



# 여러 가지 입도분포를 갖는 섬유혼합토의 동적변형특성

## Dynamic Deformation Characteristics of Fiber Reinforced Soils with Various Gradation

목 영 진\*      정 성 용\*\*      박 철 수\*\*\*  
Mok, Young-Jini      Jung, Sung-Yong      Park, Chul-Soo

### Abstract

Fiber reinforced soils have recently implemented to fills and base layers of highways and railroads, and deformation behaviors of reinforced soils in turn should be investigated. The paper evaluated deformation characteristics of fiber reinforced sands and their effectiveness of reinforcement using resonant column tests. The specimens were prepared by varying gradation and mixing polypropylene staple fibers of 0.3% fiber content. Maximum shear moduli of reinforced sands were increased by up to 30% with increasing uniformity coefficient. Shear moduli of well-graded reinforced sands were larger than those of poorly-graded ones regardless of confining pressure in the whole range of shearing strain and reinforcement was, in turn, more effective with higher uniformity coefficient.

*Keywords : shear modulus, fiber reinforced soils, reinforcement effect, uniformity coefficient, staple fiber, resonant column tests*

### 요 지

최근 들어 섬유혼합토가 도로 및 철도의 성토노반, 기층재료로 활용되기 시작하여 섬유혼합토의 변형특성에 대한 연구가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 공진주시험을 통하여 섬유혼합토의 거동특성과 보강효과를 평가하였다. 여러 가지 입도의 사질 토에 폴리프로필렌(polypropylene) 재질의 단섬유(staple fiber)를 중량비 0.3%로 혼합하여 시료를 성형하였다. 섬유혼합토의 최대전단변형계수는 양입도일수록 증가해, 비혼합토에 비해 최대 30%까지 증가하였다. 양입도의 전단변형계수는 빈입도보다 모든 전단변형을 범위에서 구속압에 관계없이 더 커, 양입도일수록 보강효과가 좋은 것으로 평가되었다.

**핵심용어 :** 전단변형계수, 섬유혼합토, 보강효과, 균등계수, 단섬유, 공진주시험

\* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 교수  
\*\* 동양고속건설 토목기술영업부 사원(전, 경희대학교 대학원 석사과정)  
\*\*\* 정회원 · 경희대학교 대학원 박사과정



## 1. 서론

최근 들어 섬유혼합토가 도로 및 철도의 성토노반, 기층 재료로 활용되기 시작하여 섬유혼합토의 변형 특성에 대한 연구가 필요하게 되었다. 사질토는 입상(粒狀)구조로 되어 있어 토입자가 쉽게 분리되고, 인장력에 저항할 수 없고, 작은 구속압에서는 전단변형이 쉽게 일어나는 특성이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해, 보강재료를 혼합하여 지반의 강도 및 안정성을 증진시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Gray와 Ohashi, 1983; Gray와 Al-Refeai, 1986; Uzdevines, 1987; 조삼덕 등, 1995; Nataraj 등, 1996; Michalowski와 Zhao, 1996; 장병욱 등, 1998). 특히 단섬유로 보강된 섬유혼합토는 흙과 섬유의 혼합이 용이하고, 강도의 등방성과 그 지속성이 우수하며, 토목섬유 공법의 단점인 보강재를 따라 진전하는 잠재적인 취약면이 없는 등의 장점을 가지고 있다(Maher, 1988; Maher와 Gray, 1990). 그러나 지금까지의 흙의 보강과 관련된 연구 및 시공은 주로 강도를 중심으로 수행되어 왔으며, 미소변형률 범위(0.0001%~1%)에서의 변형률에 따른 강성(stiffness)의 변화, 즉 보강된 지반의 비선형 거동특성에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 도로 및 철도의 성토노반, 보조기층 노상토 재료로 활용되는 사질토에 섬유를 혼합하여 미소변형률 범위의 비선형 거동을 살펴보았다.

