

도로교의 GIS 기반 지진피해평가체계 구축을 위한 데이터베이스 설계

Database Design for Development of the GIS-based Earthquake Damage Evaluation System of Highway Bridges

이상호¹⁾ · 김봉근²⁾ · 정동균³⁾

Lee, Sang-Ho · Kim, Bong-Geun · Jeong, Dong-Gyun

국문 요약 >> 본 연구에서는 도로교의 지진피해평가체계를 구축하기 위해 필요한 정보항목들을 정의하고 우리나라 실정에 맞는 데이터베이스 구축방법을 제시하였다. 도로교 지진피해평가를 위한 정보요소는 크게 구조물 관련 정보와 위치관련 정보로 구분하였다. 구조물 관련정보는 도로망에 위치한 교량의 지진피해를 예측하는데 필요한 도로교의 취약도 곡선 정보항목으로 구성하였다. 위치관련 정보항목인 도로망의 데이터구조는 상세한 교차로 모델링이 가능하도록 기존의 GIS 데이터구조를 보다 세분화하여 정의하였다. 고속도로망에 위치한 110개의 교량을 대상으로 시범 시스템을 개발하였으며, 제시된 데이터베이스 구축 방법은 도로망의 신속한 피해복구를 위한 의사결정 지원체계 구축에 효과적으로 활용이 가능함을 보였다.

주요어 지진, 교량, 피해평가체계, 데이터구조, 도로망, 취약도 정보

ABSTRACT >> The essential information elements for the Earthquake Damage Evaluation System (EDES) of highway bridges are defined in this study, and a database construction method, which fits the circumstances of Korea, is proposed. The information elements for the EDES of highway bridges are categorized in two groups: structure related information, location related information. The structure related information is composed of the fragility curve information which is necessary for earthquake damage evaluation of highway bridges. The data structure of road network, which represents the location related information, is defined in more detail than the existing GIS-based data structure of road network for modeling of junctions. A pilot GIS-based EDES subjected to 110 bridges on expressway in Korea is developed, and it is verified that the proposed database construction method for the EDES can be used to develop a decision making system for quick retrofitting of the seismic damages of highway bridges and road network.

Key words earthquake, bridge, damage evaluation system, data structure, road network, fragility information

1. 서론

도로는 다수의 구조시설물이 유기적으로 연결되어 구성된 사회기간시설물로서 내륙 교통물류의 중추적인 역할을 담당하고 있으며, 교량은 이러한 도로망을 구성하는 대표적인 토목구조물로서 지진에 의해 손상되기 쉬운 구조형식이다. 이러한 이유로 지진에 대한 적절한 대응방안이 교량에 대하여 강구되어야 한다. 교량의 지진에 대한 대응방안은 지진 발생 이전과 이후로 구분할 수 있다. 지진 발생 이전에

취할 수 있는 대응방안으로는 내진설계를 수행하거나 면진장치 또는 제진장치를 구조물에 설치하는 것이다. 지진발생 이후에 취할 수 있는 방안은 교량의 피해 정도를 평가하고 필요한 경우 보수 또는 복구하는 것이며, 이때 교량의 지진 피해 정도를 신속하고 효과적으로 평가하는데 이용할 수 있는 것이 취약도 곡선이다.

교량의 지진 취약도에 대한 연구는 1994년 미국 California Northridge지진과 1995년 일본 고베지진 발생 이후 지진에 대한 교량의 손상 정도가 체계적으로 조사되면서 활발히 진행되었다.^(1,2) 초기 교량의 취약도 곡선에 대한 연구는 과거 지진과 연관된 교량의 손상자료를 분석하는 방법으로 진행되었다. 그러나 실측에 의한 취약도 곡선 산정은 교량의 구조적인 특성을 감안하지 않은 통계적인 자료로서 다른 지역에 적용하기에는 지역적인 특성이 고려되지 못하는 단점이

¹⁾ 정희원·연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (대표지자: lee@yonsei.ac.kr)

²⁾ 연세대학교 토목공학과 박사과정

³⁾ 연세대학교 건설공학연구소 연구원

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 5. 17 / 심사종료일 : 2006. 5. 19)

있다.⁽³⁾ 이에 Karim과 Yamazaki⁽⁴⁾ 및 Shinozuka 등^(5,6)의 연구와 같이 수치 시뮬레이션을 통하여 교량의 취약도 곡선을 산정하는 연구가 미국과 일본을 중심으로 활발히 진행되었으며, 이와 같은 방법론은 이진학 등⁽⁷⁾이 수행한 층상지반의 영향으로 증폭된 지진하중에 대한 교량의 위험도를 산정한 연구, 김상훈 등⁽⁸⁾이 수행한 내진보강된 콘크리트 교량의 손상도 곡선에 대한 연구와 같은 국내 교량의 지진 취약도를 평가하는데 활용되었다.

이와 같은 취약도 곡선을 기반으로 한 지진피해평가방법은 도로망의 피해를 예측하는 시스템 개발에도 직접 활용되고 있다. 도로망의 피해를 종합적으로 평가하고 의사결정지원을 수행하는 대표적인 시스템으로는 미국의 HAZUS-MH⁽⁹⁾, REDARS⁽¹⁰⁾, MAEViz⁽¹¹⁾, 일본의 DIS⁽¹²⁾ 등이 있다. 미국이나 일본의 경우 자국의 지진피해 조사결과에 따른 통계수치를 이용하여 교량 타입별로 교량의 취약도를 정의하였으나 교량의 형식과 지진 데이터가 다른 우리나라에 이를 그대로 적용하기에는 적합하지 않다. 우리나라의 경우 국립방재연구소⁽¹³⁾에서 미국의 HAZUS와 일본의 DIS를 중점 대상으로 하여 재해정보시스템의 특성을 분석하고 국내의 적용성 여부를 검토하였으며, 최근에는 소방방재청⁽¹⁴⁾에서 지진재해대응 시범시스템 구축사업을 추진하는 등 국내 현황에 적합한 시스템 구축을 위한 연구가 수행되고 있다. 그러나 이들 연구는 빌딩구조물과 같은 도시거주지역을 시스템 구축의 주요 목표대상으로 하고 있으며, 교량을 포함한 도로망의 경우 아직 추진 예정으로 설정되어있다. 본 연구에서는 우리나라의 한정된 인원과 재원속에서 효과적이면서 신속하게 도로교의 지진피해 정도를 예측하고 이를 바탕으로 도로망의 기능을 예측하는데 필요한 데이터베이스를 설계하였으며, 이의 구축방안을 제시하였다. 특히 본 연구에서는 교차지점에 설치되는 교량의 지진피해에 따른 도로망의 지진피해를 고려할 수 있도록 기존의 도로망 데이터 구조를

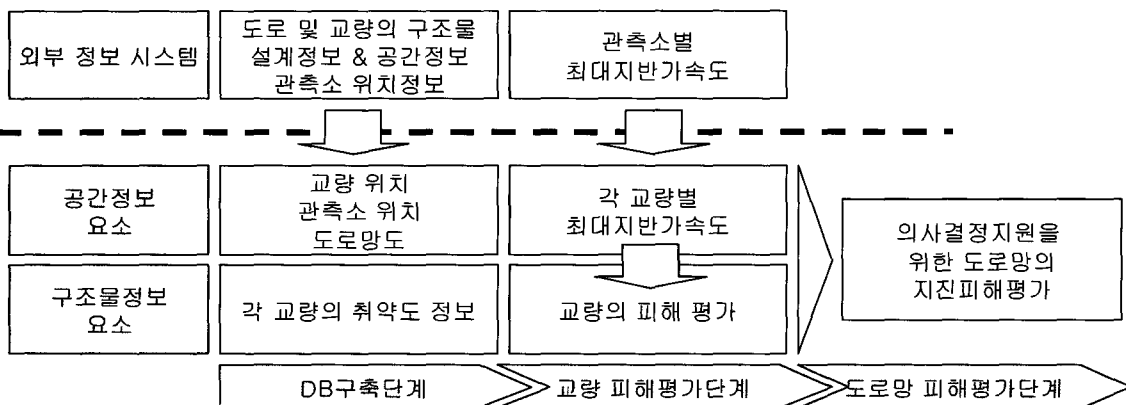
확장하여 제시하였다.

2. 교량 및 도로망 지진피해평가체계 구축을 위한 자료구조

2.1 교량 및 도로망 지진피해평가 절차

본 연구에서는 지진발생 이후 교량의 지진피해평가를 수행하고 이를 기반으로 도로망의 지진피해 정도를 예측하는 과정을 그림 1과 같이 크게 3부분으로 구성하였다. 첫 번째는 지진발생 이전에 교량의 지진 취약도 정보, 도로망 정보, 교량의 위치 정보 및 관측소의 위치정보에 대한 데이터베이스를 구축하는 단계이다. 두 번째는 지진발생 이후에 수행되는 과정으로서 우리나라 지진관측소에서 계측된 데이터를 입력하여 도로망에 위치한 각각의 교량에 작용되는 최대지반가속도 값을 산정하고 이에 따른 교량의 손상율을 예측하는 과정이다. 그리고 마지막으로 세 번째는 앞서 예측된 도로교의 지진피해 결과를 바탕으로 도로망의 지진피해 정도를 예측하는 과정이다.

