

인위적 입도조정에 따른 지반의 강도특성 변화

문준호¹, 신진화¹, 김갑부², 문선미², 김영욱^{*}
¹명지대학교 토목환경공학과, ²㈜부시돌

Variation of strength of soil matrix with artificially manipulating particle distribution of granular soil

Jun-Ho Moon¹, Zhen-Hua Xin¹, Gab-Boo Kim², Sun-Mi Moon², Young-Uk Kim^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

²Busiddol Inc.

요약 일반적으로 지반의 강도가 강한 지반은 입도분포가 양호하다고 예상할 수 있다. 그러나 Gap입도로 이루어진 지반으로 입도분포가 불량하더라도 지반의 강도가 강한 경우가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 사실에 근거하여 인위적으로 조성한 Gap 입도시료와 입도분포가 균일한 시료, 양호한 시료를 직접전단시험을 통하여 지반의 강도정수를 구하고 이를 비교 분석하였다. 또한 13mm 골재와 19mm 골재를 이용한 평판재하시험으로 확대 적용하여 현장 적용성과 입도에 따른 강도 변화의 재현성을 확인하였다. 실험 결과 입자크기비와 내부마찰각이 상관관계가 있음을 확인 할 수 있었고, 특정한 입자 크기비의 범위에서 전단저항각이 상당히 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 평판재하시험으로 극한지지력을 산정한 결과 입도조정법이 강도증가율에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 위의 직접전단 시험을 통한 시험적 검증과 평판재하시험을 통한 재현성 확인을 통해 입도분포가 좋지 않음에도 간단한 입도 조정만으로 지반의 강도 증진을 유도할 수 있었다.

Abstract In this study, an artificially formed Gap graded soil, designed to increase its shear strength, was analyzed to determine the strength parameters through direct shear tests. Uniform and fine grain size samples were compared to the Gap graded soil to investigate the increase in the shear strength. Plate loading tests were conducted using 13mm and 19mm aggregates to confirm the reproducibility of the strength enhanced samples for site application. This test confirmed that the particle size ratio and the internal friction angle are correlated to the shear strength, and the shear resistance angle significantly increased in the specific particle size ratio range. The calculation of the ultimate bearing capacity by the plate load test demonstrated that the grain size adjustment method greatly influences the strength increase rate. Therefore, the findings were verified and it was confirmed that a high shear strength is achievable despite the existence of a poor particle size distribution.

Keywords : Aggregate, Gap grade, Plate load bearing test, Shear strength test, Strength parameter

1. 서론

토목 구조물은 사용성과 안전성을 확보하기 위하여 지반의 강도를 특히 중요하게 여긴다. 강한 지반에 설치되어야 할 구조물 중 도로 및 공항을 예로 들 수 있다.

특히 공항 활주로는 거대한 중량의 비행기가 이착륙할 수 있을 만큼의 충분한 지반 강도가 필요하다. 지반의 강도는 흙의 강성에 의해 결정되는데 입도분포와, 입자의 특징들에 의한 흙의 거동과 강도 변화를 주제로 한 연구들이 다양하게 이루어졌다. Cherif et al.(2014)는 실트질

본 논문은 국방과학연구소의 국방기초연구사업인 미래지상체계특화분석 연구실의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Young-Uk Kim (Myongji Univ.)

Tel: +82-31-330-6417 email: yukim@mju.ac.kr

Received September 19, 2017

Revised (1st October 24, 2017, 2nd November 6, 2017)

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

모래를 이용하여 흙의 거동에 미치는 입도분포의 영향에 대하여 시험하였고[1], Takao Ueda et al.(2009)의 연구 결과에서도 2가지 입상체 물질을 혼합하였을 때 입자크기비 D_L/D_s 가 전단강도에 미치는 영향을 고찰하였다[2]. Kim et al.(2016), Y. Yilmaz et al.(2009)은 서로 다른 입경을 갖는 2가지 입자로 구성된 시료를 구성하여 입자크기 비와 부피 비가 전단강도에 미치는 영향에 대하여 규명하였다[3][4].

