

## 연약지반상에 축조된 호안의 측방유동에 따른 안벽말뚝의 변위

### Displacement of Quaywall Pile by Lateral Movement of Revetment on Soft Ground

신은철<sup>1)</sup>, Eun-Chul Shin, 류인기<sup>2)</sup>, In-Gi, Ryu, 김종인<sup>3)</sup>, Jong-In, Kim

<sup>1)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon

<sup>2)</sup> (주)수성엔지니어링 토질부 사원, Engineer, Division of Geotechnical Engineering, Soosung Engineering Co., LTD.

<sup>3)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사수료, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon

**SYNOPSIS** : Recently, the lateral displacement of the passive piles which installed under the revetment on 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 the ground when the revetment loading is exceeded a certain limit. The lateral displacement of ground causes an excessive deformation of under structure itself and develops lateral earth pressure against the pile foundation as well. Especially passive piles subjected to lateral earth pressures are likely to have excessive horizontal displacement and large bending moment, which induces structural failure of pile foundation and harmful effects on superstructure. The subject of study is to investigate the later displacement of pile foundation during the construction of container terminal at the south port of Incheon. Actual field measurement data and finite element method(FEM) by AFFIMEX Ver 3.4 were used to analyze the displacement of pile and the vertical settlement of soft ground. This analysis was carried out at each sequence of construction work.

**Key words** : lateral displacement, passive piles, soft ground, revetment

## 1. 서 론

연약지반상에 항만호안구조물을 설치한 후 뒤채움이나 준설매립을 실시할 경우 그로 인한 하중이 연약지반에 편재하중으로 작용하게 되면 지반내 과잉간극수압의 증가로 인한 토립자의 소성화로 인하여 측방유동이 발생하게 된다. 이러한 연약지반의 측방유동은 지반내 기초구조물로 설치되어 있는 말뚝에 변위를 유발시켜 구조물의 안정이 문제시 된다. 또한, 준설매립시 호안은 자체적으로 매우 큰 간극비와 높은 함수비를 가지고 있는 준설매립토에 의한 측방토압, 간극수압의 변화에 의해 호안제방의 측방이동으로 인한 구조물 기초의 안정성 문제는 더 크다고 할 수 있다.

본 연구는 인천 ○○○○부두 건설공사 중, 시공과정에서 발생하는 호안제방 지반의 변형 및 호안의 부에 설치된 구조물 말뚝의 수평변위를 유한요소해석을 통하여 시공단계별로 검토하여 분석하였다. 수치해석은 범용 지반해석 유한요소 프로그램인 AFIMEX Version 3.4를 사용하였다. 유한요소해석에 의한 변위 결과는 시공단계별로 초기응력상태, 말뚝항타, 모래치환, 사석층설치, 콘크리트블럭설치, 준설매

립, 배수층설치, 상재하중제하, 상재하중제하 후 방치 및 상재하중제하 후 방치 등으로 구분하여 구조물 및 기초지반에 나타난 침하와 측방 변위를 분석하였다. 수치해석에 의한 기초말뚝의 변위는 현장 계측에 의한 결과와 비교 분석하였다.

## 2. 현장계측

### 2.1 계측개요

본 연구에서의 계측항목은 호안제체의 침하 및 측방 변위, 잔교 강관말뚝의 기울기 등에 관한 것으로 나눌 수 있다. 안벽호안지역에 대한 계측항목은 두 부분으로 분류할 수 있다. 첫째는 호안제체에 대한 계측사항이고, 둘째는 안벽말뚝에 설치된 계측사항으로 분류할 수 있다. 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 1과 2는 안벽호안지역과 안벽말뚝의 계측단면을 나타낸 것이다.

