

# 충격파압에 의한 콘크리트 방파제의 거동 예측

## Response Prediction of Concrete Breakwater to Wave Impact Pressure

양 종 석\*   김 성 훈\*\*   김 동 완\*\*\*   경 민 수\*\*\*\*   김 장 호\*\*\*\*\*  
Jong-Seok Yang   Sung-Hun Kim   Dong-Wan Kim   Min-Su Kyung   Jang-Ho Kim

### ABSTRACT

The most common failure of breakwater comes from impact wave pressure generated by intense storms. This impact pressure is 10 folds greater than the pressure generated by normal waves. Therefore, the precise knowledge of magnitude of impact wave pressure applied on breakwater and its structural response is crucial for the economical and safe design. However, presently, a precise analysis of breakwater is restricted by insufficient and incorrect consideration of the effect of soil-structure interaction. 3 major research areas included in this study are (1) theoretical analysis of impact wave pressure, (2) selection of breakwater structure model (3) soil-structure interaction analysis using limit analysis computer program. Based on this analysis, predicted response of concrete breakwater and probable failure location under wave impact pressure are determined.

### 1. 서론

항만구조물 가운데 방파제는 항 외로부터 입사해오는 파랑 및 해일을 막아서 항 내 시설물 및 인명을 보호하는 중요한 사회기반시설이다. 특히, 우리나라에 매년 발생하는 태풍에 의한 피해를 억제하는 방파제의 가치는 무한히 크다. 태풍에 의한 방파제 구조물의 최악의 피해는 콘크리트 케이슨의 파괴(구조물 파괴)나 기초지반의 항복(토질항복)이다. 시간에 의존한 태풍 파력을 정적하중 분포와 값으로 계산하여 방파제의 정적 거동 해석을 수행하였다. 콘크리트의 실질적인 거동을 파악하기 위하여 콘크리트 재료 모델링을 선정하였다. 방파제의 거동을 해석하기 위하여 지반-구조물 상호작용을 고려하여 수행하였다. 충격파압을 통하여 방파제의 취약부를 파악하였다.

\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\*\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\*\*\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\*\*\*\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수

## 2. 본론

### 2.1. 충격파압적(pressure impulse)에 대한 이론 및 적용

방파제의 충격파압에 관한 수치적 연구는, 전형적으로 쓰이는 케이슨의 높이와 마운드의 폭 및 경사 정도를 고려하여 실제에서 사용되는 방파제의 구조 안에서 진행되었다. 수치실험의 한 예로서 마운드 경사면의 기울기는 1 : 3(수직거리 : 수평거리), 파가 부딪치는 부분인 충격구간(impact zone)은  $y=0$ 에서부터 위로 수직거리가 3m인 경우에 충격파압적을 계산하여 그 값의 등고선을 그림 1에 나타내었다. 충격파의 충돌진 속력  $U_0$ 는 13m/s, 밀도  $\rho$ 는 1000kg/m<sup>3</sup>로 주어졌다. 충격구간과 가까운 지역에서 충격파압이 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 실제로 위의 경우보다 더 넓은 영역에서의 수치적 결과는 위의 결과와 거의 차이를 보이지 않았다. 충격구간의 폭이 넓은 경우 예상했던 대로 충격파압의 영향이 더 멀리까지 미치고 있음을 볼 수 있다.

