

교량 하중 모형화

황 의 승* 홍 영 균**

1. 서론

교량의 설계 및 평가에 대하여 신뢰성을 확보하기 위해 확률론적 접근 방법을 사용한 합리적인 기준정립에 대한 필요가 절실하다. 하중저항계수 설계법(LRFD, Load and Resistance Factor Design)에 있어서 적재하중의 모델은 이러한 합리적인 기준정립에 있어서 가장 중요한 요소중의 하나이다.

적재하중은 교량을 통과하는 차량에 의해 발생하는 여러종류의 힘을 포함한다. 일반적으로 정적 효과와 동적 효과는 구별하여 생각하며 이 글에서는 각각 적재하중(활하중)과 충격하중으로 구분하고자 한다.

현재 미국에서 사용되고 있는 AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)²⁾의 적재하중은 약 40년 전에 개발된 것으로 그림 1에 보이고 있다. 보분배계수(GDF, Girder Distribution Factor)는 S/D 로 정의되어 있으며 여기서 S는 보의 간격이고 D는 철골 또는 프리스트레스트 콘크리트로 된 보의 경우는 5.5, 철근콘크리트보의 경우는 6을 사용하고 있다. 충격하중계수는 지간의 함수로 다음과 같이 표시되어 있다.

$$I=50/(125+L)$$

여기서 L는 ft로 나타낸 지간이다(1ft=0.

* 한국건설기술연구원 구조연구실 선임연구원, 공박

** 한국전력기술 토목구조 기술부 책임급, 공박

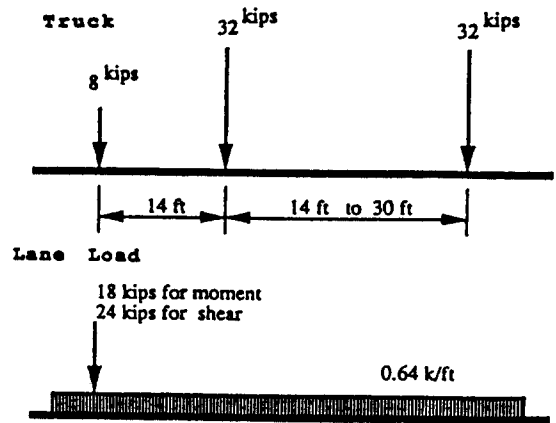


그림 1. AASHTO 적재하중 (HS20)

305m)

한편 한국에서 사용되고 있는 도로교 표준시방서¹⁾에서는 적재하중이 DB24(또는 DL24)로서 그림 2에 보이고 있다. 충격하중계수는 역시 지간의 함수로 표시되며 다음과 같다.

$$I=20/(50+L)$$

여기서 L은 m로 나타낸 지간이다.

한편, 산업의 발달과 물동량의 증가로 교량을 지나가는 차량의 무게가 현저히 증가되고 있음이 여러 교통량조사 및 실측연구에서 밝혀지고 있다. 또한 해석방법의 발달로 정확한 보분배계수를 구할 수 있으며 충격하중계수는 지간뿐만 아니라 노면요철 등 여러가지 요소가 관여하고 있다. 따라서 실제의 하중을 더 정확히 나타내는 하중모델의

개발이 시급하다. 또한 LRFD 설계법에 사용되기 위해서는 하중의 확률론적 모델이 필수적이다.

이 글에서는 적재하중과 충격하중의 모델 개발에 사용된 통계자료를 요약하고 하중개발과정을 기술하며 그 결과를 그림으로 나타내고자 한다.

2. 사하중

교량의 구조 및 비구조요소의 자중은 특히 시간이 짧은 경우에 중요한 하중중의 하나이다. 사하중의 통계적 자료는 OHBDC 시방서⁶⁾의 개정과 더불어 수행한 연구에 기초하여 개발되었다. 사하중은 대개 3종류로 나누어 지게 되는데

D_1 =공장에서 제작된 요소(철골, 프리스트레스트 콘크리트)의 자중

D_2 =현장에서 제작된 콘크리트 요소(슬래브)의 자중

D_3 =아스팔트 자중

각각에 대한 통계치는 표1과 같다.

