

슬래브교의 피로도 평가 전문가 시스템

Development of Expert System for Fatigue Assessment of Slab Bridge

오 병 환* 김 세 훈** 박 종 범*** 김 지 상****
Oh, Byung Hwan Kim, Se Hun Park, Jong Bum Kim, Ji Sang

ABSTRACT

For a realistic and reasonable determination of condition and status, assessment system should include load modeling for the loads acting on slab bridges due to traffic loads, evaluation system for fatigue, and determination of remaining service life.

The purpose of the present study is to develop a realistic expert system which can estimate reasonably the fatigue and service life of slab bridges, based on the load models that are derived from the traffic loads.

1. 서론

본 연구에서는 실제 교통특성을 고려하여 슬래브교에 작용하는 작용력을 시뮬레이션할 수 있는 기법을 개발하고 이를 이용하여 슬래브교의 피로도평가를 수행하였다.

2. 슬래브 피로도 평가 방법

2.1 차량하중 시뮬레이션

2.1.1 차종별 대표트럭의 선정

교량을 통행하는 모든 트럭의 특성을 대표할 수 있는 일정한 축간격과 축하중 분포를 갖는 표준트럭을 결정하였으며, 크게 Single Truck과 Semi-Trailer로 나누었다.(그림 1) 대표트럭은 현 지방서의 설계차량, 실제 통행하는 트럭, 현재 국내에서 생산되는 모든 트럭의 제원 등을 근거로 하여 결정하였다. 여기서, Single Truck은 2축과 3축을 갖는 트럭, Semi-Trailer는 4축이상의 트럭을 대표하며, 단위하중 W 을 갖는 차량으로 하였다.

* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 학생회원, 서울대학교 토목공학과

*** 학생회원, 서울대학교 토목공학과

**** 정희원, 서경대학교 토목공학과 교수

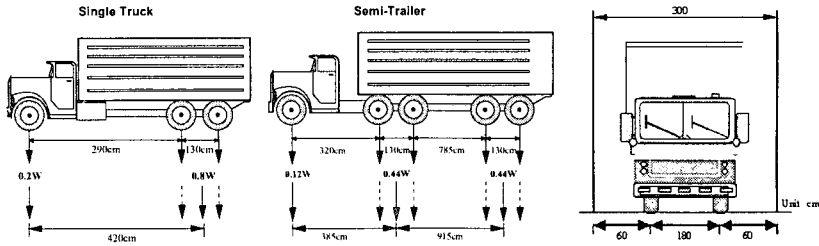


그림 1 대표트럭의 형상 (옆면과 정면)

2.1.2 차량의 통행특성 및 교통량 증가분석

차량하중의 특성을 분석하기 위한 가장 기본적인 자료는 운행중인 차량들의 총중량과 축중에 관한 자료들이다. 그러나 국도상에는 아직까지 WIM과 같은 자동축중측정장치의 설치가 미비하여 이러한 자료를 확보하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이미 수집된 차량하중 조사자료 및 과적 검문소의 과적단속자료(한국건설기술연구원,1991)를 이용하였다.

차량의 활하중은 상당한 불확실성을 갖고 있으며, 활하중 효과에 큰 영향을 미치는 변수로는 차량 총중량(vehicle gross weight), 축하중(axle weight), 차량순간격(headway distance), 축간거리(axle spacing) 및 통행량(traffic volume) 등의 무작위 변수들이 있다.

본 연구에서는 그림 2에서처럼 고속도로에서의 차량 통행자료로부터 차량의 통행 패턴별로 발생할 수 있는 확률을 분석하였다. Case4, Case5는 아주 작은 값이므로 실제로는 적용하지 않았다.

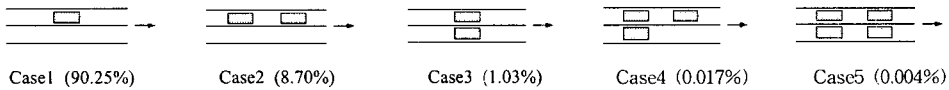


그림 2 2차선 교량에서의 통행패턴 및 빈도

차량 순간격은 적용할 때마다 실제의 값을 입력받아 사용하도록 하였다.

본 연구에서는 과거의 교통량과 현재의 교통량으로부터 미래의 교통하중의 증가를 예측하기 위해 건교부의 교통량조사자료(건설교통부,1995~2000)를 이용하여 전년도 대비 교통량의 증가비율을 측정 조사지점에 따라 분석하였다.

