

섬유혼합 보강토의 전단특성
Shearing Properties of Fiber-Reinforced Soil

조삼덕, Sam-Deok Cho*1 김진만, Jin-Man Kim*2

*1: 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotech. Engrg. Div. Korea Institute of Construction Technology, Seoul, Korea
*2: 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotech. Engrg. Div. Korea Institute of Construction Technology, Seoul, Korea

SYNOPSIS: Shearing properties of soil reinforced with discrete randomly oriented inclusions depend on soil density, particle size, grading, fiber length, tensile strength and stiffness of fiber, mixing ratio of fiber, confining stress, etc.. In this paper, the effects of those various factors on shear strength of the fiber-reinforced soil was evaluated through triaxial tests and uniaxial tests. Tests were performed on two sandy soils and one silty soil with inclusions in varying lengths, contents and tensile strengths and tested at different confining stresses in triaxial tests. From the experimental results, it was investigated if there is an optimal range of fiber lengths and fiber contents for the tested soils.

1. 서론

건설재료로서 섬유소재의 이용은 매우 오랜 역사를 갖고 있으며, 대체로 2가지 형태로 발전되어 오고 있다. 첫째는 섬유를 서로 직조하여 제분화한 토복섬유(Geotextiles)라고 명명되는 평면적인 형태이며, 둘째는 섬유(filament)자체를 흙과 혼합하는 선형적인 형태이다. 토복섬유를 이용한 공법은 그동안 급격한 기술발전을 가져와 전세계적으로 연간 약 10억 m² 정도의 토복섬유가 각종 토목구조물에 적용되는 등 활성화되어 있으나, 흙의 역학적 특성을 개선하기 위해 흙에 일정한 길이의 섬유들을 혼합하는 공법(섬유혼합 보강토공법)은 아직까지 기술발전이 미흡하여 공법의 실용화가 미진한 실정이다.

실제로 섬유혼합 보강토는 시멘트나 석회와 같이 흙에 섬유의 혼합이 용이하고, 강도의 등방성(isotropy)과 그 지속성이 우수하며, 토복섬유 공법의 단점인 보강재를 따라 진전되는 잠재적인 취약면이 없는 등의 장점을 가지고 있어 최근 선진외국에서는 이에 관한 연구가 활발하다.

섬유혼합 보강토에 관한 연구는 초기에 Brown & Sheu (1975), Wu (1976), Waldron (1977) 등에 의한 식물뿌리가 흙의 강도증가에 미치는 영향을 평가하는 연구들이 있었으며, 그 후 Gray & Ohashi(1983), McGown 등(1985), Gray & Al-Refeai(1986), Gray & Maher(1989), Al-Refeai(1991) 등은 빈입도의 모래질 흙을 대상으로 한 실내 전단시험을 통하여 섬유혼합 보강토의 전단강도 개선효과를 평가하였다. 이들이 시험에 사용한 섬유들은 야자수 줄기, 갈대 등의 천연섬유와 PVC, 나일론, 폴리프로필렌(P.P) 등의 합성섬유였으며, 이 섬유들의 인장강도와 길이, 혼합을 등을 변화시켜 가며 실험하였다. 또한 빈입도 모래 이외의 흙시료를 사용한 실험연구로는 잔류 석회석토(residual limestone soil)를 사용한 Freitag(1986)의 연구와 점성토를 사용한 Nada 등(1989)의 연구를 들 수 있다.

본 연구에서는 국내에 널리 분포되어 있는 화강풍화토의 2가지 형태와 실트질 흙을 대상으로 인장강도가 비교적 큰 모노필라멘트(Mono-filament)섬유를 사용하여 섬유의 직경과 인장강도, 길이 및 섬유 혼합율, 구속응력 등의 변화에 따른 섬유혼합 보강토의 전단특성을 규명해 보았다.

2. 섬유혼합 보강토의 전단강도 보강효과

섬유혼합 보강토에 관한 지금까지의 연구결과들을 종합해 보면, 섬유혼합 보강토의 전단강도에 영향을 미치는 인자로는 혼합되는 흙의 입도분포와 흙입자의 형상 등과 같은 흙의 공학적 특성과 섬유의 형상,

길이, 직경, 인장강도, 탄성계수, 마찰계수, 섬유 혼합율 등과 같은 섬유의 물리적·역학적 특성 및 구속응력, 다짐상태 등의 외적 인자 등을 들 수 있다.

