

헤어섬유로 보강된 모래흙의 인장강도 특성 분석

Analysis of the Tensile Strength Characteristics of Sand Soil Reinforced by Hair Fiber

손 무 락[†] · 이 재 용¹⁾

Moorak Son · Jaeyong Lee

Received: November 20th, 2015; Revised: December 3rd, 2015; Accepted: January 11th, 2016

ABSTRACT : This study was carried out with a view to increasing the tensile strength of sand soil and examined the characteristics of the tensile strength of sand soil reinforced by hair fiber which is environmentally friendly. The study investigated the change of the tensile strength and the stress-strain relationship varying the length of hair fiber, the amount of hair fiber, the amount of cement, and curing days. The test results indicated that the tensile strength increased significantly with hair fiber mixed. In addition, the sand soil mixed with hair fiber had larger displacement at failure. Based on the test results, it is appeared that the environmentally friendly hair fiber could be utilized practically to increase the tensile strength of sand soil in the future.

Keywords : Hair fiber, Sand soil, Cement, Tensile strength, Stress-strain

요 지 : 본 연구는 모래흙의 인장강도 증진에 관한 것으로서 친환경 헤어섬유를 혼입한 모래흙의 인장강도 특성을 파악하였다. 본 연구에서는 헤어섬유의 길이 및 혼입률, 시멘트의 첨가량, 양생기간을 변화시키며 헤어섬유 혼입 모래흙의 인장강도를 조사하였으며, 또한 응력-변형률 특성을 파악하였다. 시험결과, 헤어섬유 혼입 모래흙은 상당한 인장강도 증진을 보였다. 뿐만 아니라, 헤어섬유 혼입 모래흙은 파괴 시 더 큰 변위를 겪을 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 토대로 향후 모래흙의 인장강도 증진을 위해 친환경 재료인 헤어섬유를 실무적으로 활용해도 될 것으로 판단된다.

주요어 : 헤어섬유, 모래흙, 시멘트, 인장강도, 응력-변형률

1. 서 론

다양한 시설물(건물, 철도, 도로, 항만시설, 방파제 등)들을 설치하는 건설공사가 국내·외 곳곳에서 수행되고 있다. 이와 같은 다양한 시설물들이 안전하게 설치되기 위해서는 시설물들을 지지하고 있는 지반이 압축하중(대부분의 경우) 및 인장하중(사면, 도로성토, 제방성토 등) 조건에서 충분한 저항력을 가지고서 시설물의 자중과 기타 추가되는 설하중, 풍하중 등의 다양한 하중을 지지할 수 있어야 한다. 그렇지 못한 경우 지반강도를 증진하는 방법을 모색하여야 하는데 모래지반의 강도를 증진시키는 개량공법으로서 진동추를 이용하여 모래를 다지는 진동다짐공법, 무거운 추를 높은 곳에서 자유 낙하시켜 지반에 충격에너지를 가하는 동다짐공법, 흙의 간극 내에 액체 또는 분말형의 고결재를 주입하거나 혼합시켜 흙의 강도를 증진시키는 약액주입공법, 모래다짐말뚝공법, 시멘트계나 석회계 등의 고화제를 지반에 주

입하거나 혼합시켜 지반을 요구하는 강도를 증가시키는 고결공법 등이 있다. 특히 점토 및 모래지반 개량에 자주 사용되는 고결공법은 투입되는 시멘트계나 석회계 등의 고화제량이 증가할수록 공사비 또한 크게 증가하는 문제점이 있었다. 이를 해소하기 위해서 다양한 섬유혼합 보강토에 관한 연구가 수행되었다(Yang, 1972; Gray & Ohashi, 1983; Freitag, 1986; Maher & Ho, 1993; Maher & Ho, 1994; Cho & Kim, 1995; Consoil et al., 1998; Wang, 1999; Kim et al., 2002; Yetimoglu et al., 2005; Cai et al., 2006; Park et al., 2007; Tang et al., 2007; Consoli et al., 2009; Diambra et al., 2010; Consoli et al., 2012; Kutanaei & Choobbasti, 2015). 하지만 사용된 대부분의 섬유가 합성섬유(나일론, PVA, 강섬유 등)를 활용한 연구로서 여러 가지 환경오염에 대한 우려와 섬유 혼입 단가에 대한 문제들이 존재해 왔다.

