

사 면 안 정 (XI)

김 명 모*

4.3 원심력 모형실험을 이용한 사면안정 해석

4.3.1 서 론

우리는 자연현상을 이해하고 장래 거동을 예측하기 위해서 그 자연현상을 지배하는 원리를 찾아내어 이를 수식화하려고 노력한다. 그러나 우주에서 일어나고 있는 대부분의 자연 현상들은 그 하나 하나가 모두 여러가지 요인들이 복합적으로 작용하는 가운데 일어나고 있어서 이를 정확하게 묘사하려면, 만일 정확한 묘사가 그나마 가능하다면, 지나치게 복잡하고 답을 낼 수 없는 수식으로 밖에 표현할 수 없다. 따라서, 과학자들은 자연 현상의 본질을 가능한한 많이 유지하면서 답을 낼 수 있는 수식을 추구하게 되는데, 이 과정에서 필연적으로 자연현상의 간편화 또는 이상화가 이루어진다. 그러므로 이론적으로 예측한 결과는 항상 자연현상과 얼마간의 괴리가 있을 수밖에 없으며 경우에 따라서는 아주 엉뚱한 예측을 할 수도 있다.

자연현상을 이해하고 예측하는 또다른 하나의 방법은 자연현상을 실험장에서 의도적으로 재현해 보는 것이다. 이러한 물리적 실험방법은 이론적 방법과 비교하면 문제 해결에 드는 비용과 시간 그리고 에너지면에서 모두 불리하지만, 이론적 방법의 타당성을 검증하고 필요하면 보완하는 수단으로서, 이론적 방법과 서로가 동반적 관계에 있다. 실제에 있어서는 현장 실험에 드는 비용과 시간 등을 절약하기 위하여 실험 크기를 축소한 모형실험이 자주 이용된다.

토질 공학적 문제들은 대부분 그 성격의 이상화 내지 간편화가 어려운 흙을 대상으로 하기 때문에 다른 어느 분야보다 더 많은 실험적 검증이 필요하다. 그러나, 사면안정 문제에 있어서는 가장 중요한 하중 조건이 자체 중량이므로 실험 크기를 축소한 일반 모형 실험으로는 의미있는 결과를 얻을 수가 없다. 실용성 있는 실험결과를 얻기 위해서는 실험 크기 현장 실험으로 하던가, 아니면 실험환경에서 발생하는 하중 상태를 모형내에서 재현시켜야 하는데, 원심력 실험기(centrifuge)를 이용하면 이를 쉽게 달성할 수 있다. 원심력 실험기는 사면 안정 문제 외에도 정량적으로 활용할 수 있는 모형 실험의 수행을 위해서 토질 공학 분야의 여러 방면에서 다양하게 이용된다.

4.3.2 이론적 배경

모형 실험은 일반적으로 정량 실험과 정성 실험으로 나눈다. 정량 실험은 실험물과 모형 사이를 연결하는 일정한 관계식을 통하여 그 결과를 수치적으로 이용할 수 있으나, 정성 실험은 그 결과로부터 단순히 실험환경의 공학적 성질만을 확인한다. 모형 실험결과와 정량화를 위해서는 상사법칙을 만족시켜야 한다. 정력학적인 문제에서 상사법칙은 모형의 기하학적 그리고 역학적 상사관계를 요구하는데 이 관계는 기하학적 상사비(λ)와 역학적 상사비(ξ)로써 나타낼 수 있으며, 수식적으로 정의하면,

$$\lambda = \frac{L^p}{L^m} \dots\dots\dots (1)$$

와

$$\xi = \frac{\sigma^p}{\sigma^m} = \frac{\tau^p}{\tau^m} = \frac{E^p}{E^m} \dots\dots\dots (2)$$

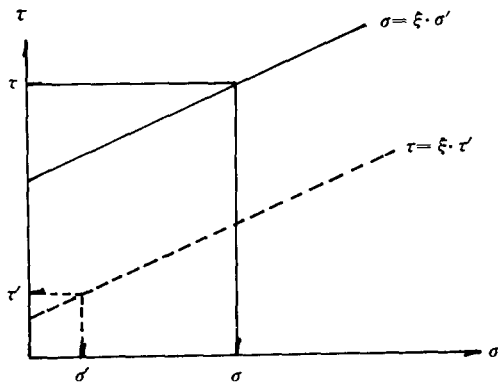
* 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

이다. 여기서 어깨 글자 p와 m은 각각 실물과 모형의 크기를 나타내며, L은 길이, σ 는 법선 응력, τ 는 전단 응력, 그리고 E는 영(Young) 탄성계수 등을 의미한다.

