

굴착사면의 안정해석과 보강설계법

Stability Analysis and Reinforced Design Method of Excavation Slopes

강 예 목* · 이 달 원** · 조 재 홍***
Kang, Yea Mook · Lee, Dal Won · Cho, Jae Hong

Summary

In this study, displacement, deformation, and stability according to change of cohesion and internal friction angle were investigated through elasto-plastic method, finite-element method, and in-site experiment when excavating soft ground using sheet pile. The results of the study were as follows :

1. The horizontal displacement was 5.5% of the excavation depth by the elasto-plastic method and 3.9% of the excavation depth by the on-site experiment at the final excavation depth(GL-8.0m) on the condition of double stair strut after excavating GL-6.0m.

2. Relationships between cohesion(c) and internal friction angle(φ) when safety factor to the penetration depth was 1.2 is shown in the following equations : (a) $c = -0.0086\varphi + 0.3(D=3m)$ and (b) $c = -0.00933\varphi + 0.14(D=4m)$.

3. The results of elasto-plastic method and the experiment show that possible excavation depth was GL-6.0m after setting single stair strut in a short period in terms of possibility of carrying out on the condition of experimental site on the contrary general reinforcement method, setting double stair strut after excavating GL-4.0m.

4. After setting the strut, distribution of the horizontal displacement had concentrated on the excavation base and possible local failure which the shear strain caused decreased by the strut reinforced.

5. After setting strut, displacement of sheet pile was decreased by half, the limit of stable excavation depth of ground was GL-8.0m, and the maximum horizontal displacement at the GL-8.0m was 1.6% of excavation depth by the elasto-plastic method, 0.7% of excavation depth by the finite-element method.

* 충남대학교 농과대학

** 한국토지공사 토지연구원

*** 충남대학교 대학원

키워드 : 탄소성법, 유한요소법, 변위, 근입깊이, 널말뚝

I. 서 론

최근 건설공사의 급증과 구조물의 대형화 추세에 따라 지하구조물의 규모나 깊이가 증가되고 있으며, 대도시에서의 흙막이 공법을 이용한 구조물 굴착공사는 항상 복잡한 도로 교통, 밀집한 고층건물 또는 지하 매설물에 인접하여 시공되고 있다.

또한, 깊은 굴착으로 인하여 인접건물의 붕괴 및 안전사고가 빈발하여 여러 가지 새로운 굴착사면의 붕괴방지공법에 대한 연구가 진행되고 있으나, 현재까지 알려진 흙막이 구조물의 개념은 일반적인 구조물로 굴착공사중 흙막이 역할만하고 본체구조물 축조후 철거되는 가설구조물로서 인접구조물에 미치는 영향과는 거의 무관하게 취급되어 도심지나 인구밀집지역, 또는 연약지반 등에서 굴착공사로 인한 인접도로나 구조물의 균열, 부등침하와 굴착에 따른 안전사고 등이 발생하여 많은 경제 적손실과 인명피해가 증가되고 있는 추세이다.

흙막이 구조물과 같은 지반-구조물의 상호작용은 토질조건, 지하수위, 재료의 특성, 지진활동 등에 의하여 영향을 받고 있으며, 이러한 지반은 매우 복잡한 거동을 나타내기 때문에 이론적으로 이러한 요소들을 모두 고려하여 설계에 반영하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 비경제적인 설계방법을 초래할 수 있다.

그러나 지반-구조물의 상호작용에 관한 지반의 거동해석은 유한요소법, 유한차분법등과 같은 수치해석법에 의하여 상당한 발전을 가져왔다.

이와같은 수치해석방법 등을 이용하여 흙막이 구조물을 설계하고자 할 때는 지반-구조물 상호작용의 특성과 해석방법을 정확히 이해하여 적용하여야 하고, 굴착방법에 따른 현장계측이 병행되어야 흙막이 구조물의 응력-변형 특성거동을 정확하게 예측할 수 있다.

널말뚝에 대한 실험적 연구는 Tschebotar-

ioff²²⁾에 의하여 처음으로 이루어졌는데 널말뚝에 대한 토압분포는 벽변형에 크게 영향을 받는다고 하였고, Rowe²⁰⁾는 모형실험 결과로 모멘트 감소방법을 제안하였다.

또한, Browzin²⁾은 Coulomb이론을 기초로 널말뚝과 경사진 앵커로 보강된 굴착사면의 안정방법을 제안하였고, Hanna¹²⁾와 Bang¹⁾ 등은 앵커의 경사각이 널말뚝의 거동에 미치는 영향을 구명하였다.

최근의 연구로서 Kurid¹⁷⁾는 3단앵커로 지지된 널말뚝의 응력-변형에 대한 실험을 하였으며, Egger⁸⁾와 Nyby¹¹⁾ 등은 유한요소법을 적용하여 널말뚝의 거동에 대하여 연구하였다.

그리고 연약지반에 대한 연구로서 國武 등¹⁶⁾은 점토지반상에 시공되는 수로굴착사면의 굴착직후 안정성에 대하여 유한요소법으로 분석하였고, 松井¹⁸⁾ 등은 굴착절토사면에 인장보강재로 보강하였을 때 보강절토사면의 파괴상태를 고찰하였다.

따라서, 본 연구에서는 연약한 점토지반에서 널말뚝을 이용하여 지반을 굴착할 때 점착력, 내부마찰각의 변화 그리고 널말뚝 근입깊이가 널말뚝의 변위, 응력 및 안전율에 미치는 영향을 탄소성법과 유한요소법으로 해석하고 현장실험결과를 비교분석하여, 널말뚝을 이용한 지반굴착현장에 적용할 수 있는 보강설계법에 관한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 해석방법

1. 탄소성법

본 연구에서 해석에 이용한 굴착단계별 탄소성 Beam Spring Model과 하중과 변형에 대한 기본식은 Fig. 1 및 식 (1)과 같다.

하중과 변형에 대한 기본식

$$EI \frac{d^4 x}{dy^4} + \frac{A \cdot E}{L} \cdot x = P_i - K_s \cdot x \quad \dots (1)$$

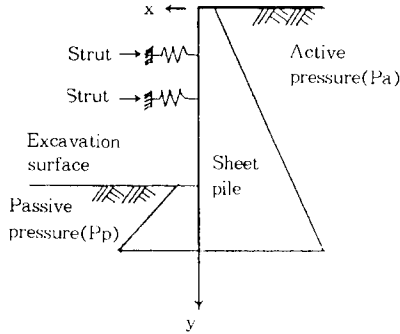


Fig. 1. The model of basic structure

여기서

- E : 흙막이벽체의 탄성계수(t/m^2)
- I : 흙막이벽체의 단면2차 모멘트(m^4/m)
- A : 지보공의 단면적(m^2)
- E : 지보공의 탄성계수(t/m^2)
- L : 지보공의 길이(m)
- P_t : 초기토압(t/m^2)
- K_s : 지반의 수평방향 지반력계수(t/m^3)
- x : 깊이 y 지점에서 벽체의 x 방향변위(m)

