

# 연약 지층 터널의 보강공법에 관한 FEM 해석 사례 연구

## - A CASE STUDY OF FEM ANALYSIS ON GROUND REINFORCEMENT USING HORIZONTAL JET GROUT ROOFING IN SOFT GROUND TUNNELING

김주봉, JOO-BONG KIM  
(주) 대우엔지니어링, 상무이사/토질 및 기초 기술사

문상조, SANG-JO MOON  
(주) 대우엔지니어링, 서울지하철 5-2감리단장/토질 및 기초기술사

황영철, YOUNG-CHUL WHANG  
(주) 대우엔지니어링, 서울지하철 5-2감리단/대리

신영완, YOUNG-WAN SHIN  
(주) 대우엔지니어링, 서울지하철 5-2감리단/사원

### SYNOPSIS

This paper presents the FEM analysis results performed to assess the applicability of Horizontal Jet Grout Roofing, one of ground improvement methods for tunneling in soft ground.

Horizontal Jet Grout Roofing Method is applicable to ensure the stability of tunnel face in non-cemented alluvial strata under high ground water pressure.

For applying this method, to ensure the reliability, the Horizontal Jet Grout Roofing should be double lined with pre-grouting to reduce the water inflow during the jet grouting.

### 1. 서론

지하에 인위적인 동공을 형성시키기 위하여는 동공 굴착 주변지반에 발생되는 변위, 응력의 시간적 변화에 대응하여 적절한 지보재를 적기에 설치함이 필요하다.

그러나 굴착주변의 지층이 매우 연약하여 (미교결매질, 퇴적층 등) 굴착면의 무지보 자립시간이 굴착 1차 지보재 설치 소요시간 (최소 4시간) 을 확보할수 없어 굴착단면을 최소화 하더라도 동공을 형성시킬 수 없는 부득이한 경우가 있다. 더욱이 지하수위가 높아 굴착면에 높은 수압이 작용되는 경우는 굴착면의 자립능력이 급격히 저하되어 굴착직후 지하수의 유입과 함께 굴착면과 막장 전면이 붕괴되는 경우가 있다.

본고는 이러한 지층에서 적용가능한 공법을 분류하고 그중 강내 수평 Jet Grouting 구근 Roof 공법 적용을 위한 FEM 해석 결과를 수록하고 있다.

### 2. 연약지층 터널의 적용공법

연약지층 터널에 있어 일차적으로 터널 굴착면이 자립할 수 있도록 하기 위한 방법으로는 지하수 및 지반 처리, 선진 지보설치로 크게 구분할 수 있으며 이에 따른 각각의 공법들은 다음과 같다.

다음의 공법들은 터널의 심도, 지반의 강도, 입도특성, 투수성, 지하수위, 지하수원, 지하매질물, 지상구축물, 작업장 여건등에 따라 단독 또는 병행 적용되어야 하며 공기, 적용장비, 시공의 확실성 (경험 및 관리능력), 공사비 등이 공법의 원리 이해 및 수치적 해석 수행과 더불어 종합적으로 고려되어야 할 것이다.

- 지하수 처리 : - Grouting에 의한 차수 (막상 및 침투 주입)  
- 터널굴착전 지하수 강화 (Deep Well, Well Point 등)  
- 수압대응 (강내에 지하수위 상회의 공기압 유지 : 압기 공법)  
- 동결방법 (지하수 동결)
- 지 반 처 리 : - Grouting에 의한 지반강도 증진 (중·저압의 막상 및 침투 주입)  
- 지반교란 시멘트 혼합 (고, 초고압 압력 분사)  
- Micro Pile Root Zone 형성  
- 동결방법 (지하수 동결에 의한 지반동결)

- 선진지보설치 : - Steel Sheet Laggng  
- Messer Plate 압입  
- 강관보강 다단 Grouting (멘젯파이프)  
- 대구경 Pipe 압입 (Pipe Roof)  
- 수평 Jet Grouting Roof  
(초고압 지반교란 시멘트 혼합 구근 Roof)

### 3. 수평 Jet Grouting 구근 Roof 공법

미교결된 충적모래, 자갈층에 터널을 굴착함에 있어 근접하천의 영향을 받는 지하수의 유출과 함께 굴착면이 붕괴되어 자립 시간 이내에 지보설치가 불가능한 경우는 일반적인 NATM 공법을 적용하기 곤란하다.

