

# 간척지 체절 후 건조수축 자연침하 사례

김현태<sup>1)</sup>, 유전용<sup>2)</sup>, 홍병민<sup>3)</sup>, 백경종<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 한국농촌공사 <sup>2)</sup> 한국농촌공사  
<sup>3)</sup> 한국농촌공사 <sup>4)</sup> (주)디솔컨설턴트

## 1. 서론

해성퇴적토로 형성된 간척지에 방조제를 체절하여 간척지를 개발하면 간척지는 표층의 대기건조와 자중압밀에 의해 매우 큰 자연침하가 발생된다. 이 침하량이 크기 때문에 설계 시 이 침하량을 고려하지 않고 설계를 하여 준공시점에 표고가 계획보다 낮아져 용배수 체계 및 도로 시설 등에 문제가 발생하여 준공처리에 어려움을 겪는 사례가 있다.

본 연구에서는 기 개발된 간척지 개발 지구에 대한 당초 설계 시와 현재의 지반특성의 변화를 분석하였다. 그리고 간극비변화로부터 자연침하량을 분석하고 대기건조 자연침하에 대한 수치해석을 실시하여 자연침하량 실험자료와 비교분석을 통하여 간척지 조성 후 간척지지반의 자연침하 특성을 분석하였다.

## 2. 방조제 체절 후 간척지 토질정수 변화

### 2.1 콘관입저항치 변화

간척지 지반에 대한 콘관입시험결과를 보면 그림 1과 같이 콘관입저항치가 설계시 보다 준공시점인 현재 매우 크게 증가하였음을 보여주고 있다. 콘관입저항치의 증가는 표층에서 크고 심도가 깊어질수록 증가량이 작아지는 특성을 보이고 있다.

콘관입저항치의 증가는 설계시보다 3~5년이 경과한 금회가 1.5~10배 이상 증가한 것으로 나타났다. 이는 간척지 표층이 건조수축에 의해 단단해지면서 자연침하가 발생한 것으로 건조수축이 발생한 심도는 2~3m 정도가 되는 것으로 나타났다.

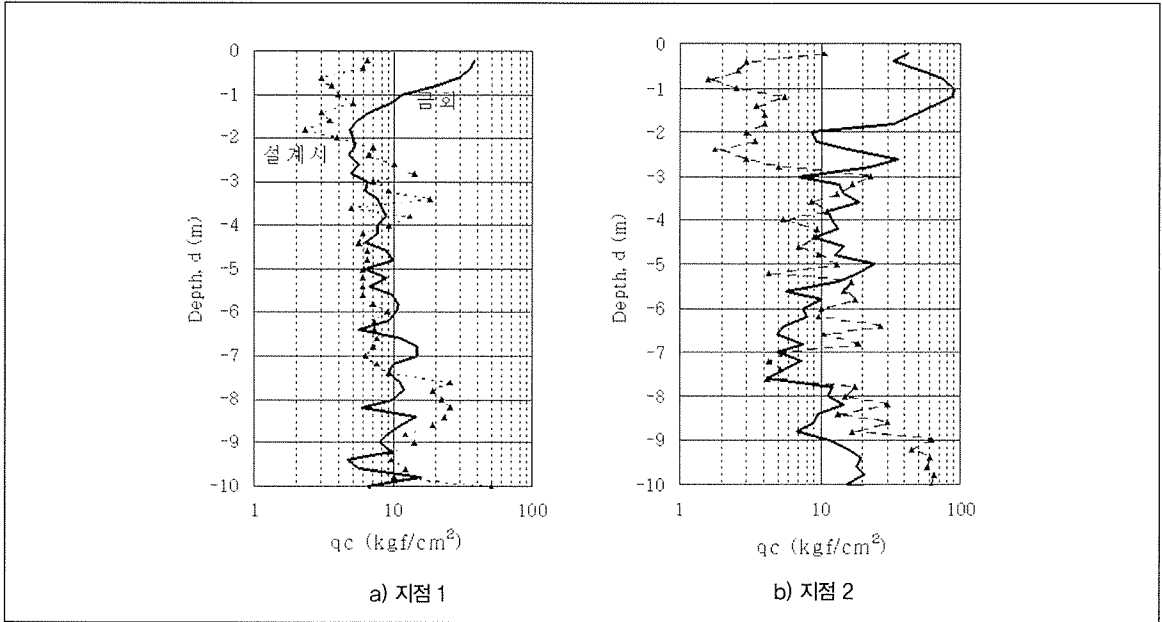


그림 1. 설계시와 금회 조사 콘관입시험결과 비교

### 2.2 함수비 변화

간척지 기초지반 표층(심도 0~3m) 흙의 함수비를 보면 그림 2와 같이 초기 설계 시는  $w_n=41.5\%$ 이던 것이 건조수축이 진행되어 현재  $w_n=30.09\%$ 로 크게 감소되어 있다.

