

수치해석적 접근을 통한 2Arch 터널의 거동양상 고찰 A Study on Behavior of 2-Arch Tunnel by Numerical Approach

김상균¹⁾, Sang-Gyun Kim, 박동욱²⁾ Dong-Uk Park

¹⁾(주) 석탑엔지니어링 지반공학부 이사, Director, Soktop Engineering Co., Ltd

²⁾(주) 석탑엔지니어링 지반공학부 과장, Manager, Soktop Engineering Co., Ltd

SYNOPSIS : The behaviour of ground induced by tunneling of 2arch tunnels may differ from the one caused by usual type tunnels. This paper describe the behaviour created by the size of pilot tunnel and the condition on the construction method of center pillar. Also, loads acting on the supports of the first tunnel and the center pillar during the excavation of second tunnel is investigated by numerical analyses. The results of numerical analyses are compared to the data records of measurement results, i.e. force on the support system and ground displacement.

Key words : 2arch tunnel, pilot tunnel, center pillar, support system, measurement results

1. 서론

2Arch 터널은 개착공법 적용이 어려운 도심지 지하철 정거장 및 환경훼손 저감 등을 위해 도로터널에 시공되고 있으며 향후 환경 및 시공조건을 예상할 때 적용이 늘어날 전망이다. 2Arch 터널은 이격거리가 매우 짧은 2차로 병렬터널로 볼 수 있으며 이로 인해 충분한 이격거리를 확보한 터널과 달리 굴착시 터널상호간에 미치는 영향이 크다. 터널형상에 있어서도 2Arch 터널은 일반적인 병렬터널에 비해 중앙 상부의 안정성이 취약하므로 벽체를 설치하여 구조적 안정성을 확보하는 형태를 보인다. 2Arch 터널의 시공실적이 많은 일본의 경우는 다수의 시공경험과 해석 그리고 계측 등을 통해 터널 굴착에 따른 거동을 파악하여 이를 토대로 개선된 설계·시공방안을 적용하고 있는 반면에 국내의 경우는 중앙벽체 시공 및 방·배수 등 기존의 문제점에 대한 뚜렷한 개선방안의 수립이 미흡한 실정이다. 현재 일본과 국내에서 적용되고 있는 2Arch 터널 주된 차이는 중앙터널 굴착단면 및 벽체 제원, 중앙터널 상부지지 조건, 지보패턴계획 그리고 방·배수설계에 있는 것으로 파악되었다. 일본의 경우, 중앙터널 및 벽체의 폭과 높이를 그림 1과 같이 지반 및 시공조건등에 따라 다양하게 적용하고 있으며 평균적인 수치는 중앙터널 폭 및 높이가 4.8m 및 5.4m 이고 벽체의 폭과 높이는 2.1m 와 4.5m 이다. 이에 비해 국내의 경우는 중앙터널 굴착 단면적이 일본보다 2배 이상 크고 벽체의 두께는 상대적으로 작다.

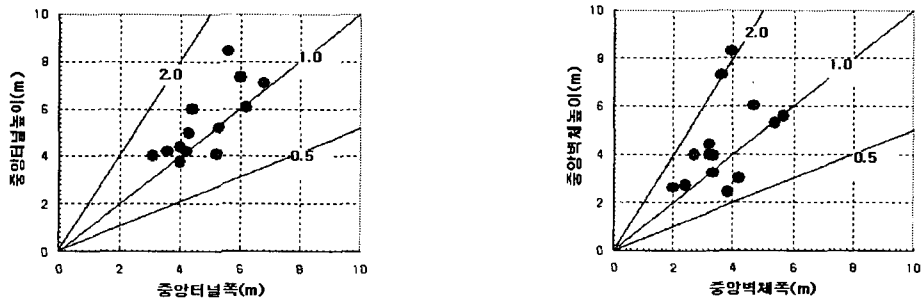


그림 1 일본 중앙터널 굴착단면 및 벽체제원

국내에서 시공되는 터널은 거더부를 중앙터널 천단까지 시공하며 이때, 방수막을 미리 설치하는 순서를 적용하는데 비해 일본의 경우에는 상부거더의 천단지지 없이 벽체만을 시공하고 방수막은 본선터널 굴착 완료후에 설치한다. 일본의 지보패턴계획은 선행터널 강지보제원과 슛크리트 두께를 후행터널에 비해 증대시키거나 후행터널 굴착에 의해 선행터널로 전이되는 하중을 감소시키기 위해 선행터널측에서 중앙부로 추가 록볼트 등을 설치하는 반면 국내의 경우, 아직까지 선행터널과 후행터널의 지보패턴을 동일하게 적용하고 있으며, 선행터널 측에서 후행터널 측으로 보강계획을 수립한 사례도 많지 않다. 중앙벽체의 제원에 있어서는 일본의 경우, 계측 및 해석자료를 바탕으로 지반 및 토피조건에 따라 벽체에 작용하는 하중을 산정하여 벽체두께를 결정하고 하부지반의 지지력을 파악하여 기초폭을 결정함으로써 중앙벽체의 중요성을 감안한 설계를 시행하고 있는 반면에 국내의 경우에는 중앙벽체에 작용하는 하중 산정 및 단면설계에 대한 면밀한 검토가 이루어진 사례가 없는 실정이다. 본 논문에서는 국내에서 시공된 기존 2Arch 터널(그림 2)과 중앙터널 단면을 축소한 2Arch 터널(그림 3)의 굴착에 따른 거동, 중앙터널 상부지지조건 및 좌·우측 본선터널의 굴착순서에 따른 영향 그리고 지층조건에 따라 중앙벽체에 작용하는 하중을 수치해석을 통해 파악하였으며 이를 기존의 계측사례와 비교하였다.

