

2-Arch 터널의 막장면 종방향 적정 이격거리에 관한 연구

이민규^{1*}, 정지수², 이성기³, 이승호⁴

A study on the longitudinal optimum separated distance of tunnel face in 2-arch tunnel

Min-Kyu Lee, Ji-Su Jeong, Sung-Ki Lee, Seung-Ho Lee

Abstract Recently, due to the effective land utilization and environmental protection, the construction of 2-arch tunnel has been gradually increased. In spite of this tendency, the mechanical information for the 2-arch tunnel, especially such as its behavior characteristics and mechanism are not enough. Therefore in this study, the theoretical and numerical studies on the behavior characteristics of 2-arch tunnel are carried out and longitudinal optimum separated distance of tunnel face is proposed by considering the analysis results from the behavior of advanced excavation of tunnel and stress of central pillar. As a result, longitudinal optimum separated distance of tunnel face is in 0.5D for the better safety of 2-arch tunnel by rapidly decreasing the stress concentration of central pillar.

Keywords: 2-arch tunnel, Pillar, Continuous analysis, Longitudinal separated distance of tunnel face

요 지 최근 선형분리 곤란, 환경훼손 최소화 및 용지보상 등의 이유로 2-Arch 터널의 채택이 점점 증가하고 있다. 이런 실정에도 불구하고 2-Arch 터널은 국내에서의 시공실적 및 설계사례의 부족으로 자료의 데이터화가 체계적이지 않고 2-Arch 터널의 역학적인 거동 메커니즘에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2-Arch 터널의 종방향 이격거리에 대한 연구를 통해 본선 선형터널과 중앙벽체의 거동 메커니즘을 분석하고 적정 이격거리를 제안하고자 한다. 2-Arch 터널의 이격거리 산정은 터널의 안정이 확보되는 조건에서 산정하는 것이 타당하며, 이격거리에 따라 보다 민감하게 작용하는 중앙벽체의 거동에 영향을 최소화 할 수 있는 범위내에서 이격거리를 산정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 이격거리에 따른 중앙벽체의 민감도 분석결과 최대 변곡점이 생겨 급격한 응력변화가 발생하는 0.5D이내를 이격거리로 산정하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

주요어: 2-Arch 터널, 중앙벽체, 연속체 해석, 종방향 이격거리

1. 서 론

국내 도로터널은 병설터널이 주종을 이루고 있으나 최근 환경훼손, 용지보상 등의 이유로 터널사이의 이격 거리가 좁아지고 있으며 특히 선형분리 곤란과 환경훼손 최소화를 위한 용지제약 및 민원이 심하게 있는 경우 2-Arch 터널의 채택이 필수적이다. 이런 실정에도 불구하고 2-Arch 터널은 국내에서의 시공실적 및 설계사례의 부족으로 자료의 데이터화가 체계적이지 않고 2-Arch 터널의 역학적인 거동에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

병설터널은 횡방향 이격거리에 대한 검토를 통해 간섭효과를 최소화하며, 터널설계 실무자료집에서는 PW

(Pillar Width)=1.5D를 기준으로 검토하여 이격하도록 하였으며(한국도로공사, 2001), 일반적으로 터널 중심 간 거리를 1.5~2.0D 이상을 이격한다. 근접병설터널의 경우 기존 문헌을 통해 살펴보면 일본의 이토즈터널의 경우 지반조건에 따라 중앙벽체 설치, 원지반 암반 활용, 선형터널 라이닝 두께 증진 등의 방안을 적용하였고(Kamimura, 1997) 오아마다이리 터널의 경우 숏크리트 두께 증가와 PC로봇트를 이용한 보강을 수행하였으며, 터널 변위, 강지보재의 응력 및 숏크리트의 응력을 측정 한 결과 선형터널 상반의 숏크리트 응력이 높게 나타났다(Kobayashi, 1994; 김도식 등, 2004).

2-Arch 터널의 경우 횡방향 이격거리가 없이 2개의 본선터널이 중앙벽체를 사이에 두고 굴착되며, 기존 문헌을 살펴보면 동시굴착 공법을 적용하므로써 응력 재분배와 변형이 동시에 발생하도록 유도하여 중앙벽체에 미치는 영향을 최소화한다(그림 1)(한국터널공학회, 2002).

