

2-Arch 도로터널에 적용된 표준지보패턴의 적정성 검토

A Evaluation of Standard Support Pattern for Two-Arch Road Tunnel

천 병 식¹⁾ · 최 광 보²⁾ · 김 혜 양³⁾ · 유 준 희[†]

Chun, Byungsik · Choi, Kwangbo · Kim, Hyeyang · Yoo, Junhee

ABSTRACT : In domestic cases, the standard support pattern of 2-lanes road tunnels is presented because construction experience and high degree various data was abundant. But, it is not desirable to apply standard for 2-Arch tunnels that the precedent and measuring data is insufficient existing support pattern blasting plan and interpretation of separate way concerning specific terrain and rock quality. In this study, behavior according to load distribution ratio and Unsymmetrical Pressure about standard support pattern which is applied in design and construction of 2-arch tunnels was analysed and the examination of blasting vibration has influence on the center wall is conducted as a consequence reasonableness of support whether or not with presumed support pressure and ground reaction curve method. In result appropriateness of standard support pattern, support quantity is proper but considers specific terrain and rock quality condition when design and construction of further step 2-arch tunnel standard support pattern must be decided by considering terrains, soil properties and construction condition of the objective tunnel.

Keywords : 2-Arch tunnel, Standard support pattern, Load distribution ratio, Unsymmetrical Pressure

요 지 : 국내의 경우 일반적인 2차로 도로터널은 시공경험 및 축적된 제반자료가 풍부하여 표준적인 지보패턴이 제시되고 있으나, 2-Arch 도로터널의 경우 아직 시공경험 및 계측자료가 부족하여 특정지형 및 암질에 대해 별도의 발파설계와 해석을 통해 선정된 지보패턴을 표준적으로 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 2-Arch 도로터널의 설계 및 시공시 적용되고 있는 표준지보패턴에 대하여 하중분담률 및 편토압에 따른 거동을 분석하고 발파진동이 중앙벽체에 미치는 영향을 분석하여 적용된 지보재의 적정성 여부를 검토하였다. 그 결과 표준지보패턴에 적용되는 지보량은 적절한 것으로 나타났으나, 이는 특정지형 및 암질 조건을 고려하여 해석 후 선정된 것으로, 향후 2-Arch 도로터널의 설계 및 시공시 최종적인 표준지보패턴 선정은 대상 터널의 지형조건, 토질조건, 시공조건 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 할 것으로 사료된다.

주요어 : 2-아치터널, 표준지보패턴, 하중분담률, 편토압

1. 서 론

지보재는 기본적으로 터널주변의 원지반이 보유하고 있는 지보기능을 최대한 활용할 수 있도록 선정해야 한다. 따라서, 지보재 선정은 터널용도, 지반상태, 토피, 지형, 용수상태, 안정성, 경제성, 시공성 등 제반의 설계조건을 종합적으로 고려하여 합리적인 지보재가 될 수 있도록 하여야 한다. 지보재의 설계는 터널굴착 전에는 복잡하게 변화하는 지반특성을 정확히 파악하기가 매우 어려우므로 지반분류에서 설정한 지반등급에 따라 표준지보패턴을 선정하고 굴착 중 계측결과에 따라 필요한 경우 지보패턴을 현장상황에 적합하게 변경할 수 있다.

국내의 경우 일반적으로 2차로 도로터널의 경우 시공경험 및 고도의 축적된 제반자료가 풍부하여 표준적인 지보패턴이 제시되고 있으나, 2-Arch 도로터널의 경우 시공경

험 및 계측자료가 부족하여 특정지형 및 암질에 대해 별도의 발파설계와 해석을 통해 선정된 지보패턴을 표준적으로 적용하고 있다. 그러나 표준지보패턴의 선정은 대상터널의 지형조건, 토질조건, 시공조건 등을 종합적으로 고려하고 2, 3차원 해석방법 등을 적용하여 별도로 설계하는 것이 타당하다.

현재 국내 2-Arch 도로터널의 설계 및 시공시 적용되고 있는 표준지보패턴에 대한 문제점은 해석조건에 있어서 암반등급 및 시공조건에 따른 하중분담율을 산정하여 해석을 수행하여야 하나 하중분담율을 지보패턴별로 일률적으로 적용하고 있으며, 2-Arch 도로터널의 특성상 편토압이 걸리는 경우가 많음에도 이를 고려하지 않는 실정이다. 또한, 본선터널 발파시 발파진동이 중앙벽체에 미치는 영향을 고려하여 지보패턴이 선정되어야 하나 이에 대한 고려가 없는 상태로서 인접구조물의 허용진동속도를 고려하

1) 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

2) 비회원, 내경엔지니어링 상무

3) 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

† 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정(E-mail : junjun54321@hanmail.net)

표 1. 기존 2-Arch 터널 표준지보패턴(한국도로공사 설계실무자료집, 2004)

구 분		TYPE-I	TYPE-II	TYPE-III	TYPE-IV	TYPE-V	비 고	
본 선 터 널	굴진장(m)	3.5m/3.5m	3.5m/3.5m	2.0m/2.0m	1.5m/3.0m	1.0m/1.0m	상부/하부	
	숏크리트	5cm	5cm	8cm	12cm	16cm	강섬유 보강	
	록 볼 트	길이	4.0m	4.0m	4.0m	4.0m	4.0m	-
		중간격	Random	3.5m	2.0m	1.5m	1.0m	-
		횡간격	Random	2.0m (arch)	1.5m	1.5m	1.2m	-
강지보공	-	-	-	H-100×100 L-50×20×30	H-125×125 L-70×20×30	H형강 격자지보		

여 별도검토가 이루어져야 한다.

따라서, 본 연구에서는 현재 2-Arch 도로터널의 설계 및 시공시 적용되고 있는 표준지보패턴에 대한 하중분담률 및 편토압에 따른 거동을 분석하고 발파진동이 중앙벽체에 미치는 영향을 파악하여 적용된 지보재들의 적정성 여부를 검토하였다. 또한, 터널의 지보압 추정방법, 터널굴착 시 공동주변의 암반과 터널지보재 사이의 상호거동에 따른 지반반응곡선방법을 이용하여 적용된 지보패턴의 적정성을 검증하였다.

