

섬유혼합토의 비선형 동적물성치

Nonlinear Dynamic Properties of Fiber Reinforced Soils

박 철 수*¹ Park, Chul-Soo
황 선 근*² Hwang, Seon-Keun
목 영 진*³ Mok, Young-Jin

Abstract

In this paper, deformation characteristics of fiber-mixed-soils were studied at small strain range(0.0001%~1%) using resonant column test and triaxial test, and reinforcement effect was evaluated by the measure of maximum shear moduli. The effects of the major parameters such as fiber content, aspect ratio and fiber type on reinforcement were comparatively assessed. The specimens were remolded from Jumunjin Sand randomly mixed with discrete polypropylene staple fibers. Maximum shear moduli of fiber-mixed-soils increased by up to 30% and modulus reduction was also restrained in nonlinear range. Shear moduli increased as the aspect ratio increases. The reinforcement was more effective with fibrillated fiber than with monofilament fiber. The most effective reinforcement was achieved with the specimen of 0.3 % fiber content.

요 지

본 논문은 공진주시험과 삼축압축시험을 이용하여 소변형률(0.0001%~1%) 범위에서 섬유혼합토의 변형 특성을 규명하였으며, 최대전단탄성계수를 잣대로 보강효과를 평가하였다. 또한 단섬유의 직경에 대한 길이의 비(형상비), 흙의 중량에 대한 섬유 중량의 섬유혼합비, 단섬유의 종류에 따른 보강효과를 비교 검토하였다. 시료는 주문진 표준사에 폴리프로필렌 재질의 단섬유를 무작위로 배합하여 사용하였다. 섬유혼합토의 최대전단탄성계수는 비혼합토에 비해 최대 30%까지 증가하였고, 비선형 영역에서의 전단탄성계수 감소량도 억제되었다. 형상비가 증가할수록 최대전단탄성계수는 증가하고, 단사에 비해 망사의 보강 효과가 큰 것으로 나타났다. 섬유혼합비는 0.3 % 부근에서 보강효과가 가장 커, 최적인 것으로 확인되었다.

Keywords : Aspect ratio, Damping ratio, Fiber content, Fiber reinforced soil, Fiber type, Reinforcing effect, Resonant column test, Shear modulus, Small strain triaxial test

1. 서 론

근래에, 합성섬유를 이용하여 지반의 강도 및 안정성을 증진시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 섬유혼

합토는 흙과 섬유의 마찰력에 의해 유발되는 섬유의 인장저항을 이용하여 흙의 역학적 특성을 개선시킨 새로운 형태의 보강토이며 옹벽 및 제방, 구조물의 기초, 철도의 성토 노반, 도로포장의 노상 안정처리 등 여러

*1 정희원, 경희대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Kyunghee Univ., sunsetlove77@hanmail.net)

*2 정희원, 한국철도기술연구원 궤도 토목연구본부 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Track & Geotechnical Engrg. Team, KRRI)

*3 정희원, 경희대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyunghee Univ.)

분야에서 적용이 되고 있다. 그동안 섬유혼합에 의한 강도 증가에 영향을 주는 인자 및 혼합조건을 규명한 연구 결과가 발표되었다(Uzdavines, 1987; Maher, 1988; Maher와 Gray, 1990; Nataraj 등, 1996; 장병욱 등, 1998). 특히 단섬유(staple fiber)로 보강된 섬유혼합토는 흙과 섬유의 혼합이 용이하고, 강도의 등방성과 그 지속성이 우수하며, 토목섬유 공법의 단점인 보강재를 따라 전진하는 잠재적인 취약면이 없는 등의 장점을 가지고 있다(Maher와 Gray, 1990).

그러나 지금까지의 섬유혼합토에 관한 연구는 지반의 파괴기준에 관심을 가져왔으며, 소변형률 범위(0.0001%~1%)에서의 변형률에 따른 탄성계수(modulus)의 변화, 즉 섬유혼합토의 비선형 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이었다. 지반은 변형률의 크기에 따라 비선형적으로 거동하며, 일반 사용하중에서 변형률의 범위는 최대 1% 이하인 것(Burland, 1989)을 감안할 때, 이러한 변형률 범위내의 정밀한 탄성계수 측정은 지반거동 예측에 절실히 요구된다.

소변형률 범위에서 탄성계수를 측정하는 대표적인 실내시험은 공진주시험이다. 공진주시험은 동적하중을 가해 변형률 0.0001%~0.1% 범위에서 전단탄성계수(shear modulus)는 물론 재료감쇠비(damping ratio)를 측정할 수 있는 신뢰성 있는 시험법이다. 또한 최근에는 로드셀과 감지기를 삼축압축 셀 내부로 이동시켜 기존의 외부 변형측정의 약점인 단부오차(bedding error) 등을 제거하여 삼축압축시험으로 변형률 0.01%~1% 범위에서 정밀하게 탄성계수를 측정하게 되었다(Tatsuoka 등, 1992; 김동수 등, 1997; 오세봉 등, 2002).