이러한 각종 인자들이 섬유혼합 보강토의 전단강도에 미치는 영향을 규명하기 위하여 그동안 많은 실내 실험연구와 이론적 해석모델 개발 연구가 수행되었으나, 각종 영향인자들이 서로 복합적으로 전단강도에 영향을 미치는 반면에 아직까지 제한된 시료를 대상으로 한 단편적인 연구가 주류를 이루고 있어 종합적이고 체계화된 평가결과는 도출되지 못하고 있다.

한편 Gray & Ohashi(1983)는 빈입도 모래를 대상으로 한 실내 전단시험 결과를 토대로, 섬유혼합 보강토의 전단파괴면에서의 한계평형모델(limit equilibrium model)(그림 1 참조)을 사용하여 섬유혼합에 의한 흙의 전단강도 보강효과를 다음과 같이 제안하였다.

그림 1과 같이 섬유가 전단파괴면에 직각인 경우와 그렇지 않은 경우에 섬유에 의한 전단강도 증가분, ΔS_R 은

$$\begin{cases} \text{직각인 경우} : \Delta S_R = t_R(\sin\theta + \cos\theta \cdot \tan\phi) \\ \text{기타인 경우} : \Delta S_R = t_R(\sin(90^\circ - \psi) + \cos(90^\circ - \psi) \cdot \tan\phi) \end{cases}$$

여기서,

$$\psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{k + (\tan i) - 1} \right\}$$

$$t_R = (A_R/A) \cdot \sigma_R$$

ϕ : 흙의 내부마찰각

θ : 섬유의 전단 비틀림각

i : 전단 파괴면에 대한 섬유의 초기 배열각

k : 섬유의 전단 비틀림비(α/Z)

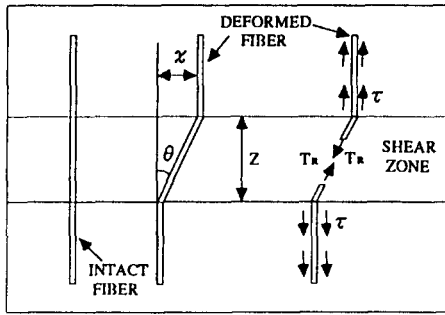
Z : 전단면의 두께

α : 수평 전단변위량

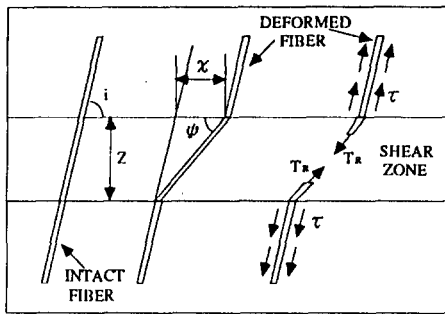
σ_R : 전단 파괴면에서 유발된 섬유의 인장응력

A_R/A : 총 시료면적에 대한 섬유의 면적비

이 식으로부터 섬유혼합에 의한 흙의 전단강도 증가효과를 개략적으로 평가할 수 있으나, 이 식은 각종 영향인자들의 효과를 충분히 고려하지 못하였기 때문에 보다 폭넓은 실험연구를 통하여 보완되어야 할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 입도분포가 다른 2종의 모래질 흙과 1종의 실트질 흙에 대해 섬유혼합에 의한 전단강도 증가효과를 섬유의 직경, 길이, 인장강도, 섬유 혼합율 및 구속응력 등의 인자들에 대해 평가해 보았다.



a) 섬유와 전단파괴면이 직각인 경우



b) 섬유와 전단파괴면이 직각이 아닌 경우

그림 1. 섬유혼합 보강토의 한계평형모델

표 1. 흙시료의 물리적 특성값

시료명	A 시료 (모래질흙)	B 시료 (모래질흙)	C 시료 (실트질흙)
비중	2.64	2.65	2.65
액성한계, LL(%)	-	-	26.5
소성지수, PI(%)	N.P	N.P	3.5
모래(%)	55.0	52.5	32.6
실트(%)	45.0	38.3	61.6
점토(%)	-	9.2	5.8
관등계수, C_u	4.5	75.0	5.5
통입분류	SM	SM	ML

