지하 공동구 시설물의 지진취약도 분석

이 득 복¹ · 이 창 수¹ · 신 대 섭^{1*}

¹서울시립대학교 토목공학과

Seismic Fragility of Underground Utility Tunnels

Deuk-Bok Lee¹, Chang-Soo Lee¹ and Dea-Sub Shin^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Univ. of Seoul, Seoul, 02504, Korea

Abstract

Damage of infrastructures by an earthquake causes the secondary damage through the world at large more than the damage of the structures themselves. Among them, underground utility tunnel structures comes under the special life line: communication, gas, electricity and etc. and it has a need to evaluate its fragility to an earthquake exactly. Therefore, the destruction ability according to peak ground acceleration of earthquakes for the underground utility tunnels is evaluated in this paper. As an input ground motion for evaluating seismic fragilities, real earthquakes and artificial seismic waves which could be generated in the Korean peninsula are used. And as a seismic analysis method, response displacement method and time history analyzing method are used. An limit state which determines whether destruction is based on the bending moment and shear deformation. A method used to deduct seismic fragility curve is method of maximum likelihood and the distribution function is assumed to the log normal distribution. It could evaluate the damage of underground utility tunnels to an earthquake and could be applied as basic data for seismic design of underground utility tunnel structures.

Keywords : seismic fragility, underground utility tunnels, real earthquakes

1. 서 론

한반도는 환태평양지진대에 근접해 있고, 예전 역사기록에 강진이 내습한 적이 있어 지진재해에 대해 안전하다고 할 수 없다. 또한, 중국 당산 지진과 스한성 지진과 같은 대륙판 내부 지진의 경우에서 알 수 있듯이 비교적 안전하다고 생각되었던 대륙판 내부에서도 대규모 지진이 발생하므로 그에 대한 대비가 필요하다. 국내에서는 1970년대부터 지진계 등의 장비를 이용한 지진계측이 이루어 졌으며, 국내에서 발생한 규모 4.0이상의 지진발생 및 유감지진의 발생이 증가추세에 있다. 규모가 작은 지진이 자주 발생하는 것은 규모가 큰 지진의 에너지 축적 과정의 현상으로도 분석될 수 있어 강진에 대한 대비가 필요하다.

지진재해는 일반적으로 피해규모가 크고 피해지역이 광범위하며, 예측 불가능한 특성이 있다. 특히 우리나라와 같이 도시화

산업화가 급속히 진행되어 인구의 약 80%가 도시에 거주 (Statistics Korea, 2010)하는 국내 상황에서의 지진재해 위험도는 더욱 증가할 것이며, 특히 거대도시일수록 지진 발생에 따른 재해위험은 증대될 것이다. 도시의 현대화 및 고도화에 따라 인명손실을 제외한 구조물의 손상 및 파괴에 의한 직접 손실보다는 가스, 전기, 통신망 등의 라이프라인을 포함한 상수도, 도로 등의 도시기반 네트워크 시설물 파괴에 의한 1차 및 2차 피해가 증가하고 있다. 특히 최근 일본, 중국 등 주변 국가에서의 대규모 지진발생시 다양한 라이프라인 시설 등 도시기반 네트워크 시설의 피해로 2차 재해 발생의 경우를 고려할 때, 도시기반 네트워크 시설물의 피해 예측 기술개발을 통한 대규모 지진재해에 대한 피해저감기술 확보가 필요하며, 이를 위해 보다 정확한 지진취약도(seismic fragility) 분석 기술의 개발이 중요하다. 이러한 평가기술의 개발은 라이프 라인 시설물의 위험도를 추정하여 한정된 자본과 인력으로

* Corresponding author:

Tel: +82-10-3170-9218; E-mail: s9218@hanmail.net

Received July 13 2016; Revised July 17 2016;

Accepted July 18 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지진재해의 대한 체계적이고 효율적인 예방투자 및 피해 복구를 가능하게 한다.

