

구속효과를 고려한 토목섬유의 인발저항력 평가기법

Assessment Method of Geosynthetic Pullout Resistance Considering Soil Confinement Effect

방 윤 경^{*1} Bang, Yoon-Kyung

이 준 대^{*2} Lee, Jun-Dae

전 영 근^{*3} Jeon, Young-Geon

Abstract

In this study, an assessment method was proposed to evaluate the pullout resistance between geosynthetic and backfill soil by using a stress-strain relationship of the orthotropic composite material subjected to both longitudinal and vertical loadings. For this analysis friction characteristics of geosynthetic-soil and stress-strain relationships subjected to soil confined pressure were investigated by performing the laboratory pullout tests for three types of geosynthetics and performing the confined extension tests for seven types of geosynthetics having geotextiles, composite geosynthetics and geogrids. A comparison was made between unconfined and confined moduli for each geosynthetic material to quantify the soil confinement effect on stress-strain properties. A comparison was also made between the relative increase of moduli at the same strain level among the seven geosynthetic materials to demonstrate the different responses of these geosynthetic materials under soil confinement. Based on the proposed procedure, it was shown that values of the increased tensile force are applicable for the evaluation of friction strengths between five types of geosynthetics and sands in light of the soil confinement effect.

요 지

본 연구에서는, 인장력과 이에 수직방향으로 작용하는 압축응력을 동시에 고려한 직교이방성 합성부재의 인장력-변형률 관계식(Bhagwan, Agarwal & Broutman, 1990)을 응용하여, 토목섬유인발저항력 및 인장력에 미치는 구속응력의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였다. 이를 위해서, 국내에서 판매되고 있는 부직포, 직포, 복합포 및 지오그리드 등의 토목섬유를 대상으로 구속신장시험(Confined Extension Test) 및 실내인발시험(Laboratory Pull-out Test)을 수행하였다. 시험결과를 토대로하여 구속응력이 토목섬유의 인장력-변형률 거동에 미치는 영향을 분석하였고, 구속응력에 의한 토목섬유 인장력 및 인발저항력의 변화를 정량적으로 평가하였다. 분석결과, 구속응력의 크기가 증가할수록 토목섬유의 할선계수가 뚜렷이 증가하였으며, 본 연구 제안방법에 의한 토목섬유-흙 사이의 마찰저항각 δ 및 보정계수 α_2 값이 기존의 인발저항력 평가방법에 비하여 다소 큰 값을 나타내어, 인발저항력 산정시 토목섬유에 가해지는 구속응력의 크기를 고려하는 본 연구 제시방법의 경우에 보다 큰 인발저항력이 얻어짐을 알 수 있었다.

Keywords : Confined extension test, Friction characteristics, Geosynthetics, Orthotropic, Pullout test, Stress-strain relationship

*1 정회원, 대원과학대학 토목과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Daewon Science College)

*2 정회원, 세명대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Semyung Univ.)

*3 정회원, 세명대학교 대학원 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil Engrg., Semyung Univ.)

1. 서론

토목섬유 보강토옹벽(Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Wall) 설계시 보강재와 주변흙 사이에서 유발되는 인발저항력 평가는 실내인발시험(Laboratory Pullout Test)에 의하는 것이 일반적이다. 토목섬유와 주변흙 사이에서 유발되는 인발저항력의 크기는 실내인발시험시 토목섬유에서 유발되는 인장력을 토대로 평가되며, 인장력의 크기는 실내인발시험시 측정된 토목섬유 길이 방향 각 지점의 변형률을 토목섬유의 광폭인장시험(ASTM D4595)에 의한 인장력-변형률 관계를 이용하여 인장력으로 환산하여 구하는 것이 일반적이다(Hayashi et al., 1994). 이러한 방법의 기본 가정사항은, 토목섬유에 가해지는 구속압력의 크기나 유·무에 따라 토목섬유의 인장력-변형률 관계가 변화하지 않는다는 것으로서, 실제 보강토옹벽의 토목섬유보강재에는 다짐하중 또는 상재하중 등에 의한 구속하중이 작용하게 되므로, 토목섬유에는 전면부 변위에 의한 인장력과 수직하중에 의한 압축력이 동시에 작용하게 되며, 그 변형거동을 구속응력을 고려하지 않은 경우와 동일하지 않다. 즉, 실내인발시험 결과 측정된 토목섬유 길이방향 각 지점의 변형률을 광폭인장시험 결과에 의해 인장력으로 환산하는 방법은, 실제 토목섬유에서 발휘되는 인장력의 크기와 차이를 나타내게 됨은 물론, 결과적으로는 토목섬유와 흙 사이의 마찰력 산정시 오차의 원인이 될 수 있다. 실제로 여러 연구자들(McGown et al., 1982; Yuan et al., 1998)의 연구결과, 구속응력의 크기가 증가함에 따라 토목섬유의 5% 변형시 할선계수(secant modulus)와 극한강도가 대체로 증가하는 것으로 나타난 바 있으며, 그 증가량은 토목섬유의 종류에 따라 다소의 차이를 보이거나 최대 약 400% 이상의 큰 증가율을 나타내는 경우도 있는 것으로 보고된 바 있다. Wilson-Fahmy et al.(1993)의 연구결과 에서도, 토목섬유의 종류에 따라서 구속응력이 응력-변형률 관계에 큰 영향을 미칠수 있으므로, 토목섬유를 대상으로한 구속신장시험(confined extension test) 결과를 설계에 적용하는 것이 보다 타당하다는 결론을 제시한 바 있다. 구속신장시험기구를 활용한 그간의 연구들은 주로 흙의 구속응력이 토목섬유의 인장력-변형률 거동에 미치는 영향에 관한 기초연구가 주류를 이루고 있으며, 구속효과를 설계에 반영하려는 시도로는 최근 Sawicki and Swidzinski(1999)가 수행한 해석적 연구를 들수 있다. 그는 구속응력이 작용하는

경우 토목섬유의 응력-변형률거동을 구속응력의 함수로 표현하였으며, 이 과정에서 McGown et al.(1982)의 실험 연구결과 제시된 흙-토목섬유 사이의 강성계수(stiffness coefficient)를 이용하였다.

본 연구에서는, 인장력과 이에 수직방향으로 작용하는 압축응력을 동시에 고려한 직교이방성 합성부재의 인장력-변형률 관계식(Bhagwan, Agarwal & Broutman, 1990)을 응용하여, 토목섬유인발저항력 및 인장력에 미치는 구속응력의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였다. 이를 위해서, 국내에서 판매되고 있는 부직포, 직포, 복합포 및 지오그리드 등 7종류의 토목섬유를 대상으로 구속신장시험(Confined Extension Test)을 수행하였으며, 구속신장시험시와 동일한 구속응력조건에서 실내인발시험(Laboratory Pull-out Test)을 수행하였다. 시험결과를 토대로하여 구속응력이 토목섬유의 인장력-변형률 거동에 미치는 영향을 분석하였고, 구속응력에 의한 토목섬유 인장력 및 인발저항력의 변화를 정량적으로 평가하였다.

2. 실내인발시험 및 구속신장시험

2.1 시험장치 및 재료

2.1.1 시험재료

본 연구에서 사용한 흙시료는 주문진 지역에서 채취되는 주문진규사를 함수비 2.0~3.0%의 자연함수비 상태로 사용하였으며, 흙시료의 비중은 2.63, 직접전단시험

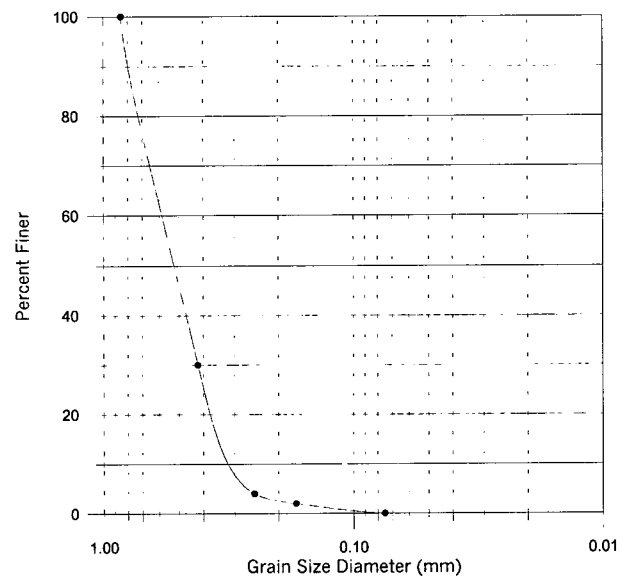


그림 1. 시험용 흙시료의 입도분포곡선

표 1. 시험에 사용된 토목섬유의 제원(판매사 제공)

| 시료번호 | 명 칭 | 재 질 | 두께 (mm) | 중량 (g/m ²) | 광폭인장강도 (ASTM D 4595) | | 비 고 |
|------|-------------|------------------------------------|---------|------------------------|----------------------|---------|---------|
| | | | | | 인장강도 (tf/m) | 신율 (%) | |
| 1 | Composite S | Polyester(그리드)+ Polypropylene(부직포) | 4 | 750 | 10 | 15 이하 | 복합포 |
| 2 | Composite C | Polyester(그리드)+ Polypropylene(부직포) | 3~4 | 510 | 11 | 13 이하 | 복합포 |
| 3 | Geogrid S | Polyester(PVC코팅) | 1.9~2.6 | 620 | 8.95 | 10 이하 | 연성지오그리드 |
| 4 | Geogrid F | Polyester(PVC코팅) | 1.5 | 610 | 11 | 10 이하 | 연성지오그리드 |
| 5 | Woven K | Polyester | 0.5 | 300 | 10* | 10~30* | 직포 |
| 6 | Nonwoven K | Polyester | 3 | 400 | 5* | 60~100* | 장섬유부직포 |
| 7 | Nonwoven P | Polypropylene | 6.8 | 1,000 | 7.5 | 50 이상 | 단섬유부직포 |

* : ASTM D 5034에 의함.

