

# 응력보정계수 산정 방법 개선

An Improvement for Determining Response Modification Factor in Bridge Load Rating

구 봉 근\*                  신 재 인\*\*                  이 상 순\*\*\*  
Koo, Bong-Kuen          Shin, Jae-In                  Lee, Sang-Soon

## Abstract

Bridge load rating calculations provide a basis for determining the safe load capacity of bridge. Load rating requires engineering judgement in determining a rating value that is applicable to maintaining the safe use of the bridge and arriving at posting and permit decisions. Load testing is an effective means in calculating the rating value of bridge. In Korea, load carrying capacity of bridge is modified by response modification factor that is determined from comparisons of measured values and analysis results. The response modification factor may be corrupted by vehicle location error that is defined as the gap of test vehicle location between load testing and analysis. In this study, the effects of vehicle location error to structural response and response modification factor are investigated, and a new method for evaluating response modification factor is proposed. The random data analysis shows that the proposed method is less sensitive to vehicle location error than the present method.

**keywords** : bridge load rating, response modification factor, random data analysis

## 1. 서 론

최근 도로교를 통과하는 차량의 대형화 및 교통량의 증가로 인하여 교량 구조물의 유지관리 및 운영이 중요한 문제로 대두되고 있다. 교량의 효율적인 운영 측면에서 교량의 활하중에 대한 실제적인 내하력 평가는

필수적이다. 교량내하력의 과소평가는 불필요한 통행 제한 또는 보강을 초래하고 내하력의 과대평가는 중차량의 통과로 인한 구조물의 점진적인 손상을 유발하여 그 수명을 단축시킬 우려가 있으며 성수대교나 창선교의 붕괴사고와 같은 예기치 못한 참사를 불러올 수 있다. 교량의 내하력 평가는 조사, 시험 및 구조해석 등

\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사수료

\*\*\* 정회원, 한국도로공사 도로처 과장, 공학박사

● 본 논문에 대한 토의를 2001년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2001년 6월호에 토의결과를 게재하겠습니다.

의 기본자료로부터 평가자의 공학적인 판단까지 요구되는 복잡한 문제이다. 공용내하력을 결정하는 방법은 기본내하력을 공용내하력으로 채택하는 방법과 구조물의 응답, 노면상태, 통행상태, 외관상태 등에 의하여 기본내하력을 보정한 내하력을 채택하는 방법이 있다. 전자의 방법은 미국(AASHTO)<sup>(1)</sup>이나 유럽(CEB)<sup>(2)</sup>에서 채택하고 있고, 후자의 방법은 한국<sup>(3)</sup>이나 일본<sup>(4)</sup>에서 채택하고 있다. 국내에서는 건설교통부와 시설안전기술공단에서 발간된 안전심설 및 성밀안전진단에 대한 세부지침<sup>(5)</sup>을 적용하는데, 이는 일본의 지침을 준용한 것으로 외관상태에 관련된 기타조건 보정계수를 생략한 형태이다. 보정내하력을 공용내하력으로 채택하는 것이 이론적으로는 진보된 방법인 것으로 보인다. 이 경우에는 각각의 보정계수를 산출하는 방법이 객관적이고 합리적이어야 한다. 그런데, 국내에서는 진단기관이나 진단자에 따라서 보정방법이나 기준이 상이하여 진단결과와 일관성이 적다. 최근에 이리한 문제점을 개선하기 위하여 다양한 연구가 수행되어 왔다.<sup>(6-11)</sup> 본 논문에서는 보정계수 중에서 응력보정계수(stress modification factor 혹은 response modification factor)산정에 있어서의 문제점을 도출하고 보다 합리적인 응력보정계수 산정방법을 제안하고자 한다.

## 2. 응력보정계수 산정방법 검토

응력보정계수는 재하시험을 통하여 구한 응력이나 처짐과 같은 구조물의 응답과 해석으로부터 구한 응답의 비이다. 응력보정계수 산정방법은 다음과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있다.

### (1) 응력보정계수 산정방법 1

재하경우(load case)중에서 계산응답과 측정응답의 비가 가장 작은 경우를 응력보정계수로 취한다.<sup>(12)</sup>

$$K_s = \min(R_i^c / R_i^m) \quad (1)$$

여기서,  $K_s$ 는 응력보정계수이며,  $R_i^c$ 는 계산응답이고  $R_i^m$ 는 측정응답이다. 그리고  $i$ 는 재하경우이다.