따라서 이러한 연약지층은 인위적으로 보강하여 굴착 및 지보작업이 가능한 최소단면으로서 자립할 수 있도록 지반강성을 크게 증가시키거나 터널 굴착전에 굴착 전방 방향으로 지보재를 설치하여 굴착단면이 형성될 수 있도록 함으로써 NATM 개념의 적용이 가능한 여건으로 개량하여야만 터널 굴진이 가능하다.

본고에서는 전장에 분류된 몇가지 적용가능한 공법중에서 수평 Jet Grouting 구근 Roof 공법의 적용 가능성 검토를 위하여 시행된 FEM 해석 결과를 수록하고 있다.

#### 3.1 FEM 해석단면

FEM 해석단면은 총적층 심도가 깊고(GL-22.0M) 지상 구축물의 하중이 터널에 비대칭으로 작용하는 지점을 선정하였으며 강내 수평 Jet Grouting 작업시 과다하게 유입되는 지하수 (작용수압 약 1.5 kg/cm<sup>2</sup>)를 억제하기 위하여 터널 진행방향 20m 단위로 폭 3.0m의 SCR 차수 Grouting을 시행하는 것으로 하였다.

해석단면은 수평 Jet Grouting이 수평에서 약 6.2° 상향으로 천공, 주입되어 구근을 형성하기 때문에 굴착단면이 Jet Grouting의 매 Step 마다 확폭되어 (Jet Grouting 구근예상 : φ600mm) 굴착최대 단면에 대하여 시행하였다.

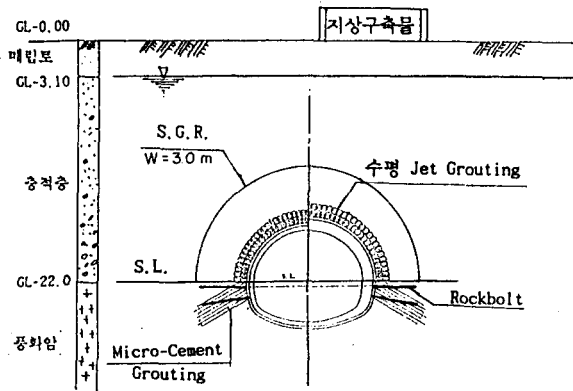


그림 3.1 FEM 해석 단면

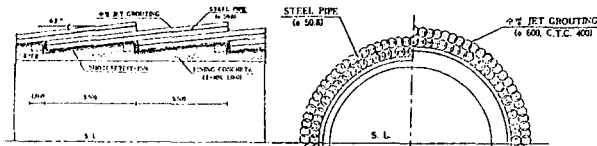


그림 3.2 수평 Jet Grouting 시공 확폭 단면

### 3.2 해석 영역

지반의 수치해석 영역은 굴착으로 인한 영향이 미치지 않는 범위로 하였다. 일반적으로 터널 해석시 수평 방향으로는 터널 직경의 3배이상, 터널 하부로는 터널 직경의 1.5배 이상을 해석 영역으로 선정하며 본 해석에는 60m×42m의 유한 요소망을 사용하였다.

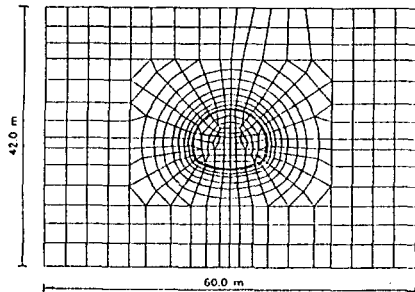


그림 3.3 해석 요소망

### 3.3 경계 조건 및 하중

해석 경계 조건은 좌, 우 경계부는 Roller로 축방변위를 구속하고, 하부 경계부는 Roller로 수직 방향 변위를 구속하였으며 하부 양 모서리는 Hinge로 회전만 허용하였다.

작용하중은 지반의 자중, 지상구축물의 하중 (7.5t/m<sup>2</sup>) 및 차량하중 (1.0t/m<sup>2</sup>)을 고려하여 적용하였다.

### 3.4 해석 물성치

FEM 해석 물성치는 해당 Project의 지질조사 보고서와 인접지역의 FEM 해석보고서 등을 참고로 선정하여 적용하였다.

