

## 강널말뚝으로 보강된 점토지반거동의 수치해석

### Numerical Analysis on the Behavior of Clayey Foundation Reinforced with Steel Sheet Pile

양극영\* · 이대재\*\* · 정진섭\*

Yang, Keek Young · Lee, Dae Jae · Jeong, Jin Seob

#### Abstract

This study was performed to investigate constraint effects of deformation (heaving, lateral displacement) of clayey foundation reinforced with sheet pile at the tip of banking on soft ground, under intact state (natural) and the state of vertical drain respectively.

The following results are obtained.

1. In view of reduction in heaving or lateral displacement, sheet pile is not supposed to be of use.
2. Sheet pile is effective only when vertical drain is installed for acceleration of consolidation and gradual loading is applied.

*Keywords* : Sheet pile, Vertical drain, Side flow, Multi consolidation, Finite element method, Modified, Cam-Clay model

#### I. 서론

최근 산업의 발달과 더불어 대규모 공사가 급증하고 이에 따라 연약지반위에 성토구조물의 축조와 기설구조물 주변에 굴착 또는 성토시공의 필요성이 증가하고 있다. 이때 근접 시공함으로써 기초지반에 발생하는 변형이 주변 구조물에 미치는 영향을

정확히 예측함은 매우 의미 있는 일이다.

근접 시공할 때 각종 대책으로서 널말뚝공법이나 심층혼합처리공법 그 외에 격자형 slab 공법 등 여러 가지가 있다. 그러나 이러한 대책공법의 시공효과에 관해서는 문헌도 거의 없고 또한 시공사례에 대한 정량적인 결과사례 보고도 거의 없으므로 그 효과에 대한 많은 의문을 내포한채 이용되고 있는 실정이다.

그러므로 본 논문은 경제성과 시공성 그리고 연약지반이나 지하수가 많은 곳에서 비교적 용이하면서 경제적으로 시공할 수 있는 널말뚝공법을 채택하여 대책효과를 높이기 위하여 vertical drain을

\* 원광대학교 공과대학

\*\* 원광대학교 대학원

\* Corresponding author. Tel.: +82-63-850-6707

fax: +82-63-850-6707

E-mail address: kyyang@wonkwang.ac.kr

배치하였을 경우에 대하여 수치해석을 통해 근접시공의 변위 억제효과를 예측하여 근접시공을 가능하게 하고자 한다.

본문의 변형해석에 적용된 이론은 Biot<sup>1)</sup>의 압밀이론과 탄소성이론에 근거한 Cam-Clay 모델<sup>2)</sup>을 보완한 수정 Cam-Clay 모델<sup>3)</sup>을 도입하여 유한요소법으로 수치해석을 수행하였다.

## II. 압밀해석에 사용한 응력-변형률 관계식

### 1. 수정 Cam-Clay 모델<sup>3)</sup>

이 연구에서 사용한 응력-변형률 관계식은 Roscoe와 Burland(1968)<sup>3)</sup>가 제안한 수정 Cam-Clay 모델을 사용하여 다음과 같이 유도한다.

수정 Cam-Clay 모델의 항복함수는 다음과 같다.

$$f = M^2 p^2 - M^2 p_0 p + q^2 = 0 \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

항복함수  $f$ 는  $p, q, \epsilon_v^p$ 의 함수이므로  $f$ 를 전미분하면 다음과 같다.

$$df = \frac{\partial f}{\partial q} dq + \frac{\partial f}{\partial p} dp + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} d\epsilon_v^p = 0 \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

소성변형률의 직교법칙을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

여기서,  $f$  : 항복함수

$\Lambda$  : 비례상수

식 (2.3)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda B_{ij} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

여기서,

$$B_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial f}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

(2.3)식과 (2.5)식을 결합하여 다음식을 얻는다.

$$df = B_{ij} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} d\epsilon_v^p = 0 \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

전변형률 증분은 소성성분과 탄성성분으로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Hooke의 법칙을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}(d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

(2.8)식과 (2.5)식을 (2.6)식에 대입하면 다음과 같다.

$$df = B_{ij} C_{ijkl}(d\epsilon_{kl} - \Lambda B_{kl}) + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} \Lambda B_{ii} = 0 \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

$\Lambda$ 값으로 정리하면

$$\Lambda = \frac{B_{ij} C_{ijkl} d\epsilon_{kl}}{B_{ij} C_{ijkl} B_{kl} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

(2.3)식에 (2.10)식을 대입하여 (2.8)식에 대입하면 다음과 같다.

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\epsilon_{kl} - \frac{C_{ijkl} B_{kl} B_{mn} C_{mnpq} d\epsilon_{rs}}{B_{mn} C_{mnpq} B_{rs} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} d\epsilon_{rs} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

$$d\sigma_{ij} = \left[ C_{ijrs} - \frac{C_{ijkl} B_{kl} B_{mn} C_{mnpq}}{B_{mn} C_{mnpq} B_{rs} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \right] d\epsilon_{rs} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

여기서  $C_{ijrs}^p$ 는 다음과 같다.

$$C_{ijrs}^p = \frac{C_{ijkl} B_{kl} B_{mn} C_{mnpq}}{B_{mn} C_{mnpq} B_{rs} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

수정 Cam-Clay 모델에서는

$$B_{ii} = \frac{\partial f}{\partial p} = 2M^2 p - M^2 p_0 \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

$$\frac{\partial p_0}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{p_0(1+e_0)}{\lambda-k} \dots\dots\dots(2.15)$$

미분의 Chain rule 사용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{\partial f}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial \varepsilon_v^p} = -\frac{M^2 p_0(1+e_0)}{\lambda-k} \dots\dots\dots(2.16)$$

(2.8)식에 (2.3)식을 대입하여 얻은 구성관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [C^{ep}]\{d\varepsilon\} \dots\dots\dots(2.17)$$

여기서  $\{C^{ep}\} = [C^e] - [C^p]$  .....(2.18)

- $\{C^{ep}\}$  : 탄소성강성행렬
- $[C^e]$  : 탄성강성행렬
- $[C^p]$  : 소성강성행렬

## 2. Beam 요소

일반적으로 beam은 연직하중  $p(x)$ 와 축방향하중  $\bar{P}$ 가 작용한다. beam 요소의 bending에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( F(x) \frac{d^2 w^*}{dx^2} \right) = p(x) \dots\dots\dots(2.19)$$

여기서  $w^*$ 는 연직변위,  $F(x) = EI(x)$ ,  $x$ 는 beam의 중심축을 지나는 좌표이다. 만약  $F(x)$ 가 beam 전체에 균일하다면 (2.19)식은 다음과 같다.

$$F \frac{d^4 w^*}{dx^4} = p(x) \dots\dots\dots(2.20)$$

beam 요소 하나를 생각하면 6개의 자유도 즉  $w_1, \theta_1, u_1, q_2, \theta_2, u_2$ 가 된다.