그림 1은 지반의 전형적인 비선형 응력-전단변형률

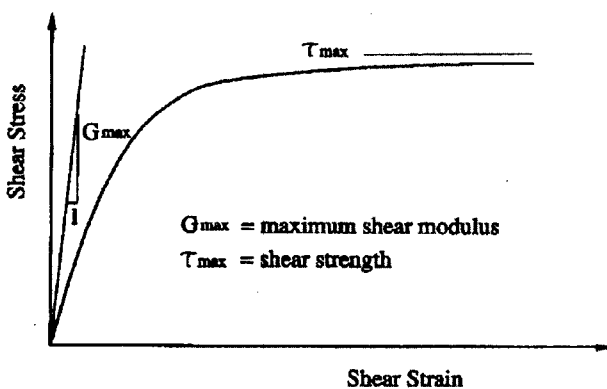


그림 1. 전형적인 지반의 응력-변형률 관계

곡선이다. 사용 편리상, 한 변형률에서 원점으로 그은 할선(secant line)의 기울기를 전단탄성계수로 정의하여 비선형 탄성계수의 잣대로 활용하고 있다. 원점 부근의 어떤 변형률까지는, 응력-변형률 곡선은 거의 직선으로 전단탄성계수가 동일한 최대전단탄성계수(G_{max})를 갖게 된다. 그 이후의 변형률에서는 점차로 할선이 낮게 되어 전단탄성계수가 감소하고 있다. 이 점차로 감소되는 전단탄성계수를 최대값으로 정규화(G/G_{max})하여 생성된 곡선은 그림 2와 같으며 동적해석의 데이터로 활용하고 있다. 여기서 주목할 사항은, 대략 전단변형률 0.001% 부근에서 최대값이 끝나 비선형 거동이 시작되고, 그 경계를 선형한계변형률이라고 부른다. 일반적으로 공진주시험으로 변형률 0.1%까지 이 곡선을 구할 수 있고, 측정기술의 발달로 삼축압축시험으로 1%까지 연장하게 되었다. 두 시험 결과는 대략 변형률 0.01%~0.1%범위에서 중복되는데 정밀한 변형률 측정의 혜택으로 하중종류(동적 또는 정적)에 관계없이 잘 일치하게 되었다.

본 연구의 목적은 소변형률 범위에서 섬유 보강에 따른 사질토의 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 특성을 연구하는데 있으며, 이를 잣대로 보강효과를 살펴보는 데 있다. 또한 단섬유의 직경에 대한 길이의 비(형상비), 흙의 중량에 대한 섬유 중량의 섬유혼합비, 단섬유의 종류에 따른 보강효과를 비교 검토하였다. 시료는 주문진 표준사를 사용하였고, 보강용 섬유는 합성섬유의 하나인 폴리프로필렌 재질의 단섬유를 무작위로 배열하여 사용하였다.

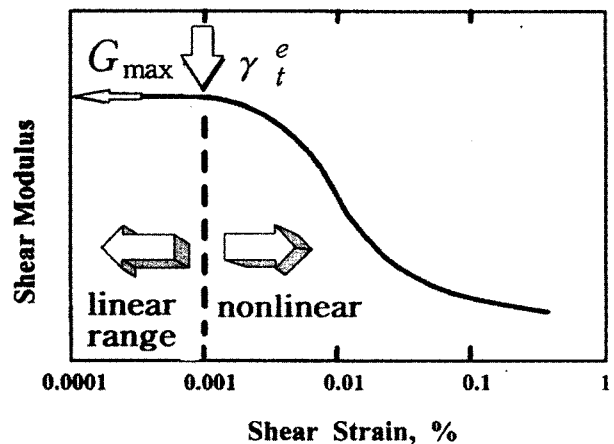


그림 2. 지반의 전단탄성계수-변형률 관계

2. 시험

2.1 시료

본 연구에서 사용한 시료는 주문진 표준사이다. 입자는 둥글며, 20번 체와 40번 체 사이의 고른 입도 분포를 갖게 하였다. 표 1은 시험에 사용한 시료의 기본 물성치이다.

합성섬유는 형태에 따라 텍솔(TEXOL)과 같이 길이가 길고 연속적인 섬유(continuous filament), 길이가 짧고 끊어진 섬유(staple fiber), 그리고 납작한 필름 형태의 섬유(slit film)로 나뉘어진다. 또한 흡 속에 섬유 배치 방향에 따라 한 방향으로 정렬된 섬유(oriented fiber)와 무작위로 배열된 섬유(randomly distributed fiber)로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 폴리프로필렌 재질의 단섬유(staple fiber)를 제조방식에 따라 다른 단사(monofilament fiber)와 망사(fibrillated fiber)를 무작위로 배열하여 시험을 수행하였다. 단사는 60mm, 망사는 19mm, 38mm, 60mm의 길이를 사용하였다. 이 시험에 사용한 섬유의 물리적 특성은 표 2와 같다.

모래의 강도 및 탄성계수는 흡 입자의 조밀한 상태에 따라 달라진다. 공진주시험은 반복하중을 가하므로 느슨한 모래의 경우, 하중이 반복됨에 따라 탄성계수가 점차 증가하는 경화현상(hardening)을 보이게 된다. 본 연구에서는 이러한 하중반복횟수의 영향을 배제하고, 섬유 보강의 자체만으로 생기는 탄성계수 변화를 알아보기 위하여 상대밀도 90%, 간극비 0.52의 매우 조밀한 상태로 공시체를 성형하여 공진주시험을 수행하였다. 또한 반복하중을 1000회 이상 가하여 경화현상이 완료된 뒤에 시험을 시행하여 하중반복횟수의 영향을 없앴다.