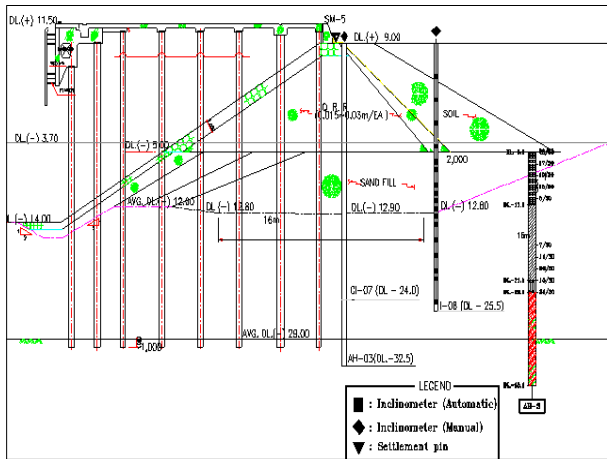


그림 1. 안벽호안지역의 계측단면

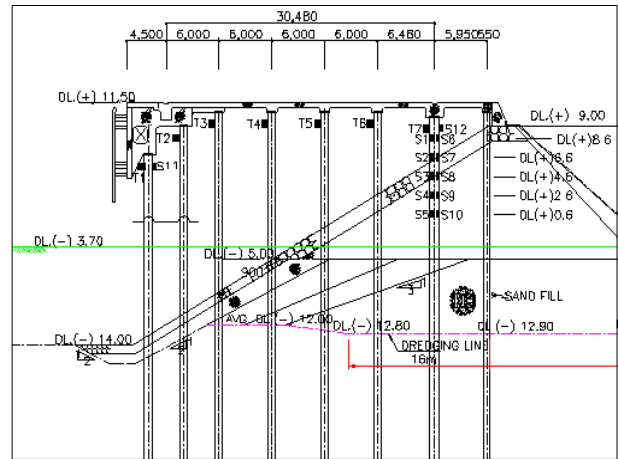


그림 2. 안벽말뚝의 계측단면

## 2.2 계측결과

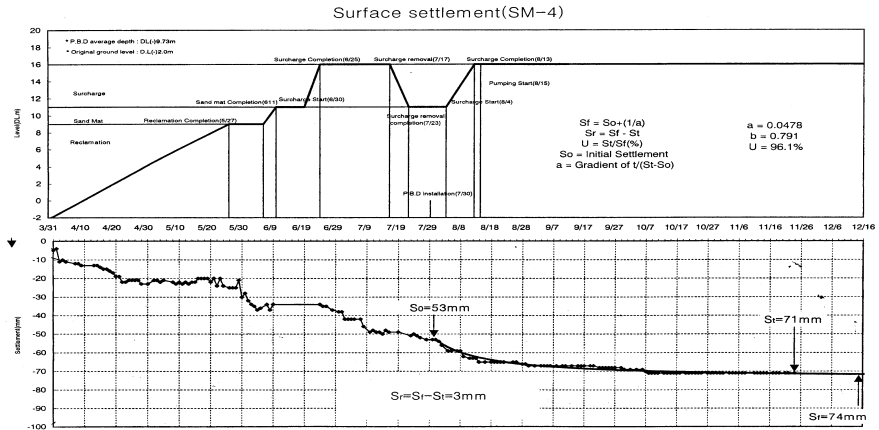
### 2.2.1 안벽호안지역

호안제체의 침하는 실측데이터를 이용한 장래 침하량 추정 방법인 쌍곡선법을 이용하였다. 쌍곡선법은 침하의 평균속도가 쌍곡선적으로 감소한다는 가정하에 초기의 실측 침하량으로 장래 침하량을 예측하는 방법이다. 식 (1)은 쌍곡선 방법에 의한 침하 예측의 Model식을 나타낸 것이다.

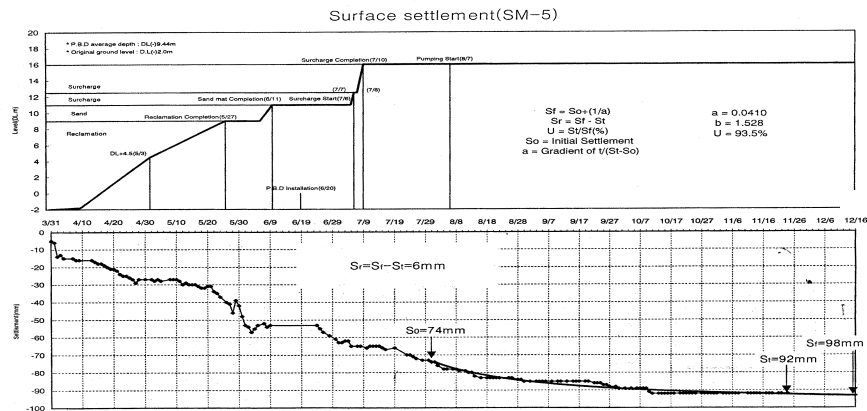
$$S_t = S_o + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

여기서,  $S_t$ 는 성토종료 경과시간( $t$ )에서의 침하량,  $S_o$ 는 성토종료 직후의 침하량,  $t$ 는 성토종료 시점으로부터의 경과시간,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 실측침하량 값으로부터 구한 계수이다.

