

# 지진 발생 후 도로망 피해 산정을 위한 정보 모델 개발

## Development of Information Model for Road Network Damage Calculation after Seismic Outbreak

이진훈· 김봉근\*\* 정동균\*\*\* 이상호\*\*\*\*  
Yi, Jin-Hoon Kim, Bong-Geun Jeong, Dong-Gyun Lee, Sang-Ho

### ABSTRACT

This study presents a new information model for building a database which is used for the Damage Calculation in a Road network after Seismic outbreak (DCRS). The component which is required for information system and data analysis is divided by four factors. Those are Ground Motion Component, Road Network Component, Fragile Structure Component, and Cost Component. These components have various manners and procedures that build informations by each systems. In this study, applying the domestic system resources and these four factors, we presented the integrated evaluating system. Finally, we also present the prototype of DCRS based on the ArcGIS. It is expected that developed prototype can play a role in more improved DCRS by advanced study.

### 1. 서 론

최근들어 대규모의 자연 재해에 의한 인류의 피해가 막대해짐에 따라 이를 예방하거나 대비하기 위한 방법론이 개발되고 있다. 그러나 대부분의 사회 기반 시설물들이 여전히 수많은 자연 재해에 그대로 노출되어 있기 때문에 사후 피해 평가 및 적절한 대처 방안이 필요한 실정이다. 특히 지진은 지상이나 지하의 모든 시설물에 심각한 피해를 줄 수 있다는 위험성 때문에 지진 다발 지역인 미국과 일본을 중심으로 지진 발생 후의 시설물 손상 평가를 신속하고 정확하게 실시함으로써 피해를 최소화하는 연구들이 진행되고 있다(Karim and Yamazaki, 2001; Shinozuka *et al.*, 2000a; Hwang *et al.*, 2000).

지진에 의한 도로망의 피해는 구조적 손상에 따른 손실보다는 국가 기간망의 기능 유실 등과 같은 2차적 사회 손실을 야기한다. 도로망의 지진 피해 산정 요소로서 교량의 취약도 곡선이 핵심적인 역할을 수행하게 되는데, 이는 전문가 집단에 의해 ATC-13(The Applied Technology Council, 1985)에서 최초로 도입되었다. 그 이후 Northridge지진과 Kobe지진 등을 통해 축적된 교량 손상 정보를 바탕으로 교량 타입에 따른 통계적 취약도 곡선 산정에 대한 연구들이 진행되어

\* 연세대학교 토목공학과 · 석사과정  
\*\* 연세대학교 토목공학과 · 박사과정  
\*\*\* 연세대학교 토목공학과 · 연구원  
\*\*\*\* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 · 교수

져 왔다(Yamazaki *et al.*, 2000). 그러나 실측에 따른 취약도 곡선 산정은 각 구조물의 구조적 특성을 반영하지 못할 뿐만 아니라 지역적인 요소에 의존적이기 때문에 해당 지역 이외의 지역에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 그래서 수치 시뮬레이션을 통한 교량의 취약도 곡선 산정에 대한 연구가 2000년을 전후로 하여 진행되어 왔다(Shinozuka *et al.*, 2000b). 또한 단순한 개별 교량의 지진 발생 후의 피해 평가가 아닌 도로망 차원의 거시적인 접근 방법에 대한 연구도 진행되어 왔다. 그리고 거시적 관점에서 지진 발생 후의 도로망 안전성 및 최단거리, 손실 금액 예측 등을 종합적으로 판단하기 위한 연구도 진행되었다(Shinozuka *et al.*, 2003; Mackie and Stojadinovic, 2005). 2000년 이후 종합적인 판단을 지원하기 위한 지진 피해 평가 시스템이 여러 기관에서 제안되었는데, 대표적인 것으로 FEMA(Federal Emergency Management Agency)의 HAZUS(FEMA, 2003), MCEER(Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research)의 REDARS(Werner *et al.*, 2003), MAE(Mid-America Earthquake Center)의 MAEViz(NCSA, 2004)가 있다.

