

## 음적차분해석법을 이용한 연직배수 공법에 의한 압밀침하에 관한 연구

### A Study on the Consolidation Settlement Due to the Vertical Drain Method by the Implicit Finite Difference Scheme

박성재\* · 정두회\*\* · 정경환\*\*\* · 이경준\*\*\*\*

Park, Sung Zae · Jung, Du Hwoe · Jeong, Gyeong Hwan · Lee, Kyeong Joon

#### Abstract

The implicit finite difference program was developed to evaluate the relationship between time and consolidation ratio within the zone of vertical drain effective radius. In the evaluation, the excess pore water pressure was considered to dissipate in two directions, namely, vertical and radial flow direction. To calculate subsoil stress increments in the soil due to multi-step embanking, the foundation soil was assumed to be an isotropic and homogeneous elastic medium and the initial excess pore water pressure was estimated by using Skempton's parameters whose condition is plane strain and elastic phase of pore pressure response within the soft ground. Regarding to the settlement estimation, immediate and primary consolidation settlements were calculated. The secondary or delayed consolidation settlement was not considered. Numerically calculated excess pore water pressure and settlements were similar to the measured data in situ. Thus, this method can be used to predict the time-consolidation ratio of each layer treated by vertical drain method.

#### 요 지

연직드레인의 유효반경내에서 시간과 압밀도 관계를 계산하기 위해 음적차분해법이 적용되었으며 계산시 과잉간극수압의 소산은 두 방향으로 수행된다. 다단계 성토에 의한 지중응력 증분을 계산하기 위해, 지표면하의 연약지반은 등방균질 탄성체로서 간주하였고 각 단계 순간성토시 초기 과잉간극수압은 포화된 점성토내에서 평면변형을 조건과 탄성단계의 간극수압 응답 상태에 대한 Skempton의 간극수압계수를 이용해 계산하였다. 침하에 대해서는, 즉시 및 1차 압밀침하량만 계산하였고, 2차 압밀침하는 고려하지 않았다. 계산된 과잉간극수압과 지표침하량이 경과시간에 대한 현장측정치와 유사한 것으로 판정되었으며, 본 연구에 적용된 계산기법(압밀특성이 다른 다층지반으로 구성된 연약지반내에 연직 배수공법을 적용하고 성토가 다단계 순간성토로 이루어질 경우 과잉간극수압 소산과정을 음적 차분해법으로 근사계산)은 각 연약층의 시간-압밀도 관계를 예측하는데 이용가능할 것으로 생각된다.

\* 정희원 · 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원 · 부산대학교 생산기술연구소 연구원

\*\*\* 정희원 · (주)동아지질 지반공학부 계측팀 차장

\*\*\*\* 정희원 · (주)동아지질 지반공학부 계측팀 과장

# 1. 서 론

국내의 토목공사가 기간산업의 발달에 의해 점차적으로 대형화되고 있으며, 그 과정에서 협소한 국토면적으로 인하여 하성 또는 해성퇴적층이 주류를 이루는 연약점토지반상에 도로 또는 성토구조물을 축조하는 사례가 늘어나고 있다.

이러한 연약지반은 지질학적 이력과 침강, 퇴적 등의 특성에 의해 압밀특성이 다른 다층지반으로 구성되어 있는 경우가 많고 그 층두께도 상당히 두꺼운 경우가 일반적이다. 본 연구에서는 연약한 다층지반상에 샌드드레인(Sand drain)공법을 적용한 후 다단계의 성토를 실시하는 경우에 대하여 시간과 압밀도의 관계를 규명하기 위해, 샌드드레인의 유효직경 내에 요소망을 구성하여 연직과 방사방향의 과잉간극수압 소산을 계산하였다. 수치계산에 있어서, 성토는 대상하중(Strip load)조건이고, 성토하중에 의한 지중응력의 증가는 등방균질한 탄성지반으로 가정하여 계산하였다. 계산된 최대, 최소 지중응력 증분에 의한 과잉간극수압의 생성은 포화된 점성토에 대하여 Skempton의 간극수압계수<sup>(1)</sup> A, B를 적용하여 다단계 순간성토에 대해 계산하고, 간극수 흐름에 관한 수치해석기법은 연직과 방사방향의 흐름을 동시에 고려하였으며 요소형상이 다소 불량하여도 안정한 해가 구해질 수 있도록 프로그램을 작성하였다.

침하량 계산중 1차 압밀침하량은 선행압밀압력을 고려한 1차원 변형조건의 압밀시험 결과치를 이용하였으며, 시료교란에 의한 토질정수를 재평가하기 위해 현장압축곡선을 사용하였다. 각 단계성토시 연약점토층의 즉시침하량은 각 연약층 내에서 앞단계 성토하중의 압밀에 의한 유효응력 증가를 고려하여 삼축시험의 압밀압력에 대응하는 탄성계수로서 적용하였다.

본 연구에서는 샌드드레인에 의해 연직배수 처리 공법을 적용한 연약지반에 대해서 성토제체 중앙부에서의 지표침하와 각 연약층 경계지점에서의 층별 침하 뿐만 아니라, 샌드드레인 유효직경내 평면상의 임의 지점과 임의 시점에 대한 과잉간극수압과 연약층별 평균압밀도를 계산하였다.

