

선형보강재와 평면보강재를 적용한 토체의 전단강도 및 투수특성

Shear Strength and Permeability Characteristics of Soil Body Reinforced with Linear and Planar Reinforcing Materials

차 경 섭** · 장 병 옥* · 우 철 웅** · 박 영 곤***

Cha, Kyung Seob · Chang, Pyoung Wuck · Woo, Chull Woong · Park, Young Kon

Abstract

Traditional methods of earth reinforcement consist of introducing strips, fabrics, or grids into an earth mass. Recently, discrete fibers are simply added and mixed with the soil, much the same as cement, lime or other additives. The advantages of randomly distributed fibers is the maintenance of strength isotropy, low decrease in post-peak shear strength and high stability at failure.

In this study, new composite reinforcement structures which consist of geotextile and randomly distributed discrete fibers were examined their engineering properties, such as shear strength of the composite reinforced soil and permeability of short fiber reinforced soil. The increments of shear strength of composite reinforced soils were the sum of increments by fiber and woven geotextile, respectively. The permeability of short fiber reinforced soil was increased with fiber mixing ratio.

Keywords : Composite reinforced soil, Shear strength, Geotextile, Short fiber

I. 서 론

흙의 낮은 인장력과 재료분리가 쉽게 일어나는 성질을 개선하기 위하여, 토체에 강성 또는 연성의 평면 보강재를 삽입하여 취약한 흙의 인장력을 보

완하고 강성을 증가시키는 연구가 진행되어 왔다. 특히, 1970년대 이후 토목섬유(geotextile)의 사용이 보다 보편화되면서, 많은 평면보강재 보강토 구조물이 시공되었으며 이와 더불어 평면보강재의 구속효과와 마찰특성 등 관련 연구가 많이 진행되었다. Haeri 등(2000)은 토목섬유의 종류 및 삽입개수 등에 따른 평면보강재의 보강효과를 실험적으로 규명하기도 하였다.

한편, 1970년대 식물뿌리가 흙의 강도에 미치는 영향에 대한 연구가 진행된 이후, 1980년대 Gray & Ohasi(1983)에 의하여 선형보강재 보강에 대한

* 서울대학교 농업생명과학대학
** 서울대학교 대학원
*** 한국철도기술연구원
* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593
fax: +82-2-873-2087
E-mail address: cha_ks@hanmail.net

연구가 본격적으로 시작되었다. 선형보강재 보강토는 평면보강재 보강토에 비하여 잠재적인 취약면이 없고, 파괴이후 강도감소가 적어 높은 안정성을 갖는 것으로 보고 되었다. 국내에서는 90년대 들어서 비로소 단섬유 보강토에 대한 연구가 시작되었고, 이후 흙 벽체, 지반개량, 사면보강 등에 활용하고자 하는 연구가 진행되었다.^{1),4),9)}

최근, 도로와 철도 등의 시공분야에서 기존노선의 변경 혹은 확장시 부지확보의 어려움을 극복하고, 안정성의 확보 및 시공경비의 절감 등을 위하여 새로운 보강토 구조물에 대한 시공수요가 증대되고 있다. 그러므로 경제적이면서도 안정성이 높은 보강토 구조물의 개발을 위한 시도로서 기존의 평면보강재 혹은 선형보강재 각각에 의한 보강뿐 아니라 두 가지 보강재료의 조합에 의한 복합보강토의 보강효과에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 선형보강재와 평면보강재를 이용한 복합적인 형태의 보강토 구조물의 개발을 위한 기초연구로서, 실내실험을 통하여 평면보강재 및 선형보강재 각각에 의한 보강효과 및 복합된 보강토의 보강효과를 살펴보고, 단섬유 혼합에 의한 토체의 투수특성을 살펴보고자 하였다.

II. 사용재료

시험에서는 수원에서 채취한 SM계열의 시료와

의왕에서 채취한 ML계열의 시료를 재료로 선정하였고, 시료의 물리적 특성은 Table 1과 같다. SM 시료의 경우 건조단위중량이 낮게 나타났는데, 이는 시료의 풍화정도가 심하고, 잘 부서지는 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

두 시료의 입도분석 결과를 Fig. 1에 나타낸 결과, SM시료의 200번체 통과량은 41.2%, ML시료는 57.1%이며, 두 시료 모두 점토크기의 입자의 양은 10%미만인 것으로 나타났다.

