

사면 및 옹벽에서의 교육용 원심모형 실험장치 활용사례



이강일
대진대학교
건설시스템공학과 교수
(kilee@daejin.ac.kr)



김태형
한국해양대학교
건설환경공학부 조교수
(kth67399@hhu.ac.kr)



이준용
University of Colorado
at Boulder 박사과정
(joonyong.Lee@colorado.edu)

1 머리말

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 여러가지 경계조건 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 모형 실험에서는 토립자의 자중에 의한 응력의 효과가 무시되거나 상사법칙이 고려되지 않는 상태에서 실험이 수행되기 때문에 그 결과의 신뢰성에 대하여 문제가 제기되고 있다. 이와는 달리 원심모형 실험은 실내에서 축소된 모형을 사용하지만 인위적으로 모형을 가속시킴에 따라 토립자의 자중을 증가시킴으로써 현장상태의 응력을 재현시켜 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 효율적인 실험기법으로 알려져 있어 지반공학에서 그 중요성이 날로 증가되고 있다 (Ko, 1988). 그러나 이와 같은 장비는 설치하는데 고가의

비용이 소요되어 국내의 경우 몇 개의 대학 및 연구소에 한정되어 운영되고 있다.

본 연구는 이와 같은 고가장비 대신 좀 더 효율적이고 매우 저렴하면서도 짧은 시간 내에 지반을 모델링하여 실험을 실시할 수 있는 소형 원심모형 실험기의 활용법 및 그 예에 대하여 소개하고자 한다. 특히 원심모형 실험은 지반공학 분야의 실험분야에서 매우 중요한 실험임에도 불구하고 우리나라 학부 및 대학원교육과정에서는 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 진행하도록 하여 지반구조물의 파괴과정 및 지반의 응력-변위관계 등을 실험을 통해 직접 확인하고 그 결과와 수치해석을 비교하는 수준 높은 교육을 진행하고 있다.

따라서 본 연구는 이와 같이 소형 원심장치에 대한 장비 활용 및 모델제작 방법에 대하여 소개하고 사면안정 및 주동 및 수동상태의 옹벽의 모델링을 통한 실험진행과정 및 분석을 실시하여 본 장비의 활용 가능성 및 국내의 장비개

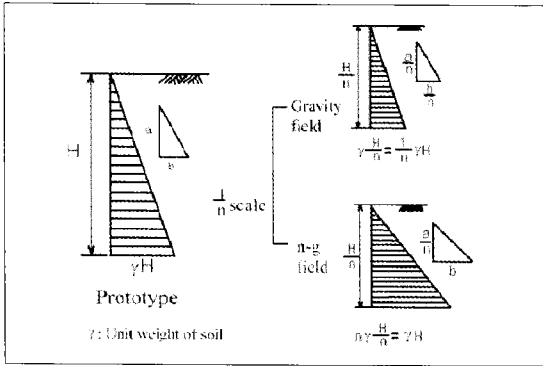


그림 1. 1-g 상태(중력장)와 n-g의 가속도장에서 비교(Kusakbe,1987)

발을 위한 기초 연구 자료를 제공하고자 한다. 본 연구에서 소개되는 실험절차 및 실험결과는 CU대학의 정규교과목인 토질실험의 한 실험분야로서 학부생들의 실험과정 및 그 리포트 결과를 중심으로 소개하였으며 본 저자들도 학부생 실험에 직접 참여하였다.

2. 원심모형 실험

원심모형 실험이란 축소모형을 원심력장에 놓고 이러한 모형에 실물과 같은 자중응력을 작용시켜 그 변형과 파괴의 거동을 고찰하는 실험 장치이다. 표 1은 원심모형 실험에서 원형과 모형사이의 상사 관계를 나타낸 것이다. 원심모형 실험에서 가장 중요한 것은 실물과 모형간의 상사성 문제이다. 실물과 축소모형 지반내의 응력상태를 1-g 상태(중력장)와 n-g의 가속도장에서 비교해보면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실물의 심도 H에서의 한 점의 지반응력은 γH 로 표현할 수 있다. 이를 중력장의 소형 모형내에서 생각하게 되면 깊이와 그 점의 응력이 각각 실물의 1/n으로 축소되어, 중력장의 소형모형내에서 실지반의 응력상태 재현에는 한계가 있음을 알 수 있다. 반면에 균질의 n-g장에서는 1/n로 축소된 심도에서의 한 점 응력은 γH 로 표현되어 실물과 동일하게 됨을 알 수 있다. 물론 n-g장의 원심력장에서는 균질의 n-g장과 같이 응력이 지반 깊이 방향으로 선형적 변화는 하지 않으나 소형 모형화에 있어서 원심모형 실험이 응력의 상사성

