

## 반복하중을 받는 철도노반 보수용 급속 팽창재료의 거동

## Behavior of Rapidly Expansion Materials for Maintenance Railroad Bed Subjected to Cyclic Loading

이준대<sup>†</sup> · 신은철<sup>1)</sup>

Lee, Jundae · Shin, Eunchul

**ABSTRACT :** The differential settlement may be generated by the variation of stresses caused by the soft ground or ground water. The cracks are usually created when the structures are leaned or deformed due to the differential settlement. A grouting method has been mainly used till now to improve the bearing capacity of the ground when the foundation of the structure is deformed by differential settlements. However, when this method is used, it takes too long time to obtain the required strength and the period of the reinforcement effect is not long enough. The advantage of GPCON injection method is to have good mechanical properties and durability, and easy construction. In addition, the GPCON method rapidly fills up the void in soils by injecting some materials into underground and also obtain the increase of bearing and shearing forces due to the expansion. In this paper the restoration capability of the foundation settlement of railway and subway subjected to cyclic loading is analytically and experimentally evaluated using the high density rapidly expansion GPCON in order to investigate the types of deformations and vibrational characteristics.

**Keywords :** Differential settlement, Grouting method, Bearing capacity, Reinforcement effect, Cyclic loading, High density rapidly expansion

**요 지 :** 지반이 연약하거나 지하수 유동에 따른 응력의 변화로 인하여 부등침하가 발생하면 구조물이 경사지거나 변형되어 균열이 발생하게 된다. 부등침하로 인하여 구조물의 기초부분이 변형되면, 지반의 지지력을 보강하는 방법으로 현재 까지 국내에서 주로 그라우팅공법을 사용하였다. 그러나 이 공법은 보강효과가 장기간동안 지속되지 못하며, 원하는 강도를 발휘하기 위해서는 오랜 시간이 필요한 단점이 있다. 급속팽창재료(GPCON) 주입공법은 기계적 물성 및 내구성이 우수하며 시공이 간편한 장점을 지니고 있으며 고결시간도 매우 짧아 하부지반에 물질을 분사하여 흠입자 사이의 지반 간극을 채움과 동시에 팽창 고결하여 지지력과 전단력을 증가시킬 수 있는 공법이다. 본 연구에서는 고밀도 급속 팽창 지퍼콘을 이용하여 반복 하중에 의한 변형특성과 진동 저감효과를 분석하고 철도 및 지하철에서 기초침하 복원성을 평가하였다.

**주요어 :** 부등 침하, 그라우팅 공법, 지지력, 보강 효과, 반복 하중, 고밀도 급속 팽창

## 1. 서 론

철도 및 지하철의 긴급 보수·보강작업이나, 연약지반에서 신속을 요하는 구조물의 부등침하 보강작업은 어려운 시공조건과 열악한 지반과 같은 특수조건 때문에 현장에서 사용할 수 있는 적절한 지반공법이 필요하다. 부등침하가 발생하면 구조물이 경사지거나 변형되어 균열이 발생하게 되는데 주요원인은 지반이 연약하거나 지하수 유동에 따른 공극이 발생하여 이 공극에 의해 지중 응력의 변화가 생기기 때문이다(천병식 등, 1995). 부등침하로 인하여 구조물의 기초부분이 변형되면, 지반의 지지력을 보강하는 방법을 사용하게 된다(고효석, 2005; 홍원표 등, 1996; 이용수 등, 2001). 현재까지 국내에서 주로 시행되어 온 케미칼

그라우팅(약액주입공법)은 각각 물유리계 약액 및 고분자계 약액을 주입재료로 이용하는 물유리계 약액주입공법과 고분자계 약액주입공법으로 이들 공법은 사용약액의 구체적 성분 및 배합비 그리고 주입장치 및 방법 등에 따라 또 다시 여러 가지 공법으로 세분된다(김진일 등, 1995; 박문수 등, 1994; 최만용 등, 2000). 공법의 선택은 주입대상 토질의 상태, 시공목적, 시공조건 및 경제성 등 지반여건에 다르게 되는 것이나 현재 우리나라에서 가장 많이 시행되고 있는 물유리계공법, 약액공법, 고압분사주입공법, 젯트 그라우팅공법 등과 같은 지반주입공법들이 현장에서 사용되고 있다(김동우 등, 2003; 김진일 등, 1995; 홍원표 등, 1997). 한편, 고분자계 약액주입공법의 경우 이에 사용되는 약액으로는 아크릴아미드계 및 우레탄계 약액(고밀도

† 정희원, 세명대학교 토목공학과 교수(E-mail : jdlee@semyung.ac.kr)

1) 정희원, 인천대학교 토목환경공학과 교수

급속팽창재료) 등이 사용되고 있다(황성도 등, 2005; 천병식 등, 2003).

