

遠心模型實驗에 의한 地下掘鑿 崩壞樣相에 관한 計測 및 解析

Monitoring & Analysis on Excavation Failure Modes
by Centrifugal Model Experiment

허 열* · 안 광 국** · 이 처 근***

Y. Heo · K.K. Ahn · C.K. Lee

(1998년 7월 16일 접수, 1998년 9월 23일 채택)

ABSTRACT

This paper is to investigate the failure surface and modes in a soil mass by a excavation of the model ground. To study the failure surface for the excavated slope, centrifugal model tests were performed by changing the angle of the excavated slope(60, 75, 90°) and the ground condition($D_r=60, 90\%$, dry and submerged ground). Excavation was simulated during the centrifuge tests by operating a valve that allowed the zinc chloride solvent to drain from the excavation. Results of 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. Also, as the angle of excavated surface is increasing, the angle of the failure surface increases. The failure length in the submerged ground increases approximately 1.10~1.34 times more than that of the dry ground.

1. 서 론

우리나라는 최근 들어 건설공사가 점차 대형화, 대도심화 되어가고 있는 추세인데 기존 경

험에만 의존해오던 관리방법에서 계측을 통한 시공관리인 정보화시공(계측 및 해석)으로의 적용이 매우 필요한 시기로 대두되고 있다. 지하 굴착에 따른 지반의 파괴 메카니즘을 예견하는

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** Illinois Institute of Technology 토목공학과

*** 충북대학교 대학원 토목공학과

것은 도시지역내에서 거대한 빌딩 등 여러 형태의 지하굴착에 따라 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 외국에서는 이러한 문제에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔지만³⁻⁷⁾, 국내에서는 토사굴착에 대한 연구결과가 미흡한 실정에 있다.

흙구조물의 파괴 메카니즘은 일반적으로 현장파괴 또는 실내모형실험으로부터 결정할 수 있다. 현장실물실험은 계측의 난점, 시간, 경제적 어려움 등이 많이 수반되어 적절하고 정확한 정보화시공에 어려움이 있다. 본 연구에서는 원심모형실험을 통하여 굴착에 따른 지반의 거동을 구명하고자 하였다. 이에 굴착면의 각도와 지반조건을 변화시켜 가면서 모형실험을 행하여 토사굴착에 따른 지반의 파괴 메카니즘과 안정화된 사면경사를 조사·분석하고자 하였다. 특히 현장에서 접할 수 있는 수중굴착시 발생하는 파괴양상 및 토량의 변화를 관찰하였으며 이는 수중지반에 대한 안정성 및 설계·시공자료가 전무하다시피 한 현재의 우리나라 상황에서 제한적이거나 기초적 정보를 제공하고자 시행하였다. 또한, 실험결과는 한계평형해석법에 의한 결과와 비교·검토하였다.

2. 한계평형해석법

한계평형해석법은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체(土體)의 안정성을 해석하는 것으로 절·성토 사면의 안정해석에 널리 사용되고 있으며, 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 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. 사면의 안전율을 구하기 위해서는 곡면인 활동면상의 각 점에서 전단응력과 전단강도를 산정하여야 한다. 수직응력은 흙의 두께에 따라 달라지며, 토성과 간극수압도 위치에 따라 다르므로 파괴토체를 여러 개의 수직절편으로 분할하고 각 절편에 대한 평형을 고려하게 된다. 한계평형해석법은 선형법과 비선형법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 비선형

법중 일반적으로 많이 사용되고 있는 Janbu의 방법을 이용하였다²⁾.

Janbu는 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 원호·비원호 활동면에 적용할 수 있는 사면안정해석법을 제안하였다. Fig. 1에서 절편의 저부에 수직방향과 수평방향의 힘의 평형조건으로부터 각각 다음 식이 얻어진다.

$$P \cos \alpha + T \sin \alpha = W - (X_R - X_L) \dots\dots\dots (1)$$

$$T + (E_R - E_L) \cos \alpha = [W - (X_R - X_L)] \sin \alpha \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서, E_L : 절편의 왼쪽에서 작용하는 수평력,
- E_R : 절편의 오른쪽에서 작용하는 수평력,
- P : 절편의 저부에 작용하는 전 수직력,
- T : 절편의 저부에 작용하는 전 수평력,
- W : 절편의 중량,
- X_R : 절편의 오른쪽에 작용하는 전단력,
- X_L : 절편의 왼쪽에 작용하는 전단력,
- α : 절편 저부의 경사각,

이다.

