

화강토와 표준사를 이용한 토목섬유의 인발시험결과 비교

Pullout Test Results of Geosynthetics using Granite Soil and Standard sand

*1 주재우, Ju Jae-Woo

*2 박종범, Park Jong-Beom

*3 김장홍, Kim, Jang-Heung

*4 송춘석, Song, Chun Seok

*5 백경중, Baek Kyung-Jong

Abstract

New concept called the pullout resistance angle has been used to express the friction, cohesion and passive resistance by pullout test at geosynthetics reinforced soil. And also in order to calculate the pullout area, the distribution area method has been used, which is a method of using the curve of tensile force exerted in geogrid. The distribution area ratio showed nearly the same result in the two kind of soils, the granite soil and the standard soil. The pullout resistance angle showed the greater value than friction angle of soil in case of low confining stress of 0.2kg/cm^2 , while it showed the smaller angle than friction of soil in case of high confining stress of 0.8kg/cm^2 .

요 지

인발 저항각이라는 새로운 개념은 토목섬유로 보강된 지반에서 인발 시험을 행할 때 발생하는 마찰력, 점착력, 수동저항을 포함하는 것이다. 인발 면적을 계산함에 있어 분포 면적법을 사용하였는데, 이는 그리드에 발생하는 인장력 곡선을 이용하는 방법이다. 분포면적비는 화강토나 표준사 지반에서 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 인발 저항각은 낮은 구속하중인 0.2kg/cm^2 일 때는 마찰각보다 더 큰 값을 보이지만, 높은 구속하중인 0.8kg/cm^2 일 때는 마찰각보다 더 작은 값을 보였다.

Keywords : Pullout test, The distribution area method, Pullout resistance angle, Confining stress

1. 서 론

보강토지반의 경우 보강재가 지반속에 삽입되어 있는데, 하중을 받게 되면, 보강재와 지반사이의 상대적인 변위로 인하여 보강재내에 인장력이 발생하며, 이러한 메카니즘에 의해 지반의 강도를 높여주는 방향으로 보강재는 그 역할을 한다. 우리나라에

서 최근 보강토옹벽의 뒷채움재로서 어디에서나 쉽게 구할 수 있는 화강토가 많이 이용되고 있다. 그러나 화강토에 있어서 중요한 설계정수인 인발마찰력에 대한 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 길이 30cm, 폭 30cm, 높이 20cm로서 비교적 소형인 인발시험기를 이용하고, 표준사 및 화강토를 지반재료로 하는 인발시험을 실시하였다. 또한, 보강재로서

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

*2 순천대학교 공업기술연구소 연구원 (Research Fellow, Research Center of Industrial Technology, Univ. of Suncheon)

*3 신명엔지니어링 대표이사 (President, Shinmyeong Engineering, Lo., Ltd)

*4 순천대학교 대학원 토목공학과 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Suncheon)

*5 (주)다솔컨설팅 대표이사 (resident, DASOL Consultant Co., Ltd)

는 지오그리드를 이용하였다. 인발시험결과를 비교 검토하였으며, 인발정수를 구하는 데 인발면적은 대단히 중요한 영향인자이다. 따라서 본 연구에서는 인발면적을 계산하는데 있어서, 새로운 방법인 인장력 분포곡선으로부터 구하는 면적비 개념을 도입하였다. 즉 인발시험중의 보강재가 받는 인장력분포를 구하여, 최대인장력을 전체길이에서 받는다고 가정했을때의 면적과 인장력분포곡선내의 면적을 비교하여 면적비를 구하고, 이 면적비를 이용하여 인발응력과 거기에 따른 인발저항각을 구하는 방법이다.

2. 인발특성치의 새로운 정의

2.1 인발 저항각

어떤 지반의 강도 특성을 얻기 위해서는 지반에서 시료를 채취하여 요소시험인 삼축시험을 실시한다. 시험결과로부터 내부마찰각과 점착력을 구하는데, 이 값은 구속응력의 크기에 무관한 값이다. 반면에, 흙과 지반사이의 저항특성을 얻기 위해 구속응력을 증가시켜가며, 보강재를 인발시키는 시험을 행한다. 이 시험은 삼축시험과 같은 요소시험이라 할 수 없기 때문에, 구속응력의 크기에 무관한 값을 얻기는 어렵다.

