

섬유혼합 보강토의 공학적 특성에 관한 실험연구

The Experimental Study on Engineering
Properties of Fiber-Reinforced Soil

조 삼 덕*¹

Cho, Sam-Deok

김 진 만*²

Kim, Jin-Man

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effects of fiber on engineering properties of Fiber-Reinforced Soil. Engineering 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 influence of fiber shape, fiber length, fiber diameter, fiber content, cement content and curing duration on engineering characteristics (compaction, shear & permeability) were evaluated for typical soils produced from construction works through uniaxial compression tests and triaxial compression tests. From the experimental results, it was also investigated if there is an optimal range of fiber lengths and fiber contents for the tested soils and tested mono-filament fibers.

요 지

섬유혼합 보강토는 흙과 섬유의 마찰력에 의해 유발되는 섬유의 인장력을 이용하여 흙의 역학적 특성을 개선시킨 새로운 형태의 보강토이다. 일반적으로 섬유혼합 보강토의 공학적 특성은 흙의 단위 중량, 입자크기, 입도분포와 섬유의 길이, 인장강도, 혼합률 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 국내에서 많이 발생하는 건설잔토 종류별로 섬유의 형태, 직경 및 길이, 섬유 혼합률, 시멘트 혼합률, 양생기간 등을 변화시켜가며 섬유혼합 보강토의 다짐특성, 전단특성 및 투수특성 등을 고찰하고, 이를 토대로 섬유혼합 보강토의 공학적 특성에 미치는 섬유 보강 효과를 규명하였다. 또한, 실험에 사용된 흙과 섬유에 대한 최적의 섬유길이와 섬유혼합률의 범위에 대한 평가를 수행하였다.

*¹정회원, 한국건설기술연구원, 지반연구실, 선임연구원

*²정회원, 한국건설기술연구원, 지반연구실, 연구원

1. 서론

최근 환경보존에 대한 국민의식이 높아가는 상황에서 건설잔토의 처분지 확보는 날로 어려워질 것으로 전망된다. 따라서 건설공사에 수반되어 발생하는 건설잔토의 역학적 특성을 개선시켜 각종 용도의 성토재로서 유효하게 이용할 수 있는 하나의 방안으로서 섬유혼합 보강토공법은 상당히 매력적인 공법으로서 평가되고 있다.

실제로 섬유혼합 보강토는 시멘트나 석회와 같이 흙에 섬유의 혼합이 용이하고, 강도의 등방성과 그 지속성이 우수하며, 토목섬유 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⁽¹⁾, Wu⁽²⁾, Waldron⁽³⁾ 등에 의한 식물뿌리가 흙의 강도증가에 미치는 영향을 평가하는 연구들이 있었으며, 그 후 Gray & Ohashi⁽⁴⁾, McGown 등⁽⁵⁾, Gray & Al-Refeai⁽⁶⁾, Gray & Maher⁽⁷⁾, Al-Refeai⁽⁸⁾ 등은 빈입도의 모래질 흙을 대상으로 한 실내 전단 시험을 통하여 섬유혼합 보강토의 전단강도 개선효과를 평가하였다. 이들이 실험에 사용한 섬유들은 야자수 줄기, 갈대 등의 천연섬유와 PVC, 나일론, 폴리프로필렌(P.P) 등의 합성섬유이었으며, 이 섬유들의 인장강도와 길이, 혼합률 등을 변화시켜 가며 실험하였다. 또한 빈입도 모래 이외의 흙시료를 사용한 실험연구로는 잔류 석회석토를 사용한 Freitag⁽⁹⁾의 연구와 점성토를 사용한 Nada 등⁽¹⁰⁾의 연구를 들 수 있다.

본 연구에서는 국내에 널리 분포되어 있는 화강풍화토의 2가지 형태와 실트질 및 점토질 흙을 대상으로 인장강도가 비교적 큰 모노필라멘트(mono-filament)섬유를 사용하여 섬유의 직경과 인장강도, 길이 및 섬유 혼합률, 시멘트 혼합률, 구속응력 등의 변화에 따른 섬유혼합 보강토의 다짐특성, 전단특성 및 투수특성 등을 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 혼합률 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 개발연구가 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⁽⁴⁾는 빈입도 모래를 대상으로 한 실내 전단시험 결과를 토대로, 섬유혼합 보강토의 전단파괴면에서의 한계평형모델(limit equilibrium model)(그림1 참조)을 사용하여 섬유혼합에 의한 흙의 전단강도 보강효과를 다음과 같이 제안하였다.

그림 1과 같이 전단영역 내에서 섬유에 유발되는 인장력을 전단면에 대한 접선력(F_t)과 수직력(F_n)으로 분리하면 식(1), (2)와 같다.

$$F_t = A_R \cdot \sigma_R \cdot \sin(90^\circ - \psi) \quad (1)$$

$$F_n = A_R \cdot \sigma_R \cdot \cos(90^\circ - \psi) \quad (2)$$

여기서, A_R 은 전단영역내에 있는 섬유의 총 단면적, σ_R 은 섬유의 길이를 따라 유발되는 인장응력, ψ 는 섬유의 전단 비틀림각이다.

따라서, 섬유보강에 의한 흙의 전단강도 증가효과, ΔS_R 은 식(1)과 식(2)를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta S_R &= (F_t + F_n \cdot \tan\phi) / A_T \quad (3) \\ &= (A_R / A_T) \cdot \sigma_R \cdot \{ \sin(90^\circ - \psi) + \cos(90^\circ - \psi) \cdot \tan\phi \} \end{aligned}$$

이때, A_T 는 총 전단면적, ϕ 는 흙의 내부마찰 각이고 ψ 와 σ_R 은 식(4), (5), (6)과 같다.

$$\psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{(\tan i)^{-1} + K} \right\} \quad (4)$$

삼각형 분포 :

$$\sigma_R = (4 \cdot \tau' \cdot E_R \cdot Z/D)^{1/2} (\operatorname{cosec} \psi - \operatorname{cosec} i)^{1/2} \quad (5)$$

포물선 분포 :

$$\sigma_R = \left(\frac{8 \cdot \tau' \cdot E_R \cdot Z}{3D} \right)^{1/2} (\operatorname{cosec} \psi - \operatorname{cosec} i)^{1/2} \quad (6)$$

여기서, i : 전단 파괴면에 대한 섬유와의 초기 배열각

K : 섬유의 전단 비틀림(x/Z)

x : 수평 전단변위량

Z : 전단면의 두께

E_R : 섬유의 탄성계수

D : 섬유의 직경

위의 식들로부터 섬유혼합에 의한 흙의 전단 강도 증가효과를 개략적으로 평가할 수 있으나, 위의 식들은 각종 영향인자들의 효과를 충분히 고려하지 못하였기 때문에 보다 폭넓은 실험연구를 통하여 보완되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 입도분포가 다른

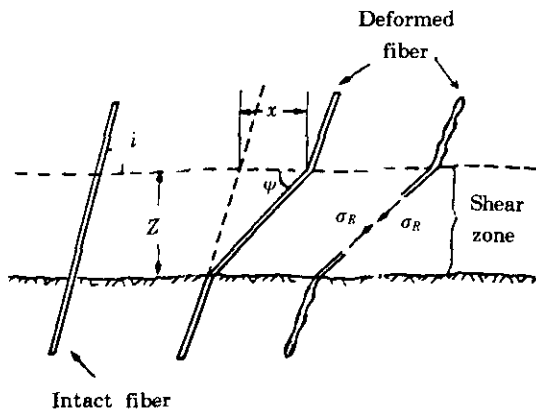


그림 1. 전단면 상에 섬유가 입의 각도 (i)로 경사져 있는 경우의 섬유보강 모델

4종의 흙에 대해 섬유혼합에 의한 전단강도 증가효과를 섬유의 직경, 길이, 인장강도, 섬유혼합률, 시멘트 혼합물 및 구속응력 등의 인자들에 대해 평가해 보았다.