2. 유한요소법

유한요소법에서 안전율은 사면을 비선형탄성, 탄소성으로 취급해서 진행성 하중을 작은 증분의 수로 나누고, 흙의 응력이력 의존특성과 비선형 응력에 의하여 구한다. 따라서 사면의 전단변형을 구하기 위해서 비선형 탄성 해석에 의한 응력-변형 관계를 쌍곡선에 근사시킨 Duncan-Chang⁷⁾의 쌍곡선식을 이용하면 다음과 같이 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \epsilon} = \frac{1/E_i}{[1/E_i + R_f \epsilon / (\sigma_1 - \sigma_3)_r]^2}$$

$$= \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2(\cos \phi + \sigma_3 \sin \phi)} \right]^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

..... (2)

여기서

- K, n : 재료정수, R_f : 파괴비,
- E_i : 초기탄성(Young's) 계수(t/m^2)
- P_a : 대기압(t/m^2),
- c : 점착력(t/m^2), ϕ : 내부마찰각

지반-구조물의 상호작용을 고려할 때 널말뚝은 Beam요소로, 널말뚝의 유연한 강성은 실제의 널말뚝부재와 같은 강성을 가진 요소로 할당 해줌으로써 다음과 같이 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$E_e \cdot I_e = E_s \cdot I_s \quad \text{..... (3)}$$

- 여기서, E_s : Steel의 탄성계수(t/m^2)
- I_s : Steel 관성모멘트(m^4/m)
- E_e : 요소의 탄성계수(t/m^2)
- I_e : 요소의 관성모멘트(m^4/m)

굴착후 버팀대가 완전히 장착되기전에는 약간의 변위가 발생하고 단순히 스프링처럼 작용한다. 이와같은 부분을 스프링 함수를 사용하면 식 (4)와 같다.

$$K = \frac{F}{\Delta L} = \frac{EA}{L} \quad \text{..... (4)}$$

- F : 부재의 힘(t)
- ΔL : 길이의 변화(m)
- E : 탄성계수(t/m^2)
- A : 부재의 단면적(m^2)
- L : 부재의 길이(m)

III. 재료 및 방법

1. 해석모델 및 분석계획

본 연구에서 탄소성법 및 유한요소법으로 분석하기 위하여 시공현장의 지반조사 결과를 해석모델로 하였다. 모델지층은 현장지반 조사결과¹⁰⁾를 기초로하여 점착력은 0.1, 0.2,

0.3kg/cm²의 3단계로, 내부마찰각은 0°, 5°, 10°, 15°의 4단계, 널말뚝의 근입깊이는 2m, 3m, 4m, 5m, 6m로 변화시키면서 버팀대 1단 (GL-0.5m), 버팀대 2단(GL-3.5m)을 설치하였을 경우에 대하여 널말뚝의 거동을 분석하였다.

2. 현장실험 개요

굴착단계에 따른 널말뚝의 거동을 분석결과와 비교 검증하기 위하여 다음과 같이 현장실험을 하였다. 굴착공사의 규모는 폭×길이(B×L)=10m×56m, 굴착깊이 H=8.0m, U형널말뚝(400×150×13) 길이 L=14m, 버팀대(H-Beam)의 길이는 9.4m(300×300×10×15)이고 버팀대간의 간격은 3m로 계획하였다.

지표면에서 널말뚝에 진동을 주면서 GL-14m의 풍화암층까지 압입시공하고, 1차로 GL-1.0m까지 굴착한후 GL-0.5m에 버팀대 1단을 설치하였으며, 2차굴착은 작업조건을 고려해서 GL-6.0m까지 굴착한후 버팀대 2단을 추가로 설치하였다. 3차굴착은 최종 굴착저면 GL-8.0m까지 바닥에서 나오는 지하수를 밖으로 배제하면서 굴착을 진행하였다.

굴착현장의 시공단면도는 Fig. 2와 같다.

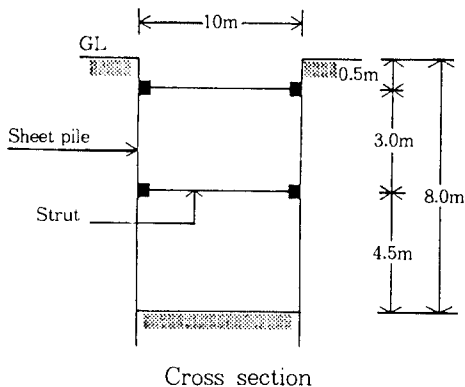


Fig. 2. Cross section of excavated in the field using sheet pile.

3. 현장지질 및 토질조사

가. 지질조사

지질조사는 회전수세식 시추기를 이용하여 조사한 결과 굴착현장 지역의 지질은 신생대 제4기 충적층으로 유수에 의하여 운반 퇴적된 층이 상부지층을 형성하고 있으며, 퇴적층의 주요 구성성분은 암회색을 띠는 점토질실트 또는 모래섞인 실트로 구성되어 있다. 부분적으로 Sand Seam과 조개껍질을 함유한 층이 나타났으며 또한 심도가 깊어질수록 비소성의 경향이 크게 나타났다. 표준관입시험을 실시한 결과, 심도 12.5m까지는 N=1~7회로 연약지반에서 보통지반의 층이 분포하고 있으며, 심도 12.5m-13.5m 사이의 층은 N=7~50회로 황갈색을 띠는 풍화대 및 풍화암층으로 매우 조밀한 상대밀도를 나타내고 있다.

굴착을 진행하면서 널말뚝의 변위상태를 측정하기 위해서 광파측정기와 스틸테이프를 이용하여 현장계측을 실시하였다.

나. 토질조사

굴착현장에서 GL-2.0~-2.8m의 깊이에서 불교란시료를 채취하여 실내실험을 한 결과 물리적성질은 Table-1과 같다.

점착력과 내부마찰각을 구하기 위한 삼축압축시험은 비압밀비배수시험으로 실시하였다. 현장에서 시추완료후 시추공내의 안정된 지하수위는 GL-2.0m로 측정되었다.

현장지반에 대한 거동을 이해하기 위하여 실내 및 현장시험으로부터 얻은 심도별 토질정수 및 강도정수와와의 관계를 퇴적층을 대상으로 회귀분석한 결과 심도가 깊어짐에 따라 함수비, 액성한계, 소성한계, 공극비는 감소하였고 점착력, 단위체적중량 및 전단강도는 증가하는 경향을 나타냈다.

Table-1. Properties of soil sample

Physical properties	γ_s (t/m ³)	1.607
	ω (%)	52.30
	G _s	2.71
	LL (%)	51.70
	PL (%)	29.60
	PI	22.10
	Passing of #200 (%)	91.49
	Cu	4.87
Unconfined compression test	USCS	MH
	qu (kg/cm ²)	0.134
Triaxial compression test	c (kg/cm ²)	0.13
	ϕ (deg)	0
Consolidation test	Po' (kg/cm ²)	2.079
	Pc (kg/cm ²)	0.48
	OCR	0.231
	C _c	0.49
	C _v (cm ² /sec)	1.76×10^{-3}
	K (cm/sec)	2.9×10^{-7}

IV. 결과 및 고찰

1. 탄소성법에 의한 해석

가. 변위 및 응력 분포

(1) 굴착단계별 변위분포

굴착깊이가 증가함에 따라 널말뚝은 토압의

증가로 변형을 일으키게 된다. Fig. 3은 $c=0.2$ kg/cm², $\phi=5^\circ$, D(근입깊이)=4m의 경우에 GL-0.5m에 버팀대를 1단만 설치했을 경우 (a)와 2단을 추가로 설치했을 경우(b)에 굴착단계를 1차(GL-1.0m), 2차(GL-1.0m~GL-4.0m), 3차(GL-4.0m~GL-8.0m)로 변화시켰을 경우 굴착깊이에 따른 널말뚝의 수평 변위변화를 나타낸 것이다. 버팀대를 1단만 설치한 Fig. 3(a)의 경우 1, 2차 굴착시의 최대변위량은 0.1~0.5cm 정도로 작게 나타났으나, 3차 굴착했을 경우는 19cm로 크게 발생하였다. 또한 최대변위량이 발생한 위치는 굴착면 상부인 0.75H~0.8H(H는 굴착깊이)에서 나타났다.

