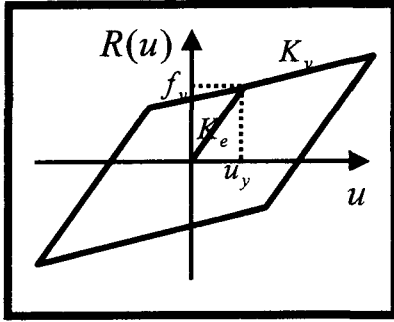


그림 1. 쌍일차 이력모델

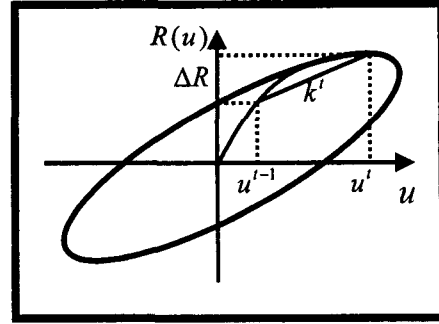


그림 2. 할선강성모델

실제 수치 연산 과정에서는 시간에 대한 이산화 과정이 포함되기 때문에 시간 $t-1$ 과 t 사이의 시간간격이 충분히 작다고 하면 식(2)의 접선강성을 다음과 같이 할선강성으로 근사할 수 있다.

$$k^t \approx \frac{R^t - R^{t-1}}{u^t - u^{t-1}}; k^t \in L_2 \quad (4)$$

식(4)의 할선강성은 접선강성이 가지는 식(3)의 정규조건을 그대로 따르게 되고 식(3)과 식(4)로부터 할선강성모델이 정의된다.

3. 정규화된 OEE

매 시간단계에서의 할선강성을 수학적으로 유도된 동해석 모델로부터 계산된 응답과 실제 계측된 응답의 차이를 최소화하는 다음의 최소자승오차법을 이용하여 구한다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \pi_E = \frac{1}{2} \sum_i \|U_i(\mathbf{x}) - \bar{U}_i\|_2^2 \quad \text{subject to } \Xi(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (5)$$

여기서, \mathbf{U} , $\bar{\mathbf{U}}$, 그리고, \mathbf{x} 는 각각 시간단계별로 동해석모델로부터 계산된 응답, 실제 계측된 응답, 시스템변수인 할선강성을 행으로 나열한 벡터들이고, Ξ 은 시스템변수에 대한 구속조건이다. $\|\cdot\|_2$ 는 유클리디안 놈을 나타내고, i 는 응답의 종류를 나타내는데 가속도, 속도, 변위 등 모든 종류의 응답이 사용될 수 있다.

최소자승법에 근거한 OEE의 경우 계측치에 발생하는 모델링오차나 계측오차에 의해서 수치적인 불안정성을 일으키게 된다. 식 (4)에서 정의된 매시간 단계에서의 할선강성에 대한 정규조건을 최소자승법에 추가적으로 부과하는 정규화기법을 사용함으로써 수치적 불안정성을 막는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 구할 수 있다 [11]. 정규화 기법에 사용되는 정규화 함수는 식(3)을 시간에 대해 이산화 하여 구할 수 있다.

$$\pi_R = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^2 \quad (6)$$

식(6)의 정규화 함수를 식(5)에 부과하기 위해서 티코노프 정규화기법을 사용하고 정규화된 오차 함수의 최적화는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [11].