2. 2-Arch 도로터널의 특징

2.1 1-Arch 터널과 2-Arch 터널의 비교

최근 들어 환경훼손저감 및 터널 입구와 출구부 구조물과의 연계성 확보를 위한 1-Arch 대단면 터널 또는 2-Arch 터널을 채택하는 사례가 증가하고 있다(김상균 등, 2003). 일반적으로 지반 및 토피조건이 양호하여 터널이 일방향 4차로로 구성 되는 경우에는 1-Arch 대단면 터널을 적용하는 경우가 많고, 지반 및 토피조건이 불리하거나 양방향 4차로의 경우는 터널안정성 및 운전자의 주행성 등에 유리한 2-Arch 터널을 적용하는 경우가 많으며, 2-Arch 터널은 환경훼손 면적이 작아 친환경적이고 제한된 용지 폭을 최대한 활용할 수 있으며 지반조건이 불량하고 토피고가 낮은 경우에 적용되고 있다(박동욱, 2003).

2.2 2-Arch 도로터널의 시공순서

2-Arch 도로터널은 시공중 발생하는 응력변화를 최대한 억제하고 이를 적절하게 분배하면서 시공하여야 안정성을 유지할 수 있으므로 터널시공은 통상 응력이 집중되는 중앙부 터널을 시공한 후 좌·우측 터널을 시공하고 마지막으로 라이닝을 타설하게 된다. 굴착방법은 지반이 극히 불량할 경우를 제외하고는 중앙 터널은 전단면으로, 좌·우측 터널은 상하반단면 분할굴착으로 시공하고, 시공순서는 중

표 2. 기존 적용하중 분담율(한국도로공사 설계실무자료집, 2004)

구 분	하중분담율
	TYPE-I, 2, 3, 4, 5
적 용	40%-30%-30%

양터널 굴착, 중앙벽체 설치, 본선터널 굴착, 콘크리트라이닝 설치의 4단계로 이루어진다.

3. 2-Arch 도로터널 표준지보패턴 적용현황

3.1 기존 표준지보패턴 현황

기존 2-Arch 도로터널의 설계 및 시공시 적용되고 있는 표준지보패턴은 특정 지형 및 암질에 대해 별도의 발파설계와 해석을 통해 선정된 것으로 표 1과 같다.

표준지보패턴 선정방법은 대상터널의 지형조건, 지질조건, 시공조건 등을 종합적으로 고려 후 수치해석 등을 통해서 결정하여야 하나, 표 3에 제시된 표준지보패턴을 별도의 고려 없이 표준적으로 사용하여 합리적인 설계 및 시공이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

3.2 기존 표준지보패턴 선정의 문제점 및 개선방향

3.2.1 하중분담율

터널에 대한 2차원 해석은 종방향 아칭효과와 숏크리트의 강성변화를 반영하기 위하여 하중분담율을 적용하고 있으며, 일반적으로 적용되는 하중분담율 40%-30%-30%은 극히 간단한 시공과정에 대한 모사로서 복잡한 시공순서를 포함하는 단면에 대한 해석에 있어서는 이러한 하중분담율 개념을 적용하는데 있어 조심스러운 접근이 요구된다(한국터널공학회, 2004).

2-Arch 터널의 설계시 적용되고 있는 하중분담율은 가정치로서 표 2와 같이 40%-30%-30%로 모든 지보 TYPE에 일률적으로 적용되었으나, 이는 실제 거동과 다를 수 있으므로 대상터널의 지질조건 및 시공조건을 고려하여 합리적인 하중분담율이 선정되어야 한다.

3.2.2 편토압

2-Arch 터널의 특성상 편토압이 걸리는 경우가 많으나 기존 해석조건은 지형이 수평인 조건으로 해석하여 표준 지보 패턴을 선정하였으므로 편토압이 발생하는 터널은 이에 대한 검토가 반드시 필요하다.

3.2.3 발파진동이 중앙벽체에 미치는 영향

2-Arch 터널의 경우 굴착단계에 있어서 중앙벽체를 시공한 후 본선터널을 발파굴착 하므로 발파에 의한 인접구조물의 안전성 확보를 위해 허용진동 속도를 규정하고 발파굴착으로 인한 중앙벽체 안정성 검토를 실시하여야 하나, 기존 표준지보패턴은 이에 대한 내용이 반영되지 않았으므로 표준지보패턴 선정시 반드시 발파진동이 중앙벽체에 미치는 영향을 검토하여야 한다.

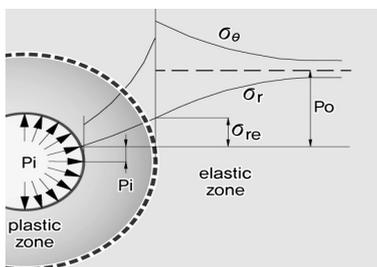
3.2.4 근접시공에 의한 영향평가

2-Arch 터널의 특성상 선행터널이 후행터널의 굴착에 영향을 받으나 이에 대한 정량적 평가가 현실적으로 곤란한 실정으로 이에 대한 검토는 시공중 계측을 통한 오랜 기간의 연구가 필요한 실정이다.

3.3 이론적 분석을 통한 지보패턴 적정성 평가방법

3.3.1 지보압 계산을 통한 지보패턴 적정성 평가방법

탄성지반내에 터널을 굴착하면 주변의 지반은 원래의 3축응력 상태에서 2축응력 상태의 평면변형률 조건이 된다. 이때 소멸되는 터널 반경의 지중응력 때문에 굴착면의 접선응력은 그림 1(a)와 같이 크게 증가하고 굴착면의 변위가 굴착공동 내측으로 발생한다. 그림 1(b)는 터널의 내공 변위가 증가함에 따라, 지보재에 작용되는 지보압의 증가양상을 보여주는 지보곡선을 나타내고 있다. 지보곡선은 굴착 후 지반에 발생한 변위(U_{i0})와 탄성특성을 나타내는 강성정수 k 로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 터널주변의 작용응력 개요도

$$U_{ie} = \frac{P_i \cdot r_i}{k} \quad (1)$$

여기서, P_i : 내부압력, r_i : 터널반경

암반의 이완으로 인한 하중은 터널의 지보재에 압력으로 작용하고 이를 지보압이라 정의하며, 지보재에 작용하는 지보압을 슛크리트, 록볼트 및 강지보로 구분하여 산정할 수 있다.

