

산악지형에서 효율적인 2-Arch 터널의 설계사례분석

산악지형에서 도로터널은 경제성 및 안정성에 유리한 병설터널 형식을 주로 채용하였으나, 최근의 환경훼손, 용지보상, 선형분리 곤란 등으로 인해 2-Arch 터널의 시공 및 설계사례가 증가하는 추세이다. 그러나 기존의 방식은 중앙터널폭 협소로 인한 시공성 저하, 방수슈트 및 중앙벽체 시공의 복잡성에 기인한 누수문제, 지보재량 산정의 불확실성 등 각종 문제점을 내포하고 있었다. 따라서 본 연구에서는 국내외 시공사례분석 및 현장방문조사를 통해 2-Arch 터널 시공의 개선방안을 도출하였으며, 지반조건을 반영한 수치해석과 대형모형실험 수행으로 2-Arch 터널의 거동특성을 파악하고 지보패턴 설계에 반영하여, 합리적인 2-Arch 터널 설계방안을 제시하였다.



01 서론

산악지형에서 도로터널은 경제성 및 안정성에 유리한 병설터널 형식이 주로 선정되어 왔다. 그러나, 최근 환경훼손, 용지보상, 선형분리 곤란 등으로 인해 2-Arch 터널의 시공 및 설계사례가 증가하는 추세이다. 국내 2-Arch 터널은 지하철 등 연약지반에서의 시공 및 설계경험을 기초로, 소규모 중앙터널을 굴착하고 중앙벽체로 중앙터널 상부를 지지 후 본선터널을 굴착하는 방식으로 시공되어 왔다. 그러

나 이 경우 중앙터널 폭이 협소하여 장비 진출입 등 시공성에 제한이 있고, 배면 침투수를 배수하기 위한 방수슈트 및 중앙벽체 시공이 복잡하여 누수문제를 일으킬 가능성이 크다. 또한, 지보재량 산정에 있어 해외 시공사례 및 지하철 등의 사례를 통하여 경험적인 방법으로 결정해 왔다. 이러한 각종 문제점을 개선하고자, 본 논문에서는 국내외 시공사례분석 및 현장방문조사를 통해 시공성, 경제성, 안정성 및 유지관리 편리성이 확보된 2-Arch 터널 설계방안을 소개하여 향후 2-Arch 터널의 설계에 도움이 되고자 한다.

02 국내·외 2-Arch 터널 시공사례

2-1. 국내 2-Arch 터널 시공사례

현재 국내외에 시공되었거나 시공 중인 2-Arch 터널을 중심으로 사례분석을 통하여 2-Arch 터널의 문제점 및 개선방향을 도출하였다. 국내 최초로 서울 외곽순환고속도로에 적용된 2-Arch 도로터널인 소래터널과 석수동 도시계획도로의 충훈터널은 지반상태가 불량하여 2-Arch 터널형식이 채택되었고, 동해고속도로 3공구의 정착터널의 경우는 환경훼손 및 도로 선형상 인접교량과 분리가 불가능하여 2-Arch 터널로 설계된 사례이다. <표 1>에서와 같이 지반상태, 선형 및 환경훼손 등의 외적인 요인으로 2-Arch 터널 적용사례가 늘고 있는 추세이며, 특히 풍화암~연암 수준의 불량한 지반조건과 연장이 400m이하로 비교적 짧은 터널에 주로 적용되고 있다.

표 1 | 국내 2-Arch 터널 적용사례

터널명	연장	최대토피	암반등급	차로	적용사유
소래	446m	50m	IV	양방향 4차로	지반상태 불량
정자산	130m	30m	IV~V	양방향 4차로	문화재존재
산성우	210m	50m	IV~V	양방향 4차로	지반상태 불량
정착	140m	40m	IV~V	양방향 4차로	환경훼손 최소화
신성	178m	40m	II~IV	양방향 4차로	환경훼손 최소화
서천	440m	60m	II~IV	양방향 4차로	환경훼손 최소화
충훈	880m	40m	IV~V	양방향 4차로	지반상태 불량

