

수중 굴착사면의 안정해석

The Stability Analysis of Submerged Excavated Slopes

이명원*·이처근**·김홍중***·안광국****·허 열*****

M. W. Lee · C. K. Lee · H. J. Kim · K. K. Ahn · Y. Heo

(1997년 6월 5일 접수, 1997년 9월 5일 채택)

ABSTRACT

The main purpose of this study is to investigate the failure surface in a soil mass by a excavation of the model ground. The failure mechanism of an earth structure is usually determined from field failure observations or from laboratory model tests at failure. To study the failure surface for the excavated slope, laboratory model tests were performed by changing the angle of the excavated slope and the ground condition. Results of the laboratory model tests were compared with those obtained with theoretical solutions using limit equilibrium analysis method. The results of model tests show that, there is a failure to create a straight line in the low angle of excavated surface and a create a circle as the angle increases. As the angle of excavated surface is increasing, the angle of the failure surface increases too. In the angle of the failure surface, the submerged ground is less than the dry ground at 3. 2°.

1. 서 론

지하굴착에 따른 지반의 파괴 메커니즘을 예측하는 것은 도시지역내에서 대형구조물 축조 및 지하공사 등 여러 형태의 지하굴착에 따라 매우 중요

한 문제로 대두되고 있다. 외국에서는 이러한 문제에 대하여 많은 연구와 실험이 진행되어 왔지만^{1~4)} 국내에서는 토사굴착에 대한 연구결과가 미흡한 실정이며 주로 현장 측정자료를 근거로 하여 굴착 흙막이벽에 작용하는 토압 및 안정성에 관한 연

*명성건설(주)

**충북대학교 대학원 토목공학과

***한국도로공사 도로연구소

****Illinois Institute of Technology 토목공학과

*****충북대학교 공과대학 토목공학과

구를 행하고 있다^{5~6)}.

흙구조물의 파괴 메커니즘은 일반적으로 현장 파괴 또는 실내 모형실험으로부터 결정할 수 있다. 현장실물실험은 계측의 난점, 시간, 경제적 어려움 등이 많이 수반되기에 본 연구에서는 실내모형 실험을 통하여 수중굴착에 따른 지반의 거동을 구명하고자 한다. 따라서, 굴착면의 각도와 지반조건을 변화시켜 가면서 모형실험을 행하여 토사굴착에 따른 지반의 파괴 메커니즘과 안정화된 사면의 경사를 조사하고자 한다. 또한, 실험결과를 한계평형해석법에 의한 안정해석 결과와 비교 검토하고자 한다.

2. 한계평형해석법

한계평형해석법(limit equilibrium analysis method)은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 것이다⁷⁾. 한계평형해석법에 의한 사면안정 해석법^{8~10)}은 여러 가지가 있으나, 대부분의 경우에 있어서는 강도정수와 기하학적 조건이 각 해석방법의 차이보다 결과에 더 큰 영향을 미치므로 강도정수를 정확히 산정하는 것이 가장 중요한 사항이다. 한계평형방법에 의한 사면안정해석은 부정정문제이다. 즉, 미지수의 수가 방정식의 수보다 많으므로 해를 얻기 위해서는 미지수의 수와 방정식 수의 차이를 보완할 수 있는 수만큼의 가정을 도입하고 있다. 일반적으로 안정해석은 파괴토체를 여러 개의 수직절편으로 분할하고 각 절편에 대한 평형을 고려하여 계산한다. 한계평형해석법은 안전율이 직접 계산되는 선형법과 시행착오법에 의해 안전율을 구하는 비선형법으로 나눌 수 있으며⁸⁾, 본 연구에서는 비선형법중 Janbu의 방법^{8~10)}에 의하여 안정해석을 실시하였다.

3. 모형실험

3.1 시료의 기본특성

본 연구에서 모형지반 형성재료로는 주문진 표준사를 사용하였으며, 기본물성실험 결과 최대 건조단위중량 1.685g/cm³, 최소 건조단위중량 1.384g/cm³이고, 비중 2.62, 균등계수 C_u는 1.30,

곡률계수 C_c는 1.02를 가지고 있는 균등한 중립질 모래이다. 또한, 시료에 대한 주문진 표준사의 전단강도정수 및 응력-변형 거동을 구하기 위하여 삼축압축시험을 실시하였으며, 그 결과 점착력은 없는 것으로 나타났으며, 내부마찰각 ϕ 는 상대밀도가 90%일 때 42°인 것으로 나타났다.

