

도로형교의 진동 및 충격계수

Vibrations and Impact Factors for Highway Girder Bridges

장	동	일*
Chang,	Dong	Il
이	희	현**
Lee,	Hee	Hyun
전	준	창***
Jeon,	Jun	Chang

요 지

본 연구에서는 트럭하중에 의한 도로형교의 진동거동을 조사하여 충격계수를 합리적으로 산출하는 경험 공식을 제시한다. 이를 위해 진동해석을 위한 가장 합리적인 차량 모델링을 제시하고, 노면조도, 차량의 속도, 교량의 길이별 충격계수를 산출한다. 연구 결과, 현행 시방서규정은 충격계수를 과소평가하는 경향이 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Vibrational behaviors of highway girder bridges due to heavy traffics are discussed, and empirical formulae for impact factors are suggested in this paper. Appropriate vehicle model for vibration analysis is found and impact factors are calculated with different surface roughnesses, vehicle speeds and span lengths. It is shown that the present codes tend to underestimate impact factors.

I. 서 론

오랜 공용기간을 갖고 있는 교량, 설계하중보다 높은 하중이 빈번히 통과하는 교량 및 장대교량 등은 중차량 통과시 발생하는 진동의 영향을 크게 받는다.

이러한 진동은 차량과 교량의 동특성, 차량의 속도 및 도로의 노면상태등 여러 요인에 의해 생기지만, 대부분의 교량공학자들은 현행 시방서

에 명시된 규정만을 고려하여 진동문제를 처리하고 있다. 그러나 현행 우리나라 시방서 규정[1]은 진동문제가 그리 중요하지 않았던 오래전의 도로 또는 교통상황하에서 규정된 것으로 현재의 교통상태에 적합한지에 대해서는 많은 의문이 제시되었다[2~5, 17, 18]. 본 연구에서는 트럭하중에 의한 도로형교의 진동거동을 조사하여 현행 시방서의 문제점에 대해 언급하고 이러한 문제점을 해소하는 한가지 방안을 제시한다.

* 성희원, 한양대학교 토목공학과 교수
 ** 정희원, 고속철도 건설공단, 궤도연구실, 동력학팀장
 *** 한양대학교 토목공학과 석사과정

이 논문에 대한 토론을 1992년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1993년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

II. 진동해석

2.1 진동이력

임의 크기를 갖는 하중이 일정한 속도로 교량위를 주행할 때 교량구조물의 운동방정식은 유한요소법에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

여기서 $[M]$, $[C]$ 및 $[K]$ 는 각각 구조물의 질량, 감쇠 및 강도매트릭스이고 $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ 및 $\{u\}$ 는 각각 절점들에서의 가속도, 속도 및 변위벡터이다. 그리고 $\{P(t)\}$ 는 하중벡터로, 임의의 위치에 작용하는 임의 하중을 Hermitian 보간함수를 이용하여 절점 하중으로 변환한 후 작성된다. 그러면 임의의 시간에서 각 절점의 진동응답은 모드중첩법에 따라 구할 수 있다[8, 11].

2.2 응답스펙트럼

응답이력을 구한 후 스펙트럼 함수는 시간신호를 정상 엘고딕(stationary ergodic) 신호로 가정하여 식(2)와 같이 구한다.

$$S(f) = \int_0^T x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (2)$$

여기서 T 는 이력신호의 측정시간, t 및 f 는 각각 시간과 진동수를 나타내는 독립변수, $j = \sqrt{-1}$, $x(t)$ 및 $S(f)$ 는 각각 응답이력 및 스펙트럼함수이다. 식(2)를 풀기 위해 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. 식(2)에 의해 구해진 응답스펙트럼으로부터 구조물의 동특성 및 진동을 일으키는 주된 원인을 파악할 수 있다[9, 10].

2.3 노면조도

불규칙한 도로위를 차량이 주행할 때 차량에는 수직 및 수평운동이 일어난다. 수직운동과 관련하여 도로에는 차량의 자중외에 수직력이 부과되는데 이러한 수직력을 흔히 동적반력 또는 동적힘이라 한다. 이 힘은 차량의 속도, 운전자의 행위, 차량의 특성(질량분포, 현가상태, 진동수, 타이어 압력등) 및 노면상태 등에 따라 다른데, 이들에 따라서 교량에 가해지는 힘은 실험에 의한 결과

차량자중의 2배까지 커질 수 있다고 보고되었다[21].

