

## 연약지반 보강성토에서 섬유보강재 소요인장강도의 결정

### The Determination of Required Tensile Strength of Geosynthetic Reinforcements for Embankment on Soft Ground

이 광 열\*<sup>1</sup> Lee, Kwang-Yeol  
황 재 홍\*<sup>2</sup> Hwang, Jae-Hong  
구 태 곤\*<sup>2</sup> Gu, Tae-Gon

#### Abstract

In the existing method to design geosynthetic reinforced embankment, the required strength of reinforcements is determined by vertical stress only rather than strain. This strength is not in accord with tensile strength that behaves as reinforcement in earth structures. The reinforcement and adjacent soil on the failure plan behave in one unit at the initial stress phase but they make a gap in strain as stress increases. This issue may cause a big impact as a critical factor on geosynthetic reinforcement design in earth structures. The quantitative analysis on strain behavior was performed with a PET Mat reinforced embankment on soft ground. From this study, several outstanding discussions are found that tensile strength of reinforcement governs the failure of embankment when the soil stress is greater than failure stress. Also the optimum required tensile strength of geosynthetic reinforcement(Tos) should be determined by stress, displacement, displacement gap and safety factor of soil-PET Mat at the location of PET Mat.

#### 요 지

기존의 섬유보강성토제체의 설계에서 보강재의 변형을 고려하지 않고 연직응력을 보강재의 인장강도로 사용함으로써, 흙구조물의 파괴응력에 대응하는 보강재의 한계응력산정과 그에 따른 보강재의 규격결정이 불가능했다. 보강재에 의해 보강된 성토제체의 파괴면에서 보강재와 흙의 거동은 초기응력단계에서는 일체로서 거동하지만 응력의 증가에 따라 변형량의 차이가 증가한다. 이러한 문제는 흙구조물의 보강재설계에서 중요한 요소로서 보강효과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 연약지반위에 PET Mat로 보강한 성토제체의 보강재 설계 시 파괴면상의 보강재 설치위치에서 흙과 보강재의 변형량을 고려한 설계방법을 제시하였다. 연구결과에 의하면, 허용안전율을 확보하는 범위내에서 예상파괴면상의 보강재 설치위치에서의 보강재의 인장강도는 흙의 응력 이상이어야 하며, 흙의 변형량( $\Delta S$ )과 보강재의 변형량( $\Delta G$ )이 일체로 거동하는 보강재의 소요인장강도를 보강재의 설계인장강도로서 결정하는 것이 합리적이고 경제적인 것으로 평가되었다.

**Keywords :** Embankment, Geosynthetics, Reinforcement, Soft ground, Stress-strain

\*1 정회원, 동서대학교 건설공학부 부교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongseo Univ., civklee@gdsu.dongseo.ac.kr)

\*2 동서대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Students, Dept. of Civil Engrg., Dongseo Univ.)

## 1. 서론

연약지반 위에 성토제체를 구축하는 경우 고려해야 할 안정요소는 성토제체에 대한 전단파괴와 하부 연약지반의 지반지지력이다. 성토제체의 보강공법으로는 지오그리드와 같은 보강재를 제체 내에 보강하여 전단파괴에 저항하도록 하는 방법이 있다. 성토제체 하부지반의 지지력과 전단파괴에 대한 안정성 확보를 위한 공법으로는 지반을 개량하는 직접적인 방법과 성토제체하부의 지반표면에 보강매트를 사용하여 성토제체 하중을 분산시켜 하부지반에 전달되는 응력을 최소화하는 간접적인 방법이 있다. 이 때 보강재로서 토목섬유를 사용하는 방법이 가장 효율적이고 경제적인 방법으로 평가되고 있다(1999, 한국지반공학회).

