

PSC박스 교량의 통행차량에 의한 내하력 평가기법 개선

An Improvement for Evaluating Load Carrying Capacity by Passing Vehicles of PSC-BOX Bridge

신재인* 박창호** 이상순*** 이병주***
Shin, Jae-In Park, Chang-Ho Lee Sang-Sun Lee Beyong-Ju

Abstract

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. This paper presents the development of a method for determining the response modification factor, using traffic load. The proposed method is based on the results of computer simulations of traffic action effects. A comparison between the proposed method and the present method shows good agreement in estimating the modified load carrying capacity of bridges.

요 지

재하시험은 교량의 내하력을 측정하는 효과적인 방법이다. 국내에서 교량의 내하력평가는 계측값과 해석값을 비교하여 산정된 응답보정계수를 사용하여 산정한다. 본 논문에서는 통행차량에 의한 응답보정계수를 결정하는 방법을 개발하였다. 제안된 방법은 차량효과를 고려하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션의 결과에 기반을 두었다. 제안된 방법과 기존 방법의 비교결과는 제안된 방법이 교량의 공용 내하력을 비교적 잘 예측한다는 것을 알 수 있다.

Keywords : Bridge load rating, Maximum traffic action effects, Load carrying capacity

핵심 용어 : 교량하중 평가, 최대차량 하중효과, 내하력 평가

* 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 과장, 공학박사

** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원, 공학박사

*** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, 공학박사

E-mail : jaein68@ex.co.kr 031-371-3339

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량의 내하력 평가는 조사, 시험 및 구조해석 등의 기본자료로부터 평가자의 공학적인 판단까지 요구되는 복잡한 문제이다. 국내에서는 구조물의 내하력을 평가함에 있어서 재하시험(load testing)이 빈번하게 사용되고 있다. 그런데 현재 사용되고 있는 재하시험 방법은 교통을 통제된 상태에서 이루어지기 때문에 이용객에게 많은 불편을 초래한다.

고속도로의 경우에는 총중량 40톤, 축중 10톤으로 과적차량의 고속도로 진입이 제한되어 있고 매년 교통량 조사가 이루어지기 때문에 교량에 작용하는 차량하중을 확실적인 접근방법으로 모형화⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾할 수 있다. 따라서 고속도로상 교량구조물의 경우에는 일정 시간 동안에 통행차량에 의해 발생하는 최대응답을 예측할 수 있으며, 이를 측정된 최대응답과 비교함으로써 구조물의 공용내하력을 추정⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 통행차량에 의한 내하력 평가기법을 장대교량에 적용하여 제안된 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 통행차량에 대한 충격계수 및 최대 변위응답

실험대상 교량은 10경간 PSC BOX형식으로 연장은 480m이고, 1987년에 준공되어 17년정도 공용된 교량이다(Fig. 1참조).



Fig. 1 실험 대상교량 전경

재하시험은 9번째 경간에서 실시되었다. 게이지 부착위치는 9번째 경간 중앙부에 Fig. 2와 같이 상·하행선에 각각 2개의 변위 게이지를 설치하였으며 측정은 6시간 30분 동안 실시하였다.

Fig. 3은 측정변위응답의 FFT결과이다. 구조물의 고유진동수는 2.14Hz이고 차량에 의한 정적응답의 고유진동수는 1Hz이하이다. 따라서 정적응답은 통행차량에 의한 동적응답에 [0,1]사이의 low pass filter를 적용하여 구하였다.

Fig. 4는 측정된 동적응답 및 필터링을 통하여 구한 정적응답을 나타낸 것이다.