표 1. 원심모형 실험에서 원형과 모형 사이의 비례관계(Ko, 1988)

항목	Prototype(실제)	Model(모형)
Length	N	1
Area	N^2	1
Volume	N^3	1
Velocity	1	1
Acceleration	1	N
Mass	N^3	1
Force	N^2	1
Stress	1	1
Strain	1	1
Time(Diffusion)	N^2	1

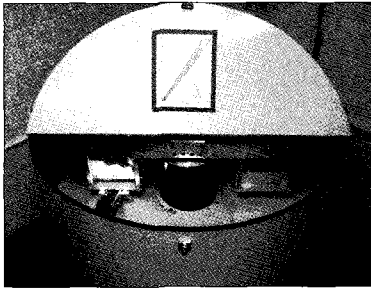
의 문제를 해결해 줄 수 있는 방법임을 알 수 있다.

원심모형 실험과 관련하여 반드시 알아야 할 몇 가지 사항은 다음과 같다. 모델로 사용된 흙의 단위중량이 깊이에 따라 일정하지, 모형 상자에서의 경계효과 문제, 모래와 같은 조립토를 실험에 사용하는 경우 입자크기 규모효과 문제 등이며 원심모형 실험 시 위 문제점들을 고려해서 실험을 관찰하고 결과를 분석하여야 한다. 특히 본 연구에서 사용되는 교육용 원심모형장치는 낮은 하중용량과 모형의 치수가 작기 때문에 실험 시 많은 오류가 발생할 수 있다. 따라서 학생들에게 흙의 모델에서 심도에 따라서 단위중량은 일정하기? 상대적으로 작은 모형으로 인한 경계조건의 영향 무엇인가? 등등을 실험을 통해 인지시키고 교육시킬 필요가 있다.

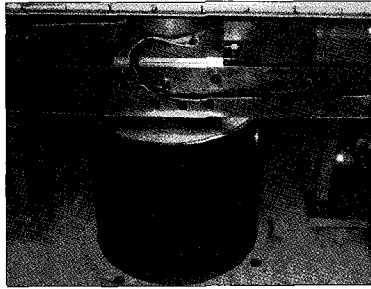
3. 원심장치 및 실험절차

3.1 교육용 원심장치

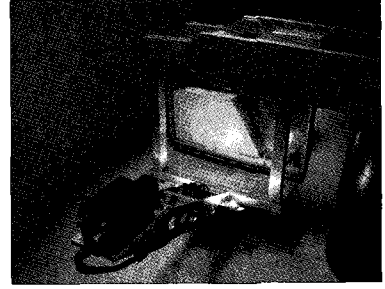
실험장치는 미국의 University of Colorado at Boulder(CU)의 지반공학연구실이 보유하고 있으며 학부 학생들의 교육을 위해 제작된 원심모형 실험장치(2g-ton)이다. 본 장치는 소형 원심장치(CU 연구실의 경우 연구용은 15g-ton, 400g-ton 보유)이므로 모형장치의 제작이 매우 용이하고, 사용법이 간단하며 또한 매우 경제적인 장점을 가지고 있다. 그림 2는 교육용 원심모형 실험장치를



(a) 전체장치도



(b) 내부장치



(c) 컨테이너설치대

그림 2. 교육용 원심모형 실험장치(University of Colorado at Boulder, 2g-ton)

