

변위 비교를 통한 케이블지지교량의 긴급 지진 안전성 평가 방법의 고찰

박성우¹, 이승한^{2*}

Study on the Emergency Assessment about Seismic Safety of Cable-supported Bridges using the Comparison of Displacement due to Earthquake with Disaster Management Criteria

Sung-Woo Park¹, Seung Han Lee^{2*}

Abstract: This study presents the emergency assessment method about seismic safety of cable-supported bridges using seismic acceleration sensors installed on the primary structural elements of them. The structural models of bridges are updated iteratively to make their dynamic characteristics to be similar to those of real bridges based on the comparison of their natural frequencies with those of real bridges estimated from acceleration data measured at ordinary times by the seismic acceleration sensor. The displacement at the location of each seismic acceleration sensor is derived by seismic analysis using design earthquake, and the peak value of them is determined as the disaster management criteria in advance. The displacement time history is calculated by the double integration of the acceleration time history which is recorded at each seismic acceleration sensor and filtered by high cut(low pass) and low cut(high pass) filters. Finally, the seismic safety is evaluated by the comparison of the peak value in calculated displacement time history with the disaster management criteria determined in advance. The applicability of proposed methodology is verified by performing the seismic safety assessment of 12 cable-supported bridges using the acceleration data recorded during Gyeongju earthquake.

Keywords: seismic safety assessment, seismic acceleration sensor, cable-supported bridge, disaster management criteria

1. 서 론

현재 국내에서는 최근의 경주지진 및 포항지진을 계기로 우리나라도 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 인식이 확산되었고, 이와 함께 대형 사회기반시설물, 특히 케이블에 의해 지지되는 현수교 및 사장교와 같은 특수교량의 지진 안전성에 대한 관심이 증대되고 있다. 최근에는 ‘지진가속도계측기 설치 및 운영기준(MOIS, 2017)’에 근거하여 주 경간장 200m 이상의 사장교와 현수교는 지진가속도계측기(seismic acceleration sensor, 이하 지진가속도계)의 설치 및 운영을 의무화하고 있으며, 이에 따라 자유장과 주탑, 보강거더 및 케이블에 지진가속도계를 설치하고, 일정 규모 이상의 지진발생 시 계측 데이터를 즉시 행정안전부로 전송하도록 하고 있다. 그러나 지진가속도계의 설치가 단순히 지진발생 시 데이터의

기록 및 축적에 의의를 두지 않고, 지진으로 인한 피해의 경감이라는 본연의 목표를 달성하도록 하기 위해서는 각 지진가속도계의 응답을 토대로 특수교량의 안전여부를 긴급하게 파악하여 2차 피해에 대비하도록 하는 의사결정 방안 마련이 필요하다.

사장교 및 현수교의 지진거동과 관련된 최근의 연구들은 주로 수치해석적 연구, 내진보강에 따른 효과에 관한 연구, 지진에 유리한 구조형식이나 재료에 대한 연구 등을 중심으로 진행되어 왔다. 최근에 발표된 특수교량의 지진거동과 관련한 수치해석적 연구들 중 Yi and Li(2017)의 연구에서는 A형 1주탑 사장교 1:20 실물모형제작을 이용한 진동시험을 통해 대략 0.3g 이상의 가속도부터 주탑의 crack이 발생함을 확인하였고 주탑의 실물모형 측정 가속도 및 변위가 수치해석 결과와 대체로 일치함을 보였다. 또한, 주탑의 손상이 축적되면 주탑의 강성이 줄어들어 고유주기가 증가하는 양상도 확인하였다. Wang et al.(2017)의 연구에서는 수치해석적 방법을 이용한 사장교 파괴 메커니즘 분석을 통하여 지진 시 교각이나 주탑이 먼저 파괴에 이르며 보강거더 및 케이블의 손상은 주탑의 손상이 발생한 후에 진행됨을 확인하였다. 댐퍼, 먼진받침 등의 설치와 같이 특수교량의 내진보강에 따른 효과와 관

¹정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터 부장

²정회원, 한국시설안전공단 국가내진센터 과장, 교신저자

*Corresponding author: shlee@kistec.or.kr

National Center for Seismic Safety, Korea Institute Safety and Technology Corporation, Jinju, Gyeongsangnamdo, 52856, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

련된 연구도 진행 중인데, 지진발생 시 사장교의 하이브리드 점성 댐퍼의 에너지 소산을 분석하고 면진장치와의 비교를 통해 하이브리드 점성 댐퍼의 역학적 우수성을 밝힌 연구 (Soneji and Jangid, 2007), 사장교에서의 납면진받침과 댐퍼의 효과에 대한 연구(Valdebenito and Aparicio, 2013), 수치해석을 통한 댐퍼 등의 내진성능향상 장치에 대한 효과를 검증한 연구(Otsuka et al, 2007) 등이 수행되었다. 특수교량의 재료 또는 형상에 대한 거동 특성을 분석한 연구 또한 진행 중이며, 보강거더의 재료적인 측면에서 상당수의 연구가 콘크리트 보다는 강재가 유리하다 결론짓고 있다. 강재 보강거더가 콘크리트나 PC 거더에 비하여 발생한 휨모멘트가 작음을 나타낸 연구(Sarma nad Kumar, 1999)와 보강거더의 형식이나 주탑 연결형식에 따른 동적특성분석을 통하여 개념적으로 지진에 유리한 구조를 역설한 연구(Shaid and Aijun, 2000), 사장교의 실시간 동해석을 통하여 확장 형식의 주탑이 지진거동에 유리하다는 연구(Desai, 2013) 등이 수행되었다. 그러나 이러한 선행 연구들은 주로 해석적인 분석을 위주로만 이루어져 왔으며, 가속도계에 의한 실측을 통해 안전여부를 확인하는 연구와 관련해서는 일부 실험실 단계에서의 거동을 분석한 연구(Yi and Li, 2017)가 진행되었기는 하지만 실 구조물에 부착된 지진가속도계를 통해 안전성을 판단하기 위한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

