

미생물을 활용한 지반개량제의 혼합비율에 따른 사질토의 강도개선 효과

Effect of Mixed Ratios of Ground Improvement Material using Microorganisms on the Strength of Sands

박경호¹, 김대현^{2*}

Kyung-Ho Park¹, Daehyeon Kim^{2*}

¹Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., Seosuk-dong Dong-gu Gwangju, 501-759, Republic of Korea

²Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., Seosuk-dong Dong-gu Gwangju, 501-759, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the objective of the study is to evaluate the effect of calcium carbonate powder, produced by the microbial reactions, on the strength of soft ground (sand). To analyze the cementation effects of calcium carbonate powder produced by microbial reactions on the strength of the sand, six different types of specimens (untreated, calcium carbonate, cement, carbonate + cement (1:9, 3:7, 5:5)) were made. The specimen were tested after curing (7 and 28 days). Uniaxial compressive strengths were measured on D 5 cm × H 10 cm specimens. Based on the test results, as both the weight ratio and the curing period increase, calcium carbonate, cement, and calcium carbonate + cement specimens showed an increase in the strength. In addition, compared with the strength of the specimen with cement, the strengths of the specimens with mixing ratios of 1:9, 3:7, and 5:5 (carbonate : cement) were found to be 93.5~95.8%, 82.5%, 65.2~70.6%.

요 지

()
6가 case(, , , + (1:9,
3:7, 5:5)) (4%, 8%) (7 , 28)
(0%, 5%, 15%) 가 D 5cm × H 10cm
가 , , + 가 가
1:9, 3:7, 5:5 + 93.5~95.8%, 82.5%,
65.2~70.6%

Keywords : Microbial reaction, Calcium carbonate powder, Soft ground, Uniaxial compressive strength

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 급속한 산업발전에 따라 국가 기간산업의 양적, 질적 확대에 인하여 넓은 대지를 가지고 있는 나라에 비해

국내에서는 부지확보에 어려움을 겪고 있다. 이에 효율적인 토지 이용을 위해 그동안 건설부지로 고려하지 않았던 느슨한 사질토나 연약한 실트질로 구성된 연약지반 개량 공법에 대한 관심이 상당히 높아지고 있어 연약지반의 개량을 위한 새로운 공법 개발이나, 신소재의 개발이 필요하다.

선진국의 경우 시멘트의 생산량을 한정하고 점차 줄여나가고 있는 추세이며, 이산화탄소 배출금이라는 국제적인 법적 세금을 만드는 방안을 추진하고 있다. 따라서 친환경 신소재를 개발하여 저탄소, 지구 온난화 방지 등의

Received 12 Mar. 2015, Revised 30 Mar. 2015, Accepted 31 Mar. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-62-230-7607; Fax: +82-62-220-2687

E-mail address: dkimgeo@chosun.ac.kr (D. Kim)

녹색성장 정책에 기여할 필요가 있고, 신소재의 개발을 통해 원자재 값 상승과 건설재료 부족 등의 문제를 해결해 나갈 필요가 있다(Park 2011).

또한 토목현장에서 다루는 대부분의 흙은 입자 크기가 균등하지 않고 크고 작은 입자가 서로 섞여 있어 실트와 같은 세립분이 일정 이상 포함된 경우가 많다(Park and Lee 1999; Park 2010). 현장지반은 대부분 느슨하게 고결된 상태로 존재하므로 고결된 지반 내의 실트나 점토와 같은 세립분이 현장 지반의 강도에 미치는 영향에 대한 정확한 평가가 선행되어야 할 필요성이 있다(Park et al. 2010).

또한 미생물용액과 염화칼슘 수용액의 반응으로 생성된 탄산칼슘을 건설자재로 널리 이용되고 있는 시멘트와 같은 분말형태로 제작하여 사용함으로써 앞서 미생물 반응에 의해 생성된 탄산칼슘의 정량적 강도 증진 효과를 확인할 수 있으므로 앞서 수행한 연구들과는 차별성을 갖는다.

본 연구에서는 연약한 지반인 느슨한 사질토 지반에 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘을 적용시 지반의 강도에 어떤 영향을 미치는지 분석하기 위하여 탄산칼슘을 시멘트와 같은 분말형태로 제작하였으며, 무처리, 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트의 비(1:9, 3:7, 5:5)의 공시체를 7일, 28일 기간으로 제작하여 일축압축 실험을 통해 강도를 분석하였다. 또한 고결된 모래 입자에 #200체 통과된 시료를 0, 5, 15%를 혼합하여 동일한 다짐방법을 통해 일축압축실험을 수행하였으며, 기존 연구된 순수한 Sand외의 실트함유가 함유된 지반의 강도 변화를 분석하였다.

