

## 안벽구조물에 대한 Centrifuge 모형실험과 수치해석

### Centrifuge Model Test and Numerical Analysis on Coastal Structure

유 남 재\* 김 동 건\*\* 전 상 현\*\*\*  
Yoo, Nam-Jae Kim, Dong-Gun Jeon, Sang-Hyun

#### Abstract

In this paper centrifuge model tests and numerical analysis on the coastal structure on the marine deposits of sand were performed to investigate the behavior of structure and foundation under the condition of wave action in field.

In centrifuge model experiments, construction sequence of coastal structure such as preparation of sand deposit, excavation replacement, rubble mound with crushed stones and installment of coastal structure was reconstructed and the behavior of ground settlement during stage of construction was observed during tests. For the final stage of simulating the horizontal movement of coastal structure due to wave force, horizontal load was applied by horizontal loading apparatus being specially designed so that horizontal displacement of structure could be observed.

Numerical analysis were also carried out and its results were compared with test results to assess the property of centrifuge mode experiments with respect to the behavior of structure as well as ground.

키워드 : 안벽구조물, 원심모형실험, 수치해석

Keywords : Coastal structure, Centrifuge model test, Numerical analysis

#### 1. 서론

최근 국내에서는 협소한 국토사정으로 종합적인 국토개발이 이루어지고 있다. 특히 해안을 개발 활용하여 공항, 항만, 산업단지 등을 건설하고 있다. 그중 항만 건설을 하기 위한 안벽 구조물의 중요성이 대두되고 있다. 안벽은 선박을 안전하게 접안시켜 화물 및 여객을 처리할 수 있게 하는 부두의 해면측 수직벽을 의미한다. 안벽구조물의 종류로는 크게 중력식, 잔교식, 널말뚝식, 기타 특수 목적형으로 나뉘어지며 대부분 안정성과 경제성을 고려하여 중력식 케이슨 안벽으로 시공하는 경향이 있

다. (삼성건설, 2006)

케이슨식 안벽은 프리캐스트 콘크리트 케이슨을 일렬로 거치하여 축조된 안벽을 말한다. 케이슨은 큰 토압에 견딜 수 있으며, 육지에서 제작하므로 품질에 대한 신뢰성이 높다. 또한 속채움을 저렴한 재료로 할 수 있다는 장점이 있다. 육상에서 제작된 케이슨은 진수 및 예인 과정을 거쳐 미리 설치된 기초 사석층위에 거치되기 때문에 안벽 축조에 따른 수중작업 시간이 길지 않다. 그리고 기존의 선가대 또는 드라이 도크 등을 이용하여 제작 및 진수를 한다면 경제성이나 시공성 측면에서 대단히 유리한 공법이 될 수 있다.

국내에서 안벽구조물에 대한 연구동향을 살펴보면 손형모(2003)는 초대형 중력식 안벽의 거동에 관하여 실험적 연구를 하였고 김성렬(2003)은 진동대 실험을 이용한 중력식 안벽의 지진거동 분석을 하였다. 김기수(2005)는 사질토 지반에서 얇은기초

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 세경대학 토목과, 전임강사, 교신저자

침하 예측에 관한 연구를 수행하였다. 그 밖에도 실내 모형실험과 수치해석을 이용하여 중력식 안벽의 거동에 관한 많은 연구들이 수행되었다.

본 연구에서는 해성 모래 퇴적층의 모형지반을 모사한 후 굴착 치환 및 사석층 조성하고 안벽 구조물을 설치하여 파압의 영향을 모사하기 위하여 수평하중을 재하함으로써 50g의 중력가속 시 구조물의 변위 및 지반의 거동을 분석하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 원심모형실험

#### 2.1.1 기본원리

원심모형실험의 기본원리는 축소된모형을 인위적으로 증가시킨 자중효과로 상쇄시킴으로써 힘의 평형관계를 유지하는데 있다. 그림 1과 같이 2차원 평면 변형상태에서 임의의 요소에 작용하는 힘의 평형식은 다음과 같다.