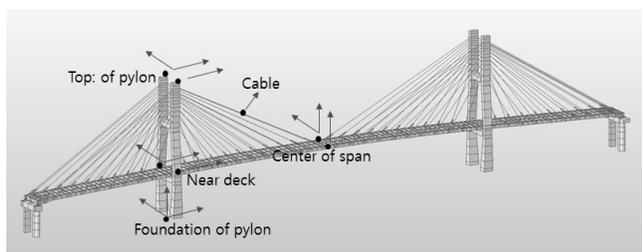
이 연구에서는 지진가속도계에 의해 실측된 데이터를 활용하여 교량의 안전성을 평가할 수 있는 다양한 방법들에 대해 논하고, 이를 통해 가장 합리적인 안전성평가 방법을 제안하고자 한다. 이 연구의 목적은 지진발생 시마다 행정안전부로

전송되는 지진가속도계 데이터를 이용하여 교량의 안전여부를 긴급하게 판단할 수 있는 기법을 제안함에 있다. 기술자가 직접 데이터를 분석하고 수치해석을 수행하는 등의 일반적인 안전성 검토 절차를 지진발생 직후의 특수교량 안전성 평가에 적용할 경우, 여러 개의 특수교량의 안전여부를 단시간 내에 판단하는 것은 불가능하다. 지진발생 시 긴급 안전성 평가를 통한 실시간 의사결정을 위해서는 모든 절차가 자동화된 시스템이 안전성 평가지표에만 근거하여 즉각적으로 판단 및 의사결정을 할 수 있도록 하는 것이 보다 효과적이라 볼 수 있다. 다시 말하면, 지진발생 시 상황의 긴급성을 고려하여 다소 정밀한 평가가 아닐지라도 계측데이터와 평가지표와의 비교만을 통해 특수교량의 개략적인 안전성 여부를 신속하게 판단할 수 있어야 하며 이를 위한 기법의 제안이 필요하다.

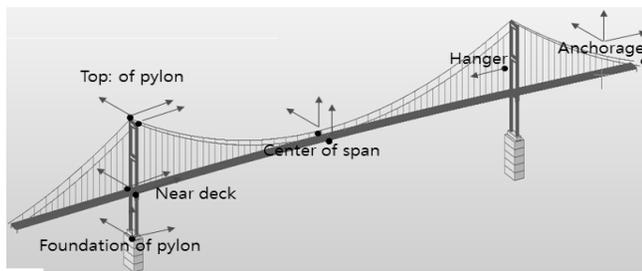
2. 특수교량의 지진 안전성 평가 방법

2.1 지진가속도계의 설치

현수교와 사장교의 지진가속도계는 자유장, 교각기초, 앵커리지, 주탑, 보강거더, 케이블 등에 설치되며, Fig. 1에는 대표적인 형식의 현수교와 사장교의 지진가속도계 설치 위치를 나타내고 있다. 그러나 제한적인 개수의 지진가속도계 응답으로 전체 구조계의 안전 여부를 판단하기에는 무리가 따르며, 각 부재별 지진가속도계의 활용방법이 다르기 때문에, 지진 시 안전성 평가를 수행하기 위해서는 각각의 지진가속도계 응답을 모아 전체계의 안전성을 한 번에 평가하는 것보다는 각 지진가속도계 설치 위치별로 안전성 평가 기법을 다르게 적용하여 개별 평가를 하는 것이 보다 합리적인 방법이 될 수 있다. 지진가속도계의 설치 위치에 따라 부재의 분류는 자유장 및 교각기초, 주탑, 보강거더, 케이블 또는 행어로 분류하였으며 각 부재별로 적용할 수 있는 안전성평가 기법은 각 부재별 특징에 따라 방법을 달리 적용할 수 있다. Table 1에는 지진가속도계를 설치된 위치별로 분류하고 이 연구에서 적용하고자 하는 안전성평가 방법을 정리하여 나타내었으며, 각각에 대한 자세한 설명은 다음의 2.2에서 언급한다.



(a) cable-stayed bridge



(b) suspension bridge

Fig. 1 The installation location of seismic acceleration sensors

2.2 부재별 지진 안전성평가 방법

2.2.1 자유장 및 주탑기초

자유장에 설치된 지진가속도계는 구조물과 위치가 이격되어 있어 구조물과 무관하게 지반자체만의 지진동의 크기를 평가할 수 있다는 특징이 있다. 따라서 측정된 최대지반가속도와 설계지반가속도의 단순 비교만으로 구조물의 안전 여부를 판단하는 신속한 안전성 평가가 가능하다. 또한, 입력지진에 대한 응답스펙트럼을 도시한 후 설계응답스펙트럼과의 비

Table 1 Safety check method using acceleration measured at seismic acceleration sensors

Member	Safety check method
Free-field, Foundation, Anchorage	- Peak ground acceleration - Response spectrum analysis
Pylon, Stiffening girder	- Simplified analysis using response displacement - Comparison of response displacement with designed displacement - Comparison of natural frequencies before and after the earthquake
Cable, Hanger	- Comparison of tension forces before and after the earthquake

교를 통하여 간단하게 안전성 여부를 판단할 수 있다.

주탑 기초에 설치된 지진가속도계의 경우 Park et al.(2018)의 연구를 통해 일부 교량을 제외하고는 최대가속도응답이 자유장에서의 응답과 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 교량의 규모나 형식에 따라 일부 교량들에서는 상부구조의 영향을 받는 것으로 분석되었으나 지진동에 의한 영향에 의한 차이와 비교하면 상대적으로 그 영향이 크지 않았다.

2.2.2 주탑 및 보강거더

이 연구에서는 지진가속도계 측정 가속도로부터 주탑 및 보강거더의 안전성을 평가할 있는 방법을 Table 1에 나타낸 것과 같이 크게 3가지로 구분하여 제시한다.

