

상시진동데이터를 이용한 모델개선 및 이를 이용한 교량의 내하력 산정

Estimation of Load Carrying Capacity of Bridges using Model Updating Based on Ambient Vibration Data

박 영 수* · 이 중 재** · 이 창 근*** · 진 승 섭**** · 윤 정 방*****

Park, Young-Soo · Lee, Jong-Jae · Lee, Chang-Geun · Jin, Seung-Sup · Yun, Chung-Bang

요 약

현재 고속도로 상의 노후 교량에 대하여는 재하시험을 통하여 정량적인 내하력 평가를 수행하고, 만족스러운 수준의 내하력이 확보되지 않은 경우에는 보수, 보강 또는 교체를 수행한다. 그러나 교통량이 많은 고속도로상의 교량에 대해서는 재하시험이 매우 어렵고, 센서 케이블 작업으로 인하여 작업성이 떨어지는 경우가 많다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 상시교통하중에 의한 교량 내하력 평가 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 내하력 평가 대상 교량에 대하여 상시진동계측을 수행하였으며, 계측된 데이터를 통하여 교량의 동특성을 추정하였다. 추정된 동특성을 바탕으로 초기 해석 모델을 Downhill Simplex 방법을 이용하여 개선하였으며, 개선된 교량 모델을 이용하여 재하시험을 시뮬레이션 함으로써, 처짐 보정 계수를 구하였다.

keywords : 내하력, 상시진동계측, 모델 개선, 처짐보정계수

1. 서 론

교량의 유지관리를 위하여는 다양한 교량 상태 평가 기법들이 동원된다. 일반적으로 정기적으로 실시하는 육안검사와, 교량이 안전하게 통과시킬 수 있는 교통하중의 크기인 내하력(Load carrying capacity)을 평가하기 위한 재하시험, 보이진 않는 교량 내외부의 상태를 평가하기 위한 다양한 비파괴 실험이 매년 다양한 교량들에 대하여 실시됨으로써, 국민들이 마음 놓고 교량의 이용할 수 있게 할 수 있는 밑바탕을 제공한다. 그러나 이러한 기법들은 육감이나 경험에 의존하는 기술(예; 육안검사)이거나, 오래 전에 개발된 기술들이 대부분으로, 최신의 기술을 적극적으로 활용하거나 접목하지 못하고 있어, 경제적이고 효과적인 교량 상태 평가를 하지 못하고 있다. 예를 들어 교량 내하력 평가를 위한 기존 방법의 경우, 교량에 변위계나 변형률계를 설치한 뒤 표준트럭을 이용하여 재하시험과 차량주행시험을 병행한다. 그러나 이를 위하여는 많은 시간과 인력을 들여 대상 교량의 하부에 계측기를 설치해야 하고, 시험을 수행하는 동안의 교통을 차단해야 한다. 따라서, 교통량이 많은 고속도로상의 교량에 대해서는 재하시험이 매우 어렵고, 계측 센서의 설치에 있어 케이블 작업으로 인하여 작업성이 떨어지는 경우가 많다. 이러한 문제점의 개선을 위하여, 상시교통하중에 의한

* 학생회원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정 1983ys@hanmail.net

** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 jongjae@sejong.ac.kr

*** 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원 lcg@ex.co.kr

**** 한국과학기술원 건설및환경공학과 석사과정 seungsab@kaist.ac.kr

***** 한국과학기술원 건설및환경공학과 정교수 ycb@kaist.ac.kr

교량 내하력 평가 시스템에 대한 연구가 이루어진 바 있으나, 케이블 기반의 상용 센서를 주로 활용함으로써 계측에 많은 노력과 비용을 필요로 하고 해석모델에 대한 역해석 프로그램 전문가가 필요한 점 등, 실용성은 크게 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 상시교통하중에 의한 교량 내하력 평가 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 내하력 평가 대상 교량에 대한 상시진동계측, 모드해석을 통한 교량의 동특성 추정, Downhill simplex 방법을 이용한 초기 유한요소모델 개선, 재하시험 시뮬레이션을 통한 처짐 보정 계수 산정 등의 과정을 통한 스마트 내하력 평가 기법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 스마트 내하력 평가 절차

스마트 내하력 평가 기법에는 처짐보정계수의 산정을 다음의 과정을 통해 구하게 된다.

