

교량부속구조물에 대한 진동해석과 피로내구성평가

Vibration Analysis and Durability Evaluation of a Sign Frame on a Bridge

이상훈* · 엔도타카오** · 이시카와 마사미** · 한연희***

Lee, Sang Hun · Endo, Takao · Ishikawa, Masami · Han, Yeon Hee

Abstract

Between traffic-induced vibration of a bridge and fatigue damage of its attached structures are very closely related. But any evaluation and design method considering the fatigue damage is not established yet. As an experimental method of evaluation of the fatigue durability, a method based on cumulative damage using a stress range histogram has been often used. However, to use the method, the fatigue durability of unmeasured points could not be evaluated. Then, in this paper, dynamic analysis of a sign frame on a bridge is carried out based on the vibration data of the bridge. And model optimization was performed for good agreement between measured responses and computed responses. As a result, we could get stress range histograms and calculate fatigue durability of unmeasured points.

key words : Equation for Motion, Sign Frame, Dynamic Analysis, Cumulative Damage, Fatigue Durability

1. 서 론

교량위에 설치되는 표식주나 조명주등의 교량부속구조물은 지상부와 달리 진동의 영향을 받기 쉬워 피로 손상이 발생할 가능성이 있다. 실제로 일본에서는 이와 같은 교량부속구조물의 피로손상사례가 가끔 발생되고 있다. 교량부속구조물의 손상은 교통사고 등 2차 재해로 연결될 가능성이 있기 때문에 적절한 대책이 요구되지만, 일반적으로 교량부속구조물에 대해서는 사하중과 풍하중만으로 설계^{1),2)}하고 교량으로부터의 진동의 영향이나 부속구조물 자체의 동적성상은 고려하지 않는 것이 보통이다. 그러나 일부저자의 관련연구³⁾에 의하면, 교통하중과 교량부속구조물의 피로와는 밀접한 관계가 있는 것으로 밝혀졌다.

교량에 설치되어있는 부속구조물에 대한 계측에 의한 피로내구성 평가방법 중 하나가 대상부에 변형률계이지를 부착하여 일반차량 공용시의 24시간 응력빈도를 측정후 선형누적피해이론을 이용하여 피로수명을 계산하는 것이다. 그러나, 이 방법은 측정점 이외의 평가가 불가능하다는 것이 단점이다. 또한, 기설구조물에 있어서는 게이지를 부착하는 작업이 제한되어 충분한 측정점의 확보가 곤란한 경우가 많다. 본 연구에서는 하중차량 주행시의 교량 및 문형표식주(이하 문형주라 한다)의 진동, 그리고 문형주 기부에 대한 일반차량 공용하의 24시간 응력빈도분포를 측정하고, 얻어진 데이터를 이용하여 동적응답해석을 행함으로써, 기설교량부속구조물에 대하여 간편하고도 신뢰성 높은 피로내구성 평가수법을 제안하는 것이 그 목적이다.

2. 교량위의 문형주에 대한 운동방정식

지진응답해석과 같이 진동외력이 구조물에 대해 동일하게 작용할 경우는, 실제의 외력작용점이 아닌 구조물의 각 질점에 관성력으로 작용시키는 것이 일반적이다. 그러나 문형주의 경우는 외력인 교량진동이 기부별로 다르므로 위와 같은 해석방법은 적용될 수 없다. 여기서는 기부별로 외력이 서로 다르게 작용하는 문형주에 적용이 가능하도록 운동방정식을 정식화한다. 우선, 그림 1에 보인 문형주 모델에 대해 전체의 운동방정

* 정회원 · 일본 동북학원대학 환경건설공학과 · 부교수 · E-mail: leesh@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

** 일본 동북학원대학 환경건설공학과 · 교수

*** 일본 동북학원대학 환경건설공학과 · 부교수

식을 세우면, 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

여기서,

$$x = \{x_s, u_1, u_2\}^T, u_1 = \{u_1, v_1, w_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3\}^T, u_2 = \{u_2, v_2, w_2, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}^T$$

또한 x_s 는 u_1, u_2 이외의 문형주의 자유도이다. 운동방정식(1)은 다음과 같이 분해된다.

$$\begin{bmatrix} M_s & & \\ & M_{u_1} & \\ & & M_{u_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

우변은 u_1, u_2 의 강제변위를 작용시킬 때의 반력이다. 행렬의 가장 윗부분에 주목하면 식(3)이 구해진다.

