

케이슨 하부의 마찰저항 부족에 따른 케이슨 안벽 변위발생 사례연구 **A Case Study for Deformation of Caisson caused by Friction Shortage**

심동현¹⁾, Dong-Hyun Shim, 박준호²⁾, Jun-Ho Park, 이경숙³⁾, Kyung-Sook Lee

1) 현대건설 기술개발원 설계실 상무, Managing Director, Hyundai Engineering & Construction Co. Ltd.

2) 현대건설 기술개발원 설계실 과장, Geotech. Manager, Hyundai Engineering & Construction Co. Ltd.

3) 현대건설 기술개발원 설계실 대리, Geotech. Engineer, Hyundai Engineering & Construction Co. Ltd.

ABSTRACT : Deformation of caisson occurred during the backfilling behind the caisson and some caisson moved toward seaside. A series of site investigation were conducted to figure out various circumstances at site and also used to analyze the cause of deformation. The soil condition of backfilling is also investigated because dredged material was used as a backfill material. The friction angle of backfill is supposed to be lower than the estimated one which was used in design stage. To determine the cause of friction shortage, back analysis for sliding safety were carried out with considering the soil condition of backfilling. A remedial plan, re-rising and relocating a caisson with backfilling good earth after treatment of caisson rubble mound to achieve the safety for sliding was proposed as a best solution based on the back analysis results. Reform concrete structure including service gallery and crane rail was also considered with the remedial work to improve the cape line of caisson.

Key words : Caisson, deformation, friction shortage, the soil condition

1. 서 론

OO 지역 내 안벽 공사현장에서 케이슨 설치 후 케이슨 내부 속채움을 완료하고 배면 뒷채움 공정을 진행하던 중, 일부 케이슨이 해측 전면으로 변위가 발생하면서 진단기로 연결된 인접 케이슨까지 동반 변위가 발생하였다.

이와 관련하여 케이슨 변위발생 당시의 제반조건을 파악하여 변위 발생의 원인을 분석하고자 일련의 조사를 실시하였다. 시추조사를 통하여 케이슨 전면의 지반 상태를 확인하였고 안벽배면의 뒷채움 토사의 물성을 분석하였다. 이를 바탕으로 변위 발생이 큰 케이슨의 배면부와 상대적으로 변위가 거의 발생하지 않은 케이슨의 배면부간 지층조건을 비교·분석하고 변위 발생 지역의 지반특성을 추정하였다. 또한 변위가 발생한 케이슨 배면지반의 지층상황을 고려하여 기초사석부와 케이슨 저면간의 케이슨 활동에 대한 안정성을 역 해석하였다.

마지막으로 지반조건 분석과 역해석을 통한 활동력을 참고하여, 케이슨의 활동에 대한 안정성 확보 및 안벽 법선을 개선시키는 데에 초점을 맞추어 보강방안을 제안하였다.

2. 현장개요 및 지반조건

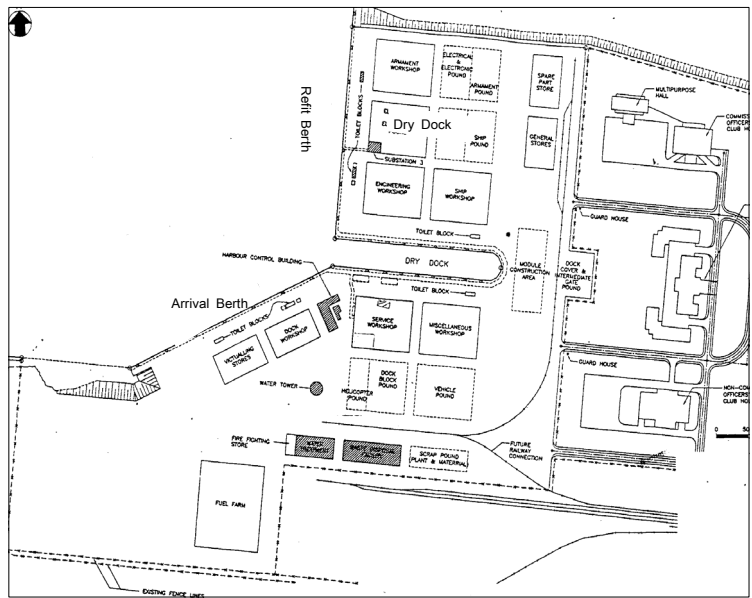
2.1 현장개요

본 공사는 그림 1에서 보는 바와 같이 OO지역에 위치하고 있으며, 케이슨 안벽 700m와 Dry Dock 을 시공하고 배후 부지를 매립하는 공사이다. 공사기간은 1995년 2월부터 1998년 6월까지 총 40개월이었으나, 현지여건의 변화로 공사기간 연장(11개월), 그리고 설계변경(6개월)으로 인하여 최종 공사기간은 2000년 1월까지 20개월이 추가되었다. 주요 공정은 준설과 매립, 케이슨 26함 거치, Service gallery 등의 콘크리트 구조물 시공 및 수문과 기계공사 등 이었다.

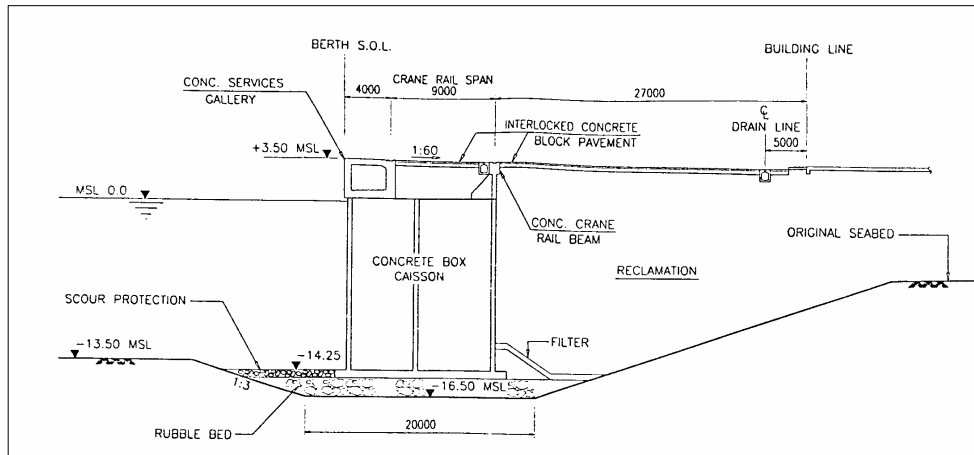
각 Berth는 13기의 콘크리트 케이슨(L25m×B15.4m×H15.23m)으로 구성되어 있으며, 케이슨 상부에는 운영시 필요한 utility line이 위치하는 Service gallery와 Crane rail beam이 추가로 설치되었고 케이슨의 기초는 트랜치 굴착 후 1.5m 두께의 사석 층을 수중 투하시켜 형성하였다.



