

극한미생물과 저가 배지를 이용한 지반고결제의 현장 적용 연구

Field Study for Application of Soil Cementation Method Using Alkaliphilic Microorganism and Low-cost Badge

최 선 규¹ Choi, Sun-Gyu

채 경 현² Chae, Kyung-Hyeon

박 성 식³ Park, Sung-Sik

Abstract

In this study, a blast furnace slag with the alkaliphilic microorganism (*Bacillus halodurans*) alkaline activator was used to cement natural soils in the field. A low-cost and massive microbial solution for cementation of field soils was produced and compared with existing microbial culture in terms of efficiency. A field soil was prepared for three different cementation areas: a cemented ground with microbial alkaline activator (Microbially-treated soil), a cemented ground with ordinary Portland cement (Cement-treated soil), and untreated ground (Non-treated soil). The testing ground was prepared at a size of 2.6 m in width, 4 m in length, and 0.2 m in depth. After 28 days, a series of unconfined compression tests on the cement-treated and microbially-treated soils were carried out. On the other hand, a torvane test was carried out for non-treated soil. The strength of field soils treated with microorganism was 1/5 times lower than those of cement-treated soil but is 6 times higher than non-treated soil. The pH measured from microbially-treated soil was about 10, which is lower than that of cement-treated soil (pH = 11). Therefore, it is more eco-friendly than Portland cemented soils. The C-S-H hydrates were found in both cement- and microbially-treated soils through SEM-EDS analyses and cement hydrates were also found around soil particles through SEM analysis.

요 지

본 연구에서는 고로슬래그의 수화반응을 일으키는 극한미생물(*Bacillus halodurans*) 알칼리 활성화제를 사용하여 현장 지반을 고결시키는 연구를 수행하였다. 현장 토사를 고결시키기 위해 저가의 미생물 배양액을 대량으로 제조하였으며, 제조된 미생물 배양액에 대한 성장실험을 실시하여 기존 미생물 배양액과의 효율성을 비교하였다. 현장 적용은 고로슬래그와 미생물 배양액을 혼합한 알칼리 활성화제로 고결된 지반(미생물 고결토), 보통 포틀랜드 시멘트로 고결된 지반(시멘트 고결토), 그리고 무처리된 지반(무처리토)으로 나누어 시험 시공하였다. 현장 지반 3곳 모두 동일한 크기인 가로 2.6m, 세로 4m, 깊이 0.2m로 시공하였다. 현장 시공 후 28일에 코어를 채취하여 일축압축시험을 실시하였으며, 무처리토 지반은 토베인시험으로 지반의 강도를 평가하였다. 본 연구에서 개발한 미생물 고결토는 시멘트 고결토에 비해 약 1/5 정도 낮은 강도를 보였으나, 무처리토에 비해서는 약 6배 정도 높은 강도를 발휘하였다. 또한,

1 비회원, Iowa State University 박사후 연구원 (Post-doctoral Researcher, Dept. Civil, Construction & Environmental Engr., Iowa State Univ.)

2 비회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Kyungpook National Univ.)

3 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engr., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7544, Fax: +82-53-950-6564, sungpark@knu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

미생물 고결토의 pH는 10으로 11 이상인 시멘트 고결토보다 낮아 상대적으로 친환경적인 것으로 판단되었으며, SEM-EDS 분석을 통하여 고결도와 고결 물질인 C-S-H 수화물이 생성됨을 확인할 수 있었다.

Keywords : Blast furnace slag, Alkaliphilic microorganism, Alkaline activator, Field test, Strength

1. 서론

최근 국내외적으로 시멘트를 사용하지 않고 미생물이나 고로슬래그를 사용하여 친환경적으로 지반을 고결시키기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 예를 들면, 지반 내에 존재하는 요소(urea)를 분해하는 미생물의 대사활동을 이용하여 흙 입자 사이에 방해석(calcite)을 석출시켜 지반의 고결을 유도하는 연구가 수행되고 있다(Kim et al., 2012; Park et al., 2011; Mitchell and Santamarina 2005; Whiffin et al., 2007; Terajima et al., 2009; Kawasaki et al., 2010; Van Paassen et al., 2010). Kim et al.(2011)과 Park(2013)은 유기산을 이용하여 지반 내에 존재하는 미생물의 반응을 촉진시켜 흙 입자 사이에 방해석을 석출시키는 고결 메커니즘을 제시하기도 하였다. 생물체로부터 생산되는 다당류인 바이오 폴리머(biopolymer)의 고분자 사슬과 흙 입자 간에 작용하는 결합력을 이용하여 흙을 안정화시키는 연구(Jang, 2010; Cole et al., 2012)도 수행되고 있다. 한편 자원 재활용을 위해 잠재 수경성을 지닌 고로슬래그에 다양한 알칼리 활성화제를 이용하여 지반을 고결시키는 연구도 수행되고 있다. 예를 들면, Yoon and Kim(2006)은 버려지는 골패각을 소성한 후 천연 수산화칼슘을 제조한 다음 고로슬래그와 혼합하여 점토 고결제로 사용하였으며, Park and Choi(2013)는 모래 고결을 위해 고로슬래그에 수산화칼슘이 주성분인 골패각과 수산화기(OH) 계열의 다양한 화학약품을 이용하여 고로슬래그가 16% 포함된 모래의 경우 일축압축강도가 3MPa까지 증가하였다.

