친환경 바이오그라우팅을 이용한 모래지반 개량 공법

Improvement Method of Sand Ground Using an Environmental Friendly Bio-grouting Material

김대현 · 사공명 · 박경호*

Dae-Hyeon Kim · Myung Sagong · Kyung-ho Park

Abstract The purpose of this research is to evaluate the improvements in the strength and injection range of loose ground after injecting CaCO_3 (created by microorganism reaction). For this purpose, three cases of single-layer (Sand, SP, SW) specimens were made in a 150mm D × 200mm H space and two cases of multi-layer specimens (SW/SP, SP/SW) were made in a 150mm D × 300mm H space. The specimens were made with a relative density of 30% of soft ground and an injection was given over a time of one day. The uniaxial compression strength was measured with a cone penetrometer and the injection range was observed by checking the bulb formation around the injection nozzle. Also, the compositions of the specimens were assessed through XRD analyses. Based on the test results, a compressive strength of 500kPa and 15cm thick cementation were noted due to the cementation of the soil. This implies that there are significant effects of the pore condition and size on bio-grouting technology.

Keywords : Bio-grouting, Sand Ground, Multi-layer Soil, Single-layer Soil, Porosity

초 록 본 연구에서는 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘을 현장조건과 유사한 장비로 제작하여 모래지반에 주입함으로 모래지반의 강도 개선 및 주입범위를 평가하고자 하였다. 본 연구를 분석하기 위해 단층토(Sand, SP, SW)는 D 150mm × H 200mm로 3가지 case를 제작하였고, 다층토(SW/SP, SP/SW)는 D 150mm × H 300mm로 제작하여 2가지 case를 Dr 30%인 연약지반으로 제작하여 1일 동안 주입실험을 수행하였다. 포켓관입시험기로 일축압축강도를 측정하였고, 주입노즐 주변의 구균형성을 통해 주입범위를 살펴보았다. 또한, XRD분석 통해 공시체내의 성분분석을 진행하였다. 그 결과, 다층토에서 SP/SW에서 전구간에 걸쳐 약 500kPa의 강도와 15cm 두께의 고결을 확인하였다. 이는 바이오그라우팅 기술이 지반의 간극 상태와 크기에 따라 주입 효과에 상당한 영향이 있음을 확인 할 수 있었다.

주요어 : 바이오그라우팅, 모래지반, 다층토, 단층토, 간극률

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

국내에서는 연약지반 및 해안 준설 매립 지반을 기초지반으로 활용하여 시공하는 공사현장이 증가하고 있기 때문에 그 동안 건설부지로 고려하지 않았던 느슨한 사질토나 연약한 실트질로 구성된 연약지반 개량 공법에 대한 관심이 상당히 높아지고 있다. 또한 해외수주 등으로 중동지역에 많은 건설업체가 진출하고 있어 연약지반의 개량을 위한 새로운 공법 개발이나, 신소재의 개발이 필요한 실정이다.

우리나라의 그라우팅공법 현황은 선진국과 비교해 기술력이나 시공의 신뢰성 측면에서 크게 낙후되어 있다.

즉, 전문성이 없이도 그라우팅에 대한 경험만 있다면 누

구나 할 수 있는 단순한 지반보강 보조공법으로 인식되고 있기 때문에 매년 7,000억 원 정도의 크지 않은 시장규모에 900여 개의 보링 및 그라우팅 등록업체가 난립하고 있는 실정이다[1].

국내 건설현장에서 주로 사용되는 그라우팅 공법은 물유리계 약액, 우레탄, 고압분사주입 등이 단독 또는 2~3가지가 병행되어 쓰이고 있으나, 이러한 주입공법은 대부분 지반의 강도 증진에만 중점을 두었으며, 그라우팅 공법에 주원료로 사용되는 시멘트 및 약액을 통해 발생하는 이산화탄소 배출 및 지하수 오염 등 환경문제에 대한 구체적인 해결방안은 제시하지 못하고 있다.

Korea Cement Association[2]에 따르면 2006년 국내 시멘트의 생산량은 약 48,000천 톤으로 세계 시멘트 생산량 7위에 해당하며, 1톤의 시멘트를 생산 시 발생하는 이산화탄소는 약 0.9톤으로서 시멘트를 통해 발생하는 이산화탄소가 온실가스의 주원인이 되고 있으므로 최근에는 이러한 환경문제를 해결하기 위해서 근본적으로 시멘트를 절감할 수 있는 대체재 개발이 다양하게 연구되고 있다.