(a) 현장위치



(b) 현장현황도



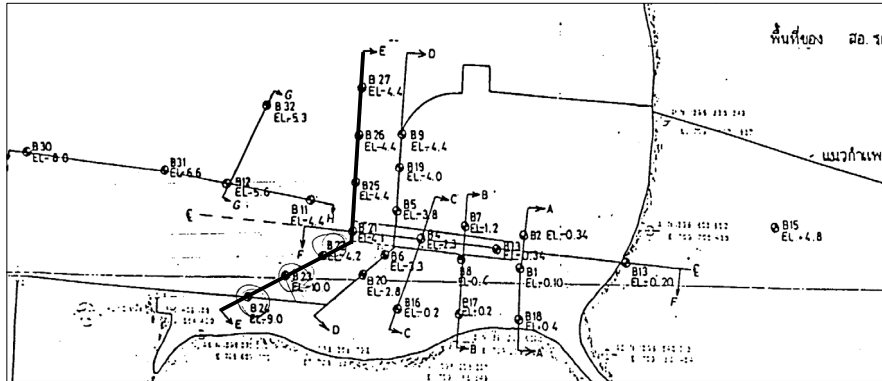
(c) 케이슨 표준단면

그림 1. 현장 현황 및 케이슨 표준단면

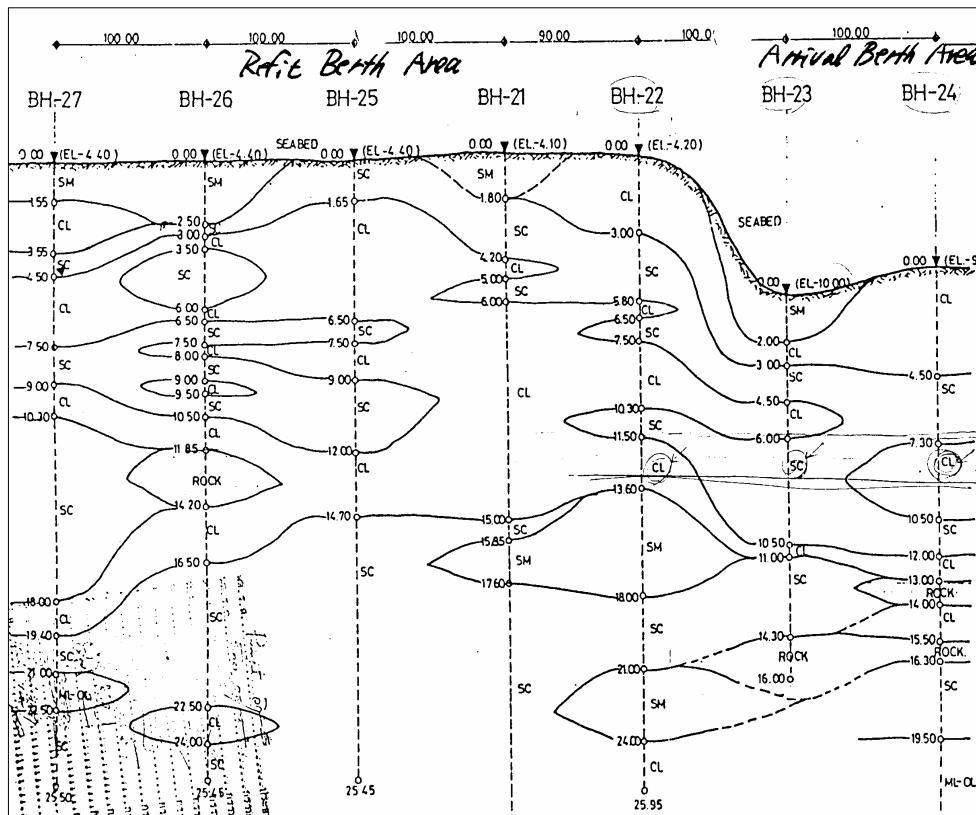
2.2 지반조건

2.2.1 지층분포

설계단계에서 실시된 기존의 시추조사 결과에 의하면 원지반 토질은 그림 2와 같이 구간 및 깊이에 따라 지층양상이 상당히 불 균질하게 나타나고 있으며, 케이슨 변위가 발생한 구역의 수심이 타구역에 비해 깊은 것으로 나타났다. 케이슨 변위가 발생한 안벽에 해당하는 시추공은 B22, B23과 B24이며, 원지반은 대체로 견고한 Sandy CLAY(CL) 또는 Clayey SAND(SC) 층으로 구성되어 있고 층 중간에 부분적으로 조밀한 Silty SAND(SM) 및 전석층이 렌즈 또는 포켓 형태로 포함되어 있다.