그림 1 | 국내 2-Arch 터널의 문제점



국내 2-Arch 터널 현장을 방문하여 조사한 결과 다음과 같은 문제점을 확인할 수 있었다. 첫째, 안정성 위주의 터널 설계로 인하여 중앙터널 폭이 협소하여 시공장비의 통행이 곤란하며 중앙벽체 거더부 철근 맞이음으로 인하여 배수관 설치시 시공성이 저하

되는 문제점을 갖고 있었다. 둘째, <그림 1>과 같이 중앙터널 굴착 후 설치된 방수슈트는 본선터널 발파 및 슛크리트 타설에 의해 손상을 받게 되고, 배수관 연결로 인한 방수슈트 관통으로 누수의 원인이 되기도 한다. 또한, 중앙벽체 거더부 상부로 철근배근과 횡·종배수관이 중첩되어 시공이 불리하고 방수슈트 접합부 손상으로 누수가 발생한 사례도 있었다.

2-2. 일본 2-Arch(안경)터널 시공사례

일본의 2-Arch 터널은 중앙터널이 없이 선행터널을 굴착하는 방법과 중앙터널을 시공 후 본선터널을 굴착하는 2가지 형태가 있다. 중앙터널이 없는 <그림 2>의 이츠츠가오카 터널의 예에서 국내 기존 2-Arch 터널 방·배수문제의 해결방법을 얻을 수 있는데, 본선터널 굴착 및 지보재 설치 후 방수슈트를 설치함으로써 발파 및 슛크리트에 의한 방수막의 손상을 방지하고 중앙벽체 누수를 근본적으로 차단하는 본 방안은 주목할 만하다. 또한 <그림 3>에 나타나 있듯이, 선행터널 지보효과와 후행터널 굴착시 제거가 용이한 유리섬유 록볼트를 설치하여 안정성과 시공성을 개선하고, 선·후행 터널의 지보 재를 비대칭적으로 적용함으로써 후행굴착으로 인한 작용하중을 효율적으로 분배시키고 있었다.

그림 2 | 이츠츠가오카 터널 현황



그림 3 | 이츠츠가오카 터널 지보재



2-3. 기존 2-Arch 터널의 문제점 및 개선사항

국내 적용중인 2-Arch 터널의 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 국내시공사례 분석 및 해외방문조사를 통해 개선방안을 도출, 다음과 같이 적용하였다. 첫째, 중앙터널 확폭으로 시공성을 개선

하였으며, 둘째, 방수막의 시공시기 및 위치를 변경하여 근본적인 누수문제 해결로 유지관리의 편리성을 향상 시키고 셋째, 2-Arch 터널 거동특성을 반영하여 지보재를 정량적으로 산정하였다. 이를 요약하면 <표 2> 및 <그림 5>와 같다.

표 2 | 문제점 분석 및 개선사항

구분	문제점	개선사항
시공성	■ 중앙터널협소 → 장비운용곤란 ■ 중앙벽체 거더부 철근 맞이음 시공성 저하	■ 중앙터널 확폭
방·배수 시스템	■ 발파, S/C타설 → 방수막 손상 ■ 이음 철근 → 방수막 손상 ■ 방수막 격입부 접합 불량, 배수관 설치곤란	■ 방수슈트 설치위치 및 시기 변경
지 보 패턴	■ 지보재의 정량적인 산정부족 ■ 지보재 배치시 현장 지반조건 미고려	■ 지반조건 및 시공순서 고려 → 지보 패턴의 정량화