### 2.3 단위중량변화

간척지 기초지반 표층(심도 0~3m) 흙의 단위중량은 그림 3과 같이 초기 설계 시는  $r_t=1.794\text{tf/m}^3$ 이던 것이 건조수축이 진행되어 현재  $r_t=1.929\text{tf/m}^3$ 로 크게 증가되어 있다.

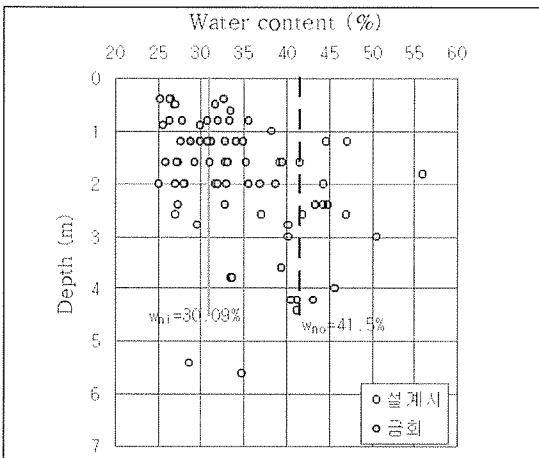


그림 2. 함수비 변화도

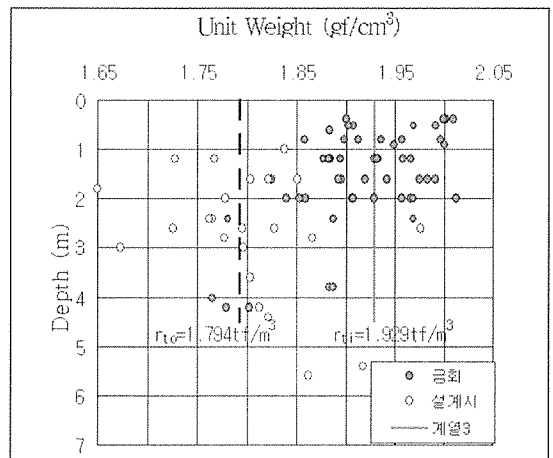


그림 3. 흙의 단위중량 변화도

## 2.4 간극비 변화

간척지 기초지반 표층(심도 0~3m) 흙의 간극비는 그림 4와 같이 초기 설계 시는  $e=1.124$ 이던 것이 건조수축이 진행되어 현재  $e=0.834$ 로 크게 감소되어 있는 것으로 분석되었다.

## 2.5 간극비 변화로부터 시공 전후

### 자연침하량 산정

설계 시 조사자료의 평균 간극비( $e_{00}=1.124$ )가 현재의 평균 간극비( $e_{01}=0.834$ )로 크게 감소되어 있다. 이는 지하수위 이상의 표층이 건조수축에 의해 감소된 것으로 건조수축에 의한 침하량을 계산하면 다음과 같다.

$$S_c = \frac{\Delta e}{1+e_0} = H \text{ 에서}$$

$$H=3\text{m 일 때 } \frac{1.124-0.834}{1+1.124} \times 300 = 41\text{cm}$$

$$H=2\text{m 일 때 } \frac{1.124-0.834}{1+1.124} \times 200 = 27.3\text{cm}$$

$$H=1\text{m 일 때 } \frac{1.124-0.834}{1+1.124} \times 100 = 13.7\text{cm가 발}$$

생될 수 있음을 알 수 있다.

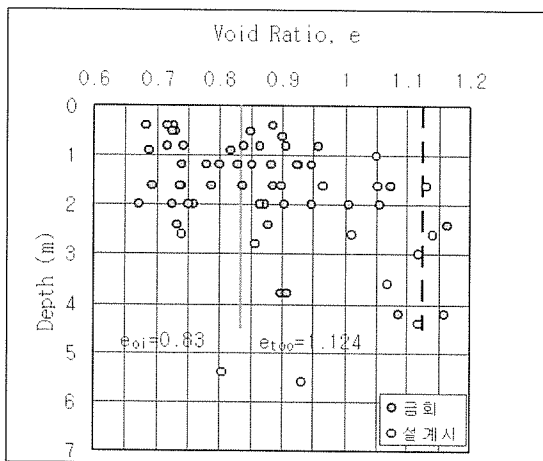


그림 4. 간극비 변화도

## 3. 대기건조 자연침하 수치해석

### 3.1 대기건조특성과 기존이론

대기건조에 의한 흙의 표면에서 발생하는 물의 흐름은 모관작용(Capillary)과 확산작용(Diffusion)에 의해 발생된다. 여기서 모관작용은 Granular soils에서 주도적인 영향요소이고, 확산작용은 Fine grained soils에서 주도적인 영향요소라고 한다.

