

호안기초로서 저치환율 모래다짐말뚝 공법의 적용 Application of sand compaction pile method of row replacement ratio as foundation of the dyke

진 성 기¹⁾, Sungki Jin, 김 범 형²⁾, Bumhyung Kim, 김 중 석³⁾, Jongseok Kim, 임 중 철⁴⁾, Jongchul Im

¹⁾ (주)에드백트 연구소장, Chief of Research Center, ADVACT Company Ltd

²⁾ 현대산업개발(주) 토목설계팀 부장, Manager of Civil Design Part, HYUNDAI Development Company

³⁾ 현대산업개발(주) 토목설계팀 과장, Assistant Manager of Civil Design Part, HYUNDAI Development Company

⁴⁾ 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Busan University

SYNOPSIS : In this study, sand compaction pile method was adopted to improve the soft ground under the permanent dyke, namely west sea dyke of Incheon New Port. The row replacement ratio 30% was applied to consider the ground condition, environmental side and the construction cost of the site.

The stability and displacement analysis was carried out by respectively SLOPE/W and PLAXIS 2D program. Based on this analysis, it is found that the safety factor and displacement is within an allowable criteria.

The model experiment was carried out using the acryl soil box with 400(H)×1200(L)×250(W)mm to show the displacement of the dyke and behavior of soft ground. Based on this experiment results, it is found that the settlement does not occur from 1 and 2 loading phases and horizontal displacement of 0.0075% occurs from 2 phases. It is also found that the differential settlement occurs 0.05mm corresponding respectively 0.02% and 0.03% of the dyke height(15cm).

Key words : sand compaction pile, row replacement ratio, safety factor and displacement, differential settlement, soil box experiment

1. 서 론

연약지반상에 성토를 하는 경우 성토하중에 따른 침하와 동시에 전단 변형의 발생으로 많은 지중 횡변위가 발생하여, 심할 경우 지반의 전단파괴로 인해 상부구조물이 붕괴될 수도 있다. 따라서 지반파괴 및 과다 변형을 억제하고, 안정적이고 신속한 시공을 도모하기 위해 다양한 종류의 지반개량공법을 적용하고 있다

일본의 경우 1960년대 까지 대부분의 항만 구조물 기초에 강제치환을 적용하였으나, 치환 폭과 깊이, 형상의 예측이 곤란하고 합리적인 설계가 어려워, 점차 준설치환으로 대체되었다. 연약토를 모두 제거할 경우 원호활동 안정계산이 용이하고 굴착 준설과 토사 투입 공정뿐이므로 공정이 단순하고 공기가 짧아 시공이 용이하나, 이 또한 굴착토량이 크고, 공사 중의 오락 발생으로 인해 환경 영향이 커 투기 장소가 확보된 특별한 경우에만 적용되었다.

1960년대 말부터 고치환율 모래다짐말뚝을 중심으로 많이 적용되어 왔으나 최근 환경 보존 및 공

사비의 감소 측면에서 저치환율 모래다짐말뚝 공법에 대한 관심이 증가하는 추세이다.

저치환율 모래다짐말뚝 공법은 샌드 드레인(SD) 공법과 고치환율 모래다짐말뚝 공법의 중간적인 형태라고 할 수 있으며, 고치환율 모래다짐말뚝 공법에 비해서 경제적이며, 샌드 드레인 공법에 비해서 침하량이 작고 공기가 단축되는 장점이 있다.

본 논문의 대상인 인천항 주변의 지반성분은 대부분 실트와 모래로 구성되어 있어 강제치환 적용 시 치환심도가 과대 평가되고 있으며 치환 심도가 깊을 경우 안정성이 불확실하고 장기침하 발생이 우려되, 지지층까지 지반개량이 가능하고 신속한 압밀배수로 운영중 잔류침하가 없는 모래다짐말뚝을 적용하였고, 남해안 지역보다 상대적으로 지반조건이 양호한 현장여건을 고려해 치환율 30%의 저치환율 모래다짐말뚝공법을 영구 구조물인 서측방파호안 하부 기초로 적용하였다.

본 논문은 인천신항 진입도로 및 호안 축조공사(1공구) 설계중 영구호안인 서측방파호안의 기초로 저치환율 모래다짐말뚝공법을 적용시 구조물 하중 및 배면 준설토 매립에 따른 원호활동 안정성, 기초의 변위 및 지반변형 형상을 분석하여 설계 기초 자료로 제공하고자 한다.

이를 위해 모래다짐말뚝의 적정 치환율을 결정하고, 시공단계별 원호활동 안정성 해석 및 변위해석을 시행하였고 평면변형률 상태의 400(H)×1200(L)×250(W)mm 제원의 대형모형토조를 제작하여 모래다짐말뚝 적용시 구조물 하중 및 배면 준설토 매립에 따른 구조물의 변위 및 지반변형 형상을 분석하였다.

2. 사업개요

2.1 대상위치 및 목적

본 과업의 목적은 인천신항을 환황해권 거점항만으로 개발하기 위한 진입도로 및 개발준설을 위한 투기장을 조기 확보하여 수도권에 부족한 항만시설을 원활히 확보하기 위해 그림 1과 같이 인천시 송도 신도시 남측해역내 부두가호안 약 3.5km, 서측방파호안 478m 및 기존 LNG진입도로를 건설하는 데 있다. 영구구조물인 서측방파호안 하부의 지층 분포는 그림 2와 같이 실트질 점토층이 GL(-)10~18m사이에 분포하고 있다.