### (2) 응력보정계수 산정방법 2

재하경우(load case)중에서 응답이 가장 큰 경우의 계산응답과 측정응답의 비를 응력보정계수로 취한다.<sup>(13)</sup>

$$K_s = R_k^c / R_k^m \quad (2)$$

여기서,  $k$ 는 응답이 가장 큰 재하경우이다.

### (3) 응력보정계수 산정방법 3

이 방법은 본 연구에서 제안한 방법으로 결침의 원리를 사용하여 모든 하중경우를 동시에 고려하여 응력보정계수를 구하는 방법이다.

$$K_s = \sum_i R_i^c / \sum_i R_i^m \quad (3)$$

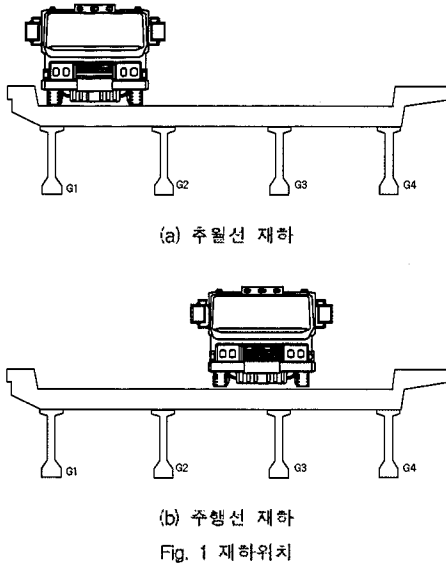
여기서,  $R_i^c$ 는 계산응답이고  $R_i^m$ 는 측정응답이며,  $i$ 는 재하경우이다.

Table 1은 고속도로상의 ○○교량에 대한 구조해석으로부터 얻은 계산응답과 재하시험으로부터 얻은 측정응답을 나타낸 것이다. 하중은 23ton의 덤프트럭을 Fig. 1과 같이 주행선과 추월선에 각각 재하하였다. 이 교량은 30m PSC빔 교량으로 수형에 상당수의 휨균열이 발생되어 PSC빔 하면을 강판으로 보강한 상태이다. 그리고 Table 1에 각각의 재하경우에 대한 계산응답과 측정응답의 비를 나타내었으며, 앞서 기술한 3가지 응력보정계수 산정방법을 적용하여 계산한 결과를 함께 수록하였다.

Table 1 ○○교량의 주형 처짐(mm) 및 응력보정계수

주형 번호	추월선 재하			주행선 재하			응력보정계수		
	계산 응답 $R^c$	측정 응답 $R^m$	$R^c / R^m$	계산 응답 $R^c$	측정 응답 $R^m$	$R^c / R^m$	방법 1	방법 2	방법 3
G1	3.31	2.52	1.31	1.37	0.99	1.37	1.31	1.31	1.33
G2	2.32	1.94	1.20	1.69	1.60	1.06	1.06	1.20	1.10
G3	1.33	1.05	1.26	1.99	2.00	1.00	1.00	1.00	1.08
G4	0.42	0.30	1.39	2.13	1.98	1.07	1.07	1.07	1.11

계산응답과 측정응답의 비는 1.00~1.39의 범위이고 재하경우에 따라 이 값이 차이가 나며, 응력보정계수도 산정방법에 따라 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.



현재까지는 응력보정계수 산정방법에 대한 충분한 연구가 수행되지 않아서 이 3가지 방법 중에서 어떠한 것이 가장 합리적인지에 대한 평가가 이루어지지 않은 상태이다. 재하경우에 따라 응답비가 차이가 나는 이유는 재하시험과 구조해석의 재하위치 차이, 구조 모델링의 문제(재료 강도, 횡분배, 경계조건, 균열 등), 계측위치와 항목 등이다. 이 중에서 본 논문에서는 재하시험과 구조해석의 재하위치 차이가 응력보정계수에 미치는 영향을 검토하고, 합리적인 응력보정계수 산정방법을 제안하고자 한다.

### 3. 재하위치 오차가 응답에 미치는 영향

재하시험을 수행함에 있어서 차량의 재하위치를 정확하게 파악하여 이를 구조해석에 적용하여야 한다. 일반적으로 재하시험은 차량의 통행을 차단한 상태에서 이루어지기 때문에 제한된 시간 내에 시험이 완료

되어야 한다. 따라서, 재하위치가 의도하는 위치와 약간의 차이가 발생할 수 있다. 특히, 최근에 널리 사용되는 의사정적재하시험(slow run test)의 경우에는 이러한 오차가 커질 가능성이 높다.