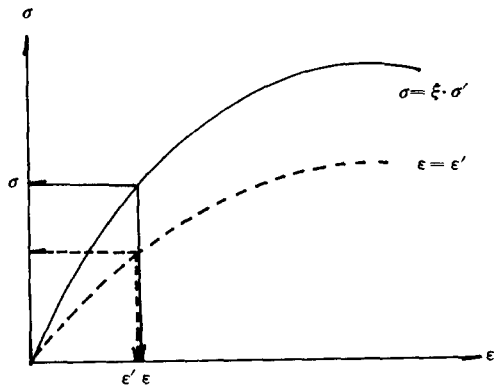
모형의 종류를 모형의 크기와 역학적 성질에 따라 나누면, 여러가지로 나눌 수 있으나, 현실적인 의미가 있는 것은 다음 두가지이다.

1) $\lambda > 1, \xi > 1$ 또는 < 1

이 경우에 모형은 실물보다 작고, 역학적 성질은 실물과 같지 않다. 이때 사면 문제를 생각하면 모형의 사면 흙에 대한 역학적 요구조건은 그림 1에 나타난 바와 같다. 즉, 모어(Mohr) 파괴 포락선은 평행관계를 유지하고(그림 1(a)), 응력-변위관계는 그림 1(b)에 보인 것과 같은 관계를 가져야 한다.



Mohr Envelope



(b) Stress - Strain Curve

그림 1. 역학적상사비가 1이 아닌 경우의 요구 조건

그러나, 대응 시료를 선정하여 이와같은 역학적 관계를 갖게 하는 것은 불가능하다.

2) $\lambda > 1, \xi = 1$

이 경우에 모형은 실물보다 작고, 역학적 성질은 실물과 동일하다. 이때에는 역학적 성질이 동일하므로 모형 사면에 실물 시료(흙)를 사용할 수 있으나, 기하학적 상사비가 1이 아니므로 시료의 단위 중량에 대한 제한 조건이 발생하는데, 사면 문제에 있어서 가장 중요한 하중조건이 사면 흙의 자체 중량이므로 이를 무시할 수 없다. 단위 중량의 상사비(ρ)를 λ 와 ξ 로 나타내면,

$$\rho = \frac{r^p}{r^m} = \frac{\sigma^p \cdot (L^p)^{-1}}{\sigma^m \cdot (L^m)^{-1}} = \xi \lambda^{-1} \quad (3)$$

가 되는데, 여기서 $\xi = 1$ 을 대입하면

$$r^m = r^p \cdot \lambda \quad (4)$$

가 된다. 그런데, 정의상 $r = m \cdot g$ (g : 중력 가속도)이므로

$$r^m = m^p \cdot g \cdot \lambda = m \cdot a \quad (5)$$

가 되는데, 동일 시료를 사용하면 $m^p = m^m$ 가 되므로 모형 시료의 중력 가속도를 λ 배만큼 증가시켜주면 상사법칙을 만족시킬 수 있다.

회전 물체에 있어서 가속도는 접선 방향(a_T)과 회전축 방향(a_R)으로 적용하게 되면(그림 2), 그 크기는

$$a_T = r \frac{dw}{dt} \quad (6)$$

과

$$a_R = w^2 \cdot r \quad (7)$$

이다. 여기서, r 은 회전 반경이고, w 는 각속도이다.

식 (5)과 식 (7)을 연결하면 필요한 원심력 실험기의 회전 각속도를 계산할 수 있는데 식으로 나타내면

$$\lambda \cdot g = w^2 \cdot r \quad (8)$$

이고, 각속도에 대해서 정리하면,

$$w = \sqrt{\frac{\lambda \cdot g}{r}}$$

이다.

4.3.3 원심력 모형 실험 약사

1930년대 초반 지반 공학적 구조물에 대한 모형 실험이 미국 Bucky^{1~5)}와 소련의 Pokrovsky^{6~9)}에 의해서 거의 동시에 독립적으로

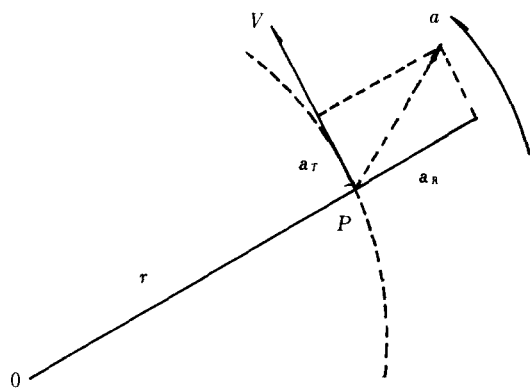


그림 2. 접선 가속도와 축방향 가속도

시작되었다. Bucky는 직경이 8인치의 원심력 실험기 속에서 1268g까지 가속시키면서 아주 작은 모형을 가지고 광산 문제 해결을 위한 실험을 하였는데 그 당시 동료들에게 크게 인정받지 못하였다. 반면에 소련에서는 Pokrovsky와 그의 동료들에 의해서 원심력 실험기를 이용한 지반 공학적 실험이 광범위하게 진행되었다. Pokrovsky는 처음에 0.7~1.5cm 직경의 실험기를 가지고 30g까지 가속하였다.

