Bacteria를 이용한 실트와 모래의 고결화에 따른 탄산칼슘 확인

Verification of Calcium Carbonate by Cementation of Silt and Sand Using Bacteria

박 경 호¹ Park, Kyung-Ho

김 대 현² Kim, Dae-Hyeon

Abstract

The purpose of this study is to understand the mechanism of cementation of soil induced by bacteria. In order to understand the mechanism of cementation of soft soils treated with bacteria, six types of specimens(Not treated, Normal concentration bacteria treatment, High concentration bacteria treatment, Supernatant high concentration bacteria treatment, Double high concentration bacteria treatment, and 25% Specimen high concentration bacteria treatment) were made. Scanning Electron Microscope (SEM), EDX and X-ray diffraction (XRD) analyses were performed on the soft silt and loose sand specimens. Compared with the normal bacteria concentration treated specimen, a clearer cementation between particles was observed in the 25% specimen high bacteria concentration treated specimen. On the basis of the preliminary results, it appears that microbial cementation can occur in the soft soil.

요 지

본 연구의 목적은 연약지반에 대한 미생물의 고결화 메커니즘을 확인하기 위함이다. 연약지반에 대한 미생물의 고결화 메커니즘을 확인하기 위해서 6가지 미생물 조건(무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 2X 고농도처리, 25% 시료 고농도처리)으로 실험되어졌다. 전자현미경(SEM, EDX)과 X선 분석 회절기(XRD)를 이용하여 실트질 시료와 느슨한 모래시료의 분석을 수행하였으며, 일반농도처리 시료에 비교하여 25% 시료 고농도처리 시료에서 입자와 입자 사이에 탄산칼슘이 더욱 명확히 관찰되어졌다. 이러한 연구결과를 바탕으로 연약지반에 대한 미생물 고결화 반응을 확인할 수 있었다.

Keywords : Bacteria, Calcium Carbonate, Cementation, Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction (XRD)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 급속한 산업발전에 따른 국가 기간산업의 양적, 질적 확대에 인하여 부지의 확보가 용이하지 않은 실정

이다. 이에 효율적인 토지 이용을 위하여 그동안 건설 부지로 고려치 않았던 느슨한 사질토나 연약한 점성토로 구성된 연약지반의 개량에 대한 관심이 상당히 높아지고 있다.

국내에서는 연약지반 및 해안 준설 매립 지반을 기초 지반으로 활용하여 시공하는 공사현장이 증가하고 있는

1 정회원, 조선대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Chosun Univ.)

2 정회원, 조선대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Chosun Univ., Tel: +82-62-230-7607, Fax: +82-62-220-2687, dkingeo@chosun.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

추세인데, 연약지반 및 준설 매립 지반은 초기 지지력이 낮고, 함수비가 높아 기초 지반으로 사용하는데 많은 어려움이 있다. 연약지반 개량공법으로 시멘트나 약액 등 화학약품을 이용하여 지반을 고결화 시키는 주입공법 등이 주로 사용되어 왔으나, 이산화탄소 배출 및 지하수 오염 등 환경문제에 대한 구체적인 해결방안을 제시하지 못하고 있다.

교토의정서에 의하여 우리나라는 2차 의무감축 대상국이 될 가능성이 높음에 따라 이산화탄소를 감축할 수 있는 방안을 마련해야 하는데, 2010년 시멘트 통계연보(Korea Cement Association, 2011)에 따르면 국내 시멘트 생산량은 약 48,000톤으로 1톤의 시멘트를 생산하기 위해서 약 0.9톤의 이산화탄소가 배출되는 것으로 나타났다. 따라서 이산화탄소를 줄이고 시멘트 및 약액을 대체할 수 있는 친환경 신소재를 이용한 연약지반 개량공법이 절실히 필요하다.

본 연구에서는 미생물을 연약 지반에 적용하여 미생물의 반응을 통해 탄산칼슘(CaCO_3)을 생성시켜 흙 입자와 흙 입자 간의 공극을 채워줌으로써 연약지반의 고결화 특성을 살펴보고, 이러한 반응의 결과를 이용하여 연약지반 개량공법의 환경적인 측면에서도 긍정적인 효과를 나타낼 수 있도록 기여하고자 하는데 목적을 두고 있다.