재하위치의 오차가 구조물의 응답에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Fig. 2와 같은 2차선 단순 1형교에 대하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 가정과 해석절차는 다음과 같다.

- (1) 모든 재료는 선형탄성거동을 하는 것으로 가정하였으며, 구조해석 프로그램은 NISA II를 사용하였다.
- (2) 바닥판은 쉘 요소로, 주형은 보요소로 모델링하였으며, 주형과 바닥판의 일체거동을 유도하기 위하여 강체요소(rigid link)를 사용하였다.
- (3) 구하고자 하는 응답의 영향면을 상반정리(reciprocal theorem)를 사용하여 구한다.
- (4) 재하위치의 오차는 평균이 0이고 표준편차가  $\sigma$ 인 정규분포로 가정하고 난수발생함수와 누적확률밀도함수(cumulative probability density function)를 사용하여 재하위치 오차를 생성한다.
- (5) 하중재하위치를 구하고 영향면을 사용하여 구조물의 응답  $R^c$ 을 구한다.

- (6) 구조물 응답  $R^c$ 의 평균값과 표준편차 및 분산계수(coefficient of variation)를 구한다.

해석에 사용된 교량은 철근콘크리트 바닥판과 강재주형이 활하중에 대해서 일체로 거동하고 있는 합성형으로, 준공년도는 1969년이고 설계하중은 DB-18이다. 교폭은 11.9m이고 지간은 15m이며, 주형의 간격은 2.1m이고 주형은 H800×300×14×26이다.

Fig. 2와 같이 주형 G1으로부터  $x$ 만큼 떨어진 위치에 단위하중이 작용하고 재하위치 오차는 표준편차가  $\sigma=30$ cm인 정규분포를 갖는다고 가정할 때, Fig. 3(a)는 주형 G1의 정규화된 평균응답을 나타낸 것이고, Fig. 3(b)는 재하위치 오차가 주형 G1의 응답에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 재하위치가 주형 G1바로 위에 위치하는 경우( $x=0$ )가 분산계수가 가장 작고 재하위치가 주형으로부터 멀리 떨어질수록 표준편차의 평균에 대한 백분율인 분산계수가 크다는 것

을 알 수 있다. 그리고 응력응답이 처짐응답에 비하여 재하위치 오차의 영향이 크며, 재하위치가 내하력을 평가하고자 하는 주형으로부터 멀리 떨어지면 신뢰성이 적다는 것을 알 수 있다.

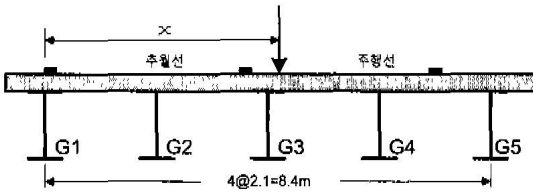
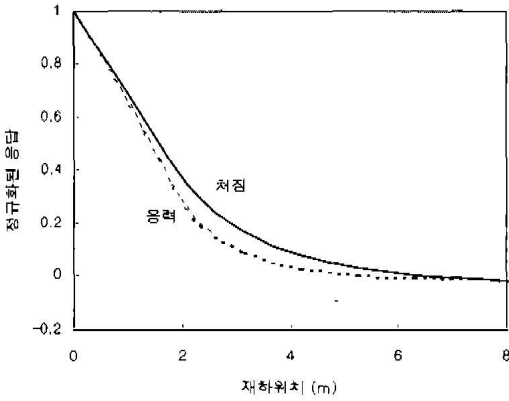
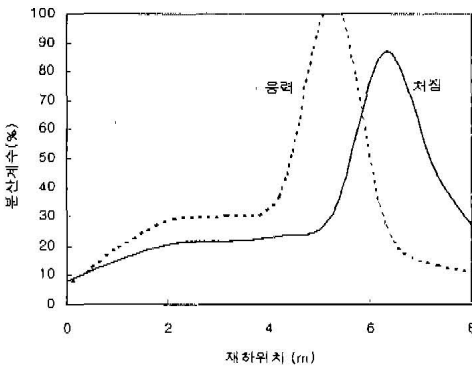