본 연구에서는 상기와 같은 여러 가지 문제점을 줄이면서 모래지반의 강도를 증가시키기 위해 친환경 재료인 사람

† Department of Civil Engineering, Daegu University (Corresponding Author : mson@daegu.ac.kr)

1) Department of Civil Engineering, Daegu University

이나 동물의 헤어섬유를 재활용하는 것으로서 지반강도증진을 위해 투입되는 시멘트계나 석회계 등의 고화제량을 줄여 공사비를 절감할 뿐만 아니라 쓰레기 매립 및 처리에 들어가는 경비 또한 절감하는 효과를 가져 올 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 동일연구자에 의해 기존에 발표한(Son et al., 2015) “헤어섬유로 보강된 점토흙의 강도 특성 분석” 논문과 쌍을 이루는 연구로서 본 연구에서는 모래흙에 대한 헤어섬유 혼입 강도 특성을 자세하게 조사하고 분석하였다.

기존 국내·외 지반개량에 대한 연구들을 조사한 결과 본 연구자에 의해 발표된 점토흙에 대한 기존논문 외에 아직까지 지반개량을 목적으로 헤어섬유를 활용한 구체적 연구사례는 없었으며, 본 연구를 통하여 모래흙의 지반개량을 위한 헤어섬유 활용연구가 좀 더 활성화될 수 있기를 기대하는 바이다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 사용된 모래흙은 주문진 표준사이며, 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 본 연구를 위해 준비된 헤어섬유 인장시험 방법 및 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 헤어섬유는 파마 및 매직 등의 처

Table 1. Physical properties of materials

Material	Unit weight (t/m ³)	Specific gravity
Sand (Jumunjin standard sand)	1.5	2.6
Portland cement	1.5	3.05
Hair fiber	1.1~1.6	1.1~1.6



Fig. 1. Tensile test of hair fibers and its results (Son et al., 2015)

리에 의해서 인장강도가 크게 감소하는 특징을 나타냈으며 본 연구에서는 이와 같은 헤어섬유를 제외하고 실험을 수행하였다.

2.2 공시체 제작

본 연구에서는 흙시멘트 압축 및 휨강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법(KS F 2329, 2012)에 의거하여 공시체를 제작하고 시험을 실시하였다. 헤어섬유를 혼입한 I형 모양의 인장강도 공시체 시편제작을 위해서 먼저 물에 헤어섬유를 넣어 혼합한 후, 시멘트 분말을 첨가하여 헤어섬유, 시멘트, 물로 구성된 혼합물을 만들었다. 그런 다음 모래시료와 혼합물을 섞어 10분간 교반하였다. 충분한 교반을 위하여 스크레이퍼를 이용해서 용기에 부착된 시료를 가운데로 모아주고 재교반하는 과정을 반복하였다. 교반된 헤어섬유 혼입 모래혼합물을 몰드에 충전하였고, 각 층당 다짐봉으로 25회씩 다짐하며 공시체를 제작하였다. 공시체는 재령별(7, 14, 28일)로 3개씩 제작하였으며 항온 항습기를 통하여 온도 20±3°C, 습도 95%에서 양생하였다.

헤어섬유 길이 및 혼입량에 따른 인장강도 특성을 파악하기 위하여 헤어섬유 길이는 5mm 및 20mm의 두 가지 조건을 고려하였고, 섬유 혼입량은 모래의 중량 대비 0.1% 및 0.5%의 조건을 고려하였다. 혼입 헤어섬유의 길이 및 양은 기존 여러 연구에서 사용한 다양한 섬유길이 및 양을 고려하여 결정하였다. 사용한 시멘트의 양은 모래흙의 단위체적(m³)당 100, 200(실제 지반개량 현장에서 일반적으로 사용되는 시멘트의 양), 300kgf의 세 가지 조건을 고려하였으며 물-시멘트비(W/C)는 80%를 적용하였다. 본 연구에 사용된 배합비와 시험조건을 Table 2에 정리하여 나타내었으며 Fig. 2는 준비된 재료들을 보여주고 있다.