최근 Park et al.(2014)은 기존 알칼리 활성화제에 극한미생물을 혼합한 새로운 미생물 알칼리 활성화제를 개발한 바 있으며, 이를 이용하여 기존 방법보다 최대 50% 정도 강도 증진 효과를 달성하였다. 이와 같은 친환경적인 지반고결에 관한 연구는 대부분 실내실험 수준이지만, 일부 Dejong et al.(2013)과 같은 연구자는 미생물의 방해석 생성 기술을 모래 사막 현장에 적용한 사례가 있다. 하지만 현장 적용을 위해서는 미생물 대량 배양 기술을 비롯하여 현장 시공성, 경제성 등과 같은

여러 가지 요소들을 고려해야 한다.

본 연구에서는 높은 pH의 수산화기 계열 화학약품에서 생존하는 극한미생물을 혼합한 미생물 알칼리 활성화 화제를 대량으로 배양한 다음 이를 고로슬래그에 혼합하여 수화반응을 유도함으로써 현장 지반을 직접 고결시켰다. 현장 지반을 고로슬래그와 극한미생물로 고결시킨 지반뿐 아니라, 보통 포틀랜드 시멘트로 고결시킨 지반, 그리고 무처리한 지반으로 나누어 현장 지반의 고결 정도를 분석 및 평가하였다. 현장 지반을 28일 동안 양생시킨 후 지반의 강도 및 pH를 분석하였으며, 또한 XRD 및 SEM 분석을 통하여 극한미생물로 고결된 지반 내 고결물질의 생성 여부도 검토하였다.

2. 현장 지반 및 고결 재료

2.1 현장 지반

현장실험 지역은 경북 성주군 용암면에 위치한 공장 부지의 일부로 지반은 비교적 단단한 상태를 나타내고 있다. 현장 지반을 고결시키기 전 시료를 채취하여 체분석과 흙의 기본 물성시험을 실시하였다. 현장 흙(Field soil)의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같고 비중은 2.62이며, 액성한계 및 소성한계는 각각 42과 21이다.

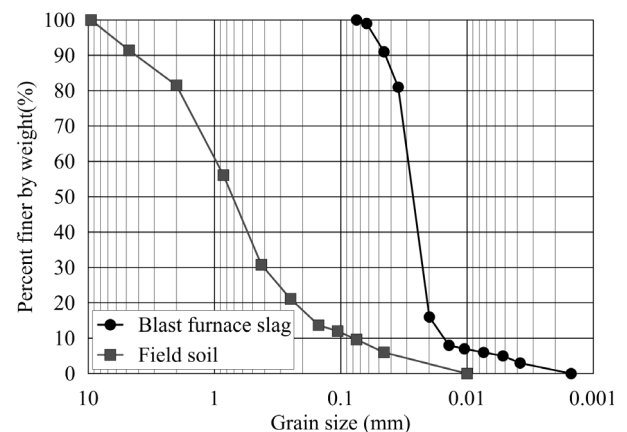


Fig. 1. Grain size distribution curves of field soil and blast furnace slag

2.2 고로슬래그

본 연구에 사용한 고로슬래그의 화학적 구성은 Table 1과 같이 SiO₂, CaO, Al₂O₃가 약 86% 함유되어 있으며, 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다. 고로슬래그는 선철을 제련하는 과정에서 발생하는 부산물이기 때문에 철광석의 품질 및 제조과정에 따라 화학적 성분이 다소 차이 날 수 있다. 분말 상태의 고로슬래그를 물과 접촉시켜도 수화반응은 거의 진행되지 않지만, 알칼리 이온 존재 하에 물과 반응하면 고로슬래그의 막이 파괴되고 CaO와 SiO₂ 성분이 용출되어 C-S-H(Calcium Silicate Hydrates)계와 C-A-H(Calcium Aluminate Hydrates)계 수화물을 생성하게 된다. 이 때 강도 발현에 기여하는 수화물은 C-S-H계이다(Lee, 2011). 한편, 포틀랜드 시멘트의 화학적 성분도 Table 1에 비교하였다.

2.3 극한미생물 알칼리 활성화제의 대량 생산

본 연구에서 알칼리 활성화제를 촉진시켜 고로슬래그의 경화를 유도하는 미생물로 사용한 *Bacillus halodurans* 균주는 지구화학적 극한환경 요인 중 pH와 관련된 것으로 pH 10-12에서 생존할 수 있는 대표적인 호알칼리성(Alkaliphile) 미생물이다. 이와 같은 고결 방식은 미생물이 흙 속에서 성장하면서 방해석, 바이오폴리머의 생성을 유도하는 기존 고결 방식과는 다르다. 한편, 이러한 기존 방식에서는 미생물이 흙 속에 생존 및 성장하기 위해서는 흙 속의 조건이 미생물의 성장조건에 적합해야 한다. 하지만, 알칼리 활성화제를 촉진시키는 역할을 하는 극한미생물은 지반 조건에 영향을 받지 않고 적용이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 높은 pH 조건(pH 10 이상)에서 제조된 배양액을 현장 흙에 혼합할 경우 다른 미생물에 의한 오염이 거의 발생하지 않는다. 이러한 극