3. 실험

3.1 실험재료

본 실험에서는 실험대상 흙시료로서 "SM"으로 분류되고 균등계수가 서로 상이한 실트질 모래흙 2종(이하 A, B 시료)과 "ML"로 분류되는 소성이 적은 실트질 흙 1종(이하 C시료), "CL"로 분류되는 소성이 적은 점토질 흙 1종(이하 D시료)을 선정하였고, 2종의 실트질 모래흙은 인천직할시 남동구 만수동에서 채취한 화강풍화토를 사용하여 소요 입도를 갖도록 조제하였으며, 2종의 실트질 및 점토질 흙은 서울시 지하철 5호선 5-14공구 건설현장(영등포구 당산동 소재)과 5-3공구 건설현장(김포공항 소재)에서 채취하여 사용하였다.

또한, 실험대상 섬유시료로는 국내에서 생산이 가능하고 인장강도가 높은 폴리에스터(polyester) 모노필라멘트를 선정하였으며, 섬유의 인장강도 및 직경에 따른 보강효과를 고찰해 보기 위하여 인장강도와 직경이 상이한 3종의 모노필라멘트 섬유(이하 MF1, MF2, MF3)를 실험에 사용하였다.

표 1과 그림 2에서는 각각 실험에 사용된 4종

표 1. 흙시료의 물리적 특성값

시료명	A 시료 (모래질 흙)	B 시료 (모래질 흙)	C 시료 (실트질 흙)	D 시료 (점토질 흙)
비 중	2.64	2.65	2.65	2.45
액성한계, LL(%)	-	-	26.5	31.0
소성지수, PI(%)	N.P	N.P	3.5	10.2
모래(%)	55.0	52.5	32.6	-
실트(%)	45.0	38.3	61.6	89.0
점토(%)	-	9.2	5.8	11.0
균등계수, C_u	4.5	75.0	5.5	7.6
통일분류	SM	SM	ML	CL

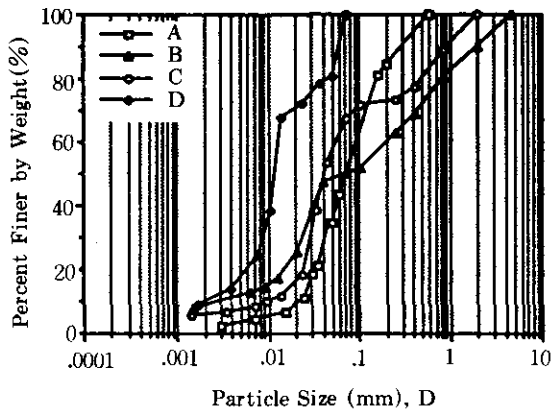


그림 2. 흡시료의 입도분포곡선

표 2. 섬유시료의 제반 특성 값

시료명	MF1 시료	MF2 시료	MF3 시료	비 고
재 질	Polyester	Polyester	Polyester	KS K 0210
직경(mm)	0.21	0.30	0.46	KS K 0463
Denier (g/9,000m)	423.8	874.2	2,063.2	KS K 3601
인장강도 (kg)	1.75	3.68	6.95	KS K 3601
인장신도 (%)	19.5	18.0	28.5	KS K 3601

의 흡시료에 대한 물리적 특성값과 입도분포곡선을 보여준다. 또한 실험에 사용된 3종의 모노필라멘트에 대한 각종 특성값은 표 2와 같다.

3.2 공시체 제조 및 실험종류

일축압축, 삼축압축 및 투수시험에 사용한 공시체는 다짐시험을 통해 구한 최적함수비(O.M.C)와 최대건조밀도(γ_{dmax})상태로 제조하였으며, 일축압축 및 삼축압축시험 공시체의 크기는 직경 7cm, 높이 15cm로, 투수시험 공시체의 크기는 직경 10cm, 높이 12.7cm가 되도록 하였다. 다짐 공시체의 제조에는 자체 제작한 정적 다짐장비와 시료성형 모듈드를 사용하였는데, 정적 다짐장비는 탄소강 재질의 하중지지대, 스테인레스 재질의 가압판과 스페이스링(space ring) 및 유압잭 등으로 구성되어 있다.

그림 3에서는 다짐 공시체의 제조과정을 보여주고 있는데, 먼저 A 다짐시험으로부터 구한 최적함수비 상태로 흙과 물을 혼합한 후 소요량의 섬유를 혼합하였다. 섬유혼합 보강토의 다짐시료 제작시의 섬유 혼합률은 흙의 노건조 중량에 대한 섬유의 중량비로 적용하였다. 그 후 공시체 높이에 따라 균등한 다짐이 될 수

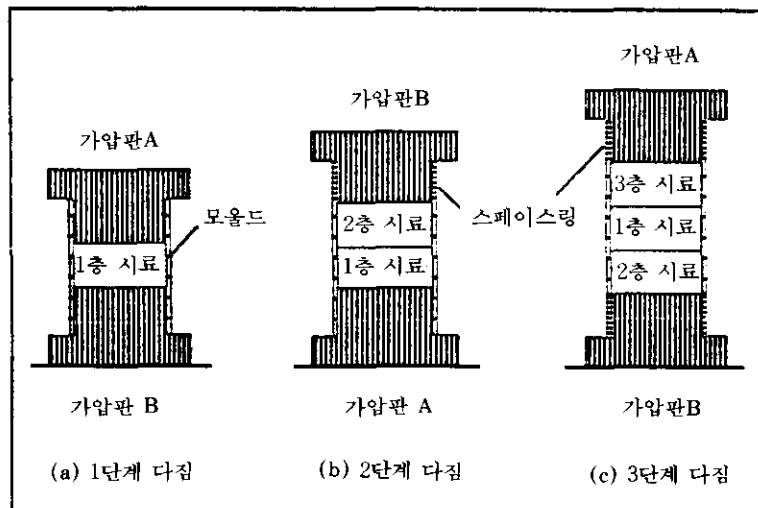


그림 3. 다짐 공시체의 제작과정

있도록 섬유혼합 시료를 시료성형 몰드내에서 3층으로 다짐을 하여 최대건조밀도 상태의 다짐 공시체를 제작하였다. 이때 각 다짐층 사이의 경계면이 실험결과에 미치는 영향을 최소로 줄이기 위해 각 다짐층의 경계면의 흙을 교란시킨 후 상부층을 다짐하였다. 따라서 다짐 완료된 공시체 내에서의 섬유들은 매우 불규칙하게 분포되어 있다.