표 2. 실험 재료의 기본 물성치

실험 시료	애터버그한계		곡률계수(c_c)	균등계수(c_u)	G_s	상대밀도(%)	USCS
	액 성(%)	소 성(%)					
카올리나이트	50.5	34.1	-	-	2.72	-	CH
Patio 샌드	비소성		1.07	4.17	2.64	70	SM

나타낸 것으로 전체원통의 직경은 130cm이고 팔의 길이는 74cm이며 전체높이는 103cm이다. 본 장치는 크게 원심장치, 전체 시스템을 컴퓨터로 제어하는 제어장치로 구성되어 있으며 실험시작과 동시에 모든 제어 및 계측 그리고 분석은 컴퓨터로 자동기록 및 분석이 이루어진다. 또한 원심장치내부에는 모형 탑재장치와 균형추 그리고 모형의 실험과정을 기록하는 고속 카메라 등이 설치되어 있으며 200g까지 실험이 가능하다.

본 연구에서 사용한 시료는 모형사면의 경우 $\psi=0$ 인 균질한 사면을 재현하기 위해 카올리나이트 점토를 응벽의 경우는 미국 Home Depot에서 구입한 Patio샌드를 사용하였는데 그 이유는 Patio샌드는 그림 3의 입도곡선에서와 같이 디지털 이미지 장치에서 입자 개개의 이동을 쉽게 감지할 수 있는 입경을 가지고 있기 때문이다. 실험시료의 기본 물성은 표 2와 같고 입도곡선은 그림 3과 같이 모래의 경우만 제시하였다.

3.2 시료특성 및 실험절차

1) 시료특성

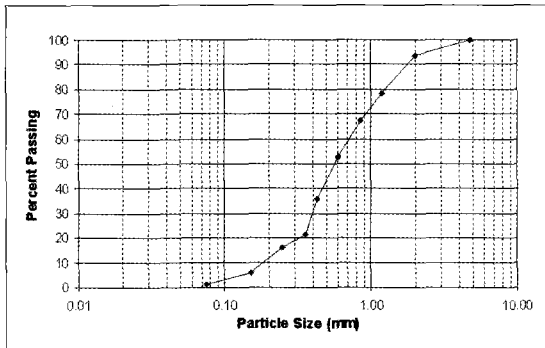
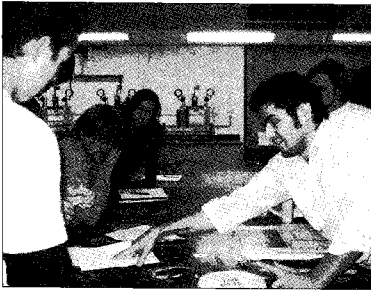


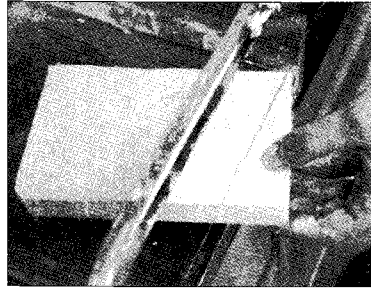
그림 3. 실험에 사용된 Patio 샌드의 입경가적곡선

2) 사면 모델링

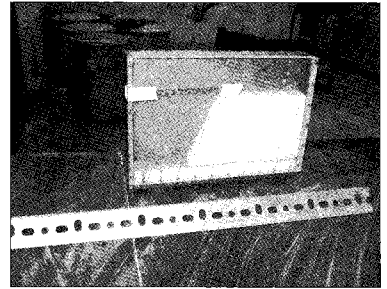
사면의 모형장치는 그림 4(c)와 같이 모형의 전체 폭은 255mm, 높이 180mm, 두께는 25mm이며 이 장치 안에 원통형 대형 압밀장치를 이용하여 사전에 압밀시켜서 준비한 시료를 필요한 규격에 맞도록 절취한 뒤 모형장치의 샌드페이퍼(사포)가 부착된 플라스틱 직사각형 막대기 위에 시료를 설치한다(그림 4(b), (c)). 이때 시료의 두께는 표면의 마찰력을 최소화하기 위해 모형 컨테이너 내부 두께(25mm) 보다는 작아야 하며 사면의 경사각은 $\beta(x=H/\tan\beta)$ 를 가정한 뒤 원하는 경사각으로 시료를 준비한다. 본 실험에서 적용한 시료는 카올리나이트 점토이며 모형 사면의 시료 높이는 80mm, 시료의 두께는 23mm이며 사면의 경사는 65o로 매 실험시료에 따라서 사면의 크기는 변한다.



