

# 構造同定法에 의한 橋梁의 安全性 評價

## Bridge Safety Evaluation Based on the System Identification

김기대<sup>1)</sup>  
Kim, Kee-Dae

이상화<sup>2)</sup>  
Lee, Sang-Wha

### Abstract

This paper presents the application of system identification approaches for the safety assessment of RC-T type bridge based on the result of field test. For these problems, the moment of inertia of cross-sectional area and the natural frequency of bridge were used as structural parameters, the SAP90 program for the structural analysis and the SLP method for the minimum error.

As a result, it is found that the proposed algorithm for this study appears applicable to real structures with reasonable complexity. It is shown that the introduction of approximate quadratic equations is more realistic and timesaving than the common methods.

### 1. 서론

교량을 비롯한 토목구조물의 대부분은 타 분야의 제품에 비해 대규모이며 단산품으로 되어 있고, 그 공용기간이 상당히 길므로 실증시험·재현 시험이 곤란하다. 그래서 약간의 데이터 및 지식·경험을 기초로 유지·관리를 해야할 필요가 있다. 그리고 이미 시공된 토목구조물은 실제 강성과 질량 등의 구조물 특성을 정확히 구하는 것은 거의 불가능하고, 또한 장기적으로 볼 때 이 구조물의 특성은 시간의 경과에 따라 변한다. 그

리므로 현재의 구조물의 특성을 비교적 정확히 나타내는 실험 결과와 구조해석 결과가 일치되는 구조물의 특성을 이용하여 구조물의 안전성을 평가하는 방법이 요망된다.

이 분야의 연구로는 1979년에 Cawley 등이 고유진동수의 변화율을 사용하여 구조물의 손상위치를 파악하는 연구를 하였고, 1985년에 Yuen은 캔틸레버보에서 손상 전·후의 고유치 변화를 비교하였으며, Pandey 등은 모드 형상에 곡률 개념을 도입하였다.

본 논문에서는 안전성 평가를 수행하기 위하여

1) 정회원 ; 대구대학교 토목공학과 교수  
2) 대구대학교 대학원 토목공학과 석사과정

● 본 논문에 대한 토의를 7월 30일까지 학회로 보내주시면 1998년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

먼저 교량을 Model化 하고, 구조계의 평형방정식을 구성하는 구조변수를 결정하기 위하여 정적 및 동적실험으로 측정된 자료를 이용하는 구조특성확인기법 構造特性確認技法(System Identification法; SI法)을 사용하여<sup>1)</sup> 콘크리트교를 대상으로 안전성을 평가하였다.

교량의 Model은 정적Model과 동적Model로 구분되고, 구조변수로 정적Model에서는 주형·횡형·슬래브의 단면2차모멘트 및 재료의 탄성계수 등이 주로 선정되고, 동적Model에서는 정적Model의 변수 외에 질량이 추가된다.

이와 같이 선정된 구조변수로부터 Model해석은 현장재하시험으로부터 대상구조물의 정적 및 동적특성인 정적응답(처짐, 변형을 등) 및 동적응답(고유진동수, 모우드 형상 등), 즉, Model 변수를 구한다. 이와같이 구한 측정치와 구조물을 Model化 한 것에 의한 해석치와의 오차의 자승이 최소로 되도록하여 구조변수를 定하고, 定된 結果를 이용하여 휨과교안전율에 대한 안전성을 RC-T형교를 수치계산으로 본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 고찰하였다.

## 2. SI法の 기본이론

SI법의 기본이론에 관한 개념은 아래와 같이 요약할 수 있다. 우선, 일련의 구조물 시험으로부터 얻어진 측정치에서 SI법을 적용하는데 필요한 처짐, 고유진동수, 진동형 등의 구조물 응답변수  $PM_i$  ( $1 \leq i \leq M$ )를 선정한다.

여기서, M은 구조특성확인과정에서 사용될 시험치, 즉 구조물의 응답 변수의 총수이다.

한편, 구조물을 충실히 Model化하여 각 응답변수  $PM_i$ 에 대응하는 해석치  $P_i$ 를 산출한다.

