통행차량에 의한 내하력 평가기법 연구

A New Method for Evaluating Load Carrying Capacity with respect to Traffic loads

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

Abstract

Bridge load rating calculations provide a basis for determining the load carrying capacity of bridges. 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. This paper presents the development of a method for determining the response modification factor, using traffic loads. The proposed method is based on the results of computer simulations of traffic action effects. The simulation program generates random traffic actions for defined traffic conditions and determines the frequency distribution of maximum 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.

keywords : Bridge Load Rating, Maximum Traffic Action Effects, Load Carrying Capacity

1. 서 론

성수대교 및 삼풍백화점 붕괴사고 이후에 유지관리의 중요성이 부각되었고 구조물 관리에 대한 특별법이 제정되었다. 교량의 효율적인 운영의 측면에서 활하중에 대한 실질적인 내하력 평가는 필수적이다. 교량내하력의 과소평가는 불필요한 통행제한 또는, 보강을 초래하고 내하력의 과대 평가는 중차량의 통과로 인한 구조물의 점진적인 손상을 유발하여 그 수명을 단축시킬 수 있으며, 예기치 못한 붕괴사고를 불러올 수도 있다.

* 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 교수, 공학박사
** 정회원, 한국도로공사구조물 진단부, 공학박사
*** 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 석사

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

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 통제한 상태에서 이루어지기 때문에 이용객에게 많은 불편을 초래한다. 또한, 현재 시행되고 있는 평가방법은 차량에 의한 실제 충격계수를 적절히 반영하지 못하고 있다.

고속도로의 경우에는 과적차량 단속이 체계적으로 이루어지고 교통량이 많으며 매년 교통량 조사가 이루어지기 때문에 교량에 작용하는 차량하중을 확률적인 접근방법으로 모형화할 수 있다.[1]~[7] 따라서, 고속도로상 교량구조물의 경우에는 일정 시간동안에 통행차량에 의해 발생하는 최대응답을 예측할 수 있으며, 이를 측정한 최대응답과 비교함으로써 구조물의 공용내하력을 추정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 통행차량에 의한 내하력 평가기법의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 계측시간동안 발생하는 최대응답

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.

확률변수에 의하여 발생하는 최대응답은 모의분석법(simulation method)과 회선법(convolution method) 등에 의하여 계산이 가능하다.[1]~[9] 모의분석법은 확률변수가 많은 경우에 수렴속도가 느리고 해석시간이 많이 소요되는 단점이 있기 때문에 본 연구에서는 회선법을 이용하여 계측시간동안에 발생되는 최대응답을 예측하였다.

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

$$r=f(x\ ,t\ ,w,l) \tag{1}$$

변수들이 상호 독립적이라고 가정하면 하중사건으로 인한 임의의 응답 r_i가 발생할 확률$P[r_i]$는 식(2)와 같이 응답 r_i를 발생시키는 각 변수의 확률로부터 구할 수 있다.(1,5)

$$P[r_i]=\sum_j\sum_k\sum_l\sum_m P[x_j]\ P[t_k]\ P[w_l]\ P[l_m] \tag{2}$$

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(1)과 식(2)로부터 하나의 하중사건에 대한 응답분포를 구할 수 있다. 계측시간동안의 총사건수 n에 대한 최대 응답분포는 식(3)으로부터 결정할 수 있다.[7]

$$P_E(r)\ =\ [P_R(r)]^n \tag{3}$$

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

식(3)과 같은 최대 응답분포는 기본적으로 여러차량의 복합적인 하중효과의 합으로 표시되며, 또한 이러한 하중효과의 최대값에 대한 분석이므로 Gumbel의 극치분포(peak distribution) Type-I에 의해 모형화하는 것이 합리적이다.[3] Gumbel의 극치분포에 대한 확률밀도함수의 평균 및 표준편차를 구하면 다음과 같다.[8]

$$\mu_E=\mu_R+\mu_n\sigma_R \tag{4}$$

$$\mu_n=\sqrt{2\log_e n}+\frac{0.5772}{\sqrt{2\log_e n}} \tag{5}$$

$$\sigma_E=\frac{\pi}{\sqrt{6}}\frac{1}{\sqrt{2\log_e n}}\sigma_R \tag{6}$$

여기서, μ_E와 σ_E는 극치분포의 평균과 표준편차이고, μ_R와 σ_R는 각각 확률분포 $p_R(r)$의 평균과 표준편차이며, μ_n은 사건수 n에 따른 계수이다.