표1. 교량 사하중의 통계치

사하중요소	평균-공칭비	변이계수
D_1	1.03	0.08
D_2	1.05	0.10
D_3	1.00	0.25

여기서 평균-공칭비는 평균값을 공칭값으로 나눈 계수이다.

3. 트럭 Data Base

일반적으로 트럭에 관한 자료는 실제 트럭의 축하중과 축간거리 등을 정지상태에서 조사하는 방법과 교량을 통과하는 트럭에 의한 교량의 반응을 측정하여 트럭의 축하중을 결정하는 Weigh-in-Motion (WIM) 방법에 의해 수집된다. 또한 과적차량에 대한 자료를 사용할 수도 있으나 이러한 자료는 일반적으로 최대값의 범위를 가지적으로 나타낸다. 이 논문에서는 1970년대에 캐나다의 온타리오 지방에서 수집한 10,000개 이상의 무거운 트럭에 대한 자료를 기초로 한다. 이 자료

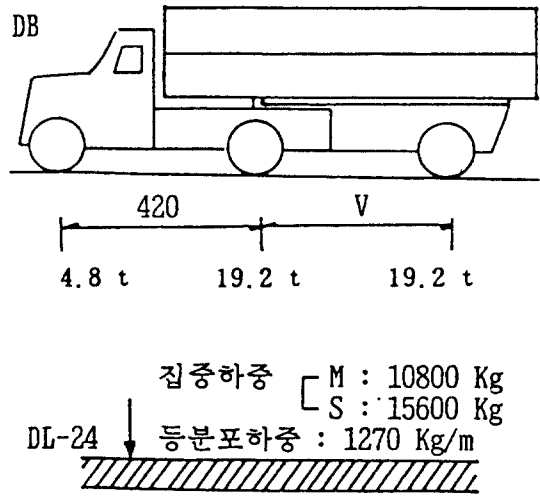


그림2. 도로교 표준시방서 DB24 하중

는 1980년 이후의 온타리오 지방 및 미국 북부지방의 트럭조사자료와도 일치한다.

이 트럭자료를 이용하여 단순시간 30-200ft (9-60m)의 교량에 대해 모멘트와 전단력의 누적분포함수(CDF, Cumulative Distribution Function)를 정규확률분포지를 이용하여 그림 3과 그림 4에 각각 도시하였다. 정규확률분포지의 사용 및 구성에 대해서는 확률과 통계에 관한 각종도서를 참조하기 바란다. 그림 3과 그림 4의 수직 축, Z는

$$Z = \Phi^{-1} [F(M)] \dots\dots\dots (1)$$

여기서 M=모멘트 또는 전단력

F(M)=모멘트 또는 전단력의 CDF

Φ^{-1} =정규분포함수의 역

수평축은 AASHTO의 설계모멘트 또는 전단력에 대한 비율로 표시하였다.

그림 3에서 평균값은 수직축의 0에서 수평으로 평행한 선분이 CDF와 만나는 수평축의 값으로 결정되며 AASHTO 설계값의 0.7~0.85정도이다. CDF's의 경사각은 변이계수를 의미하며 약 0.2~0.35의 분포를 나타낸다. 트럭자료에서 계산한 최대모멘트는 AASHTO 설계값의 1.4~1.8배의 범위를 포함한다.