$X_L = X_R = 0$ 이라고 가정하면 절편의 저부에 작용하는 수직력 P 는 식(1)로부터 다음 식과 같이 된다.

$$P = \frac{W - \frac{1}{F}(C' l \sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha)}{\cos \alpha (1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{F})} \dots\dots\dots (3)$$

- 여기서, l : 호의 길이,
- u : 간극수압

이다.

따라서, 다음 식으로부터 안전율 F 를 구할 수 있다.

$$F = \frac{\sum [C' l + (P - ul) \tan \phi'] \sec \alpha}{\sum W \tan \alpha} \dots\dots\dots (4)$$

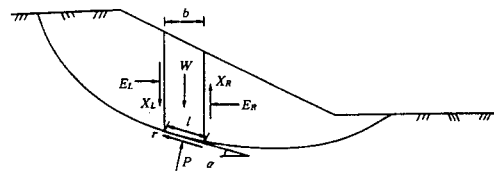


Fig. 1 Janbu's method

3. 원심모형실험

3.1 실험장치

본 연구에서는 용량 20g-ton이고 회전반경이 128cm인 원심모형시험기를 이용하여 모형실험을 수행하였으며, 그 개요도는 Fig. 2와 같다. 모형실험에 사용한 모델박스는 양측면과 후면 그리고 저면은 두께 2mm의 스테인레스로 되어 있고, 모델박스의 전면은 실험하는 동안 측방 관찰을 가능하게 하기 위하여 2cm 두께의 투명한 아크릴판으로 제작하였다. 또한, 모델박스 외부에는 하중에 의한 모델박스의 측방변형을 일으키지 않도록 하기 위하여 사각봉으로 보강하였다. 본 실험에서 사용한 모델박스의 내부 크기는 가로 50cm, 세로 15cm, 높이 45cm였으며, 모델박스의 개요도는 Fig. 3과 같다.

한편, 지반굴착을 모사하기 위하여 굴착면의 각도에 따라 미리 제작된 rubber bag에 흙과 동일한 밀도로 혼합된 zinc chloride 용액을 채워 사용하였으며, 굴착은 원심모형실험동안 zinc chloride 용액이 배수되도록 밸브를 조작하여 실시하였다.

