

개량 지반에 설치된 케이슨의 측방변위에 대한 연구

A Study on Lateral Displacement of Caisson Constructed on Improved Ground

김 명 학¹⁾ · 이 상 옥[†] · 윤 민 승²⁾ · 한 병 원³⁾

Kim, Myunghak · Lee, Sangwook · Yoon, Minseung · Han, Byungwon

ABSTRACT : In case of building up port facilities on soft ground, unsymmetrical surcharge of embankment, which make the excess pore water pressure to increase, causes to occur lateral displacement due to plasticity of soil. A study on lateral displacement and settlement of the caisson, which is installed on improved ground, was accomplished. The field measurement data and calculated values obtained from FEM program of Plaxis were compared and analyzed. For numerical analysis, the properties of soils, constructions stage and time were considered. Lateral displacement was measured at the point of inclinometers installed in front of caisson. Settlement was measured at the center of extra embankment behind of caisson. Comparison of measured and calculated for lateral displacement showed that the calculated value was greater than the measured, and increasing trend was different. The calculated value showed step increasing as step extra embankment applied, whereas the measured gradually was increased. For settlement of embankment, the amount of both measured and calculated were similar, but the trend was different like that of lateral movement.

Keywords : Soft ground, Caisson, Inclinometer, Lateral deformation, Settlement, Numerical analysis

요 지 : 연약지반상에 설치되는 항만구조물의 경우 편재하중에 의해 지반내의 과잉간극수압이 증가하게 되고, 토립자의 소성화로 인한 측방변형이 발생된다. 본 연구는 부산 ○○○현장에 설치되는 케이슨의 측방변위 및 침하 계측 데이터와 유한요소 해석 프로그램 Plaxis를 이용한 수치해석 결과를 비교·분석하였다. 수치해석 시 실제 현장의 지반 물성치와 시공단계 및 기간 설정은 지반 조사 보고서 및 실시설계 보고서를 참고하여 적용하였으며, 현장 계측 단면 1개소 단면을 선정하여 수치해석하였다. 측방변위는 S.C.P.로 지반개량된 구간에 거치된 케이슨 전면부에 설치되어 있는 지중 경사계의 위치를 지점으로 측정하였고, 침하는 케이슨 배후의 여성토부의 중심에 설치되어 있는 지표 침하판의 위치를 지점으로 선정하여 현장계측하였다. 수치해석 결과 측방 변위의 해석 값은 실측치보다 크게 나타났으며, 실측값은 지속적인 완만한 증가양상을 보였지만 해석값은 단계 성토 때마다 큰 변위를 나타내는 계단식 증가를 보였다. 반면에 침하량 변화 양상은 측방변위 양상과 비슷한 거동을 보였고 변화량은 비슷하게 나타났다.

주요어 : 연약지반, 케이슨, 경사계, 측방변위, 침하, 수치해석

1. 서 론

항만호안구조물을 설치한 연약한 점토지반 위에 성토 등으로 인한 하중이 작용할 경우에 지중응력이 발생하며 간극수압이 변화하게 되는데, 하중의 증가속도가 과잉간극수압의 소산 속도보다 빠를 경우 지중응력은 계속 증가하게 되어 소성평형상태에 이르게 된다. 특히 하중이 편재되어 작용할 경우에 지중 압력차가 발생하게 되고, 편재하중이 어느 한계를 넘으면 지반은 소성상태로 되는데, 이와 같이 편재하중에 의한 소성평형상태하의 지중압력에 의한 과도한 측방변위가 발생하는 현상을 측방유동이라 한다. 최근 연약지반 상에 항만호안구조물을 건설하는 경우가 많아지고 있으며 또한, 구조물의 안정성에 영향을 미치는 측방유동도

자주 발생하고 있다. 이러한 측방유동은 구조물의 변형을 유발시켜, 인접구조물이나 지하매설물까지 피해를 끼치게 된다. 접안시설로서 케이슨이 시공되는 경우 케이슨의 정렬 상태는 안정성 확보에 중요한 요소가 되며, 따라서 계측이나 프로그램 해석을 통한 시공 중의 케이슨 변위를 확인하는 것이 필수적이다.

본 연구는 부산 ○○○ 현장에서 계측한 케이슨의 측방유동에 대한 자료를 분석하여 편재하중이 작용할 때 발생하는 측방유동의 메카니즘을 살펴보고, 설치된 구조물의 측방유동을 유한요소 해석을 통하여 분석하였다. 수치해석은 2차원 및 축대칭 유한요소 해석 프로그램인 Plaxis(Version 7.2 1998)를 사용하였다. 유한요소 해석 시에는 현장에 적용된 시공단계와 현장의 물성치를 적용하여 측방유동 및 침하를

1) 정희원, 인제대학교 공과대학 토목공학과 건설기술연구소 정교수

† 비희원, 인제대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail : lswmanse@hanmail.net)

2) 정희원, 인제대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

3) 비희원, (주) 바이텍 코리아 영남지사 이사

해석하고 실측치와 비교, 분석하여 실측과 수치해석의 병행을 통한 더욱 합리적인 변위 예측을 하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 측방유동

연약한 지반에 성토를 하게 될 경우 편재하중이 작용하여 지반내 과잉간극수압의 증가로 인한 토립자의 소성화로 지반이 측방으로 이동하게 되어 측방변위와 인접 지반에 응기가 발생하게 된다. 이러한 현상을 측방유동이라 한다(이재훈 등, 1995).

일반적인 성토 기초지반의 변형 상황을 그림 1에서 폭이 B이고 두께가 H인 지반블록으로 나타내었다.

그림 1에서 측방 경계의 변위 프로필이 경사계 등을 통해 판명되면 단위길이당 측방유동 토량 V_δ 를 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$V_\delta = 2 \int_0^H \delta \cdot dz \quad (1)$$

지표면의 침하 형상을 알면 단위 길이당 침하 토량 V_ρ 는 식 (2)로 구할 수 있다.

$$V_\rho = 2 \int_{-B/2}^{B/2} \rho \cdot dx \quad (2)$$

여기서 δ 는 측방 변위량, ρ 는 지표 침하량을 나타낸다.

