

지반공학 분야에서 교육용 도구로서의 원심모형실험 활용법 (옹벽 모델의 예를 중심으로)

Utilization of an Instructional Centrifuge Test for Teaching in Geotechnical Engineering (Focus on Retaining Wall Model)

김태형¹⁾, Tae-Hyung Kim, 이강일²⁾, Kang-Il Lee, 김태훈³⁾, Tae-Hoon Kim, 이성철⁴⁾, Sung-Chul Lee, 황중호⁴⁾, Joong-Ho Hwang

- 1) 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수, Assistant Professor, Div. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University
- 2) 대진대학교 건설시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University
- 3) 대우건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology
- 4) 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Depart. of Civil and Environ. Engineering, Korea Maritime University

SYNOPSIS : Recently, centrifuge tests have been widely used as tools in geotechnical engineering researches in domestic and foreign. However, the size of these centrifuge facilities is very large and thus the tests require for long time, high expense, and many labors. In this study, therefore, a small capacity(2g ton) of instructional centrifuge, which can conduct tests in a short period of time effectively, was introduced. The results of centrifuge tests conducted on the retaining wall both passive and active cases was used. Medium size of sand was used with sieve off fines in sand using #40 sieve. Based on the test results, this centrifuge facility introduced in here can be enough used for geotechnical engineering education for graduate and undergraduate students

Key words : Instructional centrifuge, retaining wall, sand, passive, active

1. 서론

기초, 댐, 사면안정, 옹벽 등의 다양한 토류구조물의 응력-변형 거동 및 파괴 메커니즘을 연구하기 위해서는 여러 가지의 이론적 방법과 실험적 방법을 사용한다. 실험적 방법에서는 실물실험의 수행 및 결과분석이 가장 이상적인 방법이지만 여러 가지 경제조건 및 초기조건 등을 변화시키면서 지반의 거동 및 파괴에 대한 지내력을 확인함에 있어서 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 소형의 모형실험을 통해 실험을 실시하게 되는데 이와 같은 축소된 모형실험에서는 토립자의 자중에 의한 응력의 효과가 무시되거나 상사법칙이 고려되지 않는 상태에서 실험이 수행되기 때문에 그 결과의 신뢰성에 대하여 의문이 제기되고 있다. 하지만 원심모형실험은 실내에서 축소된 모형을 사용하지만 인위적으로 모형을 가속 시킴에 따라 토립자의 자중을 증가시킴으로써 현장상태의 응력을 재현시켜 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 효율적인 실험기법으로 알려져 있어 지반공학에서 그 중요성이 날로 증가되고 있다. 그러나 이와 같은 실험 장비는 설치하는데 많은 비용이 소요되어 국내의 경우 몇 개의 대학 및 연구소에 국한되어 운영되고 있는 실정이다.

본 연구는 이와 같은 고가장비를 좀 더 효율적인이고 매우 저렴하면서도 짧은 시간 내에 지반을 모델링하여 시험을 마무리할 수 있는 소형 원심모형실험기의 활용 예에 대하여 소개하고자 한다. 특히 원심모형실험은 지반공학 분야의 실험분야에서 매우 중요한 실험임에도 불구하고 우리나라 학부 및 대학원 교육과정에서는 이론 위주로 간단히 소개되는 수준이다. 그러나 선진국인 미국에서는 벌써 몇 개 대학에서 대형원심모형 실험 장비를 소형으로 매우 저렴하게 제작하여 실험실에서 학생들에게 사면, 기초, 옹벽등과 같은 지반구조물을 직접 모델링하고 실험을 진행하게 하여 지반구조물이 파괴되어가는 과정 및 지반의 응력-변위관계 등을 직접 눈으로 확인하고 실험결과와 수치해법을 실시하는 살아있는 교육을 진행하고 있다. 본 연구는 이와 같이 소형 원심장치를 이용하여 옹벽의 모델링을 한 예로 들어서 실험 진행과정 및 분석을 실시하였으며 본 연구를 통해 국내에도 이러한 장비의 개발을 통해 지반공학 분야의 실험교육의 개선을 기대해 본다.