지금까지는 이들 시험결과로부터 인발마찰각과 인발점착력의 개념을 도입하여 흙과 토목섬유사이의 저항특성을 나타내려는 시도를 해왔었다. 그러나, 그동안의 시험결과를 살펴보면, 인발마찰각은 구속응력에 영향을 받는 값을 알 수가 있었다. 즉, 구속응력이 커질수록 그 값은 작아지는 경향을 보인다.

따라서, 본 연구에서는 흙과 토목섬유사이의 저항 값을 새로운 개념의 용어 즉 인발저항각으로 표시하고자 한다. 여기서, 인발저항각은 인발마찰력, 인발점착력 및 수동저항 모두를 포함시키는 값으로 또한, 구속응력의 크기에 따라 달라지는 값이다. 즉, 인발 특성치는 구속응력에 영향을 받는 인발저항각 δ 만을 사용하는데, 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = \delta(\sigma_v) \quad (1)$$

2.2 인장력분포곡선에서 구하는 인발면적

인발시험에서 인발마찰력을 구하기 위해서 최대 인발력을 인발응력으로 바꾸는데, 인발면적을 어떻게 결정하느냐가 정확한 인발저항각을 얻는데 있어서 무척 중요하다. 그 이유는 전체 보강재에 인발력이 고루 분포하지 않기 때문인데, 본 연구에서는 크게 2가지 방법을 취하여 계산을 하였다.

2.2.1 전면적법

전면적법은 보강재가 포설되어 있는 면적 전체를 사용하는 방법이다. 그러나, 이 방법은 인발저항각을 실제값보다 낮게 평가되도록 한다.

2.2.2 인장력분포곡선을 이용한 면적계산

보강재의 인발시험중에 보강재에 작용하는 인장력을 구할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 인장력은 인발을 시키는 부분으로부터 어느 정도 거리에서 피크를 보이고 점차 작아져가는 경향을 보인다. 피크부분의 인장력의 값을 기준으로 수평으로 선을 그었을때, 나타나는 직사각형의 면적을 100으로 하고, 인장력 곡선하부에서의 면적의 비를 구한 후, 전체면적에 면적비를 곱함으로써 인발면적을 구하는 방법이다. 이 방법은 분포면적법이라 정의하였으며, 보강재 전체가 똑같은 인장력을 받았을때 만이 전체 면적을 사용하여 인발응력을 구할 수 있다는 점에서 볼 때, 타당성이 있는 논리라고 판단된다. 면적비는 아래 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\text{면적비} = \frac{\text{인장력분포곡선의 빗금친 면적 (Total area)}}{\text{최대인발력을 기준한 사각형면적 (Distribution area)}} \quad (2)$$

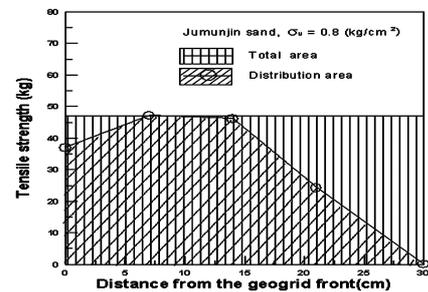


그림 4. 면적비 개념도(표준사, $\sigma_v=0.8 \text{ kg/cm}^2$ 일 경우)



사진 1. 인발시험장치

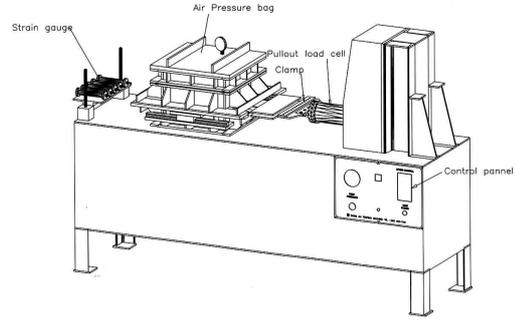


그림 2. 인발시험장치 모식도

표 1. 주문진 표준사의 물리적 성질

물리적성질 시료종류	비중, G_s	함수비, w (%)	최대밀도(g/cm^3)	최소밀도(g/cm^3)	모델지반밀도(g/cm^3)	상대밀도(%)
주문진 표준사	2.67	0.2	1.654	1.398	1.612	90

