

SI법에 의한 기설구조물의 손상평가

Damage Assessment of Existing Structures by System Identification

이희업*

양창현**

박문석***

Lee, Hee-Up

Yang, Chang-Hyun

Park, Moon-Suk

Abstract

In this study, a method for damage assessment of existing structures is suggested using system identification approach. The natural frequencies of damaged structures are utilized to determine the size of damage. The SUMT algorithm is used to minimize error of the criterion function. The structural analysis is performed by using finite element method. Numerical examples are carried out to verify the validity of the proposed method and its computational procedures. And damage estimation of PSC beam is performed to demonstrate the effectiveness of the proposed method. From the results, it is found that the proposed SI method can be applied to estimate damage in existing structures accurately and rapidly.

Key words : Damage Assessment, System Identification, SUMT

1. 서 론

최근 건설관련 구조물의 대형 붕괴사고로 인하여 기존시설물의 안전점검과 진단이 강화되고, 이 분야의 연구가 집중되고 있다. 그러나 구조물의 합리적인 손상평가 시스템이 적립 되지 않아 동일한 손상이 발생한 구조물에 대하여도 진단실시 기관이나 진단자에 따라 결과가 상이하게 나타나

는 등 일관성있고 정밀한 평가가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 구조물의 손상의 정도와 정확한 위치를 명확하게 알 수 있으면 그 결과에 따라 적절한 보수와 보강 대책을 수립하고 효과적인 유지관리를 할 수 있다. 따라서 기설구조물에 대한 적절한 손상평가 방법과 손상도에 따른 내하 능력을 추정하는 기법이 요구된다.

본 연구에서는 구조특성확인기법(system identi-

* 정회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수

*** 학생회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

fication)을^(1,2) 사용하여 기존 구조물의 손상도를 추정하였다. 이 방법은 구조물에 대한 정적 및 동적실험으로 측정된 결과와 이상화된 구조물의 해석치와의 오차의 자승을 최소화시켜 구조변수를 구하여 손상도를 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 오차의 자승이 최소가 되도록 하는 기본함수를 목적함수로 하고, 이것을 최적화하기 위해 SUMT(Sequential Uncons-trained Minimization Techniques) 알고리즘⁽³⁾을 이용하여 해를 구하였다. 현장 측정결과 대신에 실제교량에 대한 손상 시나리오를 작성하고 그에 따른 구조물의 거동을 유한요소법을 이용하여 분석한 후 손상도를 평가하고 검증하는 알고리즘을 사용하였다. 문헌의 예제와 비교를 통하여 본 연구의 타당성을 검증하였고, 기존 PSC 구조물의 고유진동수를 측정하여 프리스트레스력의 손실 및 손상도를 평가하는 방법을 보였다.

2. SI법에 의한 손상도 평가기법

주요한 구조적 매개 변수들의 최적치 평가에 사용되는 SI법을 요약하면 다음과 같다. 기설구조물의 측정자료는 $1 \leq i \leq M$ 인 범위 내에서 얻어지는데 이 때 얻어지는 PM_i 는 측정에 의한 모드와 진동수, 또는 다른 구조적 응답 매개 변수들로 정의 될 수 있다. 여기서 M 은 측정 대상의 전체 숫자나 SI의 진행에 사용되는 고정 매개변수이다. 기설구조물의 해석적 모델로부터 PM_i 와 서로 일치하는 구조적 응답변수가 정의 되고, 구조적 변수들의 N 개의 함수가 고려되면 $1 \leq i \leq M$ 과 $1 \leq K \leq N$ 의 범위에서 P_i 가 다음 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$P_i = P_i(X_1, X_2, \dots, X_K, \dots, X_N) \quad (1)$$

기설구조물의 측정 값과 해석모델의 응답을 일치시키기 위하여 P_i 에 상응하는 식 (2)와 같은 근사 함수를 사용하여 최적화 하면 효과적이다.