3. 최대응답 예측을 위한 프로그램 개발

계측시간 동안에 발생하는 최대응답을 추정하기 위하여 본 연구에서는 프로그램 MRSP(Maximum Response Simulation Program)을 개발하였다. Fig. 1은 개발된 프로그램의 흐름도를 나타낸다.

프로그램은 크게 2단계로 구성되어 있다. 첫 번째는 하나의 사건에 의한 응답의 확률분포를 회선법을 사용하여 구하는 단계이고, 두 번째는 Gumbel의 극치분포 이론에 의하여 앞서 결정한 응답의 확률분포로부터 일정시간 동안에 발생하는 최대응답을 추정하는 단계이다.

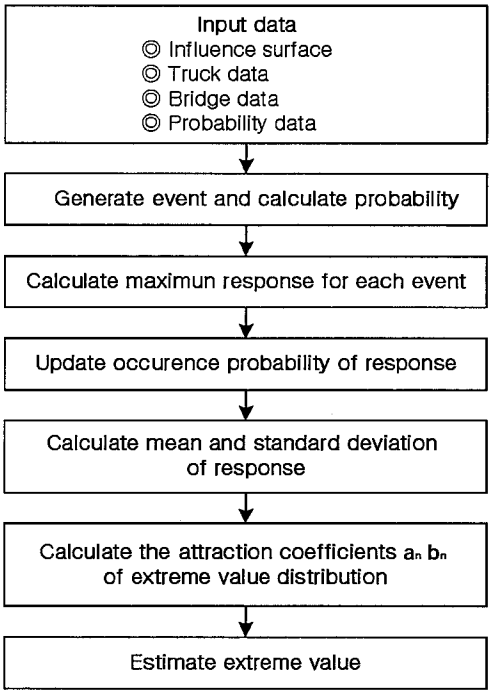


Fig. 1 프로그램 MRSP의 흐름도

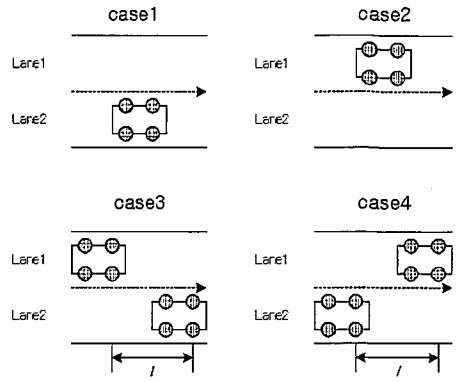


Fig. 2 차량통행 모형

본 연구에서는 30m이하의 소교량을 대상으로 하였으며, 과다한 반복계산시간을 줄이기 위하여 Fig. 2와 같이 하나의 지간에 최대로 재하가능한 트럭의 수를 2대로 제한하였다. 최대 재하대수를 2대로 제한한 이유는 대상교량이 단지간으로서 3대 이상의 트럭이 고려되어도 최대응답의 크기에는 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

차간거리는 연행중인 차량에 있어서 중요한 통행특성이다. 차간거리는 단위시간당 통행하는 차량의 수와 차량의 평균속도와 밀접한 관계가 있다. 단위시간당 통행하는 트럭의 수가 N(대/hr)이고 트럭의 평균속도가 V(km/hr)일 때, 평균차간거리 l_m(m)는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_m = 1000\,V/N \tag{7}$$

총 사건수와 연행사건의 비인 연행비 $c(\%)$는 평균차간거리 l_m 및 교량의 경간 l_b로 부터 추정할 수 있다.

$$c = \frac{l_b}{0.02 l_m} = \frac{N l_b}{20\,V} \tag{8}$$

교통량이 많을수록, 경간이 길수록 연행비는 증가하고 차량의 속도가 클수록 연행비는 감소한다.