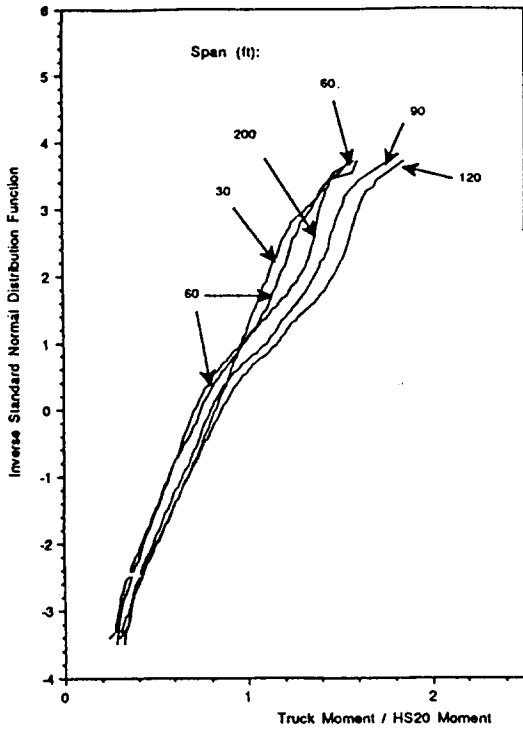


그림3. 단순지지된 교량의 모멘트 누적분포함수

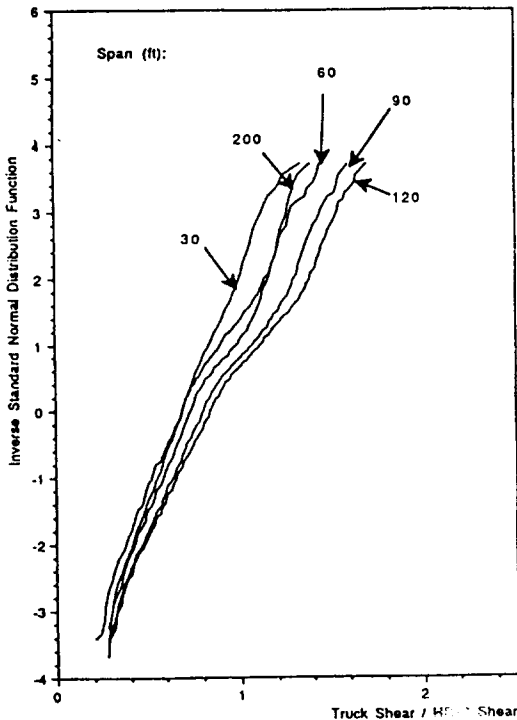


그림4. 단순지지된 교량의 전단력 누적분포함수

4. 최대 트럭모멘트 및 전단력

최대 트럭모멘트 및 전단력은 그림 3, 4의 CDF's를 확충하여 다음과 같이 결정할 수 있다. N을 일정한 시간 T 동안의 총 트럭수라고 하자. 사용한 트럭자료는 약 2주간의 교통량을 나타낸다고 가정하면 75년동안의 총 트럭수는 약 1,500배 정도이며 $N=15,000,000$ 이다. 이러한 N에 해당하는 확률은 $1/N=7 \times 10^{-8}$ 이며 이에 대한 그림 3, 4의 수직축에 대응하는 Z는 5.26이다.

트럭수(N), 확률($1/N$) 그리고 역정규분포값(Z)들이 이에 해당하는 기간(T)에 대하여 표2에 정리되어 있다. 기간(T)에 해당하는 평균 최대모멘트는 그림 3에서 구할 수 있다.

표2. 기간에 따른 트럭수, 확률, 역정규분포값

기간(T)	트럭수(N)	확률($1/N$)	역정규분포값(Z)
75년	15,000,000	7×10^{-8}	5.26
50년	10,000,000	1×10^{-7}	5.19
7.5년	1,500,000	7×10^{-7}	4.82
1.5년	30,000	3×10^{-6}	4.53
9개월	150,000	7×10^{-6}	4.24
3개월	50,000	2×10^{-5}	4.11
1.5개월	25,000	4×10^{-5}	3.94
2주	10,000	1×10^{-4}	3.71
1일	1,000	1×10^{-3}	3.09

다양한 기간동안의 평균 최대 모멘트 및 전단력을 그림 5와 그림 6에 도시하였다.