(a) 조사 위치도

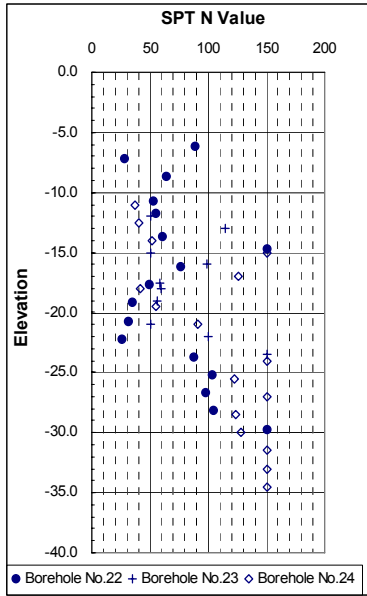


(b) 지층분포도((a)의 단면 E-E)

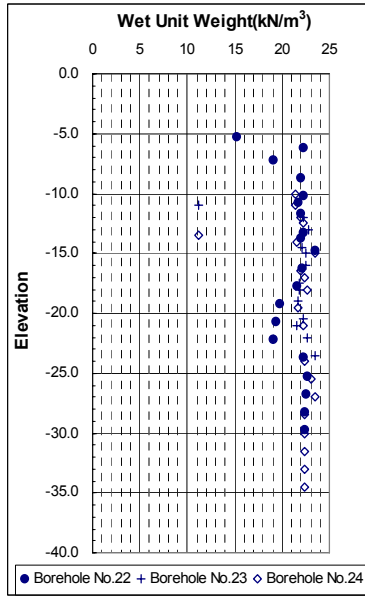
그림 2. 지반조건(1993.1 시추조사결과)

2.2.2 원지반 특성

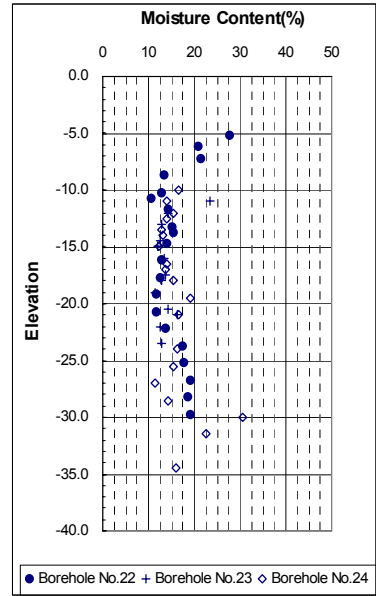
아래의 그림 3에 나타난 바와 같이, 원지반의 SPT N치는 25~150 정도로 견고 내지 매우 단단한 범위의 강도를 보이고 있으며, 실내시험결과 자연함수비는 10~20%, 액성한계 25~35%, 소성한계 10~20%의 특성을 나타내고 있다. 토사의 습윤단위중량 값은 평균 약 22.0 kN/m³ 으로 크게 나타나고 있는데, 이 값은 실내시험으로 측정된 결과치가 아니라 시료의 운반 도중 증발에 의하여 값이 작게 된 자연함수비로부터 계산된 결과 때문인 것으로 추정된다. 원지반 토사의 세립분(200번체 통과량)은 평균 40%로 점성토의 거동을 보이고 있다.



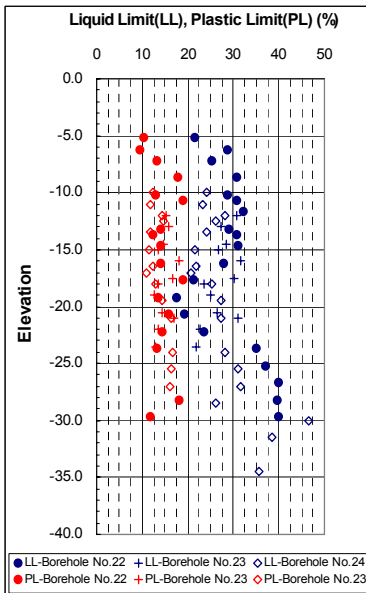
(a) SPT N Value



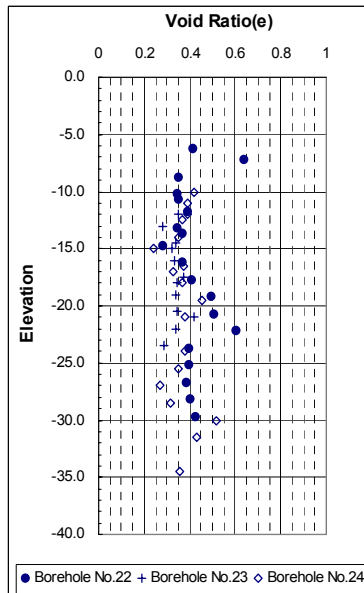
(b) 습윤단위중량



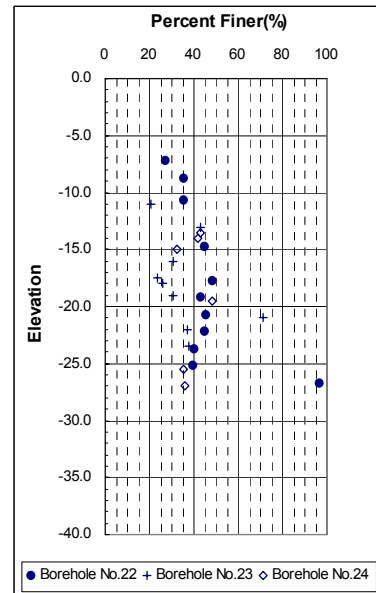
(c) 자연함수비



(d) 액성한계, 소성한계



(e) 간극비



(f) 200번체 통과중량 백분율(%)

