Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 1 pp. 217-223, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.1.217
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

쇄석 띠기초와의 거리에 따른 주변지반의 가속도 변화

손수원, 손태익, 김수봉, 김진만*
부산대학교 사회환경시스템공학과

Acceleration Variation of Surrounding Ground according to distance from Strip-Type Crushed Stone Foundation

Su-Won Son, Tae-Ik Son, Soo-Bong Kim, Jin-Man Kim*
Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

요 약 국내외에서 점토층이나 준설토 등이 있는 연약지반을 개량하고, 그 지반위에 구조물을 건설하는 수요는 점차적으로 늘어나고 있다. 그리고 이러한 개발과 더불어 태풍, 산사태, 지진 등과 같은 자연재해의 빈도와 규모도 증가하고 있다. 이러한 자연재해로 인한 피해를 예방하기 위한 방법 중 하나가 지반개량공법이다. 본 연구에서는 쇄석을 띠기초 형식으로 설치하였을 때의 주변지반의 가속도 변화를 1-G 진동대 실험을 이용하여 분석하였다. 점토를 이용하여 지반을 조성하고 기초는 쇄석을 띠형식으로 설치하였다. 주기가 다른 입력지진파에 대해 응답가속도와 응답스펙트럼을 분석하였다. 쇄석 띠기초와의 인접거리에 따른 가속도 변화를 분석하여 지진시 쇄석 띠기초가 주변지반의 가속도 변화에 미치는 영향을 평가하였다. Hachinohe 지진파 결과에서는 쇄석띠기초와의 거리에 비해 가속도가 큰 감소는 없지만, 두가지 지진파에 대한 최대응답가속도가 쇄석띠기초와의 거리에 반비례하였다. 응답스펙트럼 분석결과, 장주기와 단주기 입력파에서의 감쇠되는 주기가 달랐으며, 이와 같은 응답스펙트럼 변화가 가속도의 최대가속도값에 영향을 준 것으로 판단된다. Hachinohe 지진파에서는 쇄석띠기초와 멀어질수록 0.08~0.5초 사이의 주기에서 감쇠가 컸으며, Northridge 입력파에서는 쇄석띠기초와 멀어질수록 0.2초 이내의 주기에서 감쇠가 컸다.

Abstract In this study, the acceleration changes of the surrounding ground when crushed stones were installed in a strip-type were analyzed using the 1-G shaking table test. The ground was constructed from clay, and the foundation was installed using crushed stone of strip-type form. The response acceleration and response spectrum for various input seismic motions were analyzed. The change in acceleration was examined according to the adjacent distance to the strip-type crushed stone foundation. In the Hachinohe seismic motion results, there was no significant decrease in acceleration, but the maximum response acceleration for the two seismic motions was inversely proportional to the distance from the crushed stone foundation. As a result of the response spectrum analysis, the attenuation period in the long period and the short period input wave were different from each other, and the change in response spectrum affected the maximum acceleration value.
As the distance from the crushed stone foundation was increased, the attenuation was larger in the period between 0.08 and 0.5 sec in the Hachinohe seismic motion, the attenuation was larger in the period of less than 0.2 seconds in the Northridge seismic motion

Keywords : Crushed stone, Strip-type, 1-G shaking table test, Response spectrum, acceleration

본 논문은 한국연구재단의 지원(과제번호 NRF-2017R1A2B4010201)을 받아 수행된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.
*Corresponding Author : Jin-Man Kim(Pusan National Univ.)
Tel: +82-51-510-2349 email: jmkim@pusan.ac.kr
Received October 1, 2018 Revised (1st November 7, 2018, 2nd November 13, 2018, 3rd November 20, 2018)
Accepted January 4, 2019 Published January 31, 2019