1.2 국내·외 선행연구

최근 시멘트를 근본적으로 절감시킬 수 있는 친환경 소재인 biopolymer와 유기산 재료, 식물추출액 등을 활용한 지반개량 공법이 다양하게 연구되어지고 있는 실정이다(Lee et al. 2012; Park et al. 2012, Chang and Cho 2012). 특히, 땅 속에 존재하는 수 많은 미생물 중 *B. 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. 2012; Kim and Park 2013; Park and Kim 2012; 2013; Mitchell and Santamarina 2005; Dejong et al., 2010; Paassen et al. 2009; Wiffin et al. 2007).

국내에서는 순수한 미생물을 이용하여 강도를 증진시키는 연구를 하였으며, 미생물 고농도의 조건을 통해 고결

물의 침전을 높이는 방법을 개발함으로써 무처리 시료와 일반농도처리 시료, 고농도처리 시료 등의 혼합시험을 통해 포켓관입시험기로 측정된 결과, 500kPa 이상의 강도를 확인하였으며, 이를 통해 연약지반의 미생물 고결화를 확인할 수 있었다(Kim et al. 2012). 또한 기존의 biogrouting의 문제점인 중앙 부분에서의 강도 증가가 되지 않는 문제점들을 개선하고자 현장실험을 모형으로 재현 주입하는 연구를 수행하고 있다(Park and Kim 2012; 2013).

국외에서는 MICP(Microbially induced carbonate precipitation)방법을 이용하여 미생물과 반응용액을 반복주입을 통해 삼축압축강도 및 직접전단시험을 통해 강도 개선을 확인하는 연구가 진행되고 있다.

Dejong et al.(2006)은 SEM(Scanning electron microscopy)를 통하여 무처리 시료와 미생물 처리된 시료를 비교하여 전단파 속도를 통해 2:1 비율로 제작된 느슨한 시료에서 190m/s, MICP로 처리된 시료에서 520m/s, 석고로 처리된 시료에서 610m/s로 강도의 증가를 확인하였다.

Soon et al.(2013)은 MICP로 처리된 잔류토에서 전단 강도는 1.41~2.64배, 모래시료에서는 1.14~1.25배로 무처리 시료보다 증가함을 확인하였다.

대부분의 경우 반복주입으로 인한 공정처리가 어려우며 현장의 적용성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 또한 biogrouting의 개념을 도입하여 공시체에 그라우팅을 한 결과, 10MPa이상의 큰 값을 얻었으나 추정치에 의한 값으로 강도를 추정하였고 공기가 겹 표면 부분을 따라 강도가 증가되어 중앙 부분에서의 강도는 미미함 등의 문제점이 있었다(Whiffin et al. 2007; Paassen et al. 2009).

앞서 수행한 선행연구에서는 대부분이 순수한 Sand를 이용하여 강도개선의 효과를 확인하였고 수용액상태의 탄산칼슘을 이용하여 연약지반의 강도를 개선하고자 하였으나, 수용액상태의 탄산칼슘은 수용액 상태로 많은 양을 주입시 강도 저하와 상층액의 처리곤란 등 문제점이 있었다.

2. 공시체 제작방법 및 종류

2.1 실험재료

본 연구에 사용된 시료는 전북 남원시 송동면에 위치하고 있는 섬진강변에서 채취된 모래를 주재료로 사용하여 일축압축시험용 공시체를 제작하였다. 채취된 시료는 일축압축시험을 통해 강도를 측정할 수 있도록 시료(체가름

Table 1. Results of particle size distribution curve

| Classification | Sieve(mm) | | | C _u | C _g |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| | D ₁₀ | D ₃₀ | D ₆₀ | | |
| F0 | 0.10 | 0.16 | 0.27 | 2.45 | 0.95 |
| F5 | 0.094 | 0.15 | 0.24 | 2.55 | 1.00 |
| F15 | 0.07 | 0.13 | 0.21 | 3.00 | 1.15 |

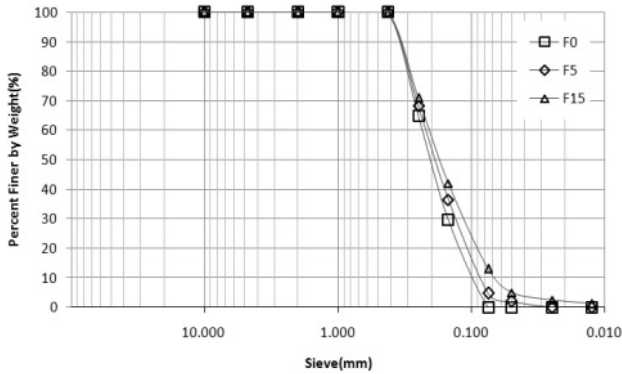


Fig. 1. Particle size distribution curve of specimens by fines

시험을 통해 #60 체(0.25mm), #100 체(0.15mm), #200 체(0.075mm)에 잔류하는 시료를 1:1:1의 비율로 물과 배합하여 공시체를 제작하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 모래시료의 입도시험 결과이며, 균등계수와 곡률계수를 다음 Table 1과 같이 나타내었다. 분석결과, F0의 시료는 빈입도에 입도분포가 좋지 않은 것으로 나타났으며 F5, F15의 시료에서는 빈입도이나 입도분포가 고른 것으로 나타났다.