스�크리트에 작용하는 지보압은 슛크리트의 일축압축강도, 터널의 반경 및 슛크리트의 두께를 변수로 산정되며 일반적으로 슛크리트의 일축압축강도와 비례하는 경향을 나타낸다. 록볼트에 작용하는 지보압은 록볼트 타설에 따른 인발강도, 록볼트의 간격 및 길이를 변수로 하며 록볼트의 인발강도와 비례하는 경향을 보인다. 강지보에 작용하는 지보압은 강지보의 휨강도, 단면적 및 간격을 변수로 산정되며 강지보의 휨강도 및 강지보의 단면적과 비례하는 경향을 보이고 합성지보재에 의한 지보압은 슛크리트, 록볼트 및 강지보의 지보압을 합산하여 결정한다.

따라서 지보패턴의 안전율은 합성지보의 지보압과 암반 이완하중의 비례식으로 표현할 수 있으며 각각의 지보압은 식 (2)~(4)로 산정되어 진다(이인모, 2004).

$$\text{스�크리트 최대 지보압} : P_{s\text{cmax}} = \frac{1}{2} \sigma_c \left(1 - \frac{(\gamma_i - t_c)^2}{\gamma_i^2} \right) \quad (2)$$

여기서, $P_{s\text{cmax}}$: 슛크리트 지보압(kgf/cm²),

σ_c : 슛크리트 일축압축강도(kgf/cm²),

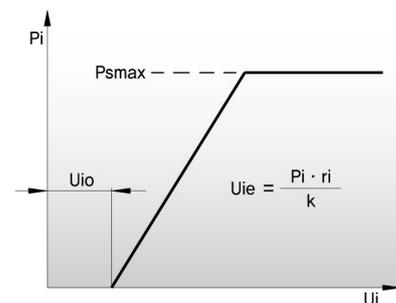
r_i : 터널반경(cm), t_c : 슛크리트 두께(cm)

$$\text{록볼트 최대 지보압} : P_{r\text{bmax}} = \frac{T_{lf}}{S_c \cdot S_l} \quad (3)$$

여기서, $P_{r\text{bmax}}$: 록볼트 지보압(kgf/cm²),

T_{lf} : 록볼트 인장강도(kgf/cm²),

S_c : 록볼트 단면적(cm²), S_l : 록볼트 길이(cm)



(b) 지보곡선 개요도

그림 1. 터널 지보곡선의 개념도(Kirsch, 1898)

$$\text{강지보 최대 지보압} : P_{ssmax} = \frac{f_{ss} \cdot a_s}{\gamma_i \cdot S_s} \quad (4)$$

여기서, P_{ssmax} : 강지보 지보압(kgf/cm²),
 f_{ss} : 강지보 휨강도(kgf/cm²),
 a_s : 강지보 단면적(cm²), S_s : 강지보 간격(cm)

3.3.2 지반반응곡선을 이용한 지보패턴 적정성 평가방법

터널굴착에 따라 막장의 종방향 아칭효과가 감소하여 내공변위는 증가된다. 이러한 경향을 나타내는 것을 지반반응곡선이라 한다. 지반반응곡선은 터널의 내압을 감소시켜 갈 때 내공변위의 증가양상을 보여주는 곡선으로서, 터널 설계시 지보재 설치시기 및 지보재의 강성 등을 결정하는데 중요하게 사용된다(이석원 등, 2005).

그림 2와 같이 터널굴착으로 인한 지반의 변형은 항복점을(P_r)지나 완전 소성거동을 하며 일정한 변위로 수렴하게 된다. 지반의 등급에 따라 수렴이 안 될 경우도 있으며, 수렴 하더라도 변위가 과다하게 발생할 수도 있기 때문에 적절한 시기에서 지보를 해주어야 한다.

이론식으로 암반과 지보재의 상호반응거동을 해석시에 Hoek-Brown의 파괴기준을 적용하였으며, 이론적인 지반 특성곡선은 지반의 거동 및 지보재의 특성을 정량적으로 파악할 수 있으나, 원형단면, 정수압상태($K_0=1$), 등방성 등의 가정으로 인해 실제 터널의 거동과 상이할 수 있으므로 수치해석을 통해 각 암반등급별 지반특성 곡선을 작성하였고 식 (5)가 적용되어 진다.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_c} + S \right)^{0.5} \quad (5)$$

여기서, σ'_1 은 최대주응력, σ'_3 은 최소주응력, σ'_c 는 암석의 일축압축강도이며, m_b 와 S 는 Hoek-Brown의 재료상수로서 식 (6)과 같다.

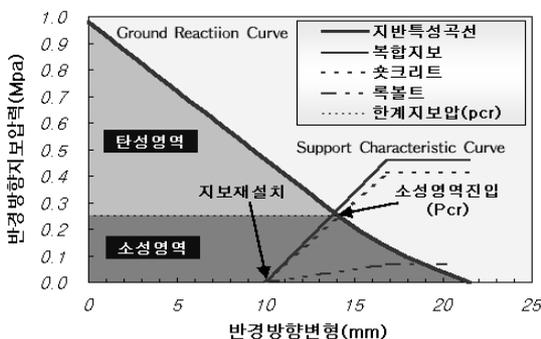


그림 2. Ground Reaction Curve(Hoek and Brown, 1980)

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right), S = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \quad (6)$$

여기서 m_i : 암석의 종류에 따른 계수
 GSI (Geological Strength Index) : 지질강도지수

터널 벽면의 내공변위 $U_{r(r=a)}$ 는 식 (7)과 같다.

$$U_{r(r=a)} = \frac{1}{2G} a^{-k\phi} (C(1-2\mu)(b^{k\phi+1} - a^{k\phi+1}) - D(b^{k\phi-1} - a^{k\phi-1})) + U_{r(r=b)} \left(\frac{b}{a}\right)^{k\phi} \quad (7)$$

또한, 그림 2의 지반반응곡선에서 지보재의 지보압과 내공변위 사이에는 식 (8)의 관계가 성립된다.

$$P_s = K_s (U_r - U_r^0) ; P_s \leq P_s^{max} \quad (8)$$

여기서, P_s : 지보압 K_s : 지보재 강성
 U_r : $U_r(r=a)$ 로서 터널벽면에서의 내공변위
 U_r^0 : $U_r^0(r=a)$ 로서 터널굴착직후 터널후방 L지점에서의 내공변위
 P_s^{max} : 최대지보압으로서 지보재 항복응력의 함수

4. 수치해석

4.1 해석적용지반

터널안정성 해석에 적용되는 암반의 물성치는 탄성계수, 단위중량, 포아송비, 점착력 및 내부마찰각 등이 있으며, 본 수치 해석에 적용된 지반의 물성치는 기존 설계 사례와 문헌상의 자료를 참조하여 암반등급별로 표 3과 같이 설정하였다. 또한, 축압계수는 천단부의 접선응력이 최종굴착시 100이라면 40% 하중분담시에는 40 이고 70% 하중분담시에는 70 정도로 커지므로 K_0 가 1.0보다 큰 경우에는 하중분담을 크게 할 때 접선응력을 많이 발생시키므로 Arching 효과에 의해 변위량이 40%인 경우보다 상대적으로 크게 발생하지 않았거나 차이가 없었으므로 2.0으로 가정하였다.

