

원심모형시험기의 제작 및 활용에 대해서

김재영^{*1}, 이기호^{*2}, 황대진^{*3}, 高田直俊^{*4}

1. 머리말

흙 구조물의 대부분은 흙 자중에 의한 영향을 지배적으로 받지만, 흙의 강도나 변형특성은 응력에 크게 의존한다. 따라서 실험모델을 중력장(1G)에서 제작하여 사용하는 경우는 자중응력이 실제 구조물보다 상대적으로 작기 때문에 실제 구조물의 변형이나 파괴거동을 정확히 표현하는 것이 쉽지 않다. 때문에, 축소모형을 가지고 실제의 응력상태를 재현하고, 변형 및 파괴거동을 파악하는 대표적인 방법으로는 원심모형실험이 이용되고 있다.

원심모형실험은 원심가속도를 부여할 수 있는 장치, 즉 원심모형시험기안에 기하학적으로 축소된 소형모형을 원심가속도가 작용하는 장소(원심장)에서 역학적거동을 파악하는 실험을 말한다. 그리고 원심모형실험에서는 실물에 대한 1/n축소모형을 중력가속도의 n배에 해당하는 원심가속도장에서 실물과 같은 응력상태를 재현하는 실험방법으로서, 축소모형을 통해 실제 구조물에서 발생하는 거동을 얻을 수 있다.

원심모형시험기는 1936년 소련의 Pokrovsky가 처음으로 사용하여 지반응력측정결과를 발표한 이래 지반공학분야의 많은 연구자 및 기술자들이 사용해 오고 있다. 현재 4년마다 열리는 원심국제회의를 통해 다양한 연구사례들이 보고되고 있다. 그러나 우리

나라의 경우, 원심모형시험기의 제작에 소요되는 고비용과 유지관리에 대한 노하우의 부족으로 연구 및 실무에서의 활용범위가 매우 한정적인 것이 사실이다.

따라서 본 기사에서는 필자들이 원심모형시험기 제작과 개보수 및 실험을 통한 경험을 바탕으로 원심모형시험기의 제작과 활용에 있어서 이용자가 숙지해야 할 사항과 원심모형실험의 적용사례에 대해 간략히 서술하였다. 아울러, 향후 국내에서도 많은 실험기가 제작될 수 있도록 부품의 국산화, 설계도면의 다양화, 다양한 연구사례의 수집, 그리고 저비용의 제작방안 확립 등으로 국내에서도 활발한 연구활동이 이루어지기를 기대한다.

2. 원심모형실험의 실시 목적과 접근 방법

원심모형기를 제작해 실험을 실시하는 경우, 시험기의 제작과 함께 활용하여 얻고자 하는 목적, 그 결과의 적용을 위해서는 다음의 세가지 사항을 고려할 필요가 있다.

- ① 왜 소형모형에 원심가속도를 부여할 필요가 있는가 (원심모형실험의 목적)
- ② 원심모형실험장치라는 것은 어떤 것인가 (원심모형시험기의 제작과 활용)
- ③ 원심력장에서 어떻게 모형의 거동을 파악할 것인가 (모형을 통한 실물의 응력거동 재현)

먼저 본 절에서는 ①과 ③에 대해 원심모형시험기를 사용하는 연구 및 기술과제에의 접근 방법에 대해 간략히 서술하고자 한다.