단섬유 보강재는 콘크리트 혼합재료로 사용되는 가볍고 인장강도가 큰 폴리프로필렌 망사형(fibrillated type) 섬유를 선정하였고, 길이는 19, 38 및 60 mm를 선정하였다. 폴리프로필렌 섬유의 물리적 특성은 아래 Table 2와 같다.

평면보강재는 소규모 실내시험에 맞게 얇고 가벼

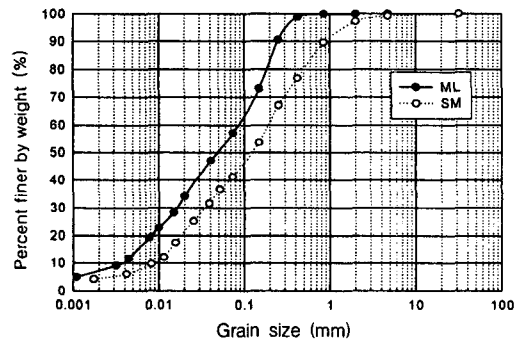


Fig. 1 Grain size distribution curves of soils

Table 1 Physical properties of soils

Sample	Location	Specific gravity	Liquid limit (%)	Plasticity limit (%)	U.S.C.S	OMC (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)
SM	Suwon	2.75	N.P	N.P	SM	23.0	1.61
ML	Uiwang	2.73	32.97	24.18	ML	20.2	1.70

Table 2 Physical properties of fiber

Fiber type	Specific gravity	Tensile strength (kPa)	Melting point (°C)	Young's modulus (kPa)
Polypropylene	0.91	3.5-7.7 × 10 ⁵	163	3.5 × 10 ⁶

Table 3 Physical properties of geotextile

Product name	Material	Tensile strength (t/m)	Expansibility (%)	Weight (g/m ²)	Permeability (cm/s)	Type
CT30	Polyester	3.0	10-40	880	10 ⁻² ~10 ⁻⁴	Woven

우며, 조직이 균일하고 역학적 기능이 우수한 재료를 선정하였으며, 그 물리적·역학적 특성을 Table 3에 기술하였다.

III. 시험방법

1. 강도시험

SM과 ML 시료에 대한 함수비와 혼합비에 따른 강도특성을 살펴보기 위하여 일축압축강도시험(공시체 직경: 100 mm, 높이: 200 mm)을 수행하였다. 함수비는 OMC전후 5%를 적용하였으며, 혼합비는 0%, 0.2%, 0.3% 및 0.5%로 변화시켜 이 시험을 통하여 작업난이도와 강도발현 등을 고려하여, 적정 함수비 및 적정 혼합비를 결정하였다.

선형보강재와 평면보강재를 사용한 복합보강토의 역학적 거동특성을 살펴보기 위해 배수 삼축압축시험을 실시하였다. 공시체 제작은 앞서 일축시험의 결과로부터 적정함수비 및 적정 혼합비를 사용하였다. 공시체는 직경 50 mm, 높이 100 mm로 제작하였으며, A-1 다짐에너지로 표준다짐시험방법에 의거하여 3층 다짐을 실시하였다.

소형다짐몰드를 제작하였으며, 시료추출기를 공시체의 크기에 맞도록 개조하였다. 하중제어방식은 변형률제어방식으로서 15%이상의 변형이 일어날 때 까지 시험하였다. 공시체의 전단시 재하장치의 전단속도는 간극수압이 발생하지 않는 범위에서 선정하였으며, SM 시료의 경우 2 mm/h, ML 시료의 경우는 1 mm/h로 달리하였다. 삼축압축시험 장치는 영국의 GDS사 제품으로 3개의 압력조절기, 간극수압 변환기가 컴퓨터로 자동 조작되고 수압으로 조절되는 시험기이다. 시험내용은 아래 Table 4와 같고, 각 공시체의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서처럼 크게 비보강토, 평면보강재 보강토(1~3단), 단섬유 보강토, 복합보강토(흙+선형보강재+평면보강재) 등으로 구성된다. 구속응력은 50, 100, 200 kPa로 변화시켰다.

