친환경 유기산 재료를 활용한 지반개량 메커니즘에 관한 연구

A Study on the Mechanism of Soil Improvement Using
Environment-friendly Organic Acid Material이 중 휘¹ Lee, Jong-Hwi정 재 원² Jung, Jae-Won한 윤 수¹ Han, Yun-Su천 병 식³ Chun, Byung-Sik

Abstract

An organic acid material, which can be manufactured by plants extraction, encourages microbe proliferation over time. Microbial activity, which is affected by organic acid, encourages accelerating consolidation with biochemical penetration ; soil particles are compacted by microbes and pore water is dissipated quickly. Additionally, CaCO_3 for cementation was made by proliferating microbes. Accordingly, tests were conducted to investigate the unconfined compressive strength and permeability of soil samples aged with and without an organic acid. In the 96 days of aging, the strength was generally 1.5~2.5 times greater than those without an organic acid material and permeability was definitely decreased to 74.2~93.1%. SEM analysis showed the change of pore structure and the change of the total bacteria counts revealed the activity of microbes reflecting the engineering characteristics and this material would be an environment-friendly for soil improvement.

요 지

식물의 추출물로 제조할 수 있는 유기산 재료는 포설 시 지중 속에서 미생물의 증식을 유도하며, 미생물에 의해 지반에서 압밀을 가속화시키고 빠르게 간극수압을 소산시킨다. 추가적으로 일부 미생물에 의해 탄산칼슘을 생성시켜 공극을 채워 강도를 증대시키거나 투수성을 감소시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 유기산 재료의 지반개량 메커니즘 규명을 위하여 화강풍화토, 라테라이트성 적토에 유기산 재료 혼합 전 후의 강도와 투수시험을 실시하였으며, SEM, XRD로부터 원인을 규명하였다. 유기산 재료 혼합 후 재령 96일에서 강도는 약 1.5~2.5배 증가하였으며, 투수계수는 72.9~93.1%의 감소율을 보였다. SEM으로부터 흙 입자의 구조가 변하거나 공극이 감소한 것을 관찰하여 강도증대, 투수감소의 원인을 규명할 수 있었으며, XRD로부터 탄산칼슘의 생성도 고결화의 주된 요인이라고 결론내릴 수 있었다. 이에 본 유기산 재료는 친환경적으로 지반을 개량할 수 있는 공법으로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

Keywords : 유기산 재료, 미생물, 탄산칼슘, 일축압축강도, 투수계수, SEM, XRD

1 정회원, 현대중공업 중앙기술원 기반기술연구소 해양산업연구실 연구원 (Member, Researcher, Ocean Industry Research Dept. / Advanced Technology Institute Hyundai Heavy Industry)

2 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

3 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., Tel. +82-2-2220-0326, Fax. +82-2-2298-3270, hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 경제적이고 친환경적인 지반개량 공법 개발의 일환으로 미생물을 활용한 지반개량 연구가 활발히 이루어지고 있다(Park et al., 2011). 이에 Dejong et al.(2006)은 모래로부터 탄산칼슘(CaCO_3)계 Calcite를 석출하고 고결화(cementation) 반응을 시키는 선행 연구(Saxena and Lastrico, 1978; Clough et al., 1981, Ghosh et al., 2005, 2009; Ramakrishnan et al., 1998, 1999; Tittelboom et al., 2010)로부터 미생물을 이용하여 직접적으로 탄산칼슘을 석출(Microbial Induced Calcium Precipitation; MICP) 및 지반개량을 연구한 바 있다. 하지만 직접적으로 미생물을 이용한 지반개량(e.g. 바이오 그라우팅)은 사전에 미생물을 배양해야 한다는 점에서 시공비 증대의 우려가 있으며, 이에 이미 토사에 존재하는 미생물의 증식을 유도하여 상기와 같은 메커니즘으로 지반개량을 유도하는 개량공법이 필요하다..

그 중 하나의 재료로써 유기산 재료를 활용한 지반개량 공법으로 유기산 재료는 현장토에 배합을 하고 적정 다짐에 의해 전압이 발생하며, 압밀을 지속적으로 높여주며, 그 후 미생물 증식에 의해 호기성 호흡 및 혐기성 호흡의 반복 작용으로 간극수 및 공극의 감소 등으로 토사를 안정시키게 된다. 이러한 유기산을 활용한 공법은 일본 Osaki corp.에 의해 개발되어 콘알파 공법(Con-a method)으로 불리고 미국, 유럽, 중국 등에서 연약한 지반의 다짐개량 및 성토 지반개량, 도로포장에서 노상토 개량, 보도, 산책길, 공원, 광장 등의 공사에서 흙포장 개량, 그리고 비산 방지 공사로의 살포 개량 등에 이미 실용화되고 있다(Osaki Corporation, 2011).

