Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 53, No. 2, pp. 35~43, March, 2011
DOI: 10.5389/KSAE.2011.53.2.035

PVA 시멘트 혼합토의 공학적 특성 연구

A Study on the Engineering Characteristics of PVA (Polyvinyl Alcohol) Fiber-Cement-Soil Mixtures

김영익* · 연규석** · 김기성** · 유경완** · 김용성**,†
Kim, Young Ik · Yeon, Kyu Seok · Kim, Ki Sung · Yoo, Kyeong Wan · Kim, Yong Seong

ABSTRACT

This study aimed to investigate the engineering characteristics of PVA fiber-cement-soil mixture used to prevent or reduce brittle failure of cement-soil mixtures due to the tensile strength increase from the addition of a synthetic fiber. The engineering characteristics of PVA fiber-cement-soil mixtures composed of PVA fiber, soil, and a small amount of cement was analysed on the basis of the compaction test, the unconfined compression test, the tensile strength test, the freezing and thawing test, and the wetting and drying test. The specimens were manufactured with soil, cement and PVA fiber. The cement contents was 2, 4, 6, 8, and 10%, and the fiber contents was 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0% by the weight of total dry soil. To investigate the strength characteristics depending on age, each specimen was manufactured after curing at constant temperature and humidity room for 3, 7 and 28 days, after which the engineering characteristics of PVA fiber-cement-soil mixtures were investigated using the unconfined compression test, the tensile strength test, the freezing and thawing test, and the wetting and drying test. The basic data were presented for the application of PVA fiber-cement-soil mixtures as construction materials.

Keywords: PVA; soil mixtures; freezing and thawing; wetting and drying test

I. 서 론

흙의 결합력과 강도를 증진시키기 위하여 흙에 시멘트를 혼입한 시멘트 혼합토는 도로, 주차장 및 광장 등의 포장 뿐만 아니라 사면보호공 및 연약지반 개량 등 다양한 분야에 활용되고 있다 (Sung and Kim, 2003; Sung, 2004). 일반 흙을 주원료로 하여 강도 개선을 목적으로 흙의 일부를 시멘트 또는 시멘트계 고화재 등을 사용하기 때문에 콘크리트에 비하여 경제적인 동시에 환경친화적 건설재료로 인식되고 있다 (Kim and Kim, 2010; Yeon et al., 2010). 그러나 시멘트 혼합토는 취성적인 파괴 형태를 나타내기 때문에 폴리플로필렌 섬유, 폴리비닐알코올 섬유 및 나일론 섬유 등을 혼합토에 랜덤 분포시켜 강도 뿐만 아니라 연성파괴를 유도하는 섬유보강 혼합토에 대한 연구가 최근 주목을 받고 있다 (Chang et al., 1999; Park et al., 2008; Kim et al., 2010; Park, 2011).

* 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목학과
** 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과
† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6463
Fax: +82-33-251-6463
E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr
2011년 2월 8일 투고
2011년 2월 24일 심사완료
2011년 3월 7일 게재확정

실제로 섬유혼합 보강토는 혼합이 용이하고 강도의 지속성이 우수하며, 토목섬유공법의 단점인 보강재를 따라 진전되는 잠재적인 취약점이 없는 등의 장점을 가지고 있어 최근 선진외국에서는 이에 관한 연구가 활발한 실정이다.

Kumar et al. (2006)은 폴리에스터 섬유로 보강된 고압축성 점토의 압축강도 특성 연구를 수행하였고, Tang et al. (2007)은 폴리프로필렌 단섬유로 보강된 시멘트 혼합점성토의 강도 및 역학적 특성을 구명하였으며, Consoli et al. (2009)은 넓은 고결 영역을 고려한 사질토의 섬유 보강효과를 연구하였다. 또한 Tang et al. (2010)은 토목섬유로 보강된 흙의 계면전단강도에 대해 주목하였고, Consoli et al. (2010)은 시멘트 혼합토의 강도 및 섬유보강 효과를 연구하였으며, Zaimoglu (2010)은 폴리프로필렌 섬유로 보강된 세립토의 동결융해 거동 특성을 구명한 바 있다.

국내에서도 Cho and Kim (1995)은 토목섬유의 형상, 섬유혼합률, 시멘트 혼합률, 양생시간 등에 따른 섬유혼합 보강토의 특성을 구명하였고, Chang et al. (1999)은 폴리프로필렌 섬유혼합보강토의 일축압축 특성을 연구하였으며, Song and Lim (2002)은 폴리프로필렌 보강혼합토의 섬유 혼합비에 따른 다짐 특성, 체적변화 및 강도 특성 등을 바탕으로 섬유혼합토의 역학적 특성을 분석하였다. 또한 Park et al. (2008)은 단섬유

를 사용한 시멘트 혼합토의 일축압축강도 특성을 구명하였으며, Kim et al. (2010)은 폴리프로필렌 섬유 보강 CSG재료의 다짐 및 압축강도 특성을 연구한 바 있다.

단섬유를 무작위로 혼합한 섬유 혼합토에 대한 기존 연구는 주로 사질토에 자연섬유 또는 폴리프로필렌과 같은 알칼리성에 약한 인공섬유를 이용한 연구가 주를 이루었으나 본 연구에서는 시멘트와 친화성이 좋은 폴리비닐알코올(polyvinyl alcohol, PVA)섬유를 사용하였으며, PVA-시멘트 혼합토의 일축압축강도 특성과 더불어 지금까지 연구가 미진했던 섬유 및 시멘트 혼합토의 동결융해 및 건습 특성 등에 주목 하였다.