미국과 일본, 대만 등과 같이 지진재해가 빈번한 국가에서는 재해추정 및 대응체계의 대한 수많은 연구가 진행되고 있고 이를 바탕으로 실제 시스템으로 적용되어 운용되고 있다 (Faccioli *et al.*, 1999; Hwang *et al.*, 1998; Hus *et al.*, 2008). 하지만 국가별, 시설유형별 설계기준 및 건설문화가 상이하기 때문에 우리나라에 적합한 피해 추정 요소기술을 국산화할 필요성이 있다. 지진취약도 시설물의 종류 및 특징에 따라 달라질 수 있으므로, 우리나라에 적합한 지진취약도 개발이 필요하다. 취약도 분석의 목적은 구조물의 지진응답이 내력을 초과하여 파괴 혹은 손상에 이르게 되는 지진가속도를 확률적으로 평가하는데 있으며, 취약도 해석을 수행함으로써 외부하중에 대한 시설물의 취약도 곡선(fragility curve)을 구성할 수 있다. 지진취약도 곡선을 구성하기 위한 지진취약도 함수는 개발 방법부터 적용에 이르기까지 최근 20여 년간 지진공학 연구 분야의 주 관심대상이었고, 지금까지 많은 양의 지진취약도함수가 개발되었다. 하지만, 지진의 영향이 크지 않는 지하 구조물이고, 가스 및 수도 등 길이방향으로 긴 지하 시설물과 달리 단면방향의 크기가 큰 지하 공동구에 대한 연구는 미흡한 실정이다(Shinozuka *et al.*, 1979; Lee 2015). 지하 공동구는 그 형태에 상응하게 짧은 길이방향 거동보다는 상대적으로 큰 단면방향 거동에 의하여 구조물의 거동 및 설계가 이루어지기 때문에 별도의 지진취약도 연구가 필수적이다.

취약도 곡선은 그 개발 목적에 따라서 특정 구조물에 대한 복잡하지만 정확한 취약도함수와 전형적인 구조물에 대한 정밀하지는 않지만 계산속도가 빠르고 이해하기 쉬운 취약도 함수의 두 가지 방향으로 개발되었다. 전자는 주로 복잡한 구조해석이론을 이용하여 특정 구조물의 지진 취약도함수를 개발하고 이를 응용하여 구조물을 이해하는데 사용되었고, 후자는 광역에 걸쳐 퍼져있는 비슷한 구조물의 지진에 의한 피해정도는 예측하는데 사용되어, 미국의 HAZUS-MH나 대만의 HAZ-Taiwan과 같은 재난피해예측프로그램의 모듈로서 사용되고 있다.

지진 취약도 해석은 하중과 구조물의 속성과 관계를 확률론적인 접근을 통해서 접근하는 것으로 다양한 방법으로 해석을 수행할 수 있다. 국내 축적된 데이터를 통한 경험적 방법은 관측이래 아직 통계적 가치를 가질만한 지진의 경험이 없으며 실험을 통해서 접근 방법은 데이터 축적을 위한 다방면의 실험이 이루어져야 하므로 현실적인 한계가 있다. 따라서 결국 합리적인 취약도 해석은 해석적 방법을 통해 이루어진다. 아직 지진발생 시 피해분석 및 사후 조치에 관한 체계적인 대응

방안이 확립되지 않은 국내의 경우, 지진에 대한 확률론적 기법은 지진 피해 예측에 대한 정보를 제공하고, 이 정보는 사전 지진재해 대책과 지진 발생 후 재해 복구 대책에 효율적으로 대응하기 위한 역할을 수행할 수 있도록 하는데 반드시 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 지하공동구 시설물에 대해서 1연 2연 공동구를 선정하여 연구를 수행하였다. 내진설계기준에서 제시하고 있는 사실도 점성토에 대해서 진행하였으며, 해석 방법을 응답변위법과 시간이력방법을 고려하여 적용성을 확인 하였다. 결과적으로 지하 공동구의 안전성과 지진의 영향을 파악하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 지하 공동구 시설물 지진해석