실제 토목현장에서 쓰이는 흙의 경우 실트부터 점토 성분 등 다양한 종류의 세립분이 섞여 있기 때문에 본 연구에서는 모래 입자 사이에 포함되는 세립분으로 점진강유역에서 채취한 흙을 체가름하여 #200번체 통과 시료인 세립분 0, 5, 15% 혼합하였으며, 모래와 세립분을 고결시키기 위한 고결제는 국내 S사의 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

2.2 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘

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°C에서 180RPM의 웨이킹 인큐베이터에서 배양하였다.

사용된 탄산칼슘은 수용액상태의 탄산칼슘을 사용한 선행연구와 달리 미생물 반응에 생성된 탄산칼슘을 시멘트와 같이 분말화하여 사용하였으며, Fig. 2는 미생물 용

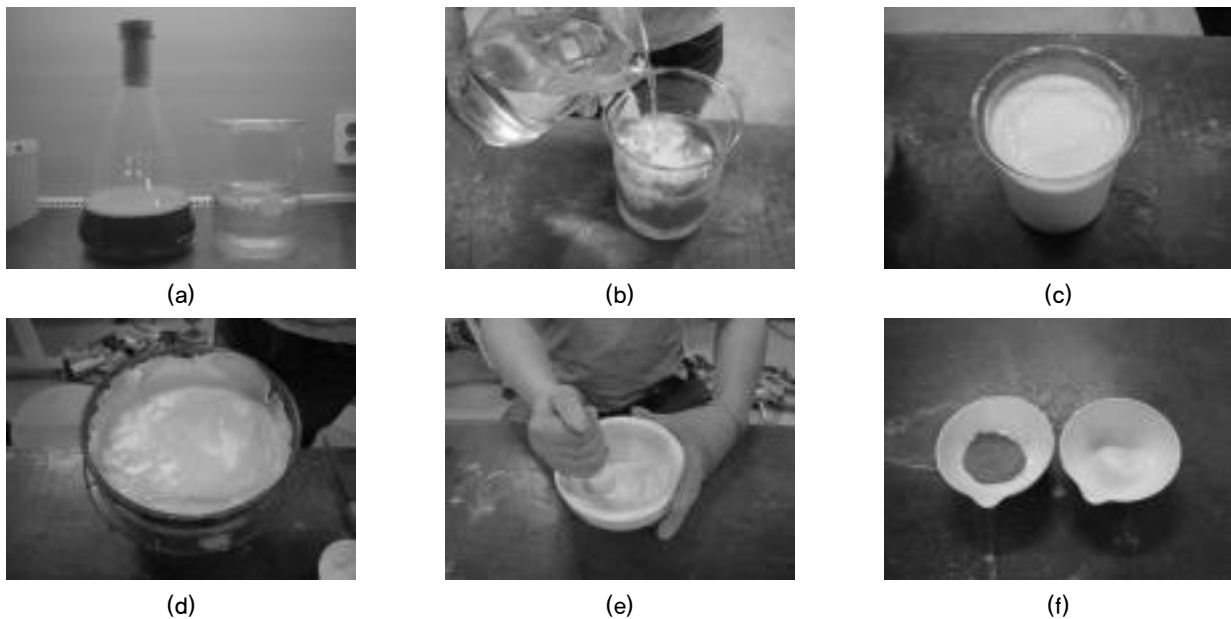
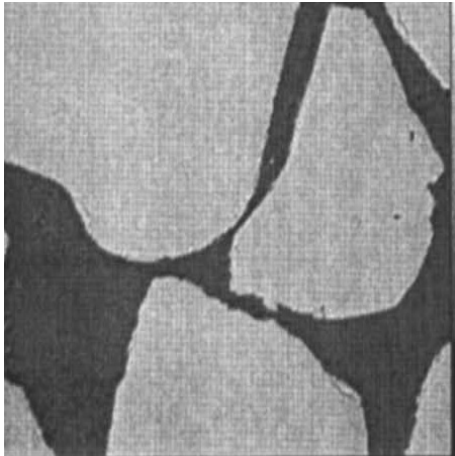
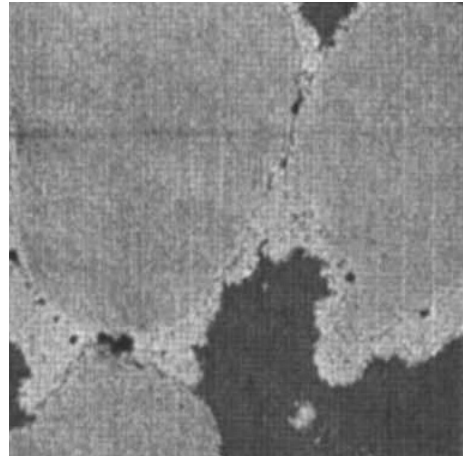


Fig. 2. Extraction and production of calcium carbonate



(a) 무처리 시료



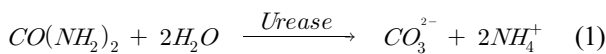
(b) MICP 처리

Fig. 3. Process of creation of calcium carbonate (Dejong et al. 2006)

액과 염화칼슘 수용액의 반응을 통해 탄산칼슘을 침전시켜 건조 후 탄산칼슘을 분말화하는 모습이다.

