

# 준설매립지반의 지반개량 설계 및 시공 - 광양항 서측인입철도 건설공사

김 동 근<sup>1</sup>, 송 하 영<sup>2</sup>, 이 진 무<sup>3</sup>, 김 재 관<sup>4</sup>, 원 동 진<sup>5</sup>

## 1. 서론

최근 국내에서는 부산신항, 광양항, 평택항, 군장신항 및 인천남외항 등 대규모 항만개발이 급속히 이루어지고 있고, 이에 따라 항후 항만 물동량의 효율적 처리와 항만 경쟁력 강화를 위한 항만배후지의 용지 수요가 급속히 증가할 것이다. 일반적으로 대규모 항만 개발시 항내로의 선박 입출입을 위한 소요수심 확보를 위해 항로를 조성하게 되고, 항로 준설시 발생하는 준설토는 투기장내로 매립하거나, 외해에 투기하게 된다. 준설토로 매립된 투기장은 지반개량 후 항만관련단지나 산업단지, 배후단지 등으로 활용하게 된다. 국내 대부분의 항만은 낙동강, 섬진강, 영산강, 금강 등 강하구에 위치하여 항내 원지반이 퇴적 점성토로 구성되어 있으며, 항로 준설로 발생하는 준설토 역시 점성토로 구성된다. 따라서,

항만관련 단지조성시 지반개량의 대상이 되는 준설토 투기장내 매립지반은 원지반 점성토상에 점토질 준설토사가 매립된 2층의 연약점성토로 구성되는 경우가 일반적이다.

준설점토로 매립된 준설매립지반은 준설토 투기 후 수년 내에 지반개량을 하여 단지로 조성되며, 이때의 준설매립지 내의 상부 준설매립점토층은 자중 압밀이 진행되는 상태이며, 하부 원지반 점성토층은 상부 준설매립층 하중에 대하여 압밀이 진행되는 상태가 될 것이다. 압밀이 진행중인 미압밀상태의 준설매립지반의 지반개량시 압밀침하량은 미압밀 상태를 고려하지 못하였을 경우, 실제의 침하량이 예상보다 크게 발생되어 여러 가지 문제를 야기할 것이다. 따라서, 준설매립 점토층과 원지반 점성토층의 압밀도에 따라 압밀침하량이 큰 차이를 나타내는 경우의 지반개량 설계시 압밀도의 추정이 상당히 중요한 요소로 작용한다. 본 고에서는 광양항 컨테이너 화물의 원활한 철송(컨테이너 화물의 철도를 이용한 수송)을 위하여 건설중인 광양항 서측인입철도 건설공사의 지반개량 설계 및 시공사례를 통하여 압

<sup>\*1</sup> 에스케이건설(주) 토목기술본부 본부장  
<sup>\*2</sup> 에스케이건설(주) 광양항 서측인입철도 건설공사 현장소장  
<sup>\*3</sup> 에스케이건설(주) Geotask팀 팀장  
<sup>\*4</sup> 에스케이건설(주) 토목기술팀 팀장  
<sup>\*5</sup> 에스케이건설(주) 토목기술팀 대리(djwon@skec.co.kr)

밀진행 상태의 준설매립지반에서의 신뢰성 높은 압 밀침하량 산정방법에 대하여 기술하였다.

## 2. 과업구간 및 지반개량 시공 개요

해양수산부에서 설계·시공 일괄입찰로 발주한 광양항 서측인입철도 건설공사 과업의 노선범위는 그림 1에 나타난 바와 같이 전라남도 광양시 초남리에서 「광양항 3-1단계 컨테이너 부두」까지이며, 과업구간은 3개소의 터널과 7개소의 교량 건설, 신호장 1개소 확장 및 철송장 2개소 신설을 포함하고 있다. 그 중 광양항 준설토 투기장 매립지 내에 위치하는 철송장 #1과 #2는 화물열차 및 Y/T(Yard Tractor)의 운영을 위한 철도와 도로 외에 컨테이너 적하와 야적을 위한 용지 등이 계획되어 있다. 본 고에서 언급할 지반개량구간은 철송장 #1과 #2가 건설되게 될 지역이다.