고밀도 급속 팽창물질 주입공법은 기계적 물성 및 내구성이 우수하며 동시에 시공이 간편한 장점을 지니고 있으며 안전고결기간이 15분정도로 매우 빨라 공기단축 효과가 커서 최근 들어 많은 공사에 적용되고 있다. 고밀도 급속팽창 물질 주입 공법은 급속 팽창성을 가진 폴리올과 이소시아네이트 물질의 특성을 이용하여 콘크리트 하부지반에 물질을 분사하여 흡입자 사이의 지반 공극을 채움과 동시에 팽창 고결하여 지지력과 전단력이 증가되는 공법이다.

본 연구에서는 철도 및 지하철에서 반복 철도차량 하중에 의한 지반 침하 복원공법의 현장 적용성 평가를 위해 고밀도 급속 팽창재료를 이용하였다. 기초침하 복원에 관한 특성을 분석하기 위하여 급속팽창재료 시료를 이용한 실험실에서 수침, 비수침 실험을 통하여 반복 하중에 의한 변형특성과 진동 저감효과를 분석하고 콘크리트 공시체와 비교하여 철도 및 지하철에서 침하 복원의 적용성을 평가하였다.

## 2. 고밀도 급속팽창재료를 이용한 공법의 적용

팽창재료를 이용한 공법은 지반의 특성을 사용목적에 부합되게 보강하기 위해 고밀도 팽창성 폴리머 재질의 주입재를 지반의 간극 속으로 침투시키는 것이다. 팽창재료인 폴리우레탄은 여타 주입재들과는 달리 그의 기본물성 및 주입특성, 기타 공학적 특성과 관련하여 비교적 넓은 범위에서 자유로이 조절이 가능하다(천병식, 1995). 이 주입공법은 경량의 우레탄 물질이 느슨한 지반의 공극을 채우면서 지반의 지지력을 강화시키고 지지력을 약 50배 이상 증강시킨다. 주입한 우레탄 물질은 시간이 경과하면서 서서히 팽창(약 30배까지 팽창)이 일어나면서 주변 지반에 490~24,500KN/m<sup>2</sup>의 팽창력이 작용하여 구조물을 밀어 올린다. 구조물을 밀어 올린다는 의미는 상부구조물에 의

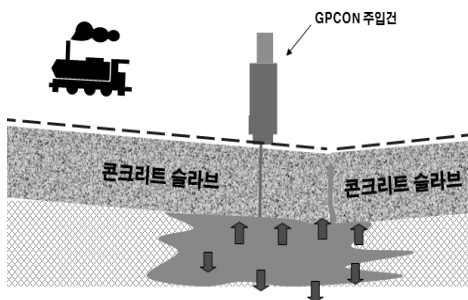


그림 1. 침하된 철도노반

한 정하중뿐만 아니라 구조물 상승 이후에 발생한 동하중까지 대응할 수 있는 압축력과 밀도가 물질이 주입된 기초지반에 이미 형성되었다는 것을 의미한다.

일반적으로 구조물 바닥 슬래브(slab)의 경우 지지기반이 하중을 분담하도록 되어 있다. 지층이 연약지반이거나 다짐상태가 불량한 경우 구조물 바닥 지표면에 공동이 발생하는 원인이 된다. 그러므로 구조물 바닥에 대한 고밀도 급속 팽창 우레탄 계열재료를 사용하는 지피콘 공법은 바닥하부 공동에 우레탄 물질의 충전과 동시에 발생한 팽창압에 의해 바닥 하부지면을 다지면서 침하된 바닥을 원래의 바닥높이로 복원하는 공법이다. 이 공법은 타공법과는 비교되지 않을 정도로 단시간(물질의 경화시간 15분이면 작업완료)으로 신속하며, 작업환경이 깨끗하고 오차범위 1~2mm 내외의 정밀한 계측관리로 정교하게 시공할 수 있는 장점이 있다(그림 2).