섬유혼합비(fiber content, %)는 섬유의 형태와 종류에 따라 적정 중량비가 다르다. 본 연구에서 사용한 폴리프

로필렌 재질의 단섬유는 기존의 삼축 및 일축압축 강도 시험에서 적정 섬유혼합비가 1% 이내인 것으로 판명되었다(Nataraj, 1996). 따라서 본 연구에서도 섬유 혼합에 따른 탄성계수에 대한 보강효과를 알아보기 위해 0.2%, 0.3%, 0.5%의 섬유혼합비로 모래와 섬유를 무작위로 혼합하여 시험을 수행하였다. 혼합시 섬유끼리 엉키는 현상을 배제하기 위해 혼합비는 0.5% 이하에서 제한하고, 인위적으로 고르게 혼합하였다. 무작위로 배열된 섬유(randomly distributed fiber)는 섬유의 혼합이 용이하고, 일정한 방향성을 가지고 배열된 섬유(oriented fiber)에 비해 잠재적인 취약면이 없는 장점이 있다. 또한 섬유가 무작위로 배열된 경우는 전단면에 수직으로 배열된 섬유혼합토와 거동이 유사한 것으로 검증되었다(Maher, 1988). 섬유혼합토의 중량-체적 관계는 섬유를 흡 입자의 일부로 간주하여 일반 토사와 동일한 관계를 갖게 하였다.

2.2 시험계획

섬유혼합토의 보강효과를 살펴보기 위해 비혼합토를 포함하여 모두 13가지의 혼합조건에 대해서 변형률 약 0.05%까지는 공진주시험(RC)을, 그 이상의 변형률 범위에서는 삼축압축시험(TX)을 수행하였다. 망사 단섬유는 길이 19mm(형상비=226), 38mm(형상비=452), 60mm(형상비=714)에 대해 각각 섬유혼합비를 0.2%, 0.3%, 0.5%로 다르게 하여 형상비, 섬유혼합비 전체에 걸쳐 보강효과를 연구하였다. 그러나 단사는 길이 60mm의 경우에만 대해서만 섬유혼합비 0.2%, 0.3%, 0.5%로 시험을 수행하여 동일한 형상비인 망사 60mm와의 보강효과를 비교하였다. 각각의 시료는 구속압을 25kPa, 50kPa, 100kPa의 세 단계로 공진주시험을 수행하였으며 섬유혼합비 0.3%, 구속압 100kPa에 대해서만 삼축압축시험을 병행하였다. 이 시험계획은 표 3과 같다.

표 1. 시료의 기본 물성치

최대건조 단위중량 $\gamma_{d \max}$ (t/m ³)	최소건조 단위중량 $\gamma_{d \min}$ (t/m ³)	비중 G _s	균등계수 C _u	곡률계수 C _c	유효입경 D ₁₀ (mm)	평균입경 D ₅₀ (mm)
1.76	1.51	2.63	1.36	0.95	0.45	0.6

표 2. 폴리프로필렌 섬유의 물리적 특성

항 목	비 중	지름 (mm)	밀 도 (t/m ³)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)
물리적 특성	0.90 - 0.92	0.084	0.89	5.2 - 7.7	3.5 - 3.8×10 ⁴

표 3. 시험 계획

구분	섬유종류	형상비 (L/d)	섬유혼합비 (%)	시험종류	구속압 단계 (kPa)
비혼합도		0	0	RC-TX	(RC는 구속압 25kPa, 50kPa, 100kPa를 사용) (TX는 구속압이 100kPa일 경우에만 수행)
섬유 혼합도	망사 (Fibrillated Fiber)	226 (19mm)	0.2	RC	
			0.3	RC-TX	
			0.5	RC	
		452 (38mm)	0.2	RC	
			0.3	RC-TX	
			0.5	RC	
	714 (60mm)	0.2	RC		
		0.3	RC-TX		
		0.5	RC		
	단사 (Monofilament Fiber)	714 (60mm)	0.2	RC	
			0.3	RC-TX	
			0.5	RC	

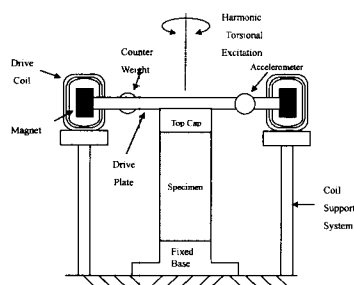
2.3 공진주시험

공진주시험의 기본원리는 원통형시료의 일차모드 공진 주파수를 찾아내 전단탄성계수를 얻는 것이다. 그림 3(a)와 같이 가진주파수를 변화시키면서 일정한 전압의 전기 신호를 코일-자석 가진장치에 보내 그림 4와 같이 반전하는 비틀력을 시료의 상부에 작용시킨다. 이 때 주파수별 시료의 변위를 측정해 그림 3(b)와 같은 곡선을 주파수응답곡선이라 한다. 이 응답곡선의 최대값이 얻

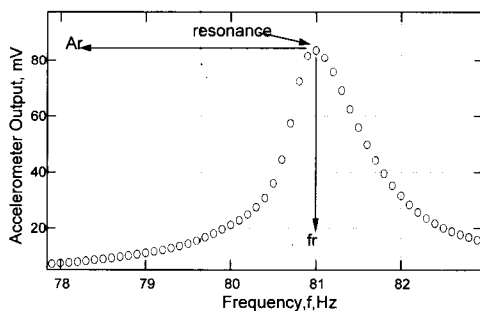
어지는 주파수가 공진주파수이다. 이 공진주파수는 시료 전단탄성계수의 지표가 되며 공진주파수가 클수록 탄성계수가 큰 것을 의미한다. 공진주파수, 가진 장치의 특성과 시료의 크기 등을 조합시켜 전단탄성계수, 전단 변형률을 계산한다. 공진주시험에서 자유진동감쇠곡선이나, half-power bandwidth method, 또는 주파수 위상 각법을 사용하여 감쇠비를 측정한다

