

## 연약지반 방파제의 시공에 관한 실험적 평가 Experimental Evaluation of Soft Ground Breakwater Construction Performance

권오순<sup>1</sup> · 장인성<sup>1</sup> · 박우선<sup>1</sup> · 염기대<sup>1</sup>

O Soon Kwon<sup>1</sup>, In Sung Jang<sup>1</sup>, Woo Sun Park<sup>1</sup> and Ki Dai Yum<sup>1</sup>

### 1. 서 론

최근 특별한 연약지반 처리공법을 적용하지 않고 자중을 감소시키고 구조적인 특성을 이용하여 연약지반 위에 설치하는 방파제가 제안·개발되고 있다. 일본에서는 자중을 가볍게 하고 파랑 하중을 역T형 구조와 말뚝을 이용하여 지지하는 구조를 시공한 사례도 있으며(門司剛至 등, 1989), 국내에서는 Fig. 1과 같이 역T형 콘크리트 방파제의 자중만으로도 과도한 압밀침하가 발생하는 아주 연약한 지반에서 방파제의 자중을 줄이기 위해 부력통을 설치하고 설계 하중은 지중에 벽체를 설치하여 지지하는 구조를 제안하고 그 성능을 평가한 바 있다(권오순 등, 2001; 권오순 등, 2002). 본 연구에서는 연약지반 방파제를 현장에서 시공시 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 해결책을 강구하기 위하여 인위적으로 불균질하게 조성된 연약지반에서 자중으로 인해 시공 상태와 부동침하를 조정하기 과정 및 선행압밀과정을 적용하여 시공 후 부동침하를 억제할 수 있는 공법에 대하여 고찰하였다.

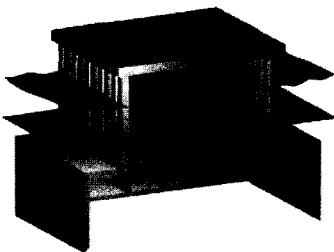


Fig. 1. Soft ground breakwater.

### 2. 실험조건

#### 2.1 재하방법

실험은 시공 방법에 따라 2단계로 실시하였다. 먼저 방파제를 설치 위치에 두고 방파제 기초 저판이 완전히 지반에 닿을 때까지 방파제 지중벽을 지반 속으로 균등하게 관입시키는 과정을 첫 번째 단계로 보았으며, 방파제가 지반 위에 놓인 후 장기 압밀침하의 영향을 제거하고 방파제 아래 지반의 초기 강성을 증가시키기 위하여 선행압밀을 실시하는 과정을 두 번째로 하였다. 또한 첫 번째 단계인 방파제의 설치과정에서 방파제의 설치에 두 가지 방법을 적용하였는데, 사하중 재하를 통한 방법과 방파제 하단에 설치된 압력실의 수압을 감소시켜 수압차로 방파제 지중벽을 관입시키는 석션법을 채택하였다.

#### 2.2 토조

시공성능 평가를 위한 연약지반은 내부 폭(B) 100cm, 높이(H) 50cm, 길이(L) 75cm인 토조에 인위적으로 조성하여 사용하였다. 토조의 양쪽 측면은 1.5cm 두께의 유리로 구성되어 있으며, 바닥에 배수구가 설치되어 지반의 상하 방향으로 배수를 허용하였다. 기존 연구 결과로부터 상부 구조물의 크기 따라 영향을 받는 지반의 범위가 기초 폭의 2배 정도이므로 토조의 폭을 방파제 모형 폭의 2배로 하였으며, 압밀침하에 영향을 주는 토층의 두께를 고려하여 기초 폭 만큼의 토층을 형성할 수 있도록 토조의 높이를 결정하였다.

<sup>1</sup> 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Corresponding Author : O Soon Kwon, Coastal and Harbor Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, 1270 Su2-dong, Sangnok-gu, Ansan, 425-172, Korea, oskwon@kordi.re.kr)

### 2.3 지반조성

연약지반 조성을 위해 사용한 점성토는 국내 점성토의 주요 구성성분인 카올리나이트(kaolinite)이며, 하부에 배수층을 형성한 후 그 위에 현탁액 상태로 50cm 이상 조성하여 자중압밀을 시켜 어느 정도 압밀이 발생하게 방치하였다. 어느 정도 토층이 형성된 후, 사하중을 좌우가 서로 크기가 다르게 가해 지반이 불균질하도록 조성하였다. 카올리나이트의 기본 물성치는 다음 Table 1과 같다. Fig. 2는 불균질 지반을 조성하고 있는 장면이며, 조성된 지반의 표면을 정리하여 실험을 수행하였다.