(a) 사면 실험준비

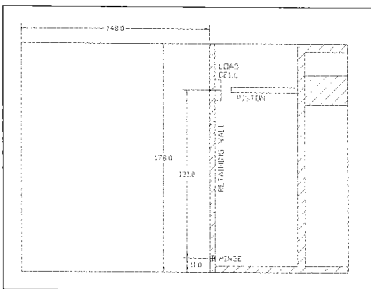


(b) 사면 경사각 절단

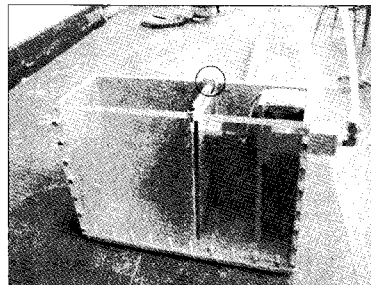


(c) 모형장치에 시료설치

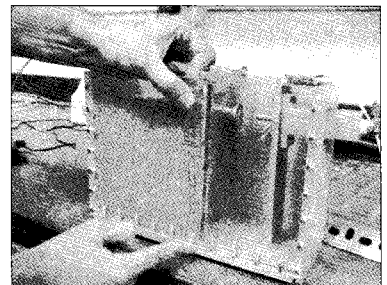
그림 4. 사면모형 제작



(a) 모형 모식도(mm)



(b) 모형 컨테이너



(c) 모형제작과정

그림 5. 옹벽모형 제작

실험 조건은 plane strain으로 가정하였다.

이와 같이 모형실험장치가 준비되면 원심장치의 버킷 중앙에 모형실험장치가 들어있는 컨테이너를 올려놓고 주어진 질량과 점토시료를 갖는 모형컨테이너의 중력의 중심(COG)를 통해 필요한 균형추의 무게를 계산하여 반대편의 다른 버킷에 동일 무게의 균형추를 올려놓는다. 실험은 60g/min으로 150g를 작동시키고 사면이 파괴될 때의 g의 N값을 기록한다. 실험이 끝나면 사면이 아닌 일부 점토시료로 베인전단 실험기를 이용해서 원심장치를 통해 압축된 점토의 수정비배수전단 강도를 체크한다.

3) 옹벽 모델링

옹벽모형장치는 그림 5(a)와 같이 높이는 178mm, 길이 148mm, 두께는 80mm이다. 본 모형장치는 재하피스톤 및 로드셀(Omegadyne에서 제작된 LOGD-100모델로 용량은 0.445kN), 수동상태 실험시 모형벽을 원래 위치에 유지시키는 역할을 하는 고정핀(그림 5(b)에서 원으로 표시), 바닥으로부터 11mm위에 위치하는 힌지 그리고 벽체(알

루미늄) 등으로 구성되어 있다. 옹벽모형에 사용한 시료는 Patio샌드로 세립의 모래가 모형의 옹벽과 컨테이너 앞과 뒤 사이에 침입하는 것을 방지하기 위해서 No.100번체로 모래의 세립분을 제거한 후 사용하였다. 준비된 모래시료는 필요한 단위중량(본 실험의 경우 17.0kN/m³) 만큼의 모래량과 낙하높이(본 실험의 경우 1.57m)를 계산하여 상대밀도 70%인 조건으로 공시체를 만들어 사용하였다. 상부표면의 경사각(θ)은 실험 조건에 따라서 경사각을 임의로 바꾸어 제작하여 실험을 실시할수 있다.

실험속도는 60g/min으로 모형 탑재대 바닥에서 100g를 가동시켰으며 옹벽벽체 중앙부에서는 91g가 체크되었다. 따라서 실제 모형실험시 무채움 옹벽의 높이는 81mm로 시험하였기 때문에 이 옹벽은 실제 7.4m 해당되는 규모이다. 수동 또는 자동상태는 옹벽의 공기압 시스템의 힘을 이용하여 유발시킨다.