*Corresponding author.

Tel.: +82-62-230-7093, E-mail : munhakng@nate.com

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.6.473>

본 연구에서는 연약지반인 느슨한 사질토 지반에 친환경 미생물의 생화학적 반응에 의해 생성된 탄산칼슘을 현장과 유사한 방법으로 그라우팅 기술을 적용하여 간극의 상태와 크기에 따라 바이오그라우팅이 지반의 강도 및 주입범위에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 그라우팅 공법인 2액 1공정 1.5shot을 적용시켜 단층토, 다층토에 Air Compressor의 일정한 압력을 이용하여 주입하였으며, 포켓관입시험기를 통해 일축압축강도 및 주입범위를 분석하였다. 또한 각각의 공시체의 화학적 반응 및 성분 분석을 살펴보기 위해 XRD분석을 수행하였다.

1.2 선행연구

미생물을 이용한 바이오그라우팅에 대한 연구는 현재까지 기초 연구단계에 있다. 국내에서는 Kim 등 [3-5], Kim [6], Park [7]과 Park과 Kim [8,9]이 연약지반에 순수한 미생물을 적용하여 강도증진 효과를 분석한 연구를 수행한 바 있으며, 주입공법을 미생물에 접목시켜 바이오그라우팅 공법에 대한 연구를 수행하고 있다. 국외에서는 Dejong 등 [10]은 미생물 고결화에 관한 연구를 수행하였으며, Whiffin 등 [11]과 Paassen 등 [12]은 바이오그라우팅의 현장 적용성 평가에 대한 연구를 수행하였다.

국내에서는 Kim 등 [3-5]이 순수 미생물의 고결화 확인을 위한 연구를 수행하였으며, 무처리, 고농도처리, 25%시료 고농도처리 등 미생물 처리 기술을 통해 포켓관입시험기로 시험결과 500kPa 이상의 강도를 나타내었다. 또한 미생물 고농도의 조건을 통해 고결물의 침전을 높이는 방법을 개발함으로써 “미생물을 이용한 연약지반의 고결화 방법”이라는 미생물 고결화 특허[3]를 국내에 최초로 등록하였고, 지반조건에 따른 미생물의 고결화 효과를 분석하였다.

국외에서는 Passen 등 [12]과 Dejong 등 [10,13]을 비롯해 소수의 연구자들에 의해 미생물의 고결화 연구가 진행되고 있다.

Dejong 등 [10]은 무처리된 모래 시료, 석고로 처리된 모래 시료, 미생물로 처리된 모래 시료의 3가지 시료에 대하여 입자간 고결화 정도를 확인하고자 시료의 상대밀도를 35%로 맞추어 실험을 실시하였고, 미생물 용액을 시료에 주입 후 반응 용액을 주입시키는 후처리 기술을 이용하여 실험을 실시하여 미생물로 처리된 모래시료에서 고결화가 발생함을 증명하였다.

Whiffin 등 [11]의 경우 공시체의 강도 값은 10MPa로 큰 값을 얻었으나, 정량적인 분석이 아닌 추정치에 의한 값으로 강도를 추정하였다.

Paassen 등 [12]의 경우 큰 모조토에서 실험을 하였으나, 강도의 증가는 표면이 닿는 부분과 공기가 닿을 수 있는 겉 표면부분을 따라서 강도가 증가되었고, 공기가 충분히 많은 중앙 부분에서의 강도 증가는 미미함 등의 문제점이 있음을 확인할 수 있었다.

앞서 수행된 국내 선행연구는 미생물의 고결화를 이루고자 미생물 용액과 반응용액을 시료에 적용하여 손비빔을 통해 연약지반의 강도를 개선하고자 하였으나, 현장 적용성이

떨어지는 문제점이 있었다. 국외 선행연구의 경우 미생물을 그라우팅에 접목시킨 바이오그라우팅 실험을 수행하였으나, Flushing하는 단순한 방법을 사용함으로써 중앙부분에서의 강도 증가가 미미한 문제점이 제기되어 주입기술이 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 적용되는 유사한 그라우팅 주입장비(2액 1공정)를 제작 및 개발하고 8mm 주입노즐을 제작하여 연약한 모래지반에 대한 바이오그라우팅의 현장 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 미생물 반응으로 생성된 고결물(CaCO₃)