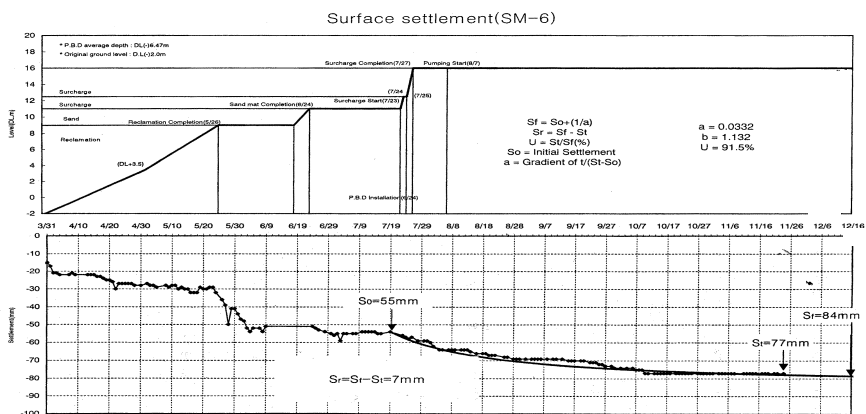
그림 3은 계측 기간내에 시공단계별 안벽호안의 지표침하 실측데이터를 바탕으로 쌍곡선법에 의해 분석한 결과이다. 초기 준설매립기간인 2개월동안 발생된 지반 침하량은 지속적으로 증가한 후 샌드매트 포설과 압성토가 재하되면서 침하량의 증가율이 급격하게 증가하게 되었다. 압성토가 완료된 후 30일이 경과된 이후에는 지반침하량이 미소하게 발생되었다. 표 1은 쌍곡선법으로 분석한 최종침하량의 예측치와 향후에 발생될 잔류침하량을 나타낸 것이다.



(a) 지표침하(SM-4)



(b) 지표침하(SM-5)



(c) 지표침하(SM-6)

그림 3. 호안제체의 시공단계별 지표침하

표 1. 호안제체의 침하량

계측사항 계측지점	계측시작일	초기 지반고 [DL(+)]m	지반고[DL(+)]m (03/11/29)	계측침하량 ( 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

표 2. 호안제체의 측방변위량

계측사항 계측 지점	계측단면	계측시작일	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

지중측방변위는 시공단계별로 1차 성토의 마지막 부분에서 급격하게 증가하여 2차, 3차 성토시 많은 양의 측방변위가 일어나 성토완료 후에는 거의 일어나지 않았다. 측방변위의 분포는 모래치환 하부의 연약점토구간에서 가장 큰 급경사를 이루며 일어났다. 표 2는 계측시작일로부터 성토제하시까지 지중측방변위량의 최대값을 나타내고, 그림 4는 지중측방변위의 분포를 나타낸 것이다.

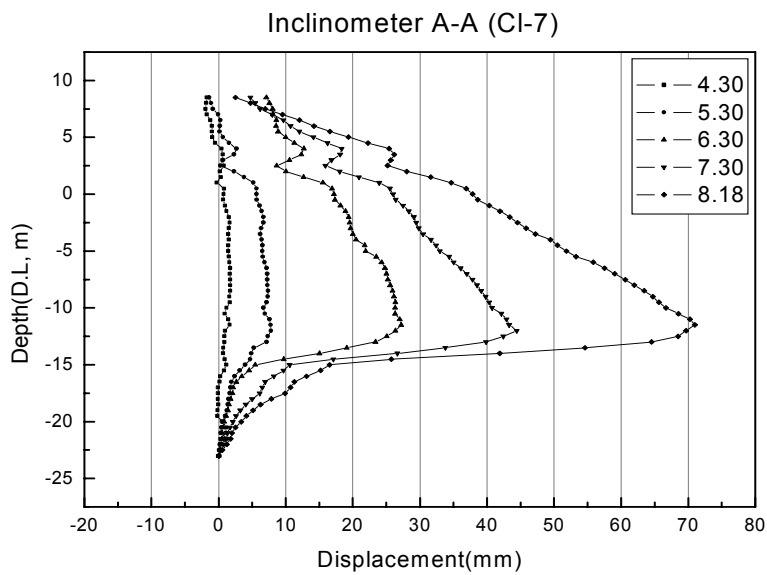


그림 4. 호안제체의 지중측방변위(CL-7)

## 2.2.2 안벽말뚝

말뚝기울기계는 그림 2와 같이 해측방향으로 T1부터 T7까지 1EA씩 설치되어 있으며 설치높이는 T1은 DL(+) $5.1\ m$ , T2는 DL (+) $8.5\ m$ , T3~T6은 DL(+) $10.6\ m$ , T7은 DL(+) $10.1\ m$ 위치에 설치되어 있다. 표 4.5는 말뚝에 설치된 기울기계로 계측된 말뚝의 기울기이다.

