

단섬유 보강된 다짐토의 강도특성과 보강 효과

Strength Characteristics and Reinforcing Effect of Compacted Short Fiber Reinforced Clay

박 영 곤* (한국철도기술연구원) · 장 병 옥 (서울대)
Park, Young Kon · Chang, Pyoung Wuck

Abstract

A series of consolidated undrained triaxial tests for compacted short fiber reinforced clay were performed to increase the field applications, e.g. retaining wall, waste landfill, soft ground etc. of soil admixtures mixed with short fiber. Kaolin clay and three types of fiber were selected. To acquire reliable length of fibers, an auto cutter was used and a helical mixer was also used to avoid floating of fibers during mixing soil and fibers. It is found that reinforcing effect by aspect ratio and mixing ratio of short fiber decreases as confining pressure is increased. Reinforcing effect has a maximum value at the aspect ratio of 120 and the fiber content of 0.6%~1.2% and low confining pressure like 50kPa.

I. 서론

흙에 인장 저항재인 긴 막대 또는 평면적인 형태의 합성 직포, 그리드를 넣어 흙의 성질을 개선하려는 개념은 35년 전에 공학적으로 정립되어, 그 동안 흙구조물, 쓰레기 매립장의 차폐재, 연약지반 등의 보강에 널리 적용되고 있으며 그 이용이 점점 증가되고 있다.

흙의 보강에 이용되는 보강재는 형태, 조직, 상대적인 강성 등에 따라 여러 가지로 나눌 수 있지만 크게 탄성계수가 높은 보강재와 탄성계수가 낮은 보강재로 분류할 수 있는데^{5,8)}, 오늘날에는 지오텍스타일, 지오그리드, 지오셀 등 합성섬유로 제작된 탄성계수가 낮은 보강재(이하 총칭하여 토목섬유라 함)가 많이 사용되고 있다. 이와 같은 토목섬유 중 평면적인 형태이외에 선형적인 형태의 섬유(단섬유, 장섬유)를 이용하고자 하는 연구^{1,2,3,4)}가 많이 진행되고 있는데, 이는 보강된 토체 내에 잠재적 취약면이 발생하지 않는 점 등 기존의 평면적인 토목섬유에 비해 많은 이점이 있기 때문이다.

본 연구는 단섬유의 현장적용성 증대를 위한 기초연구로써, 단섬유를 점토와 혼합하여 다졌을 경우 그 강도특성과 보강효과를 살펴보고, 보강효과가 최대로 나타나는 형상비와 혼합비를 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1 재료

본 연구에 사용된 흙 시료는 하동 지역의 회백색 고령토로서 #200번 체를 모두 통과하는 실트분이 많고 소성도가 낮은 흙이다. 시료의 주요 물리적인 특성은 Table 1과 같다. 또한 흙 시료의 주요광물을 조사하기 위해 X선 회절분석(X-ray diffraction analysis)을 실시한 결과 주광물은 카올리나이트(kaolinite)이고, 해로이사이트(halloysite)가 소량으로 존재하였다.

흙과 혼합에 사용된 단섬유는 폴리에스테르 섬유 2종과 현재 콘크리트 섬유로 많이 이용되고 있는 폴리프로필렌 섬유 1종을 선정하였으며 주요 물리적 특성은 Table 2와 같다. 단섬유의 표면상태 및 형상을 파악하기 위해 전자현미경 사진을 찍었으며 그 결과는 Fig.1과 같다.

Table 1. Physical properties of Kaolinite clay

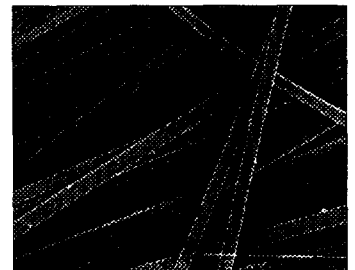
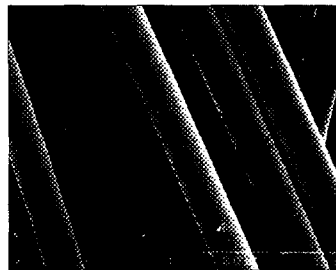
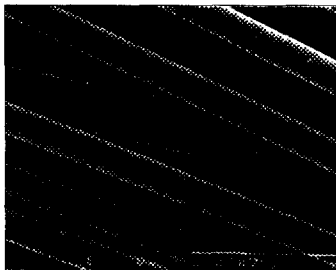
Specific gravity Gs	Liquid limit LL(%)	Plasticity index PI(%)	Grain composition		D ₅₀ (mm)	Max. dry density (kN/m ³)	OMC* (%)	USCS**
			Silt(%)	Clay(%)				
2.62	44	8	73	27	0.0095	14.1	27.7	CL

