

파랑에 의한 직립방파제 거동특성 Behavioral Characteristics of Vertical Breakwater by Wave Action

이중구

Joong Koo Lee¹

1. 서 론

해상방파제축조공사 시공 중에 나타나는 실제의 해상현상을 관찰하고 기초자료를 축적하여 향후 방파제 설계 및 시공 계획 자료로 활용하기 위해 본 연구는 수행되었다.

대상은 2004년 12월에 착수하여 2009년 5월에 준공한 울산신항 남방파제공사 현장이며, 방파제의 형식은 굴착지반 모래사석기초 중 마운드 케이슨 소파블록피복으로 구성된 ‘혼성방파제’이다. 본 연구에서는 케이슨 거치 후 외해측 소파블록피복을 하지 않은 상태로 직립케이슨 전체가 1년~2년 동안 시공 중 직립방파제 역할을 하였다. 연구내용은 외해의 파랑에 노출되어 거치된 직립케이슨의 거동을 2년간 측정할 결과를 정리하고 분석한 내용이다. 동 시간대에는 울산신항 방파제와 관련하여 남·북방파제 각 전면해상에서 파고 관측도 수행되었고 인근 간질곶 등대에서는 실시간 목측파고를 기록하였다.

따라서 현장 계측결과와 관측파고 자료를 분석하여 당초설계 예상에 대한 실제 계측으로 나타난 현상들을 비교해 볼 수 있었다. 특히 태풍영향권의 내습파랑이나 고파랑이 발생하는 시기에는 갑작스런 현저한 침하가 계측되었으며, 이로 인하여 설계예상 침하량보다 더 많은 침하가 발생한 것으로 나타났다. 그리고 파의 방향에 따라 케이슨이 횡 방향보다 종 방향으로 더 움직이거나 대각선 한쪽이 더 침하되는 것으로 나타났고, 케이슨의 무게중심에 따라 파봉시보다 파곡시의 부의 파력이 더 크게 지반에 영향을 미치는 것으로 계측되었으며, 실제 직립체체가 외해측으로 기울어진 것

으로 계측되어 나타났다. 이러한 현상에 대하여 국내외 사례를 조사한 결과 유사한 경우를 문헌에서 볼 수 있었다.

본 연구에서 실측을 토대로 분석된 내용은 향후 유사한 방파제 굴착기초의 계획, 기초사석 여성고 산정, 상부구조물 계획고 설정 시 유용하게 활용될 수 있다. 한편 태풍영향권의 내습파랑이나 고파랑으로 갑작스럽게 발생한 침하현상은 이상침하로 판단되며, 본 연구내용과 연계하여 별도의 현상해석이 필요한 것으로 판단된다.

2. 계 측

2.1 현황



Fig. 1. Location of Ulsan south breakwater

대상 방파제는 우리나라 동해남부에 위치하고 있으며 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 방파제의 수심은 DL.(-)24.5m~(-)26.5m정도로 비교적 평탄하며 하부지층은 점성토층이 1.2m~12.6m 두께이며 평균 6.8m두께로 불규칙하게 분포하고 있어 일부 기초처리 공법이 필요하였다. 사질토층 두께는 평균 1.2m, 자갈층 평균 2.7m, 풍화대 2.2m 두께로 분포하는 것으로 조사 되었다.

¹ 발표자: 현대건설(주) 토목환경사업본부 부장

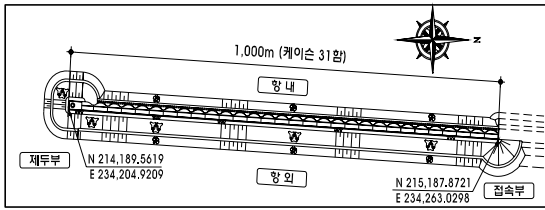


Fig. 2. Plan of breakwater

방파제의 길이는 1km이며 함당 5천톤급 반원형 슬릿비대칭 케이슨을 Fig. 2에서 보는 바와 같이 북측 접속부에 제1함을 배치하였고 순번대로 남측 제두부에 제31함을 배치하였다. 규격은 L32.4m × B17.0m × H21.0m이며 높이위치는 상부 DL(+4.00, 하부 DL(-17.00)이다. 하부기초는 Fig. 3과 같다.