2.1 미생물 반응에 의한 고결물 생성과정

본 연구에서 사용된 *B. pasteurii* 균(KCTC 3558)은 한국 생명공학연구원 생물자원센터에서 균 배양제로 균주를 분양받아 사용하였다. *B. Pasteurii* 균을 배양하기 위해 배양배지는 Nutrient Broth 8g/L, Urea 20g/L로 시료를 증류수 1L에 혼합하여 배양하였으며, 30°C에서 180RPM의 셰이킹 인큐베이터에서 배양하였다. 미생물과 요소의 반응은 식 (1)과 같으며, 미생물 성장을 통해 요소와 반응하여 아래와 같이 탄산 이온(CO₃²⁻)과 두 개의 암모늄 이온(NH₄⁺)으로 가수분해 된다.

B. pasteurii 균은 요소를 섭취하여 반응을 통해 생성된 탄산 이온(CO₃²⁻)과 염화칼슘(CaCl₂) 수용액의 칼슘 이온(Ca²⁺)이 반응하여 탄산칼슘(CaCO₃)이 생성되며, 탄산칼슘 침전 반응은 식 (2)와 같다.

이러한 단계를 거쳐 미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘(CaCO₃)은 지반 내의 간극을 채워 주고 입자간 결합력을 높임으로서 지반의 고결화(Cementation)가 나타난다. 미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘(CaCO₃)은 지반 내의 간극을 채워 입자간의 결합력을 높여 지반의 고결화(Cementation)가 형성되는데 Fig. 1은 각각의 식을 탄산칼슘 생성과정 및 흙 입자에 침전되는 모습의 Cycle을 도식화 한 것이다.

2.2 바이오그라우팅 공법의 특징

주입공법은 가는 주입 관을 지반 속에 삽입한 후 그라우트재(시멘트, 약액 등)에 압력을 가하여 지반 내에 존재하는 간극, 공동, 균열 등을 주입 그라우트재로 채워 강도증가 및 차수성을 높이는 연약지반 개량공법 중 하나이다.

바이오그라우팅 공법은 약액 주입공법에 해당되며 약액 주입공법은 고결시간을 기준으로 gel-time이 20분 이상 일 경우에는 1.0shot(약액과 반응 약액을 각각 따로 주입), 2~10분일 경우에는 1.5shot(약액과 반응 약액을 중간에서 혼합 주입), 혼합되는 순간 반응의 경우 2.0shot(약액과 반응 약액을 미리 혼합하여 주입)으로 구분된다[5]. 특히, 바이오그라우팅의 경우 Kim 등 [5]의 선행연구 결과를 통해 약액과 반

Net Urea Hydrolysis Reaction: $\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$

Net pH increase: $[\text{OH}^-]$ generated from NH_4^+ production $\gg [\text{Ca}^{2+}]$

Fig. 1 Process of creation of the calcium carbonate [13]

Fig. 2 Pore change in the particles using cementation [13]

응 약액을 중간에 혼합 주입하는 1.5shot과 혼합되는 순간 반응을 일으키는 2.0shot system 둘 다 가능한 것으로 나타났으나 2액 주입조건을 재현하고자 1.5shot을 이용하여 실험을 수행하였다.

바이오그라우팅은 환경오염에 미치는 영향이 높은 시멘트 및 약액 등을 대신하여 친환경 신소재 미생물을 이용함으로써 탄산칼슘 침전을 통해 입자 사이의 빈 간극을 채움으로써 지반의 강도 증가효과 및 차수효과를 기대하는 공법이며, Fig. 2는 고결작용을 통한 흙 입자간의 간극변화를 나타내고 있다.

3. 실내실험

3.1 연구에 사용된 시료의 물리적 특성

시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 한국 공업규격에 준하여 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302) 분석을 실시하였다.

3.1.1 시료의 물리적 특성

*B. pasteurii*는 흙 입자와 입자간의 크기에 있어서 $0.3\mu\text{m} \sim 0.5\mu\text{m}$ 의 지름을 가지고 있으며, 지반에 적용 시 활발히 움직일 수 있게 하기 위해서는 흙 입자 크기가 중요하다. 본 연구에 사용된 D150×H200(mm)의 공시체의 시료는 표준사,

Table 1 Physical characteristics of the specimens

Specimen	G_s	# 200(%)	LL	PL
Sand	2.55	1.24	N.P	N.P
SP	2.68	2.14	N.P	N.P
SW	2.64	4.34	N.P	N.P

0.42mm~0.84mm의 SP 시료와 입경이 골고루 분포하는 SW 시료로 가장 미생물이 활발히 움직이면서 가장 최적의 생장을 할 수 있는 흙과 일반 시료를 다음과 같이 선정하였다.