그림 4 | 기존 2-Arch 터널의 문제점

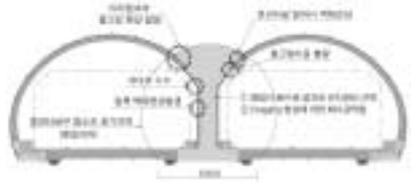


그림 5 | 2-Arch 터널 개선사항

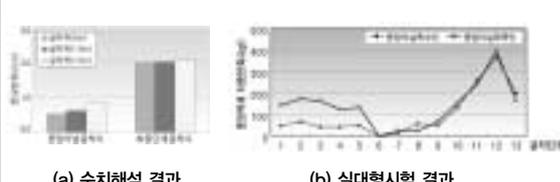


별 하중 메커니즘이 중요하므로 단계별 중앙벽체에 작용하는 하중 변화를 비교 분석하였다. <그림 7(a)>의 수치해석 결과는 중앙터널 굴착단계에서 중앙터널 폭 6.0m에 비하여 10.0m로 확폭시 10%의 변위 증가를 나타내나 최종단계 굴착시에는 유사한 변위를 보였다. <그림 7(b)>는 대형모형시험을 나타낸 것으로 중앙터널 시공단계(6단계) 이전에서는 굴착으로 인한 응력해방 영향으로 중앙터널 폭 차이에 따라 중앙벽체에 작용하는 하중이 약 2.5배 정도 크게 측정되나, 본선 선행터널 굴착(7단계) 이후로 비슷한 하중변화를 나타낸다.

그림 6 | 중앙터널 확폭 단면



그림 7 | 중앙터널 확폭에 따른 안정성 평가



03 개선된 2-Arch 터널

3-1. 시공성을 고려한 중앙터널 확폭

국내 현장방문조사 결과 국내의 2-Arch 터널은 대부분이 약 7.0m이하의 중앙터널 폭을 갖고 있어, 많은 2-Arch 터널 시공자들은 이로 인해 시공의 어려움을 겪고 있다. 시공성 개선을 위해서는 고효율의 대용량 장비의 사용이 요구되는데, 투입대상인 3-Boom 천공장비의 공간확보, 3.5m³급 페이로다의 회전 반경 (R=6800mm) 및 중앙벽체 시공중 후의 레미콘과 15ton 덤프의 진출입성 확보를 위하여 2.5m이상 폭을 확보한 중앙터널 확폭 단면을 계획하였다. 개선된 2-Arch 중앙터널 단면은 <그림 6>과 같고, 무지보 자립 시간은 2.5일로 후속공정 진입 시간의 확보가 가능하다. 중앙터널 확폭에 따른 안정성 검증을 위하여 수치해석 및 대형모형시험을 수행하였다. 2-Arch 터널의 특성상 굴착단계

3-2. 방·배수 시스템 개선

소래터널과 같은 국내 기존 2-Arch 터널 방·배수 시스템을 살펴보면, <그림 8(a)>와 같이 벽체 시공 전 중앙터널 방수슈트 설치로 본선굴착시 발파, 슛크리트 타설에 의한 손상이 발생하고 방수슈트를 관통한 배수관설치로 근본적 누수문제를 갖고 있다. 이러한 각종 문제점으로 인하여 현재 <그림 8(b)>와 같은 형태의 제안사례가 있으나, 시공적인 면에서 복잡하고 숙련된 기술이 필요하여 보다 근본적인 해결책이 필요한 실정이다

그림 8 | 방·배수 시스템

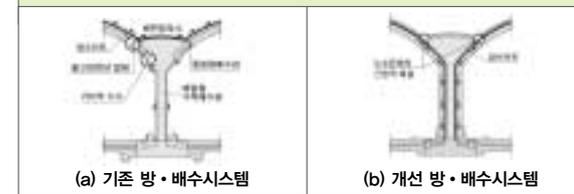


본 연구에서는 <그림 9(b)>와 같이 방수슈트의 시공위치 및 시기를 변경하였다. 이에 따라 배면 침투수는 방수슈트를 따라 유도배수되도록 하여 근본적인 누수문제를 해결하였다. 또한 개선된 방·배수 시스템으로 터널 공용 중에 발생하는 유지보수를 최소화함으로써 유지관리의 효율성을 증대하였다.