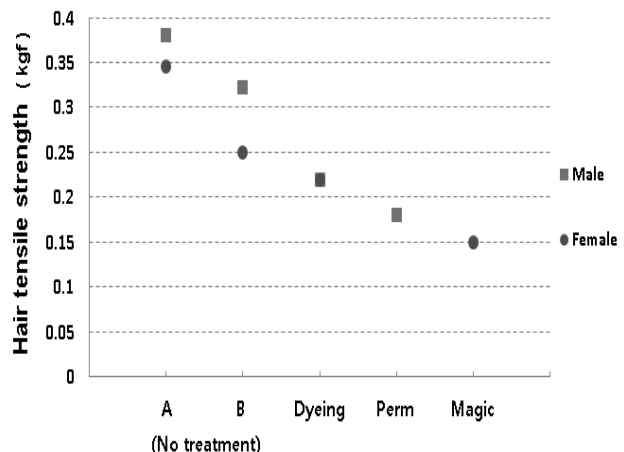


Table 2. Mixing proportion of materials for each specimen (unit : g)

Cases	Sand	Cement	Water	Hair fiber
SH (0)	400	26.8 (C = 100 kgf/m ³) : 6.7% of sand weight 53.2 (C = 200 kgf/m ³) : 13.3% of sand weight 80.0 (C = 300 kgf/m ³) : 20.0% of sand weight	21.5 42.6 64 W/C = 80%	-
SH (5_0.1)				0.4
SH (5_0.5)				2
SH (20_0.1)				0.4
SH (20_0.5)				2

* S : Sand, H : Hair fiber, (5_0.1) : (Hair fiber length (5 mm)_Hair fiber content (0.1%))

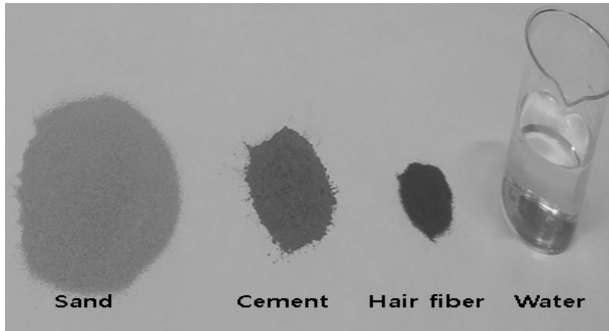


Fig. 2. Prepared materials for test specimens

2.3 실험 방법

직접인장강도 시험은 I형 공시체를 제작한 후 하중전달 장치를 공시체에 체결한 후 시험을 실시하였다. Fig. 3은 관련 시험과정을 보여주고 있으며, 작용하중의 재하속도는 분당 1mm로 변위제어를 실시하였다. 작용 인장하중 및 변위는 컴퓨터에 연결된 하중계 및 변위계를 통해 파악하였으며 시험은 공시체가 인장 절단될 때까지 수행되었다. 공시체의 재령별 각 3개의 시편에 대하여 인장강도시험을 실시하였으며 그 평균값을 결과로써 사용하였다.