$$M_s \ddot{x}_s + C_{11} \dot{x}_s + C_{12} \dot{u}_1 + C_{13} \dot{u}_2 + K_{11} x_s + K_{12} u_1 + K_{13} u_2 = 0 \quad (3)$$

최종적으로 다음식이 주어진다.

$$M_s \ddot{x}_s + C_{11} \dot{x}_s + K_{11} x_s = -(C_{12} \dot{u}_1 + C_{13} \dot{u}_2 + K_{12} u_1 + K_{13} u_2) \quad (4)$$

이상에서 구해진 식(4)는 우변이 하중항인 통상의 운동방정식이 되어, 각 절점의 응답변위, 속도, 가속도를 구할 수 있다. 여기서 $\dot{u}_1, \dot{u}_2, u_1, u_2$ 는 실측에서 구해진 기부진동의 속도와 변위이다.

3. 진동 및 응력빈도 측정

3.1 대상 문형주와 측정의 개요

대상구조물은 높이 5.5m, 폭 18.7m의 정체담지센터 용 강제 문형주이다. 그림 2와 같이 가속도계를, 문형주의 가로보와 우각부에 5개소 설치하고, 기부에서 5m씩 떨어진 난간 위에 연직방향 4개소, 수평방향 1개소에 설치하여, 196kN의 하중차를 주행시켜 진동측정을 실시하였다. 표 1에 하중차의 주행조건을 나타내었다.

표 1. 하중차 주행조건

구분	샘플링수	계측시간	주행속도	차선
kajyu1	5000	25	46.4	주행
kajyu2	5000	25	46.1	주행
kajyu3	5500	27.5	46.1	추월
kajyu4	5500	27.5	47.2	추월
kajyu5	6000	30	77	주행
kajyu6	8000	40	79.2	주행
kajyu7	9500	47.5	77.8	추월
kajyu8	8000	40	79.2	추월

3.2 응력빈도 측정

또한, 일반차량에 의한 진동의 빈도, 기부의 응력반복횟수 및 피로내구성을 평가하기 위해, 기부의 보강리브에 연직방향의 변형률게이지를 부착하여(그림 2의 원내), 일반차량 공용 하에서 히스토그램리코더에 의한 24시간 응력빈도측정을 행하였다. 빈도계수방법은 레인플로우법과 피크밸리법을 병용하여 1시간 간격의 응력빈도분포가 얻어지도록 설정하였다.

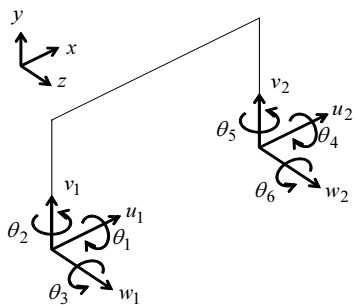


그림 1. 문형주와 기부의 자유도

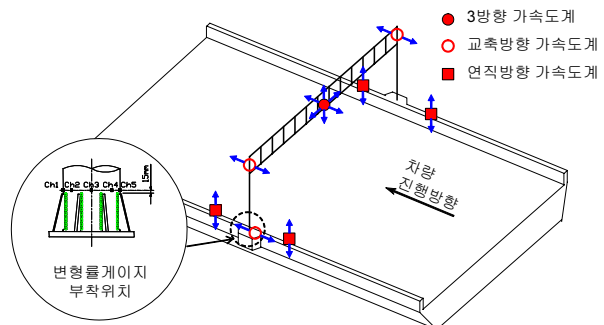


그림 2. 가속도계 및 변형률게이지의 설치위치

4. 동적응답해석

4.1 유한요소모델의 최적화

동적해석의 결과가 실측에 가까운 값을 가지기 위해서는, 실측과 해석의 고유진동수가 일치해야 한다. 대상 문형주의 응답에 가장 큰 영향을 주는 것이 교량의 탁월진동수에 가까운 3~5Hz의 진동수를 가진 저차의 진동모드라는 실측결과의 분석을 참조하고, 또한 보다 작업을 간단히 하기 위해, 질량을 파라미터로 하여 저차의 주요 모드(특히 3차 모드; 가로보의 연직 1차 휨 모드)를 대상으로 최적화를 실시하였다. 그 결과 질량이 1.2배의 경우에 고유진동수가 가장 일치하는 것으로 나타났다. 실측치와 최적화 전후의 결과를 표 2에 나타내었다. FEM 모델은, 3차원 보요소를 사용하여 전요소수 58, 절점수 42로 하였다. 강관의 질량과 속도표식 등의 부착물의 질량을 대응하는 질점에 집중질량으로 주었다. 경계조건은 기부를 전 자유도 구속으로 하였다.

