

세립분 함량 변화에 따른 반복 동하중을 받는 시멘트 혼합토의 침하 및 강성 특성평가

김대상
한국철도기술연구원

Characteristic evaluation of settlement and stiffness of cement-treated soils with the change of fines content under cyclic dynamic loading

Dae Sang Kim
Advanced Railroad Civil Engineering Division, KRRI

요약 철도 공용에 따른 반복 동하중을 지속적으로 경험하는 흙 구조물은 지속적인 침하가 발생한다. 본 논문에서는 흙 구조물을 구성하는 세립분 함량 변화에 따른 시멘트 혼합토의 침하 및 강성 특성을 반복 동하중 시험을 실시하여 평가하였다. 흙의 세립분 함량, 시멘트 함량, 양생일 수를 변화시켜가면서 총 18 케이스의 시험을 실시하였다. 동 시험 결과로부터 시멘트 혼합토는 침하 측면에서 시멘트 함량 3% 이상 사용 시 세립분 함량이 높은 흙에서도 침하 저감 가능성이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시멘트 함량이 0% 에서 3 ~ 4% 로 증가 시 탄성 침하량은 1/4 수준으로, 소성 침하량은 1/6 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 시멘트 혼합토는 강성 측면에서 시멘트 함량 증가에 따라 회복탄성계수가 증가하는 경향을 보였다. 시멘트 함량 3% 이상 사용 시에는 흙의 세립분 함량 40% 수준에서도 철도 상부노반 다짐 강성 품질기준인 80 MPa를 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract The soil structures settle down continuously under cyclic dynamic loading after opening railway lines. This study examined the characteristics of the settlement and stiffness of cement-treated soils with the change in the content of fines under cyclic dynamic loading. Eighteen cases of the test were carried out with the changes in the fines content of soils, cement content, and curing days. Based on the test results, cement-treated soils containing more than 3% of cement could decrease settlement sufficiently even with a high portion of fines under cyclic dynamic loading. In addition, the elastic and plastic settlements could be reduced using 3 to 4% cement to the level of 1/4 and 1/6, respectively. In the viewpoint of stiffness, the resilient modulus of cement-treated soils increases with increasing cement content. Using more than 3% of cement, the 80MPa compaction stiffness standard for the upper subgrade of railways was satisfied, even with 40% of fines content of soils.

Keywords : Fine Content, Settlement, Cement Treated Soils, Cyclic Dynamic Loading, Resilient Modulus

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 "ZSR(Zero Settlement Railroad) 기술개발"의 연구비지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae Sang Kim(KRRI)

email: kds@krri.re.kr

Received August 12, 2020

Accepted October 5, 2020

Revised September 21, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

도로 및 철도 노반 건설 시 사용하는 흙 재료는 저렴하고 손쉽게 구할 수 있다는 장점으로 인하여 널리 사용되고 있다. 이와 같은 장점에도 불구하고 흙 재료에 포함된 세립분양이 과다할 경우 많은 공학적인 문제를 야기시킨다. 철도와 같이 대용량 반복 동하중을 지속적으로 경험하는 상부노반은 이를 구성하는 흙의 세립분 함량에 따라 강도 및 침하 특성이 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 무 유지보수(Maintenance free)를 전제로 건설되는 콘크리트 슬래브 궤도의 경우 사용성 측면에서 궤도 구축 후 잔류침하를 30mm 이하로 엄격하게 적용하고 있다. 이와 같은 잔류침하 기준을 만족시키기 위하여 Table 1에서 보는 바와 같이 독일과 일본의 경우 상부노반의 세립분 함량 기준을 15% 이하 재료를 사용하도록 규정하거나[1-3], 이의 역학적 특성을 향상시키기 위하여 시멘트 처리된 재료를 사용하고 있다.