이에 반해 국내에서는 지난 1992년 교량 내진설계 지침이 도입되었고 지진에 대한 연구도 지속적으로 발전해가는 단계이다(김상훈 등, 2004; 이진학 등, 2004). 현재 지진에 대한 대비책으로 제안되는 내진설계는 경제성을 고려해야 하기 때문에 일정 하중 이상의 지진 하중 발생 시에는 시설물의 손상이 불가피하다. 이처럼 시설물에 손상이 발생할 경우 피해를 최소화하기 위해서는 지진 발생 후의 신속한 복구와 대책 수립 단계에서의 의사 결정을 도울 수 있는 도로망의 지진 피해 평가 체계의 구축이 필요하다. 신뢰할 수 있는 효과적인 도로망의 지진 피해 평가 체계 구축을 위해서는 개별 교량의 손상확률을 구하는 단순한 수준이 아니라 이를 구성하는 요소들을 정의하고, 각 요소들의 상관관계 및 정보 처리 절차를 분석하여 평가 체계 구축을 위한 정보 모델이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 다양하고 방대한 정보들이 통합되어 손쉽게 획득할 수 있는 방안을 기존에 존재하는 시설물 시스템을 분석하여 제시하고자 한다.

## 2. 지진 피해 평가를 위한 요소 기술의 분류

앞장에서 설명된 바와 같이 지진 발생 시에 피해가 발생하는 많은 구조물 중에 도로망 특히 교량에 대한 다양한 정보 구축이 요구된다. 이에 본 연구에서는 미국과 일본의 지진 피해 평가와 관련된 연구 성과를 토대로 국내 시설물 유지관리를 위해 운용중인 정보 시스템과 자료 분석을 위해 요구되는 요소 기술을 구현 방식에 따라 4가지의 대분류 항목으로 분류하였다. 이러한 대분류 작업은 지진 피해 평가 체계에 따라 시설물에서 발생하는 정보를 업데이트하고 추가 및 확장할 수 있는 방안을 제공한다. 첫 번째 대분류 항목은 전체 연구 내용에서 공통적으로 나타나는 교량의 구조 손상 요소인 '취약 구조물 요소(Fragile Structure Component)'이다. 구조물에 대한 정확한 피해 정보를 얻기 위해서 선행되어야 할 것으로 구조 해석을 들 수 있다. '취약 구조물 요소'는 구조 해석 정보를 바탕으로 정보가 구축되는 특성을 가지며 최종적인 형태가 확률론을 바탕으로 하기 때문에 대분류 항목에서 구분된다. 두 번째 대분류 항목으로는 실제 피해를 일으키는 하중인 지진 하중이다. 지진 하중은 두 가지 요소에 의해 결정되며 그 중 하나가 진앙지로부터 도로망까지의 거리 요소이고, 다른 하나는 도로망 안에서 교량의 위치에 관한 요소이다. '위치 관련 요소(Road Network Component)' 항목은 다른 요소들과는 달리 피해 평가 체계의 가시화를 위한 정보들을 제공하게 된다. 지진 하중에 대한 또 다른 고려 대상은 교량에 실제 하중으로 작용하는 지진 파이다. 지진파에 의한 지진동은 그대로 교량에 작용되어 피해를 입힐 수 있기에 가장 중요한 항

표 1. 각 시스템 별 구성요소의 기능/형태별 분류

Form Function	Location Data	Mathematical Function Data	Other Static Data
Ground Motion Component	Accelerometer (S)	Attenuation Function (S)	Import a shakemap file (H,R,M)
Road Network Component	Built-in GIS data (R,H,M)	-	-
Fragile Structure Component	Structure Location (R, H, M)	Classification Function (H) Damage Weight Function (H)	Fragility Information Classification (H,R,M) Import Fragility Information (M) Related Link(R,H,M)
Cost Component	-	Restoration Day (H,R) Travel Time Delay (H,R)	-

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

목이지만, 이 '지반 운동 요소(Ground Motion Component)' 항목은 이미 기존의 여러 연구에서 진행되었거나 진행 중에 있다. 따라서 본 연구에서는 지진도에 대한 정보가 구축되어 있는 경우에는 지진도 정보를 직접 입력받아 사용하고, 그렇지 않은 경우 관측 정보를 바탕으로 지진 감쇠식으로 통칭되는 보간식을 정의하여 임의 지역의 지진도를 작성하여 사용한다. 마지막으로 분류된 항목은 '비용 관련 요소(Cost Component)' 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. 최종적으로 분류된 대분류 항목과 각각의 세부 내용들을 표 1에서 정리하였다.