4.2 해석적용 지보패턴 및 지보재

본 연구에서 적용된 표준지보패턴은 3.1절 표 1의 2004년 한국도로공사 설계실무 자료집의 2-Arch 터널 표준지보패턴을 사용 하였으며, 지보재 물성치는 표 4와 같다.

표 3. 지반의 물성치

지반등급	탄성계수 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	포아송비
I등급	20,000	27	3,000	47	0.20
II등급	10,000	26	2,000	45	0.22
III등급	6,000	25	850	40	0.25
IV등급	1,000	23	300	35	0.30
V등급	400	21	100	32	0.33
풍화암	250	21	50	32	0.33
풍화토	30	19	15	28	0.35

표 4. 해석적용 지보재 물성치

구 분	탄성계수 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	포아송비	단면적 (m ²)	
Shotcrete	연 성	5,000	24	0.2	-
	강 성	15,000	24	0.2	
Rockbolt	210,000	78	-	4.9×10 ⁻⁴	
중앙벽체	23,000	25	0.18	8.0×10 ⁻¹	

4.3 해석조건 및 순서

본 연구에서는 수치해석 프로그램인 MIDAS/GTS를 이용해 지반 및 구조물을 지반조건에 따라 모델링하여 터널 굴착시 작용하는 지반거동과 중앙벽체의 거동을 파악하였다.

Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 연속체 해석을 수행하였으며, 해석 수행시 해석영역의 효율적 적용을 위하여 그림 3 과 같이 터널상부는 지표면까지, 터널하부 및 터널측방은 터널직경의 4배로 모델링하여 터널 굴착으로 인한 응력의 흐름이 원활하게 이루어지도록 하였으며, 해석순서는 2-Arch 도로터널 시공순서에 따라서 수행하였다.

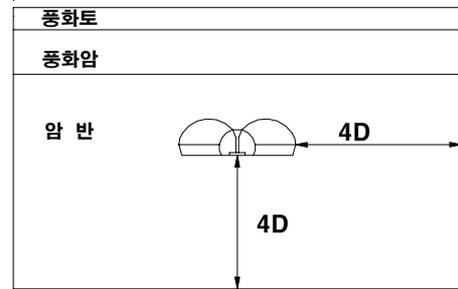


그림 3. 해석영역의 결정

5. 해석결과 및 분석

5.1 하중분담율에 따른 거동 분석

5.1.1 경험식에 의한 하중분담율 선정

하중분담율에 미치는 영향요소로는 터널의 크기, 토피, 단면형상, 굴진장, 지보량 등의 설계조건과 지반의 변형 및 강도특성 등의 지질조건이 있으나 3차원 해석을 통한 연구결과에 의하면, 터널의 크기(D), 일굴진장(L), 슛크리트

트두께(T) 및 지반의 탄성계수(E)가 주요 영향요소임이 밝혀졌다. 특히 이 4개의 주요 영향인자의 조합에 대한 72가지 경우의 3차원 수치해석을 수행한 후 각 경우에 대한 회귀분석을 통하여 하중분담율(α, β, γ)에 대한 식을 설정하였으며 기존 표준지보패턴 선정시 적용된 하중분담률과 비교·검토하였다. 굴착시 단계별 하중분담률 산정식은 식 (9)~(11)과 같으며 지보패턴별로 적용된 하중분담률은 표 5와 같다.

굴착(α) - 연성 슛크리트(β) - 강성 슛크리트(γ) 단계에 대한 하중분담률 검토(정대열, 1993)

$$\text{굴착}(\%) : \alpha = 3.340L + 3.77\ln E \quad (9)$$

표 5. 지보패턴에 따른 지보재 특성

지보패턴	터널환산직경 D(m)	일굴진장 L(m)	변형계수 (MPa)	하중분담율		
				굴착 α (%)	연성스�크리트 β (%)	강성스�크리트 γ (%)
TYPE-1	9.7	3.5	20,000	70	15	15
TYPE-2	9.7	3.5	10,000	60	20	20
TYPE-3	9.7	2.0	6,000	60	20	20
TYPE-4	9.7	1.5	1,000	50	25	25

$$\text{연성 슛크리트(\%)} : \beta = 100 - (\alpha + \gamma) \quad (10)$$

$$\text{강성 슛크리트(\%)} : \gamma = -3.126L + 3.391D \quad (11)$$

5.1.2 해석결과

2-Arch 터널의 표준지보패턴에 대하여 기존 하중분담을 적용시와 수치해석 결과를 토대로 한 제안식 적용시 터널의 변위, 슛크리트 응력, 록볼트 축력을 비교한 결과는 표 6, 7과 같다.

천단변위 및 측벽변위를 비교한 결과 그림 4, 5와 같이 지보패턴 TYPE-1, 2, 3, 4 경우에 대하여 기존의 40-30-30 하중분담을 적용시 각각 0.92~6.26mm 및 0.36~5.19mm 이고, 경험식인 70-15-15, 60-20-20, 60-20-20, 50-25-25 하중분담을 적용시 각각 0.92~6.25mm 및 0.36~5.23mm로서 변위 차이는 작은 것으로 나타났다.

스�크리트의 휨압축응력 비교결과를 그림 6과 같이 기존 하중분담의 경우 0.776~5.233MPa, 경험식에 의한 하중

분담의 경우 0.594~4.570MPa로 굴착시 하중분담을 낮게 적용한 기존방법의 경우 슛크리트 휨압축응력이 크게 나타났다.

록볼트 축력의 비교결과는 그림 7과 같이 기존 하중분담의 경우 9.9~43.9kN, 경험식에 의한 하중분담의 경우 7.7~40.7kN로 큰 차이는 없었으나, 굴착시 하중분담을 작게한 기존방법의 경우가 록볼트 축력이 큰 것으로 나타났다. 지보패턴에 따른 하중분담을 상이하게 적용하여 지반의 변위 및 지보재의 응력을 비교한 결과 지보재 응력에서 굴착시 하중분담을 낮게 적용한 기존의 경우가 지보재의 부담하중이 크게 나타났다. 따라서 터널의 표준지보패턴 적용시 굴착단계 하중분담을 낮게 적용하여 지보재의 지지하중을 증가시키는 것은 비경제적인 설계가 될 수 있으므로 터널의 시공조건 및 지질조건을 고려하여 합리적인 하중분담을 산정한 후 터널 해석을 실시하여야 할 것으로 사료된다.