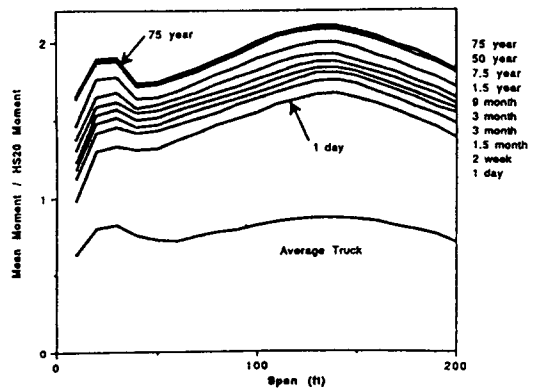


그림5. 기간에 따른 평균 최대 모멘트

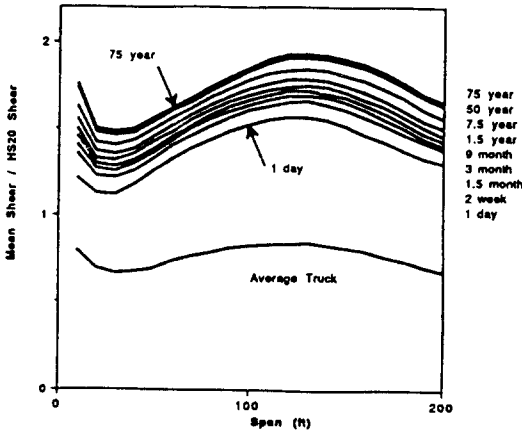


그림6. 시간에 따른 평균 최대 전단력

5. 1차선 모멘트와 전단력

1차선 교량의 최대하중효과는 하나의 트럭 또는 2대 이상의 트럭에 의해 결정된다. 한 트럭에 의한 최대효과는 그림 5, 6에 도시되어 있다. 두대이상 트럭에 대해서는 트럭 간격(Headway Distance) 과 트럭무게의 상관관계에 따라 최대효과가 결정된다. 이에 대해 일반 관측 결과를 바탕으로 다음과 같은 기술적 판단을 가정하였다.

1. 10번째 트럭은 트럭간격 50ft(15m)이내로 교량을 통과한다.

2. 50번째 트럭의 트럭무게는 바로 앞 트럭과 일정한 관계를 갖는다.

3. 100번째 트럭은 바로 앞 트럭과 동일하다.

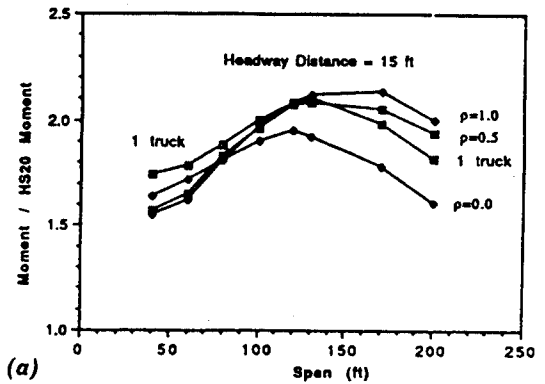
두대의 트럭을 각기 T_1 , T_2 라 하자. 두 트럭무게의 상관관계를 상관관계수, ρ (Coefficient of Correlation)로 표시하며 다음 세가지 경우를 가정하였다.

1. $\rho=0$: T_1 과 T_2 는 무관한 관계 즉, T_1 은 최대 7.5년 트럭(10번째 트럭) 그리고 T_2 는 평균 트럭

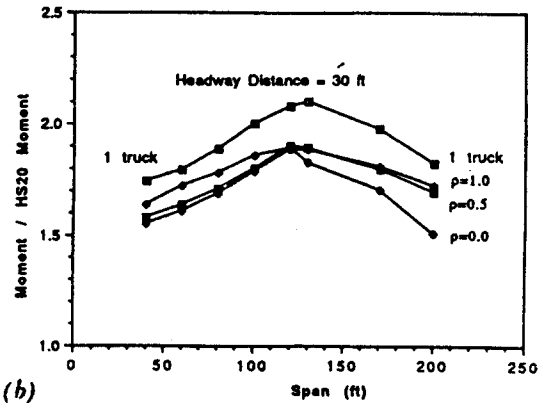
2. $\rho=0.5$: T_1 과 T_2 는 일정한 관계 즉, T_1 은 최대 1.5년 트럭(50번째) 그리고 T_2 는 최대 1일 트럭

3. $\rho=1.0$: T_1 과 T_2 는 동일 즉, T_1 T_2 는 최대 9개월 트럭(100번째 트럭)

상기 가정과 트럭간격 15, 30ft인 경우에 대한



(a)



(b)

