

연약지반상의 토목섬유보강제방의 설계도표개발에 관한 연구

A Study on Development of Design Chart for
Geotextile-reinforced Embankments on Soft Foundations

서 인 식* ¹	김 영 수* ²
Seo, In - Shik	Kim, Young - Su
허 노 영* ³	김 동 규* ³
Heo, No - Young	Kim, Dong - Gyu

Abstract

This paper presents the design chart to evaluate the two-dimensional stability of geotextile-reinforcement embankments on soft foundations. The potential failure surface in this study is assumed as the logarithmic spiral curves refracted at the boundary of layers. To facilitate the iterative calculations, a program that determines the geotextile tensile force for geotextile-reinforcement embankments was developed. This program can be used for situations with a variety of soil layers and soil types. And it can be also used for a static or seismic condition. A series of calculations has been made for a schematised situation. The results of these computation are shown in design charts. Considering static or seismic load state, these charts in the preliminary stage of the design provide a reasonable estimate of geotextile tensile force for geotextile-reinforcement embankments on soft foundations. In the final stage a more detailed calculation can be made by developed programs.

요 지

본 논문은 연약한 기초지반위의 토목섬유 보강제방의 2차원 안정해석을 위한 설계도표를 제시한다. 반복계산을 수행하기 위하여 보강제방의 요구되어지는 안전율에 필요한 보강재의 인장력을 산정하는 프로그램이 개발되었으며, 이 프로그램은 여러개의 토층과 토질로 이루어진 상황에도 사용될 수 있다. 도식화된 단면에 대하여 많은 계산결과들이 만들어 졌으며, 그 결과들로서 설계도표를 만들었으며, 정적인 경우와 지진하중을 고려할 경우에도 적용시킬 수 있다. 예비설계단계에서 이러한 도표들을 이용하여 보강제방에 대한 비교적 정확한 보강재의 인장력을 근사적으로 구할 수 있으며, 실시설계단계에서는 개발된 프로그램에 의하여 정확한 결과를 산정할 수 있다.

Keywords : Refraction, Geotextile tensile force, Design chart, Specified safety factor

*1 정희원, 경동정보대학 토목과 조교수

*2 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*3 정희원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

토목섬유에 관한 이론적, 실험적 연구는 1961년 Agershou에 의해 최초로 필터용 토목섬유의 사용에 관한 논문이 발표된 이래 꾸준한 특성시험방법들과 토목섬유의 이론적 해석 방법들에 대해서도 많은 연구가 수행되어 그 종류도 다양하게 개발되고 적용분야도 확대되어 가고 있으며, 국내에서도 그 시공성과 경제성 등이 입증되어 사용실적과 사용범위가 날로 증가추세를 보이고 있다.

Jewell(1982) 등은 Simplified Bishop방법을 사용하여 토목섬유가 사면안정에 미치는 효과를 고찰하였으며, Christie & El-Hadi(1977)는 여러 층의 토목섬유로 보강된 사면의 안정효과를 연구하였다. 그러나 토목섬유 보강사면에 대한 연구나 이론적 정립이 아직은 미약한 실정이다.

보강사면 해석의 파괴면은 Two-part Wedge형, 원호형, 대수나선형 그리고 복합직선형 등이 있으나 기존의 대부분의 연구가 원호형이었다. 그러나 실제에 있어서는 비원호파괴가 많이 발생하고 있으며, 여러 층으로 형성된 사면에서는 복합대수나선이거나 복합직선파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 근래에는 대수나선형에서 출발한 Two-part Wedge 해석도 많이 있다. 따라서, 연약지반위의 토목섬유 보강제방의 경우 파괴면을 원호로 가정하는 것보다 연약지반과 제방의 층 경계에서 파괴면이 굴절하는 대수나선이 더 적당하다(서, 김, 1994).