이러한 미지수를 구하기 위해서 축방향변위에 대해서 생각하면 다음과 같다.

$$u(x) = [1-s \quad s] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [N_a]\{q_a\} \dots\dots\dots(2.21)$$

beam bending에 대해서 생각하고 이를 조합하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} u(x) \\ w(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [N_a] & [0] \\ (1 \times 2) & (1 \times 4) \\ [0] & [N_b] \\ (1 \times 2) & (1 \times 4) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q_a\} \\ \{q_b\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.22)$$

여기서  $N_a, N_b$ 는 보간함수이고  $q$ 의 첨자 a는 축방향, b는 bending을 나타낸다. 일반적으로 포텐셜 에너지는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Pi_p = & l \int_0^1 \frac{1}{2} F(w'')^2 ds + Al \int_0^1 E \left( \frac{du}{dx} \right)^2 ds \\ & - l \int_0^1 w p ds - \bar{P} u \dots\dots\dots(2.23) \end{aligned}$$

이 식은 bending과 축방향변위에 따른 에너지의 합으로 표기된 것이다. 식을 구체화하기 위하여

$$w(x) = N_1 w_1 + N_2 \theta_1 + N_3 w_2 + N_4 \theta_2 = [N]\{q\} \dots\dots\dots(2.24)$$

여기서 보간함수

$$\begin{aligned} N_1 &= 1 - 3s^2 + 2s^3, \\ N_2 &= ls(1 - 2s + s^2), \dots\dots\dots(2.25) \\ N_3 &= s^2(3 - 2s), \\ N_4 &= ls^2(s - 1). \end{aligned}$$

또한

$$\begin{aligned} w''(x) &= \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{1}{l^2} \frac{d^2 w}{ds^2} = \frac{1}{l^2} \frac{d^2}{ds^2} [M]\{q\} \\ &= [B]\{q\} \dots\dots\dots(2.26) \end{aligned}$$

$$u(x) = [N_a]\{q_a\} \dots\dots\dots(2.27)$$

위의 (2.24), (2.26), (2.27)식을 (2.23)식에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pi_p = & \frac{Fl}{2} \int_0^1 \{q_b\}^T [B_b]^T [B_b] ds \{q_b\} \\ & + AEI \int_0^1 \{q_a\}^T [B_a]^T [B_a] ds \{q_a\} \dots\dots\dots(2.28) \\ & - l \int_0^1 [N_b]\{q\} ds - \bar{P} [N_a]\{q_a\} \end{aligned}$$

식 (2.28)을  $w_1, \theta_1, u_1, q_2, \theta_2, u_2$ 로 미분하고 6개의 선형방정식을 얻어서 각 항을 정리하여 행렬 형태로 놓으면 다음과 같다.

$$\begin{matrix} \text{대} \\ \text{정} \end{matrix} \begin{pmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & 0 \\ & \frac{4EI}{l} & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & 0 \\ & & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & 0 \\ & & & \frac{4EI}{l} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ & & & & & \frac{EA}{l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = -\frac{dl^2}{12} \begin{pmatrix} \frac{dl}{2} \\ \frac{dl^2}{12} \\ \frac{dl}{2} \\ -\frac{dl^2}{12} \\ \frac{\bar{P}}{P} \\ \frac{\bar{P}}{P} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

(2.29)식의 형태를 전체행렬에 조합하여 beam 요소에 대한 해석을 실시한다.

### III. 압밀해석 프로그램

연약점토 지반의 다차원 압밀거동을 해석하기 위하여 압밀을 탄성거동으로 표현하고 있는 다음의 Biot<sup>1)</sup> 압밀방정식에 따르는 현상으로 정의한다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p_w}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = -\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 p_w \quad (3.2)$$

여기서,  $p_w$ ,  $\epsilon_v$ ,  $k$ ,  $\gamma_w$ 는 각각 과잉간극수압, 체적변형률, 투수계수, 간극수의 단위중량이고  $\nabla^2$ 는 Laplace 연산자이며, 즉  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 이다.

(3.1)식은 미소한 흙 요소의 평형조건을 의미하고 (3.2)식은 요소의 체적변화와 배수량의 관계를 나타내는 연속조건이다.

변위증분  $\Delta u_x$ ,  $\Delta u_y$ 를 성분으로하는 벡터를  $\{\Delta u\}$ 로 표시하여 평형방정식을 만족하는 전응력 증분  $\{\Delta \sigma\}^T = (\Delta \sigma_x, \Delta \sigma_x, \Delta \tau_{xy})$ 에 대한 가상일의 원리를 이용하면 다음과 같다.

$$\int_V \{\Delta \epsilon\}^T \{\Delta \sigma\} dV = \int_V \{\Delta \epsilon\}^T \{\Delta \sigma\} dV + \int_V \{\Delta \bar{\epsilon}\}^T \{\Delta p_w\} dV = \int_V \{\Delta \bar{u}\}^T \{\Delta F_b\} dV + \int_S \{\Delta \bar{u}\}^T \{\Delta T_s\} dS \quad (3.3)$$

여기서,  $\{\Delta \epsilon\}^T$ 는  $\{\Delta \epsilon_x, \Delta \epsilon_y, \Delta \gamma_{xy}\}$

$\{\Delta \sigma\}^T$ 는  $\{\Delta \sigma_x', \Delta \sigma_x', \Delta \tau_{xy}'\}$

$\{\Delta p_w\}^T$ 는  $\{\Delta p_w, \Delta p_w, 0\}$

$\{\Delta F_b\}$ 는 물체력증분벡터

$\{\Delta T_s\}$ 는 표면력증분벡터

식 (3.3)에서 “-”의 표시는 물리량의 가상변위를 나타내기 위해서이다.

