

지하공간 개발을 위한 도심지 토사터널 적용사례

Case of applications of Earth Tunnel for underground space development

ABSTRACT

Underground space development is more active on the latest date. Currently, we construct an connecting tunnel Euljiro underground shopping-area in seoul.

we select DSM, considering geological condition and construction efficiency. The numerical analysis is performed with PENTAGON-3D and MIDAS CIVIL

This paper will introduce the Earth Tunnel Method and make an examination possible to apply downtown weak ground.

Keyword : DSM, Earth Tunnel, Weak ground, Connecting tunnel, numerical analysis



서 규 석 수석총무
(주)선구조엔지니어링 대표이사

안진호 : 두호엔지니어링 대표이사,
토질 및 기초기술사

유재목 : (주)굿모닝시티 건설본부장

김동환 : 풀림산업(주) 굿모닝시티 현장소장

윤태영 : 표준EC(주) 설계과장

1. 서론

터널공사는 일반적으로 암반지층을 굴착하는 것으로 NATM 공법이 널리 통용되고 있으나, 근래에 와서는 특수장비와 강재 가설재를 이용하여 막장자립이 곤란한 토사지반의 경우에도 터널 굴착을 할 수 있는 방안들이 개발되어 많은 시공실적을 쌓고 있다. 특히 도심지와 같은 저토피 연약지반에서는 지반침하 및 기존의 복잡한 지하매설물, 교통난, 민원발생 우려로 인해 다양한 특수터널 공법이 적용되고 있는 실정이다.

본 현장은 서울 지하철 2호선 동대문 운동장역 정거장(을지로 지하상가)과 굿모닝씨티 쇼핑몰 빌딩을 연결하는 지하통로를 지표로부터 4.0 m 하부에 설치하는 공사로서, 지하연결통로 상부에 서울 지하철 2호선 출입구 및 우수관(φ1000mm), 상수관, 광케이블 등 복잡한 지장물이 존재하고 있으며, 우측에는 지하철 환기구가 위치하여 있다.

따라서, 터널굴착으로 인한 상부도로 및 인접구조물의 안정성 확

보, 시공성, 경제성을 고려하여 현장상황에 적합한 Earth Tunnel 공법 중 DSM(Divided Shield Method)공법을 선정하였다. 본 고에서는 복잡한 도심지에서 지하공간 개발을 위한 연결통로 시공방법으로 적합한 DSM 공법 적용사례를 보고하고자 한다.

2. 공사개요

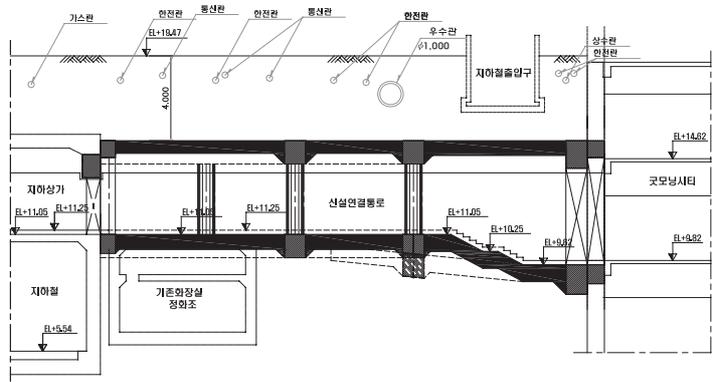
본 현장은 서울지하철 2호선 동대문운동장역(을지로 지하상가)과 굿모닝씨티 쇼핑몰 지하2층을 연결하는 공사로서 지하 4.0 m, 총면적 약 340m² 공간에 화장실 및 지하광장을 조성하는 공사이다.

〈그림 2〉와 같이 지하철 출입구 하부를 통과하며 우수관, 상수관을 비롯한 다양한 지장물이 직상부에 존재하고 주변 인접구조물로 지하철 환기구가 우측에 위치해 있다.