표 3.1 해석 물성치

물성치	메립토	층적토	개량층적층	풍화암	개량풍화암
Ko	0.5	0.5	0.5	0.35	0.3
Es (t/m <sup>2</sup> )	1.5 x 10 <sup>3</sup>	2 x 10 <sup>3</sup>	4 x 10 <sup>3</sup>	50 x 10 <sup>3</sup>	80 x 10 <sup>3</sup>
ν	0.35	0.33	0.3	0.3	0.25
φ (deg)	20	25	30	35	40
C (t/m <sup>2</sup> )	0.0	3.0	6.0	20	30
γ (t/m <sup>2</sup> )	1.9	2.0	2.2	2.2	2.3
물성치	Soft S/C	Hard S/C	Rock Bolt	수평 Jet G/R	
Ko	-	-	-	-	
Es (t/m <sup>2</sup> )	200 x 10 <sup>3</sup>	1,000 x 10 <sup>3</sup>	2.1 x 10 <sup>7</sup>	400 x 10 <sup>3</sup>	
ν	0.2	0.2	-	0.2	
φ (deg)	20	30	-	35	
C (t/m <sup>2</sup> )	200	500	18,000	80	
γ (t/m <sup>2</sup> )	2.5	2.5	7.85	2.5	

### 3.5 해석 단계

해석 단계	0	1	2
시공 순서	원 지반	S.G.R, 수평 JET G/R	상반 굴착
막장 거리	0.0	0.0	0.0
하중부담률(%)	100	100	33
형상			

해석 단계	3	4	5
시공 순서	측벽 Cement G/R 상반 S. S/C	상반 H, S/C	상반 H, S/C
막장 거리	0.3D	1D	2D 이상
하중부담률(%)	75	90	100
형상			

해석 단계	6	7	8
시공 순서	하반 굴착	하반 S/C, R/B	하반 H, S/C
막장 거리	0.0	0.3D	1D
하중부담률(%)	55	60	70
형상			

해석 단계	9	10	11
시공 순서	하반 H, S/C	인버트 굴착	인버트S, S/C
막장 거리	2D 이상	0.0	0.3D
하중부담률(%)	100	55	60
형상			

해석 단계	12	13
시공 순서	인버트 H, S/C	인버트 H, S/C
막장 거리	1D	2D 이상
하중부담률(%)	70	100
형상		

#### 4. FEM 해석 결과 및 분석

해석은 그림 4.1과 같이 3 Case에 대해 수행하였다.

Case I에서는 1열 수평 Jet Grouting과 SCR 차수 Grouting 만을 고려한 경우로써, 해석결과 Jet Grouting과 축벽 풍화암 부분의 Failure Ratio가 0.0이 되어 막장 안정 확보가 어려운것으로 나타났다. 이는 Jet Grouting 구간이 완전히 Overlap 되지 않은 1열 Jet Grouting 구간에서는 천단하중 지지가 어려우며 상부 토압이 Jet Grouting Roof에 의해 축벽부에 집중 전달되기 때문인 것으로 판단되었다.

Case II에서는 2열 수평 Jet Grouting을 시공하고 축벽 및 우각부 풍화암 층을 Micro-Cement Grouting 보강하는 것으로 계획하여 해석한 결과 Invert 굴착시 축벽 하부가 일부 허용 응력을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 하반 굴착시 하반 막장의 안정 조치가 미흡한 것을 의미한다.

Case III에서는 축벽 하부 풍화암층의 Rockbolt 보강을 추가 계획하여 해석한 결과 안전한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 축벽부 및 우각부 부근의 Failure Ratio가 다소 작으므로 시공방법을 준수하여 정밀한 시공이 요구된다.

해석	보조 공법	수평 Jet Grouting	횡단면 (A - A)
Case I	.S.G.R .1열 수평 Jet Grouting		
Case II	.S.G.R .2열 수평 Jet Grouting .Micro-Cement Grouting		
Case III	.S.G.R .2열 수평 Jet Grouting .Micro-Cement Grouting .Rockbolt		

그림 4.1 해석 Case

표 4.1 해석 Case 및 결과

해석	해석 조건	해석 결과	첨부그림(부록)
Case I	.S.G.R	.수평 Jet Grouting	.해석 요소망 (Mesh)
	.1열 수평 Jet Grouting	파괴 .축벽부 풍화암 파괴	.변위도
Case II	.S.G.R	.인버트 굴착시 축벽	.주응력도
	.2열 수평 Jet Grouting .Micro-Cement Grouting	하부 풍화암 파괴	.Failure Ratio Contour
Case III	.S.G.R	.안전(Failure Ratio	
	.2열 수평 Jet Grouting	가 작은 부분 존재)	
	.Micro-Cement Grouting .Rockbolt		

