

교량구조물의 피로신뢰성해석연구

Fatigue Reliability Analysis of Bridge Structures

오 병 환* 김 지 상** 정 철 현** 한 승 환**

Oh, Byung Hwan, Kim, Ji Sang, Chung, Cheol Hun, Han, Seung Hwan

Abstract

The safe design against fatigue failure becomes more important criterion in highway bridges. The fatigue-safety evaluation is performed for the current bridge code. A reliability model incorporating fatigue damage is formulated and the safety indices are calculated.

The present study indicates that the calculated safety indices vary greatly with traffic volumes and loadometer values. A method is proposed to maintain uniform reliability for various traffic conditions and loadings.

1. 서론

구조물에 반복하중이 작용할때 그 크기가 구조물이 저항할 수 있는 강도보다 작다 할지라도 구조물이 파괴를 일으킬 수 있다. 이와같은 현상을 구조물의 피로에 의한 파괴라 한다. 구조물의 피로문제는 반복되는 차량하중, 바람 파도에 의한 하중등을 받는 교량, 해양 구조물등에서 중요한 문제가 되며 설계시 고려하여야 할 중요사항이다. 따라서 이에 대한 많은 연구가 진행중에 있으며, 특히 포괄적인 교찰로 구조물의 설계시 피로에 대한 효과를 고려할 수 있는 근거를 마련하는 연구가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 교량피로해석모델을 신뢰성 성능 함수(performance function)로 표시한후, 실제 측정된 지역조사자료에 의해 현존시방서에 의해 건설된 교량구조물의 신뢰성수준을 산정하였다. 특히 철근 콘크리트 슬래브교량에서는 철근의 피로한계와 압축부 콘크리트의 피로에 대한 신뢰성수준을 검토하였고 이들 값을 토대로 현행설계규정에 의해서 설계되는 교량의 피로하중에 대한 목표신뢰성 수준(target reliability)을 결정하였다. 최종적으로 교량설계시 목표신뢰성수준을 만족할 수 있는 피로규정에 대해 고찰하고자 한다.

2. '신뢰성 이론

교량구조물의 경우 구조물의 부재 요소내의 응력의 변화를 일으키는 하중은 통행차량에 의한 활하중인데 이는 불확실량을 대표하고 있는 확률변수이며, 또한 구조물의 피로에 대한 저항도 여러가지 원인에 의해 불확실성을 내포하고 있다. 이런 불확실량들의 관계로 부터 합리적으로 일반적인 교량구조물의 안전성과 신뢰성을 도출하는데 구조신뢰성 이론(structural reliability theory)을 적용하였다. 일반적으로 구조물의 한계상태는 작용하중(S)과 구조물의 저항능력(R)에 의해서 식(1)과 같이 표현할 수 있고, 이때 구조물의 안전상태는 식(2), (3)과 같이 파괴확률(Pf, probability of failure)과 신뢰성 지수(β , safety index)로 표시할 수 있다.

$$g(r, s) = R - S \quad (1)$$

$$Pf = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^s f_{R,S}(r, s) ds dr \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\text{mean value of } g}{\text{standard deviation of } g} \quad (3)$$

3. 활하중모델

3.1 하중히스토그램을 이용한 수치적분방법

* 정희원 서울대학교 토목공학과 교수

** 정희원 서울대학교 토목공학과 박사과정

교량구조물을 통행하는 차량에 의한 응력변동은 구조물의 피로손상을 결정하는 중요한 요소이다. 이때 교량위를 통과하는 임의차량에 의한 활하중효과는 차량의 총중량, 축하중, 축간거리, 교량위 차량의 상대적 위치, 한 교량지간위의 차량의 대수, 충격효과, 또 각 주형에 미치는 하중분배효과등에 의해서 결정되어진다. 이러한 임의하중에 의한 하중효과를 산정하는 방법에는 하중 히스토그램을 이용한 수치적분방법, Monte Carlo Simulation, Stochastic process 기법등이 있으며 본 연구에서는 하중히스토그램을 이용하는 수치적분방법을 이용하였다. 하중히스토그램을 이용한 수치적분방법은 하중효과를 결정하는 요소들을 합리적인 방법으로 독립적으로 결합시켜 하중효과를 산정하고 이의 효과를 계수화하여 나타낸다. 그림 1에서와 같은 단, 증지간에서의 가능한 차량위치를 설정, 위치확률값과 결합시켜 하중효과의 확률분포를 산정하는데 기본식의 형태는 식 (4), (5)과 같다.

