

흙의 다짐도에 따른 인발저항특성 연구

Pullout Resistance of Geogrid Reinforced Soil according to Compaction Degree

주재우¹⁾, Jae-Woo Ju, 김병욱²⁾, Byung-Wook Kim, 박종범³⁾, Jong-Beom Park

¹⁾ 순천대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Suncheon

²⁾ 순천대학교 대학원 토목공학과, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Suncheon

³⁾ 순천대학교 공업기술연구소 전임연구원, Researcher, Industrial Technology Institute, Univ. of Suncheon

SYNOPSIS : The method which makes the soft ground reinforced by using the geogrid, a kind of geosynthetics has been getting popular and its usefulness also has been increased due to reduction in costs, ease of construction and great exterior view. But the study on the frictional characteristics, which is the important factor in design, between reinforcement and soil is insufficient.

In this study, compaction degrees were considered through large-scale pullout tests. As a part of studying on estimation of pullout frictional characteristics between soil and geosynthetics, pullout tests were performed and from the result of pullout tests, pullout frictional parameters between soil and geosynthetics were obtained and pullout behaviors were learned.

KEYWORDS : Geogrid, Geosynthetics, Pullout test, Compaction degrees

1. 서론

토목섬유를 이용한 보강토공법은 압축에 비하여 상대적으로 인장에 약한 흙의 단점을 보완하기 위하여 흙 속에 토목섬유를 포설하여 흙과 토목섬유의 마찰특성에 의하여 전단강도를 증진시키는 공법으로서, 보강토의 기본 개념은 흙과 보강재간의 마찰력을 발생시키는 것이며, 이러한 힘은 보강토의 강도를 증대시키는 구속압력이 존재하는 흙에서 더욱 명백하게 나타난다. 또한 보강재는 토체가 파괴되는 것을 방지하는 역할도 한다. 토목섬유는 상당한 잠재력을 가진 유용한 재료이다. 인발시험은 흙과 토목섬유사이의 마찰특성을 파악하기 위해 이용되어지는 시험 중 하나로서 흙과 토목섬유사이의 마찰특성을 파악하고 마찰정수를 구하기 위해 사용되는 시험이다.

본 연구에서는 우리나라에 가장 널리 분포되어 있는 대표적인 흙인 화강토와 보강토 구조물에서 많이 사용되고 있는 지오그리드 1종을 대상으로 토목섬유의 인발마찰특성을 평가하기 위하여 인발시험과 직접전단시험이 가능한 시험장치를 이용하여 흙과 토목섬유의 인발마찰특성에 영향을 미치는 요소로서 다짐도에 착안하여 수직응력의 변화에 따른 인발시험을 실시하였다. 흙의 다짐도는 건조단위중량으로 평가하고, 다짐은 일반적으로 역학적 에너지에 의해 간극을 제거하므로써 흙을 조밀화 시켜 흙과 보강재간의 마찰에 영향을 미친다. 토조내 흙시료의 제작은 다짐도 95%, 80%, 65%로 제작하였고, 상재하중은 각 다짐도에 따라 0.2kg/cm^2 , 0.5kg/cm^2 , 1.0kg/cm^2 의 세가지 응력조건으로 인발시험을 실시하였다. 인발시험결과로부터 흙과 토목섬유사이의 인발마찰거동을 파악하고, 인발마찰정수를 구하였으며, 전단강도정수와 인발마찰강도정수의 관계에 대해 고찰하였다.

2. 인발시험

2.1 인발시험 장치

본 연구에 사용된 인발시험장치는 토조와 Air bag, 전단장치 등 크게 3부분으로 구성되어 있으며, 토조의 크기는 길이 60cm, 폭 40cm, 높이 20cm이다. 토조는 상부와 하부로 분리되어 있으며 각각의 깊이는 9.5cm이고 1cm의 간격을 두고 이격되어 있다. 또한, 토조의 상부에는 Air bag이 설치되어 있어 공기압에 의해 토조내에 균등한 수직하중을 가할 수 있도록 제작되었다.