1.2 선행연구

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)에 관한 연구는 국내·외 소수의 연구자들에 의해서 연구가 진행되어졌다. 국내에서는 Kim 등(2010)이 국내 최초로 연약지반에 순수한 미생물을 이용하여 강도를 증진시키는 연구를 하였으며, 국외에서는 미국, 호주, 네덜란드 등에서 Mitchell 등(2005)과 Dejong 등(2006)이 미생물의 크기와 시료의 입경크기에 따른 적용성 등을 분석하여 연약지반에 강도를 증진시키는 연구를 진행하였고, Whiffin 등(2007)과 Paassen 등(2009)은 미생물을 그라우팅에 접목시킨 Bio-grout에 대한 연구를 진행하였다.

국내·외의 선행연구를 살펴보면 다음과 같다.

1.2.1 국내 선행연구

지반공학 분야에서 국내 최초로 순수한 미생물의 고결화 강도를 확인하기 위한 첫 번째 시도로 조선대학교 Kim 등(2010)이 연구를 진행하였다. Kim 등(2010)은 미

생물 고농도의 조건을 통해 탄산칼슘의 침전을 높이는 방법을 개발함으로써 “미생물을 이용한 연약지반의 고결화 방법”이라는 미생물 고결화 특허(Kim et al., 2011)를 국내에서 최초로 등록하였다. 그리고 무처리 시료와 일반농도처리 시료, 고농도처리 시료의 혼합시험을 통해 육안 상으로 고결화를 비교 할 수 있는 강도를 얻었으며, 이를 통해 연약지반의 미생물 고결화 가능성 정도를 확인할 수 있었다(Kim, 2011).

1.2.2 국외 선행연구

미생물학 분야로는 Stock-Fischer 등(1999)이 미생물로 유발된 탄산칼슘 침전은 pH 8.3에서 시작된다고 언급하였으며, 탄산칼슘 침전이 증가하는 비율은 pH 9이상에서 발생된다고 하였다. 탄산칼슘의 형성은 미생물의 대사활성 결과로서 발생하며, 인접 환경의 pH를 상승시킴을 확인할 수 있었다.

건축공학 분야로는 Ramakrishnan 등(1998)과 Ramachandran 등(2001)이 콘크리트 구조물의 균열을 보강하기 위한 재료로서 미생물이 이용되어졌다. 각각의 시멘트와 미생물(*B. pascuensis*) 현탁액을 모래 시료에 결합하여 공시체를 제작하였으며, 인공적인 압력을 가하여 공시체에 인공균열이 생성되어졌다. 이러한 균열은 미생물 현탁액으로 보강되어졌으며, 28일 후 균열부분의 SEM 조사를 통해 탄산칼슘(CaCO_3)의 존재를 확인하였고, 미생물이 7.6×10^2 (cells /cm²)일 때 압축강도가 높음을 확인할 수 있었다.

지반공학 분야로는 공극의 차수 효과를 확인하기 위하여 Ferris 등(1996)이 투수성이 높은 수로에서 미생물과 반응용액으로 탄산칼슘을 침전시켜 수로의 투수성을 줄이는 방법을 연구하였으며, Dejong 등(2006)은 모래를 이용하여 무처리된 모래 시료, 석고로 처리된 모래 시료, 미생물로 처리된 모래 시료에 대하여 각각 입자간의 고결화 정도를 확인하고자 모래 공시체의 상대밀도 35%로 맞추어 실험이 실시되어졌으며, 석고로 처리된 모래 시료 및 미생물로 처리된 모래 시료는 강도 분석하기 위해 삼축압축시험위 강도를 수행 하였다. 시험결과, 미생물로 처리된 모래시료에서 며칠 사이에 감지할 수준의 고결화가 발생하였으나, 주기적인 주입과 시험방법이 복잡하여 현장 적용성에 있어 어려움이 있음을 확인할 수 있었다.