2.1 지하 공동구 시설물 현황과 지진해석 Cases

지하 공동구의 지진취약도 분석을 위해서 지하 공동구에 대한 지진해석과 관련 데이터 수집이 필요하다. 다양한 형태와 크기의 지하 공동구 시설물에 대한 대표 시설물을 선정하고 이에 대한 확률론적 지진해석을 수행하였다. 지하 공동구는 대표적인 도시기반 네트워크 시설물의 하나로서, 주요 대도시 지역의 데이터를 수집하고자 하였다. 서울은 대도시로 구분할 수 있고, 데이터를 구하는데 용이하기 때문에 대표 대도시로 선정하고 자료를 수집하였다.

서울 지역의 공동구는 가락공동구, 개포공동구, 상계공동구, 상암공동구, 여의도공동구, 목동공동구로 나뉜다. 서울시의 지하 공동구 관리 현황을 바탕으로 지하 공동구의 형식별로 정리해 보니 2연 공동구가 18.88Km로 가장 많이 설치되어 있고, 그 다음으로 1연이 8.399Km, 4연이 4.088Km, 3연이 1.47Km 순서로 설치되어 있다. 비율로는 1연 공동구가 25.58%, 2연 57.50%, 3연 4.48% 4연 12.45%로 나타났다. 1연과 2연 공동구가 서울시 지하 공동구중 80%를 넘는 것을 확인할 수 있다. 그래서 80%이상을 차지하는 1연과 2연 공동구형식을 대표 시설물로 선정하였다. 대표 시설물 형상은 Fig. 1과 같다.

또한, 서울 지역 공동구 현황을 살펴본 결과 공동구의 매설깊이는 4m, 6m, 7m, 9m의 4가지의 깊이로 매설되어 있음을 확인하였고, 이를 지진해석 case에 반영하였다. 마지막으로 1연, 2연 박스의 각 타입별 규격(가로 세로 크기 비율) 5가지를 선정하였다. 최종적으로 지진해석 case는 공동구 2가지 형식과 10개의 입력지진을 9개로 스케일링한 90개의 case, 공동구 매설 깊이 4가지, 규격 9가지로 해석 case는 총 6480가지가 된다. 입력지진에 대한 자세한 내용은 다음 절에

기술한다.

각 지진해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였고, 지하 공동구의 단면내 거동을 구현하기 위한

Fig. 1 Representative underground utility tunnels for 1 box and 2 box types

Fig. 2 Analysis models for the representative underground utility tunnels

2차원 보요소를 사용하여 구조해석을 수행하였다. 모델링은 단위 길이당 단면에 대하여 수행하였으며, 슬래브와 지반이 접하는 부분은 비선형 연결(nonlinear link)요소로 모델링하였다. 지반반력 스프링의 특성이 압축에만 저항하고 인장에는 저항하지 못하기 때문에 이를 해석에 반영하기 위하여 압축에만 저항하는 압축력전달요소를 이용하여 모형화 하였다. Fig. 2는 이와 같은 특성을 반영하여 모델링한 결과이다.

2.2 입력지진

지진해석을 위한 입력지진은 총 10종류를 사용하였다. 크게 해외에서 큰 피해를 준 실측지진 6가지와 한반도 실정을 고려한 인공지진 4가지를 선택하였다. 실측지진은 Pacific Earthquake Engineering Research Center에서 자료를 습득하였다. 6개의 실측지진과 한반도 실정을 고려한 인공지진에 대한 진동수 대역 가속도 스펙트럼은 Fig. 3과 같다.

지진취약도 곡선을 작성하기 위해서는 다양한 대역대의 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)에 따른 지진해석 결과가 필요하며, 실제 지진취약도 곡선에서 나타나는 지진에 대한 변수(지진취약도 곡선의 x축)는 PGA이다. 따라서, PGA 값을 스케일링하여 다양한 지진해석을 수행하였다. 각 지진을 0.05g, 0.11g, 0.154g, 0.2g, 0.3g, 0.5g, 1g, 1.5g, 2g로 스케일링하여 지진해석을 수행한다. 9개의 PGA값은 기존 일반구조물 설계지진 가속도 0.05g, 0.11g, 0.154g, 원전 구조물의 설계 지진 가속도 0.2g와 0.3g 등 설계 지진 가속도 값을 참고하였다. 나머지 값들은 원활한 지진 취약도 곡선을 작성하기 위한 PGA값들을 산정하였다.

