

# 화강 풍화토/지오그리드 인발시험 및 마찰특성 평가

Evaluation of Weathered Granite Soil/Geogrid Friction  
Properties and Pull-out Test

조 삼 덕\*1

Cho, Sam-Deok

김 진 만\*2

Kim, Jin-Man

---

---

## Abstract

The pull-out test has been used to investigate the friction properties between soil and grid type geosynthetics which is useful to measure the passive bearing resistance as well as the skin friction.

In this paper, the friction properties between geogrid and a weathered granite soil are investigated by performing various pull-out tests. From the test results, a rational pull-out test equipment and test method is suggested by evaluating the effects of major factors (such as geogrid width, location of soil box facing, vertical loads and pull-out displacement rate, etc.) on pull-out test results.

## 요 지

그리드(grid) 형태의 토목섬유와 흙 사이의 마찰특성은 표면마찰 뿐만아니라 그리드에 의한 수동저항을 동시에 측정할 수 있는 인발시험(pull-out test)에 의해 평가되고 있다.

본 연구에서는 보강토 구조물에서 가장 많이 사용되고 있는 지오그리드(geogrid)와 국내에 널리 분포되어 있는 화강 풍화토를 대상으로 실내 인발시험을 수행하였으며, 인발시험의 주요 영향 인자들인 인발속도, 토조 전면벽의 위치, 지오그리드 시료의 폭 및 지오그리드 수동 저항부재의 유·무 등이 흙/지오그리드 마찰특성에 미치는 영향을 평가하였다.

Keywords : Pull-out test, Friction properties, Geogrid, Skin friction, Passive resistance, Pull-out speed, Sleeve length

---

---

\*1 정희원, 한국건설기술연구원, 수석연구원

\*2 정희원, 한국건설기술연구원, 선임연구원

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 우수한 경제성과 수려한 외관 및 시공의 간편성 등에 의해 직포(woven fabric), 지오그리드(geogrid), 지오네트(geonet), 복합포(geocomposite) 등의 토목섬유(geosynthetics)를 보강재로 이용한 보강토 구조물의 건설이 나날이 증가하고 있으며, 특히 보강재로서는 1980년대 초에 개발된 그리드 형태의 고강도 토목섬유인 지오그리드의 활용이 두드러지고 있다. 이러한 토목섬유 보강토 구조물의 안정해석 및 설계시에 필요한 주요 인자 중의 하나는 흙과 토목섬유 보강재 사이의 마찰특성이다. 흙/토목섬유 마찰특성을 평가하는 방법으로는 일반적으로 직접전단시험(direct shear test)과 인발시험(pull-out test)이 사용되고 있다.

토목섬유 보강재의 마찰특성 평가에 관한 연구를 살펴보면, Jewell(1980)이 보강토체의 전단면과 보강재의 경사도에 따른 마찰특성을 평가하였고, Juran et al.(1988)이 보강재 주변 흙의 부피팽창(dilatancy) 특성에 대하여 연구하였으며, Giroud et al.(1993)이 구속응력에 따른 흙/보강재의 전단특성을 연구하였다. 또한, Bacot et al.(1978)과 Schlosser & Elias(1978), Ingold(1982, 1984), Sridharan & Singh(1984, 1986, 1988), Kate et al.(1988), Rao & Pandey(1988) 등은 다양한 크기의 인발시험장치를 사용하여 흙/토목섬유 마찰특성을 평가하였고, Costalonga(1988)와 Fannin & Raju(1991) 등은 인발시험 동안 흙/토목섬유의 전단면에서 점진적인 전단특성이 나타난다고 보고 하였으며, Palmeira(1988)와 Palmeira & Milligan(1989) 및 Srinivasa Murthy et al.(1993) 등은 인발시험 장치의 크기와 전단면의 거친 정도가 인발시험 결과에 영향을 미친다고 평가하였으나, 아직까지 표준화된 인발시험 장치의 형태 및 시험방법은 제안되어 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 보강토 구조물에서

가장 많이 사용되고 있는 지오그리드 1종과 국내에 널리 분포되어 있는 화강 풍화토 1종을 대상으로 실내 인발시험을 수행하였으며, 인발시험의 주요 영향 인자들인 인발속도, 토조 전단면의 위치, 지오그리드 시료의 폭 및 지오그리드 수동 저항 부재의 유·무 등이 흙/지오그리드 마찰특성에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 그리드형 보강재에 있어서의 인발저항의 해석

일반적으로 그리드형 보강재에 대한 인발저항은 보강재의 표면과 흙 사이에 유발된 표면 마찰저항과 보강재의 수동저항 부재에 대한 흙의 수동저항에 의해서 발현된다.

Jewell et al.(1984, 1990)은 강재 그리드형 보강재의 인발저항,  $P_p$ 를 흙과 보강재 표면에서 발생되는 표면마찰(skin friction) 저항,  $(P_p)_s$ 과 보강재의 수동저항 부재에 의한 지지응력(bearing stress),  $(P_p)_{bs}$ 의 합으로 고려하여, 그림 2.1에서 정의된 보강재 단면에 대해서 다음식과 같이 표현하였다.

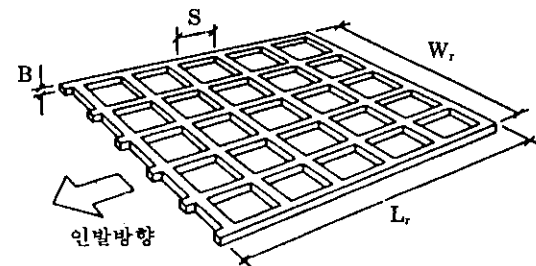


그림 2.1 보강재 단면의 정의

$$(P_p)_s = 2\alpha_s L_r W_r \sigma'_s \tan \delta \quad (1)$$

$$(P_p)_{bs} = \left( \frac{L_r}{S} \right) \alpha_b B W_r \sigma'_b \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_s$  : A, (=L<sub>r</sub>, W<sub>r</sub>)에 대한 보강재 표면적만의 비율

$\alpha_b$  : 가상 저항면적(BW) 중에서 실제로 수동저항이 유발되는 면적(그리드의 접점부분이 제외된 면적)의 비율

$L_r/S$  : 수동저항 부재의 개수  
(수동저항 부재가 1개인 경우에는  $L_r/S=1$  이다.)

