

補強斜面에 대한 Centrifuge Test와 Two-part Wedge
解析의 比較評價
Comparison and Evaluation of Two-part Wedge Analysis for
Reinforced Slopes with Centrifuge Test

서인식*, 이친**, 김병탁***
In-Shik Seo*, Chin Lee**, Byung-Tak Kim***

<Abstract>

Results of two-part wedge analysis and centrifuge test executed by Zornberg et al. were compared for geotextile-reinforced slope stability. For two-part wedge analysis results of two cases, a frictional case considering internal friction of soil as interwedge friction and a nonfrictional case not considering, were also compared and evaluated. The analysis was based on limit equilibrium and two-part wedge was divided into slices as many as the number of geotextiles to obtain a maximum tension distribution mobilized in reinforcements. A significant observation was that the distribution was a triangular shape with maximum tension of geotextile at a transit point of interwedge. The number of geotextiles and failure surface of frictional case were reasonable and more comparable to results of the centrifuge tests than those of nonfrictional case. Therefore it can be said that two-part wedge analysis is recommendable for design analysis of reinforced slopes if an interwedge angle is regarded to be an angle of internal friction in soil.

Keywords: *two-part wedge, centrifuge test,
total required reinforcement*

* 정회원, 경동정보대학 토목과, 조교수, 공학박사
** University of Southern California, 박사과정수료
*** 경북대학교 대학원 토목공학과, 박사과정수료

Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering,
Kyungdong College.
E-mail : isseo@serve.kyungdong-c.ac.kr

1. 서론

1980년대 초 이래로 보강사면의 설계에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 보강사면의 해석방법으로는 흙썰기형(Coulomb Wedge), Two-part Wedge형, 원호형 및 대수나선형 등이 있으나, 대다수의 연구는 Two-part Wedge형으로 해석되고 있다. 그리고 이들 대부분의 연구는 Geotextile의 인장력의 분포도를 저면에서 극한/허용 인장력인 삼각형 분포로 가정하여 설계하여 왔다. 한편, Two-part Wedge해석에 의한 보강사면의 설계에 있어 Bonaparte 등(1985, 1986)은 흙썰기 사이의 마찰각을 흙의 내부마찰각으로 가정($\delta = \varphi$)하였으나, Jewell(1991)은 흙썰기 사이의 마찰각을 고려하지 않았다($\delta = 0$).

본 논문의 연구목적은 Zornberg 등(1995)에 의해 시행된 보강사면에 대한 Centrifuge Test의 결과와 Two-part Wedge 해석을 비교·평가하는데 있다. 특히 흙썰기들 사이의 마찰각이 0인 경우와 흙의 내부마찰각인 경우를 비교하였다. 해석방법으로는 한계평형 해석을 기초로 하였으며, 특히 Geotextile의 인장력 분포도를 정의하기 위하여 Two-part Wedge를 Geotextile 수만큼의 절편으로 나누어 계산하였다. 본 논문에서는 안정지반 위의 조립성토 사면에 대해 국한하였다.

2. Two-part Wedge 해석

일반적으로 Two-part Wedge 해석은 계산의 간편성을 위하여 사면토괴를 두 부분으로 이루어진 강체로 가정하며, 두 개의 흙썰기가 각각 한계평형 상태라고 간주하여 해석한다. 이때 흙썰기들 사이의 마찰각을 0인 경우($\delta = 0$)와 흙의 내부마찰각인 경우($\delta = \varphi$)로 가정할 수 있다(그림 1). 그러나 일반적인 Two-part Wedge 해석으로는 각각의 Geotextile의 인장력을 정의하기가 불가능하므로 인장력 분포도를 저면에서 극한/허용 인장력(최대 인장력)인 삼각형분포로 가정하여 보강사면을 설계하고 있다.