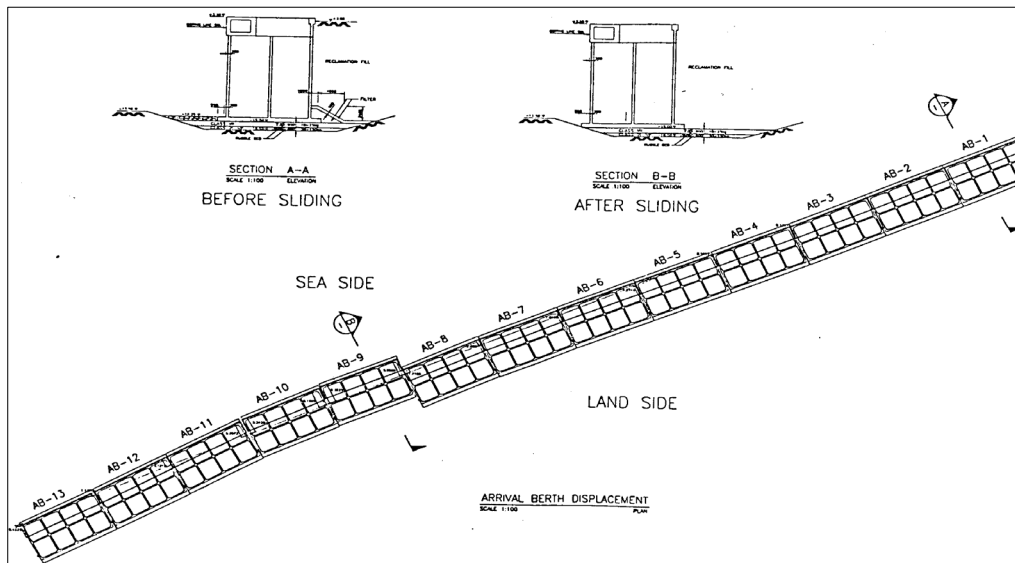
그림 3. 원지반 실내시험결과

3. 케이슨 변위 원인 분석

3.1 케이슨 변위 현황

변위발생시 공사 진행 상황은 안벽 전체 13기의 케이슨 거치가 완료되어, AB-3과 AB-5를 제외한 모든 케이슨의 Service gallery 시공이 끝난 상태였다. 육상부의 Crane rail beam은 케이슨 AB-11과 AB-13에만 설치되고 나머지 구간은 작업이 진행 중이었으며, 육상부에서 해상 쪽으로 덤프트럭과 도저를 이용하여 케이슨 상단고인 (+)9.23m 까지 뒷채움 작업이 거의 완료된 상태였다. 변위발생 당일 최대 조위 차는 1.6m로 해측 조위는 05:00시 (+)0.84m로 최고점이었으며, 변위발생 시각 부근인 20:00시 (-)0.76m 최저점을 나타내었다.

변위는 안벽 케이슨 13기중 9번째 케이슨(AB-9)으로 부터, 전단기로 연결되어 있는 좌우측 케이슨 10기가 함께 움직이는 변위가 발생하였다(그림 4 참조). 변위 발생 후 실시한 측량결과에 따르면 350m 길이 안벽 및 크레인 레일기초 중 275m 구간의 선형 변형이 발생하였다. 또한 일부 케이슨 저판의 Key Concrete 및 상부 Service galley가 파손되었으며, 케이슨 배면부 지반의 침하도 수반하였다. Rod를 이용하여 케이슨 전면부의 지표면고 및 연약퇴적층 두께를 확인한 결과 케이슨 전면부 지반고 상승이 확인되었으나, 케이슨 거치 후 장시간 발생된 유수저항으로 인하여 자연적 퇴적에 의한 것인지 혹은 변위발생에 기인한 현상인지는 명확하지 않았다.



(a) 케이슨 변위 현황(Arrival Berth Area)



(b) Key Joint 변위상황
그림 4. 케이슨 변위 현황

표 1. 케이슨 전면부의 변위

케이슨 No.	변위량(m)		케이슨 No.	변위량(m)	
	우측 코너	좌측 코너		우측 코너	좌측 코너
AB-2	-	0.021	AB-8	2.805	1.685
AB-3	0.021	0.139	AB-9	5.951	6.325
AB-4	0.139	0.617	AB-10	6.325	5.294
AB-5	0.617	1.278	AB-11	5.294	3.205
AB-6	1.278	1.928	AB-12	3.205	1.219
AB-7	1.928	2.085	AB-13	1.219	-0.429

3.2 현장조사

변위발생 원인을 규명하고 안정화 대책을 수립하기 위하여 추가 지반조사를 실시하였으며, 뒷채움 재의 강도특성, 기초사석층 상태 그리고 기초 사석층 아래 트렌치 굴착면의 상태 파악에 주안점을 두고 실시하였다.

케이슨 저판 바닥과 사석 층의 상태 확인을 위하여 Coring(A-4)을 실시하였다. 시추는 케이싱 회전만으로 굴진을 시도하였다. 이로 인해 굴진시간이 지연되고 드릴링 비트 손상으로 인한 장비의 보수 및 교체작업이 빈번하게 발생하였다.

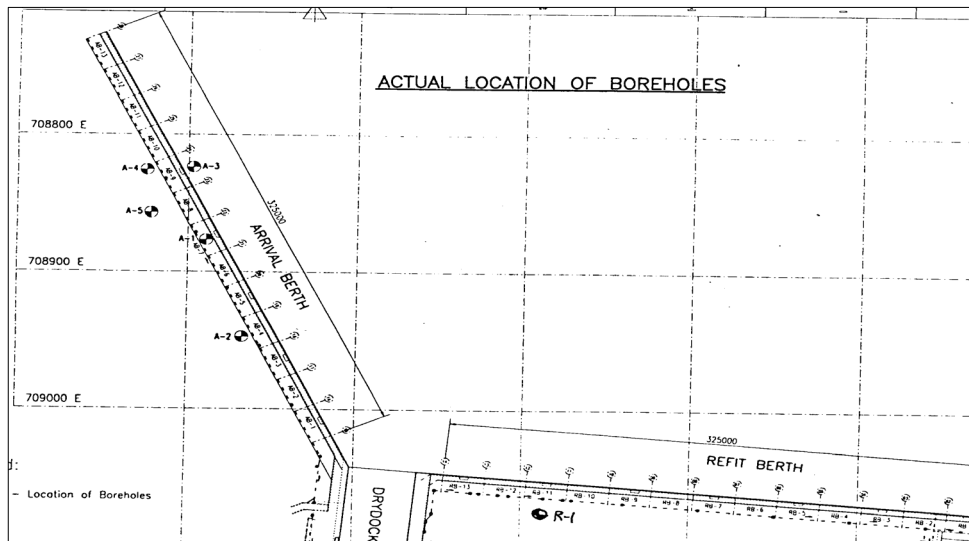


그림 5. 추가시추조사 위치도(99.3~99.5)

표 2. 시추공 위치 및 시추목적

공번	시추공 위치	시추목적
A-1	케이슨 벽체 내부	케이슨 저판, 사석층 및 원지반 상태 파악
A-2	케이슨 배면 뒷채움 지역	뒷채움재 및 원지반 특성 파악
A-3	케이슨 전면 해상	사석층 및 원지반 특성 파악
A-4	케이슨 벽체 배면 저판	케이슨 저판, 사석층 및 원지반 상태 파악
A-5	케이슨 배면 뒷채움 지역	뒷채움재 및 원지반 특성파악
R-1	케이슨 배면 뒷채움 지역	뒷채움재 및 원지반 특성파악

뒷채움재로 사용된 흙의 강도특성을 파악하기 위하여 표준관입시험 및 불교란시료를 채취하여 실내 전단강도 시험을 수행하였다. 이에 시료 채취시 교란의 영향을 최소화하고자 Thin wall tube를 사용하였으며, Piston sampler를 이용하여 아주 천천히 인발하여 Sampler 인발시 시료가 빠져나가는 것을 억제 하였다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 대략 50%의 경우 흙 자체가 매우 연약 및 느슨한 관계로 시료채취에 실패하여 교란시료를 대상으로 일련의 실내시험(입도분포, 단위중량, 함수비 및 직접전단시험)이 병행되었다.