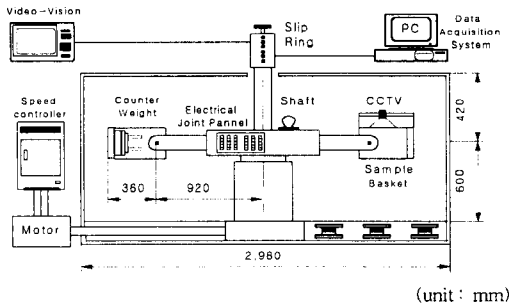


Fig. 2 A schematic of the centrifuge

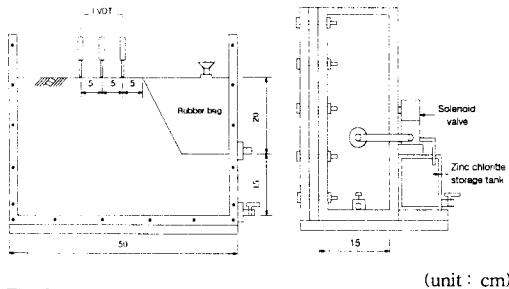


Fig. 3 A schematic of the model box

3.2 모형실험

본 연구에서 모형지반 형성재료로는 주문진 표준사를 사용하였으며, 그 특성은 Table 1과 같다. 모형실험은 Table 2에 나타낸 것과 같이 지반조건에 따라 모두 12가지 경우에 대하여 다음과 같은 과정으로 수행하였으며, 실험시 굴착 높이는 20cm로 하였다. 첫 번째로, 강사기를 사용하여 굴착 하부지반을 형성한 후 하부지반 위에 rubber bag을 설치하고, rubber bag에 zinc chloride 용액을 채워가면서 계속해서 상부지반을 형성하였다. 두 번째로, 모델박스를 원심모형시험기 회전 바스켓에 설치하고, 모델박스에 의한 모멘트와 같은 크기를 유발하는 하중을 반대편의 Counter weight basket에 조립하였다. 마지막으로, 원심모형시험기를 가동시킨 후 일정 가속도에 도달하였을 때 전원을 공급하여 rubber bag 속의 zinc chloride 용액이 배수되도록 밸브를 열어 굴착을 실시하였다. 이는 굴착기로 굴착가능한 깊이 7m 정도로 보고 굴착 g-level을 35로 시행하였다. 굴착완료후 파괴면과 굴착 후 안정화된 사면의 위치를 측정하였다. 실험시 g-level 증가에 따른 표면침하를 측정하기 위하여 3개의 LVDT를 사용하였다.

Table 1 Physical properties of Jumunjin standard sand

Specific gravity	2.62
Maximum dry density (g/cm^3)	1.685
Minimum dry density (g/cm^3)	1.384
Uniformity coefficient	1.30
Coefficient of curvature	1.02
Effective size(mm)	0.20
Internal friction angle($^\circ$)	42
Cohesion (kg/cm^2)	0

Table 2 Details of model tests

Test case	Excavated slope angle($^\circ$)	Relative density(%)	Remarks
1	60	60, 90	Dry Ground
2	60	60, 90	Submerged ground
3	75	60, 90	Dry Ground
4	75	60, 90	Submerged ground
5	90	60, 90	Dry Ground
6	90	60, 90	Submerged ground

4. 결과분석

본 연구에서는 굴착면의 각도(60, 75, 90°)와 지반조건(상대밀도 60, 90%인 지반, 건조 및 수중지반)에 따라 모두 12 종류에 대한 모형실험을 수행하였다. 굴착지반의 파괴위치는 모형지반 형성시 일정한 높이별로 강사시킨 염색사의 파괴면을 측정하여 결정하였으며, 굴착지반의 파괴위치를 굴착면의 각도에 따라 각각 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다. 이로부터 굴착사면의 파괴거리는 굴착면의 각도가 증가할수록 증가하였으며, 상대밀도가 60%인 지반의 파괴거리가 90%인 지반에 비해 약 15~22% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 수중지반인 경우의 파괴거리가 건조지반인 경우보다 약 13~30% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 굴착면의 각도에 따른 건조지반의 파괴높이는 0.91H~0.95H (H: 굴착깊이) 위치에서, 수중지반인 경우 0.95H~0.99H에서 발생하였다. 즉, 모든 경우에서 사면의 선단에 인접한 부근에서 파괴가 발생하였으며, 이와 같이 선단파괴가 발생한 것은 지반 재료로 사용한 시료가 비점착성이고, 사면의 경사가 급하기 때문인 것으로 판단되어졌다.

한편, 굴착면의 파괴양상은 굴착면의 각도가 60°와 75°인 경우에는 거의 직선파괴의 양상을 나타냈으며, 굴착면의 각도가 90°인 경우에는 원호파괴의 양상을 나타내었다. 상대밀도 60%인 지반에서 건조지반의 파괴면의 각도가 굴착면의 각도에 따라서 수중지반에 비해 1.8~2.2°, 상대밀도가 90%인 경우에는 3.0~3.6° 정도 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 건조지반에서 상대밀도가 90%인 지반의 파괴면의 각도가 굴착면의 각도에 따라서 상대밀도가 60%인 지반에 비해 3.2~5.0°, 수중지반인 경우에는 2.0~3.4° 정도 크게 나타났다. 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴면의 각도도 증가하였으며, 굴착면의 각도가 75°와 90°인 경우 파괴면의 각도는 굴착면의 각도 60°인 경우에 비해 각각 3.5~4.5°, 3.3~5.2° 증가하였다.