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

### 3. 수치해석

#### 3.1 개요

본 수치 해석의 적용지반은 실트층과 점토층으로 구성된 해성 퇴적지반이며, 연약지반이 분포되어 있는 지역이다. 또한, 시공단계에 따라 호안 기초 부분의 연약지반을 사질토로 부분치환 한 후, 사석 제체를 조성하고 상부를 콘크리트 블록으로 호안 구조물을 형성하였다. 본 연구의 수치해석은 호안의 배면으로 준설매립공사가 진행됨에 따라 잔교의 말뚝기초의 변위를 분석하기 위하여 유한요소해석을 통한 측방유동검토를 수행하였다. 사용된 프로그램은 범용 지반해석 유한요소 프로그램인 AFIMEX Version 3.4에 내장되어 있는 압밀전용 해석 솔버인 DACSAR를 사용하였다.

#### 3.2 입력자료

본 수치해석 검토에서 적용한 지반재료의 기본 물성치는 지반조사 보고서를 참고로 하여 실트, 점토, 풍화토, 풍화암의 토질정수 값을 산정하였다. 준설매립토, 사석부, Con'c Block, 모래치환재의 물성치는 일반적으로 수치해석상에 쓰이는 값을 참고로 하여 산정하였다. 다음 표 4와 5는 지반재료 및 잔교 기초로 사용된 강관말뚝의 산정된 기본 물성치 값을 나타낸 것이다.

표 4. 해석 지반재료의 기본 물성치

토질정수		$\gamma_t(v)$	$v$	$E_s(t/m^2)$	$\phi(^\circ)$	$c(t/m^2)$
토질종류						
	준설매립토	1.92	0.49	3,000	25	-
	사석부	2.0	0.25	5,000	40	2.0
	Con'c Block	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

표 5. 강관 말뚝의 수치해석 입력값

말뚝 단면	물성치	탄성계수( $t/m^2$ )	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

### 3.3 수치해석 결과

#### 3.3.1 안벽호안지역

그림 4.13은 수치해석결과에 의한 제체 침하곡선으로, 제체의 침하량은 대부분이 제체의 시공과정에서 발생하는 것으로 나타낸 것이다. 또한, 제체의 초기응력상태부터 성토를 제하한 시공단계까지의 침하량은 100~160mm로 나타났으며, 계측시점인 준설매립이 시작된 후부터의 침하량은 40~70mm로 나타났다.

그림 4.14에서 나타낸 시공단계별 측방변위분포도는 현장에 설치된 경사계 지점의 측방변위를 나타내고 있다. 측방변위의 분포는 그림에 나타난 바와 같이 모래치환 하부의 연약점토구간인 15~23.5m에서 가장 급경사를 이루며 발생되었다. 시공단계별로는 호안제체가 시공되는 485일부터 서서히 증가하여 준설매립이 시작되는 515일부터 급격한 변위가 발생하여 성토재하가 이루어 졌을 때 가장 많은 변위가 발생되었다.

