

지반조건에 따른 친환경 바이오그라우팅 주입 효과에 관한 연구

김대현¹, 박경호¹, 김민석¹, 김선학^{*}
¹조선대학교 토목공학과

A Study on the Effectiveness of Injection in Environmentally-Friendly Bio-grouting with Soil Conditions

Daehyeon Kim¹, Kyung-Ho Park¹, Min-Seok Kim¹, Sun-Hak Kim^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Chosun University

요약 본 연구에서는 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘을 현장에서 활용되고 있는 주입장비와 유사하게 제작하여 모래지반에 주입함으로 지반조건에 따른 주입범위 및 주입효과를 확인하고자 하였다. 본 연구를 위해 2종류의 단층토(SP, SW)를 D 150mm X H 300mm의 모형토조에 상대다짐도 80, 85, 90, 95%로 제작하여 주입실험을 수행하였다. 주입 후 강도개선효과를 확인하기 위해 일축압축강도를 측정하였고, 주입노즐 주변의 구근형성을 통해 주입범위를 살펴보았다. 그 결과, SW시료는 상대다짐도 85% 이상에서 주입률이 10% 이하로 나타났으며, 지반의 상대다짐도에 따라 Bio-grouting의 주입률 및 고결범위에 영향이 있음을 확인 할 수 있었다.

Abstract The purpose of this research is to identify the effectiveness of injection with soil conditions by injecting CaCO₃(created by microorganism reaction), which was recreated with equipment in similar situ condition. To analyze our research, we made 2 cases of single-layer (SP, SW) in D 150mm X H 300mm. Layers were made by RC 70, 80, 85, 90, 95% of soil condition. We measured uniaxial compression strength with cone penetrometer and watched injection range by checking a bulb formation around the injection nozzle. As a result, the relative compaction(RC) in more 85% were not injected in SW, we could identify the effect of bio-grouting technology on ground in relative compaction(RC) of injection ratio and cementation range.

key words : Bio-grouting, Soil Condition, Single-layer Soil, Injection ratio, Cementation rage

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

국내에서는 연약지반 및 해안 준설 매립 지반을 기초 지반으로 활용하는 건설현장이 증가하고 있기 때문에 그동안 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 실

정이다.

국내 건설현장에서 주로 사용되는 그라우팅공법은 물 유리계 약액, 우레탄, 고압분사주입 등이 단독 또는 2~3가지가 병행되어 쓰이고 있으나, 이러한 주입공법은 대부분 지반의 강도증진에만 중점을 두었으며, 그라우팅 공법에 주원료로 사용되는 시멘트 및 약액을 통해 발생하는 이산화탄소 배출 및 지하수 오염 등 환경문제에 대한 구체적인 해결방안은 제시하지 못하고 있는 실정이다. 또한 1톤의 시멘트를 생산 시 발생하는 이산화탄소는 약 0.9톤으로서 시멘트를 통해 발생하는 이산화탄소

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning(NRF-2013R1A1A105010106).

*Corresponding Author : Sun-Hak Kim(Chosun Univ.)

Tel: +82-10-6631-8075 email: sun93k@naver.com

Received March 23, 2015

Revised (1st April 27, 2015, 2nd May 20, 2015)

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

가 온실가스의 주원인이 되고 있으므로 최근에는 이러한 환경문제를 해결하기 위해서 근본적으로 시멘트를 절감할 수 있는 대체재 개발이 다양하게 연구되어 지고 있다 [1].

본 연구에서는 친환경 미생물에 의해 생성된 고결물을 현장 주입조건과 유사한 조건으로 그라우팅기술을 적용하여 상대다짐도에 따라 Bio-grouting이 지반의 강도 및 주입효율, 주입범위에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 따라서 상대다짐도에 따라 동일한 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 1.5shot 그라우팅 주입방식을 적용시켜 단층토에 Air Compressor의 150kPa 압력을 이용하여 주입하였고, 공기건조 후 주입효율, 고결범위 및 포켓 관입시험기를 통해 일축압축강도를 분석하였다.