하지만 일본에서는 사질토 지반에 재료를 혼합 후 콘관입 시험을 통해 96일 재령에서 콘지수가 40kN/m^2 에서 400kN/m^2 로 증가하였다고 보고된 바 있으며, 한국에서는 Do et al.(2010), Kim et al.(2011)이 유기산 재료와 시멘트를 혼합하여 실내시험을 통한 강도 특성만 규명하였을 뿐 실질적으로 토사와 유기산 재료가 어떻게 작용하여 어떠한 지반개량 메커니즘으로 강도 증대, 투수 감소 등의 지반개량 효과에 대한 규명 및 다양한 토질성상에 따른 지반개량 효과는 현재까지 규명된 바가 없다.

따라서, 본 연구의 목적은 유기산 재료를 활용하여 다양한 토질성상에 대하여 개량특성과 지반개량 메커니즘을 규명하는데 있다. 이를 위하여 실내시험을 통한 강

도특성 및 투수특성의 분석과 SEM, XRD을 실시하여 지반개량 전·후 결합특성 및 화학적 변화를 규명하였다. 이러한 결과를 이용하여 지반개량공법이 환경적인 측면에서도 긍정적인 효과를 나타낼 수 있도록 하는데 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 지반개량 개념

흙 구조물을 장기간 안정된 상태로 유지하도록 흙을 처리하는 일을 지반개량이라고 한다. 이중 가장 일반적인 개량 개념으로써 흙의 고결화(Cementation)가 사용되며, 이는 고결작용, 또는 퇴적물이 퇴적암으로 되는 속성작용이라고 한다. 이러한 고결화는 공극을 통하여 고결물(Cement)이라 부르는 고형물질들이 공극 내에 침전되어 퇴적물 입자들을 서로 묶어주어 흙 입자들을 단단하게 형성하도록 한다.

그 중에서 사암의 형태는 탄산칼슘 침전과 밀접한 관련이 있다(Saxena and Lastrico, 1978). 자연적인 고결작용 형성은 소규모뿐만 아니라 일반적인 규모, 또는 대규모의 지층상 간격에서 각기 다르게 나타난다. 침전물 내부의 고결작용 정도는 환경적인 조건 특성에 따라 조절이 가능하며 많은 차이가 발생하기도 한다. 이러한 고결화 정도는 날씨의 상태에 따라 점차적으로 시멘트 형성을 촉진시키거나 또는 더디게 하기도 한다(Dejong et al., 2006).

흙의 안정처리 방법을 분류하면 크게 물리적인 방법과 첨가제에 의한 방법으로 나눌 수 있으며, 물리적인 방법은 치환, 입도조정, 함수비 조정, 다짐 등이 있으며, 혼화제에 의한 방법은 시멘트안정처리 방법, 석회안정처리 방법, 역청처리 방법, 화학적 재료, 약액에 의한 방법으로 지반을 안정화 시킬 수 있다.

2.2 유기산 재료에 의한 지반개량 메커니즘

Fig. 1에서 보는 바와 같이 개량 전에는 토립자와 토립자의 상태가 숨털 구조, 벌집 구조 등과 같은 상태로 있으며, 통상의 전압에 의해서는 흙입자의 고리 사슬이 끊어지지 않는 형태로 존재하게 된다. 또한 이 때의 흙의 밀도는 현 상태를 유지하며 연약한 상태를 띤다. 이러한 상태에서 적절한 함수를 가지고 있는 지반에 유기

Fig. 1. schematic representation of the principle of soil improvement by an organic acid

산 물질을 포설하게 되면, 각각의 토립자의 구조적 결합은 우선 코팅되며, 미생물이 증식하게 된다. 다짐으로 인해 토립자 고리 사슬을 파쇄시키게 되며 토립자 사이로부터 압밀축진을 시킬 수 있는 공극이 형성 된다. 1차적으로 압밀축진에 의해 주변의 물은 분산되어 소산되게 되며, 2차적으로 미생물의 증식에 의해 호기성 세균과 토양 미생물은 호기성 호흡작용으로 확산된다. 포도당(D-glucose)은 기초 물질은 호기성 조건하에 해당작용과 시트르산회로(TCA, Krebs)(Krebs, 1952)을 통해 이산화탄소와 물을 생성한다. 호기성 호흡 화학 반응 방정식은 다음 Eq. (1)과 같다.

호기성 상태에서 미생물의 활동으로 인해, 미소량의 수분이 발생하게 되지만 구조물로부터의 표면하중이나 자중 압밀에 의해 급속히 제거될 수 있는 정도의 양이다. 또한 지반 내 공기는 호기성 호흡으로 인해 점차 감소하게 되며, 동시에 공극이 감소된다. 이때부터는 이산화탄소가 무기호흡의 원천으로써 사용되며 일부의 미생물에 의해 혐기성 호흡으로 전환된다. 한편, 이와 동시에 탈질소 반응과 질산호흡도 발생하게 된다. 발효와 비슷한 또 다른 반응도 동시에 나타난다. 또한 질산염, 황산염, 이산화탄소와 같은 다른 무기물질들은 호흡에

서의 전자 수용체로 사용된다(David et al., 2005). 전압과 다짐과 같은 지면에 압축을 지속적으로 적용하면 기존의 공극수를 소산시킨다.