한미생물의 성장을 위해 사용되는 배지는 Table 2의 기존 연구(Previous study)(Park et al., 2014)에서 사용한 배지와 같이 상당히 고가이다. 한편 미생물 알칼리 활성화제의 현장 적용을 위해서는 반드시 저가의 배지를 개발하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 Table 2의 Current study와 같이 상대적으로 저렴한 배지를 개발하였다. 특히 미생물의 영양분이 되는 Beef extract와 Peptone이 고가이므로 기존 BD사(Becton, Dickinson and Company)의 Beef extract와 Peptone 대신에 국내에서 대량으로 생산되고 있는 KisanBio사의 제품을 사용하여 비용을 절감하였다. 또한 NaHCO₃, Na₂CO₃, NaOH의약품도 연구용으로 사용되고 있는 제품이 아닌 순도가 약 1% 정도 낮으면서 대량으로 판매되는 제품을 이용하여 배지의 제조 단가를 낮추었다. 기존 연구에서 사용된 배지와 본 연구에서 새롭게 사용한 배지의 가격을 비교한 결과, Table 2와 같이 본 연구에서 사용한 배지의 단가가 약 55%(미생물 배양액 1 ton

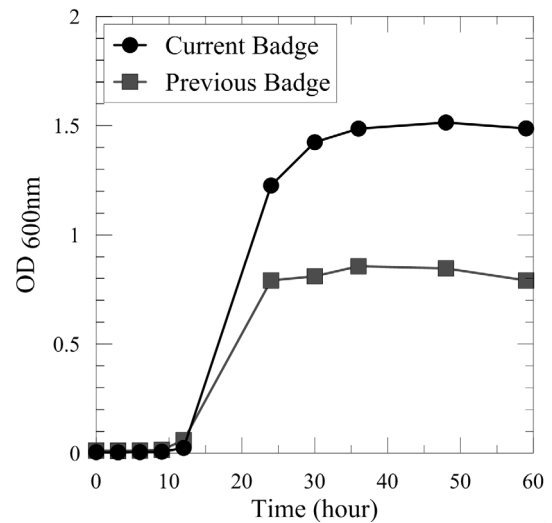


Fig. 2. Growth curves of *Bacillus halodurans* with current or previous badge

Table 1. Chemical composition of blast furnace slag and Portland cement

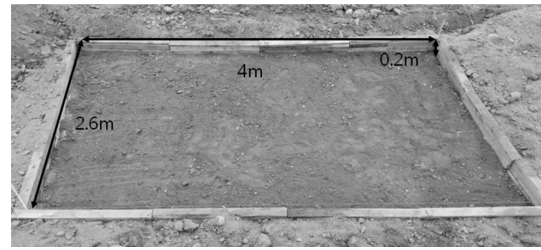
Component	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	MnO	TiO ₂	Others
Blast furnace slag	40.22	23.11	22.87	7.01	3.14	2.03	0.60	1.02	-
Portland cement	22.0	64.2	5.5	3.0	1.5	2.0	-	-	1.8

Table 2. Comparison of cost for badge used

Badge used	Cost (Won)				Total (Won)
	Beef extract	Peptone	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃	
Previous study	1,050,000	1,072,500	79,800	100,700	2,303,000
Current study	609,000	865,000	7,730	5,300	1,487,030



(a) Type of soil cementation



(b) Size of each section

Fig. 3. Three types of field soil treatment

Table 3. Type of alkaline activator and its pH

Type	Chemical		Mixing solution	pH	Molarity
	Symbol	Weight (g)	Microbial culture (ml)		
Microbial alkaline activator	NaOH	40	1,000	12.52	1 M

기준) 정도 낮은 것으로 확인되었다.

경제성뿐만 아니라 저가 배지의 효율성을 검토하기 위하여 두 종류의 배지를 이용하여 미생물 배양액을 제조하였다. Fig. 2와 같이 시간에 따른 미생물 성장실험을 실시한 결과 약 10시간까지는 배지에 관계없이 미생물이 유사하게 성장하였다. 하지만, 일정 시간이 경과한 경우 기존 배지의 흡광도(OD, Optical Density)는 0.7로 측정되었으나, 본 연구에서 새롭게 개발한 저가배지를 사용한 경우 OD가 최대 1.5까지 증가하면서 미생물의 생장이 80% 정도 증가하는 하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 각 제조사마다 미생물 영양분(Beef extract, Peptone)의 제조 방법 및 구성 성분(기업 비밀로 비공개)이 조금씩 상이하며, 이로 인하여 미생물 성장에 차이를 보인 것으로 판단된다. 따라서, 기존의 고가 배지보다 본 연구에서 사용한 배지의 경제성 및 효율성이 더 높은 것으로 확인되었다.

3. 현장 지반 고결방법 및 시험구역 시공방법

3.1 시험구역 설정

본 연구에서는 현장 지반을 고로슬래그와 미생물 알칼리 활성화제로 고결된 지반(이하 ‘미생물 고결토’ 또는 ‘Microbially-treated soil’이라 함), 보통 포틀랜드 시멘트로 고결된 지반(이하 ‘시멘트 고결토’ 또는 ‘Cement-treated soil’이라 함), 및 무처리된 지반(이하 ‘무처리토’ 또는 ‘Non-treated soil’이라 함)으로 총 세 곳으로 나누어 시험 시공하였으며, 각각의 고결 특성을 비교하였다. 현장 시험시공은 Fig. 3과 같이 시공면적 가로 2.6m, 세로 4m,

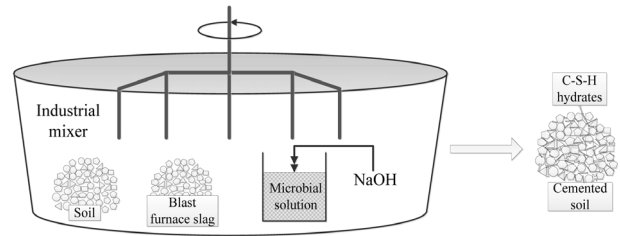


Fig. 4. Preparation of microbially-treated soil

깊이 0.2m로 시공하였으며, 세 종류의 시험구역(시멘트 고결토, 미생물 고결토, 무처리토)의 면적은 동일하다.