본 연구에서는 입의로 입도분포를 조정하여 지반의 강도를 증진시키는 목적으로 연구를 진행하였는데, 문헌에 따르면 입도분포가 양호할수록 즉 입도분포의 정도를 나타내는 균등계수(Coefficient of uniformity, C_u)가 증가함에 따라 내부마찰각이 증가하고, 또한 입도분포 곡선상에서 50 % 통과율에 해당하는 입자의 크기, 즉 d_{50} 이 증가함에 따라 지반의 내부마찰각이 크다고 알려져 있다[3][5][6]. 이에 반하여 입도분포가 불량함에도 지반의 강도가 큰 지역도 찾아볼 수 있는데, 실제 천연기념물로 지정되어 있는 사곶해변의 입도분포는 통일분류법상 SP로 구분되고 입도분포 곡선상에서 갭(Gap)입도의 입도 분포로 알려져 입도분포는 불량하지만 지반의 강도가 좋아 과거에 콘크리트나 아스팔트 포장 없이도 비행기가 이착륙할 수 있는 활주로로 사용되었다[7][8].

이러한 지반의 특성을 좀 더 구체화하여, Gap입도로 구성되어 있는 시료를 인위로 조성하여 입자크기비에 따른 내부마찰각을 비교한 연구를 진행하였다. Kim et al.(2016)에 수행되었던 연구를 기본으로 보다 다양한 시험값을 확보하기 위해 추가적인 직접전단시험을 진행하였다. 앞선 시험과 동일하게 두 가지 입자로 이루어진 Gap입도 시료를 인위로 조성하여 전단거동특성에 대하여 파악하고 고찰하였으며, 이것의 재현성을 확인하기 위하여 지반의 입도분포를 Gap입도 시료로 분석하는 방법을 제시하고 평판재하시험을 진행하여 현장 적용성에 대한 가능성을 확인하였다.

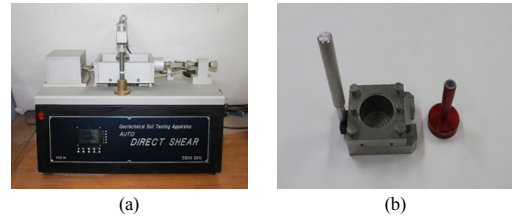
2. 본론

2.1 직접전단시험

2.1.1 시험장비

시험에 사용된 직접전단시험기는 Fig. 1과 같이 연엔 지니어링사의 Auto Direct Shear Tester를 이용하여 진

행하였다. 이 시험기는 변위제어방식으로 수직응력은 공기압으로, 수평응력은 가압기로 가할 수 있게 되어있으며 변위는 LVDT로 측정할 수 있다. 직접전단시험기에 배치되는 전단상자는 수평으로 갈라질 수 있으며 두 개의 판으로 이루어져있는 것으로 갈라진 면을 따라 전단될 수 있도록 유도하는 구조로 구성되어 있다.



(a) Direct Shear Tester (b) Shear Box
Fig. 1. Apparatus of Direct Shear Test

2.1.2 시험방법

시험방법은 98.1kPa, 196.2kPa, 294.3 kPa의 수직응력을 가한상태로 전단시켜 전단저항력을 측정한다. 이때 측정되는 전단저항력은 전단속도에 영향을 받으므로 전단속도를 매 시험마다 일정하게 0.3mm/min으로 시험을 진행하였다.

2.1.3 시험결과 및 분석

Table 1은 직접전단시험 결과를 표로 정리하여 나타낸 것이고, 이를 Fig. 2에 나타냈다. 그림에서 Long Dash line은 입자크기 0.6 mm 입자로 균질한 입도를 갖는 표준사의 내부마찰각을 나타낸 것이고, Short Dash line은 입자크기 W7-2의 입도분포가 양호한 사질토 시료의 내부마찰각을 나타낸 것이다. 또한 원 표식은 Gap 입도(Particle Size Ratio, n)에 따른 내부마찰각을 나타낸 것이고 추세선으로 입자크기 비에 따른 내부마찰각의 변화양상을 나타냈다. 직접전단시험결과 Kim et al. (2016)의 연구결과와 마찬가지로 입자크기 비에 내부마찰각이 비례하는 것으로 나타났으며, 특정한 입자크기 비에서 Gap입도의 흙이 입도분포가 양호한 시료의 내부마찰각보다 큰 것으로 나타났다. 여기서, 식 $n=R/r$ 에서 n값은 큰 입자의 입경 R와 작은 입자의 입경 r의 비를 나타낸다.

