

거더교량의 종방향 하중효과의 확률론적 분석

Statistical Analysis of Longitudinal Load Effects in Girder Bridges

오 병 환* 유 영** 최 영 철** 이 준 혁*** 김 광 수****
Oh, Byung Hwan Lew, Young Choi, Young Chul Lee, Jun Hyuk Kim, Kwang Soo

ABSTRACT

An effective live load model for analyzing probable maximum live load effects in longitudinal direction such as moment and shear was developed. The main procedure of this live load model is composed of two parts. Firstly, determination of the appropriate influence lines, and secondly, application of the characteristics of vehicles and traffic patterns. Through this procedure, probabilistic distributions of maximum probable load effects are deduced in the form of probability density function (PDF) or cumulative density function (CDF). The proposed live load model is not limited by bridge types(number of spans or girders) and can consider local or global deterioration of bridges in the analysis. Besides, load effects can be determined at any section without restrictions.

1. 서론

도로상을 통행하는 차량하중은 교량설계시 가장 큰 변동성을 가지는 요소라 할 수 있다. 현재 도로 교 설계기준에서는 교량의 등급에 따라 설계기준트럭에 의하여 교량의 설계를 수행하고 있다. 그러나 실제 교량을 통행하는 차량은 설계기준트럭의 중량을 초과하는 경우가 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 교량의 사용수명에 따라서 이러한 트럭의 통행빈도도 증가하게 되므로 교량에 발생하는 하중효과 또한 시간의 경과에 따라 점차 증가하게 된다. 특히, 교량의 사용기간의 증가에 따라 발생하는 교량의 손상에 의하여 증가된 하중효과는 교량의 사용성 및 안전성에 더욱 큰 영향을 미치게 된다. 이에 본 연구에서는 교량의 손상효과를 고려한 하중모델을 적용하여 발생하는 하중효과를 확률론적으로 분석하였으며, 이 결과는 향후 교량의 잔존수명의 예측에 적용될 수 있으리라 판단된다.

2. 차량하중 및 통행특성

현행 도로를 통행하는 차량하중에 관한 여러 가지 변수들을 측정하여 최대 활하중 효과를 예측할 수 있는 활하중 예측모델을 선정하여야 한다. 이때 최대 활하중 효과에 영향을 미치는 변수로는 차량의 총하중, 축하중, 축간거리, 교량상에서의 차량의 위치 교량지간상에 동시에 존재하는 차량의 수, 총

* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정희원, 서울대학교 토목공학과 박사과정
*** 정희원, 서울대학교 토목공학과 석사과정
**** 정희원, 서울대학교 특별연구원

격효과, 슬래브의 강성, 거더의 강성 등이 있다. 여기서, 교량지간상에 동시에 존재하는 차량의 수는 한 대 이상의 차량이 동시에 교량지간 위를 통과할 때 발생하는 변수이다. 그리고 교량의 사용기간동안의 차량의 증가를 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 생산 또는 운행되는 차량의 일반 제원 및 실제 교통량 조사자료를 바탕으로 하여 대표트럭을 선정하여 이에 대한 일일트럭교통량(ADTT), 총중량 분포, 축하중 분포 및 연행특성을 분석하였다. 그리고 1995 ~ 2000년 동안의 각 구간별 일일트럭교통량(ADTT)을 분석하여 사용기간동안의 차량의 증가를 고려하였다.

본 연구에서 적용한 중량히스토그램은 서울-부산 간의 자료로서 이후의 하중효과는 이 값을 사용하여 계산하였다.