협에 의한 모래의 내부마찰각은 36.5°, 겹보기점착력은 0.1 t/m²이다. 그림 1에는 시험 흙시료의 입도분포곡선을 보여준다.

시험에 사용된 토목섬유는, 지오그리드 보강재와, 부직포 및 직포 지오텍스타일, 그리고 지오그리드와 부직포 토목섬유를 결합한 형태의 복합포등 국내에서 생산, 또는 판매되고 있는 7종류의 토목섬유로서, 구속신장시험 및 실내인발시험시 토목섬유의 인장강도가 상대적으로 큰 경사방향(길이방향)으로 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 토목섬유의 제원은 표 1과 같다.

2.1.2 시험장치

본 연구에서 사용한 실내인발시험기의 구성요소는 그림 2와 같이 인발상자, 인발장치, 계측기, 자료수집기

(data logger)등이다. 인발상자의 내부크기는 1,300x600x600mm(길이×폭×높이)이고, 상재하중은 고무멤브레인트्यू브를 이용하여 최대 20t/m² 까지 재하할 수 있도록 하였다. 인발장치는 최대 10tf 용량의 모터와 정압기를 이용하여 인발시 일정한 변위속도를 유지할 수 있도록 하였으며, 인발시험시 인발상자 강성전면벽의 영향을 최소화하여 실제의 현장상태와 유사하도록 하는 방법으로 인발 슬리트(slit)에 인발상자 안쪽으로 길이 20cm의 슬리브(sleeve)를 설치하였다.

구속신장시험기구(confined extension test device)는 McGown등(1982)에 의해 최초 제안된 이래 여러 연구자들(Wilson-Fahmy et al., 1993 ; Christopher et al., 1986 ; Holtz, 1977 ; Juran et al., 1991 ; Ling et al., 1991 ; Wu, 1991 ; Boyle, 1995 ; Whittle et al., 1993 ;

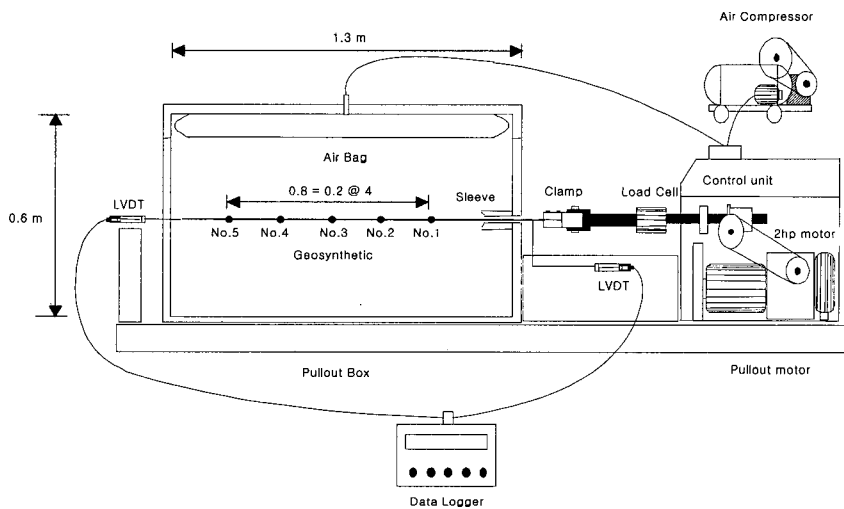


그림 2. 실내인발시험기 구성 및 개요도

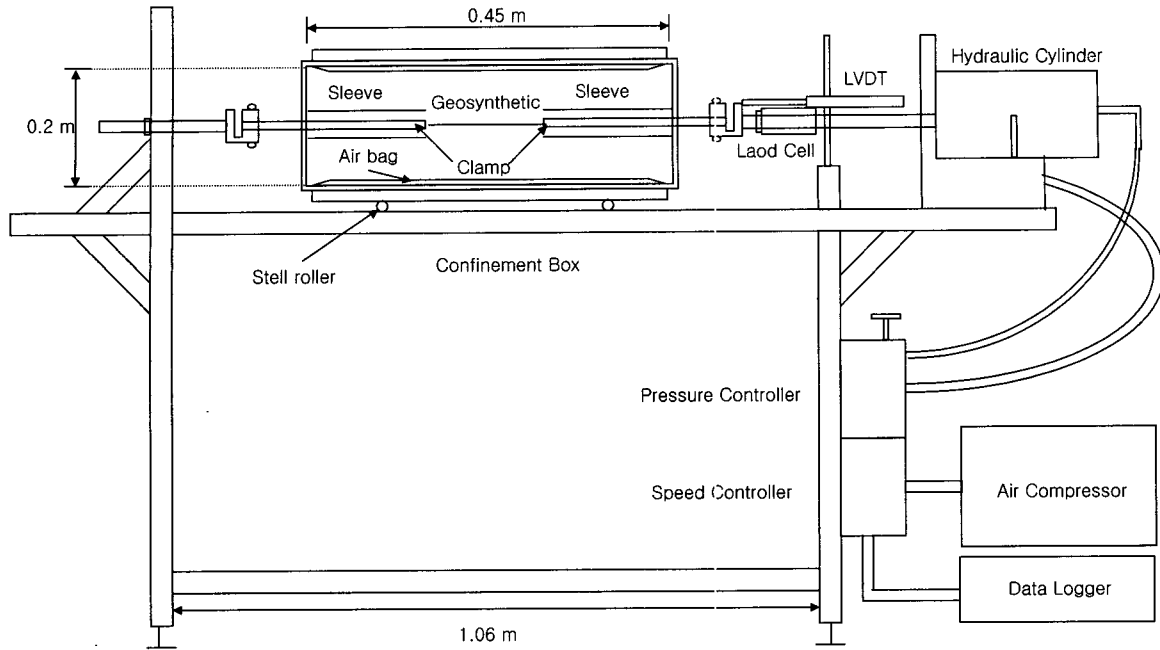


그림 3. 구속신장시험기 구성 및 개요도

Leshchinsky et al., 1987 ; Yuan et al., 1998)에 의해 수정되고 개량되어 왔으며, 본 연구에서는 Yuan et al.(1998)의 구속신장시험장치를 이용하였다. 구속상자의 내부 크기는 450×400×200mm(길이×폭×높이)이고, 흡사료에 구속응력을 재하하기 위한 고무멤브레인이 구속상자의 상·하에 설치되어 있다. 그림 3에는 시험에 사용된 구속신장시험기의 개요를 나타내었다.

2.2 시험방법

2.2.1 실내인발시험

인발상자 내부의 모래는 낙사장치를 이용하여 15cm 두께로 층다짐을 실시하였다. 이 때, 단위체적중량은 1.33g/cm^3 을 유지하도록 하였다. 인발시험에 사용한 토목섬유의 부설폭은, 상재하중의 균등성을 최대한 확보하기 위하여 日本建設省土木研究所(1992) 및 조 등(1995)의 연구결과를 토대로 양쪽 벽면으로부터 5cm씩 이격시켰으며, 부설길이는 인발상자의 길이와 동일하게 하였다. 인발시험시 인발속도는 1 mm/min로 일정하게 하였으며, 클램프 전면부에서는 하중계를, 클램프 양측 2개 지점과 지오그리드의 길이방향 5개 지점(그림 2, No. 1 ~No. 5 참조)에서는 변위계를 각각 이용하여 8개의 자료를 자료수집기(data logger)를 이용해 매 1분 간격으로 측정하였다. 길이방향의 변위는 토목섬유에

직경 0.5mm의 강선을 부착하고 이를 인발상자 후면부의 구멍을 통하여 변위계에 연결하여 측정하였고, 인발상자 내측에서는 내경 1.5mm, 외경 4.0mm의 스테인레스 강관으로 강선을 보호하여 강선과 흡사 사이의 마찰을 배제하였다. 상재하중은 통상의 보강토벽체에서 인발과 파괴가 예상되는 상부 5m 정도의 토피하중을 감안하여 10t/m^2 이내의, 3, 6 및 9t/m^2 의 세가지 크기로 조절하였으며, 인발상자내에 압력의 균등한 분배를 위하여 하중을 재하한 상태에서 24시간 동안 방치한 후 인발시험을 실시하였다.

