

연약지반 호안의 측방유동에 따른 안벽 말뚝의 거동

Behavior of Quaywall Pile by Lateral Movement of Revetment on Soft Ground

신은철* · 박정준† · 류인기**

Shin, Eunchul* · Park, Jeongjun† · Ryu, Ingi**

Abstract

Recently, the lateral displacement of the passive piles which are installed under the revetment on the soft ground is very important during the land reclamation work along the coastal line. The revetment on the soft clay develops the lateral displacement of ground when the revetment loading exceeds a certain limit. The lateral displacement of ground causes an excessive deformation of underground structure itself and develops lateral earth pressure against the pile foundation. The subject of study is to investigate the lateral displacement of pile foundation during the construction of container terminal at the ○○○○ port in Incheon. The displacement of pile and the vertical settlement were measured in the field and finite element method(FEM) analysis for each construction sequence was performed using AFFIMEX(Ver 3.4). From the comparison of the results from field measurement and the finite element analysis, the settlement of the revetment has already occurred at the time of field measurements. Since then, the noticeable lateral displacement of piles and settlement were occurred during the filling of dredged soil inside the revetment dredging and reclaiming work. After completing filling, the lateral displacement and field settlement were reduced remarkably. Generally, the results from the finite element analysis show larger than those from the measurement.

Keywords : Lateral displacement, Passive piles, Soft ground, Revetment

요 지

최근 우리나라는 연약지반으로 구성된 서해안과 남해안의 해안매립지역에 도로, 신항 등 건설사업 진행시 수평하중이 말뚝두부에 작용할 경우, 지반은 부동의 상태에서 말뚝의 이동에 저항하여 작용하는 연약지반의 측방유동과 수동말뚝에 대한 문제점이 종종 논의되고 있다. 본 연구에서는 인천 ○○○○ 부두 건설공사 과정에서 발생하는 측방유동에 따른 구조물 및 지반의 변형을 분석하기 위하여 현장계측을 실시하였고, 유한요소 해석 프로그램인 AFFIMEX Version 3.4를 이용하여 현장계측 결과와 비교분석하였다. 수치해석에 의한 변위 결과는 시공단계별로 초기응력상태, 말뚝항타, 모래치환, 사석층설치, 준설매립, 배수층설치, 상재하중재하, 상재하중재하 및 제하 후 방치 등으로 구분하여 구조물과 기초지반에 발생된 연직 및 측방 변위를 분석하였다. 현장계측과 수치해석 결과, 안벽호안의 침하량은 계측이 시작된 시점으로부터는 이미 많은 침하가 발생된 것으로 나타났으며, 계측일로부터는 준설매립에 의한 성토작업을 개시하는 시점에서 가장 많은 양의 침하가 발생되었고, 성토가 완료된 시점으로부터 침하량은 수렴하였다. 전체적으로 수치해석에 의한 결과치가 계측을 통한 결과치보다 크게 나타났다.

주요어 : 측방변위, 수동말뚝, 연약지반, 호안

* 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수

† 정회원, 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정수료 (E-mail : frostjun@incheon.ac.kr)

** 비회원, (주) 수성엔지니어링 토질부 사원

1. 서론

연약지반상에 항만호안구조물을 설치한 후 뒤 채움이나 준설매립을 실시할 경우 그로 인한 하중이 연약지반에 편재하중으로 작용하게 되면 지반내 과잉간극수압의 증가로 인하여 측방유동이 발생하게 된다(Peck, 1974; Bjerrum, 1972). 이러한 연약지반의 측방유동은 지반내 기초구조물로 설치되어 있는 말뚝에 변위를 유발시켜 구조물 안정에 문제를 유발시킨다(De Beer, 1972; Tschhotarioff, 1973). 또한, 준설매립시 호안은 자체적으로 매우 큰 간극비와 높은 함수비를 가지고 있는 준설매립토에 의한 측방토압, 간극수압의 변화에 의해 호안제방의 측방이동으로 구조물 기초의 안정성 뿐만아니라 지표면 융기가 발생하여 활동과피가 유도되어 구조물 자체 안정성에도 큰 문제를 발생시킨다(서정주, 2003; 이진형, 2003 ; 홍원표, 1994).

Tavenas(1979)는 제방축조와 축조후의 시공단계에 따른 연약지반의 응력경로와 측방변위-연직변위의 관계를 그림 1과 같이 나타내었다. 제방 축조 중에 발생하는 응력의 경로는 $\overline{OP'A'}$ 를 따라서 진행되며, 초기 지반상태는 \overline{OP} 을 따라 정지상태에 가까운 안정한 상태를 나타낸다. 이때는 지반에 발생하고 있는 모든 변위는 매우

