

피난연결통로터널의 지보패턴 및 보강범위 연구

정민¹, 한기환², 박진원³, 백경민⁴, 문훈기^{5*}

Research on the Support System and Reinforcement range of Cross Passage Tunnel

Min Jung, Ki-Hwan Han, Jin-Won Park, Kyung-Min Baek, Hoon-Ki Moon

Abstract Recently, plans of tunnel and construction have increased. Unfortunately, the more we have tunnels, the more we have accidents in there. Because an accident or a fire in the tunnel is fatal to user safety, social concerns are focusing on the disaster prevention facilities. Cross passage tunnel is regarded as one of the useful disaster prevention facilities, which is increasing, while there were only few studies about the support system. This study tried to verify whether the support system is appropriate or not with empirical methods-theoretical methods and back analysis using measurement data. Additionally, we also looked into the range of reinforcement in accordance with strength/stress ratio of rock mass.

Keywords: Disaster prevention facility, cross passage tunnel, support system, strength/stress ratio of rock mass

요 지 최근 도로계획 및 건설추세는 터널의 개소수 증가와 장대터널의 건설이 증가하는 추세에 있으며, 이와 더불어 터널내 사고로 인한 재해발생도 증가하는 경향을 보이고 있다. 터널안에서 재해나 사고는 이용객의 안전에 치명적이므로 방재시설에 대한 사회적관심이 증가 하고 있다. 피난연결통로는 병설터널에서 유용한 방재시설이므로 설치개소가 늘고 있으나 지보패턴에 관한 연구는 미미한 실정이다. 본 연구에서는 경험적 방법으로 지보패턴을 선정하고 이론식과 피난연결통로 부의 계측결과를 이용한 역해석으로 적정성을 검증하고자 한다. 또한 지반강도비를 이용한 케이스 스터디를 통하여 본선과 피난연락경의 접속각도에 따른 보강범위도 검토하고자 한다.

주요어: 방재시설, 피난연결통로, 지보패턴, 지반강도비

1. 서 론

최근 도로계획 및 건설추세는 터널의 개소수 증가와 장대터널의 건설이 증가하는 추세에 있으며, 이와 더불어 터널 내 사고로 인한 재해 발생도 증가하는 경향을 보이고 있다.

특히, 도로터널에서의 재해발생은 인명에 대한 치명적인 결과를 초래하므로 터널내 방재 대책에 대한 사회적 관심이 고조되고 있으며, 이러한 사회적 관심을 반영하여 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(2009, 국토해양부)’에서 피난연결통로를 500 m 이상의 터널에 의무적으로 설치토록 제시하고 있고, 피난연결통로 간격도

250 m 이내로 규정하여 피난연결통로 설치 개소수가 급증하고 있으나, 현재 피난연결통로 및 피난연결통로 접속부 보강에 대한 지보패턴은 단면크기나 접속에 따른 영향이 반영되어 있지 않은 실정이다. 산악터널의 경우 피난연결통로는 갱구에서 200 m 이상 이격된 구간에 설치되는 경우가 일반적이므로 설계시 별도의 조사를 수행하지 않는 실정이며, 파쇄대나 연약대 구간에 위치하지 않을 경우 양호한 암반에 설치되는 경우가 대부분이다. 따라서 본 논문에서는 본선과 피난연결통로 접속부의 지반응력 특성을 고려한 적정 지보량 및 보강범위 산정방안을 제시하고자 하였다.

2. 피난연결통로 지보패턴 선정

2.1 피난연결통로 지보패턴 적용 현황

현재 국내 도로터널 피난연결통로의 지보패턴은 암반 등급별(RMR에 의한 등급) 2~3가지 패턴으로 구분하

¹한국도로공사 팀장

²정회원, 한국도로공사 차장

³한국도로공사 차장

⁴정회원, 한국도로공사 대리

⁵정회원, (주) 용마엔지니어링 터널부 상무

* 교신저자: 문훈기 (E-mail: mhk@ymeng.co.kr)

여 적용하고 있으며, Type-1,2 분류는 고속국도 제60호선 춘천~양양간 건설공사와 고속국도 제12호선 88울림픽 고속도로 확장공사 등에 적용되었고, Type-1,2,3 분류는 삼척~동해간 고속도로 건설공사와 울산~포항간 고속도로 건설공사 등에 적용된 지보패턴이다. 위 두 가지 분류기준은 접속부 본선 보강패턴에 따라 선별적으로 적용되고 있으며, 최근에 도로공사 설계지침 개정으로 접속부 본선 보강패턴이 RP-1,2에서 RP-1, 2, 3으로 변경되면서 피난연결통로의 경우 Type-1, 2분류에서 Type-1,2,3 분류로 변경되어 적용되고 있다.

표 1, 2에서와 같이 현재 적용되고 있는 피난연결통로 지보패턴은 단면크기에(차량용 및 대인용) 관계없이 암

반등급별로 일률적인 지보를 적용하고 있으며, 교차부와 일반부(접속에 따른 영향이 작은 구간)의 구분 없이 피난연결통로 전 구간을 동일 지보량으로 보강하고 있고, 교차부 6 m구간만 라이닝 철근 및 보강 락볼트를 추가하도록 계획되고 있는 것으로 검토되었다. 따라서 피난연결통로 단면크기(차량용 및 대인용), 교차부, 일반부 등 각각의 현황에 맞는 적절한 지보량을 분석하여 합리적인 지보패턴 선정이 필요한 것으로 분석되었다.