Table 1. Standards for fines contents of upper subgrade for concrete slab track

Country	Germany	Japan	Korea
Fines contents (%)	≤ 15%	≤ 15%	≤ 25%

개통 후 발생하는 잔류침하를 최소화하기 위하여 철도 상부노반 사용재료로서 세립분 함량 기준 15% 이하 재료를 사용하는 것은 바람직하나, 양질의 토사를 확보하는 것은 토사 운반 비용 등 현실적인 문제로 어려움이 있다. 이와 같이 양질의 토사 확보가 어려운 건설 현장의 여건을 고려하여, 세립분이 함유된 재료의 역학적 특성 향상을 위한 시멘트 혼합량에 관한 연구들도 국내외에서 다양하게 진행된 바 있다[4-6]. 또한, 시멘트 이외의 다양한 혼합재료를 이용한 뒤채움재에 관한 연구도 이루어졌다[7-9].

동 연구에서는 반복 동하중을 경험하는 노반의 성능향상을 위하여 현장에서 많이 발생하는 세립분 함량이 25% 이상인 발생토에 대하여 시멘트 함량 변화에 따른 침하 및 강성에 대한 특성을 평가하고자 총 18회의 반복 하중 재하시험을 실시하였다.

2. 시험장치 및 기본물성

2.1 시험장치의 구성

Fig. 1은 반복 진동 삼축 시험장치에서 시험 데이터를 획득하는 경로를 보여준다. 삼축압력실, 셀 압력 조절장치, 축하중 및 변위 재하장치로 구성되어 있는 진동 삼축 시험장치로부터 시험체에 작용하는 연직하중 및 변위, 구속압, 간극수압 및 체적변화를 측정할 수 있다. 이와 같이 측정된 시험결과는 증폭장치와 A/D (아날로그/디지털) 변환기를 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

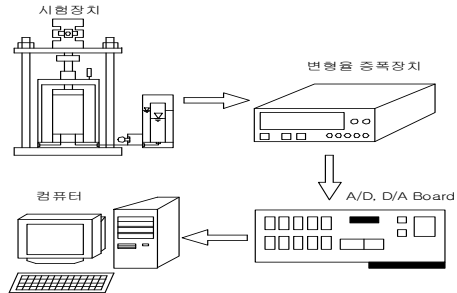


Fig. 1. Data acquisition path

2.2 기본 물성시험 결과

노반 건설이 진행중인 000 현장에서 성토재료를 채취하고, 기본물성 평가 시험을 실시하였다. 노반 성토재의 #200체 통과량은 13.9%의 비소성인 흙으로 (Fig. 2), 비중이 2.674인 통일분류법상 실트질 모래 (SM)에 해당되었다. Table 2에서는 물성시험 항목 및 결과를 보여준다.

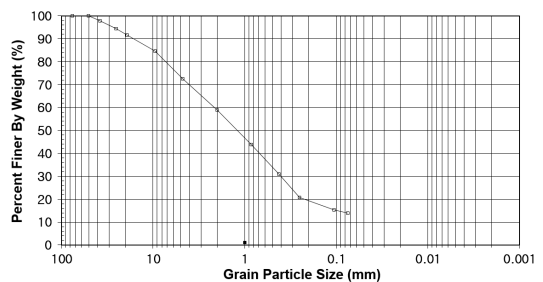


Fig. 2. Grain Size Distribution

Table 2. Physical Properties of soils

Test Items	Test Results
Liquid & Plastic Limits	N.P
Percent Passing No. 200 sieve (%)	13.9
Specific Gravity (Gs)	2.674

성토재료에서 세립분을 추출하여 세립분 함량 25%, 30%, 40% 인 시료를 조성하고 이에 대한 다짐시험 (D다짐)을 실시하였다. Fig. 3과 Table 3은 다짐시험 결과로, 세립분 함량 증가와 함께 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보여준다. 이와 같은 시험결과를 기초로 철도 상부노반 다짐 품질기준인 최대건조밀도의 95%에 해당하는 건조단위증량과 최적함수비로 Fig. 4와 같이 직경 50 mm × 높이 100 mm 크기의 공시체를 제작하여 시험에 사용하였다[10].