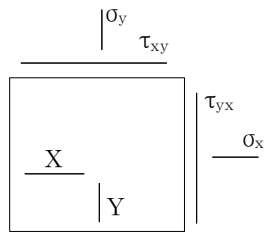


그림 1 힘의 평형상태

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \quad (1)$$

여기서, X, Y는 X, Y방향의 자중이다.

이와 같은 평형식에서 원심모형실험에서는 1/N의 축소된 모형을 사용하고 흙의 자중을 N배 가속시킴으로써 평형관계식이 다음과 같아진다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (y/N)} + N \cdot X = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial (y/N)} + N \cdot Y = 0 \quad (3)$$

위와 같은 관계식에서 N값은 서로 상쇄되어 일반적인 힘의 평형방정식과 동일하게 된다. 따라서 원심모형실험에서는 축소된 모형으로 흙의 자중을 인위적으로 증가시키어 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 조건

에서 원형의 거동을 지배하는 요소가 모형실험에서 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 동차원이어야 한다는 차원의 동차성 원리(Principle of Dimensional Homogeneity)에 근거한다.

#### 2.1.2 원심모형실험기 제원

사용된 원심모형시험기의 용량은 20g · ton이며 시험가능 한 모형 토조의 크기는 500×500×600mm 이고, 원심모형기의 중심축으로부터 Hinge까지의 거리가 1m, Swing Basket의 저면 까지 거리는 1.35m이다. Slip Ring은 총 40개의 Channel이고 Conditioner의 구동 및 Video Camera의 전원을 공급하는 Slip Ring을 분리 설치하였으며, 2개의 유압식 Slip Ring은 원심모형시험기의 하단에 설치하였다. 또한 Zoom기능과 위치조절기능을 갖춘 폐쇄 회로(CCTV)와 35mm SLR Camera가 원심모형시험기의 중심 축 좌우에 설치되어 45° 각도로 설치된 반사경을 통해 실험과정을 Monitoring할 수 있으며, CCTV의 경우 Slip Ring을 통해 외부에 비치된 VTR과 TV와 연결되어 있어 실험과정을 녹화할 수 있다.

강원대학교 토목공학과 지반공학연구실에 위치한 원심모형실험기는 연약지반의 압밀거동에 관한 연구(강대수, 1977 ; 진동욱, 1997), 역T형 옹벽의 거동특성(엄재경, 1996), 사면에 인접한 옹벽의 거동특성(이명욱, 1998), 모래다짐말뚝의 특성연구(김상진, 2002)등 다양한 지반공학 거동특성 연구에 사용되어 왔다.

### 2.2 수치해석 프로그램

PLAXIS는 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과 압밀점토 그리고 사질토 및 암반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료모형을 갖고 있다. 연약지반에 강하다는 점은 매우 작은 전단강도의 지반에 굴착 또는 성토하는 경우에 지반의 붕괴를 포함한 변형해석이 가능할 뿐만 아니라 압밀침하 및 점성침하 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있음을 의미한다.

복잡한 비선형 거동을 구하기 위하여 PLAXIS에는 다양한 구성(재료) 모형과 탄소성 상태에서 평형상태에 도달하기 위한 즉, 수렴(Convergence)을 돕는 강력한 알고리즘을 보유하고 있으며, 요소망 자동생성 등 매우 쉬워 보이는 사용자 인터페이스와 복잡한 연약지반 거동분석 문제를 간단하게 해결하는 해석기능, 그리고 강도감소법 등의 기능을 포함하고 있는 것이 PLAXIS의 특징이다. 또한, 절리성 암반을 포함한 사용자 정의 재료모형

(user defined material model)의 적용이 가능하며, 시공단계에 따른 침투해석과 그에 따른 유효응력 해석 기능과 터널 단면을 쉽게 생성할 수 있는 Tunnel Designer기능과 하중분배율 기능으로 쉘드 터널은 물론 NATM터널의 해석이 가능하다.

