

섬유의 보강 형태에 따른 섬유-시멘트 혼합토의 일축압축강도특성

Unconfined Compressive Strength of Fiber-reinforced Cemented Sands by Fiber Reinforcement Form

박 성 식¹ Park, Sung-Sik
김 영 수² Kim, Young-Su
이 중 천³ Lee, Jong-Cheon

Abstract

The behavior of fiber-reinforced cemented sands (FRCS) was studied to improve a brittle failure mode observed in cemented sands. Nak-dong River sand was mixed with ordinary Portland cement and a Polyvinyl alcohol (PVA) fiber. A PVA fiber is widely used in concrete and cement reinforcement. It has a good adhesive property to cement and a specific gravity of 1.3. A PVA fiber has a diameter of 0.1 mm that is thicker than general PVA fiber for reinforced cement. Clean Nak-dong River sand, cement and fiber at optimum water content were compacted in 5 layers giving 55 blows per layer. They were cured for 7 days. Cemented sands with a cement/sand ratio of 4% were fiber-reinforced at different locations and tested for unconfined compression tests. The effect of fiber reinforcement form and distribution on strength was investigated. A specimen with evenly distributed fiber showed two times more strength than not-evenly reinforced specimen. The strength of fiber-reinforced cemented sands increases as fiber reinforcement ratio increases. A fully reinforced specimen was 1.5 times stronger than a specimen reinforced at only middle part. FRCS behavior was controlled not only by a dosage of fiber but also by fiber distribution methods or fiber types.

요 지

취성적인 파괴를 보이는 시멘트 혼합토의 역학적 특성을 개선하기 위하여 단섬유를 사용한 섬유-시멘트 혼합토에 관한 연구를 수행하였다. 낙동강 유역에서 채취한 모래, 보통포틀랜드시멘트 그리고 최근 콘크리트와 시멘트 보강재로 많이 사용되고 있는 폴리비닐알코올(PVA) 섬유를 사용하였다. PVA 섬유는 시멘트와 접착성이 매우 우수하며 비중이 1.3으로 물보다 약간 큰 것이 특징이며 시멘트 보강재로 사용되고 있는 일반 PVA 섬유보다는 다소 직경이 큰 0.1mm의 PVA 섬유를 사용하였다. 깨끗한 낙동강 모래에 시멘트와 섬유를 최적함수비로 잘 섞은 후 5층으로 나누어 층당 55회 다짐하여 공시체를 만든 후 7일간 양생시켰다. 모든 공시체의 시멘트 혼합율은 4%로 동일하지만 섬유의 혼합위치를 다르게 시료를 제작하여 일축압축시험을 실시하였다. 강도시험에서 섬유의 보강 형태와 위치에 따른 일축압축강도의 특성을 비교하였으며, 동일한 양의 섬유가 균일하게 보강된 경우의 일축압축강도가 그렇지 않은 경우보다 약 2배 증가하였다. 층당 섬유 혼합율이 동일할 경우 섬유 보강율이 증가함에 따라 일축압축강도도 증가하였으며, 전층이 보강되었을 때의 일축압축강도는 중간층만 보강된 경우보다 1.5배 이상 강도가 증가하였다. 섬유-시멘트 혼합토 거동에서 섬유의 혼합율과 섬유가 골고루 잘 분산되도록 하는 방법 또는 분산이 용이한 섬유를 선택하는 것이 중요하였다.

Keywords : Cemented sand, Distribution, Fiber-reinforced, Unconfined compression test

1 정회원, 원광대학교 공과대학 토목환경도시공학부 전임강사 (Member, Full-time Lecturer, Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., Wonkwang Univ., sspark@wku.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 경북대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng. Kyungpook National Univ.)

3 정회원, 원광대학교 공과대학 토목환경도시공학부 겸임교수 (Member, Adjunct Prof., Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., Wonkwang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

흙은 철근 및 콘크리트와 같은 다른 토목재료와 달리 쉽게 분리될 수 있으며 외력을 받았을 때 흙입자 상호간에 쉽게 변위가 발생한다. 이와 같은 흙의 단점을 보완하기 위하여 흙이나 모래에 시멘트 또는 석고와 같은 고결 유발제를 섞은 혼합토에 관한 연구가 국내에서 활발히 진행 중이다(송창섭과 임성운, 2002a; 김기영 등, 2005; 이우진 등, 2006; 정우섭, 2007). 시멘트 또는 석고 혼합토는 흙 입자간의 고결현상으로 건조시 흙의 체적변화를 감소시키거나 강도를 증가시키므로 기초지반 및 연약지반의 보강, 옹벽 뒷채움재, 도로 및 철도의 성토노반, 기층재료 등으로 사용할 수 있다. 대부분의 연구자들이 흙에 소량의 포틀랜드시멘트를 혼합하여 시료를 제작하였으며, 일축압축시험, 실내 CBR 시험, 삼축시험 등의 실내시험을 이용하여 혼합토의 강도 및 투수성 등의 공학적 성질을 연구하였다(Saxena and Lastrico, 1978; Clough et. al., 1981; Acar and El-Tahir, 1986; Abdulla and Kioussis, 1997). 시멘트 혼합토는 시멘트 혼합율에 따라 흙의 압축강도를 상당히 증가시킬 수 있으나, 소성변형이 거의 일어나지 않고 급작스런 파괴(취성파괴)가 발생하는 단점이 있다. 삼축압축시험에서 시멘트 혼합토의 전단거동은 파괴점에 도달한 이후에 시멘트로 인한 고결을 소실하므로 일반모래와 유사한 잔류강도 및 거동을 보인다.

연약지반 위에 성토를 할 경우와 옹벽 뒷채움시에 일정한 방향으로 토목섬유를 근입하면 흙과 토목섬유 경계면에서 발생하는 마찰력으로 수평변위가 억제되어 흙의 지지력을 증진시킨다. 이와 같은 띠모양으로 흙에 삽입된 토목섬유는 다짐이 불량할 경우 근입방향을 따라 미끄러짐 현상으로 인한 파괴면이 형성될 수 있다. 따라서 일정한 방향을 가지지 않고 무작위로 섞은 단섬유(staple fiber)를 이용하는 경우가 점차 늘어나고 있다. 조삼덕과 김진만(1995), 송창섭과 임성운(2002b), 목영진 등(2005)은 점토나 사질토의 강도 및 인장력 증가 그리고 균열을 감소시키기 위하여 짧은 합성섬유(폴리프로필렌, 폴리에스테르)를 혼합한 섬유 혼합토에 관한 연구를 수행하였다. Maher와 Ho(1994)는 섬유 혼합율, 전단면에 대한 섬유방향, 섬유강도 등이 섬유 혼합토 강도에 크게 영향을 미친다는 연구결과를 발표하였다. 단섬유를 이용한 섬유 혼합토는 주로 사질토에 자연섬유(갈대) 혹은 폴리프로필렌과 같은 인공섬유를 혼합한 연구

가 주로 이루어져 왔다. 이와 같은 단섬유형태의 합성섬유를 추가적으로 시멘트 혼합토에 혼합하면 섬유의 인장력이 발휘되어 앞서 언급한 시멘트 혼합토의 취성 파괴를 방지하거나 보강토체의 지지력을 증가시킬 수 있다.