## 3. 고밀도 급속팽창 재료의 화학적 특성

폴리우레탄은 이소시아네이트기 (-NCO, isocyanate)를 두 개 이상 가진 폴리이소시아네이트와 히드록시기(-OH, hydroxy)를 두 개 이상 가진 폴리히드록시폴리올과의 반응으로 생성된다. 폴리우레탄은 구조 중에 우레탄 결합(-NHCOO-)을 함유한 고분자의 총칭으로서 주사슬 중에 점유하는 우레탄 결합기의 비율은 매우 작은 양이고 나머지 hard segment와 soft segment로 구성되어 있다. 이들 segment를 구성하는 폴리에테르 또는 폴리에스테르계 폴리올과 hard segment를 구성하는 디이소시아네이트계 화합물 사이의 반응에 의해 생성되며 촉매, 계면활성제 및 발포제 등은 폴리우레탄의 응용목적과 물성향상을 위하여 첨가한다. 이소시아네이트로는 현재 가장 많이 사용되는 것으로 TDI(toluenediisocyanate)와 MDI(4,4'-diisocyanatediphenyl methane)가 있으며, 이와 같은 폴리올과 이소시아네이트의 배합비율에 따라서 물성에 많은 차이가 나타난다. 폴리우레탄형성은 그림 3과 같은 일련의 반응을 수반한다. 반응식 ①과 같은 폴리올과 이소시아네

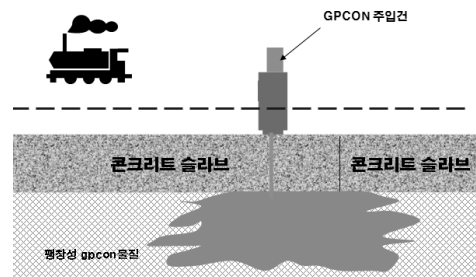


그림 2. 침하된 철도노반에 급속팽창재료 보강





그림 8. 고밀도 급속팽창재료



그림 9. 콘크리트 공시체

표 1. 급속팽창재료 및 콘크리트 공시체의 배합표

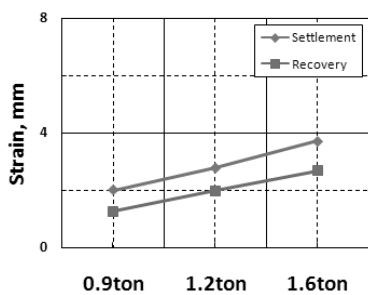
콘크리트 공시체	w/c (%)	Slump (cm)	S/a (%)	단위수량 (kg)	단위시멘트량 (kg)	굵은골재 단위량 (kg)	잔골재 단위량 (kg)	28일압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
		40	11	41	175	438	1,013.6	726.4

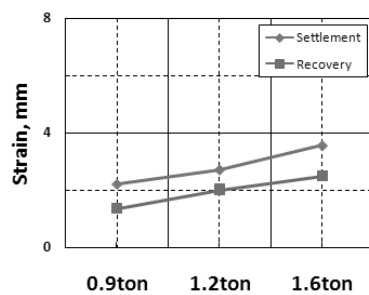
고밀도 급속팽창재료	주 재	축매재	제1첨가재	제2첨가재
		폴리에스테르폴리올 30%	폴리메릭디페닐메탄디이소시아네이트 45%	모노에칠렌글리콜 15%

함에 따라 일정한 침하량을 보이며 공시체에 대하여 약 1~2%정도 침하하였다. 하중재하가 끝난 후 공시체는 전체 침하량에 대하여 회복량은 약 60~65%정도 회복하는 특성을 보였다. 이는 수침 과 비수침이 거의 같은 공학적 특성을 보이며 급속팽창재료의 경우 물과 반응하지 않는 특성을 가지고 있다고 판단 할 수 있다. 그림 10은 고밀도 급속팽창재료 및 콘크리트의 침하량 및 회복량을 나타낸 것으로 수침시료와 비수침시료는 거의 같은 특성을 보이며 하중의 증가로 인하여 약 2.0~3.7mm정도 침하하였다.