1. 서 론

국내외에서 점토층이나 준설토 등이 있는 연약지반을 개량하고, 그 지반위에 구조물을 건설하는 수요는 점차적으로 늘어나고 있다. 그리고 이러한 개발과 더불어 태풍, 산사태, 지진 등과 같은 자연재해의 빈도와 규모도 증가하고 있다. 이러한 자연재해로 인한 피해를 예방하기 위한 방법 중 하나가 지반개량공법이다. 지반개량공법은 지반을 다지거나 조밀화하여 지반의 밀도를 증가시키는 방법과 다른 재료를 추가하여 보강하는 방법으로 구분할 수 있다. 지반의 밀도를 증가시키는 공법은 선행하중(preloading), 수직배수(vertical drain), 동다짐(dynamic compaction), 그리고 바이브로 플로테이션(vibro floatation) 공법 등이 있다. 이러한 공법들은 지반의 전단강도, 투수성 등을 변화시켜서 지반의 안정성을 높이며, 세립토가 많이 포함되지 않은 조립토 지반에서 큰 개량효과가 있다. 하지만 세립토가 많이 포함되어 있는 모래지반 또는 점성토지반에서는 다짐공법이 적합하지 않으며, 선행하중과 수직배수공법 등은 재해로 인해 발생하는 지반의 전단변형이나 침하에 대해 효과적이지 않다. 그렇기 때문에 원지반의 허용한계를 넘는 전단응력과 전단변형에 대해 충분한 전단저항 보강을 하기 위해서는 다른 재료를 추가하는 지반개량공법을 사용해야 한다. 이러한 지반개량공법은 진동치환공법(Vibro Replacement), 모래다짐공법(sand compaction pile), 심층혼합처리공법(Deep cement mixing), 그리고 그라우팅공법(Grouting) 등이 있다. 이와 같은 공법들은 지반보다 강성이 큰 재료를 사용하여 지반의 전단저항과 침하에 순기능을 한다.

쇄석 재료에 대한 대형직접전단시험, 진동다짐시험 등의 실내시험을 수행하여 분석하였으며[1,2], 쇄석의 형상특성에 대해 분석한 바 있다[3]. 또한, 철도강화노반 재료로 사용되고 있는 쇄석 재료에 대해 실내 모형반복실험을 하여 동적하중에 대한 거동특성을 분석하였다[4]. 아울러 노반두께와 노상의 강성도가 노반의 침하량과 토압량에 어떤 영향을 주는지 분석하였다. 말뚝기초 중에서는 쇄석을 이용한 스톤칼럼공법을 사용하기도 하며, 이에 대한 연구는 예전부터 지금까지 많이 수행되고 있다. 원심모형실험을 이용하여 실트층의 액상화 방지효과에 대한 스톤칼럼 성능을 연구하였으며[5,6], 진동대 실험을 수행하여 스톤칼럼공법의 액상화에 대한 평가를 수행하였다[7]. 진동대 모형실험을 이용하여 포화된 실트층에 설치된 스톤칼럼공법의 내진성능을 분석하였다[8]. 1-G 진동대를 이용하여 쇄석말뚝으로 개량된 연약점토 지반의 지진응답 특성을 평가하여 쇄석말뚝으로 개량된 지반의 전단변형은 개량되지 않은 지반에 비해 감소되는 경향을 보인다고 하였으며[9], 지반과 스톤칼럼 간의 상호작용을 분석하기 위해 진동대 실험결과와 Baez의 가정을 기초로 한 1차원 수치모델을 비교하여 실험결과가 수치모델과 유사한 결과를 보이는 것을 확인하였다[10]. 최근에는 많은 문헌자료들을 분석하여 스톤칼럼을 모델링하는 기법에 대한 연구가 진행되었으며[11], 유한요소해석을 수행하여 쇄석말뚝기초의 지지력에 대한 분석을 수행하였다[12,13]. 이와 같이 현재 쇄석을 이용한 많은 연구가 계속 수행되고 있지만, 대부분 사질토층에 대해서만 많은 연구가 수행되고 있고, 띠기초 형식으로 된 쇄석지반에 대한 분석은 수행된 바가 없으며, 쇄석의 동적특성에 대한 연구도 부족할 실정이다. 본 논문에서는 충분한 강성을 가지면서 전단저항 능력이 있는 쇄석을 띠기초 형식으로 설치하여 이로 인한 내진성능변화를 평가하기 위해 진동대 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 1-G 진동대 모형실험 준비

국가 지진방재연구센터에서 보유하고 있는 진동대를 사용하여 모형지반의 지반응답실험을 수행하였다. 모형지반조성은 특수형태의 토조(Laminar shear box; 이하 LSB)를 사용하였고, 모형지반은 카올리나이트와 쇄석을 이용하여 조성하였다. 지진파는 장주기와 단주기에 대한 분석을 위해 Hachinohe(장주기)와 Northridge(단주기) 지진파를 사용하였다.

