

달걀껍질을 칼슘원으로 사용한 미생물 고결 모래의 공학적 특성

Engineering Characteristics of Cemented Sand with Microorganism Using Eggshell as Calcium Source

최 선 규¹ Choi, Sun-Gyu

박 성 식² Park, Sung-Sik

Abstract

A calcium source is necessary for calcite precipitation within soil particles by microbial decomposition of urea and a calcium chloride is usually used. The harmful environmental impact of calcium chloride on road, ground and plants is severe. In this study, an eggshell with vinegar is investigated for an environmental-friendly calcium source. Urea-decomposing microorganism and eggshell or calcium chloride as a calcium source are mixed with Ottawa sand to precipitate calcite. Then, the cemented sand with calcite is tested for calcite precipitation, permeability and unconfined compressive strength. A specimen is prepared by loose Ottawa sand in a size of 5 cm in diameter and 10 cm in height. A urea solution with *Sporosarcina pasteurii* and two different calcium sources is injected into the specimen once a day for 30 days. Calcite precipitated at average of 7.2% on the specimen with eggshell as a calcium source, which was 1.2 times more than that with calcium chloride. The permeability of a specimen with eggshell was at average of $3.82E-5$ cm/s, which was 7.7 times lower than that with calcium chloride. Unconfined compressive strength of a specimen with eggshell was at average of 387 kPa, which was 1.2 times higher than that with calcium chloride. As more calcite precipitated, the strength increased while the permeability decreased, regardless of calcium sources.

요 지

요소 분해 미생물을 이용하여 흙 입자 사이에 칼사이트를 석출시킬 때 칼슘원이 필요하며, 일반적으로 염화칼슘을 칼슘원으로 사용하고 있다. 염화칼슘은 도로, 지반 및 주변 식물에 부작용을 일으키므로 본 연구에서는 버려지는 달걀껍질을 사용한 칼슘원을 개발하고자 하였다. 미생물에 기존 칼슘원인 염화칼슘 또는 식초로 달걀껍질을 분해하여 얻은 새로운 칼슘원을 혼합하여 모래 입자 사이에 칼사이트를 생성시킨 다음, 고결모래의 칼사이트 생성량, 투수계수 및 일축압축강도를 비교 분석하였다. 공시체 제작은 느슨한 상태의 Ottawa 모래로 직경 5cm, 높이 10cm 공시체를 만든 다음 *Sporosarcina pasteurii* 미생물을 포함한 요소와 두 종류의 칼슘원을 1일 1회씩 30일 동안 주입하여 제작하였다. 칼슘원으로 달걀껍질을 사용한 경우 칼사이트 생성량은 평균 7.2%로 염화칼슘을 사용한 경우보다 1.2배 높았다. 또한 달걀껍질을 사용하여 고결시킨 공시체의 투수계수는 평균 $3.82E-5$ cm/s로 7.7배 정도 감소하였으며, 일축압축강도는 평균 387kPa로 염화칼슘을 사용한 경우보다 1.2배 높았다. 한편, 칼슘원에 관계없이 칼사이트 생성량이 증가할수록 강도는 증가하고 투수계수는 감소하는 경향을 보였다.

1 비회원, 박사후연구원 Iowa State University (Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil Engrg., Iowa State Univ.)

2 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., 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 2016년 11월 30일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

2000년대 이후 자연환경 훼손이나 이산화탄소 배출량 증가와 관련된 시멘트를 대체하거나 사용량을 줄이기 위한 다양한 흙의 고결방법에 대해 연구하고 있다. 최근 *Sporosarcina pasteurii*와 같은 요소(우레아제) 활성 반응을 가진 미생물로 칼사이트 생성을 유도하여 지반을 고결시키는 연구가 활발히 진행되고 있다(Chu et al., 2012; Dejong et al., 2006; Mitchell and Santamarina, 2005; Van Paassen et al., 2010). Burbank et al.(2011)은 일반적으로 사용되고 있는 미생물(*Sporosarcina pasteurii*)이 아닌 토착 미생물을 이용하여 지반의 고결을 유도하기도 하였다. 이러한 미생물을 이용한 연구는 흙 입자와 미생물의 상대적 크기, 미생물 성장에 필요한 환경 조건과 같은 제약으로 모래와 같은 사질토를 대상으로 대부분 연구되었다. 하지만, 최근 Dejong et al.(2013)은 모래와 점토가 혼합되어 있는 현장 흙에 미생물로 고결을 시도하였으며, Ivanove et al.(2015)은 동결 건조된 미생물을 점토 지반에 적용하여 사질토가 아닌 점성토 지반에 대한 연구를 수행한 바 있다.

