

국내 서울지역의 부지응답해석을 고려한 하수도관의 지진취약도

신대섭, 김후승*
서울시립대학교 토목공학과

Seismic Fragility of Sewage Pipes Considering Site Response in Korean, Seoul Site

Dea-Sub Shin, Hu-Seung Kim*

Department of Civil Engineering, University of Seoul

요약 지진 발생시 도시 고도화에 따른 라이프라인 시설물의 피해가 증가하고 있다. 피해 예측을 위해 피해예측기술을 통한 라이프라인 시설물의 피해저감기술 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 라이프라인 시설물중 하수도관의 피해예측 즉기술개발을 위한 일환으로서 지진취약도 평가를 통해 지진발생시 구조물의 취약 정도를 확률론적으로 평가하였다. 실제 도시지역 지반의 응답을 도출하기 위해서 서울시 지역 158개의 시추공데이터와 7개의 실측지진파를 통해 부지응답해석을 수행하였고, 총 29822번의 시간이력해석을 통해 지진취약도를 도출하였다. 그리고 내구연한이 지난 하수도관 평가를 위해 황산염침식에 의한 강도 감소 연구결과를 적용하여 평가하였다. 결과적으로 대표단면 중 관경이 가장 작은 관 300과 800의 파괴확률 차이가 약 2배정도 차이가 나는 것을 확인하였고, 관경의 크기가 지진취약도 함수에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 그리고 강도감소율이 커짐에 따라 지진하중에 대한 파괴확률이 최대 10배 이상 높아지는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 결과를 이용하여 하수도관의 피해 예측 및 대응방안에 대한 수단으로 활용될 수 있으며, 지하 시설물에 대한 내진 설계에도 반영될 수 있을 것이다.

Abstract The number of damaged lifeline structures have been increasing with urban acceleration under earthquakes. To predict the damage, damage mitigation technology of lifeline structures should be analyzed using damage prediction technology. Therefore, in this paper, the degree of the fragility of structures under an earthquake was evaluated stochastically through an evaluation of the seismic fragility. The aim was to develop damage prediction technology of sewage pipes among the lifeline facilities. The site response was performed using the data from 158 boreholes in Seoul and 7 real earthquake waves to determine the responses in real urban areas. The seismic fragility was deduced through a total of 29822 time history analysis. In addition, sewer pipes were evaluated and the persisting period was passed by applying the research results of strength reduction which is due to sulphate erosion. As a result, the difference in failure probability between 300 and 800 with the smaller diameter of the representative pipes was approximately double and the size of the pipes has a significant effect on the seismic fragility function. Moreover, the failure probability of a seismic load increases by up to 10 fold as the strength reduction rate increases. The results of this study can be used as a means of predicting the damage and countermeasures of sewer pipes and might be reflected in the seismic design of underground facilities.

Keywords : Lifeline Structures, Seismic Fragility, Site Responses, Sewer Pipes, Urban Area

1. 서론

우리나라는 환태평양지진대에 근접해 있고 역사기록

[1]에서 나타나듯이 강진이 발생한 기록이 있어 지진재
해에 안전을 보장할 수 없다. 대륙판 내부는 안전하다고
생각되어왔지만 중국 당산지진(1976)과 스환성지진

*Corresponding Author : Hu-Seung Kim(University of Seoul)

Tel: +82-43-217-6172 email: ssaint1004@naver.com

Received April 21, 2017

Revised May 29, 2017

Accepted July 7, 2017

Published July 31, 2017

(2008)을 보면 알 수 있듯이 판 내부에서도 강진이 발생함을 보여주기 때문에 국내에서도 강진에 대한 대비가 필요하다.