Table 1. Index properties of kaolinite

G <sub>s</sub>	LL (%)	PL (%)	PI (%)	C <sub>c</sub>	C <sub>r</sub>	Fine content (%)
2.61	51.0	22.0	29.0	0.309	0.050	94.2

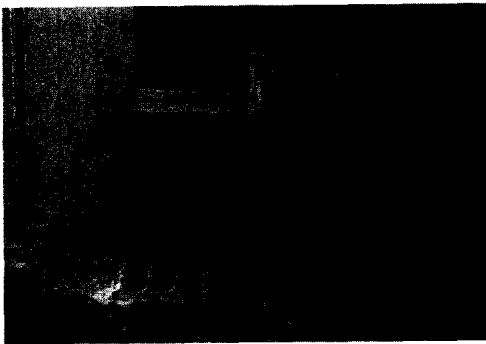


Fig. 2. Non-uniform loading.

### 2.4 방파제 단면조건

시공성능 평가를 위해 제작된 방파제의 기초 폭은 36cm, 길이는 54cm이며 높이는 18cm이다. 재질은 아크릴이며, 자중의 효과를 고려하기 위하여 방파제 중심에 3.3kgf의 추를 부착하여 사용하였다. 방파제 지중벽은 좌우에 하나씩 설치하고 그 가운데를 4개의 격실이 되도록 그 사이를 가로·세로 방향의 벽을 부착하였다. 각 격실은 서로 연결되어 있지 않고 방파제 지판 측 격실의 상부에 밸브를 연결할 수 있는 구멍을 설치하였다. 이 밸브는 석션압을 공급하기 위해 설치된 것이다. 사하중 재하 방식과 석션 방식 모두 동일한 모형을 사용하였다. 방파제의 침하량 측정을 위해 방파제 전후좌우에 각각 1개씩 자를 설치하였다.

## 3. 실험

### 3.1 사하중 재하 시공

모형방파제를 시공하기 위해 지반 위에 모형 방파제를 위치시킨 후, 추를 방파제에 올려 사하중을 재하한다. 인공적으로 불균질하게 조성된 지반이기 때문에 방파제의 지중벽이 지반에 관입되는 과정에서 부등침하가 발생하였다. 침하가 상대적으로 작게 발생한 위치에 추를 더 올려놓아 균등한 관입이 발생하도록 하였다.

다음 Fig. 3은 방파제 좌·우측에 추를 2개씩 올려놓은 장면으로 이로 인해 상대적으로 더 연약하게 조성된 지반 쪽(좌측)에서 더 큰 침하가 발생하고 있음을 알 수 있다.

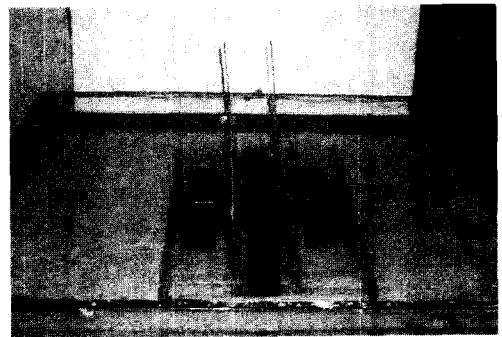


Fig. 3. Differential settlement occurred.

다음 Fig. 4는 부등침하가 발생한 상태에서 침하를 균등하게 발생하도록 하기 위하여 추가하중을 좌·우측에 각각 다르게 재하한 장면이다. 처음에는 0.8kgf 중량의 작은 추를 이용하여 원하는 침하가 발생하도록 하나씩 증가시켜가면서 균등 침하를 유도하였다. 최종적으로 그림과 같이 방파제 저판이 지표면에 완전히 일치되었다.

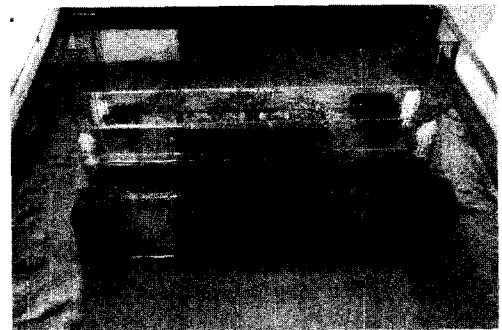


Fig. 4. Compensation of differential settlement.

### 3.2 석션(suction) 시공

방파제의 지중벽을 지반 속으로 관입시키기 위해 최근 연약지반이나 느슨한 사질토 지반에서 대형 말뚝이나 앵커의 관입을 위해 많이 도입되고 있는 석션(suction) 시공법을 적용하였다. Fig. 5는 방파제 하단에 부압(suction pressure)을 가하기 위해 방파제 하단에 설치된 격실 4개에 압력선을 연결한 장면이다. 압력선은 압력의 흐름을 열거나 차단하기 위해서 4개의 압력선에 각각 밸브를 설치하였다. 석션 시공을 위한 필요 장비 제원은 부압을 가하기 위해 진공펌프(사진 좌측 하단)와 공기압으로 작용하는 부압을 수압으로 바꿔주는 배출챔버(evacuation chamber)를 통해 방파제 하단에 각 격실로 부압이 작용하게 된다.

