Bacteria로 처리된 모래지반의 강도 및 주입효과

Strength and Effectiveness of Grouting of Sand Treated with Bacteria

박 경 호¹ Park, Kyung-Ho김 대 현² Kim, Dae-Hyeon

Abstract

The purpose of this study is to confirm strength and effectiveness of grouting of the sand treated with bacteria. In order to analyze the cementation of sand treated with bacteria, five types of specimens(Not treated, Cement 2% treatment, Cement 4% treatment, Cement 2% + $CaCO_3$ 2% treatment and $CaCO_3$ 4% treatment) were made. Unconfined compressive strength tests were done on D 5cm × H 10cm specimens and biogrouting tests were performed on D 6cm × H 12cm specimens to observe the effectiveness of grouting with bacteria. As a result, Cement 2% + $CaCO_3$ 2% treatment was found to be the most effective in terms of the unconfined compressive strength.

요 지

본 연구에서는 미생물 용액과 염화칼슘 수용액의 반응에 의해서 생성되는 탄산칼슘을 통해 연약지반(모래)의 고결화 및 주입 효과를 확인하고자 하였다. 미생물의 탄산칼슘 고결화 효과를 분석하기 위해 5가지 case(무처리, 시멘트 2%, 시멘트 4%, 시멘트 2% + 미생물 반응에 의한 탄산칼슘 2%, 미생물 반응에 의한 탄산칼슘 4%)를 실험하였다. D 5cm × H 10cm 공시체로 성형하여 일축압축강도를 측정하였으며, D 6cm × H 12cm 공시체에 연약지반을 형성하여 바이오그라우팅 주입 실험을 진행하였다. 그 결과, 시멘트 2% + 미생물 반응에 의한 탄산칼슘 2%에서 가장 높은 일축압축강도를 나타냈으며, 이는 무처리에 비해 약 1.5배 정도 강도가 증가하는 경향을 보였고, 주입실험의 경우 배수 조건의 장비주입(Air Compressor)을 통해 주입한 실험에서 효과가 뛰어났다.

Keywords : Bacteria, Cementation, $CaCO_3$, Biogrouting

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라의 그라우팅공법 현황은 선진국과 비교해 기술력이나 시공의 신뢰성 측면에서 크게 낙후되어 있다. 즉, 전문성이 없이도 그라우팅에 대한 경험만 있다

면 누구나 할 수 있는 단순한 지반보강 보조공법으로 인식되고 있기 때문에 매년 7,000억 원 정도의 크지 않은 시장규모에 900여개의 보링 및 그라우팅 등록업체가 난립하고 있는 실정이다(KOSCA, 2009).

국내 건설현장에서 주로 사용되는 그라우팅공법은 물유리계 약액, 우레탄, 고압분사주입 등이 단독 또는 2~3가지가 병행되어 쓰이고 있으나, 이러한 주입공법

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, dkimgeo@chosun.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 8월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

은 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(2005)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 연구되어 지고 있다.

본 연구에서는 시멘트 및 약액을 대체할 수 있는 친환경적인 미생물을 이용하여 탄산칼슘을 연약지반의 공극에 침전시킴으로 연약지반을 고결화 시키고자 손비빔을 통하여 일축압축강도를 측정하였으며, 현장 조건과 유사한 방법으로 1.5 shot 주입(약액과 반응약액을 중간에서 혼합 주입)장치를 제작하여 바이오그라우팅의 주입 효과를 확인하고자 하였다.

1.2 선행연구

최근 시멘트를 근본적으로 절감시킬 수 있는 대체재 개발이 다양하게 연구되어지고 있는데 특히, 땅 속에 존재하는 수많은 미생물 중 *Bacillus Pasteurii* 균(KCTC 3558)의 생·화학반응을 통해 생성되는 고결물($CaCO_3$)을 이용하여 연약지반을 고결화(Cementation)하는 연구가 국내·외 소수 연구자들에 의해서 진행되어졌다(Kim et al., 2010; 2011; 2012; Park et al., 2011; 2012; Park et al., 2012; Michell and Santamarina 2005; Dejong et al., 2006; 2010; Paassen et al., 2009; Wiffin et al., 2007).