- ① 주변의 상시진동원(바람 및 주위 교량 및 도로에서 오는 진동)을 통한 교량 상부의 상시진동 계측
- ② 실험모드해석기법(FDD나 SSD)을 통한 상시진동 가속도의 해석으로 교량의 해석모드(교량의 고유주파수 및 모드형상) 추출
- ③ 추출한 해석모드를 기반으로 하여 최적화 기법을 이용한 해석 모델의 개선
- ④ 개선된 모델에서의 하중 재하 시뮬레이션을 통한 처짐보정계수 산정

처짐보정계수 산정 과정을 식으로 나타내면 아래의 식과 같다. 우선 초기 유한요소 모델로부터 재하시험의 시뮬레이션을 통해 얻은 원하는 부재의 최대 변위를 $\delta_{calculated}^{initial FEM}$ 이라고 하자. 다음으로 ③의 과정을 통해 개선된 모델에서 동일한 하중을 재하하는 시뮬레이션을 통하여 얻은 원하는 부재의 최대 변위를 $\delta_{calculated}^{updated FEM}$ 이라고 하면 스마트 내하력 평가기법에 의해 산정된 교량의 처짐보정계수는 다음과 같다.

$$K_{\delta}^{proposed} = \frac{\delta_{calculated}^{initial FEM}}{\delta_{calculated}^{updated FEM}} \quad (1)$$

위의 식을 통해 산정된 처짐보정계수는 기존의 재하시험을 통해서 구하게 되는 처짐($\delta_{계측}$)을 $\delta_{calculated}^{updated FEM}$ 으로 바꾼것이다. 이는 교량의 동특성을 바탕으로 모델 개선을 수행하여 현재 교량의 상태를 최대한 근사하게 모사한 뒤, 이를 교량과 동일시하여 재하시험을 시뮬레이션함을 의미한다.

3. 현장 실험

3.1. 상시진동 실험

현장실험 대상교량은 35-50-50-35m (총 연장 170m)의 FCM방식으로 건설된 4경간 PSC 상자형 교량으로 현장 실험은 총 12개의 가속도계를 이용하여 수행하였으며, 대상교량 사진 및 가속도계 설치위치, 상시진동 데이터를 이용한 모드 해석 결과는 아래 그림에 나타냄 바와 같다.

3.2. 모델 개선 및 처짐보정 계수 산정

모델 개선은 Downhill Simplex 방법을 이용하여 수행 되었으며 그 결과는 표 1에 정리하였다.

내하력 산정을 위하여, DB-24하중을 초기 모델과 개선 모델의 각 경간 중앙에 재하하여 각 경간의 중앙 변위를 구하여 대상교량의 처짐보정계수를 산정하였다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 기존의 재하시험의 문제점을 개선하기 위하여 상시교통하중에 의한 교량 내하력 평가 기법에 대한 연구를 수행하였다. 내하력 평가 대상 교량에 대하여 상시진동계측을 수행하였으며, 계측된 데이터를 통하여 교량의 동특성을 추정하였다. 추정된 동특성을 바탕으로 초기 해석 모델을 Downhill Simplex 방법을 이용하여 개선하였으며, 개선된 교량 모델을 이용하여 재하시험을 시뮬레이션 함으로써, 처짐 보정 계수를 구하였다. 사용자 친화적인 GUI 기반 스마트 내하력 프로그램 개발에 대한 연구가 계속 수행중에 있다.

감사의 글

본 연구는 한국 도로공사의 연구비 지원(과제명 - 첨단센서개발 및 GUI기반 통합 평가시스템 개발)에 의해 수행되었으며 저자들은 이에 감사드린다.

참고문헌

- Faulkner, B. C., Barton, F. W., Baber, T. T., McKeel, W. T., "Determination of Bridge using Acceleration Data", Virginia Transportation Research Council, 1996.
- Brinker, R., Zhang, L. and Andersen, P.(2000) Modal Identification from Ambient Response Using Frequency Domain Decomposition, Proceedings of 16th International Modal Analysis Conference, San Antonio, Texas, USA, pp. 625-630.
- Wu, J. R. and Li, Q. S. (2004) Finite element model updating for a high-rise structure based on ambient vibration measurements. Engineering structures. Vol. 26. pp. 979-990.
- 한국건설기술연구원, "도로교의 내하력평가 실무매뉴얼", 건설교통부, 2002. 2.
- 현대건설기술연구소, "교량 상시계측 및 분석 시스템 개발과 그 적용성에 관한 연구", 건설교통부, 2000
- 한국과학기술원, "스마트 내하력 평가를 위한 통합 시스템 구축", 한국도로공사 연구보고서, 2005.