Fig. 2(a)는 배양된 미생물 용액, (b) 염화칼슘 용액(1L) 교반, (c) 반응용액 탄산칼슘 침전, (d) 탄산칼슘 추출, (e) 건조 후 분쇄, (f) 시멘트와 같은 시료로 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘을 분말화하여 공시체의 고결제로 사용하였다.

미생물과 요소의 반응은 식 (1)과 같으며, 미생물 생장을 통해 요소와 반응하여 아래와 같이 탄산 이온(CO_3^{2-})과 두 개의 암모늄 이온(NH_4^+)으로 가수분해 된다.



B. pascuensis 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 (2)와 같다.



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

다음 Fig. 3은 미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘($CaCO_3$)은 지반 내의 공극을 채워 입자간의 결합력을 높여 지반의 고결화(Cementation)가 형성되는 모습이다.

2.3 공시체 제작

본 연구에서는 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘과 시멘트, 탄산칼슘+시멘트의 공시체는 일축압축강도를 측정하기 위해 동일한 다짐에너지를 가하는 방법으로서 공시체를 5층으로 나누고 층당 30회로 일정하게 유지하였고, 일축압축시험은 공시체에 대하여 1%/mm의 전단속도로 일축압축강도시험을 실시하였다.

무처리 시료는 7일, 28일에 해당하는 공시체를 제작하였으며, 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트(1:9, 3:7, 5:5) 공시체는 중량비 4%, 8%의 공시체에 세립분 #200체 통과 시료를 0, 5, 15%로 제작한 후 각각의 양생일(7일, 28일)에 따라 측정하였다. Table 2는 무처리, 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트(1:9, 3:7, 5:5) 공시체의 배합비를 나타낸 표이다.

3. 실험결과 분석

일축압축시험은 F0의 공시체 2개씩을 각각 제작하여 유사한 값을 나타냄을 확인 한 후 압축강도시험을 수행하였고, 파괴 형상은 다음 Fig. 4와 같다.

3.1 재령일에 따른 강도효과

무처리 공시체에서 나타나는 일축압축강도의 증가는 겔보기 점착력의 영향으로 양생기간에 따라 공시체의 일축압축강도가 약간 증가함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5(a), 5(b)는 혼합비 4%, 8%에 대한 세립분이 없는

Table 2. Mixing the specimens material for 7day

| Test-ID | Cementation material | Soil (g) | Water (g) | Calcium carbonate (g) | Cement (g) |
|--------------|-------------------------------|----------|-----------|-----------------------|------------|
| N-F0-7 | - | 275 | 50 | - | - |
| N-F5-7 | | 275 | 50 | - | - |
| N-F15-7 | | 275 | 50 | - | - |
| C4-F0-7 | Cement | 275 | 50 | - | 11 |
| C4-F5-7 | | 275 | 50 | - | 11 |
| C4-F15-7 | | 275 | 50 | - | 11 |
| C8-F0-7 | | 275 | 50 | - | 22 |
| C8-F5-7 | | 275 | 50 | - | 22 |
| C8-F15-7 | 275 | 50 | - | 22 | |
| Ca4-F0-7 | Calcium carbonate | 275 | 50 | 11 | - |
| Ca4-F5-7 | | 275 | 50 | 11 | - |
| Ca4-F15-7 | | 275 | 50 | 11 | - |
| Ca8-F0-7 | | 275 | 50 | 22 | - |
| Ca8-F5-7 | | 275 | 50 | 22 | - |
| Ca8-F15-7 | 275 | 50 | 22 | - | |
| CaC4-F0-7-1 | Calcium carbonate + Cement | 275 | 50 | 1 | 10 |
| CaC4-F5-7-1 | | 275 | 50 | 1 | 10 |
| CaC4-F15-7-1 | | 275 | 50 | 1 | 10 |
| CaC4-F0-7-3 | | 275 | 50 | 3 | 8 |
| CaC4-F5-7-3 | | 275 | 50 | 3 | 8 |
| CaC4-F15-7-3 | | 275 | 50 | 3 | 8 |
| CaC4-F0-7-5 | | 275 | 50 | 5.5 | 5.5 |
| CaC4-F5-7-5 | | 275 | 50 | 5.5 | 5.5 |
| CaC4-F15-7-5 | | 275 | 50 | 5.5 | 5.5 |
| CaC8-F0-7-1 | | 275 | 50 | 2 | 20 |
| CaC8-F5-7-1 | | 275 | 50 | 2 | 20 |
| CaC8-F15-7-1 | | 275 | 50 | 2 | 20 |
| CaC8-F0-7-3 | | 275 | 50 | 6 | 16 |
| CaC8-F5-7-3 | | 275 | 50 | 6 | 16 |
| CaC8-F15-7-3 | | 275 | 50 | 6 | 16 |
| CaC8-F0-7-5 | | 275 | 50 | 11 | 11 |
| CaC8-F5-7-5 | | 275 | 50 | 11 | 11 |
| CaC8-F15-7-5 | | 275 | 50 | 11 | 11 |