토목섬유 설치 시 고려하여야 할 공학적 요소는 저면매트의 인장강도, 화학성분 및 미생물에 대한 저항성, 내후성(자외선에 대한 저항성 등) 등이 있다. 따라서 저면매트의 재질에 따른 공학적 특성상 강도가 크고, 지반지지력 공법에 많이 사용되고 있는 PET Mat를 선정하였다. PET는 에틸렌글리콜과 디메틸 테레프탈레이트 또는 테레프탈산의 중합으로 제조된 열가소성수지로서 재료적 특성은 제품에 따라 상이하지만, 일반적으로 밀도는  $1.38\text{g/cm}^3$ , 용점은  $260^\circ\text{C}$  정도이며 인장강도는  $20\sim 320\text{kN/m}$ , 중량은  $200\sim 1000\text{g/m}^2$  이내이다.

현재 섬유 보강제체의 해석에 사용되는 한계평형이론은 보강재와 흙의 변형을 고려할 수가 없어 실제의 거동특성을 모사하기에는 문제가 있는 것으로 지적되고 있다. 그 이유는 보강재와 흙이 일체로서 거동할 수 없으며, 흙의 파괴응력(항복응력) 이하에서 보강재에 변형이 발생하여 흙의 파괴응력 이상에서도 보강재는 변형이 계속되기 때문이다. 따라서 보강재의 변형을 무시한 현재의 보강재 설계방법으로는 보강지반의 정확한 파괴응력을 결정하기 어려울 뿐 아니라, 부등침하에 의한 전단파괴를 유발시키며 이에 따른 보강재 과다설계의 결과를 초래한다. 특히 소성변형이 크게 발생하는 점성토지반의 보강설계로는 비합리적이라 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 흙과 보강재의 응력-변형 특성을 동시에 고려한 해석을 통한 설계기법의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 연약지반에 PET Mat를 이용하여 지반지지력을 보강한 후 제체를 성토하는 경우에 있어서, 파괴면상의 보강재 설치위치에서 보강재와 인접한 흙의

응력-변형 해석을 통하여 일정안전을 범위에서 최적의 보강효과를 갖는 보강재의 인장강도를 결정하는 새로운 개념의 설계방법을 제시하고자 한다.

## 2. 제체내 보강재의 역학적 거동 원리

토목섬유에 의한 보강은 보강재의 큰 변형으로 인하여 기존의 보강시스템과 다르다. 이것은 약한 관성모멘트와 상대적으로 작은 탄성계수 때문에 큰 유동성을 가지게 된다. 따라서 토목섬유는 오직 인장응력에 의한 거동만이 인정되고 있다. 그 이유는 휨모멘트와 압축강도가 인장응력과 비교해서 무시할 수 있을 정도로 약하기 때문이다. 토목섬유(PET Mat) 보강 성토제체에서 보강재의 보강효과는 보강재와 흙 사이에서의 변형이 일체로 거동할 때 최대효과를 나타낼 수 있다. 그림 1에서는 하중이 재하되었을 때 제체 내에서 토목섬유의 변형형태를 보여준다. 중간부의 불연속 구간에서 변위가 크게 발생하며, 양단으로 갈수록 변위량은 누적되어 변형량이 더욱 크게 나타난다(Giroud 1995, Villard et al. 1998).

그림 2에서 나타낸 바와 같이 보강구조물내에서 마찰저항거동은 흙과 보강재 사이의 마찰력에 의한 접선력의 회복으로 구성된다. 이 메커니즘은 보강시스템에 있어서 기본적인 원리이다. 식 (1)은 보강재의 기본요소에 대한 표면마찰저항력  $\tau$ 와 반대편으로의 인장력  $dT$ 가 평형을 이루어서 보강재가 인발되지 않고 제체내에서 보강역할을 할 수 있는 것을 나타낸다(Bourdeau et al., C. Beneito, Gotteland). 이때 흙과 보강재 사이의 마찰력 ( $2\tau ds$ )이 유발인장력( $dT$ )보다 작다면 보강재는 내부로 빨려들어가 큰 침하를 야기시키며 보강재의 인장력을 더 크게 유발시키지 못한다. 따라서 보강재의 인장강도