또한 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 해석 결과를 현장계측치와 비교검토하였고, 경과시간에

대한 각 연약층의 평균압밀도 계산을 위해 연직 및 방사방향 압밀계수( $C_v$ ,  $C_{hv}$ )를 변화시켜 현장에서 실측된 침하량 및 과잉간극수압을 최종 비교하였다.

# 2. 지중응력 증분 및 초기 과잉간극수압 계산

## 2.1 지중응력 증분의 계산

성토 하중에 의한 지중응력의 증분<sup>(2)</sup>은 등방균질 반무한 탄성지반상에 평면 변형을 조건의 대상하중이 작용하는 것으로 하여 계산한다.

## 2.2 초기 과잉간극수압 계산

성토하중을 다단계 순간성토로 간주하여 구한 응력 증분을 중첩하므로써 최대, 최소 주응력 증분을 Mohr 응력원으로부터 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{cases} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_3 \end{cases} = \frac{\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_z}{2} \pm \sqrt{\frac{(\Delta\sigma_x - \Delta\sigma_z)^2}{4}} + \Delta\tau_{xz}^2 \quad (1)$$

초기 과잉간극수압 산정시 등방균질한 포화점성토 지반의 평면 변형을 조건에 대해서 탄성단계의 간극수압계수 A, B는 각각 A=0.5, B=1.0을 적용하였으며 각 단계의 순간성토에 대한 초기 과잉간극수압계산은 식 (2)에 의한다.

$$\Delta u = \Delta\sigma_3 + \frac{1}{2}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (2)$$

# 3. 침하량 계산

## 3.1 점토층의 즉시침하( $\rho_i$ )

연약지반상 성토가 1차원 재하조건인 경우, 포화 점토는 비배수 상태에서 체적변화가 발생되지 않는다(다차원 재하조건인 경우에는, 연직응력 증분  $\Delta\sigma_1$  이  $\Delta\sigma_2$ ,  $\Delta\sigma_3$ 보다 크기 때문에 재하전 초기상태에 비하면 연직방향의 유효응력은 증가하는 반면, 수평방향의 유효응력은 감소).

따라서 대상하중의 성토가 이루어지는 경우 점토층은 비배수 상태에서 침하함과 동시에 재하에 의해 발생된 응력 때문에 탄성적으로 축방변형이 나타난다. 이는 압밀현상과는 구분되고 축방유동 또는 전단변형에 의한 침하이며 압밀침하에 비해 상당히 빨리 진행된다.

즉시침하는 탄성론으로 나타내면 다음과 같다. 즉 점토층내 임의 점에서 성토하중에 의하여 발생되는 응력 증분을 각각  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ , 임의 점에 발생되는 간극수압 증분을  $\Delta u$ , 유효응력 증분을 각각  $\Delta\sigma'_1, \Delta\sigma'_2, \Delta\sigma'_3$ , 주응력방향의 변형률을 각각  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 라 하면 체적변형률  $\varepsilon_v$ 는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ &= \frac{1}{E'}(1-2\nu')(\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_2 + \Delta\sigma'_3) \end{aligned} \quad (3)$$

재하된 순간에는 체적변화가 없으므로  $\Delta V=0$ 으로 간주할 수 있고, 초기 과잉간극수압은 식 (4)와 같이 된다.

$$u_0 = \frac{1}{3}(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) \quad (4)$$

따라서 연직방향의 유효응력 증분과 그 변형률은 식 (5), (6)과 같다.

$$\Delta\sigma'_1 = \frac{2}{3} \left[ \Delta\sigma_1 - \frac{1}{2}(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{2(1+\nu')}{3E'} \left[ \Delta\sigma_1 - \frac{1}{2}(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) \right] \quad (6)$$

점토층의 비배수 조건에서의 탄성계수와 포아송비는 다음과 같다.

$$E_u = \frac{3E'}{2(1+\nu')} \quad (7)$$

$$\nu_u = \frac{1}{2} \quad (8)$$

미카사(三笠)가 제안한 전단변형에 의한 점토층의 즉시 침하량<sup>(3)</sup>은 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_c = \int_0^H \frac{2(1+\nu')}{3E'} \left[ \Delta\sigma_1 - \frac{1}{2}(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) \right] dz \quad (9)$$

식 (9)에서  $\Delta\sigma_2 = 1/2(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3)$ 라 두면, 식 (9)는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_c = \int_0^H \frac{3}{4E_u} [\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3] dz \quad (10)$$

### 3.2 압밀침하량 계산( $\rho_c$ )

1차원 변형조건 하에서 압축과 재압축을 포함하는 일반적인 경우에 대한 압밀침하량은 식 (11)과 같다.

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{C_{cr}}{1+e_0} \Delta H \log_{10} \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c}{1+e_0} \Delta H \log_{10} \frac{\sigma'_i}{\sigma'_c} \right] \quad (11)$$

여기서  $C_c$ 는 압축지수,  $C_{cr}$ 는 재압축지수이며, 연직 응력 증분  $\Delta\sigma'_i$ 는 탄성응력 분포이론에서 구한다.