흙의 압축강도와 인장력을 모두 증가시킬 수 있도록 섬유와 시멘트를 사질토에 혼합한 섬유-시멘트 혼합토에 관한 연구는 국외에서 몇몇 연구자(Consoli et al., 1998; Maher and Ho, 1993)에 의하여 시작되었다. 그 이전까지는 시멘트 혼합토와 섬유 혼합토에 관한 연구가 각각 분리되어 이루어져 왔다. 1993년 Maher와 Ho(1993)가 처음으로 오타와모래에 시멘트를 혼합한 후에 무작위로 유리섬유를 섞어 정적 및 동적 삼축시험을 실시하였다. 섬유량이 많을수록 섬유길이가 길수록 압축 및 인장강도가 증가하였으며, 섬유를 혼합함으로써 액상화에 대한 저항력도 증가하였다. Consoli 등(1998)은 실트질 모래에 비중이 2.62인 유리섬유와 포틀랜드시멘트를 사용하였다. 코팅을 하지 않은 일반 유리섬유는 시멘트와 같은 알카리성에 약하며, 물보다 2배 이상 무거운 유리섬유를 물-시멘트와 슬러리 형태로 재성형할 경우 유리섬유는 물-시멘트와 분리현상이 발생한다.

본 논문에서는 일축압축시험을 이용하여 시멘트 혼합토와 섬유 혼합토의 장점을 모두 활용한 섬유-시멘트 혼합토에 관한 연구를 수행하였다. 점토 또는 자연상태의 흙에 시멘트와 물을 혼합한 소일시멘트보다는 공시체 제작이 용이한 깨끗한 모래를 주재료로 10% 미만의 소량의 시멘트와 섬유를 섞은 혼합토에 관한 연구에 중점을 두었다. 현장에서 대량으로 섬유를 혼합할 경우 섬유가 골고루 분산되지 않고 어느 한 부분으로 집중될 수 있다. 이와 관련하여 시멘트 혼합토에서 섬유의 보강 정도나 위치에 따른 혼합토의 강도에 관한 연구는 보고되지 않았다. 본 논문에서는 동일한 시멘트 혼합율을 가진 시멘트 혼합토에서 섬유의 보강율과 혼합율에 따른 일축압축강도의 영향을 분석하였다.

2. 실험에 사용한 재료

2.1 모래와 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트 혼합토의 원재료는 낙동강유역의 성주지역에서 채취하였으며 성주모래라 부른다. 현장에서 약 1m 정도의 표토를 제거한 후 채취한 모재료를 실험실로 운반한 후에 점토성분을 제거하기

위하여 200번체를 이용하여 물로 씻어 모래주위의 점토 성분을 모두 제거한 후에 다시 건조하였다. 건조된 모래를 다시 10번 체로 통과시켜 직경이 2mm 이하인 시료를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 성주모래의 입도분포곡선은 그림 1과 같으며, 표 1은 X선을 이용한 성분분석(XRF)결과를 나타내고 있다. 이 분석결과에 의하면 성주모래는 실리카(이산화규소)가 76%이상인 실리카질 모래이며, 전자현미경사진은 그림 2와 같다.

윤길립과 김병탁(2006)은 굴패각을 모래의 고화재로 사용하기 위한 고화능평가를 연구하였다. Ismail 등(2002)은 탄산칼슘을 주성분으로 하는 파쇄성이 높은 모래에 석회, 석고, 포틀랜드시멘트와 같은 고화재의 종류에 따른 혼합토의 거동을 비교하였다. Ismail 등(2002)

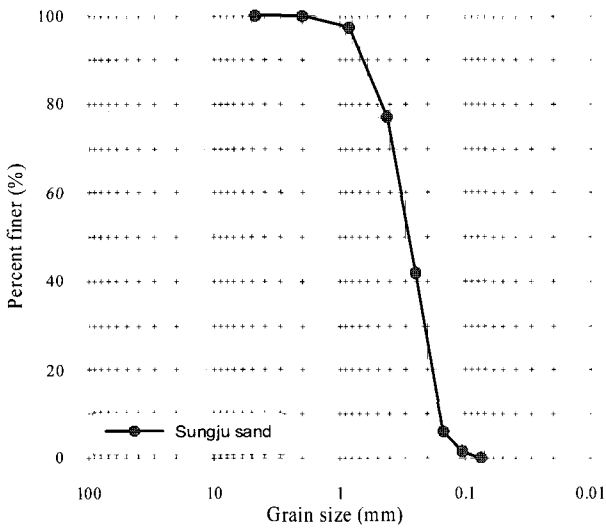


그림 1. 성주모래의 입도분포곡선

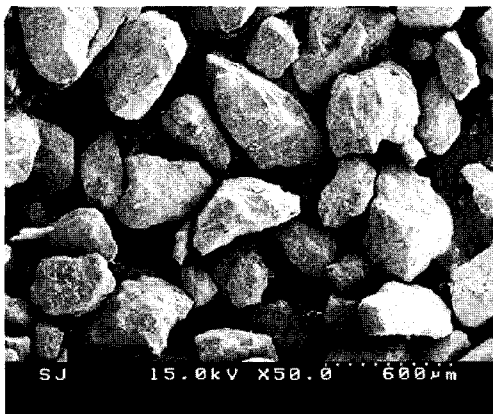


그림 2. 성주모래의 전자현미경사진

의 연구결과에 의하면 석회와 석고를 사용한 시료는 취성파괴를 보이며 그 이후에 체적이 더욱 감소하는 경향을 보였으나, 포틀랜드시멘트를 사용한 혼합토는 연성파괴를 보이며 파괴 이후에 경화현상과 체적이 팽창하는 경향을 보였다. 이와 같이 고화재의 종류에 따른 거동의 차이는 공시체에 사용한 부서지기 쉬운 모래와 고화재 사이의 강도차이 때문인 것으로 판단된다. 시멘트 혼합토에 대한 다양한 연구결과를 비롯하여 시료의 혼합성이나 현장 적용성 등을 고려해 볼 때 구입이 용이한 시멘트가 고화재로 적합하였다. 본 실험에서는 비중 3.15인 국내 S사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 건조 모래에 대한 시멘트 혼합율은 4%로 모든 시료가 동일하다. 정우섭(2007)은 성주모래에 시멘트 혼합율을 달리하여 한국산업규격 KS F2312 흙의 다짐 시험 방법(이하 ‘표준다짐방법’이라함)중에서 D다짐방법을 이용하여 각각의 시멘트 혼합율에 대한 최대건조밀도와 최적함수비를 구하였다. 시멘트 혼합율이 4%일 경우 성주모래의 최적함수비는 약 14%이며 그 결과는 그림 3과 같다.