국내에서는 Kim et al.(2010; 2011; 2012)이 국내 최초로 연약지반에 순수한 미생물을 이용하여 강도를 증진시키는 연구를 하였으며, 미생물 고농도의 조건을 통해 고결물의 침전을 높이는 방법을 개발함으로써 “미생물을 이용한 연약지반의 고결화 방법”이라는 미생물 고결화 특허(Kim et al., 2011)를 국내에 최초로 등록하였고, 무처리 시료와 일반농도처리 시료, 고농도처리 시료 등의 혼합시험을 통해 연약지반의 미생물 고결화를 확인할 수 있었다(Kim 2011).

Park et al.(2012)은 우레아제 성분을 포함하고 있는

식물에 추출한 용액을 이용하여 탄산칼슘을 석출시키는 방법으로 지반을 고결화하고자 하였으며, 이를 통해 무처리 보다 약 3배 정도 증가한 300kPa를 나타냈으나, 식물추출액의 경우 1차 2차 원액을 얻기까지 과정이 복잡하며, 4일 후 최대 5% 정도의 고결물이 생김에 따라 반응 용액과 혼합된 후에도 최대 고결물이 생성되기까지 수일이 걸리는 문제점이 있다.

국외에서는 Paassen et al.(2008; 2009) and Dejong et al.(2006; 2010)을 비롯해 소수의 연구자들에 의해 미생물의 고결화 연구가 진행되고 있다. Dejong의 경우 계속적인 주입으로 삼축압축강도를 통해 원하는 강도를 얻었으나, 그 공정이 매우 복잡하고 난해하였다. Whiffin et al.(2007)의 경우 공시체의 강도 값은 10MPa로 큰 값을 얻었으나, 정량적인 분석이 아닌 추정치에 의한 값으로 강도를 추정하였다. Paassen et al.(2009)의 경우 큰 모조토에서 실험을 하였으나, 강도의 증가는 표면이 닿는 부분과 공기가 닿을 수 있는 겉 표면부분을 따라서 강도가 증가되었고, 공기가 충분치 않은 중앙 부분에서의 강도 증가는 미미함 등의 문제점을 갖기 때문에 그라우팅의 주입기술이 상당히 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 바이오그라우팅을 통해 미생물에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)을 연약지반에 주입하고 일정시간 공기주입을 통해 공기건조를 시킴으로써 중앙 부분에서의 강도 증가의 미미한 부분을 해결하고자 하였으며, 일축압축강도 시험을 통하여 순수한 미생물에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)의 강도를 평가하고자 하였다.

2. 미생물에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)

2.1 미생물에 의한 고결물 생성과정

본 연구에서 사용된 *B. pasteurii* 균(KCTC 3558)은 한국생명공학연구원 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℃에서 180RPM의 셰이킹 인큐베이터에서 배양하였다. 미생물과 요소의 반응은 식 1과 같으며, 미생물 생장을 통해 요소와 반응하여 아래와 같이 탄산 이온(CO_3^{2-})과 두 개의 암모늄 이온(NH_4^+)으로 가수분해 된다.

B. pascuarius 균은 요소를 섭취하여 반응을 통해 생성된 탄산 이온(CO_3^{2-})과 염화칼슘($CaCl_2$) 수용액의 칼슘 이온(Ca^{2+})이 반응하여 탄산칼슘($CaCO_3$)이 생성되며, 탄산칼슘 침전 반응은 식 2와 같다.

이러한 단계를 거쳐 미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘($CaCO_3$)은 지반 내의 공극을 채워 주고 입자간 결합력을 높임으로서 지반의 고결화(Cementation)가 진행되어진다.

미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘($CaCO_3$)은 지반 내의 공극을 채워 입자간의 결합력을 높여 지반의 고결화(Cementation)가 형성된다. Fig. 1은 각각의 식을 탄산칼슘 생성과정 및 흙 입자에 침전되는 모습의 Cycle을 도식화 한 것이다.

2.2 고결물의 pH 시험

그라우팅 공법 중 대표적으로 사용되는 시멘트 + 약액 및 시멘트 고결물에서 용탈과 미생물 반응에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)의 용탈로 인한 pH 변화 시험을 통하여 지하수의 환경오염 정도를 확인하고자 하였다.