본 연구에서는 첫 번째 단계의 데이터베이스를 구축하는데 필요한 데이터구조를 설계하는데 있어서 두 가지 측면에 주안점을 두었다. 첫째는 이진학 등⁽⁷⁾, 김상훈 등^(8,15)의 연구와 같이 우리나라 실정에 맞는 취약도 곡선을 산정하는 방법에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있으므로 각각의 교량이 가지는 특성에 따른 정확한 취약도 정보를 지속적으로 관리할 수 있는 데이터체계를 유지하는 것이다. 이를 위해 교량 구조물과 관련한 정보는 교량에 대한 취약도 곡선을 재생할 수 있는 데이터항목으로 구성하였으며 2.2절에 보다 자세히 설명하였다. 둘째는 현재 우리나라에서 배포되고 있는 NGIS 기반 도로망 정보로는 교차로에 위치한 교량에 의한 도로망의 피해평가를 수행할 수 없으므로 이를 확장한 데이터구조를 설계하는 것이다. 이를 위해 차량의 진행방향



〈그림 1〉 도로망 교량의 지진피해평가를 위한 시스템 개요

을 고려하고 교차로에 설치되는 교량의 피해에 따른 도로피해를 평가할 수 있도록 데이터구조를 설계하였으며 이는 2.3절에 설명하였다.

2.2 교량의 취약도 관련 정보요소

취약도 곡선은 임의의 최대지반가속도(PGA, peak ground acceleration) 또는 최대지반속도(PGV, peak ground velocity)와 같은 지반운동 강도에 따라 교량에 손상이 발생할 확률을 도식화한 것이다. 실제로 구조물의 취약도 곡선을 구축하기 위해서는 매우 복잡한 절차를 거치게 되지만 시스템을 구현하는 단계에서의 정보형태는 단순한 편이다. 앞서 2.1절에서 언급한 바와 같이 우리나라 실정에 맞는 교량의 취약도 곡선 산정을 위한 다양한 연구가 진행되고 있으나 본 연구의 시범체계 구축에서는 손상등급별 발생확률이 식 (1)과 같은 표준정규분포식을 따르는 것으로 가정하였다.

$$P_R = \Phi \left[\frac{\ln X - \lambda}{\zeta} \right] \quad (1)$$

여기서 P_R 은 각 PGA별로 발생하는 해당 손상등급의 발생확률을 의미하며, Φ 는 표준정규분포식을, X 는 PGA, λ 와 ζ 는 각각 중앙값과 표준편차를 의미한다. 이에 따라 본 연구에서는 개별교량의 피해를 예측하는데 필요한 주요 정보요소로서 피해등급별 중앙값과 표준편차를 선택하였다. 표 1은 본 연구에서 정의한 교량 구조물에 대한 자료구조를 나타낸다. 기본적인 자료항목인 구분자(ID), 교량명(Name), 소속 링

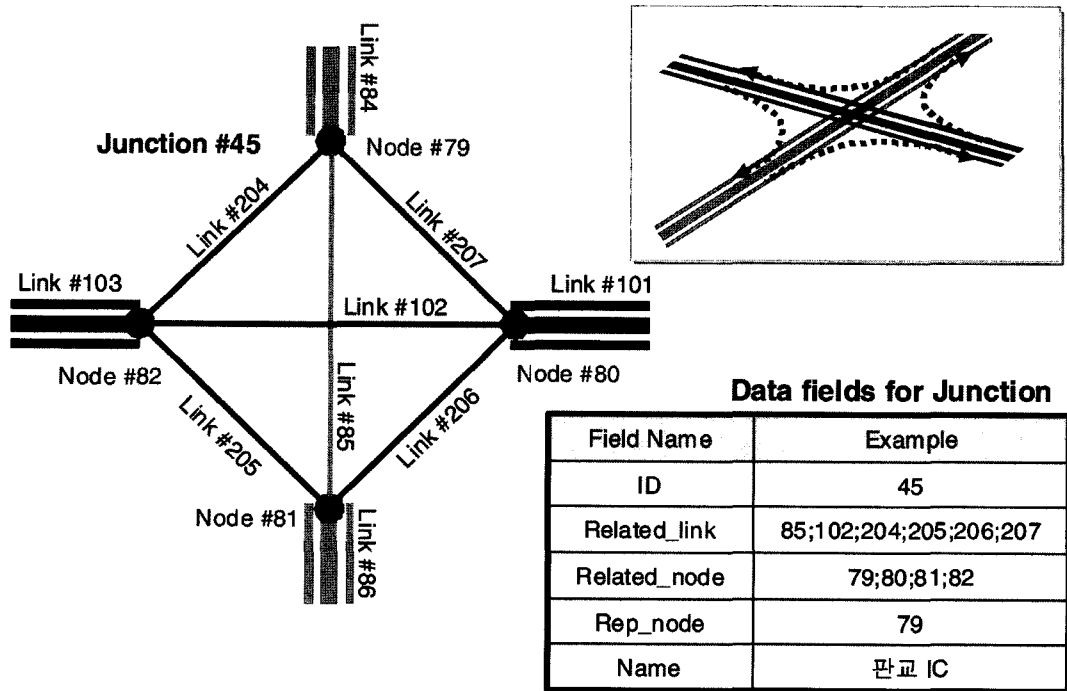
크의 아이디(Link_ID)와 함께 취약도 정보를 각 등급 당 2개씩 총 10개를 추가하여 정의하였다. 또한 교량의 손실이 해당 링크뿐만 아니라 다른 인접링크에도 영향력을 미칠 수 있는 경우를 고려하기 위하여 Affectable_LinkID를 정의하였다. Affectable_LinkID는 교량의 하부에 다른 도로망이 존재하는 경우, 상부구조물인 교량의 기능 상실은 하부도로의 차량주행에 영향을 미칠 수 있다는 가정하에 고려된 항목이다.

2.3 도로망의 데이터항목

도로망의 기본적인 위치정보는 NGIS사업에서 구축한 자료인 shape정보를 이용할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 교량의 피해에 따른 도로망의 사용성을 평가하기 위해서 기존에 우리나라에서 구축된 정보 이외에 표 2와 같은 추가의 데이터 항목을 정의하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 차량진행의 방향성을 정의하기 위해 링크의 시작과 끝을 정의하였으며, 기본적으로 시작점을 의미하는 S_Junction에서 끝점을 의미하는 E_Junction으로 차량이 진행하는 것으로 정의하였다. 편도인 경우 Is_Oneway의 값이 Yes로 설정되고, No인 경우 역방향에 대한 흐름도 허용하여 양방향 구간으로 인식하게 하였다. Weight값은 각 도로의 지체도를 정의하기 위한 가중치 정보로서 각 방향성분에 따라 독립적으로 관리하기 위해 두 개의 항목으로 정의하였으며, 기본값은 0으로, 지체도가 증가되는 경우 0보다 큰 값을 사용하였다. 도로망의 예상 복구 시간 산정을 위한 항목으로서 Repair_time 항목을 정의하였다. Repair_time은 교량의 손상정도와 손상교량의 개수에

〈표 1〉 구조물의 취약도 정보 자료구조 정의

항목 이름	데이터 타입	의미	항목 이름	데이터 타입	의미
ID	integer	고유값	C_M	double	Major damage 확률의 중앙값
Name	string	교량명	C_SD	double	Major damage 확률의 표준편차
Link_ID	integer	소속된 링크ID	D_M	double	Collapse 확률의 중앙값
As_M	double	No damage 확률의 중앙값	D_SD	double	Collapse 확률의 표준편차
As_SD	double	No damage 확률의 표준편차	Affectable_LinkID	integer	영향력이 미칠 수 있는 소속된링크를 제외한 다른 링크
A_M	double	Minor damage 확률의 중앙값	Length	double	교량의 길이
A_SD	double	Minor damage 확률의 표준편차	PGA	double	교량위치에서의 PGA값
B_M	double	Moderate damage 확률의 중앙값	DR	integer	손상등급 (Damage Rank)
B_SD	double	Moderate damage 확률의 표준편차			



〈그림 2〉 Junction과 Node와의 관계정의

〈표 2〉 Link 자료구조의 정의

항목 이름	데이터 타입	의미	항목 이름	데이터 타입	의미
ID	integer	구분자	Weight_SE	integer	시작점에서 끝점까지의 가중치
Shp	shape	도형정보	Weight_ES	integer	끝점에서 시작점까지의 가중치
S_Junction	integer	시작 포인트	Repair_time_SE	integer	시작점에서 끝점구간의 예상복구시간
E_Junction	integer	끝 포인트	Repair_time_ES	integer	끝점에서 시작점까지의 예상복구시간
Length	double	도형의 길이	Is_Closed	boolean	통제구간여부 확인자
Speed_limit	integer	해당 링크의 제한속도	Damaged_length	double	링크에서 손상된 피해길이
Is_Oneway	boolean	일방향, 양방향 구분자			

〈표 3〉 Node 자료구조의 정의

항목 이름	데이터 타입	의미
ID	integer	구분자
Long	double	경도
Lat	double	위도
Connected_Link	string	연결된 링크

〈표 4〉 Junction 자료구조의 정의

항목 이름	데이터 타입	의미
ID	integer	구분자
Related_Link	string	포함관계에 있는 링크
Related_Node	string	포함관계에 있는 Node
Rep_Node	integer	포함관계에 있는 Node 중 대표 Node
Name	string	지명

비례하여 정의된다. Damaged_length는 손상구간의 총 길이로서 지체도와 복구시간과 관련된 정보를 보유하게 된다. 링크의 방향성을 정의하는 Node의 자료구조는 표 3과 같다.