2.2 피난연결통로 지보패턴 선정

경험식에 의해 터널의 지보패턴을 선정하는 방법은 RMR, Q-system등이 있으나 RMR방법은 터널의 크기

표 1. 피난연결통로 지보패턴(Type-1,2)

구 분	대인용 피난연결통로		차량용 피난연결통로		
	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	
암반등급	I, II, III	IV	I, II, III	IV	
RMR	41이상	40~21	41이상	40~21	
Q-value	4이상	4~1	4이상	4~1	
굴진장	2.0 m	1.5 m	2.0 m	1.5 m	
숫크리트두께	8 cm	12 cm	10 cm	12 cm	
락볼트	길이	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m
	종간격	2.0 m	1.5 m	2.0 m	1.5 m
	횡간격	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m
강지보	제원	-	LG-50x20x30	-	LG-50x20x30
	간격	-	1.5 m	-	1.5 m

표 2. 피난연결통로 지보패턴(Type-1,2,3)

구 분	대인용 피난연결통로			차량용 피난연결통로		
	Type-1	Type-2	Type-3	Type-1	Type-2	Type-3
암반등급	I,II	III	IV	I,II	III	IV
RMR	61이상	60~41	40~21	61이상	60~41	40~21
Q-value	10이상	10~4	4~1	10이상	10~4	4~1
굴진장	2.0 m	2.0 m	1.5 m	2.0 m	2.0 m	1.5 m
숫크리트두께	8 cm	12 cm	12 cm	8 cm	12 cm	12 cm
락볼트	길이	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m
	종간격	2.0 m	2.0 m	1.5 m	2.0 m	2.0 m
	횡간격	2.0 m	1.5 m	1.5 m	2.0 m	1.5 m
강지보	제원	-	LG-50x20x30	-	-	LG-50x20x30
	간격	-	1.5 m	-	-	1.5 m

나 교차부에 대한 선정방법이 제시되어 있지 않으며, 피난연결통로 단면크기를 고려하고, 접속부와 일반부에 대해 차등적인 지보패턴을 선정하기 위해 단면크기와 교차 터널부를 반영할 수 있는 Q-system에 의한 지보량 산정 방법을 적용하였다.

Q-system에서 Jn에 대한 평점은 암반의 절리군 수와 상태에 따라 결정되며, 교차 터널부(접속부)나 갱구부에 대한 특수규정을 두어 Q값을 보정하도록 하고 있다.

표 3에 의하면 Jn 보정계수는 교차부 터널에 대하여 3.0×Jn 적용하도록 규정하고 있으므로 Q_{교차부}는 다음과 같다.

$$Q_{\text{일반부}} = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

$$\Leftrightarrow Q_{\text{교차부}} = \frac{RQD}{3 J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

여기서, $Q_{\text{교차부}} = \frac{1}{3} Q_{\text{일반부}}$

표 4에서 산출된 교차부에 대한 Q값과 피난연결통로 터널의 직경(차량용 피난연결통로: 6.42 m, 대인용피난연결통로: 3.56 m)을 감안하면 다음의 Q-System 도표에 의한 지보량을 산출할 수 있다.

경험적인 방법에 의한 지보량 및 국내 피난연결통로

지보패턴을 종합하여 표 5와 같이 차량용 및 대인용 피난연결통로에 대해 일반부와 교차부로 구분하여 지보패턴 선정하였으며, 교차부는 Q_{교차부} 값을 이용하여 지보량을 산정하였다.

본 연구에서 선정한 피난연결통로 지보패턴과 기존 지보패턴과의 차이점은 본선 및 피난연결통로 접속부의 영향을 작게 받는 일반부의 지보량을 터널 안정성을 만족하는 범위 내에서 적정 수준으로 감소시킨 것이며, 경제성 분석 결과 대인용 및 차량용 피난연결통로 모두 당초에 비해 개선안이 최소 5%(차량용 TYPE-1)에서 최고 25%(대인용 TYPE-2)까지 공사비가 감소하는 것으로 검토되었다.

3. 역해석을 통한 피난연결통로 지보패턴 적정성 검토

3.1 역해석 개요

선정된 피난연결통로 지보패턴의 적정성을 검증하기 위해 현장계측 자료를 바탕으로 한 3차원 역해석을 수행하여 현장 특성이 반영된 변형계수와 축압계수를 산정하였다. 본 연구에 적용된 역해석 기법은 확장된 Bayesian방법(Extended Bayesian Method, EBM)을 사용

표 3. Q-system에서 Jn값 점수 및 보정

Joint Set Number	Jn	비 고
A. 피상으로 절리가 전혀 없거나 또는 거의 없음	0.5-1	1. 교차터널부에 대하여 3.0 × J _n 2. 갱구부에 대하여 2.0 × J _n
B. 1방향의 절리군	2	
C. 1방향의 절리군 과 random한 절리	3	
D. 2방향의 절리군	4	
E. 2방향의 절리군 과 random한 절리	6	
F. 3방향의 절리군	9	
G. 3방향의 절리군 과 random한 절리	12	
H. 4 또는 그 이상의 절리군 과 랜덤하게 현저히 많은 절리	15	
I. 토사상으로 파쇄된 암반	20	

표 4. 표준지보패턴별 교차부에 대한 Q-Value 산정

구분	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
암반등급	I	II	III	IV	V
Q _{일반부}	40이상	40~10	10~4	4~1	1이하
Q _{교차부}	13이상	13~3	3~1	1~0.3	0.3이하

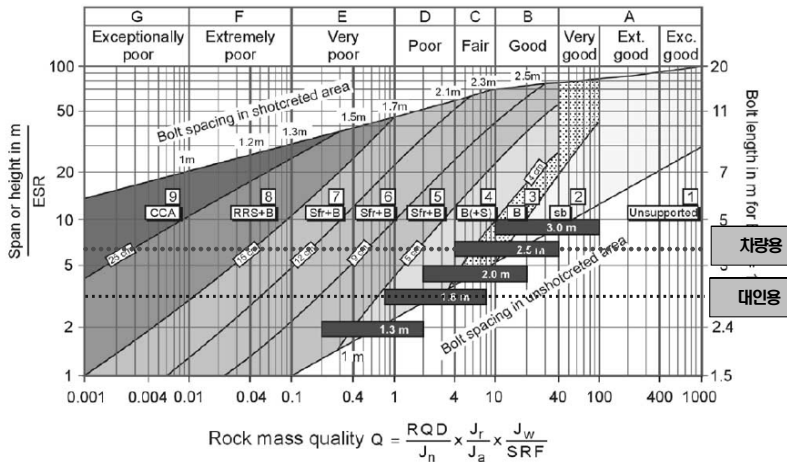


그림 1. Q-system 도표를 이용한 지보량 선정(Barton, N. & Grimstad, E., 1994)

표 5. 피난연결통로 표준지보패턴 개선안 (한국도로공사, 2009)