2.2 섬유

섬유 혼합토 연구에서 가장 많이 사용된 섬유는 폴리

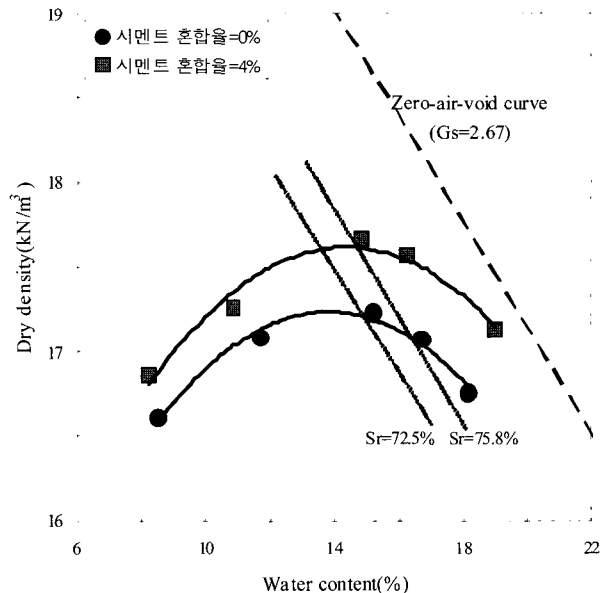


그림 3. 성주모래의 다짐특성(정우섭, 2007)

표 1. 성주모래의 성분분석 결과

Classification	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂
Content (%)	76.62	12.37	1.65	4.19	2.88	1.98	-	-	0.28

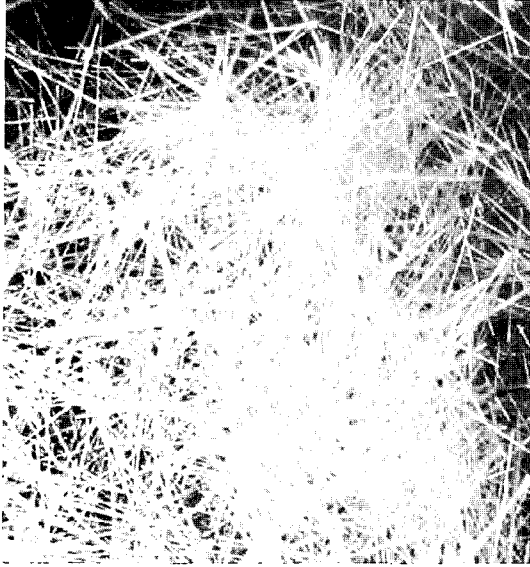


그림 4. PVA 섬유 RECS100L(직경 0.1mm)

프로필렌 섬유이다. 이 섬유는 물보다 가벼우며 알칼리성에 약하며 내구성이 부족하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 최근 시멘트 보강재로 가장 많이 사용되고 있는 폴리비닐알코올(Polyvinyl alcohol, PVA) 섬유를 사용하였으며, 그림 4는 제품명이 RECS100L이라는 PVA 섬유 사진이다. 최수명(2002)은 PVA 섬유의 특징 및 제조 방법에 대하여 자세히 소개하였으며, 그 특징은 다음과 같다. 여러 합성섬유 중에서 토목재료로 PVA 섬유는 고강도, 고탄성률의 우수한 물리적 특성을 가지며 이외에도 열안정성, 내약품성, 내후성 등이 우수하기 때문에 산업용 섬유로서 널리 사용되고 있다. PVA 섬유는 나일론, 폴리에스터에 비해 건열수축률이 낮아서 우수한 형태안정성을 나타내며, 열안정성이 좋은 것으로 잘 알려진 레이온보다 더욱 안정하다. 특히 시멘트와의 접착성 그리고 내알칼리성이 높기 때문에 콘크리트 및 시멘트 보강재로 아주 적합하다.

3. 시료성형방법 및 PVA 섬유의 분산도실험

모래에 섬유를 혼합할 경우 간단하게 손으로 섞는 방법이 있다. 섬유와 모래를 섞을 때 두 재료 사이의 이질감으로 연구자들이 많은 어려움을 겪었으며, 효율적인 섬유혼합방법은 아직 개발되지 않았다. 박영근(1999)은 Maher와 Ho(1994)가 사용한 장비와 유사한 기계를 이용하여 섬유와 모래를 혼합하였다. 이 기계는 실험실용 소형 콘크리트믹서와 유사하나 하나의 축을 따라 연속적으로 이어지는 나선형의 날을 장착하고 있다.

본 실험에서는 손을 이용하는 방법과 전기 교반기를 이용하는 방법 등 시행착오적으로 섬유와 모래의 혼합 방법을 달리하여 적절한 방법을 찾았다. 먼저 섬유를 건조한 모래와 혼합해 보거나, 섬유를 물에 넣고 분산시킨 후에 건조한 모래와 섞어 보았다. 최종적으로 시멘트와 모래를 최적 함수비인 14%로 비빈 후에 섬유를 뿌리고 다시 손으로 비벼서 재료를 혼합하였다. 비교적 굵은 섬유를 사용하였으므로 섬유혼합과정에서 발생하는 섬유의 뭉침이나 쏠림현상은 적었으며, 이로 인한 시멘트 혼합토의 강도에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 섬유와 섬유를 분리하는 작업을 모래와 섞는 과정에서 반복적으로 실시하였다.

3.1 공시체 제작방법

현장에서 채취한 흙과 시멘트를 혼합한 흙 시멘트 공시체를 제작할 경우 KS F2329를 이용한다. 하지만 깨끗한 모래를 소량의 시멘트와 혼합할 경우에 적절한 다짐시험 방법은 제시되지 않았다. 박영근(1999)은 Ladd(1978)의 저다짐(under compaction) 개념을 이용하여 섬유 혼합토의 공시체를 제작하였으나 밑부분의 다짐도가 불량하여 표준다짐방법을 이용하였다. 본 실험에서도 표준다짐방법을 이용하였으며, 직경 70mm, 높이 140mm의 시료를 5층으로 나누어 각층 사이의 분리가 생기지 않고 충분한 다짐이 되도록 제작하였다. 그림 5과 같이 양쪽으로 분리할 수 있는 몰드, 표준다짐방법과 동일한 다짐 에너지를 가하기 위한 낙하추 및 낙하시 안내역할을 하는 높이 300mm의 몰드 연결기를 이용하였다.

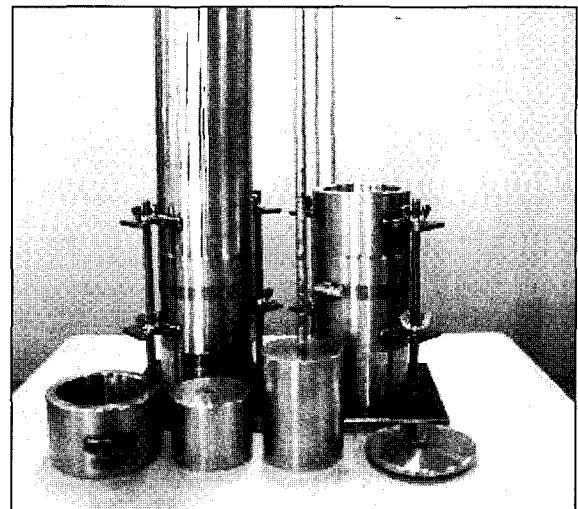


그림 5. 공시체 제작에 사용한 몰드와 햄머

공시체 제작에 사용한 건조모래에 대한 시멘트와 섬유의 비율은 다음과 같이 정의하였다. 시멘트 혼합율 ρ_c 는 건조모래를 기준으로 다음과 같이 정의하였다.

$$\rho_c = \frac{W_c}{W_s} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 W_c 는 시멘트의 무게이며, W_s 는 건조모래의 무게이다. 본 실험에 사용한 시멘트 혼합율 ρ_c 는 4%이다.