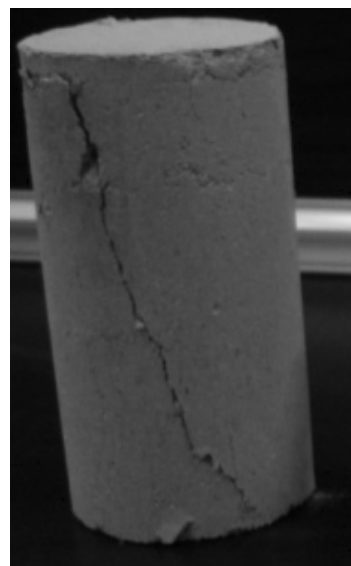


Fig. 4. View of specimen of before experiment(left) and after experiment (right)

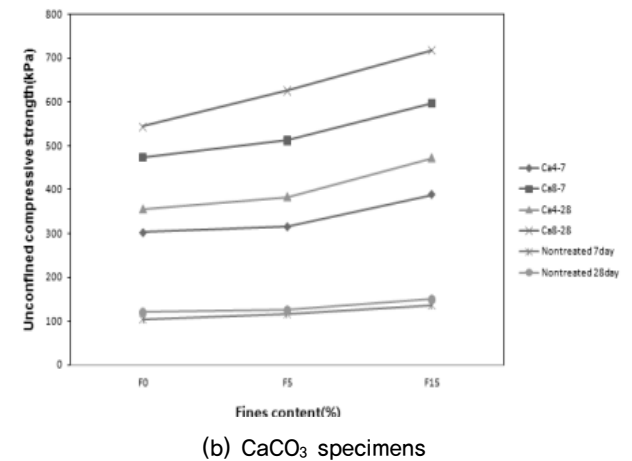
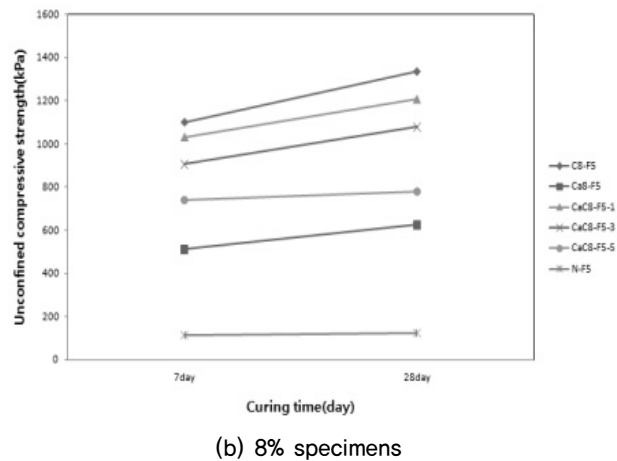
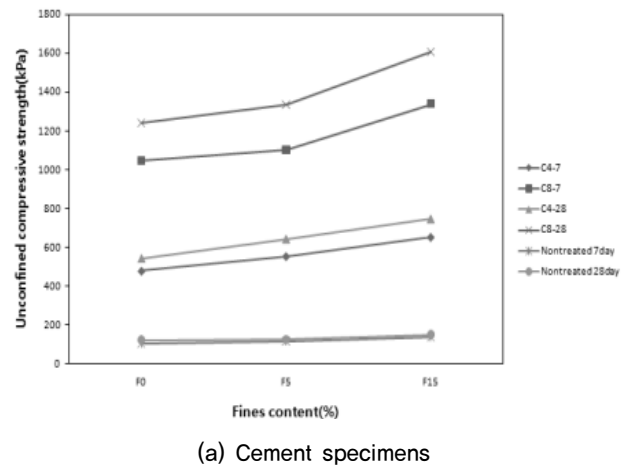
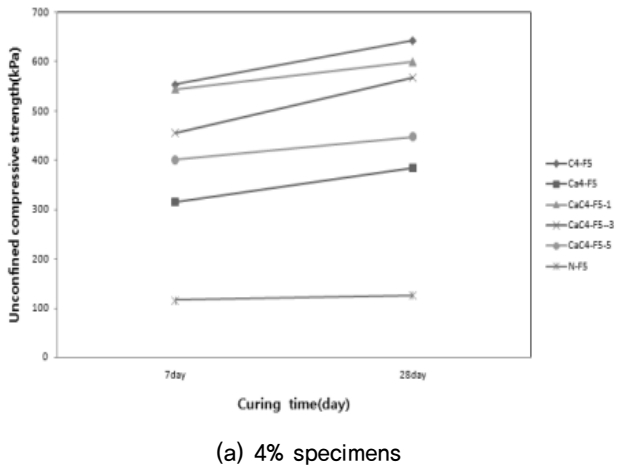


Fig. 5. Curing period to compare the strength of specimens

Fig. 6. Fines content to compare strength of specimens

공시체의 재령일에 따른 일축압축강도의 결과이며, 실험 결과 혼합비에 상관없이 분말화한 탄산칼슘이 혼합된 공시체에서는 물과 섞여 모래입자 주변에서 건조되므로 물의 증발로 인해 모래입자와 입자를 잡아주는 수축작용이 발생함에 따라 탄산칼슘 공시체의 일축압축강도가 양생기간에 따라 최대 122.2%까지 강도가 증가한 것으로 나타났다.