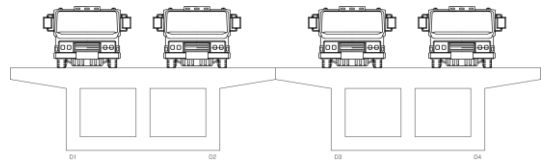


Fig. 2 게이지부착위치

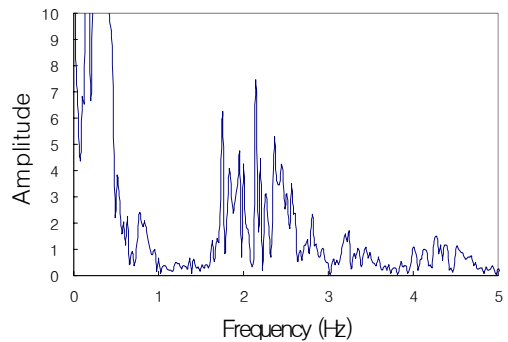


Fig. 3 처짐응답의 FFT결과

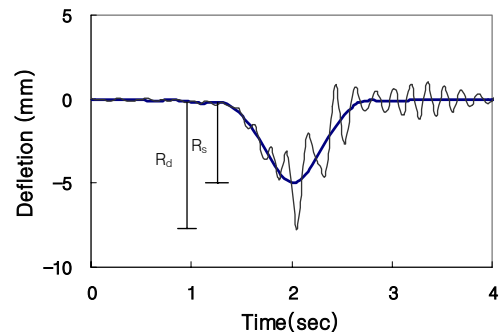


Fig. 4 필터링을 통한 충격계수 산정

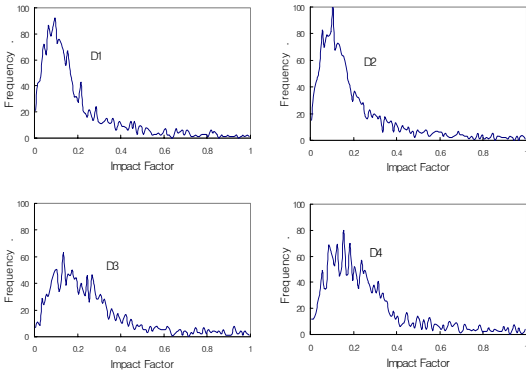


Fig. 5 응답에 대한 충격계수 분포

충격계수는 식(1)과 같이 동적최대응답과 정적최대응답의 비로부터 구할 수 있다. (4)(5)

$$i = \frac{R_d - R_s}{R_s} \quad (1)$$

여기서, R_d 와 R_s 는 각각 하나의 하중사건(load event)에 대한 최대동적응답과 최대정적응답이다.

Fig. 5는 충격계수의 분포를 나타낸 것이다. 통행차량에 의한 충격계수 산정결과, 하행선은 0.20이고 상행선은 0.22로 도로교설계기준에 의하여 산정한 충격계수 0.17보다 약간 큰 것으로 나타났다.

Fig. 6는 6시간 30분동안 계측된 최대 변위응답을 나타낸 것이다. 이 그림들에서 실선은 실측치이고 점선은 low pass filter를 사용하여 구한 정적응답을 나타낸 것이다. 중앙분리대 쪽에 설치된 변위계이지 D2와 D3의 응답이 길어깨 쪽에 설치된 D1과 D4에 비하여 큰 것으로 나타났다.

3. 구조해석 및 최대응답 예측

이 교량은 10경간 연속 PSC BOX 교량이다. 구조해석은 NISA program을 이용하여 플랜지와 복부를 4절점 쉘요소를 사용하여 모델링하였다. 콘크리트의 일축압축강도는 400kgf/cm^2 으로 가정하였으며 철근의 배근은 무시하였다. 영향면은 상반정리(reciprocal

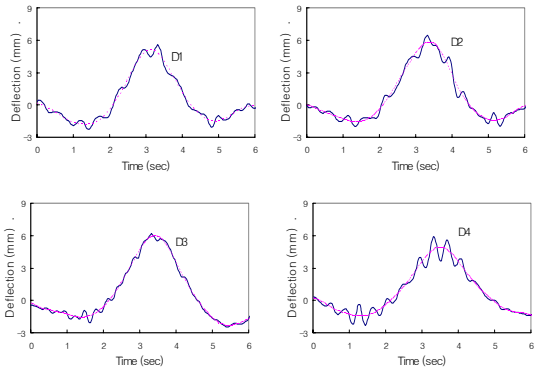


Fig. 6 최대 변위응답

theorem)를 이용하여 구하였다.

최대응답의 예측은 크게 2단계로 구성되어 있다. 첫 번째는 하나의 사건에 의한 응답의 확률분포를 회선법(7)을 사용하여 구하는 단계이고, 두 번째는 Gumbel의 극치분포 이론에 의하여 앞서 결정한 응답의 확률분포로부터 일정시간 동안에 발생하는 최대응답을 추정하는 단계이다.

교량 위에 한 대 또는 한 대 이상의 트럭이 존재하는 경우를 하나의 사건(event)으로 정의하면, 하나의 사건에 의하여 발생하는 구조물의 응답(response)은 그 사건에 포함되는 트럭위치, 트럭종류, 트럭중량, 차간거리 등의 확률변수(random variable)와 영향면(influence surface)에 의하여 결정할 수 있다.