본 논문에서는 Geotextile의 인장력 분포도를 정의하기 위하여 그림 2와 같이 두 개의 흙썰

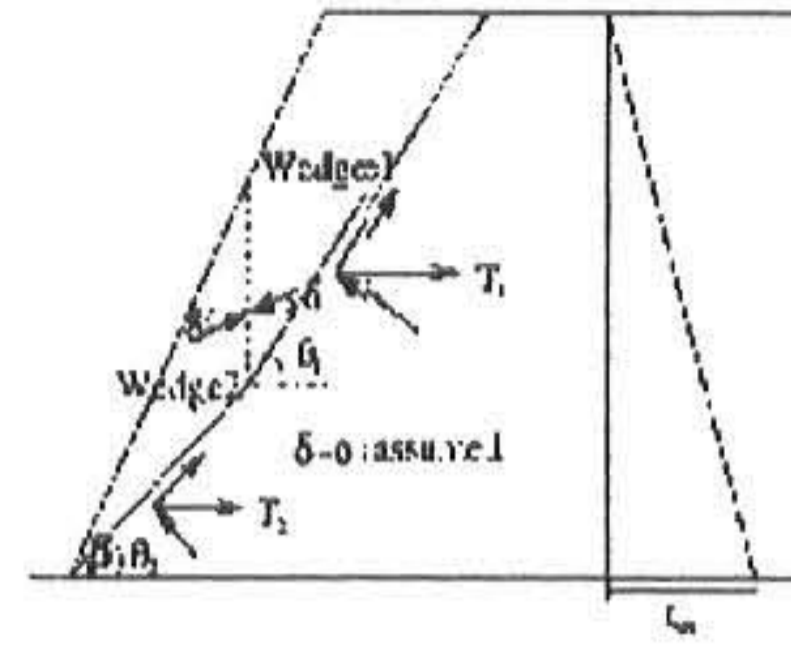


그림 1. 일반적인 Two-part Wedge와 Geotextile의 인장력 분포도

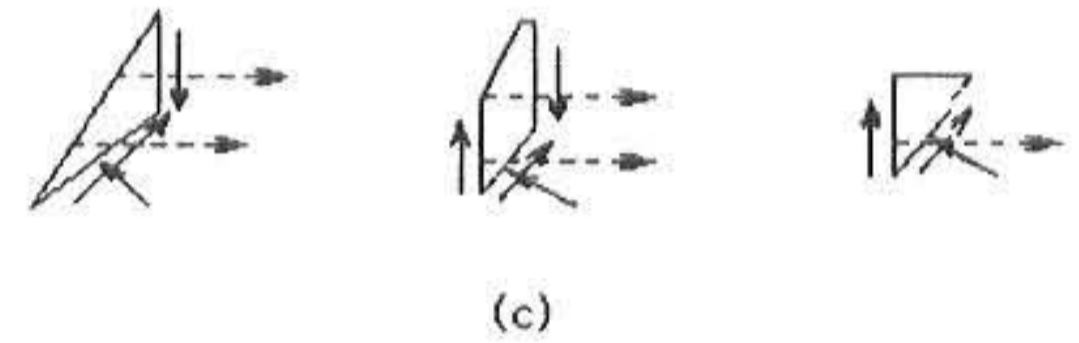
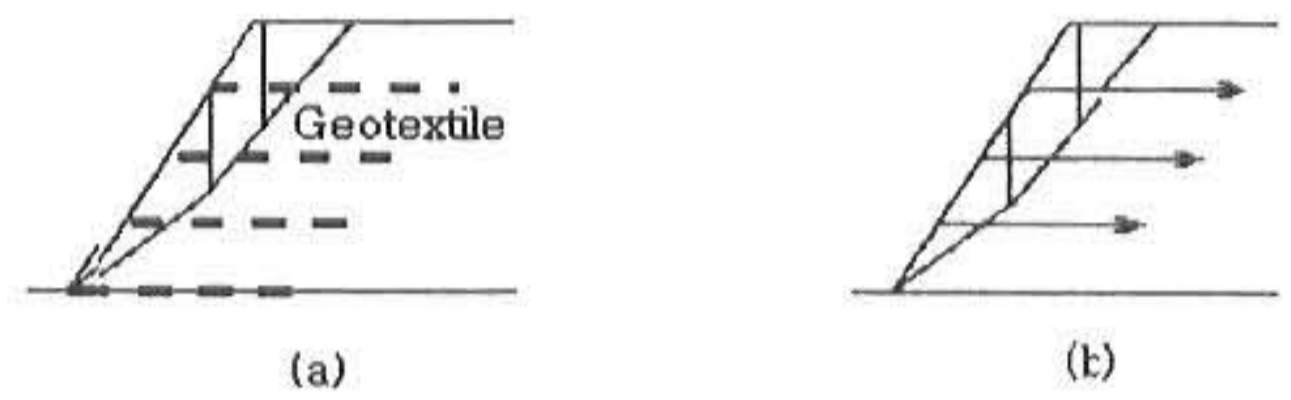


