프레임 슬래브 공법을 적용한 천층터널의 시공법 연구

A Case Study on the Shallow Overburden Tunnelling with a Frame Slab Method

정명근, Myung-Keun Jung, 박치면, Chi-Myeon Park, 이 호, Ho Lee, 김승렬, Seung-Ryull Kim

(주)에스코컨설턴트, ESCO Engineers & Consultant Co., Ltd.

SYNOPSIS : A frame slab method has been proved as a possible and profitable construction solution for the urban tunnels with very shallow overburden and the excavation from the surface is strictly limited. Since this method allows only a small amount of construction activities in the ground surface, the disturbances to the public and the surface traffic can be drastically reduced compared with the ordinary cut-and-cover method. The construction sequences of the method and the some of critical cautions needed are described in detail. Also a comprehensive numerical analysis including 2-D and 3-D analysis have been performed to verify the stability of the ground during the construction. It is revealed from this study that the frame slab method can be a quite successful solution for the shallow overburden tunnelling in urban area.

Key words : shallow overburden tunnel, frame slab method, numerical analysis

1. 서론

토피가 아주적은 터널의 경우에는 개착공법을 채택하는 것이 일반적이다. 그러나 주거지역에 인접한 지역으로서 주변의 여건상 굴착토사의 운반이 어렵고 중장비의 진입이 어려운 경우에는 사실상 개착공법 적용이 불가능하게 된다. 이러한 경우에는 지상의 건설행위를 최소화하고 터널로의 장비진입이나 버력처리 등을 실시하는 방안이 최선의 대안이 되게 된다. 토피가 적은 터널의 경우에는 일상적인 터널공법 적용이 불가능하기 때문에 터널 상부 토피를 굴착하고 프레임 슬래브라고 하는 콘크리트 슬래브를 시공한 다음 다시 되메움을 실시하고 횡방향에서 터널을 굴진해 가더라고 상부의 토피가 무너져 내리는 것을 방지할 수 있다. 이 공법은 독일(Sauer, 1992)에서 처음 제안되어 유럽 및 일본 등지에서 민가 및 도로 등 상부구조물의 안정성을 확보하고 터널시공을 성공적으로 수행하기 위하여 이 공법이 활발히 적용되었다. 따라서 본 연구에서는 프레임 슬래브 공법의 적용에 있어서 터널과 주변 지장물의 안정성 확보측면을 중심으로 국외의 시공사례와 실제 현장조건을 고려한 국내의 설계사례를 분석하였으며 수치해석 기법을 이용한 정성·정량적 해석결과를 바탕으로 프레임 슬래브 공법 미적용시의 경우와 상호 비교분석을 통해 프레임 슬래브 공법의 국내 적용 가능성을 고찰해 보고자 한다.

2. 프레임 슬래브 공법의 적용사례 검토

2.1 현황

일본의 신칸센 야에하라터널 공사(1991~1994) 구간 중 터널의 입구쪽 갱구부의 토피가 매우 낮은(약 1.0~3.0m) 약 150.0m 구간에 프레임 슬래브(π 루프슬래브)공법을 보조공법으로 적용하였다. 지반조건은 갱구부분의 약 150.0m 구간(테니스코트 방향)은 안산 각력암을 포함한 화산회질의 실트모래로 약고결의 점토퇴적물과 야구장구간의 계곡부 단구퇴적물 및 야구장 시공으로 인한 성토구간으로 구성되어 있다. 이 공법의 적용으로 인하여 본 현장에서는 터널굴착 작업과 무관하게 상부 시설물의 신속한 복구공사가

가능하였으며 시설물 운용의 휴지기간이 크게 감소되고 프레임 슬래브가 낮은 토피의 터널을 보호하여 터널의 안정성을 확보하고 동시에 기계굴착으로 인한 소음·진동 대책효과가 있었던 것으로 보고되고 있다. 그림 1과 그림 2는 일본의 신칸센 야에하라터널 공사 중 프레임 슬래브 공법이 적용된 구간에 대한 위치도 및 프레임 슬래브와 지지 구조물의 개략도를 보여주고 있다.