미생물을 이용한 칼사이트 석출방법에 의한 흙의 고결에는 칼슘원이 필요하며, 칼슘원으로 대부분 염화칼슘을 사용하고 있다. 염화칼슘이 지반에 사용될 경우 염소 이온에 의한 삼투현상에 의해 나무, 풀 등과 같은 식물을 고사시킬 뿐 아니라(Shin et al., 2010), 콘크리트나 교량 등과 같은 각종 구조물을 부식시키는 문제점(Chung et al., 2014)도 있으므로 염화칼슘을 대체할 수 있는 칼

슘원의 개발이 필요하다. 한편, Choi(2014)는 굴껍질을 이용하여 칼슘원을 제조한 다음 식물추출액을 사용하여 칼사이트를 생성시켜 모래를 고결시키는 연구를 수행한 바 있다. 하지만 다양한 칼슘원을 사용한 고결 공시체에 대한 연구 결과는 여전히 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 염화칼슘이 아닌 버려지는 달걀껍질과 식초를 이용하여 칼슘원을 제조한 다음 이를 미생물과 혼합하여 Ottawa모래에 칼사이트를 석출시키는 연구를 수행하였다. 달걀껍질을 이용한 최적의 칼슘원 제조방법을 제안하기 위해 달걀껍질 형태와 식초 혼합량에 따른 칼슘 농도를 측정하였을 뿐 아니라, 염화칼슘을 사용하거나 달걀껍질을 이용하여 직접 제작한 공시체의 공학적 특성을 비교 분석하였다.

2. 새로운 칼슘원 제조 방법 및 공시체 제작 방법

2.1 달걀껍질을 이용한 칼슘원 제조방법

달걀껍질은 94% 이상이 탄산칼슘으로 구성되어 있으며(Lechtanski, 2000), 이는 강한 산성 물질에 의해 산화칼슘(CaO)과 이산화탄소(CO₂)로 분해된다. 분해된 산화칼슘은 물과 결합하여 칼슘 용액이 될 수 있다. 본 연구에서는 달걀껍질을 분해할 강한 산성 물질로 식초를 이용하였으며, 본 식초는 W사에서 제조한 제품을 이용하였다. W사의 식초는 약 5%의 아세트산(Acetic acid, CH₃COOH)을 나타내며, 아세트산과 달걀껍질(CaCO₃)의 반응은 식 (1)과 같다.



(a) Drying of washed eggshells

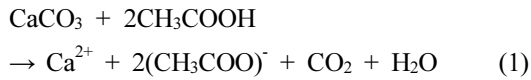


(b) Crushed eggshells



(c) Mixed eggshell with vinegar

Fig. 1. Process of calcium liquid preparation



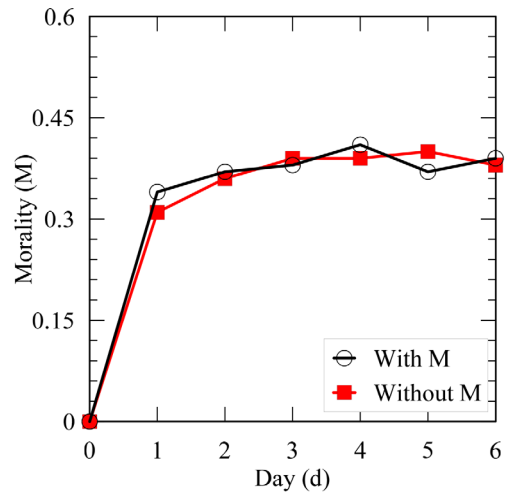
식초의 초기 pH는 3.0 - 3.5이며, 달걀껍질과 혼합 시 달걀껍질의 분해작용은 활발히 진행된다. 하지만 pH가 약 5.0에 가까워지면 달걀껍질은 식초에 의해 더 이상 분해되지 않는다. 이러한 반응을 이용한 칼슘 용액 제조 순서는 Fig. 1과 같다. 먼저 달걀껍질을 모은 다음 물로 씻어 105°C 오븐에 하루 동안 두어 말린다. 건조된 달걀껍질을 잘게 부수어 파우더 형태로 만든다. 마지막으로 유리 용기에 달걀껍질을 넣고 식초를 부어 몇 일 동안 보관한다. 이때, 달걀껍질이 완전히 분해되지 않고 일부 침전물이 발생하며, 생성된 용액 중 상층부의 맑은 용액만을 취하여 최종 칼슘원을 제조하였다.

2.2 달걀껍질 형태와 식초 혼합량에 따른 칼슘이온 비교

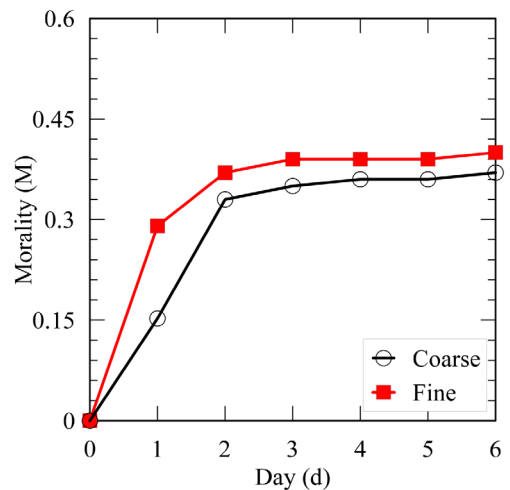
2.1절에서 설명한 방법으로 제조된 칼슘원의 이온 농도를 높이기 위해 본 연구에서는 달걀껍질의 파쇄된 크기에 따른 영향과 최적의 식초 혼합량을 파악하기 위해 세 종류의 실험을 수행하였다. 먼저 달걀 멤브레인의 유무에 따른 영향을 비교하였다. 달걀 껍질 안쪽엔 얇은 막(멤브레인)이 형성되어 있으며, 달걀껍질에서 멤브레인이 차지하는 중량은 평균적으로 달걀껍질 중량의 약 3.2%로 측정되었다. 멤브레인을 제외한 10g의 달걀껍질과 멤브레인을 포함한 10.32g의 달걀껍질에 4배의 식초를 부어 칼슘원을 제조하고 달걀 멤브레인이 칼슘원 농도에 미치는 영향을 비교하였다. Fig. 2(a)는 달걀껍질 속의 멤브레인을 제거하지 않은 경우와 제거한 경우에 대한 결과로 동그라미 모양은 멤브레인을 포함한 경우(With M으로 표시)이고 네모 모양은 멤브레인을 포함하지 않은 경우(Without M으로 표시)이다. 두 경우 칼슘 농도는 서로 비슷하였으나, 멤브레인이 있는 경우가 다소 높게 나타났다. 한편, Chang et al.(2013)은 칼슘 용액 제조를 위하여 달걀껍질 속의 멤브레인을 제거하는 방법을 추천하였으나, 달걀껍질을 이용한 칼슘원의 대량 생산 및 현장의 적용을 위해서는 멤브레인을 제거하지 않고 사용하는 칼슘원 제조 방법이 더 효율적이라 판단된다.