1.2 선행연구

친환경 미생물 반응을 통해 생성된 고결물을 이용하여 느슨한 사질토 지반에 비빔 및 혼합을 통하여 강도효과를 나타낸 연구는 계속적으로 수행된바 있다. 이러한 MICP(Microbial-Induced Calcite Precipitation) 기술을 이용하여 느슨한 사질토 지반의 강도를 개선하거나 고결물이 흙 입자와 흙 입자 사이를 침투하여 차수효과를 통해 연약지반을 개량할 수 있는 친환경 공법으로 연구되어 왔다[2-9]. 그러나 MICP 기술은 순수한 Sand 지반만을 이용하여 강도개선의 효과를 확인하였고, 느슨하거나 연약한 지반에 고결물을 혼합하여 사용하기 위해서는 여러 번 반복해서 주입해야하는 번거로움과 현장 적용성에 대한 한계를 가지고 있는 실정이다[10, 11]. 따라서 친환경 미생물 고결화 공법인 MICP 기술을 보다 효율적이고 실용적으로 현장에 적용시키고자 연약지반 처리 공법인 그라우팅공법에 MICP 기술을 접목시켜 Bio-grouting 공법을 개발하여 현장여건과 유사한 조건으로 주입 기술을 개발하여 연구를 수행하였다[1, 12, 13].

이러한 Bio-grouting 공법은 국내·외적으로 연구가 미비한 상태이며, 모두 느슨한 사질토 지반인 상대밀도 30~40%에 Bio-grouting 공법을 적용 하여 연구를 수행한 바 있다. 느슨한 사질토에 Bio-grouting을 적용한 결과, 공시체의 강도 값은 10MPa로 큰 값을 얻었으나, 정량적인 분석이 아닌 추정치에 의한 값으로 강도를 추정하였다[12]. 또한 큰 모형토조에서 실험을 하였으나, 강도의 증가는 겉 표면부분을 따라서 강도가 증가되었고, 모형토조 중앙 부분에서의 강도 증가는 미미함 등의 문

제점이 있음을 확인할 수 있었다[13]. 느슨한 SP, SW 다층토 지반을 조성하여 실험을 하여 구근을 형성하였으며 주입노즐과 거리가 멀어질수록 강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다[1].

앞서 수행한 Bio-grouting 연구를 통해 주입기술이 상당히 중요한 요인임을 확인할 수 있었고, 느슨한 지반에서 고결의 효과를 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 활용되고 있는 주입장비와 유사한 주입장비 및 주입노즐을 제작하여 다양한 지반조건에서 Bio-grouting의 적용성을 평가하고자 하였다.

2. Bio-grouting 공법

2.1 미생물 반응에 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 шей킹 인큐베이터에서 배양하였다. 이러한 *B. paseurii* 균은 요소를 섭취하여 Urease 반응을 통해 탄산 이온(CO_3^{2-})을 발생시키고 이러한 탄산이온과 염화칼슘(CaCl_2) 수용액의 칼슘 이온(Ca^{2+})이 반응하여 탄산칼슘(CaCO_3)이 생성시켜 지반 내의 간극을 채워 입자간 결합력을 높임으로서 지반의 고결화(Cementation)가 진행되어진다.

2.2 Bio-grouting 공법의 개념

Bio-grouting 공법은 환경오염에 많은 영향을 미치는 시멘트 및 약액 등을 대신하여 친환경 신소재 미생물을 이용함으로써 탄산칼슘 침전을 통해 입자사이의 빈 간극을 채움으로써 지반의 강도 증가효과 및 차수효과를 기대하는 공법이며, Fig. 1은 고결작용을 통한 흙 입자간의 간극변화를 나타내고 있다.