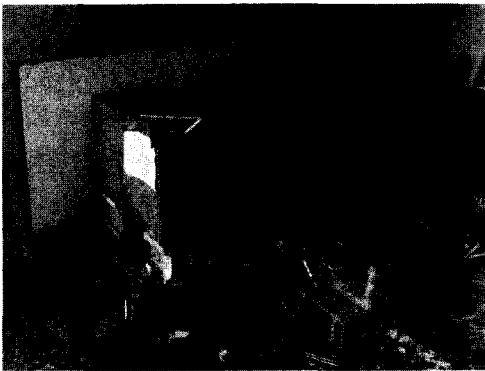


Fig. 5. Pressure line arrangement.

배출챔버를 이용하여 방파제 하단 격실에 부압을 가하고 방파제 저면의 격실에 가해지는 부압과 토층의 수면과의 위치수두차를 합산한 크기의 압력이 방파제의 관입력이 된다. Fig. 6은 석션을 이용하여 방파제 지중벽을 관입시키는 장면을 보여주고 있는 것

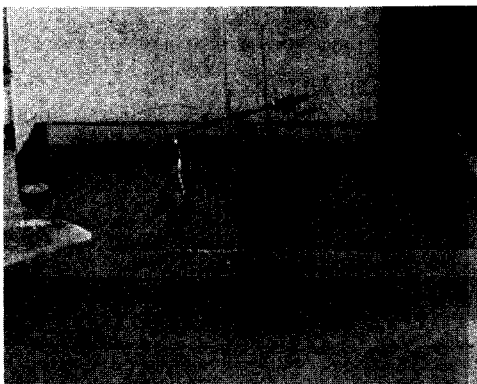


Fig. 6. Suction installation.

으로 불균질하게 조성된 지반이기 때문에 여기에서도 연약한 토층인 좌측으로 방파제가 기울었으나, 좌·우측 밸브를 이용하여 균등한 침하를 유지하면서 방파제를 시공할 수 있었다.

### 3.3 선행압밀공법(preloading)

방파제가 설치되는 연약지반의 특성을 고려하여 장기압밀 침하를 예방하거나, 연약지반의 초기 강성을 증가시켜 과압하중에 의한 탄성변형을 억제하여 선행압밀공법을 적용할 수 있다. 선행압밀이란 사용하중 상태에서 발생할 것으로 예상되는 압밀침하량은 정규압밀 상태라면 압축지수( $C_c$ )에 선형적인 관계가 있으며, 과압밀 상태라면 재압축지수( $C_r$ )에 관계된다. 일반적으로 재압축지수는 압축지수의 3~10배 정도 큰 것으로 알려져 있어, 정규압밀 상태에서 상당히 큰 압밀침하가 장기간에 걸쳐 발생하게 된다. 따라서 공용 상태에서 장기간에 걸친 압밀침하를 감소시키기 위하여 연약한 기초 지반에 미리 큰 하중을 가해서 어느 정도 압밀을 시킨 후 다시 제거하게 되어 기초 지반을 과압밀상태로 조성한다. 이러한 선행압밀을 이용하는 방법은 대표적인 연약지반개량공법의 하나이기도 하며, 연약지반이나 약간 느슨한 지반에 구조물을 설치할 경우에도 적용하여 기초 지반의 초기 강성을 증가시켜 침하나 변형을 억제하기 위해 많은 분야에서 사용되고 있다.

이번 연구에서도 이러한 선행압밀의 원리를 이용하여 설계하중까지 미리 선행압밀을 시킨 후 하중을 제거하였다가 다시 하중을 가하여 추가로 얼마의 침하가 발생하는지 고찰하였다. Fig. 7은 선행압밀하중으로 추를 82.45kgf 만큼 올린 장면이다. 실험에서 최대 하중으로 더 이상 침하가 발생하지 않는 단계까지

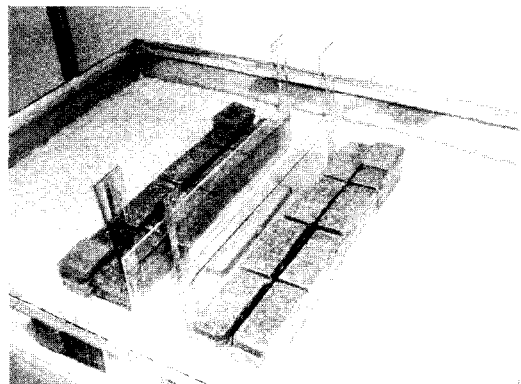


Fig. 7. Preloading step.