### 4. 연직 및 방사방향 압밀 기본방정식의 차분 근사

연직과 방사방향의 흐름에 대한 압밀 기본방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v(l) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + C_{vr}(l) \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right] \quad (12)$$

연산자를 이용하여 편도함수를 근사시킬 때 등가의 함수를 구하기 위해 시간  $t$ 에 대하여 먼저  $t_k + 1/2$   $dt = t_{k+1/2}$ 을 생각한 후 근사시키면

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{-u_{i,j,k} + u_{i,j,k-1}}{\Delta t} + O(\Delta t^2) \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{(\Delta z)^2} (u_{ij+1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j-1,k}) + O(\Delta z^2) \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{2(\Delta r)} (-u_{i-1,j,k} + u_{i+1,j,k}) + O(\Delta r^2) \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \frac{1}{(\Delta r)^2} (u_{i+1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i-1,j,k}) + O(\Delta r^2) \quad (16)$$

여기서  $i$  : 방사 방향

$j$  : 연직 방향

$k$  : 시간 증분 방향

식 (12)를 음적차분 근사식<sup>(4)</sup>으로 정리하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{-u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t} &= \frac{C_v(l)}{(\Delta z)^2} \\ & \left[ (1-\theta)(u_{ij+1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{ij-1,k}) \right. \\ & \left. + \theta(u_{ij+1,k+1} - 2u_{i,j,k+1} + u_{ij-1,k+1}) \right] \\ & + \frac{C_{vr}(l)}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \left[ (1-\theta)(-u_{i-1,j,k} + u_{i+1,j,k}) \right] \end{aligned}$$

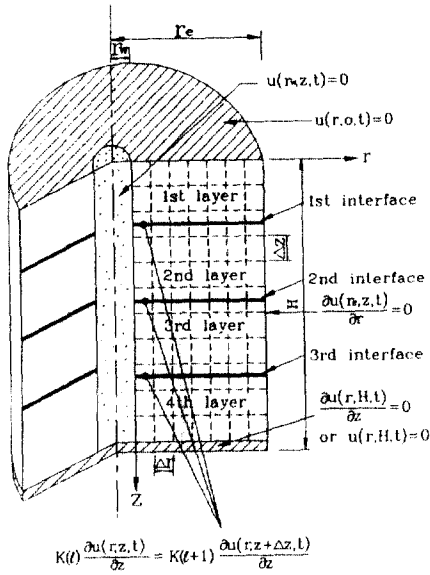


그림 1. 유효반경 내의 요소망 구성

$$\begin{aligned}
 &+ \theta(-u_{i-1,j,k+1} + u_{i+1,j,k-1}) \\
 &+ \frac{C_{vr}(l)}{(\Delta r)^2} [(1-\theta)(u_{i+1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i-1,j,k}) \\
 &+ \theta(u_{i+1,j,k+1} - 2u_{i,j,k-1} + u_{i-1,j,k+1})]
 \end{aligned} \tag{17}$$

여기서  $\theta$ 는 시간 가중치(Time weighting factor)로서  $0 \leq \theta \leq 1$ 의 범위이며 본 계산에서는  $\theta = 1/2$ 을 적용한다. 위의 식을 다시 정리하면 식 (18)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 &(-B+C)u_{i-1,j,k} + (1-2A-2C)u_{i,j,k} + (B+C)u_{i+1,j,k} \\
 &+ (A)u_{i,j-1,k} + (A)u_{i,j+1,k} + (-B+C)u_{i-1,j,k+1} \\
 &+ (-1-2A-2C)u_{i,j,k-1} + (B+C)u_{i+1,j,k+1} \\
 &+ (A)u_{i,j-1,k+1} + (A)u_{i,j+1,k+1} = 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

여기서,

$$A = \frac{C_{vr}(l) \cdot \Delta t}{2 \cdot (\Delta z)^2}, \quad B = \frac{C_{vr}(l) \cdot \Delta t}{4 \cdot r \cdot \Delta r}, \quad C = \frac{C_{vr}(l) \cdot \Delta t}{2 \cdot (\Delta r)^2},$$

$l=1 \dots n_l$ 이며  $n_l$ 은 압밀특성이 다른 연약층 수이다.

#### 4.1 요소망 구성 및 경계조건

#### 4.2 절점에 대한 차분근사식

##### 1) 내부절점인 경우

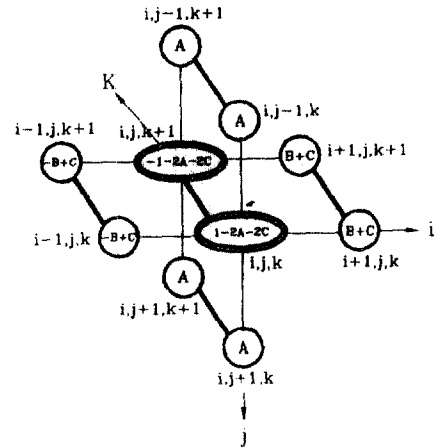


그림 2. 내부 절점에 대한 근사식의 계수 형상

##### 2) 측면 도함수 경계조건인 경우

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \Big|_{r=r_e, z, t} \tag{19}$$