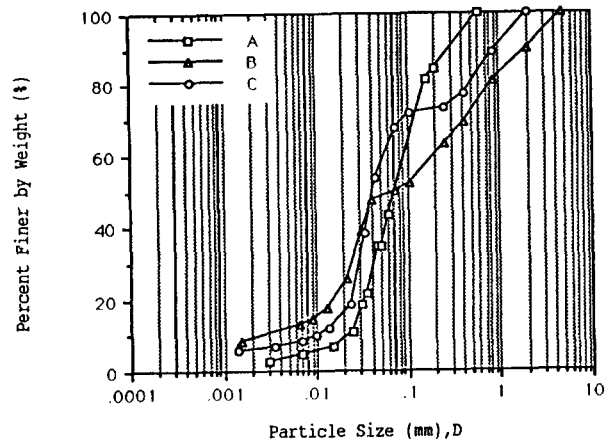


그림 2. 흙시료의 입도분포곡선

3. 실험

3.1 실험재료

본 실험에서는 섬유혼합 보강토의 전단특성을 고찰해 보기 위해 균등계수가 서로 상이한 모래질 흙 2종과 실트질 흙 1종을 실험대상 흙시료로 사용하였으며, 실험대상 섬유시료로는 인장강도가 서로 상이한 국내 생산 모노필라멘트(Mono-filament) 2종을 사용하였다.

2종의 모래질 흙은 인천직할시 남동구 만수동에서 채취한 화강풍화토를 이용, 소요 입도를 갖도록 조절하였으며, 실트질 흙은 서울시 지하철 5호선 5-14공구 건설현장(영등포구 당산동)에서 채취하여 사용하였다. 표 1과 그림 2에서는 각각 실험에 사용된 3종의 흙시료에 대한 물리적 특성값과 입도분포곡선을 보여준다. 또한 실험에 사용된 2종의 모노필라멘트에 대한 각종 특성값은 표 2와 같다.

3.2 공시체 제조 및 종류

실험에 사용한 공시체는 다짐시험을 통해 구한 최적함수비(O.M.C)와 최대건조밀도(γ_{dmax})상태로 제조하였으며, 공시체의 크기는 직경 7cm, 높이 15cm가 되도록 하였다. 다짐 공시체의 제조에는 자체 제작한 정격 다짐장비와 시료성형 모우드(mold)를 사용하였는데, 정격 다짐장비는 탄소강 재질의 하중지대, 스테인레스 재질의 가압판과 스페이스 링(space ring) 및 유압잭 등으로 구성되어 있다.

그림 3에서는 다짐 공시체의 제조과정을 보여주고 있는데, 먼저 A-1 다짐시험으로부터 구한 최적함수비 상태로 흙과 물을 혼합한 후 소요량의 섬유를 혼합하였다. 그 후 공시체 높이에 따라 균등한 다짐이 될 수 있도록 섬유혼합 시료를 시료성형 모우드내에서 3층으로 다짐을 하여 최대건조밀도 상태의 다짐 공시체를 제조하였다. 따라서 다짐 완료된 공시체 내에서의 섬유들은 매우 불규칙하게 분포되어 있다.

표 2. 섬유시료의 제반 특성값

시료명	MF1 시료	MF2 시료	비고
재질	Polyester	Polyester	KS K 0210
직경(mm)	0.21	0.46	KS K 0463
Denier(g/9,000m)	423.8	2,063.2	KS K 3601
인장강도(kg)	1.75	6.95	KS K 3601
인장신도(%)	19.5	28.5	KS K 3601

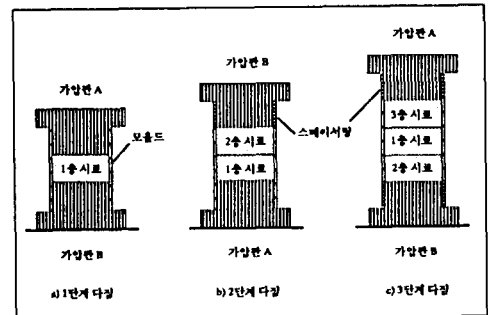


그림 3. 다짐 공시체의 제조과정

섬유혼합 보강토의 전단특성을 평가하기 위하여 3종류의 흙과 2종류의 섬유를 대상으로 섬유의 길이와 혼합율 및 구속응력 등을 다양하게 변화시켜 가며 일축압축시험과 삼축압축시험(UU Test)을 수행하였다. 섬유의 길이는 1cm, 2.5cm, 4.5cm, 7cm로, 섬유 혼합율은 0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 4.0%로, 구속응력은 0.4kg/cm², 0.8kg/cm², 1.2kg/cm², 1.5kg/cm², 1.8kg/cm², 2.1kg/cm²로 변화시켰다. 일축압축시험과 삼축압축시험에서의 공시체 압축속도는 0.8%/min 정도로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 섬유혼합 보강토의 다짐특성