¹정회원, (주)태조엔지니어링 지반사업부

²정회원, 상지대학교 토목공학과 박사과정

³정회원, (주)태조엔지니어링 사장

⁴정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

*교신저자: 이민규 (lmkyu@dreamwiz.com)

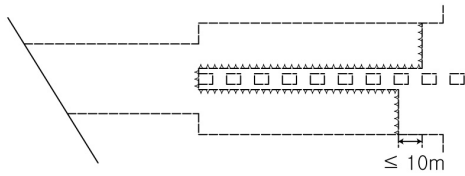


그림 1. 동시굴착공법(2-Arch 터널)

그러나 시공 공간의 부족, 시공규모의 대형화 및 대규모 발파에 의한 소음, 진동제어등 현장 여건이 허락하지 않을 경우 동시굴착 공법의 적용이 어려워 부득이 하게 종방향 이격거리를 두고 시공을 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 지반조건과 이격거리에 따른 2-Arch 터널의 거동분석을 통해 합리적인 이격거리를 제안하고자 한다.

2. 2-Arch 터널에서 종방향 이격거리에 따른 영향

병설터널에서 종방향 굴착순서의 선정은 터널굴착에 의해 발생하는 지반응력이 고르게 재분배 되고 지반의 Arching이 빠르게 형성되어 안정된 터널굴착이 이루어질 수 있도록 하기 위해 고려된다.

2-Arch 터널의 경우 선행터널이 굴착 될 때 선행터널 굴착후 후행터널이 굴착될 때 종방향 이격거리에 따라 거동양상이 상이하다. 이는 횡방향 이격거리가 없는 근접터널로 이격거리가 가까워지면 터널상호간의 간섭효과가 생기며, 선행터널의 경우 굴착 및 지보재 설치가 완료되어 변위가 수렴된 이후에도 후행터널 굴착으로 인해 상부의 Arching 현상이 없어짐에 따라 선행터널로 하중전이가 발생하여 추가적인 지반변위 및 지보재 단면력이 발생하게 된다.

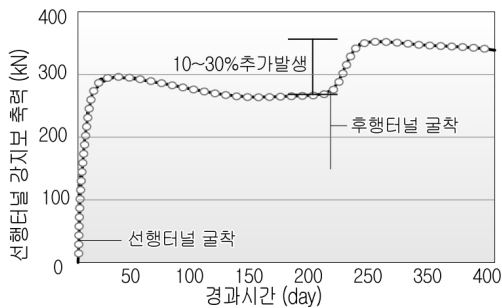
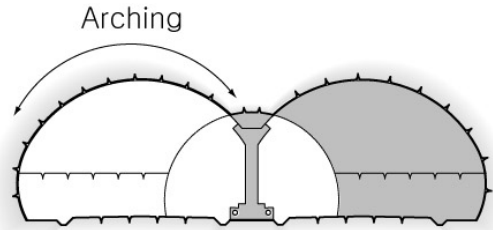


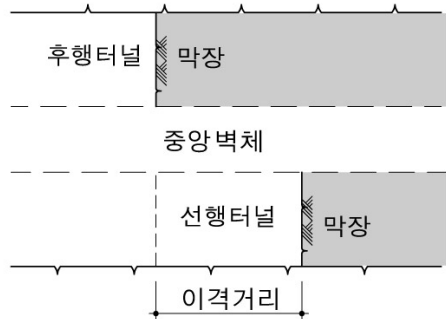
그림 2. 이격거리에 따른 선행터널의 영향

이와 같은 현상은 그림 2와 같이 일본에서 실시된 계측결과로 확인되었고, 후행터널 굴착시 선행터널부에 발생하는 추가하중은 지반조건 및 위치에 따라 10~30% 정도로 다르게 나타났다(김상균 등, 2003).

터널 상호간의 간섭효과를 고려하여 이격거리를 멀리 하게 되면 선 시공되어 있는 중앙벽체의 안정성에 악영향을 미칠 수 있다. 그림 3과 같이 선행터널 굴착으로 인해 중앙벽체에 하중이 작용하게 되며 이 힘은 중앙벽체에 비대칭응력을 유발시킨다. 이와 같은 비대칭 응력은 이격거리가 멀어질수록 과도하게 발생되며, 이러한 현상이 장기적으로 지속될 경우 구조물의 하자 요인이 될 수 있다.