본 연구에서는 PVA 섬유 혼입율에 따른 혼합토의 다짐 특성, 압축강도, 인장강도, 동결융해, 건습 특성 등의 분석을 통해 PVA-시멘트 혼합토의 강도 및 내구 특성을 구명하고자 하였으며, 이를 통해 현장에서 PVA-시멘트 혼합토를 건설재료로서 활용하는데 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 사용 재료

본 연구에 사용된 혼합토는 강원대학교 인근 현장의 터파기 시 발생된 굴착토를 사용하였으며, Table 1 및 Fig. 1은 본 연구에 사용된 혼합토의 기본 물성 및 입도분포곡선을 나타낸다.

Table 1 Physical properties of coarse aggregates

Type	Size (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M	Bulk density (kg/m^3)
Coarse	4.75～40	2.73	1.36	6.77	1,592
	0.15～4.75	2.66	1.62	6.54	1,559

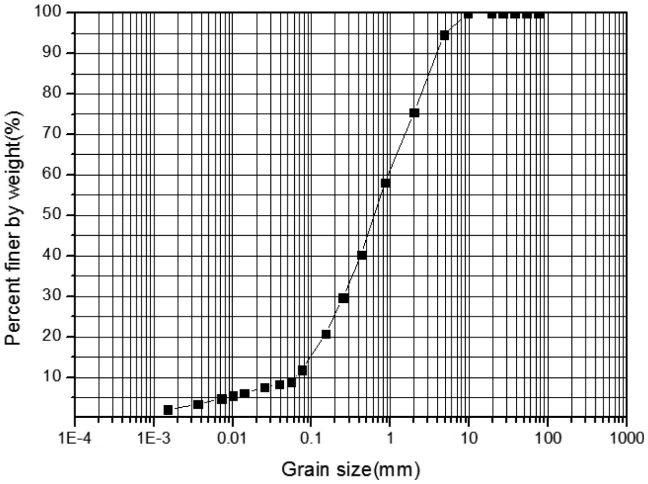


Fig. 1 Grain size distribution curve

Table 2 Mechanical properties of normal portland cement (After Yeon et al., 2010)

S.G	Setting time (h-min)		Compressive strength (MPa)		
	Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	5-7	7-20	19.4	21.6	32.3

Table 3 Chemical compositions of nomal portland cement (After Yeon et al., 2010)

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
21.09 %	4.84 %	63.85 %	3.32 %	3.09 %	1.13 %	0.29 %	2.39 %

Table 4 Physical properties of homopolymer Polyvinyl Alcohol

Color	Specific gravity	Length	Diameter	Tensile strength	Modulus of elasticity
off white	1.3	12 mm	100 micron	1,100 MPa	25 GPa

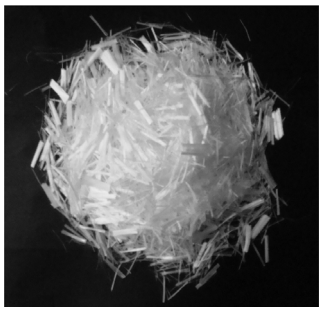


Photo 1 Shape of PVA

시멘트는 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, Table 2～3은 각각 사용된 골재 및 시멘트의 역학적 특성과 화학적 성분을 나타낸다. 한편, 혼합토의 강도 및 인성 증진을 위하여 사용된 섬유는 국내 P사가 일본으로부터 수입한 PVA 섬유이며, 사용된 PVA 섬유의 제원과 형상은 Table 4 및 Photo 1과 같다.

2. 배합설계 및 제작

가. 배합

섬유를 혼입하지 않은 시멘트 혼합토에 대하여 단위시멘트량에 따른 최적함수비 및 최대건조밀도를 측정하여 최적함수비에서 목표 강도를 발현할 수 있도록 예비실험을 통하여 최적배합을 결정하였다. 혼합토의 전체 중량에 대한 중량비로 시멘트는 2, 4, 6, 8, 10 %, PVA 섬유는 기존의 연구결과 (Cho and Kim, 1995; Kim et al., 2010; Park, 2011)를 참고하여 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 %를 혼입하였다. PVA-시멘트 혼합토의 배합설계는 Table 5와 같다.

Table 5 Mix designs of PVA-cement-soil mixtures (Unit: g)

Soil	aggregate	Cement	PVA	Remarks
2,000	2,000	80 160 240 320 400	16 24 32 40	Fiber length 12 mm

나. 다짐

각 시료의 최적함수비 및 최대건조밀도 산출을 위한 다짐은 A 다짐에 준하여 실시하였으며, 강도 측정을 위한 공시체 제작 시에도 A다짐 방법에 의하여 다짐에너지를 계산하여 3층 25회 다짐으로 다짐에너지가 일정하도록 조정하였다.

다. 공시체 제작

다짐시험에서 산출된 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 하여 수량 및 물량을 산정한 후 다짐 시험과 동일한 수준의 다짐에너지를 나타낼 수 있도록 ø100×200 mm 몰드에 재료를 투입하고 재료분리가 발생하지 않도록 각층의 재료를 따로 배합하여 3층으로 나누어 다짐을 실시하였다. 재령에 따른 강도 특성을 구명하기 위하여 재령 3, 7일 및 28일 동안 양생을 실시하였다.

3. 시험방법

가. 일축압축강도 시험

일축압축강도시험은 KS F 2405 (콘크리트의 압축 강도 시험 방법)에 준하여 재령 3, 7일 및 28일에 ø100×200 mm인 공시체를 Instron사의 만능시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하하였다.

나. 인장강도 시험

인장강도시험은 KS F 2423 (콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험 방법)에 준하여 재령 3, 7일 및 28일에 ø100×200 mm인 공시체를 Instron사의 만능시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하하여 측정하였다.