이들 해석치  $P_i$ 는 N개의 구조변수  $X_k$ 의 함수라고 생각한다.

$$P_i = P_i(X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_N) \quad (2.1)$$

여기서,  $1 \leq i \leq M$ ,  $1 \leq k \leq N$

구조변수는 구조재료의 탄성계수, 주형 및 횡형의 단면2차모멘트 등이 주로 선정될 수 있다.

구조물의 상세한 응답을 구하기 위해서는 엄밀 Model을 써서 구조변수들을 시험치와 일치할때까지 定하는 것은 계산량이 많고 시간도 많이 소요되는 등 능률적이지 못한 경우가 대부분이다.

그래서, 이 문제를 해결하기 위해서 엄밀 Model을 충분히 근사화한 유사 Model을 아래와 같이 작성하여 최적화 기법을 도입하는 것이 능률적인 방법이 될 수 있을 것이다.

각  $P_i$ 에 대해서 그것에 대응하는 근사 2차함수를 다음과 같이 정의한다.<sup>1)</sup>

$$PQ_i = C_i + \sum_{k=1}^N (X_k \cdot A_{ki} + X_k^2 \cdot B_{ki}) \quad (2.2)$$

여기서,  $1 \leq i \leq M$ ,  $1 \leq k \leq N$

먼저, 식(2.2)의 각  $PQ_i$ 에 대해서 (2N+1)개의 미지계수를 구한다.

이들의 계수를 결정하는 데에는 우선, 구조변수  $X_k$ 를 가정해서 엄밀 Model을 써서 각  $PQ_i$ 에 대응하는  $P_1$ 을 산출한다.

이때의 계산을 기준계산이라 하고, 기준계산에 쓰인  $X_k$ 를 기준구조변수  $X_k^b$ 라 한다.

다음으로 각 기준구조변수  $X_k^b$ 에 1.0보다 큰 임의값  $\alpha_k$ 를 곱해  $X_k$ 의 변역의 상한  $X_k^u$ 을 정의한다.

$$\text{즉, } X_k^u = X_k^b \cdot \alpha_k \quad (2.3)$$

같은 방법으로  $X_k^b$ 에 1.0보다 작은 임의값  $\beta_k$ 를 곱해  $X_k$ 의 하한  $X_k^l$ 을 정의한다.

$$\text{즉, } X_k^l = X_k^b \cdot \beta_k \quad (2.4)$$

그러므로  $X_k$ 의 탐사영역은 다음식으로 표현된다.

$$X_k^l \leq X_k \leq X_k^u \quad (2.5)$$

따라서 식(2.2)의 우변 (2N+1)개의 계수는 아래와 같은 과정을 수행함으로써 얻어진다.

결국, 각 구조변수를 기준계산으로부터 각각 1회에 하나씩 탐사영역의 상·하한치로 변화시켜 Computer계산에 의해 (2N+1)개의 유사Model이 얻어진다.

이 (2N+1)개 계수의 산출은 이들의 유사Model 치가  $X_k$ 의 기준치, 상·하한치가 주어진 엄밀 Model과 같은 값이 되도록 하여 구한다.

각  $PQ_i$ 에 대한 식(2.2)의 계수를 얻는데 쓰여진 (2N+1)개의 식은 다음과 같이 정리된다.<sup>1)</sup>

$$PQ_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^b) = P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^b)$$

$$PQ_i(X_1^u, X_2^b, \dots, X_N^b) = P_i(X_1^u, X_2^b, \dots, X_N^b)$$

$$PQ_i(X_1^l, X_2^b, \dots, X_N^b) = P_i(X_1^l, X_2^b, \dots, X_N^b)$$

⋮  
⋮  
⋮

$$PQ_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_k^l, \dots, X_N^b) = P_i(X_1^b, X_2^b,$$

$$\dots, X_k^l, \dots, X_N^b)$$

$$PQ_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_k^u, \dots, X_N^b) = P_i(X_1^b, X_2^b,$$

$$\dots, X_k^u, \dots, X_N^b)$$

⋮  
⋮  
⋮

$$PQ_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^u) = P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^u)$$

$$PQ_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^l) = P_i(X_1^b, X_2^b, \dots, X_N^l) \quad (2.6)$$

식(2.6)은 각 변수  $PQ_i$ 에 대한 식(2.2)의 계수 관한 (2N+1)개의 선형식을 나타낸다.