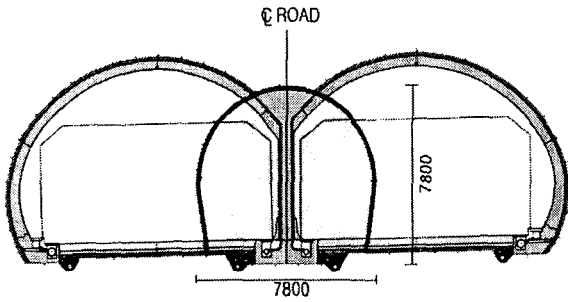


그림 2 기존 2Arch 도로터널 단면

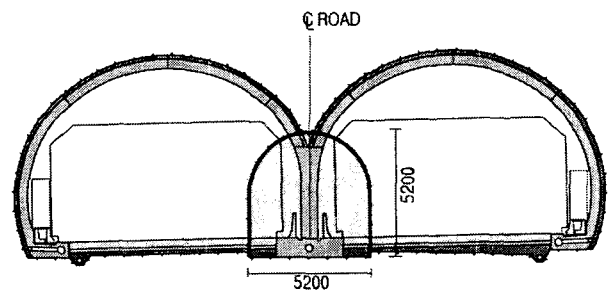


그림 3 중앙터널을 축소한 도로터널 단면

2. 해석 모델링 및 입력물성치

터널의 굴착에 따른 거동을 파악하기 위해 사용된 해석 Code는 일반적인 2차원 및 3차원 범용해석 프로그램으로 에머랄드 소프트사에서 개발한 iFEM이며 지반구성모델은 Mohr-Coulomb 탄·소성모델, 초기 축압계수는 1.0과 2.0을 적용하였다. 기존 2Arch 터널 및 중앙터널을 축소한 2Arch 터널의 개략적인 굴착시공순서는 그림 4와 같고 2차원 및 3차원해석 요소망은 그림 5 및 그림 6과 같이 요소의 분할수 및 크기로 인한 영향을 최소화하기 위하여 터널 및 터널주변 영역의 요소망을 충분히 작게하고 터널에서 멀어질수록 일정 비율로 요소 크기를 증가시켜 모델링 하였다. 입력물성치는 표 1과 같이 지보패턴 분류에 따른 일반적인 값을 적용하였다.