3.2 지반 고결방법

극한미생물 알칼리 활성화제로 현장 지반을 고결시키는 과정은 다음과 같다. 먼저 장비를 이용하여 현장 흙을 채취하고 체가름하여 10mm 이하의 모래 및 자갈을 취한 다음 고결재료인 고로슬래그를 현장 흙 중량의 10%로 혼합하였다. 그 다음 고로슬래그의 경화를 유도하는 극한미생물을 혼합한 알칼리 활성화제를 혼합하여 고결을 유발하였다. 본 연구에서 개발한 극한미생물 알칼리 활성화제의 조성은 Table 3과 같으며, 극한미생물 알칼리 활성화제는 수산화나트륨 40g에 1 Mol이 되도록 극한미생물 배양액을 혼합하는 방식으로 제조하였다. 본 연구에서는 앞서 언급한 것처럼 Fig. 4와 같이 현장 흙, 고로슬래그(현장 흙 중량의 10%), 극한미생물 알칼리 활성화제(현장 흙 중량의 25%)를 일정 비율로 혼합한 다음 산업용 교반기로 고결토를 제조하였으며, 관련 사진은 Fig. 5와 같다. 이와 같이 극한미생물을 사용할 경우, 현장 시공 시 기존의 장비 사용에 따른 미생

물의 오염에 대한 우려가 없으므로 현장 시공 시에 특별한 장비가 필요하지 않다. 따라서 본 연구에서 개발한 현장 고결방법은 기존 *Sporosarcina pasteurii* 미생물이 방해석을 생성하는 고결방법에 비해 경제성, 효율성 및 시공성이 우수하다고 볼 수 있다.

시멘트로 현장 지반을 고결시키는 과정은 다음과 같으며, 앞서 언급한 방법과 유사하다. 먼저 현장 흙을 장비를 이용하여 채취한 후 시멘트를 현장 흙의 10%로 혼합한 후 함수비 25%로 산업용 교반기를 이용하여 교반시켰다. 앞에서 언급한 두 가지 고결지반의 배합비를 Table 4에 비교하였다. 마지막으로 무처리 지반은 기존의 지반을 고결지반과 동일한 상태로 조성하기 위하여 장비로 원지반 흙을 채취한 다음 첨가물 없이 10mm 이하의 모래 및 자갈만으로 조성하였다. 지표면은 느슨한 지반을 모

사하기 위하여 다지지 않은 상태로 조정하였다.

영역 설정 및 지반 정리 후 앞서 언급한 것과 같이 세 종류의 고결방법에 따라 제작된 고결 재료를 시공하였으며, 모든 재료를 혼합한 고결토를 시험구역에 시공한 후 흙칼을 이용해 면 고르기 작업을 실시하였다. Fig. 6은 시공이 완료된 현장의 모습이며, 두 가지 고결방법으로 28일간 양생하였다.

4. 현장 고결지반의 공학적 특성 분석

4.1 강도시험 방법

현장에서 28일 동안 양생된 미생물 고결토 및 시멘트 고결토 지반의 경우에는 직경 5cm 또는 10cm 코어를



(a) Mass culture of microorganism



(b) Mixing of material by agitator



Fig. 5. Photos of mixing process



(a) Cement-treated soil



(b) Microbially-treated soil



(c) Non-treated soil

Fig. 6. Field soil after treatment

Table 4. Composition of treated field soils

Soil type	Field soil (%)	Blast furnace slag (%)	Microbial alkaline activator (%)	Cement (%)	Water (%)
MTS (Microbially-treated soil)	100	10	25	-	-
CTS (Cement-treated soil)	100	-	-	10	25
NTS (Non-treated soil)	100	-	-	-	25

채취하여 일축압축시험을 실시하였으며, 무처리토 지반은 토베인(torvane)으로 현장 지반의 강도를 측정하였다. 코어 채취는 Fig. 7과 같이 North, Center, South 3곳으로 나누어 채취하였으며, 각 장소에서 2개의 코어를 채취하였다. 시멘트로 고결된 지반의 경우 Fig. 8과 같이 직경 10cm인 코어채취기를 이용하여 공시체를 채취하였으며, 채취된 공시체의 표면 고르기를 실시하여 직

경 10cm, 높이 20cm의 일축압축시험 공시체를 제작하였다. 본 연구에서 개발한 극한미생물을 알칼리 활성화제로 이용하여 고결시킨 지반의 경우에는 육안 및 손으로 눌러 보았을 때 다소 낮은 강도가 예상되어 직경 5cm의 황동관을 지반 내로 삽입하여 코어를 채취하였다. 채취된 공시체는 직경 5cm, 높이 10cm로 시멘트 공시체보다 1/2 정도 작은 공시체이다.