실제로 지반은 반복하중 또는 동적 하중에 의하여 유발되는 변형률의 크기가 지반의 거동을 예측하는 중요한 변수임이 인식되고 있다. 일반 토목구조물의 하중 규모에서, 지반이 거동하는 변형률의 범위는 최대 1% 이하(Burland, 1989)이므로 이 변형률 범위 내의 정밀한 강성 예측이 지반거동 예측에 절실히 요구된다. 지반의 비선형 거동 예측에 대표적인 실내시험법으로는 공진주시험(resonant column tests)이 있다. 공진주시험은 변형률 0.0001%~0.1% 범위에서 지반의 동적물성치인 전단변형계수(shear modulus, G)를 측정할 수 있는 신뢰성 있는 시험법

이다.

박철수 등(2003)은 주문진표준사를 이용하여 섬유혼합토의 비선형 거동특성과 보강효과에 대해 연구하였다. 본 논문은 이 연구의 후속 연구 결과로, 여러 가지 균등 계수를 갖는 모래 시료를 성형하고 공진주시험을 수행하였다. 그리고, 저변형률 영역에서의 최대전단변형계수와 비선형 영역에서의 정규화된 전단변형계수 감소곡선에 대한 입도분포의 영향을 평가하고 그에 따른 섬유보강효과를 평가하였다.

## 2. 공진주 시험

### 2.1 시험 개요

본 연구에서 사용한 Stokoe식 고정단-자유단 공진주시험기의 기본원리는 원통형시료가 일차모드에서 공진을 유발시켜, 탄성이론을 바탕으로 시료의 동적 물성치를 산정하는 것이다. 주파수를 변화시키며 코일-자석 장치를 이용하여 정현파 비틀력을 시료의 상단부에 작용시켜 주파수에 따른 시료의 변위를 가속도계로 측정하여 주파수응답곡선을 구성한다. 주파수응답곡선으로부터 일차모드의 공진주파수를 찾고 시험장치의 특성과 시료의 크기 등을 연관시켜 전단파속도와 전단변형계수를 결정한다. 시험장치에 대한 상세한 언급은 이미 발표된 여러 문헌을 참조할 수 있다(Hwang, 1997; 박철수, 2003).

### 2.2 시료

본 연구에서 사용된 시료는 충남 아산시 배방면 하천에서 채취한 비소성 사질토이다. 시료는 불순물의 함량을 적게 하기 위해 1일 침수 후 105℃ 항온 건조로에서 24시간 건조하였다. 그리고, 체분석을 통하여 균등계수(uniformity coefficient,  $C_u$ ), 곡률계수(curvature coefficient,  $C_g$ ), 최대입자크기 등을 획득하였고 흙의 분류는 통일분류법(Unified Soil



표 1. 시험시료의 기본 물성

시료(USCS)	#4 통과량 (%)	#200 통과량 (%)	건조단위중량 ( $\gamma_d, g/cm^3$ )	균등계수 ( $C_u$ )	곡률계수 ( $C_g$ )
SW-1	96	4	1.80	9.48	1.60
SW-2	94	3	1.77	8.33	1.68
SW-3	89	2	1.79	7.54	1.88
SP-1	84	0	1.75	5.96	1.17
SP-2	90	0	1.79	3.46	1.08
SP-3	99	0	1.77	2.52	1.25
SP-4	99	4	1.72	5.05	0.97
SP-5	99	4	1.79	7.02	0.98

표 2. 폴리프로필렌 섬유 물리적 특성

항 목	비 중	지 림 (mm)	길 이 (mm)	밀 도 ( $t/m^2$ )	인장강도 ( $kg/cm^2$ )	탄성계수 ( $kg/cm^2$ )
물리적 특성	0.90 - 0.92	0.084	38	0.89	5.2 - 7.7	$3.5 - 3.8 \times 10^4$