2.2.2 구속신장시험

구속상자 내부의 모래는 상·하 상자 각 3층씩 층다짐을 실시하였다. 이 때, 모래의 단위체적중량은 실내인발시험시 측정된 모래의 단위체적중량과 동일하게 유지하였다. 즉, 단위체적중량 1.33g/cm^3 을 기준으로 하여 각 층에 필요한 중량 만큼의 시료를 할당하는 중량-체적 할당법(weight - volume allocation)(Alfaro et al.,1995)을 사용하였다. 다짐은 직접 손으로 하거나 소형 다짐봉을 사용하여 할당된 흡이 각 층에 채워질 때 까지 계속하였다. 인장시험시 토목섬유의 전체 길이방향 모두에 걸쳐서 인장력이 고르게 분포할 수 있도록 구속상자 하부에 롤러(roller)를 부착하는 방법(Yuan et al., 1998)을 이용하였다. 시험기구의 클램프는, 실내인발시험기와는 달

리 비교적 작은 부피로도 슬리브내에서 토목섬유를 완벽하게 잡아주는 기능을 필요로 한다. 예비시험결과, 클램프되는 부분의 토목섬유를 에폭시 등으로 경화처리하는 경우, 시험시 경화된 부분과 미처리 부분의 경계부에서 파단이 발생하거나, 클램프 내부에서 토목섬유가 파괴되는 등의 문제점이 발견되었으므로, 본 시험시에는 다수의 예비시험 결과를 토대로하여 직포, 부직포, 복합포 및 지오그리드 등을 안전하게 결속할 수 있도록 구속신장시험기구의 클램프를 디자인하여, 토목섬유에 별도의 경화처리 없이 시험하였다. 시험에 사용한 토목섬유의 크기는, 200(폭)×600(길이)mm로, 이중 클램프되는 부분을 제외한 시험시료의 크기는 광폭인장시험(ASTM D4595)시와 동일하게 하였다. 시험시 변형률 속도는 10%/min를 유지하도록 하였고, 인장력의 크기는 토목섬유의 앞쪽에서 한개의 하중계에 의해, 변위는 하중계 옆에 부착된 한 개의 LVDT에 의해 동시에 자료 수집기(data logger)를 이용해 매 5초 간격으로 측정하였다. 구속응력의 크기는 실내인발시와 동일한 3, 6 및 9 t/m²의 세가지 크기로 조절하였으며, 구속응력이 없는 조건에서의 광폭인장시험도 함께 수행되었다. 모든 조건에 대하여 3회 시험을 원칙으로 하였으며, 시험결과에 차이가 큰 경우에는 동일한 결과가 얻어질 때 까지 시험을 반복하였다.

3. 구속효과를 고려한 토목섬유-주변흙 사이의 마찰강도 평가기법

3.1 직교이방성부재의 변형거동

현재 세계적으로 유통되고 있는 토목섬유는 주로 폴리에스테르(polyester), 폴리프로필렌 등의 섬유를 직각으로 교차하여 직조하였거나(직포) 또는 일정한 방향 없이 배열시켜 놓고 열(melt bonding)이나 니들펀칭(needle punching) 등을 이용해 평면적으로 함께 결합시킨 형태(부직포), 또는 폴리에틸렌(polyethylene) 등의 폴리머를 직교하는 2방향으로 교차시켜 직조하였거나 구멍을 내어 한쪽 방향이나(uniaxial) 또는 양쪽 방향(biaxial)으로 인장시킨 형태가 대부분이다(한국지반공학회, 1998). 따라서, 토목섬유는 그 재료특성이 이방성(anisotropic)이며, 특히 인장력의 작용방향과 그 수직방향(토목섬유의 두께 방향)의 거동특성이 서로 상이한 직교이방성(orthotropic) 재료로 가정할 수 있다. 한 예로, Hermann 등(1978)은 뒤채움재 및 보강재를 하나의 직교이방성 합성재료로 가정하여 유한요소해석을 수행한 바 있다. Bhagwan, Agarwal & Broutman(1990)은, 합성부재에 관련한 그의 연구에서, 인장력과 이에 수직방향으로 작용하는 압축력을 동시에 고려한 직교이방성 합성부재의 인장력-변형률 관계식을 제시한 바 있다(그림 4 참조).

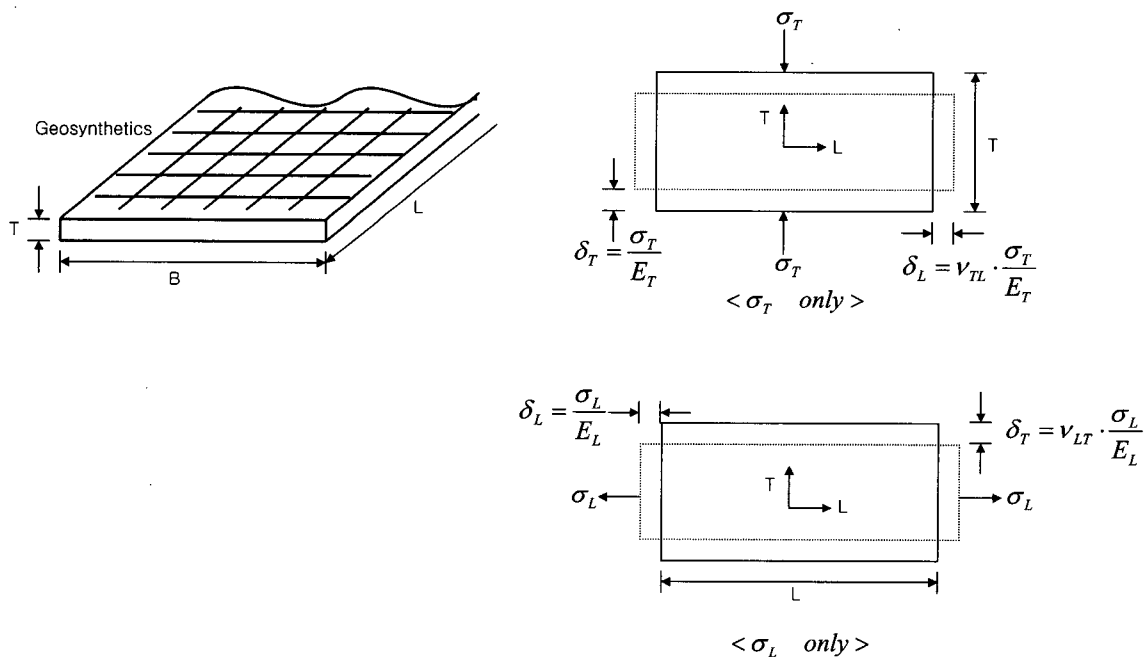


그림 4. 직교이방성 부재의 변형거동(Agarwal & Broutman, 1990)

본 연구에서는 그림 4에 명시된 바와 같이, 토목섬유를 전면부 변위에 의한 인장력과 수직하중에 의한 압축력을 동시에 받는 직교이방성 부재로 간주하여 이에 관련된 변형거동 등을 정의하고자 하였다. Hooke의 법칙을 적용하여 그림 4에 명시된 변형거동 등을 식으로 표현하면,

$$\epsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} + \nu_{TL} \cdot \frac{\sigma_T}{E_T} \quad (1)$$

$$\epsilon_T = -\frac{\sigma_T}{E_T} - \nu_{LT} \cdot \frac{\sigma_L}{E_L} \quad (2)$$

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}} \quad (3)$$

$$\nu_{LT} \cdot E_T = \nu_{TL} \cdot E_L \quad (4)$$

식 (1) ~ (4)에서, ϵ 및 γ 는 관련방향 변형률을, E_r 및 G 는 관련방향 탄성계수 및 전단계수를, τ 는 관련방향 전단응력을, 또한 ν 는 관련방향 포아손비를 각각 의미한다.

식 (1)에서,

$$\sigma_L = \epsilon_L \cdot E_L - \frac{\nu_{TL}}{E_T} \cdot E_L \cdot \sigma_T \quad (5)$$

또한 식 (4)에서,

$$\nu_{TL} = \frac{E_T}{E_L} \cdot \nu_{LT} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하여 정리하면, 결과적으로 인장력과 수직하중에 의한 압축력을 동시에 받는 직교이방성 부재로 간주된, 토목섬유의 인장응력 σ_L 계산식은 다음의 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\sigma_L = \epsilon_L \cdot E_L - \nu_{LT} \cdot \sigma_T \quad (7)$$

주변흙에 의해 구속응력을 받는 토목섬유의 경우에는, 흙과 토목섬유 사이에서 유발되는 인발저항력 τ 가 인장력과 반대방향으로 작용하게 되므로(Sawicki and Swidzinski, 1999), 식 (7)은 다음과 같이 수정된다.

$$\sigma_L = \epsilon_L \cdot E_L + \tau - \nu_{LT} \cdot \sigma_T \quad (8)$$

3.2 토목섬유의 인발저항력 평가기법

그림 5는, Hayashi 등(1994)이 토요우라(豊浦)모래를

사용한 실내인발시험을 수행하여 측정한 지오그리드의 최대인장력 분포도로서, 기존의 인발저항력 평가방법인 전체면적법(total area method), 유효면적법(effective area method) 및 최대경사법(maximum slope method), 그리고 식 (8)에 표현된 본 연구의 제시방법 등 네가지 방법의 개략을 최대인장력 분포도에 표시하였다. 토목섬유는 두께(그림 4의 T)의 치수가 길이(L) 및 폭(B)에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 인장력-변형률 거동 측정 시 단위폭당 인장력 $F(t/m)$ 을 이용하여 관련 변형률 및 탄성계수 등을 구한다. 그림 5에서 토목섬유 인발저항력 τ 의 크기는, 최대인장력 분포도의 가로축(지오그리드의 길이, L)과 세로축(최대인장력, F)의 비로써, L_E 는 유효면적법에 의한 유효길이를, 또한 $(F_{Tmax} - F_r)$ 은 L_E 에 해당하는 유효인장력을 각각 의미한다. 토목섬유와 주변흙 사이의 인발저항력 τ 는 식(9)와 같이 표현된다.

$$\tau = a_1 \cdot c_s + a_2 \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi = c_a + \sigma_v \cdot \tan \delta \quad (9)$$

위의 식 (9)에서, a_1 및 a_2 는 보정계수를, c_s 및 c_a 는 주변흙의 점착력 및 지오그리드-주변흙 사이의 부착력을, 또한 ϕ 및 δ 는 주변흙의 내부마찰각 및 토목섬유와 주변흙 사이의 마찰저항각을 각각 의미한다.