Fig. 2(b)는 달걀껍질의 입경에 따른 실험을 실시한 결과이다. 체분적으로 0.85mm 이상인 상대적으로 조립

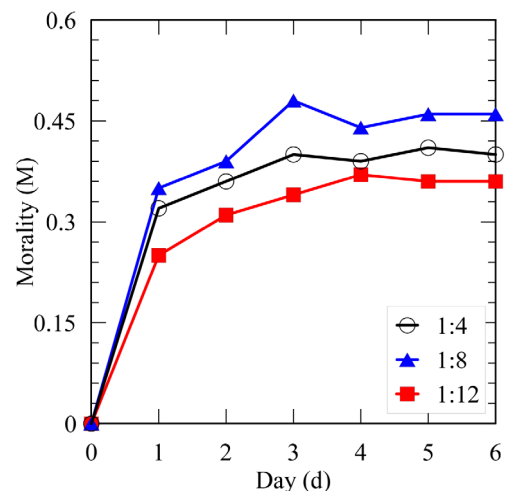
(Coarse로 표시)의 달걀껍질과 0.85mm 미만의 세립(Fine으로 표시) 달걀껍질로 분류하였으며, 각각의 달걀껍질에 4배의 식초를 섞어 칼슘 농도를 측정하였다. 그 결과,



(a) Influence of eggshell membrane



(b) Influence of eggshell size



(c) Ratio of eggshell to vinegar

Fig. 2. Optimum preparation method for eggshell

입경이 작은 경우 칼슘 농도가 더 높아 입경이 작을수록 높은 칼슘원을 얻을 수 있었다.

마지막으로 달걀껍질과 식초의 최적 혼합비 실험이다. Fig. 2(c)와 같이 동일한 무게의 달걀껍질에 식초 양을 4, 8, 12배로 달리하여 시간에 따른 칼슘 농도를 측정하였다. 실험 3-4일 후 모두 최대 칼슘 농도에 도달하였으며, 식초의 양이 8, 4, 12배 순으로 높은 칼슘 농도를 나타냈으며 최종 평균 농도는 0.4Mol로 측정되었다. 따라서, 최적의 달걀껍질과 식초 혼합비는 1:8로 결정하였다.

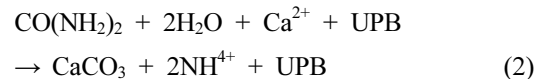
이러한 실험을 통하여 결정된 달걀껍질을 이용한 칼슘 용액 제조방법을 정리하면 다음과 같다. 멤브레인이 포함된 달걀껍질을 0.85mm 미만으로 잘게 분쇄한 다음 8배의 식초를 혼합하여 칼슘원을 제조하고 최종 농도는 0.4Mol로 설정한다.

앞서 제안한 달걀껍질로 만든 칼슘원을 이용하여 평균입경이 0.3mm인 유리구슬 입자 사이에 요소를 분해하는 미생물에 의한 칼사이트 생성 여부를 실험하였다. FEI 회사의 Quanta FEG 250 제품을 이용하여 SEM 분석을 실시하였다. SEM 분석 시 시료의 종류에 따라 다양한 방법 및 재료를 이용한 코팅방법이 적용되지만, 본 SEM 분석은 시료를 코팅하지 않은 상태로 실시하였다. Fig. 3은 달걀껍질을 칼슘원으로 사용하여 칼사이트를 생성시킨 모습으로 Fig. 3(a)는 순수한 칼사이트 모습이고, Fig. 3(b)-(c)는 생성된 칼사이트로 인하여 유리 구슬이 결합된 모습이다.

2.3 공시체 제작 방법

요소를 분해하는 미생물은 우레아제 활성 반응을 유

발하는 *Sporosarcina pasteurii*(American Type Culture Collection, ATCC 11859) 미생물을 사용하였으며, 칼슘원으로 달걀껍질 또는 염화칼슘을 사용하였다. 식 (2)는 요소 분해 미생물(UPB, urease producing bacteria)에 의한 생체광물형성작용(MICP, microbially induced calcium carbonate precipitation)을 나타내며, MICP를 통한 흙의 고결은 투수계수의 감소, 전단강도의 증가, 액상화 저항 강도의 증가 등과 같이 공학적 특성을 개선하는 것으로 알려져 있다.

