

원심모형실험에 의한 방파제의 수평변위 거동에 관한 연구

A Study on Behavior of the Lateral Movement of Breakwater by Centrifuge model Experiments

이동원¹⁾, Dong-Won Lee, 김동건²⁾, Dong-Gun Kim, 전상현³⁾, Sang-Hyun Jun, 유남재⁴⁾, Nam-Jae Yoo

¹⁾ 강원대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Kangwon Natl. Univ.

²⁾ 강원대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D Course, Dept. of Civil Engineering, Kangwon Natl. Univ.

³⁾ 세경대학 토목과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Saekyung University.

⁴⁾ 강원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon Natl. Univ.

SYNOPSIS : For the cassion type of breakwater under the condition of large wave loads, stability about lateral movement of breakwater was investigated by performing centrifuge model experiments. Prototype of breakwater was modelled by scaling down to centrifuge model and the soft ground reinforced with grouting was also reconstructed in the centrifuge model experiments. Sandy ground beneath breakwater was prepared with a soil sampled in field so that identical value of internal friction angle could be obtained. Centrifuge model experiments were carried out to reconstruct the construction sequence in field. Lateral static wave load was applied to the model caisson after the final stage of construction sequence was rebuilt and the measured lateral movement of caisson was compared with allowable value by the code to assess the stability about lateral movement of the breakwater.

Keywords : Centrifuge, Wave Load, Lateral Displacement, Caisson

1. 서 론

국내에는 협소한 국토사정을 해소하기 위한 해안 개발이 다양하게 진행되고 있으며, 공항, 항만, 산업단지 등이 해안에 건설되고 있다. 해안 개발에 있어 파랑을 막는 방파제는 매우 중요한 구조물로 그 안정성에 대한 다각적인 검토가 이루어지고 있다. 최근에는 안정성과 경제성이 우수하고, 접안시설로 사용할 수 있는 케이슨식 방파제를 다수 시공하고 있다.

국내에서 케이슨에 대한 실험적 연구로 손형모(2003)는 초대형 케이슨의 거동에 관한 모형실험을 수행하였고, 김성렬(2003)은 진동대 실험으로 케이슨의 지진거동 분석을 하였다. 그러나 대부분의 연구가 1g 조건의 축소모형실험으로 수행되어 상사성을 합리적으로 고려하지 못한 한계를 보였다.

그러므로 본 연구는 현장의 응력조건을 실내에서 모사할 수 있는 원심모형실험을 이용하여 케이슨 방파제의 안정성을 검토하였다. 이를 위해 경상남도 포항시 00현장의 케이슨 방파제를 대상으로 현장의 모래를 채취하여 기초지반으로 조성하고, 모형 케이슨을 제작 적용하였다. 시공단계를 고려한 모형실험에서 파랑하중을 작용에 따른 케이슨 구조물의 거동을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 원심모형실험 기본원리

원심모형실험의 기본원리는 축소된 모형을 인위적으로 증가시킨 자중효과로 상쇄시킴으로써 힘의 평형

관계를 유지하는데 있다. 그림 1과 같이 2차원 평면 변형상태에서 임의의 요소에 작용하는 힘의 평형식은 식 (1)과 식 (2)와 같다.

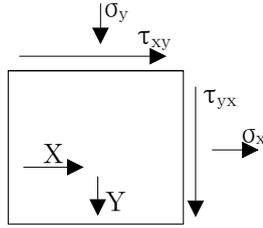


그림 1. 힘의 평형상태

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \quad (2)$$

여기서, X, Y는 X, Y방향의 자중이다.