Node는 점형 정보로서 위도와 경도의 값을 가지며, Connected_Link는 Node에 연결된 링크를 문자열로 나열한 형태이다. 정의된 Node항목은 Link를 구성하는 보조항목으로서의 역할을 수행하기는 하지만 임의의 지역명을 대신하지는 못한다. 이는 임의의 지역에 Node가 다수 존재할

수 있기 때문이다. 이러한 문제점을 극복하고 교차구간의 상세모델링을 위해서도 Node이외에 Junction이라는 추가 항목을 정의하였으며, 자료구조는 표 4와 같다.

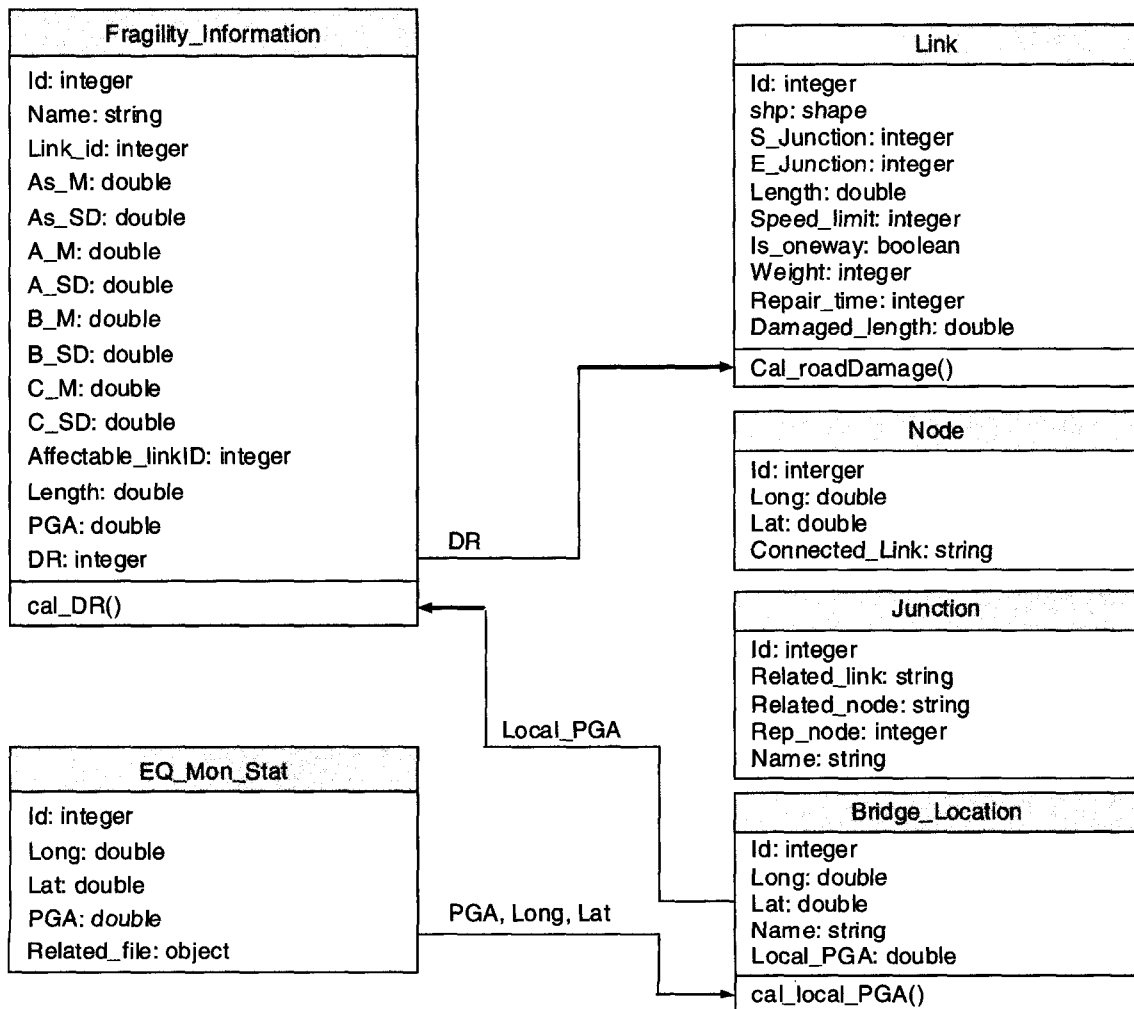
본 연구에서 정의한 Junction은 임의의 지역을 의미하며, 도형정보라기 보다는 Node 및 링크의 포함관계로 연결되는 가상적인 점형 정보가 된다. Junction과 Node의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 2개의 노선이 교차하는 교차

구간으로서 Junction #45를 기준으로 4개의 링크(#84, #86, #101, #103)가 연결되어 있다. 링크 #103에서 링크 #86으로 이동하는 경우 링크 #205를 거치게 되는데, 이때의 링크 #205이 교차구간에 흔히 존재하는 교량이 될 가능성이 있다. 만약 링크 #205에 교량이 존재하는 경우 지진피해평가 시 해당 교량의 기능상실은 링크 #205의 기능을 제한하여 링크 #103에서 링크 #86으로 진행되는 경로를 통제하게 된다. 이러한 통제과정 시나리오는 교차점을 Point정보로만 구축하는 경우 불가능한 기능이다. Junction은 기본적인 ID 정보 이외에 Junction지역에 정의되는 Node정보와 링크 정보를 포함한다. 실제 Junction의 대표값은 지역명으로서 Junction에서 Name으로 정의된 자료항목을 의미한다. 실제 교차점의 모델링은 상세하게 진행되지만 교차점 검색 및 운용상의 편의성제공을 위한 중간매개 역할을 Junction이 담당하게 된다. 이러한 Node와 Junction의 두 가지 타입의 요소 정의는 보다 현실적이고 활용도가 높은 도로망의 지진피해평가를 가능하게 하기 위함이다.

3. 교량 및 도로망의 지진피해평가 프로세스

3.1 지진피해평가를 위한 자료모델과 정보처리 프로세스

2장에서 설명한 자료모델과 이를 이용하여 교량 및 도로망의 지진피해를 평가하는 전체적인 흐름을 그림 3에 나타내었다. EQ_Mon_Stat은 지진관측소와 관련한 정보를 나타내는 요소로서 지진발생이전에는 각 관측소의 ID와 위도와 경도로 구성된 위치정보가 구축되며, 지진발생 이후에는 최대지반가속도 및 이와 관련된 파일 객체 정보가 사용자에게 의해 입력된다. EQ_Mon_Stat은 각 교량 위치에서의 최대지반가속도를 산정하는데 필요한 정보를 제공하는 정보제공요소로서 각 관측소별 위치정보와 최대지반가속도 값이 Bridge_Location의 cal_localPGA()함수에 제공된다. Bridge_Location은 각 교량 위치에서 최대지반가속도 값을 산정하기 위해 필요한 교량의 ID와 위도 및 경도로 구성된 위치정보를 포함하고 있다. cal_localPGA()를 이용해 산정한 Local_PGA 정보는 각 교량위치에서의 최대지반가속도 값으로서 이의 산정방



〈그림 3〉 지진피해평가 정보구성 요소의 상관관계 정의도

법은 3.2절에 보다 자세히 설명하였다. Local_PGA는 다시 Fragility_Information의 cal_DR()에서 각 교량의 최종 손상정도를 산정하는데 이용된다. cal_DR()은 2.2절에서 정의한 데이터구조를 기본으로 한 Fragility_Information의 데이터와 Bridge_Location에서 전달된 Local_PGA를 이용하여 최종적으로 해당 교량의 손상정도를 산정하게 되며, 각 교량의 손상도를 산정하는 방법은 3.3절에 보다 자세히 설명하였다. 마지막으로 도로망 정보를 나타내는 요소들은 앞서 2.3절에서 설명한 바와 같이 Link와 Junction, Node로 구성된다. 내부적으로 Junction과 Node는 정보제공요소로서 cal_roadDamage()함수에 도로망의 연결정보를 제공한다. cal_roadDamage()에서는 Fragility_Information에서 산정한 DR 값을 이용하여 각 Link의 손상정도를 산정하며, 이의 산정방법은 3.4절에 설명하였다.