그림7. 1트럭과 2트럭에 대한 모멘트

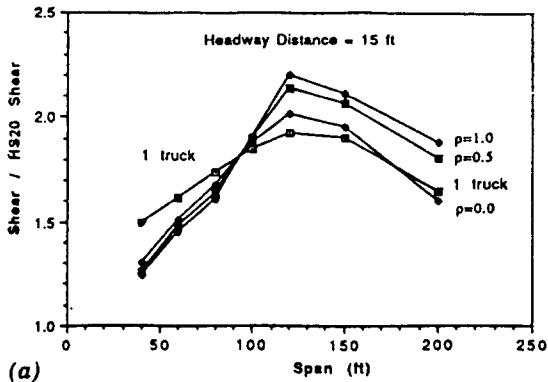
계산 결과를 그림 7과 그림 8에 도시하였다.

그림 7에서 한 트럭에 의한 모멘트 영향이 지간 100ft까지는 지배적이며 그림 8로부터 전단력에 대해서는 90ft까지의 지간임을 알 수 있다. 긴 지간에 대해서는 트럭간격에 따라 두대의 트럭이 동일한 경우가 지배적임을 알 수 있다.

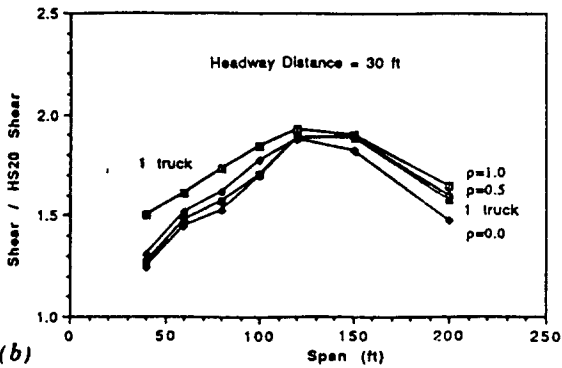
최소트럭간격은 정상운전속도가 아닌 상태에서 발생한다. 적재하중과 충격하중의 최대효과를 조합할 때 최소트럭간격이 정지상태에 가까운 상황임을 고려해야 하나 안전측의 영향임을 감안하여 최소트럭간격 15ft에 의한 상기결과를 사용하기로 한다.

6. 2차선 모멘트와 전단력

한 차선이상의 교량에서는 각기 차선 하중에 의해 보에 작용하는 분배계수를 해석하여야 한다.



(a)



(b)

그림8. 1트럭과 2트럭에 대한 전단력

최대모멘트 및 전단력은 1차선 교량에 작용하는 최대반력 또는 2차선에 작용하는 하중에 의해 결정되어 진다.

보분배계수(Girder Distribution factor)를 결정하기 위해 미국내의 보교량에 대한 통계자료를 이용하여 전형적인 교량을 모델화하여 유한요소법에 의한 구조해석을 수행하였다. 현 AASHTO 시방서²⁾에서는 보분배계수를 보간격에 의한 함수로 정의하였다. 철골 또는 P.S 콘크리트 보의 모멘트는 1차선 교량의 경우는 $S/7$ 이며 두 Lane 이상 교량의 경우에는 $S/5.5$ 이다. 여기에는 S는 ft 단위의 보간격이다. 2차선 교량 모멘트에 대한 계산 결과가 그림 9에 도시되었다.

평균 최대 모멘트와 전단력은 모의해석에 의해 결정되었다. 여기서 4가지 경우를 고려하였는데 (1) 한 차선위의 한 트럭 또는 평행한 2트럭 (2) 무관한 두 트럭 (3) 일부 상관된 두 트럭 (4) 완전 상관된 2 트럭의 경우이다. 결과적으로 완전상관된 두개의 트럭(각각의 두께는 최대 1.5개월 트