(a) 선행터널 굴착에 의한 Arching



(b) 2-Arch 터널의 종방향 이격거리

그림 3. 이격거리에 따른 중앙벽체의 영향

이와 같이 2-Arch 터널에서는 이격거리에 따라 선행터널과 중앙벽체의 거동에 미치는 영향이 상이하다. 따라서 본 연구에서는 종방향 이격거리에 따른 2-Arch 터널의 선행터널과 중앙벽체의 거동을 파악하고 민감도 분석 통해 적정 이격거리를 제안하고자 한다.

3. 해석 프로그램 및 방법

3.1 해석적용 프로그램

본 연구에 사용된 Visual FEA 프로그램은 유한요소법(Finite Element Method)을 적용한 프로그램으로서 선형탄성(Linear Elastic)모델, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 등의 탄소성 구성모델 및 비등방성 모델을 제공한다. 이외에 Shell요소, Truss요소, Embedded Bar요소 및 Sping요소 등의 모델요소를 이용한 터널 숏크리트와 록볼트 모델링이 가능하다.

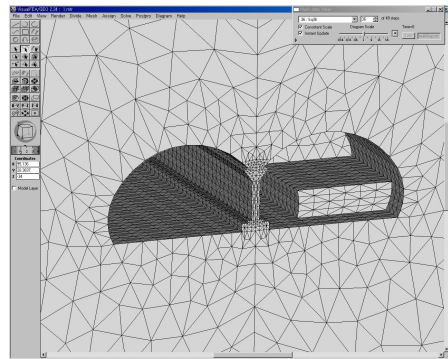
본 연구에서 지반모델은 유한요소해석에서 가장 널리 사용되고 있는 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 사용하였으며, 중앙벽체는 선형탄성모델을 적용하였다. 또한, 터널 지보재인 숏크리트는 Shell요소를 록볼트는 Embedded Bar요소를 적용하여 해석을 수행하였다.

또한 중앙벽체 상세해석에 사용된 MIDAS/ Civil은 범용 구조해석 프로그램으로서 터널 라이닝 해석, 수화열해석 등 터널의 안정성과 관련된 요소의 해석이 가능하며, Solid요소, Truss요소, Beam요소 등으로 프로그래밍이 가능하다. 본 연구에서는 Solid요소를 이용하여 중앙벽체를 모델링하여 거동을 확인하였다.

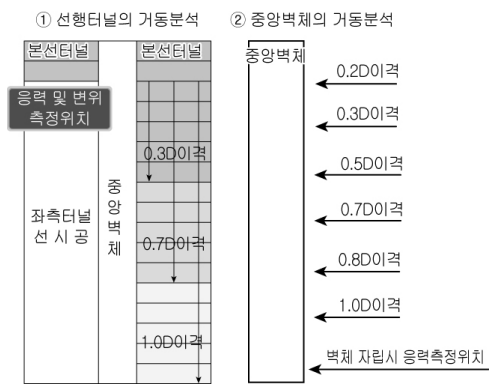
3.2 수치해석 개요 및 조건

종방향 이격거리에 따른 선형터널의 거동분석 및 중앙벽체에 작용하는 응력을 분석하기 위해 유한요소 해석프로그램을 이용하여 모형지반과 중앙벽체를 모델링하고 분석 목적에 맞춰 프로그램을 선정하여 수치해석을 수행하였다. 연속체 해석에서는 선형터널과 후행터널의 이격거리를 2-Arch 터널의 폭(D=30 m) 이내에서 0.2D, 0.3D, 0.5D, 0.7D, 0.8D, 1.0D로 나누고(그림 4) 2-Arch 터널이 일반적으로 불량한 지반에 적용되는 점을 감안하여 보통암 이하의 지반조건을 선정하고 이에 적합한 표준지보패턴을 반영하여 지반과 구조물을 모델링하였으며, 총 18 CASE로 구분하여 해석을 수행하였다. 본 해석에 사용된 해석조건 및 지반물성은 표 1과 표 2에 나타나 있다.

중앙벽체 상세해석에서는 지반과 구조물의 연속체해석에서 발생된 구조물의 변위를 하중으로 변환하여 선형터널과 후행터널이 이격거리를 두고 굴착될 때 중앙벽체가 갖는 응력분포를 파악하였다.