본고에서는 Case I, Case II의 허용 응력 초과 결과는 생략하였으며, Case III에 대하여 해석된 13단계중 상반굴착, 하반굴착, 인버트 굴착단계와 최종 해석 단계에서 얻어진 총 4단계(2, 6, 10, 13 Step)의 결과만을 수록하였으며, 각각에 대하여 변위도 (Displacement Field), 주 응력도 (Principal Stress Field), 파괴 접근도 (Failure Ratio Contour) 를 해석 요소망 (Mesh)과 함께 수록하였다.

이중 특기사항을 간략히 기술하면 다음과 같다.

##### 가. 변위도

그림 4.2는 굴착 단계별 변위도를 나타낸다. 지상 구축물과 차량 하중으로 인해 우측 천단 변위가 좌측보다 다소 크게 발생하였으며 천단 변위에 비해 미소하지만 인버트부의 변위도 약간 발생한 것으로 보아 가인버트시공 및 인버트의 조기폐합이 요망된다고 판단된다.

나. 주 응력도

그림 4.3은 굴착 단계별 주응력의 변화 양상을 보여주고 있다. 굴착에 의한 아칭효과(Arching Effect)로 인해 최대 주응력이 터널 굴착면에 접선 방향으로 발생하며, 터널 주변 지반에 비해 수평 Jet Grouting에 더 큰 응력이 발생함을 알 수 있다.

4단계 모두에서 측벽 하부에 응력이 집중되는 양상을 보였으며, 이는 충적층 및 상재 하중이 수평 Jet Grouting에 의해 지지하고 있는 풍화암층으로 전달되는데 기인하는 것으로 판단된다.

다. 파괴 접근도

그림 4.4는 굴착 단계별 파괴 접근도(Failure Ratio Contour)를 보여준다. 응력이 집중되는 부분의 파괴율은 작으며 굴착이 진행됨에 따라 Contour 간격이 좁아지며 최종적으로 터널 측벽 및 측벽 하부의 파괴율이 작고 Contour가 조밀하게 분포함을 보여주고 있다.

최종 시공 완료 후의 응력 분포는 대체로 안정된 양상을 보이나 측벽 부분의 응력 집중이 나타나므로 수평 Jet Grouting을 풍화토까지 시공하여 풍화암에 지지시키고, 그 지지 부분인 풍화암층은 Micro-Cement Grouting 등으로 측벽 하부까지 충분히 보강해야 될 것으로 판단된다.

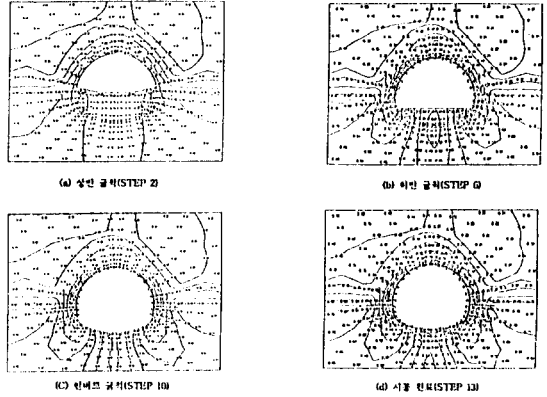


그림 4.4 파괴 접근도(Failure Ratio Contour)

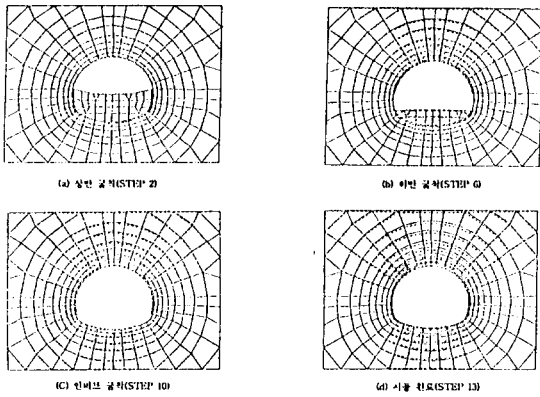


그림 4.2 변위도 (Displacement Field)