Table 1은 D150×H200(mm) 및 D150×H300(mm) 공시체 제작에 사용된 시료의 물리적 특성을 나타낸 표로써, 비중 및 # 200체 통과율 액성한계와 소성한계는 N.P(비소성)으로 나와 흙 분류 시 SW, SP로 분류 되었다. 표준사 시료는 주 문진 표준사를 이용하였으며, SW, SP 시료는 점진강 유역에서 채취한 모래시료로서 SP시료는 인위적으로 체 0.42mm~0.84mm 사이의 시료만을 추출하여 균등계수와 곡률계수를 수정함으로 SP시료를 제작하였다.

3.1.2 시료의 입도분포 곡선

Fig. 3은 단층토, 다층토 공시체 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것으로 아래 그림과 같다.

Fig. 3 Sieve analysis test of the specimens

3.1.3 시료의 배합비

(1) D150×H200(mm) 시료 배합비

본 실험에 사용된 D150×H200(mm) 시험 시료 배합비는 표준사, SW, SP시료를 이용하여 각각의 상대밀도(Dr) 30%를 기준으로 느슨한 상태 지반을 나타냈으며, 모든 실험은 배수조건으로 실험하였다. 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액은 1:1 비율로 장비주입 방법으로 각각 2000 mL를 공기압 1 kPa으로 1회 주입하여 실험하였다.

Table 2는 D150×H200(mm) 시료의 배합비를 나타낸 표로써, 공시체는 주입액이 주입관을 타고 공시체 하단부로 배수되는 것을 방지하고자 하단부를 기준으로 차수층인 모래를 20 mm 설치하였다.

Table 2 D150×H200(mm) Ratio of the specimens

Specimen	Condition		Soil (g)	CaCl ₂ (ml)	Microorganism (ml)
D150×H200 (mm)	Normal concentration bacteria	Sand	1760.8	2000	2000
		SW	1760.8	2000	2000
		SP	1760.8	2000	2000

(2) D150×H300(mm) 다층토 시료 배합비

Table 3은 D150×H300(mm) 시료의 배합비를 나타낸 표로써, SW, SP시료를 이용하여 각각의 상대밀도(Dr) 30%를 기준으로 느슨한 지반조건을 재현하였으며, 모든 실험은 배수조건으로 실험하였다.

다층토 A실험은 상부층에 SW시료, 하부층에는 SP시료로 제작하였고, 다층토 B실험은 다층토 상부층에 SP시료, 하부

Table 3 D150×H300(mm) Ratio of the specimens

Specimen	Condition		Soil (g)		CaCl ₂ (ml)	Microorganism (ml)
D150×H300 (mm)	Normal Concentration bacteria	A	Up	1320.1	2000	2000
			Down	1320.1	2000	2000
		B	Up	1320.1	2000	2000
			Down	1320.1	2000	2000

층에 SW시료로 제작하여 주입실험을 수행하였으며, 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액은 1:1 비율로 각각 2000mL를 공기압 1kPa으로 1회 주입하여 실험하였다.

본 시료 배합비 D150×H300(mm) 공시체는 D150×H200 (mm) 공시체와 달리 주입액이 원활히 배수되기 위해 A, B 실험 공시체 모두 하단부를 기준으로 투수계수가 높은 사질토로 배수층을 50mm를 설치하였고, A실험은 상단부로부터 50mm의 사질토 배수층을 설치하였으며, B실험은 선행실험 결과 상부층의 SP시료에 overflow 현상이 발생되므로 상단부로부터 50mm의 투수계수가 낮은 점토층을 설치하여 실험을 수행하였다.