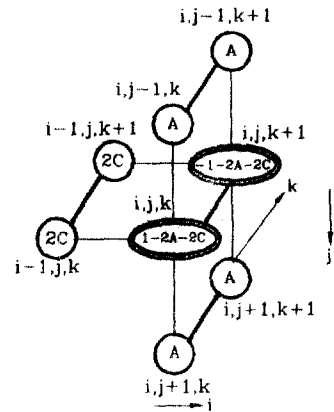


그림 3. 유효반경의 도함수 경계조건에 대한 근사식의 계수 형상

##### 3) 바닥층 도함수 경계조건인 경우

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \Big|_{r, z=H, t} \tag{20}$$

##### 4) 측면 및 바닥층 도함수 경계조건이 공존하는 지점

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \Big|_{r=r_e, z=H, t} \tag{21}$$

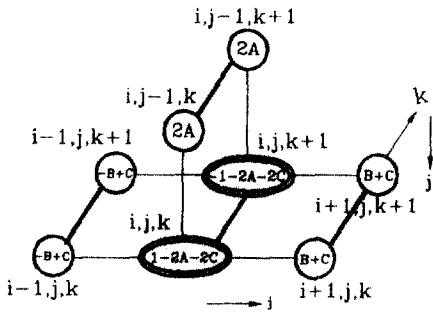


그림 4. 바닥층 도함수 경계조건에 대한 근사식의 계수 형상

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad \left|_{r=r_e, z=H, t} \quad (22)$$

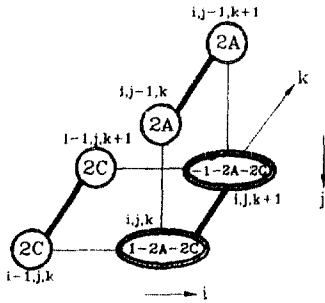


그림 5. 도함수 경계조건이 공존하는 지점 근사식의 계수 형상

### 5) 각 연약층 경계부분

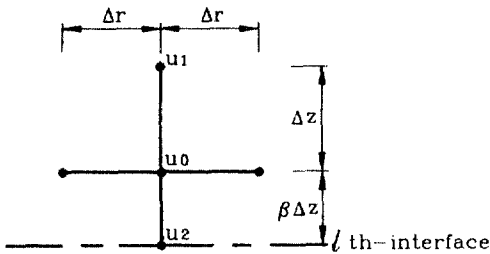


그림 6. 연약층 경계부의 절점 배치

연직방향에 대한 각 층 경계부분에서의 과잉간극수압분포를  $u = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2$ 로 가정하면 식 (12)에서 우변의 첫번째 항은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{2}{(1+\beta)\Delta z^2} \cdot \left( u_1 - \frac{1+\beta}{\beta} u_0 + \frac{1}{\beta} u_2 \right) \quad (23)$$

식 (23)을 식 (12)에 대입하면 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{-u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t} &= \frac{2 \cdot C_v(l)}{(1+\beta) \cdot (\Delta z)^2} \\ &\left[ (1-\theta) \left( u_{i,j-1,k} - \frac{1+\beta}{\beta} u_{i,j,k} + \frac{1}{\beta} u_{i,j+1,k} \right) \right. \\ &+ \theta \left( u_{i,j-1,k+1} - \frac{1+\beta}{\beta} u_{i,j,k+1} + \frac{1}{\beta} u_{i,j+1,k+1} \right) \left. \right] \\ &+ \frac{C_{vr}(l)}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \left[ (1-\theta)(-u_{i-1,j,k} + u_{i+1,j,k}) \right. \\ &+ \theta(-u_{i-1,j,k+1} + u_{i+1,j,k+1}) \left. \right] \\ &+ \frac{C_{vr}(l)}{(\Delta r)_z} \left[ (1-\theta)(u_{i,j,k} - 2u_{i,j,k+1} + u_{i,j,k+2}) \right. \\ &+ \theta(u_{i,j,k+1} - 2u_{i,j,k+2} + u_{i,j,k+3}) \left. \right] \quad (24) \end{aligned}$$

### 4.3 각 층 경계지점에서의 과잉간극수압계산

흐름의 연속성에 의해  $u_{i,j-1,k+1}$  및  $u_{i,j+1,k+1}$ 을 먼저 계산한 후, 경계지점에서의  $u_{i,j,k+1}$ 을 식 (25)와 같이 계산한다.

$$u_{i,j,k+1} = \frac{\frac{k(l)}{\Delta z(l)} u_{i,j-1,k+1} + \frac{k(l+1)}{\Delta z(l+1)} u_{i,j-1,k} - 1}{\frac{k(l)}{\Delta z(l)} + \frac{k(l+1)}{\Delta z(l+1)}} \quad (25)$$

여기서  $k(l)$ 은  $l$ 번째층의 투수계수

### 4.4 수치계산법

각 절점에 대하여 이상의 경계조건을 조합하여 행렬식을 구성하면 다음과 같다.