그림 1. 사면내 변형된 토목섬유

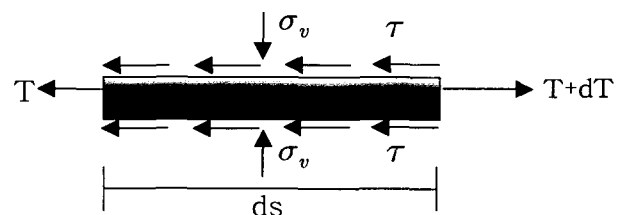


그림 2. 마찰평형원리

가 클수록 또한 흙과의 마찰력이 클수록 보다 큰 효과를 보여준다.

$$dT = 2\tau ds \quad (1)$$

### 3. 제체단면 및 재료

본 연구에서 채택한 토공구조물은 연약지반 위에 PET Mat를 보강재로 이용하여 성토한 제체이며, 하부지반을 개량한 후 양방향 직포 PET Mat를 제체의 횡방향으로 40.1m 설치한 후 상부 8.5m까지 성토하는 것으로 하였으며, 보강재(PET Mat)의 인장강도는 20~320kN/m까지를 적용하였다.

그에 따른 해석단면은 그림 3과 같으며, 하부지반은 개량공법에 의해 구간별 지반의 물성이 다르다. 성토제체의 상부에는 철도하중(50kN/m)을 설계하중으로 적용하였으며 본 해석에서 사용한 제체성토재료와 지반 개량 후 하부지반의 토질정수를 표 1에 제시하였다. 또한 광폭(wide-width) strip법을 사용하여 인장강도가 320kN/m인 PET Mat의 인장강도 시험을 수행하였다. 보강매트의 탄성계수는 응력-변형거동에 의해 프로그램내에서 자체적으로 결정된다. 보강재 PET Mat의 사진 및 응력-변형 시험결과를 그림 4~5에 제시하였다.

### 4. 해석결과 분석

PET Mat의 인장강도를 20kN/m에서 320kN/m까지 20kN/m 간격으로 증가시켜가며 ITASCA사의 FLAC(ver. 4.0)으로 해석한 결과 고강도의 보강재를 설치한 경우에는 사면내파괴나 선단부파괴가 발생하였으며, 저강도의 보강재를 사용할 경우 사면저부파괴를 유발시켰다. 파괴형상이 바뀌는 시점을 파악하기 위하여 10kN/m 단위로 인장강도를 변화시켜가며 수행된 해석 결과, 20~120kN/m까지 저강도의 보강재를 설치하였을 때 사면저부파괴가 발생하였고, 130~320kN/m의 고강도 보강재를 설치한 경우에는 사면내파괴나 선단부파괴가 발생하였으며 보강재의 강도를 증가시키기에 따라 제체내 전단변형의 크기가 감소하였다. 여러 가지 인장강도의 보강재를 설치한 경우 보강재 위치에서의 흙과 보강재의 응력을 비교검토했다. 그리고 그에 따른 안전율의 변화를 산정하여 허용안전율 범위내에서 흙과 보강재가 일체로 거동하는 최적의 보강효과를 나타낼 수 있는 경제적인 설계방법을 제시하고자 한다. 저장

도 보강재와 고강도 보강재를 포설하였을 때 전단변형률의 형상 및 사면파괴패턴, 벡터양상을 그림 6~9에 나타내었다.