요소내의 임의 점에서 변위증분  $\{\Delta u\}$ 는 절점변위증분  $\{\Delta u^*\}$ 으로부터 형상함수  $[M]$ 을 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$\{\Delta u\} = [M]\{\Delta u^*\} \quad (3.4)$$

식 (3.4)에 대응하는 요소내의 임의 점의 변형률 증분  $\{\Delta \epsilon\}$ 와 체적변형률증분  $\Delta \epsilon_v$ 는 절점변위증분과 관련지을 수 있으며 다음과 같다.

$$\{\Delta \epsilon\} = [B]\{\Delta u^*\} \quad (3.5)$$

$$\Delta \epsilon_v = \{K_V\}^T \{\Delta u^*\} \quad (3.6)$$

여기서,  $[B]$ 는 절점변위증분을 요소내 임의 점의 변형률증분으로 전환하는 형상함수

$\{K_V\}^T$ 는 절점변위증분을 요소의 체적변형률증분으로 전환하는 형상함수

일반적인 과잉간극수압증분벡터  $\{\Delta p_w\}$ 는 요소 중심의 과잉간극수압증분치  $\Delta p_w^*$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\Delta p_w\}^T = \{1 \ 1 \ 0\} \Delta p_w^* \quad (3.7)$$

유효응력증분  $\{\Delta \sigma'\}^T$ 와 변형률증분  $\{\Delta \epsilon\}^T$ 을 관련지으면 다음과 같다.

$$\{\Delta \sigma'\} = [C^{ep}]\{\Delta \epsilon\} \quad (3.8)$$

여기서,  $[C^{ep}]$ 는 3행 3열의 대칭행렬이며 탄소성 강성행렬이다.

식 (3.4)에서 식 (3.8)까지를 식 (1)에 대입하

고 가상변위를 임의로 선택한 것을 고려하면 다음과 같이 얻어진다.

$$[K]\{\Delta u^*\} + \{K_v\} \Delta p_w^* = \{\Delta Q\} \dots\dots\dots(3.9)$$

여기서,  $[K]$ ,  $\{K_v\}$ 와  $\{\Delta Q\}$ 는 각각 다음과 같다.

$$[K] = \int_V [B]^T [C^{ep}] [B] dV \dots\dots\dots(3.10)$$

$$\{K_v\} = \int_V \{B_v\} dV \dots\dots\dots(3.11)$$

$$\{\Delta Q\} = \int_V [M]^T (\Delta F_d) dV + \int_s [M]^T (\Delta T_s) dS \dots\dots\dots(3.12)$$

한편, 시간의 증가와 더불어 발생하는 과잉간극수압과 변위를 구하기 위하여 (3.2)식을 평면변형률 조건으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + \frac{1}{\gamma_w} \left[ k_x \frac{\partial^2 p_w}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p_w}{\partial y^2} \right] = 0 \dots\dots\dots(3.13)$$

식 (3.13)에서 계산된 체적변화량을 식 (3.6)에 대입하면 식 (3.9)과 식 (3.6)는  $\{\Delta u^*\}$ 와  $p_w^*$ 를 미지수로한 연립방정식을 이룬다. 그리하여  $\Delta \epsilon_v$ 를 계산하고 압밀진행과정에 따라 단계적으로 연립방정식을 풀면 압밀해를 얻을 수 있다.<sup>4),5)</sup> 식 (3.13)을 차분법으로 풀기위해 과잉간극수압  $p_w^*$ 는 다음과 같다.

$$p_w^* = \{(1 - \theta)p_{wl,t} + \theta p_{wl,t+\Delta t}\} \dots\dots\dots(3.14)$$

를 다시 풀어 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_w^* = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 \dots\dots\dots(3.15)$$

여기서,  $p_{wl,t}$ 는  $t=t$ 일 때 과잉간극수압

$p_{wl,t+\Delta t}$ 는  $t=t+\Delta t$ 일 때 과잉간극수압

$\theta(0 \leq \theta \leq 1)$ 는 차분근사상수

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 값은 그림 1에서와 같이 사변형요소  $i$ 와 이 요소를 둘러싸고 있는  $j, k, l, m$ 의 요소에 의해서 결정되어야 하는 미정계수이다.

요소 중앙점의 과잉간극수압벡터  $\{p_w^*\}$ 는 다음과 같다.

$$\{p_w^*\} = \begin{Bmatrix} p_{wi}^* \\ p_{wj}^* \\ p_{wk}^* \\ p_{wl}^* \\ p_{wm}^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & y_3^2 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4^2 & y_4^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{Bmatrix} = [B]\{a\} \dots\dots\dots(3.16)$$

그러면  $\{a\}$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\{a\} = [B]^{-1}\{p_w^*\} \dots\dots\dots(3.17)$$

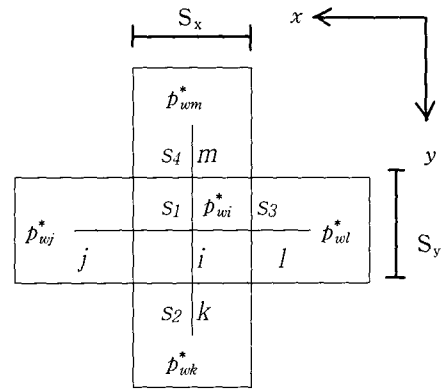


Fig. 1 Local coordination used in calculation of rate of flow

식 (3.15)을 식 (3.13)에 대입하고 식 (3.17)를 고려하여 식 (3.13)을 변환하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta v &= -\frac{\Delta t v}{\gamma_w} (2k_x a_4 + 2k_y a_5) \\ &= -\frac{\Delta t v}{\gamma_w} (2k_x b_4^T + 2k_y b_5^T) = -\{K_v\}^T \{p_w^*\} \dots\dots\dots(3.18) \end{aligned}$$

