

급속 팽창성 수지를 이용한 철로침하 복원공법의 평가

Evaluation of Railroad Restoration Technology using Quick-reaction Expansible Resins

신은철*
Shin, Eun-Chul

손원익**
Son, Won-Ik

김성환***
Kim, Sung-Hwan

강현희****
Kang, Hyoun-Hoi

ABSTRACT

Railroad, the structure maintenance and restoration project was increased and widely performed in concrete pavement road and airport, building at downtown area, bridge abutment, and other concrete structures. Especially, the ground reinforcement technique by quick-reaction expansible resins is the most effective countermeasures against differential settlement and undesired deformation of structure. In this paper, the unconfined compressive strength and some environmental related tests were conducted to evaluate compressive strength and environmental effect of quick-reaction expansive resins and soil mixtures. Also, three case histories of concrete structure and railroad restoration project are presented. Based on the laboratory test, the quick-reaction expansible resins and soil mixture represent the sufficient compressive strength and the leachate material is satisfied the environmental regulation limits. As a result of this study, the structure restoration technology using quick-reaction expansible resins is very effective for restoration of differential settlement and deformation, and it is environmentally sustainable technology.

1. 서 론

최근 도심지와 같은 교통량이 많은 제한된 공간에서의 긴급 보수와 보강작업이나, 연약지반에서 발생하는 구조물의 부등침하 보강작업 같은 구조물의 신속 보강 작업은 어려운 시공조건과 열악한 지반과 같은 특수조건 때문에 현장에서 사용할 수 있는 적절한 지반보강공법이 필요한 실정이다. 특히, 철도 노반의 경우 부등침하가 발생하면 철로의 안전에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 일반적으로 구조물이 경사지거나 변형되어 균열이 발생하게 되는데 주요원인은 지반이 연약하거나 지하수 유동에 따른 공극이 발생하여 이 공극에 의해 지중 응력의 변화가 생기기 때문이다. 부등침하로 인하여 구조물의 기초부분이 변형되면, 지반의 지지력을 보강하는 방법을 사용하게 된다. 현재 일반적으로 국내에서는 물유리계공법, 약액공법, 고압분사주입공법, Jet Grout 공법 등과 같은 지반주입공법들이 현장에서 활발하게 사용되고 있다. 그러나, 선진국에서는 이보다 훨씬 개선된 재료 및 공법들이 개발되어 적용되고 있는 실정이다. 특히, 도심지와 같은 제한된 공간과 연약지반에서 발생하는 철로관련 구조물의 부등침하에 대한 보

* 인천대학교, 토목환경시스템공학과, 정회원

E-mail : ecshin@incheon.ac.kr

TEL : (032)770-8466 FAX : (032)770-8460

** (주)호성지피콘 상무이사

*** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정

**** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정

강 작업 등 특수조건에서의 적절한 지반보강공법이 필요한 실정이다. 또한 기존의 공법에서 발생하는 환경문제 등을 감안한다면 인체에나 환경에 무해한 새로운 지반보강 공법이 필요하다.

본 연구에서는 철도, 도로 및 공항의 콘크리트 구조물에 대한 긴급 보강 및 침하된 구조물 바닥을 원상 복구하는 급속 팽창성 수지를 활용한 구조물 복원공법의 지반상태와 물질 주입량에 따른 압축강도 시험과 화학물질 저항성 시험, 철로 복원 현장 적용성 평가, 용출시험을 통한 환경적 유해요소 포함여부를 확인하였다.

2. 급속 팽창성 수지를 활용한 구조물 복원 공법

급속 팽창성 수지를 활용한 구조물 복원공법은 철로, 도로 및 공항의 콘크리트 포장의 특수한 조건에서 콘크리트 구조물 및 지반부등침하에 대한 긴급보강 및 침하된 구조물 바닥의 원상 복구를 위한 지반보강공법 기술이다. 주요내용은 프레온 가스를 발생하지 않는 팽창성 수지를 이용한 보강 재료 개발과 이 보강 재료를 이용하여 굴착공사 없이 시공상 접근이 곤란한 조건의 환경에서 지반 보강 공사를 신속히 수행할 수 있는 보강장비를 이용하여 구조물 원상 복구를 위한 긴급 복원기술이다.