그 해를 구하면 (2N+1)개의 미지계수를 구할

수 있고,<sup>2)</sup> 이것은 M개의 변수  $PQ_i$ 에 관해서 전부 동일하다. 이와 같이 해서 유사Model을 완성한다.

유사Model을 구축할 때 쓰여지는 근사의 상태를 도시하면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1은 단일 변수  $X_k$ 에 대한  $P_i$ 와  $PQ_i$ 의 변역을 나타내고 있으며,  $PQ_i$ 는 시점과 종점이  $P_i$ 와 일치하도록 근사2차함수로 표현된다.

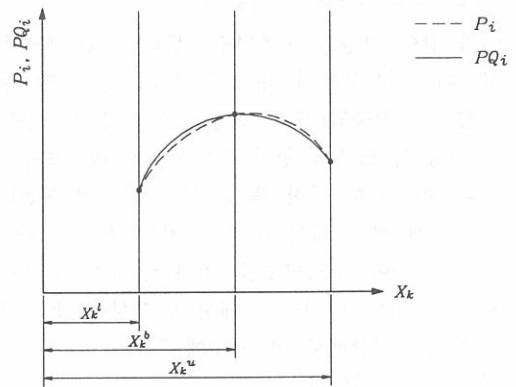


Fig. 1. 엄밀Model과 유사Model의 근사상태

이것에 기초하여 SI법의 적용이 가능하다.

즉, 오차의 자승이 최소로 되기 위한 기본함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Minimize } Err^2 = \sum_{i=1}^M (PM_i - PQ_i)^2 \quad (2.7)$$

식(2.7)을 최소로 하기 위해서는 비선형 문제를 해결할 수 있는 최적화 기법이 필요하다. 이와 같은 최적화 기법으로는 여러가지 방법들이 있는데, 그들 중 본 연구에서 사용한 SLP방법은 축차적인 선형화 기법으로 그 해법이 간단하고, 기존의 Simplex알고리즘을 이용하여 비선형 문제를 해결할 수 있는 방법이다.

일반적으로 최적해를 구하는 定式化는 아래와 같다.<sup>3)</sup>

$$\text{Minimize } z = f(x) \quad (2.8)$$

$$\text{subject to } g_i(x) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,k \quad (2.8.a)$$

$$g_j(x) = 0 \quad j=1,2,\dots,n \quad (2.8.b)$$

여기서  $x$ 는 설계변수의 Vector이고,  $z$ 는 목적함수이다.

식(2.8.a)는 부등식의 제약조건식이고,  $m$ 은 그 식의 수이며, 식(2.8.b)는 등식의 제약조건식이고,  $n$ 은 그 식의 수이다. 식(2.7)은 목적函数인 식(2.8)에 해당되는 고차의 비선형식이고, 식(2.7)의 최소화를 위한 制約條件은 설계변수의 Move Limits가 된다.

따라서 SLP方法으로 최적해를 구하기 위한 定式化는 아래와 같다.

식(2.7)을  $x^*$ 점에 관해 다음과 같이 Taylor級數로 전개하여 1次項까지 취한 선형식을 목적함수로 한다.<sup>3)</sup>

$$\text{Minimize } z = f^* + \{\Delta f^*\}^T(x-x^*) \quad (2.9)$$

$$\text{subject to } -\Delta x^L \leq x-x^* \leq \Delta x^U \quad (2.9.a)$$

여기서  $*$ 는 초기 가정해 또는 前段階解를 뜻하고,  $\Delta$ 는 Gradient Vector 이며,  $\Delta x^L$ 은 Vector  $x-x^*$ 의 하한치이고,  $\Delta x^U$ 은 Vector  $x-x^*$ 의 상한치이다.

식(2.2)에서 식(2.9)를 반복계산해서  $Err^2$ 의 값이 최소로 수렴될때의 구조변수가 確認值이다.