또한 재령일에 따른 일축압축강도는 탄산칼슘으로 재령된 공시체 보다 시멘트로 재령된 공시체에서 대부분 약 2.2배 높은 강도의 효과를 나타내었는데, 이는 시멘트 공시체에서 발생하는 수화반응으로 인한 강도증가로 확인되며 양생기간이 증가함에 따라 무처리, 탄산칼슘 공시체의 강도 증진효과보다 약 1.22배 높은 폭의 강도 증진효과를 나타냄을 확인 할 수 있었다.

3.2 세립분 및 중량비에 따른 강도효과

Fig. 6(a), 6(b)의 결과처럼 세립분의 함유량이 5%, 15% 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 보였다. Fig.

6(a)의 경우 세립분이 5, 15%로 증가함에 따라 시멘트비가 4%, 8%인 공시체의 일축압축강도는 각각 115%, 135% 그리고 105%, 128%로 증가하는 경향을 보였고, Fig. 6(b)의 경우 세립분이 5, 15%로 증가함에 따라 탄산칼슘의 비가 4%, 8%인 공시체의 일축압축강도는 각각 104%, 128% 그리고 108%, 126%로 증가함을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과는 Park, 2010과 유사한 경향을 나타내었으며, 세립분으로 인한 강도증가는 세립분이 조립분 사이를 채우면서 단위중량이 증가한 것으로 판단되었다. 또한 실트함유량이 증가함에 따라 액상화에 대한 저항강도가 증가한다는 연구가 다수 발표된 바 있다(Fei, 1991; Law and Ling, 1992).

또한 시멘트, 탄산칼슘의 중량비가 4%에서 8%로 증가함에 따라 세립분 함유량에 관계없이 일축압축강도는 증가하였으며, 세립분이 없는 공시체보다 세립분이 포함된 경우에서 시멘트비의 증가에 따른 강도증가율이 높게 나타났다.

Table 3. Strength of specimens by fines content

| Test ID | U.C.S (kPa) | | | Test ID | U.C.S(kPa) | | |
|---------|-------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|
| | F0 (%) | F5 (%) | F15 (%) | | F0 (%) | F5 (%) | F15 (%) |
| Non-7 | 104.12 | 116.64 | 137.14 | Non-28 | 121.04 | 126.47 | 151.3 |
| C4-7 | 479.87 | 554.23 | 651.55 | C4-28 | 541.93 | 642.58 | 747.58 |
| C8-7 | 1047.06 | 1100.45 | 1338.69 | C8-28 | 1243.98 | 1337.54 | 1609.21 |
| Ca4-7 | 303.61 | 316.86 | 389.2 | Ca4-28 | 356.64 | 384.51 | 472.63 |
| Ca8-7 | 475.19 | 513.18 | 597.12 | Ca8-28 | 544.71 | 627.14 | 718.3 |

Table 4. Strength of specimes by fines content (unit:kPa)

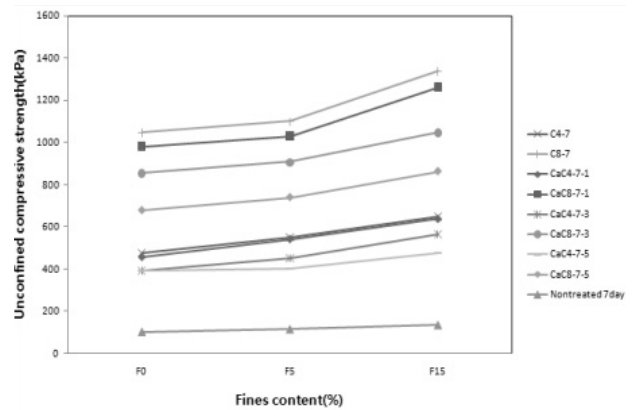
| Test ID | U.C.S (kPa) | | | Test ID | U.C.S (kPa) | | |
|----------|-------------|---------|---------|-----------|-------------|---------|---------|
| | F0 (%) | F5 (%) | F15 (%) | | F0 (%) | F5 (%) | F15 (%) |
| CaC4-7-1 | 460.01 | 545.04 | 640.34 | CaC4-28-1 | 533.78 | 599.90 | 712.86 |
| CaC4-7-3 | 396.43 | 455.47 | 566.68 | CaC4-28-3 | 459.14 | 567.38 | 622.42 |
| CaC4-7-5 | 393.27 | 401.42 | 476.31 | CaC4-28-5 | 414.66 | 448.29 | 512.69 |
| CaC8-7-1 | 982.77 | 1032.31 | 1263.07 | CaC8-28-1 | 1139.68 | 1210.40 | 1479.33 |
| CaC8-7-3 | 855.62 | 907.67 | 1048.39 | CaC8-28-3 | 989.07 | 1079.76 | 1264.49 |
| CaC8-7-5 | 680.85 | 742.19 | 864.58 | CaC8-28-5 | 748.22 | 782.02 | 930.69 |