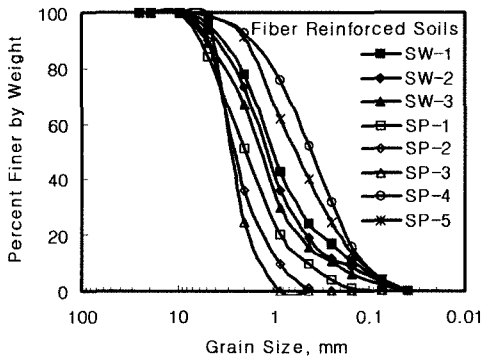


그림 1. 입도분포곡선

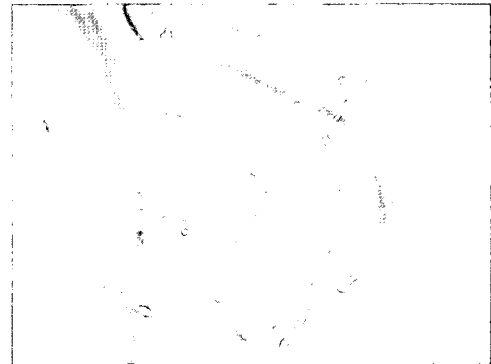


그림 2. 폴리프로필렌 재질의 단섬유: 망사

Classification System)을 이용하였다.

시험시료는 최대전단변형계수 및 정규화전단변형계수 감소곡선에 대한 입도분포의 영향을 평가하고, 이에 따른 섬유보강효과를 알기 위해 다양한 균등계수 변화를 갖는 시료를 제작하였다. 또한, 입도 분포가 집중되거나 입도 분포내에 입경의 누락 발생을 없애기 위하여 준비된 시료는 통일분류법에 의한 양입도 규정의 곡률계수를 유지하도록 하였으며, SW 3

종 및 SP 5종, 총 8종의 시료를 제작하여 공진주 시험을 수행하였다. 표 1은 시험시료의 기본 물성이고, 그림 1은 시험시료의 입도분포곡선이다.

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 흙 속에 섬유 배치 방향에 따라 한 방향으로 정렬된

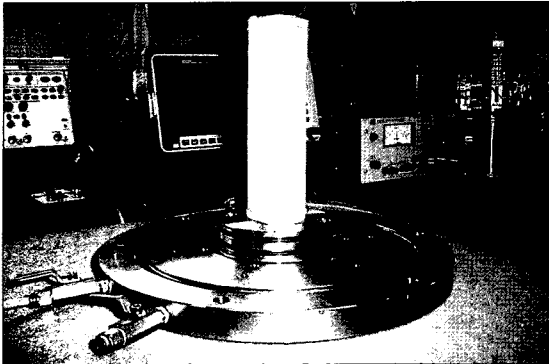


그림 3. 진공압을 이용한 모래 시료의 거치

섬유(oriented fiber)와 무작위로 배열된 섬유(randomly distributed fiber)로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 그림 2와 같은 폴리프로필렌 재질의 단섬유인 길이 38mm 망사(fibrillated fiber)를 무작위로 배열하여 시험을 수행하였으며, 공시체의 성형 및 거치는 그림 3과 같이 10kPa 진공압을 이용하였다. 이 시험에 사용한 섬유의 물리적 특성은 표 2와 같다.

### 2.3 시험 방법

시료는 공진주시험동안 무수한 반복하중(1000회 이상)을 가하여 경화현상이 완료된 뒤에 시험을 시작하여 하중반복횟수의 영향을 최소화했다. 그리고 섬유의 보강이 강성의 변화에 주는 영향을 정확히 파악하기 위해 모래가 매우 조밀한 상태(상대밀도 90% 이상)에서 공진주시험을 수행하였다. 공진주시험시 적용한 구속압은 25kPa, 50kPa, 100kPa이다.

섬유의 혼합비율, 즉 중량비(fiber content, %)는 기존의 연구에서 보강효과가 가장 큰 0.3%(박철수 등, 2003)로 하여 입도 분포별 보강 효과를 최대한 유도하였다. 섬유의 혼합 배치 방향은 무작위로 하여 시험을 수행하였다. 섬유 혼합시에 무작위 배열된 섬유는 섬유의 혼합이 용이하고 일정한 방향성을 가지고 배열된 섬유에 비해 잠재적인 취약한 면이 없다는 장점이 있기 때문이다. 또한 섬유가 무작위로 배열된 경우는 전단면에 수직으로 배열된 섬유혼합토와 거

동이 유사한 것으로 검증되었다(Maher, 1988). 섬유혼합토의 중량-체적 관계는 섬유를 흙 입자의 일부로 간주하여 일반 토사와 동일한 관계를 갖게 하였다. 섬유혼합 전후 시료의 간극비가 전체적으로 입자의 형상이 일정치 않기 때문에 약간의 감소는 발생하였지만 그 정도가 미미하여 간극비는 동일하다고 가정하여 시험을 수행하였다.