### 3. 재하시험 및 안전성 평가방법

#### 3.1 재하시험

##### 1) 정적재하시험

공용시의 상태에 있어서 기지의 재하차량을 각 주형에 가장 불리하도록 재하한다. 즉, 재하차량이 15t 덤프트럭인 경우는 中間주형에 대해서는 중륜축의 중심이 각 주형의 중심선상에 오는 한

편 각 주형지간 중앙에 재하되도록 하여 각 주형의 지간중앙에 처짐을 측정하고, 외측주형에 대해서는 노면폭의 관계로 내측주형과 같은 방법의 재하가 불가능하므로 재하차륜의 外端이 연석에 접하도록 재하하여 역시 지간중앙의 처짐을 측정한다.

##### 2) 동적재하시험

정적재하시험에 사용되었던 재하차량을 교량위 일정차선에 5km/h, 10km/h, 20km/h, ..., 등의 속도별로 주행시켜 가속계로부터 고유진동수 및 경간중앙의 진폭을 구한다.

### 3.2 SI법에 의한 구조변수의 決定

#### 1) 정적거동에 의한 구조동정

평가대상구조물인 교량의 역학적 거동으로서 각 주형의 지간중앙의 처짐을 선정하고, 재하시험으로부터 얻어진 실측처짐  $PM_i$ 를 이용한다.

정적재하시험을 기초로 SI법에 의한 구조변수를 同定하는 Algorithm은 아래와 같다.

(1) 구조변수에는 각 주형, 횡형 및 슬래브의 단면2차모멘트를 선정하고, 상한치  $X_k^u$ 에 각각의 이론치 즉, 난간·연석 등을 고려한 전단면이 유효한 단면2차모멘트를 사용하고, 하한치  $X_k^l$ 에는 상한치 값의 50%를 취하며,  $X_k^u$ 와  $X_k^l$ 의 중간값을 구조변수의 기준치  $X_k^b$ 로 한다.

(2) (1)에서 정한  $X_k^u$ ,  $X_k^l$ ,  $X_k^b$ 를 식(2.6)에 대입해서 구한 (2N+1)개의 식을 이용하여 식(2.2)의 (2N+1)개의 미지계수를 구한다.

(3) 현장재하시험의 측정처짐  $PM_i$ 와 (2)에서 구한 미지수를 대입한 식(2.2)의  $PQ_i$ 를 식(2.7)에 대입한다.

(4) 식(2.7)을 선형화하여 목적함수로 하고, 제약조건으로 Move Limits를 사용하여 선형계획 프로그램 LP(Linear Programming)를 푼다.

(5) (3)~(4)의 과정을 되풀이 하여 식(2.7)을 만족하는 구조변수  $X_k$ 를 구하고, 엄밀Model를 써서 구한 구조해석치  $P_i$ 와  $PM_i$ 를 비교하여 같으면 그때의 구조변수  $X_k$ 가 구조특성확인치가 되지만 다르면 다시 (2)에서  $X_k^u$ ,  $X_k^l$ ,  $X_k^b$ 를 조정하여 미지수를 구한다.

(6) (3)~(5)과정을 되풀이 하여 구조변수  $X_k$ 가 식(2.7)을 만족하고,  $PM_i$ 와  $P_i$ 가 같으면 그때의 구조변수  $X_k$ 가 정적거동에 의한 구조특성확인치가 된다.

### 2) 동적거동에 의한 구조특성확인

교량의 동적재하시험을 기초로 SI법에 의한 구조변수를 定하는 과정은 동적특성으로는 고유진동수를 설정한다. 동적재하시험에서 얻어진 고유진동수  $PM_i$ 와 구조해석에서 얻어진 고유진동수  $P_i$ 를 사용하여 정적거동에 의한 구조특성확인과의 경우와 같은 방법으로 구조변수  $X_k$ 를 동정한다.

### 3.3 파괴 안전율에 의한 안전성 평가

정적 및 동적의 SI법에 의해 정해진 콘크리트의 탄성계수  $E_c$ , 各桁의 단면2차모멘트  $I$ 를 사용하여 휨파괴 안전율  $\gamma_M$ 을 산출한다.