2. 투수시험

일반적인 사질토의 경우에는 투수계수가 10⁻⁴ cm/s 이하이나, 다짐성토시에는 간극이 줄어들게 되어 투수계수가 낮아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 변수위 투수시험기를 이용하여 단섬유 혼합토

Table 4 Triaxial test schedules

Sample type Confining stress (kPa)	S	SG			SF	SFG		
		SG1	SG2	SG3		SFG1	SFG2	SFG3
50	SM, ML	SM, ML	ML	ML	SM, ML	SM, ML	ML	ML
100	SM, ML	SM, ML	ML	ML	SM, ML	SM, ML	ML	ML
200	SM, ML	SM, ML	ML	ML	SM, ML	SM, ML	ML	ML

* S : Soil, SF : Soil+Fiber, SG : Soil+Woven geotextile,
SFG : Soil+Woven geotextile+Fiber, 1, 2, 3 : Number of layer by woven geotextile

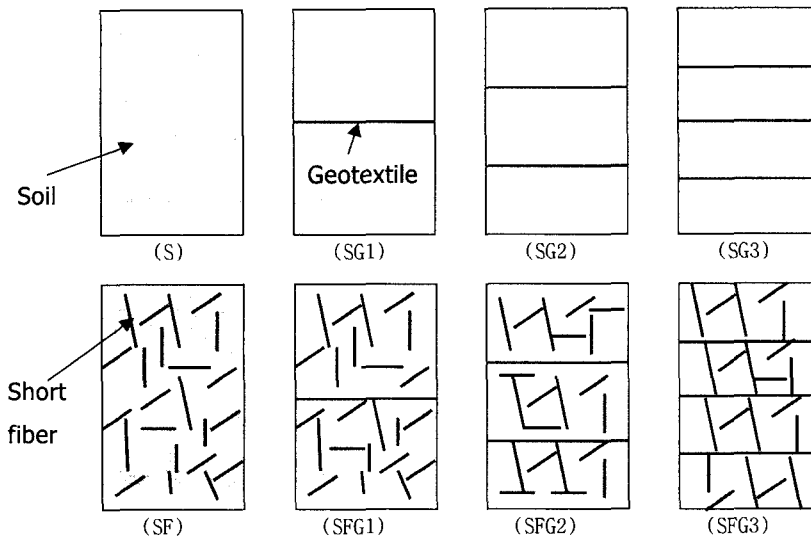


Fig. 2 Geotextile and short fiber arrangements for triaxial tests

에 대한 투수특성을 살펴보았다(KS F 2322).

투수몰드의 직경 및 높이는 각각 10 cm 및 12.7 cm 이다. 다짐에너지에 따른 영향을 평가하기 위하여 A-1 다짐에너지의 90% 및 80%로 다짐을 실시하였고, 함수비는 20%를 적용하였다. 포화의 판단여부는 24시간 이후, 흘러나온 물의 양이 간극의 양의 2~3배 정도 되는 시점으로 판단하였다. 투수계수는 30분 단위로 3~5차례 측정하였으며, 평균값을 사용하였다. 사용한 섬유는 섬유의 길이에 따른 효과를 살펴보기 위하여, 망사 19 mm, 38 mm 및 60 mm를 사용하였다. 또한, 섬유의 혼합비에 따른 효과를 살펴보기 위하여 섬유의 중량 혼합비는 0%, 0.2%, 0.5% 그리고 1%를 사용하였으며, 그 이상은 다짐의 어려움 때문에 사용하지 않았다.

IV. 결과 및 고찰

1. 응력-변형특성

가. 함수비 및 혼합비에 따른 응력-변형특성

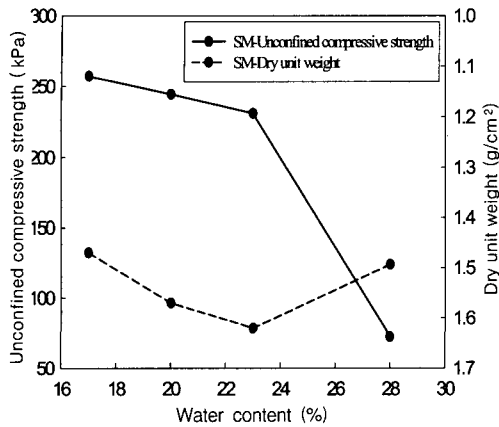
함수비(OMC, 건조축, 습윤축)에 따른 단섬유 보

강토의 응력-변형곡선을 아래 Fig. 3에 나타내었다. 이때 여러 혼합비를 적용하지 않고, Nataraj 등(1996), Park & Chang(1999)의 연구결과를 바탕으로 혼합비를 SM시료의 경우 0.2% ML 시료의 경우 0.3%를 사용하였다.

