

# 편토압을 받는 파형강판 구조물의 시공위치별 안전성 평가

이상현<sup>\*</sup> · 임희대

충남대학교 토목공학과

(2008. 1. 7. 접수 / 2008. 2. 14. 채택)

## Safety Assessment to Construction Position of Corrugated Steel Structures under Declinating Earth Pressure

Sang-Hyun Lee<sup>†</sup> · Heui-Dae Lim

Department of Civil Engineering, Chungnam National University

(Received January 7, 2008 / Accepted February 14, 2008)

**Abstract** : The corrugated steel plate structures is applied to the construction of mountain tunnel portal part with shallow depth, the tunnel on the outskirts of urban areas and ecology move passage. In this study, A finite element method is used for research the behavior of corrugated steel plate structures due to construction position under declinating earth pressure and excavation depth. A finite element method were performed varying construction position(10, 15, 20 and 25m) from slope and excavation depth from surface. The hoop thrust and moment, displacement of corrugated steel plate subjected to construction position and excavation depth is determined from a finite element method. From results of finite element method, it was found that the increase of thrust and the decrease of displacement as the amount of distance increase from slope with construction position. But the thrust and moment, displacement has not different value with excavation depth.

**Key Words** : corrugated steel plate structures, finite element method, declinating earth pressure, construction position

### 1. 서 론

국내에서 사용되는 콘크리트 라이닝의 대체 재료로 파형강판의 개착식터널 적용성에 관한 관심이 증가되고 있다. 두께 2.7~7mm의 파형강판은 동일한 두께의 일반 강판에 비해 단면계수가 10~30배 크며, 외부하중에 대해 뒷채움 흙과 구조물이 동시에 저항하는 합성구조체의 특성을 갖는다. 또한 무게가 가볍고 운반이 용이하며 현장에서 간단한 볼트 연결로 시공되므로 기존의 방식에 비해 공사기간과 공사비를 절감할 수 있는 경제적인 구조물로서, 최근에는 암거, 수로, 소교량, 생태이동통로 등으로 널리 시공되고 있다<sup>6)</sup>.

파형강판 구조물은 연성구조물이므로 연직토압이 가해지는 경우 연직방향은 압축, 수평방향은 팽창되어 구조물 양쪽의 토사를 압축시키게 된다. 따라서 주변 토사에 의한 수평토압이 연직토압에 대한

저항토압으로 작용하게 된다. 즉, 가해지는 연직력과 수평 저항 토압력이 동일한 값이 되고 이를 통해 안정된 상태를 이룰 수 있다<sup>2)</sup>. 또한, 파형강판 구조물은 강판벽체와 주변 지반의 상호작용으로 하중을 지지하는 연성거동 특성을 나타내므로 토피부를 포함한 뒷채움 높이 및 상부 활하중의 크기에 따른 벽체 축력, 모멘트 등 단면력과 단면 변형량의 변화가 거동해석에 관건이라고 할 수 있다. 조성민 등<sup>3)</sup>은 이를 위해 실험형 실험과 수치해석을 실시하였고 실험치와 수치해석치의 검증을 통해 두 값이 유사한 결과를 갖는 것으로 보고하였다. 그러나 개착식 터널 시공 시 친환경적 건설을 위하여 성토체는 일정구배를 갖는 경사시공을 하게 되고, 원래의 지반경사와 가깝도록 성토사면의 경사를 확보하는 구간에서는 터널 구조체에 편토압이 가해지게 된다<sup>1)</sup>. 한국 건설기술 연구원에서는 가압 모형실험 및 수치해석을 통해 편토압이 작용하는 개착식 터널에 대한 라이닝의 거동 및 편토압 저감대책 등에 대해 발표하였다<sup>9)</sup>. 또한 김영수 등<sup>1)</sup>은 지표면 경사 변화와 부등침하에 따른 개착식 터널의 편토압 영향에

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kangtoo@daum.net

대하여, 지표면 경사가 증가되면 편토압이 커지게 되고 이로 인한 자중의 영향을 받아 축력이 크게 증가하는 아치 구조물의 특성과 편토압 증가에 따른 라이닝의 변위 증가 및 최대 변위 발생 위치의 변화에 대해 연구하였다. 이규필 등<sup>2)</sup>은 복개 터널 구조물에 작용하는 편토압을 고려하기 위해 연직 및 수평 토압분포 면적을 계산하여 이러한 토압분포 면적을 콘크리트 라이닝의 폭과 높이에 균일하게 작용하는 등분포 하중으로 환산하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압분포를 제안하였다.

