

연약지반의 심층혼합처리공법의 시공효과

Effects of Deep Mixed Method Construction Within the Soft ground

정진섭* 양극영* 李光範**
 Jeong, jin Seob Yang, Keek Young Li Guang Fan

Abstract

This study aims at the development of computer program for the deformation analysis of soft ground, and using this computer program, study the constraint effect of deformation heaving, lateral displacement of the soft ground reinforced with improvement of soft ground up to hard strata, under intact state(natural). The following results are obtained.

1. Improvement of soft ground to the hard strata works well against the settlement of neighboring ground.
2. the larger the rigidity or width of improvement of layer to hard strata is, the less settlement occurs.
3. Improvement of soft ground to the hard strata is of no use.

키워드 : 수정 Cam-Clay 모델, 구성식, 심층혼합처리, 유한요소법, 침하, 측방변위

1. 서론

최근 산업의 발달과 더불어 대규모 공사가 급증하고 이에 따라 연약지반의 기질구조물주변에 굴착 또는 성토 시공의 필요성이 급증하고 있다. 이때 근접시공함으로서 유발되는 지반의 변형으로 인하여 주변 구조물에 미치는 영향을 정확히 예측함은 매우 의미있는 일이다. 그러나 이러한 대책공법의 시공효과에 관해서는 문헌도 거의 없고 또한 시공사례에 대한 정량적인 결과사례보고도 거의 없으므로 그 효과에 대한 많은 의문을 내포한 채 이용되고 있는 실정이다. 그러므로 본 논문은 경제성과 시공성 그리고 연약지반이나 지하수가 많은 곳에서 비교적 용이하게 시공할 수 있는 심층혼합처리공법을 채택하였고 이 공법의 수치실험을 통해 연약지반의 심층혼합처리공법의 시공효과를 밝히고자 한다.

2. 압밀해석에 사용한 응력-변형률 관계식

본 연구에서 사용한 응력-변형률 관계식은 Roscoe와 Burland(1968)3)가 제안한 수정 Cam-Clay 모델을 사용하여 다음과 같이 유도한다.

수정 Cam-Clay 모델의 항복함수는 다음과 같다.

$$f = M^2 p^2 - M^2 p_0 p + q^2 = 0 \quad (1)$$

항복함수 f 는 p, q, ϵ_v^p 의 함수 이므로 f 를 전미분 하면 다음과 같다.

$$df = \frac{\partial f}{\partial q} dq + \frac{\partial f}{\partial p} dp + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} d\epsilon_v^p = 0 \quad (2)$$

소성변형률의 직교법칙을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

여기서, f : 항복함수

Λ : 비례상수

(3)식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda B_{ij} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } B_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial f}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

(3)식과 (5)식을 결합하여 다음식을 얻는다.

$$df = B_{ij} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} d\epsilon_v^p = 0 \quad (6)$$

전변형률 증분은 소성성분과 탄성 성분으로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (7)$$

Hooke의 법칙을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) \quad (8)$$

(8)식과 (5)식을 (6)식에 대입하면 다음과 같다.

$$df = B_{ij} C_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - \Lambda B_{kl}) + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} \Lambda B_{ii} = 0 \quad (9)$$

Λ 값으로 정리하면

* 원광대학교 공과대학
 ** 中國 延邊大學校 理工大學

$$\Lambda = \frac{B_{ij}C_{ijkl}d\epsilon_{kl}}{B_{ij}C_{ijkl}B_{kl} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \quad (10)$$

(3)식에 (10)식을 대입하여 (8)식에 대입하면 다음과 같다.

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}d\epsilon_{kl} - \frac{C_{ijkl}B_{kl}B_{mn}C_{mnr}d\epsilon_{rs}}{B_{mn}C_{mnr}B_{rs} - \frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \quad (11)$$

$$d\sigma_{ij} = \left[C_{ijrs} - \frac{C_{ijkl}B_{kl}B_{mn}C_{mnr}}{B_{mn}C_{mnr}B_{rs} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \right] d\epsilon_{rs} \quad (12)$$

여기서 C_{ijrs}^p 는 다음과 같다.

$$C_{ijrs}^p = \frac{C_{ijkl}B_{kl}B_{mn}C_{mnr}}{B_{mn}C_{mnr}B_{rs} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \quad (13)$$

수정 Cam-Clay모델에서는

$$B_{ii} = \frac{\partial f}{\partial p} = 2M^2 p - M^2 p_0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial p_0}{\partial \epsilon_v^p} = \frac{p_0(1+e_0)}{\lambda - k} \quad (15)$$

미분의 Chain rule 사용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} = \frac{\partial f}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial \epsilon_v^p} = -\frac{M^2 p p_0 (1+e_0)}{\lambda - k} \quad (16)$$

(8)식에 (3)식을 대입하여 얻은 구성관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [C^{ep}]\{d\epsilon\} \quad (17)$$

$$\text{여기서, } \{C^{ep}\} = [C^e] - [C^p] \quad (18)$$

$\{C^{ep}\}$: 탄소성강성행렬

$[C^e]$: 탄성강성행렬

$[C^p]$: 소성강성행렬

3. 압밀해석 프로그램

연약점토 지반의 다차원 압밀거동을 해석하기 위하여 압밀을 탄성거동으로 표현하고 있는 다음의 Biot1) 압밀방정식에 따르는 현상으로 정의한다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p_w}{\partial x_i} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = -\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 p_w \quad (20)$$

여기서, p_w , ϵ_v , k , γ_w : 각각 과잉간극수압, 체적변형률, 투수계수, 간극수의 단위중량

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

(19)식은 미소한 흙 요소의 평형조건을 의미하고 (20)식은 요소의 체적변화와 배수량의 관계를 나타내는 연속

조건이다.