구 분	대인용 피난연결통로				차량용 피난연결통로				
	Type-1		Type-2		Type-1		Type-2		
	일반부	교차부	일반부	교차부	일반부	교차부	일반부	교차부	
암반등급	I, II, III		IV		I, II, III		IV		
RMR	41이상		40~21		41이상		40~21		
Q-value	4이상	1이상	4~1	0.3~1	4이상	1이상	4~1	0.3~1	
굴착공법	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	
굴진장(m)	3.5	2.0	2.0	1.5	3.5	2.0	2.0	1.5	
숏크리트(cm)	5	8	8	12	8	10	10	12	
락 볼 트	길이(m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
	종간격(m)	Random	2.0	Random	1.5	3.5	2.0	2.0	
	횡간격(m)	Random	1.5	Random	1.5	1.5	1.5	1.5	
강 지 보	제원	-	-	-	50x20x30	-	-	-	50x20x30
	간격(m)	-	-	-	1.5	-	-	-	1.5
라이닝(cm)	30	30(철근)	30	30(철근)	30	30(철근)	30	30(철근)	

하였으며, EBM의 목적함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$S_{EBM} = J_0 + \beta J_p \quad (2)$$

여기서,

$$J_o(\theta) = \sum_{k=1}^K \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}^T V_u^{-1} \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\},$$

$$J_p(\theta) = (\theta - p)^T V_p^{-1} (\theta - p)$$

여기서, J_o 항은 예측변위와 계측변위로 구성된 객관적 정보항(objective information)이며, J_p 항은 설계시 평가된 지반정수값(p)과 역해석에 의해 평가된 최적지반정수(θ)로 구성된 주관적 정보항(subjective information)이다. EBM의 경우, 변위에 관련된 객관적 정보항과 지반특성 치에 관련된 주관적 정보항이 모두 목적함수에 포함되어 있으며, 이 두 가지 정보항에 AIC값을 최적화시키는 가상의 β 값을 통하여 적절히 가중치를 부여함으

로써 최적의 지반특성치를 평가하게 된다.
또한, 터널에서의 절대변위를 역해석 입력 값으로 하

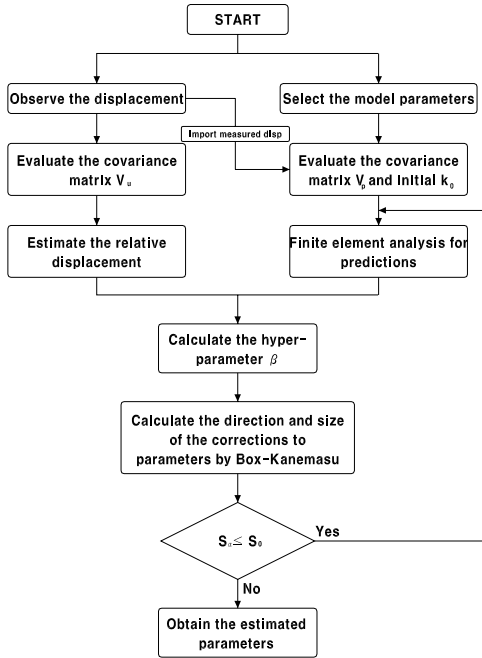


그림 2. 역해석 프로그램 흐름도(최민광, 2004)

는 기존의 역해석 기법의 한계와 어려움을 극복하고자, 터널 내에서 계측되어지는 터널의 상대변위 만을 이용하여 역해석을 수행하는 3차원 상대변위 역해석 기법으로 본선 및 피난연결통로 접속부 구간의 역해석을 수행하였다.

적용된 역해석 프로그램은 PENTAGON 3D와 연동이 가능하게 개발되었으며, 최적의 지반정수를 얻을 때까지 반복적인 FEM을 수행하게 된다. 특히 역해석 초기의 K₀를 계측된 터널 상대변위를 분석하여 자동적으로 0.7과 1.5로 부여함으로써 역해석의 효율성을 꾀하였다.

3.2 현장계측

피난연결통로 구간의 지반거동을 파악하기 위해 현재 시공 중인 고속도로 터널에 계측을 위한 시험위치(Test Site)를 총 3개소(대인용 피난갱 2개소, 차량용 피난갱 1개소) 선정하고 피난연결통로 굴착시 천단변위, 내공변위, 지중변위, 쏫크리트 응력, 록볼트 축력을 측정하였으며, 암반등급 및 계측시기는 표 6에 나타내었으며 피난연결통로의 계측항목은 표 7에 표기하였다.

피난연결통로의 변위 측정결과 상행선 교차부, 중앙부, 하행선 교차부의 천단변위 및 내공변위는 전반적으로 피난연결통로 중앙부에 비해 교차부에서 더 크게(시

표 6. 피난연결통로 계측계획

위치	형식	암반등급	내 용
00터널 시험위치 No. 2	대인	II	대인용 피난연결통로 구간 '08.10.09 계측기 설치 및 초기치 측정
00터널 시험위치 No. 1	대인	I	대인용 피난연결통로 구간 '08.09.21 계측기 설치 및 초기치 측정
00터널 시험위치 No. 3	차량	I	차량용 피난연결통로 구간 '08.11.01 계측기 설치 및 초기치 측정

표 7. 피난연결통로 계측 항목

구분	계측항목	내 용
일상 계측	막장관찰	· 전막장
	내공변위	· 피난연결통로 중앙부 및 본선 접속부(3개소)
	천단침하	
정밀 계측	지중변위	· 피난연결통로-본선 접속부(2개소)
	쏫크리트응력	
	록볼트축력	

험위치 No.1, 40%) 발생하는 것으로 나타났으며, 교차부에 설치한 지중변위계 측정결과 변위값은 천단 및 내공변위 발생양상과 비슷한 경향을 보이며 피난연결통로 굴진 초기에 변위 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

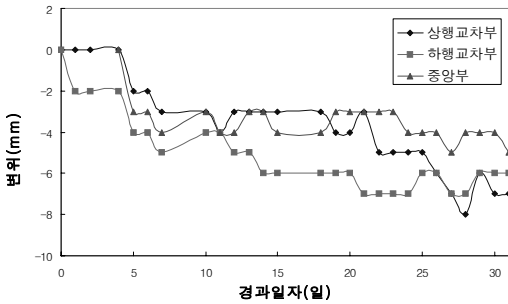


그림 3. 시험위치 No.1에서의 천단변위 현장 계측자료

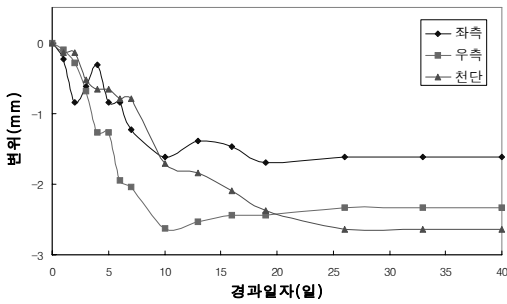


그림 4. 시험위치 No.2에서의 지중변위 현장 계측자료

교차부에 설치한 록볼트 축력 및 슛크리트 응력 측정 결과 상행선 접속부 및 하행선 접속부 모두 좌우측부에 비해 천단부의 값이 큰 것으로 나타났으며 이는 본선과 접속하는 피난연결통로 천단부 응력집중의 영향인 것으로 판단된다. 따라서 피난연결통로 현장계측 자료의 경향을 참고하여 피난연결통로 지보패턴 선정시 교차부 및 중앙부로 구분하여 적용하였다.