또 버팀대 2단을 추가로 설치한 Fig. 3(b)의 경우 1, 2차 굴착시의 최대변위량은 0.1~0.5cm로 1단 설치시와 유사하였으나, 3차굴착에서 최대변위량은 1단만 설치한 경우보다 매우 작은 3.5cm 정도로 나타났다. 최대변위가 발생한 위치는 0.87H로 버팀대를 1단만 설치한 경우보다 아래에서 최대변위가 발생하였으며, 이것은 2단 버팀대가 토압의 증가로 인한

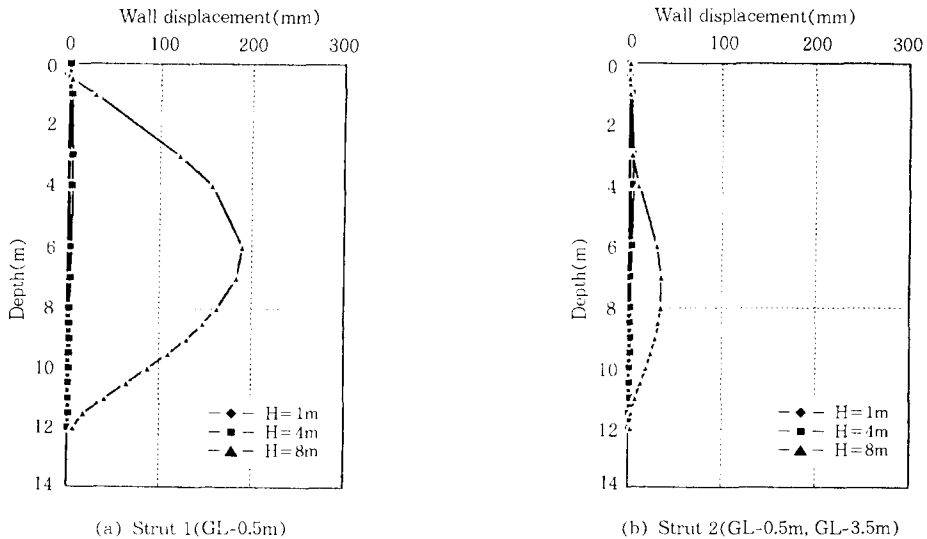


Fig. 3. Wall displacement according to various excavation depth

벽체의 수평변위발생을 억제하기 때문이라고 판단된다.

한편 Caspe³⁾의 이론으로 배면지반의 침하량을 분석한 결과 널말뚝 지점에서 1단 설치시 침하량은 33cm, 2단설치시는 4cm로 작게 나타났다. 또 침하의 영향거리는 널말뚝의 위치에서 12.3m로 나타났다. 高島⁶⁾는 중규모 굴착에서 토류벽에 작용하는 응력의 경향을 널말뚝 대체공법인 SMW토류벽에서 변위량을 실측한 결과 GL-8m에서 N값이 2~4인 연약지반에서 3.5~4.5cm, N값이 4~10인 지반에서는 1.5~3.5cm로 나타났다고 발표하였으며, 이 결과와 비교할 때 연성벽체인 널말뚝에서 굴착에 따른 수평변위의 해석결과와 유사함을 알 수 있었다.

버팀대를 1단과 2단을 설치하여 GL-8m까지 굴착한 경우의 모멘트의 변화는 1단을 설치한 경우는 깊이 GL-6m에서 72 t-m/m가 발생하였으며, 2단의 경우는 27t-m/m로 발생하여 크게 감소하였다. 버팀대 2단을 설치하여 굴착한 경우의 축압은 굴착깊이가 증가함에

에 따라 점차적으로 증가하다가 GL-8m이후부터는 감소하였으며, 최대값은 10.2t/m²이었다.

(2) 내부마찰각의 변화에 따른 변위분포

Fig. 4(a)는 점착력 $c=0.2\text{kg/cm}^2$, 근입깊이 $D=4\text{m}$ 일때 3차 굴착단계(GL-8m)에서 내부마찰각의 변화에 따른 굴착깊이별 널말뚝의 최대변위 변화를 나타낸 것이다.

버팀대를 1단만 설치했을 때, ϕ (내부마찰각) $=0^\circ$ 에서는 GL-7m굴착시 17cm의 변위를 나타냈으나 GL-8m에서는 변위가 크게 증가하면서 굴착면 붕괴가 발생하였다. $\phi=5^\circ$ 에서는 19cm로 나타났고, $\phi=10^\circ\sim 15^\circ$ 에서는 15cm~12cm의 변위가 발생하였다. 버팀대 2단을 추가로 설치하였을 경우 Fig. 4(b)와 같이 변위는 $\phi=0^\circ$ 에서 5cm, $\phi=5\sim 15^\circ$ 에서 4cm~2cm로 작게 나타났다. 이와 같은 결과로 내부마찰각이 증가함에 따라 변위는 감소하는 경향을 나타냈고, 변위의 감소폭을 고려할 때 변위에 영향을 미치는 내부마찰각의 범위는 $\phi=5^\circ$ 임을 알 수 있었다.

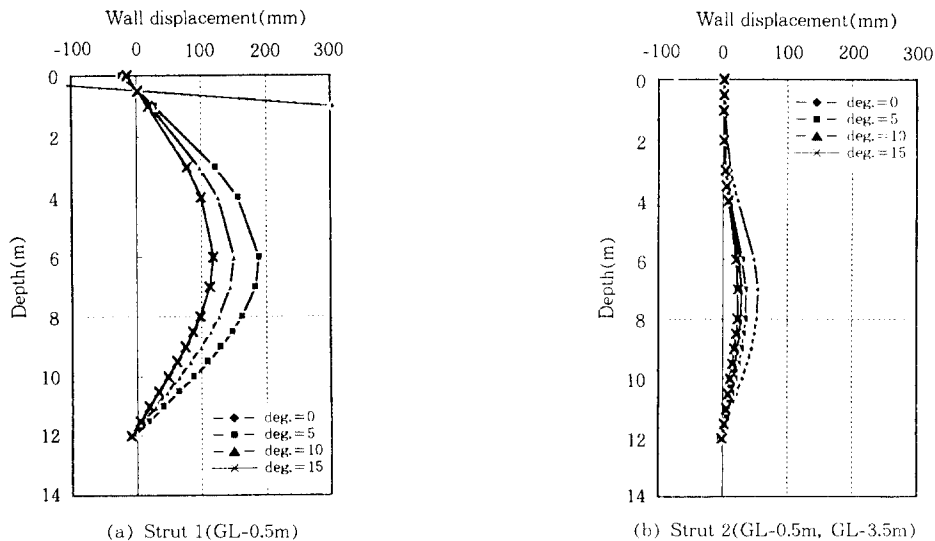


Fig. 4. Wall displacement according to various internal friction angle

(3) 점착력의 변화에 따른 변위분포

Fig. 5는 $\phi=5^\circ$, $D=4m$ 에서 GL-8m까지 굴착하였을 경우 점착력의 변화에 따른 널말뚝의 변위를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 버팀대를 1단설치한 경우로 $c=0.1kg/cm^2$ 에서는 GL-7m까지 굴착했을 때 변위는 24cm이고, GL-8m에서는 변위가 증가하면서 널말뚝의 붕괴가 발생하였으며, $c=0.2\sim 0.3kg/cm^2$ 에서 최대변위는 19~9cm로 나타났다. Fig. 5(b)는 버팀대를 2단 설치한 경우로 변위는

