

PVA섬유를 혼합한 미생물 고결토의 공학적 특성

Engineering Characteristics of Bio-cemented Soil Mixed with PVA Fiber

최 선 규¹ Choi, Sun-Gyu

박 성 식² Park, Sung-Sik

Abstract

In this study, Polyvinyl alcohol (PVA) fiber was used to increase strength (unconfined compressive strength and tensile strength) of bio-cemented sand using microorganism. Ottawa sand was mixed with PVA fibers having three fiber contents (0, 0.4, and 0.8%). The fiber mixed sand was treated 14 times by using Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) which included culture (2 times per day) during 7 days to improve its engineering properties. The *Bacillus Sporosarcina pasteurii* (*Bacillus sp.*) was used for urease activity. The specimen was prepared as a cylindrical specimen of 5 cm in diameter and 10 cm in height. Unconfined compressive strength and tensile strength were measured after cementation. Moreover, calcium carbonate content and SEM analyses were performed with a piece of sample. An average value of unconfined compressive strength increased and then slightly decreased but an average value of tensile strength ratio increased with increasing carbonate content the in same condition. Unconfined compressive strength and tensile strength increased about 30% and 160%, respectively. A strength ratio of unconfined compressive strength to tensile strength representing the brittleness decreased from 8 to 4 when fiber content increased from 0.0 to 0.8%. Such bio-cemented sand can be applied into slope area to prevent its shear failure or increase its tensile strength.

요 지

본 연구에서는 미생물 고결토의 압축강도 및 인장강도 개선을 위하여 PVA(Polyvinyl alcohol) 섬유를 혼합하는 연구를 수행하였다. 미생물 고결토의 인장강도 특성을 개선하기 위해 모래에 섬유를 혼합한 다음 미생물 배양액을 7일 동안 1일 2회 총 14회 반복주입하여 고결을 유도하였다. 모래는 Ottawa 모래를 사용하였으며, 섬유는 PVA 섬유를 세 종류의 함유량(0, 0.4, 0.8%)으로 혼합하였다. 미생물은 *Bacillus sp.* 미생물을 사용하였으며, 공시체의 크기는 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하였다. 고결이 완료된 다음 일축압축강도, 인장강도 시험을 실시하였으며, 시험 후에는 탄산칼슘 석출량과 SEM 분석을 실시하였다. 섬유의 함유량이 증가함에 따라 평균 일축압축강도는 증가하다가 약간 감소하는 경향을 보이지만, 인장강도는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 탄산칼슘 석출량이 유사하다고 볼 경우, 압축강도는 약 30%의 강도 증가를 발생하였지만, 인장강도는 약 160%의 강도 증가를 보였다. 공시체의 취성도를 나타내는 압축강도와 인장강도의 비는 섬유 함유량이 0%인 경우 약 8 정도에서 섬유 함유량이 0.8%로 증가할 경우 4까지 감소하였으며, 동일한 조건에서 섬유의 함유량이 증가할수록 인장강도의 증가 폭은 커짐을 확인하였다. 이러한 섬유를 혼합한 미생물 고결토는 전단파괴 방지 및 인장강도 증진을 요하는 사면 등의 분야에 적용 가능 할 것으로 판단된다.

Keywords : Microbially induced calcite precipitation, Unconfined compressive strength, Tensile strength, Sand, Fiber