$$PQ^i = C^i + \sum_{K=1}^N (X_K A_K^i + X_K^2 B_K^i) \quad (2)$$

여기서 i 와 K 는 범위이고 PQ^i 는 유사구조 모델이다. X_K 를 가정하여 각 PQ^i 에 해당하는 $2N+1$ 개의 미지 상수들을 계산한다. X_K 는 기준구조변수 X_K^b 에 의해 정의되며, 탐색영역은 다음 식 (3)과 같다.

$$X_K^L \leq X_K \leq X_K^u \quad (3)$$

여기서 X_K^u 와 X_K^L 는 X_K 의 상·하한치이며 상수 α_K 와 β_K 에 의하여 다음과 같이 정의한다.

$$X_K^u = X_K^b \alpha_K \quad (4)$$

$$X_K^L = X_K^b \beta_K \quad (5)$$

각 PQ^i 에 해당하는 $2N+1$ 개의 미지 상수들을 계산하는 과정은 다음과 같이 요약된다.

$$\begin{aligned} PQ^i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^b) &= P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^b); \\ PQ^i(X_1^u, X_2^b, \dots, X_N^b) &= P_i(X_1^u, X_2^b, \dots, X_N^b); \\ PQ^i(X_1^L, X_2^b, \dots, X_N^b) &= P_i(X_1^L, X_2^b, \dots, X_N^b); \\ &\vdots \\ PQ^i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_K^u, \dots, X_N^b) &= P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_K^u, \dots, X_N^b); \\ PQ^i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_K^L, \dots, X_N^b) &= P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_K^L, \dots, X_N^b); \\ &\vdots \\ PQ^i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^u) &= P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^u); \\ PQ^i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^L) &= P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^L); \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)과 같이 $2N+1$ 개의 미지 계수를 각 PQ^i

의 M 개의 구조변수에 대하여 구하여 계측 값과의 오차를 최소화하면 기설구조물의 손상도가 평가된다. SI법을 적용하기 위한 기본식은 다음 식 (7)과 같으며 전체 오차의 제곱을 나타낸다.

$$E^2 = \sum_{i=1}^M (PM_i - PQ^i)^2 \quad (7)$$

본 연구에서는 식 (7)을 최소화 하기 위한 기법으로써 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Techniques) 알고리즘을 사용하였다. 이 방법은 일련의 penalty parameter 를 사용하여 무제약 최소화 문제로 변형 시킨 목적함수의 최소해를 가능해의 영역안에서부터 지배적인 제약 조건의 경계부로 연속적으로 접근시켜 최적해를 구하는 방법으로 정식화는 다음과 같다.

Minimize ; $F(X_1, X_2, \dots, X_N)$

Subject to ; $G_k(X_1, X_2, \dots, X_N) \geq 0,$

$k=1,2, \dots, m$

$H_k(X_1, X_2, \dots, X_N) = 0,$

$k=m+1, m+2, \dots, m+p$

Modified Objective Function ;

$$\Phi(X, r_k) = F(X) - r_k \sum_{k=1}^m \ln G_k + \frac{1}{r_k} \sum_{k=m+1}^{m+p} H_k^2 \quad (8)$$

여기서 $F(X)$ 는 목적함수, $G(X)$ 와 $H(X)$ 는 각각 부등제약조건과 등제약조건이고, X 는 설계 변수, 그리고 k 는 제약조건의 수이다. 식 (8)은 penalty parameter r 과 부등제약조건방정식에 \ln 함수를 취하여 재구성된 목적함수로서 Fiacco와 McCormick(1968)에 의해 제안된 식이다. 식 (8)과 같은 무제약 최소화문제에 대한 해를 구하는데 있어 탐색방향의 탐색방법으로는 Davidon-

Fletcher-Powell Method를 이용하였고, 여기서 정해진 방향에 대한 최소해를 구하기 위해서는 Golden Section Method를 사용하였다.