미생물을 그라우팅에 접목시킨 연구는 Whiffin 등(2007)이 PVC 원기둥(66mm 지름, 5m 길이) 속에 동일한

밀도로 모래 시료(D60/D10=1.64)를 채워 미생물 주입 시험을 수행하였다. 시험결과, 탄산칼슘의 침전이 5m 모래기둥 전반에 걸쳐서 생성이 되어졌으나, 주입구 부분에서 시료의 깊이가 깊어질수록 탄산칼슘 침전의 양은 감소되었고, 이에 따라 추정식으로 구하였던 강도 또한 감소되는 문제점을 확인 할 수 있었다.

Paassen 등(2009)은 바이오그라우팅의 현장 적용성을 검토하고자 모래 시료(D60/D10=1.6)와 모래 시료(D60/D10=1.64)를 각각 사용하여 0.9m×1.1m×1m의 컨테이너 박스에 모래를 채워 주입 시험을 수행하였다. 시험결과, Manual Cone Penetration Test를 통하여 표면에서 50kg/cm² 보다 높은 강도를 나타냈으나, 가운데 부분의 탄산칼슘 침전은 미미하였고 미생물 용액이 흐르는 부분에 탄산칼슘이 많이 발견되어 주입공법의 효과가 감소함을 알 수 있었다. 또한 호기성 미생물의 특성상 공기가 닿지 않는 부분은 강도가 증가되지 못하는 결과를 확인할 수 있었다.

2. 흙의 고결화 특성

2.1 흙의 고결화(Cementation) 개념

흙의 고결화(Cementation)는 흙의 강도가 증가하는 일련의 과정이며, 퇴적물이 퇴적암으로 진행 되어지는 과정 또한 장기적인 고결화 과정으로 볼 수 있을 것이다. 이러한 고결화는 공극을 통하여 고결물(Cement)이라 부르는 고형물질들이 공극 내에 침전되어 입자와 입자사이의 결합력을 증가시켜 주는 것이다.

인공적인 고결작용은 대표적으로 그라우팅 공법 등이 있다. 비배수 그라우팅의 중요한 특성은 자연성질을 이용한 것이며, 비배수 그라우팅 방법은 흙 퇴적물의 원상태를 유지하면서 지반보강을 하는 방법이다. 화학적 그라우팅은 보통 10⁻¹~10⁻⁴cm/sec 범위의 침투성을 가진 토양을 처리하는데 사용된다(Leonard et al., 1963). 빈 공간을 중합된 겔로 채움으로써 전단강도를 증가시키게 되었으며, 이는 흙의 안정성을 증가시키고 동시에 침하로 인한 붕괴 가능성을 줄이고, 흙 입자를 고정시키는 결과를 가져온다.

2.2 탄산칼슘 생성 과정

B. pasterii 균은 요소(Urea) 및 영양배지(Nutrient Broth)

를 통해 요소분해효소(Urease)를 함으로서 2개의 암모니아(NH₃)와 이산화탄소(CO₂)를 생성한다. 미생물과 요소의 반응을 나타내는 식으로 다음과 같다(식 1).

미생물의 요소분해효소를 통해 생성된 2개의 암모니아(NH₃)는 물(2H₂O)과 반응하여 2개의 암모늄(2NH₄⁺)과 2개의 수산화이온(2OH⁻)을 생성한다. 암모니아와 물과 반응을 나타내는 식으로 다음과 같다(식 2).

이때 2개의 수산화이온(2OH⁻)은 각각 나뉘어 이산화탄소(CO₂)와 칼슘이온(Ca²⁺)과 반응하게 되는데 이산화탄소(CO₂)와 수산화이온(OH⁻)이 결합하여 탄산수소이온(HCO₃⁻)이 된다(식 3). 그리고 염화칼슘(CaCl₂)을 수용액화 하여 생성된 칼슘이온(Ca²⁺)은 탄산수소이온(HCO₃⁻)과 나머지 수산화이온(2OH⁻)과 결합하여 탄산칼슘(CaCO₃) 생성한다. 미생물을 이용한 탄산칼슘(CaCO₃) 침전의 전체 반응식은 다음과 같다(식 4).

탄산이온(CO₃²⁻)은 물과 반응 시 세 가지 상태로 존재할 수 있다. 즉, 탄산이온(CO₃²⁻), 탄산수소이온(HCO₃⁻), 탄산(H₂CO₃)로 각각 존재 할 수 있으며, 미생물로 인해 발생하는 탄산칼슘 침전은 탄산염 반응에 따라 다르게 발생한다(Ramakrishnan et al., 2001).

