

## 부력식 기초를 이용한 연약지반방파제의 개발 Development of Softground Breakwater with Buoyant Foundation

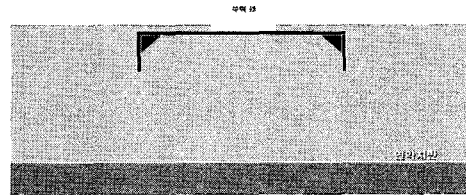
권오순<sup>1</sup>, 장인성<sup>2</sup>, 박우선<sup>3</sup>, 심재범<sup>4</sup>  
 O-Soon Kwon, In-Sung Jang<sup>2</sup>, Woo-Sun Park<sup>3</sup>, and Jae-Bum Shim<sup>4</sup>

### 1. 서 론

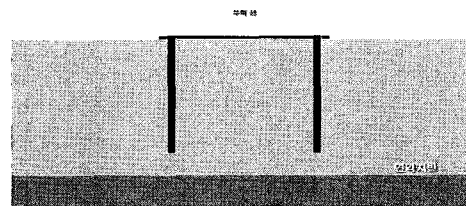
부력식 기초 방파제는 연약지반 위에 유효 중량이 가벼운 체체를 설치하고 기초에 작용하는 수동토압과 전단저항력으로 수평 파력에 저항하는 구조 형식으로 연약한 점성토지반에서 적용할 수 있다. 이 방파제는 내부에 부력을 받을 수 있는 부력체를 장착하여 방파제의 자중을 매우 작게 설계하는 것이 가능하기 때문에 지반개량 없이도 장기적인 압밀침하가 발생하지 않는 특징을 지니고 있어 매우 경제적인 공법이다. 여기에서는 부력식 기초 단면에 대하여 수치해석을 수행하여 변수분석을 실시하였고, 원심모형시험을 수행하여 개발 방파제의 적용성과 경제성을 검토하였다.

### 2. 부력식 기초 방파제

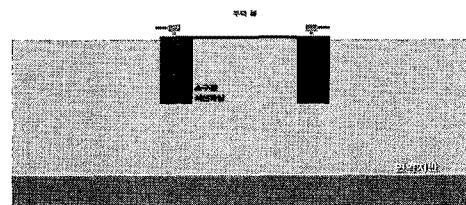
부력식 기초 방파제는 기본적으로 방파제에 부력체를 설치하는 개념을 적용하는 개념이지만, 실제 현장에서 적용성을 고려하여 그림 1과 같은 3가지 하부 기초 형식으로 구분하였다. 지반조건, 파랑조건, 시공조건, 경제성 등을 고려하여 적절한 형식을 사용할 수 있다. 구조형식은 횡방향 하중을 지지하는 방식에 따른 것으로 지중벽, 말뚝 부재 및 석션(버켓)파일을 적용하는 방법으로 구분하였다. 석션파일을 적용하면 시공과정에서 수평제어가 용이한 장점이 있다.



(a) bottom-wall type



(b) piled-raft type



(c) suction-pile type

Fig. 1. Breakwater with buoyant foundation.

1 발표자: 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원  
 2 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 선임연구원  
 3 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원  
 4 삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목ENG팀 팀장 상무

### 3. 단면의 결정

부력식 방파제의 기초시스템은 기존의 방파제와는 개념적으로 다르기 때문에 체제 안정성 평가시 주의하여야 한다. 수치 실험을 통하여 부력식 방파제의 단면 특성을 검토하여 다음 그림과 같은 결과를 얻었다. 지중벽 또는 말뚝의 길이와 기초의 폭을 적절히 배치하여 최적의 단면을 도출한다.

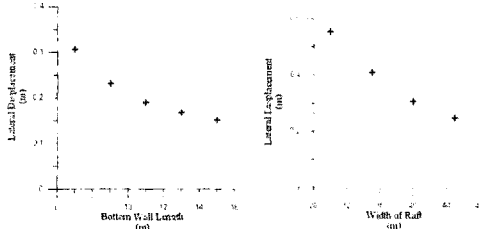


Fig. 2. Lateral resistance(bottom-wall type).

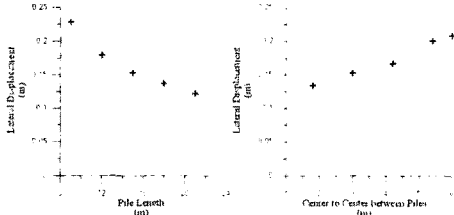


Fig. 3. Lateral resistance((piled raft type).