4. 실험결과 및 해석

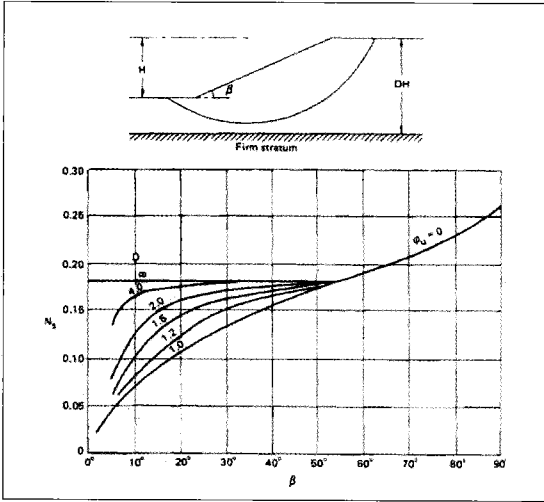


그림 6. $\psi=0$ 인 경우 테일러의 안정도표(R, F. Craig, 2003)

4.1 사면의 예

1) 베인전단 실험 및 g상태의 N값 계산

준비된 시료를 가지고 베인전단 실험을 통해서 회전모멘트 T를 측정하여 비배수전단강도 C_u 값을 계산하며 또한 원심모형 실험이 종료되면 실험을 통해 다짐된 점토시료를

가지고 또다시 베인전단실험을 수행하여 점토의 수정비배수전단 강도를 체크한다. 다음으로 모형사면 제작시 결정된 사면의 경사각 β (본 실험의 경우 65°)와 그림 6의 그림을 이용하여 Taylor의 안정계수 N_s 값을 구하면 0.2가 얻어지며 사면파괴를 일으키는 g의 값은 $N=C_u/(gN_sH)$ 식을 통해 계산하면 38.5g 값이 구해진다. 이 값은 이론식을 통해 사면의 파괴가 예상되는 중력상태에서의 N값이다. 여기서 흙의 단위중량은 18kN/m^3 이며, 사면의 높이는 80mm이다.

2) 해석

원심모형 실험기에 장치한 고속카메라(초당 2회 촬영)로부터 촬영된 사면의 파괴과정을 그림 7에 나타내었다. 이 그림으로부터 파괴면을 작성하고 호의 길이 L_a 와 반경 r(점토는 비배수 조건이므로 파괴면은 원형으로 가정), 파괴면의 중력의 중심(COG)에서 원점까지의 거리 d를 측정하고 파괴된 사면의 중량 W를 계산한다. 이 값을 가지고 사면이 파괴되기 시작하는 중력상태 g에서 안전율 $F=C_u \cdot L_a \cdot r / (W \cdot d)$ 을 계산하고 더불어 파괴된 이미지 사진으로부터 실제 파괴시 N값을 찾는다.