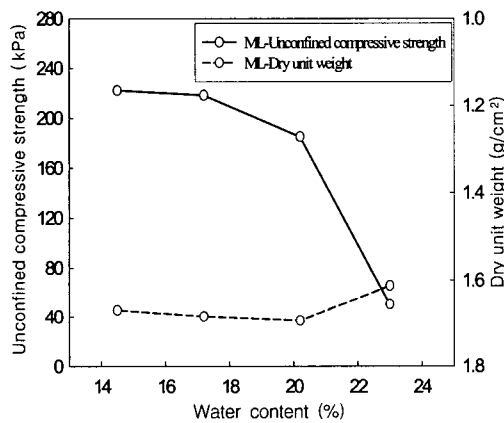
Fig. 3에서 건조단위중량은 OMC부근에서 최대로 나타내고 OMC의 습윤축 및 건조축으로 갈수록 감소하나, 일축압축강도는 OMC 습윤축에서 OMC 건조축으로 갈수록 증가하며 OMC에서 OMC건조축사이에서는 그 증가율이 작게 나타났다. 따라서 일축압축강도의 변화는 섬유의 혼합량보다 함수비에 크게 좌우되는 것으로 사료된다.

앞의 결과를 이용하여 SM시료는 함수비 20%, ML 시료는 17.2%를 적용하여 섬유의 혼합량에 따른 강도증가를 살펴보았으며, 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4에서처럼 혼합비가 증가할수록 강도가 증가함을 알 수 있고, SM 시료에서는 0.2% 이상에서 강도가 증가하지 않았고, ML 시료에서는 0.3% 이상에서 강도증가율이 작게 나타났다. 0.5% 이상의 단섬유를 혼합하는 경우에는 재료 분리가 일어나서 제작에 어려움이 발생하였으며, 이러한 현상



(a) SM soil (fiber mixing ratio : 0.2%)



(b) ML soil (fiber mixing ratio : 0.3%)

Fig. 3 Relationship between peak strength and water content

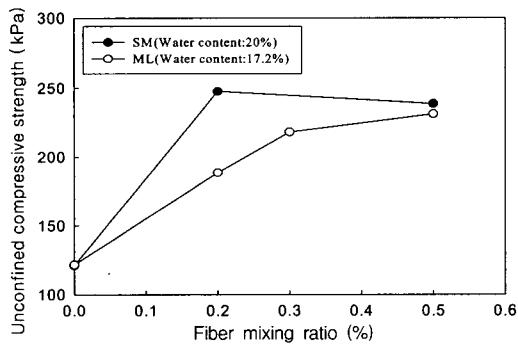


Fig. 4 Relationship between peak strength and fiber mixing ratio

은 섬유 길이 길이가 짧을수록 정도가 심하였다. Nataraj 등(1996)은 모래 및 점토에 대해서 0.3%를 적정혼합비로 선정하였고, Park & Chang(1999)의 연구에서도 점토질 흙에 대해서 0.3%이상에서는 강도증가가 없는 것으로 나타났다. 이상의 연구와 본 연구의 결과를 종합해 볼 때, 강도 및 시공성의 난이를 고려하면 혼합비 0.3% 내외가 적절한 범위인 것으로 사료된다. 또한, 함수비는 OMC 건조축 3%내외가 강도증가 측면에서 적절할 것으로 사료된다.

나. 구속응력 및 보강재에 따른 응력-변형특성

Fig. 5는 두 시료의 응력-변형 관계를 나타낸 강도에서 파괴 변형률이 증가하며, 구속응력이 클수록 파괴시 변형률도 증가하는 것으로 나타났다. 한편, ML에 대한 결과에서는 비보강토 외에 모든 보강토에서 파괴시 변형률이 15%를 나타내었다.

한편, Fig. 5(b)에 Haeri 등(2000)의 평면보강재의 삽입개수에 따른 결과를 도시하였다. 그림에서 보듯이 평면보강재의 개수가 늘어날수록 낮은 구속압에서의 파괴시 변형률이 큰 것으로 나타났고, 구속응력이 증가함에 따라 모두 15%의 변형률을 보이는 것으로 나타났다. Long 과 Saran (1978)은 평면보강재 보강의 경우 피크 후에 급격한 강도 감소가 나타난다고 하였으나, 본 연구에서는 그러한 현상은 나타나지 않았으며, 이는 보강재의 연성으로 인해 보강재에서 파괴가 발생하지 않기 때문인 것으로 사료되며, 타 연구에서도 유사한 결과가 나타났다(Koh, 1987).