3.3 역해석을 통한 지반물성치 산정

본 연구의 현장계측 구간인 시험위치 No.3의 피난연결통로 교차부 본선구간 시공시 계측 자료를 분석하여 역해석 수행시 입력 변위 값으로 선정하였으며, 역해석 대상 구간인 00터널의 지질개요는 그림 6과 같다.

피난연결통로 교차부의 본선 계측 자료를 획득하여

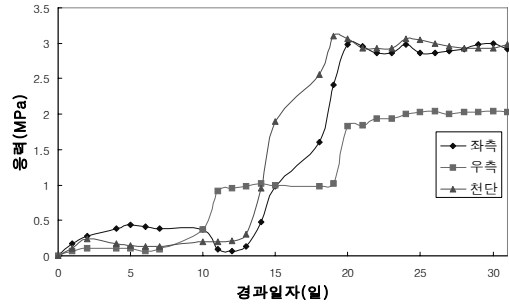


그림 5. 시험위치 No.1에서의 슛크리트 응력 현장 계측자료

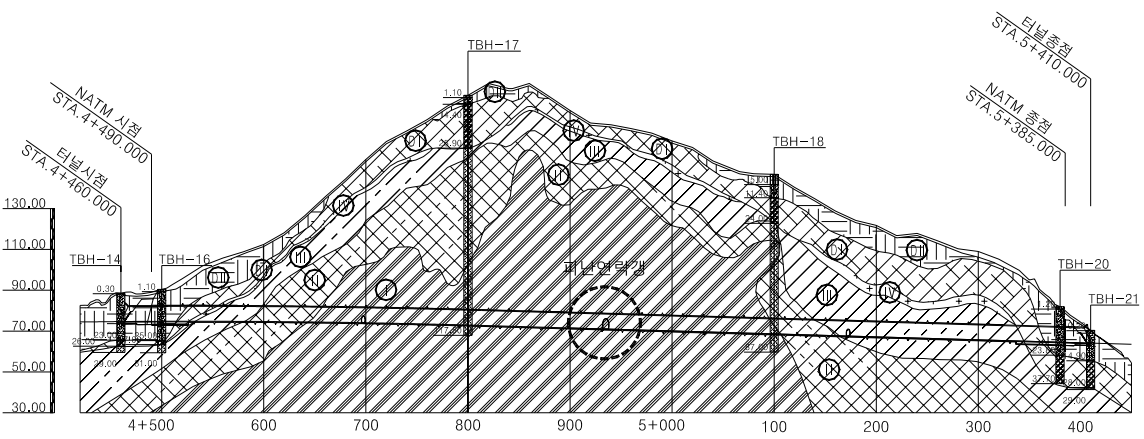
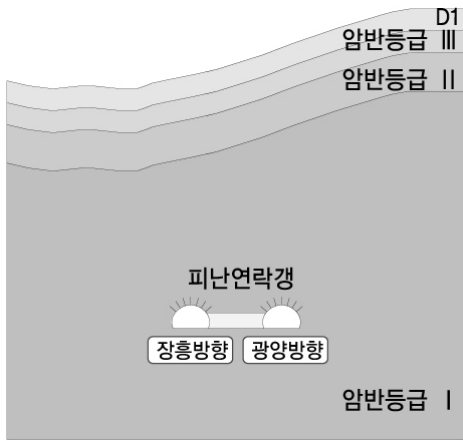
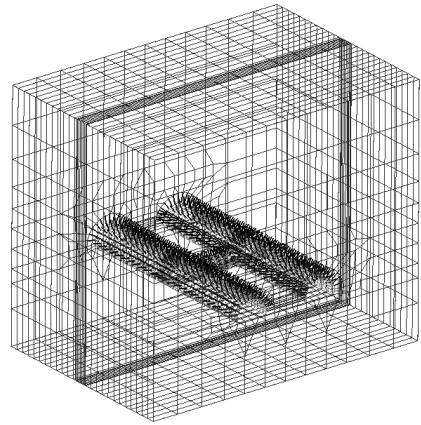


그림 6. 역해석 대상구간의 지질개요도

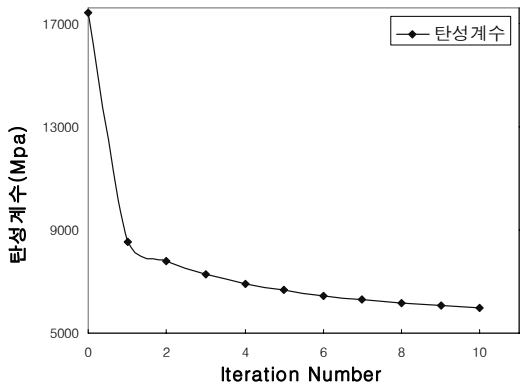


(a) 표준횡단면도

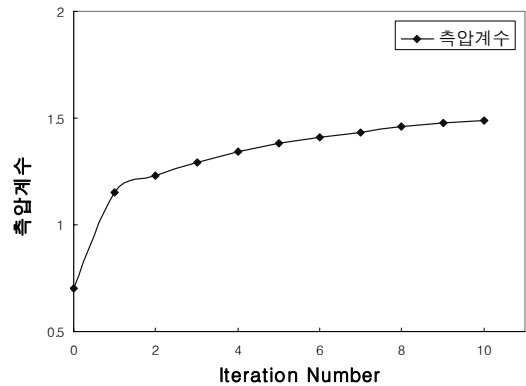


(b) 3차원 해석 모델링도

그림 7. 역해석 단면도 및 해석 모델링



(a) 탄성계수 변화 그래프



(b) 측압계수 변화 그래프

그림 8. 역해석 수행 결과

이를 시공단계별 역해석 입력치로 선정하고 설계시 평가된 지반특성치를 역해석 초기 값으로 설정하여 역해석을 수행하였으며, 해석의 정확성을 위하여 상·하행 및 교차부를 모델링 하고 터널 통과구간 지반의 탄성계수 값과 측압계수에 대하여 역해석을 수행하였다.