본 연구과 관련된 수치해석 방법에 대해서 5절에 상세히 설명하였다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 모형방파제 제작

방파제 구간을 모사하기 위하여 주문진 표준사와 폴리코트(Poly Coat)를 혼합하여 아래 그림 2와 같은 모형 방파제를 제작하였다.



그림 2 모형 방파제

#### 3.2 모형지반조성

방파제 하부의 원지반을 모사하기 위하여 수중 상대밀도 40%, 포화단위중량  $1.9\text{tf/m}^3$ 의 조건으로 모형지반을 조성하였다. 조성방법은 해수의 비중 1.03으로 준비된 물을 토조에 넣고 지반조성에 필요한 전체 모래량을 투입한 후, 진동대를 이용하여 느린 가속도로 진동하면서 단위중량을 맞추기 위하여 높이 6.25cm가 되도록 균질한 시료를 조성하였다. 이후 시료상부의 물을 제거하고 50g 중력수준으로 가속하여 모형지반의 균일한 모형지반을 조성하였다. 그림 3은 모형지반 조성 완료 사진이다.



그림 3 모형지반 조성

#### 3.3 굴착치환 및 기초 사석층 조성

시험조건에 따라 모형지반 조성 완료 후 굴착단면까지 모래층을 제거하고 그림 4와 같이 굴착치환사석 및 기초 사석층을 조성하였다. 이때 원지반 모래층에 영향이 없도록 다짐을 하지 않는 조건에서 포화단위중량  $2.0\text{tf/m}^3$ 을 갖는 사석층을 조성하고자 하였다. 중력가속은 굴착치환 사석층 조성 후, 사석층 조성 후 각각 50g의 중력가속을 수행하였다.

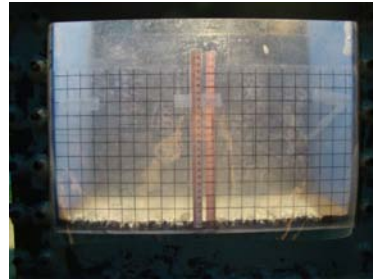


그림 4 사석층 조성

#### 3.4 방파제 거치 및 수평재하

굴착치환 및 기초 사석층 조성완료 후 제작된 모형 방파제 및 상치 콘크리트를 사석층 상부에 거치하고 하부지반의 침하와 방파제의 변위를 측정하기 위하여 케이스 상부 및 측면에 변위계(LVDT)를 설치하였다. 그리고 수평방향으로 하중을 재하하기 위하여 수평재하장치를 원심모형토조에 결합한 후 Load Cell을 아래 그림 5와 같이 모형 방파제 측면에 연결하였다. Load Cell과 모형 방파제는 볼트를 이용하여 고정시켜 하중 재하시 탈락이 발생하지 않고 지속적으로 수평하중을 재하함으로써 수평력이 측정되도록 하였다. 방파제 및 계측기 설치완료 후 50g 중력수준으로 가속한 조건에서 단위 폭당  $580.00\text{tf/m}$ 의 수평력으로 하중을 재하시켜 모형 방파제의 측방변위와 지반 침하량을 측정하였다.



그림 5 계측기 및 수평재하장치 설치

### 4. 원심모형실험 결과

#### 4.1 모래지반 조성 결과

수중에서 포화되어 있는 모래지반을 진동대를 이용하여 1g에서 형성 후 원심모형실험기 내에서의 응력 재분배를 위하여 50g의 중력수준으로 가속한 결과 모래지반의 변위는 그림 6과 같이 중앙부에서 -0.066m, 측부에서 -0.052m의 침하량이 발생하였다.