주입공법 중 하나인 Bio-grouting 공법은 약액주입공법에 해당되며, 약액주입공법은 고결시간을 기준으로 gel-time이 20분 이상일 경우에는 1.0shot(약액과 반응약액을 미리 혼합하여 주입), 2~10분일 경우에는 1.5shot(약액과 반응약액을 중간에서 혼합 주입), 혼합되는 순간 반응의 경우 2.0shot(약액과 반응약액을 각각 따로 주입)

주입방식으로 구분된다. 특히, Bio- grouting 공법의 경우 기존 선행연구인 미생물 고결화 공법인 MICP 기술의 선행연구 결과를 통해 약액과 반응약액을 중간에 혼합 주입하는 1.5shot 주입방식과 혼합되는 순간반응을 일으키는 2.0shot 주입방식 둘 다 가능한 것으로 나타났으나, 현장조건을 재현하고자 1.5shot 주입방식을 실험에 적용하였다[1].

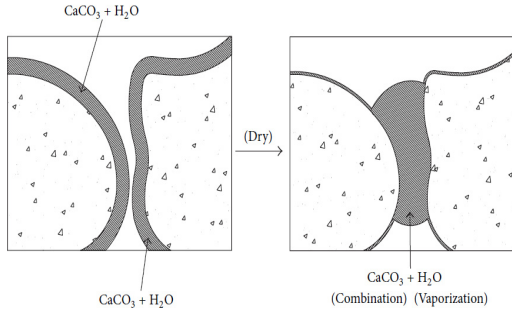


Fig. 1. Effect of enhancing strength of calcium carbonate specimens[14]

3. 실내시험

3.1 시료의 물리적 특성

본 연구에 사용된 SP, SW 시료는 섬진강 유역에서 채취한 모래시료로서 SP시료는 인위적으로 0.42mm~0.84mm의 사이의 시료만을 추출하여 균등계수와 곡률계수를 수정함으로 SP시료를 제작하였고, 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 한국 공업규격에 준하여 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 다짐(KS F 2308) 실험을 실시하였다.

Table 1은 D150 × H300(mm) 공시체 제작에 사용된 시료의 물리적 특성시험 결과를 나타낸 것으로 비중은 2.64~2.67 및 # 200체 통과율은 2.4~4.34%로 나타났으며, 액성한계와 소성한계는 N.P(비소성)로 나타났다.

Table 1. Physical characteristic of specimens

| Specimen | G_s | $P_{\#200}$ (%) | r_{dmax} (KN/m ³) | LL | PL | Cu | Cg |
|----------|-------|-----------------|---------------------------------|-----|-----|-----|------|
| SP | 2.67 | 2.4 | 16.05 | N.P | N.P | 3.9 | 0.77 |
| SW | 2.64 | 4.34 | 16.44 | N.P | N.P | 7.7 | 1.55 |

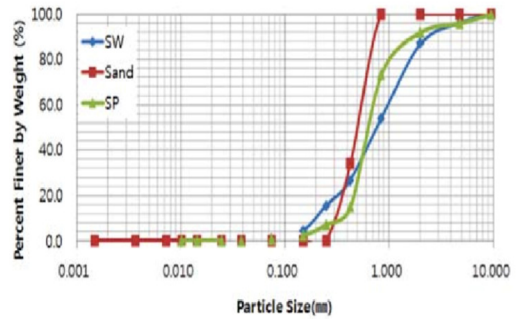


Fig. 2. Sieve analysis test of specimens

Fig. 2는 본 연구를 위한 공시체 제작에 사용된 SP, SW 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

3.2 시료의 배합비

Table 2는 D150 × H300(mm) 공시체 제작을 위한 시료의 배합비를 나타낸 표로써, 상대다짐도가 높아짐에 따라 주입효율 및 주입범위에 대하여 확인하고자 다음과 같이 실험을 수행하였다. SP시료를 이용하여 상대다짐도 70, 80, 85, 90, 95%로 공시체를 제작하여 실험을 수행하였으며, SW시료의 경우도 동일한 상대다짐도로 공시체를 제작하여 실험을 수행하였다.