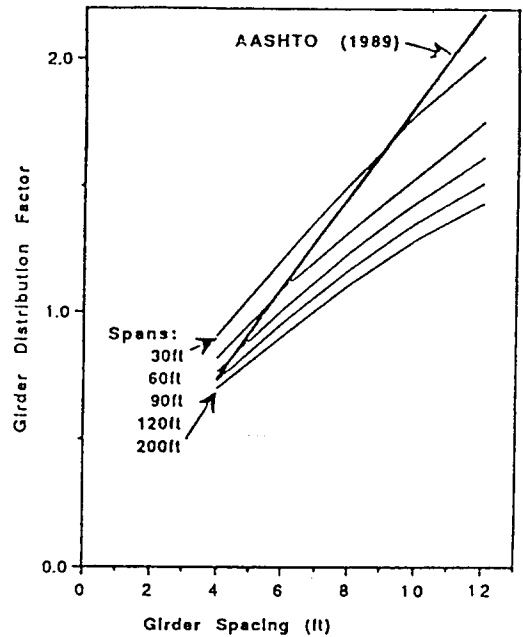


그림9. 보분배 계수

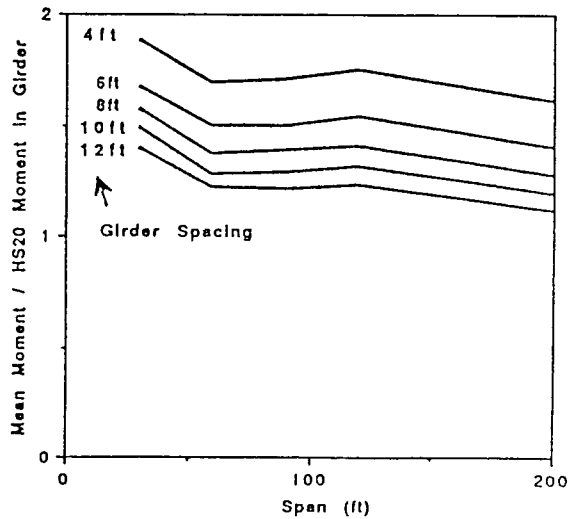


그림10. 2차선 교량의 모멘트에 대한 평균-공칭비

럭)이 재하된 경우가 가장 불리하며 이는 75년 최대트럭하중의 약 0.85배 정도이다. 1차선 교량의 경우 평균-공칭비(mean-to-nominal ratio)는 그림 5와 6에 도시되어 있으며 2차선 교량의 모멘트의 대해서 그림 10에 도시되어 있다.

7. 충격하중 모델

충격하중은 모의해석을 통하여 모델되어진다. 노면 특성 및 교량과 트럭의 동적특성을 포함하는 Computer 프로그램이 개발되었다.

노면의 요철은 실제 측정된 자료로부터 확률함수를 이용하여 구해진다. 교량은 prismatic beam으로 모델되어지며 일반트럭 및 세미트레일러가 포함되었으며 이의 동적특성 역시 실제 자료로부터 인용되었다. 충격하중계수는 정적처짐과 동적처짐의 비로 구해지며 처짐값들을 정규확률분포지에 도시된다. 최대 충격하중계수는 선형회기분석에 의해 구해지게 된다.(그림 11)

두대의 트럭이 나란히 통과하는 경우도 고려되

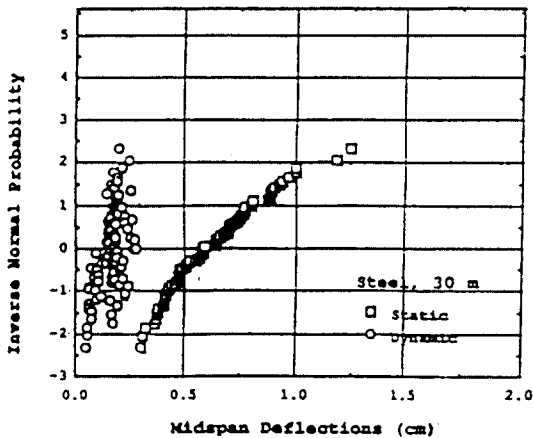
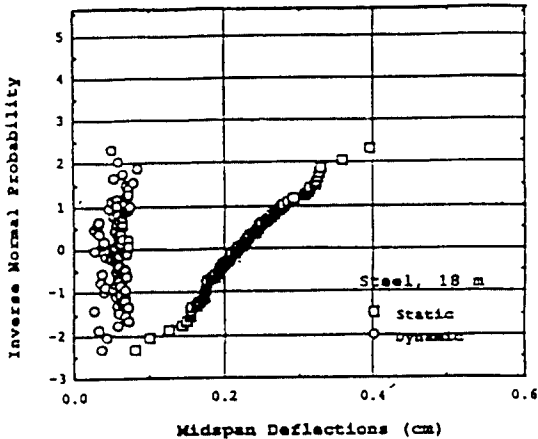


그림 11. 모의해석결과에 따른 정적 및 동적 처짐

었는데 그 결과는 그림 12와 같다. 이 경우는 충격하중계수는 2차선교량의 경우 한 대의 트럭의 경우에 비해 약 30% 정도 감소되었다.