3.3 조사결과

본 구간의 조사결과로 추정한 지층분포는 그림 6과 같으며, 현장조사결과는 표 3과 표 4, 그리고 그림 7에 정리하였다.

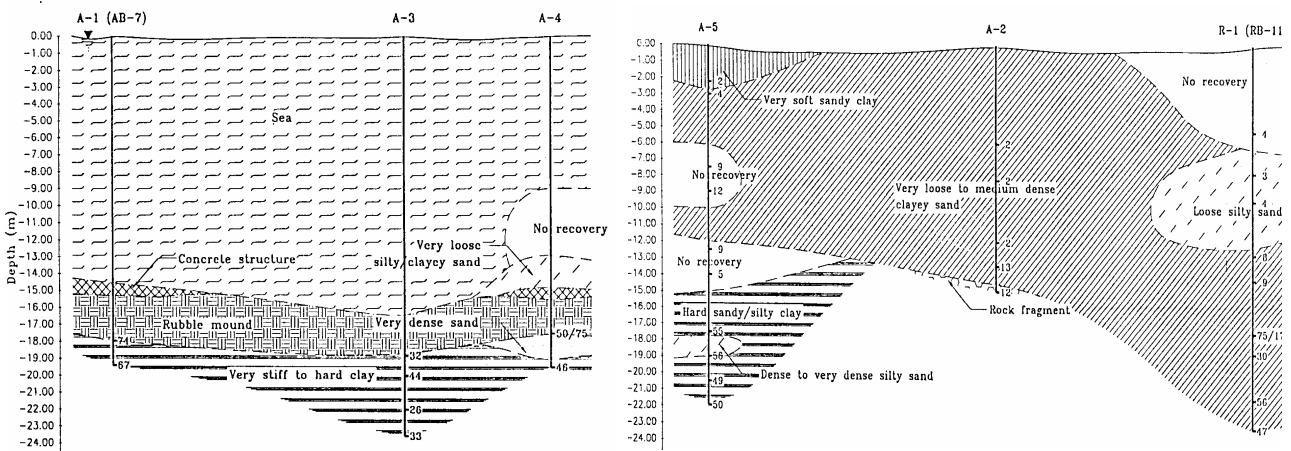
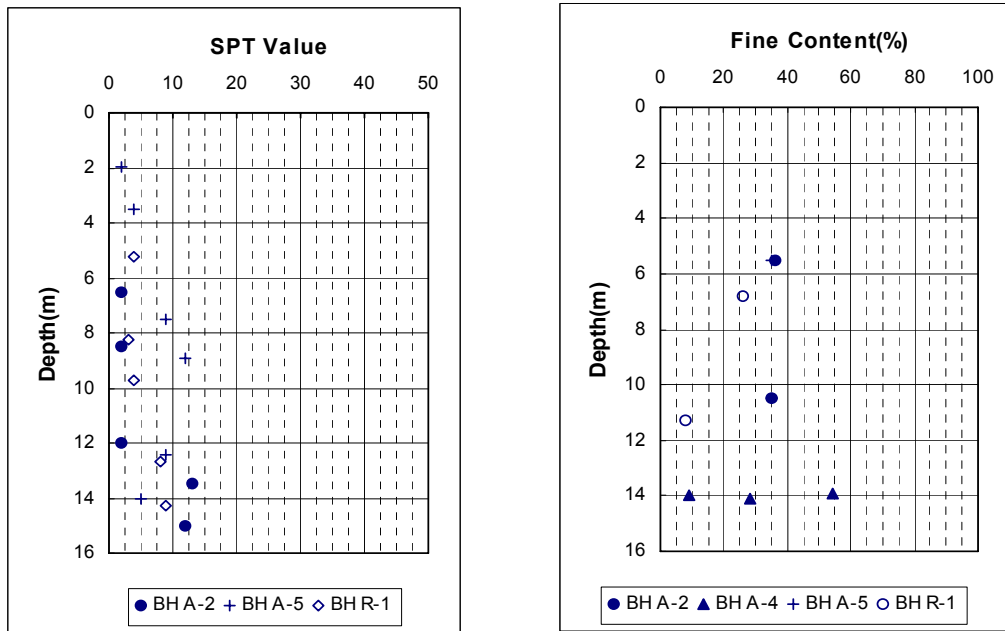


그림 6. 지층분포도

표 3. 실내시험결과

BH No.	Sample No.	Depth (m)	Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Fine Content (%)	USCS Group
				LL	PL	PI		
A-2	ST-1	5.0-6.0	15.1	24.8	12.1	12.4	36	SC
	ST-2	10.0-11.0	15.7	25.0	12.4	12.6	35	SC
A-4	ST-2	13.8-13.9	24.7	24.7	20.5	10.1	54	CL
	ST-2	13.9-14.0	17.1	NP			9	SW-SM
	ST-2	14.0-14.1	22.5	23.3	12.0	11.3	28	SC
A-5	ST-1	5.0-6.0	14.5	24.0	12.1	11.9	35	SC
	ST-2	10.0-11.0	14.2	27.3	12.9	14.4	35	SC
	ST-3	15.0-16.0	14.4	35.8	16.4	19.4	73	CL
R-1	ST-1	6.3-7.3	17.9	NP			26	SM
	ST-2	10.8-11.8	19.0	NP			8	SP-SM
	ST-3	15.3-16.3	12.5	35.3	12.1	23.2	45	SC
	ST-4	19.8-20.8	12.0	31.7	11.9	39	39	SC