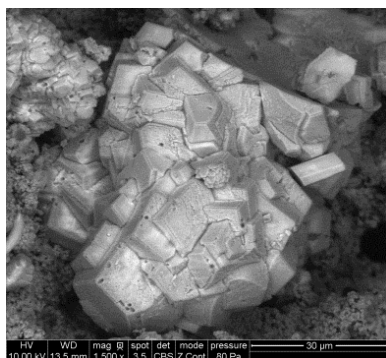


소형 공시체 제작에는 0.6-0.85mm 사이 입경을 가지는 Ottawa모래를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 1과 같다.

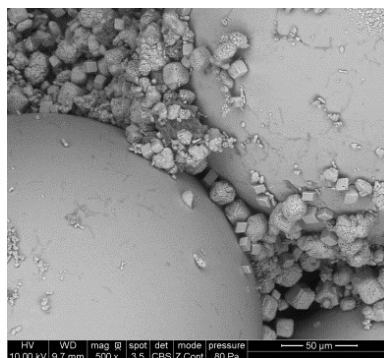
구체적인 공시체 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, Fig. 4(a)와 같이 하부에 벨브가 달린 플라스틱 몰드에 맨 아래쪽에 자갈을 넣고 필터를 설치하고 모래를 상대밀도 약 75-80%로 성형한다. 공시체의 상부에도 필터가 있으며, 크기는 직경 5cm, 높이 10cm가 되도록 제작하였다. Fig. 4(b)는 실제 몰드 제작 모습이며, Fig. 4(c)는 본 연구에서 실험한 8개의 공시체 모습이다. 4개의 공시체는 염화칼슘을 칼슘원으로 사용하여 만든 공시체이며, 나머지 4개의 공시체는 달걀껍질을 칼슘원으로 사용하여 만든 공시체이다.

Table 1. Material properties of Ottawa sand

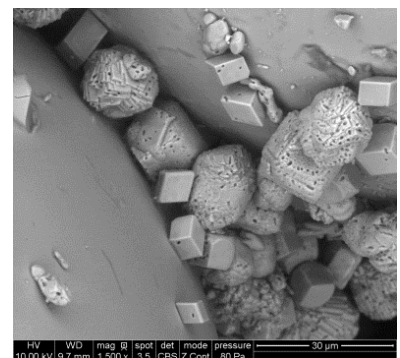
Specific gravity, G_s	D_{50} (mm)	e_{min}	e_{max}	C_u
2.65	0.72	0.502	0.742	1.2



(a) Pure calcite



(b) Connected glass beads by calcite 1



(c) Connected glass beads by calcite 2

Fig. 3. Precipitated calcite using eggshells as calcium source

미생물은 동결건조시킨 *Sporosarcina pasteurii* 미생물을 사용하였으며, 모래 고결을 위해 미생물이 포함된 용액의 주입과정은 다음과 같다. 먼저 증류수에 동결건조된 미생물을 100:1 비율로 섞어 A용액을 만든다. A용액을 8개의 몰드 상부 50mm까지 붓고 흘러내리는 용액을 모은다. 흘러내린 용액을 다시 상부에 붓는 과정을 30회 반복한다. 30회 반복 후 밸브를 잠그고 미생물 용액을 붓고 3시간 동안 둔다. 3시간 후 밸브를 열고 용액을 흘러 보낸 후 앞의 4개의 몰드에는 염화칼슘으로 만든 0.4 Mol의 칼슘 용액에 요소 1Mol 용액을 2:1로 혼합한 B용액을 붓는다. 다른 4개의 몰드에는 달걀껍질로 만든 0.4Mol의 수용액에 요소 1Mol 용액을 2:1로 혼합한 C용액을 붓는다. B용액과 C용액도 A용액처럼 붓기를 반복한다. Table 2는 칼슘원을 달리한 고결 재료의 배합비를 나타내고 있다.

앞서 언급한 과정을 1일에 걸쳐 1회 실시하였으며,

15일 동안 이 과정을 반복하였다. 16일째는 공시체의 윗부분과 아랫부분을 뒤집어 동일한 작업을 다시 15일 동안 반복하였다. 이는 미생물 용액을 상부에서 하부로 한 방향으로만 계속 주입할 경우 상하부의 고결도에 차이가 발생할 수 있기 때문이다. 30일 후 고결된 공시체를 50°C의 건조로에 하루 동안 두어 건조시켰다. 공시체의 고결된 모습은 Fig. 5(a)와 같으며, Fig. 5(b)는 몰드를 분리한 후 공시체의 모습이다.