이러한 반응의 결과로 미생물은 더욱더 급증하고 그 중 일부 미생물은 식 (2)와 같이 지반 내 존재하는 요소(Urea)를 분해시켜 탄산이온(CO_3^{2-})과 2개의 암모늄이온(NH_4^+)을 생성한다. 이 때 유기산 재료에 일부 포함되어 있는 Ca^{2+} 와 반응하여 침전이 식 (3)과 같이 발생한다.

생성된 탄산칼슘은 토립자 내 기공구조를 생성하고, 고결화를 진행시켜 점착력과 강도의 증대 및 투수계수를 저하시키게 된다(Dejong et al., 2006).

2.3 흙 속에 미생물

흙 속에서의 미생물은 흙을 변화시키는데 크고 많은 영향을 미친다. 흙에는 바이러스, 세균, 방선균부터 원생동물, 선충, 지렁이 등 많고 다양한 미생물이 살고 있으며, 흙 속에서 가장 많은 미생물은 박테리아로서 흙 1g에는 $10^4 \sim 10^6$ 종으로 구성된 1억 개체 이상이 존재하

Fig. 2. *Sporosarcina pasteurii* (Park et al., 2011)

고 있다(David et al., 2005). 특히, 박테리아의 모양은 다양하고 형태는 둥근모양이거나, 막대모양, 나선형에 가깝다. Cell 지름은 보통 $0.5\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 범위이다(Madigan and Martinko, 2003). 미생물들은 흙 입자의 공극 안에서 자유롭게 움직일 수 있으나 미세한 흙 입자의 작은 공극은 미생물의 자유로운 이동을 방해하므로 토사의 공극률 또한 중요한 것으로 알려져 있다(Kim, 2011).

탄산칼슘형성작용(MICP)의 주된 미생물은 보통 호기성 미생물로 Fig. 2와 같은 *Sporosarcina pasteurii*이다. 흔히 *Bacillus*, rod, 막대균으로 불리우며 pH 9.0 정도의 알칼리 환경을 선호한다(Park et al., 2011). 하지만 이외에도 광물질, 특히 탄산칼슘을 형성하는 미생물은 다양한 것으로 알려져 있다(Whiffin, 2004).

3. 실내시험 재료 및 방법

3.1 시험시료

3.1.1 유기산 재료

본 연구에서 사용된 유기산 재료는 Figs. 3, 4와 같이 $0.01 \sim 0.05\text{mm}$ 직경의 균등한 입자로 이루어진 설탕과 비슷한 백색 조립 입자와 같은 형상이며, 산성이 주성분이기 때문에 높은 산도(pH : 2.97)와 신맛을 띤다. 단위 중량은 약 10kN/m^3 이다.

Table 1에서 보는 바와 같이 구연산, 글루코오스, 사과산, 염화나트륨, 그리고 다른 식물 추출물들의 혼합물로 이루어져 있다. 사과산이 대부분을 차지하고 있으면 소량의 구연산 및 염화나트륨으로 이루어져 있다. 이것은 식물들로부터 추출한 구연산 및 사과산을 혼합하여 정밀한 분쇄 과정에 의해 제조할 수 있다.

Fig. 3. An organic acid material in powder form

Fig. 4. SEM image of an organic acid material ($\times 500$)

Table 1. The component of the material (%)

Component	Percentage	Component	Percentage
citric acid	15.3	K	0.1
malic acid	68.9	Mg	0.1
Na	6.5	Ca	0.1
Li	0.1	Cl	8.9
NH4	0.2	Glucose	0.1

3.1.2 토사

본 연구에서는 화강풍화토, 라테라이트성 적토가 사용되었으며, 각 시료의 공학적 특성은 다음 Table 2와 같다. 흙의 분류는 통일분류법(USCS)상 화강풍화토는 SW, 라테라이트성 적토는 SM으로 나타났으며, 전단강도정수(점착력, 내부마찰각)은 최적함수비(OMC) 상태에서 다진 공시체로 측정을 하였다. 초기 pH는 화강풍화토가 5.11, 라테라이트성 적토가 3.96으로 각각 약산성으로 나타났다. 화강풍화토의 경우, 상대적으로 라테라이트성 적토보다 세립분이 적어 액성한계와 소성지수는 측정이 불가능하였다. 또한 화강풍화토는 약간의 자갈과 85~90%의 모래, 나머지는 세립분(실트 및 점토)으로 구성되어 있다. 또한 라테라이트성 적토의 경우는 이보다 큰 25~35% 이상이 세립분(실트 및 점토)으로 구성되어 있다.