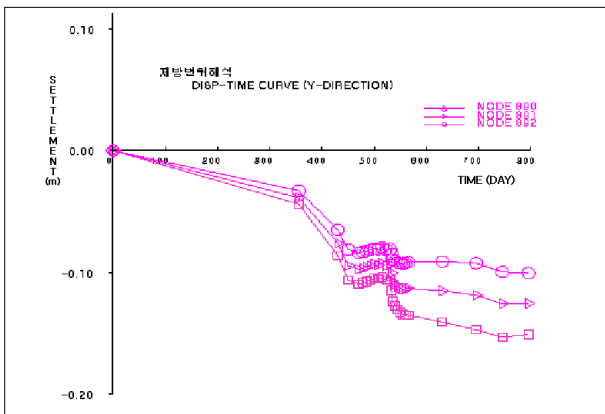


그림 5. 총침하곡선 그림

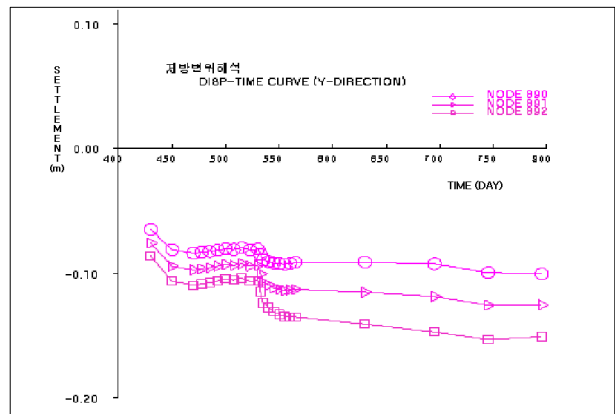


그림 6. 계측시점 이후로의 침하곡선

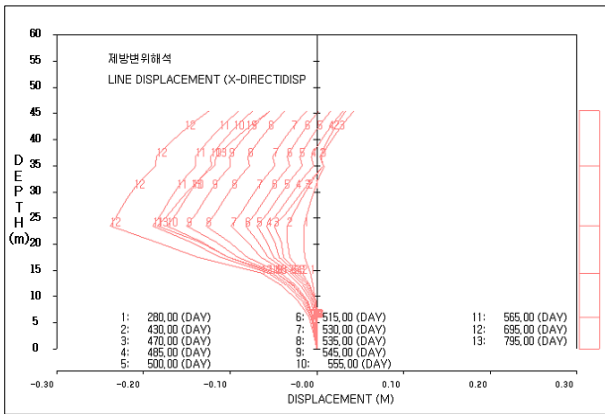


그림 7. 시공단계별 측방변위 분포도

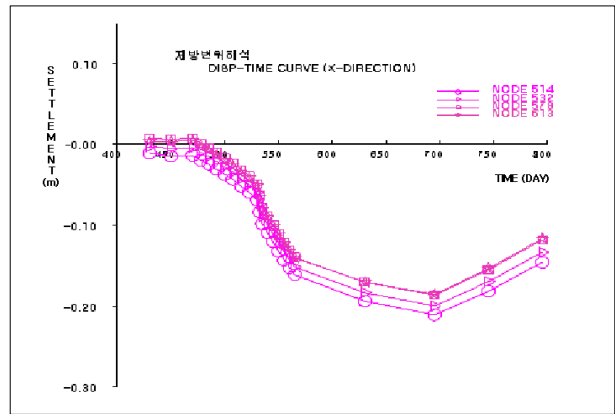


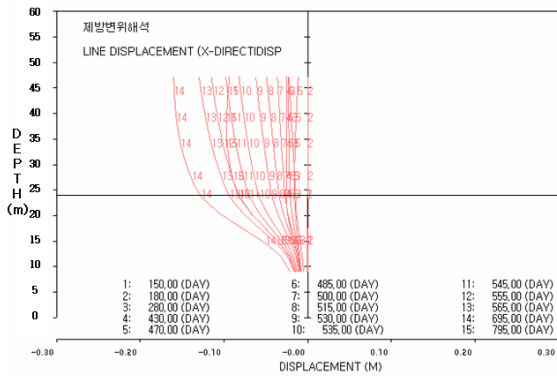
그림 8. 시공단계별 최대측방변위

#### 3.3.2 안벽말뚝

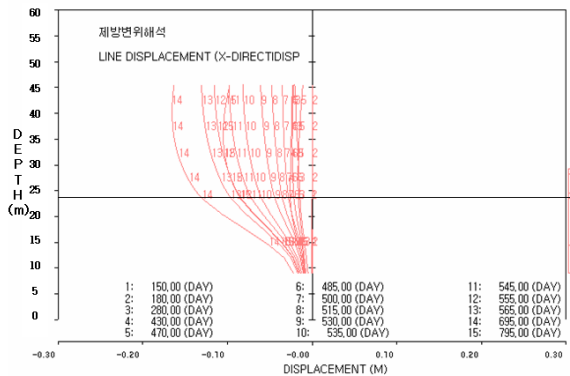
말뚝의 변위 분포는 측방변위분포와 유사한 경향을 가지고 있으며, 연약지반구간에서 가장 많은 변위를 나타내고 있다. 시공단계별로는 준설매립이 마무리되는 지점에서 변위량이 급격하게 증가하여 상재하중이 모두 재하되는 점에서 가장 큰 변형을 나타내었다. 말뚝별 변위량은 표 6에 나타내었다. 말뚝변위도 (a)~(g)에서의 수평 선분은 현장 계측 시 가상고정점을 나타낸 것이다. 표 6에 기술한 수치해석결과는 현장계측에서 가정한 가상고정점의 위치를 고려하여 절점간의 변위를 표시한 것이다.