3.2 실험장치

모형실험을 행하기 위하여 제작한 모델박스는 양측면과 후면 그리고 저면은 두께 2mm의 철판으로 되어 있고, 모델박스의 전면은 실험하는 동안 측방관찰을 가능하게 하기 위하여 2cm 두께의 투명한 아크릴 판으로 제작하였다. 또한, 모델박스의 외부에는 실험중 토압 등의 하중에 의한 모델박스의 측방변형을 일으키지 않도록 하기 위하여 사각봉으로 보강하였다. 본 실험에서 사용한 모델박스의 내부 크기는 가로 70cm, 세로 15cm, 높이 70cm였으며, 모델박스의 개요도는 Fig. 1과 같고, 굴착면의 각도에 따른 모형지반의 크기를 나타내면 Fig. 2와 같다.

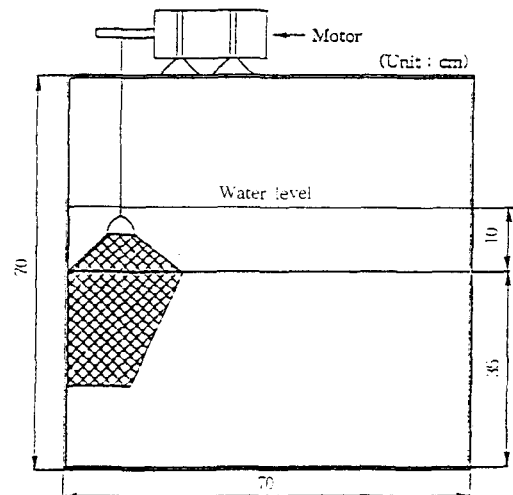


Fig. 1 A schematic of the model box

한편 지반을 굴착하기 위하여 8.33~10rpm의 회전속도와 1/30마력의 원동력을 가지고 있는 AC magnetic brake 모터를 사용하였으며, 굴착을 완료한 후에는 정지상태를 유지하도록 브레이크 장치가 되어 있다.

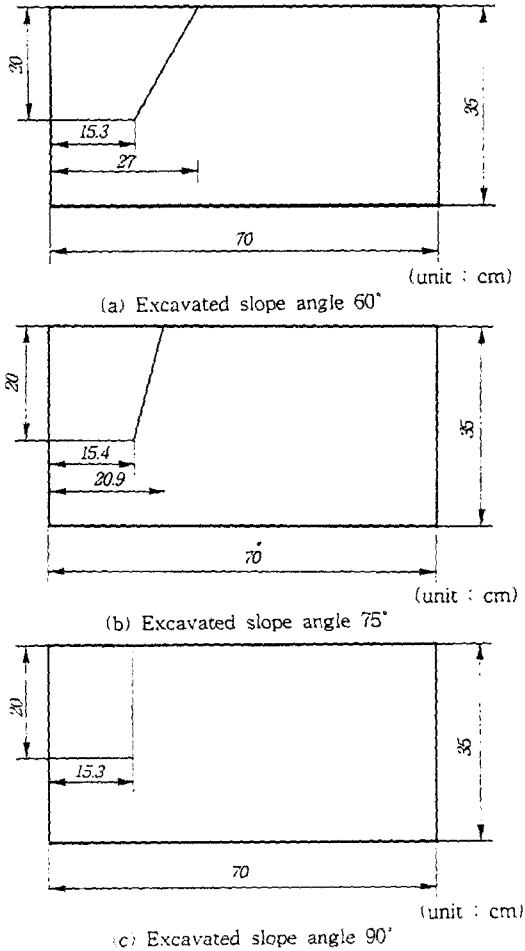


Fig. 2 Dimensions of the models

모형실험시 균일한 밀도를 갖는 지반을 형성하기 위하여 본 연구에서는 일정한 높이에서 모래를 자유 낙하시켜 지반을 형성하는 방법인 강사법으로 모형지반을 형성하였으며, 강사기의 개요도는 Fig. 3과 같다. 강사법에 의한 모형지반을 형성시 지반의 밀도는 slit 간격과 낙하높이에 의존하므로 본 연구에서는 slit 간격을 2.0mm로 일정하게 하고, 낙하높이를 변화시켜 상대밀도 90% ($\gamma_r=1.65g/cm^3$)에 상당하는 낙하높이 90cm를 구하였다. 따라서, slit의 간격 2.0mm, 낙하높이 90cm에서 모형지반을 형성하였다.