3. 실험결과 분석

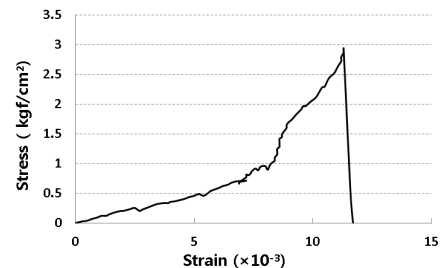
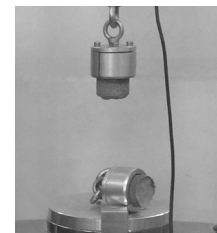
Fig. 4~6은 모래의 중량 대비 시멘트 첨가량 6.7%(100 kgf/m³), 13.3%(200kgf/m³), 20%(300kgf/m³)를 사용한 헤어섬유 혼입 모래흙에 대한 재령별 직접인장강도 변화를 각각 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시멘트 첨가량이 6.7% 및 13.3%에서는 재령일에 관계없이 헤어섬유가 혼입됨으로써 전반적으로 강도 증진이 발생하였다. 특히 헤어섬유 혼입량 및 길이(0.1%, 20mm)의 경우에서 헤어섬유가 혼입되지 않은 경우보다 가장 큰 강도증가를 나타냈으며 강도증가율(재령별 헤어섬유 혼입강도/헤어섬유 미혼입 강도 × 100%)은 시멘트 첨가량이 6.7%인 경우 재령 28일에서 약 31%로 나타났고 시멘트 첨가량이 13.3%(200kgf/m³)인 경우에는 재령 28일에서 약 49%로 매우 큰 강도증가율을 나타냈다. 하지만 시멘트 첨가량이 보다 많은 20%인 경우에는 강도 증진이 나타나지 않았으며 헤어섬유 혼입량이 0.5%로 많은 경우에는 오히려 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 시멘트 첨가량이 더욱 많아짐에 따라 헤어섬유로 인한 인장강도 증가 효과가 시멘트량 증가에 따른 인장강도증가 효과에 비해 상대적으로 작았기 때문



(a) Test process



(b) I-type specimen



(c) After failure (tensile test)

Fig. 3. Uniaxial direct tensile tests and their results

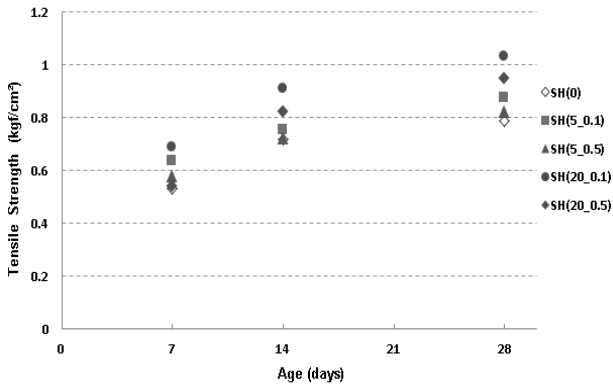


Fig. 4. Tensile strength with age (Cement : 100 kgf/m³)

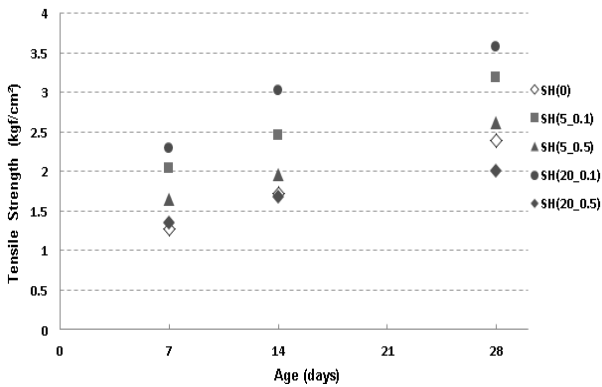


Fig. 5. Tensile strength with age (Cement : 200 kgf/m³)

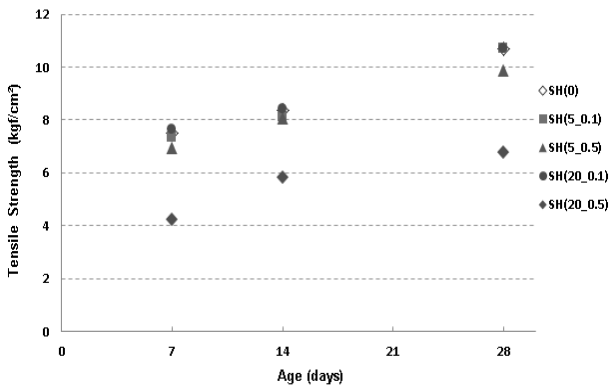


Fig. 6. Tensile strength with age (Cement : 300 kgf/m³)