본 연구에서는 연약지반상의 도로나 철도의 건설시 이루어지는 토목섬유 보강제방의 안정성을 검토할 수 있는 실용적이고 체계적인 해석모델과 프로그램을 개발하여 사면파괴를 정확히 예측하고, 보강제방의 예비설계에서 광범위한 적용성을 확보하기 위하여 가정한 도식적인 사면에 대한 일련의 계산결과들로서 설계도표를 작성하는데 그 목적을 두었다.

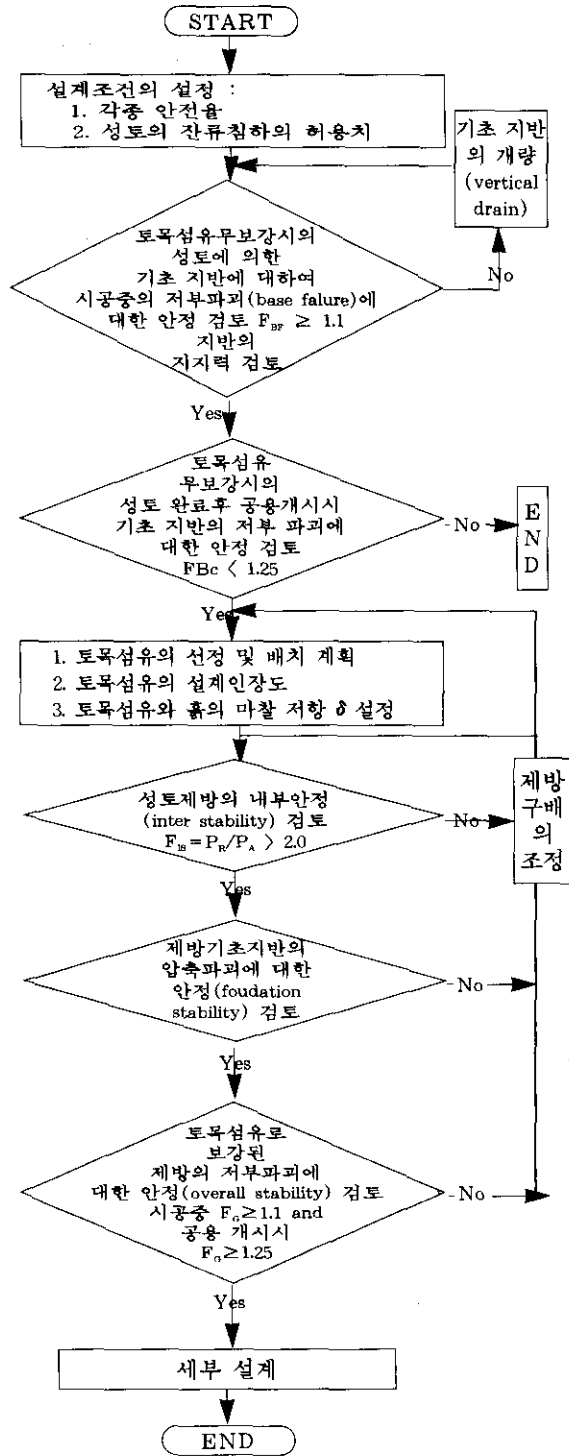


그림 1. 연약지반상의 성토제방에 토목섬유를 적용한 경우의 설계순서도

2. 토목섬유보강제방의 설계순서

본 설계순서는 기초지반의 표층이나 성토의 하부에 토목섬유를 부설하여 기초지반의 활동 파괴에 대한 성토의 안정성을 확보하는 공법으로서 적용되었다. 그리고 토목섬유의 설계순서(財團法人 土木研究センター, 1993)는 그림 1과 같다.

3. 안정해석방법

3.1 대수나선파괴면 굴절

보강사면의 가능파괴면을 대수나선으로 가정하면, 흙의 내부마찰각의 함수이기 때문에 연약층과 성토층의 경계에서 가능파괴면은 굴절하게 된다.