## 3. 동적변형특성 및 보강효과

본 연구는 입도 조정된 사질토의 섬유 혼합에 의한 전단변형계수에 대한 보강효과를 알아보기 위해 양 입도의 곡률계수로 유지하면서 균등계수를 변화시킨 시험시료를 사용하여 공진주시험을 하였다. 본 연구에서 보강효과에 대한 비교 조건(parameter)으로는 입도조정시 기준이 되는 시료의 균등계수와 시험 수행시 적용되는 구속압 크기, 전단변형률 크기를 제시하였다.

흙의 동적 변형 특성인 전단변형계수는 변형률의 크기에 따라 큰 영향을 받는다. 이 거동특성은, 변형률에 관계없이 일정한 값을 보이는 선형영역과(사질토의 경우, 전단변형률 약 0.001% 이내), 이에 후속되는 비선형영역으로 나누어 정의하고, 이 경계가 되는 전단변형률을 선형한계변형률(threshold strain)이라 부른다. 선형영역의 전단변형계수는 최대값을 가지며 이를 최대전단변형계수( $G_{max}$ )라 한다. 반면 변형률이 커짐에 따라 전단변형계수는 감소하는 비선형 거동을 보인다. 이에 따라, 전단변형계수를 선형영역과 비선형영역으로 나누어 보강효과를 평가하였다.

### 3.1 선형영역

차량하중, 기계하중, 발파, 말뚝타설 등에 의해서 지반에 유발되는 변형률은 대략 선형한계변형률 근처이다. 따라서 선형한계변형률보다 작은 저변형률

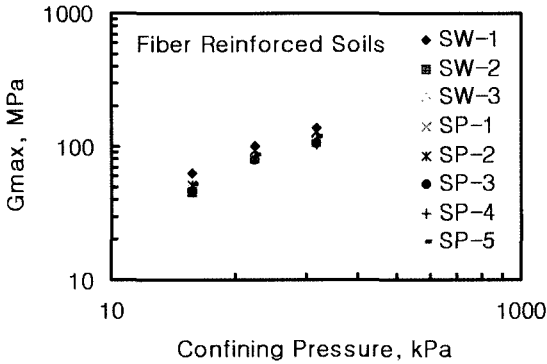


그림 4. 구속압에 따른 섬유혼합토의 최대전단변형계수

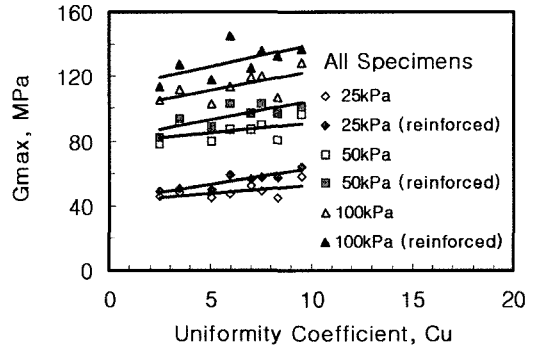


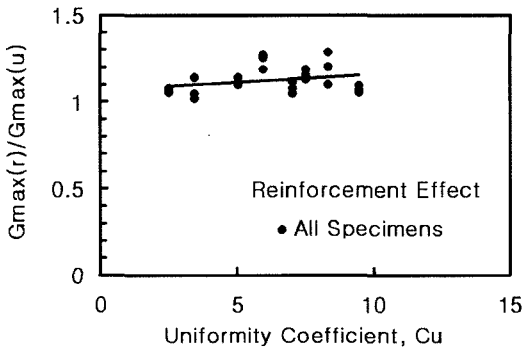
그림 5. 균등계수에 따른 최대전단변형계수

영역에서의 최대전단변형계수에 대한 분석은 매우 중요하다.