안전율을 계산하기 이전에 아래 식 (1)과 식 (2)를 통해 ω

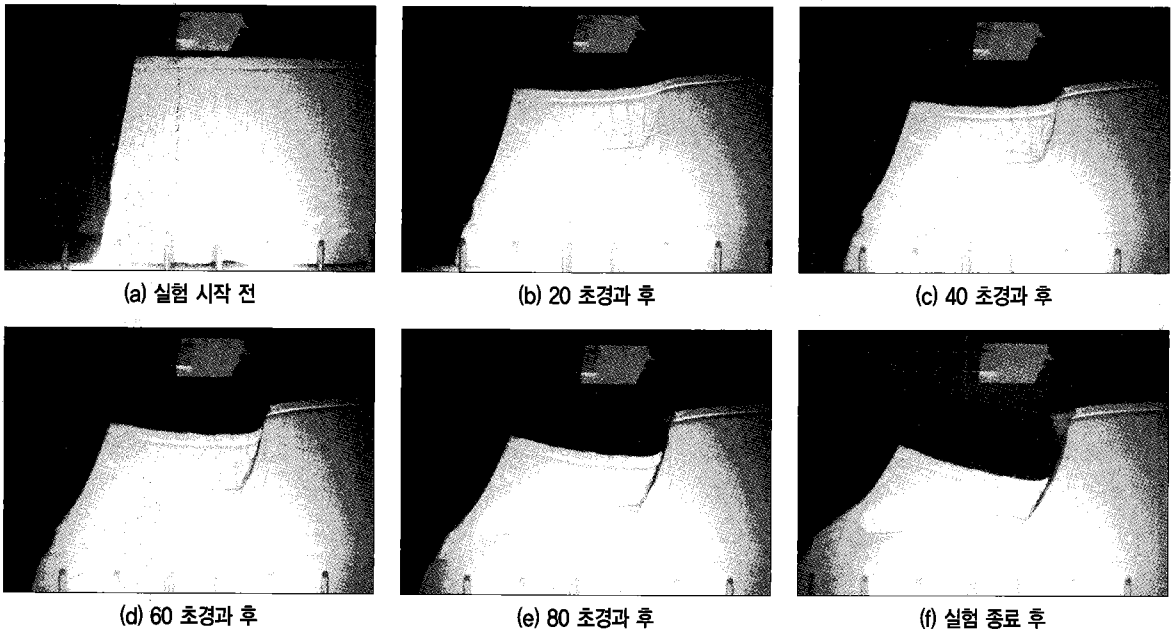
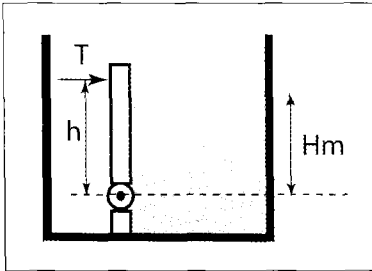


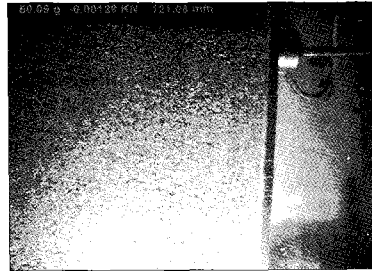
그림 7. 원심모형 실험을 통한 사면의 이미지 파괴진행 과정

표 3. 계산방정식과 파괴사면 및 이미지 그림으로부터 얻어진 각종 매개변수 결과

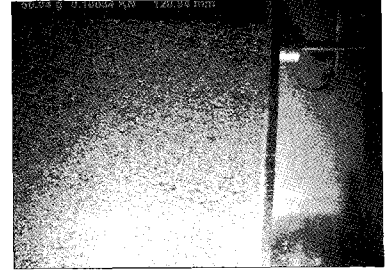
Torque	C _u	N _{expected}	L _a	d	\bar{x}_{slop}	Area	W	N _{actual}	N _{refactor}	N _{s(before)}	N _{s(after)}
44,02mmN	11,09kPa	38,5g	0,205m	0,02545m	0,0334m	0,00548m ²	3,3kN/m	35,8g	36,22g	0,2	0,21



(a) 모형에 작용하는 힘



(b) 수동상태 초기



(c) 수동상태 말기

그림 8. 원심모형 실험에서 토압계수 계산에 필요한 힘의 관계와 수동상태 실험 동안 옹벽의 거동 예

과 $N_{refactor}$ 값을 구한 뒤 파괴시 안전율 $F=1$ 로 가정하고 Taylor 안정계수 $N_s = C_u / (\gamma_{refactor} H)$ 을 계산한다. 이 값을 가지고 그림 6의 Taylor 안정차트 위에 실험한 사면경사 β 와 Taylor안정계수 N_s 를 다시 그려 이전에 구했던 N_s 값과 비교하여 정리한다.