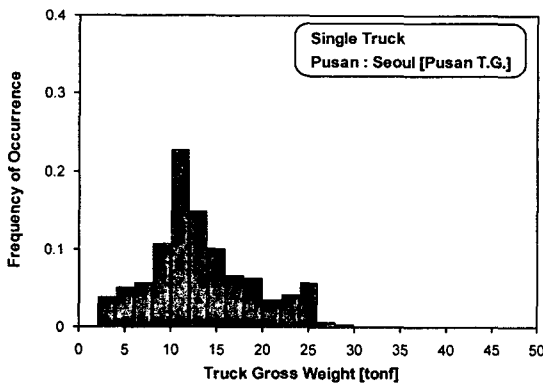


그림 1. 트럭중량 히스토그램

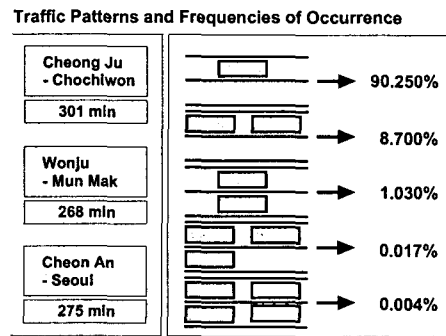


그림 2. 2차선 교량의 통행패턴

3. 하중모델의 개발

본 해석모델은 다음과 같이 2개의 부프로그램(subroutine)으로 구성되어 있다. 특히, 손상의 고려가 가능한 영향선의 개념을 도입하였으며, 임의의 단면에 대한 하중효과를 손쉽게 구할 수 있도록 하였다. 또한 매트릭스 구조해석 기법을 활용하여 교량의 형식(경간수 및 거더 개수)에 대하여 거의 제한 없이 사용할 수 있도록 하였다. 각 부프로그램의 특징을 간략히 설명하면 다음과 같다.

(1) 종방향의 영향선 계산

종방향 영향선은 단순교 및 연속교에 대하여 모두 계산이 가능하도록 모델링하였으며, 휨 및 전단에 대해서 계산 가능하도록 하였다. 연속교의 경우도 경간 개수의 제한이 없도록 다경간에 대하여 모델을 확장하였다. 일반적으로 설계시 단순교의 경우 휨은 지간 중앙, 전단은 지점에서 일정거리 떨어진 곳이 위험단면이 되며, 연속교의 경우는 이 외에 내부지점부에 대한 휨의 검토를 추가로 수행하고 있다. 그러나 수십 년간의 사용에 의하여 교량 구조물의 각 부위별로 성능 및 손상도가 다른 경우, 이런 방식은 각 시점에서의 교량상태를 적절히 반영할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 임의의 하중위치에 대하여 특정손상 부위에 발생된 하중효과를 알고자 하는 경우를 고려할 수 있는 방식으로 휨 및 전단에 대한 영향선을 계산하였다.

(2) 종방향의 하중효과 계산

종방향 하중효과의 해석은 위에서 구해진 영향선과 주어진 입력자료를 이용하여 구할 수 있다. 하중효과를 결정하기 위하여 필요한 입력자료는 교량을 통행하는 트럭하중의 중량히스토그램, 차축하중

및 축간거리, 차간거리, 일일 트럭통행량(ADDT) 및 교통량 증가계수, 교량의 제원 등이 된다. 각 항목별 특징은 다음과 같다.

① 트럭하중의 중량히스토그램

각 트럭의 중량히스토그램은 앞에서 결정한 표준트럭에 의하여 single-truck과 semi-truck으로 구분하여 각 중량별로 트럭의 일일 통행대수를 결정하여 준다.

② 차축하중 및 축간거리

트럭의 차축하중 및 축간거리는 3장에서 결정된 표준트럭의 값을 이용한다.

③ 차간거리

차간거리는 그 연행특성을 고려하기 위하여 필요하며, 교량의 하중효과 결정에 매우 중요한 역할을 수행하는 요소이다. 현재까지의 연구결과들에 의하면 차간거리는 차량간의 통행시간이나 속도 등의 개념으로만 조사되어 왔다. 그러나 이러한 방법은 각 통행트럭의 속도와 차량간 통행시간을 정확히 조사한다는 것이 거의 불가능하다는 점에서 그 신뢰성이 매우 떨어진다고 볼 수 있다. 또한 각 차량마다 통행 특성에 차이가 있을 수 밖에 없으므로 보편적 개념에서의 차량간 거리를 사용할 수가 없는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 극복하기 위하여 무작위 추출의 개념을 도입하였다. Random sampling에는 Box-Muller method를 사용하였고, 차량 간의 거리는 정규분포의 특성을 갖는다고 가정하였다.