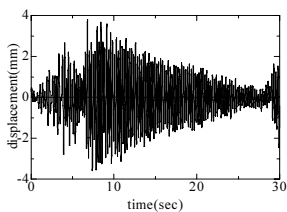
표 2. 실측치와 최적화 결과의 비교

고유진동수	1차	2차	3차	4차	5차	6차	10차
실측치	1.59	3.69	4.32	4.57	4.69	8.47	19.2
해석치	1.55	4.03	4.78	4.99	5.27	8.36	20.9
최적화	1.41	3.68	4.37	4.57	4.82	7.64	19.1

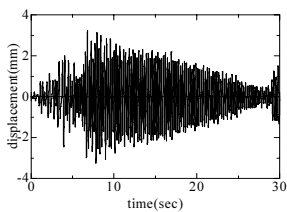
4.2 해석조건과 감쇠계수의 결정

최적화된 모델에 대해 교량진동의 실측치를 입력하여 동적해석을 행하였다. 해석에는 기부부근에 설치한 가속도계에서 실측한 가속도를 2회 적분하여 구한 변위를 교량의 진동 데이터로서 입력하였다. 적분 시 1Hz 이하와 100Hz이상의 진동수성분은 필터로 삭제하였다. 이것은 교량의 탁월진동수가 2.5Hz이상이어서 진동수가 1Hz이하의 진동으로는 다른 진동수성분에 비하여 문형주의 진동에 거의 영향을 미치지 않는다는 것과 계측의 샘플링 진동수가 200Hz라는 것이 그 이유이다. 구체적으로는 기부의 두 점에 연직방향의 평균변위와 교축직각방향의 회전변위를 입력하였다. 적분방법은 뉴마크의 β 법을, 적분시간간격 Δt 는 계측의 샘플링시간 간격과 같은 0.005sec로 하였다. 감쇠로는 Rayleigh감쇠를 적용하였다.

하중차 실험의 kajyu5, 6, 8에 대하여, 최적화된 모델을 이용하여 실측파형의 결과와 비교하면서 감쇠계수의 결정한 결과, 1,2차의 감쇠정수를 각각 0.005와 0.003으로 한 경우가 가장 재현성이 우수하였다. 해석대상의 kajyu5, 6의 보 중앙의 연직방향의 경우를 보면, 응답의 진폭의 크기와 파형의 형상이 잘 재현됨을 알 수 있다.(그림 3, 4) 다만, kajyu8에 대해서는 그림 5에서 보는 바와 같이 응답의 최대치와 파형의 형상에 다소의 차를 보이고 있다. 이것은 실제의 문형주와 해석모델에 차가 있는 진동수성분이, 교량진동에 의해 응답의 상위성이 강조된 것이 그 원인으로 생각된다.

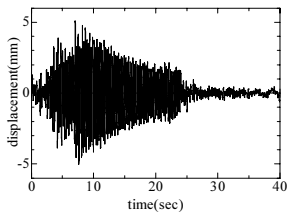


실측파형

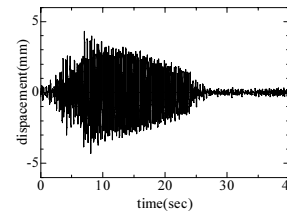


해석파형

그림 3. 보중앙의 연직방향 변위(kajyu5)

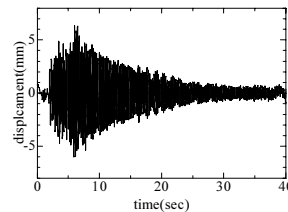


실측파형

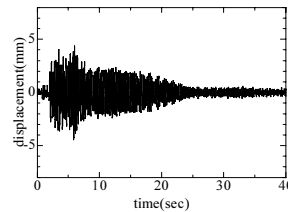


해석파형

그림 4. 보중앙의 연직방향 변위(kajyu6)



실측파형



해석파형

그림 5. 보중앙의 연직방향 변위(kajyu8)