첫 번째 방법은 지진발생 전후의 고유주파수의 변화율을 이용하여 평가하는 것이다. 이 방법은 지진 전에 구조물의 각 모드별 고유주파수를 파악하는 것이 필요하고 지진발생 시 FFT(Fast Fourier Transform)를 통한 주파수분석과 각 모드별 피크(peak)치를 추출하는 과정을 통한 비교가 이루어져야 한다. 자동화된 시스템으로 간단하게 적용하기에는 다소간의 오류가 발생할 가능성이 큰데, 이에 대한 평가 방법은 이 연구에서는 다루지 않고 추후 연구를 통해 논의하고자 한다.

두 번째 방법은 주탑의 간략해석을 이용하여 평가하는 방법이다. 이 방법은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 주탑 상부와 주탑 상판위치의 지진 시 최대변위를 추출하고 간략화된 모델(simplified model)에 인위적인 변위를 부여하여 발생하는 휨모멘트 및 전단력과 설계 휨모멘트 및 전단력과 비교하는 방법이다. 경주 및 포항지진에 대한 주탑의 변위시간이력을 검토한 결과 주로 상판위치에서보다는 주탑 상부에서 최대변위가 더 크게 발생하는 경향은 파악이 되었으나 교량별로 다양하게 나타나는 형식, 재료 및 형상 등의 특수교량의 특성을 모두 반영할 수는 없으므로 간략해석 식을 일반화시켜 제안하기에는 한계점이 있다. 특히, 경우에 따라서 Fig 3과 같이 최대

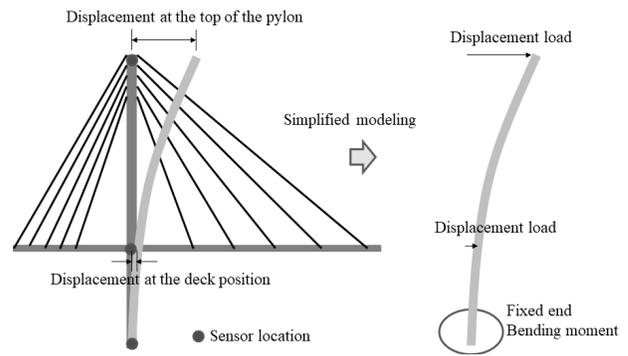


Fig. 2 Simplified model of pylon

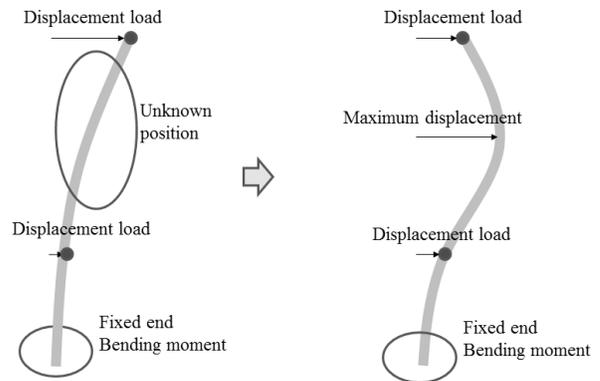


Fig. 3 Difference in position where maximum displacement occurs

변위가 주탑상부에서 발생하지 않을 수도 있으므로 현재의 설치된 지진가속도계만으로 간략해석 방법을 제안하기에는 무리가 따른다. 또한, 지진가속도계의 설치 위치 및 수량 등에도 많은 제약이 따르므로 이를 시스템으로 자동화하여 긴급 안전성 평가를 수행하기에는 적절하지 않은 방법이다.

세 번째 방법은 지진발생 시 측정된 가속도시간이력으로부터 변위시간이력을 계산하고, 이를 이용하여 얻어진 최대발생변위를 기존의 지진해석을 통해 얻어진 각 지진가속도계 설치 위치에서의 최대응답변위와 비교하여 안전성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 지진가속도계 설치 위치에서의 설계지진에 의한 최대변위만 파악하고 있으면 지진발생 시 가속도시간이력을 변위시간이력으로 계산하여 기 설정된 최대변위와 비교하기만 하면 되기 때문에 비교적 간단하게 안전여부를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 이와 같은 방법은 주탑 뿐만 아니라 보강거더에도 적용 가능하다. 이 연구에서는 이 방법에 대한 구체적인 방안을 검토한다.

2.2.3 케이블

케이블에 부착된 지진가속도계는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 케이블 중앙부 보다는 유지관리를 위한 접근이 용이하다

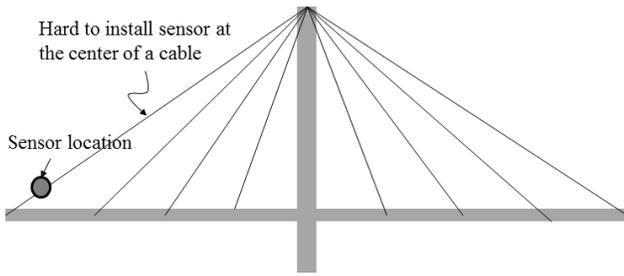


Fig. 4 Location of sensor on the stay cable

록 상판에 가까운 위치에 설치되는 경우가 많다. 기존 연구를 통해 지진 시 케이블의 진폭이나 가속도의 크기로 안전여부를 판단할 수 있는 관리기준은 찾아보기 힘들고, 관리기준이 설정되었다 할지라도 케이블 중앙부의 가속도나 진폭의 직접적 파악이 어렵기 때문에 변위 또는 가속도로 평가하기 어려운 측면이 있다. 반면에 지진가속도계의 설치 위치와 상관없이 주파수 특성은 동일하게 나타나므로 지진발생 전후의 장력을 비교하여 평가하는 것은 가능하다. 장력비교를 통한 안전성평가는 케이블의 평가에 적용되는 일반적인 방법이므로 이 연구의 대상에서 제외하였다.