노면조도란 일반적으로 고르지 못하고, 손상되거나 울퉁불퉁한 정도를 의미한다. ASTM(American Society for Testing and Materials)에서는 노면조도와 포장결을 구분하기 위하여 노면조도를 도로 표면으로부터 16mm이상 이탈된 정도라 정의하고 있다[7]. 노면조도는 주기적이거나 비주기적이다. 노면조도가 주기성을 갖는 경우, 이것은 Fourier급수를 이용하면 해석할 수 있다. 그러나 대부분의 노면조도란 주기성을 띄지 않기 때문에 Fourier급수가 노면조도를 해석하는데 사용될 수 없다. 그래서 이런 경우 노면조도를 불규칙함수로 가정하여 통계적 해석을 하는 것이 편리하다. 불규칙함수를 해석하는 한가지 방법은 파워 스펙트럼 밀도함수를 사용하는 것이다[20]. 본 논문에서는 Honda[13]가 제시한 Fig.1의 파워스펙트럼을 이용하여 10가지 노면조도를 시뮬레이션하였다. Fig.2는 시뮬레이션한 노면조도의 일례를 보여주고, Table 1은 시뮬레이션한 노면조도의 최대치를 0.5, 1.0, 2.0, 3.0배한 것을 지간길이 별로 정리한 것이다. 노면조도의 영향을 고려하여 교량구조물의 진동해석을 하는 방법은 문헌[3, 14~18]에 설명되어 있다.

III. 수치해석 및 고찰

3.1 차량과 교량의 모델링

진동해석시 본 연구의 대상교량과 같은 형교의 경우, 교량은 보로 모델링할 수 있으나, 차량의 경우 여러 연구결과[11, 14]에 따르면 차량의 현가장치와 관성력의 영향을 고려해야 된다고 알려져 있다. 이러한 사실을 확인하기 위해 본 논문에서는 임의차량을 Fig.3과 같이 4가지 형태로 모델링하여 진동해석을 수행한 결과를 비교해 보았다(Fig.4). 차량의 모델링시 차량의 총중량은 210 kN, 차량의 1, 2번째 진동수 및 감쇠비는 각각 3.1Hz, 13.0Hz와 3%, 9%라는 가정에 따라 스프링상수와 감쇠상수를 구하였다. Fig.4의 처짐이력곡선들은 Table 4의 지간 50m 단순교량 위를 차량이 60km/h로 주행할 때 교량중양점에서 계산된

것이다. 실선은 노면조도의 영향을 고려하는 경우이며 점선은 무시한 경우를 나타낸다. Fig.4로부터 판단해 볼 때 노면조도의 영향을 무시하는 경우 진동거동은 차량의 모델링에 관계없이 거의 유사하나 고려할 경우 차량의 모델링에 따라 매우 다름을 알 수 있다. 이러한 사실은 Table 2와 Table 3으로 부터도 확인할 수 있다. Table 2는 10가지 시뮬레이션된 노면조도의 영향을 고려하는 경우에 교량 중앙점에서 계산된 충격계수들의 평균과 (평균+표준편차)의 값을 나타내며 Table 3은 노면조도를 무시하는 경우의 차량모델링별, 속도별 충격계수를 보여준다. Fig.4와 Table 2 및 Table 3으로부터 노면조도의 영향을 고려하는 경우 차량을 주행하중 또는 주행질량으로 모델링하면 진동거동을 과대 평가하는 것으로 판단되므로 본 논문의 이후 계산에서는 차량을 실제와 유사하게 2 자유도 진동체로 모델링하였다. 한편 Fig.5는 노면조도의 영향을 무시하는 경우와 고려하는 경우 Fig.4(d)의 스펙트럼을 보여준다. Fig. 5에서 0.7Hz는 차량의 통과속도에 관련된 진동수, 2.09Hz는 교량의 첫번째 모드 진동수 그리고 17.67Hz는 노면조도에 의한 진동성분이다. 따라서 차량에 의한 교량 진동의 주원인은 여기서 언급한 3가지 인자인 것으로 판단되므로, 본 논문에서는 3가지 인자를 변화시키면서 충격계수를 계산하였다. Table 4는 시간길이에 따른 단순교의 단면 특성의 변화를 보여주는 것이다.