3.2 실내시험

3.2.1 배합비

본 실내시험에서는 Table 3에서 보는 바와 같이 각 다

른 재료에 대한 2개군(CASE I, II) 및 유기산의 배합비에 따른 총 6개의 CASE에 대해서 수행하였다. CASE I은 화강풍화토군, II는 라테라이트성 적토군이다. Chun(2010)은 시료를 노건조시킨 후 유기산 재료를 혼합한 결과, 노건조에 의해 시료에 존재하는 미생물의 사멸로 인해 유기산 재료에 의한 증식 및 강도증진을 나타내지 못한다는 연구결과를 발표한 바, 본 연구에서는 원시료에 포함되어 있는 함수비를 고려하여 노건조시키지 않은 시료를 사용하였다. 이에 물의 혼합비는 실내다짐시험 결과에 따라 최적함수비에 준하여 산정하였으며, 기존 함수비에 물을 더 혼합하는 방향으로 시험을 실시하였다. 유기산 재료의 혼합비는 콘알과 공법을 개발한 Osaki Corporation(2011)에서 제시하는 최적배합비 3%를 기준으로, 또한 유기산 증가량에 따른 강도증대 경향을 규명하기 위하여 6%를 추가적으로 실시하였다.

3.2.2 배양토사, 공시체 제작

배양토사 및 공시체는, 토사의 함수비 측정 → 배합비에 따른 유기산 재료 포설 → 최적함수비에 따른 물 혼

Table 2. Engineering properties of materials

Contents	Total unit weight (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	water contents (%)	LL (%)	I _p (%)	Ini. pH	Cu	Cg	USCS	#200 passed rate (%)
Weathered granite soil	16.0	48.4	37.5	5.9	—	N.P.*	5.11	7.78	1.11	SW	3.65
Lateritic soil	14.5	96.5	25.3	17.3	30.9	20.1	3.96	17.0	1.41	SM	8.73

* N.P. : Non-Plastic

Table 3. The mixture proportion in the samples (%)

Contents	CASE I-1	CASE I-2	CASE I-3	Contents	CASE II-1	CASE II-2	CASE II-3
Weathered granite soil	90	87.3	84.6	Lateritic soil	90	87.3	84.6
Water	10	9.7	9.4	Water	10	9.7	9.4
An organic acid	—	3	6	An organic acid	—	3	6
Total	100	100	100	Total	100	100	100

Fig. 5. Compaction (a) & Specimens (b), (c)

합(토사 함수비 고려) → 다짐시험법에 따른 동일한 다짐에너지로 다짐 → 외기 양생 및 주기적인 함수유지, 순으로 제작되었다. 각 CASE별 유기산 재료 포설 시 균등하게 혼합되도록 충분한 시간을 교반하였다. 일축 압축강도시험용 공시체는 높이 200mm, 직경 100mm 몰드에 다짐하여 제작하였으며, 삼축투수시험용 공시체는 높이 100mm, 직경 50mm 몰드에 다짐하여 제작하였다 (Fig. 5 참조). 단, 삼축투수시험용 공시체를 다질 때는 다짐시험(KS F 2312)에서 제시하는 다짐에너지를 맞춰 다졌다.

배양토사는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 30cm×50cm 크기의 소일팬에 공시체와 동일한 방식으로 만들었으며, 깊이는 5~7cm 정도이다. 제작된 배양토사 및 공시체는 실외에서 양생이 이루어졌으며, 미생물의 증식을 지속적으로 유도하기 위하여 주기적으로 약 500ml의 물을 살수하였다.

3.2.3 시험방법

유기산 재료의 지반개량 효과를 분석하기 위해 정량

Fig. 6. samples for lateritic soils on the soil pan

(a) Weathered granite soil

적 분석으로써 일축압축강도시험, 투수시험(삼축투수시험, 정수위 투수시험), 정성적 분석으로써 SEM, XRD, 총세균수 변화를 관찰하였다.

일축압축강도시험은 유기산 재료의 혼합 유무에 따른, 혼합비에 따른 강도의 증대 경향을 알아보기 위하여 KS F 2314에 의거하여 실시하였으며, 소정의 양생 기간 후 탈형하여 재령별(3, 7, 14, 28, 96일)로 3개 공시체의 일축압축강도를 측정하여 평균하였다. 투수시험은 ASTM D 5084에 의거하여 삼축투수시험을 실시하였다. $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 의 공시체를 배합비별로 제작하고 소정의 외기양생을 시킨 후 각 재령별(3, 7, 14, 28, 96일)에 대해서 3개 공시체의 투수계수를 측정하여 평균하였다.

SEM의 경우, 미생물의 증식으로 인한 공시체의 강도 특성과 고결체의 입자배열상태 간의 관계를 규명하기 위하여 각 배양토사에서 중심부 깊이 3~5cm에 있는 10g 정도의 토사를 채취하여 재령 96일에서 각각 25배, 1000배 확대하여 입자형상을 분석하였다.