다. 동결융해 시험

동결융해 시험은 KS F 2332 (다져진 흙 시멘트 혼합물의 동결 융해 시험 방법)에 준하여 공시체를 성형한 후에 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 −23 ℃보다 높아지지 않는 동결 캐비닛에 24시간의 동결과 온도 21 ℃, 상대습도 100 %인 습윤 양생실에서 24시간동안 융해하기를 12주기 반복하여 다음의 (1)식에 의해 흙-시멘트 손실량을 측정하였다.

$$\text{흙 시멘트의 손실율 } (\%) = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

여기에서 A: 처음에 계산된 노 건조 질량에서 최종 수정된 노 건조 질량을 뺀 값, B: 처음에 계산된 노 건조 질량

라. 건습 시험

건습시험은 KS F 2330 (다져진 흙 시멘트 혼합물의 습윤 및 건조 시험 방법)에 준하여 공시체를 성형한 후에 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 5시간의 수침과 42시간동안 71 ℃의 건조로에서 건조하기를 12주기 반복하여 동결융해시험과 동일한 방법으로 흙-시멘트 손실량을 측정하였다.

마. SEM

혼합토의 수화특성을 분석하기 위하여 재령 7일 및 28일된 공시체에서 샘플을 채취하여 주사전자현미경 (scanning electronic microscope, SEM)을 이용하여 수화생성물의 형태 및 분포를 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

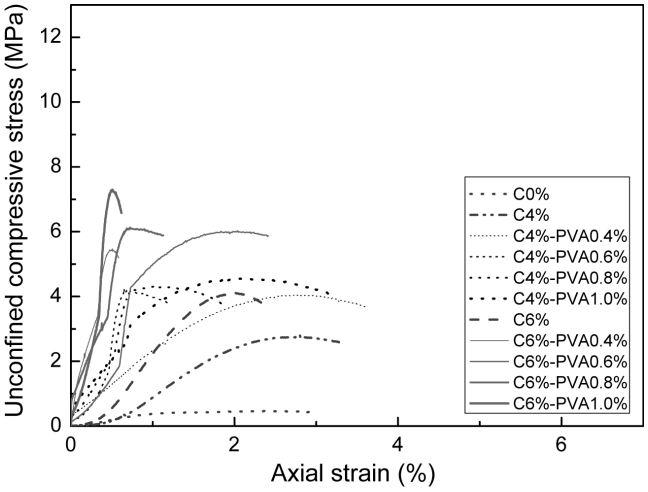
1. 압축 및 인장강도 특성

가. 섬유비에 따른 강도 특성

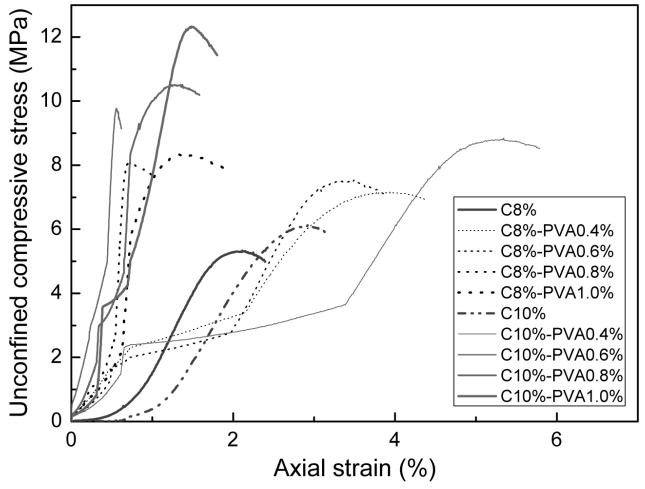
섬유의 보강 정도 즉 섬유비에 따른 일축압축강도 및 인장강도의 영향을 분석하기 위하여 본 실험에서는 시멘트비를 일정하게 고정시킨 다음 섬유비를 달리하여 공시체를 만든 후 일축압축 및 인장강도시험을 실시하였다.

일반적으로 고함수비의 흙의 응력변형 거동은 뚜렷한 파괴점이 형성되지 않고 변형률 15～20 %까지 응력이 증가하거나 유사한 값을 보이는 비선형 거동을 하는 것으로 알려져 있다 (Kong et al., 2001). 반면에 시멘트 혼합토 (Cemented sand and gravel, CSG) 재료의 응력-변형 거동은 비선형적 거동 보다는 탄성적 거동이 우세하게 나타나기 때문에 CSG 재료에 대한 설계 및 안정성 해석은 탄성해석을 기반으로 이루어 진다 (Kim et al., 2005).

Fig. 2는 재령 28일의 섬유 혼입율에 따른 PVA 시멘트 혼합토의 압축강도 변형률 곡선을 나타낸다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 PVA-시멘트 혼합토는 섬유비에 관계없이 보강을 하지 않은 흙 (C 0 %)에 비해 압축강도가 크게 증가하는 경향을 나타내었으며, 시멘트비가 4% 이하인 경우 최대압축응력에 도달한 후에 급격한 파괴없이 축변형률의 증가에 따라 서서히 전단저항력이 저하되는 형태를 나타낸다. 시멘트 혼합 비율이 6