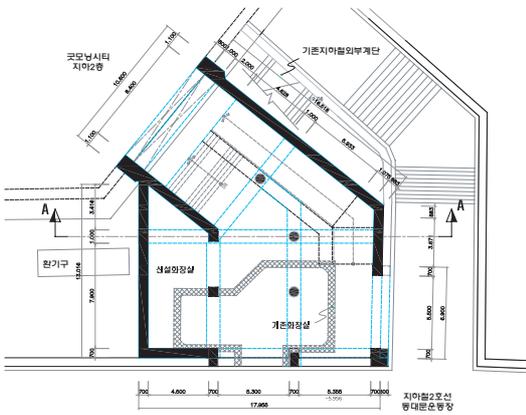
본 구간의 지층구성은 지표로부터 약 3m까지 매립층이 분포하고,



〈그림 1〉 대상구간 현황 (조감도)

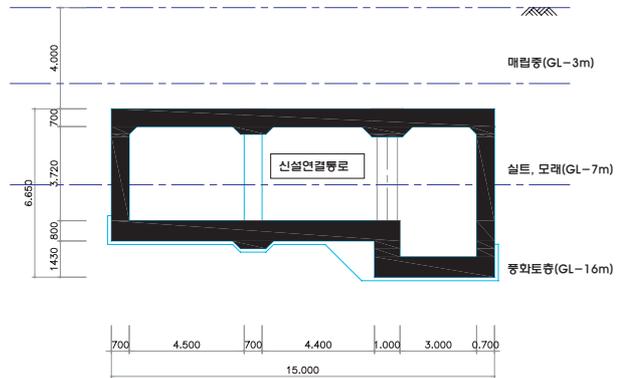


〈그림 2〉 지장물 현황도



〈그림 3〉 평면도

표준단면 (A-A)



〈그림 4〉 단면도

그 하부는 약 4m의 실트와 모래로 구성된 퇴적층과 9m의 풍화토 층으로 구성된 연약 지층이 분포하여 연결통로 굴착시 기존 구조물의 안정성과 침하에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

또한 검토구간 내에 노화된 우수관 및 상수관의 영향으로 기존 누출수가 다량 존재할 것으로 예상되며 기존 화장실 및 지하철 접속부 주변 퇴매우기층 굴착으로 인한 도로침하 대책이 철저히 강구되어야 한다.

3. 공법선정

도심지 하부를 통과하는 공법선정시 복잡한 지장물 처리 및 교통체증에 따른 민원을 고려하여 개착보다 Earth Tunnel 공법을 적용(표 1)하는 것이 일반적이다.

현재 Earth Tunnel 공법으로는 강관압입방식인 NTR, TRCM,

Pipe Roof, Front Jacking 등이 있으며, 강관을 압입하는 Messer Shield, DSM 공법이 있다.

강관압입방식 공법은 터널 예정단면 주변에 수평시추방식에 의한 대구경 및 소구경 강관을 일정간격으로 천공, 설치하고 일련의 루프를 형성시켜 지반의 이완 및 지압의 확대등을 미연에 방지해 나가는 공법이기에 때문에 지하구조물에 대한 안정효과가 큰 것으로 알려져 있으나, 강관을 추진하는 일련의 과정에서 지반침하 및 지반유기 현상이 예상된다.

강관압입방식 중 Messer Shield 공법은 터널예정단면 주변에 Plate를 추진, 굴착을 일정간격으로 반복하면서 막장막이 및 지보재를 설치하는 방법으로 굴착선상의 지장물 및 막장상태를 수시로 확인할 수 있고, 직각선형 및 R선형 구간에도 적용성이 뛰어나지만 막장전면에 충분한 안식각을 확보할 수 없으며, 후속 판넬 연결시 일정량의 침하가 발생된다.