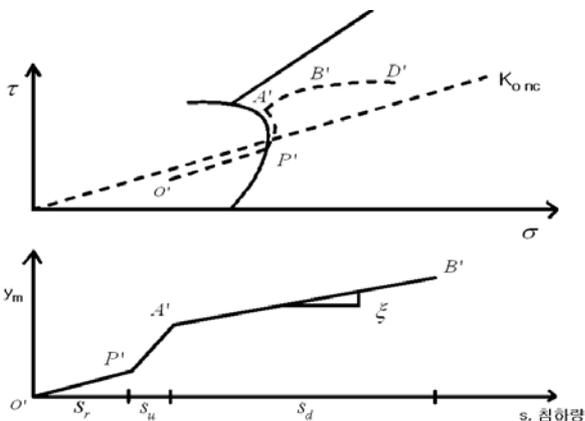


그림 1. 하중에 따른 응력경로와 측방-연직변위의 관계

작게 발생하고 연직변위보다는 측방변위가 상대적으로 더 작게 발생된다. 제방하중에 의하여 $\overline{PA'}$ 을 따라 기초점토지반의 응력상태가 선형압밀하중을 지나서 항복점에 도달될 때 연직변위의 증가와 함께 측방변위도 증가하게 된다. 제방축조가 완료되면 지반은 압밀이 진행되면서 지반의 유효응력은 $\overline{A'B'}$ 선을 따라 증가되면서 측방변위는 압밀침하량에 비해 상대적으로 작은 비율로 증가한다.

Tavenas(1979)는 제방의 실측자료를 바탕으로 그림 2에 나타난 바와 같이 제방시공 중에 발생하는 침하량(s)과 측방변위(y_m)의 관계식을 제시하였다. 즉, 실제 지반에서는 이상화된 비배수 조건이 되지 않으므로 성토단계에 따라 다음과 같이 식 (1)과 식 (2)로 나타내었다.

$$1\text{단계 성토} : \Delta y_m = (0.18 \pm 0.09) \Delta s \quad (1)$$

$$2\text{단계 성토} : \Delta y_m = (0.91 \pm 0.2) \Delta s \quad (2)$$

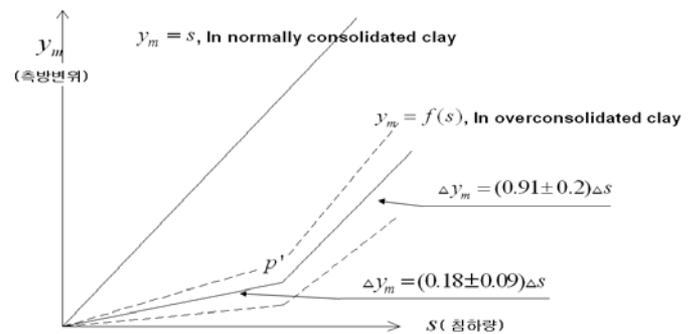


그림 2. 성토하중에 따른 침하량과 측방변위의 상관도

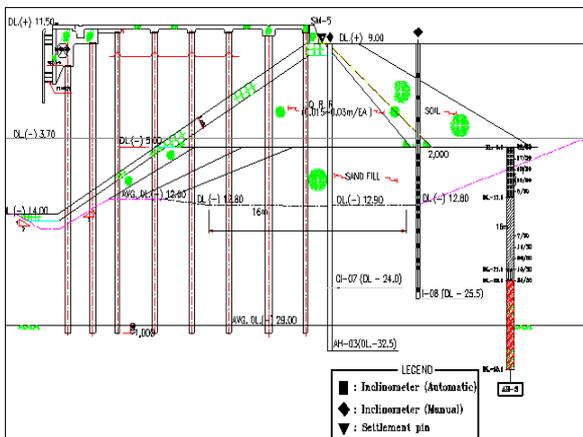
따라서, 본 연구에서는 인천 ○○○부두 건설공사 중, 시공과정에서 발생하는 호안제방 지반의 변형 및 호안외부에 설치된 구조물 말뚝의 수평변위를 현장계측과 수치해석을 통하여 시공 단계별로 비교분석하였다. 수치해석은 범용 지반해석 유한요소 프로그램인 AFIMEX Version

3.4를 사용하여 시공단계별로 초기응력상태, 말뚝항타, 모래치환, 사석층설치, 콘크리트블럭설치, 준설매립, 배수층설치, 상재하중재하, 상재하중재하 및 제하 후 방치 등으로 구분하여 구조물 및 기초지반에 나타난 침하와 측방 변위를 분석하였다.

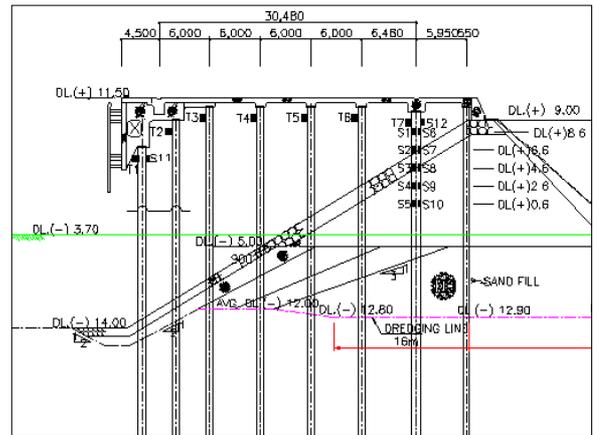
2. 현장계측

2.1 계측개요

본 연구에서는 호안제체의 침하 및 측방 변위, 잔교 강관말뚝의 기울기 등을 계측하였고, 안벽 호안지역에 대한 계측은 호안제체와 안벽말뚝에 설치된 계측사항으로 분류하여 수행하였다. 호안제체에 설치된 계측기는 호안 축조 후 준설매립 및 상재하중 재하시 호안 제체의 측방변위를 측정하기 위한 경사계와 제체의 침하를 측정하기 위한 침하핀을 설치하여 계측하였다. 안벽말뚝에는 호안 축조 후 준설매립시 안벽 말뚝의 측방 변위에 대한 안정성을 판단하기 위하여 기울기계 등의 계측기를 설치하여 자료를 수집하였다. 그림 3은 안벽호안지역과 안벽말뚝의 계측 단면을 나타낸 것이다.