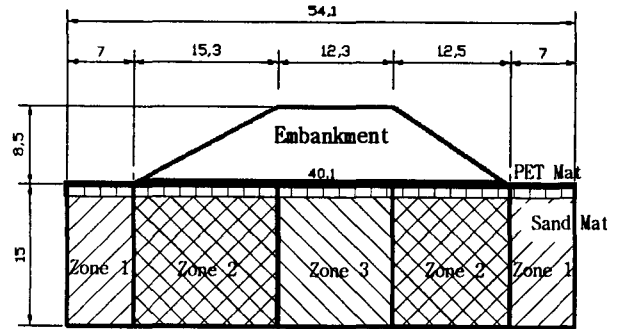


그림 3. 해석단면의 Dimension

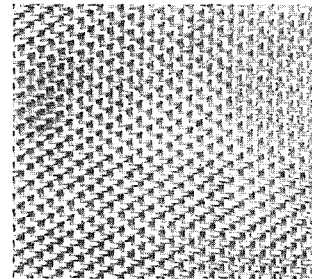


그림 4. 양방향 직포형 PET Mat

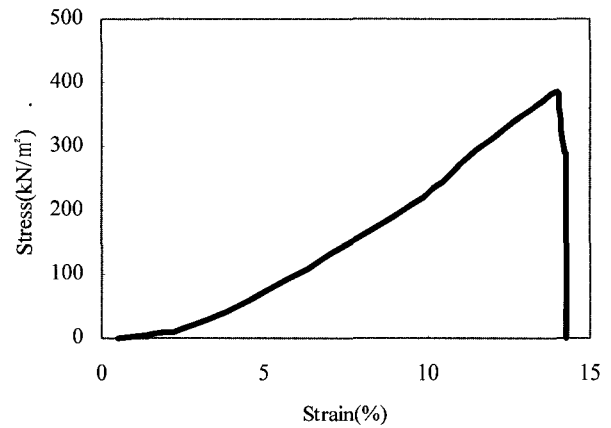


그림 5. 양방향 직포형 PET Mat의 응력-변형시험결과(인장강도 320kN/m)

표 1. 성토제체 및 하부지반의 토질물성

구 분	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)
성토제체	16.9	19	15	25
Sand Mat	18.0	23	-	33
Zone 1	10.4	16.6	20	-
Zone 2	10.4	16.6	46	12.4
Zone 3	10.4	16.6	31	12.4

현장에서 흔히 분리용으로만 쓰이는 20kN/m의 저강도 보강재부터 320kN/m의 고강도 보강재까지 여러 가지의 보강재를 설치한 경우에 대하여 체체의 전단파괴에 대한 안전율을 분석하여 그림 10에 도시하였다. 보강재 인장강도의 증가에 따라 구간별 선형적 특징을 보였는데, 무보강에서 저강도 보강재 설치 시에 안전

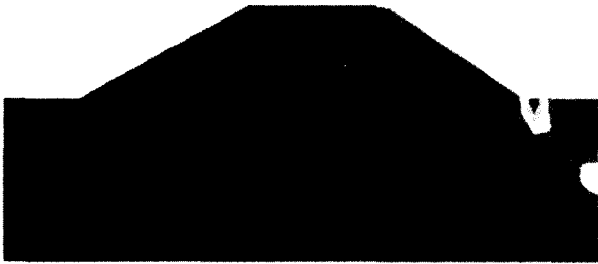


그림 6. 저강도 보강재 사용시 사면파괴패턴 (20~120kN/m보강재 사용: 보강재파괴 발생)

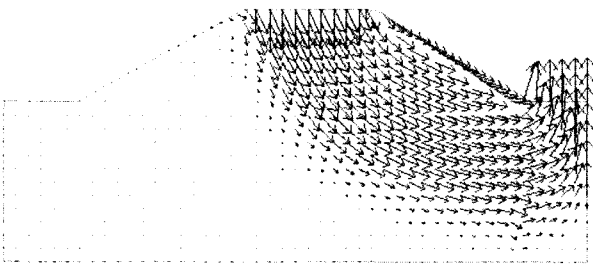


그림 7. 저강도 보강재 사용시 벡터양상 (20~120kN/m보강재 사용: 보강재파괴 발생)

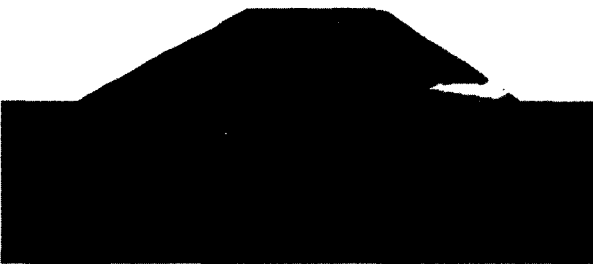


그림 8. 고강도 보강재 사용시 사면파괴패턴 (130~320kN/m보강재 사용)