변위증분 Δu_x , Δu_y 를 성분으로하는 벡터를 $\{\Delta u\}$ 로 표시하여 평형방정식을 만족하는 전응력증분

$\{\Delta \sigma\}^T = \{\Delta \sigma_x, \Delta \sigma_y, \Delta \tau_{xy}\}$ 에 대한 가상일의 원리를 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_V \{\Delta \bar{\epsilon}\}^T \{\Delta \sigma\} dV \\ &= \int_V \{\Delta \bar{\epsilon}\}^T \{\Delta \sigma'\} dV + \int_V \{\Delta \bar{\epsilon}\}^T \{\Delta p_w\} dV \\ &= \int_V \{\Delta \bar{u}\}^T \{\Delta F_b\} dV + \int_S \{\Delta \bar{u}\}^T \{\Delta T_s\} dS \end{aligned} \quad (21)$$

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

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

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

$\{\Delta F_b\}$: 물체력증분벡터

$\{\Delta T_s\}$: 표면력증분벡터

식 (21)에서 “-”의 표시는 물리량의 가상변위를 나타내기 위해서이다.

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

$$\{\Delta u\} = [N]\{\Delta u^*\} \quad (22)$$

식 (22)에 대응하는 요소내의 임의 점의 변형율증분 $\{\Delta \epsilon\}$ 와 체적변형율증분 $\Delta \epsilon_v$ 는 절점변위증분과 관련지을 수 있으며 다음과 같다.

$$\{\Delta \epsilon\} = [B]\{\Delta u^*\} \quad (23)$$

$$\Delta \epsilon_v = \{K_V\}^T \{\Delta u^*\} \quad (24)$$

여기서,

$[B]$: 절점변위증분을 요소내 임의 점의 변형율증분으로 전환하는 형상함수

$\{K_V\}^T$: 절점변위증분을 요소의 체적변형율증분으로 전환하는 형상함수

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

$$\{\Delta p_w\}^T = \{1 \ 1 \ 0\} \Delta p_w^* \quad (25)$$

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

$$\{\Delta \sigma'\} = [C^{ep}]\{\Delta \epsilon\} \quad (26)$$

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

식 (22)에서 식 (26)까지를 식 (21)에 대입하고 가상변위

를 임의로 선택한 것을 고려하면 다음과 같이 얻어진다.

$$[K]\{\Delta u^*\} + \{K_V\}\Delta p_w^* = \{\Delta Q\} \quad (27)$$

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

$$[K] = \int_V [B]^T [C^{ep}] [B] dV \quad (28)$$

$$\{K_V\} = \int_V \{B_V\} dV \quad (29)$$

$$\{\Delta Q\} = \int_V [N]^T \{\Delta F_b\} dV + \int_S [N]^T \{\Delta T_s\} dS \quad (30)$$

한편, 시간의 증가와 더불어 발생하는 과잉간극수압과 변위를 구하기 위하여 (20)식을 평면변형을 조건으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + \frac{1}{\gamma_w} \left[k_x \frac{\partial^2 p_w}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p_w}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (31)$$

식 (31)에서 계산된 체적변화량을 식 (24)에 대입하면 식 (27)과 식 (24)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.^{4,5)} 식 (31)을 차분법으로 풀기위해 과잉간극수압 p_w^* 는 다음과 같다.

$$p_w^* = \{(1 - \theta)p_w|_t + \theta p_w|_{t+\Delta t}\} \quad (32)$$

를 다시 풀어 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_w^* = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 \quad (33)$$

여기서, $p_w|_t$ 는 $t=t$ 일 때 과잉간극수압

$p_w|_{t+\Delta t}$ 는 $t=t+\Delta t$ 일 때 과잉간극수압

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

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 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 다음 식과 같다.

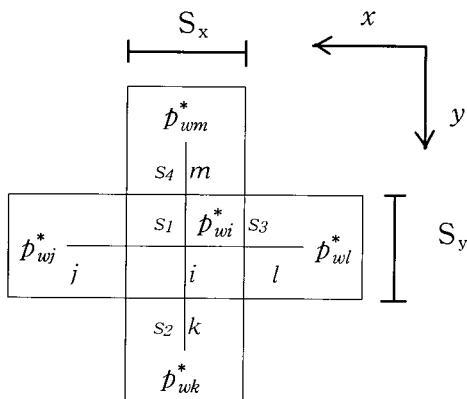


그림 1. Local coordination used in caculation rate of flow

$$\{p_w^*\} = \begin{bmatrix} p_{wi}^* \\ p_{wj}^* \\ p_{wk}^* \\ p_{wl}^* \\ p_{wm}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & y_3^2 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4^2 & y_4^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{Bmatrix} = [B]\{a\} \quad (34)$$

그러면 $\{a\}$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\{a\} = [B]^{-1}\{p_w^*\} \quad (35)$$