(a) 안벽 호안지역



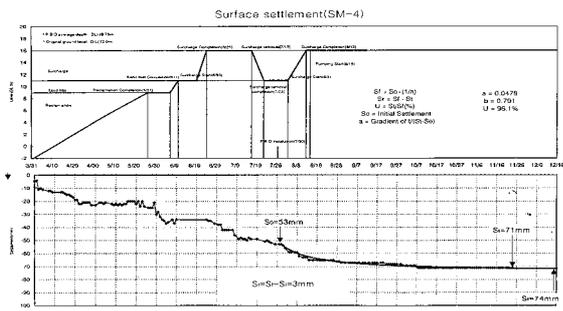
(b) 안벽 말뚝
그림 3. 계측단면도

2.2 계측결과

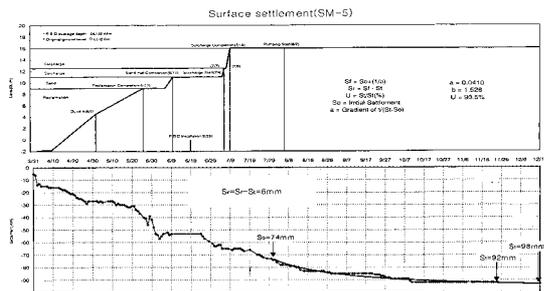
2.2.1 안벽호안지역

호안제체의 침하는 실측데이터를 이용한 장래 침하량 추정 방법인 쌍곡선법을 이용하였다. 쌍곡선법은 침하의 평균속도가 쌍곡선적으로 감소한다는 가정하에 초기의 실측 침하량으로 장래 침하량을 예측하는 방법으로서 그림 4와 같이 계측 기간내에 시공단계별 안벽호안의 지표침하 실측데이터를 바탕으로 쌍곡선법에 의한 결과를 나타내었다. 초기 준설매립기간인 2개월동안 발생한 지반 침하량은 지속적으로 증가한 후 샌드 매트 포설과 압성토가 재하되면서 침하량의 증가율이 급격하게 증가하였고, 압성토가 완료된 후 30일이 경과된 이후에는 지반침하량이 미소하게 발생되었다. 표 1은 쌍곡선법으로 분석한 최종침하량의 예측치와 잔류침하량을 나타낸 것이다.

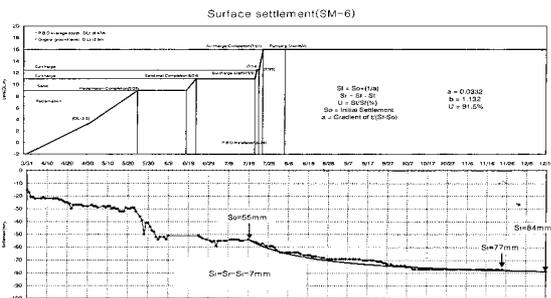
지중측방변위는 시공단계별로 1차 성토완료시 급격히 증가하여 최종 성토 완료에 따라 많은 양의 측방변위가 발생하였고, 성토완료 후에는 거의 일어나지 않았다. 측방변위의 분포는 모래치환 하부의 연약점토구간에서 가장 큰 급경사를



(a) 지표침하(SM-4)



(b) 지표침하(SM-5)



(c) 지표침하(SM-6)

그림 4. 호안제체의 시공단계별 지표침하

표 1. 호안제체의 침하량

계측사항 계측지점	계측 시작일	초기 지반고 [DL(+)]m	지반고 [DL(+)]m (03/11/29)	계측 침하량 (mm)	예상 침하량 (mm)
SM-4	03/3/13	9.060	10.942	71	74
SM-5	03/3/13	9.028	10.904	92	98
SM-6	03/3/13	9.092	10.973	77	84

이루며 발생하였다. 표 2는 계측시작일로부터 성토제하시까지 지중측방변위량의 최대값을 나타낸 것이고, 그림 5는 CL-7 지점에서 지중측방

변위의 분포를 나타낸 것이다.

표 2. 호안제체의 측방변위량

계측사항 계측 지점	계측 단면	계측 시작일	최종 변위량 (mm)
CL-3	STA. No. 3+0.43	03/4/2	72
CL-7	STA. No. 7+10.83	03/4/3	80
CL-11	STA. No. 12+14.0	03/4/7	68

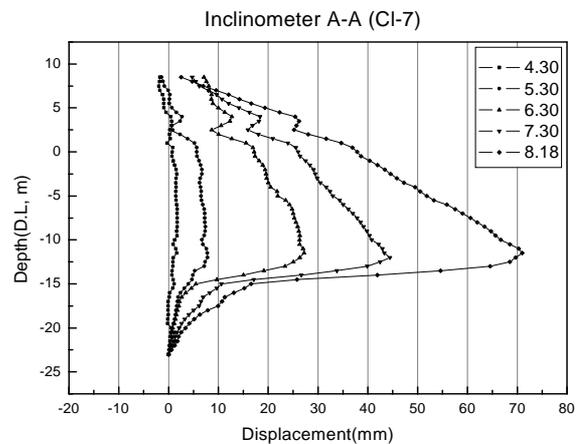


그림 5. 호안제체의 지중측방변위(CL-7)

2.2.2 안벽말뚝

말뚝기울기계는 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 해측방향으로 T1부터 T7까지 1EA씩 설치하였으며, 각각 설치높이를 보면, T1은 DL(+) $5.1m$, T2~T4는 DL(+) $10.6m$, T6은 DL(+) $10.1m$ 위치에 설치하였다. 표 3은 말뚝에 설치된 기울기계로 계측된 말뚝의 기울기값이다.