④ 일일트럭 통행량 및 교통량 증가계수

일일트럭 통행량은 교량의 사용수명 동안 발생 가능한 최대하중효과의 계산시 적용하는 극치분포 개념에서 사용된다. 일일트럭 통행량은 하중효과의 확률적 특성에서 매우 중요한 역할을 하므로 가능한 한 정확한 값을 사용해야 한다. 이미 언급한 바와 같이 사용기간 동안의 최대하중을 나타내기 위해서는 극치 분포의 개념이 필요하다. 서로 독립적인 변수 X 를 n 번 샘플링 했을 경우 그 중의 최대치는 X 의 분포로부터 결정할 수 있다.

$$Pr[X_{\max} < x] = Pr[\text{All } n \text{ observation of } X < x] \text{ or } F_{x, \max(x)} = [F_x(x)]^n$$

여기서, $F_x(x) = x$ 가 한 번 발생할 확률분포

$F_{x_{\max}}(x) =$ 최대치 X_{\max} 의 확률분포

$$F_x(x) = Pr[X < x]$$

위 식에서 일일트럭 통행량 및 교통량 증가계수는 n 값(지수)에 포함되게 된다. 따라서 그 값에 따라서 하중효과의 누적확률분포가 매우 달라질 수 있으므로 반드시 정확하고 신중한 값의 사용이 필요하게 된다.

⑤ 교량의 제원

하중효과만을 구하기 위해서는 교량의 단면특성은 필요치 않다. 단지 종방향의 휨모멘트 및 전단력의 해석을 위해서는 교량형식(단순교, 연속교)과 지간 길이가 필요하다. 그러나 종방향 해석결과가 횡방향의 해석에 필요한 자료가 되는 경우(거더교의 바닥판 해석)에는 각 거더의 단면특성 등을 정확히 입력하여야 할 필요가 있다.

⑥ 트럭하중의 재하위치

기본적으로 하중의 재하위치는 모멘트와 전단력에 대하여 동일하다. 종방향의 재하 경우는 크게 3가지로 분류하였고, 세분하여 10가지의 경우를 고려하였다.[정철현, 1993] 다만 이 경우, 기존의 통행량 조사결과에 의하여 2차선 교량에 대하여만 재하의 경우를 고려하였다.

- 2 차선에 단일 차량만이 재하되는 경우(2 Case)
- 2 차선에 연행 차량이 재하되는 경우(4 Case)
- 2 차선에 병렬 형태의 차량이 재하된 경우(4 Case)

4. 하중모델의 적용

본 절에서는 이상에서 개발된 하중모델을 적용하여 발생 가능한 최대 하중효과(휨 및 전단)를 계산한다. 본 논문에서는 하중효과의 기본적 특성을 분석하기 위하여 거더별의 분포특성은 제외하였다. 모멘트에 대한 확률분포는 단순교의 중앙단면에 대하여 검토하였다.