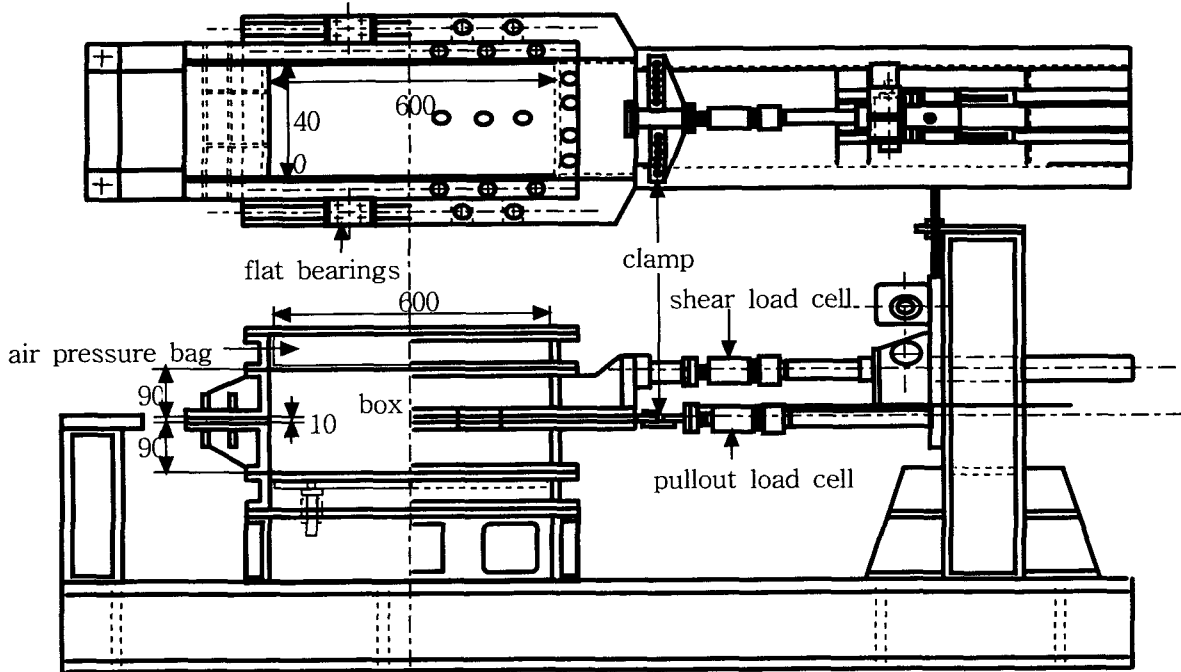


그림 1. 인발시험기

2.2 시험에 사용된 재료

2.2.1 흙시료

인발시험에 사용된 흙시료는 우리나라에 가장 널리 분포하고 있는 화강토로서 그 물리 및 역학적 특성은 표 1과 같다. 인발시험시 사용한 흙시료의 상태는 함수비가 18.96%이고, 건조밀도 1.58g/cm^3 , 1.25g/cm^3 , 1.08g/cm^3 일때 다짐도 95%, 80%, 65%의 상태로 제작하여 시험을 실시하였다.

표 1. 화강토의 물리 및 역학적 특성

재료	비중 G_s	액성한계 (%)	소성지수 (%)	최대건조밀도 (g/cm^3)	최적함수비 (%)	균등계수 C_u	#200체통과량 (%)
화강토	2.68	31.21	11.17	1.654	18.96	7.59	1.05