$c=0.1kg/cm^2$ 에서 10cm, $c=0.2\sim 0.3kg/cm^2$ 에서는 작게 나타났다. 이와같이 수평변위는 버팀대 1단과 2단을 설치한 경우에서 점착력이 증가할수록 감소하는 경향으로 나타났으며, $c=0.2\sim 0.3kg/cm^2$ 보다는 $c=0.1\sim 0.2kg/cm^2$ 에서 변위가 크게 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 해석모델에서 버팀대를 1단만 설치하고 GL-8m까지 굴착이 가능한 것은 널말뚝 근입부지반이 비교적 단단한 토층으로 되어있기 때문이라고 판단된다.

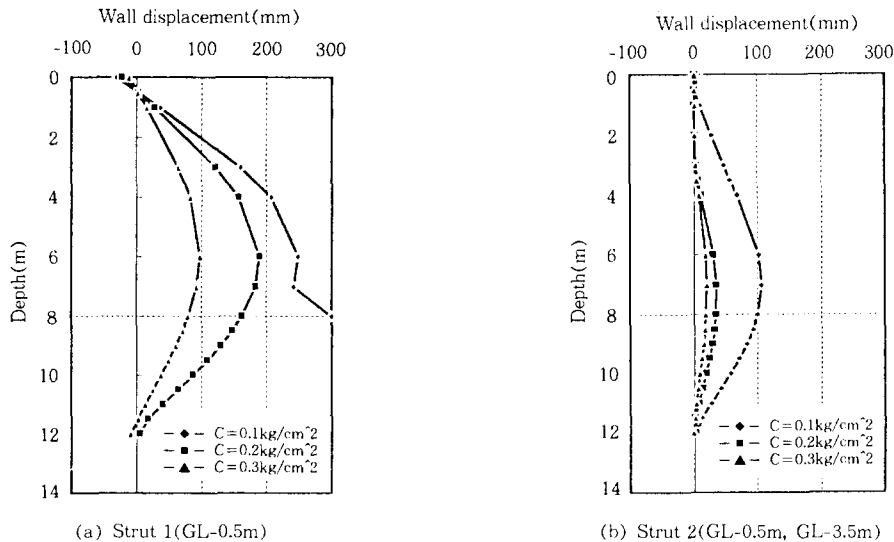


Fig. 5. Wall displacement according to various cohesion

나. 널말뚝의 근입깊이, 지반의 점착력 및 내부마찰각과 안전율의 관계

널말뚝을 이용한 굴착사면에서 빈번하게 일어나는 파괴는 널말뚝 근입깊이의 부족에 의하여 파괴가 발생한다. Fig. 6(a)는 점착력 $c=0.1, 0.2, 0.3kg/cm^2$, 내부마찰각 $\phi=5^\circ$ 일 때 근입깊이와 Rankine-Resal의 토압으로 산정한 근입깊이에 대한 안전율과의 관계를 나타낸 것이다. 근입깊이의 허용안전율 $Fs=1.2$ 를 기준으로할 경우, 점착력이 $0.1\sim 0.3kg/cm^2$

로 증가함에 따라 근입깊이의 범위는 $D=4m$ 에서 $D=2.7m$ 로 감소하였고, 근입깊이가 증가함에 따라 안전율도 직선적으로 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 6(b)는 버팀대를 2단 설치하여 굴착할 때 근입깊이 3m와 4m에서 안전율이 1.2이상 되는 점착력과 내부마찰각의 범위를 나타낸 것으로 내부마찰각과 점착력의 관계식은 $D=3m$ 일 때 $c=-0.0086\phi+0.3$, $D=4m$ 일 때 $c=-0.00933\phi+0.14$ 로 나타났다. 점착력과 내

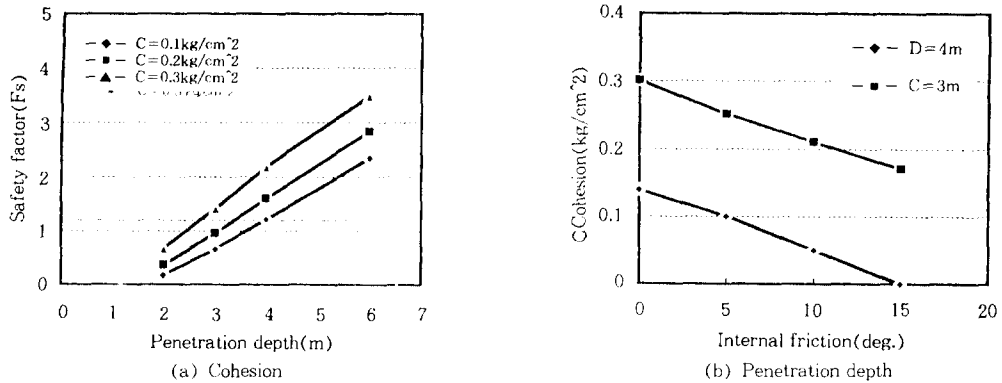


Fig. 6. Relationships between various cohesion and penetration depth

부마찰각이 안전율에 미치는 영향을 증가율로 분석한 결과 $c=0.1\text{kg/cm}^2$ 에서 $c=0.2\text{kg/cm}^2$ 로 증가할 때 안전율의 증가는 1.33배, $\varphi=5^\circ$ 에서 $\varphi=10^\circ$ 로 2배 증가할 때 안전율은 1.14배의 증가를 나타냈으며 내부마찰각과 점착력 모두 근입깊이 안전율에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

2. 현장실험 및 해석

탄소성법에 의한 분석과 현장실험 결과를 검증하기 위하여 $N=1\sim 7$ 의 연약지반에서 버팀대를 2단으로 보강하고 GL-8m까지 굴착하면서 널말뚝의 변위를 측정하였다. 현장실험 굴착은 시공성을 고려하여 일반적인 설계법과 달리 1차굴착을 GL-1m까지 굴착한후 버팀대 1단을 GL-0.5m에 설치하였고, 버팀대 2단은 GL-6m까지 굴착한후 GL-3.5m에 설치하여 GL-8m까지 굴착을 진행 하였다. Fig. 7(a)는 널말뚝의 수평변위를 약20일 동안 측정한 결과를 기간별로 나타낸 것으로 2일까지는 5.5m 굴착, 6일은 6m, 7일은 7m, 8일이후는 최종 굴착 심도인 GL-8m까지 굴착한 것이다.

현장계측결과에서 버팀대 1단을 설치하고 GL-5.5m까지 굴착하였을 때 널말뚝의 변위는 1cm, GL-6m에서 6cm, GL-7m에서 30cm로 나타났으며 GL-6m굴착이후에서 변위가 크게

증가하였고 GL-8m까지 굴착한후 최대변위는 31cm로 나타났다. 이 경우 근입깊이에 대한 안전율은 1.4로 해석되었으며, 널말뚝지점에서 배면지반의 침하는 56cm이고 침하의 영향 거리는 13m로 나타났다.