(a) SPT Value

(b) 200번체 통과중량백분율

그림 7. 실내시험결과

표 4. 직접전단시험 결과

BH No.	Sample No.	Depth (m)	Dry Density (kN/m ³)	c (kN/m ³)	Φ (deg)	Remark
A-2	ST1	5.0-6.0	20.30	20.0	32.3	
A-4	ST2	13.0-14.0	19.18	58.0	24.0	
A-5	ST1	5.0-6.0	20.30	100.5	12.1	
A-5	ST2	10.0-11.0	19.03	11.0	30.4	
A-5	ST3	15.0-16.0	18.75	110.2	18.1	
R-1	ST-1	6.3-7.3	19.35	76.0	22.1	
R-1	ST-2	10.8-11.7	19.43	0.0	32.0	
R-1	ST-3	15.3-16.3	10.38	73.0	11.5	

3.4 케이슨 저면 바닥현황

가장 큰 변위가 발생한 케이슨(AB-9) 배면의 뒷채움토와 케이슨 저판 뒷굽부 콘크리트를 관통하여 실시한 시추결과(A-4)에 확인된 같이, 뒷채움토의 세립분 함유량은 28~54 % 이며, 매우 느슨한 상태를 보이고 있다. 이는 변위 발생 시 케이슨이 앞으로 움직임에 따라 뒷채움부가 수중으로 함몰되며 교란된 영향도 있을 것으로 사료된다. 케이슨 배면의 저판 콘크리트를 관통하여 하부 사석 층까지 코어 샘플링을 실시한 결과, 콘크리트 저판과 사석 층의 경계면에 소량의 압축된 모래질 점토가 일부 나타났다



그림 8. 코어샘플에서 추정된 케이슨 저면과 사석층 상태(시추공 A-4)

이와 같은 모래질 점토는 매립지 조성시 투기된 준설토 중 여수토를 통해 유입된 것으로 판단된다. 실제 사석투하 전 트렌치 구간의 토사 제거를 위하여 Grab 및 Mud pump로 재굴착을 실시하였으나 완전히 제거되지 못하고 일부 잔류해 있었을 것으로 판단된다. 이러한 토사의 존재는 케이슨 저면과 사석층 간의 마찰력을 저하시켰을 것으로 판단된다.

3.5 뒷채움토 조사결과

뒷채움재로 사용된 흙의 특성을 파악하기 위하여 변위가 거의 발생하지 않았던 케이슨 AB-4 인접부(시추공 A-2)와 변위가 비교적 큰 케이슨 AB-8 배면측으로 22m 이격된 위치(시추공 A-5)에서의 시추 조사를 결과를 비교하였다. 시추공 A-2의 경우, 뒷채움이 케이슨 상부(E.L (+)0.23m)까지 완료된 상태로 느슨한 점토질 모래(SC)가 지표면에서 뒷채움부 바닥까지 균일하게 나타나고 있다. 세립분은 35% 가량 함유하고 있으며 N치는 깊이에 관계없이 2타로 일정한 값을 보이고 있다. 시추공 A-5의 뒷채움 토사는 점토질 모래로 세립분을 약 35%정도 함유하고 있으며 지표면으로부터 GL(-)2.75m 까지의 N치는 2였으며, 그 하부 GL(-)10m 까지는 N치가 4~12로 깊이에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다. 그러나 GL(-)10m~15m 구간에서는 N치가 5~9 범위로 다시 감소하고 있다. 지표면으로부터 15m 하부는 원지반으로 세립분 함유율 73%, N>50의 견고한 모래질 또는 실트질 점토(CL)가 발견되었다. 두 시추공 분석결과, 실제 시공된 뒷채움 재료는 설계에서 예측했었던 것에 비해 다소 큰 배면 토압을 발생시켰을 것으로 판단된다.

4. 케이슨 변위 원인 분석 및 보강방안 제안

4.1 케이슨 변위 원인 분석

케이슨 변위는 케이슨의 기울어짐 없이 거의 수평방향으로 변위가 발생하였고, 변위 발생 후 실시한 지반조사에서 저면지반의 파괴는 발생하지 않았다. 따라서 변위발생의 주된 원인은 케이슨 저면 바닥과 기초 사석재간의 마찰력이 감소된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 케이슨 안벽은 설치시의 평탄성 확보, 상부하중 분산 및 미끄러짐에 대한 마찰저항 확보를 위해 중량 20~150kg의 사석재를 케이슨 바닥과 원지반 사이에 놓게 되는데, 사석재의 상태가 마찰력 확보에 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 대개의 경우 사석투하 후 즉시 케이슨을 거치해야 하며 아울러 Air lifting 등을 이용한 사석층 표면 청소를 추천하고 있다.

다음으로 일반적인 케이슨 배면의 뒷채움토는 수중단위중량이 10.6kN/m^3 이상이고, 내부마찰각이 35° 이상의 양질토로 뒷채움을 실시하게 되어 있으나, 현장 계약조건에 따라 케이슨 배면의 뒷채움을 안벽부 준설토 매립토를 이용하여 실시하였다. 추가 지반조사(A-2)에서 나타난 바와 같이 배면 뒷채움재로 사용된 재료는 세립분 함유량 규정치보다 다소 많아 설계시 예상했던 것보다 배면토압이 증가한 것으로 판단된다.

마지막으로 배면부지 조성시의 뒷채움 작업순서를 들 수 있겠다. 본 현장과 같이 원지반이 점토질로 형성되어 있는 경우에는 트렌치 준설토, 사석투하 및 케이슨 거치 등의 작업에 의해 세립토의 부유 및 침전으로 케이슨 배면에 상당한 두께의 연약층이 형성될 수 있는데, 이를 완전 제거하는 것은 매우 어렵다. 따라서 케이슨 배면 뒷채움을 케이슨 쪽에서 육상쪽으로 진행시킴으로써 저면의 연약한 토층을 육상쪽으로 밀어내는 방법이 일반적으로 추천되고 있다.