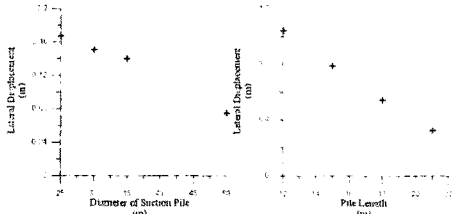


Fig. 4. Lateral resistance(suction-pile type).

### 4. 안정성 평가 기법

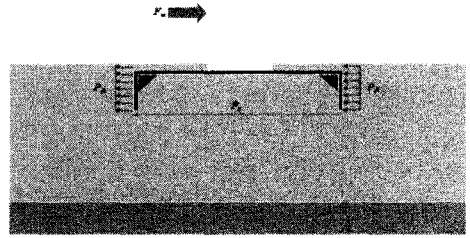
#### 4.1 횡동에 대한 안정성

횡동에 대한 안전율은 작용 파력에 대하여 기초 저면에서 발생하는 점착력과 지중에 설치된 지중벽 또는 말뚝의 수평 지지력을 합한 값과의 비로 정의한다. 횡동에 대한 안전율은 다음과 같이 산정한다.

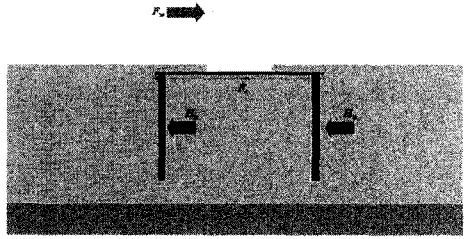
$$F.S. = \frac{F_c + F_p}{F_w}$$

여기서,  $F_c$  : 저면의 점착력,  $F_p$  : 지중벽 또는 말뚝의 극한 수평지지력,  $F_w$  : 파력

지중벽의 극한 수평지지력은 Rankine의 수동토압을 적용하였고, 말뚝의 극한 수평지지력은 Broms의 지지력 공식에 점성토에 설치된 짧은 말뚝인 경우를 적용한다



(a) Bottom-wall type



(b) Piled-raft type

Fig. 5. Safety check for sliding.

#### 4.2 전도에 대한 안정성

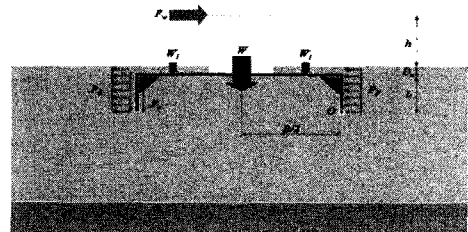
전도에 대한 검토를 하기 위하여 회전 중심(O)을 결정하여야 하는데, 지중벽 기초와 말뚝 기초 모두 Broms(1964)의 기준에 의거하면 짧은 말뚝으로 보고 지중벽 또는 말뚝 끝단을 중심으로 회전을 하는 것으로 가정한다. 부력식 방파제의 전도에 대한 안전율은 다음과 같이 산정한다.

$$F.S. = \frac{M_c + M_p}{M_w}$$

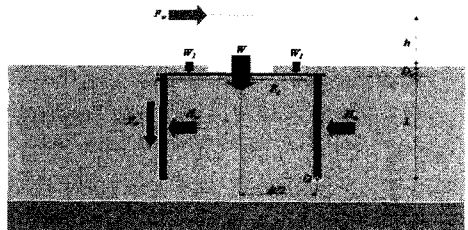
여기서,  $M_c$  : 연직력에 의한 모멘트

$M_p$  : 지중벽 또는 말뚝의 저항모멘트

$M_w$  : 파력에 의한 모멘트



(a) Bottom-wall type



(b) Piled-raft type

Fig. 6. Safety check for overturning.

### 4.3 장기 침하에 대한 검토

일반적으로 압밀침하는 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 의해서 검토가 수행되던, 지중벽이나 말뚝이 있는 경우에는 지중벽이나 말뚝으로 인해 복잡한 응력 분포가 발생해 1차원 압밀이론에 의한 압밀 침하 예측은 상당히 어려움이 있다. 실제 설계에서는 엄밀한 해석을 수행하여 장기 침하에 대한 검토를 수행하여야 하지만, 1차원 Terzaghi 압밀이론을 적용하여 간편하게 압밀 침하를 산정할 수 있는 가상 기준점에 대한 연구가 수행된 바 있다. 지중벽이 있는 경우에는 Fig. 7과 같이 지중벽 끝단을 기준으로 하여 압밀 침하를 산정한 경우가 실제 구조물의 압밀침하량과 유사하며, 말뚝 기초의 경우에는 말뚝 길이의 2/3 지점을 가상 기준점으로 하여 압밀 침하를 산정한 경우 실제 침하와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