그러나 편토압을 받는 지중 연성 구조물의 시공 위치에 따른 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 복개 터널은 경제적인 시공을 위해 절토량을 최소화해야 하고 이를 위해 사면에 인접하여 시공을 하게 되는데, 이 경우 시공위치에 따라 편토압에 의한 다양한 응력 상태가 존재하게 되며 구조물의 안전성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 편토압을 받는 지중 연성구조물의 구조안전성을 정량적으로 평가하기 위해 시공위치와 굴착심도 영향을 고려하여 다양한 해석조건을 결정한 후, 시공 단계별 수치해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 연직변위 및 부재력 응답특성 등을 검토하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1. 개요

파형강판 구조물은 지중에 설치되는 연성 구조물로서 강성 구조물과 달리 지반-구조물 상호작용에 따라 거동하게 되고 탄성해석에 의한 방법은 이런 거동을 구현할 수 없다. 현장 계측에 따른 과거의 연구결과에 의하면, 비선형적인 뒷채움 흙의 성질과 뒷채움 시공과정을 고려한 유한요소 해석결과는 현장계측 결과와 유사함이 입증되었고<sup>7)</sup> 지반-구조물 상호작용이 엄밀히 반영할 수 있는 해석모델이 요구된다. Pentagon 프로그램은 파형강판의 특징인 지반-구조물 상호작용을 모사하기 위하여 토피에 따른

지반의 응력상태에 따라 뒷채움 흙의 강성을 변화시켜 시공에 따른 구조물의 압축력과 휨모멘트를 계산하여 지반-구조물 합성구조계의 실질적인 거동을 유사하게 모사할 수 있다. 따라서 이러한 실제 뒷채움이 반영될 수 있는 범용프로그램인 Pentagon 프로그램을 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

### 2.2. 모델링

해석에 사용된 구조물의 형상은 대골형 반원아치로써, 지간 10m, 높이 5m이며, 강판의 두께는 주부재가 7.01mm이고 보강재는 4.67mm로 구성되어 있다. 먼저 Fig. 1과 같이 굴착심도에 따른 영향을 평가하기 위해 하부 지반과 주변 지반은 각각 연직방향, 수평방향을 구속 조건으로 가정한 후 심도별로, Case 1은 굴착 없이 기반암 위에 직접 시공, Case 2는 주변 풍화암을 절토하여 구조물 높이 1/2까지 굴착, Case 3은 구조물 높이까지 굴착, Case 4는 구조물 높이에 최소토포고 1.5m까지 추가 굴착한 경우로 나누어 심도별 영향성을 평가하였으며 모든 경우에 대해 최대 토피고는 10m를 유지하도록 하였다. Fig. 2는 시공위치별 거동특성을 알기 위해 Fig. 1과 같은 조건의 파형강판에 대해, 토피고는 최소 1.5m에서 최대 18.3m, 하부 지반은 기반암이며, 파형강판 구조물을 덮고 있는 토사 사면의 경사는 1:3이고 그 이후 지반을 따라 내려가는 사면의 경사는 1:1.5로 모델링되었다. 굴착 위치에 따라 되메움된 토사의 사면에서 -10m, -15m, -20m, -25m 떨어진 지점에 파형강판 구조물의 중심부가 놓여 질 수 있도록 하였고, 사면에서 가장 가깝게 위치한 -10m 지점은 실제 시공에 가장 많이 적용되므로 안정성을 좀 더 정확히 판단하기 위해 사면의 경사를 완만하게 한 경우와 성토체 지반의 강성을 증가하는 경우로 분류하여 해석을 한차례 더 실시하였다. 여기서, -10m 지점은 측면사면경사를 기존의 1:1.5에서 1:3으로 완만하게 변경하였으며, 지반강성을 증가시키기 위해 성토체의 물성치를 뒷채움 값과 같도록 변화하