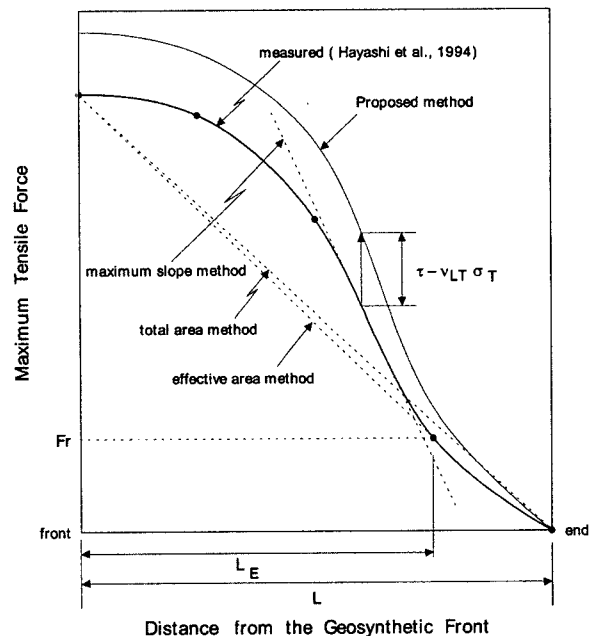


그림 5. 인발저항력 평가방법 비교

4. 시험결과 및 분석

4.1 구속신장시험

4.1.1 구속응력에 따른 토목섬유의 할선계수 및 최대강도

구속응력 변화에 따른 토목섬유의 인장력-변형률 거동은, 표 2의 할선계수(secant modulus) 및 최대강도 측정치로 대체하여 요약, 정리하였다. 여기서 할선계수는, 구속신장시험시 5% 및 10% 변형률에 해당하는 값을 산정하였다. 표 2의 결과를 살펴보면, 시험대상 토목섬유 모두에서, 구속응력의 크기가 증가할수록 토목섬유의 할선계수가 뚜렷이 증가하며, 최대강도 또한 증가하는 경향을 보여, 그간의 연구결과(McGown et al., 1982 ; Yuan et al., 1998 ; Wilson-Fahmy et al., 1993)와 동일한 경향을 보이고 있다. Geogrid S 및 Geogrid F의 경우에는, 구속응력에 따른 할선계수와 최대강도의 변화량이 상대적으로 미미하게 나타났으며, 구속응력 변화에 따른 인장력-변형률 관계곡선 형상의 차이가 명확하지 않아, 표 2에는, 구속신장시험 결과 인장력-변형률 관계의 구분이 비교적 명확하게 나타난 경우(구속응력이 0t/m²인 경우와 9t/m²인 경우)만을 명시하였다. 지오그리드 시료의 경우 기타 토목섬유에 비하여 구속응력에 따른 인장력-변형률 거동의 경향이 뚜렷한 차이를 보이지 않

는 이유로는, 지오그리드의 경우 길이방향 부재의 마찰력 및 세로방향 부재의 지지저항의 복합적 작용에 의해 마찰저항이 유발되어, 연속적인 마찰면을 갖는 기타 토목섬유와 인발저항특성이 상이하게 나타나는 등의 원인이 있을것이라 판단할 수 있으나, 보다 명확한 원인구명을 위해서는 향후 이와 관련한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 2를 살펴보면, 구체적으로 구속응력의 크기가 0t/m²으로부터 9t/m²으로 증가함에 따른 토목섬유 최대강도의 증가율은, 2.7%(Geogrid S)~24.8%(Composite S)의 범위로 나타났다. 구속응력이 0t/m²인 경우의 최대강도(광폭인장강도에 해당함)가 전반적으로 판매사에서 제공한 광폭인장강도(표 1 참조)에 비하여 큰 값을 나타내는 이유는, 일반적으로 제조업체에서 설정한 제품규격의 인장강도보다 실제 인장강도가 4~12%이상 크게 설계, 제조되어(조삼덕 등, 1999), 그 값만큼의 안전율이 내포되어 있는데 원인이 있는 것으로 판단된다. 토목섬유의 인장력-변형률 곡선의 형상은 부재의 성능저하(bond deteriorate)와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 표 2에서, 구속응력 크기에 따른 토목섬유 최대강도 변화경향은, 구속하중을 재하하지 않은 경우 부재성능 저하가 급격히 진행되며, 구속응력은 부재의 접점(cross over point)에 연직방향으로 재하되어 부재의 성능저하를 지연시키는 작용을하여, 결과적으로 구속하

표 2. 구속신장시험에 의한 토목섬유의 할선계수 및 최대강도

| 시료번호 | 토목섬유 종류 | 구속응력(tf/m ²) | 5% 변형률시 할선계수(tf/m) | 10% 변형률시 할선계수(tf/m) | 최대강도(tf/m) |
|------|-------------|--------------------------|--------------------|---------------------|------------|
| 1 | Composite S | 0 | 29.5 | 45.6 | 11.7 |
| | | 3 | 49.0 | 60.3 | 12.6 |
| | | 6 | 64.6 | 71.3 | 13.7 |
| | | 9 | 82.0 | 77.6 | 14.6 |
| 2 | Composite C | 0 | 37.1 | 59.3 | 16.2 |
| | | 3 | 101.1 | 89.5 | 17.0 |
| | | 6 | 111.6 | 101.9 | 19.0 |
| | | 9 | 128.0 | 123.2 | 19.1 |
| 3 | Woven K | 0 | 31.6 | 45.6 | 11.5 |
| | | 3 | 68.4 | 71.0 | 11.4 |
| | | 6 | 90.2 | 84.3 | 11.8 |
| | | 9 | 103.0 | 95.5 | 12.3 |
| 4 | Nonwoven K | 0 | 3.0 | 5.2 | 6.5 |
| | | 3 | 21.5 | 17.4 | 7.0 |
| | | 6 | 32.6 | 22.2 | 7.2 |
| | | 9 | 43.0 | 27.5 | 7.8 |
| 5 | Nonwoven P | 0 | 6.0 | 6.2 | 6.9 |
| | | 3 | 14.9 | 11.3 | 7.2 |
| | | 6 | 18.8 | 13.2 | 7.3 |
| | | 9 | 30.5 | 19.0 | 8.2 |
| 6 | Geogrid S | 0 | 114.6 | 93.6 | 11.3 |
| | | 9 | 137.6 | 111.5 | 11.6 |
| 7 | Geogrid F | 0 | 129.1 | 127.7 | 14.8 |
| | | 9 | 163.8 | 153.9 | 15.6 |

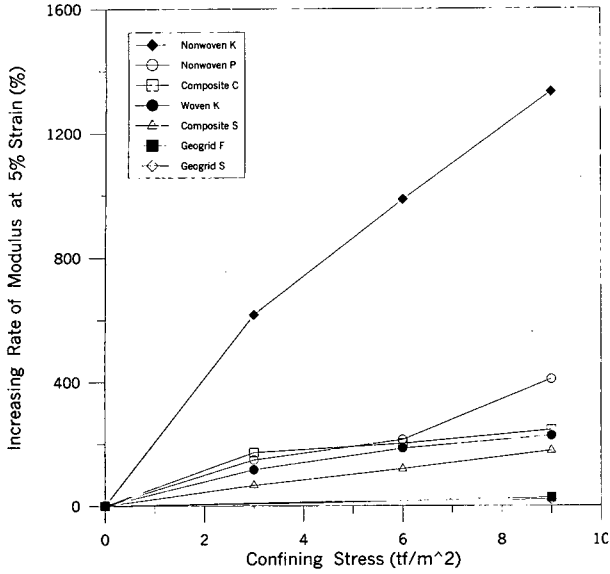


그림 6. 5% 변형률시의 할선계수 증가율 - 구속응력 관계

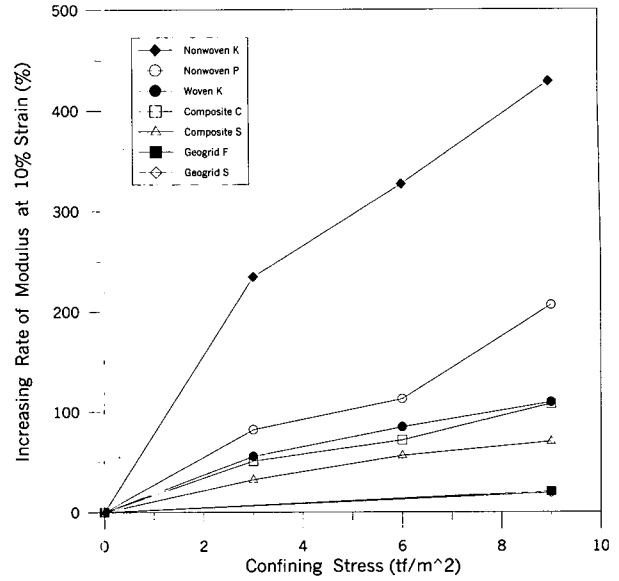


그림 7. 10% 변형률시의 할선계수 증가율 - 구속응력 관계

중은 토목섬유의 강도를 증가시키는 역할을 한다는 기존의 연구결과(Hearle et al., 1964)로 설명될수 있다.