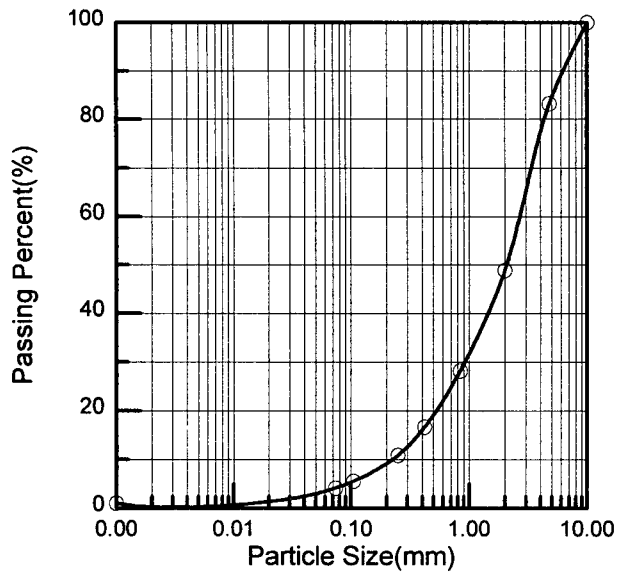


그림 2. 입도분포곡선

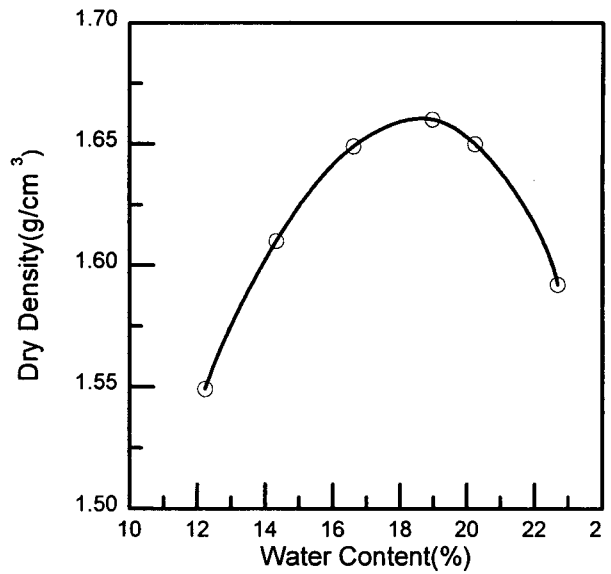


그림 3. 다짐특성 곡선

2.2.2 토목섬유

토목섬유시료는 고밀도 폴리에틸렌을 일방향으로 열연신하여 제조한 일축연신 geogrid 제품으로서, 그 물리적 특성은 표 2와 같고 그 형상은 그림 2와 같다.

표 2. 토목섬유의 물리적 특성

재 료	최대 인장강도 (kN/m)	최대 신율 (%)	망눈크기 (mm)
일축연신 Geogrid	82.5	13.0	140×17

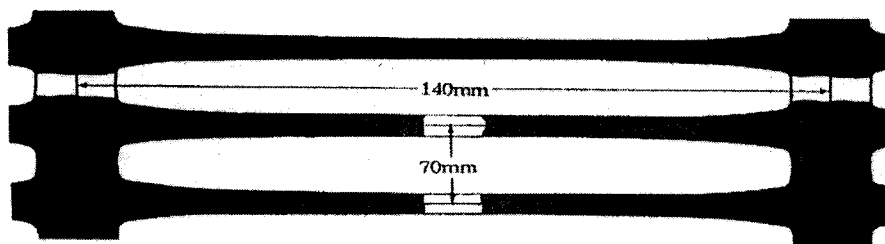


그림 4. 토목섬유의 형상

3. 시험방법

토조내 흙시료의 제작은 화강토의 함수비를 다짐시험에 의해 결정된 최적함수비로 조절하고 다짐도 95%, 80%, 65%를 목표로 하여 매층 22.55kg, 17.78kg, 15.4kg의 흙시료를 넣고 95%와 80% 일때는 4.5kg의 Rammer를 낙하고 45cm에서 367회, 122회의 타격을 가하여 다짐하였으며, 65%일때는 다짐도가 매우 낮기 때문에 넓이 20cm×20cm인 강판을 이용하여 해당층 높이까지 균일하게 다졌다. Geogrid는 토조 높이의 중앙인 10 cm 높이에 매설하였다. Geogrid의 부설길이는 토조의 길이(60cm)와 같고 부설 폭은 토조 폭의 100%인 40cm로 하였다. 수직응력은 각 다짐도에 따라 0.2, 0.5, 1.0 kg/cm²의 3가지 응력조건으로 변화를 주었으며, 인발상자내에서 압력을 균등하게 분배시키기 위하여 하중을 재하한 상태에서 약 30분 동안 방치한 후 인발시험을 실시하였다. 인발속도는 1mm/min의 일정변위량으로 제어하였으며, 인발력은 Geogrid 고정장치 후면부에 부착되어 있는 Load Cell에 의하여 측정하였다. Geogrid 고정장치의 선단에 변위계를 설치하였으며, 토조내 Geogrid의 인발변위를 측정하기 위하여 그림 3에서 보는 바와 같이 인발상자의 전면부 인발구멍으로 부터 0, 14, 28, 42, 56cm 떨어진 절점에 직경 0.6mm의 고강도 합성섬유사를 부착하고 이를 인발상자 후면부의 구멍을 통하여 변위계에 연결하여 매 1분 간격으로 인발변위를 측정하였다. 또한, 인발상자 내측에 내경 3mm의 스테인레스강관을 이용하여 고강도 합성섬유사와 흙과의 마찰을 제거하였다. 시험은 변위량이 인발상자 길이의 20%에 도달할 때까지 실시하였다.