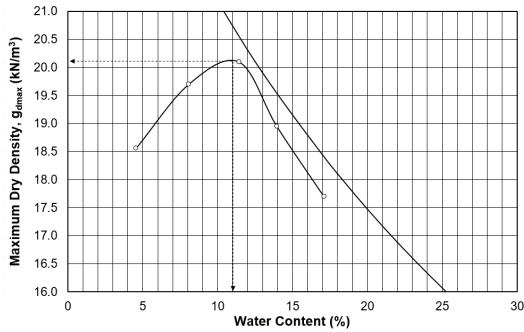


Fig. 3. Results of compaction tests (Fine content 25%)

Table 3. Results of compaction tests

Fines content (%)	Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	Optimum moisture content (%)
25	20.12	11.1
30	19.8	11.9
40	19.27	12.9

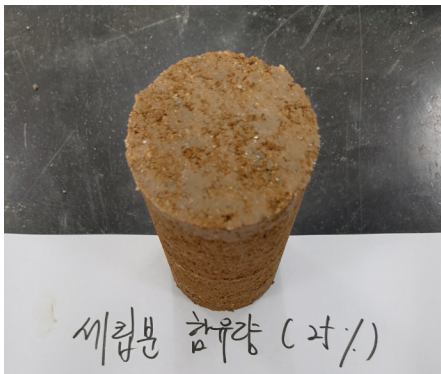


Fig. 4. Test specimen (Fines content 25%)

3. 시험조건 및 결과분석

3.1 반복 동하중시험

열차 하중을 받는 노반을 모사하여 반복 동하중 시험을 수행하였다. Fig. 5는 반복 동하중 시험을 실시하기 위하여 공시체를 삼축 셀에 세팅하고 있는 전경을 보여준다.

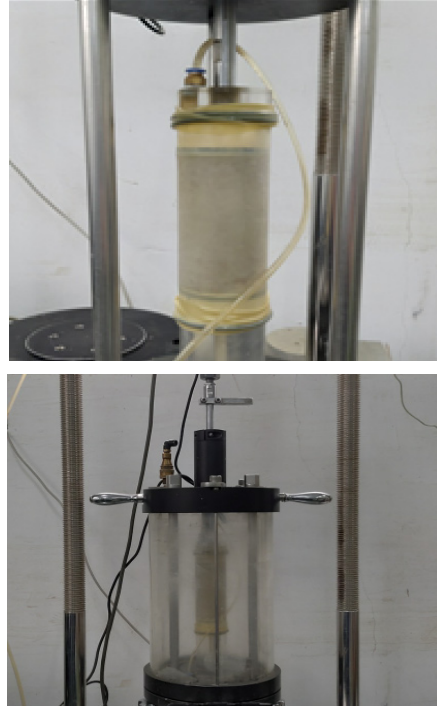


Fig. 5. Test specimen setup

수평 구속응력은 상부노반 조건을 고려하여 20 kPa로 고정시킨 상태에서 흙의 세립분 함량 (25 ~ 40%), 시멘트 함량 (0 ~ 4%), 양생일수 (0 ~ 28일), 반복 축차응력 (30 ~ 50 kPa)을 다르게 변화시킨 총 18 케이스의 반복 동하중 재하시험을 실시하였다. 최대 축차응력은 궤도하중 15 kPa, 열차하중 35 kPa의 철도노반 설계하중을 고려하여 결정하였으며, 반복 동하중의 재하주기는 시험장치의 최대 가능범위를 고려한 1.7 Hz, 반복 재하회수는 시험 가능 시간을 고려하여 2,000 회로 결정하였다. Table 4에서는 시험 항목별 조건을 정리하였다.

Table 4. Test items and conditions

Test Items	Test Conditions
Fines content (%)	25~40
Cement content (%)	0~4
Curing days (d)	0~28
Deviatoric stress (kPa)	50
Confining pressure (kPa)	20

Table 5에서는 상기 시험 항목을 고려하여 구체적인 18 케이스에 대한 시험조건을 정리하였다.

Table 5. Test cases

Cases	Fines content	Cement content	Curing days	Deviatoric stress
	(%)	(%)	(d)	(kPa)
1	25	0	0	50
2	30	0	0	50
3	40	0	0	50
4	25	2	28	50
5	30	2	28	50
6	40	2	28	50
7	30	3	0	50
8	30	3	1	50
9	30	3	7	50
10	30	3	14	50
11	25	3	28	50
12	30	3	28	50
13	40	3	28	50
14	25	3	0	50
15	40	3	0	50
16	25	4	28	50
17	30	4	28	50
18	40	4	28	50

3.2 시험 결과분석

Fig. 6 과 Fig. 7은 시험 케이스 1에 대한 시험결과로, 세립분 함량 25%, 반복축차응력 50 kPa 조건에서의 반복 동하중 시험결과이다. 시험 중 축차응력과 변위, 변위와 반복횟수 (N) 사이의 관계를 보여준다.