2.2 측방유동의 기존 연구내용

Tavenas 등(1979)은 총 21개소의 성토구간에 대한 현장계측 결과를 토대로 연약지반의 침하량과 측방유동량 사이의 관계를 분석하였다. Tavenas 등(1979)이 제시한 연약지반 상 성토 시 침하량과 측방유동량 사이의 관계를 정리하면 그림

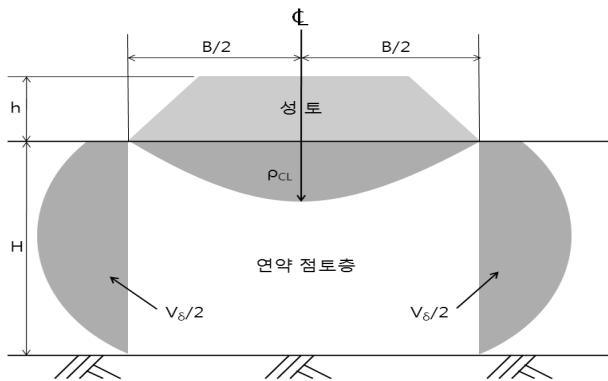


그림 1. 지반의 침하 토량과 측방유동 토량

2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2에서 하중의 초기단계(OP)에는 비교적 빠른 배수로 측방변위량이 연직침하량에 비하여 작지만($\Delta y = (0.18 \pm 0.09)\Delta s$), 성토하중이 증가하면 정규압밀(NC)상태로 변화되며, 공사의 종료단계(P'A)에서는 비배수상태로 거동하게 되어 측방변위량이 급격히 증가하고 그 크기는 연직변위량과 거의 같아진다($\Delta y = (0.9 \pm 0.2)\Delta s$). 또한 공사완료 후 장기간 방치시킨 경우(A'B)에는 배수상태로서 연직변위량에 비하여 측방변위량이 작아지는 것($\Delta y = (0.16 \pm 0.02)\Delta s$)으로 보고되고 있다(Tavenas 등, 1979).

Leroueil 등(1990)은 측방유동에 의한 연약지반 변형거동의 과정을 세 단계로 설명하고 있다. 하중재하시점부터 한계하중까지의 거동과 그 이후부터 극한하중까지의 거동, 그리고 극한하중 이후의 장기거동의 3단계의 순서를 거치는 것으로 설명하였다. 재하초기에는 간극수압의 소산이 없는 K_0 상태로 탄성적인 침하만이 인식되고, 하중의 증가에 따라 유효응력이 증가하여 어느 한계치를 넘게 되면 지반이 소성상태로 되어 압축성이 급증함과 더불어 측방 변위량의 증가가 시작된다고 하였으며, 대부분의 측방유동은 이 구간에서 발생된다고 하였다(Leroueil 등, 1990).

인천 ○○부두 건설공사 중 시공과정에서 호안제체의 연직변위와 측방변위의 상관관계를 분석해 보면 연직변위는 성토재하 시부터 꾸준히 증가하여 성토완료 후 빠르게 수렴하는 결과를 보였으며, 이에 반하여 측방변위는 성토초기에는 크게 일어나지 않았지만 성토 중 급한 경사를 이루며 발생한 것으로 관측되었다. 또한 안벽구조물의 기초로 설치된 강관말뚝의 변위는 안벽호안 지역의 측방변위와 유사하게 모래지환 하부 연약지반에서 가장 많은 변위가 일어나는 것으로 나타났다. 시공단계별로는 준설매립이 마무리되는 시점에서 변위량이 급격하게 증가되어 성토하중이 마무리되는 지점에서 가장 많은 변위량을 나타냈다(신은철 등, 2005).

팩 드레인(논산현장, 계측지점 19개소), 샌드매트(군산A, 계측지점 14개소) 및 Sand Drain + Sand Compaction Pile

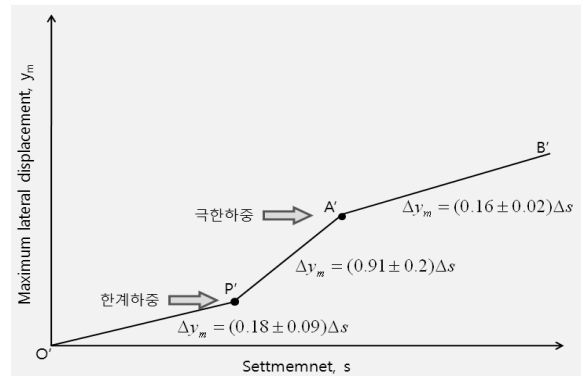


그림 2. 최대 측방변위와 침하량 관계(Tavenas 등, 1979)

(군산B, 계측지점 23개소)이 적용된 세 개의 현장에 대해서 성토 중앙부 침하량과 선단부 지중 최대수평변위량 관계를 분석한 결과 최대 측방변위량은 세 현장 모두 유사한 경향을 보이고 있으며, 회귀분석결과 $\Delta y = (0.09)\Delta s$ 의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 위식에서 나타난 결과는 Tavenas 등(1979)이 제안한 경험식의 하한계와 유사하며 대부분의 계측결과는 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 Tavenas 등(1979)이 제안식의 상한계선 아래에 위치하고 있다. 침하량 증가에 따른 측방유동량의 증가가 Tavenas 등(1979)의 연구 결과에 비해 작은 원인은 연직배수재에 의한 배수축진 효과로 인해 성토하중 증가에 따른 과잉간극수압의 증가가 상대적으로 적어서 측방유동압이 작게 발생하였고 또한 샌드매트 및 팻 매트가 연약지반의 측방유동 발생에 저항하는 효과를 발휘하였기 때문이라고 한다(홍원표 등, 2006).