식 (33)을 식 (31)에 대입하고 식 (35)를 고려하여 식 (31)을 변환하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta v = -\frac{\Delta tv}{\gamma_w} (2k_x \alpha_4 + 2k_y \alpha_5)$$

$$= -\frac{\Delta tv}{\gamma_w} (2k_x b_4^T + 2k_y b_5^T) = -\{K_V\}^T \{p_w^*\} \quad (36)$$

$$\text{여기서, } [K_V]^T = \frac{\Delta tv}{\gamma_w} (2k_x b_4^T + 2k_y b_5^T)$$

Δt 는 시간증분량

v 는 요소체적

b_4, b_5 는 $[B]^{-1}$ 의 4행과 5행의 벡터

$\Delta p_w^* = p_w^*|_{t+\Delta t} - p_w^*|_t$ 의 관계를 이용하고 식 (33)에서 $\theta=1$ 로 하여 식 (27)을 차분식으로 전환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[K]\{\Delta u^*\}_j + \{K_V\}p_{wj}^* = \{\Delta Q\}_j + \{K_V\}p_{wj}^* \quad (37)$$

식 3-18을 식 (4)에 대입하여 변형하면 다음과 같다.

$$\{K_V\}^T \{\Delta u^*\}_j = -\{K_V\}^T p_{wj}^* \quad (38)$$

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

4. 모형지반의 수치해석^{7,8)}

성토에 의한 주변지반의 변형방지대책으로써 성토부 끝에 심층혼합처리를 하였으며 이들에 대한 침하, 측방변위, 융기현상 등의 변형을 비교분석한다.

4.1 모형지반의 조건

1. 성토지반의 요소 분할은 그림 2와 같으며 층두께는 15m이고 기초폭은 92m이다. 성토 및 기초지반이 대칭이기에 반분하여 8층 21열로써 168요소 198절점의 직사각형요소를 사용한다.

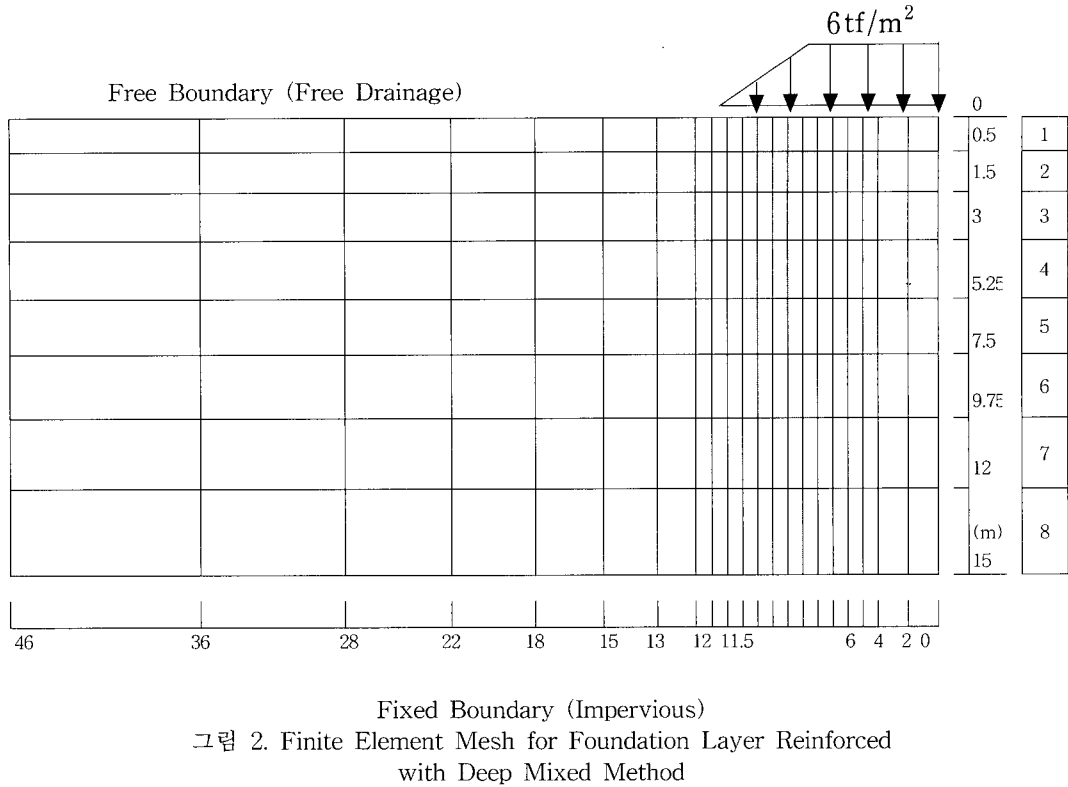


그림 2. Finite Element Mesh for Foundation Layer Reinforced with Deep Mixed Method

2. 성토부저폭은 23m로써 성토하중은 $q=6\text{tf/m}^2$ 이다.
3. 배수조건은 바닥과 측면은 비배수, 기초지반 상부는 배수상대이고, 변형조건은 바닥은 고정, 측면은 연직변위를 허용한다.
4. 각 층에 대한 재료정수는 표 1과 같으며 재료정수는 깊이에 따라 다음 식에 의해 변화시켰다.