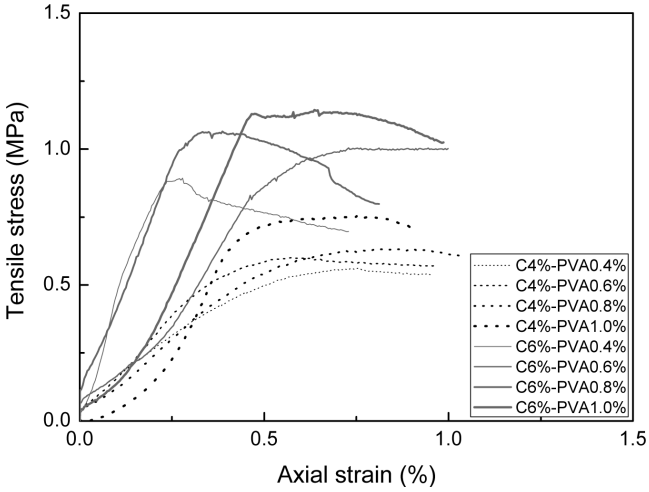


(a) Cement 4 % and Cement 6 %

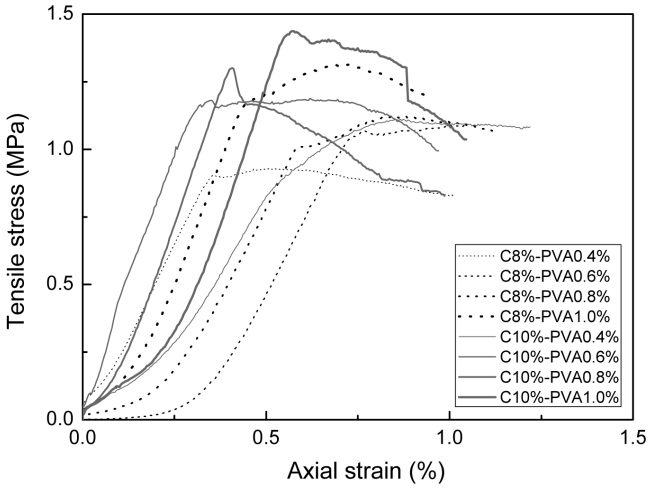


(b) Cement 8 % and Cement 10 %

Fig. 2 Unconfined compressive strength vs. axial strain (curing 28 days)



(a) Cement 4 % and Cement 6 %



(b) Cement 8 % and Cement 10 %

Fig. 3 Tensile strength vs. axial strain (curing 28 days)

% 이상의 경우 탄성계수가 크고 강도도 크게 나타나고 있는데 이는 Kim et al. (2005)이 수행한 CSG재료의 압축강도시험 결과와도 유사한 형태를 보인다.

Cho and Kim (1995)은 시멘트가 첨가된 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선은 시멘트가 첨가되지 않은 경우와 비교하여 최대압축응력은 보다 크게 발현되며 최대압축응력에 도달하는 축변형률이 보다 작게 나타나는데, 이는 시멘트의 수화작용에 의해 흙 입자 간의 결합력이 증대되는 반면에 흙속에서 인장된 섬유에 의한 흙의 수평변형 구속효과는 상대적으로 감소되는 것으로 보고하였다.

또한 Park et al. (2008)은 구속압이 영인 일축압축 상태의 섬유보강 혼합토에서 시멘트비가 8 %로 높은 경우 시멘트의 고결력이 상대적으로 강하기 때문에 섬유보강으로 인한 강도 증가효과가 감소하며, 섬유비의 증가에 따른 파괴모드의 변화가 없이 취성파괴 (brittle failure)를 나타낸다고 하였다.

Fig. 2 및 Table 6의 각 시멘트비의 실험 결과에서 섬유 보강을 하지 않은 시료와 비교해 보면 섬유 보강 효과는 1.3~2.0배로 상당히 큼을 알 수 있으며, 섬유비 증가 (0.4 % → 1.0 %)에 따른 탄성계수의 증진효과를 확인할 수 있다. 이러한 결과는 섬유혼합 보강토의 일축압축강도는 섬유비가 증가함에 따라 지속적으로 증가하나 중량비 1~2 % 이상의 섬유비에서는 섬유비의 증가에 따른 일축압축강도의 증가율이 점차 감소되는 경향이 있다는 Cho and Kim (1995)의 연구 결과와 일치한다. 또한 시멘트비가 동일한 경우 섬유비의 증가에 따라 일축압축강도비가 선형적으로 증가하는 경향을 보인다는 Park

Table 6 The list of peak strength and elastic modulus

Specimen (%)		Compressive peak strength (MPa)	Strain at peak stress (%)	Strength ratio	Secant elastic modulus (MPa)	Tensile peak strength (MPa)	Strength reduction modulus at 0.1 % (MPa)
Cement	PVA						
4	0	2.809	2.802	1.00	1.09E+02	-	-
	0.4	4.054	2.783	1.44	2.43E+02	0.561	16
	0.6	4.211	0.650	1.50	4.37E+02	0.601	13
	0.8	4.345	1.023	1.55	4.08E+02	0.633	16
	1	4.586	1.958	1.63	3.97E+02	0.757	20
6	0	4.116	2.013	1.00	2.18E+02	-	-
	0.4	5.468	0.507	1.33	1.15E+03	0.893	87
	0.6	6.021	2.036	1.46	4.63E+02	1.004	5
	0.8	6.131	0.722	1.49	8.20E+02	1.064	34
	1	7.297	0.507	1.77	1.05E+03	1.144	13
8	0	5.333	2.113	1.00	2.17E+02	-	-
	0.4	7.167	3.932	1.34	1.64E+02	0.929	22
	0.6	7.537	3.490	1.41	1.71E+02	1.091	13
	0.8	8.112	0.740	1.52	7.12E+02	1.123	16
	1	8.346	1.413	1.56	6.07E+02	1.319	38
10	0	6.129	2.919	1.00	1.72E+02	-	-
	0.4	8.846	5.339	1.44	1.23E+02	1.112	16
	0.6	9.772	0.556	1.59	1.13E+03	1.188	13
	0.8	10.513	1.371	1.72	7.93E+02	1.301	152
	1	12.334	1.486	2.01	7.13E+02	1.437	38

et al. (2008)의 연구 결과와도 유사하다.

한편, Kim et al. (2010)은 폴리프로필렌 섬유 혼입률에 따른 CSG재료의 압축강도는 재령에 관계없이 섬유 혼입률 0.6 %이내에서는 섬유를 혼입하지 않은 CSG재료에 비하여 증가하는 경향을 나타내며, 섬유 혼입률 0.8%에서는 거의 유사하거나 감소하는 경향을 나타낸다고 보고하였다.