건조과정의 분석은 대기건조현상의 계측조사 자료에 의존하고 있다. 확산건조 과정의 수학적적인 분석은 다음 확산방정식에 기초하고 있다.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dz} \left( D \frac{dm}{dz} \right) \quad (1)$$

여기서,  $m$  : Volumetric moisture content

$t$  : Time (days)

$z$  : Vertical Co-ordinate (m)

$D$  : Soil moisture diffusivity ( $m^2/day$ )

등온조건에 의한 전형적인 흙의 건조곡선은 그림 5와

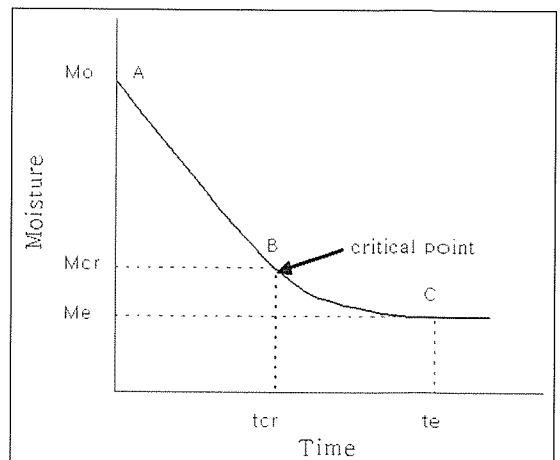


그림 5. 등온조건에 의한 이상적인 건조곡선

같다. 그림에서 점 A는 초기함수비(Mo), 점 B는 한계함수비(Mcr) 그리고 점 C는 평형함수비(Me)를 나타낸다.

건조는 두 단계로 구분되어진다. 첫 번째 단계 (A-B)는 건조가 일정한 속도로 일어나는 일정 건조비기간(Constant rate drying period)이라 하고, 두 번째 단계 (B-C)는 더 이상 건조되지 않는 te시간까지 건조속도가 감소하는 기간(Falling rate drying period)이라 한다.

흙의 건조는 흙 표면에 대기 건조력(Potential evaporation), 초기함수비, 층두께, 흙 수분확산력의 역할에 의해 의존된다. 흙입자의 크기와 조직은 흙속의 수분변화특성과 대기건조 특성에 크게 영향을 미친다.

Gardner & Hillel(1962)와 Keey(1972)은 조립자로 형성된 흙은 세립토보다 대기건조 속도가 늦다고 하였다.

침투압밀과 자중압밀, 지하수위 저하 및 지표면의 건조수축을 함께 고려할 수 있는 방법으로서, Abu-Hejleh(1995)는 Gibson(1967)의 압밀이론에 몇 가지 가정조건을 적용하고, 건조수축에 관한 변수를 추가하여 수정된 침하해석 이론을 제시하였다. 그는 지반의 건조수축 특성을 해석하기 위해 가정조건을 도입하였다. 즉, 간극비가 수축한계에 도달될 때까지 포화상태가 유지되고, 후에 건조된 흙은 단단해지며, 흙은 수평방향으로 일정하고, 물과 흙입자는 비압축성이며, 흙입자 자체의 시간적 변화는 없다고 가정하였다.

대기건조가 발생하는 동안 지표면에 형성되는 최대부압에 대한 실측자료를 보면 홍(1999)은 남해안 간척지에서  $-0.82 \sim -0.58 \text{kgf/cm}^2$ 의 값을 얻었다고 하였다.

## 3.2 대기건조 수치해석방법

### 3.2.1 가정조건

#### 1) Darcy의 법칙

흙속의 물의 흐름은 토층표면에서 물이 증발할 때 발생하는 부압에 의해 형성되는 동수경사에 의해 흐른다. 이 흐름에 대하여 Darcy의 법칙을 적용하였다.

#### 2) 토층표면의 부압

실제 현장에서 발생하는 부압의 크기는 계절, 기후 및 일조조건에 따라 차이가 크지만, 계산의 편의를 위하여 대기건조시험에서 표층의 간극비가 감소하여 일정하게 되는 시점의 간극비에 해당하는 유효응력값의 크기만큼의 부압이 작용하는 것으로 가정하였다.

이 값에 대하여는 대기건조모형시험의 실측자료와 해석결과와의 비교분석을 통하여 적용성을 검증하는 연구가 더 필요하다.

#### 3) 압축지수 일정

대기건조시 흙 표면의 부압에 의해 발생하는 동수경사에 의해 물의 흐름이 발생되고 이로 인해 흙 속의 간극수가 배제되면서 간극수압이 소산된다. 간극수압의 소산은 유효응력의 증가를 의미하며 유효응력의 증가는 간극비의 감소와 비례관계를 갖는다. 대기건조에 의한 부압조건에 대하여도 부압에 의해 발생하는 유효응력과 간극비 관계에 대하여 압축지수 일정조건을 적용하였다.