그림 2. 수정된 Two-part Wedge 해석

기를 Geotextile 수 만큼의 절편으로 나누었으며, 각 흙썰기 내에서의 각각의 절편의 수평력은 절편의 면적에 비례하며 Geotextile의 인장력은 수평방향으로만 작용한다고 가정하였다.

Two-part Wedge 해석에서, 사면의 파괴력 (T_{max})은 흙의 단위중량(γ)에 비례하고 사면높이의 제곱(H^2)에 비례한다. 즉,

$$T_{max} = \frac{1}{2} \gamma H^2$$

사면의 파괴력은 사면의 경사(β), 점착력(c) 그리고 흙의 내부 마찰각(φ)의 함수이다.

위의 가정에 근거하여 Geotextile의 인장력을 계산하여 도시한 Geotextile 인장력 분포도는 두 개의 흙썰기들 사이의 변환점에서 인장력이

최대인 삼각형 분포도로 나타났다. 이는 변환점 부근의 Geotextile로 부터 파괴가 일어날 것을 예상할 수 있다.

그림 3은 Zornberg 등(1995)의 Centrifuge Test에 사용된 B형 모델(Table 1 참조)에 대하여, 흙층들 사이의 마찰각을 흙의 내부마찰각인 경우($\delta = \phi$)로 가정한 Two-part Wedge 해석에 의한 파괴면과 인장력 분포도이다.

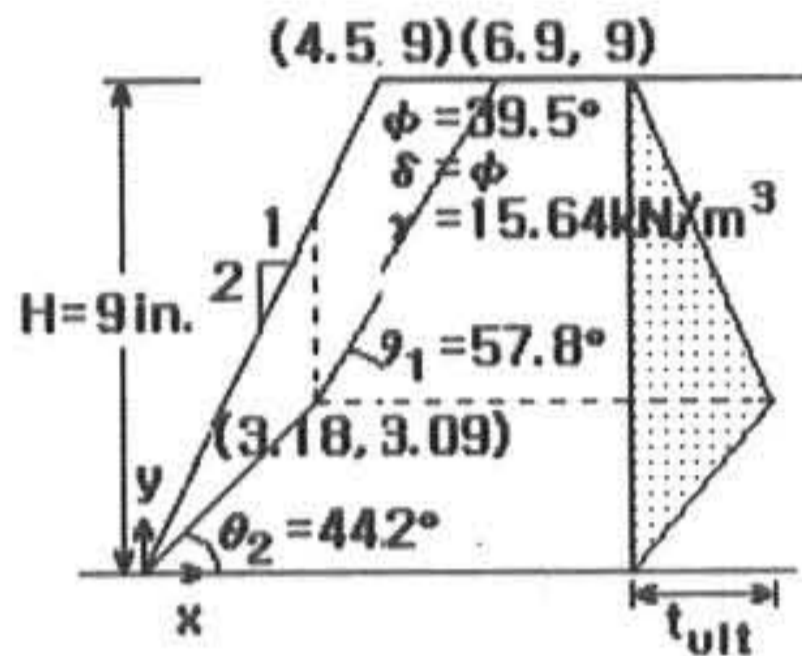


그림 3. Monterey Sand에 대한 Two-part Wedge 해석 (Zornberg, 1995)

3. Centrifuge Test

Zornberg 등(1995)에 의해 시행된 Geotextile의 보강사면에 대한 Centrifuge Test의 모델은 흙의 특성과 Geotextile의 인장강도에 따라 B형, D형, S형으로 분류된다(표 1 참조). B형은 Geotextile의 수가 18, 12, 9, 6개로 구성하였으며, D형과 S형은 12, 6개로 구성하였다. 이 시험에 사용된 재료는 Monterey Sand($c = 0$)로써 상대밀도가 55%와 75%이고, 흙의 내부마찰각이 각각 39.5° 와 42.5° 이며, 흙의 단위중량이 각각 15.64 kN/m^3 와 16.21 kN/m^3 이다. 그리고 사면의 경사가 2V : 1H이고, 사면의 높이가 9 inch이다. 그리고 Geotextile은 인장강도가 0.123 kN/m와 0.184 kN/m인 것을 사용하였다.