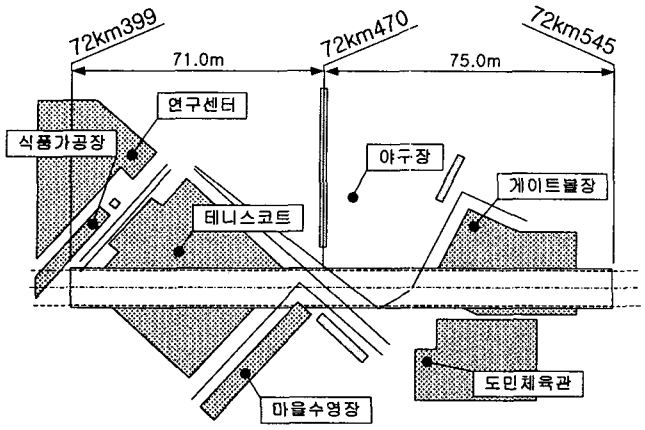


그림 1. 프레임 슬래브 공법 적용 위치도

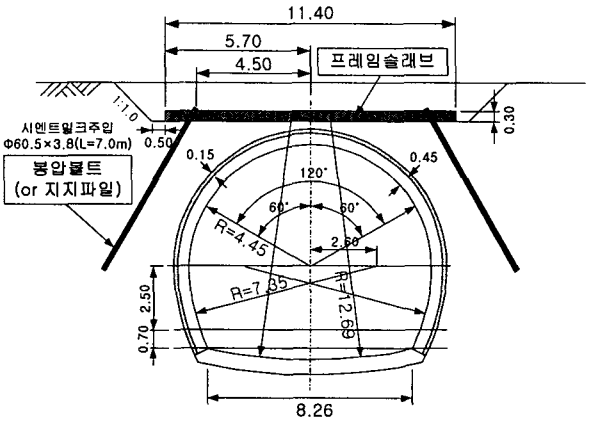


그림 2. 프레임 슬래브 및 지지구조물 설치도

2.2 시공방법 및 순서

프레임 슬래브의 시공방법 및 시공순서는 『굴착-프레임 슬래브시공-지지 구조물 설치-되메움(복공)-뒷정리(기존시설 복구)-터널시공』으로 이루어지며 일반적인 개착시공에는 존재하지 않는 프레임 슬래브 구조물 및 지지 구조물 설치 단계가 추가되며 특이할만한 사항은 개착부분 되메움이 완료된 후 상부 기존 시설물의 복구를 수행하고 터널시공이 이루어진다는 점이다. 프레임 슬래브 공법의 시공순서는 그림 3과 같다.

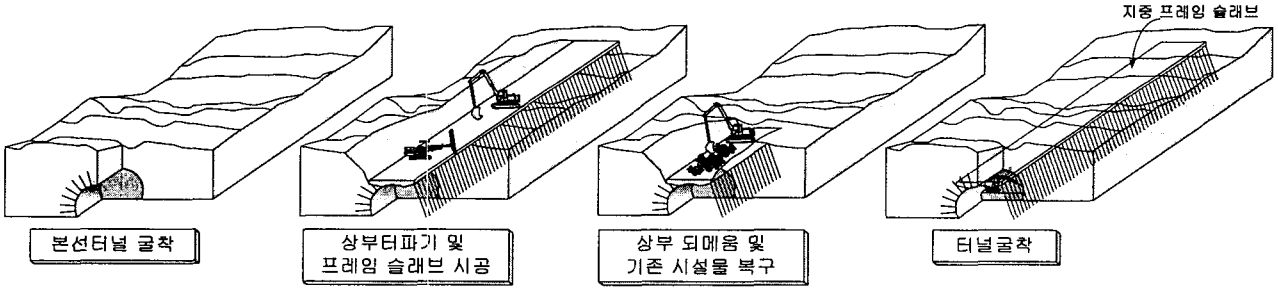


그림 3. 프레임 슬래브 공법 시공순서도

2.3 계측결과

신칸센 야에하라터널 공사 구간 중 프레임 슬래브 공법이 적용된 72km399부터 72km545까지 약 150m 구간에 대하여 갱내 15단면에서의 천단 및 내공변위 계측과 갱외 16단면에서의 프레임 슬래브 변위계측, 철근응력 계측, 지지파일 응력계측 및 지표면침하 계측이 수행되었으며 그림 4는 본 공사구간의 계측기 설치 위치도를 보여주고 있다.