각각의 입력지진들은 PGA값으로 스케일링되기 때문에 최종 입력지진의 PGA는 9개의 PGA로 동일화된다. 따라서 각각의 입력지진의 차이는 다양한 진동수 대역대의 성분값에 의하여 결정된다. Fig. 3을 참고했을때 해외 실측 입력

Fig. 3 Spectral acceleration spectrum of 6 real earthquakes and 1 artificial earthquake

지진들은 1~10Hz 대역의 값들이 크며, 한반도 실정을 고려한 인공지진은 5~20Hz 대역의 성분이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이는 입력지진의 진동수 대역 성분에 따라 시설물의 지진취약도에 많은 영향을 끼칠 수 있는 것을 예측할 수 있다.

지진취약도 분석을 위한 입력지진은 위에서 기술한 바와 같이 실측지진 6가지를 사용하기도 하고, 지역 특성을 반영한 인공지진이 작성되어 사용되기도 한다. 한국의 경우, 실제 강진으로 분류할 수 있는 실제 기록지진이 없어서 외국의 기록지진이 사용되어 왔다. 하지만, 입력지진의 진동수 대역에 많은 영향을 받는 지진취약도 분석에서 한반도의 지질 특성을 고려한 입력지진의 필요성은 필수적이라 말할 수 있다. 이를 위한 방법으로 국내의 설계응답스펙트럼을 포괄하는 지진파를 사용하는 방법이 고려하였다. 하지만, 국내 설계응답스펙트럼 조차 해외의 설계응답스펙트럼을 바탕으로 수정된 작성한 것이어서, 한반도 지질 특성과는 동떨어져 있다는 연구도 있다. Park 등(2009)은 한반도 지질 특성을 반영한 설계응답스펙트럼을 제시했는데, 이 과정에서 기반암 및 암반 모두 기준의 등재해스펙트럼(UHRS, uniform hazard response spectrum)을 도출하였다. Park 등(2009)에서 제시한 지반별 ($S_B \sim S_E$) 등재해스펙트럼을 바탕으로 지반별 인공지진을 작성하였다. 한반도 실정을 고려한 인공지진 작성에 대한 자세한 내용은 Han 등(2016)의 자료를 참고하였다.

2.3 지진해석법

지하 공동구에 대한 지진해석을 크게 두 가지 방법을 사용하였다. 시간이력해석법과 응답변위법을 사용하였다. 시간이력해석법은 해석이 복잡하고 시간이 오래 걸리는 문제와 지반의 비선형 거동을 간단히 모사하는데 문제점이 있는 방법이다. 지반의 거동을 모사하는데 변위를 바탕으로 하는 방법이 응답변위법이다. 응답변위법은 주로 지하 구조물의 내진 설계를 위해 고안된 방법으로써, 동적인 지반하중을 정적으로 변환하여 지진해석을 수행하는 방법이다. 지반운동으로 발생한 지반변위로부터 시설물의 응력 및 변형률을 구하는 것이 응답변위법의 특징이다. 주변지반은 탄성스프링으로 모델링하며 작용하는 정적하중은 표층지반의 상대변위에 의한 동토압과 구조물 전단 변형에 의해 발생하는 주면전단력 그리고 구조물 중량에 따른 관성력으로 이루어져 있다. 자세한 내용은 국토해양부 지하 공동구 내진설계기준(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)을 참조하였다. 이 두 가지 지진해석 방법을 사용한 지진취약도 곡선을 도출하여 상호 비교하였다.