3.3 모형실험

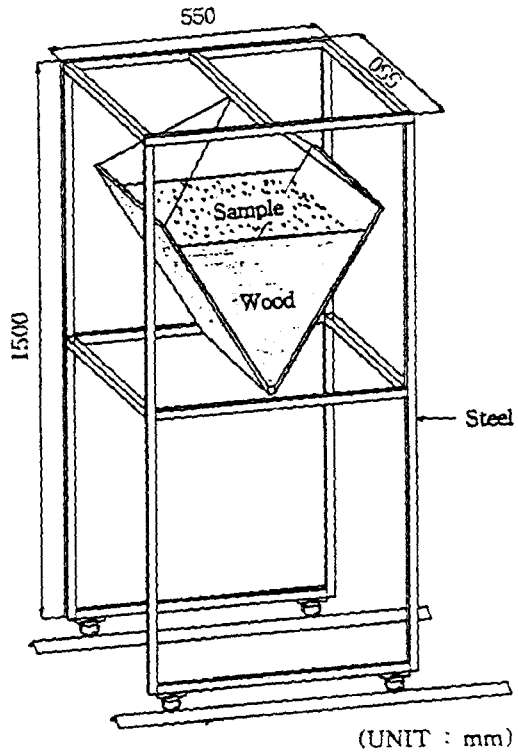


Fig. 3 Raining device

Table 1 Details of model tests

Test case	Excavated slope angle	Location of water level	Excavated height	Remarks
1	60°	-	20cm	Dry ground
2	60°	45cm	20cm	Submerged ground
3	75°	-	20cm	Dry ground
4	75°	45cm	20cm	Submerged ground
5	90°	-	20cm	Dry ground
6	90°	45cm	20cm	Submerged ground

본 연구에서 모형실험은 굴착사면의 경사각 60°, 75°, 90°의 세종류에 대해 각각 건조지반, 수중지반에 대한 모형실험을 실시하였다. 본 연구에서는 수행한 모형실험 조건은 Table 1과 같으며, 다음과 같은 과정으로 실험을 수행하였다.

첫번째로, 강사기를 사용하여 굴착 하부지반 즉, 모델박스 저부에서 15cm 높이까지 모형 하부지반을 형성하였으며, 지반 형성시 강사기와 지반 상부사이의 높이가 일정함을 유지하도록 하였다.

두번째로, 모형 하부지반 위에 철망을 설치하

고, 그 위에 계속해서 20cm의 상부지반을 형성하였다. 수중지반인 경우 모형지반 형성 완료후에 굴착에 의한 파괴면 형성에 영향을 받지 않는 위치에서 물을 공급하였다.

세번째로, 모형지반 형성이 완료된 후 모델박스 상부에 모터를 설치하였으며, 모터를 설치한 후 흙을 담고 있는 철망 부분을 케이블에 의하여 모터 축에 연결하였다.

마지막으로, 모터에 전원을 공급하여 굴착을 실시하였으며, 굴착완료 후 파괴면의 위치와 굴착 후 안정화된 사면의 위치를 측정하였다.

한편, 모형실험 완료 후 굴착지반의 파괴 메커니즘을 확인하기 위하여 시료를 염색하여 모형지반 형성시 일정한 높이별로 강사시켜 사용하였다.

4. 결과분석

4.1 실험결과

본 연구에서는 굴착면의 각도와 지반조건에 따라 모두 6 종류에 대한 모형실험을 수행하였으며, 실험완료후 측정된 굴착지반의 파괴위치를 각각 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다. 굴착면의 각도가 60°인 경우 굴착면의 파괴거리는 건조지반인 경우 비탈머리(crest)에서 약 6.9cm 떨어진 지점에서 발생하였으며, 수중지반인 경우 9.15cm 떨어진 지점에서 발생하였다. 굴착면의 각도가 75°인 경우 굴착면의 파괴거리는 건조지반인 경우 비탈머리에서 약 9.45cm 떨어진 지점에서 발생하였으며, 수중지반인 경우 10.9cm 떨어진 지점에서 발생하였다. 굴착면의 각도가 90°인 경우 굴착면의 파괴거리는 건조지반인 경우 비탈머리에서 약 12.2cm 떨어진 지점에서 발생하였으며, 수중지반인 경우 13.6cm 떨어진 지점에서 발생하였다. 이로부터 굴착사면의 파괴거리는 굴착면의 각도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 수중지반인 경우의 파괴거리가 건조지반인 경우보다 약 11~30% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