3.2 교량 위치에서의 최대지반가속도 값 산정 방법

임의지역의 최대지반가속도 값을 유추하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 전 지역의 지반정보를 이용하여 지반시뮬레이션을 수행하여 유추하는 방법이고 다른 하나는 특정지점에서 관측된 정보와 보간식을 사용하는 방법이다. 우리나라의 경우 지반정보통합DB시스템⁽¹⁶⁾의 구축이 최근 이루어졌다. 그러나 각 관측소별 지진정보를 입력하는데 있어 아직까지 실시간 형태로 데이터 교환이 이루어지지 않기 때문에 본 연구에서는 보간식과 각 관측소에서 측정된 최대지반가속도 값을 통해 해당 교량위치에서의 최대지반가속도 값을 유추하는 방법을 취하였다. 보간식은 실제 발생한 지진을 대상으로 실험적으로 도출한 실험식이 대부분이며, 본 연구에서는 이러한 실험식 중 Tamura 등⁽¹⁷⁾이 제안한 식 (2)를 사용하였다.

$$\log Y = \log a + b \cdot M - c \log(X + 30) \quad (2)$$

여기서 Y는 최대지반가속도(cm/s^2)를 나타내며 M은 지진 규모, X는 거리(km)를 나타내며, 이때 계수 a, b, c는 관측 값에 의해 계산되는 미지수이다.

3.3 교량의 손상을 산정 방법

앞서 2.2절에서 언급한 바와 같이 교량의 취약도 정보는 임의의 최대지반가속도 값에 따른 각 손상 등급의 발생확률로 나타나며 그 형태는 그림 4와 같다. 특정 손상등급이 다른 손상등급의 발생확률에 비해서 지배적으로 큰 경우에는 해당 손상등급을 예상손상등급으로 가정할 수 있지만 그림 4에서와 같이 minor damage의 발생확률과 moderate damage의

발생확률이 큰 차이가 나지 않는 경우 중복되는 확률을 모두 포괄하는 종합 손상지수가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 각 손상등급의 확률값을 모두 고려한 종합손상지수를 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

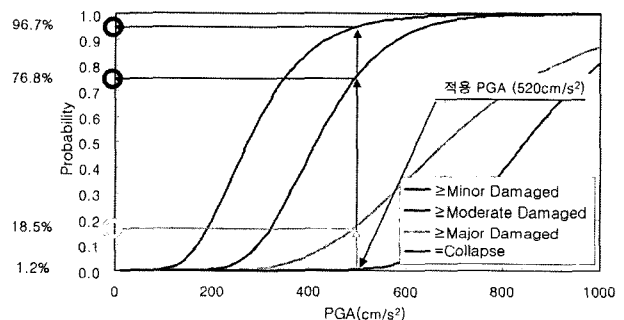
$$P_{total} = \frac{1.0 \times P_{mi} + 2.0 \times P_{mo} + 3.0 \times P_{ma} + 4.0 \times P_{\omega}}{1.0 + 2.0 + 3.0} \quad (3)$$

여기서 P_{total} 은 종합적인 손상도 지수로서 본 연구에서는 손상률(damage rate)로 명칭한다. 그리고 P_{mi} 는 minor damage 발생확률, P_{mo} 는 moderate damage 발생확률, P_{ma} 는 major damage 발생확률, P_{ω} 는 collapse 발생확률이다. 손상률은 0.0에서부터 1.0사이의 값을 가지게 된다. P_{total} 과 기존 등급과의 상관관계는 표 5와 같다.

그림 4의 각 등급에 따른 손상발생확률을 식 (3)에 적용하면 0.311이 산정된다. 이는 표 5에 나타난 바와 같이 그림 4에서 발생확률이 가장 높은 것으로 나타난 minor damage보다는 큰 값을 의미하며, 두 번째로 발생확률이 높은 moderate damage보다는 값이 작은 값을 가지게 되어 각 손상등급의 발생확률을 반영한 최종적인 교량의 손상계수로서의 역할을 수행하게 된다. 본 연구에서 구축한 시범 시스템에서는 도로망의 손상도를 식 (3)에 따른 교량의 손상률을 이용하여 산정하였다.

3.4 도로망 손상도 산정 방법

최적도로 산정을 위해서 도로망 요소에 입력되는 항목은



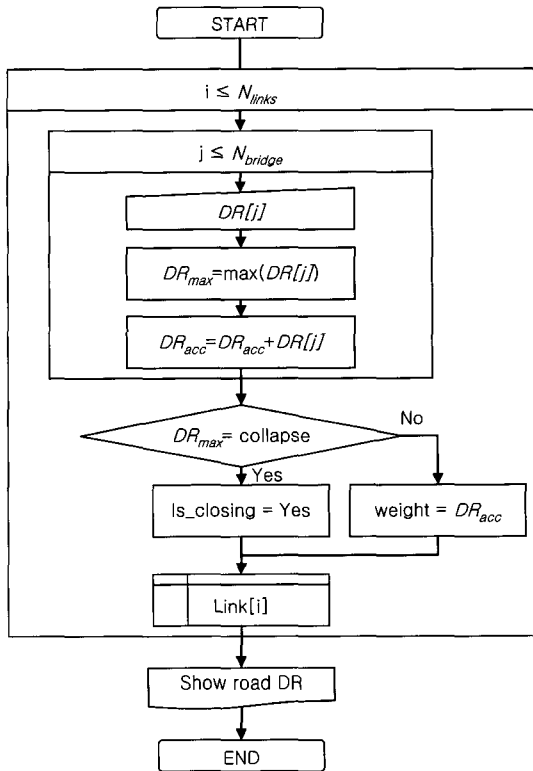
〈그림 4〉 PGA에 따른 각 손상등급의 한계확률

〈표 5〉 P_{total} 과 손상등급의 관계

P_{total}	손상등급
0.0	no damage
0.25	minor damage
0.50	moderate damage
0.75	major damage
1.0	collapse

교량의 손상등급이다. 입력된 손상등급은 각 손상등급에 따라 도로망의 기능을 정의하는 가중치 요소에 영향을 미치게 되는데, 이러한 절차는 그림 5와 같은 순서대로 나타낼 수

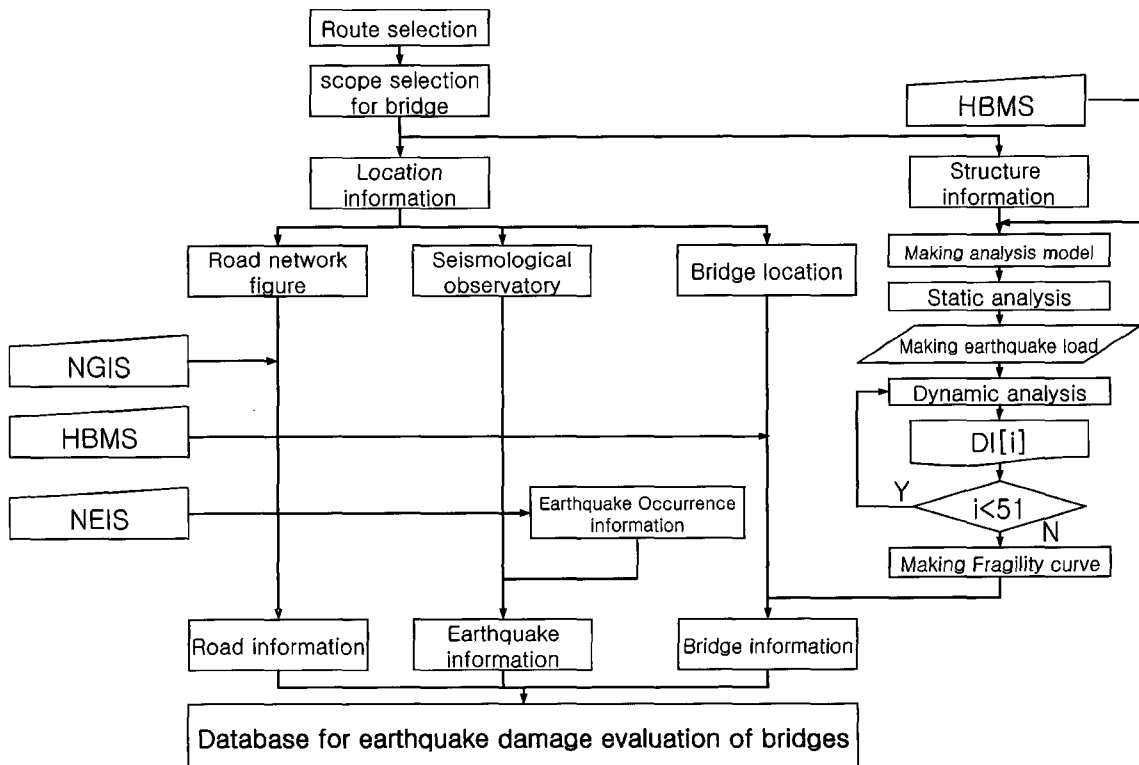
있다. 그림 5에서 N_{links} 와 N_{bridge} 는 각각 도로망 상의 링크의 총 개수 및 임의의 링크에 소속되어 있는 교량의 개수를 의미한다. $DR[j]$ 는 각 교량의 손상등급을 DR_{max} 는 각 링크에서 발생한 교량의 DR중 최대값을, DR_{acc} 는 임의 링크에서 발생한 교량의 DR의 총 누적값을 의미한다. 각 링크별로 교량의 붕괴여부를 분석하여 교량이 붕괴된 경우는 링크를 폐쇄시키고, 붕괴되지 않은 경우는 손상교량의 개수와 등급을 모두 고려하여 가중치 정보를 정의한다. 이러한 일련의 작업을 통해 교량 피해에 따른 도로망 손상도 예측을 위한 정보처리작업이 완료된다.