상대다짐도는 현장의 건조단위중량을 KS F 2308 실험을 통해 실험실에서 구한 최대건조단위중량으로 나눈 값을 말한다. 식 1은 상대다짐도를 구하는 식이다. 따라서 현장의 건조단위중량을 구하여 상대다짐도에 대한 시료의 무게를 결정 할 수 있었다.

$$R_c = \frac{\gamma_d(\text{현장})}{\gamma_d(\text{max, 실험실})} \times 100 \quad (1)$$

Air compressor 공기압 150kPa를 이용하여 1.5shot 조건으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액은 1:1 비율로 2000ml를 1회 주입하여 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 시료는 섬진강유역에서 채취한 시료로서 모형토조 D150 × H300(mm)에서 높이 200mm의 시료를 기준으로 하였으며 모든 실험은 배수조건을 적용하기 위해 하부 50mm를 표준사로 채웠고, Over flow를 방지하기 위해 상부에 30mm의 점토를 성토하였다.

Table 2. D150 x H300(mm) Ratio of specimens

| Specimen | Condition | Soil (g) | CaCl ₂ (ml) | Microorganism (ml) |
|---------------------------|-----------|----------|------------------------|--------------------|
| D150 × H300 (mm) | SW-RC-95% | 5519.86 | 2000 | 2000 |
| | SW-RC-90% | 5229.34 | 2000 | 2000 |
| | SW-RC-85% | 4938.82 | 2000 | 2000 |
| | SW-RC-80% | 4648.30 | 2000 | 2000 |
| | SW-RC-70% | 4067.26 | 2000 | 2000 |
| | SP-RC-95% | 5388.91 | 2000 | 2000 |
| | SP-RC-90% | 5105.28 | 2000 | 2000 |
| | SP-RC-85% | 4821.66 | 2000 | 2000 |
| | SP-RC-80% | 4538.03 | 2000 | 2000 |
| | SP-RC-70% | 3970.78 | 2000 | 2000 |

3.3 실험방법

Fig. 3은 Bio-grouting 장비의 전경 모습이다. Fig. 3(a)의 왼쪽 백색의 용액은 염화칼슘 수용액으로서 0.75mol의 농도를 사용하였으며, 오른쪽 노란색의 용액은 미생물 용액으로서 일반농도를 사용하였다. 상부의 노즐 호스를 통해 Air Compressor의 압력계이지 표기판의 150kPa의 일정한 압력을 가하여 하부의 배출 노즐을 통해 가운데 Y자 노즐에서 혼합됨으로써 친환경 미생물 반응으로 생성되는 고결물이 주입노즐을 따라 시료에 골고루 주입되도록 제작하였다.

Fig. 3(c)는 주입노즐 8mm관을 제작하여 시료에 골고루 주입되도록 제작하였다. Fig. 3(d)는 주입장비로 제작된 공시체에 주입하는 모습이다.

Bio-grouting은 약액주입공법인 LW공법과 유사하며 LW공법은 500~1,000kPa로 주입을 하며 고압주입시 주변 피해 발생율이 높아지기 때문에 유의해야 한다. 또한 주입량의 산정은 다음 식 2와 같이 결정한다.

$$Q = V \times n \times \alpha \times (1 + \beta) \tag{2}$$

여기서, V : 주입개량범위의 총 체적, n : 지반의 간극률, α : 지반간극에 대한 주입제의 충전률, β : 주입제의 손실계수로 사용된다.

Table 3. Factor estimate of injection amount

| Classification | Porosity(%) | Filling rate(%) | Loss rate(%) |
|----------------|-------------|-----------------|--------------|
| Sandy soil | 35~40 | 80~85 | 15 |
| Weathered rock | 25 | 84 | 10 |

본 연구에서는 실내실험의 한계로 인해 주입액과 시료 사이에 중간 밸브를 장착하여 주입시 계속적으로 상주하여 Air Compressor의 150kPa의 주입압력이 동일하게 들어갈 수 있도록 수동적으로 밸브를 조절하였으며 주입량은 동일한 조건을 주어 시료 및 지반의 조건에 따라 고결범위 및 고결강도를 측정하고자 하였다.