Fig. 2 해석 대상 교량



(a) 주형 G1의 정규화된 평균응답



(b) 응답의 분산계수

Fig. 3 주형 G1의 정규화된 평균응답과 응답의 분산계수

#### 4. 재하위치 오차가 응력보정계수에 미치는 영향검토

응력보정계수에서 계산응답은 재하위치 오차를 포함하고 있다. 재하위치 오차가 없는 경우의 계산응답을  $R^{ce}$ 라고 할 때, 식(1), (2) 및 (3)을  $R^{ce}$ 에 대하여 정리하면 각각 (4), (5) 및 (6)와 같다.

$$K_s = \min(R_i^c/R_i^m) = (1 + E_{L1})R_j^{ce}/R_j^m \quad (4a)$$

$$E_{L1} = (R_j^c - R_j^{ce})/R_j^{ce} \quad (4b)$$

$$K_s = R_k^c/R_k^m = (1 + E_{L2})R_k^{ce}/R_k^m \quad (5a)$$

$$E_{L2} = (R_k^c - R_k^{ce})/R_k^{ce} \quad (5b)$$

$$K_s = \sum_i R_i^c / \sum_i R_i^m = (1 + E_{L3}) \sum_i R_i^{ce} / \sum_i R_i^m \quad (6a)$$

$$E_{L3} = (\sum_i R_i^c - \sum_i R_i^{ce}) / \sum_i R_i^{ce} \quad (6b)$$

여기서,  $E_{L1}$ ,  $E_{L2}$ ,  $E_{L3}$ 은 재하위치 오차에 의해 발생하는 응력보정계수 오차이다.  $i$ 는 임의의 재하경우이고  $j$ 는 계산응답과 측정응답의 비가 가장 작은 재하경우이며,  $k$ 는 응답이 가장 큰 재하경우이다.

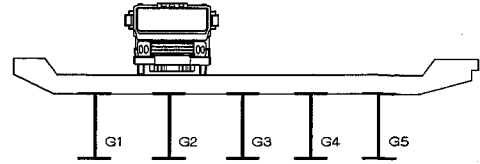
응력보정계수 오차의 표준편차는 앞에서 언급한 응답의 분산계수와 동일하다. 따라서, 응답의 분산계수가 크다는 것은 응력보정계수의 분산이 크다는 것을 의미한다. 즉, 재하위치가 응답을 구하고자 하는 부재로부터 멀리 떨어질수록 응력보정계수에 많은 오차가 포함될 수 있다.  $K_s$ 의 크기와 여기에 포함되는 오차의 크기  $E_{L1}$  사이에 아무런 상관관계가 없기 때문에 방법 1은 합리적이지 못하다. 하중과 응답을 구하고자 하는 부재사이의 거리가 가까울수록, 이 부재에 발생하는 응답의 크기가 크고 응답의 크기가 큰 하중경우(load case)가 응답의 크기가 작은 하중경우에 비하여 오차  $E_{L2}$ 가 작다. 따라서, 응답이 큰 재하경우에 대하여 응력보정계수를 도출하는 방법 2가 방법 1에 비하여 재하위치 오차의 영향을 적게 받는 방법이다.

식(6)에서  $E_{L3}$ 는 재하위치 오차가 각각 독립적인 확률분포를 갖는 2대 이상의 차량을 동시에 재하한 경우 재하위치 오차가 응력보정계수에 미치는 영향을 나타낸다.  $E_{L1}$ 과  $E_{L3}$ 의 표준편차를 각각  $\sigma_{L1}$ 과  $\sigma_{L3}$ 이라고 할 때, 두 값 사이에는 다음과 같은 부등식이 성립된다.

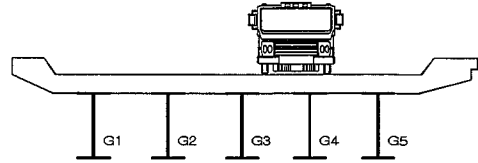
$$\sigma_{L3} \leq \sum \sigma_{L1}/n \quad (7)$$

여기서,  $n$ 은 재하경우의 수이다. 식(7)은 방법 3이 방법 1보다 재하위치 오차가 응력보정계수에 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다. 방법 2와 방법 3은 모두 방법 1보다는 합리적인 산정방법이다.

Table 2와 Table 3은 단순 I형교(Fig. 4 참조)에 대한 총중량 23ton의 트럭을 주행선 및 추월선에 각각 재하한 경우의 처짐 및 응력 응답을 나타낸 것이다. 응력의 분산계수가 처짐의 분산계수보다 큰 것을 알 수 있다. 이로부터 응력보다는 처짐을 추정하여 응력보정계수를 구하는 것이 재하위치 오차의 영향을 작



(a) 추월선 재하



(b) 주행선 재하

Fig. 4 차량재하위치

게 받는다는 사실을 알 수 있다.