$\delta$  : 흙과 보강재 표면 사이의 마찰각

$\sigma'_b$  : 수동저항부재의 유효 저항응력

$\sigma'_c$  : 보강재 표면에 작용하는 유효 수직응력

$L_r, W_r$  : 인발저항을 제공하는 그리드의 길이와 폭

한편, Palmeria & Milligan(1989)은 그리드의 수동저항 부재들의 상호간섭영향을 인발저항 평가시에 도입해야 한다는 것을 제안하였으며, 상호간섭 계수, DI와 n개의 수동저항 부재가 있는 강재 그리드의 총 수동저항을 다음과 같이 제시하였다.

$$DI = 1 - \frac{(S/\alpha_b B)}{(S/\alpha_b B)_0} \quad (3)$$

$$(P_p)_{bs} = (P_p)_{bs0} + (n-1)(P_p)_{bs0} \frac{(S/\alpha_b B)}{(S/\alpha_b B)_0} \quad (4)$$

여기서,  $(P_p)_{bs0}$  : 상호간섭 영향이 없는 첫번째 수동저항 부재의 인발력

$(S/\alpha_b B)_0$  : 상호간섭 영향이 발생하지 않는 한계 그리드 형상

Palmeira & Milligan(1989)은 다양한 강재 그리드를 대상으로 한 인발시험을 토대로 수동저항 부재의 직경과 간격의 비,  $S/B$ 가 50 이상이면 상호간섭 영향은 무시할 수 있다고 평가하였다.

식(2)에서 그리드의 수동저항면에서 발휘될 수 있는 저항응력은 제안자마다 상당한 차이를 보이고 있다. 저항응력에 대한 관계식을 제안

한 대표적인 연구자로는 Peterson & Anderson(1980), Jewell et al.(1984)을 들 수 있다. 수동저항 부재에 의한 저항응력은 기초설계의 지지력 이론을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma'_b = CN_c + \sigma'_c N_q \quad (5)$$

여기서, C : 뒤채움 흙의 점착력

$N_c, N_q$  : 지지력 계수

Peterson & Anderson(1980)은 이러한 수동저항응력을 평가하기 위해서 수평방향으로 회전된 기초에 대한 수동저항 파괴형태를 가정하여 지지력 계수,  $N_c$ 와  $N_q$ 를 다음과 같이 제안하였다.

$$N_q = \exp[\pi \tan \phi] \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (6)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (7)$$

여기서,  $\phi$  : 흙의 내부마찰각

또한, Jewell et al.(1984)은 보강재의 수동저항응력에 대한 펀칭파괴 형태(punching failure mode)를 가정하여 지지력 계수를 다음과 같이 제안하였다.

$$N_q = \exp\left[\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right) \tan \phi\right] \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (8)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (9)$$

### 3. 인발시험

#### 3.1 실험재료

본 연구에 사용한 흙시료로는 국내에 널리 분포하고 있는 화강풍화토를 대상으로 하였으며, 원주시 주택단지 조성공사 현장의 화강풍화토를 채취하여 사용하였다. 흙시료의 역학적 특성은 표 3.1과 같다. 그림 3.1과 그림 3.2에서는 각각 흙시료의 입도분포곡선과 A 다짐에

의한 다짐특성 곡선을 보여준다. 인발시험시 사용한 흙시료의 상태는 자연함수비 1.88%, 전

일방향으로 열연신하여 제조한 제품(제품명 : SR-55)으로서, 그림 3.3에서 보듯이 그리드

표 3.1 흙시료의 역학적 특성

함수비 (%)		1.88	비중		2.62
입도	모래	93.0	다짐	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	1.897
분포 (%)	실트	7.0	시험	O.M.C(%)	12.3
	점토	0	인발시험시	$\gamma_{dcomp}(g/cm^3)$	1.71
소성지수 (PI)		NP	다짐상태	다짐도(%)	90
흙분류(통일분류법)		SM-SW			

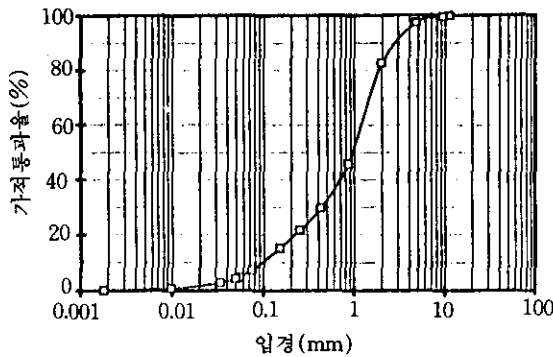


그림 3.1 흙시료의 입도분포곡선

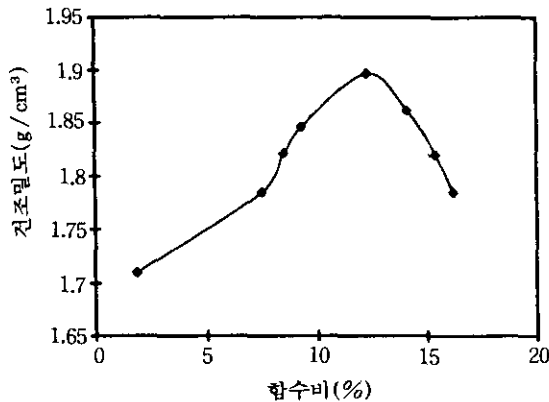


그림 3.2 흙시료의 다짐특성 곡선

조단위중량  $1.71g/cm^3$ 로 상대다짐 90%를 맞추어서 제조하였다.

인발시험시 사용한 지오그리드 시료는 고밀도 폴리에틸렌(high density poly-ethylene)을

(grid) 공간의 길이 16.6cm, 폭 2.2cm인 비교적 큰 그리드 공간을 갖고 있다. 그림 3.4에서는 geogrid 시료의 광폭 인장강도 실험결과를 보여 주는데, 일반적으로 제품 품질관리 강도로는  $5.0t/m$ 의 값을 사용하고 있다.