인 것으로 판단된다. 또한 혼입된 헤어섬유량이 상대적으로 많은 경우 인장강도의 감소는 헤어섬유의 국부적인 뭉침 현상 등으로 인해 하중작용에 대한 취약한 면이 발생하였기 때문이라는 것을 실험결과를 통해 확인하였다. Fig. 7은 헤어섬유 미혼입 모래흙의 시멘트 첨가량에 따른 재령별 직접인장강도 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시멘트 첨가량이 증가할수록 직접인장강도 또한 재령에 관계없이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 시멘트 첨가량에 따른 재령별 직접인장강도의 직접적인 비교를 보여주고 있다. 시멘트 첨가량 100kgf/m³

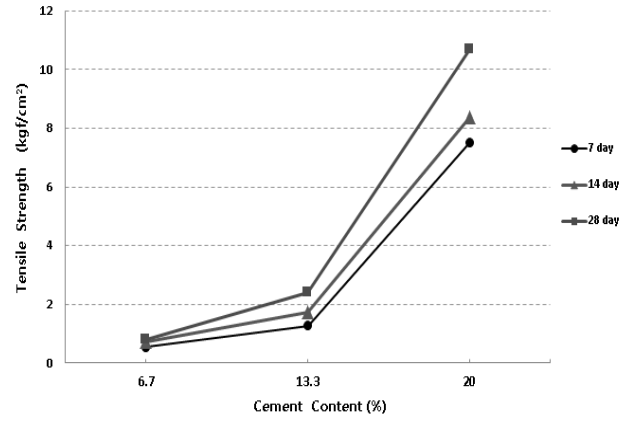
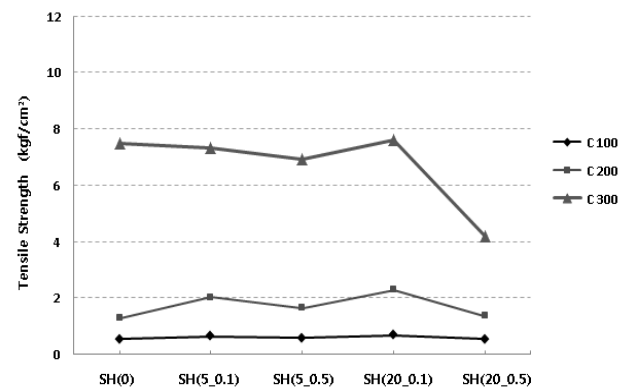
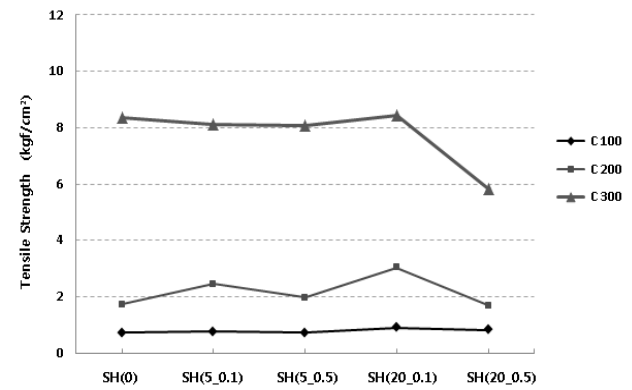


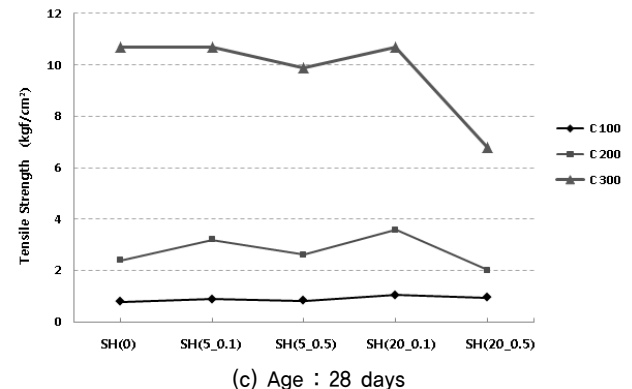
Fig. 7. Tensile strength specimens with no hair fiber for different cement content