#### 4) $\sigma_v' - k_h$ 관계 변화 고려

유효응력별 투수계수변화는 압밀계수일정조건으로 다음 식을 적용하였다.(김,1998).

$$k_v \approx \frac{0.434 Y_w C_c c_r}{(1+e_o) \sigma_v'} \quad (2)$$

여기서,  $k_v$  : 투수계수

$Y_w$  : 물의 단위중량



- $C_c$  : 압축지수
- $c_v$  : 압밀계수
- $e_0$  : 초기간극비
- $\sigma_v'$  : 유효수직응력이다.

식(2)에 압축지수  $C_c=0.35$ , 초기간극비  $e_0=1.124$ , 압밀계수가  $c_v=0.0009\text{cm}^2/\text{s}$ 으로 일정한 가정조건에 대한  $\sigma_v'$  와  $k_v$ 의 관계를 계산하여 보면 그림 6과 같다.

### 3.2.2 해석이론유도와 해석과정 전개

간척지를 개발하여 지표면이 대기에 노출되면 대기건조에 의해 그림 7과 같이 성토의 상층부에서는 흙 표면의 대기증발에 의해 부압이 발생되어 흠속의 물이 상방향으로 흐르고, 지하수위면의 하부에서는 지하수가 공급되는 조건이다.

간척지 지표면이 대기에 노출되면 지표면의 간극수압은 증발모관압( $u_a$ )만큼의 부압이 작용되고, 시간이 경과하면서 간극수압 분포가  $t=t_i-1$ ,  $t=t_i$ ,  $t=t_i+1$ 의 변화과정을 거쳐  $t=t_f$ 의 분포를 보이게 된다.

여기서 지하수위면에서 충분한 모관수의 공급이 되는 조건으로 바닥면의 간극수압은  $u=0$ 으로 물이 상부로 공급되는 조건이 된다

지표면의 대기건조 자중압밀해석방법을 유도하기 위하여 수직방향의 흐름만을 고려하면 그림 7과 같이 유한요소계로 나누어 생각해 볼 수 있다. 물의 흐름은 각 요소사이의 간극수압차  $\Delta u$ 에 의해 흐르고 각 요소에서 과잉간극수가 배수된 만큼 부의 간극수압이 발생되고 유효응력이 증가하게 된다.

초기 간극수압분포는 지표면에서 대기건조 증발모관(부)압  $u=u_a=-0.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ , 지표면이하에서 지하수면까지  $u=0$ 의 조건이다.

이러한 경계조건에 대하여 반복계산을 하면 대기건조 조건의 압밀해석을 할 수 있다.

## 3.3 대기건조 자연침하 수치해석 결과

### 3.3.1 입력자료 및 해석조건

대기건조 자연침하 수치해석에 사용한 기초지반의 토질정수 및 경계조건은 표 1과 같은 조건에 대하여 지하수위 2, 3m 조건에 대하여 실시하였다.

### 3.3.2 지하수위 2m 조건 해석결과

표 1과 같은 조건에 대하여 지하수위 2m로서 건조수축대상층의 두께가 2m인 조건에 대한 대기건조 압축특성에

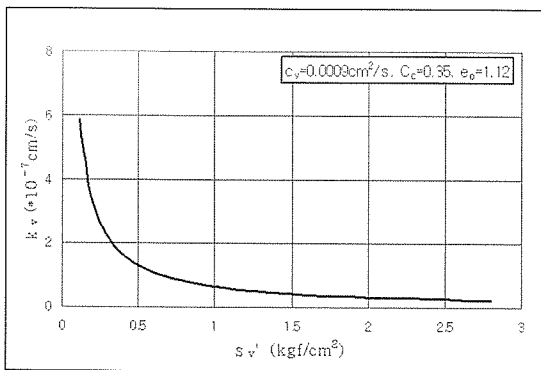


그림 6. 압밀계수 일정조건인 유효응력별 투수계수변화

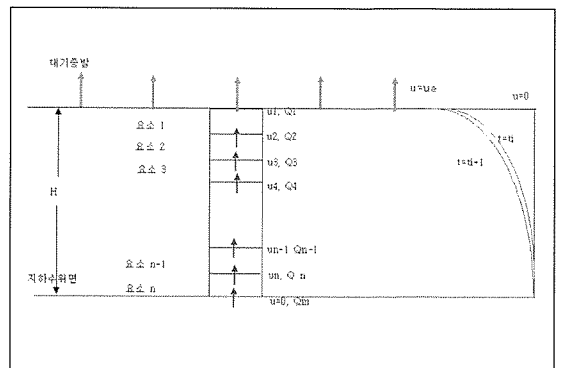


그림 7. 간척지 대기건조침하 수치해석모식도

표 1. 경계조건별 대기건조현상 해석을 위한 토질정수

구분	토질정수
초기 유효응력, $u_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0.05
대기증발 표층 모관부압, $u_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0.8
초기간극비( $e_0$ )	1.124
압축지수( $C_c$ )	0.35
압밀계수, $c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$1 \times 10^{-3}$
대기건조 대상층 두께, H (m)	2.3

대한 해석을 실시한 결과 심도별 간극수압 분포는 그림 8 a)와 같이 표층의 대기증발 모관부압이 작용되어 부의 간극수압을 보이는 것으로 나타났다.