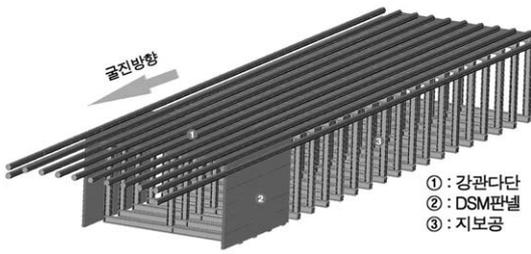
〈표 1〉 개착공법 과 터널공법 비교

구분		터널 공법 (Divided Shield Method)	개착식 공법 (H-Pile+Strut)
시공단면도			
개요		<ol style="list-style-type: none"> 1. 강철판을 유압으로 지중에 추진 2. 강지보 설치 후, 인력굴착 3. 1, 2를 반복 작업 후 콘크리트타설 	<ol style="list-style-type: none"> 1. H-Pile 근입 2. Strut 및 복공설치 후 굴착 3. 굴착완료 후 콘크리트 타설 4. 도로 및 지장물 복구
특징	장점	<ul style="list-style-type: none"> • 터널작업으로 민원발생 최소화 • 공사 중, 차량 통행가능 • 지장물 보호 및 이설비용 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> • 가장 일반적 공법 • 공사비 저렴 • 일반적으로 공기가 단축되나 민원발생시 장기화
	단점	<ul style="list-style-type: none"> • 공사비 고가 • 터널공법으로 정밀시공 요구 • 인력굴착으로 인한 작업능률 저하 	<ul style="list-style-type: none"> • 진동, 소음 인한 민원발생 가능 • 일정기간 차량통행금지 (복공기간) • 지장물 이설시 공사비 고가
채택안		ⓐ	
검토의견		지하연결통로 설치구간 상부에는 우수관을 비롯한 각종 지장물이 산재되어 있고, 지하철출입구 하부를 통과해야 하므로 개착식 공법 적용이 어려우며 진동 및 소음, 도로통체에 따른 민원발생을 최소화하기 위하여 터널식 공법인 DSM공법(Divided Shield Method)을 적용하였음.	

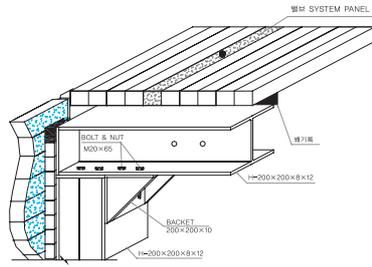
따라서 당 현장은 Messer Shield 공법의 장점을 승계하고 굴착시 주변지반 이완으로 인한 상부도로 및 지장물의 안정성 확보를 고려하여 이를 개선한 DSM공법(Divided Shield method)을 선정<표 2>하였다.

〈표 2〉 DSM 공법의 주요 개선사항

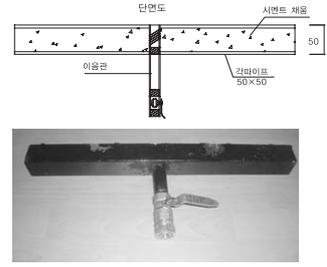
구분	개 선 사 항	효 과	비 고
1	강관단단 선행 그라우팅 적용	- 지반 자립도가 낮고 지하수위가 높은 연약지반 굴착시 지반의 선행침하 예방 및 인접구조물의 안정성을 확보.	<그림 5> 참조
2	2차 지반침하 방지를 위한 벨브 SYSTEM PANEL 적용	- PLATE 추진후 후속으로 설치되는 복공재 주변 필요한 위치에 그라우팅 주입파이프가 설치된 PANEL을 설치하여 1차라이닝 타설 후 배면 채움을 실시 외부지반을 안정화하고 방수효과 증대.	<그림 6> 참조
3	"ㄱ"자 시공을 고려한 DSM PLATE 개선	- 분리형 PLATE를 제작 적용하여 공간이 협소한 갱내에서도 안전하고 간편하게 설치할 수 있음.	<그림 7, 8> 참조



〈그림 5〉 강관다단 선행 그라우팅 모식도



〈그림 6〉 밸브 SYSTEM PANEL



〈표 3〉 Earth Tunnel 공법비교

구 분	Divided Shield Method (강관압입공법)	Pipe Roof Method (강관압입공법)
시공단면도		
개 요	강성이 큰 DSM PLATE를 배열, 유압력으로 압입한 후 내부굴착 및 지보재를 설치하는 공법.	보링방식에 의해 천공후 강관을 압입하여 파이프로프를 형성시킨 후 내부를 굴착후 지보재를 설치하는 공법.
특징	장점	<ul style="list-style-type: none"> 강관다단그라우팅 선행작업으로 지반침하 및 막장안정성 향상. 굴착중 지하매설물 육안확인 가능하여 대처능력이 뛰어나. 협소한공간에서도 추진이 가능하며 곡선 방향 수정가능
	단점	<ul style="list-style-type: none"> 지보재의 간격이 좁아 대형장비 굴착이 어려움. 인력굴착으로 인한 작업능률 저하
경제성	1.0	1.2
채택안	◎	
검토의견	터널막장 상부지반이완으로 인한 도로의 침하발생을 최소화 하며, 지반상태 확인에 따른 응급조치 및 선형수정, 작업공간 협소로 인한 현장 시공성을 종합적으로 고려하여 DSM 공법을 선정함.	