표 6. 기존 하중분담을 적용시 TYPE별 해석결과

지보패턴	하중분담 (%)	천단변위 (mm)	측벽변위 (mm)	스�크리트 휨압축 응력 (MPa)	록볼트축력 (kN)
TYPE-1	40-30-30	0.92	0.36	0.776	-
TYPE-2		1.51	0.75	1.218	9.9
TYPE-3		2.26	1.23	1.666	14.1
TYPE-4		6.26	5.19	5.233	43.9

표 7. 제안식에 의한 하중분담을 적용시 TYPE별 해석결과

지보패턴	하중분담 (%)	천단변위 (mm)	측벽변위 (mm)	스�크리트 휨압축 응력 (MPa)	록볼트축력 (kN)
TYPE-1	70-15-15	0.92	0.36	0.594	-
TYPE-2	60-20-20	1.52	0.75	0.989	7.7
TYPE-3	60-20-20	2.23	1.23	1.339	11.5
TYPE-4	50-25-25	6.25	5.23	4.570	40.7

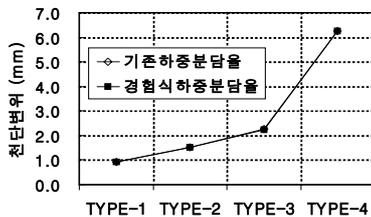


그림 4. 천단변위 비교

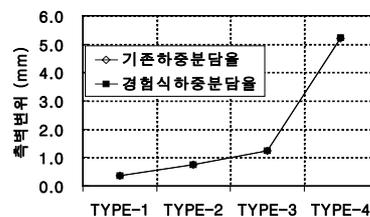


그림 5. 측벽변위 비교

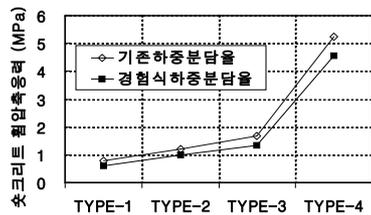


그림 6. 슛크리트 휨압축응력 비교

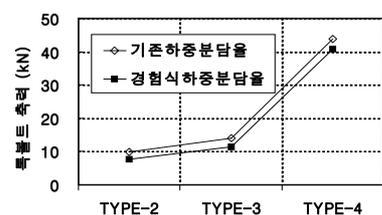


그림 7. 록볼트 축력 비교

5.2 편토압에 따른 거동분석

터널구간이 계곡부 및 편토압 지형 아래에 위치할 경우 지형적인 영향으로 터널 주변 지반 및 지보재에 비대칭 응력 또는 응력집중이 발생하여 지반의 소성 및 지보재의 국부적인 응력집중이 발생하여 터널의 안정성을 저해할 수 있다.

표준지보패턴 적용시 편토압에 의한 터널거동을 검토하기 위해 그림 8과 같이 기존 표준지보패턴 선정시 적용한 지형조건인 지표면 수평(경사각 0°)인 경우와 편토압 지형조건인 경사각 15°, 30°, 45°로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 변위산정시 부호규약은 그림 9와 같이 천단변위는 하향방향을 ⊕로, 좌측벽 변위는 우향변위를 ⊕로, 우측벽 변위는 좌향변위를 ⊖로 규정하였다. 또한, 검토대상구간의 해석조건은 지보패턴은 TYPE-4(암반등급 IV)를 적용

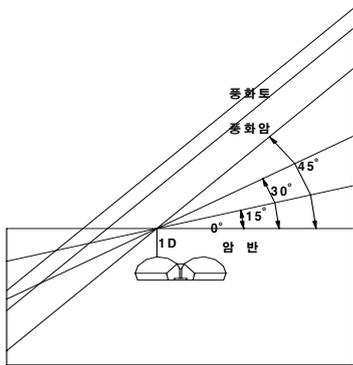


그림 8. 편토압 해석단면 및 비교조건

하였으며, 하중분담율은 50%-25%-25%, 축압계수는 2.0을 적용하였다.

5.2.1 변위발생 경향

편경사각에 따른 천단변위는 표 8과 같이 기존 표준지보패턴 선정시 적용한 지형조건인 수평(경사각 0°)인 경우 6.25~6.34mm 정도로 안정한 것으로 나타났으나 편토압 지형조건인 경사각 45°에서는 9.38~20.87mm로 천단변위가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

편경사각에 따른 측벽변위는 표 9와 같이 수평(경사각 0°)인 경우 5.22~5.23mm로 안정한 것으로 나타났으나 편토압지형 조건인 경사각 30°이상에서는 변위가 20.18~58.54mm 정도로 과다하게 나타나 불안정성이 증가하는 것으로 검토되었다. 또한 그림 10, 11과 같이 편경사각 30~45°이상에서 터널 천단변위 및 측벽변위가 큰 상승폭을 보

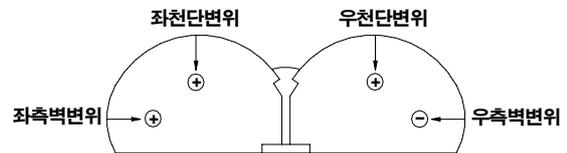


그림 9. 변위 부호 규약 및 천단변위 각도

표 8. 편경사각에 따른 천단변위

구 분	편경사각에 따른 천단변위(mm)			
	지표면 수평	지표면경사(편토압)		
	0°	15°	30°	45°
좌측터널	6.25	4.72	3.04	9.38
우측터널	6.34	7.94	10.59	20.87

표 9. 편경사각에 따른 측벽변위

구 분	편경사각에 따른 측벽변위(mm)			
	지표면 수평	지표면경사(편토압)		
	0°	15°	30°	45°
좌측터널	-5.22	-3.81	-20.18	-58.54
우측터널	-5.23	-14.21	-24.86	-43.96

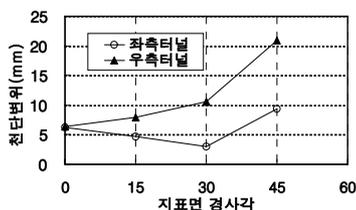


그림 10. 천단변위

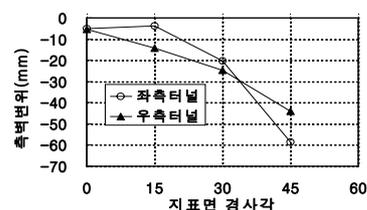


그림 11. 측벽변위

이고 있으며, 터널거동이 비대칭을 나타내어 편토압의 영향을 받는 것으로 나타났다.