표 2. 화강풍화토의 물리적 성질

재 료	비중, G_s	액성한계(%)	소성지수(%)	최대건조밀도(g/cm^3)	최적함수비(%)	균등계수, C_u	#200체통과량(%)
화강토	2.68	39.5	5.35	1.578	24.8	10.65	5.06

3. 실험

3.1 인발실험장치

인발시험장치는 길이 30cm, 폭 30cm, 높이 20cm로써 비교적 작은 인발시험장치이다. 인발시험장치는 사진 1과 그림 2에서와 같이 크게 토조와 Air pressure bag, 토목섬유고정장치 및 Load cell, 전동모터 등 5부분으로 구성되어 있다.

상부 경계면은 고른 압력을 분포시킬 수 있도록 토조상부에 Air pressure bag을 설치하였으며, 인발시에 나타나는 인발저항력은 인발장치에 부착된 로드셀에 의하여 자동으로 측정된다. 그리고 보강재의 인발변위는 토조 전면부에 설치된 변위계(LVDT)에 의하여 측정되며, 재하장치는 토조상부경계면에 설치한 air pressure bag에 공기압축기로 압축공기를 주입하여 상재압, 즉 구속응력을 가하도록 제작되었으며, 이때의 공기압은 조절장치의 압력계에 의하여 제어된다.

3.2 표준사 및 화강토의 특성

모형지반을 제작하기 위한 흙은 주문진표준사

와 화강토를 이용하였으며, 주문진표준사와 화강풍화토의 물리적 특성은 다음 표 1과 표 2와 같다. 통일분류상 주문진표준사의 경우 SP에 해당되며, 화강풍화토의 경우 SM-SC에 해당된다. 또한 직접 전단시험결과 주문진표준사와 화강풍화토의 경우 각각 점착력은 $0.016kg/cm^2$ 와 $0.361kg/cm^2$ 이었으며, 마찰각은 34.5° 와 32.4° 였다.

3.3 보강재

본 연구에서 사용된 보강재료는 일축연신 지오그리드로서, 물리적 특성은 다음 표 3과 같다. 사진 2는 보강재의 실제 모습을 나타낸 것이다.

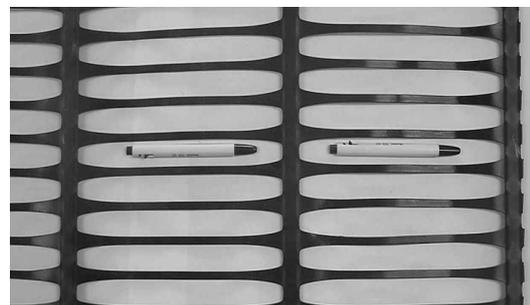


사진 2. 일축연신 지오그리드

표 3. 토목섬유의 물리적 특성

보강재의 종류	최대인장강도 (kN/m)	최대신율 (%)	격자크기 (mm)
지오그리드보강재	90.0	13.0	250×17

3.4 실험내용

인발시험은 구속응력과 흙의 종류에 따라 다음 표 4와 같이 동일한 조건으로 인발시험을 실시하였으며, 인발시험은 총 6회 실시하였다.