이 시험의 결과, g-level이 Table 1과 같이 76.5(B18), 60(B12), 37(B9), 21(B6), 66(D12), 29(D6), 52.5(S9), 32(S6)일 때 보강사면의 파괴가 일어났으며, 그 파괴면은 그림 4(B형), 5(D형), 6(S형)과 같다. Zornberg 등(1995)에 의하면 Geotextile의 최대 인장력은 사면높이의 저면부나 상부가 아닌 중간 부분에서 발견되며 또한

그 부분에서 최초로 인장강도에 이르며 결국 최초파괴가 일어난 것으로 기술하고 있다. 그리고 파괴의 종류는 보강재는 충분히 묻혀있게 하므로 보강재의 인발파괴가 아닌 보강재의 절단파괴가 일어난 것이었다.

표 1. Monterey Sand에 대한 Centrifuge Test의 결과

Models	B18	B12	B9	B6	D12	D6	S9	S6
Geotextile 수	18	12	9	6	12	6	9	6
상대밀도 (%)	55	55	55	55	75	75	55	55
단위중량 (kN/m^3)	15.64	15.64	15.64	15.64	16.21	16.21	15.64	15.64
마찰각 ($^\circ$)	39.5	39.5	39.5	39.5	42.5	42.5	39.5	39.5
인장강도 (kN/m)	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.184	0.184
파괴시의 g-level	76.5	60	37	21	66	29	52.5	32

4. Centrifuge Test와 Two-part Wedge 해석의 비교

표 2에서는 표 1의 g-level 값을 이용하여 사면의 파괴력(T_{\max})과 요구되는 Geotextile의 수(n)를 Two-part Wedge 해석에 의한 역해석(Back Analysis) 방법으로 계산한 결과를 나타내었다. 사면높이를 6m로 가정함으로써 사면의 파괴력과 Geotextile의 인장강도(t_{ult})를 수정하여 계산하였다.

$$T_{\max} = n t_{ult} N_f$$

$$n = \frac{T_{\max}}{t_{ult} N_f}$$

N_f 는 g-level의 값이며 Geotextile의 수(n)는 올림한 정수로 나타낼 수 있을 것이다.

Two-part Wedge 해석의 $\delta = \phi$ 인 경우에 요구되는 Geotextile의 수는 Centrifuge Test에 사용된 Geotextile의 수와 거의 일치함을 보인다. 그러나 $\delta = 0$ 인 경우에 요구되는 Geotextile의 수는 $\delta = \phi$ 인 경우보다는 일치하지 않음을 알 수 있다.

표 2. Monterey Sand에 대한 Two-part Wedge 해석의 결과

Models	B18	B12	B9	B6	D12	D6	S9	S6
T_{max} (kN/m) ($\delta = 0$)	3.000	2.354	1.452	0.824	2.069	0.909	2.060	1.255
Geotextile의 수 ($\delta = 0$)	25	20	12	7	17	8	12	7
T_{max} (kN/m) ($\delta = \phi$)	2.313	1.814	1.119	0.635	1.577	0.693	1.588	0.968
Geotextile의 수 ($\delta = \phi$)	19	15	10	6	13	6	9	6

그림 4, 5, 6에서는 Two-part Wedge 해석과 Centrifuge Test의 파괴면을 비교할 수 있다. Centrifuge Test의 파괴면에 Two-part Wedge 형과 같이 변환점이 발견되며, $\delta = \phi$ 이며 g-level이 작은 경우에는 두 파괴면이 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 g-level이 큰 경우에는 두 파괴면이 일치하지 않음을 알 수 있으며, 이는 초기붕괴 이후 g-level의 증가로 인한 연속파괴로 붕괴토사량이 증가하기 때문일 것으로 생각된다. $\delta = 0$ 인 경우에는 일반적으로 변환점이 $\delta = \phi$ 인 Two-part Wedge 해석과 Centrifuge Test의 파괴면보다 아래부분에 위치함을 알 수 있다.