Fig. 7(b)는 현장실험결과와 탄소성법에 의한 해석결과를 비교하기 위하여 현장굴착조건과 동일한 조건에서 해석한 결과를 나타낸 것이다. GL-5.5m까지 굴착한 경우에서 변위는 18cm, GL-6m에서는 30cm, GL-7m에서는 33cm, 최종굴착저면까지 굴착하였을 때는 44cm로 나타나 굴착이 진행되면서 최대변위 값은 차이가 있었으나 굴착깊이가 깊어질수록 해석치에 근접하는 결과를 얻었다. 현장실험과 해석결과에서 널말뚝의 변위는 굴착깊이 6m이후부터 크게 증가하므로 버팀대 2단의 보강시기는 6m굴착 이전에 보강되어야 할 것으로 판단된다. 또한 버팀대를 2단 설치하고 3단계 버팀대의 설치위치는 현장계측에서 나타난 것과 같이 7m굴착시 30cm이상의 변위가 발생했으므로 3단계 버팀대 설치는 7m까지 굴착한 후 GL-6.5m에 추가로 설치하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 8(a)는 버팀대를 GL-0.5m에 1단만 설치하고 GL-8m까지 굴착하였을 때를 나타낸 것으로 GL-6m굴착부터 변위가 크게 증가

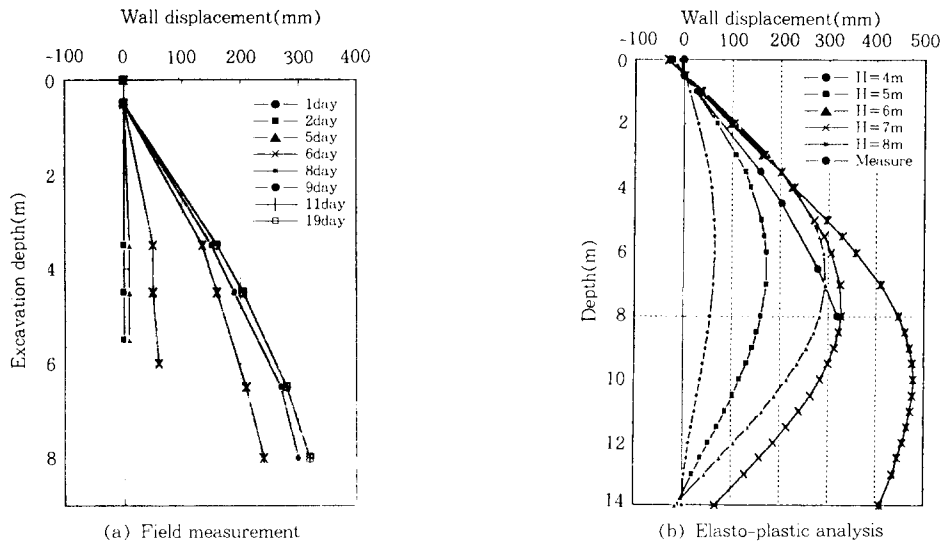


Fig. 7. Wall displacement of field measurement and elasto-plastic analysis according to excavation depth

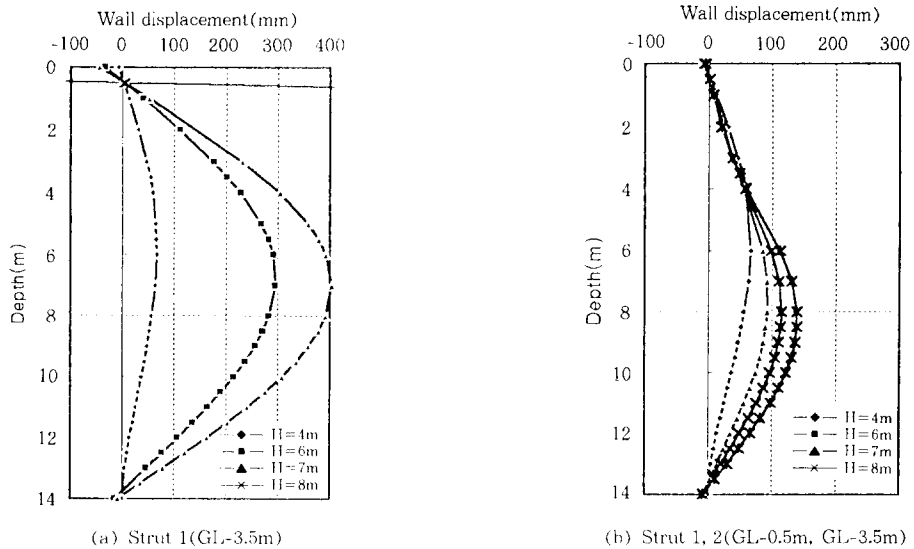


Fig. 8. Wall displacement according to general design method

하였으며, GL-7m 굴착이후 변위의 증가로 GL-8m 굴착에서는 파괴가 발생하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8(b)는 일반적인 설계법이라고 할 수 있는 GL-4m까지 2차굴착한후 버팀대 2단을

GL-3.5m에 추가로 설치한 경우의 변위를 나타낸 것이다. GL-4m~GL-6m까지 굴착하였을 때 최대변위는 6cm~9cm, GL-7m에서는 12cm, GL-8m에서는 13cm로 나타나 시공성을 고려한 경우보다 작은 변위로 안전한 시공

은 할 수 있으나, 지반굴착시 굴착면내에서 중장비의 작업조건상 문제점이 발생될 것으로 판단된다.

이와같이 측정과 해석에서 버팀대 1단만 설치할 경우 작업장비의 시공성을 고려하여 2차 굴착이 가능한 깊이는 GL-6m까지로 판단되며, GL-7m이상 굴착할 경우 굴착면의 파괴가 예측됨을 알 수 있었다. 그러나 장기간의 공사나 중요한 시설물의 공사를할 경우는 GL-6m굴착이전에 2단의 버팀대를 추가로 설치하여야할 것으로 판단된다.

3. 유한요소해석

가. 굴착사면의 설계단면과 재료특성

유한요소해석에 사용된 프로그램은 흙의 비선형과 응력-변형에 의존되는 응력이력 및 체적변형 특성을 평면변형으로 분석할 수 있으며, 또 흙댐, 록필댐 및 제방의 사면안정 해석에 많이 이용되는 Duncan등에 의하여 개발된 쌍곡선 모델을 이용하였다. 그리고 널말뚝은 Beam요소, 버팀대는 Spring 요소, 흙 부분은 사변형 요소로 각각 분할하여 해석하였으며 해석에 사용된 모델은 폭15m, 높이20m, 총절점수 475개, 요소수 426개의 요소로 분할하였다.

그리고 쌍곡선 응력-변형과 체적에 관계되는 응력의존에 대한 흙의 비선형 탄소성재료 특성의 파라미터는 Table-2와 같다.