심도별 간극비 분포는 그림 8 b)와 같이 표층의 대기증발 모관부압이 작용되어 표층의 간극비가 더 작고 심도가 깊어질수록 큰 특성을 보이고 있다. 현장함수비도 그림 8 c)와 같이 표층의 대기증발 모관부압이 작용되어 표층의

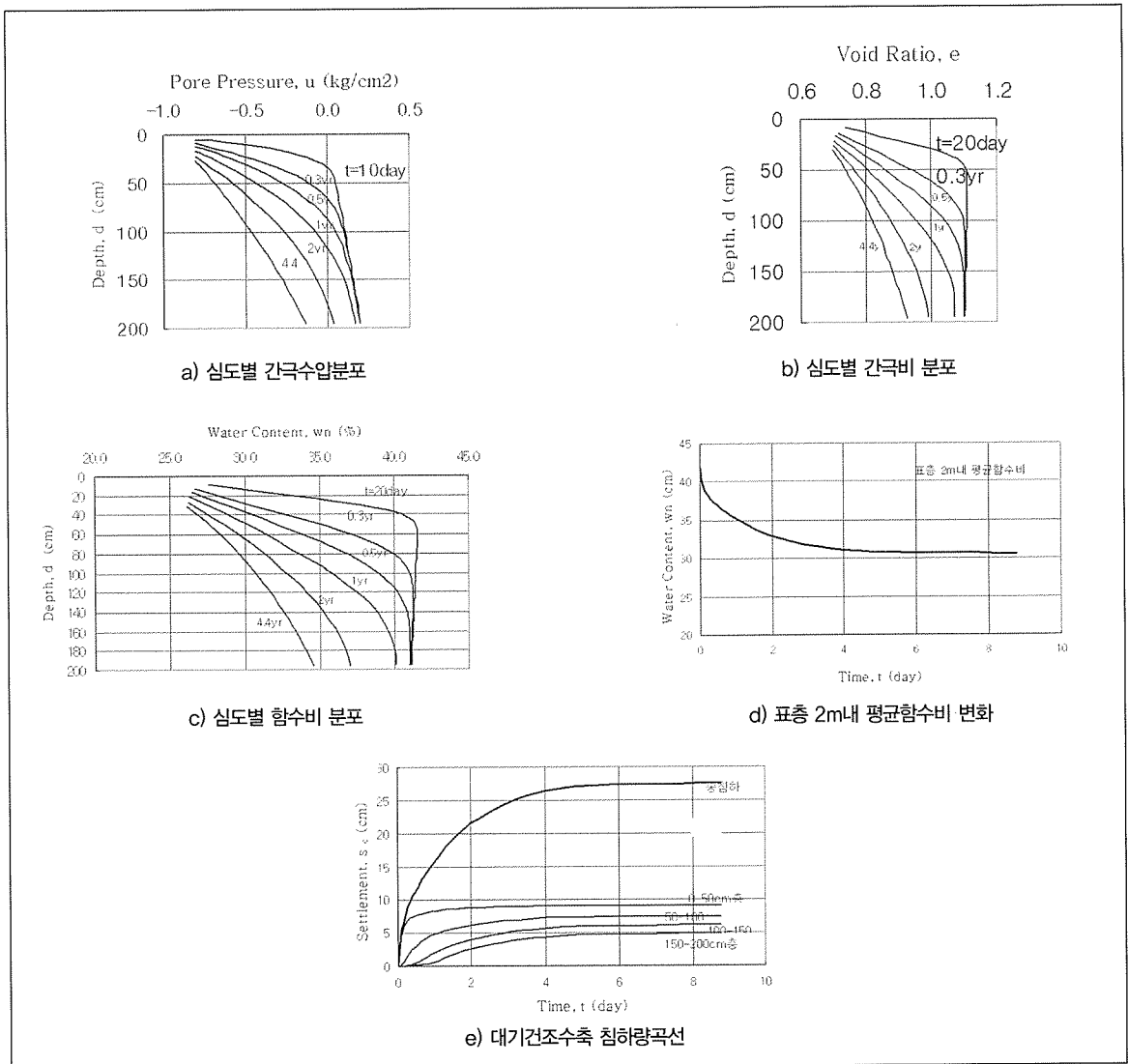


그림 8. 지하수위 2m 조건 대기건조수축 압밀해석결과



함수비가 더 작고 심도가 깊어질수록 큰 특성을 보이고 있다. 표층 2m내 평균함수비 변화를 보면 그림 8 d)와 같이 시간이 경과하면서 즉 대기건조가 진행되면서 함수비가 점점 감소하는 특성을 보이고 있다.