지진재해는 일반적으로 현대화, 고도화 되어있고 인구가 밀집되어있는 지역에 피해가 크며 피해의 정도와 규모를 예측하기 어렵다. 특히 우리나라와 같이 인구가 밀집되어있고 도시화가 집중되어있는 상황에서 지진에 대한 피해는 더 클 것으로 예상된다. 지진발생이 빈번한 일본, 중국 등은 도시의 고도화에 따른 인명손실을 제외하고 라이프 라인 시설물(상수도, 하수도, 가스관 등)의 파괴로 1차 적인 시설물의 파괴 뿐만 아니라 2차 피해(가스 누출, 폭발, 화재, 상수도 차단, 정전 등)가 증가하고 있다. 이를 위해 피해예측기술개발을 통한 라이프 라인 시설물의 피해저감기술 분석이 중요하다. 이러한 피해예측기술로는 지진취약도 분석이 있다. 지진취약도 분석은 시설물의 위험도에 대한 정량적인 피해를 추정하여 대응 및 복구를 가능하게 한다.

지진재해가 빈번하게 발생하는 국가에서는 각 나라에 맞는 시설유형별 지반의 특성별로 지진취약도[2][3][4]에 대한 연구가 진행되어왔다. 때문에 국내에 적합한 피해추정기술을 개발할 필요성이 있다.

국내 내진해석설계 기준은 기본적으로 미국의 1997 Uniform Building Code(1997-UBC)기준을 준용하고 있다. 현재 이용되고 있는 미국 기준은 기반암의 깊이가 국내보다 깊은 미국 서부해안지역의 지반에 적합하도록 작성된 기준으로 상부 30m 토층의 평균 전단파속도(V_{s30})를 이용하고 있다. 미국서부지역은 기반암이 30m이상으로 기반암까지의 지반을 고려할 수 없어 가장 큰 영향을 미치는 상부 30m의 지반을 고려하여 내진설계기준에 적용하고 있다. 그러나 국내 일반적인 지반의 경우 기반암의 깊이가 30m보다 깊지 않고 미국서부지역에 비해 토층 분포가 복잡하기 때문에 미국서부지역의 지반특성에 맞게 고려하는 것은 문제점이 있다고 판단된다. 부지의 응답을 정확히 모사하는 것은 정량적인 피해를 추정하고 대응 및 복구를 위하여 필수적으로 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 지진피해예측과 지진피해저감 판단기준 제시를 연구목표로 설정하였고 이를 위하여 국내 도시지역의 부지응답특성을 고려한 하수도 시설물의 지진취약도 분석을 연구목적으로 하였다. 그 결과가 지진에 대해 하수도시설물이 얼마나 취약한지 취약정도를 확률론적으로 평가하고자 한다.

2. 부지응답해석

2.1 부지응답해석

부지응답해석은 설계응답스펙트럼 작성, 액상화 피해예측을 위한 동적 응력-변형률 관계의 정립 및 지진지반 구조물의 작용하는 지진하중을 결정하기 위하여 수행된다.

지진 발생시 체적파는 진원으로부터 여러 방향으로 방사된다. 체적파는 지반 내에서 전파되는 도중 서로 다른 지층을 만나게 되면 그 경계면에서 반사 또는 굴절이 이루어 진다. 일반적으로 지층에서 파의 전파속도는 하부 층이 상부 층에 비하여 빠르므로 연직면으로부터 경사각을 가지며 전파되는 지진파는 지층 경계면을 지나면서 Snell의 법칙에 의해 전파경로의 굴절이 발생하여 점차 연직 방향의 전파경로를 가지게 된다.

부지응답해석은 기반암에 입력지진파를 입력하여 이로 인한 토층에서의 응답을 구하는 해석기법이다. 지진 발생시 지반이 비선형 거동을 하는 것은 이미 널리 알려져 있는 사실이며 지진에 의한 응답해석에서 비선형 거동을 고려하는 것은 지반응답 예측을 위하여 매우 중요하다. 이에 따라 등가선형해석 기법은 주파수 영역에서 비선형 거동을 고려하기 위하여 제안된 방법이며, 시간영역에서는 실제적인 비선형해석을 통하여 이를 모사하게 된다.

대표적인 1차원 등가선형 지반응답해석 프로그램으로는 SHAKE91[5]와 DEEPSOIL[6]이 있으며, 본 연구에서는 1차원 지반응답해석을 수행하기 위해 SHAKE91 프로그램을 사용하였다.