내부마찰각이 ϕ_m 인 m 토층에서 ϕ_{m-1} 인 $m-1$ 토층으로 가능파괴면이 진행할 때, 파괴면이 굴절하는 형태는 다음의 그림 2에 나타내었다.

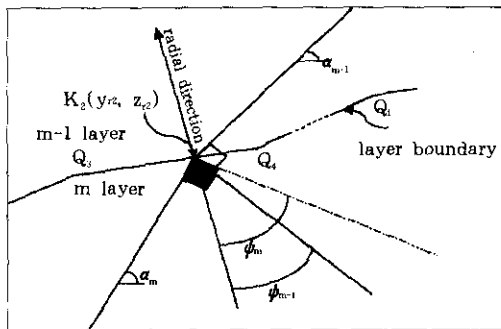


그림 2. 대수나선파괴면의 굴절

그림 2에서 파괴면이 통과하는 토층의 경계면 중의 한 점인 $K_2(y_{r2}, z_{r2})$ 에서의 접선의 기울기의 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다 (Baker et. al., 1978).

$$\alpha_{m-1} = \alpha_m + (\phi_{m-1} - \phi_m) \quad (1)$$

위의 식에서 첨자들은 각각의 토층을 의미한다.

식 (1)은 “가능파괴면은 토층의 경계에서 굴절하여 다른 토층으로 진행하여도 대수나선의 극은 불변이다.”라는 것을 의미한다. 왜냐하면 대수나선의 활동면에서 세운 법선과 반경벡터는 언제나 그 층의 ϕ 와 같은 각도를 이루기 때문이다.

3.2 지진 하중

지진하중을 고려함에 있어서는 진도법을 이용한 절편법 적용하였다. 그리고, 수평진도 K_h 와 수직진도 K_v 로 구분하여 고려할 수 있는데, 지진에 대한 K_v 성분은 상대적으로 작으므로 K_h 만 고려한다.

지진시의 수평과 수직진도를 고려한 절편법에 의한 사면안정해석에서, i 번째 절편에 대한 힘의 다각형은 그림 3과 같다.

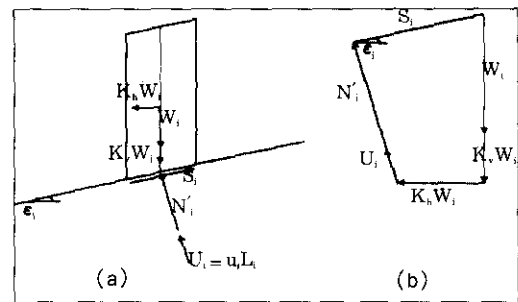


그림 3. i 번째 절편에 대한 힘의 다각형

3.3 보강사면의 안전율

본 연구에서 가능파괴면은 대수나선으로 가정하였으며 토목섬유의 인장력을 수평력으로 가정하여 해석하였다. i 번째 절편의 양 측면에 작용하는 전체 수직력과 전단력은 서로 평형을 이루는 것으로 가정하면, 절편저면에 대하여 수직인 방향($n-n$ 방향)에 대한 힘의 평형방정식은 다음과 같다.

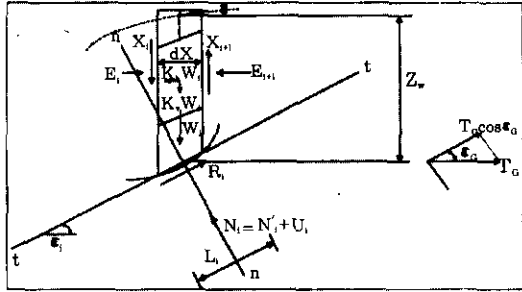


그림 4. 파괴면의 i번째 절편에 작용하는 힘

$$\Sigma F_n = 0$$

$$W_i \cos \epsilon_i - N'_i - u_i L_i - K_h W_i \sin \epsilon_i + K_v W_i \cos \epsilon_i = 0$$

$$N'_i = W_i \cos \epsilon_i - u_i L_i - K_h W_i \sin \epsilon_i + K_v W_i \cos \epsilon_i \quad (2)$$