섬유혼합 보강토의 전단특성을 평가하기 위하여 4종류의 흙과 3종류의 섬유를 대상으로 섬유의 길이, 직경, 혼합률 및 구속응력 등을 다양하게 변화시켜가며 일축압축시험과 삼축압축시험(UU Test)을 수행하였다. 섬유의 길이는 1cm, 2.5cm, 4.5cm, 7cm로, 섬유 혼합률은 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. 또한, 섬유혼합 보강토의 투수특성을 평가하기 위해 MF1 섬유를 섬유길이 2.5cm, 섬유 혼합률 0%, 1.0%, 2.0%로 변화시켜가며 투수시험을 수행하였다.

안정제 혼합에 따른 섬유혼합 보강토의 역학적 특성 개선효과를 고찰해 보기 위해 3종류의 흙(B, C, D시료)과 MF1 섬유를 대상으로 안정제로서 포틀랜드 시멘트를 사용하여 섬유길이 2.5cm, 섬유 혼합률 0%, 1%, 시멘트 혼합률 0%, 2.0%, 5.0%, 20.0%로 흙의 노건조 중량에 대한 각각의 중량비로 혼합하여 A 다짐시험과 재령 0일, 7일, 28일에 따른 일축압축시험을 수행하였다.

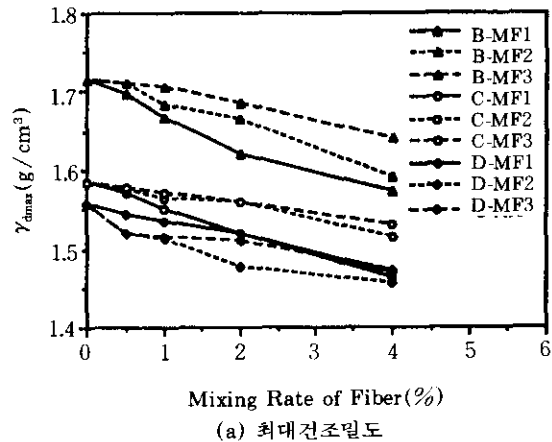
4. 실험결과 및 고찰

4.1 섬유혼합 보강토의 다짐특성

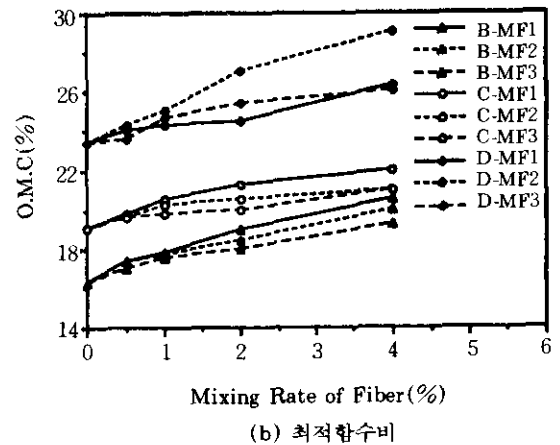
섬유혼합 보강토의 다짐특성을 고찰해 보기 위해 A, B, C, D시료를 대상으로 직경이 서로 다른 3종의 모노필라멘트 섬유를 길이와 혼합률을 변화시켜 가며 A 다짐시험을 수행하였다.

그림 4에서는 길이 2.5cm의 섬유를 혼합한 보강토의 다짐시험 결과를 섬유혼합률에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화곡선으로 도시하였다. 그림 4에서 보듯이 섬유가 흙에 혼합되면 섬유의 신축성에 의한 스펀지현상으로 다짐특성이 저하되며 이러한 현상은 입경이 큰 모래질 흙에서 보다 현저하게 나타나며 섬유직경이 가늘수록 더욱 크게 나타나는데 이는 섬유직경이 가늘수록 동일한 혼합률에서의 섬유의 양이 많아 보강토체 내에서 낮은 단위중량의 섬유가 차지하는 부피가 커질 뿐만 아니라 섬유의 스펀지 현상이 보다 크게 발현되기 때문으로 판단된다.

그림 5에서는 시멘트 첨가 섬유혼합 보강토

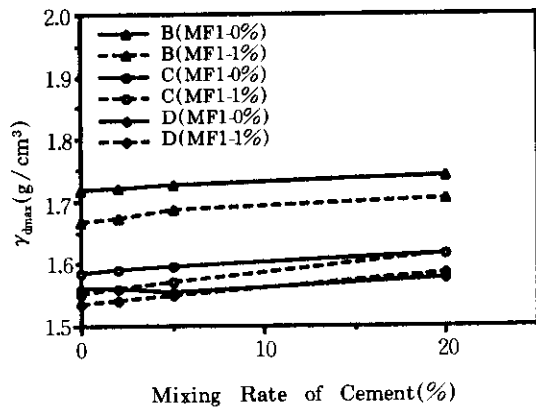


(a) 최대건조밀도

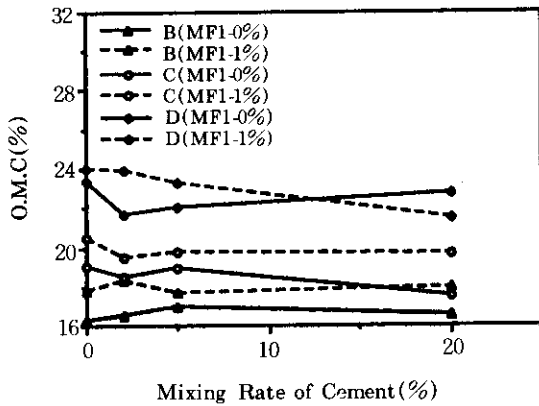


(b) 최적함수비

그림 4. 섬유혼합 보강토의 다짐특성



(a) 최대건조밀도



(b) 최적함수비

그림 5. 시멘트 혼합률별 섬유혼합 보강토의 다짐특성

의 최대건조밀도와 최적함수비의 변화곡선을 도시하였다. 그림 5에서 보듯이 흙종류에 관계없이 시멘트 혼합률이 증가할수록 섬유혼합 보강토의 최대건조밀도는 약간씩 증가되는 반면 최적함수비는 거의 일정한 추세를 나타냈다.

4.2 섬유혼합 보강토의 전단특성

앞의 2장에서 살펴보았듯이 섬유혼합 보강토의 전단특성에 영향을 미치는 인자들은 매우 다양하다. 여기서는 삼축압축실험과 일축압축실험을 통하여 이러한 영향인자들이 섬유혼합 보강토의 전단특성에 미치는 영향을 고찰해 보았다.

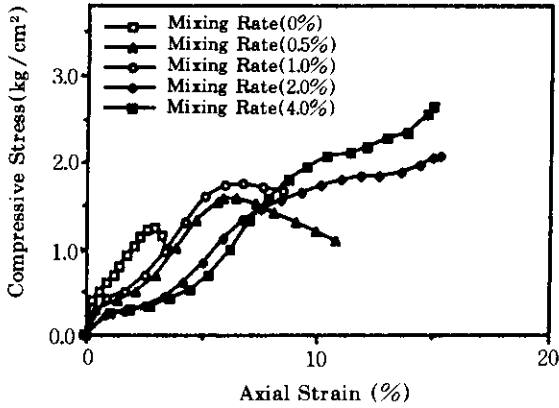
4.2.1 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선

그림 6에서는 섬유가 혼합되지 않은 흙과 비교한 섬유혼합 보강토의 전형적인 응력-변형률 곡선을 보여준다.