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

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

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

표 1. Material Properties and Parameters used in Calculation.

λ	k	M	ν	σ_{vc}	K_{oc}	σ_{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.

4.2 기초보강대책 및 제하방법

1. 그림 3과 같이 기초지반의 보강대책공으로써 폭과 깊이를 연직방향과 수평방향으로하여 지반의 강성을 높인 경우를 대상으로 한다.

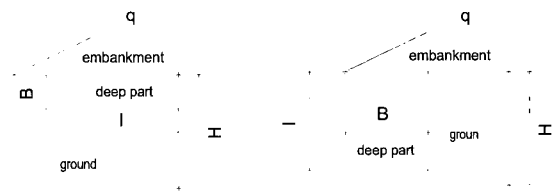


그림 3. Type of Deep mixed method

2. 대책공의 조건

표 2와 같이 심층혼합처리계의 방향 및 처리폭을 변화시킨다.

표 2. List of Case used in calculation

계산조건		대책공				심층혼합처리(D.M.M)				무대책
제하조건	지반개량유무	강성방향	연직방향		수평방향		관입장			
			B=4.0m	B=5.5m	B=3.0m	B=5.25m	③	⑥	⑦	⑧
즉시제하	무개량	$l=15.0\text{ m}$	③	⑥	⑦	⑧	①			
		$l=12.0\text{ m}$	④							
		$l=7.5\text{ m}$	⑤							

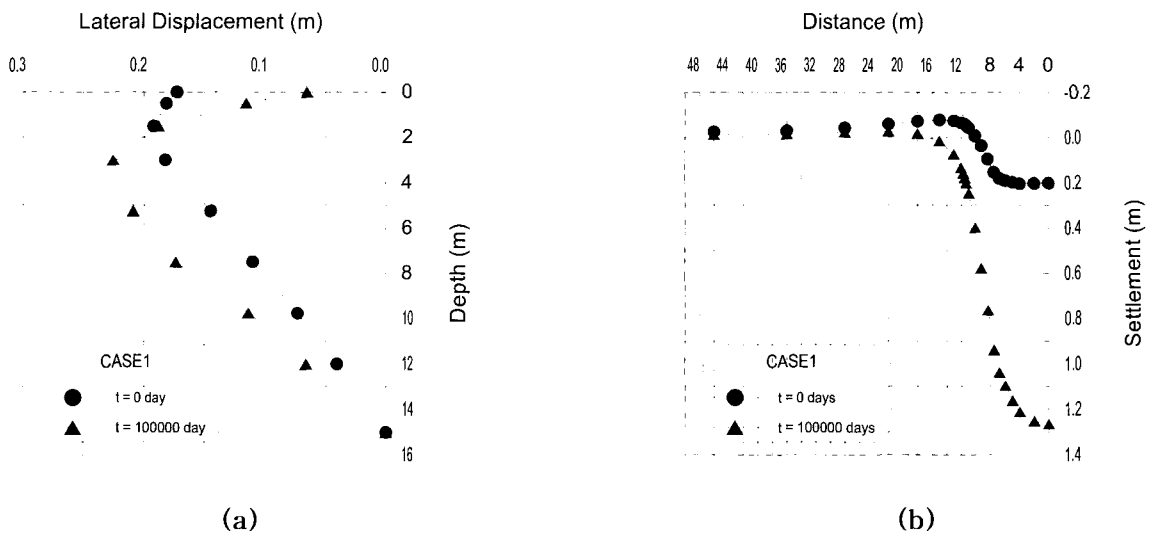


그림 4. (a) Lateral displacement at tip of embankment
(b) Shape of settlement at surface of embankment

4.3. 수치계산 결과 및 고찰

4.3.1. 지반의 변형개요

표 2의 내용으로 수치계산하여 10개 형태로 도시한다. 그 대표적인 예로서 경우 ①을 그림 3에 나타내었다.

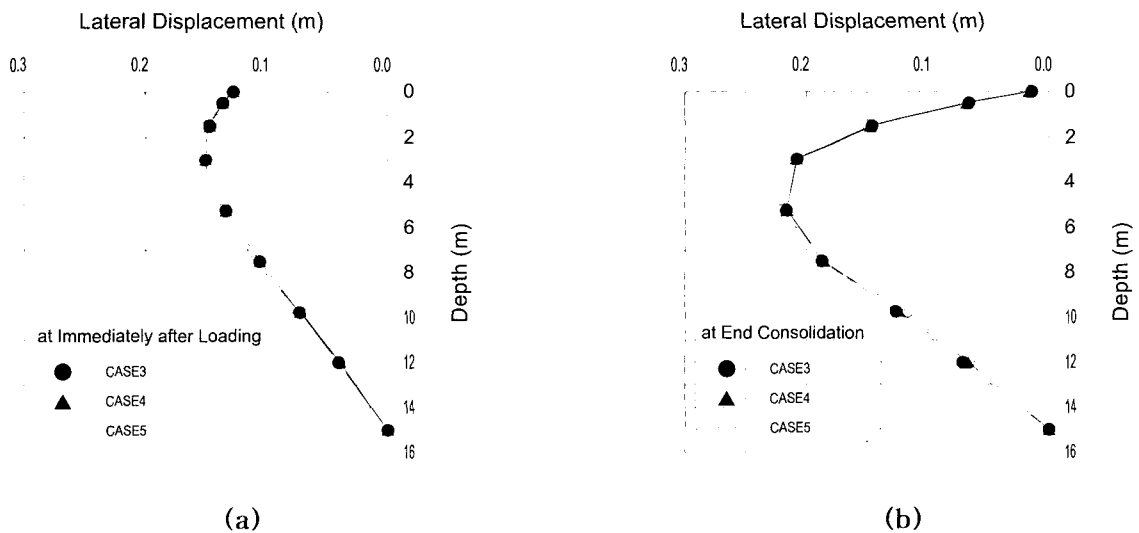
경우 ①은 그림 4(a)에서 알 수 있는 바와 같이 무대책 일 때 성토끝부에서 측방변위가 성토직후와 경과시간이 100000일에 해당되는 것을 나타낸 것이다.