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

2 정회원, 경북대학교 토목공학과 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 2017년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 시멘트 사용량을 줄이거나 시멘트를 전혀 사용하지 않고 친환경적으로 지반을 고결시키는 연구가 다양하게 수행되고 있다. 특히, 흙 속에 존재하는 미생물을 이용하여 흙 입자 사이에 탄산칼슘을 석출시켜 지반을 고결시키는 연구가 다수 수행되고 있다(Burbank et al., 2011; Chu et al., 2012; Dejong et al., 2013; Mitchell and Santamarina, 2005; van Paassen et al., 2010). 예를 들면, Burbank et al.(2013)은 토착 미생물을 이용한 생체광물 형성작용(Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 연구를 수행하였으며, 탄산칼슘 양이 증가할수록 액상화 저항강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. Al Qabany and Soga(2013)에 의하면 요소와 염화칼슘의 몰 농도가 낮을수록 작은 입자의 탄산칼슘이 만들어지면서 높은 전단강도가 발휘되었다. 또한, 여러 연구자들에 의해 탄산칼슘 생성량이 증가할수록 투수계수가 감소하는 결과를 얻었다(Chu et al., 2013; Al Qabany and Soga, 2013). Zhao et al.(2014)은 미생물의 농도가 높을수록 일축압축강도가 최대 4배까지 증가하는 것을 확인하였다. Zhang et al.(2014)은 MICP의 칼슘원으로 초산칼슘(Calcium Acetate)을 사용한 경우 기존의 염화칼슘을 사용한 경우보다 약 30%의 강도 증가를 얻었다. 이러한 미생물을 이용한 고결토의 강도를 비롯한 공학적 특성을 개선하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있으며, 일반적으로 탄산칼슘 생성량이 증가할수록 강도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 하지만 대부분의 연구자들이 미생물 고결토의 압축강도 증가에만 중점을 두고 있으며, 고결토의 인장강도 증가나 취성파괴 개선에 관한 연구는 미흡한 실정이다. PVA(Polyvinyl alcohol) 섬유는 알칼리에 강한 내구성을 가지고 있어 최근 시멘트 고결토의 강도 증진에 활용되고 있으며, 특히 파괴후 연성파괴를 유도하는 것으로 알려져 있다(Park, 2011).

따라서, 본 연구에서는 미생물 고결토의 인장강도 증

진을 위해 모래에 PVA 섬유를 혼합하고 MICP에 의한 고결토를 제작한 다음 공학적 특성을 분석하였다. 실험용 공시체는 모래에 섬유를 중량비로 0, 0.4, 0.8% 혼합한 다음 미생물 용액을 7일간 14회 반복 주입하여 제작하였다. 각각의 공시체에 대한 일축압축강도, 인장강도, 탄산칼슘 생성량을 측정하였으며, 이들의 상관관계를 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료

본 연구에 사용한 섬유는 일본 Kuraray사에서 제작한 직경 0.1mm, 길이 12mm의 PVA 섬유로 내알칼리성이 높으며 고결토의 압축강도 증진뿐 아니라 연성 파괴를 유도하는 것으로 잘 알려져 있다(Park, 2011; Ahmed and Mihashi, 2011). Fig. 1은 PVA 섬유의 모습을 나타내고 있으며, Table 1은 PVA 섬유의 특성을 나타낸다. 모래는 0.85mm와 0.6mm 사이의 비교적 균등한 입경을 가지도록 조정된 Ottawa sand를 사용하였으며, Table 2는 물리적 특성을 나타내고 있다. 요소와 염화칼슘은 시장에서 일반적으로 판매되는 화학약품을 사용하였다. 요



Fig. 1. PVA Fiber

Table 1. Properties of PVA fiber

Type	Specific gravity, G_s	Cut length (mm)	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
RECS 100L	1.3	12	0.1	1,078	25,000

Table 2. 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

소 분해를 위한 미생물은 *Bacillus sp.*(American Type Culture Collection, ATCC 11859)를 사용하였으며, 원하는 시간에 필요한 만큼의 미생물을 사용하기 위해서 사전에 미생물을 동결 건조시켜 -10°C 이하 냉동고에 보관한 다음 이를 실험에 사용하였다. 동결건조된 미생물은 1L의 D.I water에 1g을 혼합하여 실험에 사용하였으며, 약 2.5-3.0mM/min의 우레아제 활성도(Urease activity)를 가진다.