Table 5는 각각의 조건에서의 함수비, 건조밀도, 강도시험 결과이다. 미생물 고결토와 시멘트 고결토의 경우 함수비는 약 13-16%로 서로 유사하게 측정되었으며, 무처리토의 경우에는 9-12%로 고결된 지반보다

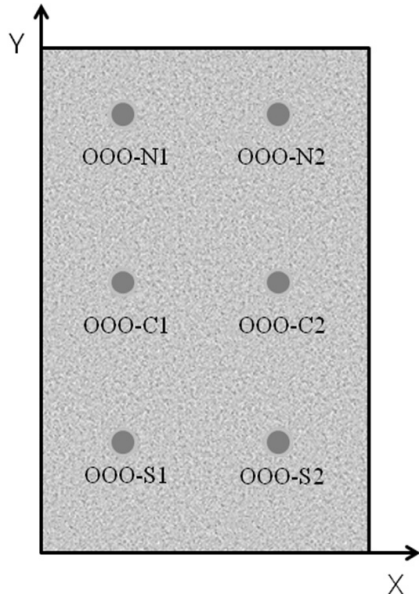


Fig. 7. Location of strength measurement



(a) Core sampling

(b) Trimming of specimen

Fig. 8. Preparation of testing specimen

Table 5. Test condition and result of strength tests

TEST ID	Soil type	Location	Water content (%)	Dry density (g/cm ³)	Unconfined compressive strength (Torvane strength) (kPa)
CTS-N1	Cement-treated soil (CTS)	North	14.60	1.68	3,909
CTS-N2			14.73	1.63	1,973
CTS-C1		Center	15.09	1.68	1,108
CTS-C1			15.91	1.67	1,708
CTS-S1		South	15.23	1.66	1,142
CTS-S2			16.45	1.68	4,204
MTS-N1	Microbially-treated soil (MTS)	North	13.78	1.71	243
MTS-N2			12.40	1.74	238
MTS-C1		Center	13.93	1.73	225
MTS-C2			12.58	1.74	327
MTS-S1		South	12.40	1.76	430
MTS-S1			13.29	1.72	281
NTS-N1	Non-treated soil (NTS)	North	10.85	1.45	60 (30)
NTS-N2			9.54	1.43	34 (17)
NTS-C1		Center	8.69	1.50	42 (21)
NTS-C2			10.24	1.40	52 (26)
NTS-S1		South	9.77	1.46	44 (22)
NTS-S2			11.93	1.48	64 (32)

다소 낮은 값을 보였다. 건조밀도는 고결토의 경우는 1.63-1.76g/cm³ 사이 값을 보였으며, 미고결토의 경우는 1.40-1.50g/cm³로 다소 낮은 값을 보였다.

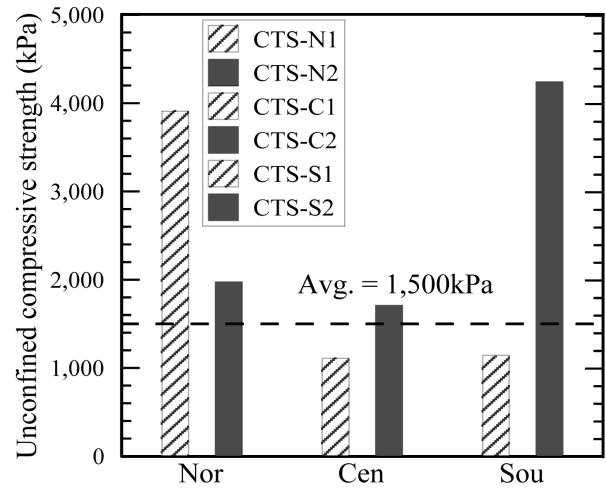
4.2 강도시험 결과

Fig. 9는 각각의 고결토 강도를 서로 비교하고 있다. 시멘트로 고결된 현장 지반의 일축압축강도는 가운데 지역 보다 주변부에서 더 크게 나타나는 경향을 보였으며, 특히 CTS-N1와 CTS-S2의 경우에는 시료를 혼합하는 과정에서 시멘트가 많이 포함되면서 다른 공시체보다 최대 4배까지 높게 측정된 것으로 판단된다. 이를 제외할 경우 평균 1,500kPa 정도의 강도를 보였다. Hwang(2014)의 연구 결과에 의하면 낙동강 모래에 8%의 시멘트를 혼합할 경우 강도가 약 1,900kPa 정도로 본 연구 결과와 유사한 강도를 보였다.

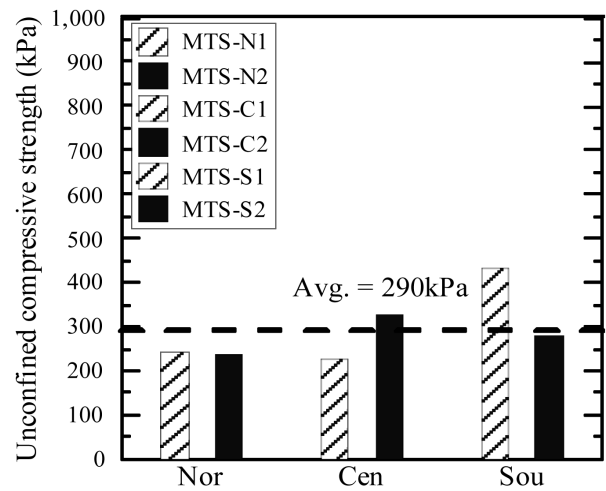
미생물로 고결된 현장 지반의 일축압축강도는 시멘트 공시체와 동일한 방법으로 측정되었으며, 그 결과 평균 290kPa로 측정되었다. 이는 모래에 적용한 기존 연구 결과와 비교하여 4배 정도 낮은 강도이다(Park et al., 2014). 그 이유로 고로슬래그가 경화되기 위하여 초기에 높은 알칼리 상태가 필요하지만, 본 현장 시험 시공은 여름철에 실시하여 현장 시공 직후 내린 비(일 강수량은 32.5mm, 기상청)로 pH가 낮아졌으며, 이것이 강도 발현에 영향을 미친 것으로 판단된다(Park et al., 2014). 또한, 미생물 고결토의 양생 기간 중 강우로 인한 높은 습도로 미생물 고결토 지반의 강도 및 내구성이 더욱 감소한 것으로 판단되며, 기존 연구에서도 미생물 고결토는 일반적으로 시멘트 고결토에 비해 물에 대한 내구성이 낮은 것으로 알려져 있다(Choi, 2014). 두 가지 공법에 의한 고결토의 강도를 비교하면 미생물 고결토가 시멘트 고결토의 강도의 약 1/5 정도로 낮았다. 하지만 미생물 고결토는 시멘트 고결토에 비해 친환경적이고 내구성 문제가 개선된다면 현장에 충분히 사용 가능할 것으로 판단된다.