응답의 분산계수는 트럭이 재하된 인접 수형에는 작으나 차량의 위치로부터 멀리 떨어질 수록 크다는 것을 알 수 있다. 응력보정계수의 분산은 재하트럭과 인접한 부재의 경우에는 방법 2가 방법 3보다 작으나, 재하트럭과 상대적으로 멀리 떨어져 있는 경우에는 방법 2가 방법 3보다 크다. 방법 2는 재하위치 오차의 영향이 특정 부재에 집중되는 반면에 방법 3은 모든 부재에 분포되는 경향이 있다. 또한 방법 1과 2의 경우에는 재하시험 반복횟수와 관계없이 응력보정계수의 분산계수가 동일하나 방법 3은 재하시험 반복횟수가 증가하면 분산계수가 감소한다.

Table 4는 방법 3을 사용한 경우에 재하시험 횟수에 따른 응력보정계수의 분산계수를 나타낸 것이다.

Table 2 처짐 (mm)

위치	추월선 재하		주행선 재하		응력보정 계수의 분산계수	
	처짐 $R^{ce}$	처짐의 분산계수	처짐 $R^{ce}$	처짐의 분산계수	방법 2	방법 3
G1	0.798	20.2	0.023	91.3	20.2	16.5
G2	1.371	1.1	0.262	22.9	1.1	3.8
G3	0.912	11.7	0.822	13.4	11.7	9.5
G4	0.284	20.4	1.278	0.7	0.7	4.0
G5	0.031	48.4	0.796	17.6	17.6	15.0
평균					10.2	9.76

Table 3 응력 (kgf/cm<sup>2</sup>)

위치	추월선 재하		주행선 재하		응력보정 계수의 분산계수	
	응력 $R^{ce}$	응력의 분산계수	응력 $R^{ce}$	응력의 분산계수	방법 2	방법 3
G1	213.8	21.7	-0.7	342.0	21.7	21.7
G2	362.0	1.4	54.5	23.4	1.4	3.2
G3	185.2	13.6	257.5	15.6	13.6	10.4
G4	52.0	22.6	396.4	1.6	1.6	3.5
G5	0.5	335.0	191.5	21.5	21.5	19.4
평균					11.9	11.6

Table 4 재하시험 횟수에 따른 응력보정계수의 분산계수 (방법 3 사용)

위치	응력보정 계수의 분산계수					
	응력			처짐		
	1회	2회	4회	1회	2회	4회
G1	21.7	19.1	15.6	16.5	14.9	11.9
G2	3.2	2.6	1.8	3.8	2.8	1.9
G3	10.4	5.6	4.0	9.5	4.9	3.7
G4	3.5	2.8	2.2	4.0	3.3	2.7
G5	19.4	16.2	11.4	15.0	13.8	9.9
평균	11.6	9.2	7.0	9.7	7.9	6.0

분산계수가 작다는 것은 하중위치오차의 영향이 작다는 것을 의미한다. Table 4에서 볼 수 있는바와 같이 재하시험 반복횟수가 증가함에 따라 분산계수는 반복횟수의 제곱근에 반비례하여 감소하는 것을 알 수 있다. 외측주형이 내측주형에 비하여 재하위치 오차의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이는 외측주형과 내측주형의 횡분배특성이 다르기 때문이다. 내측주형의 경우에는 차륜이 주형 바로 위에 작용할 때 최대이나 외측주형의 경우에는 차륜이 외측으로 멀리 떨어져 있을 때 최대의 응답을 보인다. 따라서, 주형별로 동일한 정도의 분산계수를 갖기 위해서는 Fig. 5(a)보다는 Fig. 5(b)와 같이 재하하는 것이 바람직하다. Table 5는 재하방법에 따른 분산계수를 나타낸 것이다. Fig. 5(b)와 같이 재하한 경우가 주형별 분산계수의 차가 작은 것을 알 수 있다.