3.5 모형지반제작방법 및 실험방법

주문진표준사지반의 제작방법은 다중체 낙하장치를 이용하였으며, 다중체 낙하장치를 이용한 상대밀도 90%를 재현하기 위한 조건은 체눈의 크기가 2.2mm이고, 체의 층수는 5층이며, 유출구의 직경은 4cm 그리고 낙하고는 70cm이다. 또한 인발상자 토조내 화강풍화토의 모형지반 제작은 화강풍화토의 함수비를 다짐시험에 의해 결정된 최적함수비로 조절하여 시료를 준비하고, 준비된 시료를 토조내에 포설한 후 4.5kg의 rammer를 45cm의 낙하고로 떨어뜨려 다짐하는데 다짐층수는 4층으로 하였다. 인발상자(30cm×30cm×20cm)의 체적이 $V=18,000\text{cm}^3$ 이고, 다짐층을 4층이므로 4.5kg 램머로 45cm 높이에서 낙하시킬 경우 $E_c=5.625\text{kg} \cdot \text{cm/cm}^3$ 을 유지하기 위해서는 매층 다짐횟수를 125회씩 다짐하면 소요다짐도를 확보하게 된다. 그리고 토목섬유는 하부상자 즉 2층까지 다짐후 토조 높이의 중앙인 10cm 높이에 매설하였다.

인발시험시 인발속도는 1mm/min로 일정하게 하였으며, 인발력은 토목섬유고정장치에 연결되어 있는 Load Cell에 의하여 측정하였다. 한편 토목섬유고정장치 한쪽 면에 1개의 변위계를 설치하고, 이를 Data Logger에 연결하여 매 1초 간격으로 인발변위를 측정하였다. 또한, 토조내 Geogrid의 인발변위를 측정하기 위하여 인발상자의 전면부 인발구멍으로부터 0, 7, 14, 21, 28cm 떨어진 지오그리드의 절점에 0.1mm의 구멍을 낸후직경 0.6mm의 고강도 합성섬유사를 부착하고 이를 인발상자 후면부의 구멍을 통

표 4. 인발시험내용

구분	모형지반	보강재	Normal stress(kg/cm ²)
인발 시험	주문진표준사	Geogrid	0.2, 0.5, 0.8
	화강풍화토	Geogrid	0.2, 0.5, 0.8

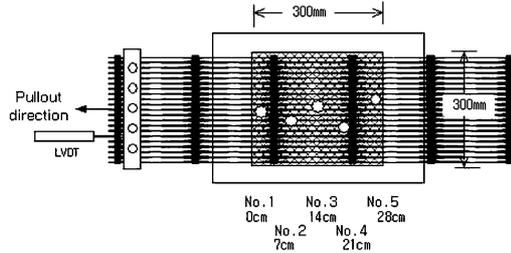


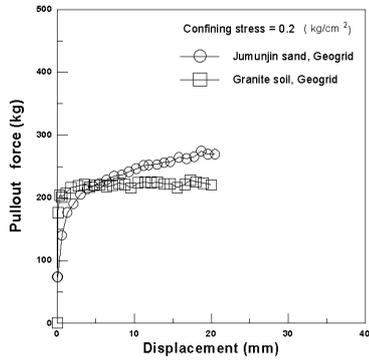
그림 3. 인발상자 토조내 지오그리드상의 고강도 합성섬유사의 부착위치도

하여 변위계에 연결하여 매 1분 간격으로 그리드 절점에서 발생하는 인장변위를 측정하였다(그림 3 참조). 그리고 인발상자 토조내 내경 3mm의 동관을 이용하므로써 고강도 합성섬유사와 흙과의 마찰을 영향을 줄일 수 있었다.