어느 경우나 시간의 경과에 따라 지표면에서의 측방변위는 증가하다가 경과시간이 500일이 지난 후부터 감소

하며 최대 측방변위는 깊이 3m인 곳에서 나타난다. 연직 변위는 제체밖(11.5m)에서는 융기가 나타나고 이들 전체의 변위량은 시간의 경과에 따라 융기는 감소되고 성토 중심선 아래 침하량은 증가함에 따라 경과시간이 100000일 때 압밀의 종료를 시사한다.

4.3.2 비교 및 고찰

표 2에 나타난 경우를 상세하게 항목별로 비교 및 고찰을 하여 본다.



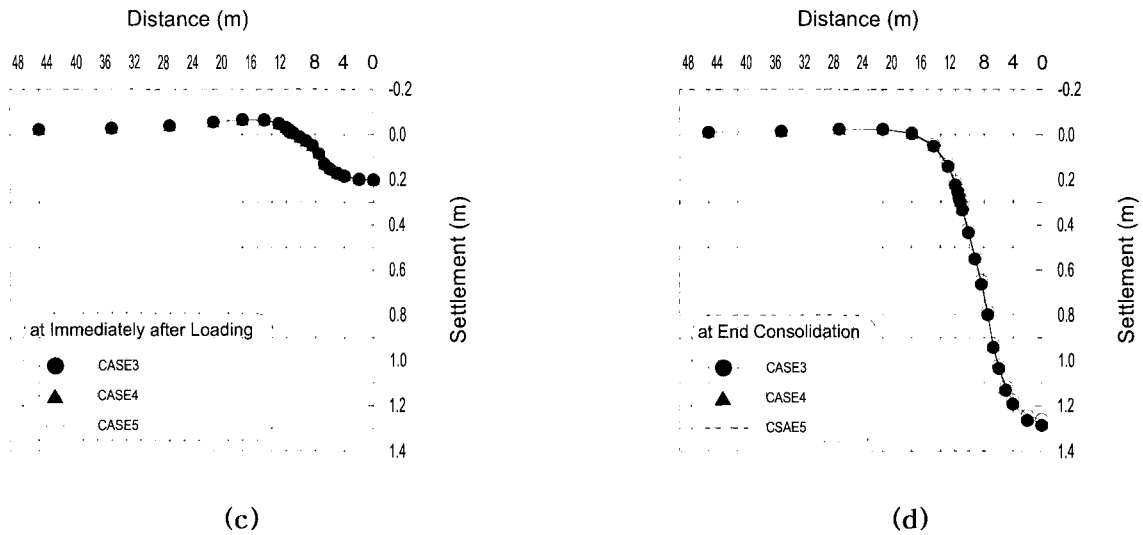


그림5. (a) Lateral displacement of embankment at immediately
 (b) Lateral displacement of embankment at end consolidation
 (c) Settlement in surface of embankment at immediately
 (d) Settlement in surface of embankment at end consolidation

대책공의 비교분석방법은 다음 항목에 의한다.

1. 무개량
- 1) 무개량시 관입장(연직방향)의 효과

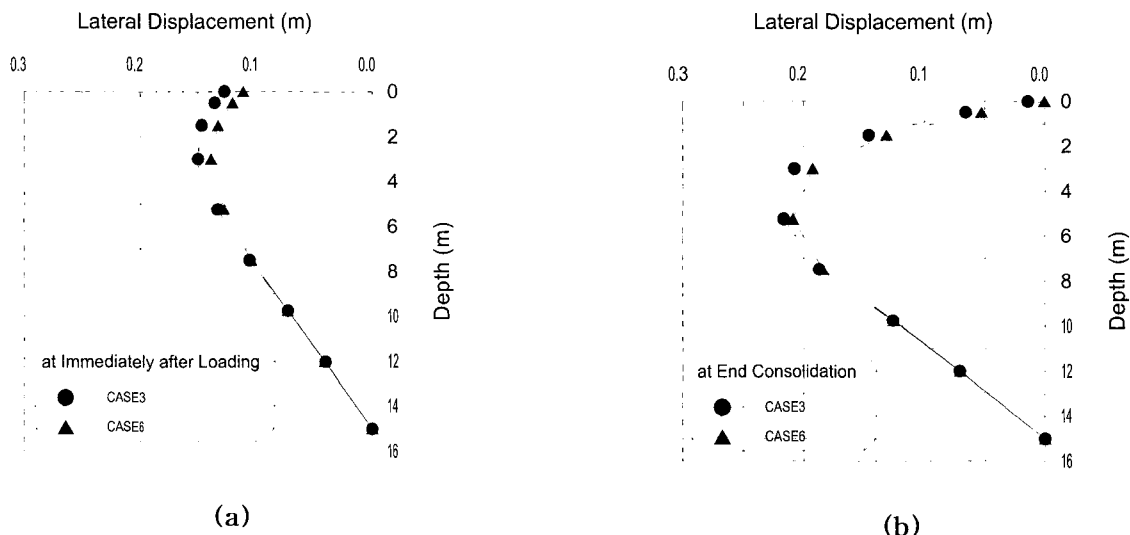
그림 5는 연직방향으로 관입깊이를 달리하고 폭 B = 4.0m일 때 즉시 측방방변위와 압밀완료시의 측방변위, 즉시 침하와 압밀완료시의 침하를 나타낸 것이다.

