

# 지진 발생 후 도로망의 피해 산정을 위한 평가체계 개발

## Development of the System for Damage Assessment of Road Network after Seismic Excitation

이진훈\* · 이형철\*\* · 정동균\*\*\* · 이상호\*\*\*\*

Yi, Jin-Hoon · Lee, Hyeong-Cheol · Jeong, Dong-Gyun · Lee, Sang-Ho

### ABSTRACT

This study provides a methodology for development of the Seismic Damage Evaluation System (SDES) in Korea. Major systems and status of database related to road networks in Korea are investigated to analyze the usability of the required information for developing the SDES. In this study, the SDES is composed of four components that are the road network component, the ground motion component, the fragile structure component, and the cost component. In addition, the procedures for the construction of database which support the SDES is proposed, and a prototype of the SDES for expressway of Korea is developed based on the developed methodology. The National Geospatial Information System (NGIS) and the National Earthquake Information System (NEIS) are used to develop the road network component and ground motion component, respectively. For the fragile structure component and the cost component, Highway Bridge Management System (HBMS) was used.

**Keywords:** seismic damage evaluation system, bridge, road network, database

### 1. 서론

지진으로 인한 피해는 인간의 생활과 관련된 모든 사회시설물을 대상으로 삼는다는 위험성 때문에 사후 피해평가와 적절한 대처방안의 수립이 절대적으로 필요하다. 피해를 입을 수 있는 대상물 중 도로망은 그 자체의 구조적 손상에 따른 손실보다는 국가 기간망의 기능 유실 등과 같은 2차적인 사회적 손실을 야기하기 때문에, 현재 지진 다발 지역인 미국과 일본 등의 선진국에서는 지진 발생 후 도로망의 피해평가를 신속하고 정확하게 하여 2차적인 손실을 최소화시키기 위한 연구들이 진행되고 있다. 이러한 도로망의 지진피해평가 평가 모델을 구성하는 요소로서 교량의 취약도 곡선 산정이 핵심적인 역할을 수행하게 된다. 구조물의 취약도 산정은 1970년대 원전 구조물의 지진 취약도를 산정하기 위해 개발된 개념으로서, 교량의 경우 ATC-13에서 최초로 전문가 집단에 의한 취약도 정보를 산정한 바 있다. 이후 1994년 Northridge지진과 1995년 일본

\* 연세대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: jeffyi@csem.yonsei.ac.kr

\*\* 연세대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: jeffyi@csem.yonsei.ac.kr

\*\*\* 연세대학교 토목공학과 연구원 E-mail: iamjdg@csem.yonsei.ac.kr

\*\*\*\* 정희원 · 연세대학교 토목공학과 교수 E-mail: lee@yonsei.ac.kr

Kobe지진 등을 통해 축적된 교량 손상 정보를 바탕으로 교량 타입에 따른 통계적 취약도 곡선 산정에 대한 연구들을 진행하여 왔다(Yamazaki et al., 2000; Hwang et al., 2000). 하지만 실측에 따른 취약도 곡선 산정은 각 구조물의 구조적 특성을 반영하지 못할 뿐만 아니라, 지역적인 요소에 의존적이기 때문에 해당되는 지역 이외의 지역에 적용하기에는 많은 어려움이 따르게 된다. 이에 따라 수치 시뮬레이션을 통한 교량의 취약도 곡선 산정에 대한 연구가 2000년을 전후로 하여 진행되어 왔다(Shinozuka et al, 2000a; Shinozuka et al, 2000b; Karim and Yamazaki, 2001). 또한 단순한 개별 교량의 지진 발생 후 피해평가가 아닌 도로망 차원의 거시적인 접근 방법에 대한 연구도 진행되어 왔으며, 이를 통해 지진 발생 후의 도로망 안전성 및 최단거리, 손실 금액 예측 등을 종합적으로 판단하기 위한 연구도 진행되었다(Yamazaki et al., 2000; Shinozuka et al., 2003; Mackie and Stojadinovic, 2005). 2000년 이후로 이러한 종합적인 판단을 지원하기 위한 지진피해평가 시스템이 여러 기관에서 제안되었는데, 대표적인 것으로 HAZUS(Bouabid, 2003), REDARS(Werner et al., 2003), MAEViz(NCSA, 2004)이 있다.