각각의 공시체에 Bio-grouting 주입을 수행한 후 24시간 동안 300kPa의 공기압으로 공기건조를 시키고 72시간 동안 자연건조를 시켰다. 자연건조를 시킨 이유는 Bio-grouting 생·화학 반응으로 생성된 고결물인 CaCO₃은 자체적으로 수화반응 일으키지 않기 때문에 공기압으로 배수를 시킨 후 자연건조를 통해 강도를 발현하였다[7].

장비주입을 통한 D150mm × H300mm 실험은 상대다짐도의 변화에 따라 Bio-grouting 기술의 적용 범위를 설정하고자 다음과 같이 상대다짐도의 변화를 주어 실험을 수행하였으며, 주입각각의 공시체 SW, SP 시료를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 장비를 통해 주입하였다.

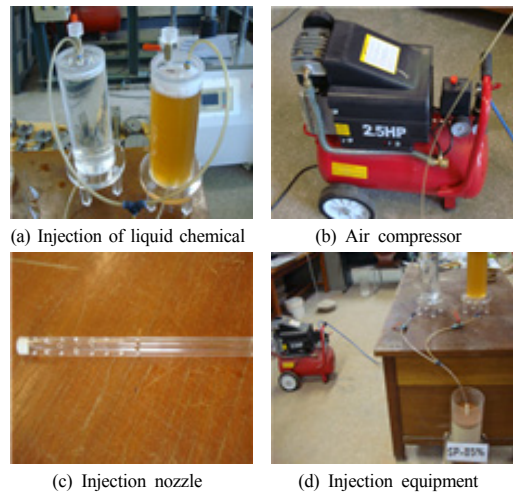


Fig. 3. Bio-grouting equipment

4. 실내시험 결과

주입범위 측정은 주입노즐 주변으로 형성된 고결화 작용으로 두께의 고결을 평가하였으며 Air compressor 150kPa의 압력으로 주입 후, SP시료에서 탄산칼슘의 침전이 공시체 옆 표면으로 많은 양이 발생하여 Fig. 4(a)와 같이 아크릴 표면에 백색의 띠를 나타냄을 볼 수 있었다. 이는 SP시료의 큰 간극사이로 침투하여 탄산칼슘이 주입된 것으로 판단되었다. Fig. 4는 SP시료에 대하여 상대다짐도에 따른 주입 후 고결범위를 나타내었다.

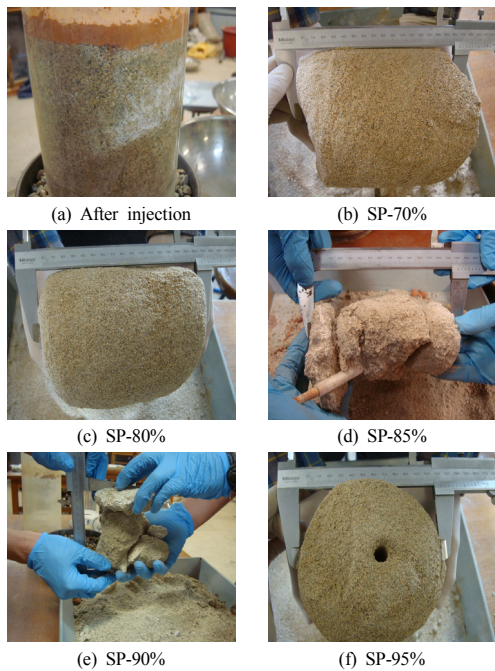


Fig. 4. Injection experiment results of SP specimens

SW시료에서는 Fig. 5(a)와 같이 탄산칼슘의 주입된 백색의 띠를 아크릴 표면에서 확인 할 수 없었고, 주입이 원활하지 않아 주입 고결물인 탄산칼슘이 Over flow되어 시료 표면 상부에 탄산칼슘이 쌓이는 현상을 육안으로 확인할 수 있었다. Fig. 5는 SW시료에 대하여 상대다짐도에 따른 주입 후 고결범위를 나타내었다.