공시체에 포함된 섬유량은 두 가지 방법 즉 섬유 혼합율로 표현하였다. 건조모래와 공시체 전체에 사용한 섬유 무게를 기준으로 정의한 섬유 혼합율은 ρ_{n1} 이라 하며, 건조모래와 각층에 사용한 섬유 무게를 기준으로 정의한 섬유 혼합율은 ρ_{n2} 이다. 이들 섬유 혼합율은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\rho_{n1} = \frac{W_{f1}}{W_s} \times 100(\%) \quad \rho_{n2} = \frac{W_{f2}}{W_s} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서 W_{f1} 은 공시체 전체에 사용한 섬유 무게이며, W_{f2} 는 각층에 사용한 섬유 무게이다. 실험은 공시체 전체에 사용한 섬유량이 일정한 경우(ρ_{n1} 이 일정)와 각층에 사용한 섬유량이 일정한 경우(ρ_{n2} 가 일정)로 나누어 실시하였다. 따라서 실험은 ρ_{n1} 이 1%인 경우(T시리즈)와 ρ_{n2} 가 0.2%인(E시리즈) 두 종류로 구성되었다. T시리즈는 공시체 전체에 대한 섬유 혼합율 ρ_{n1} 이 1%로 동일하나, 섬유를 혼합한 각층에 대한 섬유 혼합율 ρ_{n2} 는 섬유 보강층의 숫자에 따라 1%(1개층 보강), 0.5%(2개층 보강), 0.33%(3개층 보강), 0.2%(5개층 보강)로 각각 다르다. 하지만 E시리즈는 섬유를 포함한 각층에 대한 섬유 혼합율 ρ_{n2} 는 0.2%로 모두 동일하나, 공시체 전체에 대한 섬유 혼합율 ρ_{n1} 는 0.2%(1개층 보강), 0.4%(2개층 보강), 0.6%(3개층 보강), 1%(5개층 보강)로 각각 다르다. T시리즈와 E시리즈에서 섬유를 포함하지 않은 층의 ρ_{n2} 는 0%이다.

공시체 제작 후 양생에 따른 건조수축 및 균열은 섬유의 인장효과로 억제됨으로 몰드를 바로 분리하였으며, 약 25°C 정도로 7일동안 항온습윤양생을 실시하였다. 송창섭과 임성운(2002a) 그리고 정우섭(2007)에 따르면 시멘트함량이 6% 미만일 경우에는 양생기간에 관계없이 7일 양생강도가 최대강도와 유사하였다. 따라서 7일간 양생시킨 후에 일축압축시험을 실시하여, 섬유의 보강 및 혼합 정도가 일축압축강도에 미치는 영향을 연

구하였다. 이에 앞서 섬유종류에 따른 섬유의 분산도 혹은 모래와 비빔성이 좋은 섬유를 선택하기 위하여 섬유의 분산 정도를 비교하였다.

3.2 PVA 섬유의 분산효과비교

본 실험에서는 직경, 길이를 비롯한 인장강도가 각각 다른 PVA 섬유를 이용하여 어떤 섬유가 모래와 혼합이 잘 되는지를 비교하였다. 비교방법은 일축압축시험 공시체를 제작한 후에 이를 다시 5층으로 잘라서 각층에 포함된 섬유량이 일정한지를 비교하였다. 공시체에 사용한 시멘트와 섬유 혼합율은 각각 4%와 1%이며 앞 절에서 설명한 대로 손으로 재료를 혼합하였다. 표 2와 같이 성질이 다른 세 종류의 섬유를 서로 비교하였으며 이 섬유는 일본에서 수입된 PVA 섬유이다. 본 실험에서는 각기 다른 섬유를 이용하여 어떤 섬유가 시멘트 혼합토에 가장 골고루 분산되는지를 조사하였다. 각층에 포함된 섬유의 양을 계산하기 위하여 모래와 시멘트로부터 섬유를 분리해야 한다. 공시체를 물에 침전시킬 경우 섬유의 비중이 약 1.3이므로 물에 뜨지 않아 모래와 분리가 불가능하다. 본 논문에서는 물보다 훨씬 무거우며 비중이 약 1.6인 사염화탄소(Carbon Tetrachloride/carbon chloride)를 사용하여 섬유를 부유시킴으로 모래로부터 분리하려 하였으나, 액체 속에서 섬유와 모래의 영김현상으로 분리가 잘 이루어지지 않았다. 따라서 물로 시멘트를 씻어낸 다음 모래와 섬유를 건조시킨 후에 모래로부터 섬유를 집게로 하나씩 분리하였다.

각층에서 사용된 모래에서 분리된 섬유의 양을 공시체 높이에 따라 섬유와 건조모래의 비로 세 종류의 섬유에 대하여 그림 6에 도시하였다. 공시체 전체에 대한 섬유비는 1%로 제작하였으나 각층의 분리과정에서 약간의 흡이 유실되어 REC15의 경우는 각층에 포함된 섬유비의 평균이 1%보다 약간 높게 나왔다. 본 실험에서 얻어진 결과는 그림 6(b)에 나타난 것처럼 직경이 약 0.1mm인 RECS100L이 가장 고르게 배치됨을 알 수 있었다. REC15는 시멘트 보강재로 주로 사용되는 섬유이나 이와

표 2. 폴리비닐알코올 섬유의 종류 및 특징

섬유 종류	직경(mm)	섬유길이(mm)	인장강도(kgf/mm ²)
REC15	0.04	12	160
RECS100L	0.10	12	110
RFS400	0.20	18	100

같은 섬유를 모래와 혼합할 경우 섬유자체가 너무 가볍고 점성이 없는 모래에 잘 분산되지 않아 본 연구에는 적합하지 않았다. 하지만 직경이 약 0.1mm인 RECS100L 섬유는 비교적 일정하게 모래에 잘 분산되었다. 따라서 비빔성 및 분산성이 제일 좋은 것으로 판단된 RECS100L 섬유를 이용하여 섬유-시멘트 혼합토를 제작하였다.

4. 섬유의 보강 형태에 따른 일축압축강도의 영향

섬유의 보강 형태에 따른 일축압축강도의 영향을 분석하기 위하여 본 실험에서는 표 3에 나타난 것처럼 섬유의 보강 위치를 달리하여 공시체를 만든 후 일축압축 시험을 실시하였다. 일축압축시험 재하속도는 1%/min 즉 분당 1.4mm씩 재하하였다. 섬유의 보강 위치는 그림