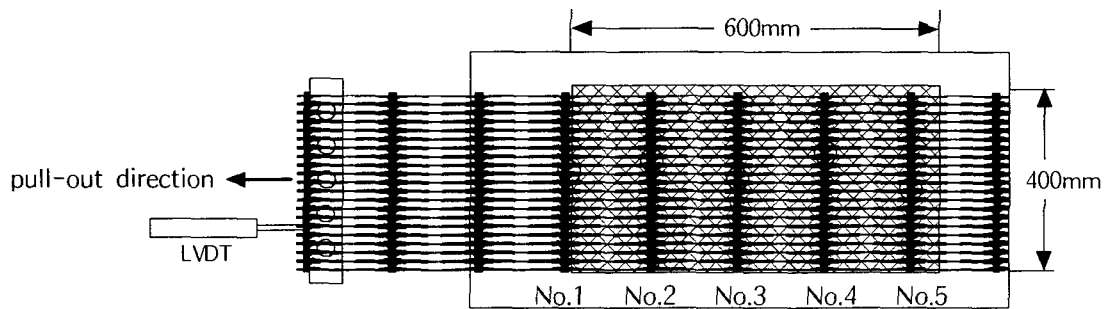


그림 5. 인발변위 측정의 위치

4. 시험결과 및 고찰

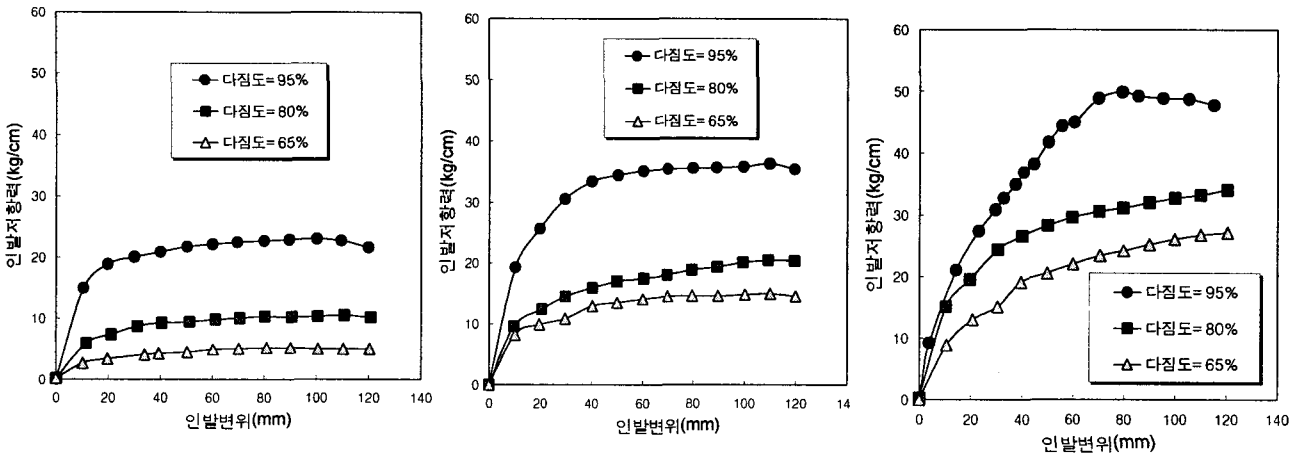
4.1 선단인발변위와 인발저항력 및 토목섬유 절점변위와의 관계

그림 6은 수직응력이 (a) 0.2kg/cm², (b) 0.5kg/cm², (c) 1.0kg/cm²인 경우 다짐도의 변화에 따른 선단 인발변위와 인발저항력과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 선단인발변위는 Geogrid 선단에 장착한 변위계의 변위를 말한다. 그림 6에서는 다짐도와 수직응력이 증가할수록 인발저항력이 증가함을 알 수 있다.