$$[A]\{u\}_{k+1} = [B]\{u\}_k \quad (26)$$

여기서  $[A]$ ,  $[B]$ 는 계수행렬,  $\{u\}_{k+1}$ 와  $\{u\}_k$ 는 각각 시간  $t + \Delta t$  및  $t$ 에서의 과잉간극수압이다. 행렬  $[A]$ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$[A] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & \delta_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \gamma_2 & \alpha_2 & \beta_2 & 0 & \dots & \dots & 0 & \delta_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \gamma_3 & \alpha_3 & \beta_3 & 0 & \dots & \dots & 0 & \delta_3 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \epsilon_n & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \gamma_n & \alpha_n & \beta_n & 0 & \dots & \dots & 0 & \delta_n \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \epsilon_n & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \gamma_n & \alpha_n \end{bmatrix}$$

여기서  $\epsilon_n$ ,  $\delta_n$ 는  $A(l)$ , 또는  $\frac{1}{\beta} A(l)$

$$\alpha_i \text{는 } -1-2A(l)-2C(l) \text{ 또는 } -1-\frac{1+\beta}{\beta}A(l)-2C(l)$$

$$\beta_i \text{는 } B(l)+C(l) \text{ 또는 } 0.0$$

$$\gamma_i \text{는 } -B(l)+C(l) \text{ 또는 } 2C(l)$$

계수행렬 [B]는 [A]에서 주대각 성분만 변화한다. 행렬은 5대각 행렬로 구성되므로 Gauss-Seidel의 반복계산법을 이용하여 각 시간 단계별로 계산한다. 따라서 임의의 시간에서 각 층의 평균압밀도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$U(t, l) = 1 - \frac{\int_{z_b(l)}^{z_t(l)} \int_0^{2\pi} \int_{r_w}^{r_e} u_n(i, j, k) \cdot r dr \cdot d\theta \cdot dz}{\int_{z_b(l)}^{z_t(l)} \int_0^{2\pi} \int_{r_w}^{r_e} u_0(i, j, k) \cdot r dr \cdot d\theta \cdot dz} \quad (27)$$

여기서

- $U(t, l)$  = 임의의 시간에서 l번째 층의 평균압밀도
- $u_0(i, j, k)$  = k번째 성토단계에 대응하는 초기 과잉간극수압
- $u_n(i, j, k)$  = 임의의 시간에서의 과잉간극수압
- $z_t(l), z_b(l)$  = l번째 층의 깊이

한편, 임의의 시간 t에서의 각 층의 침하량은 다음과 같이 계산된다.

$$\rho(t, l) = U(t, l) \times \rho_c(l) + \rho_i(l) \quad (28)$$

여기서

- $\rho(t, l)$  = l번째 층의 t시간에서 침하량
- $\rho_c(l)$  = l번째 층의 1차 압밀침하량
- $\rho_i(l)$  = 각 단계 성토시 l번째 층의 비배수 전단 변형에 의한 즉시 침하량

### 5. 현장 현황

성토현장은 93년 6월 성토완료후 압밀방치되고 있는 토지개발공사 발주 낙동강 하구 인접지역인 김해내외지구 택지조성공사 1공구 L-2-2 도로 신설 구간이다. 성토와 병행하여 측정된 계측항목은 지하수위, 간극수압, 지표침하이며 성토현장의 각 단계성토단면, 샌드드레인과 샌드매트, 계측기의 매설 위치는 그림 7과 같다.

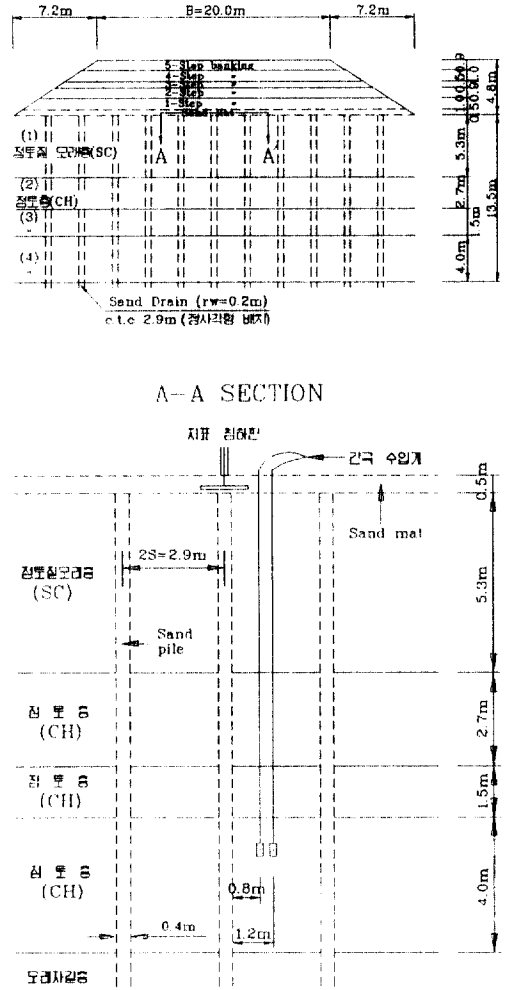


그림 7. 현장의 성토단면, 샌드드레인 및 계측기 배치

현장의 계측기기 매설시점은 샌드드레인과 샌드매트의 시공후 이루어졌고 계측기 매설은 지표침하관이 성토전 도로중앙부의 샌드매트상에 지하수위계는 유공관을 토목섬유로 에워싼 후 연약지반의 상부 점토질 모래층에, 그리고 간극수압계는 공기압식 감지기 2개를 연약지반 하부 점토층내 임의로 선정된 깊이에 샌드드레인으로 부터 이격거리만 다르게 하여 매설하였다. 특히 간극수압계는 감지기의 상·하부에 벤토나이트로 완전히 밀봉하여 그 지점의 정확한 압력수두를 얻고자 하였다.