3. 손상평가 결과 비교 및 고찰

3.1 사장교 시스템의 손상평가

본 연구에서 적용된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 문헌(4)을 참조하여 Fig. 1과 같은 사장교 시스템의 구조물에 대하여 손상도를 평가하였다. 기설구조물의 실험을 통한 계측결과를 이용하여 손상을 평가하여야하나 Table 1과 같이 손상 시나리오를 작성하고 그에 따른 구조물의 거동을 유한요소법을 사용하여 분석한 후 손상도를 평가하고 검증하는 알고리즘을 사용하였다. 여기서 손상도는 구조요소의 강성의 변화량, 즉 구조물의 손상의 정도이다. Fig. 1의 구조물은 12개의 부재와 22개의 자유도를 가지며 사용된 단면제원은 Table 2에 수록하였다. 주탑과 보부재의 연결부에는 제약방정식을 사용하여 수직변위는 구속시키고 다른 자유도는 자유롭게 하였다. 구조물이 대칭인 경우에는 손상위치 판정과 평가의 수렴속도가 느리기 때문에 Fig. 1에서와 같이 추가적인 질량을 설치하였다.

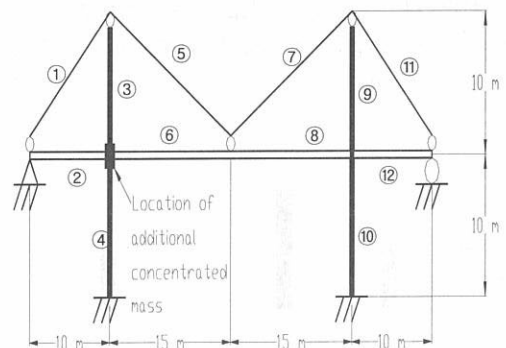


Fig. 1 사장교의 시스템(예제 1)

Table 1. 손상시나리오(예제 1)

요소 번호	②	⑤	⑩
손상도	-10%	-20%	-10%

Table 2. 구조물의 단면 제원(예제 1)

요소번호	E(N/m ²)	ρ(kg/m ³)	A(m ²)	I(m ⁴)
1,5,7,11	2.1x10 ¹¹	7800	0.05	.
2,6,8,12	2.1x10 ¹¹	7800	0.80	0.12
3,4,9,10	3.3x10 ¹⁰	2400	3.20	0.76

Table 3. 손상 전후의 고유진동수(Hz) 비교

Mode	Original(손상전)		Scenario(손상후)	
	Bicanic	본 연구	Bicanic	본 연구
1	7.776	7.716	7.690	7.625
2	9.423	10.289	9.309	10.156
3	10.956	10.969	10.711	10.763
4	19.560	16.833	19.365	16.727
5	22.993	22.008	22.533	21.857
6	27.733	25.583	26.754	24.796

Table 3은 예제 구조물의 손상전과 손상시나리오에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸 것이며 타당성을 검증하기 위해 Bicanic(1997)의 결과와 비교하였다. 본 연구에서는 범용 유한요소 프로그램을 사용하였고, 비교 결과를 보면 잘 일치함을 알 수 있다. 손상된 구조물의 12차 모드까지의 고유진동수를 이용하여 손상도를 평가하여 Fig. 2에 나타내었다. 결과를 살펴보면 손상시나리오의 부재에 대한 강성의 변화량인 손상도에 잘 수렴함을 알 수 있다.

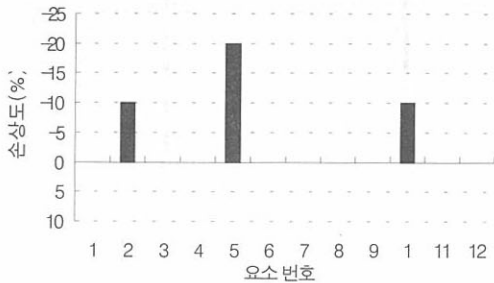


Fig. 2 손상 평가 결과(예제 1)

3.2 뼈대구조물의 손상평가

본 예제에서는 Fig. 3과 같은 뼈대구조물을 대상으로 하여 손상도 추정기법을 검증하였다. 구조물은 강기둥-약보(strong-column weak-beam)의 개념으로 설계된 2층 구조물이고 손상도 추정을 위하여 프레임요소를 사용하여 유한요소로 모형화 하였다. 앞 절의 예제와 같이 비대칭 구조물로 만들기 위하여 집중 질량을 추가하였고, 탄성계수는 2.1x10⁶kg/cm²이다. 추정기법을 검증하기 위해 구조물에 인위적으로 손상시나리오를 가정하고, 손상된 구조물의 고유진동수를 구하여 SI법을 적용하였다. 기둥은 손상이 잘 발생하지 않기 때문에 손상시나리오에서 제외하고 2층 보부재(B2)의 강성을 30% 감소시켜서 손상 전후의 고유진동수를 구하여 Table 4에 나타내었다.