2.2 공시체 제작방법

고결토 제작을 위하여 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체를 사용하였으며, 제작 과정은 다음과 같다. Fig. 2는 공시체 제작방법을 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 공시체 제작을 위한 실험 개념도이며, Fig. 2(b)는 실제 실험 모습이다. 모래의 단위중량은 16.68kN/m^3 을 목표로 하였으며, 모래에 섬유를 중량비로 0, 0.4, 0.8% 혼합하였다. 건조된 모래에 각 중량비의 섬유를 혼합하여 섞은 후 10%의 증류수를 섞어 섬유와 모래가 고르게 분포될때 까지 비빈다. 그 후, 몰드에 넣어 1cm(단위중량: 16.68kN/m^3)의 높이가 되게 만들었다. 위의 과정을 10번 반복하여 높이 10cm의 공시체를 제작하였다. 소량의 증류수를 섞고 10층으로 나누어 다짐으로써 섬유가 모래 속에서 균등하게 분포하도록 하였다(Park, 2011).

완성된 공시체에 미생물 용액을 포화가 가능한 양인 100ml를 펌프를 이용하여 용액을 순환시킨다. 3시간 순환시킨 후 미생물 용액을 버리고 동일한 물 농도의 요소/염화칼슘(0.3 M)을 펌프를 통하여 공시체에 순환시킨다(Al Qubany and Soga, 2013; van Paassen, 2009; Whiffin et al., 2007). 요소/염화칼슘 용액의 순환 시간은 칼슘 농

도 측정을 통하여 결정하였다. 요소/염화칼슘 용액을 9시간에 동안 순환시키며, 미생물 용액과 요소/염화칼슘 용액을 총 12시간에 걸쳐 순환하였으며, 1일 2회 실시하였다. 7일간(14회) 용액을 순환시켜 탄산칼슘 생성을 유도하여 18개의 고결 공시체를 제작하였다.

2.3 실험 방법

7일 동안 18 개의 모래 고결토를 제작하였으며, 고결 완료 후 3 종류의 섬유 함유비를 가진 9 개의 공시체를 이용하여 일축압축강도시험을 실시하였으며, 나머지 9 개의 공시체를 이용하여 브라질리언시험에 의한 인장강도시험을 실시하였다. 강도 측정 후 시편을 이용하여 탄산칼슘 측정량 분석을 실시하였다.

일축압축강도시험은 ASTM D 4219-08에 따라 실시하였으며, 인장강도 시험은 ASTM C496-11에 따라 실시하였으며, 탄산칼슘석출량 분석은 ASTM D4373-14에 따라 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

Table 3은 18개의 고결된 공시체의 실험 조건 및 탄산칼슘 석출량, 강도(일축압축강도, 인장강도)를 나타내고 있다.

3.1 강도 비교

Fig. 3은 일축압축시험 및 인장시험에서 각각의 섬유 함유량에서 탄산칼슘 석출량이 가장 높은 경우에 대한 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 즉, Fig. 3(a)는 탄산

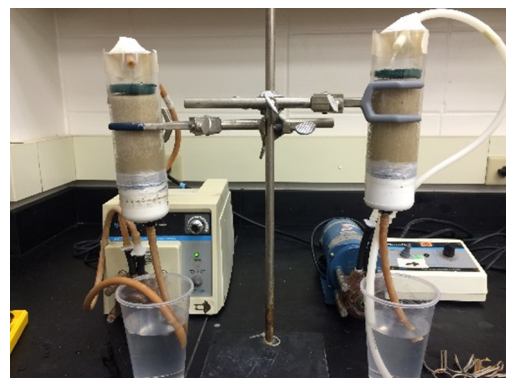
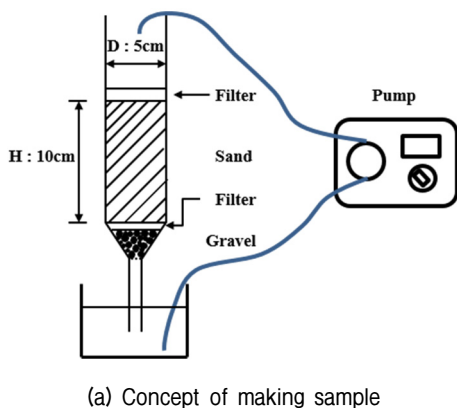