굴착완료일 후 안정화된 사면경사를 굴착면 각도에 따라서 각각 Fig. 7~Fig. 9에 나타내었다. 이로부터 굴착면의 각도가 60°와 75°인 경우에는

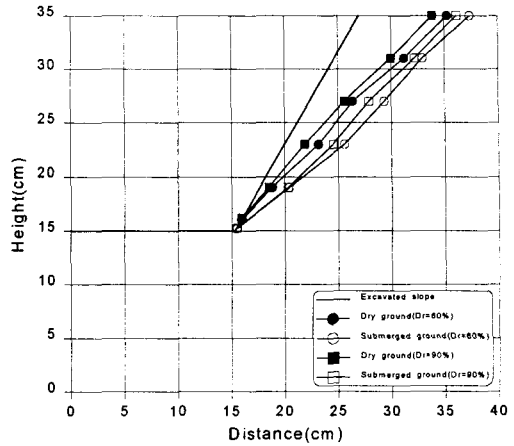


Fig. 4 Measured failure location for excavated angle 60°

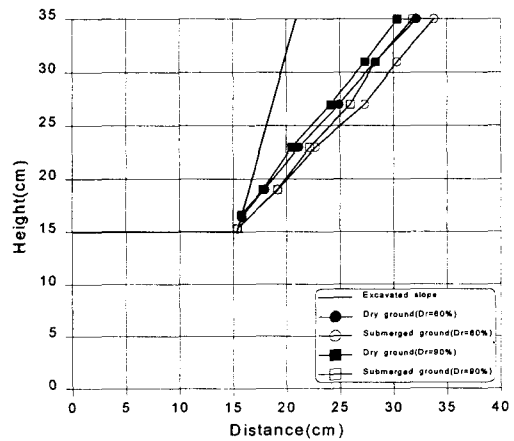


Fig. 5 Measured failure location for excavated angle 75°

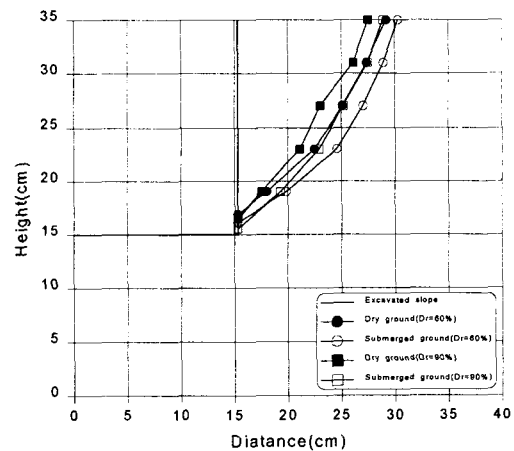


Fig. 6 Measured failure location for excavated angle 90°

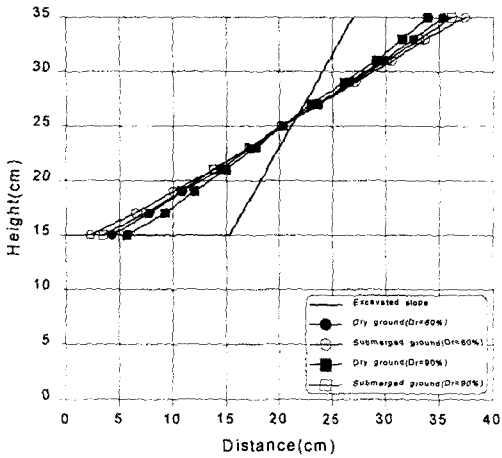


Fig. 7 Measured location of slope after failure for excavated angle 60°

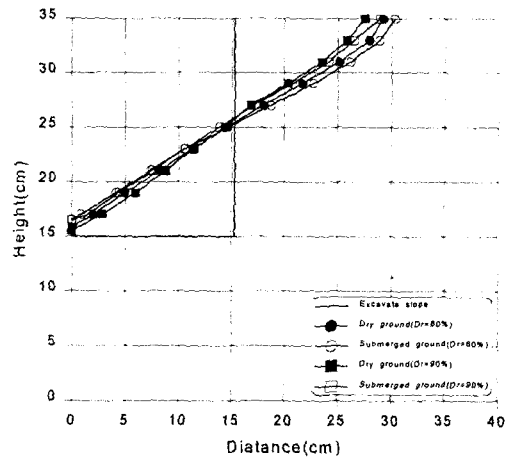


Fig. 9 Measured location of slope after failure for excavated angle 90°

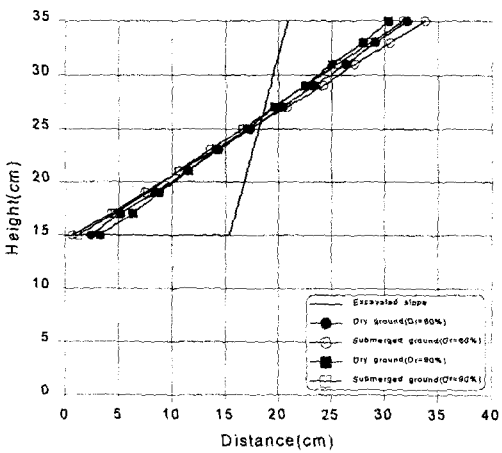


Fig. 8 Measured location of slope after failure for excavated angle 75°

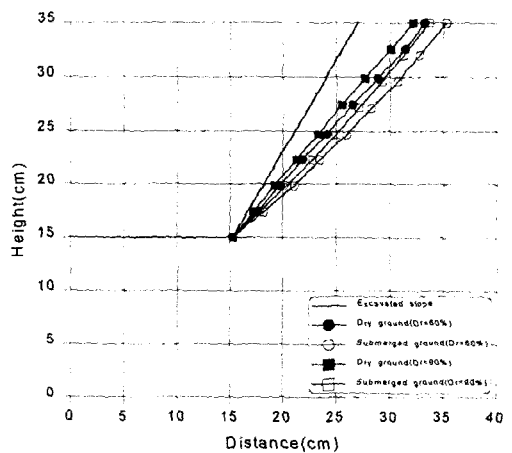


Fig. 10 Estimated failure location for excavated angle 60°