2.2 차량하중에 의한 슬래브교의 작용력 해석

본 연구에서는 슬래브교에 통행하는 차량하중이 검토하고자 하는 슬래브교의 임의의 위치에 작용하는 하중을 해석하기 위하여 판요소 유한요소해석으로 각 차량 통행 특성을 시뮬레이션하여 각 차량통행특성에 따른 최대 작용력을 도출하였다. 이렇게 구한 작용력과 각 차량통행특성이 발생할 수 있는 확률을 조합하여 확률적인 차량통행특성을 시뮬레이션한 모멘트와 전단력 스펙트럼을 산출하여 슬래브교의 피로도 해석에 적용하였다.

모멘트와 전단력을 이용하여 콘크리트와 철근의 응력은 단위폭에 대한 단면적으로 치환하여 직사각형 단면에 대하여 구하였다. 슬래브교 단면이 주어졌을 때 거더의 단면의 변형이 거더의 중앙선에 변형후에도 수직을 유지한다고 가정하면 기준점 O에서 y축 방향으로 y 떨어져 있는 부분의 변형률은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \Psi y \quad (1)$$

여기서, ϵ_0 는 기준점의 축방향 변형률이며, 인장일 때 양(+)로 정한다. Ψ 는 단면의 곡률이며 양의모

멘트를 발생시키는 곡률을 양으로 설정한다. 모멘트는 상부가 압축이고 하면이 인장일 때를 양으로 정한다. y 는 기준점에서 y 축 방향으로 거리를 나타내며 기준점에서 아래방향을 양(+)로 설정한다. 따라서 y 에서의 응력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = E_c(\epsilon_o + \Psi y) \quad (2)$$

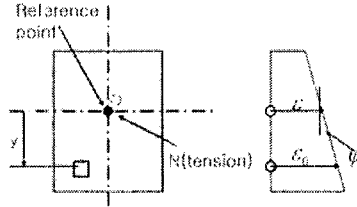


그림 3 변형 정의

단면의 축방향력 N 과 모멘트 M 를 이용하여 ϵ_o 과 Ψ 를 구한다. 시간 t_0 의 콘크리트 임의 층의 변형률과 응력은 다음과 같다.

$$\epsilon_c(t_0) = \epsilon_o(t_0) + \psi(t_0)y \quad (3)$$

$$\sigma_c(t_0) = E_c(t_0) [\epsilon_o(t_0) + \psi(t_0)y] \quad (4)$$

시간 t_0 의 철근에서의 응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ns}(t_0) = E_{ns} [\epsilon_o(t_0) + \psi(t_0)y] \quad (5)$$

2.3 차량하중에 의한슬래브교 피로도 평가

2.3.1 차량하중에 의한 모멘트에 대한 피로도 평가

2.2에서 구한 슬래브교의 압축부 콘크리트 응력 스펙트럼과 인장철근의 응력 스펙트럼을 이용하여 각 응력단계의 피로수명을 구하고 일일통행량(ADDT)를 곱하면 식(6)의 일일동안의 피로도, D_{day} 를 계산할 수 있다. 시간 t (일)의 피로손상도는 교통량 증가 계수를 고려하여 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{day} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{N_{fi}} \times ADDT \quad (6) \quad D_t = D_{day} \times t \times \left(1 + \frac{f_{gross} - 1}{365}\right) \quad (7)$$

$$t_1 = \frac{1}{D_{day} \cdot \left(1 + \frac{(f_{gross} - 1)}{365}\right)} \quad (8) \quad Y_f = t_1 - t \quad (9)$$

2.3.2 차량하중에 의한 편칭전단에 대한 피로도 평가

본 연구에서는 松井의 S-N 곡선을 이용하여 피로수명평가를 하였다. 건조상태일 때의 S-N곡선은 다음과 같다.

$$\log S = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (10)$$

여기서, $S = P_a/P_{sx}$, N 는 반복회수, P_a 는 재하하중이고 P_{sx} 는 다음 식에 의하여 계산된 값이다. 여기서 제안된 편칭전단 내하력의 식에서는 주요 인자인 바닥판두께, 유효높이, 철근량, 콘크리트의

압축강도, 재하판의 크기 및 형상 등의 영향을 고려한 것이다. (松井)

$$P_{sx} = 2B(v_{s,max} X_m + f_{t,max} C_m) \quad (11)$$

다양한 작용하중에 대하여 다음과 같은 등가반복횟수를 얻을 수 있게 된다.

$$N_{eq} = \int_{\alpha}^{\beta} \left(\frac{Q_x}{Q_0}\right)^m p(x) dx \cdot \int_0^{P_{max}} \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^m f(P) dP \cdot N_i \quad (12)$$