2. 원심모형시험의 지반응력재현 방법

원심모형실험이란 축소모형을 원심력장에 놓고 이러한 모형에 실물과 같은 자중응력을 작용시켜 그 변형과 파괴의 거동을 고찰하는 실험 장치이다. 표 1은 원심모형실험에서 원형과 모델사이의 상사 관계를 나타낸 것이다. 원심모형실험에서 가장 중요한 것은 실물과 모형간의 상사성 문제이다. 실물과 축소모형 지반내의 응력상태를 1-g 상태와 N-g의 원심장에서 비교해보면, 실물의 심도 H에서의 한 점의 지반응력은 γH 로 표현할 수 있다. 이를 1-g 상태의 소형 모형으로 생각하면 깊이와 그 점의 응력이 각각 실물의 1/N으로 축소되어, 1-g 상태의 소형 모형에서 실지반의 응력상태 재현에는 한계가 있음을 알 수 있다. 반면에 N-g장에서는 1/N로 축소된 심도에서의 한 점 응력은 γH 로 표현되어 실물과 동일하게 됨을 알 수 있다. 물론 N-g 상태의 원심력장에서는 응력이 지반 깊이 방향으로 선형적 변화는 하지 않으나 소형 모델화에 있어서 원심모형실험이 응력의 상사성의 문제를 해결해 줄 수 있는 방법임을 알 수 있다.

그 외 원심모형실험과 관련해서 반드시 알아야 할 몇 가지 사항은 다음과 같다: 모델로 사용된 흙의 단위중량이 깊이에 따라 일정한지, 모델 상자에서의 경계효과 문제, 모래와 같은 조립토를 실험에 사용하는 경우 입자크기규모효과 문제. 원심모형실험 시 위 문제점들을 고려해서 실험을 관찰하고 결과를 분석 하여야 할 것이다. 특히 본 연구에서 사용되는 작은 규모의 원심모형의 경우 이들 문제점은 큰 규모의 원심모형에 비해 상대적으로 큰 오류를 발생시킬 수 있으므로 더욱 주의가 요구된다.

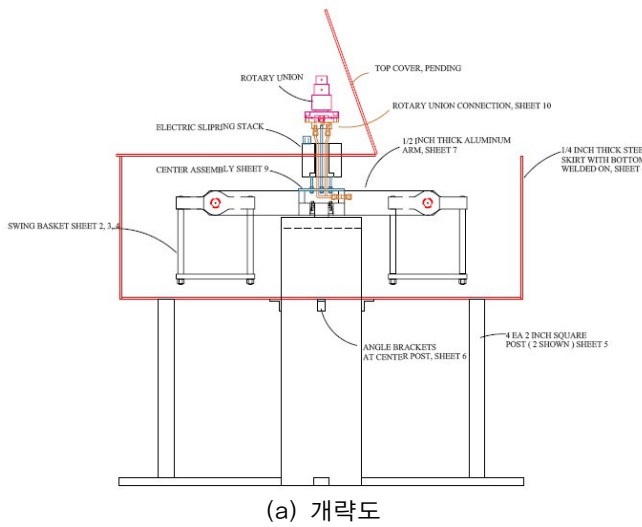
표 1. 원심모형실험에서 원형과 모델 사이의 비례관계

항목	prototype(실제)	scaled(모델)
length	N	1
area	N^2	1
volume	N^3	1
velocity	1	N
acceleration	1	N
mass	N^3	1
force	N^2	1
stress	1	1
strain	1	1
time(advection)	N^2	1

3. 실험장치 및 절차

3.1 실험장비

실험은 미국의 University of Colorado at Boulder의 지반공학연구실 소유의 교육용 원심모형실험장치(2g ton)를 사용해서 실험을 실시하였다. 그림 2는 원심모형실험장치의 개요도를 나타낸 것으로서 전체원통의 직경은 130cm이고 팔의 길이는 74cm이며 전체높이는 103cm이다. 본 장치는 크게 원심장치, 전체시스템을 컴퓨터로 제어하는 제어장치로 구성되어 있으며 실험시작과 동시에 모든 제어 및 계측 그리고 분석은 컴퓨터로 자동기록 및 분석이 이루어진다. 또한 원심장치내부에는 모형 탑재장치와 균형추 그리고 모델의 실험과정을 기록하는 고속 카메라 등이 설치되어 있다.