3. 지진취약도

3.1 지진취약도 분석

지하 공동구에 대한 지진취약도를 평가하기 위하여 거동에 대한 한계상태를 정의해야 한다. 지하 공동구의 어느 정도의 손상이 지하 공동구의 성능을 유지할 수 있는지가 그 경계가 된다. 일반적인 내진설계 기준에서는 기능수행수준과 붕괴방지 수준으로 나누고 있다. 지하 공동구의 한계상태는 붕괴방지 수준이 이에 해당하며, 지하 공동구 각 단면의 설계강도가 소요강도보다 적을 경우 손상이 발생할 것이다. 본 연구에서는 구조물에 발생하는 최대하중을 이용하여 소요강도를 산정하였고, 각 단면의 설계강도는 전단강도(V)와 휨모멘트강도(M)를 구조계산서를 바탕으로 산정하였다. 즉, 지하 공동구의 한계상태는 아래 식과 같이 각 단면의 휨모멘트와 전단에 대한 식으로 하였다.

$$\begin{aligned} g_M(\cdot) &= M_d - M_u < 0 \\ g_V(\cdot) &= V_d - V_u < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $g(\cdot)$ = 한계상태, d = 설계강도(design strength) u = 하중에 의해 계산된 소요강도(demand strength)이다.

지진취약도는 지진하중에 대하여 대상시스템 및 시설물이 얼마나 지진이 취약한지를 나타낸 것이다. 시설물에 대해서는 지진에 대하여 구조적인 손상이 발생할 확률을 도출한 것이고 지진취약도 곡선을 도출하여 표시할 수 있다. 지진취약도 곡선은 x 축은 지진가속도가 되고 y 축은 시설물의 손상확률이 된다. 따라서 지진취약도 곡선을 구하기 위해서는 다양한 크기의 지진에 대해 손상에 도달할 확률을 조건부 확률로 수식화 할 수 있다. 조건부 확률은 다음과 같다.

$$P_d = P[g(\cdot) < 0 | S_a = s_a] \quad (2)$$

여기서, P_d 는 지반입력운동의 지진가속도 S_a 에 대하여 식 (1)에서 언급한 한계상태가 0보다 적을 확률은 의미한다. 다시 말하면, 최대지진가속도 S_{a1} 일 때, 구조물의 소요강도 u 가 설계강도 d 를 초과하여 손상이 발생할 확률을 나타낸다. 이는 모멘트와 전단에 대한 한계상태 모두에 해당하고, 먼저 손상에 도달하는 조건부 확률로 계산된다. 지진취약도 곡선 작성을 위하여 Shinozuka 등(2000)의 방법을 사용하였다. Shinozuka 등(2000)은 취약도 곡선을 대수정규분포의 누적 함수로 표현하였다.

3.2 지진취약도 결과

지진취약도 곡선의 함수는 대수정규분포의 누적함수로 나타내며, 이때의 공동구 형식별 중앙값과 로그표준편차값은 Table 1에 정리하였다.

Fig. 4와 5는 1연 박스의 지진취약도 곡선을 나타낸다. Fig. 4는 응답변위법을 사용한 경우의 곡선이고, Fig. 5는 시간이력해석법을 사용한 경우의 곡선이다. 응답변위법을 사용하였을 경우, 지반의 종류에 따라 큰 차이를 보이고 시간이력해석법을 사용하였을 경우는 상대적으로 그 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 응답변위법의 하중산정 과정에서 지반조건의 계수를 사용하여 하중을 산정하기 때문에 지반조건의 지배를 많이 받게 된다. 즉, 점성토처럼 지반이 더 무를 경우 응답변위법에서는 지반의 변위하중의 변화폭이 커 구조물에 미치는 영향이 더 큰 것을 의미한다. 반면에 시간이력해석법에서는 지반의 종류에 따라 지반 스프링의 강성에만 영향을 미치므로 지하 공동구 구조물의 거동에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 6은 2연 박스의 지진취약도 곡선을 나타낸다. 지반의 종류에 따른 변위를 최소화시켜 지하 공동구 시설물 형식에 따른 취약도 양상을 확인하기 위하여 시간이력해석법을 사용한 지진취약도 곡선을 도출하였다. Fig. 5와 비교하였을 때, 1연 박스의 해석에서는 보통 외곽 상단부 안쪽에서 손상이 발생하였는데, 2연 박스는 중앙에 격벽이 있고 각각의 박스의 상대적인 크기가 적어 더 큰 지진하중에서 손상이 발생하였다.