과업대상 지반개량 구역 중 철송장 #1 지역은 최근까지 준설토를 투기하여 매립, 조성된 대심도 초연약지반을 지반개량하여 조성하여야 할 지역이며,

철송장 #2 지역은 지반개량이 완료된 3-1단계 지역 및 현재 지반개량중인 3-2단계 지역과 지반개량 구간이 중복되어 있으나, 지반개량하중이 62 kPa으로 컨테이너 부두지역의 지반개량하중 15 kPa보다 크기 때문에 추가의 지반개량이 필요한 지역이다. 이 지역은 기존 컨테이너 부두지역의 지반개량시 시공된 연직배수재 및 수평배수층이 그 기능을 유지하고 있어 별도의 추가 재하성토만으로도 지반개량이 가능한 지역이다. 따라서 본 고에서는 철송장 #1지역의 지반개량에 대하여 중점적으로 기술한다.

철송장 #1지역의 지반개량시 그림 2와 같이 3-3단계 부지와외의 시공경계 구분 및 시공장비의 원활한 운영을 위한 경계토제와 본선 선로 하부지반의 신속한 연약지반 처리 및 잔류침하 최소화를 위한 본선 토제를 강제치환공법에 의해 우선 시공하는 것으로 계획하였다. 표층처리공법으로는 가토제 시공과 병행하여 PTM공법으로 표층강도를 증진시킨 후, PET 저면매트 포설 후 벨트컨베이어에 의해 쇄석을 이용하여 수평배수층 80cm를 2단계로 시공하는 것으로 계획하였다. 철로가 지나가는 본선토제와 경계 토제 사이는 지반개량하중(62kPa)이 크고, 연약층