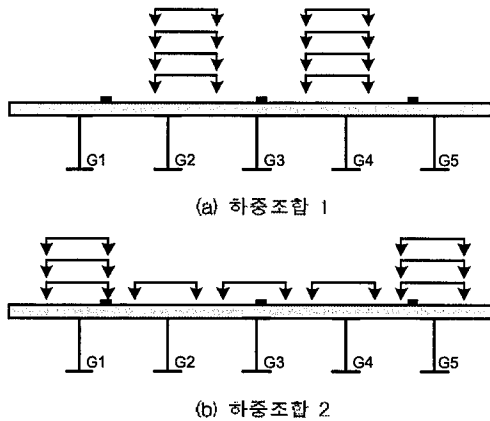


Fig. 5 하중조합

Table 5 하중조합에 따른 응력보정계수의 분산계수 (방법 3 사용)

위치	응력보정계수의 분산계수			
	응력		치점	
	하중조합 1	하중조합 2	하중조합 1	하중조합 2
G1	15.6	7.4	11.9	7.2
G2	1.8	5.1	1.9	4.8
G3	4.0	5.1	3.7	4.4
G4	2.2	5.6	2.7	4.0
G5	11.4	5.8	9.9	6.0
평균	7.00	5.8	6.02	5.2

## 5. 결 론

- (1) 본 연구에서는 재하위치 오차(재하시험과 구조해석의 하중위치 차이)가 구조물의 응답 및 응력보정계수에 미치는 영향을 검토하고 합리적인 응력보정계수 산정방법을 제안하였다.
- (2) 응력보정계수와 구조물의 응답은 재하위치 오차에 매우 민감한 것으로 평가되었다. 따라서, 재하시험을 실시하는 경우에 반드시 정확한 하중재하위치를 파악하여야 한다.
- (3) 하중이 응답을 구하고자 하는 부재에 직접 작용할 때, 재하위치 오차가 구조물의 응답에 미치는 영향이 가장 작으며, 재하위치가 부재로부터 멀리 떨어질수록 응답의 분산계수가 크다.
- (4) 응력보다는 치점을 측정하여 응력보정계수를 구하는 것이 재하위치 오차의 영향을 작게 받는다.
- (5) 외측주형이 내측주형에 비하여 재하위치 오차의 영향을 크게 받는다.
- (6) 제안된 응력보정계수 산정방법이 기존의 방법보다 합리적이고 재하위치 오차의 영향을 적게 받는 것으로 평가되었다.
- (7) 제안된 응력보정계수 산정방법은 재하횟수를 증가시키에 따라 응력보정계수의 분산계수가 감소한다. 따라서, 재하위치 오차의 영향을 줄이기 위해서 재하횟수를 증가시키는 것이 바람직하다.
- (8) 본 논문에서는 여러 인자 중에서 재하위치 오차가 응력보정계수에 미치는 영향을 검토하였다. 지점조건, 부재결합, 모델링 등도 응력보정계수에 영향을 미칠 수 있으므로 향후에 이에 대한 추가적인 연구를 수행할 계획이다.

## 감사의 글

본 연구에 도움을 주신 한국도로공사 도로처 직원 여러분께 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. AASHTO, "Manual for Condition Evaluation of Bridges," 1994.
2. CEB, "Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures. Guidance Report." CEB-Bulletine, Nr. 243, Lausanne, 1998.
3. 시설안전기술공단, "안전점검 및 정밀 안전진단 세부지침," 1996.
4. 日本土木研究所, "道路橋の點檢・補修既設橋梁の耐久性評價・向上技術に關する調査研究," 1987.
5. Chou, K. C., and Yuan, J., "Fuzzy-Bayesian Approach to Reliability of Existing Structures," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.119, No.11, 1993, pp.3276~3290.
6. 나기현, 박주원, 이증빈, 정철원, "Fuzzy 개념을 이용한 RC도로교의 건전성 평가 모델 개발," 한국구조물진단학회지, 제2권, 제2호, 1998, pp.151~161.
7. 권귀현, "장기대교의 재하시험을 통한 내하력평가," 한국구조물진단학회지, 제2권, 제1호, 1998, pp 89~97.
8. 심재수, 김춘호, "RC-T 교량의 균열을 고려한 내하력 평가 연구," 한국구조물진단학회지, 제3권, 제2호, 1999, pp. 141~146.
9. 한국도로공사, "구조물의 안전진단 및 성능 평가 시스템 개발," 1998.
10. 건설교통부, "변동용력측정을 통한 피로평가 및 건전성 평가에 대한 연구," 1999.
11. 건설교통부, "교량정밀안전진단 및 통과허용하중산정기법 개선," 1999.
12. 부산공업대학교 지역개발연구소, "교량(가화천교, 상평교) 정밀안전진단 연구용역보고서(1)," 1995.
13. 한국도로공사, "북하천교 '99정밀안전보고서," 1999

(접수일자 : 2000년 11월 28일)