

## 준설매립 초연약지반의 압밀침하 거동 및 계측 사례

### Case history in prediction of consolidation settlement and monitoring

전제성<sup>1)</sup>, Je-Sung Jeon, 이종욱<sup>2)</sup>, Jong-Wook Lee, 임은상<sup>2)</sup>, Eun-Sang Im, 김재홍<sup>2)</sup>, Jae-Hong Kim,

1) 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Korea Water Resources Corporation, KIWE, Principal Researcher

2) 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Korea Water Resources Corporation, KIWE, Senior Researcher

**SYNOPSIS** : Performance of ground improvement project using prefabricated vertical drains of condition, in which approximately 10m dredged fill overlies original soft foundation layer in the coastal area has been conducted. From field monitoring results, excessive ground settlement compared to predicted settlement in design stage developed during the following one year. In order to predict the final consolidation behavior, recalculation of consolidation settlements and back analysis using observed settlements were conducted. Field monitoring results of surface settlements were evaluated, and then corrected because large shear deformation was occurred by construction events in the early stages of consolidation. To predict the consolidation behavior, material functions and in-situ conditions from laboratory consolidation test were re-analyzed. Using these results, height of additional embankment is estimated to satisfy residual settlement limit and maintain an adequate ground elevation. The recalculated time-settlement curve has been compared to field monitoring results after additional surcharge was applied.

**Keywords** : consolidation settlement, dredged fill, settlement monitoring, consolidation analysis

## 1. 서론

본 연구에서는 대규모 산업단지 개발을 목적으로 준설매립에 의해 형성된 연약지반을 대상으로, 지반 개량초기의 예측 압밀침하량을 크게 상회하는 실제 계측결과에 대하여, 그 원인분석 및 이와 관련된 각종 시험자료 분석과 추가시험, 추가 압밀해석을 통한 장래 압밀침하량 예측 등을 수행하였다. 또한 제한된 부지인도시기를 고려한 추가 성토고 산정 및 추가 압밀거동 예측결과와 실제 계측결과와의 비교, 분석을 수행하였다.

## 2. 연약지반 개량

### 2.1 지반조건 및 개량공법

남해안 해안가에 위치한 본 연구대상 연약지반은 대략 상부 10m의 준설매립층과 하부 9m의 원지반 연약점토층으로 구성되어 있으며, 상부 준설매립층은 준설후 3년의 방치기간이 확보되어 있다. 연약지반 개량은 수직배수제에 의해 수행되었으며, 전체적 시공단계는 그림 1과 같으며, 각 단계별 시공방법은 그림 2와 같다.

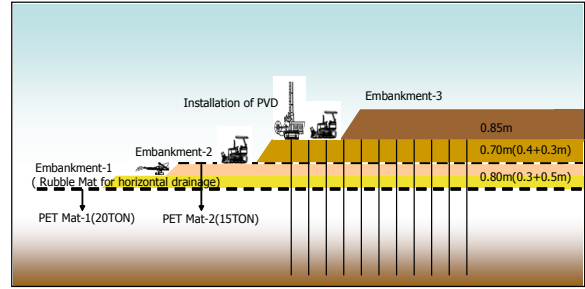


그림 1. 전체 지반개량 시공단계



① Spread PET Mat-1(20T)



② Rubble Mat-1, 0.8m



③ Spread PET Mat-2 (15T)



④ Embankment-2, 0.7m



⑤ Installation of PVD



⑥ Embankment-3, 0.85m

그림 2. 단계별 연약지반개량 시공방법

## 2.2 현장 계측결과 및 재분석

대상지반의 지표면 침하계측 결과, 지반개량이 완료되지 않은 시점에서의 침하계측 결과에서 이미 설계시 예측된 총 압밀침하량 보다 1.0m~1.8m를 상회하는 압밀침하가 발생하였다. 그림 3은 전체 대상지반중 2개소에 대한 시공이력 및 시간별 지표면침하 계측결과를 나타낸다.