현행 도로교 표준 시방서에 의한 설계활하중에 대한 휨파괴 안전율은 다음식으로 구한다.

$$\gamma_M = (\phi M_n - \gamma_d M_d) / M_l (1 + i) \quad (3.1)$$

여기서,  $\gamma_M$ ; 설계활하중에 대한 휨파괴 안전율

$M_n$ ; 공칭강도 (t · m)

$\phi$ ; 강도감소 계수 (0.85)

$\gamma_d$ ; 사하중 계수 (1.3)

위의  $M_n$  및  $M_l$ 은 아래와 같이 계산된다.<sup>4)</sup>

$$M_n = A_s \cdot \sigma_{sy} \left( d - \frac{1}{2} \cdot A_s \cdot \sigma_{sy} / (0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot b) \right) \times 10^{-5} \quad (3.2)$$

여기서,  $A_s$ ; 인장철근량 ( $cm^2$ ),

$i$ ; 계산충격계수

$d$ ; 유효높이 ( $cm$ ),

$b$ ; 압축부의 유효폭 ( $cm$ )

$\sigma_{sy}$ ; 철근의 항복응력

$\sigma_{ck}$ ; 콘크리트의 설계기준강도( $kg/cm^2$ )

또한,  $M_l$ 은 SI법에 의해 정해진  $E_c$  및  $I$ 와 처짐을 이용하여 처짐과 휨모멘트의 관계로부터 재하차량을 등가등분포하중으로 환산하여 다음과 같이 계산한다.

$$M_l = \delta \cdot \frac{48EI}{5l^2} \cdot \gamma \quad (3.3)$$

여기서,  $\delta$ ; 처짐,  $l$ ; 계산지간

$k$ ; 재하차량의 설계활하중에 대한 휨모멘트 환산치

## 4. 수치계산예 및 고찰

### 4.1 현장재하시험의 결과

#### 1) 대상교량

현장 재하시험을 행한 교량은 RC-T형교인 신성교이고 하중경우 1, 2는 각각 외측, 내측주형에 지배적인 재하상태이다.

정적재하시험에 의한 외측 및 내측주형의 지간 중앙에서 최대 처짐값은 Table 1과 같고, 동적재하시험에서 10km/hr~60km/hr의 주행속도로부터 측정된 것 중 비교적 합리적으로 판단되는 대상 교량의 고유진동수는 Table 2와 같다.<sup>5)</sup>

Table 1. 정적재하시험의 결과 (처짐 mm)

구분	하중경우	하중경우1	하중경우2
외측주형		2.74	1.71
내측주형		2.45	2.41

Table 2. 동적재하시험의 결과 (고유진동수)

구분	교량	RC-T형교
주행속도 (km/hr)		50
고유진동수(Hz)		4.8

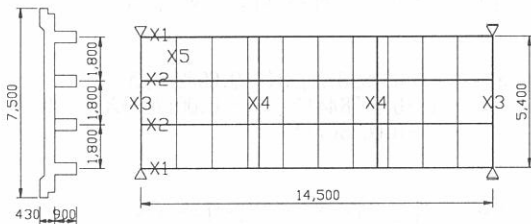
## 4.2 Model의 결정

### 1) 정적 및 동적Model

대상교량의 정적계산 Model 및 구조변수는 Fig. 2와 같다.

구조해석은 SAP90을 써서 平面格子 Model로 해서 처짐을 구한다.

동적Model은 고유진동수 및 진동 Mode를 Fig. 3과 같이 집중질량 Model을 써서 SAP90에 의해 구한다.



X1, X2 : 주형의 단면2차모멘트  
X3, X4 : 횡형의 단면2차모멘트  
X5 : 슬래브의 단면2차모멘트

Fig. 2. RC-T형교의 정적Model

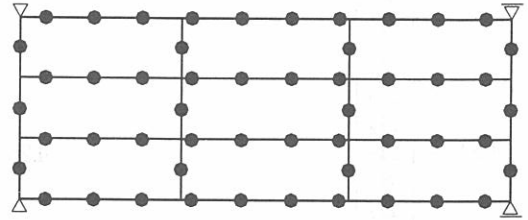


Fig. 3. RC-T형교의 동적Model

### 2) 유사Model의 작성

엄밀Model을 근사화한 정적 및 동적의 유사 Model은 식(2.2)로부터 얻어지는데, 우선 식(2.6)에서 (2N+1)개의 미지계수를 구하기 위한 (2N+1)개의 선형식은 아래와 같다.

$$[A]\{b\} = \{c\} \quad (4.1)$$

[A]는 (2N+1)개의 미지계수의 계수를 나타내는 Matrix이다.