성토하부 연약지반의 변형거동에 관한 모형실험에서 성토속도가 연약지반 침하 및 측방변위에 미치는 영향을 평가하기 위하여 성토속도에 따른 일평균 지반변형을 평가하였다. 모형 시험 결과 성토속도가 빨라질수록 침하량 및 측방변위량이 비선형적으로 급속히 증가되었으며, 이 비선형적인 지반변위의 증가는 모형지반의 프리 로드와 관계없이 성토속도의 증가에 따라 일정한 지수함수의 관계를 보이고 있는 것으로 관측되었다.

$$\Delta s = 0.3594e^{1.12v} \quad (3)$$

$$\Delta y_m = 0.0667e^{1.24v} \quad (4)$$

여기서, Δs 는 일평균 침하량(mm/day), Δy_m 은 일평균 지중 최대수평변위(mm/day), v 는 성토속도(kgf/cm²/day)를 나타낸다(이광우 등, 2009).

연약지반에 설치된 안벽구조물의 측방이동 평가결과에서 잔교식 안벽구조물의 측방이동 가능성을 효과적으로 판정하기 위한 소요 사면안전율은 말뚝의 사면 안정효과를 무시하고 1.3으로 하거나 혹은 말뚝의 사면안정효과를 고려하

여 1.6을 확보하도록 하여야 하며, 말뚝이 시공되지 않은 연약지반상 케이슨식 안벽의 안정을 위해서는 한국항만협회(2005)에서 제시하고 있는 상시 사면안전율 1.3을 소요 사면안전율로 사용하여도 무방하다(홍원표 등, 2008).

연약지반에 항만을 건설할 경우에 접안시설로 일렬로 배치되는 케이슨에 대하여 변위거동을 시공 단계에 따라 수치 해석한 결과 케이슨은 시공이 진행됨에 따라 연약지반의 압밀에 의하여 침하 거동을 보이고, 수평 변위 및 회전 거동 또한 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 변위 거동은 시공 단계에 따라 상이하게 나타났다. 본 해석에서는 케이슨의 설치, 사석 뒷채움, 선행 재하 블록의 설치 등과 같은 시공단계에서 침하 및 수평변위발생이 상대적으로 큰 경향을 나타냈으며 특히 사석 뒷채움(Rock Fill)에서는 지반의 원호 형태로 변형하면서 케이슨이 회전하는 거동을 보이는 것으로 해석되었다(추윤식 등, 2009).

대심도 연약지반상에 건설되는 케이슨의 측방변형 사례 연구에서 현장계측결과 침하량에 따른 케이슨 인접부 단계 성토 시 발생하는 침하량과 케이슨 주변의 측방변위량을 분석한 결과 뒷채움 및 매립부분의 측방변형량을 제외하면 Tavenas 등(1979)이 제안한 상한치($\Delta y = (0.18 \pm 0.09)\Delta s$) 이하로 관측된 것으로 나타났다. 또한 측방유동 발생 시 측방변위량의 크기와 편재성토의 시공속도가 가장 밀접한 것으로 관측되었다(김명하 등, 2010).

3. 연구 대상 지역의 지반특성 및 계측 결과

3.1 지반조사

본 연구대상 지역은 행정구역상 부산광역시 강서구에 위치하며, 최근에 조성된 녹산공업단지 서쪽에 위치하고 있다. 조사부지의 서쪽은 옥망산으로, 남쪽으로는 가덕도에 의해 둘러싸인 지형이며 수심은 대체로 만조 시 최대 4m 정도를 유지하고 있으며, 조수간만의 차는 2m 내외로 간조 시에는 조사부지의 일부가 노출되기도 한다. 해저지반은 해성 퇴적토층이 약 5~74m 정도로 매우 불규칙하게 분포하고 있는 상태이며, 옥망산과 가덕도 등 육지와 근접한 지역의 시추공을 제외하고는 대체로 40m 이상의 두께로 분포하고 있다. 이러한 해성 퇴적토층은 시추공의 위치와 심도에 따라 세립토층(점성토층)과 조립토층(자갈 또는 모래층)이 교호하는 경우도 있으나, 대체로 상부의 세립토층과 하부의 조립토층으로 세분되는 경향을 보인다. 해성 퇴적토층 하부에는 대부분의 지역에서 기반암이 나타나고 있으며, 녹산공업단지와 인접한 조사지역의 동측에는 기반암층 상부에서 얇은 두께의 잔류토층이 관찰되기도 하였다. 조사지역의 기

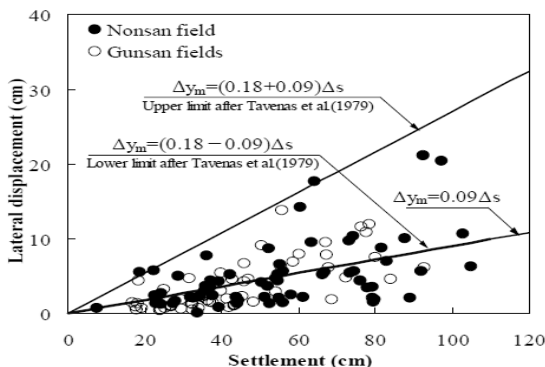


그림 3. 침하량과 측방변위량 관계(홍원표, 2006)