*1 정회원, KTS Co. 연구개발팀장

*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 지반환경연구실 연구교수

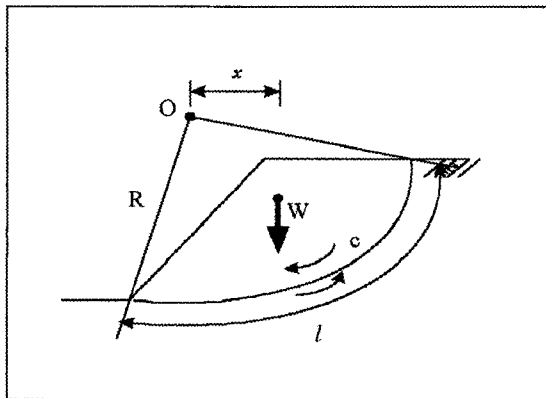
*3 정회원, 삼성건설 기술연구소 기술연구팀장

*4 大阪市立大学 工学部 教授

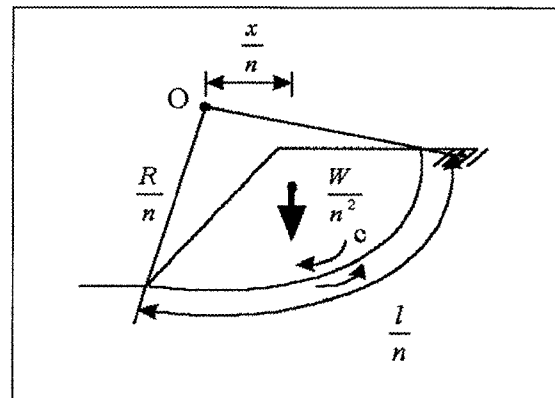
2.1 모형실험의 주요 목적

원심모형실험은 기초·실무·연구 및 교육등 여러 분야에서 시행되고 있으며, 주요목적은 다음과 같다.

- (1) 현상의 메카니즘 해명 : 현상의 해명에는 모델화한 실물이 반드시 특정 실물일 필요는 없다. 대상으로 하는 흙의 특징, 토층구성, 고려하는 실물의 성질을 재현할 수 있으면 되는 것이다. 즉 불필요한 요인을 제거해 주요한 요인을 파악할 목적으로 하는 실험이 오히려 결과의 신뢰성을 높인다.
- (2) 상사법칙의 검증 : 실물에 대해 $1/n$ 의 기하학적 상사모형을 실물과 완전히 같은 토질구성으로 만들어 nG 의 원심가속도장에서 실시하는 경우 실물과 모형의 관계를 고려할 필요가 있다(그림 1.참조). 상사법칙의 검증방법에 대한 자세한 내용은 향후 정리하여 발표하고자 한다.
- (3) 시공과정의 재현 : 시공과정이 지반이나 구조물에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 현장 실측값이나 경험이 필요하다. 그러나 현장의 상황에 따라서는 관찰이나 계측이 곤란한 경우가 빈번히 발생한다. 이런 경우는 대상구조물 또는 지반에 대한 모형실험을 실시해 현상을 관찰하여, 현장에서 얻기 어려운 결과를 얻어낼 수 있다. 그리고 최근에는 환경, 크리프, 충격문제, 지하구조물 또는 매설물에 있어서 실지반을 재현해 관찰한 연구결과가 많이 보고되고 있다.
- (4) 특정 실물의 정량적 거동파악 : 모형실험의 궁극적인 목적은 특정 실물의 거동을 완전히 재현하는 것이다. 그러나 엄밀히 말해 특정실물의 정량적 거동파악은 거의 불가능하다. 그 이유는 특정 실물의 지층구성, 토질조건의 공간적 오차, 응력이력, 초기응력상태, 시공과정등을 완전히 파악할 수 없기 때문이다. 그러나 실지반의 불확실한 성질이나 모형과 실물의 상이를 충분히 인식하고 실시하여 다양한 각도에서 관찰한 실험을 통해 그 거동을 파악할 수 있다.
- (5) 교육의 활용 : 모형실험은 현상을 시각적으로 나타낼 수 있기 때문에 교육상으로도 효과적이다. 이런 경우는 현상의 엄밀성을 요구하기 보다는 간편성을 나타내는 것이 좋다.



(1) 실물의 경우



(2) 1/n 모형

그림 1. c재료사면의 실물과 1/n모형

2.2 모형을 통한 실물과 같은 응력상태의 재현

2.2.1 변형 및 파괴거동

중력장(1G)에서 소형모형의 경우, 자중응력이 작기 때문에 실물과 같은 토질구성의 모형을 파괴시키는 것이 어렵다. 예를 들면 그림 1과 같은 균질한 c 재료로 이루어진 사면이 비배수조건에서 원호활동으로 파괴되는 문제를 생각해 보도록 하자(첨자 p, m은 각각 실물과 모형을 나타낸다). 실물의 안전율 F_p 는 저항모멘트와 활동모멘트의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_p = \frac{R \cdot c \cdot l}{W \cdot x} \quad (1)$$

이 식에서 R: 활동원의 반경

c: 전단강도

l: 원호길이

W: 토피의 중량

x: 활동원의 중심에서 토피중심까지 수평거리

한편, 실물과 똑같은 재료로 만든 축척 1/n의 기하학적 상사모형의 상사위치에 있는 원호의 안전율 F_m 은 식 (2)가 되어 실물의 n배 안전율을 나타내게 된다.