미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘(CaCO₃)은 지반 내의 공극을 채워 입자간의 결합력을 높여 지반의 고결화(Cementation)가 형성된다. Figure 1은 각각의 식을 탄산칼슘 생성과정 및 흙 입자에 침전되는 모습의 Cycle을 도식화 한 것이다(Kim et al., 2011).

3. 미생물 고결화 특성을 규명하기 위한 실내시험

본 연구에서는 사용되어진 미생물은 생명자원센터에서 KCTC 3558의 *B. pasteurii* 미생물 균을 분양받아 30℃에서 180rpm의 웨이킹 인큐베이터에서 배양되어졌으며, 그 배지의 조성은 Nutrient Broth 8g/L, Urea 20g/L로 구

성하였다.

순수한 미생물을 이용하여 연약지반의 성질을 개선하고, 강도 증가 정도를 실내시험을 통해 확인하기 위해 포켓관입시험기를 통해 일축압축강도를 수행하였으며, 탄산칼슘 생성을 확인하기 위하여 전자현미경(SEM) 분석 및 XRD 시험을 수행하였다. 또한 물성시험을 실시하여 시료를 구분하였으며, 최대건조단위중량($r_d(max)$) 및 최적 함수비(OMC)를 결정하였고, 탄산칼슘($CaCO_3$) 생성을 위해서 0.75M의 염화칼슘($CaCl_2$) 수용액을 첨가하여 재령 7일에 따른 고결정도를 확인하였다.

3.1 흙의 고결화 실내시험

본 연구에 사용된 모래는 주문진 표준사를 사용하였으며, 실트 시료는 국내에 널리 분포하고 있는 화강 풍화토 계열의 시료로 사용하였다. 시험 시료는 No.10체를 통과한 시료를 사용하였으며, 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 한국 공업규격에 준하여 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 다짐시험(KS F 2312)을 수행하였다.

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

Fig. 1. Creation processes of $CaCO_3$ (Dejong et al., 2010)

Fig. 2. Sieve analysis and Compaction curves for soils used in the study (Kim, 2011)

Table 1. Properties of soils used in the study (Kim, 2011)

Classification	G_s	# 200(%)	$r_d(max)$ (g/cm^3)	OMC(%)	LL(%)	PL(%)
SP	2.67	2.4	1.608	14.9	N.P	N.P
ML	2.67	64.3	1.328	11.6	23.3	N.P

본 연구에서는 주문진 표준사와 화강 풍화토 계열 시료에 각각 미생물을 첨가하여 고결화(Cementation) 가능성을 살펴보았다.

3.2 시험 시료 배합비

본 연구에 사용된 모래 시료의 배합비는 다짐시험을 통해 얻어진 최적 함수비 14.92% 기준으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 첨가했으며, 느슨한 모래의 상태를 재현하기 위하여 상대밀도 40%를 맞추어 시험을 수행하였다.

실트 시험 시료 배합비는 다짐시험을 통해 얻어진 최적 함수비 11.6% 기준으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 첨가했으며, 상대다짐도(R_c) 70%를 맞추어 시험을 수행하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 흙의 고결화

미생물 반응 시험 결과를 살펴보면, Figure 3은 무처리, 고농도처리, 25%시료 고농도처리 모래시료를 30℃의 인큐베이터에 넣은 후 고결화의 모습을 나타낸 것이다. 무처리 시료의 경우 시료가 굳어지지 않았음을 확인 할 수 있었으며, 고농도처리 시료의 경우 미세하게 응집효과가 나타났으나 강도 측정을 할 수 있을 만큼의 지력이 존재하지 않았다. 반면에 25%시료 고농도처리 시료의 경우 느슨한 모래지반이 넓은 분포로 단단한 모래층을 이루고 있음을 확인 할 수 있었으며, 포켓관입시험기로 압력을 가한 결과 5.0kg/cm²의 강도에 저항할 수 있는 단단한 모래층으로 굳어져 있음을 확인 할 수 있었다.