3. 미생물 고결토의 공학적 특성

두 종류의 칼슘원(염화칼슘, 달걀껍질)과 미생물을 이용하여 고결시킨 공시체의 공학적 특성을 분석하기 위하여 칼사이트 생성량 측정, 투수시험, 그리고 일축압 축강도시험을 실시하였으며, 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

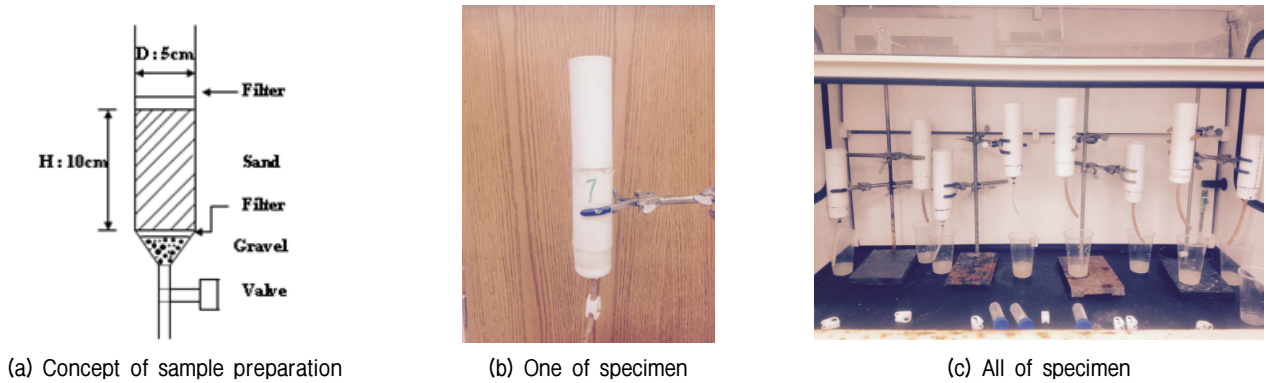


Fig. 4. Sample preparation method

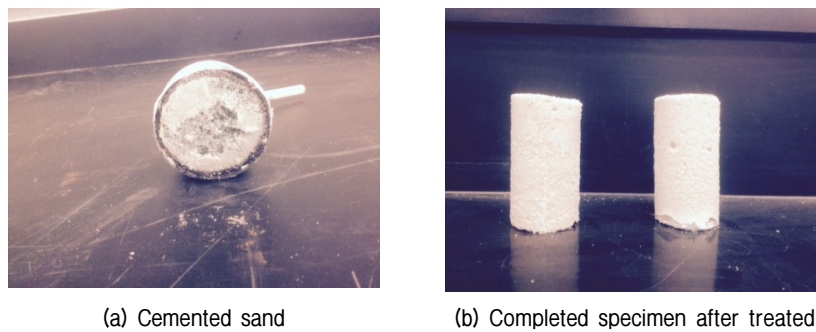


Fig. 5. Completed specimen using eggshells

Table 2. Mixing ratio of cementation material using different calcium source

Solution name	Microorganism / Distilled water (w/w)	CaCl ₂ + Distilled water (Mol)	Eggshell + Vinegar (Mol)	Urea + Distilled water (Mol)
UPB-CaCl ₂	1/100	0.4		1
UPB-Eggshell	1/100		0.4	1

Table 3. Summary of test condition and result

Test ID	Calcium Source	Permeability (cm/s)	Unconfined compressive strength (kPa)	Quantity of calcite (%)			
				Top	Middle	Bottom	Average
CC-1	Calcium chloride	3.82E-4	316	5.3	4.1	6.4	5.3
CC-2		5.56 E-4	291	5.1	4.3	6.3	5.2
CC-3		1.27 E-4	360	6.4	5.1	7.2	6.2
CC-4		1.06 E-4	370	6.9	5.4	7.5	6.6
ES-1	Eggshell	6.54 E-5	392	7.1	5.6	7.7	6.8
ES-2		1.63 E-5	418	8.2	7.0	8.0	7.7
ES-3		2.68 E-5	404	8.0	6.8	8.1	7.6
ES-4		4.41 E-5	335	7.4	4.4	7.7	6.5

3.1 칼사이트 생성량 분석

칼사이트 생성량은 ASTM D4373 - 14방법을 이용하였으며, 측정 방법은 먼저 순수한 칼사이트의 양을 달리하여 1Mol의 염산을 혼합한 후 칼사이트 양에 따른 이산화탄소 압력을 측정하여 상관관계를 도출한다. 일축압축강도시험 후 시편을 105°C의 건조로에 하루 동안 건조시킨 다음 소량의 시편을 파우더 형태로 분쇄하고 시편을 1Mol의 염산에 섞은 후 이산화탄소 압력을 측정하여 칼사이트 생성량을 측정한다. 시편은 각 공시체의 상부, 중앙, 하부에서 채취하였으며, 그 결과와 평균값을 Table 3에 비교하였다. 칼사이트 생성량은 칼슘원으로 염화칼슘을 사용한 경우 약 4.1-7.2%, 달걀껍질을 사용한 경우 약 4.4-8.2%로 달걀껍질을 사용한 경우가 더 높은 칼사이트 생성량을 보였다. 미생물에 염화칼슘을 혼합한 경우 pH는 평균적으로 8.2-8.5였지만, 미생물에 달걀껍질을 혼합한 경우 pH는 평균적으로 약 8.3-8.7로 미생물의 요소 분해작용이 더욱 활성화됨을 알 수 있었다. 이렇게 달걀껍질을 사용한 경우 미생물에 의한 요소 분해가 활발해지면서 칼사이트의 생성량이 평균 7.2%로 염화칼슘을 사용한 경우 평균 5.8%보다 1.2배 정도 높았다.