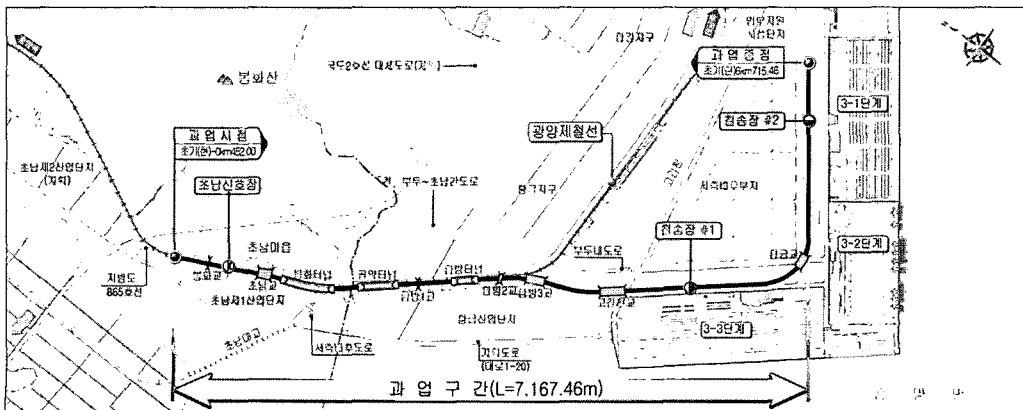


그림 1. 과업 위치도

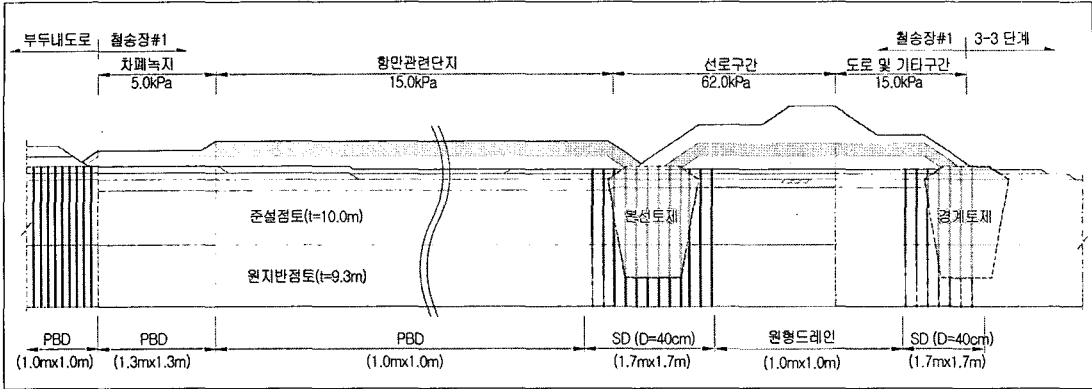


그림 2. 철송장 #1구간 지반개량 시공계획

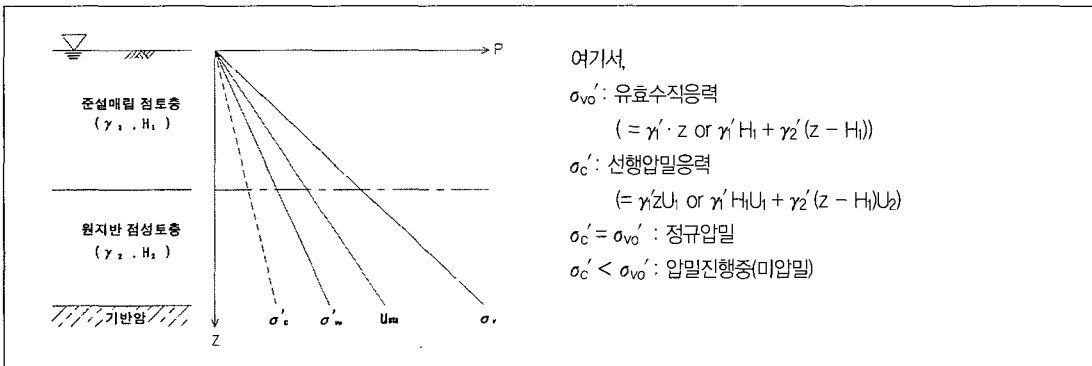


그림 3. 압밀이 진행중인 지반의 압밀도

심도가 깊어 압밀침하량이 5~9m로 매우 크게 예측 되었으므로 연직배수재의 변형, 굴곡 및 꺾임 상태에서 통수능력이 우수한 나선형 원형드레인(PCD)을 연직배수재로 적용하였고, PCD의 타입이 불가한 가토제 구간의 지반개량을 위한 연직배수공법은 시공성을 고려하여 Sand Drain으로 선정하였다. 항만관련부지 및 차폐녹지는 지반개량하중이 각각 15kPa, 5kPa로 상대적으로 작고, 이에 따른 예상 침하량이 작으며, 지반조건 및 시공조건이 유사한 인접 부두내 도로 및 3-1단계, 3-2단계 현장에 적용된 PBD로 선정하였다.

### 3. 압밀침하량 산정방법

#### 3.1 압밀진행중인 지반의 선행압밀하중

투기장내 준설매립지반은 펌프준설 등 인위적인 방법에 의해 급속히 퇴적이 진행되어 조성된 것으로 이러한 자중압밀이 진행중인 지반에서는 과잉간극수압의 발생속도가 소산속도보다 크게되어 압밀이 완료된 상태가 아닌 그림 3과 같은 부분압밀 또는 미압밀 상태가 된다. 미압밀 지반의 선행압밀하중은 정규압밀상태의 선행압밀하중(유효상재하중)보다

압밀도에 반비례하여 작기 때문에 압밀도를 고려하지 않고 압밀침하량을 산정할 경우 실제보다 큰 선행압밀하중을 고려하게 되어 침하량을 실제보다 적은 것으로 예측하게 된다.

### 3.2 압밀진행중인 지반의 압밀도와 압밀침하량

그림 4는 광양항 매립지 내 철송장 #1 지역의 ○○구역의 지반조건이다. 4장에서 언급할 각종 지반조사 결과 산정된 준설매립층과 원지반점토층의 압밀도는 각각 70%, 40%이었다. 압밀침하량 산정시 준설매립층과 원지반점토층을 정규압밀상태로 가정하였을 경우의 각 토층의 중앙에서의 선행압밀하중 (=유효수직응력)은 각각 2.30 tf/m<sup>2</sup>, 7.03 tf/m<sup>2</sup>이지만, 압밀진행중인 압밀도 70%, 40%를 적용하였을 경우의 선행압밀하중은 각각 1.61 tf/m<sup>2</sup>, 4.26 tf/m<sup>2</sup>이다.