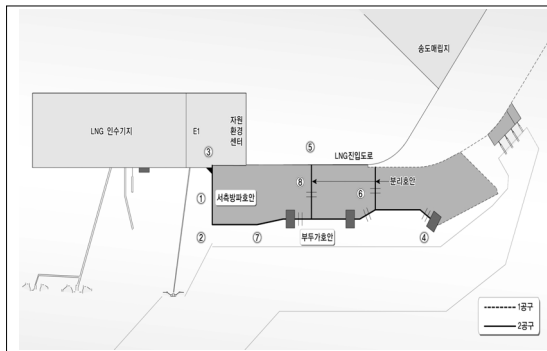


그림 1. 사업대상 위치도

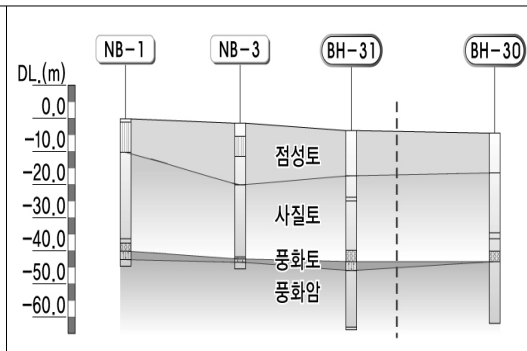


그림 2. 지층분포도

2.2 지반특성

그림 1에서 4에서와 같이 연약지반 특성 분석한 결과 자연함수비가 평균 37%로서 액성한계에 근접하게 분포하는 유동성지반으로 초기간극비 평균 0.99이며, 압축지수는 0.29로서 남해안의 비해 상대적으로 작아 침하의 영향이 적고 수직압밀계수가 커 조기에 압밀이 종료될 것으로 예상하였다.

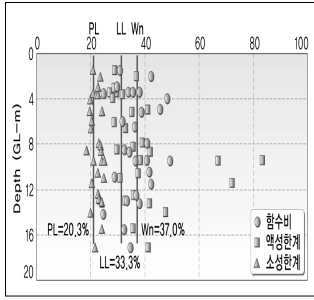


그림 3.1 소성한계 - 액성한계 - 함수비

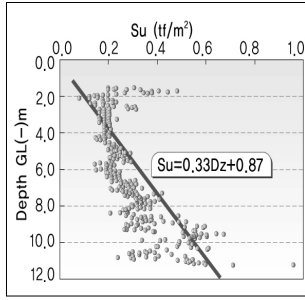


그림 3.2 비배수전단 강도(Su)

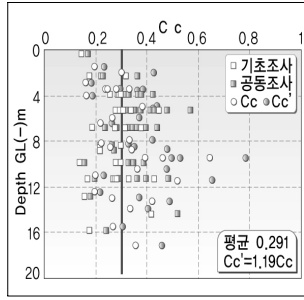


그림 3.3 압축지수

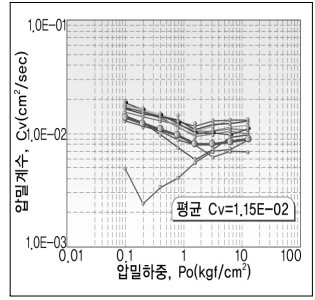


그림 3.4 수직압밀계수

그림 3. 지반특성

3. 저치환율 모래다짐말뚝의 개요

2.1 모래다짐말뚝 공법의 치환율

치환율(a_s)이란 지반 면적(A)과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적(A_s)비로 정의되고, 주로 모래말뚝의 타설 간격에 의해 결정된다. 항만공사 등 모래말뚝 자체로 지지력, 전단강도 증가효과 등을 발휘해야 하는 경우에는 치환율(a_s)이 70% 정도인 '고치환율 모래다짐말뚝 공법'이 사용되나, 항만공사에서 주로 사용하던 '고치환율 모래다짐말뚝 공법'은 모래의 부족현상으로 인해서 치환율 30~40% 정도인 '저치환율 모래다짐말뚝 공법'으로 대체중인 실정이다.¹⁾⁵⁾ 저치환율 모래다짐말뚝 공법은 샌드 드레인(SD) 공법과 고치환율 모래다짐말뚝 공법의 중간적인 형태라고 할 수 있으며, 고치환율 모래다짐말뚝 공법에 비해서 경제적이며, 샌드 드레인 공법에 비해서 침하량이 작고 공기가 단축되는 장점이 있다.

2.2 모래다짐말뚝의 설계법

2.2.1 복합지반의 안정계산

모래다짐말뚝 복합지반의 안정계산법은 Mohr-Coulomb의 전단강도공식을 기본으로, 복합지반의 조건을 고려한 원호활동 또는 선형활동 해석법으로 검토하는 방법이 일반적이다. 복합지반 사면활동해석법으로는 가상지층 설정법(profile method), 평균전단강도법이 있다.

가상 지층 설정법은 모래다짐말뚝을 보강재로 고려하여 말뚝 각각의 개체를 위치별로 모델링하여 해석하는 방법이며, 평균전단강도법은 모래다짐말뚝 개량지반의 전단강도를 산정하기 위해 모래와 점토지반의 개량율에 비례하여 각각의 전단강도를 가중 평균하는 방법으로서 복합지반 전단강도 산정을 위한 응력분담비 결정이 해석결과에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 사용하고 있는 식 (4)는 응력집중계수(μ_s)와 응력감소계수(μ_c)를 포함하고 있고, μ_c 와 μ_s 는 응력분담비(m)에 따라 달라지므로 식 (4)에 의한 복합지반 강도는 응력분담비의 영향을 받는다.