2. 전단특성

Fig. 6은 구속응력에 따른 각 시료의 파괴시 축차응력을 도시한 것이다. Fig. 6에서처럼 구속응력이 증가할수록 파괴시 축차응력이 크게 나타났고, 복합보강토에서 가장 큰 값을 보이고 있으며, ML 시료에서 평면보강재의 삽입개수가 증가할수록 축

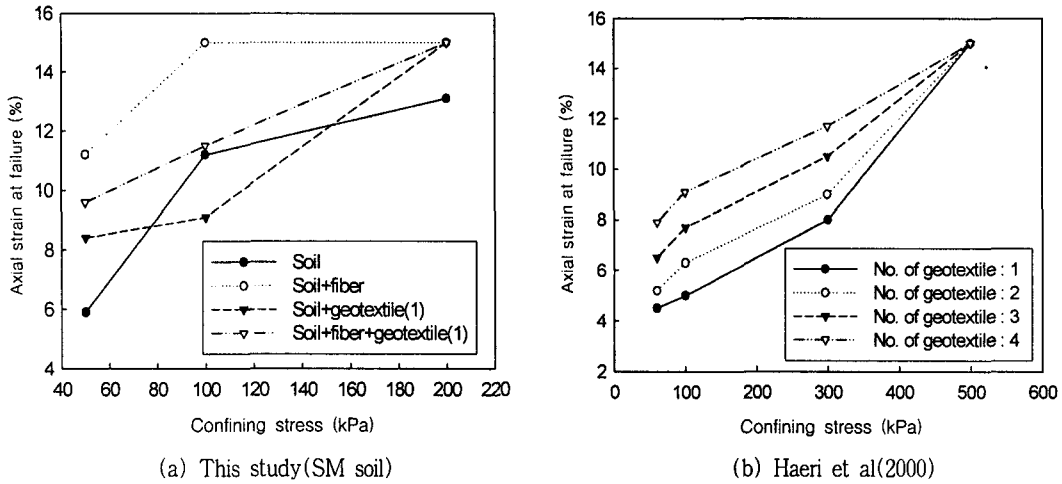


Fig. 5 Relationship between confining stress and. axial strain at failure

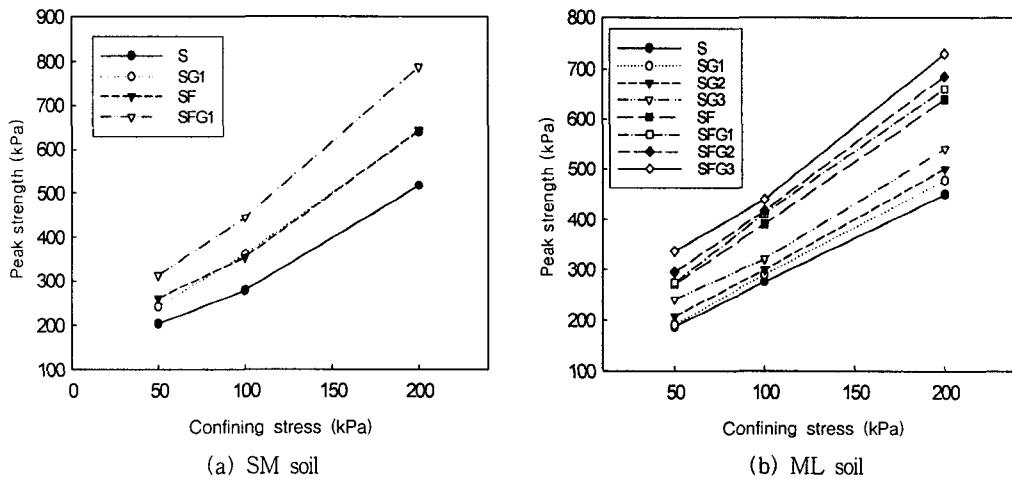


Fig. 6 Relationship between peak strength and reinforcement type

차응력 값이 증가하였다. SM 시료에서는 SG1 및 SF에서 유사한 축차응력값을 보이나, ML 시료에서는 평면보강재에 의한 강도증가는 크지 않은 것으로 나타났다.

각 구속응력별로 비보강토의 파괴시 축차응력 ($\Delta\sigma_f(U)$)에 대한 보강토의 축차응력 ($\Delta\sigma_f(R)$)의 비를 Fig. 7에 도시하였다.