3. 지진가속도계측기 설치 위치별 변위 비교를 통한 안전성 평가

3.1 안전성평가 절차의 제안

Fig. 5에는 앞 장에서 논의된 지진 시 발생 변위와 구조해석 모델을 이용하여 구한 변위와의 비교를 통한 안전성평가 절차를 나타내었다. 우선 해당 교량에 대한 수치해석 모델을 작성한 뒤 모드분석을 실시하고 지진가속도계의 상시 진동에 의한 FFT를 수행하여 실제 구조물의 주파수 특성과 모델의 주파수 특성이 최대한 일치하도록 모델을 수정한다. 수정된 모델은 실제 동적거동과 유사하다고 보고 설계응답스펙트럼 또는 관리기준으로 적용하고 있는 최대지반가속도에 대한 응답스펙트럼 해석을 실시하여 지진가속도계 설치 위치에서 발생한 최대 변위를 도출한다. 여기까지의 과정은 지진이 발생하기 이전에 미리 결정된 관리기준치로 시스템에 기 입력되며 지진발생 시에는 지진가속도 측정기록을 필터링을 통한 이중적분 등의 기법을 도입하여 변위시간이력을 계산하고 발생된 최대 변위와 기 입력된 관리기준치와의 비교를 통해 안전성 확보 여부를 판정한다.

3.2 안전성 평가 단계별 상세 내용

3.2.1 해석 변위의 도출

설계 시 또는 유지관리 목적으로 만든 해석모델을 이용한

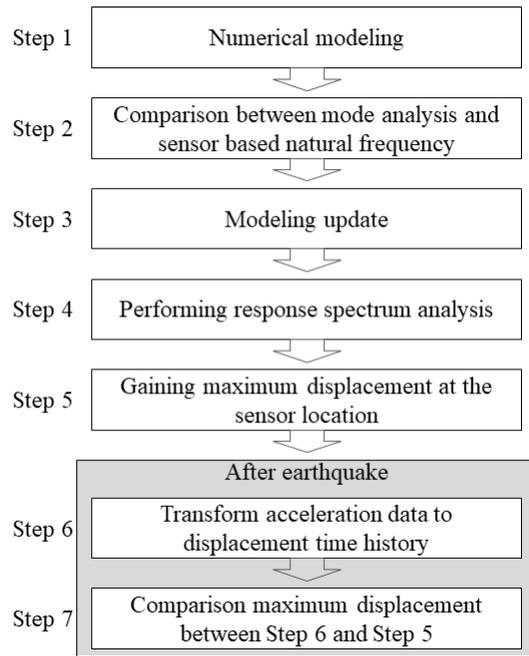


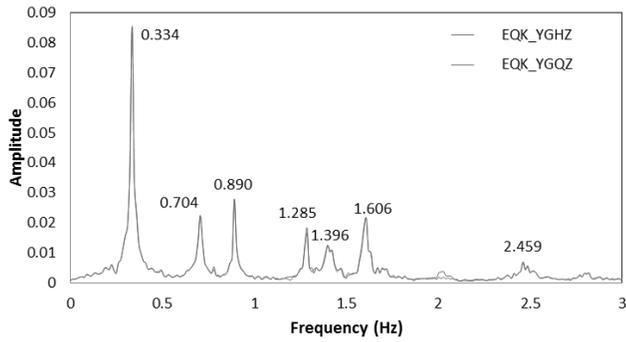
Fig. 5 Procedure of the safety assessment using comparison of displacement

모드해석을 실시하여 각 차수별 고유주파수를 추출하고 지진 가속도계의 상시데이터에 대한 각 차수별 고유주파수를 추출하여 상호 비교한다. Fig. 6에는 지진가속도계의 상시 데이터를 FFT 수행하여 모드별 피크치를 추출하고 해석을 통한 모드별 주파수를 비교하는 단계를 나타내었다. 그림에서 10% 내외의 피크치의 차이가 발생하기 때문에 모델과 실제거동과 상이하다 판단할 수 있다. 이를 고려하여 질량, 강성, 경계조건 등의 조건을 조금씩 수정하고 다시 계산하는 작업의 반복을 통하여 실제 모드별 피크치와 최대한 일치하도록 모델을 업데이트한다. 그 결과 Fig 7과 같이 실측고유주파수와 해석고유주파수가 거의 일치하는 모델을 구축할 수 있다.

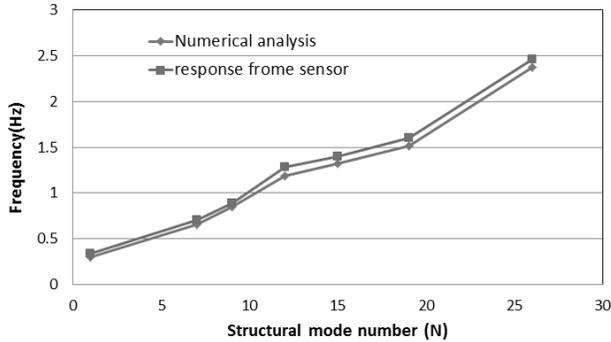
수정된 모델링을 통하여 응답스펙트럼 해석을 수행하고 최대변위를 추출한다. 이 때의 해석변위는 보다 정밀한 방법으로 추출할 수도 있으나 이 연구에서는 정형화된 방법을 적용하기 위하여 응답스펙트럼해석을 활용하였다. 각 지진가속도계의 설치 위치별로 추출된 해석변위를 시스템에 입력하고 지진발생 단계마다 입력된 해석변위와 비교토록 하여 안전성 평가를 수행한다.