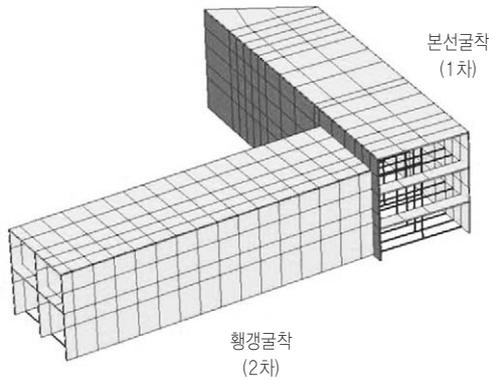
강관압입 공법중 대구경 강관(φ1500이상)을 사용하는 N.T.R 공법과 TRCM 공법은 도심지와 같은 저토퍼 구간에서 적용이 어려우며 중형 강관(φ800)을 압입하는 Pipe Roof 공법과 비교 검토(표 3)하였다.

공법 검토 결과 DSM 공법이 현장 안정성 및 시공성, 경제성을 고려할 때 가장 적합하다 판단되며 적용할 수 있는 적용범위는 다음과 같다.

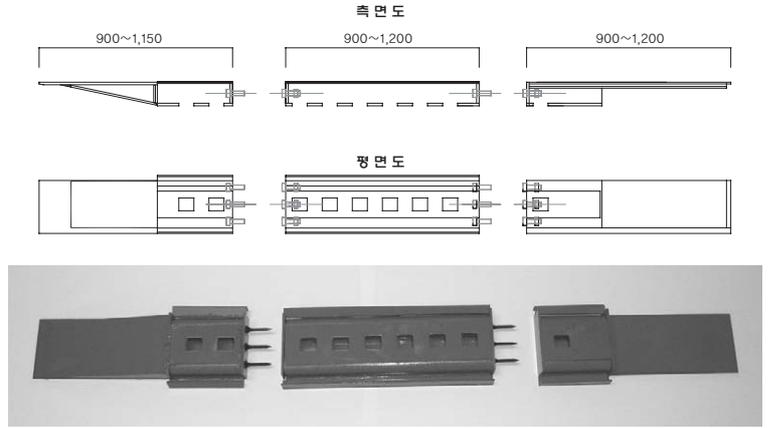
▶ 선형조건 → 평면곡선구간(R=50M이상)에서도 시공가능

▶ 단면조건 → Arch 및 Box 단면등 형태나 크기에 상관없이 시공가능

- ▶ 적용분야 →
- i) 신축건물 지하연결통로
 - ii) 기존건물 및 지중 매설물 교차횡단
 - iii) 도로, 하천, 철도 횡단 구조물
 - iv) NATM 해석이 불가능한 풍화대층 터널
 - v) 전력구, 통신구, 지하보도, 지하차도
 - vi) 비대칭형 지하공간 개발 등



〈그림 7〉 “Γ”자 시공공간 개념도



〈그림 8〉 분리형 DSM PLATE

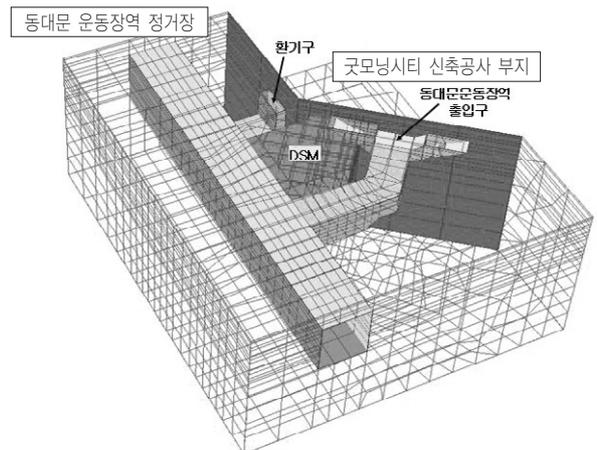
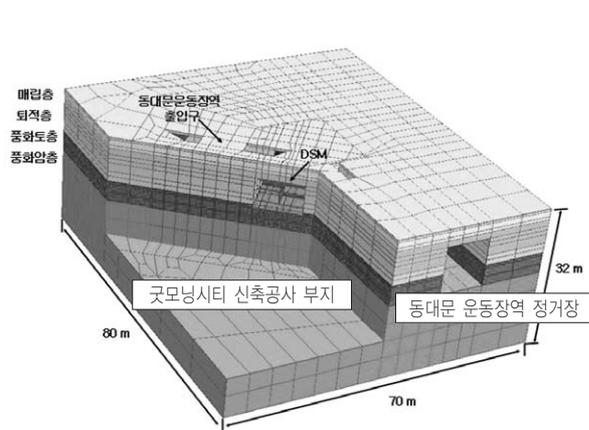
4. 터널의 안정성 해석