시험결과 대체로 구속응력별로 유사한 증가율을

나타내고 있다. SM 시료에서는 단섬유 보강토 및 평면보강재 보강토가 비보강토에 비해 약 25%의 증가를 나타내고 복합보강토에서는 54%정도의 증가를 나타내고 있다. ML 시료에서 평면보강재는 보강재 개수에 따라 5~20%의 증가를 나타내고, 단섬유 보강토에서는 약 40%의 증가를 나타내며, 복합보강토에서는 보강재 개수에 따라 45~66%가 증가하였다. 각각의 평면보강재 1단을 비교하면

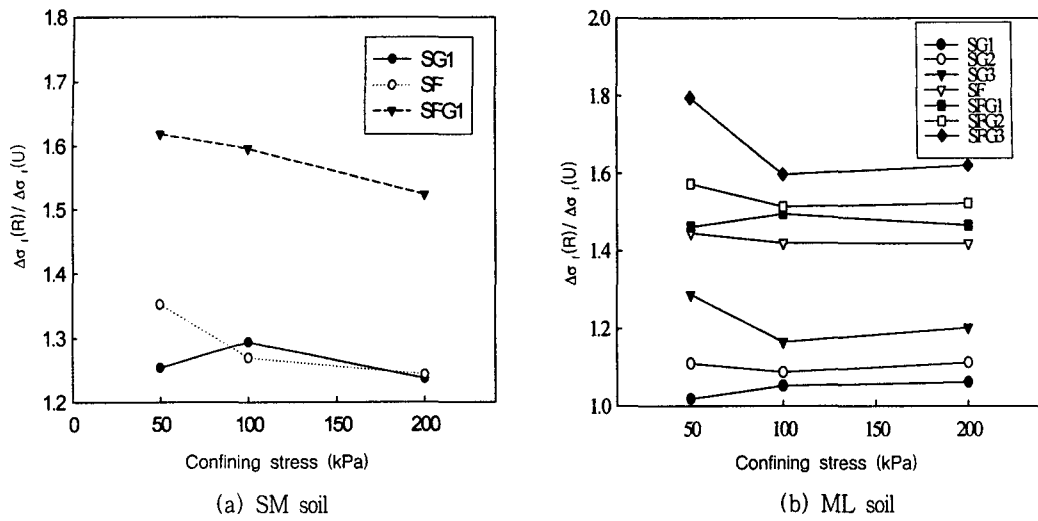


Fig. 7 Relationship between strength ratio and confining stress

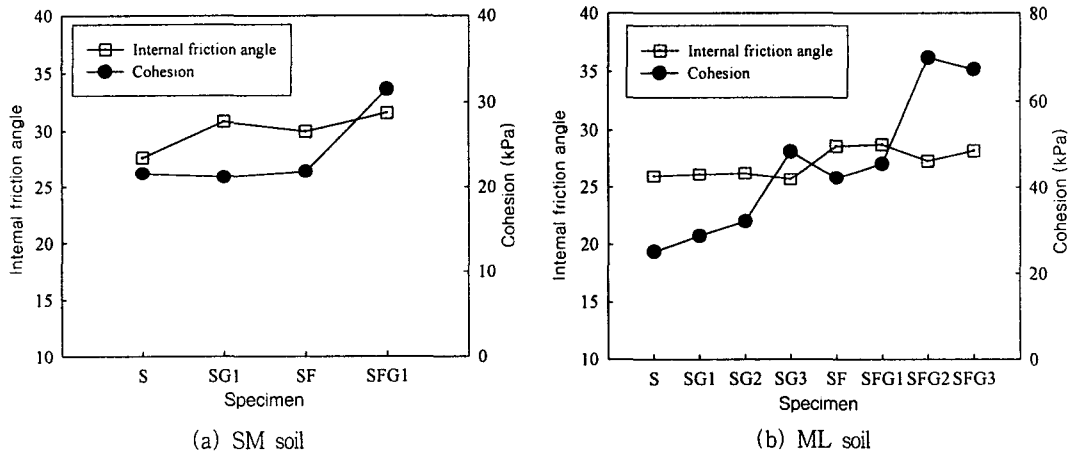


Fig. 8 Relationship between shear strength parameter and reinforcement type

SM 시료에서 보강효과가 큰 것으로 나타났다.

강도증가 효과를 내부마찰각과 점착력의 증가로 나타내었으며, 이는 Fig. 8과 같다.

SM 시료에서 점착력은 복합보강토에서 10kPa정도 증가하였고, 내부마찰각은 2~3° 증가하였다. ML 시료에서는 평면보강재 보강토에서 내부마찰각 보다는 점착력에 의한 증가가 두드러졌고, 복합보강토에서는 내부마찰각은 3° 미만의 증가가 발생하

였으나, 점착력에서는, 15~43 kPa로 큰 폭으로 증가하였다.

