

연약 지반 지역의 항만 시공 단계에 따른 케이슨 변위 거동

Sequential movement of the caisson on soft clays in the construction of the port

추윤식¹⁾, Yoon-Sik, Choo, 정영훈²⁾, Young-Hoon Jung, 황세환³⁾, Se-Hwan Hwang, 정충기⁴⁾, Choong-Ki Chung

¹⁾ 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

²⁾ 경희대학교 공과대학 건설환경공학부 조교수, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kyunghee University

³⁾ 현대산업개발 부장, Department Manager, Hyundai Development Company

⁴⁾ 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : The movement of the caisson used to construct a wharf front can affect functional performance of the port. Sequential movement of caissons at each stage of the construction is essential in the overall design as well as the stability of the port. It is common that back-analysis using the previous measurement is performed to predict the caisson movement, while there is no intensive study on sequential movement of the caissons according to the construction stage. In the study, we analyzed the pattern of the movement of caissons as a port is constructed. To simulate the construction of the port, the finite element method (FEM) is employed. The computed result shows that the caisson moves differently at each construction stage. When the caisson is being installed, the displacement of the caisson takes place mainly in vertical direction. In next stage of filling rocks behind the caisson, the top of the caisson move toward shore, while the bottom moves toward sea, thus rotating the caisson. The maximum rotation of the caisson takes place in the stage of filling rocks behind the caisson.

Keywords : caisson movement, soft clays, port, consolidation

1. 서론

우리나라에 존재하는 많은 해안 지역에는 하천 퇴적 등에 의한 연약 점성토 지반이 널리 분포하고 있다. 연약 점성토 지반에 항만 시설이 시공이 되는 경우, 지반 변형에 의하여 많은 문제가 발생할 수 있다. 특히 준설, 매립, 케이슨 설치 등 다양한 항만 시공 공정에 따라 발생하는 연직, 횡방향 변위는 항만 시설의 사용성 뿐만 아니라 안정성에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 접안 시설로서 케이슨이 시공되는 경우에는 케이슨의 정렬상태가 항만 시공의 성패를 좌우할 정도로 중요하며, 이러한 이유로 시공 중 케이슨의 변위를 예측하여 정렬상태를 확보하는 것이 필수적이다.

시공 중 발생하는 케이슨의 변위는 연약지반 개량 효과, 케이슨 하중에 의해 발생하는 연약지반 표층부의 파괴, 추후 케이슨 배면의 성토로 인한 지반 변형 등에 의하여 발생할 수 있기 때문에 이러한 메커니즘들을 폭넓게 고려해야 한다. 또한 다양한 지반 개량 및 지반 보강 공정이 항만 구조물 설치 공정과 더불어 시행되고, 각 공정별 영향 요인이 중복되어 지반거동에 영향을 주기 때문에 케이슨의 변위

예측은 매우 어려우며, 이에 따라 항만 안벽으로 사용되는 케이슨의 설치는 시공 단계부터 완료된 이후 까지 상당 기간 동안 그 거동을 주시해야 한다.

현재 연약지반 항만 시공 시 케이슨의 변위에 대한 예측이 설계과정에서 이루어지고 있지만 일반적으로 전체 변위량 예측 산정 수준이며, 각 시공 단계에 따른 변위 발생 과정이 체계적으로 분석된 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 연약지반에 시공되는 케이슨의 전체적인 변위량 예측과 함께 변위 발생 패턴을 분석하고 각 단계에서의 변위 발생 메커니즘을 밝혀 제시하고자 한다.

2. 연약 지반 및 해석 조건

2.1 해석 지반 조건

연약 점성토 지반에 항만 시설이 시공되면 시설물의 하중에 의하여 장시간에 걸쳐 변위가 발생하게 되며, 이러한 변위는 시설의 시공성이나 사용성 뿐만 아니라 시공이 완료된 후 시설의 안전성에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 실제 시공에서는 압밀 기간을 줄이기 위하여 배수재를 삽입하여 점성토의 투수성을 증가시켜 압밀 기간을 줄이거나, 강도가 높은 재료로 치환하여 연약지반의 강도를 증가시켜 압밀 거동에 의한 변위량을 줄이는 등의 다양한 연약지반 개량 공법이 적용된다. 본 연구에서도 이러한 시공 조건을 맞추기 위하여 연약 지반 개량 공법 중 보편적으로 사용되는 개량 공법을 해석에 포함시켰으며 이에 대한 설명은 표 1에 정리하였다.