XRD를 통하여, 미생물의 증식으로 인해 어떤 성분이 강도증대에 역할을 하였는지 분석하였다. 마찬가지로 배양토사에서 채취하여 혼합유무에 따라 재령 96일에서 분석하였다.

마지막으로 유기산 재료에 의한 미생물 증식의 경향을 파악하기 위하여 총세균수를 계수 하였으며, 총세균수 측정은 한국과학재단(2005)에 제시하고 있는 형광 현미경법(Hobbie et al., 1977)을 참조하여 계수하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 일축압축강도시험 결과

Fig. 7에 각 케이스별(화강풍화토균, 라테라이트성 적

(b) Lateritic soil

Fig. 7. The results of the unconfined compressive strength tests

토균) 일축압축강도시험 결과를 나타내었다. CASE I, II에서 모두 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 나타내지만, 재령 28일까지는 대부분 증가하는 추세를 띄고 있고 재령 28일과 96일 사이에서는 그 증가량이 매우 미미하다. 또한 CASE I, II에서 자경성에 의하여 유기산을 혼합하지 않더라도 일부 세립분이 물과 상호작용을 하면서 자경성에 의해 강도가 서서히 증가되는 것을 나타냈다(Das, 1994).

화강풍화토에서는 재령 3일에서는 공시체가 형성되지 않아 측정이 어려웠으며, 이는 세립분이 상대적으로 부족한 화강풍화토에서는 자경성이 부족하기 때문으로 판단된다. 유기산 재료를 각각 3% 및 6%를 혼합한 CASE I-2은 288.85kPa(재령 96일), CASE I-3은 306.74kPa(재령 96일)의 강도를 나타내면서 유기산을 미혼합한 CASE I-1(179.31kPa)보다 약 1.5배 강도 증가를 나타내고 있다.

라테라이트성 적토에서는 유기산 재료를 각각 3% 및 6%를 혼합한 CASE II-2은 638.09kPa(재령 96일), CASE II-3은 649.99kPa(재령 96일)의 강도를 나타내면서 유기산을 미혼합한 CASE II-1(263.89kPa)보다 약 2.5배 강도 증가를 나타내고 있다.

유기산 재료의 혼합비(3, 6%)에 따른 일축압축강도는 큰 차이를 보이고 있지 않으므로, 유기산 재료의 혼합비가 강도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. 이는 미생물의 증식과 활동성 여부가 유기산 재료의 양과는 무관하며, 다른 영향인자에 대한 규명이 필요할 것으로 보인다.

4.2 삼축투수시험 결과

유기산은 흙 속에서 총 두 가지의 투수능을 발휘한다. 첫째, 지반의 고결화로 인한 차수능 증대이며, 둘째, 유

기화합물에 의한 흡수반응과 발열반응으로 인해 압밀 촉진이다. 여기서는 단지 미생물의 증식으로 인한 고결화로 투수계수의 변화 정도를 관찰하였다.

일반적으로 투수계수는 1차적으로 흙의 다짐에 따라 감소하며, 차후 시간이 경과함에 따라 자경성에 의하여 고결화가 진행되면서 각각의 흙입자가 연결고리가 생기고 엉키면서 큰 차이는 아니지만 감소하게 된다. Fig. 8에서 보는 바와 같이, 일반적으로 모든 CASE에서 재령 96일까지 감소하는 경향을 나타내고 있다.

특히, 각각 투수계수 감소율(재령 0일 또는 3일에서 96일까지 투수계수 감소율)에서 분석 시, 화강풍화토는 CASE I-1에서 17.9%, I-2에서 55.9%, I-3에서 74.2%를 나타내고 있으며, 일축압축강도 결과와 마찬가지로 유기산 재료를 혼합함에 따라 투수계수는 감소하는 경향을 띄고 있다. 라테라이트성 적토에서도 CASE II-1에서 19.1%, II-2에서 87.4%, II-3에서 93.1%를 나타내고 있어 화강풍화토보다는 큰 감소율을 나타내고 있다. 이는 통상 세립분을 더 포함하고 있는 라테라이트성 적토가 고결화로 인한 강도 발현이 더 우수하나 미생물의 증식에 더 좋은 조건이라는 것은 추후 더 연구될 필요성이 있다.

재령에 따라서는 일축압축강도와 마찬가지로 재령 28일과 96일 사이에서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 유기산 재료의 혼합비(3%와 6%)에 따라서는 일축압축강도와는 달리 혼합비가 클수록 투수계수가 감소하는 것을 기대할 수가 있다.

4.3 SEM분석 결과

Fig. 9는 화강풍화토와 라테라이트성 적토에 유기산 재료의 혼합 전·후 배양토사에서 채취한 시료의 외형이

Fig. 8. The results of the permeability tests

다. 모두 채취 전 다짐이 된 상태였고, $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 에서 24 시간 이상 노건조시켰다.