Mix 1은 순수 시멘트와 물의 비율을 1:1 혼합비로 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. Mix 2는 염화칼슘 수용액(0.75Mol)과 미생물 용액의 비율을 1:1 혼합비로 섞어 탄산칼슘을 생성하였으며, 이때 발생하는 상층액은 제거하여 순수하게 생성된 탄산칼슘의 알갱이를 사용하였다. 다음 Table 1은 시험시료의 배합비이다.

시험시료는 체적 $5cm \times 5cm \times 5cm$ 의 시편 11개 ($1,375cm^3$)를 제작하였고, 시험수조는 일반 어항수조(밖에서 관찰이 용이한 유리제를 사용) 약 50L(L 63cm $\times$ B 33cm $\times$ H 40cm) 이상인 것으로 하여, 50L의 물속에 시험시료를 넣고 수조내의 산소가 공급되도록 blower를 사용하였고, 시험 시작 후 일정 시간 0h, 4h, 8h, 24h, 48h, 72h 마다 pH 변화를 측정 하였다.

Table 1. Mixing ratio of test specimen

Mix	Type of injection material			
	A (1,000ml)		B (1,000ml)	
1	—	—	Cement(g)	Water(ml)
	—	—	1,375	1,375
2	$CaCl_2$ (g)	Water(ml)	Normal concentration bacteria(ml)	
	282	2,000	2,000

Fig. 2. Water tank

시험 결과, 약 8시간 경과 후 Mix 1은 pH 10.22, Mix 2는 pH 9.11로 최대를 나타냈으며, 이후 시간이 지남에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이를 통해 미생물에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)이 시멘트 보다 pH가 더 낮게 나타났으며, 다시 원상태의 수질로 돌아오는 효과도 높았다. 특히 24시간 경과 후 수질오염의 기준이 되는 pH 8.6보다 낮은 상태로 회복됨으로써 환경적으로 안정하다고 판단된다. 다음 Table 2는 주입재의 종류에 따른 pH 변화를 나타낸 것이다.

3. 일축압축시험 및 결과

3.1 일축압축시험에 사용된 시료의 배합비

본 시험에 사용된 D 5 × H 10(cm) 시험 시료는 섬진강에서 채취한 모래를 사용하였으며, 체분석을 하여

Fig. 4. Sieve analysis of test specimen

0.25~0.075mm의 입도를 가지도록 인위적으로 제작하였다. 이는 모래 스스로 자립하지 못하기 때문에 무처리의 강도를 측정할 수 없음으로 자립할 수 있도록 표준사 대신 입도분포곡선을 이용하여 자립할 수 있도록 제작하였으며, 사용된 시료의 체분석 결과는 Fig. 4와 같다. 또한, 통일 분류법에 의해 분류한 결과 빈입도 모래(SP)로 분류되었다.

공시체는 시료 285g에 대한 시료비로 1:2의 비율 몰드에 제작하였으며, 시료는 손비빔을 통해 몰드에 제작하였고 상대밀도(D_r) 40%로 맞춰 성형하였다. 각 Case 별 시료 양생은 건조기에 1일 동안 40도에 성형하여 제작하였으며, 무처리, 시멘트 4%, 시멘트 2%, 시멘트 2% + 미생물 반응에 의한 탄산칼슘 2%, 미생물 반응에 의한 탄산칼슘 4% 시료의 5가지 Case를 2개씩 측정하여

(a)

(b)

(c)

Fig. 3. (a) Producing process of specimen, (b) Cement, (c) $CaCO_3$ using bacteria

Table 2. pH change according to injection material type

Mix	Type of Injection material		Initially	4h	8h	24h	48h	72h
	A	B						
1	Cement	—	7.57	10.07	10.22	10.22	9.12	8.55
2	Normal concentration bacteria	$CaCl_2$	7.55	9.08	9.11	8.48	8.40	8.35

Table 3. Mixing ratio of unconfined compression test

Mix	Mixing ratio			
	Soil (g)	Water (g)	Cement (g)	$CaCO_3$ (g)
Non treated Soil	285	50	–	–
Cement 2%	285	50	5.7	–
Cement 4%	285	50	11.4	–
Cement 2% + $CaCO_3$ 2%	285	50	5.7	5.7
$CaCO_3$ 4%	285	50	–	11.4

평균을 나타내었다. %는 사용된 시료 285g에 대한 무게비를 말하며, 일축압축시험기의 압축속도는 변형률 1%/min으로 측정하였다.