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \pi_{\varepsilon} = \frac{1}{2} \sum_i \|\mathbf{U}_i(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{U}}_i\|_2^2 + \frac{1}{2} \lambda \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^2 \text{ subject to } \Xi(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (7)$$

여기서 $\lambda(>0)$ 는 정규화 계수라 하고, (5)의 오차함수와 (6)의 정규화함수의 비중을 조정하는 역할을 한다. 정규화 계수를 너무 크게 설정하면 (3)의 정규조건이 과장되어 추정된 해가 실제와 많이 다를 수 있고 반대로 너무 작게 설정하면 (5)가 가지는 수치적인 불안정성이 발생하게 된다 [11]. 적절하게 결정된 정규화 계수는 계측오차로부터 파생되는 해의 진동성분을 제거하고 동시에 (3)에서 정의된 정규조건을 추정된 해에 부과함으로써, 수치적인 안정성을 가지는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 도출할 수 있다. 이를 위해서, 최적의 정규화 계수를 결정해야 하는데, 여기서는 기하평균방법(Geometric Mean Scheme; 일명 GMS)을 이용하여 결정한다 [11].

4. 민감도

식(7)을 최적화하기 위해서는 시스템변수에 대한 계산된 응답의 일차 민감도를 구해야 한다. 여기서는 시간에 대해 표현된 동적평형방정식의 증분식을 시스템변수에 대해 직접 미분함으로써 응답의 일차 민감도를 구할 수 있다. 설명의 편의를 위해 1자유도 동적평형방정식의 증분식을 이용한다.

$$m\Delta a^j + c\Delta v^j + \Delta R^j = \Delta f^j \quad (8)$$

여기서, $m, \Delta a^j, c, \Delta v^j, \Delta R^j, \Delta f^j$ 는 각각 시간단계 j 에서 질량, 가속도증분, 감쇠계수, 속도증분, 이력모델의 복원력증분, 그리고 외력증분을 나타낸다. 여기서 이력모델의 복원력 증분은 식 (4)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta R^j = x^j(u^j - u^{j-1}) = x^j \Delta u^j \quad (9)$$

x^j 와 Δu^j 는 각각 시간단계 j 에서 추정하고자하는 할선접선강성과 변위증분이다. 식 (8)을 시간 단계 k 에서의 할선접선강성에 대해 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$m \frac{\partial \Delta a^j}{\partial x^k} + c \frac{\partial \Delta v^j}{\partial x^k} + x^j \frac{\partial \Delta u^j}{\partial x^k} + \Delta u^k = 0 \quad (10)$$

식 (10)에서 필요한 수치적분을 위해서 뉴마크 베타(Newmark- β)방법[13]을 사용하면 할선접선강성에 대한 변위증분의 민감도를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial(\Delta u^j)}{\partial x^k} = \left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + x^j \right)^{-1} \left(m \left(\frac{1}{\beta \Delta t} \frac{\partial v^{j-1}}{\partial x^k} + \frac{1}{2\beta} \frac{\partial a^{j-1}}{\partial x^k} \right) + c \left(\frac{\gamma}{\beta} \frac{\partial v^{j-1}}{\partial x^k} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \frac{\partial a^{j-1}}{\partial x^k} \right) - \Delta u^k \right) \quad (11)$$

여기서 β , γ 는 각각 뉴마크 베타방법에서 수치 시간적분을 위해 사용되는 상수이다.

식(11)을 이용해서 매시간 단계의 할선접선강성에 대한 매 시간단계의 변위, 속도, 가속도의 민감도를 차례로 구할 수 있다.

5. 예제

수치예제를 통해서 제안된 방법의 타당성을 검증한다. 그림 3은 예제에 사용될 1자유도 강제-감쇠기-스프링 모델이다. 강제 질량은 100톤으로 설정하였고, 초기 스프링의 강성은 구조물의 고유주기가 1초가 되도록 설정하였다. 감쇠기의 감쇠계수는 구조물 임계감쇠계수의 5%가 되도록 설정하였다. 지진시 발생하는 지진격리장치의 이력거동을 추정하는 문제이다. 입력지반운동은 El-Centro 지진(최대지반가속도=0.308g)을 사용하였다. 지진격리장치는 초기탄성상태에서는 고유주기가 1초가 되고 항복후의 강성은 2초, 초기 항복변위는 1.25cm인 쌍일차이력모델(bilinear hysteretic model)로 모델링 하였다. 가속도데이터를 계측치로 사용하고 계측치에는 10%의 무작위 비례오차를 가하였다. 계측시간은 최대 지반가속도를 포함하는 초기 강진운동이 포함되는 8초까지이고, 401개의 가속도 데이터를 0.02초 간격으로 샘플링하였다. SI를 위한 시스템 변수로는 계측치 각각의 샘플링이 수행되는 시간간격에 해당하는 총 400개의 할선강성이 주어진다. 식 (6)의 시스템 변수를 위한 기저값으로는 초기탄성상태의 강성값으로 가정한다.