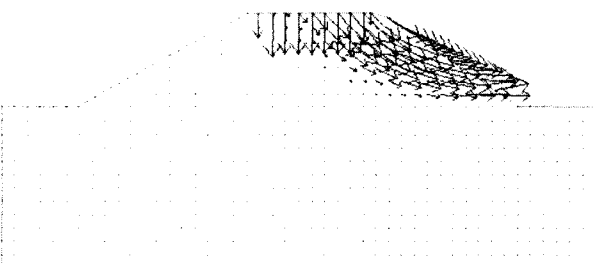


그림 9. 고강도 보강재 사용시 벡터양상 (130~320kN/m보강재 사용)

율이 급상승하였으며, 보강재의 인장강도가 20kN/m에서 130kN/m까지 증가함에 따라 안전율이 선형적으로 증가하였으며, 보강재의 인장강도가 130kN/m 이상에서는 안전율의 변화가 발생하지 않았다. 안전율은 보강재를 설치하지 않았을 때 1.32, 20kN/m의 저강도의 보강재를 사용한 경우에도 안전율은 1.43으로 무보강시와 저강도 보강시의 안전율의 차이가 크게 나지 않았으며 이는 앞에서 언급한 바와 같이 연약지반 개량 공법에 의해 지반지지력이 확보되어졌기 때문인 것으로 판단된다.

보강재의 강도가 130kN/m 이상인 경우에는 안전율이 1.57로 나타났으며, 이 후 보강재의 인장강도를 증가시켜도 안전율의 변화는 없는 것으로 나타났다.

그림 11에 나타낸 바와 같이 보강재가 설치된 위치에서의 흙은 중앙부에서 최대 164kN/m<sup>2</sup>의 전단응력을 받게 된다. 인장강도 130kN/m 미만의 보강재를 설치한 경우에는, 보강재의 인장강도만큼만 전단응력을 받으며 흙의 전단응력에 저항하지 못하고 파괴되는 경향을 보인다. 보강재의 인장강도를 164kN/m 이상의 고강도로

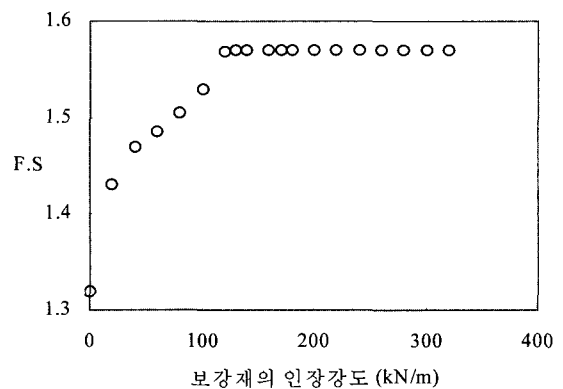


그림 10. 설계인장강도의 F.S

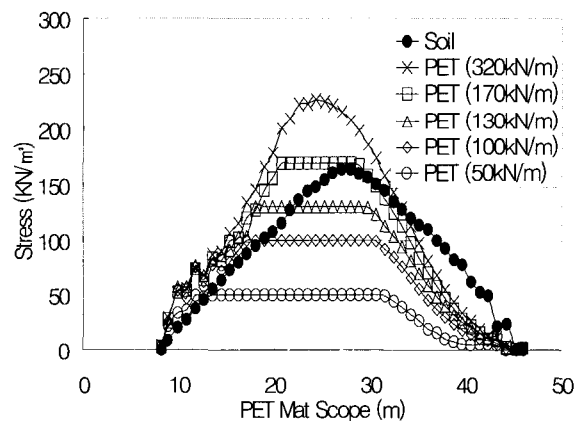


그림 11. 보강재 위치에서의 보강재-흙의 응력분포

적용하였을 때는 보강재의 인장강도가 흙의 전단응력보다 커서 보강재의 기능을 다할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 320kN/m의 보강재를 사용하여도 보강재가 제체내에서 227kN/m밖에 받지 못하므로 과다설계가 된다. 따라서 제체내 흙의 전단응력과 경제성을 고려하면 보강재의 인장강도는 보강재 설치위치에서의 흙에서 발생하는 전단응력보다 큰 값 중에서 가장 작은 값을 택하도록 설계하여야 한다.