그림 4. 연구 대상 지역

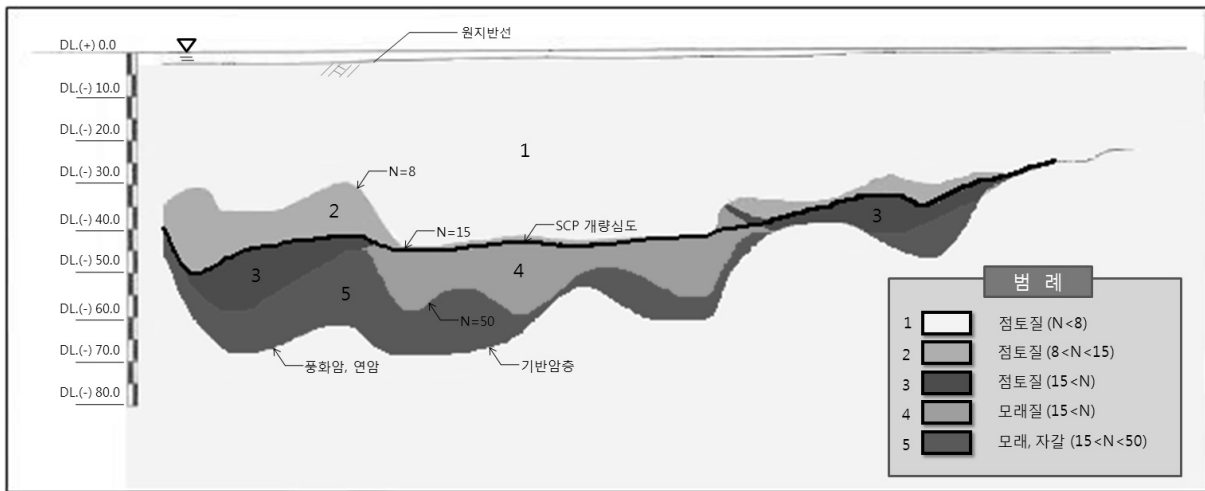


그림 5. 연구대상 지역의 지층구성 ((주)바이텍 코리아, 1999)

표 1. 지반조사결과

항목	G.L.-0 ~ 30M	G.L.-30M ~	
분류기호(통일분류법)	ML, MH, CL, CH	CL, CH	
자연함수비(%)	51.0 ~ 85.6	26.5 ~ 67.7	
비중	2.65 ~ 2.70	2.63 ~ 2.69	
액성한계(%)	42.9 ~ 80.9	33.6 ~ 74.8	
소성한계(%)	14.6 ~ 48.9	10.9 ~ 41.2	
초기간극비	1.380 ~ 2.319	0.750 ~ 1.767	
습윤단위중량(t/m^3)	1.504 ~ 1.654	1.540 ~ 1.913	
0.5mm체 통과량(%)	25.8 ~ 44.8	0 ~ 39.8	
No.200체 통과량(%)	76.0 ~ 97.2	55.1 ~ 97.4	
비배수전단강도(kg/cm^2)	FVT(현장베인전단시험)	0.180 ~ 0.754	
	UU(비압밀 비배수 삼축압축시험)	0.02 ~ 0.22	0.13 ~ 0.31
CK ₀ U (K ₀ 압밀비배수 삼축압축시험)	c'(kg/cm^2)	0.03 ~ 0.05	0.04 ~ 0.16
	ϕ' (°)	22 ~ 26	24 ~ 28
선형압밀하중(kg/cm^2)	ILT	0.24 ~ 1.4	1.32 ~ 5.2
	CRS(일정변형률 압밀시험)	0.28 ~ 1.85	2.45 ~ 4.80
압축지수(C _c)	ILT(표준압밀시험)	0.55 ~ 1.10	0.23 ~ 0.75
	CRS	0.39 ~ 0.80	0.14 ~ 0.49

반암은 옅은 녹색 또는 갈색을 띠는 백악기 화강섬록암으로 구성되고 있고 절리의 간격이 좁은 상태이다. 연구대상지역의 그림과 지층구성을 그림 4, 5에 나타내었다((주)바이텍

코리아, 1999).

본 연구대상지역의 지반조사결과를 요약한 결과는 표 1과 같다.

3.2 계측 결과

계측 지점 16개소에 대한 각 케이슨의 위치는 그림 6에 나타내었다.

케이슨 위치도에 표시한 C 단면은 수치해석에 사용한 단면을 표시한 것이며, 대표 단면인 C단면의 성토단계 및 C 단면 계측기 설치 위치도, 자동·수동 계측결과 그래프, 자