(a) 지반 및 구조물 거동분석



(b) 분석 개요도

그림 4. 이격거리에 따른 2-Arch 터널과 중앙벽체 거동분석 개요도

표 1. 해석조건

• 지 반	: Mohr-Coulomb 모델
• 중앙벽체	: 탄성체 모델
• 해석프로그램	: VisualFEA/GEOMIDAS/Civil
• 해석영역	: 터널 좌우 80 m, 터널 하부 40 m, 터널 상부 30 m 적용

표 2. 해석 적용지반의 물성치

구분	변형계수 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (°)	포아송비
보통암	6.3×10 ³	24	650	37	0.25
연암	1.5×10 ³	22	200	35	0.26
암 풍화암	9.0×10 ²	21	80	33	0.28

이와 같이 수치해석을 통해 터널과 중앙벽체의 거동을 파악하고 응력비(이격거리별 응력/1.0D 이격시 응력)와 변위비(이격거리별 변위/1.0D 이격시 변위)를 이용한 민감도 분석을 통하여 적정 이격거리를 선정하였으며, 측정 위치는 그림 5와 같이 선정하여 거동을 분석하였다.

4. 해석 결과 및 분석

4.1 이격거리에 따른 선형터널의 거동분석

종방향 이격거리에 따른 선형터널의 거동을 파악하기 위해 선형터널 천단부(그림 5의 점C)와 어깨부(그림 5의 점D)의 지보재응력 및 변위를 파악하고 민감도 분석을 실시하였다. 숏크리트 휨압축응력의 민감도분석결과 이격거리가 가까워짐에 따라 응력이 증가하였으며 지반등급에 따라 이격거리 1.0D를 기준으로 0.7D에서 2%~3%, 0.3D에서 5%~8%가 증가하였으며, 0.3D이내에서 최대 8%~10%의 민감도를 나타냈다.

터널 내공변위 또한 이격거리가 가까워짐에 따라 증가하였으며, 지반등급에 따라 이격거리 1.0D를 기준으

로 0.7D에서 4%~10%, 0.3D에서 16%~22%가 증가하였으며, 0.3D이내에서 최대 24%~29%의 민감도를 나타냈다.

본선 선형터널에 대해 이격거리에 따른 민감도 분석 결과 숏크리트 휨압축응력은 최대 10%, 내공변위는 최대 29%의 민감도를 나타냈으며, 숏크리트 휨압축응력보다 지반 내공변위의 민감도가 높은 것으로 판단된다. 선형터널에서 가장 민감하게 작용하는 것은 지반 내공변위로 최대 29%이나 2-Arch 터널의 거동은 터널에 작용하는 하중 메커니즘이 주로 중앙벽체에 의존하고 있어 매우 중요하므로 종방향 이격거리 산정시 지보재응