섬유혼합 보강토의 다짐특성을 고찰해 보기 위해 모래질 흙(A, B시료)과 실트질 흙(C시료)을 대상으로 직경이 서로 다른 2종류의 섬유(직경 0.21mm, 0.46mm)를 길이와 혼합율을 변화시켜 가며 A-1 다짐시험을 수행하였다. 그림 4에서는 길이 2.5cm의 섬유를 혼합한 보강토의 다짐시험 결과를 섬유 혼합율에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화곡선으로 도시하였다. 그림 4에서 보듯이 섬유가 흙에 혼합되면 섬유의 신축성에 의한 스펀지현상으로 다짐특성이 저하하게 되며, 이러한 현상은 실트질 흙보다 입경이 큰 모래질 흙에서 보다 현저하게 나타남을 알 수 있다.

또한 흙의 종류에 관계없이 섬유 혼합율이 증가할수록 섬유혼합 보강토의 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보여준다. 이러한 현상은 섬유 직경이 가늘수록 더욱 크게 나타났는데, 이는 섬유직경이 가늘수록 동일한 혼합율에서의 섬유의 양이 많아 보강토체 내에서의 섬유의 스펀지현상이 보다 크게 발현되기 때문으로 사료된다.

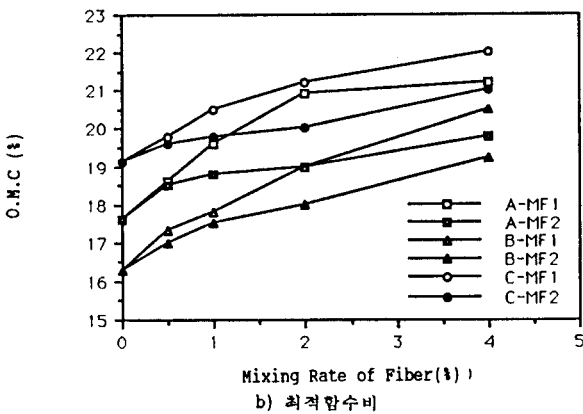
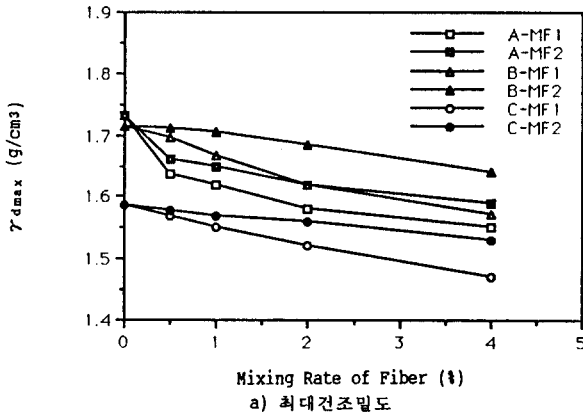


그림 4. 섬유 혼합율에 따른 최대건조밀도와 최적함수비 변화

4.2 섬유혼합 보강토의 전단특성

2장에서 살펴본바와 같이 섬유혼합 보강토의 전단특성에 영향을 미치는 인자들은 매우 다양하다. 여기서는 삼축압축시험과 일축압축시험을 통하여 이러한 영향인자들이 섬유혼합 보강토의 전단특성에 미치는 영향을 고찰해 보았다.

4.2.1 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선

그림 5에서는 섬유가 혼합되지 않은 흙과 비교한 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선을 보여준다.

그림 5에서 보듯이 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선은 섬유가 혼합되지 않은 흙은 물론 섬유 혼합율에 따라서도 상당한 차이를 보여준다. 섬유가 혼합되지 않은 흙에서는 최대 압축응력에 도달한 후 바로 급격한 파괴형태가 나타나는 반면, 섬유혼합 보강토에서는 최대 압축응력에 도달한 후에 급격한 파괴없이 측면형률의 증가에 따라 서서히 전단 저항력이 저하되는 형태를 보여주며, 특히 섬유 혼합율이 증가할수록 더욱 완만하게 전단 저항력이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 흙에 혼합된 섬유가 흙과의 마찰력에 의해 섬유혼합 보강토의 수평방향의 변형을 구속하는 효과에 기인하는 것으로 사료된다.