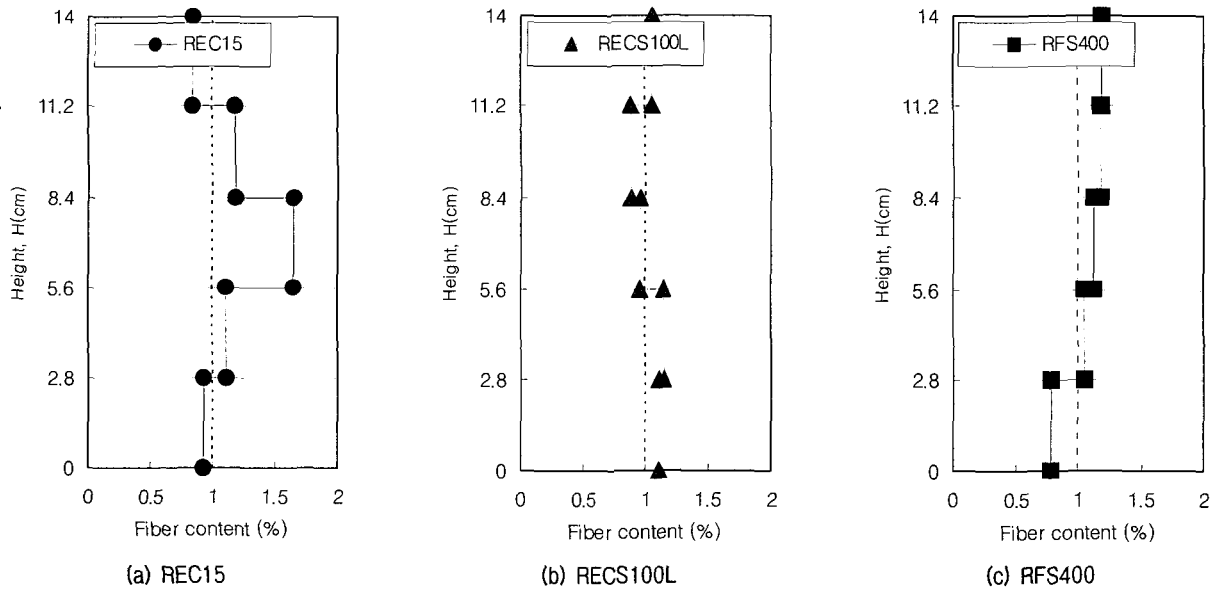


그림 6. PVA 섬유 종류에 따른 높이별 섬유의 분산도

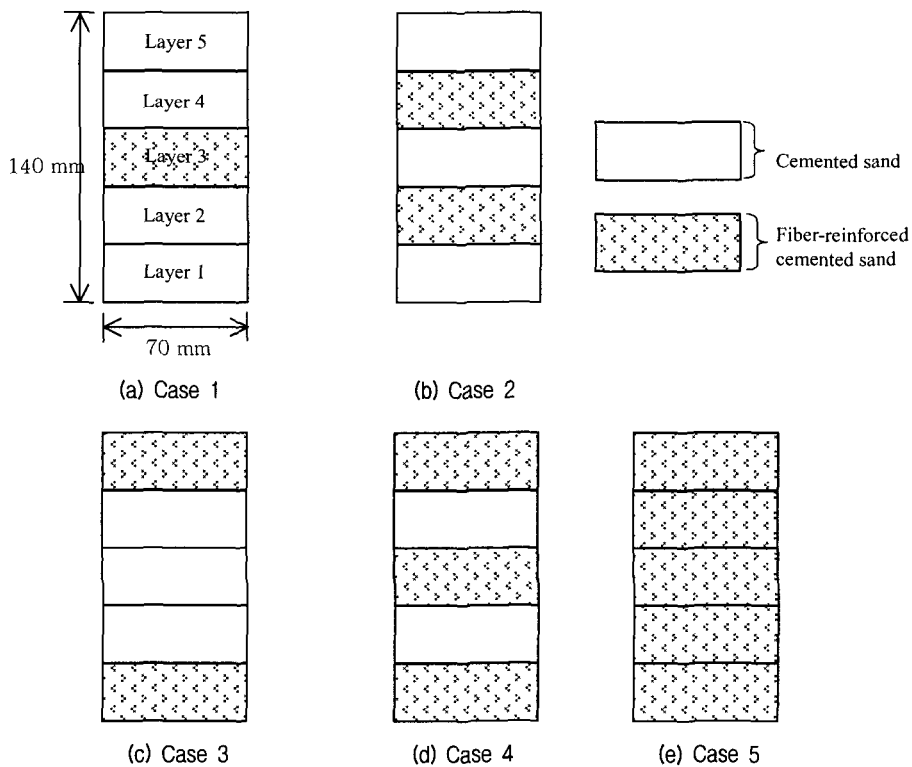


그림 7. 섬유의 보강층이 다른 공시체 제작방법

표 3. 일축압축시험 종류 및 결과

종류	섬유 보강층의 분포상황	섬유가 포함된 층에 대한 각층당 섬유비, ρ_{f2}	시료 전체에 대한 섬유비, ρ_{f1}	일축압축강도 (kPa)	할선탄성계수 (MPa)
No Fiber	섬유없음	섬유없음	섬유없음	440	37
T-1	Layer 3	1%	1%	609	31
T-2	Layer 2, 4	0.5%	1%	880	37
T-3	Layer 1, 5	0.5%	1%	481	34
T-4	Layer 1, 3, 5	0.33%	1%	741	35
T-5	All layers	0.2%	1%	894	40
E-1	Layer 3	0.2%	0.2%	530	47
E-2	Layer 2, 4	0.2%	0.4%	609	45
E-3	Layer 1, 5	0.2%	0.4%	461	37
E-4	Layer 1, 3, 5	0.2%	0.6%	696	35
E-5	All layers	0.2%	1%	857	41

7(a)에 표시한 것처럼 공시체를 5등분하여 가장 아랫부분인 1층을 기준으로 윗방향으로 2, 3, 4, 5층으로 구분하였으며, 무늬가 있는 부분은 섬유를 혼합한 층을 나타낸다. 그림 7에 나타난 것처럼 모든 층에 섬유를 보강한 경우(Case 5)를 포함하여 다섯 경우로 나누었다. Case 1은 섬유를 공시체의 중간부분에만 보강하였으며(3층만 보강), Case 4는 양끝단과 중간부분을 보강하였으며(1, 3, 5층 보강), 이와 반대의 경우는 Case 2이다(2, 4층 보강). Case 3은 보강되지 않은 층이 연속적으로 3회 이어지며 양끝단만을 보강하였다(1, 5층 보강). 섬유의 보강유무에 따른 강도의 영향을 비교하기 위하여 섬유가 전혀 포함되지 않은 공시체도 제작하였다. 섬유가 혼합되어 보강된 정도에 따른 강도의 영향을 나타내기 위하여 섬유 보강율 a_f 를 다음과 같이 정의하였다.

$$a_f = \frac{A_f}{A} \quad (3)$$

여기서 A_f 는 그림 7에서 무늬가 있는 부분으로 섬유가 혼합된 층의 면적을 나타내며, A 는 공시체 전체의 면적이다.

4.1 T시리즈의 일축압축시험결과

그림 8은 섬유가 보강되지 않은 경우와 T시리즈의 결과를 나타내고 있다. 섬유없이 시멘트만 혼합한 경우(그림 8에 No fiber로 표시)에 시료가 축변형률 약 1.3%에서 일축압축강도 440kPa를 보였다. 양끝단만을 섬유로 보강하였을 경우(T-3)에는 공시체면적의 60%에 해당하

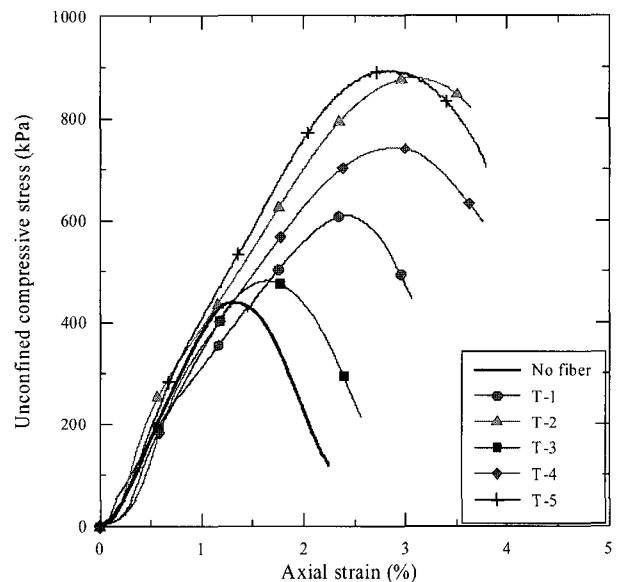


그림 8. 섬유가 없는 공시체와 T시리즈의 일축압축시험결과

는 보강되지 않은 층이 중간부분으로 집중되어 있으므로 일축압축강도는 섬유가 보강되지 않은 경우와 크게 차이점을 나타내지 않았다. T-2는 두 층만 보강을 하였으나 전층을 보강한 T-5와 유사한 거동을 보였다. 전층에 섬유가 보강된 경우에는 축변형률이 약 3%일 때 가장 큰 일축압축강도인 894kPa를 나타내고 있다. T-2와 양끝단만을 보강한 경우(T-3)를 제외하면 섬유 보강율(a_f)이 크질수록 일축압축강도가 증가하며, 최대강도에 도달하는 축변형률도 증가하였다. 그러나 T시리즈는 공시체 전체에 포함된 섬유 혼합율(ρ_{f1})은 1%로 동일하지만 각층에 포함된 섬유 혼합율(ρ_{f2})은 각기 다르므로 섬유가 보강된 층의 범위 즉 보강율을 가지고 직접 비교하는 것은 어렵다. 공시체 전체에 동일한 양의 섬유가 사

용되었지만 섬유를 골고루 보강시킨 경우(T-5)가 섬유를 양단부로 집중시킨 경우(T-3)보다 강도가 약 2배 증가하였다.