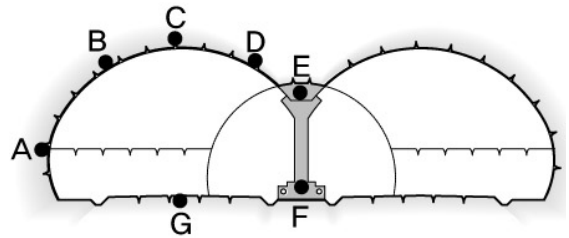


그림 5. 선형터널 변위와 중앙벽체 응력 측정 위치

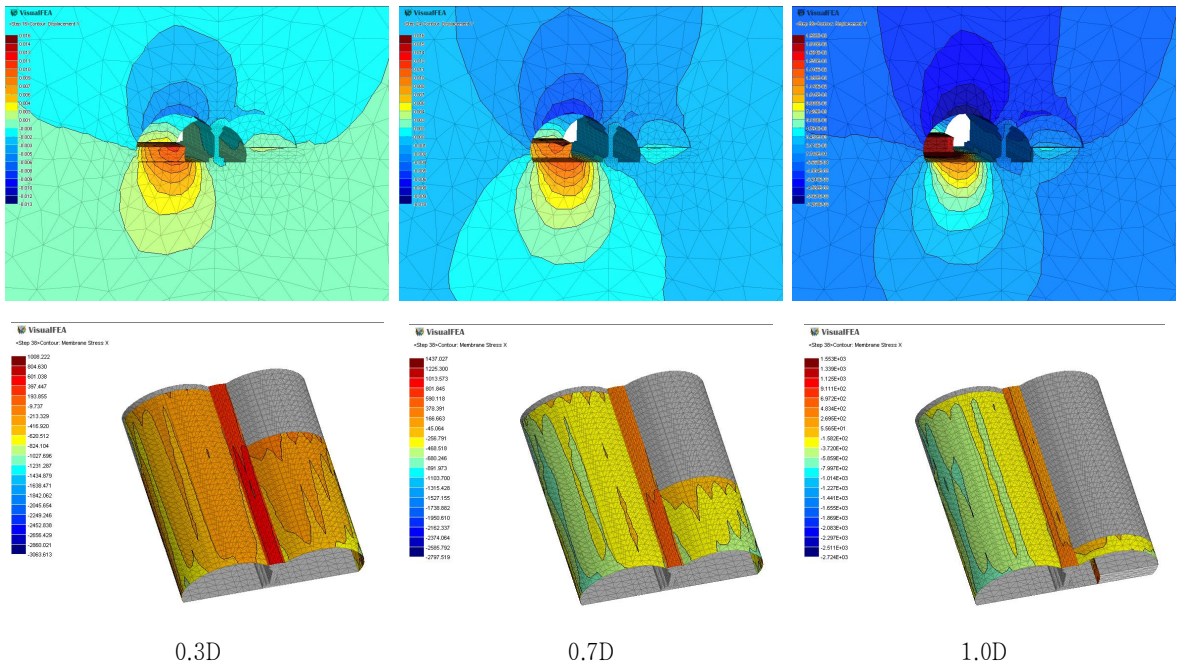
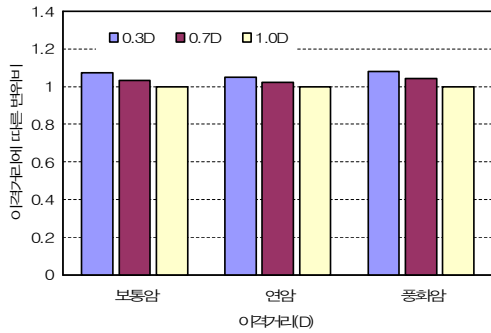
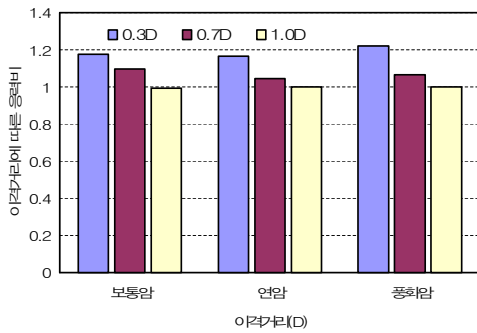


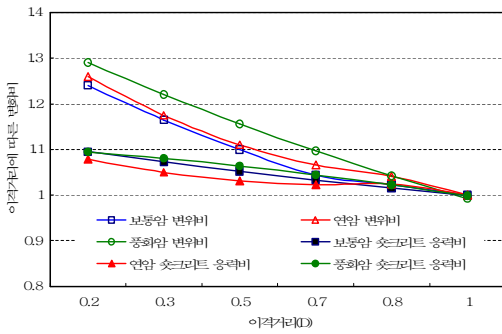
그림 6. 선형터널 거동분석 결과도 (지반변위, 숏크리트 응력)



(a) 슌크리트 응력비



(b) 내공 변위비



(c) 이격거리에 따른 민감도 분포

그림 7. 이격거리에 따른 선행터널의 거동

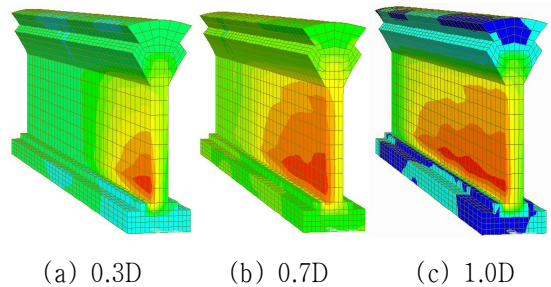
력과 변위외에도 중앙벽체의 거동분석이 반드시 병행되어야 할 것으로 판단된다.