4.1 수치해석을 통한 안정성 검토

DSM 공법 시공과정에 따른 지반 침하 영향을 검토하여 인접 시설물의 안정성을 검토하는데 주 목적이 있다. 수치해석은 실제 시공순서를 모사하여 인접 시설물의 안정성을 비교·분석하였으며 사용된 프로그램은 지반해석 전용프로그램인 PENTAGON 3D(3차원 유한

요소해석)를 이용하였다.

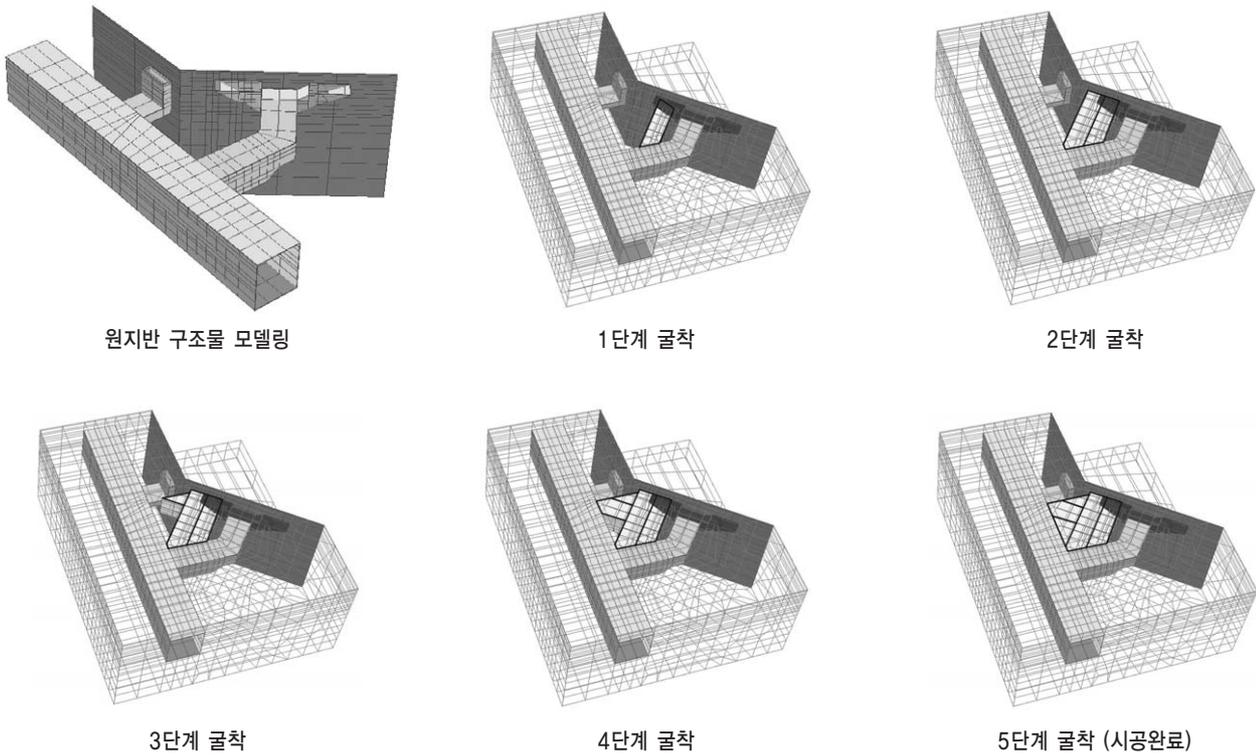
- 해석은 구간의 특성상 지하환기구와 상부도로의 안정성에 중점을 두어 수행하였으며, 기존 지하철 출입구는 시공후 폐쇄하여 되메움을 시행할 예정이므로 안정성 검토에서 제외하였다.
- 지하철 출입구, 환기구, 정거장은 shell 요소로 모델링 하였다. 지반물성치는 기존지하철 시공사례 및 지반조사결과를 사용하였으며, 해석시 적용한 지반 및 보강재료의 물성치는 <표 4>에 나타내었다.