역해석 목적함수가 수렴할 때까지 반복하여 수치해석을 수행하여 피난연결통로 교차부의 최적의 지반특성치를 평가하였으며, 그 결과 그림 8에서와 같이 터널의 변위에 영향을 미치는 피난연결통로 구간의 탄성계수가 큰 폭으로 변화하여 설계시 예측된 17,400 MPa에서 약 65% 감소한 6,000 MPa에서 최종적으로 수렴되었고,

측압계수의 경우 설계시 가정된 1.0보다 높은 약 1.5 정도의 값에서 수렴되는 경향을 나타내며 이는 천단변위에 비해 상대적으로 내공변위가 큰 변위값을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

역해석 수렴시 최종 천단변위는 -2.01 mm로 예측치인 -2.15 mm와 비슷한 수치를 나타내었고, 최종 내공변위 또한 -1.11 mm로 예측치인 -1.22 mm와 거의 유사한 결과를 나타내므로 반복연산에 의한 탄성계수 및 측압계수의 증감 경향은 적절한 것으로 검토되어 피난연결통로 구간의 지반특성치로 선정하였으며, 피난연결통로 구간의 역해석을 통하여 평가된 지반의 탄성계수와 측

압계수는 본 연구에서 선정된 피난연결통로 지보패턴의 적정성 검증을 위한 3차원 지반해석의 입력자료로 활용하였다.

3.4 3차원 지반해석을 통한 지보패턴 적정성 검토

역해석에 의해 산정된 지반 물성치를 이용하여 본 연구에서 선정된 차량용 및 대인용 피난연결통로 구간 지보패턴의 적정성 검토를 위해 지반 및 터널해석 전용 프로그램인 MIDAS GTS를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 수치해석을 위한 지반경계범위는 터널 좌측 및 하부 경계는 4D이상(D:터널직경) 상부는 지표면 고저차를 반영하여 모델링하였다.

피난연결통로 통과구간의 지반물성치는 표 8과 같으며, 축압계수는 역해석 결과치인 1.5를 적용하였다. 터

널 통과구간은 암반 I 등급 구간이므로 피난연결통로의 지보패턴은 교차부 및 일반부 모두 TYPE-1 적용하여 해석을 수행하였다.

차량용 피난연결통로 지보패턴 적정성 검증을 위한 3차원 수치해석 결과 천단변위는 교차부 -1.245 mm 및 일반부 -1.019 mm로 수렴하였고, 내공변위는 교차부 -1.131 mm, 일반부 -0.940 mm로 수렴하였으며, 슛크리트 응력은 교차부 5,419 kPa, 일반부 0.106 kPa으로 허용치인 8,400 kPa 이내로, 그리고 록볼트 축력은 교차부 8.681 kN, 일반부 0.194 kN으로 허용치인 88.7 kN 보다 작게 검토되어 선정된 지보패턴은 적정한 것으로 분석되었다.

대인용 피난연결통로 지보패턴 적정성 검증을 위한 3차원 수치해석 결과 천단변위는 교차부 -1.257 mm 및 일반부 -1.041 mm로 수렴하였고, 내공변위는 교차부 -1.247 mm, 일반부 -1.287 mm로 수렴하였으며, 슛크리트 응력은 교차부 2,794 kPa, 일반부 1,615 kPa으로 허

표 8. 수치해석 적용물성치

지반등급	단위중량 (kN/m ³)	변형계수 (MPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아슨비
I(터널구간)	26.3	6,000	2.1	44	0.2

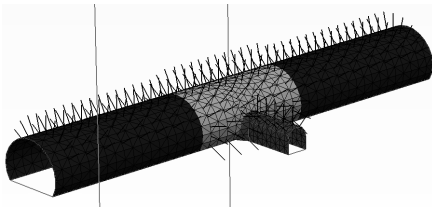


그림 9. CASE Study 수행을 위한 모델링도(대인용 접속부-접속각도 90°)

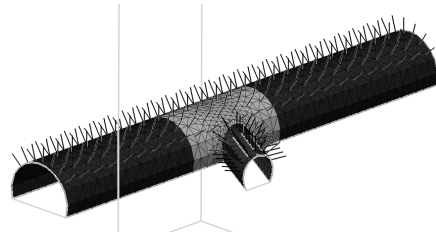


그림 11. CASE Study 수행을 위한 모델링도(차량용 접속부-접속각도 60°)

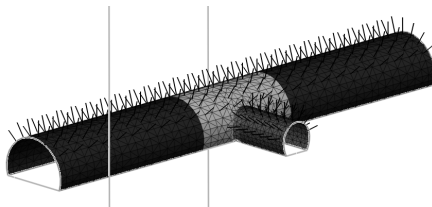


그림 10. CASE Study 수행을 위한 모델링도(차량용 접속부-접속각도 90°)

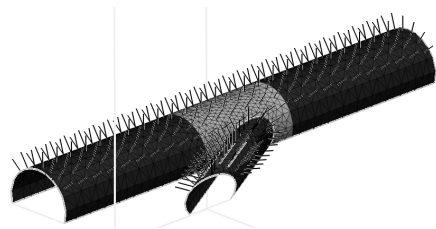


그림 12. CASE Study 수행을 위한 모델링도(차량용 접속부-접속각도 30°)

용치인 8,400 kPa 이내로, 그리고 록볼트 축력은 교차부 8.112 kN로 허용치인 88.7 kN 보다 작게 검토되어 선정된 지보패턴은 적절한 것으로 분석되었다.

4. 피난 연결통로 접속부 보강범위 검토

피난연결통로 접속부 보강범위 선정을 위해 Hsiao (2008) 등의 연구결과를 참고로 하여 한국도로공사 표준지보패턴, 접속부 보강패턴(RP-1~3), 피난연결통로 지보패턴을 적용하여 수치해석을 활용한 Case Study(84 단면)를 수행하였다.