나. 변위의 분포

일반적으로 굴착의 경우에는 지반이 탄소성적으로 변형되는 것으로 생각하면 굴착과정에 대한 하중변화의 상태나 절취면의 경계에 따라 소성영역이 다르게 나타나기 때문에 최종 단면에 대한 응력-변형상태는 시공순서에 따라 매우 다르게 나타난다. 그리고 굴착도중 버팀대나 널말뚝등을 설치하는 경우는 시공단계에서 굴착면과의 위치관계로 지반뿐만 아니

Table-2. Parameters for finite element method

Parameter	Unit	Soil	Sheet pile	H-pile
Unit weight	$\gamma_c(t/m^3)$	1.600		
Hyperbolic constant	K	19.0		
Hyperbolic constant	n	0.735		
Failure ratio	R_f	0.462		
Cohesion	$c(t/m^2)$	2.0		
Angle of internal friction	$\phi(^{\circ})$	5 $^{\circ}$		
Coefficient of earth pressure	K_0	0.960		
Poisson's ratio	ν	0.49		
Moment	$I_x(m^4/m)$		0.000228	
Young's modulus	$E(t/m^2)$		2.1×10^7	2.1×10^7
Area	$A(m^2)$		0.0191	0.01198

라 버팀대나 널말뚝의 응력-변형상태가 변화한다.

Fig. 9(a), (b)는 GL-8m까지 굴착하면서 버팀대를 2단(GL-0.5m, GL-3.5m) 설치하였을 때의 수평 및 수직변위의 분포형태를 나타낸 것이다.

수평방향의 변위분포상태는 버팀대 설치전에는 굴착면 상부에서 크게 나타났으나, 버팀대 설치후에는 널말뚝의 하단부분으로 이동되면서 집중되는 형태를 나타내고 있으며, 수직방향의 변위는 변위량만 다를뿐 분포형태는 유사한 경향을 보이고 있다.

또한, 초기단계의 굴착을 했을 때 수평 및 연직방향의 변위가 심하고, 버팀대 설치한 후 굴착이 진행됨에 따라 굴착단계에서 소성력이 발생되어 변위는 급격히 감소함을 알 수 있고, 연직방향의 변위보다는 수평방향의 변위가 증가되는 것을 알 수 있다.

이와같은 현상으로 지반이 탄성변형하는 단계에서는 상향의 변형이 계속되고, 소성력이

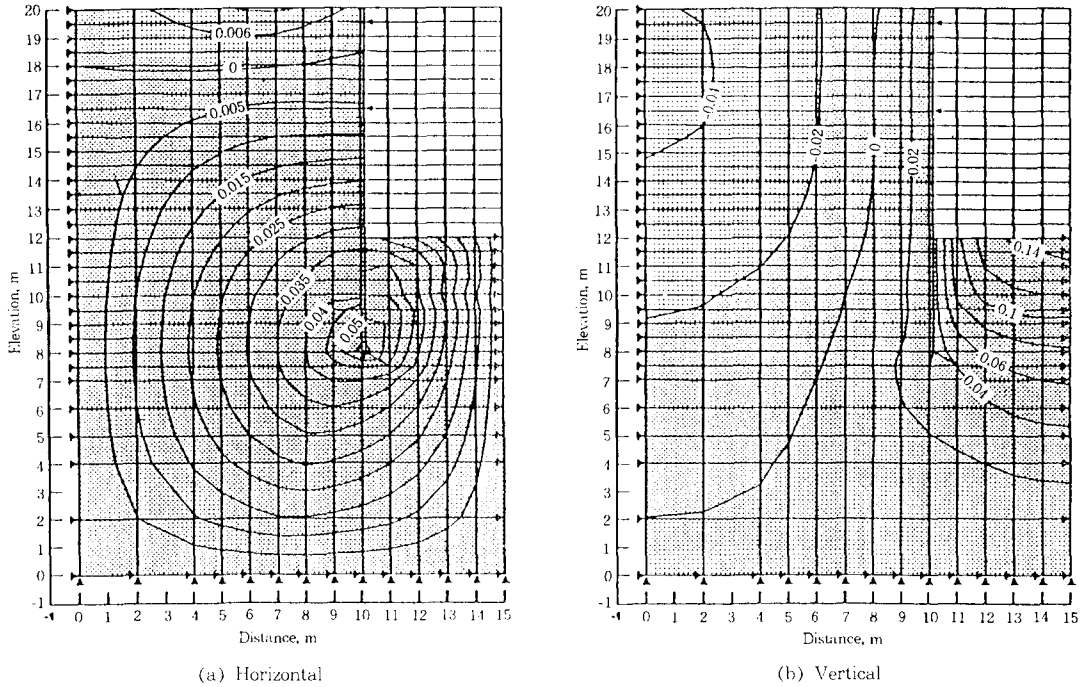


Fig. 9. Contours of horizontal and vertical displacement in the excavation slopes(Excavation : GL-8.0m, Strut : GL-0.5m, GL-3.5m)

발달하는 단계에서는 침하가 발생하게 되어 측면이 나오거나 저면에 히빙현상이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 10은 버팀대 설치전후에 굴착깊이에 따른 널말뚝의 변위를 나타낸 것으로, 굴착이 진행되면서 버팀대 설치전에는 GL-1m에서 약 1.4cm의 변위가 발생되었고, 1단 설치후 GL-4m까지 굴착시에는 4cm의 변위가 발생 되었으며, 1단 설치후 GL-8m 굴착시에는 9cm의 변위가 발생되었다.

2단의 버팀대를 설치한 후에는 굴착깊이 GL-8m일때 5.7cm의 변위가 발생하였다. GL-8m 부분에서는 버팀대 1단 설치하였을 경우와 2단 설치하였을 경우의 변위를 비교하여 보면 약 1/2정도로 급격히 감소함을 알 수 있다. 이와같은 현상으로 널말뚝의 수평변위는 근입깊이 부근에서 급격한 감소를 나타내

었고, 본 지반의 안정한 굴착깊이의 한계는 2 단 버팀대 설치후 GL-8m정도가 됨을 알 수 있었다.

Fig. 11은 굴착과정에따른 전체변위를 나타 낸 것으로, 버팀대 설치전의 변위는 매우 큰 상태이기 때문에 버팀대에 직접 작용되고, 굴착저면에서 히빙현상으로 나타났다.

그리고 버팀대 설치후는 변위가 급격히 감소하나, 널말뚝의 근입깊이 부근에서는 변위가 크게 나타나고, 굴착저면의 히빙현상도 발생하고 있다.

본 연구결과에서 널말뚝을 이용한 연약지반 굴착사면의 변위해석은, 깊은 굴착시 흙의 변형특성을 비선형 유한요소법으로 해석한 Chang⁵⁾과 Stroth²¹⁾의 연구결과와 비교 분석할 수 있었으며, 시공단계별 굴착에 따른 널말뚝의 히빙현상과 지반내의 소성력의 발달로