이와 같은 평형식에서 원심모형실험에서는 1/N의 축소된 모형을 사용하고 흙의 자중을 N배 가속시킴으로서 평형관계식은 (3)과 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (y/N)} + N \cdot X = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial (y/N)} + N \cdot Y = 0 \quad (4)$$

위와 같은 관계식에서 N값은 서로 상쇄되어 일반적인 힘의 평형방정식과 동일하게 된다. 따라서 원심모형실험에서는 축소된 모형으로 흙의 자중을 인위적으로 증가시켜 현장 원형구조물의 초기 응력 상태를 재현시키고 어떠한 형태의 경계조건에서 응력이 가하여져도 기본적인 힘의 평형 관계식을 만족시킴으로써 원심모형실험에서 현장과 동일한 재질의 시료를 사용하여 시험을 수행하면 현장 구조물과 같은 응력-변형 거동을 원심모형실험에서 재현시킬 수 있다(Schofield, 1988; Ko, 1988).

모형실험에서 원형구조물의 거동을 정확히 재현시키기 위하여 상사성(Similarity)이 만족되는 조건에서 원형의 거동을 지배하는 요소가 모형실험서 모사되어야 한다. 원형과 모형의 상사관계 및 축척관계는 차원해석(Dimensional Analysis)이나 미분 방정식(Differential Equations)을 사용하여 구할 수 있다. 차원해석은 어느 변수들에 의하여 표시되는 자연현상의 물리적 관계를 나타내는 방정식은 동차성 원리(Principle of Dimensional Homogeneity)에 근거한다(Fuglsang & Ovesen, 1988).

3. 물리·역학적 특성

3.1 모래지반

케이슨 방파제 기초지반인 모래를 현장에서 채취하여 기본물성실험을 수행하였다. 그 결과, 비중 2.68, 균등계수 1.79, 곡률계수 0.90, #200체 통과율이 0.62%인 통일분류상 SP로 분석되었다. 모형 모래지반을 현장의 내부마찰각과 동일한 조건으로 조성하기 위하여 상대밀도에 따른 직접전단실험을 수행하였다. 직접전단실험 결과, 그림 2와 같이 상대밀도 30% 조건에서 내부마찰각은 27.3°로 분석되었으며, 상대밀도 50% 조건에서 31.0°, 상대밀도 75% 조건에서 40.5°로 나타났다. 현장의 내부마찰각인 38°를 유도하기 위하여 68.6%의 상대밀도로 지층을 조성하였다.

3.2 그라우팅 개량체

모래지반 하부에 존재하는 연약점토지반은 그라우팅 혼합처리공법으로 계획되어있다. 그라우팅 개량체를 모사하기 위하여 설계 일축강도인 5.0MPa이 유도되도록 점토와 시멘트의 혼합비에 따른 일축압축 실험을 수행하였다. 혼합비(=시멘트중량/점토중량)가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향으로 그림 3과 같이 분석되었다. 모형에 적용되는 그라우팅 개량체를 설계강도인 5.0MPa을 유도하기 위한 시멘트/점토 혼합비는 30%로 나타났다.