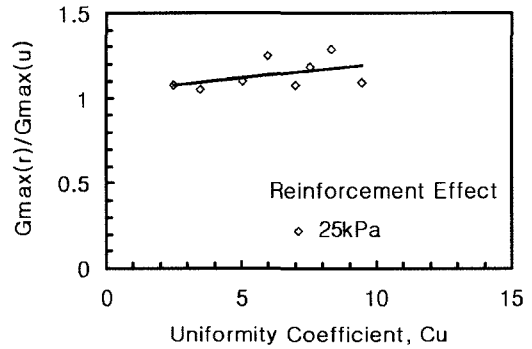
섬유혼합토의 최대전단변형계수가 구속압이 증가함에 따라 증가되는 양상은 비혼합토와 같았으며, 그림 4와 같이 대수영역에서 거의 직선의 관계를 보이

고 있다.

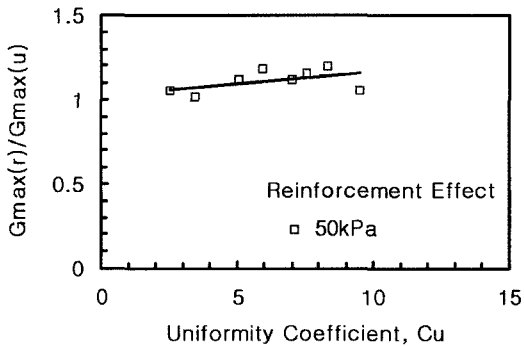
그림 5는 각각의 구속압 단계에서 섬유혼합토와 비혼합토의 균등계수 증가에 따른 최대전단변형계수의 변화를 보여주고 있다. 모든 구속압 단계에서 섬유혼합토와 비혼합토의 최대전단변형계수는 균등계수가



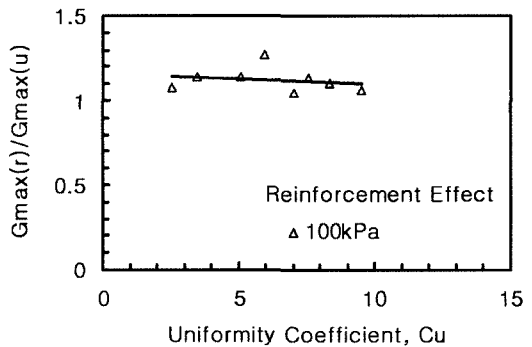
(a) 모든 구속압에 대한 보강효과



(b) 구속압 크기 25kPa



(c) 구속압 크기 50kPa



(d) 구속압 크기 100kPa

그림 6. 균등계수에 따른 보강효과



증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 섬유혼합토의 최대전단변형계수가 비혼합토보다 더 컸다. 즉, 섬유혼합에 따른 보강효과를 확인할 수 있었다.

균등계수가 증가할수록 비혼합토에 대한 섬유혼합토의 상대적인 보강효과를 비교하기 위해, 섬유혼합토의 최대전단변형계수를 비혼합토의 최대전단변형계수로 정규화( $G_{max, reinforced}/G_{max, unreinforced}$ )하여 그림 6(a)에 나타내었다. 시험결과는 모든 시료에서 비혼합토에 비해 섬유혼합토의 최대전단변형계수가 증가하여 보강효과의 정규화 수치가 1 이상을 보였고, 최대 30%까지의 증가가 확인되었다. 또한, 균등계수의 증가에 따라 정규화하여 평가한 증가량은 전체적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 입도분포가 양호할수록 그에 대한 시료입자간의 맞물림이 향상되어 마찰력을 증가시키기 때문으로 판단된다.