그림 12~13에 나타난 바와 같이 보강재의 인장강도를 증가시키며 적용하였을 때, 보강재위치에서의 흙과 보강재의 수평 및 연직변위가 감소하였다. 변위가 가장 큰 구간은 앞에서 언급한 제체의 전단변형파괴 발생구간이다. 고강도의 보강재보다 저강도의 보강재를 설치하였을 때 흙과 보강재의 변위가 크게 나타났는데, 164kN/m보다 작은 인장강도의 보강재를 설치하였을 때 보강재와 흙의 수평변위가 4.5~10.5cm, 연직변위가 -3.2~-6.0cm로 변위차가 크게 발생하였다. 이는 보강재의 인장강도가 흙의 전단응력에 대하여 충분히 저항하지 못하여 보강재의 인장파괴에 이르는 것으로 판단된다.

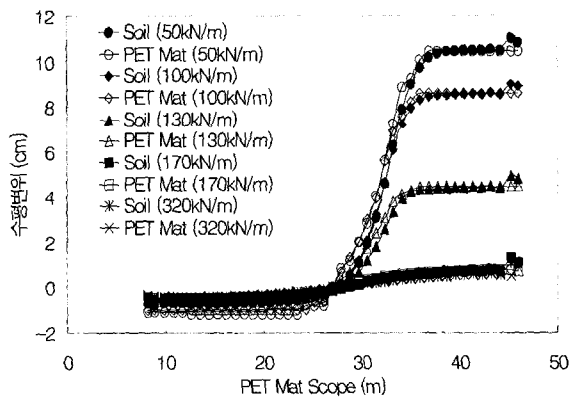


그림 12. 보강재-흙의 수평방향 변위량 비교

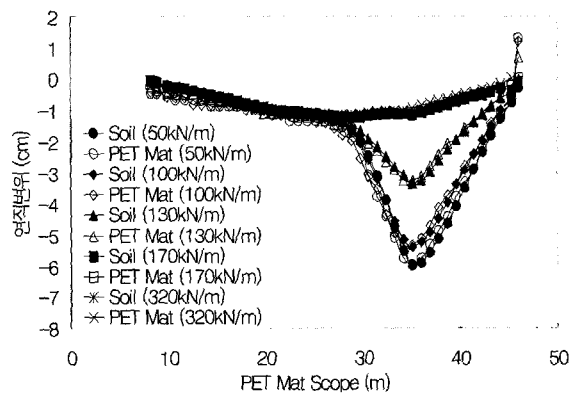


그림 13. 보강재-흙의 연직방향 변위량 비교

다. 인장강도 시험시 항복점 인장변형률의 표선거리는 3.3cm이며 파단점인장변형률 표선거리는 5.0cm인데 본 연구에서는 평균값인 4.0cm를 기준으로 선정하여 보강재의 허용변형률을 선정하였다. 따라서 보강재의 허용변형률 4cm이내의 변형을 보이는 인장강도를 선정하여야 할 것으로 사료된다.

저강도의 보강재를 설치한 제체는 보강재 위치에서의 보강재-흙의 변위차가 크기 때문에, 보강재를 흙과 일체로서 거동하는 재료로 볼 수 없다. 그러므로 제체의 부등침하로 인한 응력 집중에 의해 사면붕괴가 발생할 것으로 판단된다. 흙과 보강재의 수평변위차에서는 보강재의 인장강도가 220kN/m 이상일 때 변위차 0.45cm로 거의 일체로 거동하였고, 연직변위차에서는 160kN/m 이상일 때 변위차 없이 일체로 거동을 하였다.