〈그림 5〉 교량피해에 따른 도로망 손상도 산정 절차

4. 시범 지진피해평가체계의 개발

본 연구에서 제시한 데이터베이스의 구조와 구축방법에 따라 고속도로 교량에 대한 지진피해평가를 위한 시범 시스템을 개발하였다. 데이터베이스 구축은 그림 6에 나타난 바와 같이 크게 구조물 취약도 정보, 위치정보로 구분하여 진행하였다. 구조물 취약도 정보 구축에는 Karim과 Yamazaki⁽⁴⁾의 취약도 산출 방법론을 이용하였으며, 교량의 취약도 곡선정보를 구축하는데 있어서 필요한 구조해석정보와 위치 정보는 HBMS에 연계된 교량 설계정보를 이용하였다. 고속도로망도는 NGIS에 따라 구축된 한국도로공사의 고속도로망도 자료를 바탕으로 앞서 2절에서 설명한 데이터 구조에



〈그림 6〉 시범 시스템의 정보구축 절차

다른 데이터베이스로 구축하였으며, 지진관측소자료는 국가 지진정보시스템(NEIS)에 구축된 자료를 활용하였다. 지진 피해평가체계의 기반이 되는 GIS 플랫폼으로는 ESRI사⁽¹⁸⁾의 ArcGIS 9.0 Desktop을 사용하였으며, 내부 연산모듈은 Visual Basic으로 개발되었다. 구축절차가 복잡한 취약도 정보 구축과정과 고속도로망도 구축과정을 각각 4.1절과 4.2절에 보다 자세히 설명하였다.

4.1 교량의 취약도 정보 구축

Karim과 Yamazaki⁽⁴⁾는 교각의 파괴를 지진에 따른 교량 파괴의 지배인자로 가정하고 개별교각의 취약도 정보 산정하였으며, 본 연구의 시범 시스템 구축에서도 동일하게 가정하였다. 이에 따라 본 연구에서 각 교량의 취약도 정보를 구축하기 위해 수행한 방법을 설명하면 다음과 같다.

초기 단계로 교각의 단면해석을 수행하여 교각의 파괴모드를 산정한다. 교각의 파괴모드에는 전단파괴와 휨파괴가 있으며, 이때 휨파괴는 최대휨모멘트가 발생하는 곳에서 일어나는 파괴를 의미하며, 전단파괴는 최대전단력이 발생하는 곳에서 발생하는 것을 의미한다. 파괴모드가 정해지면 pushover 해석을 수행한다. pushover 해석을 위해서는 소성힌지를 가정해 주어야 하는데 본 연구에서는 Mattock⁽¹⁹⁾이 제안한 식 (4)를 이용하였다.

$$l_p = 0.5d + 0.05z \tag{4}$$

여기서, l_p 는 바닥에서 소성힌지까지의 거리, d 는 단면의 유효깊이, z 는 특정지점에서 변곡점까지의 거리를 각각 의미한다.

이와 같은 과정을 통해 변위와 힘의 관계로 표현되는 pushover curve가 산출되며, curve의 기울기를 통해 비선형성이 고려된 교각의 대표강성도 값을 산정하게 된다. 이와 같이 산정된 교각의 대표 강성도 값을 교각의 단진자 모델에 반영하여 비선형해석을 수행한다. 본 연구에서는 비선형 해석에 미국 재난방재청에서 무료로 배포중인 Nonlin 6.01⁽²⁰⁾을 사용하였으며, 취약도 곡선을 작성하기 위하여 각각의 교각모델에 50개의 지진하중을 이용하였다. 이러한 해석을 통해 산출되는 연성도 값을 이용하여 손상지수를 산정할 수 있는데 본 연구에서는 Park 등⁽²¹⁾이 제안한 식 (5)를 이용하여 손상지수를 산정하였다.

$$DI = \frac{\mu_d + \beta\mu_h}{\mu_u} \tag{5}$$

〈표 6〉 손상지수(DI)와 손상등급(DR)의 상관관계

Damage Index (DI)	Damage Rank (DR)	Definition
0.00 < DI ≤ 0.14	D	No damage
0.14 < DI ≤ 0.40	C	Minor damage
0.40 < DI ≤ 0.60	B	Moderate damage
0.60 < DI < 1.00	A	Major damage
1.00 ≤ DI	As	Collapse

여기서, DI 는 손상지수를 의미하며, μ_d 와 μ_u 는 정적해석을 통해 산출되는 변위 연성도와 최대변위 연성도를 각각 의미한다. β 는 cyclic loading factor로서 본 연구에서는 0.15의 값을 사용하였다. μ_h 는 이력에너지 연성도로서 동적 해석을 통해 산출된다. 취약도 정보는 교각이 임의의 손상을 입을 확률을 구하는 것이 목적이므로 손상 정도를 등급화 할 필요성이 있다. 손상등급과 손상지수의 상관관계는 Ghobarah 등⁽²²⁾이 정의한 손상등급을 사용하였으며 표 6과 같다.

확률분포를 도출하기 위해서 우선 각 지진하중별로 동적 해석을 수행하여 산정된 손상지수 값을 손상등급으로 변환시키며, 각 손상등급별로 취합하여 중앙값과 표준편차값을 계산하고 이를 GIS에서 교량의 위치정보와 함께 데이터베이스로 구축한다.

4.2 고속도로망도의 구축

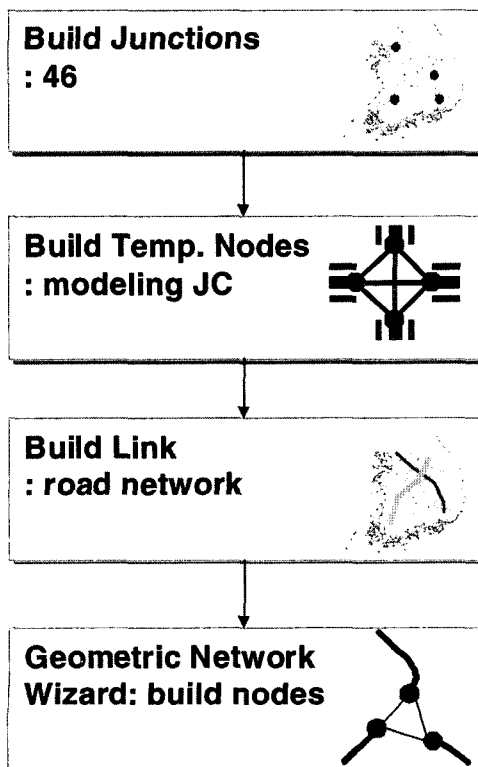
우리나라에는 현재 공식적으로 공개된 GIS 도로망 파일이 없기 때문에 본 연구에서는 한국도로공사에서 제공하는 고속도로망 정보를 기초로 수작업을 통해 도로망도를 구축하였다. 앞서 2장에서 정의한 'Link'는 shp파일의 Polyline 형식으로, 'Junction'은 Point형식으로 각각 정의하였으며, 교량자료는 attribute table로 선언하였다. 구축순서는 그림 7과 같다.

한국도로공사에서 정의하고 있는 시종점 및 교차구간은 총 46개로서 각 지명 및 경위도 좌표는 표 7과 같다. 각 지역별 대표위치자료를 경위도 좌표계를 기반으로 정의하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 대한민국전도 shp파일의 프로젝트도 경위도좌표계로 변경하였으며, 보다 정확한 위치 입력을 위해 각 지역 대표값을 절대좌표로 입력하였다. 지명에 대응하는 'Junction' 정보를 구축한 후 각 'Junction'을 확대하여 교차정보 구현을 위한 보조점을 2.3절의 기법대로 생성하였다. 이 때 보조점은 이전에 작성한 'Junction'과는 다른 Feature Class를 사용하여 정의하였다.