### 3. 국내 관련 시스템 및 자료 분석을 통한 지진 피해 평가 체계 정보 구축

#### 3.1 지진 피해 평가 정보 구성 요소의 데이터 모델

본 장에서는 2장에 정의된 각 구성 요소 별로 취득 가능한 정보들을 도출하였다. 정보 도출을 위해서 각 기능별로 구분하여 진행하였으며, 각 정보 항목의 구축 체계에 일치하는 정보가 있는 경우는 해당 정보의 취득 경로를 정의하였으며, 일치하는 정보가 없는 경우 취득 가능한 방법을 분석하여 제안하였다. 본 절에서는 각 요소의 전체적인 정보 흐름을 그림 1에 도시하였다. 지진 피해 평가 구성 정보는 총 8개로 구성되어 있으며, 이중 Road 요소는 정보 공급 특성상 3개의 세부요소로 구분한다. 교량 비용 요소(Bridge\_Cost), 공통 요소(Common\_Cost)는 Road의 Link 요소에 정보를 제공하며, 지진 관측소 요소(EQ\_Mon\_Stat)는 Bridge\_location에 정보를 제공한다. Road 요소는 정보 제공 역할을 수행하는 Junction과 Node, 정보 수요 역할을 하는 Link요소로 구성된다. Road 요소는 비용 정보 및 손상 지수 정보를 입력받아 비용 계산 및 최적거리 산정을 수행할 수 있다. 교량 위치 정보(Bridge Location)는 지진 계측소로부터 최대 지반 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)와 좌표값을 전달 받아 현재 교량 위치에서의 PGA 값을 산정한다.

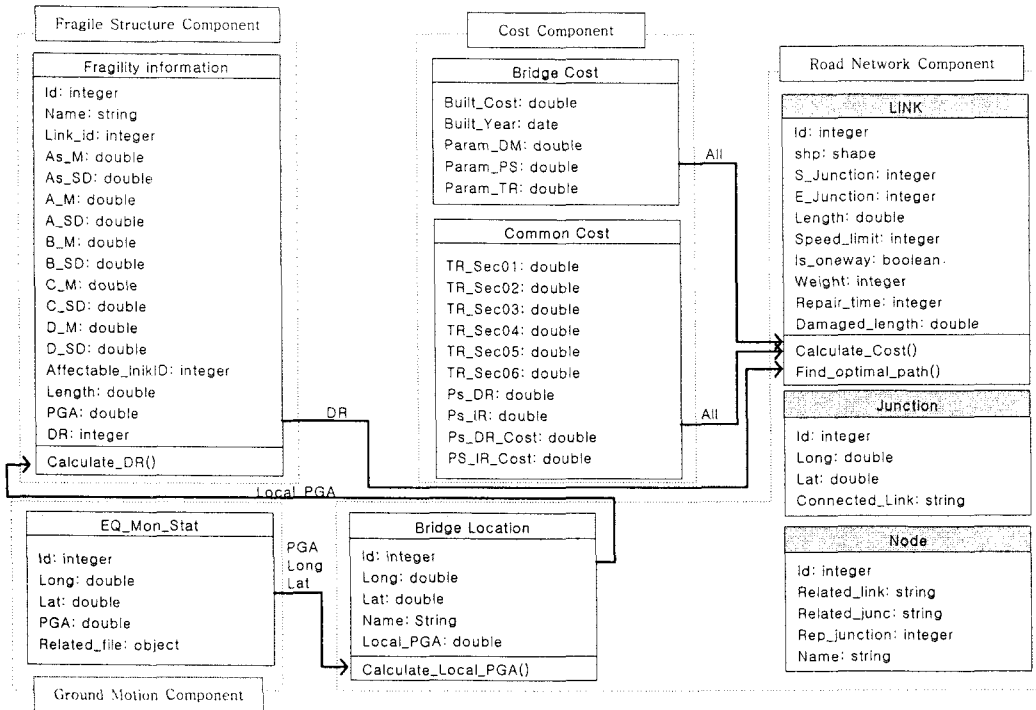


그림 1. 지진 피해 평가 정보 구성 요소의 상관관계 정의도

취약도 정보(Fragility Information)는 교량 위치 요소로부터 PGA 값을 전달받아 손상 등급을 산정 이를 Road 요소에 전달하는 역할을 수행하게 된다.