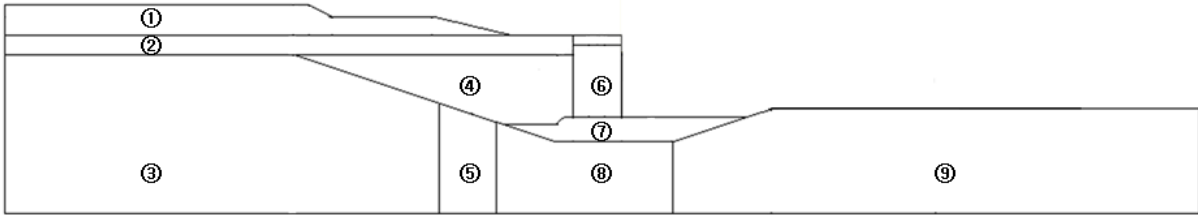
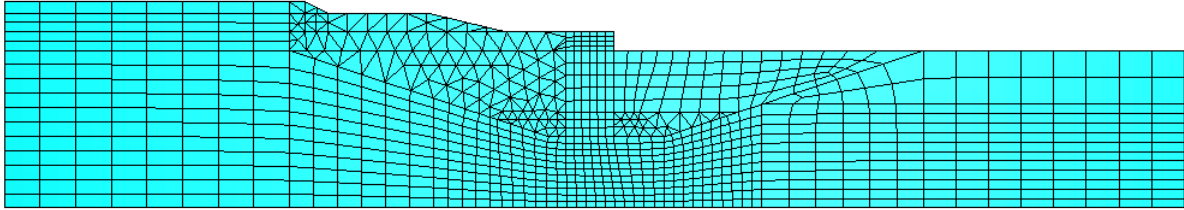
표 1. 해석에 포함된 지반 개량 공법

지반 개량 공법	적용된 위치	적용 효과
Sand Compaction Pile (SCP)	사석 마운드 하부 및 일부 배면점성토	탄성 증가에 따른 지반의 강도 증가 및 투수 계수 증가에 따른 압밀 속도의 증가
Pre-fabricated Vertical Drain (PVD)	배면 점성토	투수 계수 증가에 따른 압밀 속도의 증가

2.2 해석 단면 및 시공 조건

다양한 공법으로 개량된 연약지반의 경우 다양한 지반 조건 및 개량 공법에 따른 물성치의 변화 뿐 아니라, 시공 순서나 시간 등에 의해서도 케이슨의 변위가 다르게 발생할 수 있다. 따라서 지반의 조건에 따른 다양한 지반 모델이 필요할 뿐만 아니라 시공 순서와 시간 또한 고려하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 이러한 다양한 조건들을 고려하고 또한 시간에 따른 케이슨의 변위를 파악하기 위하여 유한 요소 해석 상용 프로그램인 ABAQUS ver 6.5를 사용하였다.

그림 1은 케이슨 해석시 사용된 단면 형상 및 요소망을 보여주고 있다. 해석은 2-D의 평면 변형률 조건으로 실시되었으며, 해석 단면의 경계조건으로 좌우측의 경계는 수평 방향의 변위를 구속하였고 바닥면은 수직, 수평 방향의 변위를 모두 구속하였으며, 해석 시의 시공 순서는 다음 표 2와 같이 정의하였다.



색상	영역	비고
①	Surcharge	선행 재하를 위한 성토체
②	Sand Mat	샌드 매트
③	Clay with PVD	PVD 처리된 점성토 구간
④	Rock Fill	뒷채움 사석
⑤	SCP-1	저밀도 SCP 시공 구간
⑥	Caisson	케이슨
⑦	Rubble Mound	사석 마운드
⑧	SCP-2	고밀도 SCP 시공 구간
⑨	Clay	무처리 점성토 구간

그림 1. 해석 단면

표 2. 해석에 적용되는 시공 순서

시공순서	시공 순서 (그래프)	시공단계	소요일	누적일	결과 표시일
1		초기 지중 응력 상태	1	1	
2		준설	180	181	
3		고밀도 SCP 설치	90	271	
4		저밀도 SCP 설치	90	361	
5		사석 마운드 설치	30	391	0
6	①	케이슨 거치	10	401	10
7	②	사석 뒷채움	10	411	20
8	③	샌드매트 설치	86	497	106
9	④	PVD 시공	5	502	111
10	⑤	선행 하중 재하 (1단계)	55	557	166
11	⑥	케이슨 상부 블럭 하중 재하	30	587	196
12	⑦	선행 하중 재하 (2단계)	225	812	421
13	⑧	선행 하중 재하 (3단계)	61	873	482