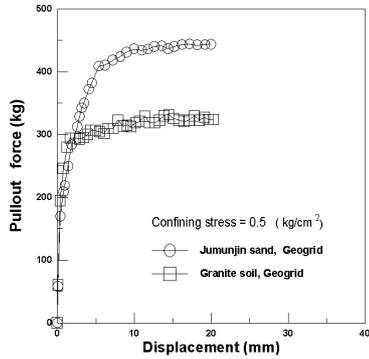
4. 결과 및 고찰

4.1 인발력과 선단인발변위의 관계

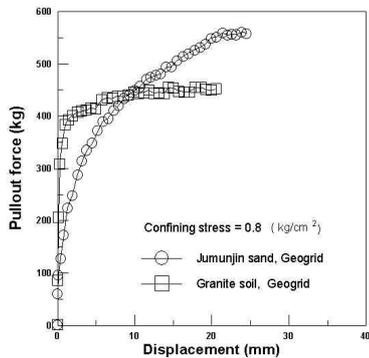
그림 4는 주문진표준사와 화강토 모형지반에 띠형과 지오그리드보강재를 인발할 경우 각각의 구속응력이 0.2, 0.5, 0.8kg/cm²로 증가할 때, 선단인발변위와 인발력과의 관계를 나타낸 것이다. 구속응력의 증가에 따라 인발력은 증가하고 있으며, 인발곡선의 형태는 지반의 종류에 따라 그 특성을 달리하고 있다. 즉, 표준사지반의 경우 인발변위의 증가에 따라, 지속적으로 인발력이 증가해가는 경향을 보이며, 따라서, 피크점에 도달할 때까지 상당히 큰 인발변위가 필요한 것으로 보인다. 그러나, 화강토지반의 경우에는 초기 2~3mm의 변위에서 최대인발력의 90%이상까지 도달하며, 그 이후에는 증가경향이 아주 완만한 특성을 보이고 있다. 이러한 특성은 표준사모래의 경우 인발이 되면서도 입자가 재빨리 재배열되면서 인발효과를 지속적으로 나타내고 있는 것으로 보이



(a) $\sigma_v=0.2\text{kg/cm}^2$



(b) $\sigma_v=0.5\text{kg/cm}^2$



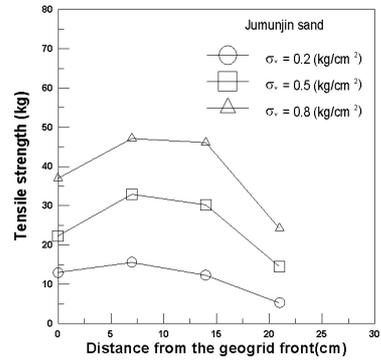
(c) $\sigma_v=0.8\text{kg/cm}^2$

그림 4. 구속응력에 따른 인발력과 인발변위 관계

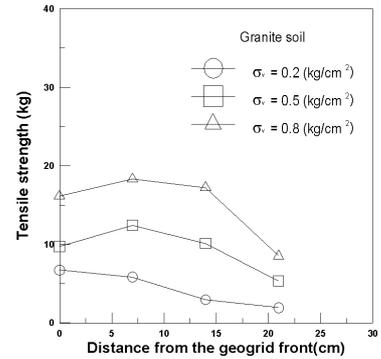
며, 화강토의 경우 점착성분의 영향으로 한번 인발이 되어버리면, 재배열되어 강도를 회복하는 능력이 현저히 떨어지기 때문이라 판단된다. 즉, 화강토를 보강지반으로 사용하는 경우 작은 변위에도 즉각 최대 인발력이 작용한다는 점이 특이하다.

4.2 최대인발력상태에서 토목섬유의 인장력분포

인발시험중 흡속에 묻혀있는 지오그리드 0, 7, 14, 21, 28cm 등 5개 절점에서 인장변위를 측정하였다.



(a) 표준사지반



(b) 화강토지반

그림 5. 최대인발력상태에서 토목섬유내의 인장력분포

절점의 인장변위차로부터 상대적인 인장변형을 구한 후, 지오그리드의 변형과 강도특성곡선으로부터 지오그리드에 걸리는 인장력을 구하였다. 그림 5는 지반의 종류에 따른 최대인발력 상태에서 토목섬유내의 인장력 분포상태를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보면, 인발을 시키는 전면에서 7cm되는 지점에서 인장력이 피크점을 보이고 있으며 후면으로 갈수록 작아지는 일반적인 특성을 보여주고 있으며, 그 경향은 주문진 표준사와 풍화토가 비슷하였다. 인장력의 크기는 전반적으로 표준사의 경우가 화강토지반에 비해서 약 2.5배정도 컸는데, 이는 인발저항치가 화강토에 비해 표준사가 크다는 것을 의미한다.