Hsiao 등의 연구에서는 접속각도 및 심도 변화를 고려한 암반등급별 보강범위를 터널천단변위의 10%증가량을 기준으로 제시하였으나, 접속터널 단면변화의 영향을 고려하지 못하였으므로 본 연구에서는 단면크기가 상이한 대인용 및 차량용 피난연결통로에 대해 Case Study를 수행하여, 단면 크기에 따른 접속부 영향을 반영하였다.

4.1 CASE STUDY 해석조건

Case Study 수행시 고려인자는 터널상부 토피고 변화에 따른 지중응력(P_0)와 암반강도(σ_{cm})의 비(σ_{cm}/P_0) 및 접속각도($90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$) 변화의 변화이며 이에 따른 본선 및 피난연결통로 거동을 검토하였다. 경계부 형성에 따른 영향을 최소화하기 위하여 바닥부는 3D, 측면은 4D, 천단부는 100 m 이상 이격시켜 적용하였고, 100 m 이상의 토피고는 상재하중으로 작용시켜 해석에 반영하였다. 토피고는 100 m, 300 m, 500 m인 경우와 각각

의 토피고에 대해 연암(Soft rock), 보통암(Medium rock) 및 경암(Hard rock)의 3가지 암종에 대하여 Case study를 수행하였으며, 각각의 암종은 $\sigma_{ci(soft)}=10 MPa$ (연암), $\sigma_{ci(medium)}=50 MPa$ (보통암), $\sigma_{ci(hard)}=100 MPa$ (경암)의 해석특성치를 반영하였다.

Hoek(2002)가 제안한 지질강도정수(GSI)와 RMR 간의 상관관계 및 등가 Mohr-Coulomb 파괴기준 c, ϕ 값으로부터 암반강도(σ_{cm})를 산정하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

Hoek 등(2002)은 $-\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3,max}$ 범위에서 파괴포락선을 평균적으로 근사하는 직선($\sigma_1 - \sigma_3$ 관계로 표현된 Mohr-Coulomb식)을 구하고 식 (3), (4) 으로부터 내부마찰각(ϕ)과 점착강도(c)를 구하여 사용하는 것을 제안하였으며, 본 연구에서는 표 9 와 같이 RMR과 토피고에 따른 c, ϕ 값을 산정하여 암반강도(σ_{cm})를 결정하는 입력치로 적용하였다.

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3)$$

$$c = \frac{\sigma_c[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}/[(1+a)(2+a)]}} \quad (4)$$

등가 Mohr-Coulomb 파괴기준의 c, ϕ 값으로부터 암

- RMR 값으로부터 GSI의 산정 :

$$GSI = RMR - 5, (RMR \geq 23)$$

- Hoek-Brown 파괴기준 m_i 값 산정 (단, $D=0$ 으로 가정)

$$: m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right), s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

$$: a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{20/3})$$

- 등가의 c, ϕ 값 산정

- 암반강도 σ_{cm} 산정 : $\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$

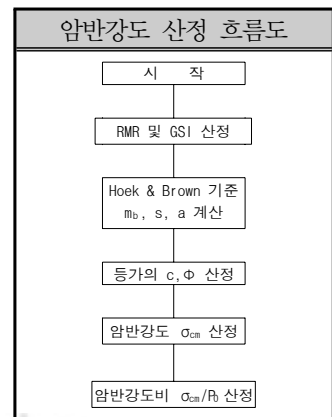


표 9. 수치해석 적용물성치

구 분	RMR	토피고 500m		토피고 300m		토피고 100m	
		c(MPa)	$\phi(^{\circ})$	c(MPa)	$\phi(^{\circ})$	c(MPa)	$\phi(^{\circ})$
경암 (Hard rock)	70	3.32	52	2.58	55	1.73	60
	50	2.25	46	1.64	50	0.87	58
보통암 (Medium rock)	70	2.38	47	1.79	51	1.07	58
	50	1.70	41	1.23	45	0.63	53
	30	1.18	35	0.84	39	0.41	47
연암 (Soft rock)	70	-	-	0.90	39	0.46	47
	50	-	-	0.67	33	0.33	42
	30	-	-	0.47	27	0.23	35

표 10. 해석조건별 암반강도비 산정결과

구 분	RMR	토피고 500m	토피고 300m	토피고 100m
경암 (Hard rock)	70	1.474	2.113	5.208
	50	0.867	1.162	2.309
보통암 (Medium rock)	70	0.968	1.340	2.977
	50	0.604	0.800	1.517
	30	0.362	0.470	0.828
연암 (Soft rock)	70	-	0.521	0.993
	50	-	0.342	0.618
	30	-	0.213	0.370

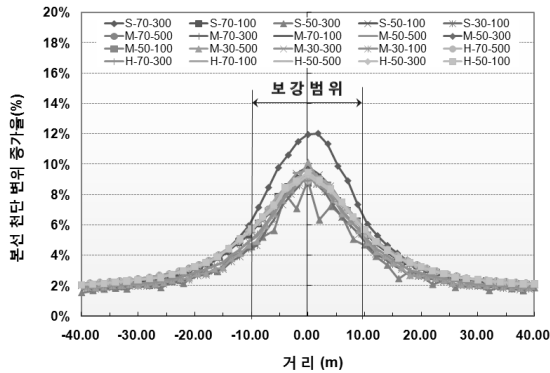


그림 13. 접속 각도별 본선부 보강범위 선정(차량용 90° 접속)

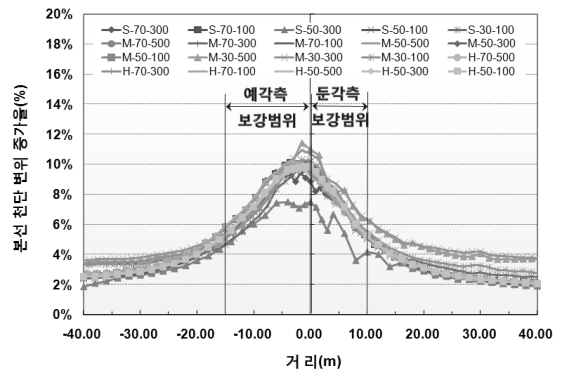


그림 14. 접속 각도별 본선부 보강범위 선정(차량용 60° 접속)

반강도(σ_{cm})를 산정하고 적용 토피고 및 암종별 단위중량을 감안한 유효토피고중(P_0)으로부터 표 10 과 같이 암반강도비(σ_{cm}/P_0)를 산정하였다.