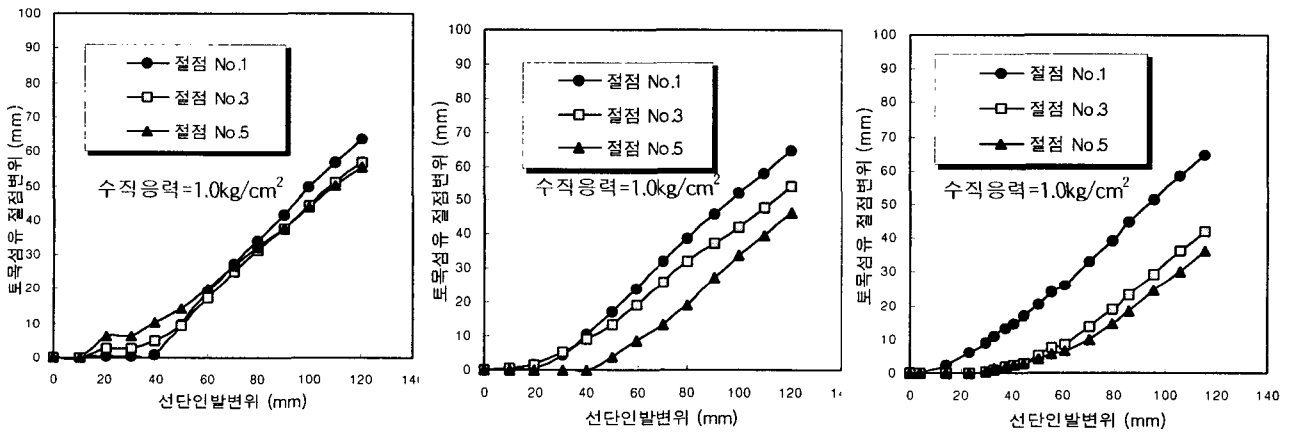
그림 7은 수직응력이 1.0kg/cm²일때의 (a)다짐도 65%, (b)다짐도 80%, (c)다짐도 95%에서의 선단인발 변위와 그림 5의 토목섬유절점 No.1, No.3, No.5의 절점변위와의 관계를 나타낸 것이다. 다짐도가 증가할수록 토목섬유절점 No.1, No.3, No.5 지점간의 변위차는 인발시작 후 선단인발변위가 60~80mm까지는 증가하지만 선단인발변위가 100mm 이상에서는 대체로 일정한 변위차를 보이고 있다. 또한, 다짐도 65%에서는 절점간 변위차가 거의 나타나지 않지만 다짐도가 커질수록 인발종료지점의 변위차가 증가함을 알 수 있다.

한편, 그림 8은 토목섬유절점 (a)No.1, (b)No.3, (c)No.5에서 다짐도별 선단인발변위와 토목섬유절점변위의 관계를 나타낸 것으로 다짐도가 증가할수록 토목섬유의 절점변위가 일어나는 시점이 늦어지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 토목섬유가 인장과 함께 인발되다가 어느지점에서부터는 더 이상 인장되지 않고 인발되기 때문으로 판단된다. 그림 5와 그림 6의 경향으로부터 다짐도가 커질수록 화강토

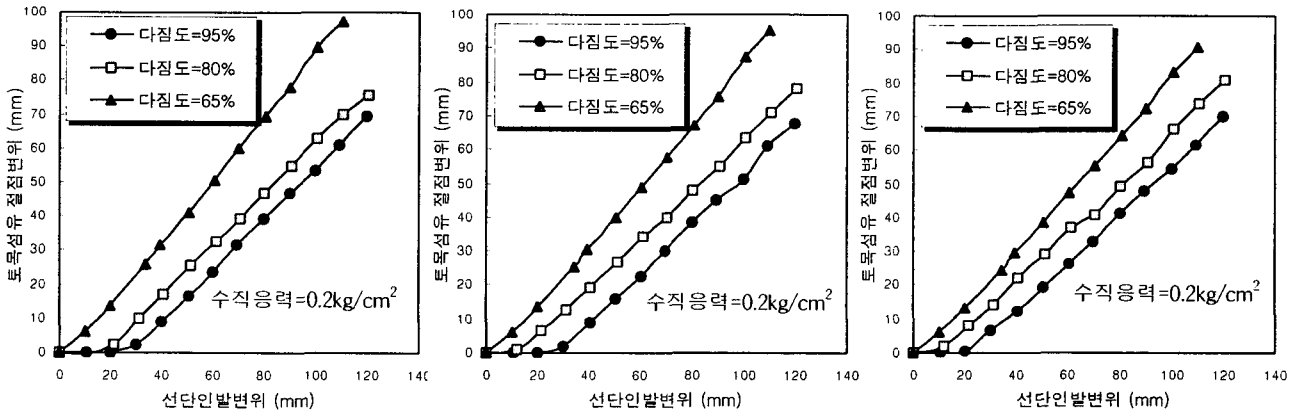
와 Geogrid의 인발마찰저항이 커지는 것을 알 수 있다.