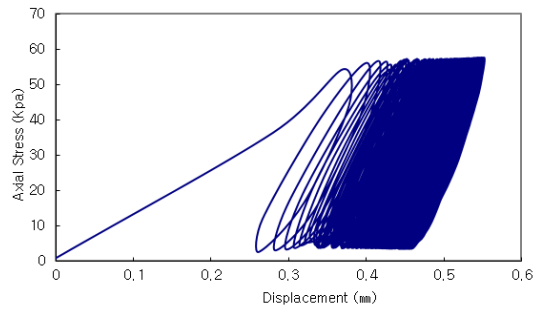


Fig. 6. Relationship between deviatoric stress and displacement (Case 1)

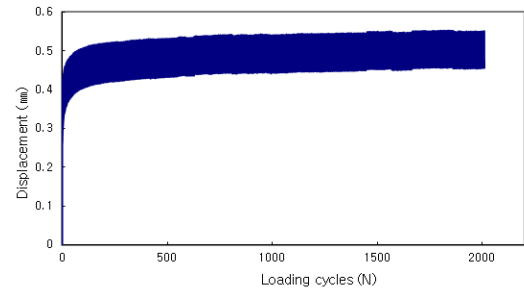


Fig. 7. Relationship between displacement and loading cycle (Case 1)

3.2.1 침하 특성

본 연구에서는 반복 동하중 2회째 작용 시의 침하량을 탄성침하량으로, 최종 발생 침하량을 소성침하량으로 정의하였다[3]. Fig. 8은 시멘트 함량 변화에 따른 흙의 세립분 함량별 탄성 침하량을 보여준다. 세립분 함량이 증가할수록 탄성침하량은 증가하였으며, 그 증가량은 시멘트 함량이 증가할수록 감소하였다. 시멘트 함량 2%를 제외하면, 모든 경우에서 세립분함량 25%에서 40%로 증가 시 탄성침하량 증가는 26 ~ 29% 범위에 있었다.

세립분 함량 25%에서 시멘트 함량이 0%의 경우 탄성 침하량은 0.118%이었으나, 시멘트 함량이 증가할수록 탄성침하량은 0.028% 수준으로 감소되었다. 또한, 시멘트 함량 2% 보다는 3% 이상에서 탄성침하량이 크게 감소되었으며, 시멘트 함량 3%와 4%에서의 차이는 크지 않았다. 시멘트 함량 0%에서 3% 혹은 4%로의 증가 시 탄성침하량은 1/4 수준으로 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

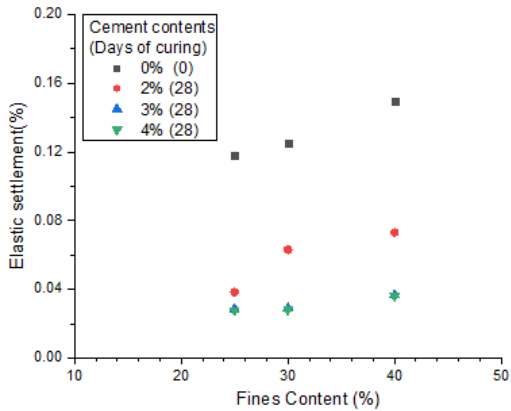


Fig. 8. Elastic settlement depending on fine contents of soils with the change of cement contents

Fig. 9는 시멘트 함량 변화에 따른 흙의 세립분 함량 별 소성 침하량을 보여준다.

소성침하량 역시 세립분 함량이 늘어남에 따라 증가하였다. 세립분 함량 25%에서 시멘트 함량이 0%의 경우 소성침하량은 0.559% 이었으나, 시멘트 함량이 4%로 증가할때 소성침하량은 0.096% 수준으로 감소되었다. 또한, 세립분 함량 변화에 따른 소성 침하량 변화는 시멘트 함량 3%와 4%에서는 크지 않았다.