굴착면의 파괴고는 모든 경우에서 사면의 선단에 인접한 부근에서 발생하였으며, 건조지반인 경우 0.92H~0.94H(H : 굴착깊이) 위치에서 발생하였으며, 수중지반인 경우 0.97H~0.99H 위치에서 발생하였다. 이와 같이 선단파괴가 발생한 것은

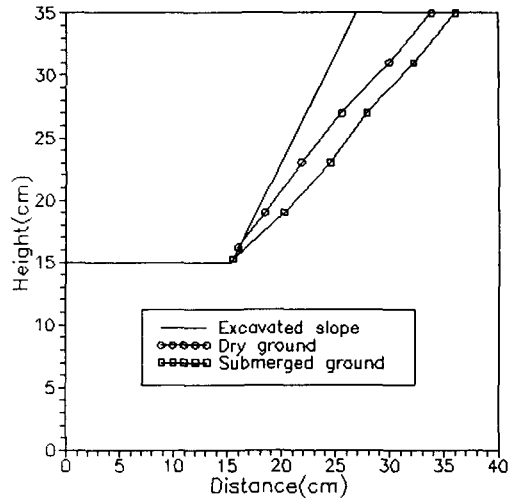


Fig. 4 Measured failure location for excavated angle 60°

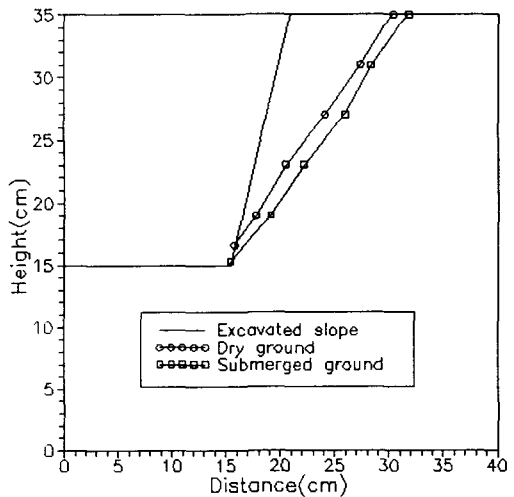


Fig. 5 Measured failure location for excavated angle 75°

지반재료로 사용한 시료가 비점착성이고, 사면의 경사가 급하기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 파괴면의 양상은 굴착면의 각도가 60°와 75°인 경우에는 거의 직선파괴의 양상을 나타냈으며, 굴착면의 각도가 90°인 경우에는 원호파괴의 양상을 나타내었다.

본 연구에서 행한 굴착실험 완료 후 안정화된 사면경사를 굴착면 각도에 따라서 나타내면 각각 Fig. 7~Fig. 9와 같다. 파괴후 안정화된 사면경사는 굴착면의 각도가 60°와 75°인 경우 거의 직선적