이들을 종합하여 보면 보강사면의 안정해석 방법으로 $\delta = \phi$ 인 경우로 가정하는 Two-part Wedge 해석법이 추천할 만 하다고 할 수 있다.

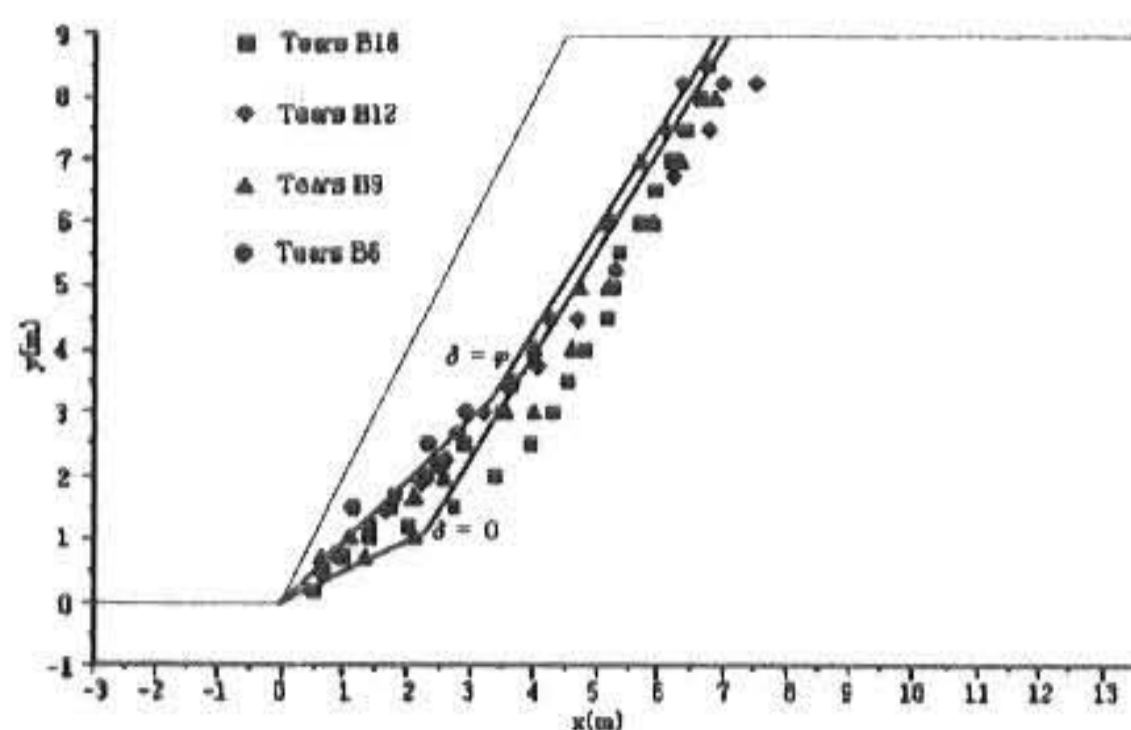


그림 4. Centrifuge Test와 Two-part Wedge의 파괴면(B형 모델)