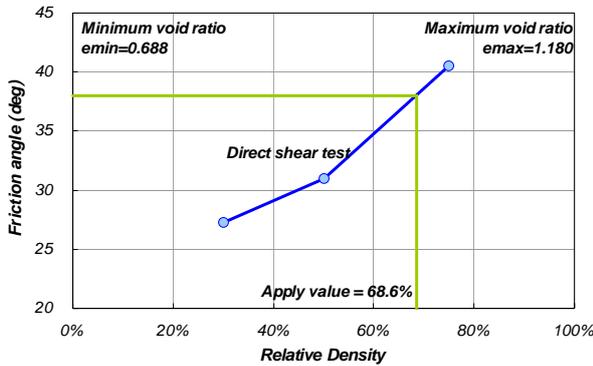


그림 2. 모래의 상대밀도에 따른 내부마찰각

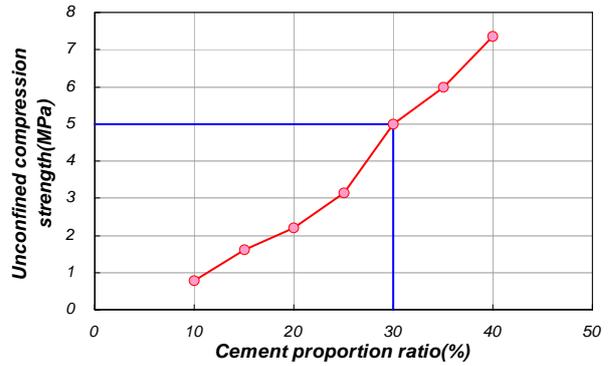


그림 3. 시멘트/점토 혼합비에 따른 일축압축강도

4. 원심모형실험

방파제 안정성 검토를 위해 모형실험은 시공순서를 고려하여 단계별로 수행되었다. 실험은 표 1과 같은 단계로 수행하였다. 모형 지층 및 구조물 조성은 1g에서 수행하였으며, 각 단계별 모형조성 후 50g 중력수준의 원심력을 작용하여 현장의 응력조건을 모사하였다. 본 연구에 사용된 원심모형실험기의 제원 및 특징은 정길수 (2005)의 연구와 같다.

표 1. 시공단계

| 구분 | Step 1 | Step 2 | Step 3 | Step 4 | Step 5 |
|------|--------|---------|------------|-------------|---------|
| 시공단계 | 점토지반조성 | 그라우팅 개량 | 기초 모래지반 조성 | 사석 및 방파제 거치 | 파랑하중 작용 |

4.1 모형 지반 및 구조물 조성

하부 점토층은 공기압을 이용한 4일간의 강제압밀로 현장의 함수비와 동일한 조건으로 조성하고, 원심모형실험기내에서 중력수준 50g로 가속하여 현장의 응력상태를 모사하였다(그림 3). 이후 시멘트/점토 혼합비 30%로 제작된 모형 개량체를 제작하여 그림 4와 같이 점토층에 타설하였다. 실험을 편의상 개량체의 직경을 20mm로 하였으며, 현장에서 계획된 19.6%의 치환율을 모사하기 위하여 40mm의 직사각형 간격으로 타설하였다. 기초 모래지반은 상대밀도 68.6%를 조성하기 위해 필요한 전체 모래량을 투입한 후 목표높이까지 다져지도록 진동대로 느리게 진동하여 그림 5와 같이 지층을 조성하였다.



그림 3. 점토층 조성

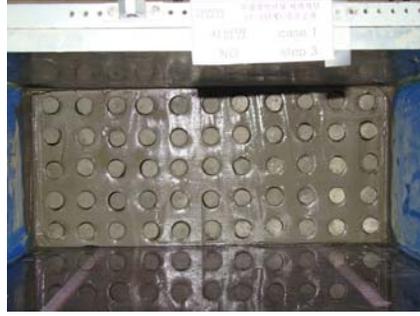


그림 4. 그라우팅 개량체 타설

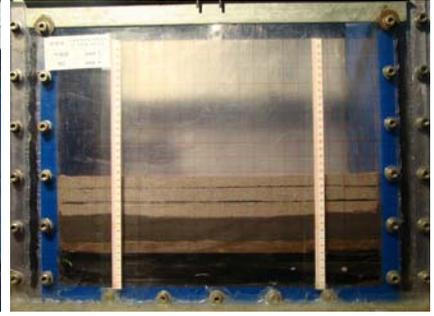


그림 5. 모래지반 조성

케이슨 하부에 조성되는 모형 기초사석은 현장과 동일한 단위중량으로 형성하였다. 모래층을 교란할 수 있는 다짐없이 20kN/m^3 의 사석 포화단위중량이 유도되도록 슬래그와 쇠석을 혼합하여 기초사석층을 그림 6과 같이 조성하였다. 모형방과제는 모래와 폴리코트(Poly-coat)를 혼합하여 그림 7과 같이 모형 방과제를 제작했으며, 단위중량을 맞추기 위해서 내부에 납을 넣어 케이슨 자중을 고려하였다. 그림 8과 같이 모형 방과제를 거치한 후 50g의 중력수준으로 가속하였다.