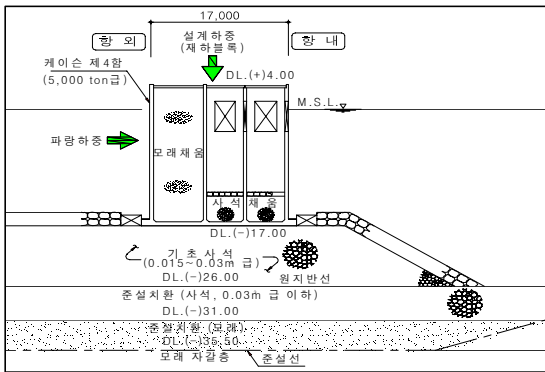


Fig. 3. Section of breakwater

2.2 관측파고

울산신항 남방파제 전면해상 약 2.0km에 위치한 정점 ST. A(N35° 25' 20.056", E129° 23' 34.033")에서 2007년 4월부터 7월까지 파향식 파고계를 운영하였으며 또한 해양연구원에서는 연구개발 사업의 일환으로 울산 북방파제 전면 정점 ST. B(N35° 27' 32.4", E129° 23' 5.5")에 파고계를 설치하여 자료를 축적하였다. 주요 관측파고는 Table 1과 같다.

Table 1. Observed wave height

발생기준일	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	파향	관측점
2007.05.28	1.66	8.37	45° NE	ST.A
2007.07.14	1.52	5.99	48° NE	ST.B
2009.09.06	1.81	8.00	(SSE)	

2.3 현장계측

2인 1조로 구성한 측량 팀이 각 케이슨 함당

상부코너 4지점의 변위를 해상상황에 따라 약 3일~7일 간격으로 2007년 3월부터 2009년 4월까지 2년간 측정하였다. 사용 장비는 TOTAL STATION (SOKKIA SET3000)과 LEVEL (SOKKIA B1C) 이었다. 계측에 앞서 원지반 지층 상태나 기초의 동 다짐과 고르기 시행여부를 조사한 결과 시방을 준수한 것으로 파악되었다. Fig. 4은 약 25일정도 설계하중 재하를 완료한 시점의 전체 31함의 상부 4지점을 계측한 결과이며 여러 거동상태를 추정할 수 있다. 함 자체의 최대 단차는 20cm 정도이며, 2, 3 Line 보다 1, 4 Line이 아래에 위치하여 케이슨이 외해측으로 기울어져 있다.

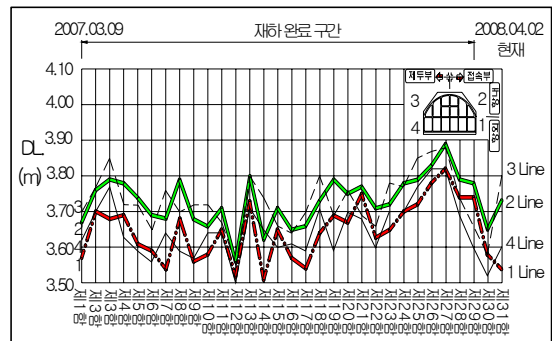


Fig. 4. Measured values of caisson

Fig. 5는 전체 케이슨의 준설치환 기초두께와 침하량을 계측한 결과이며, 평균 기초두께는 약 20m, 침하량은 약 44cm이었다. 제4함 경우 기초 두께의 d Line이 약 24m이고, 침하량은 c Line이 약 41.8cm로 나타났다. 여기서 침하량은 상치 콘크리트 타설 전 약 1년간 침하량이다.

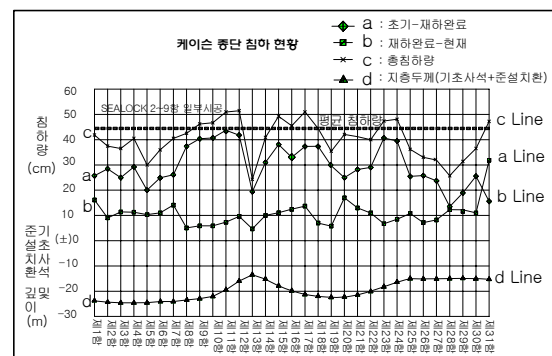


Fig. 5. Settlement of caisson relating to dredging depth

또한 제4함 경우에 Table 2와 같이 계측되었으며, 상치콘크리트 타설 후 1년간 약 6.1cm 침하량을 포함하여 2년간 평균 47.9cm가 침하되었다.

Table 2. Measuring settlement of No.4 caisson(cm)

날짜	구분	상황	앞 굽 (외해)			뒷 굽 (내해)		
			1지점	4지점	평균	2지점	3지점	평균
2007.03.09		거치완료	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2007.04.10		재하시작	24.0	31.0	27.5	17.0	25.0	21.0
2007.05.02		재하완료	28.0	37.0	32.5	22.0	30.0	26.0
2007.05.28		태풍'위투'	28.0	38.0	33.0	22.0	31.0	26.5
2007.07.14		태풍'마니'	31.0	43.0	37.0	24.0	34.0	29.0
2007.09.14		태풍'나리'	35.0	47.0	41.0	27.0	37.0	32.0
2008.04.02		상치con'c진	41.0	52.0	46.5	32.0	42.0	37.0
2009.04.08		현재	47.4	59.5	53.5	36.9	47.7	42.3

Fig. 6은 제4함 경우 시기별 수평변위 계측 결과이며 대부분 태풍영향권에서 변위가 발생하였고 외해측으로 24cm, 제두부측 중 방향으로 7.7cm가 움직여 파곡시와 NE파향의 영향을 알 수 있다.