3.2 실험방법

Fig. 4는 바이오그라우팅 장비의 전경 모습이다. Fig. 4(a)의 왼쪽 백색의 용액은 염화칼슘 수용액으로서 0.75mol의 농도를 사용하였으며, 오른쪽 노란색의 용액은 미생물 용액으로서 일반농도를 사용하였다. 상부의 노즐 호스를 통해 Air

(a) Injection of liquid chemical

(b) Specimen setting

(c) Injection nozzle

(d) Injection equipment

Fig. 4 Bio-grouting equipment

Compressor의 압력을 이용하여 압력을 가하면 하부의 배출 노즐을 통해 Y자 노즐에서 혼합되어 친환경 미생물의 생화학 반응으로 생성된 탄산칼슘이 주입노즐을 따라 시료에 주입되도록 제작하였다. Fig. 4(b)는 시료를 자유낙하 시킴으로써 3층 다짐하여 Dr 30%의 지반조건을 재현하였다. 그 이유는 느슨한 조건에서 바이오그라우팅의 시험이 용이했기 때문이며, 추후 상대밀도 및 다짐도 변화에 따른 바이오그라우팅 기술의 적용 범위를 설정하고자 한다. Fig. 4(c)는 주입노즐 8mm관을 제작하여 시료에 주입되도록 제작하였다. Fig. 4(d)는 전체적인 주입장비의 전경 모습이다.

주입액과 시료 사이에 중간벨브를 장착하여 Air Compressor의 주입압력이 동일하게 들어갈수 있도록 설계하였으며, 주입노즐은 8mm관을 사용하여 시료에 넣은 후 탄산칼슘을 주입할 수 있도록 장비를 제작하였다.

단층토, 다층토 각각의 강도를 발현시키기 위해서 공시체에 바이오그라우팅을 주입한 후 24시간 동안 3kPa의 공기압으로 공기건조를 완료하고, 72시간 동안 자연건조를 하였다. 이는 생·화학 반응으로 생성된 고결물인 탄산칼슘이 자체적인 수화반응 일으키지 않기 때문에 공기압을 공시체에 가해 배수 및 건조를 통하여 강도를 발현시키고자 하였다.

3.2.1 공시체 D150mm x H200mm 단층토 시험

(1) 공시체 D150mm×H200mm 표준사

장비주입을 통한 D150mm×H200mm 표준사 실험은 표준사를 이용하여 공시체를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 주입하였다.

미생물 용액 2000mL와 염화칼슘 수용액 2000mL를 2액 1공정 장비를 이용하여 1kPa의 공기압으로 주입 후 24시간 동안 3kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

(2) 공시체 D150mm×H200mm SP시료

장비주입을 통한 D150mm×H200mm SP시료 실험은 입도 입경이 인위적으로 제작된 SP시료를 사용하여 공시체를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 주입하였다.

미생물 용액 2000mL와 염화칼슘 수용액 2000mL를 2액 1공정 장비를 이용하여 1kPa의 공기압으로 주입 후 24시간 동안 3kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

(3) 공시체 D150mm×H200mm SW시료

장비주입을 통한 D150mm×H200mm SW시료 시험은 SW시료를 이용하여 공시체를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 주입하였다.

미생물 용액 2000mL와 염화칼슘 수용액 2000mL를 2액 1공정 장비를 이용하여 1kPa의 공기압으로 주입 후 24시간

동안 3kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

3.2.2 공시체 D150mm x H300mm 다층토 시험

(1) 다층토 A실험(상 SW, 하 SP)

장비주입을 통한 D150mm×H300mm 다층토 A실험은 상부층 SW시료, 하부층 SP시료를 이용하여 공시체를 제작하였으며, 원활한 배수를 위해 공시체 상, 하단부를 기준으로 50mm에 사질토를 배수층으로 Fig. 5와 같이 각각 포설하였다.

미생물 용액 2000mL와 염화칼슘 수용액 2000mL를 2액 1공정 장비를 이용하여 1kPa의 공기압으로 주입 후 24시간 동안 3kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

(2) 다층토 B실험(상 SP, 하 SW)

장비주입을 통한 D150mm×H300mm 다층토 B실험은 상부층 SP시료, 하부층 SW시료를 이용하여 공시체를 제작하

Fig. 5 Multi-layer soil A sectional view

Fig. 6 Multi-layer soil B sectional view

였으며, overflow 현상 및 상부층 SP시료의 과포화 현상, 배수가 원활히 되지 않는 문제점을 보완하기 위해 Fig. 6과 같이 상단부에는 점토로 차수층을 포설하였고, 공시체 하단부에는 보다 원활한 배수를 위해 자갈 배수층을 포설하였다.