표 3. 말뚝의 기울기

(단위 : °)

말뚝번호 계측일자	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
03/10/31	0.061	0.209	0.068	0.032	0.060	-0.004	-0.283
03/11/30	0.07	0.211	0.046	0.048	0.061	-0.009	-0.277

(+) 내측, (-) 해측

2.2.3 연직침하와 측방변위의 상관관계

호안제체의 연직침하는 성토재하시부터 계속 증가하여 성토완료 후 빠르게 수렴하였다. 한편, 측방변위는 성토초기시에는 크게 발생하지 않았지만 성토고가 높아짐에 따라 급격히 선형 증가하였다. 그림 6은 시공단계에 따른 호안제체의 연직침하와 측방변위와의 관계를 나타낸 것으로서 Tavenas (1979)가 제시한 바와 같이 호안제체의 연약지반은 과압밀 점토의 특성을 나타내었다. 단계별로는 1차 성토에서 $\Delta y = 0.13\Delta s$, 2차 성토에서 $\Delta y = 1.234\Delta s$, 성토완료 후에 다시 수렴하는 것으로 나타났다. 현장지반강도는 1차 성토에 의한 연직하중은 어느 정도 수용하나 2차 성토시에는 하중 증가로 인하여 현장지반의 연직침하가 측방유동에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

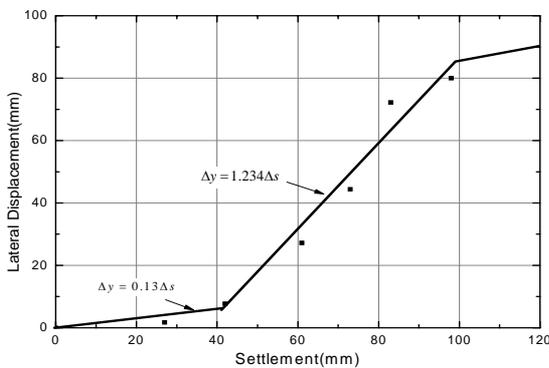


그림 6. 연직침하와 측방변위의 상관관계

3. 수치해석

해석시 적용지반은 실트층과 점토층으로 구성된 해성 퇴적지반으로 연약지반이 분포되어 있는 지역이다. 또한, 시공단계에 따라 호안 기초 부분의 연약지반을 사질토로 부분치환 한 후, 사석 제체를 조성하고 상부를 콘크리트 블록으로 호안 구조물을 형성하였다. 즉, 호안의 배면

으로 준설매립공사가 진행됨에 따라 잔교의 말뚝기초의 변위를 분석하기 위하여 수치해석을 통한 측방유동 해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 범용 지반해석 유한요소 프로그램인 AFIMEX Version 3.4에 내장되어 있는 압밀전용 해석 솔버인 DACSAR를 사용하였다.

3.1 입력자료

3.1.1 기본 물성치

본 수치해석 검토에서 적용한 지반재료의 기본 물성치는 지반조사 보고서(삼성물산, 2000)를 참고로 하여 실내 및 현장실험을 바탕으로 사질토와 점성토로 구분하여 실트, 점토, 풍화토, 풍화암의 토질정수 값을 각각 산정하였다. 준설매립토, 사석부, 콘크리트 블록, 모래치환재의 물성치는 일반적으로 수치해석상에 쓰이는 값을 참고로 하여 산정하여 다음 표 4와 같이 해석시 지반재료의 기본 물성치를 나타내었다.

표 4. 해석 지반재료의 기본 물성치

토질정수 토질종류	단위중량 γ_t (tf/m^3)	포아송비 ν	탄성계수 E_s (tf/m^2)	내부 마찰각 ϕ ($^\circ$)	점착력 c (tf/m^2)	
준설매립토	1.92	0.49	3,000	25	-	
사석부	2.0	0.25	5,000	40	2.0	
콘크리트 블록	2.3	0.2	2,000,000	50	10	
모래치환부	1.9	0.33	3,500	30	-	
원 지 반	실트	1.95	0.498	5,400	25	2.5
	점토층	1.8	0.494	-	-	3.0
	풍화토	2.0	0.489	39,000	33	-
	풍화암	2.1	0.481	150,000	35	1.0

3.1.2 적용 물성치

본 해석에서는 각각의 지반특성에 따라 탄성지반과 점탄소성 지반으로 구분하여 해석을 수

행하였다. 각각 지반특성에 따른 수치해석입력값은 표 4에 제시한 해석 지반재료의 기본 물성치와 지반조사보고서(삼성물산, 2000)를 참고로 하여 λ , μ , 유효 상재압, 원위치 토압계수, 수평 및 연직 투수계수, 소성지수, 압축지수, 초기 간극비 등을 산정하였다. 산정된 수치해석 입력값은 표 5와 표 6에 각각 나타내었다. 또한, 구조물 요소인 보요소를 사용한 말뚝의 수치해석 입력값은 설계도서를 참고로 하여 말뚝 단면에 따른 탄성계수, 단면적, 이차단면 모멘트 등을 산정하였다. 산정된 수치해석 입력값은 표 7에 나타내었다.