3.2.2 지진가속도계로부터 최대변위의 도출

지진가속도계에서 측정된 가속도로부터 변위를 도출하는 방법은 가속도 시간이력을 필터링하여 2중 적분을 수행하는 방법, 변위재구성기법(Hong et al., 2010)을 활용하는 방법 등이 있다. 이 연구에서는 원본 가속도데이터를 저주파영역과



(a) FFT Result of measured acceleration



(b) Comparison of natural frequency

Fig. 6 Comparison between the natural frequency by numerical analysis and that by measurement before modeling updating

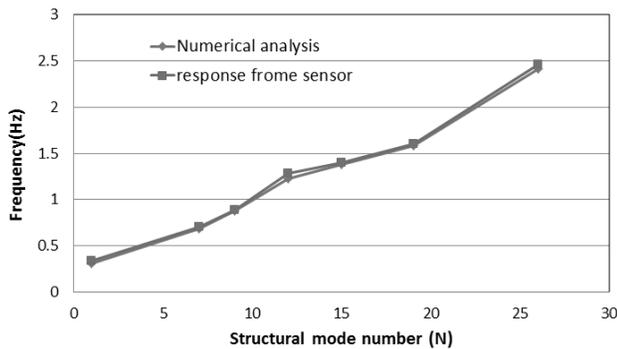
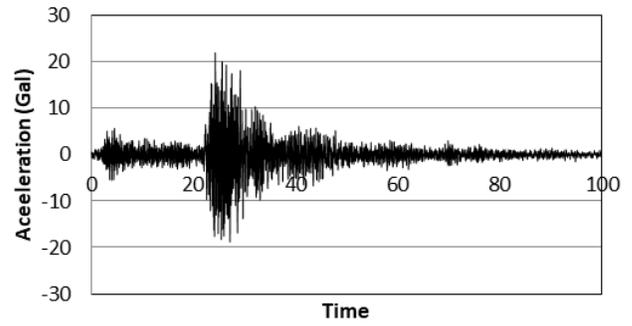


Fig. 7 Comparison between the natural frequency by numerical analysis and that by measurement after modeling updating

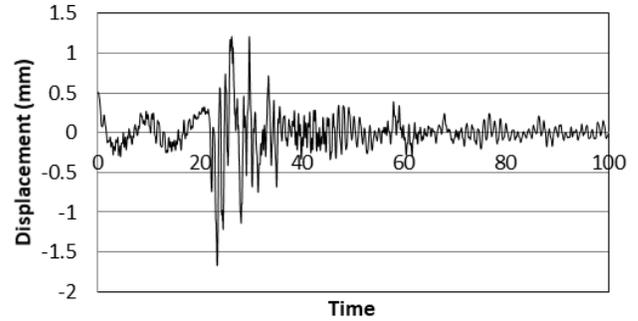
고주파영역을 제거하는 bandwidth filtering을 수행한 후 2중 적분을 수행하여 최대변위를 도출하는 방법을 적용하였다. 지진에 대한 각 부재에서의 데이터는 지난 2016년 경주지진에서 얻어진 데이터를 활용하였다. Fig. 8은 가속도시간이력(a)을 이용하여 변환된 변위이력(b)을 계산한 예이다.

3.2.3 해석변위와 지진변위의 비교를 통한 안전성평가

Table 2에는 경주지진(ML=5.8) 시 지진가속도계의 방향별로 도출된 최대 변위를 이용하여 안전성 평가를 수행한 예를



(a) Measured acceleration



(b) Calculated displacement using measured acceleration

Fig. 8 Calculated displacement using measured acceleration

Table 2 Safety check using comparison of displacements

Sensor location	Sensor direction	Displacement calculated using measured data	Displacement by structural analysis using design earthquake	Safety check
pylon (top)	longitudinal	0.74mm	109.7mm	OK
	transverse	1.04mm	199.3mm	OK
stiffening girder (center)	vertical-1	1.04mm	129.5mm	OK
	transverse	0.81mm	291.4mm	OK
	vertical-2	0.99mm	129.5mm	OK

나타내었다. 여기서 해석치는 지진구역 I, 내진1등급 교량에 대한 지진구역계수(0.11)에 위험도계수(1.4)를 곱한 0.154를 적용한 응답스펙트럼 해석에 따라 발생한 최대변위이다. 내진설계 시 해당 변위에 대한 안전율을 기 확보하였다는 가정하에 지진으로 인한 발생 변위가 설계변위 보다 작다면 안전하다고 볼 수 있다. Table 2의 해석결과는 해석치보다 실측치를 변위로 변환한 값이 매우 작음을 볼 수 있는데 이는 해당교량이 진앙인 경주로부터 약 250km 떨어져 있어 자유장에서의 최대지반가속도가 설계지반가속도 151 gal에 한참 미치지 못하는 2 gal 이내로 측정되었기 때문이다.

3.3 제안된 안전성 평가 방법의 적용

이 연구에서 제안된 방법의 적용성 검토를 위해 실제 경주 지진에 의해 얻어진 데이터를 활용하여 긴급 지진 안전성 검토를 수행하였다. 대상교량은 현수교 2개 교량을 포함한 12개 교량이며 각 교량의 제원은 Table 3에 제시하였다. 주탑과 보강거더의 응답스펙트럼 해석결과를 주 경간장 길이와 주탑의 높이별로 도시하여 각각 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다.