$$F_m = \frac{\frac{R}{n} \cdot c \cdot \frac{l}{n}}{\frac{W}{n^2} \cdot \frac{x}{n}} = \frac{n \cdot R \cdot c \cdot l}{W \cdot x} \quad (2)$$

따라서 실물의 파괴과정을 관찰할 때에는 $c' = c/n$ 이 되는 재료를 사용해 모형을 제작해야만 한다. 그러나 변형과 파괴의 전 과정에 있어서 주어진 흙과 상사적으로 거동하는 재료는 존재하지 않기 때문에 한정된 모형에 대한 시험이 많다.

하지만 이 모형이 nG의 원심력장에서는 모형내 흙의 단위체적중량 γ 가 중력장에 있어서 n배, 즉 $n\gamma$ 가 된다. 실물과 상사적인 깊이 $Z_m (=Z_p/n)$ 에 있어

서 자중응력은 $(Z_p/n) \times n\gamma = Z_p \cdot \gamma$ 가 되어 실물과 완전히 일치하게 된다. 즉 그림 1의 1/n모형은 nG의 원심력장에서 활동토피의 중량 W가 n배로 증가되기 때문에 F_m 은 F_p 와 일치하게 되며, 실물이 파괴되는 상황으로 모형도 파괴되는 것이다. 따라서 원심력장에서 시험은 중력장에서 해결되지 못하는 조건을 만족시키기 때문에 모형시험의 종류가 다양하며 시험방법의 응용성이 우수한 시험이라고 할 수 있다.

2.2.2 강도 변형특성

일반적으로 흙의 변형 및 파괴특성은 응력에 따라 현저하게 변화한다. 따라서 모형의 흙 요소에 실물의 흙 요소와 같은 변형과 강도를 발생시키기 위해서는 응력도 실물과 같도록 해야 한다. 이런 이유로 자중응력이 작은 중력장의 시험에서는 실 구조물의 변형이나 파괴거동을 기대할 수 없기 때문에, 실물의 응력상태와 상사법칙을 만족하는 축소모형을 가지고 원심모형시험을 통해 파악하고 있다. 그 중에서도 특히 흙의 역학특성에 강한 응력 의존성을 나타내는 것으로는 다음과 같은 것들이 있다.

(1) 응력-변형량 관계

흙의 전단변형량이 작은 경우는 탄성체로 볼 수 있고, 이런 경우는 탄성체 모형재료로써 변형에 대한 시뮬레이션이 가능하다. 그러나 응력-변형량관계는 변형과정에서 비선형성을 나타내는 경우가 많다. 또한 파괴에 이르기까지의 변형을 대상으로 하는 경우는 더욱 심하다. 특히 전단 중 다이레이턴스에 기인하는 체적변화는 응력에 따라 다르게 나타나며, 실물의 응력상태에서는 전단 중 수축하는 흙도 모형의 저응력하에서는 팽창하게 된다.

(2) 압축성

점토의 압축성은 압밀항복응력을 기준으로 크게 변화한다. 과압밀상태에서는 압축변형량이 압밀압력에 거의 비례하지만, 정규압밀영역에서는 응력의 대수에 비례한다. 따라서 연약점토를 대상으로 하는 자중압밀시험의 경우, 1/n축척의 중력장 모형에서 압밀 후 나타나는 함수비 w의 분포는 그림 2에 나타나