Table 6에서 강도비 (strength ratio)는 각 섬유비에 따른 압축강도를 섬유비가 0인 경우의 압축강도로 나누었을 때의 값을 의미하며, 섬유비 증가에 따라 강도비가 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 섬유비 증가에 따른 효과는 시멘트비가 4 %일 때 1.4～1.6배, 6 %일 때 1.3～1.8배, 8 %일 때 1.3～1.6배, 10 %일 때 1.4～2배 등으로 나타나 그 효과는 크다고 할 수 있다.

다만 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 응력-변형관계에서 타 연구와는 다르게 일정 응력상태에 도달하게 되면 크리프 현상이 나타나다가 일정 시간이 지난 후 재차 응력이 상승하는 현상이 나타났다.

이러한 차이는 혼합토의 종류, 공시체 크기, 입경 등에 따른 차이 등 여러 요인이 복합된 것으로 판단되며, 크리프 현상은 시료의 국소적 연약대의 1차 전단, 배합시 섬유의 뭉침 현상 존재 등의 여러 원인이 있을 수 있으나 추가 실험을 통해 좀 더 검토해야 명확하게 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

현장에서 토목섬유-시멘트 혼합토의 배합비를 결정할 시에는 이러한 크리프 현상 등 발생 가능한 문제가 주변 여건에 영향을 미치지는 않는지를 검토하여 안전한 배합 조건을 결정 할 필요가 있다.

Fig. 3은 PVA-시멘트 혼합토의 축변형률과 인장강도의 관계를 나타내며, 압축강도가 높을 경우 인장강도도 큼을 볼 수 있다. 본 연구에서 도입된 Table 6의 강도감소계수 (strength reduction modulus)는 할선탄성계수와 유사한 개념으로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{강도감소계수 (MPa)} = \frac{T_{peak} - T_a}{S_a - S_{peak}} \times 100 \qquad (2)$$

여기에서 T_{peak}: 최대 인장강도, S_{peak}: 최대 인장강도 시 축변형률 (%), S_a: 최대 인장강도 후 일정 시간 후의 변형율 T_a: S_a에서의 인장강도

강도감소계수는 최대 강도 후 응력이 급격히 감소하는지 또

는 서서히 감소하는지에 대한 강도감소 경향을 수치화하기 위한 것으로 현장 조건에 따라 $S_a - S_{peak}$를 달리 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 $S_a - S_{peak}$를 0.1 %를 적용하였는데 이는 최대치를 기록한 직후의 후 응력의 경향에 주목하고자 하였다. 실험 데이터가 충분치 않기 때문에 분석에 무리가 따르나 시멘트비가 높을수록 강도감소계수가 큰 경향을 나타내고 있으며, 이는 취성파괴에 가깝다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

따라서 시멘트비가 10 % 이상일 경우에는 일반적인 흙의 거동 보다는 수화작용의 영향력이 커지게 되어 시멘트 재료에 가까운 거동을 하는 것으로 판단된다.

나. 재령에 따른 강도 특성

Fig. 4는 양생일수의 영향을 검토하기 위해 재령 3일 및 7일, 28일에 대한 PVA 섬유 비율에 따른 압축 및 인장강도를 나타낸 것이다.

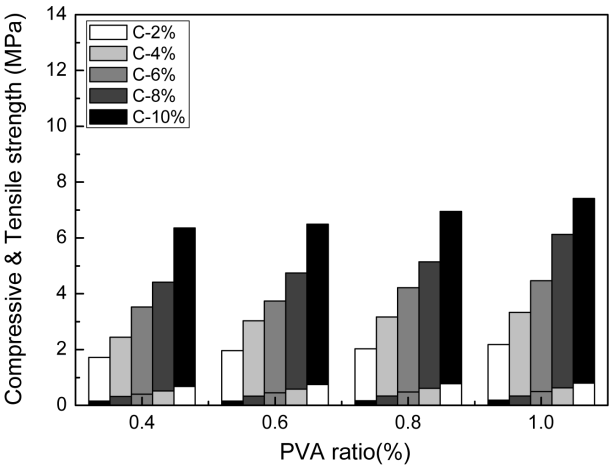
Fig. 4에서 볼 수 있듯이 시멘트비가 증가할수록 강도는 증가하고 섬유비가 클수록 강도도 크나 섬유비 보다는 시멘트비에 영향을 더 많이 받음을 알 수 있다.

Table 7은 재령에 따른 압축강도 및 인장강도와 28일 강도 값으로 나눈 강도비를 함께 표시한 것으로 압축강도의 경우 3일 강도는 28일 강도의 60～90%를 기록하고 있다. 7일 강도는 70～100%를 나타내며 시멘트비가 낮을수록 3일 강도 및 7일 강도 값이 높게 나타남을 알 수 있다. PVA 시멘트 혼합토의 인장강도는 압축강도의 1/8～1/6 수준인 것으로 나타났다.

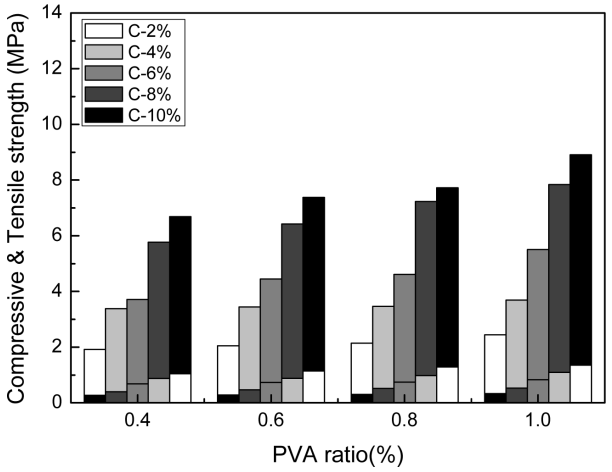
2. 동결융해 및 습윤건조 특성

지반이 동결하면 동결하기 전에 비하여 매우 단단해지며, 지반이 동결할 때는 흙의 종류, 토립자의 배열 상태, 함수비, 부동수분, 건조단위중량, 염분함유량 등 여러 가지 요인이 작용하므로 역학적 성질이 매우 복잡한 형상을 나타내는 것으로 알려져 있다. 시멘트-섬유 혼합토에 동결융해가 반복적으로 작용하면 혼합재료 내부에 물이 얼게 되고 이 때 팽창에 의하여 내부구조에 균열이 발생하여 내구성이 저하하게 되는 문제점이 있다. 따라서 섬유비 및 시멘트비에 따른 동결융해 저항성을 파악하여 현장 여건에 맞는 최적의 배합비를 선정하는 것이 필요하다.