(a) After injection



(b) SW-70%



(c) SW-80%

Fig. 5. Injection experiment results of SW specimens

4.1 지반조건에 따른 주입률

미생물 용액 2000ml와 염화칼슘 용액 2000ml, 총 4000ml의 용액을 1.5shot을 통해 공시체에 주입 후 주입이 되지 않은 용액의 무게를 측정하여 총 4000ml에서 나눈 후 주입률을 백분율(%)로 측정하였다. 지반조건에 따른 주입률을 측정된 결과 Fig. 6과 같이 나타났으며, SW시료에서는 RC 70%에서 약 77%의 주입률을 보였으나, RC 80% 이상의 경우 주입률이 확연히 떨어짐을 확인할 수 있었고 RC 85%이상에서는 주입률이 10% 이하로 주입이 거의 불가능하였다. SP시료에서는 RC 70%~85%까지 100% 주입률을 나타내었고, RC 85% 이상에서 주입률이 낮아짐을 확인할 수 있었다. Air compressor의 최대 압력은 500kPa이지만 실험상 어려움이 있어 추후 추가적인 연구를 통해 주입압력에 따라서 주입효율을 평가해야 할 필요성이 있다고 판단된다.

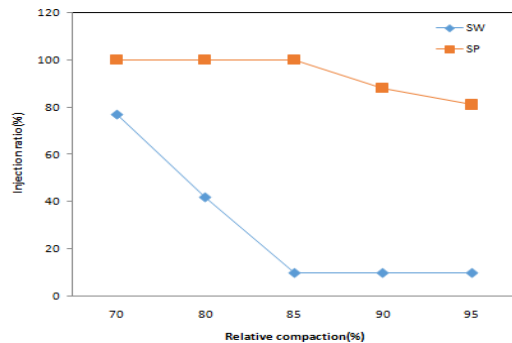


Fig. 6. Effect of injection ratio with ground conditions

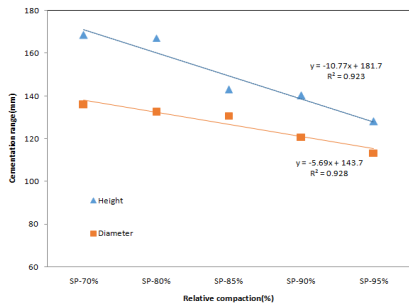
4.2 지반조건에 따른 고결범위 및 강도평가

주입 실험결과, Fig. 7과 같이 포켓관입시험기를 통해 주입구 주변의 상부 표면에서 강도를 측정하였다.

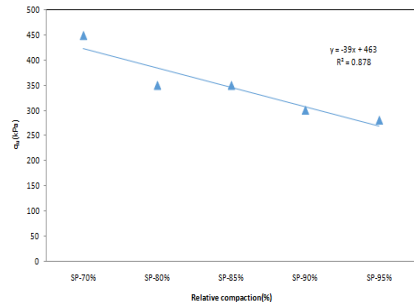


Fig. 7. Measurement point of q_u

개략적인 강도를 평가한 결과, RC 95%대비 RC 75%로 감소할수록 일축압축강도가 약 40% 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 SP시료의 경우 Fig. 8과 같이 RC 95%대비 RC 75%로 감소할수록 고결 범위의 직경은 약 20%, 높이는 약 30% 증가하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다.