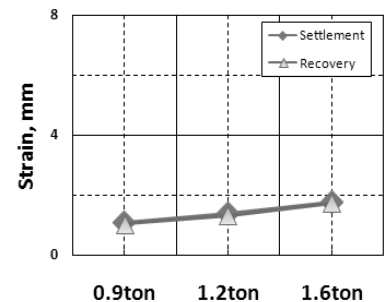
하중재하가 끝난 후 공시체는 전체 침하량에 대하여 약 1.2~2.7mm정도 회복하는 특성을 보였다. 콘크리트의 경우 침하량은 1.1~1.8mm정도 침하하였으며, 하중재하가 끝난 후 공시체는 전체 침하량에 대하여 1.0~1.7mm의 회복량을 보이고 있다. 실험 결과로부터 급속팽창재료의 경우가 반복 철도 하중이 작용하면 순간 침하의 회복률이 콘크리트 보다 우수하며 침하량에서 보면 콘크리트가 급속 팽창재료보다 침하경향이 적음을 알 수 있다. 그림 11은 각 시료를 3Hz의 속도에서 0.9ton의 반복하중으로 0~2000번 하



(a) 비수침 급속팽창재료

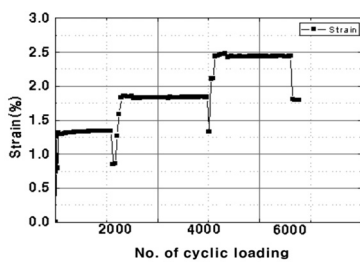


(b) 수침 급속팽창재료

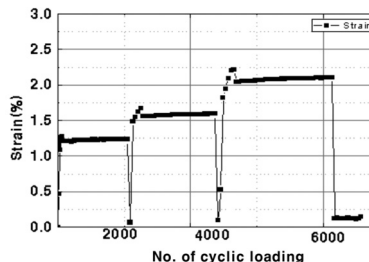


(c) 콘크리트

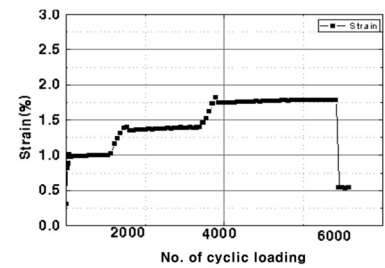
그림 10. 급속팽창재료 및 콘크리트의 침하량 및 회복량



(a) 비수침 급속팽창재료



(b) 수침 급속팽창재료



(c) 콘크리트

그림 11. 반복하중 0.9ton, 1.2ton, 1.6ton상태에서 시료별 침하 거동

중을 가하며, 1.2ton의 반복하중으로 2000번~4000번, 1.6ton의 반복하중으로 4000번~6000번까지 하중을 가한 경우의 시료별 침하 거동을 나타내었다. 표 2는 급속팽창재료와 콘크리트의 반복하중별 침하량 및 회복량을 나타내었다.

## 5.2 반복하중에 의한 진동 저감 효과

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평형위치로부터 시간의 경과와 함께 반복위치가 변화되는 현상을 말한다. 또한, 진동계란 구조물이나 지반 등의 복잡한 진동문제를 한 개의 진동모델로 단순화시킨 것을 말하며, 보강물질의 강성이 적어짐에 따라 진동저감 효과는 커짐을 알 수 있다.

지하철주행에 따라서 발생하는 요인은 우선 열차가 주행함에 따라서 그 자중이 궤도를 통해서 충격적으로 지반에 재하 되는 것이고, 이것은 차축간격, 복수차량의 연결에 의해 결정되는 반복재하 현상이다. 그 위에 구동 모터 등의 조화진동이 가해지며, 열차주행은 주기변동을 함께 갖춘 이동재하 문제로서 특징된다.

그림 12는 각 반복하중 상태에서 시료별 진동 경향을 보여주고 있으며, 급속팽창재료는 콘크리트보다 약 10~15배 정도의 진동 저감 효과가 있는 것을 알 수 있다. 표 3은 반복 하중에 의한 진동 측정 결과를 나타낸 것이다.

비수침과 수침 급속팽창재료의 경우 진동량은 각 하중에 대하여 거의 같은 진동량을 보인다. 급속팽창재료의 경우는 진동저감 효과가 커서 연약한 지반과 같은 특수 조건에서 적절한 지반 보강공법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 진동 저감 특성을 이용하여 지하철 및 산업단지의 중량이 큰 기계 하부지반 보강 시 적용성이 우수하며, 불투수성으로 물과 반응하지 않아 차수재료의 효용성도 높다.