그림 6 및 그림 7에는 토목섬유 종류에 따른 할선계수의 증가율(increasing rate of modulus)-구속응력(confining stress) 관계가 명시되어 있다. 그림 6 및 7을 살펴보면, 시험대상 토목섬유 모두, 할선계수의 증가율은 구속응력의 크기에 비례하여 증가함을 알 수 있으며, 10% 변형률시에 비하여 5% 변형률시에 해당하는 할선계수 증가율이 약 2배 이상 크게 나타났다. 구체적으로, 구속응력의 크기가 0tf/m^2 로부터 9tf/m^2 으로 증가함에 따른 할선계수 증가율은 5% 변형률시 20.1%(Geogrid S)~1333.3%(Nonwoven K)의 범위로, 또한 10% 변형률시 19.1%(Geogrid S)~428.8%(Nonwoven K)의 범위로 각각 나타났으며, 토목섬유 종류별로는 부직포 토목섬유(Nonwoven K, Nonwoven P)에서 가장 큰 증가율을, 지오그리드(Geogrid S, Geogrid F)에서 가장 작은 증가율을 각각 나타내었다. 참고적으로, Wilson-Fahmy et al.(1993)의 연구결과에서, 부직포(특히 needle-punched 부직포)에서 구속하중에 따른 토목섬유의 할선계수 증가율이 매우 크게 나타났으며, 구속하중의 크기가 인장강도에 미치는 영향은 미미하게 나타남바 있다.

4.1.2 구속응력에 따른 토목섬유의 인장력

그림 8~그림 12에는, 구속응력이 없는 상태에서의 토목섬유 인장력 F_u (tensile force)와, 구속응력 재하시 동일 변형률하에서의 인장력 F_c 의 차이 즉, 인장력 증

가량 ($\tau - \nu_{LT} \sigma_T$) (식 (8) 및 그림 5 참조)-불구속인장력 F_u 사이의 관계가 명시되어 있다. 그림 8~그림 12를 살펴보면, 구속응력에 의한 인장력 증가량은 구속응력의 크기에 비례하여 증가하며, 인장력 증가량-불구속인장력 관계곡선의 형상은 대부분 토목섬유에서 인장력 2tf/m 부근을 변곡점으로 하여 증가량이 완만해지거나 혹은 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 복합포(Composite S, Composite C)에서의 감소량이 크게 나타났다.

그림 8~그림 12를 이용하여, 구속응력 재하시 인장

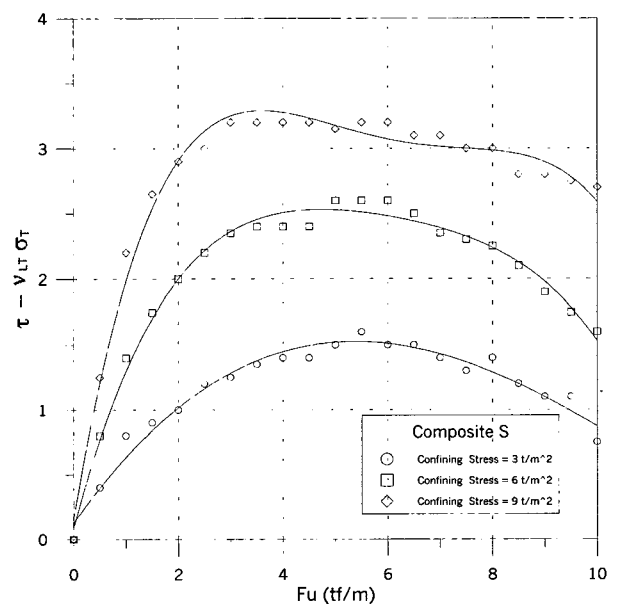


그림 8. 인장력증가량 - 구속응력이 없는 상태에서의 토목섬유 인장력 관계 (Composite S)

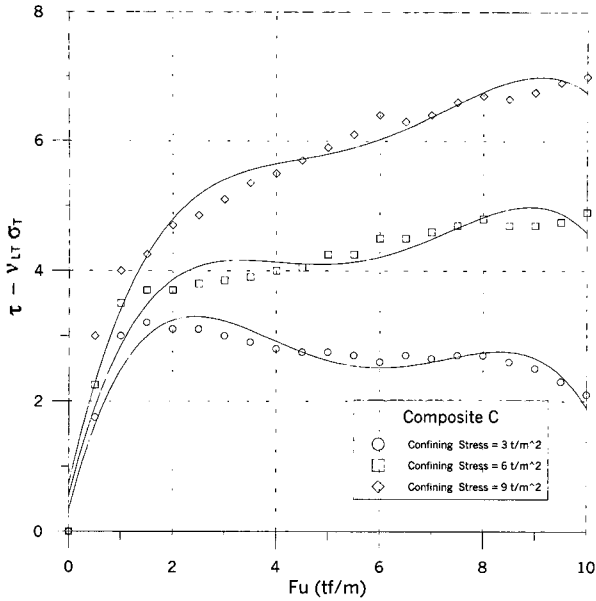


그림 9. 인장력증가량 - 구속응력이 없는 상태에서의 토목섬유 인장력 관계 (Composite C)

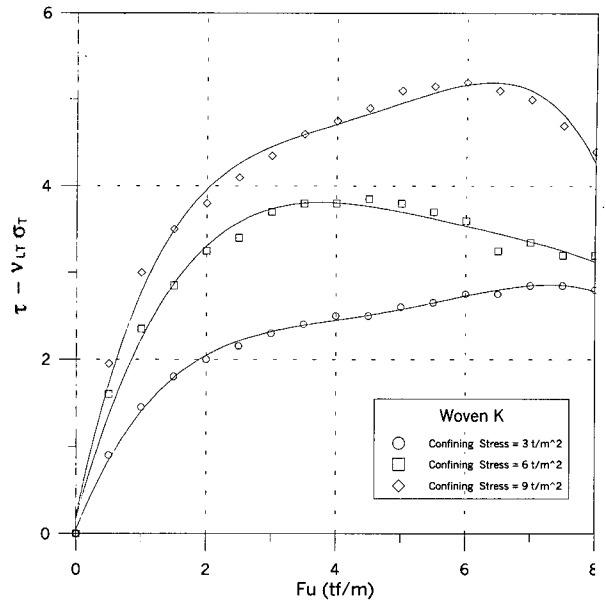


그림 10. 인장력증가량 - 구속응력이 없는 상태에서의 토목섬유 인장력 관계 (Woven K)

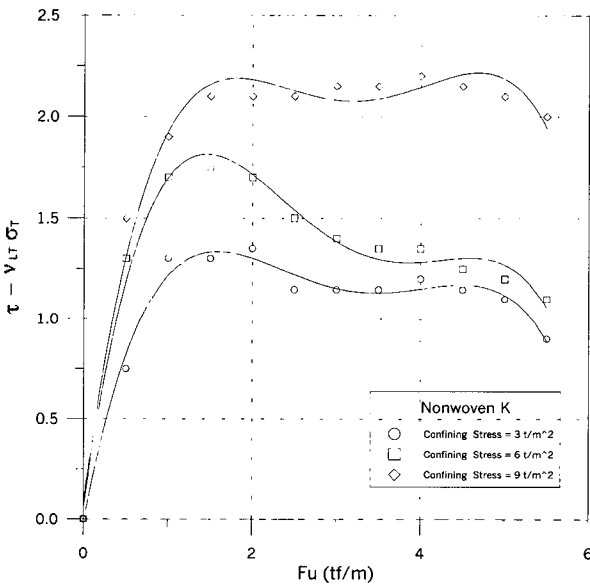


그림 11. 인장력증가량 - 구속응력이 없는 상태에서의 토목섬유 인장력 관계 (Nonwoven K)