Fig. 7과 8은 입력지진에 따른 2연 지하 공동구의 지진취약도 결과이다. 한반도 실정을 고려한 지진의 경우보다 해외 실측지진을 받는 지하 공동구의 지진취약도가 더 보수적으로 나오는 것을 볼 수 있다. Fig. 4, 5의 1연 지하 공동구의 결과들은 해외 실측지진에 대한 것으로, 해외실측지진에 대한 2연 지하 공동구 결과와 유사하다. 하지만, 한반도 실정을

Table 1 Seismic fragility curve values

Analysis case		Median	Standard deviation
1 box type	the response displacement method(sandy soil)	2.673	0.440
	the response displacement method(cohesive soil)	1.733	0.463
	the time history analysis (sandy soil)	3.325	0.775
	the time history analysis (cohesive soil)	3.187	0.873
2box type	the time history analysis (sandy soil)	2.424	0.788
	the time history analysis (cohesive soil)	2.328	0.814

Fig. 4 Seismic fragility curve for 1 box type using the response displacement method

Fig. 5 Seismic fragility curve for 1 box type using the time history analysis

Fig. 6 Seismic fragility curve for 2 box type using the time history analysis

고려한 인공지진의 경우에는 그 차이가 확연히 큰 것을 알 수 있다. 이는 지하 공동구의 고유 진동수가 30Hz~80Hz에 해당하여, 하중으로 작용된 지진의 해당 대역 성분이 큰 지진에 대하여 취약한 것을 추정할 수 있다. 한반도 실정을 고려한 인공지진도 10Hz이상의 고진동수 대역 성분이 상대적

Fig. 7 Comparison between seismic fragility curves for 2 box type(sandy soil) under real earthquakes and UHRS-envoloped artificial earthquakes

Fig. 8 Comparison between seismic fragility curves for 2 box type(cohesive soil) under real earthquakes and UHRS-envoloped artificial earthquakes

으로 큰 편이기 때문에 이에 대한 영향으로 인한 결과로 판단되었다. 이는 지하 공동구가 놓인 얇은 지반의 특징(사질토 혹은 점성토)과 지하 공동구 형식(1연 혹은 2연)보다, 지진의 종류에 따라 지하 공동구의 지진취약도가 더 큰 영향을 받는 것을 의미한다. 지하 시설물의 지진취약도를 평가하는 경우, 입력지진의 고려가 무엇보다 중요하다는 것을 잘 나타내고 있다.

위의 모든 지진취약도 결과에서 지하 공동구의 내진설계 기준에서 적용하고 있는 최대지반가속도 0.154g에서는 손상 확률이 매우 낮아 지진에 대해서는 안전한 결과를 보였다. 하지만, 그 이상의 강진이 발생하였을 때, 이러한 결과를 바탕으로 지하 공동구의 피해 양상을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 지하 공동구에 대한 지진 취약도에 대한 연구

로써, 지진에 대한 지하 공동구의 안전성과 영향을 파악하는데 그 목적이 있다. 연구 대상 대표 시설물은 연장길이의 비율이 큰 서울시 지하 공동구로 선정하였으며, 지하 공동구 형식은 1연과 2연 공동구로 지정하여 연구를 수행하였다. 지반조건은 지하 공동구 설계기준에서 제시하고 있는 사질토, 점성토 지반에 대해 매설깊이별로 진행하였다. 해석방법은 응답변위법과 시간이력 방법을 모두 고려하여 그 적용 가능성을 확인하였고, 다양한 입력지진에 대하여 지진해석을 수행하였다. 이러한 조합들로 인하여 수천번의 지진해석을 수행하여 지하 공동구의 지진 취약도를 도출하였다.