(a) Age : 7 days



(b) Age : 14 days



(c) Age : 28 days

Fig. 8. Change of tensile strength for different cement content

를 기준으로 시멘트 첨가량이 200kg/m³ 및 300kg/m³로 증가함에 따라 직접인장강도도 증가한다는 것을 알 수 있다. 특히 시멘트 첨가량이 200kg/m³에서 300kg/m³로 증가함에 따라 인장강도가 급격히 증가한다는 것을 알 수 있다. 헤어섬유의 혼입량 및 길이에 따른 변화가 특히 시멘트 첨가량 200kg/m³에서 가장 크게 나타났으며 헤어섬유 혼입량 및 길이(0.1%, 20mm)에서 재령일에 관계없이 가장 큰 강도증가를 나타냈다. 또한 시멘트 첨가량이 300kg/m³로 증가하면 헤어섬유의 효과가 나타나지 않고 오히려 헤어섬유 혼입량이 0.5%로 증가하면 강도가 저하된다는 것을 알 수 있다.

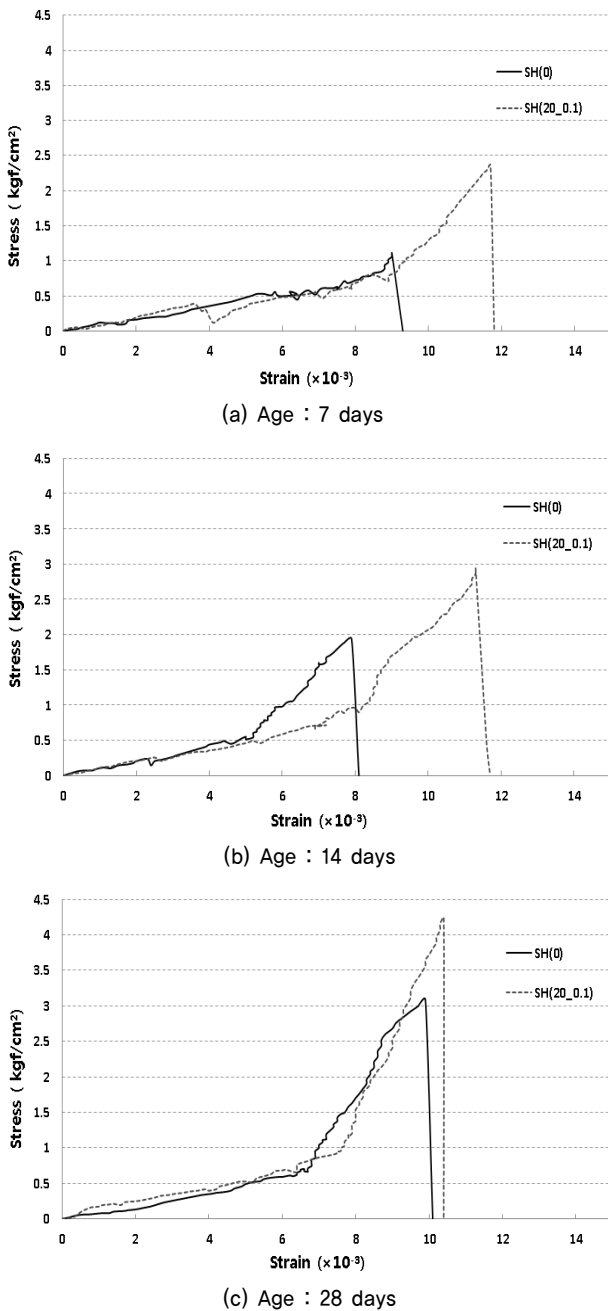


Fig. 9. Stress-strain relationship for tensile tests

Fig. 9는 시멘트 첨가량 200kg/m³를 사용한 헤어섬유(20mm, 0.1%) 혼입모래에 대한 재령별 인장응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. 헤어섬유가 혼입된 모래흙의 응력-변형률 곡선이 더 큰 첨두강도를 나타냈으며 파괴 시점까지 보다 큰 변위를 허용하는 것으로 나타났다. 하지만 재령일이 28일 정도 되면 공시체의 강도 증진 영향으로 인해 헤어섬유가 강도 증진에는 큰 영향을 미치지나 연성거동에 대한 영향은 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 모래시편의 직접인장강도 시험 후 파괴된 공시체의 헤어섬유 혼입별 모습을 보여주고 있다. 헤어섬유의 길이가 길어지고 혼입량이 증가함에 따라 헤어섬유 분포의 균질도가 저감한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 헤어섬유 혼입량이 증가함에 따라 헤어섬유의 국부적인 밀집현상 등이 발생할 수 있고 이로 인해 하중작용에 대한 취약한 면의 존재 가능성이 높아져 인장강도가 감소할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 친환경 물질이면서 폐기물로서 처리되는 헤어섬유를 재활용하여 모래지반의 인장강도를 증진시키는 등 헤어섬유 재료의 산업이용을 위한 기반기술을 구축하고 그 가능성을 제시함에 목표가 있으며, 본 연구를 통해 얻은 실험결과 및 기술적 의의를 정리하면 다음과 같다.