본 시험에 사용된 탄산칼슘은 미생물 용액과 염화칼슘 수용액(0.75mol)을 1:1 비율로 섞어 침전된 고결물인 탄산칼슘 알갱이의 g수를 측정하여 일축압축시험에 사용하였다.

다음 Table 3은 일축압축시험에 사용된 배합비이다.

3.2 일축압축시험 결과

일축압축시험결과 Table 4와 같이 무처리는 175kPa, 시멘트 2%는 195kPa, 시멘트 4%는 220kPa, 시멘트 2%+미생물2%는 255kPa, 미생물 4%는 230kPa 강도가 나타났다. Fig. 5와 같이 일축압축강도를 통해 시멘트만 사용하였을 때 보다 시멘트 + 미생물 반응에 의해 생성된 탄산칼슘과의 결합을 통해 더 좋은 강도를 나타냈으

Fig. 5. Comparison of graph result for unconfined compression test

Table 4. Test result for unconfined compression test

Reaction solution	Non teated soil	Cement 2%	Cement 4%	Cement 2% + $CaCO_3$ 2%	$CaCO_3$ 4%
q_u (kPa)	175	195	220	255	230

며, 다른 Case에 비해 일축압축변형이 더 늦게 일어났음을 알 수 있었다. 이러한 탄산칼슘을 시멘트 혼화제에 사용한다면 근본적으로 시멘트의 양을 줄임으로써 CO_2 절감에 큰 효과를 볼 수 있을 것이라고 판단된다. 또한, 무처리 시료보다 미생물에 의해 생성된 순수한 고결물($CaCO_3$)로 고결시킨 결과 약 1.5배 강도의 효과를 확인할 수 있었다.

4. 공시체의 주입시험 및 결과

4.1 시험 시료 배합비

본 실험에 사용된 D60 × H120(mm) 시험 시료는 표준사를 이용하였으며, 이는 주입시험 시 공극의 일정한 크기를 가진 시료를 주입방법에 따라 비교함으로써 미생물에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)이 모래지반에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 시료의 배합비는 상대밀도(D_r) 30%를 기준으로 느슨한 상태 지반을 나타냈고, 주사 주입은 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 각각 25ml를 5일 동안 1일 2회 주입하여 시험을 실시하였다. 또한 장비주입은 각각 250ml를 공기압 0.5kPa으로 1회 주입하여 실험하였다.

4.2 공시체의 주입시험 방법

4.2.1 주입시험

비배수(주사주입) 및 배수(주사주입), 배수(Air Compressor 주입) 각각의 3Case를 이용하여 실험을 진행 하였으며, 분사노즐은 바닥으로부터 높이는 12cm 이고, 바닥에서

Table 5. Physical characteristic of specimen

Soil	G_s	# 200(%)	LL	PL
Sand	2.55	1.24	N.P	N.P

Table 6. Mixing ratio of test specimen

Specimen	Condition		Soil (g)	$CaCl_2$ (ml)	Nomal concentration bacteria (ml)	Water (ml)
D60×H120 (mm)	Non treated soil		375.9	—	—	500
	Nomal concentration bacteria	Undrained test	375.9	250 [25ml*2N*5day]	250 [25ml*2N*5day]	—
		Drained test	375.9	250 [25ml*2N*5day]	250 [25ml*2N*5day]	—
		Air compression injection test	375.9	250 [250ml*1N*1day]	250 [250ml*1N*1day]	—

구멍 위치 높이까지는 8cm 이며 4방향으로 주입할 수 있도록 되어 있고, 각각의 주입구멍 크기는 8mm 이다. 주입 노즐을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 주입하였다. Fig. 6은 주입시험 시 사용된 주입노즐 모습이다.