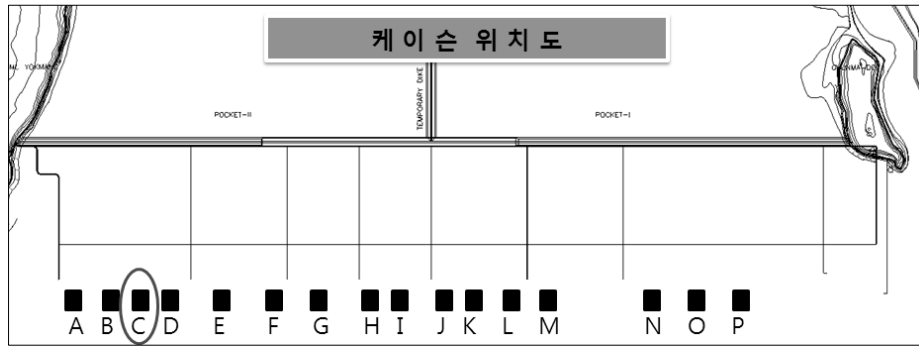


그림 6. 각 케이슨 위치도

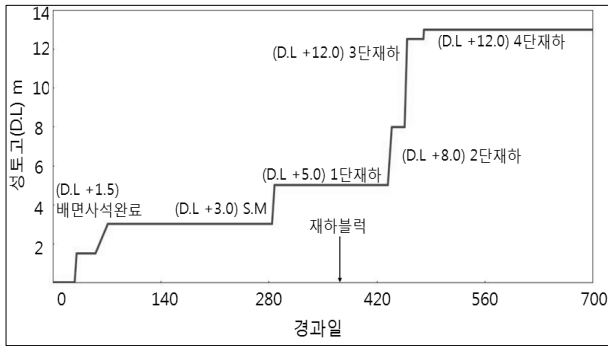


그림 7. 성토 단계

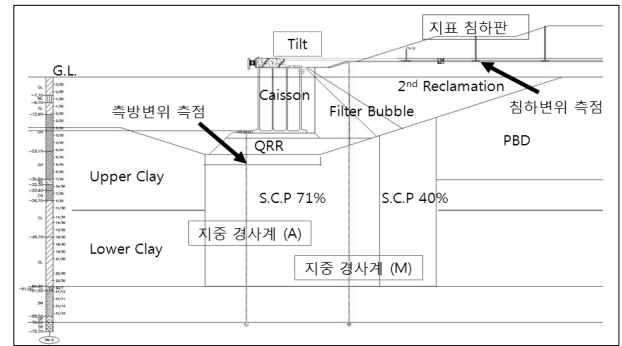


그림 8. C 단면 계측기 설치 위치도

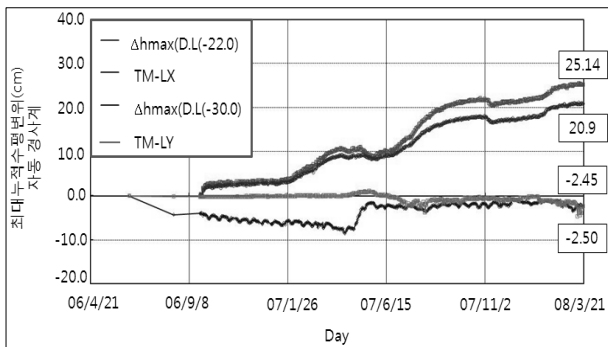


그림 9. C 단면 자동 경사계 계측결과 그래프

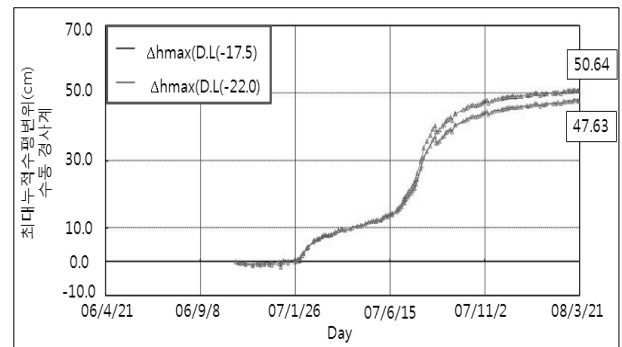


그림 10. C 단면 수동 경사계 계측결과 그래프

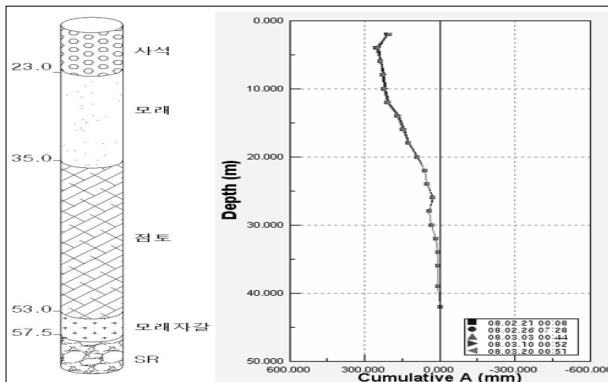


그림 11. C 단면 자동 경사계 매설도

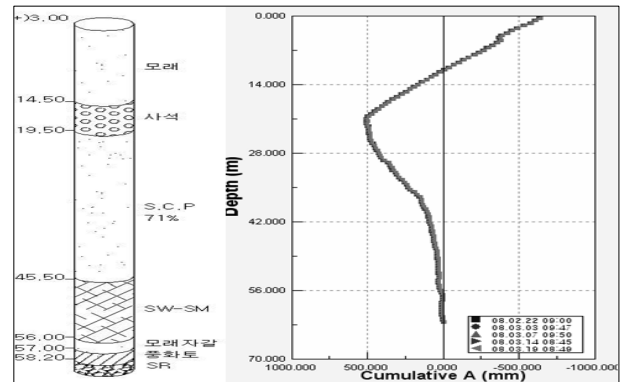


그림 12. C 단면 수동 경사계 매설도

표 2. 대표 C단면의 계측항목별 측정 결과

계측항목	설치목적	설치위치	초기치측정일자	최종측정치(cm)	비고
지중경사계 1	케이슨 전면 측방변위측정	케이슨 전면(S.C.P.71%)	06.09.23	25.14	+해측 -육측 (침하)
지중경사계 2	케이슨 후면 측방변위측정	케이슨 후면(S.C.P.71%)	06.10.22	20.90	
Tiltmeter 1	케이슨 거동 측정	케이슨 상단 1	06.06.15	-2.50	
지표침하관	성토에 따른 지반 침하	케이슨 배후 여성토 중앙	06.12.08	-257.5	

*그림 8에 나타난 지중경사계(A)는 자동경사계를 나타낸 것이며, 표 2에서는 지중경사계 1로 나타내었다.

*그림 8에 나타난 지중경사계(M)은 수동경사계를 나타낸 것이며, 표 2에서는 지중경사계 2로 나타내었다.

표 3. 해석을 위한 지반재료의 기본 물성치

토층명	γ_{dry} (t/m^3)	γ_{sat} (t/m^3)	K_v (cm/sec)	E' (t/m^2)	ν'	C_{un} (t/m^2)	ϕ (degree)
상부연약 점토층(S1,S2)	1.1	1.7	3.156e-8	1170	0.2	5.5	0
하부연약 점토층(S3)	1.2	1.7	1.151e-8	1128	0.2	8.3	0
S.C.P.(71%)	2.0	2.0	1e-3	6000	0.3	0	30
S.C.P.(40%)	2.0	2.0	1e-3	3000	0.3	0	28
Q.R.R	1.6	2	1e-3	2700	0.3	0	40
콘크리트	2.5	2.5	1e-9	2600000	0.25	10	35
사석	1.9	2	1e-3	2700	0.3	0	40
매립토(Sand)	1.4	1.9	1e-3	600	0.3	0	28
PBD	1.7	2	1e-3	3000	0.3	0.1	30

동·수동 경사계 매설도는 다음 그림 7~12에 나타내었다.