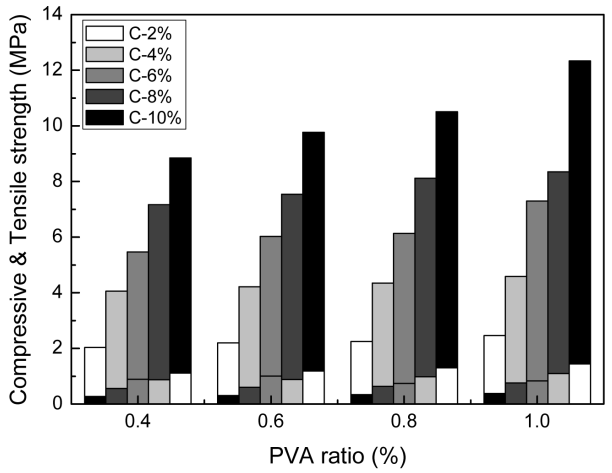
Fig. 5는 동결융해 싸이클에 따른 PVA 시멘트 혼합토의 손실량과 PVA 섬유비의 관계를 나타낸 것이다. 시멘트비가 2 %인 경우에는 섬유비가 클수록 손실률도 커지며, 4 %인 경우에는 섬유비 0.6 %에서 가장 작은 손실률을 나타내었다. 시멘트비가 8 % 이상일 때는 섬유비가 높을수록 손실률도 작아지는



(a) curing 3 days



(b) curing 7 days



(c) curing 28 days

Fig. 4 Compressive and tensile strength distribution with curing ages

Table 7 The list of compressive and tensile strength ratio

Specimen		Compressive strength (MPa)			Compressive Strength ratio		Tensile strength (MPa)			Tensile Strength ratio		Strength ratio
Cement (%)	PVA (%)	3 days	7 days	28 days	3/28	7/28	3 days	7 days	28 days	3/28	7/28	Tensile/ compressive
2	0.4	1.72	1.91	2.03	0.85	0.94	0.15	0.27	0.27	0.57	0.99	0.13
	0.6	1.96	2.05	2.20	0.89	0.93	0.15	0.28	0.31	0.50	0.91	0.14
	0.8	2.02	2.14	2.25	0.90	0.95	0.16	0.30	0.34	0.49	0.90	0.15
	1.0	2.18	2.45	2.46	0.89	1.00	0.19	0.33	0.38	0.50	0.87	0.15
4	0.4	2.44	3.38	4.05	0.60	0.83	0.32	0.40	0.56	0.57	0.70	0.14
	0.6	3.03	3.44	4.21	0.72	0.82	0.33	0.47	0.60	0.55	0.77	0.14
	0.8	3.17	3.46	4.35	0.73	0.80	0.33	0.52	0.63	0.53	0.83	0.14
	1.0	3.33	3.69	4.59	0.73	0.80	0.34	0.53	0.76	0.45	0.70	0.17
6	0.4	3.52	3.71	5.47	0.64	0.68	0.41	0.68	0.89	0.45	0.76	0.16
	0.6	3.73	4.44	6.02	0.62	0.74	0.46	0.74	1.00	0.45	0.73	0.17
	0.8	4.21	4.61	6.13	0.69	0.75	0.48	0.74	1.06	0.45	0.70	0.17
	1.0	4.47	5.51	7.30	0.61	0.75	0.49	0.83	1.14	0.43	0.72	0.16
8	0.4	4.41	5.77	7.17	0.62	0.80	0.52	0.87	0.93	0.56	0.94	0.13
	0.6	4.74	6.42	7.54	0.63	0.85	0.59	0.88	1.09	0.54	0.81	0.14
	0.8	5.15	7.23	8.11	0.63	0.89	0.61	0.98	1.12	0.54	0.87	0.14
	1.0	6.12	7.83	8.35	0.73	0.94	0.63	1.10	1.32	0.48	0.83	0.16
10	0.4	6.35	6.68	8.85	0.72	0.76	0.68	1.04	1.11	0.61	0.94	0.13
	0.6	6.50	7.37	9.77	0.66	0.75	0.75	1.14	1.19	0.63	0.96	0.12
	0.8	6.95	7.72	10.51	0.66	0.73	0.78	1.28	1.30	0.60	0.99	0.12
	1.0	7.42	8.90	12.33	0.60	0.72	0.80	1.35	1.44	0.55	0.94	0.12