미생물 용액 2000mL와 염화칼슘 수용액 2000mL를 2액 1공정 장비를 이용하여 1kPa의 공기압으로 주입 후 24시간 동안 3kPa의 공기압으로 공기건조 하였으며, 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

4. 실내실험 결과

4.1 공시체 D150mm x H200mm 단층토 실험결과

(1) 공시체 D150mm×H200mm 표준사 실험결과

Fig. 7과 같이 탄산칼슘의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 약 80mm 두께가 고결되었으며, 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정한 결과 공시체의 강도는 320kPa의 강도를 가지는 것으로 분석되었다.

본 실험결과 주입관의 하단부는 분사구를 통해 유입된 시료(모래)로 채워져 있었으며, 주입관의 상단부는 주입관 주변에 하얀색 침전물인 탄산칼슘이 침전된 것으로 나타났다.

(2) 공시체 D150mm×H200mm SP시료 실험결과

Fig. 8과 같이 탄산칼슘의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용

으로 약 110mm 두께가 고결되었으며, 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정한 결과 공시체의 강도는 450kPa의 강도를 가지는 것으로 분석되었다.

본 실험결과 주입관의 하단 부는 시료(모래)로 채워져 있었으며, SP시료의 직경이 표준사의 직경보다 크기 때문에 주입액이 보다 큰 간극 사이로 침투하여 강도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

(3) 공시체 D150mm×H200mm SW시료 실험결과

Fig. 9와 같이 탄산칼슘의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 약 150mm 두께가 고결되었으며, 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정한 결과 공시체의 강도는 400kPa의 강도를 가지는 것으로 분석되었다.

본 실험결과 주입관의 하단 부는 분사구를 통해 유입된 시료(모래)로 채워져 있었으며, 탄산칼슘의 침전은 주입 초기에 공시체의 주변으로 하얀색 떠를 형성하여 침전하는 것을 확인하였다.

(4) 단층토 바이오그라우팅 실험의 종합결론

Table 4는 Air Compressor를 이용하여 1kPa의 일정한 공기압으로 각각 2000mL의 일반농도 미생물용액과 반응용액인 염화칼슘 수용액(0.75Mol)을 공시체에 주입하였고, 24시간 동안 3kPa의 공기압으로 공기건조 후 72시간 동안 자연건조를 수행한 결과이다.

(a) Bulb formation

(b) Pocket penetration test

Fig. 7 Injection experiment result of the single-layer soil sand

(a) Bulb formation

(b) Pocket penetration test

Fig. 8 Injection experiment result of the single-layer soil SP

(a) Bulb formation

(b) Pocket penetration test

Fig. 9 Injection experiment result of the single-layer soil SW

Table 4 Single-layer experiment result of the injection range and pocket penetration test

Specimen	Injection range (cm)	q_u (kPa)
Sand	8	320
SP	11	450
SW	15	400

단층토 시험 결과, SP시료에서 만족할 만한 주입범위와 일축압축강도를 가지는 것으로 분석되었으며, 이는 바이오그라우팅 기술이 지반의 간극 상태와 크기에 밀접한 관련이 있음을 확인 할 수 있었다. SW시료의 구균형성은 바이오그라우팅 효과가 아닌 겔보기 점착력으로 건조가 완전히 되지 않은 상태에서 SW시료의 실트질 성분이 포함되어 구균이 형성된 것으로 판단된다.

4.2 공시체 D150mm x H300mm 다층토 실험결과

(1) 공시체 D150mm×H300mm 다층토 A실험 결과(상 SW, 하 SP)

실험결과, Fig. 10과 같이 탄산칼슘의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 두께 약 170mm 두께가 고결되었으며, 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정된 결과 공시체의 분사관에서 15mm 떨어진 A 지점에서는 500kPa, 35mm 떨어진 B 지점에서는 200kPa, 55mm 떨어진 C 지점에서는 10kPa의

(a) Bulb formation

(b) Pocket penetration test

A Point

B Point

C Point

(c) Strength measurement of A, B and C point from injection nozzle

Fig. 10 Injection experiment result of the multi-layer soil A

강도를 가지는 것으로 분석되었다. 이는 분사관 주변에서 가까울수록 강도는 높아지며 멀어질수록 강도가 낮아지는 경향을 보였다.