무처리 지반에 대한 강도 측정을 위하여 두 종류의 고결 지반과 유사하게 지반을 느슨하게 재성형하였으며, 미고결 지반으로 코어채취가 불가능하여 토베인시험기를 이용하여 강도를 측정하였다. Fig. 7과 같이 측정지점은 다른 고결토 지반과 동일하며, 각 지점 당 2회 측정하였다. 측정 결과 전단강도는 약 25kPa(일축압축강도 50kPa에 해당)로 낮게 측정되었다. 동일한 조건에

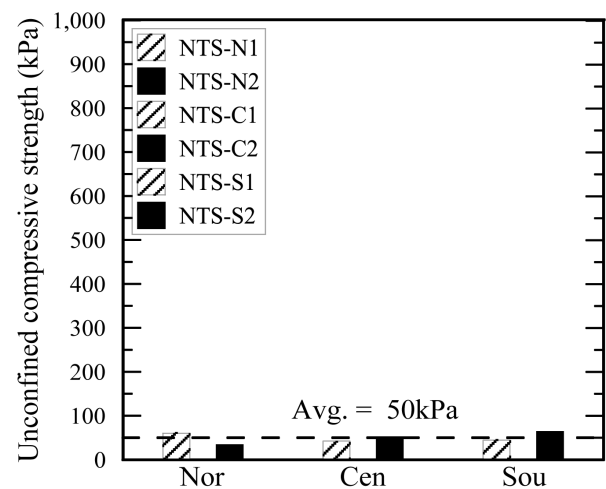
서 미생물 고결토 지반의 강도가 무처리토 지반 강도에 비해 약 6배 높게 측정되었으며, 시멘트 고결토 보다는 효과가 미미하지만 낮은 강도를 요하는 지반 고결방법



(a) Cement-treated soil



(b) Microbially-treated soil



(c) Non-treated soil

Fig. 9. Result of strength tests

에 적용가능 할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 시멘트 고결토와 미생물 고결토의 코어채취 후 일축압축시험 모습으로 파괴 전과 후의 공시체



(a) Cemented with Portland ordinary cement (b) Cemented with microorganism

Fig. 10. Specimens before and after unconfined compression tests

모습을 나타내고 있다. 균열은 공시체의 상하부보다 중앙 부위의 함수비가 다소 높아 중앙 부위에서 먼저 발생하는 경향을 보였다.

한편, 본 연구에서 개발한 미생물 고결토의 친환경성을 조사하기 위하여 양생 후의 pH를 조사하였다. pH 측정을 위하여 물 500g에 시멘트 및 미생물 고결토 그리고 무처리토를 각각 300g씩 넣고 1일 경과 후 pH를 측정하였다. Table 6은 세 종류의 흙으로부터 측정된 pH로 시멘트를 이용하여 개량한 경우 pH 11.25로 측정되었으며, 미생물을 이용하여 개량한 경우 pH 10.06으로 시멘트를 이용한 경우보다 1.19 낮은 pH를 나타내었다. 무처리토는 pH 7.45로 중성에 가까운 값을 보였다.

4.3 XRD 및 SEM 분석

미생물 고결토와 시멘트 고결토 내의 고결물질 생성 여부와 고결 정도를 분석하기 위하여 XRD 분석과 SEM 분석을 실시하였다. XRD 분석 결과로 고결물질을 판단하기에는 어려움이 있어 SEM-EDS 분석도 추가로 실시하였다. Fig. 11은 시멘트 고결토(Cement-treated soil)와

Table 6. pH values measured from treated soils

Soil type	Field soil (g)	Distilled water (ml)	pH
CTS	120	360	11.25
MTS	120	360	10.06
NTS	120	360	7.45