보강재와 흙이 접한 구간에서의 보강재와 흙의 두 재료간의 변위차이를 그림 14~15에 나타내었다. 보강재의 강도에 따른 두 재료의 변위차이는 비선형으로 log 함수형태를 나타내었다. 보강재의 강도가 220kN/m 이상에서 수평변위차이가 일정해지는 것을 알 수 있다. 보강재의 인장강도를 증가시키며 따라 수평변위차는

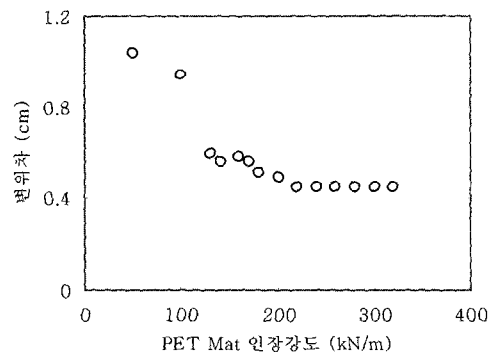


그림 14. 보강재-흙의 수평변위차

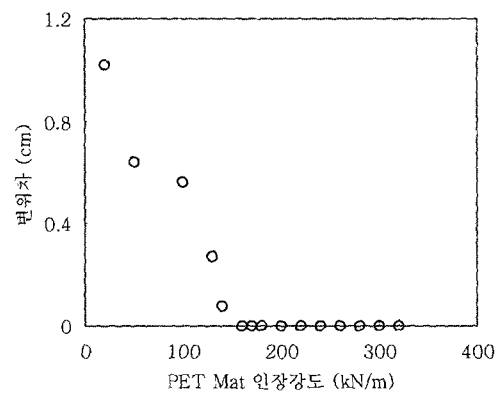


그림 15. 보강재-흙의 연직변위차

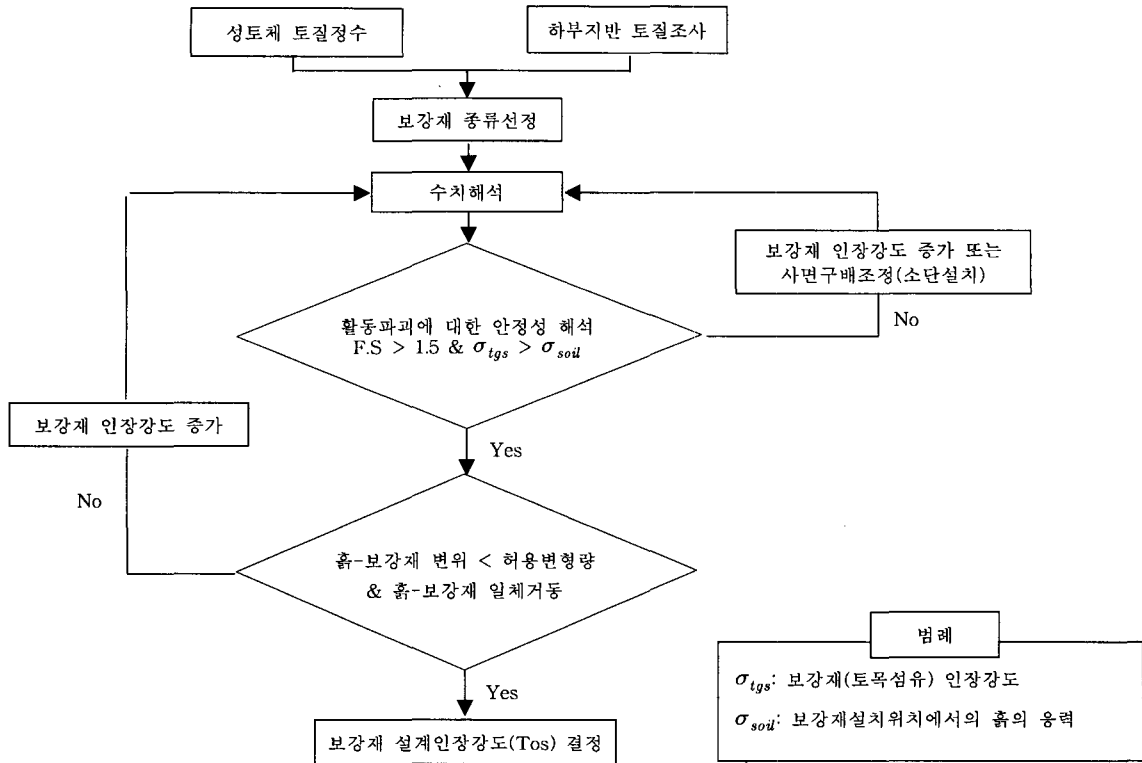


그림 16. 토목섬유 보강재 설계 흐름도

0.455cm, 연직변위차는 0으로 수렴해졌다. 동일지점에서 보강재와 흙의 변위차가 발생하는 것은 두 물질이 이질이기 때문인데, 제체내 토사의 점착력 및 보강재의 점착력, 마찰력, 강도 등에 따라 변위차이가 달라질 것으로 판단된다.