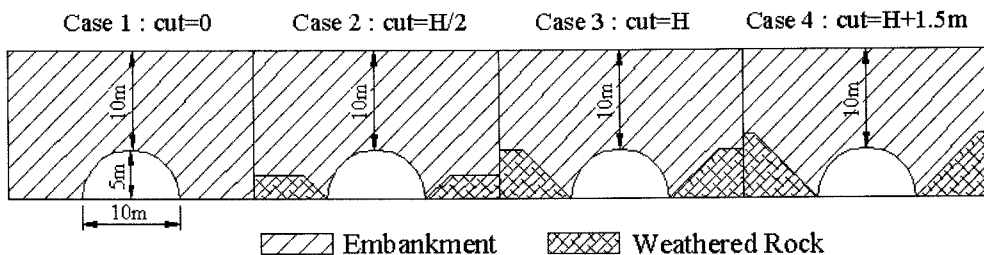


Fig. 1. Modeling(excavation depth) H : Height of corrugated steel.

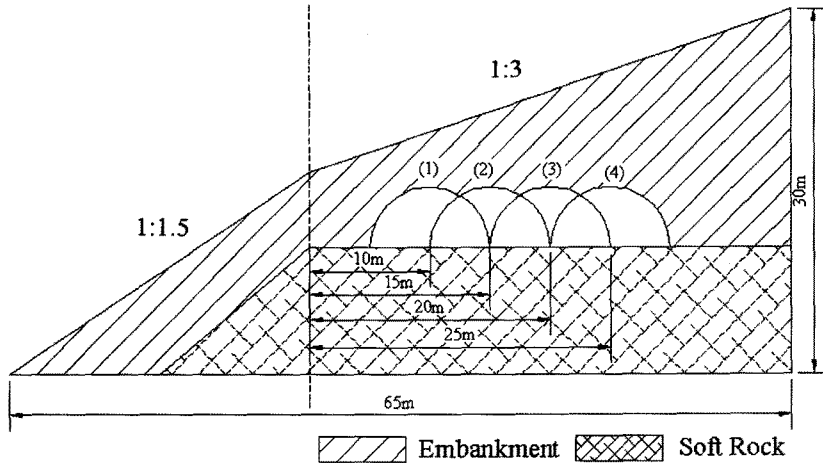


Fig. 2. Modeling(construction position) H : Height of corrugated steel.

여 적용하였다. 지표 경사로 인한 하중을 모사하기 위하여 모델링 지역에 8개 구역을 두고 각 지표경사에 상응하는 압력을 재하 하는 방법으로 해석을 실시하였다. 또한, 편토압의 영향을 최대화 하기위해 기초 바닥면을 제외하고 주변에는 기반암이나 풍화암이 없이 직접 성토하중을 받는 구조로 모델링하였다. 강관의 단계별 안정성을 평가하기 위해, Table 1은 굴착 심도별 수치해석에 적용된 시공단계, Table 2는 시공위치별 파형강관 시공단계이다. 각 표에 설명된 시공단계는 먼저, 기초저면까지 굴착 후 강관을 설치한 시기를 초기 단계로 하여 뒷채움 되는 높이에 따라, 강관높이의 1/2(H/2)까지 뒷채움 한 경우는 Stage 1로, 강관 높이(H)까지 뒷채움 한 경우는 Stage 2로, 기타 추가 성토에 따라 각각의 Stage를 구분하여 정리하였다.

Table 1. construction stages(excavation depth)

Stage	Construction
Stage 1	H/2
Stage 2	H
Stage 3	H + 1.5m
Stage 4	H + 6m
Stage 5	H + 10m

Table 2. construction stages(construction position)

Stage	Construction
Stage 1	H/2
Stage 2	H
Stage 3	H + 1.5m
Stage 4	End

H : Height of corrugated steel

Table 3. Parameters used in analysis

Parameters	Unit weight (tf/m <sup>3</sup> )	Cohesion (tf/m <sup>2</sup> )	Friction angle (°)	Elastic modulus (tf/m <sup>2</sup> )
Soft rock	2.3	10	35	100000
Weathered rock	2.1	3	30	40000
Backfill	2.0	0	34	-
Embankment	1.9	0	30	-