해석을 단순화시키기 위해서 본 논문에는 교량 위를 통행하는 트럭을 대표할 수 있는 축간격과 축중분포를 갖는 트럭을 사용하였다. 본 논문에서 사용된 대표트럭의 형상은 Fig. 3과 같이 single truck과 semi-trailer이다.(1) 그리고 Fig. 4은 도로공사 서울영업소에서 측정한 대표트럭의 총중량 히스토그램이다.[9]

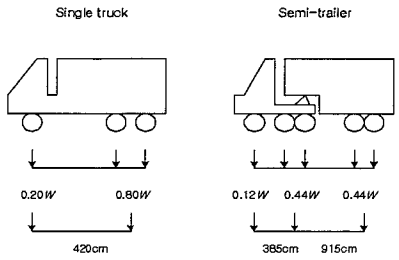


Fig. 3 대표트럭의 형상

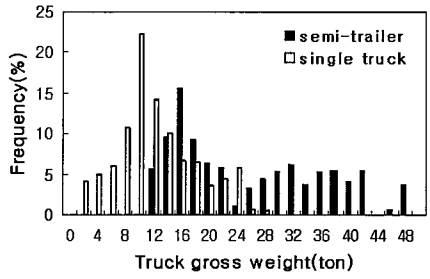


Fig. 4 대표트럭의 총중량 히스토그램

일본 건설성에서 1971년에 시행한 조사결과(2)에 따르면 차로의 폭이 3~4m인 경우, 차로 중심과 차량 중심의 거리인 횡방향 재하위치의 표준편차가 약 35cm인 정규분포에 가깝다고 보고되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 교량을 통과하는 차량의 횡방향 재하위치를 식(9)와 같이 정의하였다.

$$p_X(x)=\frac{1}{\sigma_X\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2\right] \quad (9)$$

여기서, x는 차로 중심과 차량 중심의 거리인 횡방향 재하위치이며, μ_X와 σ_X는 횡방향재하위치의 평균과 표준편차이다.

4. 현장실험 및 분석

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 고속도로상의 ○○교량에 대하여 재하시험 및 통행차량에 대한 내하력 평가를 실시하였다. 대상교량은 설계하중이 DB-18인 단순 PSC빔이며, 교폭은 10m이고 지간은 30m이다. 이 교량의 주형에는 상당수의 휨균열이 발생되어 PSC빔 하면이 강판으로 보강되어 있다. 대상교량의 AADT(Annual Average Daily Traffic)는 52,955대이고 중차량 혼입률이 61%이다.[10] 따라서, 12시간의 계측시간동안에 이 교량을 통과한 트럭의 수는 약 8,000대 이다. Single truck과 semi-trailer의 통행비율은 각각 86%와 14%로 나타났으며, 주행선과 추월선의 트럭통행비율은 각각 70%와 30%로 나타났다.[10] 연행비는 트럭의 평균속도를 100km/hr로 가정하여 식(8)로부터 구하였다.

Fig. 5는 대상교량의 횡단면과 재하시험시 트럭의 재하위치를 나타낸 것이고, Fig. 6은 통행차량에 의하여 발생한 최대 변위응답을 나타낸 것이다. G2, G3, G4는 동일한 하중사건(load event)에 의하여 발생된 것이고 G1은 다른 하중사건에 의하여 발생한 것이다.