3.2 노면조도, 차량의 속도 및 시간길이에 따른 충격계수

본 논문에서의 충격계수는 시뮬레이션된 응답이력으로 부터 (절대최대동적응답/절대최대정적응답-1)로 구한다. 현행 우리나라 시방서[1]는 충격계수를 단순히 시간길이의 함수로만 표시하고 있다.

Table 5~8은 여러가지 경우에 대한 충격계수를 정리한 것이다. 이 표들로부터 노면이 거칠어질수록, 속도가 증가할수록 충격계수는 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 시간길이에별로 처짐과 모멘트의 충격계수를 비교해보면 노면조도의 크기가 작은 경우 대체적으로 처짐의 충격계수가 크지만 큰 경우에는 반대로 모멘트의 충격계수가 크게

나타난다. 이로부터 노면상태의 불량은 처짐보다는 휨응력에 관계되는 모멘트에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

한편 전체적인 충격계수의 값을 살펴보면 속도가 증가하고 시간이 길어질수록 현행 시방서규정은 충격계수를 과소평가함을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 충격계수에 관한 시방서규정의 합리적인 개정방안을 제시하면 다음과 같다.

3.3 충격계수에 관한 시방서규정의 개정방안

충격계수에 관한 시방서규정을 개정하는 한가지 방안을 제시하기 위하여 앞의 결과들에 대한 중선형회귀분석(multiple linear regressional analysis)을 실시하였다[6].

처짐과 모멘트에 관한 중선형회귀분석식은 식(3)과 같고 Table 9는 회귀분석시 얻어진 분산 및 표준편차이다.

$$i = \begin{cases} \text{Displacement :} \\ -\frac{644}{10^4} - \frac{637}{10^7} L + \frac{185}{10^5} V + \frac{648}{10^3} R \\ \text{Moment :} \\ -\frac{327}{10^3} + \frac{898}{10^7} L + \frac{441}{10^5} V + \frac{748}{10^2} R \end{cases} \quad (3)$$

여기서 i는 충격계수 L은 시간길이(m), V는 차량의 속도(km/h) 그리고 R은 노면조도의 최대치(m)를 나타낸다. Table 9로부터 충격계수는 차량의 속도, 시간길이 및 노면조도와 큰 상관관계가 있음을 알 수 있다.

한편 충격계수들이 정규분포를 따른다고 가정하여 본 논문에서는 식(3)의 충격계수에 3배의 조건부 표준편차를 더한 식(4)를 충격계수를 구하기 위한 경험식으로 제시한다.

$$i = \begin{cases} \text{Displacement :} \\ -\frac{265}{10^5} - \frac{637}{10^7} L + \frac{185}{10^5} V + \frac{648}{10^3} R \\ \text{Moment :} \\ -\frac{202}{10^4} + \frac{898}{10^7} L + \frac{441}{10^5} V + \frac{748}{10^2} R \end{cases} \quad (4)$$

Fig.6~8은 각각 처짐에 대한 충격계수의 값을

시간길이별, 차량속도별 그리고 노면조도크기별로 정리한 것이며, Fig.9~11은 모멘트에 대한 것이다. 그리고 이 그림들에는 본 논문에서 제시한 식(4)에 의한 충격계수값이 주어져 있다. Fig.6~11을 살펴보면 계산된 대부분의 충격계수는 식(4)에 의한 값보다 아래에 있으나 현행 시방서 규정을 초과함을 알 수 있다. 또한 Fig.6과 Fig.9에는 식(4)에서 노면조도의 영향을 무시한 경우의 충격계수 값과 여러나라의 충격계수 시방서규정이 함께 표시되어 있다. 이 그림들로 부터 대부분의 시방서 규정은 중차량이 거친 노면위를 빠른 속도로 주행하는 경우 발생하는 충격계수를 과소평가함을 알 수 있다.

한편 이 그림들로부터 OBC(Ontario Bridge Code)[19]시방서는 다른 시방서에 비해 비교적 높은 충격계수를 규정하고 있으며, BS(British Standards)[12]시방서와 같이 교량길이에 관계없이 일정한 충격계수를 규정하고 있음을 알 수 있다. 특히 OBC시방서의 경우 충격에 관한 규정은 최근에 노면조도와 차량의 동특성을 고려하여 개정된 것이다. 본 논문의 결과들과 비교해 볼 때 OBC 규정은 본 연구의 결과와 비교적 부합된다고 사료된다.