$$\omega^2 = \frac{N(9.8m/s^2)}{0.565m} \quad (1)$$

$$N_{refactor} = \frac{(0.565m - x_{slop})\omega^2}{9.8m/s^2} \quad (2)$$

상기의 실험절차 및 과정을 통해 얻은 각종 매개변수를 표 3에 정리하여 나타내었다. 표 3의 결과에 의하면 파괴시 예상되는 $N(expected)$ 값은 38.5g가 얻어졌으며 실험값을 통해 수정된 $N(refactor)$ 값은 36.22g가 얻어졌다. 그러나 실제 원심모형 실험을 통해 사면의 파괴시 예측된 $N(actual)$ 값은 35.8g가 얻어졌다. 이와 같은 차이가 발생된 이유는 실험과정에서 설치한 컨테이너 박스가 약간 균형이 잡히지 않은 상태에서 실험을 실시한 점과 두 번째는 계산에 이용된 점토시료의 점착력과 단위중량 값이 실험결과와 정확하지 않을 수도 있고 호의길이 등을 손으로 체크하면서 발생할 수 있는 문제점 등으로 판단된다.

4.2 옹벽의 예

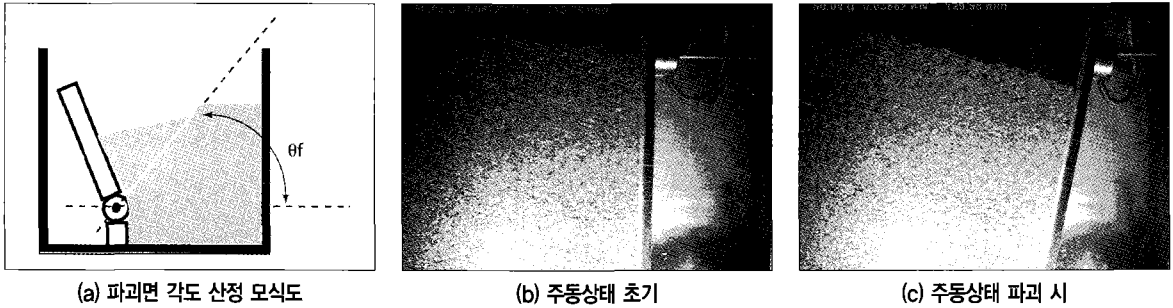
1) 수동상태

수동상태에서 모형옹벽에 작용된 힘과 변위 관계를 그려 작용된 힘(T)의 최대값을 구한다. 모형 옹벽배면의 토압 분포를 선형으로 가정하면, 힘 $P (= 0.5 K\gamma NH_m^2 t_m)$ 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 8(a)).

하지만 그림 8 (b)와 (c)에서 보는 바와 같이 실험 초기와 말기 사진을 비교해 보면 모형 벽의 변화가 없었다. 즉, 수동상태 실험에서 산정된 토압계수 K_a 가 수동토압계수 K_p 를 의미하지는 않는다는 것이다. 이것은 본 실험에 사용된 실험 예의 경우 공기압시스템이 완전 수동상태 파괴를 일으킬 정도로 충분한 힘을 제공하지 못했기 때문이다.

2) 주동상태

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



(a) 파괴면 각도 산정 모식도

(b) 주동상태 초기

(c) 주동상태 파괴 시

그림 9. 주동상태 파괴 시 파괴면 각도 산정과 주동상태 실험 동안 옹벽의 거동 예

축실험에서 측정된 미찰각과도 비교한다.

3) 실험결과의 예

옹벽모델링에서도 설명한 바와 같이 옹벽이 알루미늄인 경우 상부표면의 경사각을 0°, 15°, 30°인 3가지 경우로 나

누어 모형실험을 실시하였다. 그림 10은 원심장치 내부에 설치된 카메라로 매초에 1회씩 LabVIEW 프로그램으로 흙 재료의 이미지 거동을 촬영한 것이며 옹벽에 대한 원심 모형 실험 결과는 표 4와 같다. 표에서와 같이 옹벽사면의 경사별로 변위, 주동토압계수 등을 구할 수 있다. 사면의 경사가 증가할수록 수평변위는 감소하고 주동토압계수는 증가한다.