복합지반 전단강도 가중평균은 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{\tau} = (\mu_s \sigma_z + \gamma_s' z) \tan \phi_s \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$\begin{aligned}\bar{\tau} &= c + (\mu_s \sigma_z + \gamma_s' z) \tan \phi_s \cos^2 \theta + \Delta c \\ &= c + \Delta c (\phi_c = 0 \text{ 일 때})\end{aligned}\quad (2)$$

$$\bar{\tau}_{sc} = (1 - a_s) \tau_c + a_s \tau_s \quad (3)$$

위 식에서 응력분담과 점토층 강도증가를 고려하여 다시 나타낸 것이 식 (4)⁶⁾이다.

$$\begin{aligned}\bar{\tau} &= (1 - a_s)(c_u + \Delta c) + (\gamma_s' z + \mu_s \sigma) a_s \tan \phi_s \cos^2 \theta \\ \Delta c &= (c'/p') \mu_c \sigma U\end{aligned}\quad (4)$$

여기서,

$\bar{\tau}$: 전단면에서 발휘되는 전단강도

a_s : 모래말뚝의 치환율

c_u : 점성토의 비배수 전단강도

z : 전단파괴면의 깊이

σ : 전단파괴면의 위치에서 외력에 의한 연직응력의 평균치

μ_c : 점토의 응력감소계수, $\mu_c = [1 / \{1 + (m - 1)a_s\}]$

μ_s : 모래말뚝의 응력집중계수, $\mu_s = [m / \{1 + (m - 1)a_s\}]$

m : 응력분담비, $m = \Delta \sigma_s / \Delta \sigma_c$

$\Delta \sigma_s$: 외력에 의한 모래말뚝의 연직응력증분

$\Delta \sigma_c$: 외력에 의한 점토의 연직응력증분

c'/p' : 원지반 점성토의 강도증가율($= 0.11 + 0.0037 I_p$)

$\Delta p'$: 성토하중에 의해 발생하는 지중응력의 평균값

γ_s' : 모래말뚝의 유효단위중량

γ_c' : 점성토의 유효단위중량

ϕ_s : 모래말뚝의 내부마찰각

U : 점성토의 평균압밀도

θ : 대상으로 하는 전단면 접선이 수평면과 이루는 각도

γ_m' : 복합지반의 평균단위중량, $\gamma_m' = a_s \gamma_s' + (1 - a_s) \gamma_c'$

ϕ_m : 복합지반의 환산 내부마찰각, $\tan \phi_m = \mu_s a_s \tan \phi_s$

2.2.2 강도증가의 계산

압밀에 의한 원지반 점토의 강도증가 Δc 의 계산은 이미 앞의 식 (4)에서 제시한 바와 같은 식 (5)로 구할 수 있다.

$$\Delta c = \mu_c \cdot \sigma \cdot (c'/p') \cdot U \quad (5)$$

여기서,

c'/ρ' : 강도증가율

$\mu_c \cdot \sigma$: 점성토지반에서의 성토하중에 의한 유효응력증가

U : 평균압밀도, $1 - (1 - U_a)(1 - U_R)$

식 (5)를 사용하여 표준적인 안정계산을 실시할 경우, μ_c 는 치환율 a_s 와 응력분담비 m 에 의해 산정한다. 최근에 Norio Yagi 등은 치환율과 응력분담비 관계에서 $a_s = 15 \sim 40\%$ 일 때 $m = 3$ 으로 설정하였다.

2.2.3 복합지반의 압밀계산

복합지반의 압밀계산법은 크게 근사법, FEM을 이용하는 방법, 압밀경과시간 계산 등으로 분류할 수 있다. 근사법에는 평형법, Priebe 법, Greenwood 법 등이 있으며, 평형법은 Aboshi 등과 Barksdae⁹⁾ 등에 의해 제시된 방법으로서 응력분담비 m 을 이용하여 복합지반의 침하량을 계산한다.

침하저감계수 β 는 저치환개량에서 응력분담효과를 기대하여 다음 식 (6)으로 계산한다.

$$\text{저치환개량의 경우 : } \beta = \mu_c = \frac{1}{1 + (m - 1) \cdot a_s} \quad (6)$$

여기서, $a_s < 0.5$ 의 경우 $m=3$ 을 사용하여 식 (6)을 이용하도록 추천하고 있다.

Priebe는 쇄석기둥공법 처리지반의 침하량 계산법을 제안하였으며, Greenwood는 쇄석기둥공법 처리지반의 침하량 산정을 위한 도표를 제안하였다.²⁾¹¹⁾

모래다짐말뚝나 쇄석기둥공법에 대한 FEM 해석에는 재료의 비선형 거동과 다양한 조건의 경계조건을 고려할 수 있다. FEM 해석은 주로 축대칭 모형인 등가원주(unit cell)나 환산등가모래벽을 이용한 2차원 평면변형 문제를 이용한다. 또한 3차원 모형으로 무리말뚝(기둥)해석 또는 외기둥 해석으로 하나의 등가원주해석이 가능하다.⁸⁾⁹⁾

3. 안전성 검토 결과

3.1 안정성 해석

3.1.1 적정치환율 산정

그림 4와 같이 제체사석 하부지반 모래다짐말뚝 개량시 개량쪽에 대해 원호활동 안정성을 확보하는 적정한 전체 모래다짐말뚝 치환율과 중심부와 전면 및 후면부의 치환율을 산정하여 중심부 30% 및 전면부 및 후면부 25%의 적정 치환율을 산정하였다.