그림 6. 기초 사석층 조성



그림 7. 모형 방과제

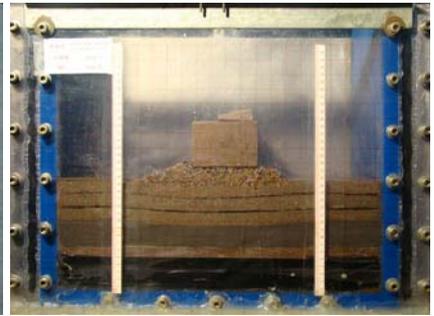


그림 8. 모형 방과제 거치

4.2 파랑하중재하

파랑에 의한 케이슨 방과제의 안정성 검토를 위하여 파랑하중을 재하하고, 변위를 측정하였다. 파랑하중은 그림 9와 같이 설치한 수평재하장치를 이용하였으며, 변위는 LVDT를 그림 10과 같이 설치하여 수평변위를 측정하였다. 그림 11은 원심모형실험을 위해 완성된 모형의 개요도이다.



그림 9. 수평재하장치 설치



그림 10. LVDT설치

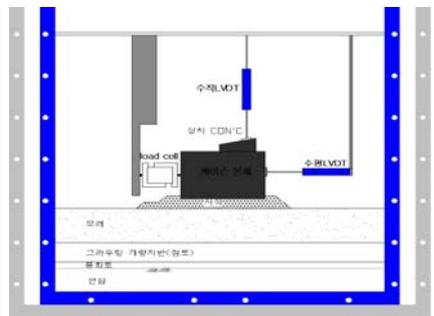


그림 11. 원심모형실험 단면도

그림 11과 같이 최종단계에서 수평재하장치와 LVDT를 설치한 후 50g의 중력수준에서 모형 파랑하중을 재하하였다. 설계 파랑하중 2.86MN/m 을 상회하는 수평력으로 2회에 걸쳐 반복 재하한 후 설계 파랑하

중 2배 이상으로 최종 수평력을 재하하였다. 원심모형실험에 의한 결과를 파랑하중에 따른 수평변위로 정리하여 그림 12와 그림 13에 나타내었다.