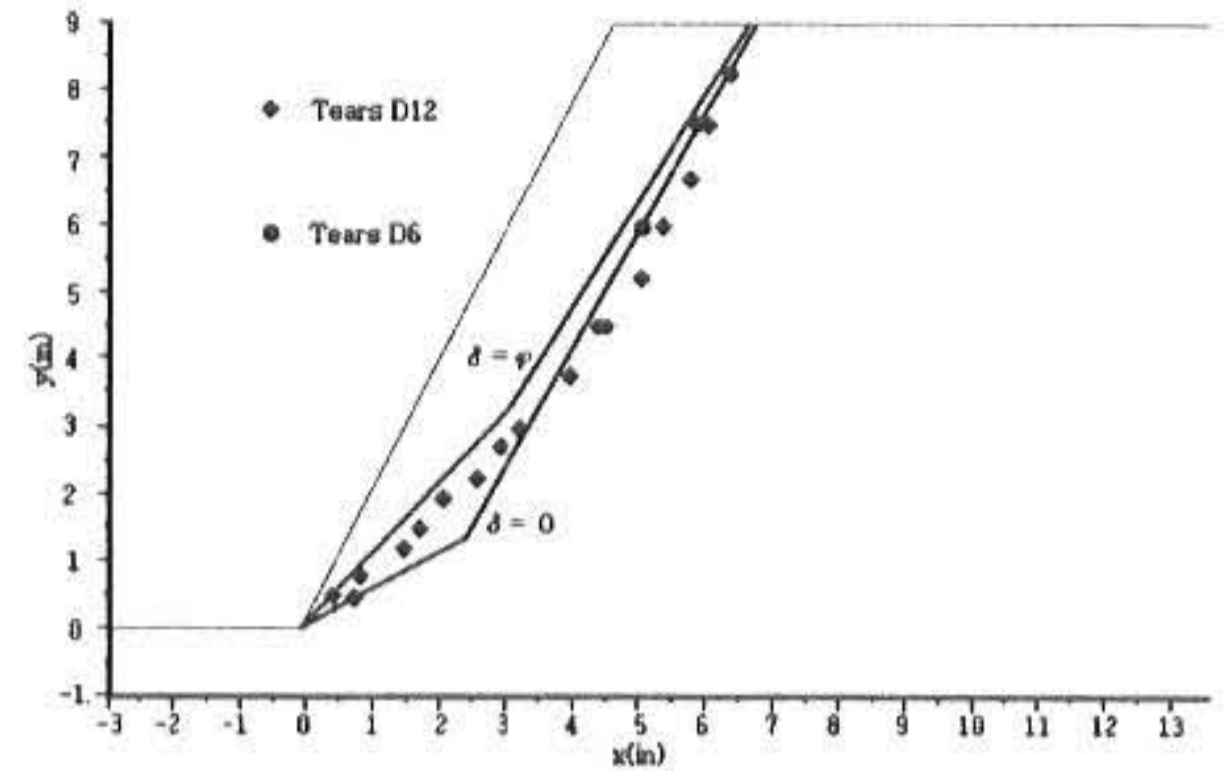


그림 5. Centrifuge Test와 Two-part Wedge의 파괴면(D형 모델)