사면의 임의의 단면에서(그림 4 참조)의 i번째 절편의 파괴면을 따라 활동에 저항하는 힘, $R(X_0)$ 와 활동을 일으키는 힘, $S(X_0)$ 는 다음과 같다(서, 1994, 1995).

$$R(X_0) = \sum_{i=1}^n (c_i L_i + N'_i \tan \phi_i)$$

$$= \sum_{i=1}^n (c_i L_i + [(W_i \cos \epsilon_i - u_i L_i) - K_h W_i \sin \epsilon_i + K_v W_i \cos \epsilon_i] \tan \phi_i) \quad (3)$$

$$S(X_0) = \sum_{i=1}^n (W_i \sin \epsilon_i + K_h W_i \sin \epsilon_i + K_v W_i \sin \epsilon_i) \quad (4)$$

그리고, 토목섬유의 인장력이 접선방향으로 작용하는 것으로 가정하여 고려하면 보강사면의 안전율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_G = \frac{R(X_0) + T_G \cos \epsilon_G}{S(X_0)}$$

$$= \frac{\sum [c_i L_i + \{(W_i \cos \epsilon_i - u_i L_i) - K_h W_i \sin \epsilon_i + K_v W_i \cos \epsilon_i\} \tan \phi_i] + T_G \cos \epsilon_G}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \epsilon_i + K_h W_i \sin \epsilon_i + K_v W_i \sin \epsilon_i)} \quad (5)$$

여기서,

n = 절편의 수

W_i = i번째 절편의 단위중량

ϵ_i = i번째 절편저면의 수평저면에 대한 경사각

L_i = 파괴면의 i번째 절편저면의 길이

u_i = 지하수위로부터 계산된 i번째 절편저면에 작용하는 간극수압

c_i = i번째 절편의 점착력

ϕ_i = i번째 절편의 내부마찰각

K_h = 수평진도

T_G = 토목섬유의 인장력

ϵ_G = 파괴면의 토목섬유지점에서의 접선각

Z_w = 절편저면에서 지하수위의 높이

E_i = i번째 절편측면의 수평력

N_i = i번째 절편저면의 수직력

U_i = i번째 절편저면의 간극수압

4. 해석 프로그램

본 연구에서 개발된 프로그램은 앞 장의 안정해석방법에서 제시된 해석모델에 대한 수치계산을 수행할 수 있으며, 프로그램의 간략한 흐름도는 다음의 그림 5와 같다.

본 프로그램은 불규칙한 토층경계와 여러층으로 구성된 사면에 적용할 수 있으며, 지하수위도 입력하여 고려할 수가 있다. 그리고 주어진 사면안전율에 대한 요구되는 토목섬유의 인장력을 구할 수 있으며, 주어진 토목섬유의 인장력에 대한 사면안전율을 구할 수 있다. 또한 본 프로그램은 연약지반상에 토목섬유 한 층을 포설한 후 성토를 행한 사면에 적용가능한 연약지반상의 토목섬유 보강 성토사면의 안정해석 프로그램이다.

5. 보강사면의 설계도표 작성

연약한 지층 위의 토목섬유 보강사면에 대한 설계를 위하여 앞 절에서 제시된 해석모델의 절차에 의하여 개발된 토목섬유 보강성토사면 안정해석 프로그램으로 주어진 사면안전율에 대하여 요구되는 토목섬유의 인장력을 계산할 수 있으며, 그림 6에 주어진 조건에 대하여 일련의 계산을 수행하였다. 본 계산에 이용된