Table 4. Parameters of corrugated steel used in analysis

Corrugated steel	Elastic modulus	Poisson's	Unit weight
	2.1×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup>	0.3	7.85tf/m <sup>3</sup>

### 2.3. 입력자료

Table 3은 모델링을 구성하고 있는 연암, 풍화암, 뒷채움재, 성토체 등 지반에 대한 수치해석 입력 자료로서 흙 요소는 Duncan<sup>8)</sup>의 쌍곡선 모델을 적용하여 3절점 혹은 4절점요소로 모델링하였고, 기반암은 Linear Elastic, 풍화암은 Mohr-Coulomb, 파형강관모델링은 2Frame to Shell4 적용하였다.

또한, Table 4는 파형강관에 대한 탄성계수, 포아송비, 단위중량에 대한 입력 자료를 나타낸 것이다.

## 3. 수치해석

본 연구에서는 굴착 심도와 사면으로부터의 시공위치에 대한 두 가지 측면에 대해 해석결과를 분석하고자 하였다.

### 3.1. 굴착 심도별 결과 분석

#### 3.1.1 축력

Fig. 3은 시공단계에 따른 축력의 변화를 나타내

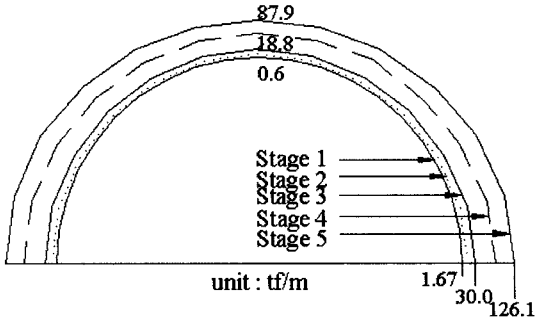


Fig. 3. Thrust subjected to the construction stages.

고 있다. 기존의 연구결과<sup>3)</sup>와 같이 성토고가 높아질수록 축력이 일정하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 구조물 상부에 가해지는 성토량이 좌우 모두 일정하게 가해지므로 중심축을 기준으로 대칭형 분포를 보이고 있으며 축력은 시공단계에 관계없이 축벽부가 천단부보다 크며, 시공 1단계에서 천단부에 최소 0.6tf/m가 발생하였고, 시공 5단계에서 최대 126.1 tf/m의 축력이 축벽부에서 발생하였다.

그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이 굴착심도가 커져도 성토 높이가 10m로 일정하기 때문에 굴착심도별 축력 값의 차이는 거의 발생하지 않았다.

### 3.1.2 모멘트

Fig. 5는 모멘트의 시공단계에 따른 변화를 나타내고 있다. 구조물 높이의 1/2까지 성토한 경우(Stage 1), 천단부에는 정모멘트, 축벽부에는 부모멘트가 발생하였고, 천단부까지 성토가 완료되었을 때(Stage 2), 축방향 토압이 최대가 되므로 그 영향에 의해 최대 정모멘트(2.75tf-m/m)가 천단부에서 발휘되었다. 최소토포고까지 성토가 완료된 경우에는(Stage 3) 성토하중에 의한 연직토압에 의해 천단부 정모멘트가

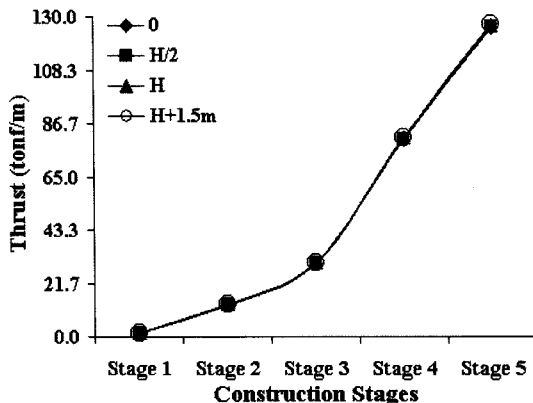


Fig. 4. Maximum thrust subjected to the excavation depth.