표 6. 현장계측과 수치해석으로 측정된 말뚝의 변위 비교

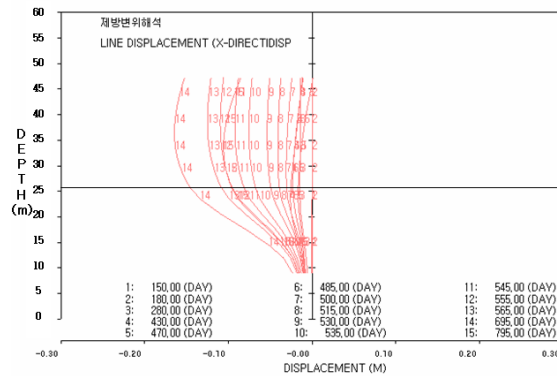
번호 \ 변위	가상고정점의 위치 (m)	말뚝의 기울기 (°)	변위량 (mm)	수치해석결과 (mm)
T1	DL(-) 17.17	0.07(해측)	33.3(해측)	42.3(해측)
T2	DL(-) 16.09	0.211(해측)	96.4(해측)	31.6(해측)
T3	DL(-) 14.59	0.046(해측)	19.8(해측)	20.2(해측)
T4	DL(-) 12.87	0.048(해측)	19.5(해측)	16.4(내측)
T5	DL(-) 11.16	0.061(해측)	22.5(해측)	46.7(내측)
T6	DL(-) 9.44	-0.009(내측)	3.14(내측)	72.3(내측)
T7	DL(-) 5.68	-0.277(내측)	75.8(내측)	92.1(내측)