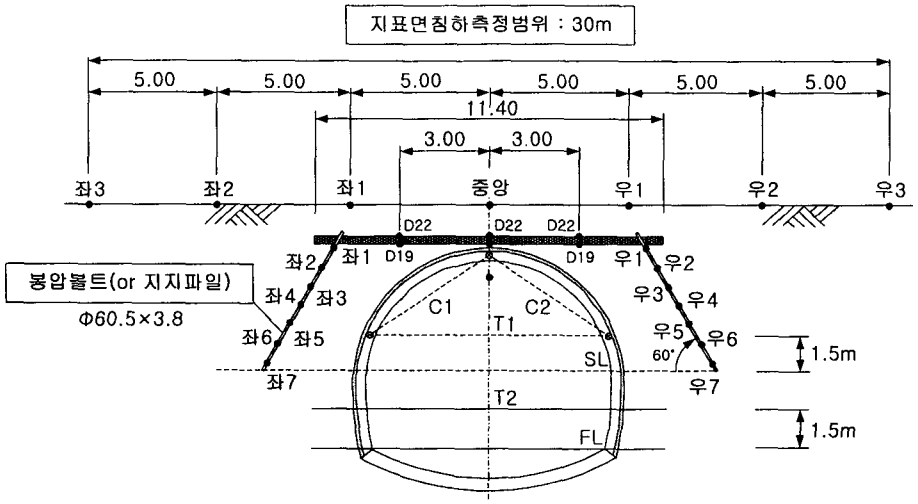


그림 4. 계측기 설치 위치도

그림 5는 천단변위 경시곡선을 나타내고 있는데 갱구부 쪽 72km430 위치에서 최대 약 5.0mm가 발생하였으나 막장 진행에 따라 야구장 흙쌓기 구간 및 도민체육관 근접구간인 72km510 위치에서 약 30.0mm에 이르렀다. 하반막장 통과 후에도 이러한 경향은 계속되어 약 35mm 정도까지 증가하다 수렴하는 경향을 보여 상부 시설물 하중이 터널의 안정성에 지대한 영향을 미치는 것으로 나타났으나 프레임 슬래브와 지지파일의 효과적인 설치로 외력이 충분히 분산되어 터널은 안전하게 시공되었다.

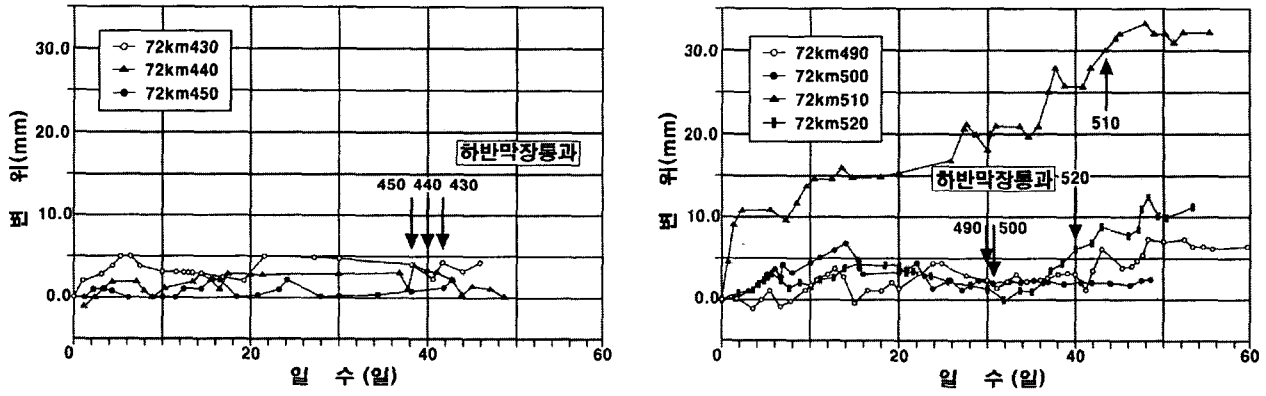


그림 5. 천단침하 경시곡선 발생경향

3. 프레임 슬래브 공법의 국내 적용성 검토

프레임 슬래브 공법의 국내 적용 가능성을 검토하기 위하여 ○○지역 고속도로 건설공사(Turn-Key 설계)의 설계사례를 고찰하고 구조물해석 및 터널 안정성 해석을 통하여 터널 및 주변지반의 안정성을 검토하였다.

3.1 현황 및 지반조건

프레임 슬래브 공법의 적용성 검토대상 구간은 터널의 상부 토피가 약 0~6.5m 정도로 기타의 보조공법을 병용하지 않고서는 시공시 터널의 안정성에 문제가 있을것으로 판단되는 지역이다. 터널은 대부분 풍화암 지반에 위치하고 있으며 주변조건은 주택지와 인접한 구간으로 개발제한구역인 그린벨트 지역이다. 특히 개착터널로 계획할 경우 주택지가 인접하여 굴착 및 토공작업으로 인한 진동, 소음, 먼지의 비산 등으로 인한 민원 발생과 자연 훼손이 우려되며 주변여건을 고려할 때 공사지역으로 장비의 진입로

개설이 곤란한 실정이다. 따라서 소형장비의 진입을 통한 프레임 슬래브 공법을 시공한 후 상부 지반의 조속한 복구와 주민 편의시설(테니스장)을 건립하고 횡방향으로 터널을 굴착하는 공법을 계획하였다. 그림 6과 7은 본 검토구간의 지반 개요도 및 프레임 슬래브 공법적용시 보강 개요도를 나타내고있다. 그림에서 보이는 바와 같이 터널이 통과하는 부분의 지반은 풍화암으로 구성되어 있고 터널상부 지반은 풍화토로 비교적 불량한 지반조건이다. 따라서 두께 0.75~1.37m의 프레임 슬래브를 설치하고 두께 2.3mm, ϕ114.3mm의 강관 파일을 지지 구조물로 선정하여 1일 굴진장 1.0m의 굴진속도로 링컷분할 굴착공법을 적용하도록 계획하였다.