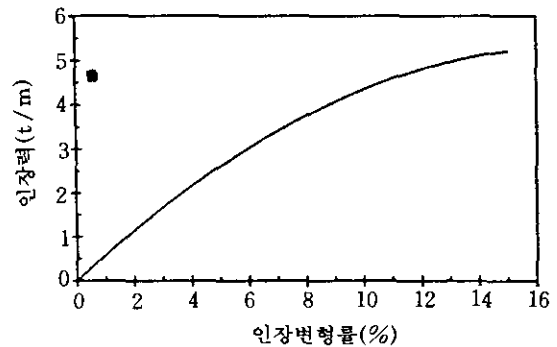
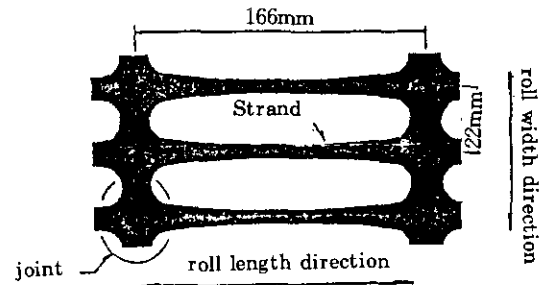


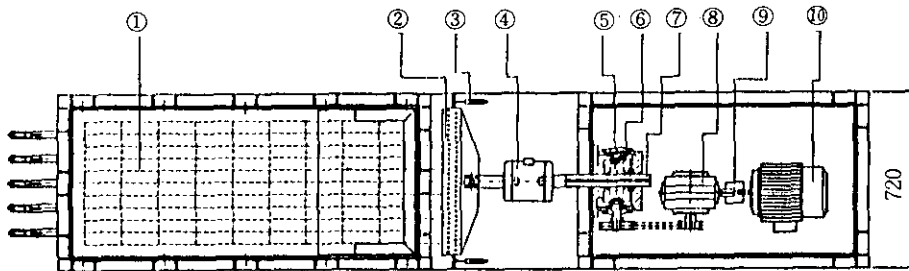
그림 3.3 지오그리드 시료의 형상 및 광폭 인장강도 특성곡선(인장속도: 1%/min)

### 3.2 인발시험 장비 및 실험방법

실험에 사용된 인발시험 장비는 그림 3.4에

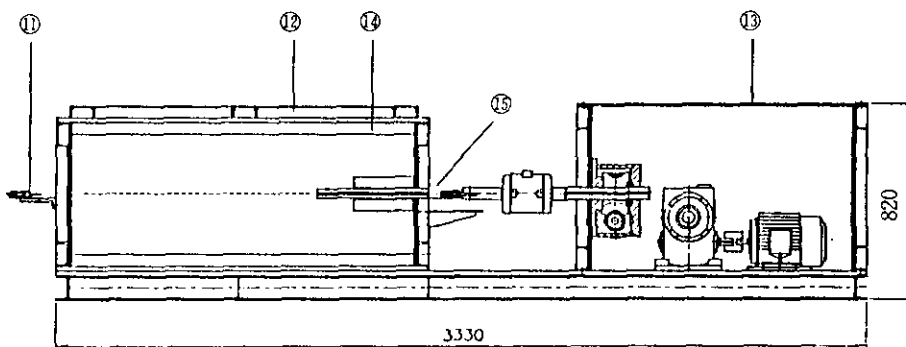
서 보듯이 흙과 지오그리드 시료가 포설되는 토조(soil box)와 인발장치 및 지오그리드와 인발장치를 연결하는 지오그리드 고정장치 등 크게 3부분으로 구성되어 있다. 토조 내부의 크기는 길이 140cm×폭 60cm×높이 60cm이며, 인발방향의 전면벽 중앙에는 간격 1.0~2.5cm

정도의 슬릿 slit가 있어 지오그리드가 자유롭게 인발될 수 있도록 되어 있다. 토조의 상부와 하부에는 고무 멤브레인을 설치하여 공기압에 의해 토조 내에 균등한 수직하중을 가압할 수 있도록 하였다.



- |                   |                   |           |
|-------------------|-------------------|-----------|
| ① 지오그리드 시료        | ⑥ worm wheel      | (단위 : mm) |
| ② 지오그리드 고정장치      | ⑦ 스크류(screw)      |           |
| ③ 변위계             | ⑧ worm reducer    |           |
| ④ 로드 셀(load cell) | ⑨ chain coupling  |           |
| ⑤ worm gear       | ⑩ induction motor |           |

(a) 평면도



- |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| ⑪ 변위계     | ⑬ 인발구동시스템 | (단위 : mm) |
| ⑫ 토조 상부덮개 | ⑭ 고무 멤브레인 |           |
|           | ⑮ 슬릿      |           |

(b) 정면도

그림 3.4 인발시험장비의 모형도

한편, 지오그리드의 인발에 따라 토조 전면 벽에 작용하는 수평토압을 측정할 수 있도록 토조 전면벽에는 슬리트로 부터 각각 5.0cm, 10.0cm, 20.0cm 상부 위치에 토압계가 설치되어 있다. 토조 후면벽 중앙에는 지오그리드 인발 시에 유발되는 토조내 지오그리드의 여러 부분에서의 인발변위를 측정하기 위해 사용한 인장 강도가 큰 합성섬유사(직경 0.37mm)가 통과할 수 있을 정도의 작은 구멍(직경 3.0mm)들이 설치되어 있다. 이 합성섬유사는 흙과 마찰영향을 줄이기 위하여 내경 3.5mm의 강관으로 보호되어 토조내 지오그리드의 접점(junction)에 부착되고 토조 외부에 설치되어 있는 변위계에 연결된다.

인발장치는 유도 전동기(induction motor), chain coupling, worm reducer, 스크류 잭(screw jack), worm gear 및 하중계(load cell)등으로 구성되어 있어, 토조내 지오그리드를 일정한 변위속도로 인발하고, 인발시의 측정할 수 있도록 되어 있다. 이 인발장치의 최대 인발변위는 20cm이다.

지오그리드 고정장치는 지오그리드를 인발 장치에 연결시키기 위한 장치로서 인발장치와 연결된 하부 스테인레스 강판과 지오그리드를 고정하기 위한 상부 스테인레스 강판으로 구성되어 있다. 상·하부의 스테인레스 강판에는 그 사이에 포설되는 지오그리드를 고정할 수 있도록 각각 60여개의 볼트구멍이 설치되어 있다. 또한, 지오그리드 고정장치 양측면에는 인발변위를 측정할 수 있도록 변위 게이지를 부착하였다.

인발시험 장비의 부속장치로는 토조내 상·하부에 설치되는 고무 멤브레인에 작용하는 압력 및 인발속도와 방향을 조절하는 장치, 토압계와 변위계 및 하중계 등의 센서(sensor) 등에서 나타나는 데이터들을 읽기 위한 Data Logger 시스템 등이 사용되었다.

토조내의 흙시료 제작은 자연상태의 흙시료를 소요단위중량(다짐도: A 다짐의 90%)로 맞추어서 15cm 높이씩 4층으로 다짐하여 제작

하였으며, 다짐에는 직경 30cm의 발판을 갖는 소형 Vibrator를 사용하였고, 토조내 흙시료의 다짐관리를 위하여 각 층 다짐 후에는 2군데에서 흙코아를 채취하여 단위중량과 함수비를 측정하였다.