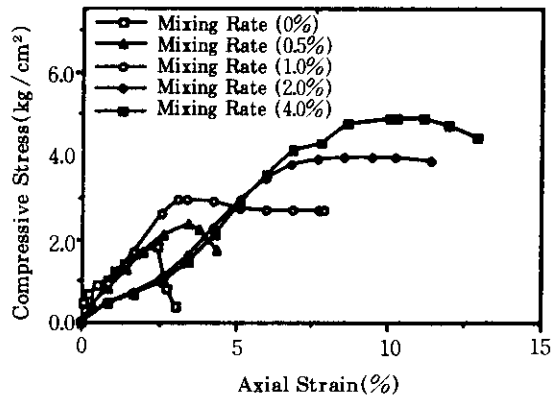
그림 6에서 보듯이 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선은 섬유가 혼합되지 않은 흙은 물론 섬유 혼합률에 따라서도 상당한 차이를 보여준다. 섬유가 혼합되지 않은 흙에서는 최대압축응력에 도달한 후 바로 급격한 파괴형태가 나타나는 반면, 섬유혼합 보강토에서는 최대압축응력에 도달한 후에 급격한 파괴없이 축변형률의 증가에 따라 서서히 전단 저항력이 저하되는 형태를 보여주며, 특히 섬유 혼합률이 증가할수록 더욱 완만하게 전단 저항력이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 흙에 혼합된 섬유가 흙과의 마찰력에 의해 섬유혼합 보강토의 수평방향의 변형을 구속하는 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

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 충분한 인장응력이 유발되지 못한 상태이므로 작은 변형률에서는 오히려 섬유혼합 보강토의 압축응력이 보다 작게 나타나는데 기인된 것으로 판단된다. 따라서 섬유 혼합률이 증가할수록 다짐시에 압축된 섬유시료들의 영향을 크게 받게 되므로 초기 탄성계수가 보다 작게 되며, 섬유에 의한 섬유혼합 보강토의 수평방향 구속효과가 크게 발현되므로 최대압축응력에 도달하는 축변형률이 보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

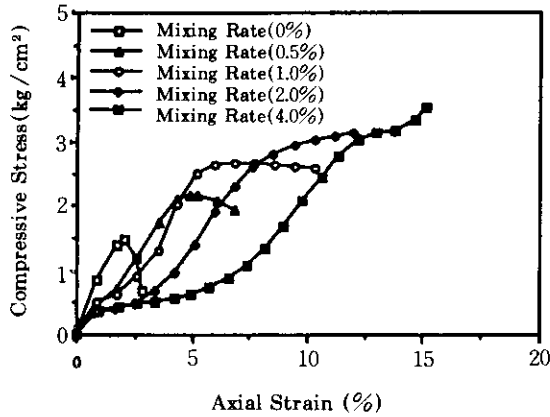
그림 7에서는 시멘트 첨가량의 변화에 따른 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선을 보여준다. 그림 7에서 보듯이 흙종류에 관계없이 시멘트가 첨가된 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선은 시멘트가 첨가되지 않은 경우와 비교하여 최대압축응력은 보다 크게 발현되며,



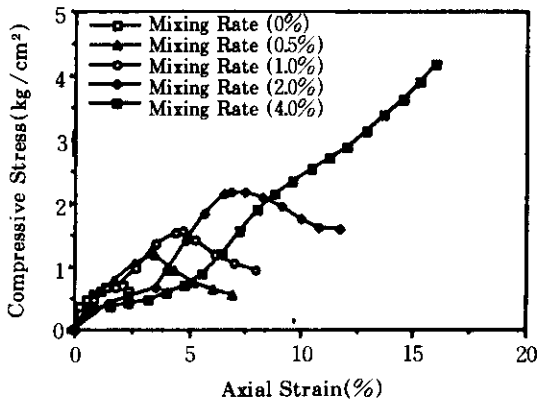
(a) A 시료



(d) D 시료



(b) B 시료



(c) C 시료

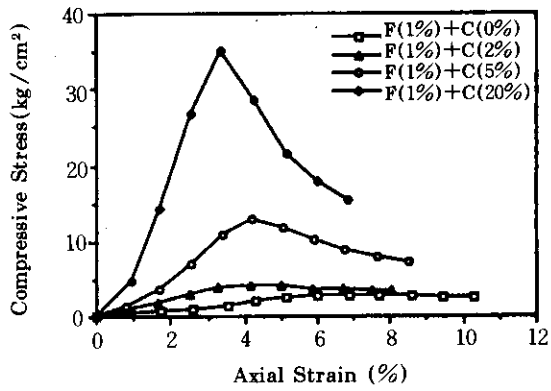
그림 6. 전형적인 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선(일축압축시험 MF1 시료, 섬유길이 2.5cm)

최대압축응력에 도달하는 축변형률이 보다 작게 나타나는데, 이는 시멘트의 수화작용에 의해 흙입자 간의 결합력이 증대되는 반면에 흙속에서 인장된 섬유에 의한 흙의 수평변형 구속효과는 상대적으로 감소되기 때문으로 사료된다. 또한, 시멘트 첨가량이 증가할수록 섬유혼합 보강토의 최대압축응력은 증가하나 최대압축응력에 도달하는 축변형률은 거의 일정한 값을 보여줌을 알 수 있다.

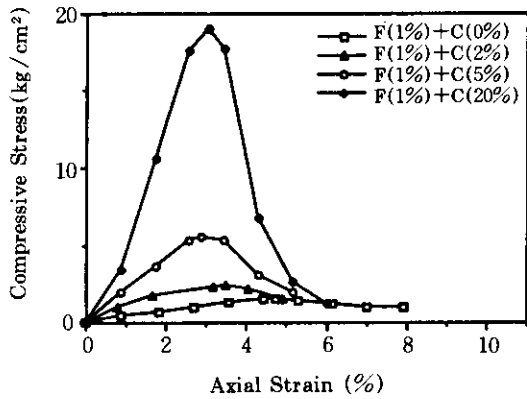
4.2.2 섬유 길이 및 직경의 영향

그림 8과 그림 9에서는 각각 흙 종류별 및 섬유 종류별 섬유 길이 및 섬유직경에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화곡선을 보여준다.

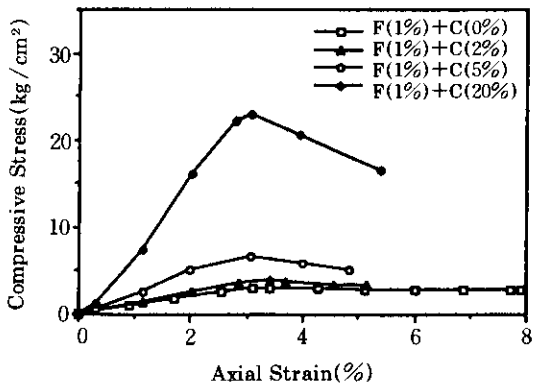
그림 8에서 보듯이 모래질 흙(A, B시료)과 점토질 흙(D시료)의 경우에는 섬유 길이가 2.5cm까지는 섬유혼합 보강토의 전단강도가 급격히 증가하나 그 이상의 길이에서는 증가효과가 미약함을 알 수 있는데, 이는 섬유의 길이가 증가할수록 흙과의 마찰력은 증가하는 반면 섬유의 엉킴현상이 두드러지며, 특히 혼합시 모래질 흙의 입경이 큰 입자들은 서로 엉켜 있는 섬유사이에서 이탈하는 경향이 나타나며, 점토질 흙은 점토의 점착성 때문에 흙과 섬유의 혼합이 용이하지 않아 섬유의 엉겨진 덩어