화강풍화토는 혼합 전, 회색 빛깔을 나타내지만 혼합

후 재령 96일에서는 약간 어두운 빛을 나타내면서 입자 간 뭉쳐져 있는 모습을 볼 수 있다. 또한 완전히 건조됐음에도 불구하고 부스러지지 않았으며 약간의 점착력

Fig. 9. The appearance of soils (96 days later)

(a) without an organic acid ($\times 25$)

(b) without an organic acid ($\times 1000$)

(c) 96 days with an organic acid ($\times 25$)

(d) 96 days with an organic acid ($\times 1000$)

Fig. 10. SEM results (Weathered granite soil, CASE I)

으로 입자 간을 결속 시키고 있는 것으로 보였다.

라테라이트성 적토는 혼합 전, 화강풍화토와 마찬가지로 부스러졌으나, 유기산 재료 혼합 후 재령 96일이 경과한 시점에서는 크게 결속된 상태로 존재하여 노건조를 시켰음에도 불구하고 부스러지지 않았다. 또한 색깔은 재령이 경과한 후에 진한 붉은색으로 변화였다.

이를 각각 25배, 1000배 확대한 SEM 분석 결과에 대

해서 Fig. 10은 화강풍화토의 경우, Fig. 12은 라테라이트성 적토에 나타내었다.

Fig. 10(a), (b)는 미혼합 시료에 대해서 각각 25배, 1000배 확대하였으며, Fig. 10(c), (d)는 유기산 혼합 후 재령 96일에서 시료에 대해서 각각 25배, 1000배 확대한 사진이다. (a)와 (c)를 비교 시 (c)에는 혼합 전에 비해 겉표면이 코팅이 된 것처럼 다른 양상을 보이고 있다.

(a) 7 days

(b) 14 days

Fig. 11. The results of SEM for microbe reaction test in sand (Kim, 2011)

(a) without an organic acid ($\times 25$)

(b) without an organic acid ($\times 1000$)

(c) 96 days with an organic acid ($\times 25$)

(d) 96 days with an organic acid ($\times 1000$)

Fig. 12. SEM results (Lateritic soil, CASE II)

이를 (b), (d)와 같이 1000배로 확대했을 시, 결표면은 상당한 차이가 나타나는 것을 알 수가 있으며, 기존의 미세한 공극이 점착 물질에 의해 없어졌다. 이는 Fig. 10에서 나타난 화강풍화토가 잘 부스러지지 않고 점착력이 존재하는 물질로 흡입자를 덮고 있다는 것을 SEM 결과로 보여준다. 이러한 점착성 물질은 유기산 재료에 의해 증식한 미생물로 인해 생성된 물질로 추정된다. 이는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 Kim(2011)이 요소(Urea) 및 염화칼슘 수용액 등을 혼합하여 만든 미생물 배치(batch)와 모래와 미생물 고농도 반응시험을 통해 얻은 SEM 분석 결과와 유사한 점을 보인다. 따라서, 유기산 재료로 인해 미생물 증식으로 인한 탄산칼슘형성작용(MICP)으로 인한 고결화로 판단이 된다.

Fig. 12는 화강풍화토와 마찬가지로 라테라이트성 적토에 대해서 미혼합 시료(a), (b) 및 유기산 혼합 시료(c), (d)에 대해서 SEM 분석한 결과이다. 상대적으로 실트 및 점토가 많이 함유된 라테라이트성 적토의 경우, Fig. 12(c), (d)처럼 점착성 물질이 보이지 않으나 입자와 입자 사이에 생성된 물질로 공극을 채워 밀실된 형상을 보이고 있다. 이들의 결합으로 인해 Fig. 9에서 보는 바

와 같은 고결체가 형성된 것으로 보인다.

Kim(2011)은 SEM을 통하여 실트보다 모래가 미생물에 의한 탄산칼슘 형성이 적합하다고 하였으나, 본 연구에서는 일축압축강도시험 및 투수시험을 통해 미생물 증식으로 인한 고결화와 이로 인한 강도증대, 차수성을 상대적으로 실트, 점토가 많이 함유된 라테라이트성 적토에서도 효과가 있음을 규명하였다. 하지만 화강풍화토에서 발생한 점착성 물질의 유무에 대해서는 아직까지 규명이 필요할 것으로 보인다.

4.4 XRD분석 결과

Fig. 13은 화강풍화토의 XRD 분석 결과이다. 미혼합 시료에서는 탄산칼슘(calcite)이 미약하게 나타나지만 유기산 재료 혼합 후 재령 96일 시료에서는 탄산칼슘, 특히 calcite의 패턴과 거의 유사하게 나타나며, 미생물에 의한 탄산칼슘 생성으로 인해 고결화가 진행되었으며, 이어 강도증대, 차수성증대로 결론을 내릴 수 있다.