* OMC : Optimum moisture content

** USCS : Unified Soil Classification System

Table 2. Physical characteristics of fibers

Properties	Specific gravity Gr	Melting point (°C)	Diameter d(mm)	Dener (g/9000m)	Tensile strength (kPa)	Tensile modulus (kPa)	Yielding stress σ ₀ (kPa)
Polyester	1.38	240	0.20	390	5.11 × 10 ⁵	9.79 × 10 ⁶	1.30 × 10 ⁵
			0.27	711	5.10 × 10 ⁵	1.02 × 10 ⁷	1.47 × 10 ⁵
Polypropylene	0.91	164	0.084	45	2.11 × 10 ⁵	1.21 × 10 ⁶	1.13 × 10 ⁵



(a) Polyester(0.20mm, dia.)

(b) Polyester(0.27mm, dia.)

(c) Polypropylene(0.084mm, dia.)

Fig. 1. Scanning electron micrograph(SEM) of fiber (×50 magnification)

2.2 실험방법

흙의 노건조 중량에 대해 소정의 비율로 계량된 단섬유와 흙을 Fig 2의 나선형 오기로 혼합한 후 Fig. 3의 직경 50mm, 높이 100mm의 공시체 몰드에서 4층으로 표준 다짐에너지의 1/2로

다졌다. 시료의 다짐은 무보강토의 다짐시험 결과를 바탕으로 함수비는 최적함수비인 27.7%, 건조밀도 12.4kN/m^3 으로 제작하였는데, Ladd(1977)의 저다짐(undercompaction) 개념⁷⁾을 이용하지 않고 표준다짐시험 방법(KSF 2312)에 준하였다.

본 연구에서 수행된 삼축 시험의 종류를 요약하면 Table 3과 같다. Table 3에서 섬유비(aspect ratio)는 섬유의 길이에 대한 직경의 비이며, 섬유비 혼합비(fiber content)는 흙의 건조중량에 대한 섬유의 중량비로 나타내었다. 사용된 삼축시험 장치는 영국의 GDS사 제품이다.

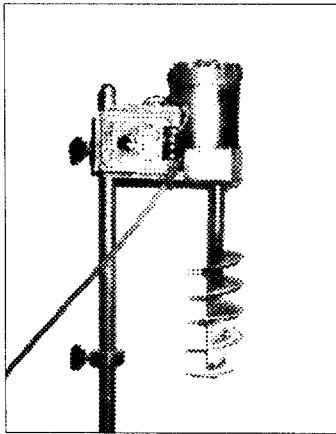


Fig. 2. Helical mixer

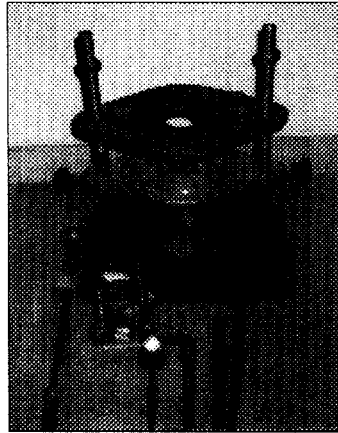


Fig. 3. Apparatus of mold and compaction set

Table 3 Schedule for triaxial test

Test No	Fiber type*	Effective confining stress (kPa)	Aspect ratio $\eta (=l/d)$	Fiber content ρ_w (%)
1-4	-	50, 100, 200, 300	-	-
5-8	PE0.20	50, 100, 200, 300	80	0.6
9-12	"	50, 100, 200, 300	120	0.6
13-16	"	50, 100, 200, 300	120	1.2
17-20	"	50, 100, 200, 300	200	0.6
21	"	100	120	0.3
22	PE0.27	100	59	0.6
23	PP	100	190	0.6