구속압 지속 시간에 따른 공진주파수의 변화(즉 전단탄성계수의 변화)를 규명하고자 예비시험을 수행하였다. 조밀한 밀도로 성형한 공시체는 예상대로 구속압 지속 시간에 거의 영향을 받지 않고 일정한 공진주파수를 보였다(즉 전단탄성계수의 변화가 없다). 이 단계에서 가한 주파수별 입력 전압은 0.001% 이내의 변형률에 해당하는 크기이다. 다음 단계는 0.01% 변형률에 해당하는 입력 전압을 주어 비선형 영역의 반복하중에 의한 경화를 미리 완료시켜, 그 뒤에 수행할 공진주시험에는 반복하중에 의한 영향을 배제하였다. 이 과정은, 기타 다른 전단탄성계수 증가 요인을 없애고 순수한 섬유에 의한 보강효과만 평가하기 위한 것이다.

위와 같은 일련의 과정이 끝나면, 구속압을 가하고 3



(a) 고정단-자유단 공진주시험 장치의 개요도



(b) 공진주시험에서 획득한 전형적인 주파수응답곡선

그림 3. 공진주시험 장치와 주파수응답곡선

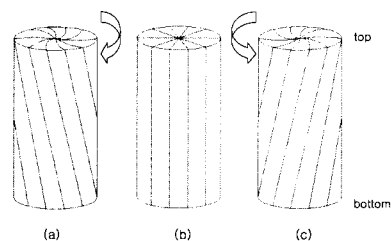


그림 4. 좌우로 반전하는 비틀력과 시료 변위

시간 이상이 지난 후에 배수조건에서 선형과 비선형 영역에 걸쳐 비틀 하중을 단계별로 증가시켜가며 공진주 시험을 수행하였다.

2.4 삼축압축시험

삼축압축시험은 LVDT를 셀 내에 설치하여 국부(local)변형 측정이 가능한 삼축시험기를 사용하여 수행하였다(그림 5 참조). 시료의 거치는 공진주시험과 동일하며 멤브레인에는 함석판 재질의 코어지지대(hinge)를 순간접착제로 붙였다. 이때의 상·하부 코어지지대는 시료의 단부오차를 제거하고 정확한 국부변형의 측정을 위해 시료 양단으로부터 25mm 떨어진 곳에 설치하였다. 삼축시험은 압밀배수시험(CD-test)을 하였으며 구속압의 재하는 공기압으로 하였다. 구속압을 3시간 정도 가한 뒤 구속셀 내부의 시료에 구속압이 고르게 작용하면 시험을 시작하였다. 하중을 가하기 전에 미소한 하중을 먼저 가하여 피스톤과 top cap, 시편사이의 접촉을 확실하게 하였다. 하중은 변형률 제어(strain control)로 재하 속도는 0.5%/min로 유지하며 시료가 완전히 파괴될 때까지 가하였다.

삼축시험에서 획득한 하중과 변위는 공진주시험에서

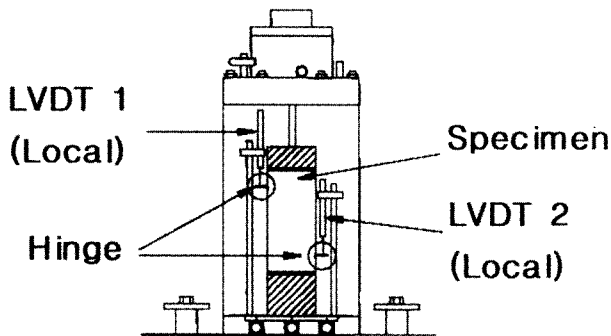


그림 5. LVDT를 이용한 소변형측정 삼축시험기 (오세봉 등, 2002)

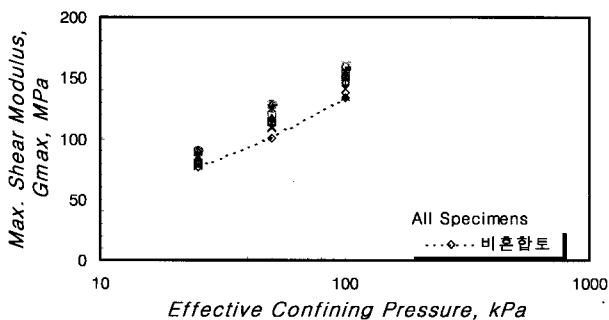


그림 6. 섬유혼합토의 최대전단탄성계수의 증가

획득한 결과와 비교하기 위해 전단탄성계수와 전단변형률로 변환하였다. 등가전단변형률(equivalent shear strain, γ_{eq})의 원칙에 따라 식 (1)을 이용하여 전단변형률(오세봉 등, 2000)과 조밀한 모래에 해당하는 포아슨비(ν) 0.3을 가정하여 전단탄성계수를 계산하였다.

$$\gamma_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \{ (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + 3/2 (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \}^{1/2}} \quad (1)$$

3. 거동 특성

3.1 공진주시험 결과

전단탄성계수특성은 선형탄성영역(변형률 0.001% 이내)의 최대전단탄성계수와, 비선형 구간의 정규화된 전단탄성계수 감소곡선으로 나타낸다. 마찬가지로, 감쇠특성은 선형영역의 최소감쇠비와 비선형 영역의 정규화된 감쇠곡선으로 표현한다. 그림 6은 구속압 증가에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 보여주고, 그림 7은 구속압 증가에 따른 최소감쇠비의 변화를 보여준다. 섬유혼합토도 구속압에 따라 최대전단탄성계수는 증가하고, 최소감쇠비는 감소하는 토사의 일반적 경향과 일치한다. 섬유혼합토의 최대전단탄성계수와 최소감쇠비가 비혼합토보다 커, 섬유보강의 효과를 반영하고 있다.