2.1 지반조성 및 기초설치

본 실험에서는 점토를 이용하여 연약지반을 조성하였다. 모형지반은 비배수 조건에서 동적거동을 한다는 가정에서 비배수 전단강도를 측정하였다(Table 1). Fig. 1(a)는 점토 지반 및 쇄석 기초를 조성하는 과정을 보여주고 있다. 토조에 방수재질의 멤브레인을 설치하고, 쇄석 띠기초층을 설치하기 위한 거푸집을 설치하였다. 그 후에 센서를 설치하면서 점토층과 쇄석층을 조성하였다.

Fig. 1 (b)는 지반조성을 완료한 모습이다.

Table 1. Material properties of the model ground

Parameter	Clay ground	Crushed stone
Undrained shear strength (kPa)	5	10
Unit weight (kN/m^3)	16	22

(a) clay and crushed stone foundation construction

(b) ground construction

Fig. 1. Ground and Foundation Installation Step

2.2 1-G 진동대 모형실험 준비

1-G 진동대 실험에는 폭과 길이가 5 m인 3자유도 시설인 진동대가 사용되었다. 0.1Hz에서부터 60Hz까지의 입력주파수를 적용할 수 있다. LSB는 한 층이 폭 1.2 m, 길이 2 m로 제작되었으며, 이번 실험에서는 0.9 m의 높이의 LSB가 사용되었다. LSB는 적층형식으로 구성되어 있기 때문에 층과 층 사이에 빈 공간들이 존재한다. 이에 모형지반의 유실을 방지하기 위해서 LSB 내부에 멤브레인을 설치하였다.

모형지반 내에 가속도계를 설치하여 가속도를 측정하였다. 가속도계 배치는 쇄석 띠 기초를 중심으로 근접거리에 따라 깊이별로 설치하였다(Fig. 2). 모형지반의 지반응답실험을 수행하기 위해 다양한 크기의 Hachinohe와 Northridge 지진파를 사용하였으며, 각 지진파의 시간이력과 응답스펙트럼은 Fig. 3과 같다. 본 논문에서는 0.3g의 가속도 수준을 가지는 입력지진파에 대해서 분석하였다. 입력파인 Hachinohe와 Northridge의 응답스펙트럼 결과이다. 입력파의 고유주기는 대략 각각 0.1~0.5초, 0.1~0.2초에 위치하는 것을 알 수 있다.

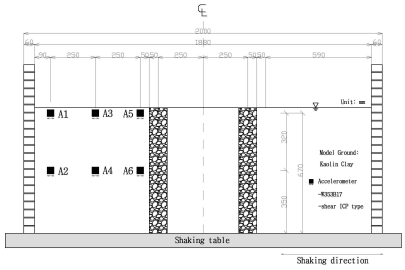
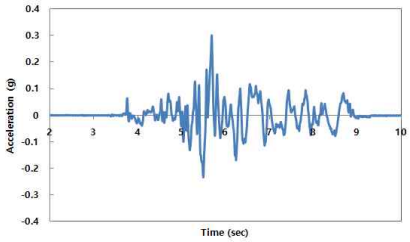
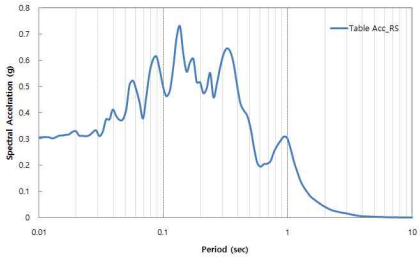


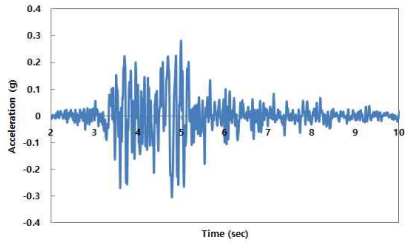
Fig. 2. Experiment setup



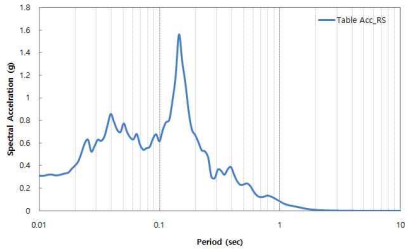
(a) Accelertaion time history (Hachinohe)



(b) Response spectrum (Hachinohe)