### 3.2 세부 구성 요소의 접근 방법

2장에서 구분한 각 요소들에 대하여 세부적인 필요 요소들을 추가적으로 정의하였다. 각 시스템 별로 정보를 구축하는 방법과 절차가 서로 상이하게 되는데, 본 연구에서는 국내 환경에 적합한 정보 산정을 위해서 각 시스템뿐만 아니라 관련 연구 내용을 분석하여 다양한 접근 방법들을 그림 2에 나타내었다. 우선, Ground Motion Component의 구성을 위해서는 2장에서 서술한 바와 같이 지진도에 대한 정보가 구축되어 있는 경우에는 지진도 정보를 직접 입력받아 사용하고, 그렇지 않은 경우에는 관측 정보를 바탕으로 지진 감쇠식으로 통칭되는 보간식을 정의하여 임의 지역의 지진도를 작성하여 사용한다. Road Network Component의 경우, 대부분의 시스템에서 그 구축 절차에 대한 과정은 언급되지 않고 있는데, 이는 대상 시스템이 구축된 미국의 도로망 GIS관련 정보 구축이 완료되었기 때문이다(USGS, 2005). 따라서 도로망 정보 구축을 위해서는 국가 GIS사업 등을 통해 구축된 기존의 도로망 정보가 제공되는지 확인해야 한다. 도로망 정보가 제공되는 경우에는 구축된 파일 포맷을 확인하여 입력 절차를 정의하고, 그렇지 않은 경우는 도로망 정보가 기본적으로 정의하는 Link정보와 Joint정보를 작성해 준다. 또한 이러한 위치 기반의 정보 이외에도 피해 후 도로망의 기능 손상을 산정할 수 있도록 파손 단계와 각 단계별 기능 손실율을 정의해야