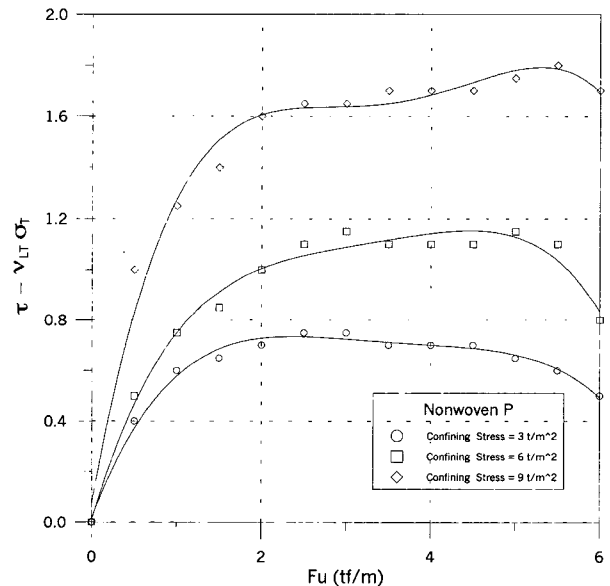


그림 12. 인장력증가량 - 구속응력이 없는 상태에서의 토목섬유 인장력 관계 (Nonwoven P)

력 증가량 ($\tau - \nu_{LT} \sigma_T$)의 크기를 광폭인장시험에 의한 인장력 F_u 의 함수로 나타낼 수 있으며, 최소제곱법 (least squares method)에 의한 실험곡선을 식 (10) 과 같은 4차식으로 표현하면 상수 a, b, c, d, e 는 표 3과 같다. 따라서, 광폭인장시험에 의한 토목섬유의 인장력은 식 (10) 및 표 3을 토대로하여 구속응력 재하시 동일 변형률하에서의 인장력 F_c 로 환산할 수 있으며, 보다 다양한 종류의 토목섬유를 대상으로 본 결과를 응용할 경우, 광폭인장시험 결과를 이용하여 구속하중 재하시의 토

목섬유 인장력-변형률 관계 예측이 가능할 것으로 판단된다.

$$(\tau - \nu_{LT} \sigma_T) = a + bF_u + cF_u^2 + dF_u^3 + eF_u^4 \quad (10)$$

4.2 실내인발시험

4.2.1 토목섬유의 선단인발력

실내인발시험은, 보강토옹벽용 보강재로 일반적으로

표 3. 구속응력 재하시 인장력 증가량($\tau - \nu_{LT} \sigma_T$) 계산식의 상수값

| 토목섬유 | 구속응력 (tf/m ²) | 다항식의 상수값 | | | | | 상관계수 |
|-------------|---------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | | a | b | c | d | e | |
| Composite S | 3 | 0.05056 | 0.76860 | -0.16096 | 0.01651 | -0.00074 | 0.97534 |
| | 6 | 0.08714 | 1.52560 | -0.35004 | 0.03584 | -0.00147 | 0.98811 |
| | 9 | 0.15371 | 2.41498 | -0.65276 | 0.07272 | -0.00292 | 0.98314 |
| Composite C | 3 | 0.34233 | 3.07976 | -1.07314 | 0.14129 | -0.00632 | 0.91566 |
| | 6 | 0.55904 | 3.14910 | -0.97784 | 0.12553 | -0.00552 | 0.93357 |
| | 9 | 0.73784 | 3.52810 | -0.96330 | 0.11699 | -0.00499 | 0.96148 |
| Woven K | 3 | 0.05299 | 1.83539 | -0.56233 | 0.07965 | -0.00409 | 0.99772 |
| | 6 | 0.18566 | 2.67678 | -0.69993 | 0.07709 | -0.00321 | 0.98599 |
| | 9 | 0.21713 | 3.53440 | -1.13802 | 0.17283 | -0.00974 | 0.99019 |
| Nonwoven K | 3 | -0.01923 | 2.25692 | -1.28846 | 0.29075 | -0.02284 | 0.98364 |
| | 6 | 0.05465 | 3.06725 | -1.78575 | 0.39293 | -0.02975 | 0.98362 |
| | 9 | 0.08830 | 3.21966 | -1.73294 | 0.38246 | -0.02957 | 0.98078 |
| Nonwoven P | 3 | 0.01752 | 0.88445 | -0.39269 | 0.07451 | -0.00524 | 0.98970 |
| | 6 | 0.00913 | 1.13441 | -0.48249 | 0.09682 | -0.00735 | 0.98385 |
| | 9 | 0.07327 | 1.90507 | -0.85365 | 0.16482 | -0.01133 | 0.98226 |

사용되는 세가지 종류의 토목섬유 즉, Composite C, Composite S 및 Geogrid S를 대상으로 수행하였다. 참고로, 복합포 토목섬유는, 점성이 있는 현장토를 보강토 용벽의 뒷채움으로 활용하는 경우에, 배수 및 보강의 기능이 동시에 가능하도록 부직포 토목섬유와 지오그리드 형태를 접합하여 제조된 토목섬유이다. 그림 13~그림 15는 실내인발시험에 의한 토목섬유의 선단인발변위(jack displacement)와 인발력(pullout force) 사이의 관계를 나타낸 것으로서, 다수의 시험결과를 회귀분석한

결과를 나타내었다. 그림 13~그림 15를 살펴보면, 세가지 종류의 토목섬유 모두 구속응력의 크기에 비례하여 최대인발력이 증가하며, 구체적인 구속응력 크기 증가에 따른 최대인발력 증가율은 약 181.1%(Composite S), 약 166.7%(Composite C) 및 466.7%(Geogrid S) 정도로 각각 나타났다. Geogrid S의 경우에 최대인발력의 크기가 상대적으로 크게 나타난 이유는, 복합포 토목섬유와 지오그리드의 인발마찰특성 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

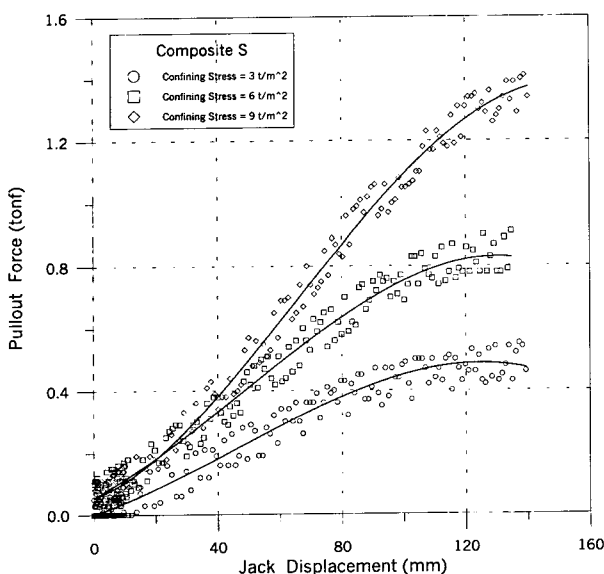


그림 13. 토목섬유의 인발력 - 선단인발변위 관계 (Composite S)

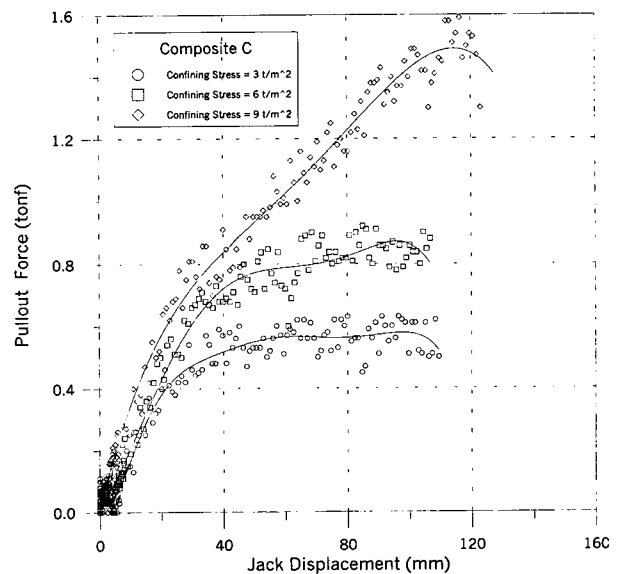


그림 14. 토목섬유의 인발력 - 선단인발변위 관계 (Composite C)

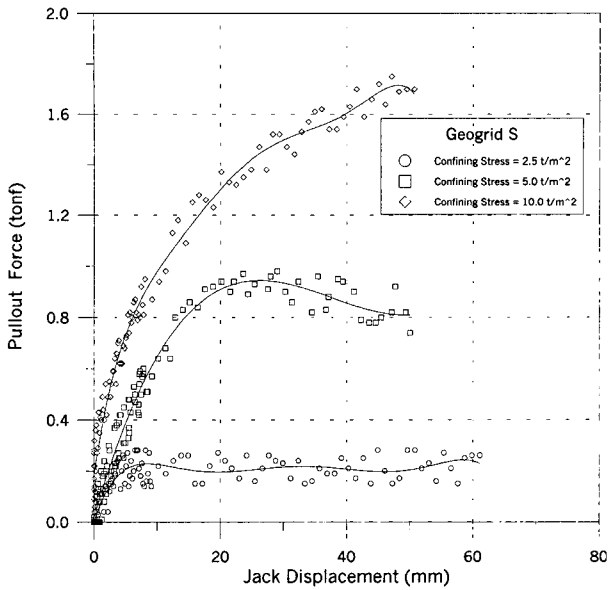


그림 15. 토목섬유의 인발력 - 선단인발변위 관계 (Geogrid S)