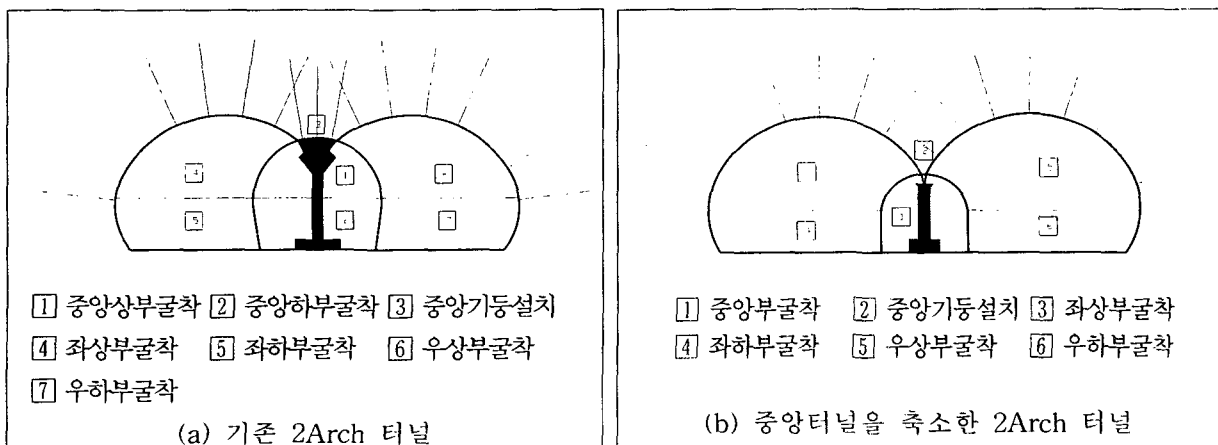


그림 4 굴착시공순서

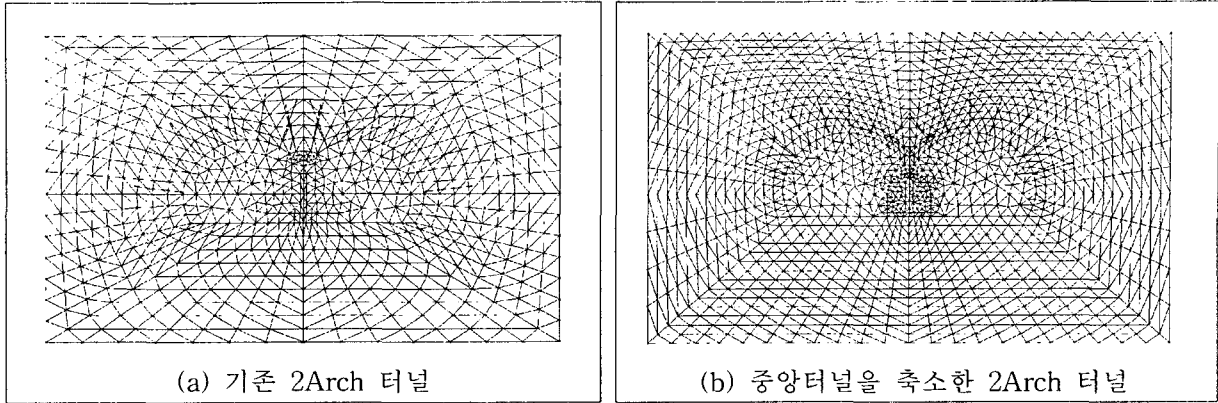


그림 5 2차원 해석요소망

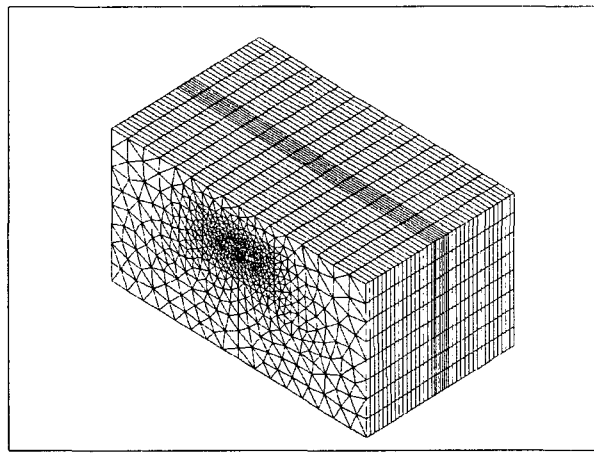


그림 6 중앙터널 축소단면 3차원 해석요소망

표 1 입력물성치

구 분	탄성계수 (t/m ²)	단위중량 (t/m ³)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (Φ)	포아송비(ν)	
Type II (보통암)	500,000	2.5	100.0	40	0.22	
Type III (연암)	100,000	2.4	60.0	38	0.25	
Type IV (풍화암)	50,000	2.2	30.0	35	0.30	
Type V (풍화토)	6,000	2.0	3.0	30	0.35	
숏크리트	연 성	500,000	2.5	N/A	N/A	0.2
	강 성	1,500,000	2.5	N/A	N/A	0.2
록 볼 트 (SD30)	21,000,000	N/A	N/A	N/A	0.25	
중앙기둥(fck=240kg/cm ²)	2,300,000	2.5	100	35	0.17	

3. 중앙터널 굴착단면 크기에 따른 영향

2Arch 터널의 시공성을 감안하여 기존 중앙터널단면의 반단면 굴착과 축소단면의 전단면 굴착에 대한 해석결과는 그림 7 ~ 그림 10과 같다. 전단면 굴착임에도 불구하고 중앙터널 축소단면이 기존단면에 비해 축압계수 1.0 인 경우, 지반변위는 22% 지보재 단면력은 32%가 감소하였으며, 축압계수 2.0 인 경우는 지반변위는 64% 지보재 단면력은 30%감소하였다. 이로부터 중앙터널 단면적이 작을수록 안정성 확보에 유리하며 반단면 굴착을 전단면 굴착으로 변경 가능하므로 터널굴착단면 축소에 따른 시공성 저하요인을 줄일수 있는 것으로 나타났다.