(a) 개략도

(b) 내부 모습

그림 2. 교육용 원심모형실험장치 (University of Colorado at Boulder, 2g ton)

3.2 실험절차

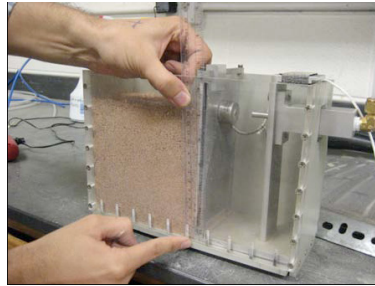
먼저 원심모형실험기의 전원을 켜고, 냉각팬이 작동되는지 확인하고, 운용 프로그램을 가동시킨다. 용벽 모델 컨테이너의 개략적인 무게중심을 구하고 컨테이너 밑 부분으로부터 무게중심까지의 거리를 정하고, 컨테이너의 질량(m_c)도 측정한다. 모래 시료를 사용하여 용벽을 만들기 위해 먼저 시료와 접하는 금속 면을 사포를 사용하여 깨끗하게 하고 공기압을 이용하여 이물질을 제거한다. 또한 좀 더 좋은 시야확보를 위해 투명 아크릴의 내·외부를 부드러운 형겔과 종이를 사용하여 깨끗하게 한다. 하중전달을 위해 필요한 모든 전선을 접속한다. 이때 전선들이 서로 엉키지 않도록 주의 한다. 공시체를 준비하고, 수동상태 시험을 하는 동안 모델 벽을 원래 위치에 유지시키는 역할을 하는 고정핀을 설치하다(그림 3(a)에서 원으로 표시). 재하 피스톤으로부터 힌지까지 높이와 컨테이너 바닥으로부터 힌지까지의 높이를 측정한다(그림 3(c)). #40번 체를 사용하여 공시체 시료로 사용할 모래의 세립분을 제거한다. 이것은 세립의 모래가 모델의 용벽과 컨테이너 앞과 뒤 사이에 침투하는 것을 방지하기 위해서이다. 준비된 모래시료를 깔때기를 사용하여 일정한 높이에서 낙하시킨 후 상부 면을 평형하게 고르고 초과된 모래는 제거한다. 모래로 형성된 용벽 모델 전체질량(m_t)를 측정하여 모래의 질량을 계산한다($m_s = m_t - m_c$). 모래공시체의 전체 치수를 측정하여 모래의 부피, 단위부피당 질량을 계산한다. 그 다음 모래를 포함한 전체 모델에 대한 새로운 무게중심을 계산한다.

$$C.O.G. x_{cog} = (W_c x_c + W_s x_s) / (W_c + W_s) = (m_c x_c + m_s x_s) / (m_t) \quad \text{식 (1)}$$

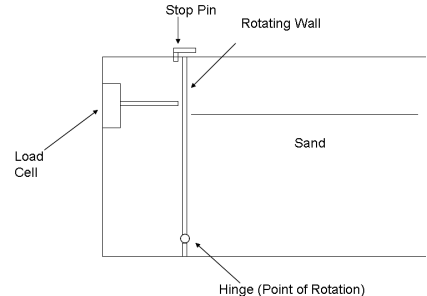
여기에서 무게 $W=mg$ 이므로 g 가 공통 요소이므로 삭제할 수 있고, x_s 는 컨테이너 바닥으로부터 모래 공시체에 대한 무게중심이다. x_{cog} 는 원심모형기 팔의 균형과 수평토압계수 계산에 필요한 g 의 N 값을 다시 계산하는데 사용된다.



(a) 모델 컨테이너



(b) 모델 제작 과정



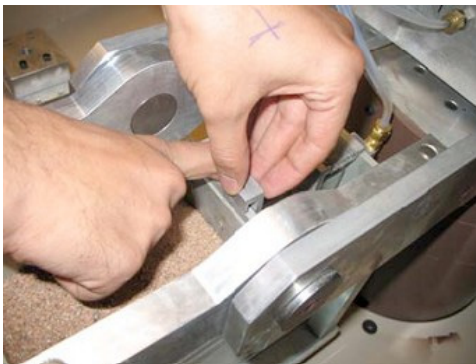
(c) 모델 모식도

그림 3. 원심모형실험을 위한 응벽 모델 제작 과정

응벽 모델이 완성되면 원심모형시험기 팔에 설치된 모형 탑재장치에 모델을 놓고 고정한다. 응벽의 변위와 작용된 힘을 측정하기 위한 전선을 연결하고 공기시스템 하중을 전달하는 튜브관을 연결한다. 무게중심 x_{cog} 와 모래를 포함한 컨테이너의 전체 질량(m_t)에 의해, 균형추의 무게를 산정하여 올려놓고, 원심모형기 뚜껑을 닫는다.