'Link' 정보는 보조점을 기준으로 작성한다. 앞서 2.2절에 설

〈표 7〉 구축대상이 되는 Junction 이름 및 경위도 좌표계

지명	경도		위도		지명	경도		위도	
	도	분	도	분		도	분	도	분
서울	126	54	37	34	장수	127	35	35	42
하남	127	12	37	32	합양	127	45	35	31
신갈	127	27	37	11	진주	128	7	35	9
이천	127	26	37	11	여주	127	39	37	15
평택	127	7	36	59	충주	127	50	36	58
안성	127	6	36	59	상주	128	12	36	25
당진	126	42	36	53	김천	128	5	36	7
서천	126	41	36	5	대구	128	37	35	52
군산	126	41	36	0	현풍	128	26	35	40
고창	126	40	35	26	마산	128	34	35	13
무안	126	29	35	0	냉점	129	0	35	8
목포	126	25	34	50	춘천	127	46	37	50
천안	127	8	36	48	홍천	127	51	37	40
공주	127	7	36	27	원주	127	57	37	23
논산	127	8	36	7	제천	128	8	37	7
익산	127	6	35	59	안동	128	42	36	33
광주	126	54	35	8	언양	129	8	35	35
순천	127	31	34	58	부산	129	4	35	10
광양	127	36	34	58	울산	129	19	35	32
진천	127	28	36	51	포항	129	21	36	0
청주	127	23	36	37	강릉	128	50	37	44
대전	127	27	36	21	동해	129	6	37	31
무주	127	39	35	58	영종도	126	54	37	34



〈그림 7〉 고속도로망도 구축 순서도

명한 방법에 따라 'Link'를 구성하며 이때 보조점을 Snapping point로 설정하여 작성하였다. 본 연구에서는 교차구간의 상세한 모델링 정보를 제외하고 거시적인 관점에서 연결되는 링크의 수를 총 56개로 구성하였으며, 'Link'작성 후 ArcGIS에서 제공하는 Geometric Network Wizard를 사용하여 연산이 가능한 네트워크를 생성하였다. 이때 가중치 요소를 추가로 정의하였으며 이를 통해 지진피해평가 시 도로의 성능을 평가할 수 있도록 하였다.

4.3 관측소 및 교량 구조물의 위치 정보 구축

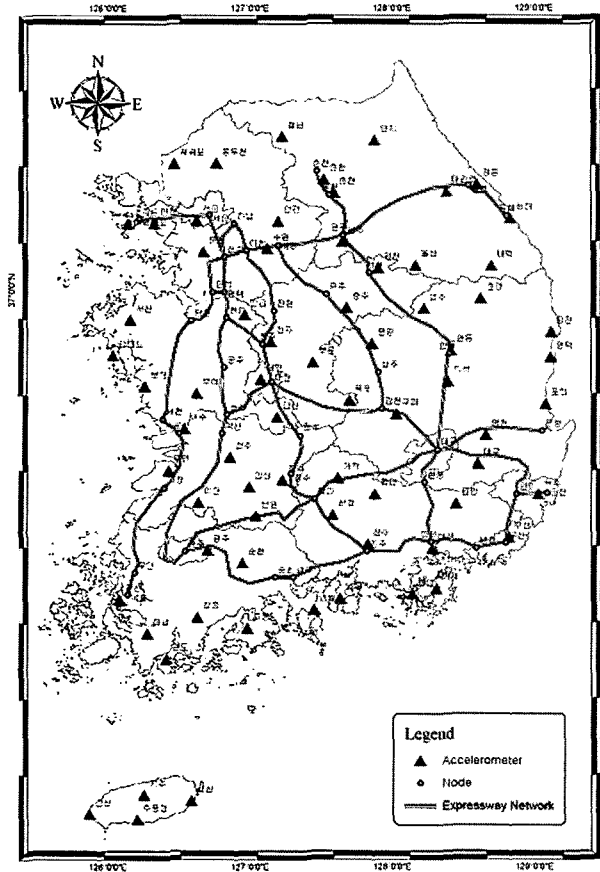
본 연구에서는 총 85개소에 대한 관측소의 위치정보를 데이터베이스로 구축하였으며, 이들 중 52개는 가속도계 전용 관측소이고, 나머지 33개는 종합관측소이다. 가속도 정보는 지진 시뮬레이션 시 최대지반가속도 값을 사용자로부터 입력 받으며 이 값을 통해 교량이 위치한 지역의 최대 지반가속도 값을 계산하게 된다. 그림 8은 구축 완료된 고속도로망 정보를 나타낸 것이다. 그림 8에서 삼각형으로 표시된 지역은 가속도계가 위치한 지역을 의미하며, 원형

으로 표시되는 지역은 고속도로의 'Junction' 위치를 의미한다. 그림 9는 구축된 교량정보를 나타낸다. 본 연구에서는 4.1절에서 설명된 일련의 해석과정을 거쳐 도출된 취약

도의 확률정보를 GIS상에 정의된 DB에 입력하였으며 이 때 지진피해평가 시 사용될 최대지반가속도 field를 추가하였다.

4.4 가상 지진에 의한 고속도로 교량 및 도로망 피해평가 시뮬레이션

4.1절부터 4.3절에 설명한 방법에 따라 구축한 시범 시스템을 이용하여 수도권 부근의 강진발생에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 수도권 지역 강진 발생을 위해 사용한 지진이력은 2003년 3월 30일 20시 10분에 인천 백령도에서 서남서쪽으로 약 80km 떨어진 해역에서 발생한 규모 5.0의 지진이다. 표 8은 당시 관측된 관측정보이다.⁽²³⁾ 본 연구에서는 관측된 자료를 바탕으로 강진을 생성하기 위하여 최고 PGA가 관측된 백령도관측소(BRA)의 값을 600cm/s^2 에 가깝도록 조절하였다. 본 연구에서는 수평면 위에 대한 취약도 정보만 산출하였으므로, 수평정보인 NS 방향과 EW 방향의 성분의 조합치를 사용하였다. 표 9는 모의지진피해평가에 사용한 관측소 위치에서의 최대지반가속도 값이다. 가상으로 가정된 최대지반가속도 값을 이용하여 식 (2)에서 구하고자 하는 미지계수 a, b, c 를 계산하였으며, 계산된 결과를 바탕으로 ArcGIS상에 구성된 나머지 관측소 위치에서의 최대지반가속도 값을 입력하였다. 그림 10은 ArcGIS상에 구축된 교량정보 및 식 (2)에서 계산된 각 경위도 좌표에 해당되는 최대지반가속도 값을 나타낸다.



〈그림 8〉 구축완료 된 고속도로망도

OBJECTID	Name	LA	LONG	LA_S	LONG_S	LA_C	LONG_C	LA_E	LONG_E	LA_W	LONG_W
10	금정교	126.75	36.55	6	5.37230	0.353307	0.322710	0.243119	0.224890	0.322020	0.207594
11	가평대	127.15	34.59	20	4.84321	0.351836	4.997420	0.296215	5.453623	0.383368	5.052833
12	간성교	127.84	36.16	30	5.61260	0.368939	6.070364	0.284323	6.526605	0.331720	6.129883
13	백령도	126.73	36.08	18	5.607802	0.357147	5.846463	0.281631	6.080053	0.405986	6.424658
14	구양교	126.88	36.42	40	5.466713	0.427309	6.046695	0.284767	6.391243	0.347642	6.702008
15	금강교	126.88	36.26	40	4.856458	0.370724	4.915878	0.267072	5.328296	0.418332	5.620023
16	백령도	126.26	35.83	22	4.872345	0.345525	5.220645	0.309503	5.251833	0.399299	5.331008
17	질탄대	126.58	35.30	25	5.323204	0.364541	4.441252	0.310355	5.529396	0.320254	5.653004
18	김포교	126.35	35.87	40	4.871682	0.407840	5.000475	0.243062	5.366889	0.336210	5.267831
19	백령도	127.64	34.99	20	5.611490	0.345947	5.371790	0.249225	5.513597	0.320774	5.738204
20	지평대	126.63	36.03	17	4.828127	0.400793	5.260231	0.214729	5.602438	0.340703	6.054664
21	외포대	126.83	37.51	1	5.237708	0.358404	4.501621	0.296408	5.972491	0.330025	6.405291
22	백령도	127.25	35.30	32	5.169124	0.378860	5.193999	0.290190	5.497403	0.343807	6.082921
23	만안교	126.81	35.12	36	5.780645	0.377895	5.985160	0.325539	6.363180	0.377200	6.541311
24	금강대	127.09	35.14	13	4.870532	0.412910	6.073143	0.273020	5.289195	0.388021	5.451928
25	대정교	126.15	37.09	40	5.659979	0.373320	5.751185	0.266002	5.974164	0.370044	6.240352
26	대정교	126.76	38.27	8	5.291725	0.330320	5.749432	0.253118	5.783314	0.344763	5.919544
27	민중교	126.96	35.00	29	5.751162	0.359676	5.754034	0.281069	6.208083	0.369448	6.256571
28	민중교	127.74	35.19	38	5.396062	0.367082	5.424782	0.262151	5.610070	0.415331	5.682361
29	부안대	126.61	35.22	27	4.859188	0.377022	4.917228	0.299520	5.070796	0.336262	5.493391
30	시흥대	129.81	37.61	10	5.574473	0.362890	5.907493	0.250402	6.047941	0.413273	6.519332
31	두정대	129.84	35.18	28	5.022020	0.364522	5.205683	0.302269	5.448164	0.325469	5.568924
32	백령도	129.08	37.55	10	5.687102	0.410849	5.982655	0.311830	6.416327	0.367200	6.501665
33	화성교	127.84	37.34	41	5.633279	0.382905	5.720651	0.295919	6.178732	0.378740	6.684298
34	시흥교	126.34	35.73	23	4.825427	0.368143	4.697578	0.250210	5.458802	0.402044	5.768023
35	가평교	127.37	37.13	12	6.154063	0.346511	5.196121	0.305334	5.210951	0.350907	5.601626
36	가평교	127.52	38.14	36	5.717167	0.466508	6.203155	0.317409	6.650882	0.400749	7.050769
37	가평교	126.39	37.63	50	5.665040	0.368301	5.114168	0.339049	5.219218	0.368499	5.628414
38	진해교	126.71	36.27	8	5.748611	0.468688	5.842042	0.314790	6.021222	0.366346	6.513211
39	영광교	126.63	36.20	40	5.234042	0.363251	5.240396	0.375218	5.294155	0.339332	5.398938
40	황금대	127.04	37.19	12	5.502426	0.358107	5.676403	0.276760	6.069392	0.336732	6.431106
41	간성교	129.12	35.26	8	5.426881	0.418930	5.876079	0.307115	5.934493	0.379111	6.191716
42	간성교	129.12	35.26	28	5.136662	0.382765	5.524182	0.321122	5.854922	0.326626	6.884781
43	간성교	127.11	36.16	16	5.376255	0.342914	4.933687	0.319044	5.547893	0.419629	6.005282
44	간성교	127.03	38.97	43	5.697962	0.348416	5.502620	0.261573	5.977519	0.325210	6.071671
45	간성교	127.72	37.32	41	5.223104	0.408211	5.442351	0.244940	5.692939	0.350823	5.663711
46	적성교	126.34	36.11	36	5.139293	0.367117	5.986680	0.313805	6.012545	0.364911	6.195226
47	간성교	127.10	36.27	16	4.978181	0.389999	4.691383	0.292204	5.771771	0.381160	5.668141
48	간성교	126.20	36.22	19	5.129564	0.426620	5.829673	0.285320	6.022371	0.370268	6.070932
49	간성교	127.42	37.20	42	5.213628	0.363956	5.695370	0.265913	5.918727	0.372580	6.340100
50	간성교	127.00	35.85	17	5.633144	0.392346	5.620165	0.301789	5.953573	0.361565	5.997748
51	간성교	126.23	36.20	48	4.903056	0.380782	5.283035	0.286668	5.362883	0.352451	5.454871