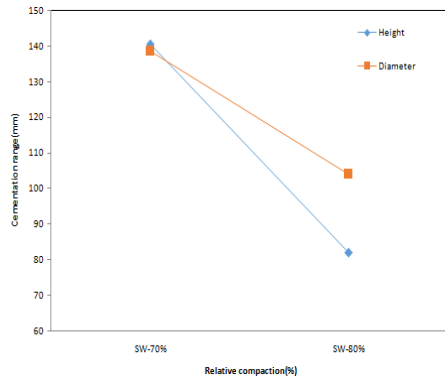
(a) Cementation range of SP specimens



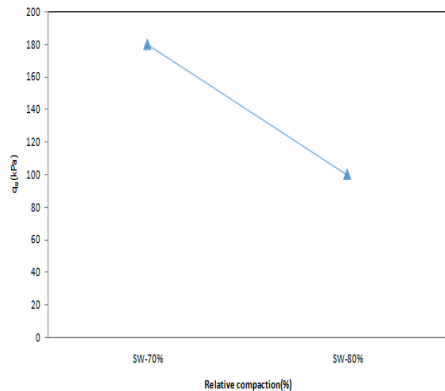
(b) q_u of SP specimens

Fig. 8. Results of cementation range and q_u of SP specimens with ground conditions

SW시료의 경우 Fig. 9와 같이 RC 70% 공시체에서 탄산칼슘의 침전으로 인한 흙의 고결 및 작용으로 약 D 138.5mm, H 140.5mm의 고결 범위를 나타내었으나, 일축압축 강도 측정 결과 180kPa으로 SP시료에 비해 강도가 낮게 나타났다. RC 80%의 공시체에서도 고결 범위는 D 104mm, H 82mm로 일축압축 강도 측정 결과 100kPa의 강도를 나타내어 SP시료와 동일하게 상대적으로 RC가 감소할수록 고결 범위의 직경은 약 25%, 높이는 약 60% 증가하는 경향을 나타내었으며, 일축압축 강도는 약 80% 증가하는 경향을 확인하였다. 또한, RC 85% 이상에서는 주입률이 10%가 되지 않아 고결범위 및 일축압축강도의 측정이 불가능하였다.



(a) Cementation range of SW specimens



(b) q_u of SW specimens

Fig. 9. Results of cementation range and q_u of SW specimens with ground conditions

Table 4. Results of cementation range and q_u with conditions

| Classification | Cementation range | | q_u (kPa) |
|----------------|-------------------|-------|----------------|
| | D(mm) | H(mm) | |
| SP-70% | 135.9 | 167.0 | 450 |
| SP-80% | 132.5 | 167.1 | 350 |
| SP-85% | 130.7 | 140.2 | 350 |
| SP-90% | 120.8 | 143.1 | 300 |
| SP-95% | 113.3 | 128.1 | 250 |
| SW-70% | 138.5 | 140.5 | 180 |
| SW-80% | 104 | 82 | 100 |
| SW-85% | - | - | - |
| SW-90% | - | - | - |
| SW-95% | - | - | - |

5. 결론

본 연구는 느슨한 사질토 지반에 친환경 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘을 현장과 유사한 방법으로 1.5shot system을 이용하여 주입 후 지반의 상대다짐도(RC)에 따라 Bio-grouting이 지반의 강도 및 주입범위에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. SP, SW 지반에 Air Compressor의 공기압을 이용하여 주입하였으며, 일축압 축강도 및 주입범위를 분석한 결과 다음과 같다.

(1) 주입효율을 측정된 결과, SP 시료에서 RC 70~85%까지 주입 효율은 100%로 나타났으나 90% 이상에서 약 15% 이상의 주입효율이 감소하는 경향을 나타냈으며 SW시료에서는 RC 85% 이상에서는 주입율이 10% 미만으로 나타났다. 따라서 SP 지반에서는 RC와 상관없이 주입을 할 수 있을 것으로 판단되었으며, SW 지반에서는 일정 RC가 올라갈수록 주입의 어려움이 있음을 확인 할 수 있었다. 추후 주입압력에 따라 주입률 평가를 통해 보완해야할 필요성이 있다고 판단된다.