2층의 흙시료 다짐 후에는 토조의 전면벽의 위치를 변화시키기 위하여 고안된 강재 슬리브(sleeve)판 2개를 전면벽에 붙여 상·하로 설치하였으며, 슬리트와 상·하 슬리브판 사이를 통과하여 다짐 흙시료 위에 길이 1m(흙 속에 묻혀진 길이) 정도의 지오그리드를 포설하였다. 슬리브 길이 20cm인 경우에는 포설된 지오그리드의 슬리트 근처에 있는 접점위치(junction)와 토조내 부착하여 인발에 따라 유발되는 변위를 측정하였다.

토조내 흙시료에 작용하는 수직하중은 0.3kg/cm<sup>2</sup>, 0.6kg/cm<sup>2</sup>, 0.9kg/cm<sup>2</sup>로 하였으며, 지오그리드의 인발속도는 1.0mm/min를 표준으로 하였다. 인발에 따라 유발되는 토압, 변위, 인발력 등은 Data Logger에서 매 1분 간격으로 수집하였다.

### 3.3 실험종류 및 내용

본 연구에서는 인발시험에서 주요한 영향인자들인 인발속도와 지오그리드의 폭을 변화시켜가며 인발시험을 하였으며, 토조 전면벽이 흙/지오그리드 마찰력에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 슬리트에 슬리브(sleeve)를 주어 그 슬리브 길이를 변화시켜 보았다. 또한, 흙과 지오그리드의 마찰저항 중에서 표면마찰 성분(skin friction)과 그리드의 수동 저항부재에 의한 수동 저항성분(passive resistance)의 비율을 고찰해 보기 위해 수동 저항부재가 있는 경우와 없는 경우(지오그리드 시료에서 수동 저항부재를 제거한 경우)에 대한 인발시험을 수행하였다. 표 3.2에서는 본 연구에서 수행한 인발시험의 종류와 내용을 보여준다.

표 3.2 수행한 인발시험의 종류와 내용

변화인자	변화값	기타실험조건
인발속도 (mm/min)	0.5, 1.0, 2.0	· 수직하중 : 0.6kg/cm <sup>2</sup> · 슬리브 길이 : 0.2, 20.0cm · 지오그리드 폭 : 50.0cm
슬리브 길이 (cm)	0.0, 10.0, 20.0 30.0, 40.0	· 수직하중 : 0.3, 0.6, 0.9kg/cm <sup>2</sup> · 인발속도 : 1.0mm/min · 지오그리드 폭 : 50.0cm
지오그리드 폭 (cm)	30.0, 40.0 50.0, 55.0	· 수직하중 : 0.6kg/cm <sup>2</sup> · 인발속도 : 1.0mm/min · 슬리브 길이 : 20.0cm
수동 저항부재	유, 무	· 수직하중 : 0.3, 0.6, 0.9kg/cm <sup>2</sup> · 인발속도 : 1.0mm/min · 슬리브 길이 : 20.0cm · 지오그리드 폭 : 50.0cm

#### 4. 인발시험 결과 및 분석

##### 4.1 인발속도의 영향

일반적으로 흙 속에 묻혀있는 지오그리드를 인발할 경우에 나타나는 인발력은 흙과 접촉하고 있는 지오그리드의 표면을 따라 발생하는 표면 마찰저항과 그리드의 수동 저항부재에서 받는 수동저항 등에 의해 발현된다. 이 중 표면 마찰저항은 지오그리드의 낮은 인발 변형률에서도 크게 나타나는 반면 그리드에 의한 수동저항은 높은 인발 변형률에서 크게 발현될 것이다. 따라서, 인발속도가 너무 빠르면 지오그리드에 높은 인발 변형률이 발현될 수 없어 그리드에 의한 수동저항이 작게 되므로 전체적인 인발력이 작게 나타날 수 있을 것이다.

그림 4.1에서는 슬리브의 슬리브 길이가 각각 0cm, 20cm인 경우에 대하여 인발속도별로 선단 인발변위(지오그리드 고정장치에서의 인발변위)에 따른 인발력 변화곡선을 보여주며, 그림 4.2에서는 인발속도에 따른 최대 인발력의 변호곡선을 보여준다. 그림 4.1과 그림 4.2에서 보듯이 인발속도가 1.0mm/min와 2.0mm

/min인 경우에는 거의 유사한 최대 인발력과 인발력 변화곡선을 보여주나 인발속도가 0.5mm/min 정도로 느린 경우에는 인발속도가 1.0mm/min의 경우에 비해 최대 인발력이 약 5%~10% 정도 감소됨을 알 수 있다.

따라서, 지오그리드와 흙 사이의 인발시험에서는 표면 마찰저항과 그리드에 의한 수동저항이 모두 적절히 발현될 수 있도록 하기 위해서 인발속도를 1.0mm/min~2.0mm/min로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

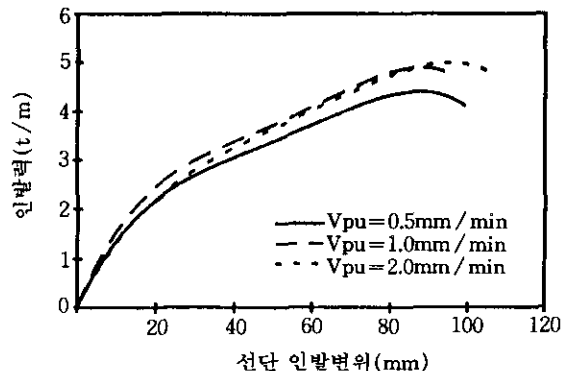


그림 4.1 인발속도별 인발력-인발변위 곡선  
( $L_{slv}=20\text{cm}$ ,  $W_{gf}=50\text{cm}$ ,  $\sigma_v=0.6\text{kg/cm}^2$ )

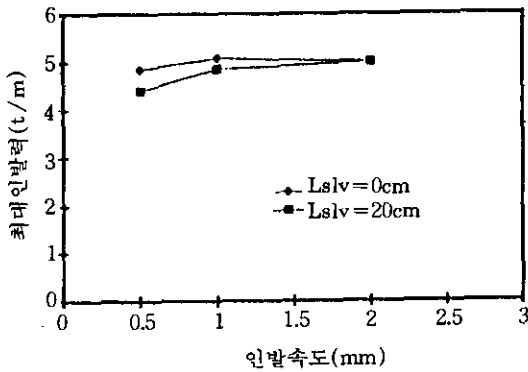


그림 4.2 인발속도에 따른 최대 인발력 변화곡선 ( $W_H=50\text{cm}$ ,  $\sigma_v=0.6\text{kg/cm}^2$ )

#### 4.2 슬리브의 슬리브 길이의 영향

그림 4.3에서는 슬리브의 길이가 각각 0cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm일 경우의 인발력-선단 인발변위 관계곡선을 보여주고, 그림 4.4에서는 슬리브 길이에 따른 최대 인발력의 변화곡선을 보여주는데, 이 그림들로부터 슬리브 길이가 길어짐에 따라 인발력이 감소하며, 인발력 감소 정도는 슬리브 길이가 0cm~20cm에서는 큰 반면 20cm 이상의 슬리브 길이에서는 매우 완만하게 나타남을 알 수 있다.