표 3 | 변경된 방수슈트 설치시기 및 위치

구분	기존 방·배수 시스템	개선 방·배수 시스템
설치 시기	■ 중앙터널 굴착 → 중앙 방수슈트 → 중앙기둥 설치 → 본선 굴착 → 본선 방수슈트 → 라이닝 타설	■ 중앙터널 굴착 → 중앙기둥 설치 → 본선터널 굴착 → 일체형 방수슈트 → 라이닝 타설
설치 위치	■ 선·후행 터널 방수슈트 연결 ■ 배수관을 통한 배수	■ 선·후행 터널 방수슈트 분리 ■ 슈트 배면 부직포/드레인보드로 배수

그림 9 | 방·배수 시스템



3-3. 지보패턴 정량화

1) 중벽을 고려한 환산폭원 산정

일반 도로터널의 경우 터널크기 및 지반조건을 고려하여 지보재량을 결정한다. 그러나 2-Arch 터널은 일반 터널과는 달리 중앙벽체에 의해 중앙터널을 지지하고 본선 굴착시 Arching 현상으로 응력을 분담하여 변위를 억제하는 특수한 거동특성을 나타낸다. 그러므로 본 연구에서는 2-Arch 터널의 지보설계를 위하여 <그림 10>와 같이 2차로, 3차로 및 4차로 터널 단면과 2-Arch 터널의 변위 및 응력 등 거동특성을 수치해석으로 비교·분석하여 환산 폭원 폭을 결정하고 지보재량 산정에 반영하였다. 전산 프로그램으로는 FLAC 2D와 Rock Support를 사용하였으며, 암반조건도 IV 등급으로 설정하였다. 해석결과, <그림 11(c)>와 같이 중앙벽체의 영향으로 2-Arch 터널의 변위 및 응력거동은 3차로 터널단면과 유사한 결과를 나타내었으며, 따라서 2-Arch 터널 지보패턴 결정시 3차로 터널 폭원인 16.5m를 적용하여 지보재량을 산정하였다.

그림 10 | 2-Arch 터널 환산단면적 비교위한 단면

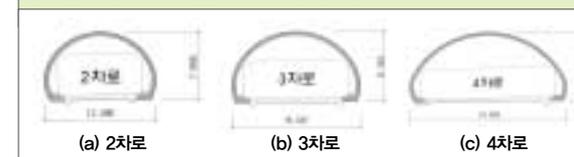
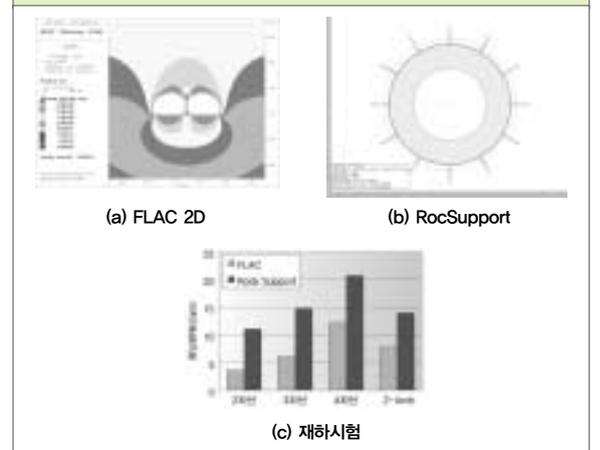


그림 11 | 2-Arch 터널 환산 단면적 비교



2) 본선터널 굴착순서 결정

현장 지반조건에서 선·후행터널 굴착순서에 따라 터널 안정에 유리한 방향으로 굴착순서를 결정할 필요가 있다. 따라서, 터널구간이 편경사 및 퇴적암지형 등으로 수평층리가 발달한 상태에서 2-Arch 터널이 선·후행 터널간 이격거리가 거의 없어 상호 영향을 미치는 특성을 반영, 터널 굴착순서를 결정하였다. <그림 13(a)>와 같이 편경사 지형에서 좌·우 터널의 굴착순서를 달리하였을 때의 지중변위 및 지보재의 응력 등을 비교하였다. 해석결과, <그림 13(b)>와 같이 본선 굴착순서에 따라 좌·우터널 슛크리트 응력이 균형적으로 나타나 응력분배 효과가 있는 저토피부를 먼저 굴착하는 것이 안정성 측면에서 유리할 것으로 판단하였다.