Fig. 2. Sample preparation

Table 3. Summary of test condition and result

ID	Test type	Fiber content (%)	Calcium carbonate content (%)	Strength (kPa)
UC01	Compression	0	8.2	230
UC02			11.3	739
UC03			12.1	1,728
UC41		0.4	7.5	773
UC42			10.3	2,016
UC43			11.9	2,065
UC81		0.8	8.5	792
UC82			9.1	1,626
UC83			13.1	2,215
TS01	Extension	0	4.8	53
TS02			6.6	180
TS03			11.3	230
TS41		0.4	6.8	230
TS42			8.4	332
TS43			10.3	308
TS81		0.8	7.1	294
TS82			9.3	435
TS83			10.4	592

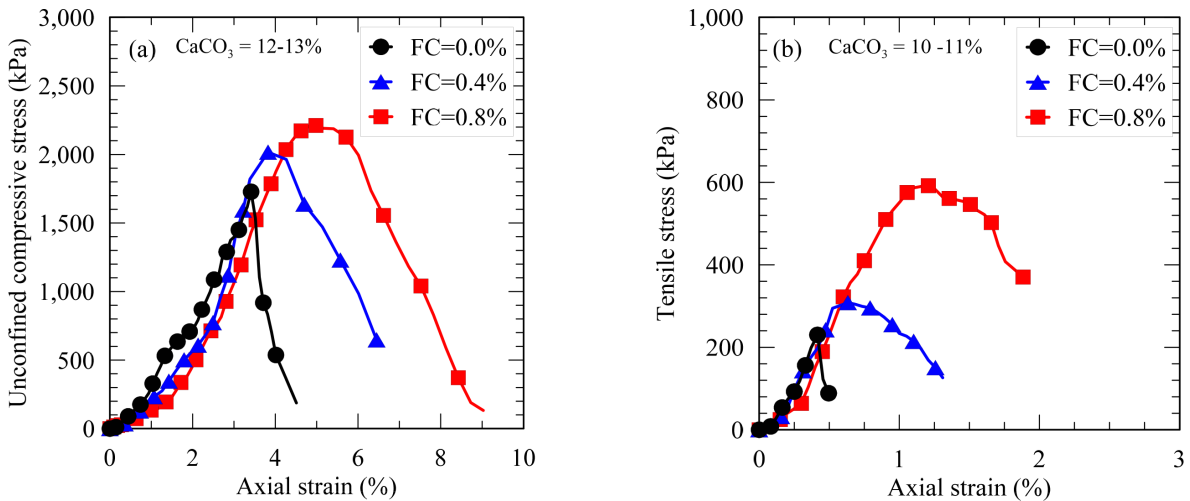


Fig. 3. Relationship between stress and strain: (a) Unconfined compressive stress, (b) Tensile stress

칼슘 석출량이 12-13% 사이인 UC03, UC43, UC83의 일축압축응력-축변형률 곡선을 나타내고 있으며, 섬유 함유량이 증가할수록 일축압축강도가 증가하며, 파괴시 축변형률도 증가하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 고결토는 파괴 후 급격하게 강도가 저하되는 경향을 보이며, MICP에 의한 고결토 또한 이와 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서도 섬유를 혼합하지 않은 경우 파괴 이후 강도가 급격하게 저하되지만 섬유 함유량이 증가할수록 파괴 이후 서서히 강도가 저하되는 연성파괴 거동을 보였다(Park, 2011). Fig. 3(b)는 탄산칼슘 석출량이

10-11% 사이인 TS03, TS42, TS83의 인장응력-축변형률 곡선을 나타내고 있다. 일축압축응력과 마찬가지로 섬유 함유량이 증가할수록 인장강도가 증가하며, 파괴시 축변형률도 증가하였다. 또한, 최대 응력 도달 후 혼합된 섬유로 인해 인성파괴 거동을 보였다. MICP에 의해 석출된 탄산칼슘이 섬유와 흙의 점착력과 마찰각을 증가시켜 강도와 인성이 상승한 것으로 판단된다(Li et al., 2016).