특이한 점은 시멘트 함량이 0%에서 3% 혹은 4%로 증가함에 따라 소성침하량은 탄성침하량 보다 상대적으로 큰 1/6 수준으로 감소하였다는 점이다. 따라서, 시멘트 함량 증가에 따른 침하량 저감 효과는 소성침하량에서 더 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

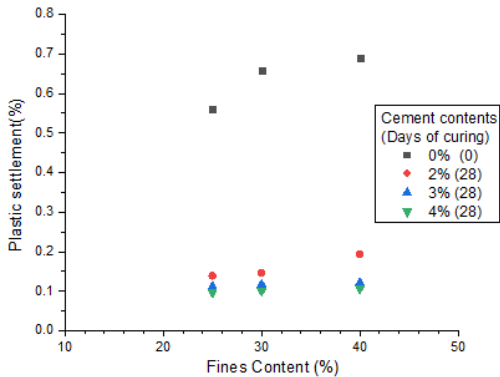


Fig. 9. Plastic settlement depending on fine contents of soils with the change of cement contents

Fig. 10은 양생일 수에 따른 탄성과 소성 침하량 변화를 95% 신뢰 범위(Confidence Band)에서의 지수함수로 나타낸 것이다. 0일에서 28일로의 양생일 수 증가에 따른 침하량 저감 현상은 탄성침하량 (1/4)보다 소성침하량 (1/5)에서 더 크게 나타났다. 탄성과 소성침하에 대한 지수함수를 산정한 결과는 Table 6과 같다.

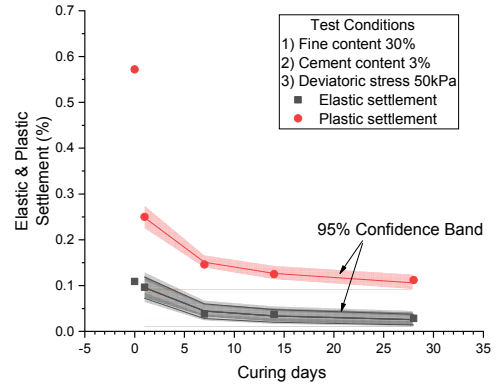


Fig. 10. Elastic & Plastic settlement depending on curing day

Table 6. Fitting curves ($y=ax^b$) for settlements

Settlements	a	b
Elastic	0.0955	-0.3948
Plastic	0.2485	-0.2553

3.2.2 강성 특성

반복 삼축압축시험 결과를 이용하여 Fig. 11과 같이 회복탄성계수 (Resilient modulus, M_R)를 구하였다. 회복탄성계수는 철도노반 조성 후 품질관리를 위하여 현장에서 적용하고 있는 변형률계수 (E_{v2})와 같이 반복축차응력과 축변형률 그래프 상에서 두 번째 재하 및 제하 시의 기울기로 결정하였으며 식 (1)과 같이 정의된다.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

M_R : 회복탄성계수 (MPa)

σ_d : 축차응력 (MPa)

ϵ_r : 축방향 회복변형률

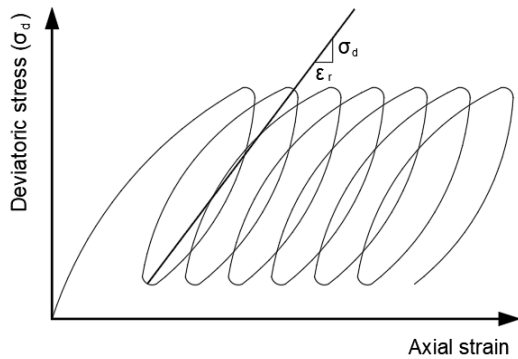


Fig. 11. Definition of resilient modulus

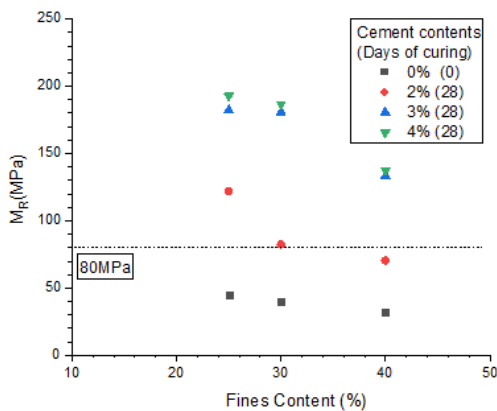


Fig. 12. Resilient modulus depending on fines content of soils with the change of cement contents