급속 팽창성 수지를 활용한 구조물 복원공법은 지반의 특성을 사용목적에 부합되게 보강하기 위해 고밀도 팽창성 폴리머 재료의 주입재를 지반의 간극 속으로 침투시키는 것이다. 이 주입공법은 경량의 급속팽창성 수지물질이 느슨한 지반의 간극을 채우면서 지반의 지지력을 강화시키고 지지력을 약 5배 이상 증강시킨다. 주입한 급속 팽창성 수지물질은 시간이 경과하면서 서서히 팽창(약 30배까지 팽창)이 일어나면서 주변 지반에 $50 \sim 2,500 t/m^2$ 의 팽창력이 작용하여 구조물을 밀어 올린다. 구조물을 밀어 올린다는 의미는 상부구조물에 의한 정하중뿐만 아니라 구조물 상승 시에 발생한 동하중까지 대응할 수 있는 압축력과 밀도가 물질이 주입된 기초지반에 이미 형성되었다는 것을 의미한다. 다시 말해 물질이 주입된 지반의 지내력이 상부 구조물의 정하중을 감당할 수 있는 것보다 훨씬 큰 수치에 도달했다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 물질 주입작업은 전체공정을 통해 지반의 지내력가가 균일해질 때까지 반복 작업된다. 본 공법은 지지력은 강화되면서 지반보강으로 인해 지반 자체의 상재하중이 증가되어서는 안되는 연약지반에 적합한 공법이다. 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 철로구조물 바닥에 대한 급속 팽창성 수지를 활용한 철로구조물 복원공법은 바닥하부 공동에 우레탄 물질의 충전과 동시에 발생한 팽창압에 의해 바닥 하부지면을 다지면서 침하된 바닥을 원래의 바닥높이로 복원하는 공법이다.

3. 실내시험

3.1 공시체제작

철노반상태와 주입량에 따른 압축강도 시험을 위해 자갈, 규사와 혼합한 공시체를 제작하였다. 자갈이 혼합된 토양혼합물 공시체 (그림 1-(a), (b),(c))는 급속 팽창성 수지 주입량 (1.0 kg)과 (1.5 kg), (6.6 kg)이고, 규사가 혼합된 토양혼합물 공시체는 (그림 1-(d), (e))로 급속 팽창성 수지 주입량이 (6.0 kg), (9.0 kg)이다. 공시체는 자체제작한 성형틀에 의해 토양혼합물을 제작한 후(그림 1), 압축강도 테스트용 시료인 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 로 재성형하였다(그림 2).

(a) 1.0 kg (b) 1.5 kg (c) 6.6 kg (d) 6.0 kg (e) 9.0 kg

그림 1. 토양혼합물 시료

(a) 1.0 kg (b) 1.5 kg (c) 6.6 kg (d) 6.0 kg (e) 9.0 kg

그림 2. 일축 압축강도시험용 재성형 공시체

3.2 일축압축강도시험

급속 팽창성 수지 물질의 압축강도 시험은 철도노반 상태와 물질 주입량에 따라 자갈+ 급속 팽창성 수지 물질(1.0 kg), 자갈+ 급속 팽창성 수지 물질(1.5 kg), 규사+ 급속 팽창성 수지 물질(6.0 kg), 규사+ 급속 팽창성 수지 물질(9.0 kg), 자갈+ 급속 팽창성 수지 물질(6.6 kg)로 제작된 공시체를 사용하여 강도 테스트하였다.

시험관련 규정은 KS M 3809(2006), KS M ISO 844(2002), KS M ISO 1923(2005) 규정에 의하여 시험을 수행 하였으며, 압축강도 시험에 사용한 시험기는 1982년도에 일본에서 제작된 200 tf, 50 tf의 CAP을 가진 ACR-200-50P TYPE의 만능재료시험기를 사용하였다. 만능재료 시험기에 하중과 변위를 체크하는 계측기를 추가로 설치하여 압축강도 시험의 편의성을 추가 하였으며, 컴퓨터와 호환이 가능하게 하여, 데이터의 정밀성을 한층 향상시켰다.