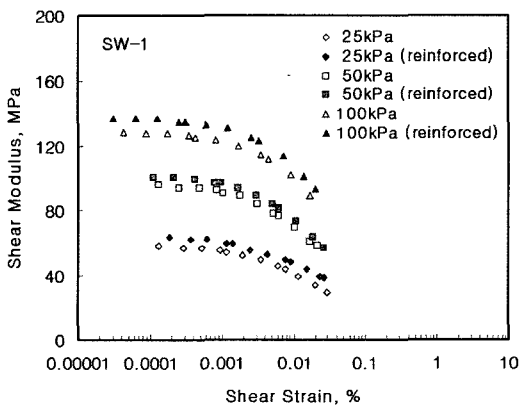
구속압 단계별로 살펴본 결과, 균등계수 증가에 따른 최대전단변형계수의 정규화된 보강효과는 그림 6(b)에서 그림 6(d)와 같다. 구속압 25kPa(그림 6(b))와 50kPa(그림 6(c))에서는 균등계수가 증가함에 따라 비혼합토로 정규화한 보강효과가 증가하였다. 그러나 구속압 100kPa(그림 6(d))에서는 정규화한 수치가 1보다 커서 보강은 확인되었으나, 정규화한 보강효과는 균등계수가 증가할수록 오히려 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 높은 구속압에서

균등계수가 큰 섬유혼합토의 강성이 섬유의 인장으로 야기된 시료의 구속보다는 모래 입자간의 마찰 요소에 의해 크게 좌우되었기 때문으로 판단된다.

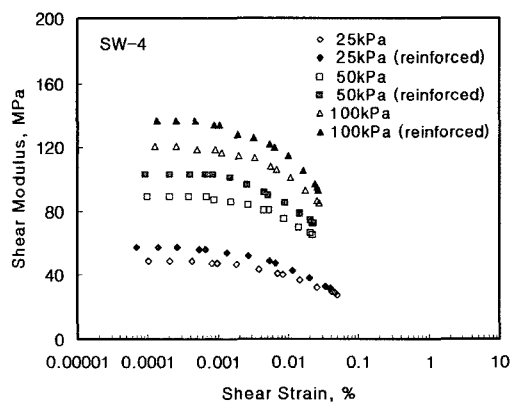
### 3.2 비선형영역

비혼합토와 섬유혼합토의 비선형 거동은 그림 7에서처럼 구속압이 증가할수록 전단변형계수는 증가하였다. 또한, 선형한계변형률 이후 전단변형률이 증가할수록 전단변형계수는 감소하였다. 그림 7(a)와 (b)는 시료 SW-1과 SW-4에 대한 구속압과 변형률의 증가에 따른 전단변형계수 감소곡선을 대표적으로 보여준 그림이다. 모든 구속압 단계와 전단변형률의 전체 범위에서 섬유혼합토의 전단변형계수 감소곡선이 비혼합토에 비해 상부에 위치하고 있으므로 보강효과를 확인할 수 있다.

시료 SW-1과 SW-4의 전단변형계수 감소곡선을 정규화( $G/G_{max}$ )하여 나타내면 그림 8(a), (b)와 같다. 전단변형률의 증가에 따라 섬유혼합토가 비혼합토에 비해 다소 크게 나왔다. 또한 섬유혼합토와 비혼합토 각각의 구속압에 대한 비선형 특성은 일정하였다. 즉, 정규화 곡선이 구속압의 영향을 받지 않고 거의 같았다. 나머지 모든 시료도 이와 동일한 거동을 보였다.