Fig. 12는 시멘트 함량 변화에 따른 흙의 세립분 함량 별 회복탄성계수를 보여준다. 세립분 함량이 증가할수록 회복탄성계수는 감소하며, 시멘트 함량이 증가할수록 회복탄성계수는 증가하였다. 철도 상부노반의 변형률계수 (E_r)에 의한 품질기준이 80 MPa 인 점을 고려할 때, 시멘트 함량 3%와 4%는 모든 세립분 함량조건에서 기준을 만족하며, 시멘트 함량 2% 인 경우에는 세립분 함량 30%까지 기준을 만족시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

4. 결론

대용량 열차 반복 동하중을 경험하는 성토 노반재료에 대하여 흙의 세립분 및 시멘트 함량, 양생일 수를 변화시키면서 18 케이스의 재하시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

- 1) 조립토에 포함된 세립분 함량이 많아지면 세립토 거동을 보이나, 세립토 함량 증가에도 불구하고 시멘트 함량과 양생일수를 적정 수준으로 제어하면 탄성 및 소성변형률을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.
- 2) 노반의 침하와 강성 측면을 고려할 때 세립분이 25% 이상 포함된 현장 발생토를 사용하여도 소량의 시멘트 혼합 적용으로 철도 공용 후 잔류침하 저감 가능성을 확인하였으며, 이때 최적 시멘트 함량은 3% 수준으로 확인되었다.

현장 발생토 등 세립분이 25% 이상 함유된 토사를 사용한 노반 시공 가능할 경우 재료 수급, 운반 등과 관련하여 경제성 향상의 가능성이 있을 것으로 판단된다. 향후 시멘트 혼합토의 경제성 분석과 흙의 세립분 함량 및 함수비 조건 변화에 따른 침하 특성에 대한 연구도 추가로 수행 계획에 있다.

References

- [1] Korea Railway Network Authority, Railway design standard for roadbed, p.1015, Korea Railway Network Authority, 2013, pp. 4-26.
- [2] RTRI, Standard for railway structures, soil structure, p.703, RTRI, Japan, 2007, pp. 84-105.
- [3] Göbel, K. Lieberenz, Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, p.389, Eurailpress Tetzlaff-Hestra., 2004, pp. 65-75.
- [4] F. Schnaid, P. D. Prietto, N. C. Consoli, "Characterization of cemented sand in triaxial compression", *J. geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 857-868, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(857\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(857))
- [5] K. Y. Kim, H. G. Park, J. S. Jeon, "Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel", *J. Korean Geotechnical Society*, Vol. 21, No. 10, pp. 61-71, 2005.
- [6] U. Aqil, F. Tatsuoka, T. Uchimura, T. N. Lohani, Y. Tomita, K. Matsushima, "Strength and deformation characteristics of recycled concrete aggregate as a backfill material", *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 5, pp 53-72, 2005. DOI: https://doi.org/10.3208/sandf.45.5_53
- [7] S. S. Hong, Y. S. Kim, Y. S. Lee, "Characteristics of Waste Lime and Soil Mixture for Reusing of Roadbed Embanking Material", *J. Korea Academy Industrial*

- Cooperation Society*, Vol. 11, No. 12, pp. 5157-5164, 2010.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.12.5157>
- [8] K. H. Lee, S. K. Kim, "Eco-Friendly Backfill Materials with Bottom Ash", *J. Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 1285-1390, 2012.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.1385>
- [9] K. H. Lee, "Characterization of Flowable Fill with Ferro-Nickel Slag Dust", *J. Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 5, pp.16-21, 2017.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.16>
- [10] E. T. Selig, J. M. Warters, *Track Geotechnology and substructure management*, p.446, Thomas Telford, 1994, pp. 3.13-3.15.
-

김 대 상(Dae-Sang Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 자원공학과 (공학석사)
- 2000년 3월 : 동경대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 4월 ~ 2002년 6월 : 서울대학교 지진공학연구센터 전임연구원
- 2002년 6월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

지반공학, 궤도토목