4.2 중앙벽체의 응력변화

앞서 언급한 바와 같이 선행 터널과 후행터널의 종방

향 이격거리에 따른 지보재응력과 터널 내공변위 검토 외에 2-Arch 터널의 중요 구조물인 중앙벽체의 압축 및 전단응력 분포를 분석하였다.

분석결과 이격거리가 가까워짐에 따라 지보재 응력과 변위가 증가함으로써 굴착에 대한 간섭효과가 심해지는 경향과는 달리 중앙벽체의 응력분포는 종방향 이격거리가 가까워짐에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이격거리에 따른 중앙벽체의 응력은 선행터널 쪽으로 비대칭적으로 분포하는 경향을 보였으며 이격거리가 증가하면 더욱 큰 응력이 광범위하게 분포하였다(그림 8).



(a) 0.3D (b) 0.7D (c) 1.0D

그림 8. 이격거리에 따른 중앙벽체의 압축응력 분포 (풍화암)

중앙벽체 압축응력의 지반등급에 따른 민감도분석결과 이격거리 1.0D를 기준으로 0.7D에서 7%~13%, 0.3D에서 35%~36%로 감소하였으며, 0.3D이내에서 최대 66%~69%의 민감도를 나타냈다(그림 9).

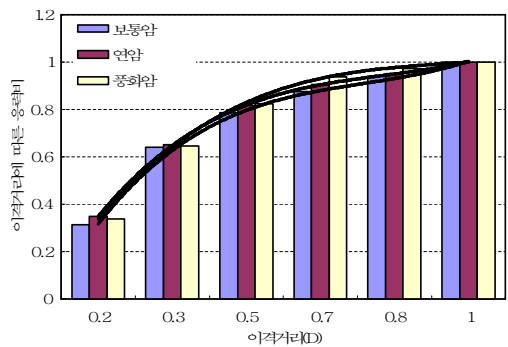


그림 9. 이격거리에 따른 중앙벽체 거동 (압축응력)

또한 중앙벽체 전단응력의 지반등급에 따른 민감도 분석결과 1.0D를 기준으로 0.7D에서는 1.0D와 같은 값

으로 민감도가 나타나지 않았고 0.3D에서 34~35%의 민감도를 나타냈으며, 0.3D이내에서 최대 53~62%의 민감도를 나타냈다(그림 10).

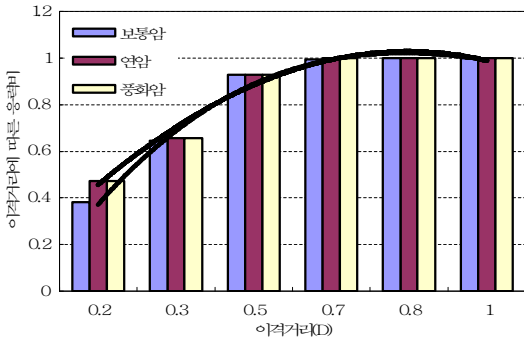


그림 10. 이격거리에 따른 중앙벽체 거동 (전단응력)

이는 중앙벽체 시공후 선행터널 굴착으로 형성되는 비대칭적인 단면형상으로 인해 중앙벽체 편측에 발생하는 불평형력이 자립거리(또는 시간)가 길어짐에 따라 심화되기 때문으로 판단된다.

이러한 현상이 장기적으로 지속될 때는 구조물의 하자요인이 될 수 있으므로 후행터널 시공이 즉각적으로 이루어져 중앙벽체에 작용되는 하중이 균등하게 작용되도록 하여야 한다.

중앙벽체 분석결과 압축응력과 전단응력 모두 비슷한 경향을 나타냈으며 민감도 분석결과 압축응력은 최대 69%의 민감도를 보이고 전단응력은 최대 64%의 민감도를 보이는 것으로 나타났다.