또한, 전면벽이 인발력에 미치는 영향은 전면벽에 설치된 토압계의 측정에 의해서도 평가

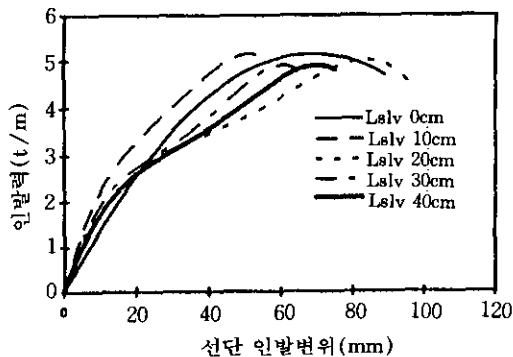


그림 4.3 슬리브 길이별 인발력-선단 인발변위 관계곡선 ( $\sigma_v=0.9\text{kg/cm}^2$ ,  $W_H=50\text{cm}$ ,  $V_{pu}=1.0\text{mm/min}$ )

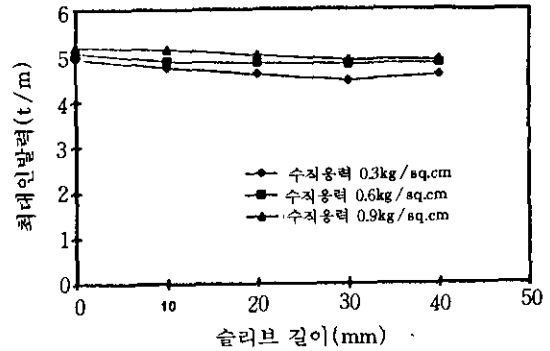


그림 4.4 슬리브 길이에 따른 최대 인발력의 변화곡선 ( $W_H=50\text{cm}$ ,  $V_{pu}=1.0\text{mm/min}$ )

되었다. 토압계는 전면벽의 슬리트로부터 각각 5cm(EP1), 10cm(EP2), 20cm(EP3) 상부의 위치에 설치되었으며, 그림 4.5에서는 슬리브 길이에 따라 각 토압계 설치위치에서 발생하는 최대 과잉 수평토압의 변화곡선을 보여준다. 이 그림도 그림 4.3과 마찬가지로 슬리브 길이가 0cm~20cm에서는 수평토압의 급격한 감소를 보여주나, 슬리브 길이가 20cm 이상이 되면 수평토압의 감소가 상당히 완만하게 나타남을 알 수 있다.

그림 4.4와 그림 4.5의 결과로부터 인발시험에서 강성 전면벽의 영향을 최소로 하기 위해서는 슬리브의 길이를 최소한 20cm 정도는 주는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

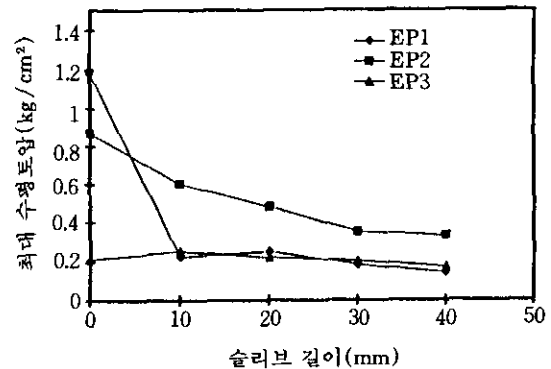


그림 4.5 전면벽에 작용하는 최대 과잉 수평토압에 미치는 슬리브 길이의 영향 ( $\sigma_v=0.9\text{kg/cm}^2$ ,  $W_H=50\text{cm}$ ,  $V_{pu}=1.0\text{mm/min}$ )



### 4.3 수직하중의 영향

그림 4.6에서는 수직하중의 변화( $\sigma_v=0.3\text{kg/cm}^2, 0.6\text{kg/cm}^2, 0.9\text{kg/cm}^2$ )에 따른 인발력-선단 인발변위 관계곡선을 보여준다. 이 그림으로부터 수직하중이 증가할수록 인발력은 증가하며, 최대 인발력이 유발되는 선단 인발변위는 작게 됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 수직하중의 증가가 흙과 지오그리드 사이의 표면 마찰저항을 크게 하고, 인발시 토조 내의 흙이

나타난다. 따라서, 흙과 토조 내부의 측면벽과 마찰에 의한 수직하중의 감소효과를 최소화하기 위하여는 토조 내에 포설되는 지오그리드 시료의 폭을 토조 내부의 측면벽과 적절하게 떨어질 수 있도록 선정해야 한다.

그림 4.7에서는 지오그리드 시료의 폭에 따른 인발력-선단 인발변위 관계곡선을 보여준다. 이 그림에서 보듯이 지오그리드 시료 폭이 50cm 이하인 경우에는 최대 인발력이 거의 유사하게 나타났으나, 지오그리드 시료의 폭이

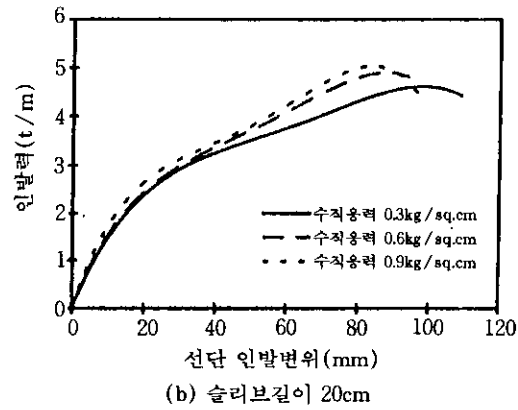
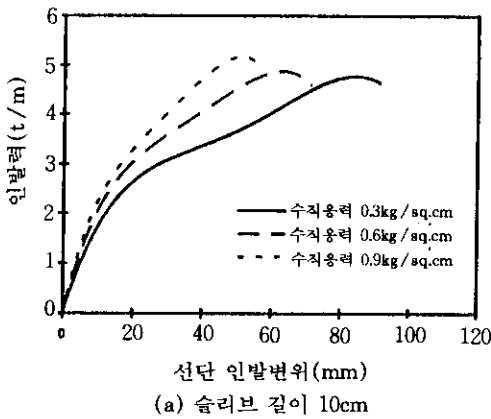