(a) B 시료



(b) C 시료



(c) D 시료

그림 7. 시멘트 첨가 섬유혼합 보강토의 응력-변형률 곡선(일축압축시험 MF1 시료, 섬유 길이 2.5cm, 양생일수 7일)

리 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, 그림 9에서 보듯이 섬유의 직경이 0.46mm인 경우는 0.21mm 직경의 섬유보다 인장강도가 4배 이상 크지만 실제 흙과 혼합된 상태에서는 오히려 흙의 전단강도 값이 작게 나타나는 경향을 보여주는데, 이는 섬유 직경이 클수록 동일한 섬유 혼합물에서의 섬유의 양이 작아 섬유와 흙의 마찰면이 작게될 뿐만 아니라 섬유와 흙 사이의 마찰력에 의해 각 섬유에서 유발되는 인장응력이 섬유가 보유하고 있는 인장강도보다 극히 작기 때문으로 판단된다. 특히, 점토질 흙(D시료)에 굵은 직경의 섬유(MF2, MF3)를 혼합한 경우에는 이러한 현상과 함께 섬유의 인장효과를 유발시키는 섬유와 흙 사이의 마찰력이 상대적으로 작기 때문에 섬유의 보강효과가 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다.

한편, 섬유의 길이가 1cm 정도로 매우 작을 경우에는 흙 속에서 섬유의 소요 인장응력을 유발시킬 만큼 흙과의 충분한 마찰력이 발휘되지 못하므로 섬유에 의한 흙의 전단강도 증가 효과가 보다 작게 나타났다. 특히 섬유의 유연성이 작은 섬유 MF2, MF3를 혼합한 점토질 흙이나 섬유 MF3를 1cm 길이로 절단하여 혼합한 모래질 흙의 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 함께 적절한 인장강도를 갖을 수 있는 보다 작은 직경의 섬유가 필요할 것으로 판단된다.

4.2.3. 섬유 혼합물의 영향

그림 10에서는 섬유 혼합물에 따른 섬유혼합

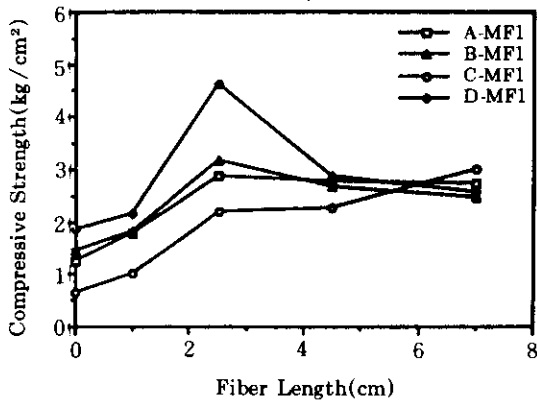


그림 8. 흙 종류별 섬유 길이에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화 : 섬유 혼합률 2.0%

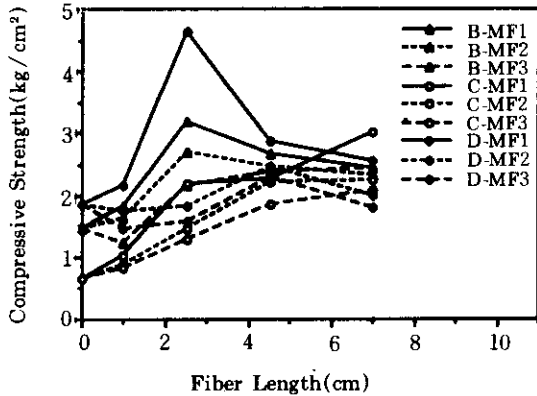
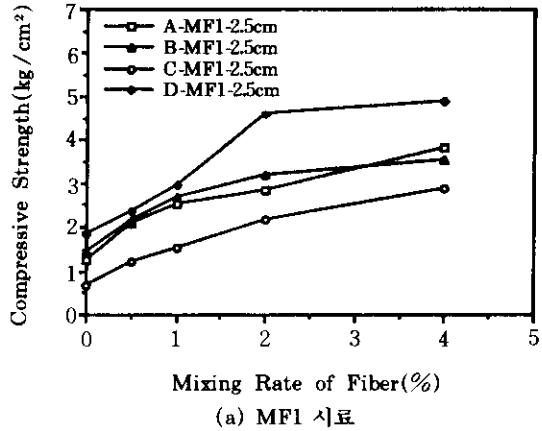


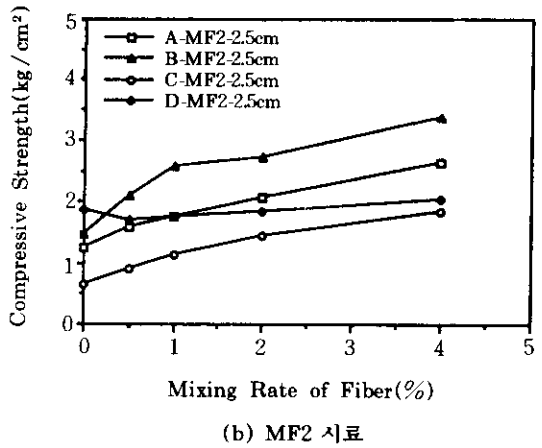
그림 9. 섬유 종류별 섬유 직경에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화 : 섬유 혼합률 2.0%

보강토의 일축압축강도의 변화를 보여준다.

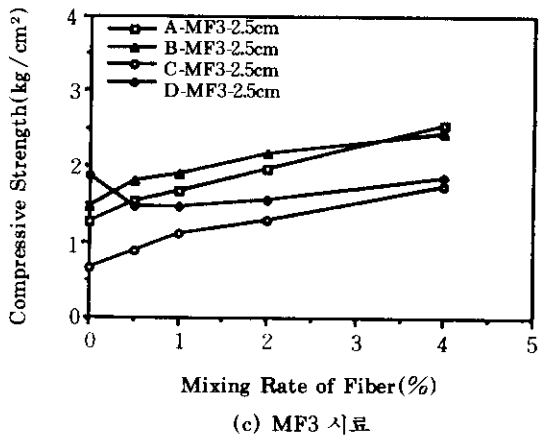
그림 10에서 보듯이 섬유혼합 보강토의 일축압축강도는 섬유 혼합률이 증가함에 따라 지속적으로 증가하나 중량비 1~2% 이상의 섬유 혼합률에서는 섬유 혼합률의 증가에 따른 일축압축강도의 증가율이 점차 감소되는 경향이 있음을 알 수 있다. 예를들면, 균등계수가 작은 모래인 A시료와 균등계수가 큰 모래인 B시료, 실트질 흙인 C시료, 점토질 흙인 D시료에 직경 0.21mm, 길이 2.5cm의 섬유를 1% 중량비로 혼합하였을 때는 일축압축강도가 각각 2.0배, 1.8배, 2.4배, 1.5배 정도로 증가한 반면에