4.3 지반등급별 민감도 분석

중방향 이격거리에 따른 본선 선행터널의 지보재와 내공변위의 발생 경향은 이격거리가 가까워질수록 증가하고 이와는 반대로 중앙벽체의 압축응력 및 전단응력은 이격거리가 가까워질수록 감소하였다. 일반적으로 병설터널의 경우 이격거리가 가까워질수록 지보재 응력 및 지반 변위가 증가하여 터널의 안정성 확보에 효과적이지 못하나 2-Arch터널은 단면의 특수성으로 인해 선행터널과 중앙벽체의 안정이 확보되는 범위내에서 이격거리를 산정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

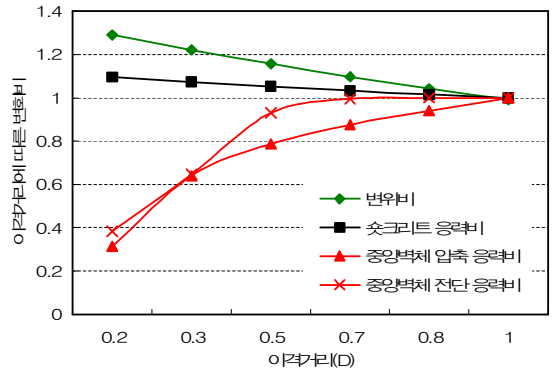


그림 11. 이격거리에 따른 민감도 분석결과 (보통암)

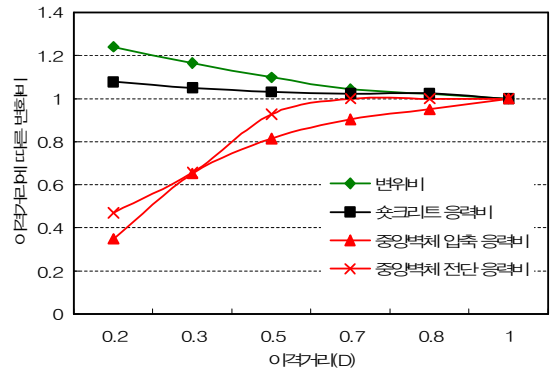


그림 12. 이격거리에 따른 민감도 분석결과 (연암)

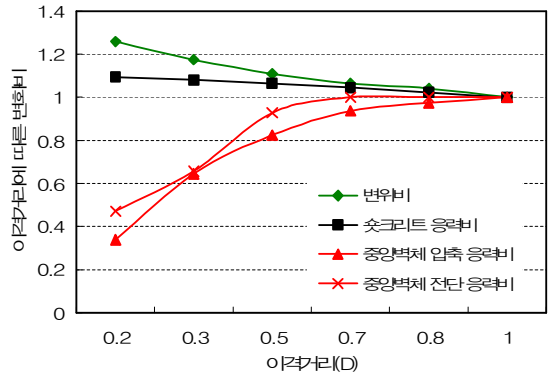


그림 13. 이격거리에 따른 민감도 분석결과 (풍화암)

위의 그림 11~13에서와 같이 지반등급에 따른 각각의 해석결과를 이용한 민감도 분석 결과에서 보듯이 지보재 응력과 지반 내공변위는 이격거리가 짧아짐에 따

라 증가하며 변화폭이 최대 29%이내이나, 중앙벽체 압축 및 전단응력은 이격거리가 짧아짐에 따라서 69%까지의 민감도를 보이며 작아지므로 이격거리에 대해서 보다 민감하게 작용되는 것을 알 수 있다.

따라서 중앙벽체의 거동에 영향을 최소화 할 수 있는 범위내에서 이격거리를 산정하는 것이 바람직 할 것으로 판단되며, 중앙벽체 응력의 민감도 분석결과 최대 변곡점이 발생하여 급격한 응력변화가 생기는 0.5D이내를 이격거리로 산정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 선행터널과 후행터널간의 종방향 이격거리에 따른 2-Arch 터널의 중앙벽체 및 본선 선행터널의 거동특성과 민감도 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 후행터널 굴착에 따른 선행터널 지보재 응력 및 지반 변위 분석결과 이격거리가 짧아짐에 따라 응력 및 변위량이 증가하였으며, 이는 터널 상호간의 간섭효과에 의한 영향으로 판단된다. 지반등급에 따른 민감도 분석결과 슛크리트 응력 보다는 지반 변위가 보다 민감하게 나타났으며, 풍화암 지반에서 가장 민감하게 나타났다. 이격거리가 짧아짐에 따라 이격거리 0.2D에서 보통암 지반은 최대 24%, 풍화암 지반에서 최대 29%의 민감도를 보이며 지반변위가 증가하였다.
2. 2-Arch 터널의 거동은 본선터널의 거동외에도 터널에 작용하는 하중이 주로 중앙벽체에 의존하고 선행터널이 먼저 굴착되면서 발생하는 비대칭적 단면형상으로 인해 중앙벽체에 비대칭응력이 발생하여 터널의 안정에 악영향을 미치게 된다. 따라서 종방향 이격거리 산정시 지보재의 응력과 지반 변위외에도 중앙벽체의 거동분석이 반드시 병행되어야 한다.
3. 종방향 이격거리에 따른 중앙벽체의 거동을 분석한 결과 대상 지반에서 모두 비슷한 경향을 나타냈으며, 이격거리가 짧아짐에 따라 중앙벽체의 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 중앙벽체 시공 후 선행터널을 선 굴착함으로써 인해 발생하는 비대