IV. 결 론

트럭하중에 의한 교량구조물의 진동거동을 조사하고, 시간길이별, 차량속도별 및 노면조도별 충격계수를 시뮬레이션한 결과를 중선형회귀분석법에 의해 통계정리한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 1) 주행차량에 의해 발생하는 충격의 주원인은 차량속도와 노면조도 및 시간길이이므로 장차 충격계수는 본 논문에서와 같이 이 3가지 인자의 함수로 표시하는 것이 바람직하다.
- 2) 충격계수는 차량속도와 노면조도의 크기에 따라 증가하며, 시간길이에 관계없이 거의 일정한 값을 유지하므로 충격계수규정은 OBC 및 BS시방서와 같이 교량길이에 관계없이 일률적으로 규정하는 것이 타당하다.

그리고 거친 노면일수록 모멘트의 충격계수가 처짐의 충격계수에 비해 크다.

- 3) 노면조도의 영향을 고려하는 경우 교량의 동적응답은 차량의 모델링에 의해 큰 영향을 받으므로 진동해석시 실제차량은 현가장치를 고려한 진동체로 모델링하여야 한다. 그러나 설계시와 같이 노면조도의 영향을 무시할 수 있는 경우에는 임의의 차량모델을 사용해도 좋다.

참 고 문 헌

- [1] 건설부, "도로교 표준시방서", 1982.
- [2] 안영수, "도로교의 동적특성에 관한 실험적 연구", 한양대학교 대학원 석사학위논문, 1987.
- [3] 이희현, "도로형교의 동적거동에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1989.
- [4] 상동일, 광종현, 이희현, "주행차량에 의한 도로교의 진동특성에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제8권, 제2호, 1988, pp.41~50.
- [5] 상동일, 최계식, 이희현, "강도로교의 진동거동에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집, 제1권, 제1호, 1989, pp.131~139.
- [6] Ang, A.H-S. and Tang, W.H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", Vol. I, John Wiley & Sons, 1975.
- [7] Balmer, G.G., "Road Roughness Technology, State of the Art", Report FHWA-RD-73-54, National Technical Information Service, 1973.
- [8] Bathe, K.J. and Wilson, E.L., "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice-Hall, 1976.
- [9] Bendat, J.S. and Piersol, A.G., "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons, 1980.
- [10] Bendat, J.S. and Piersol, A.G., "Random Data : Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons, 1971.
- [11] Biggs, J.M., "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill Book Co., 1964.
- [12] British Standards Institution, "Specification for Steel Bridges", British Standard 153, Part 3A, Load, 1966.
- [13] Honda, H., Kajikawa, Y. and Kobori, T., "Spectra of Road Surface Roughness on Brid-

- ges", J. Struct. Engrg, ASCE, 108(9), 1982, pp.1956~1966.
- [14] Honda, H., Kobori, T. and Yamada, Y., "Dynamic Factor of Highway Steel Girder Bridges", IABSE Proceedings, P-98/86, Zurich, Switzerland, 1986, pp.57~75.
- [15] IMSL(Problem Solving Software System for Mathematical and Statistical Fortran Programming), "User's Manual", Vol.2, 1982.
- [16] Inbanathan, M.J. and M. Wieland, "Bridge Vibrations due to Vehicle Moving over a Rough Surface", J. Struct. Engrg, ASCE, 13(9), 1987, pp.1994~2008.
- [17] Kim, G.C., "Effect of Vehicle Braking on Dynamic Response of Girder Bridge", Asian Institute of Technology, M. Eng. Thesis, 1986.
- [18] Lee, H.H., "Impact Factor of Moving Load due to Surface Roughness of Girder Bridge of Variable Span", Asian Institute of Technology, M. Eng. Thesis, 1985.
- [19] Csagoly, P.F. and Dorton, R.A., "The Development of the Ontario Bridge Code", Ontario Ministry of Transportation and Communications, Canada, 1977.
- [20] Quinn, B.E. and De Vries, T.W., "Highway Characteristics as Related to Vehicle Performance", Highway Research Board Bulletin, No. 250, 1960, pp.20~39.
- [21] Quinn, B.E. and Thompson, R., "Effect of Pavement Condition in Dynamic Vehicle Reactions", Highway Research Board Bulletin, No.328, 1962, pp.24~32.

(접수일자 : 1991. 12. 24)