(2) SP, SW 시료의 RC가 감소할수록 고결범위는 20%~60%, 일축압축강도는 40%~80% 증가하는 경향을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 Bio-grouting 기술이 지반의 간극 상태와 크기에 밀접한 관련이 있음을 확인 할 수 있었으며 알갱이가 일정하고 비교적 지반의 간극이 있는 SP지반에서 주입효율이 높음을 확인 할 수 있었다.

(3) SP, SW의 RC에 따라 Bio-grouting을 현장과 유사한 방법으로 재현한 결과, 공기견조를 통해 강도를 나타내었으며 Bio-grouting 공법을 현장에서 실용적으로 활용하기 위해서는 추후 이러한 고결물을 친환경 혼화제로 개발하여 시멘트 양을 효율적으로 줄이면서 차수 및 강도효과를 증대시킬 수 있는 Bio-grouting 공법을 개발해야할 것으로 판단된다.

References

- [1] D. H. Kim, M. S. Sagong, K. H. Park, "Improvement Method of Sand Ground Using an Environmental Friendly Bio-grouting Material", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 16, No. 6, pp. 473-481, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.6.473>
- [2] D. H. Kim, K. H. Park, Y. H. Lee, "Effects of Microbial Treatment on Biogrout", *Journal of Korean Geotechnical Environmental Society*, Vol. 13, No. 5, pp. 51-67, 2012.
- [3] D. H. Kim, K. H. Park, S. W. Kim, S. H. Mun, "A Novel Approach to Induce Cementation of Loose Soils", *Advanced Science Letters*, Vol. 9, pp. 545-550, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/asl.2012.2649>
- [4] D. H. Kim, K. H. Park, "Injection Effect of Bio-Grout Soft Ground", *Advanced Science Letters*, Vol. 19, pp. 468-472, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/asl.2013.4757>
- [5] D. H. Kim, K. H. Park, D. W. Kim, "Effects of Ground Conditions on Microbial Cementation in Soils", *Materials*, Vol. 7, pp. 14-156, 2014.
- [6] K. H. Park, D. H. Kim, "Identification of Calcium Carbonate for Silt and Sand Treated with Bacteria", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 6, pp. 53-61, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.11.53>
- [7] K. H. Park, D. H. Kim, "Effect of Strength and Injection for the Sand Treated Bacteria", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 2, pp. 65-73, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2013.29.2.65>
- [8] S. J. Jeon, *Effectiveness of Strength of Soil Created with Microbial Reaction*, MS, Thesis, Chosun University, Korea, 2013.
- [9] J. K. Mitchell, J. C. Santamarina, "Biological Considerations in Geotechnical Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.

131, No. 10, pp. 1222-1233, 2005.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1222\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222))

- [10] J. T. Dejon, B. M. Mortensen, B. C. Martinez, D. C. Nelson, "Bio-medium Soil Improvement", *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 36, pp. 197-210, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>
- [11] N. W. Soon, M. L. Lee, T. C. Khun, H. S. Ling, "Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation", *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 718-728, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-0149-8>
- [12] V. S. Whiffin, L. A. Paassen, M. P. Harkes, "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", *Geomicrobiology Journal*, Vol. 24, pp. 1-7, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01490450701436505>
- [13] L. A. Paassen, M. P. Harkes, G. A. Zwieter, W. H. Zon, W. R. L. Star, M. C. M. Loosdrecht, "Scale Up of BiogROUT", *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 2328-2333, 2009.
- [14] K. H. Park, S. J. Jun, D. H. Kim, "Effect of Strength Enhancement of Soil Treated with Environment-Friendly Calcium Carbonate Powder", *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, pp. 1-11, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/194925>

김 대 현(Daehyeon Kim)

[정회원]



- 1998년 8월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 미국 PURDUE 대학교 (공학박사)
- 2009년 2월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

박 경 호(Kyung-Ho Park)

[정회원]



- 2010년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 2011년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 1월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

김 민 석(Min-Seok Kim)

[준회원]



- 2015년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 석사과정

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

김 선 학(Sun-Hak Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 겸임교수

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초, CM