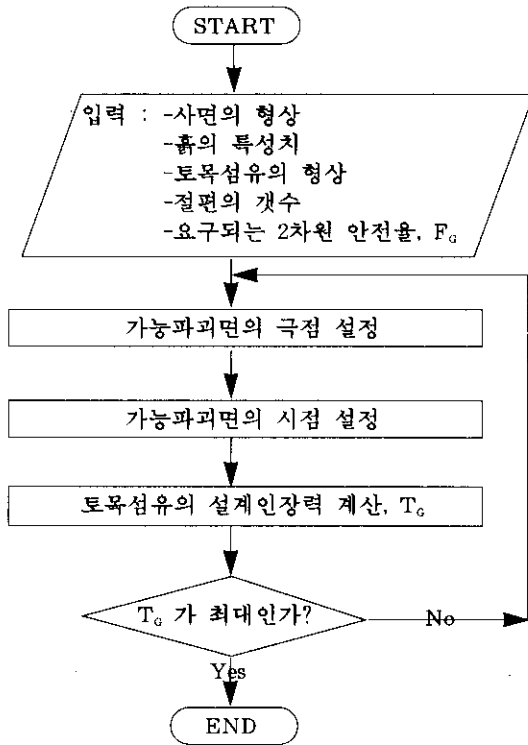


그림 5. 토목섬유의 인장력 계산을 위한 순서도

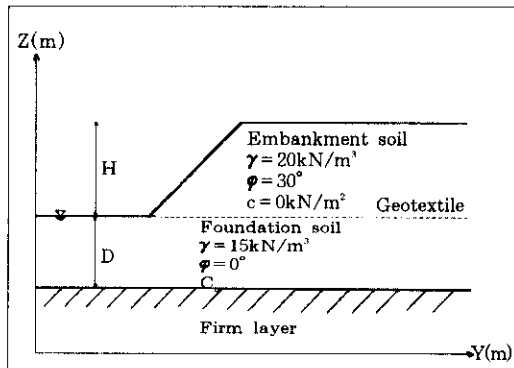


그림 6. 설계도표에 사용된 사면의 종단면도

사면에서 성토재는 사질토로 가정하였고, 연약 점토층지반은 성토에 의한 측방유동 등이 발생하지 않을 정도로 강도를 가진 것으로서 비배수 점착력(C_u)로 나타내어 진다.

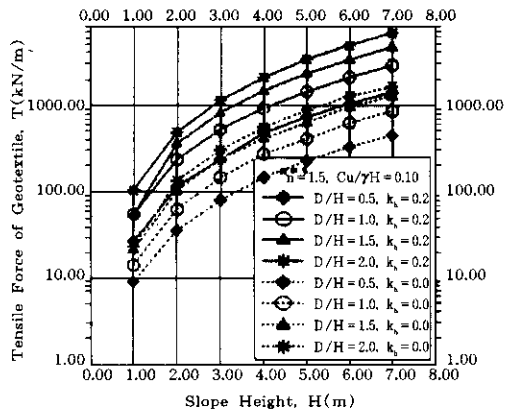
계산을 수행하기 위한 기본적인 가정은 다음과 같다: 1) 정적인 경우와 지진의 영향을 받는 두 경우에 대하여 수행하였다. 2) 요구되는 사면안전율은 $F_s=1.30$ 으로 하였다. 3) 정적인 경우와 지진의 영향을 받는 경우, 각각에 대해 요구되는 토목섬유의 인장력을 동일한 도표에서 비교하여 설계도표를 작성하였다. 4) 설계도표의 광범위한 적용성을 확보하기 위하여 사면의 경사가 1:n 일 때, $n=1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ 으로, $D/H=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 으로, $C_u/\gamma H=0.10, 0.15, 0.20$ 으로 각각 변화시켜 적용하였다. 5) 수평진도는 $K_h=0.2$ 로 가정하였다.(HUESKER, 1996)

계산 결과 작성된 설계도표는 그림 7부터 그림 10까지에 제시하였고, 도표 상에서 “직선”으로 표시된 것은 지진의 영향을 고려한 경우에 대한 것이며, “파선”으로 표시된 것은 정적인 경우에 대한 것이다. 연약지반상의 토목섬유 보강사면의 예비설계단계에서 이러한 도표들을 사용하여 토목섬유의 인장력을 쉽게 예측할 수 있으며, 제시된 설계도표에 대한 사면조건과 다른 경우에는 제시된 도표에 의한 값을 이용하여 보간법 및 외삽법으로 토목섬유의 인장력을 추정할 수 있다.