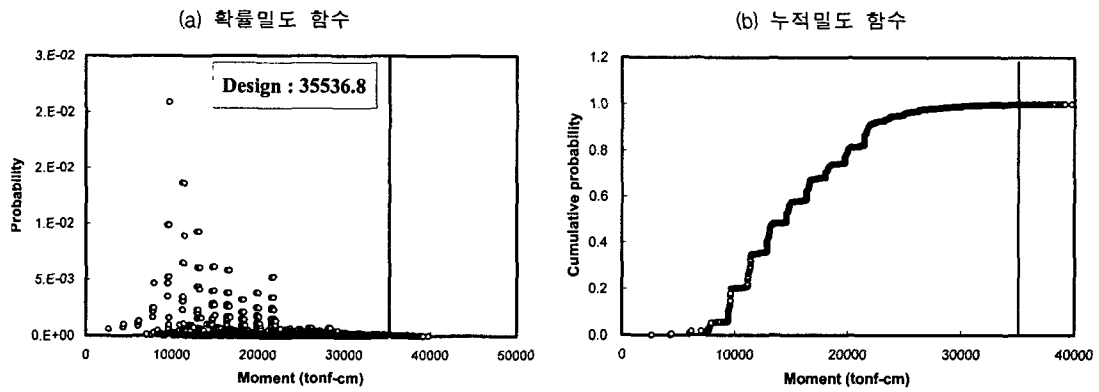


그림 3. 단순교 중앙단면 모멘트 분포

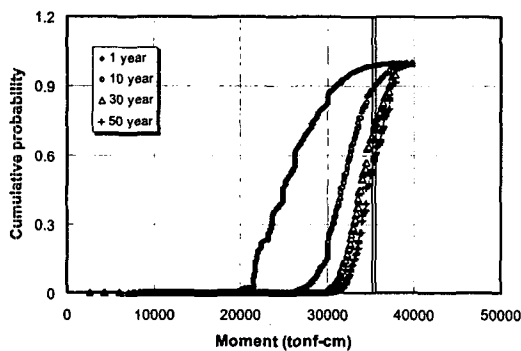


그림 4. 사용기간에 따른 발생가능 최대모멘트

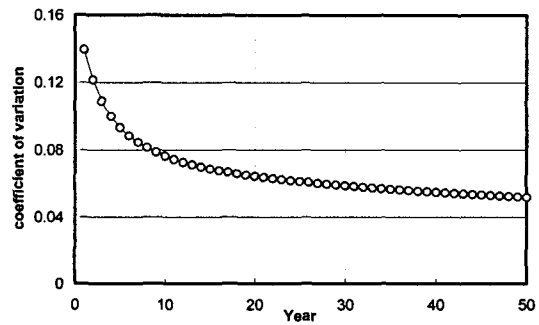


그림 5. 사용기간에 따른 모멘트 변동계수의 변화추이

전단에 대한 확률분포는 연속교의 1경간 1/4 단면에 대하여 검토하였다.