한편 공시체 내 위치에 따른 칼사이트 생성량을 비교하면, 칼슘원이 다른 두 경우 모두 하부>상부>중앙 순으로 높게 측정되었다. 본 실험은 15일 동안 미생물을 혼합한 용액을 몰드에 붓고 16일째 상부 하부를 바꾸어 다시 15일 동안 용액을 부어 고결하면서 중앙부에 비해 상부와 하부에 더 많은 칼사이트가 생성된 것으로 판단된다.

3.2 투수계수 비교

Fig. 6은 칼사이트 생성량과 투수계수의 상관관계를

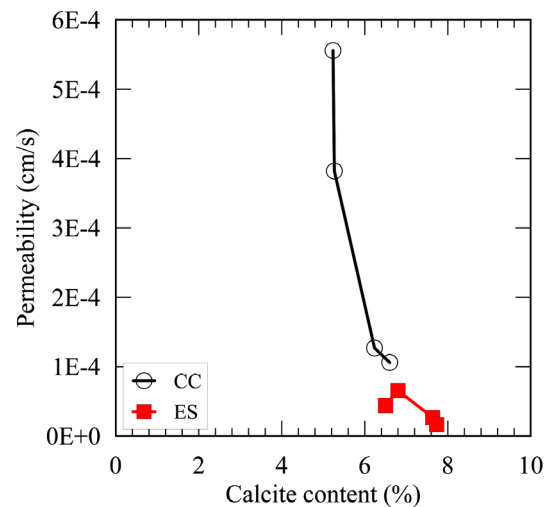


Fig. 6. Relationship between permeability and calcium carbonate content

나타내고 있으며, 칼사이트 생성량이 증가함에 따라 Fig. 3(c)와 같이 모래 입자 사이의 공극이 감소하면서 투수계수가 낮아지는 것을 알 수 있다. 염화칼슘을 칼슘원으로 사용한 공시체(Fig. 6에 CC로 표시)의 투수계수는 5.56-1.06E-4cm/s이고, 달걀껍질을 칼슘원으로 사용한 공시체(Fig. 6에 ES로 표시)는 6.54-1.63E-5cm/s로 염화칼슘을 사용한 경우보다 평균값 기준으로 7.7배 투수성이 낮은 것으로 나타났다. Chu et al.(2013)은 일축압축강도가 약 200-900kPa인 고결모래의 투수계수가 약 3-5E-5cm/s로 본 연구 결과와 유사한 값을 보였다.

3.3 일축압축강도 비교

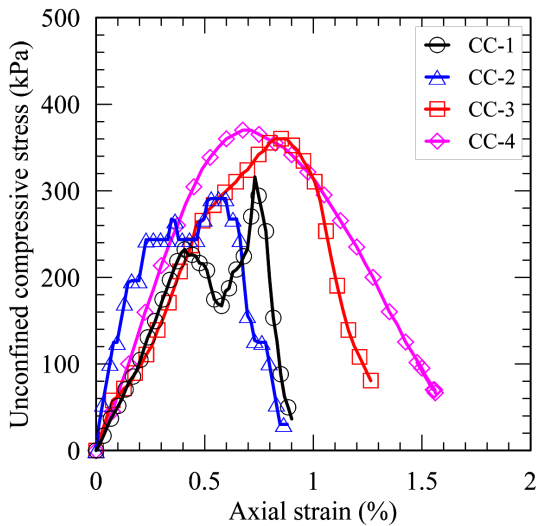
Fig. 7은 칼슘원이 다른 두 경우에 대한 일축압축응력-변형률 관계를 나타내고 있다. 일축압축강도는 염화칼슘을 칼슘원으로 사용한 경우 Fig. 7(a)와 같이 291-370kPa

사이이며, 달걀껍질을 칼슘원으로 사용한 경우는 Fig. 7(b)와 같이 335-418kPa 사이이다. Table 2에 비교한 것처럼 달걀껍질을 사용한 경우가 평균값으로 1.2배(16%) 정도 높은 것으로 나타났다. 달걀껍질을 칼슘원으로 이용한 경우 염화칼슘을 이용한 경우보다 칼사이트 생성량이 평균 1.2배 정도 더 높아 강도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 한편, 식물추출액을 이용하여 건조단위중량이 14.72-15.21kN/m³인 낙동강모래를 고결시킨 경우 칼사이트 생성량은 5-8% 정도이며, 일축압축강도는 약 300kPa 이었다(Park et al., 2014). 또한, Al Qabany and Soga (2013)의 연구에 의하면 본 연구와 동일한 미생물을 이용하여 상대밀도가 70-80%인 British standard 모래를 고결시킨 경우 칼사이트 생성량이 4-8% 정도이며, 일축