{b}는 (2N+1)개의 미지계수를 나타내는 Vector이며, {c}는 (2N+1)개의 응답변수  $PM_i$ 에 대응하는 처짐 및 고유진동수의 해석치  $P_i$ 에 해당하는 Vector이다.

식(4.1)을 구체적으로 나타낸 예는 다음과 같다.

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 75388 & 34025 & 0.175 & 15648 & 10047 & 75388 & 34025 & 0.175 & 15648 & 10047 \\ 1 & 113307 & 34025 & 0.175 & 15648 & 10047 & 113307 & 34025 & 0.175 & 15648 & 10047 \\ 1 & 37739 & 34025 & 0.175 & 15648 & 10047 & 37739 & 34025 & 0.175 & 15648 & 10047 \\ 1 & 75388 & 510335 & 0.175 & 15648 & 10047 & 75388 & 510335 & 0.175 & 15648 & 10047 \\ 1 & 75388 & 170125 & 0.175 & 15648 & 10047 & 75388 & 170125 & 0.175 & 15648 & 10047 \\ 1 & 75388 & 34025 & 0.2625 & 15648 & 10047 & 75388 & 34025 & 0.2625 & 15648 & 10047 \\ 1 & 75388 & 34025 & 0.0575 & 15648 & 10047 & 75388 & 34025 & 0.0575 & 15648 & 10047 \\ 1 & 75388 & 34025 & 0.175 & 23472 & 10047 & 75388 & 34025 & 0.175 & 23472 & 10047 \\ 1 & 75388 & 34025 & 0.175 & 0.7824 & 10047 & 75388 & 34025 & 0.175 & 0.7824 & 10047 \\ 1 & 75388 & 34025 & 0.175 & 15648 & 15075 & 75388 & 34025 & 0.175 & 15648 & 15075 \\ 1 & 75388 & 34025 & 0.175 & 15648 & 0.5025 & 75388 & 34025 & 0.175 & 15648 & 0.5025 \end{bmatrix}$$

(4.2a)

$$\{b\} = \begin{pmatrix} C_1 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{pmatrix} \quad (4.2b)$$

$$\{c\} = \begin{pmatrix} 2.278 \\ 1.753 \\ 3.340 \\ 2.034 \\ 2.622 \\ 2.275 \\ 2.282 \\ 2.270 \\ 2.290 \\ 2.254 \\ 2.316 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2.086 \\ 1.637 \\ 3.015 \\ 1.793 \\ 2.505 \\ 2.085 \\ 2.087 \\ 2.077 \\ 2.098 \\ 2.062 \\ 2.126 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 4.814 \\ 5.490 \\ 3.546 \\ 4.915 \\ 4.253 \\ 4.814 \\ 4.253 \\ 4.814 \\ 4.814 \\ 4.814 \\ 4.814 \end{pmatrix} \quad (4.2c)$$

식(4.2)의 선형식으로부터 미지계수를 구한 다음, 식(2.2)에 대입하여 유사Model을 작성하면 아래와 같다.

먼저 정적에 대한 유사Model은 다음과 같다.

$$PQ_1 = 5.265 - 0.03758X_1 - 0.028285X_2 - 0.050667X_3 - 0.031171X_4 - 0.106452X_5 + 0.000150X_1^2 + 0.000127X_2^2 + 0.014222X_3^2 + 0.002332X_4^2 + 0.036634X_5^2 \quad (4.3a)$$

$$PQ_2 = 4.831 - 0.037087X_1 - 0.03393X_2 - 0.024000X_3 - 0.021069X_4 - 0.069187X_5 + 0.000125X_1^2 + 0.000156X_2^2 + 0.014222X_3^2 + 0.001499X_4^2 + 0.024423X_5^2 \quad (4.3b)$$

그리고 동적에 대한 유사Model은 다음과 같다.

$$PQ_3 = 0.107137 + 0.072314X_1 + 0.048950X_2 + 0X_3 + 0.0000297X_4 + 0.0000641X_5 - 0.0003330X_1^2 - 0.0003527X_2^2 + 0X_3^2 - 0.0000027X_4^2 - 0.0000285X_5^2 \quad (4.4)$$

### 3) 목적함수식의 구성

비선형 목적함수인 식(2.7)에 앞에서 구한 유사Model를 대입한 목적함수의 값은 아래와 같다.