Bucky가 광산 문제에 대한 실험연구를 시작하던 뒤로 미국의 Panek¹⁰⁾—광산의 아치 구조물 설계를 위한 실험을 수행함—과 Hoek¹¹⁾, 그리고 Pokrovsky & Fyodorov¹²⁾가 편집한 책자의 제 2권에 수록된 바와 같이 많은 소련 학자들에 의해서 광산 문제에 대한 연구가 계속되었다.

1957년 영국의 Rocha¹³⁾는 토질 공학 문제 해결을 위한 원심력 실험기의 이용 가능성을 깊이 연구하였으며, 후에 Roscoe¹⁴⁾에 의해서 보완 수정되었다. 1963년 Roscoe와 Poorooshasb¹⁵⁾이 그들의 논문에서 “토질 모형 실험의 기본 원칙”을 제안하였는데 이후로 영국에서 원심력 모형 실험이 시작되었다.

1975년에 발간된 Pokrovsky와 Fyodorov의 저서¹²⁾에 모형 실험과 원심력 실험에 대한 이론적 배경이 자세히 설명되었는데, 이와 비슷한 주제를 다룬 책으로는 ‘Ramberg¹⁶⁾와 Malushitsky¹⁷⁾ 등의 저서가 있다.

Avgherinos와 Schofield¹⁸⁾는 1969년에 진흙 사면 안정 문제에 대한 예비 실험을 하였으며,

Bassett¹⁹⁾와 Smith & Hobbs²⁰⁾ 등이 그 뒤를 이어서 심도있는 연구를 하였다.

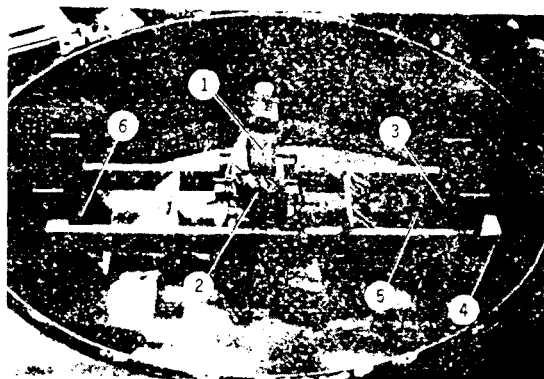
Mikasa와 Takada²¹⁾는 1973년에 열린 제7회 토질 및 기초공학 국제학술 회의에서 “수위 강하가 사력댐의 안정에 미치는 영향”에 대한 원심력 모형 실험 결과를 발표하였는데, 그들이 사용한 원심력 실험기는 시료 상자의 바닥면을 수평으로부터 얼마간 경사지게 조절할 수 있는 장치를 갖추고 있었다.

1975년에 미국 Colorado 주립 대학의 Sutton²⁾은 당시까지의 원심력 모형 실험에 관련된 업적들을 집대성한 논문을 발표하였고, 같은 해에 California 공과대학의 Scott 교수는 원심력 실험기의 지반 공학적 문제에 대한 응용을 토의하기 위한 Workshop²³⁾을 동 대학에서 주관하였다.

1980년대에 이르러서는 원심력 실험기를 이용한 지반공학적 실험이 보편화되었는데, 한편으로는 원심력 모형실험의 한계성과 원심력 모형 실험 만능주의에 반대하는 주장을 하는 학자들의 목소리 또한 점점 높아지고 있다.

4.3.4 원심력 모형 실험 장치

원심력 모형 실험 장치는 회전반경이 크면 클수록 실험오차가 줄어들게 되므로 최근에는 큰 원심력 실험기가 경쟁적으로 제작되고 있다.



- (1) Slip Ring Assembly
- (2) Closed Circuit TV Camera
- (3) Test Package Basket
- (4) Specimen Container
- (5) Mirror System
- (6) Counter-Weight Basket

그림 3. Centrifugal System Used in the Experiments

원심력 실험기는 중앙축을 중심으로 회전팔이 도는 실험 장치로서, 회전 팔 양끝의 한쪽에는 시료 상자 올림 바스켓, 다른 한쪽에는 균형추 올림 바스켓이 위치한다. 실험기의 작동중에 시료 상자 올림 바스켓위에 놓이는 시료 상자내에서 일어나는 상황을 TV 모니터로 보기 위해서 시료 상자 올림바스켓쪽 회전팔 위에 폐쇄회로 TV 카메라를 장치하고 시료 상자 속을 비추는 거울을 향해 고정시킨다. 회전하고 있는 폐쇄회로 TV 카메라와 시료 상자내에 설치한 전기 설비를 외부 전원과 연결시키기 위하여 중앙축에 일련의 '미끄럼 띠(slip ring)'가 설치되어 있다.