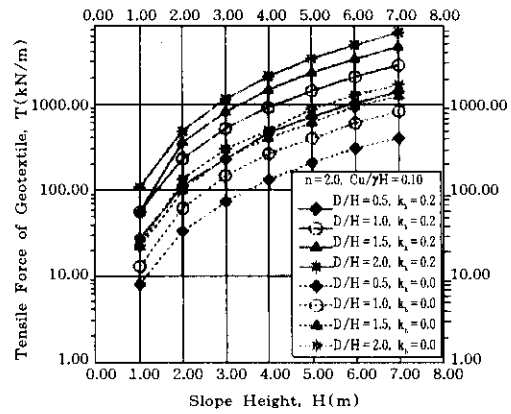
6. 결 론

연약지반상의 성토사면의 안정을 위하여 토목섬유로 보강하였을 때의 안정해석모델을 제시하고 전산 프로그램을 개발하였으며, 실제 예에 이 프로그램을 적용, 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

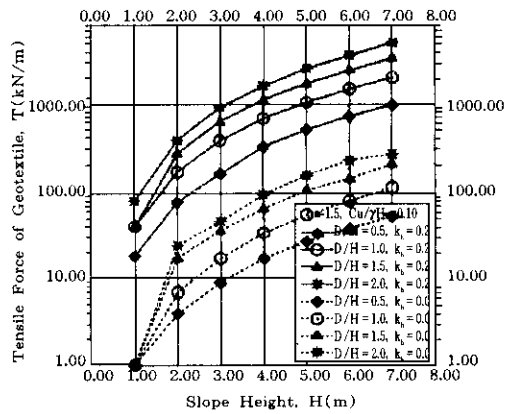
- 1) 토목섬유 보강성토사면에 대한 해석프로그램을 개발하였으며, 본 해석모델의 가능 파괴면은 이질토층의 경계에서 파괴면이 굴절하는 대수나선을 이용하였고, 토목섬유는 기초지반과 성토층 사이에 한 층을 포설한 것으로 가정하였다. 이 프로그램은 여러 층의 토질과 변화하는 토층 그리고 임의의 지하수위에 대하여