4.3 분포면적비 분석

토목섬유가 인발될 때 토목섬유에 유발되는 인장력은 인발선단부에서 포설거리에 따라, 어느 정도 증가하다가 피크를 이룬 후, 점차 거리가 멀어질수록 작게 분포되는 경향을 보이고 있다. 여기서 표준사

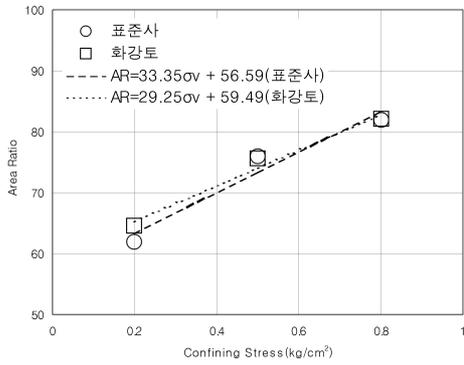


그림 5. 구속응력- 면적비

와 화강토의 경우 구속응력에 따른 면적비를 계산하여 나타낸 것이 표 5와 그림 5이다.

그림에서 보면 면적비는 흙의 종류와는 관계없이 비슷한 경향을 보여준다. 그러나, 구속응력이 클수록 면적비가 큰 값을 보이고 있어서 면적비는 구속응력에 의존하는 성질을 지니고 있음을 알 수 있었다. 각각의 흙에 대하여 구속응력에 따른 면적을 구하는 식을 회귀 분석하여 나타낸 것이 아래 식 (3), (4)와 같다.

◦ 표준사지반의 경우 :

$$\text{면적비 } AR = 33.35\sigma_v + 56.59 \quad (3)$$

◦ 화강토지반의 경우 :

$$\text{면적비 } AR = 29.25\sigma_v + 56.59 \quad (4)$$

4.4 인발저항각

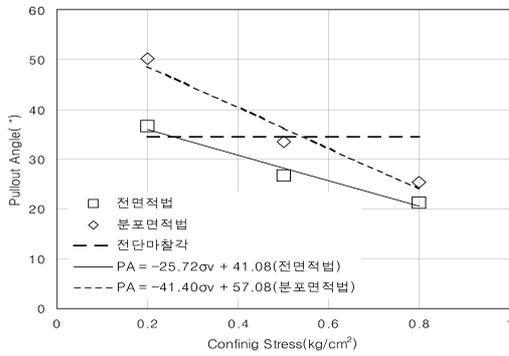
인발저항각, δ 는 구속응력에 의존하는 값이라는 개념을 식 (1)에서 정의하였다. 이러한 개념에 의해 각각의 구속응력에 따른 인발저항각을 전면적법과 분포면적법에 의해 계산하였다. 그 결과를 표 6과 그림 6에 나타내었다. 구속응력의 크기에 따라 인발저항각은 작아지는 경향을 뚜렷히 보여주고 있다. 또한, 분포면적법의 경우가 전면적법에 비해, 더 큰 인발저항각을 보여준다. 그리고, 표준사 또는 화강토가 지닌 고유의 내부 마찰각을 굵은 점선으로 나타내었다. 지반의 내부마찰각은 구속응력의 크기에 의존하지 않는 성질을 지니므로 수평선으로 그려진다. 분포면적법의 경우, 인발저항각은 낮은 구속응력하에서는 지반의 내부마찰각보다 큰 값을 보이지만, 구속응력이 커질수록 작은 값을 나타내다가 구속응력이 0.8kg/cm^2 인 경우, 내부마찰각보다 오히려 작은 값을 보여주고 있다. 분포면적법의 데이터를 이용하여 회

표 5. 면적비 계산

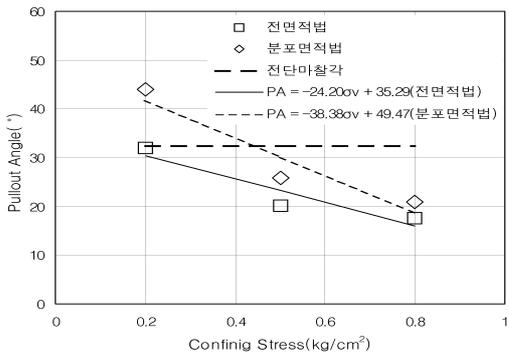
시험조건	구속응력(kg/cm ²)								
	0.2			0.5			0.8		
	전체면적 (m ²)	분포면적 (m ²)	면적비 (%)	전체면적 (m ²)	분포면적 (m ²)	면적비 (%)	전체면적 (m ²)	분포면적 (m ²)	면적비 (%)
표준사	5.55	3.44	61.98	9.84	7.48	76.02	14.13	11.57	81.88
화강토	2.01	1.30	64.68	3.72	2.81	75.54	5.49	4.51	82.15