먼저 정적에 대해서는 식(4.3a) 및 식(4.3b)를 사용하면 목적함수는 다음과 같다.

$$ES_1 = 2.74 - PQ_1 \quad (4.5a)$$

$$ES_2 = 2.42 - PQ_2 \quad (4.5b)$$

$$E_{rr}^2 = ES_1^2 + ES_2^2 \quad (4.5c)$$

또한 동적에 대해서는 식(4.4)를 사용하면 목적함수는 다음과 같다.

$$ED_1 = 4.8 - PQ_3 \quad (4.6a)$$

$$E_{rr}^2 = ED_1^2 \quad (4.6b)$$

식(4.5) 및 식(4.6)은 비선형식이므로 식(2.8)에 의해 선형화하고, 수렴된 동정치  $X_k^*$ 를 대입하면 아래와 같다.

먼저 정적인 경우에는 다음식과 같다.

$$z = (-0.002698)X_1 + (-0.002207)X_2 + (-0.003844)X_3 + (-0.001705)X_4 + (-0.008607)X_5 \quad (4.7)$$

또한 동적인 경우에는 다음식과 같다.

$$z = (-0.552016)X_1 + (-0.366263)X_2 + (-0.00)X_3 + (-0.000225)X_4 + (-0.000501)X_5 \quad (4.8)$$

Table 3. SI법에 의한 추정결과와의 비교

위치	구조변수	전단면 $I_g$	균열단면 $I_{cr}$	정적재하시험에 의한 추정치 $I_S$	동적재하시험에 의한 추정치 $I_D$
제2경간	주형 X1	12.559		4.559	5.919
	주형 X2	8.402	5.110	4.402	5.082
	횡형 X3	0.068		0.031	0.026
	횡형 X4	0.406		0.326	0.340
	슬래브 X5	0.070		0.032	0.037
오차 $\Sigma Err^2$				7.21E-7	4.21E-6

#### 4.3 SI법에 의한 구조변수의 추정결과

정적 및 동적재하시험의 결과를 이용하여 SI법에 의한 단면2차모멘트의 추정결과를 전단면과 균열단면에 대해 비교한 것은 Table 3과 같다.

#### 4.4 안전성 평가 및 고찰

본 대상 교량의 식(3.1)에 의한 정적 및 동적 휨과피 안전율의 평가 결과는 Table 4와 같다. 정적 및 동적에 대한 안전율이 다소 차이는 있으나, 일부는 도로교 표준 시방서의 활하중 계수 2.15보다 약간 적게 나타났다.

Table 4. 안전성 평가 결과

주형	$M_u$ (t·m)	$M_d$ (t·m)	$M_l$ (t·m)		$\gamma_M$		비고
			정적	동적	정적	동적	
내측주형	202.13	63.32	21.57	25.17	3.25	2.79	
외측주형	202.39	80.79	19.39	24.90	2.71	2.11	

### 5. 結 論

본 논문에서는 SI법으로 교량의 안전성평가에 대한 하나의 방법을 제안하였다. 적용예로서 철근 콘크리트 T형교에 대해 검토하였다.

제안된 방법은 구조해석의 횡수를 줄이기 위해 근사 2차함수를 도입하므로써 구조특성을 확인할

시간을 단축할 수 있었으며, 실제구조물에서 실험에 의한 응답치와 그에 대응하는 해석치가 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 이와같이 구한 단면2차모멘트를 이용하여 휨과피 안전율에 대한 안전성을 평가하였으므로 구조물의 실제거동에 의한 교량진단의 방법이라 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. 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
2. Shan S. Kuo, "Computer Applications of Numerical Methods", Addison-Wesley Publishing Company, pp. 194~207, 1972
3. Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill Book Company, pp. 365~383, 1989
4. Chu-kia Wang, and Charles G. Salmon, "Reinforced Concrete Design -5th ed", Harper Collins Publishers Inc, pp. 958~964, 1992
5. 대한토목학회 대구·경북지회, "신성교의 안전진단 보고서", 1996

(접수일자 1998. 1. 17)