수동상태 실험에서 모델 벽은 고정핀으로 고정되어 실험 초기에는 아무런 힘이 응벽에 필요하지 않다. 원심모형시험기를 50g 까지 회전시킨다. 이때 원심모형기 속도는 컨테이너 하부에서 측정한다. 응벽에 공기압시스템을 이용하여 힘을 천천히 증가시켜 최대까지 작용시킨다. 컴퓨터는 힘과 변위를 기록한다. 여기서 한 가지 알아야 할 것은 본 장치에 사용된 공기압시스템으로는 완전 수동상태 파괴를 일으킬 정도로 충분한 힘을 제공하지는 못한다. 이것은 실험 결과에서 확인 할 수 있다(그림 5 참조).

주동상태 실험에서는 모델 벽을 원래 위치에 지탱시킬 수 있을 정도의 힘만을 공기압시스템을 이용 작은 힘 만을 작용시킨다. 손으로 모델 벽을 원래 위치에 있게 잡고, 금속 고정판의 위치를 반대로 이동하고, 공기압을 50 psi 까지 증가시킨다. 이 힘은 고정핀에 작용하므로 이 상태에서 모델 벽은 정지상태(0 변위상태)이다. 원심모형시험기를 50g 까지 회전시킨 상태에서 완전 주동파괴가 발생할 때 까지 벽에 작용하는 공기압을 천천히 감소시켜 실험을 진행한다.



(a)수동상태



(b) 주동상태

그림 4. 응벽 모델의 원심모형실험 : (a) 수동상태, (b) 주동상태

4. 실험결과 및 해석

4.1 수동상태

먼저, 모델의 무게중심에 대해 g 의 N 값을 아래 식을 이용하여 다시 계산한다.

$$N = (0.565m - x_{cog})\omega^2 / (9.8m/s^2) \quad \text{식 (2)}$$

여기서 $\omega^2 = (50)(9.8m/s^2) / 0.565m = 868 \text{ rad/s}^2$ 이다.

수동상태에서 모델 벽에 작용된 힘과 변위 관계를 그려 작용된 힘(T)의 최대값을 구한다. 모델 옹벽 배면의 토압분포를 선형으로 가정하면, 힘 $P (= 0.5 K_v N H_m^2 t_m)$ 는 $H_m/3$ 위치에 작용한다. 여기서 H_m 은 모래 상부로부터 힌지까지의 높이이고, N 은 무게중심에 대한 g 의 값, $\gamma_s (= \rho_s \cdot 9.8kg/m^3)$ 는 1g상태에서의 모래의 단위중량이다. 힌지에 대한 모멘트를 취하면 수평토압계수 K 를 풀 수 있다(그림 5 a).

하지만 그림 5(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 실험 초기와 말기 사진을 비교해 보면 모델 벽의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 수동상태 실험에서 산정된 토압계수 K 가 수동토압계수 K_p 를 의미하지는 않는다는 것이다. 이것은 본 실험에 사용된 공기압시스템이 완전 수동상태 파괴를 일으킬 정도로 충분한 힘을 제공하지는 못하기 때문이다.