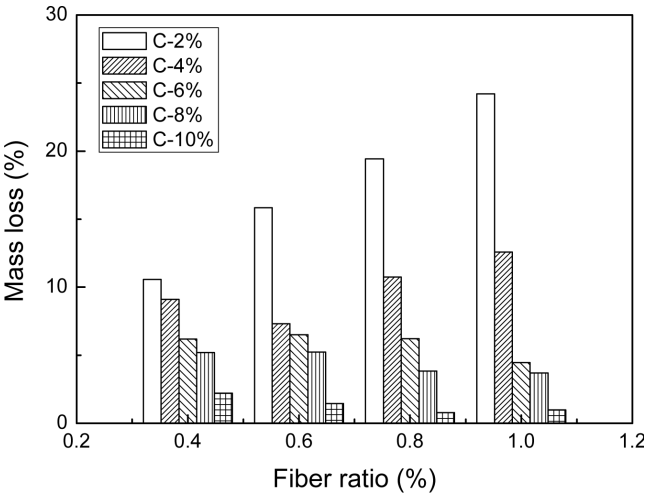


Fig. 5 The results of freeze-thaw test

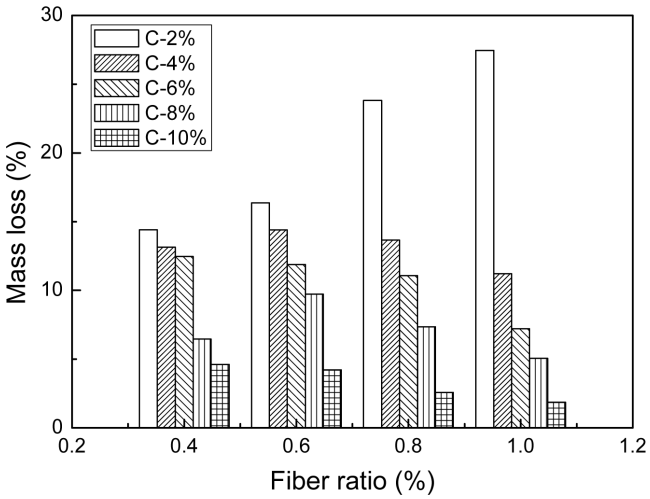


Fig. 6 The results of wet-dry test

반비례 경향을 보였다. 시멘트비와 섬유비가 증가 할수록 시멘트의 수화작용 및 섬유의 뭉침 현상이 복합적으로 나타나지만 시멘트비가 8 % 이상이 되면 수화작용의 영향이 더 커져 섬유비에는 크게 영향을 받지는 않는 것으로 판단된다.

Zaimoglu (2010)는 12회의 동결융해 싸이클을 토목섬유 보강토에 대한 동결융해 시험 결과 섬유비 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 %에 대한 손실율은 각각 39, 20, 22, 15, 20 %로 나타나 무보강일 경우 40%에 가까운 손실율을 보인데 비해 0.75 %의

섬유비로 보강할 경우에는 손실율을 15 %로 낮출 수 있음에 주목하였다. 여러 문헌에 따르면 10～15%인 정도의 손실율은 12회 동결융해 싸이클 후 표면에 가까운 흙의 강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다 (Chamberlain et al., 1990; Hassini, 1992).

Fig. 5를 참고할 때 시멘트비가 6% 이상이 되면 섬유비에 관계없이 손실률이 7% 이하가 되어 일정 정도의 동결 융해에 저항력을 갖는 것으로 판단된다. 또한 시멘트비가 4%일 때에도 동결융해에 저항력이 있으나 적정 섬유비를 채택함으로써 보다 큰 저항력을 유도할 수 있을 것으로 사료된다.

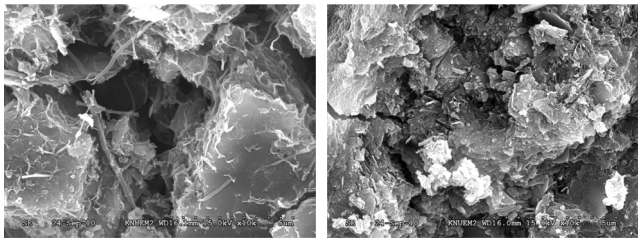
Fig. 6은 습윤 및 건조 시험 결과를 나타낸 것으로 시멘트비 2 %와 섬유비 0.8 %, 1.0 %의 조합에서 각각 23.82 %, 27.46 %의 손실률을 기록하면서 공시체 파괴가 발생하여 건조 습윤에 매우 취약한 것으로 나타났다. 따라서 섬유 보강 혼합토의 경우 시멘트비 2 %일 경우에는 공학적으로 활용하기에 다소 무리가 따르는 것으로 판단된다. 시멘트비 4 % 이상일 경우에는 손실률이 15 % 이하를 기록하여 건조 습윤에 저항력이 있는 것으로 나타났으나 보다 안정적인 측면에서 고려한다면 시멘트비가 6 % 이상인 것이 확실할 것으로 사료된다. 시멘트비 6 % 이상인 경우 섬유비 증가에 따라 건조 습윤 저항성도 높아지는 것으로 나타나 토목섬유의 혼합이 건조 습윤에 대한 저항력 증진에 일정 정도 역할을 담당하는 것으로 판단된다.

3. SEM 분석

Fig. 7은 PVA-시멘트 혼합토에 대한 재령 7일의 주사전자현미경 (SEM, S-4300 Hitachi)에 의해 10,000배로 측정한 재료 내부의 미세 구조를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 재령 7일에 채취된 샘플 표면의 형태 분석 결과 시멘트비 10 %의 경우 시멘트 수화에 의하여 수화 생설물이 다소 생성된 것을 볼 수 있으며, 시멘트비 2 %의 경우보다 더 침상의 에트린자이트 생성이 더 확연함을 볼 수 있다.

일반 콘크리트의 경우 시멘트의 혼입량이 많기 때문에 다량의 수화생성물이 형성되는 반면, 시멘트 혼합토 재료의 경우 시멘트의 혼입량이 상대적으로 적기 때문에 혼합토의 간극에 채워진 시멘트의 수화에 의해 소량의 수화생성물이 형성되고 간극을 충진하는 것으로 판단된다 (Kellsen, 1996).