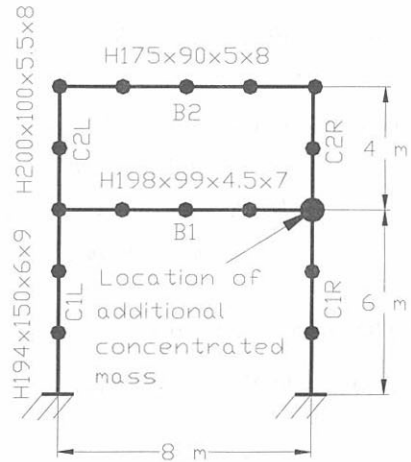


Fig. 3 뼈대 구조물의 제원(예제 2)

Table 4. 손상 전후의 고유진동수(Hz)

Mode	손상 전	손상 후
1	0.9314	0.8890
2	8.0666	7.8534
3	15.6076	15.2534
4	18.1562	17.1069
5	19.7004	18.6951

손상 후의 고유진동수를 이용하여 SI법을 적용하여 손상도를 평가한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과를 분석하면 손상시나리오와 약 2% 정도의 오차를 보이며, 본 연구에서 제안된 SI법은 손상부재의 위치 및 손상도를 추정하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

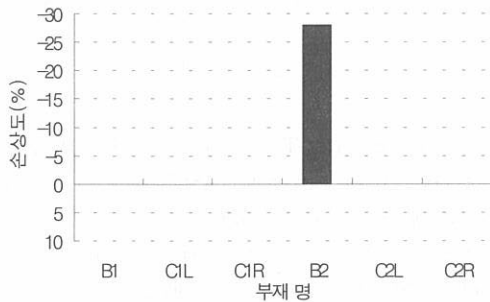


Fig. 4 손상 평가 결과(예제 2)

3.3 PSC 보의 손상평가

일반적으로 PSC 보의 경우는 시공방법에 따라 프리스트레스력의 손실량이 다르다. 문헌에 의하면 재킹력(jacking force) P_j 는 즉시손실에 의하여 초기 프리스트레스력(initial prestress force) P_i 로 감소하고, 콘크리트의 크리프, 건조수축 및 PS 강재의 릴랙세이션에 의한 시간적 감소가 끝나서 최종적으로 유효 프리스트레스력(effective prestress force) P_e 로 된다. 즉시감소와 시간적 감소를 합한 긴장재의 총감소는 재킹력의 20에서 30%의 범위⁽⁶⁾이다. PSC보의 손상은 과재하중에 의한 단면 강성의 손상과 프리스트레스력의 손실 및 손상으로 추정할 수 있다. 손실량은 시방서 및 문헌을 참조하여 계산하면 가능하나 기설구조물의 손실 및 손상의 정도는 평가하기 어렵고 기존의 검사 기법이나 강도 계산방법의 적용 또한 신뢰하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같은 PSC 보에 손상시나리오를 가정하여 SI법을 이용하여 프리스트레스력의 손상과 단면강성의 손상도를 평가하여 보았다. 콘크리트의 압축강도는 350kg/cm^2

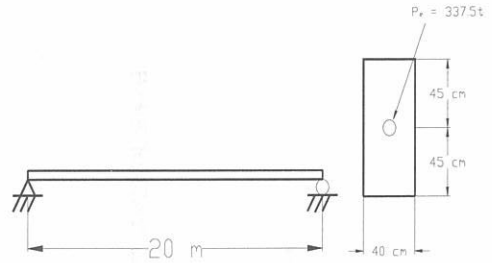


Fig. 5 PSC 보의 단면 제원(예제 3)

이고, 손상시나리오는 Table 5에 나타내었다.