그림 8과 그림 9는 섬유혼합토의 비선형 탄성계수와 감쇠특성을 Seed와 Idriss의 대표곡선(1970) 및 Dobry의 곡선(1991)과 함께 도시하여 비교하였다. 비혼합토의 전단탄성계수 감소곡선은 Seed와 Idriss의 평균곡선(파선) 및 Dobry의 곡선과 거의 일치하는 반면, 섬유혼합토의 전단탄성계수 감소곡선은 Seed와 Idriss의 상한선(upper bound)쪽으로 치우치고 있다. 또한 혼합토의 감

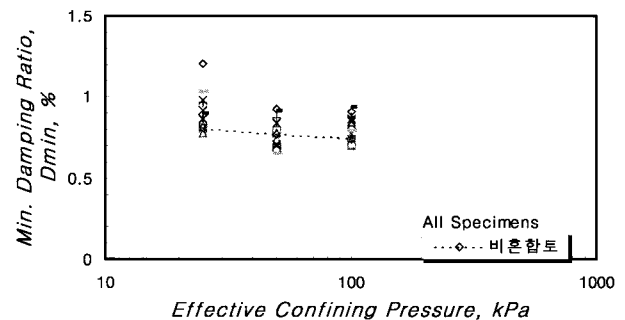


그림 7. 섬유혼합토의 최소감쇠비의 증가

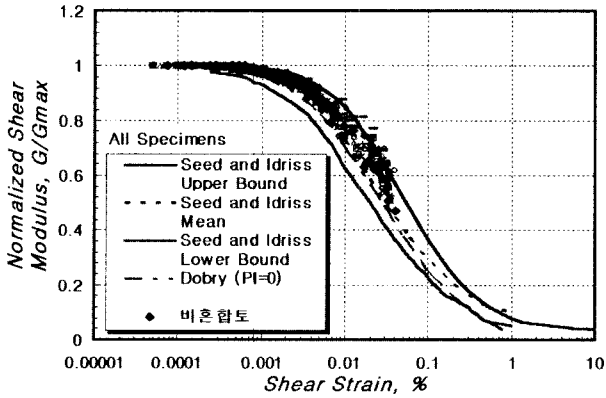


그림 8. 전단탄성계수 감소곡선

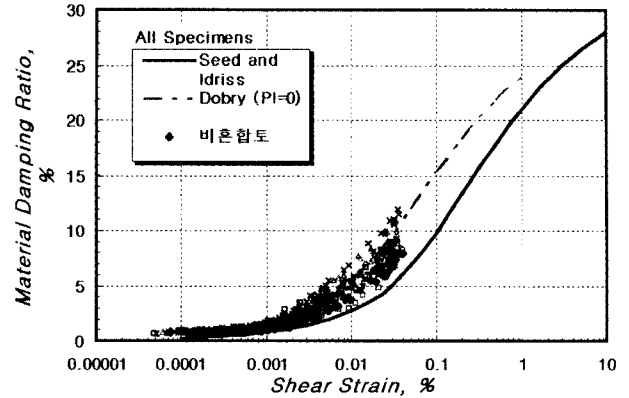


그림 9. 재료감쇠비 곡선

쇠비 곡선은 Dobry의 곡선 주변에 분포하고 비혼합토보다 큰 경향을 보이고 있다. 이는 섬유의 인장 저항이 혼합토의 전단탄성계수와 재료감쇠비에 기여함으로써 비선형 영역에서 비혼합토에 비해 변형에 대한 저항이 증가하였음을 의미한다.

3.2 삼축압축시험 결과

공진주시험의 변형률 범위는 최대 0.1%이므로, 1%까지의 전단탄성계수 특성을 규명하기 위해 삼축압축시험을 병행하였다. 셀(cell) 외부에서 변형을 측정하는 일반 삼축압축시험기로는 정확한 변형률 측정이 불가능해, 셀 내부에서 변형을 측정하는 소변형-삼축압축시험을 수행하였다.

혼합토의 응력-변형률곡선으로부터 변형률에 따른 할선율을 그어 구한 탄성계수와 포아슨비 0.3으로부터 계산한 전단탄성계수는 그림 10과 같다.

그림 11은 혼합토에 대한 0.0001%~0.1%의 변형률

범위의 공진주시험 결과와 0.01% 이상의 소변형 삼축압축시험의 결과를 합성한 것이다. 0.01%~0.1%의 중복되는 구간에서 공진주시험과 삼축시험의 결과가 비교적 잘 일치하였다. 이는 하중의 종류(정적 혹은 동적 하중)에 관계없이 정밀한 변형률을 측정하면 동일한 전단탄성계수를 구할 수 있음을 시사한다.