보강재 설치위치에서의 보강재와 흙의 응력검토 및 활동파괴에 대한 안정성 해석 후, 보강재-흙의 변위량 및 변위차를 분석하였다. 설치위치에서의 흙의 전단응력보다 큰 인장강도를 가져야 하며, 일정안전율을 만족시키고, 보강재의 허용변형량 4.0cm 미만의 변형을 일으키고, 보강재-흙의 일체 거동을 만족하는 보강재의 인장강도를 최적변형인장강도(TOS - Tensile Optimal Strength)라 칭하고, 최적변형인장강도의 보강재를 사용하는 것이 구조적 안정성과 경제성을 고려할 때 최적설계인 것으로 판단된다. 그리고 흙-보강재의 변형을 고려한 보강재 설계방법의 흐름도를 그림 16에 제안하였다.

## 5. 결론

(1) 제체내 보강재 위치에서 보강재의 인장강도가 흙의 전단응력보다 작으면 보강효과가 없을 것으로 평가

된다.

(2) 보강재의 강도차이에 따라 제체의 파괴형상과 보강재 위치에서의 보강재와 흙의 변위량이 변하는데, 제체파괴양상이 변하는 기준보다 작은 인장강도의 보강재를 설치하였을 때는 사면저부파괴가 발생하였고, 흙과 보강재의 변위가 연직 및 수평방향으로 4cm 이상 크게 발생하였다. 이와 같은 결과는 토목섬유의 불연속구간 증가로 인한 부등침하 및 전단파괴를 유발시키는 것으로 판단된다.

(3) 최소변위차가 발생하게 되는 인장강도 이상의 보강재를 설치한 경우, 보강재위치에서 보강재와 흙이 일체로 거동하는데, 보강재의 인장강도가 감소함에 따라 보강재-흙의 변위차가 발생하게 된다. 이러한 결과는 제체가 파괴응력에 도달한 경우, 토목섬유는 인장응력을 받게 되며, 그로 인한 인장변형이 발생하게 되는데 그 이유는 토목섬유의 creep 변형과 소성거동 때문인 것으로 판단된다.

(4) 토목섬유 보강재 설계 시 보강재 설치위치에서의 보강재-흙의 응력, 변위, 변위차 그리고 전단파괴에 대한 안전율 등을 산정하여 최적변형인장강도(TOS)를 채택하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

성토제체내 보강재의 설계에서 보강재의 위치변동에 따른 보강재 위치에서의 흙과 보강재의 응력, 변위, 두 재료간의 변위차 및 안전율을 파악하여 보강재의 설치 위치까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 사단법인 한국지반공학회(1999), 토목섬유 설계 및 시공지침.
2. Bourdeau, Y., Ogunrot, T., Lareal, P., & Riondy, G. 1994. Use of strain gages to predict soil-geotextile interaction in pull-out test. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and

Related Products, pp.451-456, Singapore.

3. C. Beneito, Ph. Gotteland(2001). Three-dimensional numerical modeling of geosynthetics FLAC and Modeling in Geomechanics, A.A.Balkema Publishers, pp.191-192.
4. Giroud, J.P., and Beech, J.F.(1989), "Stability of Soil Layers on Geosynthetic Lining System", in Geosynthetics '89, IFAI, San Diego, CA.
5. Gotteland, Ph. 1991. Reinforcement des sols par geosynthetiques: dimensionnement et validation. These de Doctorat de l'Universite Joseph Fourier de Grenoble, pp.384.
6. Villard, P., Giraud, H.(1998). Three-dimensional modeling of the behavior of geotextile sheets as membranes. Textile Research Journal 68(11).

(접수일자 2003. 10. 22, 심사완료일 2003. 12. 15)