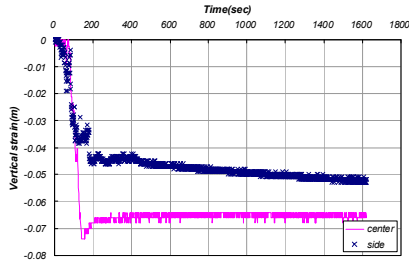


그림 6 모래지반 조성시 연직변위

#### 4.2 굴착치환 및 기초 사석층 조성 결과

굴착치환 조성 결과는 그림 7과 같이 모래지반에서 0.11m의 융기 발생, 사석층에서 0.18m의 침하가 발생하였다. 또한 기초 사석층 조성 결과는 그림 8과 같이 모래지반에서 0.01m의 융기 발생, 사석층에서 0.04m의 침하 발생 후 수렴하였다. 그러나 이 단계에서의 모래와 사석층의 변위는 모형 측면의 구속이나 침하에 대한 추가 포설 미적용 등의 모형의 한계상 실제 현장에서 예측 가능한 변위로 추정하기가 어렵다고 판단된다.

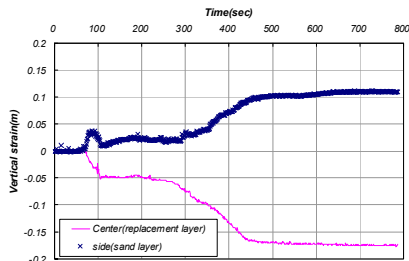


그림 7 굴착치환 후 지반 침하

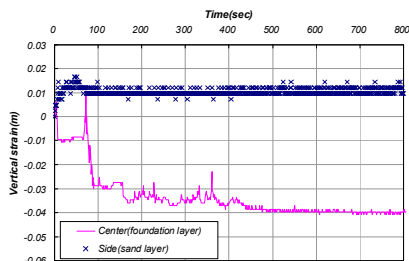


그림 8 기초사석층 조성 후 지반 침하

#### 4.3 수평재하실험 결과

방과제 및 계측기 설치 완료 후 50g 중력수준으로 가속 후 0~420초까지의 케이스는 시공단계에서 발생한 침하량은 그림 9에서처럼 최대 0.06m이고, 하중재하(420초) 이후 연직변위는 상향(+)으로 발생하며 최종 0.02m의 연직변위가 발생하였다. 또한 모형 방과제의 수평력에 대한 변위는 약 0.08m가 발생하였다. 설계력 547.8tf/m를 고려하면 수평방향의 변위가 79.7mm 발생하는 것으로 나타났다.

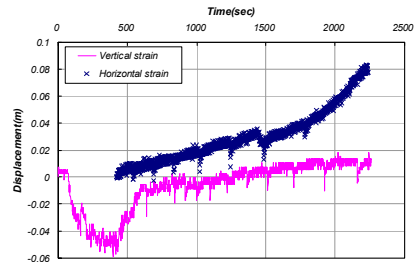


그림 9 하중재하 단계에서의 변위

수평하중재하에 의한 재하점의 수평변위는 그림 10에서 보는 바와 같이 초기에 일정하게 증가하다가 점차 변위가 커지는 경향을 보였다. 또한 초기에는 수평하중 증가에 따라 변위가 일정하게 증가하나 하중 370tonf/m 이후에는 하중 증가에 따라 변위가 다소 커지는 경향을 나타냈다.

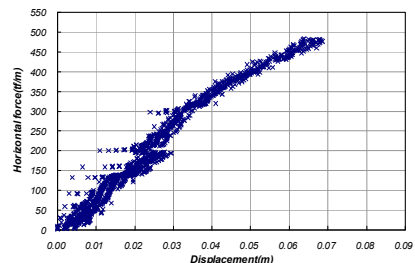


그림 12 수평하중-변위

### 5. 수치해석

#### 5.1 개요

원심모형실험 결과 분석된 방과제 및 지반 거동 경향의 타당성을 검토하고, 그 안정성을 평가하기 위하여 FEM 수치해석을 수행하여 비교 분석하였다. 적용된 수치해석 프로그램은 PLAXIS BV사의 PLAXIS v8.2를 이용하였고, 원심모형실험과 동일한 모형 및 조건에 대하여 해석을 수행하였다.