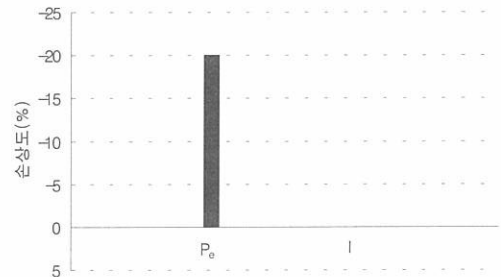
시나리오에 따른 PSC보의 고유진동수를 구하여 Table 6에 나타내었다. Fig. 6은 손상도를 평가한 결과며 이를 분석하면 손상 시나리오 1과 2는 비교적 잘 수렴하나, 손상시나리오 3은 프리스트레스력에 대해서는 약 4.5%의 오차를 보였다.

Table 5. 손상시나리오(예제 3)

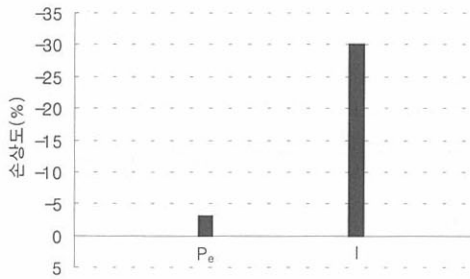
구 분	손상 scenarios		
	1	2	3
프리스트레스력(P_e)	-20%	·	-20%
단면2차모멘트(I)	·	-30%	-30%

Table 6. 손상 전후의 고유진동수(Hz)

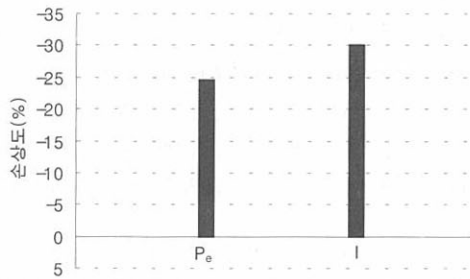
Mode	손상 전	손상 후(scenarios)		
		1	2	3
1	2.9299	3.0073	2.3062	2.4039
2	12.8427	12.9142	10.6158	10.7021
3	29.3402	29.4108	24.4211	24.5057



(a) scenario 1



(b) scenario 2



(c) scenario 3

Fig. 6 손상 평가 결과 비교

4. 결 론

본 연구에서는 구조특성확인기법을 이용하여 기설구조물의 손상도를 평가하였다. 오차의 자승이 최소가 되도록 하는 기본함수를 최적화하기 위해 SUMT 알고리즘을 이용하여 해를 구하였다.

현장 계측결과 대신에 실제교량에 대한 손상 시나리오를 작성하고 그에 따른 구조물의 거동을 범용 유한요소 프로그램을 사용하여 분석한 후 손상도를 평가하였다. 제안된 방법에 의한 손상도 추정기법의 타당성을 검증하기 위하여 예제구조물에 대해서 손상도 추정을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 제안된 SI법은 손상부재의 위치 및 손상도를 추정하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Liu S. C. and Yao T. P., "Structural Identification Concept", J. of Str. Div., ASCE, Vol. 104, No. ST12, pp. 1845~1858, 1978
2. Douglas B. M. and Reid W. H., "Dynamic Tests and System Identification of Bridges", J. of Str. Div., ASCE, Vol. 108, No. ST10, pp. 2295~2312, 1982
3. Kuester J. L. and Mize J. H., "Optimization Techniques with Fortran", McGraw-Hill B.C., 1973
4. Bicanic N. and Chen H. P., "Damage Identification in Framed Structures using Natural Frequencies", Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 40, pp. 4451~4468, 1997
5. 윤정방, 송종걸, 김유진, "기설구조물의 손상도 및 내진능력 평가방법", 한국전산구조공학회 논문집, 제 11권 제 3호, pp. 199~212, 1998
6. 신현목, "프리스트레스드 콘크리트", 동명사, 1997

(접수일자 1999. 2. 19)