일반적으로 수치해석에 의한 지반 구조물 응

력-변형해석은 대상 지반 및 구조물의 시공단계 및 기간과 밀접한 관계를 갖는다. 특히, 연약지반의 압밀침하 및 측방유동 등은 상재하중과 존치기간이 중요한 영향요소로 작용한다. 따라서, 본 검토에서는 해석의 정확도 및 타당성을 높이기 위하여 해석 과정의 모델화를 현장 시공단계 및 기간과 동일하게 적용하였다. 전체 시공단계는 초기응력상태, 말뚝향타, 모래치환, 사석층설치, 콘크리트블럭설치, 준설매립, 배수층설치, 상재하중재하, 상재하중재하 후 방치 및 상재하중재하 후 방치 등 총 15단계로 해석과정을 모델화하였다.

표 5. 탄성 지반의 수치해석 입력값

토질정수 토질종류	λ (tf/m^2)	μ (tf/m^2)	σ_{vi}' (tf/m^2)	토압계수 K_o	수평투수계수 (m/day)	연직투수계수 (m/day)	초기간극비 e_o
성토재	2189	1128	1	0.5	0.36	0.36	0.5
준설매립토	54262	1107	1	0.53	0.026	0.026	0.9
콘크리트	555556	833333	1	0.23	1×10^{-8}	1×10^{-8}	0.2
산토	876	451	1	0.58	0.003	0.003	0.4
배수층	2189	1128	1	0.5	34.56	34.56	0.6
필터층	2408	1241	1	0.36	0.003	0.003	0.4
치환모래	2554	1316	1	0.5	0.036	0.036	0.5
사석층	1320	1320	1	0.36	43.2	43.2	0.5
자갈질모래	1000	1000	1	0.43	4.32	4.32	0.5
실트	448798	1802	4.75	0.5	0.00008	0.00008	0.9
풍화토	582170	13096	18.45	0.46	0.00249	0.001245	0.6
풍화암	1282000	50641	26.95	0.43	0.0003	0.0015	0.5

표 6. 점탄소성지반의 수치해석 입력값

토질정수 토질종류	소성 지수 PI	압축 지수 C_c	선행 압밀하중 σ_{vo}	유효 상재압 σ_{vi}'	초기 간극비 e_o	일차압밀에 필요한 시간 t_c	수평 투수계수 (m/day)	연직 투수계수 (m/day)
점토	15	0.244	9.4	14.85	0.925	8179	0.0000864	0.0000864

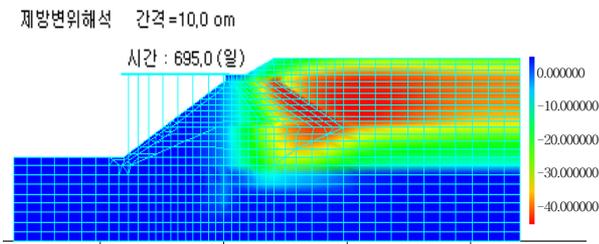
표 7. 강관 말뚝의 수치해석 입력값

물성치 말뚝 단면	탄성계수(tf/m^2)	단면적(m^2)	단면이차모멘트(m^4)
$\phi 800 \times 14t$	21,000,000	0.0351	0.00281
$\phi 1,100 \times 20t$	21,000,000	0.0691	0.0105

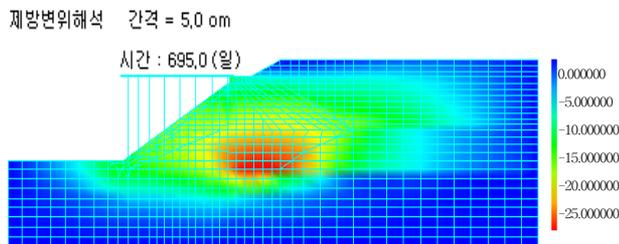
3.2 해석 결과

3.2.1 제체의 연직 및 측방변위

수치해석에 의한 변위 결과는 상기에 기술한 바와 같이 시공단계별로 구조물 및 기초지반에 나타난 연직변위 및 측방변위를 분석하였다. 그림 7은 시공단계별 연직변위와 측방변위 결과를 나타낸 것으로서 연직변위는 성토중앙부분인 준설매립구간에서 대부분 발생하였으며, 측방변위는 성토 끝부분에 해당하는 호안 제체부분에서 대부분 일어나는 경향을 나타내었다.



(a) 최종 연직 변위도



(b) 최종 측방 변위도

그림 7. 제체의 최종 변위도

3.2.2 안벽호안지역

그림 8은 수치해석결과에 의한 제체의 총침하 곡선으로, 제체의 침하량은 대부분이 제체의 시공과정에서 발생하는 것을 나타내었다. 또한, 제체의 초기응력상태부터 성토를 제하한 시공단계까지의 침하량은 100~160mm로 나타났으며, 계측시점인 준설매립이 시작된 후부터의 침하량은 40~70mm로 나타났다.