4.2 전자현미경(SEM) 분석 결과

4.2.1 SEM 분석 결과

모래의 무처리 경우 Figure 4를 살펴보면, 입자의 표면에 어떠한 침전물도 생기지 않았고 매우 매끈한 모습을 볼 수 있다. 그리고 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 2X고농도처리에서는 육안으로 확인 할 수 있는

Table 2. Mixing ratio of test specimen (Park, 2011)

Specimen	Treatment method (after 7days)	Soil (g)	Calcium chloride solution (ml)	Bacteria solution (ml)	Water (ml)
SP	No treatment	317.32	—	—	48
	Normal concentration bacteria treatment	317.32	24	24	—
	High concentration bacteria treatment	317.32	24	24	—
	Supernatant high concentration bacteria treatment	317.32	24	24	—
	Double high concentration bacteria treatment	317.32	24	24	—
	25% Specimen high concentration bacteria treatment	79.33	24	24	—
ML	No treatment	185.6	—	—	22
	Normal concentration bacteria treatment	185.6	11	11	—
	High concentration bacteria treatment	185.6	11	11	—
	25% Specimen high concentration bacteria treatment	46.4	11	11	—

Fig. 3. Change of specimens due to microbial reaction experiment

만큼의 미세한 조각들이 존재함을 확인 할 수 없었으나, 다음과 같이 표시된 부분에서 Ca의 함유량이 많이 검출되었고, 전체적인 부분을 EDX로 분석하였을 때 Ca의 함유량이 확연히 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 25% 시료고농도처리에서는 무처리에서 볼 수 없었던 모래 입자 표면 위에 하얀 알갱이들이 붙어 있음을 명확히 확인할 수 있다. 이러한 알갱이는 미생물 반응으로 생성되는 정육각형 모양의 탄산칼슘이라고 할 수 있다.

실트의 무처리 경우 Figure 5를 살펴보면, 무처리와 마찬가지로 일반농도처리 및 고농도처리에서 육안 상으로 입자 주위에 특별히 생성된 알갱이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 미생물이 공극사이를 자유롭게 이동 하기 위해서는 $0.06 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 의 흙 입자의 크기가 필요

함으로 미생물의 생장이 어려워 탄산칼슘이 거의 생성되지 않은 것으로 판단된다. 그러나 25%시료고농도처리에서 EDX와 XRD분석을 통하여 SEM상으로 확인이 어렵던 고결화의 가능성을 보았다.

4.2.2 EDX 분석 결과

모래의 경우 Figure 6과 같이 무처리에서는 거의 나타나지 않은 Ca 양에 비해 일반농도처리를 사용할 경우 약 7%, 고농도처리를 사용할 경우 약 15%의 효과를 나타내었고, 25%시료 고농도처리에서는 약 25% 이상의 칼슘 함유량을 생성할 수 있음을 실험을 통해서 나타내었다.

실트의 경우 Figure 7과 같이 칼슘의 함유량이 무처리와 비교하였을 때 미생물 작용이 거의 이루어지지 않았

Fig. 4. SEM analysis result of sand (after 7days)

Fig. 5. SEM analysis result of silt (after 7days)

Fig. 6. EDX analysis result of sand (after 7days)

Fig. 7. EDX analysis result of silt (after 7days)

Table 3. XRD analysis result of sand (after 7days)

Treatment methods of bacteria	Compound Name	Chemical Formula
No treatment	Quartz	$Si\ O_2$
	Microcline, ordered	$K\ Al\ Si_3\ O_8$
	Albite, ordered	$Na\ Al\ Si_3\ O_8$
Normal concentration bacteria treatment	Quartz	$Si\ O_2$
	Microcline, ordered	$K\ Al\ Si_3\ O_8$
	Calcium Sodium Aluminum Silicate	$Ca_{0.8}\ Na_{0.2}\ Al_{1.8}\ Si_{2.2}\ O_8$
	Albite, ordered	$Na\ Al\ Si_3\ O_8$
High concentration bacteria treatment	Quartz	$Si\ O_2$
	Microcline, ordered	$K\ Al\ Si_3\ O_8$
	Albite, ordered	$Na\ Al\ Si_3\ O_8$
	Calcium Silicate Oxide	$Ca_3\ Si\ O_5$
Supernatant high concentration bacteria treatment	Quartz	$Si\ O_2$
	Microcline, ordered	$K\ Al\ Si_3\ O_8$
	Albite, ordered	$Na\ Al\ Si_3\ O_8$
	Anorthite, ordered	$Ca\ Al_2\ Si_2\ O_8$
Double high concentration bacteria treatment	Quartz	$Si\ O_2$
	Microcline, ordered	$K\ Al\ Si_3\ O_8$
	Albite, ordered	$Na\ Al\ Si_3\ O_8$
	Calcium Sulfate	$Ca\ SO_4$
25% Specimen high concentration bacteria treatment	Quartz	$Si\ O_2$
	Microcline, ordered	$K\ Al\ Si_3\ O_8$
	Calcite, syn	$CaCO_3$