3. 복합보강토의 강도증가특성

복합보강토(흙+단섬유+평면보강재)의 비보강토에 대한 강도증가에 대한 섬유 및 평면보강재의 역할을 규명하기 위하여 단섬유 보강토 및 평면보강

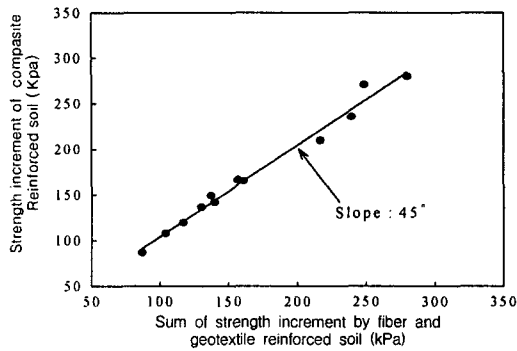


Fig. 9 Strength increment of composite reinforced soil vs. sum of strength increment by fiber and woven geotextile reinforced soil

재 보강토의 비보강토에 대한 각각의 강도증가의 합과 복합보강토의 강도증가를 Fig. 9에 도시하였다.

Fig. 9에서처럼 모든 점들은 일직선상에 일치하는 것으로 나타났으며 경사는 45°를 보였다. 이로서, 본 시험의 조건내에서는 복합보강토의 비보강토에 대한 강도증가는 단섬유 보강토 및 평면보강재 보강토의 강도증가의 합으로 표현할 수 있다. 그러나 보강재의 종류 및 흙의 종류, 섬유 혼합비 등 다양한 조건에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 섬유혼합토의 투수특성

단섬유혼합토의 성토체로서의 사용가능성을 평가하기 위하여 강도특성과 더불어 중요한 인자인 투수특성에 대하여 살펴보았다. 섬유의 혼합비에 따라서, 투수성의 변화양상을 Cho & Kim(1995)의 실험결과와 함께 Fig. 10에 도시하였다. 섬유의 증가에 따라 투수계수가 증가하는 것을 알 수 있으며, 본 연구결과 1.0%를 혼합하였을 경우 투수계수가 비혼합토에 비해 7.62~8.47배 증가하였다. Cho & Kim(1995)의 연구에서도 증가하였으나, 그 크기는 미미한 것으로 나타났다. 한편, Fig. 10의 본 연구결과에서 섬유의 길이에 따른 투수계수의 차이는 나타나지 않았다.

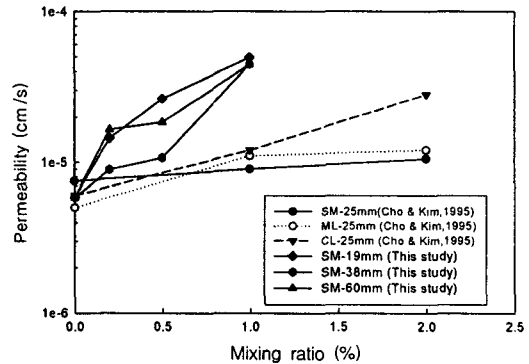


Fig. 10 Relationship between permeability and fiber mixing ratio

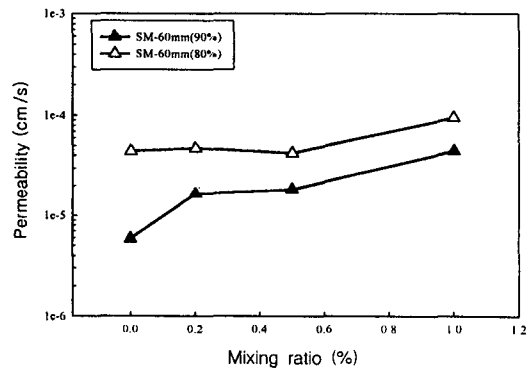


Fig. 11 Relationship between permeability and mixing ratio by compaction energy

시공시 다짐에너지 저하에 따른 투수성의 변화를 Fig. 11에 나타내었다.

다짐에너지 저하에 따라 투수계수가 증가하였으나, 혼합비 0%를 제외하면, 두 개의 다짐에너지간의 투수성의 차이는 최대 2.84배로서 크지 않은 것으로 나타났다.

섬유혼합비, 다짐에너지 등에 따른 투수계수의 변화를 투수성의 인자중 하나인 간극비로 변환하여 간극비에 따른 투수계수의 변화를 Fig. 12에 도시하였다.