Table 1. The Result of Direct Shear Test

CASE	Type	n=R/r	Internal Friction
U1-2	Uniform	1.00	35.23°
G2-2	Gap	3.42	44.15°
G3-2	Gap	4.05	45.52°
G4-2	Gap	4.82	42.84°
G5-2	Gap	5.77	51.32°
G6-2	Gap	6.86	49.34°
W7-2	Well	-	49.35°

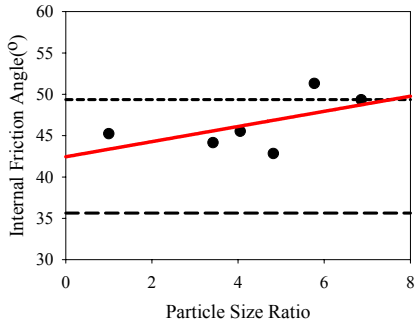


Fig. 2. Internal Friction Angle with Particle Size Ratio, n

Fig. 3에서 점선은 입도분포가 양호한 내부마찰각을 나타내며, 원과 삼각형 표식은 Gap입도 시험결과를 나타내는 것으로 굵은 선은 작은 입자가 0.93mm, 얇은 선은 작은 입자가 0.64mm인 사질토를 사용하여 실험을 진행하고 그 결과의 추세를 나타낸 것이다. 이 그림을 보면, 특정한 입자크기 비에서 내부마찰각이 크게 측정되는 것을 볼 수 있다. 따라서 입도분포가 양호한 시료의 내부마찰각을 넘어서는 Gap입도 시료가 존재할 수 있다는 것을 알 수 있다.

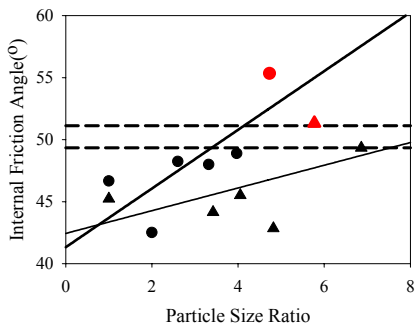


Fig. 3. Results of Direct Shear Test

각각의 시험의 d_{50} 과 C_u 에 대한 내부마찰각을 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림 모두 Viggiani et al.(2001), Wang et al.(2013)과 Yilmaz et al.(2008)의 연구결과와 경향이 동일한 것을 알 수 있다[4, 6, 9]. 즉 d_{50} 에 따라 내부마찰각이 커짐을 나타내고 있다.

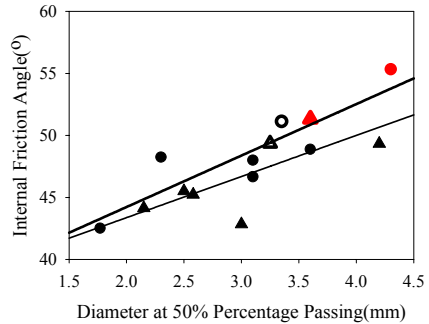


Fig. 4. Internal Friction Angle with Diameter at 50% Percentage Passing

2.2 평판재하시험

2.2.1 입도 조정된 골재

시험에 앞서 13mm골재, 19mm골재, 13mm+19mm골재에 대하여 체분석시험을 진행하였고 시험에 사용된 골재들의 입도분포 결과를 이용하여 입도 조정하였다. Table 2는 통일분류법상 시험에 사용되는 골재로 GP(Gravel poor)로 구분할 수 있고 체분석 결과는 Fig. 5와 같다. 이론적인 방법을 통하여 Table 3과 같이 13mm골재, 19mm골재, 13mm+19mm골재에 대하여 아래 식을 활용하여 깎에 대한 비율을 평가하였으며 표3에 정리하였다. 여기서, 여기서 R는 큰 골재의 입경을 나타내고 r는 작은 골재의 입경을 나타낸다.