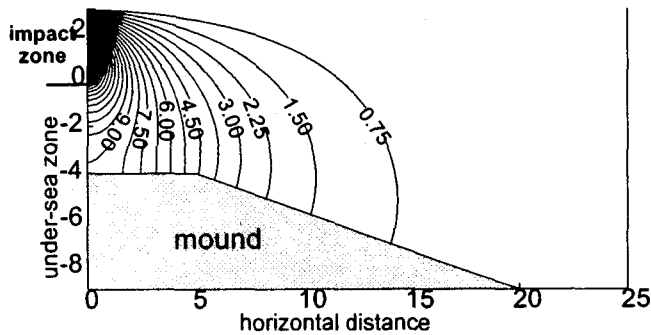


그림 4 충격 파압의 분포 및 강도

### 2.2 방파제 해석 모델링

#### 2.2.1 충격 파압

방파제 단면과 방파제 면에서의 충격쇄파압적  $P$ 의 분포가 그림 1과 같을 때 방파제의 응력 및 변형의 정도와 파괴의 가능성을 검토하였다. 방파제에 미치는 충격파압  $p$ 가 시간에 따라 선형적으로 증가하다가 최대 값을 지나서는 선형적으로 감소하는 삼각형 분포를 따른다고 가정할 수 있다. 충격파압의 지속시간을  $\Delta t$ 라고 하면 충격파압의 최대 값  $p_m$ 은  $p_m = 2P/\Delta t$ 이다. 따라서 지속시간을 바꿔 가면서 충격파압의 최대 값을 구하고 이 값을 사용하여 방파제의 정적 거동을 예측하였다. 충격파압의 지속시간  $\Delta t$ 를 0.7초부터 0.1초까지 변화시키면서 해의 수렴 여부를 수행하였다. 해가 발산하는 경우는 구조물의 파괴가 발생하였을 것이고 해가 수렴하더라도 구조물의 극한강도를 넘어선 것인지 검토할 필요가 있다. 충격파의 지속시간이  $\Delta t = 0.356$ 초일 때에는 해가 수렴하였으나 이 값보다 작은 경우 수렴하지 않았다.

## 2.2.2 방파제 구조물 모델링

그림 2에서는 방파제와 지반의 치수를 나타내었다. 정확한 응력 및 변형의 값을 얻을 수 있는 최소의 계산영역을 찾기 위하여 방파제의 중심에서 좌·우 폭과 아래의 깊이를 같은 크기로 하여 그 깊이를 176 m부터 시작하여 점차적으로 증가시키면서 수치실험을 수행하였다. 그 결과 길이가 476 m일 때 충분히 정확한 해를 얻을 수 있었다. 그림 3에서는 콘크리트 케이슨과 사석의 치수를 나타내고 있다. 지반의 치수는 최소 계산 영역을 찾기 위해서 계속 변형시켰으나 콘크리트와 사석의 치수는 변동 없이 수치해석을 수행하였다. 그림 4에서는 방파제의 쓰이는 요소 치수와 분포를 나타내고 있다. 방파제 모델링 시 전체에 사용된 절점은 11,716개이고 요소는 11,004개이다. 요소의 유형은 bilinear의 4개 절점으로 된 요소를 사용하였다. 콘크리트의 요소 크기는 1 m×1 m로 하였다. 사석부분은 경사면이 있어서 1 m×1 m와 동일하게 적용하거나, 작은 것으로 하였다. 지반의 요소 분포는 요소 크기가 1 m×1 m는 폭 100 m 높이 26 m로, 2 m×2 m는 폭 152 m 높이 52 m로, 4 m×4 m는 폭 352 m 높이 152 m로, 8 m×8 m는 폭 752 m 높이 352 m로, 16 m×16 m는 폭 952 m 높이 452 m로 하였다.

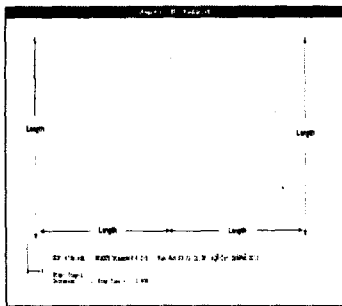


그림 5 방파제와 지반의 치수

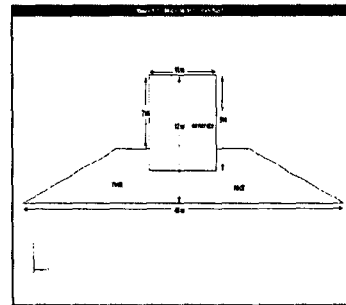


그림 6 방파제치수  
(콘크리트 케이슨과 사석)