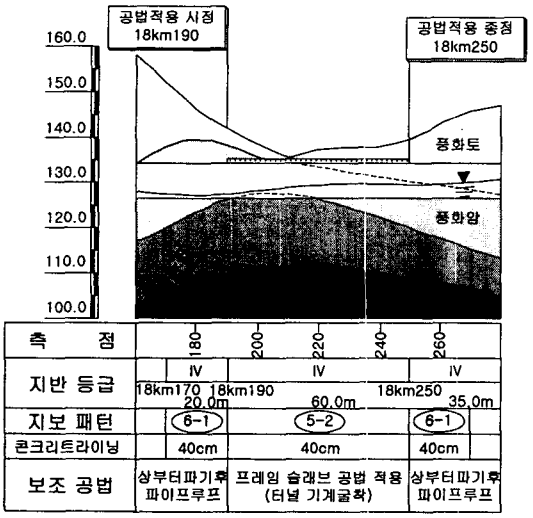


그림 6. 검토구간의 지반조건 개요도

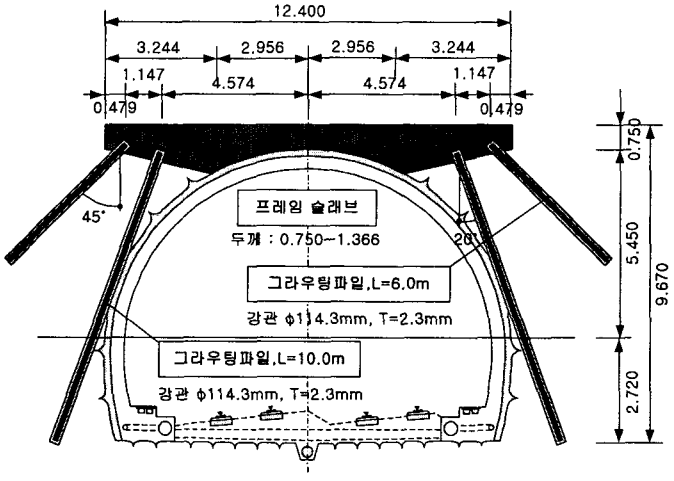


그림 7. 공법적용구간 보강 개요도

3.2 수치해석을 통한 구조물 및 터널 안정성 검증

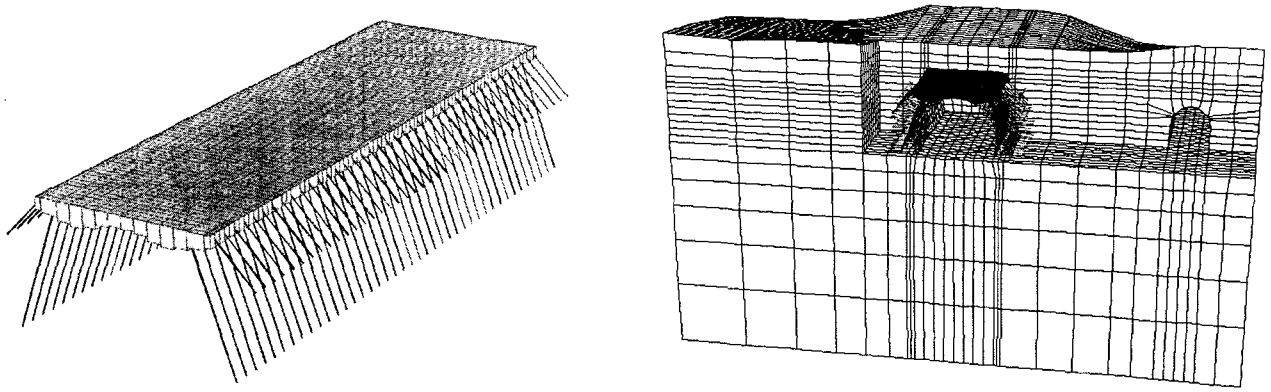
3.2.1 해석개요

그림 8에 나타난 바와 같이 프레임 슬래브 공법적용 60m 전구간을 모델링 영역에 포함시켜 시공단계를 고려한 3차원 구조 및 지반해석을 수행하였으며 이 구간 중 가장 취약한 단면을 선정하여 구조와 지반분야에 대한 2차원 엄밀해석을 수행하였다. 구조해석에 있어서는 프레임 슬래브를 포함하는 지지구조물의 안정성을, 지반해석에 있어서는 터널 및 상부지반의 안정성 검토를 주안점으로 설정하여 해석을 수행하였다.