대표단면 C에서 시공단계별 측방변위 계측결과는 그림 9, 10과 같다. 경사계의 경우 케이슨 속채움 완료 후 설치하여 06년 9월 23일부터 자동계측을 실시하였다. 최대 수평 변위량은 사석층 하부 D.L (-)22.0m에서 해측으로 25.14cm 발생하였고, S.C.P. 기초 중앙부 D.L (-)30.0m에서 해측으로 20.90cm 발생하였다. 케이슨 기울기 변화는 뒷채움 및 샌드 매트 시공 시 지반침하가 우세해지면서 육측으로 기울어지는 경향을 보였으며 이후 케이슨 상부 재하블록 재하시점부터 편재하중(단계성토) 증가에 의한 영향으로 케이슨의 거동방향이 육측에서 해측으로 변경되는 것을 관측할 수 있다. 그림 8에서 나타난 각 계측기 위치에서 각 측정값을 구하여 표 2에 정리하였다.

4. 수치해석

4.1 해석조건

수치해석은 2차원 지반공학 전용 유한요소해석 프로그램인 Plaxis를 이용하였다. Plaxis는 지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀점토 그리고 사질토 및 암반지반에서도 적용이 가능한 다양한 재료모형을 갖고 있다. 연약지반에서 강하다는 점은 매우 작은 전단강도의 지반에 굴착 또는 성토하는 경우에 지반의 붕괴를 포함한 변형해석이 가능할 뿐만 아니

표 4. 해석 시 적용한 시공 단계

단 계	내 용	일 수(day)	누 계(day)
1 단 계	배면 사석 D.L (+) 1.5m	1	1
2 단 계	방 치 1	23	24
3 단 계	S.M D.L (+) 1.5m	16	40
4 단 계	방 치 2	213	253
5 단 계	1단 재하 D.L (+) 1.5m	4	257
6 단 계	방 치 3	146	403
7 단 계	2단 재하 D.L (+) 1.5m	6	409
8 단 계	방 치 4	16	425
9 단 계	3단 재하 D.L (+) 1.5m	4	429
10 단 계	방 치 5	20	449
11 단 계	4단 재하 D.L (+) 1.5m	2	451
12 단 계	방 치 6	226	677

라 압밀침하 및 점성침하 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있다. 해석 시 더욱 정확한 해석 결과를 얻기 위하여 15 절점 요소를 선택하였으며, 모델링 시에 지반재료의 성질에 따라 해석방법의 차이가 있기 때문에 Mohr-Coulomb mode 과 점토층은 Soft Soil model로 구분하여 프로그램을 수행 하였다. 본 해석에 적용한 지반 물성치는 보고서와 일반적으로 수치해석상에 쓰이는 값들을 참고하여 수치해석을 위한 지반 물성치 보정을 파라미터 스터디를 통하여 산정하였으며, 수정된 S.C.P. 구간의 물성치와 그 외 지반재료 물성치는 표 3에 나타내었다.

연구 대상 지역의 케이슨 시공의 경우 연약지반상의 공

사이며, 이는 장시간 동안 많은 변위가 발생하여 케이슨 시공 시에나 시공 후에 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 실제 시공에서는 연약 지반의 강도를 증가시키기 위한 다양한 지반 개량 공법이 적용되고, 배수재를 통한 압밀 기간을 단축시키는 등의 대책을 마련하였다. 본 수치해석에서는 S.C.P. 등으로 지반이 개량된 물성치(표 3)를 사용하고 표 4에 나타난 시공 단계에서는 보고서 및 계측 자료를 참고한 내용이며, 프로그램 해석 시에는 계측기의 설치 시점인 4단계인 방치 2에서 약 150일이 지난 시점부터 시공단계를 적용하였다.

4.2 해석 결과

앞에서 언급한 지반 물성치와 시공 단계를 따라 대표 단면 C를 해석하였다. 모델링 단계에서 최대한 본 도면의 형상을 맞추었으나 프로그램 특성상 부분적으로 단순화하였으며, 측정 선정은 지중 경사계1과 지표 침하판이 설치되어 있는 위치(그림 8)의 변위를 분석하였다. 수치해석 후 해석 결과 데이터를 실측 데이터와 비교하였다.

C 단면 해석 결과로서 그림 11에 표시 되어 있는 지중 경사계가 위치한 케이슨 전면부의 측방 최대 변위 값은 31.6cm로 실측값인 25.1cm에 비해 6.5cm 정도의 작은 차이가 있었다. 반면에 침하판이 위치한 케이슨 배후 여성토부 중앙의