3.3 소변형 강성특성

구속압 100kPa의 비혼합토와 구속압 100kPa, 섬유 혼합비 0.3%일 때의 망사혼합토에 대해 소변형 삼축압축시험을 수행하였다. 그림 12는 공진주시험과 삼축압축시험 결과를 합성한 감소곡선이고, 그림 13은 정규화 전단탄성계수 감소곡선이다. 앞에서 언급한 바와 같이, 비혼합토는 Seed와 Idriss 평균곡선과 거의 일치하고, 섬유혼합토는 상한선으로 치우쳐 보강효과가 확인되었다.

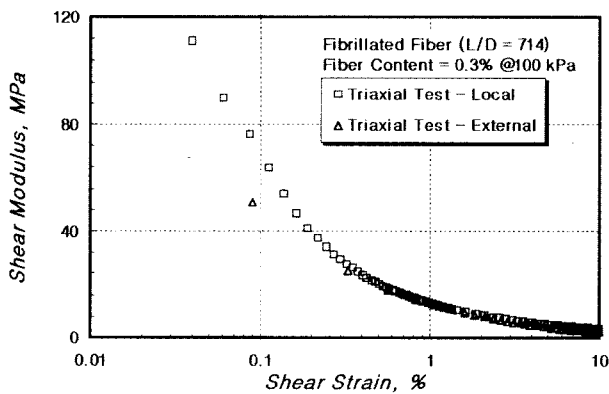


그림 10. 삼축압축시험으로 구한 전단탄성계수 감소곡선

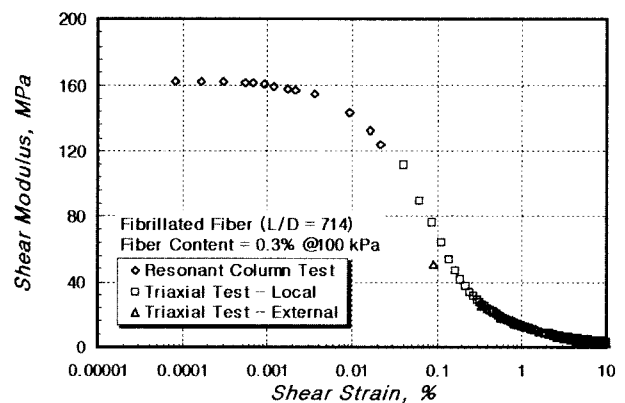


그림 11. 합성한 전단탄성계수 감소곡선

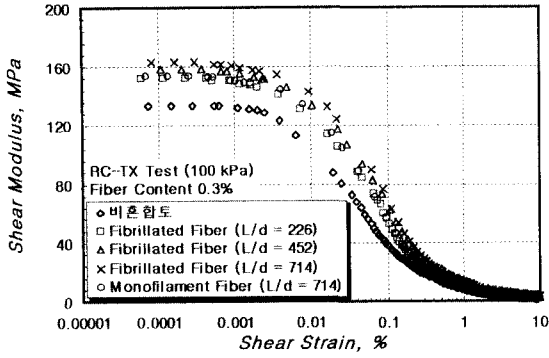


그림 12. 합성된 전단탄성계수 감소곡선

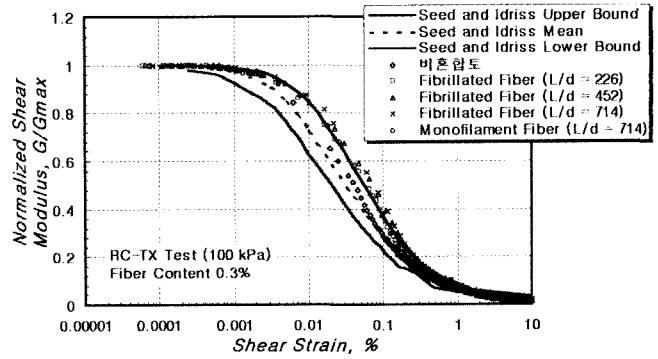


그림 13. 합성된 정규화 전단탄성계수 감소곡선

4. 보강 평가

섬유보강에 따라, 선형영역의 최대전단탄성계수와 최소감쇠비가 증가하고, 비선형 영역에서 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선의 형태가 변한다. 최대전단탄성계수가 보강 평가에 가장 효과적인 잣대로 나타나, 이를 기준으로 섬유혼합비, 형상비, 섬유의 종류에 따른 보강효과를 비교 검토하였다. 비혼합토의 최대전단탄성계수에 대한 섬유혼합토의 최대전단탄성계수의 비($G_{max, reinforced}/G_{max, unreinforced}$)를 매개변수로 하여 보강효과를 평가하였다.

4.1 섬유혼합비

그림 14는 섬유혼합비에 따른 보강효과를 나타낸다. 섬유혼합비에 따라 전단탄성계수가 최대 30%까지 증가해 보강효과가 있음을 확인할 수 있었다. 여기서 흥미 있는 사실은 혼합비가 0.3%일 때까지는 보강효과가 증가하였으나 0.5%일 때는 오히려 보강효과가 감소하였다는 사실이다. 즉 적절한 혼합비가 존재한다는 것을 의미한다. 이것은 다음의 두 가지 원인으로 판단된다. 첫