2.3 해석 물성치 결정

해석 단면에는 다양한 지반 조건들을 묘사하는 요소들이 존재하게 되며 각각의 요소는 그 목적에 따라 모델 및 물성치를 결정하여야 한다. 본 해석에서는 2-D 평면 변형률 조건으로 단면을 정의하고 해석을 수행하였으므로 투구 계수나 SCP의 치환률에 따른 강도 등은 실제의 3-D 지반에서의 물성치를 2-D에 대한 값으로 적절히 변환되어야 한다.

2.3.1 PVD 설치 연약 지반의 등가 투수계수 결정

Chai 등 (2001)에 따르면, 연직방향 투수계수 k_v 와 수평방향 투수계수 k_h 를 가진 점성토 지반에서 PVD가 설치되었을 경우, 복합 지반의 등가투수계수 k_{ve} 는 다음의 식으로 근사할 수 있다.

$$k_{ve} = \left(1 + \frac{2.5l^2 k_h}{\mu D_e^2 k_v} \right) k_v \quad (1)$$

여기서, D_e 는 단위셀의 직경, l 은 배수재 설치 심도이다. 식 (1)에서 μ 는 다음의 식으로 계산된다.

$$\mu = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} + \pi \frac{2l^2 k_h}{3q_w} \quad (2)$$

여기서, $n = D_e/d_w$, d_w 는 원형 배수재의 직경, $s = d_s/d_w$, d_s 는 스미어존의 직경, k_s 는 스미어존의 투수계수, q_w 는 PVD의 통수능이다. d_w 는 원형 단면의 샌드드레인에 대한 값이므로, PVD 형상에 맞게

환산하여야 하며, 다음의 식으로 계산된다.

$$d_w = a \frac{2(b+t)}{\pi} \quad (3)$$

여기서 a 는 형상계수(보통 0.9), b 는 배수재 폭, t 는 배수재 두께이다.

2.3.2 SCP 처리 점토층의 등가탄성계수 결정

SCP 파일이 설치된 점토 지반의 등가탄성계수는 Wang 등 (2002)의 방법을 이용하여 결정하였다. 그림 2는 연약 지반에 SCP를 설치한 모식도를 보여준다.

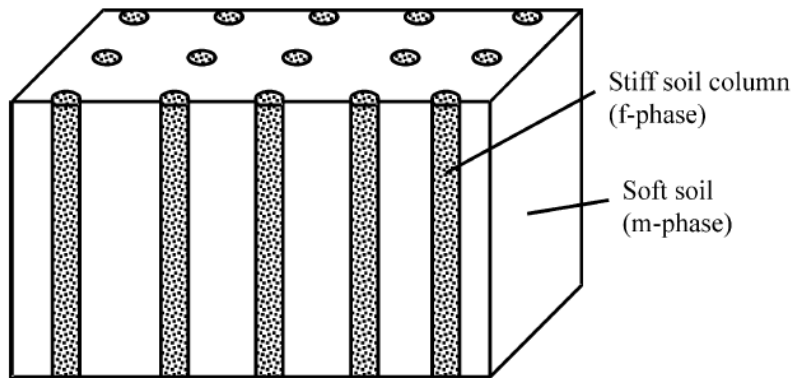


그림 2. SCP 설치로 개량된 연약 지반 (Wang 등, 2002)

이 방법에서는 SCP가 설치된 개량 지반을 매트릭스 재료(m-phase)와 보강 재료(f-phase)로 구성된 복합 셀로 간주한다. 두 재료 간의 응력비, b_s 는 다음과 같이 정의된다.

$$b_s = \sqrt{\frac{E_f}{E_m}} \quad (4)$$

여기서 E_f 는 f-phase 재료의 탄성계수(즉, SCP의 탄성계수)이며 E_m 은 m-phase 재료의 탄성계수(즉, 점토층의 탄성계수)이다. 단일 셀에서 각 phase의 응력은 균일하게 분포하고, phase의 응력 크기는 부피비에 따라 분배된다고 가정하면, 구성 관계 텐서, C 는 다음과 같이 정의된다.