그림 4.6 수직하중별 인발력-선단 인발변위 관계곡선 ( $W_{gr}=50\text{cm}, V_{pu}=1.0\text{mm/min}$ )

부피팽창하는 것(dilatancy 현상)을 억제하여 그리드의 수동 저항력을 증가시키는데 기인한다. 또한, 수직하중의 증가는 흙 속 토목섬유의 변위를 억제하여 슬릿에 가까운 위치에 있는 지오그리드 부분에서의 표면 마찰저항 및 수동 저항을 보다 크게 유발시키는 반면, 슬릿에서 멀리 떨어져 있는 지오그리드 부분에서의 인발저항을 보다 적게 유발시키기 때문으로 사료된다.

55cm로 크게 되면 토조 내부의 측면벽과 흙과의 마찰효과에 의하여 최대 인발력이 상당히 감소됨을 알 수 있다.

### 4.4 지오그리드 시료 폭의 영향

토조 내에 다짐된 흙시료의 토조 내부의 측면벽과의 마찰에 의해 수직하중을 감소시키는 결과를 야기시킬 수 있다. 이러한 수직하중의 감소 정도는 벽면과 가까운 곳에서 보다 크게

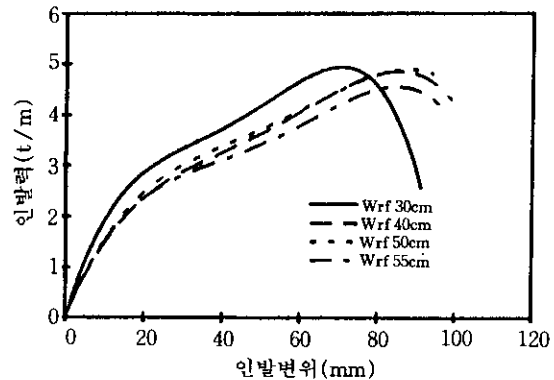


그림 4.7 지오그리드 시료의 폭에 따른 인발력-선단 인발변위 관계곡선 ( $V_{pu}=1.0\text{mm/min}, L_{dv}=20\text{cm}, \sigma_v=0.6\text{kg/cm}^2$ )

그림 4.8에서는 그림 4.7의 결과를 토대로(지오그리드 시료의 폭/토조의 폭)과 최대 인발력 사이의 관계곡선을 보여준다. 이 그림으로부터 토조 내부의 측면벽과 흙과의 마찰효과를 최소화하기 위해서는 지오그리드 시료의 폭/토조의 폭의 비율이 약 80% 이하가 되도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

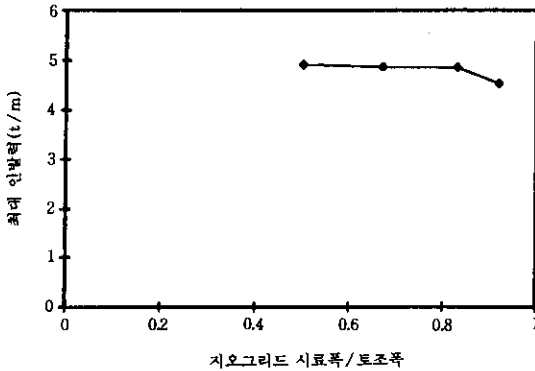


그림 4.8 (지오그리드의 폭/토조의 폭)-최대 인발력 관계곡선 ( $V_{pu}=1.0\text{mm/min}$ ,  $L_{slv}=20\text{cm}$ ,  $\sigma_v=0.6\text{ kg/cm}^2$ )

#### 4.5 수동 저항부재의 영향

##### 4.5.1 수동저항의 크기

일반적으로 흙과 토목섬유 보강재 사이에 유발되는 마찰저항의 크기는 토목섬유 보강재의 형태에 크게 의존한다. 그리드에 의한 수동 저항부재가 있는 지오그리드 보강재의 경우에는 흙/지오그리드 표면 마찰저항과 수동 저항부재에 의한 수동저항에 의해 총 마찰저항이 평가된다. 흙/지오그리드 표면 마찰저항은 흙의 종류와 지오그리드 표면의 거친 정도 등에 의해 크게 영향을 받으나, 그리드에 의한 수동저항은 그리드의 형태 및 크기, 수직하중, 흙의 입도분포 등 여러 인자들에 의해 영향을 받는다.

그림 4.9에서는 인발속도가  $1.0\text{mm/min}$ , 슬리브 길이가  $20\text{cm}$ , 지오그리드 시료의 폭이  $50\text{cm}$ , 수직하중이  $0.3\text{kg/cm}^2$ 와  $0.9\text{kg/cm}^2$ 인 조건하에서 수동 저항부재가 있는 경우와 없는 경우의

인발력-선단 인발변위 관계곡선을 보여준다. 그림 4.9로부터 본 연구에 사용한 지오그리드 시료와 흙시료에 대해서는 지오그리드 표면을 따라 발생하는 표면 마찰 저항력이 총 인발력의 79%~82% 정도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 총 인발력의 20% 정도가 그리드에 의한 수동저항에 의해 발현된 것으로 평가된다.

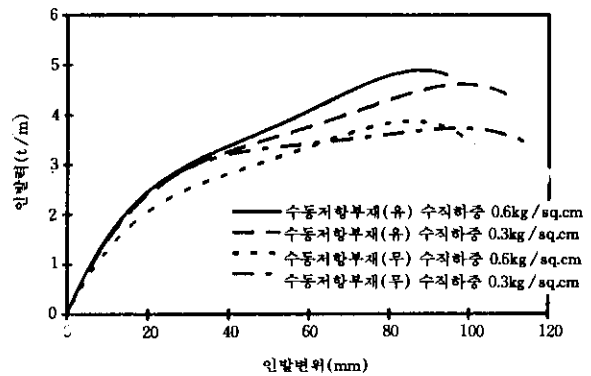


그림 4.9 수동 저항부재의 유·무에 따른 인발력-선단 인발변위 관계곡선 ( $W_H=50\text{cm}$ ,  $V_{pu}=1.0\text{mm/min}$ ,  $L_{slv}=20\text{cm}$ )