해석 모델링에 있어서는 구조해석의 경우 3차원 해석은 굴착 진행시 상부 토피의 감소에 따른 토압의 감소와 슬래브 횡단 중앙부의 라이닝 타설로 인한 지점조건의 변동(2차원의 콘크리트 라이닝의 안정성 검토를 수행하여 하중분담에 대한 본선 라이닝의 안정성을 검토)으로 안정성이 증가되므로 프레임 슬래브 시점구간에 초기 굴착 진행시를 3차원 모델링 함으로써 안정성을 확보하였으며 보수적인 2차원 해석은 막장면의 붕괴등 단면에 최대응력 발생조건을 상정하여 토압이 가장 큰 단면에 대해 그라우팅 파일을 지점으로 하는 연속보로 해석하였다.

지반해석의 경우 3차원 해석은 프레임 슬래브 공법을 적용하는 60m 전구간에 대하여 지형 및 지반조건을 고려하고 터널의 시공순서 및 보강순서를 세부적으로 반영하여 모델링하였으며 2차원 해석의 경우 가장 취약단면으로 판단되는 프레임 슬래브 설치구간의 중간지점 단면을 선정하여 해석을 수행하였다. 그림 8은 구조 및 지반해석에 적용된 해석요소망을 보여주고 있는데 구조해석에 있어서 프레임 슬래브는 3차원 쉘요소로 모델링하였고 지반해석에 있어서는 프레임 슬래브의 자중과 시공완료후의 거동을 적절히 평가하고자 3차원 고체요소로 모델링하였으며 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따르는 탄소성 재료로 프레임 슬래브 및 기타 구조물은 탄성 재료로 간주하였다. 표 1은 해석에 적용된 지반 및 보강

재의 입력특성치를 보여주고 있다.



(a) 구조해석 요소망　　(b) 지반해석 요소망

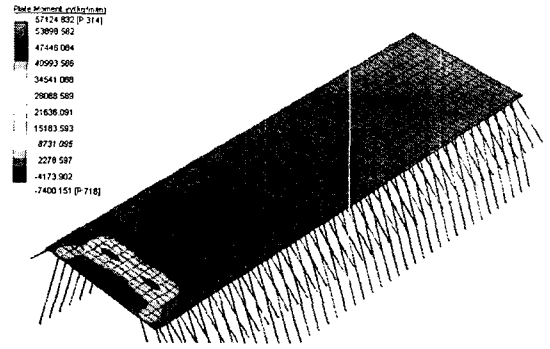
그림 8. 해석에 적용된 요소망

표 1. 해석에 적용된 지반 및 보강재의 입력특성치

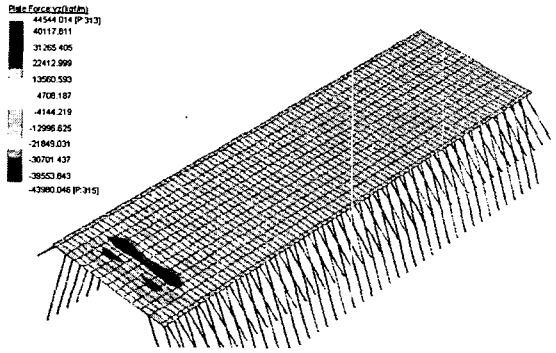
구　　분	탄성계수 ($tonf/m^2$)	점착력 ($tonf/m^2$)	내부마찰각 (°)	포아슨비	단위중량 ($tonf/m^3$)
보 통 암	900,000	350	38	0.23	2.50
연　　암	200,000	100	32	0.28	2.40
풍 화 암	100,000	30	23	0.35	2.00
연성숏크리트	500,000	N/A	N/A	0.20	2.35
강성숏크리트	1,500,000	N/A	N/A	0.20	2.35
록 볼 트	20,000,000	N/A	N/A	0.19	N/A