결과에서 알 수 있듯이, 동일 시험성토구간 내에서도 절대 침하량에 1.5m 이상의 큰 차이가 발생하고 있으므로, 침하판 설치후 후속시공과정에서의 지반응기를 고려한 재분석이 필요하였다. 그러나 P1 지역의 경우, 일정시기 이후의 침하경향은 동일한 양상을 보였으나, P2 지역의 경우는 침하판 설치후 150일 이내에서 상부시공 영향 등으로 인해 구간별 융기량이 과다하게 나타났다. P1 지역에 대하여, 시공영향이 적은 임의시점을 대상으로 침하계측결과를 재 도시한 결과, PVD 타설후 33일 경과시점부터 3개소 침하결과는 동일한 경향을 나타내었다.

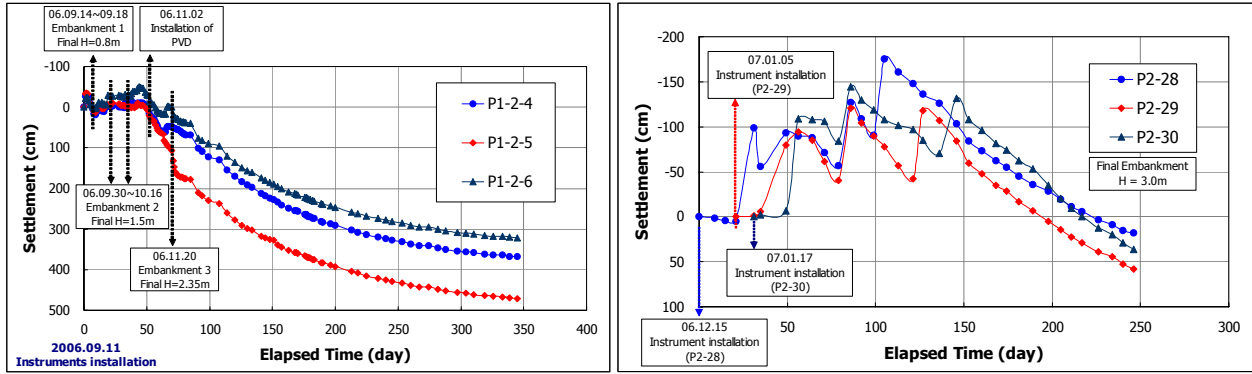


그림 3. 시공이력 및 지표면 침하계측 결과

### 3. 압밀해석 및 추가 성토고 산정

#### 3.1 압밀특성치 산정

현장 지표면침하 계측결과에 대한 재분석을 통해 시간별 침하이력을 재산정하였으며, 이러한 실 계측 결과대비 이론상의 압밀해석을 수행하였다. 기존 설계시와 지반개량시 수행했던 지반조사 결과 및 급회신규로 수행된 지반조사 결과분석을 통한 각 지층별 압밀특성치를 산정하여 최종적인 압밀해석에 적용하였다. 압밀해석시 초기 유효응력( $\sigma_0'$ ) 및 초기 간극비( $e_0$ ) 산정이 매우 중요한데, 초기 유효응력은 각 지반조사 결과분석에 의한 적정  $e-\sigma'$  상관식 산정 및 함수비-간극비 관계를 통해 유추하였다. 각 지층별 대표적 물성치 및 압밀특성치 산정결과는 표 1 및 표 2와 같다.