(a) 수직응력=0.2kg/cm² (b) 수직응력=0.5kg/cm² (c) 수직응력=1.0kg/cm²
 그림 6. 수직응력별 다짐도에 따른 선단인발변위-인발력 관계곡선



(a) 다짐도=65% (b) 다짐도=80% (c) 다짐도=95%
 그림 7. 다짐도별 선단인발변위-토목점유 절점변위 관계곡선



(a) 절점 No.1 (b) 절점 No.3 (c) 절점 No.5
 그림 8. 절점별 선단인발변위-토목점유 절점변위 관계곡선

4.2 화강토와 토목섬유의 마찰특성

그림 9는 다짐도별 수직응력과 최대인발저항력과의 관계이다. 그림 9에서 최대인발저항력은 그림 6의 (a)~(c)에서 peak의 값을 취하였으며 시험종료시까지 peak값이 나타나지 않은 경우에는 시험종료시의 인발저항력을 최대값으로 하였다. 여기에서 최대인발저항력은 각 다짐도에서 수직응력의 증가에 따라 직선적으로 증가를 보이며 다짐도가 높아질수록 큰 값을 나타내고 있다. 그림 10은 수직응력의 증가에 따른 최대인발마찰강도를 각 다짐도에 착안하여 정리한 그래프이다. 여기서 최대인발마찰강도는 전체면적법(Ochiai, 1992)에 의해 구한 인발마찰강도로서 다음 식 (1)로부터 구한다.

$$\tau = \frac{F_{Tmax}}{2A} \quad (1)$$

여기서, τ = 인발마찰강도(kg/cm²), F_{Tmax} = 토목섬유의 최대인발저항력(kg), A = 토목섬유의 면적(cm²)

최대인발마찰강도는 수직응력의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며, 이 경향을 직선적으로 나타내었을 때 이 직선의 세로축 절편과 기울기를 이용하여 다음 식 (2)에서 인발마찰강도정수를 구할 수 있다. 인발마찰강도정수를 표 3에 정리하였다. 그림 8에서는 다짐도가 증가할수록 내부마찰각이 증가하고, 주문진 표준사를 이용한 인발시험(주재우, 1999)에서 나타나지 않았던 점착력 c_p 값이 존재함을 알 수 있으며 다짐도의 증가에 따라 c_p 값도 증가하였다.

$$\tau = c_p + \sigma_v \cdot \tan \delta_p \quad (2)$$

여기서, τ = 인발마찰강도(kg/cm²), σ_v = 수직응력(kg/cm²), δ_p = 내부마찰각(°), c_p = 점착력(kg/cm²)