그림 12 | 지반조건 예시

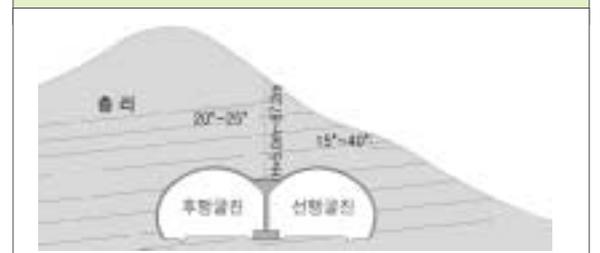
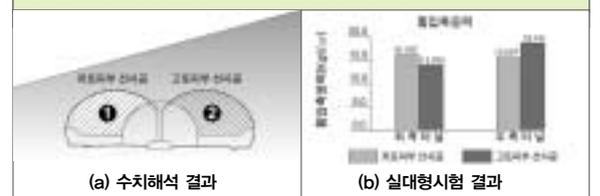
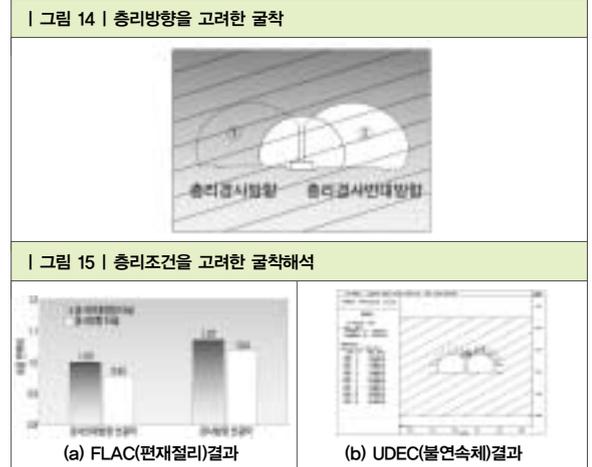


그림 13 | 편경사지형의 2-Arch터널 굴착순서 선정



또한 2차원 편재질리모델과 2차원 개별요소법을 이용하여 퇴적암의 층리특성을 구현하여 해석에 적용하였다. <그림 14>는 층리 방향성에 따른 굴착순서를 나타내고 있으며, <그림 15(a)>는 편재질리를 이용한 해석결과로 경사반대방향 선굴착시 안정성 확보에 유리한 것으로 나타났다.

개별요소법으로 구현한 퇴적암의 층리조건에서는 <그림 15(b)>와 같이 천단부 변위가 증가하는 경향을 보이고 특히, 층리의 경사가 저각일수록 변위 및 Rock Bolt 축력 등이 증가하는 것으로 나타났다. 본 터널구간의 층리방향성은 시점에서 종점으로 굴진시 Apparent Dip 8~24° 범위이므로 상기 해석결과를 토대로 저토피이고 층리경사 반대방향인 우측터널을 먼저 굴착하도록 계획하였으며, 천단부에 변위 및 하중이 집중되므로 Rock Bolt를 천단부에 집중배치하는 것으로 하였다.