### 5.2 해석 물성치

원심모형단면을 모델링한 수치해석 결과가 원심 모형실험결과와 유사하게 분석되는 물성을 적용하여 시료에 대한 정적, 동적 물성치를 종합적으로 분석하여 아래 표 1과 같은 입력값을 적용하였다. 또한 동적인 파력을 고려하기 위하여 동적해석물성에 비하여 낮은 값을 적용하였다.

표 1 수치해석 물성치

구분	적용 물성
Sand (Dr=40%)	<b>Hyperbolic model</b> $r_{sat}=19.443\text{kN/m}^3$ $e_{initial}=0.911$ $e_{min}=0.646$ $e_{max}=1.087$ $c=0.1\text{kPa}$ $\phi = 35.9^\circ$ $E_{50}^{ref}=167,000\text{kPa}$ $E_{oed}^{ref}=132,200\text{kPa}$ $E_{ur}^{ref}=501,000\text{kPa}$ $m=0.530$ $\nu_{ur}=0.330$ $P_{ref}=100\text{kPa}$ $K_0^{nc}=0.359$ $R_f = 0.840$
Crush stone	<b>Mohr-Coulomb</b> $r_{sat}=20.000\text{kN/m}^3$ $c=0.1\text{kPa}$ $\phi=40.0^\circ$ $E_{ref}=500,000\text{kPa}$ $\nu=0.300$
Breakwater structure	<b>Upper structure</b> - Linear-elastic - $r_{sat}=21.200\text{kN/m}^3$ - $r_t=19.810\text{kN/m}^3$ - $E_{ref}=2.1 \times 10^7\text{kPa}$ - $\nu=0.150$ <b>Lower structure</b> - Linear-elastic - $r_{sat}=23.000\text{kN/m}^3$ - $r_t=23.000\text{kN/m}^3$ - $E_{ref}=2.1 \times 10^7\text{kPa}$ - $\nu=0.150$

### 5.3 수치해석

#### 5.3.1 해석모델

원심모형실험 단면에 대한 지반거동분석을 위하여 유한요소해석으로 아래 그림 11, 12와 같이 해석단면 및 유한요소망을 구성하였다.

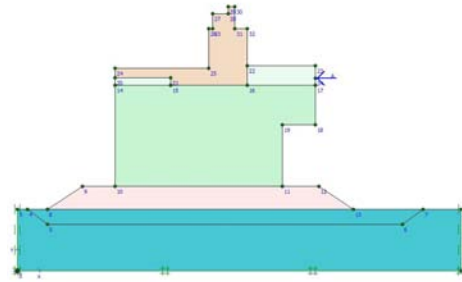


그림 11 원심모형실험단면에 대한 해석모델

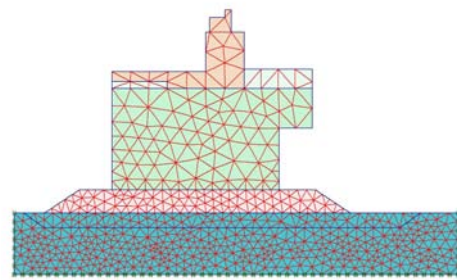


그림 12 원심모형실험단면에 대한 유한요소망

#### 5.3.2 해석단계

원심모형실험단면에 대한 수치해석은 아래 표 2와 같이 6개의 시공단계를 고려하여 수행하였다.