그림 4에서 나타낸 바와 같이 관입장을 각각 15m, 12m, 7.5m로 하였을 때 측방변위와 침하는 거의 일치하

지만 관입장을 7.5m일 때 측방변위는 약간 큰 것으로 나타났다. 따라서 관입장을 7.5m로 하여도 무방하다는 것을 알 수 있다.

- 2) 무개량시 관입폭(연직방향)의 효과

그림 6은 연직방향으로 관입깊이를 같게($l=15m$)하고 폭을 각각 4.0m와 5.5m로 하였을 때 즉시 측방방변위와 압밀완료시의 측방변위, 즉시 침하와 압밀완료시의 침하를 나타낸 것이다. 그림 5에서 나타낸 바와 같이 침하



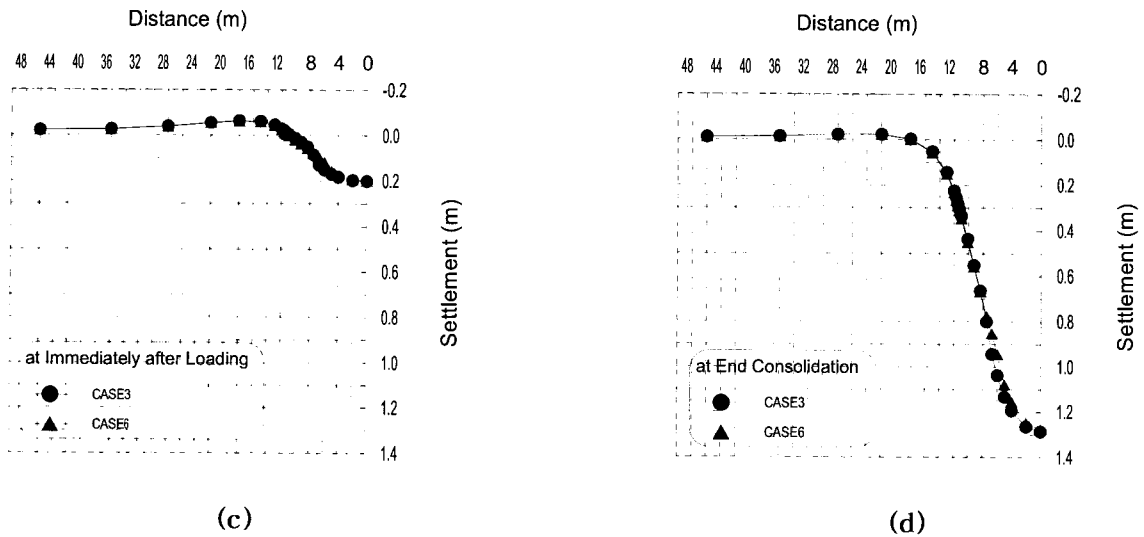


그림 6. (a) Lateral displacement of embankment at immediately
 (b) Lateral displacement of embankment at end consolidation
 (c) Settlement in surface of embankment at immediately
 (d) Settlement in surface of embankment at end consolidation

는 폭의 영향을 거의 받지 않지만 측방변위에 있어서 폭이 클 때 측방변위가 다소 크게 나타나지만 영향은 매우 작게 나타내고 있다.