그림 8의 응력-변형률 곡선은 초기의 낮은 응력구간과 그 이후에 급격한 응력증가와 함께 최대강도에 이르는 부분으로 구분된다. 초기부분은 일축압축시험에서 양단에 있는 섬유 혹은 표층부분의 다짐부족으로 발생하였다. 최대강도의 1/2지점에서 할선탄성계수(Secant Elastic Modulus)(이하 ‘탄성계수’라함)를 계산하였으며, 표 3에 나타난 것처럼 탄성계수는 대략 31~40MPa사이의 값(평균값은 35MPa)을 가진다.

그림 9는 섬유가 없는 공시체가 파괴된 이후의 모습을 나타내고 있다. 전층에 걸쳐서 크랙이 발생하였다. 그림 10(e)와 같이 전층에 섬유를 보강하였을 경우에는 그림 9와 같은 크랙은 발생하지 않았다. 그림 10(a)부터 10(d)까지 보는 것처럼 섬유가 포함되지 않은 층에서 먼저 크랙이 발생하여 파괴되었다.

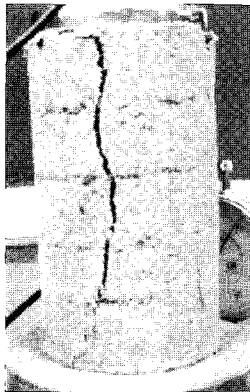
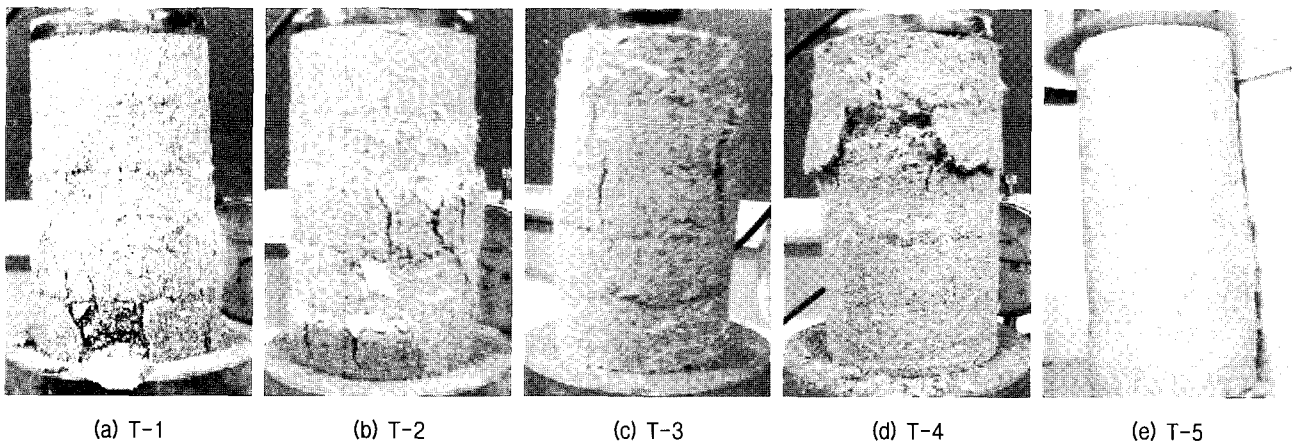


그림 9. 섬유가 없는 시멘트 혼합토의 파괴 이후의 모습

4.2 E시리즈의 일축압축시험결과

그림 11은 섬유가 보강되지 않은 경우와 E시리즈의 결과를 나타내고 있다. E시리즈는 섬유의 보강 위치가 T시리즈와 동일하나, 보강된 층의 섬유비는 표 3의 세 번째 칼럼에 나타난 것처럼 작다. 응력-변형률 관계는 T시리즈와 아주 유사한 경향을 보였으나, 최대강도와 그때의 축변형률이 T시리즈보다 다소 작았다. 양끝단만 보강된 E-3은 T-3처럼 섬유가 보강되지 않은 경우와 유사한 강도를 보였다. 각층에 포함된 섬유량은 0.2%로 동일하므로 섬유의 보강 정도에 따른 강도의 변화를 비교하였다. E-3과 같이 보강되지 않은 중간부분으로 파괴가 집중되는 경우는 비교대상에서 제외하였다. 섬유가 보강된 층의 개수에 따라 섬유 보강율 a 는 0.2(1개층 보강), 0.4(2개층 보강), 0.6(3개층 보강), 1.0(전층 보강)이다. 그림 12는 무보강시의 일축압축강도를 기준으로 섬유 보강율에 따른 일축압축강도의 증가율을 나타내고 있으며, E시리즈의 섬유 보강율이 증가할수록 강도도 그림 12의 실선처럼 점차적으로 증가하였다. 섬유가 전층에 걸쳐 골고루 분산된 경우 즉 섬유 보강율이 1.0일 경우 일축압축강도는 섬유 보강층이 없는 경우보다 2배정도 증가하였다.

E시리즈의 탄성계수는 35~47MPa사이의 값(평균값은 41MPa)을 가지며 시멘트 혼합율이 동일한 T시리즈보다는 약간 크게 나타났다. 각각의 시리즈에서 동일한 보강 정도를 가진 경우(예: T-1과 E-1)에 층당 섬유 혼합율이 작은 E시리즈의 탄성계수가 전반적으로 크게 나타났다. 하지만 섬유가 보강되지 않은 경우의 탄성계수는 T시리즈와 E시리즈의 중간 값인 37MPa를 나타내므로



(a) T-1

(b) T-2

(c) T-3

(d) T-4

(e) T-5

그림 10. 섬유로 보강된 시멘트 혼합토를 사용한 T시리즈 시험의 파괴 이후의 모습

탄성계수는 섬유유 보강유무와 관계없이 비교적 일정함을 알 수 있었다. 그림 13은 E시리즈의 파괴형상을

나타내고 있으며, T시리즈와 유사하게 섬유유 보강되지 않은 층에서 크랙이 많이 발생하였다.