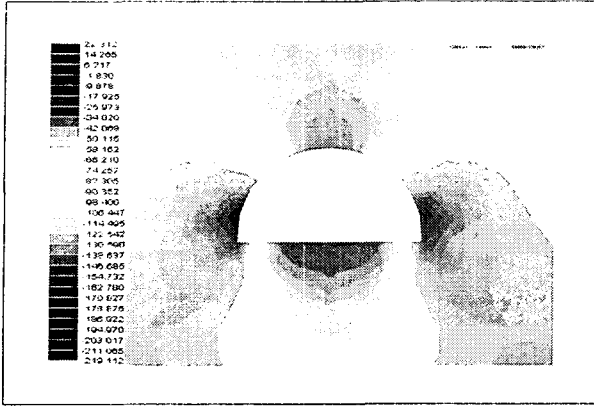


그림 7 기존 2Arch 중앙터널 반단면 주응력도

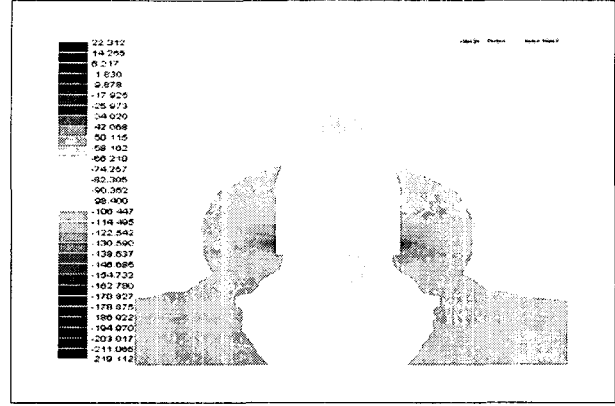


그림 8 중앙터널을 축소한 2Arch 중앙터널 주응력도

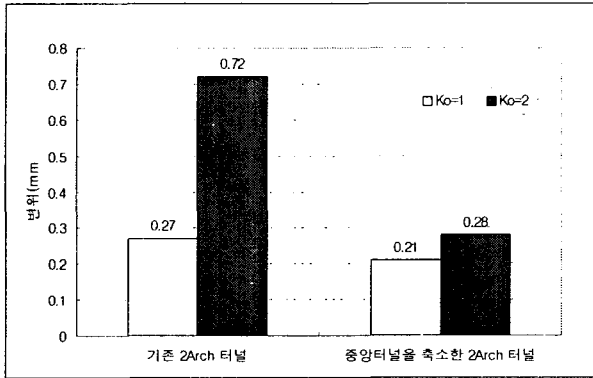


그림 9 축압계수에 따른 변위

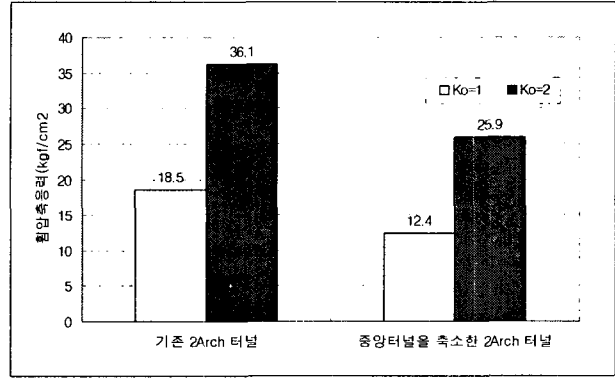


그림 10 축압계수에 따른 숏크리트응력

4. 중앙터널 상부 지지조건에 따른 영향

중앙터널 상부를 지지하는 기존 2Arch 터널은 적절한 하중분담율을 적용하면 2차원 해석과 3차원 해석의 차이는 크지 않지만 벽체시공시에 중앙터널 상부를 지지하지 않고 본선터널 굴착시에 벽체를 지보재의 지지점으로 활용하는 경우는 터널굴착시 3차원적 거동에 따른 종방향 Arching 현상에 의해 지반변위 및 지보재 단면력이 달라진다. 그러므로 중앙터널 상부미지지에 따른 영향을 보다 적절히 파악하기 위해서는 3차원 해석이 필요하므로 먼저 기존 터널단면 및 중앙터널 축소단면에 대한 2차원 해석을 수행하였으며 중앙터널 축소단면에 대해서는 2차원 해석과 동일한 토피 및 지층물성치를 적용한 3차원 해석을 실시하여 2차원 해석결과와 비교하였다. 먼저 2차원 해석 결과에 있어서는 중앙벽체의 상부 지지시와 미지지의 변위에 있어서는 상부 지지시 중앙터널 변위가 미지지의 경우보다 작게 나타났으며 본선터널부의 변위는 상부미지지의 중앙터널 축소단면이 작게 나타났다. 중앙벽체의 상부 지지시와 미지지의 지보재 응력검토 결과에 있어서는 중앙터널 및 본선 터널에 발생하는 지보재 응력이 축소된 2Arch 터널 단면이 25~32% 정도 유리하게 나타났다.

중앙터널 축소 단면에 대한 3차원 해석결과에 있어서는 종방향 Arching 현상에 의해 상부 미지지의 2차원 해석결과와 비교하여, 변위는 중앙터널부 27% 본선터널부 약 5%, 숏크리트 응력은 8~12% 로 감소하는 것으로 나타났다. 3차원 해석결과를 중앙터널 상부지지시와 비교할 때, 중앙터널에 발생하는 변위는 1.78mm 로 2차원 해석결과에 비해 상부지지조건에 따른 변위차이가 감소하는 것으로 나타났다.

이로부터 굴착구간 후방에 중앙벽체에 지지된 지보재로의 하중전이 양상이 나타남을 알 수 있으며 중앙터널 상부 미지지의 터널굴착에 따른 영향을 검토하기 위해서는 실제 시공조건을 보다 적절히 반영할 수 있는 3차원 해석이 필요한 것으로 파악되었다.