그림 4는 제안된 방법으로 시간에 따른 추정된 할선강성을 지진격리장치의 초기탄성계수에 대해 기준화하여 나타냈다. 항복이 일어나는 시간간격이 매우 짧은 곳들을 다소간의 차이가 있지만 최대지반 가속도가 수반되는 2초에서 7초까지 지진격리장치에 에너지소산이 집중되는 항복구간에서는 강성의 변화가 매우 근사하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 추정된 가속도와 계측 가속도를 0.04초 간격으로 보여주고 있는데 계측가속도 응답을 정확하게 추적하고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 추정된 할선강성들을 이용해서 구한 지진격리장치의 변위-복원력 곡선인데, 실제 지진하중동안 겪게 되는 지진격리장치의 이력을 매우 정확하게 추적하고 있음을 알 수 있다. 변위-복원력 곡선을 이용하면 지진 하중시 지진격리장치에 의해 소산되는 지진에너지와 최대 변위를 추정할 수 있다.

6. 결론

이 연구에서는 지진격리장치에 발생하는 이력거동 및 강성의 변화를 정규화된 OEE와 할선강성 모델을 이용하여 추정하였다. Duhem 이력연산자에서 변위와 복원력에 대해서 정의되는 접선강성의 정규조건 대신해서 시간에 대해 정의되는 새로운 정규조건을 제안하였다. 시간에 대한 정규조건으로 정의되는 접선강성을 각 시간단계에서의 할선강성으로 근사하여 할선강성모델을 유도하였다. OEE를 위해서는 계산된 응답과 계측된 응답의 차이를 최소화시키는 최소자승법을 사용하였

고, OEE가 가지는 수치적 불안정성을 막는 동시에 물리적으로 의미 있는 해를 구하기 위해 정규화 기법을 사용하였다. 기하평균방법을 이용하여 최적정규화 계수를 구하였다. 제안된 방법을 지진격리장치의 이력을 추정하는 예제에 적용시켜 보았다. 지진하중하의 지진격리장치의 이력거동추정문제에서 비교적 큰 계측오차에도 불구하고 변위-복원력 관계를 실제와 매우 근사하게 추정할 수 있었다. 추정된 변위-복원력 관계를 이용하여 추후 지진격리장치의 손상평가 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 계산비용 절감을 위한 계측치 시간창 분할기법과 시간에 대한 할선강성을 시간에 대한 기저함수를 이용하여 매개변수화 시키는 기법에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력 증장기 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계 당국에 감사드립니다.