국내의 경우 과거 지진 이력을 고려했을 때 가까운 시일 내에 강진 발생 주기가 도래할 수 있다는 주장이 보고되면서 한반도도 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아닐 수 있다는 의식이 확산되고 있다(안종필 등, 2003). 그러나 지난 1992년 교량 내진설계 지침이 도입된 이래 지진피해를 종합적으로 평가할 수 있는 시스템에 관한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 교량의 지진피해평가를 수행하기 위해 국내에 축적된 정보항목들을 조사·분석하여 우리나라 실정에 맞추어 효과적으로 도로망에 위치한 교량의 지진피해평가시스템을 구축할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이를 이용하여 고속도로망의 일부 교량을 대상으로 한 시범시스템을 개발하였다.

## 2. 도로망 지진피해평가시스템 구축을 위한 정보항목

본 연구에서는 기존에 제안된 지진피해평가시스템인 HAZUS, REDARS, MAEViz의 사례 분석을 토대로 도로망 지진피해평가에 필요한 정보항목을 도출하였다. 표 1은 각 시스템에서 사용하고 있는 자료항목을 피해평가를 위한 요소기술에 따라 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이 도로망에 위치한 교량의 지진피해평가를 위해 요구되는 정보항목은 크게 네 가지의 대분류 항목으로 분류된다. 첫 번째 대분류 항목은 '취약 구조물 요소'로서, 구조물에 대한 정확한 피해 정보를 얻기 위한 구조 해석 정보를 바탕으로 정보가 구축되는 특성을 가지며 최종적인 형태가 확률론을 바탕으로 한다. 두 번째는 진앙지로부터 도로망까지의 거리와 도로망 안에서 교량의 위치에 관한 '위치 관련 요소' 항목으로서, 다른 요소들과는 달리 피해평가체계의 가치

표 1 대상 사례 시스템 별 구성요소의 기능/형태별 분류

| 요소 \ 형태   | 위치 자료                | 수학적 산정식 자료                      | 기타 정적 자료  |
|-----------|----------------------|---------------------------------|---|
| 지반 운동 요소  | 가속도계 (S)             | 감쇠식 (S)                         | 지진도 파일 Import (H, R, M)                                     |
| 위치 관련 요소  | 내장 GIS 데이터 (R, H, M) | -                               | -   |
| 취약 구조물 요소 | 구조물 위치 (R, H, M)     | 분류식 (H)<br>손상 가중식 (H)           | 취약도 정보 분류 (H, R, M)<br>취약도 정보 Import (M)<br>관련 링크 (R, H, M) |
| 비용 관련 요소  | -                    | 복구 일시 (H, R)<br>통행 시간 지연 (H, R) | -   |

※ R: REDARS, H: HAZUS-MH, M: MAEViz, S: Trinet-Shakemap

화를 위한 정보들을 제공하게 된다. 세 번째는 교량에 실제 하중으로 작용하는 지진파에 의해 발생하는 지진동에 관한 것으로서 '지반 운동 요소' 항목이다. 이는 교량의 피해정도를 산정하는데 이용되는 가장 중요한 항목이며, 본 연구에서는 지진도에 대한 정보가 구축되어 있는 경우에는 지진도 정보를 직접 입력받아 사용하고, 그렇지 않은 경우 관측 정보를 바탕으로 지진 감쇠식으로 통칭되는 보간식을 사용하여 입의 지역의 지진도를 작성하여 사용하였다. 마지막으로 분류된 항목은 '비용 관련 요소' 항목이다. 비용 요소는 각 지역 및 구조물의 특성이 밀접하게 연관되는 항목으로서 일반적으로 사건 발생 비용 및 유지·관리 비용을 바탕으로 하는 통계적인 산정식의 제안이 주된 연구 내용이 되며, 이렇게 제안된 산정식에 따라 필요 요소 항목이 상이하게 되는 특성을 가지고 있다.

### 3. 지진피해평가시스템을 위한 요소별 국내 정보자원 분석

2장에서 정의된 각 요소항목 별 자료 구축을 위해 국내에서 취득 가능한 정보들을 도출하였다. 정보 도출을 위한 자료 분석은 각 기능별로 구분하여 진행하였으며, 각 정보 항목의 구축 체계에 일치하는 정보가 있는 경우는 해당 정보의 취득 경로를 정의하였고, 일치하는 정보가 없는 경우 취득 가능한 방법을 분석하여 제안하였다. 각 구성 요소별 구체적인 분석내용은 다음과 같다.