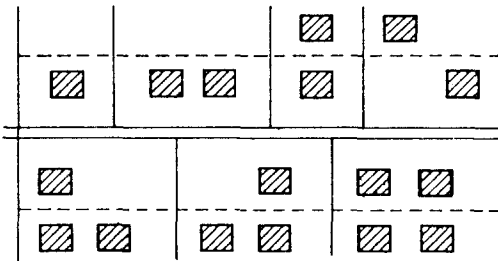


그림 1 지간위에 존재할 수 있는 차량위치

$$P_i[\text{event}] = P_i[p] * P_i[t_p] * P_i[w_t] \quad (4)$$

여기서, $P_i[p]$ = 트럭위치의 확률

$P_i[t_p]$ = 트럭종류의 확률

$P_i[w_t]$ = 트럭중량의 확률

$$P[\text{event}] = P_1[\text{event}] * P_2[\text{event}] * P_3[\text{event}] * P_4[\text{event}] \quad (5)$$

식 (4)와 같이 한 차량하중사건에 의한 확률값은 트럭위치, 트럭형태, 그리고 트럭중량의 확률이 독립적으로 결합된 확률값임을 의미하며, 식 (5)는 단, 증지간의 교량에서 지간길이와 차량종류에 따라 최대 4개의 차량하중사건이 한 하중사건을 구성하는 식이다.

3.2 활하중모델

조사장소로부터 얻은 트럭하중에 관한 자료로부터, 활하중에 의한 모멘트효과는 강주형 단순지간교의 경우는 식 (6), 철근콘크리트 슬래브교량의 경우는 식(7)과 같은 모델로서 표현할 수 있다.

$$M_j = m_j \cdot g_j \cdot i_j \cdot h_j \cdot w_j \quad (6)$$

m_j : 차량축간격계수

g_j : 주형분배계수

i_j : 충격계수

h_j : 차간거리계수

w_j : 차량중량

$$M_j = m_j \cdot i_j \cdot h_j \cdot w_j / 2E_j \quad (7)$$

E_j : 윤하중분포폭

4. 피로 손상모델

교량구조물의 피로영향에 대한 신뢰성해석에는 활하중모델외에 피로손상모델이 필요한데 본 연구에서는 비교적 수학적으로 표현이 간편한 Miner's rule을 피로 손상모델로 사용하였다. 이 방법은 응력범위 S_j 가 반복작용할때의 파괴횟수가 N_j 이면, 한번 응력범위 S_j 가 작용할때의 손상은 $1/N_j$ 이고, 이것이 n_j 번 반복될때의 누적된 손상은 n_j/N_j 라는 가정을 이용하는 것이다.

5. 성능함수

교량구조설계의 피로에 관한 성능함수의 구성은 식 (8)과 같이 파괴손상, 즉 저항할 수 있는 손상으로 부터 Miner's rule을 적용시킨 특정시간 t까지의 누적손상을 맨 값으로 표현 할 수 있다.

$$g = D_f - D(t) = D_f - \sum_j \frac{1}{N_j} \quad (8)$$

여기서, D_f : 파괴손상

N_j : 응력범위 S_j 작용시 파괴횟수

강주형을 갖는 단순지간의 교량은 설계시 선정되는 응점위험부의 S-N curve 식과 활하중효과식, 모멘트와 응력범위와의 관계 등을 조합하여 식 (9)와 같이 표시되고 단, 증지간의 철근콘크리트 슬래브교량의 경우는 압축부 콘크리트에 Tefpers 와 Kutti 의 연구에 의한 식을 이용하여 식 (10)와 같이 표현

할 수 있다.