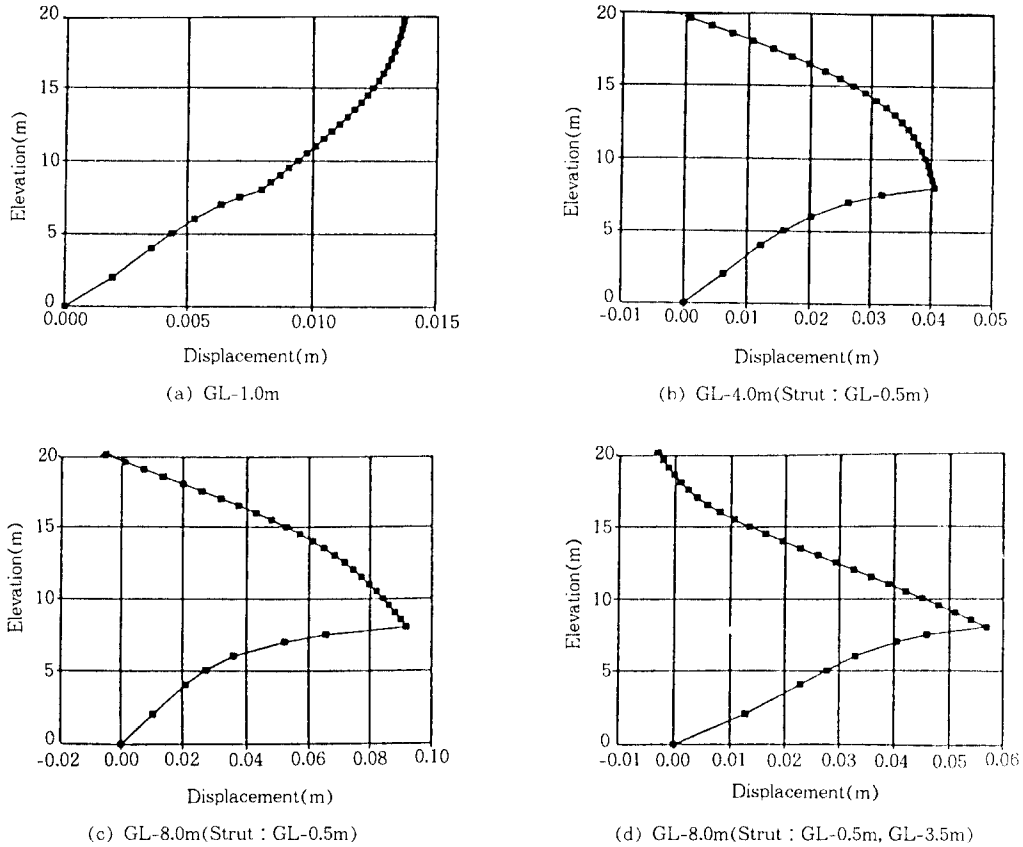


Fig. 10. Horizontal displacements of the sheet pile in the excavation slopes

인한 굴착면에서의 변위 증가현상은 石原¹³⁾의 연구 결과와 유사하게 나타났다. 또한, 버팀대의 설치위치에 따라 굴착사면의 상부에서는 변위가 감소하고, 굴착저면에서는 변위가 증가하였으며, 버팀대의 보강으로 인한 변위의 감소현상은 Richards¹⁹⁾에 의하여 수행된 현장점토지반의 유한요소해석 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

다. 최대전단변형의 분포

Fig. 12는 점토층을 3단계(GL-1m, GL-4m, GL-8m)로 굴착하면서 시공중에 2단계(GL-0.5m, GL-3.5m)의 버팀대로 지지하였을 경우 최대전단변형의 분포상황을 나타낸

것이다.

초기단계의 굴착에서는 굴착저면에서 변형값이 크고 집중되는 분포형태를 나타내고 있으며, 점차로 하부부분으로 갈수록 작아짐을 알 수 있다.

굴착이 진행되면서 변형도 증가하고 있지만, 버팀대 설치후에는 변형이 크게 감소하였으며, 최종굴착시에는 소성영역의 발달로 굴착저면에서 다시 변형이 증가하고 있다.

이와같이 순차굴착에 의한 최대전단변형은 굴착의 영향으로 점차적으로 증가하며, 굴착저면에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. 저면에서 발달된 전단변형은 결국 굴착사면의 국부적인 파괴를 일으킬 가능성이 크며, 이와같

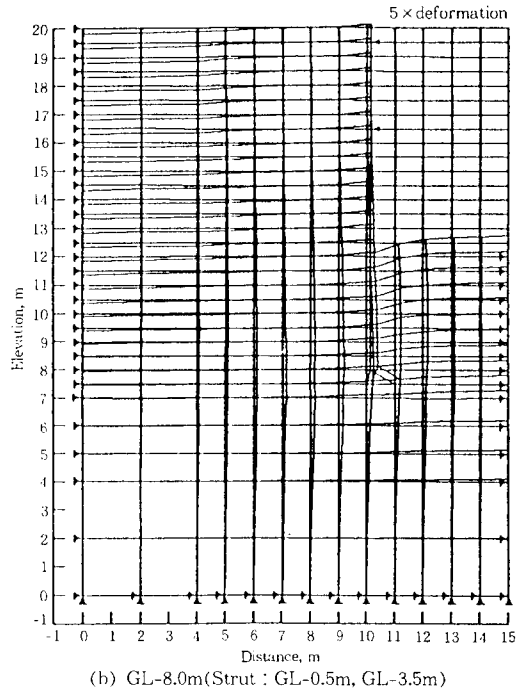
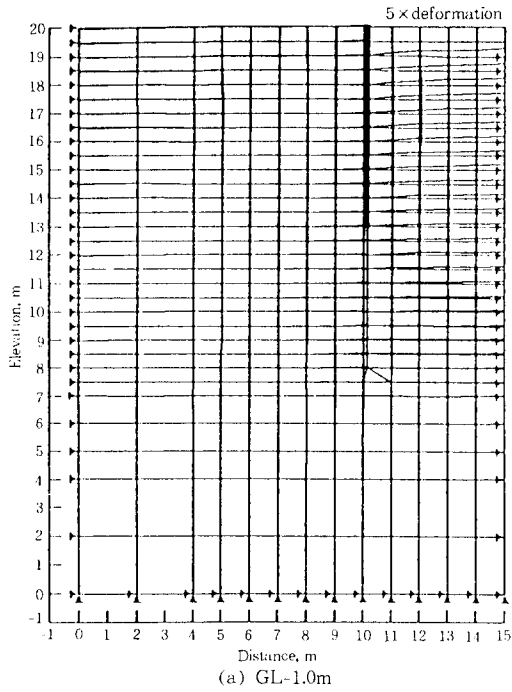


Fig. 11. Total displacements in the excavation slopes

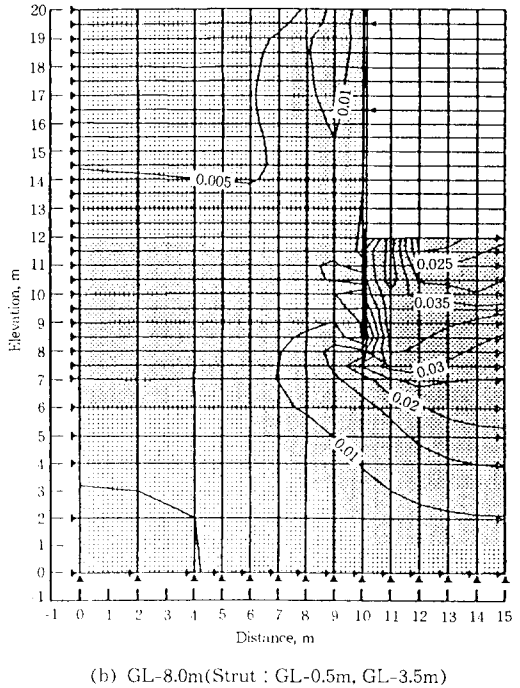
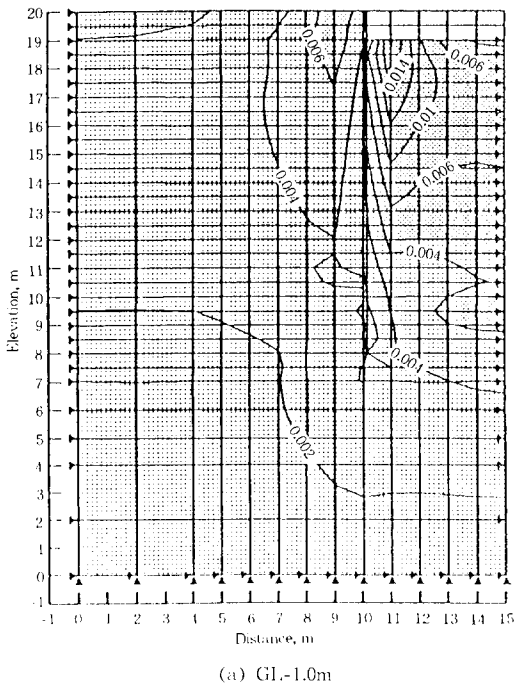