#### 3.1 취약 구조물 요소 구축을 위한 국내 자원 분석

지진에 대한 도로망 상의 취약 구조물은 크게 교량, 터널, 도로의 세 가지로 구분될 수 있지만, 본 연구에서는 교량 구조물의 취약도 정보 산정을 위한 분석을 수행하였다. 다수의 교량을 대상으로 취약도 정보를 추출하기 위해서는 정형화된 모델에 대한 취약도 정보를 산정한 후 이를 적용하는 방법이 효과적이지만, 국내 교량의 경우 준공년도 및 시공주체 별로 각 교량의 구조적 특성이 상이하기 때문에 전형적인 분류 방법은 신뢰도가 떨어진다. 따라서 개별적인 취약도 산정을 채택하였으며, 개별적인 취약도 정보 산정을 위해 필요한 구조물의 해석 정보 또는 설계 정보의 취득을 위해 국내 교량 관리 시스템을 분석하였다. 국내에서 교량의 구조적인 정보를 보관하고 있는 정보 시스템은 건설교통부의 HMS(Highway Management System)와 한국도로공사의 HBMS(Highway Bridge Management System)가 있으며, 이들은 개별교량의 취약도 곡선의 산정과정에 필요한 구조해석모델을 생성하기에 충분한 정보 분류가 이루어져 있었다.

#### 3.2 위치 관련 요소 구축을 위한 국내 자원 분석

도로망 정보는 지진피해평가 결과를 가시화하기 위해서 필수적으로 요구되는 요소이며, 일반적으로 국가적인 GIS(Geospatial Information System)사업을 통해 구축된 도로망 정보를 사용한다. 따라서 본 연구에서도 1995년 이후 체계적으로 시행된 국내 국가지리정보체계(NGIS) 사업 내용 중 도로망에 대한 정보를 조사하였다. 현재 NGIS 사업을 통해 구축된 정보들은 국가 지리 정보 유통망을 통해 통합적으로 판매되고 있지만, 수치 지도를 제외한 GIS파일은 열람만 가능할 뿐 유통되지는 않고 있다. 도로망과 관련된 정보 항목은 도로 경계면, 도로면, 도로 중심선, 면형 부속물, 선형 부속물, 면형 시설물, 장애인 편의시설, 조명시설, 기타 면형 시설물, 기타 선형 시설물, 기타 점형 시설물의 총 11개로 구성되어 있다. 도로망 정보의 경우 모두 ESRI사의 GIS파일 포맷인 shp파일로 구성되어 있다. NGIS사업을 통해 구축된 파일 포맷은 수치 지도 정보를 구성하는 AutoCAD사의 dxf포맷과 국가 지리원에서 자체적으로 제작한 ngi포맷, 도로망 정보를 구성하는 ESRI사의 shp포맷 세 가지로 구분된다. 현재 정보가 유통 단계에 있지 않아 세부적인 구성 요소를 확인할 수는 없으나, 한국도로공사와 같은 관리주체 별로도 도로망 정보를 보유하고 있는 것으로 파악되며, 따라서

국가적인 차원에서 지진피해평가 체계를 구축하는 경우에는 위치 기반의 도로망 정보의 획득은 용이할 것으로 판단된다.

### 3.3 지반 운동 요소 작성을 위한 국내 자원 분석

국내에서는 지진 계측 정보를 기상청에서 주관하여 관리하고 있으며, 특별히 지진의 발생 정보는 국가지진정보시스템(National Earthquake Information System, 이하 NEIS)을 통하여 관리되고 있다. 현재 국내에는 속도계에 대한 통합적인 운용 체계는 구축되어 있지만 가속도계의 실시간적인 통합 체계는 구축되어 있지 않으므로, 미국과 같은 지진도를 바로 사용할 수는 없다. 따라서 자체적인 지진도 작성을 위한 지진 계측 정보 및 지진 감쇠식에 대한 정보를 검토하였다. 구조물의 취약도 산정에 사용되는 지반 최대 가속도의 산정을 위해서는 가속도 정보의 실시간적인 정보 획득이 필요한데, 현재 실시간적인 정보 획득은 어려운 것으로 파악되었으며, 따라서 NEIS에서 제공하는 관측 자료 파일 만을 대상으로 분석을 진행하였다. 현재 NEIS에서 제공하는 가속도계 관측 정보는 mini-SEED라는 파일 포맷으로 제공된다. 제공되는 mini-SEED 파일은 남북, 동서, 수직 세 개의 방향 성분에 대하여 독립적으로 구성되며, ASCII가 아닌 Binary형태로 정보가 저장되어 전용 열람 프로그램인 Analyst 2.5 또는 EAS(Earthquake Analysis Software)를 통해 열람이 가능한 형태이다. 관측된 정보를 통해 임의 지역의 지진 하중을 계산하기 위한 지진동 감쇠식에 대한 연구는 국내 지진 재해도 작성을 위한 목적으로 진행되었으며, 전형적인 지진동 감쇠식은 식(1)과 같다(박동희 외, 2005).

$$\ln a_{\max} = c_0 + c_1 R - \ln R \tag{1}$$

여기서  $a_{\max}$ 는 관측지역의 최대지반가속도( $cm/s^2$ ),  $R$ 은 진원거리( $km$ )로 인 관계를 가지며, 이때  $r$ 은 진앙거리( $km$ ),  $h$ 는 진원깊이( $km$ )를 의미한다.  $c_0$  및  $c_1$ 은 관측된 값에 의해 구해지는 계수이다.