그림 3은 Colorado 주립 대학교가 보유하고 있는 원심력 모형 실험 장치중에 소형인 Genisco 1230-5G 형의 사진이다. 이 사진에는 '미끄럼 띠'장치, 폐쇄회로 TV, 시료 상자 올림 바스켓, 균형추 올림 바스켓, 시료상자 비춤거울, 그리고 시료상자 등이 나타나 있다.

참 고 문 헌

1. Bucky, P.B., "The Use of Models for the Study of Mining Problems," A.I.M.E. Technical Paper 425, 1931.
2. Bucky, P.B., "Effect of Approximately Vertical Cracks on the Behavior of Horizontally Lying Roof Strata," *Transaction of AIMME*, Vol.109, pp.212~229, 1934.
3. Bucky, P.B., A.G. Solakian and L.S. Baldwin, "Centrifugal Method of Testing Models," *Civil Engineering*, Vol.5, pp.287~290, May 1935.
4. Bucky, P.B. and R.V. Taborelli, "Effect of Immediate Roof Thickness in Long Wall Mining as Determined by Barodynamic Experiments," *Transaction of AIMME*, Vol.130, pp.314~332, 1938.
5. Bucky, P.B. and R.V. Taborelli, "Effect of Artificial Support in Long Wall Mining, as Determined by Barodynamic Experiments," *Transaction of AIMME*, Vol.139, pp.211~223, 1940.
6. Pokrovsky, G.I., "On the Use of a Centrifuge in the Study of Models of Soil Structures," *Zeitschrift fur Technische Physik*, Vol.14, No.4, pp.160~162, 1933.
7. Pokrovsky, G. and V. Boulytchev, "Soil Pressure Investigation on Sewers by Means of Models," *Technical Physics of the USSR*, Vol.1 No.2, pp. 121~123, 1934.
8. Pokrovsky, G. and I.S. Fyodorov, "An Investigation by Means of Models of Stress Distribution in the Ground and the Setting of Foundations," *Technical Physics of the USSR*, Vol.V, No.4, pp. 299-311, 1935.
9. Pokrovsky, G. and I.S. Fyodorov, "studies of Soil Pressures and Soil Deformations by Means of a Centrifuge," *Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, p.70, 1936.
10. Panek, L.A., "Design of Safe and Economical Arch Structures," *Transactions of AIMME*, Vol. 181, pp.371~375, 1949.
11. Hoek, E., "The Design of a Centrifuge for the Simulation of Gravitational Force Fields in Mine Models," *J. of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol.65, No.9, pp.455~487, 1965.
12. Pokrovsky, G. and I.S. Fyodorov, "Centrifugal Model Testing in the Construction Industry, Vols. I and II, Translation prepared by Building Research Establishment Library Translation Service, Great Britain, 1975.
13. Rocha, M., "The Possibility of Solving Soil Mechanics Problems by the Use of Models," *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* Vol. 1, pp.183~188, 1957.
14. Roscoe, K.H., "Soils and Model Tests," *J. of Strain Analysis*, Vol.3, pp.57~64, 1968.
15. Roscoe, K.H. and H.B. Poorooshasb, "A Fundamental Principle of Similarity in Model Tests for Earth Pressure Problems," *Proceedings 2nd Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 1, p.134, 1963.
16. Ramberg, H., *Gravity Deformation and the Earth's Crust*, Academic Press, New York, 1967.
17. Malushitsky, Y.N., *The Stability of Slopes and Embankments*, (Centrifugal Model Testing), Abstract of Book - English Translation, Kiev, 1975.
18. Avgherinos, P.J. and A.N. Schofield, "Drawdown

- Failure of Centrifuged Models," *Proceedings 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.497~504, 1969.
19. Bassett, R.H., "Centrifugal Model Tests of Embankments on Soft Alluvial Foundations," *Proceedings 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2.2, pp.23~30, 1973.
 20. Smith, I.M. and R. Hobbs, "Finite Element Analysis of Centrifuged and Built-Up Slopes," *Geotechnique*, Vol.24, No.4, pp.531~559, 1974.
 21. Mikasa, M., N. Takada, and K. Yamada, "Centrifugal Model Tests of a Rockfill Dam," *Proceedings 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp. 325~333, 1969.
 22. Sutton, J.R., "The Use of Models in Geotechnical Engineering", M.S. Thesis, University of Colorado Boulder, 1975.
 23. Scott, R.F., "Brief Historical Background of Geotechnical Testing by Centrifuge," Attachments of Workshop on Centrifugal Testing of Geotechnical Models, California Institute of Technology, December 1975.