그림 9는 현장에 설치된 경사계 지점의 시공단계별 측방변위분포도를 나타낸 것이다. 측방변위의 분포는 모래치환 하부의 연약점토구간인 15~23.5m에서 가장 급경사를 이루며 발생되었다. 시공단계별로는 호안제체가 시공되는 485일부터 서서히 증가하여 준설매립이 시작되는 515일부터 급격한 변위가 발생하여 성토재하가 이루어졌을 때 가장 많은 변위가 발생되었다.

그림 10은 시공단계별 측방 변위 분포도에서 최대 측방변위가 일어난 지점에 시공단계별 간극수압곡선을 나타낸 것이다. 측방변위는 준설매립이 마무리 되는 시점으로부터 상재하중이 최대로 가해져 간극수압이 순간적으로 증가되는 500~600일 경과 후 점토지반이 소성상태가 되어 측방 변위가 가장 크게 나타났다. 그 후 상재하중이 방치된 후에 서서히 간극수압의 증가폭이 감소되고, 상재하중 제거 후 소산되는 것을 알 수 있다.

그림 11은 Tavenas(1979)가 제안한 연직침하와 측방변위의 관계를 나타낸 것이다. 연직침하는 시공단계별로 나눌 때 시공초기에 대부분 발생되지만, 측방변위는 초기보다 중간단계에서 많이 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 초기단계에서는 $\Delta y = 0.22\Delta s$, 중간단계에서는 $\Delta y = 1.43\Delta s$ 으로 상관관계식이 도출되었다.

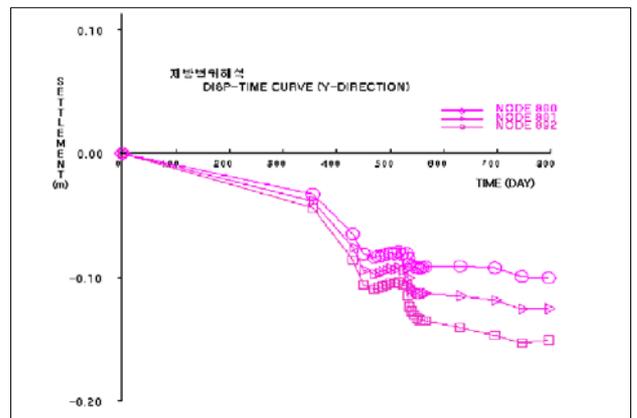


그림 8. 총 침하곡선

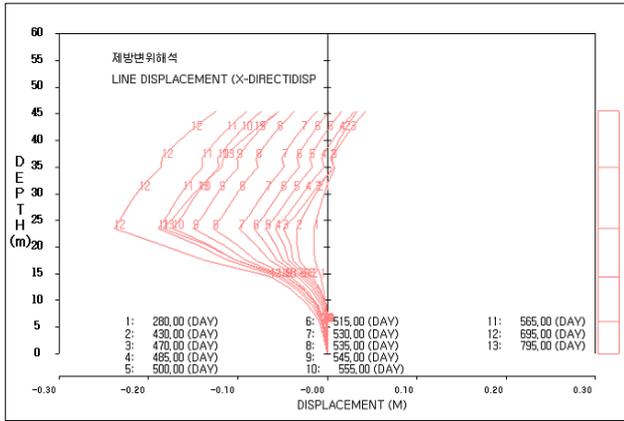


그림 9. 시공단계별 측방변위 분포도

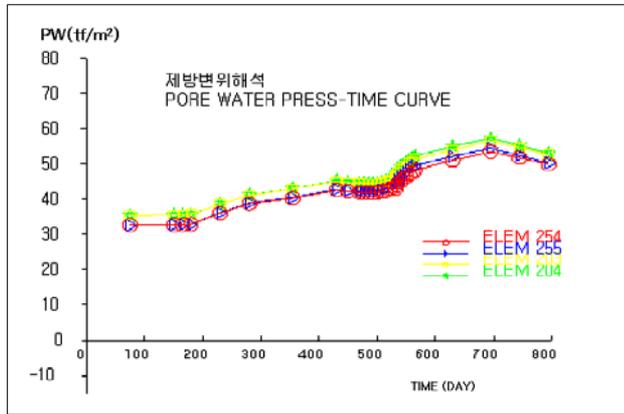


그림 10. 시공단계별 간극수압곡선

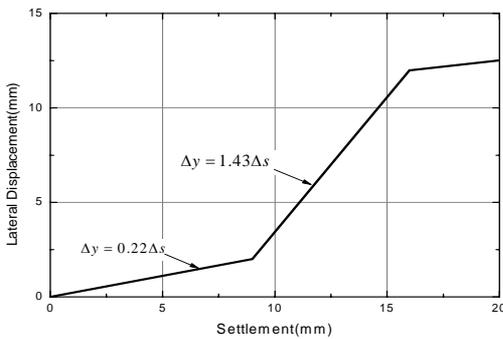


그림 11. 연직침하와 수평변위의 상관관계

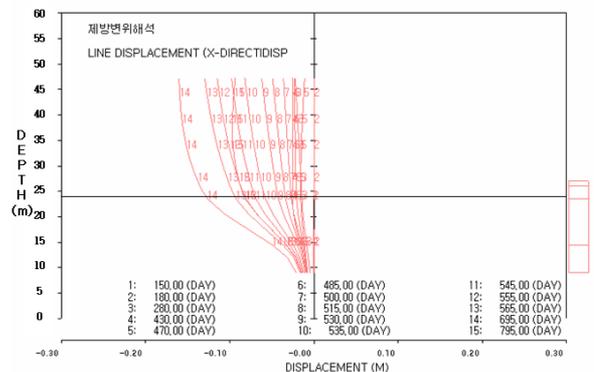
3.2.3 안벽말뚝

그림 12에 나타난 바와 같이 말뚝의 변위 분포는 측방변위분포와 유사한 경향을 가지고 있으며, 연약지반구간에서 가장 많은 변위를 나타내고 있다. 시공단계별로는 준설매립이 마무리