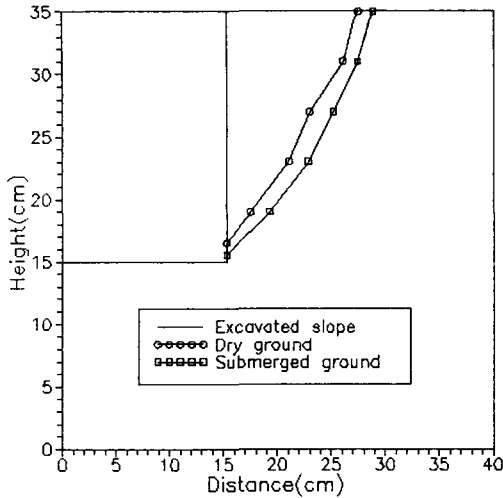


Fig. 6 Measured failure location for excavated angle 90°

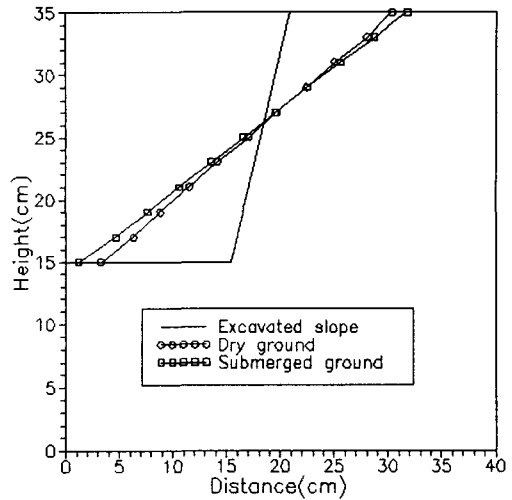


Fig. 8 Measured location of slope after failure for excavated angle 75°

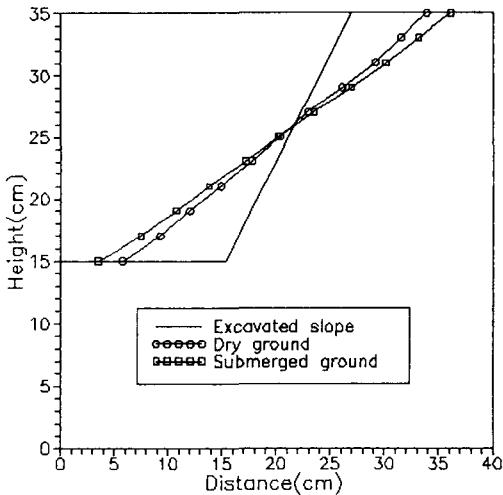


Fig. 7 Measured location of slope after failure for excavated angle 60°

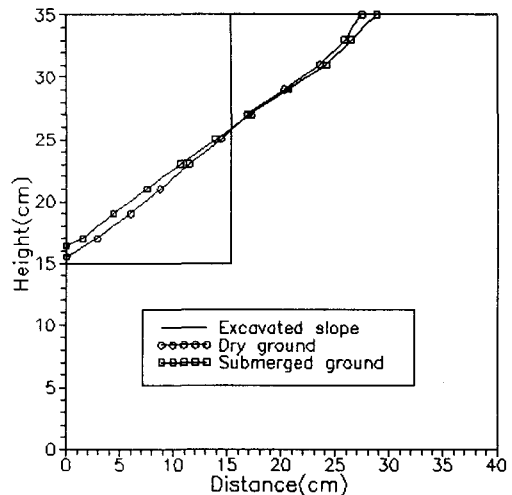


Fig. 9 Measured location of slope after failure for excavated angle 90°

으로 변화하였으며, 굴착면의 각도가 90°인 경우 원호형태를 나타내었다. 또한, 수평면과 이루는 각의 굴착면 각도에 따른 변화는 약 1°정도의 차이를 나타냈으나, 지반조건에 따른 차이는 약 3.2~3.6° 정도로 수중지반인 경우(31.7~32.9°)가 건조지반(35.3~36.1°)에 비해 작게 나타났다.

4.2 안정해석결과

본 연구에서는 한계평형해석법중 Janbu의 방법

을 이용하여 안정해석을 수행하였으며¹¹⁾, 그 결과 파괴면의 위치를 굴착사면의 각도에 따라서 Fig. 10~Fig. 12에 나타내었다. 굴착면의 각도가 60°인 경우에 파괴거리는 건조지반인 경우 비탈머리에서 약 5.16cm 떨어진 지점에서 발생하였으며, 수중지반인 경우 6.67cm 떨어진 지점에서 발생하는 것으로 나타났다. 굴착면의 각도가 75°인 경우 파괴거리는 건조지반인 경우 비탈머리에서 약 7.92cm 떨어진 지점에서 발생하였으며, 수중지반인 경우 9.