대기증발에 따른 건조수축에 의한 지하침하량 특성을 보면 그림 8 e)와 같이 시간이 경과하면서 즉 대기건조가 진행되면서 침하가 진행되는 특성을 보이고 있다.

### 3.3.3 지하수위 3m 조건 해석결과

표 1과 같은 조건에 대하여 지하수위 3m로 서 건조수축 대상층의 두께가 3m인 조건에 대한 대기건조 압축특성에 대한 해석을 실시한 결과 심도별 간극수압 분포는 그림 9 a)와 같이 표층의 대기증발 모관부압이 작용되어 부의 간극수압을 보이는 것으로 나타났다.

심도별 간극비 분포는 그림 9 b)와 같이 표층의 대기증

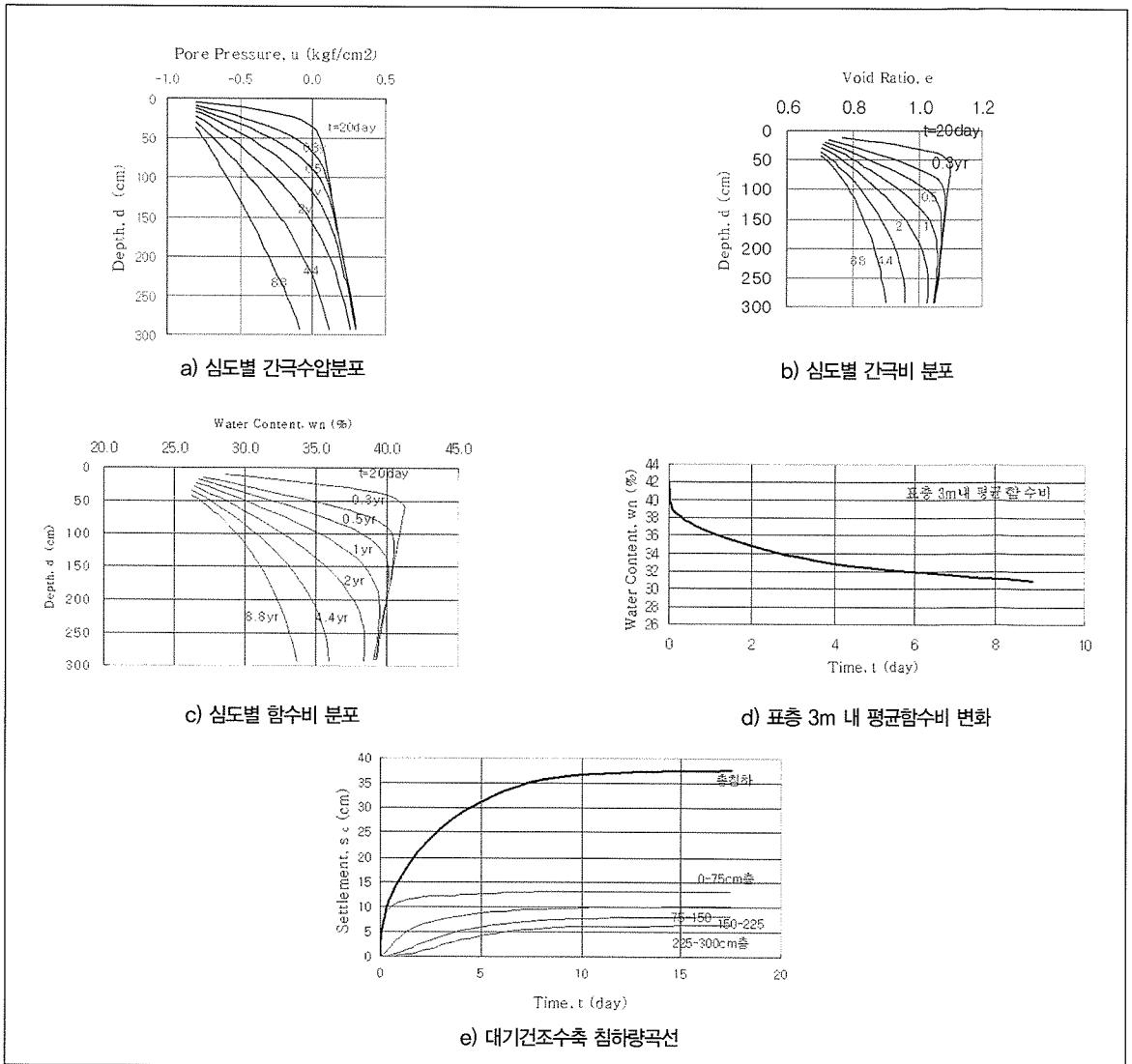


그림 9. 지하수위 3m 조건 대기건조수축 압밀해석결과

밭 모관부압이 작용되어 표층의 간극비가 더 작고 심도가 깊어질수록 큰 특성을 보이고 있다. 현장함수비도 그림 9 c)와 같이 표층의 대기증발 모관부압이 작용되어 표층의 함수비가 더 작고 심도가 깊어질수록 큰 특성을 보이고 있다. 표층 3m내 평균함수비 변화를 보면 그림 9 d)와 같이 시간이 경과하면서 즉 대기건조가 진행되면서 함수비가 점점 감소하는 특성을 보이고 있다.

대기증발에 따른 건조수축에 의한 지반침하량 특성을 보면 그림 9 e)와 같이 시간이 경과하면서 즉 대기건조가 진행되면서 침하가 진행되는 특성을 보이고 있다.

## 4. 자연침하 종합평가

### 4.1 현장함수비 평가

현장에서 실측한 함수비와 수치해석결과의 최종함수비를 비교한 결과는 그림 10과 같이 유사하게 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 간척지 지반표층의 실측 함수비는 25~35% 범위에 있으며 수치해석결과는 28~32% 범위에 있는 것으로 현장의 실제 상황과 잘 일치하는 해석결과라고 평가된다.

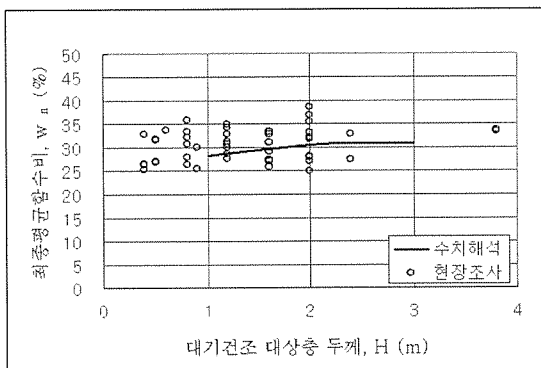


그림 10. 최종 현장함수비 비교