다층토 A실험은 하부층이 SP시료로 배수가 원활히 진행되어 바이오그라우팅 용액의 주입이 원활하였으며, 단층토 실험결과 같이 분사관 주변에 탄산칼슘이 침전되어 보다 많은 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 주입한다면 고결층 두께를 더욱 넓은 범위로 나타낼 것으로 판단된다.

(2) 공시체 D150mm×H300mm 다층토 B실험 결과(상 SP, 하 SW)

본 실험에서는 미생물 반응용액 주입시 overflow 현상을 미리 방지하기 위해서 공시체 상단부에 차수층인 점토층을

(a) Bulb formation

(b) Pocket penetration test

(c) Strength measurement of A, B and C point from injection nozzle

Fig. 11 Injection experiment result of the multi-layer soil B

설치하였다.

실험 결과, Fig. 11과 같이 약 150mm 두께가 고결되었으며, 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정한 결과 공시체의 분사관에서 15mm, 35mm, 55mm 떨어진 A, B, C 지점에서 모두 500kPa 이상의 강도를 가지는 것으로 분석되었다. 이는 미생물 반응에 의한 탄산칼슘이 간극이 낮은 SW시료(하부층)에 침투되지 못하기 때문에 overflow하여 상부층의 SP시료로 주입되면서 상부층 전단면에 강도가 나타난 것으로 판단된다.

(3) 다층토 바이오그라우팅 실험의 종합결론

Table 5는 Air Compressor를 이용하여 1kPa의 일정한 공기압으로 각각 2000mL의 일반농도 미생물용액과 반응용액

Table 5 Multi-layer soil experiment result of the Injection range and pocket penetration test

Specimen	Injection range (cm)	q_u (kPa)		
		A	B	C
SP	16	500	200	100
SW	16	500	500	500

인 염화칼슘 수용액(0.75Mol)을 공시체에 주입하였고, 24시간 동안 3kPa의 공기압으로 공기건조 후 72시간 동안 자연건조를 수행한 결과이다.

다층토 시험 결과, 상부 SP, 하부 SW의 다층토 지반에서 만족할 만한 주입범위와 일축압축강도를 나타냈으나, 이는 하부층의 SW시료의 간극이 작아 상부층의 SP시료로 미생물의 반응에 의한 탄산칼슘이 overflow하여 상부층 시료의 전단면에 강도가 나타난 것으로 판단된다. 또한 주입노즐로부터 멀어지면 멀어질수록 강도의 효과가 낮아지는 경향을 나타냈으며, 다층토에서도 마찬가지로 바이오그라우팅 기술이 지반의 간극 상태와 크기에 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

4.3 X-회절 분석 결과(XRD)

XRD분석을 통해 미생물 반응에 의해 주입된 공시체 내에서 생성된 광물을 식별하였다. 각 시료는 분석이 용이한 미세한 분말로 분쇄하였으며, X선의 회절각도는 2 θ 는 5~70°로 설정하였다. XRD 분석결과 각각의 단층토, 다층토의 공시체에서 실리카(SiO_2)와 탄산칼슘(CaCO_3)이 검출됨을 확인할 수 있었고, 이는 시료 속에 탄산칼슘 알갱이가 침투되어 나타난 결과로 분석되었다. 다음 Table 6은 각각의 시료에 대한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다.

Table 6 Specimen in accordance with the results of the XRD analysis

Test-ID		Formula
Single-layer soil	Sand	SiO_2
		CaCO_3
	SP	SiO_2
		CaCO_3
	SW	SiO_2
		CaCO_3
Multi-layer soil	SP/SW	SiO_2
		CaCO_3
	SW/SP	SiO_2
		CaCO_3

5. 결 론

본 연구는 느슨한 사질토 지반에 친환경 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘을 현장과 유사한 방법으로 1.5shot을 이용하

여 주입 후 간극의 상태와 크기에 따라 바이오그라우팅이 지반의 강도 및 주입범위에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 단층토(표준사, SP, SW) 다층토(SW/SP, SP/SW) 지반에 Air Compressor의 공기압을 이용하여 주입하였으며, 일축압축강도 및 주입범위를 분석하였고, 공시체의 화학적 반응 및 성분 분석을 살펴보기 위해 XRD 분석을 수행한 결과 다음과 같다.