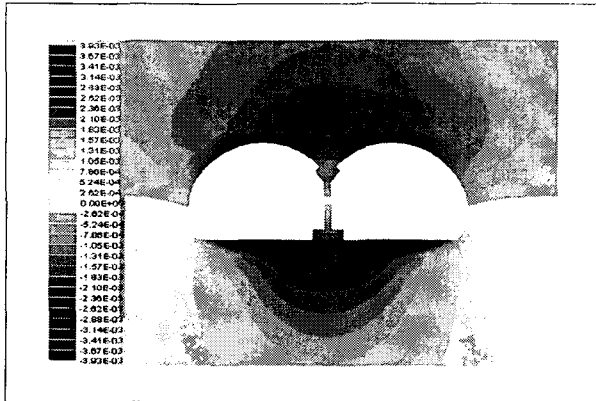


그림 11 기존 터널 상부지지시 변위도

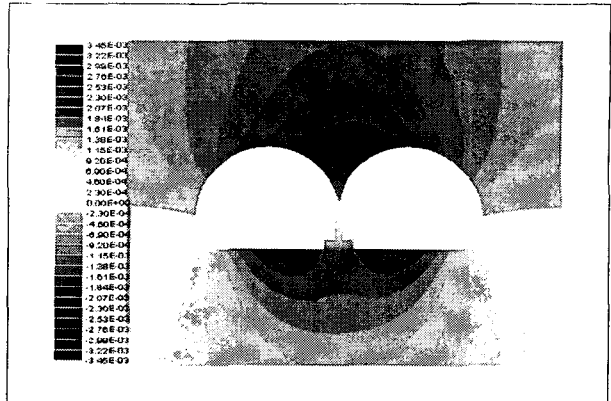


그림 12 중앙터널 축소단면 상부미지지시 변위도

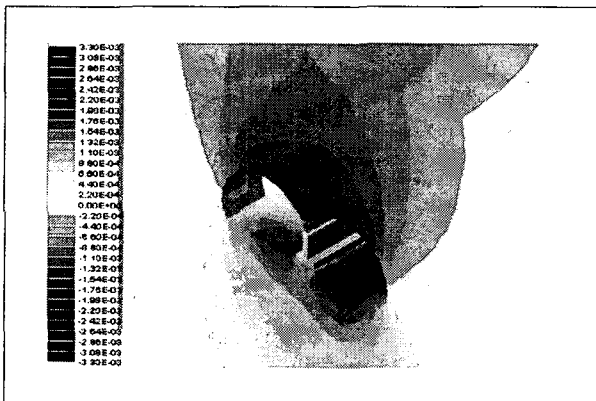


그림 13 중앙터널 축소단면 3차원 변위도

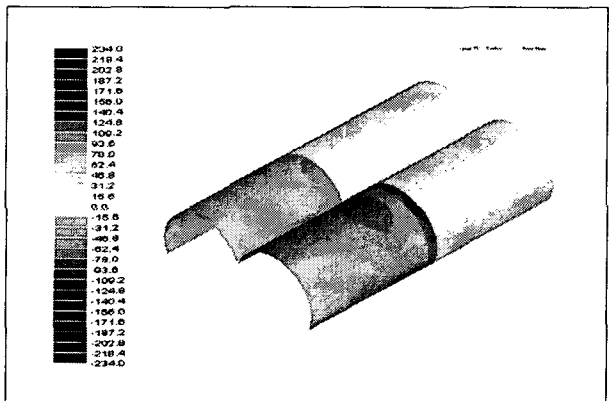


그림 14 중앙터널 축소단면 3차원 슛크리트 응력

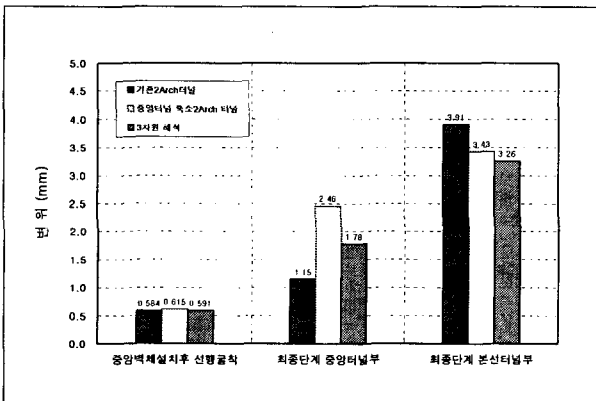


그림 15 중앙터널 및 본선터널 변위

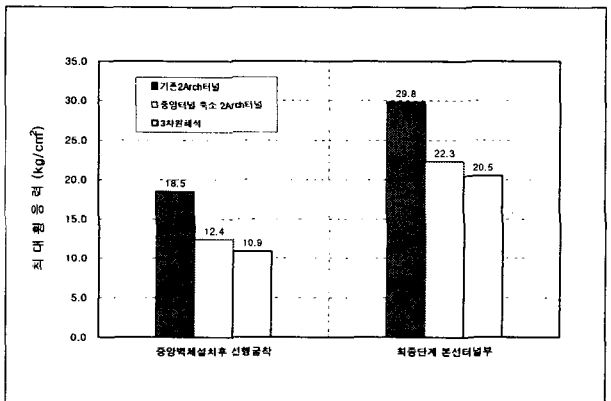


그림 16 중앙터널 및 본선터널 슛크리트응력

5. 굴착순서에 따른 지보거동 해석

일반적인 2차로 병렬터널은 충분한 이격거리를 확보하여 터널 상호간의 영향이 없으나 2Arch 터널은 굴착순서에 따라 선행 및 후행터널 거동양상이 상이하다. 선행터널의 경우, 굴착 및 지보재 설치가 완료되어 변위수렴 후에도 후행터널 굴착으로 인해 Arching 현상이 제거되어 선행터널부에 추가 변위 및 하중이 발생하게 된다. 이와 같은 후행터널굴착시 선행터널에 추가로 발생하는 변위 및 지보재 단면력을 파악하기 위한 수치해석을 실시하였다.