* PE0.20: Polyester fiber of 0.2mm in diameter
 PE0.27: Polyester fiber of 0.27mm in diameter
 PP : Polypropylene fiber of 0.084mm in diameter

III. 결과 및 고찰

3.1 응력-변형 거동

단섬유 보강된 다짐토의 압밀 비배수 특성을 살펴보기 위해 각 구속응력에 대한 압밀 비배

수 시험을 실시하여 응력-변형률 그리고 간극수압-변형률의 관계를 구하였다. 그 대표적인 예로는 다음과 같다. Fig.4는 섬유혼합비가 1.2%, 형상비가 120인 폴리에스테르 0.20mm 섬유를 점토에 혼합하여 다짐시킨 후 각각의 구속응력에 대한 변형률과 축차응력, 간극수압과의 관계를 도시한 것이다.

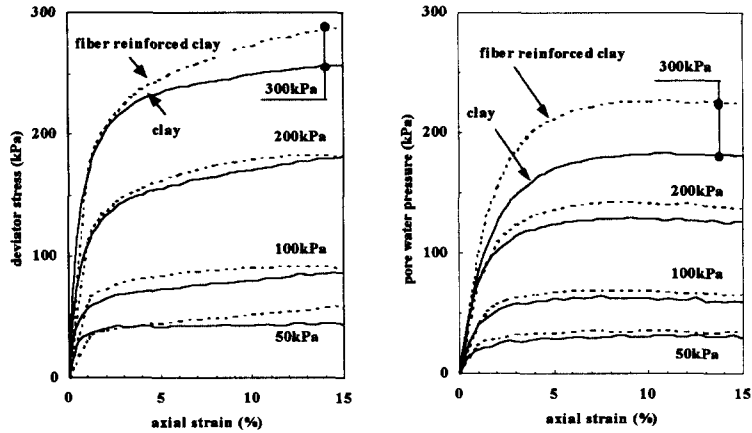


Fig. 4. Deviator stress and pore water pressure behavior under different confining pressure ($\rho_w = 1.2\%$, $\eta = 120$, PE0.20)

그림에서 구속응력이 50kPa일 경우 파괴시 축차응력은 변형률 14.9%에서 59.5kPa이었으며, 그때의 간극수압은 35.2kPa이었는데 이를 무보강토의 값과 서로 비교하면 파괴시 축차응력은 약 32%, 간극수압은 12%로 증가하였다. 구속응력이 100kPa일 경우 파괴시 축차응력은 변형률 13.1%에서 92.5kPa, 간극수압은 67.4kPa이었고, 각각에 대한 증가율은 파괴시 축차응력 6%, 간극수압 12%였다. 구속응력이 200kPa일 경우 파괴시 축차응력은 변형률 13.1%에서 183.1kPa, 간극수압은 140.3kPa로 나타났는데 무보강토에 비해 파괴시 축차응력은 거의 증가하지 않았지만 간극수압은 11% 정도 증가하였다. 또한 구속응력이 300kPa에서는 파괴시 축차응력이 14.9%의 축변형률에서 288.5kPa, 간극수압은 223.9kPa로 무보강토에 비해 파괴시 축차응력은 12%, 간극수압은 22% 증가하였다. 일반적으로 구속응력이 증가할수록 무보강토와 마찬가지로 단섬유 혼합된 다짐점토의 축차응력은 증가하였으며, 간극수압 또한 크게 증가하는 경향을 보였다.

3.2 섬유의 형상비에 따른 강도특성

섬유의 형상비에 따른 강도특성을 살펴보기 위해 삼축시험된 결과를 Fig.5와 같이 정리하였다. Fig. 5는 폴리에스테르 0.20mm의 섬유를 중량비로 0.6% 혼합하여 다짐된 경우로서 형상비의 변화에 따른 파괴시 축차응력과 간극수압을 보여준다. Fig. 5(a)에서 낮은 구속응력 즉, 50, 100kPa인 경우에는 형상비 120에서 파괴시 축차응력이 최대로 나타났고, 구속응력이 점점 증가할수록 형상비 80에서 파괴시 축차응력이 가장 크게 나타났다. 무보강토의 경우와 비교하면, 구속응력이 50, 100kPa인 경우에는 무보강토의 파괴시 축차응력보다 크게 나타났고, 200kPa 이상의 구속응력에서는 형상비 80인 경우를 제외한 모든 형상비에서 무보강토의 파괴시 축차응