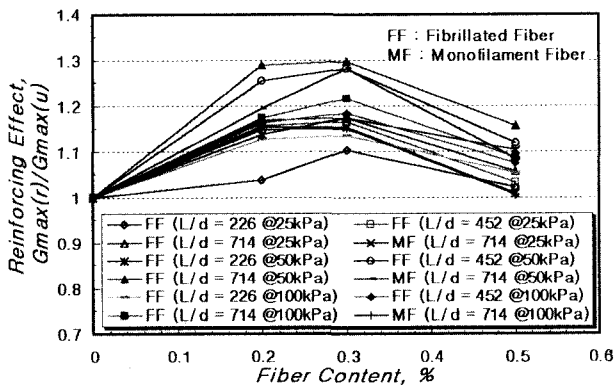


그림 14. 섬유혼합비에 따른 최대전단탄성계수

째, 시료의 전단탄성계수의 변화는 시료의 밀도에 직접적인 영향을 받는다. 그런데 시료에 혼합하는 섬유의 양이 증가하면 시료의 전체적인 밀도가 작아진다. 둘째, 과다한 양의 섬유 혼합은 흙 입자 사이의 직접적인 마찰력과 저항을 감소시킨다. 따라서 필요이상의 많은 양의 섬유 혼합은 시료의 밀도 감소와 입자간의 마찰력 감소로 오히려 보강효과가 줄어들을 알 수 있다.

그림 15는 최소감쇠비에 대한 보강효과를 나타낸다. 0.2%, 0.3%의 적은 혼합비일 때는 보강효과가 작거나 오히려 감소하는 경우도 있었으나, 0.5%의 높은 혼합비에서는 최대 50%까지 증가하였다. 혼합비가 커질 경우 최소감쇠비가 증가하는 이유는 흙 입자에 비해 시료에 혼합된 섬유의 에너지 흡수 효과가 더 크기 때문으로 판단된다.

4.2 형상비

본 연구에서는 망사(fibrillated fiber)에 대한 형상비에 따라 보강효과를 살펴보았다. 그림 16에서 알 수 있듯이 형상비(L/d)가 증가하면 섬유혼합토의 전단탄성계수가

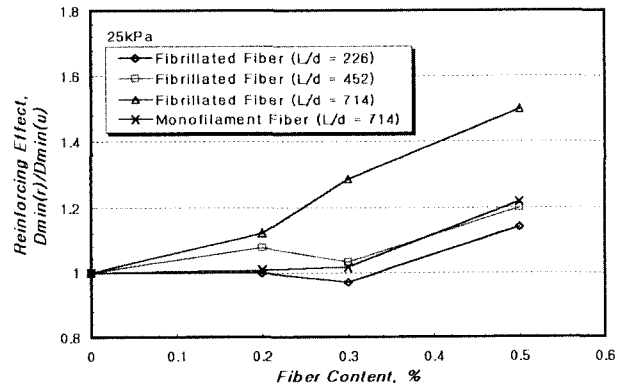


그림 15. 섬유혼합비에 따른 최소감쇠비

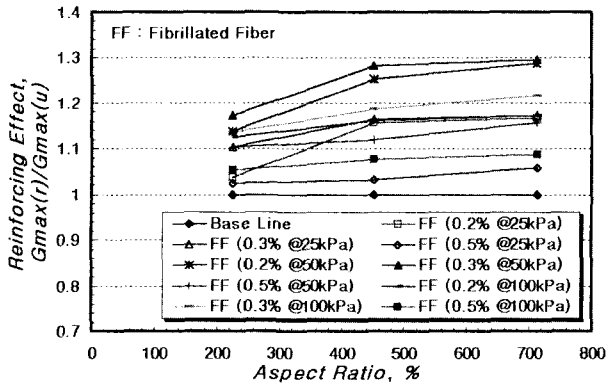


그림 16. 형상비에 따른 최대전단탄성계수

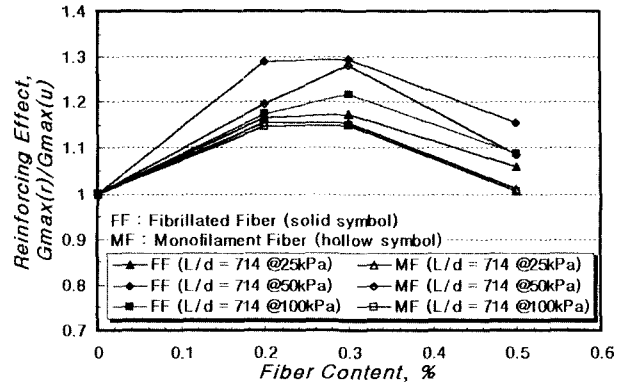


그림 17. 섬유 종류에 따른 전단탄성계수

대체적으로 증가하였다. 이는 섬유의 길이가 길어지면 흙 입자와 섬유사이의 접촉면이 증가하게 되고, 이로 인하여 흙 입자와 섬유의 일체감이 증진되기 때문이다.

4.3 섬유 종류

망사(fibrillated fiber)와 단사(monofilament fiber)의 효과를 비교하기 위해 섬유의 형상비(L/d=714)를 같게 하여 시험을 수행하였다. 섬유혼합토는 형상비가 클수록 보강효과가 크기 때문에 형상비가 가장 큰 경우를 비교하였다. 그림 17로부터 알 수 있듯이, 섬유혼합비와 형상비가 같을 경우 동일한 구속압 단계에서 최대전단탄성계수에 대한 보강효과는 단사에 비해 망사가 더 컸다.