Fig. 12. Contours of maximum shear strain in the excavation slopes

은 위험가능성은 버팀대를 보강함으로써 감소시킬 수 있었다.

Griffiths등⁹⁾은 굴착사면의 응력-변형을 유한요소법에 의하여 해석한 결과, 사면의 파괴영역과 변위벡터는 정지토압계수가 작을 때는 파괴영역이 사면의 상부부근에 집중되어 있고, 국부적인 파괴가 발생하는 반면에, 정지토압계수가 클 때의 파괴영역은 사면의 저부분까지 확대됨으로써 큰 변형이 발생한다고 하였다. 또한, 공극수압의 영향은 초기에 사면 선 부근에서 부의 공극수압이 발생되나, 시간이 경과함에 따라서 평형상태에 도달되고 수평적으로 증가한다고 하였다.

V. 결 론

널말뚝을 이용하여 연약지반을 굴착할 때 점착력 및 내부마찰각의 변화에 따른 지반의 변위, 변형 및 안정성을 탄소성법과 유한요소법 및 현장실험을 통하여 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GL-6.0m 굴착한 후 버팀대를 2단 설치했을 때, 최종굴착깊이(GL-8.0m)에서 수평변위는 탄소성법에서 굴착깊이의 5.5%, 현장실험에서는 3.9%의 변위가 발생하여 해석결과가 약간 크게 나타났고, 굴착단계별 수평변위의 형상은 유사한 경향을 나타냈다.

2. 근입깊이에 대한 안전율이 1.2가 되는 점착력과 내부마찰각의 관계식은 $D=3\text{m}$ 일 때 $c = -0.0086\phi + 0.3$, $D=4\text{m}$ 일 때 $c = -0.00933\phi + 0.14$ 로 나타났다.

3. 일반적인 보강설계시 버팀대 2단의 설치 위치는 GL-4.0m 굴착후에 GL-3.5m에 설치하고 있으나, 본 현장지반의 조건에서 탄소성 해석과 현장실험 결과 버팀대 1단을 설치한 후 단기간의 공사에서 시공성을 고려한 굴착 가능 깊이는 GL-6.0m로 판단된다.

4. 버팀대 설치후에 수평변위가 굴착저면의

아래쪽으로 이동되면서 집중되는 현상을 나타냈고, 굴착저면에서 나타나는 전단변형에 의한 국부적인 파괴가능성은 버팀대로 보강함으로써 감소시킬 수 있었다.

5. 버팀대 설치후에 널말뚝의 변위는 설치 전보다 1/2정도로 급격히 감소하였고, 지반의 안정한 굴착깊이의 한계는 2단 버팀대 설치후 GL-8.0m정도로 나타났으며, 또 최종굴착깊이(GL-8.0m)에 대한 최대수평변위는 탄소성법에서 굴착깊이의 1.6%, 유한요소법에서는 0.7%로 나타났다.

본 연구는 1995년도 교육부 지원 한국 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의해서 수행되었음

참 고 문 헌

1. Bang, S. C. 1979. Analysis and design of lateral earth support system, PH. D. Thesis. The Univ. of California at Davis, Calif.
2. Browzin, B. S. 1977. Discussion of failure of anchored sheet pile walls. Proc. ASCE, 103(4) : 350-353.
3. Caspe, 1966. Foundation analysis and design, 4th ed. p. 659.
4. Clough, G. W. and M. W. Reed. 1984. Measured behavior of wall in soft clay. Proc. ASCE, 110(1).
5. Chang, C. Y. and J. M. Duncan. 1970. Analysis of soil movement around a deep excavation. Proc. ASCE, 96(5) : 1655-1681.
6. 高鳥 三郎, 葛西 賢西, 佐貫 久, 1987. 中規模掘削における山留め應力の傾向. 基礎工. 15(6) : 78-83.

7. Duncan, J. M. and C. Y. Chang. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. J. Soil. Meth. and Found. Eng. Div., ASCE, 96(5) : 1629-1653.
8. Egger, P. 1972. Influence of wall stiffness and anchored prestressing on earth pressure distribution. Proc., 5th, European Conference on Soil Mechanics and Foundation, Madrid, Spain, p. 259-264.
9. Griffiths, D. V. and C. D. Li. 1993. Analysis of delayed failure in sloping excavation. J. Geotech. Engin. 119(9) : 1360-1378.
10. 농림수산부 농업진흥공사, 1989, 서남해안 간척조사 토질 재료조사보고서.
11. Nyby, D. W. 1981. Finite element analysis of soil sheet pile interaction. Ph. D. Thesis, Utah. State Univ.
12. Hanna, T. H. 1968. Design and behaviour of tie-back retaining-wall, 3rd. Budapest Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. p. 423-431.
13. 石原研而, 垂水尙志, 1970. 歪曲性 壁體で支持られる地盤の掘削に隨伴する状態, 第5回土質工學研究發表會講演集. p. 153-156
14. 姜义默, 李達遠, 池仁澤, 1991. 地震係數를考慮한 堤防의 斜面安定에 관한 研究, 韓國農工學會誌. 33(4).
15. 姜义默, 李達遠, 池仁澤, 趙在弘, 1993. 盛土斜面의 崩壞에 관한 實驗的 研究, 韓國農工學會誌. 35(3).
16. 國武昌人, 東孝寬, 1988. 九州·沖繩のローカルソイルの特性と土質改良. p.110-125.
17. Kurid, I. I. 1973. Studies on Tie-Back Flexible Retaining Walls in Sand. PH. D. Thesis, Univ. of Sheffield, England.
18. 松井保. 1986. 引張り補強材を含む 切土斜面の安定機構. 基礎工. 14(12):10-16.
19. Richards, D. J. and W. Powrie. 1994. Finite element analysis of construction sequence for propped retaining walls. Proc. Inst. of civil engineers, Geotechnical Eng. 107 : 207-216.
20. Rowe, P. W. 1955. A theoretical and experimental analysis of sheet pile walls. Proc. Institution of Civil Engineers, London, Part 1, Vol. 4, Jan. p. 32-69.
21. Stroh. D. and H. Breth. 1976. Deformation of deep excavations, Numerical methods in geomechanics. ASCE. 95(6) : 1655-1681
22. Tschebotarioff, G. P. 1951. Soil Mechanics Foundations and Earth Structures, Mc Grawhill Book co. New York.

〈접수일자 : 1996년 9월 4일〉