38cm 떨어진 지점에서 발생하는 것으로 나타났다. 굴착면의 각도가 90°인 경우 건조지반과 수중지반의 파괴거리는 각각 비탈머리에서 약 10.91cm, 12.53cm 떨어진 지점에서 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 10~Fig. 12로부터 파괴거리는 굴착면의 각도가 증가할수록 34~53% 정도 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 또한 동일한 각도에서 수중지반인 경우의 파괴거리가 건조지반인 경우보다 약 15~29% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

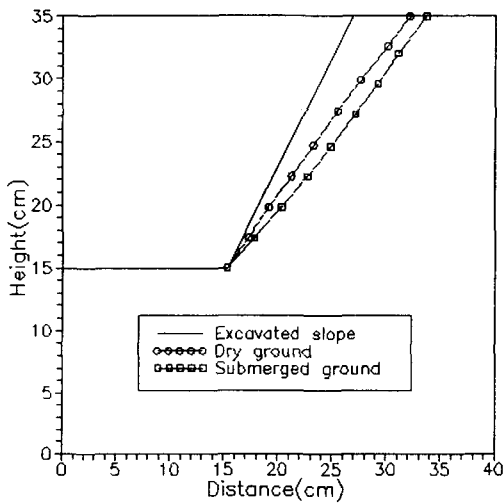


Fig. 10 Estimated failure location for excavated angle 60°

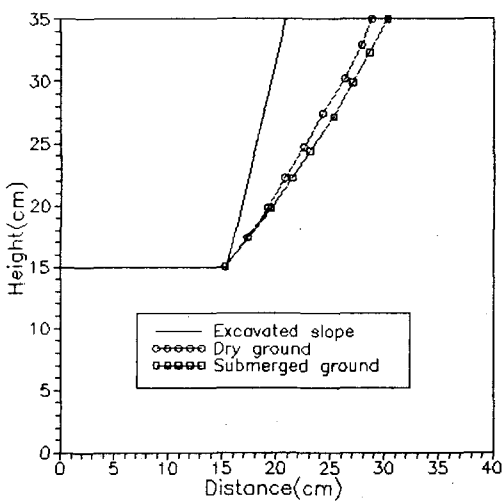


Fig. 11 Estimated failure location for excavated angle 75°

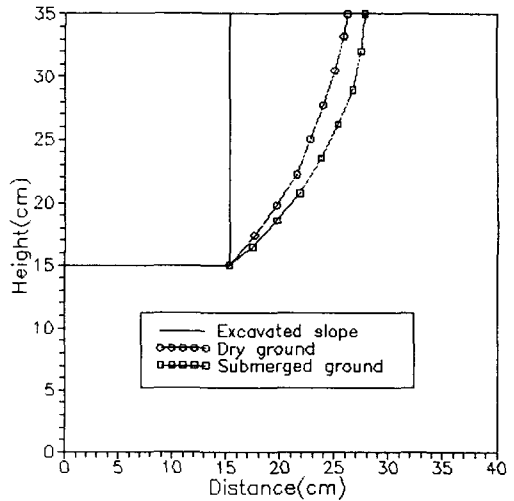


Fig. 12 Estimated failure location for excavated angle 90°

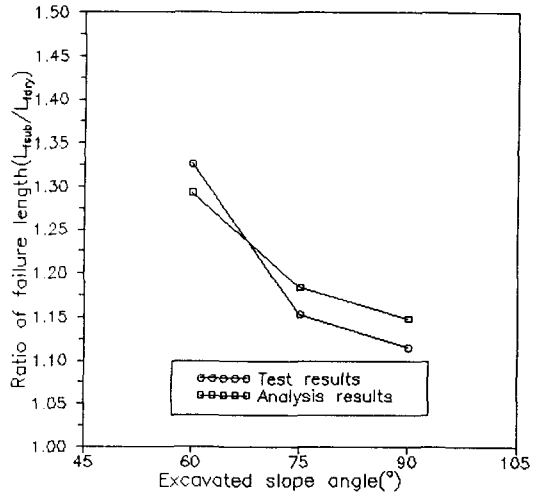


Fig. 13 Ratio of failure length according to excavated angle

4.3 결과분석

Fig. 13은 굴착사면의 각도변화에 따른 건조지반에 대한 수중지반의 파괴거리비 (L_{sub}/L_{dry})의 관계를 나타낸 것이다. 굴착면의 각도가 60°인 경우 실험결과가 안정해석결과보다 약 2.5% 정도 큰 것으로 나타났으며, 굴착면의 각도가 75°와 90°인 경우에는 이와 반대로 실험결과가 안정해석결과에 비해 각각 2.7%, 3% 정도 작은 것으로 나타났다. 또한, 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴거