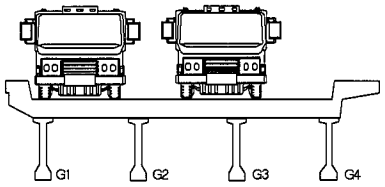


Fig. 5 대상교량의 횡단면 및 차량재하위치

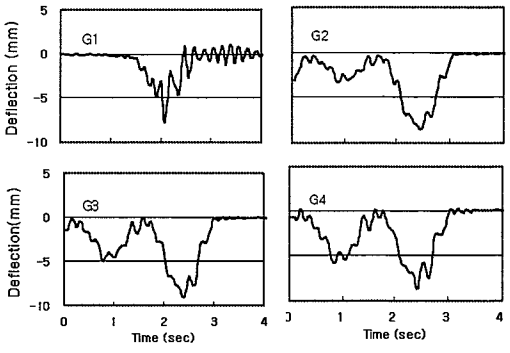


Fig. 6 측정된 최대변위응답

Table 1과 Table 2는 각각 재하시험과 통행차량에 의한 내하력 평가결과를 정리한 것이다. 재하시험시에는 충격계수를 구하기 위한 동적재하시험이 실시되지 않았기 때문에 재하시험에 의한 내하력 평가결과는 충격계수가 설계시와 동일한 것으로 보고 계산된 것이다. 재하시험과 통행차량에 의한 내하력 평가결과가 모두 내측주형이 외측주형에 비하여 응답비가 큰 것을 알 수 있다. 통행차량에 의한 결과는 Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 재하시험에 의한 결과와 약 10% 정도 차이가 난다. 설계기준으로 볼 때 이 교량의 충격계수는 0.21인데, 통행차량 데이터로부터 측정된 충격계수는 0.23~0.37이였다.

Table 1 재하시험에 의한 내하력 평가결과

주형 번호	측정치 (mm)	해석치 (mm)	응답비	기본 내하력	공용 내하력
G1	3.66	4.68	0.79	DB-31	DB-39
G2	3.75	4.02	0.93	DB-33	DB-36
G3	3.16	3.32	0.95	DB-33	DB-35
G4	2.28	2.55	0.89	DB-31	DB-35

Table 2 통행차량에 의한 내하력 평가결과

주형 번호	최대측정응답 (mm)	최대예측응답(mm)			응답비	기본 내하력	공용 내하력
		μ_R	σ_R	μ_E			
G1	7.77	2.14	1.47	8.60	0.90	DB-31	DB-35
G2	8.44	2.29	1.28	7.90	1.07	DB-33	DB-32
G3	9.00	2.48	1.29	8.11	1.11	DB-33	DB-30
G4	8.70	2.66	1.47	9.08	0.96	DB-31	DB-32

Table 3 재하시험과 통행차량에 의한 내하력 평가결과 비교

주형 번호	공용내하력		A/B
	통행차량(A)	재하시험(B)	
G1	DB-35	DB-37	95%
G2	DB-32	DB-36	88%
G3	DB-30	DB-35	85%
G4	DB-32	DB-35	91%

Table 4 실측 충격계수를 고려한 재하시험과 통행차량에 의한 내하력 평가결과 비교

주형 번호	측정치 (mm)	해석치 (mm)	충격 계수	공용내하력		A/B
				통행차량 A	재하시험 B	
G1	3.68	4.68	0.30	DB-35	DB-36	97%
G2	3.75	4.02	0.23	DB-32	DB-33	97%
G3	3.16	3.32	0.28	DB-30	DB-32	94%
G4	2.28	2.55	0.37	DB-32	DB-31	103%

Table 4는 통행차량에 의해 실제 교량에 작용하는 충격계수를 적용하여 재하시험에 의한 평가결과를 보완한 것이다. 제안된 통행차량에 의한 내하력 평가방법이 구조물의 공용내하력을 비교적 잘 예측하는 것을 알 수 있다.