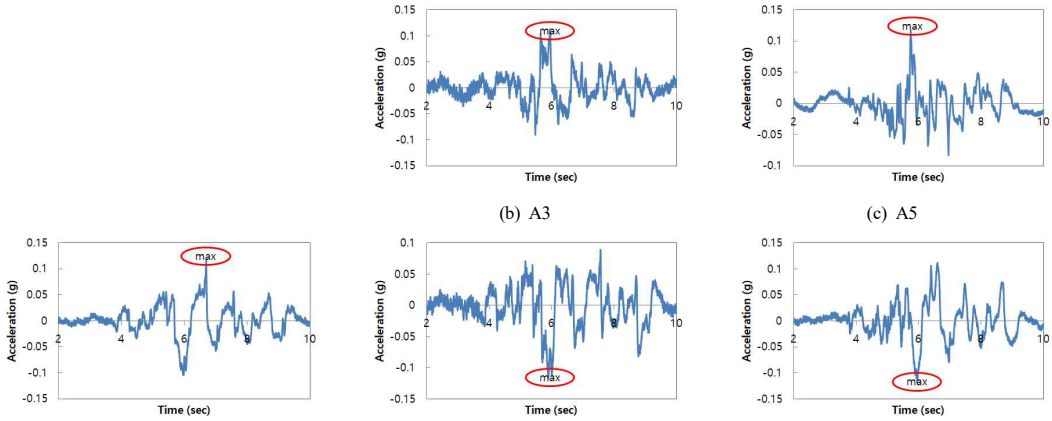


(c) Accelertaion time history (Northridge)



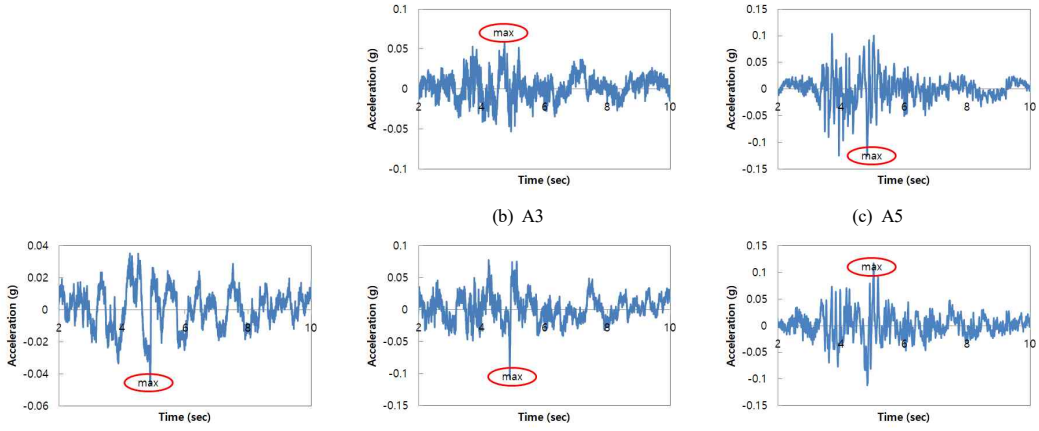
(d) Response spectrum (Northridge)

Fig. 3. Input motion



(a) A2 (b) A3 (c) A5 (d) A4 (e) A6

Fig. 4. Response acceleration at each location (Hachinohe)



(a) A2 (b) A3 (c) A5 (d) A4 (e) A6

Fig. 5. Response acceleration at each location (Northridge)

3. 실험결과 및 분석

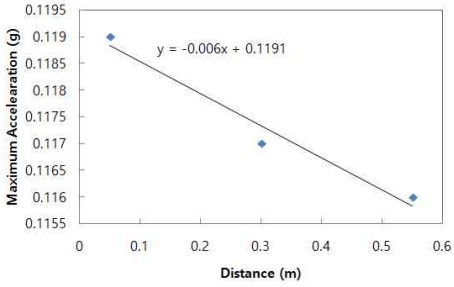
3.1 응답가속도 분석

응답가속도는 가속도계 A2,A3,A4,A5,A6를 비교하였다. A1은 실험과정에서 센서이상으로 인해 정상적인 계측값을 얻지 못하였다. Fig. 4는 Hachinohe 지진파에 대한 응답가속도이다. Fig. 5의 실험결과를 살펴보면, 모든 위치의 가속도가 입력가속도에 비해 감소되었다는 것을 알 수 있다. A2에서 A6까지의 최대응답가속도 값은 각각 0.116g, 0.113g, 0.117g, 0.117g, 그리고 0.119g 이다. 쇄석띠기초에서 거리가 멀어질수록 최대가속도가 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과 역시, Fig. 4를 보면 입력파가 점토지반을 지나 지표면으로 올라가면서 가속도 시간이력의 형상이 변하는 것을 알 수 있다. 특히 쇄석띠기초에 가장 가까운 Fig. 4 (c)와 (e)를 보면, Fig. 4 (b)와 (d)에 비해 가속도 시간이력 형상이 더 많이 변했다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 Northridge 지진파에 대한 응답가속도 결과이다. 실험결과, A2에서 A6까지의 최대응답가속도 값은 각각 0.047g, 0.058g, 0.108g, 0.126g, 그리고 0.117g 이다. 쇄석띠기초에서 거리가 멀어질수록 최대가속도가 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이는 쇄석의 강성이 점토지반에 영향을 주어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