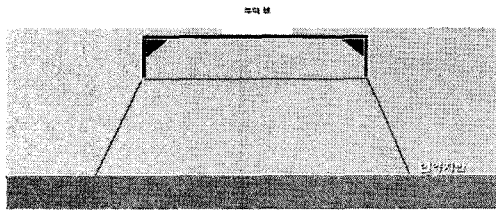


Fig. 7. Reference point of consolidation(bottom-wall).

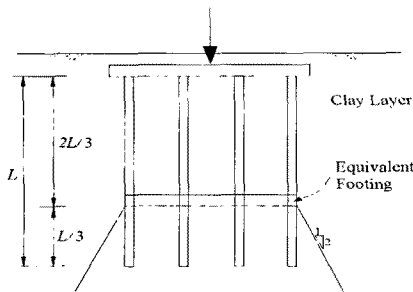


Fig. 8. Reference point of consolidation(piled-raft).

### 5. 원심모형시험

원심모형시험이란 실제 구조물의 크기를 축소된 모형체를 고속으로 회전시켜 모형체가 실제 구조물과 동일한 자중(自重) 상태를 유지시킨 후 실제 구조물에서는 인력으로 재현할 수 없는 외부조건을 모형 구조물에 가했을 때의 응답을 검토해 실제 구조물이 외부 조건에 처했을 때의 거동을 사전에 예측하는 실험기법이다. 이번 연구에서도 현장실물시험을 대신하여 원심모형을 실시하여 신형식 방파제의 성능을 평가하고자 하였다. 실험결과, Table 2와 같이 부력셀의 설치로 침하량이 억제됨을 확인하였고, 말뚝 길

이와 지름, 지중벽의 효과도 확인하였다.

Table 1. Centrifuge test results.

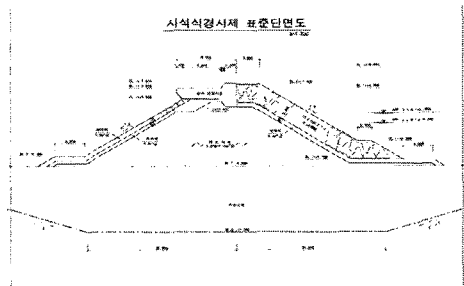
| Types  | Footing     | Buoyancy | pile no. | pile dia. | length |
|--------|-------------|----------|----------|-----------|--------|
| Case 1 | Piled-raft  | ×        | 14       | 0.8       | 11     |
| Case 2 | Piled-raft  | ○        | 14       | 0.8       | 11     |
| Case 3 | Piled-raft  | ○        | 14       | 0.8       | 16     |
| Case 4 | Piled-raft  | ○        | 10       | 1.2       | 11     |
| Case 5 | Bottom-wall | ○        | -        | 0.5       | 9      |

Table 2. Centrifuge test results.

| Types  | Settlements(m) | Lateral resistance(kN) |
|--------|----------------|------------------------|
| Case 1 | 0.59           | 5279.5                 |
| Case 2 | 0.33           | 7022.3                 |
| Case 3 | 0.52           | 6751.9                 |
| Case 4 | 0.39           | 6556.6                 |
| Case 5 | 0.42           | 6227.8                 |

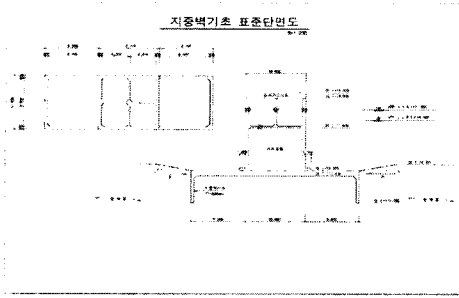
### 6. 경제성 평가 결과

부력식 기초의 적용성을 평가하기 위하여 기존에 설계 및 시공된 방파제 현장의 단면을 기준으로 하여 기본적인 설계와 안정성 평가 및 경제성 평가를 수행하였다. 여기에서는 연약지반이 깊이 분포하는 부산 신항 서방파제의 E-part 단면을 기준단면으로 선정하였다. Fig. 9-(a)는 서방파제의 기본 단면도이며, 연약지반이 38.5m 깊이로 분포하며, 부분 치환 공법을 적용한 사석경사제 형식으로 설계되었다. 체체를 가볍게 하고 지중에 말뚝이나 석선파일, 지중벽을 설치하는 공정을 기존의 지반개량 후 상부 경사제를 설치하는 공정에 비하여 시공이 간편하고 공기가 단축되며, 경제적인 측면에서도 효과가 큰 것을 확인하였다. Table 3에서 공사비 산정 결과를 정리하였는데, 기존 공법에 비해 Piled-raft 기초나 석선파일 기초를 부력식 기초 시스템과 결합한 형태가 매우 경제적인 단면인 것을 알 수 있다.