거의 직선적인 형태를, 굴착면의 각도가 90°인 경우에는 원호형태를 나타내었다. 상대밀도가 60%와 90%인 건조지반에서 안정화된 사면경사는 각각 평균 약 33°, 36° 정도로 수중지반에 비해 각각 3.2°, 4.1° 정도 크게 나타났다. 한편, 상대밀도가 60%인 지반이 90%인 지반에 비해 약 1.8~3.6° 정도 작게 나타났다.

본 연구에서는 Lovell에 의해 개발된 사면안정해석 프로그램을 사용하여 Janbu의 방법에 의해 안정해석을 수행하였으며⁸⁾, 해석결과 파괴면의 위치를 굴착사면의 각도에 따라 나타내면 Fig. 10~Fig. 12와 같다. 이로부터 파괴거리는 굴착면

의 각도가 증가할수록 증가하였으며, 상대밀도가 60%인 경우 굴착면의 각도 75°, 90°인 경우 파괴거리는 굴착면의 각도가 60°인 지반에 비해 각각 40~58%, 75~110% 증가하는 경향을 나타냈으며, 상대밀도가 90%인 경우에는 각각 40~55%, 90~112%로 나타났다. 또한 상대밀도 60%인 지반의 파괴거리가 상대밀도 90%인 지반에 비해 18~26% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 상대밀도 60%인 지반에서 건조지반의 파괴면의 각도가 수중지반에 비해 3.0~4.2°, 상대밀도가 90%인 경우에는 2.9~3.5° 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 조건에서 지반의

상대밀도에 따른 파괴면 각도의 차이는 약 2.2~4.4° 정도로 상대밀도 90%인 지반의 파괴면 각도가 큰 것으로 나타났으며, 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