콘크리트 공시체와 급속팽창재료를 이용한 경우에 대한 진동저감 효과를 측정하여 비교한 결과 약 10~15배 정도 급속팽창재료의 진동량이 감소한 것으로 나타났다. 각 시료에 대한 반복하중별 최대 진동치는 표 3과 같은 진동량을 보여주고 있다. 이들 결과로부터 반복철도 하중에 따른 급속팽창재료 보강 철도노반에서 하부 구조물에서의 진동을 크게 감소시킬 수 있다고 판단된다. 즉 고밀도 급속팽창재료는 강성이 작아 진동저감 효과가 커지므로 궤도 및 차량의 안정성에 저해 받지 않는 범위 내에서 강성을 최소화하는 것이 진동저감 효과에 가장 유리함을 알 수 있다. 각 시료별 반복하중별 최대 진동거동은 각 하중별 특성보다 시료의 영향을 받는 것으로 나타났다. 급속팽창재료의 경우보다는 콘크리트의 진동 전달량이 더 크며 진동저감 효과는 급속팽창재료의 경우가 더 큰 것을 알 수 있다. 그림 13은 수침·비수침 급속팽창재료와 콘크리트의 각 하중

표 2. 급속팽창재료와 콘크리트의 침하량 및 회복량(2000회, 속도 3Hz)

반복하중	비수침 급속팽창재료			수침 급속팽창재료			콘크리트		
	0.9t	1.2t	1.6t	0.9t	1.2t	1.6t	0.9t	1.2t	1.6t
침하량(mm)	2.016	2.785	3.723	2.226	2.730	3.572	1.103	1.389	1.784
회복량(mm)	1.284	1.985	2.685	1.365	2.018	2.486	1.049	1.337	1.736

표 3. 반복 하중에 의한 진동 측정 결과(하중반복횟수 2000회, 속도 3Hz)

반복하중	0.9 ton	1.2 ton	1.6 ton
수침 급속팽창재료 진동량 (mm/s <sup>2</sup> )	0.13407	0.14046	0.16599
비수침 급속팽창재료 진동량 (mm/s <sup>2</sup> )	0.14046	0.14684	0.15382
콘크리트시료진동량 (mm/s <sup>2</sup> )	1.87659	1.85438	1.87938

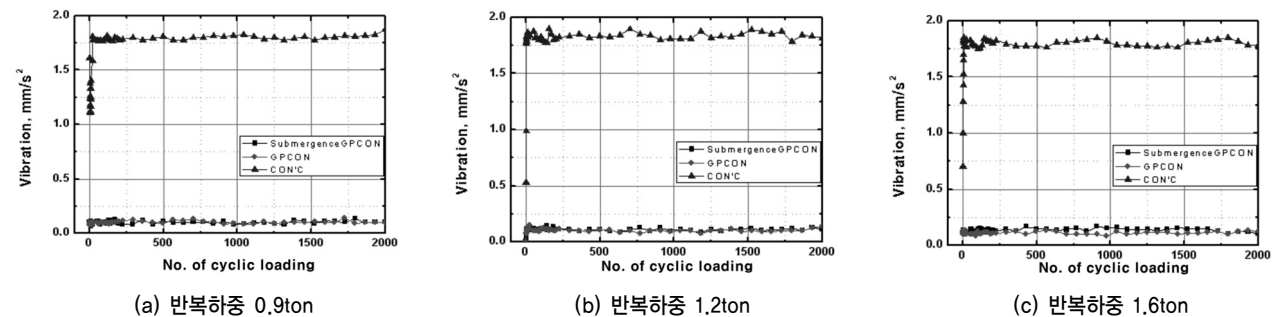


그림 12. 반복하중 0.9ton, 1.2ton, 1.6ton상태에서 시료별 진동 경향

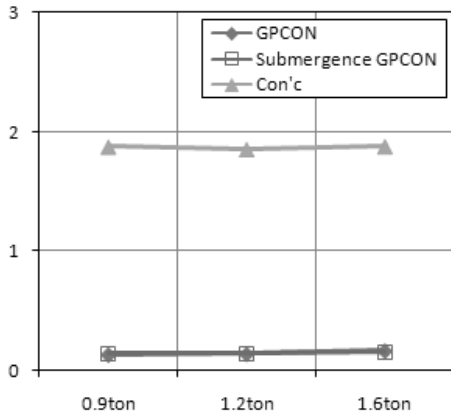


그림 13. 급속팽창재료와 콘크리트의 반복하중에 의한 진동량

별 반복 하중에 의한 진동량을 나타낸 것으로 급속팽창재료의 경우 수침시료와 비수침 시료는 거의 같은 진동량의 특성을 보이고 있다.