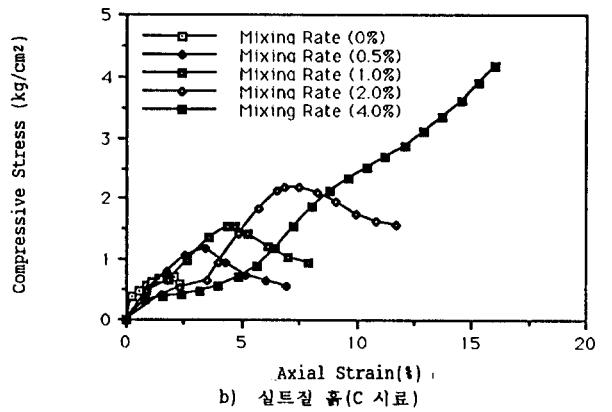
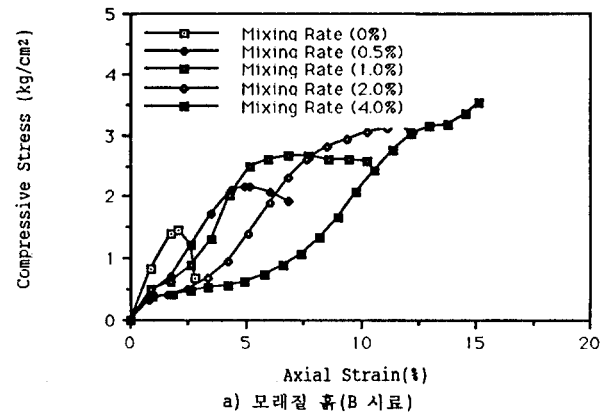


그림 5. 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선(일축압축시험) (섬유 직경 0.21mm, 섬유 길이 2.5cm)

또한 섬유혼합 보강토의 초기 탄성계수가 섬유를 혼합하지 않은 흙의 초기 탄성계수보다 작게 나타남을 알 수 있는데, 이러한 현상은 섬유혼합 보강토의 다짐시에 압축된 섬유시료들이 전단 초기에는 서서히 인장되면서 원상태로 복귀하기 시작하기 때문에 이 시기에는 섬유와 흙의 마찰에 의한 섬유의 인장응력이 유발되지 못하므로 작은 변형률에서는 오히려 섬유혼합 보강토의 압축응력이 보다 작게 나타나는데

기인된 것으로 사료된다. 따라서 섬유 혼합율이 증가할수록 다짐시에 압축된 섬유시료들의 영향을 크게 받게 되므로 초기 탄성계수가 보다 작게 되며, 섬유에 의한 섬유혼합 보강토의 수평방향 구속효과가 크게 발현되므로 최대압축응력에 도달하는 축변형율이 보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4.2.2 섬유길이 및 직경의 영향

그림 6에서는 섬유길이 및 직경에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도의 변화를 보여준다.

그림 6에서 보듯이 모래질 흙(A, B시료)의 경우에는 섬유길이가 2.5cm 까지는 섬유혼합 보강토의 전단강도가 급격히 증가하나 그 이상의 길이에서는 증가 효과가 미미함을 알 수 있는데, 이는 섬유의 길이가 증가할수록 흙과의 마찰력은 증가하는 반면 섬유의 엉킴현상이 두드러지며, 특히 혼합시 입경이 큰 입자들은 서로 엉켜있는 섬유사이에서 이탈하는 경향이 나타나 섬유의 엉켜진 덩어리 형태가 존재하기 때문으로 사료된다. 반면에 실트질 흙(C시료)의 경우에는 섬유의 길이가 길어져 섬유의 엉킴현상이 발생해도 가는 실트입자들이 서로 엉켜있는 섬유사이에 적당하게 분포하고 있어 섬유의 엉켜진 덩어리 형태가 나타나지 않기 때문에 섬유길이가 증가할수록 섬유혼합 보강토의 전단강도는 계속 증가하는 경향을 보여준다.

또한 섬유의 직경이 0.46mm인 경우는 0.21mm 직경의 섬유보다 인장강도가 4배정도 크지만 실제 흙과 혼합된 상태에서는 오히려 흙의 전단강도 값이 작게 나타나는 경향을 보여줄때, 이는 섬유 직경이 클수록 동일한 섬유 혼합율에서의 섬유의 양이 작아 섬유와 흙의 마찰면이 작게될 뿐만 아니라 섬유의 유연성(flexibility)이 좋지 않아 흙사이에서의 섬유의 interlocking효과가 작게 발현되기 때문으로 사료된다.