충격계수는 식(10)과 같이 동적최대응답과 정적최대응답의 비로부터 구할 수 있다.[11)~15)]

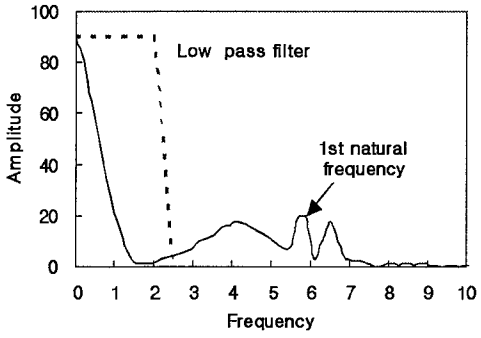
$$i=\frac{R_d-R_s}{R_s} \tag{10}$$

여기서, R_d와 R_s는 각각 하나의 하중사건(load event)에 대한 최대동적응답과 최대정적응답이다.

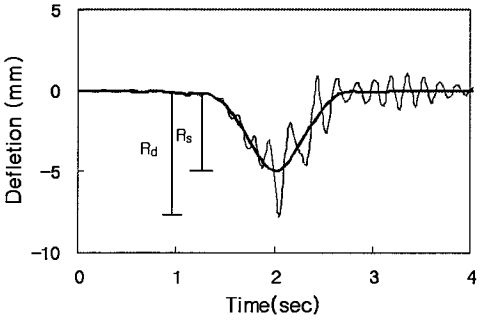
정적응답은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 통행차량에 의한 측정응답을 필터링하여 구하였다. Fig. 7(a)는 측정응답의 FFT 결과와 필터를 나타낸 것이다. 이 교량의 고유진동수는 약 5.8Hz이다. 따라서, 0~2Hz의 고유진동수만이 통과할 수 있는 low pass filter를 사용하여 정적응답을 구하였다. Fig. 7(b)는 측정된 동적응답 및 필터링을 통하여 구한 정적응답을 나타낸 것이다.

Fig. 8은 응답의 크기와 충격계수와의 상관관계를 나타낸 것이다. 응답의 크기와 충격계수사이에는 상관성이 없는 것으로 나타났다. 그리고 응답의 크기가 작은 경우가 큰 경우에 비하여 충격계수의 분산이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 충격계수의 분포와 평균값 및 분산을 나타낸 것이다. 모든 주형의 충격계수의 평균값이 도로교표준시방서에 규정되어 있는 식으로부터 계산한 값 0.21보다 큰 것을 알 수 있다.



(a) FFT 결과 및 필터



(b) 동적응답 및 정적응답

Fig. 7 필터링을 통한 충격계수 산정

또한, 외측주행의 충격계수의 평균과 분산이 내측주행보다 큰 값을 보였다. 이 교량은 노면상태가 불량하였는데 이로 인하여 충격하중이 증가된 것으로 사료된다.

5. 영향인자 분석

본 연구에서는 최대예측응답에 영향을 미치는 인자에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 각 인자의 표준조건 및 범위는 Table 5와 같다.

Table 5 영향인자의 표준조건 및 범위

변수	표준조건	변수 범위
ADTT	8000대	10~100000대
semi-trailer 비율	10%	0, 10, 20, 30%
연행비	20%	0, 10, 20, 30%
추월선 통행비율	30%	0, 10, 20, 30, 40, 50%

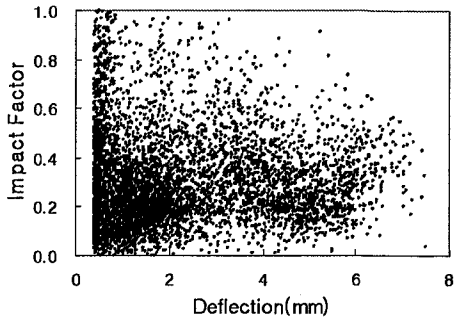


Fig. 8 주행처짐과 충격계수의 상관관계(G1)