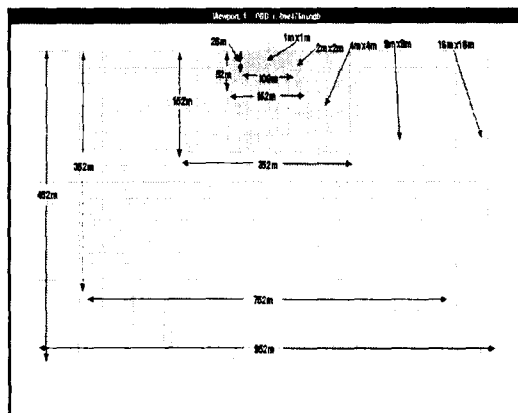


그림 7 요소 치수 및 분포

### 2.2.3 콘크리트 재료의 모델링

일반적인 경우 콘크리트는 사석 위에 건설되는 케이슨에 사용된다. 충격 과압에 의한 방파제 구조물의 최대 피해는 콘크리트 케이슨 파괴나 사석체를 포함한 기초 지반의 토질 항복이라고 보고된 바 있다. 이 연구에서는 ABAQUS 상용 유한 요소 프로그램에서 제공하는 콘크리트 재료 모델을 사용하였다. 콘크리트 초기 압축 강도는  $1300\text{kgf/cm}^2$ 와 소성 변형률 0을 사용하였다. 극한 강도는  $4650\text{kgf/cm}^2$ 를 사용하였고 소성 변형률은 0.001 값을 사용하였다. 이번 해석에 사용된 인장 강성 유형은 처짐 유형이고 그 값은 0.005로 정하였다. (보편적인 콘크리트의 최대 처짐은  $0.005\text{cm}$ 이다.) 또한 탄성 유형은 등방성이고, 탄성계수는  $2,650,000\text{ kgf/cm}^2$ , 포아송 비는 0.18로 하였다.

## 2.3 해석 결과 및 분석

### 2.3.1 콘크리트 케이슨

응력 분포도를 정확히 분석하기 위하여  $\log_{10}$  비율로 나타내었다. 충격쇄과압은 충돌 직전까지 해안 방향의 운동량을 유지하고 있지만, 충돌에 의해 운동량은 역적으로 변환된다. 쇄파의 전면이 직립한 평판같이 되어 순간적으로 방파제에 충돌하면, 매우 큰 충격 쇄파력이 발생한다. 그림 5에 나타난 Mises 조합 응력을 살펴보면 충격쇄과압이 사석과 지반으로 흡수되는 것을 볼 수 있다. 이는 사석 마운드 및 해저지반이 탄성 변형하는 것에 의해 그 일부가 흡수되는 것으로 판단된다.

그림 6, 7, 8의 응력분포도를 보면 최대 충격과압이 가해지는 해수면 부근의 콘크리트 케이슨과, 또한 케이슨과 사석의 접합부에서 최대 압축력이 발생하였다. 그리고 사석과 지반의 접합부에서 최대 인장력이 발생하였다. 이는 강한 충격 쇄파력이 방파제에 작용할 때, 콘크리트 케이슨의 구조적인 파괴 또는 사석과 지반에서의 인장력에 의한 항복이 발생할 가능성이 큼을 알 수 있다.

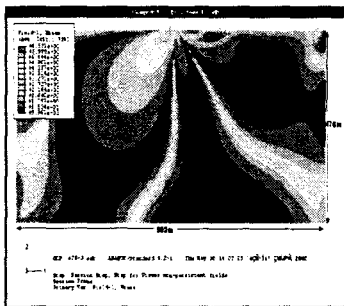


그림 8 Mises 조합 응력 분포도

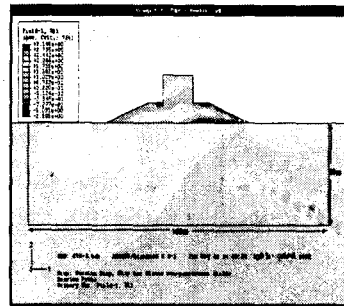


그림 9 제 1방향 응력 분포도

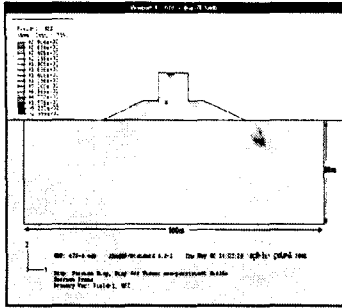


그림 10 제 2방향 응력 분포도

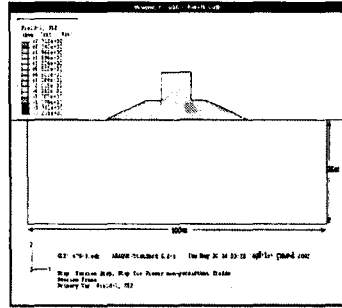


그림 11 전단 응력 분포도

처짐도에서는 결과 값들이 아주 미세하여  $\log_{10}$  비율로 하게 되면 값의 변화가 너무 커서 선형 비율로 다시 대처하였다. 그림 9, 10는 충격파압으로 인해 콘크리트 케이슨과 마운드 위 부분 그리고 사석 부분에 전반적으로 큰 처짐이 일어나고 있는 모습이다. 이는 방파제 직립부 안전성에서 활동 및 전도에 대한 안전을, 지반 지지력의 관점에서 검토해야 할 것이다.