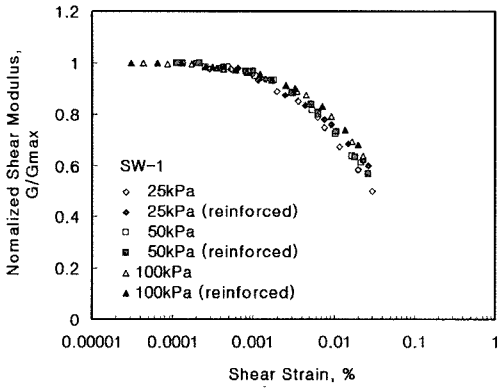


(a) SW-1

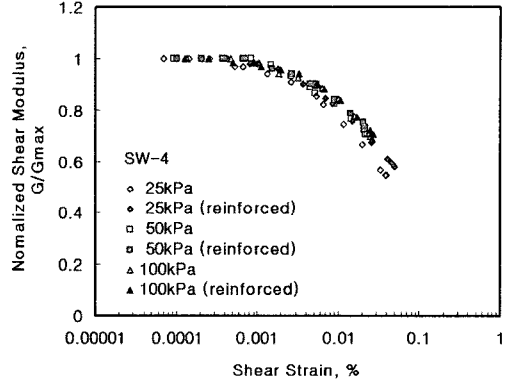


(b) SW-4

그림 7. 섬유혼합토와 비혼합토의 전단변형계수 감소곡선

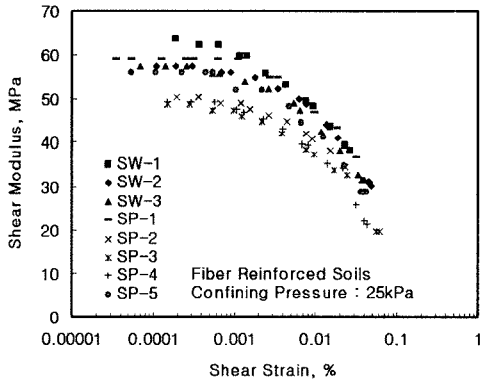


(a) SW-1

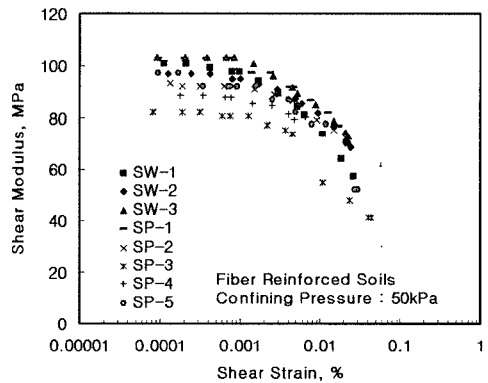


(b) SW-4

그림 8. 섬유혼합토와 비혼합토의 정규화 전단변형계수 감소곡선



(a) 구속압 크기 25kPa



(b) 구속압 크기 50kPa

그림 9. 균등계수에 따른 전단변형계수 감소곡선

그림 9(a)와 (b)는 각각 구속압 25kPa와 50kPa에서의 균등계수에 따른 섬유혼합토의 전단변형계수 감소곡선이다. 모든 시료의 곡률계수는 양입도의 규정에 만족하도록 하였고, 균등계수만 다양하게 변화시켜 가며 시료를 성형하였다. 양입도의 시료 SW-1, SW-2, SW-3의 전단변형계수 감소곡선은 구속압과 전단변형률 크기에 관계없이 빈입도의 전단변형계수 감소곡선에 비해 큰 값을 형성하고 있다. 즉, 균등계수가 증가하면 모든 전단변형률 범위에서 구속압에 관계없이 섬유혼합토의 강성이 증가하였다.