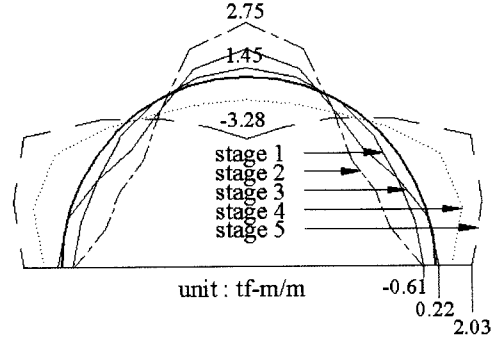


Fig. 5. Moment subjected to the construction stages.

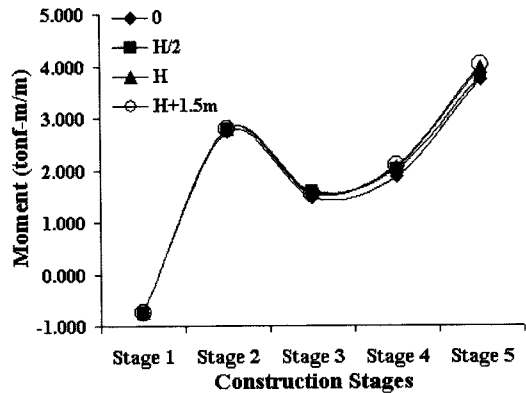


Fig. 6. Maximum moment subjected to the excavation depth.

감소하게 되고 이후의 추가 성토(Stage 4, 5)로 인한 연직토압의 증가로 천단부는 시공 1, 2, 3단계의 경우와 반대로 정점부에서 최대부모멘트 -3.28tf-m/m가, 축벽부에서는 정모멘트가 발생하게 되었다.

Fig. 6은 시공 단계별 최대모멘트를 나타낸 것으로 축력과 마찬가지로 굴착심도에 따라 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났다.

### 3.1.3. 변위

Fig. 7은 굴착심도별 연직 방향 변위 값을 나타낸 것이다. 변위 값의 변화 양상은 Fig. 5의 모멘트에서 설명되어진 바와 같이 초기에는 축면부 토압에 의해 파형강판의 천단부에 솟아오르는 형태의 변위가 발생되었고 시공 2단계(Stage 2)에서 13.5mm의 최대 변위가 나타났다. 이후에는 성토고 증가에 의한 연직토압으로 파형강판의 내측부로 변위가 발생하였고, 시공 5단계(Stage 5)의 경우 최대 변위가 -19.0 mm로 나타났다. Fig. 8은 각 굴착심도별 연직 방향 변위 값을 그래프로 도시화 한 것으로, 굴착심도가 변해도 전체적인 변위 값은 축력과 마찬가지로 동일한 성토고를 가지므로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

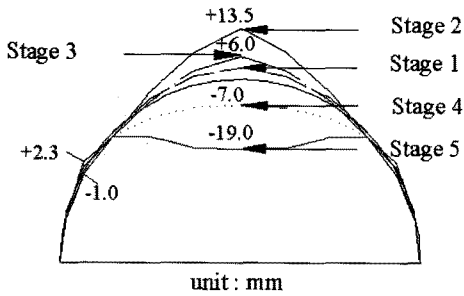


Fig. 7. Displacement subjected to the construction stages.

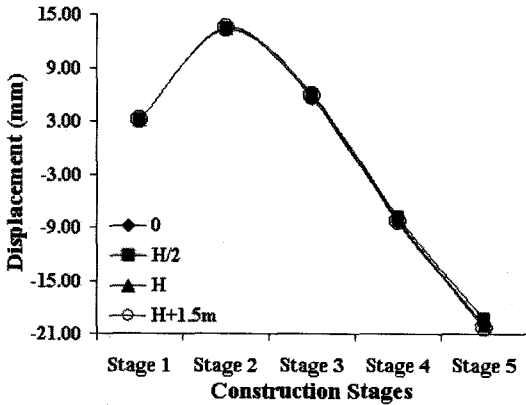


Fig. 8. Displacement subjected to the excavation depth.