3.2.2 프레임 슬래브에 대한 구조 해석결과

그림 9는 3차원 구조해석 결과로서 프레임 슬래브에 발생될 것으로 예상되는 모멘트 및 전단력도이다. 시점 및 종점구간의 종·횡방향 거동양상은 각각 내민보와 연속보의 거동특성을 보일 것으로 분석되었으며 프레임 슬래브 시·종점부 10m 구간에 대해서는 종방향으로도 강하게(D25@125) 보강하는 것이 바람직할 것으로 분석되었다. 또한 그림 10은 2차원 구조해석 결과에 따른 프레임 슬래브의 중앙부 및 단부의 단면력 발생경향을 보여주고 있는데 모멘트 발생경향은 횡방향(토피고 : 6.710m)의 경우 단부에서 최대 약 184.544tonf·m, 종방향의 경우 최대 약 45.191tonf·m가 발생하였으며 전단력의 경우 횡방향(토피고 : 6.710m)의 경우 단부에서 최대 85.790tonf, 종방향의 경우 최대 약 62.082tonf가 발생하였다. 해석결과 원지반 위에 타설된 프레임 슬래브의 거동은 프레임 슬래브 시점부와 종점부 시공시 가장 불리한 것으로 나타났다. 이는 지형조건상 되메움토가 크기 때문인 것으로 분석되었다. 프레임 슬래브의 거동은 원지반의 지지현상으로 인하여 3변지지 슬래브와 유사한 거동양상을 나타내었다. 따라서 횡방향 철근배근은 정모멘트 구간(중앙부)에 D29@100, 부모멘트 구간(단부)에 D32@100을 배근하는 것이 바람직할 것으로 분석되었다.

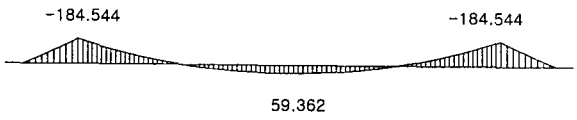


(a) 모멘트



(b) 전단력

그림 9. 모멘트 및 전단력 발생경향(3차원)



(a) 모멘트

(b) 전단력

그림 10. 모멘트 및 전단력 발생경향(2차원)

3.2.3 지반 해석결과

그림 11과 12는 터널의 굴착에 따른 지반 변위 발생경향과 지반 최대주응력 분포경향을 나타내고 있는데 프레임 슬래브의 설치로 인하여 터널 상부의 변위 및 지반응력의 집중 현상도 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그림 13과 14에서는 프레임 슬래브 공법 적용구간 중 단부로 부터 약 25m 지점에서 최대 변위가 발생될 것으로 예상되었으며 이 값들은 천단변위가 약 1.0mm의 내공변위가 약 0.36mm 정도일 것으로 분석되었다.

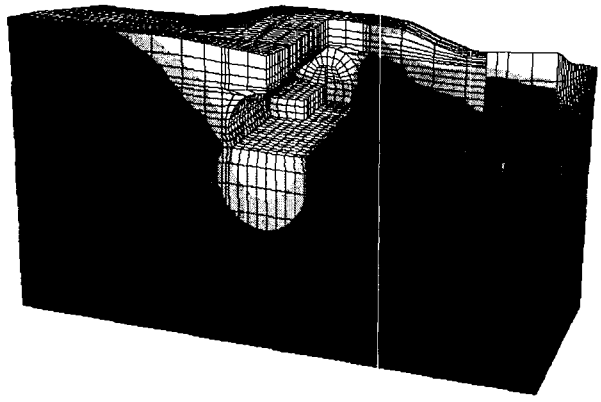


그림 11. 지반변위 발생경향(3차원)

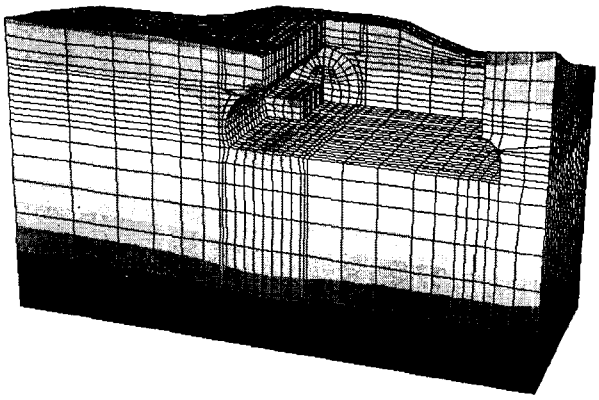


그림 12. 지반 최대주응력 발생경향(3차원

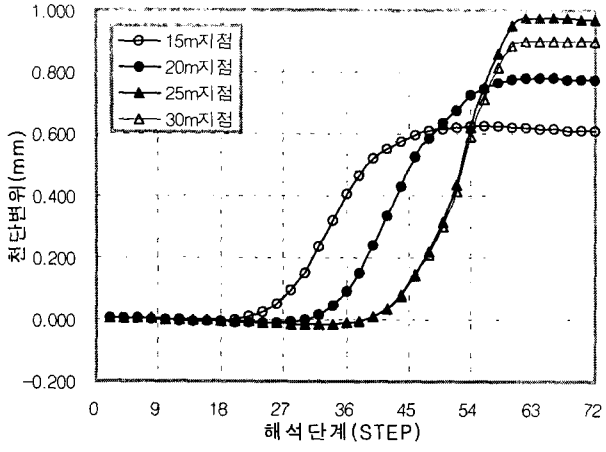


그림 13. 천단변위 발생경향(3차원)