표 1. 지층별 대상지반의 물성치

Soil properties	Upper dredged fill layer (remolded sample except for water content)		Lower original clay layer (undisturbed soil)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Natural water content (%)	88.1	117.9	65.1	82.5
Passing No.200 sieve (%)	95.8	99.9	97.9	99.1
Specific gravity	2.71	2.73	2.70	2.73
Liquid limits (%)	76.3	96.2	54.5	88.9
Plasticity index	50.8	62.2	31.9	60.3
USCS	CH		CH	

표 2. 지층별 대상지반의 압밀특성치

Soil properties	Upper dredged fill layer (remolded sample)		Lower original clay layer (undisturbed soil)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Initial void ratio, $e_0$	2.3	2.9	1.6	2.3
Compression index, $c_c$	0.83	1.22	0.79	1.07
Vertical coefficient of consolidation, $c_v(\text{cm}^2/\text{s})$	5.0E-04	9.2E-04	3.0E-04	3.5E-04
Horizontal coefficient of consolidation, $c_h(\text{cm}^2/\text{s})$	6.0E-04	9.7E-04	4.6E-04	6.5E-04

#### 3.2 조건별 압밀해석

지층별 물성치 및 압밀특성치 산정결과를 바탕으로 각 단계별 성토조건을 반영한 압밀해석을 실시하였다. 당초 설계시는 압밀침하량을 계산하는데 있어  $m_v$  법을 적용하였다. 그러나 초연약 준설패립 지반의 경우, 초기 원지반 유효응력값이 매우 작으며 전체 압밀과정을 통해 변화하는 유효응력의 범위가 매우

큰 관계로 단일값의  $m_v$  값을 전체 압밀과정에 적용하는 것은 적절하지 않다고 판단된다. 본 연구에서는 압밀침하량 계산시  $C_c$ 법을 적용했으며, 성토구간 시공단계는 총 4단계(배수층+ 산토복토,  $\Delta h=1.5m \rightarrow$  PBD타설  $\rightarrow$  순성토,  $\Delta h=0.85m \rightarrow$  임의 추가성토)로 구분하여 압밀해석을 수행하였다. 압밀해석은 수평 및 수직배수조건에 대한 각각의 해석을 수행한 후, 동일시간대에서 이들을 종합적으로 고려하였다.

초기 해석결과 현장 계측결과와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었으나, 추가 성토고를 산정하는데 있어 해석결과와 신뢰도를 증가시키기 위해 계측 침하곡선과 유사한 경향으로 압밀특성치를 재산정하였다. 단, 계측결과 및 해석결과를 비교하는데 있어, PVD 타설 전후의 시기는 상부 시공영향으로 인해 과도한 전단변형이 발생한 관계로, 이 때까지의 침하계측 결과는 객관적인 비교대상에서 제외하였다. 즉, PVD 타설후 33일이 경과한 시점부터 동일구역에서의 각 지점별 침하계측결과가 유사한 거동을 나타내었으며, 이 때부터의 침하계측결과와 압밀해석 결과를 상호 비교하였다.

본 대상지역은 최종 부지인도 시기가 제한되어 있으며, 예상치 못했던 과다 침하발생으로 인해 현 상 태에서는 부지인도 시기 및 부지인도시의 계획 지반고를 만족시키기 못하는 것으로 나타났다. 이에 대한 대책으로서 추가 성토시공을 계획하였으며, 본 연구에서는 적정 추가 성토고 산정을 위한 성토고 조건별 압밀해석을 수행하였고, 그 결과는 그림 5와 같다. 최종적으로 본 대상지역에서는 추가 3m의 성토가 필요한 것으로 검토되었으며, 이에 따른 추가 성토시공을 진행하였다.