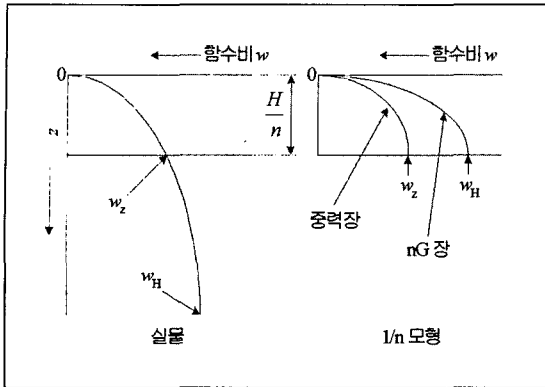


그림 2. 자중압밀 후 함수비분포

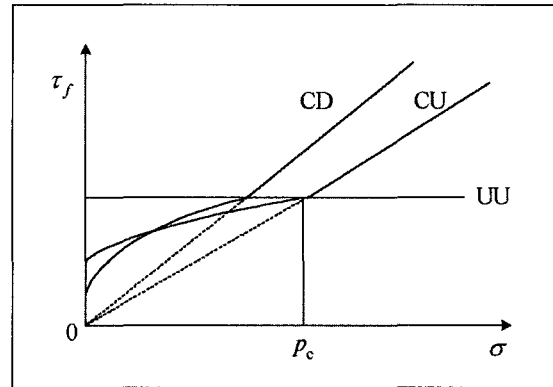


그림 3. τ_f - σ 관계에 있어서 응력이력 영향

듯이 총고 H의 실물 상층부 H/n을 재현하는 것에 지나지 않는다. 그러나 이 모형을 원심력장에 두면 실물에 대한 전 총고의 함수비 분포를 재현하는 것이 된다.

(3) τ_f - σ 관계

점성토의 압밀배수(CD), 압밀비배수(CU)장도는 응력이력의 영향에 의해 τ_f - σ 의 관계는 그림 3과 같이 나타난다. 또한 ϕ 재료인 모래·자갈질토의 경우도 τ_f - σ 관계가 반드시 직선적으로 나타나지 않으며, σ 가 커질수록 흙 입자의 파쇄등에 의해 σ 의 증가에 따라 τ_f 의 증가분도 감소해 τ_f - σ 관계가 곡선을 나타내는 경우도 있다.

3. 원심모형시험기의 제작과 활용

상기에 서술한 원심모형시험의 실시에 있어서 고려되는 사항 및 접근방법을 바탕으로 원심모형기를 이용한 시험의 사례를 살펴보도록 하자. 본 기사에서는 필자가 사용하면서 제작과 개량 및 설비를 보완한 원심모형기에 대한 제작사양과 과거 시험사례를 간략히 설명하고자 한다.

사진 1의 원심모형시험기는 필자의 은사인 Mikasa교수의 신압밀이론의 신뢰성을 확보하기 위하여 1964년 일본에서는 처음으로 Takada교수가

제작한 이래 수차례의 개량과 확장을 거쳐 1983년에 최종적으로 완성된 시험기이다. 원심력을 가하는 방법은 모형용기를 공칭반경 2.56m의 로터암에 장착해 22kw의 3상모터에 의해 회전시켜, 주파수제어로 회전수를 제어하여(사진 2.참조) 모형을 통해 원지반의 응력상태를 재현하고 있다. 측정값의 출력은 암선단에 부착한 단자와 회전축에 부착한 스위치박스를 거쳐 회전축 상부의 Slip Ring을 경유해 데이터 로거로 계측하여 PC에 자동 입력되도록 하였다. 또한 암 회전에 동조된 strobo발광에 의해 육안으로 모형을 관측하며, 또한 사진촬영이 가능하다(사진 2.참조). 그리고 별도의 디지털 표점측정장비를 사용해 모형지반의 응력전달과정을 파악하도록 하였다. 유압 및 공기압은 회전축 하부에 장착된 로터리 조인트를 통해 외부에서 모형용기에 송출되는 구조로 제작하였다. 그리고 모형용기를 0.25의 구배로 좌우로 반복적으로 기울여 정적 지진력에 해당하는 반복 수평력을 가하여 제방이나 기초지반의 거동을 관찰하도록 하였다. 사진 4~16에는 상기 원심모형시험기를 사용한 대표적인 시험사례를 나타내었다.