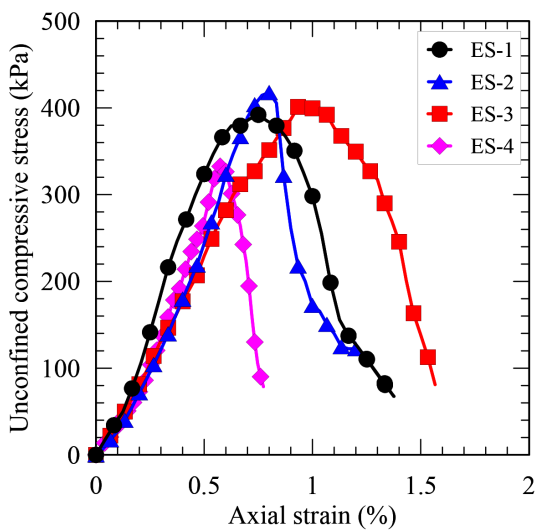
압축강도는 약 450-1,300kPa로 측정되었다. 이와 같이 공시체 건조단위중량이나 모래 종류에 따라 강도 차이가 발생할 수 있으나, 기존 연구와 유사한 범위의 강도를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 일축압축강도와 칼사이트 생성량의 관계를 나타내고 있으며, 칼사이트 생성량이 증가함에 따라 강도도 칼슘원에 관계없이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 한편, 칼슘원을 제외한 다른 실험 조건들이 동일한 경우, 칼슘원으로 염화칼슘을 사용한 경우(Fig. 8에 CC로 표시) pH가 평균 보다 달걀껍질을 사용한 경우(Fig. 8에 ES로 표시)에 미생물에 의한 요소 분해작용이 활발해지면서 칼사이트 생성량이 상대적으로 더 높았으며, 이로 인해 강도도 더 높게 발휘된 것으로 판단된다.

Fig. 9는 전단된 공시체의 모습으로 Fig. 9(a)와 같이



(a) Calcium chloride used



(b) Eggshells used

Fig. 7. Result of unconfined compression tests with different calcium source

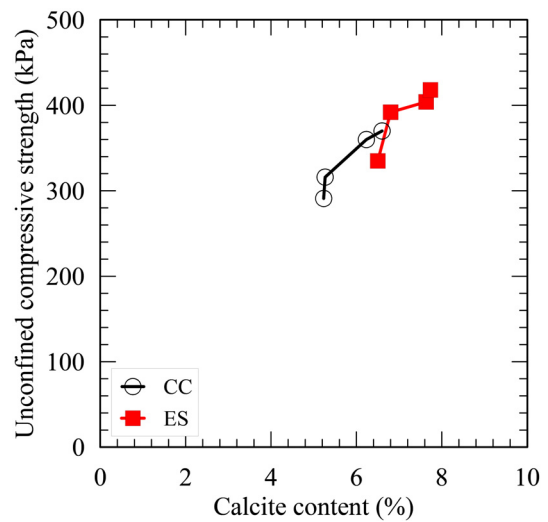


Fig. 8. Relation of unconfined compressive strength and calcite contents



(a) General sheared

(b) Central sheared

Fig. 9. Shear failure shapes

일반적인 전단파괴 형상을 나타내며, Fig. 9(b)와 같이 고결이 가장 약한 중앙부에서 파괴가 발생하는 형상을 나타내고 있다. 또한 모든 공시체에서 파괴 이후 급속히 강도가 저하되는 취성파괴를 보였다.

3.4 고찰

본 연구에서는 미생물로 흙을 고결시킬 때 필요한 칼슘원을 화학약품이 아닌 버려지는 달걀껍질(국내 계란 생산량은 2012년 기준 약 12,000백만개)(축산유통종합정보센터)과 같은 재활용 재료를 활용한 미생물 고결 방법을 연구하였다. 염화칼슘과 달걀껍질을 칼슘원으로 사용한 경우 동일한 메카니즘에 의한 칼사이트 생성으로 모래를 고결시키지만, 칼슘원의 농도에 따라 일부 공학적 특성의 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 실험 결과, 칼슘원으로 달걀껍질을 사용한 경우가 칼사이트 생성량이 평균 1.2배 증가하고 강도도 약 16% 증가하였을 뿐 아니라 투수계수도 약 7.7배 감소하였다. 이와 같이 칼슘원으로 달걀껍질을 사용하는 것이 공학적인 특성을 향상시킬 뿐 아니라 자원 재활용이나 환경보호 차원에서 더욱 유익할 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서 실시한 방법으로 달걀껍질을 이용하여 칼슘원을 제조할 경우 최대 농도가 0.4-0.5Mol 정도였으며, 이와 같은 낮은 농도로 인하여 고결 모래의 강도가 다소 낮았던 것으로 판단된다. 하지만, 향후 달걀껍질을 보다 강한 식초나 염산 등에 녹일 경우 칼슘원의 농도를 높일 수 있으므로 보다 높은 강도 발현이 가능하리라 판단된다. 또한, 칼사이트 생성량이 미생물 배양액의 주입 위치나 횟수 또는 방법에 따라 차이가 발생할 수 있으므로 균질한 강도를 발현하기 위해서는 향후 보다 많은 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 미생물을 이용한 고결 방법에서 일반적으로 사용되는 화학약품인 염화칼슘이 아닌 버려지는 달걀껍질과 식초를 이용하여 칼슘원을 제조한 다음, 이를 Ottawa모래의 고결에 적용시켰다. 이와 같이 칼슘원을 달리하여 고결시킨 소형 공시체에 대한 칼사이트 석출량, 투수계수, 일축압축강도와 같은 공학적 특성을 비교 및 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 달걀껍질과 식초를 이용하여 칼슘원을 개발하였으며, 최적의 제조방법은 멤브레인이 포함된 달걀껍질을 0.85mm 미만으로 잘게 부순 다음 여기에 식초를 중량비로 8배 혼합하고 3일 정도 후에 농도는 0.4Mol이 되도록 한다.
- (2) 미생물과 두 종류의 칼슘원인 염화칼슘 또는 달걀껍질을 사용하여 고결시킨 공시체의 칼사이트 생성량은 달걀껍질을 사용한 경우가 평균 6.5-7.7%로 염화칼슘을 사용한 경우 5.2-6.6%보다 평균값으로 1.2배 정도 더 높았다. 칼슘원의 종류에 관계 없이 칼사이트 생성량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하고 투수계수는 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 칼슘원으로 달걀껍질을 사용한 공시체의 일축압축강도는 335-418kPa로 기존의 염화칼슘을 칼슘원으로 사용하는 경우 291-370kPa 보다 평균 1.2배 정도 더 높았으며, 투수계수는 6.54-1.63E-5cm/s로 7.7배 정도 감소하였다.
- (4) 달걀껍질을 칼슘원으로 사용할 경우, 기존 방법에 비해 자원 재활용 측면뿐만 아니라 투수계수 감소에도 효과가 크므로 흙의 고결뿐 아니라 낮은 투수성을 요구하는 건설 재료로 사용한다면 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(14RDRP-B076268)으로 수행되었으며, 일부는 한국연구재단의 공공복지안전기술개발사업(No. 2012M3A2A1050982) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌(References)