한편, 섬유의 길이가 1cm 정도로 매우 작을 경우에는 흙속에서 섬유의

소요 인장응력을 유발시킬 만큼 흙과의 충분한 마찰력이 발휘되지 못하고, 흙사이에서의 섬유의 interlocking효과가 미미하므로 섬유에 의한 흙의 전단강도 증가효과가 보다 작게 나타났으며, 특히 섬유의 유연성(flexibility)이 작은 직경 0.46mm 섬유를 1cm 길이로 절단하여 모래질 흙과 혼합한 보강토의 전단강도는 섬유를 혼합하지 않은 흙의 전단강도 보다도 오히려 작게 나타났다. 따라서 섬유혼합 보강토의 전단강도를 높이기 위해서는 흙과의 충분한 마찰력을 유지할 수 있을 정도의 섬유 길이와 섬유의 유연성이 필요한 것으로 판단된다.

4.2.3 섬유 혼합율의 영향

그림 7에서는 섬유 혼합율에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도의 변화를 보여준다.

그림 7에서 보듯이 섬유혼합 보강토의 일축압축강도는 섬유 혼합율이 증가함에 따라 지속적으로 증가하나 증량비 1% 이상의 섬유 혼합율에서는 섬유 혼합율의 증가에 따른 일축압축강도의 증가율이 점차 감소되는 경향이 있음을 알 수 있다. 예로서, 균등계수가 작은 모래인 A시료와 균등계수가 큰 모래인 B시료 및 실트질 흙인 C시료에 직경 0.21mm, 길이 2.5cm의 섬유를 1% 증량비로 혼합하였을 때는 일축압축강도가 각각 2.0배, 1.8배, 2.4배 정도로 증가한 반면에 4% 혼합하였을 때는 각각 3.0배, 2.4배, 4.4배 정도로 밖에 증가하지 못하였다. 이러한 현상은 섬유 혼합율이 1% 이상이 되면 혼합된 섬유의 양이 많아 섬유의 엉킴현상이 점점 심해지며, 섬유와 흙의 마찰력에 의한 전단특성보다는 흙을 포함한 섬유들의 엉켜진 형태에 의한 전단특성이 나타나기 때문으로 사료된다. 특히 입경이 큰 모래입자들은 서로 엉켜있는 섬유사이에서 이탈하는 경향이 있어 실트질 흙(C시료)보다 모래질 흙(A, B시료)에서 이러한 현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

또한 4.2.2절에서 언급하였듯이 섬유자체의 유연성(flexibility)이 좋은 직경 0.21mm 섬유와, 섬유사이에서의 분포성이 양호한 실트질 흙에

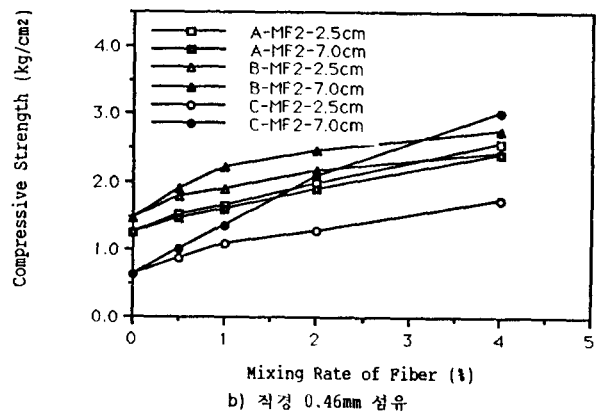
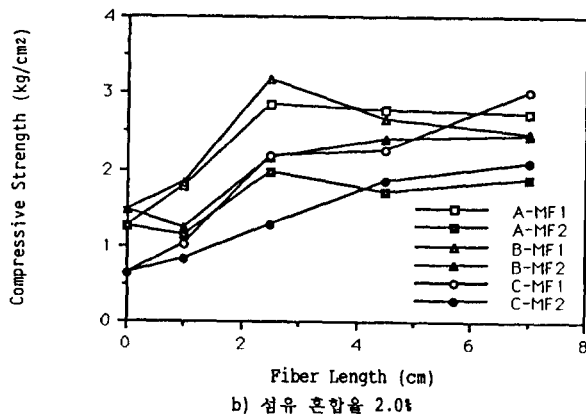
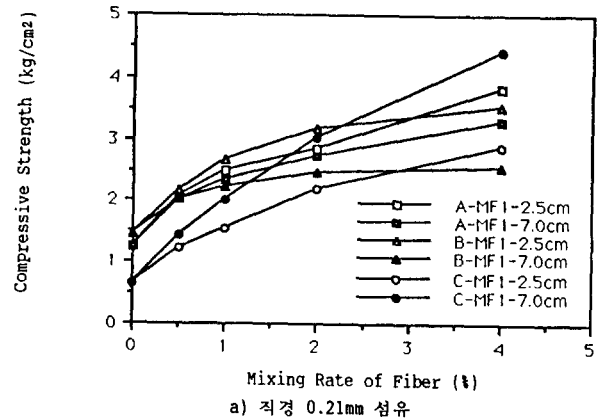
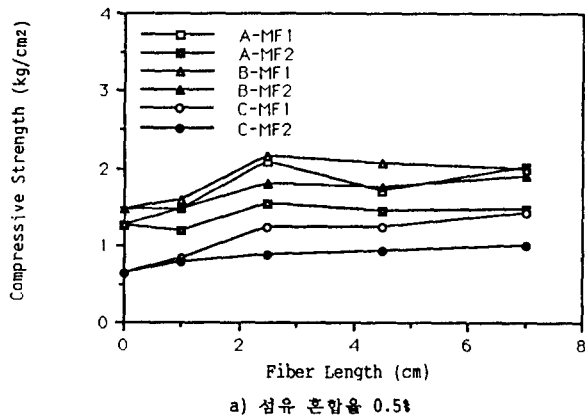