지표침하관, 지하수위계 상단 및 성토고는 표고측량으로써 이루어졌고 지하수위 및 지중의 간극수

압은 각 측정계기에 의해 주기적으로 계측되었다. 실측된 지층의 간극수압과 지하수위로부터 과잉간극수압의 평가는 지하수위의 변화가 거의 없었던 상당한 기간동안은 성토전 측정된 정상수두를 지층의 초기간극수압으로 하여 성토이후 측정된 간극수압에서 감하여 계산하였다.

연약지반중 조립토층의 입경분석 결과는, 최상부 점토질 모래층은 2회의 표준관입시험에서 채취된 교란시료의 경우 점토와 실트의 함유량은 원지반의 지표면으로부터 -3.15 m 깊이에서 47%, -5.15 m에서 32%이다. 그리고 연약지반 최하부 모래자갈층의 교란시료는 실트와 점토의 함유량이 지표면으로부터 -15.15 m 깊이에서 18%이다. 또한 -14.0 m 깊이에서 수행한 현장투수시험결과 현장투수계수는  $k=1.65 \times 10^{-3}$  cm/sec로서 평가되었기 때문에 하부의 모래자갈층은 샌드드레인이 연결되는 경우 투수층의 효과가 기대되었다.

## 6. 수치해석 결과의 검토

### 6.1 프로그램 순서도

### 6.2 입력자료

실제 계산에 적용된 요소망 구성 및 경계조건은 다음과 같으며 표 1에는 계산에 이용된 각 층의 토질정수를 나타내었다.

유효반경( $r_e$ )=1.64 m, 샌드드레인( $r_w$ )=0.2 m  
 연약층 깊이(H)=13.5 m  
 방사방향 분할수( $n_r$ )=5 :  $\Delta r=0.334$  m  
 연직방향 분할수( $n_z$ )=30 :  $\Delta z=0.45$  m  
 전체 절점수=150,  $\Delta t=0.3$  day

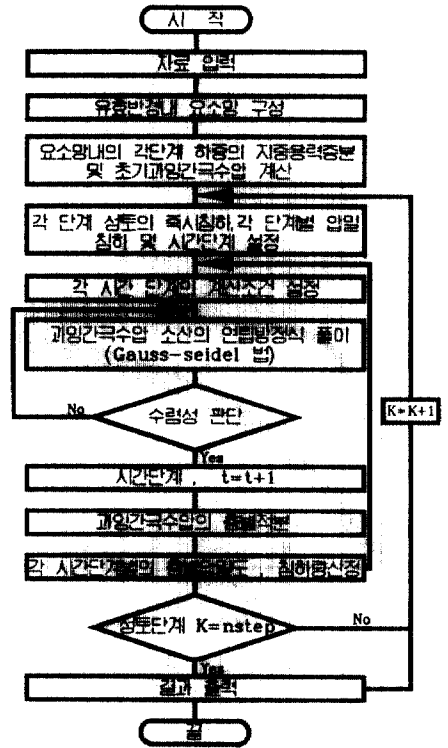


그림 8. 프로그램 순서도

### 6.3 계산결과 및 고찰

각 층의 시간에 따른 평균압밀도는 그림 9와 같다. 최상부층에서의 압밀속도가 가장 빠르게 나타났으며 약 100일이 경과한 후에 압밀도가 100%에 가깝게 나타났다. 또한 두번째 층의 압밀계수는 가장 작지만, 이 층이 최상부층의 영향에 의해 제3 및 제4층보다 압밀이 조금 빠르게 진행되었다.

그림 10은 각 층에서 과잉간극수압이 소산되는 과정을 나타낸 것이며, 상부 점토질 모래층에서는

표 1. 계산에 이용된 토질정수

연약층 구분	연약층 심도(m)	압축지수 및 재압축지수 $C_c, C_{cr}$	간극비 $e_0$	선행압밀압력 단위중량 $P_c$ (tf/m <sup>2</sup> ) $\gamma_s$ (tf/m <sup>3</sup> )	연직 및 방사방향 압밀계수 $C_v, C_{vr}$ (m <sup>2</sup> /day)	연직방향 투수계수 $K_v$ m/day
점토질모래(1) (SC)	0.0~ 5.3	0.24/0.04	0.806	7.0/1.712	6.8165E-2/6.8165E-2	1.2595E-4
점토층 (2) (CH)	5.3~ 8.0	0.70/0.08	1.280	15.5/1.720	9.7600E-3/9.7600E-3	2.292 E-5
점토층 (3) (CH)	8.0~ 9.5	0.95/0.09	1.757	8.0/1.621	1.8020E-2/1.8020E-2	2.292 E-4
점토층 (4) (CH)	9.5~13.5	1.08/0.09	1.711	13.3/1.610	1.0090E-2/1.0090E-2	2.225 E-4