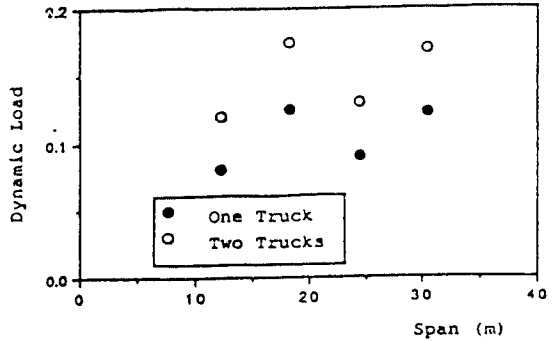


그림 12. 1트럭과 2트럭에 대한 충격하중 계수

8. 결론

이 글에서는 교량하중모델의 개발에 대하여 기술하였다. 사하중, 적재하중 및 충격하중에 대한 확률론적 모형이 제시되었다.

적재하중의 경우 트럭 Data Base를 기초로 하여 일차선 교량 또는 단경간 (지간 약 40m까지)에서는 한대의 트럭이, 2차선 교량의 경우는 완전상관된 두대의 평행트럭에 의해 결정되어진다. 대부분의 경우 현재의 AASHTO의 보분배계수는 안전측이 된다.(특히 보간격이 긴 경우)

충격하중계수는 노면 요철 및 교량과 트럭의 동적특성을 고려한 모의해석을 통하여 구해지는데 두대의 차량을 고려한 경우가 한대의 트럭을 고려할 경우보다 더 낮은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 건설부, 도로교 표준시방서, 1989.
2. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridge", AASHTO Washington, D.C., 1989.
3. Agarwal, A.C. and Wolkowicz, M., "Interim Report on 1975 Commercial Vehicle Survey," Research and Development Division, Ministry of Transportation, Downsview, Ontario, Canada.

4. Hwang, E.S. and Nowak, A.S., "Simulation of Dynamic Load for Bridges", Journal of Structural Engineering, ASCE, May, 1991.

5. Nowak, A.S. and Hong, Y.K., "Bridge Live Load Models", Journal of Structural Engineer-

ing, ASCE, September, 1991.

6. OHBDC, "Ontario Highway Bridge Design Code", Ministry of Transportation, Downsview, Ontario, Canada.

전산구조공학 도서구입 안내

지금까지 5회에 걸쳐 개최된 한국전산구조공학회 기술강습회를 위하여 출간된 교재중 구입가능한 책자와 구입요령은 아래와 같습니다.

도서번호	도 서 제 목	도서번호	도 서 제 목
TO13	하중저항 계수 설계법(LRFD)	TO41	유한요소법의 이론 및 응용
TO14	개인용 전산기를 이용한 CAD	TO42	구조동력학의 기본이론 및 응용
TO21	PC를 이용한 구조물의 해석과 설계	TO43	동적해석에 의한 내진설계
TO24	구조물의 비선형 해석	TO44	상호구조해석 프로그램의 이론 및 응용
TO31	유한요소법의 응용	TO51	유한요소법의 개념 및 응용
TO32	지반과 구조물의 상호작용	TO52	구조물의 내진설계기법
TO33	구조설계에서의 좌굴문제	TO53	지하구조물의 해석 및 설계
TO34	구조물의 최적설계	TO54	강교의 해석 및 설계

가 격 : 각권당 6,000원(우송료포함)

주문접수처 : 서울시 강남구 대치4동 915-3(명진빌딩)
135-284 사단법인 한국전산구조공학회

TEL : (02)565-0035, FAX : (02)565-0036

송금방법 : 국민은행 010-01-0395-142
예금주 : 전산구조