력보다 작게 나타났다. Fig. 5(b)에서 파괴시 간극수압은 파괴시 축차응력의 변화와 정반대 경향을 보였는데, 구속응력 50kPa인 경우를 제외하고 모든 구속응력에서 형상비 80인 경우에 가장 낮은 값을 나타내었다.

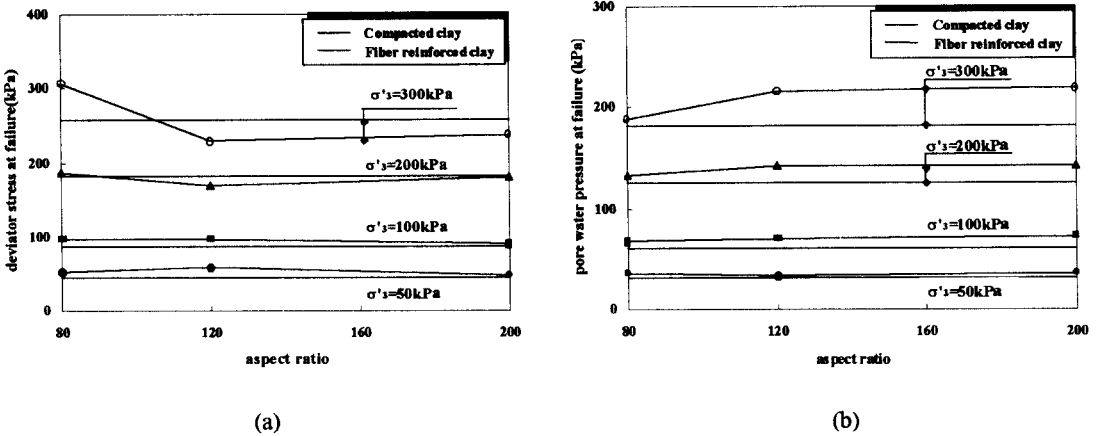


Fig. 5. Variations of deviator stress and pore water pressure at failure with aspect ratio of fiber under different confining pressures (PE0.20, $\rho_w=0.6\%$)

3.3 섬유 혼합비에 따른 강도특성

Fig. 6은 형상비 120인 폴리에스테르 0.20mm 섬유를 점토와 혼합하여 다진 시료에 대한 섬유의 혼합비에 따른 파괴시 축차응력과 파괴시 간극수압을 보여준다.

Fig. 6(a)에서, 혼합비의 증가에 따라 파괴시 축차응력은 다소 증가하는 경향을 보여준다.

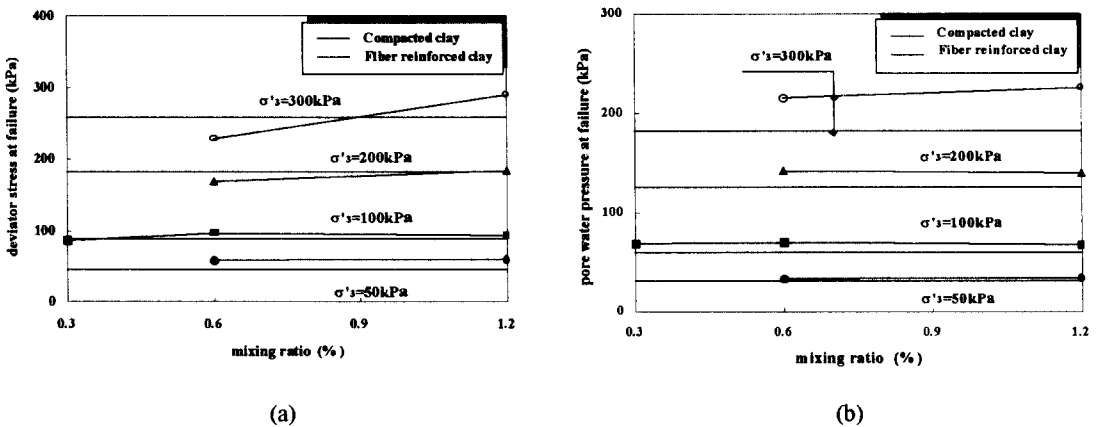


Fig. 6. Variations of deviator stress and pore water pressure at failure with mixing ratio of fiber under different confining pressures (PE0.20, $\eta=120$)