여기서,  $[K_v]^T$ 는  $\frac{\Delta t v}{\gamma_w} (2k_x b_4^T + 2k_y b_5^T)$

$\Delta t$ 는 시간증분량

$v$ 는 요소체적

$b_4, b_5$ 는  $[B]^{-1}$ 의 4행과 5행의 벡터

$\Delta p_w^* = p_{wl,t+\Delta t}^* - p_{wl,t}^*$ 의 관계를 이용하고 식 (3.15)에서  $\theta=1$ 로 하여 식 (3.9)을 차분식으로

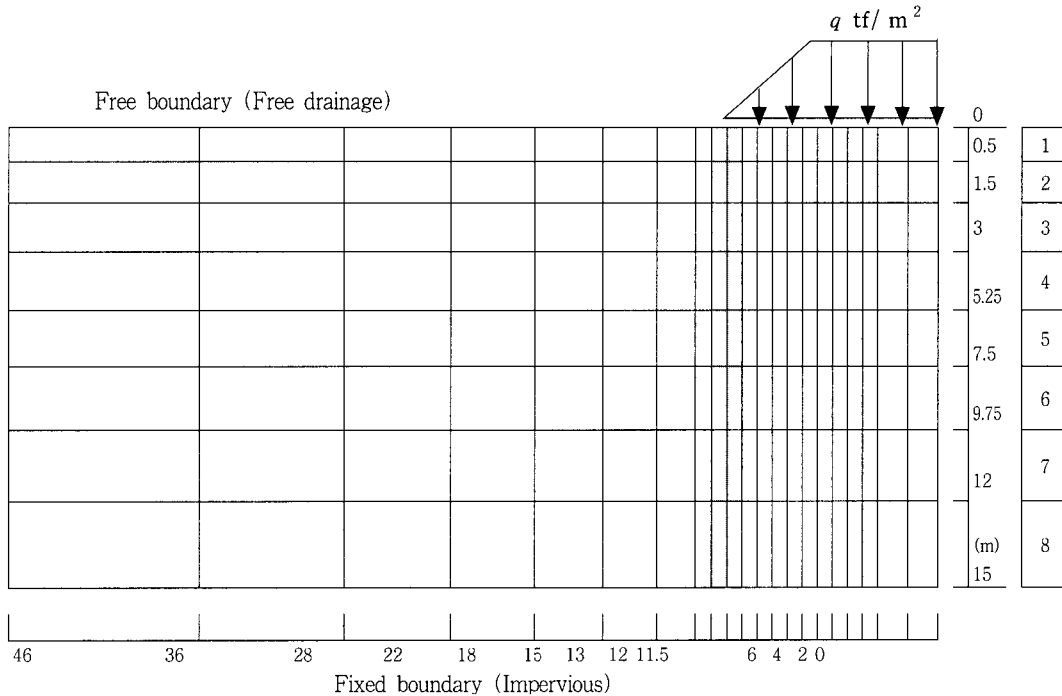


Fig. 2 Finite element mesh for foundation reinforced with sheet pile

전환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[K]\{\Delta u^*\}_j + \{K_v\}p_w^*|_j = \{\Delta Q\}_j + \{K_v\}p_w^*|_{j-1} \quad (3.19)$$

식 (3.18)을 식 (4)에 대입하여 변형하면 다음과 같다.

$$\{K_v\}^T \{\Delta u^*\}_j = -\{K_v\}^T p_w^*|_{j-1} \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

여기서 요구되는 형식은 사변형요소이고 수치해석 과정에서 4개의 삼각형요소로 이루어진 4변형요소는 Wilson(1965)<sup>6)</sup>이 제안한 방법을 이용하여 사변형요소의 중앙절점을 소거한다. 그러면 사변형요소 안에서 응력과 과잉간극수압은 일정한 값이 된다.

#### IV. 모형지반의 수치해석<sup>7,8)</sup>

성토에 의한 주변지반의 변형방지대책으로서 성토부 끝에 널말뚝을 설치하였을 때 효과적인 지반

보강을 위해 vertical drain을 병설하는 경우에 대한 침하, 측방변위, 용기현상 등의 변형을 분석한다.

#### 1. 모형지반의 조건

가. 성토기초지반의 요소분할은 Fig. 2와 같으며 층 두께는 15 m이고 기초폭 92 m를 반분하여 8층 21열로서 168요소 198절점의 장방형요소이다.

나. 성토부의 저폭은 23 m로서 성토하중은 각각  $q=3 \text{ tf/m}^2$ ,  $6 \text{ tf/m}^2$ ,  $9 \text{ tf/m}^2$ 으로 하고 매회 마다  $1.0 \text{ tf/m}^2$ 씩 증가하며 각각 3회, 6회, 9회로 나누어 작용시킨다.

다. 배수조건은 바닥과 측면은 비배수, 기초지반 상부는 배수상태이고, 변형조건으로는 바닥은 고정, 측면은 연직변위를 허용한다.

라. 널말뚝을 설치할 경우 요소분할은 Fig. 2와 같이 널말뚝의 좌우로 요소를 세분화하여 그 특성을 명확히 하도록 하고 널말뚝의 하부지점은 회전

과 고정으로 하여 계산을 실시한다.

마. 널말뚝의 길이는 각각 7.5 m, 12.0 m, 15 m 로 하여 계산을 실시한다.

바. Vertical drain은 성토부 아래 기초지반 위에 2m 간격으로 설치한다.

사. 각 층에 대한 재료정수는 Table 1과 같으며 재료정수는 깊이에 따라 다음 식에 의해 변화시켰다.

$$G = G_0 \exp[(e - e_0)/\lambda]$$

$$e = e_0 - \lambda \ln(P/P_0)$$

$$k_x = k_y = k_{x0} 10^{(e - e_0)/0.3}$$

Table 1 Material properties and parameters used in calculation

$\lambda$	$k$	$M$	$\nu$	$\sigma_{vc}$	$K_{oc}$	$\sigma_{vo}$	$K_0$	$e_0$	$k_{x0}$
0.291	0.0304	1.4	0.374	2.215	0.597	1.215	0.597	1.92	4.06E-7

\* 위의 재료정수는 최상층의 값이다.

## 2. 기초보강대책 및 재하방법

가. 널말뚝을 사용한 보강대책공에 대하여 다음과 같은 재하방법을 도입한다.