Table 1. Mean value of bedrock depth and V_{s30}

	S_B			S_C			S_D		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Depth(m)	-3.0	-14.5	-8.8	-10	-30	-17.78	-7.5	-30	-16.87
V_{s30} (m/s)	743.04	933.93	821.72	400.6	759.18	637.83	176.14	327.29	239.89

2.2 국내 도시지역의 부지응답해석

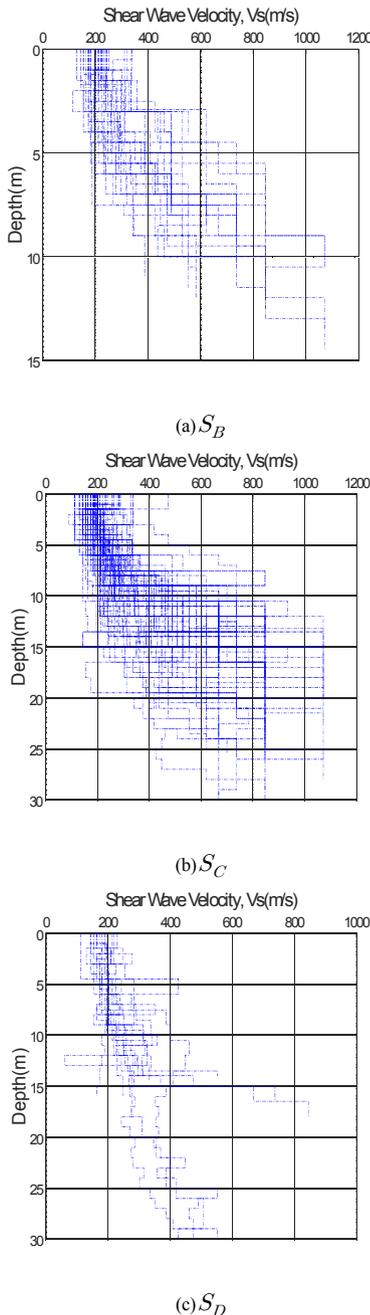


Fig. 1. Shear wave velocity profiles according to the site classification on this study area

부지응답해석을 위해서는 대상 지반의 전단파 주상도가 결정되어야 한다. 그래서 본 연구에서는 서울시 도시 지역을 대상으로 국내 일반적인 지반특성을 가지는 풍화토와 풍화암이 발달된 지역 및 퇴적도가 발달된 지역에서 자료를 획득하였다. 서울시 158개의 지반을 내진설계 기준에서 제시하는 분류방법을 이용하여 분류하였을 때 S_B 에 해당하는 지반이 37개, S_C 는 107개, S_D 는 14개로 분류되었다. 각 지반 종류별 깊이에 따른 전단파속도 주상도는 Fig. 1에 나타내었다. Table 1에서는 해석지반의 지반종류별 기반암 깊이 및 상부 토층 30m의 평균 전단파 속도를 정리하였다.

부지응답해석을 수행하기 위해서는 지반의 동적물성치인 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선이 필수적으로 필요하다. 동적물성치인 전단탄성계수 감소곡선은 해외문헌자료[7]와 실내실험에서 구한 데이터베이스를 토대로 작성된 전단탄성계수[8]를 이용하였다.

해석에 이용된 지진파는 다양한 주파수 성분을 가진 지진파를 선정하는데 기준을 두었으며 7개의 지진파에 대한 응답스펙트럼은 Fig. 2와 같다.

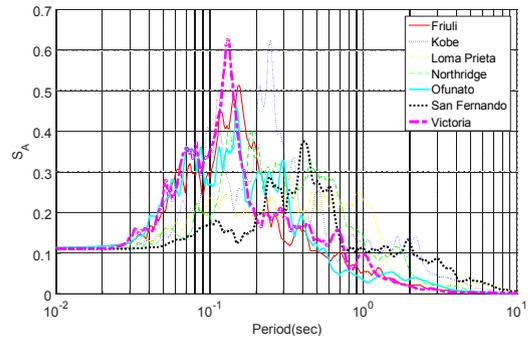


Fig. 2. Response spectra of 7 input motions

3. 지진해석

3.1 해석모델

하수도관에 대한 지진취약도 분석을 위해서 하수도관에 대한 데이터 수집이 필요하다. 대상지역이 서울시 지역이기 때문에 서울지역 하수도관에 대한 데이터를 수집하였다.