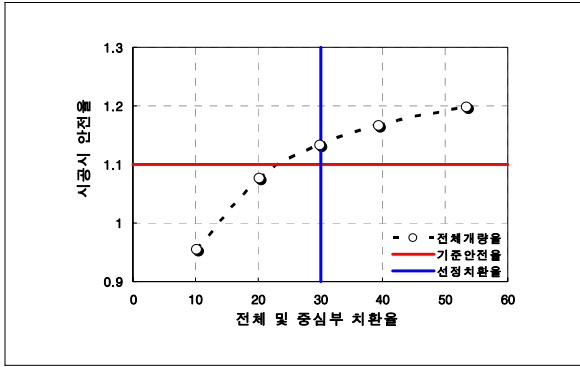


그림 4.1 전체 및 중심부 치환율 선정

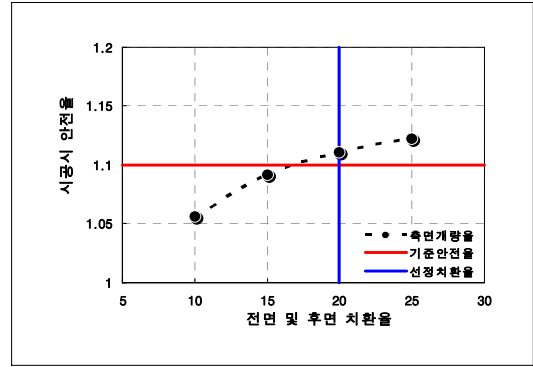


그림 4.2 전면부 및 후면부 치환율 선정

그림 4. 치환율별 원호활동 안정성 검토 결과

3.2.2 원호활동 안정성 해석

그림 5와 같은 서측방파호안을 대상으로 시공단계별 원호활동 안정성 해석 결과, 시공시 및 공용시(시공시, 평상시, 지진시) 원호활동 기준을 만족하는 것으로 나타났다.⁴⁾

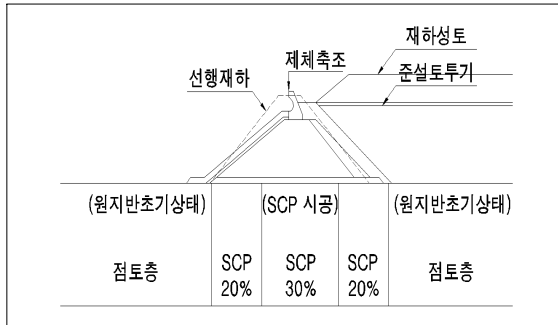


그림 5. 서측방파호안 검토 개념도

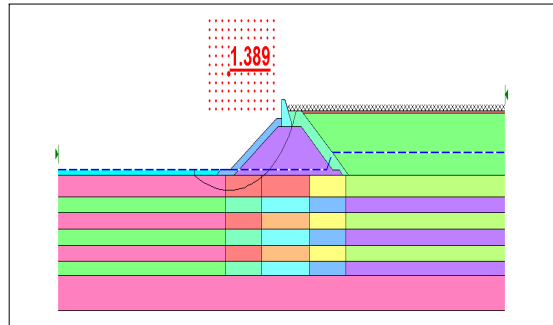


그림 6. 평상시 안정성 해석 결과

3.2.3 변위 안정성 해석

PLAXIS-2D 프로그램에 의해 서측 방파호안 구간 중 가장 취약한 대표단면을 선정하여 최대 연직 및 수평변위를 검토한 결과 그림 7,8과 같이 제체의 최대 연직변위 6.0cm 및 최대 수평변위 7.5cm로 허용변위 10cm 이내로 안정한 것으로 나타났다.⁷⁾

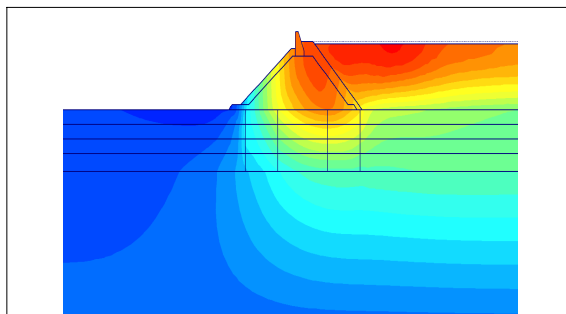


그림 7. 연직변위도

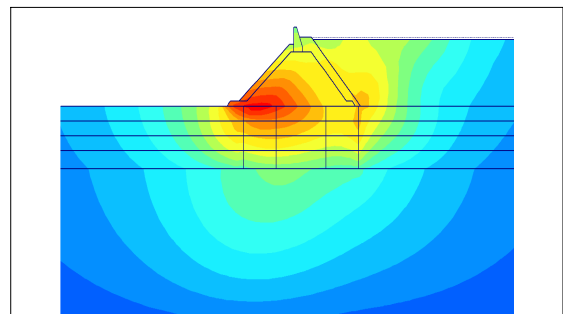


그림 8. 수평변위도

3.3 침하량 검토 결과

잔류침하검토결과 그림 9과 같이 서측방과호안 6.5cm로서 허용잔류침하 10cm이내로 안정한 것으로 나타났다.

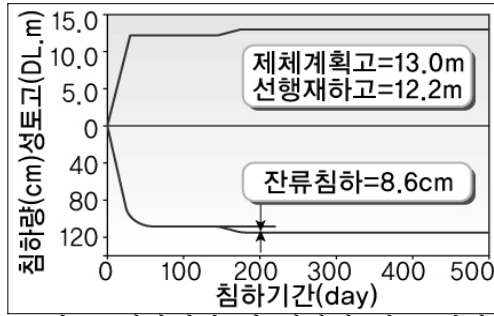


그림 9. 침하기간 및 침하량 검토 결과

4. 대형모형토조실험

본 시험에서는 호안구조물의 기초처리공법 중 모래다짐말뚝 적용시 호안 배면 준설토 매립에 따른 기초안정성을 평가하기 위해 실제 지반을 모사하고 구조물을 축조·제작하여 기초의 발생변위 및 전달 하중을 계측하고자 하였다.