4.2 역해석을 통한 케이슨 하부지반의 활동저항 추정

변위 발생의 주원인으로 추정되는 케이슨 바닥면과 기초사석체 경계면간 활동저항을 판단하기 위하여 역해석을 실시하였다(그림 9참조). 배면의 잔류수위는 변위발생 당일의 수위를 참조하여 (+)0.04m를 적용하였으며, 상재하중은 10kN/m^2 를 적용하였다. 그림 10은 상기 조건을 토대로 뒷채움토의 내부마찰각을 변화시켜가며 활동에 대한 안전율 변화추이를 살펴본 결과이다. 뒷채움토가 내부마찰각을 20° 로 가정한다면, 마찰계수가 약 0.3이 확보되지 못할 경우 활동에 대한 안전율이 1 이하가 되는 것으로 나타났다. 따라서 본 현장 케이슨 저면에서의 실제 마찰계수는 0.3 이하로 저감되었을 것으로 추정된다.

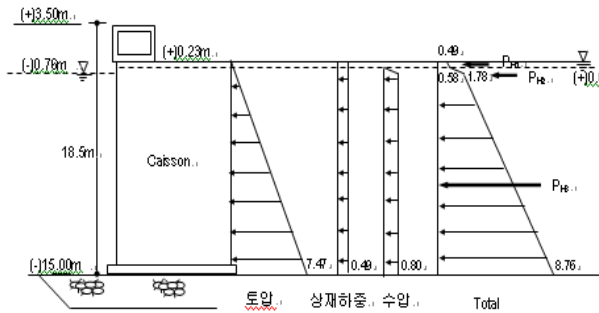


그림 9. 역해석시 하중조건

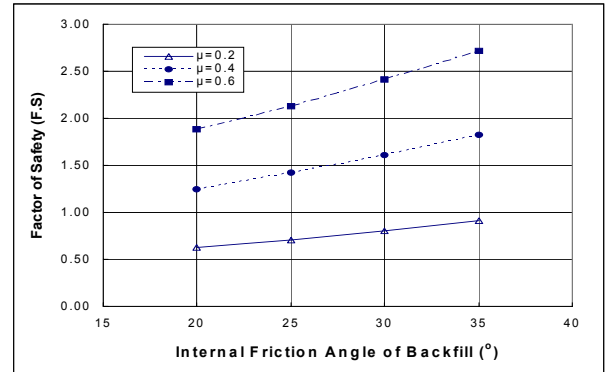


그림 10. 각 조건별 활동에 대한 안전율 변화추이

표 5. 역해석시 하중조건 산정 및 안전율 검토

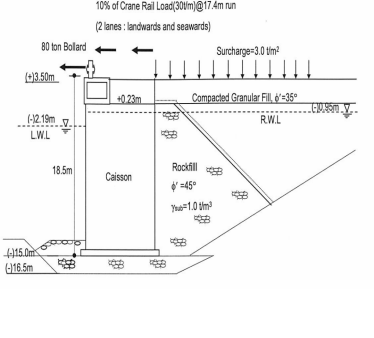
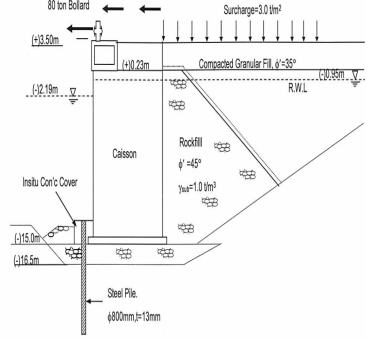
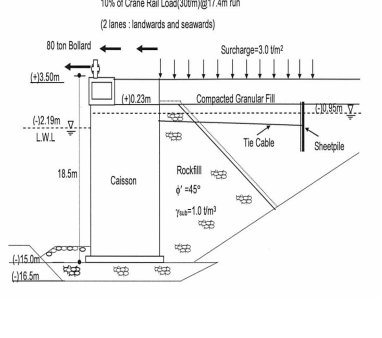
구분		산정근거		
수 평 력	① 토압	P_a	$P_a = 1/2 \cdot K_a \cdot \gamma \cdot h^2 = 0.5 \times 0.49 \times 8.0 \times 15.23^2 =$	74.70 kN/m^2
	② 상재하중	P_q	$P_q = q \cdot K_a \cdot h = 10.0 \times 0.49 \times 15.23 =$	74.70 kN/m^2
	③ 수압	P_w	$P_w = 1/2 \cdot \gamma_w \cdot h^2 = 0.5 \times 10.0 \times 15.23^2 =$	74.70 kN/m^2
	④ 소계	P_H	$P_H = P_a + P_q + P_w =$	760.90 kN/m^2
연 직 력	⑤ 케이슨 중량	P_{VC}	$P_{VC} = V \cdot \gamma_{conc} + q_{gallery} = 1,096 \times 15.0 + 5,130 =$	$21,570.00 \text{ kN}$
	⑥ 내부채움토 중량	P_{VF}	$P_{VF} =$ 케이슨 내부채움재와 뒷급상부 토사하중	$42,260.00 \text{ kN}$
	⑦ 소계	P_V	$P_V = (P_{VC} + P_{VF}) / \text{케이슨 길이}$	255.30 kN/m^2
활동에 대한 마찰계수		μ	$\mu = P_V / P_H$ (안전율 1.0 기준)	0.26

5. 케이슨 안정성 보강방안

5.1 활동에 대한 안정성 확보를 위한 검토방안

변위 발생의 요인인 활동에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 케이슨 저면과 기초 사석층 경계면 마찰계수(f)를 증가시키거나 외적 보강으로 활동저항력을 증대 시켜야 한다. 전자의 경우 케이슨을 채부상시키고 사석층 및 하부 원지반까지 재굴착하여 재시공을 하는 방법이 대표적이다. 외적보강으로 활동저항력을 증대시키는 방안으로는 케이슨 배면에 타이케이בל 등을 설치하여 부족한 활동저항력을 보충하는 방법과 케이슨 앞굽부에 역지말뚝을 시공하여 부족한 활동저항력을 보충하는 방법 등이 고려되었다. 위의 방안들을 종합적으로 고려하여 아래의 표 6과 같이 3개안을 비교하였으며, 현장여건에 적합한 최적안을 도출하였다.