그림 6. 섬유길이에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화

그림 7. 섬유 혼합율에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화

서 섬유 혼합율의 증가에 따른 섬유혼합 보강토의 전단강도 증가율이 보다 크게 나타남을 알 수 있다.

4.2.4 구속응력의 영향

그림 8에서는 구속응력에 따른 섬유혼합 보강토의 전단강도 값의 변화 특성을 고찰해 보기 위해 수행한 삼축압축시험의 결과를 보여준다.

그림 8에서 보듯이 섬유혼합 보강토의 구속응력에 따른 전단강도 변화 형태는 흙종류에 관계없이 구속응력 1.0kg/cm² 이하에서 급격한 전단강도 증가를 나타내며 그 이상의 구속응력에서는 섬유가 혼합되지 않은 흙시료의 전단 기울기와 거의 동일한 기울기로 전단강도가 증가하는 형태를 나타낸다. 이러한 전단특성으로부터 섬유혼합 보강토에서의 섬유혼합 효과는 흙의 내부마찰각의 증가가 아닌 점착력의 증가형태로 나타남을 알 수 있다. 따라서 섬유혼합 보강토에서의 점착력 증가효과와 혼합된 섬유가 흙과의 마찰력에 의해 흙시료의 수평방향의 변형률 억제시키는 효과, 즉 길보기 구속응력을 받는 효과에 기인한다고 판단된다.

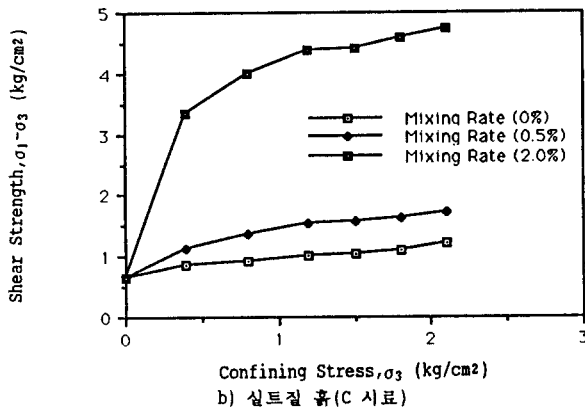
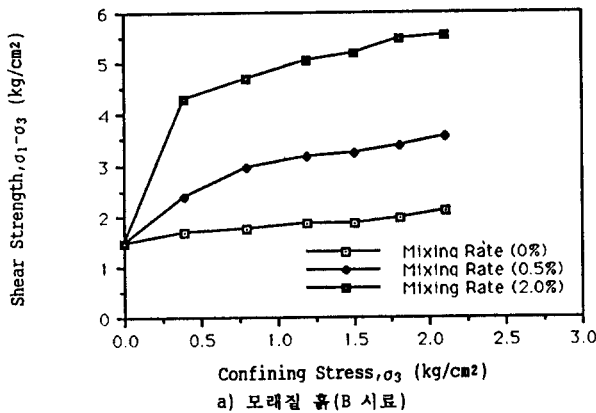


그림 8. 구속응력에 따른 섬유혼합 보강토의 전단강도 변화

5. 연구결론 및 향후 추진계획 연구

5.1 연구결론

섬유혼합 보강토의 전단특성을 평가하기 위해 수행한 A-1 다짐시험과 일축압축시험 및 삼축압축시험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 섬유혼합 보강토의 다짐특성은 섬유 혼합율이 증가할수록 최대 건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가하며, 이러한 다짐특성은

실트질 흙보다 모래질 흙에서 보다 현저하게 나타난다.