- ① 무개량지반에 즉시 재하하는 경우(자연상태)
- ② 성토아래 기초지반을 2m 간격으로 vertical drain(V.D)를 설치하고 점층 재하하는 경우

나. 널말뚝의 강성은 Table 2와 같다.

Table 2 Rigidity of sheet pile

Item	IV Type sheet pile
$E(\text{tf/m}^2)$	$2.1 \times 10^7$
$I(\text{m}^4/\text{m})$	$1.167 \times 10^{-4}$
$EI(\text{tfm}^2/\text{m})$	$2.45 \times 10^4$
The Portion of EI	1
$A(\text{m}^2/\text{m})$	$2.425 \times 10^{-2}$
$\nu$	0.333

다. Vertical drain은 성토부 아래의 기초지반에 2m 간격으로 배치하는데 이 위치는 바로 요소의 경계가 되고 이는 배수조건으로 보고 입력하여 해석한다.

라. 점층재하조건은 다음 두 가지 경우로 나누어 해석한다.

① 5 cm/day의 성토속도로 재하하는 경우 60일 재하

② 1.6 cm/day의 성토속도로 재하하는 경우 180일 재하

이상을 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3 List of cases used in calculation

Condition of calculation			Sheet pile set up	Non controled
Loading condition	Condition of foundation improvement	Hardness	IV Type sheet pile	
		Duration of banking		
Immediate loading	Natural condition	0	③	①
Gradual loading	Baking V · D improvement	60 day banking	④	②
		180 day banking	⑤	

## 3. 수치계산 결과 및 고찰

가. 지반의 변형개요

Table 3에 요약된 내용으로 수치계산하여 5개의 형태로 도시한다. 그 대표 예로서 경우 ①을 Fig. 3에 나타내었다.

경우 ①은 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 측방변위가 성토직후, 500일, 50000일에 해당되는 것을 나타낸다. 어느 경우나 시간이 지남에 따라  $t=0$ 의 경우에서 외측으로 변형이 증가하다가 500일이 지난 후부터 깊이 3m인 점을 기준하여 측방변위가 상부는 감소하고 하부는 증가하여 압밀종료와 더불어 수렴한다. 연직변위는 성토부 바깥쪽(11.5 m)에서는 융기가 나타나고 이들 전체의 변

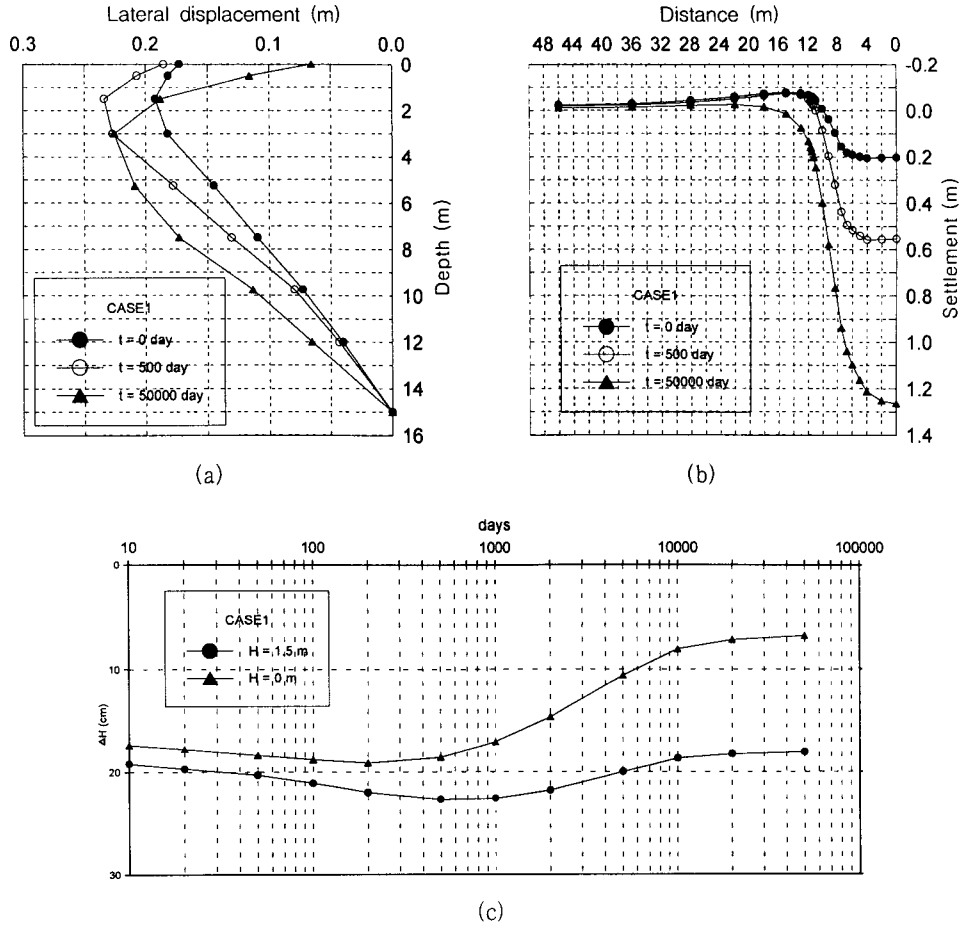


Fig. 3 (a) Lateral displacement at tip of embankment  
 (b) Shape of settlement at surface of foundation  
 (c) Lateral displacement vs. days at surface and max Lateral displacement of foundation

위량은 시간의 경과에 따라 용기는 감소되고 성토 부아래 침하량은 증가한 후 압밀이 종료된다.

지표면과 심도 1.5 m에서의 시간에 따른 측방변위를 Fig. 3(c)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 측방변위가 200일 까지 커지다가 그 후는 감소하고 있으며 심도 1.5 m에서는 500일 까지 커지다가 그 후는 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

나. 비교 및 고찰

Table 3에 나타낸 경우를 상세하게 항목별로 비교 및 고찰을 하여 본다.

대책공의 비교분석방법은 다음 항목에 의한다.

1) 점중재하의 효과

성토하중 재하속도를 변경하였을 경우를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 성토 직후의 용기 및 측방변위 모두 재하속도를 느리게 함으로써 변형이 감소하고 있다. 이것은 Vertical drain을 설치하고 성토속도를 느리게 함으로써 성토하는 동안 압밀로 인한 용기 및 측방변위를 감소하게 하는 역할을 한 것으로 생각된다.