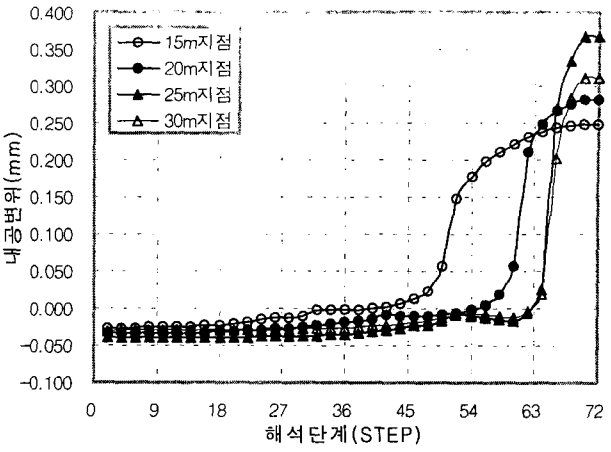


그림 14. 내공변위 발생경향(3차원)

프레임 슬래브 설치에 따른 터널 지보재의 최대 휨압축응력 및 지지구조물로 작용하는 강관파일의 축력 발생경향을 나타내는 그림 15와 16을 살펴보면 숏크리트 최대 휨압축응력은 약 7.2kgf/cm^{2}이 발생하였으며 강관 파일의 축력은 약 17.54~19.48tonf 정도로 발생하여 프레임 슬래브와 일체거동으로 인한 효과적인 응력 재분배가 이루어져 터널의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

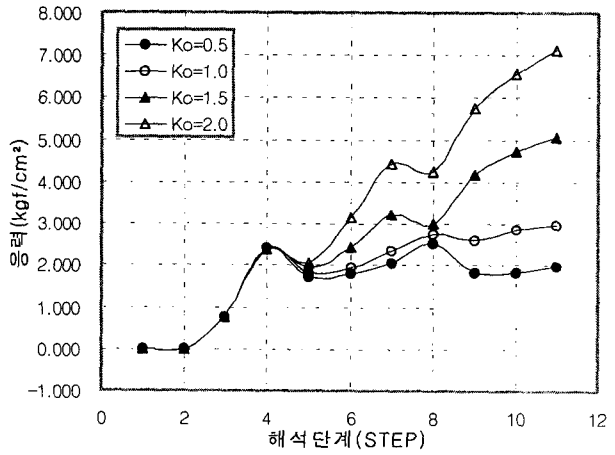


그림 15. 숏크리트 휨압축응력 발생경향(2차원)

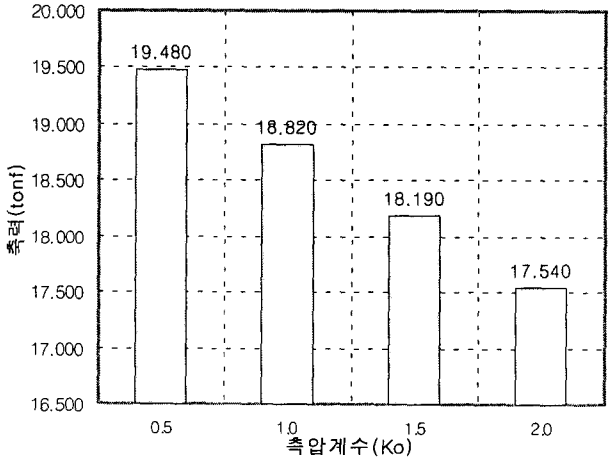


그림 16. 강관파일 축력 발생경향(2차원)

3.2.4 프레임 슬래브 적용효과 비교

그림 17은 2차원 해석결과를 이용하여 프레임 슬래브 공법 적용 유·무에 따른 터널 및 상부지반의 보강효과를 살펴보기 위하여 프레임·슬래브 공법 미적용의 터널 천단변위, 내공변위, 휨압축응력, 전단응력 및 록볼트 축력을 프레임 슬래브 공법 적용의 경우로 정규화하여 보여주고 있는데 그림에서 보이는 바와 같이 프레임 슬래브 공법 미적용시는 적용시에 비하여 터널 천단 및 내공 변위 발생면에서는 각각 최대 약 6.0배 및 4.8배의 변위 증가율을 보이며 휨압축응력, 전단응력 및 록볼트축력 발생면에서는 각각 최대 약 6.8배, 11.5배 및 1.9배의 증가율을 보였다. 이러한 경향은 프레임 슬래브 공법 적용 유·무에 따른 지표침하 발생경향을 나타내는 그림 18을 보면 더 분명하게 관찰할 수 있는데 프레임 슬래브 공법 미적용시 최대 약 8.5mm의 변위가 발생하였는데 비하여 프레임 슬래브 공법 적용으로 인하여 지표침하는 최대 약 1.86mm로서 프레임 슬래브 공법 미적용시 발생될 지표침하량의 약 20% 정도만