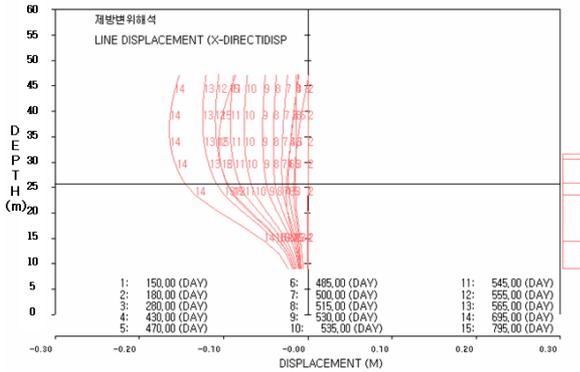
되는 지점에서 변위량이 급격하게 증가하여 상재하중이 모두 재하되는 점에서 가장 큰 변형을 나타내었고, 말뚝변위도 (a)~(f)에서의 수평 선분은 현장계측시 가상고정점을 나타낸 것이다. 표 8에 나타난 해석결과는 현장계측에서 가정한 가상고정점의 위치를 고려하여 절점간의 변위를 표시한 것이다. 말뚝 T3, T4, T5에 나타난 바와 같이 현장계측과 수치해석과의 변위 차이는 현장계측시점이 사석구조물을 설치한 후 이루어져 수치해석 결과가 현장계측결과보다 크게 일어난 것으로 판단된다. 또한, 수치해석 결과 및 현장계측결과를 보면 제방의 측방유동은 대부분이 제방하부의 연약층에서 일어나는 것을 알 수 있다. 하지만, 말뚝변위 측정시 이를 고려하지 않고 가상고정점을 결정하여 실제 발생된 변위와 현장 계측으로 이루어진 계측변위가 가상고정점의 위치가 변동되어 수치해석 결과가 현장계측 결과보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

표 8. 현장계측과 수치해석으로 측정된 말뚝의 변위 비교

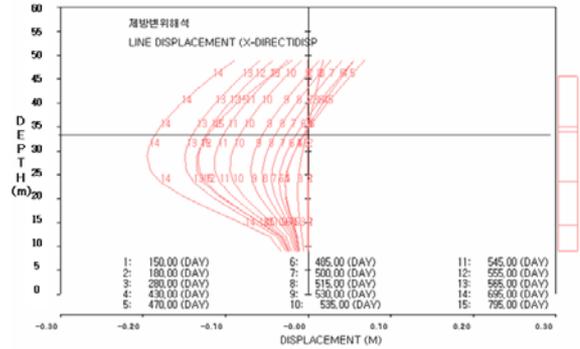
변위 번호	가상고정점의 위치(m)	말뚝의 기울기(°)	변위량 (mm)	수치해석결과 (mm)
T1	DL(-) 17.17	0.07(해측)	33.3(해측)	42.3(해측)
T2	DL(-) 14.59	0.046(해측)	19.8(해측)	20.2(해측)
T3	DL(-) 12.87	0.048(해측)	19.5(해측)	16.4(내측)
T4	DL(-) 11.16	0.061(해측)	22.5(해측)	46.7(내측)
T5	DL(-) 9.44	-0.009(내측)	3.14(내측)	72.3(내측)
T6	DL(-) 5.68	-0.277(내측)	75.8(내측)	92.1(내측)