칭적인 단면형상에 인한 것으로 중앙벽체의 응력이 선행터널 쪽으로 치우쳐 비대칭적으로 분포하는 경향을 보이며, 선행터널과 후행터널의 이격거리가 증가할수록 중앙벽체에 발생하는 비대칭 응력 또한 증가하였다. 지반등급에 따른 민감도 분석결과 풍화암 지반에서 가장 민감하게 나타났으며, 이격거리가 짧아짐에 따라 이격거리 0.2D에서 보통암 지반은 최대 65%, 풍화암 지반은 최대 69%의 민감도를 보이며 감소하였다.

4. 이격거리에 따른 지반변위와 슛크리트 응력 및 중앙벽체 응력의 민감도 분석 결과 중앙벽체의 응력은 이격거리가 짧아짐에 따라 최대 69%의 민감도를 보이며 감소하는 반면 지반변위 및 슛크리트 응력은 이격거리가 짧아짐에 따라 지반변위가 최대 29%의 민감도를 보이며 증가하였다.
5. 따라서 2-Arch 터널의 이격거리 산정에 있어 터널의 안정성이 확보되는 조건에서 이격거리에 따라 민감도가 큰 중앙벽체의 거동에 영향을 최소화 할 수 있는 범위내에서 이격거리를 산정하는 것이 바람직할 것으로 판단되며 이격거리에 따른 중앙벽체 응력의 민감도 분석결과 최대 변곡점이 발생하여 급격한 응력변화가 생기는 0.5D이내를 이격거리로 산정하는 것이 타당할 것으로 사료된다.
6. 이격거리 0.5D이내에서 중앙벽체에 작용하는 비대칭 응력의 감소가 월등하지만 수치해석에 의해 일반화된 결과이므로, 현장계측과 실험적인 방법을 통한 고찰을 수행하여 터널 안정성이 확보되는 범위내에서 이격거리를 산정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참고문헌

1. 김상균, 김태혁, 이인모 (2003), "2-Arch 도로터널 설계 및 시공 개선방안 고찰", 한국터널공학회지, pp. 29-38.
2. 김도식, 김영근, 이두화, 김창용, 배규진, 이승호, 이호성 (2004), "비대칭 근접병설터널의 안정성 및 보강공법 검토", 제4회 터널시공기술향상 대토론회, 대한토목학회, pp. 181-197.
3. 한국터널공학회 (2002), "터널의 이론과 실무", 터널공학시리즈 No. 1, pp. 225-226.
4. 한국도로공사 (2001), "터널 설계실무 자료집" pp. 619-627

5. Kamimura M. (1997), "Discussion on the behaviors of parallel tunnel with a small clearance", Proceedings of the 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp. 898-906.

6. Kobayashi M. (1994), "Observational construction of a large section minimum interval twin road tunnel in urban alluvial loose sand soil", Tunnel and Ground Conditions, Abdel Salam(ed), Balkema, Rotterdam, pp. 157-164.



이 민 규

(주)테조엔지니어링
지반사업부

E-mail: lmkyu@dreamwiz.com



정 지 수

상지대학교 토목공학과
박사과정

E-mail: js0615@paran.com



이 성 기

(주)테조엔지니어링
사장

E-mail: leesk-king@hanmail.net



이 승 호

상지대학교
건설시스템공학과
교수

E-mail: shsh123@hanmail.net