3) 무개량시 관입장(수평방향)의 효과

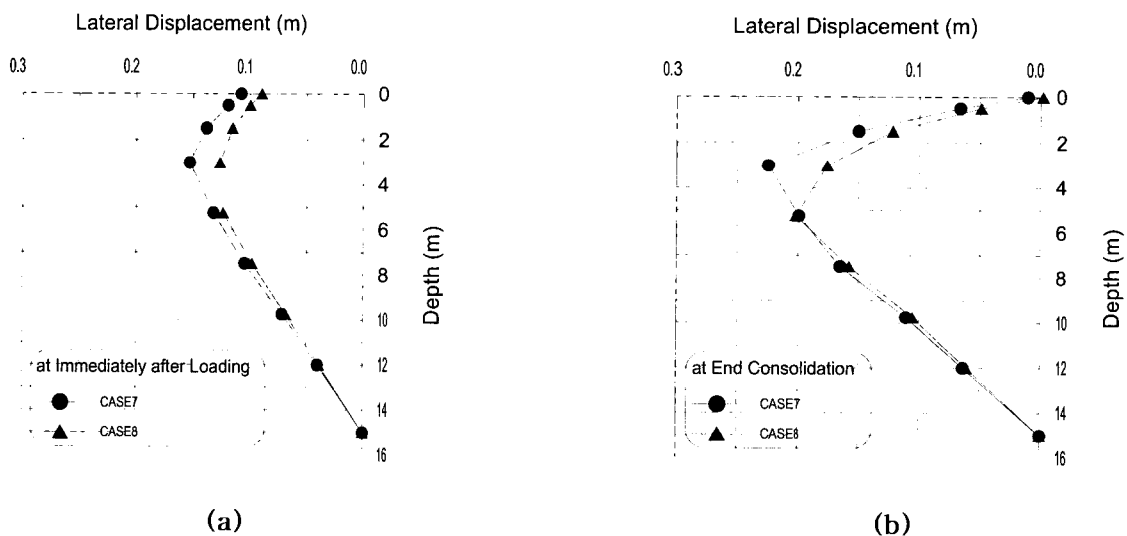
그림 7은 수평방향으로 길이를 같게 ($l = 15m$)하고 깊이를 각각 3.0m와 5.25m로 하였을 때 즉시 측방변위와 압밀완료시의 측방변위, 즉시 침하와 압밀완료시의 침하를 나타낸 것이다. 그림 6에서 나타낸 바와 같이 침하는

깊이의 영향을 매우 적게 받으며 측방변위에 있어서도 깊이의 영향은 그리 크지 않는 것으로 나타났다.

4) 무개량시 관입방향과 무대책과의 비교

그림 8은 경우 ①, ③, ⑦을 도시하여 나타낸 것이다. 경우 ①은 무대책이고 경우 ③은 연직방향으로 관입장을 15m, 폭을 4.0m로 한 것이며 경우 ⑦은 수평방향으로 길이 15m, 깊이를 3.0m로 한 것이다.

그림 7에서 나타낸 바와 같이 무대책일 때 즉시 측방



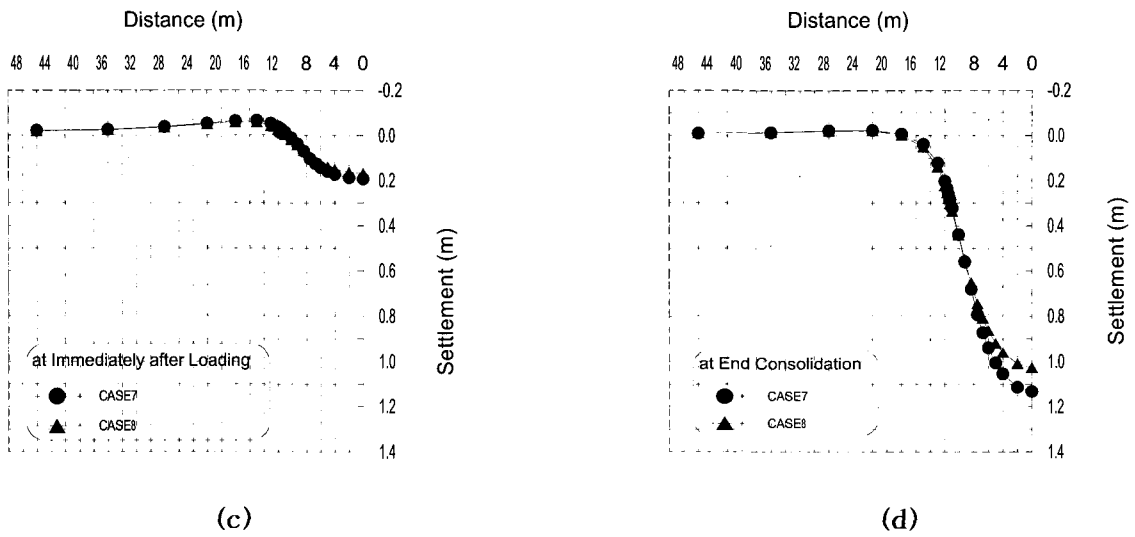
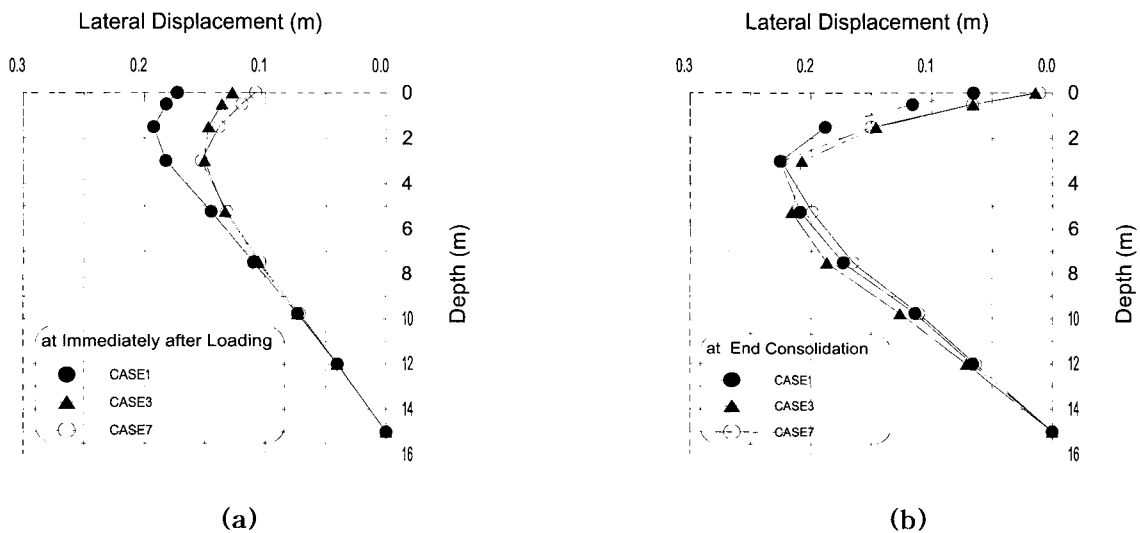