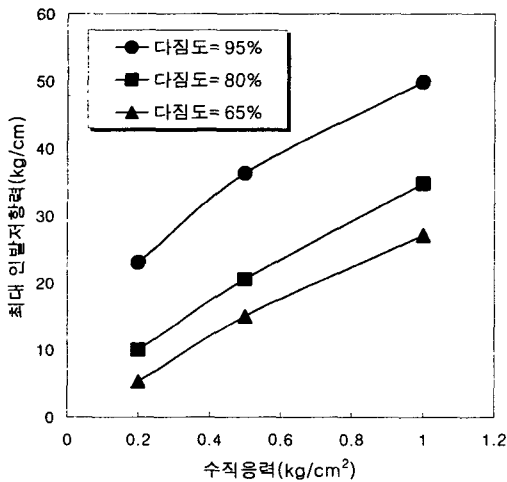


그림 9. 다짐도에 따른 수직응력-최대인발저항력 관계곡선

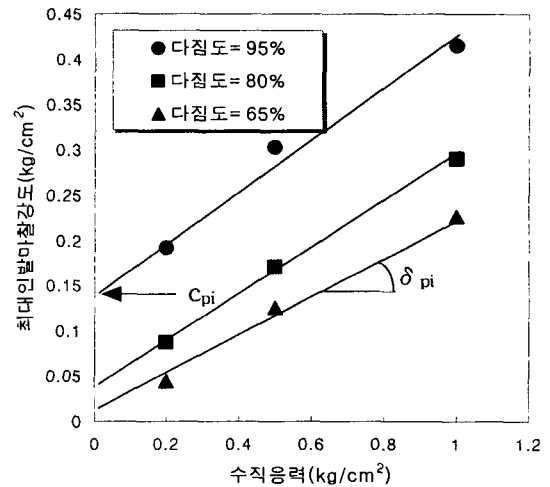


그림 10. 다짐도에 따른 수직응력-인발마찰강도곡선

4.3 전단강도정수와 인발마찰강도정수와의 관계

식 (3)에 의하여 흙만을 대상으로한 직접전단시험으로 구한 전단강도 정수와 흙과 보강재를 대상으로한 인발시험으로 구한 전단강도 정수 간의 보정계수 α_1 과 α_2 를 구한다면 직접전단시험 결과로부터 인발마찰강도정수를 구할 수 있다.

$$\tau = \alpha_1 \cdot c + \alpha_2 \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi = c_p + \sigma_v \cdot \tan \phi_p \quad (3)$$

여기서, α_1, α_2 = 보정계수

c, ϕ = 흙만을 대상으로한 직접전단시험으로 구한 전단강도 정수

c_p, ϕ_p = 흙과 보강재를 대상으로한 인발시험으로 구한 전단강도 정수

동일 시험기로 흙만을 대상으로한 직접전단시험 결과, 다짐도가 65%, 80%, 95%일 때 본 연구에 사용된 화강토의 내부마찰각은 약 30.88°, 34.46°, 49.65° 였고 점착력은 0.031kg/cm², 0.064kg/cm², 0.202kg/cm² 이었다. 그 결과는 아래 표 5와 같다.

표 3. 인발시험 결과

인발마찰강도정수 \ 다짐도	65%	80%	95%
c_p (kg/cm ²)	0.01	0.04	0.15
ϕ_p (°)	12.67	14.15	15.28

표 4. 흙만의 직접전단시험 결과

전단강도정수 \ 다짐도	65%	80%	95%
c (kg/cm ²)	0.031	0.064	0.202
ϕ (°)	30.88	34.46	49.65

표 5. 보정계수

보정계수 \ 다짐도	65%	80%	95%
α_1	0.32	0.63	0.74
α_2	0.41	0.41	0.31

5. 결론

본 연구에서는 화강토와 토목섬유사이의 마찰특성을 평가하기 위하여 일축연신 Geogrid를 이용하여 인발시험을 실시하여 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수직응력과 다짐도가 증가함에 따라 화강토와 토목섬유 사이의 인발저항이 증가하였다.
2. 화강토의 다짐도가 커질수록 화강토와 토목섬유 사이의 인발마찰강도정수인 내부마찰각이 증가하였고 주문진 표준사를 이용한 시험에서 나타나지 않았던 점착력이 존재함을 알 수 있었다. 이 점착력 c_p 도 다짐도의 증가에 따라 약간씩 크게 나타난다.
3. 최적함수비에서 95%다짐도로 다졌을 때 화강토와 일축연신 Geogrid와의 내부마찰각은 15.28° 점착력은 0.15kg/cm²이다.

6. 참고문헌

1. 주재우, 한호남, 박종범, 落舎英俊 (1999), "인발시험에 의한 지오그리드 보강토의 마찰특성에 관한 연

구“, 대한토목학회논문집, 제19권, 제Ⅲ-3호, pp.503~514.

2. 조삼덕, 김진만 (1995), “토목섬유 보강토구조물의 합리적인 해석과 설계”, 한국건설기술연구원, 연구보고서, KICT/95-GE-1101.

3. H. Ochiai, S. Hayashi, J. Otani, T. Hirai (1992), “Evaluation of pull-out resistance of geogrid reinforced soils”, *Proceedings of The International Symposium on Earth Reinforcement Practice/Fukuoka/Kyushu/Japan/11-13 November 1992*. pp. 141~146.