탄산칼슘 석출량이 거의 유사하다고 볼 경우, 압축강도는 섬유 함유량이 0%에서 0.8%로 증가함에 따라 약

30%의 강도 증가가 발생하였지만, 인장강도는 약 160%의 강도 증가를 보였다. 따라서, 미생물 고결토에 섬유를 혼합할 경우 압축강도와 인장강도 모두 증가하지만 인장강도 증진에 더욱 효과적인 것으로 판단된다.

Fig. 4와 Fig. 5는 일축압축강도와 인장강도를 비교하고 있다. Fig. 4(a)는 탄산칼슘 석출량을 세 종류로 나누어 일축압축강도와 섬유 함유량의 상관관계를 비교하고 있으며, Fig. 4(b)는 인장강도를 비교하고 있다. 섬유의 함유량이 0%에서 0.4%, 0.8%로 증가함에 따라 평균 일축압축강도는 899, 1618, 1544kPa로 증가하다가 약간 감소하는 경향을 보였다. 이것은 섬유 함유량은 비록 증가하였지만 탄산칼슘 생성량이 상대적으로 낮아 고결도 또는 강도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 한편, 섬유의 함유량이 0%에서 0.4%, 0.8%로 증가함에 따라 평균 인장강도는 154, 290, 440kPa로 점진적으로 증가하

는 경향을 보였다. 따라서, 일축압축강도 증진에는 탄산칼슘 생성량이 인장강도 증진에는 섬유 함유량이 각각 중요한 요소로 판단된다.

Fig. 5(a)는 섬유 함유량 별로 일축압축강도와 탄산칼슘 석출량의 상관관계를 나타내고 있으며, 섬유 함유량에 상관없이 탄산칼슘 석출량이 증가할수록 일축압축강도도 증가하는 것으로 나타났다(Whiffin et al., 2007; van Paassen et al., 2010; Burbank et al., 2012; Park et al., 2014). Fig. 5(b)는 섬유 함유량 별로 인장강도와 탄산칼슘 석출량의 상관관계를 나타내고 있다. 탄산칼슘 석출량이 증가할수록 인장강도 또한 전반적으로 증가하는 경향을 보였다.

Griffith(1924)는 암석을 이용하여 압축강도와 인장강도의 비를 연구하였으며, 이를 취성도라 정의하고 일반적으로 취성도는 8 정도를 나타내었다. 한편, Park and