$$C = \begin{cases} \frac{b_s}{(b_s - 1)f_s + 1} I \\ 1 \\ \frac{1}{(b_s - 1)f_s + 1} I \end{cases} \begin{cases} \text{f-phase} \\ \text{m-phase} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 b_s 는 응력비, f_s 는 SCP의 체적비, 그리고 I 는 4차 단위 텐서이다. C 는 복합재료의 탄성계수나 강도 등의 증가치를 구하는 데 사용할 수 있다. 복합 지반은 개량된 부분과 개량되지 않은 부분으로 구성되는데 이는 (i) SCP로 설치된 보다 단단한 흙이 원지반과 섞이지 않으며, (ii) SCP 보강이 특정 방향

을 가지고 있기 때문이다. 미시적 응력은 응력 국부 텐서, C 에 의해 분배되며, 파괴 시 f-phase와 m-phase에서의 응력은 다음의 식으로 계산된다.

$$q'_{uf} = \frac{b_s}{(b_s - 1)f_s + 1} q_{uf} \quad (7a)$$

$$q'_{um} = \frac{1}{(b_s - 1)f_s + 1} q_{um} \quad (7b)$$

여기서 q_{uf} 와 q_{um} 은 각각 f-phase와 m-phase에서 파괴 응력이다. 따라서 균질화된 강도, q_u^h 는 다음과 같다.

$$q_u^h = f_s q'_{uf} + (1 - f_s) q'_{um} = \frac{b_s f_s q_{uf} + (1 - f_s) q_{um}}{(b_s - 1)f_s + 1} \quad (8)$$

연직방향의 복합체 내부의 미시적 변형률은 각 phase에서 동일하고, 거시적 변형률과도 같으므로, 균질화된 변형계수 E_{50}^h 는 균질화된 강도를 거시적 변형률로 나누어 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{50}^h = \frac{b_s f_s E_{50}^f + (1 - f_s) E_{50}^m}{(b_s - 1)f_s + 1} \quad (9)$$

식 (9)로부터 SCP 보강 지반과 무처리 지반의 탄성계수비는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{E_{50}^h}{E_{50}^m} = \frac{b_s f_s (E_{50}^f / E_{50}^m) + (1 - f_s)}{(b_s - 1)f_s + 1} \quad (10)$$

점성토 지반의 경우 MCC 모델을 사용하였기 때문에 탄성계수는 응력 수준에 따라 다르지만, 개략적으로 지층의 중간 깊이에서의 응력으로 계산한다면 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$E_{50}^m = 3(1 - 2\nu) \frac{(1 + e_0)p'}{\lambda} \quad (11)$$

2.3.3 해석 모델 및 물성치 결정

해석 모델은 점성토 지반과 PVD 또는 SCP에 의하여 개량된 연약 지반의 경우에는 Modified Cam Clay model(MCC model)을 사용하였다. 사석 뒷채움 구간과 사석 마운드(rubble mound), 샌드매트(sand mat)와 성토체(surcharge)의 경우에는 압밀 거동을 하지 않기 때문에 선형 탄성 모델과 모어 쿨룸 모델을 사용하였다. 케이슨은 선형 탄성 모델로 해석하였고 케이슨 자체의 변형을 무시하기 위하여 매우 높은 탄성계수인 1×10^9 MPa를 이용하였다.

표 3. 케이슨 해석을 위한 기준 재료 물성치

영역	E(kPa)	ν_{el}	ϕ (deg)	c(kPa)			
Caisson	1.00E+12	0.1					
Rockfill	22000	0.2	40	10			
Rubble mound	22000	0.2	45	10			
Sandmat	12000	0.3	33	5			
Surcharge	12000	0.3	33	5			
영역	MCC모델(소성)			MCC모델(탄성)		투수계수	
	λ	M_c	$p_0/2$	κ	ν_{el}	k_v (m/sec)	k_h (m/sec)
Clay	0.126	1.0	10	0.051	0.15	1.00E-09	3.00E-09
ClaywPBD	0.126	1.0	10	0.051	0.15	3.59E-09	3.59E-09
SCP-1	0.020	1.42	10	0.008	0.15	1.00E-06	
SCP-2	0.016	1.42	10	0.006	0.15	1.00E-06	

3. 해석 결과 및 분석

3.1 해석 결과

시간에 따른 케이슨의 모서리의 변위를 관찰하여 전체적인 케이슨의 거동을 확인하였으며, 해석은 케이슨 해측 상부 모서리(그림 3의 C 위치)의 연직변위(침하량)와 수평변위(육측 변위 -, 해측 변위 +)를 측정하여 표시하였다.