4.3 T시리즈와 E시리즈의 비교

그림 14부터 그림 18는 섬유보강조건은 동일하나 각층에 포함된 섬유 혼합율이 다른 T시리즈와 E시리즈를 서로 비교하였다. Case 5(그림 18)의 경우는 전층에 동일한 양의 섬유유 보강된 공시체이므로 유사한 거동을 보였다. 2층과 4층을 보강한 Case 2의 경우(그림 15)는 섬유량의 증가로 일축압축강도가 상당히 증가하였으며, 그 시점에서의 축변형률도 2%에서 3%로 크게 증가하였다. 즉 T-2는 E-2보다 섬유유량이 2.5배 많으며 강도가 약 50%이상 증가하였다. 이와는 대조적으로 T-1과 E-1, T-3과 E-3, T-4와 E-4는 각층에 포함된 섬유량의 증가로 발생하는 강도증가는 아주 작았다. 따라서 섬유유 보강 형태에 따라 섬유 혼합율이 강도증가에 미치는 영향은 다를 수 있다. 일축압축강도가 발현되는 축변형률은 각층당 섬유유량이 많은 T시리즈의 경우가 상당히 크게 나타났는데, 이는 섬유유량의 증가로 인하여 혼합토 속에서 인장된 섬유유에 의한 혼합토의 수평변형 구속효과가 증가하기 때문으로 판단된다. 동일한 보강 형태를 가진 경우 공시체 제작에 포함된 섬유 혼합율이 일정량 이상이면 일축압축강도에 미치는 영향은 작아지고 최대강도에 도달하는 축변형률은 섬유 혼합율 증가에 따라 지속적으로 증가함을 알았다. 섬유-시멘트 혼합토에서 섬유 보강에 따른 강도 증가는 섬유 혼합율과 보강율이 복합적으로 강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

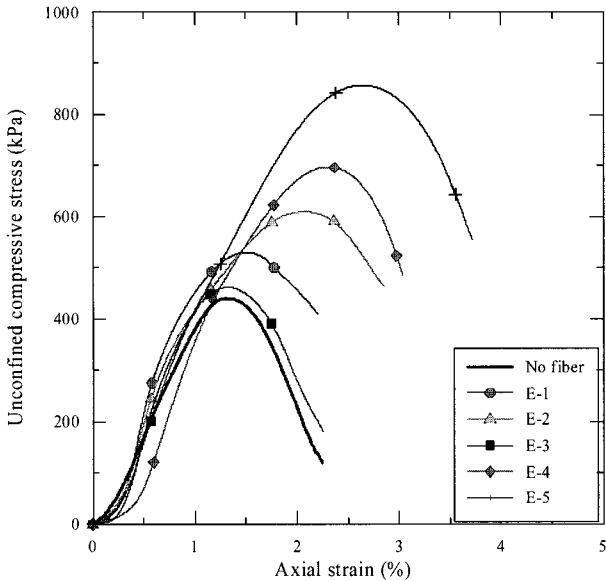


그림 11. 섬유유가 없는 공시체와 E시리즈의 일축압축시험결과

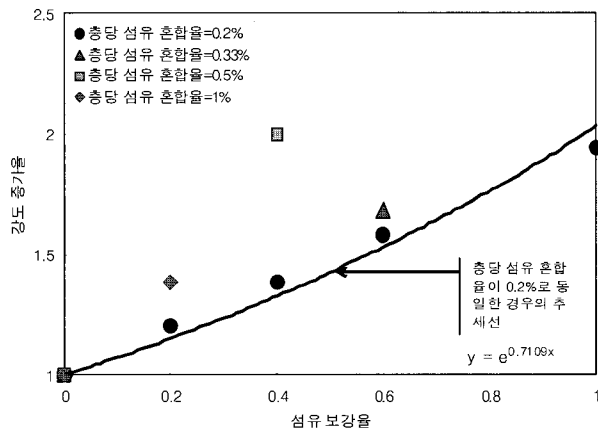
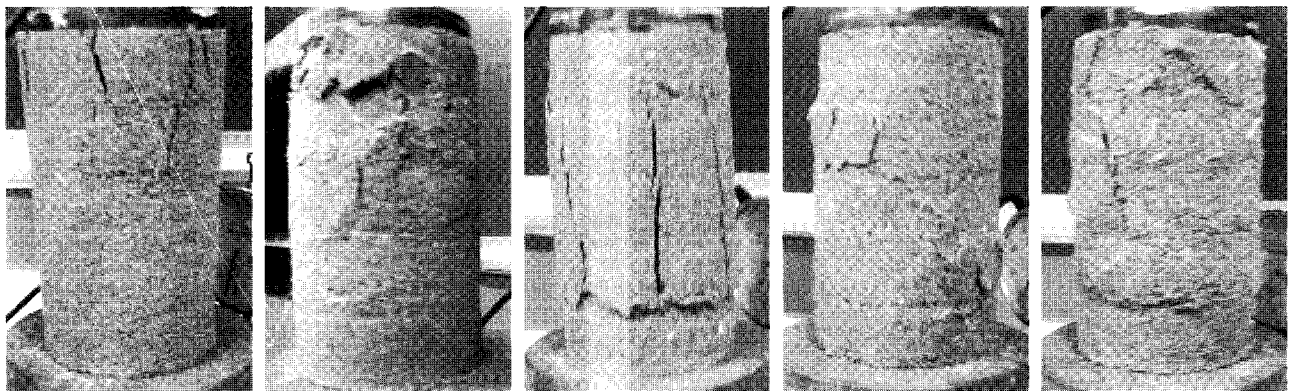