3.3 미생물을 활용한 지반개량제의 혼합 비율에 따른 강도효과

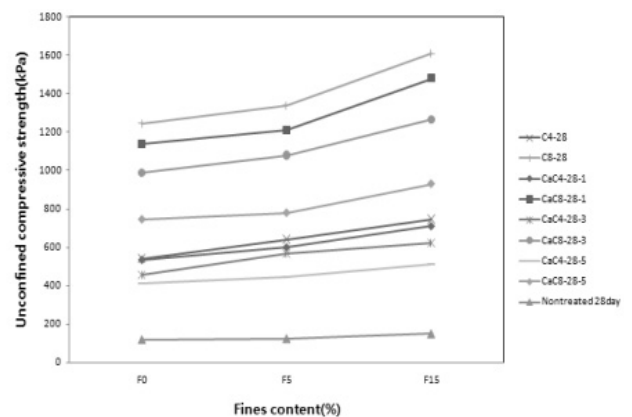
시멘트의 경우 포졸란 반응으로 인한 강도효과가 확연히 나타나지만 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘의 경우 포졸란 반응 없이 수분증발에 의한 결합 강도를 가지므로 시멘트와 혼합하여 시멘트 양을 줄이면서 최적의 효율을 갖는 혼합비를 찾고자 다음과 같이 시멘트 대비 1:9, 3:7, 5:5의 비를 시료에 혼합하여 일축압축강도를 측정하였다.

측정결과, Fig. 7(a), 7(b)에 나타난 바와 같이 재령 7일 차 시멘트 대비 시멘트 강도에 비해 1:9의 경우 약 95.8% 수준, 3:7의 경우 약 82.4% 수준, 5:5의 경우 약 70.6% 수준의 일축압축강도를 나타내었으며, 재령일 28일 차 시멘트 대비 시멘트 강도에 비해 1:9의 경우 약 93.5% 수준, 3:7의 경우 약 82.5% 수준, 5:5의 경우 약 65.2% 수준의 일축압축강도 비를 나타내었다. 이때, 재령 7일차 시멘트 대비 시멘트 강도에 비해 1:9의 경우 약 95.8%의 수준은 CaC4-1:9의 각각 F0(95.9%), F5(98.3%), F15(98.3%)의 3가지 공시체의 강도효과와 CaC8-1:9의 각각 F0(93.9%), F5(93.8%), F15(94.3%)의 3가지 공시체의 강도효과를 합하여 6으로 나눈 평균값이다.

이를 통하여 미생물에 의해 생성된 CaCO₃의 강도비율은 3:7의 비율이 가장 효율적일 것으로 판단되나, 추후 추가적인 혼합재료를 통하여 현장 그라우팅 사용 시에 알맞은 최적의 혼합비를 구해야할 필요성이 있다.



(a) Fines content to compare the strength of specimens for 7 day



(b) Fines content to compare the strength of specimens for 28 day

Fig. 7. Fines content to compare the strength of specimens

3.4 기존 고결제와 경제성 비교

본 연구에서 기존 고결제인 시멘트와 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘과의 경제성을 비교해보면 공시체 제작에 사용된 시멘트 22g을 사용할 경우 비용은 약 3원(5,500원/40kg)이고, 초속경 시멘트의 경우 22g을 사용할 경우 약 14원(25,000/40kg)이다. 미생물에 의한 탄산칼슘 22g 제조시 비용은 Urea 0.5g, 7원(15,000원/1,000g), NB 0.2g, 44원(110,000/500g), 염화칼슘 2.85g, 3원(920원/1,000g)으로 총 약 54원이 소요되므로 일반시멘트 약 18배, 초속경 시멘트 약 3배정도의 차이가 나타났다. 그러나 유해성 물질 절감 및 시멘트 1t제조 시 CO₂ 870kg을 배출하기 때문에 CO₂ 배출금(탄소배출권의 경우 CO₂ 1톤당 30달러 부과)을 고려하고, 석회석 채광을 위한 생산시설 가동 및 운영에 소요되는 비용(Kwak and Kim, 2003)으로 일반비용 : 273,620,000천원, 투자비용 : 23,000,000천원, 부두시설 사용료 : 670,846천원과 석회석 채광시 생기는 환경 절감 가능액 임야 1ha당 1,284만원(2000년 기준 - 광산 개발 기간동안 지속 될 것으로 가정), 수원함양기능의 총 가치 22,554만원, 이산화탄소흡수량을 채광면적 1ha당 환산한 이산화탄소 흡수량 약 5만원, 산림휴양기능(한 사람이 산에 가기 위한 지불 비용 : 약 6만원 x 횡수), 산림 정수 기능(부유물질 제거하기 위한 비용 : 658.3원/ha x 총 산림면적) 등 사회적 비용을 감안한다면 미생물을 이용한 고결제의 경제성은 충분이 있다고 판단된다.