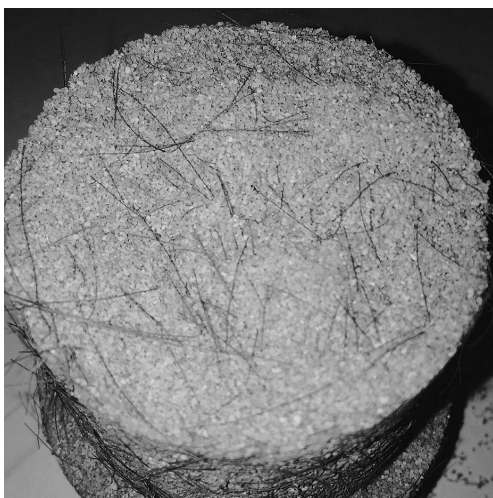
- (1) 본 연구에 대한 실험결과 친환경 헤어섬유를 모래지반의 인장강도 증진을 위하여 이용할 시 일정 조건에 따라 강도를 크게 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 특히 첨가되는 시멘트의 양과 사용되는 헤어섬유의 길이 및 혼입량에 따라 서로 다른 강도 특성을 나타냈다.
- (2) 인장강도 증진에 대한 헤어섬유의 영향은 헤어섬유 길이가 5mm보다는 20mm에서 헤어섬유 혼입량은 0.5%보다는 0.1%에서 보다 큰 강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 헤어섬유가 너무 짧으면 모래 및 시멘트와의 결합 효과가 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단되며, 또한 헤어섬유 혼입량이 너무 많으면 뭉침 현상 등으로 인해 하중작용에 대한 취약한 면이 발생하였기 때문이라는 것을 실험결과를 통해 확인하였다.
- (3) 모래흙에 있어서 헤어섬유 혼입에 따른 직접인장강도의 증진은 시멘트 첨가량을 200kg/m³로 하고 헤어섬유의 길이를 20mm, 헤어섬유 혼입량을 0.1%로 하였을 경우 헤어섬유 미혼입 대비 가장 효과가 좋게 나타났다(재



(a) SH (5 mm, 0.1%)



(b) SH (5 mm, 0.5%)



(c) SH (20 mm, 0.1%)



(d) SH (20 mm, 0.5%)

Fig. 10. Views on failure planes after tensile tests

령 28일에서 49% 강도 증진). 다시 말해 적절한 길이 및 양의 헤어섬유가 시멘트와 혼합된 모래흙 속에서 인장 재료로서의 역할을 충분히 발휘하여 인장강도를 크게 증가시킨 것으로 나타났다. 따라서 향후 모래흙 속에 헤어섬유와 같은 보강재를 혼합할 경우 섬유가 발휘하는 인장저항으로 인하여 인장강도의 큰 증가를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