발생할것으로 분석되어 프레임 슬래브는 지표면의 안정성 확보에 크게 기여할 것으로 판단되었다.

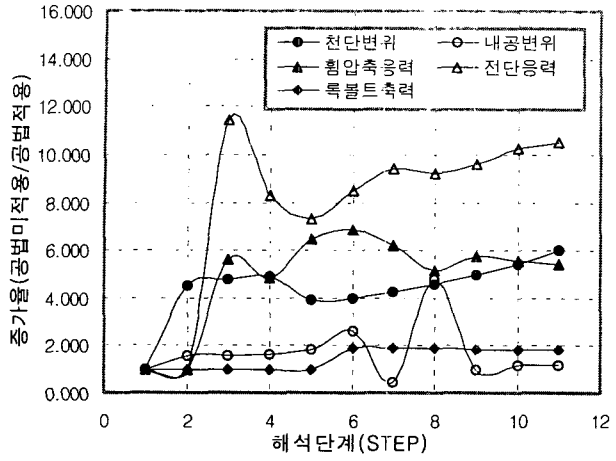


그림 17. 변위 및 응력비 발생경향(2차원)

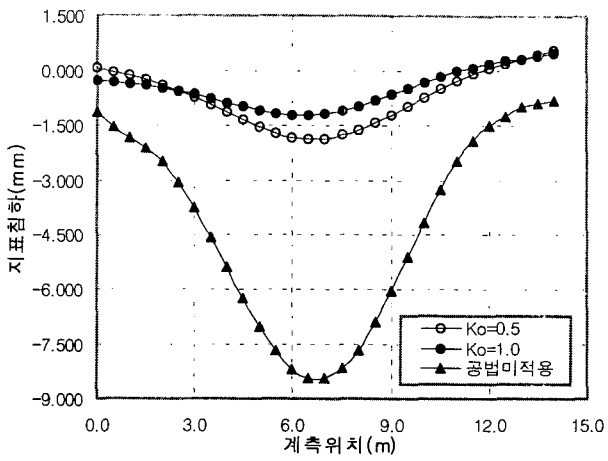


그림 18. 지표침하 발생경향(2차원)

4. 결론

본 연구에서는 토피가 아주 작은 천층터널의 시공법으로서 프레임 슬래브 공법의 적용성 평가의 일환으로 수치해석을 통한 구조물 및 지반의 안정성을 평가하고 프레임 슬래브 공법 적용에 따른 터널 및 지반보강 효과를 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 장비 진입과 굴착토사 운반이 어려운 천층터널의 경우에는 프레임 슬래브를 적용하는 터널공법이 아주 유효한 시공법이 될 수 있음을 알 수 있었다.
- 프레임 슬래브는 내민보 거동과 연속보 거동을 보이는 경향을 나타냈으며 발생하는 응력도 되메움 토사의 높이에 지배되기 때문에 되메움 토사가 아주 크게 될 경우에는 막대한 보강이 필요할 것으로 분석되었다.
- 프레임 슬래브를 적용함으로써 지표침하를 크게 줄일 수 있으며 되메움 후의 터널 굴착시에도 안정된 터널 공사가 가능할 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 日本トンネル技術協會誌(1993), トンネルと地下 vol. 24, pp. 947-954
2. Desenritter, S. And Zeidler, K.(1992), "The Schürzeburg Tunnel, Oberrieden," *Tunnel*, Feb., pp. 58-64
3. Deinhard, M., Prinz, H. And Zeidler, K.(1991), "Oberrieden Road Tunnel : Variations on an NATM Theme," *Tunnels and Tunnelling*, Nov., pp. 49-51
4. Sauer, G.(1988), "When an Invention is Something New: from Practice to Theory in Tunnelling," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section A, Mining Industry, Vol. 97, Apr., pp. A94-A108.
5. Sauer, G.(1992), "The Schürzeberg Tunnel. Oberrieden," Sept., *Proceedings, First International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures*, Ljubljana, Slovenia, Chap.2, pp. 151-165