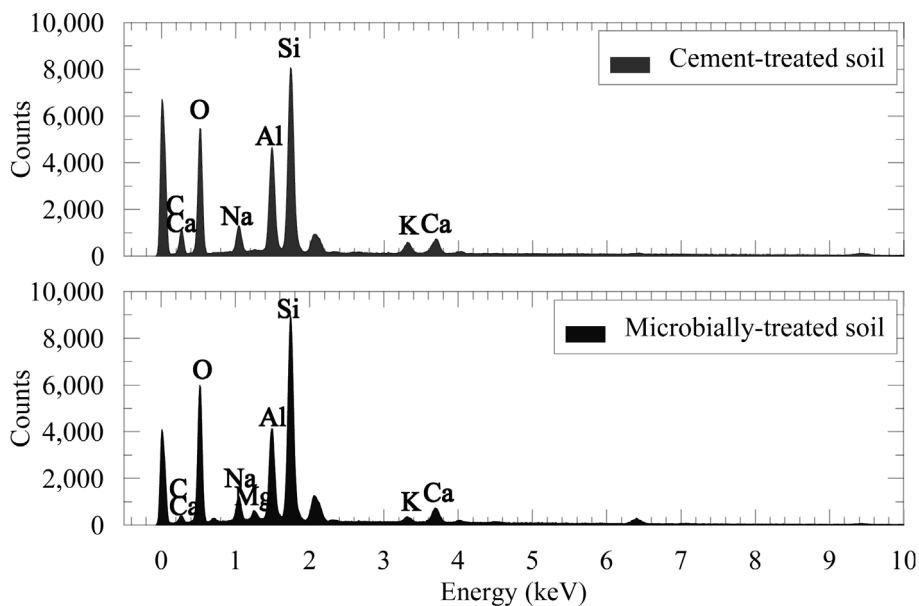
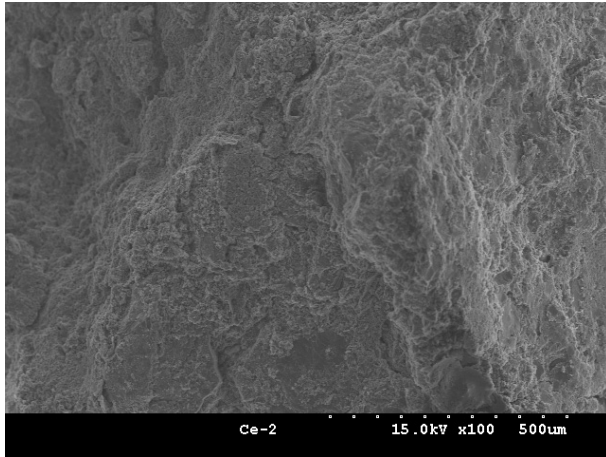
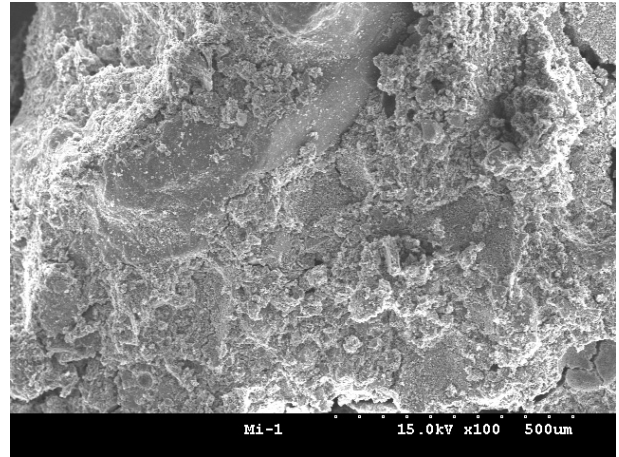


Fig. 11. Result of SEM-EDS analyses on cemented soils



(a) Cement-treated soil



(b) Microbially-treated soil

Fig. 12. Result of SEM analyses on cemented soils

미생물 고결토(Microbially-treated soil)의 SEM-EDS 분석 결과로 두 경우 모두 비슷한 구성 성분을 보였다. 미생물 고결토의 경우 고로슬래그가 극한미생물 알칼리 활성화제와의 반응으로 고로슬래그 입자의 피막이 파괴되고 수화반응이 진행되어 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO 등이 용출되었으며, 이후 지속적으로 용출된 SiO_2 , CaO 성분의 수화작용으로 C-S-H 수화물이 생성된 것으로 판단된다.

앞서 언급한 고결토의 고결 물질은 C-S-H 수화물이며(Lee, 2011) 고결도를 시각적으로 분석하기 위하여 SEM 분석을 실시하였으며, Fig. 12는 시멘트 고결토와 미생물 고결토를 100배 확대한 전자현미경 사진이다. 시멘트 고결토의 경우에는 고결물질이 흙 입자를 완전히 에워싸고 있는 모습이며, 미생물 고결토는 상대적으로 고결도가 낮아 일부 노출된 흙 입자 주변으로 고결물질이 형성되어 있는 모습이다.

5. 결론

본 연구에서는 대량으로 극한미생물 알칼리 활성화제를 제조한 다음 이를 이용하여 고로슬래그의 수화반응을 일으켜 현장 지반을 고결시키는 연구를 수행하였다. 한편 시멘트로 고결된 지반과 미고결 지반에 대한 강도시험 및 친환경성 평가도 실시하여 미생물로 고결된 지반의 특성을 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 현장 시공에 필요한 대량 미생물 배양액을 위해 기

존 배지가 아닌 새로운 저가 배지에 관한 연구를 수행하였으며, 새로운 배지의 단가 비교 및 미생물 성장실험을 통하여 새로운 배지가 기존 배지보다 경제성이 55% 향상되었으며, 성장 효율도 80% 정도 높은 것으로 확인되었다.

(2) 본 연구에서 사용한 극한미생물 *Bacillus halodurans*는 알칼리 활성화제를 촉진시켜 고로슬래그의 경화를 유도하는 역할을 하며, 현장 적용 시 방해석 생성에 사용되는 *Sporosarcina pasteurii* 미생물에 비해 오염 확률이 낮으며 현장 시공방법이 상대적으로 간편하다.