3.3 화학물질 저항성 시험

급속 팽창성 수지물질의 화학물질 저항성 시험은 자체 제작한 성형틀에 의해 성형된 급속 팽창성 수지 물질 (1.0 kg)과 (1.5 kg)을 5 cm× 5 cm× 2.5 cm의 시료로 재성형하여 7일간 아세톤, 석유, 메탄올, 모터오일, 가솔린, 물, 10% 염산, 10% 황산의 화학물질이 담긴 비커에 침수시켰을 때의 시료 변화 모습을 관찰한 것이다. 침수시키는 과정에서 급속 팽창성 물질이 화학물질들에 침수가 되지 않아 쇠석으로 하중을 가하여 침수시켜 성형시료의 상태변화를 확인하였다. 추가적으로 관찰 기간 중 다른 이 물질이 유입되는 것을 방지하기 위하여 비커입구를 호일로 밀봉한 후 성형시료의 변화상태를 관찰하였다.

3.4 환경적 특성 분석

급속 팽창성 수지 물질의 환경적 특성을 분석하여 대상재료의 환경 안정성을 파악하기 위하여 용출시험을 실시하였다. 용출시험은 한국화학시험연구원에서 급속 팽창성 수지 물질에 규사와 혼합한 토양혼합물과 결과치의 비교대상으로 토양혼합물에 급속 팽창성 수지 물질과 혼합된 규사 자체에 대해 용출시

험 하였다. 용출시험은 토양오염공정시험방법(2002)에 의해 시행하였으며, 시험항목은 Cd, Cu, Zn, Ni, As, Hg, Pb, Cr(VI), CN^- , F^- , 유기인, PCB, 수분, pH(20°C), 페놀류(페놀), 페놀류(PCP), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌과의 22개 항목을 검사 하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 압축강도특성

철도노반 상태와 주입량에 따른 압축강도 시험에서 자갈+ 급속 팽창성 수지 토양혼합물(그림 3-(a), (b), (c))의 자갈+ 급속 팽창성 수지 물질(1.0 kg)의 압축강도는 122.44 kgf/cm^2 이 측정되었고(그림 3-(a)), 자갈+ 급속 팽창성 수지 물질(1.5 kg)의 압축강도는 124.08 kgf/cm^2 이 측정되었다(그림 3-(b)). 자갈+ 급속 팽창성 수지 물질의 상태에서는 급속 팽창성 수지 물질 (0.5 kg)의 차이로 압축강도는 1.64 kgf/cm^2 의 차이가 났다. 자갈+ 급속 팽창성 수지 물질(6.6 kg)의 압축강도는 263.64 kgf/cm^2 으로 가장 높은 압축강도를 나타내었다(그림 3-(c)). 규사+ 급속 팽창성 수지 토양혼합물(그림 3-(d), (e))에서 규사+ 급속 팽창성 수지 물질(6.0 kg)의 압축강도는 212.24 kgf/cm^2 이 측정되었고(그림 3-(d)), 규사+ 급속 팽창성 수지 물질 (9.0 kg)의 압축강도는 235.08 kgf/cm^2 이 측정되었다(그림 3-(e)). 규사+ 급속 팽창성 수지 물질의 상태에서는 급속 팽창성 수지 물질 (3.0 kg)의 차이로 압축강도는 22.84 kgf/cm^2 의 차이가 났다. 압축강도 시험에서 급속 팽창성 수지 물질은 토양이나 다른 물질과 혼합 하였을 때 물질 주입량에 따라 높은 압축강도를 나타내었으며, 특히 자갈과 혼합한 토양혼합물이 규사와 혼합한 토양 혼합물보다 압축강도가 높게 측정됨을 확인하였다.

(a) 급속 팽창성 수지 1.0 kg

(b) 급속 팽창성 수지 1.5 kg

(c) 급속 팽창성 수지 6.6 kg

(d) 급속 팽창성 수지 6.0 kg

(e) 급속 팽창성 수지 9.0 kg

그림 3. 급속 팽창성 수지의 주입량에 따른 일축압축강도

4.2 화학물질 저항성 시험

화학물질 저항성 시험에서 급속 팽창성 수지 물질은 석유, 모터오일, 가솔린, 물, 10% 염산, 10% 황산에는 반응을 보이지 않았으나(그림 4-(c), (d), (e), (f), (g),(h)) 7일 후 아세트산과 메탄올(그림 4-(a), (b))에는 성형시료의 변형이 일어남을 확인하였다.