해석 결과 선행터널측 변위가 선행터널 굴착이 완료되어 수렴된 이후 후행터널 굴착시에 지반조건에 따라 그림 19와 같이 보통암층은 약 10~19%, 풍화암층의 경우는 약 15~27% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 지보재 단면력에 있어서는 후행터널 굴착에 의해 선행터널에 보통암층은 약 10~19%, 풍화암층

의 경우는 약 15~27% 정도의 추가하중이 발생하는 것으로 나타났다.

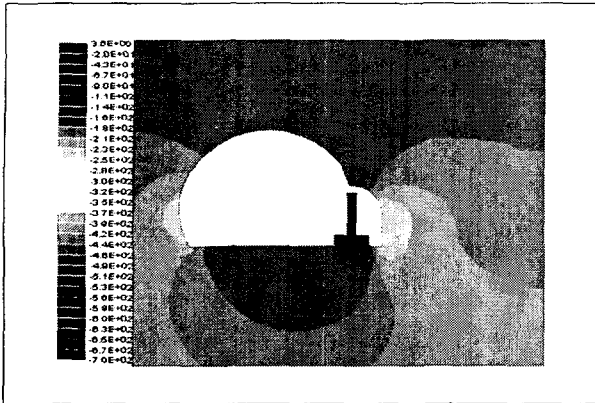


그림 17 선행 터널굴착시 지반응력분포

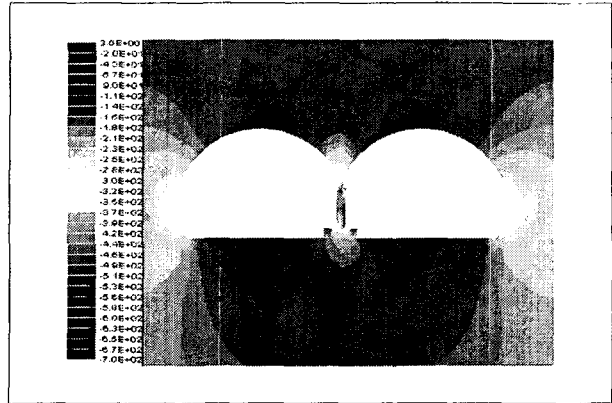


그림 18 후행 터널굴착시 지반응력분포

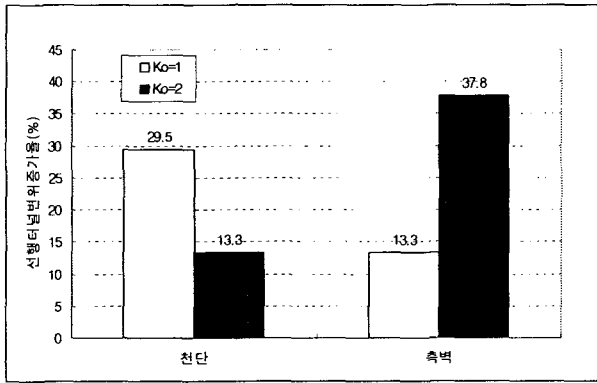


그림 19 축압계수에 따른 선행터널 변위증가율

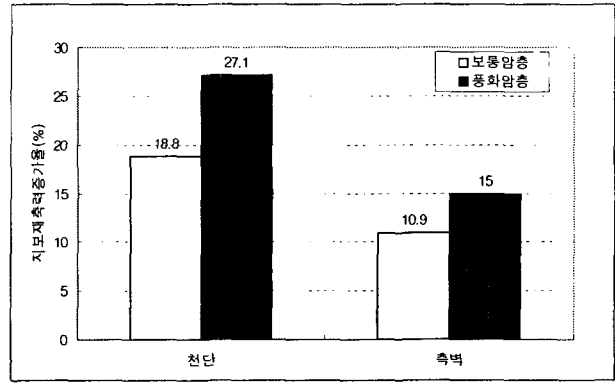


그림 20 지반조건에 따른 선행지보재 축력증가율

이와 같은 결과는 일본의 계측사례에서 강지보 축력 계측결과, 그림 21과 같이 선행터널 변위수렴 후 후행터널굴착에 의해 30%정도의 추가하중이 측정된 것과 유사한 경향을 보이고 있으며 위치에 따른 추가하중의 크기에 있어서도 수치해석 결과와 계측결과가 비슷하게 나타났다.

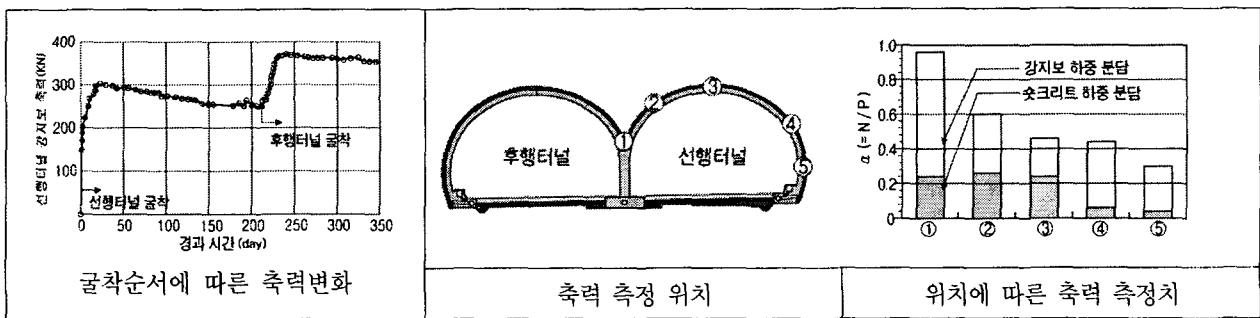


그림 21 일본 2Arch 터널 계측결과

6. 중앙벽체의 하중검토

2Arch 터널 중앙벽체의 기능을 감안하면, 시공단계별 하중작용 메카니즘 및 지반조건에 따른 하중크기 파악이 매우 중요하다. 기존의 계측사례에 의하면 토사, 풍화암과 같이 지층이 연약한 경우, 중앙벽체에 작용하

는 하중의 크기는 그림 22과 같이 토피(H) 및 터널폭(D)에 따라 하중작용폭과 높이를 결정하고 하중(P)을 산정할 수 있는 것으로 보고되었으며 암반지층의 경우는 아직까지 중앙벽체에 작용하는 하중에 대한 계측자료가 없는 실정이다. 본 논문에서는 지층조건에 따라 중앙벽체에 작용하는 하중을 파악하기 위해 중앙벽체와 주변지반의 탄성계수비(중앙벽체 탄성계수/주변지반의 탄성계수)을 변화시켜 수치해석을 실시하였다.

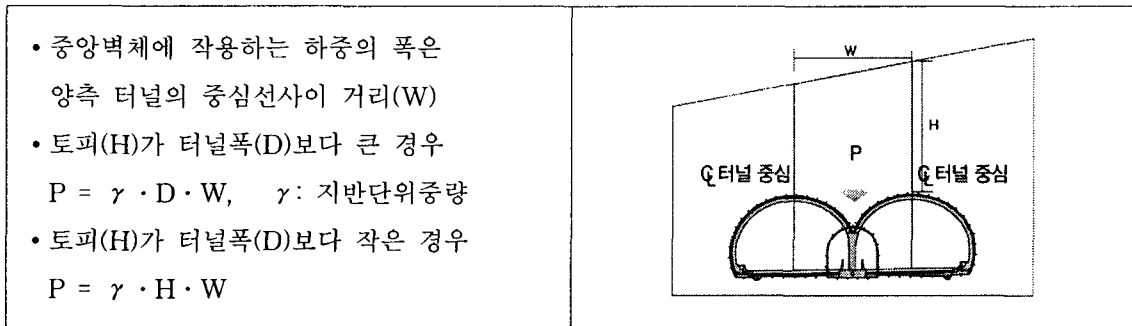


그림 22 2Arch 터널 중앙벽체에 작용하는 하중(Matsuda, 1997)

해석결과, 지반조건이 양호한 경우 (탄성계수비가 작은 경우) 실제 토피고에 따른 이론치 하중 보다 작은 하중이 중앙벽체에 작용하며, 지반조건이 불량한 경우 (탄성계수비가 큰 경우) 토피고 1.0D 하중에 근접하는 하중이 중앙벽체에 작용하는 것으로 나타났다.