리비가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴거리가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 14는 모형실험 및 Janbu의 방법에 의한 한계평형 안정해석결과 파괴면이 수평면과 이루는 각도를 굴착면의 각도에 따라서 나타낸 것이다. 이로부터 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴면의 각도가 증가한다는 것을 알 수 있으며, 또한 수중지반인 경우가 건조지반인 경우에 비해 평균 약 3.2°정도 파괴면의 각도가 작게 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

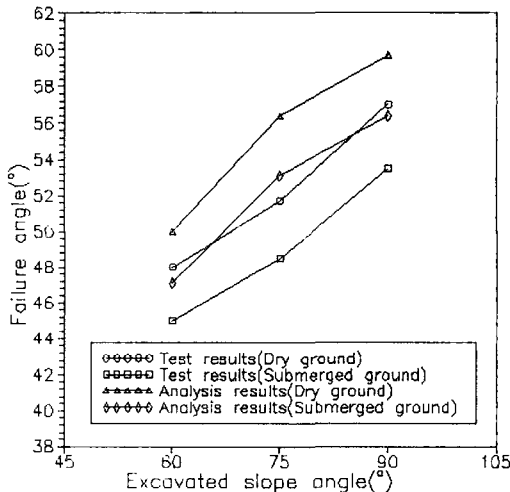


Fig. 14 Angle of failure surface according to excavated angle

5. 결 론

본 연구에서는 굴착면의 경사와 지반조건의 변화에 따른 굴착면의 파괴면과 파괴 후 안정화된 사면경사를 실내 모형실험을 통하여 규명하였으며, 또한 실험결과와 Janbu의 방법을 이용한 한계평형 해석 결과와 비교한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수중지반과 건조지반 모두 굴착사면의 각도가 낮은 경우(60°, 75°) 직선파괴의 양상을 보였고, 각도가 직각인 경우 원호파괴의 양상을 나타내었다.
- 2) 수중지반인 경우 건조지반에 비해 비탈머리에 서부터의 파괴거리는 굴착면의 경사에 따라 1.

12~1.33배 정도 증가하였고, 굴착면의 파괴고는 수중지반인 경우가 건조지반에 비해 약 5% 정도 크게 나타나 수중지반인 경우가 굴착후 파괴면의 범위 및 높이가 큰 것으로 나타났다.

- 3) 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴면의 각도가 증가하는 경향을 나타냈으며, 수중지반인 경우가 건조 지반에 비해 약 3.2°정도 작게 나타났다. 또한, 파괴면 및 파괴후 사면 안정각 모두 3~4°정도 작게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Dunlop, P., and Duncan, J. M., "Development of Failure Around Excavated Slopes", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM2, pp. 471~493, 1970.
- 2) Cole, K. W., and Burland, J. B., "Observation of Retaining Wall Movements Associated with Large Excavation", Proceedings of the Fifth European Conf. on Soil Mechanics, Vol. 1, pp. 445~453, 1972.
- 3) Burland, J. B., Longworth, T. I., and Moore, F. A., "A Study of Ground Movement and Progressive Failure Caused by a Deep Excavation in Oxford Clay", Geotechnique, Vol. 27, pp. 557~591, 1977.
- 4) Azevedo, R., "Centrifugal and Analytical Modeling of Excavation in Sand", Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder, pp. 1~222, 1983.
- 5) 이종규, 전성근., "다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포", 한국지반공학회지, 제9권, 제1호, pp. 59~68, 1993.
- 6) 홍원표, 윤중만., "지하굴착시 앵커지지 흙막이벽의 안정성에 관한 연구", 대한토목학회지, 제15권, 제4호, pp. 991~1002, 1995.
- 7) Chen, W. F., "Limit Analysis and Soil Plasticity", Elsevier, Amsterdam, pp. 1~12, 1975.
- 8) Chowdhury, R. N., "Slope Analysis", Elsevier, Amsterdam, pp. 1~241, 1978.
- 9) Fredlund, D. G., and Krahn, J.,

- “Comparison of Slope Stability Methods of Analysis”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, pp. 429~439, 1977.
- 10) 백영식, 채영수, 김영수, “지반공학시리즈 5-사면안정”, 한국지반공학회, pp. 1~162, 1994.
- 11) Lovell, C.W., “User Guide for PC STABL 5M”, Purdue University, pp. 1~132, 1988.