한편 압밀완료시의 용기 및 측방변위는 세 경우 거의 비슷한 비율로 감소하고 있으나 그 값이 그렇



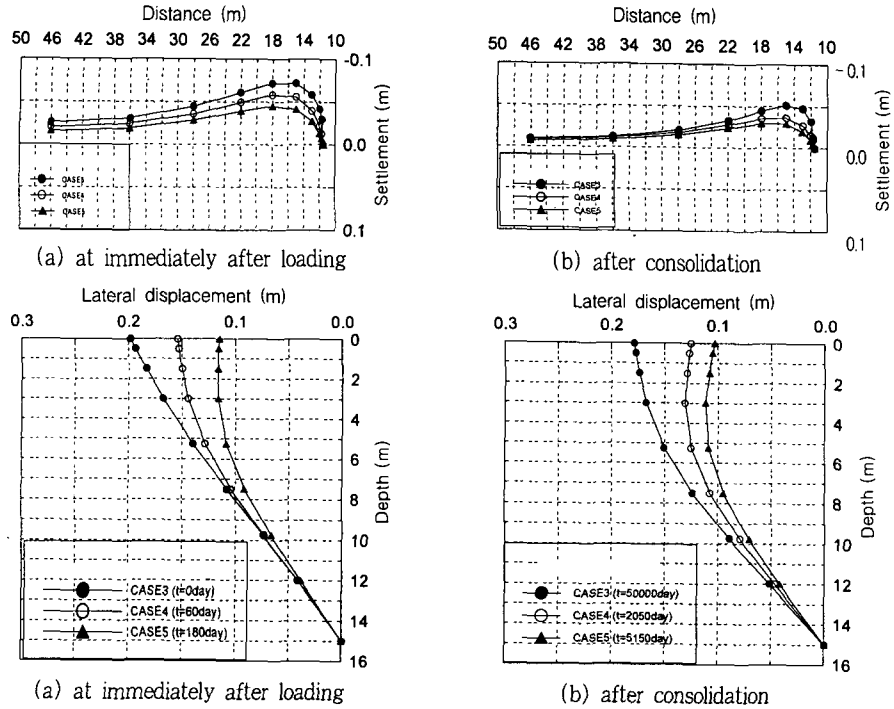


Fig. 4 Diagram due to effect of gradual loading

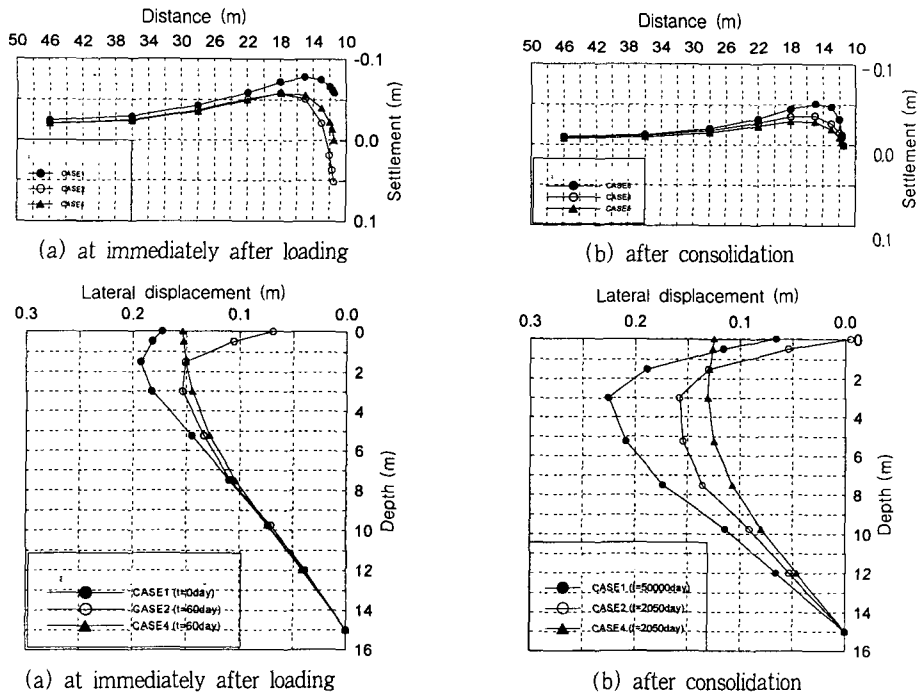


Fig. 5 Diagram due to effect of sheet pile and vertical drain

게 크지는 않았다.

2) 널말뚝 타설 및 V.D 효과

이 경우는 널말뚝과 Vertical drain을 동시에 설치한 경우(60일 성토), Vertical drain만 설치한 경우(60일 성토) 및 아무 대책도 취하지 않는 경우(즉시 성토)를 비교하여 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 Vertical drain을 설치한 경우에는 널말뚝 설치와 무관하게 성토 직후의 융기 및 측방변위는 크게 감소하고 있으며 널말뚝 설치 효과는 측방변위에 있어서는 깊이에 따라 일정한 비율로 변하게 하고 있으나 융기량은 오히려 적지만은 증가시키는 경향이 있다. 이것은 널말뚝을 설치함으로써 역효과를 초래하는 경우이다.

한편 압밀완료시의 융기 및 측방변위는 세 경우 거의 비슷한 비율로 감소하고 있으나 그 값이 그렇게 크지는 않았다.

3) 자연상태에서 널말뚝 타설효과

이 경우는 자연상태에서 널말뚝 타설효과를 비교

하여 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 점진성토일 때 널말뚝의 설치는 성토 직후 융기 억제 효과와 측방변위 억제 효과는 거의 나타나지 않으나 압밀 종료되는 시점에서는 융기 억제 효과를 다소 나타내고 측방변위 억제 효과는 비교적 크게 나타낸다. 자연상태에서 점진재하 경우 즉시재하 경우보다 융기 억제 효과와 측방변위 억제 효과가 뚜렷하게 나타냄을 알 수 있다.

이상의 고찰결과를 종합하면 흔히 사용되는 널말뚝의 대책공법은 성토직후 측방변위 억제효과는 거의 나타나지 않으므로 기대치와 거리가 있다.