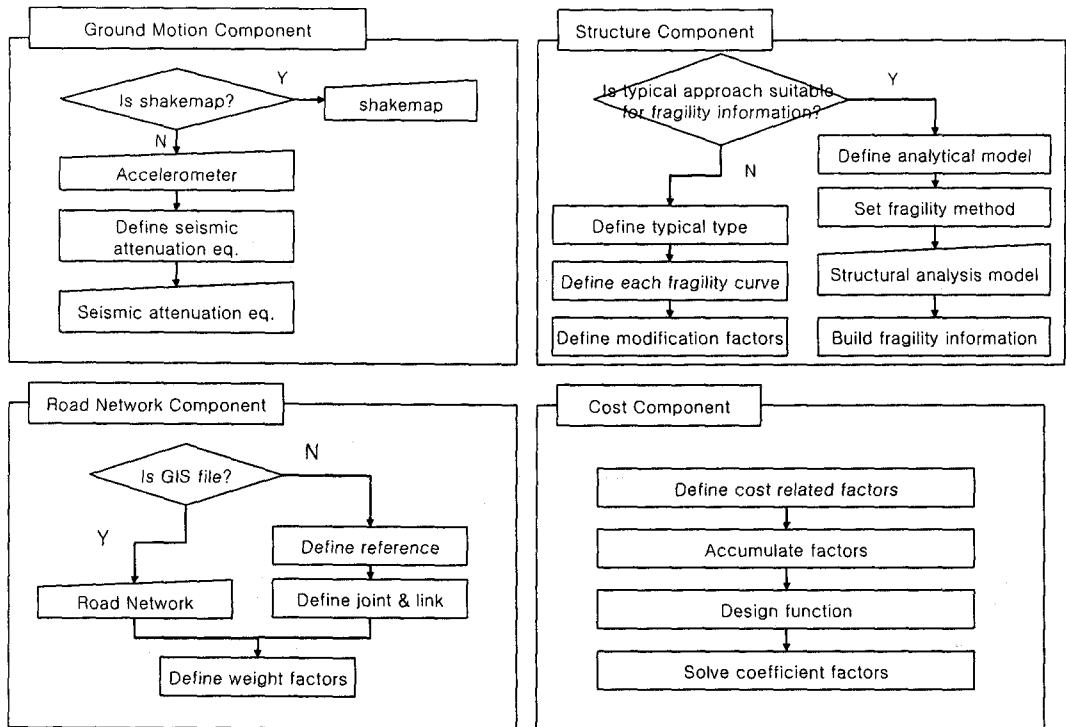


그림 2. 세부 구성 요소별 접근 방법

한다(Shinozuka *et al.*, 2003). 취약도 정보를 담당하는 구조물 정보의 경우 크게 두 가지 방법으로 접근하게 된다. 하나는 정형적인 모델에 대한 취약도 정보를 산정한 후 이를 적용하는 방법(Hwang *et al.*, 2000; Shinozuka *et al.*, 2003; Mackie and Stojadinovic, 2006)이고, 다른 하나는 개별적으로 정의된 취약도 정보를 입력 받는 경우이다. 전자의 경우 기 정의된 취약도 정보를 산정하기 때문에 한번 결정 후 약간의 변수 조절만으로 취약도 정보가 산정되지만, 후자의 경우 개별 구조물의 해석 정보를 정의하고 이를 통한 취약도 정보 산정의 번거로운 절차가 요구된다. 따라서 현재 제안된 지진 피해 평가 시스템에서는 모두 전자의 형태로 구성되어 있다. 그러나 이러한 정형적인 분류는 교량의 타입이 정형화 되어있고, 체계적으로 구분되어 있어야만 가능한 접근법이라는 단점이 있다. 개별 구조물에 대한 해석 정보의 추출이 가능한 경우 후자의 방법을 통하여 각 개별 구조물의 취약도 정보를 산정하는 방법이 전체적인 신뢰도를 높일 수 있다. 이때 필요한 것이 해석 모델 선정인데, 교각만을 대상으로 하는 경우와 받침 구조물의 파괴 등과 같은 다른 요소까지 고려하는 취약도 산정 방법은 서로 절차적인 면에서나 난이도 면에서 차이가 발생하게 된다. 비용 정보의 경우 고려되는 요소 항목에 따라 정의될 수 있는 산정식이 상이하게 되는데, 이러한 요소 산정은 비용 산정을 위해 사용될 수 있는 정보가 존재할 때만 고려될 수 있다. 따라서 이러한 비용 산정을 위해 임의의 가정 사항을 정의하여 접근하는 방법(Shinozuka *et al.*, 2003)과 누적된 자료들을 종합적으로 분석하여 체계적인 식을 제안하는 방법(Mackie and Stojadinovic, 2006) 등 서로 상이한 접근 방법을 가정할 수 있다. 이러한 접근 방법에 대한 내용을 정리하면 그림 2와 같다.

#### 4. 지진 피해 평가 체계 Prototype 구축

분석된 4가지 지진 피해 평가 체계 구성 요소들의 적합성을 검증하기 위해 본 연구에서는 GIS S/W 중 시장 점유율이 지배적인 ESRI사의 ArcGIS desktop 9.0(ESRI, 2003)을 기반으로 하는 Prototype을 제안하였다. 대상 도로망은 교량 취약도 정보 산정이 용이한 고속도로이며, 교량의 취약도 정보는 HBMS의 자료를 바탕으로 110개 교량에 대하여 구축하였다. 이때, 도로망 정보는 기존 분할 자료를 바탕으로 자체적으로 제작하였으며, 지진 계측 정보는 기상청에서 제공하는 위치 정보를 바탕으로 구축하였고 구조물 정보 구축을 위해서는 Karim and Yamazaki(2001)의 취약도 산출 방법론을 사용하였다. 마지막으로 비용 정보의 경우 HBMS를 활용하여 자료를 구축하였으며, 구축 순서 및 정보 처리 순서는 그림 3과 같다. 본 연구에서는 이와 같이 국내 관련 시스템 자원을 활용하여 통합적인 평가 체계를 구축하는 단계까지 연구를 수행하였으며, 추가적인 연구를 통해 구축된 정보를 활용한 실질적인 피해 평가를 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 3은 지진 피해 평가 체계를 위한 정보 모델 구축 절차이고, 그림 4는 본 연구를 통해 최종적으로 구축된 ArcGIS 기반의 지진 피해 평가 체계의 Prototype이다.