하중사건(load event)으로 인한 처짐, 응력 등의 구조물의 응답(response) r 은 차로중심과 차량중심 사이의 거리인 트럭 횡방향 재하위치 x , 트럭종류 t , 트럭중량 w , 차간거리 l 의 함수로서 표현된다.

$$r = f(x, t, w, l) \quad (2)$$

변수들이 상호 독립적이라고 가정하면 하중사건으로 인한 임의의 응답 r_i 가 발생할 확률 $P[r_i]$ 는 식(3)와 같이 응답 r_i 를 발생시키는 각 변수의 확률로부터 구할 수 있다.

$$P[r_i] = \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m P[x_j] P[t_k] P[w_l] P[l_m] \quad (3)$$

여기서, $r_i = f(x_j, t_k, w_l, l_m)$ 이고 $P[x_j], P[t_k], P[w_l], P[l_m]$ 는 각각 트럭위치, 트럭종류, 트럭중량, 차간거리에 대한 확률이다.

식(2)과 식(3)로부터 하나의 하중사건에 대한 응답 분포를 구할 수 있다. 계속시간동안의 총사건수 n 에 대한 최대 응답분포는 식(4)으로부터 결정할 수 있다.

$$P_E(r) = [P_R(r)]^n \quad (4)$$

여기서, $P_R(r) = \int_{-\infty}^r p_R(\xi) d\xi$ 이며, $p_R(r)$ 은 하나의 사건에 의해서 발생하는 응답의 확률밀도함수이다.

식(4)과 같은 최대 응답분포는 기본적으로 여러 차량의 복합적인 하중효과의 합으로 표시되며, 또한 이러한 하중효과의 최대값에 대한 분석이므로 Gumbel의 극치분포(peak distribution) Type-I에 의해 모형화⁽⁷⁾하는 것이 합리적이다. Gumbel의 극치분포에 대한 확률밀도함수의 평균 및 표준편차를 구하면 다음과 같다.

$$\mu_E = \mu_R + \mu_n \sigma_R \quad (5)$$

$$\mu_n = \sqrt{2 \log_e n} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \log_e n}} \quad (6)$$

$$\sigma_E = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\sqrt{2 \log_e n}} \sigma_R \quad (7)$$

여기서, μ_E 와 σ_E 는 극치분포의 평균과 표준편차이고, μ_R 와 σ_R 는 각각 확률분포 $p_R(r)$ 의 평균과 표준편차이며, μ_n 은 사건수 n 에 따른 계수이다.

Table 1 최대 측정응답 및 예측응답 비교

게이지 번호	최대 측정 응답 (mm)	충격 계수	최대예측응답 (mm)			응답비
			μ_R	σ_R	μ_E	
D1	5.549	0.196	1.368	0.844	5.843	0.950
D2	6.685	0.205	1.478	0.918	6.391	1.046
D3	6.326	0.196	1.478	0.918	6.343	0.997
D4	6.107	0.263	1.368	0.844	6.170	0.989

※ 응답비 = 최대측정응답/최대예측응답

대상교량의 양방향 AADT(Annual Average Daily Traffic)⁽⁹⁾는 47,099이고 중차량 혼입률이 38%이다. 따라서 6시간 30분 동안에 상·하행선 각각에 통과한 트럭의 수는 약 2,400대 이고 버스의 통행량이 약 900대이다. single truck과 semi-trailer의 통행비율은 각각 94%와 6%로 나타났으며, 연행비는 25%이다. 주행선과 추월선의 트럭통행비율은 각각 70%와 30%로 가정하였다. Table 1은 이러한 조건하에서 회선법(simulation method)에 의하여 추정된 최대응답이다. 응답비가 0.950에서 1.046사이의 값을 갖는다. 하행선의 응답비는 D1과 D2의 평균인 0.998이고 상행선의 응답비는 D3과 D4의 평균인 0.993으로 나타났다.

4. 통행차량에 의한 내하력평가 적용 예

기본내하력은 별도로 계산하지 않고 "97년도에 시설안전기술공단에서 실시한 보고서"의 값을 사용하였다. 강도법에 의한 정모멘트부의 내하율은 1.99이고 기본내하력은 DL-47이다. Table 2는 재하시험과 통행차량에 의해 산출한 처짐보정계수와 휨모멘트에 대한 공용내하력을 나타낸 것이다. 통행차량의 내하력 평가결과가 재하시험에 의한 결과보다 약간 작으나 그 차이는 매우 작은 것으로 나타났다. Table 2에서 재하시험에 의한 처짐보정계수와 공용내하력은 충격계수 0.15를 적용한 것이다. 통행차량에 의하여 구한 충격계수 0.20을 적용하여 공용내하력을 다시 산정하면 공용내하력이 DL-49로 통행차량에 의한 평가결과와 단지 4%의 차이를 보이고 있다.