1. 단층토 바이오그라우팅 주입 시험 결과, SP 시료에서 11cm 주입범위와 450kPa의 일축압축강도를 가지는 것으로 분석되었다. 이는 바이오그라우팅 기술이 지반의 간극 상태와 크기에 밀접한 관련이 있음을 확인 할 수 있었으며, 흙입자가 비교적 일정하고 지반의 간극이 큰 SP지반에서 주입효율이 높음을 확인할 수 있었다.

2. 다층토 바이오그라우팅 주입 시험 결과, 주입노즐로부터 멀어질수록 강도는 감소하는 경향을 나타냈으며, SP/SW 다층토 지반에서 16cm 주입범위와 상부층 SP시료의 전단면에서 500kPa의 일축압축강도를 가지는 것으로 분석되었다. 이는 하부층 SW시료의 간극이 작아 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘이 상부층의 SP시료로 overflow하여 상부층 시료의 전단면에 강도가 나타난 것으로 판단된다. 다층토에서도 마찬가지로 바이오그라우팅 기술이 지반의 간극 상태와 크기에 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

3. 단층토, 다층토에 바이오그라우팅을 현장과 유사한 방법으로 재현한 결과, 바이오그라우팅 주입을 통한 고결화 및 일축압축강도를 나타내어 현장에서 충분히 실용성이 있을 것으로 판단된다.

4. 추후 미생물의 생·화학적 반응을 통해 생성된 탄산칼슘의 자체적인 수화반응을 개발하여 바이오그라우팅 공정을 단순화 시키는 연구를 진행하고자 하며, 지반의 상대밀도 및 다짐도 변화에 따른 바이오그라우팅 시험을 통해 바이오그라우팅 기술이 적용될 수 있는 지반조건 범위를 선정하고자 한다.

후 기

이 논문은 2013년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- [1] KOSCA (2009) 2009 Specialty Contractors Statistical Yearbook, Korea Specialty Contractors Association, pp.1-3.
- [2] Korea Cement Association (2005) 2010 Cement Statistical Yearbook, Korea Cement Association, pp. 5-7.
- [3] D.H. Kim, H.C. Kim, K.H. Park (2010) Cementation of Soft

Ground using Bacteria, CERTIFICATE OF PATENT, 10-1030761, pp. 1-27.

- [4] D.H. Kim, K.H. Park, S.W. Kim, S.H. Mun (2012) A Novel Approach to Induce Cementation of Loose Soils, *Advanced Science Letters*, 9, pp. 545-550.
- [5] D.H. Kim, K.H. Park (2013) Injection Effect of Bio-Grout soft Ground, *Advanced Science Letters*, 19, pp.468-472.
- [6] H.C. Kim (2011) Discovering Cementation Characteristics of Soil using Bacteria, *Master Thesis*, Chosun University.
- [7] K.H. Park (2011) Strength Improvement of Soft Ground with Microbial Reaction, *Master Thesis*, Chosun University.
- [8] K.H. Park, D.H. Kim (2012) Verification of Calcium Carbonate by Cementation of Silt and Sand using Bacteria, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 28(6), pp. 53-61.
- [9] K.H. Park, D.H. Kim (2013) Strength and Effectiveness of Grouting of Sand Treated with Bacteria, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 2(2), pp. 65-73.
- [10] J.T. Dejong, M.B. Fritzges, K. Nüsslein (2008) Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), pp. 1381-1392.
- [11] V.S. Whiffin, L.A. Paassen, M.P. Harkes (2007) Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique, *Geomicrobiology Journal*, 24, pp. 1-7.
- [12] L.A. Paassen, M.P. Harkes, G.A. Zwieter, W.H. Zon, W.R.L. Star, M.C.M. Loosdrecht (2009) Scale Up of Biogrout: A Biological Ground Reinforcement Method, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, pp. 2328-2333.
- [13] J.T. Dejong, B.M. Mortensen, B.C. Martinez, D.C. Nelson (2010) Bio-mediated Soil Improvement, *Journal of Ecological Engineering*, 36, pp. 197-210.

접수일(2013년 9월 5일), 수정일(2013년 11월 12일),
게재확정일(2013년 12월 2일)

Dae-Hyeon Kim : dkimgeo@chosun.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chosun University, 375 Seosuk-Dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea

Myung Sagong : rockcore@krri.re.kr

New Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Railroad Museum Road, Uiwang City, Gyeonggi-Do 437-050, Korea

Kyung-ho Park : munhakng@nate.com

Department of Civil Engineering, Chosun University, 375 Seosuk-Dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea