

Article

연약지반 방파제의 시공성능 및 장기침하에 관한 실험적 평가

권오순 · 장인성* · 박우선 · 염기대

한국해양연구원 연안·항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Experimental Evaluation of Construction Performance and Long-term Settlements in Soft Ground Breakwater

O Soon Kwon, In Sung Jang*, Woo Sun Park, and Ki Dai Yum

Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : A new type of soft ground breakwater was recently developed, which does not need ground improvement because of light weight and structural characteristics. The various studies about consolidation settlements and lateral behavior of proposed soft ground breakwater have been conducted. But, the systematic investigations on the construction performance and long-term settlements of new type breakwater has not been accomplished. In this study, construction simulation of soft ground breakwater with soil box model test and experiments of the long-term wave loaded breakwater were performed. The results of test shows that it is possible to compensate differential settlements by dead loading and/or suction pressure, and to reduce the consolidation settlements by preloading method. It was also found that the vertical and lateral displacements of long-term wave loaded breakwater were negligible.

Key words : 연약지반(soft ground), 방파제(breakwater), 시공성능(construction performance), 장기침하(long-term settlements)

1. 서 론

최근 모래다짐말뚝과 같은 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 있다(門司剛至 등 1989). 국내에서는 Fig. 1과 같이 역T형 콘크리트 방파제의 자중만으로도 과도한 압밀침하가 발생되는 아주 연약한 지반에서 방파제의 자중을 줄이기 위해 부력통을 설치하여 설계하중을 지중에 설치된 벽체구조가 지지하는 새로운 구조를 제안하고 그 성능을 평가한

바 있다(권오순 등 2001; 권오순 등 2002). 본 연구는 연약지반 방파제를 실제 시공할 경우 발생할 수 있는 여러 가지 문제점을 파악하고 연약지반 위에 설치된 방파제의 장기침하에 대한 검토를 위하여 수행되었다. 시공성능을 파악하기 위하여 인위적으로 불균질하게 조성된 연약지반에서 자중으로 인해 시공 상태와 부등침하를 조정하기 과정 및 선행압밀과정을 적용하여 시공 후 부등침하를 억제할 수 있는 공법에 대하여 고찰하였다. 또한, 일반적으로 사용하고 있는 Terzaghi(1943)의 압밀침하 이론으로는 파랑과 같은 반복하중으로 인해 추가 잔류침하가 발생하지 않는 것으로 알려져 있으나, 실제 반복하중으로 인해 발생하는 압밀침하에 대한 검증된 실험결과가 많지 않기 때문에 이에 대한 영향을 고찰하고자 실험을 수행하였다.

*Corresponding author. E-mail : isjang@kordi.re.kr

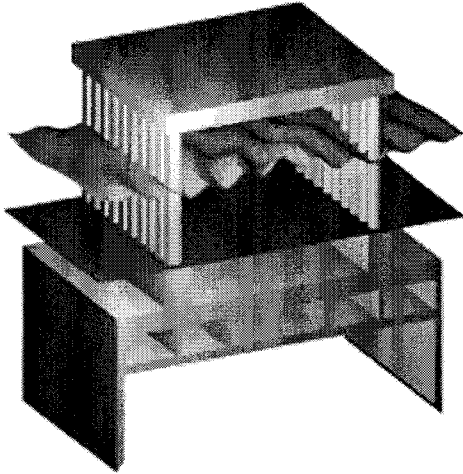


Fig. 1. Soft ground breakwater.

2. 실험조건

시공성능 평가를 위한 모형실험

시공성능 평가를 위한 연약지반은 내부 폭(B) 75 cm, 높이(H) 50 cm, 길이(L) 100 cm인 토조에 인위적으로 조성하여 사용하였다. 토조의 양쪽 측면은 1.5 cm 두께의 유리로 구성되어 있으며, 바닥에 배수구가 설치되어 지반의 상하 방향으로 배수를 허용하였다. 기존 연구 결과로부터 상부 구조물의 크기에 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.

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

시공성능 평가 재하방법

실험은 시공 방법에 따라 2단계로 실시하였다. 먼저 방

Table 1. Index properties of kaolinite.

G_s	LL (%)	PL (%)	PI (%)	C_c	C_r	Fine content (%)
2.61	51.0	22.0	29.0	0.309	0.050	94.2

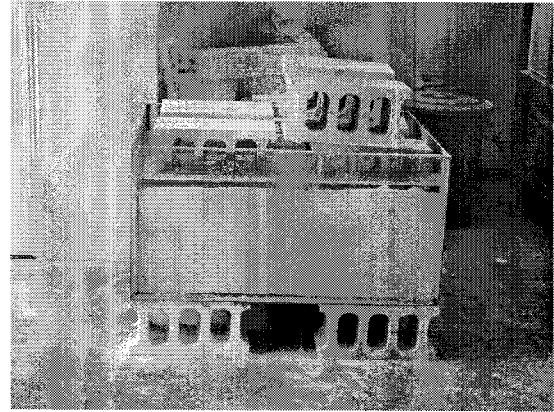


Fig. 2. Non-uniform loading for non-homogeneous soft ground.

파제를 설치 위치에 두고 방파제 기초 지반이 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 석션법(suction method)을 채택하였다.

시공성능 평가를 위해 제작된 방파제의 기초 폭은 36 cm, 길이는 54 cm이며 높이는 18 cm이다. 재질은 아크릴이며, 자중의 효과를 고려하기 위하여 방파제 증심에 3.3 kgf의 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 저판 즉 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.

선행압밀공법(preloading)

방파제가 설치되는 연약지반의 특성을 고려하여 장기압밀 침하를 예방하거나, 연약지반의 초기 강성을 증가시켜 파랑하중에 의한 탄성변형을 억제하기 위하여 선행압밀공법을 적용할 수 있다. 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 1/3~1/10배 정도인 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 선행압밀공법은 대표적인 연약지반개량공법의 하나이기도 하며, 연약지반이나 약간 느슨한 지반에 구조물을 설치할 경우에도 적용하며 기초 지반의 초기 강성을 증가시켜 침하나 변형을 억제하기 위해 많은 분야에서 사용되고 있다.

장기침하 평가를 위한 모형실험

연약지반 방파제에 실제 파랑을 작용시키기 위하여 Fig. 3과 같은 수조를 사용하였다. 소형 수조의 크기는 폭 (B) 30 cm, 높이(H) 60 cm, 길이(L) 600 cm로 규칙파를 발생시킬 수 있는 플랩형 조파 장치가 부착되어 있다. 수조 안에 연약지반을 조성하기 위하여 폭 30 cm, 높이 30 cm, 길이 40 cm인 토조를 설치한 후 카올리나이트로 이루어진 연약지반을 조성하였다. 카올리나이트를 반죽하

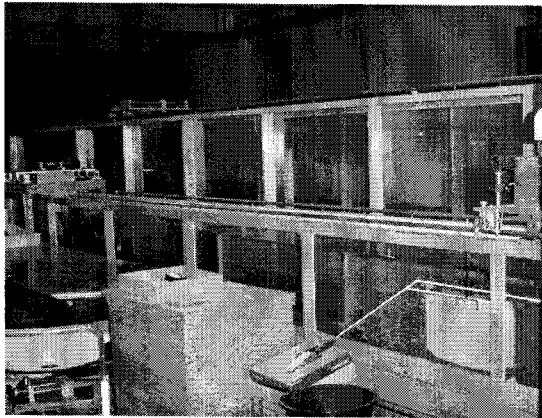


Fig. 3. Small size model box.

여 슬러리 상태로 토조에 담아 두었다가 어느 정도 안정된 후 사하중을 재하하여 2차에 걸쳐 압밀시켜 실험지반을 조성하였다. Fig. 4는 슬러리 상태의 토조에 1차 사하중 재하를 통한 지반 조성을 마친 후 2차 지반 조성 모습을 보여주고 있다.

모형 연약지반 방파제는 저판 폭을 10 cm, 지중벽의 길이는 5 cm, 높이는 17 cm인 아크릴로 제작하였다. 조성된 연약지반에 연약지반 방파제 모형을 거치시키고 압밀이 완료되도록 모사하기 위하여 사하중을 1개월 가량 재하하였다. 압밀이 종료된 이후 연약지반 위에 모래와 가는 자갈을 포설하였다.

실험 파랑조건

연약지반 방파제에 작용하는 파랑은 소형 수조의 조파 장치를 이용하여 작용하였는데, 방파제 전면 수심 8 cm (천단고 6 cm)인 상태에서 주기 2.2초의 규칙파를 가하였다. 입사파가 규칙파이기는 하나 파고는 조파판에서 재 반사영향으로 인하여 정확한 입사파고는 알 수 없고 다만 최대 파고가 4.5 cm 정도였다. 수조 내에 위치한 직립토조로부터의 반사를 줄이기 위하여 1:1.5의 자갈마운드를 토조 주위에 형성하였다. 파랑에 의한 장기적인 거동을 파악하기 위하여 규칙파를 장기간에 걸쳐 가하면서 연약지반 방파제의 천단 근처에 설치한 변위계를 통하여 시간에 따른 횡방향 및 연직 방향 변위를 측정하였다.

3. 실험

사하중 재하 시공

모형방파제를 시공하기 위해 지반 위에 모형 방파제를 위치시킨 후, 추를 방파제에 올려 사하중을 재하한다. 인공적으로 균질하지 않도록 조성된 지반이기 때문에 방파제의 지중벽이 지반에 관입되는 과정에서 부등침하가 발

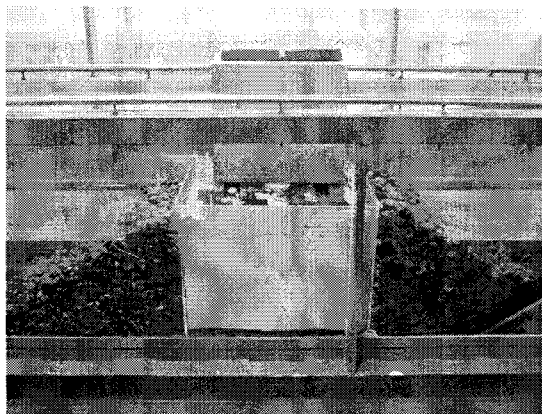


Fig. 4. Formation of soft ground (2nd stage).

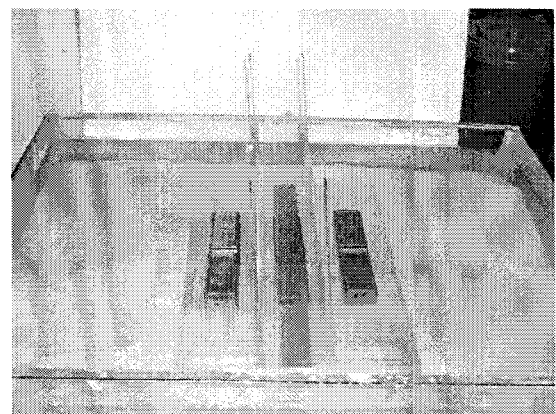


Fig. 5. Differential settlement occurred.

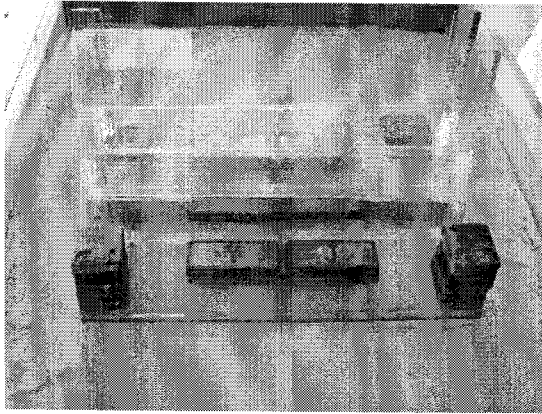


Fig. 6. Compensation of settlements.

생하였다. 침하가 상대적으로 작게 발생한 위치에 추를 더 올려놓아 균등한 침하가 발생하도록 하였다. 다음 Fig. 5는 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. 6은 부등침하가 발생한 상태에서 침하를 균등하게 발생하도록 하기 위하여 추가하중을 좌·우측에 각각 다르게 재하한 장면이다. 처음에는 0.8 kgf 중량의 작은 추를 이용하여 원하는 침하가 발생하도록 하나씩 증가시켜가면서 균등 침하를 유도하였다. 최종적으로 그림과 같이 방파제 저판이 지표면에 완전히 일치되었다.

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. 7은 방파제 모형에 부압을 가하기 위해 방파제 하단에 설치된 격실 4개에 압력선을 연결한



Fig. 7. Pressure line arrangement.

장면이다. 압력선은 압력의 흐름을 열거나 차단하기 위해서 4개의 압력선에 각각 밸브를 설치하였다. 석션 시공을 위한 필요 장비 제원은 부압을 가하기 위해 진공펌프와 공기압으로 작용하는 부압을 수압으로 바꿔주는 배출챔버(evacuation chamber)를 통해 방파제 하단에 각 격실로 부압이 작용하게 된다. 배출챔버를 이용하여 방파제 하단 격실에 부압을 가하고 방파제 저면의 격실에 가해지는 부압과 토조의 수면과의 위치수두차를 합산한 크기의 압력이 방파제의 관입력이 된다. Fig. 8은 석션을 이용하여 방파제 지중벽을 관입시키는 장면을 보여주고 있는 것으로 불균질하게 조성된 지반이기 때문에 연약한 토층인 좌측으로 방파제가 기울었으나, 좌·우측 밸브를 이용하여 균등한 침하를 유지하면서 방파제를 시공할 수 있었다.

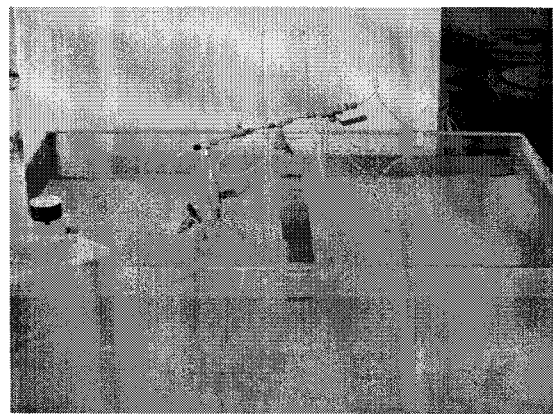


Fig. 8. Suction installation.

선행압밀(preloading)의 적용

초기 방파제와 지반을 일체화시키고 지반의 초기 강성을 증가시켜 압밀침하의 감소와 부등침하를 감소시키는 방법으로 채택한 선행압밀의 효과를 검토하기 위하여 설

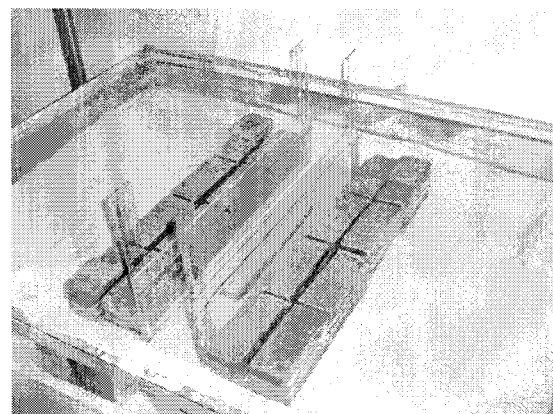
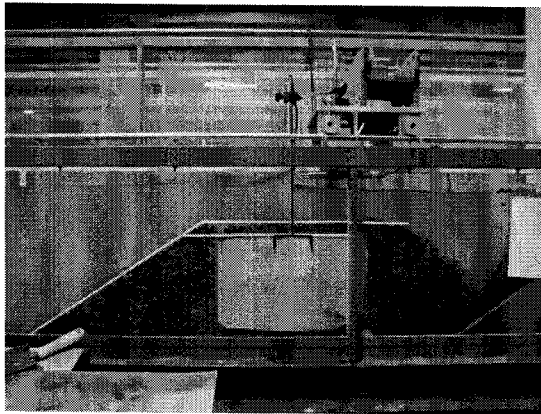


Fig. 9. Preloading step.

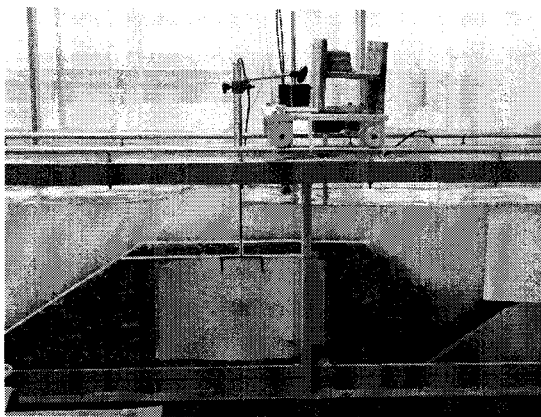
제하중까지 미리 선행압밀을 시킨 후 하중을 제거하였다가 다시 하중을 가하여 추가로 얼마의 침하가 발생하는지 고찰하였다. Fig. 9는 선행압밀하중으로 추를 82.4 kgf만큼 올린 장면이다. 실험에서 최대 하중으로 더 이상 침하가 발생하지 않는 단계까지 압밀을 진행시킨 후, 하중을 완전히 제거하고 난 이후의 침하량 변화와 다시 82.4 kgf를 올렸을 때의 침하량 거동을 관찰하였다.

반복 파랑하중에 의한 장기침하 평가 모형실험

Fig. 10은 저판 폭이 10 cm인 방파제에 파랑 하중이 작용하는 장면이다. 방파제의 변위는 방파제 천단 위치에서 LVDT를 이용하여 연직 방향 변위와 횡방향 변위를 측정하였다. 연약지반 위에 놓인 방파제의 장기 침하를 관찰하기 위하여 3개월 가량 실험을 계속하였으며, 파랑하중이 실제 수조의 크기가 작고 반사파의 영향 등으로 실험기간 동안 일정한 규칙적인 파랑하중을 가할 수는 없었으나 파랑하중과 연관된 정량적인 분석을 수행하는 것이 아니기 때문에 불규칙적인 파랑하중이 장기간에 걸쳐 노출되는 경우로 보고 정성적인 분석을 실시하였다.



(a)



(b)

Fig. 10. Wave loaded breakwater.

4. 결과분석

방파제 시공 공정에서 침하량

Fig. 11은 사하중을 재하하면서 측정된 방파제 좌우 및 전후에 설치된 자에서 읽은 침하량 곡선이다. 그림에서 초기에 발생한 부등침하를 적절한 하중을 작용하여 최종적으로 균등한 상태로 시공이 된 것을 보여준다.

선행압밀 공정에서 침하량

Fig. 12는 시공이 완료된 방파제에 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 재압축지수가 작아서 이번 연구에서처럼 작은 하중단계에서 용기와 침하가 거의 나타나지 않은 것으로 볼 수 있다.

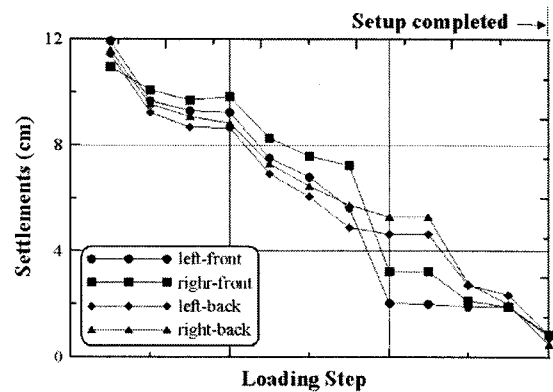


Fig. 11. Settlements of construction period.

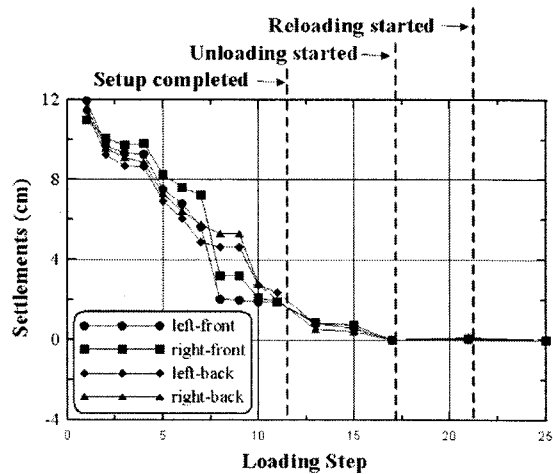


Fig. 12. Settlements of preloading and reloading period.

장기침하량 평가

Fig. 13~Fig. 15는 파랑 하중이 작용할 때 다양한 시간에서 방파제 전단 위치에서의 연직 및 횡방향 변위를 나타낸 것이다. Fig. 13을 보면, 전체적으로 일정한 주기($T=2.2$ 초)를 가지는 변위 양상을 나타내고 있으며, 횡방향 변위에 비하여 연직 방향 변위가 상대적으로 작은 값을 보이고 있다. 파랑 작용 후 9시간 25분이 경과하였을 때의 방파제 변위를 나타낸 Fig. 14의 경우, 연직 방향 변위는 Fig. 13과 큰 차이가 없지만, 횡방향 변위의 경우 파의 진행방향 쪽으로 파랑 작용시점에 비해 4배 정도의 변위를 보이는 것으로 나타났다. 한편, 파랑 작용 후 6일 18시간 30분이 경과하였을 때의 방파제 변위를 나타낸 Fig. 15를 보면, 연직 방향 변위의 경우 앞서 나타낸 두 경우와 큰 차이를 발견할 수 없지만, 횡방향 변위의 경우 Fig. 13과는 또 다른 경향을 보이고 있다. 이렇듯 시간에 따라서 방

파제의 변위거동이 다르게 나타나는 것은 입사파랑이 조파관으로부터 재반사되어 발생한 것이라 할 수 있다. 즉, 입사파랑은 주기는 2.2초이나 파고가 불규칙파와 같이 시간에 따라 변하기 때문에 발생된 현상이라 할 수 있다.

실험의 목적이 반복하중에서 압밀침하 발생여부와 지반의 소성변형에 의한 방파제의 변형에 있기 때문에 Fig. 16에 나타낸 한 주기당 평균 변위가 더 큰 의미를 지니고 있다. 그림을 보면 미소하지만 횡방향 변위는 외해측(입사파 진입 방향)으로 발생하였으며, 연직 방향 변위는 거의 발생하지 않고 있으나 방파제가 연직 방향으로 들리는 현상이 발생한 것을 알 수 있다. 횡방향 변위가 외해측으로 발생하는 것은 반복 파랑하중에 의한 영향으로 보기보다는 방파제 배후의 수위상승에 의한 방파제 전후면 수압차로 인한 영향이라고 보는 것이 타당하다. 즉, 계속적인 입사파의 내습에 의하여 월파, 방파제와 측면 유리판사이의 간

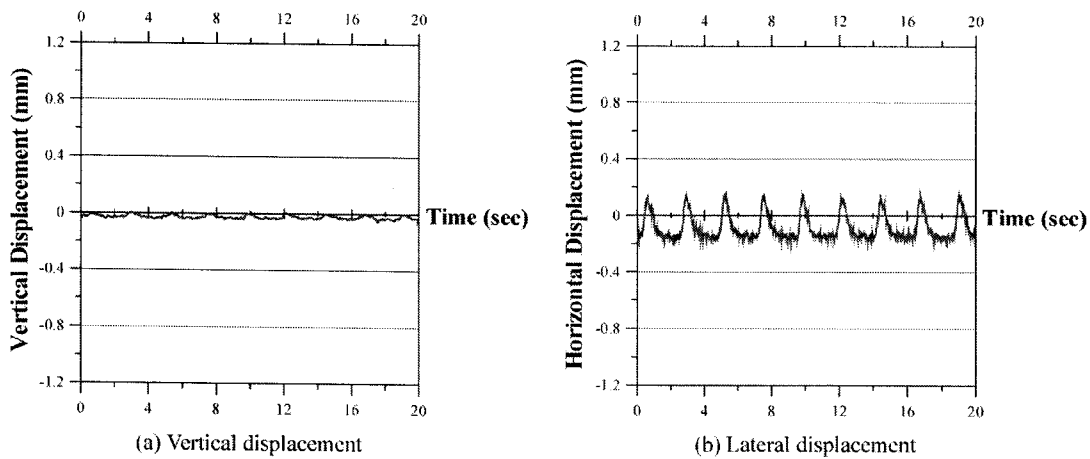


Fig. 13. Displacements of top crest (initial stage).