### 3.2. 시공 위치별 결과 분석

#### 3.2.1. 축력

Fig. 9는 시공 위치에 따른 최대 축력을 나타낸 것으로, -10m에서 -25m 지점으로 멀어질수록 축력이 증가하는 경향이 있고, 시공위치에 관계없이 모든 경우 편토압을 받으므로 좌·우가 대략 10% 정도 축력 값의 차이가 나는 비대칭 형태를 보이고 있다.

또한, Fig 10에서 보는 바와 같이 성토사면 설치 전 단계인 수평성토 완료시(Stage 3) 과형강판 구조물에 작용하는 연직토압은 천단부를 기준으로 좌·우 대칭적으로 분포하나 편토압 성도가 완료되면 -10m 지점에 비해 -25m 지점의 축력이 토피고가 최대이므로 대략 60%정도 큰 것으로 나타났다.

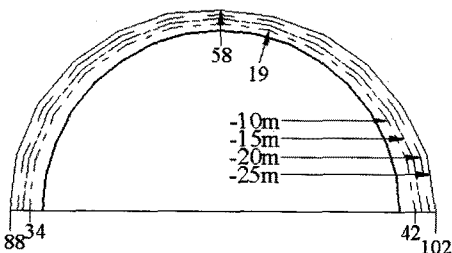


Fig. 9. Thrust subjected to the construction position.

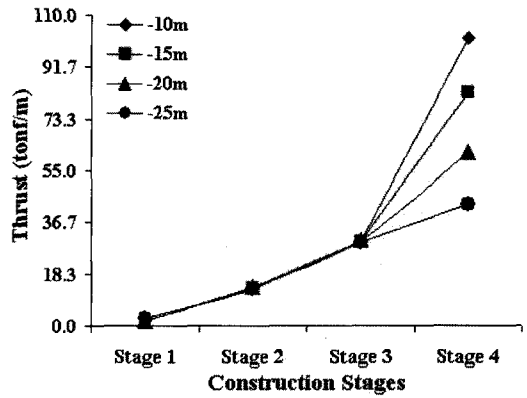


Fig. 10. Maximum thrust subjected to the construction position.

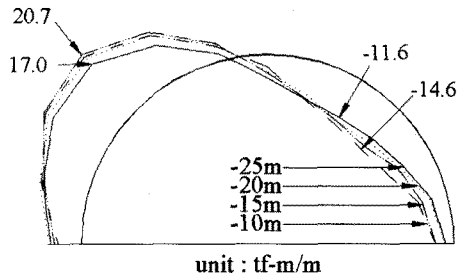


Fig. 11. Moment subjected to the construction position.

#### 3.2.2. 모멘트

모멘트는 Fig. 11과 같이 우측부 성토하중에 의한 연직력이 좌측부에 비해 크므로 좌·우 비대칭 형태가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 우측에서는 최대 -14.6tf-m/m의 부모멘트가, 좌측에서는 20.7tf-m/m의 정모멘트가 발생하였다.

또한, 시공위치별로 -10m 지점을 제외한 나머지 경우(-15m, -20m, -25m), 모멘트 값의 차이는 매우 작았으며 -10m 지점의 경우 모멘트 값이 시공 3 단계에서 최대 65%정도 컸으나 편토압이 완료되었을 때에는 시공위치에 관계없이 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다.

#### 3.2.3. 변위

Fig. 12는 연직 방향의 변위로서, Fig. 11의 모멘트 분포도와 마찬가지로 좌·우 비대칭 형태를 보이고 있으며 -10m 지점이 -25m 지점보다 10~20% 정도 변위량이 큰 것으로 나타났다. -25m 지점은 성토고가 가장 높아 축력 값이 제일 크나 이로 인한 구속 효과로 인해 오히려 변위량은 적었고, -10m 지점은 성토량이 적어 축력은 가장 적으나 좌측부 하중에 의한 구속력이 적어 응력 불균형에 의해 모멘트와 변위가 가장 크게 나온 것으로 판단되었다.

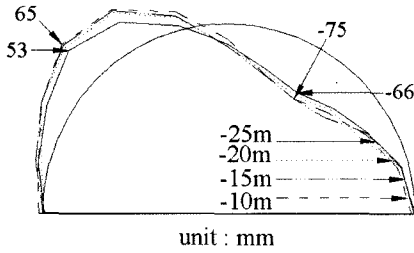


Fig. 12. Displacement subjected to the construction position.