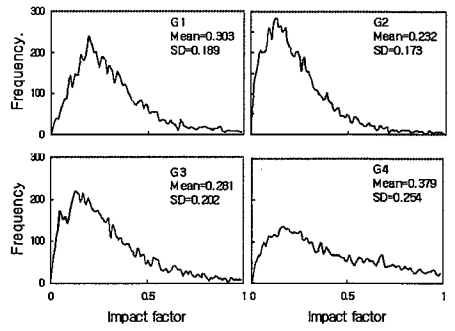
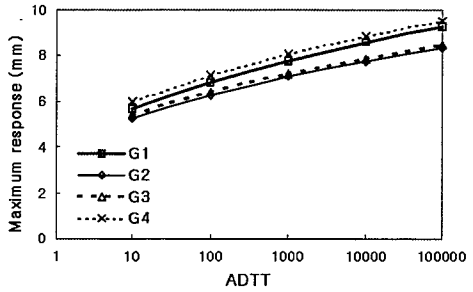


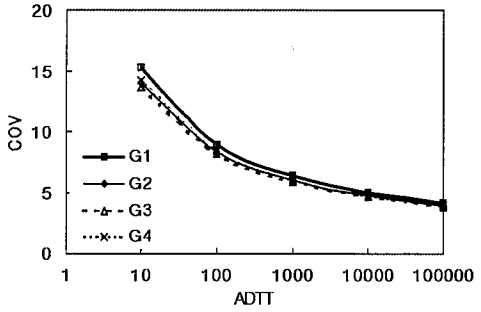
Fig. 9 충격계수 분포

Fig. 10은 계측시간동안에 교량을 통과하는 트럭통행량(truck traffic volume)에 따른 최대예측응답 극치분포의 평균과 분산계수를 나타낸 것이다. 트럭통행량이 클수록 극치분포의 평균은 커지고 분산계수(COV)는 작아진다. 트럭통행량이 작은 경우에는 분산계수가 매우 크다. 이는 트럭통행량이 작은 교량의 경우에는 통행차량에 의한 내하력 평가의 신뢰성이 적다는 것을 의미한다. 또한, 평가결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 충분한 계측시간이 필요하다는 것을 알 수 있다. 분산계수가 5%이내의 극치분포를 얻기 위해서는 약 10,000대의 트럭이 통과할 때까지 계측이 실시되어야 한다.

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13은 총트럭 중에서 semi-trailer의 비율, 연행비, 추월선 트럭 통행비율에 따른 최대예측응답 극치분포의 평균을 나타낸 것이다.



(a) 극치분포의 평균



(b) 극치분포의 분산계수

Fig. 10 ADTT의 변화에 따른 극치분포의 평균과 분산계수

Semi-trailer의 비율 및 연행비가 높아질수록 최대 예측응답은 커진다. 추월선 통행비율이 0인 경우에는 중앙분리대 측의 주행인 G1의 응답이 가장 작고 난간 쪽 주행인 G4의 응답이 가장 크게 나타났다. 그리고, 추월선 트럭 통행비율이 증가함에 따라 G1과 G2의 응답은 증가하고 G3와 G4의 응답은 감소하는 경향을 나타내었다. 중분대측 주행인 G1이 추월선 트럭 통행 비율에 가장 민감한 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 통행차량에 의한 구조물의 내하력 평가기법을 제안하고 타당성을 검토하였다. 제안된 방법은 트럭의 통행량이 많고 교통특성이 비교적 잘 알려진 교량의 경우에 공용내하력을 비교적 잘 예측하는 것으로 평가되었다. 통행차량에 의한 내하력 평가방법