표 1. 모델 개선 변수

개선 변수	위치	수량	변수의 증감	초기값	범위
스프링계수	각 지점부	5	탄젠트(Tangent)	0	$-\pi \sim \pi$
탄성계수	각 경간의 상자형 거더	4	선형	1	0.5 ~ 1.5
탄성계수	각 경간의 슬라브	4	선형	1	0.5 ~ 1.5
합계		13			

표 2. 초기 유한요소 모델과 상시진동시험 자료 비교

차수	고유진동수 (Hz)			모드형상(MAC)*		
	초기모델	개선모델	상시진동시험	초기모델	개선모델	상시진동시험
1차	2.1316	2.1485	2.1484	0.9795	0.9980	1
2차	3.1281	3.1586	3.1982	0.9606	0.9923	1
3차	4.6771	5.0426	5.0049	0.9945	0.9944	1

*상시진동시험자료를 참고(Reference)하여 비교.

표 3. 해석적 처짐과 처짐보정계수

재하경우		경간1	경간 2	경간 3	경간 4
경간 1 재하	초기모델	1.8490	-1.0320	0.3080	-0.0749
	개선 모델	1.3000	-0.7830	0.1740	-0.0429
	처짐 보정 계수	1.4223	1.3180	1.7701	1.7459
경간 2 재하	초기모델	-1.0320	3.4290	-1.2660	0.3080
	개선 모델	-0.7830	4.1030	-1.2080	0.2970
	처짐 보정 계수	1.3180	0.8357	1.0480	1.0370

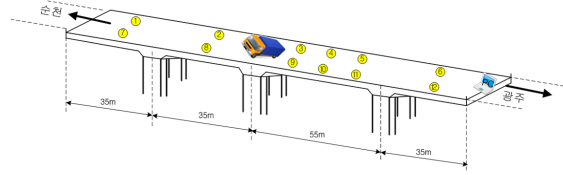
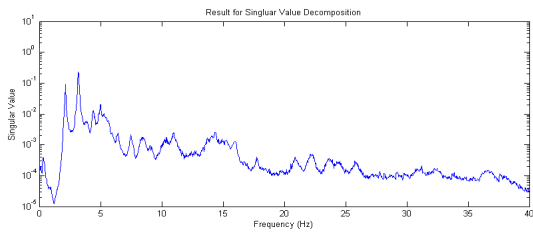
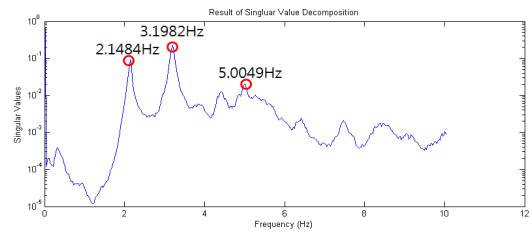


그림 1. 대상교량 및 상시진동시험 가속도계 설치 위치

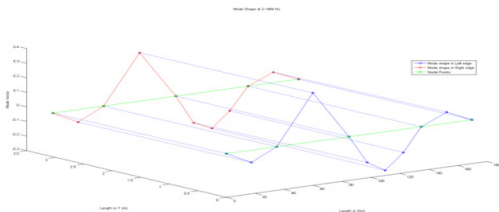


(a) 0~40Hz

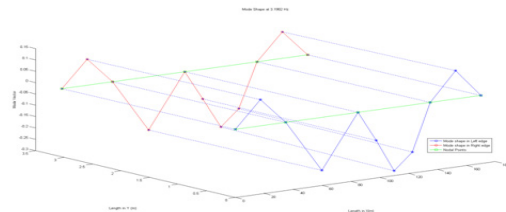


(b) 0~10Hz

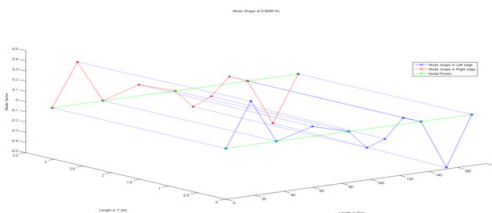
그림 2. 상시진동시험 결과 - 고유진동수



(a) 1차 모드(2.1484Hz)



(b) 2차 모드(3.1982Hz)



(c) 3차 모드(5.0049Hz)

그림 3. 상시진동시험 결과 - 모드형상