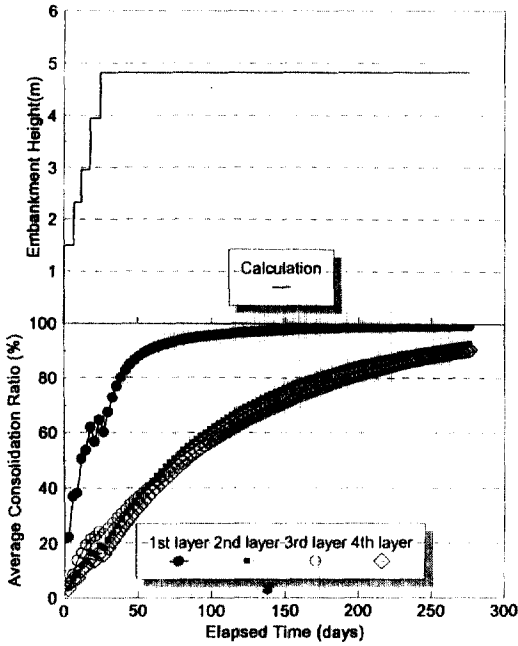


그림 9. 경과시간에 대한 각 층의 평균압밀도

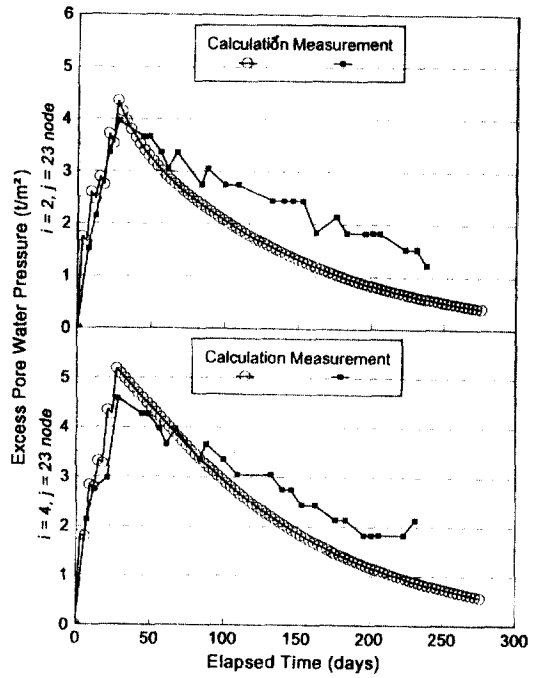


그림 11. 근사 계산된 과잉간극수압과 측정치의 비교

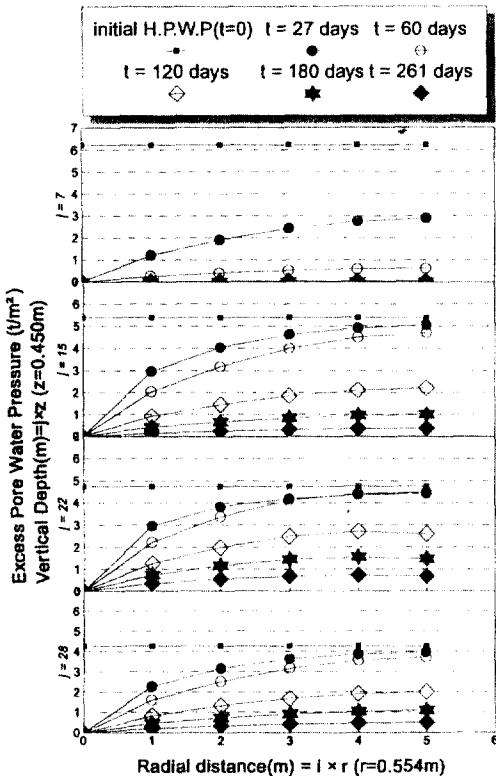


그림 10. 임의로 선정된 절점들과 시간에 대한 과잉 간극수압 분포도

과잉간극수압이 빨리 소산되었고 하부 점토층들은 그들의 압밀계수가 작은 까닭으로 과잉간극수압의 소산이 늦게 진행되고 있음을 보여준다.

그림 11은 네번째 점토층에서 측정된 과잉간극수압과 본 연구에서 계산된 과잉간극수압의 소산과정을 비교한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 성토과정에서는 이들의 값이 잘 일치하고 있으나 성토완료후 방치기간 동안에는 계산된 과잉간극수압이 실측치 보다 작게 나타났다. 즉, 계산에 의한 압밀속도가 실제보다 빠르다. 이는 실제 샌드드레인 시공시에 샌드드레인과 지반과의 경계부에서, 드레인 시공장비에 의한 흙의 교란으로 압축성보다는 투수계수가 저하됨으로 인해 압밀계수가 낮아지고 또한 시공상의 결함으로 인하여 샌드드레인의 불량형상 및 기능이 저하된 것을 수치해석으로 고려하지 않았기 때문이라고 판단된다.