압밀도를 고려하지 않고 침하량을 계산하면,

$$\begin{aligned}
 S_c &= \frac{C_c}{1+e_0} \times H \times \log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \nabla\sigma}{\sigma'_{vo}}\right) \\
 &= \frac{1.15}{1+2.3} \times 9.8 \times \log\left(\frac{2.30+1}{2.30}\right) + \frac{1.08}{1+1.8} \times 8.8 \\
 &\quad \times \log\left(\frac{7.03+1}{7.03}\right) = 73.1\text{cm}
 \end{aligned}$$

압밀도 70%, 40%를 고려하고 침하량을 계산하면,

$$\begin{aligned}
 S_c &= \frac{C_c}{1+e_0} \times H \times \log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \nabla\sigma}{\sigma'_{vo}}\right) \\
 &= \frac{1.15}{1+2.3} \times 9.8 \times \log\left(\frac{1.61+1}{1.61}\right) + \frac{1.08}{1+1.8} \times 8.8
 \end{aligned}$$

준설점토층(H=9.8m)	원지반점토층(H=8.8m)
$\gamma_1 = 1.50\text{tf/m}^3$	$\gamma_1 = 1.58\text{tf/m}^3$
U=100% 고려	U = 70% 고려
$e_0 = 2.3$	$e_0 = 1.8$
$C_c = 1.15$	$C_c = 1.08$

그림 4. 침하량 산정시 지층조건(부지내 ○○구역)

$$\times \log\left(\frac{4.26+1}{4.26}\right) = 102.8\text{cm}$$

위에서 나타낸 바와 같이 압밀도를 고려하지 않았을 경우 압밀도를 고려하였을 경우에 비하여 약 30%정도 침하량이 과소평가된다. 따라서 준설매립된 지반의 압밀침하량 산정시 준설매립층과 원지반점토층의 압밀도를 고려하지 않으면 침하량을 과소평가하게 되어 실제 시공시 침하량이 과대해지는 문제점이 발생한다.

## 4. 과업지역 지반특성

### 4.1 지층개요 및 특성

광양항 지역은 준설토를 펌프준설방식으로 투기하여 매립, 조성되었고, 매립된 연약지반은 준설매립 점토로 조성된 매립층과 해성조건에서 퇴적된 원지반 퇴적층으로 나눌 수 있다. 지반조사 결과 그림 5와 같이 준설매립층은 8~12m, 원지반 연약층인 해성퇴적층은 8~25m의 층후로 분포하는 것으로 나타났다.

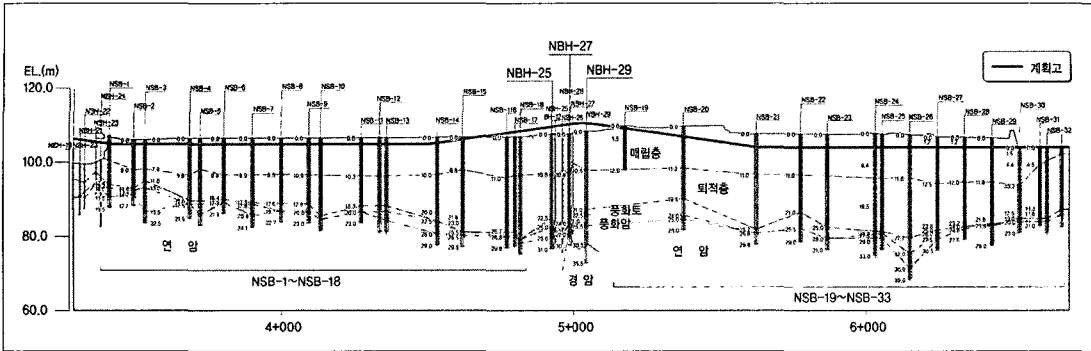
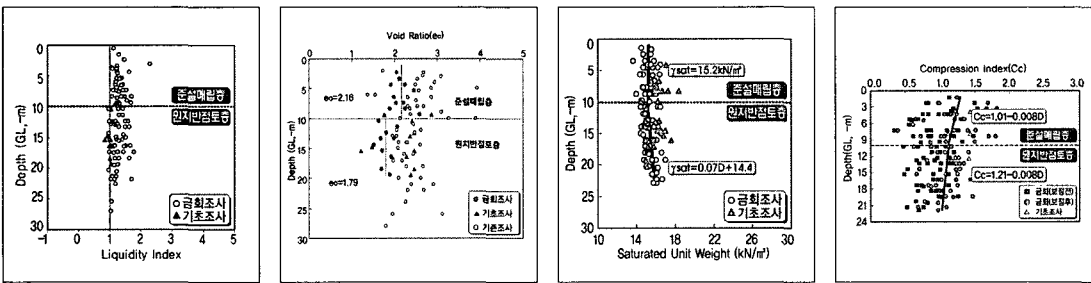