표 2 수치해석 시공 단계

해석 단계	Identification	설명
초기단계	Initial phase	원지반 조성 초기응력 반영
굴착치환	Replace crush stone	굴착치환
기초사석시공	Foundation crush stone	기초사석층 시공
방파제 하부시공	Construction of lower breakwater structure	방파제 하부 케이슨부 설치
방파제 상부 및 피복석 시공	Construction of upper breakwater structure & cover stone	방파제 상부 상치 콘크리트부 설치
수평 하중 재하	Hor. load	수평하중 재하

위의 조건으로 원심모형실험에 대한 수치해석을 그림 13~15와 같이 수행하여 도시하였다.

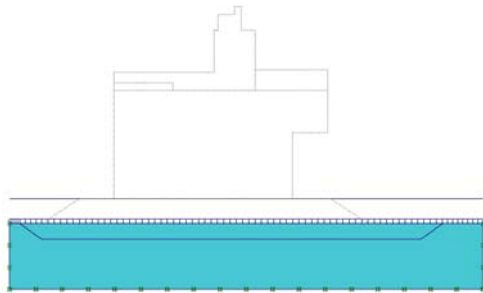


그림 13 해석단계 1 : 초기단계

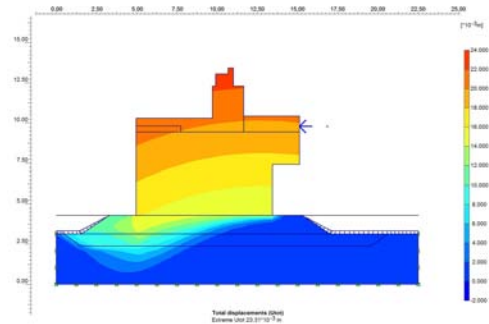


그림 16 전체 변위 분포

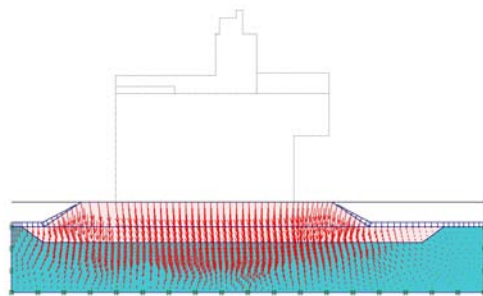


그림 14 해석단계 3 : 기초 사석 시공

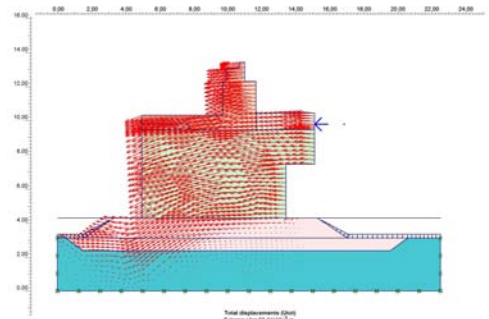


그림 17 전체 변위 벡터

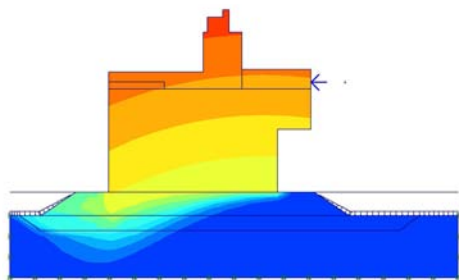


그림 15 해석단계 6 : 수평하중 제하

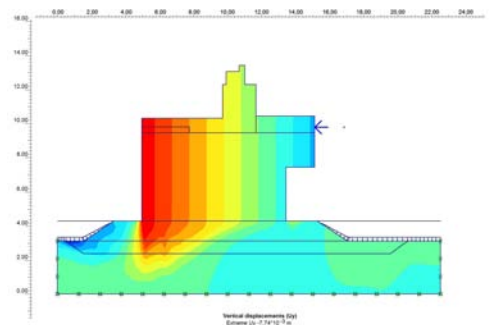


그림 18 연직변위 분포

### 5.3.3 해석결과

먼저 수평하중제하에 의한 방과제 구조물 및 지반의 거동분석 결과를 그림 16, 17과 같이 최종단계의 수평하중제하 후 전체변위 분포와 벡터로 나타내었다. 전체변위는 수평하중에 의해 항내측 아래방향으로 회전하려는 경향으로 나타났고, 최대 변위는 케이슨 상부에서 23.3mm(상사성 고려시 : 93.2 mm)로 나타났다. 또한 지반부 최대 변위는 기초사석층 상부에서 12.2mm(상사성 고려시 : 48.8mm)로 나타났다.