- (a) 아세톤 (b) 메탄올 (c) 석유 (d) 모터오일 (e) 가솔린 (f) H_2O (g) 10%염산 (h) 10%황산

그림 4. 화학물질에 대한 저항성 시험

화학물질의 저항성 시험 결과 급속 팽창성 수지 물질의 내화학성은 좋으며, 그리스유와 오일에 대한 저항성은 매우 뛰어나다. 일반적으로 수용성세척제, 염, 산, 알카리 등의 수용액에 대해서 안정하다. 강산과 강알카리는 단단한 거품에 대하여 화학성분의 분해를 일으킬 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

4.3 환경적 특성 분석

토양혼합물과 규사의 용출시험 결과를 토양오염 우려기준과 비교하여 나타내었다. 토양오염 우려기준은 지적법 제5조 제1항의 규정에 의한 전·답·과수원·목장 용지·임야·학교 용지·하천·수도용지·공원·체육용지·유원지·종교 용지 및 사적지를 말하는 “가지역”으로 하였다.

토양혼합물 용출시험결과와 토양오염 우려기준 비교결과 Cu는 2.239 mg/kg, Zn은 115 mg/kg, Ni은 2.43 mg/kg, As는 0.251 mg/kg, Pb은 2.83 mg/kg, F^- 는 67 mg/kg으로 모두 기준치 이하로 측정 되었으며, Cd, Hg, Cr(VI), Cn^- , 유기인, PCB, 페놀류(페놀), 페놀류(PCP), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌은 검출되지 않았다. 상기 결과로 알 수 있듯이 급속 팽창성 수지 물질이 혼합된 토양혼합물은 용출시험결과 환경적으로 유해하지 않다는 결론을 얻을 수 있었다. 그림 5는 토양오염기준에 대한 환경시험결과를 도시한 것이다.

그림 5. 환경적 특성분석 비교 그래프

5. 철로침하복원 현장

급속 팽창성 수지 물질의 현장 적용성 및 침하된 철로의 복원능력을 확인하기 위하여 침하된 철로 지반에 급속 팽창성 수지 물질을 주입하였다. 공사범위는 ○○지역에 위치한 상행선 철도 3m 하부에 대한

침하지반 보강 공사이다. 현장은 심도 1.2m ~ 1.5m를 전후하여 침출수에 의한 지반교란으로 인하여 철로 하부에 팽창이 형성되고, 지반 지내력 부족으로 철로가 침하되어 한달에 1~2회 보수를 지속적으로 수년간 해왔던 곳으로 지반보강 후 침하된 철로를 1cm ~ 1.5cm 원상태로 복원하였다. 지반강화는 1.5m 깊이에서 철로 밖에서 사선으로 철로 하부에 동파이프를 삽입하여 팽창성 물질을 주입, 지반강화 후 복원하였다. 기차가 운행하는 오전 10:30 분에 작업을 시작하여 2시간 만에 작업 종료하였다. 물질주입 후 5분이면 80% 경화가 이루어지고 15분이면 100% 경화되는 물질의 특성을 이용 기차가 통행하지 않는 10분 동안에 물질을 주입하여 지반강화 및 복원을 할 수 있었다. 팽창성 물질로 작업을 실시한 목적은 침출수를 막아주고 하부지반을 강화시켜 침하를 방지하기 위함이었다. 작업시 유의사항으로는 물질주입시 물질이 자갈층으로 올라와서 자갈과 혼합하여 단단한 층을 이루면 안되고 철로가 용기되지 않게 제어해야 하는 것이다.

- | | | |
|--------------|----------|----------------|
| (a) 물질주입위치선정 | (b) 천공 | (c) 주입용 파이프 삽입 |
| (d) 물질주입 | (e) 물질주입 | (f) 작업완료 |