이 때, 탄산칼슘은 자연상에서 가장 많이 존재하는 형태인 calcite는 XRD 패턴에서 회절각 29°에서 전형적인

Fig. 13. XRD results of the weathered granite soil

Fig. 14. XRD results of the lateritic soil

피크점이 나타난다(Lipus et al., 2007; Nebel et al., 2008).

하지만 Kim(2011)이 제시한 바와 같이 모래에 대한 처리 전·후 EDX 분석 결과, 대부분 모래의 주성분인 Si가 대부분이며, Ca 성분은 무처리 시 0.72%에서 11.82%(고농도 처리 시)까지 증가되었다고 발표 한 바 있다. 이에 본 연구에서도 미혼합의 경우 탄산칼슘(calcite)의 소량의 피크점은 타당하다고 말할 수 있다.

또한 라테라이트성 적토의 경우 혼합 후 29°에서 강한 피크점이 나타나면서 탄산칼슘(calcite)이 생성되었다는 것을 확인할 수가 있다(Fig. 14 참조).

4.5 총세균수 분석 결과

Fig. 15는 라테라이트성 적토에서 총세균수 분석 결과 그래프이다.

(A)의 경우는 시료를 $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 이상 노건조시킨 후 계수한 결과로, 미생물이 모두 박멸하여 살지 않았다.

(B)는 초기 조건으로 대략 g당 1.69×10^6 의 미생물이 계수되었다.

(C)는 CASE II-1(미혼합)에서 외기양생으로 96일 경과 후 총세균수 계수 결과로, 초기 조건보다 약 2배 이상 늘어난 g당 3.12×10^6 의 미생물이 계수되었다. 이는 일반 토사라도 시간의 경과함에 따라 미생물은 증식한다는 것을 뒷받침하고 있다.

(D)는 CASE II-2(3% 혼합)에서 외기양생으로 96일 경과 후 총세균수 계수 결과로, g당 7.65×10^6 의 미생물이 계수되었다. 유기산 재료에 의해 초기보다 4~5배에 달하는 미생물이 증식되었으며, 96일이 경과한 CASE II-1보다는 약 2배 정도 미생물이 증식되었다. 이 때는 탄산칼슘을 생성할 수 있는 상당분의 특정 미생물이 증

Fig. 15. The results of total counts of bacteria in lateritic soil

식될 수 있을 것으로 판단내릴 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 유기산 재료를 활용하여 화강풍화토와 라테라이트성 적토에 대해서 개량특성과 지반개량 메커니즘을 규명하기 위하여 강도, 투수시험, SEM, XRD, 총세균수를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 유기산 재료의 역할은 미생물의 증식 유도이며, 특정 미생물에 의해 탄산칼슘을 생성하여 고결화를 진행한다. 하지만 유기산 재료에 소량 포함된 Ca^{2+} 성분도 탄산칼슘 성분도 전환되어 고결화로 인한 강도증대와 투수저감에 도움이 될 것으로 판단된다.
- (2) 일축압축강도시험 결과, 재령 96일에서 유기산을 혼합한 경우 화강풍화토에서는 약 1.5배의 강도증가가, 라테라이트성 적토에서는 2.5배의 강도증가가 되었다. 이는 세립분이 상대적으로 많은 라테라이트성 적토에서 그 효과가 더 많은 것으로 나타났으며, 특히 유기산 재료의 혼합비(3, 6%)에 따른 강도증대는 큰 차이를 보이고 있지 않으므로, 혼합비가 강도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 삼축투수시험 결과, 화강풍화토는 CASE I-1에서 17.9%, I-2에서 55.9%, I-3에서 74.2%를 나타내고 있으며, 라테라이트성 적토에서도 CASE II-1에서 19.1%, II-2에서 87.4%, II-3에서 93.1%를 나타내고 있어 유기산 재료를 혼합함에 따라 투수계수는 적어진다. 이는 유기산 재료가 증가함에 따른 공극의 감소와 미생물에 의한 탄산칼슘 생성에 의한 공극의 감소가 함께 일어나며, 한편 일축압축강도와 마찬가지로 세립분이 상대적으로 많은 라테라이트성 적토가 투수 저감에 효과적인 것으로 나타났다.
- (4) SEM 분석과 총세균수 계수에 의해 유기산 재료를 포설함으로써 미생물의 증식과 점착력의 증강, 특정 물질의 생성으로부터 강도증대와 투수저감을 증명할 수 있었고, 유기산 재료 혼합 시 미혼합 시보다 약 2배 이상의 미생물 증식되었다. XRD 분석 결과, 특정 물질은 탄산칼슘이며 탄산칼슘 생성에 의한 공극의 채움과 고결화(cementation)로 결론을 내릴 수 있었다.
- (5) 현재로서는 bacillus라는 탄산칼슘형성작용(MICP)

을 하는 미생물에 의한 고결화가 지배적이나 향후에는 다른 미생물에 대한 규명이 되어 미생물을 활용한 친환경적인 지반개량 공법이 활성화 되어야 할 것이다. 또한 화강풍화토에서 공극감소의 원인이 된 점착성 물질도 향후 규명이 되어 유기산 재료에 의한 강도증대 메커니즘의 완전한 규명이 될 필요성이 있다.