실험방법은 Fig. 7(a) 비배수(주사주입) 시험 시 배수

Fig. 6. Injection nozzle

가 되지 않도록 공시체 하부에 유리판을 설치하였으며, Fig. 7(b) 배수(주사주입) 시험 시 배수가 원활이 잘 되도록 공시체 하부에 배수망을 설치하였다. 직경 8mm의 주입노즐을 통하여 미생물 용액 25ml와 염화칼슘 수용액(0.75mol)을 1:1비율로 25ml를 각각 주입하였으며, 하루 2회씩 5일 동안 총 250ml 용액을 주입하였다. 주입 후 24시간동안 1kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 24시간 상온에서 자연건조 후에 강도를 측정하였다.

Fig. 8 배수(Air Compressor) 시험은 장비를 이용한 배수 실험으로 보다 현장조건과 유사한 방법을 묘사하여 시험을 진행하였으며, 배수가 원활이 잘 되도록 공시체 하단부에 배수망을 설치, 직경 8mm의 주입노즐을 통해 미생물 용액 250ml와 염화칼슘 수용액 250ml를 주입하였다. 주입은 0.5kPa의 공기압으로 1회 주입 후에 24시간 동안 1kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 24시간 동안 상온에서 자연건조 후에 강도를 측정하였다.

본 실험을 통해서 앞서 실시한 주사주입방법과 동일

(a)

(b)

Fig. 7. (a) Undrained test (Syringe injection), (b) Drained test (Syringe injection)

(a)

(b)

Fig. 8. (a) Air compressor injection, (b) Process of biogrout test

한 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 주입함으로써 주사 주입방법과 장비를 이용한 주입방법을 비교할 수 있었다.

4.3 공시체의 주입시험 결과

두께는 바이오그라우팅 주입 후 고결된 정도의 길이를 나타내며, 강도는 포켓관입시험기를 이용하여 측정된 일축압축강도를 나타내었다. Table 7과 같이 고결두께 및 강도를 비교한 결과 배수[장비]에서 가장 큰 일축압축강도와 고결의 두께를 나타냈으며, 이는 일정시간 동안 동일하게 주입압력을 가함으로써 주입 액의 침투가 보다 안정적으로 이루어져 고결의 효과가 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 9와 같이 주입노즐길이(L 8cm) 둘레의 전 부분에 대하여 고결이 되지 않은 이유는 바이오그라우팅 분사 시 일정 부분 공극으로 침투되다가 공극의 폐색현상으로 인하여 전 부분에 주입 액이 골고루 침투되지 못함에 따라 다음과 같이 부분적인 고결효과가 일어난 것으로 판단된다.

X-회절분석(XRD) 시험은 시료 내에 존재하는 물질의 정성적분석이 가능한 장비로써 주입된 범위에서 시료를 추출하여 미생물에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)을 확인하고자 X-회절분석(XRD) 시험을 수행하였다. Table 8을 살펴보면 주사주입 - 배수, 비배수 및 장비주입 - 배수의 시료에서 탄산칼슘($CaCO_3$)이 존재하였고, 이는 흙 입자 속에 탄산칼슘이 침투되어 느슨한 모래에서 일정한 두께와 강도를 발현한 것으로 판단된다.

Table 7. Test result for Injection

Test method	Undrained test	Drained test	Air compressor injection test
Cementation thickness (cm)	3.5	4.5	5.4
q_u (kPa)	80	100	150

(a)

(b)

(c)

Fig 9. Test result (a) Undrained test, (b) Drained test, (c) Air compressor injection test

Table 8. XRD analysis result

Test	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula
Undrained test	Quartz	0.995	SiO_2
	Microcline, ordered	0.089	$KAlSi_3O_8$
	Albite, ordered	0.024	$NaAlSi_3O_8$
	Calcite	0.018	$CaCO_3$
Drained test	Quartz	0.939	SiO_2
	Microcline, ordered	0.057	$KAlSi_3O_8$
	Albite, ordered	0.020	$NaAlSi_3O_8$
	Calcite	0.008	$CaCO_3$
Air compressor injection test	Quartz	1.019	SiO_2
	Microcline, ordered	0.080	$KAlSi_3O_8$
	Albite, ordered	0.032	$NaAlSi_3O_8$
	Calcite	0.140	$CaCO_3$