- 2) 섬유혼합 보강토의 전단강도에 미치는 섬유혼합 효과는 흙의 내부마찰각의 증가가 아닌 점착력의 증가형태로 나타난다.
- 3) 섬유혼합 보강토는 전단시 최대 압축응력에 도달한 후 급격한 파괴없이 측면형용의 증가에 따라 서서히 전단 저항력이 저하하는 특성을 보여준다.
- 4) 직경 0.21mm, 길이 2.5cm의 모노 필라멘트 섬유를 1% 혼합한 섬유혼합 보강토는 모래질 흙과 실트질 흙에서 각각 1.8~2.0배, 2.4배 정도로 전단강도가 증가하였다.
- 5) 모노 필라멘트 섬유를 사용한 섬유혼합 보강토의 전단강도는 모래질 흙의 경우에는 섬유 길이가 2.5~4.5cm 범위에서 보다 큰 전단강도 증가효과를 보여주며, 실트질 흙에서는 7cm 길이까지 전단강도 증가효과가 크게 나타난다.
- 6) 섬유혼합 보강토의 전단강도 개선효과는 섬유의 인장강도는 물론 섬유의 유연성(flexibility)의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.
- 7) 섬유혼합 보강토의 전단강도는 섬유 혼합율이 증가할수록 지속적으로 증가하나, 중량비 1% 이상의 섬유 혼합율에서는 섬유 혼합율의 증가에 따른 전단강도 증가율이 점차 감소하는 경향을 보여준다.

5.2 향후 추진계획 연구

본 논문은 한국건설기술연구원에서 1993년 1월부터 2년간 수행예정인 "섬유혼합 보강토 연구"과제의 연구결과 일부를 정리한 것이며, 이와 관련하여 현재 수행중이거나 향후 추진계획으로 있는 연구내용은 다음과 같다.

- 1) 섬유혼합 보강토의 전단강도에 영향을 미치는 섬유의 유연성과 인장강도사이의 상관관계 평가
- 2) 섬유혼합 보강토에서의 시멘트 혼합효과 평가
- 3) 섬유혼합 보강토의 투수성 및 압축성 평가
- 4) 보다 효율적인 섬유형태 개발
- 5) 실내 모형실험을 통한 섬유혼합 보강토공법의 효과 검증
- 6) 실험결과를 토대로 섬유혼합 보강토의 이론적 해석모델 제시

참고문헌

Gray, D.H. and Maher, M.H. (1989), Admixture stabilization of sands with discrete, randomly distributed fibers, Proc. of X^{II}th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1363~1366.

Gray, D.H. and Al-Refeai, T. (1986), Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand, J. of Geotech. Engrg. ASCE, 112(8), pp. 804~820.

Gray, D.H. and Ohashi, H. (1983), Mechanics of fiber reinforcement in sand, J. of Geotech. Engrg. ASCE, 109(3), pp. 335~353.

Nada, Y., Ogawa, S., Ikeda, T. and Kobayashi, F. (1989), Shearing properties of reinforced soil mixed short fibers, Proc. of XX^{IV}th Conf. on Soil Mech. Engrg., pp. 1873~1874.

McGown, A., Andrawes, K.Z., Hytiris, N. and Mercer, F.B. (1985), Soil strengthening using randomly distributed mesh elements, Proc. of X^Ith Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg, Vol. III, San Francisco, Calif., pp. 1735~1738.

Brown, C.B. and Sheu, M.S. (1975), Effects of deformation on slopes, J. of Geotech. Engrg, ASCE, 101(1), pp. 147~165.

- Al-Refeai, T. (1991), Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.10, pp. 319~333.
- Waldron, L.J. (1977), Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil, *Soil Science Society America J.*, 41(5), pp. 843~849.
- Wu, T.H. (1976), Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska, *Geotech. Engrg. Report No. 5*, Depart. of Civil Engrg., Ohio State Univ. Columbus, Ohio.
- Freitag, D.R. (1986), Soil randomly reinforced with fibers, *J. of Geotech. Engrg. ASCE*, 112(8), pp. 823~826.