5.2.2 숏크리트 응력 및 록볼트 축력 분석

편경사각에 따른 숏크리트 휨압축응력 결과는 그림 12와 같으며 기존 표준지보패턴 선정시 적용한 지형조건인 지표면 수평(0°)인 경우 3.55~4.57Mpa로서 허용값(8.0Mpa)이 내로 안정한 것으로 나타났으나, 편토압 지형조건인 경사각 30°이상에서는 8.52~9.71Mpa 정도로 허용값을 초과하여 불안정한 것으로 나타났다.

편경사각에 따른 록볼트 축력 결과는 그림 13과 같으며 기존 표준지보패턴 선정시 적용한 지형조건인 지표면 수평(0°)인 경우 39.6~40.7KN정도로 허용치(89KN)이내로서 안정한 것으로 나타났으나, 편토압 지형조건인 경사각 30°이상에서는 161.2~305.7KN 정도로 허용치를 초과하여 불안정한 것으로 나타났다. 따라서 편경사각 30°이상에서는 편토압의 영향을 받아 터널 안정성에 문제가 있으므로 반드시 대상터널의 지형조건을 고려한 표준지보패턴 선정이 이루어져야 한다.

5.3 발파 진동이 중앙벽체에 미치는 영향

5.3.1 진동 규제기준 검토

우리나라의 경우 발파에 의한 인접구조물의 안전 확보

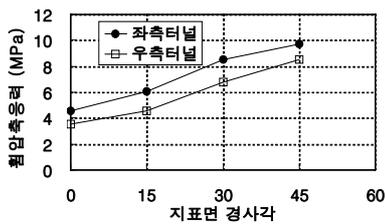


그림 12. 숏크리트 휨압축응력

를 위한 허용 진동 속도는 규정하고 있으나, 중앙 벽체에 대한 진동속도 규제는 없는 상태이므로 본 연구에서는 외국기관에서 적용하고 있는 양생중인 콘크리트의 진동 허용기준을 적용하여 벽체의 안정성을 검토하였다.

본 검토에서는 미국 교통국에서 제시한 양생중 콘크리트 기준 가운데 2-Arch 터널의 경우 중앙 벽체 시공을 완료한 후 본선터널(후행터널)을 굴착하므로 중앙벽체는 충분한 양생시간이 주어지므로 표 10과 같이 양생 10일 경과후의 진동속도인 25.4cm/sec를 본 중앙벽체에 대한 허용진동 속도기준으로 적용하였다.

5.3.2 장약량 별 진동속도 검토결과

표 11에서 발파진동식을 이용하여 지발당 장약량에 따른 진동속도를 산정한 결과 5.0~19.5cm/sec로 나타났다. 따라서, 본선터널 발파시 중앙벽체에 대한 허용진동속도 25.4cm/sec를 만족하는 지발당 장약량은 3.5kgf까지 사용이 가능한 것으로 나타났다.

5.3.3 1발파 굴진장에 대한 지발당 장약량 검토

표 12는 1발파시 굴진장이 1.0~3.5m인 경우 소요되는 지발당 장약량을 나타낸 것으로 기존 표준지보패턴의 최대 굴진장(TYPE-1,2)인 L=3.5m인 경우 장약량은 3.0kgf이 소요되는 것으로 검토되었다. 따라서 중앙벽체 콘크리트 구

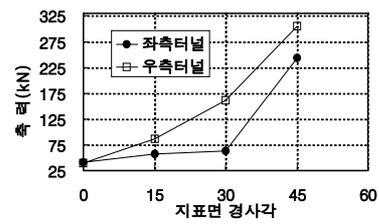


그림 13. 록볼트축력

표 10. 미국 교통국의 양생중인 콘크리트에 대한 재령별 진동허용기준(신일재 등, 2000)

콘크리트재령	0~4시간	4~24시간	1~3일	3~7일	7~10일	10일 이후
진동허용기준 (cm/sec)	5.08	0.63	2.54	5.08	12.70	25.40

표 11. 장약량별 진동속도(신일재 등, 2000)

지발당 장약량(W) (kgf)	중앙벽체와의 거리(R) (m)	진동속도(V) (cm/sec)	비 고
0.5	4.2	5.0	$V = K \cdot \frac{W^{0.7}}{R^{1.5}}$ 여기서, K : 발파진동상수로서 700을 적용
1.0	4.2	8.1	
1.5	4.2	10.8	
2.0	4.2	13.2	
2.5	4.2	15.4	
3.0	4.2	17.5	
3.5	4.2	19.5	

조물에 대한 허용진속도를 만족시키는 지발당 장약량은 3.5kgf 로서, 터널 1회 굴진장을 최대 3.5m까지 적용 가능하므로 기존 표준지보패턴 선정시 적용한 굴진장(TYPE-1,2 ; L=3.5m) 은 적절한 것으로 검토되었다.

6. 지보패턴 적정성 검토

6.1 지보압 계산을 통한 지보패턴 적정성 검토

지보패턴의 안전율은 합성지보의 지보압과 암반이완 하중의 비례식으로 나타낼 수 있으며, 2-Arch 터널의 Type-II~V 에 대한 합성지보의 지보압 및 안전율을 산정한 결과는 표 13과 같으며, 암반하중(P_r)은 아래의 식 (12)를 이용하였다.

$$(P_R) = r_t \times H_t, H_t = \frac{(100-R)}{100} \times B \quad (12)$$

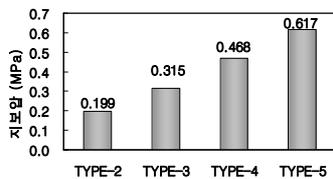
여기서, H_t : 암반하중 높이, B : 터널폭, r_t : 단위중량,
RMR : 암반등급에 따른 평균치 적용

표 12. 굴진장에 대한 지발당 장약량

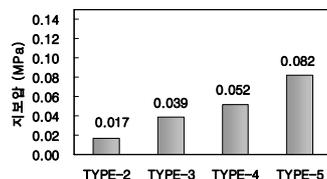
굴진장(m)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
장약량(kgf)	0.625	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0