4.1 개요

본 과업은 인천신항 진입도로 및 호안 축조공사(1공구) 설계중 호안구조물의 기초를 모래다짐말뚝 적용시 구조물 하중 및 배면 준설토 매립에 따른 기초의 변위 및 지반변형 형상을 분석하여 설계 기초 자료로 제공 하였다..

4.1.1 설계 현황

설계에 적용되어, 모형실험을 실시할 서측방과호안 구조물 하부지반의 모래다짐말뚝의 치환율 및 배치간격은 그림 10~그림 11과 같다.

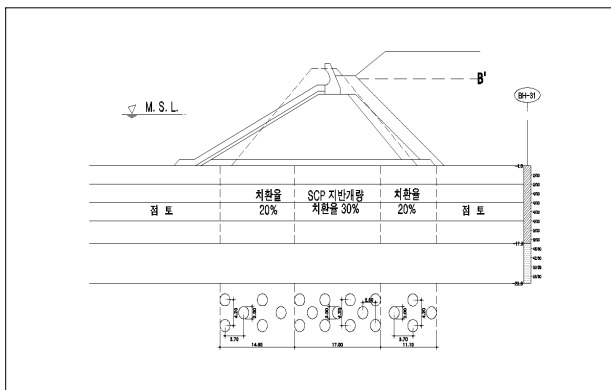


그림 10. 모래다짐말뚝 설계

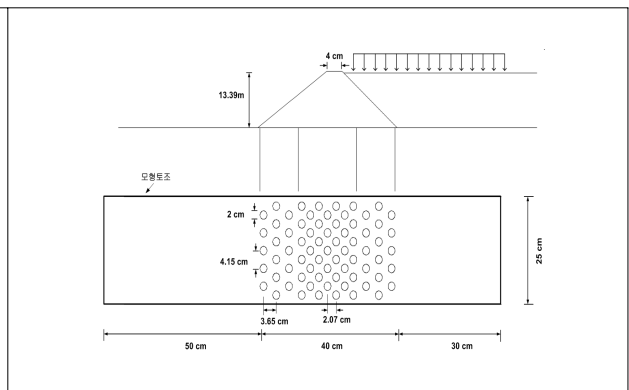


그림 11. 모래다짐말뚝 토조 모델링

4.2 재료특성

4.2.1 원지반용 점토재료

본 실험에 사용된 점토재료는 인천신항 진입도로 및 호안축조공사(1공구) 현장의 해성점토이며, 인천신항 호안축조공사 해성점토의 물리적 특성은 표 1과 같다. 본 실험에 사용된 점토재료의 물리적 특성 분석결과 인근 지역인 인천국제공항 지역의 대표적인 원지반조건 중 상부 해성층의 물리적 특성과 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

표 1. 인천신항 호안축조공사 해성점토의 물리적 특성

물성 종류	기 호	물성치
흙의 분류	USCS	ML
함수비	w_n (%)	46.1~52.1
비중	G_s	2.66
액성한계	w_L (%)	34.10
소성한계	w_P (%)	21.51
소성지수	PI (%)	3.59
모래 함유량	Sand (%)	22.18
실트 및 점토 함유량	Silt & Clay (%)	77.82

4.2.2 모래다짐용 말뚝재료

본 실험에 사용된 모래다짐말뚝용 치환재료는 주문진 표준사를 이용하였으며, 주문진 표준사의 입도분포곡선은 그림 12와 같다.

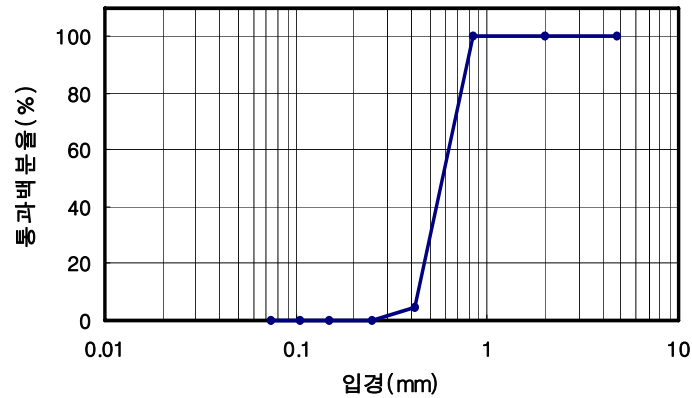


그림 12. 주문진 표준사의 입도분포곡선

4.3 모형토조실험장치

모형토조실험장치는 평면변형률 토조, 재하장치, 배수장치 등으로 구성된다.

4.3.1 평면변형률 토조

모래다짐말뚝이 시공된 연약지반을 제작하기 위해서 그림 13과 같이 평면변형률 상태의 모형토조를 제작하였다. 토조의 제원은 400(H)×1200(L)×250(W)mm ($V=0.12 m^3$)이며, 토조의 앞·뒤면은 마찰이 적은 투명 아크릴 판으로 제작하여 실험 단계별 지반의 거동을 사진판독을 통하여 관측할 수 있도록 하였고, 토조의 프레임은 강성이 큰 강재를 사용하여 하중 재하시 토조의 변형이 없도록 제작하였다. 토조 하부에는 점토 지반의 배수를 원활하게 하기 위해 배수장치를 설치하였고, 배수 제어를 위해 밸브(Valve)를 설치하였다.³⁾