$$g = D_f - \frac{V_t}{N_D} \cdot \left(\frac{M G I H}{S} \right)^3 \cdot L_o \quad (9)$$

$$g = D_f - \frac{V_t}{10^a} \left[1 + 2.303(a - \log N_D) \frac{M I H}{S E} L'_o \right] \quad (10)$$

$$\text{여기서, } L_o = \frac{1}{V_t} \sum_j \left(\frac{W_j}{W_D} \right)^3$$

$$L'_o = \frac{1}{V_t} \sum_j \left(\frac{W_j}{W_D} \right)$$

윗 식 (9), (10)에서의 M, G, I, H, E는 임의통행차량과 설계차량의 활하중 계수비이고, S는 설계반복횟수 N_D 의 응력범위와 설계응력범위의 비이다. 그리고 a는 S-N curve의 실험상수이고, V는 ADTT값, t는 교량의 사용기간이다.

6. 피로해석 및 결과

하중 히스토그램을 이용한 수치적분방법에 의해 하중효과를 산정하고 이로부터 하중효과의 확률분포를 얻어내어 차량거리계수를 그림 2와 같이 구해내어 단순지간의 강주형교량과 철근 콘크리트 슬래브 교량의 설계에 관한 신뢰성지수를 산정하였다. (그림 3, 그림 4) 이로부터 목표신뢰성지수를 결정하여 1일트럭통행량과 지역차량특성인 증량계수에 따라 다른 신뢰성수준은 하중계수(load factor)를 도입함으로써 보정할 수 있다.