$$Big\ Particle\ Weight\ Ratio = Volume\ Ratio = \frac{R^3}{R^3 + r^3} \quad (1)$$

$$Small\ Particle\ Weight\ Ratio = Volume\ Ratio = \frac{r^3}{R^3 + r^3} \quad (2)$$

Table 2. Classification of aggregate through unified classification

Aggregate type	C_u	C_g	Unified classification
13mm	1.83	1.06	GP
19mm	2.27	1.08	GP
13mm+19mm	1.98	0.98	GP

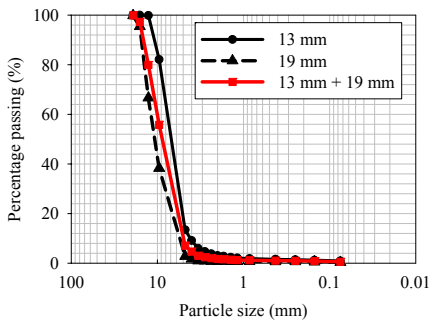


Fig. 5. Predicted Particle Size Distribution

Table 3. Theoretical Review of Puzzle Soil

Aggregate Type	Puzzle Soil degree of precision
13mm	28.3%
19mm	34.7%
13mm+19mm	87.8%

2.2.2 시험장비

시험에 사용된 토조의 제원은 Fig. 6과 같이 1.5m × 1.5m × 1.5m 인 철근콘크리트로 구성되었으며, 재하판은 0.03m두께 지름 0.3m의 원형 재하판을 사용하였다. 30t 용량의 유압실린더와 유압자키를 이용하여 하중을 주고 정밀도가 2%이내인 KL-100E 로드셀을 사용하여 재하하중을 측정하였다. 또한 0.001mm의 정밀도로 측정 가능한 LVDT를 이용하여 하중침하를 측정하고 S-2255 type의 30채널의 제원을 갖는 Data Logger를 사용하여 각 지반 조건에서의 토압분포를 측정하였다.



(a) Chamber
Fig. 6. Chamber test

2.2.3 시험방법

지반조건을 조성하기 위하여 Fig. 7에 도시한 것과 같이 시험 토조에 골재를 10cm 높이마다 다짐기로 10분간 다져서 총 70cm 높이로 골재를 채웠다. 그리고 재하판

이 수평으로 놓일 수 있도록 수평자로 위치별 수평검사를 하였다.



Fig. 7. Ground compaction

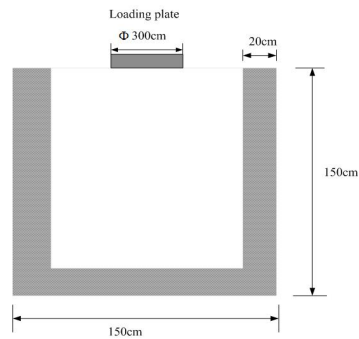


Fig. 8. Size of chamber and load plate

지반조성을 진행한 후 지중응력의 변화와 침하량을 측정하기 위해 0.3m의 평판을 이용하여 평판재하시험을 하였다. 시험하중은 단계별로 200kPa 이하로 재하하였고, 측정시간은 단계마다 15분 이상 측정을 지속하였다. 측정 중에 침하가 더 이상 발생되지 않는다고 판단됐을 때 다음 하중단계로 진행하였다.



Fig. 9. Plate load bearing test

2.2.4 시험결과

각 입도 조건에서 따라 하중침하 그래프는 Fig. 10과 같이 나타내었고 $\frac{ds}{d(\log t)} - P$ 방법과 Chin 방법을 이

용하여 평판재하시험 결과를 분석하고 극한지지력을 산정하였다[10]. 극한지지력에 대한 결과 분석은 13mm 골재, 19mm 골재, 13mm+19mm골재 시험조건에 따라 각각 Fig. 11, Fig. 12에 도시하였다. 이를 입도조정 분포와의 유사성 조건에 따라 나타나는 극한지지력에 대하여 비교 분석하였다.