그림 6. 철로 침하 복원 현장 전경

6. 결 언

본 논문에서는 급속 팽창성 수지 물질의 압축강도 시험과 화학물질 반응시험, 용출시험으로 급속 팽창성 수지 물질의 성질을 파악하였다. 또한, 철로침하 현장에서 침하복원의 성능을 평가 분석 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 철도노반상태와 주입량에 따른 압축강도 시험에서 급속 팽창성 수지 물질은 토양이나 다른 물질과 혼합 하였을 때 물질 주입량에 따라 높은 압축강도를 나타내었다. 특히, 자갈과 혼합한 토양혼합물이 규사와 혼합한 토양 혼합물보다 압축강도가 높게 측정됨을 확인 할 수 있었다.
- (2) 화학물질 저항성 시험에서 급속 팽창성 수지 물질은 석유, 모터오일, 가솔린, 물, 10% 염산, 10% 황산에는 성형시료에 어떠한 변화도 관찰되지 않았지만, 아세톤과 메탄올에는 수침시간이 길어질수록 성형시료의 형태가 변화하였다. 화학물질 저항성 시험으로 급속 팽창성 수지 물질은 CH_3COCH_3 와 CH_3OH 에 약하다는 것을 확인 할 수 있었다.
- (3) 급속 팽창성 수지를 활용한 철도구조물 복원공법 시행중 발생할 수 있는 환경적 유해요소 여부를 확인하기 위한 용출시험에서 급속 팽창성 수지 물질이 혼합된 토양혼합물은 토양오염 우려기준과 비교분석한 결과, 모든 검출성분이 기준치 이하로 나타나 환경적 유해성이 없는 것으로 나타났으며, 발암물질인 6가 크롬도 검출되지 않았다.
- (4) 현장 적용성 평가를 위해 철로침하 복원 현장에서 급속 팽창성 수지를 활용한 철도지반의 복원공법은 기존에 사용되던 공법들보다 단축된 시간으로 작업을 완료할 수 있었으며, 침하된 현장을 완벽하게 복원됨을 확인하였다.

참고문헌

1. 김진일, 천병식, 류동성, 남순성, 오성진, “**암반주입용 우레탄계 약액의 특성 및 시공사례 연구**”

2. 김진일, 천병식, 류동성, “지반보강용 폴리우레탄의 물리, 화학적 특성”
3. 박문수, 채영수, 김수만, 허영, “지반보강용 폴리우레탄의 적정 배합을 통한 기계적 열적 물성향상”
4. 황성도, 이석근, 김영민, 이지익(2005), “폴리우레탄을 이용한 아스팔트 포장의 포트홀 응급 보수재 평가”, 대한토목학회 정기학술 대회
5. 천병식, 류동성, 김종대, 류지양, “SOIL NAILING SYSTEM의 보조공법으로서 폴리우레탄의 보강효과”
6. 홍원표, 윤중만, 최정희, 정형용, “고압분사주입공법에 의한 지반개량체의 특성”
7. 천병식, 장명순, 고용일, 박기천, “석탄재의 건설재료로서의 활용에 관한 연구(환경적 특성 검토를 중심으로)”
8. 김동우, 이재영, 천병식(2003), “시멘트 그라우트재에서 Cr 용출특성에 관한 연구”, 한국지하수도양 환경학회지 Vol. 8, No.2, pp. 62-69
9. 최만용, 오세욱, 방성택, 조상래, “온도계측을 이용한 그라우팅 효과 판정”
10. 이용수, 현재혁, 정하익, 정형식(2001), “폐콘크리트의 유효활용을 위한 환경특성 평가”, 한국지반공학회논문집 제17권 제2호 pp. 143-150
11. 김진일, 천병식, 류동성, 김준섭, 이현, “지반주입용 실리카졸 약액의 개발 및 공학적 특성”
12. 홍원표, 유승경, 김두영, 진성기, 이종인, “초연약지반개량을 위한 표층고화처리에 관한 연구”
13. 천병식, 양형철(2003), “합성실리카 그라우트재의 공학적 특성”, 한국지반공학회논문집 제19권 1호 pp. 163-172
14. 황경수, 이상익, 김병일, 박용원, “NSC 및 시멘트를 섞은 하수슬러지의 일축압축강도”
15. 고효석, “다점주입 제어방식을 이용한 침하된 구조물의 지반보강 및 보강공법”
16. 천병식, 김수삼, 고경환(1997), “국산 생석회 혼합처리에 의한 지반개량”, 제 17 권
17. 민덕기, 황광모, 정진형, “산화철을 첨가한 생석회 혼합물에 대한 황산염의 영향”
18. 천병식, 김수삼, 강부건, 최상훈, 김응규, “생석회 파일 주변지반의 전단강도 특성에 관한 연구”
19. 천병식, 김수삼, 강부건, 고경환, 김준섭, “생석회공법에 의한 지반개량효과에 관한 연구”
20. 금호미쓰이화학(주) 응용연구소, “대체 발포제 HFC-245fa에 관한 고찰”
21. 김진태, 이동열, 민병일, “LDPE / HDPE / PP 혼합플라스틱의 Form 성형 연구”