섬유혼합토의 정규화 거동은 모든 구속압 단계에

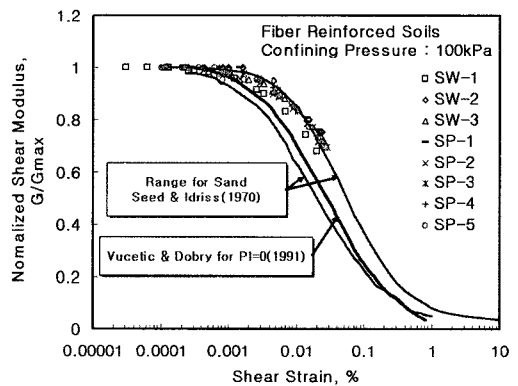


그림 10. 균등계수에 따른 정규화 전단변형계수 감소곡선



서 얇은 밴드를 형성하며 우측으로 집중하고 있다. 또한 정규화전단변형계수 감소곡선의 기울기가 완만하게 되어 비선형 범위에서도 보강효과를 확인하였다. 그림 10과 같이 정규화전단변형계수 감소곡선은 Seed와 Idriss(1970)의 사질토에 대한 곡선, 비소성 흙에 대한 Vucetic과 Dobry(1991)의 곡선과 비교하여 볼 때, Vucetic과 Dobry(1991)의 곡선보다 우측으로 이동한 상태에서 Seed와 Idriss(1970)곡선의 상한값 사이에 분포하였다. 이는 비혼합토보다 얇은 밴드를 형성하여 분포하여 섬유 혼합이 흙의 전단강성 증가에 효과적임을 증명하고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 여러 가지 입도의 사질토에 길이가 38mm인 폴리프로필렌(polypropylene) 재질의 단섬유(staple fiber)를 중량비 0.3%(기존 연구 결과에서 보강효과가 최대로 판명됨)로 혼합한 섬유혼합토의 거동특성과 보강효과를 평가하였다. 곡률계수( $C_g$ )는 일정하게 유지하고 균등계수( $C_u$ )를 변화시켜 성형한 공시체를 25kPa, 50kPa, 100kPa의 구속압에서 공진주시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 섬유혼합토의 최대전단변형계수( $G_{max}$ )는 구속압이 증가할수록 대수영역에서 선형적으로 증가하였고, 비혼합토에 비해 최대 30%까지 보강효과가 있었다.
- 2) 비혼합토와 섬유혼합토는 모든 구속압 단계에서 균등계수의 증가에 따라 최대전단변형계수가 증가하는 경향을 보였다. 이는 입도가 양호할수록 그에 대한 시료의 입자간의 맞물림이 향상되어 마찰력을 증가시키기 때문으로 생각된다.
- 3) 큰 구속압에서는 균등계수의 증가에 따른 정규화된 보강효과가 오히려 다소 감소하는 경향을 보였으며, 이는 높은 구속압하에서 섬유혼합토의 강성(Stiffness)이 섬유의 인장으로 야기된 시료

의 구속보다는 모래 입자간의 마찰 요소에 의해 크게 좌우된다는 기존의 연구와 일치하였다.

- 4) 섬유혼합토의 전단변형계수는 입도분포, 구속압 크기 및 전단변형률에 관계없이 비혼합토보다 증가하였으나, 정규화전단변형계수 감소곡선( $G/G_{max}$ )은 거의 비슷하거나 섬유혼합토가 다소 컸다. 또한 동일한 입도의 섬유혼합토는 정규화된 비선형 거동이 구속압 크기에 무관하였다. 이는 일반적인 사질토의 거동과 같다.
- 5) 입도가 양호한 섬유혼합토는 빈입도의 섬유혼합토 보다 모든 전단변형률 범위에서 구속압에 관계없이 전단변형계수가 더 커, 균등계수가 증가할수록 섬유혼합토의 비선형 전단강성 증가에 효과적임을 증명하고 있다.

#### 참고 문헌

1. 박철수(2003), 섬유혼합토의 비선형 동적물성치 측정, 석사학위논문, 경희대학교.
2. 박철수, 황선근, 목영진(2003), "섬유혼합토의 비선형 동적물성치," 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제19권, 제2호, pp. 189-197.
3. 장병욱, 김강석, 박영곤(1998), "섬유보강 혼합토의 일축압축강도 특성에 관한 연구," 98년도 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp. 461-466.
4. 조삼덕, 김진만(1995), "섬유혼합 보강토의 공학적 특성에 관한 실험 연구," 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제11권, 제2호, pp. 107-120.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Hwang, S. K.(1997), *Dynamic Properties of Natural soils*, Ph. D. Dissertation The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
10. Maher, M. H.(1988), *Static and Dynamic Response of Sands Reinforced with Discrete, Randomly Distributed Fibers*, Ph. D. Dissertation, University of Michigan.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Uzdavines, M.(1987), *Effect of Soil Reinforcement on the Liquefaction Potential of Saturated Sand*, Thesis, San Diego State University.
16. 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.

〈접수 : 2004. 11. 3〉