그림 5. 과업지역 지층특성



(a) 액성지수 (b) 간극비 (c) 단위중량 (d) 압축지수

그림 6. 과업지역의 지반조사 분석결과

지반특성은 준설패립층과 원지반 점토층 모두 고 압축성의 점토(CI)로서 지반조사 분석결과를 그림 6에 나타내었다. 액성지수는 준설패립층과 원지반 점토층 모두 1이상으로 쉽게 유동할 수 있는 초연약 상태로 나타났으며, 간극비는 준설패립층 2.16, 원지반 퇴적층 1.79로 준설패립층이 더 압축성이 큰 것으로 나타났고, 단위중량은 준설패립층의 경우 심도 증가에 따른 상관성이 없으며, 원지반 점토층에서는 심도에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 압축지수의 경우 준설패립층이 원지반 점토층보다 큰 경향을 나타내었고, 심도에 따라 미약하게나마 감소하는 경향을 나타냈다.

## 4.2 준설패립층과 원지반퇴적층의 구분

과업지역의 경우 원지반 점성토층 상에 준설패립한 상태 그대로 보존된 지역으로, 준설패립층과 원지반 점성토층의 퇴적이력이 달라 압밀특성 및 압밀도가 상이할 것으로 판단하였다. 따라서, 지반조사 시 2개의 토층의 경계파악에 우선적으로 주안점을 두었다. 토층 경계구분은 준설패립 전의 해저 지형도 및 준설패립층이 원지반 점토층과 퇴적환경 및 시기 등에 큰 차이를 나타낸다는 점에 착안, 퇴적이력 조사를 수행하였다. 퇴적이력 조사는 해수면 변동에 의한 퇴적물의 광물학적, 물리적, 지화학적, 생물학적 변화를 분석, 퇴적환경을 구분함으로써 원지

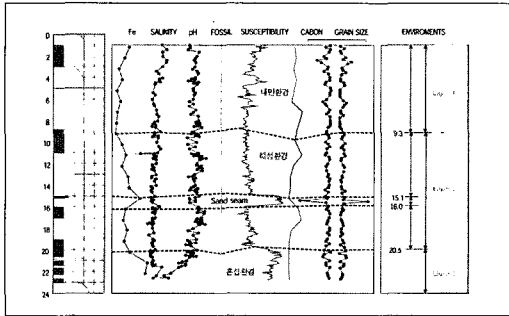


그림 7. 과업지역 퇴적환경 구분

반점토와 준설패립지반의 경계부 파악이 가능한 분석 기술로 알려져 있다. 퇴적이력 조사결과 그림 7과 같이 토층에 포함된 광물 함유량(Fe 등), 지화학적 성분분석(Salinity, PH) 물리적 특성(전기비저항, 입도) 및 유공층을 통한 생물학적 특성분석을 통한 퇴적환경 구분 등을 종합적으로 검토하여 총 3개의 토층(Layer)으로 구분하였으며, 각 토층의 분류 및 퇴적환경, 특성은 표 1에 나타났다. 퇴적이력 조사에 의한 준설패립층은 Layer-1에 해당하는 상부 9.3m 정도로 매립전 해저지형도 분석결과로 파악한 준설패립층 두께 10m와 유사한 결과를 나타냈으며 설계시 준설패립층의 두께를 10m로 적용하였다. 이러한 결과를 토대로 원지반 조사 및 실내시험에 의한 연약층의 물리적, 역학적, 압밀특성을 상부 준설패립층과 하부 원지반 점토층에 대하여 구분·분석, 지반개량을 위한 설계정수를 산정하였다.