Table 4. XRD analysis result of silt (after 7days)

Treatment methods of bacteria	Compound Name	Chemical Formula
No treatment	Quartz	$Si\ O_2$
	Albite, disordered	$Na\ (Si_3\ Al)\ O_8$
	Illite	$K(Al_4\ Si_2\ O_9\ (OH)_3)$
Normal concentration bacteria treatment	Quartz, syn	$Si\ O_2$
	Albite, calcian, ordered	$(Na, Ca)\ (Si, Al)_4\ O_8$
	calcium aluminium silicate	$K(Al_4\ Si_2\ O_9\ (OH)_3)$
	Illite	$Ca\ Al_2\ Si_2\ O_8$
High concentration bacteria treatment	Quartz, syn	$Si\ O_2$
	Albite, calcian, ordered	$Ca\ Al_2\ Si_2\ O_8$
	calcium aluminium silicate	$(Na, Ca)\ (Si, Al)_4\ O_8$
	Illite	$K(Al_4\ Si_2\ O_9\ (OH)_3)$
25% Specimen high concentration bacteria treatment	Quartz, syn	$Si\ O_2$
	Albite, calcian, ordered	$Ca\ Al_2\ Si_2\ O_8$
	calcium aluminium silicate	$(Na, Ca)\ (Si, Al)_4\ O_8$
	Illite	$K(Al_4\ Si_2\ O_9\ (OH)_3)$

다고 볼 수 있다. 그러나 25%시료 고농도처리에서 약 6%의 차이를 보이면서 느슨한 모래의 일반농도처리 정도의 Ca 함유량을 가지게 되었다. 이는 실트질에서도 고결화의 가능성이 있으며, 최적화된 미생물 처리 조건을 만족시켜 실험을 진행한다면 느슨한 모래 처리와 같이 눈에 띄만한 효과적인 결과를 가져 올 수 있을 것이다.

4.3 X-회절 분석(XRD) 결과

본 실험에서는 모래 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 2X고농축처리, 25%시료고농도처리 그리고 실트 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 25%시료

고농도처리 7일차에 대해 XRD 분석을 실시하였다. Table 3과 Table 4를 살펴보면 Ca의 계열은 여러 광물들과 결합력이 좋고 변질이 되기 쉬운 물질이므로 흙 속에 있는 여러 광물과 혼합되어 아래와 같은 결과를 얻게 되었다. 그러나 25%시료고농도처리 과정에서는 확실한 탄산칼슘($CaCO_3$)이 존재하였고, 이는 흙 입자 속에 탄산칼슘이 많이 녹아 들어가 있다는 증거가 된다.

5. 결 론

본 연구는 모래 시료와 실트 시료에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 첨가하여 탄산칼슘의 생성과 흙의 고