### 4.2 건조수축 자연침하량 평가

현장토질조사결과의 설계 시와 현재의 간극비로부터 계산된 침하량과 수치해석결과의 침하량을 비교해보면 그림 11과 같이 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 지하수위가 더 낮아 건조수축 대상층의 두께가 클수록 자연침하량이 큰 특성을 보이고 있다. 자연침하량을 보면 표 2와 같이 지하수위가 1m이면 13.7내지 15.6cm, 2m이면 27.3내지 27.6cm, 3m이면 37.8내지 41cm 정도의 자연침하가 발생되는 것을 알 수 있다.

자연침하량은 개발 후 지하수위가 형성되는 심도에 따라 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 지하수위 하강 폭이 큰 위치일수록 자연침하량이 크다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

서해안 간척지 지반의 자연침하 특성을 분석하기 위하여 현장토질조사 시험을 실시하고 자연침하 특성에 대한 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

### 1) 간척지 지반특성변화

본 사례지구에서 표층 1~4m까지 건조수축이 발생되어

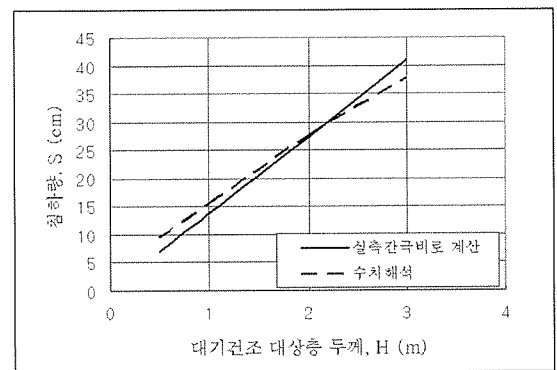


그림 11. 대기건조 대상층의 두께(지하수위)별 자연침하량



표 2. 표면건조수축에 의한 자연침하량 분석결과

지하수위(m)	자연침하량(cm)			최종 함수비(%)
	간극비로부터	수치해석	평균	
0.5	6.9	9.6	8.2	28.2
1	13.7	15.6	14.6	
1.5	20.5	21.6	21	
2	27.3	27.6	27.4	30.5
3	41	37.8	39.4	30.9

콘관입저항치(qc)는 설계시보다 급회의 값이 1.5~10배 이상 증가하였으며, 평균현장함수비(wn)는 설계시 41.5%에서 30%로, 평균간극비(e)는 1.124에서 0.834로 크게 감소하였고, 평균단위중량(rt)는 1.794tf/m<sup>3</sup>에서 1.929tf/m<sup>3</sup>으로 크게 증가되었다.