Fig 9(a)에서 확인할 수 있듯이 주탑상부의 교축방향(longitudinal) 변위는 주경간장이 길어질수록 전반적으로 증가하는 경향을 보이지만, 주 경간장 길이가 길지만 변위는 크게 나타나지 않거나 주 경간장 길이가 200~250m 수준인데도 주탑의 최대변위가 크게 나타나는 몇몇의 교량들도 확인할 수 있다. 교축직각방향(transverse)의 경우 주 경간장 길이와 최대변위와의 관계가 크지 않음을 알 수 있다. 보강거더 중앙부의 교축직각방향의 변위는 Fig 9(b)에서 확인할 수 있는 것과 같이 주경간장이 길어질수록 증가하는 양상을 보인다. 그러나 연직방향 변위의 경우 주 경간장 길이와의 큰 관련성을 찾아볼 수 없으며 상당수의 교량에서 변위가 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 주탑의 변위가 교량의 주경간장

길이 이외에도 주탑의 높이, 교량의 형상 및 경계조건 등의 다른 인자에 따라 영향을 받기 때문이며 지진하중을 수평방향

Table 3 Primary information of 12 cable-supported bridges
(CB : cable-stayed bridge, SB : suspension bridge)

Bridge name	Bridge type	height of pylon(m)			Main span length (m)
		Foundation to stiffening girder	Stiffening girder to the top	Total height	
DE	CB	12.5	100	112.5	407.5
DG	CB	20.1	30.4	50.5	100
DS	CB	23.2	58.8	82	280
GBS	CB	25.5	64.5	90	230
GG	CB	38	126	164	480
JD2	CB	27.9	69.5	97.4	344
JJC	CB	14.3	35.7	50	140
MP	CB	45.5	120	165.5	500
NH	SB	21.5	38.5	60	404
SCP	CB	30.3	58.2	88.5	230
SR	SB	28.1	59.3	87.4	250
YG	CB	33	82	115	320

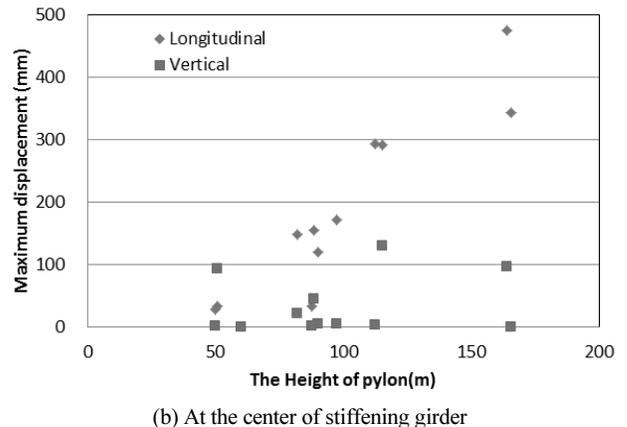
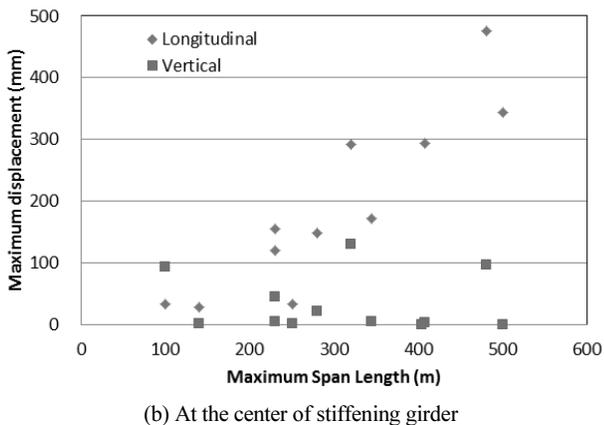
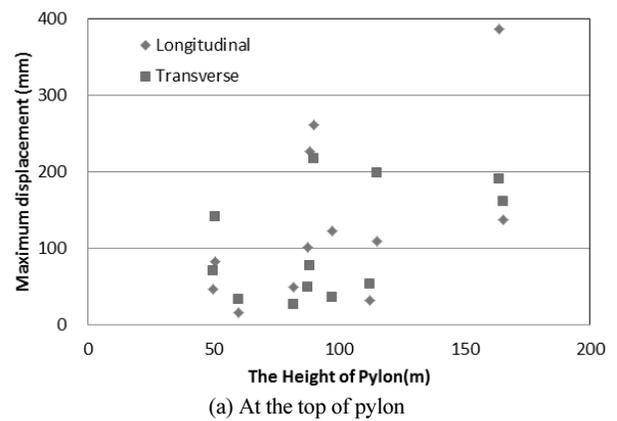
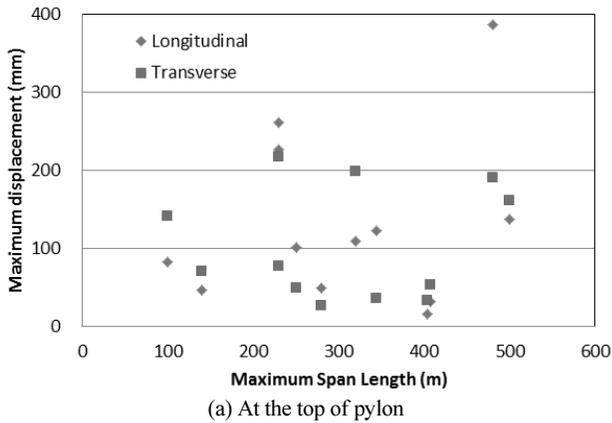


Fig. 9 Results of response spectrum analysis and the relation between main span length and maximum displacement

Fig. 10 Results of response spectrum analysis and the relation between height of pylon and maximum displacement

(교축방향 및 교축직각방향)만으로 재하하였기 때문에 발생한 결과로 판단된다.

경주지진 시 실측 가속도이력을 0.1Hz 이하와 40Hz 이상의 주파수 성분에 대해 bandwidth 필터링을 실시한 후 변위이력을 추출한 후에 최대 변위를 구한 결과를 Table 4에 나타내었다. 대부분의 교량에서 10mm 이내의 변위가 발생한 것으로 분석되었다. 일부 교량의 보강거더 중앙부에서 20mm 이상의 수직방향 변위가 발생하였는데, 이는 지진의 영향보다는 차량 활하중에 따른 진동으로 판단된다.