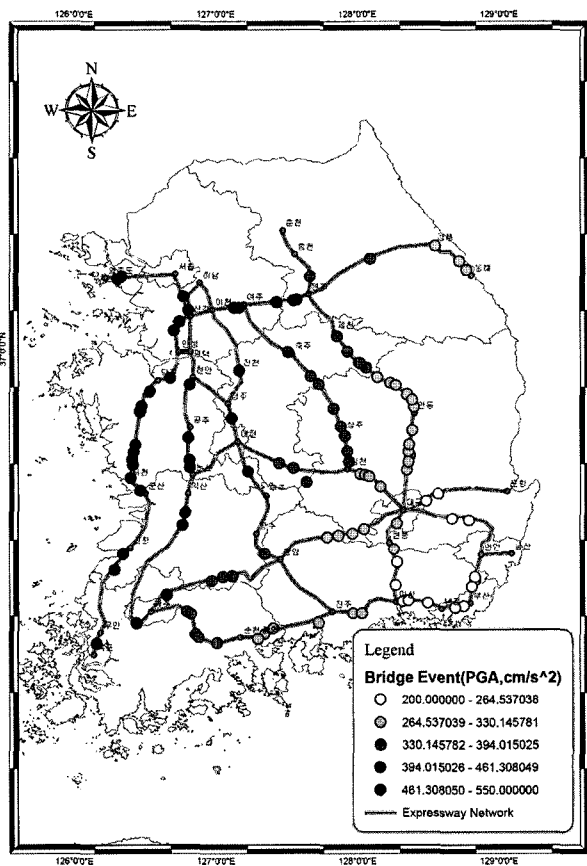
〈그림 9〉 구축된 교량의 취약도 곡선 정보

〈표 8〉 2003년 15호 지진(위도: 37.8°N, 경도:123.7°E) 이력

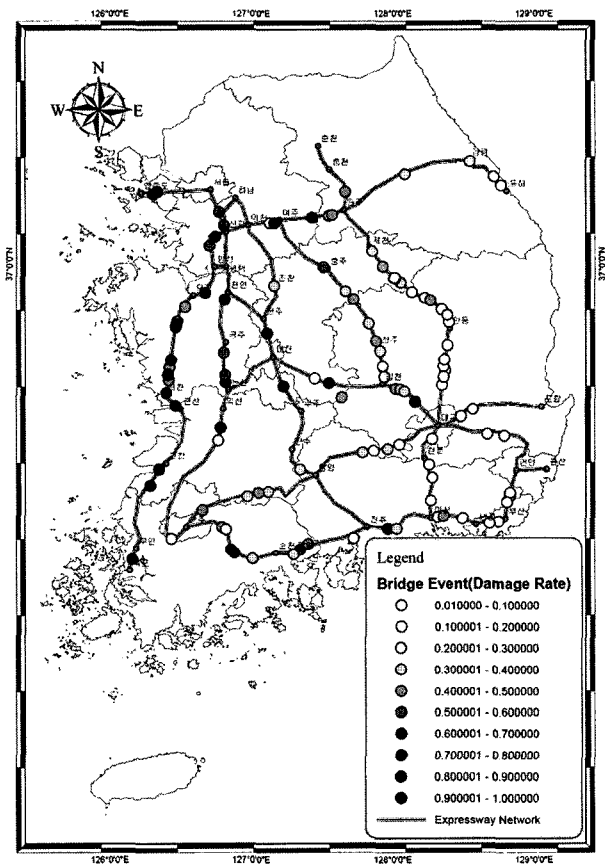
관측소	진앙거리(km)	최대지반가속도(cm/s^2)		
		수직	수평(NS)	수평(EW)
BRD	84	1.52	1.43	1.94
SES	268	1.84	2.02	1.79
SEO	285	0.90	1.21	0.61
CHC	361	0.55	0.64	0.42
CHO	378	1.05	1.90	2.49
HUK	380	0.41	0.64	0.75
KWJ	415	0.54	0.48	0.59
DGY	437	0.25	0.47	0.26
AND	464	0.45	1.01	0.61
DAG	515	0.30	0.38	0.37
ULJ	519	0.41	0.39	0.25
JJU	549	0.08	0.11	0.08
SGP	565	0.26	0.27	0.26

〈표 9〉 모의평가를 위한 증폭된 가상 강진(위도: 37.8°N, 경도:123.7°E) 이력

관측소	진앙거리(km)	최대수평가속도(cm/s ²)	관측소	진앙거리(km)	최대수평가속도(cm/s ²)
BRD	84	504.97	KWJ	415	160.38
SES	268	571.60	DGY	437	108.79
SEO	285	273.20	AND	464	242.37
CHC	361	158.41	DAG	515	112.59
CHO	378	659.25	ULJ	519	95.83
HUK	380	207.66	JJU	549	29.30
MOP	410	212.91	SGP	565	79.80



〈그림 10〉 교량 위치별 최대지반가속도 분포도 산정 결과

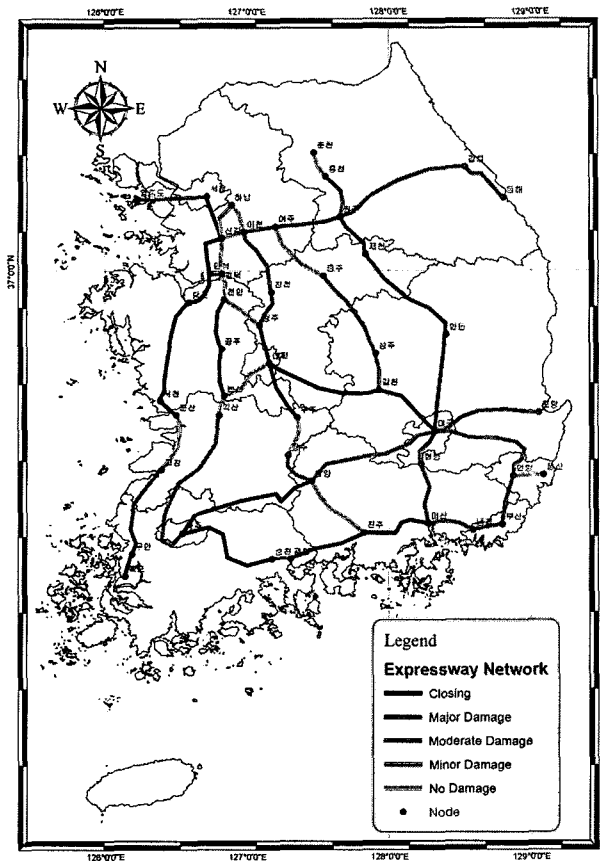


〈그림 11〉 교량별 손상을 산정 결과

4.5 시범 시스템을 이용한 시뮬레이션 결과 검토

본 연구에서 구축한 시스템을 이용하여 개별교량의 손상률을 산정하게 되는 두 번째 단계에 대한 결과는 그림 11과 같다. 교량의 손상률은 3.3절에서 제안한 식 (3)을 이용하여 계산된 값으로 표시하였으며, 0.0은 no damage를 1.0은 collapse를 의미한다. 그림 10의 결과를 통해 최대지반가속도가 크게 작용된 서해안고속도로에 위치한 교량들의 손상이 대체로 높게 나타났으며, 일부 내륙에 위치한 교량의 경우에도 가해진 최대지반가속도에 비하여 비교적 큰 손상을 나타내었다. 그림 12는 그림 11과 같이 산정된 교량의 손상등급을 바탕으로 도로망의 기능성을 도시한 것이다. 시