두번째로 연직변위 분포 분석 결과는 그림 18, 19와 같이 방과제의 항내측은 침하, 항외측은 융기되는 경향으로 나타났고, 전반적으로 침하의 경향이 크게 나타났다. 최대 연직변위는 케이슨 앞쪽에서 7.7mm(상사성 고려시:31.0mm)가 발생하였고 지반부의 최대 연직변위는 굴착치환사석층에서 4.4mm (상사성 고려시:17.7mm)가 발생하였다.

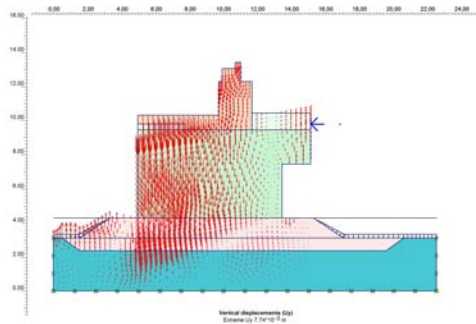


그림 19 연직변위 벡터

세 번째 케이스 및 지반의 수평변위 결과를 그림 20, 21에 도시하였다. 그림에서처럼 최대 수평변위는 방파제 위쪽에서 23.2mm (상사성 고려시 : 92.8mm)가 발생하였고, 지반부 최대 연직변위는 기초사석층에서 14.2mm(상사성 고려 : 56.8mm) 발생하였다. 수평하중재하부의 수평변위는 20.3mm (상사성 고려 : 81.1mm)로 분석되었고, 하중재하위치에서 상사성을 고려한 수평변위 81.1mm가 모형 실험에서의 수평변위 79.7mm와 유사하게 나타나 해석 모델 및 입력정수가 적합한 것으로 판단된다.

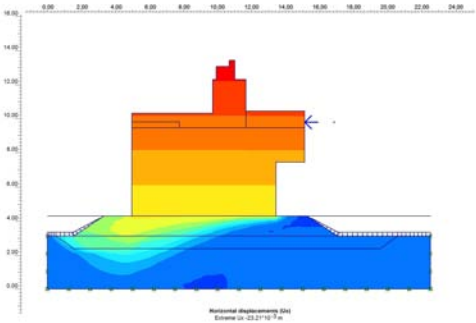


그림 20 수평변위 분포

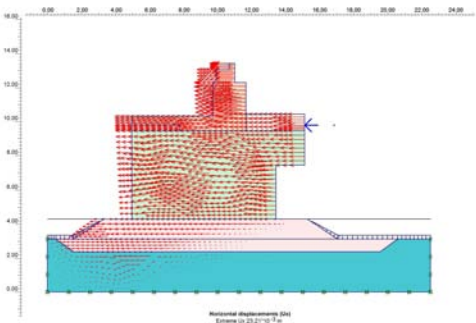


그림 21 수평변위 벡터

마지막으로 수평하중재하 후 전단응력 및 전단변형률에 대한 분석 결과 그림 22, 23과 같이 나타났다. 지반부 최대 전단응력은 굴착치환부에서 105.9kPa, 최대 전단변형률은 굴착치환부와 방파제 접합부에서 4.3%가 발생하였다. 전반적으로 지반의 전단응력은 100kPa 이내의 결과를 보이며, 전단변형률은 1.5%내의 결과를 보이고 있다. 지반의 전단응력과 전단변형률은 비교적 높은 값을 형성하고 있으며, 전단응력은 전단강도에 인접되는 값으로 판단되므로 추가적인 상세 검토가 필요할 것으로 판단된다.