5. 결론

본 논문에서는 소변형을 범위에서 섬유 보강에 따른 사질토의 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 특성을 공진주시험과 삼축시험을 이용하여 연구하였으며, 이를 갖대로 보강효과를 평가하였다. 또한 단섬유의 직경에 대한 길이의 비(형상비), 흙의 중량에 대한 섬유 중량의 섬유혼합비, 단섬유의 종류에 따른 보강효과를 비교 검토하였다. 시료는 주문진 표준사를 사용하였고, 보강용 섬유는 합성섬유의 하나인 폴리프로필렌 재질의 단섬유를 무작위로 배열하여 사용하였다. 이 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 섬유혼합토의 최대전단탄성계수와 최소감쇠비는 비혼합토에 비해 각각 최대 30%, 50%까지 증가하였다.
- (2) 섬유혼합토의 비선형 영역 전단탄성계수와 감쇠비도 뚜렷이 향상되었다. 비혼합토의 전단탄성계수 감

소곡선은 Seed와 Idriss 평균곡선과 거의 일치하는 반면, 섬유혼합토는 상한선으로 치우쳐 보강효과가 확인되었다.

- (3) 섬유혼합비가 0.3%일 때까지는 보강효과가 증가하였으나 0.5%일 때는 오히려 보강효과가 감소하는 경향을 보여, 적절한 혼합비에서 보강효과가 최대가 되는 것으로 나타났다.
- (4) 망사의 경우 형상비가 증가할수록 보강효과는 증가한다.
- (5) 일정한 형상비(L/d=714)에서의 보강효과는 망사가 단사에 비해 더 크다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터 연구과제(R11-1997-045-07003-0)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드리며, 삼축압축시험에 많은 도움을 주신 영남대학교에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동수(1995), "공진주/비틀전단(RC/TS)시험을 이용한 건조 사질토의 변형특성", 한국지반공학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 101-112.
2. 박영곤(1999), "섬유혼합토의 전단파괴 예측 모델의 개발과 비배수 전단 강도 특성 분석", 박사학위논문, 서울대학교, pp.37-41.
3. 박철수(2003), "섬유혼합토의 비선형 동적물성치 측정", 석사학위논문, 경희대학교.
4. 안영대, 오세봉, 고동희, 김동수(2002), "풍화토의 비배수 삼축압축시험시 전체 변형률 영역의 거동에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제1호, pp.29-39.
5. 조삼덕, 김진만(1995), "섬유혼합 보강토의 공학적 특성에 관한 실험 연구", 한국지반공학회, 제11권, 제2호, pp.107-120.
6. 조성호, 황선근, 김동수, 우규석(2001), "재료감쇠비 측정을 위한 주파수-위상각법, -공진주·비틀전단 실험 및 Impact Echo 시험

- 에의 적용”, 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제2-C호, pp.119-129.
7. Burland, J. B.(1989), “Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture : Small is Beautiful - The stiffness of Soils at Small Strains”, *Canadian Geotechnical Journal*, 26, pp.52-65.
 8. Gray, D. H. and Ohashi, H.(1983), “Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.109, No.3, pp.335-353.
 9. Gray, D. H. and Al-Refeai, T.(1986), “Behavior of Fabric versus Fiber-reinforced Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.8, pp.804-820.
 10. Hardin, B. O.(1965), “The Nature of Damping in Sands”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.91, January, pp.63-97.
 11. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.(1972), “Shear Modulus and Damping in Soils : Measurement and Parameter Effects”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, July, pp.603-624.
 12. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.(1972), “Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, July, pp.667-692.
 13. Hicher, P. Y.(1996), “Elastic Properties of Soils”, ASCE, August, pp.641-648.
 14. Hwang, S. K.(1997), “Dynamic Properties of Natural soils”, Ph. D. Dissertation The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
 15. Lo Presti, D. C. F., Pallara, O., Costanzo, D. and Impavido, M. (1994), “Small strain measurements during triaxial tests: Many problems, some solutions,” Proceedings, International Seminar Hokkaido.
 16. Maher, M. H.(1988), “Static and Dynamic Response of Sands Reinforced with Discrete, Randomly Distributed Fibers”, Ph. D. Dissertation, University of Michigan.
 17. Maher, M. H. and Gray, D. H.(1990), “Static Response of Sands Reinforced with Randomly Distributed Fibers”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.11, pp.1661-1677.
 18. Nataraj, M. S., Addula, H. R. and Mcmanis, K. L.(1996), “Strength and Deformation Characteristics of Fiber Reinforced Soils”, *Environmental Technology: Proc. of 3rd Int. Symp.*, Vol.1, pp.826-831.
 19. Ni, S. H.(1987), “Dynamic Properties of Sand under True Triaxial Stress state from Resonant/Column Torsional Shear Test”, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
 20. Michalowski, R. L. and Zhao, A.(1996), “Failure of Fiber-Reinforced Granular Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.3, pp.226-234.
 21. Scholey, G. K., Frost, J. D., Lo Presti, D. C. F. and Jamiolkowski, M.(1995), “Review of Instrumentation for Measuring Small Strains During Triaxial Testing of Soil Specimens”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.18, No.2, June 1995, pp.137-156.
 22. Shewbridge, S. E. and Sousa, J. B.(1991), “Dynamic Properties of Reinforced Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.9, pp.1402-1422.
 23. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1970), “Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis”, Report No.EERC 70-10, *Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley*, Sept., pp.37.
 24. Vucetic, M. and Dobry, R.(1991), “Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.1, pp.89-107.
 25. Qian, X., Gray, D. H. and Woods, R. D.(1991), “Resonant Column Tests on Partially Saturated Sands”, ASTM, GTJODJ, Vol.14, No.3, September 1991, pp.266-275.

(접수일자 2003. 1. 10, 심사완료일 2003. 4. 8)