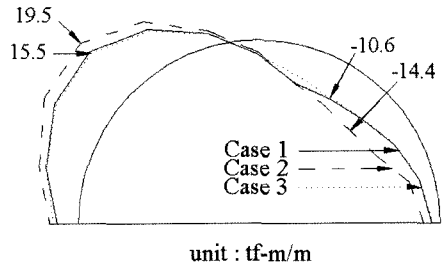


Fig. 14. Moment subjected to the construction position.

또한, 실제 시공 시 -25m 지점에 비해 -10m 지점은 굴착면이 좁아 대형 장비에 의한 충분한 다짐을 가하기 어렵고 다짐을 가해도 사면 바깥쪽으로 토체의 이동이 일어날 수 있으므로 실제로는 더 큰 변위가 발생할 가능성이 있다.

### 3.3. 사면 및 지반 보강 후 결과 분석

시공위치별 안정성을 조사한 결과 -25m 지점의 축력이 최대인 것으로 나타났다. 그러나 이 값은 기존의 연구 결과<sup>6)</sup> 파형강관을 파괴시킬 만큼 큰 값에 해당되지는 않는 것으로 판단되었다. 그러나 -10m 지점은 -25m 지점에 비해 상대적으로 모멘트나 변위가 크고 다짐 시공이 용이하지 않으므로 수치해석 결과보다 더 큰 위험성을 포함하고 있으므로 안정성을 증가시킬 수 있도록 지반의 강성을 증대하는 경우(Case 1)와 측면사면의 경사를 1:1.5에서 1:3으로 완화시키는 경우(Case 2) 그리고 지반의 경사 완화와 지반의 강성을 모두 증가시키는 경우(Case 3)로 나누어 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 13은 보강 방법에 따른 축력을 나타낸 그림으로, 축력은 상부 하중에 의해 좌우됨으로, 보강 방법에 관계없이 상부 하중이 동일한 값을 갖기 때문에 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

모멘트의 경우 Fig. 14에 나타난 바와 같이 Case 2에서는 보강하지 않은 경우와 값의 차이가 거의 발생하지 않았고 Case 1과 Case 3의 경우 모멘트 감소에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 Case 1과

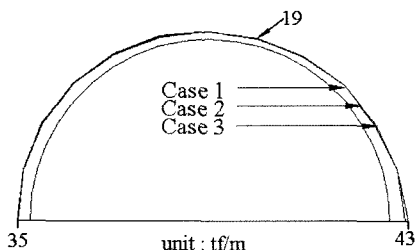


Fig. 13. Thrust subjected to the construction position.

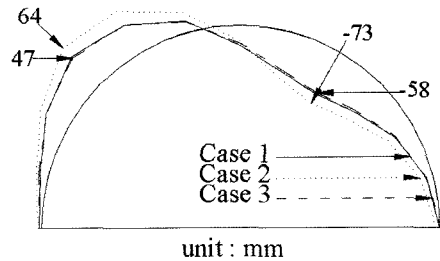


Fig. 15. Displacement subjected to the construction position.

Case 3의 차이는 크지 않았다. 이것은 기존 연구<sup>4)</sup>와 같이 뒷채움 흙의 강성이 커질수록 모멘트가 적게 발생하는 것과 유사한 결과를 보여 주었다.

Fig. 15는 보강효과에 따른 변위량을 나타낸 것이다. 모멘트의 경우와 마찬가지로 Case 1과 Case 3의 경우에는 변위 감소가 20% 정도 발생했으나 Case 2의 경우에는 보강하지 않은 경우와 큰 차이가 나타나지는 않았다.

### 4. 결론

본 연구에서는 편토압을 받는 파형강관 구조물의 굴착 심도 및 시공위치에 따른 시공단계별 수치해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 굴착심도를 파형강관의 높이와 최소토포고(1.5 m)에 따라 4가지 경우로 변화시켜 가며 축력, 모멘트, 변위 값을 해석한 결과, 최대토포고를 10m로 갖게 한 경우 전체적인 값의 차이는 매우 적었다. 그러나 굴착심도를 시공단계별로 분류하여 수치해석을 수행한 결과 시공이 진행될수록 축력은 성토고의 증가로 연직응력이 커져 일정하게 증가하고, 모멘트는 2단계에서 천단부에서 최대 정모멘트가 발생하였다. 또한 성토고의 증가에 따라 최종시공 단계에서는 반대로 천단부에서 부모멘트가 발생하였으며, 변위는 모멘트의 발생 양상과 매우 유사한 형태를 갖는 것으로 평가되었다.