설계지진가속도에 의한 최대변위와 Table 4의 실측 지진가속도 데이터로부터 분석한 최대변위와의 비를 변위에 대한 ‘안전율(safety rate)’로 정의하고, 이를 Table 5에 제시하였다. 변위에 대한 안전율은 주탑 상판위치에서보다 주탑 상부에서 높으며 이는 지진으로 인한 주탑 상부의 설계 변위가 과대평가 되고 있다고 분석할 수 있다. 보강거더의 경우 교축직각방향은 전반적으로 설계치가 과대평가된 반면에 연직방향에 대해서는 실측치가 오히려 더 큰 경우도 발견할 수 있다. 이는 설계지진해석의 경우 연직방향에 대한 고려를 하지 않았기 때문으로 분석된다. 연직방향의 경우 이 연구에서 제안한 방법이 적절하지 않음을 보여주는 것으로서 기준치를 다른 방식으로 결정하여야 할 필요가 있다. 그러나 중앙경간의 연직방향 변위는 일반적으로 차량활하중에 의한 영향을 더 많이 받는다. 실제로 Table 4에서 NH대교의 연직방향 변위가 20mm 이상으로서 이는 지진으로 인한 변위가 아니라 지진 시 차량 통과에 따른 변위로 판단되며, 이에 대한 관리기준을 보다 상향할 필요가 있다.

Table 5의 안전율이 대부분 높게 분석된 이유는 경주지진의 진앙지로부터 비교적 멀리 떨어진 교량의 응답이기 때문이다. 실제 지진의 진앙 기준 세기를 고려하여 분석해보기 위

Table 4 Peak displacement calculated using measured acceleration during Gyeongju earthquake($M_L=5.8$)

Bridge name	Pylon (mm)				Center of deck (mm)	
	top		near deck		trans-verse	vertical
	longi-tudinal	trans-verse	longi-tudinal	trans-verse		
DE	0.71	0.56	0.33	0.23	0.47	0.00
DG	0.98	2.49	-	-	0.46	1.14
DS	1.26	-	0.90	0.58	1.33	3.01
GBS	1.20	1.15	0.88	0.53	2.13	3.56
GG	5.76	1.79	0.58	0.18	1.38	1.44
JD2	0.75	0.48	0.31	0.32	1.35	3.06
MP	1.18	1.20	0.63	0.52	2.07	4.98
NH	2.31	0.95	0.65	0.62	3.63	20.03
SCP	1.31	1.31	0.62	1.17	3.95	3.24
SR	0.71	0.82	0.83	0.49	1.16	1.87
YG	0.74	1.10	-	-	0.81	1.04

하여 각 교량의 자유장 및 주탑기초의 최대가속도와 설계지진가속도와의 비를 지반가속도에 대한 안전율로 정의하고 주탑의 안전율과 비교 분석하였고, 그 결과는 Table 6에 제시하였다. 자유장 및 교각기초의 설계지반가속도(151gal)에 대한 경주지진 시 계측된 최대가속도의 비는 NH대교 및 SCP대교와 같이 비교적 진앙(경주)과 가까운 교량에서 10.0 미만의 안전율을 보인 반면에 진앙거리가 긴 대부분의 교량은 10 이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 분석되었다. 반면에 주탑 상부의 경우 일부 교량을 제외하고는 대부분의 교량이 10 이

Table 5 Safety rate of displacement during Gyeongju earthquake ($M_L=5.8$)

Bridge name	Safety rate					
	Pylon				Center of Deck	
	at the top		near deck		trans-verse	vertical
	longi-tudinal	trans-verse	longi-tudinal	trans-verse		
DE	45.5	94.4	1.2	0.5	-	-
DG	83.9	56.5	-	-	70.8	82.4
DS	38.8	-	52.9	53.9	110.7	7.0
GBS	217.6	188.7	37.0	132.4	56.1	1.1
GG	67.2	106.4	34.7	121.9	344.7	66.7
JD2	163.3	74.7	29.8	8.1	126.8	1.7
MP	116.0	134.3	73.9	79.9	165.7	0.1
NH	7.0	35.3	16.7	28.9	152.7	0.0
SCP	173.3	59.0	30.6	13.5	39.2	13.8
SR	142.4	59.3	26.2	37.4	28.0	0.3
YG	148.8	181.6	-	-	359.2	124.9
Average	109.4	99.0	33.7	52.9	145.4	29.8

Table 6 Comparison of the safety rate of displacement with that of ground acceleration

Bridge name	Ground acceleration [gal]	Safety rate	Safety rate in pylon			
			at the top		near deck	
			longi-tudinal	trans-verse	longi-tudinal	trans-verse
DE	1.4	104.9	45.5	94.4	1.2	0.5
DG	10.6	14.2	83.9	56.5	-	-
DS	6.7	22.7	38.8	-	52.9	53.9
GBS	12.7	11.9	217.6	188.7	37.0	132.4
GG	8.0	18.8	67.2	106.4	34.7	121.9
JD2	2.6	58.0	163.3	74.7	29.8	8.1
MP	19.3	7.8	116.0	134.3	73.9	79.9
NH	27.3	5.5	7.0	35.3	16.7	28.9
SCP	28.4	5.3	173.3	59.0	30.6	13.5
SR	5.0	30.2	142.4	59.3	26.2	37.4
YG	4.6	33.0	148.8	181.6	-	-
Average	-	28.4	109.4	99.0	33.7	52.9

상의 안전율을 확보하고 있고 100을 넘는 경우도 상당수 발견할 수 있다. 주탑 상판위치는 주탑 상부보다는 안전율이 낮지만 전반적으로 자유장 및 주탑기초의 지반가속도에 대한 안전율보다는 높게 나타난다. 이는 응답스펙트럼에 의한 지진 해석이 설계 주파수범위의 모든 지진진동에 대한 고려에 의해 비교적 큰 변위가 도출된 반면, 경주지진의 주파수 성분은 교량의 거동에 크게 영향을 미치지 않았기 때문으로 판단된다. 이러한 경향은 주탑 상판위치보다는 주탑 상부에서 보다 두드러지며, 변위에 대한 안전율의 결과의 경향과 일치하는 것으로 판단에 대한 근거를 뒷받침할 수 있다.