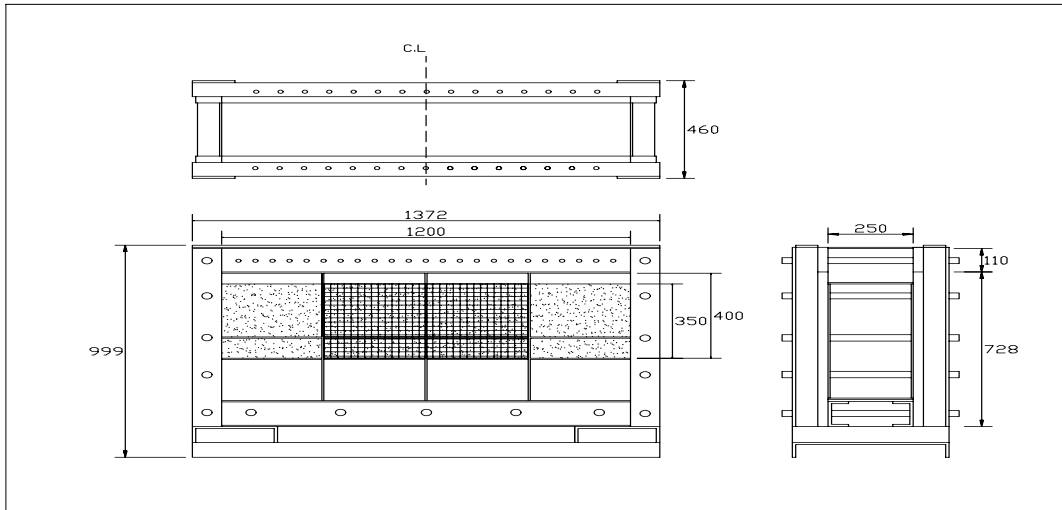


그림 13. 평면변형률 토조 (단위 : mm)

4.3.2 지반제작

호안 배면 준설에 따른 기초의 거동을 분석하기 위한 실험을 위해 사진 1과 같이 깊이 35 cm, 폭 25 cm인 평면변형률(Plane strain) 상태로 현장지반을 제작한다. 이때 지반의 강도를 일정하게 하고 모래다짐말뚝의 시공을 용이하도록 하기 위해 함수비를 75% 내외로 일정하게 한다. 모래다짐말뚝의 제작은 점토 지반에 붕과 필름케이싱(Film Casing)을 압입한 후 붕을 제거하고 필름케이싱내부에 모래를 투입한 후 필름케이싱을 제거하는 방법을 시행하였다.

지반 거동을 관찰하기 위해 아크릴 벽면에 실리콘그리스(Silicon grease)로써 타겟(Target)을 부착하여 지반변위를 관측하였다.

현장지반을 모델링하기 위한 모형지반의 제작순서는 지반을 조성한후 케이싱을 관입하였고 깔대기로 모래를 주입한후 모형 모래다짐말뚝시공을 완료하였다. 모형 구조물 상부에 변위계를 설치한 후 하중을 재하 하였다.

4.3.3 호안구조물 제작 및 변위계 설치

호안구조물은 현장 여건과 유사하게 쇄석으로 제작되었으며, 구조물 역시 평면변형률 상태를 유지하기 위해 양측면에 합판을 설치하여 길이방향 변형률을 억제하였다. 사진 1은 제작된 구조물의 모형이다.



사진 1. 호안구조물의 제작(서측방과호안)

4.4 실험결과 및 분석

실내실험을 위한 모형은 서측방과호안을 모델링하였으며, 지반개량은 모래다짐말뚝으로 제작하였다. 평면변형률 토조의 크기를 고려하여 1:100의 축척으로 지반 및 구조물을 모델링하였다. 배면하중은 총 12단계로 평면변형률 토조에 맞게 제작한 Steel bar를 이용하여 가하였다. 길이에 대한 축척이 1/100이므로 응력에 대한 상사성 역시 1/100을 고려하면, 모형실험에서 하중단계 1단계와 2 단계 사이가 실제 지반의 응력레벨과 같아진다. 본 실험에서는 지반의 변형형상이 구조물의 하부를 완전히 통과할 때까지 배면하중을 증가시켰으며, 그때의 응력레벨은 실제지반의 약 80배에 해당하는 것으로 분석되었다.

4.4.1 호안구조물의 변위 계측 결과

배면 하중에 의한 호안구조물의 연직 및 수평변위와 부등침하, 그리고 지표면의 융기량 등을 측정하기 위해 그림 15와 같이 다이얼게이지를 설치하였다. 침하계측결과 점토지표면에서의 융기량은 최종 하중단계에서 모두 0으로 나타나, 배면하중에 의한 영향이 구조물 하부 지반 개량영역에 구속됨을 알 수 있었다.

모형구조물의 폭(40cm)과 높이(15cm)에 대해 구조물의 변위를 변형률로 나타낸 결과 침하량은 하중단계 1,2단계에서 발생하지 않았으며, 수평이동량은 2단계에서 0.0075%가 발생해 두 공법 모두 실제 수평하중에 대해 안정할 것으로 판단된다.

구조물의 부등침하 계측결과 0.05mm로 나타나 구조물 높이(15cm)에 대해 각각 0.02%, 0.03%가량 발생하는 것으로 나타났다.

모래다짐말뚝으로 치환된 지반의 수평이동량 및 침하량저감 효과도 좋은 것으로 나타났다.