2) 시공위치에 따른 해석 결과에서 시공위치가 사면으로부터 멀어질수록 축력 값은 최대 60%정도 차이를 보였으며, 편토압의 영향에 의해 좌·우 비대칭 분포를 갖는 것으로 검토되었다. 비대칭 값은 우측부가 좌측부보다 10% 정도 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 시공위치가 사면으로부터 가까울수록(-10m지점) 축력과 성토체에 의한 구속력은 성토 높이가 줄어들므로 감소하게 되고 이에 따라 모멘트와 변위량은 -10m 지점이 -25m 지점보다 최대 20% 정도 큰 것으로 분석되었다.

3) 시공위치별 수치해석을 실시한 결과, 공사기간과 공사비 측면에서는 -10m 지점이 가장 우수하나 축력에 비해 변위량이 크므로 적절한 보강 대책이 필요할 것으로 판단되었다. 또한, 변위가 가장 크게 나타난 -10m 지점을 중심으로 사면경사와 지반강성을 보강하여 수치해석을 수행한 결과, 지반의 강성을 증대시킨 경우와 사면 경사를 1:1.5에서 1:3으로 완화시킨 경우 그리고 앞의 두 경우를 모두 적용한 경우 모두 축력에는 큰 변화가 없었고, 사면경사 완화와 지반 강성 증대를 모두 적용한 경우가 모멘트의 감소와 이에 따른 변위량 감소가 커서 안전한 방법으로 평가되었다. 그러나 사면 경사완화와 지반의 강성을 동시에 증대시키는 것은 경제적 측면에서 불합리할 수 있으므로 철저한 다짐 관리와 시공으로 지반의 강성을 충분히 증대시키는 것이 가장 유리한 방법이라고 사료된다.

본 연구에서는 수치해석을 중심으로 연구가 진행되었으나 향후, 실험적 접근방법과 수치해석을 통해 산정된 결과를 바탕으로 상세한 구조신뢰성평가 및 경제성분석 과정에 대해서도 보다 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- 1) 김영수, 정우섭, 윤주원, 문홍득, “편토압을 받는 개착식 터널의 부등침하에 따른 거동”, 대한토목학회논문집, 제24권, 4C호, 259~265, 2004.
- 2) 이규필, 이석원, 배규진, 전오성, 이종성, “복개 터널구조물에 작용하는 편토압 고려를 위한 설계기법 개발”, 대한토목학회 정기학술대회, 4729~4734, 2003.
- 3) 조성민, 이종구, 김명모, “실규모 현장시험을 통한 원형 지중강관 구조물의 거동분석”, 대한토목학회 논문집, 제23권, 1C호, 47~58, 2003.
- 4) 최동호, 김기남, 유호현, “낮은 아치형 파형강관 압거의 간략한 단면력식의 제안”, 대한토목학회 논문집, 제21권, 6-A호, 937~946, 2001.
- 5) 배상근, 김영수, 김판구, 윤주원, “편토압을 받는 개착식 터널의 부재력 특성 연구”, 대한토목학회 정기학술대회, 4853~4858, 2003.
- 6) 김정호, 김낙영, 이종화, 정형식, “파형강관 라이닝의 개착식 터널에 대한 적용성 분석”, 한국도로공사, 도로교통, 제98호, 57~75, 2005.
- 7) Duncan, J.M. Behaviour and Design of Metal Culvert Structures, ASCE Journal of Geotechnical Division. 105(GT3), pp. 399~417, 1979.
- 8) Duncan, J.M and Chang, C.Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, ASCE Journal of Geotechnical Division, 95(GM5), pp. 1629~1653, 1970.
- 9) 한국건설기술연구원, “복개 터널 구조물의 거동 해석 및 설계요소 기술개발” 최종보고서, 2002.