4. 맺음말

원심모형시험은 실물을 1/n으로 축소된 모형을 통

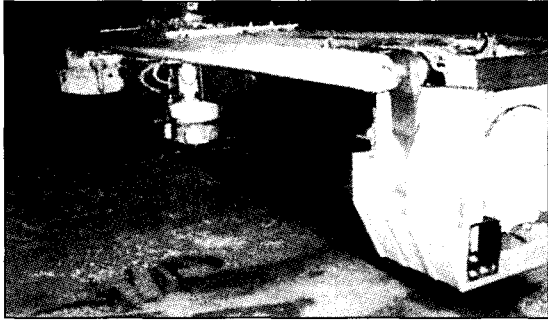


사진 1. 원심력 재하 장치

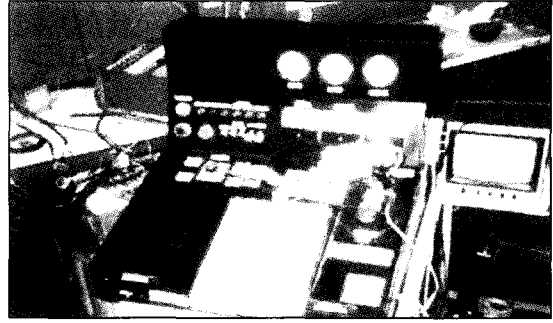


사진 2. 제어장치 및 관측 모니터

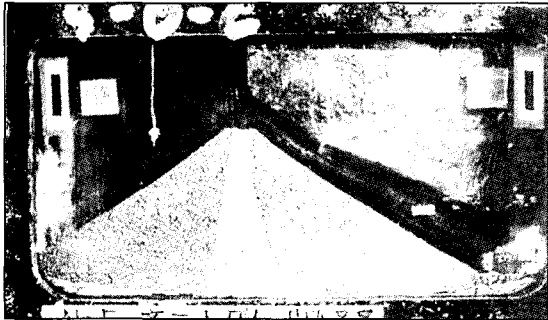


사진 3. 록 필댐의 파괴실험

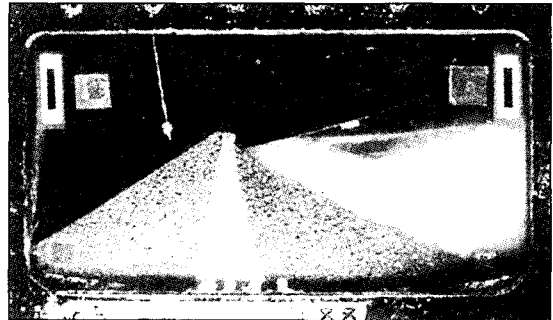


사진 4. 사진 3의 파괴상황

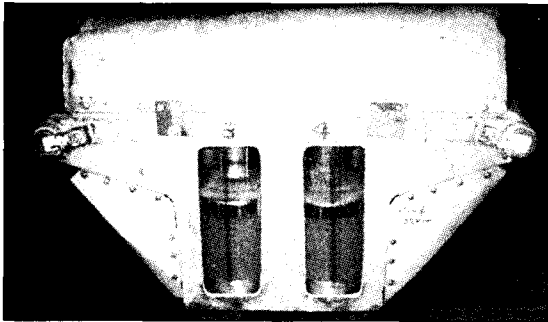


사진 5. PBD의 개량효과 실험

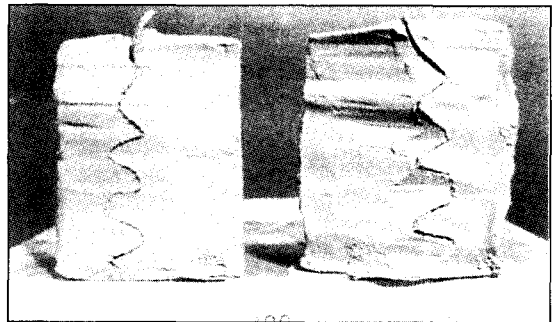


사진 6. 사진 5의 압밀후 드레인 변형

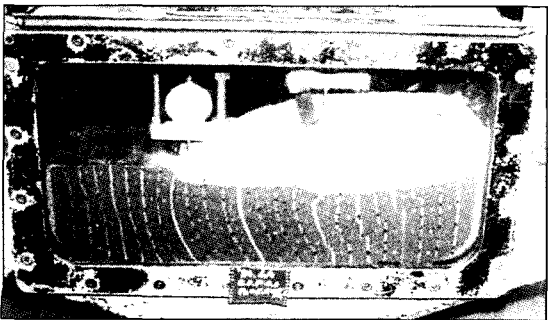


사진 7. SCP개량지반의 사면실험

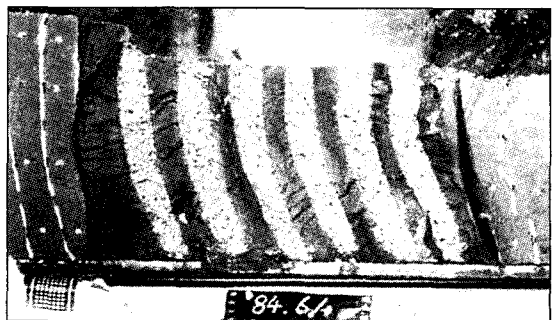


사진 8. 사진 7의 실험후 SCP의 변형

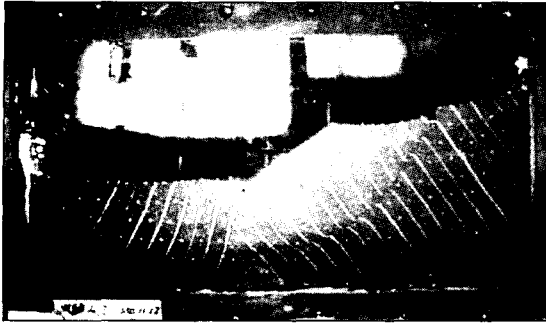


사진 9. 재압밀 점토의 사면안정실험

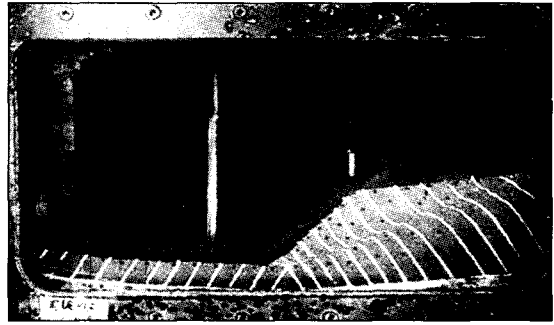


사진 10. 저중압밀점토의 사면안정실험

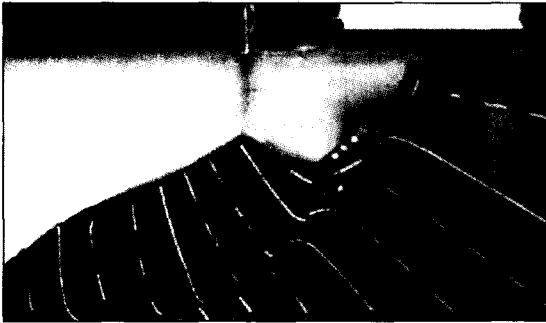


사진 11. 주동점토사면의 강도·변형특성

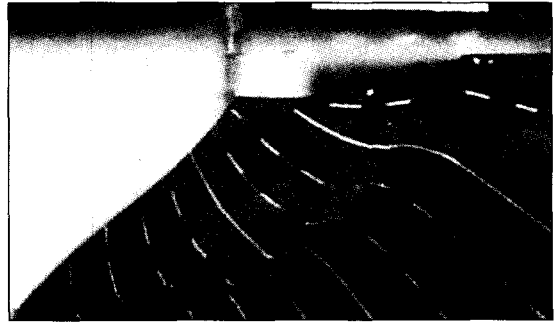