〈그림 9〉 해석구간 지반 및 터널 모델링

〈표 4〉 해석 적용 지반물성치

지층구분	변형계수(tonf/m ²)	포아슨비	점착력(tonf/m ²)	마찰각	단위중량(tonf/m ³)
매립층	1.0×10 ³	0.30	0.1	28	1.7
퇴적층(실트)	2.0×10 ³	0.30	0.0	30	1.7
퇴적층(모래)	3.0×10 ³	0.30	0.0	33	1.8
풍화토층	5.0×10 ³	0.30	2.0	33	1.9



〈그림 10〉 지반 해석 순서

(1) 통과 공법 : DSM 공법

• DSM 공법은 우선 지반에 그라우팅을 한 후, DSM 패널을 삽입하여 막장을 굴착하며 굴착 후 H-BEAM으로 보강하여 한 공정을 마무리한다. 한 공정은 지보재 간격인 0.6m로 이루어진다.

(2) 주요 설계 현안

- 천단 및 주변그라우팅 : 막장내 천단 보강으로 강관다단 그라우팅 및 Umbrella Ribs 시공
- 총 5단계에 걸쳐서 DSM 시공
- 굴착후 H-beam 보강 및 본선 DSM 굴진 완료후 막장면에 철근 콘크리트로 보강

(3) 해석 순서

- Grouting - DSM PANEL 주변장에 그라우팅 주입
- 굴진장은 종방향 0.6m이며, 총 5단계로 나누어 시공
- DSM PANEL을 지중에 삽입한 후 지반을 굴착

(4) 해석 결과

- 환기구 구조물에 발생하는 응력은 압축응력 8.42 kgf/cm², 인장응력 5.31 kgf/cm², 전단응력 1.43 kgf/cm²으로서, 모두 허용치 이내로 작용하여 구조물의 안정성에는 영향이 없으므로 판단됨.
- 환기구 구조물의 최대 변위량은 0.7mm로서 허용기준치인 25mm보다 적게 침하가 발생하여 DSM 시공시 거의 영향이 없는 것으로 판단됨.

〈표 5〉 환기구 구조물의 안정성 검토

구 분	허용 한계치	결과값 (kgf/cm ²)		검토 결과
		DSM 시공전	DSM 시공후	
전단응력	3.87	0.20	1.43	O.K.
인장응력	6.51	5.29	5.31	O.K.
압축응력	96.00	7.78	8.42	O.K.

〈표 6〉 DSM 구조물과 환기구 사이 벽체의 변위 검토

구 분	허용변위량	변위량	검토 결과
환기구	25.0 mm	0.7 mm	O.K.

- DSM 굴착시 상부도로의 파괴율이 0.2~0.4로서 탄성영역내에 있어, 상부도로의 안정성에는 영향이 없을 것으로 판단됨.
- 상부 도로의 지표면 최대침하량이 1.10 mm로서 허용기준치인 25 mm보다 적게 침하가 발생하여 구조물의 안정성에는 영향이 없는 것으로 판단된다.

〈표 7〉 상부도로의 안정성 검토

검 토 위 치	검 토 항 목	검 토 기 준	결과값	검토 결과
상부도로	파 괴 율	파괴율 < 1.0	0.2 ~ 0.4	O.K.

〈표 8〉 상부도로의 침하량 검토

구 분	허용침하량	굴착시 침하량	검토 결과
상부 도로	25.0 mm	1.10 mm	O.K.

결과적으로, 최종 굴착단계에서의 환기구 구조물 및 상부 도로의 안정성에 영향이 없는 것으로 판단된다.

4.2 강지보재 및 연결볼트 용력검토

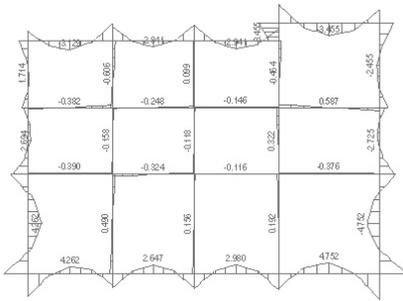
DSM 강지보재 및 전단볼트 상세검토는 구조해석 전용 프로그램인 MIDAS CIVIL을 사용하였다.