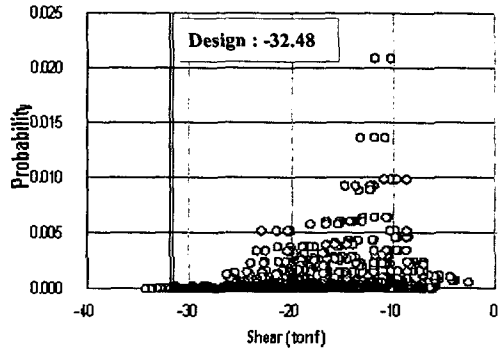


그림 6. 전단력의 확률밀도분포

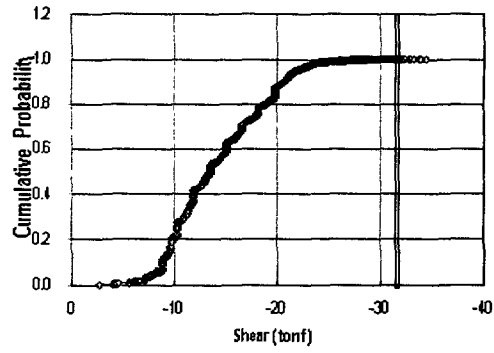


그림 7. 전단력의 누적밀도분포

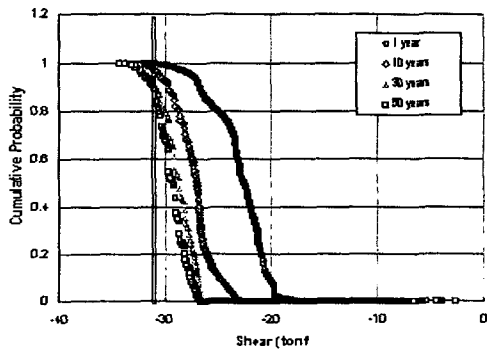


그림 8. 사용기간에 따른 전단의 누적밀도분포의 변화

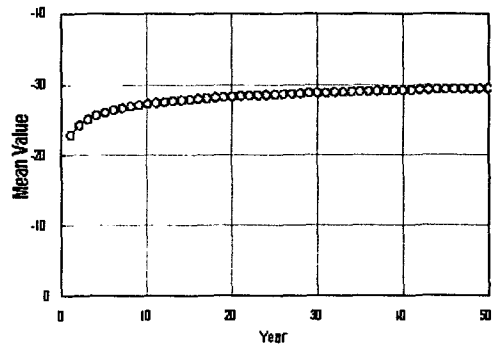


그림 9. 전단 평균의 시간에 따른 변화추이

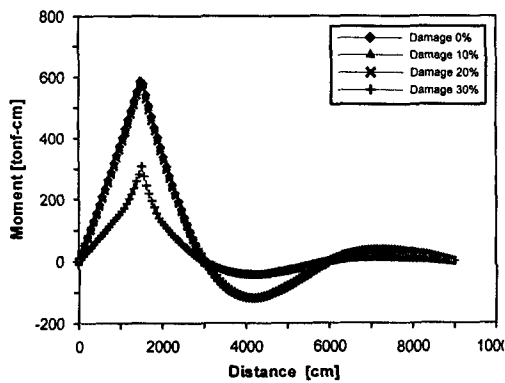


그림 10. 거더의 강성손실에 따른 모멘트의 변화

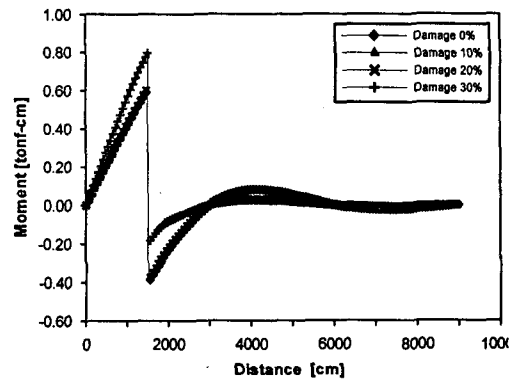


그림 11. 거더의 강성손실에 따른 전단의 변화

5. 결론

본 연구에서는 교량에 발생가능한 하중효과를 확률론적으로 분석하였다. 특히, 일반적인 관심위치가 아닌 임의위치에서의 하중효과를 도출하도록 하였고, 이에 교량의 손상효과를 고려할 수 있도록 하였다.

- (1) 영향선의 개념을 도입하여 교량의 하중효과를 결정하였다. 특히, 교량의 형식(경간수 및 거더개수)에 제한없이 사용자가 원하는 임의위치에서의 모멘트 및 전단에 대한 영향선을 결정할 수 있도록 하였다. 이때 부분별의 재료손상이나 단면손실을 고려할 수 있도록 하였다.
- (2) 교통량 및 통행특성을 영향선에 적용하여 하중효과를 계산하였다. 이때, 최대하중효과를 구하기 위하여 교량의 통행트럭을 진입시부터 완전통과시까지 이동시키며 재하하도록 하였다.
- (3) 단독, 연행, 병렬통행특성을 고려하였다.
- (4) 연행통행트럭의 경우, 조사된 확률변수(평균, 표준편차)에 통행의 무작위성을 고려하여 random sampling을 수행하여 연행거리를 계산하였다.
- (5) 극치분포의 개념을 이용하여 공용년수에 따른 하중효과를 계산하였다.
- (6) 사용기간에 따라 하중효과의 평균값은 증가함에 비하여 표준편차는 감소하였다.
- (7) 사용기간 초기에는 설계기준트럭에 의한 하중효과보다 작은 확률분포를 보이나, 사용기간의 경과에 따라 이를 초과하는 경향을 보이고 있다. 따라서 향후, 교량의 설계시에 이러한 시간특성을 고려한 설계개념이 포함되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 2000년 산·학·연 공동연구개발사업과 표준과학연구원의 인위재해방지기술연구의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. AASHO, "Standard Specification for Highway Bridges", 14th Edition, 1989.
2. Anarzej S. Nowak, "Bridge Live models", Journal of Structural Engineering, Vol.117, No 9, September, 1991
3. Michel Ghosn, "Marcov Renewal Model for maximum bridge loading", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, No. 9, September, 1985
4. Moses, F. and M. Ghosn, "Comprehensive Study of Bridge Loads and Reliability", Report No. FHWA/oh-83/005, Case Western Reserve University, Department of Civil Engineering, Cleveland, 1985
5. 건설교통부, "도로교 차량 활하중 및 피로하중 모형 개발에 관한 연구", 1998
6. 건설교통부, "도로 교통량 통계연보," 1995~2000.
7. 건설교통부, "도로교 설계기준," 2000.
8. 오병환, "확률 신뢰성 이론에 의한 구조물의 합리적 해석기법과 신뢰성 설계기준 개발(II), 과학기술부, 1991
9. 정철현, "도로상을 통행하는 트럭의 형상 및 중량특성", 대한토목학회, 제15권 5호, 1995
10. 정철현, "교량구조물의 합리적인 설계하중 및 설계기준 개발", 박사학위논문, 서울대학교, 1993.2