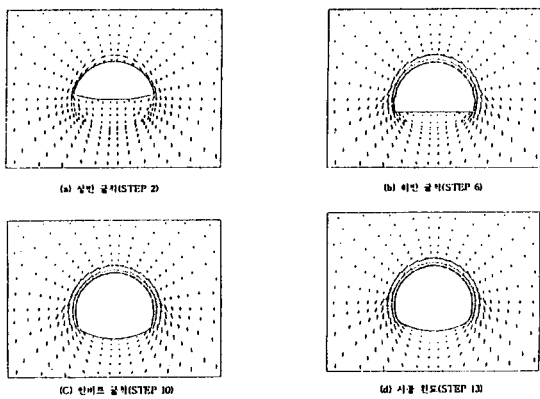


그림 4.3 주 응력도 (Principal Stress Field)

4.1 침하 및 내공 변위

해석 결과 예상되는 최대 지표침하량은 7.2 mm이며, 최대 천단침하량은 12.2 mm이다. 상반 굴착단계에서 하반 굴착 직전(Step 5)에 발생된 지표 침하량과 천단 침하량은 각각 최대 침하량의 80.2 %와 90.2 %로서 상반 굴착단계에서 대부분의 변위가 발생하므로 상반 굴착 및 지보상태가 터널의 안정에 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 지표 침하량 7.2 mm는 상부 구조물에 큰 영향은 미치지 않을 것으로 판단되나 지하수위 저하로 인해 침하량은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 천단 침하량 12.2 mm는 Jet Grouting 및 측벽 하부 풍화암층의 확실한 보강 시공을 전제로 하여 얻어진 결과이며 계속시 이보다 큰 변위가 발생할 경우에는 지상 건축물의 안정을 고려하여 추가적인 보강대책이 필요하다.

터널의 내공변위는 상반 굴착완료 상태에서 최대 6.28 mm로 확대 되었다가 최종 굴착 완료 상태에서 3.64 mm로 축소되었다. 표 4.2 및 그림 4.6와 그림 4.7은 해석 단계별 지표 및 천단 침하, 내공 변위의 변화 양상을 보여주고 있다.

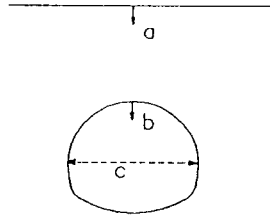


그림 4.5 침하 및 내공 변위

구분 STEP	(단위 : mm)		
	지표 침하(a)	천단 침하(b)	내공 변위(c)
0	0.000	0.000	0.000
1	0.000	0.000	0.000
2	2.134	4.085	-2.224
3	4.545	8.279	-4.780
4	5.275	10.084	-5.669
5	5.776	11.007	-6.283
6	6.418	11.619	-5.519
7	6.903	12.029	-4.659
8	6.983	12.055	-4.356
9	7.036	12.090	-4.150
10	7.168	12.196	-3.823
11	7.198	12.202	-3.643
12	7.179	12.178	-3.642
13	7.169	12.162	-3.642