### 4.3 지층별 압밀도 산정

앞서 언급한 바와 같이 원지반 점토층상에 준설패립하여 조성된 지반의 경우 준설패립층 하중에 의한 원지반층에서의 압밀도 및 자중압밀이 진행중인 준설패립층에서의 압밀도가 압밀침하량에 큰 영향을

표 1. 퇴적층 구분 및 특성

Layer	층분류	환경	퇴적층 특성
1	준설패립층	산화 환경	• 담수환경의 유기물이 풍부, 천해의 화석이 포함되지 않은 퇴적물로 매립
2	해성 퇴적층	환원 환경	• 해성 퇴적환경에서 형성된 해성퇴적층
3	퇴적층	산화 환경	• 해수면 상승초기 담수유입환경에서 퇴적된 층

미치므로 신뢰성 높은 압밀침하량 예측을 위해 연약층의 압밀도 파악이 중요하다. 정확한 압밀도 산정을 위해 그림 8과 같이 준설토 투기전·후 지반고를 이용한 역해석, 표준압밀 및 CRS 시험, CPTu 소산 시험, 피에조미터 현장시험 방법 등 다양한 기법을 이용하여 압밀도를 추정하였다. 역해석은 준설토 투기이력과 과거 원지반의 지층물성치를 이용하여 압밀침하계산을 수행한 후 계산결과로부터 현상태의 원지반 점성토층의 압밀도를 평가한 것으로 50~53%정도의 압밀도를 나타내었다. 표준압밀 및 CRS시험에서는  $P_c$  및 OCR을 이용하여 현상태의 압밀도를 파악하였고, 준설패립층은 65~75%, 원지반 점토층은 14~95%의 범위를 나타내었다. CPTu 소산시험시에는 간극수압의 수렴이 완전히 이루어질 수 있도록 최소 48시간 이상 관측하여 정도 높은 압밀도 파악에 노력하였으며, 부지내 대표지역에 피에조미터를 매설한 후 간극수압을 계측하여 압밀도를 파악하였다. CPTu 소산시험과 피에조미터에 의한 압밀도는 준설패립층 60~80%, 원지반 점토층 30~55%의 범위를 나타냈다. 이상의 시험결과를 표 2에 나타냈으며, 압밀침하량 산정시 준설패립층과 원지반 점토층 각각에 대하여 70%, 40%를 적용하였다. 원지반 점토층의 경우 준설패립층보다 배수거

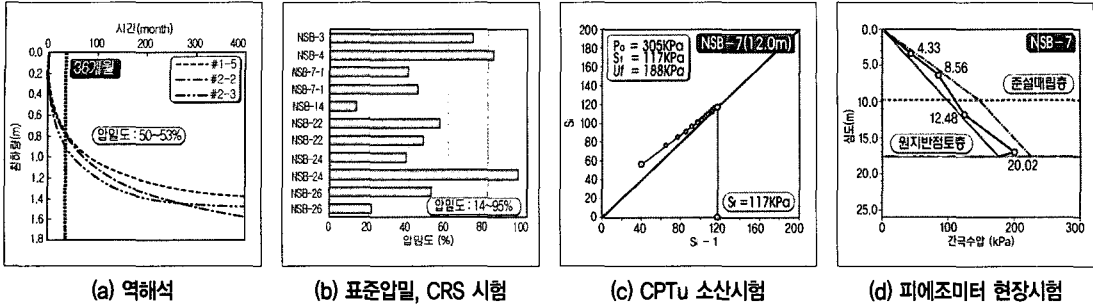


그림 8. 연약점토층의 압밀도 파악

표 2. 준설패립층과 원지반 점토층의 압밀도

토 층	압밀도(%)				설계 적용 압밀도(%)
	역해석	표준압밀, CRS 시험	CPTu 소산시험	피에조미터 시험	
준설패립층	-	65~75	60~80	70	70
원지반점토층	50~53	14~95	30~55	40~50	40

리가 깊어 압밀도가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다.