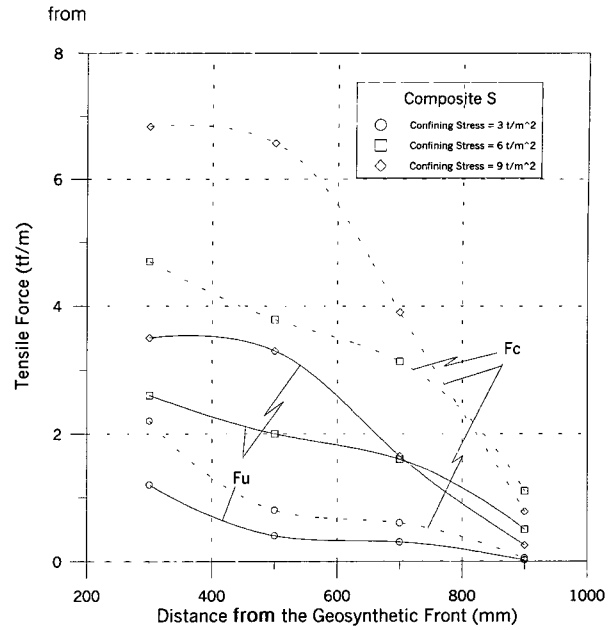


그림 16. 최대인발력 상태에서의 토목섬유 길이방향 인장력 분포도 (Composite S)

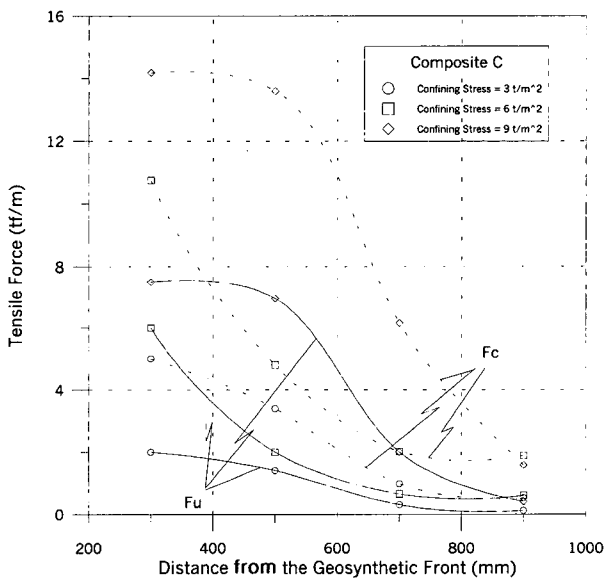


그림 17. 최대인발력 상태에서의 토목섬유 길이방향 인장력 분포도 (Composite C)

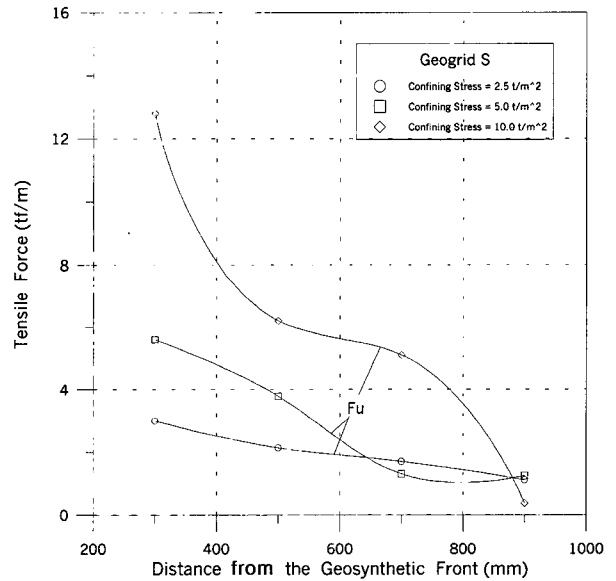


그림 18. 최대인발력 상태에서의 토목섬유 길이방향 인장력 분포도 (Geogrid S)

4.2.2 토목섬유의 인장력분포

토목섬유 길이방향 인장력의 크기 결정은 「4.1.1 구속응력에 따른 토목섬유의 활선계수 및 최대강도」 분석결과와, 식 (10) 및 표 3을 토대로하여 토목섬유의 변형률을 인장력으로 환산하였다. 그림 16 및 그림 17에는, 실내인발시험시 최대인발력 상태에서 Composite S 및 Composite C 각 측정간(그림 2, 측정 1~5)에서 발휘되는 인장력의 분포를 나타내었다. 토목섬유 측정간 변형률을 인장력으로 환산하는 과정에서, 구속응력이 없

는 상태에서의 인장력-변형률 관계곡선을 이용한 경우를 실선으로, 또한 구속응력 재하시의 인장력-변형률 관계를 이용하여 인장력 증가량을 고려한 경우 (식 (10) 및 표 3을 이용한 경우)를 점선으로 각각 표시하였다. Geogrid S(그림 18)의 경우에는, 「4.1.1」에서 전술하였듯이 구속응력 변화에 따른 인장력-변형률 관계곡선 형태의 차이가 명확하게 나타나지 않았으므로, 복합포 토목섬유와의 비교분석을 위하여, 구속하중이 없는 상태에서의 인장력-변형률 관계곡선을 이용한 경우만을 나

타내었다. 그림에서, 인장력의 크기는 세가지 토목섬유 모두 토목섬유의 전면부로 부터 후면으로 갈수록 그 값이 점차 작아지는 결과를 나타내며, 특히 전면부에서는 구속응력의 크기에 비례하여 인장력의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 세가지 종류의 토목섬유 모두, 토목섬유 후면부에서의 인장력 크기는 약 0.2~2.0 tf/m의 범위로, 구속응력의 크기에 무관하게 큰 차이를 보이지 않고 작은 값에 수렴하였으나, 전면에서의 인장력 크기는 Composite C에서 상대적으로 큰 값을, Geogrid S에서 가장 작은 값을 나타내었다. 구속응력에 의한 인장력 증가량을 살펴보면, 구속응력에 비례하여 인장력의 크기가 증가하여 「4.1.2 구속응력에 따른 토목섬유의 인장력」에서의 분석결과와 동일하게 나타났으며, 인장력 크기가 작은 토목섬유 후면에서는 구속응력에 의한 인장력 증가량이 상대적으로 작게 나타났다.

4.3 평가방법에 따른 토목섬유 마찰강도 산정

본 연구에서 수행된 구속신장시험 및 실내인발시험 결과를 토대로, 기존의 최대인발력 평가방법 및 본 연구의 제안방법 등을 이용해, Composite S, Composite C 및 Geogrid S와 주문진규사 사이의 마찰강도정수 c_a , δ 및 보정계수 α_1 , α_2 (식 (9)참조) 값을 각각 산정하였으며, 그 결과를 요약하여 정리하면 표 4와 같다. 실내인발시험 결과 토목섬유의 인장력 분포곡선(그림 16~18 참조)의 형태가 보강재의 유효길이를 판단하기에 적합치 않아, 유효면적법(effective area method)에 의한 마찰강도 산정에는 어려움이 있는 것으로 나타났다. 따라서, 본 분석에서는 전체면적법(total area method) 및 최대경사법(maximum slope method)을 이용하여 분석하였다. 아울러, 시험에 사용된 주문진규사는 점착력 $c_s = 0.1t/m^2$ 으로, 실내인발시험에 의한 토목섬유 마찰력 산정시 부착

력이 매우 작게 나타났으므로, 점착력에 관련된 보정계수 α_1 은 분석에서 제외하였다. 표 4에서 우선 Geogrid S의 경우를 살펴보면, 전체면적법에 의한 기존평가방법을 적용하면 토목섬유-주문진 규사 사이의 마찰저항각 δ 는 32°로, 보정계수 α_2 는 0.9로 각각 나타나, 동일 제품에 대한 조삼덕 등(1999)의 연구와 부합되는 결과를 나타내었다. Composite S 및 Composite C를 살펴보면, 전체면적법으로 평가하였을 경우 마찰저항각 δ 의 크기는, 기존의 평가방법을 적용하면 12.0°(Composite S), 24.0°(Composite C), 본 연구 제안방법을 적용하면 21.0°(Composite), 36.5°(Composite C)로, 본 연구 제안방법에 의한 마찰저항각이 큰 값을 나타내었다. 토목섬유 종류별 마찰저항각의 크기는, Composite C에서 가장 큰 값을, Composite S에서 가장 작은 값을 나타내었다. 최대경사법으로 평가하였을 경우에는, 전체면적법에 비해 최대 475.0%(Composite S) 정도 큰 마찰저항각을 나타내고, 전체적으로 마찰저항각의 크기가 비현실적으로 크게 과대평가되어, 최대경사법에 의한 마찰강도 평가방법은 제한적인 적용만이 가능할 것으로 판단된다. 참고로, Ochiai et al.(1992)의 연구에서 위의 세가지 방법에 의한 인발저항력 평가 결과, 최대경사법에 의한 결과가 여타 두가지 방법보다 크게 나타났으며, 인발저항력의 크기를 크게 과대평가하는 것으로 보고한 바 있으며, 김홍택, 방윤경(1996)의 연구에서도, 최대경사법에 의한 마찰저항각이 매우 크게 산정된 결과를 나타낸바 있다.