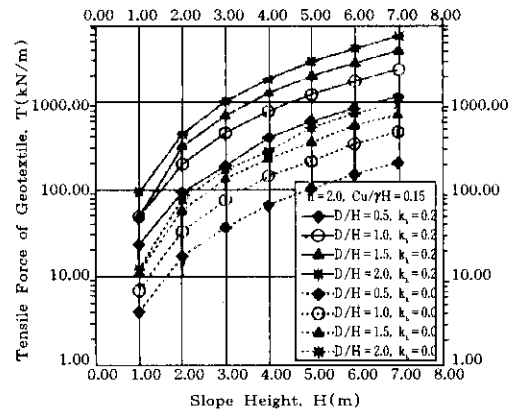
(a) $Cu/\gamma H = 0.10$



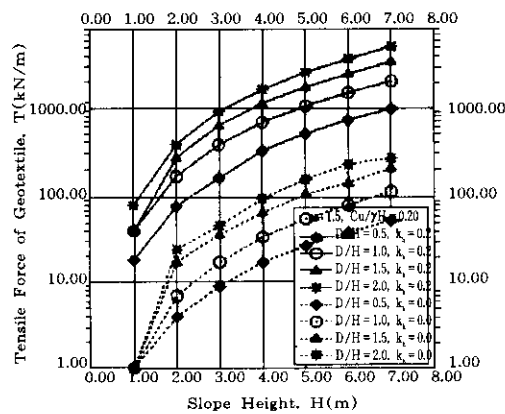
(a) $Cu/\gamma H = 0.10$



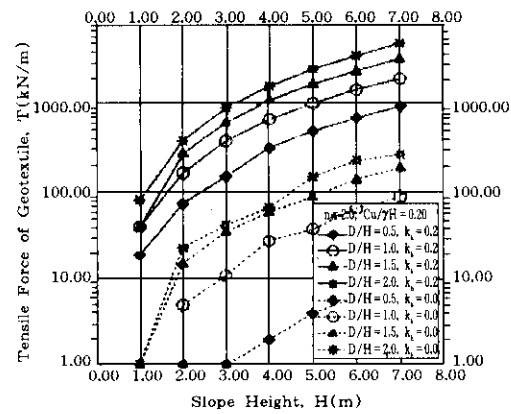
(b) $Cu/\gamma H = 0.15$



(b) $Cu/\gamma H = 0.15$



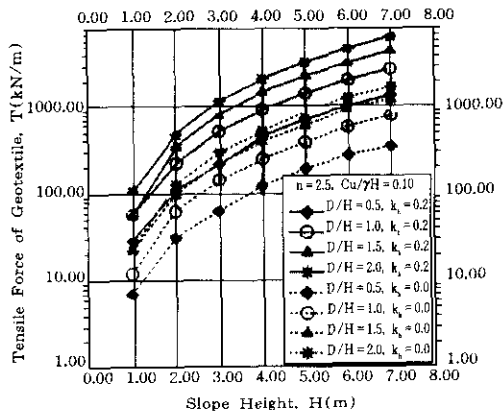
(c) $Cu/\gamma H = 0.20$



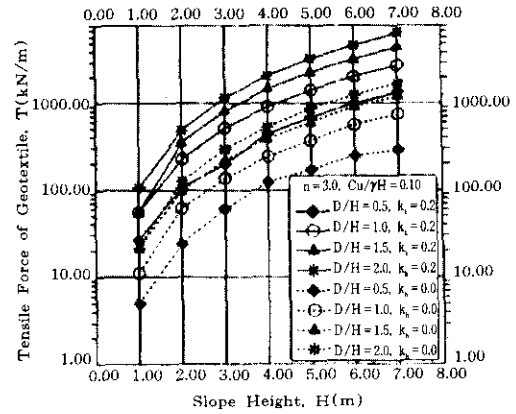
(c) $Cu/\gamma H = 0.20$

그림 7. 설계도표 A($n=0.15$)

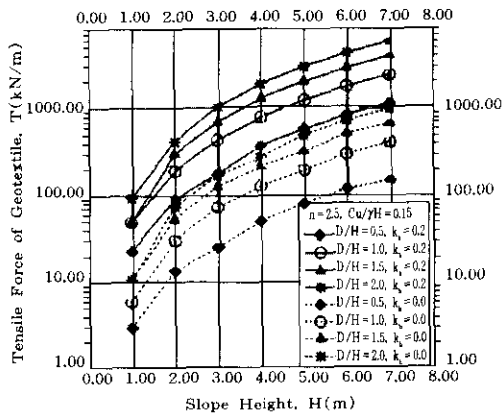
그림 8. 설계도표 B($n=0.20$)