Maher(1988)⁷⁾는 단섬유 보강된 모래에 대한 삼축시험에서 형상비가 일정한 상태에서 섬유의 혼합비를 증가시킬 경우 강도는 구속응력에 관계없이 점진적으로 증가한다고 하였는데, 이는 구속압으로 공기압을 사용하고 불포화 상태에서 시험을 수행하였기 때문에 포화된 시료내의

간극수압에 대한 영향을 고려하지 않은 결과로 판단된다. Gray와 Al-Refeai (1986)⁶⁾ 또한 갈대와 유리섬유를 Muskeron 모래와 0.21~2%까지 혼합하여 삼축시험을 실시하였는데, Maher와 같이 섬유 혼합비에 따라 점진적으로 증가하는 양상을 보였는데 이 경우 역시 불포화 상태에서 시험을 수행하였다.

Fig. 6(b)에서, 파괴시 간극수압은 구속응력에 관계없이 혼합비의 증가에 따라 모두 증가하는 경향을 보였고 무보강토의 파괴시 간극수압보다 크게 발생되었다.

3.4 단섬유 특성에 따른 보강효과

Fig. 7은 폴리에스테르 0.20mm 섬유를 0.6% 혼합하여 다진 경우에 대해 형상비와 강도증진비와의 관계를 도시하였다. 강도증진비는 무보강된 흙의 파괴시 축차응력($\Delta\sigma(U)$)에 대한 보강된 흙의 파괴시 축차응력($\Delta\sigma(R)$)의 비로써, 단섬유 혼합으로 인한 보강효과의 정도를 나타낸다. 구속응력이 증가할수록 강도증진비는 감소하였고, 가장 큰 보강효과는 구속응력 50kPa, 형상비 120일 때로서 약 30%의 보강효과가 가져왔다. 높은 구속응력에서는 형상비 80일 때 가장 높은 보강효과를 보였고, 구속응력이 200kPa 이상인 경우 보강효과는 거의 나타나지 않았다. 따라서 현장 적용을 위한 적절한 구속응력과 형상비는 50kPa, 즉 2~3m이내의 심도 또는 높이의 비배수 상태인 다짐 지반일 경우 형상비가 120인 단섬유를 0.6% 혼합할 때 가장 높은 보강효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

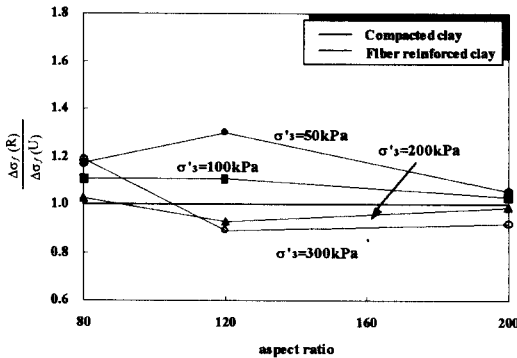


Fig. 7. Influence of aspect ratio of fiber on fiber contribution (PE0.20, $\rho_w=0.6\%$)

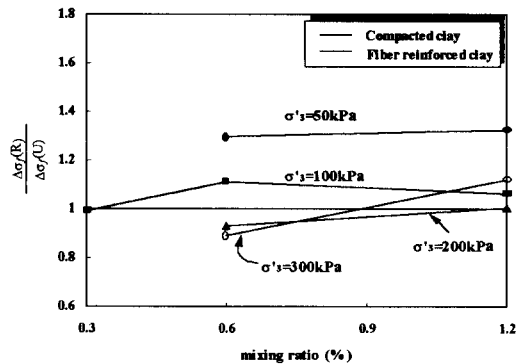


Fig. 8. Influence of mixing ratio of fiber on fiber contribution (PE0.20, $\eta=120$)