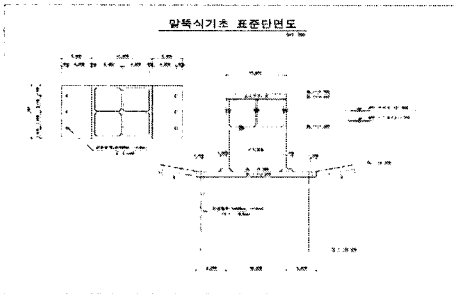


(a) Busan new port west breakwater (E-part)

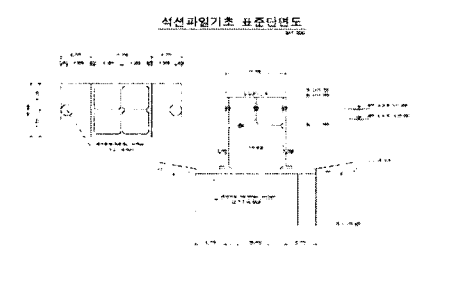
Fig. 9. Feasibility study - continue



(b) Bottom-wall type breakwater



(c) Piled-raft type breakwater



(d) Suction-pile type breakwater

Fig. 9. Feasibility study

Table 3. Feasibility study results.

| Types             | Construction cost (10m), won |
|-------------------|------------------------------|
| Rubble mound      | 1,957,450,715                |
| Bottom-wall type  | 1,186,048,843                |
| Piled-raft type   | 862,806,428                  |
| Suction-pile type | 943,416,278                  |

## 7. 결 론

상부 하중을 부력으로 경감시켜 하부지반에 최소한으로 전달하여 지반을 개량하지 않고 사용할 수 있도록 하는 기초시스템을 개발하기 위한 기초연구를 수행하였다. 연구결과, 부력을 이용하여 상부 자중을

가볍게 만들고, 필요한 지반의 지지력을 말뚝기초를 이용하여 저항하게 하는 새로운 형식의 방파제의 안정성 평가와 현장 적용성을 수치해석과 원심모형시험을 통하여 검증하였으며, 연약지반이 발달한 지반에서 이 공법을 적용할 경우 기존 공법에 비해 공사비의 50% 이상을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 “대수심/대심도 연약지반상 대형 해양구조물의 신개념 부력식기초 실용화 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 권오순, 장인성, 박우선, 염기대 (2001), 횡하중을 받는 연약지반용 방파제의 거동, 대한토목학회 논문집, 제21권, 제3-B호, pp. 237-247.
- 권오순, 장인성, 박우선, 염기대 (2002), 연약지반 방파제의 압밀 침하 거동, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제1-B호, pp. 57-66.
- 김홍택, 강인규, 최효범, 박시삼 (2002), Piled Raft 기초 적용사례 분석, 한국지반공학회 2002 봄 학술발표회 논문집, pp. 597-604.
- 해양수산부 (1997), 부산 신항 방파제 실시설계 용역 요약 보고서.
- 해양수산부 (1999), 대수심 방파제 및 연약지반 관련 기술(II).
- Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S.R., and Taylor, R.J.(2000), Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases, Journal of Marine Structures, No.13, pp.367~382.
- Biot, M.A. (1941), General theory of three-dimensional consolidation, Journal of Applied Physics, Vol. 12, pp.155~164.
- Goda, Y. (2000), Random Seas and design of maritime structure (2nd edition)-Advanced Series on ocean engineering-Volume 15, World Scientific Publishing Co., pp. 126-160.
- Jang, I.S., Kwon, O.S., Park, W.S., Jeong, W.M. (2007), Lateral and consolidation behaviors of seabed-type breakwater for very soft ground, Ocean Engineering, Vol. 34, No. 17-18, pp. 2240-2250.
- Schofield, A. N. and Wroth, C. P. (1968), Critical state soil mechanics, McGraw-Hill, New York.