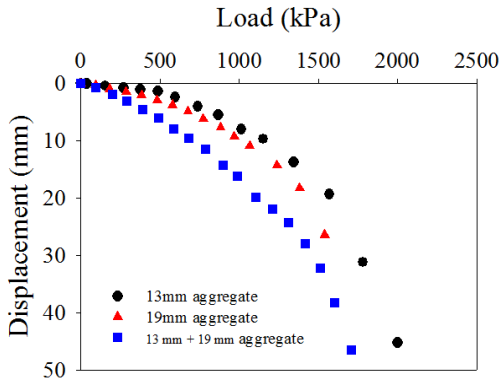


Fig. 10. Load settlement curve for underground stress

평판재하시험 하중침하 결과로부터 $\frac{ds}{d(\log t)}$ -P방법을 이용하여 시험결과를 분석하였다. Fig 11로부터 입도 조건에 따라 각각 13mm골재 입도조건에서는 1,131kPa, 19mm골재 입도조건에서는 1,162kPa, 13mm+19mm골재 입도조건에서는 1,399kPa로서 Gap 입도 조정 지반조건에서 지지력이 13mm와 19mm골재 지반조건에 비하여 각각 6.7%, 20.4% 향상되었다.

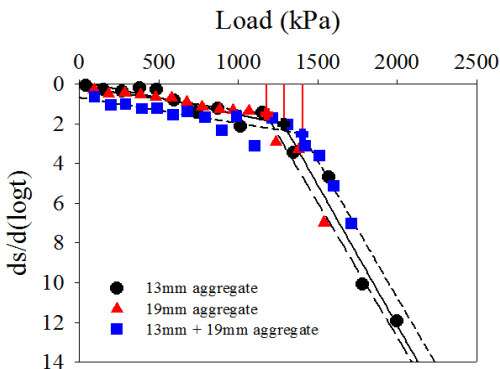


Fig. 11. Results analysis by $\frac{ds}{d(\log t)}$ -P method

Fig. 12로부터 Chin 방법으로 결과분석을 하였을 때 13mm골재 입도 조건에서의 지지력은 2,205kPa, 19mm골재 입도 조건에서는 2,076kPa, 13mm+19mm골재 입도 조건에서는 2,606kPa로서 입의조정 지반 조건에서 지지력이 25.5%향상 되었다.

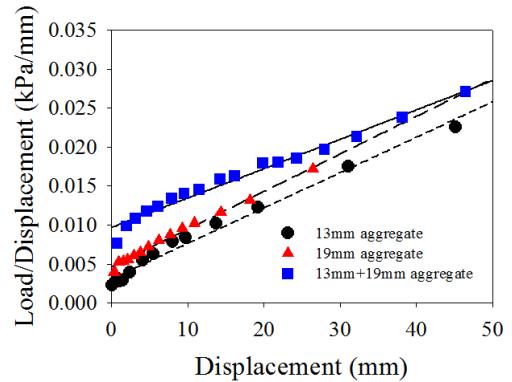


Fig. 12. Results analysis by Chin method

실험결과 갭 입도 골재 혼합비가 갭 분포와의 오차율이 적을수록 평판재하시험을 통해 극한지지력을 산정했을 때 극한지지력이 더 크게 나타난다. 그 결과를 Table 4에서와 같이 정리하였다.

Table 4. The Results of plate bearing test

CASE	Particle Composition	Estimating Method of Ultimate capacity		Manipulating particle degree of precision
		$\frac{ds}{d(\log t)}$ -P Method	Chin Method	
1	13 mm (100 %)	1311 kPa	2,205 kPa	28.3%
2	19 mm (100 %)	1162 kPa	2,076 kPa	34.7%
3	13 mm (40 %) + 19 mm (60 %)	1399 kPa	2,606 kPa	87.8%

3. 결론

본 연구에서는 Gap입도의 시료를 임의로 조성하여 Gap입도의 강도특성에 대해 직접전단시험을 진행하여 비교분석 하였으며, 또한 이의 재현성을 확인하기 위하

여 평판재하시험을 진행하였다.

직접전단시험결과 입자크기비가 커질수록 전단저항각이 증가하는 경향을 나타내지만 특정 입자 크기비 범위에서 전단저항각이 입도분포가 양호한 전단저항각보다 큰 것을 알 수 있었다. 또한 d_{50} 에 대해 전단저항각이 비례하는 것으로 나타났으며 다른 연구들과도 동일한 연구결과를 보이고 있다.