표 4.2 굴착 단계별 침하 및 내공 변위

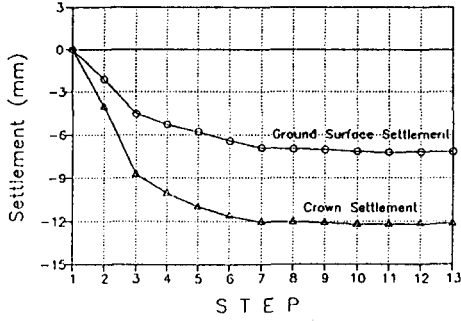


그림 4.6 해석(굴착) 단계별 지표 및 천단 침하

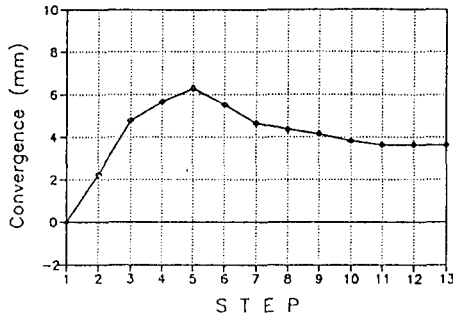


그림 4.7 해석(굴착) 단계별 내공 변위

(- : 압축, + : 인장, 단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

STEP	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
부계											
1	-1.35	-3.64	-5.16	-6.80	-8.53	-9.02	-9.35	-9.80	-10.07	-10.07	-10.07
2	-0.37	-1.48	-2.29	-4.06	-6.95	-7.81	-8.40	-9.19	-9.71	-9.71	-9.70
3	-0.73	-2.03	-2.96	-4.25	-7.19	-8.08	-8.69	-9.59	-10.12	-10.11	-10.11
4	-2.04	-5.00	-6.95	-9.90	-11.39	-12.08	-12.58	-13.21	-13.55	-13.54	-13.54
5	-6.25	-12.83	-17.33	-15.24	-13.64	-13.39	-13.23	-13.23	-13.26	-13.26	-13.27
6	-14.54	-24.58	-30.53	-19.98	-10.84	-8.53	-7.26	-6.21	-5.77	-5.82	-5.85
7	-5.43	-10.90	-14.56	-12.05	-10.79	-10.70	-10.65	-10.67	-10.70	-10.70	-10.70
8	-15.21	-24.94	-31.28	-19.97	-11.09	-8.94	-7.53	-6.36	-5.96	-6.03	-6.08
9					-8.33	-13.88	-17.62	-15.23	-13.92	-13.88	-13.85
10					-6.53	-11.23	-14.21	-12.34	-11.47	-11.47	-11.47
11					-14.67	22.58	-27.88	-20.44	-16.02	-16.09	-16.20
12									-5.82	-9.82	-12.49
13									-0.31	-0.83	-1.18
14									-0.08	-0.07	-0.11
15									-0.01	-0.10	-0.18
16									-2.89	-5.17	-6.70
17									-7.59	-12.13	-15.17

표 4.3 굴착 단계별 슛크리트 응력

#### 4.2 슛크리트 응력

FEM 해석결과 터널 시공과정에서 슛크리트에 발생하는 최대 압축응력은 상반 굴착 단계 (Step 5)시 측벽부에서 31.3 kg/cm<sup>2</sup>, 하반 굴착 단계 (Step 9)시 측벽부에서 27.9 kg/cm<sup>2</sup> 정도이며, 최종 굴착후(Step 13)에도 역시 측벽부에서 16.2 kg/cm<sup>2</sup> 정도를 보임으로써 상반 굴착단계에서 최대 값으로 나타나다가 점점 감소하는 경향을 보일 것으로 예상된다. 인버트 굴착후에는 슛크리트의 응력변화가 거의 없음을 보여주고 있으며 인버트 부 슛크리트에는 작용 응력이 크게 나타나지 않지만 인장 응력 발생 가능성이 보여지므로 인버트 굴착후 조기에 슛크리트를 타설 하는 등의 적절한 시공이 필요하다. 표 4.3과 그림 4.9는 해석단계별 슛크리트 응력 변화를 보여주고 있다.

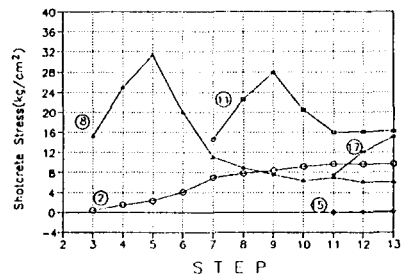


그림 4.9 해석(굴착) 단계별 슛크리트 응력변화

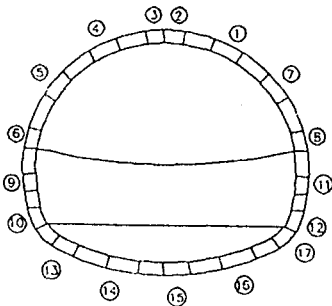


그림 4.8 슛크리트 응력 확인 위치

#### 4.3 Rockbolt 축력

측벽 하부 보강을 위한 Rockbolt의 최대 축력은 우측 상부에서 약 3 ton, 우측 하부의 Rockbolt에는 1.2 ton 정도 작용하여 하중을 크게 받지 않고 있는 것으로 분석되었다. 하반 반단면에 설치되는 Rockbolt 중 상부 2개의 Rockbolt는 주로 하반 굴착단계의 하중을, 하부의 2개의 Rockbolt는 주로 인버트 굴착단계의 하중을 받고 있는 것으로 보여진다.

표 4.4와 그림 4.11은 계획 Rockbolt의 해석단계별 축력 변화를 나타내고 있다.