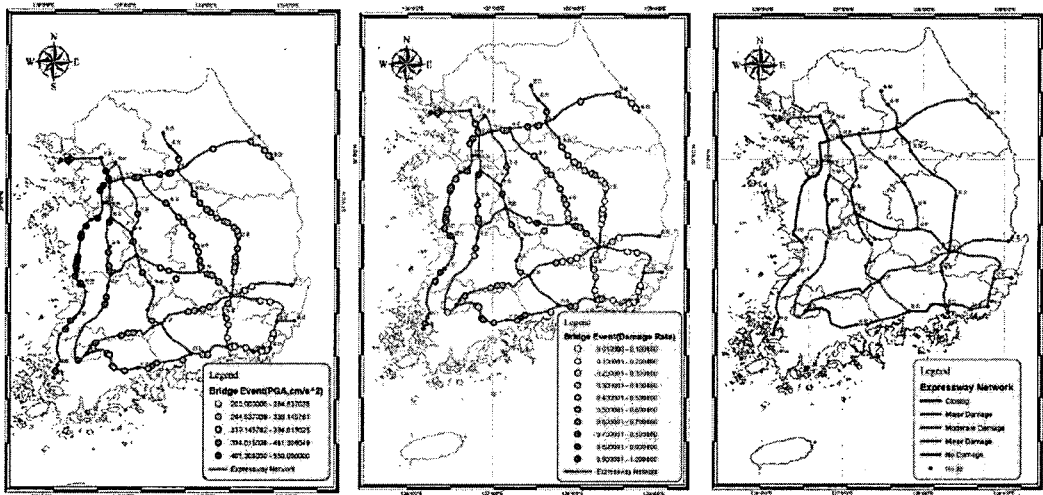
### 3.4 비용 관련 요소 구축을 위한 국내 자원 분석

재난발생 후 피해액의 정량적인 예측은 재난복구 예산배정 및 피해복구 우선순위결정을 위한 정보로 사용되며, 이를 통해 궁극적으로 재난복구의 신속성을 확보할 수 있게 된다. 지진피해평가 모델에서 고려할 수 있는 비용요소는 크게 bridge cost와 common cost의 2가지가 있는데, 전자는 교량의 손실 및 교통량과 같은 교량에 의존적인 비용정보와 후자는 시간대별 교통량 비율, 사상자 1인당 비용 등 교량에 의존적이지 않은 일반 비용정보 항목이다. 교량의존적인 비용정보의 경우 산정식에 따라 필요로 하는 정보가 변하게 되는데, 본 연구에서는 구조물 손상비용 산정이 목적이 아니기 때문에 일반적인 보수보강정보를 통한 비용 산정이 기존 교량관리시스템을 통해 가능함을 확인하였다. 두 번째 일반비용정보항목의 경우도 산정식에 따라 필요정보가 변하게 되는데, 일반적으로 구조물의 통계적인 정보 등을 통한 산정이 가능하며, 이러한 정보는 건설교통부에서 제공하는 통계정보를 활용할 수 있을 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 교량의 비용정보항목은 HBMS의 자료를 활용하였으며, 시간대별 교통량은 건설교통부에서 제공하는 '주간교통량정보' 자료를 활용하였다.

## 4. 도로망 지진피해평가 시범시스템 개발

본 연구에서는 ArcGIS desktop 9.0(ESRI, 2003)을 기반으로 지진피해평가체계를 위한 시범시스템을 개발하였다. 대상 도로망은 고속도로로 하였으며, 교량의 취약도 정보는 HBMS의 자료를 바탕으로 110