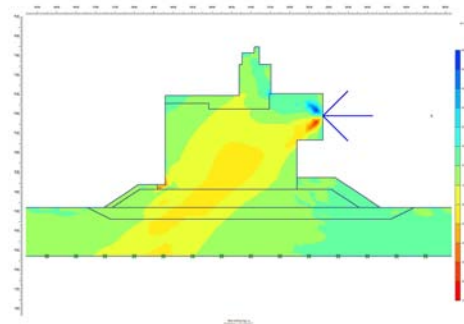


그림 22 수평재하에 따른 전단응력

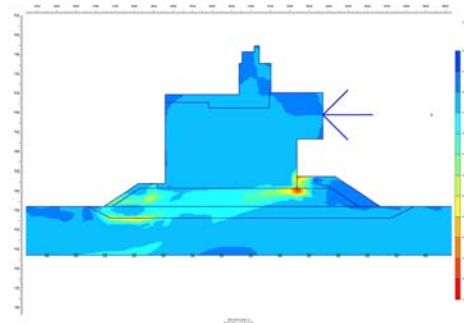


그림 23 수평재하에 따른 전단변형률

## 6. 결론

본 연구에서는 고파랑, 대수심 조건하에서 형성된 방파제에 대해 파압이 작용될 때의 안정성 검토를 원심모형실험과 수치해석을 통하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

원심모형실험 결과 모래지반의 변위는 모래지반 조성 후 0.066m, 굴착치환 후 0.11m, 기초사석층 조성 후 0.01m가 발생하였다.

수평하중재하 단계에서 연직변위는 초기 시공단계에서 0.06m 발생하여 증력수준에 이르러 하중재하시 서서히 증가하여 최종적으로 0.02m의 변위가 발생하였다.

원심모형실험에 대한 수치해석 수행 결과 하중 재하위치에서 상사성을 고려한 수평변위 81.1mm가 실험에 의한 수평변위 79.7mm와 유사하게 나타나 수치해석 모델 및 입력정수가 적합함을 알 수 있었고, 설계력에 의해 소정의 안정성이 확보되는 것으로 분석되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 강대수, “연약점토의 이차원 압밀에 관한 원심모형시험”, 강원대학교 대학원 공학석사학위논문, 1997.
- [2] 김기수, “사질토 지반에서 얇은 기초 침하예측”, 경북대학교, 2005.
- [3] 김상진, “저치환율 모래다짐말뚝의 원심모형실험”, 강원대학교 대학원 공학석사학위논문, 2002.
- [4] 김성렬, “진동대 실험을 이용한 증력식 안벽의 지진거동 분석”, 서울대학교 대학원, 2003.
- [5] 삼성건설, 항만건설기술, 2006.
- [6] 손형모, “초대형 증력식 안벽의 고동에 관한 실험연구”, 연세대학교 대학원, 2003.
- [7] 엄재경, “상재하중 하 역T형 옹벽의 활동거동에 관한 원심모형실험”, 강원대학교 대학원 공학석사학위논문, 1996.
- [8] 이명옥, “사면에 인접한 옹벽의 원심모델링”, 강원대학교 대학원 공학석사학위논문, 1998.
- [9] 전동욱, “원심모형실험에 의한 연약점토의 자중압밀에 관한 연구”, 강원대학교 대학원 공학석사학위논문, 1997.
- [10] Ko, H. Y., “Summary of the State-of-art in Centrifuge Model Testing”, *Centrifuge in Soil Mechanics*, Craig, James & Schofield(eds), Balkema, pp. 11~18, 1988.
- [11] Schofield, A. N., “An Introduction to Centrifuge Modelling”, *Centrifuge in Soil mechanics*, Craig, James & Schofield(eds), Balkema, pp. 1~9, 1988.