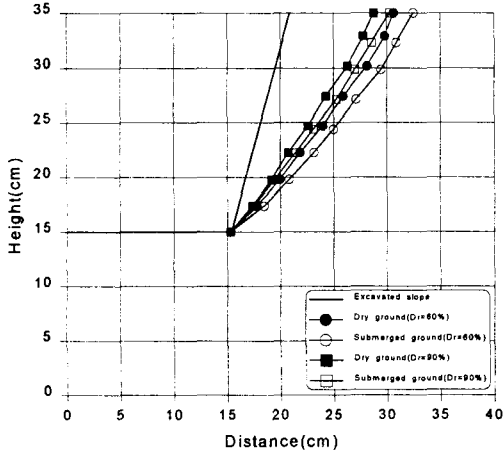


Fig. 11 Estimated failure location for excavated angle 75°

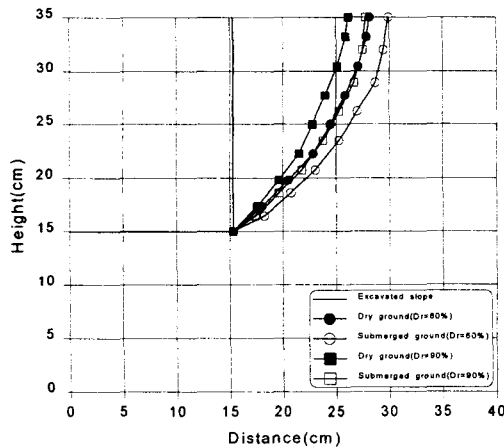


Fig. 12 Estimated failure location for excavated angle 90°

Fig. 13은 건조지반의 파괴거리를 $L_{f\ dry}$, 수중지반의 파괴거리를 $L_{f\ sub}$ 라고 하였을 때, 굴착면의 각도에 따른 파괴거리비($L_{f\ sub} / L_{f\ dry}$)의 관계를 나타낸 것이다. 이로부터 상대밀도가 60%인 지반에서 굴착면의 각도에 따라 실험결과 파괴거리비가 안정해석결과에 비해 평균 4.4% 작게 나타났다. 한편, 상대밀도 90%인 지반에서 굴착

면의 각도가 60°인 경우에는 실험결과가 안정해석결과보다 약 3.0% 정도 큰 것으로 나타났으며, 굴착면의 각도가 75°와 90°인 경우에는 이와 반대로 실험결과가 안정해석결과에 비해 각각 2.2%, 3.0% 정도 작은 것으로 나타났다. 또한, 모형실험 및 안정해석결과 모두 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴거리비가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴거리가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

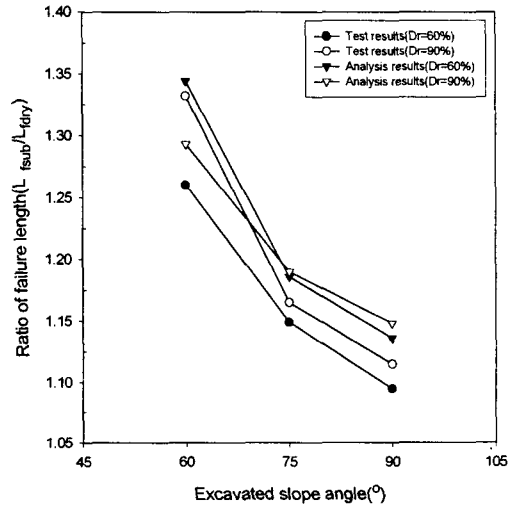


Fig. 13 Ratio of failure length according to excavated angle

Fig. 14는 모형실험 및 Janbu의 방법에 의한 안정해석결과 파괴면이 수평면과 이루는 각도를 굴착면의 각도에 따라서 나타낸 것으로 이로부터 굴착면의 각도가 증가할수록 파괴면의 각도가 증가한다는 것을 알 수 있다. 지반의 상대밀도 60%에서 건조지반인 경우 실험결과가 안정해석결과에 비해 평균 약 3.9° 정도 파괴면의 각도가 작고, 수중지반인 경우 약 2.6° 정도 작다는 것을 알 수 있다. 또한, 상대밀도가 90%인 경우에 실험결과가 안정해석결과에 비해 건조지반인 경우 약 3.2°, 수중지반인 경우 약 3.4° 정도 파괴면의 각도가 작게 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 지반굴착 전후의 표면침하 측정결

과를 나타낸 것으로 이로부터 굴착에 의해 침하가 급격하게 증가하며, 사면에 인접한 지표면의 침하가 가장 크게 발생함을 알 수 있다. 또한, 지반의 상대밀도가 낮을수록 굴착면의 각도가 증가할수록 침하량이 크게 발생하는 것으로 나타났다.