압밀을 진행시킨 후, 하중을 완전히 제거하고 난 이후의 침하량 변화와 다시 82.4kgf를 올렸을때의 침하량 거동을 관찰하였다.

## 4. 결과분석

### 4.1 방과제 시공 분석

Fig. 8은 사하중을 재하하면서 측정된 방과제 좌우 및 전후에 설치된 자에서 읽은 침하량 곡선이다. 그림에서 초기에 발생한 부등침하를 적절한 하중을 작용하여 최종적으로 균등한 상태로 시공이 된 것을 보여준다.

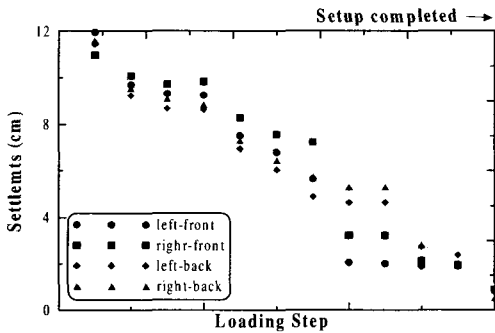


Fig. 8. Settlements of construction period.

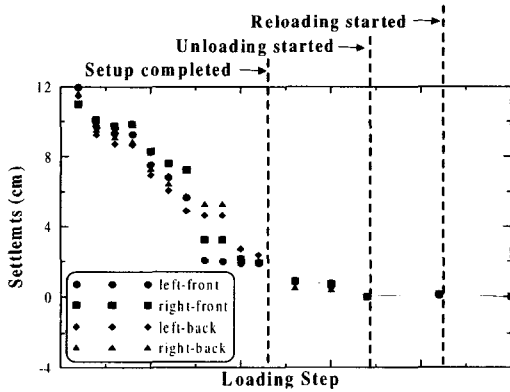


Fig. 9. Settlements of preloading and reloading period.

### 4.2 선행압밀공법 분석

Fig. 9는 시공이 완료된 방과제에 선행압밀하중을 가하여 추가로 더 압밀을 진행시키고 또 하중을 제거한 후 다시 하중을 가한 결과를 도시한 것이다. 그림에서 하중을 제거한 이후 침하량 감소량과 다시 하중을 가했을 때 발생하는 침하량이 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 제압축지수가 작아서

이번 연구에서처럼 작은 하중단계에서 용기와 침하가 거의 나타나지 않은 것으로 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 연약지반 방과제의 시공성능을 평가하기 위하여 토조시험을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 지중벽을 가진 연약지반 방과제를 지반에 관입하면서 균등한 침하를 유도하기 위한 시공방법으로 사하중을 이용하는 방법과 석션(suction)을 이용하는 방법을 적용하였으며, 두 방법 모두 적절한 시공방법으로 검증되었다.
- ② 연약지반 방과제의 장기 압밀침하의 감소와 기초 지반의 초기 강성을 증가시켜 방과제의 변위를 제어하기 위해 선행압밀을 실시하여 그 효과를 검증하였으며, 실험 결과로부터 선행압밀공법을 적절히 적용한다면 압밀침하는 거의 발생하지 않도록 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 '대수심 방과제 및 연약지반 관련기술' 연구용역의 일환으로 수행된 것입니다

## 참고문헌

- 권오순, 장인성, 박우선, 염기대, 2001. 횡하중을 받는 연약지반용 방과제의 거동, 대한토목학회 논문집, 제21권, 제3-B호, pp. 237~247.
- 권오순, 장인성, 박우선, 염기대, 2002. 연약지반 방과제의 압밀 침하 거동, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제1-B호, pp. 57~66.
- 해양수산부, 1999. 대수심 방과제 및 연약지반 관련기술(II), pp. 248~285.
- 門司剛至, 村山伊知郎, 元野一生, 高田直和, 1989. 軟弱地盤着底式防波堤開發, 海洋開發論文集, 第5卷, pp. 103-107.
- Bjerrum, L., 1963. Allowable Settlements of Structures, Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, pp. 135~137
- Boscardin, M. D. and Cording, E. J., 1989. Building Response to Excavation-induced Settlements, Journal of the Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 115, No. 1, pp. 1~

21.

Das, B. M., 1990. Principles of Geotechnical Engineering, PWS-KENT, Boston

Skempton, A. W. and MacDonald, D. H., 1956. The Allowable Settlements of Buildings, Proceedings of Institution of Civil Engineerings, Part III, The Institution of Civil Engineers, London, pp. 727~768.