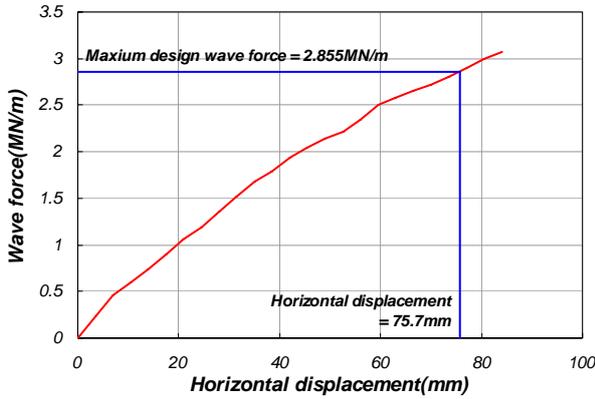


그림 12. 최대 설계파랑하중 작용

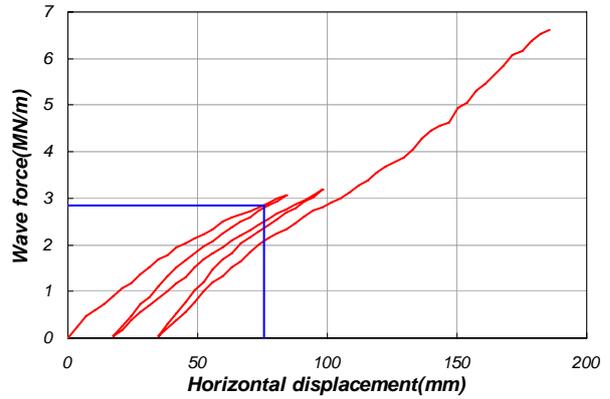


그림 13. 반복하중 및 최대수평하중 작용

그림 12 또는 그림 13의 실험결과에서 보는 바와 같이 하중 증가에 따라 선형적으로 수평변위가 발생하는 경향으로 분석되었다. 그림 12에서 보는 바와 같이 초기 설계 파랑하중에 의해 75.7mm의 수평변위가 발생하였다. 하중제거 후 다시 2번째의 설계 파랑하중을 재하한 단계에서는 그림 13과 같이 69.8mm의 수평변위가 발생하였다. 제하 후 3번째 마지막 하중재하단계에서는 설계하중에서 64.6mm의 수평변위가 발생하였으며, 최대하중 6.61MN/m에서는 150.5mm의 수평변위가 발생하였다. 이렇게 분석된 수평변위를 설계기준상 케이슨의 허용 수평변위와 비교하여 파랑하중에 의한 케이슨의 안정성을 검토할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 수평력으로 고려된 파력은 실제 동적인 하중으로 본 연구는 정적 하중을 기준으로 모사하였으므로 이에 대한 한계가 있을 것이다. 향후 이를 보완할 수 있는 원심모형실험에 대한 연구를 통하여 보다 합리적으로 케이슨의 안정성을 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 파랑하중에 의한 케이슨식 방파제의 안정성 검토를 위해 원심모형실험을 수행하였으며, 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 원심모형실험은 시공단계를 고려하여 적용하였으며, 각 시공단계는 1g에서 형성한 후 50g로 가속하여 현장의 응력조건으로 모사하였다.
- 2) 점토층은 현장의 함수비가 유도되도록 공기압을 통한 압밀로 조성하고, 모래지반은 설계 내부마찰각이 유도되는 상대밀도로 형성되도록 진동을 통하여 조성하였다. 또한, 점토층 개량을 위한 그라우팅 처리공법을 모사하기 위하여 설계압축강도를 갖는 모형 개량체를 시멘트와 점토를 혼합하여 제작하였다. 이 모형 개량체를 치환율을 고려하여 점토층에 설치하였다.
- 3) 케이슨식 방파제 설치 후 설계파랑을 수평하중재하장치로 3회 반복 재하하고, 수평변위를 LVDT로 측정하였다. 그 결과, 파랑하중이 증가함에 따라 방파제의 수평변위가 선형적으로 나타났다. 설계 파랑하중 2.86MN/m의 재하에 의해 단계별로 64.6~75.7mm의 수평변위가 발생하였다. 또한, 모형실험 조건상 최대 수평하중인 6.61MN/m에서는 150.5mm의 수평변위가 발생하였다. 원심모형실험으로 획득된 수평변위를 설계기준과 비교하여 케이슨식 방파제의 안정성을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성렬(2003), “진동대 실험을 이용한 중력식 안벽의 지진거동 분석”, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
2. 손형모(2003), “초대형 중력식 안벽의 고동에 관한 실험연구”, 연세대학교 대학원 석사학위논문.
3. 정길수(2005), “하중재하방법에 따른 SCP복합지반의 거동특성”, 강원대학교 대학원 박사학위논문, pp.41~44.
3. Ko, H. Y.(1988), "Summary of the State-of-art in Centrifuge Model Testing", *Centrifuge in Soil Mechanics*, Craig, James & Schofield(eds), Balkema, pp.11~18.
4. Schofield, A. N.(1988), "An Introduction to Centrifuge Modelling", *Centrifuge in Soil mechanics*, Craig, James & Schofield(eds), Balkema, pp.1~9.
5. Fuglsang L.D. and Ovesen N.K. (1988), "The application of theory of modelling to centrifuge studies", *Centrifuge in soil mechanics*, Craig, W., James, Schofield, A. (eds.), Balkema, Rotterdam, pp.119~138.