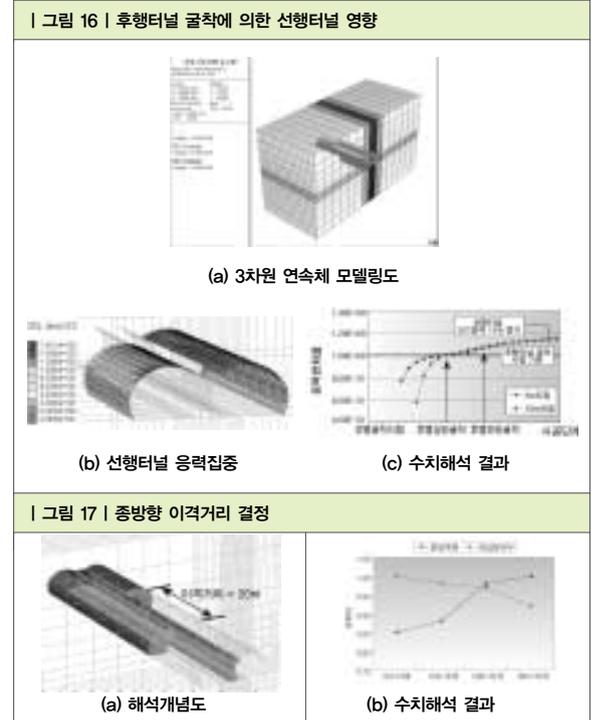


3) 선·후행터널 거동특성 및 이격거리 산정

2-Arch 터널은 굴착순서에 따라 선·후행터널 거동양상이 상이하 다. 선행터널은 굴착 및 지보재설치완료 및 변위수렴 후에도 후행터널 굴착으로 Arching 현상이 제거되어 선행터널부에 추가 변위 및 하중이 발생하게 된다.(김상균, 2003) 후행터널 굴착이 선행터널에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 <그림 16(b)>와 같이 선행터널 어깨부에 응력집중이 발생하였고 <그림 16(c)>와 같이 후행터널 굴착시점을 기준으로 슛크리트 응력이 약 15% 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 선행터널의 응력집중 및 추가변위에 대비, 선행터널의 슛크리트 두께를 10~15% 증가시켰다. 또한 본선터널 굴착시 막장 안정

성을 확보하고 중앙벽체에 과도한 응력이 작용하는 것을 방지하는 적절한 종방향 이격거리 산정을 위하여 이격거리별 변위비를 검토한 결과, <그림 17(b)>와 같이 이격거리 20m에서부터 중앙벽체에 발생하는 과도한 응력집중을 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

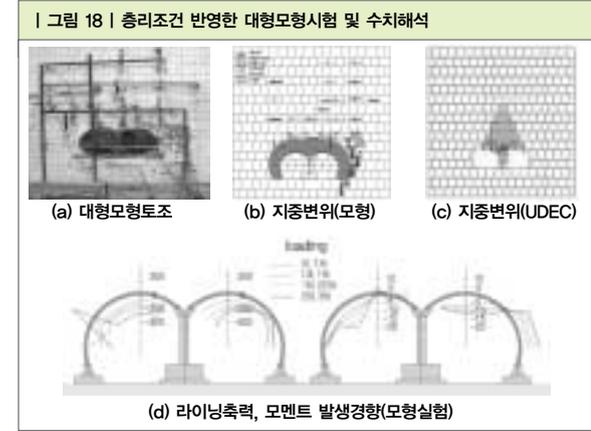


4) 퇴적암 지형을 고려한 지보패턴 설계

대형모형실험 장치를 이용, 층리군 암반지반을 조성후 지반 경계면에 압력을 가해 현장응력조건을 구현한 뒤, 2-Arch 터널 시공 순서에 따른 지반과 중앙벽체의 역학적 거동특성을 확인하였다.

<그림 18(b)>에서와 같이 대부분의 지중변위는 0.25D(D:2-Arch 터널 직경)내에서 발생하였으나 정량적 크기는 실험결과와 수치해석 결과가 다소 차이가 있었다.

또한 중앙터널 굴착시 대부분의 지중변위가 발생하고 본선 굴착시의 변위증가량은 미소하게 나타났으며 층리와 수직인 터널천단부에서 소성영역과 변위가 집중되는 것으로 나타나 집중적인 보강이 필요한 것으로 분석되었다. <그림 18(d)>는 라이닝의 거동을 파악하기 위하여 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하는 것으로 라이닝의 축력 및 모멘트는 천단부에 집중되는 것으로 나타났다. 이는 층리조건을 구현한 수치해석과 일치하는 결과이다.



5) 적용 지보패턴

현장조건을 반영한 대형모형실험과 수치해석으로 2-Arch 터널 지보패턴의 정량화를 도모하였으며, 이를 통해 지보패턴을 다음과 같이 산정했다.