Table 2 재하시험과 통행차량에 의한 내하력 평가결과 비교

구 분	기본 내하력	재하시험 (충격계수 0.15)		통행차량		B/A
		처짐 보정 계수	공 용 내하력 (A)	처짐 보정 계수	공 용 내하력 (B)	
하행선	DL-47	1.083	DL-50	1.002	DL-47	94%
상행선	DL-47	-	-	1.007	DL-47	-

Table 3 수정된 재하시험에 의한 평가결과와 통행차량에 의한 평가결과 비교

구 분	기본 내하력	재하시험 (충격계수 0.20)		통행차량		B/A
		치짐 보정 계수	공 용 내하력 (A)	치짐 보정 계수	공 용 내하력 (B)	
하행선	DL-47	1.044	DL-49	1.002	DL-47	96%
상행선	DL-47	-	-	1.007	DL-47	-

5. 결 론

본 연구에서는 통행차량에 의한 내하력 평가기법의 적용성을 검토하기 위하여 중부선 107.4km ○○교에 대하여 통행차량에 의한 내하력 평가를 실시하고 이를 기존의 재하시험에 의한 공용내하력과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 통행차량에 의한 내하력 평가 결과 휨모멘트에 대한 공용내하력은 상·하행선 모두 DL-47로 평가되었다. 이는 97년도에 시설안전기술공단이 재하시험에 의하여 평가한 내하력(DL-50)의 약 94% 수준이다.
- 2) 통행차량에 의한 충격계수 산정결과, 하행선은 0.20이고 상행선은 0.22로 도로교설계기준에 의하여 산정한 충격계수 0.17이나 97년도에 시설안전기술공단에서 실시한 동적주행시험으로부터 구한 충격계수 0.15보다 큰 것으로 나타났다.
- 3) 이를 고려하여 재하시험 결과를 다시 구하면 재하시험에 의한 공용내하력은 DL-49로 통행차량에 의한 결과와 단지 4% 차이가 발생함을 알 수 있다. 이러한 오차는 구조해석과 재하시험시 차량 위치 의해서도 발생할 수 있으므로 통행차량에 의한 내하력평가방법이 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다.

- 4) 통행차량에 의한 내하력 평가방법은 교통특성⁽¹⁾⁽⁹⁾ (트럭통행량 및 중량분포)이 비교적 잘 알려진 교량의 경우에 공용내하력을 비교적 잘 예측하는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 구봉근, 한상훈, 신재인, 이상순, "통행차량에 의한 내하력 평가기법 연구," 한국구조물진단학회논문집, 제5권, 제1호, 2001, pp. 115-122.
2. 구봉근, 신재인, 이상순, "응력보정계수 산정방법 개선," 한국구조물진단학회논문집, 제5권, 제1호, 2001, pp. 169-175.
3. 신재인, 이상순, 한범성, "통행차량에 의한 내하력 평가기법 연구", 한국구조물진단학회 학술발표회논문집, 제4권, 제2호, 2000, pp. 319-325.
4. 구봉근, 신재인, 류택은, 이재범, 류연중, "고속도로 교량구조물의 통행차량에 의한 충격계수 산정방법 개발" 한국콘크리트학회 학술발표회, 제13권, 제2호, 2001, pp. 809-814.
5. 신재인, 박창호, 이상순, 이원태, "PSC박스 거더교량의 통행차량에 의한 내하력 평가기법 개선", 대한토목학회 학술발표논문집, Vol. 1, 2005, pp. 1053-1056.
6. 황학주, 김상효, "도로교 최대활하중효과 분석을 위한 모의해석기법," 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, 1993, pp. 77-86.
7. 과학기술처, "확률 신뢰성이론에 의한 구조물의 합리적 해석기법과 신뢰성 설계기준 개발", 1991.
8. 한국도로공사 도로교통기술원, "상시교통하중에 의한 교량 내하력 평가기법 개발", 2005.
9. 한국도로공사, "고속도로 교통량조사," 2004.
10. Simon F. Bailey, Rolf Bez, "Site Specific Probability Distribution of Extreme Traffic Action Effects," Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 14, 1999, pp. 19-26.

(접수일자 : 2007년 4월 20일)