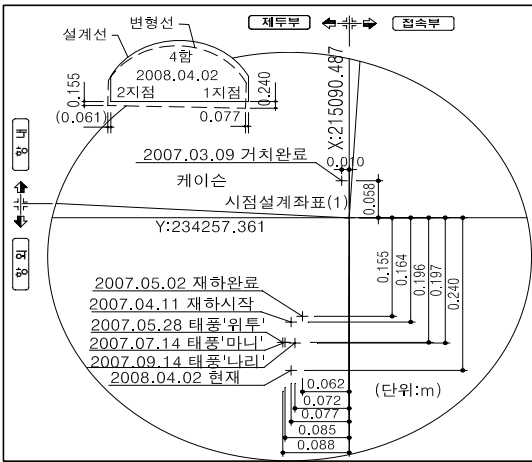


Fig. 6. Horizontal displacement of No.4 caisson

3. 고 찰

3.1 치환 깊이와 침하량의 관계

Fig. 7과 같이 추세선이 비선형으로 나타났으며 치환 깊이 약 8m까지는 비례적 증가하였으나 그 이상에서는 줄어드는 것을 알 수 있었다.

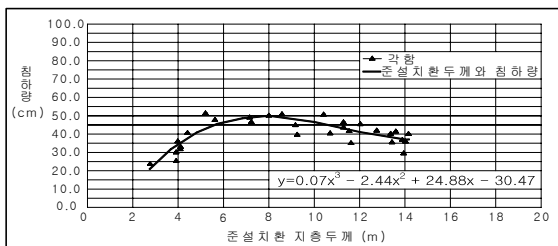


Fig. 7. Correlation between dredging depth and settlement

3.2 외해측으로 기울어진 현상

Fig. 8은 제4함 경우이며 전체 31함 케이슨들이

유사하게 외해측으로 기울어진 것이 계측되었다. 비대칭케이슨의 초기응력이 큰 외해측으로 파곡시의 부의 파력이 작용하여 발생한 현상이다.

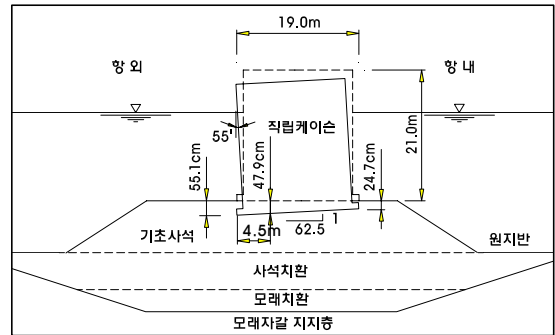


Fig. 8. Settlement aspect of vertical caisson (wave height, H=2m)

3.3 파의 방향성

Fig. 9은 대표적으로 제4함 경우 NE 파와 파곡시 부의 파력의 영향으로 케이슨이 대각선 중방향 4번 지점이 더 깊게 기울어졌다. 따라서 입사파각 각 보정의 의미가 미미한 것으로 판단되었다.

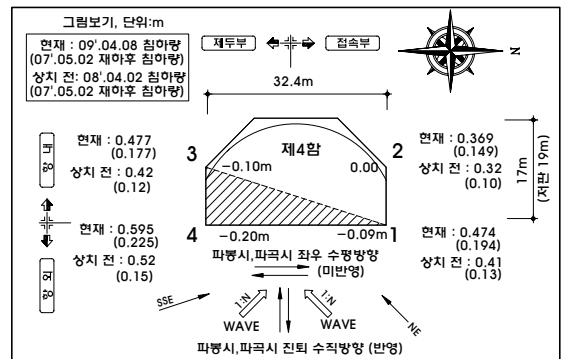


Fig. 9. Wave direction & settlement of No.4 caisson

3.4 예상하지 못한 추가침하량

Table 3은 제4함의 당초 설계침하량이며, 재하완료 후 잔여침하량 약 30cm로 예측되었다. 실측 결과는 Table 2에서 알 수 있으며 재하완료 시점에서 평균 29.2cm의 침하가 계측되어 설계침하량과 유사하게 나타났다. 이후 Fig. 9에서와 같이 기상청발효 태풍영향권의 내습파랑으로 현저한 침하가 계측되었다. 2년간 추가침하량은 약18.7cm이며, 이중 약 60%인 11cm는 태풍영향 등 고파랑으로 갑자기 침하된 것으로 계측되어 나타났다.