1. Al Qabany, A. and Soga, K. (2013), "Effect of Chemical Treatment Used in MICP on Engineering Properties of Cemented Soils", *Geotechnique*, Vol.63, No.14, pp.331-339.
2. ASTM D4373-14 (2014), *Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils*, West Chnshohocken, PA, USA.
3. Burbank, M, Weaver, T., Green, T., Williams, B., and Crawford, R. (2011), "Precipitation of Calcite by Indigenous Microorganisms to Strengthen Liquefiable Soils", *Geomicrobiology Journal*, Vol.28, No.4, pp.301-312.
4. Chang, K. C. S., McGinn, J. M., Weinert, E. Jr., Miller, S. A., Ikeda, D. M., and Duponte, M. W. (2013), "*Natural Farming: Water-Soluble Calcium*", Sustainable Agriculture, pp.1-3.
5. Choi, S. G. (2014), "*Development of environment-friendly sand*

- cementation using blast furnace slag and calcite precipitation*", Ph.D. thesis, Kyungpook National University.
6. Chu, J., Ivanov, V., and Stabnikov, V. (2012), "Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation on Surface or in the Bulk of Soil", *Geomicrobiol. J.*, Vol.29, No.6, pp.544-549.
 7. Chu, J., Ivanov, V., Stabnikov, V. and Li, B. (2013), "Microbial Method for Construction of an Aquaculture Pond in Sand", *Géotechnique*, Vol.63, No.10, pp.871-875.
 8. Chung, J.S., Kim, B.H., and Kim, I.S. (2014), "A Case Study on Chloride Corrosion for the End Zone of Concrete Deck Subjected to De-icing Salts Added Calcium Chloride", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.29, No.6, pp.87-93.
 9. DeJong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüslein, K. (2006), "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.132, No.11, pp.1381-1392.
 10. DeJong, J.T., Soga, K.S., Kavazanjian, E., Burns, S., van Paassen, L., Fragaszy, R., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S.S., Burbank, M., Caslake, L., Chen, C.Y., Cheng, X., Chu, J., Ciurli, S., Fauriel, S., Filet, A.E., Hamdan, N., Hata, T., Inagaki, Y., Jefferis, S., Kuo, M., Larrahondo, J., Manning, D., Martinez, B., Mortensen, B., Nelson, D., 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", *Géotechnique*, Vol.63, No.4, pp.287-301.
 11. Ivanov, V., Chu, J., Stabnikov, V., and Li, B. (2015), "Strengthening of Soft Marine Clay Using Bioencapsulation", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.33, No.4, pp.320-324.
 12. Lechtanski, V.L. (2000), "Calcium Carbonate Content of Eggshells, Inquiry-Based Experiments in Chemistry", Oxford : New York, pp. 159-165.
 13. Mitchell, J. K. and Santamarina, J. C. (2005), "Biological Considerations in Geotechnical Engineering", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.131, No.10, pp.1222-1233.
 14. Park, S.S., Choi, S.G., and Nam, I.H. (2014), "Effect of Plant-Induced Calcite Precipitation on the Strength of Sand", *Journal of Mater. Civ. Eng.*, Vol.26, No.8, 06014017.
 15. Shin, S. S., Park, S. D., Kim, H. S., and Lee, K. S. (2010), "Effects of Calcium Chloride and Eco-friendly Deicer on the Plant Growth", *Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.32, No.5, pp.487-498.
 16. Van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J. M., van der Star, W. R. L., and van Loosdrecht, M. C. M. (2010), "Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-scale Biogrout Experiment", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.136, No.12, pp. 1721-1728.

Received : February 16th, 2016

Revised : April 28th, 2016

Accepted : May 1st, 2016