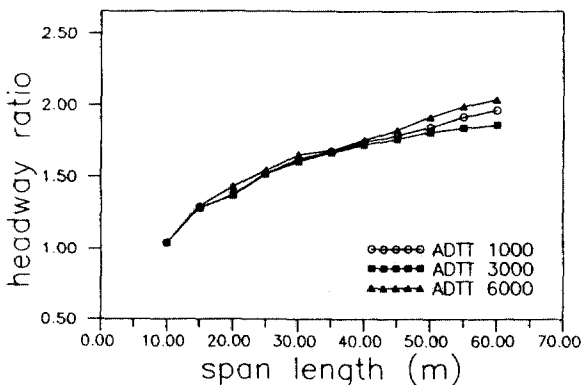


그림 2 지간길이에 따른 차량간격계수

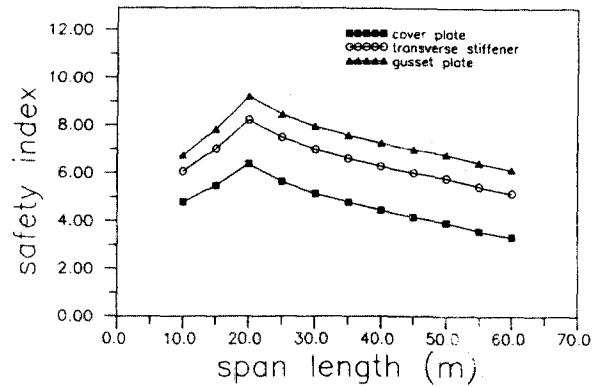


그림 3 I형 강주형교량의 신뢰성지수

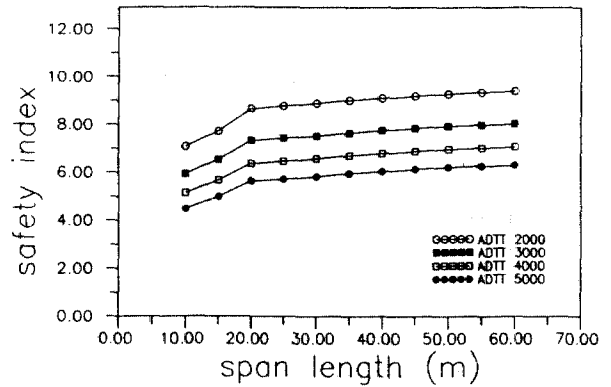


그림 4 철근콘크리트 슬래브교량의 신뢰성지수

본 연구에서 얻어낸 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 현행 규정에 의해 설계되는 단순지지된 단, 증지간(10-60m)의 강주형교량과 철근콘크리트 슬래브교량은 피로에관해 각각 5.748과 6.919의 신뢰성수준을 보이고 있다. 이는 설계강도 신뢰성에 비해 비교적 일정한 값이나 1일트럭통행량과 지역차량특성에 따라 편차를 보인다.
- 2) 강주형교량은 용접부위별, 즉 gusset plate, transverse stiffener, cover plate 등에 따라 다른 신뢰성 수준을 보여주고있다.
- 3) 철근콘크리트 슬래브교량의 인장철근은 현행 설계시의 공칭활하중 응력범위보다 높은 피로한계를 갖아 안전한 것으로 사료된다.
- 4) 지역의 증량특성과 1일트럭통행량에 따른 신뢰성수준의 변동은 하중계수를 도입함으로써 일정한 신뢰성수준을 확보하였다.

표 1 I형 강주형교량에서의 하중계수

L ₀ ADTT	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7
1000	0.547	0.689	0.789	0.869	0.935	1.047
2000	0.691	0.871	0.996	1.095	1.179	1.324
3000	0.796	1.003	1.148	1.263	1.353	1.523
4000	0.879	1.108	1.269	1.396	1.503	1.682
5000	0.950	1.197	1.370	1.507	1.625	1.816
6000	1.016	1.279	1.465	1.613	1.736	1.944

표 2 철근콘크리트 슬래브교량에서의 하중계수

L ₀ ADTT	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
2000	0.792	0.824	0.854	0.883	0.910	0.936
3000	0.907	0.944	0.979	1.012	1.043	1.073
4000	0.999	1.040	1.079	1.114	1.149	1.182
5000	1.077	1.121	1.163	1.202	1.239	1.275
6000	1.145	1.192	1.236	1.279	1.319	1.356

참고문헌

1. Nyman, W. E. and Moses, F., "Calibration of Bridge Fatigue Design Model," J. Struct. Eng., Vol.111, No.6, June, 1985.
2. Fisher, J. W., et al., "Effect of Weldments On The Fatigue of Steel Beams," National Cooperative Research Program, Report 102, 1970.
3. Fisher, J. W., Bridge Fatigue Guide, American Institute of Steel Construction, 1977.
4. Pavia, A., "Reliability Approach to Fatigue Design of Highway Bridges," thesis presented to Case Western Reserve University at Cleveland, Ohio, in 1975, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

5. Moses, F. and Pavia, A., "Probability Theory for Highway Bridge Fatigue Stresses-Phase 2," Final Report, Ohio Department of Transportation, Aug., 1976.
6. Fatigue Reliability : Introduction, by the committee on fatigue and fracture reliability of the committee on structural safety and reliability of the structural division, ASCE Vol.108, No ST1, Jan., 1982.
7. Fatigue Reliability : Quality Assurance and Maintainability, by the committee on fatigue and fracture reliability of the committee on structural safety and reliability of the structural division, ASCE Vol.108, No ST1, Jan., 1982.
8. Fatigue Reliability : Variable Amplitude Loading, by the committee on fatigue and fracture reliability of the committee on structural safety and reliability of the structural division, ASCE Vol.108, No ST1, Jan., 1982.
9. Fatigue Reliability : Development of Criteria for Design, by the committee on fatigue and fracture reliability of the committee on structural safety and reliability of the structural division, ASCE Vol.108, No ST1, Jan., 1982.
10. Murdock J., and Kesler C. E., "The Mechanism of Fatigue Failure in Concrete," T.& A.M. Rep.No.587, Univ. of Illinois, Aug., 1960.
11. Raithby, K. D., "Behavior of concrete under fatigue loading." Department in concrete technology, I.F.D. Lydon, Applied Science Publishers Ltd, 1979.
12. Hsu, T. C., "Fatigue of Plain Concrete," ACI Journal, Feb., 1982.
13. 박제선, 장동일, "강구조물의 용접연결부의 피로강도에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제 5권, 제 3호, 1985.
14. 교량내하력조사, 건설부 국립건설시험소, 1983.
15. Corley, W. G., and Hanson, M., "Design of Reinforced Concrete for Fatigue," ASCE, Vol.104, No.ST6, June, 1978.
16. 유성원, "철근 및 프리스트레스트 강봉의 피로 특성에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사 학위논문, 1989.