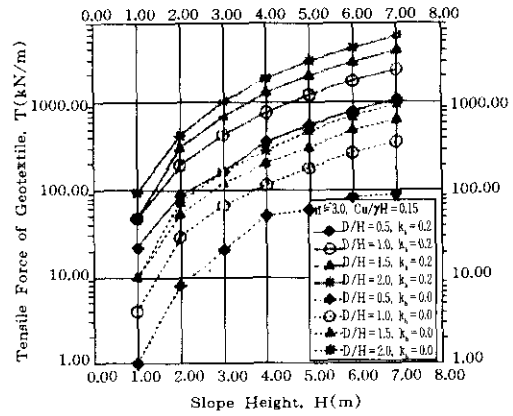
(a) $Cu/\gamma H = 0.10$



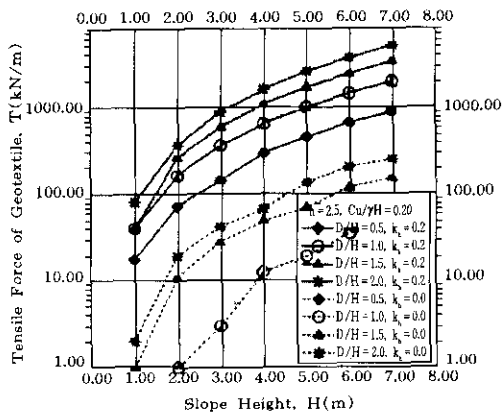
(a) $Cu/\gamma H = 0.10$



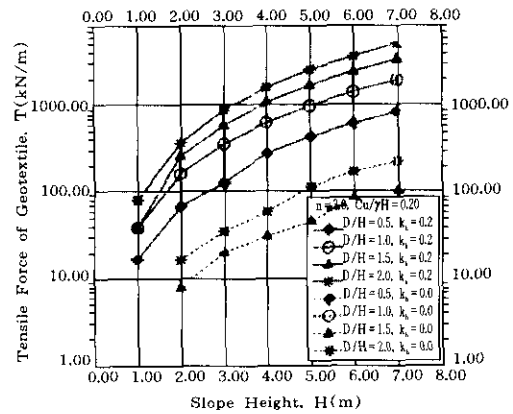
(b) $Cu/\gamma H = 0.15$



(b) $Cu/\gamma H = 0.15$



(c) $Cu/\gamma H = 0.20$



(c) $Cu/\gamma H = 0.20$

그림 9. 설계도표 C ($n = 0.15$)

그림 10. 설계도표 D ($n = 0.20$)

서도 수행 가능하다.

- 2) 토목섬유 보강성토사면에 대하여 일련의 계산을 통해 설계도표들을 작성하였고, 이 도표들은 보강사면의 예비설계에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 제시된 설계도표에 대한 사면조건과 다를 경우에는 제시된 도표에 의한 값을 이용하여 보간법 및 외삽법으로 토목섬유의 인장력을 추정할 수 있다.
- 4) 제시된 설계도표를 이용하여 정적인 경우와 지진의 영향을 고려한 보강사면에 대한 토목섬유의 인장력을 추정할 수 있다.
- 5) 본 해석모델에서는 토목섬유와 토사 사이의 상호작용관계가 고려되지 않았으며, 토목섬유의 응력분포, Creep 거동 등이 고려되지 않았으므로 정확한 해석을 위하여 그 관계를 규명하여 해석모델에 첨가하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 서인식, 김영수 (1994), "대수나선과괴에 대한 확률론적 3차원 사면안정해석," 한국지반공학회지, 제10권, 제2호, pp. 121-137.
2. 서인식 (1997), "토목섬유 보강사면의 안정도표에 관한 연구," 한국지반공학회지, 제13권, 제4호, pp. 67-74.
3. 財團法人 土木研究センター ジオテキスタイル補強土工法普及委員會(1993), 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. 209-215.
4. HUESKER Synthetics GmbH & Co. 한국총대리점 (주)벽진인터내셔널 (1996), Design Guidelines for Reinforced Embankments on Soft Subsoil using Stablenka Reinforcing Mats, pp. 34-37.
5. Baker, R. and Garber, M. (1978), "Theoretical Analysis of the Stability of Slopes," Geotechnique, Vol. 28, No. 4, pp. 395-411.
6. Christie I.F. & EI-Hadi K.M. (1977), "Some Aspect of the Design of Earth Dams Reinforced with Fabric", Proc. Int. Conf. on Use of Fabrics Geotechnics, Paris, Vol.1, pp. 99-103.
7. Jewell, R. A. (1982), " A Limit Equilibrium Design Method for Reinforced Embankments on Soft Soils," Second International Conference of Geotextile, Las Vegas.

(접수일자 1998. 6. 8)