이와 같이 시멘트에 의하여 생성된 수화생성물은 흙과의 결합력을 증가시킬 뿐만 아니라 혼입된 PVA 섬유와의 부착력 향상에도 기여하여 섬유 보강 혼합토 재료의 압축 및 인장강도 증진에 효과적일 것으로 판단된다.



(a) Cement 2 % (b) Cement 10 %

Fig. 7 Microstructure of sample specimens (PVA 0.6 %, curing 7 days)

IV. 결 론

본 연구에서는 PVA 섬유 혼입율에 따른 혼합토의 다짐 특성, 압축강도, 인장강도, 동결융해, 건습 특성 등의 분석을 통해 PVA-시멘트 혼합토의 강도 및 내구 특성을 구명하고자 하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. PVA-시멘트 혼합토는 섬유 혼합비 및 시멘트 혼합비율이 증가함에 따라 압축강도 및 인장강도는 증가하는 경향을 나타냈으며, 섬유비 0.4 %～1.0 %일 때 토목섬유 혼합에 따른 강도 증진 효과는 시멘트비 4 %에서 1.4～1.6배, 시멘트비 6 %에서 1.3～1.8배, 시멘트비 8 %에서 1.3～1.6배, 시멘트비 10 %에서 1.4～2배 등으로 나타나 그 효과는 큰 것으로 나타났다.

2. PVA-시멘트 혼합토의 압축강도 시험 결과, 3일 강도는 28일 강도의 60～90 %, 7일 강도는 70～100 % 정도이며, 인장강도는 압축강도의 1/8～1/6 수준인 것으로 나타났다.

3. PVA-시멘트 혼합토의 건조 습윤시험 결과 시멘트비가 6 % 이상인 경우 섬유비 증가에 따라 건조 습윤 저항성도 높아져 토목섬유의 혼합이 건조 습윤에 대한 저항력 증진에 일정 정도 역할을 담당하는 것으로 나타났다.

4. 현장에서 활용 가능한 PVA-시멘트 혼합토의 최적 배합비는 강도 및 동결 융해 등 내구적 안전성을 고려하여 PVA 0.8 %와 시멘트 0.6～1.0 %를 혼합 사용한다면 강도 증진 및 연성파괴를 유도하는데 적절할 것으로 판단되나, 현장 여건 및 활용 목적에 따라 달라질 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [과제번호: C1006558-02-01] 연구비 지원 및 강원대학교 공동실험실습관의 장비 (SEM) 지원과 농업생명과학연구원의 기자재 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Chang, P. W., Y. K. Park, C. W. Woo, and K. S. Kim,

1999. Unconfined strength characteristics of fiber reinforced soil. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 41(1): 72-78 (in Korean).

2. Chamberlain, E. J., I. Iskveer, and S. E. Hunsiker, 1990. Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils. Proceedings International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural, Range and Forest Lands. March 21-22, Spokane, WA, pp. 145-155.
3. Cho, S. D., and J. M. Kim, 1995. The experimental study on engineering properties of fiber-reinforced soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 11(2): 107-120 (in Korean).
4. Consoli, N. C., Bassani, M. A., and L. Festugato, 2010. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes* 28: 344-351.
5. Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A., and F. D. Rosa, 2009. Fiber reinforced effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes* 27: 196-203.
6. Hassini, S., 1992. Some aspects of landfill design. Mediterranean Conf. on Environmental Geotechnology, Cesme Turkey. *Environmental Geotechnology* 137-144.
7. Kellsen, K. O., 1996. Heat curing and post-heat curing regimes of high-performance concrete: influence on microstructure and C-S-H composition. *Cement and Concrete Research* 26(2): 295-307.
8. Kim, K. Y., H. G. Park, and J. S. Jeon, 2005. Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(10): 61-71 (in Korean).
9. Kim, Y. I., K. S. Yeon, and Y. S. Kim, 2010. The compaction and compressive strength properties of CSG material reinforced polypropylene fiber. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 52(4): 73-81 (in Korean).
10. Kim, Y. I., and Y. S. Kim, 2010. Unconfined compressive strength and micro-structure properties of CSG materials due to specimen size. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 52(4): 93-101 (in Korean).
11. Kong, K. Y., H. T. Kim, J. K. Ro, and B. M. Hong, 2001. Unconfined Compressive Strength of Fiber-reinforced Cemented Sands by Fiber Reinforcement Form. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 23(8): 159-169 (in Korean).
12. Kumar, A., B. S. Walia, and J. Mohan, 2006. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials* 20: 1063-1068.
13. Park, S. S., 2011. Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. *Construction and Building Materials* 25: 1134-1138.
14. Park, S. S., Y. S. Kim, S. G. Choi, and S. E. Shin, 2008. Unconfined compressive strength of cemented sand reinforced with short fibers. *The KSCE Journal of Civil Engineering* 28(4C): 213-220 (in Korean).
15. Song, C. S., and S. Y. Lim, 2002. Mechanical characteristics of reinforced soil(Ⅱ). *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech.* 5(6): 37-42 (in Korean).
16. Sung, C. Y., 2004. Permeability of polypropylene fiber reinforced soil concrete pavement material. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 46(6): 13-19 (in Korean).
17. Sung, C. Y., and Y. I. Kim, 2003. Development of polypropylene fiber reinforced environmental friendly pavement material for farm road. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 46(1): 35-40 (in Korean).
18. Tang, C. S., B. Shi, F. Chan, and Y. Chi, 2007. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilzed clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 25: 194-202.
19. Tang, C. S., B. Shi, and L. Z. Zhao, 2010. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes* 28: 54-62.
20. Yeon, K. S., Y. I. Kim, S. H. Hyun, and Y. S. Kim, 2010. Compressive strength properties and Freezing and Thawing Resistance of of CSG materials. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 52(1): 51-59 (in Korean).
21. Zaimoglu, A. S., 2010. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polylropylene fibers. *Cold Regions Science and Technology* 60: 63-65.