여기서,

Q_x : 관심위치로부터 x만큼 떨어진 곳에 하중 P_0 가 작용되는 경우의 전단력

Q_0 : 관심위치에 하중 P_0 가 작용되는 경우의 전단력

m : 피로수명곡선(S-N 곡선) 기울기의 역수(절대값)

α, β : 축중 재하의 한계위치

$p(x)$: 축중 재하위치의 확률밀도함수

P_{max} : 최대 축하중

P_i : 실제 재하하중(충격계수 포함)

P_0 : 기본 축하중

$f(p)$: 통행 축하중의 확률밀도함수

N_i : 일일 증차량 통행량(ADTT)

식 (12)의 N_{eq} 는 일일 발생하는 등가의 반복재하횟수를 의미한다. 따라서 바닥판의 피로수명(년)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_f = \frac{N_f}{365 \times N_{eq}} \quad (13)$$

여기서, N_f : 최빈 통행위치에 기본축하중이 작용하는 경우의 파괴 반복횟수

3. 슬래브교 피로도 평가를 위한 전문가 시스템

3.1 Expert System

본 연구에서 개발한 Expert System의 구성은 다음과 같다.

교량의 단면과 철근의 배근상세 등 교량에 대한 정보를 입력하고 다음으로 교량을 통행하는 트럭의 중량히스토그램을 입력한다. 대표트럭은 2축의 Single Truck과 3축의 Semi-trailer로 구분되며 각각에 대해서 축간거리와 축중비율에 대한 값을 입력한다. 매년 교통량 증가계수, ADDT, 교량위를 동시에 통행하는 트럭간의 간격과 대표트럭간의 혼합비율을 사용자가 입력함으로써 보다 정확한 하중효과를 산정하도록 하였다. 이를 바탕으로 해석하고자 하는 지점의 피로도 와 잔존수명을 산출한다.

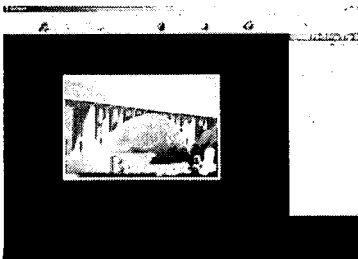


그림 4 프로그램 화면

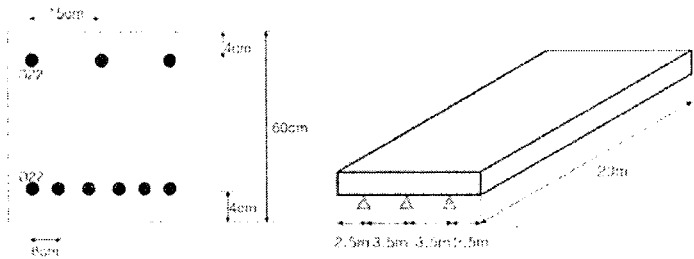


그림 5 교량 재원

3.2 교량 적용 사례

교량재원은 중방향 20m, 횡방향 12m, 슬래브 두께 60cm인 1경간 교량으로 하였다.(그림 5)

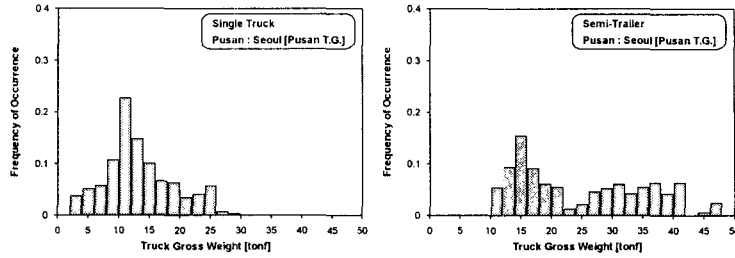


그림 6 트럭중량 히스토그램(부산-서울 : 부산T.G)

트럭중량 히스토그램은 그림 6의 히스토그램을 사용하였다. 대표트럭의 축간거리와 축중비율은 그림1의 값을 사용하였다. 교통량 증가계수는 1.02, 트럭간의 간격은 평균 1.5m, 표준편차는 0.15m로 하였다. ADDT는 1000대이고 차량비율은 다음과 같다. Single Truck : Semi_Trailer = 0.9 : 0.1

검토 위치는 슬래브의 중앙점으로 하였다. 차량하중에 의한 슬래브교의 작용력을 구하면 검토위치에서의 모멘트 스펙트럼과 전단력 스펙트럼은 다음과 같다. (횡방향 x축, 중방향 y축)