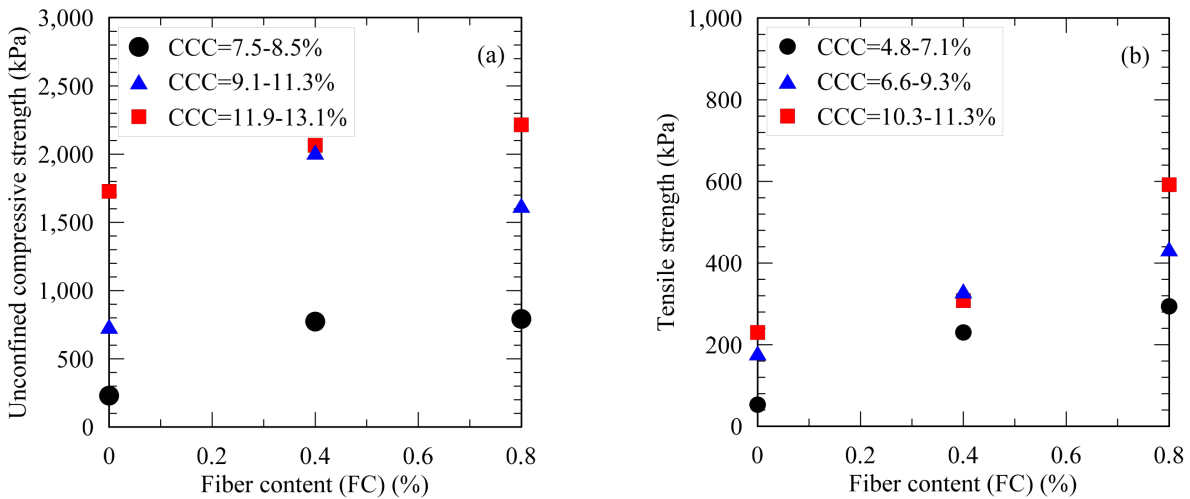


Fig. 4. Relationship between strength and fiber content for different calcium carbonate contents

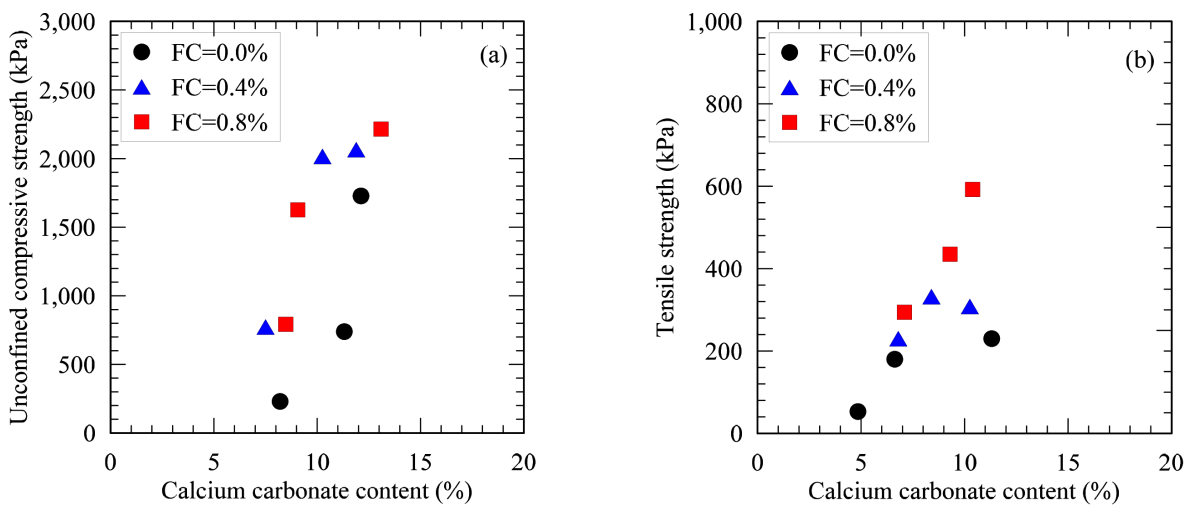


Fig. 5. Relationship between strength and calcium carbonate content for different fiber contents

Lee(2014)에 의하면 취성도는 재료의 종류, 시멘트 함유량에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 섬유 함유량에 따른 미생물 고결토의 취성도를 분석하였다. Fig.