2) 현장토질시험자료(간극비)로부터 자연침하 계산

설계시와 현재의 지반표층의 간극비 감소량으로부터 자연침하량을 계산한 결과 지하수위가 1m 하강하면 13.7cm, 2m 하강하면 27.3cm, 3m 하강하면 41cm의 자연침하가 발생하는 것으로 분석되었다.

3) 표층건조수축에 의한 자연침하 수치해석결과


지반 표층의 건조수축에 의한 자연침하에 대한 수치해석결과 지하수위 하강량이 클수록 자연침하량이 크며, 지

하수위가 1m 하강하면 15.6cm, 2m 하강하면 27.6cm, 3m 하강하면 37.8cm의 자연침하가 발생하는 것으로 간극비로 계산한 결과와 일치하는 것으로 분석되었다.

5) 표층 건조수축에 의한 자연침하속도

간척지 지반의 지하수위하강과 함께 건조수축에 의한 자연침하는 압밀침하와 같이 시간이 경과하면서 서서히 진행된다. 본 연구에서 가정한 조건으로 수치해석을 실시한 결과 90%의 침하가 진행되는 시간은 지하수위가 2m 하강시 5년, 3m이면 10년 정도가 소요되는 것으로 분석되었다.

그러나 본 가정조건의 적정성과 기후의 영향에 대한 연구 및 해석방법에 대한 검증과 보완이 필요하다. 이에 대한 연구를 계속할 계획이다.



**(주) 주 쫓 들 E.N.C**

**K. S. E & C**

- ◎ 도로 및 단지설계
- ◎ 설계검토 및 기술자문
- ◎ 연약지반 및 터널설계
- ◆ 서울시 서초구 서초동 1339-7호 청화빌딩 3F ◆
- ▶ TEL: 02-587-8776

- ◎ 가시설 및 지반조사
- ◎ 사면보강 및 기초설계
- ◎ 계측관리 및 측량
- ▶ FAX: 02-587-8978

[참고문헌]

1. Kim, H. T. (1998), "Consolidation by the Vertical Drain Considering Well Resistance and the Variation of Permeability in the Smear Zone", Ph.D. Dissertation, Dongkuk University, Seoul, Korea, pp.8~38.
2. Hong, B. M. (1998), "Characteristics of Desiccation Shrinkage and Consolidation Settlement in Reclaimed Tidal Land", Ph.D. Dissertation, Dongkuk University, Seoul, Korea.
3. Brand, E.W. and Brenner, R.P.(1981), "Soft Clay Engineering", Else-vier Scientific Publishing Company, pp.159~238, 311~317, 537~544.
4. Gibson, R.E.(1958), "The Progress of Consolidation in a Clay Layer Increasing in Thickness with Time", *Geotechnique*, Vol.8, pp.171~182.
5. Nakase, A.(1984), "海洋土質", 日本土木學會, pp.11~12, 119~142.

- 기초보강 마이크로파일
- 부력대항 영구앵커
- 사면보강 강연선, 강봉앵커
- 재진장형 앵커



독일 DYWDAG SYSTEM사와  
기술 제휴 협력사공업체



(주)토탈지오이앤씨

경기도 안양시 동안구 비산동 1107 안양무역센터 1503호

TEL 02) 2057-9099, 031) 476-9009 FAX 02) 6008-7122

WWW.TotalGeo.co.kr

Email : tgenc@chol.com

**GEOGENY**  
CONSULTANTS  
GROUP

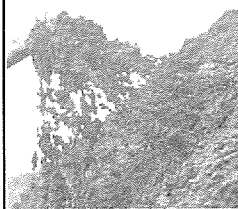
the Total Solutions of  
GEOTECHNICS

(주)지오제니 컨설턴트는 21세기 대한민국 지반기술의 표준을 만들어 나가는 기업입니다. 기술은 곧 기업의 경쟁력입니다. 지오제니 컨설턴트는 끊임없는 연구개발과 현장경험을 통해 건설환경에 가장 적합한 솔루션 개발에 주력하고 있습니다. 최상의 기술과 품질을 만나보십시오



서울서초구 방배4동 807-2 부원빌딩 2층  
전화 : 02-3472-2261 팩스 : 02-3476-8057  
<http://www.geogeny.biz>

토질 기술 사회의 영원한  
발전을 기원합니다.



텍슬복와토 설계 및 시공

3arch 터널 설계 및 시공



주식회사

현이앤씨

Hyun Engineering & Construction Co., Ltd.

Phone : 0502-066-3333, 02-322-0034~5

Home : [www.hencc.co.kr](http://www.hencc.co.kr)