(a) MF1 시료



(b) MF2 시료



(c) MF3 시료

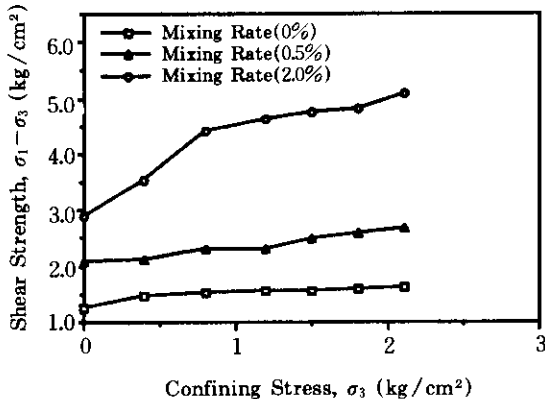
그림 10. 섬유 혼합률에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화

4% 혼합하였을 때는 각각 3.0배, 2.4배, 4.4배, 2.6배 정도로 밖에 증가하지 못하였다. 이러한

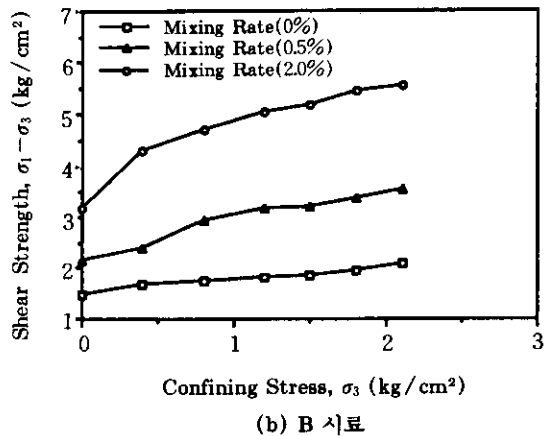
현상은 섬유 혼합률이 1~2% 이상이 되면 혼합된 섬유의 양이 많아 섬유의 엉킴현상이 점점 심해지며, 섬유와 흙의 마찰력에 의한 전단 특성보다는 흙을 포함한 섬유들의 엉켜진 형태에 의한 전단특성이 나타나기 때문으로 판단된다. 특히, 점토질 흙에 굵은 직경의 섬유(MF2, MF3)를 혼합한 경우에는, 이러한 현상과 함께 점토와 섬유 사이의 마찰력이 상대적으로 작기 때문에 섬유 혼합률에 따른 섬유의 보강효과는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

4.2.4 구속응력의 영향

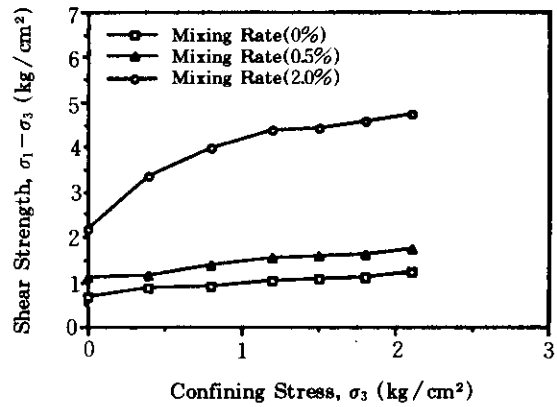
그림 11에서는 구속응력에 따른 섬유혼합 보강토의 전단강도 값의 변화특성을 고찰해 보기 위해 섬유길이 2.5cm의 MF1의 시료를 대상으로



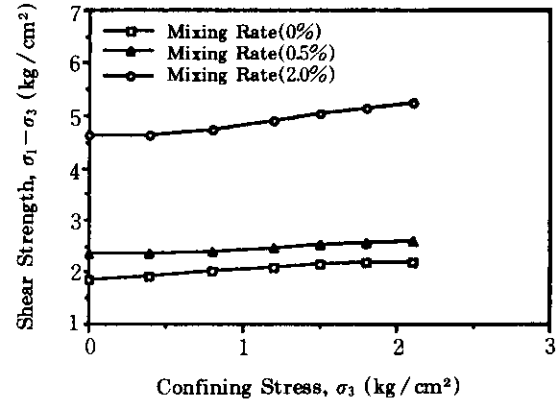
(a) A 시료



(b) B 시료



(c) C 시료



(d) D 시료

그림 11. 구속응력에 따른 섬유혼합 보강토의 전단강도 변화(MF1 시료, 섬유 길이 2.5cm)

로 수행한 삼축압축시험의 결과를 보여준다.

그림 11에서 보듯이 섬유혼합 보강토의 구속응력에 따른 전단강도 변화형태는 A, B, C시료의 경우 흙 종류에 관계없이 구속응력 1.0kg/cm² 이하에서 완만한 전단강도 증가를 보이다가 그 이상의 구속응력에서는 섬유가 혼합되지 않은 흙시료의 전단 기울기와 거의 동일한 기울기로 전단강도가 증가하는 형태를 나타내는 반면, D시료에서는 구속응력에 관계없이 섬유가 혼합되지 않은 흙 시료의 전단 기울기와 동일한 증가형태를 나타낸다. 이러한 전단

특성으로부터 섬유혼합 보강토에서의 섬유혼합 효과는 흙의 내부마찰각의 증가가 아닌 점착력의 증가형태로 나타남을 알 수 있다. 따라서 섬유혼합 보강토에서의 점착력 증가효과는 흙과 혼합된 섬유가 흙과의 마찰력에 의해 흙시료의 수평방향의 변형을 억제시키는 효과, 즉 겉보기 구속응력을 받는 효과에 기인한다고 판단된다.

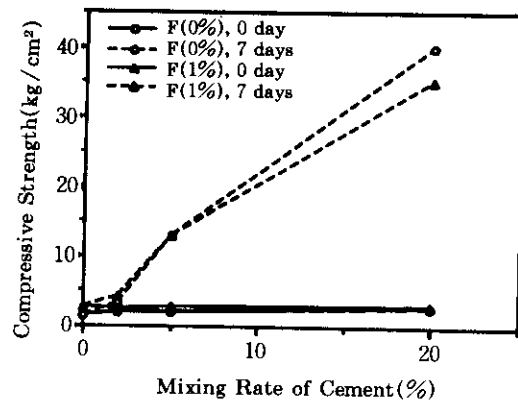
4.2.5 시멘트 혼합물의 영향

그림 12에서는 시멘트 혼합률에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화를 보여준다.

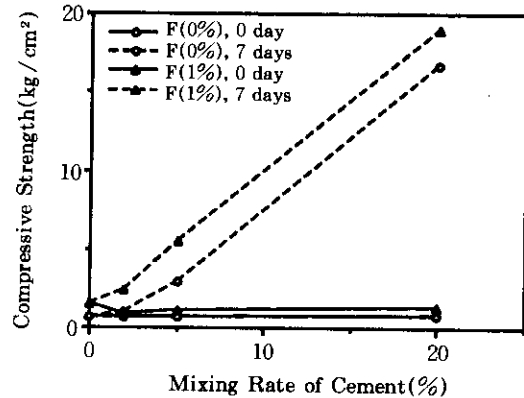
그림 12에서 보듯이 섬유혼합 보강토의 압축강도는 일반 흙과 마찬가지로 시멘트 혼합률이 증가할수록 지속적으로 증가하며, 양생이 되지 않은 경우에는 시멘트 혼합에 의한 강도증가 효과가 미미함을 알 수 있다. 예로서, 양입도의 모래질 흙(B시료), 실트질 흙(C시료)과 점토질 흙(D시료)에 직경 0.21mm, 길이 2.5cm의 섬유를 1% 혼합하고, 시멘트를 5% 혼합하여 7일간 양생시킨 후의 일축압축강도가 시멘트를 혼합하지 않은 경우에 비해 각각 4.9배, 3.6배, 2.3배 정도로 증가하였고, 시멘트를 20% 혼합하여 7일간 양생시킨 상태에서는 각각 13.1배, 12.2배, 5.7배 정도로 증가하였다.