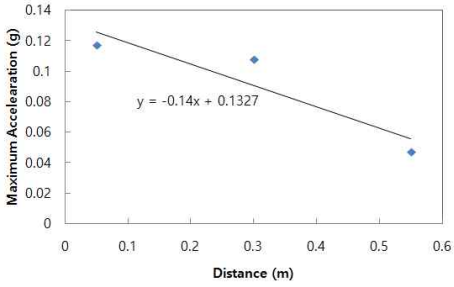
Fig. 5는 Fig. 4와는 달리, 입력파가 점토지반을 지나

지표면으로 올라가면서 가속도 시간이력의 형상이 큰 변화를 보이지 않았다. 이 결과로 미루어 볼 때, 단주기 영역의 지진파에서는 장주기 영역의 지진파와 달리 시간이력 형상변화에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 쇄석띠기 초와의 거리에 따른 최대응답가속도를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 6 (a)는 Hachinohe 지진파에 대한 결과이고, Fig. 6 (b)는 Northridge 지진파에 대한 결과이다. Hachinohe 지진파 결과에서는 쇄석띠기초와의 거리에 비해 가속도가 큰 감소는 없지만, 두가지 지진파에 대한 최대응답가속도가 쇄석띠기초와의 거리에 반비례하고 있다는 것을 알 수 있다. 쇄석띠기초까지의 거리와 최대응답가속도의 관계를 그래프로 나타내고 추세선을 작성하여 수식으로 나타내었다.



(a) Hachinohe

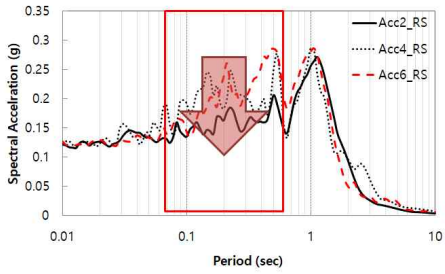


(b) Northridge

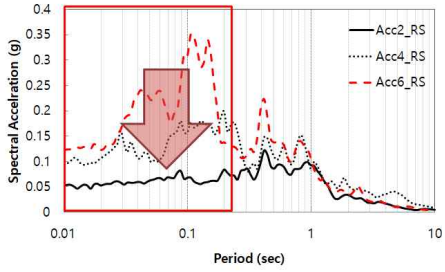
Fig. 6. Response acceleration according to distance from strip foundation

3.2 응답스펙트럼 분석

입력파와 응답가속도 결과에 대해 응답스펙트럼 분석을 수행하였다. 계측된 응답가속도의 응답스펙트럼은 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7 (a)의 응답스펙트럼에 따르면, 쇄석띠기초와 멀어질수록 0.08~0.5초 사이의 주기에서 감쇠가 크다는 것을 알 수 있으며, Fig. 7 (b)의 응답스펙트럼에 따르면, 쇄석띠기초와 멀어질수록 0.2초 이내의 주기에서 감쇠가 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 화살표 방향으로 감쇠가 이루어지는 것을 표시하였다. 지반-구조물 설계시에는 쇄석기초로 인한 지표면에서의 변화된 가속도 수준과 주기특성을 고려해야 된다.



(a) Hachinohe



(b) Northridge

Fig. 7. Response spectrum at each location

4. 요약 및 결론

쇄석 띠기초로 개량된 지반의 내진성능을 분석하기 위해 1-G 진동대 실험을 수행하였고, 연구내용은 다음과 같다.

1. 장주기 영역 및 단주기 영역 지진파에서, 쇄석띠기초에서 거리가 멀어질수록 최대가속도가 작았으며, 이는 쇄석의 강성이 점토지반에 영향을 주어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.
2. 장주기 영역의 지진파에서는 입력파가 점토지반을 지나 지표면으로 올라가면서 가속도 시간이력의 형상이 변하였으나, 단주기 영역의 지진파에서는 장주기 영역의 지진파와 달리 시간이력 형상변화에 큰 영향을 주지 않았다.
3. Hachinohe 지진파 결과에서는 쇄석띠기초와의 거리에 비해 가속도가 큰 감소는 없지만, 두가지 지

진파에 대한 최대응답가속도가 쇄석띠기초와의 거리에 반비례하였다.