널말뚝은 성토하부에 압밀을 촉진하기 위한 vertical drain을 설치하고 점증재하방법을 병행하는 경우가 융기 및 측방변위를 억제하는 확실한 효과가 있었다.

4) 성토고에 따른 거동

이 경우는 경우③에서 성토하중을 각각 3, 6, 9  $tf/m^2$ 으로 하여 성토고에 따른 거동을 비교하여 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 성토

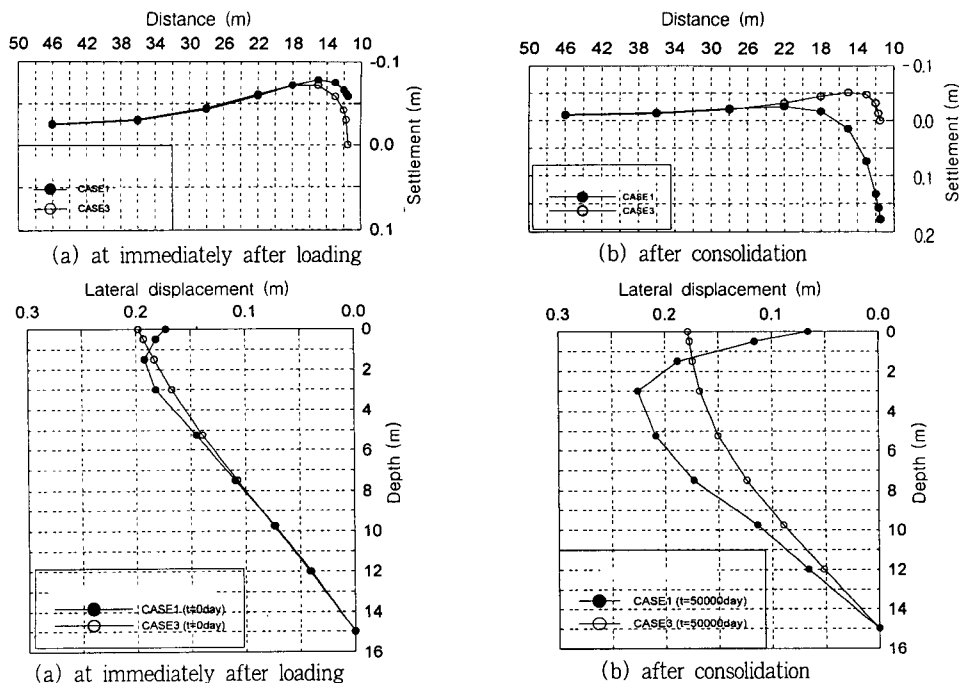


Fig. 6 Diagram due to effect of sheet pile under the natural state

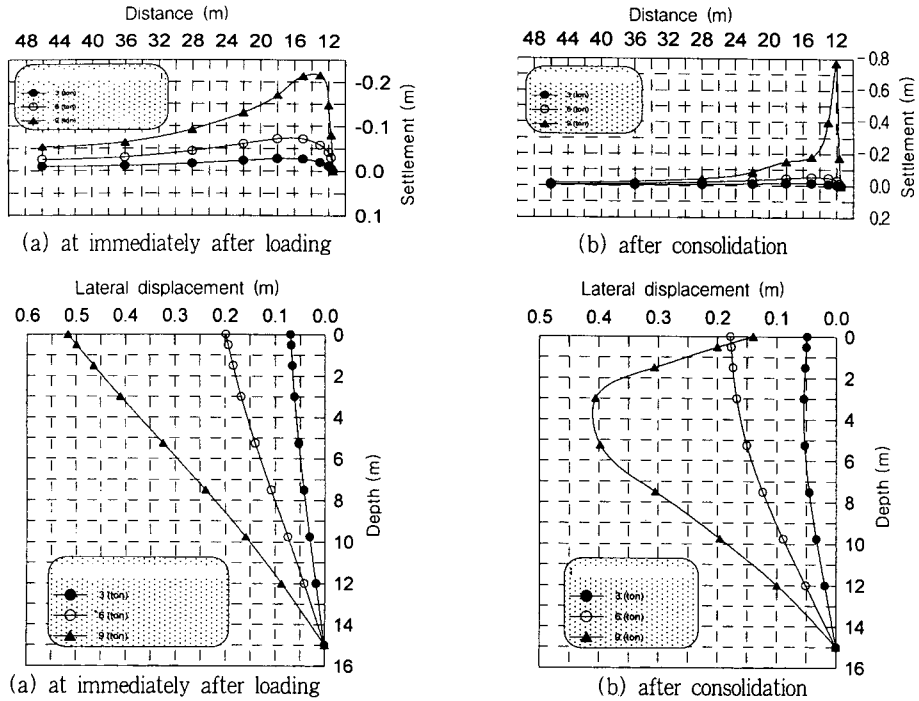


Fig. 7 Diagram due to effect of embankment loading

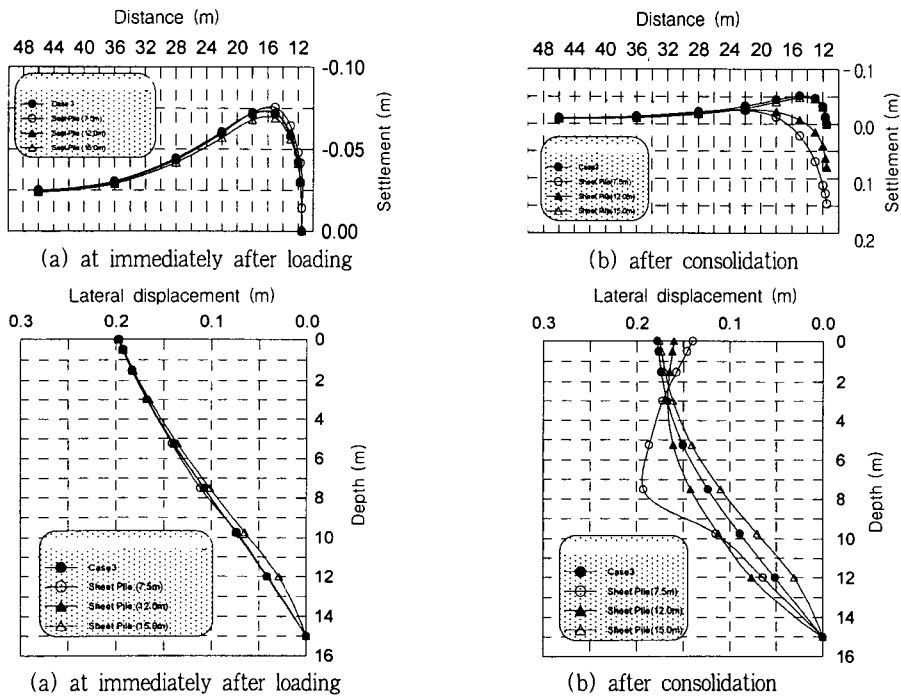


Fig. 8 Diagram due to effect of sheet pile length

직후의 용기 및 측방변위는 성토고의 크기에 따라 증가하며 성토하중이  $9 \text{ tf/m}^2$ 일 때 용기와 측방변위는 매우 크게 나타나어 성토하중의 한계 값에 가까움을 보여주었다.

그러나 압밀완료시에는 용기는 성토하중이 각각  $3, 6 \text{ tf/m}^2$ 일 때 많은 회복을 나타내었지만 성토하중이  $9 \text{ tf/m}^2$ 일 때 용기는 거의 4배로 증가하였다. 측방변위는 성토하중이 각각  $3, 6 \text{ tf/m}^2$ 일 때 약간의 회복을 보였지만 성토하중이  $9 \text{ tf/m}^2$ 일 때 측방변위는 지표면에서 많은 회복세를 나타낸 반면 깊이  $3 \text{ m}$  이하에서는 상당한 증가세를 보였다. 위 결과로 보아 성토하중  $9 \text{ tf/m}^2$ 를 한계 하중을 초과한 것으로 보인다.

5) 자연상태에서 널말뚝의 길이와 하부지점의 회전 및 고정효과

이 경우는 자연상태에서 널말뚝의 길이효과와 하부지점 상황을 비교하여 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 성토 직후의 용기 및 측방변위는 널말뚝의 길이와 하부지점의 유무에는 무관함을 보여 주었다.

압밀완료시에는 널말뚝의 길이가  $7.5 \text{ m}$ 와  $12 \text{ m}$ 일 때는 성토끝부분에서 약간의 침하를 나타내다가 수평거리가 멀어지면서 서서히 용기를 나타내며 널말뚝의 길이가  $15 \text{ m}$ 일 때는 하부지점의 회전 또는 고정과 관계없이 거의 같은 현상을 나타냈다. 그러나 측방변위에서는 널말뚝의 길이가  $7.5 \text{ m}$ 일 때 무대책시에 가까우며 널말뚝의 길이가 길면 길수록 측방변위의 억제 효과가 크며 널말뚝의 길이가  $15 \text{ m}$ 일 때 하부지점이 고정이면 회전일 때보다 측방변위의 억제 효과가 약간 크게 나타낸다.

이상의 고찰결과를 종합하면 흔히 사용되는 널말뚝의 대책공법은 성토 직후 측방변위 억제효과는 다소 나타나지만 그다지 크지 않으므로 기대치와 거리가 있다. 그리고 vertical drain을 설치할 경우에는 압밀에 의한 용기 및 측방변위 억제효과를 얻을 수 있었다.

널말뚝은 성토하부에 압밀을 촉진하기 위한