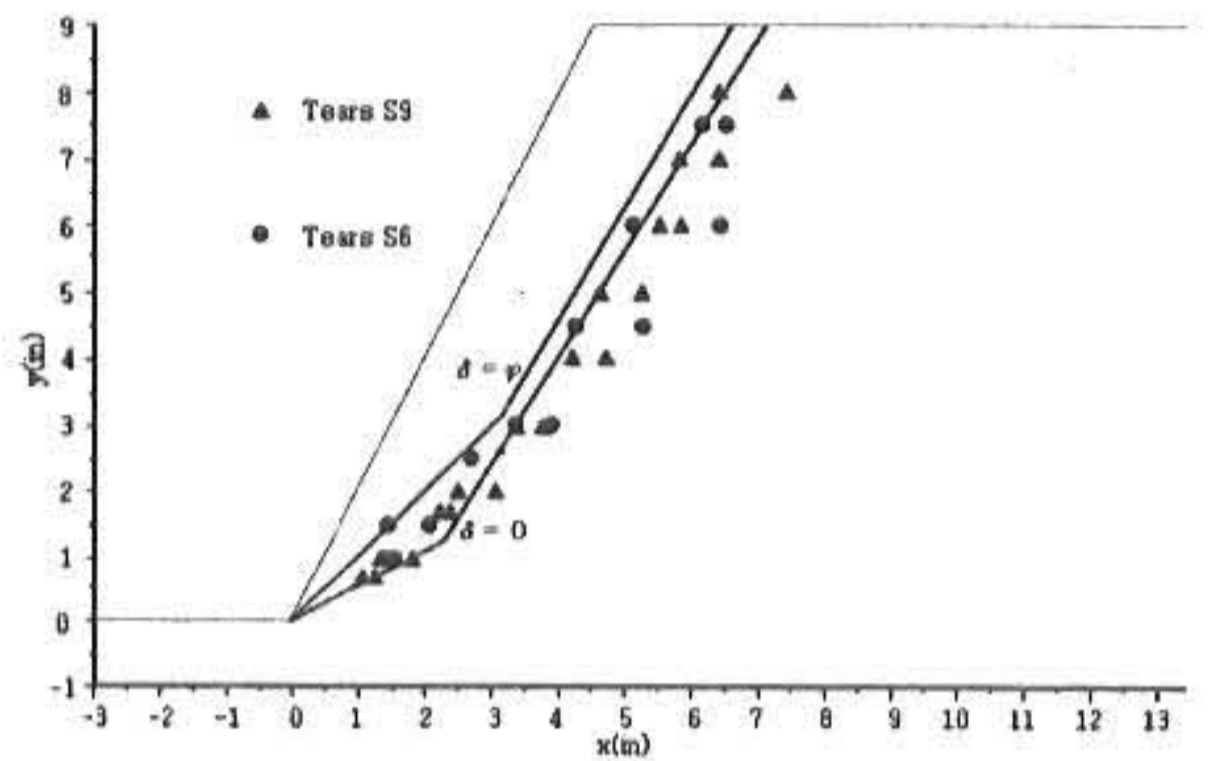


그림 6. Centrifuge Test와 Two-part Wedge의 파괴면(S형 모델)

5. 결론

본 연구에서는 geotextile 보강사면에 대한 새로운 two-part wedge 해석법을 제안하였으며, 이 방법의 타당성을 알아보기 위하여 centrifuge test결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) geotextile 보강사면에서 발생하는 인장력의 분포는 기존에 많이 알려진, 저면이 최대인 장력인 삼각형 분포는 아니다.
- (2) 제시된 two-part wedge 해석법에서 흙층 사이의 마찰각은 $\delta = \phi$ 로 가정하는 것이 더 추천할 만 하다고 할 수 있다.
- (3) 본 연구를 통하여 얻은 결론을 보강사면의 설계에 적용하기 위해서는 더 충분한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Bonaparte, R., Holtz, R. D. and Giroud, J. P. (1985), "Soil Reinforcement Design Using Geotextiles and Geogrids," ASTM Special Technical Publication 952(PCN 04-952000-38), pp. 68-116, ASTM Committee D-35 on Geotextiles, Geomembranes and Related Product, Los Angeles, CA.
2. Bonaparte, R., Schmertmann, G. R. and Williams, N. D. (1986), "Seismic Design of Slopes Reinforced with Geogrids and Geotextiles," Foundations and Reinforced Embankments 2/5, pp. 273-278, Third International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria.
3. Cristopher, B. R. and Holtz, R. D. (1985), "Geotextiles Engineering Manual," National Highway Institute, FHWA, Washington, D.C.
4. Duncan, J. and Wright, S. (1980), "The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis," Engineering Geology 16(1), pp. 1-17.
5. Ingold, T. S. (1982), "An Analytical Study of Geotextiles Reinforced Embankments," Proc., 2nd Int. Conf. on Geotextiles, Las Vegas, Vol. 3, pp. 683-688.
6. Jewell, R. A. (1991), "Application of Revised Design Charts for Steep Reinforce Slopes," Geotextiles and Geomembranes 10, pp. 203-233.
7. Koerner, R. M. (1994), "Designing with Geosynthetics," Third Edition, Prentice Hall, New Jersey.
8. Leshchinsky, D. and Boedeker, R. H. (1989), "Geosynthetic Reinforced Soil Structures," J. of Geotechnical Engineering, ASCE 115(10), 1459-1478.
9. Leshchinsky, D. and Volk, J. (1986), "Predictive Equation for the Stability of Geotextile Reinforced Earth Structures," Proc., Third Int. Conf. on Geotextiles, Vienna, pp. 383-388.
10. Schmertmann, G. R., Chouery-Curtis, V. E., Johnson, R. D. and Bonaparte, R. (1987), "Design charts for geogrid-reinforced soil slopes," Proc. Geosynthetics '87 Conf., New Orleans, pp. 108-120.
11. Woods, R. I. and Jewell, R. A. (1990), "A Computer Design Method for Reinforced Soil Structures," Geotextiles and Geomembranes 9, pp. 233-259.
12. Zornberg, J. G., Sitar, N. and Mitchell, J. K. (1995), "Performance of Geotextile-Reinforced Soil Slopes at Failure: a Centrifuge study," California Department of Transportation No. RTA-65T128.

(1999년 6월27일 접수, 1999년 10월10일 채택)