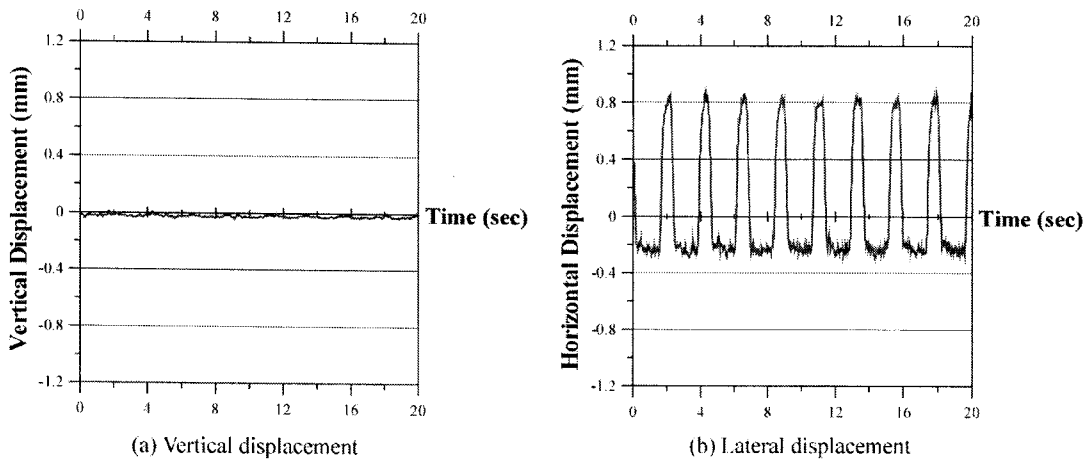


Fig. 14. Displacements of top crest (after 9 hours 25 min.).

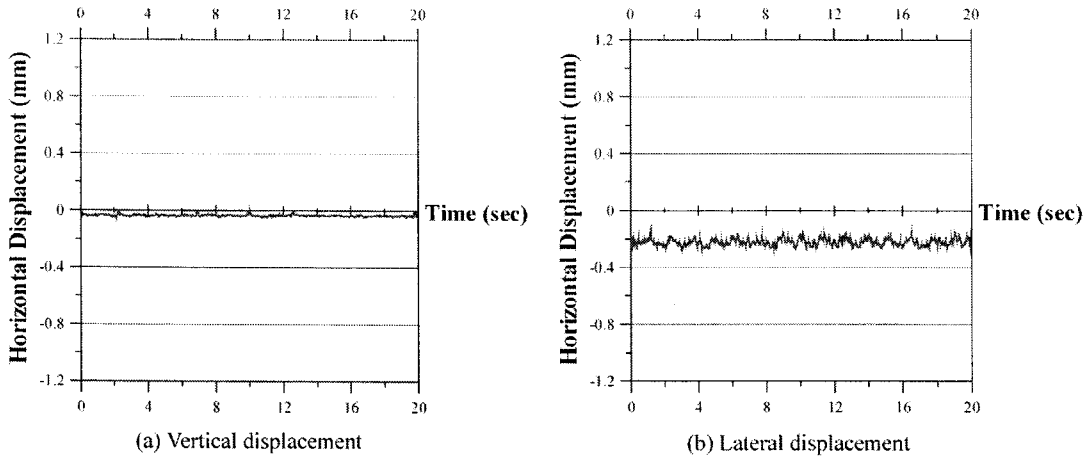


Fig. 15. Displacements of top crest (after 6 days 18 hours 30 min.).