표 6. 활동에 대한 안정성 확보를 위한 검토방안 비교

구분	보강안 1	보강안 2	보강안 3
<p>보강 방법</p>	<p>케이슨 재부상 후 기초사석층 재시공+ 사석뒷채움</p> <ul style="list-style-type: none"> · 5기의 케이슨(AB-9~AB-13) 재부상 시킨 후 기초사석층 재시공후, 사석으로 뒷채움 · 뒷채움재를 사석재(Rockfill)로 변경하여 토압 감소시킴 	<p>케이슨 앞굽부 억지말뚝 시공 + 사석뒷채움</p> <ul style="list-style-type: none"> · 케이슨 재부상 없이 기초사석층의 마찰력 손실을 압굽부에 억지말뚝 시공하여 부족한 저항력 보충 · 뒷채움재를 사석재(Rockfill)로 변경하여 토압 감소시킴 	<p>타이케이בל 설치 + 사석뒷채움</p> <ul style="list-style-type: none"> · 케이슨 하부와 기초사석층 사이의 점토침전물로 인한 마찰력 손실을 케이슨 후면에 타이케이בל과 앵커체를 설치하여 부족한 저항력을 보충함. · 뒷채움재를 사석재(Rockfill)로 변경하여 토압 감소시킴
<p>대표 단면</p>			
<p>특이 사항</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 케이슨 재부상 후 케이슨 바닥과 기초사석층 재시공 · 재설치 후에는 충분한 마찰력을 발휘한다는 가정 하에 활동에 대한 마찰계수 0.5 적용 	<ul style="list-style-type: none"> · 역해석 결과를 참고하여 감소된 마찰저항 고려함 · 말뚝 향타를 위한 향타선 동원이 추가적으로 요구됨 · 말뚝과 케이슨 연결 작업이 수중에서 이루어져야 하므로 시공성이 떨어짐 · 케이슨의 변위발생을 보강하기 위해서 잔교식 안벽 등의 추가 보강안이 병행되어야 함 	<ul style="list-style-type: none"> · 역해석 결과를 참고하여 감소된 마찰저항 고려함 · 케이슨의 변위발생을 보강하기 위해서 잔교식 안벽 등의 추가 보강안이 병행되어야 함
<p>채택 방안</p>	<p style="text-align: center;">○</p>		

5.2 안벽법선 개선을 위한 검토방안

안벽법선 개선시에는 케이슨의 안정성, 안벽법선의 직선 유지뿐만 아니라 적절한 작업성, 공사비 및 공기 등이 고려되어야 한다. 따라서 표 6의 채택 안을 기준으로 변위가 크게 발생한 5기의 케이슨(AB-9~AB-13)은 뒷채움토 및 속채움토 제거 및 재 부상시킨 후, 활동에 대한 마찰저항을 충분히 확보하도록 하였다. 그러나 AB-5~AB-8까지의 4기 케이슨에 대해서는 재 부상시킬 5기 케이슨 배면토 제거에 따른 절토구배를 따라 부분적으로 뒷채움토를 Rockfill로 변경하여 배면토압을 일부 감소시키고 케이슨 상단에 Mass Concrete를 추가하여 동시에 케이슨 자중을 증가시키는 방안을 채택하였다.

마지막으로 변위가 거의 없었던 나머지 케이슨(AB-1~AB-4)은 별다른 보강 없이 Support wall을 따라 Mass Concrete를 소량 추가하도록 하였다. 전반적으로 재부상한 5기의 케이슨을 기준으로 나머지 케이슨의 Service gallery 단면을 조정하였으며, 이를 위해 기존의 콘크리트면 일부의 철근을 노출시켜 확장부와 연결하고 Anchor bar를 이용하여 기존 면과 확장면의 접촉이 용이하게 되도록 하였다. 또한 Crane rail 궤도를 안벽법선과 평행하게 하기 위해서는 일부구간의 해측 Crane rail이 공동구(Service gallery)의 상부 슬라브에 놓이게 되므로, 추가로 철근을 배치하여 슬라브를 보강하고 슬라브 두께를 부분적으로 증대시켰다. 해측 Crane rail이 옮겨감에 따라 육상측 Crane rail도 Side wall 안쪽으로 당겨지게 되어 각 케이슨 Diaphragm wall에 Support column을 설치하여 Rail을 지지토록 하였다.

6. 결론

본 현장의 케이슨 변위발생과 관련하여 원인을 조사하고 보강방안을 도출하고자, 시추 및 실내시험을 포함한 현장조사를 수행하였다. 그 결과 케이슨 저면 바닥과 기초 사석재간의 마찰감소 및 준설토사의 뒷채움재로 인한 배면토압의 증가가 원인으로 추정되었다. 이에 활동에 의한 안정성을 확보하기 위하여 변위가 크게 발생한 케이슨을 재 부상시키고, 배면의 뒷채움 재료를 변경하여 토압의 감소효과를 함께 도모하였다. 또한 안벽법선을 직선으로 유지하기 위하여 변위가 발생한 케이슨을 기준으로 나머지 Service gallery 단면을 조정하고, Crane rail의 위치변경으로 인한 하중증가를 대비하여 슬라브를 보강하였다. 원인 분석 및 보강방안을 검토하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 현장과 같이 안벽기초 시공을 위하여 트렌치를 준설하고 준설토를 배후지 매립토사로 유용할 때에는 준설토의 트렌치 유입이 되지 않도록 시공관리를 철저히 하여야 하며, 기초 사석투하 후 케이슨 거치 전에 사석 층의 상태를 확인하는 작업이 요구된다.
- 2) 뒷채움재는 벽체 안정성에 중요한 요소이므로 설계조건에 맞는 토사로 뒷채움을 실시하여 설계시보다 과도한 배면토압이 발생하지 않도록 해야 한다.
- 3) 역해석 결과 콘크리트와 기초 사석층간의 마찰계수(f)는 0.3이하로 나타나 기초사석층의 관리가 케이슨 안정성 확보를 위한 가장 중요한 부분임을 확인하였다.
- 4) 원지반이 점성토로 이루어진 경우 시공 관리를 철저히 하지 못할 경우 케이슨 변위 발생을 야기시킬 수 있으므로, 이에 대한 대비를 철저히 준비하여야 한다.