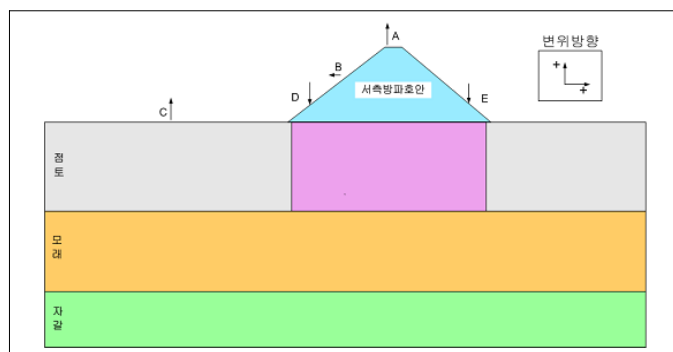


그림 15. 구조물의 변위계측기 위치도

표 2. 구조물의 각 측정지점별 계측결과

하중 (kN/m^2)	변위 (mm)		
	호안천단	호안측방	점토지표
	모래다짐말뚝	모래다짐말뚝	모래다짐말뚝
0.00	0.00	0.00	0.00
1.25	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	-0.03	0.00
3.75	0.00	-0.08	0.00
5.00	0.04	-0.17	0.00
6.25	0.10	-0.30	0.00
7.50	0.23	-0.54	0.00
8.75	0.34	-0.73	0.00
10.00	0.45	-0.91	0.00
11.25	0.49	-1.08	0.00
12.50	0.66	-1.39	0.00
13.75	0.75	-1.60	0.00
15.00	0.93	-1.75	0.00

표 3. 구조물의 길이에 대한 수직·수평 변형률 산정

하중 단계	모래다짐말뚝			
	침하		측방이동	
	침하량 (mm)	변형률 (%)	측방 이동량 (mm)	변형률 (%)
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.03	0.0075
4	0.04	0.03	0.17	0.04
8	0.45	0.30	0.91	0.23
12	0.93	0.62	1.75	0.43

표 4. 구조물의 부등침하 계측결과

하중 (kN/m^2)	모래다짐말뚝		
	침하량(mm)		단차(mm)
	제외측	제내측	
0.00	0.00	0.00	0
1.25	-0.02	-0.02	0
2.50	-0.07	-0.02	0.05
3.75	-0.12	0	0.12
5.00	-0.18	0.09	0.27
6.25	-0.26	0.30	0.56
7.50	-0.36	0.68	1.04
8.75	-0.44	1.01	1.45
10.00	-0.50	1.34	1.84
11.25	-0.54	1.63	2.17
12.50	-0.63	2.16	2.79
13.75	-0.68	2.51	3.19
15.00	-0.72	3.07	3.79

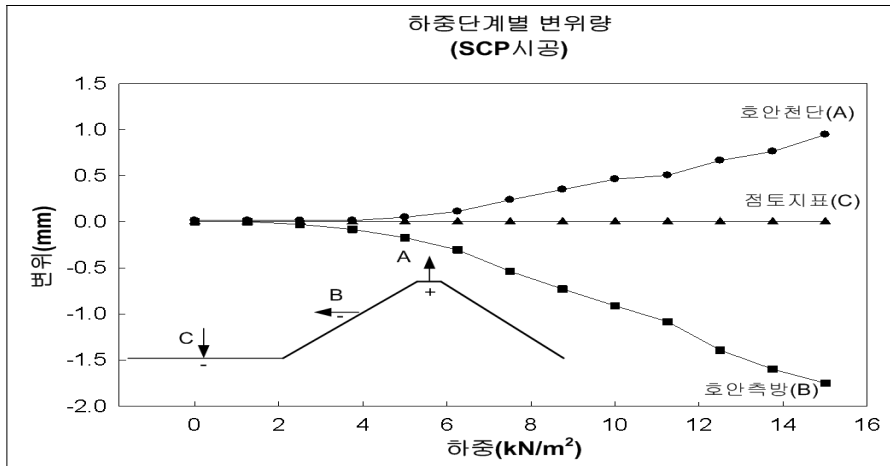


그림 16. 하중단계별 구조물의 변위 계측결과

4.4.2 지반변형 해석결과

하중단계에 따른 지반변형을 분석하였으며, 하중단계의 증가에 따라 파괴영역이 지반개량 구간내로 확장되는 것을 볼 수 있다. 모래다짐말뚝의 경우 파괴양상이 얇은기초의 수동영역의 파괴양상과 같이 발생함을 볼 수 있다. 그림 17~그림 20의 하중단계 1, 2의 경우 지반의 변형이 모래다짐말뚝의 차단으로 인해 배면하중 하부에서만 발생하므로 배면하중에 대해 안정한 것으로 판단된다.¹²⁾