(a) T1

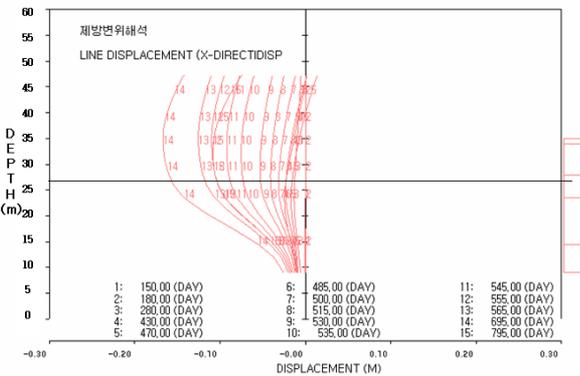


(b) T2

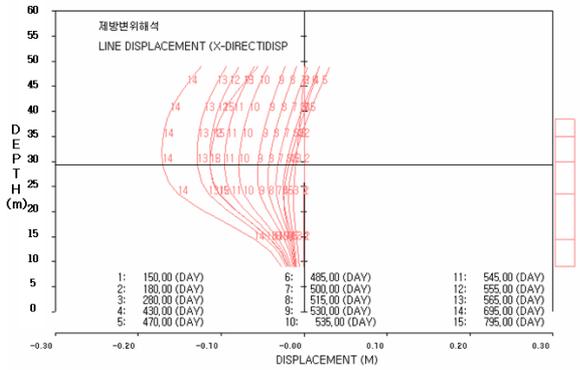


(f) T6

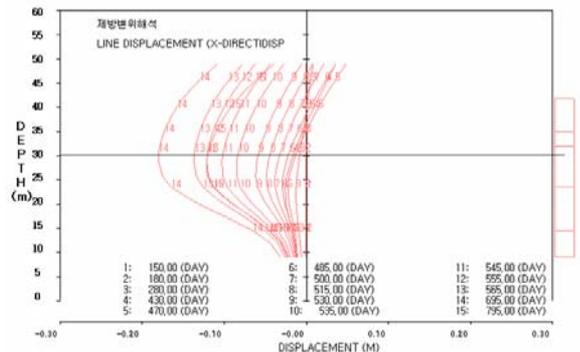
그림 12. 말뚝의 시공단계별 변위도



(c) T3



(d) T4



(e) T5

4. 결론

본 연구는 인천 ○○○○ 부두 건설공사 중, 시공과정에서 일어나는 구조물 및 지반의 변형을 현장계측과 수치해석방법인 유한요소해석을 통하여 시공단계별로 비교·분석하였다. 시공단계별로 초기응력상태, 말뚝항타, 모래치환, 사석층설치, 콘크리트블럭설치, 준설매립, 배수층설치, 상재하중재하, 상재하중재하후 방치 및 상재하중재하 후 방치 등으로 구분하여 구조물 및 기초지반에 나타난 연직, 측방 변위를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 안벽호안 지역의 침하량을 계측에 의한 실측데이터와 수치해석을 통한 해석 결과를 비교하여 분석하였을 때 침하량은 체체(사석층) 설치시 가장 크게 발생하여 계측이 시작된 시점으로부터는 이미 많은 침하가 발생된 것으로 나타났다.
- (2) 안벽호안 지역의 측방변위는 계측에 의한 실측치와 마찬가지로 모래치환 하부의 연약점토구간에서 가장 큰 급경사를 이루며 발생된 것으로 나타났다. 시기적으로는 준설매립이 시작되면서 급경사를 이루어 변위가 발생되어 성토가 완료되는 시점까지 가장

큰 변위가 발생되었으며 성토완료 후 수렴되는 경향을 보였다.

- (3) 호안제체의 연직변위와 측방변위의 상관관계를 분석하여 보면, 연직변위는 성토재하시부터 계속 증가하여 성토완료 후 빠르게 수렴하였다. 이에 반하여 측방변위는 성토 초기시에는 크게 일어나지 않지만 성토 중 급한 경사를 이루면서 발생하였다.

- (4) 안벽구조물의 기초로 설치된 강관말뚝의 변위는 안벽호안 지역의 측방변위와 유사하게 모래치환 하부 연약지반에서 가장 많은 변위가 일어났다. 시공단계별로는 준설매립이 마무리 되는 시점에서 변위량이 급격하게

증가되어 성토하중이 마무리되는 시점에서 가장 많은 변위량을 나타내었다. 현장계측과 수치해석과의 차이는 계측시점과 가상고정점 가정시 측방변위가 일어나는 가상고정점의 위치가 변동되어 수치해석 결과가 현장계측결과보다 다소 크게 나타난 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2004년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

(접수일 : 2006. 4. 4 심사일 : 2006. 4. 6 심사완료일 : 2006. 4. 21)

참고문헌

1. 권영철(1999), 연약지반 위에 시공한 성토에 의한 측방변위, 충북대학교 대학원, 석사학위논문, p. 59.
2. 삼성물산(2000), 인천남항 컨테이너부두 건설공사 지반조사보고서, (주)서영기술단, p. 456.
3. 서정주, 서동희, 정상섭, 김유석(2003), 측방유동을 받는 교대말뚝기초의 거동분석(1) -원심모형실험연구-, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제1호, pp.5~19.
4. 이진형, 서정주, 정상섭, 장범수(2003), 측방유동을 받는 교대말뚝기초의 거동분석(II)-측방유동 판정기준-, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제1호, pp.21~29.
5. 홍원표, 권오현, 한중근, 조성한(1994), 연약지반상 교대의 측방이동에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제10권, 제4호, pp. 53~65.
6. Bjerrum, L.(1972), Embankments on Soft Ground, *Proceeding ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue University, Vol. 2, June, pp. 1045~1458.
7. De Beer, E. and Wallays, M.(1972), Forces Induced in Piles by Unsymmetrical Surcharges on the Soil around the Piles, *Proc. 5th ICSMF*, Madrid, pp. 325~332.
8. Peck, R. B., Hanson, W. E. and Thornburn, T. H.(1974), *Foundation Engineering*, John Wiley & Sons, New York, pp. 301~302.
9. Tschotarioff, G. P.(1973), Lateral Pressure of Clayey Soils on Structures, *Proc. 8th ICSMF*, Specialty Session 5, Moscow, Vol. 4., pp.227~280.
10. Tavenas, F., Mieussens, C. and Bourges, F.(1979), Lateral Displacements in Clay Foundations under Embankments, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, pp. 532~550.