이상과 같이 이 연구에서는 설계변위와 실측변위의 비교를 통한 긴급 지진 안전성평가 방법의 적용성을 분석하였다. 그러나, 설계변위는 구조물의 이상적인 상태를 가정한 것으로서 각 교량의 부지 특성을 고려한다면 교량의 공용 중에 설계 변위를 초과할 가능성이 거의 없다. 따라서 안전관리의 목적에 따라 관리기준을 설계변위에 비하여 다소 보수적으로 적용하여 안전성을 평가하는 것도 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 사장교 및 현수교에 부착된 지진가속도계를 활용하여 교량의 지진 안전성을 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 실측된 지진가속도계의 상시 응답을 이용하여 구조해석 모델의 고유주파수와 비교를 통해 최대한 유사한 동적특성을 갖도록 모델링을 개선하고, 지진해석을 수행하여 지진가속도계 설치 위치별 최대 변위를 도출하며, 도출된 변위는 사전에 관리기준치로서 시스템에 기 입력된다. 지진발생 시 실시간으로 측정된 가속도시간이력을 필터링 후 2중적분을 통해 변위시간이력으로 변환한 뒤 최대변위를 추출한다. 최종적으로 시스템이 기 입력된 관리기준치와의 추출된 변위와의 비교를 통해 안전성을 평가한다.

제안된 방법의 적용성을 확인하기 위하여 경주지진 시 기록된 데이터를 활용하여 12개 특수교량의 긴급 안전성 평가를 수행하였다. 보강거더에서의 연직방향 응답의 경우 지진 하중 보다는 차량활하중의 영향을 많이 받기 때문에 이 연구에서 제안한 긴급안전성 평가 방법을 적용하기에 적절하지 않은 것으로 분석되었다. 그러나 주탑의 수직, 수평방향 변위나 보강거더 직각방향 변위의 경우 제안된 방법을 적용할 수 있음을 보였다.

이 연구에서 제안한 안전성 평가방법의 목적은 다량의 현수교 및 특수교량을 지진관리시스템에서 단시간 내에 평가할 수 있는 기법을 제안하는 것이므로 상세해석보다는 간략한 해석법의 제안에 초점을 두었으며 추가적인 연구를 통해 보

다 정밀하고 합리적인 안전성 평가 방법을 도출하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-002)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Desai, A. K. (2013), Seismic history analysis for cable stayed bridge considering different geometrical configuration for near field earth quakes, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, World Academy of Science, Engineering and Technology, 7(7), 558-565.
- Hong, Y. H., Kim, H. K., and Lee, H. S. (2010), Reconstruction of dynamic displacement and velocity from measured accelerations using the variational statement of an inverse problem, *Journal of Sound and Vibration*, 329, 4980-5003.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2017), Installation and Operation Manual for the Seismic Acceleration, Ministry of the Interior and Safety, written in Korean.
- Otsuka, H., Yamahira, K., and Komiya, Y. (2007), Research on seismic safety, retrofit, and design of a steel cable-stayed bridge, *Proceedings of 1st International Conference on Modern Design, Construction, and Maintenance of Structures (MDCMS)*, 36-41.
- Park, S. W., Lee, S. H., Choi, G., (2018), Seismic response characteristics of domestic cable-supported bridges due to Gyeongju earthquake: case study, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection (KSMI)*, 22(5), 1-12, written in Korean.
- Sarma, P. S., and Kumar, M. S. (1999), Seismic performance of Steel cable stayed bridges - An overview, international conference on Suspension, *Proceeding of International Conference on Suspension, Cable Supported and Cable Stayed Bridges*, Indian Institution of Bridge Engineers, 249-251.
- Shaid, H. U., and Aijun, Y. E. (2000), Seismic conceptual design of long-span cable-stayed bridge, *Proceedings of 12th World Conference on Earthquaked Engineering (WCEE)*, 2123.
- Soneji, B. B., and Jangid, R. S. (2007), Passive hybrid systems for earthquake protection of cable-stayed bridge, *Engineering Structures*, 29(1), 57-70.
- Valdebenito, G. E., and Aparicio, A. C. (2006), Seismic behaviour of cable-stayed bridges : A-state-of-the-art-review, *Proceeding of 4th International Conference on Earthquake Engineering*, Taipei, Taiwan, paper no.45.
- Wang, X., Zhu, B., and Cui, S. (2017), Research on collapse process of

cable-stayed bridges under strong seismic excitations, *Shock and Vibration*, Hindawi, article ID 7185281.

Received : 08/30/2018

Revised : 10/16/2018

Accepted : 10/19/2018

Yi, J., and Li, J. (2017), Longitudinal seismic behavior of a single-tower cable-stayed bridge subjected to near-field earthquake, *Shock and Vibration*, Hindawi, article ID 1675982.

요 지 : 이 연구에서는 사장교 및 현수교에 부착된 지진가속도계측기를 활용하여 교량의 안전성을 긴급하게 평가할 수 있는 기법을 제안한다. 실측된 지진가속도계측기의 상시 응답을 이용하여 구조해석 모델의 고유주파수와 비교를 통해 최대한 유사한 동적특성을 갖도록 모델링을 개선한다. 설계지진에 대한 지진해석을 수행하여 지진가속도계측기 설치 위치별 최대 변위를 도출하며, 도출된 변위는 사전에 관리기준치로서 시스템에 기 입력된다. 지진발생 시 실시간으로 측정된 가속도 시간이력을 필터링 후 2중적분을 통해 변위시간이력으로 변환한 뒤 최대 변위를 추출한다. 최종적으로 시스템에 기 입력된 관리기준치와 추출된 변위와의 비교를 통해 안전성을 평가한다. 경주지진 시 기록된 데이터를 활용한 12개 특수교량의 긴급 안전성평가 수행을 통해 제안된 방법의 적용성을 확인한다.

핵심용어 : 지진 안전성 평가, 지진가속도계측기, 케이블지지교량, 재난관리 기준