결과적으로, 현 지하 공동구 내진설계에서 적용하고 있는 재현주기 1,000년 지진에서는 안전한 것으로 판단되었고, 그 이상의 지진이 발생하였을 경우는 입력지진의 종류에 따라 그 손상의 경우가 달라질 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구를 통하여, 그 동안 많은 연구가 진행된 관망 지하 시설물(가스, 수도, 상수도 등)과 다른 구조 형식을 따르는 지하 공동구의 지진 취약성에 대한 연구를 진행하였다. 이러한 결과를 바탕으로 지진시 지하 공동구 시설물의 피해 예측 및 대응 방안에 대한 수단으로 활용될 수 있으며, 지하 시설물에 대한 내진설계에도 활용될 수 있을 것이다. 단순히 지하 공동구는 지진에 대하여 비교적 안전하다는 결과보다는, 지하 시설물의 지진 취약도 연구를 바탕으로 정확한 재난 피해 예측과 그에 대한 과학적인 재난 대응책 마련으로 재난 피해를 최소화 하는데 활용될 수 있고 재난에 대비하는 일환으로 연구가 수행되었다.

References

- Faccioli, E., Pessina, V., Calvi, G.M., Borzi B. (1999) A Study on Damage Scenarios for Residential Buildings in Catania City, *J. Seismol.*, 3, pp.327~343.
- Han, S.R., Lee, H.D., Lee, C.S. (2016) Seismic Fragility of Underground Utility Tunnels Considering Probabilistic Site Response Analysis, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 16(3), pp.31~37.
- Hus, C.C., Lai, M.C., Sung, Y.C., Tsai, I.C., (2008) Rapid Seismic Damage Assessment System of Existing Bridges in Taiwan, *The Twenty-First KCCNN Symposium on Civil Engineering*, Singapore.
- Hwang, H., Huo, J. R. (1998) Probabilistic Seismic Damage Assessment of Highway Bridges, *6th US National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, WA.
- Lee, C. S. (2015) *Development of Seismic Fragilities for*

Urban Infrastructure Network, National Emergency Management Agency of Korea.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs
(2010) *Utility-Pipe Conduit design Standard*,
Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Park, D.H., Kwak, D.Y., Jeong, C.G. (2009)
Development of New Probabilistic Seismic Hazard
Analysis and Seismic Coefficients of Korea Part I :
Application and Verification of a Novel Probabilistic

Seismic Hazard Analysis Procedure, *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, 10(7), pp.103~109.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., Naganuma, T. (2000) Statistical Analysis of Fragility Curve,
ASCE J. Eng. Mech., 126(12), pp.1224~1231.

Shinozuka, M., Takada, S., Ishikawa, H. (1979)
Some Aspects of Seismic Risk Analysis of Under-
ground Lifeline Systems, *ASME J. Press. Vessel Tech.*, 101, pp.31~43.

요 지

지진시 사회 인프라시설물의 피해는 시설물 자체의 피해보다 사회 전반에 걸친 2차 피해를 야기한다. 그 중, 지하 공동구 구조물은 통신, 가스, 전기 등 사회의 라이프라인에 해당하여 지진에 대한 취약성을 정확히 평가하여야 할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 지하 공동구의 지진 발생 지반가속도에 따른 파괴가능성을 평가하였다. 평가를 위한 입력지반운동은 해외 실측 지진데이터와 한반도에서 발생가능한 인공지진파를 차용하였으며, 지진해석 방법은 응답변위법과 시간이력해석법을 사용하였다. 파괴여부를 판별하는 한계상태는 휨모멘트와 전단 파괴를 바탕으로 하였다. 취약도 함수 도출을 위한 방법은 최우도법이 사용되었으며, 그 분포함수는 대수정규분포로 가정하였다. 이는 지진시 지하 공동구 시설물의 피해 평가는 물론 지하 공동구 시설물의 내진설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 지하 공동구, 지진취약도, 실측지진, 인공지진