Table 3. Initial design settlement of caisson(cm)

구분 (단위:cm)	제4함		시공사항	비고
	항측	해측		
즉시침하	16.62	12.00	S=22.83cm < 여성고 d=30cm이내	상치 Conc'c 자중과 설계 상재하중 반영.
	평균 S = 14.31			
경험 침하	치환 사석	9.81 7.23	동다짐 S _f =45cm이내	
	평균 S = 8.52			
	기초 사석	31.23 23.48		
소계	41.04 30.71		동다짐 후 (다짐율 50%) 잔여침하량 약 30cm이상	
	평균 S = 35.88			
계	57.66 42.71			
	S = 50.19			

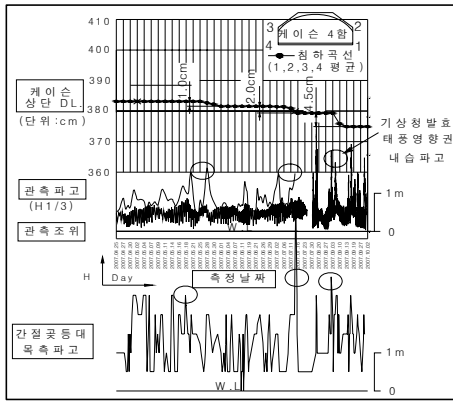


Fig. 10. Measured value and wave

3.5 파고와 침하량의 관계곡선

선형 케이슨의 시기별 침하량은 Table 3와 같으며 1일 침하량으로 환산하여 파고와 관계 추세를 Fig. 11과 같이 도출하였다.

Table 4. Settlement of caisson by storm wave

태풍	발생기간	계측침하량(S, cm)			
		제4함	제5함	제6함	제7함
YUTU	2007.05.25~30	1.00	2.75	2.00	1.50
MANYI	2007.07.06~16	2.00	1.75	2.25	2.75
NARI	2007.09.04~14	4.50	4.25	2.00	2.50

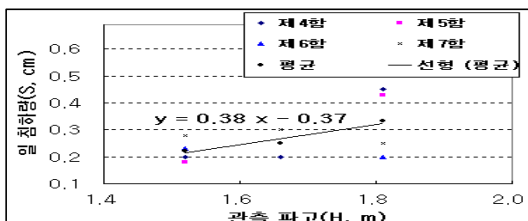


Fig. 11. Relative curve of wave height and settlement

3.6 굴착치환 기초사석 층의 지지력

본 연구의 직립케이슨 안정성은 당초 설계파고 5.1m와 기초사석층 지지력 50tf/m² 기준하여 안전한 것으로 검토되었다. 계측결과 파고 약 1.5m ~ 2m 일때 약 11cm정도 추가침하가 발생함에 따라 적절한 기초사석 층의 시공성 검토 등 지지력에 대한 판별이 필요하다고 판단되었다.

4. 결 론

해상에 거치하는 직립케이슨의 거동현상을 2년 동안 계측한 자료를 축적 및 분석하였다. 연구결과 치환 깊이가 깊을수록 침하가 증가하지 않고 일정깊이에서 감소되는 것을 알 수 있었으며, 파의 방향, 케이슨의 무게중심과 파곡시의 부의 파력이 작용 시에 예상하지 못한 방향으로 기울어지거나 이동하며 부동침하가 발생하는 현상을 알 수 있었다. 또한 태풍영향권 고파랑이 출현시 예상하지 못한 갑작스런 침하가 발생하는 것을 알 수 있었으며 굴착치환 기초사석 층의 시공성 검토 등 지지력에 대한 판별이 필요한 것으로 판단되었다. 그리고 실측 파고와 침하량의 관계곡선을 도출하였다. 따라서 분석된 사례를 토대로 유사한 방파제의 굴착치환 기초의 계획, 기초사석 여성고 산정 및 상부구조물 계획고 설정 시 유용하게 활용할 수가 있겠다. 또한 방파제의 거동특성에 대한 폭 넓은 검토가 계속 이어져야 하겠다.

감사의 글

본 연구의 수행에 도움을 주신 분들께 감사합니다.

참고문헌

동아대학교 (2007) 울산신항 흐름 및 파랑 관측과 분석 (4차보고서).
 안익성 (2009) 파랑하중에 의한 부분치환 경사식 방파제의 거동특성에 관한 연구, 학위 논문.
 이중구 (2009) 파랑에 의한 직립방파제 거동특성, 학위 논문.
 해양수산부 (2004) 울산신항 남방파제 및 기타공사(제1공구) 축조공사, 대안설계보고서
 해양수산부 (2005) 항만 및 어항 설계기준.
 Oumeraci, (1994) Review and analysis of vertical breakwater failures-lessons learned. 외