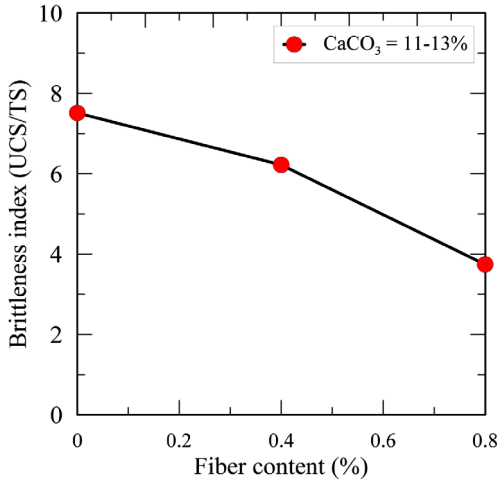
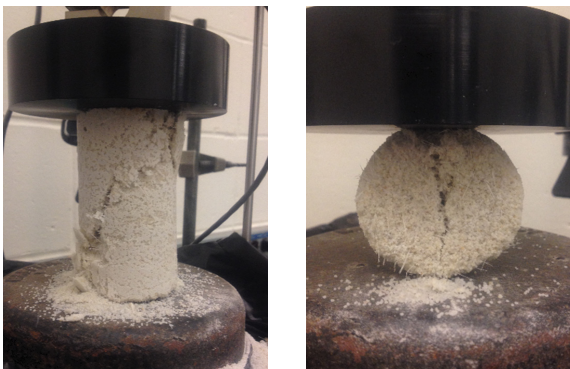
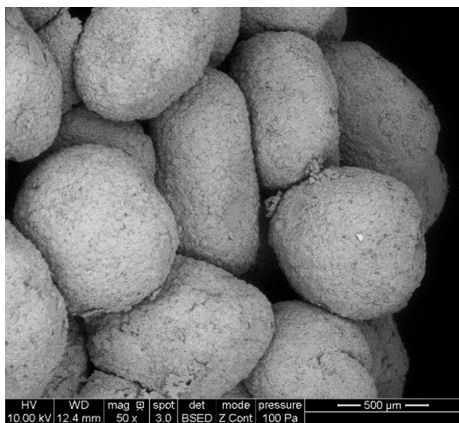


Fig. 6. Ratio of unconfined compressive strength to tensile strength with fiber content

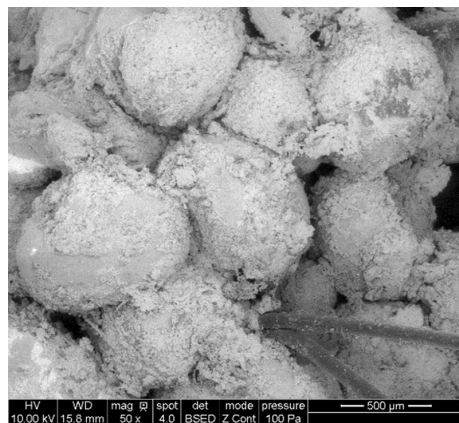


(a) Unconfined compression test specimen (b) Tensile test specimen

Fig. 7. Failure shape of bio-cemented sand with fiber



(a) Cemented sand by MICP



(b) Cemented sand with fiber by MICP

Fig. 8. SEM photos

6은 섬유 함유량에 따른 취성도를 나타내고 있으며, 섬유를 혼합하지 않은 경우 약 8 정도이지만, 섬유의 함유량이 증가할수록 취성도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 조건에서의 섬유의 함유량이 증가할수록 인장강도의 증가 폭이 더 커진다는 것을 나타내고 있다.

3.2 공시체 모습

Fig. 7(a)는 일축압축강도시험에서 섬유 함유량 0.4%인 공시체의 파괴 모습이며, Fig. 7(b)는 섬유 함유량이 0.8%인 인장강도시험 공시체의 파괴 모습이다.

미생물 고결토에서 섬유의 영향을 시각적으로 분석하기 위하여 강도 측정 후 시편을 채취하여 SEM 분석을 실시하였다. Al Qabany and Soga(2013)는 탄산칼슘의 크기가 작을수록 높은 강도를 발현하는 것으로 확인하였으며, Fig. 8과 같이 본 연구에서도 공시체 내의 탄산칼슘 크기는 섬유 함유량에 관계없이 약 10 μm 미만으로 섬유를 혼합한 경우 섬유가 모래 사이에 탄산칼슘과 같이 고결되어 압축 및 인장 강도 증진에 기여하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 모래에 PVA 섬유를 혼합하여(0.0, 0.4, 0.8%) 제작한 공시체에 MICP에 의한 고결을 유도한 후 미생물 고결토의 공학적 특성(압축강도, 인장강도)을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 섬유 함유량이 0%에서 0.4%, 0.8%로 증가함에 따라 평균 일축압축강도는 899, 1618, 1544kPa로 증가하다가 약간 감소하는 경향을 보이지만, 인장강도는 154, 290, 440kPa로 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 미생물 고결토에 PVA 섬유를 혼합할 경우 압축강도보다 인장강도 증진에 더 효과적인 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 일축압축강도와 인장강도는 섬유 함유량에 관계없이 탄산칼슘 석출량이 증가할수록 모두 증가하는 경향을 보였다. 공시체의 취성도를 나타내는 압축강도와 인장강도의 비는 섬유 함유량이 0%인 경우 약 8 정도에서 섬유 함유량이 0.8%로 증가할 경우 취성도는 4까지 감소하였다. 따라서 미생물 고결토에 섬유를 혼합할 경우 기존 고결토의 취성파괴를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(14CRTI-B063773-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