vertical drain을 설치하고 점중재하방법을 병행하는 경우가 용기 및 측방변위를 억제하는 효과가 가장 크다.

## V. 결 론

연약점토지반에 성토재하 또는 기존구조물에 근접 시공할 때 연약지반의 강화 즉, 측방변위 및 용기에 대한 억제 대책으로서 여러 가지 방법이 이용되고 있다. 본 논문은 이들 공법 중 특히 시공성, 경제성이 비교적 좋은 널말뚝을 설치하고 이 보강공법의 효과를 증진시키기 위하여 기초지반을 vertical drain으로 배수했을 때 지반의 보강효과와 변위 억제 효과가 있음을 규명하였다. 그 결과에서 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 널말뚝 대책공법으로서는 성토 직후의 용기 및 측방변위의 억제효과를 기대할 수 없었다.
2. 널말뚝은 성토하부에 압밀을 촉진하기 위하여 vertical drain을 설치하고 점중재하방법을 병행하는 경우가 용기 및 측방변위를 억제하는 확실한 효과가 있었다.
3. 성토 직후에는 널말뚝의 길이와 하단부 고정 유무에 거의 무관함을 보였다.
4. 압밀완료시에는 널말뚝의 길이가 길면 길수록 측방변위 억제 효과가 크게 나타났다.

## References

1. Biot, M. A. 1956, "General Theory of Three-dimensional Consolidation", Journal of Applied Physics, Vol.12, pp. 155~164.
2. Roscoe, K. H., Schofield, A. N., and Worth, C.P., 1958, "On the Yielding of Soil", Geotechnique, London, England, Vol. 8, No. 1 pp. 22~52.
3. Roscoe, K. H. & J. B. Burland., 1968. "On the Generalized Stress Strain Behaviour of 'Wet' Clay", Engineering Plasticity, Cambridge Univ.

- Press. pp. 535~609.
4. Christian, J.T. 1968, "Undrained Stress distributions by Numerical Method" *Journal of the Soil Mechanics and Foundation, Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM6, pp.1333~1345.
  5. Chrisrian, J.T. & Boehmer, J.W., 1970, "Plane Strain Consolidation of Finite Element", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation, Division, ASCE*, No.96, SM4, pp. 1435~1457.
  6. Wilson, C. P. 1965, "Structural analysis of axisymmetric solids," *AIAA J.*, Vol. 3, pp. 2269~2274.
  7. 姜秉宣, 1985, "彈塑性 model에 의한 複合軟弱地盤의 變形에 관한 數值解析研究", 博士學位論文, 全南大學校 大學院
  8. 姜秉宣, 朴炳基, 鄭鎮燮, 1985, "複合軟弱地盤의 變形解析에 관한 數值解析", *大韓土質學會誌*, 第1卷, 第2號, pp. 27~39.