또한, 모래질 흙(B시료)에서는 시멘트가 중량비로 5% 이상 혼합되면 섬유혼합 보강토의 압축강도가 섬유가 혼합되지 않은 경우 보다 오히려 작아지는데, 이는 시멘트의 수화작용에 의한 흙의 고결화 정도가 클수록, 즉, 응력-변형률 곡선에서 최대압축응력에 대한 할선탄성계수가 클수록 흙과 섬유의 마찰력에 의해 유발되는 흙의 수평변형 구속효과가 전체 강도증가분에서 차지하는 비중이 점차 감소하고, 흙입자 사이의 전단 저항 응력이 흙과 섬유의 최대 마찰력 보다 크게 발현될 정도로 흙이 고결화되면, 즉 할선탄성계수가 어느 한계값 이상으로 크게 되면 흙 속에 혼합된 섬유들은 오히려 시멘트의 수화작용에 의한 흙의 고결화 정도를 저하시키는 요인이 되기 때문으로 판단된다.

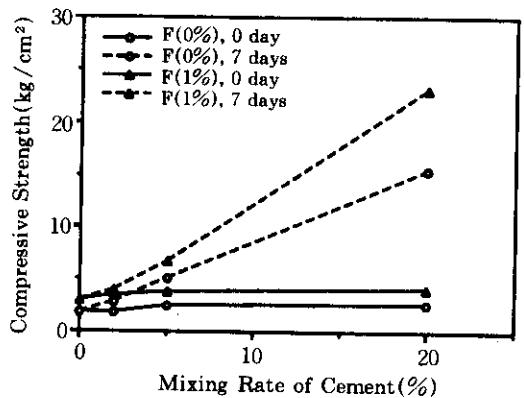
다.



(a) B 시료



(b) C 시료



(c) D 시료

그림 12. 시멘트 혼합률에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화(MF1 시료, 섬유 길이 2.5cm)

그림 13에서는 MF1 시료(길이 2.5cm)에 대하여 섬유에 의한 흙의 수평변형 구속효과가 흙의 고결화 정도 보다도 작게 발현되는 시멘트 첨가 섬유혼합 보강토의 한계 활선탄성계수를 평가해 보기 위해, 동일한 조건(흙시료, 섬유시료, 시멘트 혼합률, 양생일수 등)에서 중량비 1%의 MF1 시료를 혼합한 시멘트 첨가 보강토의 일축압축강도가 섬유가 혼합되지 않은 시멘트 첨가 보강토의 일축압축강도 보다 큰 경우와 작은 경우를 비교하여 도시하였다.

그림 13에서 보듯이 섬유에 의한 흙의 수평변형 구속효과가 발현되지 않는 시멘트 첨가 섬유혼합 보강토의 한계 활선탄성계수는 8.8kg/cm² 정도로 평가할 수 있다.

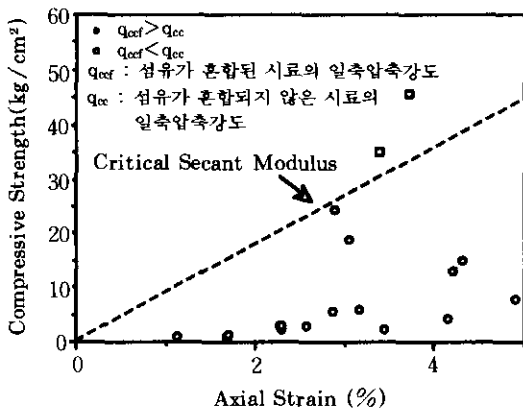
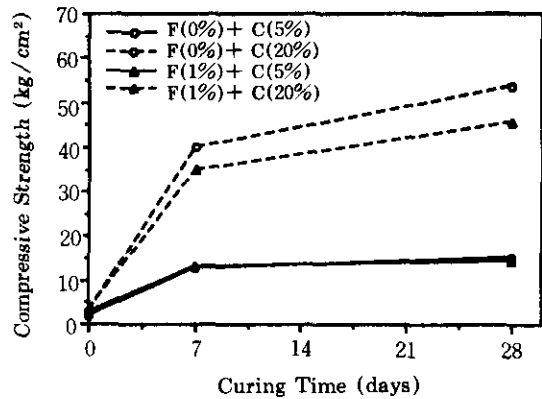


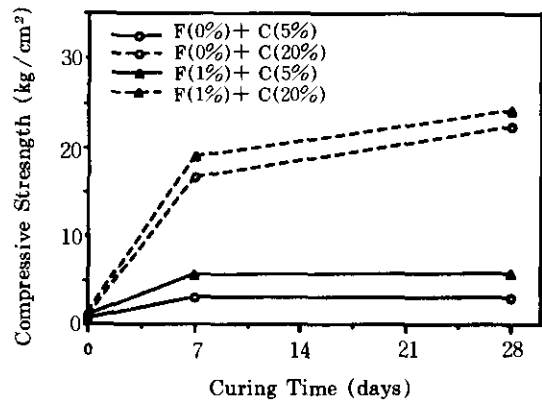
그림 13. 섬유 보강효과가 나타나지 않는 시멘트 첨가 섬유혼합 보강토의 한계 활선탄성계수

4.2.6 양생일수의 영향

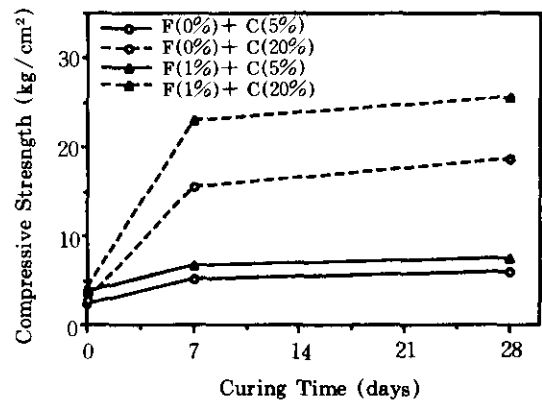
그림 14에서는 시멘트가 중량비로 5%, 20% 첨가된 섬유혼합 보강토의 양생일수에 따른 일축압축강도의 변화를 보여준다. 그림 14에서 보듯이 시멘트가 첨가된 섬유혼합 보강토의 일축압축강도는 섬유가 혼합되지 않은 경우와 마찬가지로 양생일수 7일까지는 급격하게 증가하고 그 이후에는 완만하게 증가하는 경향을 보여주는데, 이러한 현상은 시멘트 혼합률이 작을수록 보다 현저하게 나타남을 알 수 있다.



(a) B 시료



(b) C 시료



(c) D 시료

그림 14. 양생일수에 따른 섬유혼합 보강토의 일축압축강도 변화(MF1시료, 섬유 길이 2.5cm)

예를들면, 양입도의 모래질 흙(B시료), 실트질 흙(C시료), 점토질 흙(D시료)에 직경 0.21 mm, 길이 2.5cm의 섬유를 1% 혼합하고, 시멘트를 5% 혼합하여 7일간 양생시킨 후의 일축 압축강도가 양생하지 않는 경우에 비해 각각 4.6배, 5.1배, 1.8배 정도로 증가하였고, 28일간 양생시킨 상태에서는 각각 5.4배, 5.4배, 2.0배 정도로 증가하였다. 또한, 시멘트를 20% 혼합하여 7일간 양생시킨 후의 일축압축강도는 양생하지 않은 경우에 비해 각각 11.7배, 14.9배, 5.7배 정도, 28일간 양생시킨 상태에서는 각각 15.3배, 19.1배, 6.3배 정도로 증가하였다.