4.2 접속각도별 보강범위 선정

Case Study 수행시 고려인자는 암반강도와 터널상부 토피고 변화에 따른 초기지중응력비(σ_{cm}/P_0), 암반등급(RMR) 및 피난연결통로 접속각도이며 이들의 영향을 고려하여 본선 및 피난연결통로 거동을 검토하였다. 검토 결과 그림 13~18과 같이 본선과 피난연결통로의 접

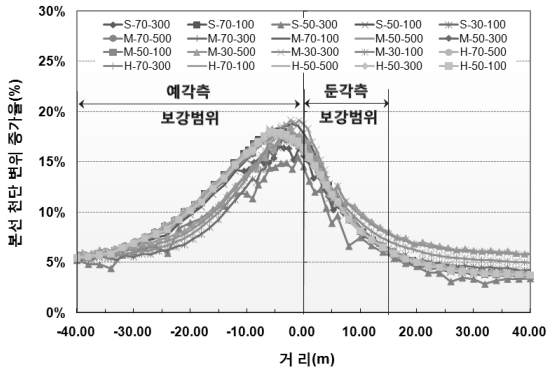


그림 15. 접속 각도별 본선부 보강범위 선정(차량용 30° 접속)

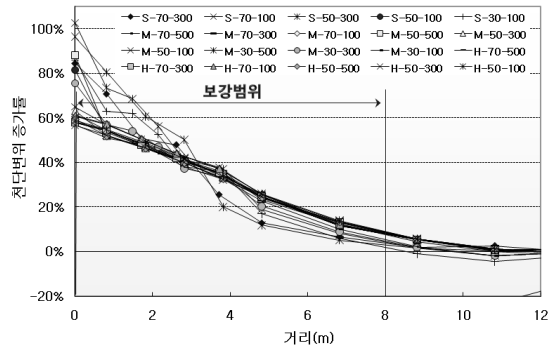


그림 17. 접속 각도별 피난연결통로 보강범위 선정(차량용 60° 접속)

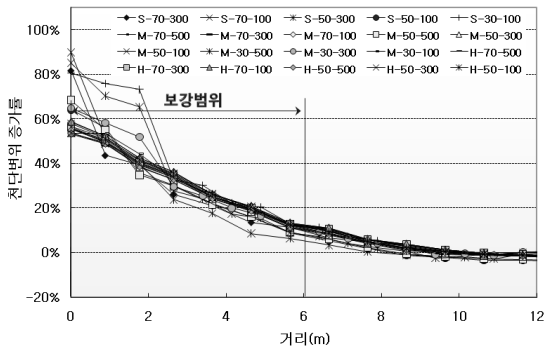


그림 16. 접속 각도별 피난연결통로 보강범위 선정(차량용 90° 접속)

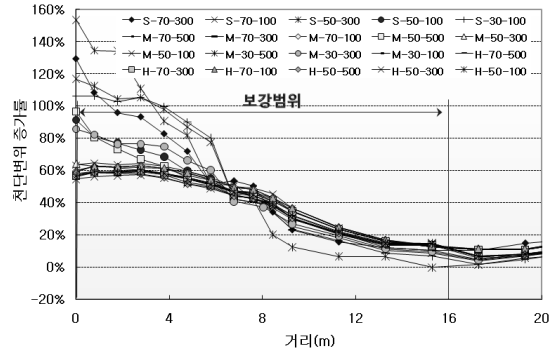


그림 18. 접속 각도별 피난연결통로 보강범위 선정(차량용 30° 접속)

속각도가 작을수록 천단변위 증가율이 커져서 보강범위가 증가하는 경향을 나타내었다.

하단의 표 11은 본선 및 대인용 피난연결통로 90° 접속부의 보강영역을 정리한 내용으로써 이 경우 암반강도비 σ_{cm}/P_0 가 가장 작은 S-50-300과 M-30-500의 소성영역 발생을 검토하여 접속부 응력집중에 의한 피난연결통로 보강영역 검토하였으며, Case Study 결과를 활용하여 피난연결통로 접속부의 보강범위를 검토한 결과는 다음과 같다.

해석결과 본선과 피난연결통로 접속부 천단부 및 측벽에 집중적으로 소성영역이 발생하며 추가적인 지보설치로 터널 안정성을 확보하여야 할 것으로 판단되며, Case Study 결과 5~7%의 추가변위를 허용할 때 본선 보강범위는 10 m 접속터널의 보강범위는 4 m가 적정한 것으로 검토 되었다.

하단의 표 12는 본선 및 차량용 피난연결통로 90° 접속부의 보강영역을 정리한 내용으로써 본선 보강범위의 경우 암반등급에 관계없이 현재 적용중인 보강범위 20 m를 기준으로 할 때 약 5~7% 추가적인 천단변위를 허용하는 것으로 나타났다. 따라서 피난연결통로가 30°, 60°로 접속하는 Case의 경우 피난연결통로 굴착 후 5~7%의 추가적인 천단변위 발생을 기준으로 보강범위를 선정하였고, 피난연결통로 접속터널의 해석 결과 현재 적용중인 보강범위 6 m는 90° 접속시 약 10%의 추가변위를 허용하는 것으로 판단되며 Hsiao(2008) 등의 연구결과와 부합한다. 따라서 피난연결통로가 30°, 60°로 접속하는 Case의 경우 10%의 추가적인 피난연결통로 천단변위 발생을 기준으로 보강범위를 선정하였다.

하단의 표 13은 본선 및 차량용 피난연결통로 60° 접속부의 보강영역을 정리한 내용으로써 본선 보강범위

표 11. 본선 및 대인용 피난연결통로 접속부(90°도 접속시)

구분	본선 보강영역(m)		접속터널 보강영역(m)
	예각측	둔각측	
본 연구 성과	10.0	10.0	4.0
일본도로공단	13.3	13.3	3.4
Hsiao 등의 연구	5.78	5.78	5.78

표 12. 본선 및 차량용 피난연결통로 접속부(90°도 접속시)

구분	본선 보강영역(m)		접속터널 보강영역(m)
	예각측	둔각측	
본 연구 성과	10.0	10.0	6.0
일본도로공단	13.3	13.3	6.2
Hsiao 등의 연구	10.6	10.6	10.6

해석결과 본선 천단부 변위분포는 피난연결통로가 예각(60°)으로 접속하는 측이 변위발생이 다소 집중되는 경향을 나타내며 둔각측(120°)의 경우 90° 접속시와 유사한 변위분포 경향을 나타내는 것으로 검토되어 예각측의 경우 15 m, 둔각측의 경우 10 m를 피난연결통로 설치에 의한 보강범위로 선정하였다. 60° 접속시의 피난연결통로 접속터널의 경우 본선 접속부의 천단변위 증가율이 약 60~100%를 나타내어 90° 접속시의 50~90%에 비하여 다소 증가하는 것으로 나타났으며, 60° 접속시 본선과 예각으로 접속하게 됨에 따라 변위증가율이 증가하게 되어 피난연결통로 보강범위는 약 8 m로 정도로 평가되었다.