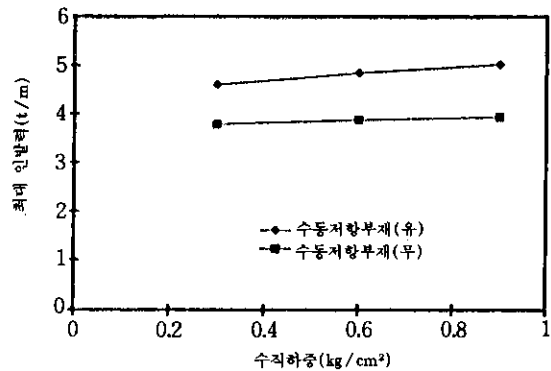


그림 4.10 수동 저항부재의 유·무에 따른 수직하중-최대 인발력 관계곡선 ( $W_H=50\text{cm}$ ,  $V_{pu}=1.0\text{mm/min}$ ,  $L_{slv}=20\text{cm}$ )

또한, 그림 4.10에서는 수동 저항부재가 있는 경우와 없는 경우에 대한 수직하중-최대 인발력 관계곡선을 보여준다. 이 그림으로부터 수

동 저항부재가 있는 경우에서 수동 저항부재가 없는 경우보다 수직하중의 증가에 따른 최대 인발력의 증가가 더욱 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 앞의 4.3절에서 언급하였듯이 수직하중의 증가가 인발시 토조내 흙의 부피팽창(dilatancy 현상)을 억제하여 그리드에 의한 수동 저항력을 증가시키는 효과에 기인한 것으로 판단된다.

#### 4.5.2 이론식과의 비교

앞의 2장에서 기술한 강재 그리드의 수동저항을 구하는 이론식에서는 수동저항부재간에 상호간섭이 없다면 흙속에 묻혀있는 수동저항부재들은 동일한 저항력을 나타내는 것으로 되어 있으나, 지오그리드와 같은 연성 그리드 보강재에서는 수동저항 부재의 변형이 발생하므로 강재 그리드와 같이 동일한 저항력이 유발되지 않을 것이다.

그림 4.11에서는 인발속도 1.0mm/min, 슬리브 길이 20cm, 지오그리드 시료의 폭 50cm, 수직하중이 각각 0.3kg/cm<sup>2</sup>, 0.6kg/cm<sup>2</sup>, 0.9kg/cm<sup>2</sup>인 조건하에서 수동저항 부재가 있는 경우와 없는 경우의 지오그리드 내 여러 위치에서의 유발변위를 보여준다. 그림 4.11에서 보듯이 인발에 따라 지오그리드 내에서 유발되는 변위는 수동저항 부재의 유·무에 관계없이, 슬리브 단부로부터 떨어진 거리에 따라 유사한 형태로

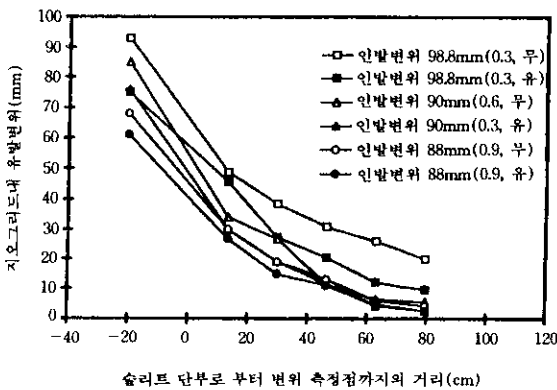


그림 4.11 지오그리드 내 유발변위 곡선

감소되고 있음을 알 수 있다. 즉, 흙 속에 묻혀 있는 지오그리드의 인발에 따른 표면마찰저항과 각 수동저항 부재의 저항은 인발 선단부로부터 멀어질수록 점점 작게 발현된다고 볼 수 있다.

따라서, 지오그리드의 수동저항력 평가 시에는 강재 그리드에 대한 수동저항력 평가식(2장식(4))에 각 수동저항 부재의 인발저항에 대한 기여정도가 포함되어야 할 것으로 사료된다. 즉,

$$(P_p)_{bs} = [(P_p)_{bso} + (n-1)(P_p)_{bso} \frac{(S/\alpha_b \cdot B)}{(S/\alpha_b \cdot B)_s}] \times \beta \quad (10)$$

여기서,  $\beta$ 는 수동저항 부재의 변형에 따른 평균 저항감소계수( $0 < \beta < 1$ )

그림 4.12에서는 본 연구에서 사용한 지오그리드를 대상으로 하여, Peterson & Anderson(1980)과 Jewell et. al.(1984)의 수동저항 응력식을 이용하여 구한 총 수동저항력 및 실험값과  $\beta$ 값을 적용한 이론값을 비교하여 보여 준다. 이론식 계산에서는 인발저항을 제공하는 지오그리드의 길이  $L_r$ 을 그림 4.11의 결과를 토대로 하여  $L_r(m) = 50/\sigma_f(kg/cm^2)$ 로 가정하였으며, 지오그리드 시료의 수동저항 부재간 간격(S)이 16.6cm이고 수동저항 부재의 직경이

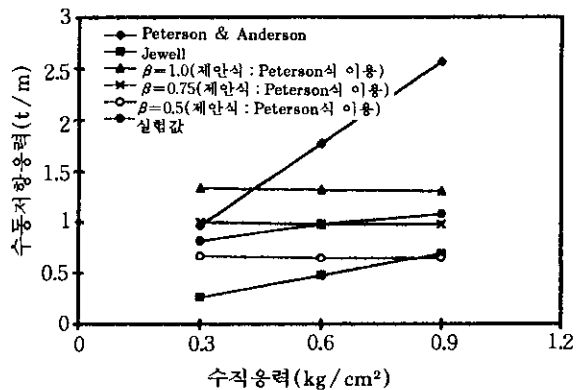


그림 4.12 이론식과 실험값의 비교

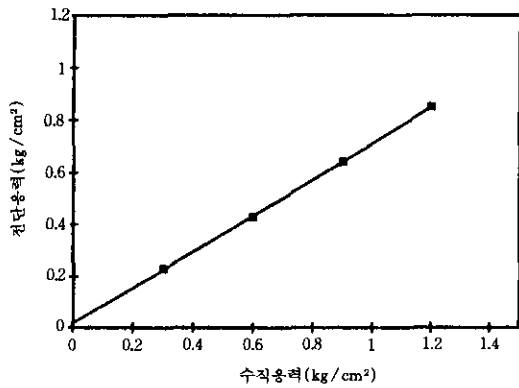


그림 4.13 흙 시료의 직접전단시험결과

0.35cm로  $S/B=47.4$  이므로 Palmeira & Milligan(1989)의 연구결과를 토대로 상호간섭영향을 무시하였다. 또한, 흙시료의 대형 직접전단시험 결과로부터 접착력,  $C=0.01\text{kg/cm}^2$ , 내부마찰각  $\phi = 34.6^\circ$ 를 사용하였다.(그림 4.13 참조)