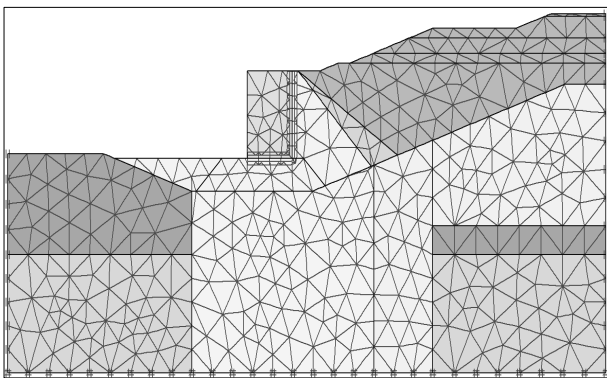


그림 13. C단면 Mesh 구성

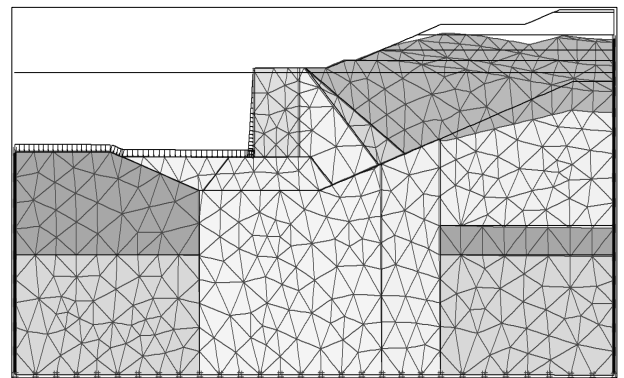


그림 14. Deformed Mesh

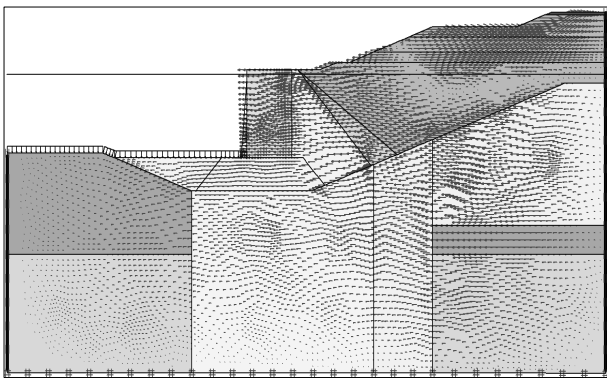


그림 15. Horizontal displacements

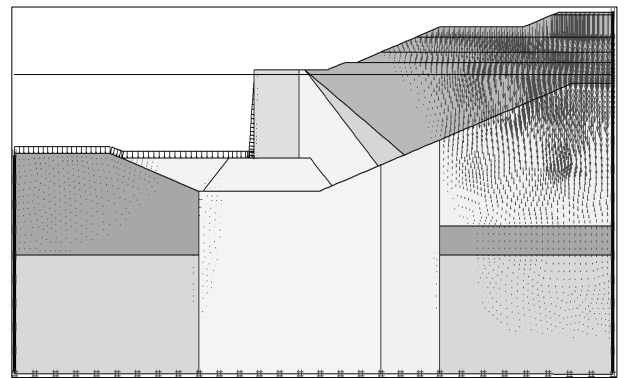


그림 16. Vertical displacements

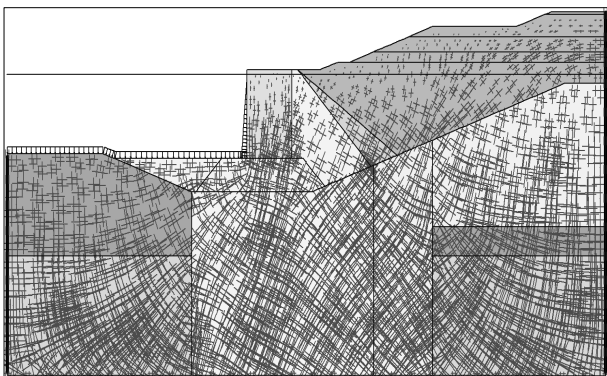


그림 17. Total stresses

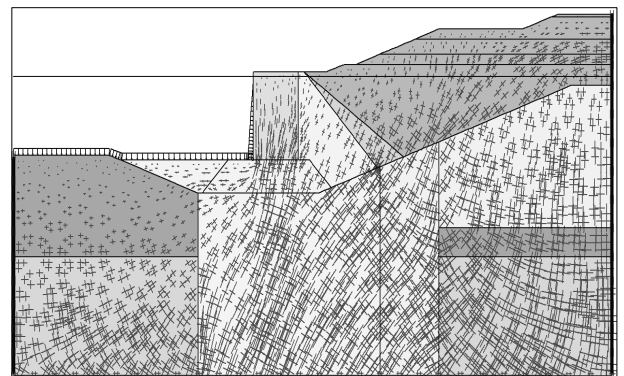


그림 18. Effective stresses

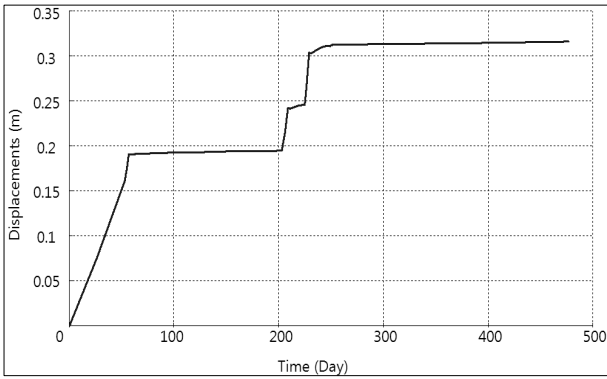


그림 19. 시간에 따른 측방 변위

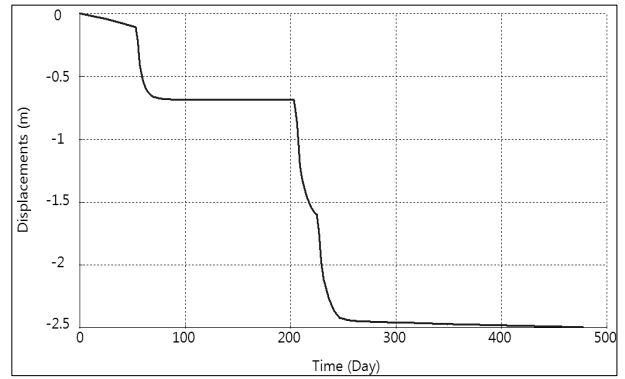


그림 20. 시간에 따른 침하 변위

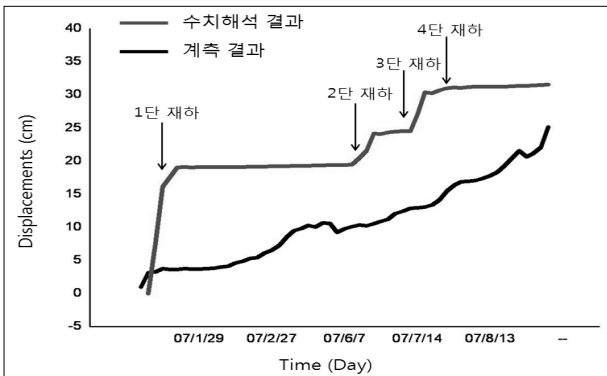


그림 21. 시간에 따른 측방 변위 비교

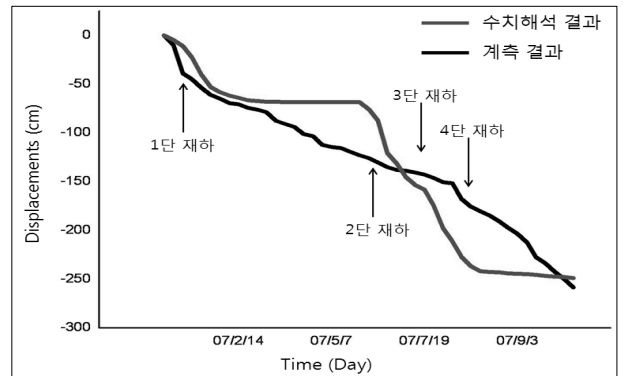


그림 22. 시간에 따른 침하 변위 비교

표 5. C 단면 해석 결과와 실측치 비교

Horizontal displacements		Vertical displacements	
최종 실측치(cm)	최종 Plaxis 값(cm)	최종 실측치(cm)	최종 Plaxis 값(cm)
25.1	31.6	257.5	249.1