결화 특성을 살피고자 하였다. 무처리 및 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 2X고농도처리, 25%시료고농도처리에 대해 기초 물성을 파악하였고, 전자현미경(SEM, EDX) 분석 및 X-회절 분석(XRD) 시험을 통해 메커니즘을 확인 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 미생물의 고결화 정도 확인을 위해 전자현미경(SEM)으로 분석한 결과, 모래의 경우 입자와 입자 간에 탄산칼슘 입자가 생성되었음을 표면검사 결과를 통해 확인하였으며, 이러한 입자는 EDX에서 나타난 Ca 광물 함유량 증가와 일치한다.
실트의 경우 EDX에서 나타난 것 같이 Ca 광물 함유량은 증가 하였으나, 그 양이 미미함을 알 수 있다. 따라서 미생물이 성장하기 위해서는 입자와 입자 사이의 공극이 필요함으로 공극이 작은 실트질에서는 탄산칼슘이 거의 생성되지 않은 것을 확인할 수 있었다.
- (2) X-회절분석(XRD)로 분석한 결과, 모래 및 실트 무처리에서는 Ca 계열의 광물이 생성되지 않았으며, 기타 처리에서는 Ca의 계열의 특성상 다른 광물과 결합력이 좋고, 변질이 되기 쉬운 물질이므로 흙 속에 있는 다른 광물과 혼합되어 $CaCO_3$ 가 아닌 광물로 나타나게 되었다. 그러나 모래 25%시료고농도처리에서 흙 속에 존재하는 $CaCO_3$ 를 확인 할 수 있었다.
- (3) 미생물 고결의 효율을 높이고자 시료의 양을 75%로 줄인 25%시료고농도처리 7일 시험결과, SEM, EDX, XRD 분석을 이용하여 $CaCO_3$ 를 확인하였고, 이를 통하여 순수한 미생물을 이용한 흙의 고결화를 이루게 되었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업(No. 2012-0003673)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Dejong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K. (2006). "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear.", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No.11, pp.1381-1392.
2. Dejong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. and Nelson, D. C. (2010). "Bio-mediated Soil Improvement." *Journal of Ecological Engineering*, Vol.36, pp.197-210.
3. Ferris, F. G., Stehmeier, L. G., Kantzas, A., and Mourits, F. M., (1996). "Bacteriogenic Mineral Plugging." *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol.35(8), pp.56-61.
4. Kim, D. H., Kim, H. C., and Park, K. H. (2010), "Possibility of Cementation of Soft Soil using Bacteria", *Korean Geotechnical Society Fall National Conference*, Gyeonggi, Korea, pp. 379-391.
5. Kim, D. H., Kim, H. C., and Park, K. H. (2011a), "Cementation of Soft Ground using Bacteria", CERTIFICATE OF PATENT, 10-1030761, pp.1-47.
6. Kim, D. H., and Park, K. H. (2011b), "Creation of $CaCO_3$ and Cementation of Soil using Bacteria", *Korean Geotechnical Society Spring National Conference*, Gyeonggi, Korea, pp.661-671.
7. Kim, H. C. (2011), "Discovering Cementation Characteristics of Soil using Bacteria", *Master Thesis*, Chosun University.
8. Korea Cement Association (2011), *2010 Cement Statistical Yearbook*, Korea Cement Association, pp.5-7.
9. Leonard, M. W., and Moller, K. (1963). *Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice*, Butterworth Publishers, London, pp.156-163.
10. Mitchell, J. K., and Santamarina, J. C. (2005). "Biological Considerations in Geotechnical Engineering." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No.10, pp.1222-1233.
11. Paassen, L. A., Harkes, M. P., Zwieter, G. A., Zon, W. H., Star, W. R. L., and Loosdrecht, M. C. M., (2009). "Scale Up of BiogROUT: A Biological Ground Reinforcement Method." *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.2328-2333.
12. Park, K. H. (2011), "Strength Improvement of Soft Ground with Microbial Reaction", *Master Thesis*, Chosun University.
13. Ramakrishnan, V., Bang, S. S., and Deo, K. S., (1998). "A Novel Technique for Repairing Cracks in High Performance Concrete Using Bacteria." *Proceedings of International Conference on High-Performance High-Strength Concrete*, Perth, Australia, pp.597-618.
14. Ramakrishnan, V., Ramesh, K. P., and Bang, S. S., (2001). "Bacteria Concrete." *Proceedings of SPIE International Society of Optical Engineering*, Melbourne, Australia, pp.168-176.
15. Stocks-Fisher, S., Galinat, J. K., and Bang, S. S., (1999). "Microbiological Precipitation of $CaCO_3$." *Soil Biology and Biochemistry*, Vol.31, pp.1563-1571.
16. Whiffin, V. S., Paassen, L. A., and Harkes, M. P., (2007). "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique." *Geomicrobiology Journal*, Vol.24, pp.1-7.

(접수일자 2011. 12. 1, 심사완료일 2012. 6. 4)