- (4) 실험결과 헤어섬유를 모래지반의 강도 증진을 위하여 이용할 시 일정 조건에 따라 강도를 크게 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 유연성 있는 헤어섬유의 보강재 역할 때문에 파괴가 일어나기 전까지 보다 큰 변형을 허용할 수 있는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구의 대상인 친환경 헤어섬유를 이용한 모래지반 강도 증진 기술은 국내·외적으로 아직 시도되지 않은 기술로서 본 연구를 통해 헤어섬유의 모래지반 강도 증진 및 산업이용을 위한 가능성을 파악함에 그 기술적 의의

를 찾아볼 수 있다. 현장적용성과 관련해서도 적당한 크기로 절단된 헤어섬유를 모래 및 시멘트 등과 혼합 및 교반만 하면 되므로 시공성 및 작업의 난이도에 있어서 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 더 나아가 폐기물로서 처리되는 헤어섬유를 적극적으로 재활용한다면 폐기물 처리비용 등을 절감하고 모래지반 개량에 소요되는 시멘트량을 감소시킬 수 있으며, 기존의 화학섬유 및 약품 등을 이용한 지반개량에 의한 환경오염 또한 줄일 수 있는 여러 장점이 있는 것으로 판단된다.

References

1. Cai, Y., Shi, B., Ng, W. W. and Tang, C. (2006), Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil, *Engineering Geology*, Vol. 87, pp. 230-240.
2. Cho, S. D. and Kim, J. M. (1995), The experimental study on

- engineering properties of fiber reinforced soil, *Geotechnical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 107~120 (in Korean).
3. Consoli, N. C., Bellaver Corte, M. and Festugato, L. (2012), Key parameter for tensile and compressive strength of fibre-reinforced soil-lime mixtures, *Geosynth. Int.*, Vol. 19, Issue 5, pp. 409~414.
 4. Consoil, 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*, Vol. 124, No. 12, pp. 1211~1214.
 5. Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A. and Dalla Rosa, F. (2009), Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range, *Geotext. Geomembr.*, Vol. 27, pp. 196~203.
 6. Diambra, A., Ibraime, E., Muir Wood, D. and Ruessell, A. R. (2010), Fibre reinforced sands: experiments and modelling, *Geotext. Geomembr.*, Vol. 28, pp. 238~250.
 7. Freitag, D. R. (1986), Soil randomly reinforced with fibers, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No. 8, pp. 823~826.
 8. Gray, D. H. and Ohashi, H. (1983), Mechanics of fiber reinforcement in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 335~353.
 9. Kim, W. S, Jung, D. H. and Cho, I. M. (2002), Compressive strength characteristics of PVA fiber reinforced soil-cement mixture, *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 3, pp. 147~156 (in Korean).
 10. Kutanaei, S. and Choobbasti, A. (2015), Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 10.1080/01694243.2015.1110073, pp. 1~15.
 11. KS F 2329 (2012), Testing method for making curing of soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory, Korean Standards Association (in Korean).
 12. Maher, M. and Ho, Y. (1993), Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 330~338.
 13. Maher, M. and Ho, Y. (1994), Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber soil composite, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 8, pp. 1381~1393.
 14. Park, S. S., Kim, Y. S. and Lee, J. C. (2007), Unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sands by fiber reinforcement form, *Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 8, pp. 159~169 (in Korean).
 15. Son, M., Song, H. S. and Lee, J. Y. (2015), Analysis of the strength characteristics of hair fiber reinforced clay soil, *Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 6, pp. 15~25 (in Korean).
 16. Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y. (2007), Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25, No. 3, pp. 194~202.
 17. Yang, Z. (1972), Strength and deformation characteristics of reinforced sand, Ph.d thesis. University of California, Los Angeles.
 18. Yetimoglu, T., Inanir, M. and Inanir, O. E. (2005), A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 23, No. 2, pp. 174~183.
 19. Wang, Y. (1999), Utilization of recycled carpet waste fibers for reinforcement of concrete and soil, *J. Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 38, Issue 3, pp. 533~546.