침하 변위 값을 비교해 본 결과 실측에서는 257.5cm 침하가 발생하였고, 수치해석에서의 침하는 249.1cm의 침하가 발생하여 8.4cm 정도의 차이가 나타났다. 그림 15, 16에서는 해석단면의 수평 변위와 수직변위의 분포도를 나타내었으며, 그림 17, 18에서는 해석단면의 응력 분포도를 나타내었고 각 변위와 응력을 약 5배로 크게 나타내어 시각화하였다. 그림 19, 20에서는 수치해석 시 시간에 따른 측방 변위 및 침하변위를 나타내었는데, 성토 단계에서 변위가 크다는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 마지막으로 그림 21, 22에는 시간에 따른 변위를 실측 데이터와 수치해석 결과 값을 비교하여 그래프로 나타내었다. 수치해석 상 그래프는 성토단계와 방치단계에서 확연한 차이가 나타난 반면, 계측 그래프는 완만하게 변위가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 전체적인 변위 양상은 유사한 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구는 연약지반 상에 시공되는 구조물로 인한 측방 변위 및 침하량을 유한요소해석방법 프로그램인 Plaxis를 이용하여 수치해석 후, 부산 000공사의 지반보고서 및 현장 실측 데이터와 비교, 분석하였다.

- (1) 해석 단면 C인 케이스 전면부의 측방변위는 수치해석 결과가 실측치보다 대체로 크게 나타났으며, 변화 양상에서 해석 값은 단계 성토에 따라 단계적으로 증가하였으나 실측값은 지속적인 증가를 나타내었다. 이는 실측값의 경우 S.C.P. 71%로 개량된 후 케이스가 거치되고 지중경사계가 설치되어 케이스 배후의 여성토의 영향이 실제보다는 작게 영향을 미친 것으로 판단되며, 지중경사계의 계측 시점이 여성토의 단계 성토 직전에 실시되어 이미 변위 발생된 것과 계측 측정과 수치해석 상 측정점의 위치 차이에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 수

치해석 결과에서 측방변위가 해측으로 향하고 있는 것을 그림 15를 통하여 확인할 수 있으며 이는 실측과 동일한 결과를 나타내었다.

- (2) 수치해석 결과 케이슨 배면 단계 성토를 실시한 지점에서 측방변위 및 침하가 주로 발생하였다. 이와 같은 현상은 수치해석 시 위에서 언급한 케이슨 배후의 여성토 외 사석마운드, 지반개량, 케이슨 거치 등의 시공이 완료된 시점 이후를 수치해석 하였기 때문에 단계 성토 이전에 발생한 변위는 나타나지 않은 것으로 판단되었다.
- (3) 단계 성토에 따른 침하량 변화 양상도 계측치는 변위가 완만하게 증가하는 반면에 해석 값은 각 단계 성토에 따른 변위가 확연한 차이를 나타내었지만 변화량은 비슷한 값을 나타내었다. 이 또한 수치해석 시 제외된 시공단계에 의한 것과 측점의 위치 차이에 의한 것으로 판단된다.
- (4) 수치해석 값과 현장 계측 데이터를 기존의 연구에서 Tavenas 등(1979)이 제시한 식인 $\Delta y = (0.18 \pm 0.09) \Delta s$ 에 대입해 본 결과 실측치의 범위는 $23.175 < \Delta y < 69.525$ 이며, 수치해석 값의 범위는 $22.419 < \Delta y < 67.257$ 으로 측정 위치의 차이는 있으나 두 값 모두 제안한 식에 만족한 결과를 얻었다.
- (5) 수치해석을 통하여 정확한 값은 얻기 어려우나, 변위 양상과 해석 값에서 어느 정도 유사한 값을 얻을 수 있기 때문에 수치해석과 현장 계측을 병행하여 고려하면 더욱 합리적인 측방 변위 및 침하를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 초장대교량 사업의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김명학, 윤민승, 이상욱, 이채건, 한병원(2010), 대심도 연약지반상에 건설되는 케이슨의 측방변형 사례 연구, *가을 학술 발표회 논문집*, 한국지반공학학회, pp. 940~950.
2. 신은철, 류인기, 김종인(2005), 연약지반상에 축조된 호안의 측방유동에 따른 안벽말뚝의 변위, *봄 학술 발표회 논문집*, 한국지반공학학회, pp. 932~939.
3. 이광우, 조삼덕, 홍원표(2009), 성토하부 연약지반의 변형거동에 관한 모형실험, *한국지반공학학회 논문집*, Vol. 25, No. 5, pp. 17~28.
4. 이재훈, 홍성영(1995), 지반의 측방유동, *도서출판 건설도서*, pp. 10~61.
5. 추윤식, 정영훈, 황세관, 정충기(2009), 연약 지반 지역의 항만 시공단계에 따른 케이슨 변위 거동, *봄 학술 발표회 논문집*, 한국지반공학학회, pp. 119~209.
6. 홍원표, 이광우, 조삼덕(2008), 연약지반에 설치된 안벽구조물의 측방이동 평가, *한국지반공학학회 논문집*, Vol. 24, No. 11, pp. 5~16.
7. Leroueil, S., Magnan, J.P. and Tavenas, F.(1990), Embankments on Soft Clays, *Ellis Horwood*, N.Y., pp. 147~176; 189~195.

(접수일: 2010. 12. 15 심사일: 2011. 1. 5 심사완료일: 2011. 3. 11)