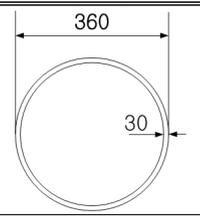
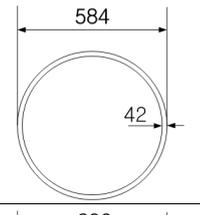
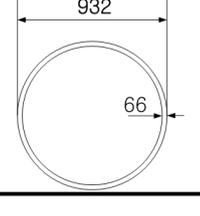
서울시의 경우 하수관로 처음 설치년도는 1973년이며 2017년까지 설치된 관종을 보면 70%로 흙관이 가장

많은 것으로 나타났다. 관의 형태는 사각형과 원형으로 나뉘며, 서울시에 설치된 원형관의 경우 최소 200mm에서 최대 2100mm이고 박스관의 경우 최소 300mm×250mm에서 최대 243mm×3500mm으로 설치되어 있는 것으로 파악되었다. 서울시 흙관의 관경별 설치현황을 보면, 300mm에서 500mm 크기의 관이 46.13%로 가장 많은 차지를 하였고 500mm에서 800mm 크기의 관이 39.35%로 그다음으로 많이 설치된 관으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 사용된 하수도관은 서울시 하수도관의 70%를 차지하는 흙관을 대표단면으로 하였다. 관경은 300mm에서 800mm의 관경이 85.47%로 대부분을 차지하고 있기 때문에 300mm, 500mm, 800mm로 정하였다.

하수관로는 현장 설치시 현장 조건에 맞게 설계가 되어 설치되기 때문에 일반적인 단면이 있지 않다. 그래서 흙관에 대한 설계기준(KS F 4403)에서 제시하고 있는 단면 형태를 따랐다(Table 2).

Table 2. Properties of the sewage pipe

Section (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)
	300	30
	500	42
	800	66

3.2 한계상태

지중에 매설되는 하수관거는 습기와 황화수소 등의 가스에 노출되어 있을 뿐만 아니라 토압, 상재하중, 차량

하중 등이 가해지는 상태로 있기 때문에 지상의 다른 시설물보다 노후의 진행이 빨라 관거 내부의 물리적 손상을 초래하게 된다. 이러한 하수관거의 내구연한은 20년으로 설계된다. 내구연한은 구조물의 사용하는데 있어서 원래의 목적을 수행할 수 있는 동안의 연수로 Rotam이 정의한 바 있고 Abu-Tair 등에 의하면 내구연한의 끝은 구조물의 파괴가 발생하거나 구조물을 유지하는데 중요한 보수가 끝날 때 종료된다고 하였다. 하지만 현재 서울시 하수관로 조사 결과 30년 이상의 관로가 50% 이상으로 조사 발표되면서 하수관로에 대한 강도 성능 저하를 고려한 평가가 필요하다(Table 3).

Table 3. Years of use of sewage pipes in Seoul, 2014(km)

Years of use	<10years	10~20years	20~30years	>30years
length of pipe	1,207.7	1,493.7	2,458.1	5,411.1
%	11.4%	14.1%	23.3%	51.2%

콘크리트 구조물이 황산염에 의한 침식으로 강도저하가 발생한다는 연구[9][10]가 진행되고 있지만 하수관거의 황산염 침식으로 인한 강도저하 매커니즘에 대한 연구는 부족한 실정이다. 하수관거의 황산염 침식으로 인한 강도저하를 확인하기 위해서는 내구성 설계에서 허용할 수 있는 성능저하 상태로 철근 부식이 시작되는 시점, 피복콘크리트에 부식균열이 발생하는 시점을 확인하여 구조적 성능을 확인할 필요가 있다. 하지만 하수관에 들어가서 확인 할 수 없는 환경 등 현장여건이 어려워 정량적으로 강도 저하를 고려하기 어렵다.