5. 피로수명의 추정

하중차 주행실험에서 계측된 교량진동에 대한 동적응답해석결과로부터 얻어진 히스토그램을 **그림 6**에 나타내었다. 하중차의 재하조건은 kajyu8의 경우이다. 이들 응력빈도분포에 적용하여, 선형누적피해이론을 이용하여 피로수명을 추정하였다. 피로등급은 용접단부를 마무리한 기부에는 F등급을, 마무리하지 않은 보에는 G등급을 적용^{4,5)}하였다. 또한 안전측의 손상도를 계산하기 위해 피로한계는 고려하지 않았다. 실측치는 일반차량공용하의 24시간의 수명이며, 해석치는 196kN의 하중차주행시의 수명이다. 한 대의 하중차로 24시간의 일반차량을 대표하는 것은 얼마간 무리가 있으나, 본 연구에서는 간단히 피로수명을 구하기 위해, 계측으로부터 구한 기부의 피로수명에 기초하여 각각의 분담율을 구하고 다른 부분의 피로수명을 이 분담율에 비례시켜 구하였다. 각각의 분담율을 x, y로 하면 다음 두 식이 성립한다.

$$\frac{x}{3.52 \times 10^{-8}} + \frac{y}{3.65 \times 10^{-8}} = 110$$

$$\frac{x}{5.92 \times 10^{-9}} + \frac{y}{1.64 \times 10^{-8}} = 625$$

이 연립방정식에서 구한 x,y의 비율로 합산한 피로수명의 결과를 **표 3**에 나타내었다. 우각부의 하부 파이프의 보강리브에서 추정한 피로수명은 498년으로 기부보다 길게 나왔으며, 사용연한 내의 피로손상의 가능성은 낮을 것으로 보인다.

6. 결론

유효한 응답을 재현하기 위해서는 진동계측에 기초한 모델의 최적화와 적절한 감쇠정수를 선택할 필요가 있다. 문형주의 고유진동수가 교량의 탁월진동수대에 있을 경우 그 모드에 대해 공진하여 피로파괴에 이를 가능성이 커지게 된다. 문형주 각부의 피로내구성을 평가한 결과 피로연한 내에 피로균열이 발생할 가능성은 낮다고 판단된다. 본 연구에 사용된 해석과 평가방법은 기설치 문형주, 조명주에 대한 잔여피로수명의 평가에 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 일본도로협회 (2000). “도로표식설치기준·동해설”
2. 일본도로협회 (2000). “도로조명주시설설치기준·동해설”
3. 小塩達也, 李相勳, 山田健太郎, 森成顯, 森下宣明 (2001). “교통하중에 의한 표식주의 진동과 피로내구성” 일본 토목학회 구조공학논문집, 47A권, pp. 1009-1017.
4. 일본강구조협회 (1993). “강구조물의 피로설계지침”
5. 山田健太郎, 近藤明雅, 小林且典, 宮本伸治, 荒木準一 (1992). “강관주 기부의 피로강도” 일본 토목학회 구조공학논문집, 38A권, pp. 1045-1054.

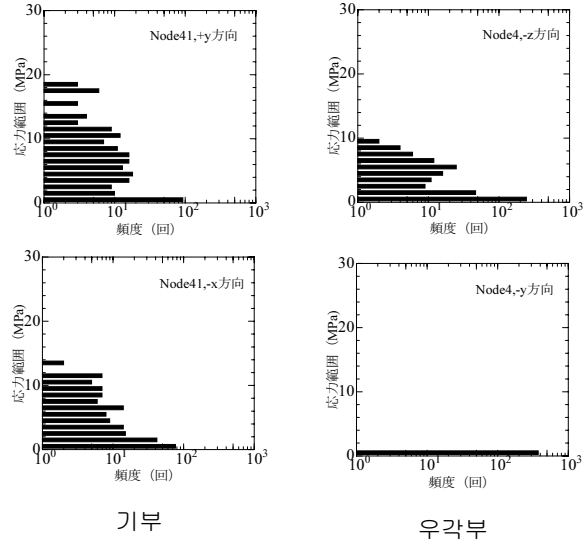


그림 6. 해석에 의한 히스토그램(kajyu8)

표 3. 표식주 각부에 대한 피로수명

구분		기부		우각부	
		y방향	x방향	z방향	y방향
실측치	24시간응력빈도측정(년)	110	625	-	-
	kajyu5	3.52e-8	5.92e-9	7.58e-9	1.30e-10
해석치	kajyu8	3.65e-8	1.64e-8	1.21e-8	1.88e-10
	kajyu5	102.2	607.6	474.5	27700
	kajyu8	7.8	17.4	23.5	1517
	total(년)	110	625	498	29217