참 고 문 헌

1. Chun, B. S. (2010), "Final Report about A Study on the Evaluation on Application of River Bank of Con-a Method", Hanyang University, pp.1-15.
2. Clough, J. M., Peet, M. M., and Kramer, P. J. (1981), "Effects of high atmospheric CO₂ and sink size on rates of photosynthesis of a soybean cultivar", *Plant Physiol.* 67, pp.1007-1010.
3. Das, B. M. (1994), *Principle of Geotechnical Engineering*, 3rd edition, PWS Publishing Company, Boston, pp.67-87.
4. David, M. S., Jeffry, J. F., Peter, G. H., and David, A. Z. (2005). "Principles and Applications of Soil Microbiology" 2nd edition. Pearson Prentice Hall, pp.33-50.
5. DeJong, J. T., Fritzges, M. B., and Nülein, K. (2006), "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1381-1392.
6. Do, J. N., Lee, J. H., Kim, J. W., Kim, K. M., Lee, J. K., Kim, Y. S., and Chun, B. S. (2010), Effect of Strength Increase of the Ground Using Polysaccharide Environmentally Friendly Soil Stabilizer, 2010 Korean Geo-Environmental Society Fall Conference, pp.97-101.
7. Ghosh, P., Mandal, s., Chattopadhyay, B. D., and Pal, S. (2005), "Use of microorganism to improve the strength of cement mortar", *Cement Concrete Research*, Vol.35, No.10, pp.1980-1983.
8. Ghosh, S., Biswas, M., Chattopadhyay, B. D., and Mandal, S. (2009), "Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar", *Cement and Concrete Composites*, Vol.31, pp.93-98.
9. Hobbie, J. E., R. J. Daley, and S. Jasper, (1977), "Use of Nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy", *Appl., Environ., Microbiol.*, Vol.33, pp.1255-1228.
10. Kim, S. T., Do, J. N., Jo, H. S., and Chun, B. S. (2011), "Effects of Ground Strength Increase using Polysaccharide Environmentally Friendly Soil Stabilizer", *The Journal of KGES*, Vol.12, No.11, pp.13-21.
11. Kim, H. C. (2011), *Cementation characteristics of soil using Bacteria*, Josun University Graduate school, Master's thesis, pp.1-15.
12. Krebs, H. A. (1952), Symposium 3 (Citric Acid Cycle), 2nd Int., Congr. Biochem. Paris.
13. Lipus, L. C. and Dobersek, D. (2007), "Influence of magnetic field on the aragonite precipitation", *Chemical Engineering Science*, Vol.62, pp.2089-2095.
14. Madigan, M. T. and Martinko, J. M. (2003), *Brock biology of microorganisms*, 11th ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
15. Nebel, H. and Epple, M. (2008), "Continuous Preparation of Calcite, Aragonite and Vaterite, and of Magnesium-Substituted Amorphous Calcium Carbonate (Mg-ACC)", *Journal of Inorganic and General Chemistry*, Vol.634, No.8, pp.45-57.
16. Osaki Corporation (2011), Construction manual for con-α (translated from Japanese). Osaki Corporation. <http://www.osaki-c.co.jp>. accessed 1 February 2011.
17. Park, S. S., Kim, W. J., and Lee, J. C. (2011), Effect of Biomineralization on the Strength of Cemented Sands, *Journal of KGS*, Vol.27, No.5, pp.75-84.
18. Ramakrishnan, V., Deo, K. S., Duke, E. F., and Bang, S. S. (1999), "SEM investigation of microbial calcite precipitation in cement", *Proc. Of 21st International Conference on Cement Microscopy*, Las Vegas, NV, pp.406-414.
19. Ramakrishnan, V., Bang, S. S., and Deo, K. S. (1998), "A Novel Technique for Repairing Cracks in High Performance Concrete Using Bacteria", *Proc. of The Int. Conf. on HPHSC*, Perth, Australia, pp.597-618.
20. Saxena, S. K. and Lastrico, R. M. (1978), "Static properties of lightly cemented sand", *Journal of Geotech. Engng. Div., ASCE*, Vol.104, No.12, pp.1449-1465.
21. Tittelboom, K. V., Belie, N. D., De Muynck, W., and Verstraete, W. (2010), "Use of bacteria to repair cracks in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.40, pp.157-166.

(접수일자 2012. 6. 12, 심사완료일 2013. 1. 25)