## 5. 압밀침하량의 산정

### 5.1 잔류침하량 및 최적성토고 산정

본 과업의 지반개량부지는 그림 2에 나타난 바와 같이 컨테이너의 적하가 이루어지는 철송장 지역 내의 철도 노선 구간과 도로/단지 및 녹지로 이용되는 것으로 계획되었다. 철송장 지역은 철도 선로침하 발생시 열차 주행 안정성 문제와 빈번한 선로보수로 인한 비용 증가가 예상되어 잔류침하 기준을 5cm로, 설계하중은 62kPa로 적용하였고, 도로/단지 및 녹지는 각각 10cm, 30cm로 적용하였다.

선형재해성토와 연직배수재에 의한 지반개량공법의 잔류침하량은 재해성토고 및 방치기간에 의해

조절이 가능한데, 일반적으로 지반개량 설계시 배수재 간격에 따른 목표압밀기간 및 허용잔류침하량 기준을 고정시켜 놓고, 공용하중에 대한 잔류침하량이 허용침하량 이내로 발생하게 계산하여 재해성토고를 시행착오법(trial and error)으로 산정하게 된다. 이러한 방식의 재해성토고 산정은 시행착오법으로 인한 많은 시간이 소요되고 지반개량 목표인 허용잔류침하량과 목표압밀도를 동시에 만족시키기가 어려운 불합리한 점이 있다.

본 과업에선 이러한 시행착오법에 의한 불합리한 점을 개선하고자 재해성토고 산정시 그림 9에 나타난 바와 같이 최적성토고 개념을 적용하였다. 다수의 성토고를 가정하여 압밀해석을 수행, 성토고-침하량 곡선을 도시한 후 구하고자 하는 압밀도(U=95%, 100%)의 침하선을 작도한다. 이때, 성토고-침하량의 관계가 비선형적 거동을 보이므로 다항식에 의해 추세선으로 침하경향을 도시한다. 침하 후의 여성고가 부지계획고와 교차하는 교점(①)을

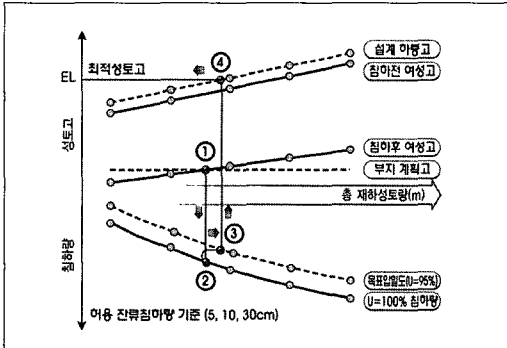


그림 9. 최적성토고 산정개념

구하여 그 때의 압밀도 100% 침하량(②)으로부터 허용잔류침하량(5cm, 10cm, 30cm)을 뺀 지점에서 수평방향으로 압밀도 95%의 침하추세선과 만나는 교점(③)을 구하고, 그점에서 수직으로 선을 그어 설계 하중고 직선과 교차하는 점(④)을 구하면 그 점의 Y 좌표가 최적성토고이다. 이 방법을 사용하여 목표압밀도와 허용잔류침하량 기준을 동시에 만족시키는 재하성토고를 간편하고도 합리적으로 산정할 수 있었다.

## 5.2 압밀침하량 산정치와 실측치의 비교, 분석

앞 서 언급한 준설패립층과 원지반 퇴적층의 경계구분, 준설패립층과 원지반 퇴적층의 압밀도 산정, 최적성토고 및 압밀침하량 산정결과의 적정성 검증을 위해 과업구간 중 철송장 #1 지역 내의 지반개량이 종료된 OO구역에서의 압밀침하량 계측결과와 압밀 진행중인 준설패립층 및 원지반 점성토층의 압밀도를 고려한 경우 및 압밀도를 고려하지 않은 경우의 압밀 침하량 계산결과를 그림 10에 비교하여 나타내었다. 압밀침하량의 계산은 수평배수