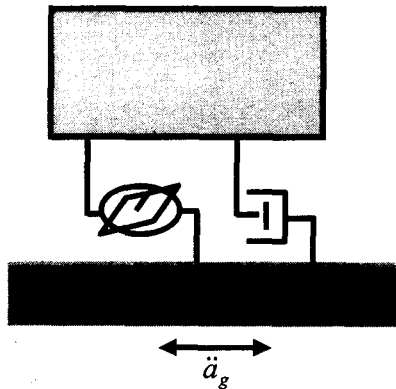


그림 3. 강제-감쇠기-스프링 구조물

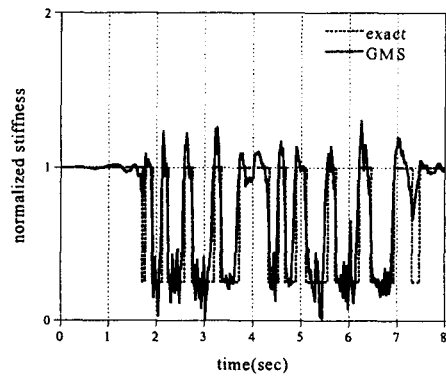


그림 4. 10% 비례계측오차가 있을 때 할선강성의 추정결과

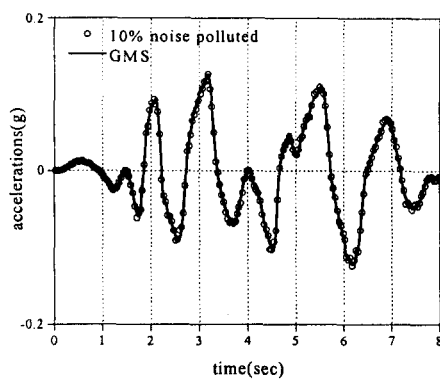


그림 5. 10% 계측오차가 있을 때 추정된 가속도 응답과 계측응답의 비교

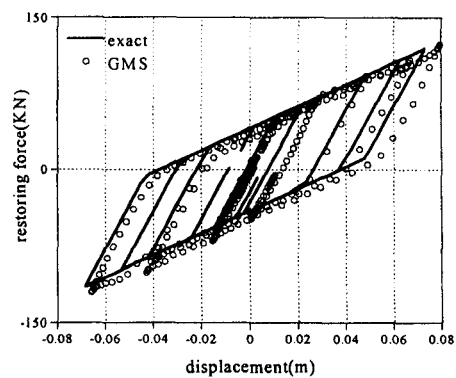


그림 6. 10% 비례계측오차가 있을 때 추정된 할선강성을 이용해 구한 면진장치의 힘-복원력 곡선

참고문헌

1. Ebisawa, K., Ando, K., and , Shibata, K., "Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components," *Nuclear Engineering and Design*, **198**, 2000, pp.61-74.
2. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley and Sons: Chichester, 1993.
3. Macki, J.W., Nistri, P., and Zecca, P., "Mathematical models for hysteresis," *SIAM Review*, **35**, 1993, pp.94-123.
4. Ni, Y.Q., Ko, J.M., and Wong, C.W., "Nonparametric identification of nonlinear hysteretic systems," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **125**(2), 1999, pp.206-215.
5. Ge, L. and Soong, T.T., "Damage identification through regularization method I: Theory," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **124**(1), 1998, pp.103-108.
6. Masri, S.F., Sassi, H., and Caughey, T.K., "Nonparametric identification of nearly arbitrary nonlinear systems," *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, **49**, 1982, pp.619-628.
7. Masri, S.F., "A hybrid parametric/nonparametric approach for the identification of nonlinear systems," *Probabilistic Engineering Mechanics*, **9**, 1994, pp.47-57.
8. Zhang, H., Foliente, G.C., Yang, Y., and Ma, F., "Parameter identification of inelastic structures under dynamic loads," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, 2002, pp.1113-1130.
9. Smyth, A.W., Masri, S.F., Chassiakos, A.G., and Caughey, T.K., "On-line parametric identification of MDOF nonlinear hysteretic systems," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **125**(2), 1999, pp.133-142.
10. Loh, C.H., Lin, C.Y., and Huang, C.C., "Time domain identification of frames under earthquake loadings," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **126**(7), 2000, pp.693-703.
11. Park, H.W., Shin, S., and Lee, H.S., "Determination of an optimal regularization factor in system identification with Tikhonov regularization for linear elastic continua," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **51**, 2001, pp.1211-1230
12. Oden, J.T., *Applied Functional Analysis : A First Course for Students of Mechanics and Engineering Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.
13. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering, 2nd ed.*, Prentice-Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 2001.