사진 12. 수동점토사면의 강도·변형특성

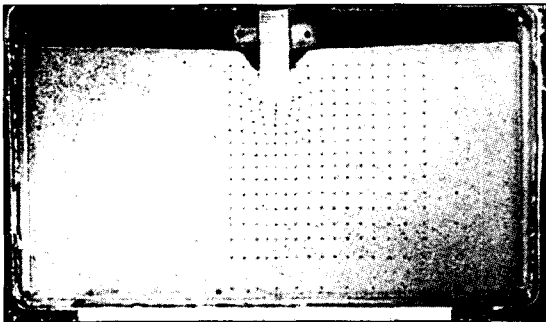


사진 13. 동압밀 공법에 있어서 지반변형 계측

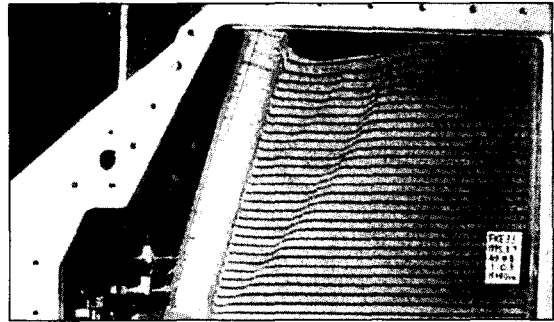


사진 14. 옹벽의 변형과 토압실험

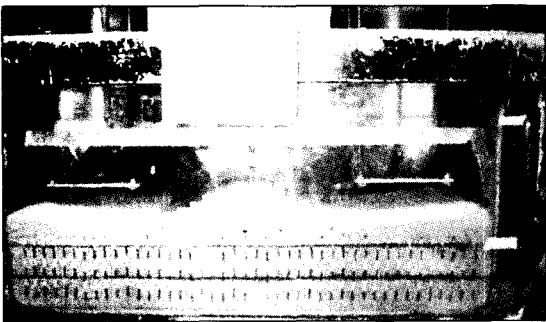


사진 15. 나무말뚝 타설에 의한 제체개량실험

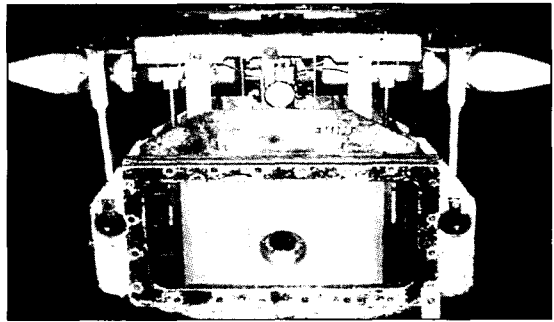


사진 16. 매설관에 작용하는 토압실험

해 실물과 같은 응력거동 및 변형·파괴특성을 구하는 시험으로 지반공학 분야에서 다양한 각도로 사용되어 오고 있다. 하지만 우리나라의 경우, 제작비용과 유지관리·활용문제를 이유로 연구·실무적으로 많이 이용되지 않고 있다. 이에 대한 상세한 원인과 대안을 정리하면 다음과 같다.

1) 정밀부품 제작기술

우리나라의 정밀기계 제작기술이 세계적인 수준에 도달해 있는 점을 고려해 볼때, 원심모형시험기를 외국기술을 도입하지 않고 국내기술만으로도 저렴하게 제작 가능할 것으로 판단된다. 실제로 필자들이 조사한 결과에 의하면 원심모형시험기에 필요한 중요부품의 상당부분을 국내에서 제작할 수 있으며, 품질면에서도 전혀 문제가 없음을 확인하였다.

2) 용도에 따른 다양한 설계도면의 확보

원심모형시험기의 제작과 활용을 위해서는 국내·외의 건설예정 또는 기 건설된 있는 댐, 사면 그리고 도로 등과 같은 다양한 현장조건을 정확히 모사할 수 있어야 한다. 따라서, 모형제작의 노하우를 확보하고 설치공간 및 적용범위와 부합되는 최적조건의 장비 제작의 토대확보가 필요하다.