(3) 미생물 고결토의 일축압축강도는 평균 290kPa로 무처리된 지반에 비해서는 약 6배 정도 높게 측정되었으나, 평균 강도 1,500kPa를 보인 시멘트 고결토에 비해서는 1/5 정도 낮은 강도를 발휘하였다. 이는 미생물을 이용한 지반 고결 및 양생이 우기 시에 이루어져 고결토의 강도 및 내구성이 다소 낮아진 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서 개발한 극한미생물을 이용한 고결방법이 낮은 강도를 요하는 친환경 지반 개량 분야에는 충분히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 미생물 고결토의 pH는 11 이상인 시멘트 고결토보다 1 정도 낮아 상대적으로 친환경적임을 확인하였다. XRD 분석을 실시하였으나 결과값으로 고결물질을 확인하기에는 미흡한 점이 있어 SEM-EDS 분석을 통하여 C-S-H 성분을 확인하였으며, 또한 SEM 분석을 통하여 고결을 시각적으로 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토해양기술연구개발사업의 연구비지원(11기술혁신 F01)에 의해 수행되었으며, 논문에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 남인현 박사님께 감사 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Cole, D. M., Ringelberg, D. B., and Reynolds, C. M. (2012), "Small-Scale Mechanical Properties of Biopolymers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, No.138, pp.1063-1074.
2. Choi, S. G. (2014), "Development of Environment-friendly Sand Cementation Using Blast Furnace Slag and Calcite Precipitation", Ph.D Thesis, Kyungpook University.
3. Dejong, J. T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., Van Paassen, L. A., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S. S., Burbank, M., Caslake, L. F., Chen, C. Y., Cheng, X., Chu, J., Ciurli, S., Esnault-Filet, A., Fauriel, S., Hamdan, N., Hata, T., Inagaki, Y., Jefferis, S., Kuo, M., Laloui, L., Larrahondo, J., Manning, D. A. C., Martinez, B., Montoya, B. M., Nelson, D. C., Palomino, A., Renforth, P., Santamarina, J. C., Seagren, E. A., Tanyu, B., Tsesarsky, M., and Weaver, T. (2013), "Biogeochemical Processes and Geotechnical Applications: Progress, Opportunities and Challenges", *Geotechnique*, Vol.63, No.4, pp.287-301.
4. Hwang, S. H. (2014), "The Relationship between Unconfined Compressive Strength and Shear Wave Velocity of Cemented Sands", Master Thesis, Kyungpook University.
5. Jang, I. H. (2010), "Biopolymer Treated Korean Residual Soil - Geotechnical behavior and Applications", Ph.D Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
6. Lee, I. J. (2011), "An Experimental Study on the Alkali-activated Slag Cement Using Recycling Water of Ready Mixed Concrete", Master thesis, Hanyang University.
7. Kawasaki, S., Ogata, S., Hiroyoshi, N., Tsunekawa, M., Kaneko, K., and Terajima, R. (2010), "Effect of Temperature on Precipitation of Calcium Carbonate Using Soil Microorganisms", *Journal of Japan Society of engineering Geology*, Vol.51, No.1, pp.10-18.
8. Kim, S. T., Lee, C. J., Kim, W. J., and Lee, J. C. (2012), "The Influence of Calcite Nano Material on Microorganism Mixed Mortar", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.28, No.5, pp.77-85.
9. Kim, S. T., Do, J. N., Jo, H. S., and Chun, B. S. (2011), "Effect of Ground Strength Increase Using Polysaccharide Environmentally Friendly Soil Stabilizer", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.11, pp.13-21.
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. Park, S. S., Kim, W. J., and Lee, J. C. (2011), "Effect of Biomineralization on the Strength of Cemented Sands", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.27, No.5, pp.75-84.
12. Park, S. S. and Choi, S. G. (2013), "A Study on Sand Cementation and its Early-Strength Using Blast Furnace Slag and Alkaline Activators", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.29, No.4, pp.45-56.
13. Park, S. S., Choi, S. G., and Nam, I. H. (2014), "A Study on Cementation of Sand Using Blast Furnace Slag and Extreme Microorganism", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.1, pp.93-101.
14. Park, E. H. (2013), "A Properties of Ground Improvement by Con- α Method", Master Thesis, Hanyang University.
15. Terajima, R., Shimada, S., Oyama, T., and Kawasaki, S. (2009), "Fundamental Study of Siliceous BiogROUT for Eco-friendly Soil Improvement", *Journal of Japan Society of Civil Engineers C*, Vol.65, No.1, pp.120-130.
16. Van Paassen, L. A., Ghose, R., Vander Linden, T. J. M., Vander Star, W. R. L., and Van Loosdrecht, M. C. M. (2010), "Quantifying Biomediated Ground- 159 -improvement by Ureolysis : Large-scale BiogROUT Experiment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.12, pp.1721-1728.
17. Whiffin, V. S., Van Paassen, L. A., and Harkes, M. P. (2007), "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", *Geomicrobiology Journal*, Vol.24, pp.417-423.
18. Yoon, G. L. and Kim, B. T. (2006), "Stabilizing Capability of Oyster Shell Binder for Soft Ground Treatment", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.11, pp.143-149.

Received : October 28th, 2014

Revised : December 7th, 2014

Accepted : January 8th, 2015