표 13. 지보패턴 별 지보압 및 안전율 산정결과

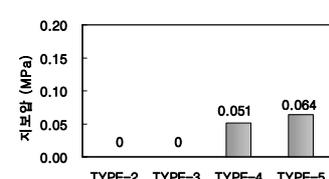
구 분	지보압 (MPa)				암반하중 (P_r , MPa)	안 전 율 (FS)
	쏿크리트 (P_{scmax})	록볼트 (P_{rlmax})	강지보재 (P_{ssmax})	전 체 (P_t)		
TYPE-II	0.199	0.017	-	0.216	0.081	2.662
TYPE-III	0.315	0.039	-	0.355	0.130	2.732
TYPE-IV	0.468	0.052	0.051	0.572	0.167	3.417
TYPE-V	0.617	0.082	0.064	0.764	0.196	3.885



(a) 쏿크리트 최대지보압

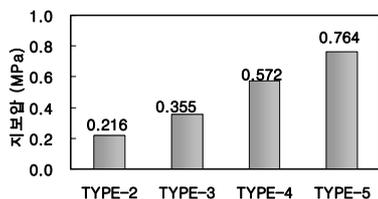


(b) 록볼트 최대지보압

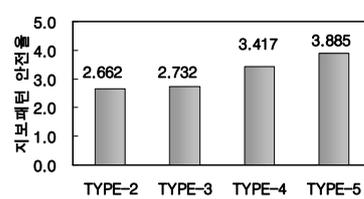


(c) 강지보 최대지보압

그림 14. 지보재의 종류에 따른 지보압 분포경향



(a) 합성지보 최대지보압



(b) 지보패턴별 안전율

그림 15. 합성지보의 지보압 및 지보패턴 안전율 분포경향

지보재의 종류에 따른 지보압은 그림 14와 같이 쏿크리트 최대지보압은 0.199~0.617MPa, 록볼트 최대지보압은 0.017~0.082MPa, 강지보 최대지보압은 0.051~0.064MPa 로 산정되었다.

합성지보 최대지보압은 그림 15와 같이 0.216~0.764MPa 로 분포하며, 각 지보패턴별 안전율 분포는 2.662~3.885로 기준치인 1.5이상으로 지보패턴 설계는 적절한 것으로 나타났다.

6.2 지반반응곡선을 이용한 적정성 검토

수치해석에 의한 지보재의 안정성만을 검토하는 것은 암반자체의 지보능력과 지보설치 후 암반과 지보재의 일체화된 거동을 알 수 없고 지보설치 시기에 따른 지보의 효과정도를 파악할 수 없기 때문에 지반 반응 곡선에 의한 지보재 적정성 검증 및 지보재 설치시기를 검토하였다.

지반반응 곡선 및 지보재 성능 검토에 의한 지보재 적정성 검토는 지반등급이 상대적으로 불량한 지보패턴 TYPE-4, TYPE-5에 대해 수행하였다.

6.2.1 TYPE-4 지반반응곡선

표 14와 같이 지반반응곡선 작성시 터널굴착에 의해 발생하는 내압을 굴착전 초기 압력에서 0.0까지 변화시켜 이에 따른 터널의 소성반경 및 터널변형을 계산한 결과 소성반경은 5.250~6.423mm, 터널변형은 0.000~8.649mm로 산정되었으며, 해석결과 초기응력 0.564MPa에 대하여 8.649mm 가량의 변형 후 암반안정화가 이루어지는 것으로 검토되었다.

또한, 그림 16의 암반-지보 특성곡선(TYPE-4)에서와 같이 슛크리트+록볼트의 최대 지보압력은 0.206MPa로서 한계지보압(P_{cr}) 0.023MPa 보다 크게 나타나 기존 지보패턴 설계는 적정한 것으로 나타났으며, 지보재 설치시기는 한

계지보압 발생이전인 천단부 변위 3.966mm 발생후 가능한 것으로 나타났다. 그림 17은 터널변형에 따른 소성영역의 확산도로서 반경방향 변형(mm)/터널 반경(m)의 비가 0.729 지점에서 소성영역이 크게 증가하는 경향을 나타냈다.

6.2.2 TYPE-5 지반반응곡선

표 15와 같이 지반반응곡선 작성시 터널굴착에 의해 발생하는 내압을 굴착전 초기 압력에서 0.0까지 변화시켜 이에 따른 터널의 소성반경 및 터널변형을 산정한 결과 소성반경은 5.250~6.297mm, 터널변형은 0.000~7.413mm로 산정되었으며, 해석결과 초기응력 0.514MPa에 대하여 7.413mm가

표 14. 내부지보압에 따른 소성반경 및 터널변형(TYPE-4)

단계	내부지보압 (MPa)	소성반경 r_p (m)	터널변형 U_i (mm)	소성반경/터널반경	터널변형/터널반경
0	0.000	6.423	8.649	1.223	1.647
1	0.005	6.105	6.023	1.130	1.147
2	0.010	5.697	5.070	1.085	0.965
3	0.018	5.444	4.223	1.037	0.804
4	0.023	5.310	3.031	1.011	0.729
5	0.097	5.250	3.185	1.000	0.606
6	0.205	5.250	2.449	1.000	0.466
7	0.313	5.250	1.714	1.000	0.326
8	0.384	5.250	1.224	1.000	0.233
9	0.492	5.250	0.489	1.000	0.093
10	0.564	5.250	0.000	1.000	0.000

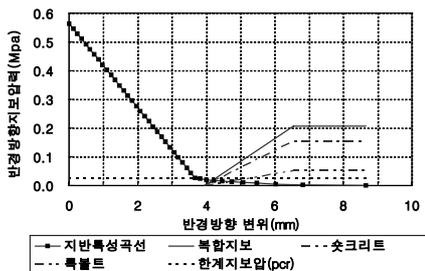


그림 16. 암반-지보 특성곡선(TYPE-4)

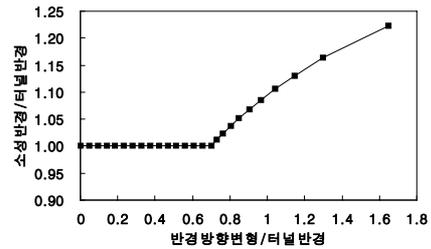


그림 17. 터널변형에 따른 소성영역의 확산도

표 15. 내부지보압에 따른 소성반경 및 터널변형(TYPE-5)