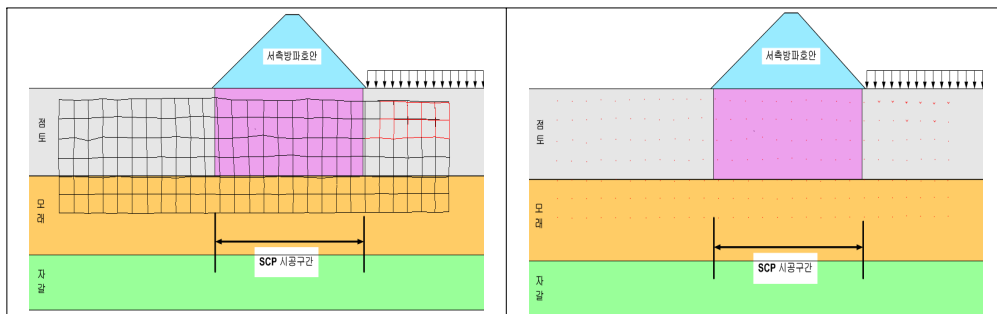


그림 17. 1단계 지반변형해석

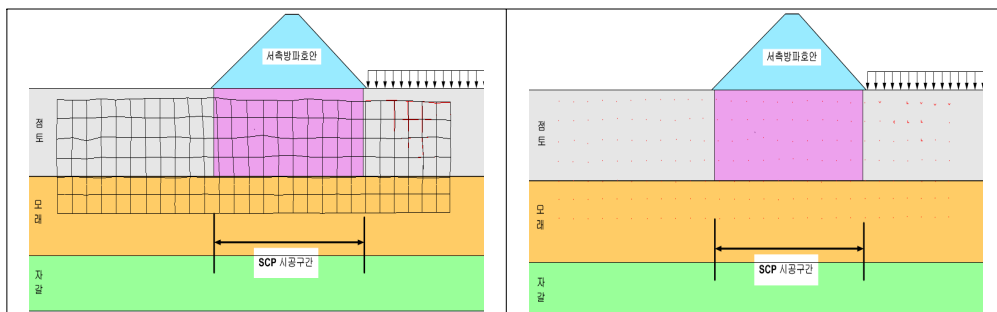


그림 18. 2단계 지반변형해석

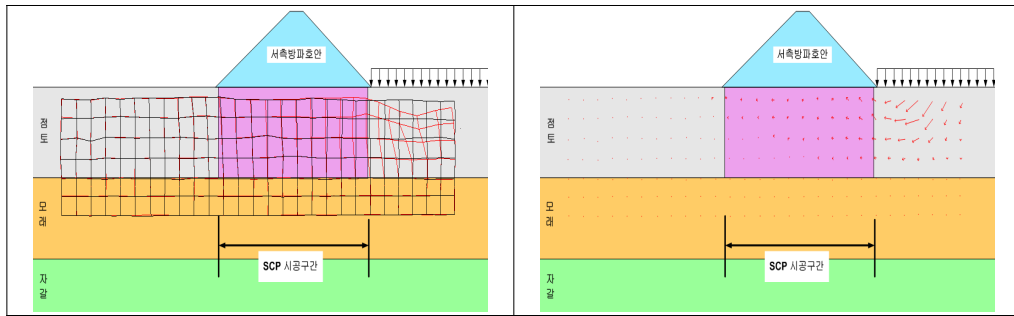


그림 20. 12단계 지반변형해석

5. 결론

호안 기초처리공에 대한 안정해석 및 대형 토조 모형실험 수행결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 서측방파호안 하부 지반 모래다짐말뚝의 치환율을 원호활동 해석에 의해 산정한 결과, 중심부 치환율 30%, 전면 및 후면부의 치환율은 20%가 적정한 것으로 나타났다.
- 2) 서측방파호안에 대한 시공단계별 안정성 해석 결과 원호활동, 변위 및 침하기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 3) 서측방파호안에 대한 잔류침하 검토결과 발생침하량이 6.5cm로서 허용잔류침하 10cm기준을 만족하여 침하에 대해 안정한 것으로 나타났다.
- 4) 모형구조물의 폭(40cm)과 높이(15cm)에 대해 구조물의 변위를 변형률로 나타낸 결과 침하량은 하중단계 1, 2단계에서 발생하지 않았으며, 수평이동량은 2단계에서 0.0075%가 발생해 실제 수평하중에 대해 안정할 것으로 판단된다.
- 5) 구조물의 부등침하 예측결과 0.05mm로 나타나 구조물 높이(15cm)에 대해 각각 0.02%, 0.033% 가량 발생하는 것으로 나타났다.
- 6) 지반변형해석 결과 모래다짐말뚝의 경우 파괴양상이 얇은기초의 수동영역의 파괴양상과 유사하게 발생하였다.

참고문헌

1. 박용원, 윤길립, 문대중(2000), “모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 특성연구”, 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제4호, pp. 117~128.
2. 배우석(2001), “쇄석말뚝으로 개량된 기초시스템의 지지력 및 침하특성”, 충북대학교 대학원 박사학위논문, pp. 6~29.
3. 배종순, 권정열, 권민재(2002), 제형하중을 받는 말뚝이 매입된 연약지반에서의 측방유동에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제3-c호, pp. 307~317.
4. 장신남(1996), “모래다짐말뚝 시공지반의 사면안정해석”, 명지대학교 대학원 박사학위논문, pp.

1 ~ 133.

5. 해양수산부(1999), “대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(Ⅱ)”, 한국해양연구소 연구보고서, pp. 1 ~ 299.
6. 해양수산부(2005), “항만 및 어항 설계 기준”, pp. 567 ~ 579
7. Atkinson, J.(1993), “An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations Through Critical State Soil Mechanics”, McGraw-Hill, pp. 316 ~ 323.
8. Balaam, N. P., and Poulos, H. G.(1978), “Methods of Analysis of Single Stone Columns”, Proceedings of Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques, Sydney, Australia, pp. 497 ~ 512.
9. Barksdale, R. D., and Bachus, R. C.(1983), “Design and Construction of Stone Columns-Vol. I”, Report No. FHWA/RD-83/026, FHWA, Washington D.C, pp. 1 ~ 194.
10. Huat, B. B. K., and Craig, W. H.(1994), “Simulation of a Trial Embankment Structure in Malaysia”, Proceedings of the International Conference Centrifuge 94, Singapore, pp. 51 ~ 57.
11. Juran, I., and Guermazi, A.(1988), “Settlement Response of Soft Soils Reinforced by Compacted Sand Columns”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.114, No.8, pp. 930 ~ 943.
12. Kimura, T., Nakase, A., Kusakabe, O., and Saitoh, K.(1985), “Behavior of Soil Improved by Sand Compaction Piles”, Proceeding of the 11th International Conference Soils and Foundation Engineering, Vol.2, pp. 1109 ~ 1112.