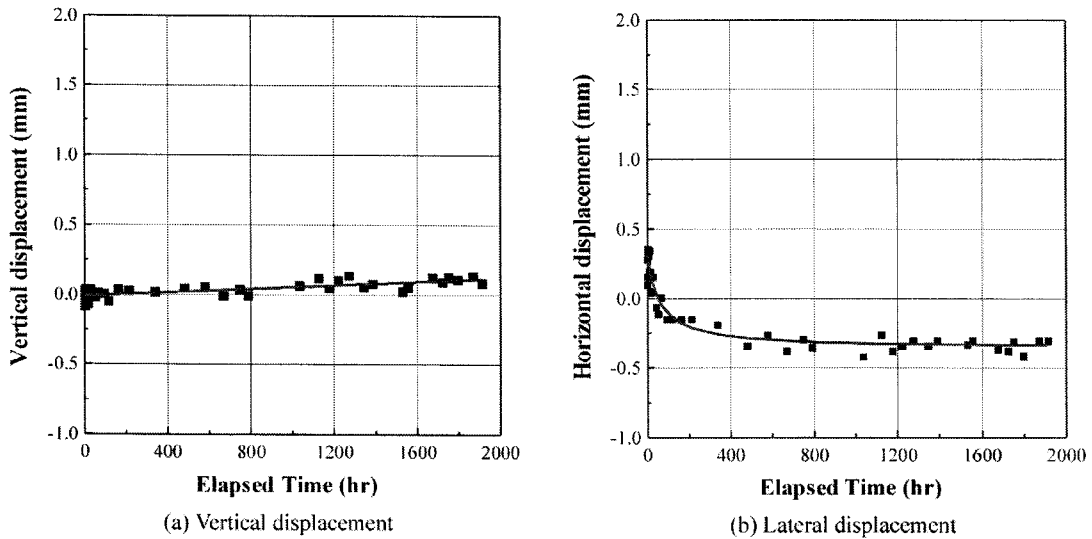


Fig. 16. Maximum displacements of top crest against wave loading.

격을 통한 해수유입 등에 의해서 후면 수위가 상승되어 발생된 것으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 실제해역에서는 발생하지 않는 점을 감안해 보면 반복 파랑하중에 의한 지반의 압밀침하의 발생하지 않은 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

이번 연구에서는 연약지반 방파제의 시공성능을 평가하기 위하여 사하중을 이용하는 방법과 석션(suction)을 이용하는 방법을 토조시험을 통하여 검증하였으며, 선행압밀을 적용하여 방파제 공용시의 압밀침하를 감소시킬 수 있는지에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 파랑하중으로 인해 발생할 수 있는 장기 압밀침하를 고찰하기 위하여 소형수조에서

수리·토조 모형실험을 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지중벽을 가진 연약지반 방파제를 지반에 관입하면서 균등한 침하를 유도하기 위한 시공방법으로 사하중을 이용하는 방법과 석션(suction)을 이용하는 방법을 적용하였으며, 두 방법 모두 적절한 시공방법으로 검증되었다.
2. 연약지반 방파제의 장기 압밀침하의 감소와 기초 지반의 초기 강성을 증가시켜 방파제의 변위를 제어하기 위해 선행압밀을 실시하여 그 효과를 검증하였으며, 실험 결과로부터 선행압밀공법을 병행하여 적용한다면 압밀침하는 거의 발생하지 않도록 제어할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 연약지반 위에 설치된 방파제에 3개월 동안 파랑하중을 가한 결과, 연직 변위와 횡방향 변위는 무시할 수 있

을 만큼 작게 나타났으며, 이러한 결과는 설계파보다 상당히 작은 파랑하중에 연약지반 방파제가 장기간 동안 노출 되어도 추가적인 압밀침하는 발생하지 않을 것으로 예측 할 수 있다.

사 사

이 연구는 해양수산부 '대수심방파제 및 연약지반 관련 기술' 연구용역의 일환으로 수행된 것입니다. 원활한 연구를 위해 협조해주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

권오순, 장인성, 박우선, 염기대. 2001. 횡하중을 받는 연약지

- 반용 방파제의 거동. *대한토목학회 논문집*, 21(3-B), 237-247.
- 권오순, 장인성, 박우선, 염기대. 2002. 연약지반 방파제의 압밀 침하 거동. *대한토목학회 논문집*, 22(1-B), 57-66.
- 박우선, 권오순, 염기대. 2001. 신형식 연약지반 방파제 개발. *한국해양·해양공학회 정기학술발표회*, 65-68.
- 해양수산부. 1999. 대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(II). p. 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*, 5, 103-107.
- Terzaghi, K. 1943. *Theoretical soil mechanics*. Wiley, New York. p. 265-296.

Received Jul. 14, 2003

Accepted Nov. 18, 2003