그림 12. 섬유 보강율 및 층당 섬유 혼합율에 따른 강도증가율



(a) E-1 (b) E-2 (c) E-3 (d) E-4 (e) E-5

그림 13. 섬유유 보강된 시멘트 혼합토를 사용한 E시리즈 실험의 파괴 이후의 모습

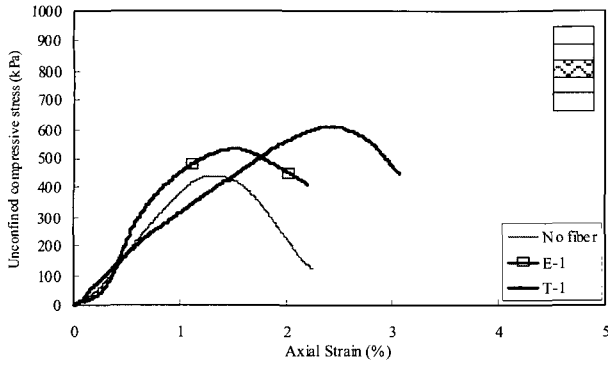


그림 14. E-1과 T-1의 일축압축응력-변형률 곡선

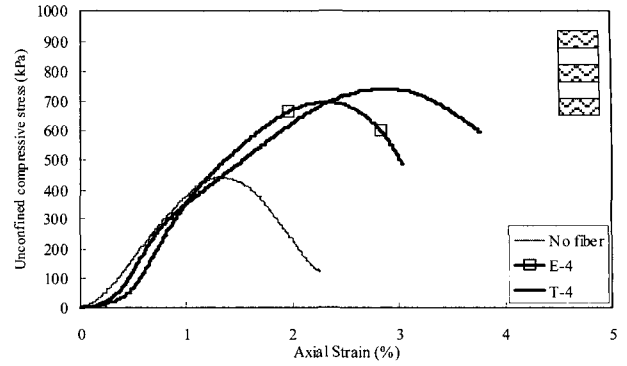


그림 17. E-4과 T-4의 일축압축응력-변형률 곡선

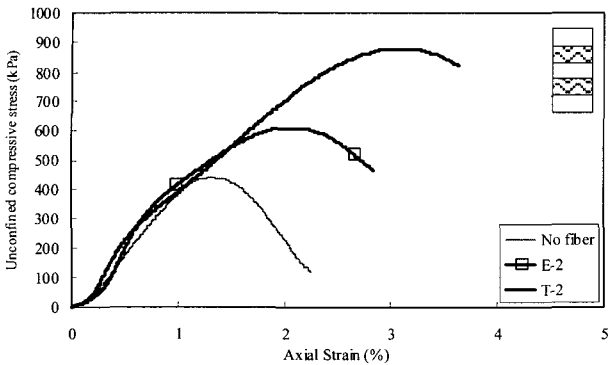


그림 15. E-2과 T-2의 일축압축응력-변형률 곡선

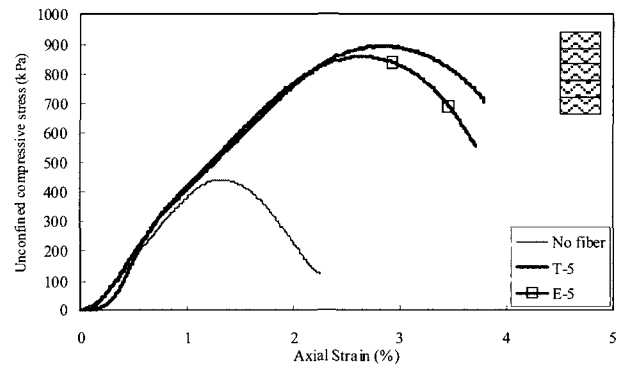


그림 18. E-5과 T-5의 일축압축응력-변형률 곡선

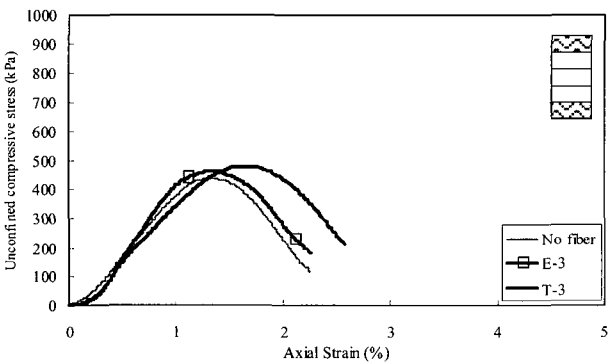


그림 16. E-3과 T-3의 일축압축응력-변형률 곡선

5. 결론

본 논문에서는 흙의 압축강도를 증가시키는 시멘트 혼합토와 흙의 인장력을 증가시키는 섬유 혼합토의 장점을 이용한 섬유-시멘트 혼합토에 관한 연구를 수행하였다. 모래를 주재료로 하여 실내시험용으로 제작하는 섬유-시멘트 혼합토에서 손으로 섬유를 섞는 방법이 가장 효과적으로 섬유를 골고루 분산시켰다. 시멘트 보강재로 주로 사용되는 PVA 섬유보다는 다소 직경이 큰 0.1mm 정도의 PVA 섬유가 모래와 잘 섞이며 섬유-시멘트 혼합토 공시체 제작에 적합하였다. 동일한 시멘트

혼합율을 가진 공시체에서 섬유의 보강 형태와 위치를 달리하여 일축압축시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공시체 전체에 대한 섬유 혼합율이 동일한 경우(T 시리즈), 섬유가 골고루 분산된 경우의 일축압축강도가 894kPa로 그렇지 않은 경우의 481kPa에 비하여 약 2배정도 증가하였다.
- (2) 섬유 보강층당 섬유 혼합율이 동일한 경우(E 시리즈), 섬유 보강율이 증가함에 따라 일축압축강도도 증가하였으며, 전층이 보강되었을 때의 일축압축강도는 857kPa로 중간층만 보강된 경우의 530kPa보다 1.5배 이상 강도가 증가하였다.
- (3) 섬유 보강 형태가 동일한 경우(예: T-1과 E-1), 각 층에 섬유가 0.2% 이상 보강이 되면 강도 증가는 섬유 보강 형태에 따라 차이가 있지만 일반적으로 작았다. 하지만 최대강도에 도달하는 축변형률은 섬유 보강 형태에 관계없이 섬유 혼합율의 증가에 따라 0.5~1%정도 증가하였다.
- (4) 섬유 혼합율에 관계없이 섬유 보강이 공시체의 양단부로 몰릴 경우 섬유로 인한 보강효과는 일축압

축강도를 기준으로 미미하였다.

- (5) 시멘트 혼합율이 4%인 섬유-시멘트 혼합토의 탄성계수는 섬유 혼합율에 따라 크게 영향을 받지 않았다.

감사의 글

일축압축시험장비사용을 허락해 주신 연 엔지니어링에 감사드립니다. 실험을 도와준 경북대학교 건설공학부의 최선규와 박장호에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김기영, 박한규, 전제성 (2005), Cemented sand and gravel 재료의 강도특성, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권 10호, pp.61-71.
2. 목영진, 정성용, 박철수 (2005), 여러 가지 입도분포를 갖는 섬유 혼합토의 동적변형특성, *한국도로학회 논문집*, 7(1), pp.39-47.
3. 박영곤 (1999), *섬유혼합토의 파괴예측 모델의 개발과 비배수 강도 특성 분석*, 박사학위논문, 서울대학교.
4. 송창섭, 임성윤 (2002a), 보강 혼합토의 역학적 특성(1)-시멘트 혼합토, *한국환경복원녹화기술학회지*, 5(6), pp.9-13.
5. 송창섭, 임성윤 (2002b), 보강 혼합토의 역학적 특성(2)-섬유 혼합토, *한국환경복원녹화기술학회지*, 5(6), pp.37-42.
6. 이우진, 이문주, 최성근, 홍성진 (2006), 고결에 따른 모래의 비배수 전단거동 변화, *한국지반공학회 논문집*, 제22권 4호, pp.85-94.
7. 윤길립, 김병탁 (2006), 표층/심층혼합처리용 굴폐각 고화제의 고화성능 평가, *한국지반공학회 논문집*, 22(11), pp.143-149.
8. 정우섭 (2007), *낙동강 하상모래의 시멘트 혼합율에 따른 강도특성*, 박사학위논문, 경북대학교.
9. 조삼덕, 김진만 (1995), 섬유혼합 보강토의 공학적 특성에 관한 실험연구, *한국지반공학회지*, 11(2), 107-120.
10. 최수명 (2002), 폴리비닐알코올 섬유의 이해와 제조기술, *섬유기술과 산업*, 제6권 제1/2호, pp.83-95.
11. Abdulla, A. A. and Kioussis, P. D. (1997), "Behavior of cemented sands-I. Testing", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21, pp.533-547.
12. Acar, Y.B. and El-Tahir, E. A. (1986), "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), pp.1001-1005.
13. Clough, G.W. et al. (1981), "Cemented sands under static loading", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(GT6), pp. 799-817.
14. Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., and Ulbrich, L.A. (1998), "Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(12), pp. 1211-1214.
15. Ismail, M. A., Joer, H.A., Sim, W.H. and Randolph, M.F. (2002), "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), pp.520-529.
16. Ladd, R.S. (1978), "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
17. Maher, M.H. and Ho, Y.C. (1993), "Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads", *Geotechnical Testing Journal*, 16(3), pp.330-338.
18. Maher, M.H. and Ho, Y.C. (1994), "Mechanical properties of Kaolinite/fiber soil composite", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8), pp.1381-1393.
19. Saxena, S. K. and Lastrico, R.M. (1978), "Static properties of lightly cemented sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(GT12), pp.1449-1464.

(접수일자 2007. 5. 4, 심사완료일 2007. 8. 17)