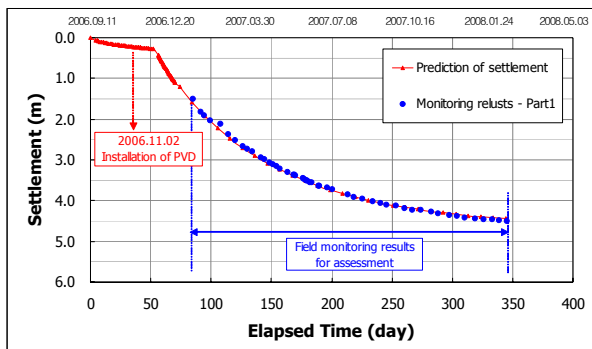


그림 4. 현 성토조건에 대한 압밀해석 결과

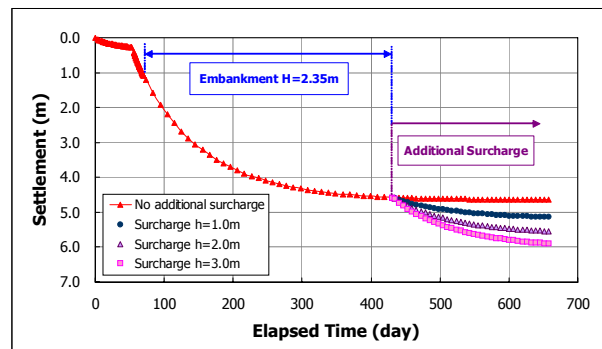


그림 5. 추가 성토고별 압밀해석 결과

### 3.3 압밀해석 및 계측결과 비교

초기 압밀해석후, 압밀해석 결과와의 비교시에는 346일 경과기간까지의 현장 침하계측 결과가 활용되었다. 당초 검토 후에도 지속적인 현장 계측을 실시했으며, 추가 성토시공이 438일~472일기간에 진행되었다. 그림 6은 당초 압밀해석 결과와 추가 성토시공 기간 및 그 이후의 현장 계측결과를 비교한 것으로, 기존 압밀해석 결과가 실제 현장의 압밀침하거동을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

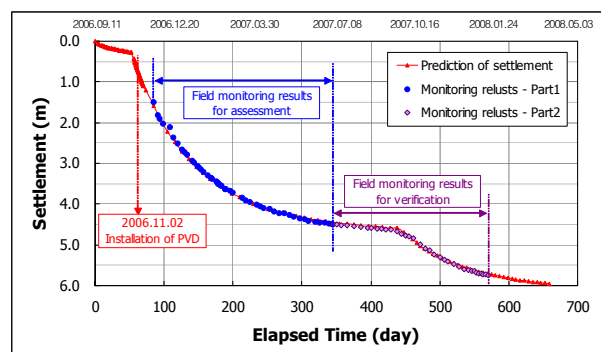


그림 6. 추가 성토시공후 계측 및 해석결과 비교

## 4. 결론

본 연구에서는 대규모 산업단지 개발을 목적으로 준설매립에 의해 형성된 연약지반을 대상으로, 지반 개량초기의 예측 압밀침하량을 크게 상회하는 실제 계측결과에 대하여, 그 원인분석 및 이와 관련된 각종 시험자료 분석과 추가시험, 추가 압밀해석을 통한 장래 압밀침하량 예측, 추가 성토고 산정 등을 수행하였다. 본 연구결과, 압밀해석시 초기 유효응력 산정 및 침하량 산정방식은 전체 압밀예측 결과에 매우 큰 영향을 미치며, 압밀거동에 대한 계측결과 분석시 지반개량 초기시기의 과도한 전단변형에 대

한 분석과 보정이 매우 중요하고, 이를 통한 해석결과의 역해석은 실제 연약지반의 압밀거동을 예측하는데 있어 매우 유용함을 확인할 수 있었다.

## **참고문헌**

1. Choa, V, Bo, M.W., and Chu, J (2001), "Soil improvement works for Changi East Reclamation Project", Ground Improvement, Vol.5, No.4, pp.141-153.
2. Chu, J, Bo, M.W., Chang, M.F., and Choa, V (2002), "Consolidation and Permeability Properties of Singapore Marine Clay", J Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.128, No.9, pp.724-732.
3. Gibson, R.E., Schiffman, R.L. and Cargill K.W. (1981), "The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays II. Finite Nonlinear Consolidation of Thick Homogeneous Layers", Canadian Geotechnical Journal, Vol.18, pp.280-293.