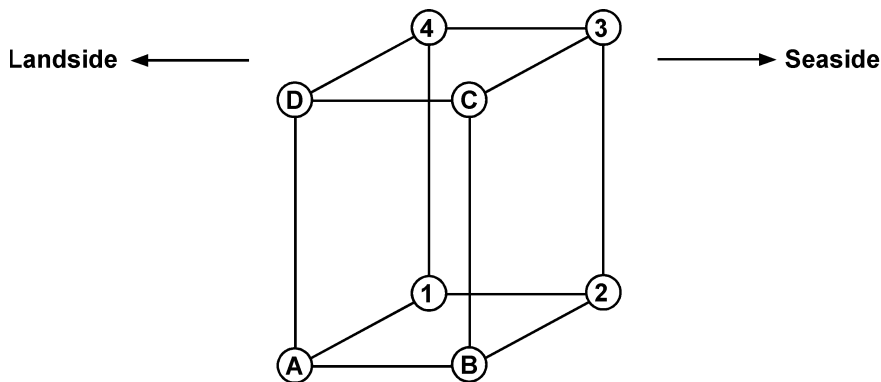


그림 3. 해석에 사용된 케이슨의 형상

그림 4는 점 C에서의 시간에 따른 케이슨의 침하 거동 및 수평 변위를 표시하고 있다. 이때 각 시공 단계별로 구별하기 쉽도록 각 시공 단계를 점선으로 나누고 시공단계를 표 2의 시공 단계(그래프)의 번호로 각각 표시하였다. 그림 4에서 케이슨의 A, D(육측 모서리)와 B, C(해측 모서리)에서 각각 침하 거동이 같으며, C, D(상부 케이슨)와 A, B(하부 케이슨)에서는 각각 수평 변위가 동일하게 나타난다. 이를 통하여 케이슨 자체의 변형이 거의 발생하지 않으며, 해석 과정 중 강체 거동을 하는 것을 파악할 수 있다.

그래프에서 침하량과 수평변위가 급격하게 변하는 구간은 케이슨 거치, rock fill, 그리고 케이슨의

pre-loading 단계이다. 이 시공 단계들에서는 케이슨과 인접한 곳에서 시공이 이루어져, 케이슨에 직접적으로 영향을 주기 때문에 각 시공 과정 중 많은 양의 침하가 발생하는 것으로 판단된다. 반면에 PVD가 설치되거나 배면 구간에 성토체가 설치되는 등의 시공 과정들은 케이슨과 상대적으로 거리가 먼 곳에서 이루어지기 때문에 비교적 적은 양의 침하가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 변위가 많이 발생하는 시공 초반 단계(케이슨 거치, 사석뒹채움)에서 케이슨의 좌, 우측에 대한 부등 침하와 상, 하부의 변위 차이가 급격히 발생하며, 이러한 변위 차이는 케이슨 상부 블록에 하중이 재하되는 단계 ⑥에서 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