1. Ahmed, S. F. U. and Mihashi, H. (2011), "Strain Hardening behavior of Lightweight Hybrid Polyvinyl Alcohol (PVA) Fiber Reinforced Cement Composites", *Materials and Structures*, Vol.44, No.6, pp. 1179-1191.
2. Al Qabany, A. and Soga, K. (2013), "Effect of Chemical Treatment used in MICP on Engineering Properties of Cemented Soils", *Geotechnique*, Vol.63, No.4, pp.331-339.
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. Burbank, M.B., Weaver, T.J., Lewis, R., Williams, T., Williams, B., and Crawford, R. (2012), "Geotechnical Tests of Sand Following Bio-induced Calcite Precipitation Catalyzed by Indigenous Bacteria", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No.6, pp.928-936.
5. Burbank, M., Weaver, T., Lewis, R., Williams, T., Williams, B., and Crawford, R. (2013), "Geotechnical Tests of Sands Following Bioinduced Calcite Precipitation Catalyzed by Indigenous Bacteria", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.139, No.6, pp.928-936.
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. 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., Jeffers, 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.
8. Griffith, A. A. (1924), "Theory of rupture", Proc. 1st. Int. Congr. Applied Rock Mechanics, Delft, pp.55-63.
9. Li, M., Li, L., Ogbonnaya, U., Wen, K., Tian, A., and Amini, F. (2015), "Influence of Fiber Addition on Mechanical Properties of MICP-Treated Sand", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol.28, No.4, pp. 04015166.
10. Mitchell, J. K. and Santamarina, J. C. (2005), "Biological Considerations in Geotechnical Engineering", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.131, No.10, pp.1222-1233.
11. Park, S. S. (2011), "Unconfined Compressive Strength and Ductility of Fiber-reinforced Cemented Sand", *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.2, pp.1134-1138.
12. Park, S., Choi, S., and Nam, I. (2014), "Effect of Plant-Induced Calcite Precipitation on the Strength of Sand", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol.26, No.8, pp.06014017 1-5.
13. Park, S. S. and Lee, J. W. (2014), "Study on the Direct Tensile Test for Cemented Soils using a Built-in Cylinder", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.34, No.5, pp.1505-1516.
14. van Paassen, L. A. (2009), "BiogROUT (ground improvement by microbially induced carbonate precipitation)", PhD thesis, Delft University of Technology, the Netherlands.
15. 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.
16. Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., and Harkes, M. P. (2007), "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", *Geomicrobiol. J.*, Vol.24, No.5, pp.417-423.
17. Zhang, Y., Guo, H. X., and Cheng, X. H. (2014), "Influences of Calcium Sources on Microbially Induced Carbonate Precipitation in Porous Media", *Materials Research Innovations*, Vol.18, No.2, pp.79-84.
18. Zhao, Q., Li, L., Li, C., Li, M., Amini, F., and Zhang, H. (2014), "Factors Affecting Improvement of Engineering Properties of MICP-Treated Soil Catalyzed by Bacteria and Urease", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol.26, No.12, pp.04014094 1-10.

Received : March 15th, 2016

Revised : May 12th, 2016

Accepted : July 8th, 2016