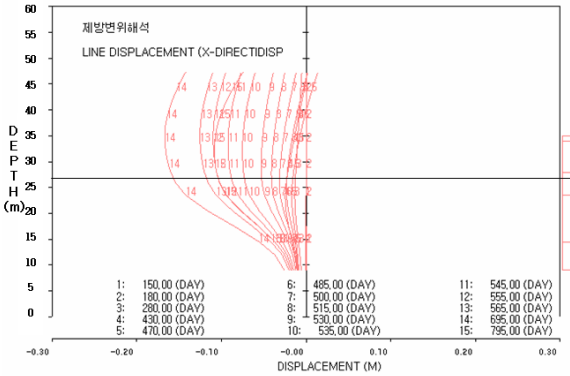
(a) T1



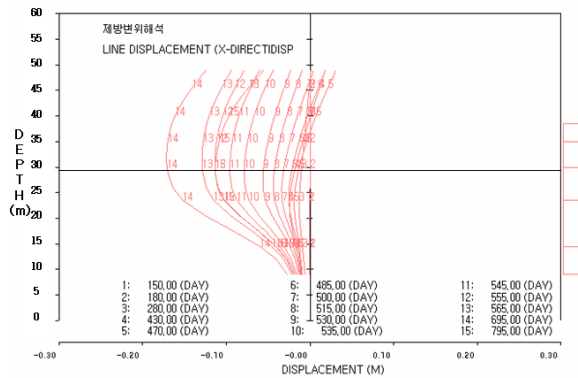
(b) T2



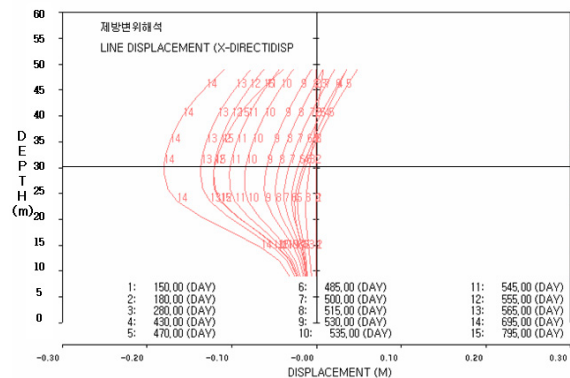
(c) T3



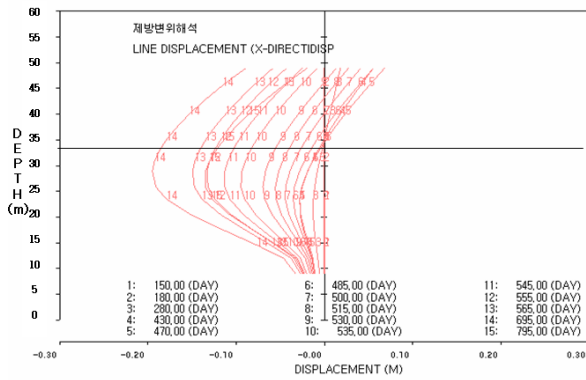
(d) T4



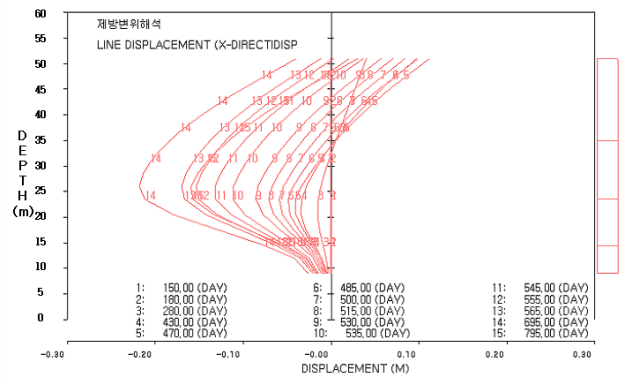
(e) T5



(f) T6



(g) T7



(h) T8

그림 9. 말뚝의 시공단계별 변위도

## 4. 결론

본 연구는 인천 ○○○○부두 건설공사 중, 시공과정에서 일어나는 구조물 및 지반의 변형을 현장계측과 수치해석방법인 유한요소해석을 통하여 시공단계별로 검토·분석하였다.

1. 안벽호안 지역의 침하량을 계측에 의한 실측데이터 결과와 수치해석을 통한 해석 결과를 비교하여 분석하였을 때 침하량은 제체(사석층) 설치시 가장 많은 침하량이 발생하여 계측이 시작된 시점으로부터는 이미 많은 침하가 발생된 것으로 나타났다.

2. 안벽호안 지역의 측방변위는 계측에 의한 실측치와 마찬가지로 모래치환 하부의 연약 점토구간에서 가장 큰 급경사를 이루며 발생된 것으로 나타났다. 시기적으로는 준설매립이 시작되면서 급경사를 이루어 변위가 발생되어 성토가 완료되는 시점까지 가장 많이 변위가 발생되었으며 성토완료 후 수렴되는 경향을 보였다.

3. 호안제체의 연직변위와 측방변위의 상관관계를 분석하여 보면, 연직변위는 성토재하시부터 꾸준히 증가하여 성토완료 후 빠르게 수렴하는 결과를 볼 수 있다. 이에 반하여 측방변위는 성토초기에는 크게 일어나지 않지만 성토 중 급한 경사를 이루면 발생하는 것을 볼 수 있다.

4. 안벽구조물의 기초로 설치된 강관말뚝의 변위는 안벽호안 지역의 측방변위와 유사하게 모래치환 하부 연약지반에서 가장 많은 변위가 일어나는 것으로 나타났다. 시공단계별로는 준설매립이 마무리 되는 시점에서 변위량이 급격하게 증가되어 성토하중이 마무리되는 시점에서 가장 많은 변위량을 나타내었다. 현장계측과 수치해석과의 차이는 계측시점과 가상고정점 가정시 측방변위가 일어나는 지점을 잘못 고려하였기 때문에 현장계측결과가 수치해석 결과보다 다소 크게 나타난 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 정하익(1999), "해안공간 개발을 위한 연약지반 처리기술", 한국건설기술연구원, pp. 746.
2. 권영철(1999), "연약지반 위에 시공한 성토에 의한 측방변위", 충북대학교 대학원, 석사학위논문.
3. Tschhotarioff G.P.(1973), "Lateral pressure of clayey soils on structures", *Proc., 8th ICSMFE, Specialty Session 5, Moscow, Vol. 4. 3, 1973, pp.227~280.*
4. Reese, L.C., Impe, W.F.V.(2001), "*Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading*", pp. 187~226.