## 6. 결 론

반복철도하중에 대한 급속팽창재료 보강 철도노반의 침하 특성 및 진동저감 효과에 관한 연구를 위하여 고밀도 급속 팽창 우레탄 계열 재료의 압축강도 시험과 반복하중별 침하특성 분석 시험, 반복하중별 진동량 저감효과 분석 시험을 시행하고 급속팽창재료의 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 급속팽창재료 공시체를 각각 재하하중 0.9ton, 1.2ton, 1.6ton 상태에 놓고 전체 높이에 대한 소성변형의 침하량을 측정된 결과 약 1~2%정도 침하하였고 하중재하가 끝난 후 회복량은 약 60~65%정도 회복하는 특성을 보였다. 반복하중에 의한 수침한 시료와 비수침 시료의 회복량 차이 및 최대 진동치는 거의 같은 결과를 보였고 불투수성으로 물과 반응하지 않아 차수재료의 효용성도 높다고 판단된다.
- (2) 급속팽창재료와 콘크리트를 이용한 경우의 반복하중에 의한 진동저감 효과 측정 결과 급속팽창재료의 진동량이 약 10배 정도 감소하여 진동저감 효과가 큰 것으로 판단되며, 철도노반에 급속팽창재료를 보강했을 경우 노반의 공극 속으로 지피콘이 침투하여 노반강화

효과가 나타나므로 반복 철도하중에 의한 하부 구조물에서의 진동을 크게 감소시킬 수 있을 것이다.

- (3) 고밀도 급속 팽창재료는 반복하중을 받는 철도나 지하철의 지반보강 효과가 우수하므로 긴급 보수 보강하여 노반의 부등침하에 대한 보강, 기존 파일 및 기초보강, 구조물에 대한 신속보강 작업 등 어려운 시공조건과 연약한 지반과 같은 특수 조건에서 적절한 지반 보강 공법으로 활용할 수 있을 것이다. 또한, 진동 저감의 특성을 가지므로 지하철 및 산업단지의 중량이 큰 기계 하부지반 보강 시 적용성이 우수하다.

## 참 고 문 헌

1. 고효석 (2005), 다점주입 제어방식을 이용하여 지반보강 후 침하된 구조물을 복원하는 공법, *한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집*, pp. 31~36.
2. 김동우, 이재영, 천병식 (2003), 시멘트 그라우트제에서 Cr 용출특성에 관한 연구, *한국지하수토양환경학회지*, Vol. 8, No. 2, pp. 62~69.
3. 김진일, 천병식, 류동성, 김준섭, 이현 (1995), 지반주입용 실리콘 약액의 개발 및 공학적 특성, *대한토목학회 학술발표회 논문집(III)*, pp. 489~492.
4. 김진일, 천병식, 류동성, 남순성, 오성진 (1995), 암반주입용 우레탄계 약액의 특성 및 시공사례 연구, *대한토목학회 학술발표회 논문집 II*, pp. 405~408.
5. 박문수, 채영수, 김수만, 허영 (1994), 지반보강용 폴리우레탄의 적정 배합을 통한 기계적 열적 물성 향상, *한국지반공학회 분학술발표회 논문집*, pp. 133~140.
6. 이용수, 현재혁, 정하익, 정형식 (2001), 폐콘크리트의 유효활용을 위한 환경특성 평가, *한국지반공학회 논문집*, 제17권 제2호, pp. 143~150.
7. 천병식, 고용일 (1995), 석탄재의 건설재료로서의 활용에 관한 연구-환경적 특성 검토를 중심으로, *한국지반공학회지*, Vol. 11, No. 2, pp. 99~106.
8. 천병식, 양형철 (2003), 합성실리카 그라우트제의 공학적 특성, *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제1호, pp. 163~172.
9. 최만용, 오세욱, 방성택, 조상래 (2000), 온도계측을 이용한 그라우팅 효과 판정, *대한토목학회 학술발표회 논문집(II)*, pp. 655~658.
10. 황성도, 이석근, 김영민, 이지익 (2005), 폴리우레탄을 이용한 아스팔트 포장의 포트홀 응급 보수재 평가, *대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp. 5267~5270.
11. 홍원표, 유승경, 김두영, 진성기, 이종인 (1996), 초연약지반개량을 위한 표층고화처리에 관한 연구, *대한토목학회 학술발표회 논문집(III)*, pp. 515~518.
12. 홍원표, 윤준만, 최정희, 정형용 (1997), 고압분사주입공법에 의한 지반개량체의 특성, *대한토목학회 논문집*, Vol. 17, No. III-4, pp. 415~423.

(접수일: 2008. 11. 19 심사일: 2008. 12. 4 심사완료일: 2009. 1. 16)