그림 12는 성토체체 중앙하부의 계측된 지표면 침하와 계산결과를 비교한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 성토초기에 실측치가 계산치보다 크게 나타났다. 이는 도로성토를 하는 과정에서 인접지역에서의 우선 성토로 인하여 실제 측정치는 초기에



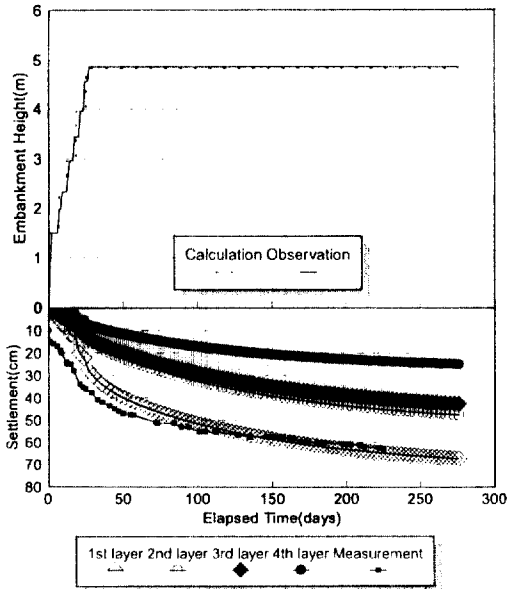


그림 12. 도로중앙부 연약지반의 측정된 지표침하량과 실측치의 비교

침하가 발생되었지만, 수치해석에서는 이러한 실제 시공상황을 정확하게 반영할 수는 없었던 까닭으로 판단된다.

## 7. 결 론

본 연구는 연약 점토지반에 성토 등의 축조를 할 때 흔히 발생하는 침하 등의 문제를 해결하기 위한 연구의 일환으로 낙동강 하구지역을 대상으로 하였다.<sup>(6-7)</sup> 본 연구의 대상은 김해내외지구 택지조성공사를 위하여 신설도로구간의 연약지반을 샌드드레인공법으로 압밀을 촉진시킨 지역이다. 연구의 목적은 이러한 연직배수공법을 적용했을 때 음적차분 해석에 의하여 압밀의 진행과정을 미리 파악하고자 하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 과잉간극수압의 소산을 계산할 때 방사방향 압밀계수( $C_{vr}$ )는 1차원 변형조건하의 표준압밀시험 결과를  $\sqrt{t}$ 법으로 산정한 연직압밀계수( $C_v$ )와 동일한 값을 적용하였다.

2) 성토하중에 의한 침하는 즉시침하 및 1차압밀 침하량을 계산하였으며, 즉시침하량은 지반을 반무한 탄성지반으로 가정하여 미카사의 이론을 적용

하여 계산하였고 1차 압밀침하량은 압밀시험결과로부터 Casagrande법을 이용하여 선행압밀압력( $\sigma'_c$ )을 구하고 처너 및 재압축지수( $C_c, C_{cr}$ )는 현장압축곡선으로부터 구하여 적용하였다.

3) 계측자료를 분석하기 위해 본 연구진이 개발한 프로그램, EMMS<sup>®</sup>에 의해 현장에서 실측한 시간에 따른 지표침하 및 과잉간극수압의 소산을 계산된 결과와 비교하였던 바 유사하게 나타났다. 따라서 다층지반으로 구성된 연약지반 내에 연직 배수공법으로 지반처리를 할 경우, 본 연구에 적용한 계산기법으로 압밀진행정도를 예측하여 시공시에 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악함으로써 시공의 효과를 높일 수 있으리라 판단된다.

본 연구에 포함되지 않는 smear effect 및 well resistance를 추가로 고려하여 개선·연구코자 한다.

## 참고문헌

1. Pany, R.H.G. and Wroth, C.P., "Shear stress-strain properties", *Soft Clay Engineering*, Edited by Brand, E.W. and Brenner, R.P., Elsevier Scientific Publishing Co., pp. 311-362, 1981.
2. 木村, "應力傳播", 土質力學, 最上武雄編著, 技報堂出版株式會社, pp. 250-255, 1969.
3. 網干, "壓密, 土質力學", 最上武雄編著, 技報堂出版株式會社, pp. 331-353, 1969.
4. Al-Khafaji, A.W. and Tooley, J.R., *Numerical Methods in Engineering Practice*, Halt Rimehart & Winston, Inc., pp. 501-600, 1986.
5. 朴性栽, 鄭京院 外 6人, "軟弱地盤 盛土에 관한 研究事例(I) (실계법과 계측관리 적용에 관해서)", 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp. 457-460, 1992.
6. 朴性栽, 鄭斗會, 鄭京院 外 2人, "軟弱地盤 盛土에 관한 研究事例(II) (연직 배수공법에 의한 압밀침하)", 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp. 499-502, 1993.
7. 李境準, "鉛直排水工法에 의한 壓密沈下에 관한 연구", 부산대학교 석사학위논문, pp. 26-47, 1993.
8. 부산대학교 공과대학 토목공학과 박성재교수 연구실 & (주)동아지질, "EMMS(EMbankment Monitoring System): 연약지반상 성토공사 계측관리용 프로그램 사용법 설명서(Ver 2.1)", 1994. 3.

(接受: 1994. 5. 6)