평판재하시험 결과 지반의 극한지지력은 입도분석결과에서 오차율이 적을수록 지반의 극한지지력이 큰 것으로 산정됐고, 이를 통하여 직접전단시험의 재현성을 확인할 수 있었다.

향후 연구에서 골재입경에 따른 최적 배합비를 만들어 시공현장에서 범용재료인 골재로만으로도 시공이 가능하여 공사 난도를 대폭 완화시키고 간단한 골재조합으로 만으로도 지반강도를 높이고 공기를 단축시켜 공사비를 절약할 수 있다는 점을 기대할 수 있다.

References

- [1] Cherif taiba. A, Mahmoudi.Y, Belkhatir.M, Kadri.A, Schanz.T, " Effect of Gradation Mechanical Behavior of Silty Sand Soils", Conference: Colloque International, Caracterisation et Modelisation des Materiaux et Structures, November, pp. 1-11, 2014.
- [2] Takao Ueda, Takashi Matsushima, Yasuo Yamada, "Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture", Granular Matter, vol. 13, no. 6, pp. 731-742, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-011-0292-1>
- [3] Kab-Boo Kim, Jun-Ho Moon, Kyo-Young Gu, Young-Woo Chun, Young-Uk Kim, "Effect of Gap grade on Shear Strength of sandy soil", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 17, no. 4 pp. 319-324, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.319>
- [4] Y. Yilmaz, M. Mollamahmutoglu, V. Ozaydin, K. Kayabali, "Experimental investigation of the effect of grading characteristics on the liquefaction resistance of various graded sands" Engineering Geology. J, vol. 91, no. 100, pp. 91?100. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.12.002>
- [5] Esma Mostefa Kara, Mourad Meghachou, Nabil Aboubekr. "Contribution of particles size ranges to sand friction." Engineering, Technology & Applied Science Research vol. 3, no. 4, pp. 497-501, 2013.
- [6] Jun-Jie, Wang, Hui-Ping Zhang, Sheng-Chuan Tang, "Effects of particle size distribution on shear strength of accumulation soil." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering vol. 139 no. 11, pp. 1994-1997, 2013.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000931](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000931)
- [7] Ho Gyun Lim, "A Study on Geotechnical Characteristics at Sagot Beach, Beakryoung Island", Master's thesis, Graduate school of Kookmin Univ, Seoul, 2004.
- [8] Sang San Park, Nam Jun Cho, "A Study on Bearing Capacity of Sagot Beach in Baekryoung Island", Journal of the Korean Geotechnical Society, pp. 1183-1190, March, 2005.
- [9] G. Viggiani, M. K. Nuntz, J. Desrues, "An experimental investigation of the relationships between grain size distribution and shear banding in sand, sand", Continuous and Discontinuous Modeling of Cohesive Frictional Materials, Lecture Notes in Physics, vol. 568, pp. 111 – 127. 2001.
DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-44424-6_8
- [10] Byeong-II Kim, Seung-Hyun Lee, Young-Uk Kim, Seong-Min Jo, Chan-Yeong Yoon, Wan-Je Jo, "Foundation Engineering", Moon Undang, 2013.

문 준 호(Jun-Ho Moon)

[정회원]



- 2013년 3월~2015년 2월 : 명지대학교(공학석사)
- 2015년 3월~현재 : 명지대학교 토목환경공학과 박사과정

<관심분야>

토질역학, 지반공학

신 진 화(Zhen-Hua Xin)

[정회원]



- 2013년 9월~현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석박사통합과정

<관심분야>

토질역학, 지반공학

김 갑 부(Kab-Boo Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 10월 : 삼성엔지니어링
- 2001년 8월 : H&TC
- 2016년 12월 ~ 현재 : 부시폴 대표이사

<관심분야>
기초공학, 입상체거동

문 선 미(Sun-Mi Moon)

[정회원]



- 2000년 2월 : 경희대학교 토목공학과(공학사)
- 2005년 1월~2016년 10월 : 토목 설계사 근무
- 2017년 1월 ~ 현재 : 부시폴 소속

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 영 욱(Young-Uk Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : The Pennsylvania State University 토목환경공학과 (공학박사)
- 2001년 3월~현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>
토양오염 복원, 환경공학, 토질역학