4. Hachinohe 지진파에서는 쇄석띠기초와 멀어질수록 0.08~0.5초 사이의 주기에서 감쇠가 컸으며, Northridge 입력파에서는 쇄석띠기초와 멀어질수록 0.2초 이내의 주기에서 감쇠가 컸다.

References

[1] K. S. Yoo, "Compaction Characteristics of Crushed Stones by Cyclic Load", *Proc. of KSCE Journal of Civil Engineering Conference*, Vol.2003, No.10, pp.4055-4058, 2003.

[2] S. Lee, C. Youn, H. An, B. Seo, "Interface shear strength between Crushed Stone and Geotextile", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.5, No.1, pp.33-38, 2006.

[3] W. B. Shim, Y. G. Kwon, K. N. Hong, S. H. Han, "Comparison of Shape Characteristics between Coarse Aggregate by Computational Dynamic Generation Modeled and Crushed Stone", *Proc. of Korea Concrete Institute Fall Conference*, Vol.2013, No.10, pp.785-786, 2013.

[4] S. Hwang, S. Lee, I. Lee, C. Choi, "Characteristic of Behavior of the Crushed Stone Reinforced Roadbed under Cyclic Loading", *KGS Spring 2001 National Conference*, pp.525-532, March, 2001.

[5] K. Adalier, A. Elgamal, J. Meneses, J.I. Baez, "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.23, No.7, pp.571–584, 2003.
DOI: https://doi.org/10.1016/s0267-7261(03)00070-8

[6] K. Adalier, A. Elgamal, "Stone Column Remediation of Liquefiable Silty Marine Foundation Deposits", *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, Hawaii, USA, pp.686-691, June, 2011.

[7] K. Adalier, B. Elgamaz, "Mitigation of Liquefaction and associated ground deformations by stone columns" *Engineering Geology*, Vol. 72, No.3-4, pp.275-291, 2004.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.11.001

[8] Y. Zhan, G. Jiang, H. Yao, "Dynamic characteristics of saturated silty soil ground treated by stone column composite foundation", *Advances in Material Sciences and Engineering*, Vol.2014, Article ID 745386, pp.1-7. 2014.
DOI: https://doi.org/10.1155/2014/745386

[9] J. M. Kim, H. J. Lee, J. H. Ryu, "Seismic Response of Stone Column-Improved Soft Clay Deposit by Using 1g Shaking Table", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.12, pp.61-70, 2010.

[10] J. M. Kim, J. H. Ryu, M. N. Kim, S. W. Son, "1g Shaking Table Test on Soil and Stone-column Interaction Behavior under Seismic Loading", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.4, pp.115-124, 2012.
DOI: https://doi.org/10.7843/kgs.2012.28.4.115

[11] J. Castro, "Modeling Stone Columns", *Materials*, Vol.10, No.7, Article ID 782, 2017.
DOI: https://doi.org/10.3390/ma10070782

[12] H. Kardgar, "Investigation of the Bearing Capacity of Foundations on Encased Stone Columns Using Finite Element Method", *International Journal of* Integrated Engineering, Vol.10, No.1, pp.103-108, 2018.
DOI: https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.01.016

[13] M. Das, A. K. Dey, "Prediction of Bearing Capacity of Stone Columns Placed in Soft Clay Using ANN Model", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.36, No.3, pp.1845-1861, 2018.
DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-017-0436-0

손 수 원(Su-Won Son) [정회원]

- 2018년 2월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 연수연구원

<관심분야>
토목공학, 지반공학

손 태 익(Tae-Ik Son) [정회원]

- 2014년 8월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (박사과정)

<관심분야>
토목공학, 지반공학

김 수 봉(Su-Bong Kim) [정회원]

- 2013년 8월 : 한양대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (박사과정)

<관심분야>
토목공학, 지반공학

김 진 만(Jin-Man Kim) [정회원]

- 2001년 12월 : U.C Berkeley Civil Engineering (공학박사)
- 2002년 1월 ~ 2002년 7월 : U.C Berkeley Civil Engineering Post Doc.
- 2003년 10월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수

<관심분야>
토목공학, 지반공학