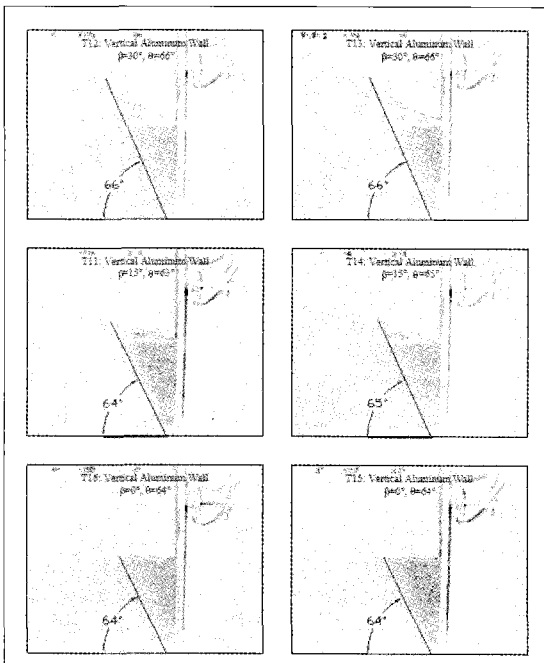


그림 10. $\delta=1/2$ 인 경우 내부 카메라로부터 포착된 이미지 결과 (Elliott, 2006)

5. 결론

원심모형 실험장치를 소형(200g)으로 제작하여 학부 및 대학원 교육을 위한 원심모형 실험의 예를 사면 및 옹벽의 모델링을 통해 검토하였다. 사면모형의 경우 이론적인 결과와 실험을 통해서 얻은 결과가 서로 약간 불일치하는 것은 실험과정에서의 기계 설치 시 발생하는 약간의 오류와 실험에 사용된 점토의 매개변수 그리고 파괴사면을 해석 시 호의 길이, 중력의 중심 등을 측정하면서 발생하는 오류 등에 의해 일 수 있으며 이러한 원인을 최소화시킨다면 매우 양호한 실험결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 옹벽의 경우 실험에 사용된 공기압시스템이 완전 수동상태 파괴를 일으킬 정도로 충분한 힘을 제공하지는 못하기 때문에 수동토압계수 K_a 를 산정할 수는 없었다. 하지만 주동상태

표 4. 옹벽모형에 대한 실험결과(Elliott, 2006)

Slope, $b(^{\circ})$	Wall Surface	Active Displacement(mm)	D/H	Active Force(N)	K_a
0	Aluminum	0.24	0.0030	8.20	0.104
15	Aluminum	0.22	0.0027	8.60	0.108
30	Aluminum	0.18	0.0022	9.00	0.114

에 대해서는 완전 파괴 상태를 발생시킬 수 있었으며 주동 토압계수와 마찰각을 산정할 수 있었다.

이 실험 결과에서 알 수 있듯이 소형 원심모형 실험장치는 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 획득하여 수치해석 결과와 비교하게 함으로써 지반 거동의 실재를 이해하는데 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.
4. Josh Elliott(2006), "A Retaining Wall Active Earth Pressure Comparison : Centrifuge Tests, Finite Element Analysis, and Active Earth Pressure Theory", University of Colorado at Boulder, Degree of Master of Science

회비 납부 안내 (지로 및 온라인)

학회 사무국에서는 연중 수시로 학회비를 수납하고 있사오니, 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 문의사항이 있으면 사무국으로 연락하여 주시기 바랍니다.

• 은행 무통장(타행) 입금

국민은행 계좌번호 : 534637-95-100979 예금주 : 한국지반공학회

• 지로용지 납부

2008년 5월 20일부로 금융결제원에 승인을 받아 한국지반공학회 회비도 지로용지 납부를 할 수 있게 되었습니다.

• 지로용지 기입시 유의점

- 지로 장표상의 금액과 납부자 관련정보(회원번호, 성명, 납입금 종류 등)는 흑색볼펜으로 글씨체는 정자로 표기해 주시기 바랍니다.

- 납부금액란에는 정확한 위치에 정자로 아라비아 숫자만 기입합니다.

납부금액 앞뒤에 특정기호(W, -, * 등)를 표시 할 수 없습니다.)

※ 지로용지를 못 받으신 분은 지반공학회 사무국(02-3474-4428/양윤희)으로 전화주세요