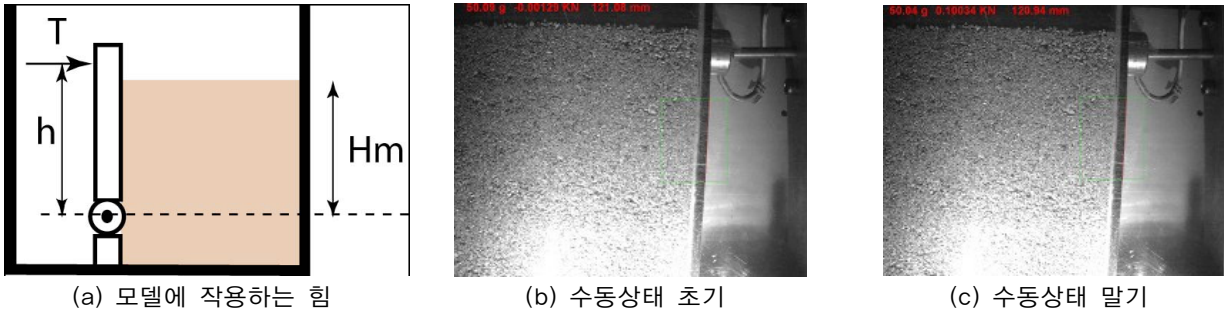


그림 5. 원심모형실험에서 토압계수 계산에 필요한 힘의 관계와 수동상태 실험 동안 옹벽의 거동

4.2 주동상태

수동상태에서와 같은 방법으로 주동상태에 얻은 실험 결과를 분석하여 주동토압계수 K_a 를 산정한다. 이것을 이용하여 마찰각(ϕ)을 계산한다. 또한 주동상태 실험에서 촬영된 마지막 사진을 이용하여 파괴면의 각도(θ_f)를 측정하여 Rankine과 Coulomb의 주동토압이론을 이용하여 마찰각을 구한다($\phi = 2(\theta_f - 45^\circ)$). 이 값을 K_a 로부터 계산된 값과 비교한다. 계산된 이들 마찰각을 직접전단실험과 삼축압축실험에서 측정된 마찰각과도 비교한다.

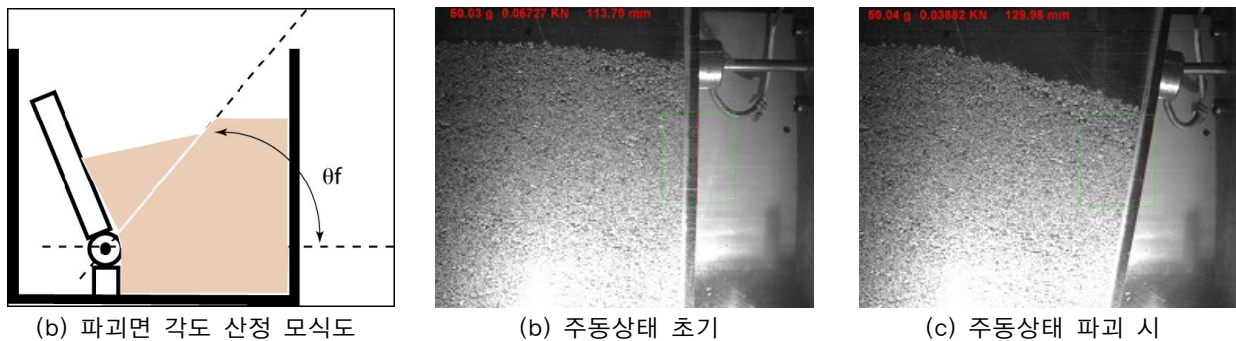


그림 6. 주동상태 파괴 시 파괴면 각도 산정과 주동상태 실험 동안 옹벽의 거동

5. 결 론

원심모형실험장치를 소형(2g ton)으로 제작하여 학부 및 대학원 교육을 위한 원심모형 실험의 예를 용벽의 모델링을 통해 검토하였다. 본 실험에 사용된 공기압시스템이 완전 수동상태 파괴를 일으킬 정도로 충분한 힘을 제공하지는 못하기 때문에 수동토압계수 K_p 를 산정할 수 는 없었다. 하지만 주동상태에 대해서는 완전 파괴 상태를 발생시킬 수 있었으며 주동토압계수와 마찰각을 산정할 수 있었다.

용벽 모델 실험에서 알 수 있는 바와 같이 이 소형 원심모형실험장치는 제작비용이 매우 저렴하고 실험하고자하는 모형장치 제작 및 실험 소요 시간이 매우 짧은 장점을 가지고 있다. 또한 이 장치는 많은 학생들이 직접 지반공학 분야의 구조물을 모델링하고 파괴과정 및 지반의 응력-변위관계의 데이터를 직접 획득하게 함으로써 매우 실용적인 교육도구임을 알 수 있다.

참고문헌

1. 高田直俊, 日下部治(1987), “講座「遠心模型實驗」3. 原理”, *土と基礎*, Vol.35, No.12, pp. 89-94.
2. Hon-Yim Ko(1988), Summary of the state-of-the-art in centrifuge mode testing, *Centrifuge in Soil Mechanics*, Craig, James & Schofield, Balkema, Rotterdam, pp.11-18.
3. R.F.Craig(2004), "Craig's Soil Mechanics" Seventh edition, Spon press.