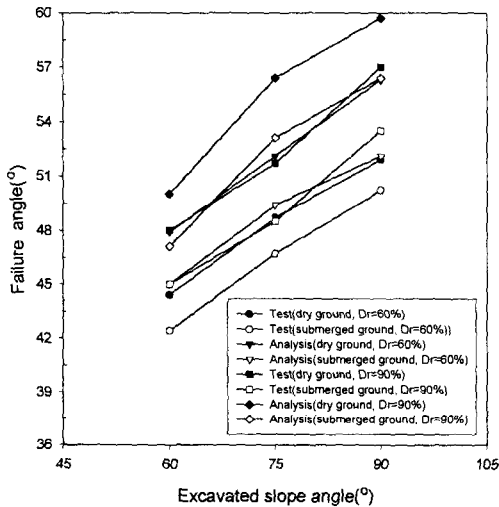


Fig. 14 Angle of failure surface according to excavated angle

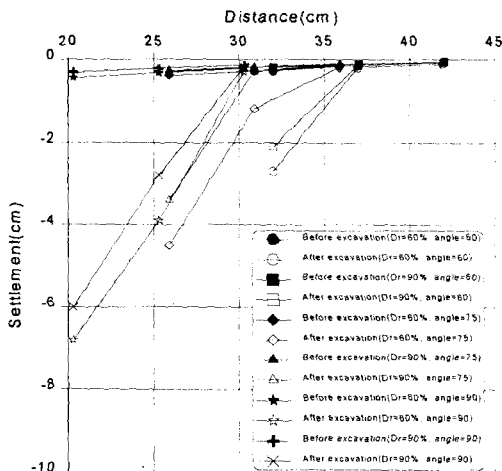


Fig. 15 Measured surface settlement

5. 결론

본 연구에서는 굴착면의 경사와 지반조건의 변화에 따른 파괴면과 파괴후 안정화된 사면경사를 원심모형실험을 통하여 규명하였다. 제한된 실험과 계측에서 수중지반의 붕괴양상을 관찰하였으며, 실험결과는 Janbu의 방법을 이용한 해석결과와 비교 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 굴착사면의 파괴면은 모형실험결과가 안정해석결과에 비해 상부에서는 약 18% 정도 크게 나타났으며, 하부에서는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 굴착사면의 경사가 낮은 경우 (60°, 75°) 직선파괴의 양상을 보였고, 경사가 직각인 경우 원호파괴 양상을 나타내어 파괴면 추정시 굴착면의 경사에 따른 파괴형태를 고려해야 할 것으로 판단된다.
- 2) 굴착사면의 파괴거리는 상대밀도 60%인 지반이 상대밀도 90%인 경우에 비해 19.6% 정도 크게 나타났으며, 수중지반의 파괴거리 파괴높이가 건조지반 굴착에 비해 큰 것으로 나타났다.
- 3) 파괴면의 각도 및 사면 안정각은 지반의 상대밀도가 높을수록, 굴착면의 각도가 증가할수록 크게 나타났으며, 동일한 조건에서 수중지반의 파괴면 각도가 건조지반에 비해 약 1.8~3.6° 정도 작게 나타났다.
- 4) 수중지반의 굴착토량은 건조지반에 비해 상대밀도가 60%인 경우에는 약 24~32%, 상대밀도가 90%인 경우에는 약 28~40% 정도 증가함을 알 수 있었다.
- 5) 본 연구를 통해 얻은 결론은 제한적이거나 수중지반의 설계 및 시공시 기초자료로 활용될 수 있다고 생각된다.

본 연구는 충북대학교 국책 자유공모과제(과제번호: 96F-19)의 지원으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 준 국책사업추진단에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 박성재, 정경완, 지하 굴토 지보공의 계측 및 해석(정보화시공)에 관한 연구, 대한토목학회지, 제15권, 제5호, pp. 1381~1395, 1995.

- 2) Anderson, M.G., and Richards, K.S., Slope Stability-Geotechnical Engineering and Geomorphology, John Wiley & Sons, New York, pp. 11~186, 1987.
 - 3) Azevedo, R., Centrifugal and Analytical Modeling of Excavation in Sand, Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder, pp. 1~222, 1983.
 - 4) Borja, R.I., Analysis of Incremental Excavation Based on Critical State Theory, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 116, No. 6, pp. 964~985, 1990.
 - 5) 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.
 - 6) Chang, C.Y., and Duncan, J.M., Analysis of Soil Movement Around a Deep Excavation, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96, No. SM5, pp. 1655~1680, 1970.
 - 7) Duncan, J.M., and Clough, G.W., Finite Element Analysis of Port Allen Lock, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, No. SM8, pp. 1053~1068, 1971.
 - 8) Lovell, C.W., User Guide for PC STABL 5M, Purdue University, 1988.
-