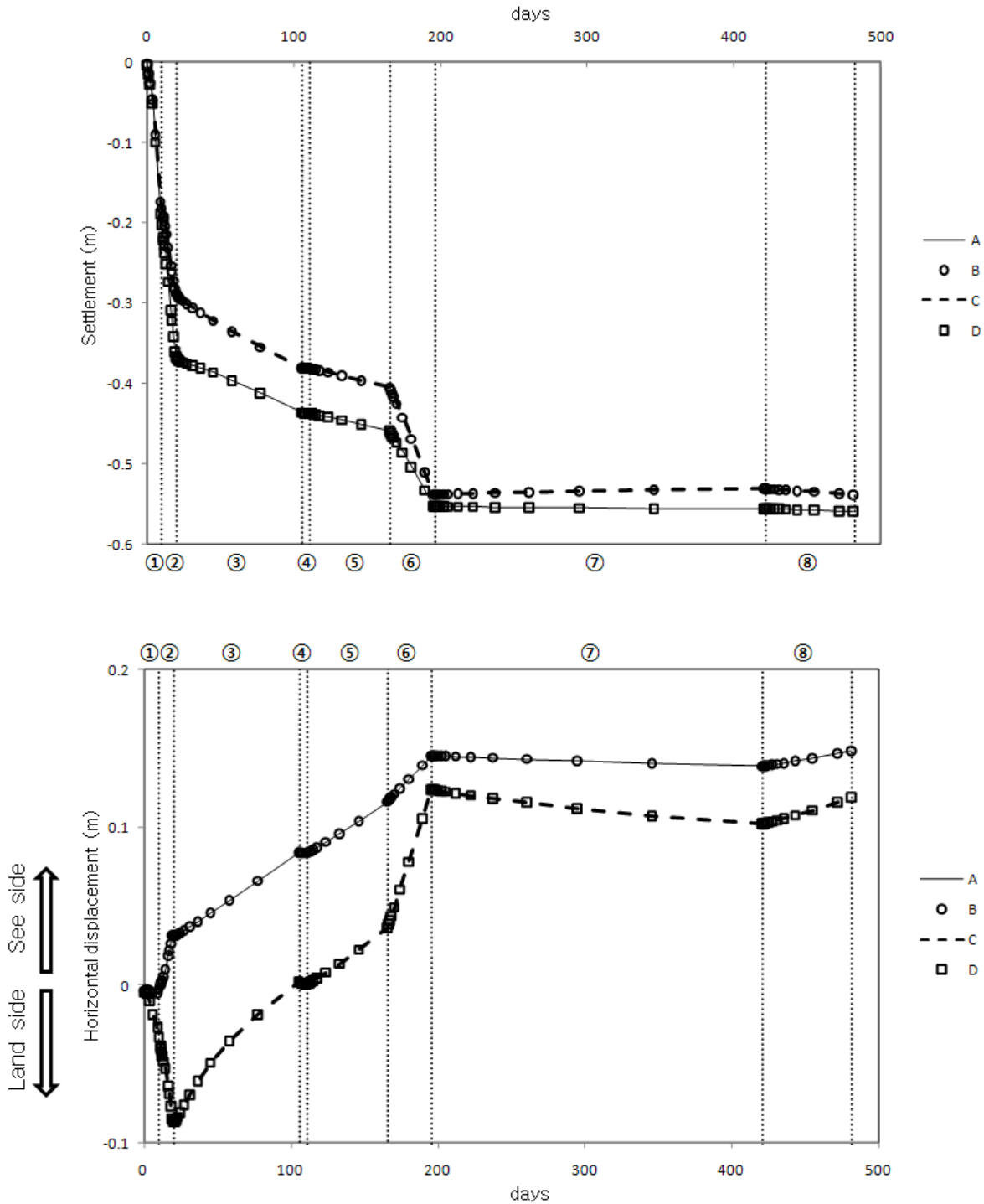


그림 4. 시간에 따른 케이슨의 변위 거동

3.2 시공 단계에 따른 변위 거동

시공 단계에 따라 케이슨의 침하 및 수평변위를 전체적으로 확인하기 위하여, 케이슨의 각 모서리(그림 3의 A, B, C, D)에서의 변위를 시공 단계에 따라 나누어 표시하였다(표 4). 표에서 확인할 수 있듯이 케이슨 설치, 사석 뒷채움, 케이슨상부 블록 재하의 단계에서는 4개의 모서리 점에서 침하와 수평 변위가 크게 발생하였으며, 상대적으로 PVD 시공이나 선행 재하 단계와 같은 곳에서는 침하와 수평변위가 상대적으로 작게 나타났다.

표 4. 시공 단계에 따른 케이슨의 변위량

시공단계	침하(m)		수평 변위(m)	
	평균 침하량	침하율 (침하량/전체침하량)	상부변위(C,D)	하부변위(A,B)
케이슨 설치	-0.1893	0.3470	-0.0281	0.0013
사석 뒷채움	-0.1348	0.2470	-0.0532	0.0335
샌드매트 설치	-0.0813	0.1491	0.0876	0.0525
PVD 시공	-0.0003	0.0006	-0.0007	0.0002
선행 재하 1	-0.0262	0.0480	0.0375	0.0332
케이슨상부 블록재하	-0.1100	0.2016	0.0852	0.0283
선행 재하 2	0.0017	-0.0032	-0.0215	-0.0066
선행 재하 3	-0.0054	0.0099	0.0165	0.0099
총 변위량(합계)	-0.5457	1.0000	0.1233	0.1521