5. 결 론

본 연구에서는 시멘트 및 약액을 대체할 수 있는 친환경적인 미생물을 이용하여 탄산칼슘을 연약지반의 공극에 침전시킴으로 연약지반을 고결화 시키고, 현장 조건과 유사한 방법으로 1.5 shot 주입(약액과 반응약액을 중간에서 혼합 주입)장치를 제작하여 바이오그라우팅 공법의 효과를 확인하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주입재의 용탈로 인한 pH 변화 시험 결과 미생물 반응에 의한 고결물($CaCO_3$)가 시멘트에 비해 상당히 낮은 pH를 나타냄을 알 수 있었고, 24시간 이내에 다시 원상태의 수질로 돌아오는 회복 효과 또한 높음을 알 수 있었다. 따라서 수질오염에 미치는 영향이 적다고 할 수 있다.
- (2) 일축압축강도시험결과, 무처리 시료보다 미생물에 의해 생성된 고결물($CaCO_3$)이 약 1.5배 정도 높은 강도를 나타내었으며, 시멘트 2% + $CaCO_3$ 2% 혼합된 시료에서 최대 255kPa 까지 강도를 나타냈다. 이는 시멘트와 결합성이 상당히 좋은 것으로 판단되며, 혼화제 재료로서 시멘트의 사용을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 주입장비를 이용한 실험결과, 탄산칼슘 반응에 의한 시료의 고결화 두께가 약 5.4cm 정도의 크기로서 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 일정한 주입량과 주입압력(저압)을 가한 결과로 판단되며, 보다 고압

을 주기 위해서는 모형토조의 지름 및 높이를 높여서 시료 및 약액의 overflow를 방지하여 실험을 해야 할 것으로 판단된다. 또한, 이러한 장비 주입은 현장 실험을 유사하게 모사한 것으로서 현장에서도 충분히 실용성이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업(No. 2012-0003673) 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사드립니다.

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. Kim, D. H. and Park, K. H. (2011), "Creation of $CaCO_3$ and Cementation of Soil using Bacteria", 2011 *Korean Geotechnical Society Spring National Conference*, Gyeonggi, Korea, pp.661-671.
4. Kim, D. H., Kim, H. C., and Park, K. H. (2010), "Possibility of Cementation of Soft Soil using Bacteria", 2010 *Korean Geotechnical Society Fall National Conference*, Gyeonggi, Korea, pp.379-391.
5. Kim, D. H., Kim, H. C., and Park, K. H. (2011), "Cementation of Soft Ground using Bacteria", CERTIFICATE OF PATENT, 10-1030761, pp.1-47.
6. Kim, D. H., Park, K. H., Kim, H. C., and Lee, Y. H. (2012), "Effect of Microbial Treatment Methods on BiogROUT", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.13, No.5, pp.51-57.

7. Kim, D. H., Park, K. H., Kim, S. W., and Mun, S. H. (2012). "A Novel Approach to Induce Cementation of Loose Soils.", *Advanced Science Letters*, Vol.9, pp.545-550.
8. Kim, H. C. (2011), "Discovering Cementation Characteristics of Soil using Bacteria", *Master Thesis*, Chosun University.
9. Korea Cement Association (2005), 2010 *Cement Statistical Yearbook*, Korea Cement Association, pp.5-7.
10. KOSCA (2009), 2009 *Specialty Constructors Statistical Yearbook*, pp.1-3.
11. 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.
12. Paassen, L. A., Harkes, M. P., Zwieten, 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.
13. Park, K. H. (2011), "Strength Improvement of Soft Ground with Microbial Reaction" *Master Thesis*, Chosun University.
14. Park, K. H. and Kim, D. H. (2012), "Verification fo Calcium Carbonate by Cementation of Silt and Sand using Bacteria", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.28, No.6, pp.53-61.
15. Park, S. S., Choi, S. G., and Nam, I. H. (2012), "Development of Soil Binder using Plant Extracts", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.28, No.3, pp.67-75.
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 2013. 1. 29, 심사완료일 2013. 2. 13)