- 지보재 간격 0.6 m, 굴착심도 토사 H=4.0 m, 도로활하중 1.5 tonf/m², 축압계수는 저토피 구간임을 고려하여 0.5를 적용하였다.
- 가시설 구조물 설계는 허용응력 설계법을 기준으로 규정에 따라 강재(SS400)의 허용 휨응력 1,400 kgf/cm², 허용전단응력 800 kgf/cm²,

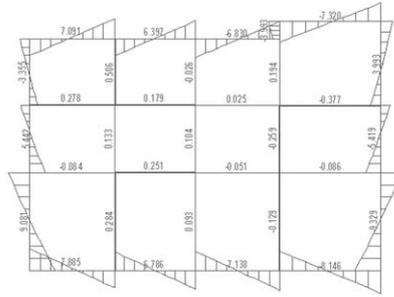
〈표 9〉 강재의 허용응력

종 류		일반구조용 압연강재 (SS400)	비 고
휨응력	인장면 순단면	1,400	l : 좌굴장 b : Flange 폭
	압축면 총단면	$\frac{l}{b} \leq 4.5 : 1,400$ $4.5 \leq \frac{l}{b} \leq 30, \quad 1,400 - 24(\frac{l}{b} - 4.5)$	
전단응력(총단면)		800	
축방향 인장(순단면)		1,400	
축방향 압축(총단면)		$\frac{l}{r} \leq 20$ 일 경우, 1,400	l (cm) : 유효좌굴장 r (cm) : 단면2차반경
		$20 \leq \frac{l}{r} \leq 93$ 일 경우, $1,400 - 8.4(\frac{l}{r} - 2.0)$	
		$93 \leq \frac{l}{r}$ 일 경우, $\frac{12,000,000}{6,700 + (\frac{l}{r})^2}$	

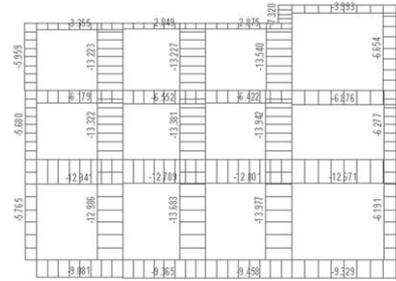
* 허용응력 증가 계수 1.5를 적용하여 사용함.



Bending Moment Diagram



Shearing Force Diagram



Axial Force Diagram 1단계 굴착

〈그림 11〉 강지보재의 단면력도

고장력볼트(M20,F10T)의 허용응력 3.9 ton/ea 에 증가계수 1.5 를 적용하여 검토하였다.

- 해석결과 하부 부재에 휨모멘트 $M_{max}=4.75 \text{ tonf/m}$, 축력 $N=9.33 \text{ ton}$, 측벽부재에 전단력 $S_{max}=9.33 \text{ tonf}$ 가 최대로 작용 하였고 부재검토 결과 휨과 축력의 합성응력은 $0.661 < 1$ 로 만족하였고, 전단에 대한 검토결과도 $0.552 < 1$ 로 허용치를 충족 하였다.
- 연결볼트에 축방향력, 휨모멘트, 전력이 함께 작용하는 경우 최대 작용력은 2.617 ton/ea 로 허용치인 3.9 ton/ea에 만족하는 수치를 보여주고 있다.

5. 결론

앞으로 도심지 지하공간 개발에 있어서 복잡한 지하 매설물 및 급증하는 교통체증, 공사 중 발생하는 소음·진동으로 인한 민원발생, 주변 인접구조물에 대한 안정성 문제로 인하여 공법 선정에 있어서 더욱더 신중한 검토가 필요하다.

이에 본 고에서 살펴본 DSM 공법은 도심지 터널 적용사례로 유용한 자료가 되리라 사료되며, 굴착으로 인한 지반침하 및 변위를 최소화하는 안정성이 우수한 공법으로 향후 그 수요가 점점 증가 될 것이라 판단된다.

참고문헌

1. (2004.10), “DSM 공법의 현장 적용성 및 시공사례에 관한 연구”, 한국지반환경공학회
2. (2003), “건설교통부 구조물 기초설계기준 해설”, 한국지반공학회
3. (2003), “도로교 설계기준 해설”, 대한토목학회
4. (1998.11), “지반공학시리즈(7) 터널”, 구미서관, 한국지반공학회
5. 김선홍, 조용석, 김동기, 박병은(2007.11), “도로하부를 통과하는 철도터널의 특수공법 적용사례”
6. 홍창수, 황대진, 이강호, 조금식(2005.09), “도심지 지하상가 연결통로 DSM공법 적용사례 연구”