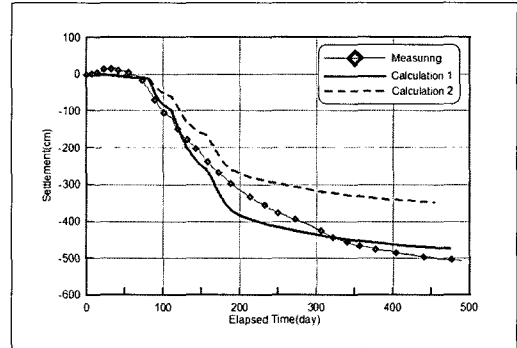


그림 10. 철송장 #1 내의 OO구역에서의 압밀침하량

층 시공, 토사복토, PBD타설 및 재하성토 등 복잡한 단계별 시공 및 연직배수재에 의한 압밀축진효과를 모두 고려할 수 있는 유한차분 압밀해석 프로그램인 TCON을 이용하였다.

그림 10의 침하량 산정결과, 지반조사로 파악된 준설패립층 및 원지반 점성토층의 압밀도를 고려하여 해석한 침하량 결과(Calculation 1)는 실측치의 95%로 나타났으나, 압밀도를 고려하지 않았을 경우의 침하량(Calculation 2)은 실측치의 70%로 상당히 과소하게 산정되었고, 압밀도를 고려한 경우가 실측치에 더욱 부합하는 것으로 나타났다. 압밀도를 고려하였을 경우의 침하량이 실측치와 크지는 않지만 5%정도 작게 산정된 이유는 침하량 계산시 구간별 대표 물성치를 사용하여 실제 계측이 이루어진 구역에서의 지반물성치와 일부 차이가 있었을 것이고, 설계시 파악하여 계산시 적용한 준설패립층과 원지반 퇴적층의 압밀도가 실제 시공시보다 시간경과에 따라 다소 작게 적용되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 실제 지반개량 시공시 시공 직전 피조콘 소산시험 등을 통하여 시공당시 대상지층의 압밀도를 파악하여 적용한다면 좀 더 정도 높은 압밀침하량을 예측할 수 있을 것이다.



## 6. 결론

본 고에서는 광양항 서측인입철도 건설공사 중 광양항 준설토 투기장 매립지내에 조성하고 있는 철송장의 지반개량 설계 및 시공사례를 통하여 압밀이 진행중인 준설매립지반에서의 압밀도 파악의 중요성 및 파악방법, 신뢰성 있는 압밀침하량 산정방법에 대하여 소개하였다.

퇴적이력이 확연히 구분되는 준설매립층과 원지반 점토층의 경계파악을 위해 해저 지형도 및 퇴적이력 조사를 수행하였으며, 각 층의 정도 높은 설계 압밀도를 산정하기 위해 준설토 투기 전·후의 지반고를 이용한 역해석, 표준압밀 및 CRS시험, CPTu 소산시험 및 피에조미터 현장시험 등을 적용하였다. 다양한 지반조사로 파악한 압밀도를 적용하여 압밀침하량을 산정하고 실제 발생한 침하량과 비교한 결과, 압밀진행중인 지반의 압밀도를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 실측치에 더욱 부합한 결과를 나타내는 것으로 나타났다.

광양항 서측인입철도 건설공사의 철송장 부지의 특성과 유사한 준설매립지반을 지반개량하여 조성되게 될 광양항, 부산신항 등의 많은 항만관련 단지

공사에 있어 본 고에서 소개한 준설매립층과 원지반 점성토층의 경계파악, 각 층의 압밀도 추정, 지반개량시 잔류침하량을 만족하는 최적성토고 등 지반개량공법 적용시의 압밀침하량 추정방법이 계획 및 설계시 참고자료로 널리 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고 문헌

1. 에스케이건설(2005), 광양항 서측인입철도 건설공사 기본설계보고서
2. 여수지방 해양수산청(2005. 12), 광양항 서측인입철도 건설공사 실시설계보고서 및 지반조사보고서
3. 김현태, 홍병만, 백경중, 김상규(2003), "급속퇴적지반의 미압밀상태 평가", 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제5호, pp. 89-98
4. 한국지반공학회(2003), 지반조사결과의 해석 및 이용, 구미서관
5. M.W.Bo, J.Chu, B.K.Low, V.Choa(2003), SOIL IMPROVEMENT - Prefabricated Vertical Drain Techniques, THOMSON