또한, B시료의 경우 시멘트 혼합률이 5% 이상되면 양생일수가 증가할수록 섬유혼합 보강토의 압축강도가 섬유가 혼합되지 않은 경우보다 점점 작게 나타남을 알 수 있는데, 이는 앞의 4.2.5절에서 기술하였듯이, 시멘트의 수화작용에 의한 흙의 고결화 정도가 커서, 흙입자 사이의 전단저항 능력이 흙과 섬유의 최대마찰력보다 크게 발현되면 흙 속에 혼합된 섬유들이 오히려 시멘트의 수화작용에 의한 흙의 고결화 정도를 저하시키는 요인으로 작용하기 때문으로 판단된다.

4.3 투수특성

그림 15에서는 섬유 혼합물에 따른 섬유혼합 보강토의 투수계수 값의 변화특성을 고찰해 보기 위해, 섬유길이 2.5cm의 MF1 시료를 대상으로 수행한 투수시험의 결과를 보여준다.

그림 15에서 보듯이 흙 종류에 관계없이 섬유 혼합률이 커질수록 섬유혼합 보강토의 투수계수의 log값이 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있으며, 양입도(Cu=75)의 B시료 보다 균등입도(Cu=5.5, 7.6)의 C시료, D시료에서 섬유 혼합률이 커질 수록 섬유혼합 보강토의 투수계수가 보다 크게 증가함을 알 수 있다.

조립토인 B시료 보다 세립토인 C시료나 D시료의 상대적으로 큰 투수계수의 증가는 섬유 혼합에 따른 섬유혼합 보강토의 다짐성 저하와

간극비의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 섬유 혼합에 따른 투수계수의 증가는 모세관 현상에 의한 지하수의 유입을 차단하여 다소나마 동상방지에 효과적일 것으로 기대된다.

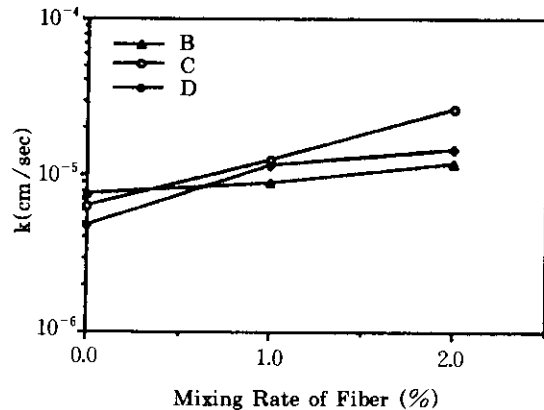


그림 15. 섬유 혼합물에 따른 투수계수 변화(MF1 시료, 섬유 길이 2.5cm)

5. 결 론

섬유혼합 보강토의 공학적 특성을 평가하기 위해 수행한 A다짐시험과 일축압축시험, 삼축압축시험 및 투수시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 섬유혼합 보강토의 다짐특성은 섬유혼합률이 증가할수록 최대 건조밀도는 감소하고 최적 함수비는 증가하며, 이러한 다짐특성은 조립토인 모래질 흙에서 보다 현저하게 나타난다.

2) 섬유혼합 보강토의 전단강도에 미치는 섬유혼합 효과는 흙의 내부 마찰각의 증가가 아닌 점착력의 증가형태로 나타난다.

3) 섬유혼합 보강토는 전단시 최대 압축응력에 도달한 후 급격한 파괴없이 축변형의 증가에 따라 서서히 전단 저항력이 저하하는 특성을 보여준다.

4) 직경 0.21mm, 길이 2.5cm의 모노 필라멘

트 섬유를 1% 혼합한 섬유혼합 보강토는 모래질 흙, 실트질 흙, 점토질 흙에서 각각 1.8~2.0배, 2.4배, 1.5배 정도로 전단강도가 증가하였다.

5) 모노 필라멘트 섬유를 사용한 섬유혼합 보강토의 전단강도는 모래질 흙 및 점토질 흙의 경우에는 섬유 길이가 2.5cm 내외의 범위에서 보다 큰 전단강도 증가효과를 보여주며, 실트질 흙에서는 7cm 길이 까지 전단강도 증가효과가 크게 나타난다.

6) 섬유혼합 보강토의 전단강도는 섬유 혼합률이 증가할수록 지속적으로 증가하나, 중량비 1~2% 이상의 섬유 혼합물에서는 섬유혼합률의 증가에 따른 전단강도 증가율이 점차 감소하는 경향을 보여준다.

7) 시멘트가 첨가된 섬유혼합 보강토의 최대 전단강도는 흙 종류에 관계없이 시멘트 혼합률이 증가할 수록 약간씩 증가하는 반면에 최적 함수비는 거의 일정한 경향을 나타내었다.

8) 직경 0.21mm, 길이 2.5cm이 모노필라멘트 섬유에 의한 흙의 수평변형 구속효과가 발현되지 않은 시멘트 첨가 섬유혼합 보강토의 한계 활산탄성계수는 8.8kg/cm² 정도로 평가되었다.

9) 시멘트 첨가 섬유혼합 보강토의 일축압축강도는 양생일수 7일까지는 급격하게 증가하고 그 이후에는 완만한 증가를 보여준다.

10) 섬유 혼합률이 증가할 수록 섬유혼합 보강토의 투수계수의 log값이 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보여준다.

감사의 글

본 연구를 수행함에 있어 관련 자료제공 및 실험장비 제작 등에 협조해 주신 대한산자공업(주) 윤윤모 사장께 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Brown, C.B. and Sheu, M.S.(1975), Effects of deformation on slopes, J. of Geotech. Engrg, ASCE, 101(1), pp. 147~165.
2. 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.
3. Waldron, L.J.(1977), Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil, Soil Science Society America J., 41(5), pp. 843~849.
4. Gray, D.H. and Ohashi, H.(1983), Mechanics of fiber reinforcement in sand, J. of Geotech. Engrg. ASCE, 109(3), pp. 335~353.
5. McGown, A., Andrawes, K. Z., Hytiris, N. and Mercer, F.B.(1985), Soil strengthening using randomly distributed mesh elements, Proc. of XI th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg, Vol. III, San Francisco, Calif., pp. 1735~1738.
6. 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.
7. Gray, D.H. and Maher, M.H.(1989), Admixture stabilization of sands with discrete, randomly distributed fibers, Proc. of XII th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1363~1366.
8. Al-Refeai, T.(1991), Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 10, pp. 319~333.
9. Freitag, D.R.(1986), Soil randomly reinforced with fibers, J. of Geotech. Engrg. ASCE, 112(8), pp. 823~826.
10. Nada, Y., Ogawa, S., Ikeda, T. and Kobayashi, F.(1989), Shearing properties of reinforced soil mixed short fibers, Proc. of XXIV th Conf. on Soil Mech. Engrg, pp. 1873~1874.

(접수일자 1995. 3. 2)