침하량과 수평변위로 표현된 해석 결과를 이용하여 케이슨의 전체적인 형상을 그림 5에 도시하였다. 그림에서는 변화 양상을 더 확실하게 확인하기 위하여 변화량을 10배로 확대하여 시각화하였다. 또한 케이슨의 상대적인 변위를 확인하기 위하여 해당 시공 단계는 굵은 선으로, 이전 시공 단계의 케이슨 위치는 얇은 선으로 표현하였으며 초기 케이슨 위치는 점선으로 표시하였다. 이 도시된 그림들을 분석하면 시공 단계별로 다음과 같은 사항들을 확인할 수 있다.

- 1단계-caisson 거치:
케이슨의 자중에 의하여 수직 처짐이 지배적으로 발생한다.
- 2단계-사석뒷채움:
사석뒷채움에 의한 압밀 침하와 함께 원호의 형태로 변형이 생기면서 B점(해측 밑의 점) 중심으로 하여 케이슨이 회전한다.
- 3단계-샌드매트 설치:
Sand mat의 자중에 인하여 해측 아래 방향(↘)으로 케이슨이 밀리는 형상으로 변위가 발생된다.
- 4단계-PVD 설치:
PVD가 작동하면서 뒤쪽 점토지반의 압밀 침하 거동이 심해지고 그에 따라 케이슨의 상부가 배면측으로 기울기 시작한다. 하지만 본 해석에서는 변화의 양은 미소하게 나타났다.

○ 5, 7, 8단계-선행재하하중 재하단계:

3개의 시공 과정 모두 샌드매트 설치 단계와 비슷하게 해측 밑의 방향으로 변위 거동이 주로 나타난다. 3번의 선행 재하 단계 중 선행재하 1단계(surcharge-1)에서 변위량이 가장 크다.

○ 6단계-케이슨 상부 블록 재하:

블록의 자중에 의하여 해측 밑의 방향으로 변위 거동이 발생하면서 케이슨이 전체적으로 해측으로 밀리는 거동이 발생한다. 또한 케이슨의 상부가 해측으로 이동하여 A점(육측 밑의 점)을 기준으로 회전하는 형상으로 변위가 발생하여 기울어진 형태의 케이슨이 다시 수직으로 서있는 형상으로 되돌아오게 된다.