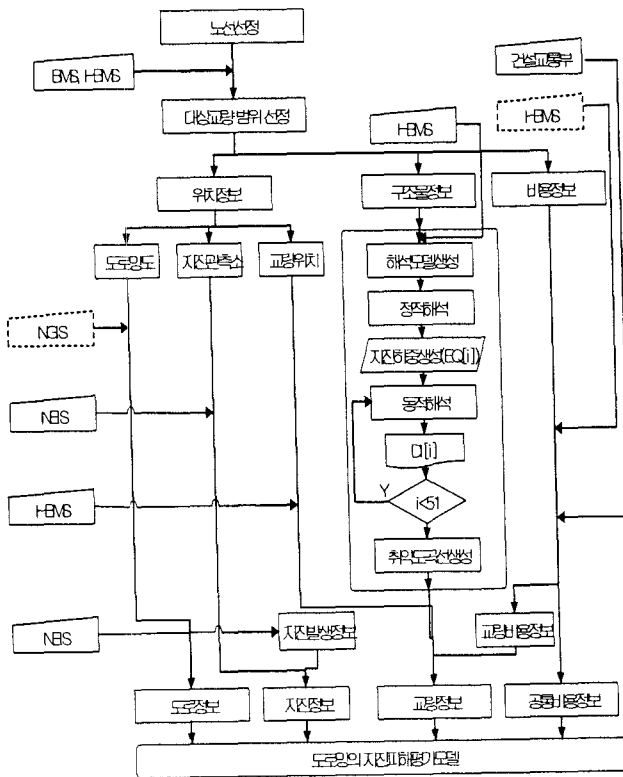


그림 3. 지진피해평가체계를 위한 정보모델 구축절차

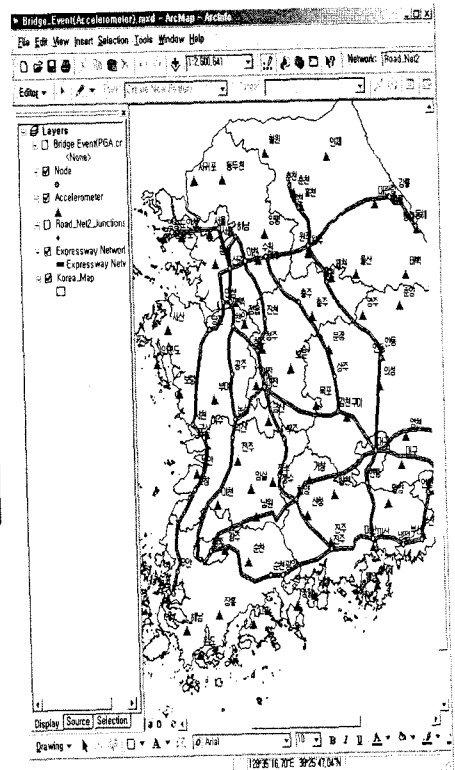


그림 4. 지진피해평가체계 Prototype

#### 5. 결 론

본 연구를 통해 현재 미국과 일본을 중심으로 연구되고 있는 지진 피해 평가 모델과 국내의 정보 기술을 이용하여 지진피해 평가 체계를 지원하는 정보 모델을 제안하고 지진 피해 평가를 위한 Prototype을 구축하였다. 이를 위해 HMS, HBMS, FMS와 같은 국내 교량 유지 관리 시스템과 NGIS, NEIS와 같은 지진 피해 평가 시스템을 분석하여 개발된 정보 모델의 적합성을 확인하였으며, 이를 통해 지진 피해 평가 체계 구축을 위한 자료 구축 절차를 제안하였다. 교량 시스템 분석 시 HBMS의 자료가 구조 해석 정보구축을 위해 적합한 것으로 판별되었으며, HBMS의 자료 중 자료 구축률이 우수한 110개의 교량정보를 바탕으로 교량 취약도 정보를 구축하였다. 성공적인 Prototype 구축을 통해 본 연구에서 제안한 자료 구축 방안이 지진 발생 후 도로망 피해 산정을 위한 정보 모델 개발에 적합함을 확인하였으며, 개발된 Prototype은 추가 연구를 통해 제안될 보다 향상된 지진 피해 평가 체계의 기반 역할을 수행할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

- 김상훈, 김두기, 서형렬, 김종인 (2004) 내진보강된 콘크리트 교량의 손상도곡선, 한국구조물진단학회, Vol. 8, pp. 203-210.
- 이진학, 윤진영, 윤정방 (2004) 지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가, 한국지진공학회 논문집, Vol. 8, pp. 31-43.
- Nielson, B. (2003) Bridge seismic fragility-functionality relationships: A requirement for loss estimation in Mid-America, *Student Council Online Magazine*, Vol. 3, Number 2.
- Bouabid, J. (2002) HAZUS-MH and Technological hazards powerpoint presentation, *FEMA*,
- Hwang, H., Jernigan, J., and Lin, Y. (2000) Evaluation of seismic damage to memphis bridges and highway systems, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 5, 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*, Vol. 30, 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*, Vol. 35, pp. 77-93.
- Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J., and Naganuma, T. (2000a) Statistical analysis of fragility curves, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, pp. 1224-1231.
- Shinozuka, M., Feng, M., Kim, H., and Kim, S. (2000b) Nonlinear static procedure for fragility curve development, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, pp. 1287-1295.

- Shinuzuka, 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.