표 2 지반조건에 따른 중앙벽체에 작용하는 하중

토피고	실제토피고에 따른 하중(ton)	탄성계수비 1 (하중비)	탄성계수비 10 (하중비)	탄성계수비100 (하중비)
0.5D	346	214 (0.62)	372 (1.07)	465 (1.34)
0.75D	503	264 (0.52)	474 (0.94)	540 (1.07)
1.0D	664	318 (0.48)	571 (0.86)	703 (1.05)

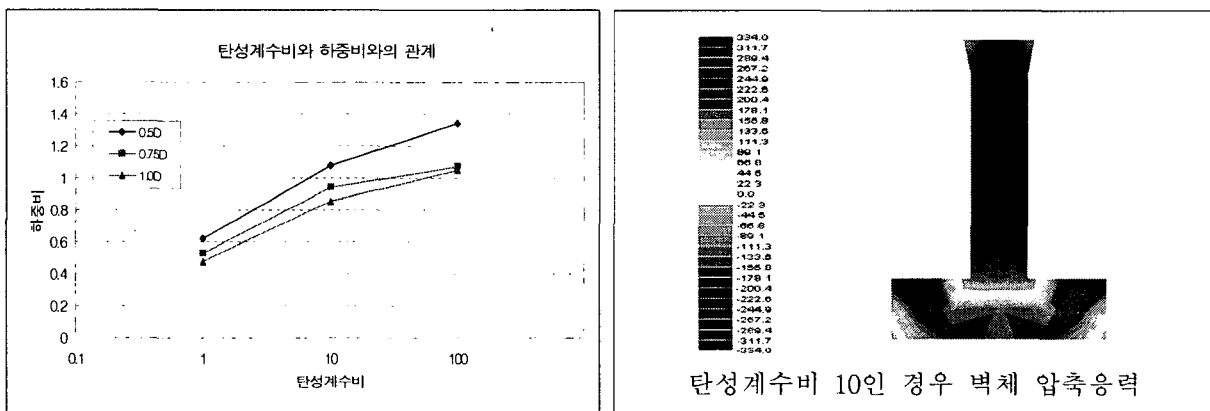


그림 23 2Arch 터널 중앙벽체에 작용하는 하중

7. 결론

국내의 경우, 지하철 정거장 및 도로터널에서의 적용 시공실적에 비해 아직까지 2Arch 터널 굴착에 따른 거동양상을 반영한 설계가 이루어지지 못하고 있어 기존의 시공 및 유지관리상의 문제점에 대한

개선이 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 2Arch 터널의 거동특성을 파악하기 위해 중앙터널 단면축소 및 상부지지조건, 굴착순서에 의한 영향 그리고 지층조건에 따라 중앙벽체에 작용하는 하중을 수치해석을 통해 파악하였다.

중앙터널 굴착단면을 작게 할수록 안정성 확보에 유리한 것으로 나타났으며 이로 인해 중앙터널 상부를 지지하지 않은 상태에서 본선터널을 굴착하는 경우에도 기존 터널단면을 적용하고 상부지지후 본선터널을 굴착하는 경우에 비해 안정한 것으로 나타났다. 중앙터널 굴착단면 크기 및 상부지지 조건은 터널의 안정성 뿐만아니라 시공성 및 방·배수 설계등에 있어서도 중요한 사항이므로 단면설계시 굴착시공성이 확보되는 한도 내에서 적극적으로 단면축소를 검토할 필요한 것으로 판단된다. 굴착순서에 따른 해석결과는 동일한 토피 및 지층조건하에서도 선형터널에서의 변위 및 지보재 단면력이 후행터널에 비해 크게 발생하는 것으로 나타나 선형터널의 지보량을 후행터널에 비해 증대시키거나 중앙부 록볼트 간격을 조밀하게 할 필요가 있는 것으로 나타났다. 중앙벽체에 작용하는 하중 및 단면제원에 있어서는 현재까지 적절한 설계방법도 확립되어 있지 않은 상태에서 획일적으로 적용되고 있으나 수치해석결과, 지층조건 및 토피 등에 따라 작용하중의 변화가 크게 나타나므로 향후 2Arch 터널의 설계시에 시공순서에 따른 하중작용양상을 파악하고 특히, 암반으로 구성된 지반에 대한 하중은 토사 및 풍화암등에서의 하중양상과는 다르므로 이에 대한 계측 및 해석을 실시하여 하중을 파악하여 적절한 벽체 두께 및 기초 폭을 결정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 왕이완, 2001, “도로에서 2Arch 터널의 적용성”, 대한터널협회 정기학술발표회, pp 141~152
2. M. Kamimura, 1997, “Discussion on the behaviours of parallel tunnel with a small clearance”, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp 898~906
3. Tetsuo Matsuda, 1998, “Gound behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground”, Tunnels and Metropolises, pp 1193~1198
4. 上川裕之, 2002 “小土かぶり地山に大断面メガネトンネルを貫く - 四國横斷自動車道 大代古墳トンネル”, 日本土質工學會誌, pp 19~29
5. 青木宏一, 上村正人, 2000, “わが國におけるめがねトンネルの 現状”, トンネル工學研究論文報告集, 第10卷 pp 161~166
6. 青木宏一, 上村正人, 2001, “わが國におけるめがねトンネルの 現状と課題”, トンネルと地下, 第32卷 9号 pp 53~62