마지막으로 하단의 표 14는 본선 및 차량용 피난연결통로 30° 접속부의 보강영역을 정리한 내용으로써 본선 보강범위 해석결과 본선 천단부 변위분포는 피난연결통로가 예각(30°)으로 접속하는 측이 변위발생이 크게 집중되는 경향을 나타내며 둔각측(150°)측 또한 90° 접속시에 비하여 변위가 다소 크게 발생하여 피난연결통로 설치에 따른 영향범위가 확대되는 것으로 검토되어 예각측의 경우 40 m, 둔각측의 경우 15 m를 피난연결통로 설치에 의한 보강범위로 선정하였고, 30° 접속시 피난연결통로 접속터널의 경우 본선 접속부의 천단변위 증가율이 약 60~160%를 나타내어 90° 접속시의 50~90%에 비하여 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 30° 접속시 본선과 예각으로 접속하게 됨에 따라 변위증가율이 증가하게 되어 피난연결통로 보강범위는 약 16 m

표 13. 본선 및 차량용 피난연결통로 접속부(60°도 접속시)

구분	본선 보강영역(m)		접속터널 보강영역(m)
	예각측	둔각측	
본 연구 성과	15.0	10.0	8.0
일본도로공단	16.6	13.3	12.4
Hsiao 등의 연구	15.5	10.6	15.5

표 14. 본선 및 차량용 피난연결통로 접속부(30°도 접속시)

구분	본선 보강영역(m)		접속터널 보강영역(m)
	예각측	둔각측	
본 연구 성과	40.0	15.0	16.0
일본도로공단	53.2	13.3	24.8
Hsiao 등의 연구	23.0	10.6	23.0

로 평가되었다.

5. 결 론

근래에 들어 도로계획 및 건설추세는 터널의 개소수와 장대터널 건설이 증가하고 있으며, 이에 따라 터널내 재해시 가장 효율적인 시설물 중 하나인 피난연결통로의 개소수도 급증하고 있으나, 아직까지 본선과 피난연결통로 접속부에 대한 적정 지보량과 보강범위는 미정립되어 있는 실정으로 이에 본 연구에서는 합리적이고 경제적인 지보패턴과 접속부 보강범위를 선정하기 위해 다음과 같이 연구를 수행하였다.

1. Q-system, 기존 사례 및 이론식에 의한 지보패턴 검토 후 대인용 및 차량용 피난연결통로 지보패턴을 선정하였다.
2. 선정된 지보패턴의 현장 적용성을 검증하기 위해 계측 자료를 이용한 역해석을 통해 지보패턴의 적정성 검토하였고, 그 결과 안전율이 모두 기준치 이상으로 검토되어 선정된 지보패턴은 적절한 것으로 분석되었다.
3. 본선 및 피난연결통로 접속부 보강범위 선정을 위해 초기 지중응력비, 암반강도와 본선 및 피난연결통로 접속각도에 근거한 3차원 지반해석(CASE STUDY, 84단면)을 수행하였으며 본 Case study와 국외 연구 사례를 비교 분석한 결과 본선 보강영역의 경우 접속

각도 변화에 따라 예각측 0.75 D~3.0 D, 둔각측 0.75 D~1.1 D값을 나타내는 것으로 분석되었고, 피난연결통로 보강영역의 경우도 0.94D~2.6D로 일분 기준 및 Hsiao 등의 연구에 비하여 대부분 작은 값을 나타내는 것으로 검토되었다.

본 연구에서 제시한 피난연결통로 접속부 구간의 지보패턴 및 보강범위는 제한적인 지반정보에 의해 정량화 된 결과이므로 실제 설계 적용시 피난연결통로가 설치되는 현장조건이 반영된 3차원 지반해석에 의해 안정성을 검증하여야 할 것으로 판단되며, 피난연결 통로는 부득이한 경우를 제외하고는 설치간격 등을 기준에 맞게 조정하여 암질이 양호한 구간에 위치토록 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 고려대학교 공학기술 연구소 (2004), “NATM 터널의 변위 범위에 대한 안정성 평가”, 포스코 건설 고려대학교 공동연구 논문, pp. 65-221.
2. 국토해양부 (2007), “터널설계기준”, pp. 87-89.
3. 국토해양부 (2009), “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”, pp. 24-31.
4. 양형식, 전양수 (2002), “FLAC을 이용한 터널 역해석 프로그램의 개발”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제12권, 제1호, pp. 37-42.
5. 일본도로공단 설계요령 (設計要領 第三集 第九編トンネル 제7장 기타구조물의 설계), pp. 160-162.
6. 장정범, 김문겸 (1998), “역해석에 의한 지하구조체의 거동예측에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제8권, pp. 139-145.
7. 한국도로공사 (2009) “터널 피난연결통로 설치에 따른 지보패턴 설치 방안 연구용역”, pp. 23-210.
8. Akutakawa, S., Meek, J.L. and Brown, E.T. (1991), “The Back Analysis of in-situ stresses in a multiple stage excavation problem”, Computer Methods and Advances in Geomechanics, Beer, Booker&Carter, Balkema, pp. 937-942.
9. Barton, N. and Grimstad, E. (1994), “The Q-system following twenty years of application in NMT support selection”, Felsbau 12, Nr.6, pp. 428-436.
10. Evert Hoek, Carlos Carranza-Torres and Brent Corkum (2002) “Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition”, pp. 2-6.
11. Hsiao, F.Y. Wang, C.L. and Chern J.C. (2008), “Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area”, pp. 3-7.
12. Sakurai, S. and Takeuchi, K. (1983), “Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels”, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 16, pp. 173-180.

접수일(2010.2.5), 수정일(2010.3.8), 게재확정일(2010.3.23)