그래서 지진에 취약한 내구연한 20년이 지난 하수도관을 대상으로 기준에 보고된 황산염 침식에 의한 강도 감소를 고려하여 흙관의 강도 감소율을 50%와 70%로 가정하여 내진 해석을 수행하였다. 그리고 하수도 관로에 작용하는 응력과 휨모멘트를 확인하여 먼저 손상이 발생하는 부분을 파괴로 보고 해석을 수행하였다.

하수관로에 발생하는 최대하중을 이용하여 소요강도를 산정하였고, 각 단면의 설계강도는 전단강도(V)와 휨모멘트강도(M)를 구조계산서를 바탕으로 산정하였다. 즉, 하수관로의 한계상태는 아래 식과 같이 각 단면의 휨모멘트와 전단에 대한 식으로 하였다.

$$g_M(\cdot) = M_d - M_u < 0 \tag{1}$$

$$g_V(\cdot) = V_d - V_u < 0 \tag{2}$$

Table 4. Mean and standard deviation of seismic fragility curve

	C_m	ζ	P_{fla}			
			0.11g	0.154g	0.22g	
50%	300	1.034	0.758	0.00154	0.0054	0.0205
	500	0.487	0.572	0.00462	0.01968	0.0822
	800	0.464	0.581	0.00658	0.02588	0.0993
70%	300	0.483	0.746	0.02379	0.05873	0.1463
	500	0.323	0.52	0.01918	0.07017	0.2303
	800	0.279	0.537	0.04147	0.1239	0.3292

$$P_{fla}(a) = \text{Prob}[A \leq a] = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{C_m}\right)}{\zeta} \right] \quad (3)$$

여기서, a 는 지반입력운동의 최대지반 가속도, $\Phi[\cdot]$ 은 표준 정규분포함수의 누적확률 분포, C_m 과 ζ 은 손상상태에 따른 대수정규분포함수의 중앙값과 로그표준편차를 의미한다.

본 연구에서는 신뢰성 있는 지진취약도 함수 도출을 위하여 각 관경(300mm, 500mm, 800mm)에 대해 부지응답해석을 통한 지반 158개(S_B 37개, S_C 107개, S_D 14개), 7개의 해외실측지진파, 9개의 지진가속도로 스케일링하여 총 29862번의 해석수행을 통해 지진취약도를 도출하였다.

지진취약도 곡선의 중앙값과 로그표준편차는 Table 4 이고 Fig. 3은 50%강도감소에 의한 하수도관의 지진취약도 함수를 나타낸 것이고 Fig. 4는 70%강도감소에 의한 하수도관의 지진취약도 함수를 도출한 것이다. 중앙값은 파괴 확률 50%일 때의 지진가속도 값을 의미하며 로그 표준편차는 기울기를 의미하는데 값이 클수록 기울기가 작고 값이 작을수록 기울기가 크다. Table 4를 보면 관경의 크기가 커질수록 중앙값과 로그표준편차 값이 작아지는 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이는 관경이 큰 지진에 더 취약하다는 것을 의미한다. 50%의 강도감소를 적용한 하수도관의 지진취약도 곡선을 보면 설계시 1000년 재현주기 지진력 0.154g에 해당하는 파괴확률이 300관에서는 0.15%, 500관에서는 0.46%, 800관에서는 0.65%로 가장 큰 파괴확률을 보였다. 70%의 강도감소를 적용한 하수도관의 지진취약도 곡선을 보면 0.154g에서 300관은 5%의 파괴 확률을 보였고, 500관은 7%, 800관은 12%로 가장 높은 파괴 확률을 보였다.

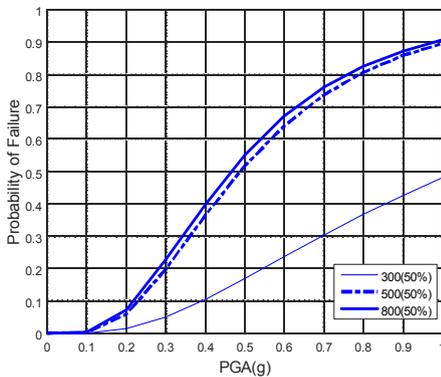


Fig. 3. Seismic fragility curve of sewage pipe(50%)