3) 연구사례 및 결과의 공유

원심모형시험기의 제작과 함께 얻어지는 연구결과는 국제원심회의와 같은 국제 심포지움에서 발표된 외국 사례와 비교검토할 수 있다. 아울러 비교검토를 통한 연구노하우의 축적과 정확하게 현장조건을 모사할 수 있는 정보 공유가 가능하게 된다.

따라서 본 기사에서는 원심모형시험기 제작에 있어서 연구자가 참고해야 할 사항들과 적용사례에 대해 필자의 경험을 바탕으로 간략히 서술하였다. 향후 원심모형기를 이용한 실험이 보다 활발해지고 연구·실무분야에서 유익한 연구결과가 발표되어지기를 기대한다.

참고문헌

- 1) 三笠正人, 高田直俊(1966), 遠心力装置による自重圧密実験, 第21回土木工学年次学術講演会概要集, pp.46/1-2
- 2) 三笠正人, 高田直俊, 望月秋利(1980), 遠心力を利用した土構造物の模型実験, 土と基礎, Vol. 28, No.5, pp.15-23
- 3) 高田直俊(1987), 遠心模型'実験, 土と基礎, Vol. 35, No.12, pp.89-94

광고 게재 모집 안내

월간 “地盤”에 게재할 광고를 다음과 같이 연중 수시로 모집하오니 지면을 통하여 회사를 홍보하고자 하는 업체 및 회원은 신청하여 주시기 바랍니다.

- 다 음 - (단위: 만원 / 회)

		표지 2, 4	표지 3	내 지
칼	라	60	50	45
흑	백	40	30	25

※ 1년 단위 계약 10% DC, 특별회원사 15% DC (1년 단위 계약 10% DC 추가)