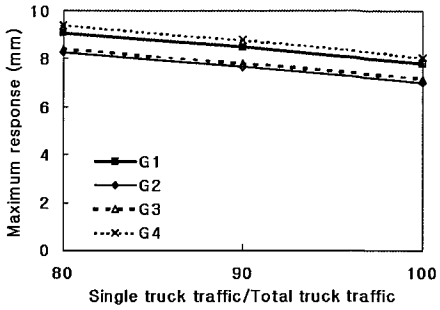


Fig. 11 semi-trailer의 비율에 따른 극치분포의 평균

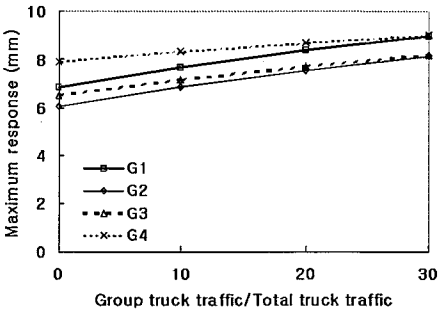


Fig. 12 연행비에 따른 극치분포의 평균

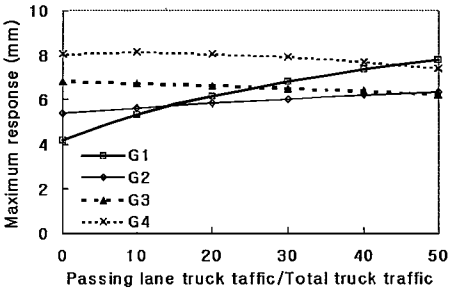


Fig. 13 추월선 트럭 통행비에 따른 극치분포의 평균

은 재하시험을 위한 교통통제가 필요하지 않기 때문에 이용객의 편의를 증진시킬 수 있으며, 실제 구조물에 작용하는 충격하중을 적절히 반영할 수 있어 합리적인 것으로 평가되었다. 또한, 향후 상시계측을 통한 구조물의 유지관리 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 구조물진단부의 연구개발사업인 통행차량에 의한 내하력평가기법 개발의 연구성과 중의 일부이며, 연구를 수행할 수 있도록 지원해주신 한국도로공사의 도로처 직원 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 정철헌, 김지상, "도로교상을 통행하는 임의 통행트럭에 의한 최대 활하중효과", 대한토목학회논문집, 제17권, 제 I-1호, 1997, pp. 35~42.
2. 김성효, 이창용, "최대 차량하중효과 분석을 이용한 도로교 설계차량하중의 평가", 대한토목학회논문집, 제17권, 제 I-1호, 1997, pp. 67~78.
3. 황학주, 김상효, "도로교 최대활하중효과 분석을 위한 모의해석기법", 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, 1993, pp. 77~86.
4. 구봉근, 신재인, 이상순, "응력보정계수 산정방법 개선", 한국구조물진단학회논문집, 제5권, 제1호, 2001, pp. 169~175.
5. 과학기술처, "확률 신뢰성이론에 의한 구조물의 합리적 해석기법과 신뢰성 설계기준 개발(III)", 1991, pp. 142~186.
6. 신재인, 이상순, 한범성, "통행차량에 의한 내하력 평가기법 연구", 한국구조물진단학회 학술발표회논문집, 제4권, 제2호, 2000, pp. 319~325.
7. Bailey, S. F., Bez, R., "Site Specific Probability Distribution of Extreme Traffic Action Effects," Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 14, 1999, pp. 19~26.
8. Solnes, J., "Stochastic Processes and Random Vibrations", John Wiley & Sons, 1997, pp. 60~182.
9. 한국도로공사, "강형교의 교통분석 및 발생응력의 모형화 연구", 1997, pp. 179~239.
10. 한국도로공사, "고속도로 교통량조사," 1999, pp. 218~223.
11. Paultre, P., Proulx, J., and Talbot, M., "Dynamic Testing Procedures for Highway Bridges Using Traffic Loads," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 2, 1995, pp. 362~376.
12. Ricciardi, G., "Random Vibration of Beam under Moving Loads", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, No. 11, 1994, pp. 2361~2380.
13. Nowak, A. S., "Live Load Model for Highway Bridge", Structural Safety, Vol.13, 1993, pp. 53~66.
14. 이원태, 박영석, 정태주, "고속도로 교량의 충격계수에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제20권, 제3-A호, 2000, pp. 395~406.
15. 한국도로공사, "교량의 충격계수에 관한 연구", 1997, pp. 67~192.

(접수일자 : 2000년 12월 28일)