①	<ul style="list-style-type: none"> 지보설계 <ul style="list-style-type: none"> 중앙터널 축벽부 : 2차로 기준 중앙터널 상부, 본선터널 : 3차로 기준 중앙터널 축벽부 → 본선굴착시 제거가 용이한 Fiber Rock Bolt 적용
②	<ul style="list-style-type: none"> 선행터널 슛크리트 두께 10~15% 증가
③	<ul style="list-style-type: none"> 선행터널 응력집중부 R/B보강 L=6.0m
④ ⑤	<ul style="list-style-type: none"> 수평층리를 고려하여 천단부 Rock Bolt 간격을 축벽부보다 조밀하게 적용

3-4. 중앙벽체 설계

본 연구에서 계획된 2-Arch 터널은 중앙터널 굴착 후 응력변화를 최대한 억제하기 위해 중앙벽체를 시공하여 안정성 확보한 후에 본선의 선행 및 후행터널을 순차적으로 시공하도록 하였다.

본 장에서는 이러한 중앙벽체의 두께 및 철근 보강 여부를 결정하기 위하여 경험적 설계하중 산정방법과 수치해석을 통한 변위 산정방법을 이용하였으며, 여기서 경험적 설계하중 산정방법은 계측 및 해석 자료를 바탕으로 Matsuda(1997)가 제안한 것으로 <그림 20>와 같이 토피고(H)가 터널 총 폭(1D) 이상일 경우에는 1D 만큼의 토피하

중이 작용하고, 그 이하 일 때는 토피고 만큼의 하중이 작용한다고 가정하는 방법이며, 이와 함께 수치해석을 통하여 본선 터널의 시공 단계에 따라 중앙벽체에 작용하는 수직 및 수평변위를 산정하고 중앙벽체에 작용시키는 방법을 병용함으로써 중앙벽체의 안정성을 평가하였다.



04 결론

최근 환경훼손의 최소화 및 선형분리가 불가능한 조건 등으로 인하여 2-Arch 터널이 많이 시공되고 있으나, 기존의 방식은 많은 문제점들을 내포하고 있어 국내·외 현장방문조사를 통하여 개선점들을 도출, 본 연구에 반영하였다. 또한 지반조건을 반영한 수치해석과 대형모형실험을 수행하여 2-Arch 터널의 거동특성을 파악하였으며, 이를 적극적으로 지보패턴 설계에 반영하였다.

기존 2-Arch 터널의 누수로 인한 터널 구조물의 영향 및 도로결빙 등으로 인한 운전자의 안전문제를 해결하기 위하여 방·배수 시스템을 개선하였다. 우선, 중앙터널 굴착 후 방수슈트를 1차적으로 설치하고, 본선 선·후행터널 굴착 후 방수슈트를 2차적으로 설치하던 것을 선·후행 굴착 후 한번에 설치토록 설치시기를 변경하였다. 또한, 중앙벽체 상부의 방수슈트를 중심으로 선·후행터널의 방수슈트가 연결된 형태에서 선·후행 터널이 각각 독립되도록 설치위치를 변경함에 의하여 방수슈트 배면을 따라 침투수가 유도배수되어 누수 차단 효과가 탁월하며 유지관리 또한 편리할 것으로 기대된다. S

◎ 참고문헌
 1. 이상덕, 정경한, 양재원, 김지성, 이철주, 류남열(2004), 대형모형실험에 의한 2-Arch 터널의 역학적 거동양상 고찰
 2. 김상균, 김태혁, 이인모(2003), "2Arch 도로터널 설계 및 시공 개선방안 고찰", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집
 3. 유태호, 권오근(2002), 2-Arch터널(소래터널) 누수 발생에 관한 고찰, 도로와 공학, Vol. 9, No 2, pp. 38~44, 도로 및 공항기술사회
 4. 왕이원(2001), "도로에서 2-Arch 터널의 적용성", 대한터널협회 정기학술발표회, pp. 141~152