개 교량에 대하여 구축하였다. 이때, 도로망 정보는 3.2절에 언급한 바와 같이 기존 문헌 자료를 바탕으로 자체적으로 제작하였다. 또한 지진 계측 정보는 기상청에서 제공하는 위치 정보를 바탕으로 구축하였으며, 비용 정보의 경우 HBMS를 활용하여 자료를 구축하였다. 그림 1은 개발된 시범시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 사례를 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사용한 지진이력은 2003년 3월 30일 20시10분에 인천 백령도 서남서쪽 약 80 km 해역에서 발생한 규모 5.0의 지진으로 당시 14개 관측소에서 관측된 가속도 값을 이용하였다. 그림 1의 (a)는 시뮬레이션 결과 고속도로 상의 각 교량 위치에서 산정된 최대지반가속도 값(PGA)을 나타낸 것이며, (b)는 이에 따라 산정된 각 교량의 손상률을 나타낸 것이다. 그림 1의 (c)는 각 노선에 포함된 교량의 손상률에 따라 평균화된 도로의 손상률을 나타낸 것으로, 그림 1에서 나타낸 바와 같이 구축된 시범시스템을 이용하여 개략적이지만 도로망 피해의 현황 파악 및 최적경로 산정 등과 같은 재난피해복구를 위한 의사결정을 지원할 수 있는 정보를 성공적으로 얻을 수 있었다.



(a) 교량 위치별 PGA 분포도 (b) 도로망 상 교량의 손상률 (c) 도로망의 손상률  
 그림 1 가상 지진발생에 따른 도로망 피해평가 사례

## 5. 결 론

본 연구에서는 국내의 상황에 적합한 도로망의 지진 발생 후 피해평가체계의 개발을 위해 외국의 지진피해평가시스템의 운용적인 특징들을 분석하여 평가체계를 구성하는 요소기술들을 정의하고 정의된 자료들의 처리절차를 분석하여 평가모델을 제안하였으며, 국내에서 획득 가능한 정보 항목들을 이용하여 고속도로의 지진피해평가를 위한 시범시스템을 구축하였다. 최종적으로 구축한 시범시스템을 통해서 수행한 가상 지진시나리오를 통해 도로망 피해의 종합적인 현황 파악 및 최적경로 산정 등과 같은 재난피해복구를 위한 의사결정을 성공적으로 지원하는 것을 확인할 수 있었으며, 제안된 정보모델이 지진피해평가체계 구축에 적합함을 확인하였다. 본 연구를 통하여 개발된 시범시스템은 추가의 연구를 통해 의사결정 지원을 위한 보다 완벽한 정보를 담은 우리나라 실정에 맞는 지진피해평가모델 개

발을 위한 기반이 될 것으로 기대되어진다.

### 감사의 글

본 연구는 2005년도 KEERC(R11-1997-045-13005-0)의 지원에 의하여 연구되어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 박동희, 연관희, 장천중, 최원학, 이대수 (2005), 후쿠오카 지진('05. 3. 20, M=7.0)의 지진동 감쇠특성 분석, 한국지반공학학회 논문집, 8(3), pp. 109-113.
- 안종필, 유덕찬, 김영일 (2003), 한국의 지진특성에 관한 고찰, 2003 대한토목학회 정기학술대회 논문집, CD-Rom paper, pp. 4144-4149.
- Bouabid, J. (2002) *HAZUS-MH and Technological Hazards*, FEMA.
- ESRI (2003), *Getting to know ArcGIS desktop*, ESRI Press.
- Hwang, H., Jernigan, J., and Lin, Y. (2000) Evaluation of seismic damage to memphis bridges and highway systems, *Journal of Bridge Engineering*, 5(4), pp. 322-330.
- Karim, K. and Yamazaki, F. (2001) Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(12), pp. 1839-1856.
- NCSA (2004) *MAEViZ introduction & tutorial*, University of Illinois.
- Mackie, K. and Stojadinović, B. (2005) Post-earthquake functionality of highway overpass bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(1), pp. 77-93.
- Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J., and Naganuma, T. (2000a) Statistical analysis of fragility curves, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), pp. 1224-1231.
- Shinozuka, M., Feng, M., Kim, H., and Kim, S. (2000b) Nonlinear static procedure for fragility curve development, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), pp. 1287-1295.
- Shinozuka, M., Murachi, Y., Dong, X., Zhou, Y., and Orlikowski, M. (2003) Seismic performance of highway transportation networks, *Proceedings of China-US Workshop on Protection of Urban Infrastructure and Public Buildings against Earthquakes and Manmade Disasters*, Beijing, China, CD-Rom paper, 18 pages.
- Werner, S.D., Lavioe, J.-P., Eguchi, R.T., Taylor, C.E. (2003) MCEER research progress and accomplishments 2001-2003, *MCEER*, pp. 17-33.
- Yamazaki, F., Motomura, H., and Hamada, T. (2000) Damage assessment of expressway networks in Japan based on seismic monitoring, *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-Rom paper, 8 pages.