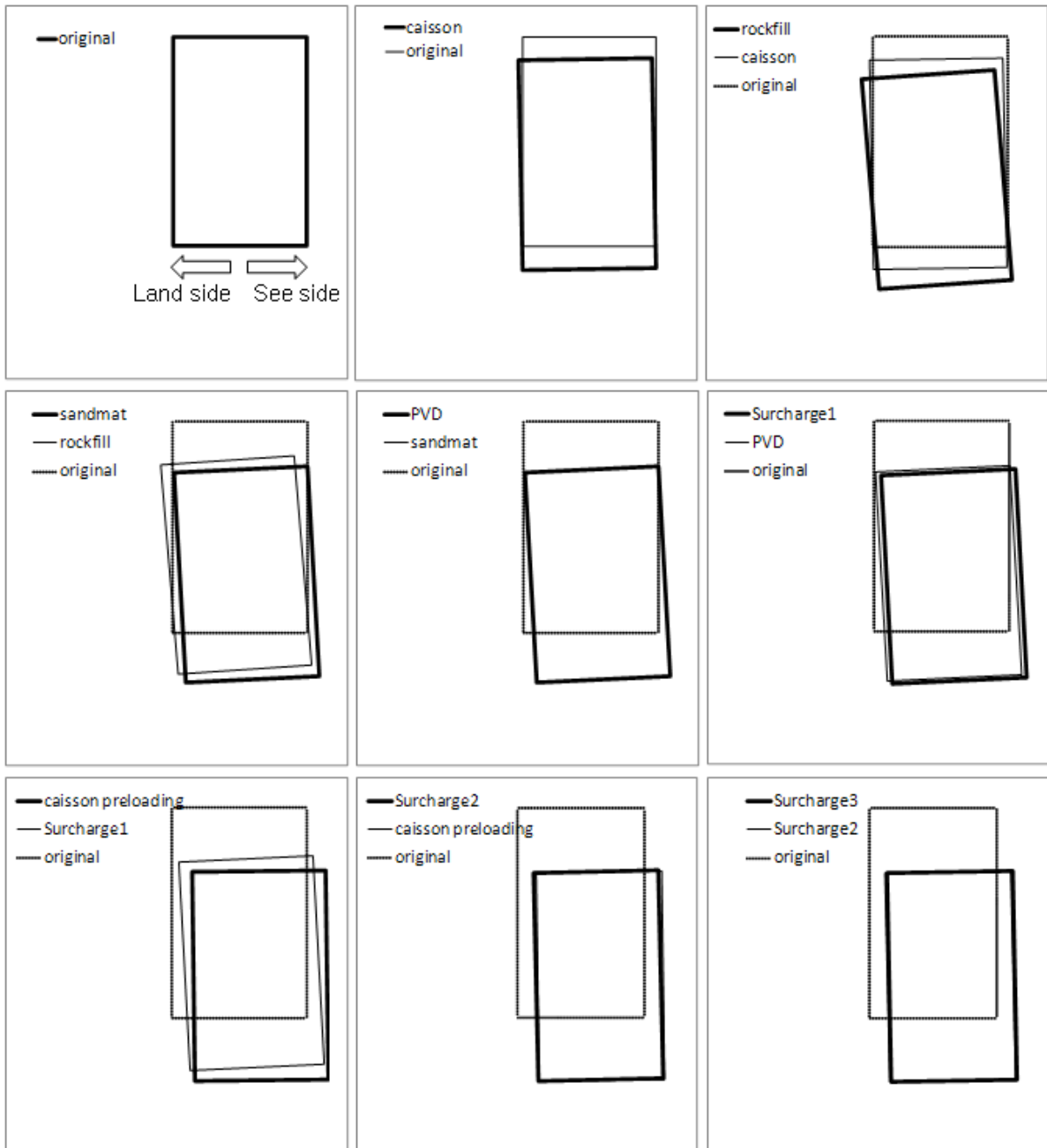


그림 5. 시공 단계에 따른 케이슨의 변위 거동

4. 결론

본 연구에서는 연약지반에 항만을 건설할 경우에 접안시설로서 일렬로 배치되는 케이슨에 대하여 변위 거동을 시공 단계에 따라 분석하였다. 해석 시에는 결과의 사실성을 극대화하기 위하여 최대한 현장의 조건을 반영하여 해석 단면 및 해석 조건을 결정하여 해석을 실시하였다.

케이슨은 시공이 진행됨에 따라 연약지반의 압밀에 의하여 침하 거동을 보임은 물론, 수평 변위 및 회전 거동 또한 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 변위 거동은 시공이 진행되면서 지반 조건이 변화함에 따라 다양한 형태로 조합되어 나타나게 되며, 이에 따라 케이슨의 변위 거동은 시공 단계에 따라 상이하게 나타났다. 본 해석에서는 케이슨의 설치, 사석 뒷채움, 선행 재하 블록의 설치 등과 같은 시공 단계에서 침하 및 수평변위 발생량이 상대적으로 큰 경향을 나타냈으며, 특히 사석 뒷채움(rock fill)에서는 지반이 원호 형태로 변형하면서 케이슨이 회전하는 거동을 보이는 것으로 해석되었다. 따라서 실제 시공 시에도 해당 시공 단계들에서는 케이슨의 변위 및 지반의 안정성에 특히 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 본 해석은 해석 깊이를 하나로 정하여 해석을 수행하였지만, 케이슨의 거동은 점토층의 두께가 달라짐에 따라 다르게 조금씩 나타날 것으로 판단된다. 따라서 실제 시공에서는 케이슨이 시공될 위치의 점토층의 두께를 고려하여 케이슨의 변위 해석을 실시하면 더 정확하게 케이슨의 거동을 해석할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Chai, J.-C., Shen, S.-L., Miura, N. and Bergado, D.T. (2001). "Simple method of modeling PVD-improved subsoil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 11, pp. 965-972.
2. Chung, S.G., Ryo, C.K., Jo, K.Y. and Huh, D.Y. (2005). "Geological and Geotechnical Characteristics of Marine Clays at the Busan New Port", *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 23, pp. 235-251
3. Wang, J.G., Leung, C. F. and Ichikawa, Y. (2002). "A simplified homogenisation method for composite soils", *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, pp. 477-500.