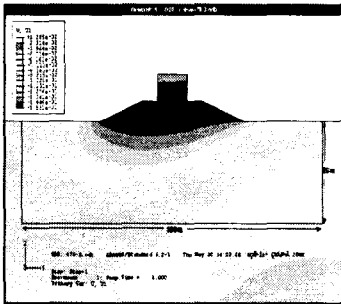


그림 12 1방향 처짐 분포도

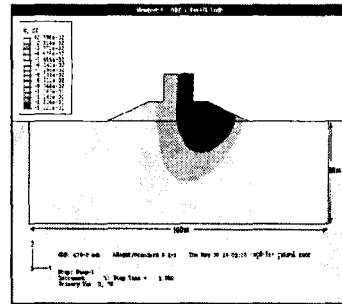


그림 13 2방향 처짐 분포도

방파제에서 응력이 집중되는 부분을 그림 11에 도시하고, 이 요소들의 응력-변형률 곡선을 그림 12에 나타내었다. 초기 곡선은 탄성영역인 직선을 나타내고 최대 응력에 도달하면서 소성 거동을 나타낸다. 이 결과에서는 세부화된 파괴 메카니즘은 나타나지 않으며 일반적인 응력-변형률 상승곡선을 나타내고 있다. 최대 응력을 받는 부분이 콘크리트와 사석 부분의 접합부(요소 번호 291), 사석과 지반의 접합부(요소 번호 124), 충격파압을 직접적으로 받는 콘크리트 케이슨의 전면(요소 번호 50)인 것으로 보아 방파제의 국부적인 파괴모드를 알 수 있다. 또한 방파제의 전반적인 파괴에서 전도 파괴에 대한 안전성도 파악해야 할 것이다.

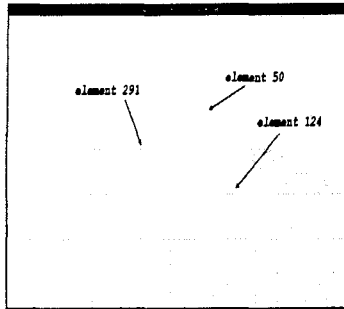


그림 14 응력이 집중되는 요소

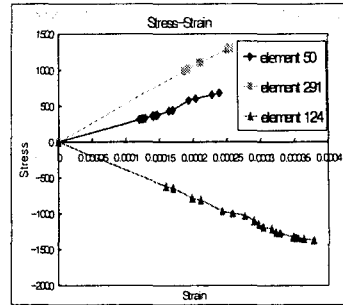


그림 15 집중 응력 요소에서의  
응력-변형률곡선

### 3. 결 론

충격과압에 의한 방파제의 거동 해석을 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 충격과압의 관련 연구 결과를 수집, 조사하여 실제 방파제의 구조에서 충격과압의 분포를 적용하였다.
2. 충격과압의 지속시간과 해의 수렴 여부를 통해 적합한 모델을 선정하였고,  $\Delta t = 0.356$ 초 일 때 가장 적합한 것으로 판단되었다.
3. 충격하중을 통하여 방파제의 취약부는 콘크리트와 사석 부분의 접합부(요소 번호 291), 사석과 지반의 접합부(요소 번호 124), 충격과압을 직접적으로 받는 콘크리트 케이슨의 전면(요소 번호 50)임을 파악하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제(과제번호: R01-2000-00365)의 지원을 받아 수행되었다. 본 연구를 가능케 한 한국과학재단에 감사 드립니다.

#### 참고 문헌

1. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., "ABAQUS manual :I. ABAQUS Theory Manual, II. Standard User's Manual, III. CAE User's Manual," 2000.