4. 결론

- (1) 세립분의 함유량이 5%, 15% 증가할수록 시멘트비에 따라 105~135%까지, 탄산칼슘의 비에 따라 104~128%까지 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 이는 세립분이 조립분 사이를 채점1우면서 단위중량이 증가한 것으로 판단되었다. 또한 세립분이 없는 공시체보다 세립분이 포함된 경우에서 시멘트비의 증가에 따른 강도증가율이 높게 나타났다.
- (2) 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘의 비에 따른 일축압축강도 측정된 결과, 1:9에서 시멘트 대비 약 93.5~95.8%, 3:7의 경우 82.5%, 5:5의 경우 65.2~70.6%로 혼합 비율은 3:7이 가장 효율적인 것으로 판단되나 추후 추가적인 혼합재료를 통하여 현장 그라우팅 사용 시에 알맞은 최적의 혼합비를 구해야할 필요성이 있다.

- (3) 중량비 및 재령일에 따른 일축압축강도를 측정된 결과, 중량비와 재령일이 높아짐에 따라 일축압축강도는 증가하였으며, 탄산칼슘으로 재령된 공시체 보다 시멘트로 재령된 공시체에서 대부분 약 2.2배 높은 강도의 효과를 나타내었는데, 이는 시멘트 공시체에서 발생하는 수화반응으로 인한 강도증가로 확인되며, 탄산칼슘의 경우는 물의 증발로 인해 모래 입자들을 결속하는 수축작용이 발생함에 따라 강도가 증가한 것으로 나타나 시멘트에 비해 강도의 증가효과는 크지 않았음을 확인 할 수 있었다.
- (4) 기존 고결제인 시멘트와 미생물에 의한 탄산칼슘 고결제의 경제성을 분석한 결과, 일반 시멘트 약 18배, 초속경 시멘트 약 3배 정도의 차이가 났다. 하지만 시멘트 생산 시에 발생하는 이산화탄소 배출금 및 자연환경 훼손 등 사회적비용을 고려하였을 때 경쟁력은 충분히 있다고 판단된다.

Acknowledgement

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).

References

1. Chang, I. and Cho G. C. (2012), "Strengthening of Korean Residual Soil with b-1,3/1,6-glucan Biopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol.30, pp.30-35.
2. Dejong, J. T., Fritzes, 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.
3. 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.
4. Fei, H. C. (1991), "The Characteristics of Liquefaction of Silt Soil", *Ground Improvement*, Vol.8, No.1, pp.1-5.
5. 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.
6. Kim, D. H. and Park, K. H. (2013). "Injection Effect of Bio-Grout Soft Ground.", *Advanced Science Letters*, Vol.19, pp.468-472.
7. Kwak, T. W. and Kim, H. G. (2003), *Social Cost-benefit*

- Analysis of Lapaz-Hanla Limestone Development Project*, Ministry of Environment Report. pp.1-49.
8. Law, K. T. and Ling, Y. H. (1992), "Liquefaction of Granular Soils with Non-cohesive and Cohesive Fines", *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam*, pp.1491-1496.
 9. Lee, J. H., Hong, J. O., Jin Y. and Chun, B. S. (2012), "The Evaluation of the Field Applicability of the Soil Improving Method Using the Environment-friendly Organic Acid Material", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.9, pp. 85-95.
 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., 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.
 12. Park, B. G. and Lee, G. C. (1999), "Evaluation Methods of Weathering Degree for Korean Decomposed Granite Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.15, No.1, pp. 127-141.
 13. Park, K. H. (2011), *Strength Improvement of Soft Soil using Soft Soil*, MS, Thesis, Chosun University, Korea.
 14. Park, K. H. and Kim, D. H. (2012), "Identification of Calcium Carbonate for Silt and Sand Treated with Bacteria", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp. 53-61.
 15. Park, K. H. and Kim, D. H. (2013), "Effect of Strength and Injection for the Sand Treated Bacteria", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.2, pp.65-73.
 16. Park, S. K. (2010), *A Study on Characteristics of Soil-Cement with Fine Contents*, MS, Thesis, Jeonnam University, Korea.
 17. Park, S. S., Choi, S. K. and Nam, I. H. (2012), "Development of Ground Cement using Plant Extract", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.3, pp.67-75.
 18. Park, S. S., Kim, K. Y., Kim, C. W. and Choi, H. S. (2010), "Strength Variation of Cemented Sand Due to Wetting", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.29, No.6, pp. 303-311.
 19. Soon, N. W., Lee, M. L., Khun T. C. and Ling, H. S. (2013), "Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.4, pp.718-728.
 20. 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.