표 6. 전면적과 인장력곡선에 따른 인발특성

지반종류		구속응력(kg/cm ²)											
		0.2				0.5				0.8			
		인발저항 강도 (kg/cm ²)	인발 저항각 (°)	전단 마찰각 (°)	상호작용 계수 (a)	인발저항 강도 (kg/cm ²)	인발 저항각 (°)	전단 마찰각 (°)	상호작용 계수 (a)	인발저항 강도 (kg/cm ²)	인발 저항각 (°)	전단 마찰각 (°)	상호작용 계수 (a)
전면적법	표준사	0.149	36.88	34.5	1.084	0.252	26.74	34.5	0.733	0.311	21.24	34.5	0.565
	화강토	0.125	32.00	32.4	0.984	0.183	20.10	32.4	0.576	0.252	17.48	32.4	0.496
분포면적법	표준사	0.240	50.23	34.5	1.456	0.331	33.54	34.5	0.972	0.380	25.39	34.5	0.736
	화강토	0.193	44.01	32.4	1.358	0.242	25.85	32.4	0.798	0.307	20.98	32.4	0.648



a) 표준사지반



(b) 화강토지반

그림 6. 구속응력에 따른 인발저항각분포

귀분석하여 인발저항각을 구속응력의 함수로 나타낸 식이 아래와 같다.

◦ 표준사지반의 경우 :

$$\delta = -41.40\sigma_v + 51.08 \quad (5)$$

◦ 화강토지반의 경우 :

$$\delta = -38.38\sigma_v + 49.47 \quad (6)$$

5. 결론

본 연구에서는 인발정수에 대한 새로운 개념의 용

어 즉 인발저항각이라는 개념을 도입하였다. 이러한 인발저항각 개념을 바탕으로 표준사 및 화강토에 대한 인발시험을 실시하였으며, 그 분석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분포면적비는 흙의 종류와는 관계없이 비슷한 경향을 보여주었다. 그러나, 구속응력이 클수록 면적비가 큰 값을 보이고 있어서 면적비는 구속응력에 의존하는 성질을 지니고 있음을 알 수 있었다.
2. 분포면적법의 경우, 인발저항각은 낮은 구속응력 하에서는 지반의 내부마찰각보다 큰 값을 보이지만, 구속응력이 커질수록 작은 값을 나타내다가 구속응력이 0.8kg/cm²인 경우, 내부마찰각보다 오히려 작은 값을 보였다.
3. 새로운 개념의 인발정수를 도입하였고, 어느 정도 타당성 있는 시험결과를 얻었으나, 다양한 흙과 다양한 토목섬유를 이용하는 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박종범(2005), “인발상자크기 및 단계적 인발시험에 의한 보강토의 인발특성”, 순천대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
2. 조삼덕, 김진만(1995), “토목섬유 보강토 구조물의 합리적인 해석과 설계”, 한국건설 기술연구원, 연구보고서, KICT/95-GE-1101.
3. Hayashi, S., Makiuchi, K. and Ochiai, H.(1994), “Testing Methods for Soil-Geosynthetic Frictional Behaviour-Japanese Standard”, 5th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, September, pp.411~415.
4. Koerner, R.M., (1994), “Designing with Geosynthetics”
5. Ochiai, H. Yasufuku, N & Yamaji, H. Guang-Li Xu, Hirai, T(1996), “Experimental evaluation of reinforcement in geogrid-soil structure”, Proceedings of The International Symposium on Earth Reinforcement, pp.249~254.
6. Palmeira, E. M and Milligan, G. W. E.(1989), “Scale and other factors affecting the results of pullout tests of grids buried in sand”, Geotechnique, Vol.39, pp.511~524.