전체면적법에 의한 보정계수 α_2 값을 살펴보면, 기존의 평가방법을 적용하면 0.3~0.6의 범위로, 본 연구 제안방법을 적용하면 0.5~1.0의 범위로 각각 나타나, 본 연구제안방법에 의한 보정계수 α_2 값이 다소 큰 값을 나타내었다. 참고로, 日本建設省土木研究所(1992)에서 상대밀도 약 50%, 간극비 0.8 전후의 조밀하지 않은 토요

표 4. 평가방법에 따른 토목섬유-주문진 규사 사이의 마찰강도

| 마찰저항각 및 보정계수 평가방법 | | | Composite S | Composite C | Geogrid S |
|-------------------|-----------|--------------|-------------|-------------|-----------|
| 전체 면적법 | 기존의 방법 | δ (°) | 12.0 | 24.0 | 32.0 |
| | | α_2 | 0.3 | 0.6 | 0.9 |
| | 본 연구 제안방법 | δ (°) | 21.0 | 36.5 | - |
| | | α_2 | 0.5 | 1.0 | - |
| 최대 경사법 | 기존의 방법 | δ (°) | 69.0 | 50.0 | 75.0 |
| | | α_2 | 3.5 | 1.6 | 5.0 |
| | 본 연구 제안방법 | δ (°) | 58.0 | 35.0 | - |
| | | α_2 | 2.2 | 0.9 | - |

우라(豊浦)모래를 대상으로 수행한 지오그리드 인발시험결과에 의하면, 보정계수 a_2 값은 1.0 정도로 나타나 바 있으며, 조삼덕 등(1995)이 지오그리드 보강재 및 모래질흙(SP, SM)을 대상으로 수행한 인발시험결과에서는, $a_2 = 0.5 \sim 1.0$ 의 범위로 나타난 바 있다. 따라서, 본 연구 제안방법에 의한 토목섬유-주변흙 사이의 마찰강도 평가방식은 부분적으로 적정성이 인정되며, 토목섬유에 상재하중 및 다짐하중 등 구속응력이 작용하는 경우 그 영향을 고려할 수 있는 비교적 합리적인 마찰강도 평가기법으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는, 인장력과 이에 수직방향으로 작용하는 압축응력을 동시에 고려한 직교이방성 합성부재의 인장력-변형률 관계식(Bhagwan, Agarwal & Broutman, 1990)을 응용하여, 토목섬유인발저항력 및 인장력에 미치는 구속응력의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였다. 이를 위해서, 국내에서 판매되고 있는 부직포, 직포, 복합포 및 지오그리드 등의 토목섬유를 대상으로 구속신장시험 및 실내인발시험을 수행하였으며, 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 구속신장시험 결과, 구속응력의 크기가 증가할수록 토목섬유의 할선계수가 뚜렷이 증가하였으며, 할선계수의 증가율은, 10% 변형률시에 비하여 5% 변형률시에 약 2배 이상 큰 값을 나타내었다.
- (2) 구속신장시험 결과, 구속응력의 크기가 증가할수록 토목섬유의 할선계수가 증가하였으며, 지오그리드 시료의 경우, 구속응력에 따른 할선계수와 최대강도의 변화량이 상대적으로 미미하게 나타났다. 구속하중에 따른 할선계수 증가율은 부직포 토목섬유(Nonwoven K, Nonwoven P)에서 가장 큰 증가율을, 지오그리드(Geogrid S, Geogrid F)에서 가장 작은 증가율을 나타내었다.
- (3) 구속응력 재하시 일정 변형률하에서의 토목섬유 인장력의 크기는, 광폭인장시험시 동일 변형률하에서의 인장력에 비하여 증가하였으며, 인장력 증가율은 구속응력의 크기에 비례하고, 변형률이 작은 경우에는 변형률 크기에 비례하여 증가하나, 변형률 약 3%~15% 이후에는 증가율이 점차 감소하는 것으로 나타났다.

- (4) 복합포토목섬유의 경우에 전체면적법에 의한 마찰저항각 δ 및 보정계수 a_2 값은, 기존의 평가방법을 적용하면 $12.0^\circ \sim 24.0^\circ$ 및 $0.3 \sim 0.6$ 의 범위로, 본 연구 제안방법을 적용하면 $21.0^\circ \sim 36.5^\circ$ 및 $0.5 \sim 1.0$ 의 범위로 각각 나타나, 인발저항력 산정시 토목섬유에 가해지는 구속응력의 크기를 고려하는 본 연구 제안방법의 경우에, 보다 큰 인발저항력이 얻어지는 것으로 나타났다.
- (5) 토목섬유 인발저항력 평가시 최대경사법에 의한 방법은 전반적으로 마찰저항각의 크기를 비현실적으로 크게 과대평가하는 것으로 나타나, 최대경사법에 의한 마찰강도 평가방법은 제한적인 적용만이 가능할 것으로 판단된다.
- (6) 제한된 시료를 대상으로 기존 연구결과와의 비교분석 결과, 본 연구 제안방법에 의한 토목섬유 인발저항력 평가방식은 부분적으로 그 적정성이 인정되며, 향후 보다 많은 시험결과를 토대로한 본 연구제시 평가기법의 검증작업이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2001년 중소기업청 산·학·연 공동기술개발컨소시엄사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능케한 당국에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김홍택, 방윤경(1996), "지오그리드-페 EPS 조각 혼합경량토의 마찰특성," 한국지반공학회지, 제12권 제6호, pp.163~183.
2. 김홍택, 방윤경, 박준용, 김승욱(1996), "실내인발시험에 의한 지오그리드/페 EPS 조각 혼합경량토의 마찰특성 평가," 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.262~264.
3. 방윤경, 이준대, 전영근(2001), "토목섬유 인장력에 미치는 구속응력의 영향에 관한 연구," 대한토목학회 학술발표회 논문집.
4. 조삼덕, 김진만(1995), 토목섬유 보강토구조물의 합리적인 해석과 설계, 한국건설기술연구원, 연구보고서, 95-GE-1101.
5. 조삼덕, 김진만(1999), 지오그리드 보강재의 공학적 특성 및 현장 적용성 평가, 한국건설기술연구원, 연구보고서, 건기연 99-070.
6. 한국지반공학회(1998), 토목섬유의 설계 및 시공요령.
7. 建設省土木研究所(1992), ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, pp. 65~76.
8. Alfaro, M.C., Miura, N. and Bergado, D.T.(1995), "Soil-Geogrid Reinforcement Interaction by Pullout and Direct Shear Tests", Geotechnical Testing Journal, Vol.18, No.2., pp.157~167.
9. Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman(1990), Analysis and Performance of Fiber Composites, John Wiley & Sons, New York.
10. 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.
11. Hermann, L.R. and Yassin, A.L.(1978), “Numerical Analysis of Reinforced Earth Systems”, ASCE Symp. on Earth Reinforcement, Pittsburgh, U.S.A.
 12. Leshchinsky, D. and Field, D. A.(1987), “In-Soil Load Elongation, Tensile Strength and Interface Friction of Nonwoven Geotextile”, Proc. of Geosynthetics’ 87, New Orleans, pp.238~249.
 13. McGown A., Andrawes, K. Z., Wilson-Fahmy, R. F. and Brady, K. C.(1981), “A New Method of Determining the Load-Extension Properties of Geotechnical Fabrics,” Department of Environment, Department of Transport, U.K., Report SR 704, pp.14.
 14. McGown A., Andrawes, K. Z. and Kabir, M. H.(1982), “Load-Extension Testing of Geotextiles Confined In-Soil,” Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, U.S.A., Vol.3, pp.793~798.
 15. Ochiai H., Hayashi, S., Otani, J. and Hirai, T.(1992), “Evaluation of Pul.-Out Resistance of Geogrid Reinforced Soils”, Proc. of Int. Symposium on Earth Reinforcement Practice, Kyushu, Japan, pp. 141~146.
 16. Sawicki, A. and Swidzinski, W.(1999), “Unconfined versus Confined Testing of Geosynthetics,” *Geosynthetics International*, Vol.6, No.3, pp.157~169.
 17. Wilson-Fahmy, R. F., Koerner, R. M. and Fleck, J. A.(1993), “Unconfined and Confined Wide Width Tension Testing of Geosynthetics,” *Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures*, ASTM 1190, S.C.Jonathan Cheng, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia. pp.49~63.
 18. Yuan, Z., Swan, R. H. Jr., and Bachus, R. C.(1998), “Soil Confinement Effect on Stress-Strain Properties of Geosynthetics”, 6th Int. Conf. on Geosynthetics, pp.523~528.
- (접수일자 2001. 9. 3, 심사완료일 2001. 12. 8)