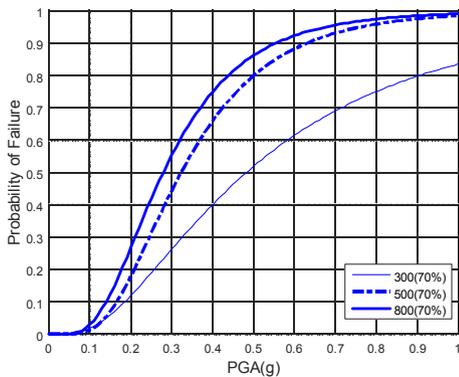


Fig. 4. Seismic fragility curve of sewage pipe(70%)

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

4. 지진취약도

지진취약도는 임의의 지반운동수준 a 가 구조물의 내진성능 A 보다 커질 확률(즉, 구조물의 조건부 파괴확률, $P_{fla}(a)$)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 하수도관의 대표단면 3개를 국내 도시지역의 지반을 고려하기 위하여 부지응답해석을 실시하였고, 시간이력해석을 바탕으로 지진취약도 곡선을 도출하였다. 그 결과 하수도관의 파괴 확률을 보다 정량적으로 알 수 있었다.

결과적으로 대표단면 중 관경이 가장 작은 300관과

800관과의 차이가 약 2배정도 차이가 났는데, 이는 관경의 크기가 지진취약도 함수에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

그리고 강도감소율이 커짐에 따라 지진하중에 대한 파괴확률이 최대 10배 이상 높아지는 것을 알 수 있다. 현재 서울도시지역에 있는 내구연한이 지난 하수도관에 대한 지진피해가 클 수 있다는 것을 보여준다.

본 연구는 하수도관의 피해 예측 및 대응방안에 대한 수단으로 활용될 수 있으며, 지하 시설물에 대한 내진설계에도 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] K. H. Lee, "Historical Earthquake Data of Korean", *Journal of the Korea Geophysical Society*, v.1, n.1, pp. 3-22, 1998.

[2] M. Ozaki, A. Okazaki, K. Tomomoto, T. Iba, R. Satoh, H. Nanba, H. seya, K. Moriyama, T. Ugata, "Improved Response Factor Methods for Seismic Fragility of Reactor Building", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 185, pp. 277 - 291, 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(98\)00237-4](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(98)00237-4)

[3] M. Dan, P. R. Ghiocel, G. G. Wilson, J. D. Thomas, "Seismic response and fragility valuation for an Eastern US NPP including soil - structure interaction effects", *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 62, pp. 197 - 214, 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)00020-9)

[4] K. Bhargava, A. K. Ghosh, M. K. Agrawal, R. Patnaik, S. Ramanujam, H. S. Kushwaha, "Evaluation of Seismic Fragility of Structures-a case study", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 212, pp. 253 - 272, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(01\)00491-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(01)00491-5)

[5] Idriss, I. M. Sun, J. I. "User's Manual for SHAKE91," Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil Engineering, University of California, Davis, 1992.

[6] D. Park, Y.M.A. Hashash, "Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis", *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 249-274, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1080/13632460409350489>

[7] Seed, H.B. Idriss, I.M. "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report no. EERC 70-10, 1970.

[8] D. S. Kim, Y. W. Choo, "Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea Using Resonant Column Tests", *Korean Geotechnical Society*, vol. 17 no. 5, pp. 115-128, 2001.

[9] S. T. Lee, "Evaluation on the Performance of Silica Fume Blended Cement Matrix Exposed to External Sulfate Attack" *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 11 no. 4, pp. 121-128, 2007.

[10] S. H. Bae, J. I. Park, K. M. Lee, "Influence of Mineral Admixtures on the Resistance to Sulfuric Acid and Sulfate Attack in Concrete" *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 22, no. 2, pp. 219-228, April, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.2.219>

신 대 섭(Dea-Sub Shin)

[정회원]



• 2011년 8월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 석·박 통합과정

<관심분야>

내진 및 지진, 토목구조

김 후 승(Hu-Seung Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 1월 ~ 2011년 2월 : 동명기술공단 구조부 근무
- 2011년 2월 ~ 2013년 1월 : 유니스이엔씨 설계부 근무
- 2012년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

내진 및 면진, 토목구조