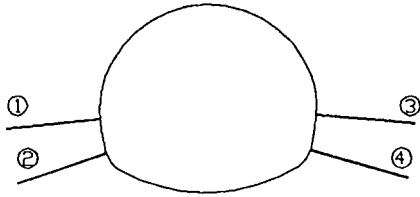


그림 4.10 Rockbolt 위치

표 4.4 굴착 단계별 Rockbolt 축력

(단위 : ton/개)

STEP	7	8	9	10	11	12	13
부재							
1	1.23	1.48	1.66	2.13	2.42	2.45	2.48
2	-0.64	-0.93	-1.13	0.06	0.10	1.13	1.21
3	1.29	1.75	1.98	2.49	2.80	2.85	2.89
4	-0.58	-0.92	-1.15	0.02	0.92	1.05	1.14

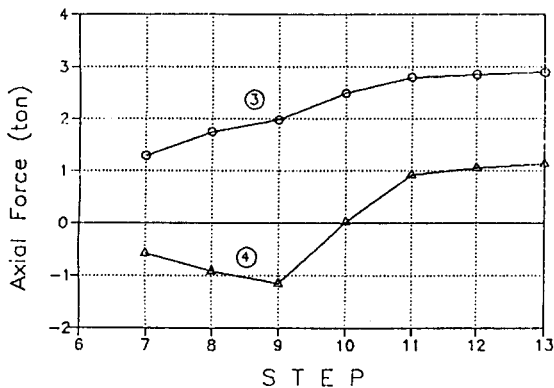


그림 4.11 해석(굴착) 단계별 Rockbolt 축력 변화

## 5. 결론 및 제언

이상과 같이 지하철 복선터널 PD-2A 구간에 대한 FEM 해석에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

가. 수평 Jet Grouting을 1열로 해석하였을 경우 Jet Grouting 부분이 파괴되는 것으로 나타났으며, 2열로 해석하였을 경우에는 Jet Grouting 은 안정하였으나 측벽 풍화암층에 응력이 집중되어 파괴가 예상되었다. 따라서, 측벽 풍화암층을 Micro-Cement Grouting으로 보강하는 것으로 하여 해석하였으나 국소적인 파괴가 발생하여 Rockbolt 시공을 추가하여 안전한 결과를 얻을 수 있었다.

나. 수평 Jet Grouting은 2열로 시공될 수 있도록 12m 길이에 6m 이상 중첩 시켜 시공해야 하며, 충적층 뿐만 아니라 풍화토까지 시공하여 풍화암층에 지지될 수 있도록 해야한다. 해석 단면은 S.L.까지 충적층으로 구성 되어 있으나 지질 상태를 보면, 터널 저면에서 천단부까지 다양한 변화 상태를 보이고 있기 때문에 막장면 지질 상태에 따라 풍화암까지 시공해야 한다.

다. 수평 Jet Grouting에 의해 전달되는 하중이 집중되는 상·하반 경계부의 측벽 풍화대층은 Micro-Cement Grouting으로 적정 강도가 발휘될 수 있도록 충분한 보강이 필요하다.

라. 구간에 따라 충적층 심도가 변화하여 하반에 Rockbolt가 없는 구간은 국부적으로 응력이 허용치를 초과할 가능성이 크므로, 상반 시공은 분할 굴착과 함께 굴착 즉시 Sealing Shotcrete 타설을 하여 과다변형, 막장 밀립현상 등에 대비 해야 한다. 또한, 상반 가인버트에 의한 조기 폐합을 실시하고 하반은 Mini-Bench로 굴진하여 조기 폐합되도록 철저한 시공관리가 필요하다.

마. 침하 및 내공 변위의 예상 결과치로 볼 때 지표 침하량은 지상구축물에 영향을 미칠 정도는 아닐 것으로 예상되나, 지하수위 저하에 의한 침하량이 클 경우는 지상구축물의 안전이 우려되므로 시공중 현장 계측결과가 해석 결과치보다 클 경우에는 그 원인 규명과 추가 보강작업을 고려해야 한다.

바. Rockbolt의 축력은 1~3 ton 정도로 큰 편은 아니지만, 측벽하부 풍화암의 안정 및 변위 억제에 필요하며 해석 결과에서도 그 효과가 있는 것으로 보여지므로 정밀 시공이 요구된다.

사. 전체적으로 정밀 시공과 병행하여 현장 계측을 주의깊게 실시하여 문제 야기시 원인 규명과 그에 따른 보강대책이 수립·시행되어야 할 것이다.