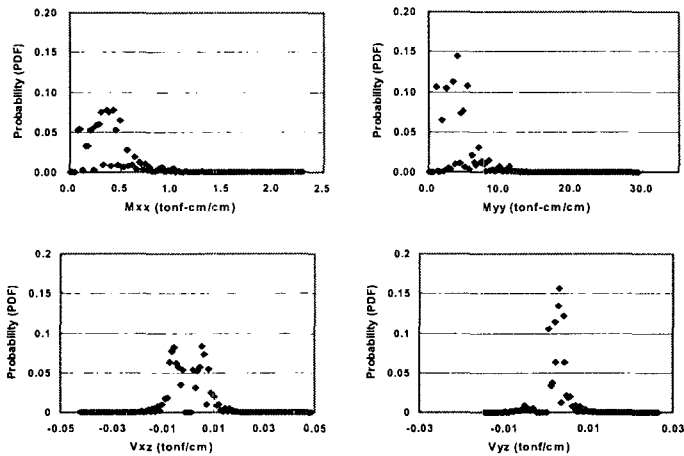


그림 7 검토위치에서의 모멘트와 전단력의 확률분포

위에서 해석한 작용력(그림 7)에 대한 슬래브교 단면의 응력을 해석하였다. 슬래브교의 주요 하중작용방향은 중방향이므로 단면의 y 방향에 대해서 콘크리트의 응력과 철근의 응력분포를 구하였다.

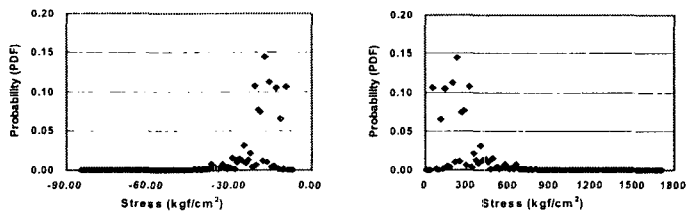


그림 8 M_{yy} 에 의한 압축연단의 콘크리트 응력 스펙트럼과 인장철근 응력 스펙트럼

위의 응력 스펙트럼을 이용하여 압축연단의 콘크리트의 피로도를 구하였다. 해석결과 잔존수명은 1.0×10^{21} (일)으로 피로에 대해서 안전한 것으로 나타났다. 인장철근의 피로도는 1000일 후 0.0556이고 잔존수명은 17000일(46.57년)로 해석되었다.

편칭전단에 대해서는 식(11)을 이용하여 P_{sx} 를 구하고, 기본축하중을 1tonf으로 하여 식 (10)에 대입하여 N_f 를 구하였으며, 기본축하중이 작용할 때의 전단력과 그림7의 V_{yz} 스펙트럼을 이용하여 N_{eq} 를 구하였다. 해석결과 N_{eq} 는 9.07×10^9 로 나타났다. N_f 와 N_{eq} 를 식 (13)에 적용하여 피로수명을 계산한 결과 Y_f 는 9.77×10^{19} (년)으로 예상되었다. 전단효과는 지점 근처에서 크게 나타나므로 교좌에서 종방향으로 1m만큼 떨어져 있는 위치에서 편칭전단에 대한 피로수명 Y_f 를 구한 결과 잔존수명이 1.02×10^{15} 년으로 중앙위치보다 수명이 짧은 것으로 나타났으나 사용중 피로에 안전한 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 슬래브교의 현재상태를 추정하고, 차량반복하중에 의한 손상모델을 개발하여 이를 근거로 피로손상에 대한 잔존수명을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 슬래브교에 대한 모멘트와 편칭전단에 대한 피로도해석을 수행한 결과 슬래브교 중앙에서는 압축연단의 콘크리트와 편칭전단에 대한 피로도는 무시할 수 있는 정도이며 이에 반해 인장철근의 피로도는 슬래브교의 잔존수명을 결정하는 요인임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Lyu, Y (2002), "Development of Probabilistic Prediction System for Remaining Life of Reinforced Concrete Decks of Bridges," Ph.D Thesis of Seoul National University, 2002.
2. Youn, S.G., "A Study on the Fatigue Behavior and the Fatigue Design of the Reinforced Concrete Deck Slabs of the Composite Bridges," Ph.D. Thesis of Seoul National University, 1996.
3. David Z. Yankelevsky, Orit Leibowitz, "Punching shear in concrete slabs", International Journal of Mechanical Sciences, 1999.
4. Philip C. Perdikaris, "RC Bridge Decks Under Pulsating and Moving Load," the Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 3, March, 1988.
5. 건설교통부, "도로 교통량 통계연보", 1995~2000.