다짐 후 측정된 공시체의 무게 및 체적으로부터 공시체의 간극비를 산정한 결과 혼합비의 증가 및 다짐에너지의 감소에 따라 간극비가 증가하는 것은

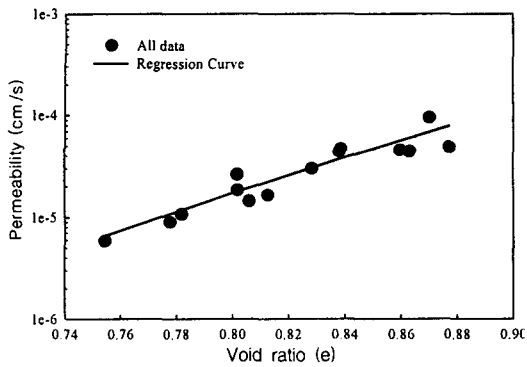


Fig. 12 Relationship between permeability and void ratio

로 나타났다. 투수계수는 간극비에 대하여 log k 값이 직선적으로 변화하였고, 아래의 회귀식으로 표현할 수 있었다.

$$\log k = -3.16 + 16.61e \quad (R^2 = 0.74)$$

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 실내시험을 통하여 단섬유혼합토의 혼합비 및 함수비에 따른 강도특성을 살펴보고, 평면보강재의 층수 및 섬유혼합에 따른 전단특성 및 단섬유 혼합토에 대한 투수특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 적정함수비 및 혼합비 산정시험과, 타 연구결과를 종합하여 볼 때, 단섬유의 혼합량은 0.3%이 내가 적정하고, 강도증가 측면을 고려할 때 적정함수비는 OMC 건조축이 유리할 것으로 사료된다.
2. 복합보강토의 강도증가가 SM 시료에서는 약 54%의 증가, ML 시료에서는 45~66%의 증가가 나타났고, 점착력과 내부마찰각으로 표현한 결과, SM 시료에서는 각각 10 kPa, 3° 증가하였고, ML 시료에서는 각각 15~43 kPa, 3° 증가하였다.
3. 모래질 흙인 SM시료에서는 복합보강토의 강도증가에 대하여, 평면보강재와 섬유가 비슷한 강도증가분을 나타내었으나, 실트질 흙인 ML 시료에

서는 섬유의 역할이 매우 큰 것으로 나타났다.

4. 복합보강토의 강도증가는 비보강토에 대한 단섬유 보강토의 강도증가분과 평면보강재 보강토의 강도증가분의 합으로 표현되었으며, 두 가지 보강재에 의한 보강효과는 독립적인 것으로 나타났다.

5. 섬유의 양이 증가할수록 단섬유 혼합토의 투수계수는 증가하였으나, 섬유의 길이에 따른 차이는 나타나지 않았다. 혼합비 및 다짐에너지에 따른 투수성의 변화를 간극비로 표현한 결과 간극비에 따라 log k가 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

References

1. Cho, S. D. and Kim, J. M. 1995. The experimental study on engineering properties of fiber-reinforced soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 11(2): 107-120. (in Korean)
2. Gray, D. H. and Ohashi, H. 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering Division. ASCE*. 109 (3): 335-353
3. Haeri, S. M., Noorzad, R. and Oskoorouchi, A. M. 2000. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand. *Geotextile and Geomembranes*. 18: 385-402
4. Kim, N. K., Park, J. S., Koh, S. B., Kim, K. H. and Lee, M. J. 2001. Characteristics and applications of fiber-reinforced soils. *Proceedings of the 2001 Annual conference. Korean Society of Civil Engineers* : 1-4. (in Korean)
5. Koh, H. S. 1987. Effects of geotextile-reinforcement on mechanical behavior of clay soils. Ph.D. diss. Seoul National University. (in Korean)
6. Lee, H. K. and Simunovic, S. 2000. Modeling of progressive damage in aligned and randomly oriented discontinuous fiber polymer matrix. *Composites. Composites : Part B*. 31: 77-86
7. Michalowski, R. L. and Zhao, A. 1996.

- Failure of fiber-reinforced granular soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(3): 226-234
8. Nataraj, M. S., Addula, H. R. and Mcmanis, K. L. 1996. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. *Environmental Technology: Proc. of the 3rd Int. Symp.* 1: 826-831
9. Park, Y. K. and Chang, P. W. 2000. Composition and reinforcing effect of remolded short fiber reinforced clay. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 116(6): 87-95 (in Korean)
10. Prabakar, J. and Sridhar, R. S. 2002. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behavior of soil. *Construction and Building Material*, 16: 123-131
11. Santoni, R. L., Tingle, J. S. and Webster, S. L., 2001. Engineering Properties of Sand-Fiber Mixtures for Road Construction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(3): 258-268