그림 4.12로부터 펀칭 파괴형태를 고려하여 그리드의 수동저항응력을 도출한 Jewell et al.의 이론값은 기초의 전반전단파괴 형태를 고려한 Peterson & Anderson의 이론값은 물론 실험값보다는 작게 나타났으며, Peterson & Anderson의 이론값은 지오그리드의 유효 인발저항길이를 고려하지 않아 수직하중이 클수록 실험값과 보다 큰 차이를 보여 줌을 알 수 있다. Peterson & Anderson의 이론식에 상기 2가지의 인자를 고려한 경우에는 실험값에 근접한 결과를 보여주며, 수동저항 부재의 변형에 따른 저항감소계수,  $\beta$ 의 값은 0.75 정도임을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 보강토 구조물에서 널리 사용되고 있는 지오그리드 1종과 국내에 널리 분포되어 있는 화강 풍화토 1종을 대상으로 실내 인발시험을 수행하여 인발시험의 여러 인자들이 흙/지오그리드 마찰특성에 미치는 영향을

평가하였다. 본 연구에서 수행한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 흙 속에 묻혀있는 지오그리드의 인발시험에서는 인발속도를  $1.0\text{mm/min} \sim 2.0\text{mm/min}$ 로 하는 것이 바람직하다.
- 2) 인발시험에서 강성 전면벽의 영향을 최소화 하기 위해서는 슬리트의 슬리브 길이를 최소한 20cm 정도로 하여야 한다.
- 3) 수직하중이 증가할수록 지오그리드의 인발력은 증가하며, 최대 인발력이 유발되는 인발변위는 감소한다.
- 4) 토조 내부의 측면벽과 흙과의 마찰에 의한 지오그리드의 인발력 감소효과를 최소화 하기 위해서는 지오그리드 시료의 폭/토조의 폭의 비율을 80% 이하로 하는 것이 바람직하다.
- 5) 본 연구에서 사용한 지오그리드와 흙시료에 대하여 총 인발력의 20% 정도가 그리드에 의한 수동저항에 의해 발현된 것으로 평가되었다.
- 6) 지오그리드의 수동저항 부재의 변형에 의한 저항 감소효과와 유효 인발저항길이를 고려하여 강재 그리드에 대한 수동저항 이론식을 보완하였으며, 본 연구에서 사용한 지오그리드 시료의 수동저항 감소계수,  $\beta$ 는 0.75 정도로 평가되었다.

## 참고 문헌

1. Bacot, J., Iltis, M., Lareal, P., Paumier, T. and Sanglerat, G.(1978), "Study of the soil reinforcement friction coefficient", Proceedings of the Symposium on Earth Reinforcement, ASCE, Pittsburgh, PA, USA, pp. 157~185.
2. Costalonga, M. A. R.(1988), "Geogrid pull-out tests in clay", M. sc. Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, 211pp.
3. Fannin, R. J. and Raju, D. M.(1991), "Pull-out resistance of geosynthetics", 44th Canadian Geotechnical conference, Calgary,

- Alberta, pp. 81/1~8.
4. Giroud, J. P., Darrasse, J. and Bachus, R. C. (1993), "Hyperbolic expression for soil-geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic interface shear strength", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 12, pp. 275~286.
  5. Ingold, T. S.(1982), "Some observation on the laboratory measurement of soil-geotextile bond", *Geotech. Test J. ASTM* 5, pp. 57~67.
  6. Ingold, T. S.(1984), "A Laboratory investigation of soil-geotextile friction", *Ground Engineering*, Vol. 17, pp. 21~28.
  7. Jewell, R. A.(1980), "Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soil", Ph. D. Thesis, Cambridge University.
  8. Jewell, R. A., Milligan, G. W. E., Sarsby, R. W. and Dubois, D.(1984), "Interaction between soil and geogrids", *Proc. of Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering*, London, England, pp. 18~30.
  9. Jewell, R. A.(1990), "Reinforcement bond capacity", *Geotechnique* 40, No. 3, pp. 513~518.
  10. Juran, I., Knochenmus, G., Acar, Y. B. and Arman, A.(1988), "Pull-out response of geotextiles and geogrids", *Proc. of Symp. on Geotextiles for Soil Improvement*, ASCE, Geotechnical Special Publication 18, pp. 92~111.
  11. Kate, J. M., Rao, G. V. and Tyagi, S. K. (1988), "Evaluation of soil-reinforcement friction", *Ind. Geotech. J.*, Vol. 18, pp. 153~160.
  12. Palmeira, E. M.(1988), "Discussion on direct shear tests on reinforced soil by Jewell & Wroth(1987)", *Geotechnique*, Vol. 38, pp. 146~148.
  13. Palmeira, E. M. and Milligan, G. W. E.(1989), "Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand", *Geotechnique*, Vol. 39, pp. 511~524.
  14. Peterson, L. M. and Anderson, L. R.(1980), "Pull-out resistance of welded wire mesh embeded in soil", *Research Report*, Dept. of Civil Engineering, Utah State University, Logan, UT, USA.
  15. Rao, G. V. and Pandey, S. K.(1988), "Evaluation of geotextile-soil friction", *Ind. Geotech. J.*, Vol. 18, pp. 77~105.
  16. Schlosser, F. and Elias, V.(1978), "Friction in reinforced earth", *Proceedings of the Symposium on Earth Reinforcement*, ASCE, Pittsburgh, PA, USA, pp. 735~763.
  17. Sridharan, A. and Singh, V.(1984), "Friction coefficient in reinforced earth", *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference*, Calcutta, Indian Geotechnical Society, pp. 43~47.
  18. Sridharan, A. and Singh, V.(1986), "An experimental study on mild steel as soil reinforcement", *Ind. Geotech. J.*, Vol. 16, pp. 334~345.
  19. Sridharan, A. and Singh, V.(1988), "Effect of soil parameters on friction coefficient between soil and reinforcement", *Ind. Geotech. J.*, Vol. 18, pp. 323~339.
  20. Srinvasa Murthy, B. R., Sridharan, A. and Bindumadhava(1993), "Evaluation of interfacial frictional resistance", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 12., pp. 235~253.

(접수일자 1996. 3. 11)