뮬레이션을 수행한 결과 진앙지가 서해 백령도 부근임을 고려할 때 대전-김천 구간과 진주-마산 구간에 위치한 일부 교량의 경우 가해진 최대지반가속도 값에 비하여 비교적 손상이 크게 나타났으며, 이에 따라 해당 도로의 피해 정도도 주위의 도로보다 크게 산정되었다. 본 연구에서는 단순히 교각단면의 설계정보만으로 해당 교량의 취약도를 평가하였다. 따라서 대전-김천 구간과 진주-마산 구간에 위치한 일부 교량의 경우 교각단면 자체에 대한 내진성능이 타 교량에 비하여 떨어지는 것으로 볼 수 있으며, 이들 교량에 면진 또는 제진장치가 설치되어 있는 경우 이에 대한 지속적인 성능확인이 정기적인 안전점검 시 수반되어야 할 것으로 판



〈그림 12〉 도로망의 피해평가 결과

단된다.

본 연구에서 구축한 시범 시스템을 이용하여 수행된 시뮬레이션 결과는 곧바로 실무에 적용하기에는 많은 제약사항이 따르는 것이 사실이다. 이는 본 시범 시스템에서 교량의 취약부위를 교각으로만 가정했으며, 전체 교량을 대상으로 하는 것이 아닌 선택된 100여개의 교각만을 대상으로 하였고, 교량의 피해를 예측하는데 가장 중요한 요소인 교량위치에서 최대지반가속도 값을 산정하는데 있어서도 상세한 지반운동특성을 고려하지 않았기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 현재까지 우리나라에 구현되어있지 않은 도로망을 대상으로 한 지진피해평가체계 구축을 위한 세부방법을 제시하였으며, 시범 시스템 구축 및 시뮬레이션을 통해 본 연구의 결과가 추후 우리나라 도로망의 지진평가체계의 구축에 활용이 가능함을 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 지진발생 후 도로교의 피해를 신속히 예측하고 이를 기반으로 도로망의 기능을 평가할 수 있는 지진피해평가체계 구축을 위한 데이터 구조를 정의하고 현재 우리나라 실정에 맞춘 데이터베이스 구축 방안을 제시하였다.

다수의 도로교에 대한 지진피해 정도를 신속히 예측하기 위해 지진 취약도 곡선 정보를 이용하였으며, 본 연구에서는 취약도 곡선이 표준정규분포식을 따르는 것으로 가정하여 표준편차와 중앙값을 주요 데이터항목으로 선택하였다. 제시한 데이터 구조를 이용하여 우리나라 고속도로망과 고속도로에 위치한 110개 교량의 데이터베이스를 구축하였으며, 수도권 부근에 최대지반가속도가 600cm/s²인 가상의 지진을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구를 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제시한 데이터 구조와 데이터베이스의 구축 방법론을 이용하여 지진피해 사례가 부족한 우리나라의 도로교에 대한 지진피해평가체계를 효과적으로 구축할 수 있음을 검증하였다.
- (2) 본 연구에서 개발한 시범 시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 대전-김천 구간과 진주-마산 구간에 위치한 일부 교량의 경우 교각자체에 대한 내진성능이 타 교량에 비하여 떨어지는 것으로 나타났으며, 이들 교량에 면진 또는 제진장치가 설치된 경우 정기적인 성능 확인이 필요한 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 개발한 시범 시스템은 교량에 작용되는 최대지반가속도 값의 산정에 간략한 보간식을 사용하였으나 최근 구축된 지반정보통합DB시스템과 국가지진정보시스템(NEIS)과 연계한다면 보다 신속하고 정확한 최대지반가속도 값을 산정할 수 있는 정보체계구축이 가능할 것이다.
- (4) 교량의 취약도 곡선 정보는 이를 산정하는데 활용하는 설계정보에 따라 그 정확성이 달라질 수 있으므로 유지관리에 따른 최신의 구조물 설계정보를 활용할 수 있는 교량설계정보체계의 지원이 필수적이다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 KEERC(R11-1997-045-13005-0)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다. 또한 고속도로망 및 교량 데이터베이스를 구축하는데 도움을 주신 한국도로공사 도로교통기술원에도 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Werner, S.D., Jernigan, J., Taylor, C.E., and Hwang, H., "Seismic vulnerability assessment of highway systems,"

- NCEER Bulletin*, Vol. 9, No. 4, 1995, pp. 1-11.
2. Shinozuka, M., Moore, J., Gordon, P., Richardson, H.W., Chang, S., and Cho, S.-B., "An integrated model of highway networks and the spatial metropolitan economy: Toward a general model of how earthquake losses affect the economy," *NCEER Bulletin*, Vol. 12, No. 1, 1998, pp. 8-15.
 3. Hwang, H., Jernigan, J., and Lin, Y., "Evaluation of seismic damage to Memphis bridges and highway systems," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 5, No. 4, 2000, pp. 322-330.
 4. Karim, K. and Yamazaki, F., "Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 12, 2001, pp. 1839-1856.
 5. Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J., and Naganuma, T., "Statistical analysis of fragility curves," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, 2000, pp. 1224-1231.
 6. Shinozuka, M., Feng, M., Kim, H., and Kim, S., "Nonlinear static procedure for fragility curve development," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, 2000, pp. 1287-1295.
 7. 이진학, 윤진영, 윤정방, "지진취약도분석을 통한 교량의 지진 위험도 평가", 한국지진공학회논문집, 제8권, 2004, pp. 31-43.
 8. 김상훈, 김두기, 서형렬, 김종인, "내진보강된 콘크리트 교량의 손상도곡선", 한국구조물진단학회논문집, 제8권, 2004, pp. 203-210.
 9. FEMA, *Using HAZUS-MH for Risk Assessment: How-To Guide*, 2004.
 10. Werner, S.D., Lavoie, J.-P., Eguchi, R.T., Taylor, C.E., and Moore, J.E., "REDARS1: Demonstration Software for Seismic Risk Analysis of Highway Systems," *Research Progress and Accomplishments 2001-2003*, MCEER-03-SP01, Red Jacket Quadrangle, Buffalo, New York, 2003, pp. 17-34.
 11. NCSA, *MAEViz introduction & tutorial*, University of Illinois, 2004, <http://alg.ncsa.uiuc.edu>.
 12. Miyatake, H. and Nunomura, A., "General overviews and future perspectives of disaster information systems in Japan," *35th Joint Meeting Panel on Wind and Seismic Effects*, Public Works Research Institute (PWRI), 2003, <http://www.pwri.go.jp>.
 13. 국립방재연구소, "지진재해정보시스템 도입방안 연구", 보고서, 국립방재연구소, 서울, 2000, 109pp.
 14. 소방방재청, 지진재해대응 시범시스템 구축 제안요청서, 2005.
 15. 김상훈, 이진학, 김호경, "교량의 지진 취약도 해석 시 사용되는 성능 스펙트럼 기법의 평가", 한국지진공학회논문집, 제8권, 2004, pp. 67-76.
 16. 한국건설기술연구원, 지반정보통합DB 시스템, <http://www.geoinfo.or.kr>.
 17. Tamura, K., Nakao, Y., and Matsumoto, S., "New attenuation relation of peak ground motion and acceleration response spectrum," *10th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001.
 18. ESRI, *Getting to know ArcGIS desktop*, ESRI Press, 2003.
 19. Mattock, A.H., "Rotational capacity of reinforced concrete beams," *Journal of Structural Division*, Vol. 93, ST2, 1967, pp. 519-522.
 20. Charney, F.A., *NONLIN*, FEMA, 1996.
 21. Park, Y.J., Ang, A.H.-S., and Wen, Y.K., "Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 111, No. 4, 1985, pp. 740-757.
 22. Ghobarah, A., Aly, N.M., and EI-Attar, M., "Performance level criteria and evaluation," *Proceedings of the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the next Generation of Codes*, Balkema, Rotterdam, 1997, pp. 207-215.
 23. 기상청, 지진연보(2003년), 동진문화사, 2004.