섬유의 혼합비에 따른 보강 효과를 살펴보기 위해 0.3%, 0.6%, 1.2%의 중량비로 0.20mm 폴리에스테르 섬유를 혼합하여 압밀 비배수 삼축시험을 실시하였다. 각각의 경우에 있어 형상비는 120으로 동일하다. Fig. 8은 섬유 혼합비에 따른 강도증진비를 도시한 것으로, 단섬유에 의한 보강효과는 형상비와 마찬가지로 구속응력이 증가할수록 감소하였다. 가장 큰 보강 효과는 구속응력이 50kPa인 경우로서 1.2%의 중량비에서 약 40%의 보강효과를 보였다.

IV. 결론

다짐된 단섬유 보강점토의 강도특성과 보강효과를 살펴보기 위해 섬유와 점토의 혼합비 및 점토의 혼입비를 변화시켜 각각에 대한 압밀 비배수 삼축시험을 수행하였다. 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 형상비에 따른 파괴시 축차응력은 구속응력이 비교적 낮은 50, 100kPa인 경우에는 무보강토의 파괴시 축차응력보다 크게 나타났고, 200kPa 이상의 구속응력에서는 형상비 80인 경우를 제외하고 모든 형상비에서 무보강토의 파괴시 축차응력보다 작게 나타났다. 파괴시 간극수압은 파괴시 축차응력의 변화 경향과는 정반대로, 구속응력 50kPa인 경우를 제외한 모든 구속응력에서 형상비 80인 경우에 가장 낮은 값을 보였다.
2. 섬유와 점토의 혼합비에 따른 파괴시 축차응력은 혼합비의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, 구속응력이 50, 100kPa인 경우를 제외하고 모두 무보강토의 파괴시 축차응력보다 낮게 나타났다. 파괴시 간극수압은 구속응력에 관계없이 혼합비의 증가에 따라 모두 증가하는 경향을 보였고 무보강토의 파괴시 간극수압보다 크게 발생되었다.
3. 섬유와 점토의 혼합비가 일정(0.6%)할 경우, 섬유와 점토의 형상비에 따른 보강효과는 구속응력이 증가할수록 감소하였고, 가장 큰 보강효과는 구속응력 50kPa, 형상비 120일 때로서 약 30%의 보강효과가 가져왔다. 높은 구속응력에서는 형상비 80일 때 가장 높은 보강효과를 보였고, 구속응력이 200kPa 이상인 경우에는 보강효과가 거의 나타나지 않았다.
4. 섬유와 점토의 혼합비에 따른 보강효과는 섬유와 점토의 형상비와 마찬가지로 구속응력이 증가할수록 감소하였다. 가장 큰 보강효과는 섬유와 점토의 형상비가 120으로 일정할 경우 구속응력이 50kPa, 1.2%의 혼합비에서 나타났으며 약 40%의 강도증진을 보였다.

참고문헌

1. 박영곤, 장병욱, 1998, 섬유혼합 점토의 비배수 전단강도 특성에 대한 연구, 한국농공학회 학술발표회, pp.382-387
2. 박영곤, 1999, 섬유혼합토의 파괴예측 모델의 개발 및 비배수 강도 특성 분석, 박사학위논문, 서울대학교
3. 박영곤, 장병욱, 2000, 섬유혼합토의 전단파괴해석, 한국농공학회지, 제42권 2호, pp.86-92
4. 장병욱, 박영곤, 우철웅, 서동욱, 1998, 흙과 섬유의 상호마찰 특성의 측정에 관한 연구, 한국농공학회 학술발표회, pp.467-472
5. Gray, D.H. and H. Ohashi, 1983, Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand, J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 109(3), pp.335-353
6. Gray, D.H. and T. Al-Refeai, 1986, Behavior of Fabric versus Fiber Reinforced Sand, J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 112(8), pp.804-820
7. Maher, M.H., 1988, Static and Dynamic Force Response of Sands Reinforced with Discrete, Randomly Distributed Fibers, Ph.D. The University of Michigan
8. McGown, A., K.Z. Andrawes and M.M. Al-Hasani, 1978, Effect of Inclusion Properties on the Behaviour of Sand, Geotechnique, Vol. 28, No.3, pp.327-346