단계	내부지보압 (MPa)	소성반경 r_p (m)	터널변형 U_i (mm)	소성반경/터널반경	터널변형/터널반경
0	0.000	6.297	7.413	1.199	1.412
1	0.004	5.869	5.398	1.117	1.028
2	0.008	5.653	4.620	1.077	0.880
3	0.012	5.495	4.113	1.046	0.783
4	0.019	5.305	3.581	1.010	0.682
5	0.070	5.250	3.103	1.000	0.591
6	0.169	5.250	2.413	1.000	0.459
7	0.268	5.250	1.723	1.000	0.328
8	0.366	5.250	1.033	1.000	0.196
9	0.432	5.250	0.574	1.000	0.109
10	0.514	5.250	0.000	1.000	0.000

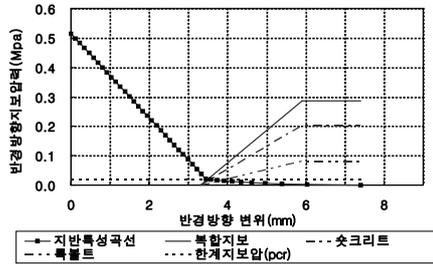


그림 18. 암반-지보특성곡선(TYPE-5)

량의 변형후 암반안정화가 이루어지는 것으로 검토되었다.
 또한, 그림 18의 암반-지보특성곡선(TYPE-5)에서와 같이 쏫크리트+록볼트의 최대 지보압력은 0.285MPa로서 한계지보압(P_{cr}) 0.019MPa 보다 크게 나타나 기존지보패턴 설계는 적정한 것으로 나타났으며, 지보재 설치시기는 한계지보압 발생이전인 천단부 변위 3.310mm 발생후 가능한 것으로 나타났다. 그림 19는 터널변형에 따른 소성영역의 확산도로서 반경방향변형/터널반경의 비가 0.682 지점에서 소성영역이 크게 증가하는 경향을 나타냈다.

7. 결 론

본 연구에서는 국내 2-Arch 도로터널의 설계 및 시공시 적용되고 있는 표준지보패턴에 대하여 하중분담율 및 편토압에 따른 거동을 분석하고, 발파진동이 중앙벽체에 미치는 영향을 분석하여 적용된 지보재들의 적정성 여부를 검토하였다. 또한 터널의 지보압 추정방법, 터널굴착시 공동주변의 암반과 터널지보재 사이의 상호거동에 따른 지반반응곡선방법을 이용하여 적용된 지보패턴의 적정성을 검증하였으며 종합적으로 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 기존 2-Arch 도로터널의 표준지보패턴 적용시 하중분담율을 일률적으로 적용하였으나, 본 연구에서는 지보패턴에 따라 경험식에 의해 산정된 하중분담율을 지보TYPE별로 상이하게 적용하여 지반변위 및 지보재 응력을 비교 검토하였다. 그 결과 굴착시 하중분담율을 낮게 적용한 기존의 경우가 지보재의 부담하중이 크게 나타나 비경제적인 설계가 될 수 있으므로 반드시 터널의 시공조건 및 지반조건을 고려하여 합리적인 하중분담율을 산정한 후 터널설계를 실시하여야 할 것으로 판단된다.
- (2) 2-Arch 도로터널에 대해 편토압에 의한 터널의 거동을 검토하기 위해 지형경사 및 토피고도를 변화시켜 수치해석을 실시한 결과 천단변위 및 측벽변위는 편경사각 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 이상에서 큰 상승폭을 보이고 있으며, 편토압의 영향에 의해 비대칭 거동을 하는 것으로 나타났다. 또한, 쏫크리트 휨압축 응력 및 록볼트 축력에 대한 분석 결과 편경사각 30° 이상에서 편토압의 영향을 받아

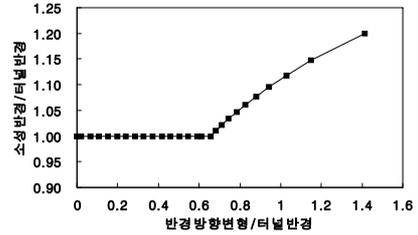


그림 19. 터널변형에 따른 소성영역의 확산도

터널 안정성에 문제가 발생하는 것으로 나타나 반드시 대상터널의 지형조건을 고려한 표준지보패턴 선정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

- (3) 본선터널 발파굴착시 발파진동이 중앙벽체에 미치는 영향을 검토한 결과, 허용진동속도를 만족시키는 지발당 약양량은 3.5kgf로서 기존 표준지보패턴의 최대굴진장($L=3.5m$)은 적정한 것으로 검토되었다.
- (4) 지보압 계산에 의한 방법 및 암반-지보반응곡선에 의한 기존 표준지보패턴의 적정성 검토결과 적용지보패턴은 적정한 것으로 나타났으나, 이는 특정지형 및 암질조건을 고려하여 해석 후 선정된 것으로 향후 2-Arch 도로터널의 설계 및 시공시 최종적인 표준지보패턴 선정은 상기내용에서 검토한 바와 같이 대상터널의 지형조건, 토질조건, 시공조건 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김상균, 김태혁, 이인모 (2003), 2-Arch 도로터널설계 및 시공 개선방안 고찰, *한국터널공학회지*, Vol. 5, No. 1, pp. 29~38.
2. 박동욱 (2003), *도로터널에서 2-Arch 터널의 적용성과 문제점 개선사항에 대한 연구*, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 4~14.
3. 신일재, 이정인 (2000), 발파진동이 양생중인 라이닝 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제 16권, 6호, pp. 29~63
4. 이석원, 정종원, 남석우, 이인모 (2005), 침투력이 터널의 지반반응곡선에 미치는 영향, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권 3호, pp. 87~88.
5. 이인모 (2004), *터널의 지반공학적 원리*, 새문, pp. 11~57.
6. 정대열 (1993), *터널막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석모델의 하중분배율에 관한 연구*, 박사학위논문, 서울대학교, pp. 109.
7. 한국도로공사 (2004), *설계실무 자료집*, pp. 113~116. pp. 263~270.
8. 한국터널공학회 (2004), *터널의 이론과 실무*, 구미서관, pp. 107~108.
9. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), *Underground Excavation in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 143~149, pp. 176, pp. 244~328.
10. Kirsch, G. (1898), *Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Fertigungslehre*, Veit. Ver. Deut. Ing., Vol. 42, No. 28, pp. 797~807.

(접수일: 2008. 8. 8 심사일: 2008. 8. 21 심사완료일: 2008. 11. 11)