그림 7. (a) Lateral displacement of embankment at immediately
 (b) Lateral displacement of embankment at end consolidation
 (c) Settlement in surface of embankment at immediately
 (d) Settlement in surface of embankment at end consolidation

변위는 가장 크게 나타내고 연직과 수평 심층혼합처리에
 시 거의 차이를 보이지 않으며 압밀 완료할 시점에서는
 세 경우는 거의 같은 것으로 나타냈다.

침하에서는 세 경우 즉시 침하하는 거의 같고 압밀완료
 시 연직 심층혼합처리가 가장 작게 내고 무대책과 수평
 심층혼합처리에서는 거의 같은 것으로 나타냈다.

이상의 고찰결과를 종합하면 심층혼합처리 대책공법은
 성토직후 측방변위 억제효과는 그다지 크지 않으며 기대
 치와 거리가 있다.



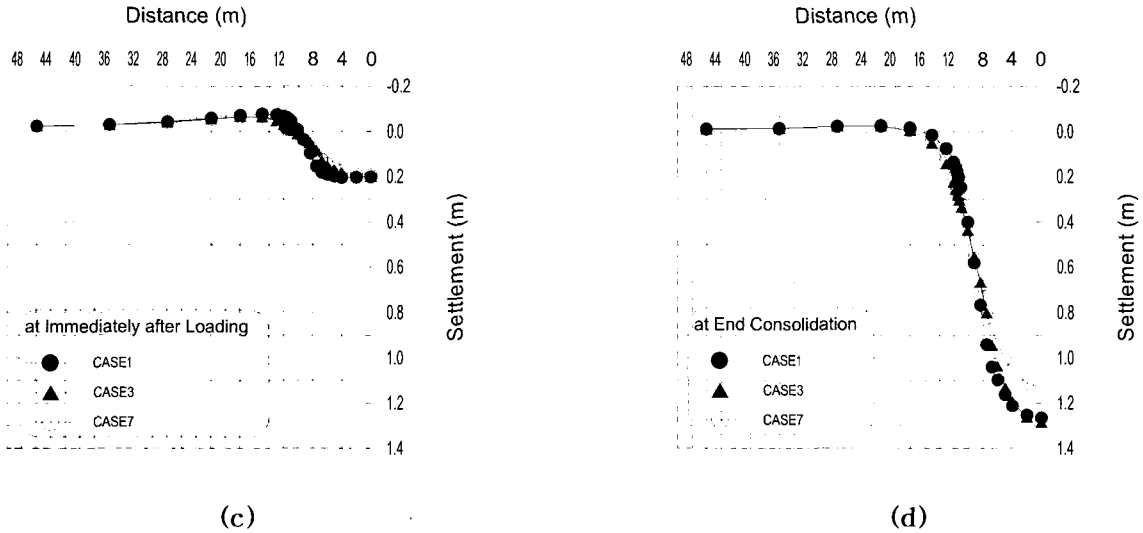


그림 8. (a) Lateral displacement of embankment at immediately
 (b) Lateral displacement of embankment at end consolidation
 (c) Settlement in surface of embankment at immediately
 (d) Settlement in surface of embankment at end consolidation

5. 결론

연약점토지반에 하중이 재하될 때 또는 연약점토지반의 기존구조물에 접근 시공할 때 지반의 강화나 측방변위 및 용기에 대한 보강대책으로써 여러 가지 방법이 이용되고 있다. 본 논문은 그들 공법 중 특히 시공성, 경제성이 좋은 심층혼합처리공법을 깊이나 강성 등을 변화시켜 이 보강공법의 효과를 증진시켜 지반의 보강효과와 효용성을 밝혔다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연직방향 심층혼합처리나 수평방향 심층혼합처리가 비록 무대책과 비교할 때 측방변위와 침하에 대한 억제효과와가 좋지만 예상치와는 거리가 있다.
2. 연직방향심층혼합처리 효과는 수평방향심층혼합처리 효과보다 다소 크다.
3. 주변지반의 침하효과에 관해서는 심층혼합처리 깊이를 지지층까지 관입하여 시공하고 그 자신의 침하가 없을 경우에만 유효하다.

참고 문헌

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. 강병선, 1985, "탄소성모델에 의한 복합연약지반의 변형에 관한 수치해석 연구", 박사학위논문, 전남대학교
8. 박병기, 정진섭, 강병선, 1985, "복합연약지반의 변형해석에 관한 수치해석", 대한토목학회지, 제1권, 제2호, pp. 27~39.